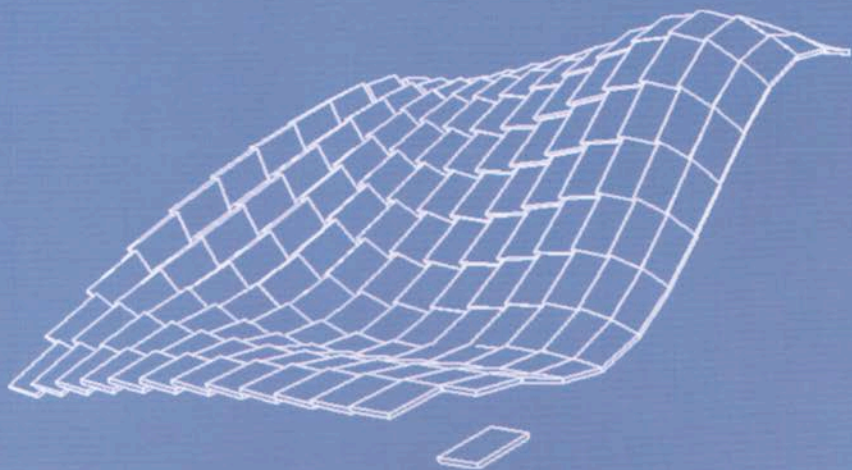


uno (nessuno) centomila | prototipi in movimento

trasformazioni dinamiche del disegno
e nuove tecnologie per il design

workshop
marzo-maggio 2014



Workshop della Scuola Nazionale di Dottorato
in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo

a cura di
Michela Rossi e Andrea Casale

politecnica


MAGGIOLI
EDITORE

seminario di apertura del workshop a cura di
Design Representation
Sezione Design & Cultures - Dipartimento di Design
Politecnico di Milano

Giuseppe Amoruso
Fausto Brevi
Mauro Ceconello
Gabriele Pierluisi
Michela Rossi
Michele Russo

Coordinamento: Michela Rossi
Progetto grafico: Flora Gaetani
Immagine di copertina: Giorgio Buratti

POLITECNICO DI MILANO



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

DIPARTIMENTO DI DESIGN



Scuola Nazionale di Dottorato in
Scienze della Rappresentazione e del Rilievo

ISBN 978-88-916-0449-1

© Copyright 2014 Maggioli S.p.A.

È vietata la riproduzione, anche parziale, con qualsiasi mezzo effettuata, anche ad uso interno e didattico, non autorizzata.

Maggioli Editore è un marchio di Maggioli S.p.A.
Azienda con sistema qualità certificato ISO 9001:2000
47822 Santarcangelo di Romagna (RN) • Via del Carpino, 8
Tel. 0541/628111 • Fax 0541/622595

www.maggioli.it/servizioclienti
e-mail: clienti.editore@maggioli.it

Diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica, di riproduzione e di adattamento, totale o parziale con qualsiasi mezzo sono riservati per tutti i Paesi.

Il catalogo completo è disponibile su *www.maggioli.it*, area università

Finito di stampare nel mese di settembre 2014
da DigitalPrint Service srl - Segrate (Mi)

Uno (nessuno) centomila | prototipi in movimento

**Trasformazioni dinamiche del disegno
e nuove tecnologie per il design**

**workshop
marzo-maggio 2014**

**Workshop della Scuola Nazionale di Dottorato
in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo**

**a cura di
Michela Rossi e Andrea Casale**

Dipartimento di Design | Politecnico di Milano

**Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro
d'Architettura | Sapienza Università di Roma**

COLLANA POLITECNICA

COMITATO SCIENTIFICO- AREA ARCHITETTURA

Serie di : **Tecnologia, Progettazione dell'architettura, Urbanistica e territorio, Design, Saggi, Documenti e Ricerche, Real Estate**

Cristiana Achille, Dipartimento BEST, Ricercatore ICAR 06, Politecnico di Milano; Oscar Eugenio Bellini, Dipartimento ABC, Ricercatore di ruolo confermato ICAR 12 Tecnologia dell'architettura, Politecnico di Milano; Tim Bennet, School of surveying & planning Faculty of art, design and architecture, Kingston University, UK; Guya Bertelli, Dipartimento DASTU, Professore di ruolo 1 fascia, Politecnico di Milano; Matteo Bolocan Goldstein, Dipartimento DASTU, Professore Associato in Geografia economico-politica, Politecnico di Milano; G. Bertrando Bonfantini, Dipartimento DASTU, Professore Associato di Urbanistica, Politecnico di Milano; Antonio Borghi, PhD in Progetti e Politiche Urbane, URBACT II ; Marco Bovati, Dipartimento DASTU, Ricercatore in Composizione Architettonica e Urbana, Politecnico di Milano; Angelo Bugatti, Dipartimento DICAR, Ordinario in Composizione Architettonica e Urbana, Università degli Studi di Pavia; Andrea Ciaramella, Dipartimento ABC, Ricercatore, Politecnico di Milano; Laura Daglio, Dipartimento ABC, Ricercatrice di ruolo confermata ICAR 12 Politecnico di Milano; Anna Delera, Dipartimento DASTU, Professore Associato, Politecnico di Milano; Riccardo Dell'Oso, Dipartimento di Architettura, Professore di Composizione Architettonica e Urbana, Università degli Studi di Catania; Ioanni Delsante, Dipartimento DICAR, Ricercatore universitario, Università degli Studi di Pavia; Giovanni Denti, DASTU, Professore di prima fascia ICAR 14, Politecnico di Milano; Andrea Di Franco, Dipartimento DASTU, Ricercatore di ruolo, Politecnico di Milano; Luca M. F. Fabris, Dipartimento DASTU, Dottore di ricerca in Tecnologia dell'Architettura e dell'Ambiente, Politecnico di Milano; Emilio Faroldi, Dipartimento ABC, Professore, Politecnico di Milano; Davide Fassi, Dipartimento INDACO, PhD, Politecnico di Milano; Massimo Fortis, Dipartimento DASTU, Professore ordinario di Composizione Architettonica e Urbana, Politecnico di Milano; Giorgio Garzino, Dipartimento ISEG, Professore Associato di ruolo, Politecnico di Torino; Agnese Ghini, Dipartimento DICATeA, Ricercatrice ICAR 10 Architettura e Tecnica, Università degli Studi di Parma; Elena Granata, Dipartimento DASTU, Ricercatrice in Tecnica Urbanistica, Politecnico di Milano; Areli Marina, Ph.D. History of Art and Architecture, University of Illinois; Declan McKeown, Faculty of built environment, Dublin Institute of Technology, Irlanda; Marzia Morena, Dipartimento ABC, Ricercatrice di ruolo confermata ICAR 12, Politecnico di Milano; Nick Nunnington, , Professional programs, Higer Colleges of Technology Abu Dhabi Emirati Arabi; Ilaria Oberli, Dipartimento ABC, Ricercatrice di ruolo confermata ICAR 12, Politecnico di Milano; Pierluigi Panza, Dipartimento DASTU, Docente di storia dell'Estetica Moderna, Politecnico di Milano; Ingrid Paoletti, Dipartimento BEST, Ricercatrice di ruolo confermata ICAR 12 Tecnologia dell'Architettura, Politecnico di Milano; Angela Silvia Pavesi, Dipartimento ABC, Ricercatrice di ruolo nel SSD 08/C1 - Design e Progettazione dell'Architettura, Politecnico di Milano; Laura Pezzetti, Dipartimento ABC, Ricercatore, Politecnico di Milano; Orsina Simona Pierini, Dipartimento di Progettazione dell'Architettura, Ricercatrice in Composizione Architettonica e Urbana, Politecnico di Milano; Sergio Pone, Dipartimento di Progettazione urbana e Urbanistica, Professore Associato, Università degli Studi di Napoli Federico II; Valeria Pracchi, Professore Associato ICAR 19 Restauro, Politecnico di Milano; Massimo Rossetti, Dipartimento Culture del Progetto, Ricercatore in Tecnologia dell'Architettura, Università IUAV di Venezia; Michela Rossi, Dipartimento INDACO, Architetto, Politecnico di Milano; Francesco Rubeo, , Professore a contratto in Valutazione economica dei progetti, Sapienza Università di Roma; Dario Russo, Dipartimento di Design, Ricercatore di Storia del Design, Università di Palermo; Cesare Sposito, Dipartimento DARCH, Ricercatore ICAR 12 Tecnologia dell'Architettura Università di Palermo; Luca Tamini, Dipartimento DASTU, Ricercatore di ruolo confermato in Urbanistica, Politecnico di Milano; Valeria Tatano, Dipartimento Culture del Progetto, Professore Associato di Tecnologia dell'Architettura, Università IUAV di Venezia; Maurizio Tira, Dipartimento DICATA, Professore Ordinario di Tecnica e Pianificazione Urbanistica, Università degli Studi di Brescia; Marco Lorenzo Trani, Dipartimento ABC, Dottore di ricerca in Ingegneria Ergotecnica Edile, Politecnico di Milano; Maria Cristina Treu, Dipartimento DASTU, Professore Ordinario di Urbanistica, Politecnico di Milano; Oliviero Tronconi, Dipartimento ABC, Professore ordinario, Direttore del Laboratorio Gest.Tec. Politecnico di Milano; Gianni Utica, Dipartimento ABC, Professore associato di Estimo ed esercizio professionale, Direttore dei corsi della Formazione Permanente in acustica per la progettazione, Politecnico di Milano; Maria Pilar Vettori, Dipartimento ABC, Dottore di Ricerca, Politecnico di Milano; Arianna Vignati, Dipartimento INDACO, Assistant Researcher, Politecnico di Milano; João Pedro Xavier, Architetto, Vice-preside di Facoltà, Vice-presidente del Comitato Scientifico, University of Porto (FAUP); Fabrizio Zanni, Dipartimento DASTU, Professore Associato in Progettazione Architettonica Politecnico di Milano

Il presente testo è stato sottoposto alla procedura di valutazione e accettazione del doppio referaggio anonimo (*double-blind peer review*), in conformità con i procedimenti e i criteri definiti per la pubblicazione nella Collana.

Indice

- 7** Presentazione | Cesare Cundari
- 9** Ripensare il disegno. Introduzione | Michela Rossi e Andrea Casale
- 13** Rethinking Design | Michela Rossi e Andrea Casale

PARTE I | SEMINARIO

- 19** Generative Design. La rappresentazione delle variazioni infinite | Celestino Soddu
- 35** Le regole del disegno. Modelli organici e pattern digitali | Michela Rossi
- 53** Modellazione 3D, ambienti BIM, modellazione solida per l'Architettura e il Design | Anna Marotta, Massimiliano Loturco
- 61** Rilevare per modificare | Adriana Rossi
- 73** La forma mutante | Andrea Casale
- 85** Forma in movimento | Graziano Valenti
- 93** Variabili in cerca di definizione: ontologia del disegno computazionale | Giorgio Buratti
- 111** Prototipi responsivi. L'approccio nel contesto del Physical Computing | Giorgio Vignati
- 125** Physical computing: strumento creativo per il designer di oggi | Maximiliano Ernesto Romero
- 137** Progettare architetture responsive | Attilio Nebuloni
- 149** Progettazione computazionale e fabbricazione robotica per l'architettura | Pierpaolo Ruttico

PARTE II | ESPLORAZIONI

- 163** Contorni apparenti. Algoritmi digitali per la movimentazione delle superfici articolate | Michele Calvano
- 173** L'ordine complesso. La generazione delle superfici minime periodiche | Giorgio Buratti
- 183** Le geometrie dei meccanismi per il movimento | Leonardo Paris
- 193** 'Prototipazione' per l'architettura | Leonardo Baglioni, Federico Fallavolita, Marta Salvatore
- 209** Computer Grafica e design delle installazioni interattive e multimediali | Tommaso Empler
- 221** I metodi di comunicazione dei sistemi responsivi | Fabio Quici
- 231** Bibliografia di riferimento | a cura di Giorgio Buratti

Presentazione

Cesare Cundari

Sapienza Università di Roma

Coordinatore del Dottorato in "Scienze della Rappresentazione e del Rilievo"

*Direttore della Scuola Nazionale di Dottorato in
"Scienze della Rappresentazione e del Rilievo"*

Con grande favore accolgo la richiesta di presentare questo volume che raccoglie una prima parte degli atti relativi ad un Workshop sulle trasformazioni dinamiche del Disegno e le nuove tecnologie per il Design svoltosi in collaborazione tra docenti del Politecnico di Milano e dell'Università Sapienza di Roma e che costituisce un nuovo documento di una consolidata collaborazione.

Il tema, inquadrato dai due curatori nella introduzione, stimola qualche riflessione.

Quando, nel 2011, fui incaricato del coordinamento del Dottorato romano, fui favorevole a recepire, nell'ambito delle attività di formazione, alcune iniziative rivolte esplicitamente al ruolo del Disegno nell'ambito del Design; la stessa attenzione al problema l'ho mantenuta quale Direttore della Scuola Nazionale, patrocinando peraltro l'iniziativa di cui al presente volume. Ciò, naturalmente, con la curiosità del ricercatore di esplorare possibili nuovi spazi di studio ma, contemporaneamente, con il timore di favorire nuovi equivoci nel rapporto tra disegno/progetto/produzione.

Sono stato sempre convinto che il disegno di rilievo dell'architettura, non fermandosi alla rappresentazione delle sue superfici, debba esplicitarne le connotazioni costruttive ed estetiche; analogamente ho sempre pensato che il disegno di progetto - considerato come atto di invenzione - non possa ignorare le caratteristiche di lavorazione e dei materiali: lo confermano - per fare due esempi emblematici - le tracce delle casseforme lignee sulle strutture in cemento armato di Le Corbusier come i materiali prescelti ed utilizzati da Frank Lloyd Wright per la Casa sulla Cascata. Il fatto che in ambito industriale la giusta importanza l'abbiano assunta i procedimenti di lavorazione ed i comportamenti dei vari materiali, secondo me, conferma

l'assunto che chi disegna per progettare - anche per una produzione in serie - debba conoscere fino in fondo caratteristiche e proprietà dei materiali e dei processi di lavorazione.

Oggi l'evoluzione tecnologica consente un immediato passaggio dal modello digitale al prototipo; questo è sicuramente un vantaggio per il progettista consentendogli una più pronta verifica della idoneità proporzionale e funzionale dell'oggetto inventato; il mio rammarico è nel fatto che il progettista non sia più costretto a verificare l'efficacia della propria invenzione giovandosi solo e soprattutto delle proprie capacità di espressione grafica o di visualizzazione mentale/spaziale, così come hanno dovuto fare sino a qualche anno fa tanti Maestri del Design. Questa semplificazione potrebbe avere effetti dirompenti nella formazione dei giovani progettisti.

La mia preoccupazione è, infine, rivolta ad un altro aspetto d'importanza strategica: qualsiasi modello virtuale (purché di determinate caratteristiche tecniche) può essere prototipato Allora qualsiasi disegno meriterebbe una prototipazione? In che misura incideranno il fattore di riduzione di scala, l'abbinamento di materiali, ecc. Possiamo effettivamente pensare - per questa facilitazione consentita dall'evoluzione tecnologica - di trovarci all'inizio di un nuovo artigianato in cui trovino nuovamente quel modo "alto" di coagulo la capacità di invenzione, la conoscenza del materiale e la sua manipolazione?

O, non piuttosto, siamo - come in tanti altri campi della nostra operatività - in un momento di euforia che non rende chiaramente visibili i termini del problema, che non rende evidente il ventaglio di competenze necessarie affinché una invenzione (il disegno) possa essere effettivamente realizzata?

La domanda più importante che attende risposta è: qual'è l'ambito entro il quale possa svolgersi l'azione del Disegno senza confondersi perniciosamente con il Progetto, aspetto che, pur nella unitarietà del concetto/processo disegno=progetto, non sempre trova riscontro nelle dinamiche universitarie.

In ogni caso, sono convinto che la ricca e complessa esperienza cui si riferisce il presente volume - e che troverà il completamento della sua narrazione nell'altro volume che sarà pubblicato nei prossimi mesi - sia di sicuro giovamento per trovare possibili risposte ai quesiti prima espressi.

Infine, per la diretta conoscenza dell'immane lavoro che l'organizzazione di queste iniziative comporta, non posso esimermi, nel mio duplice ruolo, dal ringraziare i due promotori - la prof. Michela Rossi del Politecnico di Milano e il prof. Andrea Casale del mio Ateneo - con tutti i loro collaboratori, per l'attività svolta e per la ricca esperienza che hanno consentito ai dottorandi.

Presentazione

Cesare Cundari

Sapienza Università di Roma

Coordinatore del Dottorato in "Scienze della Rappresentazione e del Rilievo"

*Direttore della Scuola Nazionale di Dottorato in
"Scienze della Rappresentazione e del Rilievo"*

Con grande favore accolgo la richiesta di presentare questo volume che raccoglie una prima parte degli atti relativi ad un Workshop sulle trasformazioni dinamiche del Disegno e le nuove tecnologie per il Design svoltosi in collaborazione tra docenti del Politecnico di Milano e dell'Università Sapienza di Roma e che costituisce un nuovo documento di una consolidata collaborazione.

Il tema, inquadrato dai due curatori nella introduzione, stimola qualche riflessione.

Quando, nel 2011, fui incaricato del coordinamento del Dottorato romano, fui favorevole a recepire, nell'ambito delle attività di formazione, alcune iniziative rivolte esplicitamente al ruolo del Disegno nell'ambito del Design; la stessa attenzione al problema l'ho mantenuta quale Direttore della Scuola Nazionale, patrocinando peraltro l'iniziativa di cui al presente volume. Ciò, naturalmente, con la curiosità del ricercatore di esplorare possibili nuovi spazi di studio ma, contemporaneamente, con il timore di favorire nuovi equivoci nel rapporto tra disegno/progetto/produzione.

Sono stato sempre convinto che il disegno di rilievo dell'architettura, non fermandosi alla rappresentazione delle sue superfici, debba esplicitarne le connotazioni costruttive ed estetiche; analogamente ho sempre pensato che il disegno di progetto - considerato come atto di invenzione - non possa ignorare le caratteristiche di lavorazione e dei materiali: lo confermano - per fare due esempi emblematici - le tracce delle casseforme lignee sulle strutture in cemento armato di Le Corbusier come i materiali prescelti ed utilizzati da Frank Lloyd Wright per la Casa sulla Cascata. Il fatto che in ambito industriale la giusta importanza l'abbiano assunta i procedimenti di lavorazione ed i comportamenti dei vari materiali, secondo me, conferma

l'assunto che chi disegna per progettare - anche per una produzione in serie - debba conoscere fino in fondo caratteristiche e proprietà dei materiali e dei processi di lavorazione.

Oggi l'evoluzione tecnologica consente un immediato passaggio dal modello digitale al prototipo; questo è sicuramente un vantaggio per il progettista consentendogli una più pronta verifica della idoneità proporzionale e funzionale dell'oggetto inventato; il mio rammarico è nel fatto che il progettista non sia più costretto a verificare l'efficacia della propria invenzione giovandosi solo e soprattutto delle proprie capacità di espressione grafica o di visualizzazione mentale/spaziale, così come hanno dovuto fare sino a qualche anno fa tanti Maestri del Design. Questa semplificazione potrebbe avere effetti dirompenti nella formazione dei giovani progettisti.

La mia preoccupazione è, infine, rivolta ad un altro aspetto d'importanza strategica: qualsiasi modello virtuale (purché di determinate caratteristiche tecniche) può essere prototipato Allora qualsiasi disegno meriterebbe una prototipazione? In che misura incideranno il fattore di riduzione di scala, l'abbinamento di materiali, ecc. Possiamo effettivamente pensare - per questa facilitazione consentita dall'evoluzione tecnologica - di trovarci all'inizio di un nuovo artigianato in cui trovino nuovamente quel modo "alto" di coagulo la capacità di invenzione, la conoscenza del materiale e la sua manipolazione?

O, non piuttosto, siamo - come in tanti altri campi della nostra operatività - in un momento di euforia che non rende chiaramente visibili i termini del problema, che non rende evidente il ventaglio di competenze necessarie affinché una invenzione (il disegno) possa essere effettivamente realizzata?

La domanda più importante che attende risposta è: qual'è l'ambito entro il quale possa svolgersi l'azione del Disegno senza confondersi perniciosamente con il Progetto, aspetto che, pur nella unitarietà del concetto/processo disegno=progetto, non sempre trova riscontro nelle dinamiche universitarie.

In ogni caso, sono convinto che la ricca e complessa esperienza cui si riferisce il presente volume - e che troverà il completamento della sua narrazione nell'altro volume che sarà pubblicato nei prossimi mesi - sia di sicuro giovamento per trovare possibili risposte ai quesiti prima espressi.

Infine, per la diretta conoscenza dell'immane lavoro che l'organizzazione di queste iniziative comporta, non posso esimermi, nel mio duplice ruolo, dal ringraziare i due promotori - la prof. Michela Rossi del Politecnico di Milano e il prof. Andrea Casale del mio Ateneo - con tutti i loro collaboratori, per l'attività svolta e per la ricca esperienza che hanno consentito ai dottorandi.

Ripensare il disegno | Introduzione

Michela Rossi*, Andrea Casale**

*Dipartimento di Design, Politecnico di Milano

**Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro d'Architettura,
Sapienza Università di Roma

Le sinergie tra la modellazione digitale con algoritmi morfogenetici reiterati e la diffusione di macchine da prototipazione capaci di trasformare direttamente i modelli virtuali in copie al vero, anticipano cambiamenti radicali nei processi produttivi, destinati a incidere prepotentemente sui metodi del progetto. La recente crisi economica ha evidenziato l'equilibrio instabile del sistema industriale, basato sulla produzione di massa di oggetti tutti uguali, in cui i grandi numeri richiedono la realizzazione di linee produttive costose e giustificano processi progettuali raffinati anche per prodotti di basso costo.

Senza la fabbricazione a macchina dell'industria manifatturiera non sarebbe nato il design, reso necessario dalla separazione tra il progetto e la produzione, come era già avvenuto parecchi secoli prima nell'architettura.

L'industrializzazione richiedeva l'apporto preliminare del progetto per la meccanizzazione del fare, che per forza di cose coinvolgeva anche il disegno del prodotto, determinando la nascita del design come disciplina peculiare dell'era industriale. L'industria e il design, legati da un'inscindibile sorte comune, avrebbero reso obsoleta la figura dell'artigiano capace di creare oggetti uno per volta, da un disegno al vero, senza l'esigenza di un progetto preliminare, perché nel suo lavoro manuale fare e pensare coincidono.

La dicotomia tra la fase ideativa e quella produttiva che caratterizza il processo industriale, ha relegato il disegno all'ambito del progetto, favorendo la progressiva scomparsa degli strumenti della sua esecuzione manuale, gli stessi che erano stati indispensabili al fare dell'artigiano.

La nuova rivoluzione preannunciata dall'introduzione della prototipazione digitale e dalle potenzialità dell'adattamento alla produzione in associazione ai software capaci di controllare la fabbricazione a basso costo di pezzi diversi, direttamente da uno stesso modello, rimette il

disegno alla base della realizzazione, aprendo la strada a una nuova artigianalità, capace di coniugare il concetto di pezzo unico con la produzione industriale.

Nell'evoluzione del rapporto tra il *pensare* e il *fare*, prima implicitamente intrecciati nell'azione della mano dell'artista artigiano e poi legati da un rapporto di causa effetto espresso dal progetto, si consuma lo spostamento del ruolo del disegno dal *fare* al *pensare* e quindi la sua concezione come linguaggio tecnico prima che come strumento attivo dell'atto creativo. Per questo motivo sembra opportuno partire dal disegno, nelle nuove forme e articolazioni che esso può assumere nell'evoluzione delle tecnologie digitali, per capire il rapporto nuovo che si instaura tra il design e la produzione all'alba di quella che può diventare una nuova rivoluzione industriale e introducendo la possibilità di produrre pezzi unici in serie, riavvicina l'industrial design ai presupposti del progetto di architettura.

L'industrializzazione e i conseguenti cambiamenti sociali di inizio novecento hanno portato alla nascita del design e ai radicali cambiamenti nella forma e nella funzione dell'architettura. Oggi, il nuovo rapporto fra l'uomo e la gestione dell'informazione permette, da una parte, di modificare l'oggetto durante la sua produzione, coniugando il concetto di pezzo unico con la produzione industriale, dall'altra consente di progettare superfici architettoniche capaci di modificare la propria forma per adeguarsi a diverse esigenze formali e funzionali, interagendo con l'ambiente esterno.

Il design e l'architettura ritrovano le antiche corrispondenze concettuali e progettuali nel nuovo rapporto con l'informatica.

L'architettura diventa design e il design muta in architettura. L'oggetto diventa mutevole e mutante e, nelle diverse scale dal progetto industriale a quello architettonico, è pensato per modificare la propria conformazione così da potersi adattarsi, in "tempo reale", alle esigenze dell'utente. La progettazione diventa algoritmica e gli oggetti di architettura e di design responsivi, si crea quindi un chiaro collegamento di carattere dinamico fra gli eventi generatori (*input*), il progetto (elaborazione digitale) e la rappresentazione formale (*output*). Il disegno, per le nuove forme e articolazioni che assume nell'evoluzione delle tecnologie digitali, diventa un nuovo e rivoluzionario strumento di progetto, controllo e verifica del rapporto tra l'architettura, il design e la produzione-costruzione, riannodando in maniera assolutamente nuova i rapporti progettuali tra l'architettura e il design.

Una trasformazione imponente, per quanto poco avvertita, è in atto nell'operare e nei prodotti che caratterizzano oggi la società: è il processo evolutivo verso le attività "real-time". Nel campo specifico del progetto, il fenomeno si avverte osservando l'affermarsi dei progetti parametrici, dei modelli cinematici responsivi, della prototipazione rapida e di numerose altre attività ad esso connesse.

Il processo è generato e alimentato da un rinnovato rapporto fra l'uomo

e il computer o in modo più generale fra l'essere umano e lo spazio dell'elaborazione digitale. Elemento chiave di questo rinnovamento è la centralità dell'elaborazione nelle nuove attività e nei nuovi prodotti: essa non è utilizzata per generare un prodotto, ma è essa stessa anima intelligente del prodotto.

Gli oggetti mutevoli così progettati non hanno una forma statica definita, ma sono in continua rappresentazione di se stessi.

L'articolato processo progettuale che sottende la complessità di questa "rappresentazione", trova fondamento nella modellazione digitale parametrica, nella simulazione cinematica dei modelli, nella prototipazione rapida, e – quasi a chiudere il cerchio – nell'acquisizione digitale dei modelli sperimentali.

La progettazione parametrica è l'unica via per definire oggetti realmente responsivi, creando un chiaro collegamento di carattere dinamico fra eventi generatori, il progetto e la rappresentazione.

La simulazione cinematica studia la rappresentazione del progetto nello spazio quadridimensionale realizzato, aggiungendo la variabile tempo a quello tridimensionale: consente di riconoscere, affrontare e risolvere le problematiche connesse alla movimentazione delle forme.

L'acquisizione dell'output nelle diverse accezioni fisico e virtuali, e la sua reintegrazione all'interno del processo progettuale, consente di rinnovare e ampliare il livello di interazione e ricorsività che in vario modo ha da sempre caratterizzato il processo progettuale.

Operare in questo nuovo scenario, dove l'oggetto supera la tradizionale staticità per acquisire un nuovo significato formale attraverso il movimento nel tempo, propone un'indispensabile analisi e acquisizione di conoscenze teoriche e riflessioni critiche interdisciplinari che uniscono il disegno al progetto abbracciando sia la modellazione parametrica che la comunicazione dell'oggetto responsivo, sia la robotica che la prototipazione, sia i sistemi cinematici e dinamici che le geometrie dei meccanismi, e trova nella sperimentazione un'indispensabile strumento di concreta verifica.

Nel workshop è possibile individuare due momenti distinti, ma strettamente interlacciati:

- il seminario, prevalentemente di carattere teorico e critico sugli sviluppi e conoscenze nei diversi campi d'interesse, ospitato dal Dipartimento di Design del Politecnico di Milano;
- il laboratorio teorico-applicativo, svolto presso la Facoltà di Architettura di Roma con approfondimenti teorici e pratici e la successiva sperimentazione rivolta agli studenti del XXVIII ciclo del Dottorato in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo e del XXIX ciclo del Dottorato del Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura della Università "Sapienza".

Ad unire strettamente queste due esperienze si sono succedute, in video

conferenza, delle attività integrative di approfondimento a cui hanno partecipato alcuni docenti, dottori e dottorandi della Scuola Nazionale di Dottorato in Scienze della Rappresentazione.

Si è voluto quindi distinguere l'attività svolta in due pubblicazioni distinte: la prima, che trova traccia in questo libro, orientata all'indagine degli aspetti teorici, critici e applicativi inerenti la ricerca sulla forma responsiva; la seconda, che troverà collocazione nella Collana degli Strumenti del Dottorato in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo (in fase di redazione), affronta l'aspetto sperimentale dimostrando come l'applicazione teorica proponga nuove ed interessanti convergenze tra Disegno e Progetto nella gestione della forma movimentata, quando questa assume la propria espressione materiale e fisica.

Il contenuto del libro si divide in due parti, costituite da contributi apparentemente slegati perché frutto di mani (e teste) diverse, ma legati da un *fil rouge* che si dipana fissando l'attenzione sulle diverse implicazioni delle tecnologie digitali nel progetto, che ben al di là del rapporto con la rappresentazione, stanno cambiando il modo di fabbricare e costruire le "cose", riportando in attualità ricerche e contenuti desueti.

La prima parte riflette e talvolta amplia gli interventi presentati al seminario iniziale, tesi a presentare le radici culturali dei fondamenti teorici e delle diverse declinazioni applicative della rappresentazione parametrico-generativa in relazioni al progetto e alla produzione alla luce dell'evoluzione digitale, che introduce il recupero dell'artigianalità in una nuova interpretazione del pezzo unico. Il libro si apre con la storia del Design generativo e il racconto delle prime ricerche pionieristiche che hanno aperto la strada che ha portato ad un approccio nuovo al progetto, partendo da sperimentazioni solo apparentemente "improduttive". Seguono un richiamo alle radici della cultura parametrica del progetto nei presupposti matematici del disegno ornamentale e del Basic Design, il riferimento alla natura e alla definizione dei software per il progetto e al significato delle trasformazioni parametriche in relazione alla forma degli oggetti, infine gli strumenti e le tecnologie che permettono l'interazione responsiva del designer con il progetto e del prodotto con il suo fruitore.

La seconda parte raccoglie le lezioni del workshop telematico, volte a fornire ai partecipanti le conoscenze di base per sperimentare applicazioni concrete nell'ambito del progetto di oggetti/architetture caratterizzati da superfici mobili, capaci di interazioni dinamiche con l'utente. I diversi capitoli quindi sottolineano prima le problematiche di base della progettazione (gli algoritmi digitali, le geometrie e i meccanismi del movimento, la definizione e le proprietà delle forme) e poi esempi significativi di applicazioni specifiche negli ambiti di maggior interesse: la prototipazione digitale, le installazioni interattive e multimediali, la comunicazione.

Rethinking Design | Introduction

Synergies between digital modeling, based on algorithms of form generation, and the spread of prototyping machines that can easily transform virtual models into actual objects, anticipate radical changes in production processes and industrial-scale production. These developments will have far-reaching implications for design procedures and methodologies. The recent economic crisis has highlighted the instability and identity crisis facing the 'western' industrial system, a model now embraced globally, and based on the production of objects that are identical and produced in vast numbers. This mass production provides the economic justification for expensive production lines aimed at the production of broadly identical low-cost products.

Industrial design, as we know it today, was born during the machine age of the Industrial Revolution of the eighteenth and nineteenth centuries. Design and production became progressively separated, a divorce witnessed previously in architectural design. Industrialization necessitated the contribution the contribution of design prior to the management of making, which inevitably also involved the product, resulting in the birth of industrial design as a distinctive subject or specialism of the industrial era. Industry and design, bound together by an unbreakable common fate, made obsolete the figure of the artisan, who was able to create objects one by one, starting from a true-scale drawing, without any need for a preliminary draft, because in handwork *to make* and *to design* are referred to the same actor.

The dichotomy between the creative phase and the manufacturing one, that characterizes the industrial process, has relegated the contribution of drawing to a support role in the drafting process, and has favoured the gradual disappearance of the tools of manual execution, the same that were essential to the craftsperson during the making process. In the evolution of the relationship between *thinking* and *making*, which originally was intertwined in the action of the hand of the craftsperson-artist and then was expressed by the design, drawing plays its role from *making* to *thinking* and then coming back to its early conception as technical language instead of being just an active tool of the creative process. Today the revolution announced by the integration of digital prototyping with software that manages the low-cost manufacturing of different pieces directly from one same model, opens the way for a new type of craftsperson. This in turn brings together the concept of a single piece with serial production and puts drawing at the base of the

making process again, approximating the conditions prevalent largely in architectural design.

At the dawn of this New Industrial Revolution, in order to understand the new relationship between design and making, it seems appropriate to re-start the drawing process in order to design a product's DNA and, assisted by new forms of digital technology, to re-discover the fundamental principles of visual structure and how these principles subtend final form. Structure subtends form, and drawing comes into play where the first meets the later and thus helps to merge design thinking, drawing and making.

This seminar was dedicated to unwrapping the principles, processes and developments that subtend the New Industrial Revolution and, in particular, it will highlight the new relationship between design thinking, drawing and making.

At the beginning of the twentieth century, the industrialization and the consequent social changes led to the birth of design and to radical transformations in architecture. Today, the new relationship between man and information management make it possible to amend the object during its production, combining the concept of the *single piece* with *mass production*. It is possible to create objects that change their shape by adapting to the different needs of design and function, or create architecture with responsive surfaces that react to environment.

Through their relationship with the compute, the industrial design and the architecture find their common roots in old design concepts. The architecture becomes industrial design and the later evolves in architecture. The product becomes changeable and mutant. In the different scales from industrial design to architecture, its conformation is meant to change in order to fit in "real time" with the user's needs.

The algorithmic design creates responsive objects, which stress the dynamic link between the environment (*input*), the design (*digital processing*), and the shape (*output*). Thanks to the new expression that it fulfils in the evolution of digital technology, the computing – i.e. digital drawing- gains importance in the project management. The relationship between design and manufacturing/construction stresses in an unexpected way the one between architecture and industrial design.

The working mode and the products features in today's society are radically evolving, leading towards "real-time" activities. In the field of design the rise of parametric design, rapid prototyping, models of responsive kinematic surfaces of architecture and several other activities, is flagrant. The evolution is powered by a renewed relationship between man and computer, or more generally between the human being and the digital space. The key element of the innovation is the centrality of computing in the design process, such as in new products. The computing generates objects and it is the intelligent soul of their design.

New objects and/or architecture can change, to fit the user's needs in

“real time”. They have not a defined and static shape, but they are a continuous representation of themselves.

An articulated design process subtends the complexity of the “re-presentation”. It grounds on parametric modeling, on kinematic simulation of models, on digital prototyping and on the digital acquisition of experimental mock-up models.

The parametric design is the way to create responsive objects. It creates a dynamic link between the generating events (input), the project (digital processing) and its formal representation (output).

The representation in a “four-dimensional space” includes the variable of “time”, which make possible the simulation of movement in order to study the solution of issues related to the handling of shape elements. The output in physical and virtual models increases the interaction between the designer and the whole design process.

Operate in this new scenario, where the object goes beyond the traditional static to acquire a new formal meaning through movement, suggests critical reflections that merge drawing and design. This requires, the acquisition of theoretical knowledge and embracing both the parametric modelling and the communication of responsive object, the robotic and the prototyping, the kinematic systems and the geometry of mechanisms. These interdisciplinary skills are the necessary tool for the verification carried out by PhD candidates with the design experimentation, which is the actual goal of the workshop.

The workshop had two parts, closely interlaced each other:

- the seminar, guested by the Department of Design of Politecnico di Milano and had a theoretical and critical approach and focused on knowledge developments in the main topic;
- the studium was hold in Rome by the Faculty of Architecture and met together theoretical insights and specific applicative experiences, preparing the following design application carried out by PhD candidates of XXVIII and XXIX cycles of the doctorate programme of the Department of History, Drawing and Restoration of Architecture, “Sapienza” University of Rome.

The integrative insights unite closely the two parts with some videoconference lectures, attended by scholars, PhD and PhD candidates of the “Scuola Nazionale di Dottorato in Scienze della Rappresentazione”.

We wanted therefore to distinguish these different activities in two separate publications: this book gathers theoretical investigations, critical issues and research applications, which are the workshop’s “input”; a further volume in the book series of “Strumenti del Dottorato in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo” will afford the experimental “output”, demonstrating how the theoretical application leads to interesting convergences of Drawing and Design, in the project management of “moving” Architecture.

The book is divided into two parts, consisting of contributions seemingly

unrelated because they are due to different hands (and heads). Anyway they are linked by a common thread that focuses the attention on different implications of digital technologies in Design, which -well beyond the relationship with the representation- are changing the way we produce and build “things”, bringing old content in current research.

The first part reflects and sometimes broadens the lectures of the initial seminar, with the aim to present cultural roots of theoretical foundations and applications of the parametric-generative representation as a consequence of digital technologies, which recover the craftsmanship in a new interpretation of the product. The book opens with the history of generative design's development and the story of the first pioneering research that paved the road to a new approach to the project, starting from seemingly “unproductive” experiments. Then, there is a reference to the ornamental and the basic design in the mathematical assumptions in symmetries, such as to the nature; further a definition of various softwares and the meaning of parametric transformations in relation to the shape; finally tools and technologies that facilitate the interaction of the designer and of the users with responsive objects.

The second part contains the lessons of the workshop, aimed to provide participants with the basic knowledge to experiment applications in the design of responsive objects/architectures with movable surfaces, capable of dynamic interaction with the user. Following chapters highlight the significant issues of digital algorithms, geometry and mechanics of movement, the definition and properties of shapes. Last chapters focuses on specific applications in the areas of great interest for today design: digital prototyping, interactive installations and multimedia communication.

PARTE I

SEMINARIO

Milano, 19 marzo 2014

Generative Design | La rappresentazione delle variazioni infinite

Celestino Soddu

Politecnico di Milano

*Piero della Francesca è l'inventore della poetica delle forme.
La sua Divina Proporzione costruisce infiniti spazi di bellezza e armonia
Nel suo tempo sino ad oggi, nell'ordine di un processo in rebus generandi.
Immenso è il suo amore e profonda la scienza per l'umile eterna arte del
poetare.*

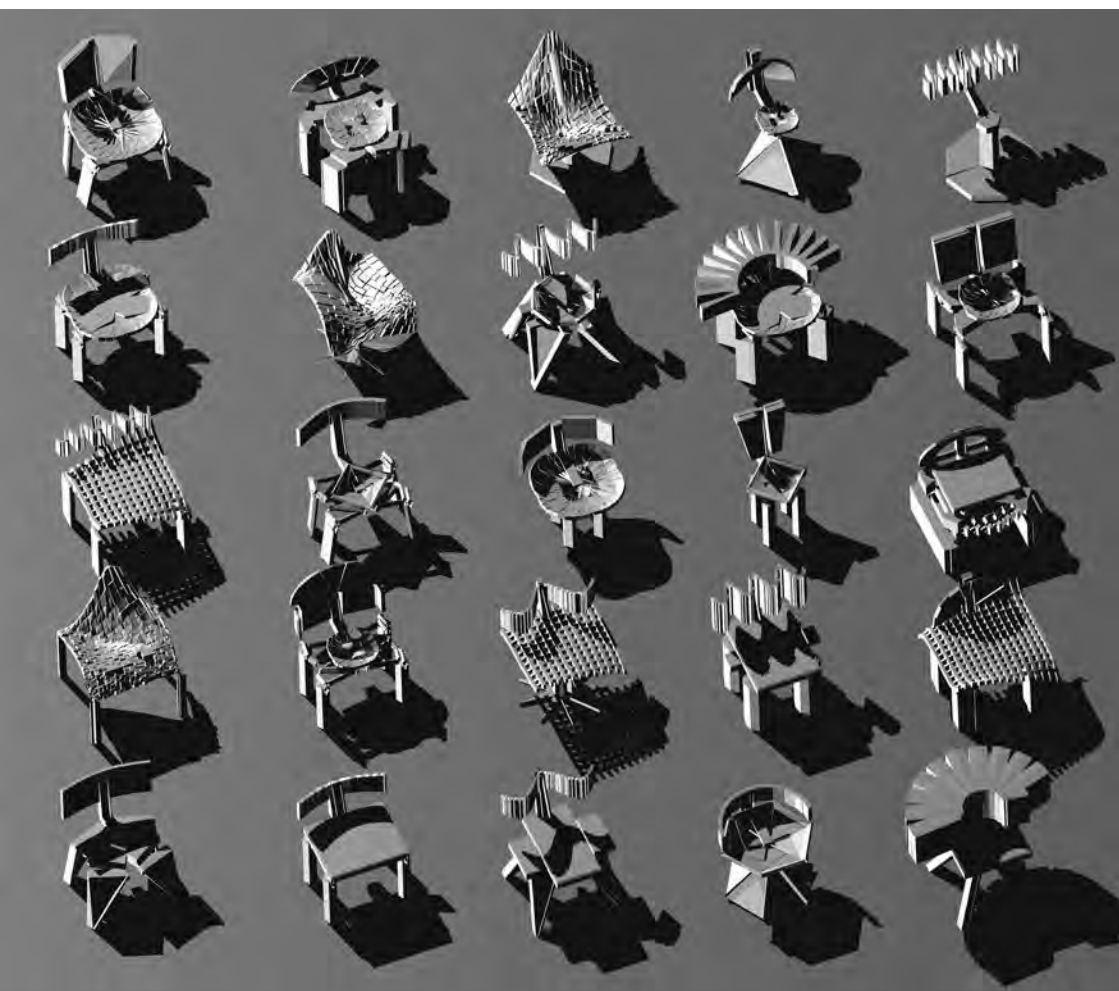
Enrica Colabella, Quartine per Piero, 2014

Alla fine degli anni settanta, con la disponibilità dei primi computer, ho costruito la possibilità di rappresentare la dinamica di un processo direttamente attraverso algoritmi, passando così dalla realizzazione di singoli risultati a quella delle logiche dinamiche. Ed è iniziato un percorso di scoperta per me affascinante.

Tutto nasce dalla geometria, in particolare dalla geometria proiettiva, capace di rappresentare l'infinito attraverso un punto di vista, capace di definire e progettare la complessità attraverso la soggettività.

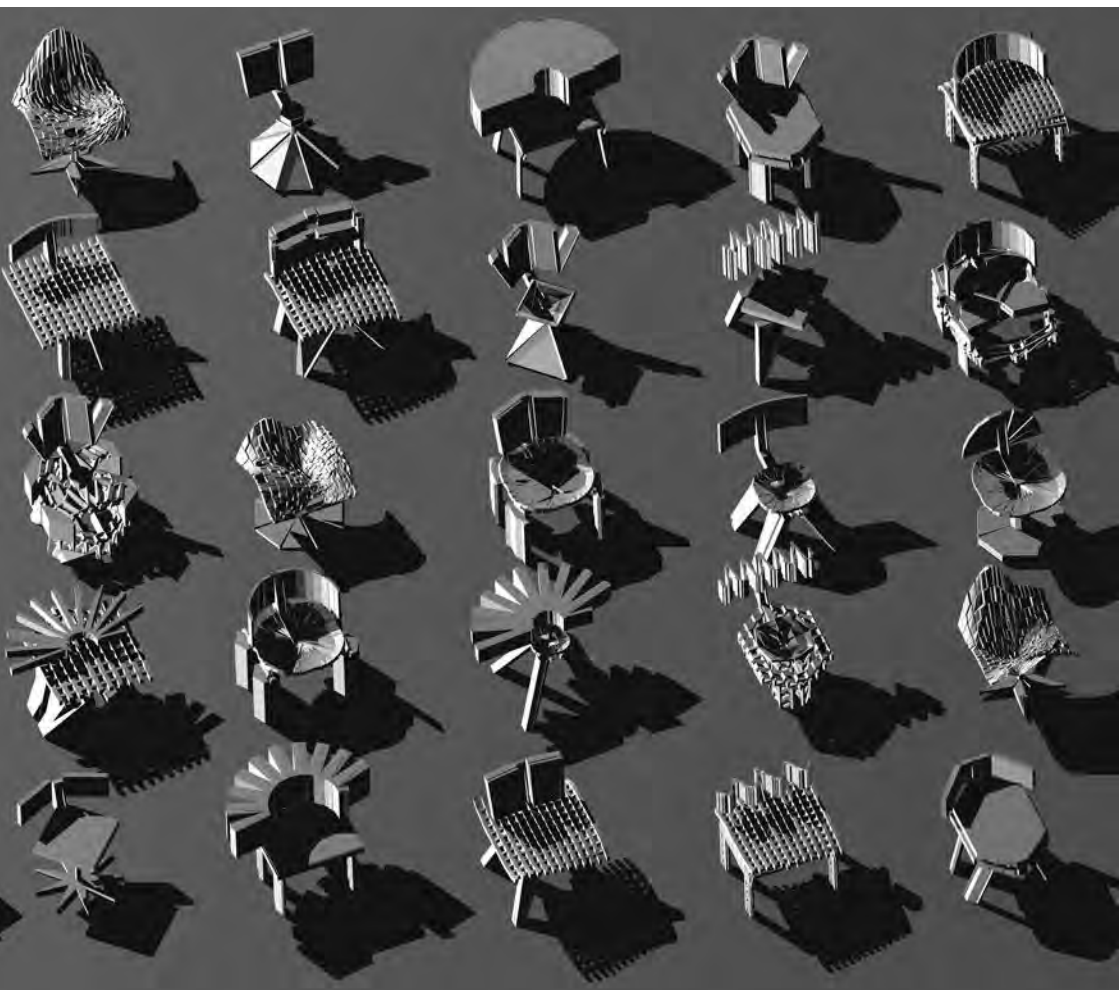
Citando Focillon, i visionari costruiscono i propri strumenti. Costruire i propri strumenti è il passo fondamentale per rappresentare la propria visione. Anche piccole cose, come costruirsi le proprie squadre per disegnare, come ricordo di aver fatto negli anni settanta costruendo per me squadre con angoli di 36 gradi adatti a disegnare pentagoni, è un modo di agire in sintonia con la propria visione dello spazio.

I miei primi strumenti operativi digitali sono nati progettando piccoli programmi capaci di gestire la costruzione prospettica. O meglio di gestire il passaggio tra eventi tridimensionali e rappresentazioni bidimensionali che alludono alla visione, ed ovviamente l'inverso, da eventi bidimensionali interpretabili come allusioni tridimensionali al modello tridimensionale. Qui la struttura dell'interpretazione soggettiva coincideva esplicitamente, per la prima volta, con l'identità geometrica di un punto di vista. La variazione del punto di vista generava, in progress, molteplici scenari tridimensionali. È stata una scoperta operativa fondamentale. Applicando gli algoritmi definiti nel mio processo di scoperta ad opere d'arte che alludevano



alla tridimensionalità, pur non avendo *esplicitamente* una struttura consolidata di costruzione prospettica, ho cercato di indagare sulla complessità soggettiva della visione dell'artista, interpretandone la sua rappresentazione.

Le opere di Giotto ma soprattutto di Simone Martini hanno disvelato un possibile mondo della complessità che mi ha profondamente affascinato. La rappresentazione di una città dall'esterno, così come appare nella tavola di Simone Martini "*Il bambino azzannato dal lupo*" del 1328 sembra, a prima vista, totalmente estranea alla costruzione



F01 | *generazione di sedie, 1992-2004.*

prospettiva del Brunelleschi. Applicando il software che avevo realizzato per attuare il passaggio 2d-3d, costruito per la restituzione prospettica attraverso l'identificazione di un punto di vista, i risultati sono stati sorprendenti: al variare del punto di vista interpretante variava l'assetto stereometrico degli edifici. Ad una sequenza progressiva del punto di vista virtuale dall'esterno all'interno della città gli edifici, al passare del soggetto interpretante, divenivano

stereometricamente accettabili come architetture, ossia avevano una geometria di parallelepipedo. Per poi ridiventare obliqui all'allontanarsi del punto di osservazione virtuale. L'ipotesi che mi è apparsa evidente è che Simone Martini avesse rappresentato la città dinamicamente, innestando la rappresentazione di una quarta dimensione temporale attraverso l'anamorfosi degli edifici rispetto ad un percorso progressivo di accesso alla città. (C. Soddu, *L'immagine non euclidea*, Gangemi 1986). [2]

Devo ringraziare ancora Carlo Ludovico Ragghianti per avere ripetutamente discusso con me a lungo su questo approccio ed avermi stimolato a percorrere il processo di scoperta delle strutture logiche di trasformazione progressiva dello spazio geometrico che mi hanno portato ad identificare e costruire processi generativi sull'architettura, l'arte, il design e la musica già negli anni ottanta. Questo anche pubblicando le mie ricerche su *Critica d'Arte*, dalle prime sperimentazioni prospettiche al computer sul *Calice* di Paolo Uccello (*Critica d'Arte*, n.8 1986) in un articolo [1] scritto con il mio caro amico Paolo Alberto Rossi, sino all'interpretazione della stanza di Van Gogh in cui ancora una volta il fascino del dipinto è anche basato sul particolarissimo punto di vista utilizzato: una visione dall'alto con lo sguardo rivolto ancora verso l'alto ma che rappresenta lo spazio solo nella parte che sta in basso.

Nel 1989, con il libro *Città Aleatorie*, [3] questo approccio alla creatività attraverso le strutture dinamiche di rappresentazione geometrica si è esplicitato nell'approccio Generativo. L'occasione è venuta proprio dall'esperienza sulle tavole medievali di Simone Martini e sugli affreschi di Giotto. L'idea è stata quella di rappresentare dinamicamente la Città Medievale Italiana. O meglio di costruirne una sorta di DNA artificiale che, come il codice genetico naturale, sia capace di generare, in progress, infinite possibili città tutte uniche ma identificabili come variazioni e riconoscibili dal loro carattere "medievale Italiano" (fig. 2).

L'approccio, proprio per i presupposti di uso del punto di vista soggettivo, non poteva essere analitico. Effettivamente raccogliere analiticamente eccessivo materiale non avrebbe portato alcun beneficio a questa ricerca. L'approccio scelto è un tipico approccio scientifico che predilige l'interpretazione dell'esistente ed ha come fine la costruzione di una rappresentazione sintetica, una formula, una "teoria" una logica basata su un'ipotesi. In questo caso un codice generativo simile ad un DNA che possa rappresentare l'idea di città medievale diventa un DNA. Ma l'obiettivo è stato di rendere questo approccio anche operativo, avendo la capacità, come il DNA, di generare le città stesse in multiple e complesse variazioni, pressoché infinite.

Questa logica si riferisce in modo esplicito all'arte come scienza ed alla scienza come arte. Essa mi ha portato ad utilizzare come referenti proprio le rappresentazioni di Giotto e di Simone Martini e non le città medievali esistenti. Ne è nato un codice generativo che non usa database ma collezioni di codici di generazione dinamica; che non lavora sulle forme ma sulle progressive trasformazioni; che non definisce dei risultati univoci ma progressive interferenze e contaminazioni capaci di produrre variazioni infinite. È così nata la Progettazione Generativa. (C. Soddu, *Città Aleatorie*, Masson 1989) Nel successivo libro *Il progetto ambientale di Morfogenesi*, C. Soddu ed E. Colabella, 1992 viene messa a punto la struttura logica di un processo di apprendimento della progettazione architettonica e del design (fig. 1). La collaborazione con E. Colabella chiarisce la complessità del percorso generativo partendo come attrattore del processo dal testo poetico letto come catalizzatore per definire il carattere di complessità da raggiungere.

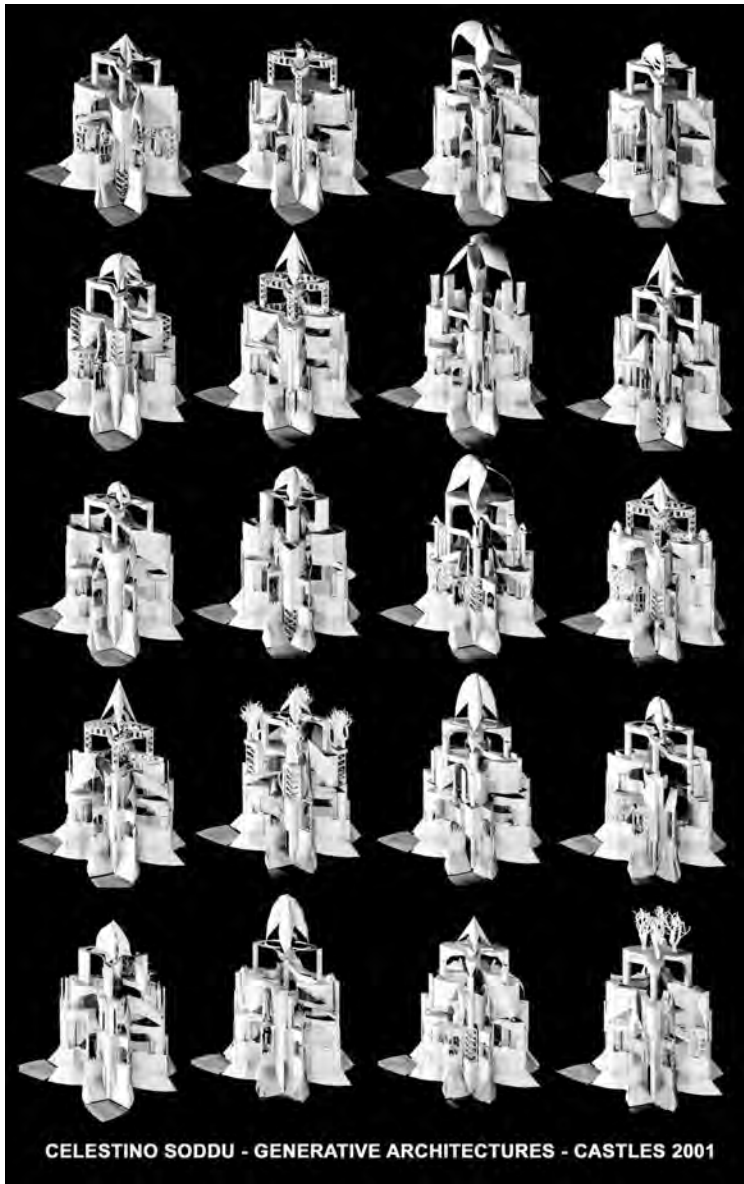
La struttura progressiva di questo percorso di scoperta progettuale viene non solo esplicitata teoricamente ma ne viene anche raccontata la sperimentazione pratica attraverso i software generativi da me realizzati, Basilica ed Argenia, ed attraverso le sperimentazioni dei nostri studenti del Politecnico di Milano. I risultati raggiunti sono soprattutto l'evoluzione progressiva dell'identità progettuale degli studenti e della complessità e caratterizzazione raggiungibile e ripetibile, in quanto esperienza acquisita, abbiamo anche la definizione di un approccio operativamente percorribile didatticamente. Lavorare sulle trasformazioni progressive basandosi su un punto di vista che interpreta gli eventi precedenti, le "scoperte" precedenti è, senza dubbio, il nucleo base del Generative Design. Ed è anche in forte sintonia con la struttura logica propria del mondo dell'Arte e della Scienza. Tutti gli artisti hanno reinterpretato i propri maestri, l'ha fatto Picasso con Velasquez e le statuette africane, l'ha fatto Francis Bacon con Van Gogh, e lo ha fatto ogni architetto nel corso della storia.

Attraverso l'approccio generativo, oltre a reinterpretare quelli che considero i miei maestri di architettura, come Gaudì e Borromini, ho tentato anch'io di reinterpretare Picasso, ed in particolare i suoi ritratti di donna e, recentemente, di reinterpretare i ritratti di Francis Bacon (fig. 6). L'ho fatto basandomi, come in tutti i miei software generativi, su passaggi ripetuti tra dimensioni diverse dove, per ogni passaggio, viene identificata una specifica interpretazione soggettiva. L'immagine viene letta come allusione tridimensionale di un evento bidimensionale, ne viene costruito un modello tridimensionale che a sua volta viene rappresentato bidimensionalmente, e così via. Ma non è tutto. Sin dalle prime esperienze di costruzione logica

di algoritmi di rappresentazione prospettica non mi sono limitato alla prospettiva canonica. Ho sondato i limiti di questa costruzione prospettica, spingendo i parametri geometrici sin dove non sarebbe stato possibile utilizzare il controllo visivo diretto. Limiti che sono stati valicabili solo attraverso una automazione del processo di generazione dei risultati. Spingendomi poi verso altri tipi di rappresentazione prospettica di difficile attuazione solamente con procedimenti grafici.

In questo senso la base è stata la costruzione della prospettiva totale anamorfica (C. Soddu, *L'immagine non euclidea*, 1986). Una prospettiva in cui si metteva in discussione la simmetria tra il punto di osservazione ed il punto osservato, così come questo bipolo è strutturato nella prospettiva classica. Se, guardando uno spazio, giro gli occhi e mi guardo tutt'intorno, ad un singolo punto di osservazione corrispondono infiniti punti osservati. Se mi trovo in una stanza rettangolare con due finestre opposte e guardo una finestra, le linee delle pareti concorrono verso un punto all'interno della finestra, alla mia altezza. Ma se guardo all'altra finestra opposta, le stesse linee concorrono in un punto opposto. Se muovo lo sguardo velocemente da un opposto all'altro, le linee si piegano e concorrono in due punti di fuga, uno all'opposto dell'altro. I miei primi esperimenti hanno tentato di tracciare singole prospettive classiche in ogni singolo frammento direttamente vicino al punto osservato e poi, dato che il computer non si stanca ma ripete senza sosta quello che è stato ordinato, ho ripetuto questa costruzione prospettica per tutti i punti di una sfera intorno al punto di osservazione. Il risultato è stato che effettivamente le linee sono curve e la prospettiva risultante è una prospettiva curva a 360 gradi, la cui matrice geometrica può essere identificata come non euclidea e la cui capacità di rappresentare lo spazio tridimensionale è dovuta al processo anamorfico che viene riproposto ogni qual volta ci si immedesima con il punto di osservazione adottato. Quando ciò accade le linee curve vengono anamorficamente lette come rette. Ho poi ho cercato di trovare un algoritmo sintetico per generare tali prospettive e mi sono accorto che era estremamente semplice, molto più semplice ed immediato degli algoritmi necessari a generare prospettive "classiche".

Ma esistono altre prospettive fantastiche ed affascinanti le cui potenzialità sono straordinarie. Florenskij ha identificato nelle icone Russe una struttura particolare: la prospettiva rovesciata. Mentre in queste icone è identificabile la caratteristica rappresentazione dell'immagine del Santo che assume un valore di centro dell'universo, non era così scontata la logica adottata ed il paragone con le altre rappresentazioni prospettiche. Quello che afferma Florenskij è che la prospettiva rappresenta solo la pelle dell'evento, in questo caso



F02 | *generazione di castelli medievali, 1989-2000.*



F03 | *generazione per l'identità di Gerusalemme, 2010.*

della figura del Santo, mentre non rappresenta ciò che sta sotto la pelle. In altri termini è la rappresentazione di una superficie e non di un evento solido. Ma ciò è sufficiente. La prospettiva rovesciata rappresenta la pelle del viso del Santo dall'interno della stessa testa. Dato che la superficie, la pelle è uguale all'interno come all'esterno, l'immagine risultante appare come vista dall'esterno ma, in realtà, potrebbe essere stata costruita come vista dall'interno della testa. (C. Soddu, *Perspective, a Visionary Process: The Main Generative Road for Crossing Dimensions*, in *Nexus Network Journal*: Volume 12, Issue 1, Springer Publisher, New York, 2010) [34]

Sperimentando questo con algoritmi scritti ad hoc, mi sono accorto che questa rappresentazione può arrivare a risultati simili a quelli delle icone Russe se si utilizza, per la vista dall'interno della faccia, la prospettiva totale anamorfica a 360 gradi e non la prospettiva



F04 | *generazione per l'identità di Brussels, 2013.*

canonica. In altri termini la prospettiva rovesciata di Florenskji appare come il rovesciamento della prospettiva non euclidea a 360 gradi e non di quella del Brunelleschi. Tale rovesciamento apre un'altra possibilità nelle possibili rappresentazioni prospettiche ed al rapporto punti di vista e punti osservati. Ci troviamo di fronte ad una rappresentazione in cui i punti di vista sono infiniti ed il punto osservato è uno solo: l'immagine del Santo.

Questo ha naturalmente ampliato le potenzialità generative dei passaggi tra rappresentazioni possibili di allusione tridimensionale, modelli tridimensionali e modelli dinamici temporali a quattro dimensioni. Ad esempio, solo leggendo un'immagine come prospettiva canonica, costruendone il modello 3D, producendo una rappresentazione non euclidea e rileggendola con una restituzione canonica produce progressive trasformazioni il cui codice può

essere utilizzato per costruire in progress una specifica identità e riconoscibilità spaziale.

Uno degli obiettivi è stato quello di costruire un'identità riconoscibile attraverso un processo generativo. Di fatto costruire una "specie" e generare in progress infiniti individui, infinite variazioni, come in Natura.

L'idea che Enrica Colabella ed io abbiamo sostenuto, sin dalla pubblicazione del *Progetto ambientale di Morfogenesi, Codici genetici dell'Artificiale* 1992, [4] è stata la possibilità di una produzione industriale intelligente capace di produrre infiniti oggetti unici ma appartenenti alla stessa specie, con le medesime caratteristiche e funzionalità utilizzando le macchine a controllo numerico ed un software generativo. Sperimentalmente questo è stato attuato, per la prima volta, nell'Industrial Centre del Politecnico di Hong Kong durante la mia permanenza in quella Università nel 2001 ed i risultati sono stati esposti al Visual Art Center del Museo di Hong Kong nel 2002.

Ma uno degli aspetti più interessanti della progettazione generativa è quello di definire e gestire in progress l'identità ambientale. L'identità di una città non è infatti solo legata a specifiche caratteristiche formali. È, come tutte le identità, legata ai processi di trasformazione che sono propri di uno specifico modo di evolversi. La città ideale è, per chi vive una città come ad esempio Milano, una Milano che si evolve diventando più Milano. E' legata a "come" la città si trasforma progressivamente. Un'identità che non evolve è solo un'identità perduta. Ho quindi provato a scrivere dei codici generativi capaci di rappresentare l'ideale di città diverse, come Hong Kong, New York, Los Angeles, Chicago, Washington D.C., Shanghai, Roma, Cagliari, Lecco e Milano (C. Soddu, Milano, *Variazioni Visionarie. Meta-codici futuristi per l'identità di Milano*, Gangemi 2005) [24]. Da questo sono nate tutta una serie di mostre personali in queste città dove ho fatto vedere immagini di modelli tridimensionali architettonici capaci di rappresentare le evoluzioni dell'ambiente urbano e nelle quali potesse essere riconoscibile una Hong Kong più Hong Kong di prima, Los Angeles più Los Angeles di prima, e così via. Le mostre sono state utili per verificare se effettivamente queste trasformazioni nate da mie interpretazioni logiche avessero una capacità di essere lette anche da altri. La mia domanda ai visitatori è stata sempre la stessa: ma questa Milano ti sembra più Milano di prima?

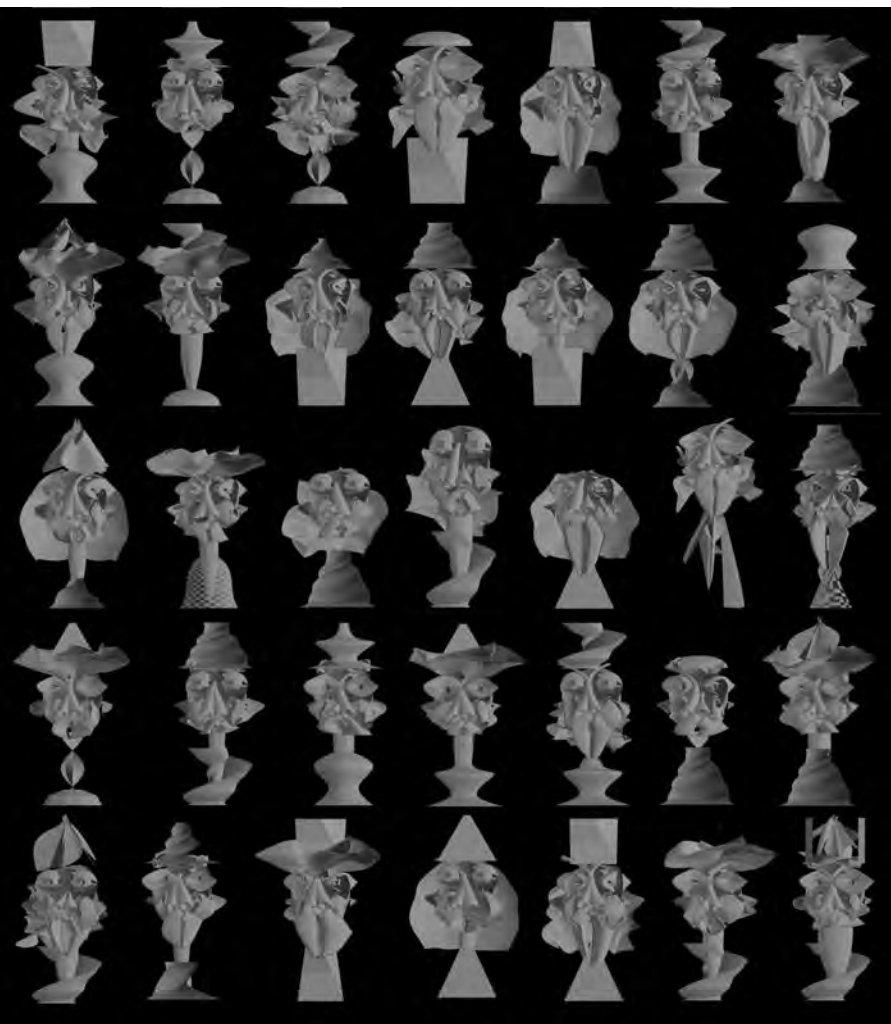
Quello che è stata una vera sorpresa e che, ad un variare anche minimo di alcuni elementi logici il carattere e l'identità degli spazi variava sostanzialmente. Ciò mi ha riportato alle immagini di D'Arcy Thompson, dove poche variazioni proporzionali trasformavano



F05 | *Omaggio a Borromini e Piranesi, 2011.*

un coccodrillo in una scimmia, una specie in un'altra. (D'Arcy Thompson, *Crescita e forma*, Boringhieri 1992)[15]

Una delle mie più recenti sperimentazioni è stata ripercorrere logicamente l'opera di Francesco Borromini e costruire codici generativi dall'interpretazione geometrica dinamica delle sue opere. Ne è risultato un software generativo capace di produrre cattedrali barocche contemporanee ma fortemente legate alla tradizione borrominiana. Le immagini delle architetture generate sono state inserite all'interno di stampe romane del Piranesi (fig. 5).



F06 | generazione di ritratti "Omaggio a Francis Bacon", 2013.

Questo ha consentito di verificare ed ampliare sia la complessità barocca in sintonia con le rappresentazioni dell'ambiente romano sia la possibilità che le stampe del Piranesi sembrassero più di Piranesi di prima. Questo perchè erano costruite percorrendo l'approccio proprio del Piranesi che è la stratificazione progressiva di prospettive differenti. I risultati non sono stati solamente immagini

ma anche modelli fisici realizzati con stampanti 3D dove gli interni, in contaminazione con l'esterno, raccontano le dinamiche geometriche proprie di una interpretazione logica del Borromini. Anche in questo caso l'obbiettivo è stato generare architetture barocche in omaggio a Borromini anche se Francesco Borromini, come tutti i grandi artisti visionari, non ha lasciato volutamente spiegazioni, distruggendo le indicazioni dei processi adottati per la costruzione geometrica delle sue opere. [38]

Proprio in questi ultimi anni, pur continuando a sperimentare la generazione di identità architettoniche e di oggetti, ho ritrovato nuovamente la passione per la musica. Dalla quale forse, ricordando la mia attività di jazzista negli anni sessanta, tutto è nato. Ho costruito un software generativo, MusicaBlu, capace di generare spartiti musicali di jamsessions in cui i vari solisti rappresentano le mie interpretazioni dei solisti e dei musicisti che considero i miei maestri, da Bach a Mozart, da Milt Jackson a Coltrane, dai Beatles a Miles Davis. Identità nella logica del processo progressivo, variazioni ed imprevedibilità, ma forte riconoscibilità nei risultati: è l'Arte Generativa, oggi conosciuta in tutto il mondo, ma di impronta profondamente Italiana.

Bibliografia

- [1] C. SODDU, P.A. ROSSI, *Il calice di Paolo Uccello uno e senza limite*, con un'introduzione di C.L.Ragghianti, in "Critica d'arte" n.8 1986.
- [2] C. SODDU, *L'immagine non euclidea*. Gangemi. 1986. La 2° edizione e-book è scaricabile gratuitamente da www.artscience-ebookshop.com.
- [3] C. SODDU, *Città Aleatorie*, Masson editore. 1989. La 2° edizione e-book è scaricabile gratuitamente da www.artscience-ebookshop.com.
- [4] C. SODDU, E.COLABELLA, *Il progetto ambientale di morfogenesi*, Progetto Leonardo 1992. La 2° edizione e-book è scaricabile gratuitamente da www.artscience-ebookshop.com
- [5] C. SODDU, E.COLABELLA, *Recreating the city's identity with a morphogenetical urban design*, on Making the Cities Livable, Freiburg, 1995
- [6] C. SODDU, E.COLABELLA, *Pantheon*, CD-Rom Multimedia realizzato per il Poligrafico dello Stato 1996.
- [7] C. SODDU, G. TELESFORO, *100percent; pure live funk and generative art*, TV movie realizzato dalla STREAM, network Italiano, 1996.
- [8] C. SODDU, *GENERATIVE ART*, proceedings of GA98, Editrice Dedalo, Roma, 1999.
- [9] C. SODDU, *New naturality: a Generative Approach to Art and Design* in Artificial Life 7 workshop proceedings, Carlo C. Maley and Etlis Boudreau Editors, Portland, Ontario, USA, 2000.
- [10] C. SODDU, *Argenia, Art's Idea as Generative Code*, in 2000 Genetic and Evolutionary Computation Conference proceedings, Annie S. Wu, University of Central Florida Editor, Las Vegas, Nevada, 2000
- [11] C. SODDU, *Basilica, an Architectural Generative Virtual Office based on Italian Renaissance Codes interpretation*, in Mosaic 2000 proceedings, University of Washington Editor, Seattle, 2000.
- [12] C. SODDU, *Argenia, naturality in Industrial Design*, in proceedings of 3rd International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design, CAID&CD'2000, International Academic Publisher, World Publisher Corporation, 2000.
- [13] C. SODDU, *Recognizability of the idea: the evolutionary process of Argenia*, in P.Bentley & D. Corne (edited by), "Creative Evolutionary Systems", Morgan Kaufmann Publisher, San Francisco US, 2001.
- [14] DUNCAN GRAHAM-ROWE, *Design Genes*, Blueprint Magazine, August 2001.
- [15] D'ARCY THOMPSON, *Crescita e forma*, Boringhieri, 1992. (1917)
- [16] C. SODDU, *New Naturality: a Generative approach to Art and Design*, Leonardo Magazine 35, MIT press, July 2002.
- [17] C. SODDU, E.COLABELLA, *Generative Art, Preludi natural mirrors*, ISEA2002, Nagoya, Japan, published by Inter Society for the Electronic

Arts, Japan.

- [18] C. SODDU, *Clarity, complexity harmony and safety: Identity's Generative codes build liveable cities*, Cities Asia Summit, Singapore, PSA Pub, 2002.
- [19] C. SODDU, E.Colabella, *Argenia, a mother tongue in infinite variations*, Proceedings of the First International Conference on Design Computing and Cognition, Workshop 3 "Implementation Issues in Generative Design Systems", MIT Boston, 2004.
- [20] C. SODDU, *Visionary Variations of Milano. Generative projects designing the Identity of Milano*, proceedings of "De Identitate" CRUI, Roma, 26-27 July 2004, Domus Argenia editore, Milano 2004. scaricabile gratuitamente da www.artscience-ebookshop.com.
- [21] C. SODDU, *Generative Design / Visionary Variations - Morphogenetic processes for Complex Future Identities*, in Organic Aesthetics and generative methods in Architectural design, edited by P. Van Looke & Y. Joye in Communication&Cognition, Vol 36, Number 3/4, Ghent, 2004.
- [22] C. SODDU, *Argenia, Artificial DNA and Visionary variations*, in "O sentido e o universo digital", proceedings of SIGRADI, the VII congresso ieroamericano de grafica digital, Unisisod, 2004.
- [23] C. SODDU, *Generative Design*, in "Architect", December 2004, China.
- [24] C. SODDU, *Milano, Variazioni Visionarie; Milan, Visionary Variations*, Gangemi editore, Roma 2005. La 2° edizione e-book è scaricabile gratuitamente da www.artscience-ebookshop.com.
- [25] C. SODDU, *Generative Art in Visionary Variations*, in Art+Math=X proceedings, Univ. of Colorado Boulder, 2005.
- [26] C. SODDU, *Visionary Variations in Generative Architectural Design*, Chepos magazine n.003, TU/e, Eindhoven 2005.
- [27] C. SODDU, E. COLABELLA, *A Univesal Mother Tongue*, Leonardo Electronic Almanac Volume 13, Number 8, August 2005.
- [28] C. SODDU, *Argenia, Artificial DNA and Visionary variations*, The Journal of designing in China, Hong Kong, 2005.
- [29] C. SODDU, *Argenia in timeless gen-codes*, proceedings of ARTMEDIA IX, Salerno, 2005.
- [30] C. SODDU, E.Colabella, *Argenia*, in PNCM conference proceedings, Daugavpils, Latvia, 2007.
- [31] C. SODDU, E.Colabella, *Lumen in Splendore*, proceedings of ApliMat, Bratislava, 2008.
- [32] C.SODDU, *From Design to Meta-Design: Generating the artificial DNA of Lecco Futuristic Identity*, in PCNM conference proceedings, Daugavpils University publisher, Latvia, 2009.
- [33] C. SODDU, *Argenia, Generative Architectural design*, in Computer-integrated architecture and construction, Edited by P.J. Bártolo, N.M. Alves and H.M. Bártolo, Nova Science Publisher, 2011.

- [34] C. SODDU, *Perspective, a Visionary Process: The Main Generative Road for Crossing Dimensions*, in Nexus Network Journal: Volume 12, Issue 1, Page 33-46, DOI 10.1007/s00004-010-0016-6, Springer Publisher, New York, 2010.
- [35] C. SODDU, *Immanent Codes of Cities Identity*, paper as invited speaker at the 1st International Conference "Art, Science and Technology: Interaction between Three Cultures", ORT Braude College, Karmiel, Israel, 2011.
- [36] C. SODDU, E. Colabella, *Natural Codeness for Artificial Uniqueness* proceedings of the 1st International conference of Sustainable Intelligent Manufacturing, Leiria, Portugal, 2011.
- [37] C. SODDU, *Generative Design*, article in GASATHJ, Generative Art Science and Technology hard Journal, issue #1, 2012. ISBN 978-88-96610-13-8, www.gasathj.com.
- [38] C. SODDU, *Generative Art, papers 1998-2013*, articoli presentati ai 16 convegni Generative Art, Domus Argenia pub. 2014, ISBN 978-88-96610-29-9. E-book scaricabile gratuitamente da www.artscience-ebookshop.com.

Siti web

www.generativedesign.com

www.generativeart.com

www.gasathj.com

www.artscience-ebookshop.com

Le regole del disegno | Moduli e pattern in trasformazione

Michela Rossi

Politecnico di Milano - Dipartimento di Design

Il progresso tecnologico è stato la risultante di due fattori correlati: l'affinamento degli utensili e la disponibilità di fonti di energia. Nel corso della storia, l'accesso a nuove risorse che mutavano in modo radicale la *quantità* e l'*intensità* (quindi anche il costo) della forza lavoro è stata la causa prima delle due grandi rivoluzioni che hanno interessato la struttura produttiva dell'occidente.

Agli albori del Medioevo l'applicazione del mulino vitruviano alla molitura, ha poi favorito la nascita della manifattura urbana e lo sviluppo della città trecentesca. Alcuni secoli dopo, l'invenzione della caldaia a vapore ha determinato l'origine della civiltà industriale propriamente detta.¹

Nella loro applicazione al lavoro, gli strumenti hanno sempre avuto un ruolo attivo sul risultato, condizionando in modo decisivo le qualità dei prodotti, come risulta evidente nel circolo vizioso dell'innovazione tecnologica implicita nel rapporto di causa-effetto per il quale l'uomo specializza gli utensili in funzione della lavorazione, e sviluppa tecnologie consone agli strumenti di cui dispone.

Si dice che "*la necessità aguzza l'ingegno*"; nei fatti la ricerca di attrezzi specifici e la conseguenza della disponibilità degli stessi sono sempre andate di pari passo, senza che si possa riconoscere quale delle due sia veramente la causa, e quale l'effetto.²

1. AA.VV. *Storia della tecnologia*, Torino, Bollati - Boringhieri, 2012-13.

2. Si dice che deriva dal proverbio "*Mater artium necessitas*". La parola latina *ars* significa "abilità" e resta nella parola italiana "artefice". In inglese, il proverbio corrispondente è "*Necessity is the mother of invention*". Il detto sarebbe però un'invenzione rinascimentale, la cui prima citazione si trova nel *Vulgaria* di William Horman. Cfr. Wikipedia.

Nelle applicazioni quotidiane si può pensare che la causa sia la disponibilità tecnologica e l'effetto sia il tipo di produzione, ma riguardo alle grandi idee vale sicuramente il contrario: molti capolavori del passato devono la loro esistenza al fatto che chi le ha pensate o volute, ha poi trovato il modo di realizzarle. Un esempio eclatante è quello della geniale soluzione del Brunelleschi al problema ingegneristico creato dalla realizzazione della cupola di Santa Maria del Fiore.³

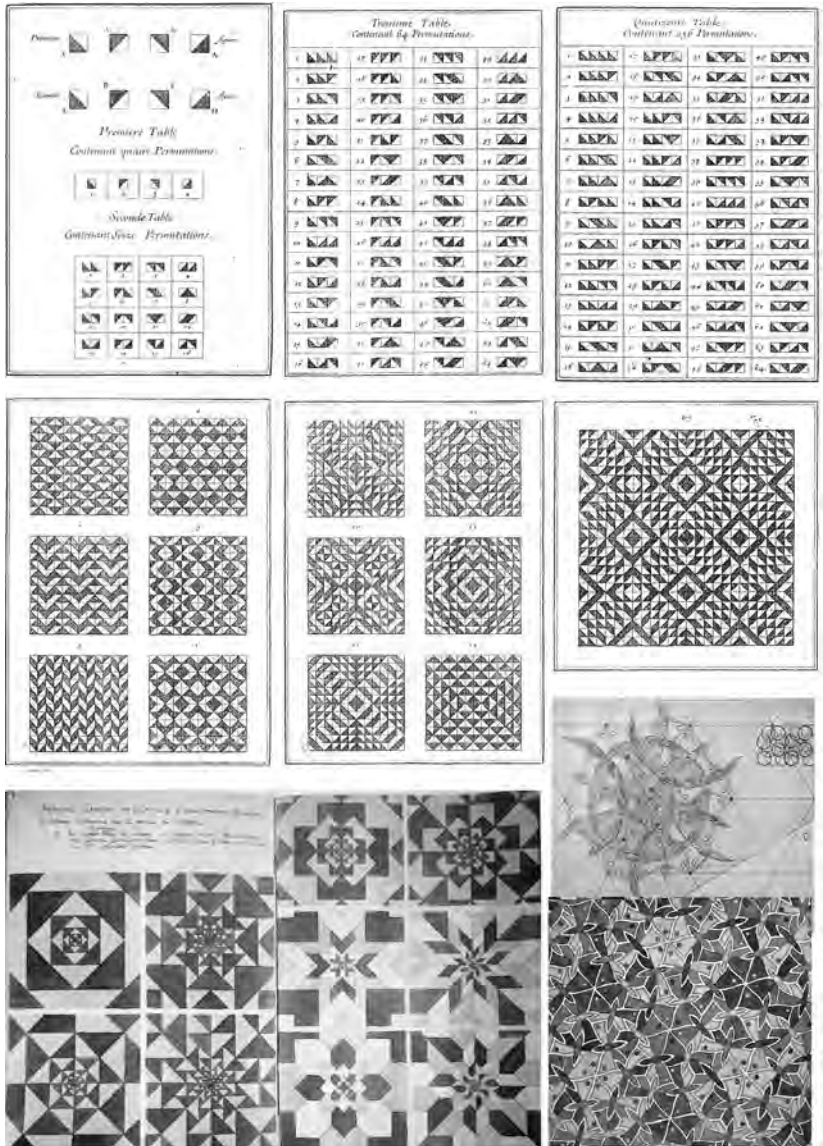
Questo condizionamento caratterizza a tutte le scale anche il rapporto tra i metodi e gli strumenti tecnici del progetto. Di conseguenza le forme dell'architettura e degli artefatti che arredano il microcosmo artificiale dell'uomo si configurano in relazione ai modi di rappresentazione del progetto, ovvero le modalità di realizzazione del modello che prefigura la costruzione, perché realizzazione ha sempre applicato gli stessi strumenti e procedimenti del disegno.

Con queste premesse era facile prevedere che l'introduzione dell'informatica e la sua applicazione al disegno avrebbero inciso sul progetto e sui suoi "prodotti". L'informatica è una delle tante facce dell'energia nucleare, perché applica tecnologie correlate alla studio delle particelle atomiche. La velocità di calcolo della macchina aumenta sempre più la quantità di "energia" disponibile al disegno assistito, come conseguenza della nuova rivoluzione preannunciata dalle applicazioni civili degli studi sull'atomo della prima metà del XX secolo.

Un cambiamento profondo è palese nell'architettura del decostruttivismo, che non sarebbe stato possibile (o facile) sviluppare senza strumenti che permettessero di studiarne le forme organiche e le trasformazioni topologiche nello spazio virtuale della rappresentazione digitale. Come già per gli attrezzi da lavoro, la volontà di costruire oggetti che esulavano dalla regolarità cartesiana delle forme euclidee, ha stimolato le tecnologie della rappresentazione digitale allo sviluppo di *software* che ne permettessero il controllo. Un esempio significativo è quello di Katia nell'ingegnerizzazione dell'opera di F. O. Gehry, peraltro concepita in modo tradizionale, usando modelli di studio costruiti in modo molto artigianale con spugnette e fil di ferro e poi sviluppati con l'ausilio di un programma appositamente sviluppato, ma se ne potrebbero citare altri.⁴

In breve le nuove modalità della rappresentazione digitale han-

-
3. Il Brunelleschi è passato alla storia come padre del Rinascimento per avere risolto l'ingegnerizzazione del progetto gotico di Arnolfo di Cambio, che insieme alla prospettiva ha aperto un'era nuova nelle arti.
 4. In particolare Gregg Lynn e Lars Spuybroeck, che ha teorizzato con molta lucidità la concezione del progetto come processo.



F01 | Sviluppo delle permutazioni simmetriche di 4 elementi diversi. Tavole combinatorie tratte da S. Truchet, *Méthode pour faire un'infinité de dessins differens avec de carreaux mi-partis de deux couleur par une ligne diagonal* ou observation di Pere Dominique Douat. Paris, 1722. Pattern simmetrici su griglia quadrata o triangolare, dagli studi preparatori di M.C. Escher.

no scatenato l'inventiva nella ricerca di nuove forme; nello stesso tempo la tecnologia si è adeguata velocemente alle richieste dei progettisti con lo sviluppo di interfaccia e sistemi di interazione che facilitavano la *computer graphics*, permettendo l'accesso diretto del disegnatore allo *scripting*, ovvero alla stesura delle informazioni che "costruiscono" il riferimento informatico del disegno digitale.

Questo ha fatto sì che a cambiare non fossero solo le forme, ma anche i metodi del disegno e quindi del progetto, spostando l'attenzione dalla *tettonica* alla *forma-disegno*:

- la prima rielabora la logica additiva e aperta della composizione di elementi costruttivi che anticipa la stessa dinamica del cantiere;
- l'altra sviluppa l'articolazione in funzione dell'insieme concepito come un organismo unitario.

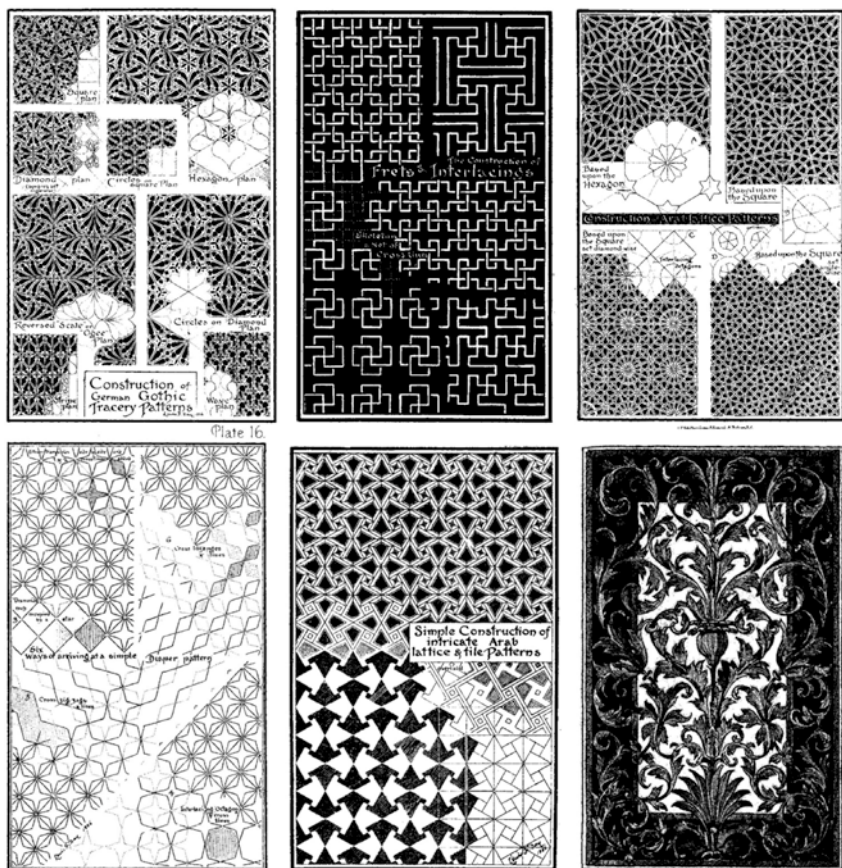
Questi due approcci applicano i procedimenti antitetici dell'*aggregazione modulare* e della *scomposizione* dell'intero su cui si basa la teoria classica delle proporzioni⁵ che deriva le sue regole rispettivamente dalla individuazione di un modulo e/o di una griglia regolare che misura i rapporti tra le parti o alle suddivisioni armoniche dell'intero secondo tracciati regolatori ordinati da una logica riconoscibile.

I due sistemi trovano un riscontro alternativo nella visione pragmatica della costruzione che caratterizza gli applicativi BIM e in quella più concettuale che pervade la concezione del disegno come processo mentale unitario, governato dagli algoritmi dei software generativi. Entrambi gli approcci sviluppano però elementi riferibili a concetti correlati che sono basilari nella teoria del disegno e della definizione del movimento: le leggi della geometria nel rapporto che lega le parti nell'insieme e le categorie innate dell'orientamento spazio-temporale cui si riferiscono le *trasformazioni*.

Un futuro antico

Per apprezzare l'effetto della rivoluzione informatica è stato necessario aspettare che si compisse il ciclo di crescita della prima generazione di nativi digitali, che non si è dovuta adattare alle nuove tecnologie, ma si è formata insieme a loro, sviluppando un approccio spontaneo, apparentemente autonomo dai riferimenti precedenti. Nell'introduzione di *Machining Architecture* L. Spuybroek scrive che: "*The computer has reached a cultural stage, finally. The years that it was used for dreaming of perfect shape grammars and design au-*

5. P.H. Scolfield. 1958



F02 | Pattern ornamentali da L.F. Day. *The Anatomy of Pattern*. London, 1897.

La logica combinatoria definisce il numero delle alternative che si possono ottenere con i movimenti rigidi delle simmetrie elementari (traslazione, riflessione, rotazione o rototraslazione):

- 7 nelle conformazioni lineari (gruppi fregio, cornici);
- 17 nell'aggregazione bidimensionale della superficie (gruppi del piano, wall-paper);
- 230 nello spazio (gruppi cristallografici).

I sistemi chiusi applicano logiche di partizione connaturate alla forma che possono avere un'organizzazione seriale o polare, nei quali la disposizione gerarchica delle forme implica due fasi distinte e correlate: l'inquadratura, ovvero la definizione del dominio con un bordo (cornice) e il riempimento, ovvero l'organizzazione del campo definito dal dominio.

tomation (...) or, worse, used for dreaming disembodied dreams of an architecture floating in cyberspace – those tears are over. Also finally and especially important for the architectural profession, computers have outgrown their servile function in the digital drawing room, where the real design was still done far away from the machines, sketched by hand, guided by genius.”⁶

Con i nativi digitali si è consumato il passaggio tra il *computer-tecnigrafo* e il *computer-processo*. Il progetto è sempre meno il risultato di una composizione additiva di parti per diventare il disegno globale e unitario di una forma in divenire, ordinata da regole più o meno complesse, implicite nel processo stesso.

L'architettura, intesa in senso lato come “struttura articolata”, nasce da un insieme di elementi che evidenziano linee e tettonica complesse, che le nuove tecnologie rendono finalmente capaci di interagire con sollecitazioni esterne, assecondandole con trasformazioni topologiche che sovvertono la sua proverbiale staticità.

Il *computing* controlla la complessità del disegno progettuale, applicando sistemi dinamici ispirati dalla scienza e dalla matematica nel tentativo di trovare un modello che spieghesse con una regola riconoscibile i sistemi caotici che governano i fenomeni naturali.⁷

Le forme dell'architettura decostruttivista, che richiamano i concetti matematici della geometria algebrica e l'algebra relazionale dei grafi, implicano quindi tre livelli d'innovazione: *concettuale*, *geometrico* e *materiale*.

I primi due sono direttamente correlati al processo matematico unitario che controlla il disegno fino al raggiungimento preordinato della forma finale. Il terzo è una conseguenza indiretta dell'applicazione dell'ingegno alla volontà creativa attraverso la stesura dello *scripting*, che definisce e controlla tutti i passaggi del processo generativo. Così gli strumenti digitali aprono la strada allo studio di nuovi materiali o di usi innovativi, basati anche sullo sfruttamento delle proprietà geometriche delle forme, implicito nel disegno.

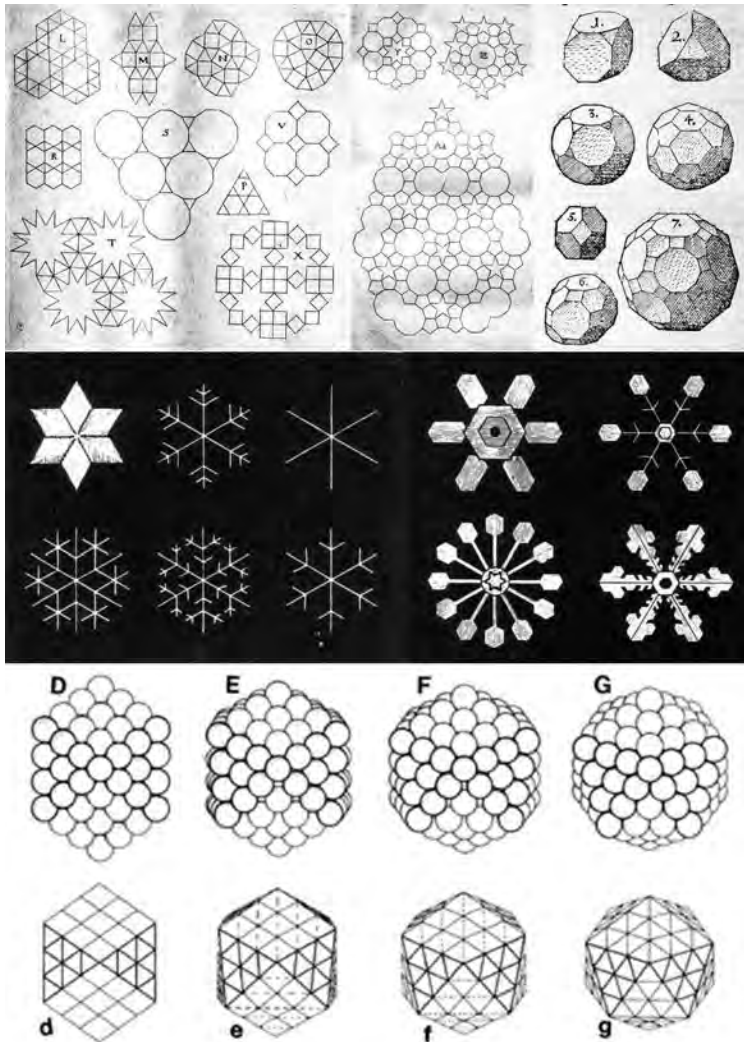
Rispetto alle prime due rivoluzioni, nelle quali la novità ha riguardato prima la *quantità* e poi l'*intensità* dell'energia disponibile, l'era dell'elettronica aggiunge la *velocità* di calcolo alla potenza concentrata del laser, riducendo ai minimi termini la richiesta di “faticavoro” anche in termini di elaborazione progettuale.

L'accelerazione dell'innovazione dovuta ai livelli crescenti di energia disponibile, ha riportato di attualità i concetti e le regole mai abbandonati della trattatistica classica, incentrati sui concetti di

.....

6. L. Spuybroek, 2004, pag. 4

7. R. Penrose, 2006.



F03 | Tassellazioni piane con combinazioni di poligoni e poliedri semiregolari da Keplero, *Harmonices Mundi*, 1619. Struttura simmetrica dei cristalli di neve, da G. Semper, *Der Stil*, 1865. Studi sull'impacchettamento di sfere da B. Fuller. Le conformazioni regolari che si sviluppano a partire dalle simmetrie elementari sono rappresentate in tutti i regni della natura e sono state osservate e studiate anche da Platone e Keplero. La trattatistica ottocentesca ha confermato l'importanza del modello naturale nell'architettura e l'interesse estetico e costruttivo per l'equilibrio delle conformazioni regolari.

modulo e di proporzione, di ripetizione e varietà, di similitudine e cambiamento, che sono alla base della teoria del disegno e sono stati ripresi ciclicamente e aggiornati dagli studiosi della natura, dai matematici e dagli artisti (figg. 1-2-3-4-5).

Regole

La definizione ottocentesca di *grammatica ornamentale* per l'esposizione delle leggi del disegno sottolinea il riferimento al concetto di decorazione come linguaggio espressivo, ma nello stesso tempo evidenzia il suo riferimento alla matematica.

Le grammatiche ornamentali hanno applicato al disegno le regole delle permutazioni teorizzate da Dominique Douat e pubblicate nel 1722 da Sébastien Truchet, indicato come l'autore del primo trattato esplicitamente dedicato alla teoria del disegno.⁸ (fig. 1)

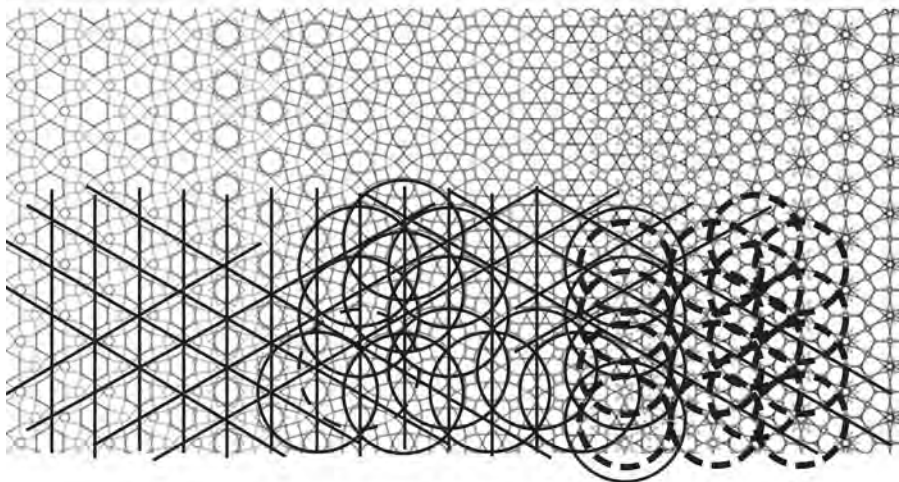
L'accostamento regolare di moduli uguali o simili consente di ottenere innumerevoli disegni con un numero limitato di elementi base, favorendo la variabilità delle forme, caratterizzando in prevalenza motivi geometrici o geometrizzati, concettualmente riconducibili all'intreccio, come aveva già dimostrato Douat nel 1707 sviluppando le possibilità di permutazione di un massimo di 4 elementi, che ricorda la combinazione degli aminoacidi nella catena del DNA, la cui varietà delle configurazioni consente di codificare un numero infinito di proprietà.

La moltiplicazione degli studi sulle leggi del disegno trova riscontro nell'affermazione di Owen Jones,⁹ secondo il quale il segreto del successo dell'ornamentazione deriva dalla produzione di un effetto generale vasto con la ripetizione di pochi elementi semplici, secondo quelle che per Gottfried Semper sono le leggi fondamentali della forma con cui opera la natura: *simmetria*, *proporzionalità* e *direzionalità*.¹⁰ Le stesse quattro simmetrie elementari sono alla base di tutte le strutture ripetitive dei disegni ornamentali usati da tutte le culture fin dall'antichità, prima della catalogazione moderna. (fig. 2) L'ordine dell'ornamento nasce dall'osservazione dei fenomeni naturali (fig. 3) che poi ritroviamo applicati alle ricerche di molti progettisti contemporanei. Le leggi dei pattern sono al centro dell'interesse matematico di Andreas Speiser, fondatore della *Teoria dei*

8. E. GOMBRICH, 1979, p. 90. Truchet è anche l'inventore del sistema di misura della dimensione dei caratteri tipografici in punti, che la grafica digitale ha contribuito a divulgare ai non addetti ai lavori.

9. cfr. O. JONES, *The Grammar of ornament*, Londra, 1856.

10. G. SEMPER, 1860.



F04 | *Le metamorfosi di Escher si basano sulla progressiva deformazione delle griglie periodiche di appoggio del pattern di un "controcambio" o di un disegno congruente con centri di simmetria multipla. Questi motivi sono il faticoso risultato di operazioni reiterate di "spostamento" di porzioni sulla forma geometrica del tassello di partenza sino ad ottenere l'effetto voluto.*

Gruppi, che si prolunga nelle esperienze dei teorici del Basic Design¹¹ alla scuola di Ulm, anticipatori della *Shape Grammar* di George Stiny e del *Generative Design* di Celestino Soddu.¹²

11. Il Basic Design è il nucleo teorico e metodologico su cui si fonda la teoria della configurazione, costituiva la disciplina propedeutica del Bauhaus, dove i maestri erano Klee, Itten e Kandinsky e della Hochschule für Gestaltung di Ulm; la disciplina indaga i fondamenti teorici della forma e le relazioni fra la componente estetica, tecnologica e scientifica del progetto.

12. "*Generative Design is a morphogenetic process using algorithms structured as not-linear systems for endless unique and un-repeatable results performed by an idea-code, as in Nature*", definizione sull'intestazione del sito www.celestinodosdu.com.

Processi

Le esperienze sperimentali novecentesche che accompagnano l'affermazione del computer, offrono "...la possibilità di programmare la creazione di pressoché qualsiasi tipo di ordine e di studiarne gli effetti". Sono parole scritte oltre 30 anni fa da Ernst Gombrich, che subito dopo aggiunge "Forse la massima novità in proposito è la capacità del computer non soltanto di seguire qualsiasi regola complessa di organizzazione, ma anche di introdurre una dose di aleatorietà esattamente calcolata. Le configurazioni risultanti da questa tecnica, consistente nel lasciare un certo campo al caso all'interno di un reticolo fissato di movimenti predeterminati, non soltanto presentano elementi di un certo interesse estetico, ma offrono anche una comprensione senza pari delle operazioni del nostro senso dell'ordine nella percezione di schemi complessi".¹³

Shape grammar è il nome assegnato ai sistemi di algoritmi digitali che generano forme geometriche da Stiny¹⁴ e Gips, che nel 1971 applicarono alla grafica informatizzata i principi linguistici di Noam Chomsky¹⁵. Questa consiste in una serie di regole e di un motore generativo che la applica all'elemento primitivo, reiterando lo stesso processo un dato numero di volte. La regola definisce quindi le trasformazioni per effetto di successive applicazioni.

Una grammatica formale deve avere almeno tre regole: un inizio, una o più regole di trasformazione e una regola finale.

La regola di partenza è necessaria per innescare il processo, quella finale per arrestarlo quando la forma è compiuta.

Il processo si applica anche ad elementi complessi, nei quali la forma risultante è definita da diversi parametri in modo che l'applicazione della regola può prendere in considerazione un insieme di fattori diversi nello stesso ciclo, o agire su configurazioni sempre più complesse come i frattali. Inoltre può esistere una struttura gerarchica che subordina un fattore ad altri.

Ad esempio, la struttura parametrica della regola può essere correlata alle dimensioni delle parti e alle proporzioni intrinseche di un oggetto, consentendo la creazione di una grande varietà di possibili soluzioni da un unico modello, in modo analogo alla varietà degli organismi simili in natura. Successivamente una nuova regola può controllare la combinazione gerarchica degli elementi.

.....
13. E. GOMBRICH, op.cit, pag 114.

14. G. STINY, G. GIPS. 1972

15. N. CHOMSKY, 1980.

Molti autori hanno evidenziato il ruolo degli esempi naturali nello sviluppo dei concetti matematici attraverso i quali l'uomo cerca di spiegare i fenomeni fisici ed è interessante notare come i modelli matematici delle strutture naturali sono stati rielaborati e adottati come modelli per risolvere i problemi costruttivi o formali del progetto.¹⁶ Il primo ad affermare l'origine organica dell'architettura è stato Vitruvio, seguito dai trattatisti del rinascimento, ma è D'Arcy Thompson che all'inizio del secolo scorso ne ha spiegato le ragioni chimico-fisiche, dimostrando che la natura, che persegue la massima efficienza, ha sperimentato tutte le forme possibili offrendo un modello utile per la sua grande efficienza, che anticipava la fantasia e l'ingegno dell'uomo. Nella sua spiegazione, il morfologo inglese afferma che la regolarità delle conformazioni naturali nasce dalla necessità di equilibrio e compensazione di forze e la simmetria è tipica delle strutture inorganiche. Quando un fattore esterno altera l'equilibrio interno al sistema, come succede nella crescita degli organismi viventi, questi devono riequilibrare la loro forma con piccoli cambiamenti che mantengono "inalterata" la forma dello gnomo.¹⁷ In natura *"all changes are small changes. Though a transformation can have a large effect, it is always a relatively small step, and the newness of the new can never be appreciated right away."*¹⁸

Le forme dinamiche del design d'ispirazione organica contemporaneo sono ancora una volta il risultato della disponibilità di strumenti di rappresentazione adeguati, capaci di tradurre in forme i modelli matematici che interpretano i fenomeni naturali. La generazione digitale della forma procede in modo analogo alla crescita degli organismi e al processo evolutivo, un passo per volta per mantenere e ristabilire un equilibrio dinamico che garantisce la massima efficienza alla forma e manifesta la sua *concinntas* nell'*euritmia* del disegno.¹⁹ Quest'ultima applica il senso dell'ordine che deriva dalla ripetitività modulare implicita negli aggregati cellulari e nella crescita organica. Nel piccolo essa applica i concetti basilari del disegno impliciti negli archetipi formali dedotti dall'osservazione naturale, che la tutta la trattatistica riconosce essere alla base delle

16. R. PENROSE, op. cit.

17. W. D'ARCY THOMPSON, 1917.

18. L. SPUYBROEK, p. 9.

19. Secondo G. Semper, nelle sue creazioni l'uomo costruisce un mondo in miniatura che evoca la perfezione irraggiungibile delle meraviglie della natura, della quale intuisce le regole, e nel gioco creativo delle forme dell'ornamento soddisfa il suo istinto cosmogonico, frustrato dall'impossibilità di spiegare l'essenza profonda della realtà.

invenzioni umane, gli stessi che permettono di controllare il processo morfogenetico digitale.

La differenza principale rispetto al passato è lo spostamento dell'interesse dall'equilibrio statico che nasce dall'applicazione periodica delle simmetrie elementari delle grammatiche ornamentali ottocentesche, alla ricerca di dinamismo attraverso un cambiamento riconoscibile, graduale e continuo, del modulo base nella ripetitività del reticolo. "*Our language of patterning is based on similar principles of translation, reflection and rotation, though it can reach a higher level of complexity since there are no exact borders between figure and configuration. All figures have internal and external transformation that interact with effects like merging, hooking, crossing, sliding, opening, nesting.*"²⁰

Modelli

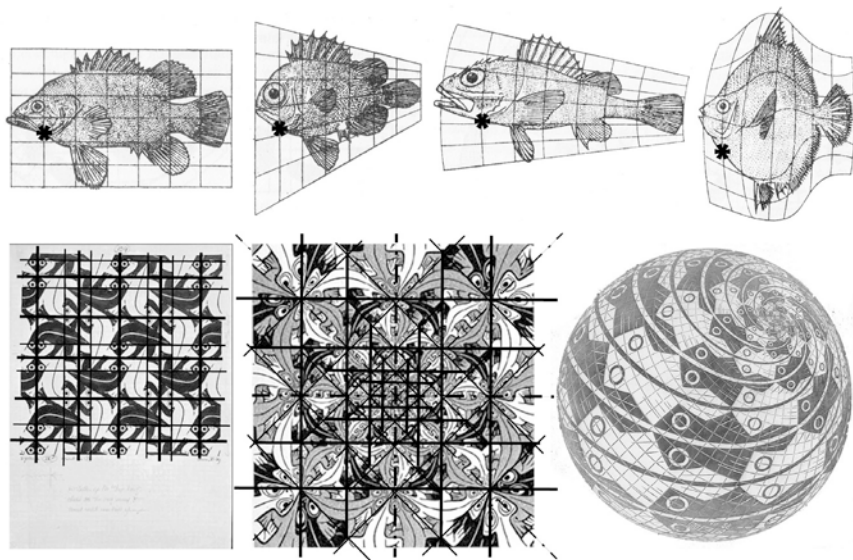
Secondo Gombrich il senso dell'ordine è una categoria innata e l'uomo si è costruito intorno un mondo di forme geometriche semplici. La nostra percezione coglie il contrasto tra ordine e disordine, leggendo la *regolarità* come indice di *intenzionalità*. Per conferire decoro, il disegno si configura in forme ordinate secondo leggi riconoscibili, legate a motivi scanditi dalla ripetizione uniforme di *pattern*, la cui natura modulare deriva da motivi originari dell'intreccio e della tessitura, che sono ripetitivi come conseguenza della loro stessa realizzazione.²¹

I *pattern* producono insieme di disegni ordinati, generati dalla ripetizione regolare di forme secondo schemi precostituiti ma variabili, basati sulle leggi della simmetria, che applicano movimenti rigidi elementari nel piano e nello spazio.

La logica combinatoria definisce il numero delle alterative che si possono ottenere con i movimenti rigidi delle simmetrie elementari (traslazione, riflessione, rotazione o rototraslazione): le successioni lineari su doppia linea produce 7 gruppi fregio, l'aggregazione bidimensionale sviluppa 17 gruppi piani (wallpaper); le conformazioni spaziali generano 230 differenti gruppi simmetrici nello spazio (gruppi cristallografici). I gruppi del piano sono stati applicati nelle decorazioni dei pavimenti, dei tessuti e delle carte da parati e le possibili combinazioni sono note da tempo memorabile e già gli egizi impiegavano tutti i gruppi del piano nelle decorazioni parietali e i matematici hanno proceduto alla loro classificazione rigo-

20. L. SPUYBROEK, p. 272

21. Cfr. E. GOMBRICH, 1979.



F05 | *M.C. Escher ha applicato le deformazioni omologiche delle forme che Thomson aveva individuato comparando la forma dei vertebrati a una graduale trasformazione del pattern modulare con un lento e minuzioso processo di disegno che anticipa gli algoritmi delle prime forme di computer graphic, introducendo il riferimento biologico alla trasformazione e alla crescita.*

rosa (fig. 1). La simmetria multipla che può essere osservata nelle aggregazioni conformazioni naturali delle strutture cristalline, negli organismi inferiori e nei vegetali.

Il modulo base, ripetuto secondo sequenze cicliche, individua una griglia di riferimento basata su reticoli semplici di forme elementari che si susseguono senza lasciare interstizi nella tassellazione del piano o dello spazio. Ne derivano sistemi additivi aperti, che applicano l'accostamento seriale periodico con ripetizioni cicliche indifferenziate. Tutte le tassellazioni periodiche del piano adottano griglie con maglie uguali quadrilatero o triangolari/esagonali, regolari o irregolari.²²

.....

22. La composizione di tasselli derivati dalla scomposizione del pentagono regolare, con il quale non è possibile la copertura del piano senza interstizi, dardi e aquiloni produce invece tassellazioni aperiodiche come quelle brevettate da Penrose, presenti anche nei girih persiani del XVI secolo.

I sistemi chiusi applicano logiche di partizione connaturate alla forma, che possono avere un'organizzazione seriale o polare, nelle quali la disposizione gerarchica delle forme implica due fasi distinte e correlate: l'*inquadramento*, ovvero la definizione del dominio con un bordo (cornice) e il *riempimento*, ovvero l'organizzazione del campo definito dal dominio.

In tutti i motivi ornamentali si ritrovano motivi complessi costruiti su una struttura geometrica più semplice e spesso ripetitiva e la sovrapposizione di reticoli diversamente orientati può aumentare il grado di complessità del disegno, ma lo studio delle simmetrie è alla base di molte altre ricerche riferibili all'ambito progettuale del design o dell'architettura.

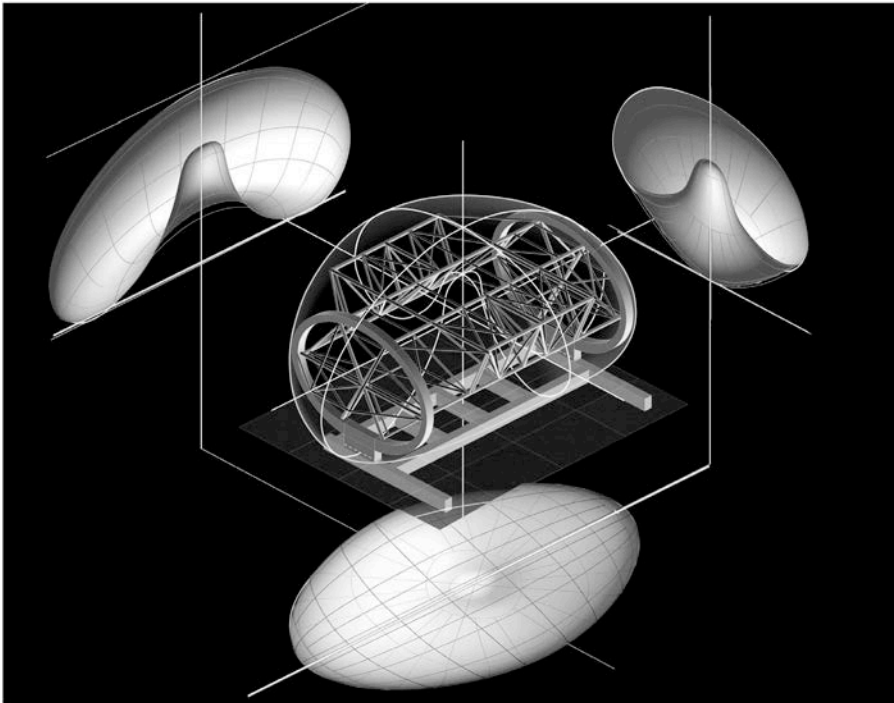
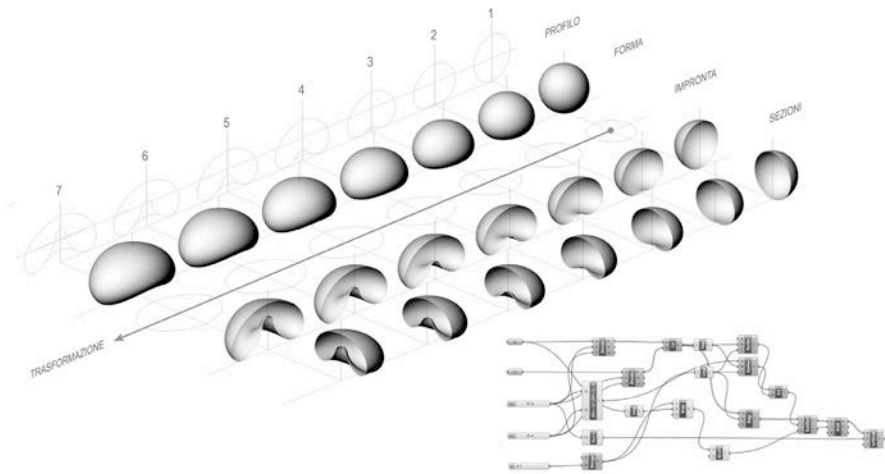
Con le avanguardie del XX secolo, il rifiuto dell'ornamento ha portato ad una riscoperta del valore di "riempimento" della geometria e le strutture elementari del disegno sono diventate un campo di sperimentazione grafica e "strutturale". Gli esempi più conosciuti sono quello di M.C. Escher (figg. 1-4-5) sulla tassellazione regolare del piano, da cui è partita la ricerca sulla trasformazione e la deformazione dei reticoli, e di R.B. Fuller sull'impacchettamento dei solidi regolari e sull'equilibrio "energetico" in un sistema chiuso.

I gruppi dello spazio hanno interessato i chimici e i cristallografi in relazione alla struttura geometrica della materia e alle simmetrie dei cristalli, che sono stati presi a modello da Buckminster Fuller, per studiare l'assestamento delle sfere e i reticoli tridimensionali in applicazioni costruttive e strutturali.²³ Questa ricerca lo ha portato al brevetto delle strutture "tensegrali" e geodetiche, e poi alla concezione della geometria sinergetica, presentata come la geometria del pensiero e dedicata a Coxeter "*Dr. Coxeter is the geometer of our bestirring twentieth century, the spontaneously acclaimed terrestrial curator of the historical inventory of the science of pattern analysis. I dedicate this work with particular esteem for him and in thanks to all the geometers of all time whose importance to humanity he epitomizes*".²⁴

La scienza è nata dall'osservazione del mondo naturale e la natura è stata il primo modello per il progetto che deve esaudire i requisiti vitruviani di *firmitas*, *utilitas* e *venustas* nella *concinnitas* che deriva dall'*euritmia* delle parti in un disegno unitario. Nel mondo organico possiamo trovare i riferimenti di tutte quelle che sono le regole

23. I gruppi cristallografici hanno interessato in relazione all'impacchettamento e al rapporto che i reticoli spaziali più semplici potevano avere con l'aggregazione strutturale nelle costruzioni modulari delle strutture reticolari.

24. R.B. FULLER, 1975, pag. 7.



F06 | *Simulazione generativa del processo di definizione della forma e della tassellazione della superficie per la realizzazione delle lastre di rivestimento del Cloud Gate di Anish Kapoor a Chicago (disegno di G. Buratti).*

base del disegno. Gli equilibri naturali sono infatti un ottimo esempio di ottimizzazione del materiale sfruttando al meglio i requisiti geometrici delle forme. Il risultato non è solo quello dell'efficienza strutturale, ma anche di un disegno ordinato e armonioso capace di esprimere i concetti di *euritmia* e *concinnitas*, ovvero la bellezza implicita nella capacità di organizzare le parti nel tutto, in un sistema organico ed efficiente.

Dopo che D'Arcy Thompson ha dimostrato che la regolarità della natura era l'effetto della massima efficienza implicita nelle proprietà della geometria e che all'origine della vita sembra esserci una rottura dell'equilibrio asimmetrico e dinamico che consente la crescita dell'organismo, il concetto di equilibrio organico è stato sviluppato concretamente in termini costruttivi e strutturali innovativi dai progettisti del XX secolo. Il modello organico trova piena applicazione nelle trasformazioni topologiche del design contemporaneo, perché l'efficienza di calcolo della macchina permette di "disegnare", e quindi di controllare, le trasformazioni di un organismo in crescita. Gli algoritmi del disegno digitale applicano le simmetrie elementari e le regole della forma alla dimensione dinamica della crescita, con processi reiterati che creano strutture complesse che imitano i fenomeni naturali e l'organizzazione degli organismi viventi. Attraverso trasformazioni analogiche simili a quelle spiegate da D'Arcy Thompson, essi permettono di studiare, rappresentare e costruire in modo semplice forme matematicamente complesse con superfici organiche. (fig. 6)

Lo *scripting* richiede la conoscenza dei principi geometrici del disegno, solo così gli artefatti artificiali dell'uomo possono sperimentare le infinite possibilità di ordine.

Per infrangere le regole, bisogna conoscerle bene...

Bibliografia

- [1] S. TRUCHET. *Méthode pour faire un'infinité de dessins differens avec de carreaux mi-partis de deux couleur par une ligne diagonal ou observation di Pere Dominique Douat*. Paris, 1722.
- [2] O. JONES, *The Grammar of Ornament*. London, 1856.
- [3] G. SEMPER. *Der Stil*, Munchen, 1860-63, trad. it. Parziale a cura di B. Gragnuolo, Laterza, Bari, 1992.
- [4] L.F. DAY. *The Anatomy of Pattern*. London, 1897.
- [5] D'ARCY W. THOMPSON, *On growth and form*, 1917, trad. it. *Crescita e forma*, Bollati e Boringhieri, Torino, 1992.
- [6] ANDREAS SPEISER. *Die Theorie der Gruppen*. Zurich, 1937.
- [7] P.H. SCHOLFIELD. *The Theory of Proportion in Architecture*. Cambridge University Press. 1958-2011.
- [8] N. CHOMSKY. *Studies on Semantics in Generative Grammar*, 1972.
- [9] STINY G., J. GIPS. *Shape grammars and the generative specification of painting and sculpture*. In *Information Processing 71*, pp. 1460-1465. North-Holland Publishing Company. 1972.
- [10] R.B. FULLER, *Synergetics. Explotations in the Geometry of Thinking*. Macmillan Publishing, 1975.
- [11] G. STINY. *Algorithmic Aesthetics*. University of California Press. 1978.
- [12] N. CHOMSKY, *Rules and Representations*, New York: Columbia University Press. 1980.
- [13] STINY G. *Introduction to shape and shape grammars*. Environment and Planning B: Planning and Design 7(3), 343-351. 1980.
- [14] E. GOMBRICH. *The Sense of Order. a Study in the Psychology of Decorative Art*. Oxford, Phaidon, 1979, trad. it. *Il senso dell'ordine*, Einaudi, Torino, 1984.
- [15] I. STEWART. *What shape is a Snowflake?*, Weidenfeld & Nicholson, London, 2001. Trad. it. *Che forma ha un fiocco di neve*, Bollati Boringhiari, Milano, 2003.
- [16] C. POZZI, *Ibridazioni architettura/natura*, Meltemi, Roma, 2003.
- [17] N. SALA, G. CAPPELLATO. *Architetture della complessità, la geometria frattale tra arte, architettura e territorio*, Franco Angeli, Milano, 2004.
- [18] L. SPUYBROEK. *Nox. Machining architecture*, Thames & Hudson, Londra, 2004.
- [19] R. PENROSE. *The Road to Reality: A Complete guide to the Laws of the Universe*. Vintage Books. 2004. Trad. it. *La strada che porta alla realtà, le leggi fondamentali dell'universo*, BUR Scienza, Milano, 2006.
- [20] G. STINY, G. GIPS, *Shape: Talking about Seeing and Doing*. MIT Press, Cambridge, MA. 2006.
- [21] C. LANGELLA. *Hybrid design. Progettare tra tecnologia e natura*, Franco Angeli, Milano, 2007.

- [22] R. BETTI, E. MARCHETTI, L. ROSSI COSTA, a cura di. *Simmetria: una scoperta matematica*, Polipress, Milano, 2007.
- [23] A.A. V.V. *Nature Design. From inspiration to innovation*, Museum für Gestaltung, Zurigo, Lars Müller Publishers. 2007.
- [24] K.M. HAYS, D. MILLER, a cura di. *Buckminster Fuller, Starting with the universe*, Whitney Museum of American Art, New York, 2008.
- [25] M. HANN, *Symbol, Pattern & Symmetry. The cultural significance of structures*. Bloombury. London. 2013.
- [26] C. TEDESCHI. *Ordine, disordine e caos. Idea, pensiero, forma e rappresentazione nel disegno dell'architettura*. Mattioli 1885. Fidenza, 2013.

Modellazione 3D, ambienti BIM, modellazione solida per l'Architettura e il Design

Anna Marotta*, Massimiliano Lo Turco**

*Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino

**Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica,
Politecnico di Torino

In un momento storico in cui la pratica professionale richiede sempre più specifiche competenze e tempistiche estremamente serrate, si palesa la tendenza a orientare le tecnologie software verso un loro utilizzo più consapevole e strutturato, in una continua ricerca, a volte faticosa, di strategie procedurali per l'utilizzo di piattaforme condivise. Al contempo, il mercato si adegua proponendo un elevato numero di applicativi nati per risolvere le diverse specificità. Lo stesso termine *parametro* si caratterizza in funzione del contesto di applicazione; se in matematica¹ equivale a una costante arbitraria, richiamata in sistemi, formule ed equazioni, in ambito progettuale esso può assumere diverse sfumature. È opportuno quindi fare un po' di chiarezza all'interno di questa "babele informatica": a differenza dei software parametrici, i software a oggetto presentano maggiori affinità con la progettazione architettonica, in cui le librerie interne a disposizione sono infatti suddivise per tipologie di elementi edilizi.¹ In questo contesto il termine parametro presenta molteplici accezioni che consentono di gestire variabili di tipo temporale, estimativo, materico, prestazionale dei singoli oggetti, i componenti edilizi appunto, che si relazionano tra loro attraverso una base dati. Esistono pertanto applicativi in cui il *parametro* è al centro di un sistema di relazioni dimensionali e associative ed è reso flessibile da procedure che agevolano non soltanto la concezione formale, ma anche le dinamiche legate alle successive fasi costruttive, fertile

.....
1. Cfr. G. CANGIALOSI, S. CAPOCCHIN, V. COLALEO, M. LO TURCO, *Il disegno collaborativo - Collaborative drawing* _ In: G. GARZINO (a cura di), *Disegno (e) in formazione: disegno Politecnico*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna, p. 135.

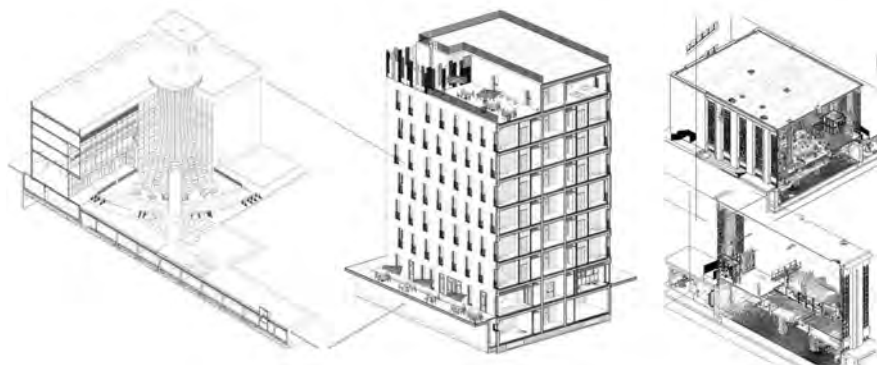


F01 | La gestione 4D del cantiere. Elaborazioni grafiche correlate a diagrammi di Gantt. V. Mottola, M. De Luca Picione.

terreno per la sperimentazione di codici di programmazione. In altri scenari lo stesso termine è sotteso al controllo di un certo numero di variabili (non soltanto geometrico-relazionali) che consentono di governare un particolare processo (progettuale, costruttivo, gestionale,...). In informatica, *“il parametro è un valore che una funzione si aspetta di ricevere per eseguire il suo lavoro”*. In altre parole la funzione, lo stesso programma e il sistema operativo *si aspettano* (valori) e *vogliono sapere* (cosa fare) perché il programmatore ha espressamente previsto che vengano assunte informazioni in tal senso, ha cioè previsto il passaggio di parametri. Nell’ambiente diffuso dei software di progettazione la costruzione di relazioni e la generazione di oggetti mediante procedure di modellazione è affidata a una programmazione predisposta all’interno delle singole applicazioni, denominata *scripting*: un linguaggio di programmazione inserito in un software che permette di lavorarci dall’interno, personalizzando gli strumenti e creandone di nuovi. Tali strumenti hanno fornito ai progettisti funzioni in precedenza inaccessibili (se non attraverso operazioni complesse e dedicate) potenziando non soltanto le procedure di modellazione, ma di fatto anche la possibilità di utilizzare formati comuni per la condivisione delle informazioni.²

Dall’osservazione di alcune illustri testimonianze del passato si può evincere che ciò che cambia e si evolve non è tanto l’approccio metodologico, quanto piuttosto la tecnologia a supporto del
.....

2. Cfr. S. CONVERSO, *Il progetto digitale per la costruzione. Cronache di un mutamento professionale*, Maggioli, Rimini 2010, pp.16-17.



F02 | Alcuni progetti redatti in ambiente BIM svolti in collaborazione con il Servizio Edilizia e Logistica del Politecnico di Torino. Da sinistra a destra: Energy Center Piemonte (progetto preliminare), residenza C. Codegone, (progetto esecutivo), Rifunionalizzazione ex Centrale Termica (progetto esecutivo, già realizzato). M. Lo Turco, G. Cangialosi.

professionista. Ecco dunque scorgere possibili analogie con alcuni celebri disegni di Mario Ridolfi, dove si relazionavano elaborati grafici con informazioni di tipo alfanumerico, o ancora, con l'architettura parametrica di Moretti e le elaborazioni condotte attraverso l'istituto dell'I.R.M.O.U.³, in cui si esplicitavano le relazioni, ancora una volta di tipo numerico, tra le diverse entità, per la risoluzione di problemi di tipo geometrico.

Le metodologie di *Building Information Modeling* propongono soluzioni prefigurando il manufatto edilizio attraverso un modello – di dati appunto - composto da componenti edilizi relazionati tra loro attraverso le regole del buon costruire. Il termine *Modellazione 3D* indica propriamente un processo atto a definire una qualsiasi forma tridimensionale in uno spazio virtuale generata su computer. Le tecniche sono molteplici, ne citiamo alcune: modellazione solida, per superfici, manuale, o procedurale, basata su primitive solide e successiva manipolazione attraverso operazioni booleane, modellazione poligonale, modellazione basata su *metaball* e ancora, software di scultura 3D, o elaborazioni condotte attraverso tecniche di *rotoscoping*.

Il termine *modellizzazione* è invece sotteso a quel processo cognitivo che porta alla costruzione di un modello. In tal senso

.....

3. I.R.M.O.U.: Istituto per la Ricerca Matematica e Operativa in Architettura e Urbanistica.

s'intende sostenere che gli applicativi BIM impiegati nel processo edilizio richiedano uno sforzo intellettuale maggiore rispetto alle più consolidate piattaforme CAD, proprio perché l'esito finale è di tipo multidisciplinare e multirelazionale. Un valore aggiunto è sicuramente rappresentato da una duplice gestione della quarta dimensione: la prima consente di produrre elaborazioni di tipo dinamico, (animazioni precostituite o vere e proprie navigazioni in *real time*); la seconda si riferisce a una gestione delle diverse fasi temporali di cantierizzazione e costruzione del manufatto⁴ (fig. 1), fino a convergere verso operazioni di *Facility Management* sul bene stesso, ove quindi la dicotomia tra la fase ideativa e quella produttiva che ha caratterizzato per molto tempo il processo industriale pare essere superata e il disegno non è più relegato al mero ambito progettuale.

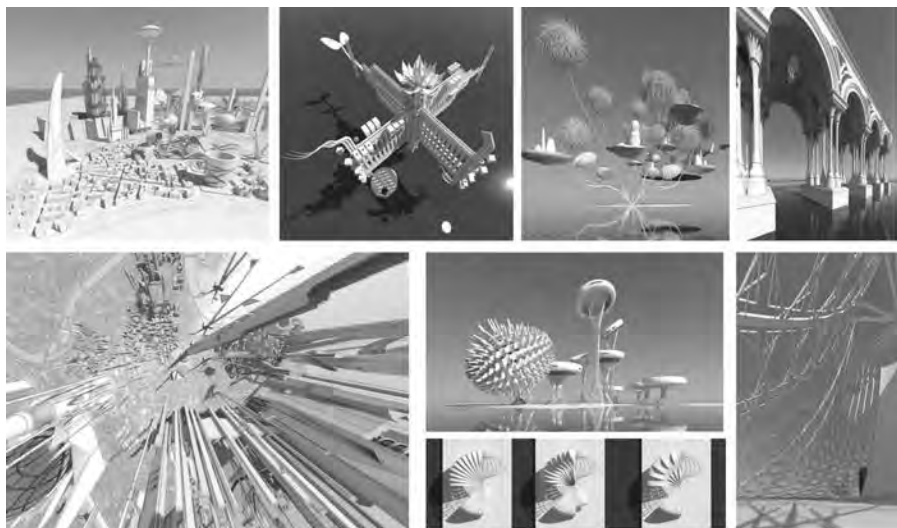
In relazione ai filoni di ricerca attivi sui temi descritti, si segnala il progetto di ricerca InnovANCE, finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico,⁵ il cui obiettivo primo consiste nella creazione della prima banca dati nazionale contenente tutte le informazioni tecniche, scientifiche, economiche utili alla filiera delle costruzioni. Il sistema favorirà l'integrazione di tutti i soggetti del processo costruttivo per eliminare le incomprensioni che generano inefficienze, soprattutto attraverso l'utilizzazione di metodologie BIM (fig. 2).

Si vorrebbe infine riflettere sulla flessibilità sempre maggiore che questi applicativi possiedono e che agevolano la gestione di forme organiche e superfici complesse in maniera autonoma. Parallelamente si stanno diffondendo applicativi che permettono il dialogo tra le diverse piattaforme risolvendo, seppure parzialmente, l'annosa questione dell'interoperabilità dei dati. Il *Building*

.....

4. Si ricorda a tale riguardo un interessante lavoro condotto da alcuni ricercatori della Scuola di Ingegneria dell'Università degli Studi della Basilicata che affrontano il tema dell'organizzazione dei cantieri e della predisposizione delle attrezzature di servizio e di sicurezza mediante una nuova rappresentazione dinamica del sistema cantiere, utilizzando la tecnologia BIM. Cfr. V. MOTTOLA, M. DE LUCA PICIONE (a cura di), *Il progetto dinamico del cantiere edile*, Sole 24 ore, Milano 2009.

5. Il Dipartimento DISEG – Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica del Politecnico di Torino sta collaborando al progetto di ricerca attraverso il contributo di: prof. B. Chiaia, prof.ssa G. Novello, prof. A. Osello, prof. C. Caldera, prof. G. Garzino, ing. A. Fantilli, arch. S. Davardoust., ing. M. Lo Turco. Quest'ultimo, in collaborazione con il Servizio Edilizia e Logistica del medesimo Ateneo, ha sviluppato numerosi progetti in ambiente BIM; alcuni di essi sono stati utilizzati nelle simulazioni condotte all'interno del progetto di ricerca. Cfr. <http://www.innovance.it/>



F03 | Città utopiche modellate in ambiente BIM. E. Di Giacomo.

Information Modeling costituisce dunque un nuovo e rivoluzionario strumento di progetto, controllo e verifica del rapporto tra l'architettura, il design e la produzione-costruzione.

Si segnalano alcuni esempi virtuosi di modellazione *free form*, riferiti a scenari di città utopiche, in cui l'autore⁶ si è divertito a esplorare i confini e anche i limiti di queste tecnologie nella ricostruzione di scenari del tutto o in parte inventati (fig. 3).

Questi ambienti virtuali possono essere poi trasformati in modelli plastici attraverso le recenti tecniche di prototipazione rapida. Si riporta una sintesi di una ricerca⁷, nel quale si illustra il processo che conduce dal modello 3D virtuale alla realizzazione del modello fisico e si analizzano criticamente alcuni casi studio di fama internazionale, filtrati attraverso criteri multirelazionali quali sostenibilità, grado di dettaglio, velocità di esecuzione, riferiti a tecniche, strumentazioni, materiali.

Gli esempi selezionati si riferiscono alle più moderne esperienze di prototipazione rapida condotte attraverso tecnologie basate prevalentemente su processi di tipo additivo, su basi

6. L'autore delle elaborazioni relative alle città utopiche è l'architetto Emmanuel Di Giacomo.

7. La ricerca è coordinata dalla prof.ssa Anna Marotta.



M. Ferreri CASA TUTTA D'UN PEZZO (SLA)

J. Ruijssenaers LANDSCAPE HOUSE (SLA)



A. Morgante RADIOLARIA (SLA)

Softkill Design, PROTOHOUSE (SLS)

J. Sabin, GREENHOUSE AND CABINET OF FUTURE FOSSILS (FDM)

F04 | Alcuni esempi internazionali di prototipazione rapida condotta attraverso processi di tipo additivo. A. Garabello, M. Marsano, A. Marotta.

polverose, liquide e solide.⁸ Sono stati inoltre analizzati esempi più propriamente affini al disegno industriale, o ancora, facenti riferimento ad altri ambiti quali quello medico, l'*automotive*, la moda, il settore alimentare (fig. 4).

Questi ultimi esempi in particolare dimostrano come il Disegno o le Tecniche di Rappresentazione influenzino e siano influenzate da altri settori disciplinari come costantemente avviene per il mercato videoludico, per la navigazione in *real time* di modelli virtuali, per l'influenza del cinema nel campo delle animazioni e per la realtà aumentata, dove si iniziano ad allestire alcune interessanti applicazioni anche nel campo edilizio/architettonico.

Quella che è un'occasione del digitale deve diventare una sfida professionale nella teoria e nella pratica dell'architettura e del design, che abbatta le barriere esistenti tra progettazione e tecnologia, o quantomeno contribuisca ad avvicinare discipline oggi considerate troppo separate. Per questo motivo si stanno costituendo *network* di corsi che stabiliscano legami più stretti

.....

8. Nel processo additivo su base polverosa il laser definisce i vari livelli, e il materiale utilizzato è appunto una polvere; i processi additivi su base liquida costruiscono i diversi componenti in una vasca liquida fotopolimerizzante. Nell'ultimo esempio di processo additivo, il materiale di base è solido, trattato attraverso procedure di estrusione o di incollaggio.



F05 | Quadro comparativo delle esperienze reperite indagato attraverso analisi multicriteria. A. Garabello, M. Marsano, A. Marotta.

tra le diverse discipline, lavorando con gli studenti con maggiore continuità, prefigurando inoltre esperienze semiprofessionali. In un futuro ormai non molto lontano il flusso di informazioni sarà sempre più simile al processo⁹ proposto dai software parametrici: proprio per questa ragione i docenti sono tenuti a preparare gli studenti a una nuova rivoluzione culturale che li vedrà depositari e profusori di una metodologia che ben presto si affermerà nell'industria delle costruzioni. I tradizionali metodi didattici legati alle costruzioni devono rinnovarsi, evolvendosi e adattandosi agli attuali sistemi informatici. Intendendo l'innovazione come l'atto di introdurre nuove idee, nuove tecnologie e nuovi prodotti o processi per la risoluzione dei problemi secondo approcci differenziati, lo stretto legame tra ricerca e didattica è ovviamente essenziale.

9. Durante una sua Welcome Lecture, il prof. Clark Cory aprì il suo intervento con queste parole "Before discussing what BIM is, it should be clear what it isn't. BIM isn't something you can order of the shelf... it's a PROCESS!" sottolineando provocatoriamente come i disegni 2D comunicano l'intenzione progettuale, ma spesso contengono errori, incongruenze o lacune. Cfr. C. CORY, *BIM and its impact on engineering & graphic communication education*, in: AAVV., Proceedings of the 14th International Conference on Geometry and Graphics, ICGG 2010, Kyoto, Japan, 5th-9th August 2010, p.27.

Bibliografia

- [1] A. CINA, A. LINGUA, M. PIRAS, P. DABOVE, P. MASCHIO, H. BENDEA, G. NOVELLO, M. LO TURCO, G. CANGIALOSI, *Metodologie integrate tra rilievo e progetto: l'utilizzo delle scansioni LiDAR in ambiente BIM*, In: 16° conferenza nazionale ASITA, Vicenza, 6-9 novembre 2012. pp. 469-476.
- [2] A. GARABELLO, M.L. MARSANO, *Dall'architettura visualizzata all'architettura reale*, Tesi di Laurea in Architettura, relatrice prof.ssa A. MAROTTA, a.a.2013-2014.
- [3] G. GARZINO, (a cura di), *Disegno (e) in_ formazione. Disegno Politecnico. Drawing (and) Information. Polytechnic drawing*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna 2011.
- [4] M. LO TURCO, G. NOVELLO, *Representation means to condense complex information: the updating of new media for the construction field*, in: INGEGRAF - International conference on Graphics Engineering June 19th - 21th, 2013 Madrid, Spain.
- [5] M. LO TURCO, G. NOVELLO, *From real to virtual (and back): survey and design applied to BIM approach*. In: MO.DI.PHY. MODELING FROM DIGITAL TO PHYSICAL, Lecco, 11-12 Novembre 2013. pp. 96-103.
- [6] M. LO TURCO, G. NOVELLO, *Which drawing to deliver more information?* In C. GAMBARDELLA, (editor) *Less More Architecture Design Landscape*, Le vie dei Mercanti X Forum Internazionale di Studi, Capri, 2-4 giugno 2012, La scuola di Pitagora editrice, Napoli, pp. 690-700.
- [7] M. LO TURCO, *Elogio al disegno parametrico: dalla teoria ai processi operativi - Praising parametric drawing: from theory to operational processes*. In: XXXIV Convegno dei Docenti della Rappresentazione - ELOGIO DELLA TEORIA: IDENTITÀ DELLE DISCIPLINE DELLA RAPPRESENTAZIONE E DEL RILIEVO, Roma, 13-15 Dicembre 2012.
- [8] A. MAROTTA (a cura di), *Qualità dell'architettura, qualità della vita*, Celid, Torino 2008.
- [9] A. MAROTTA, *Qualità dell'immagine, qualità dell'architettura*, In: A. MAROTTA (a cura di), *Qualità dell'architettura, qualità della vita*, Celid, Torino 2008.
- [10] V. MOTTOLA, M. DE LUCA PICIONE (a cura di), *Il progetto dinamico del cantiere edile*, Sole 24 ore, Milano 2009.
- [11] A. OSELLO, *Il futuro del disegno con il BIM per ingegneri e architetti, The future of Drawing with BIM for Engineers and Architects*, Dario Flaccovio Editore, Palermo 2012.

Rilevare per modificare

Adriana Rossi

Dipartimento di Ingegneria Civile, Design, Edilizia e Ambiente
Seconda Università di Napoli

Agli esordi dell'*Industrial Design*, l'economia di un'azienda dipendeva in larga misura dalla razionalizzazione dei processi e dall'unificazione dei prodotti, così che a garantirne l'efficienza erano principalmente la riduzione degli scarti, l'utilizzo delle materie prime con i semilavorati, la semplificazione del montaggio e del collaudo. In quelle condizioni la produzione in serie di un numero elevato di oggetti o componenti standard, era l'obiettivo primario e caratterizzante. Nella contemporaneità, invece, le possibilità offerte dall'evoluzione tecnologica hanno consentito di perseguire la redditività auspicata, senza per questo sottostare ai vincoli discesi dall'originaria impostazione. Sempre per perseguire la promozione culturale dell'oggetto, l'incremento dei consumatori e quindi l'esaltazione commerciale e distributiva del prodotto, gli esperti del settore manipolano il processo, così che anche il designer è attento a rendere versatile il progetto, controllandone le fasi di formazione, esecuzione, distribuzione e vendita. Tra le cause determinanti l'impiego degli elaboratori che, in ogni fase del ciclo di vita del prodotto, integrano competenze e strategie d'interventi, sovrapponendo i campi decisionali ai descrittivi.

Per una sequenza di cause-effetti, il disegno tradizionale, eseguito a mano e con l'ausilio di un tecnigrafo, è stato avvicinato dal disegno automatico (cosiddetto perché i segni grafici erano derivati direttamente dagli algoritmi matematici), per poi essere sostituito dal disegno informatico, fondato sulla scienza che studia i sistemi mediante i quali si acquisiscono, memorizzano, elaborano e diffondono le informazioni elettroniche. Al centro dell'interesse di tecnici e professionisti, non più o solo la geometria della rappresentazione (2D), ma la costruzione di un paradigma solido, cui legare le infor-

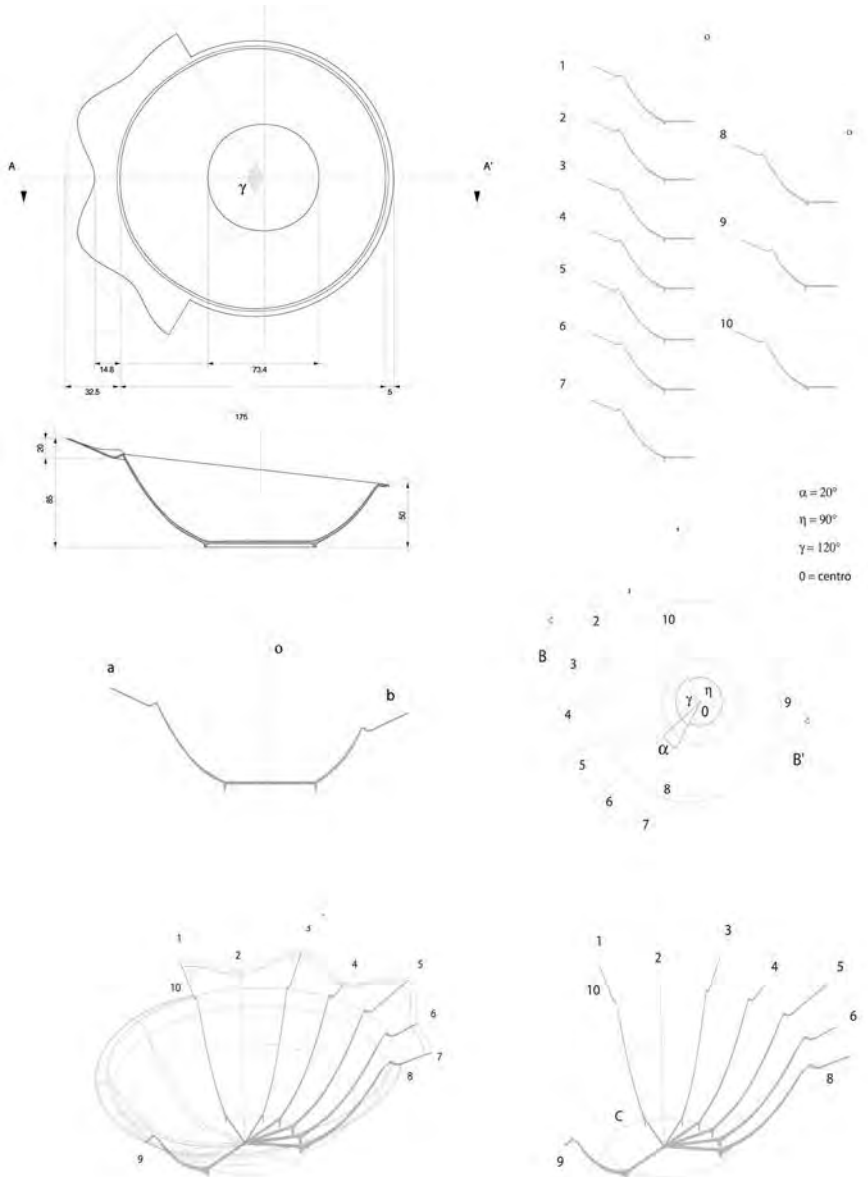
mazioni fisiche ai ragionamenti funzionali alla modifica e riconfigurazione delle proprietà connotative.

Ipotesi

Non volendo entrare nel merito delle questioni squisitamente progettuali, certamente mutate con l'introduzione dei nuovi sistemi di produzione e denotazione informatica, di contro aspirando a circoscrivere le osservazioni al solo rilievo degli oggetti industriali, si analizzano alcuni aspetti logici e metodologicamente fondati, volti a liberare la materia dalle qualità sensibili per risalire all'idea che la sostiene, quindi alle sue possibilità costitutive. In questa luce e come ricorda l'etimo della parola, il rilievo sottolinea la ricorsività delle azioni volte ad *alzare*, per *togliere*, informazioni nella direzione del movimento impresso dal soggetto, il quale, proprio perché seleziona e raccoglie, porta, da ciò che inizialmente appare liscio e indistinto (*laevo*) quel che invece s'impone per essere emergente e distinto (*re-laevo*)¹.

Non è per caso che la struttura della forma si basi sulla morfologia degli artefatti, che per essere descritti devono essere interpretati, così da distinguere qualità, per ordinare insieme di caratteri omogenei. Diversi sono i livelli di approfondimento che dallo spazio percepito, metaforico e ambiguo, conducono a un altro, certo e calcolato e questo cominciando dal modo in cui suddividere i contorni per misurarne la geometria. Di certo i criteri adottati non influiscono sull'esito della forma rappresentata, tuttavia, contrassegnano le tappe di un processo conoscitivo che immediatamente ricade sulle sequenze d'istruzioni o passi procedurali volti a trascrivere nel linguaggio binario (discontinuo) i segni percepiti dall'occhio (continui). Per gestire insieme di numeri ordinati secondo una convenzione e in differenti ambienti di sviluppo, l'elaboratore si serve di funzioni pre-impostate: i software che garantiscono l'operatività dei sistemi di modellazione, manipolano i descrittori, leggi, cioè, che definiscono specifiche condizioni di appartenenza. Per essere più chiari si pensi, a un esempio, a una linea grafica, un profilo tracciato con l'ausilio della gestualità di una mano. La descrizione digitale richiede la trascrizione in un insieme di archi regolari: parti di ellissi, iperboli o paraboli, vale a dire trasformate omologiche di un cerchio, in ogni caso identificato dal luogo geometrico dei punti equidistanti dal centro. Sul piano informatico, infatti, questa certezza si può

.....
1. 1990. *Il rilievo tra storia e scienza*. Atti del Convegno tenuto a Perugia. Tavola rotonda: Roberto de Rubertis / Roberto Masiero. ["XY" n.11-12: 243].

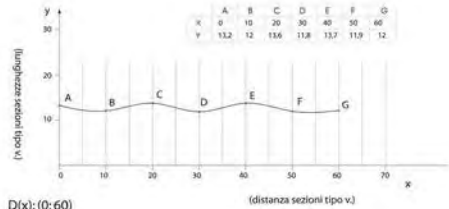
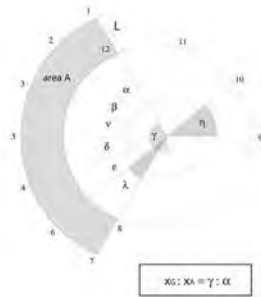


F01 | Rilevo e modellazione del piatto fondo (Driade).

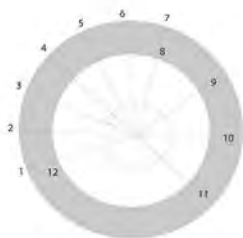
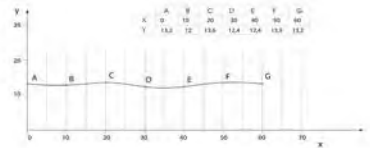
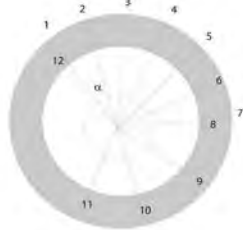
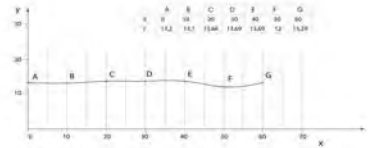
tradurre graficamente in vari modi: interpolando tre punti, o due punti estremi del diametro, oppure fissando il centro e il raggio o ancora il centro e il diametro, in fine, tracciando un raggio tangente a due entità presenti. Nel ventaglio di possibilità offerte dalle funzioni pre-impostate ciò che cambia sono le sequenze algoritmiche, non certo la legge che resta unica e immutabile. Le opzioni ineriscono la scelta delle incognite e quindi delle variabili dipendente all'interno delle funzioni preposte a risolvere classi di problemi nei quali è prevista una procedura automatica di arresto (algoritmo). Pertanto i problemi grafici possono essere generalizzati, così che la rappresentazione dell'oggetto rilevato non è che un esito possibile di un processo in divenire, calcolabile in ogni sua componente e quindi valutabile nelle traiettorie che trascrivono i dati in segni grafici.

Tra le chiavi utili, il concetto di 'specie' preso in prestito dalla biologia che, com'è noto, classifica gli organismi viventi secondo gerarchie di livelli definiti. Il riferimento a un'organizzazione ontologica impone la necessità di distinguere tra gli *attributi* e le *proprietà*, vale a dire tra le caratteristiche *invarianti*, perché pregnanti e sostanziali, e quelle *variabili*, giacché sostituibili nella stessa specie. Le prime sono denotative di un'organizzazione tassonomica; le seconde, per quanto evidenti, marcano invece le differenze tollerate nella stessa classe. Conseguono la necessità di procedere per differenza dei caratteri all'interno di una determinata occasione progettuale o, per rimanere in metafora, all'interno della stessa 'famiglia' di specie (fig. 5).

Circoscrivendo la questione, almeno inizialmente, alla geometria degli aspetti visibili, le caratteristiche variabili possono ricondursi all'esistenza di campi algebrici, intervalli numerici entro i quali la successione rende riconoscibili misure di una data "identità di specie". L'esercizio tende a definire un sistema di rapporti e proporzioni parametriche da sostituire ai valori bloccati dal rilievo di una forma puntuale (fig.1). La dialettica derivata si basa sulla capacità dell'operatore di orientarsi dando un ordine pratico all'esperienza interpretativa, cui si associa la capacità di formulare idee (figg. 2-3). Impostato il modello derivato dalla qualità del rilievo, in altre parole dalla complessità di dati raccolti e messi a sistema (fig.4), l'elaboratore calcola, per cicli gerarchici di classi, le scelte nidificate. L'aspetto più interessante derivato dall'uso di una macchina, per nulla intelligente ma in grado di svolgere operazioni velocemente e con precisione, è la possibilità di auto arricchire il database iniziale intersecando i dati e memorizzando gli esiti computati. Ai fini programmati, la sequenza di eventi/richieste, connessi in modo labile e adattivo, verifica induttivamente le ipotesi soggettive. Rispetto alle potenzialità generative cui tendono i software pro-



D(x): (0; 60)
D(y): (8; 20)



grammati a questo fine, la rappresentazione del rilievo consente di non perdere di vista l'esito finale e con esso la poetica dell'oggetto in questione. Consapevoli della complessità metaforica evocata dall'oggetto e degli irrinunciabili attributi legati alla sua bellezza, funzione e stabilità, gli stessi operatori possono vagliare, di volta in volta, i limiti imposti dalla gestione automatica (fig.3). La validità del sistema è direttamente proporzionale al grado di libertà del 'paradigma indiziario', la regola che aggrega le informazioni per verificare gli sviluppi².

In questa prospettiva il disegno informatico dell'oggetto rilevato, lungi dal correre sul binario forzato dell'apparente efficienza o sulla spettacolarità dei risultati univoci, governa le modifiche e, quel che più interessa ai nostri fini, indirizza all'idea di progetto: come le foglie dei cotiledoni, spiega Jon Frazer, contengono al loro interno riserve nutritive capaci di garantire lo sviluppo del seme, così una legge numerica, sintesi di premesse e strategie d'intervento, può generare variazioni teoricamente infinite, tutte derivate dalla stessa matrice, ma al contempo tutte diverse³. Quando le soluzioni appaiono adatte a risolvere questioni reali (isomorfe), le relazioni elaborate possono assumere carattere decisionale. In tal modo si capovolge l'approccio tradizionale aprendo le scelte a sviluppi, in altro modo, imprevisi e imprevedibili.

Tesi

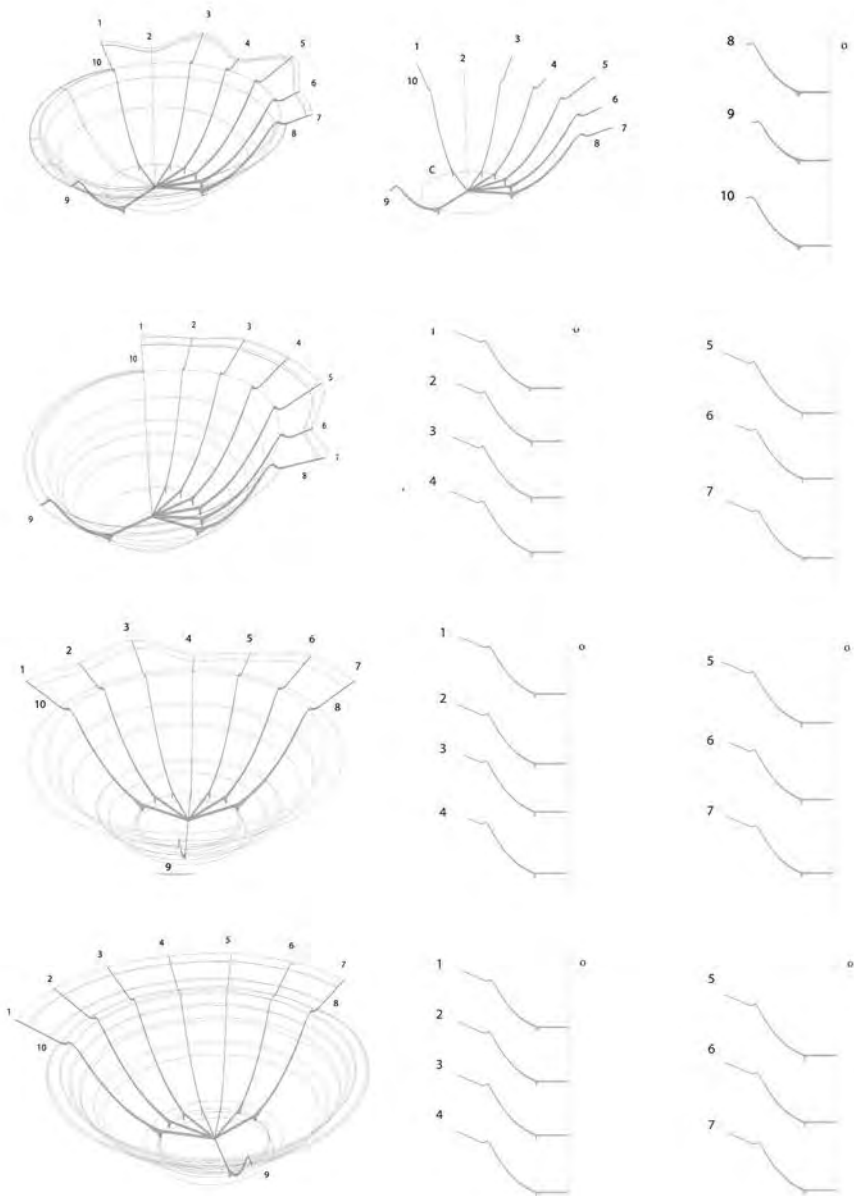
È una capacità della mente umana trarre dall'indeterminata percezione delle immagini ipotesi organizzative degli elementi che strutturano la forma. Diversi i piani di approfondimento: il più immediato e a largo raggio di azione è la geometria fondata sulla riconoscibilità dell'aspetto visibile. Scomporre le parti per commisurarle, è una pratica empirica che Euclide riscatta elevando la geometria a scienza. Risultato, questo, ottenuto circoscrivendo i limiti delle questioni (óroi, in greco) con ragionamenti logico-deduttivi da sottoporre a verifica induttiva.

Il criterio, se trasferito all'elaborazione informatica, insiste sulla descrizione matematica che formalizza gli aspetti geometrici per correlarne degli altri, quali le caratteristiche topologiche e funzionali. Ripercorrendo a ritroso i processi di appercezione della forma, la sua elaborazione elettronica è conseguenza del vaglio delle componenti che configurano l'insieme, così che le fasi di modellazione

.....

2. SODDU e COLABELLA, 1992.

3. FRAZER, 1995.



F03 | Modifiche derivate dal generatore di specie.

PERCORSO

1



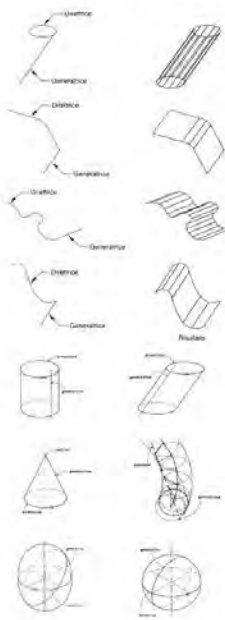
SEZIONE

2



POSIZ. PERCORSO

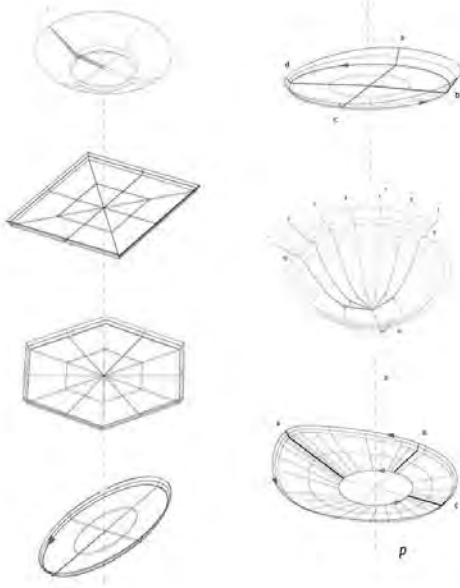
3



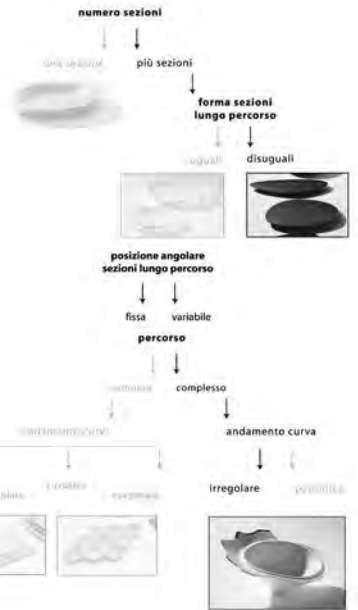
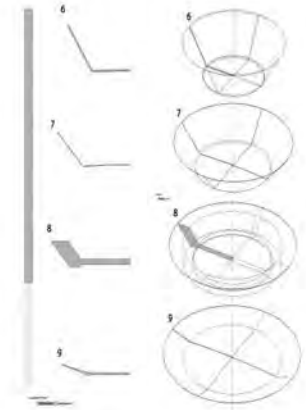
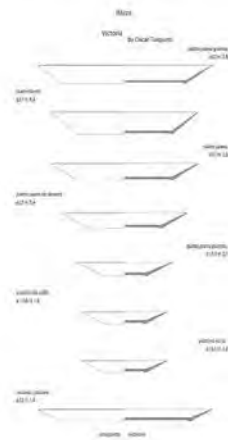
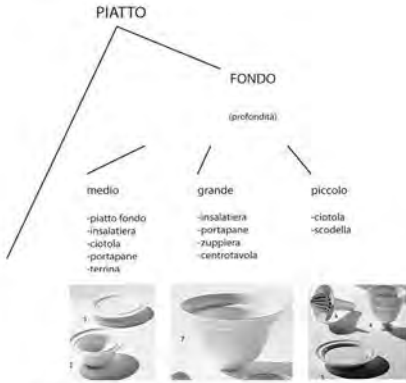
1

2

3



F04 | Schema delle modifiche, esempi di modellazione.



CSG memorizzano il sistema, articolando le primitive solide e con esse le relazioni di vincolo. Il database di coordinate ai vertici sposta l'attenzione dalle parti solide ai contorni di superficie. La loro riduzione a intervalli regolari permette la misura, quindi la trascrizione digitale di elementi finiti. Dall'analisi dei luoghi geometrici emergerà la scelta dei descrittori: vale a dire dei profili o delle sagome che generano involucri di superfici se estruse lungo una retta, oppure trascinate lungo un percorso, in alternativa cucite.

Dai contorni rettificati si ricavano regioni "mappate" e controllate per mezzo d'isoparametriche, linee che anziché interpolare punti di controllo, approssimano nodi, cui le funzioni conferiscono diversi pesi attrattivi.⁴ Nell'uno e nell'altro caso, i profili delle sezioni "spesso rati" delineano gusci (*shell*) a loro volta trasformabili in solidi pieni di nuvole di punti cui conferire proprietà fisiche. È evidente che la scelta delle condizioni di appartenenza a un luogo geometrico (descrittore) non influisce sulla restituzione della forma rilevata, ma ne orienta la sua modifica in funzione delle regole autoimposte, predisponendo un paradigma indiziario (fig.4).

Conclusioni

Posto quale obiettivo il governo della forma, il progetto di rilievo tende a trasformare l'impostazione grafica da statica in dinamica. Un fine perseguito ordinando i dati raccolti in un sistema gerarchico di qualità variabili e invariabili, estensione di logiche e codici naturali. Liberata la materia dalle proprietà sensibili per risalire al luogo delle scelte e quindi delle idee che le sostengono, si riscopre il piacere di chi, come il vasaio, plasma l'argilla con l'ausilio del tornio. Lo strumento partecipa attivamente alla definizione del risultato, indirizzando il pensiero che, nell'istante produttivo, appare creativo. Le figure allegate a titolo esplicativo, mostrano un esercizio di rilievo che, contribuendo a rendere fluido il pensiero, stimola la riflessione⁵. Gli esiti sono dialetticamente confrontabili in virtù delle

-
4. N.U.R.B.S. (*Non Uniform Rational B-Splines*): geometrie (di linee e superfici) controllate da rapporti di polinomi (condizione richiamata dal termine *rational*) che distingue queste rappresentazioni da altre forme parametriche espresse come somma di polinomi; il numero dei nodi che definiscono l'elasticità della linea. I valori dei nodi programmati per attrarre la curva con pesi diversi (*non uniform*) possono esser aggiunti ma non rimossi senza modificare la forma di una NURBS. Alcuni software sono dotati di un'interfaccia avanzata utile a rimuovere i nodi quando si cancella un punto di controllo.
 5. Gli esempi illustrati sono stati tratti da Rossi, Adriana. 2005. *Disegno design*. Roma: Officina Edizioni, p. 156.

procedure reiterabili. Lunghi dal perseguire la semplice innovazione stilistica, le fasi del rilievo indirizzano a un lavoro concettuale, lucido e razionale, perciò svincolato da qualsiasi significato emozionale.⁶

Bibliografia

- [1] BHATTA S., GOEL A. 1996. 'From Design Cases to Generic Mechanisms'. In: *Artificial Intelligence in Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, Special Issue on Machine Learning 10:131-136, 1996.
- [2] BHATTA S., GOEL A. 1996. 'Generic Modeling in Analogical Reasoning'. In: *Proc. Eigtheenth Cognitive Science Conference*, San Diego, July 1996.
- [3] BHATTA S., GOEL A. 1997. 'An Analogical Theory of Creativity in Design'. In: *Proc. 2nd International Conference on Case-Based Reasoning*, Lecture Notes in Computer Science - 1266, pp. 565-574, 1997.
- [4] BHATTA S., GOEL A. 1997. *A Functional Theory of Design Patterns*. In: *Proc. 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-97)*, Nagoya, Japan, August 1997, pp. 294-300.
- [5] BHATTA S., GOEL A. 1997. *Learning Generic Mechanisms for Innovative Design Adaptation*. In: *Journal of Learning Sciences*, 6(4): 367-396, 1997.
- [6] BHATTA S., GOEL A. 2002. *Design Patterns and Creative Design*. In: *Engineering Design Synthesis*, A. Chakrabarti (editor), Chapter 16, pp. 271-284, Springer, 2002.
- [7] BOND W., STICKLEN J., GOEL A.; CHANDRASEKARAN B., 1989. 'Functional Reasoning for Design and Diagnosis'. In: *Proc. 2nd International Workshop on Model-Based Diagnosis*, Paris, France, July 1989, Los Altos, CA: Morgan Kaufmann.
- [8] BROWN D., PUNCH W., GOEL A. 1996. *A Knowledge-based Selection Mechanism for Strategic Control with Application in Design, Diagnosis and Planning*. *International Journal of Artificial Intelligence Tools*, Vol. 4 (3), pp 323-348, 1996.
- [9] CHANDRASEKARAN B., 2000. Josephson, and J. R. 2000. 'Function in device representation'. In: *Engineering with Computers*, 16(3/4):162-177, 2000.
- [10] CHANDRASEKARAN B., 2005. *Representing function*. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 19 (2005), 65-74.

6. Cfr. KOSUTH, J. 1965. *One and Three Chairs* [Kosuth, 1969. *Art after Philosophy*. Trad. it. 1987. *L'arte dopo la filosofia*. Costa & Nolan, 2009].

- [11] CHANDRASEKARAN B., GOEL A., IWASAKI Y. 1993. 'Functional Representation as Design Rationale'. In: *Computer archivio*, Vol. 26, n. 1 (1993), pp. 48-56. IEEE Computer Society, Press Los Alamitos
- [12] DAVIES J., NERSESSIAN N., GOEL A. 2005. *Visual Models in Analogical Problem Solving*. In: *Foundations of Science*, 10(1):133-152, 2005.
- [13] FRAZER, J.H. 1995. *An Evolutionary Architecture, Architectural Association*. London: Cambridge University.
- [14] GOEL, ASHOK. 1995. 'An Alternative Approach to Qualitative Device Modeling in Conceptual Engineering Design'. In: *Proc. 1995 NSF Design and Manufacturing Grantees Conference*, La Jolla, California, January 1995.
- [15] Goel, A., Todd G., N. Nersessian. 1996. *The Role of Generic Models in Conceptual Change*. In: *Proc. Eigtheenth Cognitive Science Conference*, San Diego, July 1996.
- [16] GOEL A., TODD G., N. NERSESSIAN. 2000. *Function-follows-Form: Generative Modeling in Scientific Reasoning*. In: *Proc. 22nd Cognitive Science Conference*, 2000.
- [17] SATTIRAJU P. GOEL A. 1998. *Functional Modeling for Enabling Adaptive Design of Devices for New Environments*. *Artificial Intelligence in Engineering*, 12:417-444, 1998.
- [18] SODDU C.. 2002. *New naturality: a generative approach to art and design*. In: *Progetto Leonardo May 35* (MIT PRESS July 2002).
- [19] SODDU C., COLABELLA E. 1992. *Il progetto ambientale di morfogenesi. Codici genetici dell'artificiale*. Bologna: Società Editrice Esculapio, 2012.
- [20] UMEDA Y., KONDOH S., SHIMOMURA Y., TOMIYAMA T. 2005. *Development of design methodology for upgradable products based on function-behavior-state modeling*. In: *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, Vol. 10, (2005), pp. 161-182.
- [21] WIE M., BRYANT, CARI R., MATT R., BOHM, D. MCADAMS, R.B. STONE. *A model of function-based representations*. In: *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, Vol. 19:2005. pp. 89-111,
- [22] GOEL A., YANER P. 2006. 'From Drawings to Models by Analogical Transfer'. In: *Proc. Fourth International Conference on Theory and Application of Diagrams*. Stanford University, Palo Alto, California, June 2006.
- [23] GOEL A., YANER P. 2007. *Understanding Drawings by Compositional Analogy*. In *Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2007)*, Hyderabad, India. January 2007.

La forma mutante

Andrea Casale

Sapienza Università di Roma

Dipartimento di Storia, Rappresentazione e Restauro dell'Architettura

“Creatività è unire elementi esistenti con connessioni nuove, che siano utili”

Questa è la definizione di creatività proposta dal celebre matematico, fisico e filosofo francese Henri Poincaré all'inizio del 900. L'affermazione particolarmente sintetica e chiara, descrive in maniera precisa cos'è la creatività e perfettamente si adatta a descrivere il fare dell'architetto e del designer.

Penso che analizzare il senso delle parole scelte dal matematico e filosofo, permetta di individuare quei concetti che sono propri del progettare.

“Unire elementi esistenti” sta a significare che non c'è bisogno d'inventarne di nuovi, sono i costituenti stessi della natura, sono i principi del passato, ma sono anche i contenuti della realtà che altri hanno individuato e che ininterrottamente arricchiscono il nostro mondo. Inoltre vuol dire studiare le forme che gli elementi possono esprimere e che trovano le proprie radici nella tradizione.

Da una parte il rispetto della materia e della forma che essa può generare, che abbiamo imparato ad apprezzare nelle opere dei maestri come in Mies Van Der Rohe o in Carlo Scarpa, dove il ferro, la pietra e il cemento, pur articolandosi in poetiche composizioni spaziali, non tradiscono mai la propria concreta naturalità fisica. Dall'altra la geometria che la materia può descrivere, come in Theo van Doesbug o in Pier Luigi Nervi dove essa esalta le proprie doti plastiche mantenendo inalterato il rapporto tra l'opera nel suo insieme e il dettaglio.

“Con connessioni nuove”, vuole dire apprezzare nuove giustapposizioni, nuove interazioni, nuovi possibili usi. Nuove configurazioni che abbracciano in continuità le diverse scale del progettare, dalla città all’edificio pubblico per poi trovare nell’unità abitativa il modulo minimo di espressione, come succede opere di Le Corbusier o in Alvar Aalto; *“dalla città al cucchiaino”* come diceva Rogers nel 1952.

“Che siano utili”, è questo il punto che trovo più illuminante nella definizione di Poincaré.

Ha senso inventare qualche cosa che non sia utile? Ha senso non occuparci del ruolo sociale dell’azione creativa accettando che essa possa avere il solo valore di espressione di una volontà personale e individuale?

Progettare è indagare, studiare, individuare nuove regole che possano essere socialmente condivise. Azioni che sono espressione di concetti etici che hanno fatto grandi i nostri maestri e caratterizzato il nostro vicino passato.

L’architettura e il design sono prodotti sociali, appartengono alla collettività e nella collettività trovano il loro senso esistenziale; sono da sempre fatti politici che generano un fare rivolto alla polis, alla società degli uomini, ed è con essa e per essa che il progettista attiva la sua capacità creativa per concepire, costruire e offrire l’artefatto.

“Connessioni nuove, che siano utili”, illustra il compito più profondo dell’atto creativo, il superamento della regola esistente attraverso un’azione che sia in grado di istituire nuove regole dalla collettività condivise. È l’agire umano a cui è riconosciuto un’utilità sociale, etica, estetica e non per ultima economica; in cui la personalità del progettista è accolta insieme alla natura dell’uomo e alla materia che esso educa e manipola come elemento che partecipa direttamente nell’azione creativa.

Eppure troppo spesso è stata data una descrizione della creatività che l’identifica come espressione istintiva di una personalità, un’esigenza singolare di mostrarsi, l’esplosivo bisogno di un’autonomia e individuale manifestazione, espressione di una soggettività che si rivela al di fuori delle regole. Niente di più distante da quanto affermato da Poincaré.

L’avvento dell’informatica, che da tanti è visto come una vera e propria rivoluzione, nel campo della progettazione ha significato la possibilità di appropriarsi di nuove forme e di nuove tecnologie per poterle realizzare. Spesso però queste hanno assunto il significato di realizzare oggetti che poco hanno a che fare con l’esprimere forma e funzione per la collettività, ergendosi come dimostrazione tecnica e formale di pochi e per pochi. L’edificio e l’oggetto hanno assunto



F01 | *M. Fuxas, Fiera di Rho-Però. Zaha Hadid, Centro culturale Heydar Aliyev. S. Calatrava, Padiglione Quadracci, Milwaukee Art Museum. Diller + Scofidio, Nuvola. Lampada da studio L-1 Luxo di J. Jacobsen (1937). Tizio di R. Sapper (1972). Organic Armchair di Charles e Ray Eames ed Eero Saarinen (1940). Sedia Panton di V. Panton (1960).*

troppo spesso il significato di esibizione di una nuova danarosa classe che si compiace nell'ostentare l'individualità. L'oggetto è tornato ad essere per pochi, economicamente costoso la cui qualità principale è spesso la firma dell'autore.

Il termine *Archistar*, diventato parte del lessico contemporaneo, inventato dalle studiose Gabriella Lo Ricco e Silvia Micheli, autrici del saggio "Lo spettacolo dell'architettura. Profilo dell'*archistar*" (Bruno Mondadori, Milano, 2003), tanto consapevoli dell'efficacia del neologismo da volerlo proteggere con copyright, dimostra la nuova realtà dell'architettura come show business e il nome dell'architetto come brand, come marchio. Non di meno si potrebbe parlare di prodotti di *designerstars*, per indicare l'analogo fenomeno che accade nel mondo del design griffato.

Si racconta che Pitagora camminando per le strade di Crotona, sentendo battere sull'incudine si rese conto che il suono non dipendeva dalla forza con cui veniva percossa l'incudine, ma dal peso del martello. Costruendo uno strumento musicale di una sola corda, sperimentò che cambiando la lunghezza della corda vibrante cambiava il suono, e che l'intervallo musicale era legato direttamente alle proporzioni espresse dalla lunghezza della corda. Per il grande matematico una regola divina, la proporzione numerica, governava il cosmo così come legava il comportamento di tre fenomeni naturali completamente diversi: il suono, il peso e la lunghezza.

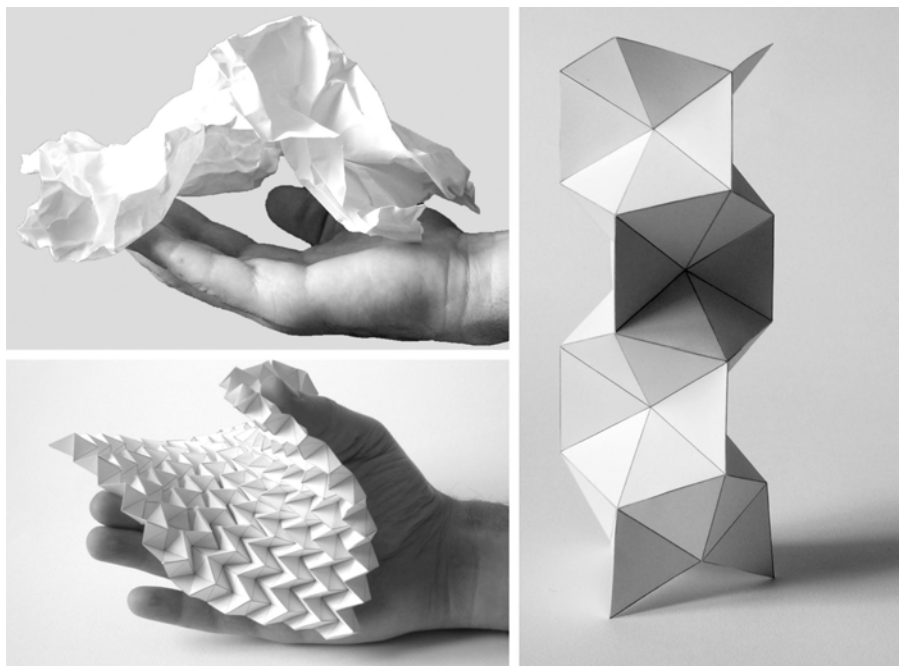
Si racconta ancora del grande sconforto che colpì la scuola da lui fondata quando si scoprì che non era possibile trovare un segmento divisore del lato del quadrato che potesse essere usato per dividere la sua diagonale. Ma sempre da quella scuola nasce la soluzione, il Teorema di Pitagora, da molti considerato il più *bello* e importante teorema della geometria. Ecco che l'incommensurabilità viene risolta con il rapporto che lega le aree dei quadrati costruiti sui lati, con l'area del quadrato costruito sull'ipotenusa.

Dallo spazio monodimensionale, la corda dello strumento o il lato e la diagonale del quadrato, la geometria si appropria del piano e supera l'incommensurabile attraverso la forma.

Polis, forma, geometria, rappresentazione, progetto.

Un elenco di nomi che descrivono un rapporto tra parti, una proporzione che da sempre ha determinato il fare dell'architetto e del designer.

L'architettura per Vitruvio deve ubbidire alla *firmitas*, all'*utilitas*, alla *venustas*. Molto più tardi all'inizio del 900, non avendo più il coraggio di usare la *venustas* come strumento oggettivo di giudizio, l'architettura moderna trasforma la triade nella diade *forma e funzione*, ancora comunque una proporzione tra parti, che hanno assunto e assumono i diversi significati e le declinazioni che hanno caratte-



F02 | *Superficie piegata caotica. Superficie piegata a forma. Superficie piegata strutturata.*

rizzato e caratterizzano i più alti esempi di architettura e di design. Lo studio della forma e delle sue proprietà geometriche accompagna da sempre la progettazione e da sempre ha indirizzato la ricerca estetica, dall'individuazione dei cinque poliedri platonici illustrati anche da Leonardo (*"Divina Proporzione"* di Luca Pacioli), ai più contemporanei studi di solidi frutto della rotazione e intersezione tra poliedri, risultato delle prime sperimentazioni dell'informatica applicata all'arte che diventa regola di Lucio Saffaro. Per passare alle sperimentazioni di Escher e dell'Optical Art e ancora ai ritmi generati dalla geometria frattale che sembrano poter spiegare alcuni fenomeni percettivi legati al giudizio della visione.

È innegabile che l'architettura e il design dei nostri giorni hanno scoperto un nuovo ruolo per la forma. La tecnologia applicata all'informatica permette configurazioni mai proposte e mai realizzate nel passato. L'oggetto, l'artefatto, assume un ruolo non più legato alle condizioni specifiche dei luoghi della polis, ma supera l'identità locale per divenire elemento di una globalizzata società, priva di specifiche e singolari connotazioni.

Una polis, mutevole e mutante, in continua modificazione che diventa il risultato di una condivisione trasversale dell'informazione che supera i confini nazionali descrivendo nuovi contesti collettivi. E la forma dovrebbe diventare elastica, capace di rispondere alle diverse funzionalità che si vogliono per l'artefatto, il quale assume il ruolo emblematico di rappresentare l'instabile e veloce nuova realtà sociale.

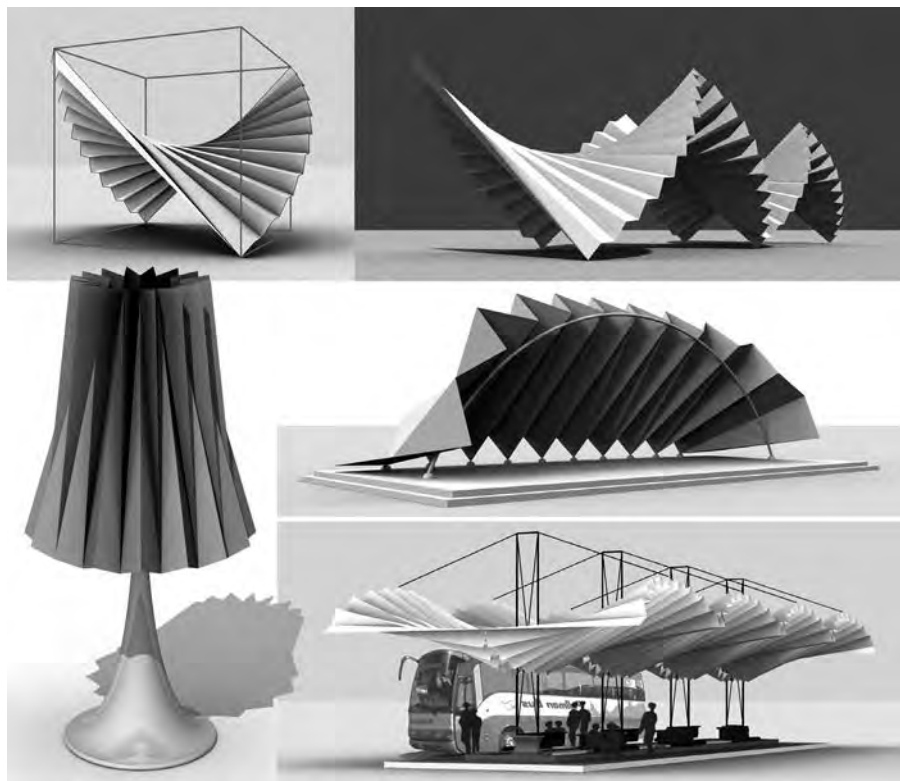
Le ricerche contemporanee nell'architettura hanno superato il concetto di forma risolta come sovrapposizione, giustapposizione e intersezione, sviluppando da una parte la forma libera, figlia dei nuovi programmi informatici di gestione del modello (Frank O. Gehry, Zaha Hadid, per citare i più conosciuti), dall'altra la forma che, ubbidendo ad input comportamentali, sia adatta e modifica la propria configurazione per rispondere a condizioni funzionali, formali e comunicative diverse (S. Calatrava, Diller e Scofidio).

Nel design la movimentazione di parti ha da sempre coniugato l'esigenza funzionale con il valore estetico, dalla famosa lampada da studio L-1 Luxo di J. Jacobsen del 1937 alla tizio di R. Sapper del 1972. Ed anche la forma libera, risultato dell'interazione diretta tra disegno, prototipo e realizzazione industriale, ha tradizioni antiche: dalle famose sperimentazioni sull'uso degli allora "nuovi materiali" come la organic armchair di Charles e Ray Eames ed Eero Saarinen del 1940, alla famosa sedia di V. Panton del 1960; arrivando alle attuali sperimentazioni risultato dell'applicazione di software per il controllo della prototipazione, come la stampante 3d e le frese a controllo numerico (fig. 1).

La forma è diventata dinamica, mutevole e mutante, ubbidisce a indicazioni diverse e si dispone a rispecchiare la variabilità e il dinamismo della vita a cui partecipa o che in essa vi si svolge.

Proprio per le caratteristiche dell'oggetto mutante, mobile e dinamico, il disegno, inteso come lo strumento di rappresentazione di modelli, ha assunto necessariamente molti e differenziati modi di espressione per la progettazione e il controllo della forma. Il disegno può analizzare le caratteristiche della forma ancor prima che essa assuma un ruolo fisico definito, prima che si concretizzi come manifestazione di un oggetto. Attraverso di esso è possibile attuare una sperimentazione sulla forma senza che essa assuma ancora un ruolo funzionale, suggerendo configurazioni che potranno essere di guida per la funzione che l'oggetto potrà assumere.

La superficie ha preso negli ultimi tempi un nuovo significato sia per l'architettura che per il design e le forme che essa può assumere hanno determinato uno scambievole e proficuo rapporto tra interessi scientifici diversi, le forme della matematica hanno interessato i progettisti e le forme dei designer hanno incuriosito i matematici.



F03 | Alcune dimostrazioni sulle configurazioni raggiungibili da una superficie piegata composta da tasselli triangolari tutti uguali.

Ripercorrendo l'antica arte del piegare la carta, l'origami, il nostro gruppo di ricerca (Andrea Casale, Graziano Mario Valenti, Michele Calvano) ha sviluppato uno studio volto principalmente all'analisi delle proprietà della superficie nel generare forme.

Abbiamo voluto indagare le possibili configurazioni che può assumere una superficie piana se dotata di pieghe orientate e disposte secondo specifici pattern di tassellazione; i tipi di relazioni che esistono tra le geometrie del pattern e le configurazioni che può assumere la superficie; il movimento applicato alla superficie nel passaggio da una configurazione ad un'altra; la gestione di queste superfici applicate all'architettura e al design.

Le ricerche contemporanee sulle Folding Surfaces mantengono in comune con l'antica arte del piegare la carta il fine di costruire delle

pieghe sulla superficie perché questa possa arrivare a definire nello spazio una determinata configurazione spaziale; differentemente la nostra ricerca indaga le possibili configurazioni che una superficie piegata è capace di generare attraverso il suo movimento.

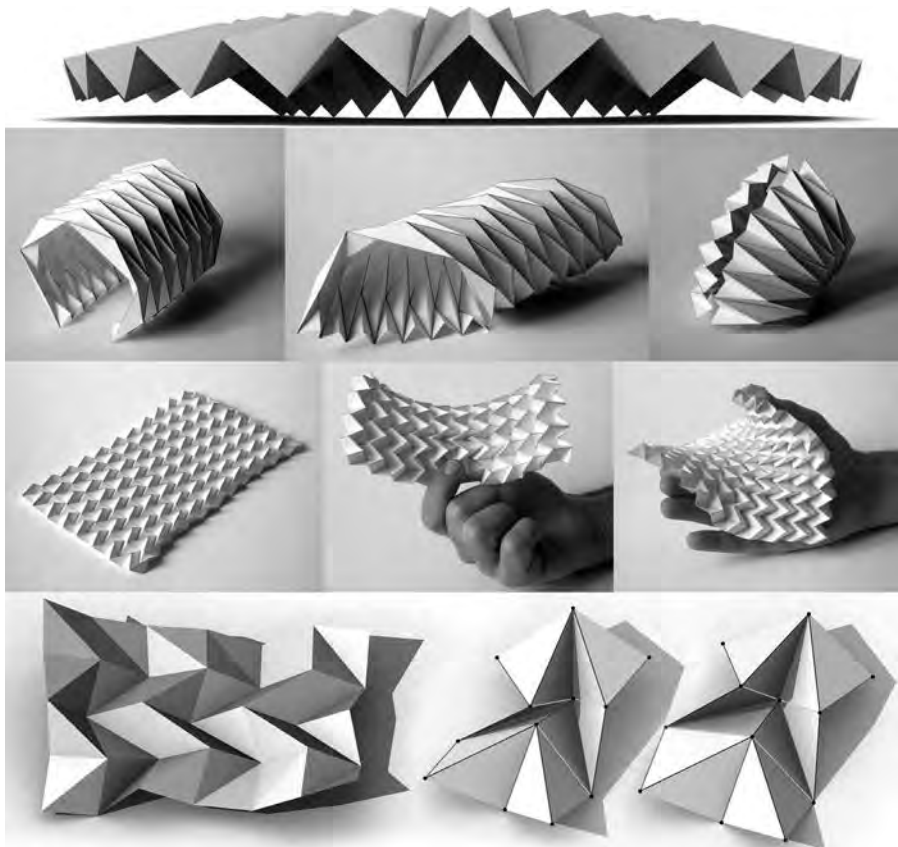
Analizzando la distribuzione di pieghe che tassellano una superficie, abbiamo potuto distinguere tre famiglie di conformazioni (fig. 2). Nella prima, chiamata "caotica", la superficie è sottoposta ad una tassellazione disordinata e minuziosa, proprio grazie a questa suddivisione in piccoli e diversi tasselli essa si appoggia a innumerevoli forme di supporto. La seconda, chiamata "a forma", è dotata di pieghe in modo tale che riesca a raggiungere una preordinata forma, le pieghe determinano la suddivisione minima in modo da raggiungere la configurazione preordinata. La terza chiamata "strutturata", studia come la tassellazione della superficie permetta di raggiungere nello spazio configurazioni diverse attraverso il movimento delle sue parti (fig. 3).

Queste superfici piegate articolate "strutturate" sono il risultato di diverse tassellazioni regolari. I tasselli sono poligoni regolari rigidi che ripetonano sul piano la loro aggregazione minima. Le cerniere permettono la rotazione del tassello secondo un preordinato verso (monte o valle). Per alcune conformazioni si è scelto di arricchire la tassellazione con delle cerniere neutre, non vincolate ad un preordinato verso di rotazione, che accrescono le possibili configurazioni raggiungibili dalla superficie (fig. 4).

Le superfici piegate articolate, modificano nel tempo le loro conformazioni spaziali. Il cambiamento avviene in maniera continua da una condizione geometrica ad un'altra mutando la forma complessiva, ciò che non cambia è la forma del tassello rigido e il vincolo che esiste tra essi. Le superfici così trattate realizzano due diversi obiettivi: la possibilità di raggiungere diverse configurazioni attraverso il movimento e il basso costo in quanto composte da gruppi di tasselli uguali tra loro. Se inoltre dotiamo queste superfici di appropriati automatismi per la gestione del movimento, allora queste sono capaci di cambiare per adattarsi a diversi input sia fisici che comunicativi (fig. 5).

Le caratteristiche geometriche e dinamiche delle superfici così trattate, hanno preteso l'uso di modelli informatici adatti a provare la mobilità delle parti e che nel contempo permettono di verificare le qualità formali delle configurazioni da esse assunte nello spazio. Questi modelli informatici sintetizzano le condizioni che poi potranno diventare costruttive e permettono di simulare il comportamento meccanico proposto dagli automatismi previsti nella realizzazione dell'opera.

Oggi abbiamo programmi che sfruttano maggiormente le poten-



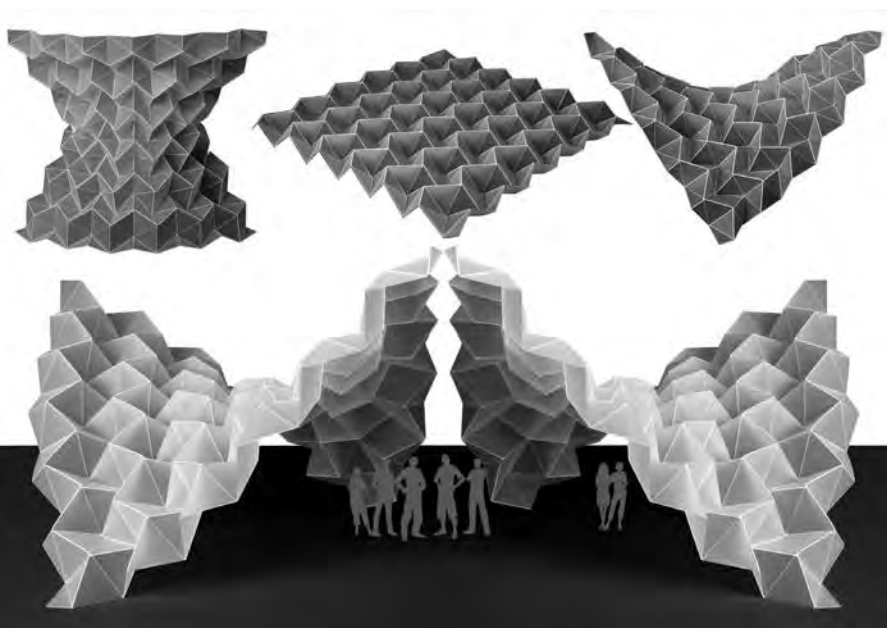
F04 | *In alto: Yoshimura pattern, alcune possibili configurazioni.*

In basso: Miura pattern con l'ulteriore piega neutra, alcune possibili configurazioni. Come agisce la piega neutra su di un gruppo minimo di tasselli.

zialità di calcolo del computer: algoritmi governano il passaggio dalla geometria, alla geometria computazionale, ridando al calcolatore la sua naturale funzione.

Le originali soluzioni della geometria, integrate da apposite procedure parametriche digitali per l'analisi e la rappresentazione automatica delle superfici, hanno guidato l'individuazione di metodologie operative capaci di assistere il progettista dalla fase ideativa a quella costruttiva.

Nella fase ideativa, la complessità della geometria presa in esame viene razionalizzata attraverso la reiterazione di azioni semplici atte a costruire il comportamento percettivo e funzionale della superfi-



F05 | Alcune configurazioni che può raggiungere un Miura pattern esagonale con l'aggiunta della piega neutra attraverso il movimento.

cie generata. In quella costruttiva, la definizione parametrica può essere ulteriormente articolata in funzione della tipologia, degli spessori dei materiali, della progettazione delle cerniere, del colore e della forma nel suo complesso, fino alla simulazione di una significativa esperienza di percezione dell'artefatto.

È interessante notare che la gestione di queste superfici pretende l'uso di tutti gli strumenti della rappresentazione. Allo studio del pattern costruito attraverso il disegno tradizionale, si lega immediatamente la verifica attraverso un modello fisico semplificato, a questo si accompagna il modello virtuale statico per verificare che le condizioni geometriche proposte dai tasselli rigidi incernierati siano realmente realizzabili senza deformazioni, successivamente il modello parametrico permette di verificare che quanto previsto si realizzi nella movimentazione.

La superficie, dotata di appropriate pieghe, propone studi che abbracciano interessi diversi, dalle proprietà geometriche del piegare, alle geometrie delle configurazioni che la superficie riesce ad assumere muovendosi nello spazio, ai vincoli costruttivi e formali

che devono essere risolti perché la superficie strutturata possa realizzare la movimentazione delle sue parti.

Inoltre essa pone ulteriori e nuovi interrogativi che vanno da quali debbano essere gli input a cui deve rispondere la superficie piegata a quali debbano essere le metodologie più adatte perché si possa comunicare una struttura che trova nel movimento la sua specifica condizione formale.

In questa sperimentazione si è dimostrato come il disegno possa recuperare il suo antico ruolo, unire la qualità di analisi e verifica dell'idea progettuale; inoltre espleta la caratteristica forse più importante, diventare sistema capace di suggerire nuove e diverse suggestioni che il progettista comprende e giudica. Si mostra come indispensabile ausilio in grado di instaurare con il progettista quel particolare rapporto attivo, fonte egli stesso di suggerimenti e soluzioni.

Il progetto diviene il risultato di un esperimento che unisce il mondo del design con l'architettura, provando come la creatività applicata alla progettazione di un artefatto sia sempre un processo integrale, dove il problema della scala è solo un'effimera motivazione di distinzione tra due realtà che hanno infiniti punti in comune.

E la forma diventa il risultato di una mutevole condizione che varia in funzione di specifici vincoli costruttivi e formali in cui il movimento, inteso nella sua concezione più ampia e attuale, propone nuovi e importanti cambiamenti sia nella gestione che nell'espressione del progetto.

Bibliografia

- [1] B. ZEVI. *Poetica dell'architettura neoplasticista*. Ed. Einaudi, 1974.
- [2] K. MIURA. *Folding a plane- scenes from nature technology and art, Symmetry of structure*, interdisciplinary Symposium, ed. Danvas G. & Nagy D., Budapest, 1989. pp 391-394.
- [3] HUMIAKI HUZITA. *Understanding Geometry through Origami Axioms*, in Proceedings of the First International Conference on Origami in Education and Therapy (COE T91), J. Smith ed., British Origami Society, 1992. pp. 37-70.
- [4] G. LO RICCO, S. MICHELI. *Lo spettacolo dell'architettura. Profilo dell'archistar*. Mondadori Bruno. 2003.
- [5] G. M. VALENTI, *HySpace: spazio virtuale parametrico per la fruizione interattiva di modelli digitali*. In *Sistemi informativi per l'architettura*, Ali-nea, Firenze, 2007. pp.600-605, 2007.
- [6] M. EMMER. *Matemorph da Escher all'architettura virtuale* (pp. 81, 100). Lucio Saffaro, artista della geometria (pp. 157, 170). In *Matematica e cultura in Europa*. Ed. Springer Verlag, 2010.
- [7] T. TACHI. *Geometric Considerations for the Design of Rigid Origami Structures*, in Proceedings of IASS Symposium 2010, Shanghai, China, pp. 771-782.
- [8] R. J. LANG. *Origami Design Secrets: Mathematical Methods for an Ancient Art*, sec. ed. AK Peters, 2011. pp. 770.
- [9] A. CASALE, M. CALVANO. *Castelli di carta. La piega per la costruzione di superfici articolate*, DisegnareCon, vol. 5, n.9, Bologna, (2012) pp. 309-316.
- [10] G. M. VALENTI, J. ROMOR. *Geometria responsiva*. In DisegnareCon, vol. 5, n.9, Bologna, 2012. pp. 309-316.
- [11] A. CASALE, G. M. VALENTI. *Architettura delle superfici piegate. Le geometrie che muovono gli origami*, in nuovi quaderni di Applicazioni di Geometria Descrittiva, Vol. 6, ed. Kappa. 2013.

Forma in movimento

Graziano Mario Valenti

Sapienza Università di Roma

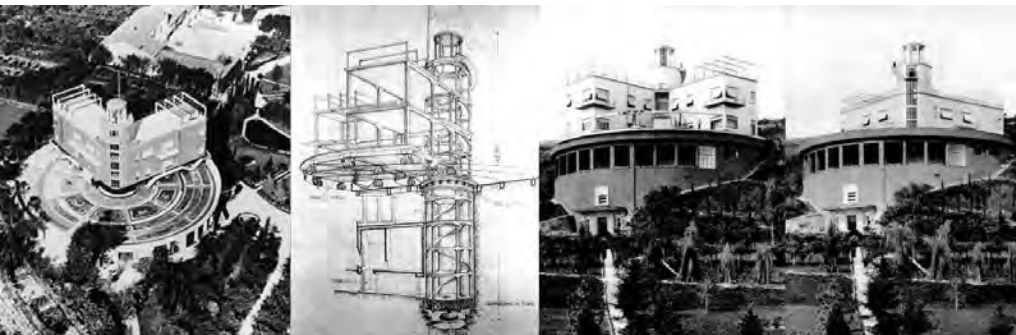
Dipartimento di Storia, Rappresentazione e Restauro dell'Architettura

Forma in movimento: questo sembra essere il destino ineluttabile dell'architettura e del design. Alla staticità propria dei corpi senza vita, caratteristica del prodotto artificiale, l'essere umano, attraversando i secoli, ha sempre tentato di contrapporre un meccanismo dinamico, emulazione del "vitale".

Un percorso di ricerca, motivato da diverse quanto unidirezionali ambizioni, tutte protese, più o meno inconsapevolmente, all'invenzione di un organismo perfetto: mutevole, versatile, efficace, "pensante".

Siamo abituati ad immaginare oggetti in movimento i prodotti dell'ingegneria meccanica, questo particolare punto di vista ha certamente caratterizzato il progetto "cinetico" dell'architettura e del prodotto industriale finora realizzato.

Nel prodotto industriale le ridotte componenti gravitazionali, generalmente presenti, hanno consentito una maggiore sperimentazione del movimento; viceversa, le grandi masse che caratterizzano l'architettura hanno limitato notevolmente gli orizzonti di ricerca in quest'ambito. I problemi affrontati nella scala architettonica, sono stati prevalentemente quelli del varco, dell'orientamento e della copertura. Mentre nei primi due ambiti le soluzioni sperimentate, hanno riguardato prevalentemente semplici trasformazioni di traslazione e rotazione, il tema della copertura è stato affrontato in modo più radicale, tentando di risolvere vere e proprie mutazioni della forma. Se nel primo caso possiamo parlare di un'architettura semplicemente "cinetica", nel secondo caso è più corretto riferirsi ad un'architettura "dinamica", ove il progettista va oltre il concepimento di un semplice cambio dell'orientamento della forma, per affrontare una vera e propria trasformazione della sua geometria. Possiamo consi-



F01 | Casa girasole - Angelo Invernizzi.

derare appartenere al primo caso sia l'edificio noto come *casa girasole*, progettato nei primi anni trenta dall'ing. Angelo Invernizzi (fig. 1), sia il *Mobile Dwelling Unit* progettato da LOT-EK (fig. 2).

Nella *casa girasole* una semplice rotazione del corpo superiore dell'edificio ne ottimizza l'orientamento; nel *Mobile Dwelling Unit* una traslazione "esplosa" lo spazio interno verso l'esterno. Per quanto in entrambi i casi sia percepito un cambiamento di stato della forma, l'interpretazione della geometria rimane costante.

Appartengono invece all'ambito "dinamico", diverse soluzioni che affrontano il tema della copertura. Fin dalle prime applicazioni dei *velarium* progettate per anfiteatri come il Colosseo, al preziosissimo e sistematico lavoro di *Frei Otto*¹, per arrivare alle più recenti opere di Santiago Calatrava², la copertura ha rappresentato l'elemento architettonico per eccellenza con cui confrontarsi con la mutazione dinamica della forma. Il progettista, in questi casi, si trova a dover gestire una complessità notevolmente superiore, derivante dalla libertà di mutazione della forma e dalla necessità di gestirne in ogni istante il suo comportamento meccanico strutturale (fig. 3).

La recente innovazione digitale, prodotta oggi non tanto dalle nuove tecnologie disponibili quando finalmente dall'alfabetizzazione informatica divenuta propria dei progettisti, sta caratterizzando ulteriormente il progetto architettonico che, oltre che mutevole, versatile ed efficace, sta diventando anche "pensante".

1. A partire dagli anni '60 Frei Otto coordina il gruppo di ricercatori dell'ILEK, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, a Stoccarda, svolgendo un notevole lavoro di ricerca e sperimentazione sui sistemi di movimentazione delle coperture.
2. Dalle più giovani *Doors* della *Ernsting Warehouse* in Coesfeld, al più maturo *Quadracci Pavillon* dell'Art Museum di Milwaukee.

F02 | *Mobile Dwelling Unit - LOT-EK.*

Con questo termine, un po' enfatico, si vuole alludere al concetto di "responsivo": ossia alla possibilità di progettare un organismo architettonico, capace di trasformarsi nello spazio, come prodotto di una elaborazione di informazioni, generalmente provenienti da sensori.

Tutto ciò, che per certi versi può apparire molto innovativo, in realtà non lo è per niente. Quest'affermazione, non nasce dalla constatazione che se esaminassimo il passato, potremmo individuare già presenti opere considerabili responsive, quanto e soprattutto per il fatto che il concetto di responsività, altro non è che l'applicazione del paradigma di base, cuore della tecnologia digitale: input -> elaborazione -> output. Un paradigma che solo oggi assurge a elemento centrale, essenziale e dunque vitale per il progetto, ma naturalmente era già presente fin dalle origini della diffusione del computer. Quella che è mancata è stata l'alfabetizzazione informatica: una cultura digitale diffusa, utile a comprendere quale fosse il vero ausilio che l'elaborazione digitale in modo innovativo e insostituibile poteva fornire al progettista.

Se volgiamo lo sguardo indietro e osserviamo l'evoluzione delle applicazioni della tecnologia digitale al progetto è facile individuare almeno tre fasi principali. Nella prima fase, che potremmo definire di "emulazione", l'elaborazione digitale è stata sottoutilizzata, finalizzandola a riprodurre gli strumenti di disegno\progetto tradizionali. È stata il cavallo di troia della tecnologia informatica: la via scelta per permeare il largo pubblico, rompendo le incredibili reticenze verso l'innovazione dell'attività professionale. Nello specifico dell'attività progettuale architettonica e del disegno industriale, non v'è stato in questo periodo un significativo cambio di processo: si è continuato a procedere nello stesso modo - con il disegno bidimensionale soprattutto - con qualche vantaggio in



F03 | *Quadracci Pavillon, Art Museum di Milwaukee - Santiago Calatrava.*

termini di velocità e di precisione. Il grande risultato di questa fase è stato dotare di un computer ogni professionista.

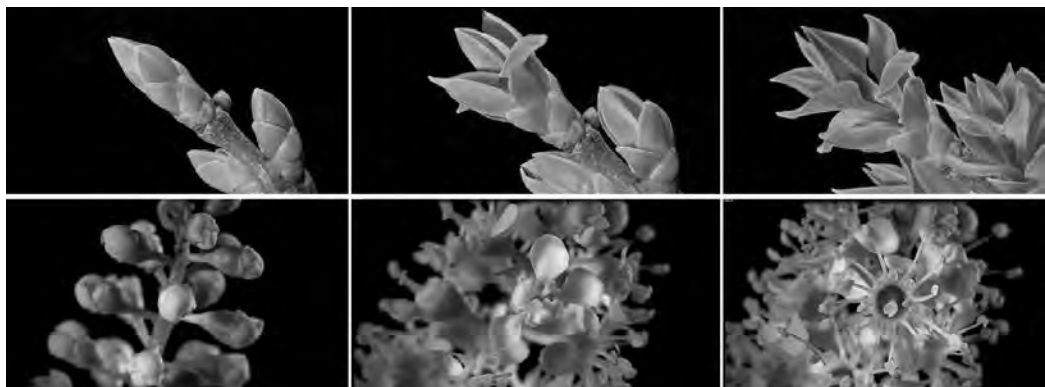
La seconda fase invece è notevolmente più appropriata agli strumenti informatici, potremmo definirla la fase della “simulazione”. L’elaborazione digitale finalmente viene utilizzata per integrare le informazioni e produrre delle sintesi utili all’evoluzione del progetto. Verifiche formali, strutturali, ambientali, economiche, così come diverse altre, si rendono disponibili al progettista in tempo reale, entrando preponderatamente nel processo ricorsivo necessario alla definizione del progetto. L’integrazione e l’elaborazione dell’informazione, non sono finalizzate ad emulare uno strumento tradizionale³, bensì forniscono un contributo innovativo, altrimenti non ottenibile.

L’elaborazione non è ancora parte del progetto, ma è finalizzata e indispensabile per la sua definizione. L’architettura progettata è ancora statica, ma si arricchisce nei contenuti che sono via via sempre più ottimizzati.

La seconda fase è ancora oggi imperante, ma qui e là cominciano a formarsi piccole crepe, ove fuoriescono esperienze che anticipano l’avvento della terza fase, che potremmo definire della “integrazione”. Il germoglio di questo processo è negli edifici intelligenti, che rappresentano il vertice massimo evolutivo della seconda fase, nonché il ponte di connessione con la terza. Con il termine di “integrazione” si vuole qui evidenziare come l’elaborazione non sia solo utile al progetto, ma sia essa stessa parte del progetto. Il progettista,

.....

3. Un tecnografo elettronico, per esempio, al quale possiamo assimilare i primi software CAD.



F04 | *Movimento e trasformazione della forma in natura.*

non crea una forma statica, ma una forma dinamica che si trasforma nel tempo reagendo a stimoli esterni, raccolti da apparati sensoriali, in un complesso sistema di azione-reazione anch'esso parte indissolubile dell'insieme del progetto.

L'integrazione è tanto più riuscita quanto più la relazione *input*->*elaborazione*-> *output* è non lineare: ossia quanto è più complessa l'elaborazione dell'*input* e, per conseguenza, quanto più è sorprendente e imprevedibile la produzione – efficace - dell'*output*.

Esemplificando con un paragone teatrale, utile all'illustrazione, potremo dire che, l'architettura così come l'oggetto industriale, nella prima fase entravano in scena come oggetti senza vita, facenti parte della scenografia; nella seconda fase partecipavano come comparse, relegate ad un rigido copione; nella terza fase ricoprono il ruolo di protagonisti, capaci di improvvisare e di meravigliare sulla base di un canovaccio.

Il progettista, infatti, stabilisce i criteri comportamentali dell'oggetto progettato, ma tanto questi sono più complessi quanto meno sarà possibile anticiparne tutte le manifestazioni.

Una riflessione notevole che deriva da queste considerazioni è il cambiamento di ruolo che la rappresentazione assume nel processo progettuale. Quando si opera creativamente nel concepire oggetti "statici", la rappresentazione è strumento per visualizzare l'idea progettuale; quando invece dobbiamo progettare un oggetto "responsivo", la rappresentazione è l'obiettivo del progetto: ossia il modo in cui esso si manifesta nella sua mutevole continuità formale e comunicativa.

Naturalmente il progetto di un forma responsiva, dunque mutante, aspirante ad una complessità di reazione e quindi di comunicazione,

richiede innanzitutto un'approfondita conoscenza della geometria. In particolare di tutte quelle informazioni che generalizzano la genesi delle forme e ne definiscono continuità e discontinuità topologiche, così che possano dinamicamente cambiare aspetto nello spazio (fig. 4).

Solo per questa via si può giungere a concepire la parametrizzazione di una genesi generativa e comunicativa del progetto e alla sua "attuazione", intendendo con questo termine il sistema di vincoli fisico\geometrici che ne consentono la trasformazione.

Oggi abbiamo a disposizione per questo tipo di sperimentazione avanzati strumenti di modellazione hardware e software, innovative e ormai accessibili attrezzature di prototipazione rapida, sensori e microprocessori componibili come fossero componenti del Lego e infine interfacce utente materiali e immateriali. Vi sono dunque tutte le premesse per sviluppare una profonda sperimentazione sui progetti responsivi, sia alla piccola che alla grande scala. Dobbiamo però fare attenzione nel nostro operare di procedere tanto in modo sincronico, quanto e soprattutto in modo diacronico. Con il termine sincronico, intendiamo dire calati nel nostro tempo, quindi naturalmente familiarizzando, appropriandoci e infine massimizzando le tecnologie via via disponibili utili alla rappresentazione nella sua più ampia accezione di attività di conoscenza e comunicazione. Ma l'operare sincronico, non può essere svolto in modo appropriato, se non abbiamo maturato una capacità di lettura critica diacronica del fenomeno. Che ci renda capaci di leggerne non il manifestarsi, ma l'essere e soprattutto il suo divenire. In termini più concreti, bisogna evitare di farsi abbagliare e assorbire dagli strumenti e dal loro prodotto, ed invece focalizzare attenzione e ricerca sui fondamenti e sul processo che caratterizzano quest'evoluzione.

Bibliografia

- [1] BULLIVANT L. *Responsive Environments: Architecture, Art And Design* (V&A Contemporaries) Author: Lucy Bullivant, Publisher: Victori. 2006.
- [2] HASTINGS S. R. *Computer design tools for climate-responsive architecture*. *Solar & Wind Technology*, 1989, 6.4: 357-363.
- [3] GALFETTI A., FRAMPTON K., FARINATI V. *Villa Girasole: la casa rotante*. Mendrisio Academy Press, 2006.
- [4] GLAESER L., OTTO F. *The Work of Frei Otto and His Teams, 1955-1976*. Institut für leichte Flächentragwerke, 1978.
- [5] OTTO F., TROSTEL R., SCHLEYER F. K., *Tensile structures; design, structure, and calculation of buildings of cables, nets, and membranes*. The MIT Press, 1973.
- [6] STERK T. d'ESTRÉE. *Building upon Negroponte: a hybridized model of control suitable for responsive architecture*. In *Automation in construction*, 2005, 14.2: 225-232.
- [7] TZONIS A., CALATRAVA, S. ROSSELLI P., *Santiago Calatrava: la poetica del movimento*. Rizzoli, 1999.
- [8] VALENTI G. M., *Il modello integrato*. In MIGLIARI R., *Disegno come Modello*. Roma: Kappa, 2004, 59-62.
- [9] VALENTI G. M., *Teoria informatica per la progettazione architettonica*. In PORTOGHESI P., SCARANO R. *Il progetto di architettura*. Roma: Newton & Compton, 1999, 567-573.

Variabili in cerca di definizione | Ontologia del disegno computazionale

Giorgio Buratti

Politecnico di Milano - Dipartimento di Design

Nel processo progettuale il disegno da sempre precede l'attività costruttiva. L'atto del disegnare costituisce un momento di organizzazione di idee, di gestione delle risorse e di previsione dei risultati, reso possibile dall'impiego di strumenti dedicati. Matita, penna, compasso e altri semplici utensili si sono affinati lentamente, rimanendo sostanzialmente invariati nel corso dei secoli, e solo negli ultimi quattro decenni sono stati affiancati dai sistemi informatici. L'introduzione del computer come strumento di disegno ha determinato un mutamento epocale: oltre a contrarre i tempi di esecuzione ed aumentare l'accuratezza del segno, l'elaboratore permette di disegnare in uno spazio tridimensionale efficacemente simulato, consentendo l'espressione di forme più articolate. La prima fase di produzione di disegni attraverso l'uso dello strumento digitale è caratterizzata dall'importanza dell'hardware, continuamente evoluto alla ricerca di prestazioni ottimali e di rappresentazioni sempre più realistiche. Il ruolo del software è relegato alla simulazione delle attività operative del disegno tradizionale, il computer è trasformato in un efficace "tecnigrafo digitale". I cambiamenti di natura economica, sociale e culturale che hanno contraddistinto gli ultimi anni, hanno accelerato l'avvento di una società digitale e globalizzata. In questa nuova fase l'accresciuto livello di alfabetizzazione informatica ha portato i progettisti ad indagare i processi, spesso sconosciuti, che sottendono il funzionamento dello strumento digitale utilizzato, determinando l'avvento di un nuovo tipo di modellazione basata sulla logica elaborativa delle informazioni e capace di innovative sperimentazioni formali.

La libertà morfologica che contraddistingue le recenti produzioni nel

mondo del design o dell'architettura, sono il risultato di un utilizzo consapevole del mezzo digitale che libera il progettista dai vincoli e dai condizionamenti dei software CAD di prima generazione. Questi strumenti inducono l'utilizzatore a scegliere tra insiemi di possibilità formali predefinite e successivamente assemblate. I processi di generazione delle geometrie sono nascosti dietro all'interfaccia del software, rimanendo materia di competenza delle case produttrici del programma che spesso sviluppano soluzioni non rispondenti alle complesse esigenze formali e funzionali della progettazione odierna. Ricercatori e professionisti legati alle discipline del progetto hanno pertanto cooperato con gli ingegneri informatici per ovviare a questi limiti, sviluppando strumenti sempre più aperti e adattabili alle singole esperienze progettuali e di ricerca.

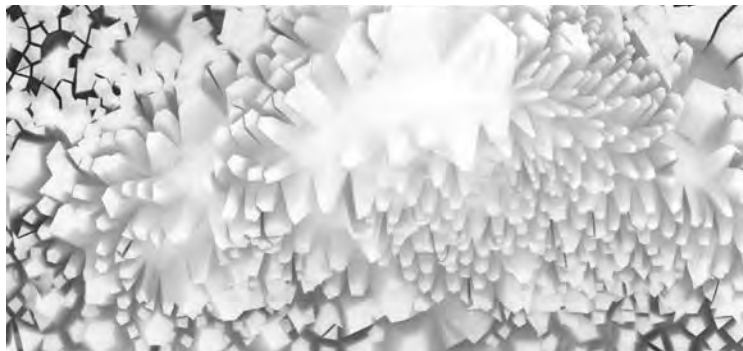
Caratteristica comune di questi software di modellazione è la generazione della forma attraverso la stesura di algoritmi¹ definiti dall'utilizzatore.

L'utilizzo di un procedimento di calcolo come strumento di disegno promuove un indirizzo di ricerca basato sulla centralità del concetto di codice-procedura nel quale la forma non è definita a priori, ma deriva da un processo di affinamento di istanze concettuali, comunicative, strutturali e geometriche che porta al risultato più rispondente alle aspettative formulate in partenza (fig. 1).

La costruzione della forma come risposta ad una serie di regole di relazione non è comunque un approccio recente, ma precede l'utilizzo delle tecnologie informatiche come strumento di progettazione e rappresentazione². La reciproca fecondazione con l'utilizzo dell'elaboratore ne ha però esteso le possibilità, permettendo l'evoluzione del disegno assistito verso una nuova fase

.....

1. Il termine algoritmo deriva dal nome del matematico arabo Al Khwarismi, vissuto nel IX secolo, che pubblicò l'opera *Kitab Al-jabrwal Muqabala* (L'arte di numerare ed ordinare le parti in tutto). Un algoritmo è una procedura generale, finita, completa, non ambigua ed eseguibile che opera su dati d'ingresso fornendo un risultato.
2. Nella storia della progettazione esistono numerosi esempi. Uno dei più antichi documenti conosciuti a sistematizzare delle regole di relazione tra le parti è il *De Architectura* di Vitruvio. Sempre nel campo dell'architettura i quattro libri dell'architettura di Palladio (1570) e il *Précis des Leçons d'Architecture* di Durand (1802) forniscono regole di composizione e costruzione per edifici formalizzate in una sequenza finita di passi. Lewis Foreman Day nel suo scritto *Pattern Design* del 1933 analizza la genesi, gli scopi e le finalità estetiche dei pattern decorativi, definendo le procedure teoriche per la loro realizzazione in relazione alla neonata produzione industriale. Il rotolo timuride-turkmeno (1300) illustra come realizzare le complesse tassellature aperiodiche che costituiscono il motivo decorativo tradizionale noto come girih.



F01 | Modello digitale ottenuto con l'approccio generativo.

ancora poco compresa. Le teorie e le pratiche confluite in questo processo sono tanto eterogenee che non esiste a tutt'oggi una definizione univoca, ma una stratificazione di concetti non sempre coerente.

*Modellazione parametrica, modellazione associativa, modellazione algoritmica, modellazione generativa, modellazione emergente*³ sono alcune denominazioni che evidenziano caratteristiche specifiche di un paradigma molto più complesso che non è ancora stato sistematizzato, né spiegato nell'influenza che può avere sulla teoria e sulla pratica del disegno, del progetto e della fabbricazione. Queste definizioni presentano confini sfumati e significati sovrapponibili che sono usati a volte in modo improprio. La comprensione di questa nuova fase di veloce evoluzione dei modellatori digitali non può dunque prescindere da una contestualizzazione dei termini comunemente usati e delle diverse esperienze che hanno posto le basi per la nascita di questo approccio.

In questo scritto sono approfondite e contestualizzate le due denominazioni più usate, modellazione parametrica e modellazione generativa, nel tentativo di identificare una terminologia univoca e precisa.

Approccio parametrico

Parametro è un termine usato in varie discipline che identifica l'utilizzo di elementi variabili appartenenti ad un sistema definito.

-
3. Spesso i termini vengono associati tra loro a dilatarne il significato: parametrico-generativo; algoritmico-generativo; parametrico-associativo; generativo-emergente, sono alcune delle combinazioni più comuni.

Il vocabolo, riferito ad un software di modellazione, definisce solitamente uno strumento in cui le costituenti geometriche della forma sono identificate numericamente e interdipendenti.

La necessità di descrivere la geometria di un oggetto attraverso una formulazione matematica nasce tra la fine degli anni '50 e l'inizio degli anni '60 del novecento come risposta a necessità produttive. In questo periodo la diffusione di macchinari di fabbricazione a controllo numerico (CNC) determina l'esigenza di modelli numerici delle parti che possano guidare le macchine nella realizzazione di realtà formali articolate. Le prime aziende ad interessarsi alle possibilità offerte dalle macchine CNC e allo sviluppo delle tecniche di modellazione computazionale operano nel settore navale, aerospaziale o automobilistico, dove la definizione della forma ha complesse implicazioni di carattere fluidodinamico e aerodinamico. Caratteristica comune a questi distretti produttivi è la necessità di operare su geometrie tridimensionali caratterizzate da curve in forma libera (*free-form*), configurazioni difficili da descrivere numericamente. Solo nella prima metà degli anni '60 vengono studiate diverse soluzioni teoriche, basate sulla geometria differenziale⁴, in grado di rappresentare in forma digitale le curve generatrici di superfici *free-form*⁵. Diviene così possibile descrivere un modello tridimensionale attraverso una rappresentazione coerente di elementi geometrici bidimensionali (lunghezza e larghezza) che identificano la superficie di interesse.

Nascono i primi *modellatori di superfici*, che riproducono una geometria attraverso la descrizione formale della pelle esterna, che risulta di spessore nullo. In un software di questo tipo la forma desiderata è ottenuta tramite assemblaggio di diverse superfici.

-
4. La geometria differenziale studia con i metodi dell'analisi matematica le proprietà locali e globali di curve e superfici nel piano e nello spazio. Per far ciò ricerca innanzitutto quelle caratteristiche che siano indipendenti dalla particolare rappresentazione di una curva o di una superficie per cui, inizialmente, vengono precisati e definiti i concetti intuitivi di direzione e curvatura.
 5. Lo sviluppo dei software fu iniziato da compagnie pioniere come Douglas, Lockheed, Boeing, McDonnell Aircraft e General Motors negli Stati Uniti e Renault e Citroën in Europa. Le diverse soluzioni formulate da vari ricercatori operanti nei settori privati (Paul De Casteljaou alla Citroën, Pierré Bezier alla Renault, James Ferguson alla Boeing) impiegheranno alcuni per essere diffuse poiché le aziende preferivano mantenere i risultati segreti ricavandone un vantaggio competitivo. A beneficiarne sarà Steve Coons che, operando al MIT, era meno soggetto a vincoli di segretezza diventando per anni il riferimento più noto per gli studiosi del settore.



F02 | Schema di funzionamento dei modellatori solidi CSG.

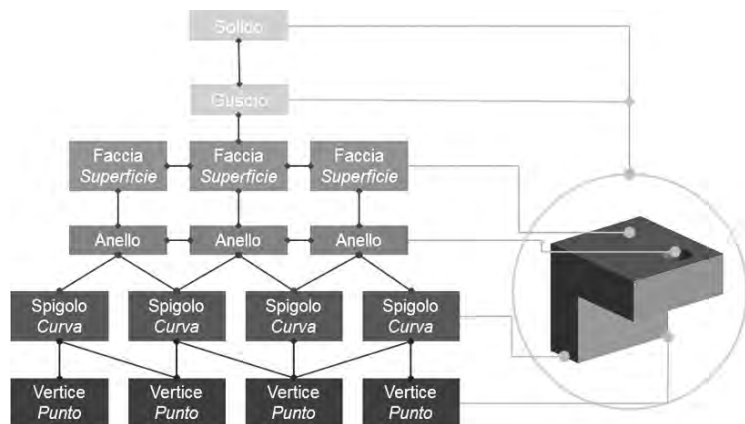
Il modello generato sarà pertanto “vuoto”, non dotato di uno spessore effettivo.

Negli anni '70 con il crescente sviluppo dell'industria dello stampaggio di polimeri e della meccanica di precisione sorgono nuove esigenze produttive. In questi settori il problema fondamentale non è tanto la descrizione della forma, solitamente controllata adeguatamente con gli elementi della geometria euclidea, quanto la difficoltà di gestire disegni tecnici di oggetti complessi caratterizzati da un grosso numero di componenti morfologicamente semplici. Inoltre i progetti sviluppati per queste attività sono caratterizzati da numerose revisioni e modifiche, il che rende difficoltosa la gestione dell'aggiornamento di disegni e informazioni correlate al processo progettuale, aumentando nel contempo le possibilità di errore.

Sempre in questi anni si diffonde nelle aziende l'utilizzo dei sistemi FEA (*Finite Element Analysis*)⁶. Questi software permettono l'analisi elastica e strutturale di sistemi complessi sottoposti a forze facilitando notevolmente il lavoro dei progettisti. Condizione necessaria all'ottenimento di risultati precisi e utilizzabili è l'accurata descrizione del modello digitale utilizzato per i calcoli.

La modellazione per superfici non soddisfa queste esigenze perché naturalmente priva del concetto di proprietà di massa, senza il quale è difficile prevedere eventuali interferenze, è perché

6. I sistemi FEA sono sistemi di decomposizione spaziale in cui il volume occupato dal modello è rappresentato attraverso un insieme di celle elementari non sovrapposte dette voxel (Volume Elements) di cui si può con buona approssimazione considerare costante il comportamento sotto sforzo. Si può considerare come l'estensione al caso tridimensionale della rappresentazione di immagini bitmap, composte da pixel di uguale dimensione.



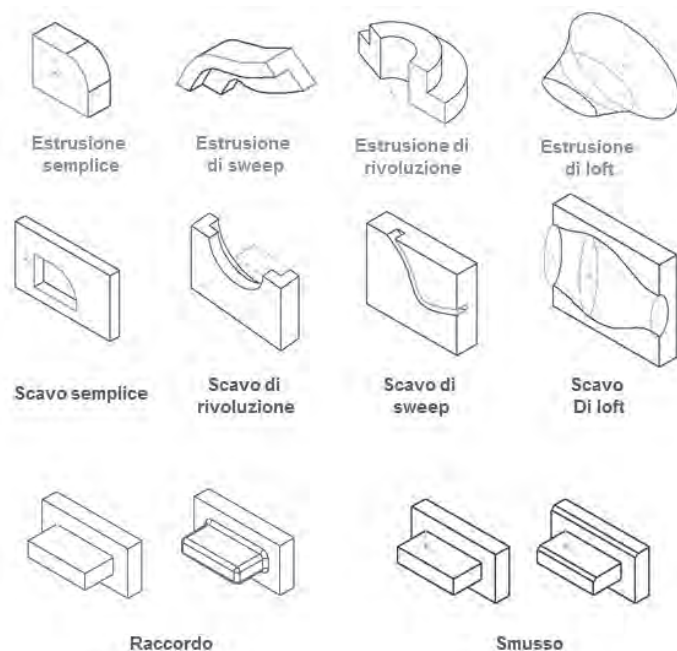
F03 | Schema di funzionamento dei modellatori solidi B-Rep.

alcune approssimazioni numeriche, dovute all'implementazione informatica degli algoritmi di descrizione della forma, determinano dei margini di imprecisione problematici in molti settori produttivi. Per questi motivi nasce, nella prima metà degli '70, la teoria della *modellazione per solidi*⁷ che permette la creazione di modelli digitali completi e non ambigui, in grado di contenere tutte le informazioni necessarie a descrivere la geometria dell'oggetto. Inizialmente i *modellatori per solidi* si dividono in due famiglie: CSG (*Constructive Solid Geometry*) e B-Rep (*Boundary Representation*).

Nella modellazione CSG il modello è descritto attraverso forma, dimensioni e posizionamento relativo in un sistema di riferimento di solidi elementari o loro relazioni booleane (unione, intersezione, differenza). Le operazioni che portano alla realizzazione della geometria sono memorizzate in una struttura di dati ad albero efficiente dal punto di vista del calcolo e dell'archiviazione dei dati, ma che limita la modellazione alle forme definibili attraverso i solidi elementari e le combinazioni booleane possibili (fig. 2).

La modellazione B-Rep invece descrive esplicitamente il volume attraverso le entità metriche bidimensionali che ne definiscono il contorno e attraverso i legami topologici che mantengono i collegamenti logici tra i diversi elementi (fig. 3). La condizione necessaria all'ottenimento di un modello funzionale è il rispetto

7. I principali promotori di questo approccio furono Voelker e Requicha a Rochester e Ian Braid a Cambridge, che definirono i due approcci fondamentali: CSG e B-Rep.



F04 | Primitive di modellazione additive, sottrattive e secondarie dei modellatori solidi Feature Based.

della la regola di Eulero-Poincaré⁸, che permette la definizione di geometrie più complesse rispetto a quelle ottenibili con i modellatori CSG, ma determina anche un maggior numero di informazioni da gestire con conseguente impegno di memoria dell’elaboratore. I due approcci vengono incorporati alla fine degli anni ’80 dai modellatori solidi *Feature based*, che utilizzano primitive di modellazione nella definizione del modello consentendo la realizzazione di geometrie più articolate. In generale le operazioni di modellazione utilizzate da questi strumenti si distinguono in *additive* e *sottrattive*, cioè aggiungono o sottraggono “materiale” al

8. La caratteristica di Eulero è un numero intero che descrive alcuni aspetti della forma di uno spazio topologico. Formulata originariamente per i poliedri, ed usata per dimostrare vari teoremi inclusa la classificazione dei solidi platonici, la regola di Eulero (chiamata anche caratteristica di Eulero-Poincaré) è definita a partire da una omologia introdotta dal matematico Henri Poincaré : $Vertici + Facce - Spigoli = 2(Gusci - Fori-Passanti) + Anelli$.

modello digitale utilizzando la definizione di uno o più profili piani per la generazione della forma (fig. 4).

I modellatori solidi *Feature based* mantengono la struttura ad albero in grado di immagazzinare il sistema di relazioni geometriche tra le variabili che definiscono il modello. Pertanto la modifica incrementale di un parametro si trasmette a tutti gli elementi dipendenti senza dover necessariamente ricostruire l'intero modello digitale. Poiché basati sulla logica di associazione tra le parti questi strumenti vengono definiti anche *associativi*.

I sistemi di modellazione solida recenti sono sempre più legati ad una produzione caratterizzata da forte automazione, pertanto tendono ad integrare in un unico modello numerico tutte le informazioni che caratterizzano il ciclo di vita del prodotto. I dati disponibili spaziano dal disegno di progetto alla realizzazione fisica dei vari componenti e della struttura complessiva, dalla scelta dei fornitori alla manutenzione necessaria.

Questi applicativi si sono diffusi anche nel settore edile attraverso soluzioni digitali che gestiscono il ciclo di vita di un edificio o di qualunque altra infrastruttura. I BIM (*Building Information Modelling*) sono strumenti in grado di coordinare e trasferire ai vari referenti di un progetto modelli tridimensionali arricchiti da dati che definiscono in modo dettagliato le caratteristiche di componenti e materiali, le condizioni contrattuali con fornitori e prestatori d'opera, le normative e quanto altro ruota attorno al progetto in corso d'opera.

Considerato spesso come un applicativo parametrico, il Bim è piuttosto un sistema integrato che si allontana dagli strumenti di disegno assistito tradizionali: gli elementi primitivi usati nella generazione di un modello non sono più punti, linee, curve o superfici, ma componenti architettonici e costruttivi tridimensionali prestabiliti quali muri, porte, finestre, controsoffitti, tetti, definiti a partire dagli standard disponibili sul mercato. Questi vengono scelti, collocati e modificati entro limiti compatibili con la morfologia dell'edificio progettato.

I BIM sono caratterizzati da un contenuto semantico che deriva direttamente dal campo di attività dell'architettura, laddove i modellatori tradizionali sono completamente sintattici. Nel posizionare un componente in un modello occorre definirne il significato oltre che la forma, per cui la geometria complessiva nasce dal sistema di informazioni e non dalla manipolazione diretta. Aggiungere caratteristiche e componenti su misura è possibile, ma più complicato che in un modellatore tradizionale: non basta disegnarlo, ma è necessario specificare anche i vari

parametri informativi e le relazioni con gli elementi dipendenti. Anche soluzioni formali non convenzionali, come ad esempio un muro inclinato, potrebbero non essere ammesse dal software, costringendo il progettista a soluzioni alternative. D'altro canto la rappresentazione unificata che si ottiene è in grado di produrre tutta la documentazione necessaria a descrivere il progetto garantendo la congruenza dei dati, il coordinamento tra le diverse figure professionali coinvolte e l'ottimizzazione dei processi costruttivi.

Approccio generativo

Il termine *generativo* riferito ai software di modellazione si diffonde negli ultimi anni a seguito dell'aumentata integrazione di tecniche informatiche nel processo progettuale.

Si è già scritto come i comandi base dei modellatori in commercio difficilmente permettono ai progettisti di gestire morfologie ed operazioni complesse. Per ovviare a tali limiti e soddisfare le crescenti esigenze del mondo della progettazione, le case costruttrici di software hanno implementato nei loro prodotti dei semplici ambienti di programmazione basati sui linguaggi interpretati⁹. Diviene così possibile all'utente esperto estendere le potenzialità native dei programmi, concependo nuove funzionalità attraverso lo sviluppo di piccoli codici, detti "*script*".

La diffusione di questi applicativi ha contribuito a promuovere la diffusione di un metodo alternativo di disegno digitale capace di dare forma e materia a configurazioni innovative. Il conseguente dibattito nel mondo della progettazione e della ricerca ha promosso la proliferazione di nuove definizioni che sembrano rivendicare la distanza dalle esperienze passate. In realtà l'utilizzo del computer e di processi algoritmici per disegnare non preclude la continuità con periodi e pratiche precedenti: ad un'attenta analisi le teorie che hanno portato alla definizione di *sistema generativo* costituiscono un intreccio complesso, solo in parte legato all'evoluzione degli strumenti digitali di modellazione.

.....

9. Un linguaggio informatico è per definizione diverso dal linguaggio macchina. Necessita quindi di una traduzione perché sia leggibile dal processore. Il codice sorgente, contenente le istruzioni da eseguire, viene quindi eseguito attraverso un linguaggio "interprete" (i cosiddetti linguaggi di scripting) come Visual Basic o Python. L'alternativa è il linguaggio compilato, cioè tradotto direttamente in istruzioni di linguaggio macchina da un programma compilatore: il risultato è un file binario 'eseguibile' (codice eseguibile) che non necessita di altri mediatori.

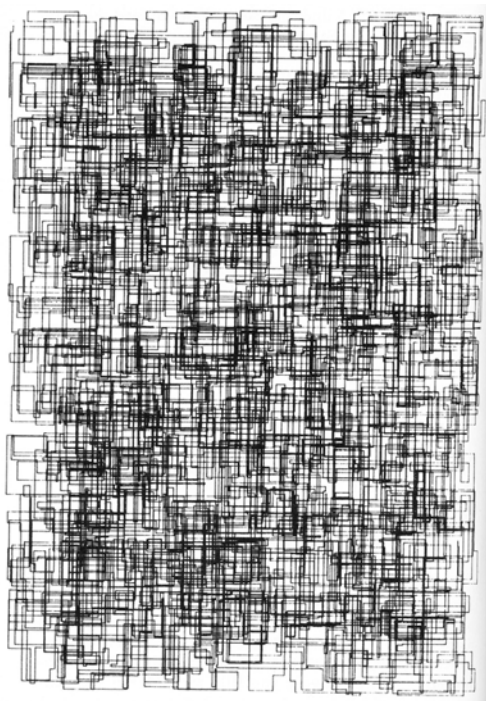
Le esperienze che pongono le basi per la nascita dell'approccio attraversano la storia dell'arte, del design e dell'architettura spaziando per campi apparentemente lontani dal mondo della progettazione come il cognitivismo, la biologia, la linguistica, la composizione musicale e la filosofia.

Il termine "generativo" appare nel panorama scientifico agli inizi degli anni '60 a seguito della pubblicazione dell'opera di Noam Chomsky¹⁰ *Syntactic Structures*. Nel trattato lo studioso introduce la teoria linguistica della *grammatica generativo-trasformatzionale*, secondo la quale le strutture che presiedono alla capacità umana di parlare e comprendere un linguaggio sarebbero per la maggior parte innate. È quindi sufficiente apprendere concretamente gli elementi di eccentricità della lingua madre a cui si è esposti per parlarla correttamente. In altri termini tutte le lingue seguono un insieme comune di regole, sebbene le interazioni tra queste possano variare grandemente in funzione di alcuni parametri linguistici peculiari.

Una *grammatica generativa* è pertanto in grado di creare un numero infinito di possibili relazioni a partire da un insieme finito di regole. Queste proprietà sarebbero desiderabili per un linguaggio naturale poiché, sebbene un cervello umano possieda una capacità finita, gli esseri umani sono comunque in grado di generare, comprendere e inventare enormi quantità di frasi distinte.

Nel '65 Max Bense¹¹, influenzato dalle ricerche di Chomsky, introduce il concetto di "*estetica generativa*" definita come: "*...la combinazione di tutte le operazioni, regole e teoremi che possono essere utilizzati deliberatamente per produrre condizioni estetiche (sia distribuzioni che configurazioni) quando applicate ad un insieme di elementi materiali. Quindi l'estetica generativa è analoga alla grammatica generativa, in quanto aiuta a formulare i principi di uno*

10. Avram Noam Chomsky (Philadelphia, 7 dicembre 1928) è linguista, filosofo e teorico della comunicazione. Professore emerito di linguistica al Massachusetts Institute of Technology è riconosciuto come il fondatore della grammatica generativo-trasformatzionale, spesso indicata come il più rilevante contributo alla linguistica teorica del XX secolo. L'influenza dell'opera di Chomsky è fondamentale anche nell'ambito della filosofia, della psicologia, delle teorie evoluzionistiche, della neurologia e della scienza dell'informazione. In quest'ultima disciplina la classificazione dei linguaggi formali proposta da Chomsky ha fornito le basi per la definizione sintattica dei linguaggi di programmazione.
11. Max Bense (Strasburgo 1910 - Stoccarda 1990), filosofo e studioso di estetica, docente a Jena e a Stoccarda. Utilizzando concetti della teoria dell'informazione, ha proposto una nuova estetica che rintraccia per l'arte un'autonomia nella progettualità del bello come complementarietà tra arte e canoni scientifici.



F05 | Nees, Georg: Untitled (Micro Innovation), 1967, plotter drawing (Nees: Computergraphik 2006, p.222, ill. 31).

*schema grammaticale di realizzazione di una struttura estetica*¹².

Il tentativo di Bense è di utilizzare le leggi della statistica come base razionale per la creazione di immagini. A tale scopo suddivide le figure in piccoli quadrati di cui studia le singole proprietà, cercando eventuali connessioni interne in grado di creare nuove immagini secondo criteri predeterminati. L'insuccesso nella definizione di una legge porta lo studioso verso l'analisi semiotica delle opere, con la quale continua a perseguire l'obiettivo di "...una produzione razionale dell'arte."¹³

L'estensione del termine al disegno assistito dall'elaboratore viene introdotto ufficialmente lo stesso anno da un allievo di

12. Max Bense, *Aestetica: Einführung in die neue Aesthetik*, (1965) Baden-Baden 1982, p. 345 traduzione dell'autore dal riferimento in inglese da Reichardt, ed., *Cybernetics, Art and Ideas*, p. 57

13. Max Bense, *ibid.* p. 214.

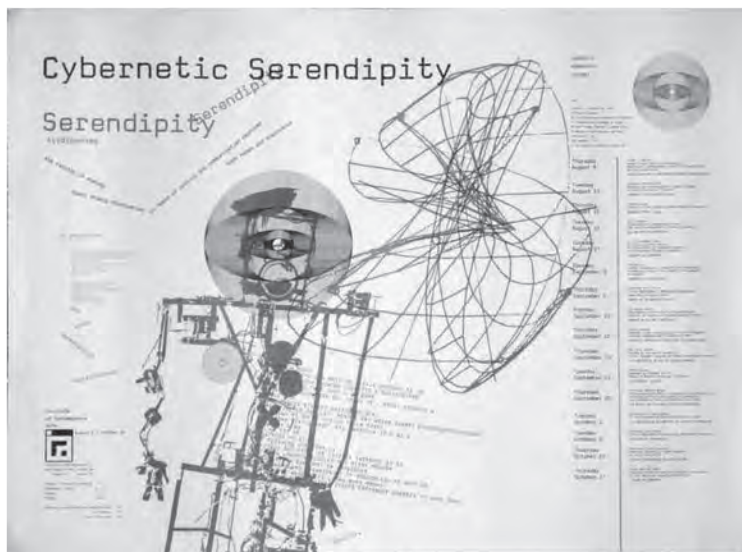
Bense, Georg Nees¹⁴. L'autore espone in una mostra intitolata "Generative Computergrafik"¹⁵, una serie di opere realizzate durante un'esperienza lavorativa alla Siemens ad Erlangen, dove aveva iniziato a scrivere programmi in ALGOL¹⁶ basati su generatori di numeri casuali.¹⁷ Questi semplici script erano usati per informare i primi plotter a penna che provvedevano successivamente all'esecuzione del disegno (fig. 5).

Nees è il primo ad esplicitare un modello di indagine integrato, basato sullo sviluppo di un programma per computer logicamente deterministico, che prevede la relazione tra il risultato formale e l'astrazione delle regole necessarie al suo ottenimento. Intuisce da subito che a differenza di una composizione creata in modo tradizionale da un artista in una serie di prove visive, o semplicemente attraverso la creazione ispirata di un'immagine, la rappresentazione ottenuta da un sistema generativo è solo una delle possibili migliaia compresenti nel codice che le definisce. Per Nees il significato di un'immagine risiede quindi nell'astrazione del problema formale e nella definizione del codice sorgente che ne permette la risoluzione.¹⁸

I cataloghi degli eventi successivi, "*Some more beginnings*:"

.....

14. Georg Nees (1926- ,Norimberga, Germania) è professore onorario di informatica presso l'Università di Erlangen, in Germania. La sua tesi di dottorato *Generative Computergrafik* del 1968, conseguita presso l'Università di Stoccarda sotto la supervisione di Max Bense, è stata la prima a focalizzarsi sulla computer art.
15. La mostra si è tenuta nelle sale del "Studiengalerie der TH Stuttgart" (poi Università di Stoccarda), sotto l'egida del *Ästhetisches Colloquio*, seminario offerto da Max Bense e il suo Institut für Philosophie und Wissenschaftstheorie. A tutt'oggi rimane incerto il nome effettivo della mostra, poiché Nees, unico artista ad esporre, non ricorda il titolo originale né le opere esposte. Alla mostra è attribuito il titolo della tesi di dottorato di Nees di pochi anni posteriore.
16. ALGOL (abbreviazione di ALGO^rithmic Language) è un linguaggio di programmazione sviluppato a metà degli anni 1950 che ha notevolmente influenzato il mondo dell'informatica. Molti dei linguaggi di scripting utilizzati odieramente ne sono l'evoluzione.
17. Un generatore di numeri casuali è un dispositivo di calcolo o fisico progettato per generare una sequenza di numeri o simboli che mancano di un qualsiasi schema riconoscibile. I generatori di numeri casuali esistono fin dai tempi antichi si pensi al gioco dei dadi, al lancio di una moneta, o all'uso degli ideogrammi dell' I-Ching come tecnica di divinazione.
18. Si veda Georg Nees, *Generative Computergraphik*, pubblicato dalla Siemens, 1969. Riferimento citato nel sito http://www.medienkunst-netz.de/themes/generative-tools/computer_art



F06 | Locandina della mostra *Cybernetic Serendipity* tenutasi all’Institute of Contemporary Arts di Londra nel 1968

Experiments in Art and Technology (E.A.T.)” organizzata al Brooklyn Museum di New York, “*Cybernetic Serendipity*” all’Institute of Contemporary Arts, di Londra nel 1968 (fig.6) e “*Software*” al Jewish Museum di New York nel 1970, mostrano come le teorie della scuola di Stoccarda influenzino opere d’arte, grafiche, architettoniche, letterarie o musicali.

Le teorie dei precursori si frammentano in molteplici percorsi diversi all’interno della corrente dell’*Arte generativa*, esperienza vasta ma caratterizzata da un comune denominatore: l’utilizzo di un sistema generativo nella realizzazione dell’artefatto.

Spiegare tutte le connotazioni che il termine assume nel corso degli anni, a volte con significati molto diversi tra loro, trascende lo scopo e le possibilità di questo scritto. In ambito progettuale sono rilevanti gli studi di Celestino Soddu¹⁹, tra i primi in Italia ad utilizzare i sistemi generativi come strumento progettuale. Nel 1992 lo studioso elabora una prima definizione di Design Generativo: “*Il Design Generativo è*

.....

19. Celestino Soddu è stato tra i primi a sperimentare i sistemi generativi in architettura, realizzando, sin dal 1986, software di supporto al progetto. Opera didatticamente e nella ricerca sull’approccio generativo al progetto, in particolare sulle matrici culturali.

un processo morfogenetico che usa algoritmi strutturati come sistemi non lineari per risultati unici, infiniti ed irripetibili eseguiti da un codice-idea, come in Natura.”

L'enunciato è successivamente ripreso durante la “*Conferenza Internazionale dell'Arte Generativa*” (denominata semplicemente “*GA*”) organizzata annualmente a Milano e nella quale confluiscano i contributi di artisti, intellettuali e ricercatori di diversi settori interessati al tema.

Sempre in occasione della *Ga* del 2003 Philip Galanter²⁰ presenta la definizione di Arte Generativa attualmente riconosciuta: “*Arte Generativa*” *si riferisce a qualsiasi pratica artistica nella quale l'artista usi un sistema, come (ad esempio) un set di regole di un linguaggio naturale, un programma per computer, una macchina, o un'altra invenzione procedurale, che è messa in moto con un certo grado di autonomia in modo tale da contribuire a/o risultare in un'opera d'arte completa.”*

Galanter si concentra sulle modalità, piuttosto che sulle qualità o sui caratteri di un sistema generativo, superando in parte la definizione precedente e delineando in modo comprensivo e distintivo il fenomeno.

Conclusioni

A distanza di una decade anche la formulazione di Galanter non sembra più descrivere correttamente il ruolo che quotidianamente i software generativi svolgono.

Benchè i programmi di modellazione siano strumenti che contribuiscono alla generazione dell’“opera”, il concetto di “autonomia del sistema”, connaturato a tutte le esperienze che provengono dall’Arte Generativa, implica che il sistema stesso sia in qualche modo indipendente rispetto agli intenti del progettista. La disamina delle molte realizzazioni rese possibili negli ultimi anni da questi applicativi mostra invece come, anche seguendo un approccio generativo, i progettisti prefigurino da subito un certo risultato formale che poi perseguono. Si pensi a tutti quei casi in cui si cerca di imitare e riproporre le caratteristiche di strutture osservate in natura.

Se è vero che la morfologia è inizialmente indefinita nella mente del

.....

20. Philip Galanter è artista, teorico, e ricercatore presso il Dipartimento di visualizzazione della Texas A & M University. Le sue attività comprendono l'esplorazione artistica di sistemi complessi e lo studio del rapporto tra cultura della scienza e discipline artistiche.

progettista, come d'altronde nella fase iniziale di qualsiasi progetto, non è vero che un *concept* generativo prescinde necessariamente dal risultato formale. Le peculiarità dello strumento rendono necessaria l'acquisizione dei linguaggi informatici necessari a dialogare con l'elaboratore, ma la capacità di prefigurare e gestire forme articolate deriva dalla conoscenza dell'utilizzatore della geometria, la disciplina che studia le forme nel piano e nello spazio e le loro mutue relazioni. In questo senso, un approccio epistemologico alla geometria è alla base dell'attività del designer, intesa come l'incontro tra un insieme di precise condizioni "al contorno" formalizzabili e quantificabili (materiali, vincoli fisici e temporali, scopo prefissato, fattori economici ed aziendali) ed un'istanza creativa che deve implementarsi.

Inoltre la definizione di Galanter slega correttamente la pratica dall'Arte Generativa dal mezzo usato, poiché nella realizzazione di un'opera d'arte non è solitamente rilevante avere un sistema isolato da fattori causali esterni o delle procedure condivise. Nel campo della progettazione però è spesso necessario che i metodi stabiliti vengano eseguiti in maniera pedissequa e ripetibile, ad ottenere una coerenza tra intento dei progettisti e risultato formale dell'opera difficilmente ottenibile con strumenti diversi dal Personal Computer. Dalle riflessioni sviluppate in questo scritto si delinea l'esigenza di una definizione autonoma, capace di descrivere uno sviluppo che pur in rapporto di dipendenza con le esperienze dell'Arte Generativa, se ne distingue formalmente. Questa nuova fase nasce da una serie di esigenze progettuali e produttive che hanno trovato risposta in un profondo controllo degli strumenti digitali di disegno e nel concetto di diagramma-procedura come sistema di indagine. Il termine "Design Procedurale" è forse la denominazione più corretta a definire un approccio progettuale generativo caratterizzato dall'utilizzo del Personal Computer e che non può essere messo in atto senza l'ausilio di un software in grado di eseguire le procedure definite dal designer.

Inoltre la maggior parte degli strumenti di *modellazione parametrica*, ed anche alcuni software di *modellazione per superfici*, permettono di definire procedure di generazione della forma personalizzate, in diversa misura e con diverse modalità.²¹

Non è quindi corretto parlare di "software generativo" e "software parametrico", in quanto spesso queste definizioni coincidono, mentre è appropriato parlare di "approccio parametrico",

21. Si va dall'utilizzo di plug-in come Grasshopper a semplici comandi da interfaccia passando per l'implementazione del codice di programmazione o anche attraverso interfacce grafiche simboliche.

“approccio generativo” o “approccio procedurale”.

Si noti che mentre l'approccio generativo può essere anche parametrico non è vero il contrario. Benché ci siano dei punti di convergenza i due sistemi sono sostanzialmente diversi nel metodo di produzione delle istanze geometriche del modello.

Si è già descritto come nell'approccio parametrico le regole che l'utente può imporre sono un gruppo ristretto e predefinito. Il progettista definisce un solo modello geometrico virtuale per volta, modellato istanza per istanza, mentre le modifiche possibili sono quelle ammesse dalle primitive geometriche che costituiscono la forma. Cambiando i valori delle variabili vincolate si ottengono nuovi modelli ri-creati mediante la procedura di soluzione dei vincoli. Nell'approccio procedurale-generativo il designer definisce contemporaneamente più modelli geometrici virtuali, operando su un'unica definizione del processo mediante la quale il computer genera le istanze del modello. Nella descrizione algoritmica tutte le possibili alternative morfologiche sono coesistenti, è l'utente ad operare una scelta tramite la selezione delle variabili. Questa caratteristica si rivela particolarmente utile quando è necessario creare e gestire molteplici unità o varianti formali.

La sinergia con gli ultimi sviluppi tecnologici, in particolare i nuovi processi di fabbricazione digitale, stanno rivelando tutto il potenziale di questo approccio che si contraddistingue come strumento innovativo capace di integrare i metodi di disegno tradizionali.

Bibliografia

- [1] AGOSTON M.K., *Computer graphics and geometric modelling – Implementation and algorithms*. London: Springer-Verlag. 2005.
- [2] ARIDA S., *Contextualizing Generative Design*. MSc thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA. 2004.
- [3] EASTMAN C., TEICHOLZ, P., SACKS R. AND LISTON K, *BIM Handbook*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2008.
- [4] GALANTER P., *What is Generative Art? Complexity theory as a context for art theory*, GA2003–6th Generative Art Conference. Milano, 2003.
- [5] KNIGHT, T., *Shape Grammars in education and practice: history and prospects*, consultabile al sito http://www.mit.edu/~tknight/IJDC/frameset_abstract.htm [6/04/2014]
- [6] LEACH N., *Digital Morphogenesis*, *Architectural Design* 79, no. 1, 2009. pagg. 32-37.
- [7] MARK E., GOLDSCHMIDT G., GROSS M., *A Perspective on Computer Aided Design after Four Decades* in: 26th eCAADe Conference Proceedings, Antwerp, Belgium, pp. 169-176. 2008.
- [8] SHAH JAMI J., MARTTI M., *Parametric and feature based CAD/CAM*, Wiley-Interscience, 1995.
- [9] SODDU C., COLABELLA E., *Il progetto ambientale di morfogenesi (the enviromental design of morphogenesis)*. Progetto Leonardo Publisher. 1992.
- [10] TERZIDIS K., *Algorithmic Architecture*, Burlington, MA: Elsevier. 2006.
- [11] MEREDITH, M. SASAKI M., (eds.) *From control to design: Parametric/algorithmic architecture*, Barcelona, Spain: Actar-D. 2008.

Prototipi responsivi | L'approccio nel contesto del Physical Computing

Giorgio Vignati

Politecnico di Milano - Dipartimento di Design

L'obiettivo di questa comunicazione è proporre una panoramica sintetica sul contributo che le attuali tecnologie ICT (*Information and Communication Technology*), sia hardware che software, possono dare al tema della costruzione di prototipi come sistemi responsivi e in particolare nel contesto applicativo del Physical Computing. A questo scopo dopo una definizione generale di prototipo responsivo viene introdotta la disciplina del Physical Computing, ne viene evidenziato il contributo e l'aspetto innovativo, illustrato l'approccio operativo e infine, non entrando troppo nei dettagli tecnici, si accenna agli strumenti hardware e software disponibili attualmente. Alcuni semplici progetti sono finalizzati ad evidenziare l'approccio operativo.

Prototipo

Senza addentrarsi in una discussione approfondita che il tema meriterebbe, per lo scopo che ci si prefigge, si intende per prototipo uno strumento pratico che permette di compiere verifiche e valutazioni rispetto allo sviluppo di un'idea/progetto. Questa è una visione certo approssimata e riduttiva ma ha l'obiettivo, e forse anche il pregio, di sottolineare del prototipo il carattere operativo. Sicuramente il concetto di prototipo ha delle declinazioni più vaste e articolate ma che in questo caso tenderebbero a distogliere se non a nascondere gli aspetti pragmatici quali elementi essenziali per comprendere i contributi attuali della tecnologia ICT. Detto in altri termini la costruzione di un prototipo consente di verificare e sperimentare fisicamente gli aspetti ritenuti importanti nello sviluppo di un progetto sia questo un prodotto, un manufatto architettonico /urbano o un'installazione artistica.

Prototipo responsivo

Si considera responsivo un prototipo quando “risponde/reagisce” all’ambiente esterno. Essere responsivo per un prototipo contribuisce ulteriormente ad aumentarne la valenza operativa evidenziata in precedenza. Si richiede l’instaurarsi di una relazione “attiva” tra il prototipo e il mondo esterno. Questa proprietà viene non necessariamente trasferita al prodotto finale (questo avviene quando sia un elemento di progetto), e potrebbe rimanere a livello di prototipo dove questo serva ad ottenere valutazioni utili alla realizzazione successiva di un qualche manufatto.

Sovente quando si vuole dare enfasi alla relazione con l’uomo si usa anche il termine interattivo. Per esempio un robot si può considerare responsivo se esegue in autonomia i compiti a lui assegnati (è il caso, per esempio, di quei prodotti che puliscono il pavimento in modo autonomo), mentre è sicuramente interattivo se assiste persone anziane dove è necessario attivare una relazione comunicativa. In sintesi è il coinvolgimento della componente umana che definisce se il prototipo sarà da considerare responsivo o interattivo.

Da qui in avanti, per semplicità espositiva e per gli scopi di questa comunicazione viene scelto di usare il termine responsivo come termine più generale e rappresentativo che quindi può o no includere l’interazione con l’uomo.

Physical Computing (PhC)

Una definizione sufficientemente generale può essere questa: il PhC è una disciplina che si pone come obiettivo la costruzione di sistemi interattivi attraverso l’uso di hardware e software. Per hardware si intende l’insieme delle componenti elettroniche e per software si intende l’insieme dei programmi sviluppati per controllare il comportamento del sistema.

In questo contesto il sistema reagisce utilizzando proprietà fisiche (meccaniche, chimiche, elettriche...) del mondo (attraverso dispositivi quali sensori e attuatori) e capacità di elaborazione dei dati che determinano come il sistema reagisce e questo si ottiene attraverso la codifica del comportamento in un linguaggio di programmazione.

In altri termini (fig. 1) il sistema responsivo riceve una sollecitazione (cattura/rileva delle proprietà fisiche dell’ambiente come input), elabora una risposta come output e la realizza modificando delle proprietà fisiche dell’ambiente esterno utilizzando degli attuatori, dispositivi cioè che “attuano” la risposta.

Questo è un punto cruciale. Nella fig. 2 sono rappresentati le due possibili modalità con cui un sistema può rispondere ad un evento

esterno. Il sistema ha come obiettivo l'accensione di una sorgente luminosa (rappresentato da un LED) attraverso un pulsante che chiude il circuito se premuto e lo apre se rilasciato.

Quando si tiene premuto il pulsante (il sistema rileva un input esterno) la corrente circola nel circuito, il LED si accende e rimane acceso finché non rilascio il pulsante. Il primo sistema risolve l'obiettivo con un circuito cablato e l'unico comportamento possibile è LED acceso per il tempo in cui il circuito è chiuso o LED spento per il tempo in cui il circuito è aperto. Non sono possibili altre funzionalità. Se cambiano le specifiche, ad esempio si vuole un LED che compia una transizione di luminosità o che lampeggi con una frequenza variabile, devo modificare il circuito e aggiungere altri componenti, si deve cioè modificare l'hardware.

Il secondo sistema, attraverso un codice opportuno inserito nella componente di elaborazione, e in grado di compiere diverse attività: legge lo stato del pulsante, calcola il tempo di chiusura o apertura, conta il numero di aperture e chiusure e altro ancora. Il sistema così configurato realizza il comportamento del LED in modo che risponda ai dati di ingresso, ad esempio facendolo lampeggiare o modificando la sua luminosità secondo il tempo di chiusura del circuito. Una volta escluso il malfunzionamento delle componenti di input ed output, il carattere distintivo di un sistema responsivo è proprio la separazione fisica tra input ed output e il loro collegamento attraverso un'elaborazione.

Flessibilità, modularità ed estendibilità sono caratteristiche proprie dell'uso di codice così da progettare differenti funzioni e comportamenti senza modificare l'hardware.

Grande merito alla diffusione del Physical Computing si deve al contesto in cui si è sviluppato negli ultimi anni. Fattori essenziali, quali la miniaturizzazione dei dispositivi elettronici, la discesa dei costi e l'aumento della potenza elaborativa, hanno dato il loro apporto alla diffusione di questa disciplina; altro elemento chiave è stato l'uso del web come catalizzatore che ha permesso la nascita di numerose e agguerrite comunità open e la conseguente diffusione e condivisione della conoscenza teorica ma soprattutto pratica, dove cioè progetti ed esperienze vengono comunicati e resi disponibili in forma aperta o quantomeno libera e gratuita, allargando la partecipazione attiva a molti attori, ingegneri, architetti, designer, artisti e makers. Attraverso le comunità presenti in rete è possibile (consigliato) nello sviluppo di un'idea/progetto partire esplorando soluzioni a progetti simili da cui attingere liberamente per poi sperimentare (replicando) l'esperienza quindi studiarla e comprenderla per poi elaborare una propria soluzione che migliora o espande quella da cui si era partiti. Questo approccio vale sia per le compo-

nenti software che per quelle hardware. Il principio guida è “non reinventare la ruota”.

Il Physical Computing quale piattaforma open per i prototipi responsivi

Dalla precedente definizione del Physical Computing si può riconoscere che la caratteristica forte e peculiare è la componente di elaborazione ovvero la capacità di definire il comportamento del sistema prototipo, e questo si realizza con una codifica formale in linguaggio di programmazione. E' la componente software che permette di progettare e implementare la reazione/interazione col mondo. Il software consente una maggiore flessibilità al sistema rispetto a rigide comportamenti cablate sia analogiche che digitali, dove cioè la risposta è definita da un'opportuna configurazione fisica o elettronica (circuiti dedicati). Il vantaggio di utilizzare un software è la possibilità di modificare la risposta del prototipo mantenendo la stessa struttura fisica (hardware).

Nel software si definisce l'interpretazione dei dati che arrivano dal mondo esterno, vengono messi in relazione tra loro, vengono elaborate informazioni e attuata una strategia di risposta che viene poi realizzata fisicamente dal hardware a disposizione.

Vediamo ora, in termini generali gli strumenti ICT a disposizione per le componenti di input, di elaborazione e di output di un sistema/prototipo responsivo.

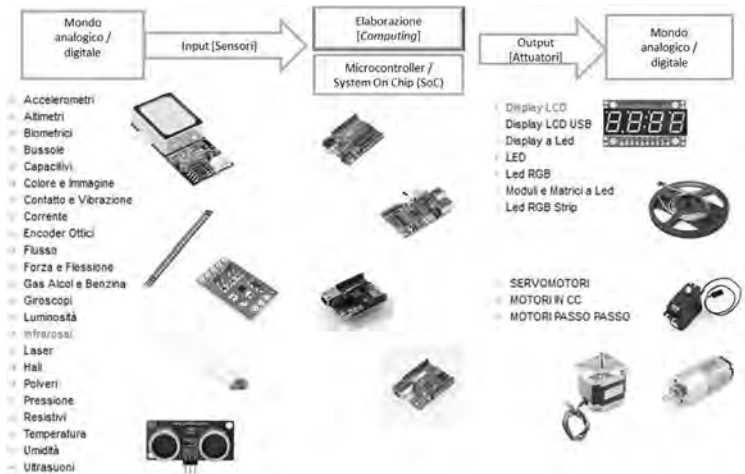
Gli strumenti del Physical Computing

Un progetto di Physical Computing utilizza strumenti che ricadono in due categorie principali: hardware e software.

L'hardware può essere catalogato in tre macro-insiemi che ne definiscono finalità e utilizzi: sensori, attuatori e elaboratori (fig.1). Ciascuna di queste ha poi ulteriori e articolate sottocategorie.

Sensori

Per sensori si intendono tutti quei dispositivi elettronici che permettono di rilevare stimoli ambientali e trasformarli/tradurli in formati utili a essere trattati dalla unità di elaborazione. Attualmente la produzione di sensori sta subendo una crescita impressionante: accelerometri, gps, sensori di temperatura... Si trovano oramai sensori in tutti i dispositivi *mobile*, nell'indossabile, nel monitoraggio ambientale, nelle applicazioni di gaming; si può affermare che se esiste una proprietà fisica del mondo questa può essere rilevata da un sensore opportuno.



F01 | Sistema responsivo – logica e strumenti.

In fig. 1 sono riportati una lista di sensori disponibili sui portali dedicati all'hobbysmo. Questa lista si allungherebbe di molto se si getta uno sguardo ai portali di distributori quali rs-component, Fanell solo per citarne due dedicati ai professionisti e alle aziende.

Non bisogna confondere i sensori con gli strumenti di misura dei quali sono dei componenti essenziali. Per esempio per misura la quantità di luce presente in un ambiente si usa un luxmetro che ha all'interno un sensore di luminosità. La struttura logica del processo si può così sintetizzare: l'ambiente interagisce con il sensore modificandone proprietà progettate per rilevare un particolare stimolo (luce, temperatura...) queste vengono tradotte in variazione di tensione e successivamente elaborate, nei sensori più sofisticati il dato viene preelaborato e trasmesso all'unità di elaborazione in formato alfanumerico.

Come esempio elementare di sensore vediamo un 'sensore di prossimità' (fig. 3). Un trasmettitore emette un fascio IR (infrarossi) che rimbalza sull'ostacolo e viene catturato da un sensore IR. Misurando il tempo tra emissione e ritorno è possibile determinare la distanza. Per i sensori più semplici l'output di solito è una tensione che dipende dal dato fisico da rilevare, la relazione (il più delle volte non lineare) tra queste grandezze è descritta in opportuni documenti tecnici (datasheet). Nella fig. 3 è visualizzato un sensore di prossimità agli infrarossi e il grafico che traduce la relazione distanza-tensione (in Volt).

Il sensore stesso può essere interpretato (semplificando molto)



F02 | *dal circuito cablato al circuito computing.*

come sistema reattivo con una finalità ben determinata: reagire ad un dato elementare proveniente dal mondo e rispondere con un altro dato questa volta elaborabile.

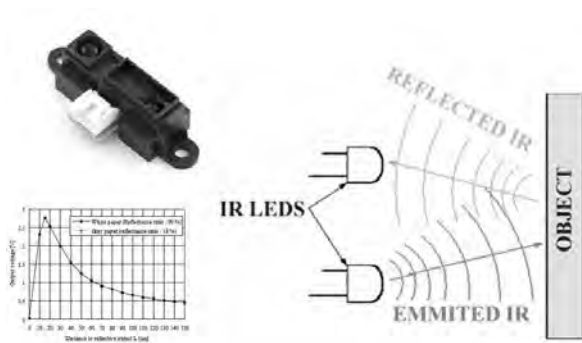
Attuatori (componenti di output)

Gli attuatori traducono il comportamento codificato nel software operando sul mondo fisico. Per dare esempi semplici e immediati si pensi alla movimento attuato con motori elettrici di una porta ad apertura automatica. In fig. 1 sono mostrati come esempio di attuatori due categorie, i motori e le sorgenti luminose, dai singoli LED alle strisce ai display LCD.

In modo simmetrico rispetto ai sensori è possibile pensare agli attuatori come dispositivi che modificano proprietà fisiche del mondo/ambiente. Si possono quindi controllare movimenti, illuminazione, luce, colore.

Elaborazione/Controllo

Questa è la componente, come si è detto, caratteristica dell'approccio del Physical Computing alla costruzione di prototipi e prodotti responsivi: è il cuore di tutto il sistema. E' in questa componente che risiede l'intelligenza del sistema responsivo. Il cambiamento di paradigma è qui, la risposta al mondo non è codificata/realizzata nella configurazione di proprietà fisiche (sistema analogico) ma vi è una elaborazione dei dati realizzata da un software. I dati in ingresso sono ovviamente importanti altrimenti si ha solo elaborazione di spazzatura, detto in termini sintetici si ha "spazzatura in ingresso spazzatura in uscita". La relazione con il mondo esterno si attua attraverso sensori ed attuatori senza i quali il software non potrebbe



F03 | Sensore di prossimità ad infrarossi.

definire e controllare il comportamento di un sistema responsivo in maniera coerente agli obiettivi del sistema.

Sono due le tipologie principali che implementano fisicamente questa componente: i controllori e i processori. In comune hanno una unità di controllo integrata al microprocessore, ma differiscono per gli obiettivi e la modalità di elaborazione.

Molte sono le piattaforme presenti sul mercato che consentono l'elaborazione, ma attualmente sono due quelle oramai consolidate presenti sul mercato hobbistico e semiprofessionale: per la tipologia controllori sicuramente la scheda Arduino, per la tipologia processori la scheda Raspberry Pi (fig. 4).

Arduino

La piattaforma di prototipazione in ambito di PhC più diffusa è sicuramente la scheda Arduino, progetto open hardware nato nel 2005 nell'ambito della scuola di interaction design ad Ivrea. Benché per eccessiva semplificazione si descrive talvolta Arduino come un piccolo computer, in realtà esso è un microcontrollore, esegue solo il codice (in questo caso si parla di firmware) caricato su di esso, e non ha quello che caratterizza un computer ovvero un sistema operativo. Ha però il vantaggio di essere semplice ed efficace. Gestisce input e output senza onere di componenti software più impegnative, permette di accostarsi alla costruzione di sistemi responsivi dal basso senza una reale competenza né elettronica né informatica ed è supportato da un vastissima comunità in rete.

Raspberry Pi

Prendono sempre più spazio i sistemi SoC (Systems on Chip) che



F04 | *Arduino UNO – esempio di Shields di Arduino – Raspberry Pi – esempio di Shields di Raspberry Pi.*

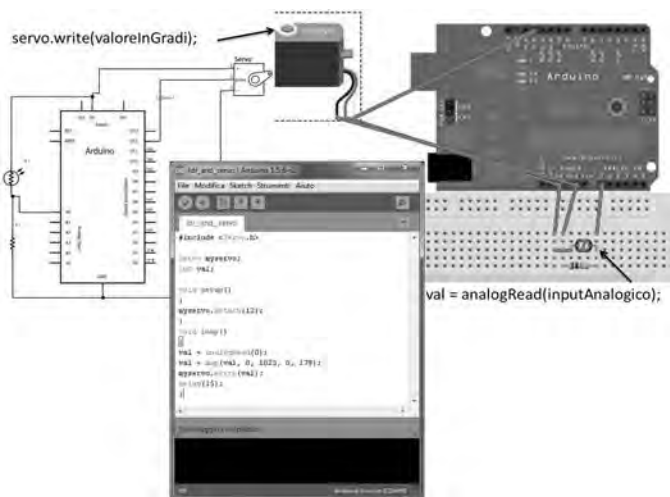
sono a tutti gli effetti dei minicomputer. Questi possiedono un sistema operativo (il più delle volte una distribuzione dedicata di Linux, il sistema operativo open source per eccellenza), non hanno bisogno di un pc di appoggio per sviluppare il codice, possiedono tutte le caratteristiche di quelle che sono le motherboard (schede madri) dei pc attuali e hanno una potenza elaborativa ora paragonabile a quella di un smartphone di qualche anno fa.

Di questa tipologia il Raspberry Pi (conosciuto anche come RPi), sul mercato da marzo del 2012, è attualmente il sistema SoC che sta riscuotendo il maggior successo: dal suo ingresso sul mercato ha venduto quasi 2.5000.000 di pezzi. Il progetto è nato dalla idea di produrre ad un costo conveniente (38 euro) un sistema in grado di essere utilizzato nella alfabetizzazione informatica. Le sue caratteristiche gli hanno consentito la diffusione tutti coloro che appresi i rudimenti di programmazione con la piattaforma Arduino hanno voluto espandere le loro applicazioni in un ambiente più sofisticato dal punto di vista di elaborazione.

Ambedue queste piattaforme di elaborazione hanno creato un ecosistema di appassionati dagli obiettivi più diversi. Dai makers ai professionisti. La forza dei due ambienti è nella condivisione e apertura dei progetti. Nel caso di Arduino si è creato un ambiente dove la curva di apprendimento è rapida e si possono ottenere risultati gratificanti in poche ore. Risultati che fino a pochi anni erano accessibili solo ad esperti in elettronica ora sono alla portata di persone a cui è richiesto solo la voglia di sperimentare in prima persona.

L'ecosistema Arduino si è arricchito di schede compatibili (shield) che si possono agganciare una sopra l'altra, ampliando le funzionalità e le applicazioni, in una logica di modularità simile a quella propria del software.

Ci sono shield per controllare led, per scrivere un lcd, per connettersi in wifi per gestire motori. Una visione che ha contribuito e tuttora continua a diffondere una capacità progettuale, prima difficile,



F05 | Struttura di un'applicazione responsiva.

anche verso utenti completamente impossibilitati ad entrare nel gioco. Artisti architetti designer comunque persone non avvezze alle magie dell'elettronica e dell'informatica possono ora entrare e progettare sistemi responsivi.

L'ambiente di RPi è all'inizio più impegnativo, ma superato il primo impatto, è ancor più promettente. Nato con l'obiettivo di educare alle basi dell'informatica le giovani generazioni di studenti, è esploso invece tra gli appassionati di informatica ed elettronica potendo tra le sue caratteristiche collegarsi (come Arduino) al mondo esterno attraverso opportune componenti elettroniche.

Attualmente quello che sta accadendo è una convergenza verso l'integrazione dei due sistemi attraverso schede che collegano i due ambienti e rendono disponibili la condivisione delle applicazioni.

Esempi di semplici prototipi responsivi

Qui di seguito si descrivono due esempi di prototipi responsivi tra i moltissimi presenti in rete, scelti per la loro semplicità funzionale e la configurazione (hardware elettronico e software) praticamente simile per tutte e due ma con differenti declinazione nelle parti meccaniche che realizzano i cinematismi dei movimenti, sia per gli obiettivi e per la modalità di implementazione.

Prima di passare ai singoli esempi è opportuno descrive la struttura funzionale che ambedue condividono e sintetizzata nella fig. 5.

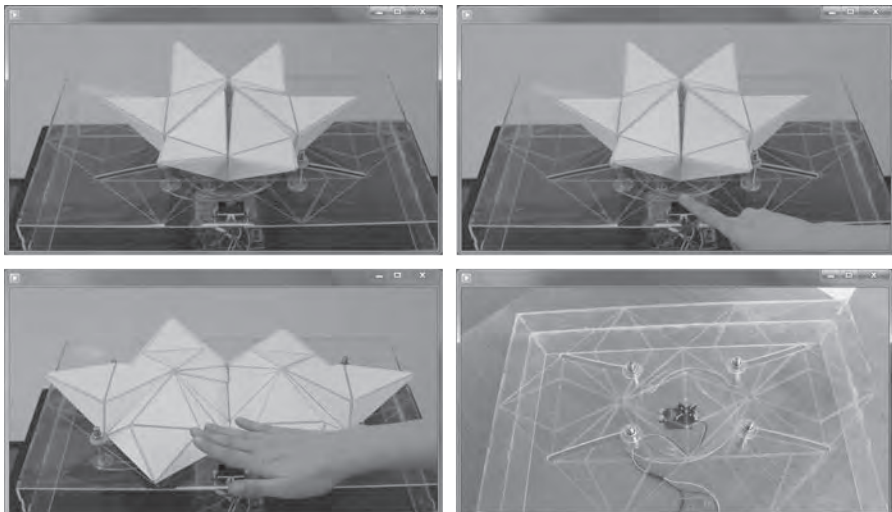
Lo scopo di questo progetto, che può essere considerato come modello per i due esempi, è ruotare un motore servo di un angolo espresso in gradi definito da un valore che dipende dalla quantità di luminosità in un ambiente.

Sulla destra è rappresentato lo schema del circuito, dove si evidenzia il simbolo del sensore di luminosità, il controllore (Arduino in questo caso) e a sinistra il simbolo del servomotore. In centro è visualizzato l'ambiente di sviluppo (IDE-Interactive Development Environment) e il codice che implementa il comportamento del sistema. Sulla destra è rappresentato il prototipo fisico, dove sono presenti i componenti reali (sensore, Arduino, motore servo).

Senza entrare nel dettaglio del codice nella figura sono riportate le due istruzioni fondamentali che codificano il comportamento: (`analogRead`) che legge il sensore di luminosità e lo trasforma in un valore (`val`) che opportunamente trasformato in gradi, e passato all'istruzione (`Servo.Write`) controlla la rotazione in gradi del servomotore. Come si evince il prototipo qui non assume nessuna forma particolare ed esprime nel suo minimalismo le funzioni del sistema (comportamento).

Il sistema così configurato ha una sua modularità intrinseca che permette di sostituire il sensore di luminosità con un altro (es. prossimità, umidità, distanza o...) senza quasi modificare nulla nella struttura del codice, se non le funzioni specifiche di lettura del sensore utilizzato. La configurazione appena descritta è alla base dei due prototipi trovati in rete. Questi utilizzano la struttura del sistema precedente dandone una forma fisica più specifica. Nei due casi il movimento è reso attraverso il movimento di un elemento tridimensionale quale un origami. Il prototipo in fig. 6 presenta un origami responsivo controllato da un sensore di prossimità. Il risultato è molto efficace nella sua semplicità.

Il secondo prototipo, mostrato in fig. 7, riguarda il progetto di una parete interattiva composta da pannelli realizzati con elementi di origami. In questo caso il sensore utilizzato è di luminosità. Da notare come i due prototipi mostrino differenti meccanismi di movimento. Infine risulta interessante l'uso delle caratteristiche fisiche e geometriche dell'origami che consentono di realizzare un elemento di superficie semplice che contiene in se la capacità di movimento grazie alla sua intrinseca configurazione cinematica.



F06 | *Origami responsivo (destra-sinistra e alto-basso) - posizione di riposo (chiuso)- posizione del sensore di prossimità- Interazione con l'origami avvicinando la mano al sensore di prossimità - meccanismo che realizza il movimento dell'origami.*

Note finali

“You can't play the game, if you don't know the rules” (anonimo)

Nella panoramica presentata si sono toccati alcuni punti riguardanti gli obiettivi e gli strumenti inerenti alla costruzione di prototipi responsivi visti nel contesto del Physical Computing. Queste brevi note sono da considerare più come suggestioni che il lettore potrà approfondire con la bibliografia e i siti suggeriti, da cui partire per una personale esplorazione del tema.

Aspetto operativo - Make it

Il prototipo assume in questo contesto i connotati di un oggetto fisico e obbliga a scontrarsi con la realtà proprie del mondo materiale. Nello sviluppo di un'idea/progetto nel contesto dei sistemi responsivi non è sufficiente un concept più o meno articolato e formalizzato, che certo può essere un punto di partenza (ma non è il solo), magari ben rappresentato con i più opportuni strumenti CAD, con animazione e rendering di effetto. Ma la realtà ha un peso, un'inerzia, spessori, tolleranze, un costo energetico e altro ancora.

Il prototipo forza il progettista a compiere un passaggio dal virtuale al reale. Le idee/progetti quando si calano nel mondo, e si relazio-

nano con esso, acquistano una valenza fisica e concreta che attualmente gli ambienti di simulazione (pur sofisticati) non riescono ad ottenere. “*Il riso non si cuoce con le parole*” (dal film “*Jiro e l’arte del sushi*” di David Gelb) riassume, benché tratto da un contesto diverso, il punto di vista pragmatico dell’approccio operativo qui esaminato.

Accessibilità - ora si può

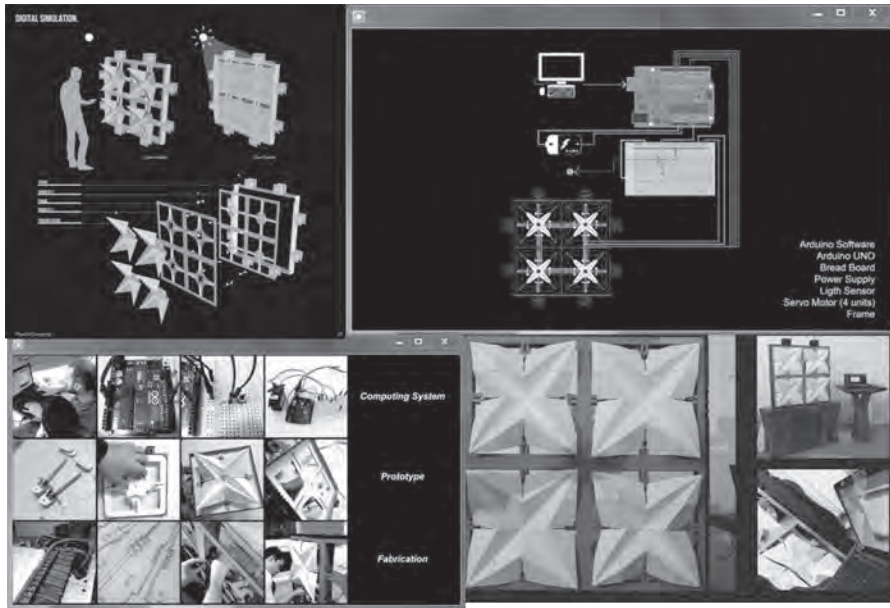
La tecnologie ICT danno ora la possibilità agli stessi progettisti di accedere agli strumenti e cimentarsi nella costruzione di prototipi responsivi, ciò che fino a solo una decina di anni fa era proibitivo sia per i costi che per le competenze specialistiche in gioco. Questa accessibile è ora resa disponibile dalle tecnologie ICT almeno per un’ampia categoria di idee/progetto. L’eco-sistema è basato sul web, con le comunità di makers e di competenti appassionati che riversano in rete grandi quantità di progetti, esperienze e conoscenze da cui attingere. Tutti possono trovare il proprio livello da cui partire e costruirsi un percorso personale di apprendimento. Se si vuole trovare un difetto in questo approccio è nella velocità con cui cresce l’offerta di strumenti, nella loro varietà e sofisticazione; ciò può dare una sensazione di smarrimento e disagio che il più delle volte scompaiono nel momento in cui ci si “tuffa” nella realizzazione di un proprio progetto.

L’importanza del codice - Dal digitale al fisico

Il cuore di un sistema responsivo, così come evidenziato nei paragrafi precedenti, è rappresentato dal codice che guida il comportamento, e dal software che ne è la sua implementazione in un linguaggio di programmazione. In [1] si descrive il software come strumento della mente, non quindi uno strumento solo meramente operativo lasciato ai professionisti programmatori o, se proprio necessario, da apprendere con fastidio, difficoltà e noia, ma uno strumento creativo per coloro considerati non professionisti del settore come ad esempio architetti, designers e artisti a cui il libro si rivolge.

In una società sempre più ibrida, come argomentato in [4], sarà molto importante, soprattutto per le nuove generazioni, sapere “metter le mani” per entrare come attori attivi nella società sempre più orientata dalla tecnologia e non essere solo utilizzatori passivi e analfabeti. Il punto di vista espresso in [4] dagli autori (che non sono tecnocrati ma sociologi) può essere considerato forse estremo, ma che ci sia comunque un fondo di verità lo si può verificare guardandosi attorno e senza neanche troppo acume.

Per esempio si è oramai invasi da sensori, sono ovunque: nei nostri *mobile*, nelle auto, nelle case, nel lavoro, nell’intrattenimento e su di noi sia come abbigliamento che come accessori.



F07 | Facciata responsiva: idea - facciata responsiva: schema prototipo - processo di sviluppo e realizzazione - installazione prototipo.

Questi sensori/oggetti dialogano fra loro e interagiscono con noi. Ora gli strumenti ICT danno la possibilità, anche per i non specialisti, di accedere alle loro funzioni e progettare/programmare prototipi di nuovi prodotti che se promettenti, e qui allora entrano le competenze più specifiche, ingegnerizzarli e proporli al mercato. Nell'eco-sistema del Physical Computing sono presenti molte "filosofie" di accesso come ad esempio il "learning by doing" o il "learning by experiment" che propongono percorsi efficaci e gratificanti a coloro che vogliono "imparare le regole del gioco" e l'uso consapevole delle tecnologie ICT e non solo per le applicazioni descritte in questo testo.

Bibliografia

- [1] C. REAS, C. MCWILLIAMS, E. LUST, *Form+Code in Design, Art, and Architecture*. New York: Princeton Architectural Pr, 2010.
- [2] S. BARRACLOUGH, *How Do Things Move*. Raintree. 2007.
- [3] A. MAIETTA E P. ALIVERTI, *Il manuale del maker. La guida pratica e completa per diventare protagonisti della nuova rivoluzione industriale*. FAG, 2013.
- [4] A. KHANNA, P. KHANNA, *L'età ibrida. Il potere della tecnologia nella competizione globale*. Codice. 2013.
- [5] D. ROBERTS, *Making Things Move: Diy Mechanisms for Inventors, Hobbyists, and Artists*. New York: Tab Books. 2010.
- [6] T. IGOE, *Making Things Talk*, 2 edizione. Beijing; Farnham: O'Reilly Vlg. Gmbh & Co. 2011.
- [7] CASALE, A.; VALENTI, G.M. *Architettura delle superfici piegate - le geometrie che muovono gli origami*. Roma: Edizioni Kappa. 2013.
- [8] T. O'SULLIVAN, D. IGOE, *Physical Computing: Sensing and Controlling the Physical World with Computers* by Dan O'Sullivan, Tom Igoe 1st, 1ST edizione. Thomson.
- [9] J. TREBBI, *The Art of Folding: Creative Forms in Design and Architecture*. Barcelona, Spain: Promopress. 2013.
- [10] D. ELLIOTT, R. MACDOUGALL, E W. J. TURKEL, New Old Things: Fabrication, Physical Computing, and Experiment in Historical Practice, CJC, vol. 37, n. 1, apr. 2012.
- [11] V. PARLAC, Integrating Physical and Digital: Interactive technologies and design of matter. 2011.
- [12] V. PARLAC, Surface Change: Information, Matter and Environment – Surface Change Project. 2013.
- [13] J. STANKOVIC, I. LEE, A. MOK, E R. RAJKUMAR, Opportunities and obligations for physical computing systems, Computer, vol. 38, n. 11, nov. 2005; pagg. 23–31.

Siti web

www.it.farnell.com.

www.urdesign.it.

www.instructables.com/index.

www.iaacblog.com.

www.origamit.scripts.mit.edu.

www.it.rs-online.com.

Physical Computing | Strumento progettuale per i designer di oggi

Maximiliano Ernesto Romero
Politecnico di Milano - Dipartimento di Design

Siamo di fronte a quello che molti chiamano “la nuova rivoluzione industriale” (Anderson, 2013). Un cambiamento storico dove le logiche di produzione, distribuzione e consumo dei beni materiali che conosciamo potrebbero essere ridefinite grazie all'utilizzo della tecnologia in maniera diversa. Alla base di questo cambiamento esistono diversi fattori, ma sicuramente, uno dei più importanti riguarda la possibilità di scambiare facilmente via internet l'informazione necessaria per la costruzione di prodotti. Questa informazione può riguardare *Know-How* ed esperienze costruttive ma anche, e fondamentalmente, la “descrizione” matematica delle parti componenti di questi prodotti. Grazie a archivi informatici strutturati secondo codifiche prestabilite (files), è possibile scambiare modelli 2D e 3D che possono controllare macchine utensili automatizzate, usando la cosiddetta tecnologia a Controllo Numerico Computerizzato (CNC). Parliamo di tecnologie costruttive disponibili a livello industriale da almeno 20 anni ma che oggi suscitano grande interesse pubblico perché disponibili in formati ridotti, detti Desktop, e cioè, a misura di utente finale e non solo da azienda; parliamo di Desktop Digital Fabrication. “*Widespread access to these technologies will challenge traditional model of business, foreign aid and education.*” (Gershenfeld, 2012, p. 43).

Quello che una volta si faceva a mano con il legno o altri materiali facilmente modellabili, come gli ormai famosi modelli di Giovanni Sacchi (fig. 1) per i grandi designer degli anni '60, con l'avvenimento del CAD e del CNC è passato a farsi completamente in via digitale.

Questo cambiamento, che ha comportato enormi vantaggi dal punto di vista della quantità, ma non sempre l'ha fatto dal punto di vista

della qualità del risultato. In passato, fare il modello, era un'attività da esperti, e come dice Sottsass parlando di Giovanni Sacchi, era una sorte di completamento del processo progettuale.

«Fuori da ogni lode generica, la sua grande capacità va oltre il «fare» i modelli: è il capire gli oggetti che poi, lui, con i modelli racconta... Con Sacchi si va oltre il volume: lui fa sentire cosa succede veramente, tattilmente: produce una sensazione evoluta, tanto che un suo modello può soddisfare completamente il designer. Con un modello così, in verità, non si ha quasi più voglia di fare l'oggetto» (Ettore Sottsass in Polato, 1991, pp. 119-123)

Oggi, molte condizioni sono cambiate (tecnologie, mezzi, materiali, obiettivi, risorse economiche, ecc) e di conseguenza è cambiato anche il processo progettuale, con la possibilità anche di produrre autonomamente modelli di alta qualità.

Desktop Digital Fabrication

In questa “nuova rivoluzioni industriale” il cambiamento più significativo non riguarda la tecnologia ma l'utilizzo che si fa di questa, chi la utilizza e dove lo fa. Alcuni autori parlano di democratizzazione della tecnologia, o meglio dell'accesso a questa. *“La rivoluzioni degli atomi sta portando nelle nostre case macchine in grado di creare oggetti reali. Queste macchine richiedono poche decine di minuti per trasformare un modello tridimensionale, cioè un disegno eseguito su un computer, in qualcosa di fisico, che possiamo toccare con mano.”* (Maietta e Aliverti, 2013, pp. 124). Parliamo di macchine di costruzione additiva (come la stampa 3D) e sottrattiva (come le frese e le macchine per il taglio laser a controllo numerico) che possono modificare facilmente la materia partendo da un disegno CAD.

Questo cambiamento sta offrendo la possibilità ad un consumatore critico di auto prodursi le proprie soluzioni, o come dice Anderson: *“La produzione di massa va bene per le masse; ma per voi che cosa funziona?”* (Anderson, 2013, pp.76). Così, settori di consumatori con particolari necessità, spesso faticano a trovare in mercato, a prezzi ragionevoli prodotti che risolvono i loro specifici bisogni. Pensiamo al mondo dei non-vedenti, ipovedenti e cechi, che spesso dipendono della sensibilità di altri (coloro che progettano e costruiscono gli spazi abitativi e pubblici) per poter interagire agevolmente col mondo che ci circonda.

Con l'obbiettivo di sperimentare le potenzialità della Desktop Digital Fabrication al mondo degli utenti con necessità specifiche, è stato realizzato un workshop di co-progettazione con utenti non vedenti. Per la realizzazione del lavoro è stato scelto un ambiente di



F01 | Modello in legno con dime del telefono Grillo di Marco Zanuso e Richard Sapper per Siemens, 1965 Foto: Federico Pollini – Archivio Giovanni Sacchi.

modellistica ortodossa, il laboratorio di falegnameria dell'Archivio Giovanni Sacchi (Sesto San Giovanni, MI).

Secondo l'ICSID (International Council of Industrial Design) *“il design è un processo progettuale che mira a risolvere problemi specifici della società”*, un obiettivo ambizioso perché i problemi specifici, più che *“alla società”* appartengono alle singole persone. Infatti nell'approccio del Design for All, si tende a progettare soluzioni in maniera inclusiva, che possano risolvere problemi della maggior quantità (e varietà) di persone, spingendo a considerare anche le persone con specifiche disabilità. In fatti, secondo Paul Hogan, presidente emerito dell'European Institute for Design and Disability, (Design for All Europe) *“Il buon design abilita, il cattivo design disabilita”*. Il miglior design, però, è individuale ed specifico. Nel caso della esperienza sopracitata, gli utenti non vedenti, *“esperti nelle proprie problematiche”* sono stati aiutati dai designer nella progettazione delle soluzioni ai propri problemi, soluzioni che possono essere realizzate (per motivi di costo di produzione) solo grazie alla Desktop Digital Fabrication.

Physical Computing e prototipi interattivi

Oltre alla possibilità di produrre in maniera automatizzata alcuni pezzi di un prodotto, o un prodotto completo, oggi è diffusa anche la necessità di animare questi prodotti o dare loro *“intelligenza”*. Il physical computing è l'ambito di ricerca che s'interessa di studiare

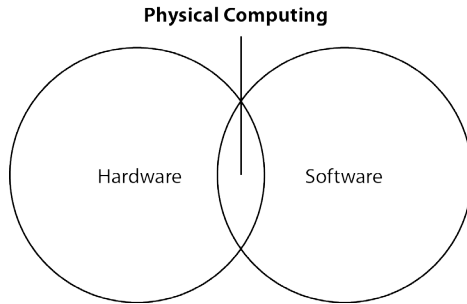


F02 | *Designers e utenti non vedenti co-progettando prodotti da stampare in 3D.*

questo rapporto fra fisicità e comportamento. Il *physical computing* si occupa di creare una comunicazione fra il mondo fisico e il mondo virtuale dei computer (O'Sullivan e Igoe, 2004, pp. XIX), dando così, intelligenza ai prodotti.

I prodotti industriali possono essere considerati intelligenti quando sono in grado di raccogliere informazioni dal contesto (mediante sensori), processare questa informazione per prendere delle decisioni secondo una logica predefinita e posteriormente agire per modificare il contesto (mediante attuatori). Un prodotto intelligente, in sintesi è composto da sensori, processori e attuatori e il comportamento di questo prodotto dipende dalle decisioni che il progettista ha assegnato per ogni condizione ambientale.

In questo modo, il *firmware* (programma che determina il comportamento) diventa parte costitutiva dell'informazione costruttiva di un prodotto, così come lo sono le tavole tecniche, le indicazioni sui materiali, le dimensioni, i processi produttivi, ecc. Possiamo dire che un prodotto intelligente è costituito da Software e Hardware, quindi da parti materiali (hardware) e parti immateriali (software), e che il *physical computing* si occupa dello studio del collegamento fra queste due parti (fig. 3). Ad esempio, su come un sensore (materia-



F03 | Il physical computing comporta Hardware e Software.

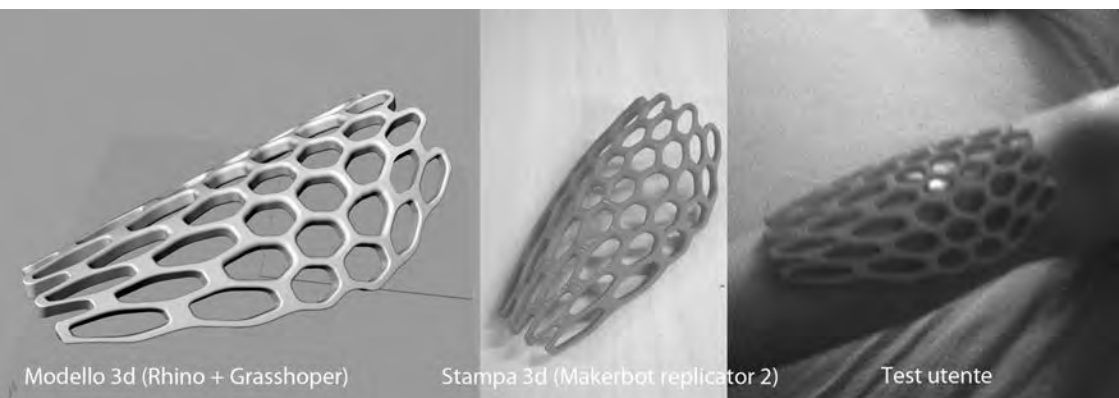
le) può raccogliere informazione dall'ambiente (materiale) e digitalizzarla per essere processata secondo una certa logica, definita dal firmware (immateriale), che di conseguenza genererà una restituzione nell'ambiente grazie ad un attuatore (materiale).

“Physical computing is an approach to learning how humans communicate through computers that starts by considering how humans express themselves physically. A lot of beginning computer interface design instruction takes the computer hardware for given - namely, that there is a keyboard, a screen, perhaps speakers, and a mouse - and concentrates on teaching the software necessary to design within those boundaries. In physical computing, we take the human body as a given, and attempt to design within the limits of its expression.” (O’Sullivan e Igoe 2004)

Il physical computing è l’approccio che permette agli oggetti di uso quotidiani di diventare intelligenti, e quindi, interfacce uomo-computer naturali. Se consideriamo che anche quest’informazione, legata ai comportamenti dei prodotti, in quanto digitale, può essere scambiata facilmente grazie ad internet e quindi è suscettibile di condivisione, così come il resto delle “istruzioni” per la produzione di un prodotto. In più, se previsto al momento della progettazione, il comportamento può essere facilmente aggiornato e quindi, citando Anderson: *“nuovi bit possono infondere nuova vita a vecchi atomi”* (Anderson, 2013, pp.168)¹.

Questa situazione, cambia radicalmente il processo col quale i prodotti sono concepiti, se nel passato la rappresentazione era una sorte di sintesi codificata della complessità del progetto, in questo momento, la rappresentazione è parte della definizione del progetto stesso e della sua complessità.

.....
1. Ad esempio, Aibo, il “cane” robotico della Sony, può essere aggiornato con nuove funzionalità che sfruttano meglio l’hardware disponibile (sensori e attuatori).



F04 | Esempio di processo di progettazione algoritmica, prototipazione 3D e test con utenti.

Computational Design

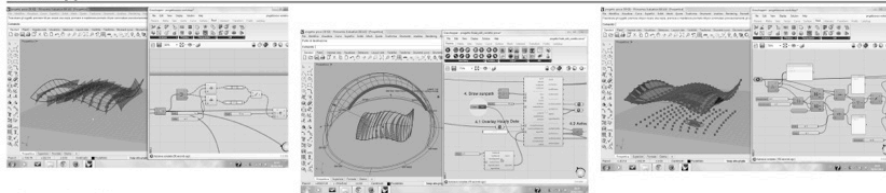
Dal momento che le macchine di fabbricazione possono interpretare un documento digitale e produrre un oggetto materiale con poche limitazioni formali e altissima precisione (rispetto alle macchine analogiche) e che queste macchine diventano di utilizzo semplificato anche per i non esperti, molti designer hanno iniziato a sperimentare con i bits e con l'informatica.

Così, da una modellazione tridimensionale che lavorava con il paradigma della produzione industriale (si progettava secondo quello che si poteva meccanizzare) si sta passando alla modellazione matematica, se vogliamo, astratta dei limiti produttivi, forti dalla consapevolezza che le macchine di fabbricazione digitale possono fabbricare "quasi qualsiasi cosa". L'accessibilità alle sperimentazioni formali che permettono le macchine desktop, fa sì che si possa spingere la ricerca formale fino a limiti prima impensabili o possibili solo ad esperti.

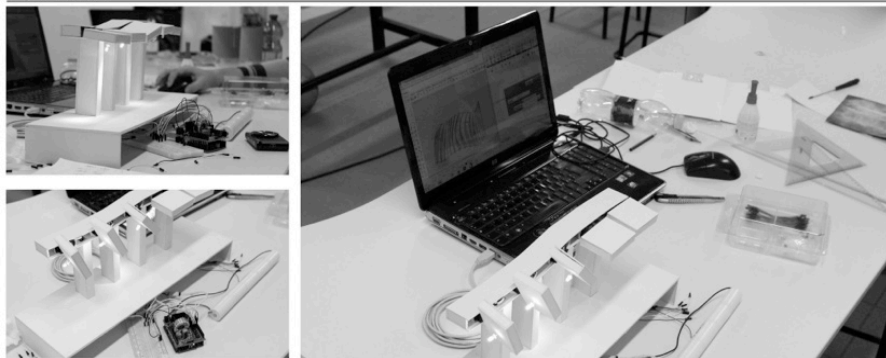
Come esempio si può citare il progetto del parastinchi personalizzato, sviluppato dal Laboratorio di Physical Computing (PhyCoLab) del Politecnico di Milano per un utente bambino (fig. 4). Lo specifico bisogno era di coprire da eventuali colpi ma non dall'aria, una ferita risultante di un intervento chirurgico. Un prodotto che non esiste in mercato è che non avrebbe senso di produrre industrialmente per motivi di costi in relazione con frequenza di richiesta.

L'esempio menzionato è stato progettato con un software algoritmico che permette modificare le dimensioni e la relazioni formali fra le parti. Questa funzionalità semplifica il ridimensionamento e adatta-

Grasshopper



Physical Model



F05 | Dettaglio di tavola di progetto L'Edere e Maestroni, Corso Responsive Morphologies I Ed.

mento all'anatomia dell'utente, nonché l'estetica del prodotto, forti del fatto che non ci sono quasi limiti produttivi grazie alla stampa 3D.

Il nuovo paradigma di progettazione

Possiamo intuire che l'insieme di conoscenze legate al Computational Design, Physical Computing e Digital Fabrication stiano diventando il nuovo paradigma di progettazione complessa.

Il rapporto fra queste discipline è evidente in attività progettuali dove il risultato che si vuole ottenere è rappresentato da dispositivi in grado d'interagire con il contesto. Il processo progettuale applicato da L'Edere e Maestroni progettazione per il disegno di una tettoia riattiva nel contesto del corso Responsive Morphologies 1°Ed. del Politecnico di Milano dimostra come l'iterazione e la ripetitività del ciclo progettazione-prototipazione sia una condizione fondamentale in questo contesto (fig. 5). Di fatto, in progetti complessi e interattivi, la necessità di un approccio Trial and Error (Campbell et Al, 1936) è ancora fondamentale, ma oggi diventa accessibile anche ad alti livelli di precisione e basso costo. Il caso del progetto citato è un esempio di come si può insegnare ai nuovi designer l'utilizzo di

queste tecnologie e approccio progettuale fortemente contaminato di condivisione e multidisciplinarietà.

FabLabs e Makers

Nel corso del 2001 negli Stati Uniti nasce il primo FabLab, presso il Massachusetts Institute of Technology, da un'idea del professor Neil Gershenfeld, grazie ad una concessione del National Science Foundation, ed in collaborazione con il Grassroots Invention Group ed il Center for Bits and Atoms (CBA), parte del Media Lab del MIT. I FabLab sono "officine di fabbricazione digitale" (dall'inglese Fabrication Laboratory), uno dei più diffusi tipi di spazio dedicati al "fare" in comune, piccole officine che offrono servizi personalizzati e strumenti di fabbricazione digitale come stampanti 3D, laser cutter e macchine a controllo numerico. Ad oggi esistono FabLabs in tutto il mondo, dagli Stati Uniti al Sudafrica, dall'Afghanistan all'India e dalla Nuova Zelanda al Brasile.

Gershenfeld crea il suo laboratorio come supporto al corso "How to make (almost) anything", (MAS 863) del MIT, un corso che nasce dall'idea che se le persone possono dominare la tecnologia della costruzione, questa costruiranno soluzioni ai propri problemi e che oggi le tecnologie per la produzione sono digitali e accessibili.

"Mi sono reso conto che la soluzione vincente per la produzione digitale è la produzione personale. Non si tratta di fabbricare quello che potete comprare al Wall-Mart, ma di fabbricare quello che non potete comprare lì." (Gershenfeld, 2005)

Un nuovo metodo didattico

Nel corso del 2001 negli Stati Uniti nasce il primo FabLab, presso il Massachusetts Institute of Technology, da un'idea del professor Neil Gershenfeld ed in collaborazione con il Grassroots Invention Group ed il Center for Bits and Atoms (CBA).

I FabLab sono "officine di fabbricazione digitale" (dall'inglese Fabrication Laboratory), uno dei più diffusi tipi di spazio dedicati al "fare" in comune, piccole officine che offrono servizi personalizzati e strumenti di fabbricazione digitale come stampanti 3D, laser cutter e macchine a controllo numerico. Ad oggi esistono FabLabs in tutto il mondo, dagli Stati Uniti al Sudafrica, dall'Afghanistan all'India e dalla Nuova Zelanda al Brasile.

Gershenfeld crea il suo laboratorio come supporto al corso "How to make (almost) anything", (MAS 863) del MIT, un corso che nasce dall'idea che se le persone possono dominare la tecnologia della costruzione, queste costruiranno soluzioni ai propri problemi e che

oggi le tecnologie per la produzione sono digitali e accessibili.

“Mi sono reso conto che la soluzione vincente per la produzione digitale è la produzione personale. Non si tratta di fabbricare quello che potete comprare al Wall-Mart, ma di fabbricare quello che non potete comprare lì.” (Gershenfeld, 2005)

In questi contesti di formazione si è diffuso l'utilizzo del termine “Thinkering” per definire un metodo di apprendimento basato sulla sperimentazione senza scopi predefiniti. Banzi lo definisce come *“ciò che accade quando si cerca qualcosa che non si sa bene come fare guidato da capriccio, fantasia e curiosità.”* (Banzi, 2008, pp.5) e che ha origini nell'articolo di John Seely Brown che descrive il “tinkering” come *“constructing / playing / wrestling with objects by appropriating, transforming and personalizing them for one's own learning and practice”* (Brown e Duguid, 2000).

Questo processo, che si basa nella sperimentazione e non solo nel trasferimento di conoscenza da un esperto a un allievo, è collegato al rapporto fra lavoro manuale e lavoro intellettuale, in quanto il lavoro intellettuale è risultante di una esperienza manuale che avviene prima e non il contrario. S'impara manipolando, non osservando. La dicotomia fra lavoro intellettuale e lavoro manuale è ampiamente sviluppata da Matthew Crawford nel suo libro “Il lavoro manuale come medicina dell'anima”. Nel suo lavoro, l'autore propone questa tesi facendo un'analisi storica della separazione del lavoro con la conseguente alienazione di alcune mansioni intellettuali che diventano completamente scollegate dalla realtà fisica. Questa situazione risulta spesso evidente nei progetti sviluppati dagli studenti di design che, abituati a progettare esclusivamente al computer grazie ai sistemi CAD, non riescono a prevedere gli errori a volte macroscopici per un occhio allenato nella pratica. La realtà materiale dei progetti non perdona generosamente gli errori che invece si possono nascondere nelle rappresentazioni grafiche fotorealistiche. *“Non è possibile diventare musicisti senza imparare a suonare un strumento specifico, senza assoggettare le proprie dita alla disciplina della tastiera o delle corde. Il potere espressivo del musicista si fonda su un'obbedienza che viene prima; la sua capacità di agire dipende da una sua continua sottomissione. ... Egli deve obbedienza alla realtà meccanica del suo strumento”.* (Crawford, 2009 pp 64)

Diventa così evidente che, in un modo che si appresta ad entrare in una nuova rivoluzione industriale, la formazione del designer deve essere riconsiderata.

Conclusione

Più di venti anni dopo il riesame del disegno industriale da parte di Tomàs Maldonado, vige ancora il ruolo di base del designer, sebbene anche le capacità produttive e le necessità dell'utente siano fortemente cambiate: *“El diseñador industrial ha tenido siempre la función de proyectar productos industriales mediando entre las capacidades productivas y las necesidades del usuario.”* (Maldonado 1993)

Già nel 1993, infatti, quest'autore aveva evidenziato il problema del ruolo di un disegnatore industriale che ha a che fare con un ambito dove la microelettronica e l'informatica spingono alla miniaturizzazione dei prodotti tecnologici.

“Muy a menudo, hoy en día, proyectar objetos no es de hecho muy distinto a proyectar sistemas de interacción. [...] Sin embargo eso no impide que una parte considerable de la actividad del diseñador industrial siga firmemente anclada en la tarea de “dar forma” a objetos materiales que, nos guste o no nos guste, siguen estableciendo una relación tradicional con los usuarios, es decir una relación que se desarrolla, precisamente, a través de la naturaleza materialmente tangible de los objetos.” (Maldonado 1993)

Come anticipato da Maldonado, il Disegno Industriale iniziò a trovarsi sempre più spesso di fronte alla necessità di disegnare *“scocche per circuiti stampati e schede elettroniche”* senza neanche capire cosa ci fosse dentro, ma sapendo solo che l'utente doveva interagire con qualche genere di display. Così, alcuni designer iniziarono a interessarsi, come suggerito da Guy Bonsiepe (1991), della progettazione dell'informazione contenuta nelle interfacce di questi dispositivi, anche se erano soprattutto gli stessi ingegneri a sviluppare le interfacce visive digitali. (Cooper, 1999).

Oggi l'interazione uomo-prodotto è molto di più dell'interfaccia grafica, il prodotto completo ha capacità di comunicazione, non solo formale ma anche di comportamento. I più, il prodotto diventa l'interfaccia di un sistema complesso e collegato attraverso internet a svariati servizi (Internet of things).

Il design italiano è ancora ai margini di questo cambiamento e rischia di rimanere fuori. Attualmente nella scena internazionale del reclutamento di risorse umane per il design, oltre alle tipiche figure come Product Designer, Transportation Designer, Car Designer, Interaction designer ed altre, incomincia la ricerca di profili come Wireless Product Designer, Mobile Product Designer, Product Interactive Designer che congiuntamente con Interface Designer occupano gli spazi di progettazione per la nuova tipologia di prodotti di base elettronica, ovvero i prodotti ICT. In questo contesto i designer

hanno così il ruolo di materializzare nel migliore dei modi possibili la tecnologia digitale.

Una delle figure chiave si definisce come Design Technologists, colui che dovrebbe permettere di superare il gap tra le discipline progettuali e quelle tecnologiche. Lo specialista che guida il team creativo e porta all'implementazione di soluzioni progettuali assicurando capacità tecniche e rispondenza rispetto ai requisiti. Un designer tecnologicamente evoluto. Il Design Technologist dovrà possedere conoscenze di Physical computing, Digital Fabrication e Computational Design.

Analizzando i risultati dei grandi concorsi del design industriale di livello internazionale come Red Dot, Good Design Award o IF design, si nota la quasi totale assenza di nomi italiani nelle sezioni riferite all'ICT. Se l'Italia ha avuto sempre un ruolo importante ad esempio nel Car Design e Forniture Design, oggi nei prodotti tecnologici di consumo le ultime tendenze stilistico-morfologiche nonché di interazione innovative, arrivano da oriente o dagli Stati Uniti d'America. Uno dei motivi di quest'assenza potrebbe essere imputato al fatto che in Italia vi sia ancora scarsità di aziende ICT, e pertanto non si sono create le condizioni per la formazione di figure specifiche in questo ambito. Il sistema produttivo Italiano si basa principalmente su piccole e medie imprese specializzate in settori produttivi tradizionali e poco tecnologici. Questo ha comportato che i designer in Italia abbiano sviluppato una grande esperienza nel design di prodotti come mobili e complementi d'arredo in generale. Sono quindi pochi i designer che progettano elettrodomestici e meno ancora quelli che fanno prodotti di elettronica di consumo o ICT.

Sebbene negli ultimi tempi il governo italiano, seguendo le linee europee, incentivi la creazione di imprese ad alto contenuto tecnologico per rilanciare l'economia nazionale a livello mondiale, è comunque evidente che, fino ad ora, il livello di preparazione specifica in ambito ICT dei designer italiani sia scarso.

L'ambito ICT è complesso anche perché cambia velocemente: le tecnologie si evolvono vertiginosamente ed è difficile per una struttura accademica storica seguirne i passi. A questo punto diventa importante avere contatti diretti con la aziende del settore, che per natura propria devono addirittura anticipare questi cambiamenti. Per formare il nuovo profilo del designer risulta quindi necessario spingere la creazione di laboratori che permettano simultaneamente la progettazione, la sperimentazione e la valutazione dei prodotti con l'utente finale.

Bibliografia

- [1] ANDERSON C. *Makers, Il ritorno dei produttori. Per una nuova rivoluzione industriale*. Milano: Rizzoli Etas. 2013.
- [2] BONSIPE G. *Il progetto dell'interfaccia*, in *Línea gráfica*. n°3. 1991.
- [3] CAMPBELL D.T.; Stanley, J.C.; Gage, N.L. *Experimental and quasi-experimental designs for research*. Boston: Houghton Mifflin. 1963.
- [4] CRAWFORD M. *Il lavoro manuale come medicina dell'anima*. Milano: Mondadori. 2009.
- [5] COOPER A. *Il disagio tecnologico*,. Milano: Ed. Apogeo. 1999.
- [6] GERSHENFELD N. *Fab: the coming revolution on your desktop*, Basic Books, New York, 2005
- [7] GERSHENFELD N. *How to Make Almost Anything*, Foreign Affairs, Novembre/Dicembre. 2012.
- [8] MAIETTA A., ALIVERTI, P. *Il manuale del maker, La guida pratica e completa per diventare protagonisti della nuova rivoluzione industriale*. Milano: Edizioni FAG. 2013.
- [9] MALDONADO T. *El diseño industrial reconsiderado*. Barcelona: Editorial Gustavo Gilli. 1993.
- [10] O'SULLIVAN D.; Igoe, T. *Physical Computing, Sensing and controlling physical world with computers*, Thomson course technology. Boston: 2004.
- [11] POLATO P., a cura di. *Il modello nel design. La bottega di Giovanni Sacchi*. Milano: Hoepli. 1991.

Progettare architetture responsive

Attilio Nebuloni

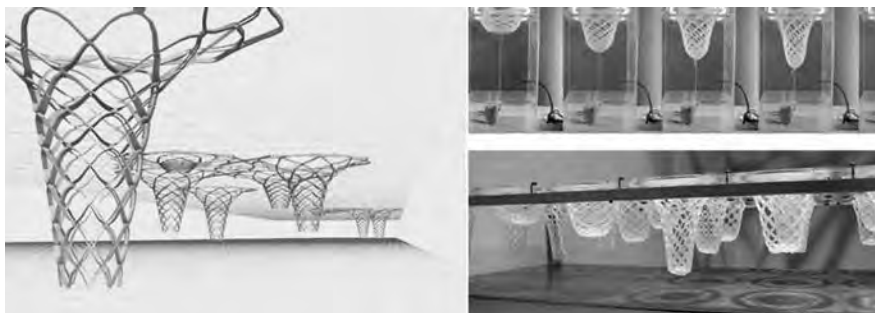
Politecnico di Milano - Dipartimento di Design

La relazione tra progetto e responsività, intesa come la capacità di una struttura o un'organizzazione di recepire degli stimoli esterni e modificandosi produrre, nel contempo, dei cambiamenti nel contesto entro cui si inserisce, è al centro di una linea della ricerca architettonica per una nuova "ecologia" del progetto, che si fonda sulla rinnovata attenzione dei progettisti ad apprendere dalle forme e dai modi di organizzarsi della natura.

Se dal punto di vista disciplinare le premesse a tale orizzonte di studio sono da ricercarsi principalmente nel superamento delle logiche compositive dell'oggetto finito, per spostare, al contrario, l'attenzione su una dimensione più processuale e diagrammatica del progetto, è guardando agli strumenti che possiamo trovare le ragioni più significative di tale sviluppo.

Sul piano strumentale, infatti, il crescente avvicinamento dei progettisti al mondo delle architetture responsive, si lega da un lato al sempre più facile accesso ai *software* di modellazione algoritmica ed ai linguaggi della programmazione (comunità di utenti e linguaggi visuali di programmazione, gli elementi più significativi), dall'altro alla diffusione anche nel campo dell'architettura di nuovi dispositivi e piattaforme *open source* per la prototipazione rapida, che permettono di creare oggetti e spazi capaci di interagire in modo dinamico con l'ambiente circostante.

Messi da parte i riferimenti e gli indirizzi interni alla disciplina, e perlòpiù in termini di aderenza logico-formale a "tipi" ideali (nelle funzioni piuttosto che nelle forme), il progetto guarda al più generale contesto ambientale entro cui andrà ad inserirsi, per seguire approcci che si avvicinano agli aspetti dell'architettura del paesaggio, ovvero sistemi dove la ricchezza che deriva da una



F01 | *Open Columns* è un progetto di ricerca dove colonne non strutturali fatte di materiale elastomerico, vengono continuamente riconfigurate in relazione agli stimoli dello spazio circostante (Omar Khan - Center for Architecture and Situated Technologies, University of Buffalo).

complessità di insieme è più che la semplice somma delle sue singole parti (logica di emergenza vs logica additiva).

Complessità e sostenibilità si fondono così nella definizione di nuove forme di ecologie artificiali, che alla ottimizzazione e meccanizzazione delle strutture di spazio e dei modi della sua costruzione, sostituiscono più naturali logiche di adattamento e varietà.

Il rifiuto della ripetizione identica di un prodotto o modello ideale e la sua meccanizzazione che ha caratterizzato per secoli la costruzione del progetto e determinato, anche visivamente, un paesaggio dove “l’identità è la norma, l’analogia insignificante e l’aspettativa culturale di copie identiche ha infine interessato le funzioni e il valore di tutti i segni”, oggi vede dall’emergere di un nuovo *imprinting* algoritmico, una nuova generazione di oggetti progettuali, la cui forza si lega alla possibilità di mutare degli stessi: “Algoritmi, software, hardware e strumenti digitali di fabbricazione, sono i nuovi standard che determinano non solo l’aspetto generale di tutti gli oggetti di una serie non standardizzata, ma anche gli aspetti di ogni singolo prodotto, che può cambiare casualmente o nel progetto. Invece di un *imprinting* meccanico che stampa fisicamente la stessa forma sugli oggetti, un *imprinting* algoritmico libera e rende visibile il cambiamento delle forme e la mutazione da un oggetto a quello successivo.” (Carpo, 2011).

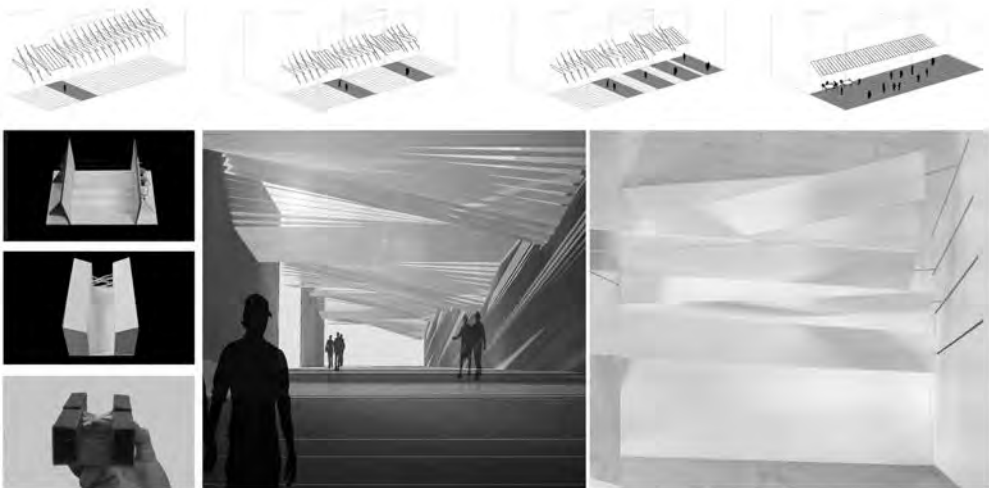
In tale scenario, l’azione progettuale si riappropria quindi di una rinnovata dimensione del “fare”, dove i modelli architettonici, e nello specifico i modelli concettuali di studio, diventano il centro di una sorta di lavoro “artigianale” del progettista, che nel tornare costruttore di sistemi formali e non di semplici spazi statici, ritrova

la strada creativa dell'improvvisazione, intesa come la soluzione di un problema nel palesarsi dello stesso. Attraverso questa forma non-lineare e codificata di ricerca creativa, inoltre, l'idea non si configura attraverso un percorso strutturato preliminare di analisi e di interpretazione critica della stessa, quanto per un lavoro continuo di sperimentazione sugli oggetti progettuali, secondo una più diretta logica del tipo "prova e correggi".

Da oggetto a meta-progetto

Per Bernard Cache (Cache, 1995), l'uso di funzioni parametriche apre a due grandi possibilità: in primo luogo, permette di concepire ed elaborare le forme complesse, difficili da rappresentare con i metodi tradizionali del disegno (comportando che alle composizioni di primitive o di semplici contorni, facciano seguito superfici con curve variabili) e secondariamente, di gettare le basi per una forma di produzione non standardizzata dove, attraverso la modifica dei parametri, è possibile costruire una forma diversa per ogni oggetto della stessa serie.

Pensato in tali termini, l'oggetto progettuale non si identifica più semplicemente nei termini della relazione tra forma e contenuto,



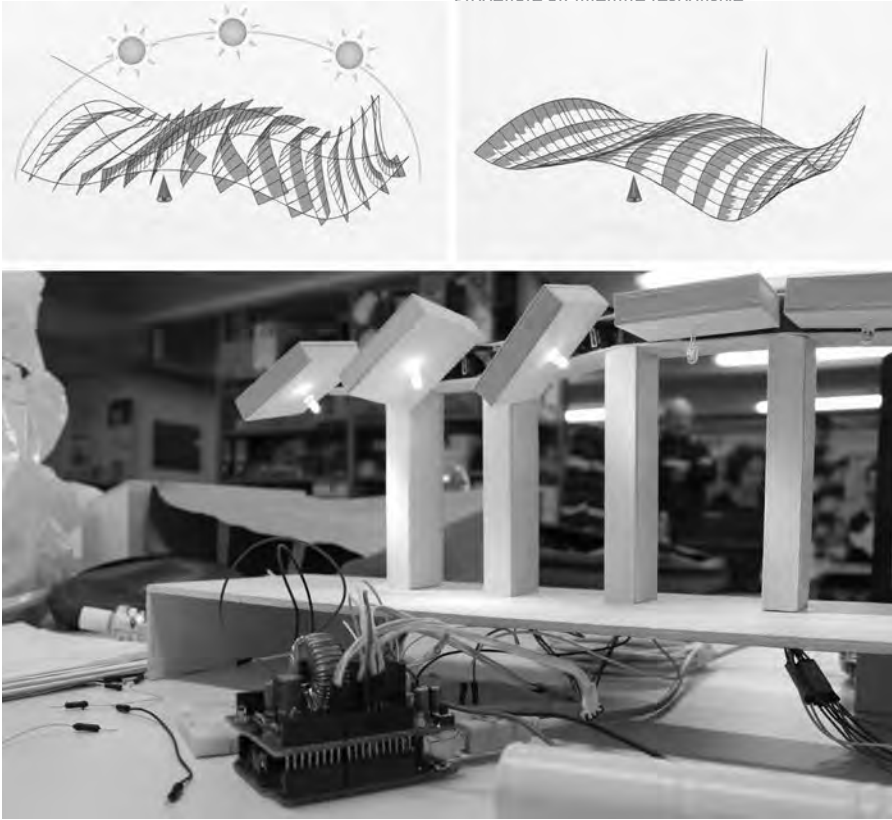
o in generale per gli aspetti della sua figurazione, ma per una potenzialità espressiva che gli deriva dalla capacità di variare lungo una curva di possibilità, dove l'oggetto stesso può liberamente fluttuare. Un oggetto che diventa, in sostanza, l'espressione di una funzione piuttosto che l'immagine che prende forma in modo inequivocabile, e finito, di geometria e spazio.

Nel progetto, ciò implica in primo luogo assumere una dimensione di apertura che sostituisce alle forme finite della composizione architettonica, quella delle "famiglie di forme possibili" (Saggio, 2003), che rispetto ad una complessità di parametri non risolti individualmente, variano per assumere tante più configurazioni spaziali, quante sono le combinazioni possibili dei parametri stessi, non prevedibili e pianificabili a priori. Nello specifico della costruzione di sistemi e ambienti in grado di recepire e rispondere in modo interattivo con il contesto, i valori di tali parametri si legano a degli stimoli esterni di natura ambientale, come la luce, la temperatura, l'umidità, la ventilazione, ecc., o più di tipo relazionale, nell'interazione con il movimento o il rumore prodotto dalle persone, elevando così in termini potenziali la capacità di mutazione del progetto stesso, per costruire una matrice di valori utili che informano le funzioni degli algoritmi nel modello digitale.

I caratteri che emergono da tale orientamento progettuale fanno quindi riferimento principalmente alle logiche della programmazione ed agli aspetti processuali della sua costruzione.

Nel campo della programmazione, gli oggetti, a differenza delle funzioni della programmazione imperativa (che determinano in modo esatto un insieme di istruzioni finite ad un dato risultato, e quindi potenzialmente ripetibili da parte di un soggetto terzo), sono categorie aperte e di livello superiore, che si descrivono semplicemente per generiche caratteristiche e comportamenti, che prendono forma in un corpo definito solo quando tali aspetti vengono istanziati, ovvero specificati nel programma. Programmare per oggetti, significa quindi pensare diversamente alle applicazioni, che saranno composte da elementi indipendenti, la cui caratteristica principale è quella della riutilizzabilità e, di conseguenza, della capacità di potersi interfacciare con una molteplicità di contesti eterogenei.

Nell'ambito dell'architettura, l'aspetto della dinamicità trova forma nel comportamento attivo dei componenti progettuali, che in modo analogo agli oggetti di un programma responsivo, possono mutare in ragione del variare degli *input* esterni. Abbandonando l'idea di lavorare al progetto in termini globali, nel componente l'idea progettuale viene in un certo senso discretizzata in suoi elementi base con limitati gradi di complessità e capacità di azione



F03 | *Solar shelter* (Marco L'Erede e Sabrina Maestroni).

“locale” (pur con una specifica attenzione alla loro potenzialità di fabbricazione), che in quanto tasselli elementari rimandano alla dimensione “globale” del modello algoritmico generale, per disegnare configurazioni di insieme complesse e mutevoli.

Diversamente, quindi, da approcci che ricercano la varietà nella composizione di una diversità di singoli pezzi “rigidi”, nell’approccio progettuale per componenti la diversità trova forma nella capacità di azione di una pluralità di oggetti “dinamici” tra loro simili (fig. 1).

Fisicità dei modelli responsivi

Confrontarsi, e scontrarsi, con gli aspetti fisici della costruzione di un prototipo, è un passaggio obbligato dei modelli responsivi. Ciò attiene, in primo luogo, alla capacità del prototipo stesso di comunicare simulando un comportamento dinamico dei suoi elementi e differenziandosi così dal modello tradizionale,

dove l'attenzione è principalmente rivolta alla descrizione dell'architettura e dei suoi elementi costitutivi.

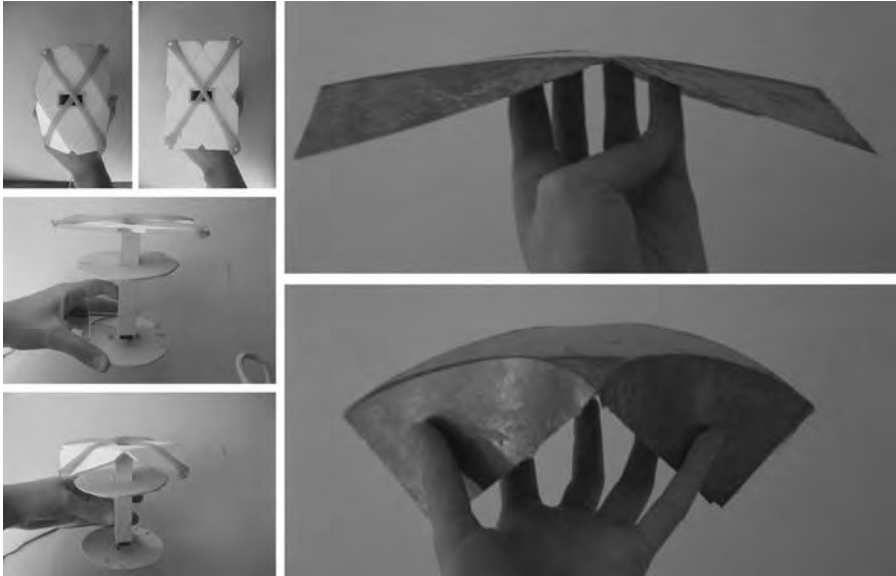
Il prototipo, in sostanza, è da leggersi come l'immagine analogica del modello digitale, in primo luogo nei suoi elementi strutturali e di comportamento dinamico, secondariamente nella forma di uno schema base che riassume i caratteri fisici più significativi della sua organizzazione formale, ed infine quale tassello fisico che accompagna la progettazione e lo studio del modello algoritmico. Il suo sviluppo, anche in ragione degli strumenti e dei materiali disponibili per la sua costruzione che ne caratterizzano a volte una generale "rozzezza" delle forme, sarà rivolto quindi alla sperimentazione e validazione di un'idea, piuttosto che alla produzione dell'oggetto stesso.

Nella costruzione del prototipo responsivo entrano in gioco aspetti del progetto architettonico che normalmente non trovano riscontro né nel modello analogico, né in quello digitale, come gli attriti, l'elettronica e la sua alimentazione, principalmente, ma anche il peso dei vari materiali, le loro caratteristiche fisiche e meccaniche, gli ingranaggi e le connessioni, il movimento e il ciclo dei motori, ecc. È quindi importante aprire il progetto a strumenti e competenze esterni al mondo dell'architettura e nello specifico al mondo della costruzione di sistemi e componenti interattivi propri del *physical computing*.

Lavorare sull'*output* di un prototipo fisico di studio, permette infatti una migliore comprensione delle potenzialità del progetto digitale e la possibilità concreta dello stesso di trovare forma di fattibilità. Ciò richiede proprio in fase di sviluppo progettuale di scontrarsi con aspetti non peculiari al mondo dell'architettura, per evitare che idee e progetti spesso promettenti sul piano concettuale e della loro elaborazione digitale, vengano significativamente semplificati per ragioni di coerenza a soluzioni tecniche e ad un apparato figurativo guidato da modelli e componenti progettuati standardizzati nei modi della produzione corrente.

Nello specifico della dotazione di un prototipo di studio di un componente progettuale responsivo, capace di interagire non solo in modo dinamico ma anche bidirezionale con l'ambiente, oltre all'*hardware* e al *software* di base della piattaforma di prototipazione, troveranno spazio una varietà di sensori per la ricezione di stimoli esterni (foto e termo resistori, sensori di prossimità, *buzzer*, potenziometri ...), accanto a degli attuatori per il controllo dinamico delle sue azioni (servomotori, luci LED, *buzzer* ...).

Incorporando delle istruzioni e una certa dose di elettronica, i componenti progettuati in forma di prototipo, si presentano quindi come degli oggetti "intelligenti", anche se con un grado



F04 | *Environmental screen* (Beatrice Buffa).

di intelligenza limitato alla capacità di reagire a degli stimoli per produrre un comportamento atteso. Responsività e reattività sono in tal senso sinonimi di una stessa logica algoritmica: sono oggetti, cioè, che non hanno una capacità autonoma di organizzarsi, come avviene nel caso dei più complessi sistemi interattivi, ma è il progettista-programmatore che nella fase della loro costruzione, ed in ragione a specifiche scelte e vincoli di natura progettuale, ne decide la forma ed il grado della loro organizzazione.

Per la natura dinamica e responsiva del componente di ricevere stimoli e sviluppare azioni in modo ricorrente, il progetto che trova forma nell'articolazione spaziale di tali oggetti, non spezza più in fasi distinte la progettazione stessa, ma nella condivisione di un nuovo linguaggio comune (quello della programmazione e del pensiero digitale), genera al contrario un flusso continuo di informazioni che interfacciano, per una ritrovata unità autografica, il momento dell'ideazione a quello dell'elaborazione del progetto, nella relazione continua tra le dimensioni analogica – digitale – analogica.

Esperienze

Andare oltre il disegno per trovare nel modello di studio lo strumento di costruzione e comunicazione del progetto secondo

approcci autografici, ovvero approcci di un “progettare-costruendo” di stampo artigiano, che esclude la mera riproduzione di una forma pre-data e rompe una catena di gerarchia di valore lineare dal pensare al fare, è stato l’oggetto di una recente ricerca didattica sul tema delle morfologie responsive presso il Dipartimento di Design del Politecnico di Milano¹.

Le esperienze di ricerca progettuale, nell’interazione tra gli aspetti della modellazione algoritmica e quelli del *physical computing*, hanno portato alla costruzione di prototipi responsivi quali risultati di un percorso algoritmico inquadrato nella relazione: dimensione fisica di dati in ingresso – elaborazione algoritmica digitale – restituzione fisica del risultato progettuale, e quindi del tipo analogico – digitale – analogico.

L’adozione di modelli parametrici non costituisce di per sé tale ciclo del percorso progettuale e la scelta di riversare quindi il risultato del progetto principalmente nella forma del prototipo, è stato uno specifico obiettivo di ricerca. Si è fatto quindi uso della piattaforma di prototipazione rapida Arduino sia nella fase iniziale, come una sorta di “sensore” capace di catturare degli *input* esterni, che in quella finale dell’*output* dei prototipi, dove ha permesso di alimentare e muovere una serie di attuatori base (led e motori servo) per la simulazione del comportamento delle azioni “responsive” elaborate nel modello digitale.

Il confronto con la fisicità dei modelli e la sperimentazione che ne è derivata in termini di dotazioni tecniche ed elettroniche necessarie al funzionamento dei modelli stessi, ha determinato un pacchetto di vincoli progettuali, che accanto ai parametri di ingresso ha guidato la revisione di molte soluzioni elaborate nello studio del modello digitale, per una loro concreta operatività funzionale.

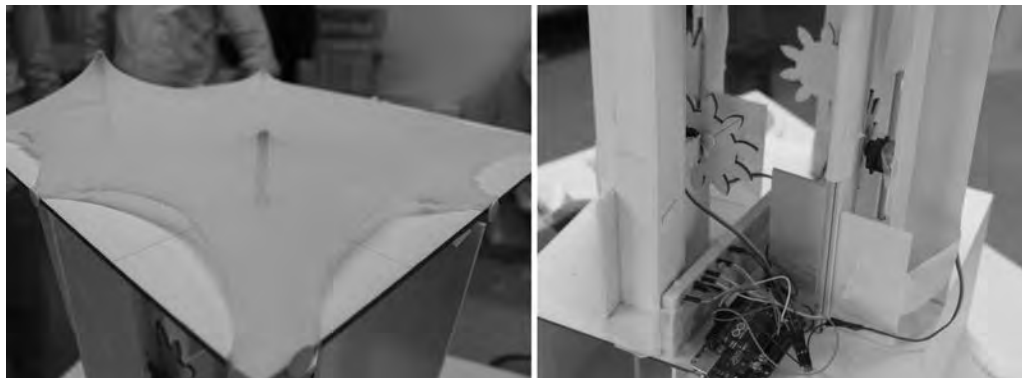
Tutti i prototipi sono stati sviluppati con una specifica attenzione al contenimento dei costi, giustificato dall’essere modelli di studio, e comportando il più delle volte il riuso di pezzi e materiali di scarto. Ciò ha determinato, inoltre, una certa “precarietà” in termini di durata degli stessi, limitata al tempo utile del confronto sul modello algoritmico dell’idea iniziale (figg. 2 – 6).

Dynamic street

L’idea di legare la generazione dello spazio alle persone che in essa

.....

1. Responsive Morphologies. Arduino e Grasshopper nel progetto di morfologie complesse per l’architettura e il design. Attilio Nebuloni, Max Romero, Giorgio Vignati, Andrea Rossi e Matteo Taramelli. Sviluppo di modelli dinamici responsivi. Interazione tra le piattaforme di *physical computing* Arduino, modellazione algoritmica Grasshopper, interfaccia analogico-digitale Firefly.



F05 | *Unexpected landscape* (Andrea Giovenzana e Lorenzo Serra).

vi abitano è alla base del concept di questo progetto. Ne deriva una copertura che “segue” le persone, accompagnandole con il movimento nello spazio. Nel modello ciò è reso possibile da un sistema di sensori e attuatori montati sugli elementi primari della copertura stessa. Lo spazio di studio è una generica strada pedonale, sulla quale si muovono gli elementi di una copertura dinamica (simulati dalle lamelle), che assumono una posizione aperta, quando lo spazio non è abitato, o chiusa per generare un ambiente coperto al passaggio delle persone. La forma semplice degli elementi base della struttura è a supporto di una idea progettuale in veste di programma, più che di forma definita.

Solar shelter

In questo secondo esempio, la copertura del progetto si caratterizza per pannelli capaci di reagire sia ad agenti ambientali esterni (fattori climatici) che a stimoli relazionali interni (presenza di persone). In merito al primo aspetto, i pannelli sono progettati per ruotare attorno al loro asse centrale per seguire l’andamento del Sole e così proteggere lo spazio sottostante dai raggi solari diretti. Nelle ore notturne, o in caso di precipitazioni, i pannelli chiudono la superficie, garantendo protezione allo spazio sottostante. A superficie chiusa, i fruitori possono ricevere luce artificiale grazie alla presenza di un sistema dinamico di illuminazione che reagisce alla presenza delle persone ed è informato da sensori di movimento.

Environmental Screen

Questo progetto nasce come copertura responsiva per uno spazio sportivo all’aperto (parco, area giochi, campi e percorsi sportivi ...). I componenti che costituiscono la copertura devono quindi avere

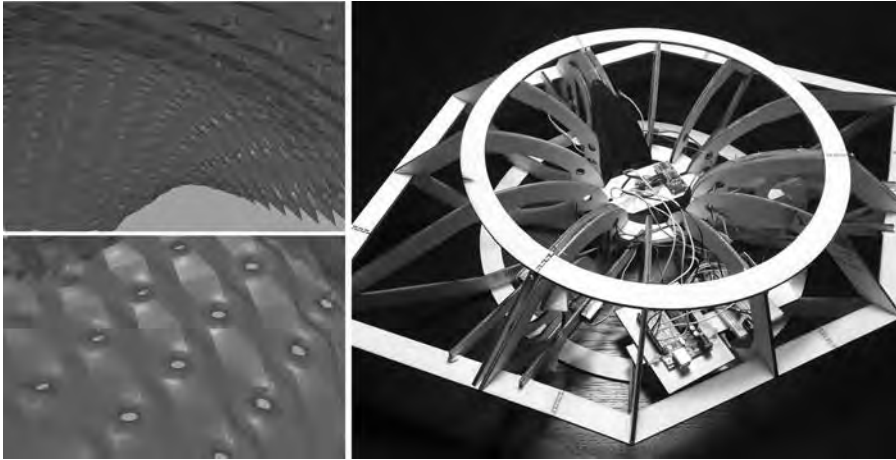
caratteristiche di adattabilità rispetto alle condizioni ambientali, per ombreggiamento e protezione dalla pioggia. L'idea progettuale porta quindi ad un componente capace di aprirsi e chiudersi (a livello geometrico tale disegno si appoggia lungo linee curve), andando a modificare la geometria nel suo complesso, contraendosi ed espandendosi, per garantire le diverse condizioni di filtro ambientale.

Unexpected landscape

Un ulteriore esempio è questo progetto che propone una reinterpretazione del concetto di bugnato per legarlo ad una modellazione del suolo, che nella sua continua capacità di adattarsi a varie condizioni ambientali, si attrezza spazialmente per ospitare diverse attività. Attivando in modo continuamente diverso ed inatteso una serie di meccanismi che richiamano l'idea di pistoni meccanici, il prototipo simula l'interazione tra lo spazio della superficie e l'ambiente esterno, determinata dalla quantità di persone, dal rumore e dalla pressione delle stesse sulla superficie. I pistoni creano un pattern geometrico e quando attivati generano una tensione sulla membrana deformabile della superficie.

Smart pavilion

Ultimo esempio questo progetto che sviluppa il c—omponente parametrico di una struttura leggera per un piccolo padiglione espositivo, capace di rispondere, nel suo disegno, a degli stimoli esterni di natura ambientale e sociale. All'esterno, l'incidenza dei raggi solari determina il grado di apertura e chiusura dei "petali" tessili della struttura, contribuendo nel contempo a creare sempre diverse configurazioni sulla geometria di insieme del padiglione (nel modello algoritmico). All'interno, un analogo comportamento della struttura che muove la superficie tessile e accende dei LED, è determinato dalla sua relazione con gli utenti, rilevati attraverso semplici sensori di prossimità.



F06 | *Smart pavilion* (Manuel Romeo).

Bibliografia

- [1] CACHE B. *Earth Moves: The Furnishing of Territories*. Cambridge: The MIT Press. 1955.
- [2] OOSTERHUIS K. *The Form of Change. Real-Time Architecture*. In *Convergence*. n. 7, 2001.
- [3] SAGGIO A. *Informazione Materia prima dell'architettura*. In *Op. Cit.*, Rivista quadrimestrale di selezione della critica d'arte contemporanea, n. 118. Napoli: Electa Napoli. 2003.
- [4] AVA FATAH S. & SEAN H. (2007), *Embedded, Embodied, Adaptive: Architecture + Computation*. London: Emergent Architecture Press. 2007.
- [5] BEESLEY P. E KAHN O. *Responsive Architecture/Performing Instruments*. In *Situated Technology*, n. 4, 2009.
- [6] CARPO M. *The alphabet and the algorithm*. Cambridge: The MIT Press. 2011.

Progettazione computazionale e fabbricazione robotica per l'architettura

Pierpaolo Ruttico

Politecnico di Milano - Dipartimento di Meccanica | INDEXLAB

Un'architettura "informale"

La progettazione computazionale unitamente alle tecnologie di produzione a controllo numerico stanno radicalmente ridefinendo il modo di progettare e costruire ad ogni scala di intervento, dal masterplan, all'edificio, all'oggetto. Ogni elemento dell'architettura appartiene ad un sistema di informazione e interazione capace di generare ordini strutturali complessi. Grazie all'importante ruolo che giocano l'informatica e la matematica nel rendere possibile la generazione di sistemi logici-organizzativi competitivi rispetto a quelli dell'architettura moderna, si delinea un nuovo paradigma, interessante espressione di un linguaggio architettonico il cui codice generativo è rappresentato da algoritmi, scripts e "parametri".

Avendo a disposizione nuove geometrie e nuovi strumenti per governarle è infatti possibile facilitare il processo creativo. Il concetto di "linea" scompare, le colonne si biforcano, curvano e diventano travi, i solai piegano e diventano muri e coperture. Sperimentiamo nuovi tipi di concezione spaziale nei quali esterno e interno, cielo e terra, concavo e convesso, sono il riflesso di un unico spazio fluido e indefinibile. Grazie alle tecnologie digitali e alle macchine a controllo numerico possiamo fabbricare e assemblare forme sempre più complesse e generare architetture straordinariamente espressive.

Il sistema progettazione-fabbricazione cambia con l'introduzione del concetto di variazione e differenziazione; si avverte il passaggio da un tipo di produzione standardizzata ad una produzione sempre di massa, ma personalizzata, differenziata in elementi potenzialmente unici (figg. 1-2).

Le logiche compositive, di aggregazione spaziale e di ottimizzazione strutturale-energetica concorrono a definire un unico sistema “multi-parametrico” basato sulla “performance”. Gli elementi dell’architettura non tendono più ad ottimizzare uno specifico scenario, ma diventano parte del “tutto”, dove il tutto è più della somma delle singole parti. E’ così che l’involucro si presenta sempre più come un sistema ibrido, dove la variazione morfologica tende a rappresentare l’ambiguità e il movimento. Poiché non c’è gerarchia, ma soltanto interdipendenza tra gli elementi, si genera un nuovo equilibrio tra l’astratto e il materiale. Si aprono nuove possibilità e nuove sfide per un’architettura che diventa “informale”.

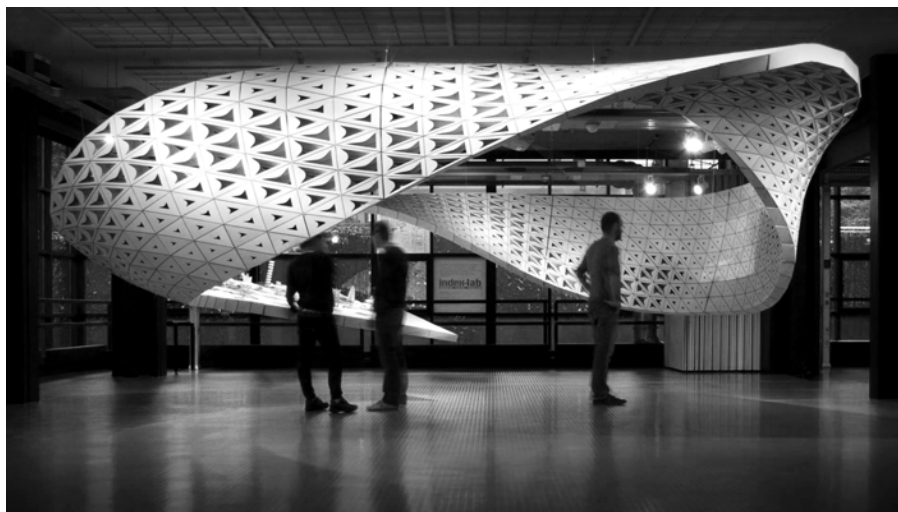
Progettare e realizzare ordini strutturali complessi implica che ingegneri e architetti adottino un nuovo metodo di lavoro, aperto a nuovi sistemi di organizzazione, dove i confini tra le discipline svaniscono e le competenze si trasmettono quasi per osmosi. Capita che gli ingegneri diventino artisti e gli architetti programmatori, o viceversa.

Un tale processo, così integrato e altamente specializzato, apre nuove frontiere e stimolanti sfide. Perché ciò avvenga, nelle università di tutto il mondo i programmi dei corsi stanno cambiando; nelle school di ingegneria-architettura si insegnano progettazione computazionale e parametrica, fabbricazione digitale e robotica, tecnologia dei materiali innovativi e “intelligenti”, automazione, visual thinking e analisi formale. Nuove società di progettazione si strutturano formando unità interne di ricerca e sviluppo; in ambiente universitario nascono laboratori che si dedicano alla sperimentazione e forniscono consulenza ad aziende e gruppi di progettazione.

“Shaping”, “generating”... “finding form”.

Per quanto schematizzabile, l’approccio per progettare ordini strutturali complessi può tendere a due logiche contrapposte. La prima consiste nel ridurre al minimo il materiale utilizzato arrivando a generare la forma geometrica essenziale - generating form, la seconda consiste nel far emergere sia le condizioni minime perché le forze si distribuiscano correttamente, sia le condizioni perché si manifestino nuovi sistemi organizzativi, arrivando a dar “forma libera” - shaping form.

Nel primo caso l’uso del materiale è ottimizzato, ma ogni deviazione dal sistema è preclusa, basti pensare alle strutture geodetiche di Buckminster Fuller. Nel secondo caso si può arrivare ad architettura sovracodificata che gode dell’eccesso di materiale e di sovrastrutture.



F01 | INDEXLAB “Exhibition” 2010, Politecnico di Milano. Un sinuoso nastro che avvolge il visitatore. Il primo allestimento in Italia progettato con processi algoritmici e logiche parametriche. Un flusso di 1.250 moduli costantemente differenziati, 11.000 elementi di cartongesso tagliati con tecnologia laser a controllo numerico e assemblati meccanicamente (cm 6500 x 6500 x 250).

Tra questi due poli si posizionano le forme emergenti dell'architettura contemporanea. Negli ultimi dieci anni il mercato ha promosso ogni tipo di sperimentazione. Da approcci “top-down”, dove la forma è “a priori” e l'ottimizzazione strutturale non consente cambiamenti formali - l'architettura di Frank Gehry può essere un riferimento, a processi “bottom-up”, dove algoritmi evolutivi interpretano le condizioni al contorno e generano la forma che meglio si adatta alle date condizioni di carico - ad esempio le strutture “Flux” di Mutsuro Sasaki.

Tra i due estremi si può collocare il processo iterativo di “form-finding”, che, attraverso dei compromessi, lascia spazio sia al libero arbitrio sia all'ottimizzazione strutturale. Seguendo questo processo, la forma iniziale può essere concepita con approccio intuitivo e con l'aiuto di modelli fisici o di software di modellazione tridimensionale. Le combinazioni tra curve direttrici e generatrici (solitamente “NURBS” - Non Uniform Rational B-Splines), concepite come supporti liberi di muoversi nello spazio, danno luogo a forme geometriche complesse e strutture spaziali ad elevato grado di iperstaticità. Il modello digitale che si ottiene viene analizzato agli elementi finiti e, una volta individuate le criticità, lo si approssima



F02 | *INDEXLAB "Exhibition" 2010, Politecnico di Milano. Modelli in scala di oggetti, architetture e città stampati 3D (cm 20x20x20). La differenziazione continua, la variazione sistematica e adattiva e l'ottimizzazione del rapporto forma-struttura sono i principali temi indagati.*

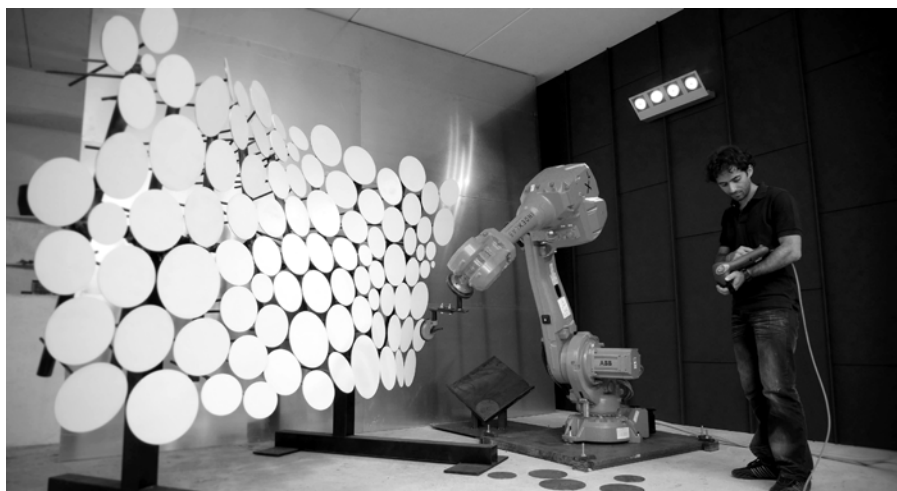
adattando le "curve guida" e le superfici a configurazioni ottimali, quindi si verifica nuovamente agli elementi finiti e così via. Il processo è reiterativo e continua fino al raggiungimento di una soluzione soddisfacente. Va detto che, ad oggi, l'analisi strutturale non-lineare risulta difficile da dominare, occorre molta potenza di calcolo. Inoltre, stabilire se il dominio sia reale o fittizio è una preoccupazione costante. Questo è uno dei motivi per cui molte strutture complesse sono sovradimensionate.

Discretizzazione di forme complesse

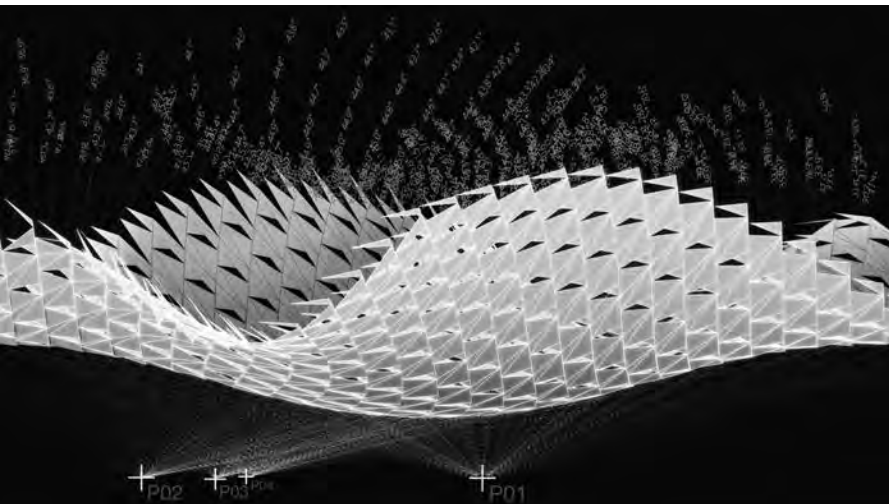
Predisporre la struttura alla sua produzione comporta una serie di valutazioni principalmente economiche ed estetiche, che si riflettono nella scelta del tipo di discretizzazione. In funzione dell'analisi geometrica si ipotizzano diverse tipologie di approssimazione delle superfici. Nel caso in cui le superfici del modello di partenza siano a curvatura semplice, il processo di generazione di sottostrutture e di pannellizzazione è relativamente semplice - ad esempio le superfici rigate sviluppabili possono essere distese su un piano senza stiramenti o lacerazioni. Nel caso in cui le superfici siano a doppia curvatura, il processo diventa complesso. Si può procedere alla realizzazione diretta tramite stampi, un processo che mantiene la



F03 | INDEXLAB "Circle Packing" 2013, Politecnico di Milano – Nieder. Prototipo di facciata progettato con processi di "form-finding" e realizzato con braccio robotico a sei gradi di libertà tramite "pick-and-place" e saldatura adattabile. La prima realizzazione al mondo di assemblaggio robotico di pannelli piani differenziati a fissaggio adattabile.



F04 | INDEXLAB "Circle Packing" 2013, Politecnico di Milano – Nieder. Prototipo di facciata progettato con processi algoritmici iterativi e logiche parametriche, realizzato con braccio robotico antropomorfo e generazione automatica delle traiettorie (cm 350 x 160 x 70).



F05 | INDEXLAB “Shivers” 2012, Politecnico di Milano – Nieder – EverElettronica. Prototipo di facciata unico nel suo genere, progettato con processi algoritmici e logiche parametriche, realizzato con tecnologie di taglio - piega a controllo numerico e dotato di sensori e attuatori per adattarsi all’ambiente.

fluidità delle superfici, ma che tuttavia è molto costoso e per questo si cerca di limitare; nell’industria navale, ad esempio, le formature a caldo si riducono al 20-25%. In alternativa le superfici si possono approssimare tramite suddivisione in elementi piani, come triangoli o figure poligonali planari, o ancora tramite “circle-packing” (figg. 3-4), che disegnano pattern sovracodificando l’immagine della superficie.

Un altro metodo prevede l’approssimazione con superfici rigate sviluppabili. In questo caso, per ottenere un effetto di fluidità, occorre gestire la densità della parametrizzazione in funzione della curvatura. Lungo i bordi delle superfici adiacenti si presentano infatti discontinuità di tangenza che è importante saper approssimare a valori costanti. Aumentando ad esempio il numero di superfici rigate all’aumentare della curvatura gaussiana si riduce l’effetto di segmentazione; uno dei vantaggi è quello di poter utilizzare le generatrici come luogo per posizionare struttura, giunti, elementi di connessione.



F06-07 | INDEXLAB "Shivers" 2012, Politecnico di Milano – Nieder – EverElettronica. Prototipo di facciata unico nel suo genere, progettato con processi algoritmici e logiche parametriche, realizzato con tecnologie di taglio - piega a controllo numerico e dotato di sensori e attuatori per adattarsi all'ambiente.

Progettazione parametrica, fabbricazione digitale e assemblaggio robotico

Il successo di una struttura a geometria complessa non può prescindere da questioni che vengono da lontano, come le risposte all'accumulo e smaltimento di acqua, neve e ghiaccio, agli effetti delle disuniformi dilatazioni termiche o agli irregolari cedimenti delle fondazioni. Ogni materiale e sistema costruttivo prevede dei comportamenti e ha dunque delle limitazioni - ad esempio i raggi minimi di curvatura meccanica, i carichi massimi consentiti, le luci di impiego, le dilatazioni termiche, la tenuta idraulica o l'elasticità del sistema. E' dunque necessario progettare gli elementi di una struttura con la consapevolezza di poter adattare dimensioni e tolleranze al variare dei dati in ingresso. Grazie ai software parametrici è possibile controllare la geometria degli elementi in modo flessibile e dinamico. Ogni parametro, se modificato, influenza automaticamente la variazione di tutto il sistema. La progettazione parametrica non riguarda soltanto l'oggetto in sé, ma coinvolge lo spazio entro cui gli oggetti sono contenuti e "informati".

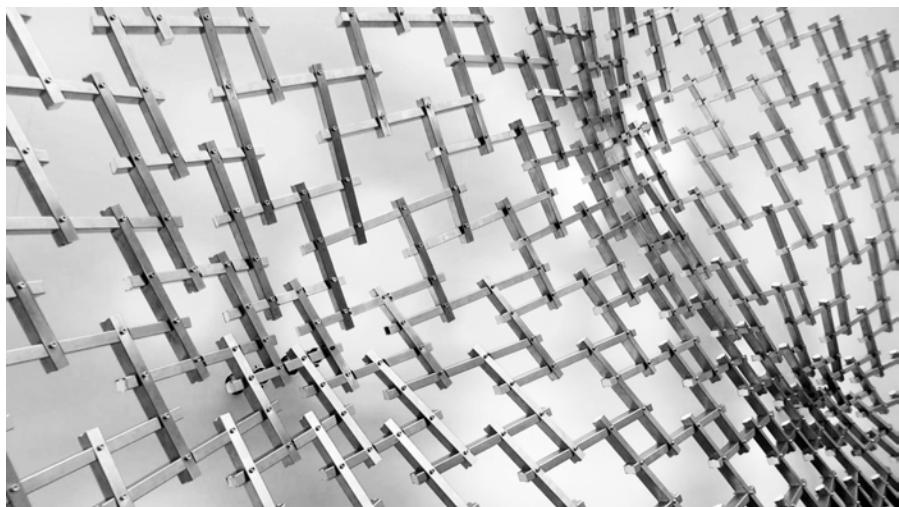
Grazie alle macchine a controllo numerico la produzione di massa di elementi unici diventa un processo sempre più competitivo rispetto alla produzione seriale. Per l'assemblaggio invece, penso agli elementi di connessione, ci vorrà del tempo perché il processo possa essere industrializzato. Una interessante linea di ricerca è lo studio di dime e stampi dinamici che variano le configurazioni a controllo numerico. Un altro modo per impiegare la tecnologia emergente è utilizzare i robot come stampanti tridimensionali - questo potrebbe cambiare radicalmente il modo di concepire e

realizzare gli edifici. Sebbene l'industria delle costruzioni edili sia conservativa e complessa, le aziende più innovative cominciano a credere nelle potenzialità dei robot e investono in progetti di ricerca per l'ideazione di nuovi processi produttivi. Robot e umani hanno competenze complementari. La cooperazione tra uomo e macchina potrebbe portare alla reintroduzione del concetto di artigianalità, che è andato perduto con l'industrializzazione. Con il supporto dei robot gli operai non sarebbero più costretti ad eseguire lavori ripetitivi e pericolosi, ma potrebbero sfruttare intuito e capacità di rielaborazione per dar vita a nuovi processi costruttivi. (fig.1)

Esempi di realizzazioni

In questo capitolo proporrò due esempi di strutture complesse progettate e realizzate da INDEXLAB per aziende partner. La prima è una struttura di rivestimento in alluminio di tipo "responsive", progettata per essere realizzata con tecnologie di taglio e piega dei pannelli a controllo numerico e dotata di sensori - attuatori per adattarsi alle condizioni ambientali (figg. 5-6-7); la seconda è una struttura reciproca in acciaio inox progettata per essere realizzata con tecnologia di taglio robotico tubo-laser (figg. 8-9). Per prototipo di facciata di tipo "responsive" ci sono due aspetti di innovazione: il primo riguarda la messa a punto di questioni compositive e descrittive di geometrie complesse legate al tema della doppia curvatura. Il pattern generato si presenta come una superficie sfaccettata, riconducibile ad un insieme di triangoli, che con un gioco di sporgenze e rientranze generano effetti suggestivi di riflessione della luce. Gli elementi di facciata sono pannelli metallici unici e ottenuti mediante processi di taglio e piega a controllo numerico. Il secondo aspetto innovativo consiste nell'aver introdotto nel progetto la quarta dimensione – il tempo – dunque lo scenario dell'interattività. Il pattern diventa dinamico, trasformandosi grazie ai sistemi di attuazione e a speciali sensori che captano le condizioni ambientali e rilevano la posizione degli utenti.

I pannelli di facciata si aprono e si chiudono in funzione di molteplici variabili, quali il fattore di luce diurna, la spinta del vento, le temperature superficiali e media radiante, la rilevazione della presenza di persone, fattori legati all'isolamento termico e acustico, e così via (figg. 6-7). Possiamo immaginare un edificio che di giorno può essere aperto o chiuso per migliorare l'irraggiamento solare degli spazi interni, mentre la sera la facciata si modifica, ad esempio, all'avvicinarsi degli utenti, interpretando mediaticamente le attività interne all'edificio. Addirittura, se alcune persone volessero



F08 | INDEXLAB “Reciprocal Frame” 2013, Politecnico di Milano – BLM. Prototipo in acciaio inox (cm 400 x 200 x 60). La prima realizzazione al mondo di facciata reciproca in doppia curvatura per tecnologia di taglio robotizzato tubo-laser.

percepire la luce solare e altre no, la facciata sarebbe in grado di auto-programmarsi per rendere permeabili soltanto determinate zone.

La seconda struttura di esempio è un'interessante applicazione in Architettura della tecnologia di taglio-tubo-laser robotizzato (figg. 8-9). La struttura reciproca tridimensionale rappresenta un esempio di come l'impiego di tubi tagliati laser, opportunamente progettati e assemblati, possa configurare un nuovo sistema costruttivo per la realizzazione di facciate e coperture, la cui forma può variare nello spazio per approssimare superfici a doppia curvatura. La struttura non è solo un'affascinante provocazione di arte programmata, ma rappresenta un esempio di come l'impiego di elementi tubolari tagliati laser e fissati meccanicamente l'uno all'altro in modo reciproco, possa costituire un'alternativa competitiva rispetto ai tradizionali sistemi strutturali ad aste tubolari che convergono in nodi. Un nuovo campo di azione del taglio laser, che incontra un nuovo modo di progettare l'Architettura. (fig 5)

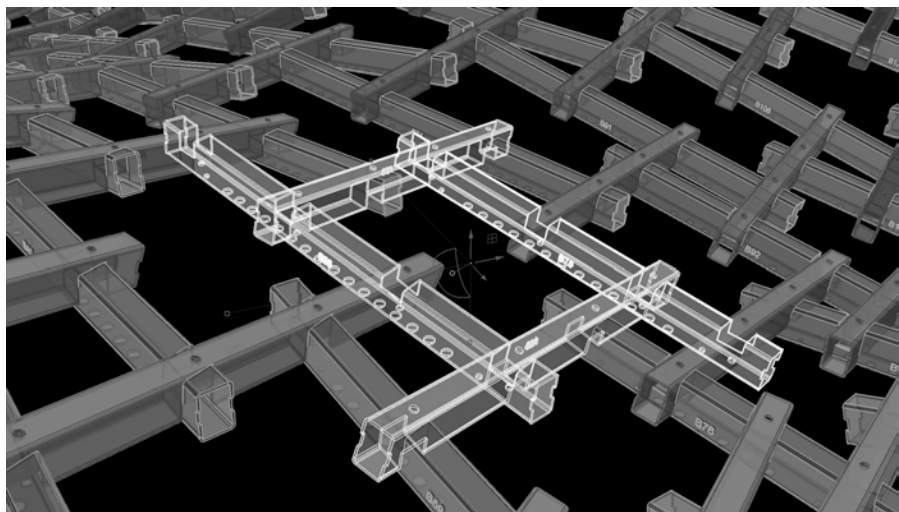
Il progetto di ricerca sviluppato da INDEXLAB apre scenari fino ad oggi inesplorati nel panorama delle strutture metalliche free-form. Il sistema strutturale prevede una maglia composta da aste intrecciate e bloccate meccanicamente l'una all'altra mediante incastri.

L'algoritmo che risolve la struttura reciproca è di tipo iterativo,

mentre l'ottimizzazione della geometria per la produzione segue un processo di progettazione parametrica. (fig. 6)

Il sub-sistema base consiste in quattro aste intrecciate in quattro punti nodali. Supponendo di esaminare il sub-sistema su maglia quadrata, potremmo così descriverlo: un estremo delle singole aste è connesso ad un'altezza variabile dell'asta perpendicolare. Chiamiamo il luogo di connessione "punto nodale". Le aste sono da considerarsi rigide e rettilinee, ma possono ruotare virtualmente nell'intorno dei punti nodali. Lo scostamento dal piano di una delle aste provoca un riposizionamento delle aste dell'intero sistema. Ridurre le eccentricità (distanza tra "estremo-asta x" ed "asta y") entro le tolleranze di fabbricazione richiede un processo iterativo, che porta all'equilibrio del sistema dopo un elevato numero di iterazioni. Il processo si può definire di form-finding, segue sia una logica Top-down (l'Architetto stabilisce una superficie a doppia curvatura sulla quale generare la struttura reciproca), sia una logica Bottom-up (l'algoritmo ottimizza la superficie di partenza per risolvere l'equilibrio strutturale del telaio).

Questo prototipo rappresenta uno straordinario esempio di mass customization. Ogni elemento strutturale, infatti, è unico e si differenzia dagli altri sulla base di precise regole geometriche definite da algoritmi generativi. La produzione è stata organizzata come segue: dopo una fase iniziale durante la quale sono state stabilite le tolleranze di fabbricazione e realizzati i primi mock-up, si è passati ad una fase di taglio dei diversi elementi tubolari in acciaio inox. Ciascuno elemento è stato marcato con codice alfanumerico, che identifica non solo la posizione del tubolare all'interno della struttura, ma anche l'orientamento. A questo proposito è importante sottolineare che la struttura esposta (che rappresenta in scala un prototipo di struttura per facciate o coperture di maggiori dimensioni) è stata ottenuta dall'assemblaggio di 350 elementi tubolari, ognuno con dimensioni diverse dagli altri. Per amplificare il distacco volumetrico della struttura dalla parete, sono state posizionate strisce di LED sul retro delle aste. Nello specifico, una delle due orditure di tubolari è stata microforata sul retro per permettere di includere e nascondere i led all'interno delle aste. L'effetto di variazione cromatica, inoltre, è interattivo e varia in funzione della distanza dell'osservatore dalla struttura. Per la realizzazione di questa struttura la tecnologia laser ha giocato un ruolo molto importante: quanto uscito dall'algoritmo sviluppato da INDEXLAB è stato immesso direttamente nel software di nesting delle macchine per taglio laser senza nessun intervento umano e da qui sono usciti i programmi di lavoro per produrre i componenti richiesti. Si deve considerare che non sarebbe stato economicamente fattibile



F09 | INDEXLAB “Reciprocal Frame” 2013, Politecnico di Milano – BLM. Prototipo di facciata progettato con processi algoritmici iterativi e logiche parametriche, realizzato con tecnologia di taglio robotizzato tubo-laser e dotato di sensori e led integrati per applicazioni interattive.

produrre questi elementi con tecniche di lavorazione tradizionali. La struttura reciproca realizzata rappresenta un esempio di innovazione dal punto di vista progettuale e realizzativo, un promettente sistema costruttivo che amplia gli scenari applicativi della tecnologia di taglio tubo laser per l'Architettura. (fig. 7)

Dal “problem solving” al “problem caring”

La possibilità di stabilire delle relazioni tra diversi sistemi logici - organizzativi contribuisce a definire il nuovo paradigma dell'architettura contemporanea. Ogni sistema logico, invece di preoccuparsi di ottimizzare uno specifico scenario, informa gli altri sistemi e si orienta ad una ottimizzazione multi-parametrica del “tutto”. Le logiche di aggregazione spaziale e di ottimizzazione strutturale ed energetica concorrono a definire un unico sistema basato sulla “performance”. Detto ciò rimane aperta la questione sul libero arbitrio. Da Alvar Aalto a Frank Gehry l'intento è stato quello di usare il movimento come alternativa all'ornamento. La sfida forse più difficile è quella di far convergere struttura e architettura in un unico “movimento”, mantenendo tuttavia la dimensione percettiva della spontaneità e dell'immediatezza.

INDEXLAB

Indexlab è un laboratorio di ricerca e sviluppo che integra i migliori talenti nel campo del design, dell'architettura e dell'ingegneria per progettare nuovi sistemi costruttivi e sperimentare innovativi processi di fabbricazione digitale e robotica. Fondatore e Design Principal: Pierpaolo Ruttico. Collaboratori e team leader di progetto: Andrea Locatelli – Pasquale Lorusso – Stefano Arrighi – Andrea Rossi – Carlo Beltracchi. www.indexlab.it

Bibliografia

- [1] BALMOND C., *Informal*, Prestel Verlag, Munich, 2002.
- [2] FRAZER J., THEMES VII. *An Evolutionary Architecture*. Architectural Association, London, 1995.
- [4] GRAMAZIO F., KOHLER M. *Digital Materiality in Architecture*. Baden: Lars Müller Publishers. 2008.
- [5] IWAMOTO L. *Digital Fabrication: Architectural and Material Techniques*. New York: Princeton Architectural Press. 2009.
- [6] LYNN G., *Animate form*. Princeton Architectural Press, New York. 1998.
- [7] MENEGUZZO M., MORTEO E., SAIBENE A. *Programmare l'arte. Olivetti e le neoavanguardie cinetiche*. Catalogo della mostra. Johan & Levi editore. 2012.
- [8] PICON A. *Digital culture in architecture: an introduction for the design professions*, Birkhauser, Basel. 2010.
- [9] POPOVIC LARSEN O. *Reciprocal Frame Architecture*, Architectural Press Elsevier, Oxford. 2008.
- [10] POTTMANN H., ASPERL A., HOFER M., KILLIAN A. *Architectural Geometry*, Bentley Institute Press, Exton, Pennsylvania. 2007.
- [11] REISER J., UMEMOTO N. *Atlas of Novel Tectonics*, Princeton Architectural Press, New York. 2006.
- [12] WACHSMANN K. *Wendepunkt im Bauen - Una svolta nelle costruzioni*, Mondadori Milano. 1956.

PARTE II

ESPLORAZIONI

Roma, aprile 2014

Contorni apparenti | Algoritmi digitali per la movimentazione delle superfici articolate

Michele Calvano

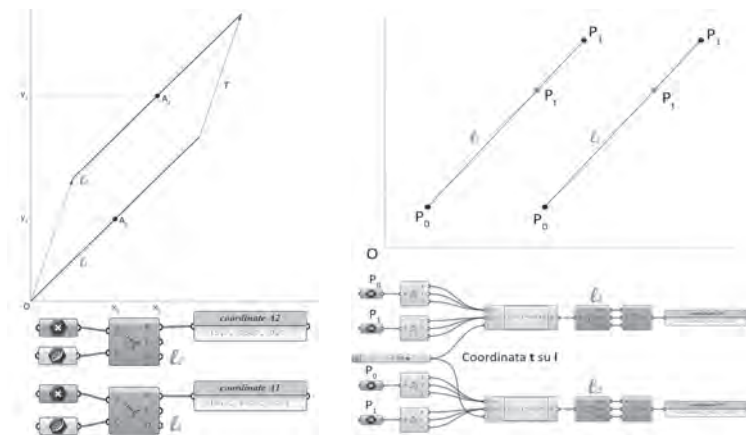
Sapienza Università di Roma

Dipartimento di Storia, Rappresentazione e Restauro dell'Architettura

Per superfici articolate si intende quella categoria di superfici che nascono nel piano ed opportunamente piegate costruiranno dei pattern formati da facce tutte uguali o uguali a gruppi. Pensando di sostituire alle pieghe le cerniere introduciamo nel sistema il movimento, dando vita ad articolazioni che permettono a questa nuova entità di assumere diverse conformazioni nello spazio.

Le ordinarie procedure di tassellazione delle superfici complesse partono dalla forma ideata per arrivare ad una tassellazione più o meno fitta di elementi piani tutti diversi tra loro. Il processo di fabbricazione di queste superfici, pure se tecnologicamente e tecnicamente molto preciso, non si discosta molto da un processo di natura artigianale e la grande massa di elementi tutti diversi inevitabilmente propongono realizzazioni economiche molto dispendiose. L'aspetto originale proposto delle superfici articolate è disegnare una tassellazione regolare nel piano, creando facce a quattro o tre lati che ruotando sulle cerniere di contatto si articolano nello spazio creando forme complesse dal profilo mutevole.

La conformazione totale è determinata dal movimento dei singoli tasselli intorno alla piega; quest'ultima non è altro che una porzione di retta intorno alla quale avvengono operazioni di rotazione delle facce a lei connessa. Operazione che trova una semplice risoluzione in condizioni di stasi, ma dobbiamo immaginare che i punti appartenenti alla cerniera non hanno coordi-



F01 | Coordinate “estrinseche” di un punto. Per coordinate estrinseche si intendono le coordinate x, y, z del punto A rispetto al sistema di riferimento assoluto dello spazio digitale.

F02 | Coordinate “intrinseche” di un punto. Per coordinate intrinseche si intende il valore numerico del parametro t che identifica la posizione del punto sulla curva o i parametri u e v che identificano la posizione del punto su una superficie.

nate fisse ma variano durante il movimento delle articolazioni, da qui la necessità di approfondire alcuni temi della rappresentazione digitale in grado di risolvere creativamente le diverse condizioni.

Ispirazioni matematiche

I software di rappresentazione digitale, ed in primo luogo quelli di rappresentazione matematica, propongono la possibilità di risolvere problemi di natura geometrica direttamente all’interno dello spazio 3D simulato. Il prof. R. Migliari spiega come oggi sia possibile risolvere in maniera diretta importanti problemi di geometria (es. problema di Apollonio) legati alle relazioni tra primitive solide nello spazio. Dimostrando come la rappresentazione digitale sia in grado di applicare i principi della Geometria Proiettiva, superando la rappresentazione sul piano per risolvere tematiche proprie delle forme nello spazio.

I due metodi, la rappresentazione matematica e la rappresentazione numerica, possono esprimere, se profondamente indagati, valori aggiunti che vanno oltre la sola rappresentazione diretta di forme

nello spazio. Questo può avvenire solo se riusciamo ad entrare nel merito dei nuovi metodi recependo la natura delle informazioni che da questi derivano.

Per fare un esempio:

Rappresentiamo una curva di primo grado con un software CAD (I_1 in fig. 1), sappiamo tutti che la linea retta disegnata è definita luogo geometrico in cui le coordinate dei punti soddisfano regole matematiche chiare. Ricordiamo infatti che nel piano cartesiano, ogni punto si compone di due coordinate (x,y) ; una retta può essere scritta in forma implicita come l'insieme dei punti le cui coordinate (x,y) soddisfano l'equazione lineare: $ax + by + c = 0$

Poniamo un punto al centro della linea I_1 disegnata, la sua posizione è legata alla coordinata x_1 e y_1 , che identificano il punto A_1 nel piano coordinato XY . Applichiamo uno spostamento T alla linea e al punto creando una copia I_2 della prima ed A_2 del secondo. Il nuovo punto, è ancora al centro della linea ma assumerà una nuova coppia di coordinate x_2 e y_2 (I_2 in fig.01). Ci rendiamo conto che le coordinate non stabiliscono alcun rapporto tra la curva ed il punto, ne sanciscono esclusivamente una variazione di posizione determinata dalla trasformazione T di un qualunque punto presente nel piano cartesiano. Il punto A , pur appartenendo alla curva I determina con essa un rapporto "estrinseco", esclusivamente legato alla posizione rispetto all'origine O della terna tri-ortogonale.

La maggior parte dei sistemi CAD rappresentano le curve attraverso espressioni polinomiali di grado e parametri variabili; i punti sulla linea retta disegnata in fig. 02 si esprimono attraverso la seguente funzione di Bezier:

$$P(t) = (1 - t)P_0 + tP_1, t \in [0,1]$$

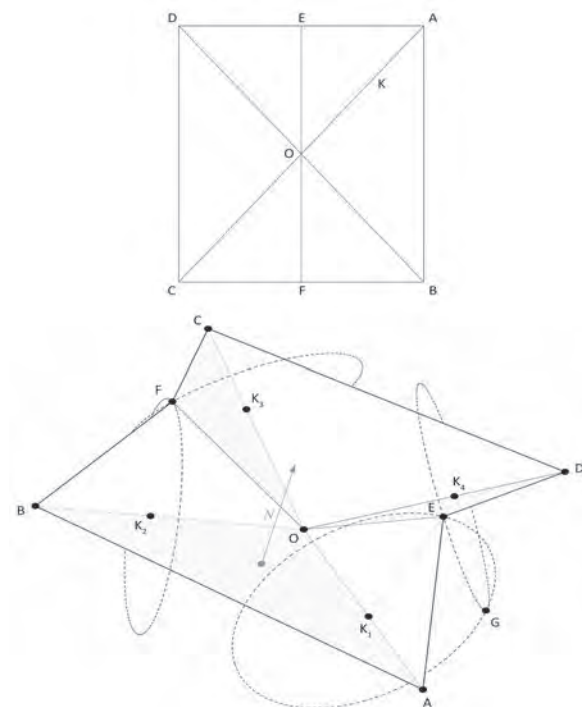
La funzione scritta presenta un'unica variabile t interna al dominio di esistenza della linea. Con $t = 0$ il punto P_t coincide con il punto iniziale P_0 , con $t = 1$ il punto coincide con il punto finale P_1 . Applicando nuovamente uno spostamento alla linea e al punto in esame notiamo che la variabile t , rimanendo pari al valore 0,7 identificherà un punto specifico della linea (fig. 2). In questo modo il punto stabilisce un rapporto "intrinseco" con la curva.

La variabile t è un valore legato al percorso dato, che nel caso della curva è un percorso monodimensionale, per cui ad una sola variabile; se avessimo come entità d'appoggio una superficie, il percorso sarebbe guidato da due variabili intrinseche (composizione del movimento in u e in v). La conoscenza di questi spazi parametrici intrinsechi alle entità trattate permette di risolvere i problemi inerenti alle cerniere delle superfici articolate, in qualunque posizione esse si trovino rispetto alla terna triortogonale.

Punti linee superficiali

Osserviamo il modulo in figura, composto da pieghe monte e pieghe valle che lo riducono a due tipi di tasselli triangolari. Pensiamo ad un primo movimento semplice ruotando simmetricamente i triangoli grandi intorno ad una cerniera che passa per il punto **O** e parallela all'asse **Y** della terna globale. In relazione alle indicazioni delle pieghe i triangoli minori ruoteranno intorno la cerniera **OA**, mobile nello spazio. Si presenta, se pur in una condizione anomala, un problema classico di geometria descrittiva, il ribaltamento di un piano intorno ad una linea, la cerniera valle (**OA** in fig. 3). La risoluzione va quindi cercata nel percorso che compie il punto **E** durante il suo movimento intorno la cerniera **OA**, percorso che avviene all'interno di un piano perpendicolare alla cerniera e che interseca il piano in questione nella retta di massima pendenza passante per **E**. Proiettando il punto in **K** sulla cerniera identifichiamo la linea in questione, raggio del cerchio di ribaltamento che rappresenta il percorso del punto **E** intorno **OA**. Il punto proiettato **K** si identifica attraverso tre coordinate estrinseche (**x,y,z**) ed una coordinata intrinseca (**t**); ricordando le nozioni poc'anzi specificate, ci rendiamo conto che il parametro **t** permetterà di individuare la proiezione dei vertici opposti a tutte le cerniere valle dei triangoli piccoli (**K₁, K₂... K_n**), cerniere che varieranno la posizione in relazione alla rotazione dei triangoli grandi. Per tutti i punti **K_n** sulle cerniere facciamo passare un piano nel quale disegniamo un cerchio di raggio pari a **EK**, distanza di proiezione. Notiamo nella fig. 03 che i cerchi si affacciano due a due, l'intersezione tra i cerchi speculari è il punto che soddisfa la condizione di medesima distanza tra le due cerniere, rispettivamente il punto **E** ed **F** nello spazio. Per ogni coppia di cerchi le intersezioni sono due (il punto **E** ed il punto **G** in figura), ma una sola genererà la piega monte, è quindi necessario procedere all'ideazione di un algoritmo di selezione con cui individuare la soluzione corretta. Il sistema estrinseco proporrebbe il confronto tra le coordinate **z** dei punti intersezione, ma essendo l'intero modulo un sistema in movimento, la soluzione sarebbe invalidata in alcune condizioni.

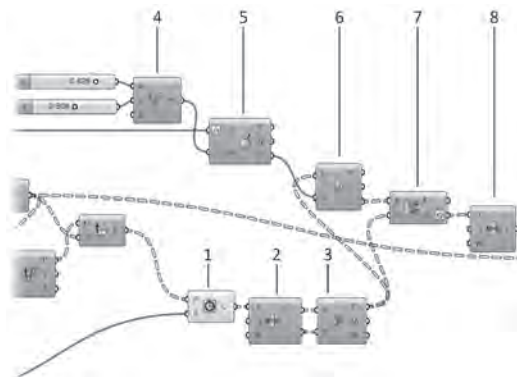
Costruiamo allora un nuovo sistema di riferimento il cui piano coordinato **XY** apparirà ad una delle facce grandi del modulo (fig. 04), nell'esempio alla faccia **ABO** in quota, proponendo l'asse **Z** del nuovo sistema parallelo alla normale **N** della faccia; il piano delle coordinate così collocato, di dimensioni infinite, divide lo spazio in una porzione superiore al piano, positiva, ed inferiore al piano, negativa. Il confine tra spazio positivo è negativo varierà in relazione al movimento della faccia triangolare, identificando una condizio-



F03 | *Sopra - Sviluppo piano del modulo base dove EO ed FO sono le pieghe monte. Sotto - Rappresentazione schematica del movimento del modulo in cui si evidenziano le geometrie che garantiscono la validità del movimento.*

ne sempre vera pur cambiando la posizione spaziale del modulo. Rispetto al nuovo sistema tri-ortogonale valuteremo la variabile z dei due punti di intersezione dei cerchi nello spazio, selezionando quella con il valore positivo. Le quattro cerniere libere estruse verso i punti di intersezione selezionati, garantiranno la dimensione e la correttezza del movimento delle facce del modulo.

Nell'esempio presentato è chiaro che la movimentazione nelle diverse condizioni è possibile solo svincolando la definizione risolutiva dalle condizioni estrinseche al modulo, mentre il risultato sarà migliore quanto più possibile legheremo l'algoritmo a qualità intrinseche ad essa. Inoltre il controllo della forma è interamente legato alla correttezza delle condizioni geometriche messe a sistema: mantenendo invariata la lunghezza della cerniera, ed il percorso del punto rispetto ad essa, garantiamo la costanza della superficie movimentata.



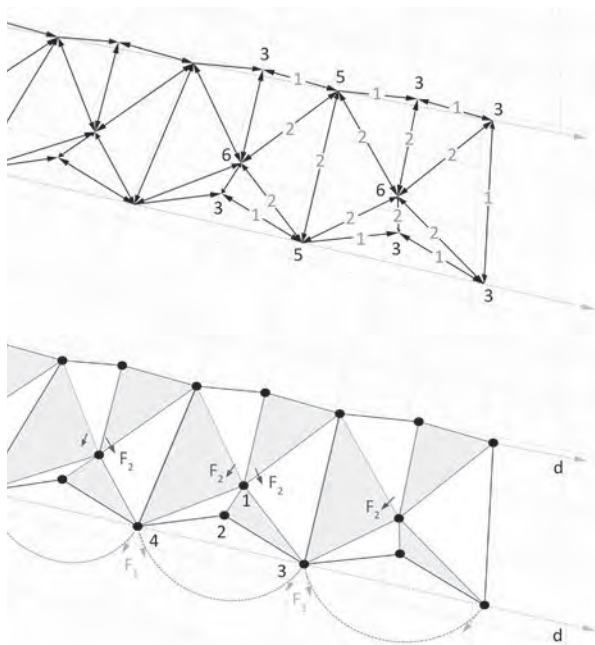
F04 | *Algoritmo di selezione del punto intersezione tra le traiettorie circolari in grado di generare la piega monte. 1) traiettorie circolari, 2) identificazione dei cerchi affacciati, 3) intersezione tra le curve, 4) coordinate parametriche u e v , punto di origine del piano tangente, 5) costruzione del piano di costruzione, nuovo sistema per il calcolo delle coordinate dei punti, 6) valutazione delle coordinate rispetto al nuovo sistema di riferimento, 7) e 8) scelta del punto intersezione che soddisfa la piega monte, 9) costruzione della faccia triangolare partendo dal bordo libero ed il punto trovato.*

La rigidità delle forme è quindi simulata tramite relazioni geometriche che propongono un approccio risolutivo esatto e applicabile a superfici contenute a causa dell'accurata descrizione computazionale che richiede la sua attuazione. La reiterazione della procedura permette di verificare i rapporti di movimento di ogni parte legandola al movimento delle altre. È evidente però che la gran massa di dati che tale procedura propone rende difficile non solo il controllo della definizione complessiva, ma anche l'analisi delle diverse conformazioni che la superficie può assumere ubbidendo a geometrie di supporto diverse.

Da qui la necessità di compiere un ulteriore passo nella ricerca che proponga algoritmi con cui gestire in maniera efficiente una maggiore massa di dati, contemplando anche ambiti fisici.

Forze e tensioni

Un nuovo aspetto del lavoro considera la possibilità di simulare forze e tensioni utili a garantire la movimentazione e la rigidità delle facce. La risoluzione del sistema in movimento è affidato alla sintesi del problema in due temi principali: l'identificazione della rigidità dei materiali, della continuità tra le parti ed il sistema di forze e vincoli applicati.



F05 | *Sopra – Valenza di vertici e lati che definiscono i rapporti tra le parti della mesh sintesi numerica della superficie articolata. Sotto – Schema delle forze e dei vincoli che caratterizzano e contestualizzano la superficie piegata e la muovono correttamente.*

Riprendiamo il modello di piega precedentemente illustrato mostrando il nuovo approccio risolutivo. In questo caso il movimento della forma è frutto di particolari forze applicate capaci di simulare nello spazio digitale le reali azioni che si effettuerebbero per il movimento del prototipo fisico. Le forze non possono essere applicate sulla continuità della forma, i processori dei computer non sono in grado di calcolare la reazione della superficie ad un numero infinito di forze. Il modulo scelto deve essere discretizzato in una mesh regolare, per la quale i tasselli rispecchiano perfettamente le facce generate dalle pieghe (fig. 5).

La superficie, sottoposta alle giuste sollecitazioni reagisce movimentando le facce che devono rimanere di uguale dimensione e legate le une con le altre sempre seguendo gli stessi vincoli geometrici durante il movimento. Per questo motivo, dalla mesh generata dobbiamo rilevare la topologia riducendo la forma ad un sistema ad aste (fig. 5): la maglia triangolare (o in altri casi quadrilatera) delle facce. Negli ambiti fisici quasi sempre la riduzione ad un mo-

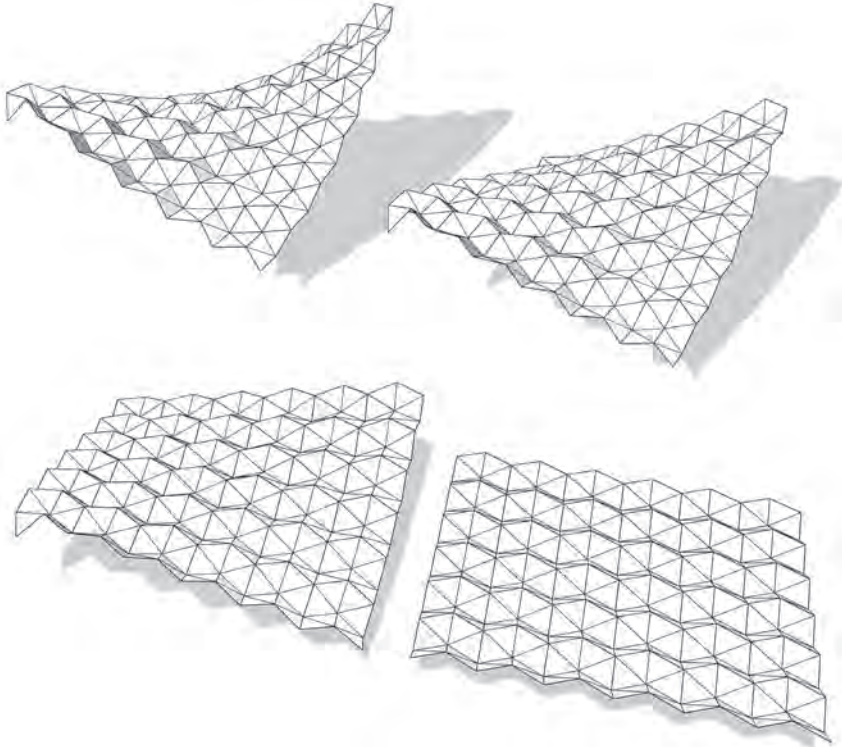
dello numerico permette di affrontare le simulazioni fisiche, infatti la mesh nelle sue liste numeriche, grazie alla valenza dei vertici e dei lati delle facce, riesce a descrivere in modo semplice gli aspetti topologici delle strutture rappresentate.

Su questo schema geometrico è possibile individuare un sistema di forze enumerabile ed applicabile a liste scelte di vertici, in modo da ottenere la corretta movimentazione delle parti. Nel modello scelto decidiamo di attuare le coppie di triangoli piccoli avvicinandoli; avendo informato il sistema della consistenza, i nodi e le cerniere della superficie otterremo il movimento delle articolazioni. Analizziamo le facce scelte individuando i vertici che delimitano la piega (1 e 2) ed i vertici liberi da avvicinare (3 e 4), i primi due vertici delimitano l'asse di torsione, mentre gli altri due i punti di applicazione delle forze utili alla formazione della coppia torcente (F_1 rosse in fig. 5). Ovviamente le forze vengono applicate puntualmente creando un sistema discreto di azioni su tutte le coppie di facce piccole. Il cinematismo che si crea operando sui vertici delle facce minori si distribuisce sull'intero modello che si muove in maniera disordinata. L'organizzazione del movimento avviene grazie alla simulazione di vincoli che daranno una direzione allo spiegarsi della superficie. Pensiamo allora di simulare dei carrelli posti ai vertici che daranno la possibilità di scorrimento lungo la direzione d .

L'allontanamento delle facce piccole adesso tende a riportare in maniera ordinata la superficie piegata nel piano, condizione limite che determina l'annullamento delle informazioni di pieghe monte e valle. Per garantire al modello la possibilità di tornare alla condizione di partenza, si aggiunge l'azione F_2 (fig. 5) da applicare alla coppia di facce grandi, un'azione che tende a riportare le pieghe grandi alla condizione di partenza in modo da conservare la proprietà di essere monte. Il sistema di azioni e reazioni porta ad un movimento fluido e controllato, manifestando una quantità minima di deformazione elastica durante il movimento che si riassorbe immediatamente alla fine dell'azione cinematica.

Conclusione

Osserviamo un modello di superficie articolata più complessa, il Miura pattern, generalmente caratterizzato da facce quadrilatera piane che permettono a questo modello il solo dispiegamento del piano (fig. 06). L'originale introduzione nel pattern della piega neutra consente al modello, adesso suddiviso in triangoli tutti uguali, di cambiare forma nello spazio adagiandosi su superfici a doppia curvatura. In questo caso oltre a determinare la rete di elementi lineari, dobbiamo introdurre le forze che agiscono sugli angoli a riposo



F06 | *Tassellazione e movimento di un pattern che da piano si modifica andando ad adagiarsi su una superficie a doppia curvatura. Trasformazione che esplicita il valore della ricerca.*

delle pieghe monte e delle pieghe valle.

Per quanto riguarda la piega neutra, i momenti applicati su di esse devono avere una intensità in grado di mantenere l'angolo piatto se non sollecitato nelle diverse direzioni.

Una importante condizione messa a sistema è l'obbligo della superficie articolata a scorrere su una superficie matematica d'appoggio, inizialmente piana. In un secondo tempo si deforma la superficie nurbs muovendo lungo la Z i due vertici opposti, il modello articolato segue la superficie matematica che da piana diventa parabolica. La piega neutra permette la torsione della superficie regolarmente tassellata e piegata, che durante il movimento non varia le singole aree delle facce. In questo modo siamo in grado di controllare geometrie mutevoli che possono essere prefigurate e tassellate attra-

verso una maglia strutturata che nell'assumere diverse conformazioni nello spazio propone contorni apparenti sempre mutevoli.

Bibliografia

- [1] A. CASALE, M. CALVANO. *Castelli di carta. La piega per la costruzione di superfici articolate*, DisegnareCon, vol. 5, n.9, Bologna, 2012. pp. 309-316.
- [2] A. CASALE, G. M. VALENTI. *Architettura delle superfici piegate. Le geometrie che muovono gli origami*, in nuovi quaderni di Applicazioni di Geometria Descrittiva, Vol. 6, ed. Kappa. 2013.
- [3] T. TACHI. *Geometric Considerations for the Design of Rigid Origami Structures*, in Proceedings of IASS Symposium 2010, Shanghai, China, pp. 771-782.
- [4] RAJAA ISSA. *Essential Mathematics for Computational Design*, Second edition by Robert McNeel & Associates.
- [5] A. CASALE, G. M. VALENTI, M. CALVANO, J. ROMOR. *Surfaces: Concept, Design, Parametric Modeling and Prototyping*. In: AA.VV. *Nexus Netw J* vol. 15, p. 271 - 283, Turin: published online 8 May 2013, © 2013 Kim Williams Books.
- [6] CASALE A., VALENTI G.M, CALVANO M (2011). *Tra rappresentazione e fabbricazione, dalla costruzione del modello, al modello costruito*. In: S.A.V.E. HERITAGE SAFEGUARD OF ARCHITECTURAL, VISUAL, ENVIRONMENTAL HERITAGE. Aversa, Capri, 9-10-11 June 2011. NAPOLI: La scuola di Pitagora s.r.l., 2011, vol. 10, p. 1-9.

L'ordine complesso | La generazione di superfici minime periodiche

Giorgio Buratti

Politecnico di Milano - Dipartimento di Design

*«Cellula e tessuto, conchiglia ed osso, foglia e fiore
... non fanno eccezione alla regola «Dio geometrizza sempre».
I loro problemi di forma sono prima di tutto dei problemi matematici;
i loro problemi di accrescimento sono essenzialmente problemi fisici...»
D'Arcy Thompson*

Una superficie minima è una superficie in cui la curvatura media è sempre nulla. Questa caratteristica è connessa alla proprietà tipica di queste superfici di assumere la forma che ricopre la minor area possibile di un perimetro dato.

I primi studi sulle superfici minime risalgono ad Eulero¹ che attraverso dimostrazioni matematiche ha dimostrato la proprietà di ottimizzazione dell'area. Si deve però a Plateau e alle sue osservazioni sul comportamento delle lamine di acqua saponata la formulazione del principio generale che permette di realizzare tutte le superfici minime di cui si conoscono o le equazioni o la generatrici geometriche.

Le conclusioni di Plateau sono state ottenute dall'analisi sperimentale e prevedono la costruzione di un contorno chiuso qualsiasi con del filo di ferro. Se tale telaio è immerso ed estratto da un liquido saponato è possibile osservare la creazione di un insieme di lamine che velocemente si assestano in un'unica configurazione stabile. (fig.1)

Plateau non può fare a meno di notare come questo fenomeno si realizza "quasi per incantesimo": "...vi è un fascino enorme nel contemplare queste forme leggere, ridotte nella loro essenzialità a delle superfici matematiche, che si fanno adornare dei colori più

1. L. EULER, *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes sive solutione problematis isoperimetrici latissimo sensu accepti*, in OPERA OMNIA, a cura di C. Carathèodory vol.24, Fusli, Bernae 1952.



F01 | *Elicoide ottenuto attraverso l'immersione di un telaio di filo di ferro nell'acqua saponata.*

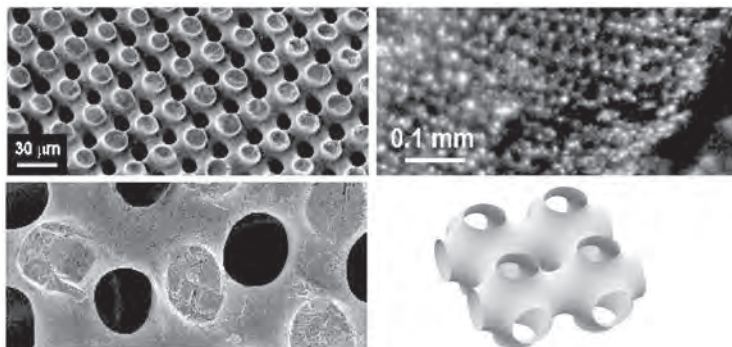
*brillanti, e che malgrado la loro fragilità durano per lungo tempo*².

Negli anni successivi numerosi matematici si sono interessati alle superfici minime, tra essi gli studi più importanti si devono a Lagrange e Schwarz. Quest'ultimo nel 1856 è stato il primo a scoprire le Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS), una nuova classe di superfici minime ottenute attraverso una serie di simmetrie di rotazione.

Bisogna però aspettare il 1960 per avere ulteriori approfondimenti sulla natura delle TPMS, quando Schoen scopre una dozzina di nuovi gruppi. In quel periodo lo studioso stava lavorando per la NASA cercando di capire come le proprietà delle superfici minime potessero essere sfruttate nell'esplorazione dello spazio.

Questa attenzione è giustificata sia dai problemi di ordine matematico che sono stati rivelati dalle ricerche, sia dalla scoperta di numerose proprietà (meccaniche, strutturali ma anche di conducibilità elettrica) che contraddistinguono le superfici minime. Il rinnovato interesse in tempi più recenti deriva dalla scoperta di configurazioni di superfici minime in una notevole varietà di sistemi diversi: dalla disposizione dei cristalli di calcite che formano l'esoscheletro di alcuni organismi, all'assetto dei tessuti umani, alla struttura di base di talune schiume di sintesi alle teorie che spiegano la natura dei fenomeni astronomici (fig. 2). È comprensibile il motivo che porta studiosi non solo di discipline matematiche, ma anche di fisica, di scienze biologiche, di scienze dei materiali e delle strutture, di medicina e in tempi più recenti di architettura e design, a ricerche sempre più approfondite.

.....
2. J. PLATEAU, *Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires*, Gauthier-Villars, Parigi, 1873.



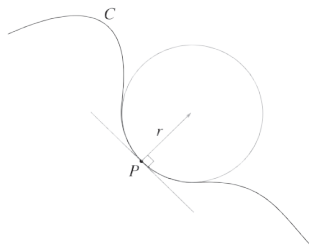
F02 | *Ingrandimento al microscopio ottico a scansione di una lamina di rame. La struttura è composta da un sistema periodico di P-surface.*

Definizione geometrica delle superficie minime

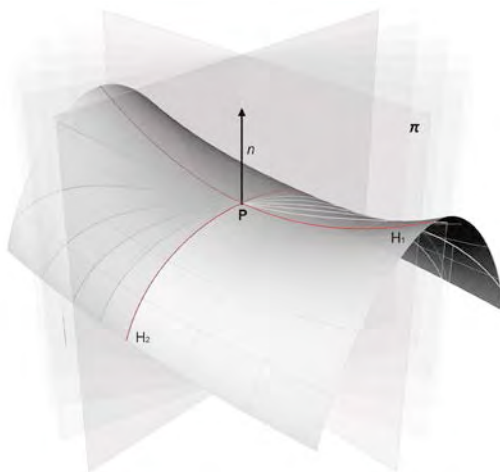
Si è già scritto come la condizione necessaria all'ottenimento di una superficie minima sia la curvatura media sempre nulla. Perché l'enunciato risulti chiaro è quindi necessario approfondire il concetto di curvatura media di una superficie.

Si consideri il punto P di una superficie e la retta normale alla superficie nel punto N , quindi si intersechi la superficie con il piano π su cui giace N . Della curva di intersezione ottenuta si consideri la curvatura nel punto P .

La curvatura fornisce già a livello intuitivo informazioni sul comportamento della curva: se si prende ad esempio come curvatura una retta, non si ha nessun incurvamento e la curvatura di questo caso sarà nulla, mentre nel caso particolare in cui la curva sia una circonferenza il suo incurvamento sarà costante in ogni punto. Per una curva generica la curvatura, che varia da punto a punto,



F03 | *Cerchio osculatore di una curva generica nel punto P.*

F04 | *Curvatura media di una superficie a sella.*

viene definita tramite la costruzione del cerchio osculatore (fig.3), ovvero il cerchio tangente alla curva che meglio la approssima, e sarà pertanto definita dalla relazione $C_p = 1/r$ dove r è il raggio del cerchio osculatore.

Se si ruota il piano π attorno alla normale \mathbf{N} , per ognuna delle posizioni del piano si otterranno delle curve di sezione caratterizzate da un diverso valore di curvatura nel punto \mathbf{P} (ovviamente se la superficie considerata non è una sfera, nel quale caso avranno tutte uguale valore).

Nel caso di una superficie generica tra le diverse curvature vengono privilegiate quella il cui valore è il più grande e quella il cui valore è il più piccolo, che prendono il nome di curvatures principali della superficie e indicate con $\mathbf{H1}$ e $\mathbf{H2}$. (fig.4)

La curvatura media \mathbf{H} è la somma algebrica delle due curvatures principali definita dall'equazione:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H1} + \mathbf{H2}/2.$$

Ne consegue che l'equazione che caratterizza le superfici di aerea minima (detta anche teorema di Lagrange), espressa in termini di curvatures principali diventa:

$$\mathbf{H1} + \mathbf{H2} = 0$$

Questa condizione può essere ottenuta o perché entrambe le quantità sono nulle, come nel caso del piano che quindi è una superficie minima, oppure perché si ha:

$$H1 = - H2$$

Cioè in ogni punto una delle curvatures principali è rivolta in fuori e una è rivolta in dentro come nel caso di una superficie a sella.

Disegnare le TPMS

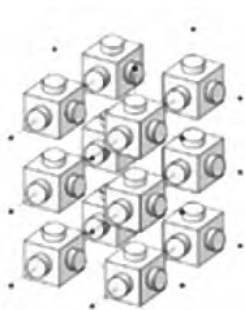
Le Triply Periodic Minimal Surface presentano caratteristiche di grande interesse, non solo a fini progettuali.

Sono dette periodiche perché costituite da un'unità di base che può essere replicata, teoricamente all'infinito, nello spazio cartesiano a tre dimensioni (triplly) creando una nuova superficie senza soluzione di continuità e senza intersezioni (Fig.5).

Il gruppo comprende una grande quantità di configurazioni diverse caratterizzate da un'alta complessità morfologica. Tutte le superfici appartenenti a questa famiglia dividono lo spazio in due fasi disgiunte ma intrecciate e allo stesso tempo continue. La caratteristica topologica di bi-continuità è rara nello spazio bidimensionale e (a tutt'oggi) praticamente unica in quello tridimensionale.

Questa singolarità offre alcune proprietà notevoli. Si è precedentemente scritto come una superficie minima sia contraddistinta da diverse curvatures o, in altre parole, come alcune zone siano più piatte di altre. Ne consegue che non tutti i punti della superficie sopportano in egual misura eventuali carichi concentrati.

Se la stessa superficie viene associata in una distribuzione periodica, l'iterazione fisica tra i moduli provoca un effetto compensativo che aumenta notevolmente la loro efficienza strutturale. Questo risultato si ottiene, secondo la definizione di superficie minima, impiegando il minor materiale possibile.





F06 | Generazione algoritmica di una superficie minima Doppio Giroide.

I vantaggi sopracitati sono reali nel caso in cui la superficie ottenuta sia un sistema in tensione o se il materiale con cui è costruita è in grado di resistere a sollecitazioni di trazione e compressione.

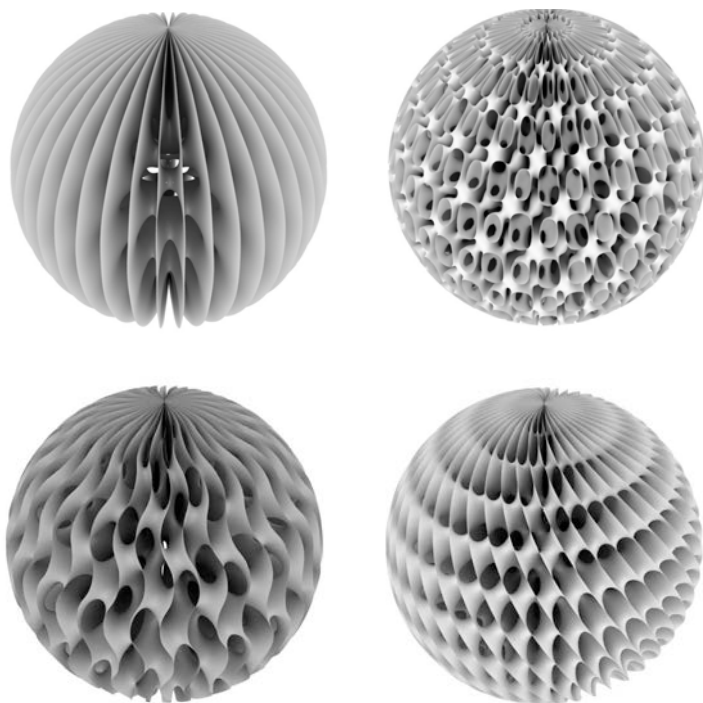
Riassumendo:

1. Le Tpms possiedono una naturale rigidità geometrica
2. Permettono l'uso ottimale dei materiali
3. Configurano strutture stabili e resistenti
4. Le forme che ne risultano possono essere sorprendenti dal punto di vista estetico.

Fino a tempi recenti questi vantaggi sono però rimasti teorici.

La rappresentazione di una singola superficie minima con i metodi di rappresentazione tradizionali, digitali o analogici, è già un'impresa piuttosto ardua. La condizione di curvatura media nulla che le contraddistingue, sebbene relativamente facile da verificare a posteriori, è difficoltosa da disegnare con gli strumenti tradizionali. Anche risolvendo il problema della rappresentazione del modulo base, per configurare le caratteristiche qui elencate, bisognerebbe comunque considerare le singole unità come parti organiche di un sistema periodico. L'obbiettivo, forse fattibile per geometrie lineari utilizzando i tradizionali sistemi di disegno assistito al computer, appare impossibile con le tecniche di disegno manuale.

I nuovi strumenti di disegno digitale in grado di sfruttare un approccio generativo hanno contribuito a superare questi limiti. Sfruttando la possibilità offerta da questi applicativi di organizzare i progetti in sistemi associativi basati su logiche di relazioni tra i parametri, è possibile gestire livelli di complessità formale impensabili soltanto pochi anni addietro. All'utilizzatore è necessariamente richiesta, in luogo dell'apprendimento di un'interfaccia di modellazione, la capacità di indagare e controllare le logiche della forma e la conoscenza degli strumenti teorici, peculiari della geometria, che gestiscono relazioni complesse tra elementi eterogenei.



F07 | *Discretizzazione di una sfera tramite diversi tipi di Triply Periodic Minimal Surface.*

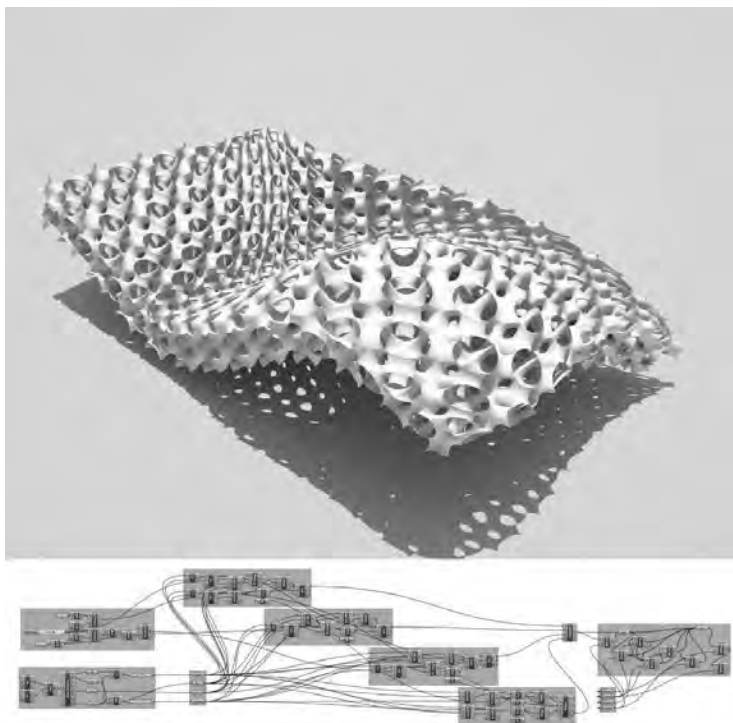
La modellazione digitale si trasforma basandosi sull'utilizzo di linguaggi di programmazione e non, come nei software CAD tradizionali, su serie predefinite di primitive geometriche.

Il progettista è così in grado di aggirare i limiti imposti dal software ampliando le proprie possibilità creative e definendo il processo di sintesi formale più adatto allo scopo. Nel caso in questione l'utilizzo di Grasshopper ha permesso di tradurre le complesse equazioni che descrivono le superfici minime in forme tridimensionali.

La scrittura di un algoritmo basato su una funzione in forma implicita³ permette di mappare in un dominio prestabilito di punti, quelli necessari all'ottenimento preciso delle singole superfici

.....

3. *Il metodo implicito usa una funzione lineare a tre variabili. Tipicamente una superficie implicita è definita da un'equazione nella forma: $f(x,y,z)=0$*



F07 | Discretizzazione di una superficie Free-form tramite superficie minima di Noevius. Nella parte sottostante la rappresentazione visuale dell'algoritmo tipica di Grasshopper.

minime. (fig.6) Queste successivamente sono utilizzate per popolare qualsivoglia geometria si renda necessaria. (fig 7)

Risolvere il problema della rappresentazione non è ancora sufficiente ai fini progettuali. L'oggetto disegnato per poter essere utilizzato nel mondo fisico, deve in qualche modo essere materializzato.

Fino a poco tempo fa realtà così complesse dal punto di vista morfologico erano estremamente difficili da produrre, ma i progressi nelle tecnologie di stampa tridimensionale hanno reso oggi possibile anche la realizzazione in serie di queste strutture.

Il principio di funzionamento di queste tecnologie è basato sulla solidificazione controllata di una resina liquida foto-polimerizzabile. Tramite un laser e una piattaforma di supporto a geometria orientabile queste macchine producono oggetto tridimensionali depositando a strati il materiale.

I parametri strutturali quali porosità, spessori e dimensioni possono

essere liberamente variati ad ottenere una nuova generazione di prodotti che possiedono caratteristiche innovative.

Bibliografia

- [1] A. SCHOEN, *Infinite Periodic Minimal Surfaces without self-intersection*, NASA Technical Note, NASA TN D-5541, 1970.
- [2] D'A. W. THOMPSON, *Crescita e forma*, Cambridge University Press, 1917.
- [3] E. W. WEISSTEIN, "Minimal Surface" from MathWorld – A Wolfram Web Resource, accessed September 2009, <http://mathworld.wolfram.com/MinimalSurface.html>.
- [4] G. BURATTI, *Generative algorithms and associative modeling to design articulate surfaces*. In Proceedings of the Nexus Ph.D. Day Relationships between Architecture and Mathematics; a cura di M. Rossi. Milano: McGraw-Hill. 2012.
- [5] G. BURATTI, *Superfici minime periodiche: la geometria dell'apparente casualità* in Geometria descrittiva e rappresentazione digitale, memoria e innovazione, vol. 2, p. 134-139, Roma: Edizioni Kappa. 2012.
- [6] G. BURATTI, *The complex order. Generating triply periodic minimal surface structures* In proceedings of the Nexus Ph.D. Day Relationships between Architecture and Mathematics; a cura di A. Gönenç Sorguç, Ankara: Metu Mf. 2014.
- [7] J. PLATEAU, *Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires*. Paris: Gauthier-Villars. 1873.
- [8] K. BRAKKE, *Triply periodic minimal surfaces* : Susquehanna University, Selinsgrove, PA. <http://www.susqu.edu/facstaff/b/brakke/evolver/examples/periodic/periodic.html>.
- [9] L. EULER, *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes sive solution problematice isoperimetrice latissimo sensu accepti*, in Opera omnia, a cura di C. Carathéodory, vol. 24. Bernae: Fusli. 1952.
- [10] M.EMMER, *Bolle di sapone, tra arte e matematica*. Torino: Bollati e Boringhieri editore. 2010.
- [11] P. PEARCE, *Structure in Nature is a Strategy for Design*. Cambridge, Mass.: MIT Press. 1978.
- [12] S.HYDE, S. ANDERSSON, S. LÄRSSON M K.BLUM, Z. LANDH, T.LIDIN, and B.W. NINHÄM, *The Language of Shape*. Amstredam: Elsevier. 1997.

Le geometrie dei meccanismi per il movimento

Leonardo Paris

Sapienza Università di Roma

Dipartimento di Storia, Rappresentazione e Restauro dell'Architettura

Nel 1854 Giovanni Codazza pubblica a Milano un trattato dal titolo *La Teoria geometrica degli ingranaggi*. La struttura e i contenuti del trattato ricalcano abbastanza fedelmente quelli di un altro trattato scritto qualche anno prima, nel 1842, a Parigi da Olivier dal titolo *Théorie géométrique des engranages*. I due testi testimoniano l'importanza scientifica di un argomento molto particolare nell'ambito di quel vasto contenitore scientifico che è la Geometria Descrittiva che proprio nell'800 ha avuto la sua massima diffusione.

L'aspetto sicuramente più interessante che emerge dalla lettura dei due trattati è quello relativo allo studio delle cosiddette geometrie coniugate che sono alla base del funzionamento degli ingranaggi, cioè quei particolari meccanismi di trasmissione del moto noti fin dall'antichità ma mai in effetti studiati dal punto di vista delle correlazioni delle loro proprietà geometriche (fig. 1). L'argomento è rimasto nell'alveo delle applicazioni della Geometria Descrittiva per molti anni a seguire. Poi durante il '900 a seguito delle specializzazioni dell'ingegneria meccanica e con gli studi sulla dinamica il tema è stato approfondito in altri contesti disciplinari.

Nell'ambito delle attività di rinnovamento della Geometria Descrittiva promosse anni fa dalla scuola romana e fiorentina lo studio delle geometrie degli ingranaggi è senz'altro un'applicazione da rivalutare, attualizzandola, anche grazie alle possibilità offerte oggi dalla modellazione informatica e dai sistemi di modellazione parametrica attraverso cui riuscire a simulare in tempo reale il movimento e le corrispondenti relazioni

geometriche. Il tema è indubbiamente affascinante perché le geometrie che sono sottese al meccanismo dell'ingranaggio, nel momento in cui si muovono, si devono relazionare con altre geometrie, dovendo spesso anche rispettare dei vincoli che altrimenti non avrebbero.

Non è questa la sede per ripercorrere l'articolata teoria geometrica degli ingranaggi, per la quale si invita il lettore a rileggere, per esempio, il trattato di Giovanni Codazza ancor oggi attualissimo e scritto in maniera fluida e discorsiva. Per un primo approfondimento su alcune recenti rivisitazioni si rimanda alle pubblicazioni curate dal sottoscritto e citate nella bibliografia.

Ciò che si vuole proporre in questa sede è la riproposizione di una esemplificazione pratica per dimostrare, in conformità allo spirito del workshop, il ruolo della geometria nel movimento e le possibilità offerte dalla modellazione informatica di verificare in tempo reale proprietà geometriche apparentemente semplici ma difficilmente rappresentabili solo con gli strumenti grafici che lo studioso aveva a disposizione prima della rivoluzione informatica (fig. 2).

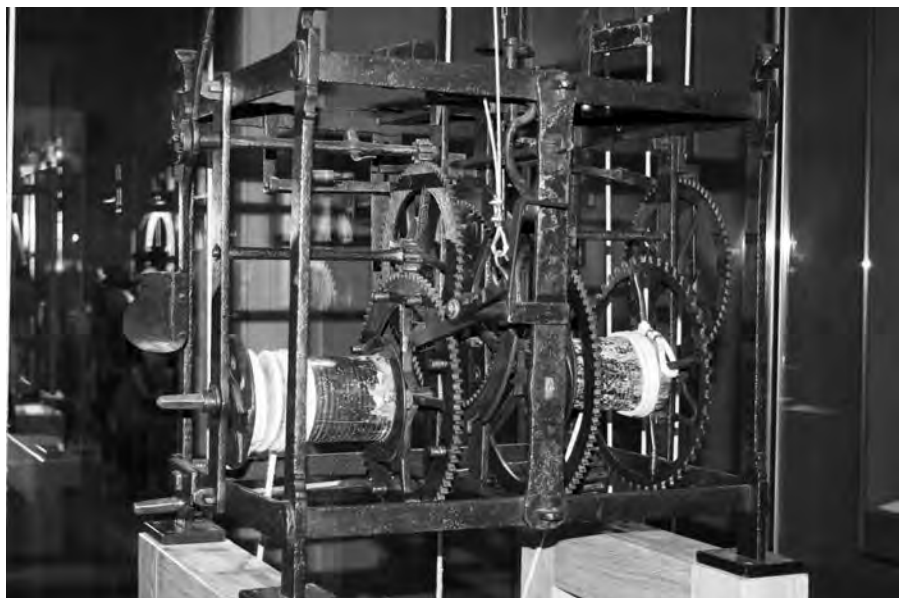
Prima di entrare nel dettaglio è opportuno ricordare alcune nozioni e definizioni di base che possono aiutare a comprendere meglio l'argomento.

L'ingranaggio è un meccanismo elementare costituito da una ruota dentata che ingrana con un'altra ruota dentata o con una cremagliera o con una vite senza fine allo scopo di trasmettere un movimento. Gli ingranaggi possono essere utilizzati per trasmettere il moto rotatorio fra due o più assi, o per convertire il moto rotatorio in moto progressivo.

Negli ingranaggi la trasmissione del movimento avviene attraverso delle ruote dentate. In questa trasmissione di moto gli assi degli ingranaggi possono essere: *paralleli*, *concorrenti* o *sgombri*.

In ciascun caso può verificarsi che il rapporto tra le velocità angolari rimanga costante oppure variabile. Nel primo caso si hanno *gli ingranaggi a rapporto di velocità costante*; nel secondo caso *gli ingranaggi a rapporto di velocità variabile*.

Un requisito fondamentale nella identificazione delle superfici dei denti è che queste debbono conservarsi a contatto durante il movimento rotatorio delle ruote; quando le superfici dei denti di due ruote di un ingranaggio soddisfano questa condizione si dicono *coniugate*.



F01 | Orologio del '500; British Museum of London.

In un ingranaggio le superfici dei denti possono venire a contatto secondo una linea o conservarsi progressivamente a contatto in un punto. Nel primo caso l'ingranaggio si definisce di *forza*, nel secondo di *precisione*.

Parlando di ingranaggi si è più volte fatto riferimento ai denti che rappresentano il vero e proprio elemento di contatto e di trasmissione del moto. La dentatura di un ingranaggio può essere esterna, interna o laterale. Il primo caso, quello più conosciuto, dà all'ingranaggio una forma raggiata, con i denti rivolti verso l'esterno (fig. 3).

Gli ingranaggi si possono classificare prima di tutto in funzione della disposizione reciproca degli assi ed anche in funzione della posizione della dentatura, per cui si ottengono per esempio le ruote dentate semplici, elicoidali, a doppia elica, le ruote coniche a denti dritti o a corona ipoide, il rocchetto o cremagliera, la vite senza fine o ingranaggi non circolari.

Fatta questa sintetica premessa sulle definizioni vediamo ora quali sono le implicazioni geometriche in un esempio, quello di due ruote dentate cilindriche in cui quindi gli assi



F02 | Ruote dentate cilindriche con diversa velocità angolare.

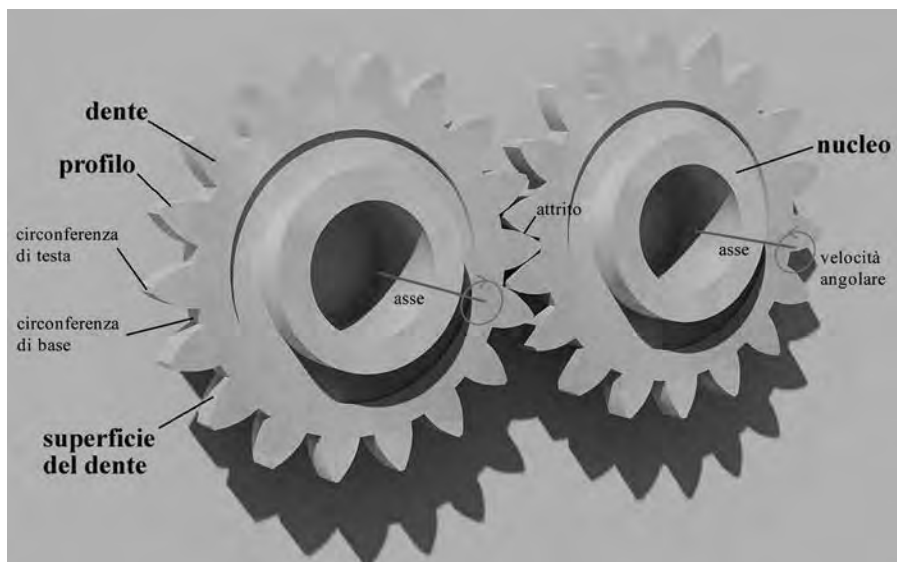
dell'ingranaggio sono paralleli. I nuclei di due ingranaggi ad assi paralleli sono dei cilindri circolari retti, così come le superfici dei denti in cui la direttrice è parallela all'asse del nucleo e la generatrice è rappresentata dal profilo del dente. Le ruote sono generalmente comprese tra due piani perpendicolari agli assi che ne definiscono l'altezza dell'ingranaggio.

I denti hanno una estensione limitata rispetto al nucleo e nel moto rotatorio rimangono in contatto solo per una certa frazione di tempo e di spazio. L'ingranaggio quindi deve essere progettato per garantire la continuità del moto per cui deve accadere che quando un dente perde il contatto con il suo coniugato il dente successivo deve avere già ingranato l'altro dente coniugato.

Questa condizione, come vedremo, ha ripercussioni sulle dimensioni complessive della ruota, sul numero e sulle dimensioni dei denti e, conseguentemente sul passo dei denti, cioè sulla distanza tra le mezzerie di due denti contigui.

E' evidente che alcuni aspetti squisitamente teorici del problema devono essere necessariamente rimodulati in fase costruttiva nel momento in cui occorre tener conto del cosiddetto *gioco* dell'ingranaggio.

Vediamo ora quali sono le considerazioni geometriche



F03 | Elementi e definizioni di un ingranaggio a ruote dentate.

riguardante la linea che definisce il profilo del dente. Esistono diversi metodi pratici per la costruzione del profilo di un dente ma da un punto di vista strettamente geometrico la linea che più di altre soddisfa la condizione di permanenza del contatto tra i due profili coniugati durante la rotazione è l'evolvente della circonferenza, cioè il luogo dei punti descritto da un punto di una retta che rotola senza strisciare su di una circonferenza (fig. 4). Si possono evidenziare alcune importanti proprietà di questa curva.

Ogni punto P di una retta tangente in C alla circonferenza di base a rotazione conclusa cade sulla circonferenza in P' percorrendo un settore circolare di lunghezza pari alla distanza del punto CP. L'evolvente della circonferenza è l'involuppo delle perpendicolari alle rette tangenti.

Per ogni punto della circonferenza è possibile costruire una famiglia di evolventi tutte equidistanti tra loro. Una evolvente è una curva aperta a spirale in cui è identificabile un ciclo corrispondente ad una rotazione completa di 360° della retta tangente; cioè la distanza TP' è uguale a $2\pi r$.

Poiché per ogni punto esterno alla circonferenza è possibile costruire due diverse rette tangenti si possono ottenere due

distinte famiglie di evolventi; una in cui il punto P si avvicina alla circonferenza secondo un andamento orario, l'altra antiorario. Attraverso l'uso di un modellatore matematico possiamo sperimentare per via grafica il comportamento di questa curva nel momento in cui deve imprimere al profilo coniugato un movimento rotatorio.

Il caso analizzato ed illustrato sinteticamente nella figura 4 è il più semplice ed è quello di due ruote dentate uguali che hanno perciò la stessa velocità angolare. Nel momento in cui si definiscono i due nuclei circolari delle ruote di raggio r occorre definire la distanza d tra i centri; $d - 2r$ è l'altezza del dente. Ogni ruota ha una *circonferenza di base*, riferita al nucleo, ed una *circonferenza di testa* che include anche il profilo del dente.

La circonferenza di testa di raggio r_t avrà un certo rapporto con il raggio della circonferenza di base r_b , il cui valore è sempre > 1 . Poiché la seconda ruota ha una circonferenza di base uguale, anche la seconda evolvente sarà uguale alla prima, con lo stesso verso, ma con un moto rotatorio contrario.

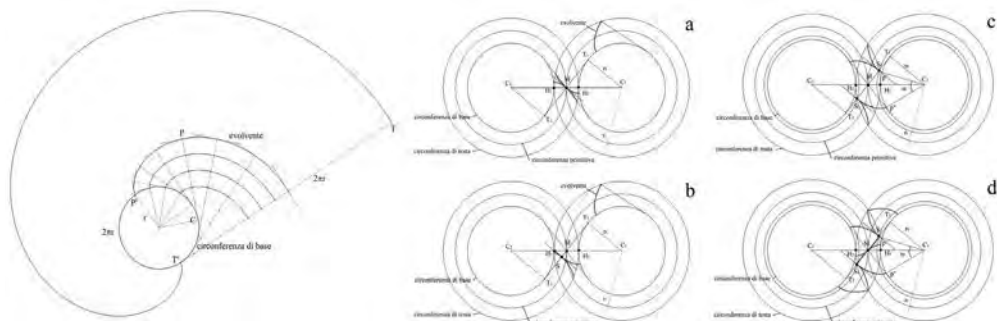
Osservando la figura si riconoscono le due circonferenze di base, la retta congiungente i due centri C_1C_2 che contiene il segmento H_1H_2 , cioè l'altezza del dente, i due profili coniugati, cioè le evolventi a ciascuna delle circonferenze, che si incontrano nel punto medio M del segmento H_1H_2 , la retta T_1T_2 tangente ad entrambe le circonferenze passante per il punto M. La normale alla retta T_1T_2 che per costruzione è anche tangente ad entrambe le due evolventi.

Se si imprime ora una stessa rotazione, antioraria al primo profilo e oraria al secondo profilo si noterà che i due profili coniugati rimangono in contatto in un punto S che appartiene sempre alla retta T_1T_2 con una diversa normale evidentemente parallela alla prima. Tale condizione vale per qualsiasi rotazione impressa ai due profili coniugati.

Alla retta tangente T_1T_2 appartengono pertanto tutti i punti di contatto tra le coppie coniugate di evolventi delle due circonferenze di base dell'ingranaggio.

La tangente T_1T_2 contiene il segmento S_1S_2 i cui estremi sono definiti dall'intersezione della stessa retta con le due circonferenze di testa. Questo segmento individua il campo di azione di due denti coniugati, cioè in sostanza la posizione iniziale S_1 in cui il primo profilo aggancia il secondo e la posizione finale S_2 in cui i due profili si staccano.

L'individuazione di questo segmento è fondamentale per il



F04 | Geometria di un ingranaggio a ruote dentate con uguale velocità angolare.

corretto funzionamento dell'ingranaggio in quanto i due denti successivi devono poter *ingranare* prima che i precedenti si stacchino; questa è la condizione necessaria per dare continuità al movimento.

Immaginiamo ora che l'ingranaggio che stiamo progettando sia reciproco, che si possa cioè cambiare il senso di rotazione; questo significa che i denti avranno un profilo speculare che è un'altra evolvente.

La ruota dentata è quindi formata da una serie di denti la cui geometria è definibile attraverso alcuni parametri costruttivi che sono: il numero, il passo e la dimensione dei denti. Questi vanno evidentemente progettati in modo tale da garantire la continuità della rotazione ma anche la non interferenza tra i due denti coniugati.

Continuando la nostra sperimentazione proviamo a calcolare qual è per esempio l'incidenza della geometria rispetto al passo, cioè la distanza tra due denti di una stessa ruota misurabile o al centro del dente o all'attacco P'P'' delle due evolventi successive. Il passo dell'ingranaggio è evidentemente esprimibile anche come valore dell'angolo ω che sottende l'arco P'P''.

Sul passo dell'ingranaggio e quindi di conseguenza sul numero dei denti si possono a questo punto fare una serie di considerazioni. La prima è che il numero deve essere intero; l'angolo relativo al passo deve essere inferiore dell'angolo ω altrimenti il movimento delle ruote non è continuo. Il passo infine deve essere tale da garantire il perfetto incastro senza sovrapposizioni tra i denti delle due ruote.

Possiamo verificare graficamente il valore ω dell'angolo e

definire un diagramma che metta in relazione geometrica l'altezza del dente con la quantità di denti sulla ruota.

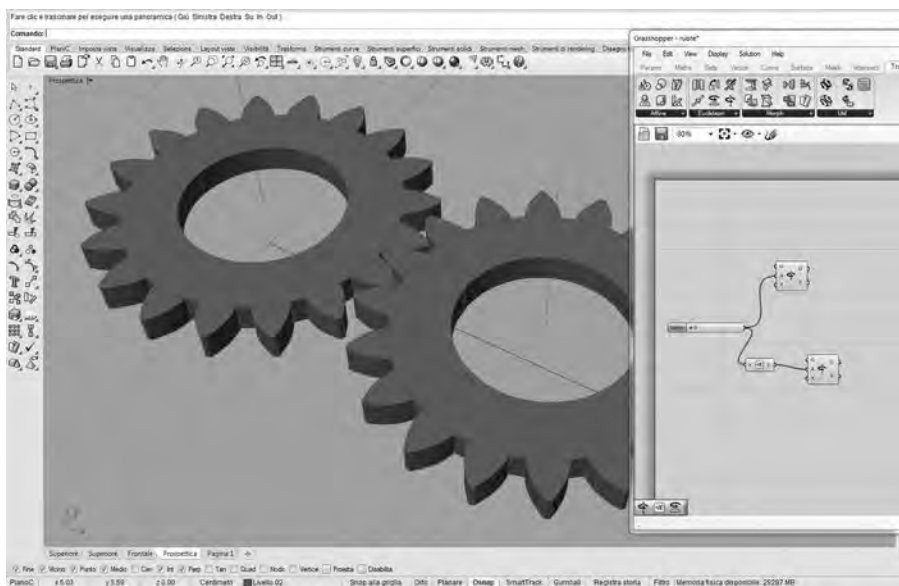
Una volta determinato il passo dei denti, se si prova a disegnare l'intero profilo del dente con un'altra evolvente speculare a formare una specie di arco acuto, si osserva che oltre un certo rapporto tra circonferenza esterna e di base il dente non ha più lo spazio necessario per incastrarsi con l'altro. C'è quindi un limite oltre il quale il meccanismo non può funzionare.

In tutte le altre configurazioni al di sotto di tale soglia si verifica che è possibile allargare il profilo del dente riuscendo anche a ridurre leggermente il passo in modo da avere maggiore garanzia di continuità del moto rotatorio.

Una volta costruito il modello tridimensionale dell'ingranaggio costituito da due ruote dentate formate, come nell'esempio illustrato, da 18 denti ciascuna è possibile verificarne l'efficacia con alcune applicazioni in grado di simulare il movimento e la correlazione geometrica tra i vari componenti dell'ingranaggio. Interessante è l'applicazione parametrica Grasshopper di Rhinoceros attraverso cui è possibile visualizzare in tempo reale il rapporto geometrico tra i due ingranaggi associando alle due ruote dentate lo stesso valore angolare di rotazione con lo stesso valore assoluto ma con segno invertito (fig. 5). Lo stesso applicativo può essere utilizzato per parametrizzare la costruzione dell'ingranaggio inserendo semplicemente i valori dei raggi delle ruote dentate e la distanza tra i due centri, dando modo al software di calcolare l'altezza dei denti e conseguentemente il suo numero ottimale, inserendo per esempio anche dei range di sovrapposizione nel momento in cui una ruota ingrana sull'altra.

Possiamo concludere queste brevi note riagganciandoci al principio ispiratore di questo workshop sulla necessità di ripensare il progetto, cioè l'idea, sull'onda delle trasformazioni dinamiche rese possibili dall'evoluzione delle tecnologie digitali.

Così si esprimeva Giovanni Codazza nel suo trattato: "La traccia di questa superficie (parlando di una primitiva di un ingranaggio, NdA), dietro considerazioni geometriche, condurrebbe ad operazioni grafiche troppo complicate per essere compatibili coi bisogni della pratica. Independentemente però da questa circostanza essa non presenta altra difficoltà per chi abbia famigliari i metodi della geometria descrittiva. Io mi limiterò ad additare il seguito di queste operazioni, lasciandone



F05 | Applicazione dell'ingranaggio con un modellatore parametrico.

l'esecuzione per esercizio allo studioso.”

La capacità di riuscire a controllare il movimento nelle geometrie coniugate per mezzo dei modellatori informatici è senza dubbio una delle linee di ricerca più interessanti in grado di dare nuovo significato alle forme geometriche che conformano lo spazio nell'architettura e l'oggetto nel design.

Bibliografia

- [1] PARIS L. *Geometrie coniugate* In: Disegnarecon, Vol. 5, n. 9 (2012) - Geometria - Costruzione - Architettura, a cura di R. Migliari. Bologna. 2012.
- [2] PARIS L. *Teoria geometrica degli ingranaggi* In: Geometria descrittiva e rappresentazione digitale. Memoria e innovazione. Vol. II, a cura di A. Casale. Roma: Edizioni Kappa. 2012. Pagg. 63-84.

'Prototipazione' per l'architettura

Leonardo Baglioni*, Federico Fallavollita**,
Marta Salvatore*

*Sapienza Università di Roma

Dipartimento di Storia, Rappresentazione e Restauro dell'Architettura

**Università degli Studi di Bologna - Dipartimento di Architettura

Introduzione

Questo contributo intende illustrare le problematiche principali legate alla costruzione di modelli di architettura destinati alla realizzazione di modelli fisici, maquette in scala, controllabili attraverso sistemi Cad, nell'ambito della stampa 3D con particolare riferimento alla stereolitografia.

Le problematiche legate alla costruzione di modelli di questo tipo sono descritte in relazione ad una esperienza maturata nell'ambito del Nervilab¹ (Nervi Virtual Lab), laboratorio di ricerca della Sapienza di Roma, che ha visto nel 2010 la realizzazione di 12 modelli² in ABS, in scala compresa fra 1:50/1:100, redatti per la mostra itinerante *Pier Luigi Nervi Architettura come sfida*.

-
1. Il NerViLab è un gruppo di ricerca multidisciplinare coordinato dal prof. Francesco Romeo, del Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica della 'Sapienza' di Roma, che si dedica allo studio degli aspetti geometrico-formali e costruttivi delle opere di Pier Luigi Nervi; <http://w3.disg.uniroma1.it/nervilab/>.
 2. Dei dodici modelli redatti per la mostra, nove sono stati redatti a Roma dal nostro gruppo, in particolare: l'Aula delle udienze Pontificie in Vaticano (S. Cazzato), il Palazzetto dello Sport di Roma (C. Di Bella), la Cattedrale di St. Mary a San Francisco (B. Picone), la sede dell'Ambasciata d'Italia a Brasilia (I. Proietti Muzzi), la sede dell'Unesco a Parigi (E. Boria), lo Stadio Berta di Firenze (L. Troiani), il Teatro Augusteo a Napoli (S. Fimmanò), la torre della Borsa di Montréal, l'Aviorimessa di Orbetello (M. Calcagnoli); tre modelli invece sono stati stampati sulla base della modellazione condotta da Mario Sassone del Politecnico di Torino, in particolare: il Palazzo delle Esposizioni di Torino, il Palazzo del Lavoro di Torino, il Ponte del Risorgimento di Verona.

Stampa 3D, finalità e tecniche

Oggi il termine 'prototipazione' è entrato a far parte del linguaggio corrente degli architetti ed è spesso usato per definire genericamente la realizzazione di un modello fisico a partire da un modello digitale. Con il termine prototipazione però, si rischia di indicare una sola delle diverse finalità che può avere la costruzione di questi modelli, senza che sia specificata la tecnologia impiegata per la loro realizzazione.

Per poter collocare il nostro contributo nell'ampio panorama della stampa 3D, è opportuno esplicitare le diverse finalità di cui è suscettibile un modello fisico e sintetizzare le tecniche disponibili per la sua realizzazione.

Di norma architetti e designer rivolgono l'attenzione a questi modelli per soddisfare tre esigenze principali³ (fig. 1):

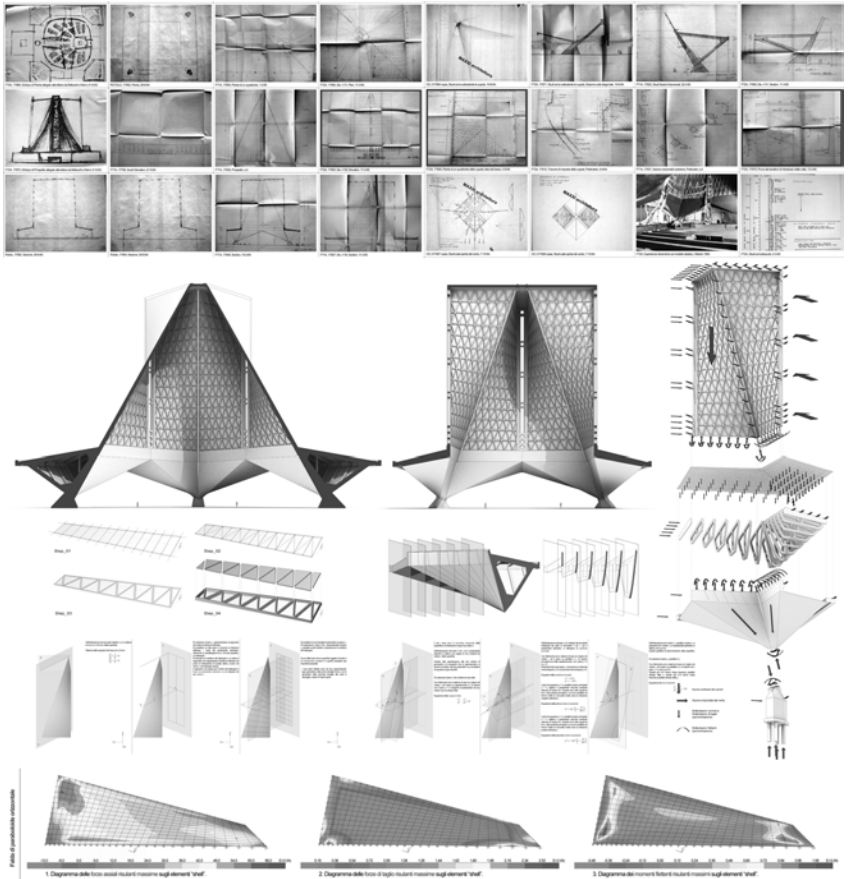
- la costruzione di una maquette, generalmente in scala, capace di comunicare un'idea o una fase progettuale;
- la costruzione di un prototipo, e cioè di un modello in scala 1:1, identico nella forma, ma non nei materiali, al componente che dovrà essere realizzato;
- la costruzione di manufatti, e cioè la realizzazione vera e propria di parti e componenti.

Per realizzare questi modelli possono essere impiegate diverse tecniche, riconducibili a due tecnologie principali, una sottrattiva, che lavora quindi per sottrazione progressiva di materiale da un blocco di partenza, l'altra additiva, che lavora, al contrario, per deposito di strati successivi di materiale. Fra le macchine sottrattive ricordiamo le CNC machines (Computer Numerical Control) che trovano diverse applicazioni in ambito meccanico per la lavorazione del legno, della pietra, dei metalli ecc.

La qualità della lavorazione dipende in questo caso dai gradi di libertà degli utensili impiegati che, rispetto ad un sistema cartesiano di riferimento variano da un minimo di due, ai classici 6, di cui 3 di traslazione e 3 di rotazione, ma che aumentano se si introduce la possibilità di inclinazione e/o rotazione del sistema di riferimento stesso, come ad esempio del mandrino nel caso di torni, trapani, fresatrici ecc.

Le macchine additive lavorano invece per depositi successivi di strati di materiale. I software di gestione (Cam) del processo di stampa dividono il modello in un certo numero di strati paralleli e

.....
3. Si veda H. POTTMANN (2007), A. ASPERL, M. HOFER, A. KILIAN, *Architectural Geomtry*, Exton: Bentley Institute Press, pp. 567-578.



F01 | *La metodologia di ricerca applicata allo studio della cattedrale di St. Mary: ridisegno, rappresentazione matematica, rappresentazione numerica del modello per l'analisi strutturale e il rendering, stampa stereolitografica.*

li riproducono uno alla volta, addizionandoli ai precedenti; i diversi strati sono fusi automaticamente per creare un singolo oggetto tridimensionale.

La qualità di stampa si misura in base alla risoluzione, espressa in x, y, z, in cui i parametri x e y sono confrontabili con quelli di una tradizionale stampante a inchiostro, mentre il parametro z indica lo spessore dello strato⁴, a cui è demandata buona parte della qualità

4. Le stampanti disponibili in commercio ammettono spessori che in me-

finale del modello. Queste stampanti possono impiegare diversi tipi di materiali, polveri, liquidi o solidi. Per quanto riguarda le polveri ricordiamo la tecnologia Selective Laser Sintering (SLS), in cui ogni strato è ottenuto sinterizzando parti di un sottile velo di polvere (materiale termoplastico, come ad esempio policarbonato, nylon, ABS). Un laser scansiona la superficie e colpisce in maniera selettiva i punti richiesti; le polveri colpite dal laser fondono, mentre le altre sostengono lo strato successivo. Alcune tecnologie per la lavorazione delle polveri, in particolare amido, gesso o polvere ceramica, fanno uso di leganti, evitando il ricorso a strutture di supporto (3D Print). Fra le tecniche che prevedono l'uso di materiali fluidi ricordiamo la stereolitografia, che prevede l'esposizione di resina liquida epossidica alla luce ultravioletta. Questa, depositata in una vasca, viene colpita da un raggio laser, quindi polimerizza e solidifica. Ricordiamo ancora la stampa FDM (Fused Deposition Modelling), in cui un filamento di materiale termoplastico (nylon o ABS) è estruso semifuso e depositato in strati successivi. Le tecniche che utilizzano materiali solidi infine (come le LOM - Laminated Object Manufacturing) costruiscono il modello per incollaggio di fogli successivi, di carta, plastica o altro materiale rivestito da una resina termoplastica che serve da collante. Il foglio viene posato sullo strato precedente, un rullo caldo scioglie la resina e un laser effettua il taglio.

Le tecniche additive in generale sono quelle a cui di norma ci si rivolge per la costruzione di modelli di architettura o di oggetti di design. In particolare le tecniche FDM, per via dei costi contenuti di acquisto e di gestione, costituiscono oggi una risorsa accessibile per la costruzione di modelli di verifica e di controllo di fasi intermedie del processo progettuale (seppure nei modelli low cost queste stampanti non raggiungano risoluzioni particolarmente elevate). Questa breve ricognizione intorno alle finalità e alle tecniche di stampa 3D ci permette di inquadrare l'esperienza condotta dal Nervilab, finalizzata alla costruzione di maquette in scala di alcune opere realizzate da Pier Luigi Nervi, attraverso tecniche di stampa additive, stereolitografiche in ABS⁵.

La metodologia applicata

L'attività di ricerca condotta dal Nervilab ha voluto mettere in evi-

dia si attestano intorno ai 100/200 micron (alcune stampanti possono depositare strati anche più sottili).

5. La stampa di questi modelli a grande scala, realizzata da Materialise, ha avuto il sostegno economico di Italcementi.

denza attraverso la costruzione di questi plastici gli aspetti strutturali e geometrico formali delle opere di Nervi selezionate, in relazione a specifiche fasi progettuali ritenute particolarmente significative. Per la redazione di questi plastici è stata elaborata una metodologia, applicabile al caso generale della costruzione di modelli di architettura, che si articola in quattro fasi principali:

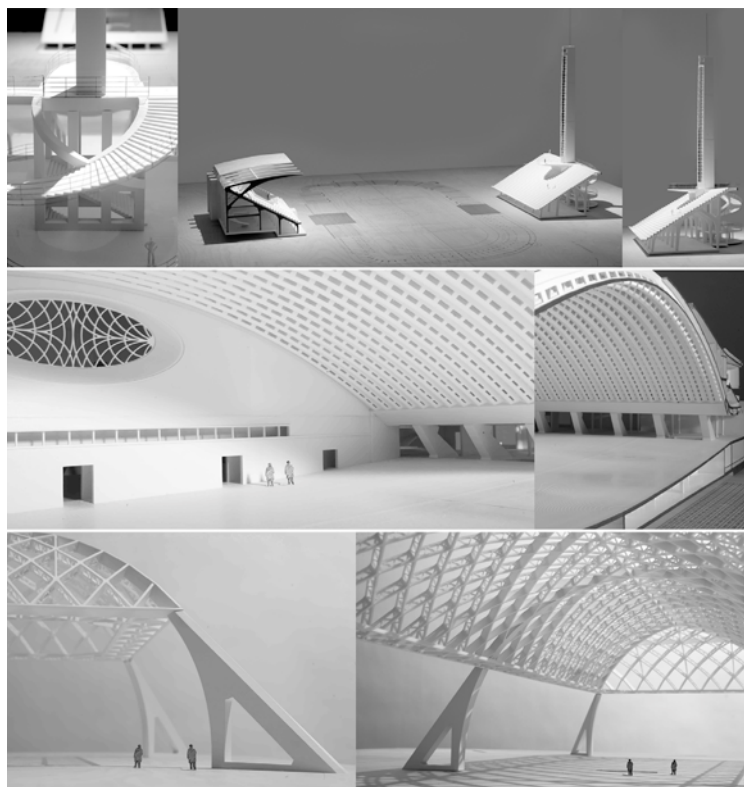
1. *Ri-disegno*: lettura critica, interpretazione del dato e redazione degli elaborati di sintesi per la costruzione del modello.
2. *Rappresentazione matematica del modello*: controllo della geometria delle parti, progetto del modello e relativa scala, verifica della corretta topologia.
3. *Rappresentazione numerica del modello*: trasformazione Nurbs – mesh, tassellazione per il rendering e per la stampa stereolitografica, analisi finale della qualità della mesh.
4. *Stampa stereolitografica*: tecnologia e materiali, finiture e integrazioni.

La prima fase riguarda il ri-disegno degli elaborati di progetto ed il progetto del modello. Si tratta di una fase preliminare delicata in cui si decide che cosa il modello dovrà comunicare, e in cui vengono preparati gli elaborati grafici di base secondo cui questo verrà costruito. Per la redazione dei modelli del Nervilab, che hanno generalmente riprodotto fasi progettuali intermedie piuttosto che la realizzazione vera e propria dell'opera, ci si è serviti dei materiali d'archivio conservati in particolare al Maxxi di Roma, al Civa di Bruxelles, al Csac di Parma, al Coni a Roma (fig. 1). L'interpretazione delle fonti è una fase tanto delicata quanto fondamentale che conduce spesso a vere e proprie scelte progettuali di interpretazione del dato, dovute alle incongruenze che si possono riscontrare fra i diversi ed eterogenei materiali d'archivio.

Stabilite le componenti del progetto che si vogliono rappresentare, si procede con la rappresentazione matematica del modello⁶, ovvero una rappresentazione continua basata sulla matematica Nurbs [3-4]. L'esigenza di una rappresentazione di questo tipo, apparentemente incongruente con i formati poligonali richiesti dalle stampanti 3D, è dovuta alla necessità di controllare con accuratezza la morfologia delle parti che compongono l'opera. Le architetture di Nervi, come noto, sono caratterizzate dall'uso di superfici a doppia curvatura, in particolare rigate, fra cui trovano largo impiego i para-

.....

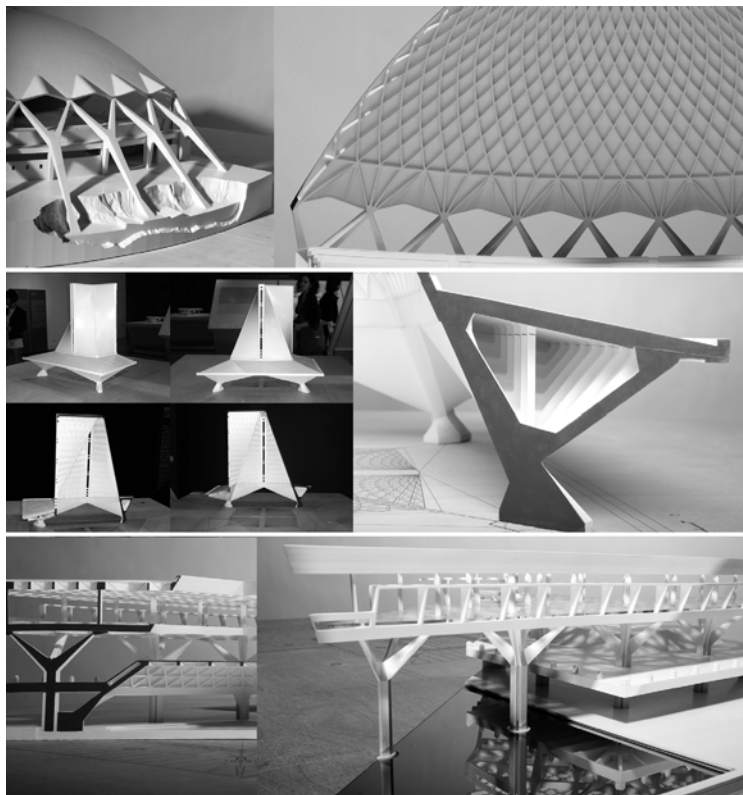
6. Per rappresentazione matematica intendiamo una rappresentazione digitale continua del modello, in cui linee e superfici sono descritte da equazioni matematiche di tipo parametrico; per rappresentazione numerica ne intendiamo invece una rappresentazione discreta, approssimata, basata su listati di coordinate di punti.



F02 | Immagini dei modelli fisici realizzati: Stadio Berta, Firenze; Aula delle udienze pontificie, Città del Vaticano; Aviorimessa, Orbetello (Foto Lode Saidane, courtesy NerViLab).

boloidi iperbolici, conoidi, elicoidi ecc.⁷ (fig. 1). La rappresentazione matematica di queste superfici consente un controllo continuo e accurato, limita l'approssimazione alla sola fase di tassellazione del modello, consente infine l'utilizzo di questo per finalità diverse dalla realizzazione della maquette come, nel nostro caso, analisi di carattere geometrico e strutturale.

-
7. L'uso delle rigate nelle costruzioni, in particolare nell'architettura del cemento armato, trova ragione per via della loro semplicità di esecuzione; le assi delle casseforme venivano infatti disposte secondo le direttrici o le generatrici di queste superfici.



F03 | Immagini dei modelli fisici realizzati: Palazzetto dello Sport, Roma; Cattedrale di St. Mary, San Francisco; Ambasciata d'Italia a Brasilia (Foto Lode Saldane, courtesy NerViLab).

In questa fase si stabilisce la scala che dovrà avere il modello e il relativo taglio. La scelta della scala dipende da ragioni di diverso tipo, legate ai costi del modello stampato e alle dimensioni del bounding box della stampante 3D che si è scelto di utilizzare. Ogni stampante ha un volume massimo di stampa che varia in maniera considerevole da un modello all'altro, anche in ragione della tecnologia utilizzata. Per avere un'idea, possiamo stampare con dei box di volume pari a 15x15x15 cm, dimensioni intorno a cui si aggira lo standard delle stampanti FDM low cost⁸, oppure con dimensioni di 2000x800x700

.....

8. Dimensioni e risoluzione possono variare da modello a modello anche in modo considerevole, e sono date in questa sede a scopo esemplificativo.

cm, come nel caso della stampante stereolitografica Mammooth utilizzata per la riproduzione dei modelli del Nervilab. La scala deve essere considerata anche in funzione dell'eventuale assemblaggio delle parti di cui si compone il modello (fig. 2). Se si lavora con stampanti additive, si deve tener conto anche dell'orientamento del modello. Sulle superfici dei modelli stampati con questa tecnologia infatti, sono ben visibili gli strati dovuti al deposito progressivo di materiale; tali superfici appaiono pertanto tramate da una texture 'a righe', più o meno visibili in funzione dell'accuratezza della stampante (parametro z). La scala infine dovrà essere compatibile con il taglio che si intende dare al modello. Nel caso dei modelli del Nervilab, sono stati scelti degli spaccati capaci di mostrare in maniera efficace le geometrie delle componenti strutturali delle architetture scelte, tenendo anche conto delle simmetrie di alcune delle opere selezionate (fig. 3).

La scala influisce direttamente sul livello di dettaglio che è possibile riprodurre. Questo livello dipende dall'accuratezza della stampante ma si attesta di norma su limiti ben più alti rispetto allo spessore dello strato riproducibile dalla stampante 3D. La costruzione di un modello destinato alla stampa, sebbene sia virtuale, deve tener conto delle stesse problematiche che vincolano la costruzione di una maquette fisica, che dipendono anche dalle proprietà meccaniche dei materiali utilizzati. Sono quindi da evitare elementi realizzati con spessori eccessivamente sottili o angoli particolarmente acuti, specialmente se riprodotti in materiali fragili, come ad esempio il gesso. La scala del dettaglio dipende perciò dall'accuratezza della stampante, dalla scala complessiva del modello, dalle caratteristiche meccaniche del materiale impiegato.

I modelli del Nervilab sono stati quasi tutti assemblati, di norma per ottimizzare la disposizione degli elementi all'interno del box di stampa, ma anche per sperimentare modellazioni di tipo ibrido⁹, in parte mesh, in parte nurbs, come nel caso dell'anello di fondazione del Palazzetto dello Sport (fig. 3).

La realizzazione di un modello matematico ai fini della stampa 3D deve rispondere a pochi ma essenziali requisiti. In estrema sintesi deve essere costituito da volumi chiusi e avere le normali orientate verso l'esterno. I software preposti alla rappresentazione matematica mettono a disposizione diversi strumenti diagnostici di verifica

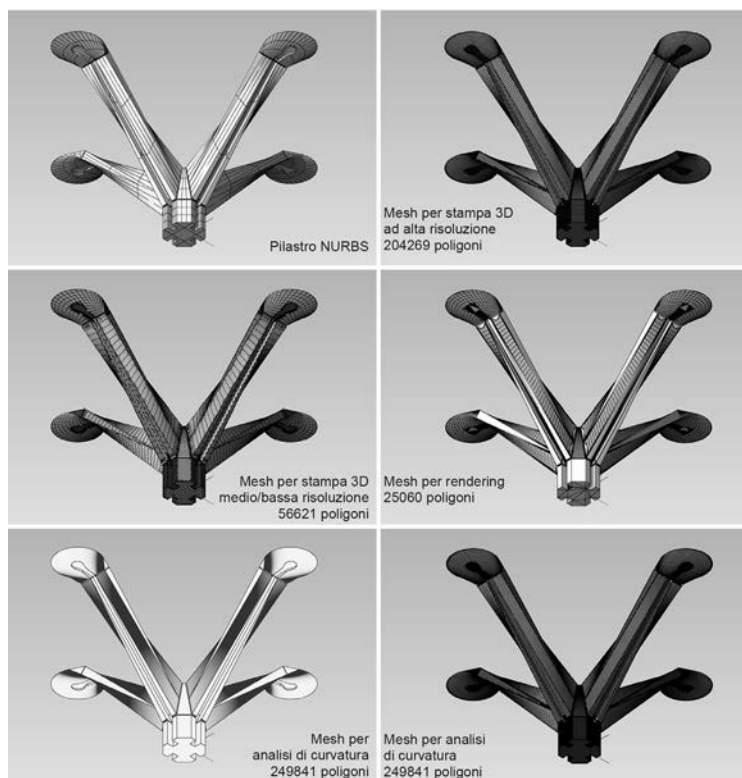
9. Per modellazione di tipo ibrido intendiamo una modellazione che si avvale di superfici nurbs e mesh insieme; questo approccio di tipo misto permette di controllare contestualmente la modellazione rigorosa delle superfici e la modellazione libera di elementi naturali, come lo spaccato del terreno nel caso del Palazzetto dello Sport.

della qualità del modello. Consentono infatti di verificare che sia composto da volumi, o polisuperfici chiuse e valide, che non presenti fori, che abbia le normali orientate nel verso giusto, che non presenti bordi aperti o non-manifold ecc. Rispettare questi pochi requisiti nella costruzione del modello matematico garantisce una conversione in formato poligonale rapida e priva di errori.

La terza fase della metodologia consiste nella conversione di un modello matematico in uno poligonale, quindi approssimato e semplificato perché composto da superfici poliedriche (mesh); questa fase prende il nome di *surface tessellation*. L'obiettivo della tassellazione è quello di cercare soluzioni approssimate. Il campo di applicazione di questi metodi spazia dall'ingegneria civile ed aeronautica fino ad arrivare all'analisi della dinamica dei fluidi per l'industria navale oppure per la medicina (fig. 5). La *surface tessellation* afferisce al più ampio quadro nel quale operano le tecniche informatiche di *meshing* predisposte alla generazione di mesh a partire da un insieme di punti (ordinati o meno), disposti nello spazio. Si tratta di un passaggio molto delicato perché se non ben controllato, rischia di compromettere l'accuratezza raggiunta nella precedente fase di rappresentazione matematica. È evidente che all'aumentare del numero di poligoni corrisponde una maggiore accuratezza di rappresentazione della superficie, ma questa caratteristica deve sempre essere relazionata agli obiettivi preposti, per non incorrere in una inutile e ridondante mole di informazioni. In generale, il requisito principale che deve essere rispettato in una mesh, a prescindere dalle finalità per le quali viene generata, è l'isotropia che, in termini geometrici, si traduce nella costruzione di poligoni triangolari tendenti il più possibile ad essere equilateri. Gli errori di calcolo infatti tendono ad aumentare in prossimità dei vertici dei triangoli dilatati con variazioni evidenti di lati.

La generazione di una mesh comporta una serie di problematiche di natura geometrica, matematica ed informatica che da diversi anni sono divenute oggetto di ricerca e sperimentazioni, per le importanti ricadute che essa trova in diversi settori dell'industria meccanica, della biologia, dell'informatica e della medicina. Molti dei software attualmente disponibili sul mercato, fondano i propri algoritmi su di un principio geometrico chiamato criterio di Delaunay, definito nel 1934 dal matematico russo Boris Delaunay. Si basa su di un concetto molto semplice, che impone che ogni nodo non debba essere contenuto nel cerchio (o sfera nel caso di mesh volumetriche) che circoscrive qualsiasi triangolo (o tetraedro) presente nella mesh (fig. 5). La triangolazione di Delaunay è duale¹⁰ della tassellazione

10. Infatti collegando ogni punto sorgente della tassellazione di Voronoi

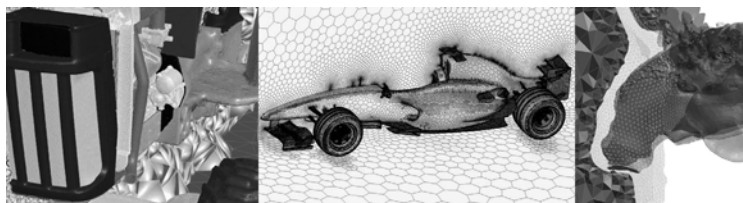


F04 | Esempio del pilastro di Brasilia, tassellato con diversi livelli di accuratezza.

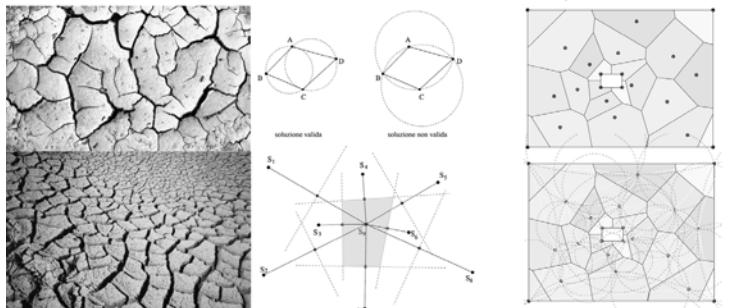
di Voronoi, algoritmo fondamentale nella costruzione di reticoli irregolari che trova campi di applicazione eterogenei come la geofisica, l'informatica, la metallurgia, la biologia e perfino la meteorologia. Grazie al rapporto di dualità tra i due sistemi, è possibile passare da una tassellazione di Voronoi ad una triangolazione di Delaunay con semplici passaggi definibili in una procedura automatica.

Gli approcci alla discretizzazione di una superficie continua espressa in forma parametrica, come le entità NURBS, sono di due tipi: il primo fa riferimento alle caratteristiche geometriche della superficie; il secondo si relaziona allo spazio parametrico (dominio) della

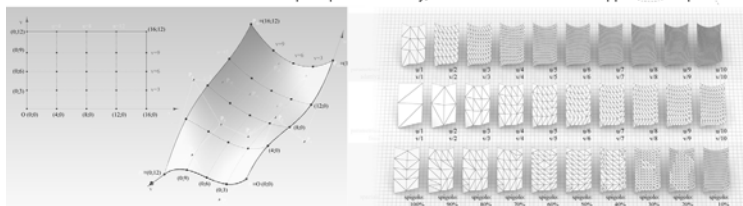
solo con i punti sorgenti dei poligoni adiacenti otteniamo una triangolazione di Delaunay. Inoltre, i centri dei cerchi circoscritti ad ogni triangolo di Delaunay coincidono con i vertici dei poligoni di Voronoi.



mesh volumetriche per il calcolo fluido dinamico



principio di Delaunay, tassellazione di Voronoi e rapporto di reciprocità



dominii di una superficie NURBS a surface tassellazione

F05 | Il meshing e la surface tassellation di superfici NURBS.

superficie stessa. Per caratteristiche geometriche si intende la possibilità di agire su parametri come la lunghezza degli spigoli della mesh (espressa in unità di misura), oppure sulla distanza massima ammissibile tra gli spigoli della mesh e la NURBS. In questo approccio, un parametro molto utile è quello che agisce sulla ampiezza angolare massima ammissibile, tra la normale alla NURBS e le normali ai poligoni della mesh in un intorno dei vertici: più piccolo è questo valore e maggiore è il numero di poligoni che verranno generati, dando luogo ad una mesh accurata. Questo parametro è molto utile laddove si voglia ad esempio discretizzare una superficie con ampie variazioni di curvatura gaussiana, ad esempio per calcolarne una resa chiaroscurale, ed avere una mesh con un alto numero di poligoni nelle zone con curvatura maggiore, ed un numero di poligoni più basso nelle zone con curvatura prossima allo zero. L'approccio sul

dominio della superficie invece, genera ottimi risultati di isotropia nel caso di superfici con parametrizzazione a distanza, cioè nei casi in cui il parametro sia uniformemente distribuito sull'intera superficie. In questi casi infatti, i parametri u e v possono essere suddivisi in n e t parti, in modo da creare una griglia ordinata di punti che costituirà la posizione dei nodi della mesh.

Il procedimento che regola la trasformazione da modello matematico a modello numerico, non segue un unico iter operativo, ma si declina in ragione delle strumentazioni con cui si opera e delle caratteristiche geometriche del modello da stampare. La stampante 3d utilizzata nell'esperienza Nervilab (Mammoth Stereolithographic di Materialise) è stata scelta sia per le significative dimensioni dei modelli stampati, sia perché lavora con l'ABS, resistente e pertanto adatto alla realizzazione di plastici soggetti a continue sollecitazioni, come quelli realizzati per una mostra itinerante.

Il requisito principale di una mesh per una stampa 3D è, come già detto, quello della regolarità di distribuzione dei poligoni (fig. 4). La regolarità della mesh può comportare in fase di conversione del modello un consistente numero di poligoni, che è consigliabile tenere sotto controllo per evitare di sovraccaricare il software Cam che dovrà gestire il modello nella sua fase di invio alla stampa. Nel caso del Nervilab il software utilizzato ha consentito la gestione di file di lavoro con milioni di poligoni, di conseguenza la tassellazione ha potuto generare mesh un altissimo numero di poligoni anche nel caso di superfici che avrebbero potuto essere ottimizzate. L'obiettivo principale è stato quello di ottenere una maglia più isotropa ed omogenea possibile.

La mesh, composta da poligoni triangolari¹¹ deve verificare le condizioni topologiche descritte per le entità rappresentate matematicamente, in particolare deve essere solida, chiusa, con le normali unificate e rivolte verso l'esterno, e compatibile con la tolleranza usata dalla stampante 3d. Se la fase di rappresentazione matematica è stata eseguita secondo i principi teorici sopra descritti, la verifica di queste condizioni topologiche e metriche, diventa un passaggio semi automatico nel quale si rende necessaria solo una verifica eseguita con gli strumenti CAM proprietari delle aziende delle stampanti 3d. Nel caso del Nervilab in particolare, Materialise ha sviluppato un software CAM (Magic), che consente la verifica topologica dei file .stl, l'eventuale modifica e correzione di errori, ed infine la

.....

11. Il formato standard condiviso per la stampa 3D è l'.stl; tale formato ammette mesh triangolari, non quadrilatere; i poligoni quadrilateri vengono ulteriormente suddivisi in fase di salvataggio attraverso una diagonale, a garanzia della planarità del poligono.

progettazione della fase di stampa (risoluzione, orientamento, struttura di supporto ecc.).

A conclusione del processo di stampa i modelli sono stati liberati dalle rispettive strutture di supporto¹², levigati e verniciati¹³.

Le parti sono state infine assemblate e i modelli predisposti per l'esposizione. La fase di assemblaggio ha previsto inoltre l'integrazione di elementi di dettaglio che, per via delle dimensioni ridotte, o per condizioni di eccessiva fragilità, o ancora per esigenze comunicative del modello, non sono state stampate, ma che sono invece state realizzate con materiale diverso. L'ultima fase del processo ha interessato l'allestimento, di cui si è tenuto conto sin dalla scelta delle sezioni del modello. L'uso di specchi e la collocazione del modello su di una planimetria stampata su legno hanno consentito la lettura dell'insieme dello spazio attraverso le sue proprietà di simmetria.

Conclusioni

L'esperienza di NerViLab è stata, e continua ad essere¹⁴, l'occasione per evidenziare le potenzialità della rappresentazione digitale sperimentale e della prototipazione rapida.

Le stampanti 3D rendono più diretto e controllato il rapporto fra il progetto del modello e la sua esecuzione, tradizionalmente mediato dalla figura dell'artigiano. Grazie anche alla diffusione che negli ultimi anni hanno avuto le stampanti 3D, il progettista può controllare in modo accurato la realizzazione del modello in tutte le fasi del processo creativo.

Come abbiamo visto, il processo della costruzione del modello è suddiviso nell'utilizzo di una forma di rappresentazione matematica, continua, e una forma numerica, discreta, e in una trasformazione di informazioni fra queste due forme che la tecnologia sta rendendo ogni giorno più agevole e rapida. La rappresentazione matematica è in grado di ricreare nell'ambiente digitale forme geometriche complesse, in modo da poter studiare le proprietà geometriche,

-
12. Nel caso di oggetti o sbalzi significativi i software Cam progettano una struttura di supporto, necessaria per evitare il collasso di parti aggettanti del modello nelle fasi di avanzamento della stampa. Queste verranno rimosse in seguito dall'intervento di un operatore che si occuperà inoltre della levigatura delle parti di attacco con la struttura temporanea, e delle fasi di verniciatura protettiva finali.
 13. Non sempre è necessaria la fase di levigatura e verniciatura, come invece nel caso dei modelli del Nervilab.
 14. Attualmente il gruppo di lavoro sta affrontando lo studio di progetti non realizzati di Pier Luigi Nervi.

strutturali e costruttive con livelli di accuratezza mai raggiunti prima da qualsiasi altro metodo di rappresentazione sintetica. I modelli architettonici stampati, derivati da modelli matematici, hanno il pregio di una elevata accuratezza, il che li rende uno strumento di progettazione prezioso. Questi modelli, infine, in continuità con la tradizione della maquette architettonica, hanno uno straordinario potenziale comunicativo, che li rende interessanti per scopi educativi ed informativi. Negli ultimi anni la prototipazione rapida è diventata sempre più sofisticata e si è largamente diffusa, tanto da essere destinata a diventare uno standard nel disegno professionale. La riduzione dei costi di stampa, raggiunta anche grazie all'introduzione sul mercato di stampanti auto-costruite, ne ha favorito l'adozione in ambito didattico e di ricerca, aprendo la strada a possibili nuove sperimentazioni.

Tra le ricerche più avveniristiche possiamo ad esempio segnalare quelle applicate in ambito medico scientifico. Materialize, che ha realizzato i modelli del Nervilab presentati in questo articolo, ha contribuito a vari esperimenti in ambito medico relativi alla ricostruzione e al trapianto di alcuni organi umani. In questo scenario, la realizzazione di modelli fisici basati direttamente su modelli digitali, sta diventando l'oggetto di ricerca in settori applicativi eterogenei, che vanno dalla progettazione architettonica alla medicina, ad altri settori molto distanti fra loro.

Bibliografia

- [1] BAGLIONI L., FALLAVOLLITA F., ROMEO F., SALVATORE M. *I dodici modelli del NerViLab*, in OLMO C., CHIORININO C. (a cura di), Pier Luigi Nervi, architettura come sfida. Cinisello Balsamo, Milano: Silvana Editoriale. 2010, pp. 236-237.
- [2] CINTI LUCIANI S., MIGLIARI R., *Rappresentazione matematica*, in MIGLIARI R., Geometria descrittiva, vol. I, Novara: CittàStudi de Agostini. 2009, pp. 206-227.
- [3] DE ANGELIS M., MIGLIARI R., SDEGNO A., *Rappresentazione numerica o poligonale*, in MIGLIARI R., Geometria descrittiva, vol. I, Novara: CittàStudi de Agostini. 2009, pp. 228-254.
- [4] FALLAVOLITA F., *Le superfici rigate*, in MIGLIARI Riccardo, Geometria Descrittiva, Vol. II, Novara: CittàStudi de Agostini. 2009, pp. 153-223.
- [5] POTTMANN H., ASPERL A., HOFER M., KILIAN A., *Architectural Geometry*. Exton: Bentley Institute Press. 2007, pp. 567-578.
- [6] Laboratory for Integrated Prototyping and Hybrid Environment (Liphe) of McGill School of Architecture, <http://liphe.mcgill.ca/about.html>.
- [7] OXMAN N., *Variable property rapid prototyping*, In Journal of Virtual and Physical Prototyping (VPP), Vol. 6, n. 1, March 2011, <http://web.media.mit.edu/~neri/site/>
- [8] RepRap self-replicating manufacturing machine, http://www.reprap.org/wiki/Main_Page.

Computer Grafica e design delle installazioni interattive e multimediali

Tommaso Empler

Sapienza Università di Roma

Dipartimento di Storia, Rappresentazione e Restauro dell'Architettura

Introduzione

Nella progettazione parametrica il collegamento dinamico fra gli eventi generatori di input, il progetto considerato come elaborazione digitale e la rappresentazione formale, quale elemento di output, può trovare una valida forma di simulazione cinematografica mediante le installazioni interattive e multimediali.

Le “interaction and multimedia experiences” consentono di sviluppare nuovi metodi di comunicazione e comprensione dei sistemi responsivi con la movimentazione delle forme in tempo reale grazie ad alcune modalità d'interazione.

Interaction and Multimedia Experiences

Le installazioni interattive si propongono come strumenti innovativi di comunicazione e divulgazione sia nel settore della ricerca che della documentazione, come, ad esempio, nei Musei.

Le principali componenti delle installazioni interattive sono: gli utilizzatori, i contenuti, la tecnologia.

L'utilizzatore è pienamente coinvolto nell'esperienza, poiché la percezione degli oggetti e la loro comprensione dipende solo ed esclusivamente dalle sue azioni. Gli viene fornita l'opportunità di esperire e scoprire totalmente l'oggetto d'interesse, ma è compito dell'utilizzatore stesso sfruttare ogni mezzo per la comprensione e la conoscenza di quanto viene esplorato.

La conoscenza avviene attraverso sistemazioni spaziali che sfruttano le tecnologie digitali interattive. Quadri, sculture (nel caso dei musei) ed oggetti in genere vengono raccolti ed organizzati

secondo un progetto espositivo; sono organizzati con la forma di comunicazione ritenuta più efficace e proiettati frontalmente o retroproiettati su schermi verticali od orizzontali, che costituiscono il supporto all'interazione che si vuole far esperire: il semplice gesto della mano, o dei piedi dell'utilizzatore può animare l'installazione, far ruotare gli oggetti, illuminarli, apparire documenti, cambiare scenari, ecc.

La tecnologia delle installazioni interattive è in grado di catturare l'attenzione degli utilizzatori di ogni età, conducendoli lungo un percorso visivo, tattile ed uditivo. L'innovazione non consiste solo nel coniugare le nuove tecnologie con la ricerca, ma anche nel presentare contestualizzati oggetti ed eventi spesso appartenenti a situazioni reali o virtuali, con simulazioni digitali realistiche.

Nella realizzazione delle installazioni interattive sono implicate due procedure:

- la componente della comunicazione visiva nell'ambito della comunicatività del sistema ipotizzato;
- la componente della multimedialità nella definizione del sistema d'interazione uomo/macchina.

Componente della comunicazione visiva

Alla base della definizione ed organizzazione della componente della comunicazione visiva sono da considerare alcuni aspetti che derivano dagli studi condotti in ambito percettivo, artistico e di gestione degli spazi da Kevin Lynch, Rudolf Arnheim ed Edward T. Hall.

Kevin Lynch, ha condotto degli studi che dimostrano l'esistenza di alcuni automatismi comportamentali/percettivi nel rapporto uomo/oggetto.

In termini di urbanistica vengono elencati una serie di elementi ricorrenti nella struttura della città:

- Paths (percorsi): di solito le strade, luogo utilizzato per lo spostamento;
- Edges (margini): limiti visivi e urbani;
- Nodes (nodi): luoghi d'incrocio tra i diversi percorsi;
- Landmarks (punti di riferimento): segnalatori urbani che condizionano il comportamento del soggetto;
- Districts (quartieri): cellule complesse di cui è composta la città.

Questo studio è utile per riflettere sul concetto in cui l'organizzazione della percezione dello spazio è condizionata anche dall'interpretazione che il fruitore attribuisce ai diversi elementi in esso ricorrenti, e questo tanto nella città, quanto in uno spazio chiuso, come ad esempio un museo.

In ambito percettivo, creando degli elementi dotati di una funzione



F01 | *Interazione analogica, anamorfosi di Felice Varini, Parigi.*

chiara, si possono sfruttare le organizzazioni percettive già interiorizzate dal fruitore, utilizzando codici di comportamento già appresi nel passato per approcciare una nuova e diversa situazione ambientale.

In quest'ottica se, ad esempio, una data installazione interattiva propone un'interfaccia "a forma" di panchina, il fruitore in primis penserà a "sedersi". Analogamente se viene chiesto al fruitore di non sedersi sulla panchina ma, ad esempio, di accarezzarla, si attiva un fenomeno di dissonanza cognitiva, che crea un "corto circuito" tra i comportamenti che il soggetto ha precedentemente appreso, e che, quindi, possono essere dati per associati, ed il comportamento che, invece, gli viene richiesto.

Questo fenomeno, che aumenta la difficoltà di relazione uomo/macchina, può rivelarsi, se supportato da un'interazione di tipo ludico o spettacolare, comunque efficace in quelle installazioni volte a ricontestualizzare un oggetto, o ciò che esso rappresenta all'interno di un nuovo contesto.

Lynch propone più approcci per problemi derivanti dall'analisi dell'ambiente fisico (concepiti per lo spazio urbano ma riadattabili all'analisi dello spazio privato):



F02 | *Interazione analogica, anamorfosi presso la Cité des Sciences et de l'Industrie, Parigi.*

F03 | *Interazione analogica, anamorfosi presso la Cité des Sciences et de l'Industrie, Parigi.*

- a. descrittivo;
- b. studio delle trasformazioni dell'ambiente;
- c. pragmatico: considera ogni caso di studio nella sua unicità, l'attenzione è posta sulla soluzione di problemi relativi alla rimodellazione dell'ambiente fisico, orientata al perseguimento di un obiettivo comunicativo (normalmente in termini di risposta del fruitore). Come vantaggio ha quello di essere un metodo di analisi profondamente ancorato al "reale", ma soffre dell'inesattezza metodologica che si manifesta utilizzando teorie di carattere generale adattate a casi specifici;
- d. rapporto obiettivo/forma: è una variante più astratta del metodo sopra descritto.

Questo approccio ha a che fare col modo in cui assetti fisici alternativi agevolano od inibiscono differenti obiettivi individuali e sociali. L'approccio è focalizzato sull'azione e mira a definire ambienti ottimali per specifiche azioni. Una criticità di questo metodo è da relazionare al suo carattere statico.

Per utilizzare l'ottica di Arnheim un'installazione, nella sua manifestazione fisica, deve essere considerata come oggetto d'arte¹

1. R. ARNHEIM, *Per la salvezza dell' arte. Ventisei saggi*, Feltrinelli, Bologna, 1992, p.25.



F04 | *Interazione digitale, interazione con touch panel con utilizzo di Adobe Flash, Casa dell'Architettura, Roma.*

e si manifesta quindi come un “contenitore ed espositore” di tutte le proprietà che interrogano l’utente (in termini di riflessione, come di risposta fisica ad uno stimolo).

Ciò implica che la qualità fisica di un’opera d’arte sia la sua capacità di essere facilmente percepibile e ciò perchè i sensi sono già predisposti a cogliere i segnali rilevanti; alla comprensibilità dello stimolo corrisponde un più alto tasso di risposta da parte del fruitore.

Da questo primo contatto con l’opera, quello prettamente percettivo, scaturisce la possibilità di accedere a tutte le attrattive relative al contenuto dell’opera, nonché tutte le associazioni personali che possono legare l’opera al fruitore.

In quest’ottica si deve perseguire quella che Arnheim definisce come “ordine ed armonia”, ossia una struttura organizzata che consenta all’opera di illustrarsi spontaneamente.

Edward T. Hall propone una cultura e gestione dello spazio basati sulla prossemica, che può essere riguardata come uno dei sistemi di comunicazione non verbale più semplici, che regola il senso delle distanze tra gli individui.

Vengono definite da Hall quattro diverse zone, ognuna suddivisa in due fasi di vicinanza e di lontananza, all’interno delle quali i soggetti definiscono le relazioni dell’uno con l’altro:

- *distanza intima*, in cui la presenza dell'altro è evidente ed il coinvolgimento è ingigantito a causa dell'intensificarsi dei rapporti sensoriali;
- *distanza intima distanza personale*, va dai 45 ai 120 cm di distanza tra i soggetti coinvolti, la presenza dell'altro continua ad essere evidente, ed è possibile entrare in rapporto con lui mediante le estremità del corpo. La fase di lontananza è quella in cui si discutono argomenti di interesse e carattere personale;
- *distanza sociale*, è divisa dalla zona precedente dal cosiddetto "limite di dominio". La fase di lontananza è usata per isolare o schermare gli individui;
- *distanza pubblica*, vai dai 3,5 m in poi ed è la distanza che ci fa sentire liberi di scappare.

L'argomento delle distanze può essere utile nel progettare un'installazione nel momento in cui va considerato il tipo di relazione "sociale" che si intende far scattare tra uomo e macchina. Un'interfaccia che necessita di una manipolazione diretta di strumenti verrà recepita dal fruitore come realtà intima e per questo bisognerà predisporre dei meccanismi che inducono il soggetto a "fidarsi" dell'installazione stessa.

Viceversa un'interfaccia che funziona, ad esempio, con il movimento della propria ombra proiettata su uno schermo, non violerà lo spazio intimo di un soggetto, pur coinvolgendone il corpo.

La prossemica risulta culturalmente definita, ossia esiste una diversa gestione delle distanze e dei loro significati nelle diverse culture del pianeta. Questo implica che un'analisi in questa direzione va sempre ricondotta ad un sistema di riferimento, ossia alla cultura all'interno della quale ci si muove nel creare un sistema multimediale.

Infine si può considerare una "semiotica dello spazio", dove nel considerare lo spazio come testo si possono considerare vari parametri, ma l'approccio più utile allo scopo proposto è quello che considera come opposizione fondamentale quella tra unità e molteplicità, tra "spazio frammentato" e "spazio olistico".

Lo "spazio frammentato" è suddiviso al suo interno anche allo sguardo esterno, predispone una intravisione molteplice fra interno ed esterno e provoca una moltiplicazione dei punti di vista; è ciò che avviene ricreando uno spazio frammentato all'interno di unico ambiente ed allestendo le varie "divisioni tra i frammenti", avendo cura di creare dei percorsi visivi obbligati che consentono agli sguardi dei visitatori di muoversi parzialmente tra i diversi ambienti. La narrazione che ne deriva è multipla ed ipertestuale, non viene definito a priori un percorso che tocca tutti gli eventi, ma viene lasciata al fruitore la possibilità di concatenare gli episodi (ossia



F05 | *Interazione digitale, projection mapping generativo, Marsiglia.*

i vari pezzi esposti) come meglio crede. Altresì il fruitore potrà decidere di creare più narrazioni, ripercorrendo più volte ed in maniera sempre nuova lo spazio espositivo.

Lo “spazio olistico” rappresenta un'unità più o meno omogenea e, normalmente, al suo interno va definito un percorso unico e chiaro. Si percepisce chiaramente l'impossibilità di definire una narrazione personale, abbracciando completamente il percorso narrativo proposto. L'allestimento diviene secondario, serve sostanzialmente

a rivestire lo spazio. A questo spazio corrisponde una narrazione di tipo classico, in cui viene definito a priori un continuum da seguire e le scelte del fruitore sono ridotte al minimo (accettazione o rifiuto di intraprendere il percorso narrativo).

Questo utilizzo dello spazio risulta di difficile gestione. Non lascia al fruitore la possibilità di sviluppare il suo percorso per prove ed errori, correggendosi da solo, in modo da trovare autonomamente il massimo grado di soddisfazione; è necessario che il percorso definitivo sia creato con la massima cura.

Il tipo di spazializzazione deve, comunque, rispettare le caratteristiche degli oggetti proposti, creando un percorso che sia adeguato al tipo di oggetto da raccontare. Uno spazio “frammentato” e “multiplo” sarà in accordo con un’esposizione d’arte contemporanea, che si arricchirà dei messaggi proposti dall’allestimento, che non solo definiranno il taglio della narrazione, ma inviteranno anche al suo stravolgimento.

Va ricordato che nell’ottica di un’estetica di contrasto, o di rottura si possono accostare oggetti e spazi in netto contrasto tra loro, ma sempre avendo ben chiari gli effetti sul senso che ciò produce.

Componente della multimedialità

La componente dell’interazione/multimedialità è articolata in due ambiti: uno analogico ed uno digitale.

Interazione analogica

Nell’interazione analogica è previsto un coinvolgimento diretto dell’individuo attraverso la stimolazione dei diversi canali sensoriali. Sono possibili soluzioni multisensoriali o che privilegiano un particolare senso, come nel caso del senso visivo con i sistemi di illusione ottica. La percezione sensoriale, dal punto di vista concettuale, si allinea con una affermazione di Bruno Munari: *la comunicazione visiva avviene per mezzo di messaggi visivi, i quali fanno parte della grande famiglia di tutti i messaggi che colpiscono i nostri sensi, sonori, termici, dinamici, ecc. Si presume, quindi, che un emittente emetta dei messaggi e un ricevente li riceva*².

Nell’uso comune distinguiamo un ventaglio discretamente ampio di forme di comunicazione, oltre a quella visiva è possibile indicare quella uditiva, tattile, olfattiva, gustativa, che sono associate ai relativi meccanismi percettivi, definibili come indizio visivo, acustico, olfattivo, tattile.

.....

2. B. MUNARI, *Design e comunicazione visiva*, Laterza, Bari, 1993, p. 84.



F06 | *Interazione digitale, interazione con il sistema kinect in cui sono utilizzati Processing ed Arduino, Casa dell'Architettura, Roma.*

F07 | *Interazione digitale, interazione con il sistema kinect in cui sono utilizzati Processing ed Arduino, Casa dell'Architettura, Roma.*

Queste forme di comunicazione sono in parte o tutte coinvolte.

Un'ulteriore riflessione meritano i sistemi di illusione ottica ricondotti all'anamorfismo.

Il termine "anamorfismo" deriva dal greco, *ana* = di nuovo e *morfé* = forma (forma ricostruita), e si riferisce ad un tipo di arte realistica in cui l'immagine della realtà è distorta da una trasformazione proiettiva, in modo da rendere difficile il riconoscimento del soggetto rappresentato (come nel caso di alcune applicazioni su dipinti) o creare una deformazione scientificamente controllata per ottenere effetti speciali (come nel caso di alcune applicazioni architettoniche). L'immagine del soggetto, nei termini abituali, può essere "formata di nuovo" osservando l'immagine distorta da un determinato punto di vista (il punto di vista prospettico P.V. o centro di proiezione), prendendo il nome di "anamorfosi diretta" oppure riflessa su una superficie specchiante, con il nome di "anamorfosi catottrica". Questo tipo di specchio, solitamente di forma cilindrica o conica, viene definito anamorfoscopio.

La tecnica ampiamente utilizzata a partire dal periodo rinascimentale e per tutto il periodo Barocco, oggi utilizza le medesime regole costruttive del passato, facilitate dall'uso delle nuove tecnologie e dagli strumenti informatici, mentre gli scopi sono sostanzialmente diversi. Se nel passato in ambito architettonico l'anamorfosi obliqua piana serviva per simulare e dare profondità a spazi finti (come per la cupola di Sant'Ignazio a Roma), oggi l'obiettivo è stupire l'osservatore con installazioni artistiche (temporanee o permanenti) o decorazioni degli spazi esterni (fig. 1) o d'interni (figg. 2-3),

oppure comunicare un messaggio pubblicitario tramite l'uso dei nuovi media ed ancora veicolare messaggi comportamentali in determinate situazioni (come nella segnaletica orizzontale stradale). Il sintesi si ha un passaggio d'uso della tecnica anamorfica da finalità utilitaristiche a scopi prevalentemente ludici.

La possibilità offerta dall'occhio virtuale della camera fotografica o dalla telecamera ne consente un'ampia diffusione sui mezzi telematici e sul web, la camera viene sempre posizionata nel centro di proiezione, per vedere ricostruita l'immagine originale disposta sul piano orizzontale, verticale o decostruita su più oggetti³.

Interazione digitale

Nel sistema digitale l'installazione interattiva è organizzata con alcune componenti di base:

- lo sviluppo di un'applicazione, realizzata con un apposito software (Processing o Flash), che consente un'interazione con il visitatore ed avente come soggetto l'oggetto proposto;
- un'unità di calcolo (PC) in cui viene eseguita l'applicazione;
- un videoproiettore, con ottica grandangolare per evitare auto ombreggiamenti, collegato all'unità di calcolo per visualizzare la scena sulla superficie predisposta;
- diffusione degli eventuali effetti sonori;
- interazione mediante un dispositivo dotato di sensore e capace di captare i movimenti dell'utilizzatore e trasferirli all'unità di calcolo per creare interazione con l'applicazione stessa, creando un sistema di azione/reazione tra l'uomo e la macchina.

Il progetto d'interazione avviene mediante l'uso di alcuni software specifici come Processing o Flash, mentre l'interazione con il visitatore è gestita con sistemi sensibili al corpo umano tipo "kinect" o gestiti mediante sensori da Arduino.

Processing

Processing è un linguaggio di programmazione basato su Java, che consente di sviluppare diverse applicazioni come giochi, animazioni e contenuti interattivi. Da Java eredita completamente la sintassi, i comandi e il paradigma di programmazione orientata agli oggetti, ma in più mette a disposizione numerose funzioni ad alto livello per gestire facilmente l'aspetto grafico e multimediale. È distribuito sotto licenza Open Source, ed è supportato dai sistemi operativi GNU/Linux, Mac OS X e Windows. Processing può interagire con la scheda hardware Arduino.

.....
3. T. EMLER, *Grafica e Comunicazione Ambientale*, Dei, Roma, 2012, p. 76-87.

Le varie creazioni sono denominate sketch e sono organizzate in uno sketchbook. Ogni sketch contiene in genere, oltre alle classi di oggetti che lo compongono, una cartella Data in cui viene inserito il materiale multimediale utile all'applicazione, come, ad esempio, immagini, font e file audio. Ogni applicazione creata può inoltre essere esportata come Java applet.

Adobe Flash

Adobe Flash (in precedenza Macromedia Flash e ancora prima FutureSplash) è un software per uso prevalentemente grafico che consente di creare animazioni vettoriali principalmente per il web. Viene utilizzato inoltre per creare giochi o interi siti web e grazie all'evoluzione delle ultime versioni è divenuto un potente strumento per la creazione di Rich Internet Application e piattaforme di streaming audio/video. Viene inoltre incorporato nei Media Internet Tablet (M.I.T.) della Archos.

Flash, tra le sue principali caratteristiche, permette di creare animazioni complesse e multimediali (figg. 4-5). All'interno di esse infatti si possono inserire:

- forme vettoriali, che sono gli oggetti principali con cui Flash permette di lavorare;
- testo (sia statico sia dinamico) e caselle di input per il testo;
- immagini raster (Bitmap, GIF, Jpeg, PNG, TIFF e altri formati) sotto forma di oggetto bitmap;
- audio (MP3, WAV e altri), sia in streaming che per effetti sonori;
- video (AVI, QuickTime, MPEG, Windows Media Video, FLV);
- altre animazioni create con Flash (tramite ActionScript o interpolazioni).

Inoltre permette di creare animazioni interattive, grazie alla presenza di un linguaggio di scripting interno. Tramite questo linguaggio, denominato ActionScript e basato su ECMAScript, è possibile applicare comportamenti agli oggetti o ai fotogrammi dell'animazione. Inizialmente erano presenti solo poche azioni, ma allo stato attuale ActionScript è diventato uno strumento molto potente. Grazie ad esso si possono creare infatti menu, sistemi di navigazione, GUI, siti web completi e giochi anche complessi.

Un'altra caratteristica importante è la possibilità di mantenere simboli riutilizzabili in una libreria. Esistono diverse tipologie di simboli, fra i quali semplici oggetti grafici, clip filmato (sotto-animazioni con una timeline propria e indipendente da quella principale), pulsanti, oggetti bitmap, ecc. Questa caratteristica è molto importante, in quanto permette di: semplificare il lavoro dello sviluppatore, che può modificare tutte le istanze presenti nell'animazione modificando il simbolo nella libreria; ridurre le

dimensioni del file SWF prodotto; creare comportamenti interattivi complessi applicando del codice agli oggetti.

Arduino

Arduino può essere utilizzato per lo sviluppo di oggetti interattivi stand-alone ma può anche interagire, tramite collegamento, con software residenti su computer, come Adobe Flash, Processing, Max/MSP, Pure Data, SuperCollider, Vvvv.

Grazie alla base software comune, ideata dai creatori del progetto, per la comunità Arduino è stato possibile sviluppare programmi per connettere a questo hardware più o meno qualsiasi oggetto elettronico, computer, sensori, display (figg. 6-7) o attuatori. Dopo anni di sperimentazione è oggi possibile fruire di un database di informazioni vastissimo.

Il team di Arduino è composto da Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino, e David Mellis. Il progetto prese avvio in Italia a Ivrea nel 2005, con lo scopo di rendere disponibile, a progetti di Interaction design realizzati da studenti, un dispositivo per il controllo che fosse più economico rispetto ai sistemi di prototipazione allora disponibili. I progettisti riuscirono a creare una piattaforma di semplice utilizzo ma che, al tempo stesso, permetteva una significativa riduzione dei costi rispetto ad altri prodotti disponibili sul mercato. A ottobre 2008 in tutto il mondo erano già stati venduti più di 50.000 esemplari di Arduino.

Bibliografia

- [1] R. ARNHEIM, *Per la salvezza dell'arte. Ventisei saggi*. Bologna: Feltrinelli. 1992, p. 25.
- [2] B. MUNARI, *Design e comunicazione visiva*. Bari: Laterza. 1993, p. 84.
- [3] T. EMLER, *Grafica e Comunicazione Ambientale*. Roma: Dei. 2012, p. 76-87.

I metodi di comunicazione dei sistemi responsivi

Fabio Quici

Sapienza Università di Roma

Dipartimento di Storia, Rappresentazione e Restauro dell'Architettura

Con l'aggettivo "responsivo" ci riferiamo generalmente a tutto ciò che reagisce o risponde tempestivamente e adeguatamente ad uno stimolo, ad un ambiente, ad un supporto. I sistemi responsivi comportano un mutamento, o adattamento, che incide sulla loro forma sostanziale o anche solo sulla loro componente visuale. Se escludiamo gli organismi biologici e la fisica, la responsività si può innescare sia mediante algoritmi sia mediante sistemi meccanici. Se ci poniamo il problema della comunicazione e quindi della rappresentazione di tali sistemi dobbiamo dunque confrontarci necessariamente con immagini che si modificano nel tempo o con delle trasformazioni fisiche vere e proprie di tipo cinetico.

Vale qui la pena ricordare in tal senso le esperienze maturate nell'ambito dell'arte cinetica degli anni Venti, la quale era già orientata all'indagine e alla sperimentazione di tutti gli aspetti della visione del movimento e del movimento stesso, reale o virtuale, come mezzo di espressione. In particolare, nell'ambito dell'Arte Programmata — l'evoluzione dell'arte cinetica negli anni Cinquanta e Sessanta —, l'opera veniva considerata come un oggetto che è occasione di sperimentazione nel convogliare vari percorsi interpretativi della relazione tra soggetto e oggetto. La progettazione dell'opera era studiata nei particolari in funzione dello spettatore, considerata anche "la possibilità di interazione di fattori aleatori o probabilistici e la sua moltiplicabilità seriale"; e si completava attraverso l'uso di tecniche produttive tipiche dell'industria.

Un sistema responsivo sembrerebbe dunque rispondere soprattutto ai requisiti del disegno industriale; ma non si tratta necessariamente di un ambito così circoscritto, come vedremo.

Viene naturale pensare che il mezzo di comunicazione più idoneo per sistemi di questo tipo sia la ripresa video. Ma può realmente dirsi sufficiente ed efficace? La videocamera è uno strumento di registrazione omnicomprendivo che coglie tutto indifferentemente, mentre nei sistemi responsivi sono coinvolte numerose diverse componenti ed entità che chiamano in causa l'interazione, quindi azioni, elementi fisici e tecnologie ma anche risposte percettive e psicologiche, quindi azioni e reazioni. Come comunicare dunque questo complesso insieme di componenti?

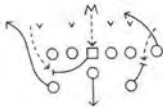
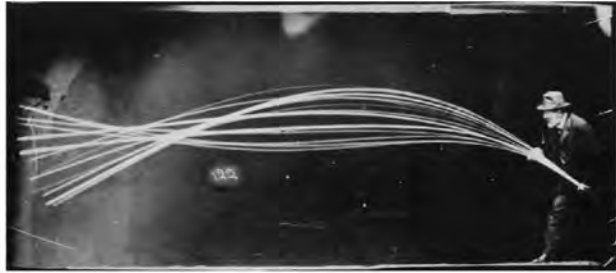
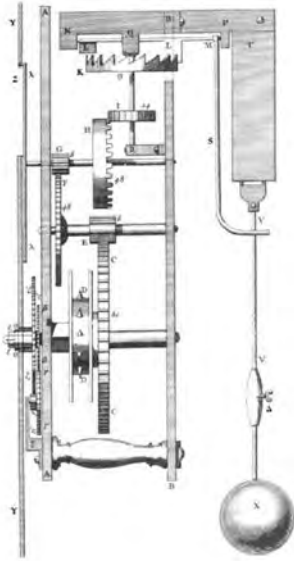
Prendiamo in esame l'installazione *Hyper Matrix* realizzata dal collettivo di *media arts* Jonpasang (Jin-Yo Mok, Sookyun Yang, Earl Park, Jin-Wook Yeo e Sang.Wook Yu) per il padiglione espositivo del gruppo Hyundai Motor all'Expo 2012 di Yeosu.

Si tratta di un "paesaggio cinetico verticale" realizzato attraverso migliaia di cubi di misura 30x30 che danno forma a tre pareti delimitanti uno spazio interno nel quale prendono posto gli spettatori. Una struttura d'acciaio supporta i motori che controllano ciascun volume. I cubi appaiono estrudersi dalla superficie della struttura creando una serie infinita di configurazioni predefinite, come dei pixel digitali tradotti in termini fisici che si diffondono nell'ambiente, mentre suoni suscitano un più profondo senso di interazione tra l'audience e lo spazio circostante. Oltre ai movimenti dei cubi, ulteriori effetti ottenuti mediante *digital mapping* coprono le superfici per amplificare visivamente la dimensionalità dell'installazione e l'ambiguo confine tra realtà e virtualità.

Più recente, è l'installazione *Responsive Hexi Wall* dello studio canadese Thibaut Sld. Si tratta in questo caso di un sistema a parete costituito da 60 moduli esagonali in grado di muoversi. Hexi è un muro responsivo perché la sua forma fluttua, si modifica, interagendo con i nostri movimenti (Fig. 5). Il progetto realizza una sintesi tra robotica e arte chiamando in causa l'interazione nel momento in cui usa dati raccolti in *real-time* registrati mediante tecnologia *motion-tracking* per decodificare e interpretare i gesti e le azioni di una persona prossima all'installazione.

Nel primo caso si ha la riproposizione di una esperienza che, in fondo, è ancora teatrale. Il sistema responsivo *Hyper Matrix* reagisce fisicamente agli impulsi interagendo con il software integrato. Nei confronti del pubblico, l'interazione si ha solo a livello psicologico ed emozionale, dal momento che si assiste ad una *performance*, ad una messa in scena.

Nel secondo caso, il *Responsive Hexi*, la responsività si realizza invece con una effettiva interazione. L'esperienza visuale si arricchisce con l'artificio cinetico.



F01 | Orologio a pendolo di Christian Huygens; seconda versione (1673).

F02 | Étienne Jules Marey. Fotogramma di un'asta flessibile messa in vibrazione (1886).

F03 | Alexandra Jones. Notional Notation; grafico notazionale per registrare passi di danza in ambiente urbano.

F04 | Bernard Tschumi. Diagramma di azione di gioco.

F05 | Thibaut sld. Responsive Hexi Wall (2014).

Da questi esempi possiamo intuire come la rappresentazione, con l'avvento di nuove tecnologie — così come anche la storia ci insegna —, sia chiamata a rispondere a requisiti sempre più complessi nello svolgere il suo ruolo di sviluppo e governo dell'idea, di controllo, di verifica e visualizzazione dell'efficacia degli effetti di nuovi meccanismi, in particolar modo se cinetici.

Le componenti cinetica ed interattiva chiamano in causa il fattore spazio-temporale, un aspetto che il disegno tecnico messo a punto nella seconda metà del XIX secolo non aveva contemplato.

Se consideriamo i disegni delle prime macchine cinetiche, come gli orologi ad acqua del XVI secolo o l'orologio a pendolo messo a punto da Christian Huygens nella metà del XVII secolo (Fig. 1), notiamo come il meccanismo sia descritto e quindi rappresentato esclusivamente nei suoi aspetti meccanici, usando gli stessi sistemi e le stesse convenzioni alle quali si ricorreva anche per la rappresentazione di organismi statici come l'architettura. Nulla lascia intendere il movimento generato. Le proiezioni mongiane interverranno per codificare "un metodo generale e rigoroso che consente di rappresentare nella bidimensionalità del piano la triplice determinazione geometrico-dimensionale degli oggetti"¹ raggiungendo dunque quella che viene considerata "la completa descrittività della rappresentazione". Ma oltre all'oggetto ci possono essere degli effetti che esso produce, diverse relazioni che può instaurare — tra le sue diverse stesse componenti o mediante interazione con corpi esterni —, forze che agiscono sulla sua stessa morfologia. Tutto ciò non può essere comunicato, sintetizzato e verificato solo mediante sistemi geometrici di rappresentazione.

Anche l'architettura può diventare un meccanismo cinetico inducendo una percezione variabile dello spazio. Questo effetto si può ottenere mediante forme articolate che frammentano la risposta percettiva — restituendo informazioni parziali dell'intorno — oppure, unitamente ad artifici prospettici, lo spazio architettonico può risultare mutevole e rispondere in diverse maniere agli indizi della percezione, a seconda della posizione dell'osservatore — è questo il caso degli artifici anamorfici già diffusi nel XVI secolo. Il cinetismo sta allora nel movimento indotto nell'osservatore, il quale è spinto a muoversi e ad interrogarsi facendo esperienza dello spazio architettonico. L'esperienza dell'architettura acquisisce una dimensione spazio-temporale.

.....

1. V. UGO, *Fondamenti della rappresentazione architettonica*, Società Editrice Esculapio, Bologna 1994, p. 99.

Questa dimensione legata al fattore del movimento e alla percezione dinamica emerge in tutta la sua evidenza con la nascita della fotografia e del cinema. Con Eadweard Muybridge (1830-1904) e Étienne Jules Marey (1830-1904) la fotografia, ovvero la cronofotografia, rivelò per la prima volta aspetti della realtà che l'occhio, fino ad allora, non era stato in grado di cogliere (Fig. 2). La fotografia cesserà presto di riprodurre semplicemente le inquadrature fisse e rigidamente impostate tratte dalla tradizione pittorica, per diventare analitica ed espressiva, fornendo così il pretesto e gli strumenti per rivoltarsi contro quella stessa pittura accademica ed introdurre una nuova estetica.

Alla realtà "rivelata" dalla fotografia si deve l'introduzione del movimento nell'arte da parte di Marcel Duchamp, Tatlin e Rodchenko. Gli esperimenti con oggetti mobili, composti, fatti di elementi che potevano assumere posizioni diverse nello spazio, servirono all'esplorazione di nuovi media e allo sviluppo di forme d'arte non convenzionali che fornirono un contributo determinante nella esplorazione della quarta dimensione nell'arte: il tempo.

La scultura cinetica di Naum Gabo, *Kinetic Costruction* (1919-20) è debitrice delle immagini introdotte dalle fotografie di Jules Marey. Un'asta metallica connessa con un'apparecchiatura motorizzata imprime un movimento ondulatorio. La velocità e la frequenza delle oscillazioni sono tali che l'occhio registra una forma virtuale generata dalla proiezione del movimento, un volume virtuale, inesistente nella sostanza, una "eco visuale". L'occhio non è in grado di cogliere il movimento in sé, coglie piuttosto il contorno di un'immagine tridimensionale. Nei meccanismi cinetici dunque, la visualizzazione fotografica sembra in grado di fornire informazioni più complete della stessa fisicità dell'oggetto.

Balla, Boccioni, El Lissitzky, Delaunay, Harold Edgerton ed altri utilizzarono la pittura, la scultura, la fotografia – elaborando anche nuove forme articolate di rappresentazione come il fotocollage —, per cogliere e comunicare le "forme" del movimento, per rivelare le dinamiche che governano la realtà apparente e tramutarle in una vera e propria estetica. Cinema e fotografia avevano rieducato l'occhio dell'uomo.

Lo sviluppo delle arti visive, dalla prospettiva fissa rinascimentale alla "visione in movimento", è — secondo Laszlo Moholy-Nagy — "visione di relazioni"; un "approccio flessibile che guarda alle cose in un campo di continuo, costante movimento fatto di mutue relazioni". La "visione in movimento" è comprensione simultanea, la quale diviene "performance creativa" dal momento che comporta «il guardare, sentire e pensare tutto in relazione, non come sommatoria

di fenomeni isolati»². La visione in movimento è sinonimo di simultaneità e spazio-tempo; un mezzo per comprendere la nuova dimensione. «La visione in movimento significa anche pianificare le dinamiche percettive delle nostre facoltà visionarie»³.

Ma per pianificare le nostre “dinamiche percettive” si richiedono sempre nuovi mezzi di rappresentazione, visualizzazione e comunicazione. Lo stesso Moholy-Nagy fu un pioniere in tal senso. Nel progettare la scultura cinetica *Light Prop for an Electric Stage*, (1928-30) con l'intento di esplorare i confini tra scultura, architettura e film attraverso giochi di luci e ombre generati da luci proiettate e riflesse, Moholy-Nagy produsse degli elaborati con tecniche miste (disegno e fotocollage) dove erano indicate anche le forze vettoriali che avrebbero impresso il movimento ai diversi elementi di cui era composta la scultura, nonché le relative configurazioni variabili. Alla insufficienza del disegno tecnico tradizionale si cerca di rispondere attraverso l'elaborazione di un linguaggio notazionale.

La ricerca di sistemi notazionali alternativi di visualizzazione, con fini tanto descrittivi che progettuali, si sviluppa parallelamente proprio al diffondersi della componente dinamica e interattiva nelle diverse arti.

Sergej Ejzenstein elaborò, ad esempio, un sistema grafico-notazionale per gestire il progetto del montaggio cinematografico, avendo sviluppato la consapevolezza che «il montaggio non è tanto un mezzo per riprodurre l'immagine di un oggetto o di un fenomeno in genere (l'immagine dell'oggetto “in quanto tale”), quanto, piuttosto, un procedimento che mira fondamentalmente a dare un'immagine orientata; non una riproduzione, ma proprio quell'immagine che meglio evidenzia un atteggiamento nei confronti dell'oggetto o del fenomeno»⁴.

Non a caso il linguaggio del montaggio cinematografico, con la sua idea di dare “un'immagine orientata” e di coordinare contemporaneamente diversi aspetti finalizzati ad un unico sistema dinamico di visualizzazione, verrà preso a riferimento in successivi elaborati notazionali in campi differenti, compresa l'architettura. Dal momento che il progetto si confronta con il comportamento dell'uomo, con la percezione umana, il linguaggio notazionale appare ancora oggi come un'efficace alternativa al disegno tecnico e alla

.....

2. ibidem, p. 153.
3. idem.
4. S. M. EJZENSTEIN, *Teoria generale del montaggio*, a cura di Pietro Montani, Marsilio, Venezia 1985 (ed. consul. quarta ediz. 2004), p. 219.

rappresentazione animata (video). Attingendo a diverse tecniche e ai diversi media la notazione grafica può arrivare ad elaborare una sintesi che può, quanto meno, tentare di esprimere la complessità del fenomeno della visione e della comprensione della realtà percepita. «In quale maniera arriviamo a formarci un'idea chiara di un oggetto esistente nello spazio?» – si chiede Lessing nel *Del Laocoonte* (1766) — «Innanzitutto noi consideriamo separatamente ciascuna delle sue parti, poi facciamo la connessione di queste parti fra loro, e per ultimo il tutto. I nostri sensi eseguono queste varie operazioni con una velocità così mirabile che esse ci sembrano essere una sola, e questa velocità è assolutamente necessaria affinché noi possiamo formarci un'idea corrispondente del tutto, poiché questa non può essere che il risultato delle idee che abbiamo già formato delle diverse parti e della loro reciproca connessione»⁵. Sulla base di questo tipo di riflessioni e nel filone della ricerca che intendeva rendere l'arte “partecipata” dal pubblico nacquero progetti ed esperienze dove immagini e corpi in movimento mettevano in discussione l'oggetto artistico come prodotto di pura contemplazione, interrogando e coinvolgendo come parte attiva l'osservatore. Nell'idea di Cinema Simultaneo – detto anche Policinema — elaborata da Moholy-Nagy (1925) lo schermo diventava allora un disco concavo o convesso dove tre diverse proiezioni si incontravano sommando le immagini, nell'intento di sviluppare un cinema che andasse oltre la tradizionale struttura narrativa. A Berlino, Erwin Piscator introduceva film nella scenografia teatrale (1919-33) per moltiplicare i paesaggi e le viste e trasformare il teatro in evento totale, facendo ricorso anche a diversi meccanismi ottici, acustici e meccanici.

Il problema che ogni volta emergeva era quello di controllare questa contaminazione di forme artistiche e linguaggi e di prefigurarne gli effetti.

Accanto alle notazioni grafiche utili al progetto del montaggio cinematografico possono allora dare spunti interessanti anche le notazioni coreografiche. Dagli artifici per adattare i sistemi di rappresentazione comunemente in uso alla registrazione grafica delle figure di danza barocca, passando per le notazioni di Oskar Schlemmer nel Bauhaus, all'astrazione lineare dei corpi dei danzatori in movimento di Kandinsky, fino ai diagrammi del linguaggio Laban e al primo software di creazione e notazione dei movimenti di danza messo a punto da Merce Cunningham, si assiste sempre al tentativo di trovare un sistema di comunicazione e di controllo del movimento

5. G. E. LESSING, *Del Laocoonte*, tr. it. di C.G. Landonio, Milano 1936, p. 68 (cit. in S. M. Ejzenstein, *Teoria generale del montaggio*, cit. p. 219-220)

di corpi nello spazio e della percezione che ci restituiscono (Fig. 3). Anche l'architettura, come è stato già evidenziato, non è esente da tale problema. Se l'organismo architettonico è tradizionalmente statico, non lo sono le azioni che vi si svolgono. Anzi, possiamo dire che la città, come "organismo vivente" è il sistema responsivo per eccellenza. Su questo aspetto si è interrogato Bernard Tschumi sul finire degli anni Settanta elaborando una serie di grafici con i quali intendeva esplorare il "luogo" dove lo spazio architettonico incontra il movimento dei corpi reali (Fig. 4). Con i *Manhattan Transcripts* — in un periodo lontano dall'avvento delle possibilità offerte dai software di *photo editing* e modellazione — assistiamo al tentativo di trascrivere cose che normalmente sono rimosse dalle rappresentazioni architettoniche tradizionali, nello specifico, lo spazio e il suo uso, l'ambientazione e la scrittura dell'azione, il programma e tutto ciò che rende l'interazione un "evento". La notazione grafica che elabora Tschumi fa ricorso a piante e prospetti, fotografie, diagrammi e viste prospettiche organizzate su un sistema tripartito (spazi, eventi, movimenti) sviluppato per introdurre il fattore temporale ed esperienziale nella lettura dell'architettura della città. Tre livelli disgiunti della realtà sono mostrati contemporaneamente: "il mondo degli oggetti", fatto dagli edifici che sono resi astratti attraverso planimetrie, piante e fotografie; "il mondo dei movimenti", con sistemi notazionali tratti dalla coreografia, dallo sport, dal cinema e dai diagrammi di movimento in generale; "il mondo degli eventi" derivato dalla fotografia di cronaca. Questi diversi livelli di realtà — e relative rappresentazioni — sono frammentati, riassemblati, e soggetti a nuove combinazioni e associazioni registrando la risposta dell'ambiente urbano in termini di mutamenti percettivi indotti da determinate azioni.

Un ambiente urbano, ad esempio, diventa un sistema responsivo quando induce il movimento per ricucire i frammenti di geometrie colorate nelle installazioni anamorfiche di Felice Varini. Le immagini dell'intorno urbano mutano di continuo con il nostro movimento, spinti come siamo dalla ricerca del punto di vista che è all'origine delle sue costruzioni anamorfiche. Frammenti di linee rette e curve, schegge di superfici riempite di colori, per lo più primari, vanno ad imprimersi su pareti e cornici, su colonne, capitelli e pilastri, su pavimenti, segnaletiche e arredi urbani. Per ritrovarne le ragioni e i rispettivi ruoli l'osservatore è costretto a muoversi nello spazio urbano fino a ricomporre arcane geometrie che riescono a restituire piana la vista tridimensionale dello spazio urbano. Gli interventi di Felice Varini spingono alla esplorazione dello spazio architettonico e urbano e trasformano l'atto passivo del guardare in una esperienza attiva.

Una strategia analoga, ma mediata dall'uso di video proiezioni, sensori, luci e suoni è messa in atto da Rafael Lozano-Hemmer nelle installazioni della serie *Relational Architecture* come *Body Movies* (2001), *Bajo Reconocimiento* (2006) o *Under Scan* (2005) focalizzate su nuove relazioni temporali che emergono da situazioni artificiali – dove gli spettatori sono anche protagonisti —, definite dallo stesso Lozano-Hemmer “relazionali” o “attualizzazioni tecnologiche di ambienti urbani con memoria aliena” (1994) o “anti-monumenti per dissimulazioni pubbliche” (2002). Si tratta di installazioni in ambiente urbano in grado di modificare gli spazi che normalmente abitiamo “per creare relazioni umane e sensoriali nuove all'interno di contesti rivisitati — come ha sottolineato Marco Mancuso — per aumentare la nostra percezione del contesto circostante, modificando le consuete e spesso assuefatte dinamiche che regolano il nostro rapporto con l'ambiente attorno a noi”.

Si tratta di esperienze che nascono in campo artistico ma che, in virtù del dialogo già avviato con l'architettura, arrivano ad influenzarla convogliando artifici e finalità responsive nella stessa progettualità architettonica e urbana.

I metodi di comunicazione dei sistemi responsivi, dunque, non possono che prendere riferimento da tutte le esperienze di rappresentazione e visualizzazione dei campi e delle forme di progettualità dalle quali derivano, fino ad elaborare sistemi notazionali che necessariamente si presenteranno con i caratteri dell'ibridazione dando vita ad un artefatto comunicativo che può andare oltre la mera funzione oggettuale-descrittiva.

Bibliografia

- [1] V. UGO, *Fondamenti della rappresentazione architettonica*. Bologna: Società Editrice Esculapio. 1994, p. 99.
- [1] S. M. EJZENSTEIN, *Teoria generale del montaggio*, a cura di Pietro Montani. Venezia: Marsilio. 1985. (ed. consul. quarta ediz. 2004, p. 219).
- [1] G. E. LESSING, *Del Laocoonte*, tr. it. di C.G. Milano: Landonio. 1936, p. 68 (cit. in S. M. Ejzenstein, *Teoria generale del montaggio*, cit. p. 219-220).

Bibliografia di riferimento

a cura di Giorgio Buratti
Politecnico di Milano - Dipartimento di Design

Arte Generativa

SHERIDAN, S. *Generative Systems versus Copy Art: A Clarification of Terms and Ideas*. In Leonardo. Vol. 16. no. 2. Cambridge, MA: The MIT Press. 1983. pp. 103-108.

SODDU, C.; COLABELLA E. *Il progetto ambientale di morfogenesi, Progetto Leonardo*. 1992. 2° edizione e-book.

CLAUSER, H. R. *Towards a Dynamic*, Generative Computer Art. Leonardo. Vol. 21. no. 2. 1988. pp. 115-122.

SODDU, C. *Generative Art*, proceedings of GA98. Roma: Editrice Dedalo. 1999.

SODDU, C. *New naturality: a Generative Approach to Art and Design*. in Maley, Carlo C. edited by. *Artificial Life 7*, workshop proceedings. Portland (Ontario, USA): Etlis Boudreau Editors. 2000.

GALANTER, P. *What is Generative Art? Complexity theory as a context for art theory*. In GA2003-6th Generative Art Conference. Milano. 2003.

GREENBERG, I. *Processing: Creative Coding and Computational Art*. Friends of Ed. 2011

PERSON, M. *Generative Art. A practical guide using processing*. Manning Publications. 2011.

BOHNACKER, H. *Generative Design: Visualize, Program, and Create with Processing*. Princeton: Princeton Architectural Press. 2012.

MENEGUZZO, M.; MORTEO, E.; SAIBENE A. *Programmare l'arte. Olivetti e le neoavanguardie cinetiche*. Catalogo della mostra. Monza: Johan & Levi editore. 2012.

Architettura responsiva

S. M. EJZENSTEIN, *Teoria generale del montaggio*, a cura di P. Montani, Venezia: Marsilio. 1985.

HASTINGS, S. R. *Computer design tools for climate-responsive architecture*. In *Solar & Wind Technology*, vol. 6, n. 4. 1989. pp. 357-363.

D'ESTRÉE S. T. *Building upon Negroponte: a hybridized model of control suitable for responsive architecture*. In *Automation in construction*, vol. 14, n. 2. 2005. pp. 225-232. BULLIVANT, L. *Responsive Environments: Architecture, Art And Design*. London: V&A Contemporaries. 2006.

BEESELEY, P.; KAHNO, O. *Responsive Architecture/Performing Instruments*. in *Situated Technology*, n° 4. 2009.

Fabbricazione digitale

LINDSEY, B. *Digital Gehry Material resistance, digital construction*. Basel: Birkhäuser. 2001.

BURRY, M. *Between Intuition and Process: Parametric Design and Rapid Prototyping*, New York, NY: Spon Press. 2003.

KOLAREVIC, B., edited by. *Architecture in the digital age – design and manufacturing*. New York: Spon Press. 2003.

GERSHENFELD, N. *Fab: the coming revolution on your desktop*, New York: Basic Books. 2005.

BONWETSCH, T. GRAMAZIO, F. KOHLER, M. *The informed Wall: applying additive digital fabrication techniques on architecture*. In *Synthetic Landscapes, Proceedings of the 25th Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture*. Louisville: 2006.

KOLAREVIC, B. *Digital Fabrication: From digital to material*. 2007. Online, http://www.iit.edu/~mcleish/arch497_DDF/branko_kolarevic.pdf

GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. *Digital Materiality in Architecture*. Baden: Lars Müller Publishers. 2008.

PAOLETTI, I. *Innovative design and construction technologies*, Milano: Maggioli Editore (Politecnica). 2009.

IWAMOTO, I. *Digital fabrications – Architectural and material techniques*. New York: Princeton Architectural Press. 2009.

OXMAN, N. *Variable property rapid prototyping*, In *Journal of Virtual and Physical Prototyping (VPP)*, vol. 6, n. 1, March 2011.

GERSHENFELD, N. *How to Make Almost Anything*, in *Foreign Affairs*, Novembre/Dicembre. 2012.

A. CASALE, G. M. VALENTI, M. CALVANO, J. ROMOR. *Surfaces: Concept, Design, Parametric Modeling and Prototyping*. In: AA.VV. *Nexus Netw J*. vol. 15, p. 271 - 283, Turin: Kim Williams Books. published online. 2013.

KHANNA, A.; Khanna, P. *L'età ibrida. Il potere della tecnologia nella competizione globale*. Torino: Codice edizioni. 2013.

MAIETTA, A.; ALIVERTI, P. *Il manuale del maker. La guida pratica e completa per diventare protagonisti della nuova rivoluzione industriale*. Milano: FAG. 2013.

Geometria computazionale

DO CARMO, M.P. *Differential geometry of curves and surfaces*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc. 1976.

BLACKWELL, W. *Geometry in architecture*. Toronto: Wiley-Interscience. 1984.

BARNHILL, R.E. *Geometry processing for design and manufacturing*. Philadelphia: SIAM. 1989.

MIURA, K. *Folding a plane- scenes from nature technology and art, Symmetry of structure*, interdisciplinary Symposium, Danvas G. & Nagy D., ed. By Budapest: 1989. pp. 391-394.

HUMIAKI, H. *Understanding Geometry through Origami Axioms*, in *Proceedings of the First International Conference on Origami in Education and Therapy (COE T91)*, J. Smith ed., British Origami Society. 1992. pp. 37-70

TAYLOR, W.F. *The geometry of computer graphics*. Belmont: Wadsworth inc. 1992.

DAVIES, A.; Samuels, P. *An introduction to computational geometry for curves and surfaces*. Oxford: Clarendon Press. 1996.

FLAKE, G.W. *The computational beauty of nature, computer explorations of fractals, chaos, complex systems, and adaptation*. Cambridge, MA: The MIT Press. 1998.

MARSH, D. *Applied geometry for computer graphics and CAD*. London: Springer-Verlag. 1999.

FARIN, G. et al.; ed. by. *Handbook of computer aided geometric design*. Amsterdam: Elsevier Science. 2002.

POTTMANN, H.; Wallner, J. *Computational line geometry*. Berlin: Springer-Verlag. 2001.

GOLDMAN, R. *Pyramid algorithms – a dynamic programming approach to curves and surfaces for geometric modeling*, San Francisco: Elsevier Science. 2003.

AGOSTON, M.K. *Computer graphics and geometric modelling—Implementation and algorithms*. London: Springer-Verlag. 2005.

MORTENSON, M.E. *Geometric modeling*. New York: Industrial Press Inc. 2006.

POTTMANN H. et al. *Architectural geometry*. Exton: Bentley Institute Press. 2007.

BOBENKO, A.I. et al.; edited by. *Discrete differential geometry*. Basel: Birkhäuser. 2008.

PARIS, L. *Teoria geometrica degli ingranaggi*. In: *Geometria descrittiva e rappresentazione digitale. Memoria e innovazione. Vol. II, a cura di A. Casale*. Roma: Edizioni Kappa. 2012.

VALENTI, G. M.; ROMOR, J. *Geometria responsiva*. In *DisegnareCon*, vol. 5, n. 9, Bologna. 2012. pp. 309-316.

TREBBI, J. *The Art of Folding: Creative Forms in Design and Architecture*. Barcelona, Spain: Promopress. 2013.

Grammatica della forma

TRUCHET, S. *Méthode pour faire un'infinité de dessins differens avec de carreaux mi-partis de deux couleur par une ligne diagonal ou observation di Pere Dominique Douat*. Paris. 1722.

OWEN, J. *The grammar of ornament*, Londra. 1856.

SEMPER, G. *Der Stil*, Munchen, 1860-63, trad. it. Parziale a cura di B. Gravano, Laterza, Bari. 1992.

DAY, L.F. *The Anatomy of Pattern*. London. 1897.

MORRIS, C. *Fondamenti di una teoria dei segni*. Torino: Paravia. 1938.

KLEE, P. *Teoria della forma e della figurazione*. Milano: Feltrinelli. 1959.

ITTEN, J. *Design and form: the basic course at the Bauhaus*, Reinold Pubi. Corporation: New York. 1965.

CHOMSKY, N. *Studies on Semantics in Generative Grammar*. 1972.

STINY G., J. GIPS. *Shape grammars and the generative specification of painting and sculpture*. In *Information Processing 71*, pp. 1460-1465. North-Holland Publishing Company. 1972.

ALEXANDER, C. *Notes on the Synthesis of Form*, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1966. MARCOLLI, A. *Teoria del campo*. Firenze: Sansoni. 1975.

ALEXANDER, C. *A Pattern Language: Towns Buildings Constructions*. Oxford: Oxford University Press. 1977.

- MARCOLLI, A. *Teoria del campo 2*. Firenze: Sansoni. 1978.
- STINY, G. *Algorithmic Aesthetics*. University of California Press. 1978
- CHOMSKY, N. *Rules and Representations*, New York: Columbia University Press. 1980.
- STINY G. *Introduction to shape and shape grammars*. Environment and Planning B: Planning and Design 7(3), 343-351. 1980.
- GOMBRICH, E. *The Sense of Order. a Study in the Psychology of Decorative Art*. Oxford, Phaidon, 1979, trad. it. *Il senso dell'ordine*,. Torino: Einaudi. 1984.
- SEMERARI, L. *La grammatica dell'ornamento. Arte e industria tra ottocento e Novecento*. Bari: Laterza. 1994.
- OTTO, F. P. *Finding Form*. Berlin: Edition Axel Menges. 1995.
- REISER, J.; Umemoto, N. *Atlas of novel tectonics*, Princeton: Princeton Architectural Press. 2006.
- Rossi, M. *Il segno e la forma. Grammatica grafica per studenti di architettura*. Fidenza: Mattioli 1885. 2006.
- STINY, G.; GIPS, G. *Shape: Talking about Seeing and Doing*. Cambridge, Mass.: The MIT Press. 2006
- R. BETTI, E. MARCHETTI, L. ROSSI COSTA, a cura di. *Simmetria: una scoperta matematica*. Milano: Polipress. 2007.
- HENSEL, M.; Mendes, A. 'Morpho-Ecologies', London: Architectural Association publications. 2007
- CARPO, M. *The alphabet and the algorithm*, Cambridge: The MIT Press. 2011.
- SODDU, C. *Immanent Codes of Cities Identity*, 1st International Conference "Art, Science and Technology: Interaction between Three Cultures". Karmiel, Israel: ORT Braude College. 2011.
- HANN, M. *Symbol, Pattern & Symmetry. The cultural significance of structures*. London: Bloombury. 2013.
- KNIGHT, T. *Shape Grammars in education and practice: history and prospects*. http://www.mit.edu/~tknight/IJDC/frameset_abstract.htm [25/04/2013].
- TEDESCHI, C. *Ordine, disordine e caos. Idea, pensiero, forma e rappresentazione nel disegno dell'architettura*. Fidenza: Mattioli 1885. 2013.

Modelli organici e sistemi complessi

- D'ARCY W. THOMPSON. *On growth and form*, 1917, trad. it. *Crescita e forma*,. Torino: Bollati e Boringhieri, Torino, 1992.
- SPEISER, A. *Die Theorie der Gruppen*. Leipzig - Zurich: Koehler, 1937.

FULLER, R.B. *Synergetics. Exploitations in the Geometry of Thinking*. Macmillan Publishing. 1975.

I. STEWART. *What shape is a Snowflake?*, Weidenfeld & Nicholson, London, 2001. Trad. it. *Che forma ha un fiocco di neve*, Milano: Bollati Boringhieri. 2003.

POZZI, C. *Ibridazioni architettura/natura*. Roma: Meltemi, 2003.

SALA, N.; CAPPELLATO., G. *Architetture della complessità, la geometria frattale tra arte, architettura e territorio*. Milano: Franco Angeli. 2004.

SPUYBROEK, L. *Nox. Machining architecture*. London: Thames & Hudson. 2004.

PENROSE, R.. *The Road to Reality: A Complete guide to the Laws of the Universe*. Vintage Books. 2004. Trad. it. *La strada che porta alla realtà, le leggi fondamentali dell'universo*. Milano: BUR Scienza. 2006.

LANGELLA, R. *Hybrid design. Progettare tra tecnologia e natura*. Milano: Franco Angeli. 2007.

A.A. V.V. *Nature Design. From inspiration to innovation, Museum für Gestaltung*, Zurigo: Lars Müller Publishers. 2007.

K.M. HAYS, D. MILLER, a cura di. *Buckminster Fuller, Starting with the universe*, New York: Whitney Museum of American Art. 2008.

Physical computing

O'SULLIVAN, T.; IGOE, D. *Physical Computing: Sensing and Controlling the Physical World with Computers*. Thomson. 2004

STANKOVIC, J.; LEE, I.; MOK, A.; RAJKUMAR, R. *Opportunities and obligations for physical computing systems*. in *Computer*. Vol. 38, n. 11, pagg. 23–31, nov. 2005.

Barraclough, S. *How Do Things Move*. Raintree. 2007.

ROBERTS, D. *Making Things Move: Diy Mechanisms for Inventors, Hobbyists, and Artists*. New York: Tab Books. 2010.

IGOE, T. *Making Things Talk*. Beijing, Farnham: O'Reilly Vlg. GmbH & Co. 2011.

PARLAC, V. *Integrating Physical and Digital: Interactive technologies and design of matter*. in proceedings of 31th annual conference of ACADIA. 2011.

ELLIOTT, D.; MACDOUGALL, R.; TURKEL, W. J. «*New Old Things: Fabrication, Physical Computing, and Experiment in Historical Practice*». *CJC*, vol. 37, n. 1, apr, 2012.

PARLAC, V. *Surface Change: Information, Matter and Environment – Surface Change Project*. in *Open Systems: proceedings of the 18th International Conference CAADRIA*. Hong Kong: CASA. 2013.

Sistemi generativi

- CHOMSKY, N. *Three models for the description of language*. In IRE Trans on Information Theory, vol. 2, n. 3, 1956. pp.113–124.
- PEARCE, P. *Structure in Nature is a Strategy for Design*. Cambridge, MA: The MIT Press. 1980.
- FRAZER, J. *Themes VII: An Evolutionary Architecture*. London: Architectural Association. 1995.
- BHATTA S., GOEL, A. *Learning Generic Mechanisms for Innovative Design Adaptation*. In Journal of Learning Sciences, vol. 6, n. 4. 1997. pp. 367-396.
- LYNN, G., *Animate Form*. New York: Princeton Architectural Press. 1999.
- JOHNSON, S. *Emergence: The Connected Lives of Ants, Brains, Cities and Software*. New York: Scribner. 2001.
- DE LANDA, M.L.; *Mille anni di storia non lineare, rocce, germi e parole*. Torino: Instar. 2003.
- ARIDA, S. *Contextualizing Generative Design*. MSc thesis, Boston, MA: Massachusetts Institute of Technology. 2004.
- OXMAN, R. *Theory and design in the first digital age*. in Design Studies, vol. 27, n. 3. 2006. pp. 229-265.
- REISER, J. Umemoto, N. *Atlas of Novel Tectonics*. New York: Princeton Architectural Press. 2006.
- TERZIDIS, K. *Algorithmic Architecture*, Burlington, MA: Elsevier. 2006.
- OXMAN, R. *Performance based Design: Current Practices and Research*, in IJAC - International Journal of Architectural Computing, vol. 6, n. 1, 2008. pp. 1-17.
- SAKAMOTO T. et al. *From control to design – parametric/algorithmic architecture*. Barcelona: Actar-D. 2008.
- MEREDITH, M.; ARANDA, L.; SASAKI, M.; *From Control to Design: Parametric/Algorithmic Architecture*. Barcelona: Actar-D. 2009.
- SCHUMACHER, P. *Parametricism - A New Global Style for Architecture and Urban Design*. In AD Architectural Design - Digital Cities, vol. 79, n. 4, July/August. 2009.
- HENSEL, M.; MENGES, A.; WEINSTOCK, M. *Emergent Technologies and Design*. Oxford: Routledge. 2010.
- DE WOLF, T.; HOLVOET, T. *Emergent Technologies & Design: Towards a Biological Paradigm for Architecture*. New York: Routledge. 2010.
- PICON, A. *Digital culture in architecture: an introduction for the design professions*. Basel: Birkhauser. 2010.
- REAS, C.; MCWILLIAMS, C.; LUST, e. *Form+Code in Design, Art, and*

Architecture. New York: Princeton Architectural Press. 2010.

TACHI, T. *Geometric Considerations for the Design of Rigid Origami Structures*, in Proceedings of IASS Symposium 2010, Shanghai, China: 2010. pp. 771-782.

BURATTI, G.; *Generative algorithms and associative modeling to design articulate surfaces*. In proceedings of the Nexus Ph.D. Day Relationships between Architecture and Mathematics. Rossi, M. ed. by. Milano: McGraw-Hill. 2012.

CASALE, A.; CALVANO, M. *Castelli di carta. La piega per la costruzione di superfici articolate*, in DisegnareCon, vol. 5, n. 9, Bologna. 2012. pp. 309-316.

LEITÃO, A.; SANTOS, L. *Programming Languages for Generative Design: A Comparative Study*. in IJAC - International Journal of Architectural Computing, vol. 10, n. 1. 2012. pp. 139-162.

SODDU, C. *Generative Design*, in GASATHJ, Generative Art Science and Technology hard Journal, vol. 1, 2012.

CASALE, A.; VALENTI, G. M. *Architettura delle superfici piegate. Le geometrie che muovono gli origami*, in Nuovi Quaderni di Applicazioni di Geometria Descrittiva, Vol. 6. Roma: ed. Kappa. 2013.

BURATTI, G. *The complex order. Generating triply periodic minimal surface structures*. In proceedings of the Nexus Ph.D. Day Relationships between Architecture and Mathematics. Gönenç Sörgüç, A. ed by. Ankara: METU, Department of Architecture. 2014.

Software

PIEGL, L.; TILLER, W. *The NURBS book*. Berlin: Springer-Verlag. 1995.

SHAH, J.; MARTTI, M. *Parametric and feature based CAD/CAM*. Wiley-Interscience. 1995.

SALOMON, D. *Computer graphics and geometric modelling*. New York: Springer-Verlag. 1999.

SCHODEK, D. et al. *Digital design and manufacturing: CAD/CAM applications in architecture and design*. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons, Inc. 2005.

RUTTEN, D.; *RhinocerosScript 101, digital version*. Seattle: Robert McNeel & Associates. 2007.

SODDU, C.; Colabella, E. *Argenia*, in PNCM conference proceedings. Daugavpils, Latvia: 2007.

VALENTI, G. M. *HySpace: spazio virtuale parametrico per la fruizione interattiva di modelli digitali*. In Sistemi informativi per l'architettura, Firenze: Alinea. 2007. pp. 600-605.

MARK, E.; GOLDSCHMIDT, G.; GROSS M. *A Perspective on Computer Aided Design after Four Decades*. in 26th eCAADe Conference Proceedings. Antwerp, Belgium: 2008. pp. 169-176.

Rossi, A. *Disegno - Design. Natura morta e vita metafisica*. Roma: Officina Edizioni. 2008.

PAYNE, A. ISSA, R. *Grasshopper Primer*. digital edition. Palo Alto, CA: ISSUU. 2009. ISSA, R. *Essential Mathematics for Computational Design*, Seattle: Robert McNeel & Associates. 2010.

TEDESCHI, A. *Architettura parametrica. Introduzione a Grasshopper*. Potenza: Le Penseur. 2010.

WOODBURRY, R. *Elements of Parametric Design*, New York: Routledge. 2010.

KHABAZI, Z. *Algoritmi generativi con Grasshopper*, edizione italiana a cura di Marsala. Palo Alto, CA: ISSUU. 2011.

