

Autori

1

Sarvpriya Raj Kumar
MSc in Product Design
Sapienza Università di Roma

2

Viktor Malakuczi
Researcher
Sapienza Università di Roma

Titolo

Avant-garde CAD: Generative Design

Parole Chiave

design generativo, manifattura additiva, innovazione, leggerezza, ottimizzazione

Abstract

Con l'arrivo della Manifattura Additiva (MA), è diventato possibile realizzare forme e strutture che sarebbero impossibili da produrre con i processi convenzionali, per cui la MA offre la possibilità di una libertà morfologica senza precedenti. Consente una diffusione più ampia del Design Generativo (DG), un approccio progettuale reso possibile dagli strumenti evoluti di computazione, i quali consentono ai designer di definire vincoli e obiettivi, poi istruire un algoritmo a generare numerose variazioni e ottimizzare il progetto finché la soluzione desiderata venga raggiunta. L'idea di generare numerose alternative era presente già agli albori del CAD oltre un mezzo secolo fa, ma questo approccio è emerso soprattutto nel decennio passato grazie a progetti di ricerca sperimentale nel settore sia accademico che privato.

Nel prossimo decennio fino a 2030 si attende una diffusione molto più ampia in diversi ambiti industriali che potrebbero trarre benefici dalla possibilità di ottimizzare il peso e le prestazioni meccaniche, di usare meglio i materiali grezzi, oppure di potenziare il processo creativo aiutando i designer a esplorare e valutare obiettivamente numerose soluzioni in un tempo breve. L'articolo comincia descrivendo il posto dei DG nel percorso evolutivo del CAD, poi vengono delineati le principali direzioni tecnologiche come l'ottimizzazione topologica, morfogenesi e biomimesi. Successivamente si esamina come la ricerca accademica e industriale utilizzino il DG per raggiungere vari obiettivi, con attenzione particolare sul design dei trasporti (da motociclette ad astronavi), poiché questo è il campo che ha ricevuto più investimenti di DG finora. Infine, il contributo conclude osservando come il ruolo del designer si sposta verso una figura di "curatore" di dati input e di geometria output, con la conseguente necessità di adottare nuovi strumenti e apprendere nuove competenze. Ciò significa non solo nuove conoscenze tecniche, ma anche un approccio progettuale più flessibile, dove la ricerca e riflessione critica diventa sempre più importante e l'atto creativo diventa uno sforzo sempre più collaborativo tra designer, dati, ambiente, persone e algoritmi.

Testo

Introduzione

L'evoluzione della cultura materiale nel decennio 2010-2020 era dominata da una proliferazione dell'intelligenza digitale: in dispositivi digitali dedicati a diversi contenuti, integrati in vari tipi di oggetti digitali (internet delle cose), in sofisticati sistemi prodotto-servizio, nonché negli strumenti della pratica progettuale – anche quando il designer affronta un prodotto tradizionale e puramente analogico. Partiamo dal presupposto che nel prossimo decennio (2020-2030) vedremo sviluppare ulteriormente tutte le tendenze sopra menzionate, ma ci concentriamo su un'evoluzione osservabile nella pratica di “dare forma” la quale in modo sempre più da "nativo digitale", grazie ai più avanzati strumenti CAD del Design Generativo.

Nella pratica progettuale il “form follows function” di Louis Sullivan è uno slogan ricorrente da molto tempo, invitando a una gestione “sobria” delle forme – slogan che ha provocato l'invenzione di diverse alternative opposte, come “form follows fun” o “form follows fiction” (serie Alessi di Stefano Giovannoni); spesso si osserva inoltre che le tecnologie digitali distaccano la forma dalla funzione. D'altronde, l'uso avanzato della computazione apre la possibilità di un nuovo modo di dare forme funzionali: oggi il CAD rende possibile un approccio “form follows force” (Li, 2018) attraverso simulazioni fisicamente realistiche e algoritmi generativi che evolvono le forme gradualmente, così come fa la selezione naturale darwiniana. Questo approccio, chiamato Design Generativo, spesso conduce a risultati sorprendenti, geometrie estremamente complesse i quali sarebbero difficili da immaginare e ancora più difficili da disegnare (o modellare) con gli strumenti convenzionali del CAD. Di conseguenza, oltre al potenziale di aumentare le prestazioni meccaniche, il processo evolutivo del DG implica anche un nuovo linguaggio estetico che ricorda le forme naturali ma è risultato di un processo fondamentalmente diverso dalla biomimesi “convenzionale”, dove il designer emula le forme di entità biologiche con lo scopo di ottenere un vantaggio funzionale o estetico. Alcuni degli esempi di biomimesi sono i Bullet Train giapponesi con forma aerodinamica ispirata al becco dell'alcone o la chiusura a Velcro ispirata ai semi di bardana. Al contrario, il DG non imita necessariamente forme biologiche già esistenti, ma evolve forme che spesso diventano simili a forme naturali.

Un passo avanti nello sviluppo del CAD

Il primo sistema di *computer numerical control* (CNC) è nato negli anni '50 (Pronto di Patrick Hanratty, 1957) e poco dopo è emersa anche l'idea del software CAD già negli anni '60 e già allora era intesa come qualcosa di più sofisticato di un semplice strumento di disegno. Sutherland, pioniere del CAD, sostiene che una trasformazione significativa richiede un cambiamento nel modo di pensare: mentre “penna e inchiostro o matita e carta non hanno una struttura intrinseca [...] la versione computerizzata del progetto [dovrebbe essere] il documento principale da cui derivano tutte le informazioni ausiliarie” (Sutherland, 1975, p. 76). Infatti, già il suo software sperimentale Sketchpad aveva funzionalità di Design Parametrico, per cui la modifica di un elemento poteva innescare una modifica automatica di tutti gli elementi correlati secondo i vincoli stabiliti dal progettista. Tale possibilità era un fattore trainante dello sviluppo

qualitativo dei prodotti perché, come afferma il fondatore di PTC (Pro/Engineer) Samuel Geisberg, “L'obiettivo è creare un sistema sufficientemente flessibile da incoraggiare l'ingegnere a prendere facilmente in considerazione una varietà di soluzioni” (Geisberg citato in Teresko, 1993, p. 28)

In seguito al semplice CAD *freeform* e dopo il CAD parametrico solido, gli anni 2000 hanno portato a una democratizzazione dell'*algorithms-aided design*, come la chiamano Tedeschi, Wirz e Andreani (2014), grazie a nuovi linguaggi di programmazione visiva (Generative Components, Grasshopper, Dynamo) integrati nei pacchetti CAD più diffusi. Mentre John Maeda già nel 2001 invitava i designer ad apprendere la programmazione creativa e sperimentare con un approccio “design by numbers”, almeno per la grafica / arte, per il design di oggetti fisici questo è diventato praticabile solo grazie all'interfaccia *user-friendly* della programmazione visiva. Da allora, il “parametricismo” (Patrick Schumacher, 2016) è diventato uno stile architettonico abbastanza popolare – anche se discusso – caratterizzato da elementi che si adattano reciprocamente e si cambiano anche secondo influenze esterne, portando a componenti differenziate piuttosto che alla modularità ripetitiva. Come osserva Carpo (2015), gli avanzati hardware di fabbricazione digitale e gli avanzati software di design parametrico hanno consentito all'architettura di andare oltre al paradigma di costruire da un abaco di componenti prefabbricati e hanno reso possibile uno spostamento verso algoritmi che controllano dinamicamente ogni elemento del progetto.

Design Generativo: tipi e strumenti

Il DG per il design dei prodotti è il prossimo passo nell'evoluzione del CAD, passo consentito dalla proliferazione dell'intelligenza artificiale. Le applicazioni avanzate si basano sull'apprendimento automatico e sui reti neurali artificiali, i quali consentono al computer di imparare l'esecuzione di compiti “creativi” senza una programmazione esplicita di ogni singolo passaggio dell'attività: il lavoro del programmatore/progettista consiste nello specificare i requisiti e supervisionare il processo. Con DG, “il progettista definisce i vincoli da rispettare e gli obiettivi da raggiungere in un cosiddetto sistema esperto (*expert system*); si definisce poi un sistema di ottimizzazione per soddisfare algebricamente questi requisiti. I metodi GD spaziano da programmi completamente autonomi che generano la soluzione migliore in assoluto, fino a sistemi interattivi che generano potenziali soluzioni per la valutazione da parte dei progettisti.” (Leary, 2019, p. 203).

Questa definizione generica può essere ramificata secondo diversi principi generativi, i quali implicano diversi vantaggi funzionali e valori estetici. Gli algoritmi sviluppati appositamente (ad esempio attraverso Grasshopper) possono generare qualsiasi tipo di geometria parametrica, dopodiché i modelli possono essere valutati secondo una moltitudine di criteri. Tuttavia, negli ultimi anni lo sviluppo si è focalizzato sui voxel (pixel 3D); Jackson (2019) identifica tre tipi:

- a) Ottimizzazione topologica, con cui l'utente definisce una geometria, dalla quale si rimuove ripetutamente il materiale virtuale che contribuisce meno alle prestazioni meccaniche per ottenere il risultato finale più efficiente; è un tipo di DG sottrattivo.

- b) Biomimesi, con cui si imitano forme e comportamenti osservati in natura, come la crescita delle colonie batteriche, struttura ossea, o le radici e i rami degli alberi. È un tipo additivo di DG in quanto implica la crescita del materiale virtuale.

c) Morfogenesi, con cui l' algoritmo risposta di gruppi di cellule al loro ambiente. La crescita delle cellule sotto carico è più forte mentre le cellule scariche vengono scartate.

Per praticare questi tre tipi di DG, sono già disponibili diverse soluzioni software:

- Autodesk – Fusion 360 (Morfogenesi con Biomimesi)
- Dassault Systemes – Functional GD (Ottimizzazione Topologica con Biomimesi) e XGen (programmazione visiva con modellazione 3D interattiva)
- PTC – Creo GD (Ottimizzazione Topologica con Biomimesi)
- Siemens – NX GD (Ottimizzazione Topologica con Biomimesi)
- MSC – Apex GD (Ottimizzazione Topologica con Biomimesi)

Il processo generativo risulta una geometria composta da voxel che viene poi convertita in una geometria sfaccettata (mesh), ideale per la MA, ma può essere ottimizzata anche per i metodi convenzionali della produzione di massa. Per riassumere, Jackson evidenzia quattro caratteristiche chiave del DG: è focalizzato sui componenti, guidato da obiettivi, limitato da vincoli ed eseguito in modo autonomo.

Algoritmi di Design Generativo nella ricerca di design

In pratica, ciò significa che i designer non definiscono più la forma direttamente, ma collaborano con un algoritmo, gestiscono un processo di selezione (non) naturale, esercitano una pressione evolutiva e giudicano i risultati. Tale giudizio può essere condiviso anche con gli utenti, come dimostra la piattaforma sperimentale Endlessforms.com, che consente l'evoluzione di geometrie 3D attraverso l'input degli utenti in *crowdsourcing* come forza evolutiva per guidare lo sviluppo di forme virtuali astratte (Clune e Lipson, 2011).

La ricerca in Design ha utilizzato a lungo gli strumenti di DG per ottenere forme estremamente complesse e ispirate alla biologia, simulando la stessa crescita biologica; in particolare, Neri Oxman del MIT ha sperimentato con la simulazione di numerosi principi di crescita (ad esempio Bader et al, 2016), a volte integrandola con una crescita biologica reale o inventando modi e materiali completamente nuovi di fabbricazione digitale (ad esempio Mogas Soldevila, Duro-Royo e Oxman, 2015). Anche il design italiano ha esplorato il potenziale espressivo delle morfologie di DG bio-ispirate, come Alessandro Zomparelli che le utilizza per realizzare accessori di moda.

Ormai anche rinomate aziende di design hanno adottato il DG come strumento di progettazione: nel 2019 Kartell ha lanciato la sedia A.I., una collaborazione tra Philippe Starck e Autodesk, che utilizza l'ottimizzazione con DG per ottenere una sedia non solo leggera, ma anche bella e coerente con il linguaggio estetico personale dello stesso Starck. L'ottimizzazione del peso e delle prestazioni è, infatti, un fattore trainante dello sviluppo del DG incentrato sul prodotto. Tale ottimizzazione è particolarmente rilevante nel campo dei trasporti: i veicoli devono essere i più sicuri e più leggeri possibile allo stesso tempo, così da poter minimizzare il consumo energetico; pertanto, molte ricerche e attori industriali hanno investito nella sperimentazione avanzata. Nel percorso dello sviluppo tecnologico, le sperimentazioni svolte per i prodotti di fascia alta spesso si trasferiscono in vari campi del mercato con qualche anno di ritardo, sembra dunque opportuno esaminare alcune delle sperimentazioni più avanzate nel campo del design dei trasporti.

AVANT-GARDE CAD : GENERATIVE DESIGN

L'applicazione del Design Generativo nel design dei trasporti

NASA | Partendo dal più ambizioso dei nostri esempi di DG, il Jet Propulsion Lab (JPL) della NASA ha sviluppato un nuovo *lander* che verrà inviato alle lune di Giove e Saturno. Come per qualsiasi missione di esplorazione spaziale, ridurre il peso della navicella al minimo è un aspetto critico, il che ha giustificato lo sforzo di ricerca di DG in collaborazione con Autodesk.

L'ottimizzazione del telaio del *lander* utilizzando Fusion 360 ha consentito una riduzione del peso del 35% rispetto al progetto originale, mentre il tempo necessario per effettuare le iterazioni si è ridotto dai due-quattro mesi iniziali a due-quattro settimane (Mraz, 2018). Nell'ambito di un altro progetto chiamato Artemis, la NASA ha collaborato con Jacobs Engineering per sviluppare la tuta spaziale di nuova generazione - il primo importante aggiornamento negli ultimi quattro decenni - per la missione lunare del 2024. Nel caso della Extravehicular Mobility Unit (xEMU), il software Creo di PTC ha consentito di dimezzare il peso di alcuni componenti; d'altronde la struttura reticolare interna consente anche una dissipazione costante del calore, contribuendo così a mantenere la temperatura giusta all'interno di xEMU (Oberhaus, 2020).

Airbus | Nell'aereo A320 viene utilizzata una partizione per separare l'equipaggio dai passeggeri, nonché per supportare la struttura dell'aereo, alla quale è fissato in 4 punti. Fusion 360 ha aiutato a generare numerose varianti della forma, seguendo l'algoritmo di crescita della muffa melmosa, un organismo unicellulare; la variante scelta risulta più leggera del 45% rispetto all'originale; il miglioramento è ancora più marcato in termini di utilizzo della materia prima, ridotto del 95% grazie al processo di MA utilizzato per realizzare il separé. Lo stesso principio strutturale potrebbe essere esteso da questo componente all'intero telaio dell'aereo; secondo Airbus (2018), l'adozione di GD per l'intera linea di prodotti potrebbe far risparmiare 465.000 tonnellate di emissioni di CO2 all'anno.

BMW | Passando agli esempi "a terra", BMW ha sviluppato un telaio sperimentale (completo di forcellone) per la motocicletta S1000RR utilizzando il Fusion 360 per progettare una forma bionica radicalmente nuova (Jackson, 2018). Pur essendo solo un veicolo da mostra finora, potrebbe indicare un cambiamento nel design di motociclette, dove tipicamente il telaio rimane esposto, annunciando visivamente i vantaggi prestazionali portati da DG. BMW, che ha un grande centro di MA, ha utilizzato il DG anche in progetti mirati alla produzione in serie, come una staffa di montaggio che viene utilizzata nel per il tetto retrattile della i8 Roadster (Putre, 2018).

Bugatti | L'azienda automobilistica ha sviluppato la prima pinza freno monoblocco a otto pistoncini, minimizzando allo stesso tempo il peso e aumentando la rigidità in collaborazione con Laser Zentrum Nord per il suo modello Chiron. Il componente si è alleggerito del 40% passando da 4,9 kg di alluminio a 2,9 kg di titanio realizzato con il processo di MA (Bravo, 2018). Con un altro progetto hanno dimezzato il peso del più grande sistema di controllo idraulico di ala posteriore al mondo, utilizzando il software Siemens NX per il modello Chiron PUR SPORT. I componenti strutturali che aiutano a regolare l'aerodinamica del veicolo sono realizzati in titanio

AVANT-GARDE CAD : GENERATIVE DESIGN

sinterizzato (SLS), ma in questo caso la struttura ottimale si ottiene attraverso una combinazione di materiali diversi, poiché le bielle sono in fibra di carbonio (Sher, 2018).

Volkswagen | Per il suo *concept car* Type 20, VW ha ridisegnato vari componenti del suo classico microbus Transporter del 1962: il volante, i supporti dello specchietto retrovisore, i cerchi delle ruote e la struttura di supporto per il sedile posteriore (Deplazes, 2019). Il processo di DG (svolto in Fusion 360) è stato utilizzato per scopi che vanno chiaramente oltre alle prestazioni e appartengono forse al design della comunicazione tanto quanto all'ingegneria: nel suo stato attuale, DG è spesso utilizzato per ottenere un linguaggio visivo “retorico” che mira a rafforzare l'identità di un'azienda come impresa innovativa.

Il Gladiatore | Con l'ultimo esempio, si si descrive un'esperienza diretta con DG. Uno degli autori, Sarvpriya Raj, ha sviluppato un telaio per una motocicletta da corsa per la sua tesi di laurea magistrale in design del prodotto. Qui, una prima ipotesi strutturale (disegnata con il CAD convenzionale) è stata inserita nel software insieme a parametri come le forze che agiscono sul telaio, il processo di fabbricazione e il materiale da utilizzare. Seguendo il principio dell'ottimizzazione topologica, il software Functional GD di Dassault Systemes ha ideato soluzioni ottimizzate applicando la giusta quantità di materiale alle aree soggette a deformazione e sollecitazione, riducendo così la massa del 25%, da 8 a 6 kg. Queste strutture sono state perfezionate per generare la struttura finale da realizzare tramite la MA. L'altro grande vantaggio è l'integrazione delle parti, ovvero la riduzione del loro numero, in quanto viene creata una singola struttura invece di più parti che normalmente si uniscono per comporre il telaio; l'integrazione aiuta a evitare i potenziali problemi causati dalle giunzioni e tolleranze imperfette tra le componenti.

Conclusion

Gli esempi sopra elencati illustrano che l'ottimizzazione della topologia, la biomimesi e la morfogenesi guidate dal DG possono aiutare a generare ed esplorare geometrie precedentemente inconcepibili che non solo migliorano le prestazioni del prodotto (ad esempio il peso), ma implicano anche un nuovo linguaggio visivo. Per sfruttare appieno il potenziale del DG, è necessario l'impiego della MA il quale, pur avendo ancora importanti limiti in termini di velocità e costo, aiuta a minimizzare sia l'utilizzo di materie prime sia i dannosi prodotti collaterali, quindi il DG può essere visto come un pratica di progettazione per aiutare la transizione verso una cultura materiale sostenibile. Per praticare il DG, il progettista deve partire da un insieme completo di informazioni riguardo le aree critiche per la funzione e le prestazioni; deve sapere quali sono i carichi e le forze che agiscono sul pezzo; qual è il processo di fabbricazione che verrà utilizzato.

Poiché le forme 3D vengono generati automaticamente e il progettista diventa un “curatore” dei dati di input e della geometria di output, la progettazione diventa un processo iterativo a ciclo rapido, velocizzando lo sviluppo. Nel futuro possiamo aspettare un'ulteriore espansione dell'intelligenza artificiale (IA) nel design, già dalla prima fase concettuale: un progetto di design speculativo di Foster (2016, per Google X) ipotizza un'IA che raccoglierà informazioni

sul comportamento individuale per comprendere fino in fondo gli utenti, aiutandoli a raggiungere i loro obiettivi personali con prodotti progettati ad hoc. È una visione a lungo termine, ma già per il 2030 potrebbe formarsi una nuova nicchia di esperti di DG, che potrebbe diventare una figura professionale abbastanza riconosciuta e ampiamente utilizzata. Tuttavia, per svolgere questo nuovo ruolo, i progettisti dovranno ampliare i propri strumenti e le proprie competenze, non semplicemente con nuove conoscenze tecniche ma anche con un approccio più flessibile, dove la ricerca e la riflessione critica diventano sempre più importanti rispetto alla capacità di definire geometrie, e l'atto creativo diventa uno sforzo collaborativo tra designer, dati, ambiente, persone e algoritmi.

References

- Airbus (2018). *Pioneering bionic 3D printing*. Retrieved July 12, 2020, from <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2016/03/Pioneering-bionic-3D-printing.html>
- Bader, C., Patrick, W., Kolb, D., Hays, S., Keating, S., Sharma, S., Dikovsky, D., Belocon, B., Weaver, J., Silver, P., and Oxman, N. (2016). Grown, Printed, and Biologically Augmented. *3D Printing and Additive Manufacturing*, Volume 3, Number 2, 2016, 79-89
- Bravo, T. (2018). *World premiere: Brake caliper from 3-D printer*. Retrieved July 13, 2020, from <https://www.bugatti.com/media/news/2018/world-premiere-brake-caliper-from-3-d-printer/>
- Carpo, M. (2015). *The Alphabet and the Algorithm*. MIT Press, Cambridge.
- Clune, J., Lipson, H. (2011). Evolving three-dimensional objects with a generative encoding inspired by developmental biology. In T. Lenaerts, M. Giacobini, H. Bersini, P. Bourguine, M. Dorigo, R. Doursat (edited by), *Proceedings of the European Conference on Artificial Life*. pp. 141-148. Cambridge, MA: MIT Press.
- Deplazes, R. (2019). *Autodesk Collaborates With Volkswagen Group on Generative Design in Electric Showcase Vehicle*. Retrieved July 13, 2020, from <https://adsknews.autodesk.com/news/autodesk-volkswagen-generative-design-electric-showcase-vehicle>
- Foster, F. (2016). The Selfish Ledger. [speculative design study in video format for Google X]. Retrieved 23 November, 2018, from <https://www.theverge.com/2018/5/17/17344250/google-x-selfish-ledger-video-data-privacy>
- Jackson, B. (2018). *BMW demos 3D printed S1000RR sport bike following \$12.3 million investment*. Retrieved July 13, 2020, from <https://3dprintingindustry.com/news/bmw-demos-3d-printed-s1000rr-sport-bike-following-12-3-million-investment-132331/>
- Jackson, C. (2019, August 21). *What is Generative Design?* Retrieved July 11, 2020, from <https://www.lifecycleinsights.com/tech-guide/generative-design/>
- Leary, M. (2019). *Design for Additive Manufacturing*. Elsevier, <https://doi.org/10.1016/C2017-0-04238-6>

Li, Q. (2018). Form Follows Force: A theoretical framework for Structural Morphology, and Form-Finding research on shell structures. *Architecture and the Built Environment*, 2018 No. 2, <https://doi.org/10.7480/abe.2018.2>

Maeda, J. (2001). *Design by Numbers*. Boston: MIT Press.

Mogas Soldevila, L., Duro-Royo, J., Oxman, N. (2015). Form Follows Flow: A Material-driven Computational Workflow For Digital Fabrication of Large-Scale Hierarchically Structured Objects. *Proceedings of the ACADIA 2015 Conference – Computational Ecologies: Design in the Anthropocene*, Cincinnati.

Mraz, S. (2018). *NASA Uses Generative Design on Next-Generation Interplanetary Lander*. Retrieved July 12, 2020, from <https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/article/21837312/nasa-uses-generative-design-on-nextgeneration-interplanetary-lander>

Oberhaus, D. (2020). *NASA's New Moon-Bound Space Suits Will Get a Boost From AI*.

Retrieved July 13, 2020, from <https://www.wired.com/story/nasas-new-moon-bound-space-suits-will-get-a-boost-from-ai/>

Putre, L. (2018). *With a Small but Mighty Bracket, BMW Raises the Roof on 3-D Printing*.

Retrieved July 13, 2020, from <https://www.industryweek.com/technology-and-iiot/article/22026127/with-a-small-but-mighty-bracket-bmw-raises-the-roof-on-3d-printing>

Schumacher, P. (2016). *Parametricism 2.0: Rethinking Architecture's Agenda for the 21st Century*. Indianapolis: John Wiley & Sons.

Sher, D. (2018). *Bugatti and Siemens use AM to improve Chiron's aerodynamics control system*.

Retrieved July 13, 2020, from <https://www.3dprintingmedia.network/bugatti-and-siemens-am-chiron-aerodynamics/>

Sutherland, I. (1975). Structure in Drawing and the Hidden-Surface Problem. In N. Negroponte (edited by), *Reflections on Computer Aids to Design and Architecture*, pp. 73-77. New York: Petrocelli/Charter.

Tedeschi, A., Wirz, F., Andreani, S. (2014). *AAD, Algorithms-aided design*. Brienza: Le Penseur.

Teresko, J. (1993). Parametric Technology Corp.: Changing the way Products are Designed. *Industry Week*, December 20.

Gli autori hanno condiviso l'impostazione teorica e l'articolazione dei contenuti. Se necessario attribuire la responsabilità individuali per motivi accademici, Sarvpriya Raj Kumar ha contribuito con le sezioni Design Generativo: tipi e strumenti; L'applicazione del Design Generativo nel design dei trasporti; Conclusione. Viktor Malakuczi ha contribuito con le sezioni Introduzione; Un passo avanti nello sviluppo del CAD ;Algoritmi di Design Generativo nella ricerca di design.