

# Design parametrico di un prodotto industriale customizzato

Un sistema posturale per carrozzine

**Daniele Baratta** Università di Bologna, Dipartimento di Architettura  
 daniele.baratta6@unibo.it

Partendo da un'indagine sulla letteratura inerente lo stato dell'arte dei prodotti *customizzati* progettati parametricamente, si propone l'analisi di un caso studio: l'elaborazione di un algoritmo generativo applicato al progetto di uno schienale per carrozzine per disabili. Nel contributo si descrive la parametrizzazione e il processo di costruzione della mesh 3D, ottimizzata rispetto alle esigenze posturali, con qualità di grande traspirabilità e leggerezza, vere caratteristiche innovative del prodotto.

Si conclude il contributo evidenziando come il processo descritto sia maturo per permettere l'introduzione sul mercato degli ausili alla disabilità di schienali realizzati su misura, disegnati su piattaforme CAD generative e prodotti con fabbricazione additiva.

*Schienale traspirante, Sistema posturale, Design parametrico, Algoritmo generativo, Processo di mass customization, Fabbricazione additiva*

From a literature research regarding the state of the art of parametrically designed customised products, a case study is proposed: the design of a generative algorithm applied to wheelchair backrests. The 3D parametrisation and mesh building is described; it is optimised for postural needs and it adds lightness and breathability, core innovative features to these products.

It is concluded that the described process is ready to introduce taylormade backrests on the market, designed with generative CAD platforms and produced by additive fabrication.

*Breathable backrest, postural system, parametric design, generative algorithm, mass customization process, additive manufacturing*

## Introduzione

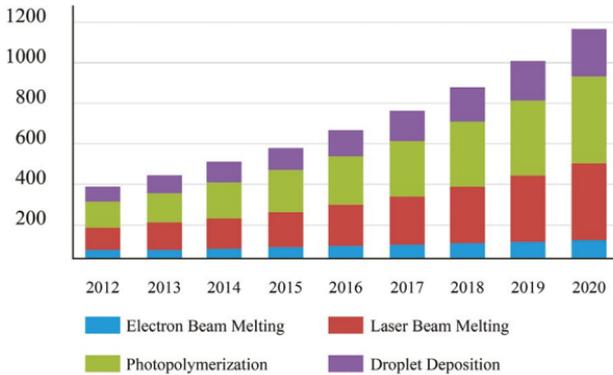
La recente diffusione di strumenti di modellazione parametrica generativa dal linguaggio semplificato ha permesso a un crescente numero di figure l'esplorazione di nuove frontiere ideative.

Se per i progettisti dell'ambiente costruito, questo ha significato essere liberati dal vincolo della modularità dell'elemento architettonico, per i designer di prodotto ha comportato essere svincolati dalla limitazione della serialità. L'uso simultaneo di CAD parametrico-generativi e di tecnologie di *additive manufacturing* ha permesso l'effettiva personalizzazione di prodotto in alcune nicchie di mercato. L'utilizzazione di questo processo, nonostante la costante diminuzione di costo, rimane economicamente valida soltanto quando si presentano determinate esigenze di progetto. Queste ultime hanno a che vedere con l'unicità delle caratteristiche estetico-funzionali del prodotto in oggetto, ovvero devono soddisfare bisogni differenti da utente a utente oppure dare risposta allo stesso bisogno in modo diversificato a causa di vincoli unici per ogni individuo. Attualmente le principali nicchie di mercato nelle quali queste esigenze giustificano investimenti implementati in termini di costo legati al progetto sono principalmente *biomedical*, *fashion* e *tooling* (Vojislav et al., 2011); la prima, della quale fa parte il caso studio presentato, è sicuramente quella che ha ricevuto l'attenzione maggiore da parte della comunità scientifica (Lansford et al., 2016).

Chen et al. (2016) ne offrono una recente ed estesa panoramica sullo stato dell'arte. Il grafico [fig. 01] sintetizza quantitativamente l'espansione del mercato in oggetto suddividendolo per tecnologie produttive.

Alcuni studi specifici ci permettono di evidenziare i settori del biomedicale che, ad oggi, si sono dimostrati più ricettivi rispetto all'implementazione di processi con parametrizzazione dei modelli; Lochner et al. (2012) dimostrano come automatizzare la progettazione di un ausilio plantare. L'operazione, nella maggior parte dei casi, è ancora condotta manualmente; in questo caso, a partire dalla scansione 3D della mappa pressoria d'appoggio della pianta, è stato elaborato un algoritmo che restituisce il modello 3D della soletta plantare, pronto per essere fabbricato e implementato. Il processo è molto simile a quello usato per la progettazione dell'ausilio posturale successivamente descritto.

Sergei Azernikov (2010) descrive il caso di parziale parametrizzazione delle matematiche di un apparecchio acustico. In questo caso l'involucro del dispositivo deve interfacciarsi, da una parte, con la biometria del



padiglione auricolare e, dall'altra, con il contenuto tecnologico standard. Infine Hun et al. (2015) descrivono il progetto di un'ortosi per il polso ibrida: la struttura interna disegnata sull'anatomia del paziente e il guscio protettivo esterno prodotto in misure standard. L'esempio è interessante poiché, anche in questo caso, si assiste all'interazione tra una parte del prodotto customizzata e una parte standard; una condizione che si ripete nel caso studio descritto successivamente in questo lavoro. Le ortosi per il polso sono state oggetto di numerose sperimentazioni che si sono servite di tecniche di sviluppo parametrico delle matematiche 3D; si citano in particolare Cortex di Jake Evill e Osteoid di Deniz Karasahin [fig. 02].

Il ricorso alla tassellazione Voronoi della superficie per ottenere aperture diffuse e bilanciate, è una pratica diffusa su molti prodotti customizzati ottenuti parametricamente. La semplice disposizione di punti su una superficie, che portano poi alla definizione della tassellazione, è infatti un sistema immediato per definire le caratteristiche strutturali dell'oggetto progettato.

La tassellazione Voronoi è anche un eccellente metodo per ottenere velocemente ed efficacemente una varianza estetica sul prodotto. È stata adottata, nello specifico, anche dal dottor Lelio Leoncini che, in collaborazione con il team di progettisti di Wasp [1], sta eseguendo numerose sperimentazioni sul processo di parametrizzazione e fabbricazione additiva di busti posturali a correzione di patologie di deformazione della spina dorsale [fig. 03].

Si ritiene interessante citare due ulteriori progetti che hanno esplorato questa frontiera sperimentale per il mercato della moda e accessori. Lo studio di design statunitense Nervous System [2] ha messo a punto diversi algoritmi generativi (*Kinematics*) che permettono di

elaborare infinite varianti di tassellazione Voronoi dove ogni cella è incernierata alle circostanti, in modo da ottenere un effetto di “tessuto rigido”. Successivamente i prodotti sono sinterizzati in un unico processo, ripiegati su loro stessi come un vero e proprio tessuto, e fra loro assemblati. I gioielli sono personalizzabili dall’utente attraverso una piattaforma interattiva online [fig. 04].

Altre aziende hanno messo a punto processi finalizzati alla definizione di prodotti unici realizzati su misura; inevitabilmente questi sistemi implicano il ricorso a strumenti di modellazione parametrico-generativa nella fase di progettazione del pezzo. Alec Banks (2016) sintetizza in un parallelismo le sperimentazioni di Nike, Adidas, New Balance and Under Armour [fig. 05].

Ultimo progetto pilota significativo è quello di Seiko che con la collaborazione di Materialize, service provider di stampa 3D [3], ha dato vita a una linea di occhiali adattabili al viso del fruitore. In questo caso i parametri influenti sulla forma finale sono: la dimensione della montatura, l’angolazione dell’attacco alle stanghette e la lunghezza delle stanghette stesse.

Gli esempi sinteticamente descritti tentano di fornire una limitata ma significativa panoramica dello stato dell’arte relativa all’applicazione di strumenti di modellazione parametrici sul mercato. In particolare si evidenzia come al-

02  
Progetti Cortex  
di Jake Evill  
(in alto)  
e Osteoid  
di Deniz  
Karashahin  
(in basso)



cuni settori – in particolare quello sanitario e quello della moda e accessori – abbiano già portato a termine la fase dei progetti pilota e siano proiettati verso una vera e propria implementazione per il mercato di massa.

#### **Antefatto del caso studio**

Il caso studio è frutto di un lavoro di ricerca condotto nell'arco di tre anni. Inizialmente il progetto ha previsto l'elaborazione di un processo che permettesse la customizzazione del prodotto schienale, partendo da misurazioni specifiche condotte sul paziente. Questo processo ha portato al risultato di un prodotto *taylormade* capace di dare risposta a determinate necessità ancora insoddisfatte nel mercato dei sistemi posturali per carrozzine: personalizzazione, traspirabilità e leggerezza compresenti in unico prodotto. In una fase successiva si è riformulato parzialmente il processo in funzione di un duplice obiettivo: rendere più veloce il sistema di progettazione-produzione del dispositivo e abbassarne il costo. Questa evoluzione di approccio, avvenuta a più di un anno di distanza dall'avvio della ricerca, ha richiesto l'introduzione di un algoritmo generativo per la customizzazione del prodotto. Conseguentemente si è resa evidente una non linearità del progetto, conseguenza del suo sviluppo in due fasi ben distinte e separate.

03





04

04  
Progetti *Kinematics* di Nervous  
System

03  
Stampa e test di busto ottenuto  
parametricamente a partire  
da scansione 3D (Leoncini)



05

### Metodo

Il processo di progettazione e produzione di un prodotto costruito sulla biometria di un individuo, come è facile immaginare, è sostanzialmente diverso da quello tradizionalmente inteso per un prodotto *mass market*. Kimberly Jensen e Jordan Cox (2008), nella relazione illustrativa di un caso studio analogo a quello qui presentato, forniscono un'efficace implementazione del condiviso modello di Karl Ulrich e Steven Eppinger (1995), suddiviso in sei fasi. Le fasi 3 e 4 costituiscono i punti nodali del processo, rappresentando il particolare focus di interesse anche per questo studio.

Le sei fasi attengono:

- fase 1 / *pianificazione*;
- fase 2 / *sviluppo del concept*;
- fase 3 / *progettazione del sistema* (selezione di una configurazione geometrica biomeccanica nella forma di struttura totalmente definita e individuazione dei criteri di personalizzazione);

03

62

05  
Suole Nike  
(sopra) e New  
Balance (sotto)  
realizzate  
con design  
parametrico  
e sinterizzate

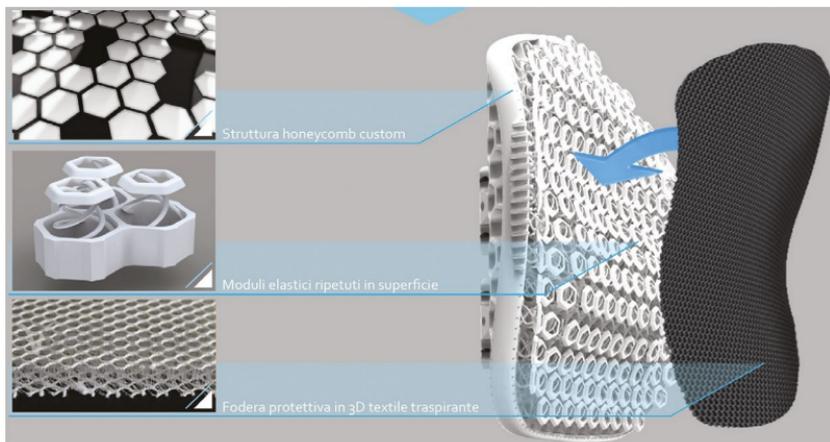
- fase 4 / *progettazione dettagliata* (design della bio-interfaccia, creazione della geometria del prodotto, parametrizzazione, produzione varianti);
- fase 5 / *test e modifiche*;
- fase 6 / *avviamento produzione*.

Le fasi critiche, al fine di ottenere efficace personalizzazione, sono riconducibili alla scelta dei parametri biometrici e all'implementazione dell'algoritmo generativo.

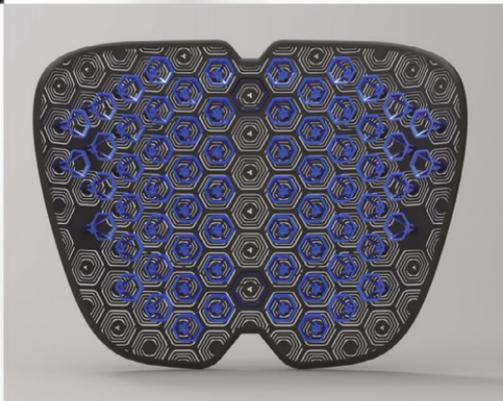
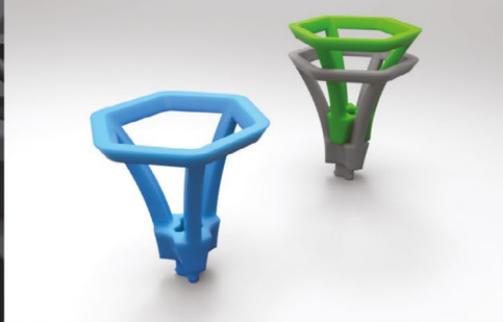
### Parametrizzazione

La parametrizzazione, in ambiente CAD, è l'operazione di definizione dei parametri a partire dai quali l'intero prodotto viene generato; modificando i suddetti parametri viene aggiornata, conseguentemente, l'intera geometria, conseguendo una sostanziale automazione del processo di design del prodotto. La definizione dei parametri di partenza rappresenta la fase chiave per una efficace progettazione di prodotti al fine di renderli realmente adattabili a diversi contesti. Nella progettazione meccanica tradizionale, da molti anni abituata all'impiego di software parametrici, i dati analitici di partenza sono solitamente costituiti da numeri che definiscono dimensioni lineari, raggi di arrotondamento, moltiplicazione di elementi ecc. Nel design bio-geometrico l'interfacciarsi con le forme del corpo umano rende necessario fornire all'algoritmo informazioni più dettagliate; nel caso specifico illustrato, come in molti di quelli citati precedentemente, i parametri sono costituiti da superfici scansionate e linee, oltre che da numeri.

06  
Il concept di  
prodotto



06



07

### Schienale *customizzato* traspirante per carrozzine. **Caso studio.**

*Fasi 1-2: pianificazione e sviluppo concept.* In queste fasi si è seguito un tradizionale processo di design del prodotto: l'analisi di bisogni inespressi, la ricerca delle potenziali nicchie di mercato insoddisfatte e delle tecnologie abilitanti ha permesso lo sviluppo di un concept di prodotto innovativo. La schiena di paraplegici e tetraplegici è in costante appoggio sullo schienale di una carrozzina, tradizionalmente costituito da gommapiuma o da schiumati poco igienici e poco traspiranti; in particolari condizioni di sudorazione l'impiego di tali materiali può provocare fastidio, infiammazione o addirittura piaghe [fig. 06].

Il concept elaborato prevede due componenti posti a definire il prodotto: una superficie rigida, costruita su misura, che soddisfi le esigenze posturali del paziente e una moltitudine di elementi ammortizzanti funzionali a conferire il comfort desiderato allo schienale.

*Fase 3: progettazione del sistema.* Al fine di ospitare efficacemente i molteplici elementi ammortizzanti e offrire numerose "luci" di traspirazione, si è definita una particolare tassellazione dell'elemento rigido di supporto. La scelta della tassellazione esagonale "*honeycomb*" è quella che, a parità di rigidità, offre il miglior rapporto tra vuoti e pieni, ottimizzando la traspirazione. Nella prima

07

La prima (sinistra) e seconda (destra) versione di elementi ammortizzanti

versione prototipata di schienale, a causa di una limitata scelta di materiali sinterizzabili, questa struttura rigida era piuttosto voluminosa. Nella versione successiva si è riusciti ad assottigliare lo spessore a 1/3, con notevoli risultati in termini estetici e tempi di sinterizzazione. La base rigida è l'elemento che, successivamente, sarebbe stato possibile personalizzare grazie alla parametrizzazione di tre input: la corretta superficie di supporto posturale, la linea del profilo perimetrico dello schienale e lo spessore dell'*honeycomb* per la rigidità desiderata [fig. 07]. Gli elementi ammortizzanti hanno registrato lungo la fase di ricerca una evoluzione ulteriore. Nella prima versione, a conclusione di una fase di test, era stata selezionata una geometria funzionale al materiale sinterizzato; ogni elemento era concettualmente costituito da una molla a compressione, ospitato nella cella dell'*honeycomb*. Questo concept prevedeva la sinterizzazione dell'intero schienale e una maggiore complessità nello sviluppo dell'algoritmo. La seconda versione è invece costituita da una molla piatta a trazione, meno ingombrante e più gestibile computazionalmente nella costruzione dell'algoritmo parametrico. Questa seconda versione prevede la divisione dell'elemento ammortizzante in due componenti: la molla e la testina di appoggio; la prima integrata alla base strutturale e sinterizzata con essa, la seconda ottenuta da stampo a iniezione e assemblabile successivamente.

*Fase 4: progettazione dettagliata.* La progettazione del sistema posturale su misura è partita dal rilevamento della corretta superficie d'appoggio. Ci si è serviti, come modello, dell'attuale sistema posturale del paziente; tale rilievo antropometrico è stato replicato mediante un calco in sabbia e riproduzione in gesso, scansionato in 3D e ricostruito digitalmente. In una fase successiva di modellazione manuale si è tassellata la superficie, estrudendola in modo da ottenere la rigidità desiderata e collocando in essa i numerosi elementi di appoggio ammortizzanti.

08  
Processo di  
rilevazione del  
sistema posturale  
e ricostruzione  
mesh



08

In chiusura di questa fase si è provveduto a costruire una cornice e un sistema di fissaggio al telaio della carrozzina. L'intera operazione, seppur soddisfacente nel risultato, ha mostrato evidenti limiti di replicabilità, dovuti al laborioso lavoro di modellazione *ad hoc* [fig. 08].

Il passaggio a un sistema di modellazione parametrica prometteva a questo punto un enorme riduzione dei tempi di disegno tridimensionale.

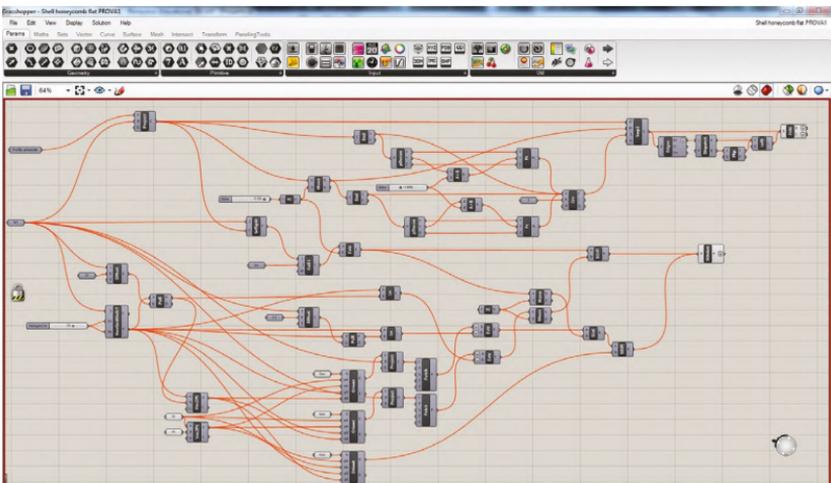
A più di un anno di distanza dalle prime sperimentazioni si è presentata l'opportunità di condurre un'approfondimento di progetto col fine d'implementazione dell'algoritmo.

Dopo numerose versioni, l'algoritmo ottimizzato compie, sinteticamente, le seguenti operazioni:

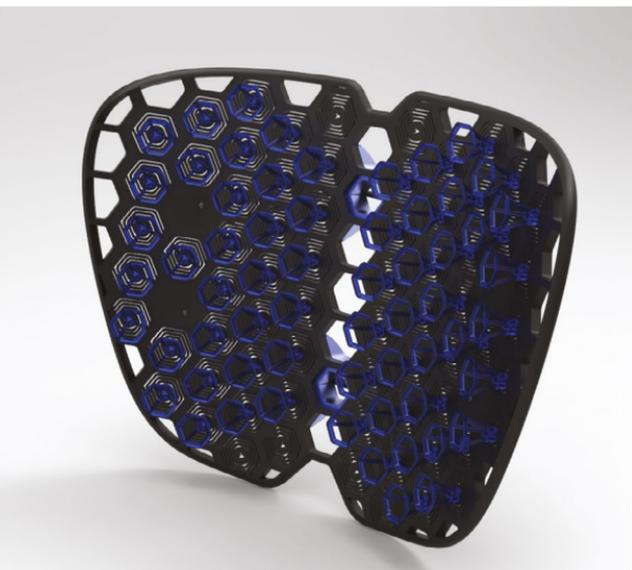
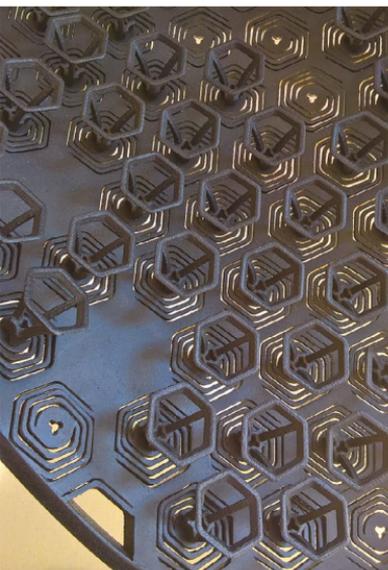
- lettura di tre paramtri (superficie posturale, profilo tangenziale e spessore);
- tassellazione *honeycomb* della superficie posturale e creazione delle luci esagonali;
- taglio della superficie in corrispondenza del profilo tangenziale;
- estrusione della superficie e creazione del volume *honeycomb* strutturale;
- realizzazione del bordo tangenziale dello schienale;
- collocamento del disegno delle molle in corrispondenza delle luci ed estrusione;
- unione booleana tra struttura, bordo e molle [fig. 09].

Il prodotto è successivamente completato, nella sua configurazione finale, mediante le "testine" di appoggio e gli elementi di connessione al telaio della carrozzina. Quest'ultima fase aggiunge una personalizzazione estetica al prodotto e lo rende adattabile a diversi tipi di telaio.

09  
Graficizzazione  
dell'algoritmo  
generativo  
in ambiente  
Grasshopper  
per Rhinoceros



09



10

### Conclusioni

Dal punto di vista del prodotto la sperimentazione ha dimostrato un'efficace implementazione di un algoritmo generativo per la personalizzazione geometrica di un ausilio alla disabilità [fig. 10].

La verifica qualitativa dello schienale, sinterizzato in materiale Windform® GT [4], ha confermato un'ottima resistenza meccanica, una buona risposta elastica delle molle (nonostante una prova di stress a numerosi cicli non sia ancora stata condotta) e una più che buona risoluzione estetica. Un test d'uso del prodotto ha confermato, tuttavia, la necessità di avvalersi di "testine" di appoggio prodotte in serie in materiale adeguato; un materiale più morbido come un PP annullerebbe il rumore dato dal reciproco sfregamento durante l'uso dello schienale e la potenziale usura dei pezzi stessi.

Sul piano quantitativo, in mancanza di casi documentati che possano evidenziare parametri per la valutazione delle performance, si ritiene prematuro avanzare delle conclusioni.

Dal punto di vista del processo di prototipazione emergono ancora lacune che ne rallentano lo sviluppo. Nonostante la fase di modellazione computazionale sia stata automatizzata e la sinterizzazione del prodotto abbia completato il processo in modo fluido, la fase iniziale di acquisizione dei dati risulta laboriosa. Più moderni

10  
Dettaglio  
fotografico  
del prototipo  
e render del  
prodotto  
assemblato

e veloci metodi di scansione 3D (come scanner 3D manuali), purtroppo non disponibili in questa sperimentazione, potrebbero permettere una semplificazione e una maggiore efficacia del processo, contestualmente a una esperienza migliore per il paziente e l'operatore sanitario.

Il sistema descritto in questo contributo è, attualmente, protetto da brevetto e in stato di sviluppo ulteriore da parte di un'azienda di ausili alla disabilità. L'implementazione del servizio che permetta l'acquisizione dati, progettazione parametrica e fabbricazione del pezzo su specifiche esigenze del paziente è il prossimo obiettivo.

#### NOTE

[1] Pagina aziendale <http://www.wasproject.it/w/> [Maggio 2017]

[2] Pagina aziendale <http://n-e-r-v-o-u-s.com/> [Maggio 2017]

[3] Pagina aziendale <http://www.materialise.com/> [Maggio 2017]

[4] Pagina aziendale <http://www.windform.it/> [Maggio 2017]

#### REFERENCES

Ulrich Karl, Eppinger Steven, *Product Design and Development*, New York, Irwin McGraw-Hill, **1995**, pp. 432.

Jensen Kimberly, Cox Jordan, "Bio-surfaces and geometric references for mass customization, in bio-interface design", *Journal of Intelligent Manufacturing*, n. 19, **2008**, pp. 553-564.

Tak-Man Cheung Jason, Zhang Ming, "Parametric design of pressure-relieving foot orthosis using statistics-based finite element method", *Medical Engineering and Physics*, n. 30, **2008**, pp. 269-277.

Azernikov Sergei, "Computer aided design of ventilation tubes for customized hearing devices", *Computer-Aided Design*, n. 42, **2010**, pp. 87-94.

Eyers Daniel, Dotchev Krassimir, "Technology review for mass customization using rapid manufacturing", *Assembly Automation*, n. 30, **2010**, pp. 39-46.

Petrovic Vojislav, Haro Gonzales Juan Vincente, Jordà Ferrando Olga, Delgado Gordillo Javier, Blasco Puchades Jose Ramòn, Porolès Griñan Luis, "Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies", *International Journal of Production Research* n. 4, vol. 49, **2011**, pp. 1061-1079.

Jin Wang, Haining Zhang, Guodong Lu, Zheng Liu, "Rapid parametric design methods for shoe-last customization", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* n. 54, **2011**, pp. 173-186.

Lochner Samuel, Huissoon Jan, Bedi Sanjeev, "Parametric Design of Custom foot Orthic Model", *Computer-Aided Design & Application* n. 9, **2012**, pp. 1-11.

Hun Kim, Seongwon Jeong, "Case Study: Hybrid model for the customized wrist orthosis using 3D printing", *Journal of mechanical science and technology* n. 29, **2015**, pp. 5151-5156.

Hsu Ding-Yang, Cheng Yin-Lin, Bien Mauo-Ying, Lee Hsin-Chien, "Development of a method for manufacturing customized nasal mask cushion for CPAP therapy", *Australas Phys Eng Sci Med* n. 38, **2015**, pp. 657-664.

Lansford Christopher, Grindle Garret, Salatin Benjamin, Dicianno Brad E., "Innovations With 3-Dimensional Printing in Physical Medicine and Rehabilitation: A review of the Literature", *PM&R* n. 12, **2016**, pp. 1201-1212.

Chen Roland, Jin Yu-an, Wensman Jeffrey, Shih Albert, "Additive manufacturing of custom orthoses and prostheses – A review", *Additive Manufacturing* n. 12, **2016**, pp.77-89.

Scott Clare, Dr. Lelio Leoncini and WASP medical Create Better Spinal Care Through 3D Printing <https://3dprint.com/155133/wasomedical-lelio-leoncini/> [Maggio 2017]

Banks Alec, *Who is winning the 3D printing battle in footwear and Why?* <http://www.highsnobiety.com/2016/12/15/3d-printed-shoes-nike-adidas/> [Maggio 2017]

<https://n-e-r-v-o-u-s.com/kinematics/> Applicativo online per la realizzazione parametrica di gioielli [Maggio 2017]

<http://www.evilldesign.com/cortex> Home page del progetto di Ortési per polso di Jake Evill [Maggio 2017]

<http://www.materialise.com/en/cases/materialise-and-seiko%E2%80%99s-award-winning-xchanger-collection> Pagina della rassegna stampa del progetto sviluppato da Materialise, Seiko e Hoet Design studio [Maggio 2017]

<http://layerdesign.com/projects/go/> Home page del progetto di carrozzina customizzata e stampata in 3D, sviluppata dallo studio Layer [Maggio 2017]

<http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/healthcare-3d-printing-market> Riepilogo del Report condotto da Grand View Research sul mercato sanitario del 3D printing [Maggio 2017]

Michael Parker, *Nervous System unveils new 3D printed Kinematics petal Dress*, 2016 <https://3dprint.com/122616/new-kinematics-petal-dress/> [Maggio 2017]