

Oltre la misura: modelli parametrici per la realizzazione assistita del progetto

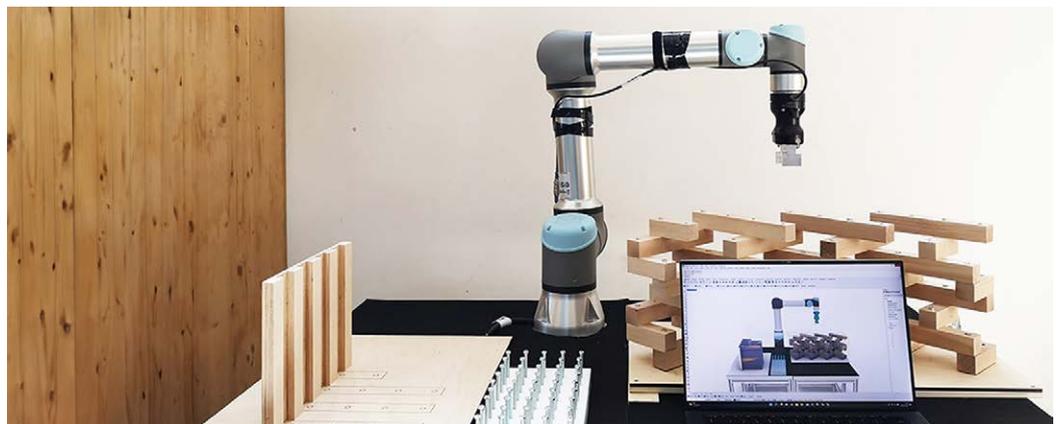
Michele Calvano
Roberto Cognoli

Abstract

L'articolo approfondisce la relazione tra misura e parametro nei modelli 3D destinati alla fabbricazione, focalizzando il ruolo che il parametro ha nella definizione e manipolazione di forma ed informazione. Viene introdotto il concetto di misura come dato passivo e attivo, approfondendo il secondo caso, in cui il parametro guida la trasformazione del modello, diventando un elemento di manipolazione indiretta. I parametri attivi definiscono le caratteristiche geometriche delle forme e possono essere costituiti da funzioni e vincoli. Il processo di progettazione parametrica prevede anche la composizione oculata di vincoli per garantire la coerenza morfologica e topologica durante le trasformazioni della forma. L'articolo esplora le fasi del processo di modellazione 3D, indicando i parametri e le misure che portano alla realizzazione del progetto. Per questo scopo si passa attraverso diversi modelli, dal Modello Concettuale al Modello di Fabbricazione indicando il ruolo chiave dei dati nella definizione della forma e delle relazioni. Il Modello Procedurale emerge come rappresentazione nodale, identificando il parametro come elemento per programmare azioni e trasferire l'esperienza tecnologica del costruttore ai macchinari che renderanno il prodotto reale tramite un processo programmato. Il lavoro si conclude illustrando una esperienza di ricerca applicata in cui sono riconoscibili i diversi modelli ed il ruolo che le misure e i parametri hanno per la definizione del Modello Reale.

Parole chiave

modello multidimensionale, fabbricazione digitale, modello informato, modellazione parametrica, data driven



Assemblaggio del modello reale utilizzando il braccio robotico. I parametri introdotti nel Modello Procedurale guidano la fabbricazione del Modello Reale. Elaborazione degli autori.

Introduzione

In un modello parametrico possiamo identificare due tipi di misura, quella letta e quella scritta; nel primo caso parliamo di un dato passivo che esprime la qualità metrica e geometrica dell'oggetto 3D, nel secondo caso è un dato che, se modificato comporta la variazione del modello. Le variabili che influiscono sulla forma finale del modello 3D vengono chiamati parametri; i parametri di un modello sono ad esempio la lunghezza, la larghezza, l'altezza e tutte le relazioni metriche tra le parti dell'oggetto (fig. 1).

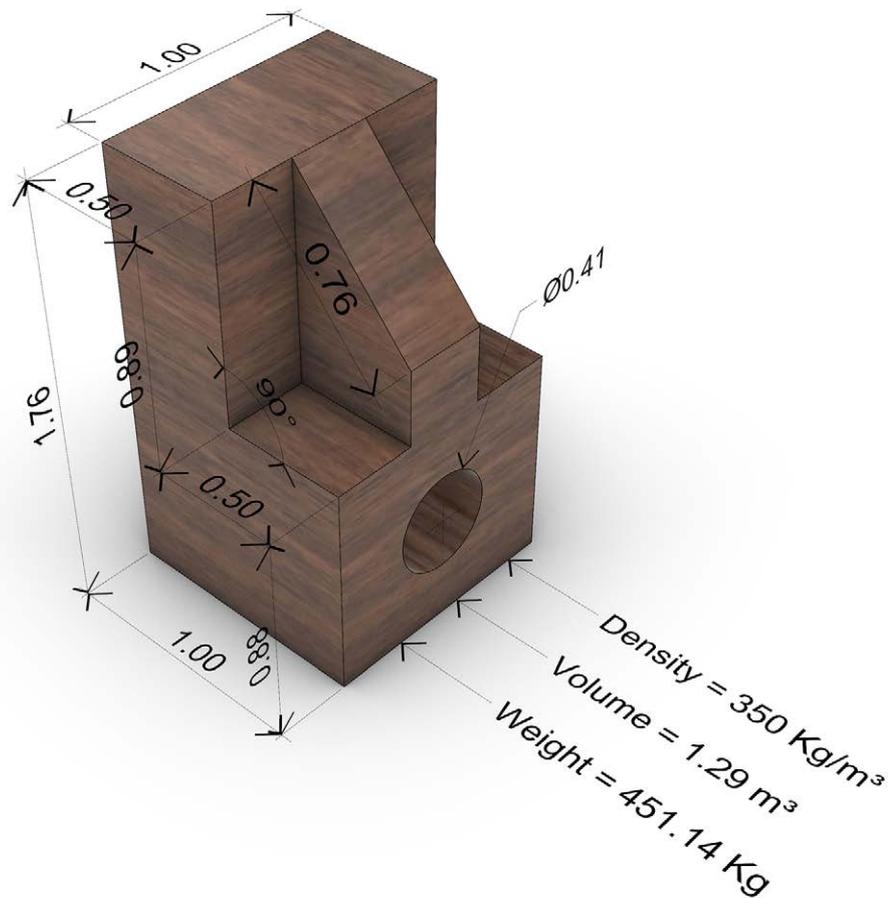
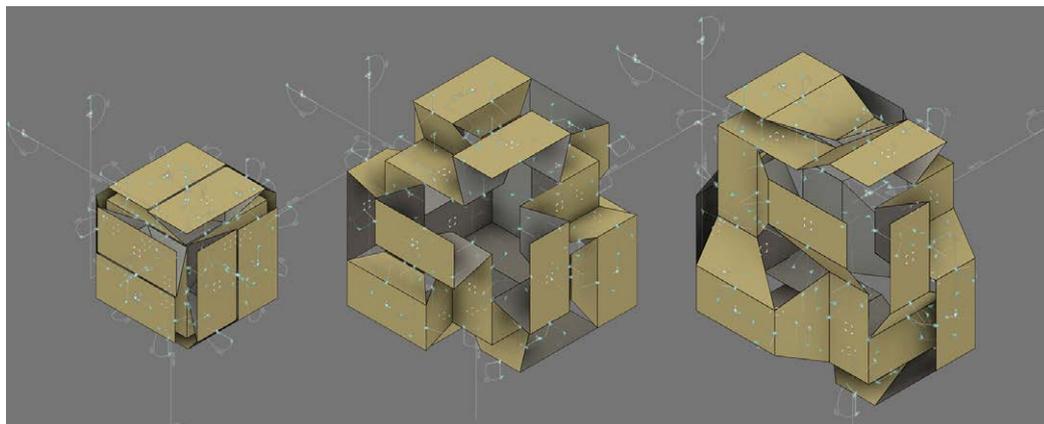


Fig. 1. Modello caratterizzato da parametri numerici ed attributi testuali per l'introduzione di nuove dimensioni informative attive e passive. Elaborazione degli autori.

Tra i parametri annoveriamo quelle informazioni numeriche e testuali che arricchiscono la rappresentazione con altri domini di conoscenza capaci di espandere la dimensione informativa del disegno. I dati che non descrivono o modificano gli aspetti metrici e geometrici del modello sono comunemente chiamati attributi. Alcuni esempi di attributi, in ambito architettonico, sono l'anno di costruzione dell'edificio, l'attribuzione del fabbricato, il materiale di costruzione, il tipo di finitura e molte altre indicazioni. Alcuni parametri possono assumere dei valori espressi in formule che relazionano uno o più informazioni; altri parametri invece devono sottostare a regole o relazioni che definiscono la correlazione tra parti del modello, in questo caso parliamo di vincoli. La corretta progettazione dei vincoli garantisce che il modello mantenga intatti gli aspetti morfologici e topologici durante la variazione dei parametri (fig. 2).

Oggi possiamo intendere il modello digitale come l'unione tra istanza estetica (morfologia e topologia) ed istanza informativa (parametri ed attributi), cambiando il paradigma della rap-

Fig. 2. Modello parametrico dinamico; il modello si trasforma muovendosi nel rispetto dei vincoli progettati (modello di Andrea Casale).



presentazione digitale che, da rappresentazione tridimensionale, diventa rappresentazione parametrica multidimensionale. I parametri, le regole e i vincoli che definiscono l'insieme delle soluzioni prodotte costituiscono il modello parametrico; la selezione delle informazioni che conformano il disegno deve essere attentamente progettata in base all'utilizzo e allo scopo del modello.

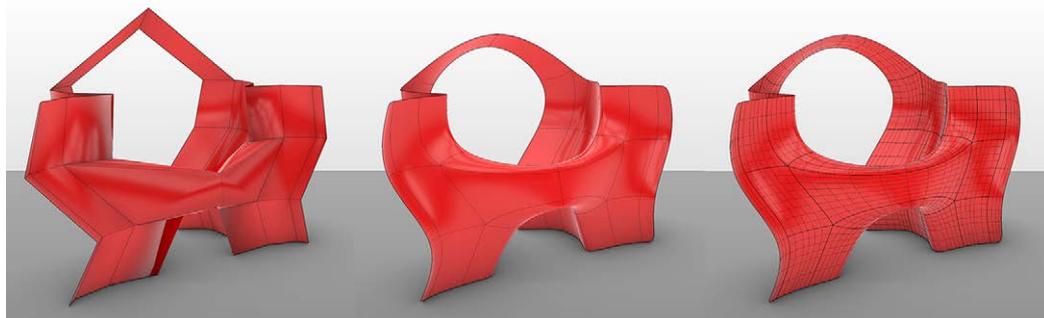
Le fasi di sviluppo del progetto si possono articolare attraverso una successione di modelli caratterizzati da differenti livelli di dettaglio, di informazione e di misura in relazione al ruolo che ogni singolo modello ha nel percorso ideativo. Disegni e modelli sono gli strumenti dei progettisti utili a sviluppare l'idea progettuale, ma sono anche gli strumenti per comunicare e consultare le discipline tecniche che partecipano allo sviluppo del progetto. Emerge così la chiara necessità di gestire e coordinare le informazioni tra gli attori coinvolti nel processo. Di conseguenza si rendono indispensabili nuovi approcci e strumenti per la gestione e la selezione accurata dei parametri al fine di generare modelli appropriati per ciascuna fase del processo.

Metodi

La definizione di progetti complessi richiede una visione multidimensionale e multidisciplinare del progetto [Calvano, Mancini 2021]; l'idea deve essere indagata nell'astrazione dello spazio digitale per quanto riguarda la genesi evolutiva, così come nella concretezza dello spazio reale per l'indagine di soluzioni tecniche e costruttive. Nelle esperienze progettuali più avanzate [Wagner et al. 2020], il progetto matura attraverso la correlazione di diversi modelli che elenchiamo di seguito.

Il Modello Concettuale è l'atto iniziale del processo di progettazione, con cui il designer inizia una comunicazione con sé stesso, spiegando le forme e le caratteristiche desiderate per il

Fig. 3. Metodi di rappresentazione digitale per il disegno del modello concettuale. Da sinistra: rappresentazione numerica (mesh), rappresentazione ibrida (subd), rappresentazione continua (NURBS). Elaborazione degli autori.



progetto attraverso le immagini. Il fine è la definizione di una forma consapevole, che possa raccogliere la complessità di un modello d'architettura che per natura connette diversi domini di conoscenza. Per fare questo il progettista si avvale anche di processi generativi [Singh, Gu 2012] capaci di integrare competenze multidisciplinari nel progetto. In un modello concettuale è preferibile comporre le forme senza utilizzare istanze parametriche che irrigidiscono la libertà del disegno, utilizzando quegli strumenti che propongono una interazione diretta con la forma, per cui i parametri principali sono le coordinate dei vertici di una mesh (rappresentazione numerica), la posizione dei punti di controllo di una superficie NURBS (rappresentazione matematica) oppure la manipolazione topologica, possibile con i modelli subD (rappresentazione ibrida) (fig. 3).



Fig. 4. Modello fisico per l'indagine dei processi di costruzione e la consecutiva digitalizzazione. Elaborazione degli autori.

Il Modello di Studio è una rappresentazione fisica che supporta la fase iniziale di un progetto; la costruzione avviene mediante processi analogici, in alcuni casi artigianali in modo da testare il processo di fabbricazione (fig. 4). Il Modello di Studio deve rappresentare le problematiche di costruzione del modello reale in modo da scegliere e sperimentare le tecnologie di costruzione, simulando il processo di fabbricazione della forma complessiva e dei dettagli; il risultato è costruire un oggetto funzionante mantenendo l'istanza estetica definita nel progetto. Oltre alle misure suggerite dal Modello Concettuale, i parametri da rispettare sono quelli imposti dai materiali scelti e dalle tecnologie utilizzate per la fabbricazione delle parti. La consapevolezza acquisita durante questa attività sarà di supporto alla progettazione dei parametri che saranno inseriti nel Modello Procedurale.

Il Modello Continuo è il risultato di operazioni di Reverse Modeling [Calvano 2013; Russo 2012] effettuate sul Modello Concettuale il quale, essendo un modello rapido ed istintivo, redatto in una fase iniziale del processo creativo, si porta dietro errori topologici e carenza di dettaglio; a queste problematiche deve assolvere il Modello Continuo. I parametri da considerare durante il disegno del Modello Continuo sono quelli legati al tipo di rappresentazione

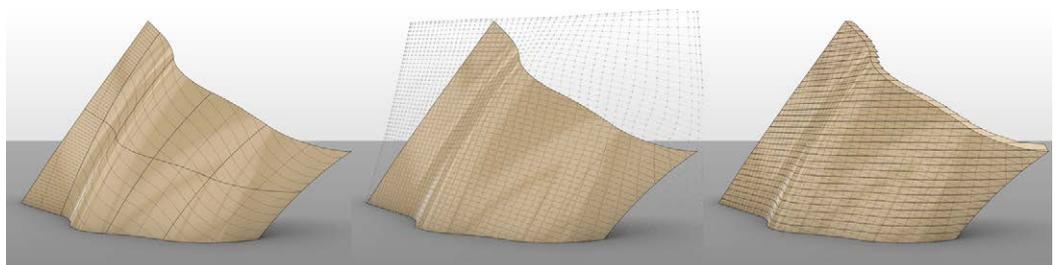


Fig. 5. Attività di Reverse Modeling per il Passaggio dal Modello Concettuale al modello continuo, quest'ultimo è necessario per la generazione del Modello di Fabbricazione. Elaborazione degli autori.

digitale utilizzata. Il Modello Continuo è l'input principale del Modello Procedurale, motivo per cui le rappresentazioni che meglio si prestano alla composizione di questo modello sono quella matematica e quella ibrida, che dispongono entrambi di una forte base matematica garantendo la rappresentazione continua di curve e superfici [Antonelli et al. 2013]. I parametri di variazione sono per ambedue i modelli la possibilità di spostamento nello spazio dei punti di controllo; solo per la rappresentazione subD vi è anche la possibilità di manipolare direttamente la topologia della forma (fig. 5).

Il Modello Procedurale si conforma attraverso processi algoritmici programmati mediante Textual Programming Language (TPL) o Visual Programming Language (VPL) [Leitao 2012; Calvano et al. 2022], configurando quella che viene definita modellazione indiretta. Attraverso i linguaggi di programmazione si istruiscono le azioni che permettono di trasferire l'esperienza tecnologica e costruttiva maturata sul Modello di Studio al Modello di Fabbricazione. Il Modello Procedurale è per sua natura parametrico, ed il numero di parametri è funzione delle attività progettate in esso (fig. 6).

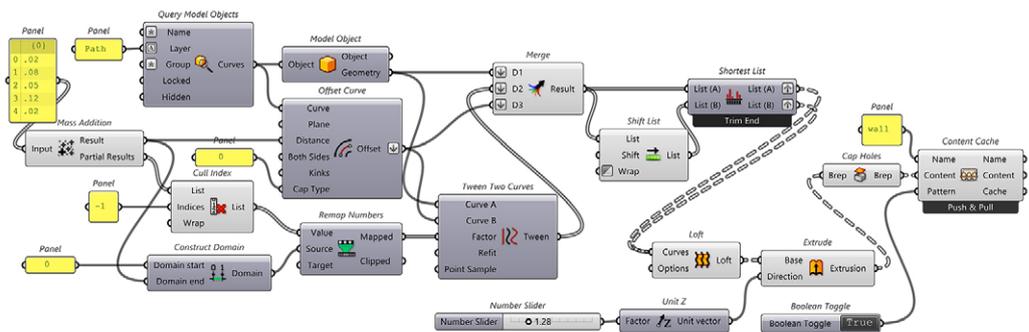


Fig. 6. Rappresentazione indiretta di un Modello Procedurale utilizzando il Visual Programming Language. Elaborazione degli autori.

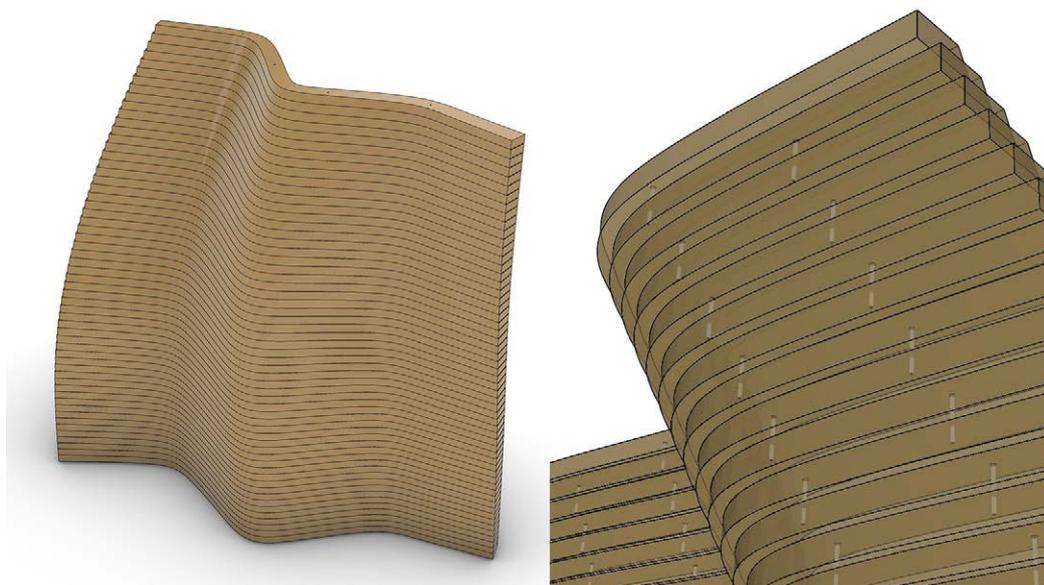
Il Modello Procedurale consente di legare le parti tecniche al Modello Continuo, ridisegnandolo ad una scala di dettaglio più approfondita; con il Modello Procedurale si istruiscono le relazioni tra i diversi modelli mantenendone un legame diretto. I processi sperimentali effettuati in maniera diretta sul Modello di Studio si traducono in misure, azioni, informazioni connesse al successivo Modello di Fabbricazione, con cui attivare i processi di costruzione degli elementi dell'oggetto reale.

La rappresentazione indiretta di un modello attraverso la progettazione di un codice ha il vantaggio di creare un sistema di variabili equilibrato per cui la variazione di una misura, comporta una variazione dinamica dell'intero modello nel rispetto dei vincoli geometrici predisposti nel codice. Un ulteriore punto di forza del modello procedurale è l'esplicitazione, mediante uno schema grafico, della storia di costruzione del modello e dei processi che in maniera progressiva lo trasformano.

Il Modello di Fabbricazione è la rappresentazione semantica in ambiente digitale di quello che sarà il modello costruito, l'obiettivo di un processo digitale integrato in cui convergono i parametri di progettazione e i parametri di realizzazione (Modello Procedurale). Tale modello facilita una transizione fluida dalla fase di progettazione alla fase di realizzazione attraverso una rappresentazione digitale che include principi di design, considerazioni sui materiali e tecniche di fabbricazione (fig. 7). Essendo un modello semantico, alla forma sono associate le informazioni relative a dettagli geometrici, le tolleranze stabilite in base alla tecnologia di fabbricazione scelta, la programmazione delle azioni che seguiranno le macchine durante il processo di costruzione; quanto descritto rientra a pieno nell'ambito dell'information Modeling (IM) [Lee 1999].

L'IM relazionato al tema del progetto e del rilievo, è un argomento ampiamente dibattuto dai settori scientifici che fanno ricerca e sperimentazione in quest'ambito; le metodologie ed i software sono diversi ma tutti sono riconducibili ad una modellazione Object-Oriented (O-

Fig. 7. Il Modello di Fabbricazione contiene tutte le informazioni che permettono al modello di essere il gemello digitale del modello reale; nella figura vediamo, ad esempio, gli elementi costruttivi ed il sistema di montaggio adottato per la realizzazione di una forma complessa. Elaborazione degli autori.



O) per la quale tutte le parti del fenomeno indagato sono visibili e modellabili mediante oggetti presenti in cataloghi digitali provvisti di misure, proprietà e comportamenti (parametri). In architettura quest'approccio si definisce BIM se il soggetto è la produzione edilizia contemporanea, HBIM se il soggetto è il costruito storico [Gigliarelli et al. 2016]. Anche il product design propone metodologie e strumenti simili, in questo caso si parla di Model Based Definition, dove disegni bidimensionali e informazioni di produzione convergono in un unico modello tridimensionale, condiviso tra i vari attori del processo progettuale mediante file STEP (Standard for the Exchange of Product model data) [Sudarsan et al. 2005; Bijmens, Cheshire 2018].

Il Modello Reale rappresenta la materializzazione dei dati virtuali e quindi la costruzione del modello di Fabbricazione. La fase di costruzione dell'oggetto reale è un momento delicato poiché il Modello di Fabbricazione, da cui deriva il Modello Reale, si presenta come un contenitore caratterizzato da una grande quantità di parametri e in alcuni casi si rischia di generare risultati reali inconsistenti. La sovrabbondanza di variabili introduce complessità e ambiguità nel modello, rendendo difficile la sua interpretazione. Il Modello Procedurale deve quindi predisporre una parte di codice capace di interrogare le informazioni del modello, filtrando i dati utili per la trasposizione dal digitale al reale. Il Modello Reale offre una rappresentazione tangibile e dettagliata dell'effetto prodotto da alcuni parametri nello spazio fisico, permettendo una percezione diretta e approfondita delle implicazioni progettuali. I parametri propri del modello reale sono le informazioni che riguardano la gestione in magazzino del prodotto smontato, lo stoccaggio, il trasporto, la movimentazione all'interno del sito di montaggio ed il montaggio stesso; i parametri elencati possono essere anch'essi incorporati nel Modello di Fabbricazione.

Risultati

Nell'ambito di una recente ricerca degli autori [Neri et al. 2023], si è approfondito l'impiego dei modelli descritti per la progettazione e la fabbricazione di componenti in legno per facciate; il processo è stato incentrato sull'uso di tecniche di fabbricazione digitale mediante CNC e assemblaggio effettuato da robot collaborativi. La ricerca si è articolata attraverso lo sviluppo dei diversi modelli descritti, ciascuno con una funzione ben definita nel processo ideativo e produttivo.

Il Modello Concettuale è stato definito nella fase iniziale del progetto per esplorare le diverse soluzioni, indagando anche un approccio generativo e data-driven per ottimizzare l'ombreggiamento estivo delle facciate. Attraverso il modello, sono stati identificati gli elementi chiave del progetto, stabilendo le basi per le successive fasi (fig. 8).

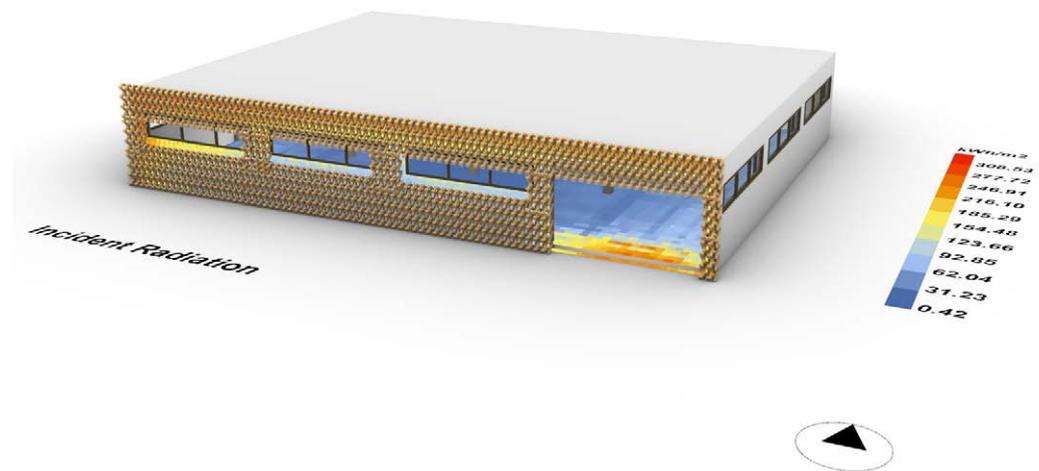


Fig. 8. Modello concettuale per la simulazione e per l'ottimizzazione dell'ombreggiamento estivo. Elaborazione degli autori.

Successivamente sono stati realizzati Modelli di Studio per analizzare le caratteristiche dei materiali e per determinare parametri e limiti associati ai processi di fabbricazione e assemblaggio. Questa fase ha permesso di verificare la fattibilità delle soluzioni meta-progettuali definite nel Modello Concettuale, tenendo conto delle proprietà dei materiali e delle strategie di assemblaggio attraverso una verifica diretta (fig. 9). Le informazioni e i parametri raccolti dai modelli fisici di studio sono stati utilizzati per la definizione del Modello Continuo, in esso è stata effettuata la tassellazione delle superfici della facciata, determinando il pattern ottimale di posizionamento e le dimensioni degli elementi in legno. Nel Modello Procedurale sono stati messi in relazione i parametri e i vincoli definiti nelle fasi precedenti, ovvero la densità, la posizione nello spazio degli elementi e la suddivisione in

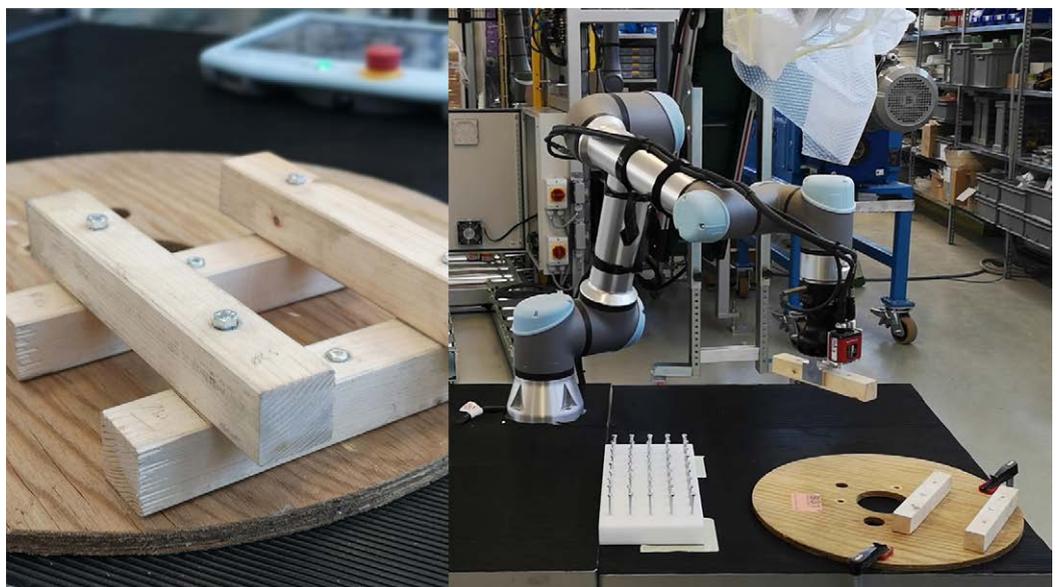


Fig. 9. Modello di studio per verificare la fattibilità delle soluzioni meta-progettuali in relazione a materiale e strategie di assemblaggio. Elaborazione degli autori.

cluster di assemblaggio in relazione alle aree di lavoro delle macchine (fig. 10). Nel modello è stato “programmato” il processo di realizzazione, stabilendo le relazioni tra le diverse soluzioni meta-progettuali individuate e le geometrie, le tecnologie di fabbricazione e le logiche di assemblaggio.

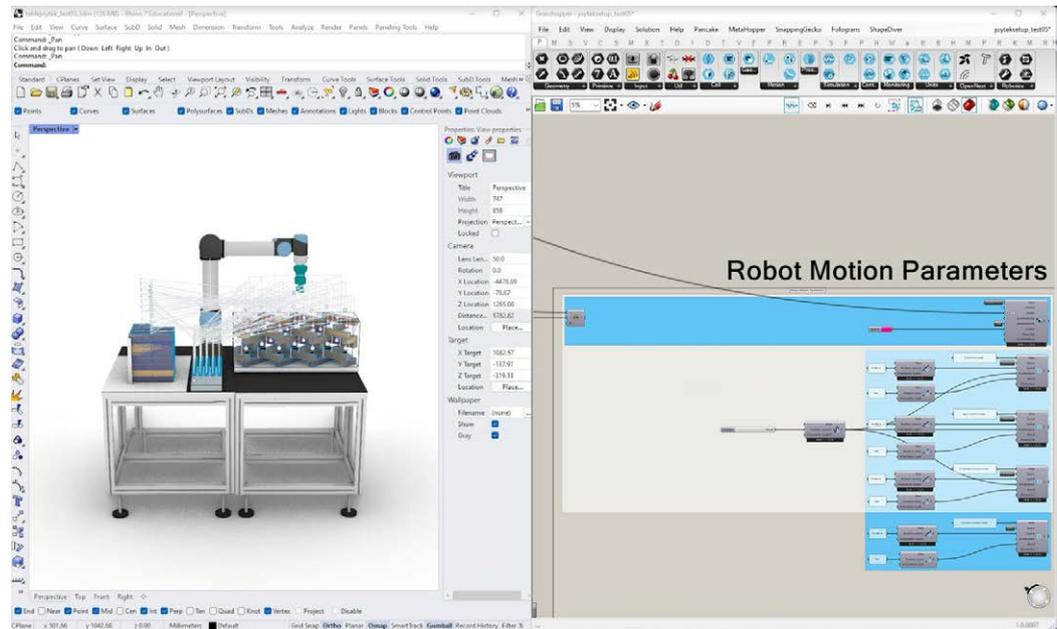


Fig.10. Modello procedurale comprensivo del setup di assemblaggio descritto in Visual Programming Language. Elaborazione degli autori.

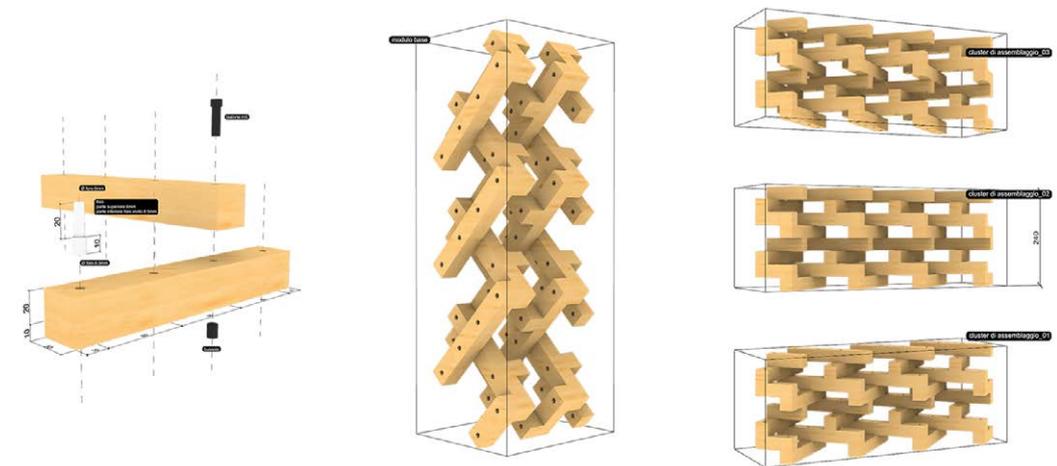


Fig.11. Modello di fabbricazione/ assemblaggio – elemento – modulo base – aggregazione. Elaborazione degli autori.

Le relazioni tra parametri di progetto e parametri del processo realizzativo definiti dal Modello Procedurale rappresentano il collegamento diretto tra la progettazione e la realizzazione pratica, contribuendo alla definizione di un Modello di Fabbricazione parametrico. Tale modello permette l'aggiornamento dei parametri di realizzazione in funzione delle diverse soluzioni progettuali e definisce i dati per la produzione degli elementi in legno mediante CNC (ad esempio, i percorsi degli utensili, le dimensioni delle punte per le forature) e per l'assemblaggio robotizzato (come la sequenza di montaggio, le traiettorie e le velocità di movimento) (Fig. 11).

La materializzazione nel Modello Reale ovvero l'oggetto fisico realizzato direttamente attra-

verso il modello di fabbricazione con l'ausilio di un robot collaborativo (fig. 12), evidenzia l'efficace relazione tra rappresentazione, progetto e realizzazione; il Modello Reale dimostra inoltre come il sistema permetta di realizzare strutture complesse dipendenti da parametri di progetto con precisione e flessibilità.

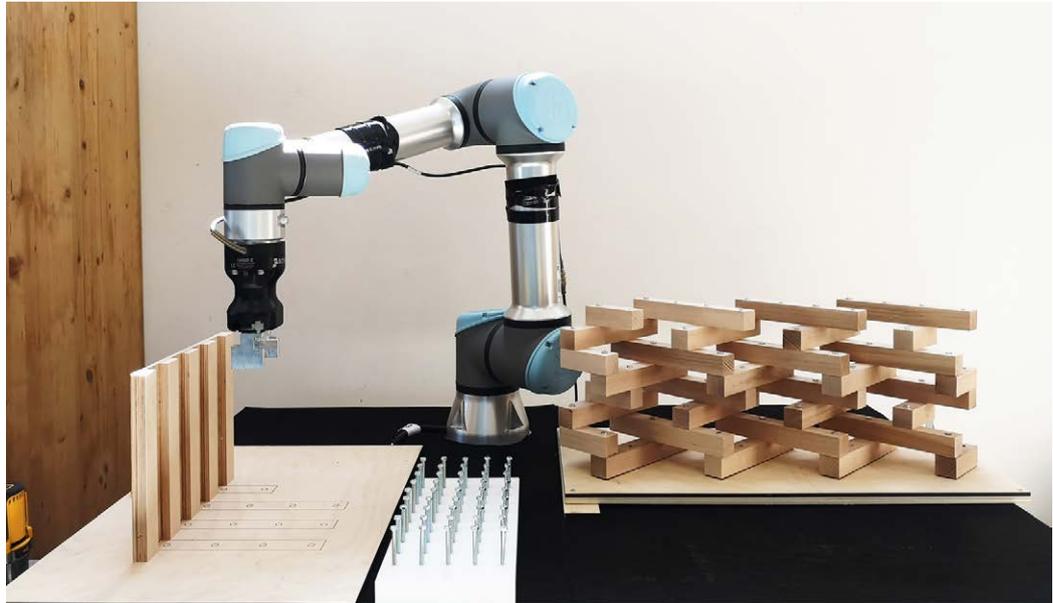


Fig. 12. Modello reale assemblato tramite robot collaborativo. Elaborazione degli autori.

Conclusioni

Il lavoro presentato introduce una metodologia avanzata per la gestione di modelli parametrici e procedure finalizzate a facilitare la realizzazione di geometrie complesse, altrimenti difficilmente modellabili. Inoltre, mostra come l'integrazione tra programmazione robotica e design offra una notevole flessibilità, permettendo modifiche rapide al sistema di controllo dei robot in risposta a variazioni nei progetti CAD, aprendo così nuove frontiere nell'ambito del Digital Manufacturing.

L'analisi proposta indaga una parte delle relazioni esistenti tra modelli digitali e modelli fisici, fornendo legami parametrici generalmente unidirezionali (dal digitale al reale). Un ulteriore aspetto riguarda i legami parametrici bidirezionali, in cui anche dal modello realizzato si acquisiscono, in maniera continua, informazioni che arricchiscono i modelli digitali. Questo approccio identifica un particolare tipo di modello, noto come Digital Twin, che include l'uso di sensori, tecniche di misurazione, e sistemi di controllo applicati all'oggetto fisico per costruire una banca di informazioni utile durante il ciclo di vita dell'oggetto realizzato.

In questo contesto, le rappresentazioni architettoniche sono sempre più indirizzate verso la descrizione di processi attraverso linguaggi di programmazione (Textual Programming Language e Visual Programming Language), supportati dall'Intelligenza Artificiale, piuttosto che verso l'interpretazione umana diretta. Sebbene alcune informazioni possano risultare ambigue o di difficile interpretazione per l'uomo, le stesse possono essere elaborate efficacemente dalle macchine per la produzione. Pertanto, è essenziale per il progettista contemporaneo acquisire una coscienza del pensiero algoritmico, organizzare i linguaggi computazionali, e indirizzare ordini a un'Intelligenza Artificiale capace di interpretare direttamente le sequenze progettuali per i dispositivi di fabbricazione. In tal senso, la corretta individuazione e gestione dei parametri diventa fondamentale per il successo del progetto. La combinazione di metodologie avanzate e tecnologie emergenti promette di trasformare radicalmente il modo in cui concepiamo, progettiamo e realizziamo le cose.

Riferimenti bibliografici

- Antonelli M., Beccari, C. V. Casciola, G., Ciarloni R., Morigi S. (2013). Subdivision surfaces integrated in a CAD system. In *Computer-Aided Design*, vol. 45, n. 11, pp. 1294–1305. <<https://doi.org/10.1016/j.cad.2013.06.007>>
- Bijens J., Cheshire D. (2018). The Current State of Model Based Definition. In *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 16, n. 2, pp. 308–317. <<https://doi.org/10.14733/cadaps.2019.308-317>>
- Calvano M. (2013). Algoritmi geometrici per il Reverse Modeling. Conversione della rappresentazione numerica nella rappresentazione matematica per il progetto di design. In *Geometria descrittiva e rappresentazione digitale. Memoria e innovazione*. Roma: Kappa, pp. 17-37.
- Calvano M., Mancini M. F. (2021). Testing and Defining a Complex Design Through Digital and Physical Models. In *Nexus Network Journal*, vol. 23, n. 4, pp. 995–1016. <<https://doi.org/10.1007/s00004-021-00569-6>>
- Calvano M., Martinelli L., Calcerano F., Gliarelli E. (2022). Parametric Processes for the Implementation of HBIM—Visual Programming Language for the Digitisation of the Index of Masonry Quality. In *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 11, n. 2. <<https://doi.org/10.3390/ijgi11020093>>
- Gliarelli E., Calcerano F., & Cessari L. (2016). Implementation Analysis and Design for Energy Efficient Intervention on Heritage Buildings. Digital Heritage. In *Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection*, pp. 91–103. <<https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9>>
- Lee Y. T. (1999). Information Modeling: From Design To Implementation. In *Proceedings of the Second World Manufacturing Congress*, pp. 315–321. <https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=821265> (consultato il 17 agosto 2024).
- Leitao A.L.S. (2012). Programming Languages For Generative Design: A Comparative Study. In *International Journal of Architectural Computing*, vol. 10, n. 1, pp. 139-162. <<http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ijac201210109>> (consultato il 17 agosto 2024).
- Neri F., Cognoli R., Palmieri G., Ruggiero R. (2023). Robotic Assembly of a Wooden Architectural Design. In T. Petrič, A. Ude, & L. Žlajpah (eds.), *Advances in Service and Industrial Robotics*, vol. 135, pp. 426–433. Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-32606-6_50>
- Russo M. (2012). Integrated Reverse Modeling Techniques for the Survey of Complex Shapes in Industrial Design. In J.A. Munoz Rodriguez (ed.), *Laser Scanner Technology*. InTech. <<https://doi.org/10.5772/35140>>
- Singh V., Gu N. (2012). Towards an integrated generative design framework. In *Design Studies*, vol. 33, n. 2, pp. 185–207. <<https://doi.org/10.1016/j.destud.2011.06.001>>
- Sudarsan R., Fenves S. J., Sriram R. D., Wang F. (2005). A product information modeling framework for product lifecycle management. In *Computer-Aided Design*, vol. 37, n. 13, pp. 1399–1411. <<https://doi.org/10.1016/j.cad.2005.02.010>>
- Wagner H. J., Alvarez M., Groenewolt A., Menges A. (2020). Towards digital automation flexibility in large-scale timber construction: Integrative robotic prefabrication and co-design of the BUGA Wood Pavilion. In *Construction Robotics*, vol. 4, nn. 3–4, pp. 187–204. <<https://doi.org/10.1007/s41693-020-00038-5>>

Autori

Michele Calvano, Sapienza Università di Roma, michele.calvano@uniroma1.it
Roberto Cognoli, Università di Camerino, roberto.cognoli@unicam.it

Per citare questo capitolo: Michele Calvano, Roberto Cognoli (2024). Oltre la misura: modelli parametrici per la realizzazione assistita del progetto/ Beyond Measure: parametric models to support design implementation. In Bergamo F., Calandriello A., Ciammaichella M., Friso I., Gay F., Liva G., Monteleone C. (a cura di), *Misura / Dismisura. Atti del 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Measure / Out of Measure. Transitions. Proceedings of the 45th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 175-194.

Beyond Measure: parametric models to support design implementation

Michele Calvano
Roberto Cognoli

Abstract

The article explores the relationship between measure and parameter in 3D models intended for manufacturing, focusing on the role of the parameter in defining and manipulating both the shape and the information. It introduces the concept of measurement as passive and active data and examines the second case, where the parameter drives the transformation of the model, becoming an element of indirect manipulation. Active parameters define the geometric properties of shapes and can consist of functions and constraints. The parametric design process also involves the careful design of constraints to ensure morphological and topological consistency during transformations. This article examines the steps in the 3D modelling process, indicating the parameters and actions that lead to the realisation of the design. It goes through different models, from the conceptual model to the fabrication model, highlighting the key role of data in defining form and relationships. The procedural model emerges as a nodal point, identifying the parameter as an element for programming actions and transferring the technological experience of the manufacturer to the machines that will realise the product through a programmed process. The paper concludes by illustrating an applied research experience in which the different models and the role that measurements and parameters play in defining the real model are recognised.

Keywords

multidimensional model, digital fabrication, informed model, parametric modelling, data driven



Real model assembly using the robotic arm. The parameters introduced in the Procedural Model guide the manufacture of the Real Model. Authors' elaboration.

Introduction

In a parametric model, two types of measurements can be identified: the read and written ones. The first type refers to passive data that express the metric and geometric qualities of the 3D object, while the second type refers to data that, when modified, cause variations in the model. The variables that influence the final shape of the 3D model are known as parameters; for instance, parameters of a model include length, width, height, and all the metric relationships between the parts of the object (fig. 1).

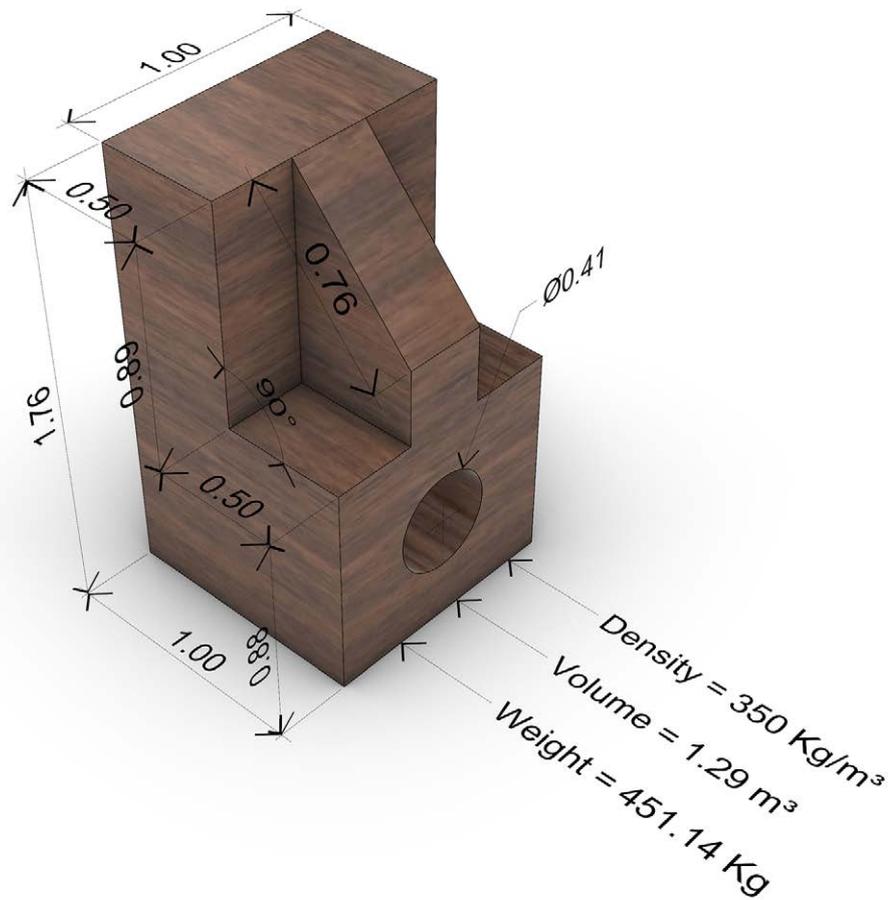
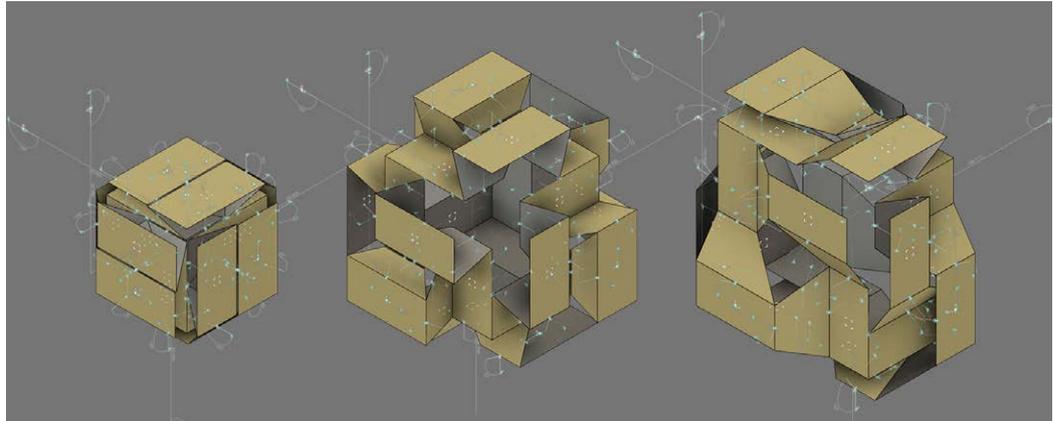


Fig. 1. Model characterised by numerical parameters and textual attributes for the introduction of new active and passive informational dimensions. Authors' elaboration.

Parameters also encompass numerical and textual information that enriches the representation with additional knowledge domains, thus expanding the informational dimension of the design. Data that do not describe or modify the metric and geometric aspects of the model are commonly referred to as attributes. In architecture, examples of attributes include the year of construction, the attribution of the building, the construction material, the type of finish, and various other indications. Some parameters can be expressed by formulas that relate to one or more pieces of information; other parameters, however, must comply with rules or relationships that define the correlation between parts of the model, known as constraints. Proper design of constraints ensures that the model retains its morphological and topological aspects during parameter variations (fig. 2).

Today, we can understand the digital model as the union of aesthetic (morphology and topology) and informational (parameters and attributes) instances, shifting the paradigm from three-dimensional representation to multidimensional parametric representation. The para-

Fig. 2. Dynamic parametric model; the model transforms while adhering to the designed constraints (Andrea Casale's model).



meters, rules, and constraints that define the set of produced solutions constitute the parametric model; the selection of information shaping the model must be carefully designed based on its intended use and objectives.

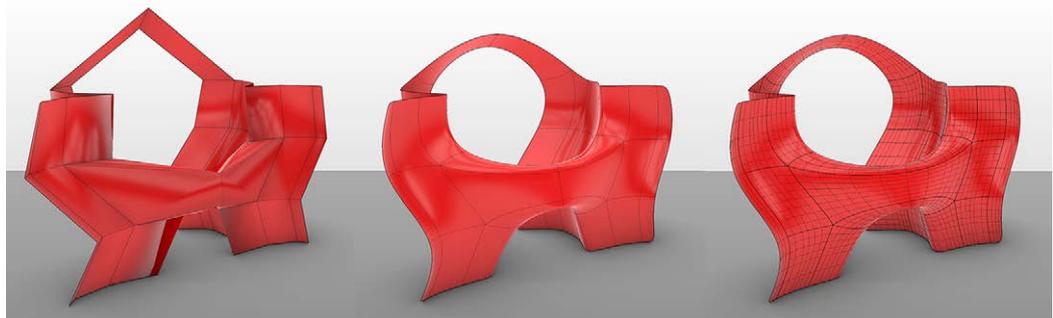
The development phases of a project can be articulated through a sequence of models characterized by different levels of detail, information, and measurement, relative to the role each model plays in the design process. Drawings and models are tools designers use to develop design ideas and communicate with the technical disciplines involved in project development. This highlights the need to manage and coordinate information among the actors involved in the process. Consequently, new approaches and tools become essential to accurately manage and select parameters to generate appropriate models for each phase of the process.

Methods

Defining complex projects requires a multidimensional and multidisciplinary vision [Calvano, Mancini 2021]: the idea must be explored both in the abstraction of digital space, regarding its evolutionary genesis, and in the concreteness of real space, for technical and constructive solutions. In advanced design expressions [Wagner et al. 2020], the project evolves through the correlation of various models, which we list below.

The Conceptual Model is the initial stage of the design process, where the designer communicates with themselves, explaining the desired forms and characteristics of the project through images. The goal is to define a conscious form that can encompass the complexity of an architectural model, inherently connecting different knowledge domains. To achieve this, the designer employs generative processes [Singh, Gu 2012] capable of integrating multidisciplinary expertise into the project.

Fig. 3. Digital representation methods for the design of the conceptual model. From left: numerical representation (mesh), hybrid representation (subd), continuous representation (NURBS). Authors' elaboration.



In a conceptual model, it is preferable to compose forms without using parametric instances that constrain the freedom of the form. Instead, it is more appropriate to use tools that allow direct interaction with the form, where the main parameters are the coordinates of the vertices of a mesh (numerical representation), the position of the control points of a NURBS surface (mathematical representation), or topological manipulation possible with subD models (hybrid representation) (fig. 3).

The Study Model is a physical representation that supports the initial phase of a project. Its construction involves analog processes, sometimes artisanal, to test the fabrication process (fig. 4). The Study Model must highlight construction issues of the real model, to experiment with construction technologies, and simulate the fabrication process of the overall form and



Fig. 4. Physical model for the investigation of construction processes and subsequent digitalisation. Authors' elaboration.

details. The result is a functional object that maintains the aesthetic instance defined in the project. Besides the measurements suggested by the Conceptual Model, the parameters to be considered are those imposed by the chosen materials and fabrication technologies. The knowledge gained during this activity will support the design of the parameters incorporated into the Procedural Model.

The Continuous Model results from Reverse Modeling operations [Calvano 2013; Russo 2012] performed on the Conceptual Model. The Conceptual Model, being a quick and instinctive model drafted in the initial creative phase, carries topological errors and lack of details, while the Continuous Model addresses these issues. The parameters to consider during the Continuous Model's design are related to the type of digital representation used. The Continuous Model is the main input for the Procedural Model, which is why mathematical and hybrid representations, both with a strong mathematical basis, are best suited for this model, ensuring the continuous representation of curves and surfaces [Antonelli et al. 2013]. Variation parameters for both models include the ability to move control points in space; subD representation also allows direct manipulation of the shape's topology (fig. 5).

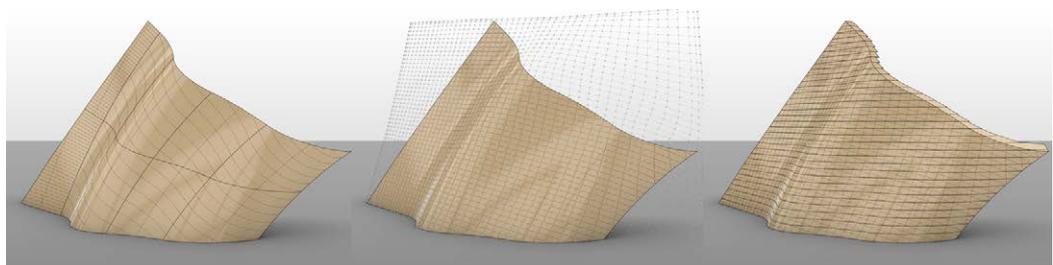


Fig. 5. Reverse Modelling activities for the transition from the Conceptual Model to the continuous model, the latter being necessary for the generation of the Manufacturing Model. Authors' elaboration.

The Procedural Model is shaped through algorithmic processes programmed using Textual Programming Language (TPL) or Visual Programming Language (VPL) [Leitao 2012; Calvano et al. 2022], resulting in what is known as indirect modeling. Through programming languages, actions are defined to transfer the technological and constructive experience from the Study Model to the Fabrication Model. The Procedural Model is inherently parametric, and the number of parameters depends on the activities designed within it (fig. 6).

The Procedural Model links the parameters and constraints defined in previous phases, such as density, spatial positioning of elements, and division into assembly clusters concerning machine working areas (fig. 10). The model governs the realization process, establishing relationships between various identified meta-design solutions, geometries, fabrication technologies, and assembly logics.

The Procedural Model enables the integration of technical parts with the Continuous Model, redesigning it at a more detailed scale. With the Procedural Model, the relationships between different models are instructed while maintaining a direct link. The experimental

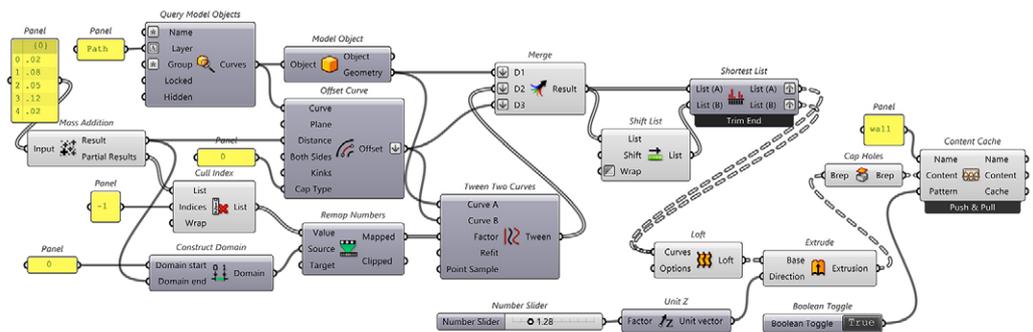


Fig. 6. Indirect representation of a Procedural Model using Visual Programming Language. Authors elaboration.

processes performed directly on the Study Model are translated into measurements, actions, and information connected to the subsequent Fabrication Model, which activates the construction processes of the real object's elements.

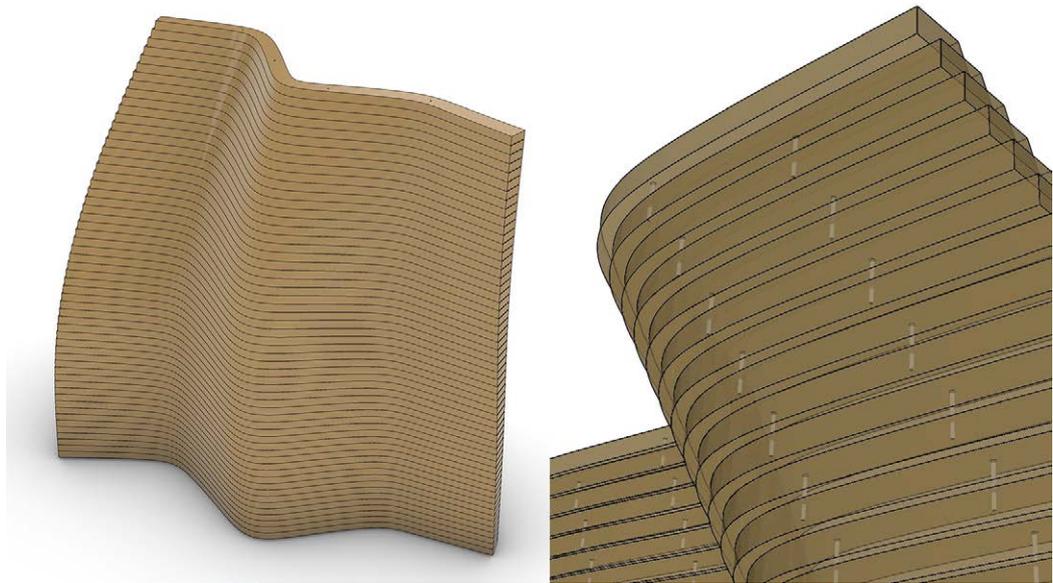
The indirect representation of a model through the design of a code has the advantage of creating a balanced system of variables, whereby the variation of one measure results in a dynamic variation of the entire model, respecting the geometric constraints established in the code. Another strength of the Procedural Model is the explicit representation, through a graphical schema, of the construction history of the model and the processes that progressively transform it.

The Fabrication Model is the semantic representation in a digital environment of what will become the constructed model, the objective of an integrated digital process where design parameters and realization parameters converge. This model facilitates a smooth transition from the design phase to the realization phase through a digital representation that includes design principles, material considerations, and fabrication techniques (fig. 7). As a semantic model, it associates information related to geometric details, tolerances established based on the chosen fabrication technology, and the programming of actions for the machines during construction. This falls within the realm of Information Modeling (IM) [Lee 1999].

IM, related to project and survey themes, is widely debated in scientific fields conducting research and experimentation in this area. The methodologies and software may vary, but are all related to Object-Oriented (O-O) modeling, where all parts of the investigated phenomenon are visible and modelable through objects in digital catalogs equipped with measurements, properties, and behaviors (parameters).

In architecture, this approach is defined as BIM (Building Information Modeling) for contemporary building production and HBIM (Historic Building Information Modeling) for historical construction [Gigliarelli et al. 2016]. Product design also employs similar methodologies and

Fig. 7. The Fabrication Model contains all the information that allows the model to be the digital twin of the real model; in the figure, for example, we see the constructive elements and the assembly system adopted for the realisation of a complex shape. Authors' elaboration.



tools, known as Model-Based Definition, where two-dimensional drawings and production information converge into a single three-dimensional model shared among the various actors in the design process through STEP files (Standard for the Exchange of Product model data) [Sudarsan et al. 2005; Bijnens, Cheshire 2018].

The Real Model represents the materialization of virtual data, for the construction of the Fabrication Model. The construction phase of the real object is a critical moment, because the Fabrication Model, from which the Real Model is derived, contains numerous parameters, a complexity that may lead to inconsistent real results. The overabundance of variables introduces complexity and ambiguity, generating possible misinterpretation. The Procedural Model must therefore include code capable of querying model information, filtering useful data for the digital-to-real transition.

The Real Model offers a tangible and detailed representation of the effects produced by specific parameters in physical space, allowing direct and in-depth perception of design implications. The specific parameters of the Real Model include information concerning the warehouse management of the disassembled product, storage, transportation, handling within the assembly site, and the assembly itself. These parameters can also be incorporated into the Fabrication Model.

Results

In a recent study by the authors [Neri et al. 2023], the use of the described models for designing and fabricating wooden facade components was explored. The process focused on using digital fabrication techniques via CNC and the assembly performed by collaborative robots. The research was structured through the development of the various described models, each with a well-defined function in the design and production process.

The Conceptual Model was defined in the initial phase to explore different solutions, investigating a generative and data-driven approach to optimize the summer shading of the facades. Through the model, key project elements were identified, establishing the foundations for subsequent phases (fig. 8).

Subsequently, Study Models were created to analyze material characteristics and determine parameters and limits associated with fabrication and assembly processes. This phase verified the feasibility of the meta-design solutions defined in the Conceptual Model, considering material properties and assembly strategies through direct testing (fig. 9). The information and

parameters gathered from the physical study models were used to define the Continuous Model, tessellating the facade surfaces to determine the optimal placement pattern and dimensions of the wooden elements.

In the Procedural Model, the parameters and constraints from previous phases were linked,

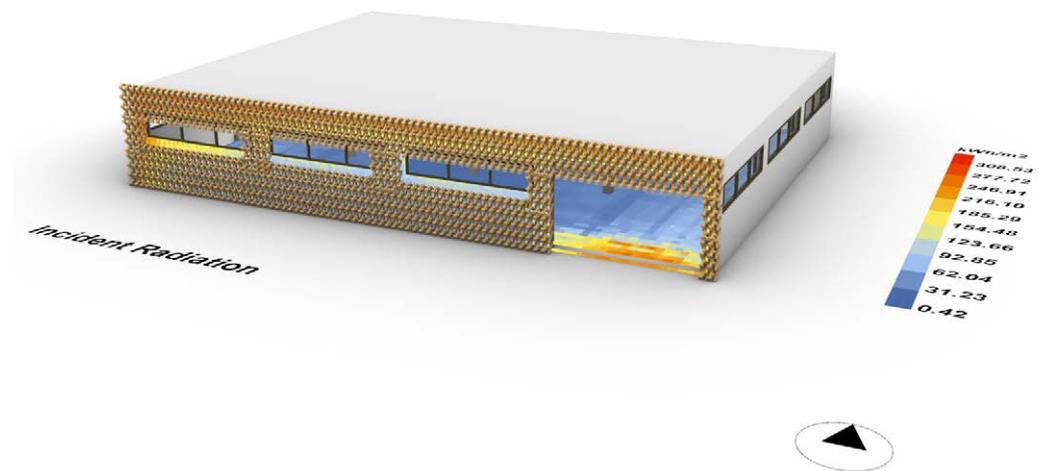


Fig. 8. Conceptual model for the simulation and optimisation of summer shading. Authors' elaboration.

such as element density, spatial positioning, and assembly cluster division concerning machine working areas (fig. 10). The model programmed the realization process, establishing relationships between the identified meta-design solutions, geometries, fabrication technologies, and assembly logics.

The relationships between design parameters and production process parameters defined by the Procedural Model represent the direct link between design and practical production, contributing to the definition of a parametric Fabrication Model. This model allows the update of production parameters based on different design solutions and defines data for the production of wooden elements via CNC (e.g., tool paths, drill bit sizes) and robotized assembly (e.g., assembly sequence, trajectories, and movement speeds) (fig. 11).

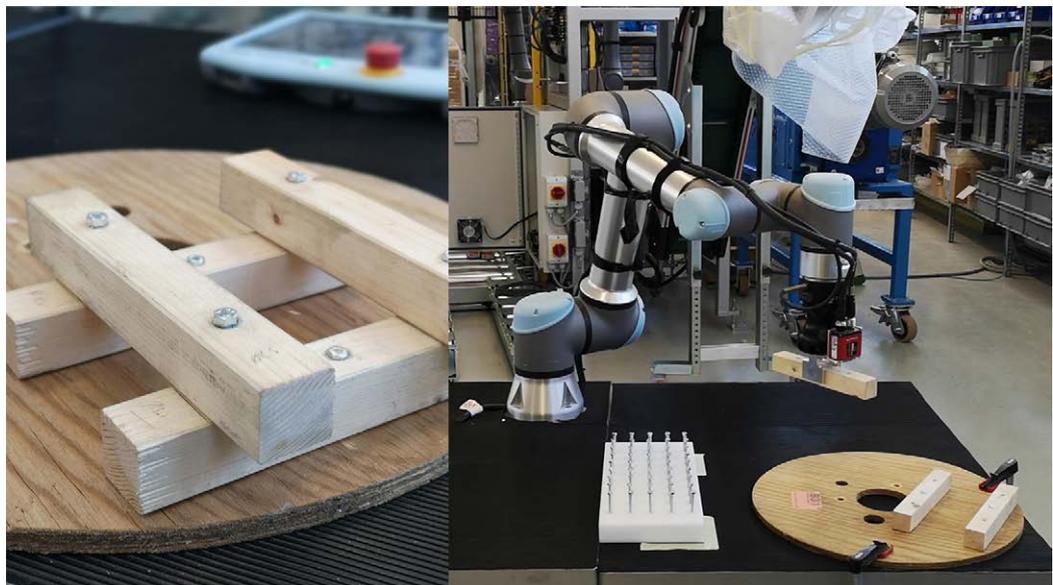


Fig. 9. Study model to verify the feasibility of meta-design solutions in relation to materials and assembly strategies. Authors' elaboration.

The materialization in the Real Model, as the physical object realized directly through the Fabrication Model with the assistance of a collaborative robot (fig. 12), highlights the effective relationship between representation, design, and realization. The Real Model also demonstrates how the system enables constructing complex structures dependent on design parameters with precision and flexibility.

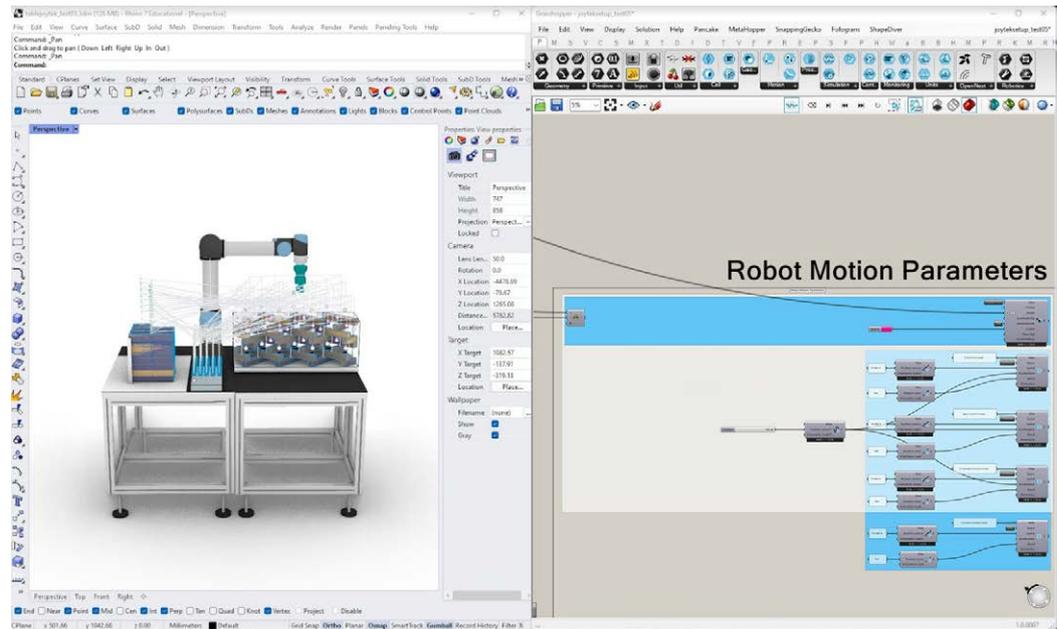


Fig.10. Procedural model including the assembly setup described in Visual Programming Language. Authors' elaboration.

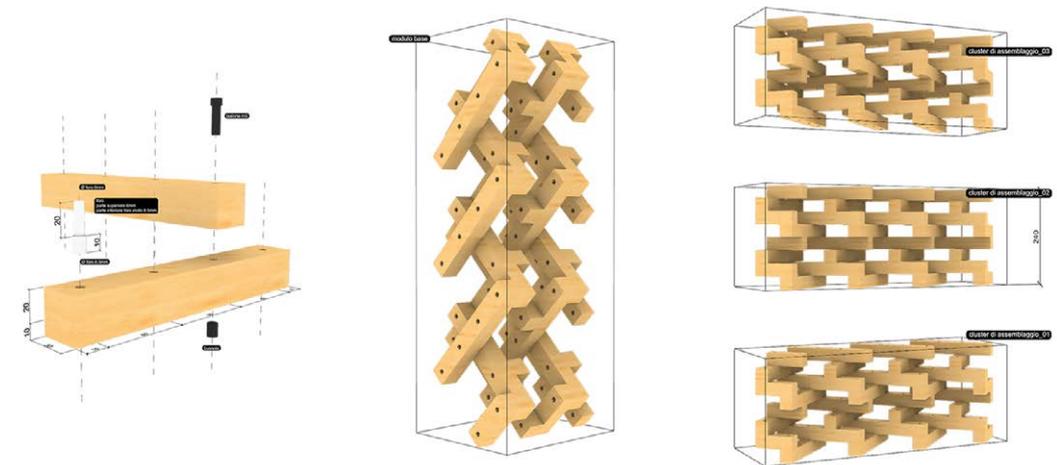


Fig.11. Manufacturing/assembly model – element – base module – aggregation. Authors' elaboration.

Conclusions

The presented work introduces an advanced methodology for managing parametric models and procedures to facilitate the realization of complex geometries that would otherwise be difficult to model. Additionally, it demonstrates how integrating robotic programming and design offers significant flexibility, allowing for quick modifications to the robot control system in response to changes in CAD projects, thereby opening new frontiers in Digital Manufacturing.

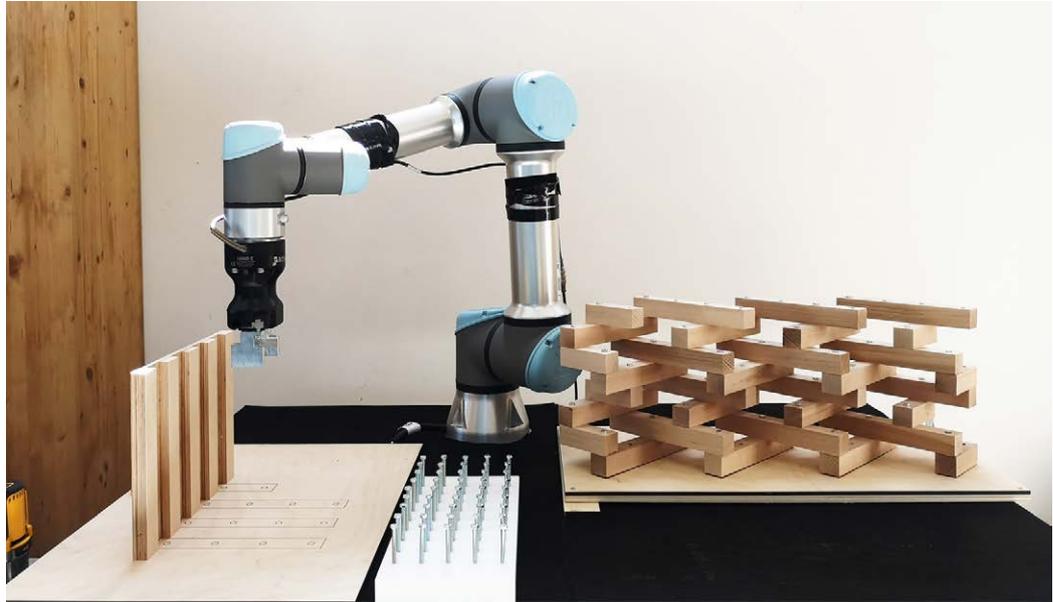


Fig. 12. Real model assembled using a collaborative robot. Authors' elaboration.

The proposed analysis investigates some relationships between digital and physical models, providing generally unidirectional parametric links (from digital to real). Another aspect concerns bidirectional parametric links, where information continuously acquired from the realized model enriches the digital models. This approach identifies a particular type of model, known as a Digital Twin, which includes sensors, measurement techniques, and control systems applied to the physical object to build a database of information useful throughout the lifecycle of the object.

In this context, architectural representations increasingly describe processes through programming languages (Textual Programming Language and Visual Programming Language), supported by Artificial Intelligence, rather than direct human interpretation. If some information may be ambiguous or difficult for humans to interpret, it can be effectively processed by machines for production. Therefore, it is essential for contemporary designers to develop an awareness of algorithmic thinking, organize computational languages, and direct commands to an Artificial Intelligence capable of directly interpreting design sequences for fabrication devices.

In this regard, the correct identification and management of parameters become crucial for the project's success. Combining advanced methodologies and emerging technologies promises to radically transform how we conceive, design, and realize projects.

References

- Antonelli M., Beccari, C. V. Casciola, G., Ciarloni R., Morigi S. (2013). Subdivision surfaces integrated in a CAD system. In *Computer-Aided Design*, vol. 45, n. 11, pp. 1294–1305. <<https://doi.org/10.1016/j.cad.2013.06.007>>
- Bijnens J., Cheshire D. (2018). The Current State of Model Based Definition. In *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 16, n. 2, pp. 308–317. <<https://doi.org/10.14733/cadaps.2019.308-317>>
- Calvano M. (2013). Algoritmi geometrici per il Reverse Modeling. Conversione della rappresentazione numerica nella rappresentazione matematica per il progetto di design. In *Geometria descrittiva e rappresentazione digitale. Memoria e innovazione*. Roma: Kappa, pp. 17-37.
- Calvano M., Mancini M. F. (2021). Testing and Defining a Complex Design Through Digital and Physical Models. In *Nexus Network Journal*, vol. 23, n. 4, pp. 995–1016. <<https://doi.org/10.1007/s00004-021-00569-6>>

- Calvano M., Martinelli L., Calcerano F., Gigliarelli E. (2022). Parametric Processes for the Implementation of HBIM—Visual Programming Language for the Digitisation of the Index of Masonry Quality. In *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 11, n. 2. <<https://doi.org/10.3390/ijgi11020093>>
- Gigliarelli E., Calcerano F., & Cessari L. (2016). Implementation Analysis and Design for Energy Efficient Intervention on Heritage Buildings. Digital Heritage. In *Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection*, pp. 91–103. <<https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9>>
- Lee Y. T. (1999). Information Modeling: From Design To Implementation. In *Proceedings of the Second World Manufacturing Congress*, pp. 315–321. <https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=821265> (consultato il 17 agosto 2024).
- Leitao A.L.S. (2012). Programming Languages For Generative Design: A Comparative Study. In *International Journal of Architectural Computing*, vol. 10, n. 1, pp. 139–162. <<http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ijac201210109>> (consultato il 17 agosto 2024).
- Neri F., Cognoli R., Palmieri G., Ruggiero R. (2023). Robotic Assembly of a Wooden Architectural Design. In T. Petrič, A. Ude, & L. Žlajpah (eds.), *Advances in Service and Industrial Robotics*, vol. 135, pp. 426–433. Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-32606-6_50>
- Russo M. (2012). Integrated Reverse Modeling Techniques for the Survey of Complex Shapes in Industrial Design. In J.A. Munoz Rodriguez (ed.), *Laser Scanner Technology*. InTech. <<https://doi.org/10.5772/35140>>
- Singh V., Gu N. (2012). Towards an integrated generative design framework. In *Design Studies*, vol. 33, n. 2, pp. 185–207. <<https://doi.org/10.1016/j.destud.2011.06.001>>
- Sudarsan R., Fennes S. J., Sriram R. D., Wang F. (2005). A product information modeling framework for product lifecycle management. In *Computer-Aided Design*, vol. 37, n. 13, pp. 1399–1411. <<https://doi.org/10.1016/j.cad.2005.02.010>>
- Wagner H. J., Alvarez M., Groenewolt A., Menges A. (2020). Towards digital automation flexibility in large-scale timber construction: Integrative robotic prefabrication and co-design of the BUGA Wood Pavilion. In *Construction Robotics*, vol. 4, nn. 3–4, pp. 187–204. <<https://doi.org/10.1007/s41693-020-00038-5>>

Authors

Michele Calvano, Sapienza Università di Roma, michele.calvano@uniroma1.it
 Roberto Cognoli, Università di Camerino, roberto.cognoli@unicam.it

To cite this chapter: Michele Calvano, Roberto Cognoli (2024). Oltre la misura: modelli parametrici per la realizzazione assistita del progetto/ Beyond Measure: parametric models to support design implementation. In Bergamo F., Calandriello A., Ciammaichella M., Friso I., Gay F., Liva G., Monteleone C. (Eds.), *Misura / Dismisura. Atti del 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Measure / Out of Measure. Transitions. Proceedings of the 45th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 175-194.