



# Dalle “macchine inutili” alle “macchine utili”. Algoritmi generativi per costruire le geometrie della trasformazione

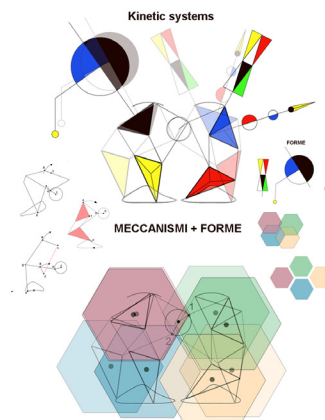
Mara Capone  
Angela Cicala

## Abstract

A fronte di un costante interesse per le strutture cinetiche non si riscontra una corrispondente diffusione, soprattutto per la complessità del processo che richiede necessariamente uno studio approfondito del sistema cinematico e della geometria del movimento. L'approccio prevalentemente empirico, basato sulla sperimentazione dei meccanismi, è quello che ha prevalso nel tempo. La possibilità di utilizzare strumenti algoritmico generativi in grado di simulare e rappresentare il movimento apre nuove prospettive per progettare dinamicamente la geometria del movimento. Il nostro contributo si colloca in una ricerca più ampia che ha l'obiettivo di definire strumenti parametrici in grado di simulare alcuni sistemi cinematici utilizzabili per la progettazione di strutture composte da aste rigide incernierate. Per tradurre le regole geometriche in VPL e simulare il movimento sono state sperimentate le potenzialità di strumenti per la modellazione parametrica ed in particolare di specifici tool, con l'obiettivo di costruire meccanismi azionabili utilizzando forze applicate. Partendo dalla definizione di un sistema cinematico e dalle condizioni geometriche e di vincolo che consentono il movimento, abbiamo definito due diverse tipologie di sistemi: quelli “non funzionali”, che hanno trovato ampia diffusione in ambito artistico, e quelli “dispiegabili”, scissor like, i cui campi di applicazione sono molteplici. Obiettivo principale della ricerca è quello di testare le potenzialità degli algoritmi MovArt e SMA, in grado di generare soluzioni diverse, definirne i limiti e procedere all'ottimizzazione.

## Parole chiave

Strutture cinetiche, movimento, design computazionale, deployable structures, scissor-like structures



Algoritmo MovArt. I  
(Arte in Movimento)  
– sperimentazioni con  
forme diverse. (Immagine  
prodotta dagli autori).

## Introduzione

La costruzione di cinematismi originariamente connessa alla realizzazione di sistemi meccanici in grado di rispondere a specifiche esigenze funzionali ha trovato molteplici ambiti di applicazione nell'arte, nell'architettura e nel design.

A partire dalla prima definizione di architettura cinetica di William Zuk e Roger Clark (*Kinetic Architecture* 1970) (fig. 01) che descrivono l'architettura cinetica come "un sistema capace di adattarsi ai cambiamenti", la cinetica in architettura ha assunto direzioni e obiettivi diversi nel tempo per misurarsi con i concetti di adattabilità, flessibilità e trasformazione. La presenza di cinematismi ha contraddistinto innumerevoli esempi e assunto diverse nature legate sia alle caratteristiche fisiche, tecnologiche e materiali dell'architettura che agli aspetti propriamente estetico formali, riguardanti la possibilità di generare tipi di forme e spazi differenti in grado di accogliere molteplici modalità d'uso, coinvolgendo l'intero organismo architettonico, parti di esso o agendo soltanto su alcuni degli elementi che lo compongono [Stevenson 2017]. Sin dal principio del XX secolo, i progettisti hanno costantemente cercato di includere nei propri progetti forme di dinamicità, intesa come la capacità di un insieme ordinato di attuare del movimento o di variare rispetto ad una morfologia di base; e ciò tanto nell'iniziale sfida di incorporare nel progetto la dimensione del tempo, quanto per sperimentare un'interazione con il contesto guidata dalle potenzialità abilitanti delle tecnologie [Nebuloni 2020].

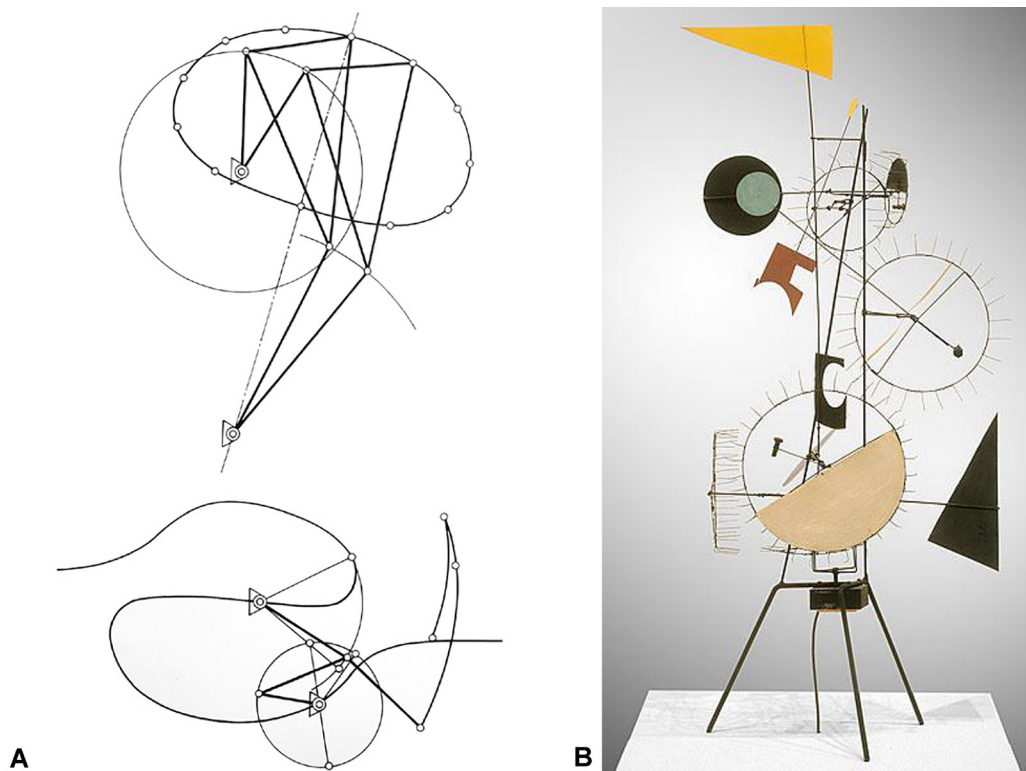
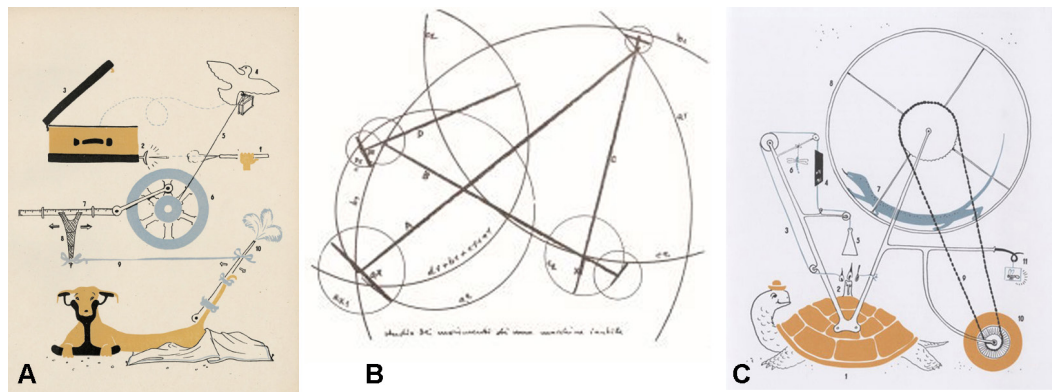


Fig. 01. A) 1970 William Zuk, Roger H. Clark, esempi di movimenti cinetici in *Kinetic Architecture*, 1970; B) 1954 Jean Tinguely, *Méta-mécanique*.

I primi esperimenti cinetici in ambito artistico risalgono al periodo tra il 1913 e il 1920, le sperimentazioni di Duchamp e di Man Ray, basate su semplici meccanismi rotatori come la *Ruota di Bicicletta* (1913) e il *Rotative Plaques*, diventano sempre più complessi nel *Light-Space-Modulator* (1930) di Laszlo Moholy-Nagy e nelle *Macchine Inutili* realizzate a partire dagli anni Trenta da Bruno Munari. Il suo *Manifesto del macchinismo* (1952) invita a fare arte con le macchine e a stabilire una nuova relazione tra arte e tecnologia, a produrre macchine che possono apparire "inutili" (fig. 02) perché da esse non si ricavano beni di consumo materiali, ma utilissime a produrre "beni di

Fig. 02: Bruno Munari, "Macchine inutili": A. Agitatore di coda per cani pigri; B. Studio dei movimenti di una Macchina Inutile (Bollettino n.5 Movimento Arte Concreta, Milano, 1952); C. Motore a lucertola per lumache.



consumo spirituale (immagini, senso estetico, educazione del gusto" [Munari 1942].

Queste opere, basate sulla definizione di regole generative, consentono di costruire molteplici varianti a partire dagli stessi meccanismi cinematici e rappresentano la premessa fondamentale delle sperimentazioni cinetiche che culminano con la mostra *Le Mouvement* (Parigi 1955). In questa occasione si delineano due diverse tendenze del movimento avanguardistico, da un lato la simulazione del movimento percettivo basato sul sapiente uso delle illusioni ottiche, dall'altro si producono opere basate sul movimento reale determinato in modo naturale o artificiale, principale oggetto della nostra ricerca.

In relazione a questo quadro di riferimento teorico, nell'ambito dei sistemi cinetici possiamo, dunque, distinguere diverse categorie anche in relazione ai diversi possibili campi di applicazione:

1. Strutture cinetiche non funzionali – installazioni artistiche;
2. Sistemi cinetici trasportabili (strutture estensibili);
3. Sistemi cinetici trasformabili/responsivi.

### La geometria del movimento

La definizione di un sistema cinetico si basa sulla possibilità di simulare il cambiamento di stato (forma) in relazione alla configurazione morfologica del sistema e alle azioni che attivano il movimento. I sistemi cinematici, generalmente classificati in base alle loro caratteristiche morfologiche e cinematiche (Hanaor 2001), possono essere raggruppati in quattro categorie principali:

1. strutture composte da aste incernierate;
2. strutture composte da piastre incernierate, *origami*;
3. strutture composte da aste e cavi, *tensegrity*;
4. strutture a membrana, *pneumatiche*.

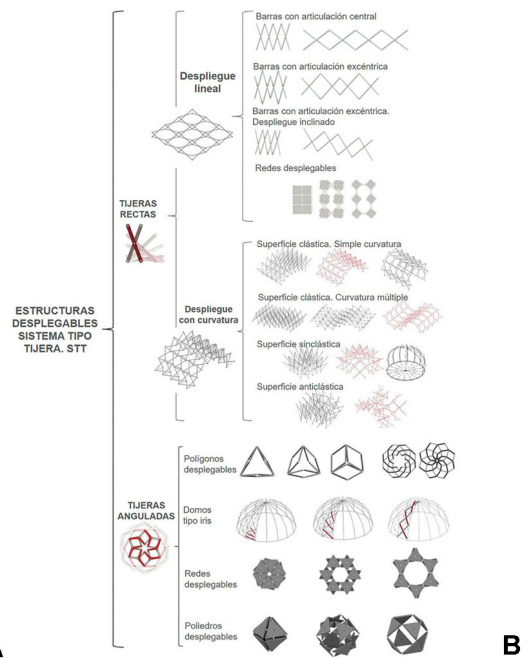
La caratteristica fondamentale di una struttura cinetica è quella di cambiare configurazione in funzione di una certa azione applicata, le diverse forme che il sistema può acquisire dipendono dalla geometria dei singoli elementi, dalle caratteristiche fisiche e dalle relazioni di vincolo. Possiamo, inoltre, distinguere le strutture in base al loro processo di trasformazione in due grandi gruppi: *deformabili*, sistemi basati sulla proprietà intrinseca del materiale di cambiare configurazione (palloni tecnici che vengono gonfiati con aria calda...) e *non deformabili*, composti da elementi rigidi (aste o piastre) collegati tra loro da cerniere che consentono il movimento in funzione dei diversi gradi di libertà (fig. 03).

Il controllo del progetto si basa sulla possibilità di simulare il processo e, quindi, di rappresentare il movimento. Il nostro contributo si inserisce in questo ambito approfondendo alcuni casi di sistemi composti da aste rigide incernierate.

Obiettivo principale della ricerca è quello di costruire uno strumento basato su regole generative per la costruzione di sistemi cinematici composti da aste rigide in grado di simulare il movimento. Un sistema cinetico richiede che l'intera configurazione, o almeno alcuni dei suoi elementi, possano cambiare la loro geometria. La conoscenza della geometria del movimento è la base per la definizione di un modello algoritmico generativo che, in funzione di alcuni parametri scelti come

		Morphology			
		Lattice			Continuous
		DLG	SLG	Spine	Plates
Kinematics	Rigid links	Pantographic (scissors)			Folded Plates
		Peripheral Scissors 19	Angulated scissors (retractable roofs) 74	Masts and arches 16	Linear deployment 110
	Radial scissors 22	Others 55	Reciprocal grids (Dismountable) 75	Radial deployment 5	
Deformable	Bars			Curved surface	
	Articulated joints 60	Ruled surface 83	Reciprocal grids (Dismountable) 85	101	
		Strut-cable systems	Tensioned membrane		
		Tensegrity 68	Fabric 170	Pneumatic	
		Others 69	Hybrid 98	Low pressure 124	
			Ribbed	High pressure	

Fig. 03. Classificazione delle strutture cinetiche: A) 2001, A. Hanaor e R. Levy, *Evaluations of Deployable Structures for Space Enclosures*. B) 2017, Natalia Torres. *Clasificación de estructuras desplegables. Sistema Tipo Tijera*.



riferimento, le variabili del sistema, consente la generazione di meccanismi o, in altre parole, di strutture a geometria variabile. Questo tipo di strutture deve essere progettato in modo tale da possedere uno o più gradi di libertà che ne consentano il movimento.

Nell'ambito della nostra ricerca a partire da casi studio sono stati costruiti i modelli parametrici utilizzabili per generare:

1. Strutture cinetiche non funzionali;
2. Costruire una struttura a singola curvatura composta da aste rigide con sistema *shissor like*;
3. Costruire una struttura cinematica a doppia curvatura positiva con sistema *shissor like*;
4. Costruire una struttura cinematica a doppia curvatura negativa con sistema *shissor like*.

Per definire un sistema cinetico è necessario partire dai concetti base che consentono di mettere in relazione geometria e movimento. Ogni elemento che compone una struttura (asta o superficie piana che sia) ha 3 gradi di libertà nel piano (due traslazioni e una rotazione) e 6 gradi di libertà nello spazio (tre traslazioni e tre rotazioni).

Gli elementi sono collegati tra loro da *coppie* (vincoli) che possono essere generalmente definite in funzione del numero di gradi di libertà tra i due corpi vincolati che possono variare dall'incastro (che impedisce tutti i movimenti), alla cerniera (piana o sferica), ai carrelli che consentono rotazioni e traslazioni. In generale si definiscono *coppie cinematiche* quelle coppie che vincolano due elementi consecutivi lasciando almeno un grado di libertà. Un insieme di elementi collegati da coppie cinematiche è una *catena cinematica*, che si definisce *aperta* se l'ultimo elemento non è collegato al primo, o *chiusa* se il primo e l'ultimo elemento sono collegati tra loro.

Si definisce *meccanismo* una catena cinematica chiusa dove uno dei membri è fisso.

Affinché si verifichi il movimento è necessario si verifichino le seguenti condizioni:

$F > 0$  dove  $F$  indica i gradi di libertà del sistema

Nello spazio è dato da:

$F = 6(L-1) - 5j_1 - 4j_2 - 3j_3 - 2j_4 - j_5$  dove  $L$  = numero di membri e  $J$  = numero delle coppie cinematiche di classe "n" presenti nel n meccanismo, ovvero numero di coppie cinematiche che permettono al sistema n gradi di libertà.

Nel piano è dato da:  $F = 3 \times (L-1) - 2j_1 - j_2$

Le catene cinematiche possono essere variamente composte a seconda delle intenzioni di progetto; obiettivo della nostra ricerca è quello di costruire strumenti parametrici implementabili, in grado di riprodurre alcuni meccanismi modificabili e riutilizzabili per diversi scopi.

Partendo questi principi teorici di base, da un punto di vista metodologico, abbiamo definito un

workflow che può essere schematizzato come segue:

- Caso studio: schema del meccanismo
- Scelta dei parametri e costruzione dello strumento generativo
- Rappresentazione del movimento
- Test dello strumento

## Approccio computazionale

A fronte di un costante interesse per le strutture cinetiche non si riscontra una corrispondente diffusione nella pratica soprattutto per la complessità del processo che richiede necessariamente uno studio approfondito del sistema cinematico e della geometria del movimento. Nel caso delle strutture cinematiche che abbiamo definito "non funzionali" è fondamentale, ad esempio, definire il movimento e la traiettoria descritta dai singoli punti che compongono il sistema. Per le strutture "estensibili", invece, è necessario simulare il movimento e le diverse configurazioni geometriche che il sistema assume nel passare da una configurazione iniziale alla configurazione finale di progetto. L'approccio prevalentemente empirico, basato sulla sperimentazione dei meccanismi, è quello che ha prevalso nel tempo, la possibilità di utilizzare strumenti algoritmico generativi in grado di simulare e rappresentare il movimento apre nuove prospettive per progettare dinamicamente la *geometria della trasformazione*.

Il nostro contributo si colloca in una ricerca più ampia che ha l'obiettivo di definire strumenti parametrici in grado di simulare alcuni sistemi cinematici, in particolare l'obiettivo è quello di fornire strumenti utilizzabili per progettazione di strutture cinetiche il cui meccanismo è basato sull'utilizzo di aste rigide.

Partendo dai principi fondamentali, lo strumento potrà essere sperimentato per generare soluzioni diverse in funzione di specifici parametri scelti come riferimento per definire sistemi utilizzabili in modo flessibile in diversi campi di applicazione. Per tradurre le regole geometriche in VPL e simulare il movimento sono state sperimentate le potenzialità di strumenti per la modellazione parametrica ed in particolare di specifici tool, con l'obiettivo di costruire meccanismi azionabili utilizzando forze applicate.

## Casi studio

### Meccanismi cinetici | installazioni artistiche

Nell'ambito dei sistemi cinetici che abbiamo definito "non funzionali" sono comprese le installazioni artistiche il cui movimento può essere azionato da forze artificiali o naturali. Emblematiche sono le opere di Theo Jansen, gli *Strandbeest*, installazioni zoomorfe che vivono sulla spiaggia, creature ibride in grado di sfruttare la spinta del vento per muoversi lentamente, come un miraggio, sul lungomare. Le opere di Jansen possono sembrare scheletri di animali preistorici o enormi insetti, ma in realtà sono gigantesche creazioni realizzate con materiali dell'epoca industriale: tubi flessibili in plastica, filo di nylon e nastro adesivo; nascono come algoritmi, ma non richiedono tecnologie avanzate per spostarsi: infatti, si muovono con la forza del vento, che caratterizza la costa olandese, loro habitat naturale (fig. 04).

Nell'ambito della nostra ricerca abbiamo studiato alcuni dei meccanismi cinetici su cui sono basate le installazioni di Jansen e le macchine inutili di Munari, costruendo una serie di algoritmi *MovArt*. /



Fig. 04. Theo Jansen: *Strandbeesten*, animali della spiaggia, ai quali Jansen ha iniziato a dedicarsi già negli anni ottanta.

(Arte in Movimento) che simulano il movimento e che possono essere utilizzati per generare configurazioni applicabili in diversi contesti. I meccanismi cinetici tradotti in VPL sono sistemi piani composti da aste rigide incernierate, il meccanismo è azionato dal moto rotatorio che si trasmette al sistema attraverso una puleggia a cui è collegato.

In questa fase della ricerca abbiamo definito tre tipologie di meccanismi (fig. 05):

MECCANISMO 1: aste incernierate all'estremità e 1 punto fisso non appartenente alle aste e con 2 elementi rigidi (triangoli)

MECCANISMO 2: aste incernierate all'estremità e 1 punto fisso appartenente ad un'asta

MECCANISMO 3: un'asta incernierata in un punto intermedio e 2 punti fissi.

In questo contributo riportiamo alcuni esiti delle sperimentazioni in corso realizzate utilizzando il MECCANISMO 1 che abbiamo implementato introducendo sulla stessa puleggia un secondo meccanismo, ottenendo così un sistema composto da quattro elementi rigidi (fig. 06).

L'algoritmo *MovArt.1* consente di modificare il sistema cinematico base, utilizzando alcuni parametri in relazione alla dimensione delle aste e all'utilizzo di più elementi base nel piano e/o nello spazio. Il sistema cinematico base può essere utilizzato per movimentare forme di vario tipo che sono ancorate ai triangoli rigidi, il cui numero può variare.

In questa fase della ricerca abbiamo sperimentato due diverse configurazioni generate con *MovArt.1* utilizzando un sistema cinematico composto da quattro triangoli rigidi azionato da un moto rotatorio. Lo strumento consente di ancorare agli elementi rigidi qualsiasi forma (anche con svi-

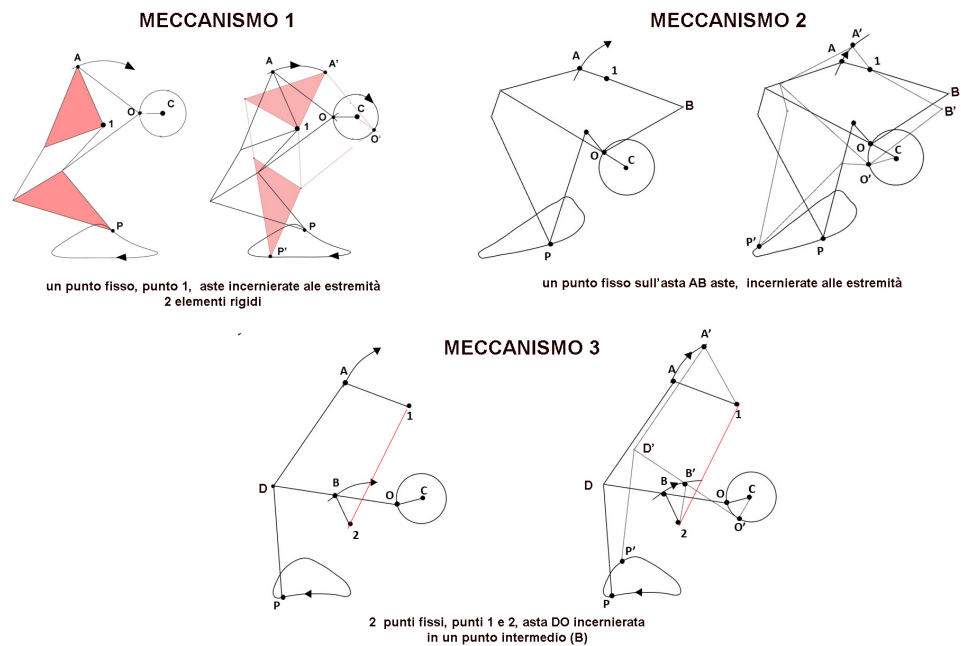


Fig. 05. Definizione dei diversi meccanismi cinetici analizzati. (Immagine prodotta dagli autori).

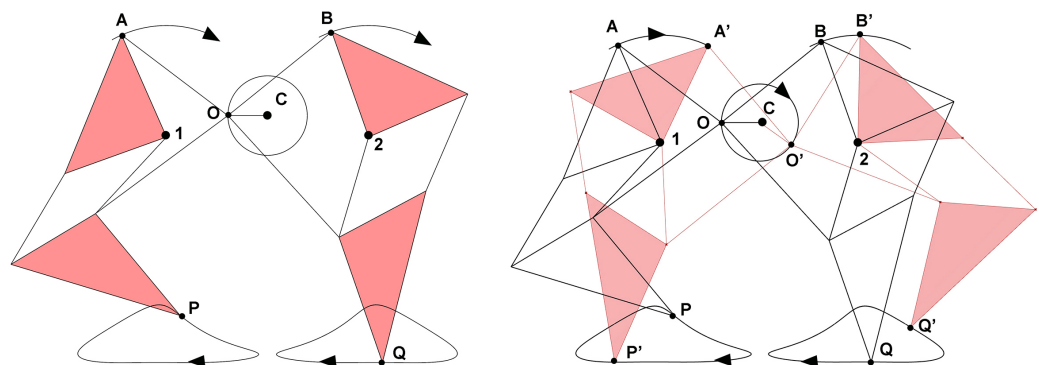


Fig. 06. *MovArt.1*: modello parametrico utilizzato per le sperimentazioni in corso. (Immagine prodotta dagli autori).

luppo tridimensionale) modificabile parametricamente per geometria, dimensione e colore. La simulazione del movimento consente di valutare dinamicamente le singole forme e le eventuali interferenze. Gli approcci possibili possono essere vari, a scopo esemplificativo abbiamo realizzato alcuni esempi composti da geometrie semplici (uguali o diverse) con l'obiettivo di rendere evidenti alcune potenzialità dello strumento (fig. 07). Altre sperimentazioni sono state realizzate utilizzando lo stesso sistema cinematico per generare configurazioni basate sul principio delle macchine inutili di Munari (fig. 08).

### Meccanismi cinetici | Sistemi estendibili scissor like

Nell'ambito dei sistemi cinetici composti da aste incernierate, dalle strutture "inutili" siamo passati ad analizzare le strutture dispiegabili, *scissor like*, "strutture utili", che, grazie alla caratteristica di essere "compattabili", possono essere utilizzate per realizzare strutture temporanee, padiglioni, strutture per l'emergenza etc. (figg. 09, 10).

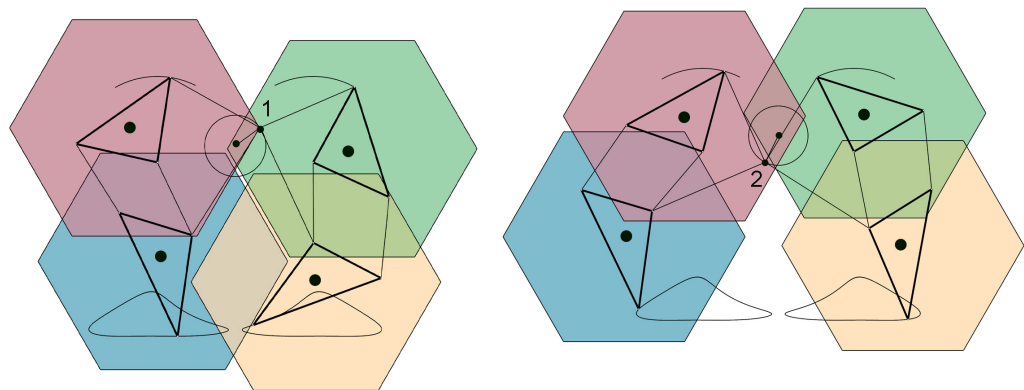


Fig. 07. MovArt. I: sperimentazione con superfici uguali ancorate agli elementi rigidi. (Immagine prodotta dagli autori).

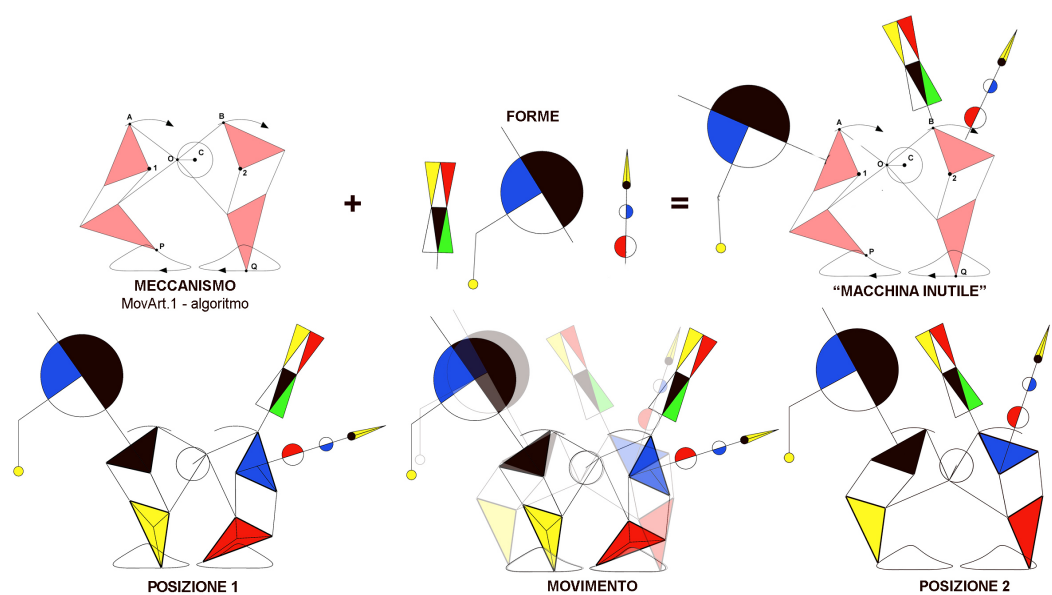


Fig. 08. MovArt. I: sperimentazione basate sul principio delle "Macchine inutili" di Munari. (Immagine prodotta dagli autori).

Sulla base di un'ampia letteratura esistente in relazione allo studio delle strutture *scissor like*, estendibili, sono stati sintetizzati i principi geometrici fondamentali, scelti i parametri per la definizione di un modello parametrico (*SMA- Scissor Maker*) in grado di generare possibili soluzioni diverse e simulare la geometria del movimento.

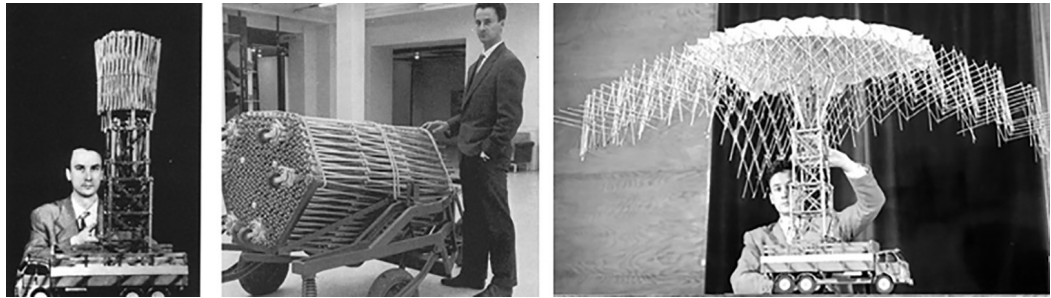


Fig. 09. Emilio Pérez Piñero, teatro trasportabile Theatre, 1961 – struttura estendibile e compattabile.

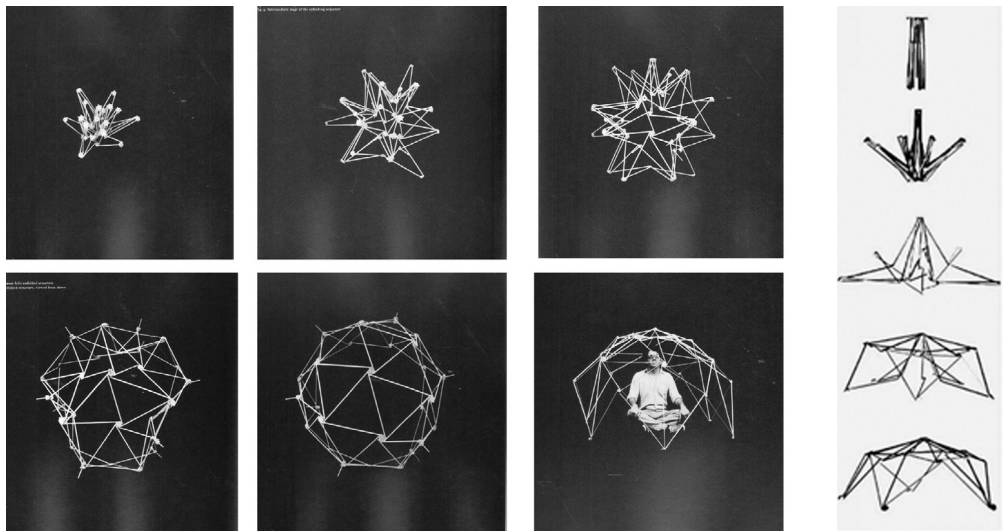


Fig. 10. Calatrava, strutture trasportabili. Santiago Calatrava, *On the Foldability of Space Frames*, tesi dottorale, 1979.

L'obiettivo della ricerca è quello di sperimentare in diversi ambiti l'utilizzo dello strumento (*SMA- Scissor Maker*) per valutarne l'efficacia. L'attività di testing consente di individuare le criticità, implementare lo strumento e/o ridefinire alcuni approcci.

Alla base del processo vi è la comprensione della geometria e l'individuazione delle variabili che influenzano il comportamento di dispiegamento della struttura.

Per i sistemi *scissor like* il processo si basa sull'utilizzo del vincolo di dispiegabilità definito dall'equazione di Escrig (1985):  $a + b = c + d$

da cui deriva che un sistema è completamente dispiegabile e/o compattabile se la somma delle semilunghezze  $a$  e  $b$  di un'unità a forbice è uguale alla somma delle semilunghezze  $c$  e  $d$  dell'unità adiacente, condizione sempre soddisfatta se le due aste che compongono l'unità sono incernierate al centro e se le unità sono uguali. Se il vincolo di dispiegabilità non è rispettato, la configurazione iniziale non può essere compatta oppure completamente dispiegata (fig. 11)

Le unità *scissor like* sono costituite da due aste rettilinee rigide vincolate con una cerniera intermedia che consente la rotazione intorno ad un asse perpendicolare al loro piano comune. Modificando la posizione delle cerniere si possono definire due principali categorie unità *scissor like* lineari e unità *scissor like* polari ed una ulteriore categoria di unità *scissor like* angolari, costituita da quattro aste incernierate al centro (fig. 11).



Il modello parametrico *SMa.I* (*Scissor Maker*) sviluppato nella prima fase della ricerca consente di generare un sistema piano in cui è possibile variare la lunghezza delle aste, la posizione della cerniera intermedia, il numero di elementi e di simulare il movimento di apertura e chiusura di un singolo sistema. A partire dalla singola unità si possono generare (fig.11):

- Sistemi lineari con aste uguali (completamente dispiegabili)
- Sistemi lineari con aste diverse (non completamente dispiegabili)
- Sistemi polari con aste uguali ed elementi simmetrici (completamente dispiegabili)
- Sistemi polari con aste uguali ed elementi asimmetrici (non completamente dispiegabili)

Il modello parametrico consente di definire la struttura spaziale componendo i diversi sistemi piani, in una prima fase si possono ottenere superfici a singola curvatura e a doppia curvatura positiva. Il passaggio dall'elemento lineare compatto, composto da più unità, all'elemento tridimensionale pone l'ulteriore problematica in relazione ai movimenti necessari al compattoamento ed al dispiegamento della struttura, che può avvenire nel suo complesso o per parti.

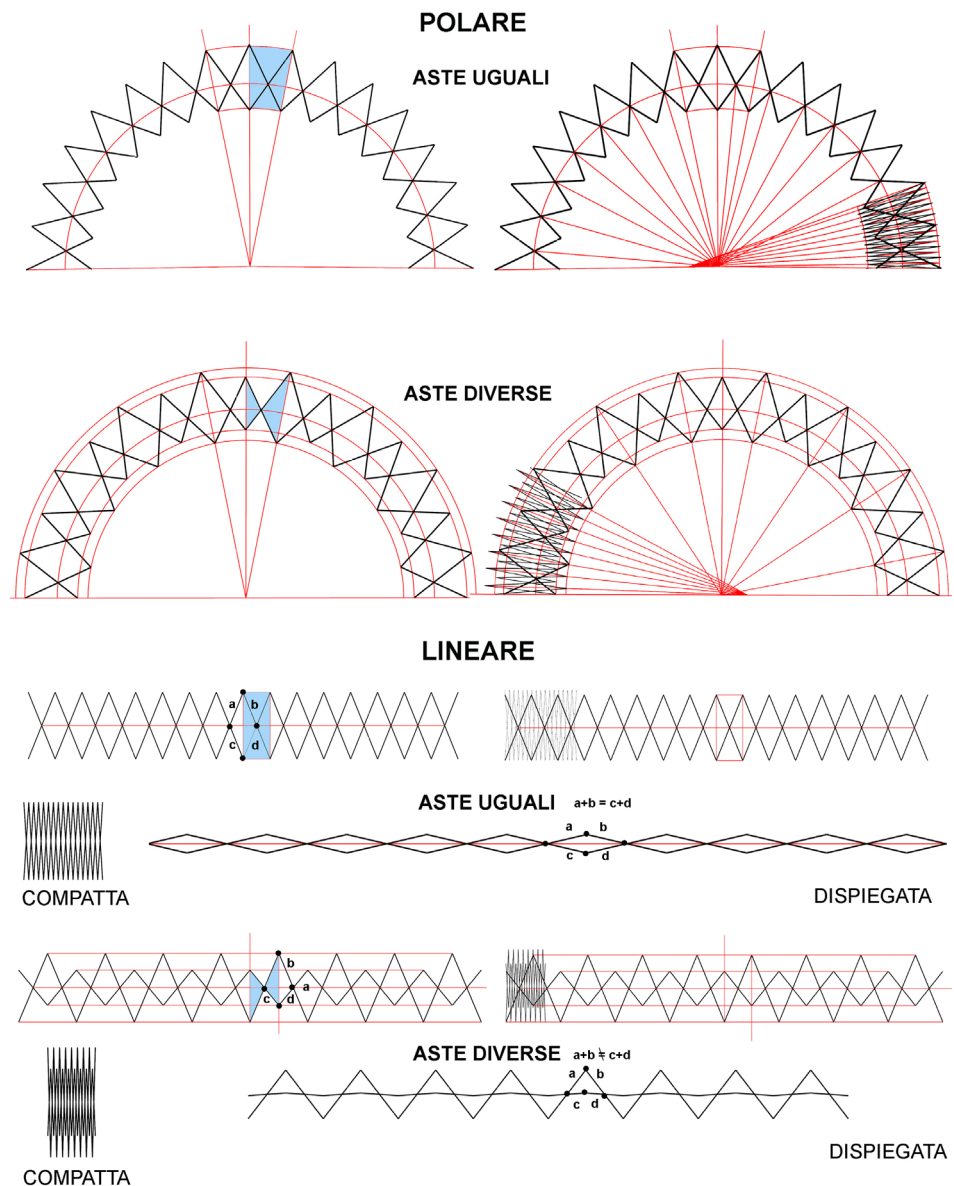


Fig.11. SMa.I (*Scissor Maker*) testing: con unità base lineare o polare \ aste uguali o aste diverse - simulazione del processo di dispiegamento.

In funzione dei diversi possibili ambiti di applicazione, della scala, dei materiali previsti, è necessario un ulteriore studio di dettaglio del sistema meccanico, quindi della realizzazione dei meccanismi che consentono il movimento e degli ingranaggi necessari.

*SMa.1* consente di generare superfici composte da unità lineari ed unità polari. Per superare il principale limite dello strumento riscontrato nelle prime fasi del testing abbiamo sviluppato *SMa.2* che consente di generare elementi cinetici dispiegabili a partire da una qualsiasi curva. In questo caso non si parte dalla singola unità ma dalla curva che rappresenta la configurazione finale di progetto (fig. 12). Le singole unità sono definite utilizzando la regola geometrica che assicura il rispetto del vincolo di dispiegabilità. Le unità che compongono l'elemento sono lineari, *SMa.2* consente di progettare la geometria delle unità partendo dalla curva di progetto. Le variabili del sistema (INPUT) sono l'altezza  $H$  dell'unità, la curva di progetto e il numero delle unità. In questo caso la superficie ideale di progetto si può generare considerando le curve ottenute sezionando la superficie con piani aventi la stessa giacitura (paralleli).

Questo processo consente di costruire per parti una superficie con qualsiasi curvatura.

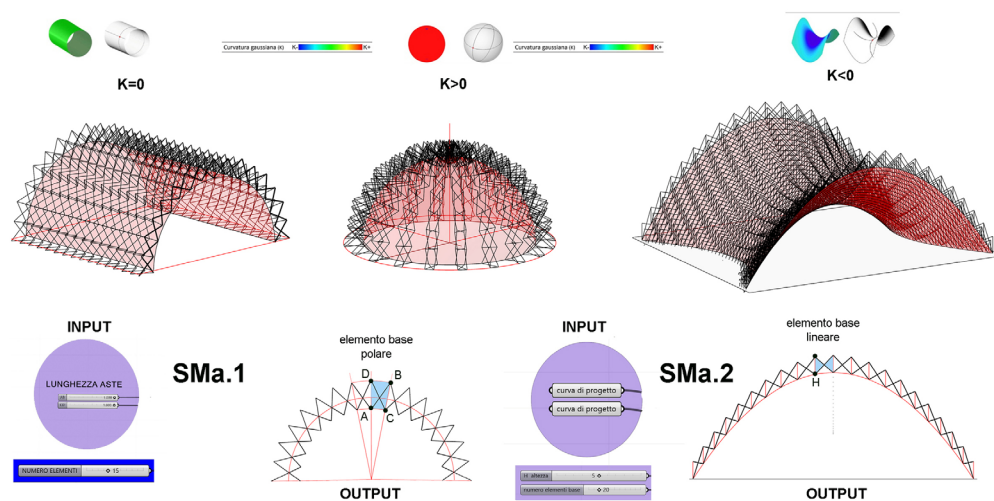


Fig. 12- *SMa.1* e *SMa.2* testing activity. Generazione di sistemi cinetici composti da elementi piani dispiegabili. Superfici ideali di riferimento con curvatura gaussiana nulla, negativa e positiva.

## Conclusioni e sviluppi futuri della ricerca

Nell'ambito della ricerca sulla geometria applicata per la rappresentazione e simulazione dei meccanismi del movimento e sulle possibili applicazioni è in corso una sperimentazione nell'ambito di un accordo internazionale con l'Università di Napoli Federico II (UNINA) e l'Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e il coinvolgimento dei Laboratori LAM (Laboratorio di Architettura e Modellistica - UNINA) e LMP (Modeling and Prototyping - UFPB). La sperimentazione prevede l'utilizzo dello strumento parametrico da noi definito per la progettazione di sistemi cinetici e la realizzazione dei relativi prototipi nell'ambito di quattro categorie che coinvolgono diverse possibili scale di intervento con cui sarà necessario misurarsi: design (arredo, arredo urbano...), strutture temporanee (padiglioni, strutture per l'emergenza...), sistemi per l'architettura (sistemi facciata, controsoffitti intelligenti...) e installazioni artistiche (macchine inutili, incubatori di messaggi culturali...). Durante questa attività di testing lo strumento sarà implementato e/o modificato in modo da rispondere in modo più adeguato alle problematiche e alle esigenze che saranno definite in relazione allo sviluppo dei progetti.

### Riferimenti Bibliografici

- Arnouts, L.I.W., et al. (2019). Computational Design of Bistable Deployable Scissor Structures: Trends and Challenges. In *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, n. 199, pp. 19-34.
- Asefi, M., Aram, S. (2018). Flexibility in Architecture: An Innovative Design for Covering of a Transformable Dome Using Kinetic Elements. In *Space Ontology International Journal*, n. 4, pp. 41-52.
- Beatini, V. (2011). *Cinemorfismi. Meccanismi che definiscono lo spazio architettonico*. Tesi di dottorato di ricerca in Forme e Strutture dell'Architettura, relatore/tutor prof. G. Royer Carfagni. Università degli Studi di Parma.
- De Temmerman, N. (2007). *Design and Analysis of Deployable Bar Structures for Mobile Architectural Applications*. Tesi di dottorato di ricerca, relatore/tutor prof. M. Mollaert. Libera Università di Bruxelles.
- Fabrisio, O., López, A. (2020). *Diseño paramétrico de las estructuras desplegables: control límite de Movimiento*. Tesi di dottorato di ricerca in Tecnologia dell'Architettura, dell'Edilizia e dell'Urbanistica, relatore/tutor arch. R. Sastre Sastre, correlatore/cotutor arch. X. Gimferrer Vilaplana. Università Politecnica della Catalogna.
- Friedman, N. (2011). *Investigation of highly flexible, deployable structures: review, modelling, control, experiments and application*. Tesi di dottorato di ricerca in Ingegneria Civile, relatore/tutor prof. G. Farkas, correlatore/cotutor prof. A. Ibrahimbegovic. Università di Tecnologia ed Economia di Budapest, Università di Tecnologia di Compiègne.
- Hanaor, A., Levy, R. (2001). Evaluations of Deployable Structures for Space Enclosures. In *International Journal of Space Structures*, n. 16, pp. 211-229
- Munari, B. (1942). *Le Macchine inutili*. Torino: Einaudi.
- Nebuloni, A. (2020). Il fattore tempo nel progetto delle architetture adattive. In *Tempo e Architettura*, n. 20, pp. 98-105.
- Rodriguez, C. (2011). Morphological Principles of Current Kinetic Architectural Structures. In *Adaptive Architecture*, pp. 1-12.
- Schumacher, P. (1996). The Architecture of Movement. In *Arch+*, n. 134/135, pp. 56-58 <[https://www.researchgate.net/publication/336233684\\_The\\_Architecture\\_of\\_Movement\\_Transformable\\_Structures\\_and\\_Spaces](https://www.researchgate.net/publication/336233684_The_Architecture_of_Movement_Transformable_Structures_and_Spaces)> (consultato il 28 febbraio 2022).
- Stevenson, C. (2011). *Morphological principles: current kinetic architectural structures*. Proceedings of the International Adaptive Architecture Conference.
- Wang, CY., Hou, JH. (2018). Analysis and applications of theo jansen's linkage Mechanism: Theo Jansen's linkage mechanism on kinetic architecture. In Alhadidi, S., et al. (a cura di). *CAADRIA 2018 - 23rd International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia: Learning, Prototyping and Adapting*. Pechino, Cina, 17-19 maggio 2018, vol. 2, pp. 359-368. The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA).
- Zellner, P. (1999). *Hybrid space: new forms in digital architecture*. London: Thames & Hudson.
- Zuk, W., Clark, R. (1970). *Kinetic Architecture*. New York: Van Nostrand Reinhold.

### Autori

Mara Capone, UNINA, Università degli Studi di Napoli Federico II, mara.capone@unina.it  
Angela Cicala, UNINA, Università degli Studi di Napoli Federico II, angela.cicala@unina.it

Per citare questo capitolo: Capone Mara, Cicala Angela (2022). Dalle "macchine inutili" alle "macchine utili". Algoritmi generativi per costruire le geometrie della trasformazione/From "useless machines" to "useful machines": Generative algorithms to build transformation geometries. In Battini C., Bistagnino E. (a cura di). *Dialoghi. Visioni e visualità. Testimoniare Comunicare Sperimentare. Atti del 43° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Dialogues. Visions and visuality. Witnessing Communicating Experimenting. Proceedings of the 43rd International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 2199-2220.



# From “useless machines” to “useful machines”. Generative algorithms to build transformation geometries

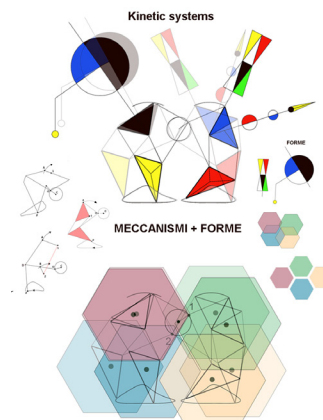
Mara Capone  
Angela Cicala

## Abstract

Despite constant interest in kinetic structures, there is not corresponding dissemination in practice, mainly due to the complexity of the process. In fact, it necessarily requires an in-depth study of the kinematic system and the geometry of the movement in order to design these kind of structures. The mainly empirical approach, based on the experimentation of mechanisms, has prevailed over time. The possibility of using generative algorithmic tools able to simulate and represent the movement opens new perspectives to dynamically design the geometry of the transformation. Our contribution is part of a wider research that aims to define parametric tools able to simulate some kinematic systems that can be used for the design of structures composed of rigid hinged rods. In order to translate the geometrical rules into VPL and to simulate the movement, the potentialities of parametric modeling tools and in particular of specific tools have been experimented, with the aim of constructing mechanisms that can be operated using applied forces. Starting from the definition of a kinematic system, the geometric conditions and constraints that allow the movement, we defined two different types of systems: the “non-functional” ones, which have found wide diffusion in the artistic field, and the “deployable” ones, scissor like, whose application fields are multiple. The main objective of the research is to test the potential of the MovArt and SMa algorithms, which can generate different solutions, define their limits and proceed to optimization.

## Keywords

Kinetic structures, movement, computational design, deployable structures, scissor-like structures



Algorithm MovArt. I  
(Arte in Movimento)  
– tests with different  
shapes. (Image by  
authors).

## Introduction

The building of kinematic systems - originally connected to the realization of mechanical systems able to respond to specific functional needs - has found multiple fields of application in art, architecture and design.

Starting from the first definition of kinetic architecture by William Zuk and Roger Clark [Kinetic Architecture 1970] (fig. 01) describing kinetic architecture as “a system able to adapt to changes”, the kinetics in architecture has taken different directions and objectives over time to measure themselves with the concepts of adaptability, flexibility and transformation. The presence of kinematics has distinguished countless examples and assumed different natures linked both to the physical, technological and material characteristics of the architecture and to the properly aesthetic formal aspects, concerning the possibility of generating different types of forms and spaces able to accommodate multiple modes of use, involving the whole architectural organism, parts of it or acting only on some of the elements that compose it [Stevenson 2017].

Since the beginning of the 20th century, designers have constantly tried to include forms of dynamism in their projects, understood as the ability of an ordered set to implement movement or to change in relation to a basic morphology.

This both in order to include the time dimension in the project, both in order to experiment an interaction with the context guided by the potential abilities of technologies [Nebuloni 2020].

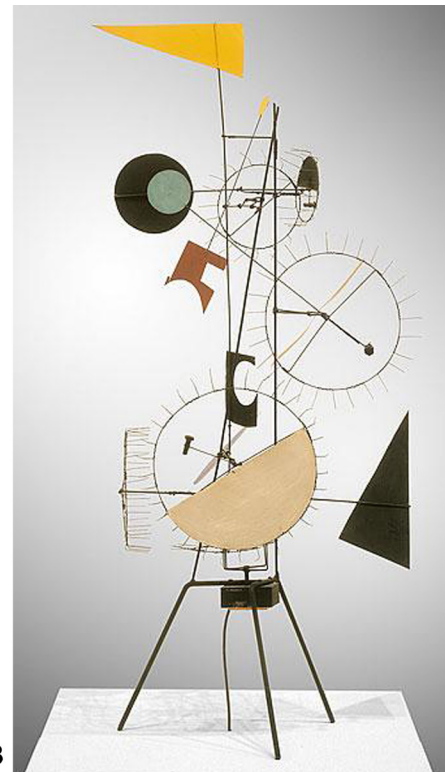
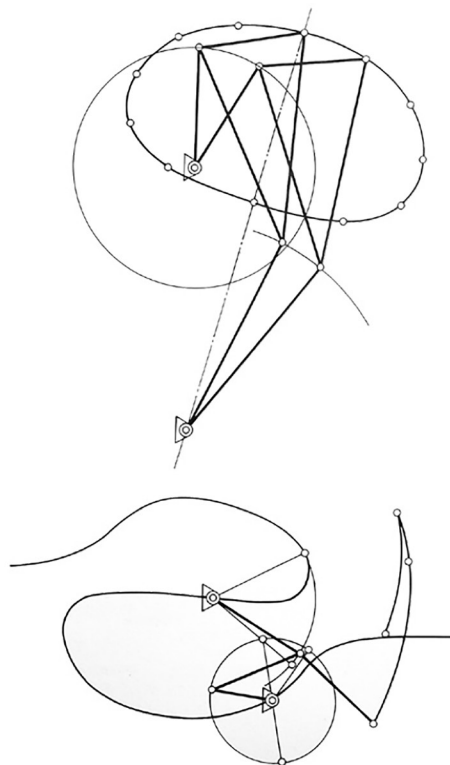
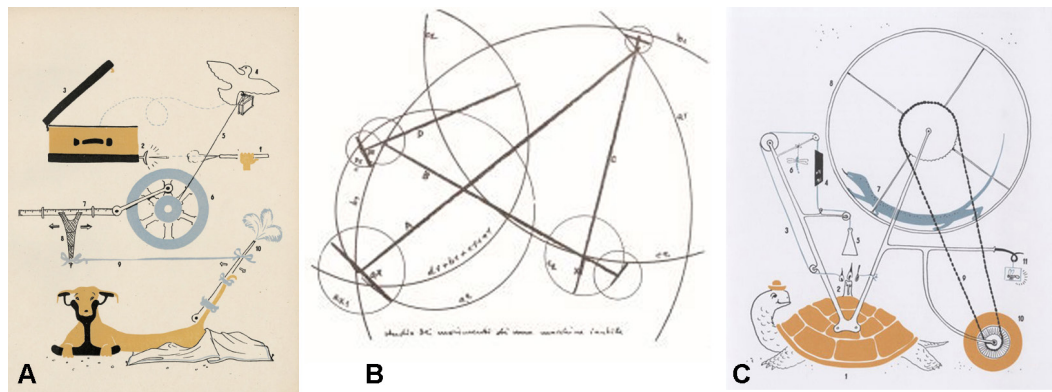


Fig. 01. A) 1970 William Zuk, Roger H. Clark, kinetic movements examples in *Kinetic Architecture*, 1970; B) 1954 Jean Tinguely, *Méta-mécanique*.

The first kinetic experiments in the artistic field were developed between 1913 and 1920, the experiments of Duchamp and Man Ray, based on simple rotating mechanisms such as the *Bicycle Wheel* (1913) and the *Rotative Plaques*, became more complex in Laszlo Moholy-Nagy's *Light-Space-Modulator* (1930) and in Bruno Munari's *Useless Machines* (fig. 02) from the 1930s onwards. His *Manifesto del Meccanismo* (1952) invites us to make art with machines and to establish a new relationship between art and technology, in order to produce machines that may appear “useless” because they do not produce material consumer goods, but that are very useful to produce “spiritual consumer goods, images, aesthetic sense, education of taste” [Munari 1942].

Fig. 02. Bruno Munari, "Macchine inutili": A. Tail shaker for lazy dogs. B. Movements study of an useless machine (Bollettino n.5 Movimento Arte Concreta, Milano, 1952); C. Lizard engine for snails.



These works, based on the definition of generative rules, allow the construction of multiple variants starting from the same kinematic mechanisms and represent the fundamental premise of the kinetic experiments that culminate with the exhibition *Le Mouvement* (Paris 1955). On this occasion two different streams of the avant-garde movement are outlined, on the one hand the simulation of perceptive movement based on the wise use of optical illusions, on the other hand works are produced based on real movement determined in a natural or artificial way, that is the main topic of our research.

In relation to this theoretical reference framework, we can therefore distinguish different categories in the field of kinetic systems, also in relation to the different possible areas of application:

1. Non-functional kinetic structures - artistic installations;
2. Transportable kinetic systems (extensible structures);
3. Transformable and/or responsive kinetic systems.

### The geometry of the movement

The kinetic system definition is based on the possibility of simulating the change of state (form) in relation to the morphological configuration of the system and the actions that activate the movement.

Kinematic systems, generally classified according to their morphological and kinematic characteristics [Hanaor 2001], can be grouped into four main categories:

1. structures composed of hinged rods;
2. structures composed of hinged plates, *origami*);
3. structures composed of rods and cables, *tensegrity*;
4. membrane structures, *pneumatic*.

The main feature of a kinetic structure is that it can change configuration according to the applied action; the different shapes that the system can assume depend on the geometry of the single elements, on the physical characteristics and on the constraint relationships. We can, moreover, distinguish structures according to their transformation process into two large groups: *deformable*, systems based on the intrinsic property of the material to change configuration (technical balloons inflated with hot air...) and *non-deformable*, composed of rigid elements (rods or plates) connected by hinges that allow movement according to different degrees of freedom (fig. 03).

Design control is based on the possibility of simulating the process and therefore representing the movement. Our contribution is part of this framework, exploring some cases of systems composed of rigid hinged rods.

The main goal of the research is to build a tool based on generative rules for the construction of kinematic systems composed of rigid rods that can simulate motion.

A kinetic system requires that the whole configuration, or at least some of its elements, can change their geometry. Knowledge of the geometry of the movement is the base for the

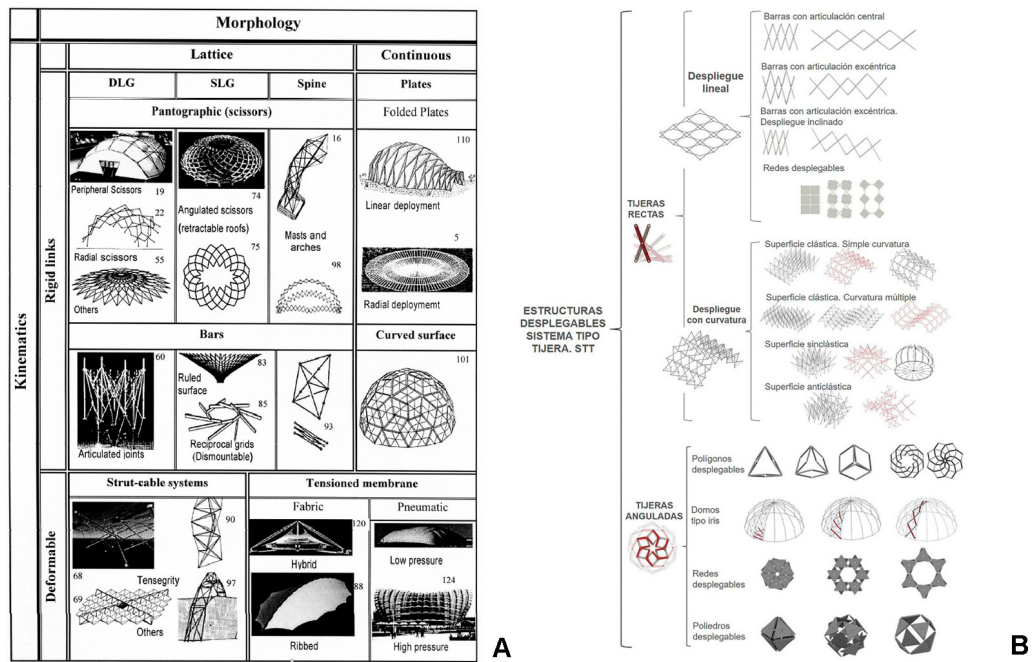


Fig. 03. Kinetic structures classification: A) 2001, A. Hanaor e R. Levy, *Evaluations of Deployable Structures for Space Enclosures*. B) 2017, Natalia Torres. *Clasificación de estructuras desplegables. Sistema Tipo Tijera*.

definition of a generative algorithmic model which, according to certain parameters chosen as a reference, the variables of the system, allows the generation of mechanisms or, in other words, structures with variable geometry. This type of structure must be designed in such a way as to have one or more degrees of freedom allowing it to move.

In the context of our research, parametric models have been constructed from case studies that can be used to generate:

1. Non-functional kinetic structures;
2. Building a single-curvature structure composed of rigid rods with a *scissor-like* system;
3. Constructing a kinematic structure with double positive curvature with *scissor-like* system;
4. Construct a kinematic structure with double negative curvature using the *scissor-like* system.

In order to define a kinetic system, it is necessary to start from the basic concepts that allow us to relate geometry and motion. Each element of a structure (rod or flat surface) has 3 degrees of freedom in the plane (two translations and one rotation) and 6 degrees of freedom in space (three translations and three rotations). The elements are connected to each other by *couples* (constraints) that can be generally defined as a function of the number of degrees of freedom between the two constrained bodies, which can change from the joint (which blocks all movements) to the hinge (flat or spherical), to the carriages that allow rotations and translations.

In general, *kinematic couples* are defined as those couples that are binding two consecutive elements leaving at least one degree of freedom. A set of elements connected by kinematic couples is a *kinematic chain*, which is defined as *open* if the last element is not connected to the first, or *closed* if the first and last elements are connected to each other. A mechanism is defined as a closed kinematic chain where one of the members is fixed. The movement requires the verification of the below conditions:  $F > 0$  where  $F$  indicates the degrees of freedom of the system.

In space it is given by:  $F = 6(L-1) - 5J_1 - 4J_2 - 3J_3 - 2J_4 - J_5$  where  $L$  = number of members and  $J$  = number of kinematic pairs of class "n" present in the n mechanism, i.e. the number of kinematic pairs that allow the system n degrees of freedom.

In the plane it is given by:  $F = 3 \times (L-1) - 2J_1 - J_2$

The kinematic chains can be variously composed according to the design intentions, the aim of our research is to build parametric tools that can be implemented, capable of reproducing some mechanisms that can be modified and reused for different purposes.

Starting from these basic theoretical principles, from a methodological point of view, we have defined a workflow that can be schematised as follows:

- Case study: mechanism diagram
- Choice of parameters and construction of the generative tool
- Representation of the movement
- Instrument testing

## Computational approach

While there is a constant interest in kinetic structures, there is no corresponding diffusion in practice, mainly due to the complexity of the process. In fact, it necessarily requires an in-depth study of the kinematic system and the geometry of the movement. In the case of kinematic structures that we have defined as “non-functional”, it is essential to define the movement and trajectory described by the individual points that compose the system. For “extensible” structures, on the other hand, it is necessary to simulate the movement and the different geometric configurations that the system assumes in the passage from an initial configuration to the final design configuration. The mainly empirical approach, based on the experimentation of mechanisms, has prevailed over time; the possibility of using generative algorithmic tools able to simulate and represent the movement opens new perspectives to dynamically design the *geometry of the transformation*.

Our contribution is part of a wider research that aims to define parametric tools able to simulate some kinematic systems; in particular, the objective is to provide tools that can be used for kinetic structures design whose mechanism is based on the use of rigid rods.

Starting from the main principles, the tool can be tested in order to generate different solutions according to specific parameters chosen as reference to define systems that can be used in a flexible way and in different application fields. In order to translate the geometrical rules into VPL and to simulate the movement, the capability of parametric modelling tools and in particular of specific tools has been experimented, with the aim of building mechanisms that can be operated using applied forces.

## Case studies

### Kinetic mechanisms | arctic installations

The kinetic systems we have defined as “non-functional” include artistic installations whose movement can be driven by artificial or natural forces. Emblematic are the works of Theo Jansen, the *Strandbeest*, zoomorphic installations that live on the beach, hybrid creatures that are able to exploit the buoyancy of the wind to move slowly, like a mirage, along the waterfront. Jansen’s works may look like skeletons of prehistoric animals or huge insects, but they are actually huge creations made with materials from the industrial age: plastic hoses, nylon thread and tape; they are born as algorithms, but they don’t require advanced technology to move. In fact, they move with the force of the wind, which characterizes the Dutch coast, their natural habitat (fig. 04).

As part of our research, we have investigated some of the kinetic mechanisms on which Jansen’s installations and Munari’s useless machines are based, constructing a series of algo-

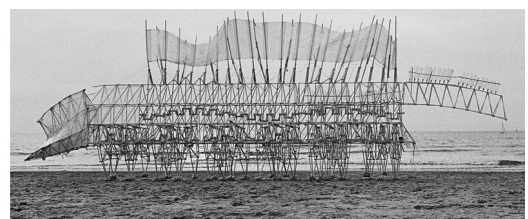


Fig. 04. Theo Jansen: *Strandbeesten*, beach animals, which Jansen began working on in the 1980s.



rithms, *MovArt.1* (Art in Motion), that simulate movement and can be used to generate configurations applicable in different contexts. The kinetic mechanisms translated into VPL are flat systems composed of rigid hinged rods, driven by rotational motion that is transmitted to the system through a pulley to which it is attached.

At this stage of the research we have defined three types of mechanisms (fig. 05):

MECHANISM 1: rods hinged at the end and 1 fixed point not belonging to the rods and with 2 rigid elements (triangles)

MECHANISM 2: rods hinged at the end and 1 fixed point belonging to a rod

MECHANISM 3: a rod hinged at an intermediate point and 2 fixed points.

In this paper, we report some results of ongoing experiments, carried out using MECHANISM 1. We have in fact implemented mechanism 1 by introducing a second mechanism on the same pulley, thus obtaining a system composed of four rigid elements (fig. 06).

The *MovArt.1* algorithm allows to modify the basic kinematic system, using some parameters in relation to the size of the rods and the use of more basic elements in the plane and in space. The basic kinematic system can be used to move shapes of various types that are anchored to rigid triangles, whose number can vary.

In this phase of the research we experimented with two different configurations generated with *MovArt.1* using a kinematic system composed of four rigid triangles, driven by a rotary

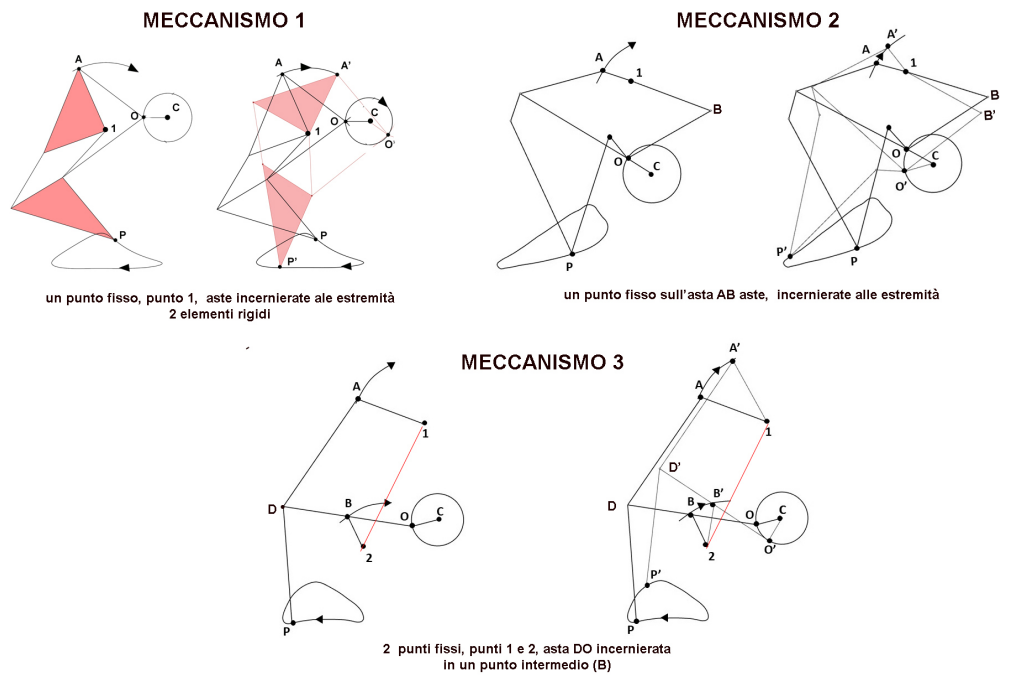


Fig. 05. Definition of the different kinetic mechanisms analyzed. (Image by authors).

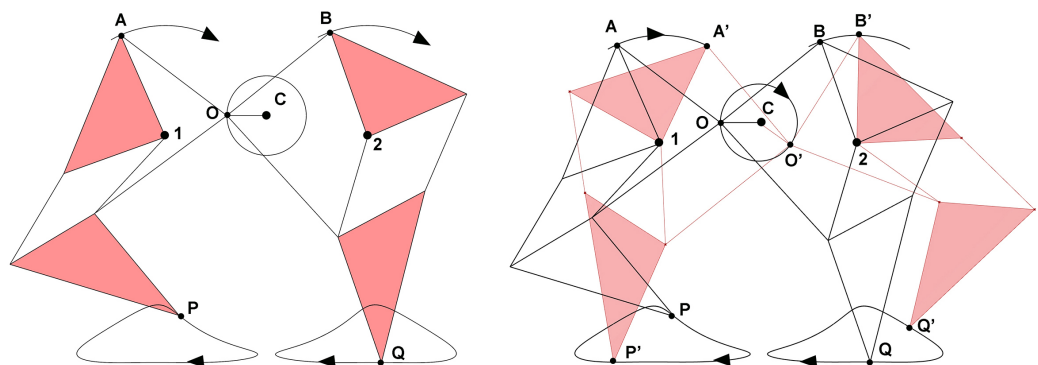


Fig. 06. *MovArt.1* : parametric model used for our testing activity. (Image by authors).

motion. The tool allows to anchor to the rigid elements any form (also with three-dimensional development) modifiable parametrically for geometry, size and colour. The simulation of the movement concurs to dynamically evaluate shapes and possible interferences. The approaches can be various; we have realized some examples composed from simple geometries (equal or various) with the objective to make clear some potentialities of the tool (fig. 07). Other tests have been carried out using the same kinematic system to generate configurations based on Munari's *useless machines* principle (fig. 08).

### Kinetic mechanisms | Extensible scissor systems

In the context of kinetic systems composed of hinged rods, we have moved on from "useless" structures to analyse deployable structures, "useful structures", which, due to their characteristic of being "compactable", can be used to design temporary pavilions, emergency structures etc. (figs. 09, 10). On the basis of a wide existing literature related to the study of *scissor-like*, extendable structures, the fundamental geometrical principles have been syn-

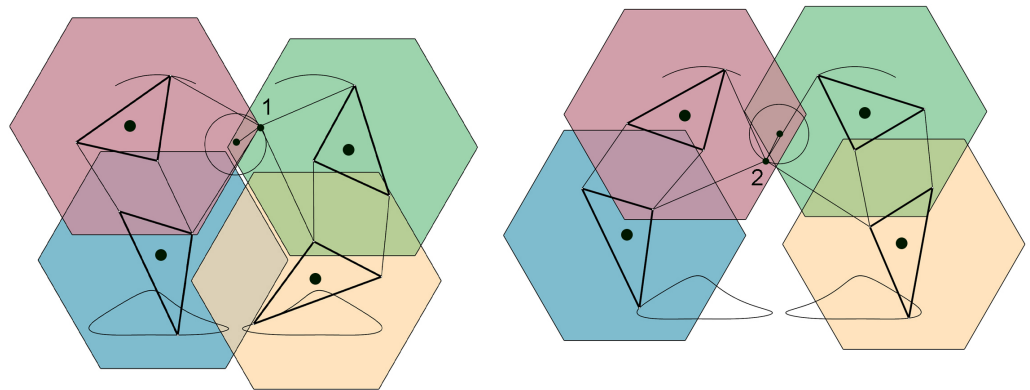


Fig. 07. MovArt.1: testing with equal surfaces anchored to rigid elements. (Image by authors).

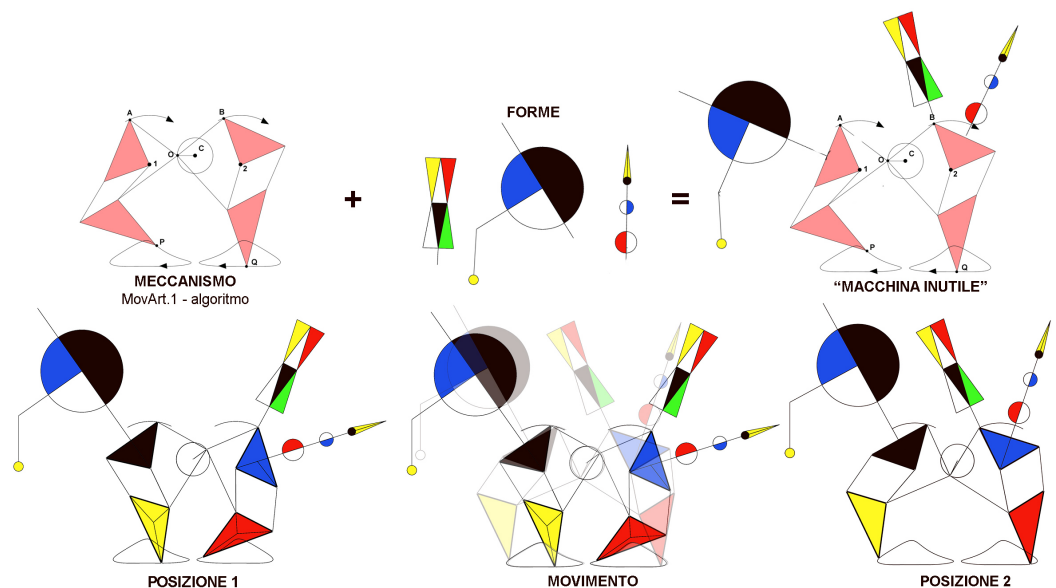


Fig. 08. MovArt.1: experimentation based on the principle of Munari's "Useless Machines" (Image by authors).

thesized, the parameters have been chosen for the definition of a parametric model (*SMA- Scissor Maker*) able to generate different possible solutions and to simulate the geometry of the movement.

The research aim is to test the use of the tool (*SMA- Scissor Maker*) in different areas in order to evaluate its efficiency. The testing activity makes it possible to identify critical points, implement the tool and/or redefine certain approaches.

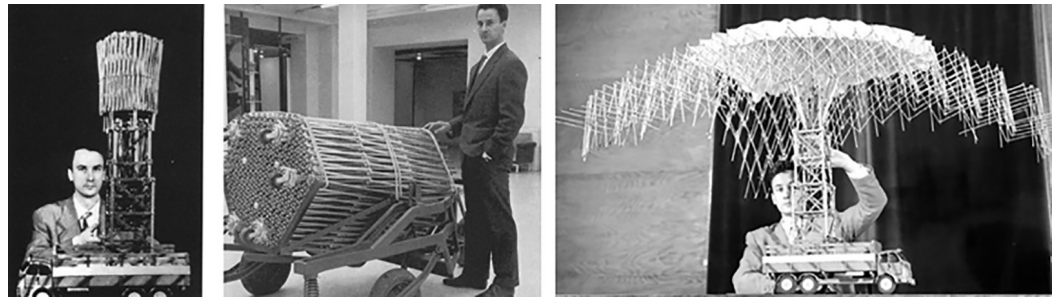


Fig. 09. Emilio Pérez Piñero, portable theater Theatre, 1961 – extendable and compactable structure.

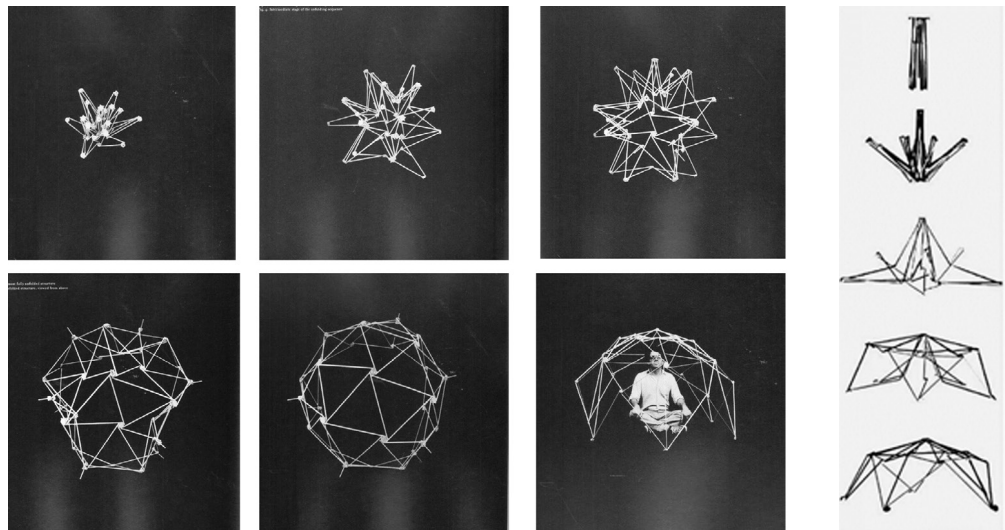


Fig. 10. Calatrava portable structures. Santiago Calatrava, *On the Foldability of Space Frames*, doctoral thesis, 1979.

The basis of the process is the understanding of geometry and the identification of variables that influence the deployment behaviour of the structure.

For *scissor-like* systems the process is based on the use of the deployability constraint defined by the equation of Escrig (1985):  $a + b = c + d$

from which it results that a system is completely unfoldable and/or compactable if the sum of the half-lengths  $a$  and  $b$  of a scissor-like unit is equal to the sum of the half-lengths  $c$  and  $d$  of the adjacent unit, this condition is always satisfied if the two rods composing the unit are hinged at the centre and if the units are equal. If the unfolding constraint is not respected the initial configuration cannot be compact or completely unfolded (fig. 11).

*Scissor-like* units consist of two rigid straight rods constrained by an intermediate hinge that allows rotation about an axis perpendicular to their common plane. By modifying the position of the hinges, three main categories can be defined: linear *scissor-like* units, polar *scissor-like* units and a further category of units, angular *scissor-like* units, consisting of four rods hinged at the centre (fig. 11).

The parametric model SMA. I (*Scissor Maker*) developed in the first phase of the research allows the generation of a flat system in which it is possible to vary the length of the rods, the position of the intermediate hinge, the number of elements and to simulate the opening and closing

movement of a single system. Starting from the single unit it is possible to generate (fig. 1 I):

1. Linear systems with equal rods (fully deployable)
2. Linear systems with different rods (not fully deployable)
3. Polar systems with equal rods and symmetrical elements (fully deployable)
4. Polar systems with equal rods and asymmetrical elements (not fully deployable)

The parametric model makes it possible to define the spatial structure by composing the different plane systems; in a first phase, surfaces with single curvature and double positive curvature can be obtained.

The transition from the linear compactable element, composed of several units, to the three-dimensional element involves a further problem in relation to the necessary movements for compacting and unfolding the structure, which can take place as a whole or in parts. According to the different possible areas of application of the mechanical system, the scale, the materials involved, it is necessary to carry out a further detailed study of the system, therefore of the mechanisms enabling the movement and the gears required.

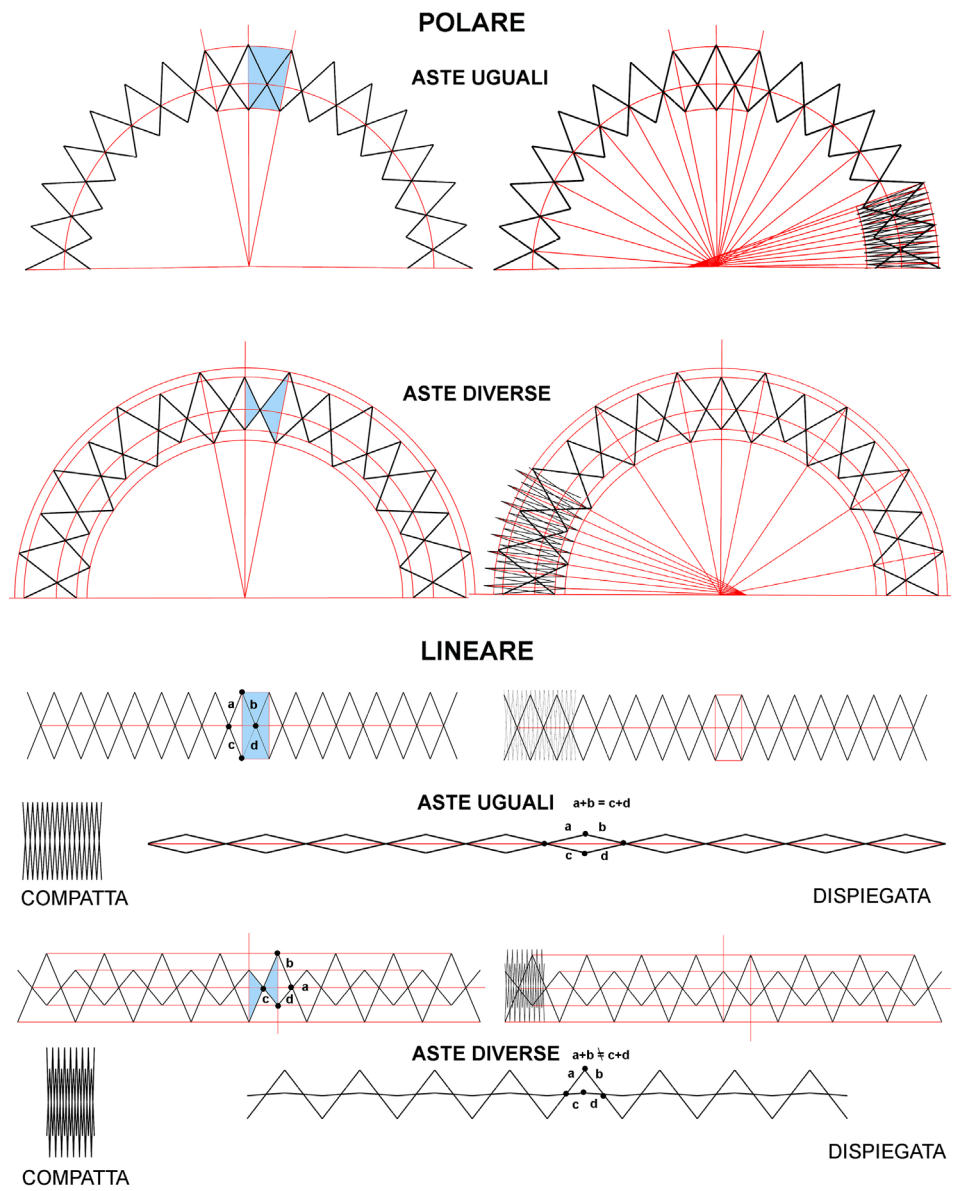


Fig. 1 I. SMa. I (Scissor Maker) testing with linear or polar units \ equal or different rods - simulation of the unfolding process.

*SMa.1* allows the generation of surfaces composed of linear and polar units. In order to overcome the main limitation of the tool encountered in the early stages of testing, we developed *SMa.2*, which allows the generation of kinetic elements that can be unfolded from any curve. In this case we do not start from the single unit but from the curve which represents the final design configuration. The individual units are defined using the geometric rule that ensures the deployability constraint is satisfied. The units that compose the element are linear; *SMa.2* allows to design the geometry of the units starting from the design curve. The system variables (INPUT) are the height  $H$  of the unit, the design curve and the number of units. In this case, the ideal design surface can be generated by considering the curves obtained by sectioning the surface with planes having the same layout (parallel). This process makes it possible to construct a surface with any curvature by parts.

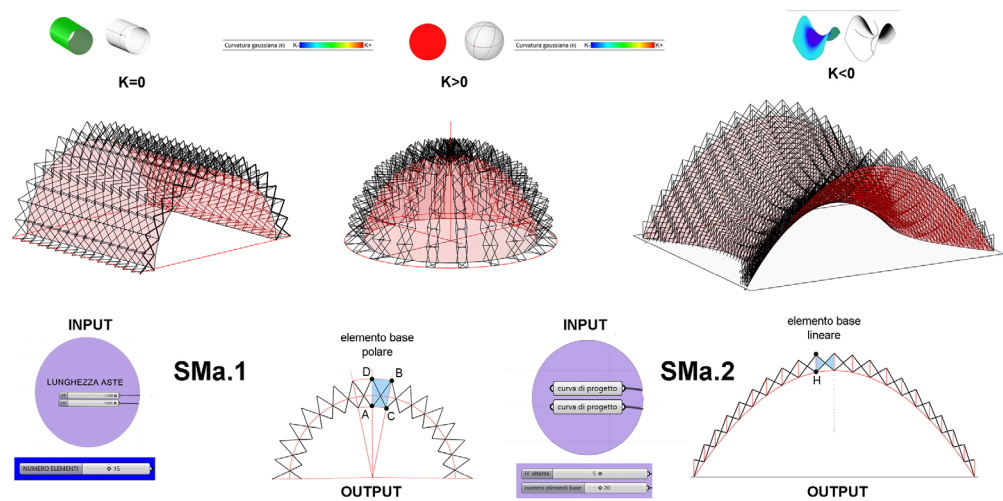


Fig. 12. SMA.1 e SMA.2 testing activity. Kinetic systems generation composed of deployable plane elements. Ideal reference surfaces with zero, negative and positive Gaussian curvature.

## Conclusion and future development of research

As part of the research on applied geometry for the representation and simulation of the mechanisms of motion and possible applications is underway an experiment that is part of an international agreement with University of Naples Federico II (UNINA) and Universidade Federal da Paraiba (UFPB), LAM (Laboratorio di Architettura e Modellistica - UNINA) and LMP (Modeling and Prototyping - UFPB).

The experimentation foresees the use of the parametric tool defined by us for the design of kinetic systems and the realization of the relative prototypes within four categories that involve different possible scales of intervention with which it will be necessary to measure: design (furniture, urban furniture...), temporary structures (pavilions, emergency structures...), systems for architecture (facade systems, intelligent false ceilings...) and artistic installations (useless machines, incubators of cultural messages...).

During this testing activity, the tool will be implemented and/or modified in order to respond in a more adequate way to the problems and needs that will be defined in relation to the development of the projects.

## References

- Arnouts, L.I.W., et al. (2019). Computational Design of Bistable Deployable Scissor Structures: Trends and Challenges. In *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, n. 199, pp. 19-34.
- Asefi, M., Aram, S. (2018). Flexibility in Architecture: An Innovative Design for Covering of a Transformable Dome Using Kinetic Elements. In *Space Ontology International Journal*, n. 4, pp. 41-52.
- Beatini, V. (2011). *Cinemorformismi. Meccanismi che definiscono lo spazio architettonico*. Tesi di dottorato di ricerca in Forme e Strutture dell'Architettura, relatore/tutor prof. G. Royer Carfagni. Università degli Studi di Parma.
- De Temmerman, N. (2007). *Design and Analysis of Deployable Bar Structures for Mobile Architectural Applications*. Tesi di dottorato di ricerca, relatore/tutor prof. M. Mollaert. Libera Università di Bruxelles.
- Fabrisio, O., López, A. (2020). *Diseño paramétrico de las estructuras desplegables: control límite de Movimiento*. Tesi di dottorato di ricerca in Tecnologia dell'Architettura, dell'Edilizia e dell'Urbanistica, relatore/tutor arch. R. Sastre Sastre, correlatore/cotutor arch. X. Gimferrer Vilaplana. Università Politecnica della Catalogna.
- Friedman, N. (2011). *Investigation of highly flexible, deployable structures: review, modelling, control, experiments and application*. Tesi di dottorato di ricerca in Ingegneria Civile, relatore/tutor prof. G. Farkas, correlatore/cotutor prof. A. Ibrahimbegovic. Università di Tecnologia ed Economia di Budapest, Università di Tecnologia di Compiègne.
- Hanaor, A., Levy, R. (2001). Evaluations of Deployable Structures for Space Enclosures. In *International Journal of Space Structures*, n. 16, pp. 211-229
- Munari, B. (1942). *Le Macchine inutili*. Torino: Einaudi.
- Nebuloni, A. (2020). Il fattore tempo nel progetto delle architetture adattive. In *Tempo e Architettura*, n. 20, pp. 98-105.
- Rodriguez, C. (2011). Morphological Principles of Current Kinetic Architectural Structures. In *Adaptive Architecture*, pp. 1-12.
- Schumacher, P. (1996). The Architecture of Movement. In *Arch+*, n. 134/135, pp. 56-58 <[https://www.researchgate.net/publication/336233684\\_The\\_Architecture\\_of\\_Movement\\_Transformable\\_Structures\\_and\\_Spaces](https://www.researchgate.net/publication/336233684_The_Architecture_of_Movement_Transformable_Structures_and_Spaces)> (consultato il 28 febbraio 2022).
- Stevenson, C. (2011). *Morphological principles: current kinetic architectural structures*. Proceedings of the International Adaptive Architecture Conference.
- Wang, CY., Hou, JH. (2018). Analysis and applications of theo jansen's linkage Mechanism: Theo Jansen's linkage mechanism on kinetic architecture. In Alhadidi, S., et al. (a cura di). *CAADRIA 2018 - 23rd International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia: Learning, Prototyping and Adapting*. Pechino, Cina, 17-19 maggio 2018, vol. 2, pp. 359-368. The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA).
- Zellner, P. (1999). *Hybrid space: new forms in digital architecture*. London: Thames & Hudson.
- Zuk, W., Clark, R. (1970). *Kinetic Architecture*. New York: Van Nostrand Reinhold.

## Authors

Mara Capone, UNINA, Università degli Studi di Napoli Federico II, mara.capone@unina.it  
Angela Cicala, UNINA, Università degli Studi di Napoli Federico II, angela.cicala@unina.it

To cite this chapter: Capone Mara, Cicala Angela (2022). Dalle "macchine inutili" alle "macchine utili". Algoritmi generativi per costruire le geometrie della trasformazione/From "useless machines" to "useful machines": Generative algorithms to build transformation geometries. In Battini C., Bistagnino E. (a cura di). *Dialoghi. Visioni e visualità. Testimoniare Comunicare Sperimentare. Atti del 43° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Dialogues. Visions and visuality. Witnessing Communicating Experimenting. Proceedings of the 43rd International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 2199-2220.