

國立交通大學
建築研究所
碩士論文



基於張拉整體結構探討動態性結構
Tensegrity as Exploration into Dynamic Structure

研究生：蘇薇晨
指導教授：許倍銜

中華民國一百零二年七月

摘要

可動建築中大致可分為永久性建築與臨時性輕型構築，其中較常應用在臨時性建築的張拉整體(Tensegrity)結構發展非常有限，較多以巨型雕塑品或戶外空間公共藝術的方式存在，其輕量性(Lightness)與變化性(Morphing)的優勢少被應用，本研究針對其臨時性、可動性做深入探討，以張拉整體結構的連接方式及可動性為發想，提出多種結構型態在動態上的探討，並提出可模組化的優勢型態，預期未來可在建築皮層或臨時性輕型構築方面做應用。

本研究藉由探討張拉整體結構的組接方式，發展出最終型態的可動結構，符合其輕量性與變化性的優勢，發展出最佳化的型態。結構考慮張拉結構原本的自應力、自平衡性特點，深入討論變動性的活動範圍、活動向度，對動態結構所需的組構方式進行設計，改變原本變動範圍非常有限的張拉整體結構模式，使最後的型態能有全面性的型變或位移的可能。最後與記憶合金做結合，把張拉整體結構中具有伸縮性的繩索構造(cables)替換成記憶合金，觀察記憶合金在大形結構中的驅動狀況。

本研究發展的最後結構在型態上的變化，相較於張拉整體結構明顯增加許多，可動範圍增大，降低整體型態在變動時的破壞性。單一個體可在水平、垂直方向連續相接、無限連接，可依需求調整多寡，達到可模組化的功能。不同於張拉整體結構以往使用在巨型雕塑品，本文發展的型態具有高度柔軟性、可塑性佳，但欠缺自體支撐力，在應用上需要外力介入輔助支撐，例如吊掛、懸掛方式使用時需要固定在依附架構上，類似建築皮層的概念，藉由不同伸縮桿件的使用與感應器的結合，可做出比張拉整體結構在以往使用上更多元的表現方式，在控制型變上更加便利。

關鍵字：張拉整體結構(Tensegrity)、模組化、動態性、記憶合金

ABSTRACT

Kinetic architecture can be divided into permanent architecture and temporary light fabrication. Development of tensegrity architecture which often used in temporary architecture is very limited, and majority of the architecture was expressed by massive sculptures or outdoor public art. Its advantages of lightness and morphing are less applied to the architecture. Temporary and morphing are investigated in this study, which we make a variety of discussions in kinetic tensegrity architecture and made the best available module. Expected the module can be apply to architecture skin or temporary light fabrication in the future.

In the study we discuss different combination method. The final kinetic structure of the research has the advantages of lightness and morphing, in the end we made the best available module. The module has to consider the self-stress and self-balancing feature in tensegrity module, also consider the variability range of activities and motion vector.

In the last chapter, The final kinetic structure combine with memory alloy, the parts of the stretchable cables of the final struture replace memory alloy, and observed that how the memory alloy drive in large kinectic structure system .

In this study, the morphing of final structure is more variable, broader moveable range than tensegrity architecture and reducing the deformation damage. A single structure can be combined infinitely with each other in horizontal or vertical, then modular function is achieved by different conditions. Different with the giant sculpture used in tensegrity architecture, our research is highly flexible and good at plasticity. Because it is short of self-supporting, structure applications need other outside-supporting as being fixed in attachment structure by hanging or suspension. Like concept of architecture skin, which by different usage of telescopic rod and sensor combination, it shows more diverse than traditional tensegrity architecture and more convenient in controlling deformation.

Key word: Tensegrity, module, Kinetic , memory alloy

謝誌

謝謝在這兩年中，所有陪我走過的每一位。謝謝。

特別感謝：

謝謝我的指導教授—許倍銜老師。因為老師的指導，讓我見識到研究的深度與廣博，得以踏進學術的領域；老師適時的指點，讓我可以自由發展而不致偏離主旨；老師的信任，讓我得以盡興完成這本論文。

謝謝數位組的侯君昊老師以及設計組的龔書章老師、曾成德老師。在建築所的這兩年，因為每位老師擅長的領域不同、理念不同，使我接收到各方的資訊也學到用各種不同的角度思考，每一次的講座、評圖都是非常寶貴、難得的經驗。

謝謝組上的同班同學、學長姐、學弟妹、還有所上的同學們。每位同學都不吝分享個人想法，給予不同的角度、不同的做法，點點滴滴的交流都成為這本論文的養分。當然還有每一次喝酒喝到掛的解脫。

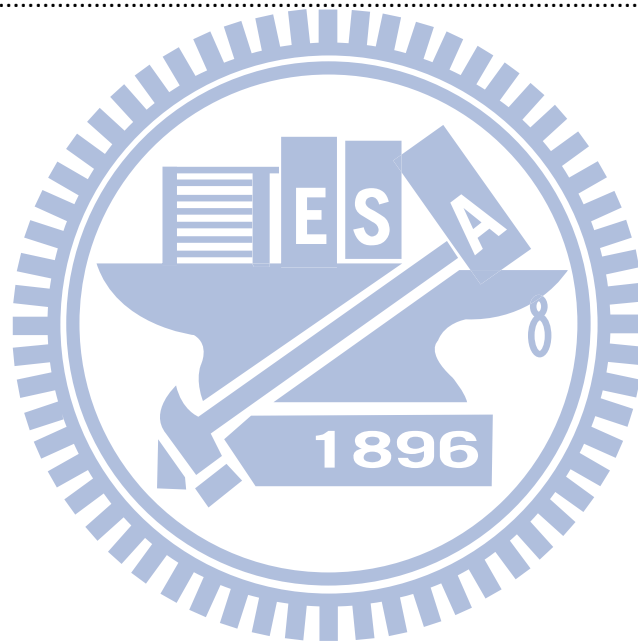
謝謝我的家人。家人的支持、陪伴，給予我繼續前進的動力。



目錄

摘要.....	i
ABSTRACT.....	ii
謝誌.....	iii
目錄.....	iv
圖表目錄.....	vi
第一章 導論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究背景.....	2
1.2-1 張拉整體結構的模組化設計.....	3
1.2-2 電腦運算輔助設計.....	3
1.2-3 以「動態性」來討論張拉整體結構系統型態.....	4
1.3 研究議題.....	5
1.4 研究方法與範疇.....	5
第二章 文獻探討.....	7
2.1 張拉整體結構(Tensegrity)定義與討論範疇.....	7
2.1-1 張拉整體結構(Tensegrity)簡述與定義.....	7
2.1-2 張拉整體結構(Tensegrity)跟自然界的關係.....	9
2.1-3 張拉整體結構(Tensegrity)在藝術上的應用.....	10
2.1-4 張拉整體結構(Tensegrity)在建築上的應用.....	12
2.2 國內外研究現狀和發展動態.....	12
2.2-1 目前使用張拉結構系統的節能屋案例.....	14
2.2-2 Double Layer Tensegrity Grids.....	16
2.2-3 記憶合金驅動的單塔狀張拉整體結構.....	16
2.3 張拉整體結構(Tensegrity) 單元與幾何模型.....	17
2.3-1 張拉整體結構(Tensegrity)單元.....	17
第三章 實作與實驗階段—張拉整體單元在動態性的發展過程.....	19
3.1 各種棱柱體簡單型單元體實作與觀察.....	19
3.1.1 簡單型張拉整體單元.....	20
3.1.2 實驗與觀察結論並決定其後發展原型單體.....	21
3.1.3 以 grasshopper 下的 kangaroo 外掛來模擬 3-struts 張拉整體系統.....	27
3.2 (3-struts) 張拉整體結構單元矩陣延展.....	30
3.2.1 型態一.....	30
3.2.2 型態二.....	33
3.2.3 型態三.....	35
3.2.4 型態四.....	39

3.2.5 原型單體各種矩陣形結論	43
第四章 以多種材料應用在張拉整體結構原型操作	45
4.1 以彈簧應用於張拉整體結構	46
4.1.1 以記憶金屬應用於張拉整體結構	46
4.2 10*10 矩陣張拉整體系統 - 以彈簧取代部分張拉結構系統	49
4.2.2 8*8 矩陣張拉整體系統 - 以記憶合金取代部分張拉結構系統	56
4.3 張拉整體結構(Tensegrity)在建築皮層的應用初探	67
第五章 結論	68
議題討論-動態設計的範疇	68
研究成果	69
研究限制	70
後續研究	71
參考文獻	72



圖表目錄

圖表 1 可動建築的概略型式	1
圖表 2 TENSEGRITY 常見的型式，左為環狀結構，中為單塔狀結構，右為球型結構	1
圖表 3 以張拉整體結構的複雜型態顯示其趨向集中狀態的示意圖	2
圖表 4 不同材料使用在不同領域的張拉整體結構	2
圖表 5 本論文研究流程圖	6
圖表 6 1974 年 KENNETH SNELSON 在柏林的施工過程	8
圖表 7 人類骨骼與肌肉運動與張拉結構的關係	9
圖表 8 貓骨骼與肌肉運動與張拉結構的關係	9
圖表 9 蜘蛛絲與張拉結構的關係	10
圖表 10 TENSEGRITY SCULPTURE BUILT IN 1974 BY KENNETH SNELSON	10
圖表 11 斯耐爾森在巨型雕塑作品的發展	11
圖表 12 富勒穹頂	13
圖表 13 K.SNELSON, 2002-03, 以三棱柱張拉整體單元連續組接	14
圖表 14 PRAIRIE HOUSE—HOUSE FOR A FASHION PATTERNS MAKER AND FIBER ARTIST	15
圖表 15 DOUBLE LAYER TENSEGRITY GRIDS	16
圖表 16 STRUCTURED CREATURE BY YOSUKE USHIGOME .	16
圖表 17 簡單型多面體張拉整體單元	18
圖表 18 實作之張拉系統中的桅杆結構	19
圖表 19 實作模型之桅杆尺寸與桅杆尺寸誤差值示意圖	19
圖表 20 以三面體張拉整體結構示意其應力情形	20
圖表 21 實作模型之桅杆結構與繩索結構接合方式	20
圖表 22 實作模型三、四、五、六、七、八棱柱體，其各單元的可動度、可動範圍示意圖	21
圖表 23 三棱柱體繩索與桅杆數學關係式與結構關係關係	22
圖表 24 單元體與單元體相接方式的十種關係	24
圖表 25 單元體與單元體相接方式的十種關係	25
圖表 26 單元體與單元體相接方式的十種關係之圖表討論	26
圖表 27 GRASSHOPPER 運算器連接方式與結果	27
圖表 28 KANGAZOO 中固定 UNARYFORCE 以及 STIFFNESS, REST LENGTH 的變化圖	28
圖表 29 KANGAZOO 中固定 REST LENGTH 以及 STIFFNESS, UNRAYFORCE 的變化圖	29
圖表 30 KANGAZOO 中固定 REST LENGTH 以及 URAYFORCE, STIFFNESS 的變化圖	29
圖表 31 三棱柱體最佳的相接方式	31
圖表 32 型態一實體模型	31
圖表 33 型態一，以最佳相接方式擴展後的上視圖、立面圖、透視圖	32

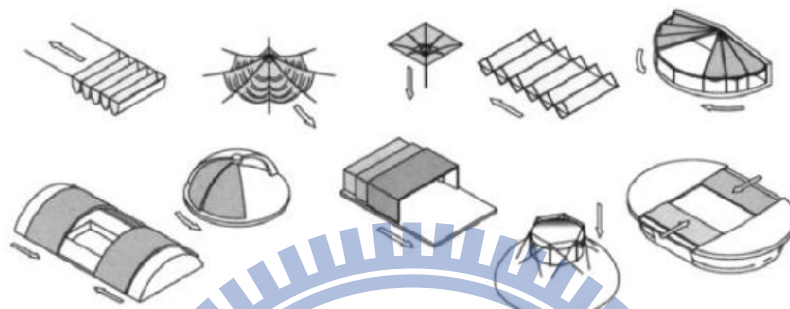
圖表 34	型態二實作模型	33
圖表 35	型態二，擴展後的上視圖、立面圖、透視圖	34
圖表 36	型態二轉變到型態三的過程示意圖	35
圖表 37	型態三模型實做過程(一)	35
圖表 38	型態三模型實做過程(二)	36
圖表 39	型態三模型實做過程(三)	36
圖表 40	型態三模型實做過程(四)	36
圖表 41	型態三矩陣排列後的上視圖、前視圖、透視圖	38
圖表 42	型態三轉變到型態四的過程示意圖	39
圖表 43	型態四模型實做過程(一)	40
圖表 44	型態四模型實做過程(二)	40
圖表 45	型態四模型實做過程(三)	41
圖表 46	型態四模型實做過程(四)	41
圖表 47	型態四矩陣排列後的上視圖、前視圖、透視圖	42
圖表 48	型態四前視圖	43
圖表 49	型態一透視圖	43
圖表 50	型態二	44
圖表 51	以彈簧應用於單塔型張拉整體結構	46
圖表 52	以記憶合金應用於三稜柱體張拉整體結構	47
圖表 53	10*10 矩陣張拉整體系統 - 以彈簧取代部分張拉結構系統的原型製作	49
圖表 54	10*10 彈簧矩陣張拉整體系統原型製作	50
圖表 55	10*10 彈簧矩陣張拉整體系統各種型態	51
圖表 56	10*10 彈簧矩陣張拉整體系統各種型態	52
圖表 57	10*10 彈簧矩陣張拉整體系統各種型態	53
圖表 58	10*10 彈簧矩陣張拉整體系統各種型態	54
圖表 59	10*10 彈簧矩陣張拉整體系統各種型態	55
圖表 60	以記憶合金取代部分張拉結構系統之單塔測試	56
圖表 61	8*8 記憶合金矩陣張拉整體結構系統 上正、下反兩面	57
圖表 62	8*8 記憶合金矩陣張拉整體結構系統 測試系統	58
圖表 63	單元體通電測試(一)	59
圖表 64	單元體通電測試(二)	59
圖表 65	單元體通電測試(三)	60
圖表 66	相鄰兩個單元體同時通電實驗(一)	60
圖表 67	相鄰兩個單元體同時通電實驗(二)	61
圖表 68	以單塔結構為單元做通電實驗一秒計分隔圖	62
圖表 69	記憶合金通電後的周圍變化	63
圖表 70	記憶合金通電後的周圍變化(立面圖)	63
圖表 71	以塔型結構為單位通電實驗(一)	64

圖表 72	以塔型結構為單位通電實驗(二)	64
圖表 73	以塔型結構為單位通電實驗(三)	64
圖表 74	以塔型結構為單位通電實驗(四)	65
圖表 75	以塔型結構為單位通電實驗(五)	65
圖表 76	以塔型結構為單位通電實驗(六)	65
圖表 77	以塔型結構為單位通電實驗(七)	66
圖表 78	以塔型結構為單位通電實驗—最後型態	66



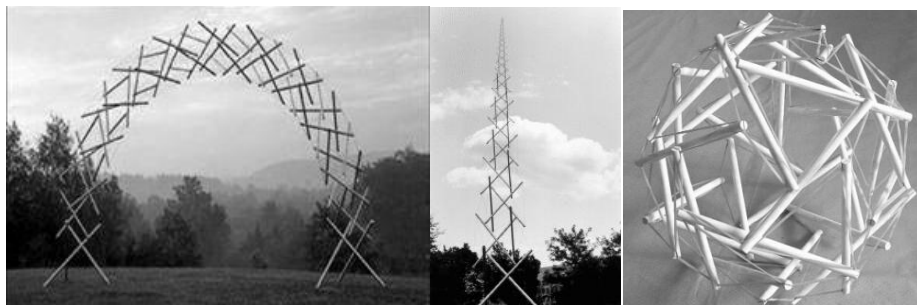
第一章 導論

1.1 研究動機



圖表 1 可動建築的概略型式

建築為什麼要動？從仿生建築來看，建築界從仿生學取材應用，從自然界生物體的功能與作用機制，尋找技術解決之道，仿生建築的極致應用，就是一個有機的動態結構。(鄭泰昇，2011)可動建築至今已經發展出許多型式，個體基本元件的動作方式可包含：旋轉、滑動、扭轉、曲直、伸縮等幾種，產生出多元動態樣貌：移動、伸展、波伏、開闔等幾類，可動建築中大致可分為永久性建築與臨時性的遮蔽棚架，永久性建築具有堅固的結構體或支撐，臨時性建築則強調其及時性的拆卸、方便運送。其中張拉整體(Tensegrity)結構[1]在建築上的使用非常有限，多半發展成巨型雕塑品，其輕量性(Lightness)與變化性(Morphing)少被應用於建築上，本研究針對其臨時性、可動性做深入探討以張拉整體結構的連接方式及可動性為發想，提出多種結構型態在動態上的探討並提出可模組的最佳狀態。

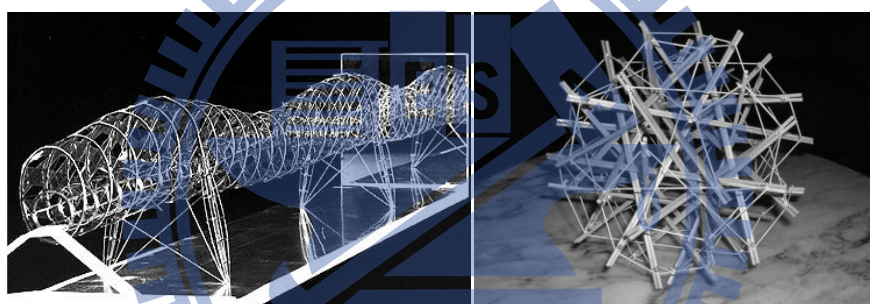


圖表 2 Tensegrity 常見的型式，左為環狀結構，中為單塔狀結構，右為球型結構

[1] 「張拉整體」一詞由巴克敏斯特·富勒在 20 世紀 60 年代創造，用以描述「張拉整體式結構」。張拉整體 (Tensegrity) 是一種基於在連續張力網路內部應用受壓構建的結構原理。其中，受壓構件之間並不接觸，而預先張拉的構件構成了空間外形，關於詳盡的介紹請參閱本文第二章第一節。

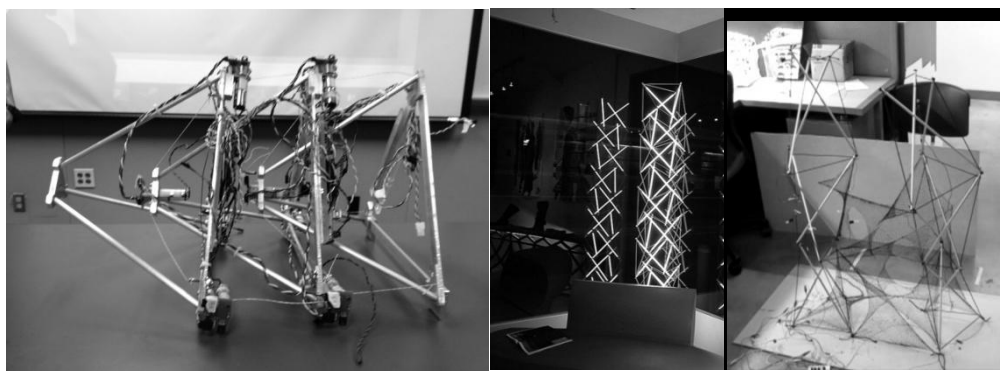
以張拉整體結構在型構上的應用，其藝術性已經發展出許多幾何型、變化形，也在世界各地展示出許多大型藝術品，但從「構築性」來檢視張拉整體結構，其「構築方法」及「構築機制」角度而言，其輕質性(Lightness)與變化性(Morphing)運用在建築上的例子非常有限。張拉結構相較於其它建築結構的優勢在於其架構的輕質性與可變動性，目前的技術已將其使用在對自然環境的改變，光、熱、降雨...等，但是變動的方式都從建築物的開口來討論，並未較深入討論其變動性與臨時性的議題，而且未針對動態結構所需的組構方式進行設計，因此所變動的範圍非常有限，難有整體結構位移的可能性。

假若達到整體位移的可能，在空間圍塑的議題上，增加邊界的動態性，造成更多空間屬性可能，空間的使用也將更多元。由於拉張結構整體模組的自應力、自平衡特性，可以將製作完成的模組體獨立運至工地在所要位置進行現場拼裝是它的優點，考慮運送過程的外力磨損、搖晃會造成破壞，因此，張拉整體結構的穩定狀態通常都趨向於集中形態，不易有單邊較突出可作為延伸或變型的連接面，以單元存在的形式居多，本研究將挑戰突破這樣的穩定性並重新組成一曲面。



圖表 3 以張拉整體結構的複雜型態顯示其趨向集中狀態的示意圖

1.2 研究背景



圖表 4 不同材料使用在不同領域的張拉整體結構

張拉整體結構的發展已多年，所使用的材料也日趨多元，圖表四左圖以張拉整體結構為基礎發展的機器人，中圖以燈管為結構做出的張拉整體結構藝術雕塑，右圖為筆型空壓桿為結構做出的張拉結構作品。以上三個案例皆混合不同材料，以簡單幾何型張拉整體結構出發，在型體上稍作變化，保留張拉整體可變動的優勢在各領域發展。本研究在這些多元作品基礎上，也以簡單幾何型張拉整體結構出發，以不同的材料如彈簧、記憶合金的應用；以不同的組合方式，改變標準正多稜柱型，在可動範圍、可動性上做突破。

1.2-1 張拉整體結構的模組化設計

張拉整體結構設計最大的問題在於，由於系統中外力的引入，整體會產生較大的型變、位移，為了預防外力對於本體的型變超出結構的承受範圍，而使結構永久變形、破壞，必須預先估計到所有可能發生的位移，並且增加型變範圍以降低永久破壞的發生。在模型體自由的狀況下，所有外力的引入以及支撐材的剛強度、繩索的彈性係數彈性限度等都是變因，在綜合許多變因的影響下，預估其整體結構的變型型態與各個節點的位移狀況是個複雜的過程。本文希望藉由電腦輔助運算，在建模時給予各種變因，透過電腦計算，預先模擬可能發生的型變，在實體建模時考慮媒材的選用，降低永久破壞的發生。

不規則、複雜性高的張拉整體結構在受力的狀況下，其型變趨勢更加難以預測，本文試以正多邊形張拉整體結構作為單元體依據，期望單元體的型態可規則性的排列，可延展為可多方使用的結構基礎。得到期望的單元後，接著討論其組構方式，組構方式的不同影響拼裝完成後整體的變動性、位移範圍，位移範圍的增大可增加使用的多元性，從建築開口的變化轉而影響建築邊界界定的方式與意義。

1.2-2 電腦運算輔助設計

電腦輔助繪圖設計系統(CAD)、電腦輔助製造系統(CAM)及電腦輔助分析(CAE)技術之結合，不僅可使自動化邁向更高階的領域，增加設計產品的分析能力，更造成一般新興工業型態，使產品設計與製造整合技術更加快速，加上近年來 RP 快速原型機與 RT 快速模具(Rapid Prototyping, Rapid Tolling)技術的廣泛使用，產品經設計後，製造的及時性已逐步落實。

反觀建築設計上電腦輔助繪圖的廣度與精度有過之而無不及，不論是面架構塑型方式或實體塑型方式，都是真正塑造一個模型，這個模型可由各個視角去觀測，實際量測幾何資料，甚至計算物理特性。由於有實際的模型資料存在，後續可將這些模型資料轉至

CAM 軟體作 CNC 加工設計、或轉至 CAE 軟體作有限元素分析、轉至彩現軟體作材質模擬、光影模擬之產品造形設計。

從模擬建模到實體建造過程往往涉及電腦運算及 3D 建模工具的輔助，目前所知工程力學輔助運算軟體運用較普遍的為 ANSYS 有限元素分析軟體，可用來分析與力學，熱傳及電磁學相關的工程問題，包括靜態分析，動態分析，非線性分析等等，可應用於航太及國防工業、汽機車及運輸器材工業、機械工業、資訊及家電工業等等。但這樣的軟體在運用上必須非常精準的輸入使用材料的性質、彈性係數、抗壓強度等等，而且所需電腦資源較為龐大，一般都會有專門配給的設備在運行，一般個人電腦難以應付。

一般的 3D 建模軟體，SKETCH UP、3D max、Rhino，以單純的幾何形體建構，在完全不考慮力學的狀態下進行設計，進入工程階段時再以工程分析軟體輔助，但涉及彈性結構，如帳篷結構系統；或拉張平衡結構，如 Tensegrity 時，這類系統本身涉及應力平衡，如果在建模初期未考慮應力，實做將會有不如預期的嚴重誤差，整體的型變跟材料是否可以承受應力都是最直接的問題。本篇論文試以 Rhino 的外掛 Grasshopper，平台下的一套基於質子系統的物理模擬軟體 Kangaroo，用簡單的方式來模擬現實世界物理運動，不借助工程分析軟體輔助，試在彈性結構系統上，讓實作的結果趨近於預期型態的可能性。

1.2-3 以「動態性」來討論張拉整體結構系統型態

本文著重討論張拉整體結構的可動性，在可模組化的單元結構下，討論張拉整體結構在各種組構方式的可動性、可動範圍、可運動向度等等，發展出最合適的型態，使單元體與單元體的相互牽制力相對減小，增加可活動範圍，同時又必須滿足模組化所需的統一型態、統一組構方式，以及組合後的初始狀態的多元使用性。以「可動性」、「動態運動」作為依據檢視本文張拉整體結構，回顧「動態運動」、「動態邊界」在歷史的表現方式、以及動態邊界在藝術、建築上的討論，在第四章節以實體模型操作，實驗張拉整體結構在動態邊界議題上的可能性，檢視型變的滑順程度，並探討以張拉整體結構操作動態邊界議題時，其後應用在建築皮層或裝置藝術的可行性以及可應用範疇。

本文將以同一種張拉整體結構的單元矩陣型為主體，來展現建築因子多種組合的可能。展示其建築皮層或邊界主體的多面性，這一區到另一區的交界線，反映二者的態度，因此對二邊可能扮演不同角色，有雙重功能作用。亦或是可以將場所的特性轉換或導入到另一個場所，可以結合兩種不同性質的空間，將空間的特性和邊界結合在一起。

邊界的特質是空間場所形成的，也決定了空間的特性為何。邊界的型式影響場域的塑造，

進而影響人在場域中的感受，可動邊界可以多種形態存在，改變邊界語彙、也改變空間語彙，本論文以張拉整體結構的輕質性及可動性，基於此特性發展出可模組化、立即組裝拆卸的空間介面，以原型操作來討論張拉整體結構在動態邊界的可能。

1.3 研究議題

本研究有幾個必須克服的問題，一是以可取得的材料考量，整合各種材料組合成張拉整體結構，並且考慮人為實作誤差對模型的影響。此外，必須發展出特有的組構方式，考慮因素包括，連接方式是否牢固、單元間的緊密性是否可承載更多個其他單元、是否加其他桅杆結構(strut) 或繩索(cable) 當作單元間的連接結構等，發展出使張拉整體結構單元矩陣後，可彎曲、扭轉、伸縮的結構或方法，使其成一連續順暢的彎曲面。由於張拉整體結構模組的自應力、自平衡特性，可以將製作完成的模組結構體獨立運至工地在所位置進行現場拼裝是它的優點，考慮運送過程的外力磨損、搖晃會造成破壞，因此，拉張結構的穩定狀態通常都趨向於集中的形態，不易有單邊較突出可作為延伸或變型的連接面，本研究將挑戰突破這樣的穩定性並重新組成一曲面。

1.4 研究方法與範疇

本研究在討論彈性結構中的拉張結構 (Tensegrity)，從電腦輔助軟體建模到實體建模的過程中，採用較為個人化、簡易性的輔助軟體 Kangazoo (plug-in for Grasshopper)，透過運算變因對形體的變化量，對應到真實環境中，達到預期中的應力平衡型態。

●電腦輔助運算設計

—以 Kangazoo 基於質子系統的物理模擬外掛軟體，用簡單的方式來模擬現實世界物理運動，預知力量的分布與型態的走向，減少實體建模的錯誤。

—探討工程分析軟體 ANSYS 與 3D 建模軟體 Rhinoceros 的外掛 Kangazoo (plug-in for Grasshopper),

●構材模組

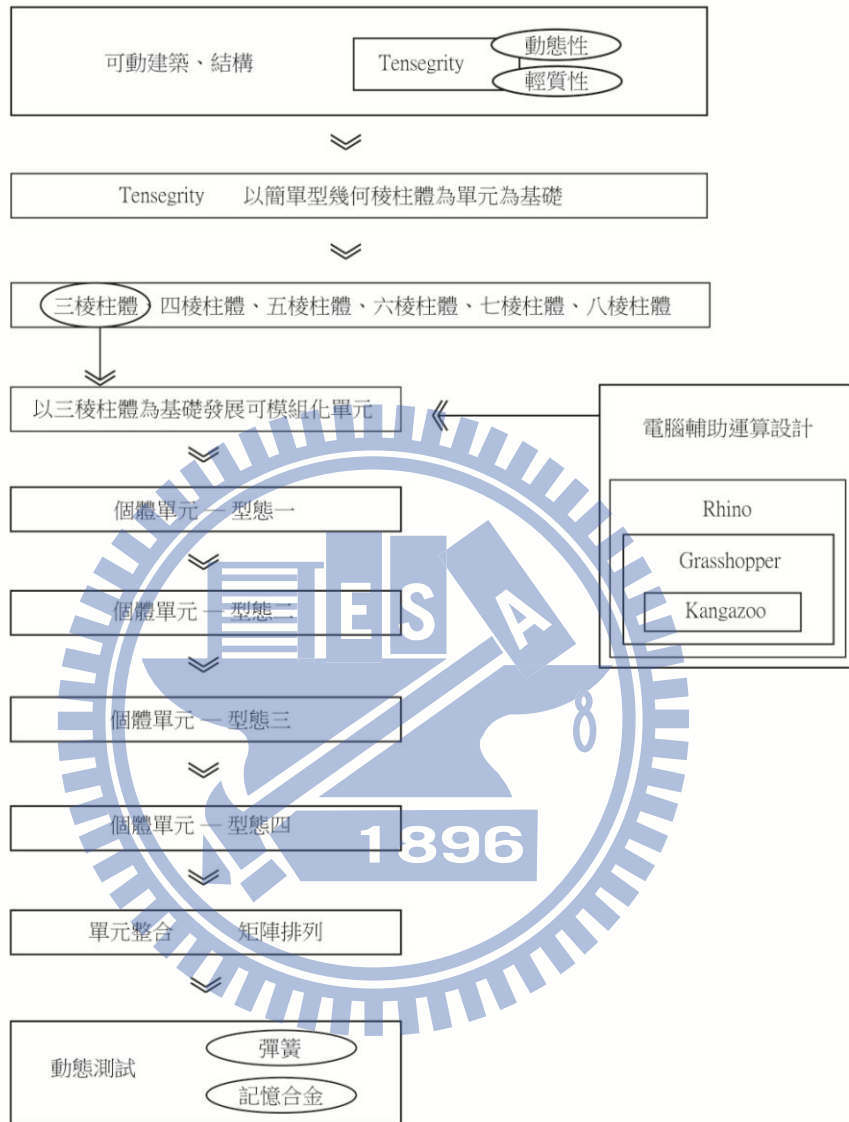
—探討拉張結構系統的方向性、及其衍生的組構方法。

—實驗材料的可適性，開發可適用的拉張原型。

●原型演作

—系統原型實作，並以對照組做比較，驗證本研究論述。

—藉由實驗性原型系統的演作，討論拉張結構(Tensegrity)系統的相關面向，包括設計議題、材質特性、強度、連接點設計、轉彎處結構設計等。



圖表 5 本論文研究流程圖

第二章 文獻探討

本章節探討張拉整體結構(Tensegrity)的領域與定義，以及到目前的代表性作品與發展過程。

2.1 張拉整體結構(Tensegrity)定義與討論範疇

20 世紀 40 年代，美國的發明家，結構工程師，建築大師巴克明斯特·富勒(Richard Buckminster Fuller)從一些自然現象中得到啟發(張拉整體結構與自然界的現象的關係請參閱本文 2.1.2)，推斷出宇宙中存在著一種叫做張拉整體的自然規律。這些自然現象包括：物氣球在氣體分子不停運動下自動撐開；魚網在魚的前後跳動或在內部壓桿之稱作用下張開；浩瀚的海洋中獨立存在著諸多孤島等等。富勒把這些現象歸結為：在連續張拉(Tensile)作用下形成的統一整體(Integrity)及連續張拉+統一整體=拉張整體 (Tensile+ Integrity=Tensegrity)，因此他將這類結構定義為張拉整體結構。

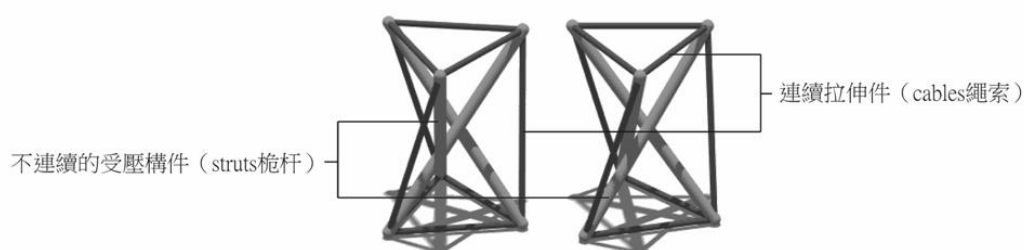
張拉整體作為一種客觀的存在，在其結構體系的發展歷史上曾出現過許多名稱，如自應力網絡、浮動受壓體系、臨界或超臨界體系等。這些名稱的不同主要由於研究者的出發點不同，有的從幾何學角度考慮，有的著重於拓樸原理，有的則剛強了力學特性。

2.1-1 張拉整體結構(Tensegrity)簡述與定義

張拉整體結構(Tensegrity)結構是由張力體系和懸浮在張力體系中的孤力受壓單體共同組成。根據者富勒(1975)給出的定義，一個張拉整體結構是由連續拉伸件(cables 繩索)和不連續的受壓構件(struts 桅杆)所構成。

構成規則主要有二：

- 〈1〉結構只能由受壓構件、受拉構件組成
- 〈2〉受壓單體之間不能互相直接連結



定義中的連續拉伸件（cables 繩索）和不連續的受壓構件（struts 桅杆）容易造成字面上的混淆，不連續受壓構件指的是在整個張拉整體構件的力傳導場域中，每段桅杆結構皆為分開個體；而連續的拉伸件容易誤解成張拉整體場域中所有的繩索結構皆由同一條線段所串連起來，但實際上 Kenneth Snelson 在 1974 年的柏林展場案中，清楚的呈現施工過程，每段繩索、桅杆、接頭都是分開個體，經由接頭連串起來。

After all the parts have been measured and cut and the drawings, photographs, papers and lists made, the creates are built, the container filled, the boat sails, and here I am, in Berlin, ready to put the sculpture together for the first time anywhere. (取自 KENNETH SNELSON forces made visible 2009)

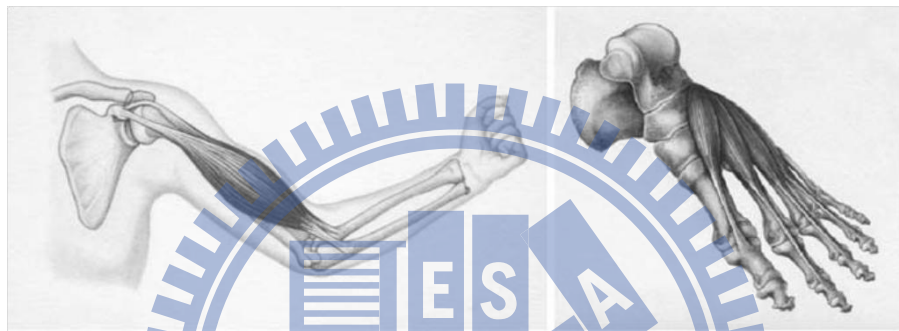
由此可推斷富勒（1975）給出的定義中，連續拉伸件所指的可能是型態上的連續，需要接頭來連串各段繩索，力量的傳導可連續而不間斷。



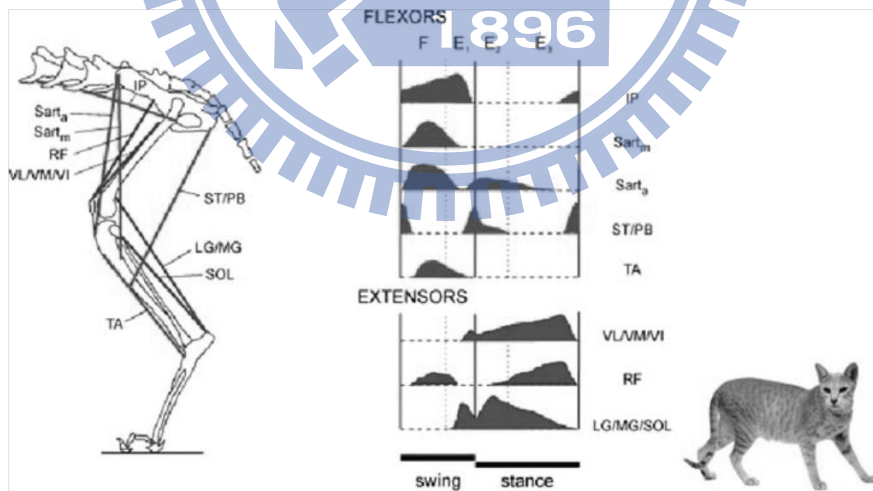
圖表 6 1974 年 Kenneth Snelson 在柏林的施工過程

2.1-2 張拉整體結構(Tensegrity)跟自然界的關係

D'Arcy W. Thompson 說：「大自然的的一切型體都可以用幾何方式來解釋。」我們可以從自然界學習許多事物，但他也提醒，數學不能用來解釋任何物理系統，只能讓我們找到近似性質或用簡化的方式來描述物理系統。我們可以說的數學模型是真相的一理想化。動物和人的骨骼、肌腱特殊的連接方式可以順暢地控制運動。骨頭和肌腱連接的演化使動物的控制功能更加方便，這其中包括骨頭壓縮的承載能力，以及肌腱提供一個穩定狀態所需的壓力。



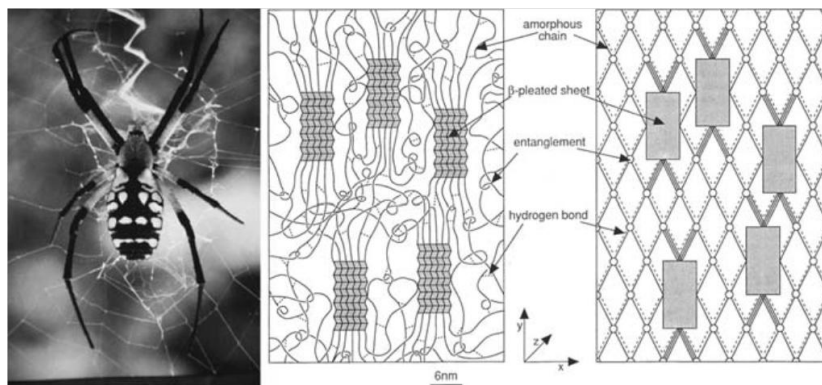
圖表 7 人類骨骼與肌肉運動與張拉結構的關係
(左圖) class 2 shoulder joint and class 3 elbow joint (右圖) class 2



圖表 8 貓骨骼與肌肉運動與張拉結構的關係

圖 5 顯示肌腱如何跟骨頭連接，以及肌腱如何控制它們來完成運動。肌腱(肌肉運動的致動器) 連接肱骨骨手臂的前臂尺骨和橈骨，這三塊骨頭相交於肘，因此我們將此歸類為一 3 根不具伸縮杆的張拉結構整體。任何不具伸縮的杆件(這裡是指骨頭的部分)的形

狀都是有功用的，右圖為一腳趾控制系統，可視為一 2 根不具伸縮杆的張拉結構整體。圖 6 是貓後腿的運動方式，右圖是時間和每個肌腱在步行所需的力量，其中包括屈肌腱（紅色）、伸肌腱（藍色）。

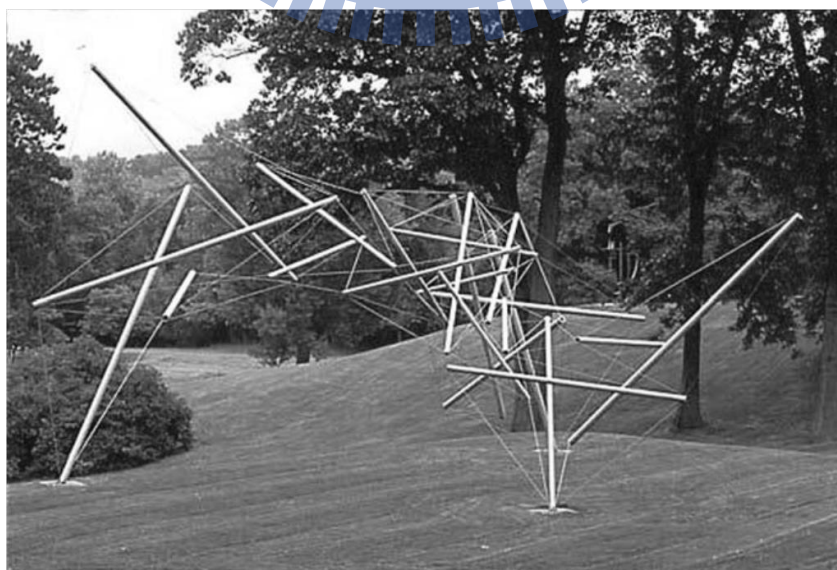


圖表 9 蜘蛛絲與張拉結構的關係

康奈爾大學的研究員林恩 Jelinski 和杜邦公司的 Y. Termonia 提出，蜘蛛絲是一個複雜的折疊蛋白物，主要由兩種氨基酸組成，甘氨酸和丙氨酸。丙氨酸依照兩種物質來排列(1) 矩形版（微小晶體中的分子版狀物），稱為 β -版，在圖 7 中的折疊片，和(2) 無定形鏈的拉伸網絡的材料，可以採取應變。矩形板在張拉整體結構上擔任不具伸縮的杆件 (rigid bodies)，無定形鏈在張拉整體結構上擔任可拉伸物(tensile members)， β -折疊片之間不接觸。

2.1-3 張拉整體結構(Tensegrity)在藝術上的應用

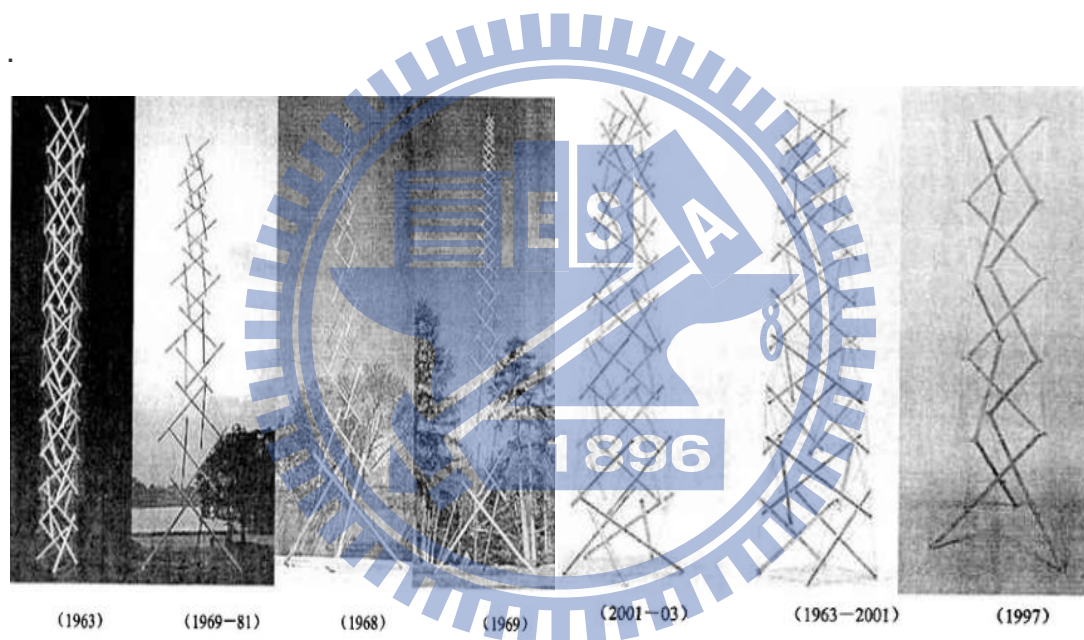
圖表 10 tensegrity sculpture built in 1974 by Kenneth Snelson



直線與簡單幾何型的美，早在西元前 355 年哲學家柏拉圖已經讚美過。這種形式的美出現在 **Kenneth Snelson** 的雕塑作品與 **Buckminster Fuller** 的建築上，張拉整體系統在藝術上的發展已經 50 多年，其中包括了建築作品，但由於沒有便利的工程分析工具和優化設計工程結構系統，技術的不足，阻止了藉由張拉結構發展的樸拓系統工程設計與施工設計替代品的發展。

張拉整體結構結合了藝術、科學、型式、功能，藝術家 **Kenneth Snelson** 自己也質疑張拉結構系統在任何功利價值或營利可能，藝術家的創造力和多元的創作概念影響了結構工程的發展卻沒有有效的分析工具輔助。

美籍數學家曼德布羅特(B.B.Mandelbort)提出，張拉結構系統可看成是一種數學上的分形理論(fractals)，分形是通過無限個自相似形分割空間或填充空間(通常是平面)，以類似的樸拓規則用有限的自相似型填充有限空間。



圖表 11 斯耐爾森在巨型雕塑作品的發展

斯耐爾森等人的張拉整體雕塑，帶有較多的藝術成分，其構成一般是不規則的。從結構本質上講，這些雕塑只有一種預應力狀態，即張拉一根索就可以給整個結構施加完預應力。在斯耐爾森的雕塑作品中，除了不規則造型的張拉整體藝術小品之外，規則的張拉整體塔結構也得到巨大的發展，如圖 7 所示。

斯耐爾森的張拉整體塔的雕塑作品的產生過程可以看做是張拉結構塔整體的發展過程。在圖 7 中從 1963~1969 年的四個作品都是簡單型的多稜柱單元張拉整體塔，1963~2001 年的作品為复合型張拉整體塔，而 1997 年的作品為簡化後的簡單型多稜柱張拉整體塔。

2.1-4 張拉整體結構(Tensegrity)在建築上的應用

建築上有益的發展：

隨著時代的演進人們對空間的需求也在改變，在土木工程，張拉整體重量比傳統結構上較輕的優勢是公認的，建築物可在有限的範圍改變空間的型式來符合使用者要求，在 **Prairie House** (請參閱本文 2.2.1 張拉結構系統的案例)已經做到，它可以隨著白天與夜晚不同來調節開闔以控制光照進體育場的量。甚至有些住宅的屋頂設計，可以控制曝光處是在起居室、陽台、或是廚房；陽台與起居室的隔牆可以隨著溼度、陽光、降雨自動縮放開闔；窗戶和屋頂的設計因應熱與空氣流動做應變變化，以減少空調的用量。

建築上預防災害的發展：

為了在劇烈的搖晃中或強風中生存，建築物必須要因應運動，就像人體的膝蓋和關節。建築物可變動的基礎(地基)可以有效減少地震發生時的損失。

2.2 國內外研究現狀和發展動態

張拉整體結構是指一類特定的索桿結構體系。對張拉整體結構早期的研究工作是由 **D.GEmmerich** 完成的，至今已持續發展 90 多年。在近期發表的文獻中，**D.GEmmerich** 報導了他首次觸及的張拉整體結構，他參照了俄國工程師所進行的研究，這些研究登載於 1929 年首次出版的由建築師 **Laszlo Moholy Nagy**、**Von Materier** 撰寫的著作中，這些著作在 1968 年再版。**L.M.Nagy** 還給出了 1921 年在莫斯科舉行的一個建築模型展覽會的兩幅照片，展示了一個“平衡結構”。在這次展覽會上 **Johassen** 展示了由 3 根剛性直杆、8 根索構成的模型，但是，該模型還不具有剛度，而且通過任意一根索的收縮都會使模型產生機構位移。因此該模型僅僅是張拉整體結構的“雛型”。這個新奇的結構已經非常接近由 3 根杆和 9 根所組成的自應力體系。

1947 年翰 1948 年的夏天，富勒在黑山學院(**Black Mountain College**)教學期間不斷重複張拉整體這個詞，他主張，自然界以連續張拉來固定相互獨立的受壓體，我們必須製造出這個原理的結構模型。令富勒高興的是，他的學生，著名的雕塑加斯耐爾森(**K.Snelson**)做出了答案，並把其發明交給了富勒。斯耐爾森的發明是由一把弦把 3 根獨立杆件拉緊在一起形成的穩定體。其後不久，斯耐爾森就把他的張拉整體結構模型用於雕塑中。斯

耐爾森的雕塑代表了現代張拉整體結構發展的開始。



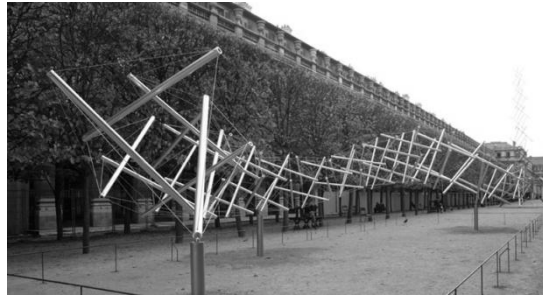
圖表 12 富勒穹頂

有關張拉整體結構最早的文獻是富勒在 1962 年申請的專利。在這項名為張拉整體的結構的專利中，富勒詳盡描述了他的結構思想，即：在結構中盡可能減少受壓狀態。因為受壓存在著屈曲現象，張拉結構整體使結構處於連續的張拉狀態，從而可以實現“壓桿的孤島存在於壓桿的海洋中”的設想，圖 10 所示為體現張拉結構整體思想的富勒穹頂。1963 年，埃墨瑞池在他的結構專利中給出了張拉整體的另一個定義：張拉整體結構由壓桿和索組成，其組合方式使壓桿在連續的索中處於孤立狀態，所有壓桿都必須嚴格地分開同時靠索的預應力連接起來，拉張結構整理不需要外部的支承和錨固，像一個自支承結構一樣穩定。

斯耐爾森等人的張拉整體雕塑，帶有較多的藝術成分，其構成一般是不規則的。從結構本質上講，這些雕塑只有一種預應力狀態，即張拉一根索就可以給整個結構施加完預應力。後來的研究對張拉結構分析後認為，從結構概念上按照力學分析的觀點可將張拉整體結構定義為：由一組互相獨立的受壓單元與一套連續的受壓單元相交構成的自應力、自平衡的空間鉸接網格結構體系。

在斯耐爾森的雕塑作品中，除了不規則造型的張拉整體藝術小品之外，規則的張拉整體塔結構也得到巨大的發展。

斯耐爾森的張拉整體塔的雕塑作品的產生過程可以看做是張拉結構塔整體的發展過程。在圖 9 中從 1963~1969 年的四個作品都是簡單型的多稜柱單元張拉整體塔，1963~2001 年的作品為复合型張拉整體塔，而 1997 年的作品為簡化後的簡單型多稜柱張拉整體塔。



圖表 13 K.Snclson, 2002-03, 以三棱柱張拉整體單元連續組接

2.2-1 目前使用張拉結構系統的節能屋案例

Prairie House—House for a Fashion Patterns Maker and Fiber Artist

草原之家是一個利用張拉結構驅動系統與新皮層覆蓋系統的住宅案，藉由可變動系統的調節，據估計，一年可減少一半以上的碳排放量，同時也是參數化建築設計之美的表現形式之一，可回應式建築隨著環境不同，改變其形式或顏色。

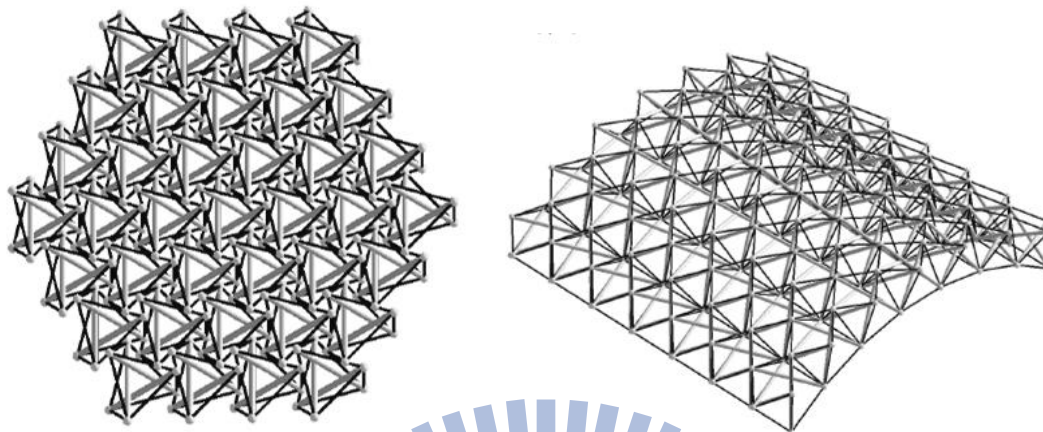
oframBFRA 主持建築師 Tristan d'Estree Sterk 利用記憶金屬構件與輕質金屬杆件、線材的空間結構組合，結合各種感測器感知不同環境變化來改變空間尺度和形式，如感測到人數增多而讓記憶金屬通電而收縮，進而使整個結構張開增加空間使用量，相較于絕大多數現代建築中的固定剛性結構系統，這樣的可變結構嘗試以動態地平衡張力與壓力之「肌肉與骨骼」柔性建築構架系統，同時達到結構的適應性(structural adaptability)、功能需求的即時性(on-demand performance)以及動態美學(kinetic aesthetics)的整體構築目標。

數學模擬結果顯示，在中西部的氣候下，藉由變換包覆皮層的顏色，從白色轉換成黑色，一年可節省 0.45% 的用電量。為了達到最大節省效能，室內包覆膜在溫暖季節必須使結構變輕，顏色變淡變白，而在寒冷季節時則轉為暗色並且緊閉其開口，在夏季時減少覆蓋膜的厚度，易於散熱，在冬季時厚度增加，節能保溫，據估計在溫度變動範圍 2 度~12 度的中西部，綜合每項節能系統的運作，每年最多可節省全年用電的 8.01%。



圖表 14 Prairie House—House for a Fashion Patterns Maker and Fiber Artist

2.2-2 Double Layer Tensegrity Grids



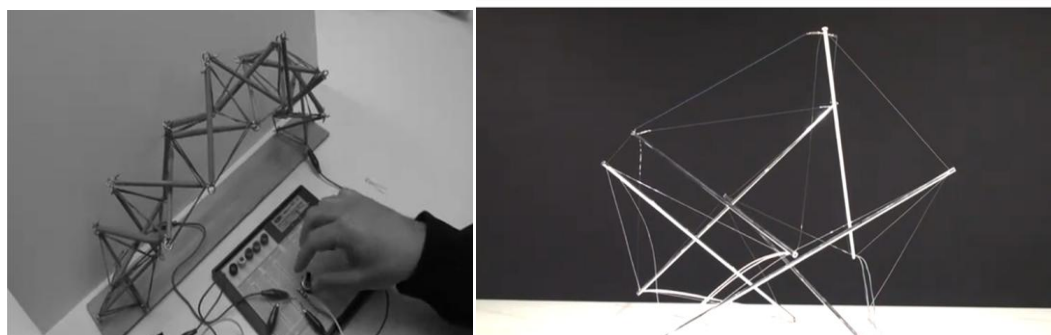
圖表 15 Double Layer Tensegrity Grids

斯洛伐克科希策技術大學(Technical University of Košice)在2012年發表的

Double Layer Tensegrity Grids 中提出基本三桅杆幾何型跟四桅杆幾何型自平衡狀態下的曲度問題，並提出三桅杆幾何型在自平衡時有一球型曲面，推演出數學公式，說明在球型座標中如何求得各個頂點的三維座標。在這篇發表中提出了Tensegrity Grids的概念，此概念相較於Tensegrity單元體，發展出以單一個體水平相接延展的型態，相接方式為水平擴展。本研究探討水平擴展的可動範圍與可動性，並發展垂直擴展的矩陣型態，並檢討單層水平接法與垂直向接法在動態性方面的不同。

(Tatiana Olejnikova,2012, Double Layer Tensegrity Grids)

2.2-3 記憶合金驅動的單塔狀張拉整體結構



圖表 16 Structured Creature by Yosuke Ushigome .

日本藝術家或國外建築學界人士，利用張拉整體結構可自體平衡伸縮的特性，把可伸縮的繩索結構用記憶合金代替，模擬互動式建築的原型動態，日本藝術家

Yosuke Ushigome 提出未來的互動建築，將涉及人體與有機體的層面。記憶合金以往的案例較多應用在單原體或塔狀結構，尚未有將記憶合金用在 tensegrity grids 或面狀、球狀等大形結構上，本研究將運用此技術跟 8*8 矩陣張拉整體結構結合，觀察記憶合金在大形結構中的驅動狀況。

2.3 張拉整體結構(Tensegrity) 單元與幾何模型

關於張拉整體塔從構行上的分類，可以從幾何學和型態學角度出發，張拉整體塔結構或結構中桅杆數量都是建立在多面體為單元的基礎上的。

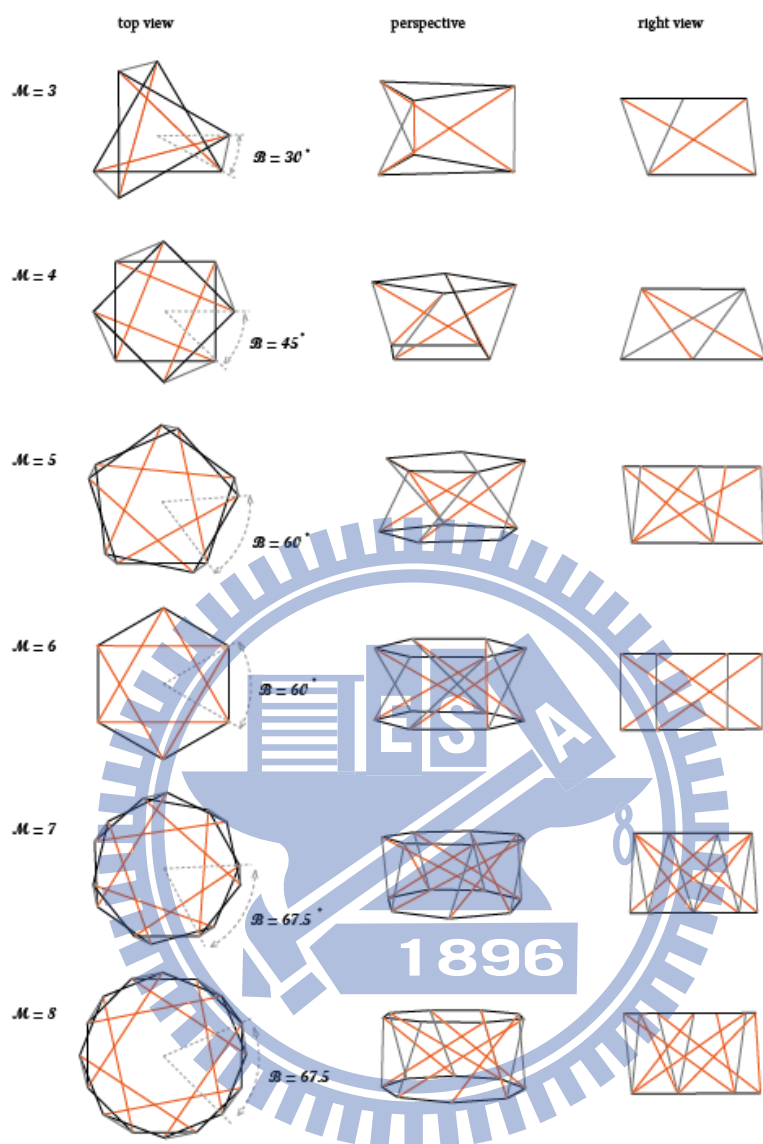
2.3-1 張拉整體結構(Tensegrity)單元

張拉整體結構(Tensegrity)在型態學和拓樸學上是複雜的結構體系，所以用一種有效的幾何方式來描述是非常重要的。各種類型的張拉整體結構(Tensegrity)都是由單元組裝起來的，這些單元可以是棱柱型單元、截棱錐型單元或各種多面體型的單元，這些單元與多面體之間有著密不可分的關係。

兩組多面體系列的規則正稜柱體和規則斜稜柱體是簡單對應的分類方法，可以和簡單型張拉整體單元之間建立起一一對應的關係。這兩組多面體有一共性，它們都是由兩個平行平面內的兩個完全相等的正多邊形的頂點相逢而成，不同的是，上下兩個多邊形完全重合還是上下相對轉動頂角的一半，正是這一特性，構成了他們組合成雙層或多層平版型空間結構的內在潛力。對應於邊數為 m 的多邊形系列，規則正稜柱體分別為：五面體(三稜)、六面體(四稜)、七面體(五稜)、八面體(六稜).....面數 $f=m+2$, $m \geq 3$ ；規則斜稜柱體分別為四面體(一稜)、八面體(三稜)、十面體(四稜)、十二面體(五稜).....面數 $f=2m+2$, $m \geq 1$ ，其中四面體為 $m=1$ 的特例，它正好是所有多面體中面數最少的多面體。

當稜作為壓杆時，規則正稜柱體組成的結構是不穩定的，在任何小擾動下都會變成斜稜柱體，因此規則正稜柱體不能作結構單元，簡單型張拉整體單元就只能來自於斜稜柱體，按照張拉整體結構的定義，一套連續的受拉單元體固定著一組相互獨立的壓杆，對於一個 m 邊形稜柱體，上下的 m 個邊均為拉索，兩個索多邊形靠 m 根壓杆和 m 根拉索連接起來，形成 m 邊稜柱的簡單型張拉整體單元體，簡稱 m 稜柱體。這樣，我們就稜柱行多面體和簡單形張拉整體單元之間建立起了一一對應關係，這種對應關係的關鍵在於稜柱形多面體的多邊形邊數，分別對應於簡單型張拉整體單元中的壓杆數、斜索數以及上下底面的索多邊形的邊數。例如，稜柱體的底面多邊形為四邊形時，對應的簡單形

張拉整體單元稱為張拉整體四棱柱單元體，簡稱四棱柱體。



圖表 17 簡單型多面體張拉整體單元

對應於 $m=3、4、5、6、7、8$ ，簡單型張拉整體單元如圖所示。按照壓杆的走向，圖中簡單體為左轉或稱逆時針，相應的，還有一組右轉或叫做順時針的張拉整體簡單體。與棱柱形張拉整體簡單體相似，還有一組截棱錐形張拉整體簡單體，截棱錐形簡單體可以通過改變棱柱形簡單體的上下底面的相對大小而獲得。

m 邊形的截棱錐簡單型張拉整體單元體稱為 m 棱錐體。同樣， m 邊的截棱錐張拉整體簡單體也由 m 根壓杆及 m 個斜索連接著上下兩個 m 邊的索多邊形。棱柱形張拉整體簡單體是構成平版形張拉整體結構的基本單元。

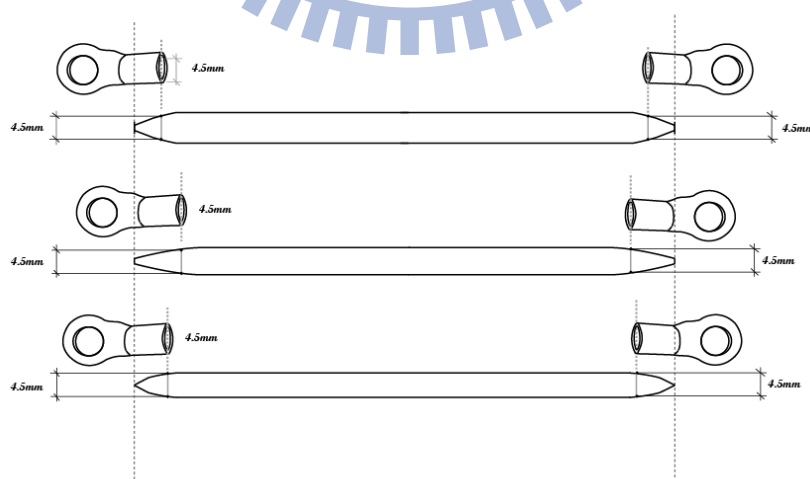
第三章 實作與實驗階段—張拉整體單元在動態性的發展過程

3.1 各種棱柱體簡單型單元體實作與觀察

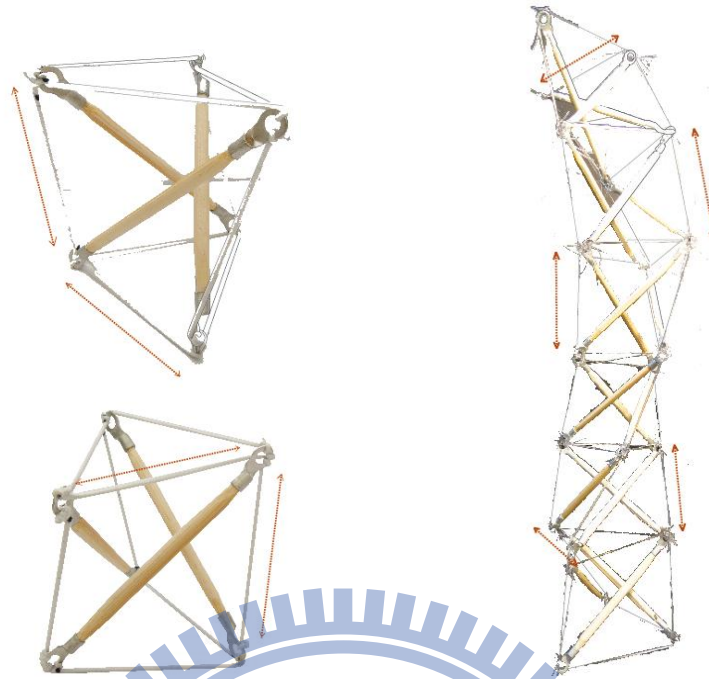
在本章節中實際操作了上章節所述的簡單型張拉整體單元，包括三棱柱體、四棱柱體、五棱柱體、六棱柱體、七棱柱體、八棱柱體，不具伸縮的壓杆結構使用竹棒截短削邊，壓杆與繩索接合處使用 R5.5-5 電子端做為接點，伸縮繩索使用 0.8mm 的透明彈性線。所有的實體模型必須考慮的人為操作誤差有，(1)竹筴削邊後加上電子端的長度誤差範圍 0~5mm，(2) 透明彈性線固定在電子端接頭後，因為兩端拉力不同造成彈性線受力不同，以致穩定狀態的長度不一，誤差範圍 0~15mm (3)電子端頭與電子端頭接合處方向不一、重疊部分也不同，對於單位長度有累加誤差的可能。如圖所示



圖表 18 實作之張拉系統中的桅杆結構



圖表 19 實作模型之桅杆尺寸與桅杆尺寸誤差值示意圖



圖表 20 以三面體張拉整體結構示意其應力情形

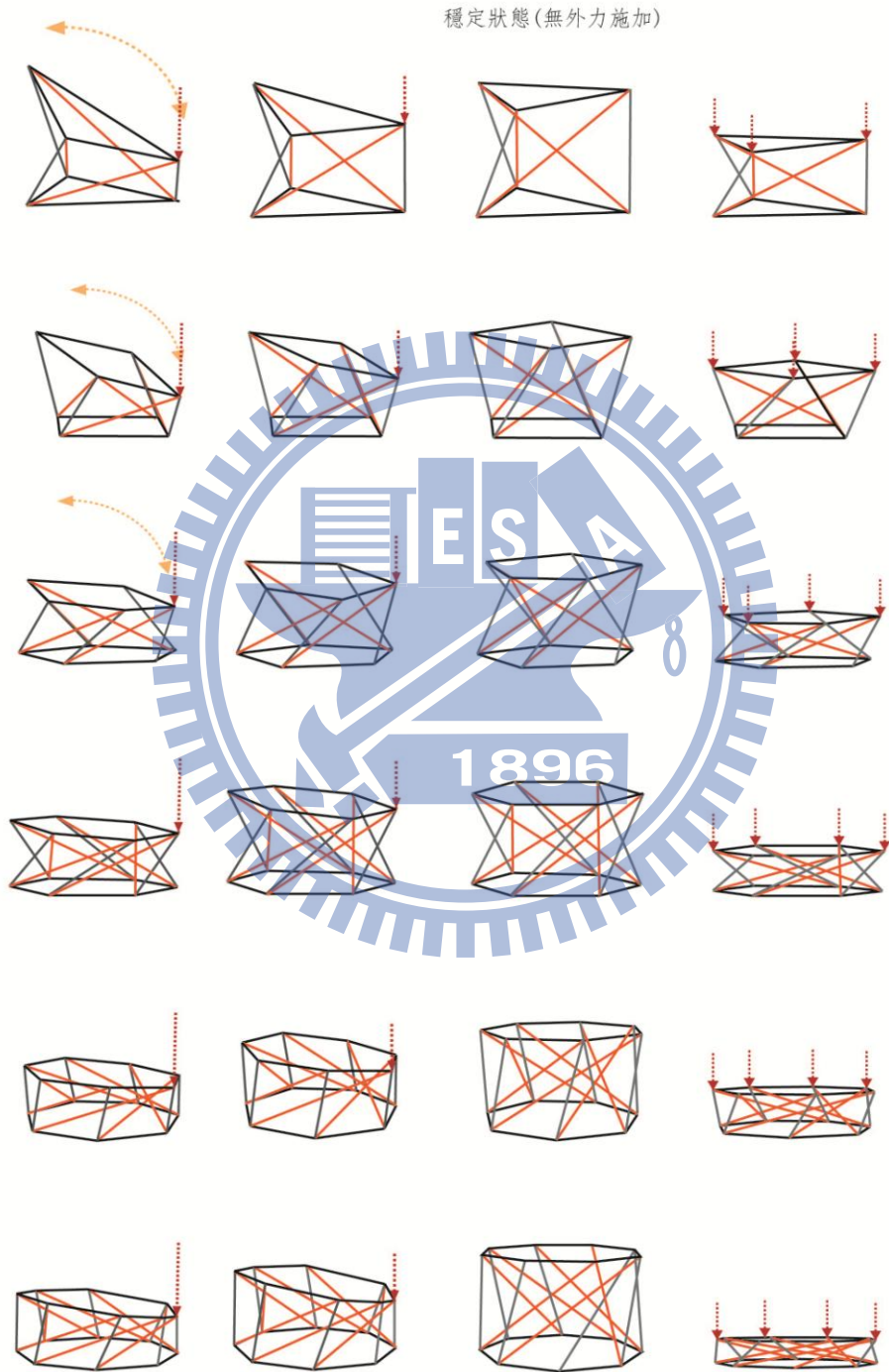


圖表 21 實作模型之桅杆結構與繩索結構接合方式

3.1.1 簡單型張拉整體單元

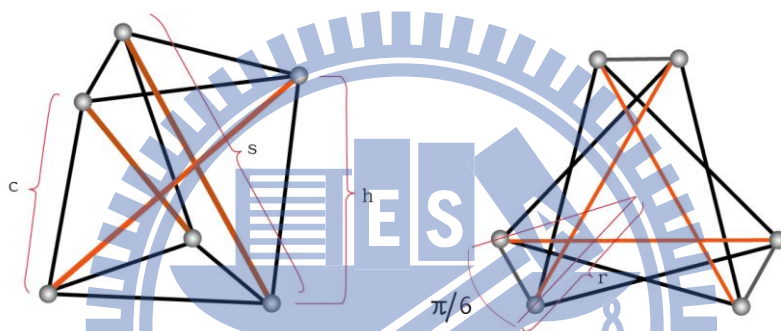
張拉整體結構可從正棱柱體發展到無限複雜的不規則體，只要符合張拉結構的定義皆在此範圍內，但本文將發展成有規則性的矩陣排列牆體，不規則形體較難有可連續的平面或可連續相接的統一拉伸繩索部位(tenseil cable)，因此本小節針對三棱柱體、四棱柱體、五棱柱體、六棱柱體、七棱柱體、八棱柱體實做模型，觀察並選擇其一進行接續發展的單元體。

3.1.2 實驗與觀察結論並決定其後發展原型單體



圖表 22 實作模型三、四、五、六、七、八稜柱體，其各單元的可動度、可動範圍示意圖

以同材質的桅杆、繩索做出同樣高度的多棱柱單元，實地操作後發現，以同樣力平均施壓(型態一比較)，八棱柱體最容易做出高度的變化，三、四棱柱體需費較大的力施壓。若以單點施壓(型態二、三比較)， m 越大，上層與下層正多邊形連接桅杆數與繩索數越多，相互牽制、影響也越大，不易有單邊突出的變化，其他點與邊隨受壓點移動，而且變化形態受限於重直伸長縮短，相互牽制力越大，在曲面變化或曲面轉彎處會造成較大限制，無法形成流暢的弧度，而 m 越小，造成同樣型變須有較大的施壓力，這個現象在單體矩陣量化後會更加明顯，使之型變力量將會更大，為了使矩陣可隨意彎曲，選定 **3-struts** 棱柱型張拉整體單元，必須克服的問題包括：(一)必須有一連接方式可突破曲面限制，使單元模組可隨意連接、拆卸。(二)在保持其單點有較大變化範圍的條件下，使型變所須施加力變小，減少相互牽制。



圖表 23 三棱柱體繩索與桅杆數學關係式與結構關係關係

在 **3 struts tensegrity** 結構中，struts、cable、和整體的高度有一穩定狀態的關係。假如給定 struts 的長度為 s ，cables 的長度為 c ，整體高度為 h ，三角形中心到頂點的距離為 r ，數學關係式可表示成：

$$s/c = \sqrt{2} = 1.467$$

$$s = r\sqrt{3 + 2\sqrt{3}}$$

$$h = r\sqrt{1 + \sqrt{3}}$$

選定 **3 struts tensegrity** 做為發展矩陣的原型單體後，下一步即是單元與單元間連接的相對位置，首先試想所有可能的相接關係，再一一檢視、分類各種接法的利弊。如下圖所示 **10** 種平面關係，搭配平面圖下方的關係位置透視圖：

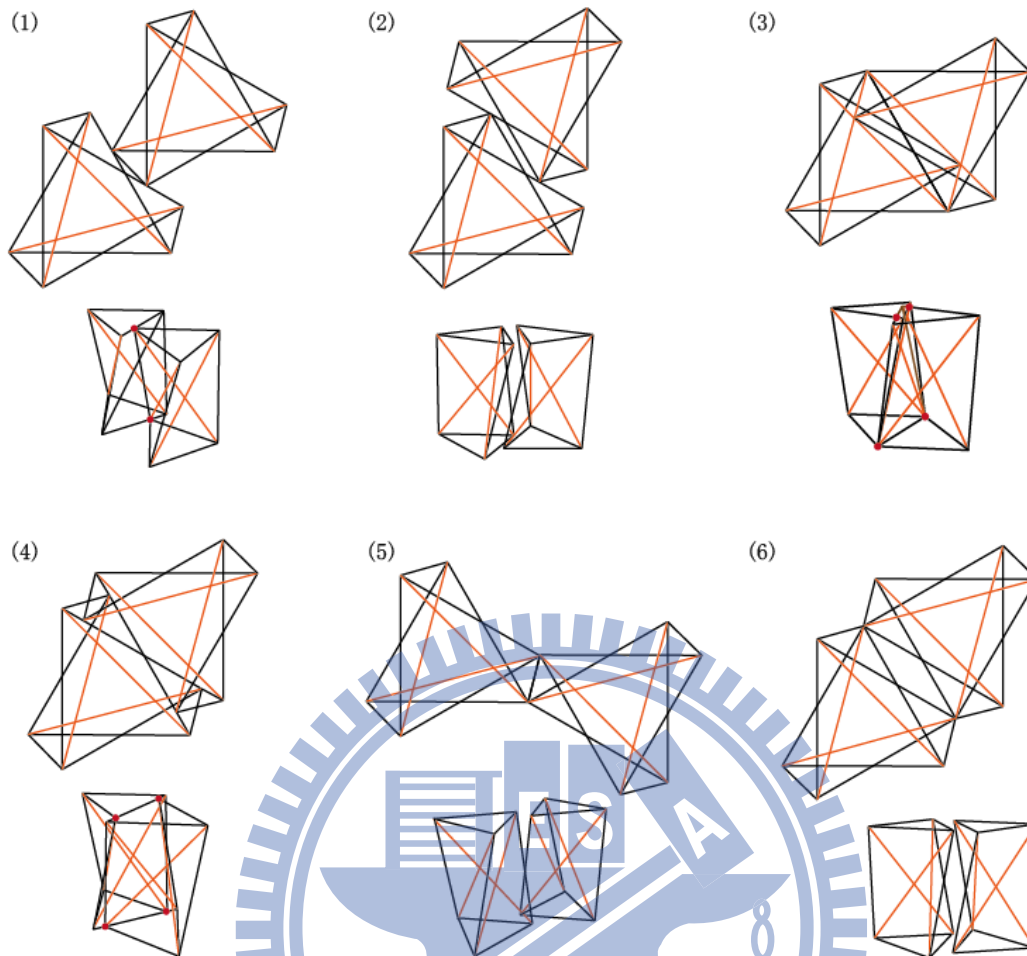
檢視是否可做為發展的依據單元體，其中要考慮的因素包括，

- (1) 相接後的各單元保持其原本的構造，不影響原本的應力關係、扭轉角度。
- (2) 相接的位置是 **cables** 還是頂點，相接頂點數多寡，太少相接的頂點數是否相牽制太小，矩陣排列後扭轉變化的不順暢；太多相接的頂點數是否相牽致太大，造成扭轉困難。
- (3) 單元體的任一結構是否侵入另一單元體，有侵入(重合)部分的相接關係互相牽制也較大，矩陣排列後結構穩固，不容易有穩定的形變。

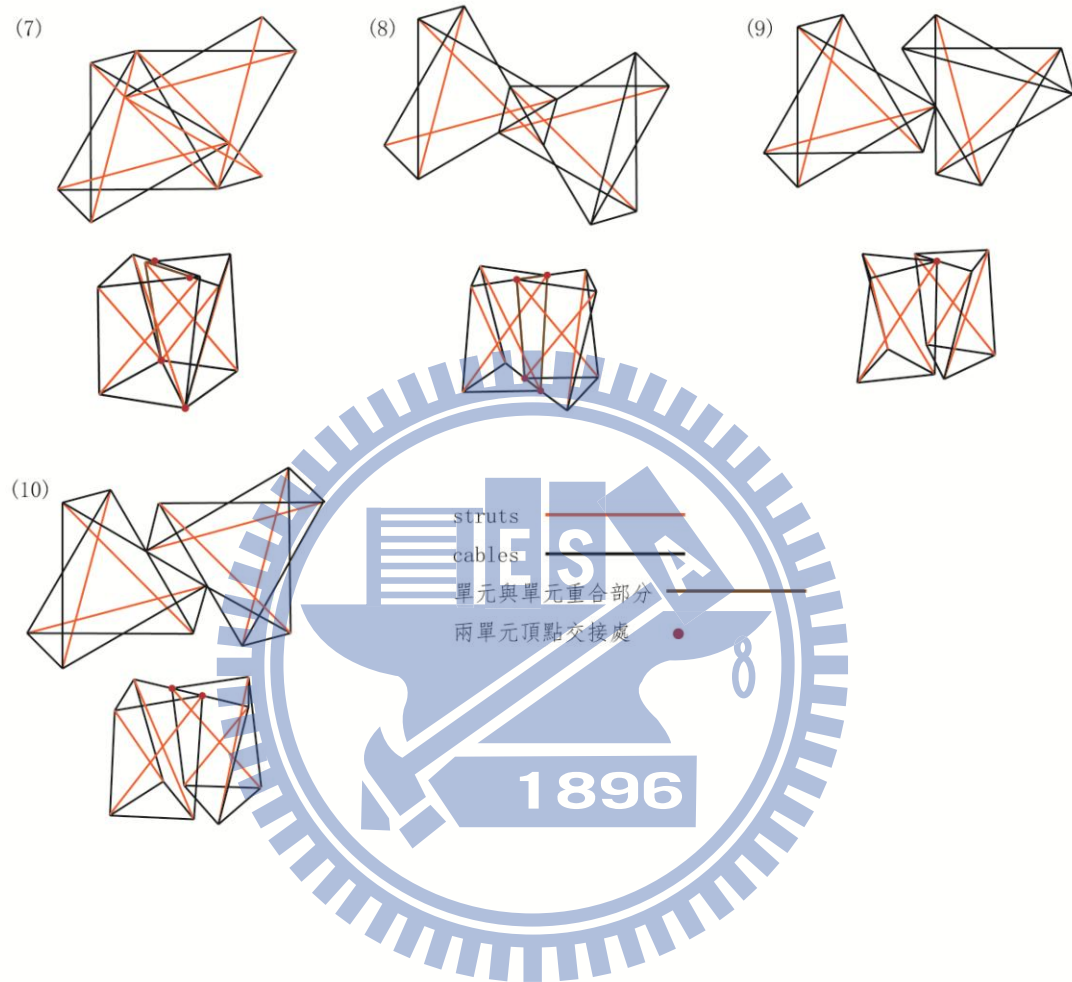
下圖比較表即依據以下 6 點，討論最有利矩陣發展的結構：

- (1)重合 **cables** 數量
- (2)相接點數量
- (3)是否有侵入另一單元構造
- (4)是否保持原有的應力關係
- (5)上層是否有相接處
- (6)下層是否有相接處








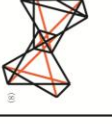

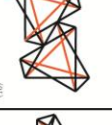




圖表 24 單元體與單元體相接方式的十種關係



圖表 25 單元體與單元體相接方式的十種關係

										
重合cables數量	0	0	1(下層)	1(下層)	0	0	1(下層)	2(上、下層)	0	0
相接點數量	2(上、下層)	0	4(上層2下層2)	4(上層2下層2)	1(垂直向cable)	0	4(上層2下層2)	4(上層2下層2)	1(上層)	1(上層)
是否有侵入另一單元構造	無	無	有	無	無	無	有	有	無	無
是否保持原有的應力關係	有	有	有	無	有	有	有	有	有	有
上層是否有相接處	有	無	有	有	無	無	有	有	有	有
下層是否有相接處	有	無	有	有	有	無	有	有	有	無

圖表 26 單元體與單元體相接方式的十種關係之圖表討論

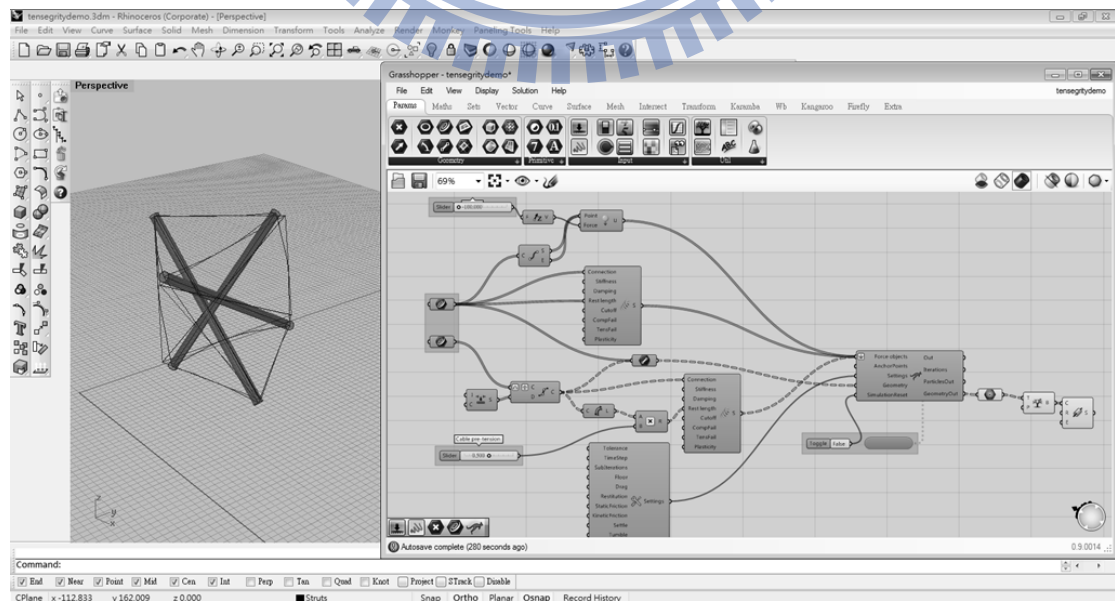
3.1.3 以 grasshopper 下的 kangaroo 外掛來模擬 3-struts 張拉整體系統

Kangaroo

Kangaroo 是 Grasshopper 介面使用下的一套基於質子系統的物理模擬外掛，用簡單的方式來模擬現實世界物理運動。Kangaroo 的仿真模擬可以幫助我們去了解現實物理現象的作業原理，例如所有材料彎曲屬性、剪刀與扭轉等行為可以當作多組質子之間簡單相互作用在分子層的自然表現。雖然現實物體所包含的質子數量遠大於 Kangaroo 模擬時的質子數量，但是透過合理安排模擬時質子的取樣值，就能得到與真實結果接近的結果。質子是一個物體中包含的質量、位置和速度，對力量有反應，但是質子沒有空間概念，例如，各種非剛性的結構可以透過 Kangaroo 中 SpringsFromLine 的功能大概模擬物體的性質，包括設定結構的剛強度、阻尼、以及趨向穩定狀態的長度，阻尼是指任何振動系統在振動中，由於外界作用(如流體組力、摩擦力等)或系統本身固有的原因引起的振動幅度逐漸下降的特性。

Kangaroo 透過產生很多種動力的方法來模擬各種物理運動，這些力量影響著在模擬中的質子。所有這些被反饋到“動力對象”上，力量可以來自各種來源，如材料變形(彈性)的設定、風力的設定。

運算器連接方式

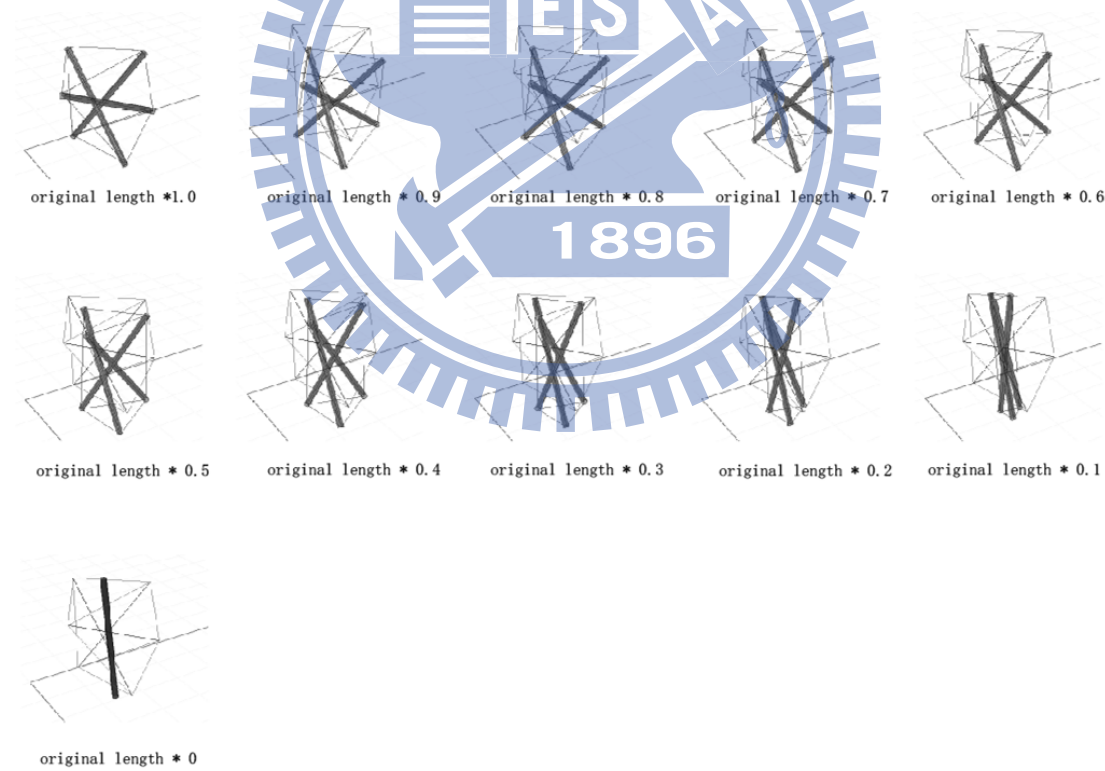


圖表 27 grasshopper 運算器連接方式與結果

Grasshopper 的使用，分別給定 3 根 struts 和 9 條 cables 物質特性設定，利用彈簧運算器 (SpringsFromLine)，cables 設定的項目包括繩索本身的剛強度(彈性)，和繩索初始長度(趨向穩定狀態的長度)，struts 在趨向穩定狀態的長度細項設定為初始長度，而剛強度則不設定(不可伸縮)，因為在張拉結構的定義中，struts 的結構是各自獨立分開而且不可伸縮的桅杆，另外，桅杆的結構有明顯的質量，所以給定 struts 一個單一性力量(UnaryForce)，方向為 Z 軸向下，模擬地心引力的作用力。最後須將所有的設定值，任何物件的作用力連接到物理運算器(KangarooPhysics)執行計算，在物理運算器設定為每一毫秒計算一次，另外，必須在 SimulationReset 連接開關，控制是否執行運算。

運算結果

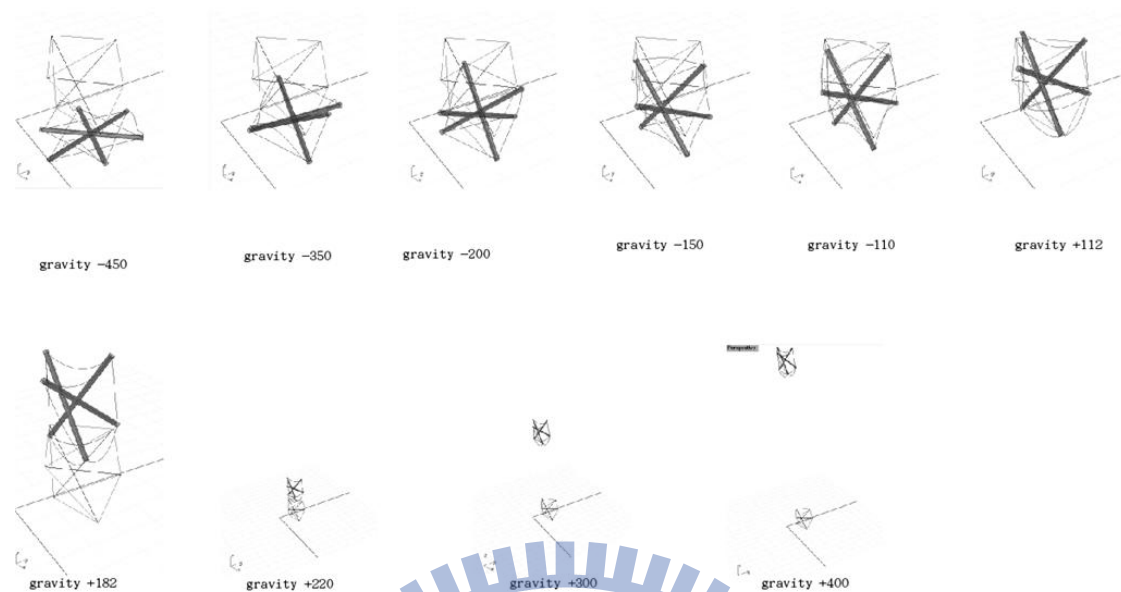
在這個運算器連結系統設定了三個變因(Number Slider)，第一個是 cables 趨向穩定狀態的長度(rest length)，第二個是 struts 所受的地心引力數值(UnaryForce)，第三個是 cables 的剛強度(stiffness)。



圖表 28 kangaroo 中固定 UnaryForce 以及 Stiffness，rest length 的變化圖

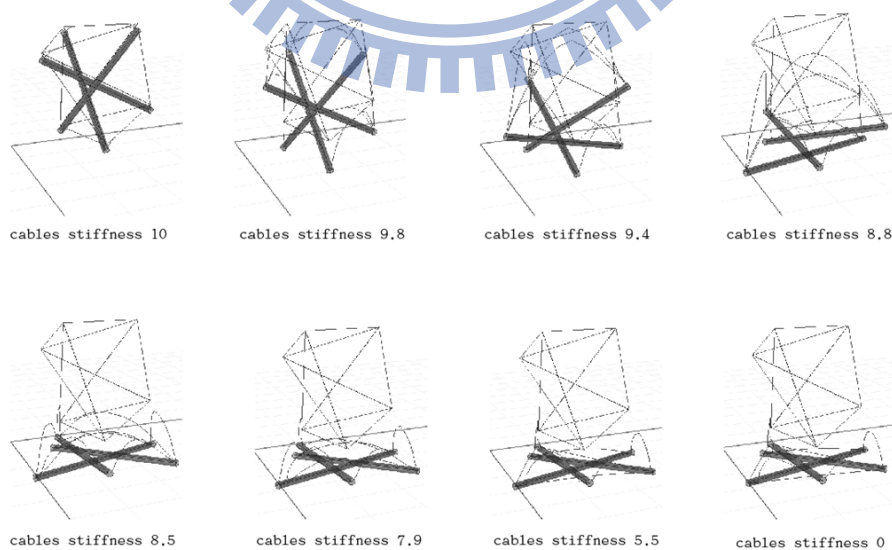
上圖所示為固定 struts 所受的地心引力數值(UnaryForce)以及 cables 的剛強度(stiffness)，其設定的數值，地心引力 (UnaryForce)為+100，cables 的剛強度(stiffness)為 10，cables 趨向穩定狀態的長度或者初始長度(rest length)從 rest length *0 到 rest length *1 的漸變變化，

當數值為 1.0 時呈現最穩定狀態。



圖表 29 kangazoo 中固定 rest length 以及 stiffness，UnrayForce 的變化圖

上圖所示為固定 cables 趨向穩定狀態的長度(rest length)，以及固定 cables 的剛強度 (stiffness)。設定數值為 rest length*1，剛強度 stiffness 為 10，地心引力數值範圍從+500 到 -500 的的漸變變化，其結果顯示最趨近穩定型態的數值，大約落在+100 附近，離 100 數值越遠會有更加不穩定的狀態，設定值範圍在-350 到-500 時，重力太大，桅杆結構完全橫倒，難有變動的可能。重力數值在+220 到+400 範圍時，幾乎處於無重力狀態，桅杆與繩索都不在地平面上。



圖表 30 kangazoo 中固定 rest length 以及 UrayForce，stiffness 的變化圖

上圖所示為固定 cables 趨向穩定狀態的長度(rest length)以及 struts 所受的地心引力數值(UnaryForce)，兩項數值分別設定 cables 趨向穩定狀態的長度為 rest length*1，struts 所受的地心引力數值(UnaryForce)為+100，cables 的剛強度(stiffness)由 0 到 10 的漸變變化。設定的繩索剛強度數值越小，桅杆受拘束越小，如圖顯示，數值在 8.8 以下的狀態都已傾倒在地，無法再針對其他變因做型態上修正，數值在 9 到 10 之間才能有應變運動，最穩定狀態數值為 10。

小結

本小節使用 Rhino 外掛 Grasshopper 平台下的一套基於質子系統的物理模擬軟體 Kangaroo，預期用簡單的方式來模擬現實世界物理運動。操作結果顯示，三個變因無法與現實溝通，使用者所採用的材料系數，無法在應用軟體輸入確切數值，只能知道當使用 Kangaroo 運算器，三個變因中趨於穩定狀態的概略數值，以及可以改變環境(改變 UnaryForce 數值)，模擬現實世界不存在的狀態。因此，Grasshopper 所反應的數值並不能直接當作實驗過程的參考數值，無法對模擬張拉整體結構較明顯的助益。

3.2 (3-struts) 張拉整體結構單元矩陣延展

與多元變動性空間同時考量的是，動態結構產生的結構穩定性問題。「可調控剛性」(controllable rigidity)是可回應建築的基本考慮要件之一(Sterk 2006)。剛性在工程領域中是指一個彈性體在受力的時候對抗撓曲和變型的能力。不論是可動框架或可動表層都可藉由剛性的操控，維持動態結構的穩定性，提升運作效能。可控剛性的考量可透過以下四個程序：

- (1)構造模組化：模組化的方是有助於減低系統的複雜度，並且提升可建造性。
- (2)構造連結性：構元件的連結能力可以使局部模組之間相互連結。
- (3)構造承載力：須要能夠回饋力量傳遞的狀況，以及提供力量傳遞的路徑。
- (4)構造形體上：從可動構造在形體的幾何性，考量各個狀態的穩定性。

3.2.1 型態一

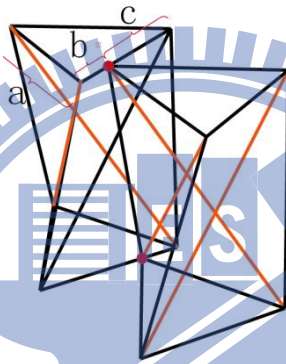
此種接法相接的兩點都在水平繩索上，垂直繩索上雖然沒有相接點，但以單層水平方式矩陣排列後，除了最外圈的單元體是兩面相接外，其他皆是三面相接，假如給定繩索總長度是 a，接點分割後短邊是 b 長邊是 c，相接關係可表示成：

$b/c = 0.36$ (四捨五入取小數點以下第二位)

$b/a = 0.26$ (四捨五入取小數點以下第二位)

實際操作上取相接位置時，無法精確的標示出位置，加上人工接合時力道不均，可能有單邊拉扯略大，因此在這裡必須要考慮人為誤差的產生。組構方式為單層沒有垂直方向的疊加，不可慮應力的情況應該是如右側視圖，平坦的單層結構，但實際操作後發現，每個張拉結構單元的穩定狀態通常都趨向於集中的形態，所以水平矩陣連接後有稍微彎曲的情形。如覆蓋在大球體表面的圓球體弧度。

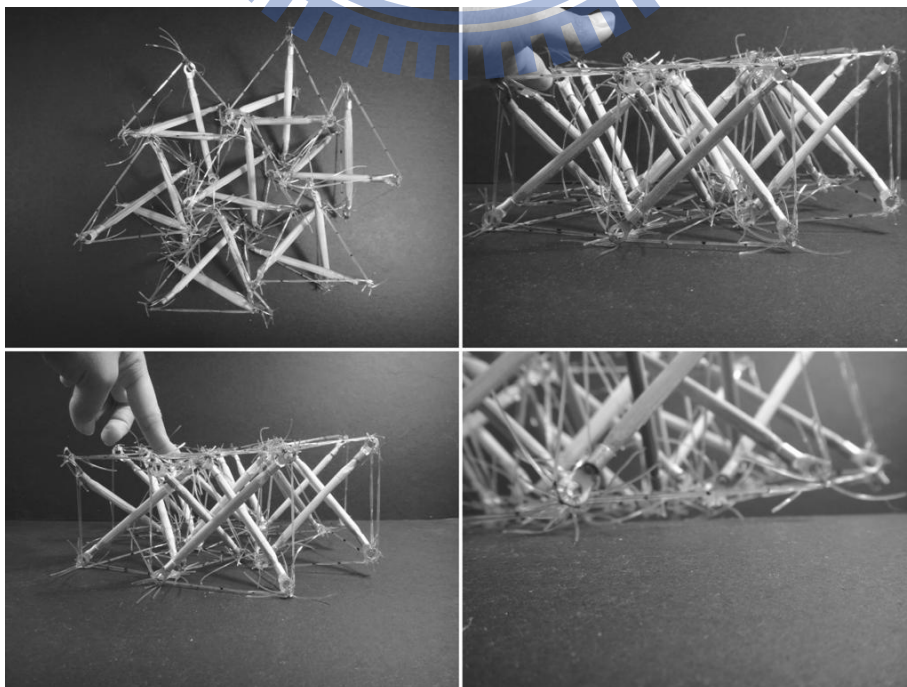
因為單體的三面皆有相接點，矩陣排列後構造穩固，需要作用很大的力來彎曲，可型變的範圍有限，作用力一消失結構體立即回復原型，無法在型變時有較穩定的狀態。



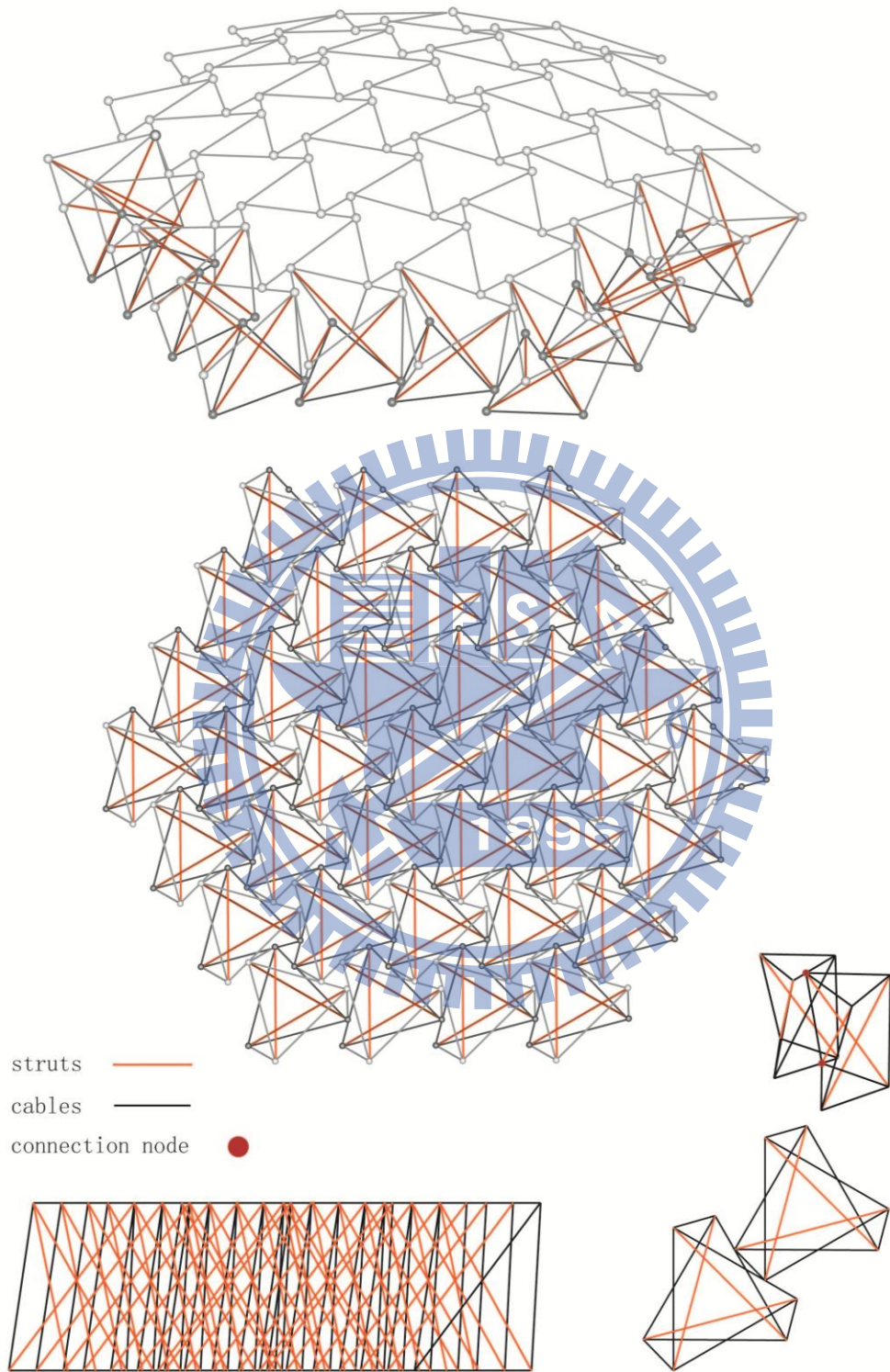
圖表 31 三稜柱體最佳的相接方式

型態一實體模型：

圖表 32 型態一實體模型



(Tatiana Olejnikova ,2012,Double Layer Tensegrity Grids)



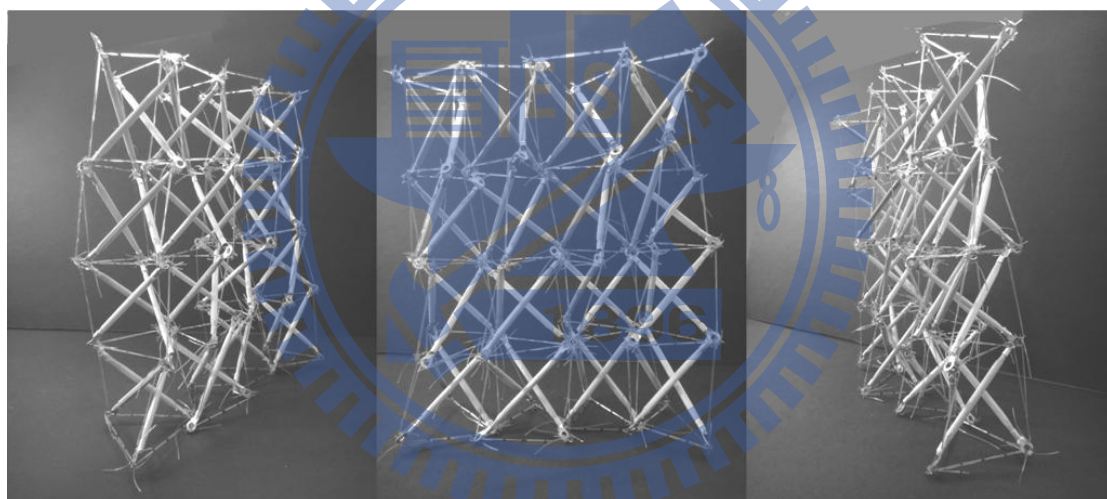
圖表 33 型態一，以最佳相接方式擴展後的上視圖、立面圖、透視圖

3.2.2 型態二

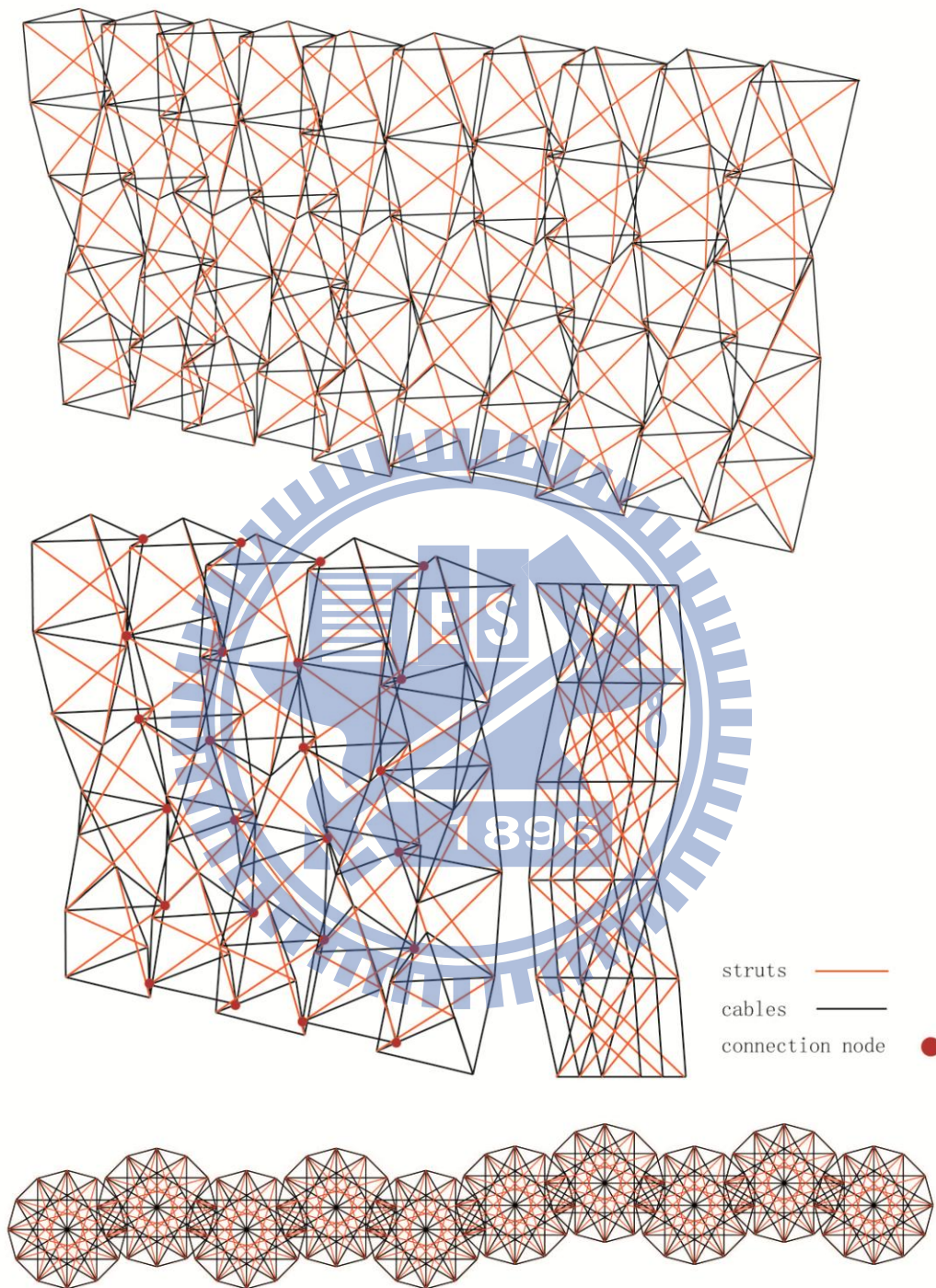
為了使此連接方式更能隨意彎曲、扭轉，改良三面各有兩接點的矩陣，從垂直向做疊加(下圖所示)，除了左右兩邊的單體以外，其他內層的單體在兩面各有兩個接點，接點的位置隨著往上疊加的層數跟著改變接點的位置，不過短邊與長邊的關係依然保持

$b/c = 0.36$ (四捨五入取小數點以下第二位)

在這種垂直向矩陣發展的接法，如同上一小節所述，依然存在人為誤差的可能，實際操作取相接位置時，無法精確的標示出位置，加上人工接合時力道不均，可能有單邊拉扯略大的情況，因此在這裡必須要考慮人為誤差的產生。垂直發展的矩陣相較於水平單層的矩陣較能自由活動，相牽制較小。

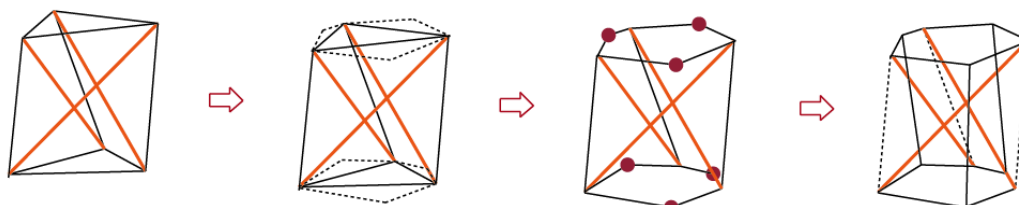


圖表 34 型態二實作模型



圖表 35 型態二，擴展後的上視圖、立面圖、透視圖

3.2.3 型態三

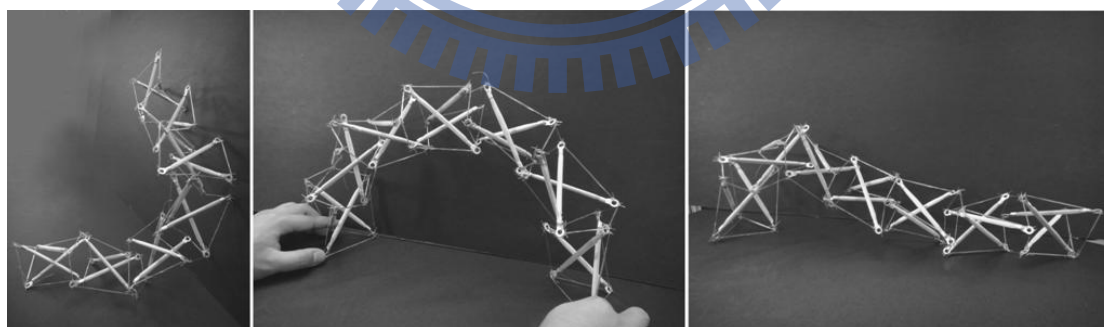


圖表 36 型態二轉變到型態三的過程示意圖

為了使矩陣有更大的曲度，同時曲度的變化可以更加連續順暢，本小節以 **3 struts tensegrity** 為單元體做變化。首先將水平繩索的三角形擴張，三角形的三頂點看成是正六邊形其中三個不相鄰的三個頂點，所有 **cables** 和 **struts** 連接方式不變的情況下，紅色點標示出頂點位置沒有任何 **cables** 和 **struts** 支撐，如果沒有任何張力撐開，正六邊形會縮為三邊形，因此把上層紅色點與下層紅點以 **cables** 的結構相接，完成第一種變型單元體。

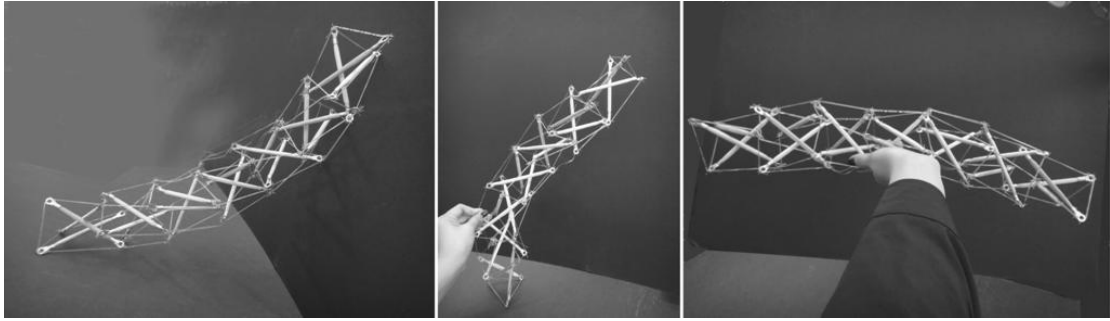
正六邊形的棱柱體，上層與下層旋轉角度為 **60** 度，由於正六邊形的對稱性，所以預期旋轉後上下層可完全重合，理想狀況應如下圖所示的平面圖，有一連續可相接的邊，而且矩陣的邊界整齊，相較於前述的三棱柱體，必須前後交錯來找尋相交點的狀況，更有利於矩陣牆體組裝成型。

型態三模型實做過程：



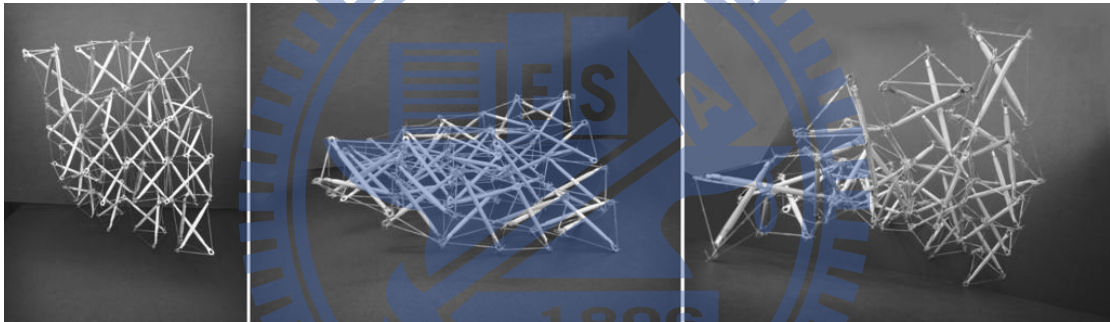
圖表 37 型態三模型實做過程(一)

以圖表 34 後發展型態操作，六面體單元的其中三垂直邊，沒有桅杆結構支撐，連接上層三頂點與下層三頂點，其餘三垂直邊先不以高彈力線連接，觀察其活動，發現柔軟度、可塑性極佳，單一單元結構及整體塔型結構的活動度都相當高，整體可隨 **90** 度牆角彎曲、伏貼，但是缺乏支撐自體重量的結構，無法垂直站立。



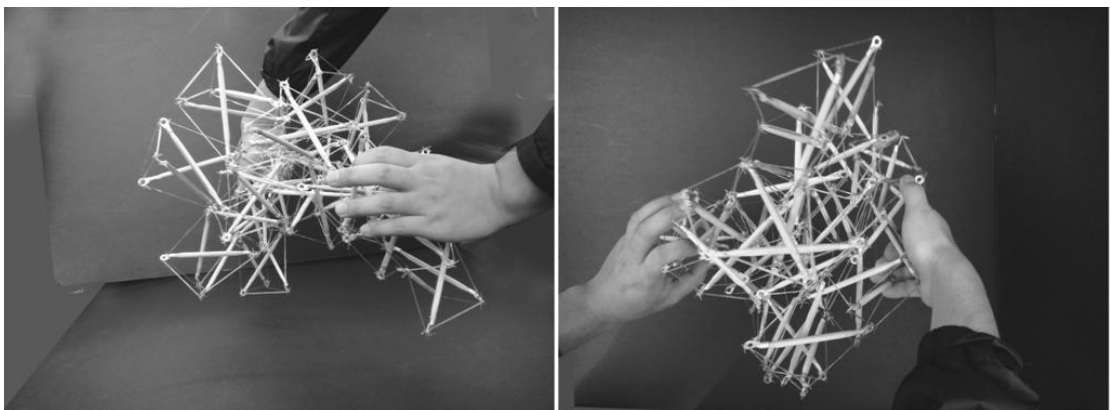
圖表 38 型態三模型實做過程(二)

以圖表 35 態繼續操作，將其他未連接的垂直邊相接，其自體支撐力變大，由於型態三單塔型結構內單元相接後，整體不在同一個垂直面上，一左一右相序由底層向上交錯，重力往外偏，結構也不能夠站立。



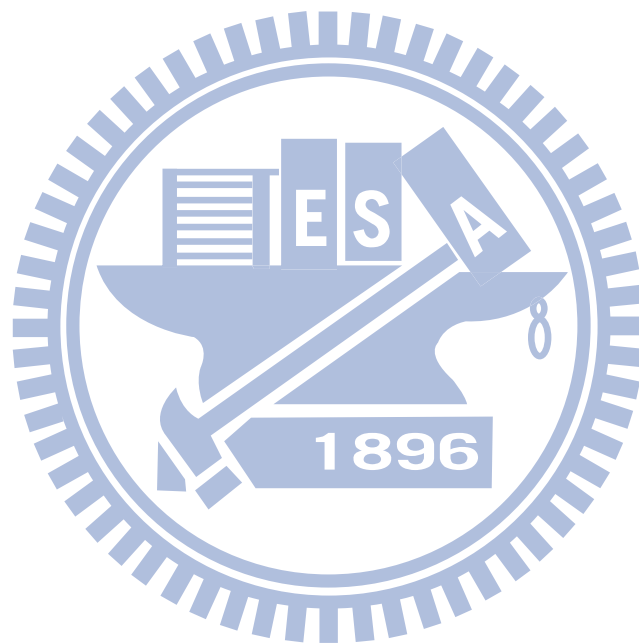
圖表 39 型態三模型實做過程(三)

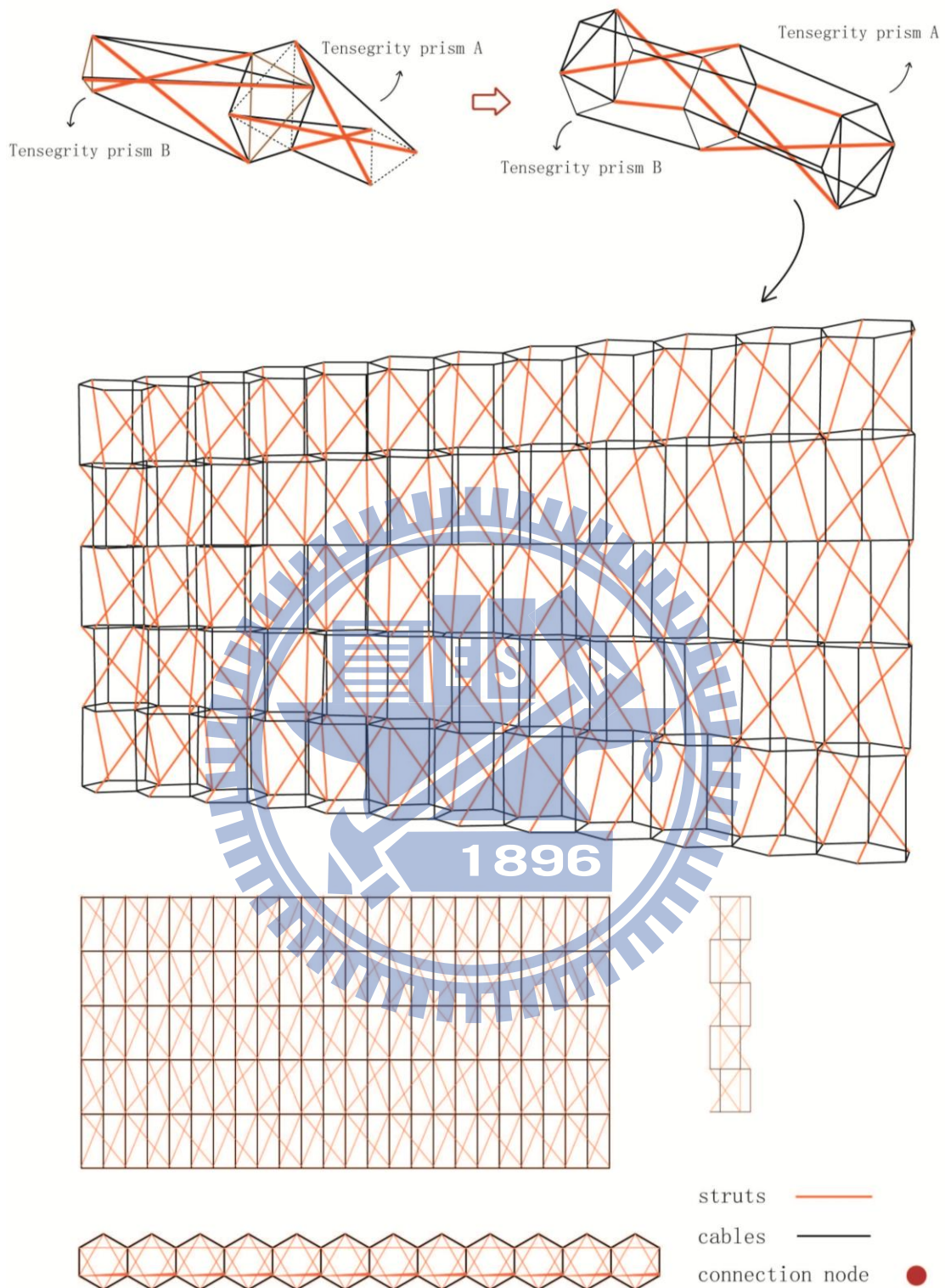
以圖表 36 塔型態作 4*5 矩陣張拉整體結構，由於型態三單塔結構沒有同在一平面上的垂直邊，連續相接四個塔狀結構後，在沒有外力介入的情況下，亦有明顯一彎曲的趨勢，其彎曲趨勢呈現旋轉變態，連接越多個塔狀結構旋轉越明顯。



圖表 40 型態三模型實做過程(四)

圖表 38 試當外力介入時，型態三型變範圍、運動向度如何。隨著旋轉的方向給予外力，單元間、單塔間相互牽制力小，型變範圍大(圖表 38 圖)，圖表 38 圖為加上另一方向的力並且使旋轉角度到最大的變態情形。



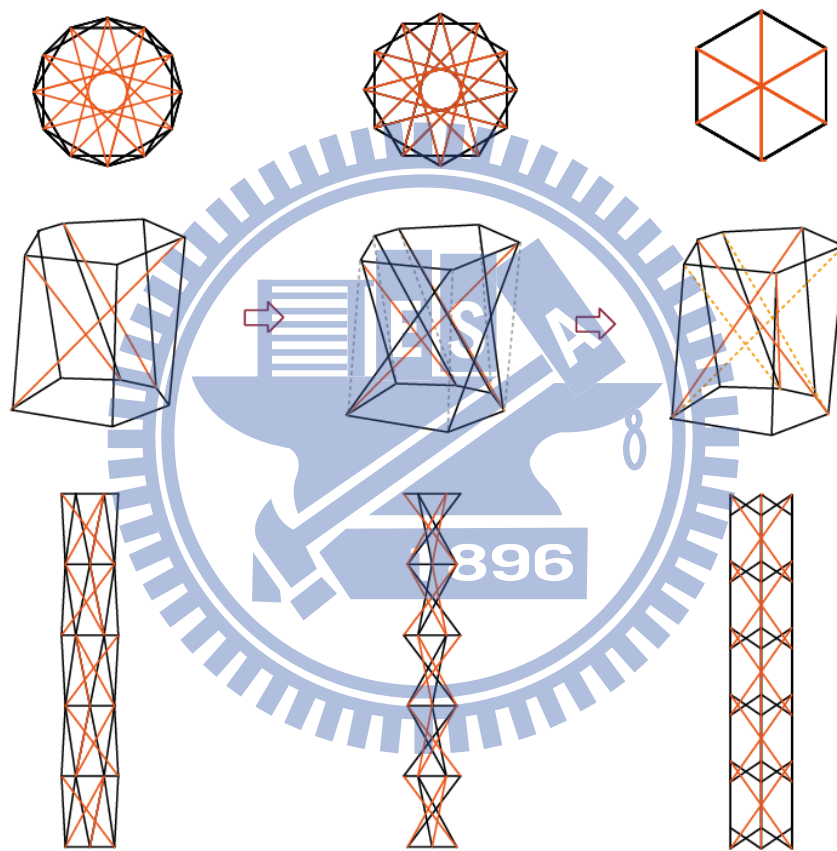


圖表 41 型態三矩陣排列後的上視圖、前視圖、透視圖

幾何正棱柱型的張拉結構，上層與下層應旋轉 60° 度，以正三棱柱型為單元做上圖所示的六邊棱柱型變，預期以半數的桅杆數達到同樣的結果，減少單元間相互牽制，可使型變容許度較大，但實際操作模型，發現旋轉角度不到 60° 度，無法有一統一可連接的面，上層與下層的連續是曲面而非平面，若以上圖的相接法，各單元無法保持原本的應力關

係，各單元會有些微形變導致整體有明顯的曲度，但是型變容許度相較於型態一二確實增加許多，接下來的實驗希望保持其變型容許度，增加旋轉角度使其有一可相接的平面。

3.2.4 型態四



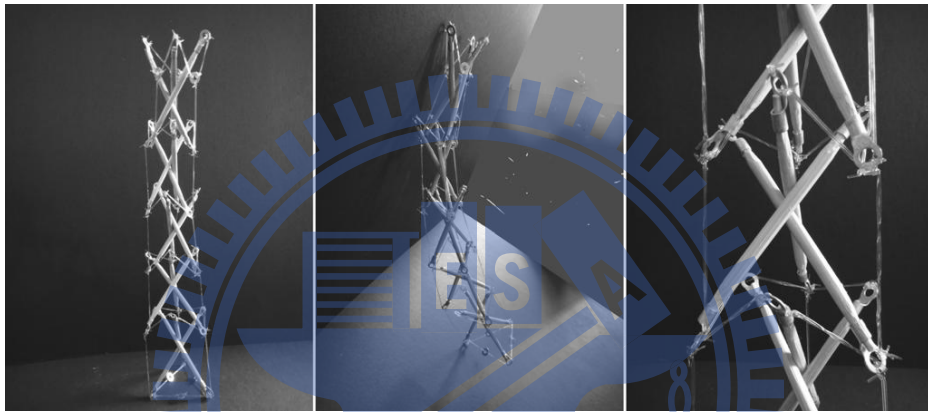
圖表 42 型態三轉變到型態四的過程示意圖

增加扭轉角度有兩個方向，第一是增加桅杆旋轉的角度，第二是增加繩索的旋轉的角度。如圖第二步驟，將繩索上層與下層相鄰 2 邊的頂點相接，實驗結果顯示，繩索結構對於整體旋轉角度沒有明顯的影響，正六邊形旋轉角度幾乎一樣，但有增加支撐力的作用，如圖第三步驟，將桅杆上層與下層鏡射對稱頂點相接，實驗結果顯示，上層與下層正六邊形趨近重合，沒有得到預期旋轉 60 度後重合的結果，卻產生六邊平行的面，可以做為模組化後的相接面。

此三種變型態可以歸納出三種結果：

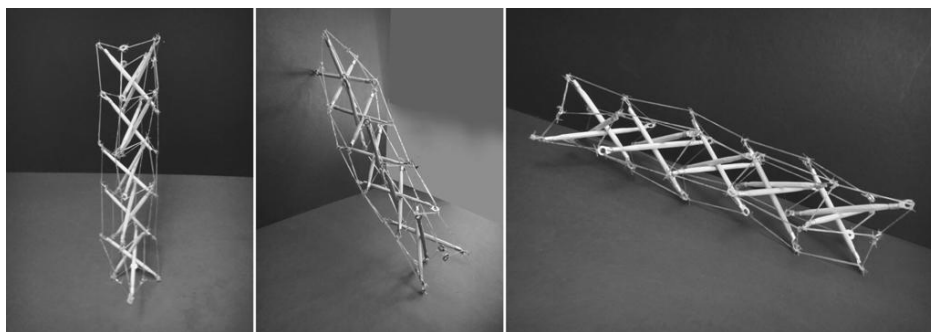
- (1) 正多棱柱形張拉整體結構中，真正改變結構型變的部分為桅杆(struts)部分。
- (2) 正多棱柱形張拉整體結構中，繩索(cables)部分對於整體形變或旋轉的影響非常有限，但有增加支撐力，強化結構穩定的作用。
- (3) 正 m 邊棱柱張拉整體變形結構中，最大旋轉角度發生在，上層與下層相鄰 $(m/2)-1$ 邊時。

型態四模型實作過程：



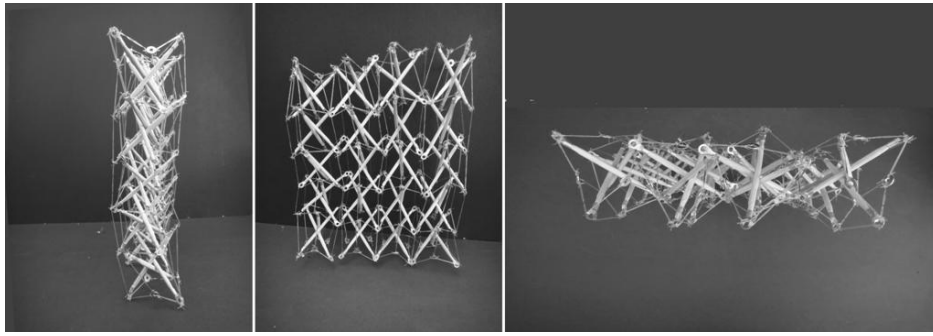
圖表 43 型態四模型實做過程(一)

以圖表 40 最後型態作模型實做，如上圖 41，每層三個桅杆與相鄰層三桅杆都會形構成上層六頂點與下層六頂點，只連接其中三個相對頂點，其餘三個對應垂直邊不連接，結果顯示結構可支撐自體重量，上圖中間顯示其柔軟度佳，彎曲程度近似於型態三。



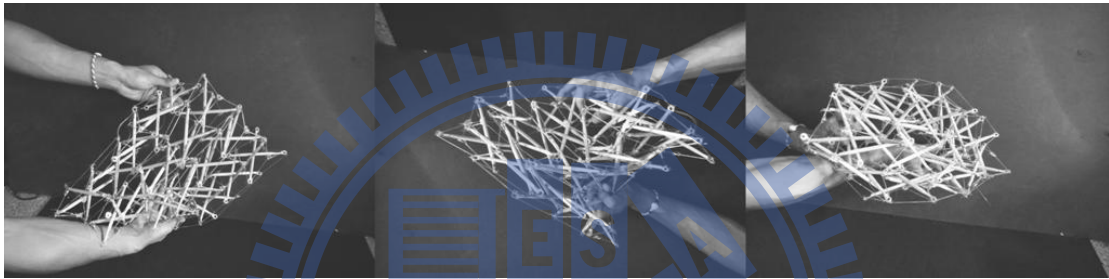
圖表 44 型態四模型實做過程(二)

圖 42 以圖 41 型態繼續製作，連接其餘尚未連接的三對應頂點，結果顯示整體結構更加穩固，柔軟度、可塑性相較於圖 41 較低，無法隨垂直牆角有較大的曲度。



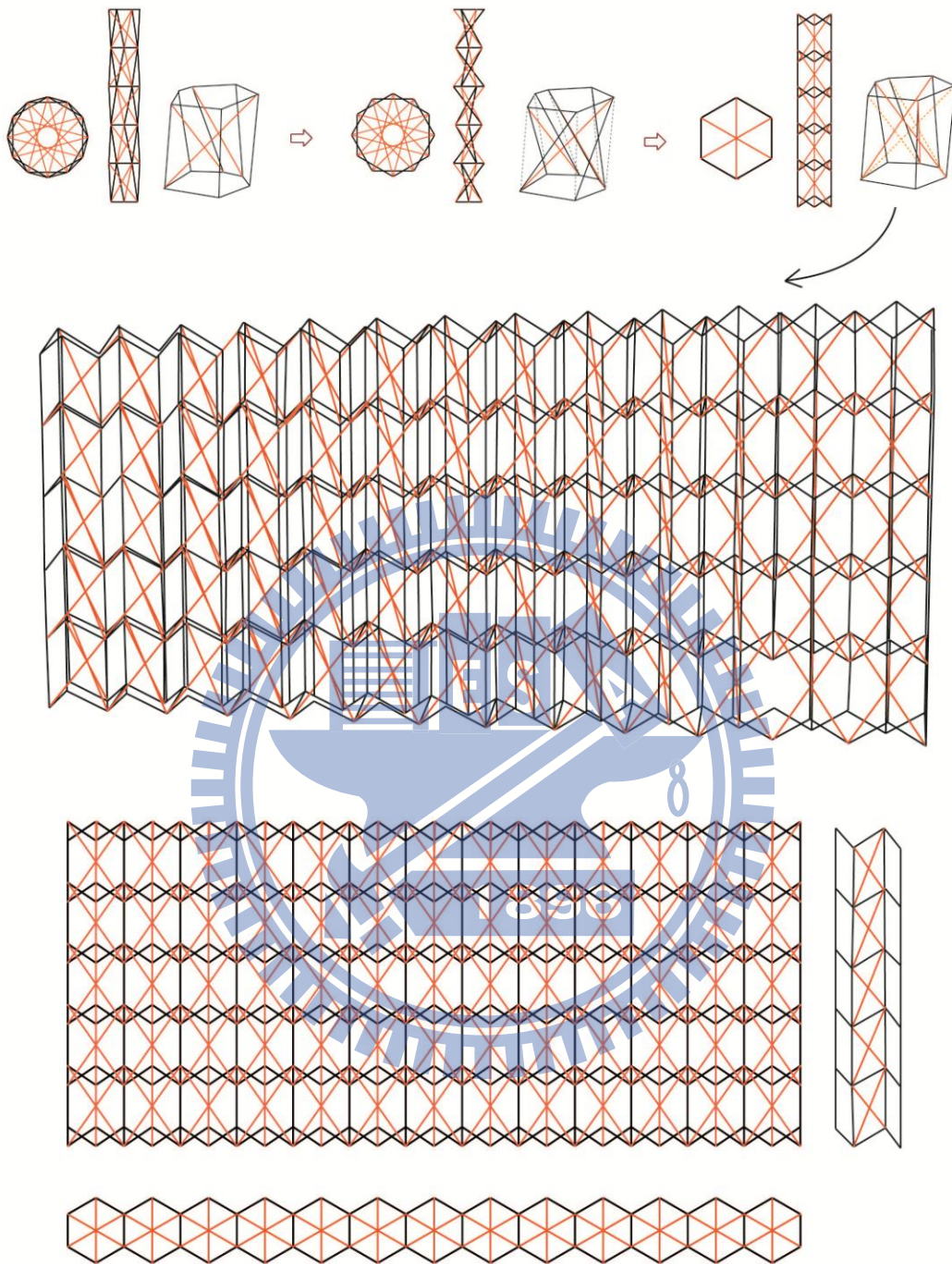
圖表 45 型態四模型實做過程(三)

圖 43 所呈現的是以圖 41 的單塔結構做 4*5 矩陣張拉整體結構。



圖表 46 型態四模型實做過程(四)

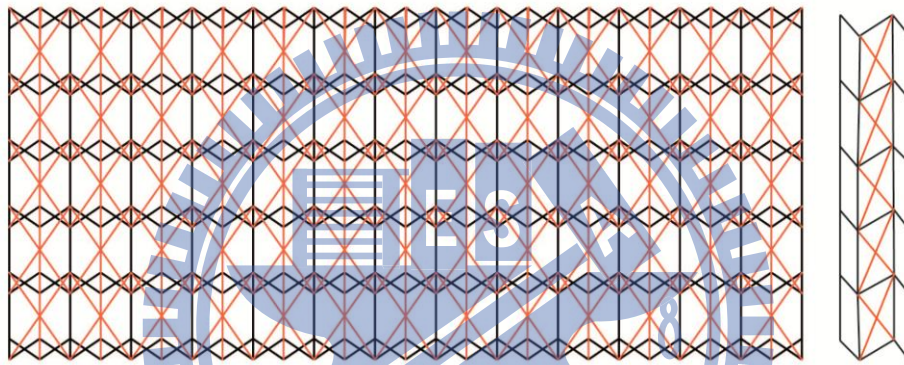
圖 44 引入人為外力產生不同程度曲度的狀態。型態四的初始狀態為規則的平坦面，可以依外力的方向、施力的大小做不同的型變，而且其型變不會超出模型承受範圍。



圖表 47 型態四矩陣排列後的上視圖、前視圖、透視圖

3.2.5 原型單體各種矩陣形結論

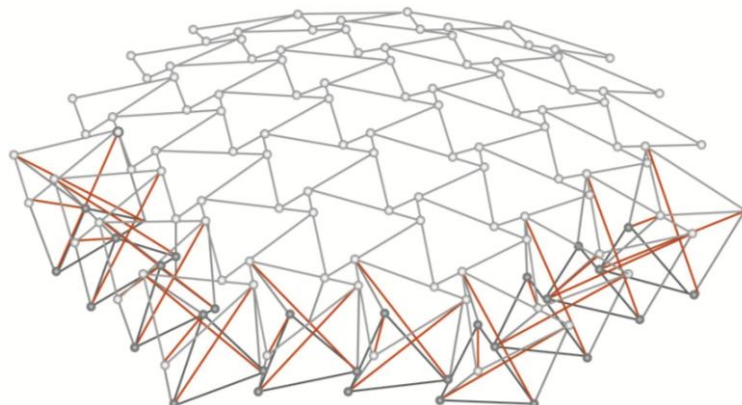
型態四優於型態三在於改變其原有的曲度，其未受力的初始狀態平坦，可以有更多元型態變的可能，應用在披覆於建築牆體或皮層時，可以批覆於直牆，也可以改變型態、扭轉角度批覆於有曲度的面體上。型態四的拘束程度或者可扭轉的程度優於型態一、型態二，但是相較於型態三，由於型態四的結構上層單原體與下層單原體因為相接的方式，部分互嵌另一方的本體，增加彼此的牽制。也因為桅杆與繩索接合的方式，塔型結構張拉整體結構在第一個與最後一個的單原體，沒有型態一、二、三有平整的相接面可依附在地面、牆體、天花，其首尾端的六個點不在同一水平面上，其中沒有桅杆支撐的三個點因為繩索的拉力，位置高於其他三點，這是應用設計時應該列入思考的問題。



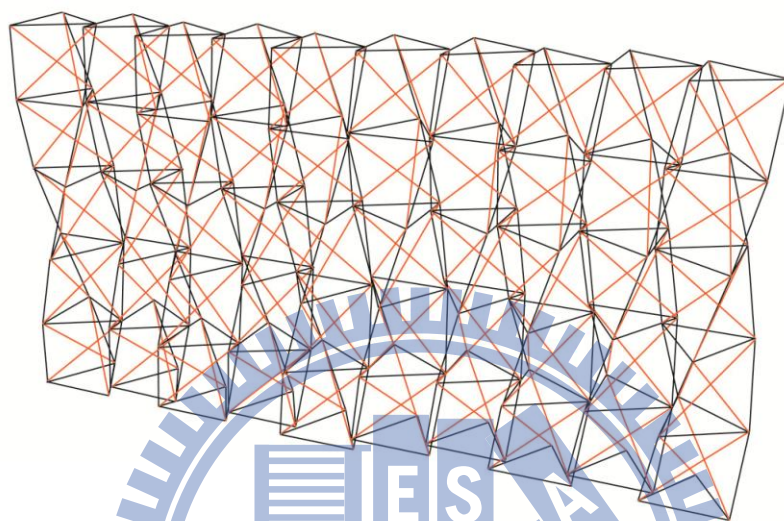
圖表 48 型態四前視圖

型態一的結構方式為單層水平延展，型態二、三、四都是單塔垂直發展後再相接，相較之下，水平單層結構較穩固，能彎曲扭轉的範圍不大，單元擴展後因為繩索的彈性拉力，整體平面呈現球面曲度。此型態的應用可批覆於球型曲面的構造物，做小範圍的可動運用。

圖表 49 型態一透視圖



型態二的結構方式，先以單元向上堆疊為單塔狀結構，再考慮單塔與單塔之間的接合處，因為單塔向上發展時，下單元與上單元有一 30 度旋轉角度，依續向上累加，其接合方式必須一前一後相互交錯，在每一層僅有一相接點，而且單塔間無法在同一平面上。型態二的可動性比型態一、型態四大，但是可運動方向範圍較小，水平彎曲範圍比垂直彎曲範圍大許多。



圖表 50 型態二

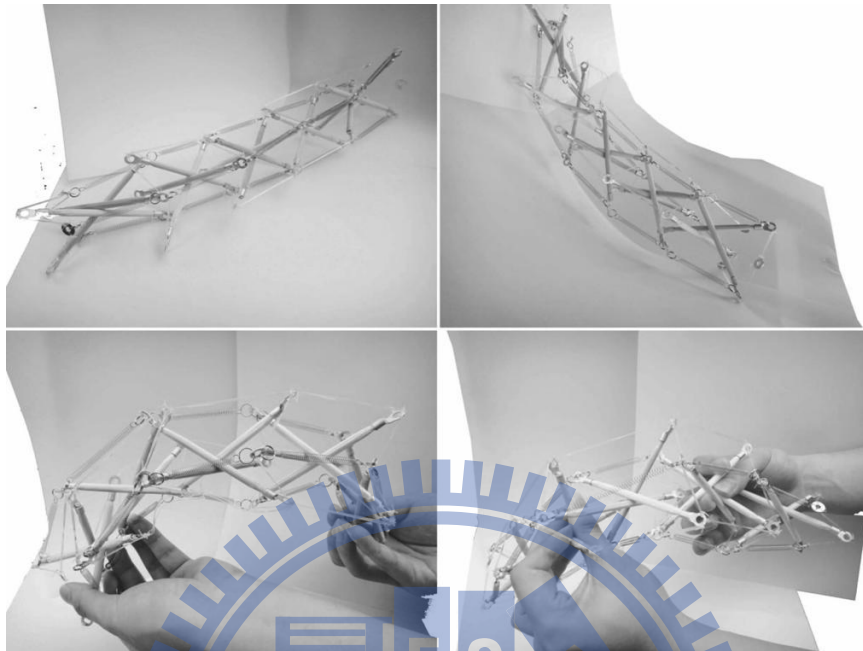
在發展過程中的型態一、型態二、型態三雖然因為扭轉需求與改善其初始穩定狀態的彎曲情形，而不採用為最終模組化的單元體，但是其一、二、三型態也都建立在可以模組化的單元體基礎上，由單元體量化相接後組成牆體，因為每種形態的接合點數量不同、接合地方不同，造成每一型態的可動性可能偏向垂直或偏向水平，在某一方向有較容易的扭動的趨勢。這個在模組化設計中應該除去的情形，也不盡然應被完全忽略，假若遇到有彎曲的需求，如建築本體有曲面設計，或是室內牆面曲面設計時，若需要些微彎曲又不需太大的可動性，則可考慮型態一的張拉整體結構，型態一在結構上比型態四更加穩固。而型態三的接合方式在連續接合後會有明顯的彎曲，其視覺性效果可作為戶外空間的雕塑作品或做為藝術品的發展的基礎。

第四章 以多種材料應用在張拉整體結構原型操作

本文在第三章著重討論張拉整體結構的可動性，在可模組化的單元結構下，討論張拉整體結構在各種組構方式的可動性、可動範圍、可運動向度等等，發展出最適合做多元應用的型態四，使單元體與單元體的相互牽制力相對減小，增加可活動範圍，同時又必須滿足模組化所需的統一型態、統一組構方式，以及組合後的初始狀態的多元使用性。第四章以「可動性」、「動態運動」作為依據檢視本文張拉整體結構，回顧「動態運動」、「動態邊界」在歷史的表現方式、以及動態邊界在藝術、建築上的討論，本章節以實體模型操作型態四，實驗張拉整體結構在動態邊界上的可能性，檢視型變的滑順程度，並探討以張拉整體結構操作動態邊界時，其後應用在建築皮層或裝置藝術的可行性以及可應用範疇。

由於張拉結構整體在形狀變動時，繩索或桅杆的長度隨之改變，以彈性繩做為繩索的模型，繩索部分在巨烈變形時會有明顯鬆弛的情形，因此有自伸縮性的材質可以使整體架構更清晰，在以「動態運動」、「動態邊界」檢視張拉整體結構前，本節前半部分實驗彈簧、記憶金屬應用在張拉結構的情況，觀察是否多材料混合實用可使張拉整體結構變動的型態更加順暢，型態轉變的過程是否因為彈簧本身的伸縮性、自應力的特性而減少型變過程稜角突起的情形。再以其中較佳的材料作實體模型操作。

4.1 以彈簧應用於張拉整體結構



圖表 51 以彈簧應用於單塔型張拉整體結構

以彈簧取代張拉整體的繩索(cables)結構，實驗結果所呈現的柔軟度與可塑性大於彈性繩的結構，塔型結構可服貼於曲面上，增加彎曲角度時所需力量相較於第三章的實驗過程明顯小許多。但必須注意的是單塔的結構支撐也較弱，可能必需以矩陣後的互相牽制力量來強化結構。第二個必須在設計初期就考慮的是彈性限度的問題，如果所需變型範圍大，彈簧伸長量大，總長度若超過彈性限度，結構整體無法回復到初始狀態。

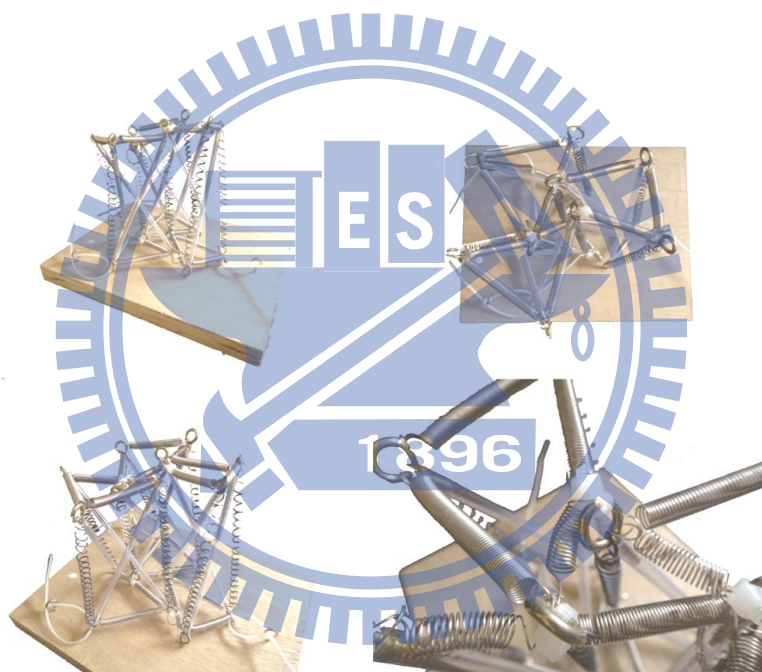
4.1.1 以記憶金屬應用於張拉整體結構

何為記憶金屬？形狀記憶合金(shape memory alloy)，顧名思義，就是一種能夠記憶原有形狀的金屬材料。也就是說，此種材料在其冷卻狀態下(低溫相)，若將它變形，當加熱至某臨界溫度以上，它可以回復到變形前的形狀。其應用主要是利用兩項顯著之特性：形狀記憶效應及彈性效應。此一系列的合金集溫度感測、溫度觸發形變、機械特性、耐腐蝕特性等，不僅符合現代材料所講求的輕、薄、短、小特點，進而以一纖細之記憶合金絲線可完全取代溫度感測器、小型馬達等昂貴組合，它直接隨溫度變化產生機械動作。

單向與雙向性形狀記憶效應

單向形狀記憶效應是指合金在低溫相變形後，若加熱使溫度達 a_f 以上，將可以回復原來形狀，但若將溫度冷卻到 m_f 以下，它將維持在加熱時回復的形狀，不再回復到原來變形時的形狀。對雙向形狀記憶效應而言，它能夠加熱變化為高溫形狀；若再冷卻的話，也能回復成低溫相原來的形狀，反覆多次這種熱循環，均能顯現高、低溫相不同形狀的特性。如圖所示即為雙向記憶行為彈簧元件之動作示意圖，隨加熱或冷卻時的溫度變化可以自發的伸長及縮短。假若僅僅具有單向記憶行為的話，加熱可回復到變形前的原來形狀，但加熱後冷卻，它將保持加熱回復之形狀，而不再有任何的形狀變化，如圖即為典型單向記憶行為彈簧元件動作示意圖。

三桅杆型(3- struts)單元體相接實驗



圖表 52 以記憶合金應用於三稜柱體張拉整體結構

記憶合金通電或加熱後本身具自發性伸縮，可取代第三章實驗過程的繩索結構，而且型變過程順暢，不會有繩索過度鬆弛而垂墜的情形。但是要考慮的是同一種型號的記憶合金原本的長度與通電後的型變長度固定，所以彎曲的範圍有一定限度，若做為設計材料，是設計過程中必須考慮的因素之一。另外要考慮的是記憶合金的價格昂貴，若做為 **cables** 的結構，範圍越大，所需要的數量倍增，可觀的設計預算也是需要慎重審核的。

小結

以彈簧取代張拉整體的繩索結構，實驗結果所呈現的柔軟度與可塑性大於彈性繩的結構，單塔型結構可服貼於曲面上，增加彎曲角度時所需力量相較於第三章的實驗過程明顯小許多。但是彈簧結構必須依靠外力來改變其形態，假若做為建築皮層或互動裝置藝術的考量，所使用的媒材必須是自體力量改變其形態，記憶合金雖然沒有彈簧的柔軟度、可塑性，但是呈現出自體結構長度的改變進而改變整體型態的原型，記憶合金結構的張拉系統可以提出可自體伸縮媒材運用在張拉整體結構時所需注意的問題，以及提出記憶合金在伸縮性的問題，作為選擇其他媒材應用的參考。

在下一小節將以彈簧取代部分張拉系統的繩索結構，做出一個 10×10 的矩陣張拉整體系統，在不考慮結構支撐以及應用媒材的限制下，呈現本文發展出的張拉整體結構系統在型變上各種可能性。此外，以記憶合金取代部分張拉系統的繩索結構，做出一個 8×8 的矩陣張拉結構系統，測試通電後的記憶合金所帶動的型變程度，與理想狀態(彈簧結構)的差異性，提出可以改善的方向。



4.2 10*10 矩陣張拉整體系統 - 以彈簧取代部分張拉結構系統



圖表 53 10*10 矩陣張拉整體系統 - 以彈簧取代部分張拉結構系統的原型製作

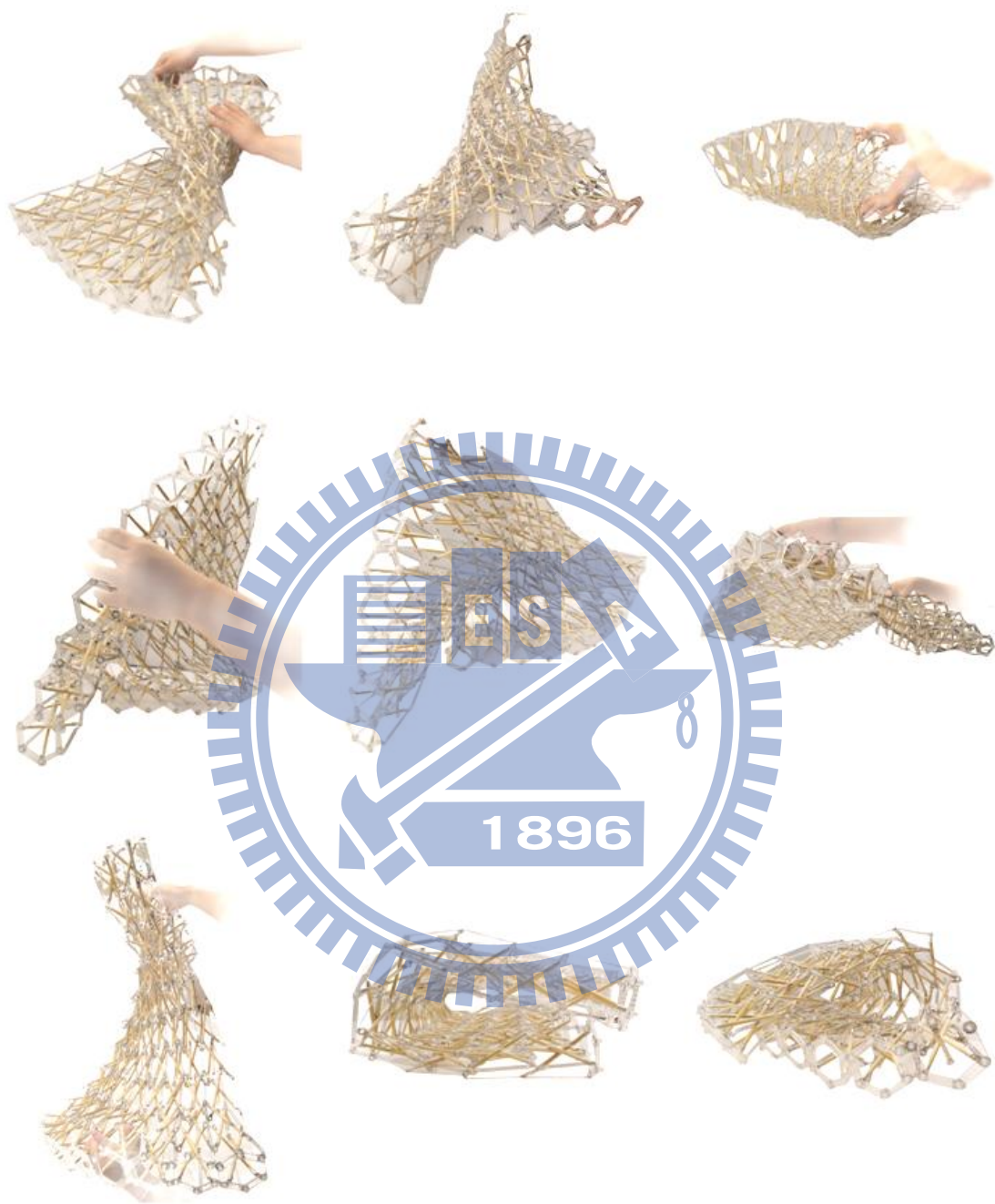
此系統先以單塔成型，由十個基本單元組成，單元中的六條垂直邊，三條為高彈力線三條為彈簧，相互交錯，底面與頂面以塑膠螺絲螺帽固定在正六邊型的壓克力片上，以確定每個單塔都在同一平面上。再以其中兩條相鄰的垂直邊連接另外一單塔結構，依序連接十個單塔結構。



圖表 54 10*10 彈簧矩陣張拉整體系統原型製作

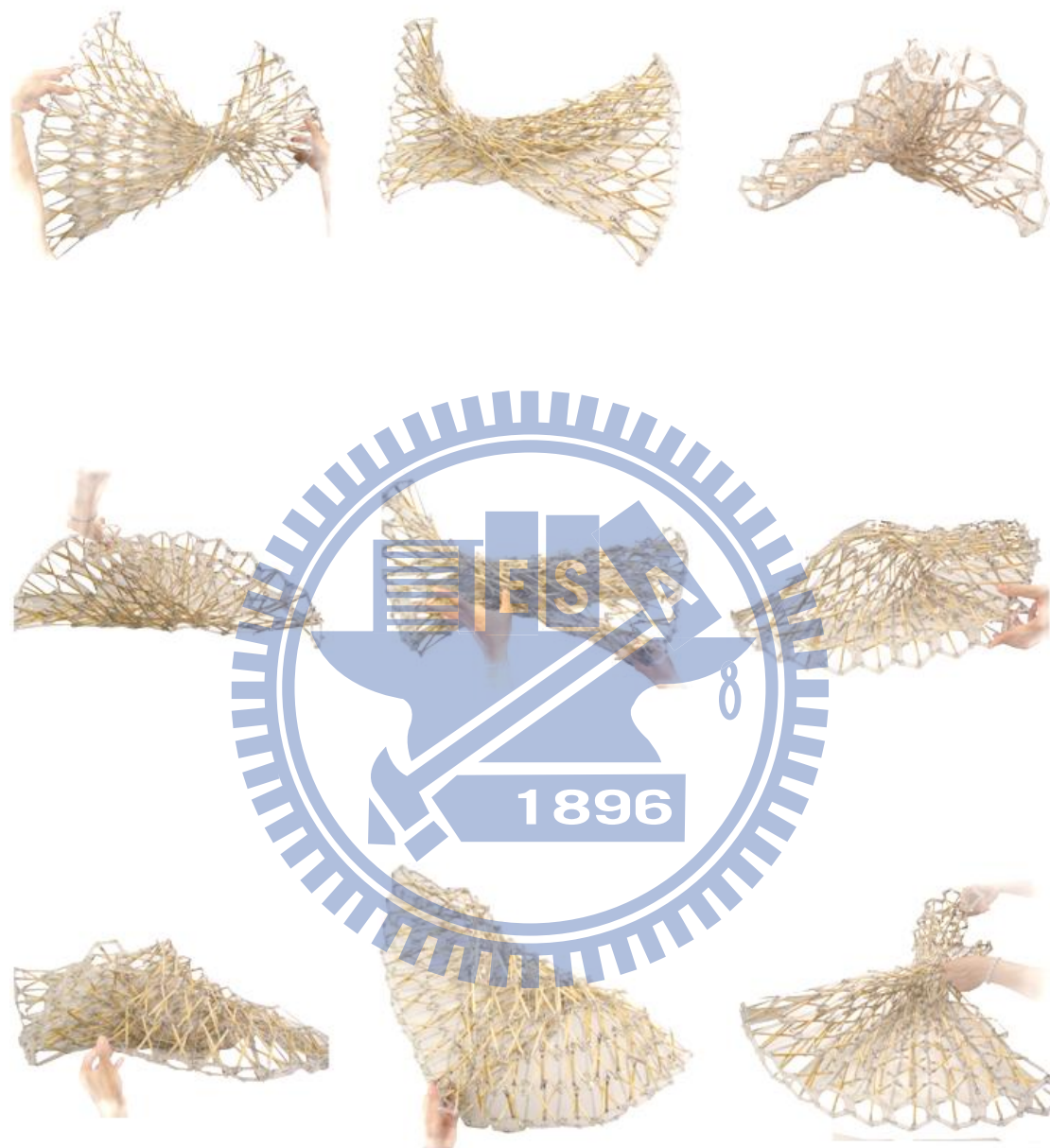
10*10 的張拉結構系統呈現的是材料限制小、不考慮結構支撐力的張拉整體系統，以彈簧代替系統可伸縮部位，由於材料選擇的是有高度伸縮性的彈簧，其他可自伸縮性的媒材如記憶合金、氣動壓桿，機械帶動的可伸縮桿件等，都有比彈簧更好的支撐力，但同時也必須考慮其伸縮性的容易度。以下概略提出 45 種此結構不同的動態變化。





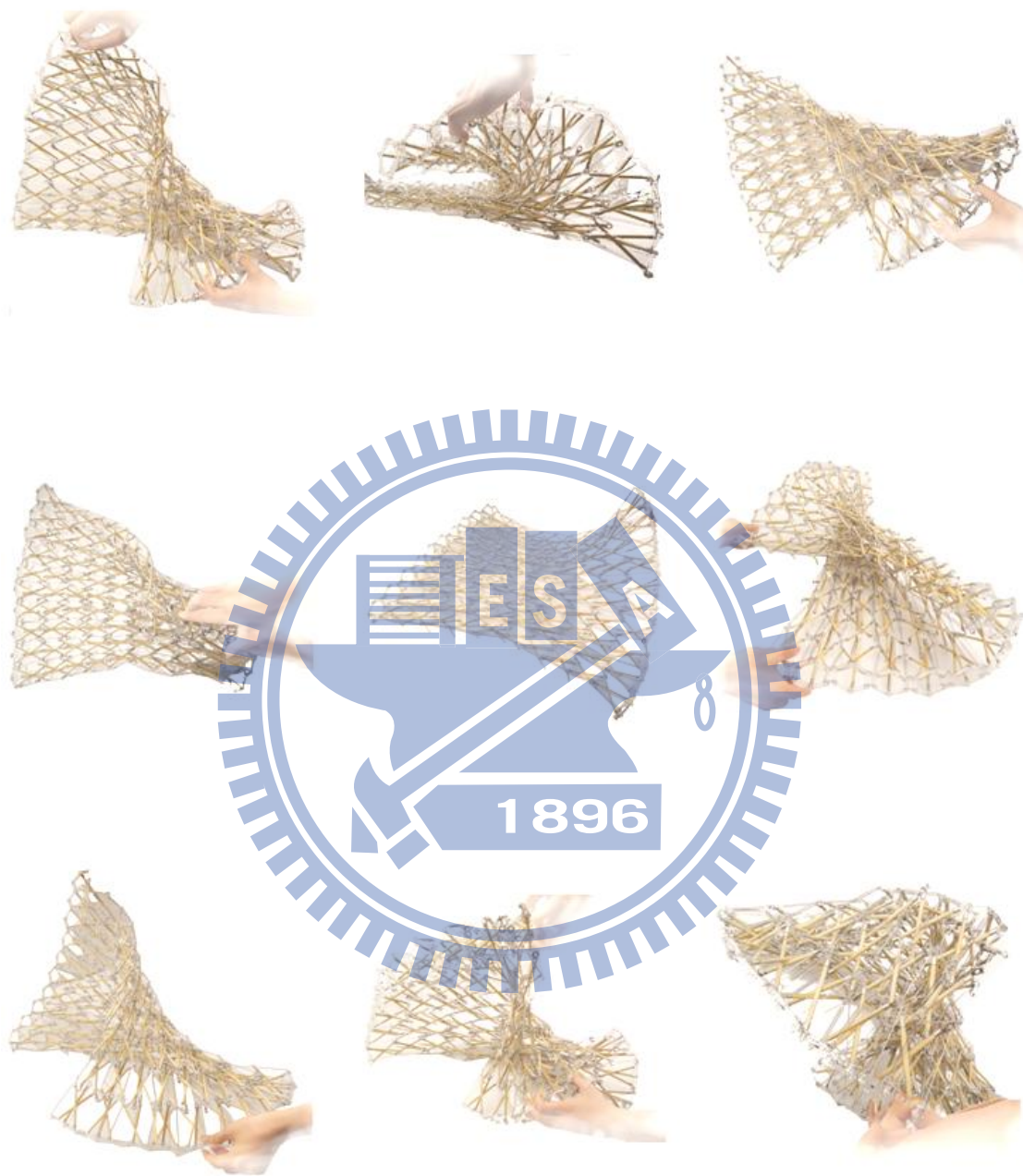
圖表 55 10*10 彈簧矩陣張拉整體系統各種型態

如上圖所示，以彈簧取代半數的繩索所呈現的張拉整體結構系統，其可動範圍大、可呈現的型態細膩度高，如上排一左圖與中圖、中排一左圖與中圖、雖然整體造型差不多，但扭轉的角度有不同之處。



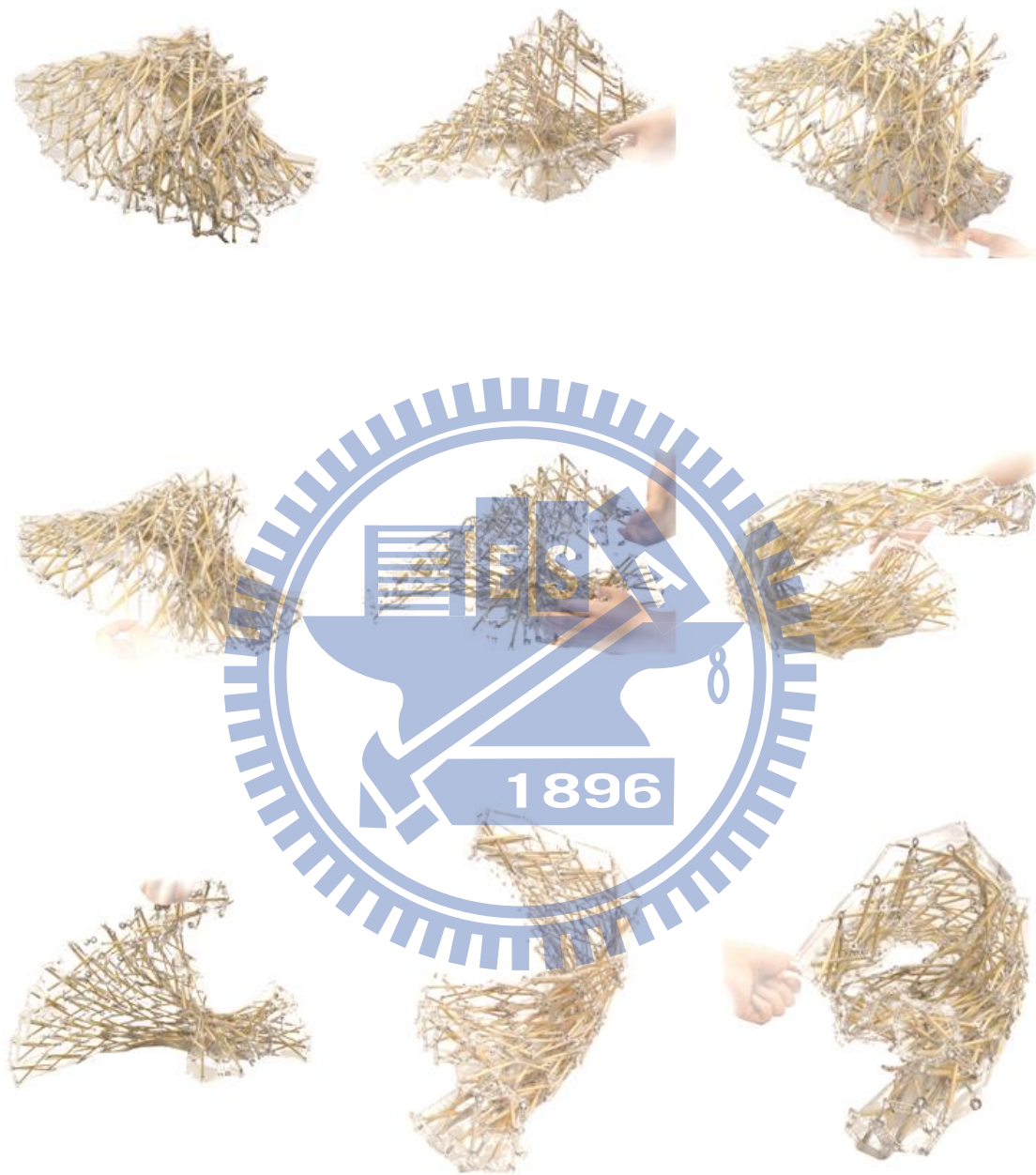
圖表 56 10*10 彈簧矩陣張拉整體系統各種型態

又如上圖所示，第一橫排中間圖與第二橫排中間圖，造型大同小異，但扭轉方向的稍微差異或是施力點不同，即造成左右兩邊開口大小差距大。



圖表 57 10*10 彈簧矩陣張拉整體系統各種型態

上圖型態的施力方式大都以彎曲、扭轉的方式成型。



圖表 58 10*10 彈簧矩陣張拉整體系統各種型態

上圖所示的型態，大致可分兩階段，先給予彎曲、扭轉的施力，再加上彎折的方式成型。



圖表 59 10*10 彈簧矩陣張拉整體系統各種型態

彈簧代替繩索部位的張拉整體結構系統，經由外力的介入(人的拉、扯、扭、轉)，可以做出許多不同動態變型，曲度的變化多層次，顯示其柔軟度與可塑性佳，其顯示的是不考慮應用在建築層面的原型操作，由於彈簧可伸縮性大、容易拉扯變形，此系統沒有足

以支撐自體的結構，可以說是不考慮實際建築皮層應用的動態型變最佳化。

4.2.2 8*8 矩陣張拉整體系統 - 以記憶合金取代部分張拉結構系統

單塔測試



圖表 60 以記憶合金取代部分張拉結構系統之單塔測試

在此小節中採用的記憶合金皆為型號 3-642 NiTi Spring (to activate heat to 70°C-80°C with 3A of current)，使用電源供應器供給 15 伏特電壓，再漸進給予電流至 3 安培，左圖為初始的單塔結構，以記憶合金連接單原體其中兩個邊，只給予其中一邊電流，另一邊保持原初始狀態，右邊兩個圖呈現通電後的結果，給予電流至三安培後，持續三秒，記憶合金的拉力可以對單塔型的張拉整體結構造成明顯的型變，而高彈力線也可以應付型變後所需的伸長度而不發生斷開。

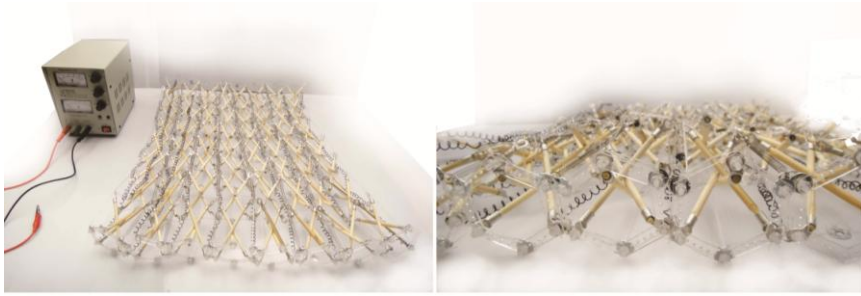
小結

彈簧系統的柔軟度比記憶合金系統佳，彈簧系統可因外力的推擠產生多種型態，而記憶合金系統因為 NiTi 合金在不通電不加熱的狀態下，有一較穩定、不易變形的狀態，雖然記憶合金從外界給力進而產生型變也是使其型變途徑之一，但所需力量較大也不方便，要做整體的變化時，必須給予每一線段 NiTi 合金不同外力，但是記憶合金系統呈現優於彈簧系統的是每個單原體的自主性。記憶合金系統因為常態下有一穩定的固定形狀，因此可以針對所需變化的單元做通電或加熱，系統中每個單原體之間牽動性較小，其餘不通電的記憶合金可保持初始狀態，顯示記憶合金系統可控制度、自主性較高。

8*8 矩陣張拉整體結構系統



圖表 61 8*8 記憶合金矩陣張拉整體結構系統 上正、下反兩面

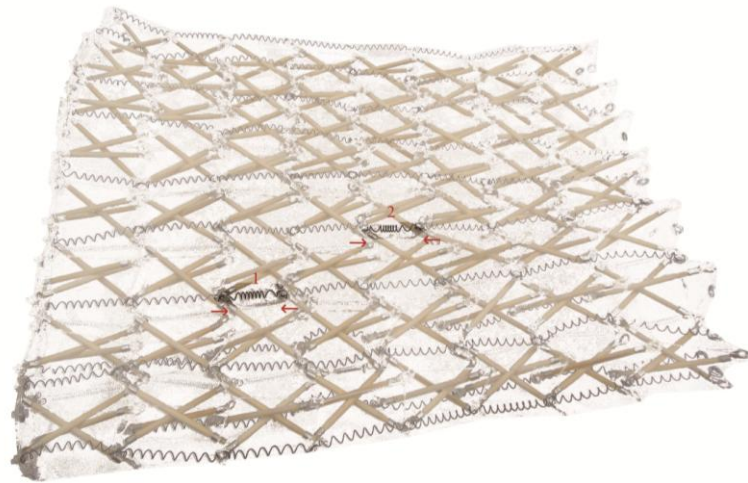


圖表 62 8*8 記憶合金矩陣張拉整體結構系統 測試系統

8*8 矩陣型張拉整體結構系統的成形，首先，先組接單塔，單塔由八個基本單元組成，單元中的六條垂直邊，三邊為記憶合金兩邊為彈簧一邊為高彈力線，三條記憶合金互不相鄰，底面與以塑膠螺絲螺帽固定在正六邊型的壓克力片上，以確定每個單塔都在同一平面上，頂面不固定。再以其中兩條相鄰的垂直邊連接另外一單塔結構，依序連接十個單塔結構。用以相接另一單塔的兩垂直邊，一邊為記憶合金，一邊為彈簧。記憶合金的張拉整體結構系統跟彈簧系統相比，彈簧的柔軟度、可塑性高，記憶合金系統由於記憶合金在常溫、不通電狀態下固定形態，需要較大的外力才會發生伸縮、型變，因此記憶合金系統不通電不加熱狀態可變型範圍非常有限。

單元體通電測試

記憶合金系統的張拉整體結構之實驗主題主要分為兩部分，一是單元體通電實驗，二是以塔狀結構為單元做通電實驗。前者單原體實驗主要觀察單原體的伸縮對矩陣張拉整體結構型態的改變，後者主要觀察多段記憶合金通電後所牽動的形體變化，比較單原體與塔狀單元對矩陣系統的改變差異。



圖表 63 單元體通電測試(一)

上圖為通電單元體內單一線段的記憶合金(1)(2)，結果顯示記憶合金可縮回初始狀態，通電後縮短的記憶合金對整體形態改變非常有限，但通電線段對其相鄰左段與右段有明顯的牽動，使前段與後段稍微伸長，相接點往通電端趨近。



圖表 64 單元體通電測試(二)

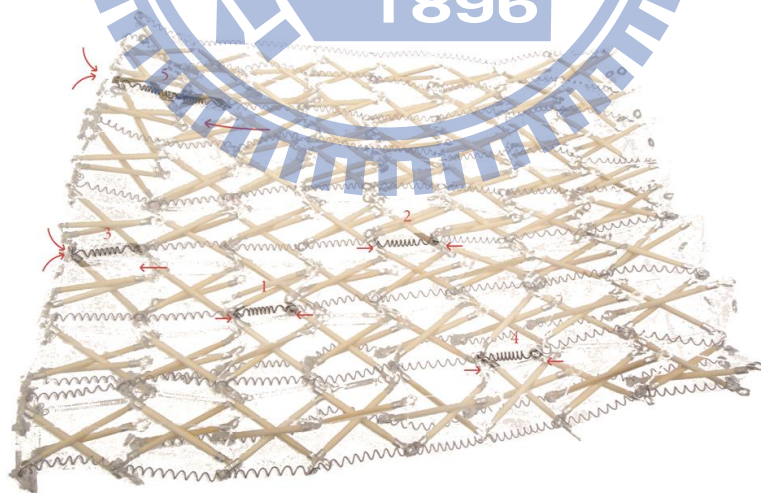
上圖為通電單元體內單一線段的記憶合金，但通電的線段為整體系統邊緣的單元體其中一邊(3)。結果顯示記憶合金亦可縮回初始狀態，通電後縮短的記憶合金對整體形態改變相較於通電系統中間單原體可改變型態稍微大些，通電線段對其相鄰的邊有明顯的牽動，使右段稍微伸長，使邊界的形狀改變，但整體而言改變依然不明顯。



圖表 65 單元體通電測試(三)

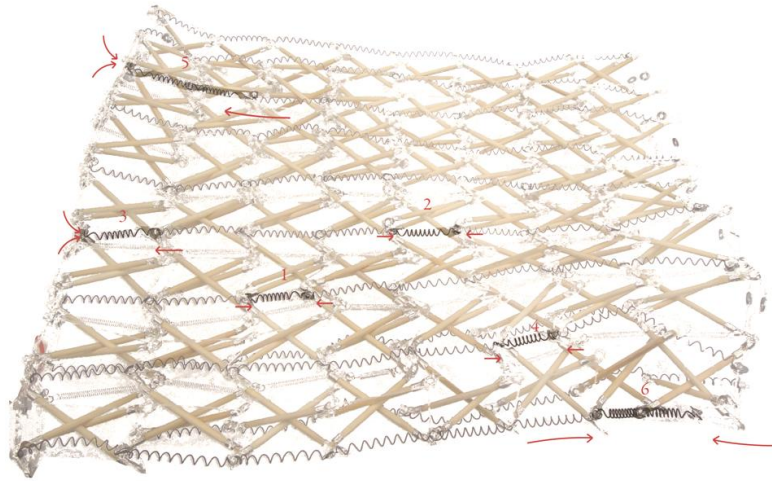
上圖為通電系統中間單元體單一線段時間前後差異比較圖(1)(2)(3)(4)。編號 1、2、3、4 分別代表通電順序，編號 1 與編號 4 通電時間約經過 3 分鐘，實驗結果亦顯示剛通完電的記憶合金回復未使用最短、最緊密狀態，隨著時間經過，張拉整體系統的應力會將記憶合金再拉回穩定狀態的長度，此狀態長度介於初始未通電狀態長度與通電後狀態長度之間。

相鄰兩個單元體同時通電實驗



圖表 66 相鄰兩個單元體同時通電實驗(一)

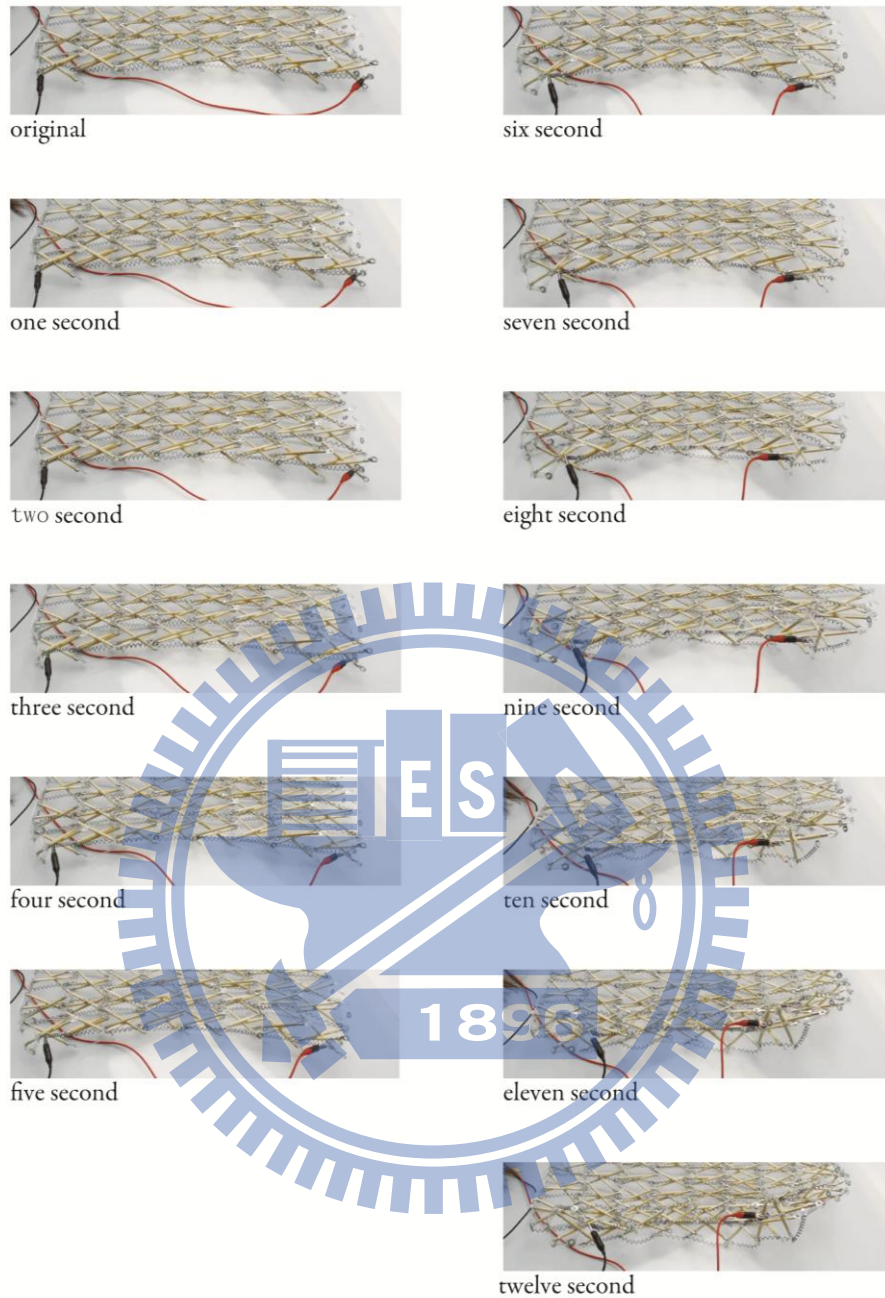
上圖在張拉整體結構邊緣的相鄰的兩個單元體同時通電測試，其邊緣有固定在正六邊型壓克力片上(5)。



圖表 67 相鄰兩個單元體同時通電實驗(二)

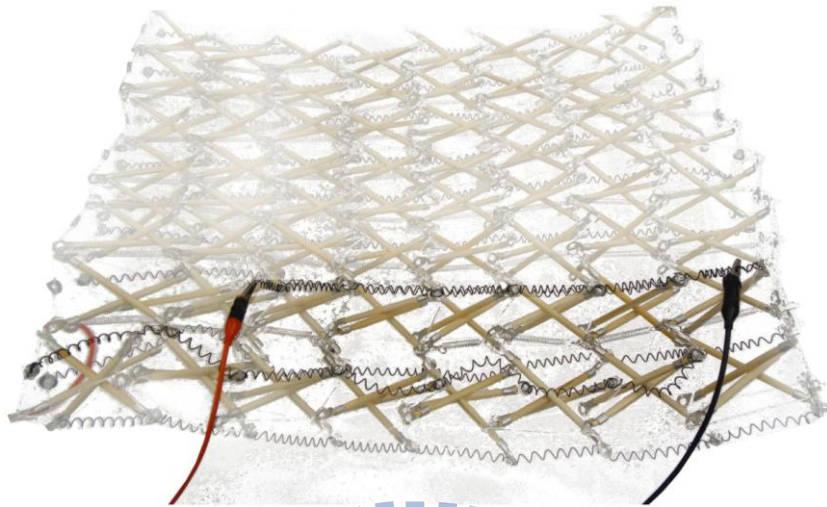
上圖為張拉整體結構邊緣的相鄰的兩個單元體同時通電測試，其邊緣沒有固定在正六邊型壓克力片上(6)。結果顯示雙段記憶合金通電後所造成整體的型變比單一段明顯許多，變化程度有加乘的效果，沒有固定在統一平面上的變化比有固定的一端更加明顯。但同樣在通電後需對抗整體系統的應力，一段時間後會再度回復伸長，縮小型變量。以單塔結構為單元做通電實驗



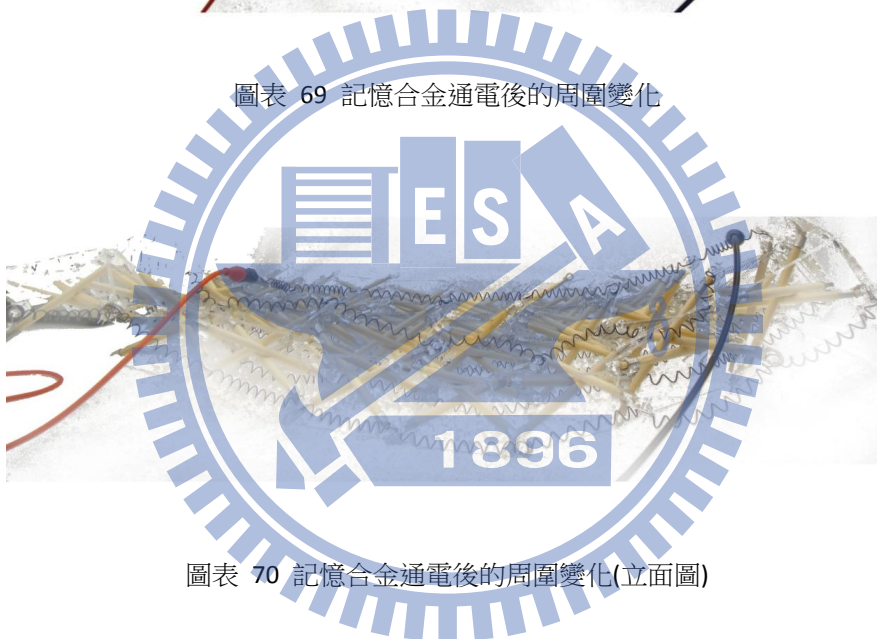


圖表 68 以單塔結構為單元做通電實驗一秒計分隔圖

上圖的型變漸變圖，是以最側邊的記憶合金固定給予 15 伏特電壓，給予電流由 0 安培到 3 安培，前五秒給予 2~2.5 安培，第六秒到第十二秒給予穩定 3 安培電流，電源供應器的正極與負極分別夾在塔型垂直邊的前後兩端，塔型中的八個單元體記憶合金不連續，在端子圓孔以螺絲螺帽固定相接的前後兩段記憶合金。影像紀錄並觀察後發現，前五秒的變形量相較於第六到十二秒的變形量小，電流達到 3 安培時的變化最顯著，越靠近正極負極的單元體變化越巨烈，中間單元體的記憶合金變形量最少。電源供應器結束供電的後兩秒後，因為結構本身應力，壓縮的記憶合金被結構張力伸長一些。



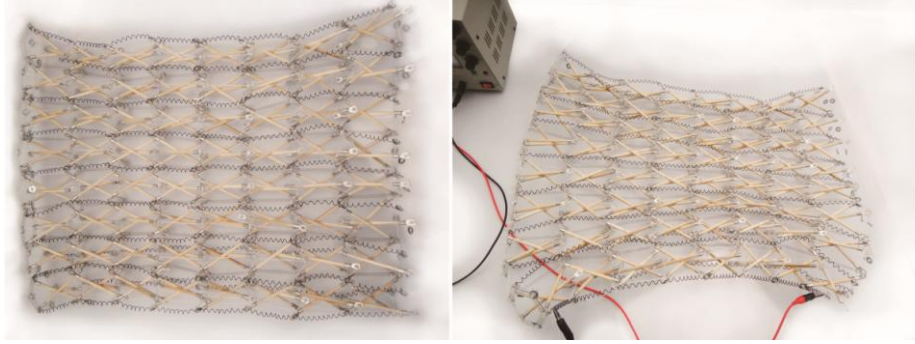
圖表 69 記憶合金通電後的周圍變化



圖表 70 記憶合金通電後的周圍變化(立面圖)

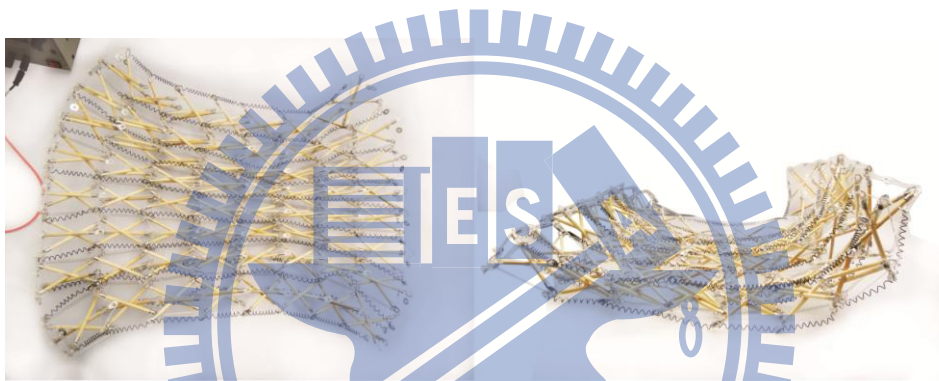
以塔型為單元做通電實驗，其變化可顯著影響整體型變，但記憶合金在不通電的狀態不像彈簧有自恢復力或因應系統應力變化伸長的彈性，在通電塔狀的相鄰結構無法因應隨之縮短，因此過長的記憶合金扭曲變形，對整體系統造成不可預期的型變，這個問題在記憶合金的加熱實驗提出，亦可做為往後選擇其他媒材時需要考慮的因素。

以塔型結構為單元依續通電實驗



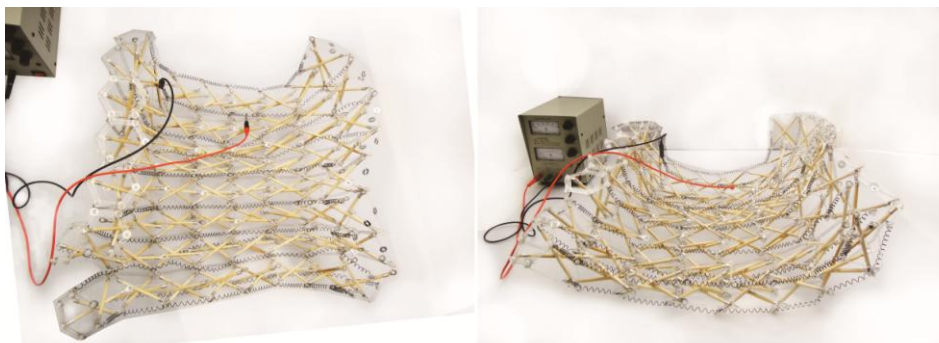
圖表 71 以塔型結構為單位通電實驗(一)

左圖為原始初始狀態，右圖為單一側邊記憶合金通電後的結果。單一側邊通電後的型變可以對矩陣系統有型變影響，但由於其他單原體的記憶合金依然保持初始長度，型變影響範圍限於側邊塔狀結構與相鄰的塔狀結構，其它的結構紙有些微變化。

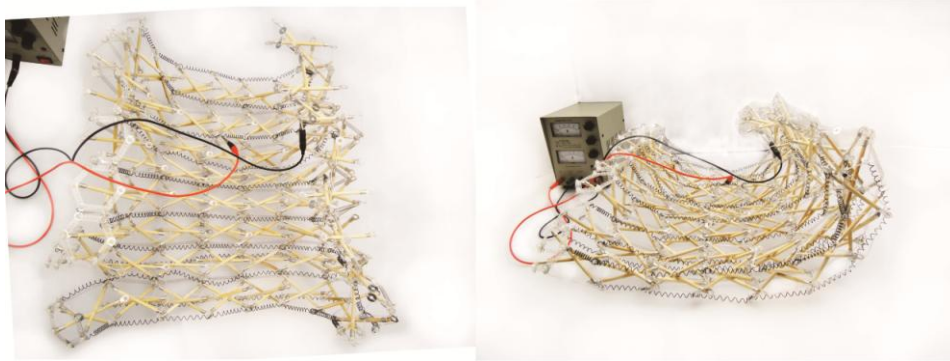


圖表 72 以塔型結構為單位通電實驗(二)

左圖為右側與左側通電後的型變狀態上視圖，右圖為正視圖。結果顯示通電後的型變從上視圖觀察，左右兩側記憶合金縮短後可明顯改變整體形狀，但從正視圖的角度討論彎曲度，從兩側邊要帶動矩陣張拉整體系統力量仍稍嫌薄弱，彎曲度有限，正六邊型壓克力固定端因為中間不變的記憶合金牽制加熱的記憶合金，整體而言，不固定端在捲曲度上較明顯。

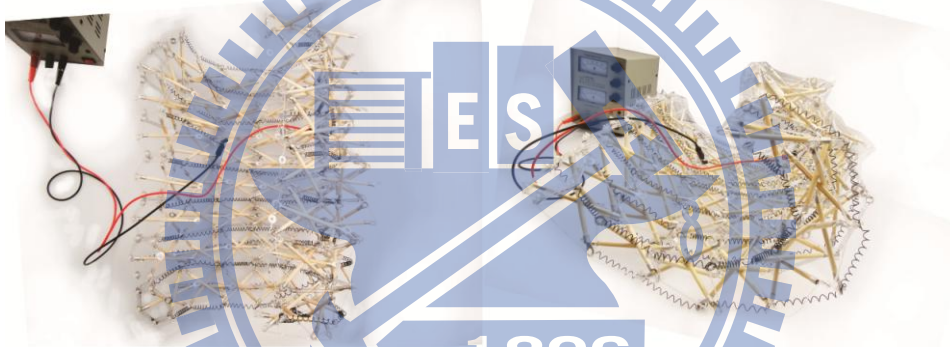


圖表 73 以塔型結構為單位通電實驗(三)



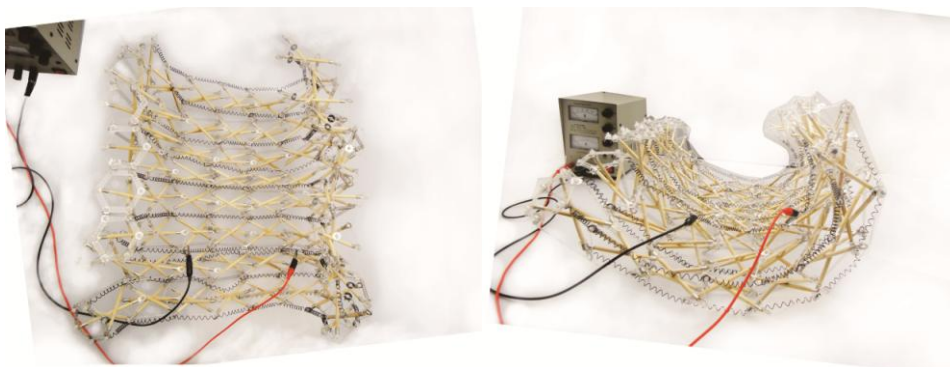
圖表 74 以塔型結構為單位通電實驗(四)

左圖為通電第一、二、八排記憶合金之上視圖，右圖為正視圖。結果顯示第一排與第二排記憶合金皆通電後，對於前排的影響較為顯著，從正視圖觀察彎曲度，前排的彎曲度明顯大於後段。記憶合金相接處沒有銲接處理，當型態彎曲時造成前段與後段記憶合金接觸不良，造成斷路，必須分斷給電。給予八段記憶合金同樣的變形縮短的長度，一次給予八段所需的時間較長，相同變化量以分段通電的方式測試，速度較快效果明顯。



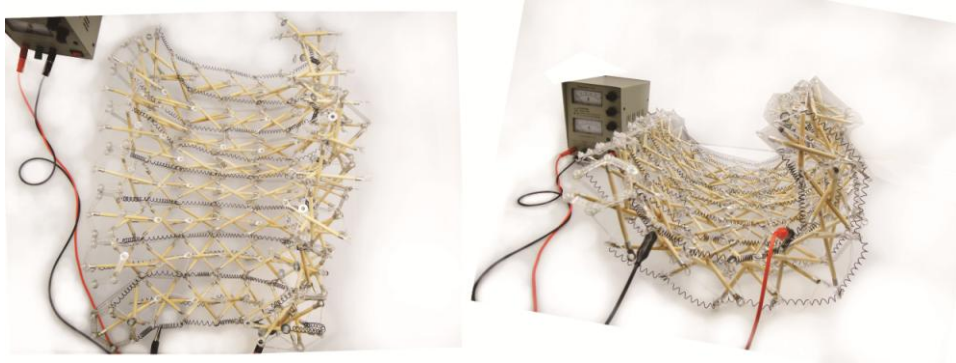
圖表 75 以塔型結構為單位通電實驗(五)

左圖為通電第一、二、三排與第八排記憶合金之上視圖，右圖為正視圖。結果顯示通電的記憶合金越多彎曲程度逐漸明顯，通電一、二、八排的結果呈現前排彎曲，後排部分仍然接近水平面，此區別證明了記憶合金系統的每個單原體有變形的可控制性，相互影響的程度比彈簧系統小許多。



圖表 76 以塔型結構為單位通電實驗(六)

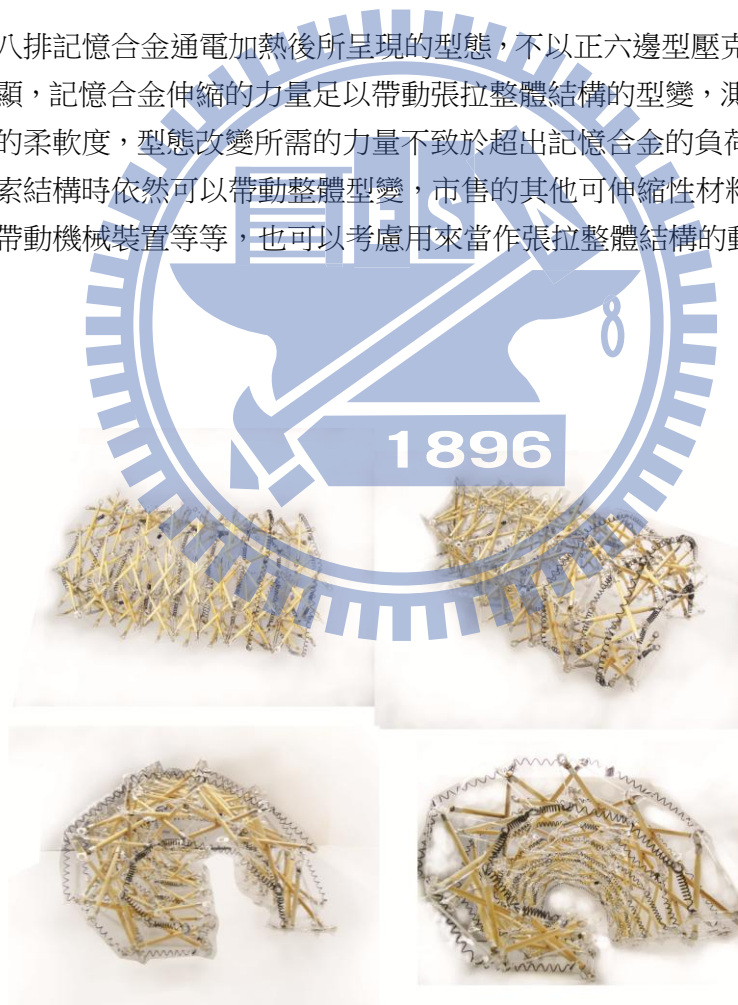
左圖為通電第一、二、三、七、八排記憶合金之上視圖，右圖為正視圖。



圖表 77 以塔型結構為單位通電實驗(七)

左圖為通電第一、二、三、四、五、六、七、八排記憶合金之上視圖，右圖為正視圖。

下圖為全部八排記憶合金通電加熱後所呈現的型態，不以正六邊型壓克力片固定的一端捲曲度較明顯，記憶合金伸縮的力量足以帶動張拉整體結構的型變，測試結果顯示此結構具有動態的柔軟度，型態改變所需的力量不致於超出記憶合金的負荷，以市售的其他材料代替繩索結構時依然可以帶動整體型變，市售的其他可伸縮性材料如；油壓桿、氣壓管、馬達帶動機械裝置等等，也可以考慮用來當作張拉整體結構的動力設備。



圖表 78 以塔型結構為單位通電實驗—最後型態

4.3 張拉整體結構(Tensegrity)在建築皮層的應用初探

本文旨提出張拉整體結構系統的優勢，從「構築性」來檢視張拉整體結構，其「構築方法」及「構築機制」角度而言，其輕質性(Lightness)與變化性(Morphing)經過改變其相接法、接點、排列方式，發展出可及時組裝拆卸、運送方便的模組化單元，創造出在開放空間中一種新型態牆體，利用其動態活動範圍廣，若可搭配伸縮性良好的動力設備如：彈簧、記憶合金、油壓桿、氣壓管等等，可在室內柔性劃分空間，在室內空間的運用可利用吊掛的方式取代必須有支撐力的剛硬結構，使其在內部空間的使用不會過於突兀。

不同於張拉整體結構以往使用在巨型雕塑品，本文發展的型態具有高度柔軟性、可塑性佳，但欠缺自體支撐力，在應用上需要外力介入輔助支撐，例如吊掛、懸掛方式使用時需要固定在依附架構上，類似建築皮層的概念，藉由不同伸縮桿件的使用與感應器的結合，可做出比張拉整體結構在以往使用上更多元的表現方式，在控制型變上更加便利。本研究發展的最後結構在型態上的變化相較於張拉整體結構明顯增加許多，可動範圍增大，降低整體型態在變動時的破壞性。單一個體可在水平、垂直方向連續相接、無限連接，可依需求調整多寡，達到可模組化的功能。

在建築上的使用，除了必須考慮到尺度放大後，單元體隨之放大是否影響動態性的靈活度，而結構上也必須考慮支撐問題，外加性的建築皮層可以側面固定或吊掛的方式存在，假若應用在臨時性建築，則必須考慮採用的建材、動力設備應用在伸縮結構上是否可承受本體重量及型變。由本文發展出的張拉整體結構(Tensegrity)可做出的動作包括：旋轉、扭轉、曲直、伸縮、波伏等等，綜合這些動作可做出多種組合的型態變化。

第五章 結論

議題討論-動態設計的範疇

本研究提出一個完全動態的設計，在穩定框架下有最大的可動性，以下就經濟效益、機能類型、建築實體元素三方面進行討論，重新思考動態設計在目前建築、室內、藝術所應有的思考角度，以及其扮演的角色。

在經濟效益的考量下，一個構造上屬於「完全動態」或稱為「整體移動」的結構體，相較於局部應用動態設計，可以有更多元的使用，在不同的空間量、空間構造、不同的自然環境較有可調式的優勢。

就機能而論，住宅的使用是否對變動性有強烈需求，變動性的助益性多少，是否對於工程上的困難與損耗有等值回饋或更好的回饋。住宅重視的是空間的宜人性，主要可在兩方面著重，其一是可調以適應氣候條件的外層表皮，二是可動態的內牆，公共建築、藝術雕塑或展覽館需要有彈性與多元使用性的空間，適合應用在可重組的內部隔間牆。

就建築實體元素而言，操作對象可能是依附於主體結構的動態外殼表層，塑造炫麗的動態建築立面，配合聲光效果以達炫目的演出，吸引人潮流連、注目。操作對象也可能是室內嵌於建築物內部的可移動隔間牆或樓板，對於展覽館類型空間可隨展品的大小，展品營造氛圍所需空間大小，做每次不同的調度。

研究成果

本研究的貢獻主要在於提出，利用張拉整體結構輕質性(Lightness)與變化性(Morphing)的優勢，設計出有別於慣常建築設計最終僅需要收斂成單一靜態的形體狀態，而呈現出動態結構的多樣性，提高設計思考的複雜度。由於張拉整體模組的自應力、自平衡性，其結構通常處於穩定、集中的狀態，不易有單邊或某一桅杆特別突出，其穩定型單體也難有可連續相接的面或點。本研究突破張拉整體結構的穩定性，在穩定狀態下找尋最大變動範圍的結構，同時必須滿足可以模組化的單元體，其模組化後的初始狀態可供作可調的變動、扭轉，可以將製作完成的單體或模組獨立運至工地，在所要位置進行現場拼裝，其模組的型態、大小可以依設計需求或施工現場的場地限制，如運送過程容積限制、施工場地通道的高度限制、施工場地出入口大小限制等等，其拆卸容易，可在製造廠先客製其組件的大小，再送至施工場地，若過程中有無預期的限制，也可以當場緊急拆卸。

在環境變動較快的地區的居住者，時常因應環境條件改變而遷徙居住地點，必須仰賴易於拆卸重組的建築構造體。而在本研究提到的張拉整體結構則須因應空間型體的不同，可以基於此型態之容易拆卸組合的特性，發展出以同一結構體，可做為臨時搭建的結構，亦可應用在建築皮層或室內私領域的間隔，讓建築物的遮蔽性在這種自然環境嚴苛的地方可以被彈性地利用。

在發展過程中的型態一、型態二、型態三雖然因為扭轉需求與改善其初始穩定狀態的彎曲情形，而不採用為最終模組化的單原體，但是其一、二、三型態也都建立在可以模組化的單元體基礎上，由單元體量化相接後組成牆體，因為每種形態的接合點數量不同、接合地方不同，造成每一型態的可動性可能偏向垂直或偏向水平，在某一方向有較容易的扭動的趨勢。這個在模組化設計中應該除去的情形，也不盡然應被完全忽略，假若遇到有彎曲的需求，如建築本體有曲面設計，或是室內牆面曲面設計時，若需要些微彎曲又不需太大的可動性，則可考慮型態一的張拉整體結構，型態一在結構上比型態四更加穩固。而型態三的接合方式在連續接合後會有明顯的彎曲，擴展到一定程度後會有規則性的自轉彎，此型態在藝術多媒體雕塑上也許可以是基本型態的發展基礎。

不同於張拉整體結構以往使用在巨型雕塑品，本文發展的型態具有高度柔軟性、可塑性佳，但欠缺自體支撐力，在應用上需要外力介入輔助支撐，例如吊掛、懸掛方式使用時需要固定在依附架構上，類似建築皮層的概念，藉由不同伸縮桿件的使用與感應器的結合，可做出比張拉整體結構在以往使用上更多元的表現方式，在控制型變上更加便利。本研究發展的最後結構在型態上的變化相較於張拉整體結構明顯增加許多，可動範圍增大，降低整體型態在變動時的破壞性。單一個體可在水平、垂直方向連續相接、無限連接，可依需求調整多寡，達到可模組化的功能。

研究限制

在原型演作階段中，所提出的設計型態，乃是匯集本研究所發展的基本原型。而概念原型與建築原型的差異在於建築原型必須在真實尺度下被重現。在真實尺度下所必須面對的各種系統的整合問題，即材料、結構、構造關係的考量，都有別於數位環境或縮小比例模型。當研究的進程，行至將概念原型更進一步在真實尺度下被發展為建築皮層或公共藝術時，所需要思考的問題有二：一是動態元件(驅動器、致動器)內嵌於既有結構體，取代原型製作中的繩索，使結構依需求自動變動型態，此時與周遭系統的關係，需要被詳加檢視。二是動態原型設計的組構方式，所使用的接頭、線材等在真實比例構築下，採取不同的材料需要有多少程度的調整？

本文著重在概念原型的基本構造，使其可以模組化並且在空間中有一定影響作用，反觀動態結構的使用，最後都會趨向讓可動結構與人或自然環境互動，也就是所謂的可動建築、可回應式建築，此時需要感應系統與控制系統以及致動系統結合，市售的感測器種類與靈敏度往往會侷限設計，或是記憶合金與氣壓感的市售規格固定無法合用於實際規格等等，從概念原型到建築原型的過程會加進更多不確定因素，使張拉整體結構的單元模組落實在現實中的困難度增加。而現在已有的應用軟體無法從設計端輸入感測器與致動器的資料，讓虛擬端告之設計者可能發生的錯誤，虛擬端與設計端有斷層，無法回饋跟檢視設計端的利弊。這會使實驗過程的困難度增加、進程緩慢，無法有效率的進行研究。

後續研究

近年來以動態建築為特色的建築案例中，有強調視覺效果的媒體表層，或利用表面特殊材質的變化，本研究則偏重於實體構築的動態行為，關於基本型構組合有初步討論，但值得更進一步探討在實體應用時如何建立一個通用準則，從元件製造過程、層級分類，藉由標準化的流程對現場拆裝與重組盡最大效益。

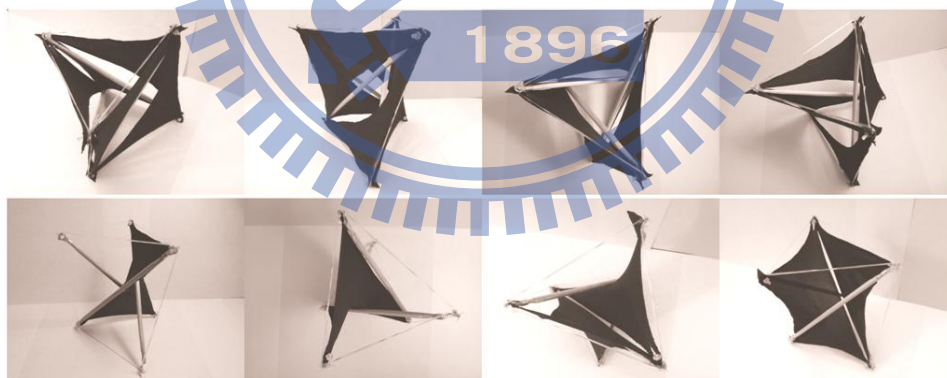
介面構築

構造

可動構造執行仰賴基本機構關節之間的組合，基本結構接合介面已在本文詳細的推演，嘗試在一種輕量化材料使用下的構築方式。對於依附於主體結構的動態外殼表層而言，在不同的介面如，不同的結構體、不同的空間型體，應該要有因應變化的接合方式。

皮層

皮層覆體必須兼顧足夠的伸展性、輕量化與封閉性的選擇。在本文所推演出的張拉整體結構要考慮的包括，單元體內皮層或是披覆於單元體外皮層，單元體內需考慮到桅杆結構的阻礙，若皮層結構接觸到桅杆，則皮層無法展現其受力狀態型狀，皮層與桅杆將會互相影響。若披覆於單元體外則須考慮到材質的伸縮性，當矩陣體型變量巨烈時，皮層是否有可隨之型變的伸縮性。



元件層級分類

一個發展完備的動態構築方法與構造語言，需要下面兩個基本要素，才可能成為可以初步供產業界使用的動態構築方法。

- 1.構造層級分類，各個元件應該有一個結構邏輯的分類關係，如果只將每個元件視為同一層級的組裝堆疊，在施工現場可能造成混淆，拖延施工進度，如由大到小分成柱子、小柱、小框架、表層支架等等，在本文所討論的張拉整體結構大致可分為，組構元件、單元體、單元體 2*2 矩陣、單元體 10*10 矩陣、矩陣牆體等等。
- 2.模組元件的標準化，接頭元件、框架結構體的標準化。

參考文獻

Tatiana Olejnikova(2012). Double Layer Tensegrity Grids

N.D. Oliveto , M.V. Sivaselvan (2010).Dynamic analysis of tensegrity structures using a complementarity framework

R.E. Skelton, M.C. de Oliveira (2009). Tensegrity Structure

Milenko Masic ,Robert E. Skelton (2005).Selection of prestress for optimal dynamic/control performance of tensegrity structures.

Cornel Sultan , Robert Skelton (2003)Deployment of tensegrity structures

Cornel Sultan , Martin Corless , Robert E. Skelton (2001).Symmetrical reconfiguration of tensegrity structures.

N. Fazli, A. Abedian().Design of tensegrity structures for supporting deployable mesh Antennas

Chandana Paul, Francisco J. Valero-Cuevas, and Hod Lipson (2006).Design and Control of Tensegrity Robots for Locomotion

Jean-Paul Pinaud, Soren Solari, and Robert E. Skelton. Deployment of a Class 2 Tensegrity Boom

Chris A. Mohr, Marc Arsenault (2011). KINEMATIC ANALYSIS OF A TRANSLATIONAL 3-DOF TENSEGRITY MECHANISM

Silvia Lenyra Meirelles Campos Titotto, Telmo Egmar Camilo Deifeld and Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti (2004). THE MONUMENT TO THE FUTILE FORM II:CONCEPTION, SIMULATION AND REALIZATION OF A TENSEGRITYMEMBRANESCULPTURE

Kenneth Snelson(2011). The Art of Tensegrity

Anders Sunde Wroldsen(2007).Modelling and Control of Tensegrity Structures

Peng Zhangli (2006).Theoretical research on tensegrity torus
And load-carrying capacity and practical calculation method for welded hollow spherical
joints subject to planar tri-directional combined loading of axial forces and bending
moments

W ANG Hong—jun , ZHANG Qi—lin , ZHOU ji , YANG Zong—lin (2004).Tensegrity model
making

CHEN Zhi-hua, ZHAO Jian-bo,LIU Xi-liang (2005).Study on Tensegrity Tower
Composed of Truncated Triangular Pyramid

CHEN Zhi-hua, SHI Jie , LIU Xi-liang (2004). Experimental Study on Quadrangulr
Prism Unit of Tensegrity

PENG Zhang-Li ,YUAN Xing—fei, DONG Shi—lin(2006).Tensegrity torus

William Zuk,Roger H. Clark(1970).Kinectic Architecture.

Essay by Eleanor Heartney, Additional text by Kenneth Snelson(2009).KENNETH
SNELSON force made visible

鄭泰昇，《互動建築：空間即媒體、界面、與機器人》(Interactive Architecture: Space
as Medium, Interface, and Robot) , 2011

陳上元(2007),智慧代理者理論應用在可調適性建築環境的研究-以智慧皮層為例(The
study of applying agent-based theory to adaptive architectural environments-Smart skin
as an example)