參數化設計模擬：複合構材的形變干預與衍生

陳嘉懿*

桃園創新技術學院 建築系

摘要

本研究探討基於數位設計與製造方法，實現一複合構造的參數化設計流程。本研究透過電腦模擬與實作實驗，透過即時三維視覺化互動模擬與參數化設計，模擬複合構材受到外力產生變形之干涉行為，以助於了解材料行為其相關變數的運算關聯。本研究透過參數化工具軟體進行數位模型的開發，以模擬所實驗材料的行為，並評估這些行為彼此構成一系統的可能性。本研究目的有三：(A) 模擬當材料被施加某些應力時，透過軟體平台的物理特性引擎或其相容的工具庫模擬，可使數位模型表達其材料的物理及動態運動特性。(B) 延伸前述模擬流程，再將模擬結果轉作為某些規則產生器的輸入資料，使成為材料形變過程中可改變或修正材料行為的干預因子，藉此也產生許多仿生造型設計的可能性。(C) 探討 3D 模型斷面圖層化之拆解、組裝元件的方法，並結合人工組裝(堆疊、綑綁)及機器切割(斷層、雷射切割)等實作方法。上述流程印證了數位模擬結果轉換為真實材料複合構造的製作方法。

關鍵字：數位設計與製造、參數化設計模擬、複合構材

*Email: joychen@tiit.edu.tw Tel : 03-4361070#4508 Fax : 03-4374236

PARAMETRIC DESIGN SIMULATION: MUTATIONAL INTERVENTION AND FORM GENERATION OF A COMPLEX TECTONICS

Jia-Yih Chen*

Department of Architecture, Taoyuan Innovation Institute of Technology

Abstract

This study focuses on the parametrical design process in fulfilling a complex tectonics based on digital design and fabrication methods. Through the experiments to computationally understand behavior of a material under some forces leading to complex deformation and intervene into it to cause partial or full mutation of the behavior. The research objectives are: (A) investigating a possibility to construct a system to grasp behavior of the targeted material by developing a digital model, which can represent physical and dynamic movement of it while being under some forces, through simulations utilizing physics engine or any other coherent library. (B) aiming to extend the simulation process further to use the simulation result as an input and turn it into a generator of some rules to intervene in the process of deformation which can alter or modify the material behavior. (C) examining to fuse manual assembly –chopping, tearing, perforating, folding, stacking- and machine fabrication/assembly –cutting, binding- to take advantage both of human labor and precise machines/robotics. The process above proves a method for embodying the complex tectonics with real-world materials.

Keywords：Digital Design and Fabrication; Parametrical Design Simulation; Complex Tectonics

*Email: joychen@tiit.edu.tw Tel : 03-4361070#4508 Fax : 03-4374236

壹、前言

本研究探討基於數位設計與製造方法，實現一複合構造的參數化設計流程。隨著電腦運算速度及軟體演算法介面的進步，參數化模擬(Parametric Modeling)由系統內建圖塊轉變為設計者的設計工具，透過更友善介面的腳本撰寫，設計者能自行設計參數化模組的衍生規則，使設計更加系統化，也提高了模型的視覺化表達能力。然而電腦運算所產生的各種複雜幾何形體，跳脫既有的建材構造組合模式，究竟應透過怎樣的流程，才能將數位設計的構想在真實世界中呈現出來，實為本研究切入的動機。希望透過此一議題的探討作為先期研究，為後續的智慧綠建築模組資訊模型設計課題產生可運用的關鍵方法，以銜接未來可動式設計單元在數位輸入與控制上的需求，並能落實到實體世界單元的運作當中。

一、 研究目的

本研究透過參數化工具軟體的運用，進行數位模型的開發，以找出所實驗材料的行為，並評估這些行為構成一系統的可能性。其目的有三：(A) 模擬當材料被施加某些應力時，透過軟體平台的物理特性引擎或其相容的工具庫模擬，可使數位模型表達其材料的物理及動態運動特性。(B) 延伸前述模擬流程，再將模擬結果轉作為某些規則產生器的輸入資料，使成為材料形變過程中可改變或修正材料行為的干預因子，藉此也產生許多仿生造型設計的可能性。(C) 探討 3D 模型斷面圖層化之拆解、組裝元件的方法，並將模擬結果轉換為真實材料製作的方法與流程。

二、 研究方法

本研究透過電腦模擬與實證實驗之方法，如圖 1，其步驟有五，包含電腦端前置作業及實作展示，內容如下：

1. 先建構一包含 Grasshopper 定義的 Rhino (3dm) 基礎模擬檔案，包含嵌入的 python 碼程式及 Rhino 5.0 軟體上的物理特性引擎，操作者可選定所包含材料之特定行為目的進行模擬及分析。
2. 透過 Rhino 5.0 及 Grasshopper，對材料加入限制條件，來測試各種不同材料參數組合的可能性及可能產出的結果。依照所對應的形狀變化對於鎖定的材料進行探討，定義出其目標造型與所需要的節點、關節、元件。

3. 經過模擬方案的篩選，選定所產出的目標方案，並產生材料加工製造與組裝的數據資料，以便於開始製造與組裝。
4. 根據製造/組裝資料將材料加工成半成品，再透過實際材料的拆解、編碼、疊合、組裝，實現完成所模擬的數位模型。
5. 成果展示：將所組裝完成的作品(長 2m X 寬 2m X 高 50cm)安裝充氣馬達，隨時補充氣囊空氣壓力，以維持構件之間之動態平衡。

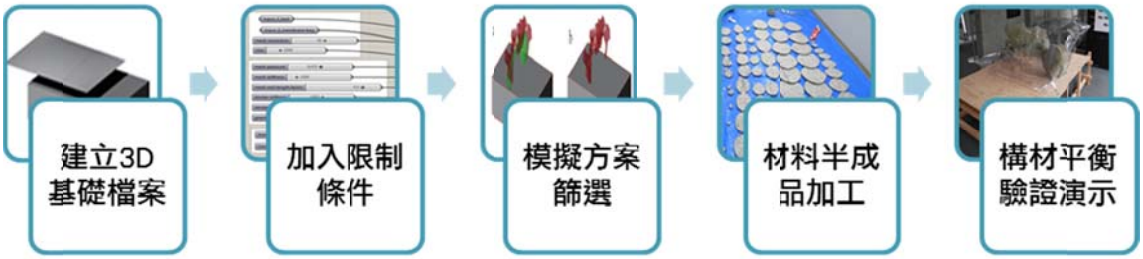

圖 1. 研究方法與執行步驟流程圖

本研究藉由電腦模擬與實作實驗，透過 Grasshopper 即時三維視覺化互動模擬與參數化設計平台，並運用 Kangaroo 外掛程式，模擬複合構材受到外力產生變形的干涉行為，以助於了解材料行為與相關運算參數的關聯。上述電腦模型將具體透過設計/製造/組裝實作成為一個特殊的複合構材，其組成單元透過切割、穿孔、摺疊、堆疊及綑黏等流程，最後產生一材料的整合系統。從設計到模擬各流程中，研究者可在此系統中明確地控制其中所有變數。此一複合構板實作流程希望能印證數位模擬結果可轉換為真實材料複合構造的製作方法。

貳、文獻探討

一、參數化設計工具的發展

近年來隨著數位製造工具的發展，全球數位設計領域對於參數化設計模擬逐漸重視，並視為革命性之新方法。所謂「參數化設計模擬」即指透過對於數據、尺寸、幾何與變數等重要數值的調整，達到改變設計的目的，因此許多設計者以參數化設計作為實踐與控制有機、複雜、曲面造型的有效手段。早期參數化模型大多仰賴套裝軟體中既有的參數化元件，近年來許多三維軟體則進一步提供腳本編

撰的功能，如：AutoCAD 的 Autolisp、3d MAX 的 MaxScript、SketchUp 的 Ruby、MAYA 的 MEL、Rhinoceros 的 VB Script、C#及 Python 等。而對於不諳程式設計的設計人員而言，Rhinoceros 的 Grasshopper 插件(Plug-in)實為一友善好用之圖形介面工具，可透過關聯式模型，將系統所設計好的運算元件(component)工具庫套用在 3d 模型上，透過運算元件的拖拉與串接，間接達到腳本的功能，如圖 2 以本研究之模擬案例為例，圖右 Grasshopper 介面中運算元件對圖左 3D 模型產生之影響結果，隨即可以透過視覺化呈現一目瞭然。由於軟體取得及使用容易，為許多建築相關設計領域進入參數化設計的橋梁，參數化建模將設計中有意義之參數，透過規則或函數加以產生動態化定義，使複雜的設計因子得以建立理性化、系統化的關係。Grasshopper 平台應用案例近年快速崛起，逐漸成為參數化設計界主流。(陳珍誠，2014) (邱浩修，2013) (Schumacher, 2012)

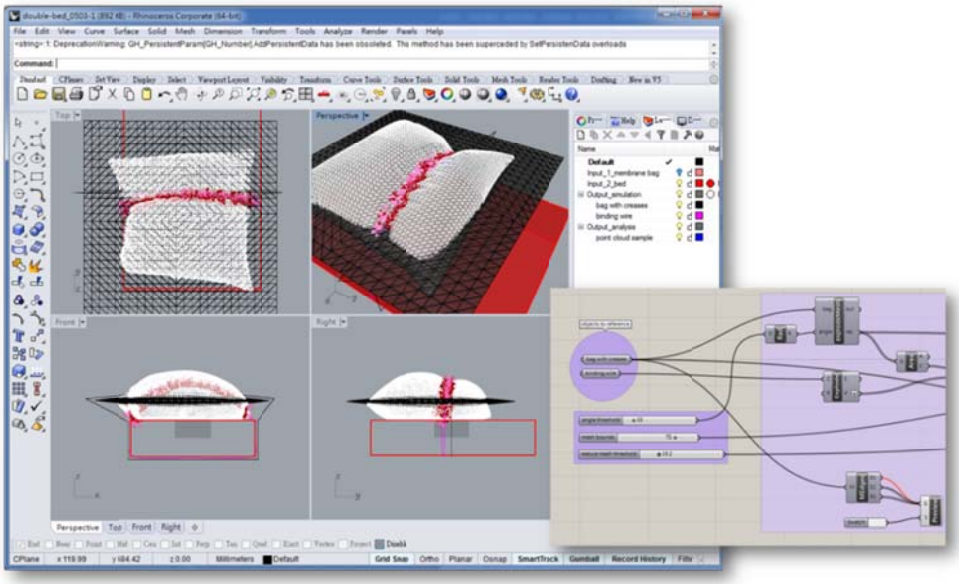

圖 2. Rhino 3D 建模軟體與 Grasshopper 參數化設計平台介面

二、 參數化設計工具的應用原理

透過參數化的方法，設計的修改與可能的設計解答可以在極短的時間內完成。根據陳珍誠(2012)的分類，參數化設計應用於設計過程中的特性可包含下列幾項：(1) 可釐清設計原件中各個子物件之間的關係與關聯，即設計條件、限制、材料、經費、效益等參數與模型之關聯；(2) 根據既有案例加以參數化產生類似的設計案例，如：引用過去著名建築案例之形狀文法；(3) 根據不同的設計需求發展出相關

的參數化模型，當設計需求更改時不需重新製作電腦模型；(4) 提供不同設計條件與限制下的設計解答與選擇：有助於提出更多替選方案的比較；(5) 以時間為基礎的動態序列形式變化，可觀察數位演化的過程；(6) 模擬設計完成後製造端之參數化數位製造實踐，可產生更複雜的結構、形體、與細部等系統化製造元件。上列多項特性說明參數化設計之應用原理，足以涵蓋本研究所欲探索之主題。

三、 物理特性模擬引擎

由 Daneil Piker 所開發的 Grasshopper 外掛模組 “Kangaroo”是 Grasshopper 參數化設計軟體的動態物理模擬引擎，可以即時評估設計形式的真實性能及建築材料的實際現象，再由分析結果找出最佳設計方案。如圖 3，Kangaroo 外掛能直接模擬 Rhino3D 模型的物理行為，可以針對環境場域中由 Grasshopper 所建構的多種幾何物件進行多重力學的模擬，包含：碰撞行為、彈性、重力、風力、彎曲力、渦漩力等。Kangaroo 可簡單直覺地利用動態的張弛產生靜態平衡結構。達到平衡的結構可以重新分配力的向量，產生交互作用。(Kangaroo, 2014)

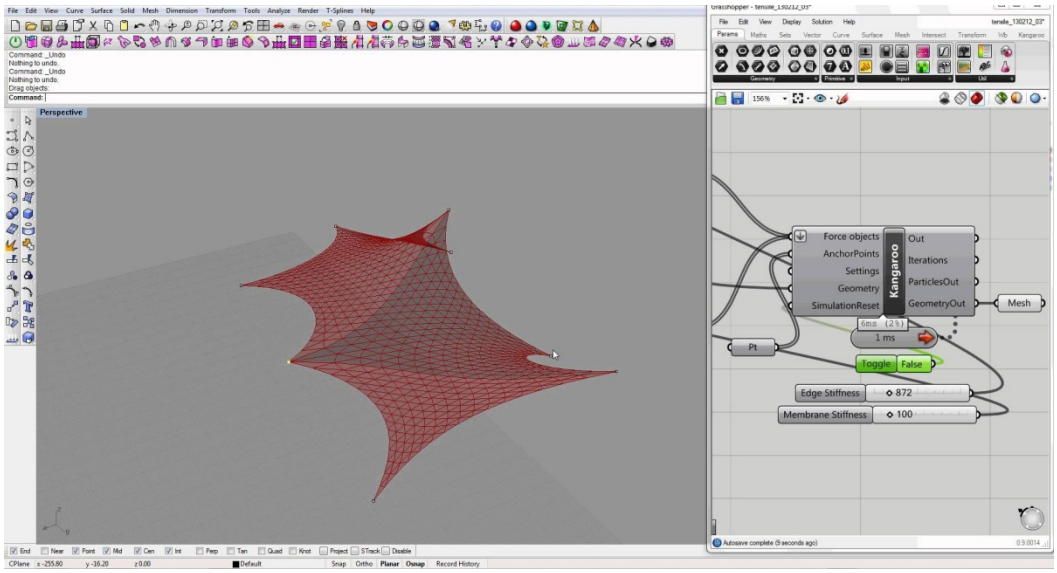

圖 3. Kangaroo 協助物理特性模擬 (Wallgren，2013)

四、 建築物參數化設計實例

鳥巢和水立方的成功，向世人展示了數位設計特別是參數化設計的可能性及潛在魅力。如圖 4 即為北京奧運國家游泳中心「水立方」，以參數化工具中細胞結構

仿生原理的表皮，即二維 voronoi 細胞結構網格和 ETFE 膜的生成方法。

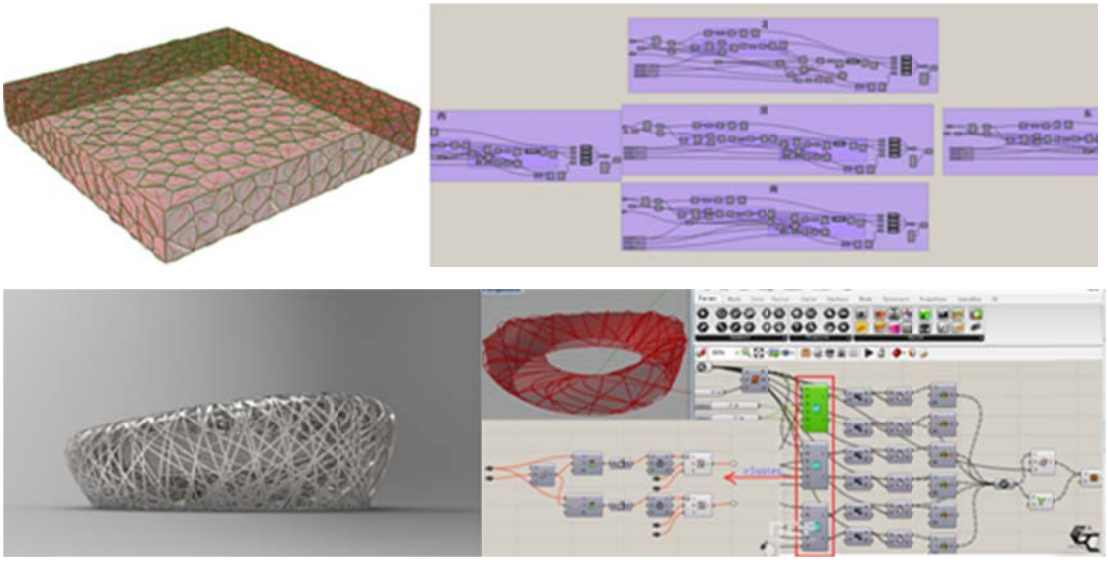

圖 4. 水立方和鳥巢的參數化模型 (資料來源：王豪翔)

參、參數化設計之數位檔案模擬

本段落描述參數化設計之數位檔案模擬之各階段工作內容，以下小節一、二說明透過數位設計工具發展之 3D 模型與外掛程式所加入之外力參數，可模擬氣囊捆紮後所產生皺摺之構材行為；小節三、四、五說明透過點雲資料之萃取與參數運算方法之運用組合，可衍生出各種可能之造型替選方案；小節六進而從所衍生之替選方案中，考量後續可加工之方法將模型加以解析，產生後續將透過數位製造工具加以實作並作為本研究之結果驗証之目標方案。相關過程說明如下：

一、氣囊 Rhino (3dm) 基礎模型建立

如圖 5，複合材料包含三個物件：(1)薄膜構成的方形充氣囊，大小為 2m*2m。(2)下方放置氣囊的床架，平面大小為 140cm*195cm。 (3)綑綁氣囊的繩索。依本研究設計，將氣囊以單一線性拉力構件被綑綁固定在木架上。

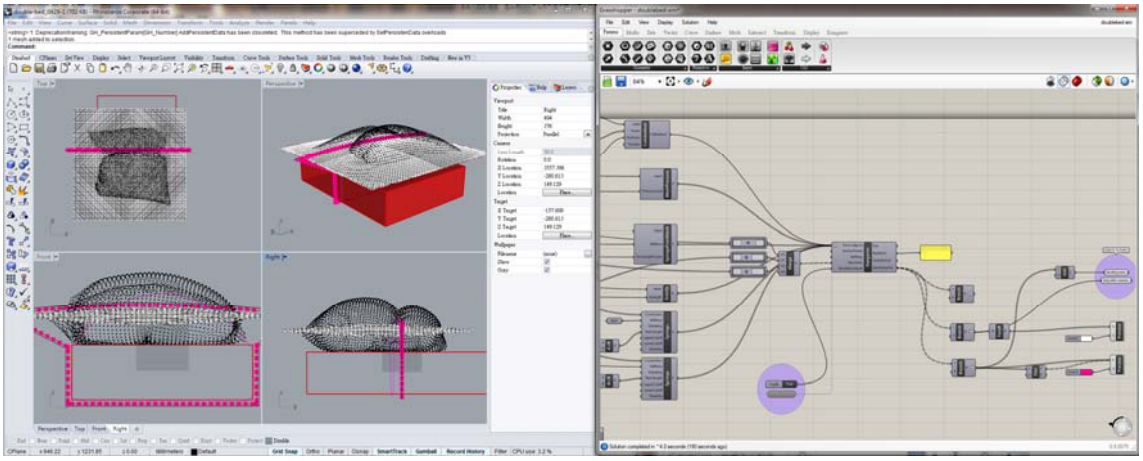

圖 5. 氣囊 Rhino 模型在 Grasshopper 中加入 Kangaroo 的操作介面

二、氣囊充氣模擬

如圖 6b、6c，上述 Rhino 3d 模型之所有物理特性模擬流程以 Kangaroo 外掛工具中運算元件的組合串接與參數數值測試，即可由視覺化效果判斷氣囊充氣捆綁後之模擬形狀是否合乎設計要求，得到定案造型後，即透過 Grasshopper 的 bake (烘培) 指令形成固定網面，並將此結果作為模擬流程的產出結果。如圖 6c 及圖 7 氣囊壓力及捆紮構件彈力達到動態平衡的狀態，存取此一結果之模型與曲線造型，做為後續量體衍生之依據。

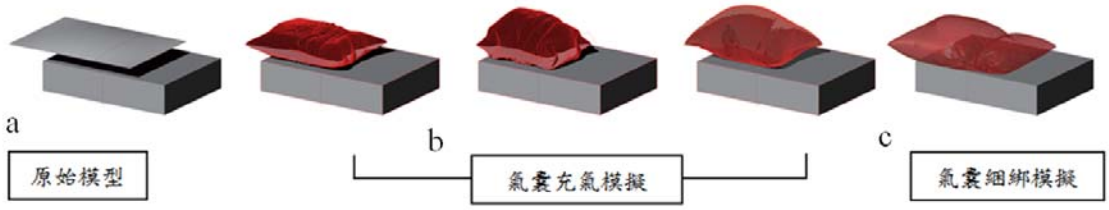

圖 6. 氣囊模型檔案建置與充氣模擬過程

參數化設計模擬：複合構材的形變干預與衍生

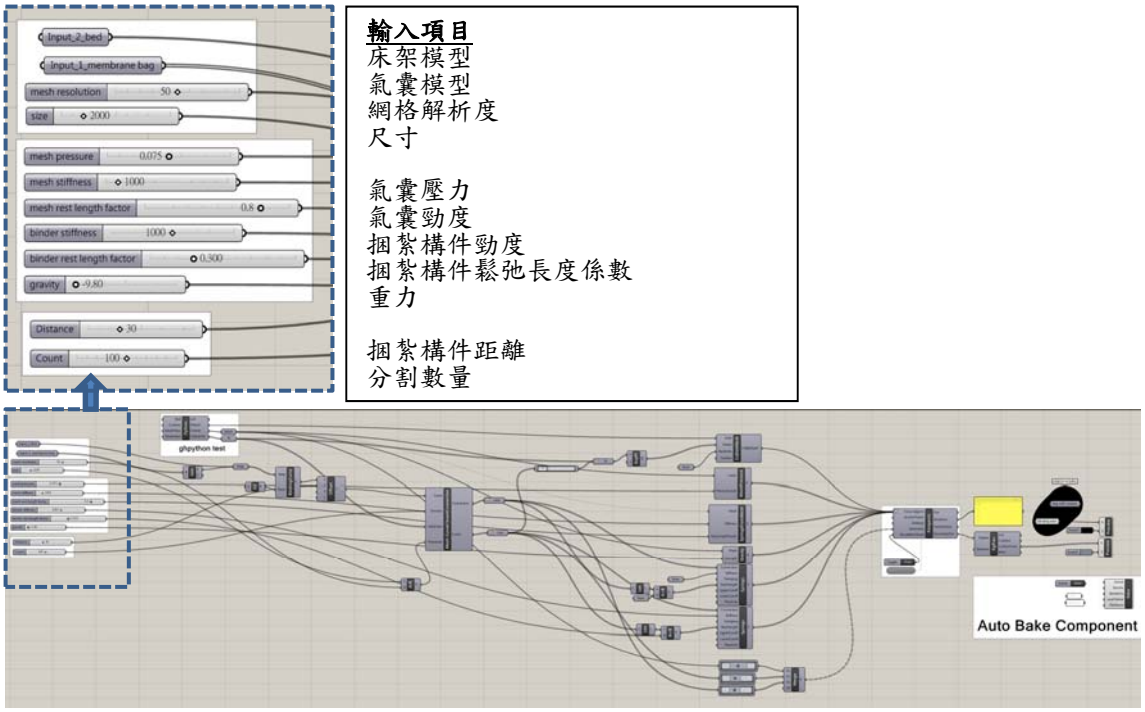

圖 7. 氣囊壓力與綑紮構件彈力之模擬輸入參數

三、節點資料萃取

如圖 8，藉由綑紮構件相鄰三角面(face)的分析所產生的這些節點，能夠表達皺褶及邊角區域的最大變形。在量測點和線的距離後，將超過所設定臨界值的點加以忽略。將所留下來的點作為後續設計過程的輸入值，可以表現出皺褶區域的網格面(Mesh)變化。

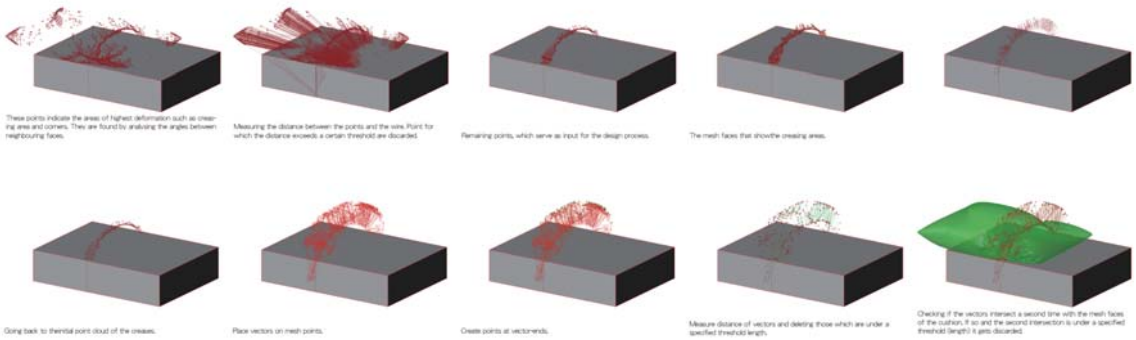

圖 8. 節點資料萃取過程

四、設計階段一：節點資料衍生之變形球量體組合

回到皺褶原始的點雲(point cloud)資料，在網格點上放置法線向量。在法線向量端點上加上點，再量測向量的距離，並將少於指定臨界值長度的向量刪除。檢查向量與網格面交叉點次數，若有交叉超過兩次以上且第二交叉點距離小於臨界長度者，均加以忽略。如圖 9a 中的綠色點即為所留下來的點雲。這些節點可因應不同的設計概念與材料進行下列處理：

1. 八叉樹(Oct-tree)處理：藉由這些點，在其上產生八叉樹運算，一種用於描述三維空間的樹狀資料結構，即可得到如圖 9b 的紅色盒狀量體堆疊產生效果。其中若有小於臨界值的分割便將其刪除。
2. 球狀處理(sphere)：在節點上產生圓球，將所有圓球運用布林運算聯集在一起，以產生連續的單元，並將聯集後量體平滑化，即得到如圖 8c 的效果。此部分量體後續將以不織布雷射切割後黏貼組裝形成變形球量體。

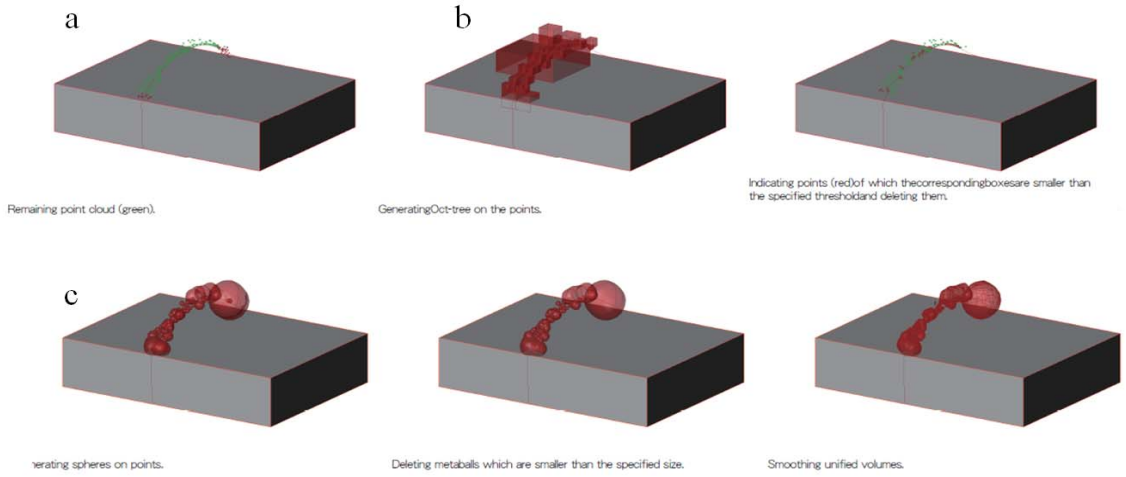

圖 9. 階段一節點資料衍生之變形球量體組合

五、設計階段二：節點資料衍生之矩形實體組合

運用 metaball 變形球造型技術，將階段一球形處理後之量體套用在點雲上，並透過節點參數的臨界值定義，控制 metaball 生成與否，並將落在 metaball 以外的點(圖 10a-2 之黑點)濾除。平行複製網狀線條，並依法線向量方向投影所有剩餘的網格點(圖 10a-4 之紅點)，產生上層的節點。隨機減少網格面上的點數量並平行複

製曲線。如圖 10b，在所剩餘的點雲上執行 Voronoi 空間細胞分割演算法，以曲線將所生成的 Voronoi 曲面中心點，與點雲上的節點相連。並確保曲線為封閉 polyline。定義出這些節點後，如圖 10c-1，將整體沿著 XYZ 軸方向各複製+60mm 及-60mm，得到最後的結果。定義垂直於起始群組節點向量的平面(圖 10c-2 之紅色平面)，定義垂直於第二群組節點向量的平面(圖 10c-3 之綠色平面)，以此兩組節點法向量垂直面產生矩形實體的組合，並以布林運算將幾何形體作聯集，得到圖 10c-4 之結果。此部分量體後續將以片狀壓克力塑料組成垂直相嵌之立體網格面(waffle)加以製作。

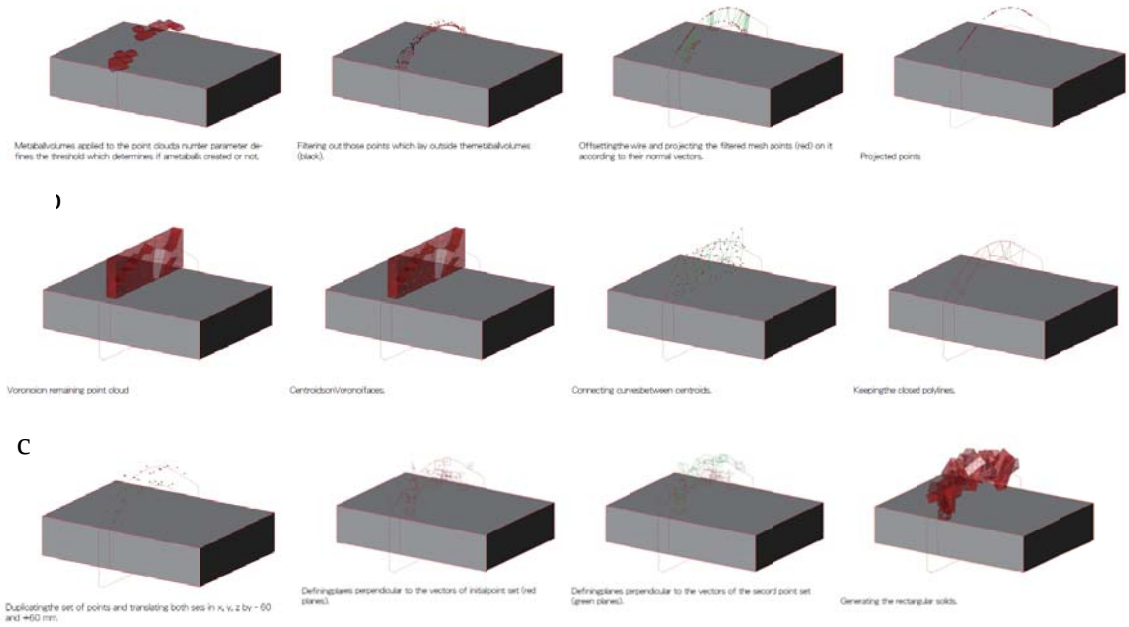

圖 10.　階段二節點資料衍生之矩形量體組合

六、設計階段三：異質材料量體之布林運算組合與交叉網格斷面解析

如圖 11a，插入第一階段所產生的變形球(metaball)量體，與第二階段產生的矩形實體組合，以布林(boolean)運算相減(後者減去前者)，得到如圖 11b 的結果。如圖 12，由於後續在模型實作上，擬以壓克力片狀塑料做為材料，進行交叉斷面組裝，因此需要透過 YZ 斷面及 XZ 斷面每隔 2 公分為單位，將幾何量體做斷面輪廓掃描解析，並為交叉格狀構造擠出一系列的實體面，做為後續切割為實體斷面之

依據。

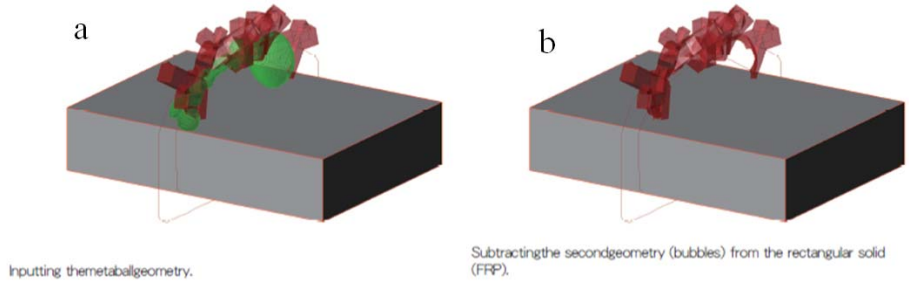

圖 11. 由兩階段量體相減產生之矩形實體

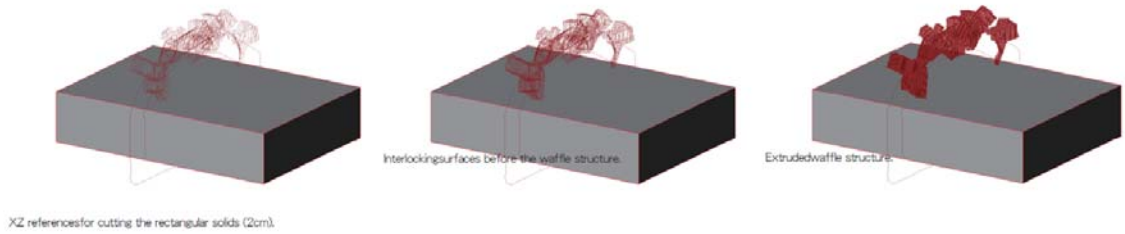

圖 12. 交叉網格斷面輪廓解析與構造實面產生

七、模擬結果

如圖 13a 為壓克力塑料格狀構造量體與 metaball 不織布材料量體的組合結果，如圖 13b 將所衍生的組合量體放置於起始階段的氣囊上，所得到的模擬結果。

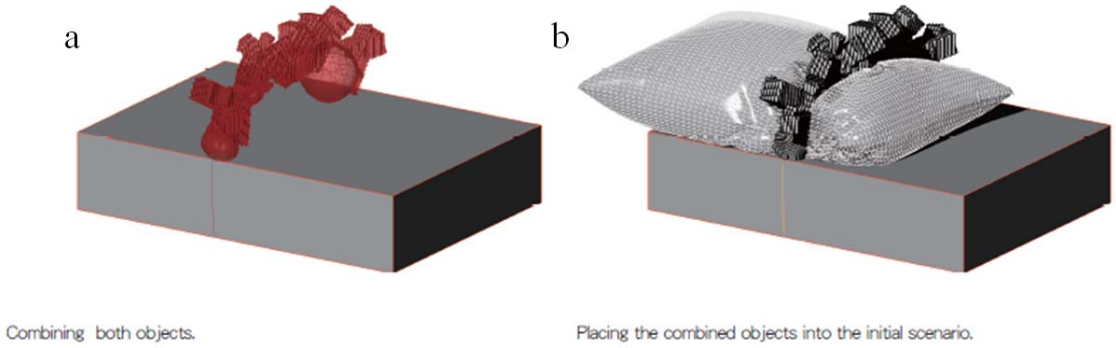

圖 13. 參數化設計衍生之複合構材模擬結果

肆、模型實作與討論

如圖 14，模型實作分為幾個步驟：(1) 先將雷射切割好的不織布 metaball 變形球斷面組件加以編碼、黏貼；(2) 將雷射切割好的壓克力塑料(格狀構造斷面)進行編碼，並依斷面順序，進行交叉組裝；(3) 將預先以透明塑膠布製作成之氣囊以空氣壓縮機進行打氣，產生其造型；(4) 以木料釘製床板結構作為下部支撐；(5) 到達組裝測試現場，先將床架組起作為底座，將氣囊及壓克力網格矩形組合體、不織布變形球組合體等構件，透過繩索及 3D 列印所製成的套管加以穿透捆紮，產生應力達到初步之力平衡；(6) 氣囊具有壓力感測器，可隨時在氣壓不足時啟動空氣壓縮機充氣，以產生動態平衡。

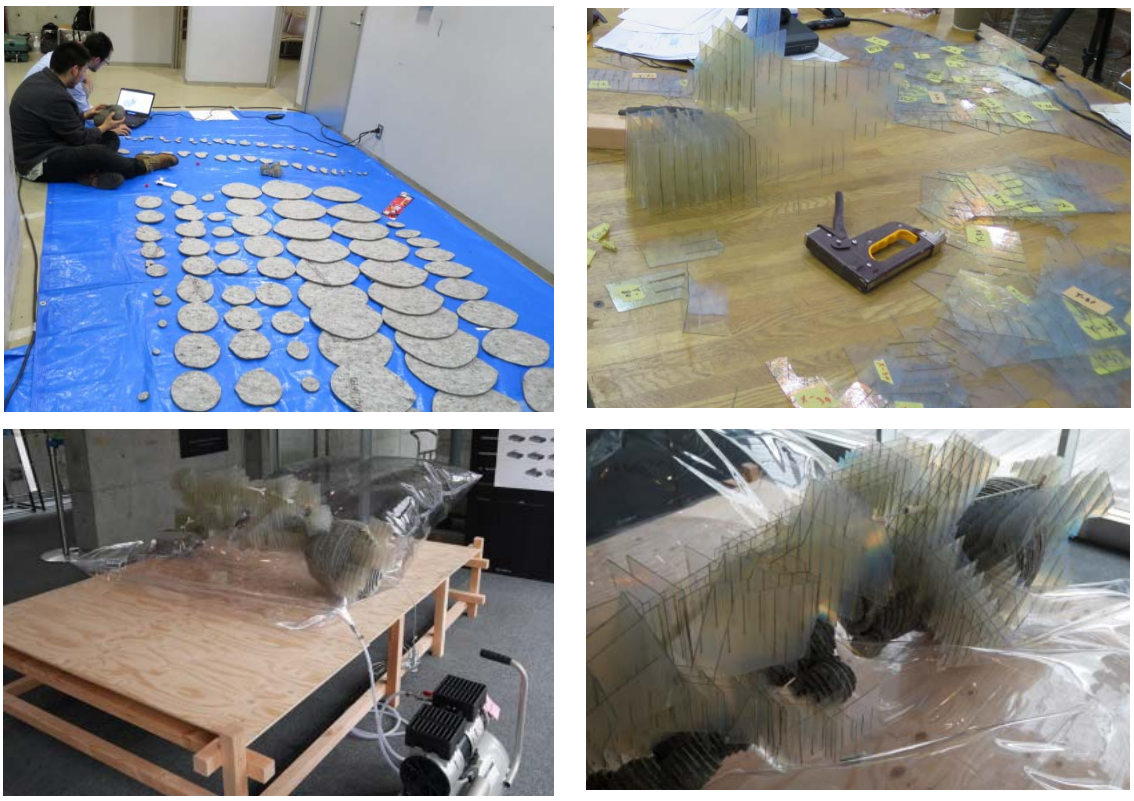

圖 14. 模型實作的過程與結果

實作結果發現如下：(1) 矩形組合體之數位模型在進行斷面解析時，厚度間隔規劃必須考慮組裝時之工作性，本次以 2cm 為間隔，在以手工組裝交叉榫接時，造成工作縫隙過小，必須藉助老虎鉗、木槌、聶子等工具，但仍感到組裝困難，不易施力；(2) 若要增

加交叉斷面之間隔，材料厚度若太薄，會造成勁度不足，容易彎曲變形。然而雷射切割機所能接受之材料種類與厚度，常受限於機器本身之性能。以本次所製作的格狀構造物為例，採用厚度 2mm 之壓克力塑料來產生斷面輪廓組件，但材料之勁度不足，常導致在交叉榫接組裝時相當困難，留設勾縫缺口的大小會影響到材料組裝後的結果，太鬆則會搖晃，太緊則會產生應力殘留，甚至缺口未能完全嵌入密接的交接點，會導致模型產生變形；(3) 約 1cm 厚的不織布所堆疊黏合之變形球(meatball)重量相對較重，此外氣囊之氣密性及材質厚度不足，易造成氣囊壓力外洩，需要不斷透過空氣壓縮機補充氣壓，細紮之皺褶所造成氣囊較小的一側，較難保持與電腦模擬模型中一樣飽滿的外型，需要透過後續研究進行氣囊之修正設計，或替換質地密度較小之變形球材料。

伍、結論與建議

一、研究結論

本研究透過參數化工具軟體的運用，進行數位模型的開發，找出所實驗材料的行為，並評估這些行為構成一系統的可能性。所得到結論如下：

1. Rhino 3d 繪圖工具，結合 Grasshopper 參數化運算工具及 Kangaroo 物理特性模擬引擎所構成的平台，確實能夠透過視覺化方式進行動態力學特性模擬，引導設計者專注於 3D 量體造型與材料組合的設計開發。
2. 數位設計的可能性，由過去透過可預期的 3D 基本幾何量體逐一繪製並加以組合，進化到參數化設計以關鍵節點產生之點雲(point cloud)，並套用衍生設計規則後，產生與自然界物件組合方式相仿的幾何運算結果。此一過程常令設計者不可預期且驚豔不已，此部分也是參數化設計最吸引設計者之處。透過此一方式在設計中導入自然界的衍生規則，並即時產生視覺化的設計結果回饋，使電腦中的虛擬物件可以逐步接近現實環境的模擬，並做為重要的仿生設計方法，是目前設計研究與教學相當值得投注開發之領域。
3. 本研究中，由數位模擬導入數位製造的過程中發現，可選擇的材料種類、尺寸與機具性能常受到限制，以使用雷射切割機為例，必需將 3D 量體進行斷面的解構與重組，然而此一過程便產生了許多可替選方案的可能性。本次實驗操作由於受限於時間、人力、經費，僅能先設定一套複合構材及斷面組裝的組合方案，未來勢必可以再進一步比較其他不同的組合方案，找出最適合的數位製造參數，提供後續足尺模型製作者做為參考。

二、後續研究建議

針對上述研究結論，後續研究建議如下：

1. 不同的複合構材題材與基本造型的模擬與測試：可再藉由較具代表性之建築案例之模組元件(如：綠建築開窗單元、外殼遮陽單元等)加以取樣，進行同樣流程之模擬與實作測試。
2. Kangaroo 力學工具庫之運算原理與實作檢測比較：檢討 Kangaroo 元件庫中各工具之物理原理，並就各因子輸入數值對於造型與力量分布所產生之影響加以探討。並可將完成定型後之 3d 模型轉到 Tekla 等結構材料力學分析軟體加以比較。並進一步檢討數位模型與實際氣囊氣壓等數據之間的關聯性。
3. 衍生規則之探討：對於過程中觸發設計之有意義節點 (如：本實驗中之點雲)，可以再就 Grasshopper 程式所提供之多種衍生規則再加以比較探討其對於造型產生之影響。
4. 探討 3D 模型斷面圖層化之拆解、組裝元件的方法：將模擬結果轉換為真實材料製作的方法與流程，可能採取手動的切割、掰開、穿孔、摺疊、堆疊，或是工具機械的雷射切割、組裝。甚至進一步透過自動化機械手臂之運用，在考量節省人力、費用及精密度等均取得最好平衡狀況下，期能作為未來邁向精密機械或自動化機器人組裝的先驅研究。未來相關研究也將延伸到探討建築設計/製造/組裝的意義，實作方向也可從探討靜態結構組件的控制，朝向探討製造組裝過程中材料多重行為的整合控制。

謝誌

感謝科技部給予本研究之補助，計畫編號：NSC102-2221-E-253-006。感謝本研究之合作成員：Toshikatsu Kiuchi, Taichi Sunayama, Kosuke Nagata, Shinichiro Hinoki, Katrin Jonas, Serdar Aydin, Daeho Jung。

參考文獻

(1) 王豪翔，2013，〈參數化在空間設計中的應用〉，《E 演學刊-研究專欄》。www.eyann.com/article.asp?id=129，取用日期：民國 103 年 10 月。

(2) 邱浩修，2013，《重構自然_數位構築方法下的建築新詩性》，臺中市：東海大學創藝研究學院建築研究中心。

(3) 陳珍誠，2014，〈變遷中的數位建築設計教學〉，《臺灣建築學會會刊雜誌》，2014年04月: 第7-11頁。

(4) 陳珍誠，2012，〈參數化設計於建築設計過程中的意義與應用〉，《國科會專題研究結案報告》，2012年。

(5) Kangaroo Manual (Grasshopper version), http://api.ning.com/files/yPjjd3IjSzDhL3dzJkMTSiPHFBFe8m2SxAX-pvUfidJ*2W82Ij0BG-2z*M*LELCkzVSTxX2UToz-sJgBVHa6MnPmf-Gvdppk/KangarooManualGrasshopperversion_.htm，取用日期：民國103年10月。

(6) Schumacher, P., 2012, “The Autopoiesis of Architecture”, Vol.2: A New Agenda for Architecture, John Wiley& Sons, Inc.

(7) Wallgren, J., 2013, “Tensile Membrane in Kangaroo”。https://www.youtube.com/watch?v=0ZzrKH_bvY4, 取用日期：民國103年10月。