

國立交通大學
建築研究所碩士論文

仿生軟性表皮參數式設計與施作流程研究
**A FRAMEWORK FOR
THE PARAMETRIC DESIGN OF THE BIONIC SOFT-SKIN**

研究生：邱筠穎

指導教授：劉育東、侯君昊

中華民國九十九年七月

仿生軟性表皮參數式設計與施作流程研究

A FRAMEWORK FOR THE PARAMETRIC DESIGN OF THE BIONIC SOFT-SKIN

研究生：邱筠穎

Student : Yun-Ying Chiu

指導教授：劉育東

Advisor : Yu – Tung Liu

侯君昊

June - Hao Hou

國立交通大學

建築研究所

碩士論文

A Thesis

Submitted to Graduate Institute of Architecture

College of Humanities and Social Sciences

National Chiao Tung University

In partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

In

Science of Architecture

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

中文摘要

在自由形體創作設計中，被建造實體化的案例大多為具有骨架(bones)與表皮(skin)的自由形體，或是以骨架為組構方式的自由形體。僅由皮層組成的軟性表皮(soft-skin)自由形體案例較少被實際建造出或是停滯於電腦模擬的數位模型，操作流程相較於其他案例亦是較不透明化，沒有一定的準則可供參考。

基於參數式環境(parametric environments)與生態學(biology)的基礎下，如何設計沒有骨架、僅由皮層組構成的軟性表皮自由形體？而軟性表皮設計的數位模型被實體化建造又該如何操作？

本研究試圖藉由案例分析(case study)擬出一套初步軟性表皮設計與施作流程，接著以此流程作為基礎框架(framework)，實際操作一個仿生軟性表皮(bionic soft-skin)參數式設計與實體化建造。經由紀錄在 Grasshopper 參數式環境中的仿生軟性表皮設計操作與實體模型的施作流程(manufacturing process)，擬出第二套設計與施作流程，比較前後流程之差異與缺失，提出一套完整的流程做為未來軟性表皮自由形體設計者的參考。

關鍵字：軟性表皮、仿生建築、參數設計、Grasshopper

Abstract

This paper is a presentation of the preliminary framework for the design and fabrication of the soft-skin. Today, the digital technology applied in the architecture field is everywhere. However, there are still lots of fantastic free form architecture uncompleted and remained on the paper architecture or only the digital visual simulated model.

Until now, most of the finished free form cases are consisted of the skin and bones, or only the bones. The complete soft-skin cases without the bones are fewer and the process remains untold. Based on the parametric environments and biology, how might you design a free form without the bones? How could you make the soft skin stand up?

After the case study and the integration of the initial framework, the research starts a series of exploration of bionic soft-skin design and fabrication in the Grasshopper and CAM process, and seeks to propose the preliminary framework as a helpful reference for the designers who deal with the soft skin project.

Keywords: soft skin, bionic architecture, parametric design, grasshopper.

謝誌

在此，對於劉育東老師與侯君昊老師獻上最深的感謝，老師們在我發展論文及研討會投稿的過程中，給予指導與肯定，讓我能在自己喜愛的領域中進行研究，並將之集結成碩士論文及研討會發表，進而獲得國際認可，這是以前從未想像也不曾有過的經驗，非常感謝劉育東老師與侯君昊老師的教導。

再者，謝謝劉育東老師、侯君昊老師、許倍銜老師的口試指導，口試過程中的積極指正與寶貴意見，讓我發現自己仍然不足之處，並得到許多額外的知識補充，獲益良多，感謝老師們對於論文審核的用心與堅持。

在論文發展與研討會投稿的過程中，十分感謝陳姿如學姐、洪珮倩學姐、許穎正學長的經驗分享與研究討論，尤其是姿如與珮倩學姐的耐心討論和不吝分享經驗、想法，讓我能釐清自己的思緒、更快了解整體情勢，積極投稿國際性研討會，在做研究的過程中，能有學姐們的陪伴真是太幸運了。

而在同儕之間，相當感謝許宏賓、李哲維、林庭羽、黃道的討論與陪伴，彼此之間的激勵、叮嚀與幫助讓大家一起不斷往前走，這股同儕間的互助力量是難得可見的，有幸能遇到這群伙伴一起學習，讓我深感榮幸。

最後，感謝在交大曾經幫助過我的老師、同學與所辦助理，謝謝你們的仁慈與誠摯，很高興能在交大和你們相處兩年，我會帶著交大所教我的、在交大學到的繼續往前走人生的路途，迎接人生的挑戰。

目錄

第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究問題與目標	2
1.3 研究方法與步驟	3
1.4 論文架構	5
第二章 文獻回顧	6
2.1 數位時代以前的建築表皮型態	6
2.2 數位時代以後的表皮發展	8
2.3 參數式設計的表皮	10
第三章 案例研究	13
3.1 案例選擇	13
3.2 案例分析	15
3.3 初步軟性表皮設計與施作流程建立	29
第四章 設計實作	30
4.1 軟性表皮自由形體設計與數位建構	30
4.2 軟性表皮設計與施作流程	37
第五章 結論與建議	40
5.1 結論	40
5.2 研究貢獻	41
5.3 研究限制與未來研究	42
參考文獻	43
個人簡歷	
附錄	

第一章 緒論

1.1 研究背景

電腦輔助建築設計(computer-aided architectural design)在現今的經濟和技術上均已可為。自 1960 年初期開始研究，其理論和實際作業都已發展到一個境界(Mitchell, 1977)。數位設計媒材(digital design media)改善了傳統 2D 手繪所需耗費的大量時間與人力，讓設計繪圖更精確，提高了繪圖效率(Lin, 1999)。電腦數位模型(digital model)提供了有別於實體模型(physical model)的電腦特性來輔助設計者，如可快速建造(縮短手工製作模型的時間)、容易進行編修、快速貼材質讓設計更趨近於設計成果、模型的動態模擬、物理特性(力學、分子)的狀態模擬等(Lim, 2007)。隨著電腦輔助設計發展出的參數式設計(parametric design)亦是現今普遍應用的設計方法之一。

進而言之，參數式電腦輔助設計系統(parametric modeling CAD systems)已高度普遍使用於建築領域中，並成為設計過程的實踐、研究標準輔助工具(Barrios, 2005)。設計輔助工具的進步與普及化促使建築樣貌多元發展，衍生出多層次(multi-layer)的表皮設計，使表皮成為結構(structure)、立面(façade)、屋頂(roof)、空間(space)等，表皮的表現不再只是以往的簡潔立面，甚至回歸至原始的生物形象與結構體的組構方式，亦即仿生建築(bionic architecture)。

另一方面，在仿生建築範疇中，由於緊密的形式與機能關係，生物學是一個遞歸的(recursive)建築靈感來源，並可在其中找到自然平衡的力量及幾何的相應解決方式(Couceiro, 2005)。仿生設計藉由參數式電腦輔助設計系統應用於建築設計。在仿生表皮設計(bionic-skin design)應用在參數式設計的過程，可藉由參數應用軟體 Grasshopper 的清晰歷史紀錄(explicit history)與可回溯性(reductive)(Hnizda, 2009)。在數位模型模擬階段與實體模型製作過程中，不斷反覆修改數位模型的參數(parameter)與運算器(component)連結方式(connection)，以達到實體模型的製作成果實現(Davidson, 2010)。

1.2 研究問題與目標

在自由形體創作設計中，藉由電腦輔助設計與製造(CAD/CAM)工具的使用，自由曲面建築形體隨處可見，複雜的參數式建築表皮設計亦是建築師不斷努力嘗試與實踐的方向。作為建築的一部份，建築表皮(building skins)扮演一個重要的轉換介質角色在內與外、建築與都市空間之間。當建築表皮從承重結構(structure)中分離出來，此表皮將只是純粹的皮層(skin) (Schittich, 2002)。一旦建築表皮在建築結構系統中具有獨立性，建築表皮將如同帷幕或衣物般懸掛，此介於結構與皮層之間的關係已引發許多建築生產與激辯(Leatherbarrow and Mostafavi, 2005)。以皮層和骨架(bones)為出發點的建築設計更是自 80 年代初期即已開始(Hodge, 2006)。基於上述的討論，本研究將建築表皮的結構依組構方式歸納為皮層和骨架。

然而，關於表皮的問題是深奧的，並非淺薄的問題。表皮的界線在哪？表皮的狀態是什麼？它是僅有表面或是具有深度？或是兩者皆有？表皮為空間的變遷，擺動不定的情況。平滑的改變(smooth exchange)、流動(flow)、連續表皮(continuous surface)、皮層(skin)、薄膜(membranes)與透明圓形頂(bubbles)等，這些表皮的意向被持續不斷的呈現在當代文化。當人類越來越驅科技化，自然與人造的界線則開始模糊化。數位 3D 建模軟體在自動催化的系統中使用演算程式產生或改變軟性、弧面形體，其改變如同遺傳學的突變(Lupton, 2007)。

延續本研究對於建築表皮組構方式的歸納，表皮已經被數位時代的建築師與設計者作為拓撲學般迷人的空間組織模式以進行廣泛的探討(Hensel and Menges, 2008)。介於電腦操作與結構表現之間的聯繫可透過電腦模擬，以此建立思考結構表現的可能性理論模式(Leach, Turnbull and Williams, 2004)。然而，被實體化建造的案例大多為具有皮層和骨架的自由形體，或是以骨架為組構方式的自由形體，僅由皮層組成的軟性表皮(soft-skin)自由形體案例較少被實際建造出或是停滯於電腦模擬的數位模型，操作流程相較於其他案例亦是較不透明化，沒有一定的準則可供參考。

隨著參數式設計不斷的發展，豐富了建築表皮的構成、表現方式及深度。在許多案例中我們可以看到建築師基於建築基地環境因素與使用者空間需求，藉由參數式技術(parametric techniques)決定建築表皮的表現形式與構成(Goldberg, 2005)。相關案例顯示，生物系統的自組性(self-assembled)使其能使用薄弱的材質建構出穩固的結構(Hensel, Menges and Weinstock, 2006)。因此，以軟性表皮為組構內容的自由形體設計可以利用參數式工具的輔助，組構出具有穩固結構的仿生軟性表皮(bionic soft-skin)，提高被實體化建造的可能性。

基於參數式環境(parametric environments)與生態學(biology)的基礎下，如何設計沒有骨架、僅由皮層組構成的軟性表皮自由形體？而軟性表皮設計的數位模型被實體化建造又該如何操作？本研究試圖藉由案例分析(case study)擬出一套初步軟性表皮設計與施作流程，接著以此流程作為基礎框架(framework)，實際操作一個仿生軟性表皮參數式設計與實體化建造。經由紀錄在 Grasshopper 參數式環境中的仿生軟性表皮設計操作與實體模型的施作流程(manufacturing process)，提出一套流程做為未來軟性表皮自由形體設計者的參考。

1.3 研究方法與步驟

由於無骨架組構的軟性表皮自由形體建造實體化案例較少，且沒有一定的設計與施作模式框架可循。因此，本研究基於參數式環境與仿生態形體結構，試圖提出一套軟性表皮設計與施作流程做為未來軟性表皮自由形體設計者的基礎參考。在此，研究方法分為主要四個步驟：

第一步驟為案例分析：由於大多的自由形體設計案例是由具有皮層和骨架組成，或是以骨架結構為主的自由形體，僅由單純的軟性表皮組構系統形成的自由形體設計案例不多，大多仍然停留在紙上建築或是數位模型。在此挑選幾個具有較完整設計及施作過程，並在參數式環境中進行的軟性表皮自由形體設計案例。相關且可供參考的軟性表皮自由形體設計案例有下列幾項：

1. NOX – Holoskin and soft office.
2. Marcos Novak – Allobio and Liquid Architecture.

3. Xefirotarch / Hernan Diaz Alonso – Pitch Black and Masison Seroussi.
4. Greg Lynn – Animate Form and 5900 Wilshire Blvd. Restaurant & Trellis Pavillion.
5. Ball-Nogues Studio – Maximilian’s Schell and Liquid Sky.

上述五個建築設計團隊，十個建築案例皆是在數位時代中，關於流動性自由形體、仿生物型態結構、參數式工具使用與建築表皮探索等議題較具有深入研究且有所成果發表的建築案例，並且具有一定程度的被納入研究案例討論與具有公眾之認可性。

在建築設計中，表皮除了本身建築實質效用外，亦常被拿來加以探討其建築外衣形象、對外的社會意義及都市立面等，在此則要針對自由形體的表皮設計過程、數位工具的應用、結構組成方式與建構製造方法進行探討。本研究將在上述列出的可供參考案例中挑選出幾個具備無骨架的軟性表皮自由形體案例進行分析討論。

第二步驟為「初步軟性表皮設計與施作流程」建立：根據上述案例分析的設計流程歸納出一個「初步軟性表皮設計與施作流程」作為案例研究的初步研究參考。

第三步驟是設計實作：原型(prototype)作為人們遵循、參考的典範(Gero, 1990)，為了本研究的特定目標，進行「軟性表皮自由形體設計與數位建構」作為設計實作。因而在此開始了一系列在 Grasshopper 中進行的參數式設計與電腦輔助製造過程(CAM process)的探索，「軟性表皮自由形體設計與數位建構」的設計流程將依循第二步驟所建立的「初步軟性表皮設計與施作流程」進行，並在設計與數位建構結束時提出一套設計原型，以此驗證步驟二所歸納出的「初步軟性表皮設計與施作流程」。

第四步驟為「軟性表皮設計與施作流程」建立：依據案例分析建立的「初步軟性表皮設計與施作流程」作為基礎框架流程，分析第三部分設計實作的流程，比較兩個設計流程之差異與正確性，以此修改、完善「軟性表皮設計與施作流程」，作為最終的設計流程建立。

1.4 論文架構

基於研究問題與目標之設定，從研究方法與步驟發展論文主體。為求本研究論文結構明確清晰，以下將以概述方式簡要條列出論文架構。本論文架構分成五大章節陳述研究內容：

第一章：簡述軟性表皮設計研究之背景、發展過程，並進一步說明問題與目標，藉此提出研究方法與步驟之概要說明，安排研究論文節奏與過程發展。

第二章：將文獻回顧依歷史時間發展脈絡分為「數位時代以前的建築表皮型態」、「數位時代以後的表皮發展」、「參數式設計的表皮」三個部分進行回顧探討。其中，將參數式設計從「數位時代以後」裡頭獨立出來進行深入探討，在此基礎下研究建築表皮在歷史脈絡中各時期的角色。

第三章：此章節包含研究方法中的第一與第二步驟，本研究依據參考文獻之設計流程為基礎，針對研究問題與目標進行案例研究分析，再基於案例分析結果建立「初步軟性表皮設計與施作流程」作為接下來作為驗證的設計實作之初步研究參考。

第四章：依據「初步軟性表皮設計與施作流程」進行研究方法中的第三與第四步驟——作為設計實作的「軟性表皮自由形體設計與數位建構」，以及「軟性表皮設計與施作流程」建立。紀錄軟性表皮設計實作過程中的流程步驟，以此檢討案例分析所產生之「初步軟性表皮設計與施作流程」的正確性，進而完善此設計與施作流程之結構，建立「軟性表皮設計與施作流程」。

第五章：整合上述三、四章之研究結果，進而提出研究限制與貢獻，以及未來研究之發展議題。

第二章 文獻回顧

2.1 數位時代以前的建築表皮型態

建築對外形象為建築立面，如同 Louis I. Kahn 所言：建築無相，建築存有。唯有建築作品是有外貌的，這外貌最精彩的部分是作為一種奉獻，對建築的奉獻(Louis and Lobell, 2008)。因此，人們藉由閱讀建築立面做為對建築的初步了解，而建築體完美的先決條件亦是創造一個面對街道的特殊展示面。進而言之，建築立面是傳達一棟建築物功能及重要性最基本的元素，正立面(façade)一字字根來自拉丁語 *façies*，跟 *face* 和 *appearance* 是同義字。因此，討論建築物的臉(face)時，立面特別指的是具有象徵性的向街道面。立面作為既成界線(built border)而言，作用和正門相似：德文中，牆這個字為 *Wand*，和 *wenden*(轉變)或 *Wandlung*(改變)有關；牆因此成了室外轉為室外的地方，反之亦然，這個轉換區具有交換的功能，如果表面有相當可塑性且動勢明顯的話，牆會變的更有活力。更進一步解析立面，立面是由各個單一元素所構成，單一元素本身成了具有個別表現力的實體。立面構成一方面是結構化，另一方面是次序化(Krier, 1993)。

本研究的歷史文獻回顧從古典建築開始談起，在 Marcus Vitruvius Pollio 的建築十書(The Ten books on Architecture)中指出，立面是建築的外觀，垂直意象，略微著色以突顯建築之線條，透視是打出前面陰影和側面。其立面設計效果始於平面，在古典建築最重要的建築代表—神廟(Figure 1)中，將其種類分為以牆為主(*antis*)、前面有柱式(*prostyle*)、前後有柱式(*amphiprostyle*)、四周有柱式(*peripteral*)、牆柱分離式(*pseudodipteral*)、內殿屋頂開口式(*hypaethral*) (Pollio, 1931)。在此可以看到，立面的主體組成為牆和柱列(*orders*)。而我們可以進一步的指出，古典建築的本質為柱式(*orders*)，這些柱子和它的附屬構件，只要與外觀有關的話，幾乎樣樣都具有意義(Summerson, 1966)。由此可知，古典建築的立面為柱列、牆和裝飾物所組成的具有厚實結構性與裝飾性的硬性表皮，拱圈結構(*arches*)骨架與磚牆皮層結合而成的硬性表皮。

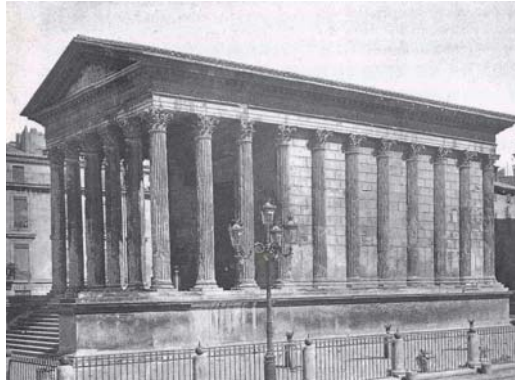


Figure 1
古典建築

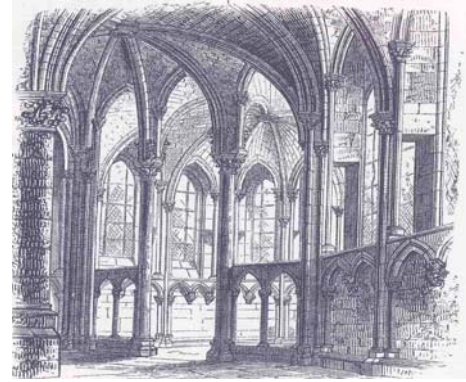


Figure 2
哥德建築

到了哥德時期，尖拱(pointed arch)、肋拱頂(ribbed vault)和飛扶壁(flying buttress)都是哥德式建築的基本元素，法國建築率先將這些元素結合起來，開啟了一種新的建築風格(Cole, 2002)。哥德建築(Figure 2)揭示了在厚實石頭面殼上創造寬大開口的嘗試，古典大教堂被解構成承重骨架和支撐元素，建築表皮逐步發展成由肋骨(rib)、拱頂(vault)、石砌表面等(Schittich, 2002)。甚之，作為結構骨架的尖拱之間則嵌滿彩色玻璃，取代原本的厚實石砌牆面。此時期的建築立面開始出現皮層和骨架的組構關係，皮層開始出現透明性。

隨著工業革命發展帶動了建築業的興起，1851年倫敦萬國博覽會由鐵件與玻璃組成的水晶宮(crystal palace)成為19世紀邁向20世紀的試金石(Figure 3)，這個由工業化大量生產構件組成的建築開啟了建築的新紀元(Pevsner, 1985)。隨著現代建築的不斷發展，現代主義的產物摩天大樓的簡潔幾何立面典型從此時形成，沙利文(Louis Sullivan)的方正立體建築物中基本的簡樸作法與裝飾互成對比，以玻璃與鐵件產生輕巧、規則的骨架和寬闊的窗戶。利用裝飾使建築物表情更豐富，並使分割更加明確。其裝飾的特徵從有機的自由造型變化到輪廓一致的精確幾何型。這種形式在沙利文的水牛城保險大樓(Guaranty Building, Buffalo)(Figure 4)得到最後確定的具體化(Frampton, 1992)。

在拒絕古典主義之歷史模式的現代運動中，新藝術(Art Nouveau)是現代運動的一部份。新藝術最喜愛的裝飾主題是在植物、海水與飄垂的髮絲等自然造型中發現柔美的雙重曲線。最著名的代表建築師—安東

尼·高第(Antoni Gaudí)·其作品受到中世紀與自然啟發。他逐步放棄歷史主義·由原本的哥德式風格轉為一種「生物」(biological)風格·即呈現在巴塞隆納聖家堂(Sagrada Família)側翼的轉變(Jordan, 1984) (Figure 5)。因而·相對於古典建築(classical architecture)由古典原則嚴謹建立出的立面樣貌·幾何造型立面成為數位建築以前的標準建築立面典型。進而·古典原則與幾何元素碰撞發展出精彩繽紛的現代建築表皮型態。

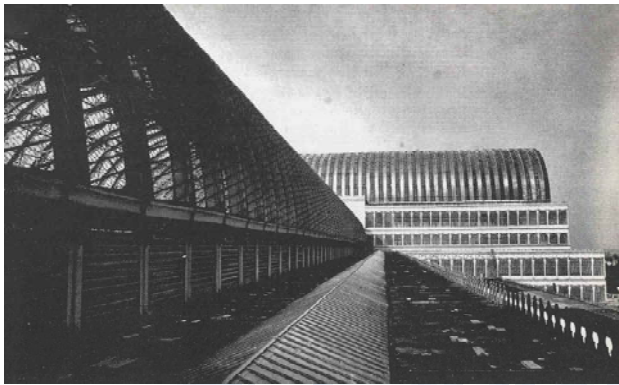


Figure 3
水晶宮



Figure 4
保險大樓



Figure 5
聖家堂

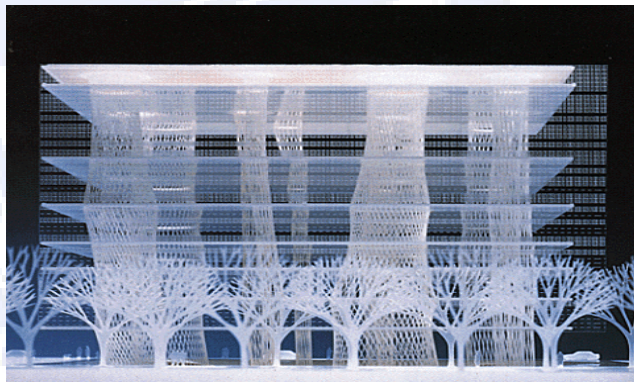


Figure 6
仙台媒體中心

2.2 數位時代以後的表皮發展

數位科技已為建築師帶來新的解放·形體、概念、材料·甚至是設計媒材和設計本身之間的關係·都已到了一個劃時代的階段。在這樣的思維下·建築的元素與建構過程已相當不同於我們從前所認知的建築了。(Liu and Lim, 2005)。現今建築正進行一場無聲革命·人們更注重的是意願與原則聲明的表現。這場革命源自技術發展引起變化的敏感性：從

Toyo Ito 的仙台媒體中心(Sendai Mediatheque)(Figure 6)的流動性建築立面、Renzo Piano – Maison Hermes, Tokyo 的大範圍貼磚立面使用，這時的立面已成為倒映形象的大屏幕。接而，Herzog & de Meuron 試圖將立面減至最薄，使建築表皮成為建築內部與外部空間一道非常脆弱的防線。建築構築元件的多層化就像是一個不可透視物體的可透視表演。這樣的建築立面使外部影像減弱乃至消失，但同時又在自身，像電視畫面一樣反射出來(Nobuyuki, February 2002)。更有媒體建築(media architecture)藉由多媒體立面(media facade)即刻性的傳遞來自環境文化性、社會性及經濟面的訊息(Haeusler, 2009)。然而，越來越多的建築物對於外部包裝賦予了更多內涵，甚至是內部裝飾，在此影響下，傳統建築風格中建築物的外觀失去其一貫意義，而體現另一種新的表達信息的方式:材料(material)、新式外觀(new appearance)、多媒體技術(multimedia technology)，因此，這些都是構成我們今天所看到的表現城市景觀最有效的信息(information)方式(Coppa, 2006)。

數位時代(digital age)以來建築表皮以更多元的方式詮釋建築與環境關係。建築表皮不僅僅是連接內外的介面，藉由建築技術的發展與電腦輔助設計/電腦輔助製造的應用，皮層的概念衍生至結構、立面、屋頂，甚至是整體建築物的組成。例如 Herzog & de Meuron 的北京國家體育館 (The National Stadium, China, Beijing) (Figure 7)建築立面完全由結構組成，結構構件相互支撐結成網狀，整體結構系統將立面、屋頂、樓梯及碗狀內核心融於一體，就像鳥類用細樹枝編織出的鳥巢一般(Nobuyuki, August 2008)。

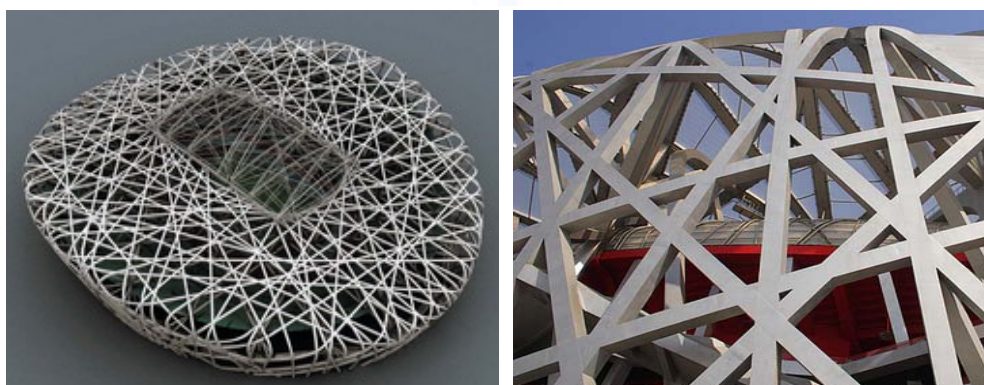


Figure 7
北京國家體育館

同樣的工作團隊的另一個作品 – 邦德街 40 號公寓大樓(40 Bond, Apartment Building Bond Street, New York, USA) (Figure 8) · 其建築立面設計採用對街頭塗鴉回應的拼貼方式 · 藉由電腦輔助工具的使用 · 將原本平面的塗鴉轉化為 3D 型態 · 塗鴉線條的輕重依據材料及鑄造的厚度需求而定 · 並根據大門在結構上的需求調整表皮介面紋路與密度 (Nobuyuki, December 2008) 。由此可見 · 技術的進步與材料的靈活發展創造了新的局勢 · 建築立面可以避開傳統的編制 — 垂直面 · 與地面夾角 90 度 · 建立引人注目的量體 · 缺乏直線的有機結構 · 以及經常挑戰地心引力與其他物理原理的立面造型(Fajardo, 2008) 。

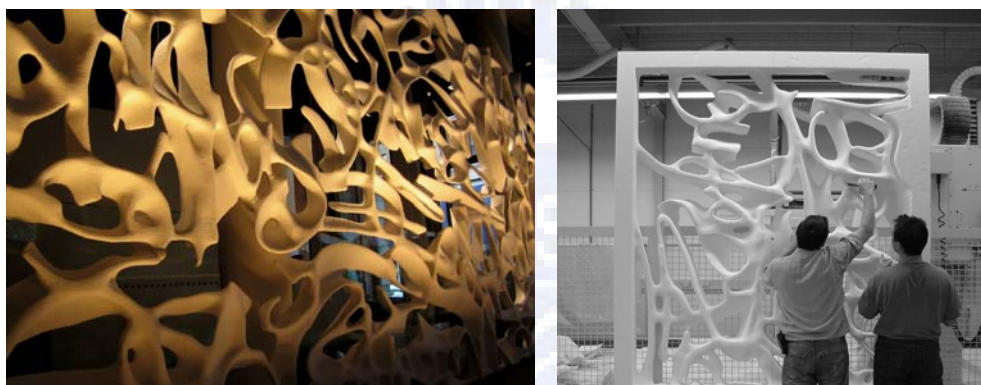


Figure 8
邦德街 40 號公寓大樓

這些介面存在著介於結構與表皮間曖昧不清的皮層關係 · 建築表皮除了遮雨防風的基本需求與立面造型美觀外 · 先進的建築技術發展促使建築表皮設計日趨複雜(Brandt, 2005) · 隨著電腦輔助設計與建造工具的介入更進階發展出參數化設計 · 參數式設計意味著一個全新的、非傳統標準設計所產生出的組構方式 · 其藉由參數的變化與重複產生更精確複雜可控制的設計方法(Goldberg, 2005) 。

2.3 參數式設計的表皮

參數式設計為藉由動態式控制影響設計之參數相關因子 · 以此即時生產估算、調整設計方案的設計方式 · 參數式建模則是由參數式物件與屬性集結而成的參數式設計所產生之幾何表現過程 · 此參數式設計可視為以參數式模型(parametric model)與參數式建模系統(parametric modeling

systems)作為設計基礎的過程(Barrios, 2005)。此外，參數式建模系統最初在航空業發展，現今藉由提供強大的概念設計框架進入建築領域。參數式模型可從單一參數架構快速生成設計，並且提供完整的設計過程紀錄，可彈性的不斷評估、修改或更新不同的組成在同一個參數模型結構中(Carlos, 2004)。近年來，參數模組方式(parametrically modulated approach)的透徹研究在參數表現方式上更勝過於實際的構造結構(Al-Haddad, 2008)。參數式模型在各種材料的限制上做快速的形式變化，這些數位構築透過電腦輔助生產工具(CAM)產生彈性的連結策略組構建築形體(Hemsath, 2009)。

進一步討論，參數式設計中的表皮組成方式目前可分為七種：螺旋型(Spiraling)、包裹法(packing)、編織法(weaving)、調配法(blending)、裂化法(cracking)、群聚法(flocking)、貼磚法(tiling) (Aranda and Lasch, 2005)。其中，建築亦參考服裝的詞彙使用，包裝(wrapping)、編織法、折疊(folding)、印刷(printing)、打褶(pleating)表面及材料(Hodge, 2006)。除了來自時裝界的參考，這些分類來自於自然界原本即固有的生態結構樣貌，藉由數位工具模仿生物形態組成，此結構方式又稱為生態結構(morpho-ecologies)(Hensel and Menges, 2007) (Figure 9)。這些參數式設計不只是電腦內的數位模擬，更是以實際操作方式應用於建築立面，深化建築表皮內涵。

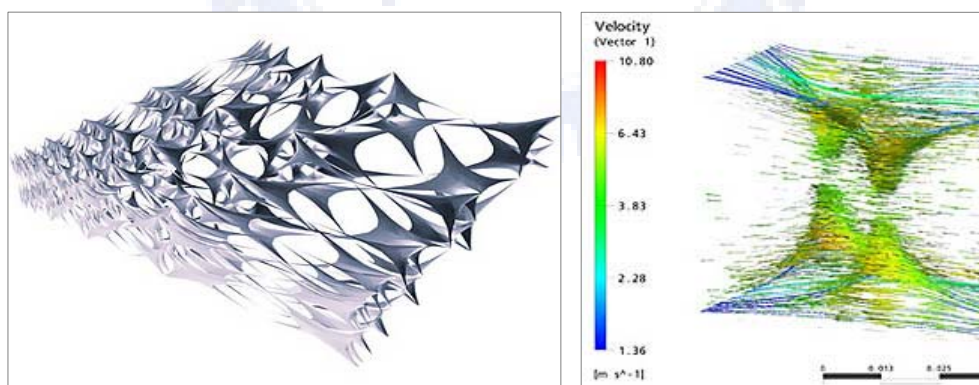


Figure 9
生態結構

隨著參數式設計的發展，仿生學開始與建築結合。仿生學對建築師的吸引力在於它提供了將外型與功能更好地融合在一起的可能，大自然能以最經濟的低限度方法來滿足需要，採用自然結構作為模型能夠得到

更輕的結構和新的形式，並且可以更有效地利用材料。(Aldersey-Williams, 2003)。透過組構生物化學的資訊網絡，自然資訊擁有高效率的自我組織能力、適應力、再生與分解之程序，此項優點帶領科學從自然仿生工具中描繪出行為模式，建築亦受此趨勢帶來的巨大效益影響(Paz Gutierrez, 2008)。Xefirotarch – Maison Seroussi (Paris, France) (Figure 10)是應用這個新的數位設計方法的實驗性住宅案例，這棟房子利用場地拓展和程序化元素衍生的有利因素，延展了圍合概念並將其轉變為一種巢居概念。正如同存在於一個 Moebius Strip，這裡沒有所謂外側或內側建築空間概念，整體建築如同生物體般生長蔓延(Alonson, 2008)。這也說明如何將參數的可擴展性技術應用於不同規模的建築問題並建立幾何元素與數學函數之間的依賴關係(Goldberg, 2005)。

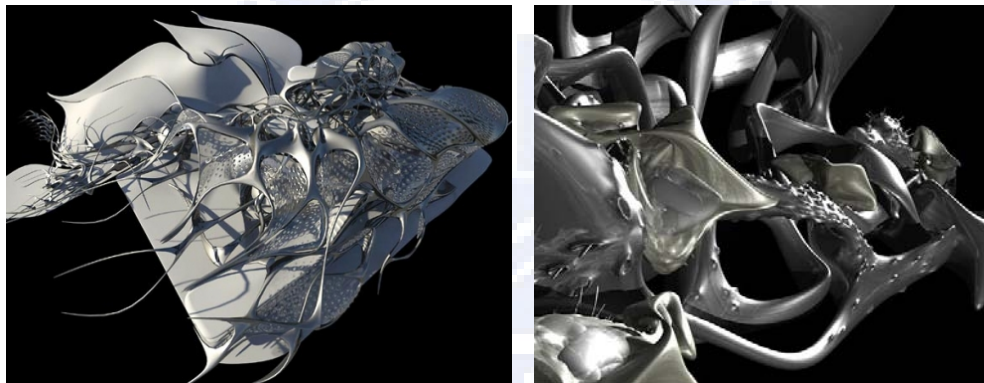


Figure 10
Maison Seroussi

經由大量的建築參數式設計案例發生，我們可以看到參數式工具已被大量應用於建築設計中，生態結構樣貌的建築型態讓自由形體的組構方式更加多元、穩固。然而，應用於參數式設計的無骨架軟性表皮自由形體設計卻大多停留在紙上建築階段，將數位模型實體化建造的案例實屬少數。

因而，想要將數位建造的自由形體直接相對地轉換成自由形體結構，依舊無法可循，例如連續平面被分割成幾何表皮時，仍需要有底部結構(substructure)支撐，或是被運算成許多小零件，從數位建構的設計中直接製造出幾何形體表皮(free form façade)構件（即無骨架的自由形體）仍然是未來需要努力的遠景(Knaack, Klein, Bilow and Auer, 2007)。

第三章 案例研究

3.1 案例選擇

由於大多的自由形體設計案例是由具有骨架及皮層組成，或是以骨架結構為主的自由形體，僅由單純的軟性表皮組構系統形成的自由形體設計案例不多，在此以案例研究作為研究方法，挑選幾個具有較完整參數式設計及施作過程的軟性表皮自由形體設計案例，藉由分析這些案例得到「初步軟性表皮設計與施作流程」，以此作為下一步研究的基礎。可供挑選的案例有下方五個建築設計團隊，十個建築案例：

1. NOX – Holoskin and soft office.
2. Marcos Novak – Allobio and Liquid Architecture.
3. Xefirotarch / Hernan Diaz Alonso – Pitch Black and Masison Seroussi.
4. Greg Lynn – Animate Form and 5900 Wilshire Blvd. Restaurant & Trellis Pavillion.
5. Ball-Nogues Studio – Maximilian's Schell and Liquid Sky.

上述案例在數位時代中，關於流動性自由形體、仿生物型態結構、參數式工具使用與建築表皮探索等議題皆具有深入研究且有所成果發表的建築案例。但由於本研究目標在於求得「軟性表皮設計與施作流程」，其中的關鍵在於軟性表皮自由形體如何在無骨架的狀態下撐起軟性表皮，並且軟性表皮自由形體設計能夠被建構出 1:1 比例的最終作品，因而，案例的選擇是需要具備完整的設計與成功的數位建構過程，以達到案例分析的完整度與可參考性。

可惜的是，初步列出的可供參考案例大多仍停留於數位模型模擬階段，被建造出的案例不多。考慮了上述幾個討論的因素，因而在此選擇了 Ball-Nogues Studio 的兩個建築設計案例，作品包括：

1. 小型戶外建築裝置：2005 年美國加州洛杉磯材料與應用中心 – Maximilian's Schell (Figure 11)。
2. 大型戶外建築裝置：2007 年紐約現代美術館當代藝術中心年輕建築師競圖 – Liquid Sky (Figure 12)。



Figure 11
Maximilian's Schell



Figure 12
Liquid Sky

這兩個案例皆是無骨架的軟性表皮自由形體設計，其藉由數位工具的幫助在參數式環境下進行設計，並最後建造出 1:1 最終作品。基於資料的取得與資料量的考量，在此僅挑選了 Ball-Nogues Studio 的一個大型建築案例與一個小型建築案例，這兩個案例皆具有較完整的軟性表皮自由形體設計與建構過程的資料來源及設計說明，如此可提高案例分析結果的可參考性與後續研究步驟的可行性。

設計過程一般認為有五個階段 — 分析、構想設計、初期設計、細部設計與生產計畫(Cross, 1989)。Lim(2007)則進一步將數位設計與建造過程分為 — 1.建築計畫、2.概念發展、3.設計發展、4.細部設計與施工圖、5.數位建構。本研究將基於 Lim 的五個案例分析因子進行案例分析探討，進而擬出無骨架的軟性表皮自由形體之「初步軟性表皮設計與施作流程」。

Ball-Nogues Studio 是由 Benjamin Ball 和 Gaston Nogues 組成的設計與構築工作室，此工作室專門設計建築、藝術、產品與研發施工方法，並一併完成建築施工作業流程。擅長使用數位工具進行設計與利用 CNC(computer numerically controlled)輔助施工過程的進行，其不少作品為無骨架的自由形體設計，且利用軟性材質建構自由形體的表皮，例如漸變顏色的線段、衣物、聚酯薄膜(Mylar)等。在他們的設計中，建築裝置的製作過程是很重要的，他們自行研發特定的工具幫助材料線段染色、以低科技的方式架起裝置的表面，電腦輔助工具的使用與低科技的人力資源是 Ball-Nogues Studio 重要的設計特點(Materials & Applications, 2005)。本研究挑選了兩個 Ball-Nogues Studio 的作品作為案例研究，對其運用 CAD/CAM 進行設計與施作流程深入探討分析。

3.2 案例分析

3.2.1 Maximilian's Schell

June 25 2005-January 20, 2006 Materials & Applications, Los Angeles, California, USA

此設計基地位於美國加州洛杉磯的材料與應用中心的庭院中，這個新的建築裝置一部分是為了展現新的 21 世紀張力結構，另一部份是為了向迪士尼工作室出產的科幻電影「黑洞」中的一個角色 Maximilian Schell 致敬。裝置被設計以羽毛般重量詮釋來自「宇宙中致命力量」，以此包裹流動的戶外空間，此「宇宙中致命力量」的意象由類似於彩色玻璃的染色聚酯薄膜組構而成，盤繞在戶外庭院的上方一整個夏天。一個集結 504 個不同的零件組合而成一個參數式多變的物件，這個漩渦狀室外裝置天棚的極端複雜與重複性是參考自黑洞中的角色——萊因哈特博士，博士如暴君般希望利用漩渦的力量和支配未知的偉大真理(Materials & Applications, 2005)。

在開始建構實體模型前，Ball-Nogues Studio 在發展過程中已花費超過一年的時間研究許多設計原型，然而實際上的作品製作時間僅花費兩個禮拜。原因在於這個裝置不僅是建築，也可說是雕塑品，且是經由一致的製作策略產生的量身定做(made to order)產品。經由本研究整理案例的設計與製造過程資料，在下方將就各階段設計發展與施工過程作個別說明分析，以下五個步驟為案例設計與製作過程：

1. 建築計畫：為了整合結構與皮層，漩渦被設計為加有鋼絲的「極小曲面」(minimal surface)，且在數學定義下的張力中伸展開。作品的設計源自於 Frei Otto 於西元十九世紀的五零與六零年代所做的肥皂薄膜表皮模型(soap films surface model) (Figure 13)，一個典型的利用電腦軟體進行有限度的元件(finite element)運算過程。

在西元 1964 年時，Frei Otto 在斯圖加特大學(University of Stuttgart)發現輕結構研究所，因而，他開始和他的團隊在此著手進行廣大的自然形體研究，此過程產生與激發最大限度的結

構。例如殼結構(shell structure)、輕結構、膜結構(membrane structure)、索網結構(cable net)、充氣結構等(Otto, 1995)。

承襲上方的研究，利用簡易硬紙板製作初步作為結構研究的概念模型，藉著這個模型模擬出黑洞型態(Figure 14)，以及人在黑洞底端的空間感(Figure 15)。此時已約略可看出自由形體設計樣貌。接著，用更接近最終作品狀態的材質——白色透明的塑膠片製作更進一步的小比例 CAM 模型，並將模型置入小比例基地模型模擬使用狀態(Figure 16)。

此時的實體模型製作即已利用到數位工具與 CAM 工具的輔助，並且表皮單元的分割與形成已是參數化設計下的產品。在建築計畫階段的模型中可以看到使用 CAM 工具加以編號的表皮單元(Figure 17)。以上兩個初步 CAM 模型所使用的材料都是重量輕且具有硬度，因而，當表皮單元被組構成漩渦狀形體時，表皮單元即可很輕易的形成該有的形體樣貌。

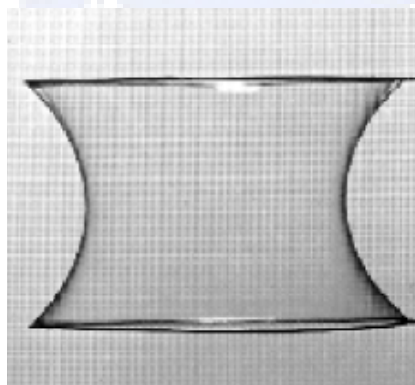


Figure 13
肥皂薄膜表皮模型

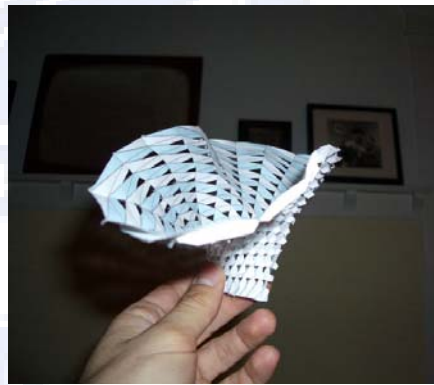


Figure 14
概念模型



Figure 15
概念模型



Figure 16
概念比例模型

2. 概念發展：接下來，經過設計者的手繪草稿與數位參數模型建立，薄膜結構工程師藉由 3D 軟體進行數位化精製與再定義「極小曲面」模型。在「概念發展」階段，他快速且精確的操作數位模型，計算漩渦狀天蓬垂吊時緊繃狀態受到地心引力所造成的扭力並賦予最後的漩渦狀天棚從頭到尾的每個表皮單元都遍佈著張力(Figure 18)。如此的作法，讓漩渦狀自由形體呈現一個純粹、平滑的樣貌，尤其是從自由形體外部觀看時。當人在漩渦狀天棚內部觀看時，作品如同一個巨大的透明狀花朵，花瓣因為地心引力輕輕垂墜、向下捲曲。



Figure 17
編號表皮單元

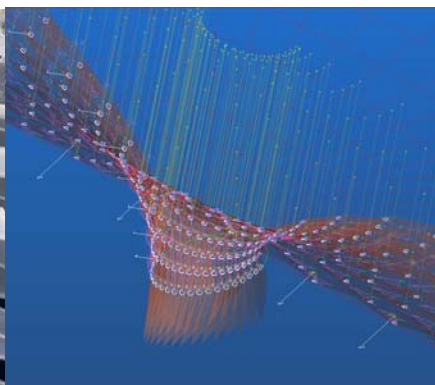


Figure 18
數位模型

3. 設計發展：Ball-Nogues Studio 在最終作品施工前先操作較小的 1/4 比例 CAM 模型試驗數位模型實體化之可行性。為了達到作品所需要的美學效果，設計者藉著運用聚酯纖維薄膜(Mylar)及加強作用的捆狀尼龍(Nylon)與聚醯胺纖維(Kevlar Fiber)等材料，以這些具有韌性的軟性材料組成漩渦狀形體。

先將數位模型中的表皮單元在數位平台中一一攤平以便後續動作的處理(Figure 19)，再來將這些材料在 CNC 平台上切割，為求表皮單元之結構完整性，無法直接在聚酯纖維薄膜上以 CNC 編號，而改以人工方式將表皮單元分類(Figure 20)，並在軟性薄膜上以油性筆編號歸類(Figure 21)，接著開始第一次的 1/4 比例 CAM 模型架設試驗(Figure 22)。

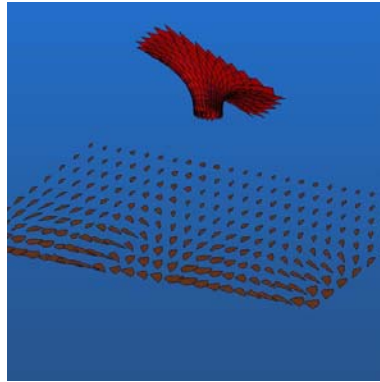


Figure 19
表皮單元



Figure 20
表皮單元分類

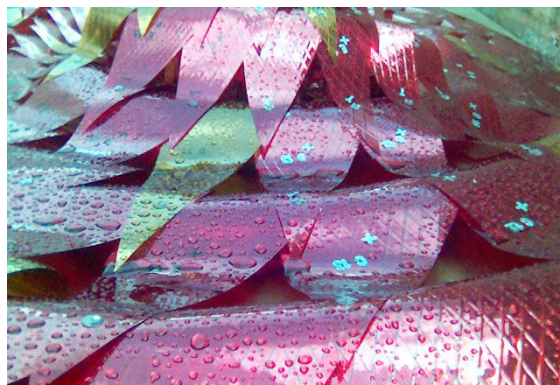


Figure 21
編號表皮單元



Figure 22
1/4 比例模型

4. 細部設計與施工圖：從上述試驗可知，第一個利用硬紙板所製作的 CAM 模型可藉由輕質材料與紙板所具有的韌性特質，輕易的在表皮單元組構後形成數位模型中所模擬的樣貌。同樣的，第二個利用白色透明塑膠片製作的 CAM 模型也是利用材質特性，自然就形成了漩渦狀形體，並且進一步的完成了透明度的需求。接下來的 1/4 比例 CAM 模型則開始試驗最終作品所要使用的表皮材料，此時的模型大小已不是可輕易掌握的尺寸了，因而開始有作品自身重量、材料韌性與張力等問題需要考量。

所以，在 1/4 比例 CAM 模型中，設計者開始利用鋼條架起基本的頂部吊掛用框架，以韌性強不易斷的尼龍繩連接鋼條與漩渦狀天棚，固定頂部的定位點，並且使用自身重量輕的 Mylar，這個材料特質亦能達到花瓣末端捲曲的意象。接下來，數位建構的模型也將以同樣方式挑戰最終的 1:1 比例的作品。

5. 數位建構：設計者率先將足以撐起 1:1 實體模型的鋼條在基地庭院的四端架設起(Figure 23)，接著將數位模型處理好的檔案送至 CNC 進行切割表皮單元的工作(Figure 24)，由於每一個單元皆互不相同，因而切割工作非常繁雜且瑣碎，雖然有 CAM 工具的精確功能輔助，但仍須以人工方式在接合處做記號。

等到表皮單元切割完畢，便將 CNC 切割出的強化聚酯薄膜鱗片按造表皮單位編號組裝成列(Figure 25)，人工方式使用聚碳酸酯鉚釘(polycarbonate rivets)固定表皮單元間(Figure 26)，組裝完成後的漩渦狀天蓬依舊是癱軟在地(Figure 27)，必須加裝其他輔助支撐才能成形。因而，利用先前架設的鋼管及鋼索將天棚吊起便施工完成(Figure 28)。整個過程使用了 504 片完全不同的鱗片，陽光透過鱗片的折射與反射在地上形成不規則圖形，站在漩渦中心的下方可仰望無際天空(Materials & Applications, 2005)。

漩渦狀自由形體的表皮同步發生反射與透射，透過多層金屬薄膜的加工處理，琥珀色薄膜具有抵抗紫外線光的功能。這樣的結果可以說是帳棚形式薄膜結構或是某種程度上的 Frei Otto 索網結構。進一步來說，Maximilian's Schell 可以說是結構與皮層的結合(Corporation, 2007)。由 504 個各不相同的花瓣狀參數零件組成特殊的張力結構網，每一個花瓣單元連接另外三個交接點相鄰的單元並以聚碳酸酯鉚釘固定去塑造出整個漩渦狀形體，透過重力的包覆，花瓣狀表皮單元不斷改變大小與比例成為各自獨立的元件。

藉由改變洛杉磯材料與應用中心庭院的空間、色彩度與聲音，使得這個內部具有實驗性臨場感的裝置創造一個誘使人進行社會互動與冥想的戶外空間。當陽光從頭頂射入，天蓬投射著色後的幾何不規則碎形光線在地板上，伴隨著雄蜂聲響的環繞音在觀賞者腳步後方轟轟作響(Ball and Nogues, 2010)。

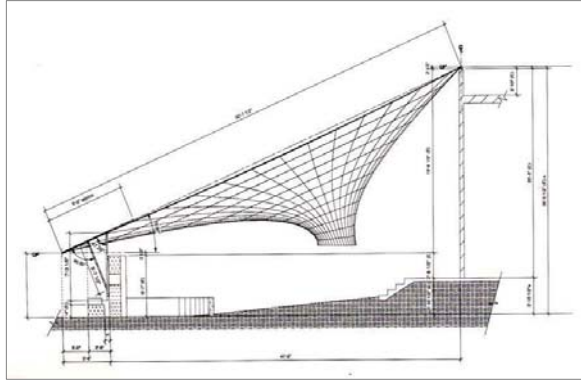


Figure 23
安裝支撐鋼柱



Figure 24
裁切表皮單元



Figure 25
表皮單元編號



Figure 26
連結表皮單元



Figure 27
安裝表皮至框架





Figure 28
1:1 比例原型

從上述軟性表皮自由形體設計與建構過程中可以得知，在建築計畫階段時，Ball-Nogues Studio 已經開始利用小比例 CAM 模型進行初步的設計試驗，並進行了初步的結構研究設計。概念發展階段時則在數位模型中進行造型探討與結構模擬驗算，直到定案數位模型。設計發展階段則開始將數位模型實體化，使用的是接近 1:1 比例的 CAM 模型，接著在細部設計與施工圖階段則開始檢討先前的設計步驟，進行材料試驗，最後進入了數位建構階段。完整的設計與施作流程整理如下(Figure 29)。



Figure 29
Maximilian's Shell 設計與施作流程

3.2.2 Liquid Sky

MoMA/P.S.1 Young Architecture Program 2007

June 25-October 31, 2007 P.S.1 Contemporary Art Center, Long Island City, New York, USA

此案例為紐約現代美術館(MoMA)和當代藝術中心(P.S.1)2007年所舉辦的年輕建築師競圖中的獲勝者·Ball-Nogues Studio 於紐約當代藝術中心的中庭製作為期四個月的臨時性裝置·名為「Liquid Sky」。此次的展覽會將基地附近的街景帶入·並會有因應美術館新館的成立而舉行的音樂會。因而·競賽主辦者們要求設計師為音樂會設計舞台·裝置空間需能容納 6000 人·設計中需考量三個因素——座位、遮陽結構與水·且有資金限度與限時三個月的設計與施工時間(Nobuyuki, October 2008)。

由此可見·此次的設計作品不僅是改變環境氛圍之建築裝置·而是更進一步加入了使用者需求。並且·相較於上一個案例——Maximilian's Schell·這個案例挑戰的是更大的尺度操作·基地範圍更是上一個案例的五倍大小(Figure 30)·這使得作品更接近建築。經由本研究整理案例的設計與製造過程資料·將就各階段設計發展與施工過程做個別說明與分析。以下五個步驟為案例設計與製作過程：

1. 建築計畫：設計者以手繪草稿方式構思作品的大概形體樣貌·將表皮組構方式分為三種樣貌(Figure 31)·以三種不同的表皮單元原型的形狀與顏色作為區分。以這個方式·此巨大網絡樣貌的圖樣將呈現作者想表現的「萬花筒般的彩色圖案」。當陽光瀟透過可透光材質的表皮單元組成如花般開放的建築裝置·映照在地上時會呈現多彩的圖騰·突出基地外牆的建築裝置頂飾將重新配置當代藝術中心的天際線。

六座裝置塔由未經處理的木柱撐起軟性材質建構成的帳棚式表皮·並提供基地上的離散空間所需的巨大休憩用吊床的結構基礎·以明亮色彩網製作而成的休憩吊床提供休息空間給活動中的人們。與基地相鄰的戶外藝廊·Ball-Nogues Studio 設計了一個垂墜的水滴狀表皮單元構成的網狀物·其四周由沖水塔作為支柱撐起整個表皮(MoMA P.S.1, 2007)。



Figure 30
基地圖

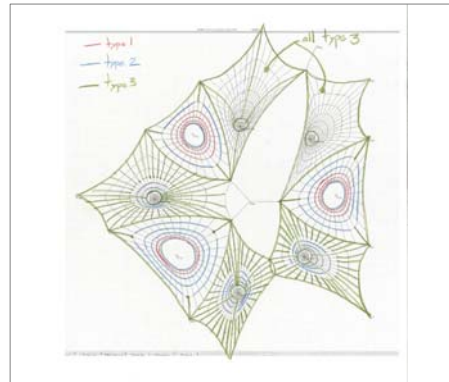


Figure 31
手繪草圖

2. 概念發展：接著進入建構 3D 數位模型階段，將設計者的手繪草稿轉化成數位模型。設計者首先將基本自由形體的表皮部分建構完成(Figure 32)，並將表皮進行單元分割(Figure 33)，接著開始進行參數式設計的部分，將表皮應用上寫好的參數式程式指令碼便得到相對應表皮弧線所產生的漸變大小與比例的表皮單元及其組構出的網狀結構(Figure 34)，接而建構自由形體表皮所需的張力結構基礎——三角錐狀木構塔(Figure 35)，主要的帳棚式表皮結構單元便完成(Figure 36)。接下來，便以此繼續發展成六個塔狀單元組構而成的大型建築裝置。

另外一方面，藉由數位模型檢視主體裝置網絡的表皮型態，從數位模型中模擬表皮網絡因為張力呈現緊繃狀態的表皮(Figure 37)，並從中規劃表皮單元的張力分佈狀況與合理化表皮的曲度(Figure 38)，接著模擬陽光透過多彩表皮網絡的光線效果(Figure 39)，以提高建築裝置建構的成功率及實質效果。另外，基地旁由垂墜水滴狀表皮單元組成之網狀物亦經過數位模型模擬垂墜情形，表皮網絡呈現張力狀態而形成「水滴狀」表皮構成方式(Figure 40)，這個水滴狀表皮單元組構成的網狀物藉由四個角落的「沖淋塔」支撐起整體網狀結構。這個「沖淋塔」有別於主要作品的結構支撐塔，藉由慣性翻轉塔頂木桶並同時發出雷鳴般聲響，觀眾可在此沖涼取樂。經過上述概念發展的過程，確定了作品最後的設計定案(Nobuyuki, October 2008)。

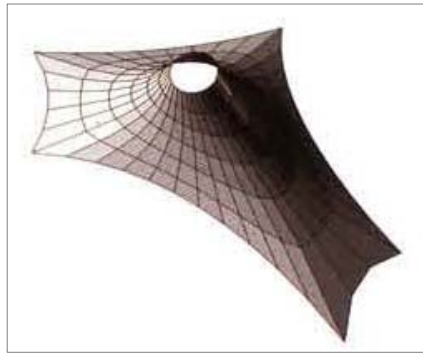


Figure 32
基本表皮樣貌

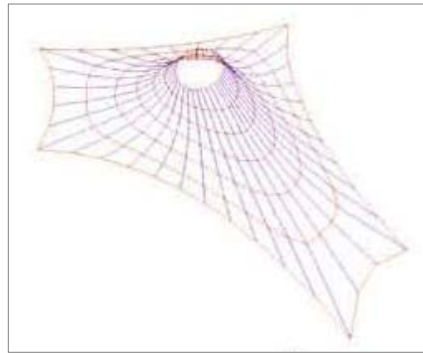


Figure 33
分割表皮



Figure 34
應用表皮生成指令碼

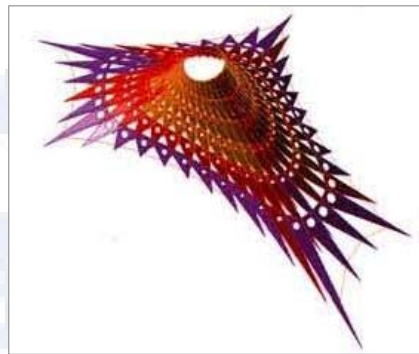


Figure 35
支撐架

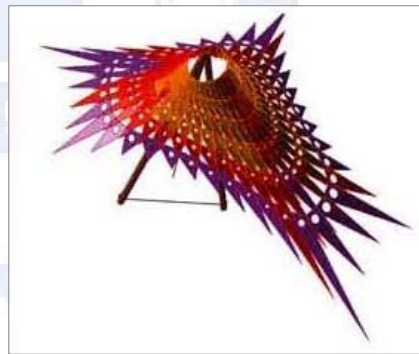


Figure 36
完整表皮網絡



Figure 37
數位模型

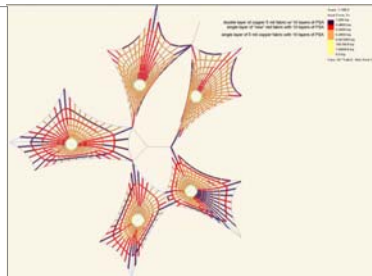


Figure 38
表皮單元研究

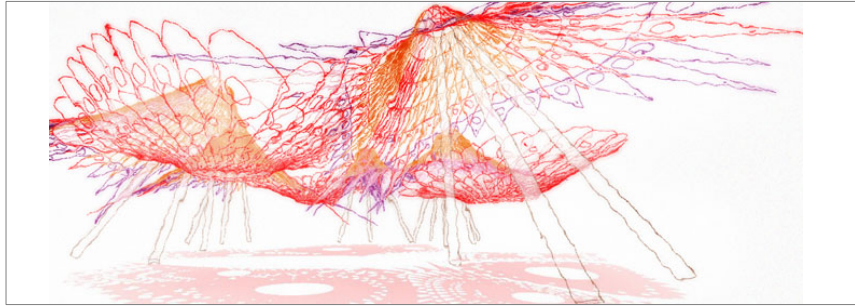


Figure 39
陰影分佈研究

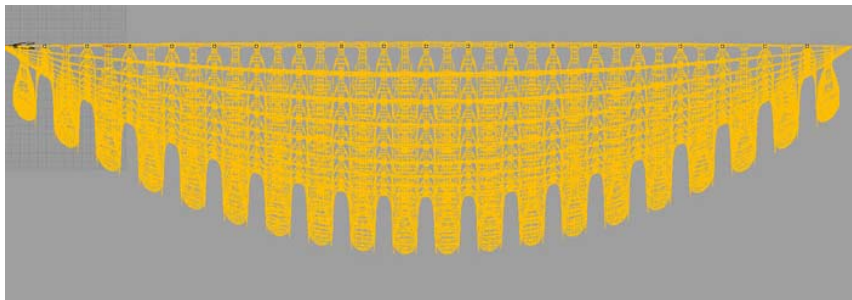


Figure 40
數位表皮研究

3. 設計發展：經過數位模型模擬網絡的曲度與分佈之後則進入小比例 CAM 模型試驗階段。將數位模型的表皮單元攤平分類後 (Figure 41) · 以不易變形具有硬度與透明度的輕薄壓克力片作為材料，利用 CAM 工具產生表皮單元，再一一將其組構成帳棚式結構表皮形體，並進而將自由形體表皮形體放進基地模型中模擬使用方式。藉著實體模型的空間定位可以清楚看出裝置的大體樣貌構成與使用狀況 (Figure 42)。

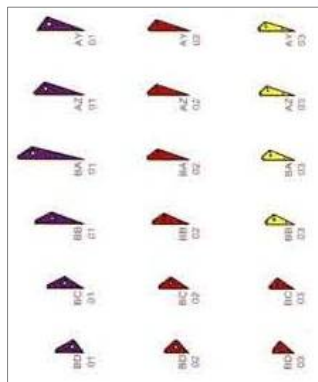


Figure 41
表皮單元



Figure 42
比例模型

4. 細部設計與施工圖：從紐約當代藝術中心的提案模型中可以看到，第一次的試驗 CAM 模型的表皮材料是具有硬度與透明度的透薄紅色壓克力片，所以可以輕易形成設計者所需的自由形體外型。然而，實際作品為帳棚式結構的自由形體表皮設計，結構基礎為三角木頭支柱撐起的張力結構。因而，所需的表皮材料需具備輕薄、透光與可形成柔軟滑順曲線的特質。

接著探討實際材料所表現出的網絡狀態是否符合數位模型。Ball-Nogues Studio 在這個案子中使用的製作方法是低科技作法的結合，從帆船工業取經，使用最新的薄膜切割方式與組構技術。在表皮薄膜材料上，採用的是 Mylar 聚脂薄膜片組成的「鑲嵌式」軟性薄膜表面，是 Ball-Nogues Studio 很熟悉且經常使用的材料，它能夠覆蓋兩個巨大的庭院基地。

5. 數位建構：經過上述的過程討論與研究，Ball-Nogues Studio 便開始最後的 1:1 實體模型建構。首先，從軟性材質建構的表皮形體所需的結構支撐開始，依據先前電腦模擬的結構分析結果，支撐架由主要的三根未加處理的木柱組成不對稱三角錐 (Figure 43)，三角錐的著地處會埋入基地的地平線以下以穩固結構 (Figure 44)，支撐骨架下方以作為休憩用的吊床網狀物連接在一起 (Figure 45)，除了可提供活動中的休息空間 (Figure 46)，還能充分利用骨架下的空間與加強支撐骨架的結構 (Mitchell, 2007)。

等到支撐骨架都已架設完畢，再利用吊車將組裝完畢的癱軟狀軟性表皮形體吊掛固定在支撐骨架上 (Figure 47)，尚未吊掛起的軟性表皮形體是癱軟在地、不具結構力的 (Figure 48)，而固定在支撐骨架上的軟性表皮形體也只是垂掛在上頭，如同尚未揚帆前的帆吊掛在桅桿 (Figure 49)。因而，開始將六座塔的表皮形體接連在一起，使作品成為一個大型的巨大網絡天棚，在完成後的建築裝置上可以看到軟性表皮形體因為其他結構的輔助所產生之張力影響，軟性表皮不再癱軟，已呈現平滑的自由形體曲面 (Figure 50)。



Figure 43
三角錐結構



Figure 44
安裝



Figure 45
固定網



Figure 46
休息空間



Figure 47
組裝



Figure 48
龐軟軟性表皮



Figure 49
無張力表皮



Figure 50
1:1 比例原型

分析完 Liquid Sky 整個設計與建構過程可以得到幾個重點。在建築計畫階段，Ball-Nogues Studio 藉由手繪草稿勾勒出基地配置、作品形體與組構方式，由於此作品為大型建築裝置，因而在此階段需要更多的機能性使用考量。接著在概念發展階段，藉由在數位參數模型中的造型探討得到最後的定案數位模型。設計發展階段則展開數位模型實體化的中比例 CAM 模型製作。藉由這次的 CAM 實體模型檢視設計缺失與軟性表皮自由形體的數位建構可行性。細部設計與施工圖階段則進行材料試驗的討論與考量 1:1 比例 CAM 模型數位建構時所需的軟性表皮支撐結構。等一切準備妥當，數位建構階段從張力結構支撐開始施工，利用 CNC 切割出的薄膜表皮單元經過人力加工細部之後，組構成完整的帳棚式結構，最後的組裝工作完成後則可看到作品的最終樣貌。完整的設計與施作流程如下(Figure 51)。



Figure 51
Liquid Sky 設計與施作流程

3.3 初步軟性表皮設計與施作流程建立

從上述的案例分析可以得知，由於無骨架的軟性表皮自由形體在結構上具有缺陷，必須對表皮組構方式進行結構性研究探討，並以額外的輔助結構支撐軟性表皮。軟性表皮自由形體設計在初步的小比例 CAM 模型階段時，可以利用參數設計規劃仿生結構之表皮達到表皮單元的結構自組性，使用具有韌性的材料，輕易的達到數位模型中的自由形體樣貌。然而，當最後的數位建構階段時，則有軟性表皮自由形體的自身重量與表皮形體結構等問題需要解決。因而，在細部設計與施工圖階段進行的材料試驗與先前的結構研究，即需要事先考量與研究。

根據上述兩個軟性表皮案例的設計與施作流程總結歸納出一個「初步軟性表皮設計與施作流程」(Figure 52)，以此作為接下來實驗步驟的初步研究流程參考。

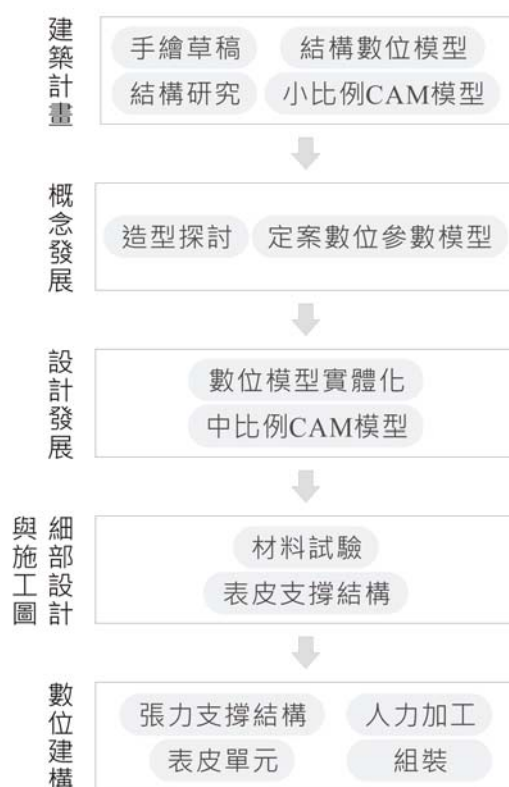


Figure 52
初步軟性表皮設計與施作流程

第四章 設計實作

4.1 軟性表皮自由形體設計與數位建構

經由第三章案例分析的結果可以得知，在軟性表皮自由形體設計與施作流程中，參數式設計應用、表皮結構自組性、材料試驗與表皮張力支撐結構成為很重要的決定性因素。然而，為了驗證案例分析整理出的「初步軟性表皮設計與施作流程」，本研究將在此章節進行一系列軟性表皮自由形體設計與施作流程的探索，以此過程驗證「初步軟性表皮設計與施作流程」之完整性與參考價值。

因此，本研究設計流程延續第三章案例分析結果所產生的「初步軟性表皮設計與施作流程」，設計過程則依照交通大學建築研究所針對數位組開設的數位設計課的程序表，。此數位設計課透過批判性的探索當代數位設計的自由形體建築過程去勾畫出數位構築的未來性(Lim, 2009)。軟性表皮自由形體設計作為其中的案例去重新定義建築表皮中皮層與骨架的關係，並探討無骨架的軟性表皮設計與構築過程。以下五個子步驟(sub-steps)為軟性表皮設計與構築過程：

1. 建築計畫：設計基地設定於銜接建築出入口與自然景觀的木棧道上，人們從此處離開與進入，脫離與介入，毫不費心在此處。因而嘗試在此處設計一個建築裝置使過客們留意與關注。設計想法為構建如同樹冠般覆蓋與圍塑太陽（光源），當陽光（光線）透過樹葉（表皮單元）縫隙投射於木棧道時，將會有迷人氛圍產生。人們也開始在此停留與生活。

為達成設計構想，首先以手做編織結構概念模型(Figure 53)草擬出自由形體的結構樣式，藉著扭轉改變模型形體探討軟性表皮的組構方式。編織是由兩個不同方向系統的物件所組成的綜合體，其藉由互相連結的方式產生結構自組性去形成整體的形體(Aranda and Lasch, 2005)。可惜的是，編織系統的結構無法符合本研究的自由形體設計所需的平滑曲線，即使此仿生結

構具有自組性。因而，如同文獻回顧中所提及，生物界自然形成的結構中具有最佳的穩定性，可以藉由模仿生物結構的組織方式，應用於軟性表皮的結構，在此選擇的是生物鱗片般的表皮組構方式作為第一次實驗 CAM 模型的表皮結構。

接下來先將簡單的數位形體在 Grasshopper 中定義，利用參數式設計產生初步參數模型，經過 AutoCAD 軟體處理後產生 2D 表皮單元，再利用雷射切割機產生小比例結構 CAM 模型 (Figure 54)。基於實驗結果，決定自由形體表皮單元組構方式以循著自由形體漸變大小與比例的生物鱗片組構形式為主。



Figure 53
概念模型



Figure 54
結構模型

2. 概念發展：決定了初步軟性表皮的組構方式之後，則利用數位工具(Rhinoceros)模擬作品樣貌，建構出初步幾何形體的數位模型(Figure 55)，將數位模型帶入 Rhinoceros 外掛工具 Grasshopper 中加以定義，在 Grasshopper 中連結運算器建構表皮組成方式，以仿造生物鱗片(bio-flakes)組構方式形構表皮單元樣貌。Grasshopper 的參數運算列的資料包含軟性表皮的分割、表皮單元的形體、表皮單元的接合與接合處的細部。藉由連結運算器與參數的運算列應用，幾何自由形體的表皮轉化成生物鱗片樣貌。調整參數值模擬表皮單元組構方式，使表皮鱗片互相交接(to fix)產生出關鍵性的接合點(joints)，再度改變參數以達到每個表皮單元的完整性與合理的連結(Figure 56)，因而得到初步的軟性表皮自由形體設計定案。

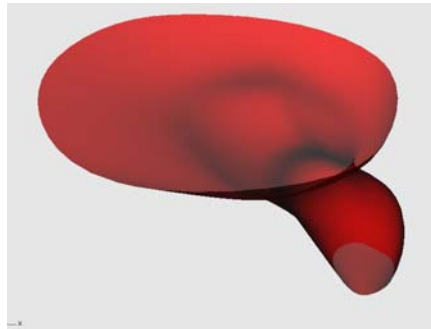


Figure 55
數位模型

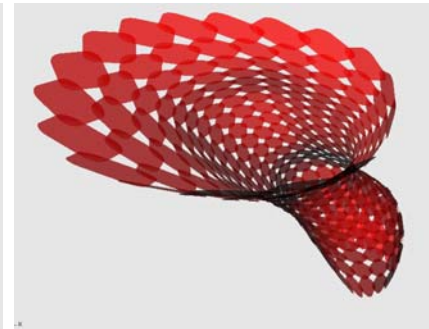


Figure 56
參數模型

3. 設計發展：透過 Grasshopper 的運算定義，將定案的參數模型轉檔至 AutoCAD 中進行攤平(to unfold)表皮單元的動作，並處理 2D 表皮單元的連接處細部(to detail)與組裝序列編號，接著使用 CAM 工具 - 雷射切割器產生表皮單元，使用的材料是常見的低磅數厚紙板(bristol board)，以人工的方式將 81 個表皮單元組構成 1:20 的中比例 CAM 模型。此時自由形體以互相交集的連結便輕易的撐起完整的表皮結構，再以膠帶加以輔助強化固定，1:20 比例實驗模型(Figure 57)便如同電腦模擬的數位模型。在此可得知，由於仿生結構的表皮單元組構方式應用，軟性表皮自由形體可以輕鬆的形成預先模擬的形體樣貌。

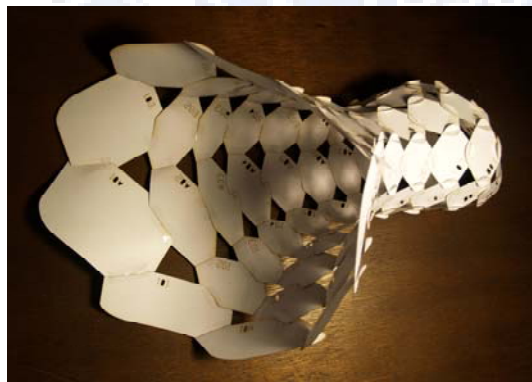


Figure 57
1/20 比例模型

為了更貼近 1:1 實體模型，再次回到 Rhinoceros 修改數位模型的造型，使自由形體更加圓滑呈現蛹狀幾何形體(Figure 58)，接著在 Grasshopper 中調整參數數值，增加表皮單元的數量以符合 1:10 實驗模型表皮單元該有的相對放大尺度(Figure

59) · 接著進入 AutoCAD 進行攤平與細部處理。此次以更加柔軟、具有透光性材料 0.15mm 的透明 Polypropylene 進行第二次中比例 CAM 模型製作，經由雷射切割後產生了以 144 個表皮鱗片單元組成的 1:10 實驗模型，組裝好的軟性表皮由於材質過於平滑無法彼此卡接穩固，需以釘書針固定滑動的 Polypropylene 接合處，即便軟性表皮接合處都已固定，由於表皮材料過於柔軟不具支撐力，表皮單元開始產生捲曲現象無法自然成形，於是 1:10 比例 CAM 模型呈現癱軟狀態(unformed)，需藉由外力支撐將模型吊起，以各向度的張力撐起表皮曲線如同蛹狀的幾何原型，但表皮單元過於捲曲，仍舊無法形成平滑的表皮曲面(Figure 60)。

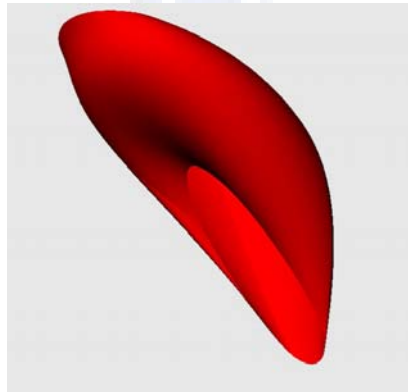


Figure 58
數位模型

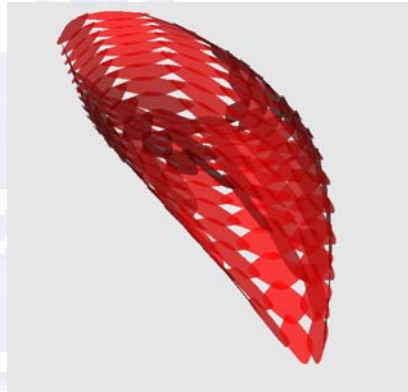


Figure 59
參數模型

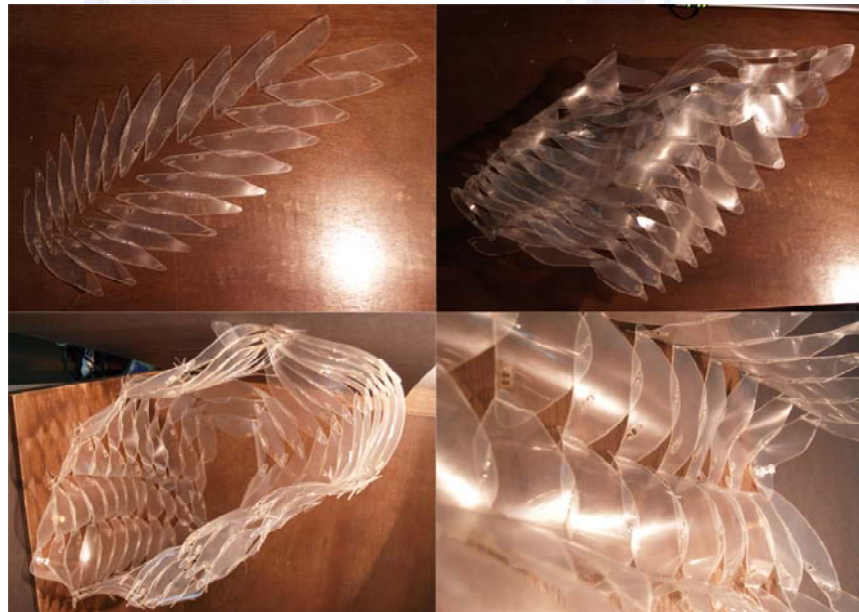


Figure 60
1/10 比例模型

4. 細部設計與施工圖：從上次的 1:10 比例 CAM 模型實驗中可以看出表皮單元的材料在此扮演很重要的角色，關乎表皮單元的結構自組性、自由形體的表皮圓滑度及設計需求的透光性。然而，軟性表皮的表皮缺乏骨架支撐，模型尺度變大時需要有張力結構支撐才能成形。為了預先解決進行 1:1 實體模型數位建構時會遇到的難題，開始進行 1:2 比例實驗 CAM 模型製作。

再次進入 Grasshopper 參數環境中進行調整參數值的動作，增加表皮單元的數目與調整接點的卡接程度。同樣以 0.15mm 的 Polypropylene 進行第三次實驗模型製作，這次採用了顏色的 Polypropylene 增加表皮單元硬度。利用雷射切割機產生了 324 個表皮單元組成 1:2 實驗模型，此模型除了表皮支撐問題之外還有自重(net weight)需要解決。表皮單元之間用銅扣(brass eyelets)連接可更靈活的調整表皮單元的向度，一個表皮單元會有四個向度的連接點，以釣魚線固定在天花板上的支撐點產生張力將蛹狀自由形體掛起，利用各方向的張力將軟性表皮自由形體的幾何原型撐起，一切就緒後可以看到 1:2 比例 CAM 模型呈現蛹狀的自由形體(Figure 61)。此次的表皮材料較不易產生捲曲現象，但表皮單元本身韌性不夠以致無法自我支撐成形，需完全性的依靠外在結構。



Figure 61
1/2 比例模型

5. 數位建構：由先前的研究步驟得知，厚紙板是具有足夠的韌性以達到基本的表皮自我成形，而 Polypropylene 雖具有設計需求的透明性，但由於材料特性使得表皮單元自組性過於薄弱，即便有仿生結構的表皮單元自組性輔助，仍舊無法達到初步的結構要求，因而在此不予採用。

於是，正式開始最終 1：1 實體模型數位建構，第三次進入參數式環境中進行調整參數值的動作，1：1 實體模型將以長度 102 公分、寬度 65 公分、高度 115 公分的巨大尺度展現。由於 Polypropylene 材質過於柔軟不具支撐力，無法表現出自由形體的彎曲造型，於是使用第一次試驗的實驗模型所使用的厚紙板作為材料，由於量體過大，所以使用較具支撐力的高磅數厚紙板作為表皮材料，同樣以 brass eyelets 作為接合處的連結可讓表皮單元隨著力量的走向微調角度。

接著，利用雷射切割機進行編號並產生了 324 個互不相同的表皮鱗片單元組構成 1:1 實體模型。表皮單元在連接的過程中由於紙的特質會有撕裂的狀況發生，因此必須再次重複雷射切割新的表皮單元替換。組裝過程則需利用木架將沉重軟性表皮撐起以進行內部的單元組裝，組裝完畢後蛹狀軟性表皮依舊呈現癱軟狀態(Figure 62)。此時的問題與 1:2 實驗模型相似，只是量體尺度放大兩倍。接著，仿照 1:2 實驗模型的張力結構系統，搭建在連接戶外的室內基地平台上，在樓版上釘上鐵釘作為支撐定點，以各向度的釣魚線吊掛起蛹狀軟性表皮，藉由微調整線的鬆緊度與方向，利用線與樓版之間產生的張力，以及軟性表皮自身的重力與鱗片表皮單元的結構自組性將軟性表皮自由形體撐起。

最後，施工成果就如同最初電腦運算模擬出的效果，透過軟性表皮自身重量所產生的重力拉扯，鱗片(bio-flakes)表皮單元順著蛹狀自由形體的曲線變化產生等比關係的形狀漸變，1：1 實體模型就如同數位模型一般呈現圓滑曲線的蛹狀物(Figure 63)，軟性表皮自由形體設計與建構過程到此作為結束。

檢視軟性表皮設計的成果，巨大的蛹狀自由形體的確為此中界空間帶來更多的注目，人們開始圍繞著如樹冠般的幾何形體，觀賞、玩耍、談天、拍照，或是進入產生互動行為，例如談話、看書、抽煙等。白天時，醒目的白色量體吸引人們靠近，晚上時，昏黃燈光透過鱗片表皮單元的縫隙在地上產生陰影紋路，使木棧道平台瀟灑迷人氛圍。

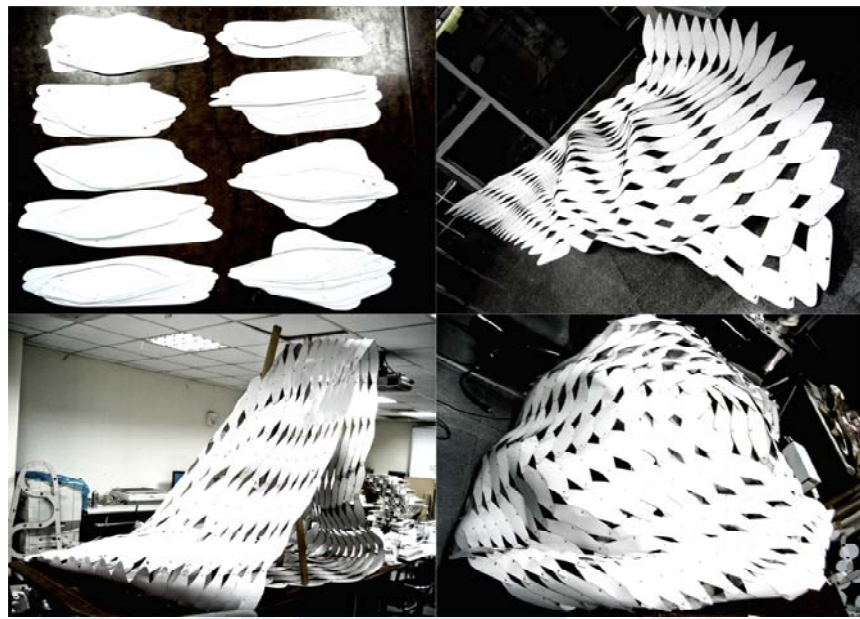


Figure 62
組構過程



Figure 63
1:1 比例原型

4.2 軟性表皮設計與施作流程

如同上述研究步驟所提及，本章節詳細紀錄了一系列參數式設計與數位建構實體化製作過程的五個步驟，包括建築計畫、概念發展、設計發展、細部設計與施工圖、數位建構五個主要步驟與其中的子項目。接下來，將就這五個步驟進行說明與討論。

首先，軟性表皮自由形體本身不包含骨架，除了皮層本身之外，並沒有額外的硬性結構可以支撐自由形體，在設計初期即需要結構研究的考量。所以，結構研究、參數式結構數位模型、小比例 CAM 模型便成為第一步驟的建築計畫的子項目。參數式造型也許是最具有潛力與耀眼的建築形式形體，然而，為了成為更為有效率的造型方式，參數式造型必須超越現階段大多停留在電腦模擬的情況(Garcia, 2010)。因而，在進行建築計畫階段的結構研究時，參數式結構數位模型除了作為表皮組構方式的設計模擬外，尚須在參數模型建構時考量到實作過程將所需的建構元素，例如接點的接合方式、表皮單元的造型將影響接合的數量、表皮數量與自由形體曲面平滑度的關係等，這些建構元素將影響小比例 CAM 模型成功與否的關鍵，與成為下一步驟的參數內容。

第二階段的概念發展在確認了軟性表皮的結構方式之後，則針對設計需求建構數位模型，並進行造型探討與 Grasshopper 的參數運算列的建構，直到最後的定案數位參數模型。數位表皮(digital skin)不受傳統的進化因素所驅使，表皮應具備深度，此深度正是來自虛擬建築結構的威脅所產生的問題(Taylor, 2003)。這些論點在建構參數運算列時是需要加以注意的，基於此需求，數位模型也是因為可以進一步預先模擬將要面對的問題而生。

到了第三階段的設計發展時，為了得到中比例 CAM 模型，數位模型實體化的過程成了關鍵。在數位時代的電腦輔助製造技術中，新的數位化生產過程暗示著，建築設計的建造施工成為可直接運算的函數。藉著 CAM 工具的應用，由 NURBS 曲線與曲面構成的複雜幾何形體也是可以被加以運算並建構實體化。生產過程將基於切割、減去法、添加劑與形成製造，以此提供豐富的機會去探索新的幾何構造(Kolarevic,

2005)。在此基礎之下，本章節的設計實作在此階段進行了兩次的數位模型實體化的過程，原因在於第一次的 1:20 比例 CAM 模型雖然輕易的形成自由形體，但比例過小，為了更接近 1:1 實體模型數位建構，再次進行了 1:10 比例 CAM 模型的數位模型實體化過程，但此次的模型開始出現軟性表皮材質過於柔軟不具支撐性，因而在下一階段展開了「材料試驗」與探索「表皮支撐結構」的過程。

在第四步驟的細部設計與施工圖階段中，由於軟性表皮的材質特性與無骨架支撐問題，一方面，可以藉由表皮仿生結構的自組性完成初步的成形作用，另一方面，「表皮支撐結構」更是此階段的重點，相應而生的「結構實驗模型」是相較於第三章的設計與施作流程所新增的項目。在第三章的案例分析中，「結構實驗模型」是在數位模型中進行的，由於技術限制的考量，本次的設計實作中則以 1:2 比例 CAM 模型取代第三章案例分析中的數位模型。並且，檢視第三章的案例分析過程，因為專業結構運算軟體的使用而沒有特意指出「結構實驗模型」的部分，本研究則在此階段提出以作為更為詳盡的流程紀錄。

最後，第五步驟的數位建構階段則按照第四步驟的表皮支撐結構試驗結果進行 1:1 實體模型數位建構，以雷射切割機產生表皮單元，以人力的方式進行手工藝般的接點細部加工。接下來，藉由多向度的定點魚線吊掛以產生張力去拉出自由形體的蛹狀造型，一旦張力形成，表皮的仿生結構將自動排列塑造出自由形體曲線樣貌。因而，在此設計施作流程中，即便沒有骨架，軟性自由形體依舊可以透過張力結構的懸掛方式形成電腦模擬中的數位模型樣貌，懸掛方式所產生的張力在此設計中則取代原有的骨架支撐作用。

檢視本研究第四章節的軟性表皮設計與施作流程可以發現，相較於第三章案例分析所整理出的流程，本章節設計實作的步驟中有「修改參數」的動作產生，在「結構實驗模型」與「數位建構 1:1 實體模型」階段都有回到參數式模型調整參數值的步驟。接著回頭檢視第三章的案例也可以發現此動作的跡象，在每一次的「數位建構」步驟中，只是較不明顯，設計說明過程中沒有明確指出。但是，由於在不同比例的 CAM 模型中有不同的表皮單元數量的需求，因而，回到參數式模型「修改參數」的動作是必要的。

因此，經由軟性表皮設計實作的驗證，本研究在「結構實驗模型」與「數位建構」兩個步驟中皆加入「修改參數」的回溯動作，以達到整個流程的完整性。總結上述的五個步驟，下方流程將成為沒有骨架的軟性表皮自由形體設計與施作流程(Figure 64)。

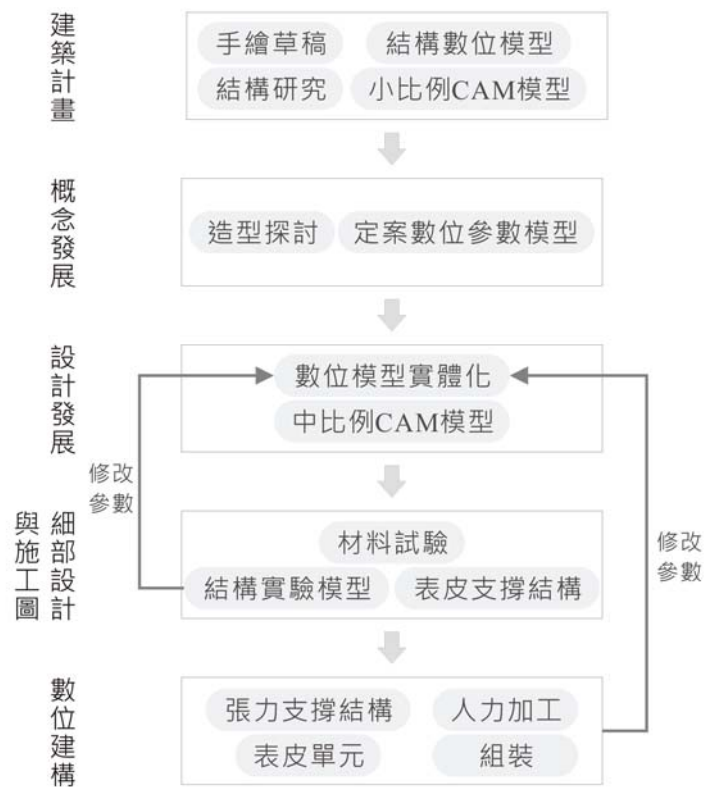


Figure 64
軟性表皮設計與施作流程

第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究依據案例分析的設計資料與實作過程，預期能從案例分析中歸納出軟性表皮設計的幾項重要步驟，統整這些步驟以得到「初步軟性表皮設計與施作流程」。進而以此「初步軟性表皮設計與施作流程」作為基礎，實際操作一次軟性表皮設計與建構，藉由記錄分析此次設計實作的過程與結果，回頭驗證第三章所得到的「初步軟性表皮設計與施作流程」，進一步修改「初步軟性表皮設計與施作流程」，最終將得到「軟性表皮設計與施作流程」的完整內容。

最後，歸功於 Grasshopper 的清晰歷史紀錄與設計回溯功能，以及仿生物結構的自組性應用，第四章節的設計實作驗證了第三章案例分析歸納出的「初步軟性表皮設計與施作流程」之可行性，並進而完善此設計與施作流程。

然而，軟性表皮自由形體的支撐與自重問題仍需要進一步的討論與挑戰更精確的處理方式，首先，1:20 比例 CAM 模型的軟性表皮單元在組構完畢後，由於生物系統的結構自組性與材料特性，鱗片表皮單元能夠藉著彼此互相的連結，輕易的形成蛹狀幾何形體。然而，因為軟性表皮材質的因素，1:10 比例 CAM 模型的鱗片表皮單元則開始產生捲曲的現象，並癱軟在地無法成形。而 1:2 比例 CAM 模型除了表皮支撐問題外，又多了軟性表皮自身重量的問題。因而，越來越大與不斷增重的表皮結構已經很難去形成自由形體的幾何樣貌。為了形成仿生軟性表皮的幾何形體，必須有額外的力量支撐，例如張力系統。

為了進行軟性表皮設計與數位建構，本研究進行了一系列的案例分析、初步設計與施作流程歸納，接著按造此流程進行了設計實作，並成功的完成了軟性表皮設計與數位建構，證實了軟性表皮自由形體可按造特定的設計與施作流程，經由一定的建構方式確實的施作完成，並非預估中的困難重重不易操作，僅能作為紙上建築的討論。

5.2 研究貢獻

透過一系列的研究分析與驗證步驟，總結上述結果得出的流程將成為沒有骨架的「軟性表皮設計與施作流程」。由於目前軟性表皮自由形體的數位建構實體化案例甚少，而當中已建造完成的案例，其設計與施作流程亦不透明化，隱含許多未知的過程與步驟。有鑑於此，本研究流程將做為未來從事軟性表皮自由形體的設計者之基礎流程，以此發展參數式仿生軟性表皮，並進一步探索軟性表皮的多樣性與各種的可能性。

在參數式設計的部分，本研究藉由參數式環境對於建築設計與數位建構的強大功能。在每一次的數位建構過程中，無論是小比例、中比例，或是最終的 1:1 實體模型，都能夠應用參數式設計的清晰圖像歷史紀錄與回溯設計流程的功能，從中修改參數值即可得到設計數位模型，而不需以再次重新建構數位模型的方式達到設計結果。如此精確與立即性的設計方式將帶給參數式軟性表皮設計者許多的幫助與便利，提升軟性表皮自由形體的設計效率與數位建造的實踐度。

而在軟性表皮的結構研究上，本研究提供了幾種仿生表皮結構組成方式，如同先前文獻所提及，生物結構與生具有的穩定性是值得學習與應用的，無論是數位時代以前的 Antoni Gaudí，數位時代以後的 Frei Otto，或是當下的 Greg Lynn、Marcos Novak、NOX、Xefirotarch、Ball-Nogues Studio，都已參與仿生建築的研究與建築形式的試驗。因而，在此基礎下，未來的仿生結構能夠延續先前的研究基礎，進而開始更為快速且多元的發展。

另一方面，本研究對於軟性表皮在數位時代的新定義亦提供應用方式，未來研究者可藉此發展出各式的軟性表皮用途與在建築中的不同存在角色。軟性表皮自由形體可以從小規模的建築裝置藝術、室內展演空間發展延伸至建築的部分主體，進而賦予建築空間機能的使用。基於此潮流，軟性表皮自由形體將脫離僅是建築裝置的角色，可以進一步的成為建築圍塑空間的軟性建築表皮。

5.3 研究限制與未來研究

本研究實作部分礙於課堂時間進度的配合與單人實作規模的限制而選擇以目前已被普遍使用的電腦輔助設計與製造的工具操作，例如常見的 Grasshopper、AutoCAD 與雷射切割機，並將實驗範圍限制在裝置藝術部分，最終完成作品則因規模過小以致無法含括更多建築表皮所需之建築結構、環境控制、建築構造等不同專業領域之實證。未來研究將以此軟性表皮設計流程為基礎，把實作案例大小擴大延伸至實體建築運用部分，進一步探討此軟性表皮設計流程，使此設計操作流程更臻完善，以增加軟性表皮設計流程的參考性，進而提高操作軟性表皮的可實踐度。

再者，礙於專利與軟性表皮操作技術發展尚未成熟，本研究方法中的案例分析研究部分仍舊有未知的不透明操作流程，例如結構工程的運算、表皮材質的精密加工合成過程與多元的表皮結構運用，並且在第四章的設計實作中亦產生了不少的表皮材料問題與張力支撐結構的解決方式，此需要更為專業的結構運算研究與軟性表皮之科技研發，並以更為長遠的研究計畫來進行釐清。因此，可依據本研究之結果流程，更進一步的進行軟性表皮設計與施作流程發展。使得軟性表皮的應用範圍得以擴大至建築軟性表皮，成為更為有效與實際的建築使用。

參考文獻：

- Aldersey-Williams, H 2003, *Zoomorphic: New Animal Architecture*, Collins Design (October 7, 2003), pp.8-31, pp.168-171.
- Al-Haddad, T 2008, Parametric Modulations in Masonry, *CAADRRIA 2008*, Chiang Mai(Thailand), 9-12 April 2008, pp. 221-228.
- Alonso, H D 2008, *Xefirotarch*, Huazhong University of Science and Technology Press.
- Barrios, C 2005, 'Transformations on parametric design models', *CAAD Futures 2005*, Vienna, Austria, pp. 393-400.
- Brandt, J 2005, 'Skin That Fits: Designing and constructing cladding systems with as-built structural data', Smart Architecture: Integration of Digital and Building Technologies, *Proceedings of the 2005 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design In Architecture*, pp. 236-245.
- Carlos, R B H 2004, 'Parametric Gaudi', *SIGraDi 2004*, Brasil.
- Cole, E 2002, *The Grammar of Architecture*, Bulfinch(June 2002)
- Coppa, A 2006, *Facciate a Secco*, Milano, Motta Architecture srl.
- Corporation, A 2007, *SPA-DE Vol.5: Space & Design – International Review of Interior Design*, Azur Corporation (February 25, 2007), pp.153-156.
- Couceiro, M 2005, 'Architecture and Biological Analogies: Finding a generative design process based on biological rules', *eCAADe 2005*, Lisbon, pp. 599-606.
- Cross, N 1989, *Engineering design methods*, Strategies for Product Design, Chichester.
- Fajardo, J (ed.) 2008, *Skin: Architecture & Volume*, Page One publishing private limited.
- Frampton, K 1992, *Modern Architecture: A Critical History*, Thames & Hudson; 3 Sub edition (May 1992).
- Garcia, M (ed.) 2010, *Patterns of Architecture*, Wiley Press (January 7, 2010), pp.28-41.
- Gero, J S 1990, 'Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design', *AI Magazine*, 11(4), pp. 26-36.
- Goldberg, S A 2005, 'ICHTYOMORPH - Design and development of a fish-skin double façade system for freeform super tall buildings using Parametric Design Tools', *SIGraDi 2005*, Peru, vol. 1, pp. 144-149.
- Haeusler, M H 2009, *Media Facades*, Avedition GmbH (June 25, 2009), pp12-20.

- Hemsath, T L, McCracken, B and Russell, D 2009, *Decon Recon: Parametric CAD/CAM Deconstruction Research*, ACADIA 09, Illinois (Chicago), 22-25 October 2009, pp.291-293.
- Hensel, M and Menges, A (ed.) 2007, *Morpho-Ecologies: Towards Heterogeneous Space In Architecture Design*, AA Publications.
- Hensel, M, and Menges, A (ed.) 2008, *Versatility and Vicissitude: Performance in Morpho-Ecological Design*, Wiley Press, pp. 88-95.
- Hensel, M, Menges, A and Weinstock, M (ed.) 2006, *Techniquea and Technologies in Morphogenetic Design*, Academy Press, pp. 26-33.
- Hnizda, M 2009, 'System-Thinking: Formalization of Parametric Process', *ASCAAD 2009*, Manama, pp. 215-223.
- Hodge, B 2006, *Skin + Bones: Parallel Practices in Fashion and Architecture*, Thames & Hudson (October 30, 2006), pp. 11-21.
- Jordan, R F 1984, *Concise History of Western Architecture*, Thames & Hudson Ltd, First Edition edition (January 1, 1984), pp. 307-315.
- Knaack, U, Klein, T, Bilow, M, Auer, T, 2007, *Façade: Principles of Construction*, Birkhäuser Architecture, 1 edition (August 24, 2007), pp.120-131.
- Kolarevic, B (ed.) 2005, *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, Taylor & Francis; New edition edition (August 4, 2005), pp.33.
- Krier, R 1993, *Elements of Architecture*, Academy Editions; 2 Rev Sub edition (July 1993).
- Leach, N, Turnbull, D and Williams, C (ed.) 2004, *Digital Tectonics*, Academy Press, pp. 4-12.
- Leatherbarrow, D and Mostafavi, M 2005, *Surface Architecture*, the MIT Press, pp. 1-8.
- Lim, C K 2007, *A Better Digital Design and Construction Process Using CAD/CAM media*, Hsinchu, Taiwan.
- Lin, C Y 1999, 'The representing capacity of physical models and digital models', *Computer Aided Architectural Design in Asia (CAADRIA)*, pp. 53-62.
- Liu, Y T and Lim, C K 2005, *New tectonics*, Birkhäuser Architecture, 1 edition (July 13, 2005), pp190-193.
- Louis, I. K and Lobell, J 2008, *Between Silence and Light: Spirit in the Architecture of Louis I. Kahn*, Boston, Shambhala; second edition (September 9, 2008).
- Lupton, E 2007, *Skin: Surface, Substance, and Design*, Princeton Architectural Press; 1 edition (June 14, 2007), pp.55-63.
- Mitchell, W J 1977, *Computer-Aided Architectural Design*, New York: Wiley, John & Sons.

Nobuyuki, Y (ed.) 2002, *Architecture and Urbanism February 2002: Special Issue: Herzog & de Meuron 1978~2002*, Maruzen Co Ltd: Japanese Edition.

Nobuyuki, Y (ed.) 2008, *Architecture and Urbanism August 2008: Beijing 2008*, Maruzen Co Ltd: Japanese Edition.

Nobuyuki, Y (ed.) 2008, *Architecture and Urbanism October 2008: The New Ecologies in Los Angeles – Design and Technology*, Maruzen Co Ltd: Japanese Edition.

Nobuyuki, Y (ed.) 2008, *Architecture and Urbanism December 2008: Small Architecture in Spain*, Maruzen Co Ltd: Japanese Edition.

Otto, F 1995, *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*, Edition Axel Menges (January 25, 1995).

Paz Gtierrez, M 2008, *Material Bio-Intelligibility, Silicon + Skin: Biological Processes and Computation*, 28th ACADIA, Minneapolis 16-19 October 2008, pp.278-285.

Pevsner, N 1985, *The Sources of Modern Architecture and Design*, Thames & Hudson (February 1985)

Pollio, M V 1931, *Vitruvius: on Architecture*, translated by Frank Granqer, Leob Classical Library published (January 1, 1931).

Schittich, C (ed.) 2002, *In Detail: Building Skins*, Birkhäuser published, enlarged edition (October 19, 2002)

Summerson, J 1966, *The Classical Language of Architecture*, the MIT press, 1 edition (December 15, 1966)

Taylor, M (ed.) 2003, *Surface Consciousness (Architectural Design)*, Academy Press (June 9, 2003), pp.65-68.

參考網站：

Ball, B, Nogues, G 2010 - <http://www.ball-nogues.com/index.html>

Lim, C K 2009 - <http://ddsnctu.blogspot.com>

Davidson, S 2009 - <http://www.grasshopper3d.com/>

Materials & Applications, 2005 - <http://www.emanate.org/>

MoMA P.S.1, 2007 - <http://www.ps1.org/yap/view/1>

Ball, B, Nogues, G 2007 - <http://liquidskyblog.blogspot.com/>

Mitchell, R S 2007 - <http://www.flickr.com/photos/8421701@N04/>

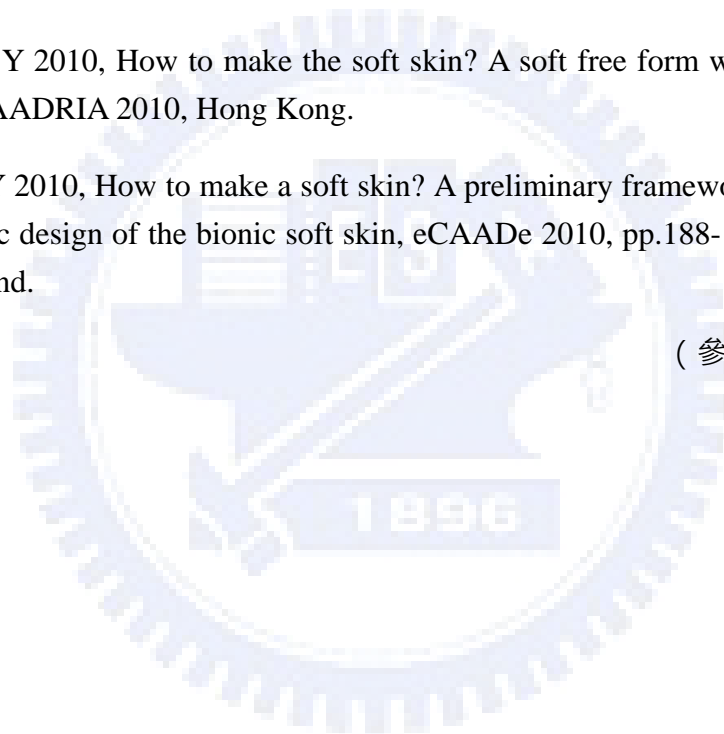
個人簡歷

現為交通大學建築所碩士班數位組學生，大學畢業於台北科技大學建築系。碩士研究著重於 CAD/CAM 領域中的參數式設計、仿生建築與軟性表皮自由形體之議題，除了研究之外，更進而致力於數位模型實體化之實踐。學術著作如下：

Chiou, Y Y 2010, How to make the soft skin? A soft free form without the bones, CAADRIA 2010, Hong Kong.

Chiu, Y Y 2010, How to make a soft skin? A preliminary framework for the parametric design of the bionic soft skin, eCAADe 2010, pp.188-192, ETH, Switzerland.

(參見附錄)



HOW TO MAKE THE SOFT-SKIN?

A soft free form without the bones

YUNG-YING CHIOU

Graduate Institute of Architecture, NCTU, Hsinchu, Taiwan

blacka43@arch.nctu.edu.tw

1. Introduction

Until now, most of the finished free form cases consist of skin and bones, or only the bones. The finished soft-skin cases are fewer and the process remains untold. Besides, biological systems are self-assembled, using mainly quite weak materials to make strong structure (Hensel, 2006). The natural balance of forces and corresponding geometric solutions was found in living beings (Couceiro, 2005). Furthermore, parametric design is the process of designing with parametric models or in a parametric modeling setting (Barrios, 2005). The geometric object under examination, is tested using a system of varied parameters inputted into the program Grasshopper, an explicit history graphic plug-in for Rhinoceros (Hnizda, 2009). Based on the parametric environments and biology, how could we possibly design a soft free form without the bones? This research seeks to record the bionic soft-skin design process in Grasshopper and production process, as a helpful reference for designers who deal with similar cases.

2. Research Process

The soft skin design and production process are shown as following steps:

1. Construction research: Making a conceptual model and twisted it to investigate the construction of soft-skin. The soft skin consists of the bio-flakes, and each of them is unique per se (Figure 1).

2. Form Finding: Digitalizing the cocoon-shaped geometry in the Rhinoceros according to the data defined in Grasshopper. With the application of the component system, which connected the component and parameter, the geometry skin is transformed into the bio-flakes looks (Figure 2).

3. The 3D CAD Model and 1:20 Scaled CAM Model: 81 unfolded bio-flakes skin units were detailed in AutoCAD, and then they were uploaded onto the laser cutter to constitute 1:20 model by the bristol board (Figure 3).

4. Material Experiment in 1:10 and 1:2 Scaled CAM Model: Change the input data into the parameters and examine the result to make 1:10 by 144 pieces of 0.15mm transparent polypropylene bio-flakes and staples and 1:2

CAM model by 324 pieces of 0.15mm red polypropylene bio-flakes and brass eyelets(Figure 4 and 5).

5. Final 1:1 Soft Skin Free Form CAM Model: The third time to adjust the data in Grasshopper applying constant digital 3D geometry for final model comprised of 324 bio-flakes in bristol board, each cut and labeled by laser cutter. Every flake is connected to its neighbors at four points using brass eyelets but still weak and lacking of supportability. And the last move: hang up the cocoon-shaped soft skin at the ceiling with tensile fishing lines, and the design is all set .Finally, the finished work looked just like the initial computer visualization (Figure 6).

3. Conclusions

At the end, attributing to the explicit history graphic and reductive functions of Grasshopper, the work is finished. However, the supportability and the weight of the net remain discussible and challenging. First up, the soft skin units of 1:20 model can interlock each other to form the cocoon shape easily due to their self-organization of the biological system. Secondly, the bio-flakes of 1:10 model eventually started to roll up and crush because of the soft material, then the weight of net is another problem to face in 1:2 model. Thirdly, the bigger and heavier structure is hard to form the cocoon shape. To sum up previous points, they will be the future work in this research. And this research study will be a reference for the making soft free form without the bones.

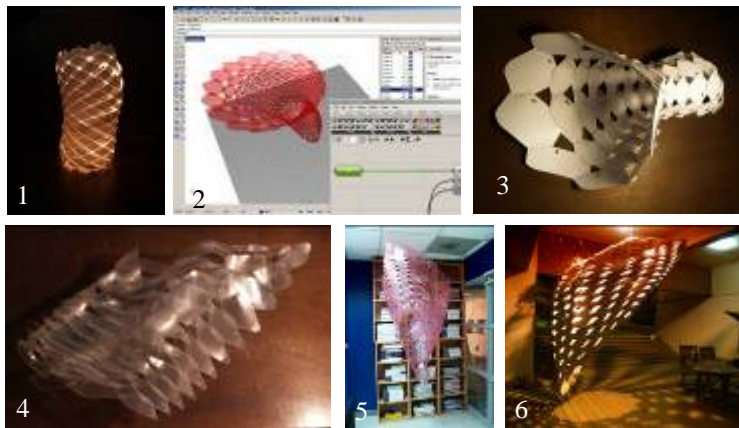


Figure 1 to 6
(Please, refer to the text.)

References

- Barrios, C.: 2005, Transformations on parametric design models, *CAAD Futures 2005*.
 Couceiro, M.: 2005, Architecture and Biological Analogies, *eCAADe 2005*, pp. 599-606.
 Hensel, M., Menges, A. and Weinstock, M.: 2006, Techniques and technologies in morphogenetic design, Academy Press, 26-33.
 Hnizda, M.: 2009, System-Thinking: Formalization of Parametric Process, *ASCAAD 2009*.

How To Make The Soft Skin?

A preliminary framework for the parametric design of the bionic soft skin

Yun-Ying, Chiu

Graduate Institute of Architecture, National Chiao Tung University, Taiwan

blacka43@arch.nctu.edu.tw

Abstract: This paper is a presentation of the preliminary framework for the design and fabrication of the soft-skin. Today, the digital technology applied in the architecture field is everywhere. However, there are still lots of fantastic free form architecture uncompleted and remained on the paper architecture or only the digital visual simulated model. Until now, most of the finished free form cases are consisted of the skin and bones, or only the bones. The complete soft-skin cases without the bones are fewer and the process remains untold. Based on the parametric environments and biology, how might you design a free form without the bones? How could you make the soft skin stand up? The research starts a series of exploration of the design and fabrication for the soft skin, and seeks to propose the preliminary framework as a helpful reference for the designers who deal with the soft skin project.

Keywords: Soft skin; bionic architecture; parametric design; grasshopper.

Introduction

Being part of the architecture, the building skin plays an especially important role as a transition between inside and outside - between building and the urban space. As the building skin was separated from the load-bearing structure, it became a pure skin. This pure skin defined our urban environment for so long (Schittich, 2002). Once the skin of building became independent of its structure, it could just as well hang like a curtain or clothing. The relationship between structure and skin has preoccupied much architectural production since this period and remains contested today (Leatherbarrow and Mostafavi, 2005). Furthermore, in both fashion and architecture, the skin and bones take as its point of departure design from the beginning of the 1980s (Hodge, 2006). Based on the above mention, the research redefines the structure of the building skin as the skin and bones.

Following the redefinition, surfaces have been explored extensively by architects and designers of the digital era as topologically fascinating models of spatial organization (Hensel and Menges, 2008). A link between the operations of the computer and structural behavior can therefore be established and a theoretical paradigm can be set up for thinking about the possibility of understanding structural behavior through computer simulations (Leach, Turnbull and Williams, 2004). Until now, most of the finished free form cases are consisted of the skin and bones, or only the bones. Fewer free form cases without the bones are completed in reality and remains on the digital visual simulated model. The free form only consisted of the skin is difficult to build up, especially the soft skin one. This is a challenge to face. For the specific issue, the paper starts with a series of exploration of the design process and fabrication for the soft skin.

Related Work

Much recent architecture work and design take inspiration from the bio-morphology and operate in the parametric design systems, such as Frei Otto's project, Greg Lynn's animate form and so on. These organic forms were transformed from biological paradigm, and constructed through three-dimensional plots from computer files. Further discussion will be the following statement.

Patterns and forms in nature, such as the spiral and fractal, are products of internal laws of growth and of the action of external forces. Architects learn to use natural forms from observing living structures: trees, bones, shells, petals and microscopic creatures (Pearson, 2001). Related studies have shown that biological systems are self-assembled, using mainly quite weak materials to make up strong structure. Plants resist gravity and wind loads through variation of their stem sections and the organization of their material in successive hierarchies, using small quantities of 'soft' materials in each organizational level to archive their structural goals (Hensel, Weinstock and Menges, 2006). And, the recursive source of architectural inspiration due to the tight relationship between form and function. The natural balance of forces and corresponding geometric solutions were found in living beings (Couceiro, 2005). In order to advance soft skin design and fabrication, the bio-morphology constructions are available for consideration.

Moreover, parametric design is the process of designing with parametric models or in a parametric modeling setting (Barrios, 2005). The geometric object under examination is tested using a system of varied parameters inputted into the program Grasshopper, an explicit history graphic plug-in for Rhinoceros (Hnizda, 2009). Parametric modeling has been understood as instrumental for its ability in improving workflow, its rapid adaptability to changing input and its delivery of precise geometric data for digital fabrication and performance analysis (Hensel, Weinstock and Menges, 2006). Through the previous introduction of the bionic architecture and parametric design, the soft skin of the free form would be the primary parameter in the evaluation of a structure. The related discussion and application would be the part of the design process.

Based on the research of the parametric environments and biology, how could we possibly design a soft free form without the bones? This research seeks to record the bionic soft-skin design process in Grasshopper and the manufacturing process, to propose the preliminary framework as a helpful reference for the designers who deal with similar cases.

Research Methodology and Steps

To propose a design prototype, here we start a series of exploration of soft skin design in Grasshopper and CAM process. Prototypes are the first on which others are modeled (Gero, 1990). Accordingly, the design process of this paper follows the schedule of the digital design studio at National Chiao Tung University, Taiwan. This course outlines a future state of digital fabrication through a studio-based critical exploration of process of contemporary freeform architecture in digital design. This research paper is one of the studio projects to redefine the structure of skin and manufacturing process. As the soft skin is the only character of the free form cases, the structure of the soft skin will become a key characteristic of the feasibility of making the soft skin.

For the specific goal to figure out how the design and fabrication of the soft skin will be, the soft skin design and manufacturing process are shown as studied by the following 5 steps:

1. Construction Research: Making a conceptual model in weaving system and twisted it to investigate the structure of soft-skin (Figure 1). Weaving is the synthesis of two different systems, interlocking in order to give self-supporting from to their combined whole (Aranda and Lasch, 2005). Unfortunately, the weaving system couldn't fit the smooth curve that the research needs, even though it was adaptable system. For more approach to the smooth curve and self-organization of material systems, the each skin unit should be more small, tenacious and flexible. On the basis of the experiment, the soft skin consists of the bio-flakes in a gradual change follows the smooth curve of the free form, and each of them is unique per se (Figure 2).
2. Form Finding: Digitalizing the cocoon-shaped geometry in the Rhinoceros according to the data defined in Grasshopper. The data includes the division of the surface, the shape of the skin unit, the joint of skin unit and the detail of the crossover. With the application of the component system, which connected the component and parameter, the geometry skin is transformed into the bio-flakes looks, adjusting the data of operators to make sure every skin unit intersects each other for forming moment connections. The shape of the skin units follows a similar logic to the differentiation of the cocoon-shaped - all have the similar form and geometric logic but the size is varied through a number of parametric changes in the Grasshopper. These few parametric changes allow the form of the skin units to adapt to the changing curvature and varying density of the bio-flakes structure through a simple algorithm (Figure 3).
3. The 3D CAD Model and 1:20 Scaled CAM Model: Through the definition of algorithm in the Grasshopper, the cocoon-shaped digital model was converted into AutoCAD to unfold and detail. 81 unfolded bio-flakes skin units were detailed and numbered in AutoCAD, and then they were uploaded onto the laser cutter to constitute 1:20 model by the bristol board which is the common material in architecture physical concept model (Figure 4).
4. Material Experiment in 1:10 and 1:2 Scaled CAM Models: Change the input data into the parameters and examine the result to make 1:10 CAM model by 144 pieces of 0.15mm transparent polypropylene bio-flakes fixed with staples (Figure 5) and 1:2 CAM model by 324 pieces of 0.15mm red polypropylene bio-flakes locked with brass eyelets, and the polypropylene is firmer in color (Figure 6). All the soft skin units have to unfold, detail and number in AutoCAD to make sure every step in control and form the overall shape of a cocoon.
5. Final 1:1 Scaled Soft Skin Free Form CAM Model: The third time to adjust the data in Grasshopper applying constant digital 3D geometry for final physical CAM model comprised of 324 bio-flakes in bristol board, each cut and labeled by laser cutter. Every flake is connected to its neighbors at four points using brass eyelets but still weak and lacking of supportability (Figure 7). And the last move: hang up the cocoon-shaped soft skin at the ceiling with tensile fishing lines, and the design is all set.

Finally, the finished work looked just like the initial computer visualization. Through the agency of the gravity of the soft skin, the bio-flakes continually changed scale and proportion to form the smooth cocoon-shaped free form (Figure 8).



Figure 1
Conceptual model



Figure 2
Bio-flakes model

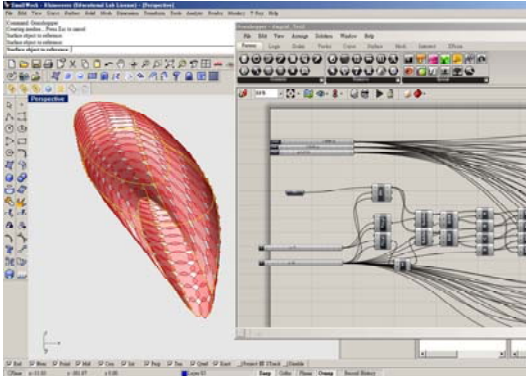


Figure 3
Parametric model and setting

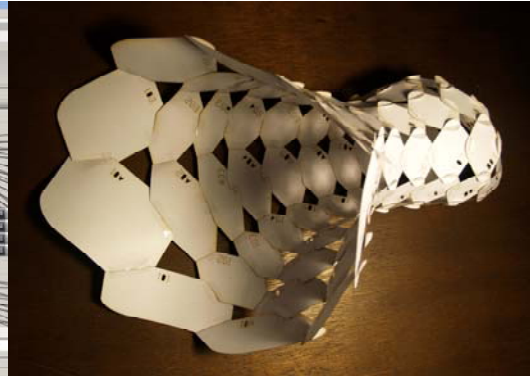


Figure 4
1:20 Scaled CAM Model



Figure 5
1:10 scaled CAM model



Figure 6
1:2 scaled CAM model



Figure 7
the process of fabrication

Figure 8
final 1:1 scaled CAM model

Research Results

As shown on the above mentioned, this paper described 5 steps of the preliminary framework of the parametric design and manufacturing process which was introduced and its advantages investigated. On account of the property of the soft material and no bone-supported, the free form shape was supported by multi-dimensional tension from the fish lines linked to the ceiling and the self-organization of the bio-inspired structure create the shape naturally.

In contrast to the free form cases with the bones, there are some specific steps in the exploration of the soft skin design and fabrication process. In order to approach the real architecture, the study of the research needs to promote the scale of the physical CAM model. Thus, every scale change should go back to the parametric model to adjust the data of the parameters, and experimented with the new soft material for the self-organization of the soft skin structure systems.

Eventually, the soft skin free form project was finished even though the outcome is no bones inside. To sum up 5 steps, the preliminary framework for designing and manufacturing the soft skin without the bones was seen below (Table 1).

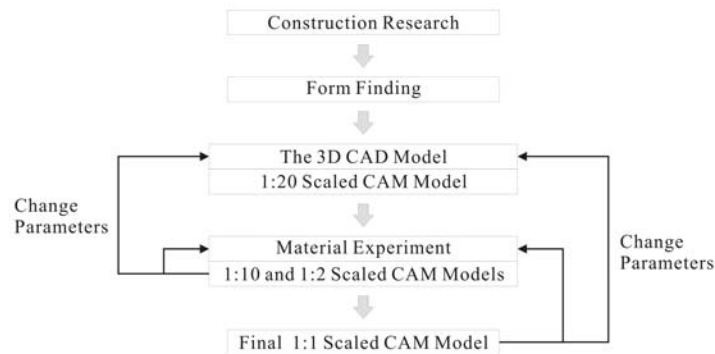


Table 1
the preliminary framework of the soft skin

Conclusions

Ultimately, attributing to the explicit history graphic and reductive functions of Grasshopper, and the self-organization of the biological structure, the work is finished.

However, the supportability and the weight of the net remain discussible and challenging. First up, the soft skin units of 1:20 scaled CAM model can interlock each other to form the cocoon shape easily due to their self-organization of the biological system and the property of material. Secondly, the bio-flakes of 1:10 scaled CAM model eventually started to roll up and crush because of the soft material, and then the weight of net is another problem to face in 1:2 scaled CAM model. Thirdly, the bigger and heavier structure is hard to form the cocoon shape. To shape the form of the bionic soft skin geometry, we need more external force aid, such as the tension.

The preliminary framework of the soft skin is limited in one instance. Further research will emphasize the variety of design and fabrication of the soft skin and the capability of the structure of the bionic soft skin. As the previous points, they could be the future work in this research. In addition, this research study will be a helpful reference for the designers who deal with the soft skin project.

References

- Aranda, B and Lasch, C 2005, *Pamphlet Architecture 27: Tooling*, Princeton Architectural Press, pp. 32-39.
- Barrios, C 2005, 'Transformations on parametric design models', *CAAD Futures 2005*, Vienna, Austria, pp. 393-400.
- Couceiro, M 2005, 'Architecture and Biological Analogies: Finding a generative design process based on biological rules', *eCAADe 2005*, Lisbon, pp. 599-606.
- Gero, J S 1990, 'Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design', *AI Magazine*, 11(4), pp. 26-36.
- Hensel, M, and Menges, A (ed.) 2008, *Versatility and Vicissitude: Performance in Morpho-Ecological Design*, Wiley Press, pp. 88-95.
- Hensel, M, Menges, A and Weinstock, M (ed.) 2006, *Techniquea and Technologies in Morphogenetic Design*, Academy Press, pp. 26-33.
- Hnizda, M 2009, 'System-Thinking: Formalization of Parametric Process', *ASCAAD 2009*, Manama, pp. 215-223.
- Hodge, B 2006, *Skin + Bones: Parallel Practices in Fashion and Architecture*, Thames & Hudson Press, pp. 11-21.
- Leach, N, Turnbull, D and Williams, C (ed.) 2004, *Digital Tectonics*, Academy Press, pp. 4-12.
- Leatherbarrow, D and Mostafavi, M 2005, *Surface Architecture*, the MIT Press, pp. 1-8.
- Pearson, D 2001, *New Organic Architecture: The Breaking Wave*, University of California Press, pp. 48-61.
- Schittich, C (ed.) 2002, *In Detail: Building Skins*, Birkhäuser Press, pp. 9-27.