

國立交通大學建築研究所

碩 士 論 文

自 由 形 體 表 皮 製 造 改 進

Construction Improvements for the Making of Free-Form Surfaces



研 究 生 陳 子 豪
指 導 教 授 劉 育 東

中華民國九十九年一月

中文摘要

電腦科技以及新媒材在建築的發展，激發了設計者的想像力，在製造上建築更帶領新形式的解放，光滑的曲面成為數位建築的象徵。CAD/CAM 製造自由形體建築的施作方法，分為曲面表皮以及骨架的製作。而在玻璃的曲面表皮製作通常使用：1.CNC 數值控制，製造曲面的單元(Kolarevic,2003) 2.三角化及攤平，(Welch,1994; Turkiyyah, 1997 ; Lee, 2005) 3.平面化四角面等方法(Glymph , 2002; Shelden,2002 ; Schmiedhofer, 2008)。在自由曲面的製造複雜且昂貴的，因此為了節省經費，我們會希望一定數量的表皮單元是重複的，以減少玻璃單元開模的數量。而美學上，自由形體的表現上會希望盡量與原始設計一樣，並且充分表現曲面光滑的表面。但是製造上與美學上往往是難以兼顧的。例如：CNC 數值控制，可以有效且忠實的表現設計的形體，曲面單元精準且光滑，但未經模矩化的曲面使得，每一塊單元都不一樣大，美學上呈現了光滑的特性，但是造價太過於高昂(LIM, 2006; Lee,2005 ;Turkiyyah ,1997)。再者三角網格及平面四邊形網格法使用雷射切割平面單元，雖然有效的將低了造價以及施工的困難。但是使用平面的單元簡化自由曲面成為多面體的近似形體外觀，卻使得自由曲面不光滑而且不連續，違反了美學觀感。(Shelden,2002 ; Schmiedhofer, 2008 ; Baldassini, 2008)

因此為了同時兼顧施工以及美學，我們的主要問題及目標是：為了使更容易建造曲面單元，在最小限度的改變原始設計的形體，同時保持自由形體曲率連續而且光滑的特性的條件下，我們如何增加重複的表皮單元數目？基於問題本文透過實際案例的玻璃帷幕，展示基本且實用的幾何原理，並且整合成為可應用的步驟。最後將方法及步驟整理為玻璃自由曲面表皮分割的流程。在本文中自由形體的曲面，會具有以下條件。1. 為自由形體的玻璃帷幕 2.面為雙向度曲面 3.表皮單元為曲面，並且曲率連續。曲率本文的幾何方法，使用有幾何規則的曲面逼近原始設計形狀，使得表面單元可以分割為可具有相同單元的曲面。可整理為以下步驟：

- 步驟 1:提取原始設計曲面上的兩條(U,V)向結構線
- 步驟 2:簡化、重新描繪上一步中兩條不同向度 (U,V 向) 曲線，使這兩條曲線成為對稱的二階曲線所組成的曲線；這些曲線可能有幾段曲線組合成。
- 步驟 3:控制這兩條曲線掃略 (sweep) 成新的 NURBS 曲面。
- 步驟 4:藉由調整這兩條曲線來控制曲面以進行 Form Finding (Shelden,2002)，以逼近原始的形狀。
- 步驟 5:再依照兩條曲線對稱規則來分割曲面取出曲面單元。
- 步驟 6: 特徵重繪。將無法模矩化的單元去除，以原始表面取代。

在我們操做的實際案例中，原始設計的表皮單元數目由 53 塊完全不同的單元，下降至 41 塊不同的單元，有 24 塊單元是有模矩的，而且單元和單元間的曲率是完全連續的。使用此方法產生的新表面會擁有光滑的表面，而且可以得到一些重複的曲面單元，但不可避免的，此方法會改變一些原始設計的形狀。在最理想狀況下，此方法最多可將曲面單元數目減少至原始設計 50%

英文摘要

The development of computer technology and new media in architecture has given new rise to the creativity of designers and lead architecture to new break through in construction. The making of CAD/CAM free-form structures, can be divided into the making of curved surfaces and the skeleton. In using curved glass as the skin, methods often used are: 1. CNC for the making of curved components (Kolarevic, 2003) 2. Triangulating curved faces and then flattening (Welch, 1994; Turkiyyah, 1997; Lee,2005) 3. Quadrilateral Planar Facets. (Glyph, J. 2002;Shelden, 2002 ;Schmiedhofer,2008) This research paper proposes a new method for curved-glass construction using a simple and robust geometric method.

Presently, problems encountered while making CAD/CAM surfaces are view in two dimensions: 1. Manufacturing issues: In present manufacturing, each unit is unique and needs to be made individually. Such complexity leads to problems like mounted expenses and difficulties in construction. (LIM, 2006 ;Lee,2005 Turkiyyah, 1997) 2. Aesthetic issues: Triangulating, and parallelogram framing techniques form shapes out of planar components. This constructs a non-smooth surface for the exterior causing it lose aesthetic values. (Shelden,2002 ;Schmiedhofer,2008 ;Baldassini,2008)Therefore, the main problem is: in order to minimize changing the original design during construction and to construct in a simpler fashion, how do we maximize the amount of repeated components but at the same time keep the smoothness of the free form design?

According to the problems mentioned above, we review actual cases on curtain glass, and then demonstrate the geometric method through procedure. At the end process and steps will be categorized and organized into a framework for free-form glass dividend. Free-form surfaces mentioned in this paper are to meet the restrictions: 1. free-form surface must be a glass curtain 2. curved surface must be curved in both directions. 3. the surface component is to be a curved surface which has a constant radius of curvature. The geometric method proposed in this research, uses a curved surface to meet the original designed shape allowing surface components to divide surfaces into repeated components. Procedure can organized as below:

Step 1:To use a double dimension (U,Vdimension) degree 2 curve as a control element for NU RBS.

Step 2:By adjusting the control element we execute form-finding on the “ main 3D model” for a shape-closure to the original form. The new shape will come close to the original and thus replace it.

Step 3:Then, divid the curved surface to while conforming these two control elements.

Step 4:Part of the new curved component will grow symmetrically due the the symmetry of the curved line. Resulting from this symmetric, paired and identical curved components will be found in the new shape.

The new surface constructed using this method will result in a smooth surface along with a few repeated curved components. However, this inevitably will slightly change the shape of the original design. Under ideal circumstances, curved components can be reduced to half the original design.

目錄

中文摘要	I
英文摘要	II
目錄	III
1. 第一章 緒論	1
1.1. 研究背景	1
1.2. 主要問題及目標	3
1.3. 方法及步驟	5
2. 第二章 文獻回顧	8
2.1. 媒材的發展與自由形體發展	8
2.2. CAD/CAM 應用於自由形體	11
2.3. 曲面表皮單元方法	13
3. 第三章 方法及步驟	21
3.1. 階段一：曲面條件限制以及幾何原理	22
3.1.1 玻璃表皮單元假設與幾何條件限制	22
3.1.2 FORM FINDING 幾何原理	25
3.1.3 CAD/CAM 背景技術	28

3.2.	階段二：探討幾何操作步驟	32
	步驟 1 將原始結構曲線提出	33
	步驟 2 曲線降階與重新描繪二階曲線	37
	步驟 3 UV 向曲線生成新的 NURBS 曲面	39
	步驟 4 FORM FINDING 及調整	40
	步驟 5 分割	41
	步驟 6 特徵重繪與構造調整	43
3.3.	階段三：分析	45
	3.3.1 數位測量與分析	45
	3.3.2 CAD/CAM 流程分析	48
4.	第四章 結論與貢獻	51
4.1.	結論與貢獻	51
4.2.	限制	52
4.3.	未來研究	53
5.	參考文獻	55

第一章 緒論

1.1. 研究背景



數位媒材與電腦科技作為設計媒材的革命發展，使設計者跳脫傳統的二維思維模式(Liu, 1996; Porter and Neale, 2000; Smith, 2004)，設計者能自由的探索空間的新型態，進入三維甚至四維的思考邏輯，使空間形式認徹底的改變，空間的形式邁向自由曲面的流動與不規則型態幾何造型。(Mitchell, 1998.b; Nardini, 2003; Kolarevic, 2003) 20世紀末古根漢畢爾包美術館的落成，數位媒材的應用開啟設計自由形體建築的新頁，數位建築型態開始浮現。(Mitchell, 1998.a; Liu, 2001, Liu, 2008) 電腦科技的輔助完全參與設計的早期到晚期的全面階段，成為建築生產與建築設計不可或缺的技术(Mitchell, 1998.a; Ruby, 2001)

為了表達新型態的數位自由曲面，CAD/CAM等電腦科技應用於自由曲面的製造稱為數位製造(fabrication)成為新的挑戰與課題。設計者可以藉由CAD/CAM製作技術表達設計者對於新型態的空間認知以及複雜連續的光滑曲面。數位媒材的影響除了新的數位形式浮現，更改變了建築傳統構築的新元素(Mitchell, 1998)CAD/CAM『建造』的過程成為數位建築的元素，整合成為新構築的元素(tectonics)，生產的流程整合為設計的一部份，使設計與建造更具一致性。(Gao, 2004; Liu and Lim, 2008)雖然CAD/CAM已發展出標準的製造流程以及方法，使得在數位時代之前無法奢望的

形體想像可以付諸實現。但是就製造的向度來討論，自由形體的建造還是非常的困難的，尤其對於自由曲面玻璃。(Kolarevic, 2003; LIM, 2006; Lee, 2005; Turkiyyah, 1997; Schmiedhofer, 2008)

自由形體表面往往具無規則的曲率，這對於施工流程從放樣、計算到組合、均帶來了莫大的難度。CAD/CAM 製造自由形體建築的施作方法與技術，分為曲面表皮以及骨架的製作。此種自由形體的施作方式是引用硬殼式構造(monocoque construction)是源自於航空工業中製造飛行器的構造方式，將形體分隔為分割為正交的骨架，再使用表皮包覆骨架形成完整的外型，外殼承受大部分結構力，這樣內部空間就不需要支撐，並且可以自由塑形。(Shelden, 2003; 李元榮, 2005; Griffith and Kenfield, 2006) 合理化自由曲面的不規則幾何體，使得虛擬的數位空間以及真實世界的建構性搭起實踐的橋樑，是關於數位形體輸出和製造的關鍵(Glymph, 2002; Shelden, 2003; Kolarevic, 2003)。以下為曲面合理化方法。

CNC milling 數值控制流程為了獲得曲面玻璃製造所需的模具，將曲面的幾何形體分割、切削成形為各種大小不一的單元模具，再翻模製造玻璃實體單元。CNC milling 可以有有效的忠實表達設計形體，完完全全的再現虛擬的形體於現實之中。在組裝時單元構成的曲面非常的滑順(smooth)，但是目前曲面並無有效的合理化方法，玻璃模具只可使用一次而且造價高昂。例如 Gehry 的 Conde Nast 咖啡廳案例，以及 Bernhard Franken 在 1999 年的 BMW 展示館，各個玻璃單元皆不同每一個單元皆開一個模具，因此開模費用十分的高昂。(圖 1-1)

而三角面來取代近似的自由形體(Turkiyyah et al., 1997; Welch, 1994)，應用於自由形體已經發展得非常成熟，可以有有效的降低組裝的難度以及造價。(Shelden, 2003; Schmiedhofer, 2008) 三角化形體進一步將每一個單元攤平，可以直接將 3D 的數位資料轉換為可以施工的 2D 圖面，透過雷射切割輸出表皮的單元。而 2005 年李元榮將三角化步驟歸納於 CAD/CAM 輸出流程中，更撰寫三角攤平作業的自動化程式。但三角面法就美學及施工的觀點討論，仍有一些不足：在外觀上原始設計的曲面化為三角的平面網格，這在曲面光滑的原則下，已經做了非常大的妥協。建造者為了獲得良好的施工，犧牲了原始形狀平滑的外觀改由近似的平面多面體代替。再者雖然三角形單元擁有平面的特性，但大部分情況下每一塊仍然為不一樣大小，這使得每一塊的單元無法大量生產，而增加了造價。例如 2007 年藍天組的 BMW 展示館的建築外皮，使用三角面法合理化玻璃帷幕，但表面並不平順光滑。(圖 1-2)

四邊網格法為現在處理自由曲面主要方式。此種方法大量運用在曲面玻璃的製

作，透過特殊的建模規則與演算法，將原始設計的形體重新計算為由四邊平面單元所構成的曲面，並且藉由 Catia 整合了自動化、參數化的流程(Glymph, 2002 ; Shelden, 2003)。爾後平面化四邊網格法的設計及施工流程發展，著重於模型與設計的互動。(Schmiedhofer,2008; Pottmann et al,2006; Baldassini,2008 ;)。四邊網格法利用平面的單元，增加施工的方便性，使得單元可利用雷射切割製造。在美學的角度上來談，在自由形體上組裝成的接縫容易表達自由曲面的韻律感，同時減少了組裝所需要的橫條、格筐的數量，並且操作形體上帶來較多機械性的不便操作。但是依然具有多面體的特徵，並非光滑的曲面，這違背了自由曲面光滑而且連續的特徵。例如：2007 年 Norman Foster 設計的流行音樂中心的外皮單元為四邊面多面體不光滑的網格。(圖 1-3) (Schiftner, 2007)



圖 1-1 CNC milling 表皮



圖 1-2 三角面法表皮

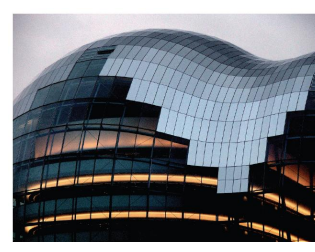


圖 1-3 平面四邊面法表皮

1.2. 主要問題及目標

數位媒材的應用開啟建築設計的新頁，光滑以及連續的型態成為新建築形式的語彙，自由形體數位建築型態開始浮現。自由形體傳達的意象是非線性，均勻的連續 (Lynn, 1995) 這種狀態也意味著，形體的複雜性。而合理化自由曲面的不規則幾何體，使得虛擬的數位空間以及真實世界的建構性搭起實踐的橋樑，也就是合理化、標準化是數位形體輸出和製造的關鍵(Glymph, 2002; Shelden,2003; Kolarevic,2004)在自由曲面製造上，減少複雜的程度且以及工程造价是需要考量的實質因素，為了節省經費，建造者會希望一定數量的表皮單元是重複的，以減少玻璃單元開模的數量。而美學上，自由形體的表現上會希望盡量與原始設計一樣，並且充分表現曲面光滑的表面。然而現有的曲面玻璃的製造方法中，現行的方法對於建造以及美學之間的取捨非常的兩極化，我們很難兩者兼顧。CNC 數值控制，可以忠實的表現設計的形體，曲面單元精準光滑，但由於沒有針對曲面適當的合理化方法，使得曲面的單元每一塊都不一樣大，這在美學上呈現了光滑的特性，但是卻導致造價太過於高昂 (LIM,2006 ; Lee,2005 ; Turkiyyah ,1997)。而三角網格及平面四邊形網格使用雷射切割

的平面單元，雖然有效的將低了造價以及施工的困難。但是使用平面的單元簡化自由曲面成為多面體的近似形體外觀，卻使得自由曲面不光滑而且不連續，違反了美學觀感。（表格 1-1）（Shelden,2003；Schmiedhofer, 2008；Baldassini, 2008）

表 1-1 表皮方法比較

方法	優點	缺點
CNC 數值控制	曲面光滑平順且連續 與設計形體完全相同	造價高昂 單元模矩皆不同
三角面法	網格頂點與設計形體相同 較少的造價	多面體不光滑表面 三角網格 單元模矩皆不同 較多的構件
四邊網格法	網格可表達曲面的韻律 構件較少	多面體不光滑表面 近似形體 單元模矩皆不同

因此為了同時兼顧施工以及美學，表達自由曲面光滑的特性，同時減少曲面單元的數目。本研究的主要問題及目標是：為了使更容易建造曲面單元，在最小限度的改變原始設計的形體，同時保持自由形體曲率連續而且光滑的特性的條件下，該如何增加重複的表皮單元數目？

由上述問題所延伸更精準的幾何定義：三角面法四邊網格法的單元構成為：取自形體表面的頂點資料作為弦長，這使得曲面單元並不連續，單元和單元之間只有 G0 連續(位置)，曲率以及切線並不連續。這樣的作法使得外觀呈現多面體的樣貌。因此為了要達到光滑的曲面，單元和單元間需要 G1（切線連續）及 G2（曲率連續）的條件，而同時達到有若干的曲面單元相等。（如圖 1-4）更進一步的基於以上問題本文透過實際案例的玻璃帷幕，展示基本且實用的幾何原理，並且整合成為可應用的步驟為目標。最後將方法及步驟整理為玻璃自由曲面表皮分割的初步工作流程綱要。

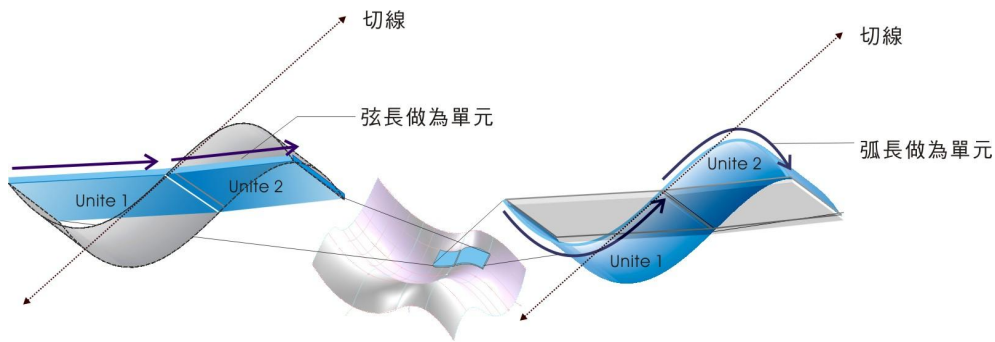


圖 1-4 A：平面網格：單元 G0 連續 B：單元 G1 G2 連續

1.3. 方法及步驟

本文研究先從文獻回顧歸納現有的表皮製作方法及流程，以理解應用於自由形體表皮單元製造的 CAD/CAM 技術，以及理解這些方法的幾何原理。為了探討自由形體 CAM 技術，本文先假設需要探討的自由形體的條件限制如材質、曲面特性，作為先行條件。提出必須符合曲面性質假設的新方法、幾何原理、處理問題及目標的策略。並且藉由實際案例的操作解說，一步一步的以實際案例說明方法在實際案例應用的問題。最後分析評估新方法的結果，包括新的幾何特性，是否有達到假設條件所限制的條件以及目標。本文研究自由形體的細部構造方法，期望達到將自由曲面分割為可模倣具化，同時又具有光滑和連續的表皮單元。本研究分成以下階段進行：

階段一：曲面條件限制以及幾何原理

1.1 假設

假設一：根據上述問題還需要做進一步的條件限定，自由形體的玻璃曲面會因為玻璃的材料特性以及設計需求，會有不同的解決策略，因此需要限定基本的特性。本文根據鑄造玻璃不可二次施工的特性，假設曲面玻璃必須排除 Ruled Surface 的合理化方法。

假設二：基於帷幕玻璃的構造原理，骨架與玻璃單元為互相脫離的關係，研究完成後骨架與表皮的接合關係可由二次結構來搭配與調整。因此可以假設：本研究對曲面單獨進行操作，只探討曲面玻璃的幾何關係。

1.2 限制

表達自由曲面光滑的特性，同時減少曲面單元的數目。在視覺上與美學上的條件

需求，需要精確的定義何謂光滑的程度與定義。因此本文所探討的自由曲面會具有以下條件限制：（1）為自由形體的玻璃帷幕（2）面為雙向度曲面（3）表皮單元為曲面，並且曲率連續。這些限制的條件並不同於目標所陳述的，而是基於自由曲面以及 CAD/CAM 的特性所設置，也就是除了目標以外必須達到的附加條件。

1.3 幾何原理探討

本文由文獻回顧延伸 2002 年 Dennis R. Sheldon 為了處理四邊形玻璃網格結構的幾何方法的原理。並且以上述假設的材料以及曲面幾何性質作為限制條件，探討曲面單元間接續問題。為了平滑以及連續的幾何定義，進一步討論。

階段二：探討操作步驟

基於以上幾何的原理，還需要整合出可以應用的步驟，因此藉由在進行的實際案例，來瞭解實際施工與設計者的需求並且整理為可以應用的策略。本文選自一個符合上述條件的案例，此案例為 2007 年開始在台灣執行的『水墨狂草』設計案的玻璃帷幕，因為此案特別強調建築形體的線條連續 (continuity) 以及玻璃帷幕必須完全光滑。其中的玻璃帷幕，因為設計者的要求，因此需捨棄三角面法，四邊形網格法等平面化的外觀。又因為經濟因素的考慮，本案執行必須減少玻璃單元的數量。因此本研究藉由操作此方法並且詳細描述上述幾何方法所衍生的可以操作並且實際應用的步驟，並且歸納為標準的操作程序。並且為了本文的實用性，針對每一個步驟所遇到的問題及其可能產生的問題詳加描述並提出解決的策略。操作可分概略的三個階段分別為下述：

2.1 結構曲線分析調整

簡化複雜的原始設計模型，將曲面順合理化後，取得較簡單的曲面資料分析。接著將曲面的結構線進一步降階，降階後重新描繪的曲線為可分析的二階結構線，關鍵的曲線一共有兩條，為垂直向度結構線以及水平向度結構線。

2.3 曲面逼近

二階的結構線生成曲面。再進一步的控制結構線的中心點、頂點，逐步調整至與原始設計相似。在此階段，曲線的逼近是透過軟體上視覺化的調整，比較原始設計及新形狀的差異，以目測的方式來評斷新的曲面是否可行。

2.4 單元分割

新的近似曲面以二階曲線的對稱規則進行分割。藉由對稱軸鏡射的單元必定會相同，因此最理想狀況下可以達到單元有一半相同。此外在分割過程中，會遇到關於構造的問題，分割的方式也必須考慮著單元尺度問題以及樓版構造的限制。而最後曲面單元所組構的外形比較原始設計，將無法模矩化的單元捨棄，以符合原始設計的特徵。

階段三：分析

為了判斷此方法是否可行，需要對上述方法得到的結果進行分析以瞭解單元間是否連續光滑，單元有多少重複，使用此方法更改了多少設計？評估的項目如下。

3.1 單元數目及單元連續

原本對幾何生成方式，衍生對稱的幾何產生了對稱的表皮單元。但為了檢核新的方法是否有達到問題的標準：增加曲面重複的單元，減少曲面單元的數目，因此必須測定單元模矩化的數目，及重複的單元是否有些微的差異。而在曲面光滑的程度：在曲面或網格上顯示分析條紋檢核，如果單元彼此的接續達到曲率連續（G2 連續），及可以定義為曲面的單元呈現為光滑而且連續的曲面。

3.2 相似度

新的曲面得到與原始設計形體相近的新模型，但與原始設計有多少相同？這個問題使得度量相似的程度成為這方法是否可行的重點之一。因此需要定義相似度，提供一組可供評估的條件來做檢核。本文在此將相似度做兩種定義以符合曲面的特徵。以下為相似度的測定項目：


1 尺寸：面積大小改變多少判斷尺寸是否接近。

2 形狀相似：將新的曲面投影在舊的曲面上，比對兩者互相對應的點之間的距離相對偏移值。這個定量測出的是形狀間的關係，會顯示出新的曲面上有哪些地方的特徵或細節被更改。

第二章 文獻回顧

2.1. 媒材的發展與自由形體發展

2.1.1 思維的媒介-媒材



人類的思維活動依賴著媒材作為呈現及載體，系統以及工具的建構引領著思考的進步，媒材作為設計者的工具，也影響著設計者思維，設計的思考過程中創作者的想法，由設計的媒材所呈現，然而不同的媒材對設計有思考有不同的想法，(Zevi , 1981; 劉育東, 2006)。而認知行為的觀點來看，Schon 在 1992 年認為設計行為的運作，是由於一連串設計者與媒材互動的過程。

雖然媒材可以做為設計操作過程的工具，但是在設計歷史的早期，媒材卻限制了創作者的意念。早在古埃及時期建築師就利用平面圖、立面圖來呈現建築物立體的概念，平面式的思考，描述著三度空間中建築構建的依存關係，這時的建築物還是遵循基本幾何形式的和諧，建築立體的變化，都可用平面式的思考加以解決，直至歌德晚期至文藝復興，表為了達日趨繁複建築形式的需求，才使得『新媒材』產生『實體模型』，提工作為新的操作工具，這種新的工具一直使用在到今天，可充分作為應付大部分的設計需求，直至 1900 年後，模型的更孕育了許多偉大的設計，高地使用 Estereo Estatica 結構模型，Utzon 使用大型結構模型測試，以可以滿足絕大部分的設計需求。(Million, 1994)

直至今日新媒體的革命，使設計媒材上又多了新的選擇，快速、即時、精確、大

量的計算改上了設計的流程，和操作性。這徹底的改變了設計者的思考方式，得電腦產生的新媒體，產生了新的空間體驗，它所能給予建築師在設計上的啟發應該是多元的，隨之受到影響的是建築設計的過程、工程建造和空間形式上認知的改變(Kolarevic, 2003;劉育東, 2006)，這也帶來建築形體的解放。

在建築形體的建構性上，電腦已經為建築帶來數位化的生產技術，其中有個關鍵的因素就是電腦軟硬體的快速進步，使得 CAD/CAM 等科技大幅的縮短建築設計過程中所消耗的時間、減低工程建造上的成本，並強烈的影響今日建築設計和製造上的實行(Mitchell, 1998;Kolarevic, 2001)透過媒材操作性設計師不在想法不再受到限制，不同以往想的出來畫不出來的表達障礙。

2.1.2 數位建築的浮現-自由形體的發展

數位時代前自由形體

數位時代前自由形體媒材的應用的發展：1900~2000 年間，雖未進入數位時代，但在近代建築產生了前立體式的思考(劉育東, 2006)已經開始浮現，創作者對於空間創作應用於媒材的思考方式，這個時期一些建築師利用傳統媒材進行對自由形體的創造、利用有限的思考工具來研究形體的構成，整合大量的 2D 草圖、細部圖、量體模型與結構模型等，媒材的應用在此為交互式的整合，並且模型在此扮演了與施作者溝通的重要角色，藉由溝通來減少設計想法與實際施作的差異。結構以特殊的結構模型研究之。如 1900 年高地在 Casa Milla, Colonia, Sagrada Famili 聖家堂大量運用各式各樣的媒材做交錯式的應用，以對空間的細部感覺以及策略方向進行全盤的認知。

由曲面施作的方式為透過施工者手工雕塑的方式，來彌補模型與實體的差異，也就是說透過手工製作的彈性、來決定自由曲面，建造建造大多為以混能土為構造方式，磚造或是泥作，因此許多無費在設計階段描述的細節與問題，可由現場施工的直接調整。如、Le Corbusi 的廊香教堂、1924 年 Erich Mendelsohn 設計的愛因斯坦天文台最甚者為 Rudolf Steiner 1928s 的人類哲學院(圖 2-3)，透過數個表示量體大小關係的模型，和關鍵標準圖做為參考，利用標準化的概念及參數化的圖面來呈現設計，再由施工者補足曲面的細節，這為參數化設計的濫觴。(Steiner,2003，Liu 2006，Lim2006)

1950 年後自由由形體案例：這些案例開始運用在公共建築上，大型化、地標化

是他們的特徵，由於形體的規模關係、無法如上述以手工製作，屈就工程的建構，改採規矩的幾何形式。例 1957 John Utzon 設計的 Sydney Opera House(圖 2-2)，以建築如同帆船一般的曲面屋頂殼狀系統著稱，在其設計自由曲面的形式，為了建造的可行性，逐漸將結構調整成以規則的曲面簡化，其做為複雜的頂蓋，為了建造的研究，施工團隊以及 Utzon，仰賴大量的實體模型以及細部圖說，更甚者使用機械技術來輔助設計，研究其屋頂的結構系統。



圖 2-1 聖家堂



圖 2-2 雪梨歌劇院

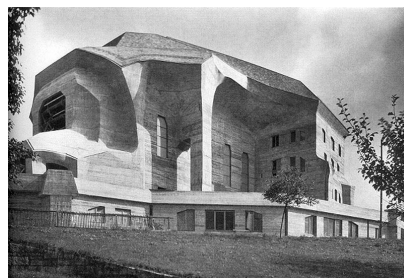


圖 2-3 Rudolf Steiner 設計的人類哲學院

後數位時代自由形體的發展

進入到數位時代後，在 CAD/CAM 科技進步的輔助下，從實質模型到數位工具所產生的數位模型，其之間最大的改變是透過三度空間來提升設計者的控制力和自由度，包括可預視性，可調整性，模擬性、提升建築設計過程中表現形式的視覺溝通，構想即時的編修、提升變化性或衍生性。CAD/CAM 應用在建築領域的成就，主要在於改變了建築的設計過程，從以往利用 2D 圖說和手工製作實體模型的表現法來說明設計，數位設計的方式擺脫了舊有的侷限將實體和虛擬相互轉換來輔助設計的過程。由此可知，CAD/CAM 在當代建築設計上扮演著重要的角色，設計師與建造者需要倚靠 CAD/CAM 的技術。(Kolarevic, 2001; Mitchell, 2004; 劉育東, 2001; 李元榮 2005; 林楚卿 2007.)。數位化的設計在於實踐，也就是許多數位建築標榜其為「數位實際」，而非虛擬空間(邱茂林, 2003)。因設計思考的解放而衍生許多複雜的問題於自由形體的製造生產以及施工組裝上，並已超出傳統建築所能負荷的範圍。近年來，有關數位製造的過程，在 CAD/CAM 技術的輔助下建築師將形體塑造的更自由更解放，因而也帶動了新的建造方式發展建築新的結構系統、細部接頭和表皮材料。

1997 年為分界 Frank Ghery 完成巴塞隆納的『魚』型雕塑設計之後，便開始湧現大量使用 CAD/CAM 作為設計與建造媒材的案例，其後完成了多棟包括畢爾包與迪士尼音樂廳等著名案例，藉由 3d Scanner 掃描設計的草模，轉換至電腦數為模型進行邊修，最後利用 RP 進行來回於現實與數位之間的交錯操作，至建造階段時，Ghery

自 Catia 發展一套 CAD/CAM 建造系統，GT (ghery tecnolige) 對建築的設計建造進行標準化成為成熟的商業化應用程式。如 NOX, Frankert、UN studio、Zaha、日本的伊東豐雄等亦使用 CAD/CAM 輔助設計至建構的過程。

2.2.CAD/CAM 應用於自由形體

2.2.1 CAD/CAM 技術

計算機最早的繪圖系統 1950 年美國軍方所發展 SAGE 呈現了雷達上的資訊，最早期的電腦繪圖系統是呈現數值運算的結果，呈現函數，以及彈道模擬的圖形。此時的電腦尚未呈現媒體的性質，單純為製圖(plot)。70 年代後，由於航太工業的發展需要，自由曲面形體繪製描述無法實現在傳統的平面繪圖系統上，而電腦繪圖需求轉為空間上的具體呈現，以因應愈驅複雜的形體，因此發展數位建模系統。發展出的系統如下：

1. Mesh 由多邊形描述物體，定義出”面”以及”體”描述的方法。
2. 貝茲曲線，為描述 3D 空間的曲面關係在三度空間中描述曲線以及曲面變為可行。
3. 非均勻有理樣條”(non-uniform rational B-spline, NURBS)為標準化的商用 CAD 系統用來定義複雜的連續曲面，參數化造型技術如 CATIA 等。
4. 參數化實體建模技術，(Solid modeling)。應用軟體有 I-DEAS，以及 Unigraphic、UniSolids。(CAD 的歷史發展，參考網站 CAD-History) (Chris and Jimmie, 1993)

70 年代 CAD/CAM 技術就此開始彌合。CAE 電腦輔助工程分析(Computer-Aided Engineering, CAE)開始發展，在機械、電子、航空、航太以及建築等領域得到了廣泛的應用。在建築上 CAD/CAM 技術使建築的設計過程和製造生產的傳統模式產生了重大的改革。早期技術主要以 CNC 為主(Callicott, 2001) 隨個人電腦的普及化，使得原本只能在工作站上運行的 CAM 系統，開始研發配合個人電腦的小型 CAM 硬體。但是一直到 1980 中後，CAD 在被設計師廣泛的使用後，CAM 才開始被運用在設計上。(Groover and Zimmers, 1984; Mitchell and McCullough, 1995; Ryder et al, 2002)所有新發展大致如。

1. CNC (computer numerical control, CNC)電腦數值控制：是一種減去法(subtractive)的數位生產製作方式，例如(a).3D 銑床 (CNC milling)、(b)水刀切割(CNC water jet cutting)、(c).雷射切割(laser cutting)等(d)打槽機技術(CNC routing)。

2. RP 快速成形(Rapid Prototyping, RP)：為疊層加工技術(Layered Manufacturing, LM)，是附加的製造的方式為技術，又稱為立體印刷術。1.Concept Modeling
2.Rapid Prototyping。
3. 3D scanner:為一種逆向工程的技術，將實體模型轉為數位資料，再將其輸入 CAD。(Luca and Nardin ,2002)。(Seely, 2004;Friedman, 2002)

2.2.2 CAD/CAM 應用於自由形體數位建造流程

薄殼構造(Shell)

薄殼結構係以薄膜狀殼物作成曲面狀。利用其立體勁性承受自重外，並抵抗外加载重之構造形式，是為形抗結構。利用其立體勁性承受自重外，並抵抗外加载重之構造形式。薄殼系統應用於自由形體採用鋼筋混凝土為材料，以鋼筋配筋作為抗拉材料，在搭模版澆製塑形。(Sapaun ,2005)因此構造關鍵在於模版的組立及放樣。早期薄殼結構及應用於曲面構造物的發展，如：東海大學路斯義教堂。(圖 2-4) 1957 年 John Utzon 設計的雪梨歌劇院等為採此結構系統(圖 2-2)。而近年來的構造方式廣泛使用鋼絲網噴塗混凝土免拆模版工法以利製造，如：2006 年伊東豐雄設計的台中歌劇院。施作方式由竹中工務提出，採用『桁架鋼筋混凝土牆』，以鋼筋作為桁架並組裝成底架，再用三成金屬網做成免拆模版使用，再用高流動性混凝土灌時成為一體。(圖 2-5)

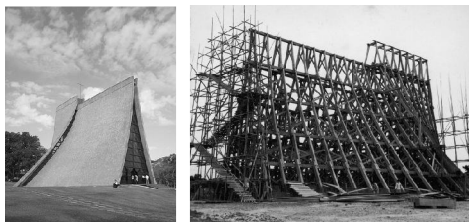


圖 2-4 路斯義教堂薄殼曲面及其施工

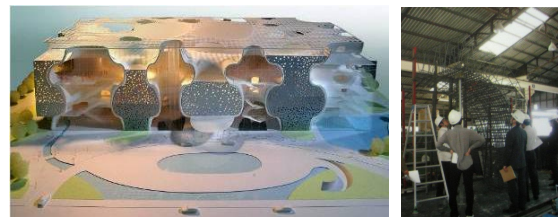


圖 2-5 2006 年台中歌劇院及其薄殼構造

硬殼式構造的表皮及骨架(monocoque construction)

自由形體傳達的意象是非線性，均勻的連續(Lynn,1995)這種狀態也意味著，形體的複雜性，自由形體表面往往具無規則的曲率，這對於施工流程放樣、計算到組合、均帶來了莫大的難度，但為了施作的可執行性、依然需要分割為正交的骨架，再使用覆皮的方式將表皮圍合，這種方法是採用硬殼式構造(monocoque construction)的概念。Monocoque 來自希臘文的單(Mono)與法文的殼(coque)，是指構造體為外圍

的皮層作為結構荷載，而非透過內部的構架體或桁架。這種方式是航空工業中製造飛行器的構造方式，將形體分隔為分割為交錯的骨架系統，再使用表皮包覆骨架形成完整的外型，同時組夠的外殼承受大部分結構力，這樣內部空間就不需要支撐，並且可以自由塑形。自由形體的施作，大量引用此種構造方式，利用規則的骨架、加上外覆的表皮塑形。(Shelden2002;李元榮 2005, Griffith2008)。

硬殼式構造是目前自由形體施作的方式大多為骨架外覆表皮，兩者互為脫開的關係，與薄殼結構比較在結構的行為上也有明顯差異，通常是由骨作為結構行為的主角，所有的在載重皆透過骨架傳遞，而面材基本上除了本身自重外不傳遞其他荷重。

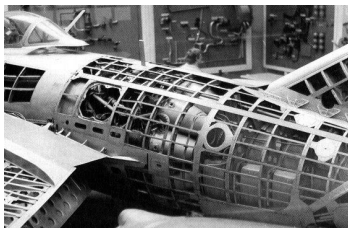


圖 2-6 航太工業硬殼式構造

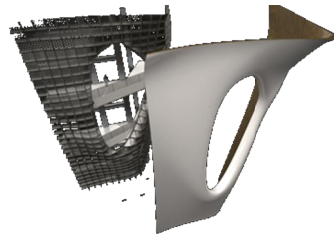


圖 2-7 硬殼式構造應用於自由曲面

表皮及骨架施作流程

由於數位建築的浮現大量的案例被建造出來，2000 年後許多學者開始尋找標準化的數位設計與建造流程，如 Jennifer ,Seely, Kolarevic 2003 研究設計與建造過程。其中林楚卿 2006 年基於李元榮所做的歸納提出一個完整的 CAD/CAM 數位設計及建造流程，其內容包括了 Gehry 和 Franken 重要案例，並結合國內施作案例分析可成標準化程序。其中分別定義四個設計及製作階段：1.建築計畫、2.概念發展 3.設計發展 4.細部設計與施工圖、及數位建構，詳流程(圖 3-1)。(Mitchell, 1998; Lindsey, 2001; Kocaturk 2001; Kolarevic, 2003; Dritisas, 2004; Lee, 2005 ;Lim,2007)

2.3. 曲面表皮單元方法

就是合理化自由曲面的不規則幾何體，使得虛擬的數位空間以及真實世界的建構性搭起實踐的橋樑，也就是合理化，是關於數位形體輸出和製造的關鍵(Glymph,2002 ; Shelden,2003)曲面表皮 CAM 電腦輔助製造，在以往自由形體施作流程，分為曲面以及骨架的製作，表皮主要方法有：1.CNC 數值控制 (Kolarevic, 2002)，或是 2. 曲面三角化及攤平，因為每塊曲面單元皆須客製化，臨了曲面單元數複雜且龐大的以致施工困難的窘境，導致造價過高而使得難以實踐，因此數位自由形體的曲面建構，需提

出使曲面單元簡化為少數的單元的方法，使的自由形體 CAM 方法建構性更為提升。面材標準化及模具化分析是為了掌握經費及造價。過去的一般建築設計之所以可以被較輕易的用較少的單價被建造，主要就是在標準化及模具化。自由形體的建造媒材上，除了研發較低成本的新工法外，另外有一些實務的研究，著眼在軟體。希望透過在設計階段的分析，微調及修正部分曲面，在不同中儘量找到模具化，以降低成本。

目前曲面的 CAD 製作曲面的流程不外乎為兩種基本的運算方式為，1.分割形體以及形體的衍生，分割形體為拆解物體的單元形成許多個部分再加以組構(三角化);而形體的衍生則為，2.以單元發展成形體，再逐漸逼近與原始設計相似的形狀(四邊形平面化)。但兩者通常是為互相獨立的系統，由這些系統所生成的表面構築方式，都幾乎可以完整的描述各種形狀(三角形較四邊形可完整描述形狀)，但是若遇到模矩化單元表面的議題，兩者系統皆為無法提供良好的解答。(Glyph,2002; Sheldon2003; Schmiedhofer,2008)

2.3.1 CNC milling 數值控制流程

為了獲得曲面玻璃製造所需的模具，將曲面的幾何形體分割、切削成形為各種大小不一的單元模具，再翻模製造玻璃實體單元。CNC milling 是現代工業，做鑄造機具、零件之用的模具最主要的方式之一，可以有效的忠實表達設計形體，完完全全的再現數位空間中虛擬的形體於現實之中。CNC milling 方法是依照建造所用的機具所衍生的製造方法，CNC 稱為電腦數值控制洗床，將材料切割成行是減去法的數位生產方式。這些刀具主要是以可以轉動的鑽頭，沿著物體表面的外形做精密的切割，並且依照機具的性能可以做平面外切割外，還可以做有深度的切割以描述物體的高度。但相較於 RP 快速成形，因為切銷刀具工作角度限制和刀具可作業的深度是依據機具種類不同而有相對的限制，因此 CNC 減去法對於物體的描述能力缺少了自由度。但 CNC milling 可用於多種材質的加工、木材、保力龍、甚至石材、金屬，這相優勢在製造實體的建築生產用的構件上擁有實際應用的優勢。(Seely, 2004)

CNC milling 應用於建築的自由曲面的製造最著名的就屬 Frank Gehry 在他多個案例中大量的使用此製造方法鑄造自由曲面外表皮單元。加工應用餘建築混凝土外牆的模版製造，曲面玻璃鑄造的模具製造，以及金屬外皮的加工。著名的 1997 年畢爾包古根漢美術館案例中，其建築物的石材曲面基座部分，即為 CNC milling 切割出每片曲度都不相同的石灰岩面版(圖 2-8)。而在洛杉磯迪士尼音樂廳(The Walt Disney Concert Hall, 1992-97)的 CAM 建造過程，及應用將設計的 3D 模型資料轉至 CNC milling 做數字控制的切銷成形，切割出不同曲率的鋼筋混凝土模版，最後在模版內

配筋、澆置、養護，作為塊體式預鑄結構系統的單元生產。(圖 2-11) 在 2000 年時 Frank Gehry 在紐約 Conde Nast Cafeteria 的室內裝修，應用 CNC milling 作為複雜的玻璃曲面鑄造模版生產(圖 2-10)。為了以光滑的曲面玻璃作為表現的基調。設計案中曲面單元完全相異，Gehry 使用 CNC 製造不銹鋼模具，然後再利用模具鑄造玻璃。(Franken, 2003)



圖 2-8 CNC milling 岩面版

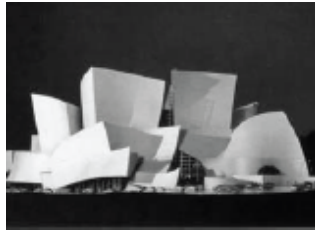


圖 2-9 Walt Disney Concert Hall

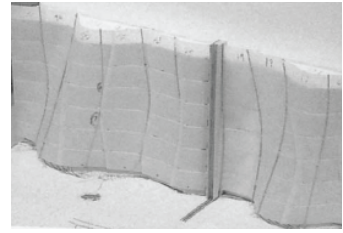


圖 2-10 CNC milling 鑄造曲面玻璃

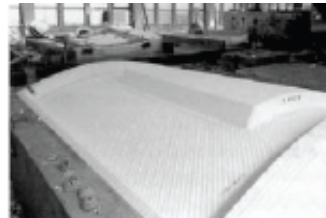


圖 2-11 CNC milling 切銷不同曲率鋼筋混凝土模版(Kolarevic, 2003)

1999 年 BMW 展示館由建築師 Bernhard Franken 所設計建造完成。“水滴”的設計概念要求曲面滑順的表現，透過電腦的運算將水滴的抽象型態轉變成 3D 的電腦資料，並且透過電腦的高斯分析，將形體的曲面最佳化，並且經由電腦工程師將曲面依照結構上的需求計算出結構所需的骨架和表皮的單元數量，在運用水刀切割機切割出 3500 塊扁鐵作為支撐形體的骨架和 CNC milling 開發出 305 片表面曲度不同的玻璃表皮，在工廠生產完成後運送至現場組裝成建築物(Franken, 2003)。(圖 2-12)

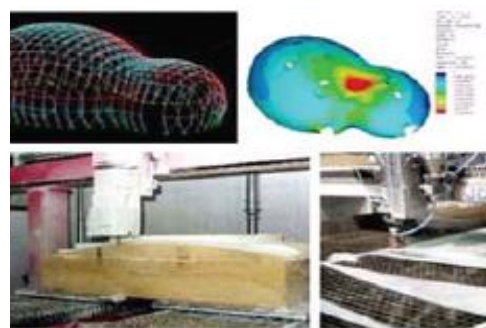


圖 2-12 Bernhard Franken (1999)BMW 展示館設計與製造過程 (Franken 2003)

2.3.2 三角化

所謂的三角化為擷取自由形體曲面上的點資料，形體利用三角面簡化曲面，平面網格組成的近似多面體(圖 2-11)。如此，三角面多面體利用 CAD/CAM 可將其平面單元的資料，直接輸出，將 3D 的數位資料轉換為可以施工的 2D 圖面，透過雷射切割輸出表皮的單元。用三角面來取代近似的自由形體，過利用三角面攤平的方式，可以將造價大幅度的降低。三角化被應用於做出玻璃的自由形體，三角化是描述形體最自由的方式，事實上所有在數位空間可見的形體，不管為特徵建模系統，NURBS 系統，還是 Subdived(細分網格)建模系統，所有的曲面形體最終都會回歸於三角面構成的表達方式，三角面的單元最基本的模式。所以以三角面應用於曲面的分解是可以最接近原始的設計的形體，而且是最簡單、最無困難、最自然不過的方式。(Glymph et al,2002; Shelden, 2003;Schmiedhofer ,2008)而除了應用於玻璃材質的自由形體之外，三角面的組成方式，更廣泛的應用於其他材質的曲面上，如金屬外皮等，目的為大幅減少建造的經費。

三角面法的發展：三角面法應用於建築的發展已經非常成熟，因為三角面本身因為在幾何上三點在空間中必定共面，所以並不需要特殊的演算法，而大部分的商用套裝軟皆有此功能可將自由形體輸出成三角面的網格。Welch 於 1994 年最初提出以平面三角網格描述自由曲面的方法，1997 年 Turkiyyah 提出三角面的運算法應用於實體建模系統的細分運算法，應用於模型降級細分顯示，以取代近似的自由曲面，使三角面法得到廣泛的運用。(圖 2-13)

一般的 CAD 應用軟體皆具有將曲面轉換成三角面的內建功能，而現在更有一些較應用導向的軟體可進階的設定直接將三角化曲面展開。如 Form Z 即可使用三角面攤平。而商用軟體如 Peper kura 以摺紙模型的功能，可將模型設定展開方式，自動設定展開的模式，與紙模型黏貼所需的接縫。延伸運用得到廣泛應用。(圖 2-15)

上述所提的三角化，應用於建築的設計製造，更發展了折版單元作為曲面單元的系統作為延伸的應用，三角化形體的方式加上透過利用三角面攤平的方式，可以直接將 3D 的數位資料轉換為可以施工的 2D 圖面，透過雷射切割輸出。而(李元榮,2005)，將三角化步驟歸納於，CAD/CAM 輸出流程中，更撰寫三角攤平作業的自動化程式，改進了施工組裝的應用，如測定單元折版的角度，計算版編號單元之間厚度等改進。(圖 2-14)

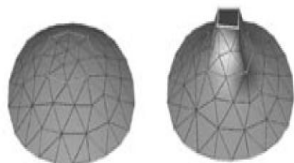


圖 2-13 三角面化自由形體 (Welch,1994)

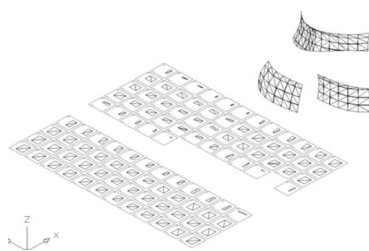


圖 2-14 三角面法攤平自動化程式 (林楚卿,2007)



圖 2-15 Peper kura 摺紙軟體三角面展開功能

2000 年時亞洲台灣的自由形體研究團隊 AleppoZone，公信大廳的設計案，實驗三角面法應用於在自由形體的骨架以及表皮，金屬板材則是採用三角面法，經由自動化程式的撰寫將曲面轉化為三角平面資料，再由 Laser cutter 切割製造，最後再將單元組裝成面(圖 2-16)。(Liu et al ,2002；Lim ,2004；李元榮,2005) 義大利建築師 Massimiliano Fuksas 2004 年設計的 Milan Trade Fair 其巨大的曲面玻璃棚架，其玻璃單元亦採用此法製造。(圖 2-17) 2007 年藍天組於德國設計的 BMW 展示館應用三角面法製作表皮單元於展示大廳的玻璃帷幕，其玻璃單元每一塊完全相異，並且採用 Laser cutter 切割製造 2D 輸出的圖面，為標準應用此法於製造施工的案例。(圖 2-18)



圖 2-16 三角面法應用公信大廳設計案

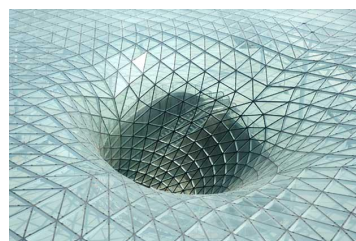


圖 2-17 Milan Trade 玻璃棚頂



圖 2-18 2007 年藍天組 BMW 展示館應用三角面法製作表皮單元

但三角面法就美學及施工的觀點討論，仍有一些不足：在外觀上原始設計的曲面化為三角的平面網格，這在曲面光滑的原則下，已經做了非常大的妥協。為了獲得良

好的施工，犧牲了原始形狀平滑的外觀改由近似的平面多面體代替。再者雖然三角形單元擁有平面的特性，但大部分情況下每一塊仍然為不一樣大小，這使得每一塊的單元無法大量生產，而增加了造價。

2.3.3 平面四邊形網格

平面四邊形網格法定義為：是以四邊形並且為平面的單元所組成的曲面來構成近似原始設計曲面的多面體幾何方法，再利用 CAM 方法製造。首先將原始模型上的網格平面化，為將原始的模型事先就固定約束為平面，這需要透過特殊的建模規則與演算法來達成。最後輸出平面的單元，再使用雷射切割輸出表皮的 2D 施工圖。四邊網格法為現在處理自由曲面主要方式。此種方法大量運用在曲面玻璃的製作，透過特殊的建模規則與演算法，將原始設計的形體重新計算為由四邊平面單元所構成的曲面。平面網格法是由三角面法發展而成，一般來說，於曲面上四邊形的網格皆不是平的，皆為空間的，因此此法再解決計算出平面的網格，將原本需折平的三角單元約束成平面。（圖 2-19）(Pottmann et al,2006)三角網格法來描述自由曲面時，雖然可以完整的描述設計形體的特徵，但是在美學的觀點上三角網格單元邊界無法呈現韻律感，而在施工也需要較多的支撐以及接頭的數目和單元和單元之間的接縫也不容易處理。因此使用四邊形代替成對的三角單元，可以減少自由形體的單元數目，並且減少做為支撐的二次結構、構件等構造物的數量。平面化曲面的方法大量運用在玻璃上，因為玻璃塑的過程需要鍛造，基於在經濟的理由，熱處理被證明是不可行的，所以必須是平面並且不可彎折或塑形的材質上。(Glymph et al, 2002 ; Shelden, 2003;Pottmann et al,2006; Schmiedhofer,2008)

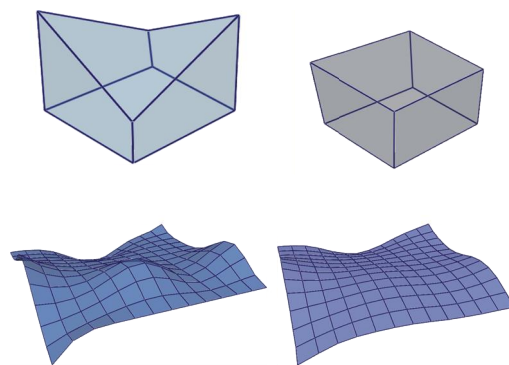


圖 2-19 網格平面化為四邊網格

2003 年 Dennis R. Shelden 為了處理四邊形玻璃網格結構，提出了平面化四邊形網格的方法。爾後 2008 年為了發展平面化製造方式，發展出了此平面四邊網格方法應用於設計流程中的幾何操作方式，稱為 PQ meshes（PQ meshes: 為四邊並且是平面的

面，分離的與一個物體匹配的。的設計及施工流程被探討，著重於模型平面化以及與設計的互動，有關於設計、建造和生產的特殊性能，應用於曲面設計的曲面分析策略之中。(Schmiedhofer, 2008)

四邊網格法利用平面的單元，增加施工的方便性，使得單元可利用雷射切割製造。在美學的角度上來談，在自由形體上組裝成的接縫容易表達自由曲面的韻律感，同時減少了組裝所需要的橫條、格框的數量，並且操作形體上帶來較多機械性的不便操作。但是依然具有多面體的特徵，並非光滑的曲面，這違背了自由曲面光滑而且連續的特徵。

2002 年 蓋瑞設計的 Simon Wiesenthal Center 是複雜自由型體建築，整個設計有 7 個巨大複雜玻璃表面的構造，有一些拿來當作牆面。有兩個最大的片段，由自由曲面的建築物，覆蓋圍塑出，本文主要討論此案例作研究(圖 2-20)。2004 年 Norman Foster 設計的 Sage 流行音樂中心，其外皮單元為多面體不光滑的網格，由簡單的幾何操作，設計成平的四邊形玻璃。(Schiftner, 2007) (圖 2-21)



圖 2-20 Simon Wiesenthal Center 曲面頂蓋



圖 2-21 Sag 流行音樂中心外皮四邊平面玻璃

2.3.4 平面四邊形網格法幾何 (Quadrilateral Planar Facets)

一般來說，於曲面上四邊形的網格皆不是平的皆為空間的，若要將曲面網格約束為平面網格則需要特殊的計算方法。2002 年 Dennis R. Shelden 為了處理四邊形玻璃網格結構，提出了平面化四邊形網格的幾何方法。此方法為：

透過基本的幾何原理，一組縱向的向量，與另橫向的向量，將會構成保證為平面的曲面單元。引伸演算出一個製作的法則，依靠著（母線）以及（幾何準線），可以產生空間曲面，單獨的從平面四邊形。也就是將一個斷面線與路徑，形塑出的曲面，將保有平面化的特性。此方法可以藉由兩組控制線段，來形塑出許多種的表面，稱為

為轉換表面 (Translation Surface) 的應用，藉由此方法可以逼近與原始設計相近的形狀，提供工程上的合理化，易於施工的平面單元。經由以上的法則，又提出了自動的參數化流程，藉由 Catia 操作，以幾何學和參數化的電腦架構。以衍生的計算『層級性』的參數來設定『控制元素』系統。最佳化的技術使產生出來的形狀與建築師最初設計相差不遠。(圖 2-22,2-23)

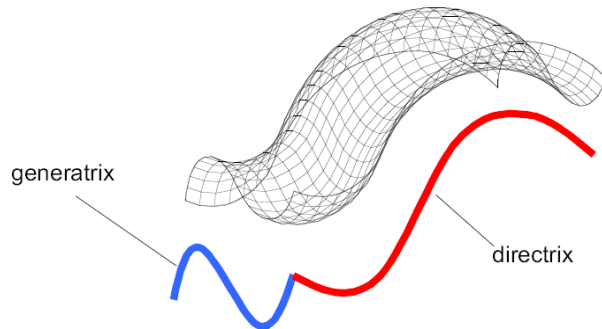


圖 2-22 四邊形網格平面化 (Quadrilateral Planar Facets) 幾何

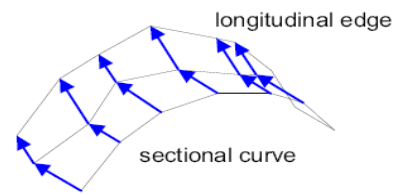


圖 2-23 平面化原理



第三章 方法及步驟

運用電腦的輔助來使複雜的工程可以順利進行，其 CAD/CAM 技術建立一套數位設計的流程來提升建造的效率和節省工程費用。而 2007 年林楚卿基於(李元榮,2005)的研究流程與數個國內外的實際案例歸納出 CAD/CAM 技術影響自由形體在結構系統、接頭和工程、材料的因子，提出一個完整的數位設計及建造流程，並結合國內施作案例分析可成標準化程序。而本文的問題為探討曲面表皮單元的模矩化，探討玻璃表皮單元的製造以及建構方法。因此本文專注於 CAD/CAM 技術流程中『3D 主要模型』的至『細部設計』階段中的硬殼式結構中的表皮單元分割和幾何分析方法。(圖 3-1)

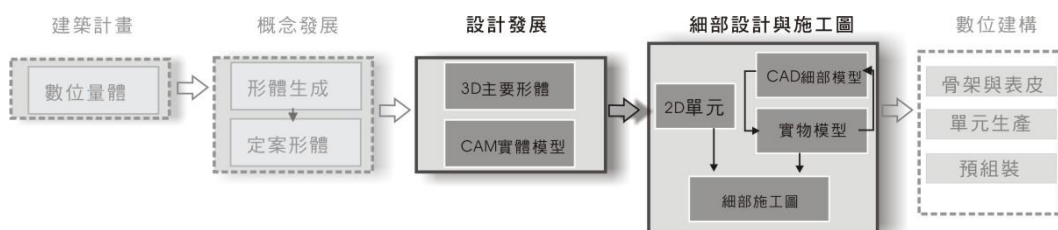


圖 3-1 本研究位於先期數位設計製造流程的位階(林楚卿,2007)

本文中數位製造方法有三個主要階段：(階段一)分析自由曲面玻璃帷幕的單元構造方式並且提出研究的限制條件，以及操作上曲面性質的規範。接著研究基本的根據限制條件討論相關的幾何原理作為後續研究發展的基礎。而在技術階段由於本文橫

跨設計至製造階段的流程，因此在這裡討論 CAD/CAM 的技術要點。(階段二) 討論操作步驟歸納每個步驟的方法、策略，使幾何原理可化為實際應用系統化的流程。(階段三) 最後分析所得到的結果提出評估新方法所得到的結果與原始設計模型的差異。最後在 RP 技術的輔助下可以反覆的製造生產實體模型來檢視實際生產方法的可行性。(圖 3-2)

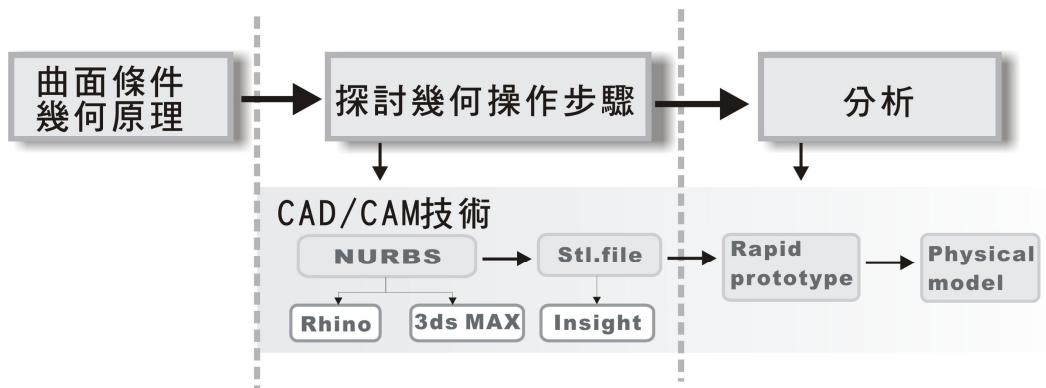


圖 3-2 本研究三階段



3.1.階段一：曲面條件限制以及幾何原理

3.1.1 玻璃表皮單元假設與幾何條件限制

根據上述問題自由形體的玻璃曲面，因為玻璃的材料特性以及設計需求，會具有以下條件。(一) 本研究之自由形體曲面為玻璃帷幕，本方法照玻璃特性限制為無法彎折及二次施工(二) 基於構造原理，本文只單獨研究曲面單元方法，其曲面為雙向度曲面(三) 表皮單元為光滑的曲面，並且單元與單元之間的接續為 G1 或 G2 連續。以下分述之。

玻璃性質與結構體系所造成的條件

1909 年 Edouard Benedictus 獲得的專利製造層壓玻璃，開始製造優質大規格玻璃，使得玻璃建材蓬勃的發展起來，隨著現代主義的興起，玻璃成為國際樣式的基本建築語彙之一。玻璃帷幕的高樓宣示著透明與流動的空間形式成為建築的新價值主流。而自由形體的玻璃帷幕，不同於金屬、混凝土等材料特性，玻璃的生產方法決定其本身的物理性質。而玻璃是一種均質的材料，一種固化的液體，不具有晶體的結構，這就是玻璃透明的原因。並且玻璃硬度很高，這種性能充分體現了玻璃表面的耐用、

耐磨性，但也反應了玻璃作為材質使得二次施工的困難，因此以玻璃作為材質必須使用平板玻璃或是鑄造的方法。

按建築技術規則帷幕牆的定義為：『一, 26:帷幕牆定義為構架構造建築物之外牆，除承受本身重量以及其所受之風力、地震力外不再承受或傳導其他載重之牆壁。』建築物內的每個部件都有能力承擔負荷及傳透力。但建築其構造依其結構行為及級體系歸類有不一樣的構造關係。其結構等級分為三種：（一）主體結構：承擔核心，所有柱子、牆、樓板合需要承擔水平何垂直得負荷支撐（二）次要結構：不屬於柱結構的樓板，內置構件、隔牆、屋頂構造、及附屬構造、立面構件（三）第三級結構：屬於次要結構得一部份，其結構性並不是重要的，如立面窗戶。因此帷幕牆的構造可視為獨立運作的附加原件。

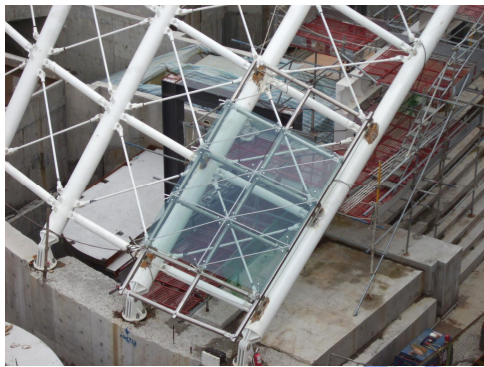


圖 3-3 曲面玻璃帷幕構造

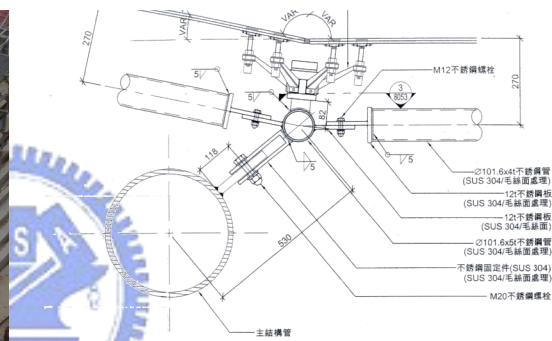


圖 3-4 玻璃帷幕二次結構接頭大樣圖

以高雄捷運美麗島站為例：進行曲面的玻璃帷幕施工案例為例分析。美麗島車站的設計建築師為高松申，建築的主要量體為四個對稱的曲面玻璃穹頂所構成。結構玻璃工程為霖亞帷幕科技工程有限公司所負責，玻璃曲面為馬鞍型的複曲率曲面。玻璃以及骨架的結構關係為：骨架作為一級結構之稱次結構所傳遞的重量，三級結構為玻璃的三角面單元，經過模矩化使用相同的一套模矩。其中二級結構的鐵件作為骨架以及表皮間的橋樑，提供傳遞力量的路徑，並且使骨架和模矩化的表皮單元的組裝上可以進行夠漸漸的彈性調整的空間(圖 3-3,3-4)。因此帷幕牆的構造可視為獨立運作的附加原件。由上述玻璃的材質條件以及構造原理及案例說明，本文可對玻璃材質的曲面帷幕規範：

1. 曲面玻璃必須使用開模鑄造的施工方法，曲面的玻璃單元因為玻璃材質無法進行二次加工，因此如金屬的表皮單元常用的分析方法：Rule surface 進行展開製作表皮單元的展開圖再彎折做單元包覆骨架的方法並不適用玻璃材質。

2. 本研究進行時依據主次結構的構造原理可以假設：因為玻璃屬於三級結構原件，可以對曲面單獨進行操作，只探討曲面玻璃的幾何關係。研究完成後骨架與表皮의 接合關係可由二次結構來搭配與調整。

光滑：單元連續性的限制條件

為了回應本文的研究問題：同時兼顧施工以及美學，表達自由曲面光滑的特性，同時減少曲面單元的數目。在視覺上與美學上的條件要求，需要更精確的定義何謂光滑的程度與定義。NURBS 建模系統中表現滑順接續需要嚴謹的邊界條件，如何使兩個以上的面平滑的連接在一起，需要定義連續性。連續性用於描述兩條曲線或兩個曲面之間的關係。每一個等級的連續性都必需先符合所有較低等級的連續性的要求。這些連續的條件如下列：

G0 位置連續：只測量兩條曲線端點的位置是否相同，兩條曲線的端點位於同一個位置時稱為位置連續 (G0)。(圖 3-5a)

G1 正切連續：測量兩條曲線相接端點的位置及方向，曲線的方向是由曲線端點的前兩個控制點決定，兩條曲線相接點的前兩個控制點（共四個控制點）位於同一直線上時稱為正切連續 (G1)。連續的曲線或曲面必定符合 G0 連續的要求。(圖 3-5b)

G2 曲率連續：測量兩條曲線的端點位置、方向及曲率半徑是否相同。兩條曲線相接端點的曲率半徑一樣時稱為曲率連續 (G2)，曲率連續並無法以控制點的位置來判斷。

G2 連續的曲線或曲面必定符合 G0 及 G1 連續的條件。(圖 3-5c)

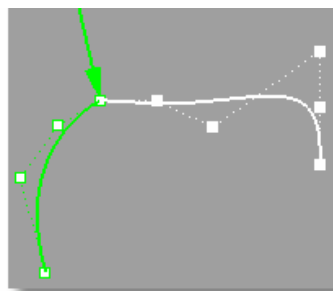


圖 3-5A G0 位置連續

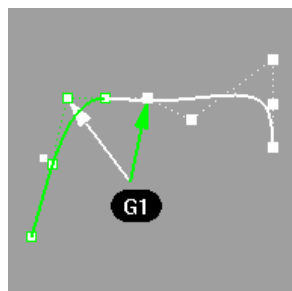


圖 3-5B G1 正切連續

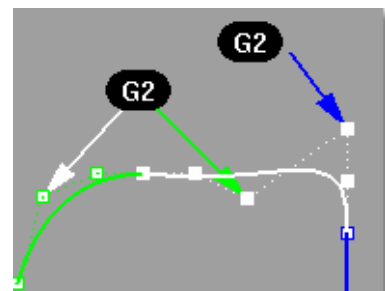


圖 3-6 G2 曲率連續

光滑的程度討論本文重新對問題進行定義：不同於三角面法四、邊網格法的單元構成為：取自形體表面的頂點資料作為弦長，這使得曲面單元並不連續，單元和單元

之間只有 G0 連續(位置)，曲率以及切線並不連續。這樣的作法使得外觀呈現多面體的樣貌。因此曲面光滑的條件為下：為了要達到光滑的曲面，單元和單元間需要 G1 (切線連續) 以上的連續條件，而同時達到有若干的曲面單元相等。

3.1.2 Form Finding 幾何原理

幾何原理

2003 年 Dennis R. Shelden 為了處理四邊形玻璃網格結構，提出了平面化四邊形網格的方法。此方法為：轉換表面的幾何原理透過基本的幾何原理，一組縱向的向量母線 (Generatrix)，與另橫向的向量準線 (Directrix) 掃略 (sweep)，將會構成保證為平面的曲面單元。引伸演算出一個製作的法則，依靠著母線以及幾何準線，可以產生空間曲面，單獨的從平面四邊形。也就是將一個斷面線與路徑，形塑出的曲面，將保有平面化的特性。(GLYMPH,2002; Shelden, D, 2003;Pottmann et al2006; Schmiedhofer,2008)

而在文中為了討論平滑以及連續，引伸 Shelden 的方法進一步討論。Shelden 於幾何體上討論平面化網格的構成，探討了構成單元角度以及弦長的方法表示，而在此更進一步討論的是曲面上弧長以及切線的條件構成。為了要達到光滑的曲面單元要達到曲面上的曲率至少是正切連續 (G1 連續) 的。因此進一步討論。其中母線 (Generatrix)，與準線 (directrix) 構成的曲面 surface，各曲線在各自的方向上都會保有自己的幾何特性。如果母線是具有對稱性質的線段 (如，圓弧、拋物線、conical line) 那在母線方向的斷面上，也會呈現母線對稱的特性；準線方向亦相同。

因此符合此原則的曲面，自母線的對稱軸(如拋物線的頂點) 分割單元的話，其單元也會對稱。單元為鏡射的關係只有對稱，單元的性質為大小相同方向相反，單元依然不一樣。而為了達到完原相同，曲面的單元需要在母線以及準線的方向都對稱，因此單元藉由母線對稱一次，再藉由準線對稱一次，連續對稱兩次後，曲面上的單元就會完全相同。因此限制母線以及準線皆由對稱的線段構成，曲面單元的數目至多可以找到一對，因此單元的數目可成為一半。(圖 3-7)

因此依據以上原理本文的方法為：使用具有對稱特性的母線 (Generatrix)，與準線 (directrix) 掃略出曲面。並且控制線段對原始設計做 Form Finding 在依照對稱點做分割即可得到成對的單元，進而增加單元重複的數目。

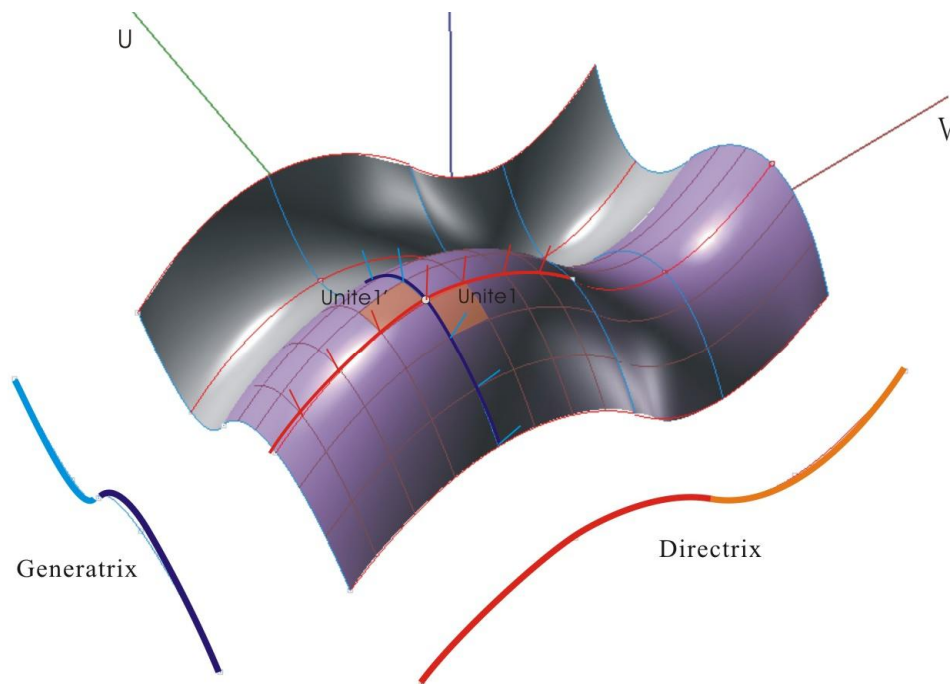


圖 3-7 UV 向的放樣線:母線 Generatrix 及準線 Directrix :規則的二階曲線所組成。Unite 和 Unite 1' 為成對相同的單元。

曲面曲線階數

為了達到光滑的曲面及單元連續的邊緣接續，還需要瞭解 NURBS 建模系統定義曲面平滑度的特徵。現階段建構數位模型的建模方法分為非均勻有理 B-spline 曲線稱為 (Non-Uniform Rational B-Spline) NURBS 透過數學式的計算可以有效並精確地表示任何曲面上精確的資料。NURBS 曲線是由以下四項所定義：階數、控制點、節點及估計法則。其中影響最大的因素為階數。以下討論階數 (Degree)。

多項式看起來像是 $y = 3 \cdot x^3 - 2 \cdot x + 1$ 。"階數"是多項式之中影響力最大的變數。例如： $3 \cdot x^3 - 2 \cdot x + 1$ 的階數是 3； $-x^5 + x^2$ 的階數是 5，以此類推。NURBS 的函數是有理多項式，NURBS 的階數是多項式的次數。從 NURBS 建模的觀點看來，(階數 -1) 是曲線一個跨距 (Span) 中最大可以"彎曲"的次數。例如：1 階的直線，可以"彎曲"的次數為 0。(圖 3-8) 拋物線、雙曲線、圓弧、圓 (圓錐斷面曲線) 為 2 階曲線，可以"彎曲"的次數為 1。(圖 3-9)立方貝茲曲線為 3 階曲線，如果將 3 階曲線的控制點排成 Z 字形，該曲線有兩次"彎曲"(圖 3-10)

因此重上述定義來看一階的曲線函數，其彎曲次數為 0，因此曲線的外形為直線的型態。若曲線函數為二階以上則彎曲次數為 1 以上，因此可以定義為『真的曲線』，

其接續連續光滑而且連續。因此將原始設計的結構線取出，後使結構線降階為二次的圓錐斷面曲線，將可以取得光滑並可以分析的曲線。利用二階曲線重新描繪取得近似的曲線：以將利用相近的可分析規則曲線來規則化結構線（拋物線，弧線、雙曲線直線）重新計算相似的形狀（人工調整），這些線段將來必須應用在形狀重建，而分開的 2 階曲線線段以切線連接。

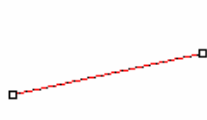


圖 3-8 1 階：直線。

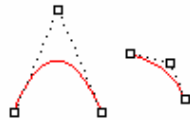


圖 3-9 2 階：雙曲線、圓弧、圓

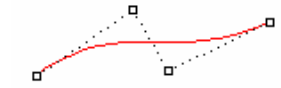


圖 3-10 3 階曲線。

二次曲線 (Conical Line)

圓錐曲線 (conic section)，又稱圓錐截面、二次曲線，是數學中通過平切圓錐（嚴格為一個正圓錐面和一個平面完整相切）得到的一些曲線。（圖 3-11）兩個眾知的圓錐曲線是圓和橢圓。這出現在圓錐和平面的交截線是閉合曲線的時候。圓是橢圓的特殊情況，這時平面垂直於圓錐的軸線。如果平面平行於圓錐的母線(generator line)，則圓錐曲線叫做拋物線。最後，如果交線是開曲線並且平面不平行於圓錐的母線，則圓錐曲線是雙曲線。在笛卡爾坐標系內，二元二次方程的圖像可以表示圓錐曲線，並所有圓錐曲線都以這種方式引出。方程有如下形式：

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0$$

上述四個條件可以被合併為依賴固定的一個點 F(焦點)和不包含 F 的一個線 L(準線)和一個非負實數 e(離心率)的一個條件。對應的圓錐曲線由到 F 的距離等於 e 乘以它們到 L 的距離的所有點組成。對於 $0 < e < 1$ 得到橢圓，對於 $e = 1$ 得到拋物線，對於 $e > 1$ 得到雙曲線。(圖 3-12)在圓的情況下， $e = 0$ 且準線被假想得離中心無限遠。這時聲稱圓由距離是到 L 的距離的 e 倍的所有點組成是沒有意義的。圓錐曲線的離心率因此是對它偏離於圓的程度的度量。

所有的二階方程的函數圖形，接可以視為圓錐曲線的組合，其組合為：拋物線、雙曲線、圓弧、圓。而這些特定的圖形極容易找到對稱的特性。利用此特性可以實現 Form Finding 幾何原理。

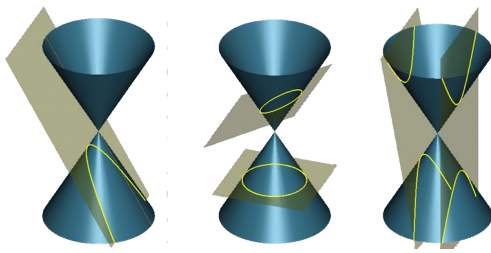


圖 3-11 圓錐曲線 左：拋物線 中：橢圓 右：雙曲線（摘自 <http://mathworld.wolfram.com/>）

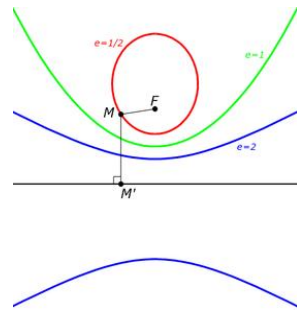


圖 3-12 離心率與二次曲線

3.1.3 CAD/CAM 背景技術

本研究的操作系統，採用多個 CAD/CAM 平台的協作。研究的工具流程橫跨 MAYA、RHINO、3DsMAX、INSIGHT，以下(圖 3-13)說明。在數位流程中討論操本研究在數位環境下操作所需的 CAD/CAM 技術所需要具備的事項。

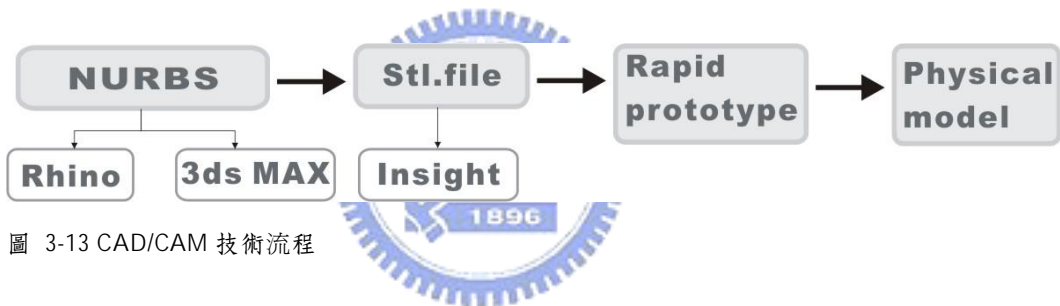


圖 3-13 CAD/CAM 技術流程

CAD 技術

為了在數位化環境下實踐光滑並且模矩化的曲面分割，本文以 CAD/CAM 媒材，實驗並且探討自設計方案的重新分析至製造的流程。逐步的探討 CAD 和 CAM 媒材轉換的技術流程，使得研究所發展的幾何方法可以順利生產來進行分析測試，並說明 CAD/CAM 技術如何應用於流程中，且列出實做過程所遭遇的問題和提供可能解決的方法。

Rhino

為了達到光滑的曲面以及連續的邊緣接續，需要以 NURBS 曲面建模系統提供操作。現階段建構數位模型的建模方法分為非均勻有理 B-spline 曲線 (Non-Uniform Rational B Spline) 與多邊形建模系統 (POLYGON) NURBS 系統主要廣泛的應用於動畫、工業設計，工程分析中，不同於多邊行建模系統以細分的多邊行網格(Mesh) 以近似的形體模擬曲面的樣貌，NURBS 可以精確地呈現標準的幾何圖形如直線、圓

等，以及自由造型的幾何圖形。NURBS 呈現的幾何圖形所需的資料量遠比一般的網格形式要少，並且 NURBS 透過數學式的計算可以有效並精確地表示任何曲面上精確的資料。因此本文以 NURBS 為主要的建模系統。

而本篇以 3D 軟體 Rhino4 作為在 CAD 環境使用 NURBS 建模的主要平台，在 Rhino 提供了 NURBS 建造模型的操作形式，設計者可以隨意的在 Rhino 內進行高階的建模等功能。除了出色的建模工具外。Rhino 亦提供完整的檔案轉換平台、包括 IGES 標準交換檔、FBS、STL file 等，並且以其高精準度及極小的公差著名，因此本文選擇 Rhino 作為分析操作平台。但是 Rhino4 並不提供完整的即時修改。因此在後續步驟中還需要藉由 3DsMAX 來進行 Form Finding。

3DMAX

3DMAX 其 NURBS 功能擁有即時互動操作的優點。這為後續操作的必要性，並且 3DMAX 在由 NURBS 轉檔至 STL.file 有較簡便的操作流程。

1. 增加精準度：於 Approximation/Tessellation 設定高解析度，NURBS 的細分網格可以得到較高的建模精度。
2. 關閉降級顯示：Transfore Degree，將可以得到即時修改即時顯示的增加操作的方便。
3. 平行掃略：3DMAX 中的 NURBS 功能勾選 1Rail-sweep 並且選擇 Sweep Parallel 指令，達到『平行』掃略，可符合幾何原理所描述的規則，而 Rhino 中的單軌掃瞄 Sweep1 不可平行掃略。因此在 Rhino 中不可執行 Form Finding。

STL.file 轉檔流程

NURBS 模型分析完成後，需將數位模型輸出 STL 檔案格式至 3dsMAX 軟體執行 STL 檔案的修補以方便進一步的實體輸出至 Insight 軟體。但在輸出 STL 檔案前，3dsMAX 需操作幾個重要的程序使得 STL 檔案可以輸出，避免模型錯誤，程序如下：

1. RHINO 轉換為 STL 檔：使用 Mesh 指令，將 NURBS 模型轉換為多邊行網格檔案，依照 RP 模型的輸出的尺度調整網格細分程度，一般來說越精細曲面品質越好。再輸出成 STL 檔至 MAX 中。
2. 轉 POLYGON：3dsMAX 中執行 Convert to POLYGON，將模型轉換為四邊面網格。使模型成為多邊行的網格，以利 STL 檔案修補的動作。同時檢查多邊行的法

向量是否一致，若不一致使用 Edit polygon/Polygon/Flip 進行修補，務必求法向量一致。(圖 3-14)

3. 長厚：由於 RP 實體模型必須具備厚度才可以進行實體輸出，因此使用 Shell 指令將轉檔後的 Polygon 模型增加厚度，其厚度依照 RP 設備的精確度決定，一般來說不可小於 1mm。(圖 3-15)
4. STL 檔分析：使用 STL check 指令檢合模型錯誤部分，分別查找：1.開放邊界 Open Edge 使用 Edit polygon/Border Edges 全選後封閉缺口(CAP)， 2.多重邊界 Edit Polygon / WeldVertex。(圖 3-16)

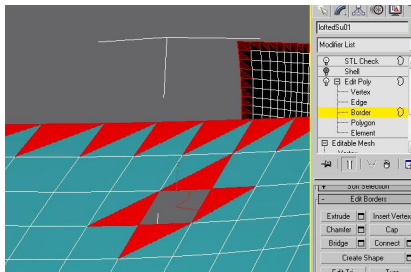


圖 3-14 封閉破面

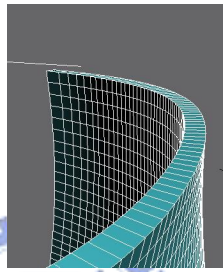


圖 3-15 SHELL 長厚

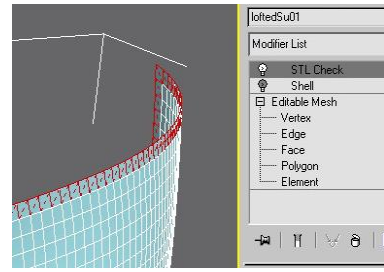


圖 3-16 STL.file 檢查指令組

Insight

Insight 軟體是在提供 CAD 和 CAM 之間資料轉換的平台，從讀入 3dsMAX 所輸出的 STL 檔案，經過計算模型的尺寸、材料和輸出的精密度再交由 RP 裝置輸出成實體模型。Insight 軟體的使用程序如下：(圖 3-17)

1. 模型切面 (slice)：首先開啟 STL 檔案，在 STL/ Units and scale 設定模型的單位，與初始大小並安置於工作平台內。斷面分割高度(Slice height)此數值的設定是用於決定 RP 裝置的噴頭在噴射材料描繪每個斷面的輪廓，以此斷面分割高度來設定描繪的次數。(圖 3-18)
2. 支撐材設定設定(Modelers Setup)：選定輸出的模式為實體(Solid)或者是空心(Sparse)，在本文都使用實體模式，因實體能反應本文薄殼的曲面單元；接著設定模型輸出的精密度，選擇 Fine rasters)定模式。並且於斷面計算完成後，選擇計算所需要的支撐材。(圖 3-19)
3. 工作路徑(Toolpaths)：此步驟可以設定模型輪廓線的寬度和依模型的厚度來設定噴頭的工作路徑，在此為了補強模型採用空心模式讓實體模型可以更堅固。

4. 計算材料以及工作時間：接著就是進行材料的計算，過程可以分成計算模型邊緣的輪廓、計算支撐材的設置以及計算工作路徑的設置。若是 STL 的模型有破面在計算模型邊緣輪廓時 Insight 會提出警告，並提供破損的面的位置，所以可以依其指示回到 3dsMAX 內進行檢查和修正，再重新輸出 STL 到 Insight 進行設定。最後逐層檢查斷面是否封口和輸出材料分佈的狀況，完成檢查後就可以將模型資料輸出到 RP 裝置來製作實體模型。

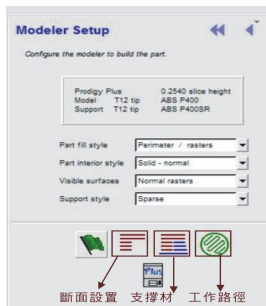


圖 3-17 Insight 設定

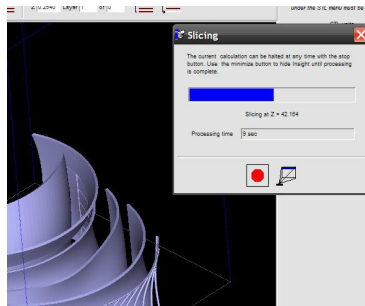


圖 3-18 計算切面

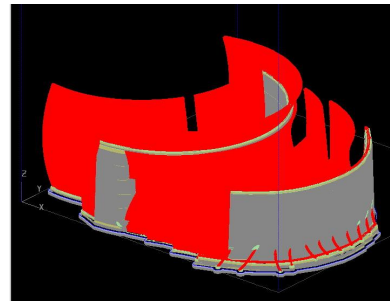


圖 3-19 設定支撐材

CAM 實體輸出技術

本研究所使用的 RP 裝置為熔解沈積法(Fused Deposition Modeling, FDM) (圖 3-20)，在接收完成 Insight 軟體計算出模型的每成層斷面後，以 2D 成形的方式，一層一層的堆疊模型斷面，堆積成實體的 3D 模型。當 RP 裝置準備進行製作模型前，需要置入平台使材料可以依此來堆疊模型，在放置的過程中必須確定平台是水平的擺設，若是有些微不準確可能造成 RP 裝置的噴頭校位錯誤，導致模型無法成形，另外在實體模型輸出的過程中可以透過 Insight 連結網路，查看模型輸出的進度以及材料的耗損，減少非必要的人力和時間，來增加工作的效率。最後使用超音波清洗機將支撐材溶解。(圖 3-21)



圖 3-20 本研究所用之 RP 裝置



圖 3-21 超音波清洗機

3.2.階段二：探討幾何操作步驟

基於以上幾何的原理，還需要整合出可以應用的步驟，藉由在進行的實際案例，來瞭解實際施工與設計者的需求並且整理為可以應用的策略。本研究透過實際的真實案例討論玻璃帷幕的建造方法。這個案例為 2007 年開始在台灣執行的「澳底國際建築計畫案」。此國際計畫為一會真實會落實的住宅設計案，將會於 2010 年建造。計畫中由 20 位國內外建築師進行集體設計，其中一棟約 150 坪的三層樓住宅、具有東方藝術元素的設計案『水墨狂草』為交大建築研究所由劉育東教授所帶領的 AleppoZONE 設計團隊所設計。本案的設計概念由東方文字書寫藝術衍生而來，因此特別強調建築形體的線條連續以及玻璃帷幕必須完全光滑。其中的玻璃帷幕，因為設計者的要求，因此需捨棄三角面法，四邊形網格法。又因為經濟因素的考慮，設計建造者必須減少玻璃單元的數量。此案由的玻璃帷幕的玻璃系統主要為一樓至三樓的玻璃及骨架系統構成，玻璃安裝於管狀柱子之間。1-2 樓的落地窗為 28 片完全大小不一的不規則曲面玻璃，曲率較平緩且變化一致，而三樓的曲面玻璃則為 16 片。曲率的變化極端。因此本文操作只取 2-3 樓進行操作。(圖 3-22)

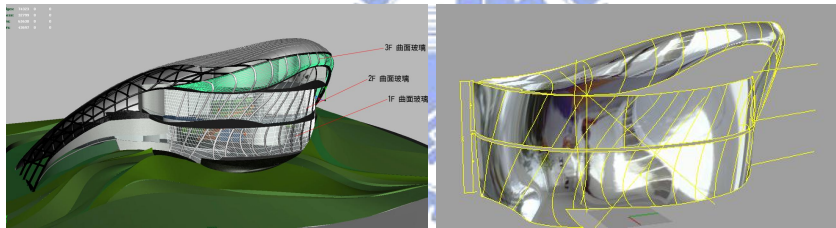


圖 3-22 水墨狂草玻璃帷幕及其原始分割

本文取主要的玻璃帷幕為操作對象，並且使用的操作平台為 RHINO 4，本文整理步驟並且對照實際操作與原理做每個步驟的歸納以及整理。以下為幾何操作流程分為三個主要步驟以及各階段的子步驟，並於下段其各個步驟。

結構曲線分析調整

目的為簡化複雜的原始設計模型，將曲面順合理化後取得較簡單的曲面資料分析。接著將結構線進一步降階。其子步驟為下：

步驟 1:提取原始設計曲面上的兩條(U,V 向)結構線

步驟 2 簡化、重新描繪上一步中兩條不同向度 (U,V 向) 曲線，使這兩條曲線

成為對稱的二階曲線所組成的曲線；這些曲線可能有幾段曲線組成。

曲面逼近

二階的結構線生成曲面。再進一步的控制結構線的中心點、頂點，逐步調整至與原始設計相似。比較原始設計及新形狀的差異，此階段又可分為下列兩子步驟。

步驟 3 控制這兩條曲線生成新的 NURBS 曲面。

步驟 4:藉由調整這兩條曲線來控制曲面做 Form Finding，以逼近原始的形狀。

單元分割

新的近似曲面以二階曲線的對稱規則進行分割。藉由對稱軸鏡射的單元必定會相同，因此最理想狀況下可以達到單元有一半相同。此外在分割過程中，會遇到關於構造的問題，分割的方式也必須考慮著單元尺度問題以及樓版構造的限制。此階段又可分為下列兩子步驟。

步驟 5 再依照兩條曲線對稱規則 來分割曲面取出曲面單元。例如拋物線經過拋物線頂點的分割線段，單元數目將會減少。

步驟 6:特徵重建，將不必要的合理化後的幾何刪除。



步驟 1 將原始結構曲線提出

步驟 1.1 重新合理化原始曲面

為了取得可以操作的形體，需要回復成為原始未經分割修剪的原始曲面資料。因為原始設計模型資料太過複雜難以操作，尤其是經過設計過程不斷於 3D 軟體裡操作的原始 3D 模型，反覆經過修剪分割的曲面往往會造成控制點的數目增加，曲面出現不平滑的皺摺化模型資料以利後續的分析與操作。

首先由平台的轉換：於設計階段設計者使用的核心工作的平台為 MAYA 作為形式操作的媒材，MAYA 是應用於建築設計具高度創造力的 NURBS 曲面平台，但於本文研究還需要更精準以及具有完整的分析工具的 RHINO4 作為本文的操作平台。因此本案必須先自 MAYA 中轉換檔案格式 IGES 以銜接。曲面取自(3D 主要模型)回復成未經編修的資料後，經過曲面順化(smooth)合理化(optimized)將有效的減少 CV

控制點的數量，得到精簡的。經過簡化後的曲面需要經過的曲面分析，以瞭解曲面的平滑度以及 CV 控制點數。例如：由下表 3-1 可知曲面的構成 UV 結構線的複雜程度，合理化曲面後，曲面的 CV 控制點由 3519 減少至數減少了 99.14 %。

另外值得注意的是此項操作不改變曲面的外型以及平滑度、階數、等所有特徵，只修正多餘的控制點。經過修剪及順化後的曲面控制點減少為原來的 1/15，且曲面更加的滑順。(圖 3-23 ; 3-24)操作過程如表 3-2:

表 3-1 曲面順化比較

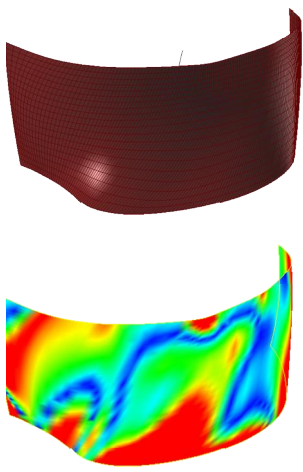
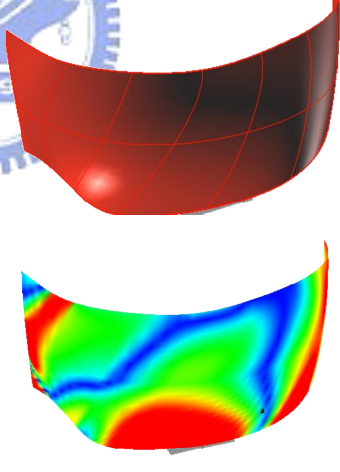
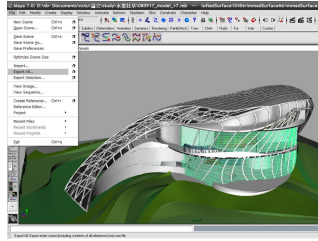
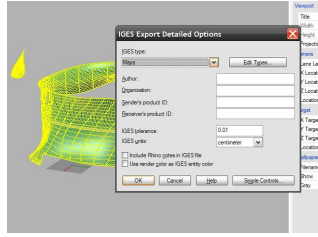
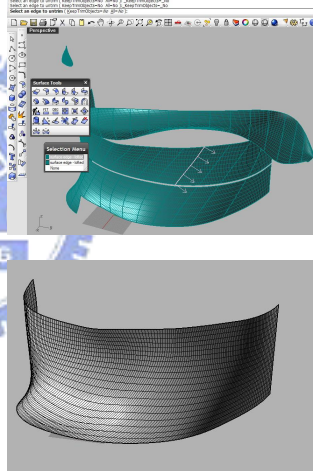
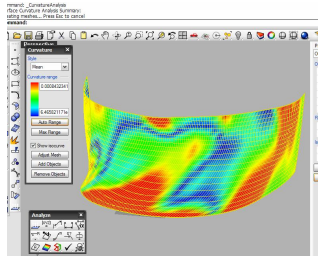
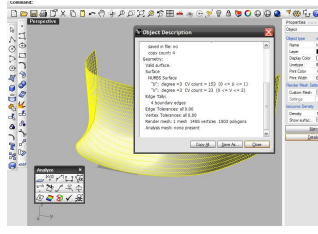
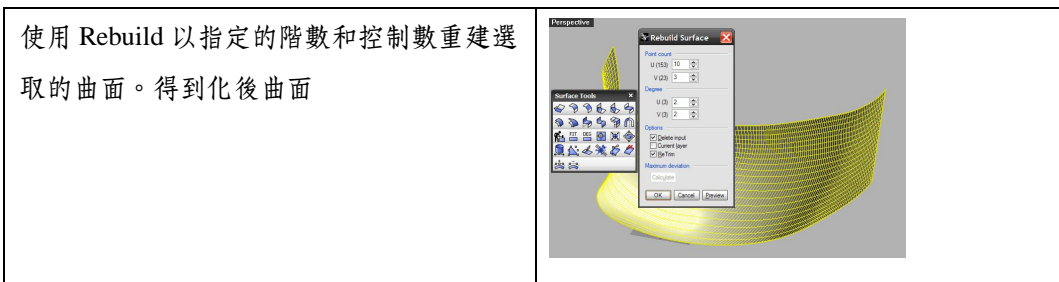
原始曲面	順化後曲面
NURBS 曲面： U: 階數 = 3 CV 數 = 153 (0 <= U <= 1) V: 階數 = 3 CV 數 = 23 (0 <= V <= 2) CV 點數：3519 4 個邊界邊緣	NURBS 曲面 U: 階數 = 3 C V 階數 = 10 (0 <= U <= 1) CV 點數：30 4 個邊界邊緣
 <p data-bbox="304 1637 504 1666">圖 3-23 原始模型</p>	 <p data-bbox="825 1630 1102 1659">圖 3-24 順化後曲面模型</p>

表 3-2 步驟 1.1 過程

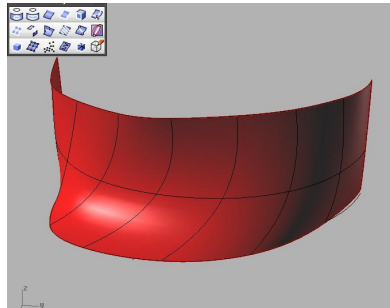
說明	圖示
<p>在 MAYA 中選擇所要模型 Export 選擇以 IGES 作為交換檔輸出，不刪除歷史紀錄。</p>	
<p>RHINO 選擇適合 MAYA 的 IGES 格式，轉檔，並且檢查尺寸。</p>	
<p>選擇曲面 Untrim，移除曲面的修剪邊界，得到原始曲面。</p>	
<p>使用 CurvatureAnalysis 分析曲面曲率。</p>	
<p>使用 Properties/ Detail/ Object Description 檢核曲面資料，階數，CV 控制點數、邊界數目，得表 3-1。</p>	

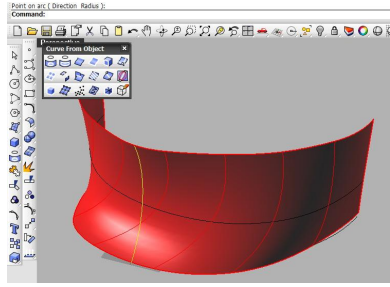
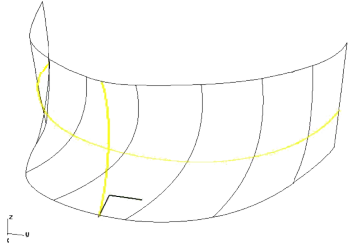


步驟 1.2 提出結構線

為逆向操作重新生成符合原始設計的曲面，需要提出關鍵結構線。NURBS 曲線建模系統，以數學函數為基礎的曲線所衍生，NURBS 曲線由：階數（Degree），控制點(CV)，節點（Knot）為關鍵元素構成，只需要控制關鍵曲線的資料並控制曲面的型態，就可以精確的定義曲面生成。因此為了獲得更精簡的原始設計資料，只需擷取曲線。依照幾何原理（圖 3-10）所示，曲面曲線的提出，需要選擇 UV 方向的兩條主要的曲線，分別作為母線以及幾何準線作為曲線生成的基準。所以 NURBS 網格框線組中的數條曲線選擇主要的兩條結構線，因此必須考慮其他條件來選擇關鍵的曲線，例如構造方式以及原始曲面的邊界。所以在本案例中提出物體的中心座標系統上的兩個像度（UV 向）的關鍵曲線或是世界座標系統中正交結構曲線。但是由於原始設計的玻璃帷幕構造為垂直水平向度的分割，為了操作方便，本案例中提出水平向、垂直向的關鍵線段。提出的線段可以還原成原始的形狀，操作過程如表 3-3。

表 3-3 步驟 1.2 過程

說明	圖示
<p>ExtractIsoCurve 抽離出框架結構線。或使用 ExtractWireframe 抽離出框架結構線，取出結構框線組。</p>	

<p>Section 切割出模型上的垂直向的曲線。</p>	
<p>自框線組合選擇出兩向介於中間值的曲線，選擇曲面高度一半處抽離 u 向結構線。</p>	

步驟 2 曲線降階與重新描繪二階曲線

為了將原始的不規則曲面重新組合成由規則的曲面所構成（球面、conical surface 等）的近似曲面，需要使用規則的曲線去定義規則的曲面。NURBS surface 由上一步提出的關鍵曲線所定義，藉由改變這些曲線來編輯原始設計的曲面。若曲線呈現一階以上，曲線都為平滑的真曲線，這與 Mesh 建模系統的系分數不同，Mesh 細分數呈現的階數，代表的是曲面平滑的程度，而 NURBS 呈現的則為變化程度，二階以上的曲線都為完全的平滑其接續連續光滑而且連續，所以若將曲線重新以二階曲線描繪，將可以得到較易被分析、分解、但卻擁有相同光滑的曲線。降階過後的二階曲線，其性質必定為圓錐斷面曲線的線段組合（參考上述 3.1.2）將可以化簡為：圓弧、雙曲線、拋物線，雙曲線等規則的曲線，將可以取得光滑並可以分析的曲面。因此就可以將線段分割為具有對稱性質的曲線。本案的操作過程如表 3-4

二階曲線的描繪

將曲線簡化為二階曲線，並尋找對稱條件，是本方法的關鍵。以下解說其要領以及原則。

（一）分解降階後的二階曲線：在 RHINO 曲線降為二階以後，其屬性必定為圓錐斷面曲線的組合。其曲線組合的連接處是以『節點』連接。因此從節點處使用 Trim 指令切開曲線，可以得到各自獨立的圓錐曲線。（圖 3-25-a）

(二) 切開後的曲線打開控制點，各自操作曲線。對稱軸必定垂直於曲線的頂點，並且兩者弦長也必相等，因此以弦長取中點作垂直線段，將垂直線段當作對稱軸。接著以移動控制點頂點，符合曲線的中心點以及對稱軸。而分開的兩組曲線以混接曲線相連接，曲線可以得到 G1 連續。(圖 3-25-b)

(三) 調整曲線：使控制點沿作圖產生的對稱軸移動，曲線會符合對稱規則。不斷的調整控制點在對稱軸上的位置將得到不同的圓錐曲線。當曲線為圓弧時，其後續步驟產生的結果將有對大的重複單元數目。在步驟 4 中與 步驟 5 中都需要遵守對稱軸的規則。(圖 3-25-c-d)

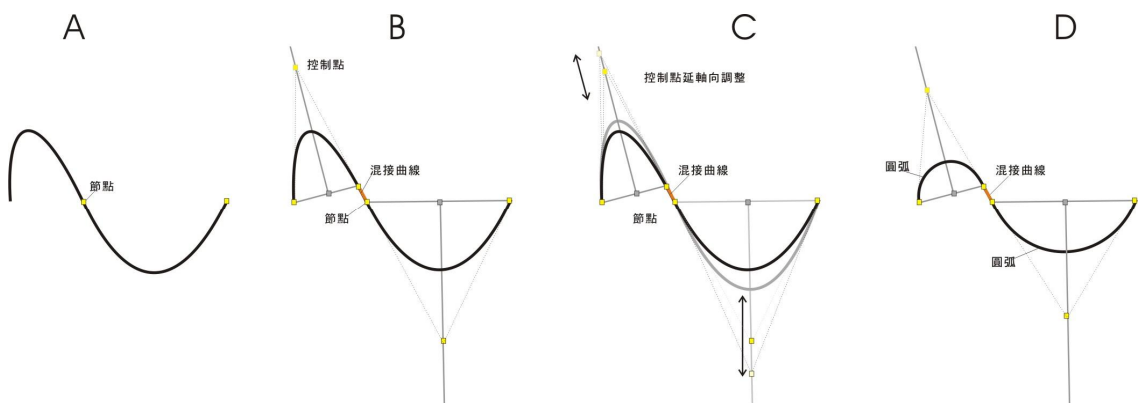
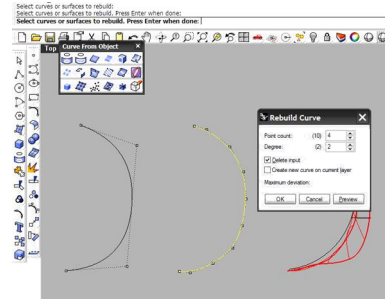
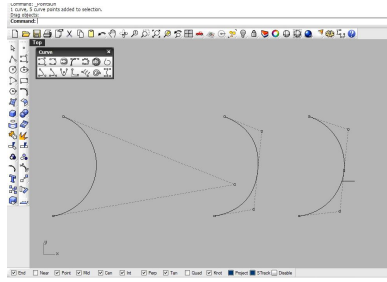
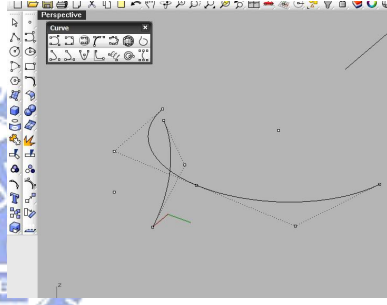


圖 3-25 二階曲線描繪：(A) 曲線由節點處分段 (B) 調整控制點尋找對稱軸 (C) 控制點於對稱軸上調整位置 (D) 調整成圓弧組成的曲線。

表 3-4 步驟 2 曲線降階與重新描繪二階曲線

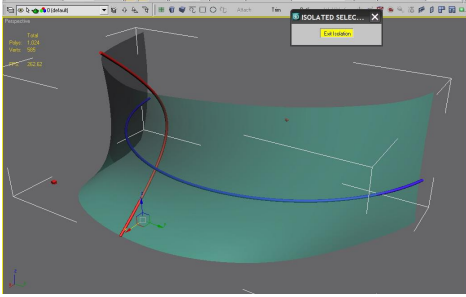
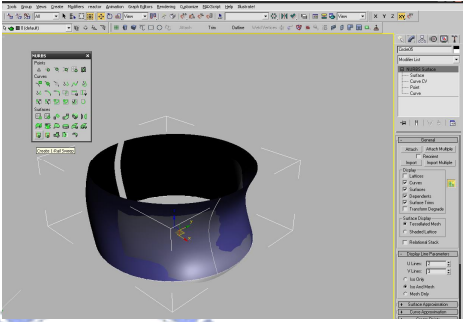
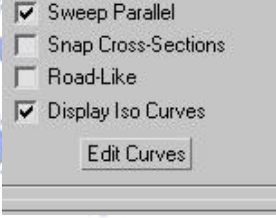
說明	圖示
<p>將放樣線降為 2 階：使用 ChangeDegree 修改曲線階數。</p>	

<p>Rebuild Curve 指令減少曲線的控制點數，在此控制點數為 4。</p> <p>打開 PointsOn 觀察控制點。</p>	
<p>使用 Conic 描繪二階曲線：重新描繪取得近似的曲線：以將利用相近的可分析規則曲線來規則化結構線（拋物線，弧線、雙曲線直線）重新計算相似的形狀（人工調整），這些線段將來必須應用在形狀重建。</p>	
<p>同樣執行 V 向度的曲線</p> <p>並藉由 PointsOn 觀察控制點，找出控制頂點，對稱軸，並且標示之。</p> <p>這個案例中線段垂直像度為拋物線，水平向度為橢圓曲線。</p>	

步驟 3 UV 向曲線生成新的 NURBS 曲面

這個步驟為由原本形狀的關鍵曲線，重新簡化後進行新的規則形狀重建，但簡化後的曲線會與原始曲線產生一些差異，因此還需要進一步調整，在此案中簡化後的曲線為橢圓、以及拋物線兩組 UV 向曲線。跟據 2002 年 Dennis R. Sheldon 所提平面化四邊形網格的方法，UV 向各自擁有各自自身的規則特性，UV 向曲線對稱，還需要『互相平行』的掃略（參考 3.1.2）。於 Rhinoceros 的 Sweep1 掃略指令，無法提供『平行掃略』的功能。並且不支援連動的功能並不適合進行 Formding。因此在此需要轉換至 3DsMAX 中。點選兩條 UV 曲線，使用 1Rail-sweep（單軌掃描）重建新的曲面並且勾選 Sweep Parallel（平行掃略）。為了增加後續操作性，取消 Transfore Degree 可以得到即時的顯示。選擇 Surface Approximation/Tessellation/High，可得到精細的表面。本案的操作過程如表 3-5。

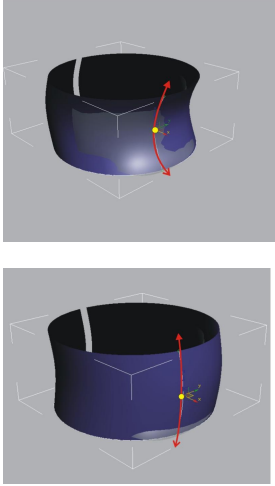
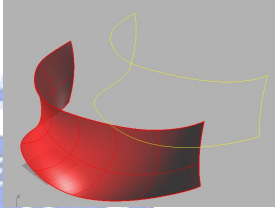
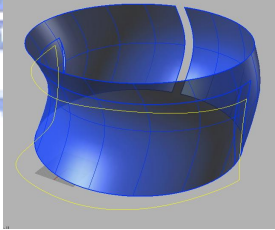
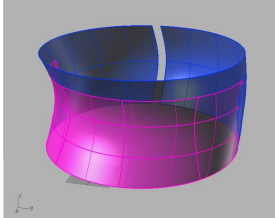
表 3-5 步驟 3 UV 向曲線生成新的 NURBS 曲面

說明	圖示
<p>選擇簡化後的曲線以及原始設計曲面轉檔至 3DsMAX 中。</p>	
<p>1Rail-sweep：本案中新的曲面構成方法為使用掃略或旋轉成形：於 MAX 中使用 NURBS 工具 LATHE（旋轉成形）或 1Rail-sweep（單軌掃描），本文採用單軌掃描</p>	
<p>在 1Rail-sweep 指令中選擇 Sweep Parallel。</p>	

步驟 4 Form Finding 及調整

為了重新逼近、接近原始的形狀，在此階段需要同時調整 UV 向上對稱的二階母線及準線曲線。在此階段需要同時調整曲面，以重新逼近、接近原始的形狀。在此階段，曲線的逼近是透過軟體上視覺化的調整，比較原始設計及新形狀的差異，此步驟並無明確的定義，以目測的方式來評斷新的曲面是否可行。進行 Form Finding 的 surface 由關鍵的 UV 向母線準線構成，而母線及準線皆為具有對稱性的二階曲線，而需要注意的是，調整不可變動曲線的對稱性質，控制點必須符合對稱軸（圖 3-28-C）。在確認曲面的特徵可被接受後，新的曲面只需要有一部份符合原始設計，接著就可以利用原始的形狀進行邊界的條件來確定形狀外部的輪廓。另外此步驟必然花費繁複的操作與冗長的時間在手工微調上。操作過程如表 3-6。

3-6 步驟 4 Form Finding 準線的旋轉以及調整

說明	圖示
<p>調整母線以及準線：調整曲線的 CV 關鍵點，準線延母線的規則轉動曲面的變化增為三維。選擇頂點(對稱點)移動，以改變形體。</p>	
<p>Pull 指令將邊界線段使用法向量投影，將線段投影至新的曲面上。</p>	
<p>透過 IGES 轉檔回 rhino 邊界條件的重塑：使用 DupBorder 指令將原始型式的邊界提出。</p>	
<p>以投影線段使用 Trim 指令切割新的曲面。</p>	

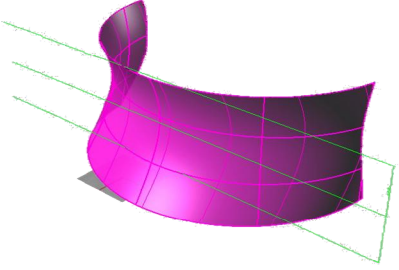
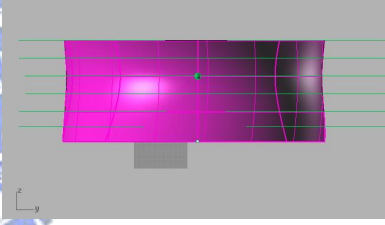
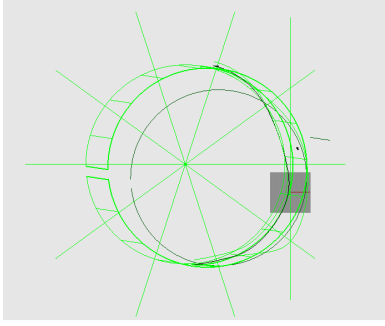
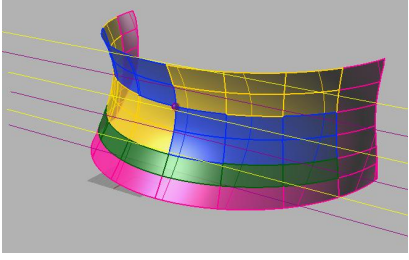
步驟 5 分割

步驟 5.1 單元分割

依據上述對稱性的原理，曲面會因為對稱的母線和準線而達到對稱，因此依照對

稱軸分割將可以得到相同的曲面單元。例如：以拋物線重繪而產生的曲面，需要自拋物線的頂點做為主要分割，分割的結果從對稱軸兩兩對稱。另外對稱軸的選擇，盡量使用水平向、垂直向以符合原始設計的構造。因樓版的構造關係，部分是成水平狀，因此造成了良好的切割線段，所以本案以水平的邊緣為分割線段來作為切割放樣線的基準。(圖 3-27)本案的操作過程如表 3-7。

表 3-7 步驟 5 單元分割

說明	圖示
於垂直向以對稱軸為不可移動的中心點等距偏移，上下界線固定後固定後再等分細分間距	
先沿著對稱軸的頂點畫出對稱線，再使用 Section 指令，將新的曲面分割	
於水平向延橢圓的軸向做旋轉線分割	
新形式完成，其模矩化的程度於 3-3 討論。	

步驟 5.2 邊界問題分割策略

分割的方式除了依照曲面單元分割，有原始形狀的邊界、輪廓分割。而單元分割的尺寸若太大將會使得邊緣的單元被輪廓切割而使得重複的單元減少。因此儘量縮小單元的尺寸，將可以更顯著的增加重複單元的數量。分割會產生下列兩個問題：

1 邊界問題：造成因邊界的不規則，在自由曲面的分割中，分割的方式除了依照曲面本生的規則以及形式外，尚須要有原始形狀的邊界、輪廓。而邊界與單元大小的比例會造成邊界問題，影響著分割好的單元的完整。如下圖所示。若規模夠大，單元對邊界的比例夠小，將可以更顯著的增加重複單元的數量。(圖 3-26)

2 選擇有規律的線段作為分割線段：原形狀的原邊緣，因樓版的構造關係，部分是成水平狀，因此造成了良好的邊界條件，所以本案以水平的邊緣為分割線段做為切割放樣線的基準。(圖 3-27)

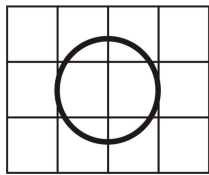


圖 3-26 邊界單元大小

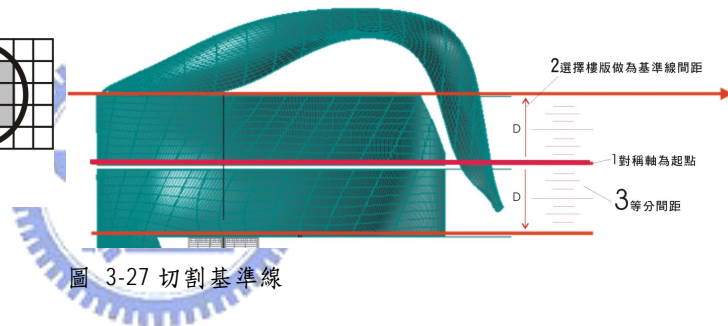


圖 3-27 切割基準線

步驟 6 特徵重繪與構造調整

為了使之與原始設計形狀更為逼近，我們利用無法被模具化的單元，將他視為曲面可自由調整的部份，對於這些部份切割，以原始設計的曲面取代。因為部分切割好的單元與曲面的輪廓衝突，這些無法被合理化，因此無關於模具化，因此再這一部份，可以視為曲面可自由調整的部份。為了使之與原始設計形狀更為逼近，因此對於這些部份切割，以原始設計的曲面取代。操作過程如表 3-8。

若採用原本的外牆支柱主結構，對應在外覆的帷幕皮層時，兩者結構線的走向會完全不同，因此可以採用：主結構與外皮脫開，而兩者之間採用二次結構接合，可採用球形接頭、萬向接頭。(圖 3-28)

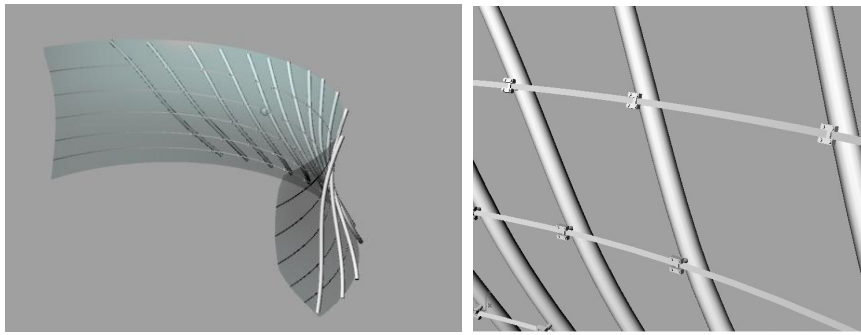
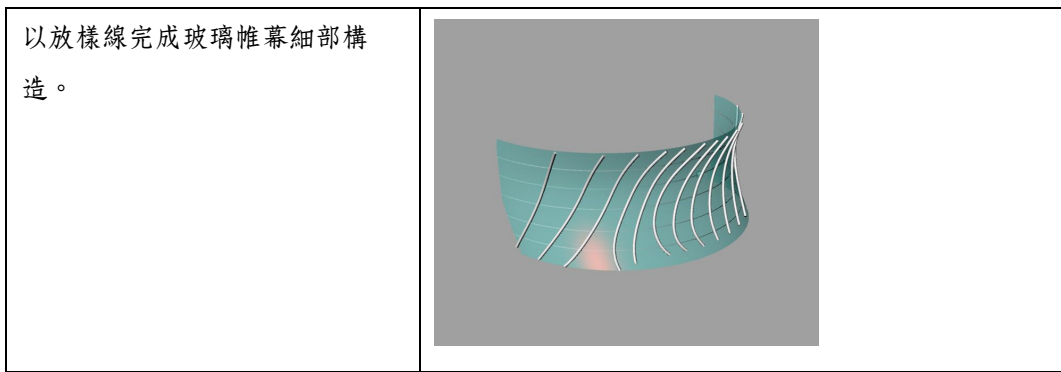


圖 3-28 主結構，次結構

表 3-8 步驟 6 特徵重繪過程

說明	圖示
<p>擷取原始形狀的邊界：使用 DupBorder 擷取幾何的邊界。</p>	
<p>原始形狀邊界與可模矩化曲面做銜接：使用 BlendSrf 在兩個曲面之間建立平滑的混接曲面。</p>	
<p>以步驟 5-1 中的分割線段重新以 Trim 分割。其結果於 3-3 討論。</p>	
<p>單元邊界提出作為玻璃帷幕的次結構的放樣線。</p>	



3.3.階段三：分析

為了判斷此方法是否可行，需要對上述方法得到的結果進行分析以瞭解單元間是否連續光滑，單元有多少重複，使用此方法更改了多少設計？評估的項目如下。經過以上步驟的介紹本研究希望，在最小限度的改變原始設計的形體，同時保持自由形體曲率連續而且光滑的特性的條件下，藉由曲面的對稱規則增加重複的表皮單元數目。因此以下對相似度以及模矩化的檢討。

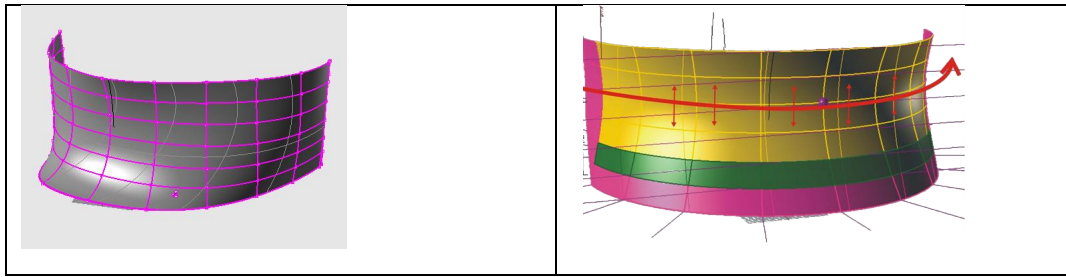
3.3.1 數位測量與分析

單元數目及單元連續

原本對幾何生成方式，衍生對稱的幾何，因此產生了對稱的表皮單元。原始的形式是由對稱的母線及準線（兩者皆對稱）所掃略（sweep）的衍生形狀，沿著母線所對稱的單元，其表面單元若經過規則化的分割，則會產生對稱並且完全連續的表皮單元。於本案例中單元的數目減少為原來的 54%。其中可以模矩化的單元，可以兩兩成對，成對的單元面積大小完全相同。（表格 3-9）

表 3-9 新舊單元數目及連續性比較

原始設計單元	新形狀單元
皆無法分割為相同，共 53 塊。	相同的單元：24 塊、對模矩 19 塊無法模具化 無法模具的原因：因邊界問題產生 19 塊 因被排除在對稱條件之外：11 塊



在此曲面光滑的程度可以使用 Zebra 斑馬紋在曲面或網格上顯示分析條紋檢核。由圖可看出斑馬文連續的型態，各條紋之間並無斷層與條紋集中的現象，因此可以判斷：單元彼此的接續達到曲率連續 (G2)，曲面的單元呈現為光滑而且連續的曲面。(圖 3-29) 原本對幾何生成方式，衍生對稱的幾何，其表面單元若經過規則化的分割，則會產生對稱並且完全連續的表皮單元，因此產生了對稱的表皮單元。但，對稱的表皮單元，如同鏡射一般，大小相同，方向相反，雖然幾何性質一樣，但終究並非相同的單元，所以在幾何性質的尋找上，單元必須擁有大小相同，方向亦相同。因此如果是母線及準線兩者皆對稱，所衍生的形體，將會帶有雙對稱性，簡單的說：對稱兩次，則經過分割後，分割單元會完全相等並且邊界以及曲率連續。(圖 3-30)

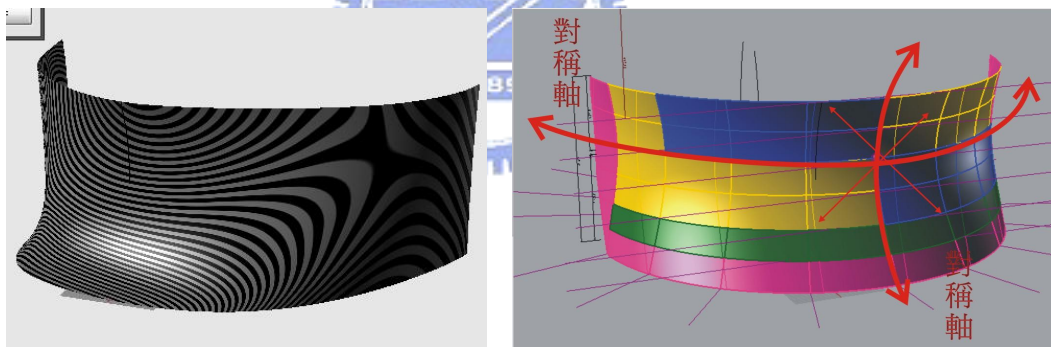


圖 3-29 (左) 連續性：(G2)曲率連續。 圖 3-30 對稱軸分佈

相似度

經過以上步驟對曲面做重新計算的步驟後，將可以得到與原始設計形體相近的新模型，模型本身將與原始形體不一樣。當合理化的模型被定義來滿足新的幾何規則，原始設計自身的幾何條件就一部份的被捨棄掉，這是這樣的結果無法避免條件與結果之間的競合。事實上同樣的幾何條件的去除與重塑，同樣出現在 2003 年 Sheldon 提出的平面四邊行網格方法中，提出的幾何演算方式：利用兩組 UV 向的母線以及準線掃略成形，逐漸逼近原始設計形狀，同樣直覺的，調整控制線段。本文中的方法是根據此研究就衍生而來，同樣依賴直覺化的調整，因而條件與結果之間的競合，依然成

為必要的條件。但是不可能一味的只求模矩化形體，我們需要盡量維持與設計形體相似。調整依賴直覺，但有多少細節被捨去？與原始設計有無相符合？這個問題使得度量相似的程度成為這方法是否可行的重點之一。而度量相似的程度該如何被定義？調整形狀時是以直覺的調 NURBS 的結構曲線來定義逼近設計形狀，直覺的調整如何定義相似度，如何主觀的條件如何化為客觀的數據以供評估。因此本研究定義相似度，提供一組可供評估的條件來做檢核，其中主要分為面積大小、形狀以及曲面條件。以下定義相似度。

(1) 尺寸：面積大小的接近，是判斷新舊形式是否接近的最基礎條件。這區分相似以及類似的不同。相似擁有相同的形狀；形狀相同但尺寸縮小，這在幾何上稱做相似。但此方法的評估值需要定義大小關係一樣，作為真實的設計模型尺度的確定。使用查找面積的指令 RHINO 中使用 Area。（表 3-10）

(2) 形狀相似：將新的曲面投影在舊的曲面上，比對兩者互相對應的點之間的距離相對偏移值。這個定量測出的是形狀間的關係，會顯示出新的曲面上有哪些地方的特徵或細節被捨棄或更改。而此測量是跟整體形體的相對值，測量的值必須換算成為比例關係。形狀相似的測定：在 RHINO 中使用 PointDeviation。（圖 3-31）

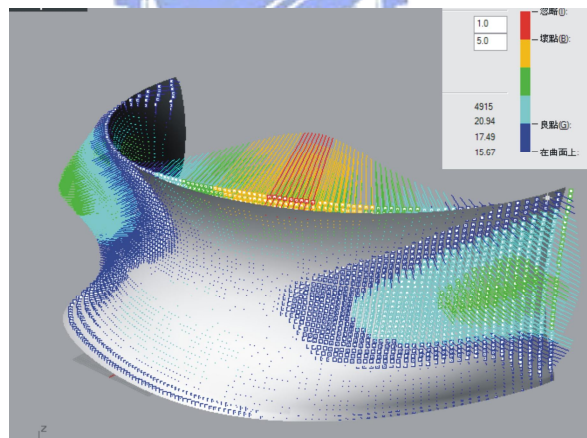


圖 3-31 曲面偏移量

表 3-10 曲面相似度比較

面積	偏移值
原：2266829 cm	平均距離: 17.4852 cm 標準偏差值: 15.6658 cm
新：2273601 新形狀面積大小為 100.4%	偏差值 17/755= 2.25%
	最大距離: 72.8582 cm 偏差值：72.8/2836cm = 2.57%

(3) 曲面階數條件：曲面條件為曲面的階數 Degree 是否為 2 階以上曲面；而影響曲面單元之間的連續性是否連續。例如三角面的方法，偏移量很小，曲面若設定 2 階連續性條件為評估條件時，但因為三角面為平面，其階數為 1 需要將它曲面視為與原始形體不相似。而這個量值是以主觀的感受為主。

透過 Form Finding 的計算，帶有對稱性質可被模矩化的幾何形體產生，這時其面結構特徵，大致上是相同的，在確認曲面的特徵可被接受後，透過以上的檢核，設計者可以更客觀的瞭解曲面與原來設計的差異程度而判斷新的形式是否合理。依據以對設計模型重新進行比較分析可得到下列關係。可以客觀的得知新的模型與原始設計十分的相近。

3.3.2 CAD/CAM 流程分析

以下 3 個 CAM 模型代表設計發展的過程分析，用『先期 CAD/CAM 設計與建造流程』（圖 3-1），當作分析分析的重點，以檢視流程與本研究之間的關係。

早期設計模型

CAM 實體模型適於設計概念發展的形體之後，目的是在檢視『3d 主要模型』實體建造的可能性以及合理化。CAM 實體模型首先研究曲面骨架的形式，切割模型的骨架，利用 CNC 雷射切割骨架作為媒材與結構技師檢核結構的合理性。並且在屋頂曲面的皮層採用 RP 輸出 ABS 材質的曲面模型來檢視表皮的设计。（圖 3-32）此階段的模型同時研究表皮與骨架同時組構的複合型態。



圖 3-32 早期設計模型

設計主要模型

經過上述的檢視與調整發展『3d 主要模型』，最後使用 RP 設備輸出的 CAM 實體模

型。(圖 3-33)此階段的模型較上一步驟的模型精確。此階段的玻璃帷幕縮減為一到二層樓，構造的系統明確的區分出骨架以及表皮的设计方案。在玻璃帷幕採用圓鋼管為骨架已配合設計形體的自由曲線，並且對於玻璃帷幕進行第一步的合理化，曲率分析順化曲面。另外曲面玻璃的分割方案，與 Bently Micostaion 技術人員合作，發展撰寫自動化的運算程式，希望可以有效的透過玻璃曲面的分析運算，以降低曲面玻璃的造價。但是由(圖 3-37)分析可以發現玻璃曲面的分割方式，是配合原鋼管的走向來分割，曲面玻璃並無法有效並且準確的達成規格化的目標。

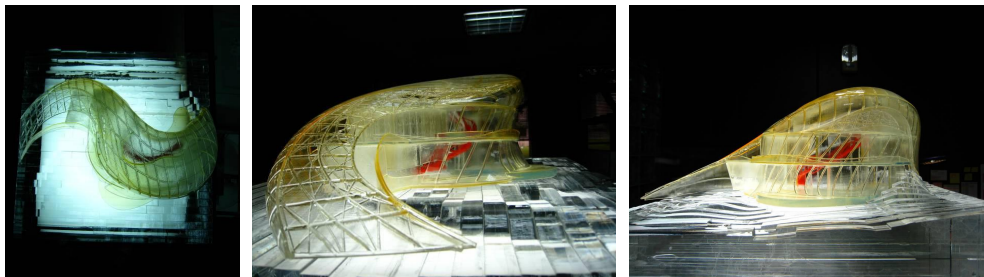


圖 3-33 3D 主要模型輸出之實體模型

本方法合理化後模型

RP 實體模型用於設計流程的檢視。除了依據 3-3 曲面分析的結果外，可確定單元的大小與模矩化的程度外。在實際合理化與設計者溝通的過程中，RP 實體模型扮演主要溝通的媒介。在此階段本研究檢視合理化後的模型 1、模型 2、模型 3(圖 3-34 左)確定實體模型與『設計主要』模型的差異，以及檢視本方法位於設計流程的定位。藉由此，達到除了技術上問題解決的對策，更幫助檢視本方法對於設計流程的幫助。

以 RP 為媒介的模型，在設計過程中的檢視的最主要項目是配合設計者的概念以及想法。由工程的問題延伸至設計流程中。因此，本方法因為調整而不可避免的調整與更改，設計者是否可以接受成為最重要的一點。由下圖可知：模型 1、模型 2、模型 3，此三個 RP 實體模型分別代表本方法操作的階段，其修改的過程可以看出本方法的推移。

模型 1: 是『3d 主要模型』是最原始的設計。首先模型 1 於原始設計中的玻璃分割採用完全曲線的分割法，曲線的分割呼應設計概念的書法線條，強調筆勢的流暢與東方色彩的韻律。尚未經過本法的操作

模型 2: 為本方法操作的階段模型，而在分割上已經達到單元減少的目的。但是模型 2 是本方法在步驟 1 至步驟 4 的調整方案，經過可以看出邊緣部分，與原始設

計相差較多，玻璃曲面的外觀雖然近似，但有許多的細節被捨棄掉，而偏移量上也較大，無法配合玻璃外牆的圓管柱子，因此在設計修正的討論上，並不為設計者所接受。

模型 3：為最後合理化對應步驟 7 的模型。由於基於設計者要求，盡量保持與原始設計相近，因此對於本方法無法模矩化的部分，捨棄不用，改採以原始設計的邊界配合之。最後的修正模型，與原始設計十分相近，並且避免了於方法步驟 5 中的邊界問題，利用無法模矩化的邊界單元所佔的空間。在曲面單元的分割上，此階段達到了簡化單元的目的並且最小尺度的改變了原始設計。因此在進行模型的檢視時，需要特別注意邊緣的性質。(圖 3-34 右)

CAD/CAM 流程小結

經過以上的分別代表各個討論流程的模型後，本法探討的過程可以放大到 CAD/CAM 的流程。本方法的位於先期數位流程中，會橫跨『設計發展』與『細部設計』階段。由於 Form Finding 會改變原始設計，所以必須於設計發展過程的『3D 數位模型』來回修改，並且使用 RP 實體模型作比較，以瞭解其相似的程度是否可被建築師接受。而到細部設計階段，於步驟 5 的分割單元，直接輸出表皮單元的模型資料。其流程詳(圖 3-35)。



圖 3-34 (左) RP 實體模型 (右) 特徵重繪處比較

圖 3-35 表皮合理化流程應用於『先期數位設計建造流程』

第四章 結論與貢獻

本研究討論如何改進自由形體表皮製作，提出分割表皮幾何的方法並且將流程整理為可以應用的 CAD/CAM 流程。其結論、限制條件、未來研究等細項於下詳述之。



4.1. 結論與貢獻

自由以及更動態的不規則曲面造型因為數位媒材作為設計思考的媒介，解放建築師思考的框架，而成為數位時代的基本語彙之一。以往無法想像的空間形式與造型，藉由 CAD/CAM 電腦輔助之下，數位製造的可能性使得實踐想像不再是一種宣言。

本研究探討 CAD/CAM 技術應用於自由曲面的分割方式，改進現有合理化不規則形體的方法。在現有方法中，建造者將形體直接使用 CNC Milling 翻模製造將會使得成本過於高昂。而三角面法以及四邊面法，則很大程度的犧牲掉的自由曲面光滑且連續的美感元素。因此本文企圖尋找可以折衷的辦法。藉由模矩化來減少單元模矩數目，並且同時考慮曲面必須光滑條件作為本研究的幾何上的限制，以達到時兼顧美學的要求以及施工的方便。

本文依據既有的理論，加以改進，提出簡單且實用的幾何原理，並且詳細解釋。另外在操作原理的說明避免涉及過於繁瑣的軟體操作，『3-1 幾何方法原理』中對方法的說明提出整體的概觀，使製造者易於瞭解。而在『3-2 步驟演練』對機械性的操

作本文亦提出較細部的說明。

此外由於實際的操作 CAD 的過程，複雜而且繁瑣，因此本文依據幾何方法整理出步驟 1~步驟 6 個步驟，完整的檢附操作的每階段的原理以及所應注意的事項。並且藉由正在直行的案例，實際操作。在操做的實際案例中，使用此方法產生的新表面會擁有光滑的表面和重複的單元，原始設計的表皮單元數目節省 1/2 的單元數目，而且單元間的曲率是完全連續的，但此方法會改變一些原始設計的形狀。以下分述之：

模矩化重複的單元：透過原理所示本文操作的流程步驟 1-步驟 6，用於簡化形體的單元數目。如果用較小的分割避開曲面的輪廓，將可以得到單元最高的重複程度，最多曲面單元數目減少至原始設計 50%。（表 3-9）

光滑的單元分割：自由曲面的表皮單元可以得到光滑的表面，而非多面體的呈現，本研究可以得到平滑而且彼此連續的單元。（圖 3-30）

評估原始設計改變：使用本方法會產生出新的近似形狀，其結果必然與原始的設計不同，因此要瞭解改變的設計是否可以為設計者接受時，必須藉由相似度的評估方法來瞭解改變的程度是否為設計者所接受。（表 3-10）提出兩個測量設計相似程度測量的方法，分別為單元數目的檢討和相似度的探討。

生產的流程上 CAD/CAM 流程：實際操作案例時應用於 CAD/CAM 設計製造流程中的角色。除了本方法幾何原理的討論，本文來回於 Rhino 以及 3ds Max 之間頻繁的操作，操作探討每個步驟中間所與到的問題，如轉檔過程 本文加以詳細的說名。

另外在 RP 實體輸出的過程的檢視，由於本文中此方法測試過程與設計者的討論中以 RP 實體模型作為溝通的媒材，因此在 CAD/CAM 流程中本文歸納此流程作為『曲面合理化的初步流程』的初步架構。（圖 3-35）

此方法可以得到光滑而且連續的曲面，而且單元有一定程度的重複。在平面網格法與 CNC milling 之間，可以有另一個兼顧光滑曲面的外觀以及藉由重複的單元以減少製造成本的折衷辦法。

4.2. 限制

本研究定義所要合理化的必須是光滑的曲面，所以於第三章清楚限制曲面的條件，各個曲面單元之間的接續條件必須達到正切連續以上，以達到美學平滑的外觀。

同時間又必須達成一定的單元相同。這兩者的條件必區同時符合缺一不可。在後續應用時若設計者要求的條件本方法就不一定適用。而最重的假設是『光滑的曲面』，這與平面網格法迥異。雖然本研究延伸 2003 年 Dennis R. Sheldon 所提出的平面化四邊形網格方法，但是若要處理平面多面體的曲面，則無法處理。例如，設計者要求的是多面體的外觀，及不適用本法。此外步驟 5 應用於本法的切割條件亦有嚴格的限制，切割的線段必須完全符合步驟 2 中所描繪的階接曲線的對稱條件。亦即切割與曲線無法分開作業。於操作本法時必須特別注意一點。條件的嚴格限制也代表了曲面分割狀態無法擁有自由度，因此本研究方法曲面之分割不可使用特殊的 Pattern。

本方法基於由曲面的對稱特性達到減少單元數目的目標，單元成對才可減少模矩，因此基於幾何原理的限制，最多能節省 1/2 的單元數目，但無法再增加更多重複的數目。除非在步驟 2 使用圓弧作為母線，才可達到最大的功效。因此若還要增加另外更有效率的方式，還需尋找其他的演算法。

另外本方法於 3.1.1 中所假設的材料限制，也是本方法的重要條件之一。本方法以玻璃為材料，依據玻璃不可二次加工、折疊的材料特性作為前提，因此玻璃必須採用鑄造翻模製作。若採用其他材質做為單元，則本法不見得是最好的解決方案。例如，採用可以彎折捲曲的材料，木板、金屬版等等，需要另尋分析方法如：Rule surface 進行展開製作表皮單元的展開圖再彎折做單元包覆骨架的方法。

此外在本方法的使用上，應用於此案例可以得到良好的效果，但是還需要更多的實際應用與操作，以加強驗證本方法的普遍性。最後本文雖以『水墨狂草』實際案例進行操作，但此案例尚未開始進入建造施工流程，在基於因此本方法以較小尺寸的模型以及建模工具來檢核、實驗，現階段無法考慮到施工、玻璃開模時的誤差等實際尺度下發生到的問題。又本文基於 2006 林楚卿『先期 CAD/CAM 設計製造流程』所探討的『曲面合理化的初步流程』，尚需要後續實際的施工來作對『數位建構』作全盤的描述與修正。

4.3. 未來研究

使用本方法需要極繁複的流程進行操作，特別是步驟 4 中最耗時間的手動 Form Finding 過程需要長時間的評估，而步驟 2 曲線描繪與步驟 5 分割方法的互為必須的限制條件，而繁複機械化過程容易產生失誤造成不必要的時間損失。因此為了有效的減短操作步驟，未來可以發展程式化使流程自動化。而本文於 3-3 中提出評估原始設計與本方法衍生的曲面之間差異的評估基準，未來於程式化的過程中亦可以整合至

自動化的過程中。

此外本方法，是應用於『CAD/CAM 設計流程』完成後再進行合理化，而且需要在 Rhino 與 MAX 中是不同的操作平台中跨軟體的整合，本文所題簡單的幾何方法，被步驟以及軟體的限制切割至繁瑣難以操作，因此未來若在早期設計的階段即整合此方法，發展出新的建模工具用於設計前期的階段，同時整合不同操作平台，將可以使得曲面有效的使曲面直接滿足合理化的條件，操作效率有立竿見影的提升。

另外未來可討論其他的材質，由於本文的立論基礎先以限制條件最多的玻璃材質作為出發點，如果採用不同材質，雖然本方法亦可處理，但因為條件的放寬，將可尋找更有彈性的解決方案，如可彎折的材料，將可以提供一部份的延展性，可使用 Ruled surface 方法探討。

最後而本文以實際案例操作但尚未開始進入建造施工流程，在未來在本案例繼續進行時，可對後續的『數位建構』流程進行探討，包括了檢核材質的施工、玻璃開模時的誤差等等實際尺度下發生到的問題。並且在實際案例的應用中還需要更多不同尺度的實際案例作為實驗，以研究本法的適用性。



參考文獻

- Baldassini , N. 2008, Glazing Technology: the Hidden Side of Free-Form Design.
- Callicott, N. 2001. Computer-Aided Manufacture in Architecture. Oxford: Architectural Press.
- Chris, M. and Jimmie, B. 1993. CAD/CAM - From principles to practice. UK: Addison-Wesley.
- Franken, B. 2003. Real as Data. Architecture in the digital age: Design and Manufacturing. Upenn. Spon Press. pp.121-138
- Friedman, M. (ed). 2002. Gehry Talks: Architecture + Process. New York, NY: Universe Publishing.
- Gao, W P (2004) Tectonics? A case study for digital free-form architecture Proceedings of Computer Aided Architectural Design Research in Asia Yonsei
- Glymph, J., Shelden, D., CECCATO, C., MUSSEL, J. AND SCHOBBER, H. 2004. A parametric strategy for free-form glass structures using quadrilateral planar facets. Automation in Construction 13, 187-202.
- Griffith, Kenfield; Sass, Larry and Michaud, Dennis 2005, A strategy for complex-curved building design: Design structure with Bi-lateral contouring as integrally connected ribs
- Groover, M. P. and Emory W. Zimmers, J. 1984. CAD/CAM Computer-aided design and manufacturing. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-hall Inc.
- Kocaturk, T., Veltkamp, M. and Tuncer, B. 2003. Exploration of Interrelationships between Digital Design and Production Processes of Free-Form Complex Surfaces in a Web-Based Database. CAAD FUTUTE. Tainan, Taiwan. Kluwer Academic. pp. 445-455.
- Kolarevic, B. 2001. Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age. ACADIA 20. New York: Buffalo. pp. 268-278.
- Kolarevic, B. 2003a. Architecture in the Digital Age: design and manufacturing. New York: Spon Press.
- Kolarevic, B. 2003b. Design fabrication: from digital discourse. Indianapolis, Indiana. U.S.A. Bookmaster, Inc. pp. 54-55.
- Kolarevic, B. 2004. Designing and Manufacturing the material in the Digital Age. ACADIA.
- Lim, CK. 2006. A better digital design and construction process using CAD/CAM media.'
- Lindsey, 2001 B. Lindsey, Digital Gehry: material resistance digital construction, Birkhauser,
- Liu, Y. T. (ed.): 2001, Defining Digital Architecture : 2000 FEIDAD Award, Birkhäuser, Berlin.
- Liu, Y. T. and Lim, C, K. 2008 New tectonics: a preliminary framework involving classic and digital thinking
- Liu, Y.-T. 1996. Understanding of Architecture in the Computer Era. Taipei: Hus.

- Luca, F. D. and Nardin, M. 2002. Behind the Scene: Avant-garde Techniques in Contemporary Design. Basel, Boston, Berlin: Birkhauser.
- Lynn, G. 1995. Folding in architecture: John Wiley & Sons.
- Million, H. A. 1994. The Renaissance from Brunelleschi to Michaelangelo. New York: Rizzoli.
- Mitchell, W. J. and McCullough, M. 1995. Digital Design Media. New York: John Wiley & Sons.
- Mitchell, W. J. Computer-Aided Architectural Design, New York, Wiley, John & Sons. Inc., 1977
- Mitchell, W. J.:1998.a, Antitectonics: The Poetics of Virtuality, In. J. Beckmann, (ed), The Virtual Dimension:Architecture, Representation and Crash Culture, Princeton Architectural Press, New York, Pp.205-217.
- Mitchell, W. J.:1998.b, Articulate Design of Free-Form Structures, In I. Smith, (ed), Artificial Intelligence in Structural Engineering: Information Technology for Design, Collaboration, Maintenance, and Monitoring, Springer Verlag, Berlin. Pp.223-234.
- Nardini, M.:2003, Avant-garde techniques in contemporary design - New tools or new languages for the project?,
- Porter, T. and Neale, J. 2000. Architectural supermodels. Oxford: Architectural Press.
- Pottmann, H. Sigrid Brell-Cokcan, 2006.Discrete Surfaces for Architectural Design PQmesh 引用
- POTTMANN, H., LIU, Y., WALLNER, J., BOBENKO, A. AND WANG, W. 2007. Geometry of Multi-layer Freeform Structures for Architecture. ACM Trans. Graphics 26, 3. In Proceedings of SIGGRAPH 2007.
- Ruby, A. 2001. Architecture in the age of digital producibility. DigitalReal--Blobmeister: First Built Projects. Schmal, P.C.(ed). Basel. Birkhauser. pp. 206-211
- Ryder, G., Ion, B., Green, G., Harrison, D. and Wood, B. 2002. Rapid design and manufacture tools in architecture. Automation in Construction. 11: 279-290.
- Smith, A. C. 2004. Architectural model as machine: A new view of models from antiquity to the presentday. Oxford: Architectural Press.
- Steiner, R. 2003. Architecture - An Introductory Reader. The Square, Forest Row: Rudolf Steiner Press.
- Sapaun, S.M., 2005, " Concurrent design and manufacturing process of automotive composite components" , Assembly Automation, 146-152
- SCHIFTNER, A. 2007. Planar Quad Meshes from RelativePrincipal Curvature Lines. Diploma Thesis.
- Schmiedhofer ,H. 2008. Design and Panelization of Architectural Freeform-Surfaces by Planar Quadrilateral Meshes.
- Schon, D. A. and Wiggins, G. 1992. Kinds of seeing and their funtions in designing. Design Studies. 13(2): 135-156.
- Seely, J. C. 2004. Digital fabrication in the architectural design process. Master Thesis. MIT.
- Shelden, D, (2003), " Digital Surface Representation and the Constructability of Gehry ´ s Architecture." Diss. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2003

Turkiyyah, G.M ,1997,An accelerated triangulation method for computing the skeletons of free-form solid models.

Welch, W. and Witkin, A. 1994, Free-Form Shape Design Using Triangulated Surfaces

Zevi, B. 1981. The modern language of architecture: Van Nostrand Reinhold. 2.1.1 p12

李元榮, 2005. 自由形體設計與施作流程研究 (A study on the process of free form design and construction) 交通大學博士論文, 新竹, 台灣

林楚卿, 2007. 自由形體設計與施作流程研究 (A better digital design and construction process using CAD/CAM media) 交通大學博士論文, 新竹, 台灣

劉育東, 2001. 數位建築的浮現, 胡氏圖書出版社, 台北

劉育東. (ed.): 2006, 數位建築與東方實驗

邱茂林(編), 2003. 數位建築發展, 田園城市文化事業有限公司, 台北

The History of CAD : <http://mbinfo.mbdesign.net/CAD-History.htm>

Rapid Prototyping : <http://check.itgo.com>

OpenNURBS 網站 : <http://www.opennurbs.org/>

Mathworld : <http://mathworld.wolfram.com/>

