

一、概論

建築在某個層面上可看成是形體與空間的發展史。早期人類的藝術創作經常透過觀察自然界的形體及線條而獲致靈感，而在歷史的發展過程中，建築卻在落實的過程中因受限於設計表現法、建築材料、結構及施工技術，使得設計師們只能退而求其次的以有限的幾何線條來詮釋從觀察自然而獲得的無限靈感。反觀純藝術，卻不受落實條件的限制，這也就是造成除藝術與建築差異的重要因素。

過去有太多的建築師企圖解放空間並克服這種由「觀察」到「思維」的豐富性以及由「思維」再到「創作」的先天的侷限性。然而想克服這種先天的限制卻也極度仰賴媒材及新科技的發展。過去因科技的既不都使得設計師的創意能像前跨進一步。從過去文藝復興時代模型的出現，到 Gaudi 運用工藝及雕刻的手法配合大量的圓面，表現建築上獨特的空間幻覺，甚至到 Utzon 因為工業革命發展而建的雪梨歌劇院都是如此，但在電腦出現以前，其所能呈現的都還是有一定的限制。其不足的部分，都必須仰賴建築師敏銳的空間感及過人的空間處理能力來補足，然而依賴這種不明確的圓面或是空間的想像力，所能掌握量體及空間的精準度還是相當的有限。但電腦的出現所帶動的數位科技(digital technology)的快速發展，使得今天打破建築先天的限制及困境成為可能。

正如上述，數位科技在這幾年來以讓領域間的差距更小，建築也在正在快速改變中，也出現了所謂的自由形體類型的建築，國際間的作品從 Gehry 的嘗試，以及隨之而後的 Eisenman、UN Studio...等設計團隊，到近幾年的幾個成熟案子，數位科技影響建築，已經是個可見的趨勢。而這種趨勢更帶動了針對建築的數位媒材研究，其層面涵概電腦輔助設計與電腦輔助製造 (computer aided design / computer aided manufacturing, CAD/CAM) (Kolarevic, 2001, Callicott, 2001)、新媒材(Groover and Emory, 1984, Kvan and Kolarevic, 2002)、數位建築自動化 (Goldman, and Zdepski, 1990)、甚至教育的研究等，也讓這類的自由形體建築設計與製造更趨完備。這種打破形體限制的設計或是研究，在國外都已經漸漸成熟，如近幾年來台灣所舉辦的遠東數位建築獎 (far eastern international digital award design, FEIDAD) 中的各參賽建築案，都可以看見這類作品的發表。甚至成為一個新的領域(Klinger, 2001, Turkiyyah et al., 1997)，在新發表的作品中無論大型中型甚至是室內設計尺度的小型，都可以看到這些研究跟技術的蹤跡。

(1) 研究問題與目的

如上所述，透過釐路，由於全世界的這類自由形體建築中的發展，也開始影響著周遭相關的領域，包括教育、建築工業、設計等。但是台灣的建築工業長期缺乏這樣的實際案例，所以在 CAD/CAM 研究領域大都是應用在工業設計領域上，

針對自由形體建築的研究與應用，卻寥寥無幾。而建築教育上，透過解路台灣的學生可以知道這樣新興的發展趨勢，但是如何被建造組裝，確一無所知。

綜合以上幾點，也就是說自由形體對於台灣而言只是存在於紙上建築，自由形體在設計階段後，也就結束了，沒有建造的機會。這樣的情況下，台灣對於自由形體的建造過程，所需要的流程、技術、新科技、限制及問題，都是一個空白的領域，以致於當數位媒材開始影響著全世界的建築時，台灣卻只能對於自由形體裹足不前。而台灣僅有的公信大廳設計案，也只能說是一個初探，對於其正執行是否完備還有待探討。

所以本研究研究目的可分成設計建造流程及自由形體設計建造所需媒材兩方面。在設計建造流程上希望透過驗證得到一個完整的小型流程，並基於小型流程發展初步的中型流程。在新媒材上，希望透過建造過程，分析出目前自由形體設計建造所需的新媒材，以及歸納出幾類目前針對自由形體設計建造所需的方向。

(2) 研究方法與步驟

研究方法上，首先以設計建造流程而言，由於先前研究中的案例公信電子大廳設計，所得到的建築設計過程，為針對公信設計案所分析得出的設計過程，所以這樣的過程，只能被定義為小型數位建築設計的初步模型，因為公信電子接待大廳設計案僅僅在於少數的條件下：

1. 小型尺度
2. 雷射切割金屬折板與骨架
3. 壓克力熱壓成型
4. 雷射切割壓克力熱壓折版

基於上述的條件所提出的一個初步模型(Figure 3.1)，對於其不足及加入其他相關條件後的適用性，還必須經過數個案例再檢驗，才能了解其完整性。

所以本研究的第一步驟，即是挑選與公信電子大廳條件相仿的案例對初步模型進行檢驗。而為了有效控制實驗案例的可信度，作為驗證的案例必須是具有下列的條件：

1. 特定媒材的設計流程
2. 相同尺度的基地條件
3. 利用數位媒材輔助設計建造
4. 新的設計媒材或施工條件
5. 新的施工方式或材料

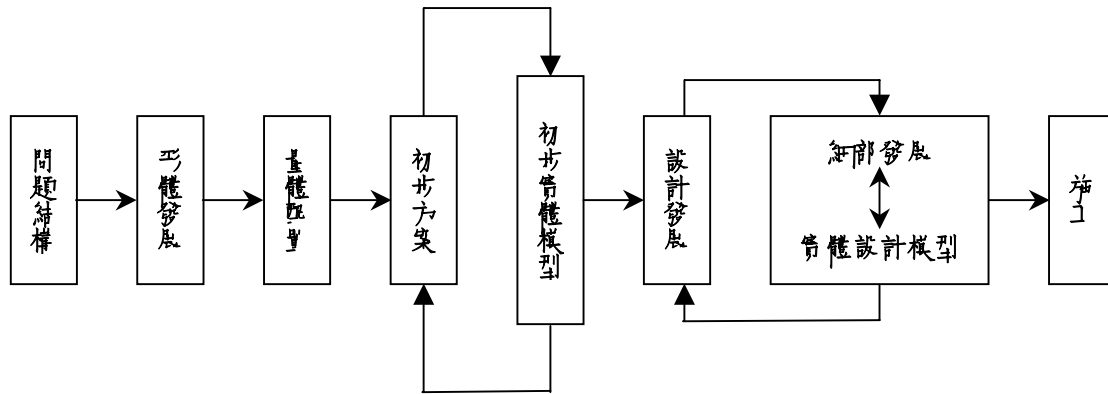


Figure 3.1 自由形體組裝初步流程

基於上述所控制的條件，本研究挑選了銘傳龜山校區新藝術中心、北美館遠東建築獎數位展區、竹北大廳櫃檯三個設計建造條件相仿的小型的設計建造案，作為驗證案例。希望透過三個案例的操作檢驗先前研究所提出的各步驟，並整合操作過程中所發現的不足或錯誤，提出一套修正的自由小型自由形體設計建造的完整流程。

而在獲得小型自由形體設計建造流程後，基於小型的設計建造流程操作一個型的案例，並獲得一個初步的型自由形體設計建造流程。在實驗案例上透過分析，大連公司深圳總部設計案，由於具有型規模並且利用電腦媒材作為設計工具，以及其所採用的材料與工法，與過去操作小型自由形體建築設計案相仿，所以便選定作為型流程發展的實驗案例。最後希望透過所發展的小型流程操作，檢驗不同尺度的自由形體的設計建造，是否已經完備，並藉由發現不足的部份，修正小型流程，獲得初步的型自由形體設計建造流程。

另外在新媒材的發展方面，則希望透過不同各種尺度的自由形體設計建造實際案例執行，探索目前各種數位媒材應用在建築上的各種可能性，及目前針對自由形體建築的發展，數位媒材有哪方面的不足，最後歸納出目前媒材所需要發展的方向。

最後，本研究透過三個小型案例與一個型案例作為研究的素材，所有研究案例，均為作者與多人共同參與。但研究的重點在於整個自由形體設計建造的流程資料蒐集，所有的取材專注於流程的問題、困難、步驟等。而研究也專注於所獲得的大量資料對於自由形體設計建造的關鍵要素分析上，至於整體設計最後的完成度及設計本身的好壞與否，並不在本研究的討論中。

二、先前研究

從人類從事設計活動開始，不斷地運用各種媒材來呈現心中的概念與想法，但時卻也受到媒材的限制而無法將創意完全發揮，工藝復興大師米開朗基羅就曾大量繪製平面立面剖面等各種圖面，想要將他腦中所設想的複雜形體描繪出來，直到實體模型的出現，米開朗基羅才開始對於空間的掌握跨進一大步，但也僅止於幾何行的以描述的傳統空間。但還是有許多的創意僅止於想像層面，因為科技及沒才的不足，最後卻仍然被迫放棄，因為想的到卻畫不出來，或是即使畫的出來也蓋不起來。

到了十九世紀西班牙偉大的建築師 Gaudi 更進一步大膽追求創意的空間形式，企圖跨越人類從思維到創作以及創作到落實間的天然限制，試圖創造出如雕塑般的建築作品(Figure 2.1)。

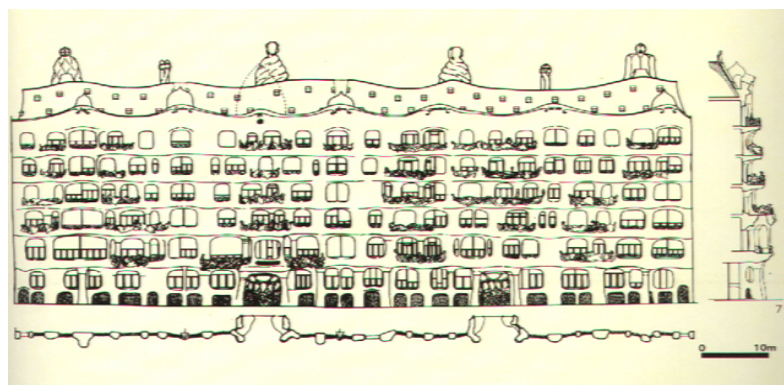


Figure 2.1 Gaudi 作品聖家堂位於巴塞隆納

為了彌補當年建築科技媒材的不足，在設計的前期，為了正確的表達他心智裡的所想像的空間，不再於往常的平、立、剖等圖面表達建築方式、他運用工藝及雕刻的手法並配合大量的剖面圖面，僅可能的表達他所創作的每一個建築空間。再者，為了確切的表達每一個創作的曲面或曲線，他必須帶領建築工人將他所畫的

圖面透過其筆施作精確的傳達他的想法讓工人可以大量施作(Figure 2.2)。

透過這樣的流程，Gadui 成功的縮短了人類無限的思維與現實建築空間的距離，但是，這樣的過程所創造出來的建築空間其實是已經不知經過多少轉折變化甚至因為無法克服的媒材技術問題而最終必須選擇妥協放棄。今日我們可以說這樣的作品除了是靠建築師過人的空間想像能力，與建築工人之間完美合作而達成之外，更是，在結合了這些妥協與放棄的結果。而這樣的結果，很可能已經犧牲了許多人類心智空間中的無限創意與概念。



a.



b.

Figure 2.2 Gadui 完工作品及施工圖

本研究著重於自由型體的發展，所以接下來在本章中，將透過數個代表性的國內外自由形體案例，針對自由形體因為不同媒材的出現，設計流程的不斷改變進行研究分析，國外案例從早期 Utzon 所設計的雪梨歌劇院(Figure 2.3)，我們看到成品與草圖的落差，到後來 Gehry 堅持將概念完整呈現而運用了電腦媒材，開啟所謂的數位時代，再到最近持續蓬勃發展的建築案例作為說明；國內則以 2001 年完成的公信電子大廳為例。

2.1 自由形體國外案例

2.1.1 早期自由形體案例——以 Utzon 為例

工業革命後，藉由數學及物理的基礎科技一日千里，建築設計也因為科技的進步，有相當大的發展，可是這樣的發展仍不足以填補設計師創意與現實的落差。



Figure 2.3 雪梨歌劇院

早期追求無限創意的建築師，如 Utzon 所設計雪梨歌劇院(Figure 2.3)，一開始的草圖猶如一幅藝術圖畫(Figure 2.4)，其充滿張力的曲線線條，優雅而自由，其所呈現的線條及區面所呈現的空間複雜度，以當時的科技幾乎無法用數學的幾何方程式來表達。以致於我們可以從設計的剖面圖的發展看到，這些自由而優美的曲線線條一再被更改，並以數學方程式可以被表達出來的近似曲線所代替；而也由於其空間複雜度太高，以當時的科技並無法處理這樣大量的空間變化。於是充滿變化的空間曲面，更近一部的被修正成為球體的一部分(Figure 2.5)，以便施工的模塊化。這樣的修正過程原因無他，正因為設計師原始的曲線一但進入建造過程之後，當時的施工技術及科技包括空間點的定位、結構、放樣、材料...等等，都無法正確處理大量的空間變化，於是所有的設計都必須被調整成具有 R 曲率的標準線條(Figure 2.6)，以降低空間再真正施工時的複雜性的，使得所有的圖面細節都可以被標準化、模塊化。但這樣的妥協卻無法真正的呈現設計師心中的創意。而這樣的科技發展，某個程度上而言也正扼殺設計師的想像空間。



a.



b.



c.

Figure 2.4 雪梨歌劇院草圖(a,b)，設計師 Utzon 利用模型檢測設計(c)

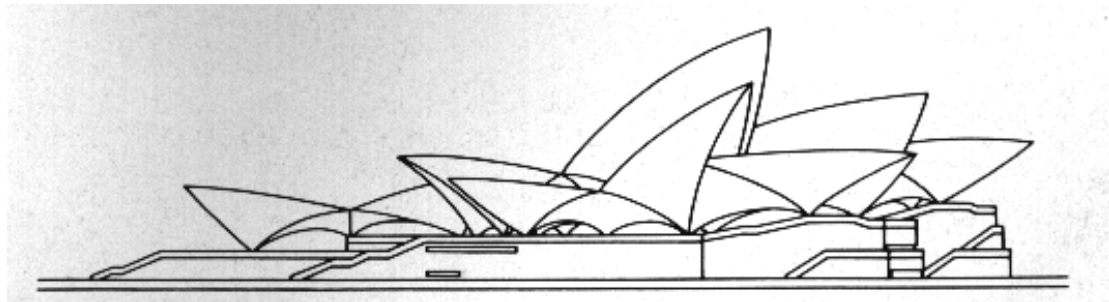


Figure 2.5 雪梨歌劇院立面圖

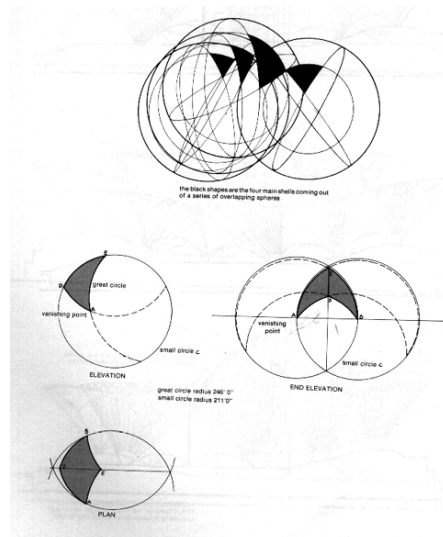


Figure 2.6 雪梨歌劇院設計發展與模型

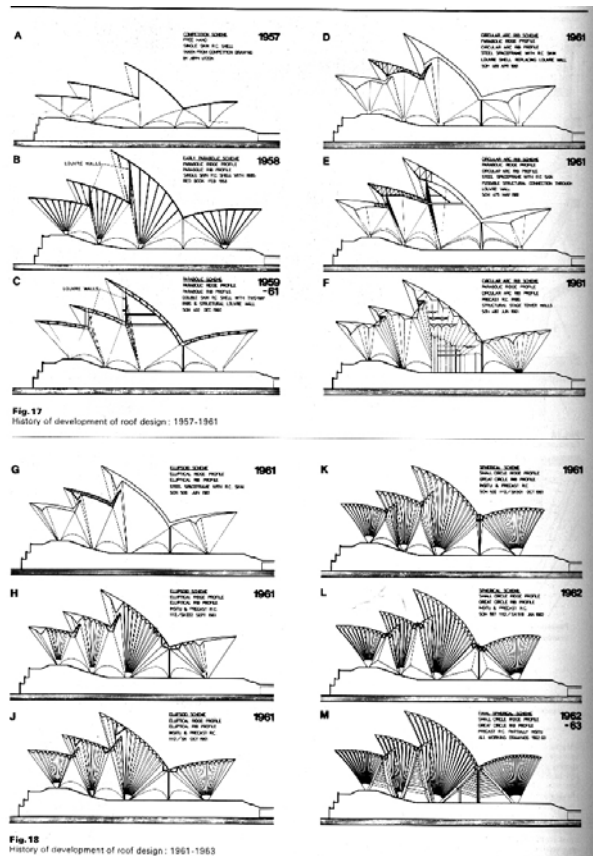


Figure 2.7 History of development of roof design: 1957-1961

Figure 2.8 History of development of roof design: 1961-1963

2.1.2 電腦時代的自由形態案例——以 Gehry 為例

解構主義之後，美國建築師 Gehry 開始從不同的角度及觀點看建築設計，他開始尋求建築的純藝術性(Friedman, 1999)，跳脫建築的傳統思緒，而開始從另一個角度看建築的可能性。在 1992 年巴塞隆納奧運(Figure 2.7)，他應邀設計一個魚造型雕塑，他捨棄接受妥協的幾何線條而開始追求充滿想像的自由曲線。但為了要完成這樣的設計，他發現過去傳統的二維表示的圖面，無法表達他心中想呈現的設計理念，於是他放棄過去建築所慣用的媒材工具，轉向尋求電腦所衍生的各種媒材在建築上的可能性。以下就針對 Gehry 在建築上所使用的新材加以描述。

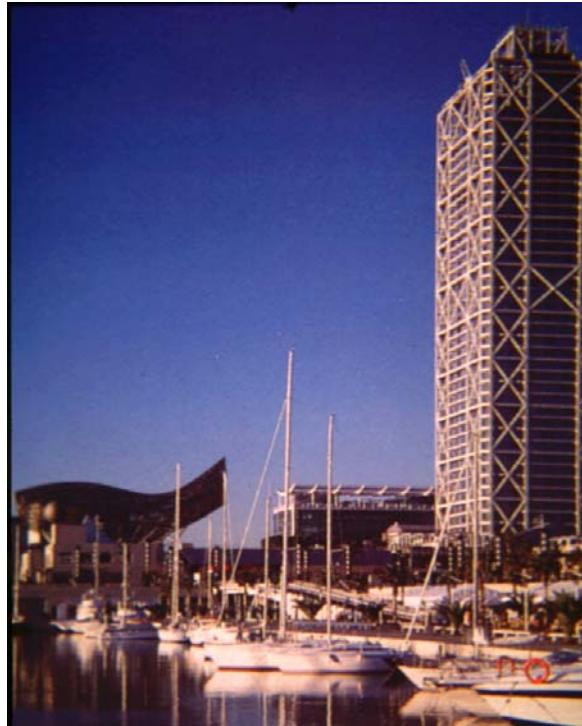


Figure 2.7 Gehry 畢 塞隆繪點雕塑

(1) 設計早期

Gehry 追求建築的純藝術性，所以他捨棄過去傳統的由平、立、剖開始的設計過程，而由物件本身的美感出發，從模型著手設計(Figure 2.8)。但是這樣的完全異於傳統的設計過程，當設計進行到配置真實的空間機能時，卻發現初步發展的設計模型，在尺寸比例上不足幫助設計師理解模型本身所呈現的複雜空間，唯一的方式就是製作一模一樣的大比例模型，於是 Gehry 在這樣的設計過程裡引用了兩樣新的設計工具 --- 電腦以及三維座標指向器 (tree-dimensional digitizer)(Figure 2.9)。透過 3D digitizer 設計師首次能獲得初步發展的設計模型 3d 數位資料，並透過這樣的資料，得以在電腦裡面重新產生數位的三維模型，而電腦裡所呈現的數位三維模型，幫助了設計師無比例限制可以縮放大小，更可以進一步了解實體模型所呈現的室內空間，並進一步修改，讓 Gehry 這樣的工作與傳統的設計過程得以操作。

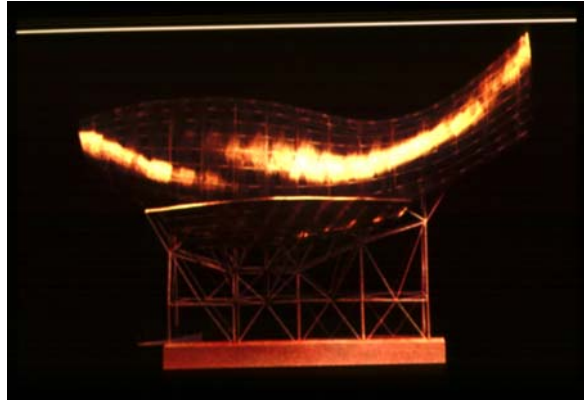


Figure 2.8 Gehry 魚雕塑模型



Figure 2.9 利用 3d digitizer 將實體模型輸入電腦

(2) 設計時期

當 Gehry 將所有的空間機能與型體都設計完成後，與一般藝術家不同的是，無論設計本身的藝術性再高，都必須落到其實的建造以及材料問題。過去傳統的設計過程，由於有經驗值可循，所以在設計進行的過程中，設計師對於材料及結構、構造方式等，都有先例可循。但像 Gehry 這樣充滿創意的空間，對於結構及材料對於建築歷史而言，都是一種新的嘗試。為了修正各種自由形態空間在結構及空間上的不合理性，Gehry 結合另外其他領域的知識補足這樣的設計上的不足，他引用造船及航空領域的軟體，進行結構力學的分析，首次由這樣的過程，設計師可以其實的檢視這樣設計的可行性與否。

(3) 施工

傳統的施作流程，由於侷限於垂直水平的空間，所以可以很容易的透過平面的圖面表達建築的定位及基準點，而材料部份，也不需要太大的變化就可以達到建築的需求，也正因為這樣的理由，過去一百年來雖然科技有極大的進步，可是建築工業卻無太大的變革。而 Gehry 所追求的創意空間，是現有建築工業所無法滿足的，為了追求他所想要的空間形式，他引用工業設計及汽車工業的各種科技，敘

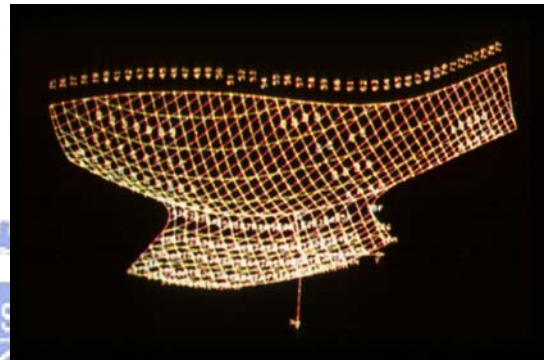
述如下：

軟體

Gehry 最終可以建造出像龐畢度藝術中心這樣大型的案子，除了硬體方面的媒材外，最重要的他引用了原本應用在航空科技的軟體“電腦輔助三維介面應用程式”(computer aided tri-dimensional interface application, CATIA)。CATIA 整合了電腦輔助設計(computer aided design, CAD)、電腦輔助工程(computer aided engineering, CAE)及電腦輔助建造(computer aided manufacturing, CAM)，所以 Gehry 在從設計到施工圖階段，可以進行各種的檢測及模擬，包括材料(Figure 2.10)與結構的分析(Figure 2.11)，甚至是單元生產及組裝的模擬(Figure 2.12)，從模擬的結果進行設計的修改，反覆進行使設計最後能落實。

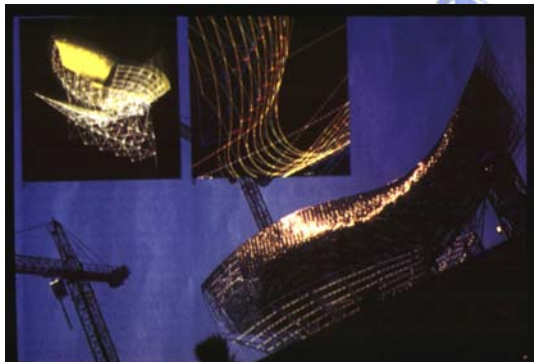


a.

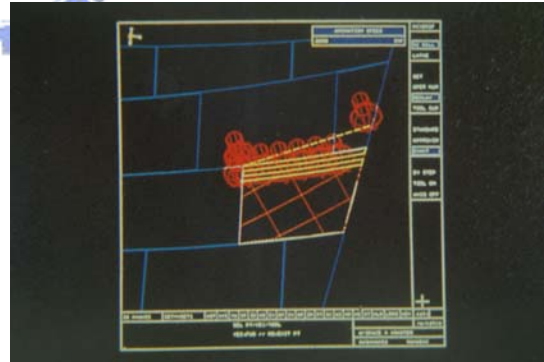


b.

Figure 2.10 CATIA 面材分析(a), CATIA 骨架分析(b)



a.



b.

Figure 2.11 CATIA 結構分析(a), CNC 單元製造模擬(b)

CNC

這樣的工具很廣泛的被工業設計及汽車工業所使用，Gehry 將這樣的工具引入建築設計的模板製造、牆面石材的加工(Figure 2.13)、金屬加工等，使得讓原本難以建造跟掌握的設計形體，可以有一套精準的施工方式可以執行。



Figure 2.13 CNC 單元製造成品

熱切割

如先前所提過的，建築設計中，所有的非方程式可描述的曲線，為了可施工，都必須以具有半徑的近似曲線來代替。但 Gehry 引進這樣的技術，於是設計中所有的自由曲線，每個曲率都有數位的資料，曲線不需要再以近似的曲線來代替，而可以透過這樣的技術，精準的被切割出來。

滾彎機

相對上述的技術，這樣的技術就是在設計晚期，將所有自由彎曲的骨架，進行分析及拆解，拆解成單一半徑的數段骨架，於滾彎成型後，再將其焊接。



2.2 目前 CAD/CAM 新發展

如工业设计或汽車製造，大量生產的主要因素就是標準化。為什麼過去的建築所建造出來的大部分的形式都以垂直水平為主？因為當時科技的因素，所能標準化的就是單元物件的形態。所以過去的建築控制的條件少，組裝標準化，建造較容易，所以也讓建築的型態的發展有了一定向度的限制。但是自從 Gehry 在自由形態的設計建造上嘗試了新的媒材之後，發現了許多新科技與媒材應用在建築上的可能性，從軟體到硬體，都有新發現。並且發現，由於這些新媒材的介入，建築所能標準化的不再是形態。透過 CAD/CAM 的技術，建築能標準化是“流程”。就像我們平日使用印表機將輸出一樣，每篇文章都不一樣，但是其過程卻是標準化。

2.2.1 CAD 早期的發展

CAD 的早期與我們現在所使用的 CAD 系統有所出入，最早是 1963 年 Ivan 所發的 Sketch Pad，利用數位化的壓力板，開始將傳統紙跟筆的繪畫媒材轉換成數

位的，這也是最早 CAD 的技術的使用，而後因應工業設計的需求，在 1960 年代開始簡單的線架構的 CAD 應用外，也開始從線架構發展以面為基礎的繪圖方式如 1970 年帶的表面建模(surface modeling)、1960 到 1980 年代所發展非均勻有理 B 樣曲線(non-uniform rational B-spline, NURBS)及到 1980 年代發展的參數設計(parametric)等等都是。基於這些技術的成熟，後來才開始發展我們今天所使用的 CAD 系統。

2.2.2 CAM 早期發展

CAM 的發展最起源於 1950 年代的美國，開始研究讓電腦自動控制機器，這樣的自動化控制系統稱為 數值控制(numerical control, NC),後來才被稱為電腦數值控制 (computer numerical control, CNC)。

在 1960 年代更將這樣的發展，進一步結合縫路，而發展了所謂的縫路結合多台 CNC 機器(flexible manufacturing system, FMS)，然後在 1970 年代後微型處理器的出現，讓個人電腦開始發展，使得原本只能在大型工作站上運行的 CAM 系統，開始研發配合個人電腦的小型 CAM 硬體。但是一直到 1980s ~ 1990s 後，CAD 在被設計師廣泛的使用後，CAM 才開始被運用在設計上。

於是由於這些新工具的引入，形體的設計上沒有了限制後，便開始有許多的設計師在設計的各種階段嘗試引用新的科技或媒材，甚至開發新的媒材如 Gehry、NOX、UN Studio、dECOEI.....等。另一方面這樣的發展也開始影響了建築教育，某些學校 Columbia、UCLA、ETH、MIT....等也專注這樣的數位發展。進而由於自由形體設計及建造上的對新科技及媒材的需求，加上近幾年來自由形體建築的經驗，使得原本在其他領域如工業設計(Jccobs,1992, Callicott, 2001, Sass, 2004)、汽車工業、航太.....等應用的 CAD/CAM 科技(Kolarevic, 2000)，也開始成為建築的一個專門的領域。而在 1990 年代開始有建築師將這樣的方式引入建築，作為製作模型的方式。而後的研究更是越來越多元。像是針對設計階段的叫喚期，如何將設計的量體實體化，透過實體模型檢視設計，而非停留在電腦上，另外還有一部分研究新的組裝方式(Gordon, 1988, Shaviv and Edna,1975);以及談到新媒材工具的研究(Goldman and Zdepski, 1990, Simondetti, 2002);由於建築的形體不再受限後，發現不論在單元製造生產階段，或是組裝階段，遠大於過去傳統建築所需要處理的資料量，但解決這樣的問題，還有一部分研究便開始著手如何從建築設計到建造過程中，將可被標準化的步驟程式自動化(Kvan and Kolarevic, 2002, Wang and Duarte, 2002)的研究。所有國外這類的新發展大致如下：

(1) 3D scanner

早期 Gehry 所使用的 3d digitizer 必須按照每個點的順序用手工的方式將數位

的資料逐一輸入，這樣的方式有其限制。也就是因為由於人工的方式太過繁瑣，以及 3d digitizer 的工作範圍有限，於是對於輸入的物件大小及複雜度就有其一定的限制。而由於科技的進步，三維的輸入裝置也有了長足的進步，使得上述的缺點都有了不錯的改善，這方面的發展可以分成幾類來說明：

雷射式掃描器

其基本的原理是透過物體被雷射光照射所反射出來光譜的不同，去分辨物體的形狀。早期這樣的技術都被運用在醫學上面，而隨著科技的進步，雷射光的成本越來越低，也就開始被工業設計的領域所引用，而也有些專注於建築藝術性的建築師也開始引用這樣的工具。不同於以往的 3d digitizer，由於他的工作平台的空間相對的加大許多，也不再需要透過人工的方式將所有的點雲資料一一輸入，加上數位式的操控，速度上及應用上，相對的自由許多。而雷射式的三維掃描器，根據使用的目的有所不同，還可分為可攜帶式的及固定式的。但他們的共同限制在於都必須在一定的距離內才有作用。

照相式掃描器

雖然雷射式的三維掃描器相對於過去，其成本已經相對的低很多，但是依然不能提供一般的人來使用，於是有了照相式的掃描器產生，這樣的掃描器利用光學的原理，透過不同的角度拍攝物體，再利用內建的程式在將平面的資料還原成 3D 的模型，這樣的技術，只需要數位的照片資料及可以獲得 3D 的模型。不需要太多的昂貴設備及可使用。使用時也比較不需要考慮到物件的大小及距離。

空間掃描器

基本原理跟前面的沒有差太多，主要的不同在於能掃描的範圍。空間掃描器是以建築的角度，進行掃描的。也就是建立一個空間的三維資料，這樣大範圍的掃描技術，是剛被開發出來不久，且精準度較過去的照相式的高，但是也有其缺點，其缺點在於當物體有前後關係時，背後的物件會被前面的物件所遮蔽，這樣的缺點讓在掃描建築物時，許許多多細節都無法被呈現，必須配合小型的掃描器，才能獲得完整的三維資料。

早期透過三維雷射掃描器，Gehry 將其應用在設計的量體數位化上，由於 Gehry 的設計方式是從實體模型先進行，等到設計接近成熟階段，再用掃描器將模型的所有三維數位資料，轉換成電腦可辨識操作的數位模型，然後進行細節設計，最後進行結構分析。而大型的空间掃描器，由於是最近才被開發的技術，所以應用上還不多，有部分的人將其應用到歷史建築(Tang, 2001)數位資料保存，透過三維資料的建立，可以將隨著時間耗損的元件再次復原。雖然最近有些研究(Liu, 2004)也曾經利用大型的雷射掃描進行類似的工作，不過這樣的媒材除了 Gehry 外，尚未有新的研究其應用在建築上的其他研究產生。

(2) 快速成型機

其基本原理，像是影印機一般，將模型分割成無數個連續的斷面，一層層的疊輸出。早期的快速成型機((rapid prototype, RP)有其形體上的限制，只能做一些比較簡單的量體，形體上也較為粗糙。但現在有了新的支撐材技術，成型上幾乎可以沒有限制將電腦中的形體精準製作出來。建築原本的形式，因為科技的限制，設計上通常只被局限於垂直與水平的形式。因為當時，電腦裡面的空間形體被設計到某一階段時，如果想要根據電腦模型再製作實體模型，必須製作一些關鍵的骨架，然後再依據骨架的位置重新還原設計的形體。可是這樣的過程，對於太過複雜的形體，或是無法決定關鍵骨架的自由空間形式，難以被精準的呈現。而透過 RP 的技術，所有電腦裡所呈現的空間形式，除了尺寸上有一定的限制外，幾乎可以毫無限制的被重新被製作成實體的模型。

在 RP 尚未出現前，設計師對於自由形體的掌握只能透過先製作實體模型，然後再將實體模型透過三維的掃描器獲得數位資料進行編修。另外可製作關鍵的骨架，披覆可塑性較大的材料以掌握形體。可是這樣的方式有其缺點，。這樣的操作模式有其一定的限制，在工業設計的領域中，由於設計的尺度不大，所以再次的修改顯得容易的多。但是到了尺度的尺度如汽車製造，對於真正想像中的形體則必須很繁複的修改然後重新製造，而且獲得的量體精準度也不高。

RP 出現後，不但工業設計汽車設計的領域加以大量的運用。在應用於自由形體建築設計與建造上，這部分的著墨也是最多的，因為 RP 材料本身具有一定的強度，以及其形體無限制，所以被大量的運用在模擬及研究新的組裝方式上。過去簡單的東西因為標準化，所以可以被大量的製造，而現在 RP 以及相關的周邊技術也讓自由形體開始標準化，所以相關於 CAD/CAM 新媒材及技術研究，RP 的應用及研究也是著墨最多的部分。如德國的 Streich 在 1990 年代，就利用了 stereolithography，也就是早期的 RP 開始製作模型。另外在 1997 年 Simondetti 的研究中，就提到所謂的如何利用 RP 在早期的設計上。到了 2002 年 Ryder 等人也開始跟進到論 RP 在建築上的相關運用。

(3) 電腦數值控制

如前所述，在個人電腦出現後，便開始應用在各種領域上，而電腦數值控制(computer numerical control, CNC)的技術就是這樣環境下的成果，並大量被用在工業設計的成型上，應用的機具跟範圍很廣，也由於長期的發展，已是相當成熟的技術，但也因為應用領域的不同，所以還有些研究著墨於如何改進 CNC 生產效率上(Lartigue et al., 2001)。

CNC 應用的材料也很廣，從玻璃金屬到紙、木頭類，不過 CNC 由於刀具的深度及加工的角度上是固定的，所以造型上沒有 RP 這麼的自由。而在自由形體的單

元製造上對於剛性很高的材料如金屬、玻璃難以精準加工的物件，CNC 的技術即可發揮很大的功能。CNC 運作的基本原理是讀取電腦裡可以很容易的獲得物件上 Z 軸高度，透過工具將 Z 軸的高度不需要的部分除去，這樣就可以精確的得到所有的自由型體的表面。CNC 的運用很廣泛，但在建築上大致上涵蓋：

1. 熱切割
2. 雷射切割
3. 水刀切割

數值化切割工具較 RP 佔優勢的是由於可加工各種材料，甚至石材、金屬，所以無論是直接加工材料或是加工製作單元的模具，都非常方便。使得傳統的材料運用上有更佳的彈性及變化。但由於這類的技術過去已經相當成熟，再加上 RP 的出現，解決了形體難以加工的問題，所以其針對建築建造及組裝的研究相對於其他新科技數量上少很多。在 Gehry 案例中，如甘根漢美術館，CNC 被用來直接加工石材，作為自由曲面的外牆。另一案例中——即將完成的 NY 迪士尼辦公大樓設計案中，CNC 則被用來製作自由彎曲牆面的工具，透過 CNC 先製作一個以工業泡沫當材料的模具，綁完鋼筋後，澆灌水泥最後成型。

(4) 端版

CNC 的加工技術雖然可以非常精準，但是對於材料卻相當的浪費，同時對於加工金屬及玻璃方面造價過於昂貴。而端版是一種加工金屬的技術，最早被用來製作手工的飛機製造及汽車製造。透過精準的數個關鍵的骨架，再利用機器或手工式槌打的將表面製作出來。這樣的方式優點是造價相對於 CNC 的加工方式低，缺點為加工的精準度必須依賴加工者的技巧，精準度無法被有效的控制。在國外建築案例中，金屬曲面板的應用大致可以分為兩種：

依附材料自然成型

在甘根漢美術館的案例中，外牆的金屬板使用並非預先成型，利用金屬材料本身具有一定的彈性，以及，由於尺度大，相對的曲度變化不大，所以透過直接包覆在外牆，加上結點的固定可自然成型。

金屬成型版

金屬成型板又可分為以模具支撐及以骨架支撐兩種。在相對的尺度小的情況下，金屬板的彎曲度大，所以無法利用金屬本身的韌度，自然成型。所以必須在組裝前，預先成型。但不論是用手工成型或是半機械成型，都必須有可參考的表面作為成型的支撐。骨架支撐的生產製造過程，就是不透過模具，而先組裝必要的關鍵骨架，然後依附骨架作為成型的基準，在龐畢度藝術中心六樓餐廳的案例中，就是以這樣的方式所生產建造，不過這樣的方式其精準度會因為關鍵骨架的疏密不同，而有所不同，在精準度上較難控制。相較於骨架支撐的端版方式，模具作

為支撐的方式，就相對的精準的多，但是也因此必須事先利用 CNC 加工模具，所以成本也比較高。

(5) 真空成型 / 熱壓成型

這個樣的科技是從 CNC 裡衍生過來的，主要是用來加工各種的塑膠類材料。包含我們日常生活所使用的手機、電視、螢幕.....等等。所以這樣的技術事實上早已充滿在我們生活上的各種產品上，其加工的形體，也不大有限制。但是由於一般的模具，是重複使用的，其使用的次數越高，則成本因為平均後而顯得便宜，可是對於自由形體的建築每個單元都不相同，所以所有的模具只能被使用一次，這也就是為什麼自由形體的建築造價會高的原因。

(6) 滾彎機

這樣的技術常常被用來加工可塑性較高的管狀材料，如生鐵不鏽鋼...等。這樣的方式過去通常用於加工欄杆、扶手...等，由於其加工的方式必須有一定的半徑，所以過去加工的材料，通常較為規則。但是由於設計上的需要，自由彎曲的設計越來越多，於是只要透過將所有自由彎曲的線條拆解成為一段段具有單一半徑的資料(Figure 2.14)，即可透過原本較為傳統的單元生產方式，生產加工。但是由於過去的加工可以容許較大的誤差值，所以這樣的加工方式精準度上也較難為控制，必須在現場組裝上透過校正來控制。

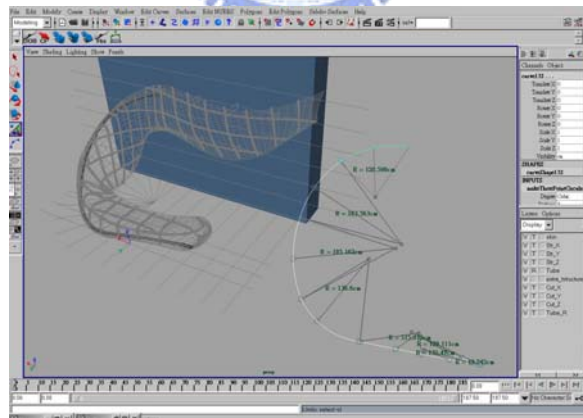


Figure 2.14 圓管加工圖拆解

(7) 軟體

自由形體的建造除了硬體科技的進步外，軟體的發展也是不可或缺的一環，早期 Gehry 於 1999 應邀在巴塞隆納建造他的第一個自由形體設計案，當時也由於它引進了新的電腦軟體 CATIA 使得他的設計可以被實現建造。而軟體發展研究的方向大致可以被歸納成以下的結論：

結構分析

過去的設計大部分以垂直水平為主，就是因為施工的能力，限制了設計的發展。但是隨著設計越來越不受二維媒材的限制，自由曲面的結構分析及計算，也開始向別的領域來探索。以 CATIA 為例，早期的 CATIA 主要被運用在航太科技上，在空氣力學上以及飛機的結構上也多所琢磨。後來就被借用到建築的結構分析來。另外還有一些軟體，除了本身領域的運用外，還針對建築上的運用開發了新功能，如 Pro E、Alais StudioTools...等都是在原本的架構下加入了針對自由形態建築設計的結構分析及設計。還有一部份甚至針對設計的早期而設定開發，如 3D VIZ、ArchiCAD 等等都是。

材料分析

隨著設計的多元化，材料上的運用，也隨之越趨多樣。甚至過去我們所熟悉的舊材料也有新的用法。過去在工業設計中，每樣產品在設計過程當中，原本就會對材料進行分析，包括加工方法、材料限制、材料強度...等。建築也將這些在工業設計領域材料處理經驗，轉為建築的新材料。

三角化曲面展開

國外有一部分的研究 (Turkiyyah et al., 1997) 著眼於如何用三角面來取代近似的自由形態。透過三角面的做法，可以將造價大幅度的降低。也可以在設計初期，就利用三角面攤平的方式，輸出模型。如 Form Z、就有這樣的功能。專為紙模型設計開發著名的 Pepakura Designer (Figure 2.15) 甚至可以設定展開的方式。但是這樣的過程落實到單元生產在幾方面卻顯得不足。首先三角面材在單元製造的過程需要每一片面材的角度，可惜目前所有的軟體，卻無法紀錄及輸出這樣的資料。再者，目前的軟體，都是利用內定的設定值，作為展開及三角化的方式。這樣的方式，輸出組裝後無法辨認每一個特定的單元，造成組裝上的困難。所以這方面還急需進一步的開發。

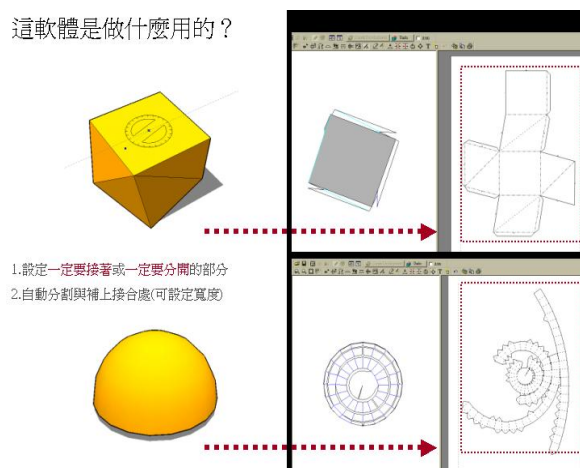


Figure 2.15 Pepakura Designer 三角面展開

面材最佳化分析

不論多先進的科技，以及建造工法多麼進步，經費及造價上總是必須被掌握的。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，在不叫儘量找到模具化，以降低成本。這樣的想法基本上有幾類：

1. 透過分析讓所有的面材都可以用幾套模具組合運用後，都可以涵蓋
2. 透過微調設計，將所有的面材模矩化
3. 透過分析，用一套模具涵蓋所有的曲面

曲面展開

在自由曲面部份，並非是所有的物件都可以被開模製作。大型的自由曲面，這方面的限制更加顯著。在工業設計 UG/NX、SolidEdge、ProE 等都有這樣的功能 (Figure 2.16)。透過電腦的分析，建築尺度的自由曲面也可以透過 2D 加工的傳統工具，達成自由曲面的效果。

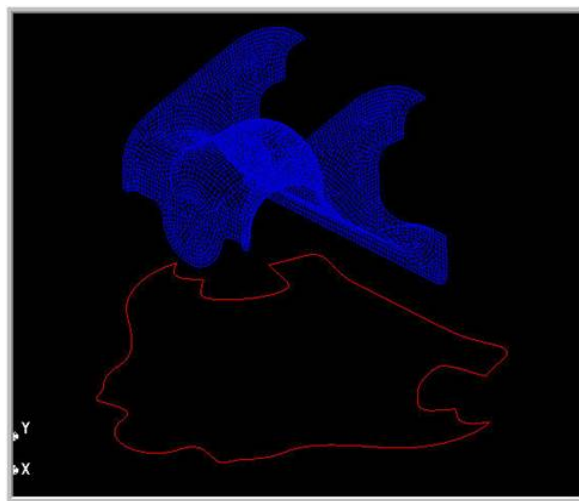


Figure 2.16 Solid work 自由曲面展開

後段 CAM 單元製作的模擬

單元製造叫，往往會發生在設計叫無法預期及估計的錯誤或問題發生，但是由於 CAD/CAM 近年來在工業設計叫緊密的結合，於是在設計的軟體叫，發展了模擬材料性質及生產過程的功能 (Figure 2.17)。透過這樣的功能，除了在設計過程叫，可以檢視結構及材料的合理性外，更可以進一步，檢測單元生產的合理性。也可以在未進行單元生產前，將可能發生的問題降到最低。

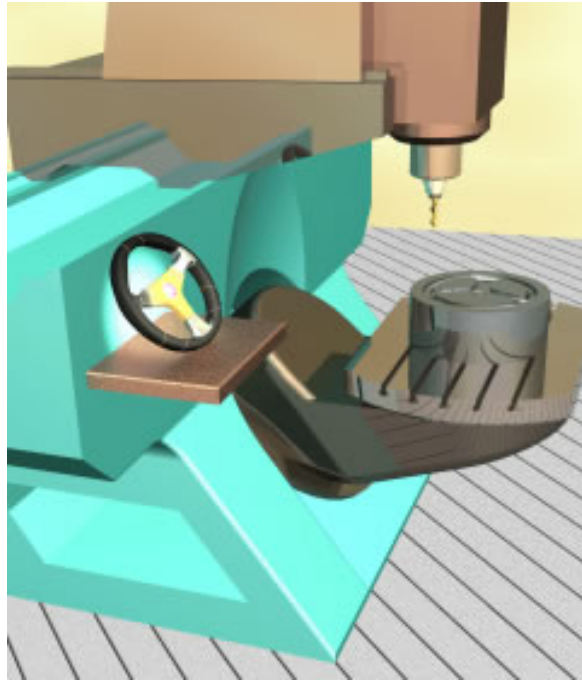


Figure 2.17 UG/NX CNC 加工模擬

新硬體的開發

除了探索別的領域，尋找適合自由形態建築設計及製造的新媒材外，畢竟由於領域上的不同，所需要的媒材，也會有些許的差異，這些差異已有些研究著重在這部分上，如針對設計早期的工具，為了使設計工具更視覺化實體化開發的實體塑模工具，讓設計師在設計進行時，不透過滑鼠，而用更接近傳統設計的實體模型進行設計。另外，還有在單元製作後期，過去使用磨具製作單元式應用在工業設計的領域上，由於要求的精度相當高，模具必須被一再的重新製作，但建築上使用模具的單元製作相對上並不需要那麼高的精度，如果模具可被重複利用，則成本可以大幅度的降低，MIT正在開發這樣的工具，使得自由形態的建築造價不再高居不下。

2.2.3 其他領域相關新工法架技術

(1) 硬殼/半硬殼式機體構造

硬殼式機體構造(monocoque construction)是一種構造飛機機體構造的方式。捨棄過去利用骨架將機身結合在一起的方式，透過隔框(Bulkhead)、縱桁(Longeron)、蒙皮(Skin)、型條(Former)，形成完整的構造，由蒙皮承受大部分的結構力。這樣的好處可使機身內的空間不需具有支撐，進而可以獲得更多及完整的空間達到 50%。而這樣的設計卻有個缺點，也就是其平均偏差(mean variation, MV)太高而無法解決。後來也就出現半硬殼式機體構造

(semi-monocoque construction)，這也是目前機身所採用最多的構造方式，透過增加機身內空間的支撐，雖然犧牲掉 25% 的空間，但卻在 MV 上有極大的改善。

(2) 有限元分析法

有限元分析法(finite element method, FEM, finite element analysis, FEA)是將結構離散化，用有限個容易分析的單元來表示複雜的物件，單元之間通過有限個節點相互連接，然後根據變形協調條件綜合求解。由於單元的數目是有限的，節點的數目也是有限的，所以稱有限元法。雖然有限元的概念早在 40 年代就有人提出，但由於當時電腦尚未出現，它並未受到人們的重視。在 60 年代發展起來的是種新的數值計算方式。隨著電腦技術的發展，有限元法在各個工程領域中不斷得到深入應用，現已遍及宇航工業、核工業、機電、化工、建築、海洋等工業，是機械產品動、靜、熱特性分析的重要手段。而 FEM 的分析方式還在不斷的進步並日趨完備。

而於過去沿用材料力學、理論力學攻勢來進行設計建造的分析及計算，由於簡化許多條件，因而計算精度很低。結果使結構尺寸加大，浪費材料，有時還會造成結構性能的降低。這種方法靈活性很大，只要改變單元的數目，就可以使解的精確度改變，得到與真實情況無限接近的解。也就是各領域捨棄傳統的經驗類比將設計理論設計真正落實。所以透過 FEM 的分析方式可以達到

- 縮短設計和分析的迴圈周期
- 增加產品和工程的可靠性
- 採用優化設計，降低材料的消耗
- 在製造或工程施工前預先發現潛在的問題
- 減少試驗時間和經費
- 縮短工程時間及經費

這也就是各個領域——包含航太工業、汽車工業等採用這樣的方式後，有重大轉變的原因。

2.3 自由形體臺灣案例

從 1990 年代開始，我們可以看到國外建築上發展的各種案例。但反觀台灣，目前台灣是世界上十分重要的高科技生產國與輸出國，但台灣的建築以及它的建築工業卻從過去的三十年來卻沒有太多的改變，相較於台灣高科技的工業環境，切切實實的表現出建築工業的落後。

而台灣也透過網路資訊發達的影響，也在 1999 年開始於汐止遠東商業大樓 A 棟

三樓，進行公信電子接待大廳(Figure 2.18)設計，開啟台灣對自由形體設計建造的先例(Liu, Lee, 2002)。而這樣的設計在完成後，也開始有相關研究進行(Lee, 2001, 2003)進行研究，並進一步提出了一個小型自由形體設計建造的初步流程。而此研究為台灣首次嘗試的數位建築的案例。而此案例無論是在設計的階段，或是建造的階段，也由於是台灣建築工業上第一次嘗試，所以遭遇了需多的問題，大致上可以分為下列幾個階段來說明。



Figure 2.18 公信電子大廳設計圖

2.3.1 設計中的困難與解決

(1) 現有圖面與基地環境有相當大的差距

根據圖面資料完成的設計，傳統建築空間天花板上的管線，缺乏 Z 向的高度資料，所有的管線（包含風管、冰水管、水電等）都以現場的資料為準而解決，並無 3d 的資料留下，設計實無數位的資料可依據。基地管線複雜度高，無法掌握所有的資料，只能在現場取得無法移動的關鍵管線的高度，作為設計的依據條件。

(2) 骨架、單元的接合方式

骨架採用的是 10mm*100mm 斷面的黑鐵，對於室內的尺度而言，要將單元構件組裝，有一定的難度，此次設計，在骨架間的組裝採用凹槽交叉的方式；而骨架跟壓克力間的則決定用抓鉤的方式組合固定。

2.3.2 設計軟體的決定

(1) 對於NURBS構成的物件易於編修

此次設計的重點在於將電腦中的自由空間，可以被呈現在現實的環境中，必須考慮電腦中的自由形體與現實基地的精確度的問題，所以設計的自由形體必須不斷的在基地與電腦間不斷的修正。在評估的幾項軟體中，MAYA 對於自由形體的建

構，具有相當高的自由度。

(2) Maya 動力系統，模擬物理特性，易於對輸出單元作檢驗

電腦環境中的物件，並沒有現實環境中所應具有的物理特性，當設計進行到某一階段時，不易做建造時所需的檢驗，(如材料厚度、重力、物件碰撞等)而 MAYA 具有內建的物理系統，可以被運用作為設計的檢驗。

(3) 標注系統，易於施工

單元輸出後的成品，必須被精確的定位於相對電腦空間中的實體環境加以組裝。所以電腦中必須要生產一套為施工而製作的標注圖樣。傳統的建築圖面，將尺寸標注於平面上(XY,YZ,ZX)，無法清楚的標示出自由形體位於三度空間的單元，而 MAYA 可以將自由彎曲的表面設定成為標注的平面；換言之 MAYA 可以在自由曲面上標注(Figure 2.19)，而此點對於施工有相當大的幫助。

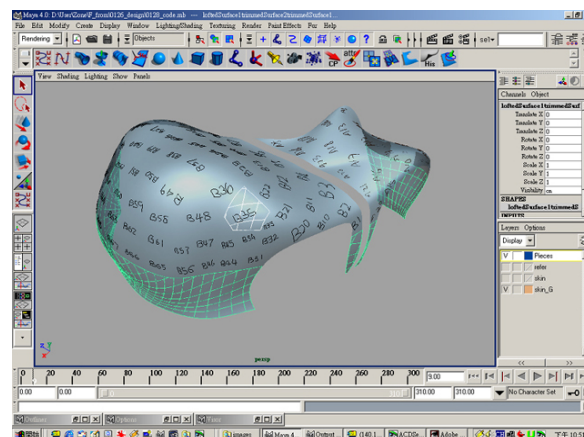


Figure 2.19 MAYA 標注系統

(4) 較佳的即時 VR 互動介面，有助於 3D 形體的掌握

電腦媒材中進行設計，最不易掌握的就是三度空間中的空間感，自由曲面的設計尤其如此。MAYA 提供了類似 VR (虛擬實境中) 操作介面介面，除了比一般可做即時彩現的軟體操作上較優越外，還提供材質、燈光等的即時彩現，使得設計更容易被掌握。

2.3.3 影響設計關鍵

(1) 電腦中缺乏物理特性，無法檢驗實際所做的困難，必須從實體模型發現問題

雖然 MAYA 可以透過某些特定的物理特性模擬，來達到檢驗設計的目的，但是

對於施做過程的測試與模擬，卻無法達到預期的要求。於是在設計進行到一特定階段，必須製作實體模型來補齊不足。

(2) 實體模型 study 時發現設計無法建造原因：單元分割方式錯誤

首次的實體模型製作，所有的單元組件為三向度的(單元組件非時的在 XY、YZ、ZX 的平面有曲度變化；換言之所有的組件無法被平豎於任一平面上。這樣的組裝過程發現，除了所有的物件在空間中並無可用的參考點以外，非時的對於組件的形狀，也無從去檢驗是否與電腦中的形體一致。再者目前並無經濟且可行的製造技術。也就是說，這樣被建造出來的東西只能“看起來像”，而無從去要求精確度。從實體模型中，知道單元的分割必須重新被考慮，這樣設計才有可能被“精確”的建造，於是根據原始的設計，重新分割單元(Figure 2.20)，所有元件必須是被控制只在一平面上有曲度變化，最後再將所有元件組合，唯有這樣才有可能達到精確的目的。

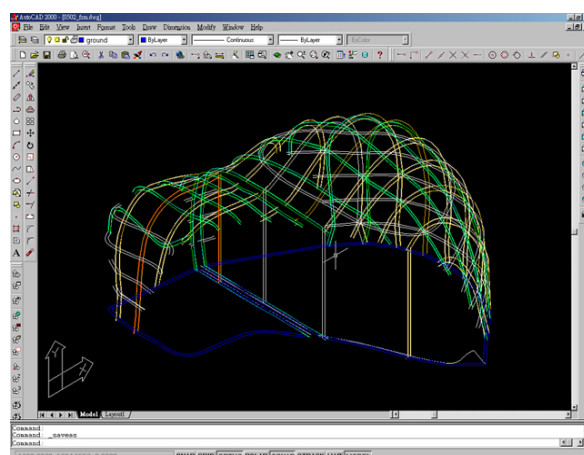


Figure 2.20 公信電子大廳面材分割

2.3.4 精準度架設計

(1) 架型架數位模型輸入輸出缺乏精準度

由本案是台灣第一次實驗性的自由形體案例，在設計過程及單元製造各方面上並無可依循的例子，在設計過程晚期，希望透過實體模型及數位模型間的互相檢視而修正設計，但由於這樣的設計方式是個新的探索，媒材上並未用到精準度較高的輸入輸出設備，所以實體與數位模型相互間的轉換，無法控制其精準度。

(2) 交卡的凹槽深度只取平均值

本案在施工圖的階段，由於並未考慮到每個骨架接點精準度的問題，所以在施工圖的製作上，採用 AutoCAD 二維的繪製方式，每根骨架所製作的卡榫凹槽，取的是骨架的同心線作為卡榫的深度，但是兩個骨架相交的凹槽並不是都在同心線

上，所以按照施工圖所製造的單元，進行組裝時就會因為施工圖的不準確，而產生誤差。

2.3.5 單元生產時的困難與解決

(1) 壓克力單元製作誤差

壓克力材質本身具有彈性，真空成形時，會完全緊貼模具表面，但冷卻後由於散熱不均及材料本身應力等因素，加上模具並非採用公母模的方式（成本加倍），最後會產生大約是3mm~8mm的誤差。

(2) 真空成形單元的誤差

目前真空成形製作的方式(Figure 2.21)，大致上分成製模、成形、修邊這三個步驟，除了製模以外，其餘的步驟並非利用機器製作，而是採用傳統人工修邊，無法控制誤差的精準度。無差甚至可達到公分級。



Figure 2.21 公信電子大廳面材真空成型

2.3.6 施工時的困難與解決

(1) 測試

骨架單元組件

雷射切割機械及黑鐵材料有面積大小的限制，所有的骨架組件無法一次將其切割輸出，所以組件輸出後必須考慮到接續後單元形狀的準確性，及焊接後冷縮熱漲的變形問題。

利用單元控制精準度（凹槽、折板大小）

以電腦進行設計並無重力及材料物理性問題，而透過電腦物理性的模擬，可以預

先知道組裝過程中所會發生的問題（如單邊懸空的單元無法站立以致無法定位），所以除了設計的形體以外，必須增加輔助建造的骨件，並透過凹槽及雷射切割的放樣地樑，來達到可建造及控制精準度的目的。

(2) 施工者架技術

除了單元製作的準確性外，現場放樣也是必須被嚴謹的控制。由於單元本身具有重量，且其相對而言的長寬比較大，所以無法靠材料本身維持垂直與水平，必須輔以雷射水平儀校正其自重所產生的變形，而目前以室內尺度的施工者而言較無這樣的概念，大部分的施工者並不要求到 mm 這樣的精準度，都還是停留在公分及的誤差為建築可接受的尺度這樣的概念，以致於影響往後壓克力面材組裝的施工精準度。

(3) 空間定位困難

傳統的建築施工，可說成是“三度空間”面”精準度的構成（如牆高 320，只要所有牆面在 Z 軸高度達到 320 公分高度即可；也就是所有的點有一個高度 320cm 的 XY 平面作為依據）但以自由形體而言，雖然所有的骨件都只有一向度的曲度變化，但是組件則必須被很精確的定位在空間中的一點，以室內尺度而言，雷射空間定位儀並非是一經濟有效的方式，所以除設計圖外，必須對單元組件的骨架增加輔助性的骨架及凹槽，如此一來只要單元本身的精準度夠高，則利用這些輔助的點及物件，空間定位自然會準確。

(4) 精準度架施工

鐵件斷面依然過小，材料產生些微形變造成誤差

在這個案例中，由於時間經費的限制，加上案子本身是室內尺度，在設計定案後，並未進行結構及材料段面的分析。所以在決定材料及段面大小，是透過經驗值來決定。由於自由形體的組裝與一般建築的經驗值不同，所以最後組裝時發現由於主要結構骨架的斷面稍小，於是在承受自重後(Figure 2.22)，發生骨架稍微變形的情況。於是造成些微的誤差，造成最後面材組裝時的不精準。



Figure 2.22 公信電子大廳現場組裝

梯廳部分長向因斷面稍小產生扭曲，重新製作折板吸收誤差

如上所述由於在結構估計上，稍嫌不足，所以造成變形，於是許多的預製的三角形折版，因為已經有誤差無法被組裝上，於是便必須針對某些折版依據現場的誤差重新製作，以符合現場的尺寸。

櫃臺上方部分區域曲率過大，超出抓勾設計的容許範圍

設計定案後，由於骨架的分割是按照垂直水平的，面材與骨架間的距離也隨著曲率的不同而有所變化，抓具是根據大部分的面材骨架距離間的需求所設計的，但是在組裝時發現有部分的面材的曲率過大，骨架面材距離超過抓具設計的容許值。所以在組裝時會產生些誤差。

單元於焊接後，會產生冷縮熱漲的形變

由於版材大小的限制，在單元生產時免不了必須要將單元分割成若干組件，所以重新銲接時必須要進行校正以確保單元的精準度。但是當所有的單元組裝完畢後，必須再次進行焊接固定的動作。如非單元焊接一樣也會因為冷熱收縮不均，而產生形變。單元可以被校正，可是組裝完後，在三度空間的定位跟校正再執行上相當困難，所以也會造成精準度的降低。

三、檢驗小型自由形體建造流程

先前研究根據實際的自由形體案例公信大樓為實驗案例，提出了一個小型自由形體設計建造過程的初步模型(Lee, 2003)。但是這樣的模型是針對公信大樓設計的個案，為了要驗證其完整性，應該再透過數個相似的案例進行實驗，才能得知先前研究所提的流程是否完備，本研究便以三個自由形體真實案例——銘傳新藝術中心、北美館遠東建築獎數位展區、兆曜電子竹北總部櫃檯設計作為實驗題材，進行實驗操作。

3.1 公信自由形體初步流程

公信案所得到的建築設計過程，為針對公信設計案所分析得出的設計過程，但這樣的過程，只能被定義為小型數位建築設計的初步模型，因為公信電子接待大廳設計案僅僅在於少數的條件下：

1. 小型尺度
2. 雷射切割金屬折板與骨架
3. 壓克力熱壓成型
4. 雷射切割壓克力熱壓折隔

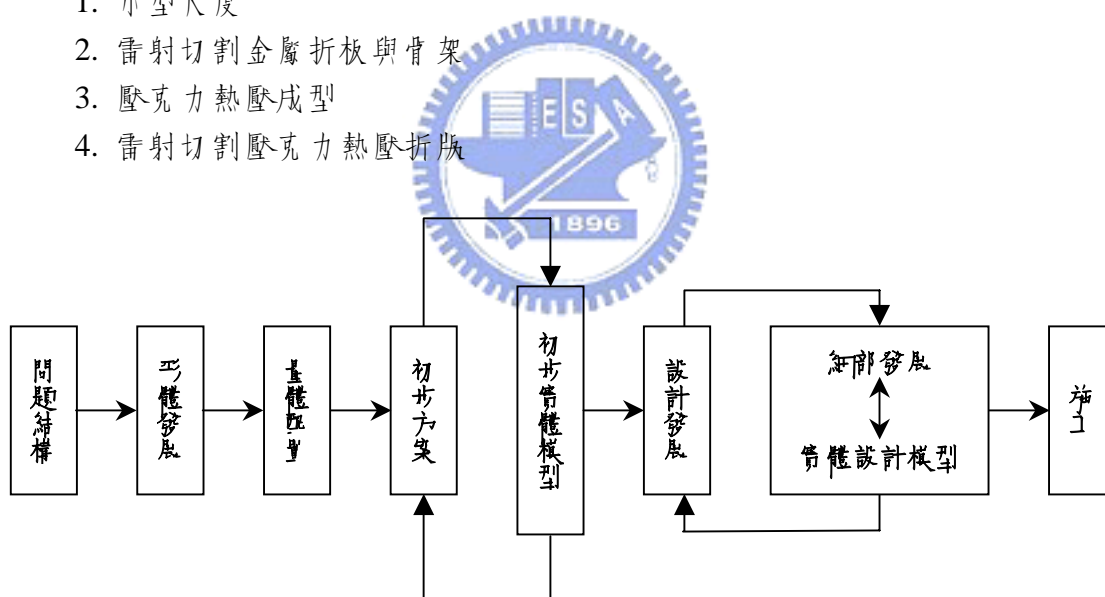


Figure 3.1 自由形體組裝初步流程

基於上述的條件所提出的一個初步模型(Figure 3.1)，對於其不足及加入其他相關條件後的適用性，還必須經過數個案例再檢驗，才能了解其完整性。

所以本研究的第一步驟，即是針對初步模型所提到的步驟作檢驗。並根據被以下所設定的目標挑選案例進行實驗：

特定媒材的設計流程

本研究針對在設計的手法上，以電腦作為早期設計發展的主要媒材，並輔以其他傳統或新媒材。所以如 Gehry 以傳統模型作為早期設計發展的媒材，並不在此研究的範疇當中。

相應尺度的基地條件

為了確認先前研究所提出的設計過程與方法是否無誤，所以在接下來的程序當中，首先就是必須找的基地條件與先前案例相類似的，作為驗證的對象，希望透過相近的設計案執行先提出的流程，檢視這樣的操作過程是不是完整以及可能出現的問題。

利用數位媒材輔助設計建造

本研究的另一重點是自由形體的建造與設計中，在目前數位媒材的發展中，那些發展是可以被應用在自由形體的設計及建造上，以及針對建築這樣的發展，哪些數位媒材還需要被發展及投入研究。這樣的探索必須是透過真實的案例才能漸漸的將這部分慢慢趨於完備。在公信案中，已經有一部分的研究成果，也正由於新的數位媒材的應用才使公信的設計可以被完成。所以在進行真實案例實驗時，同樣的也必須運用到新的媒材來設計。對於過去所熟悉的媒材，必須探索其限制與是否有更好的媒材與方式。而對於過去媒材上不能解決的問題，尋求新的可能的媒材。所以為了控制兩個案子的條件盡量接近，以及探索媒材在自由形體的可能性，挑選的案子，必須具有應用數位媒材在設計及建造過程的特性。

新的設計媒材或施工條件

本研究將自由形體的材料與工法，著眼於過去的研究及實驗中，並未涵蓋所有的可能使用的材料及施工方式，所以本實驗在相應的條件下，將有限度的增加其他可能的施工方式或是新的材料，以檢視這樣的流程是否可以涵蓋所有小型數位建築的設計流程。

新的施工方式或材料

由於過去公信電子大廳設計尺度小，也是台灣自由形體的第一次嘗試，這樣的研究嘗試中，所能涵蓋的工法、材料、相關技術都相當有限。而根據這樣的條件所提出的自由形體設計的過程，在本研究中，希望可以透過新的案例所探索到的新工法、材料等，對這樣流程進行實驗，是否需要修正或重新提出一個流程，作為提出中型自由形體建築設計建造流程的基準。所以本研究的另一重點，希望在新的案例中，尋找新的設計材料與方法。

3.2 檢驗小型自由形體流程

經過這樣的條件控制，本研究將挑選三個案例，一是銘傳新藝術中心，另一案例為北美館遠東建築獎數位展區，最後為兆曜電子竹北總部櫃檯設計。以下將針對案子的工作，說明與公信案之比較關係。

3.2.1 銘傳泰山校區新藝術中心

此基地位於銘傳大學泰山校區，為一舊有的空間再利用。主要的空間機能為新藝術的展示區，因此在設計上希望空間上可以呈現純藝術的多樣性。

工法上，此案例中，採用接近的施工技術，這是針對公信所提出的設計流程直接的測試，這樣的流程是否可以無誤的執行或是需要被修正。

另一方面在材料的採用上，做了新的嘗試，除了舊有的金屬以外、壓克力外，新的材料使用上包括木材及矽酸鈣板等。並在部分的區域裏將設計的形體儘可能的複雜化，此外也測試一小部分的戶外結構藉此開始探討小型的數位建築面臨戶外環境的一些可能遭遇的問題，進而修正公信的設計過程。將按照過程順序作說明

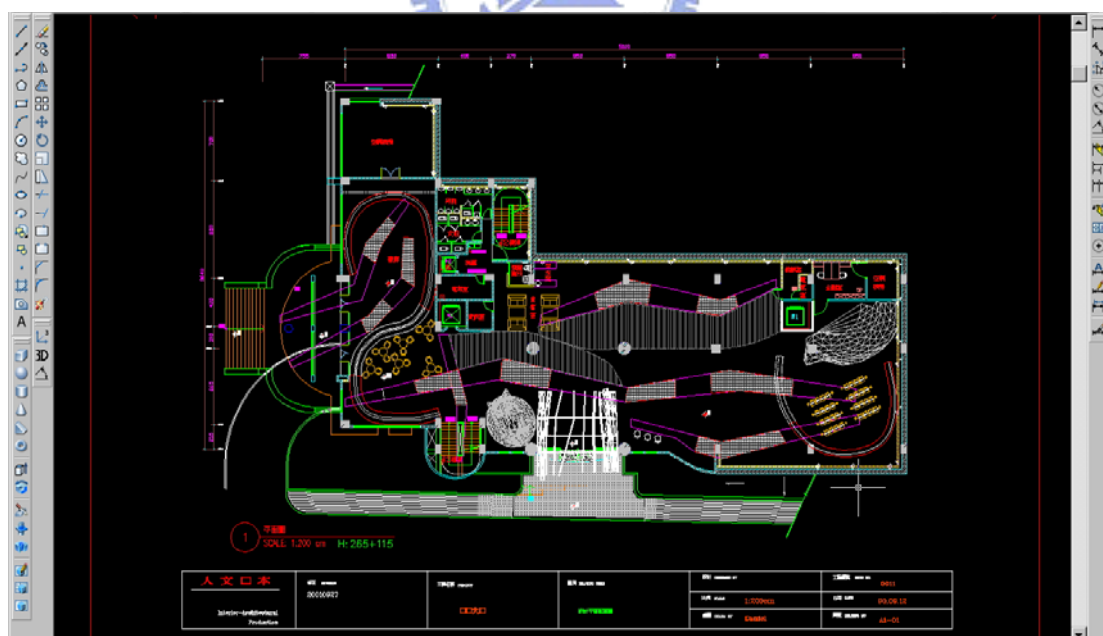


Figure 3.2 銘傳新藝術中心基地圖

(1) 早期設計

銘傳泰山校區這設計案中，是由業主訂下最初的配置要求，然後進行細部設計，

所以在早期設計上，並未涉及到先前研究所提的問題結構及量體配置這兩部份，而是直接進入初步的設計方案。在基地條件上，規模較公信大許多，但是量體上較為零碎(Figure 3.2)，在各方面都與公信相當接近。

在早期設計的階段當中，設計按照以下的步驟進行：

基地調查

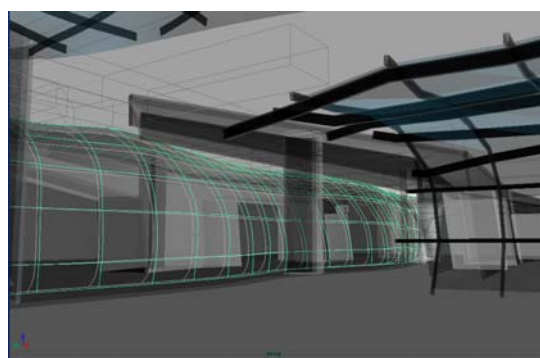
基地樓板間的高度為 430cm，也是由一個既有的空間改建而成，由於這樣的空間型態，所以知道現場的正確高度及管線位置，顯得相當重要。所以當時就將現場保留的管線，重新繪製成 3D 的空間檔案。以利進行設計。

利用電腦媒材進行單體型態發展

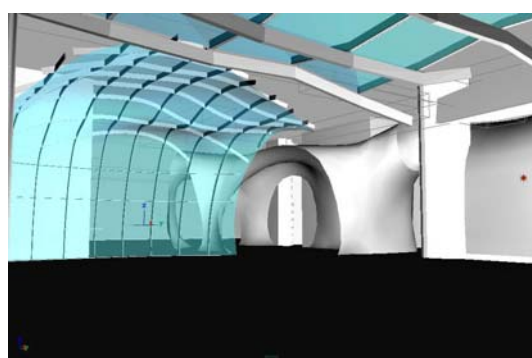
設計上被要求希望配置數個單體空間，及一個長向空間。但都必須是自由形體的空間。在這樣的要求下，使用 MAYA 進行單體的設計。由於新藝術中心的設計有時問上的要求，在公信案中的早期設計中，提出設計與實體模型交替運用檢視模型在這個案中，無法進行。於是銘傳案中，所有的設計都是在電腦中進行，不透過實體模型，但在設計過程中，發現了進行設計時的兩個特點，這樣的特點足以擬彌補無實體模型的不足直接用電腦作進行設計：

1. 與真人等比例大小的模型：透過這樣，可以知道人與空間的關係，也確保這樣的設計發展的空間是與真實空間所符合的。
2. 透過人視點高度的視角進行設計：上步驟最主要控制空間在使用上，不會造成空間浪費或是過低。但是透過模擬人視點的高度(Figure 3.3)，可以進一步控制設計的空間感。

這步驟中驗證在初步設計方案時，實體模型與初步設計的交互運用是可以完全被取代，早期實體模型的運用對於自由形體早期設計而言，並無必要的關鍵性運用。



a.



b.

Figure 3.3 MAYA 模擬人視覺轉時設計(a, b)

(2) 設計定案

最後設計的設計案如 Figure 3.4 在這個設計階段，可分成下列幾項步驟進行描述：
決定製造、材料及組裝方式

在本案例採用垂直水平骨架的結構方式，折版壓克力、及矽酸鈣板。部分工法上與公信接近的，只有在矽酸鈣板的運用上是一種全新材料的測試。

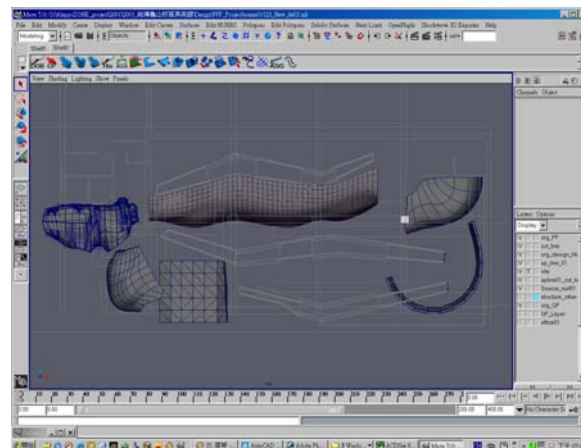


Figure 3.4 銘傳新藝術中心平面圖

結構計算

當所有的骨架都被決定後，並進行結構計算，由於長向空間，自重較大，所以必須經過結構的檢驗。這案例中，透過傳統的結構設計師的經驗值，進行計算，最後決定結構斷面的大小。

實體模型製作

在此步驟中，實體模型的製作顯得相當重要，因為在設計的設計案前，並無公信案所提使用實體模型與電腦模型相互進行修正及檢視，而電腦媒材在設計的過程中並無物理性質的設定，如重力、骨架組裝碰撞等。實體模型的製作正好可以補足利用電腦進行設計這部分的不足。

(3) 施工圖

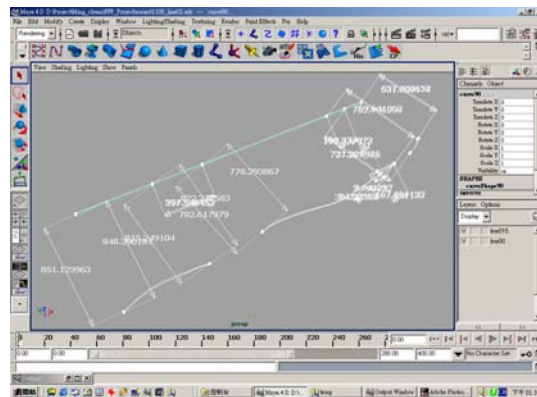
雖然在材料運用上，使用了一個新的材料，可是基本上是採用骨架、面材的系統。所以大致可以分成幾部分來談：

放樣點輸出

根據現場的實況，測量幾個基準點(Figure 3.5a)，並以這些基準點，繪製放樣圖面(Figure 3.5b)，以利將來施工。



a.

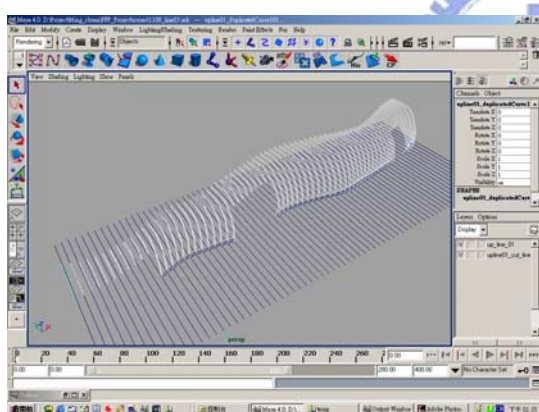


b.

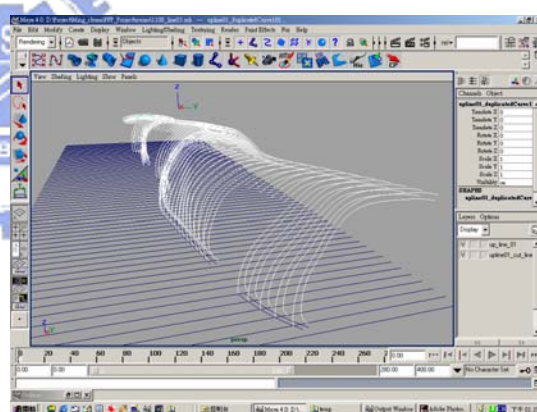
Figure 3.5 新藝術中心基地現場(a)，新藝術中心放樣圖(b)

骨架輸出

骨架上採用金屬雷射切割骨架及木骨架(Figure 3.6)兩種。金屬骨架部分(Figure 3.7)，必須製造精準的雷射切割骨架，並且修正在公信案中的錯誤，將凹槽的公差放大 0.5mm，使得到時候組裝可以順利，另外為了組裝前的單元校正也將設計中的骨架，輸出校正長度。木骨架部分，則輸出傳統木工放樣的要求，也就是輸出具有格點的單一元件，可以使得木工可以切割。



a.



b.

Figure 3.6 新藝術中心木骨架放樣圖(a, b)

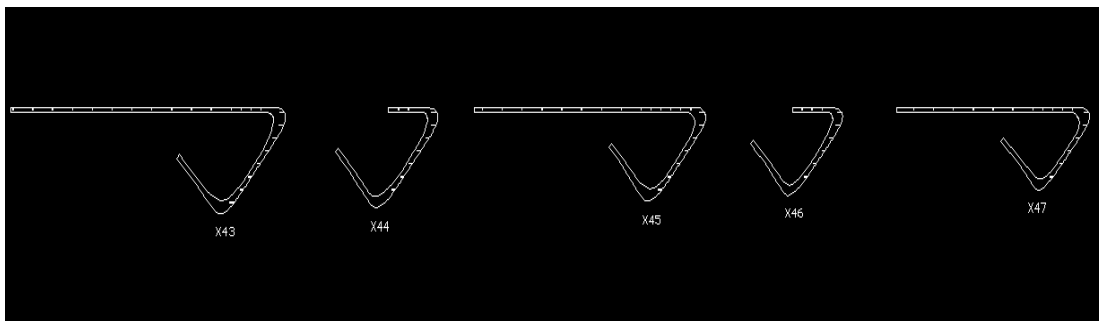


Figure 3.7 新藝術中心雷射切割骨架

面材輸出

面材部份(Figure 3.8)，採用壓克力折版及矽酸鈣板的方式。過去公信案再折版部分，對於折版空間定位及，正反面的折版，無定義，所以在組裝上，耗費工時。固銘傳新藝術中心裏的壓克力折版部分，輸出單一壓克力的展開圖面，標註尺寸及折角，並加入了單一面向展開以及固定位置標註，以修正了公信單元生產上的不足。矽酸鈣板的部分(Figure 3.9)，由於矽酸鈣板相較於金屬玻璃具有不需加工的可塑性，在數位資料上面，只要骨架的資料準確，則面材部份，可以直接依附骨架，直接進行包覆，所以不需要另外增加數位的資料輸出。

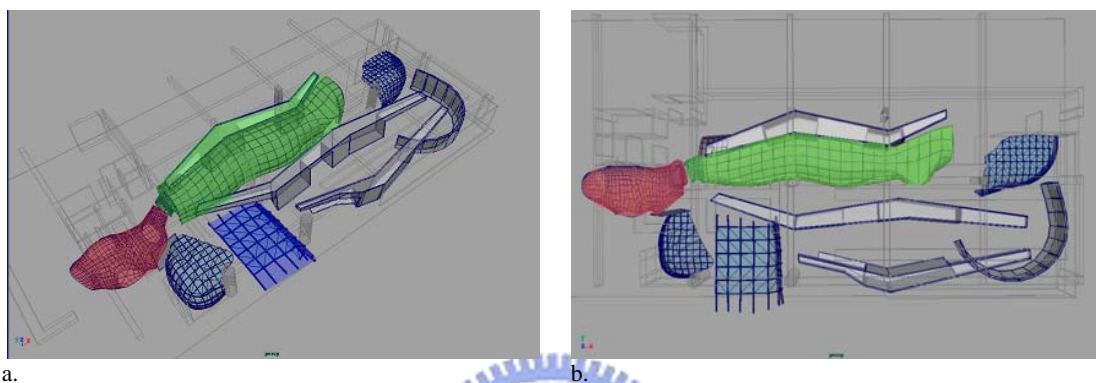


Figure 3.8 新藝術中心自由形態面材使用分佈紅色為矽酸鈣板、綠色為木板、藍色為壓克力(a, b)

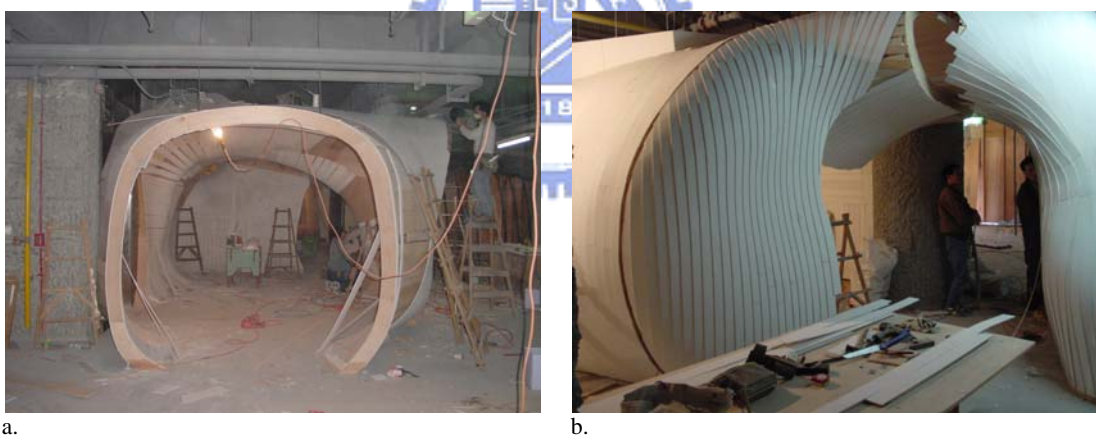


Figure 3.9 新藝術中心矽酸鈣板施工現況(a, b)

(4) 單元生產

由於銘傳新藝術中心所使用的工法與材料並與公信並無太大的不同，所以在單元生產上，加上在施工圖的部份，已經修正過去在公信案有錯誤的部份，在單元生產部份，並無太大的問題。至於新的材料壓克力及矽酸鈣板的運用。矽酸鈣板是直接於現場組裝的，壓克力這樣的材料，則用加熱的方式仿造金屬板折彎加工過程，並無太大的不同。

(5) 現場組裝

放樣

此次的組裝中，由於現場的基本測量非常的準確，所以在放樣上，放樣點容易被測量出來，加上施工單位在校正上相較過去的施工單位也較為專業，利用了雷射水平儀的幫助，在控制骨架的垂直水平部份，也較為精準。

骨架組裝

相較於過去公信的組裝，新藝術中心一案中骨架的凹槽上增加了 0.5mm 的公差，使得整個骨架組裝上，從原本的 60 天的工期，縮短為兩天就可以組裝完畢，而且也由於不需要裁切骨架，以及在施工後開始用雷射水平儀二次校正 (Figure 3.10，在施工上更為精準。

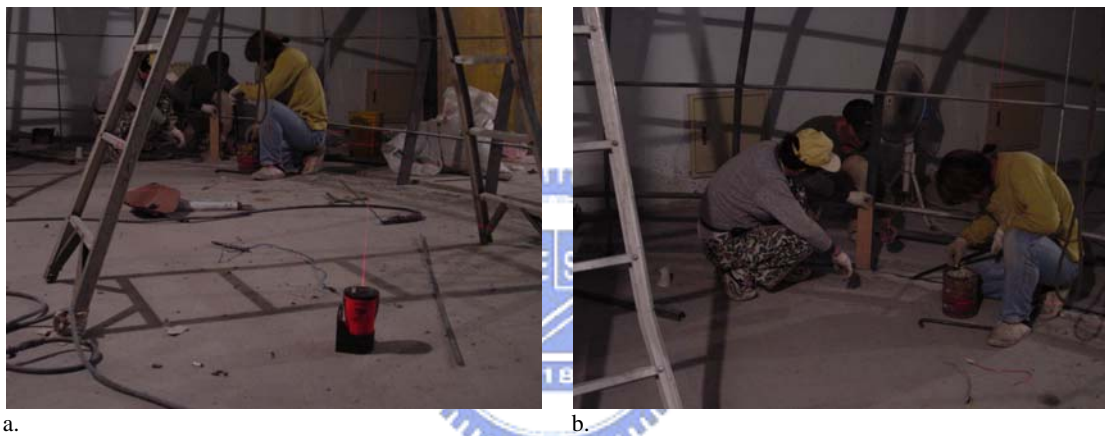


Figure 3.10 雷射水平儀校正骨架(a, b)

面材組裝

在曲面材矽酸鈣板部分 (Figure 3.11)，由於只需要依附現場的骨架，而骨架也由於放樣及施工的精準度提高，使得在矽酸鈣板施工部份，並未產生問題。壓克力折版面材部份，過去研究裡的經驗發現，面材在生產及組裝過程中，會因為資料的輸出不精確，而產生方向及內外面的混淆，所以折版部份，則加強此部分的標註的統一性 (Figure 3.12)，以避免混淆情況的發生。



Figure 3.11 木骨架及矽酸鈣板施工現況

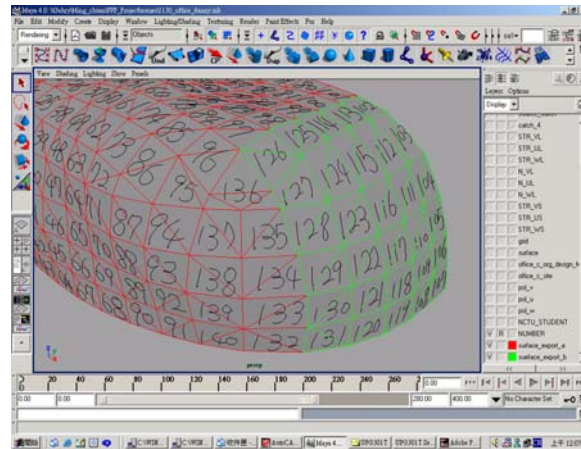


Figure 3.12 會議廳折版標注

(6) 小結

透過銘傳新藝術中心的設計案，發現公信電子大廳設計所提出的設計流程中，在幾個部分顯得不足。首先發現先前研究問題結構到具體配置，在整個流程中對並不會因為設計型態或媒材的不同而有所差異。所以在自由形體設計建造流程，不應將初步方案前的步驟納入流程(Figure 3.13)。

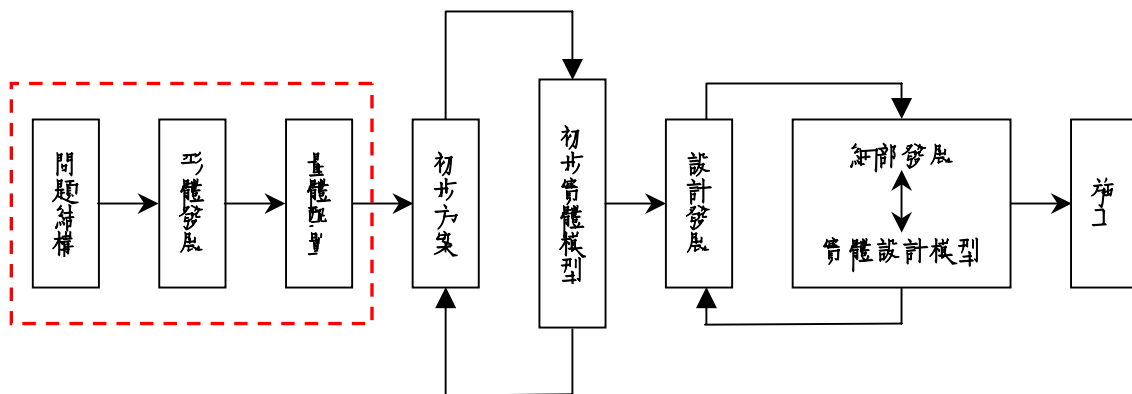


Figure 3.13 自由形體初步流程前三步驟

其次先公信所提出的流程叫，在初步設計階段叫，實體模型的在設計早期運用，似乎在公信案叫只是個案。反而在設計定案的階段扮演較重要的角色 (Figure 3.14)。

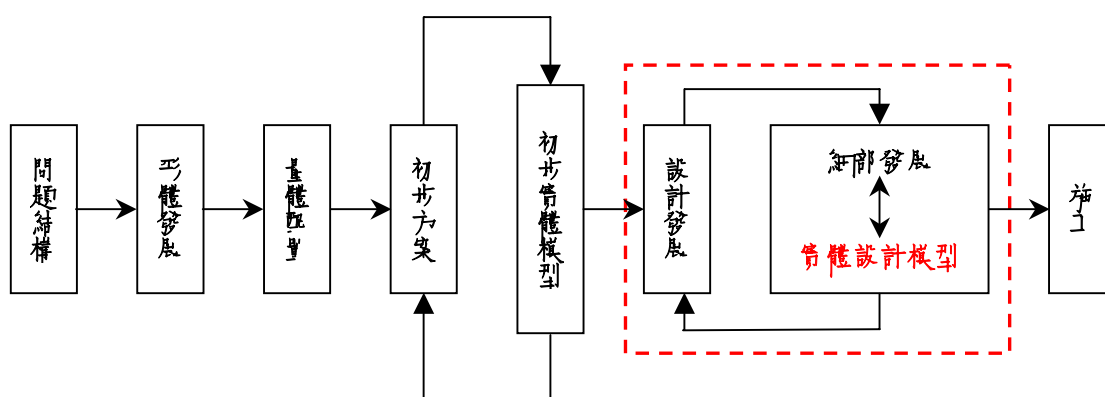


Figure 3.14 設計發展階段實體模型的運用

另外在設計發展階段，本案叫使用了幾樣新的設計材料，及新的施工方法，包括木頭、矽酸鈣板，新條件的加入，對於設計發展階段似乎無太大的改變。再者如上所述，先前研究並在設計定案後到施工叫問的過程，並未著墨太多。但實際在執行本案時，發現先前研究所未提及的問這段過程，包括施工圖階段、單元製造階段，在自由形體建造的過程中，扮演極為重要的角色，因為這步驟叫的每一階段，都與設計與施工有很大的關係。所以針對小型自由形體的設計建造流程，應加入這部分 (Figure 3.15)，修正舊的模型。

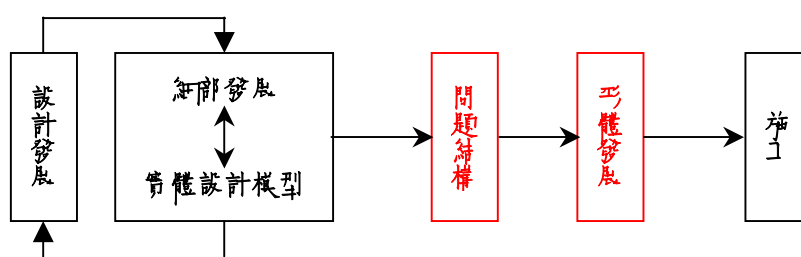


Figure 3.15 設計發展與施工階段叫問應補足的步驟

最後在進行此案後，雖然在新媒材的運用上，並未有太多的嘗試，但在折板的施工圖製作上發現，雖然折板的數位資料輸出已經可以標準化，可是這樣的資料輸出處理的數量太多，以致於在不斷重複的過程中，容易產生人為的失誤，使得資料輸出錯誤。接下來的案例叫，應該將這樣的資料輸出程式化，讓資料的錯誤降到最低。

3.2.2 遠東建築獎數位展區

基地在台北市立美術館的三樓(Figure 3.16)。此案為遠東建築獎於北美館中展覽時，所特別設立的數位建築展區，希望透過真實的自由形體的呈現，讓參觀者對這樣的發展，能有進一步的了解。

由於本案性質屬於臨時性的建築，所以有時間的限制，所以在設計上，大部分採用已經在過去的案例裡已經成熟的媒材技術進行。但在這裡使用了兩樣新的材料作為實驗公信案中所述流程的對照。本設計案依然以垂直水平骨架及金屬折板表皮為主，但結合圓管及薄膜兩樣材料作為新的設計條件。而有了銘傳龜山校區這設計案的經驗後，發現自由形體建造過程在施工圖及單元製造也扮演相當重要的角色。為了進一步釐清這兩步驟在自由形體設計建造中的關係，也非相斥於銘傳新藝術中心的步驟描述本案。

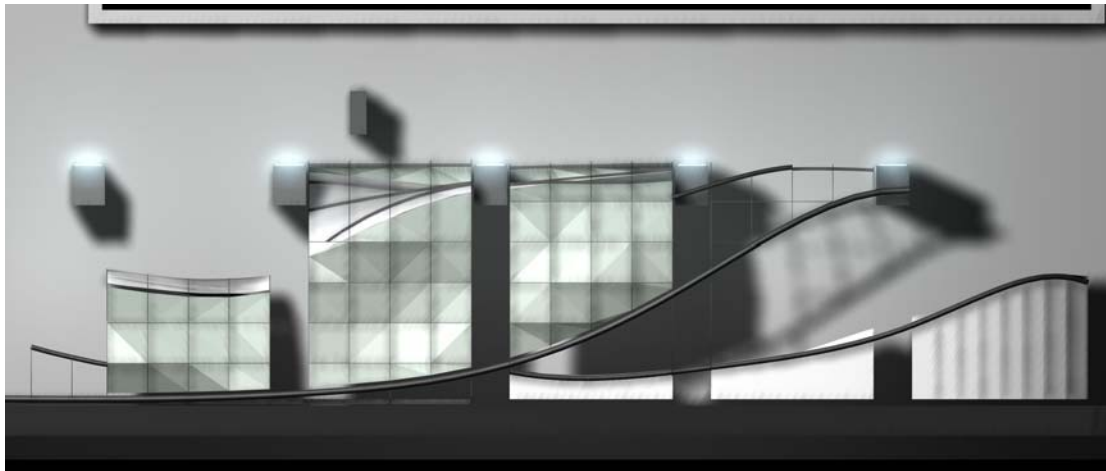


Figure 3.16 北美館數位展區設計平面圖

(1) 早期設計

基地關鍵資料的取得

由於基地現場為常態性的展覽空間(Figure 3.17)，樑下間的淨高度約為 600 對於設計而言，高度的限制上相當的寬鬆，對於設計與現場的配合上，較為容易。



Figure 3.17 北美館數位展區設計基地現況

利用電腦媒材進行單體型態發展

此部份為所有小型自由形體設計的基本條件，所以在遠東數位獎臨時展區內，也用同樣的方式作為發展設計的工具。但是由於這個案子裡時間非常的短。加上銘傳龜山校區的經驗，所以決定在此階段並不使用實體模型作為初步設計的工具。

(2) 設計定案

在這個設計階段(Figure 3.18)，可分成下列幾項步驟進行描述：



a.



b.

Figure 3.18 北美館數位展區透視圖(a, b)

決定組裝製造材料及方式

在本案子亦採用垂直水平骨架的結構方式，金屬折板、薄膜。工法與過去兩個實驗相比，唯有在薄膜及圓管的運用上是新的嘗試。

結構計算

此次由於時間上的關係，加上材料單純，規模上也較小，所以在設計定案後，便即時運用 sap2000 這個結構計算軟體，模擬結構行為並決定斷面。

細節設計

在本案中最初的設定上，希望快速的組裝並在展覽完成後，希望可以將其拆解並可做將來的組裝。這樣的要求，在設計上除了要考虑接和外，更要進一步在電腦中模擬如何拆解在搬運上不會因為搬運而使得結構毀壞。所以雖然細節設計上皆採用過去所熟練的工法，但是因為拆解的需求，所以在電腦中進行模擬拆解成數塊之後，還必須用結構計算軟體，再次進行模擬，以確定搬運的過程不會有問題。

(3) 施工圖階段

由於本案的規模相比較小，基本上是採用骨架、面材，而且選用金屬面材，在相片的技術上並無特別可研究的部分。所以施工圖階段重點放在可以拆解及新材料的使用上。所以大致可以分成下列幾部分來談：

骨架

骨架上採用金屬雷射切割骨架(Figure 3.19)，本案例考慮將來的拆解部份，過去的雷射切割骨架在施工圖結束後，交由施工廠商根據版材的大小，將所有的過長的骨架，一一分解成適當的長度，但是由於設計要求中可被拆解的條件(Figure 3.20)，所以骨架的長度及必需根據結構計算的結果，而不能由雷射切割廠商自行決定，所以此案雷射切割的最大長寬必須與結構一併考慮。



Figure 3.19 北美館數位展區施工現況



Figure 3.20 北美館數位展品可拆卸骨架

圓管

圓管部分，為此次的設計中所運用的新材料，其加工方式，是透過滾彎的方式或是 CNC 數控的方式進行所以在圓管加工方面，由於加工方式的限制，必須將所有的圓管拆解成可被加工的資料，圓管的加工資料必須是單段的，且內外徑必須僅標註(Figure 3.21)。由於原本使用的軟體 Maya 屬於動畫軟體，對於這樣的要求便無法處理，在這部份，則必須將這樣的資料處理，分成下列兩部分。



a.



b.

Figure 3.21 圓管加工 (a), 圓管成品 (b)

1. 處理逼近曲線：設計定案後，在操作上第一部份 Maya 操作處理逼近曲線(Figure 3.22)。也就是必須將空間中所有的自由彎曲曲線，用近似圓弧拆解成逼近於自由彎曲的曲線，並將數段圓弧轉格式，進行下一步。

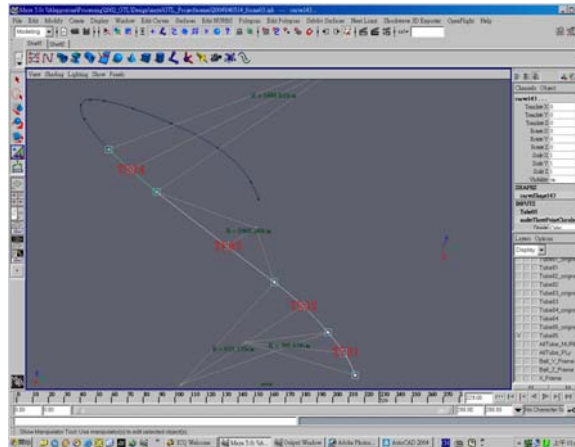


Figure 3.22 MAYA 設計後取近似圓弧圖

2. 標註圓半徑及內外徑弧長：將格式轉成 AutoCAD 能接受的尺寸，進行展開並標註內外徑尺寸(Figure 3.23)，最後記錄管材間的旋轉角度，以利組裝。

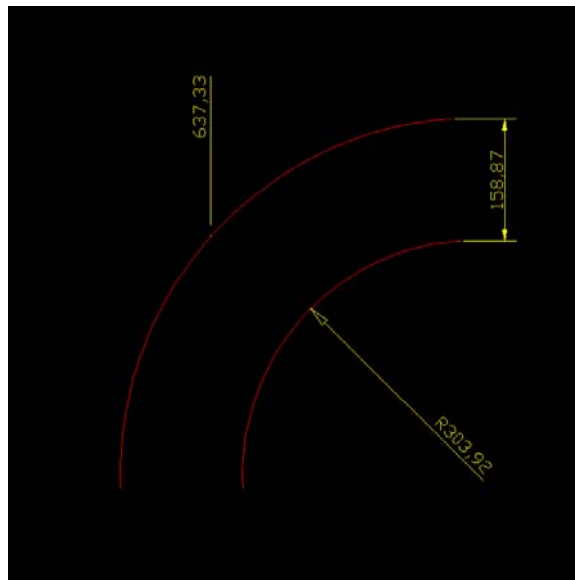


Figure 3.23 圓管加工圖標注

3. 輸出骨架三維座標，進行薄膜單元生產：薄膜這樣的材料，過去的建築上被運用的相當廣泛，是個相當成熟的技術。但是薄膜對於自由形體的建造，所會碰到的問題，及所需要提供的資料，透過這次的實驗，發現，在設計定案後，只需提供薄膜單元製造所需要的三維座標即可，但是，由於薄膜的基本是受張力的，所以在最後呈現的結果，與原始設計稍有出入。

(4) 單元生產

單元生產的過程叫，依照過去的生產方式，基本上並無太大的問題，唯有在管材加工後，在內外徑的弧長無法檢驗，以致組裝上的精準度，只能由管材本身的可塑性加以調整。

(5) 現場組裝

由於現場的空間條件良好，加上施工圖製作上相當精準，所以大部分的組裝上沒有太大的問題(Figure 3.24)。薄膜也由於提供廠商施工的三維資料無誤，也可以很精準的被組裝。但是圓管組裝上發現幾個問題。



Figure 3.24 電腦模擬圖面與完工現場

滾彎半徑不精準

目前台灣的管材加工，大部分都停留在傳統用模板比對加工的方式(Figure 3.25)，電腦數位控制的加工方式尚未普及，所以在加工的精準度上，無從控制起。



a.



b.

Figure 3.25 傳統人工圓管加工(a), CNC圓管加工(b)

弧長不精準

加工管材一般而言，都必須加工稍長的管材，再加以裁切，但是由於管材的裁切角度都不準，也形成，所需要的弧長，不能被控制。

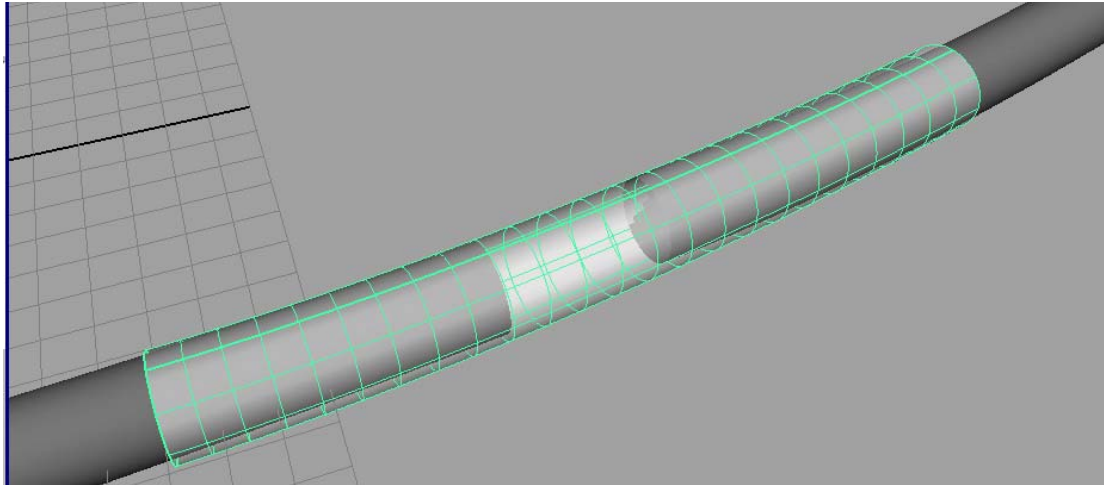


Figure 3.26 未解決管材加工不精準所採用的轉接管材

由於發現這樣的問題，所以在本案的例子當中，必須回到設計上修改設計，也就是管材無法直接接和，而必須透過轉接的管材(Figure 3.26)，將其連接，讓兩根相接的管材可以透過，轉接的管材，吸收不精準的部分。所以管材的運用，發現在現場組裝部份，也會與設計過程產生互動。

(6) 小結

本案中，將重點擺在早期設計以後，特別是從施工圖、單元生產到現場組裝這部分。透過此案再一次驗證公信電子大廳設計所提出的設計流程的不足(Figure 3.27)。首先，在設計發展階段中，工法的決定會影響設計的繼續發展及結果甚至是細節的發展，如在本案中，薄膜只能受張力，所以當決定應用薄膜這樣材料，設計上為了要維持薄膜的型態，必須對於無法對薄膜施予張力的型態部份，加以修改，以符合最後的設計結果。

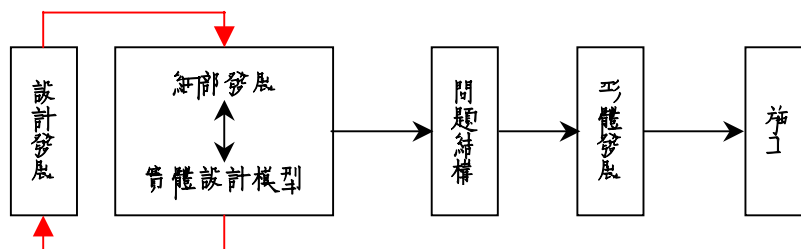


Figure 3.27 設計發展與施工階段相互影響

另外，銘傳案中，發現早期設計中實體模型與電腦模型的交互運用，似乎沒有一定的必要性，反而實體模型在檢驗設計的結構及工法上，更為有應用的價值。但是本案中，由於新的軟體 SAP2000 的應用，真實的檢驗了自由形體各部份在不同方向受力的真實結果(Figure 3.28)，不但實現了設計條件中希望可以被拆解要求；也透過結構軟體的提前應用，發現實體模型在自由形體的建造過程中，似

乎沒有其應用的重要性(Figure 3.29)。

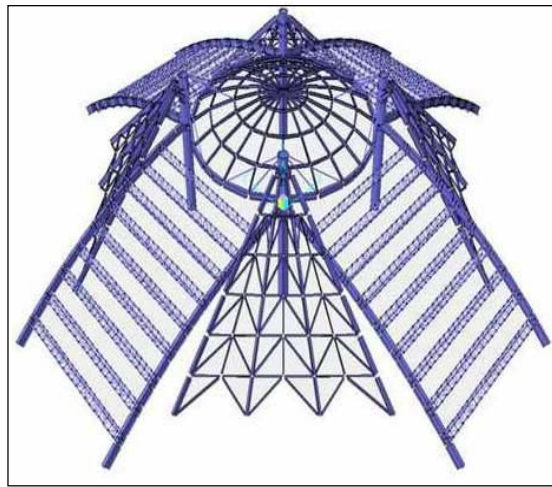


Figure 3.28 SAP2000 模擬結構案例

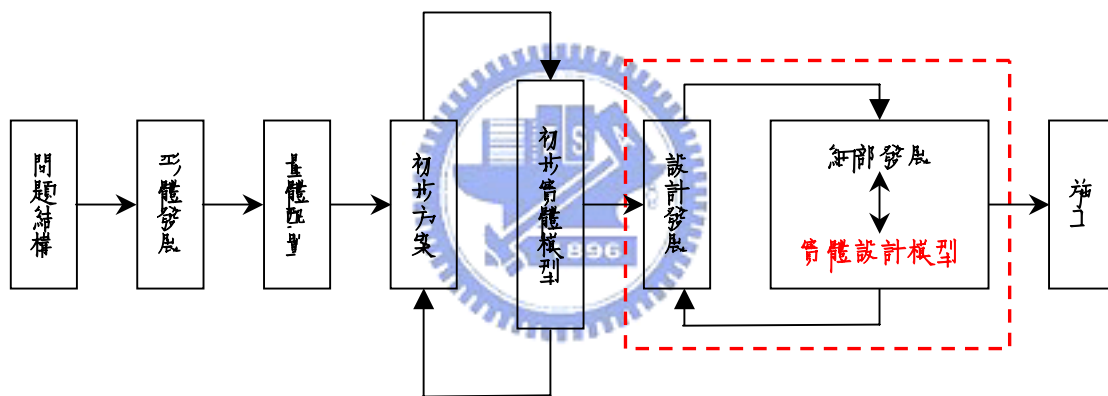


Figure 3.29 設計發展階段實體模型使用的重要性

新材料的應用，發現除了單元製造與設計產兩階段，會有修正、製造、再修正循環關係外，現場組裝步驟與設計最後發展也有相似的關係(Figure 3.30)，也就是現場組裝會發現非預期的問題，而由些問題的解決方式必須透過回饋到設計階段修改設計才可以解決。

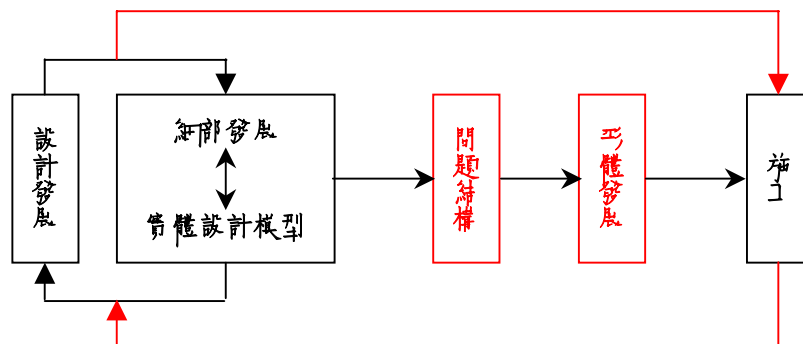


Figure 3.30 施工階段與設計發展相互影響

最後，在新材料及媒材的探索上，自由形體建築設計的資料處理量與設計的規模成正比，且自由形體組裝單元的每筆資料都不相同，必須一一輸出，較於過去傳統的建築圖面，自由形體所需要的資料量遠大於傳統建築。證明折板數位資料程式化的必要性，否則在其一定規模的設計中，單元生產資料會成為無法處理，讓自由形體設計的規模被侷限。

3.2.3 兆曜股份有限公司大廳櫃檯設計

此案位於竹北一間高科技公司的大廳。在前兩設計案例中，自由形體組裝的整體架構可能會遭遇的問題，及必須修正的部分，已經大多數被提出討論及發現。但是過去的案例當中，由於經費及時間上的各種條件限制，並未使用到自由曲面的金屬板做為面材。雖然過去在公信大廳設計中也有所謂的櫃檯設計，但其設計、單元製造及生產過程，並未精確的控制其方法及步驟，加上其製造方式，利用傳統的木工打造，無法標準化設計及製造流程。因此設計重點放在金屬自由曲面板的製造標準化流程的探索上。本案配合其他的室內設計櫃檯上，基本上採用骨架面材的結構方式生產組裝，在金屬自由曲面板上採用端版製造技術(Figure 3.31)，並用這樣全新的工法及材料，再次檢驗小型自由形體的設計流程



Figure 3.31 櫃檯設計完工圖

(1) 早期設計

設計的現場，為一個剛裝修的工地，樓層高度 520cm，由於本次設計案例為單體的櫃檯設計，對於現場的放樣要求各方面，並無特別精準的要求。所以此次在現場環境三維資料上，並無更高的要求。

(2) 設計定案

由於櫃檯單體本身牽涉的設計問題並不多，設計很快就定案下來。當在決定結構方式發現，由於櫃檯的尺度小，骨架必須如果只是垂直水平分割，在組裝上會因

為骨架的間隔太大。無法完整將所有的骨架組裝在一起，讓垂直水平的骨架系統，無法解決骨架的問題，發現完全垂直水平的骨架並無法解決所有的問題，於是選擇部份的結構不用完全垂直水平，用順著彎曲度最大的部份，分割作為結構系統(Figure 3.32)。其他部分依然維持原本的垂直水平系統，以解決當時所遭遇的問題。

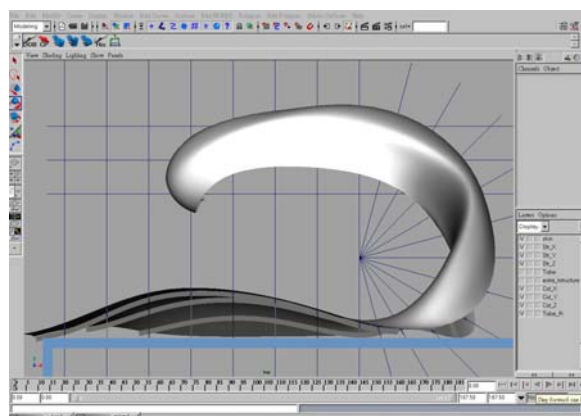


Figure 3.32 櫃檯骨架依據需要以非心圓作為分割系統

(3) 施工圖

骨架的施工圖部分，由於設計上基於垂直水平的結構，所以在施工圖製作上，並無太大的差別。面材的部份，端版的製作基本上是靠著模具作為曲面成型板依據標準，進行加工，所以只要可依附的骨架密度夠高(Figure 3.33)，則不需要另外的施工圖的輸出。但是由於金屬板的延展性有其一定的限制，當曲面變化太大，則面材在加工的過程會產生破壞，所以針對於區面過大的部份，必須進行材料加工模擬分析(Figure 3.34)。

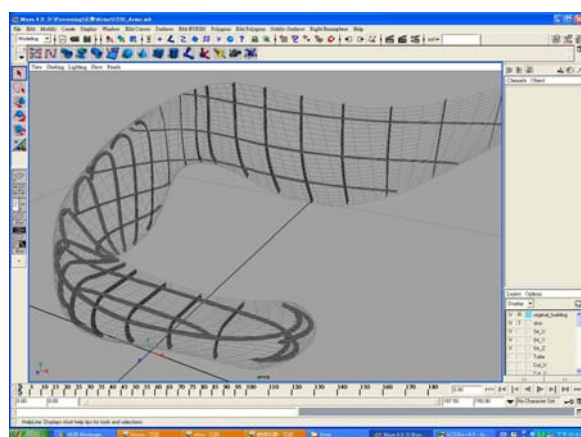


Figure 3.33 櫃檯骨架密度分佈

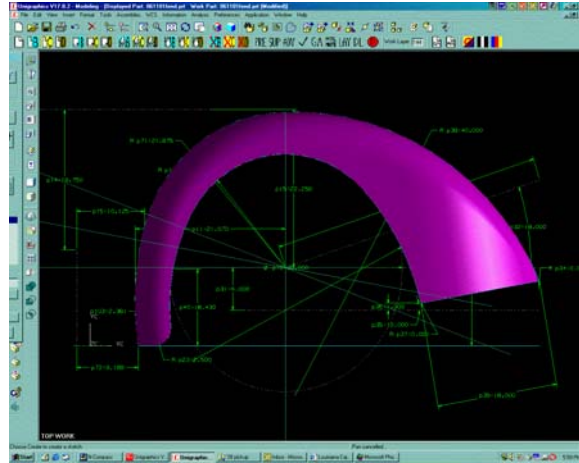


Figure 3.34 汽車端版分析

(4) 單元生產

如上所述，端版必須依附骨架，才可以加工，所以單元的生產無法脫離現場組裝而獨立存在(Figure 3.35)。所以端版部分並沒有單獨的生產過程。



a.



b.



c.



d.

Figure 3.35 汽車端版技術(a, b), 汽車端版骨架(c), 汽車端版單元製造(d)

(5) 組裝

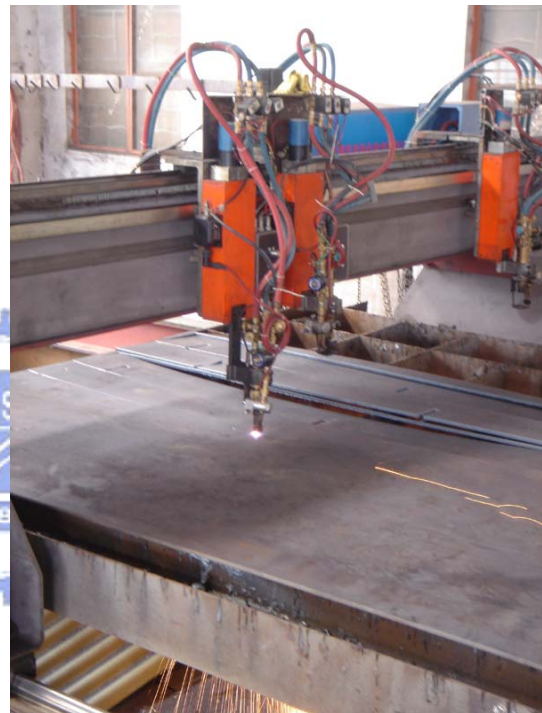
由於本案的規模不大，所遭遇的問題大致只有骨架及面材兩類的問題：

骨架

雖然骨架的組裝是基於垂直水平分割方式修改的，但是組裝的過程中發現由於雷射切割方式是垂直於面材(Figure 3.36)，所以當垂直水平骨架採取依照自由形態彎曲的方式進行，便會產生不垂直於面材的切口出現(Figure 3.37)，這樣缺口造成製造完的單元，組裝不精準。如將來以垂直水平骨架為結構系統，必須避免這樣的單元切口產生。

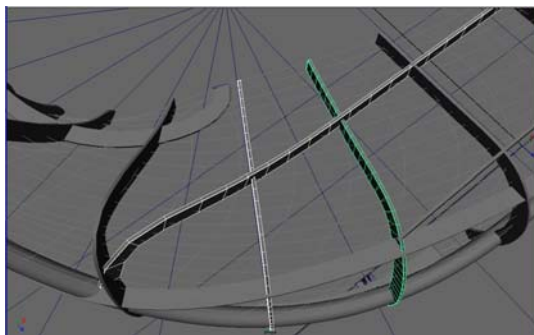


a.

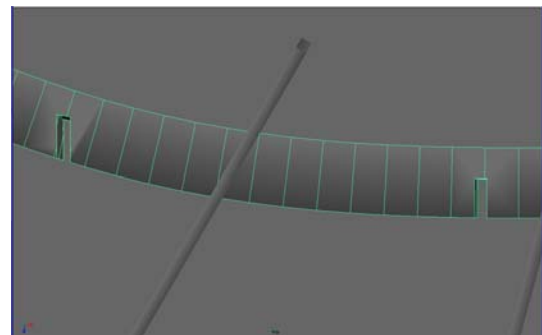


b.

Figure 3.36 骨架雷射切割(a, b)



a.



b.

Figure 3.37 不當骨架分割(a)，非垂直於骨架的卡榫凹槽(b)

面材

面材的組裝及製造為本案最主要的挑戰，端版面材的精準度完全取決於所依附的骨架或支撐上，也就是支撐的面材的結構密度越高(Figure 3.38)，則面材的精準度也越高。但是骨架越密，相對的造價也越高。如何在精準度及造價上取得平衡，本案在端版的組裝過程也獲得幾個經驗：

1. 增加主結構以外的雷射切割骨架
2. 如在結構骨架間增加鏤筋(Figure 3.39)，或補以鐵絲網等方式，將面材的區面大致成型，作為支撐。有了比較精準的參考區面作為支撐後，金屬的曲面板在成型上，其精準度，就可以被控制到一個程度(Figure 3.40)。



a.



b.

Figure 3.38 增加支撐的鏤筋後較平滑的平面(a, b)



a.



b.

Figure 3.39 增加面材支撐的鏤筋(a)，成型後的端版(b)

(6) 小結

與前兩個研究案例的著眼點不同，過去在公信案中也曾想利用金屬曲面板做為設計的材料，但是當時並未使用端版的技術，而希望用模具成型的方式，造成造價太高，而無法施作，最後退而求其次用壓克力這樣的材料。所以公信案中提出

的設計施作流程並未對於這樣的材料提出施作流程或探索問題。本案運用有別於過去三個案例的材料及施工法得到幾點結論：

第一、基於過去銘傳新藝術中心及北美館臨時展區所獲得的經驗及流程，發現即使加入了新的材料及工法，在基本流程上都會有設計公信所沒提及的施工圖、單元製造兩階段。

第二、版的製造與骨架的密度相關——骨架越密則可以作為成型的支撐越多，則曲面板成型後自然越準，可是骨架越多則造價越高，所以這個案例中發現可以透過幾種方式在骨架密度與精準度上取得平衡。

第三、新媒材的發展部份，三個案例中發現，不管是金屬材質的成型板，或是壓克力，都必須使用模具。但在單元製造的過程，模具的生產製作，在成本上佔了很大的比例，過去的模具都是用來大量製造，當生產的數量越大，則越經濟。但是自由形體建築的由於每個單元都不相同，所以模具只會被使用一次，相對的成成本太高。從小型的自由形體建築設計案例來看，模具式組裝中不可或缺的一部份，若模具可以被重複的使用，並結合 CNC 這樣的技術，則在自由形體的生產製造上成本可以被大量降低。也可以讓自由曲面的面材生產標準化。

3.3 小型自由形體設計建造流程及新媒材發展的可能性

在公信電子大廳設計的研究中，提出了一套針對小型建築物的設計建造流程，由於先前研究所提及的是自由形體建築與一般傳統建築再建造流程上的差別，但是本研究是著眼在自由形體的建造流程，所以不涉及初步方案前的設計流程 (Figure 3.40)。指針對從初步設計到施工建造完成部份來討論。

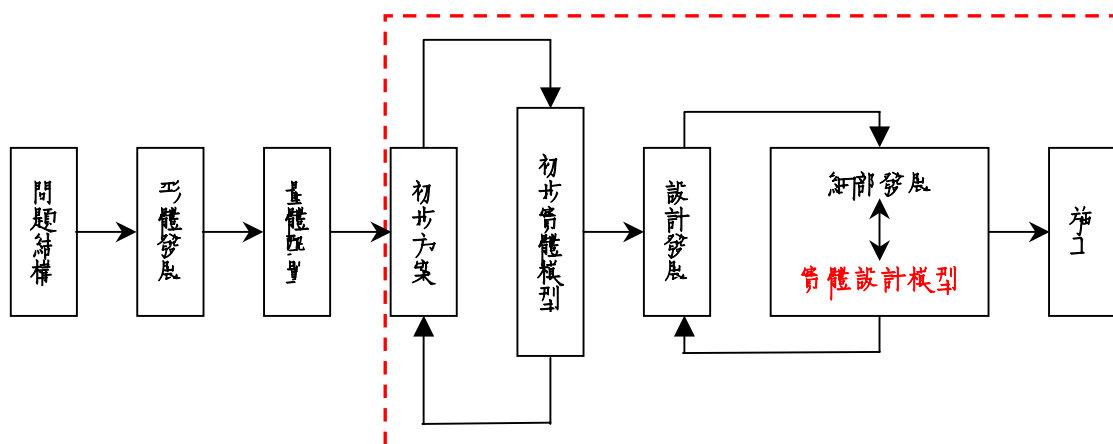


Figure 3.40 自由形體流程應該討論的部份

針對新媒材部分的發展部份，在施工圖階段可發現在折版的施作流程中，折版的

施工圖，已經是個標準化的動作，可是這樣的動作非常的繁瑣，規模小時可以用人工方式，製作施工圖，可是這樣的流程由於過於繁複，所以常常會出錯。如果這樣的資料要進一步運用到中型甚至大型自由形體建造上，則這樣的人工方式，便因為資料量過大無法處理，而且也不易驗證資料的錯誤。所以將折版製作資料的程式化，是從小型建築設計到中型建築設計的關鍵。另外，在單元製作的階段上，不論任何材質的自由曲面的成型板，都必須製作模型，作為成型的依據，可是模具只能用一次的方式，造成自由形體組裝的高造價。所以如果能開發數控的模具，讓模具可以透過數位的資料，呈現所需的形狀，如此才可以使造價降低。在設計流程的驗證及修改上，透過三個小型的自由形體案例先前研究提出來的流程，些許的不足需要修正。

首先，先前研究提出的設計流程，將自由形體設計建造的重點放在設計上。但從上述的三個案例中發現，在設計發展與施工間應該還存在施工圖製作、單元生產兩階段。所以在上述的流程內應加入這兩階段。

第二，在設計發展過程階段中，當設計完成進行結構分析時，發現組裝方式的不同，會影響到設計，也就是說，結構方式的決定與設計是成一個迴圈式的關係，唯有合理的結構方式與設計相配合，設計建造才可以繼續進行。

第三，原始的設計建造流程中，在初步設計的發展上，認為實體模型的運用在設計建造流程中有着不可或缺的角色，可是透過三案例發現實體模型的運用，在運用電腦設計自由形體時，為非必要性。但雖然本研究透過三個小型案例驗證，實體模型的非必要性，不過一方面由於針對實體模型的非必要性驗證案例採樣僅止於三個案例，另一方面由於小型的設計建造流程，在變數上較少，可影響的變因有限，所以雖然目前分析結果顯示實體模型的運用的非必要性，但此結論應該透過其他更多的案例及中型大型等不同尺度的實驗案例資料分析，才可以驗證此步驟的正確性。

最後，當設計定案後，透過數位媒材的輔助，雖然可以模擬組裝及建造流程，但是免不了會發生在組裝過程中，會有不可預期的問題發生，如組裝後的誤差超出當時設計的容許值，這樣的情況必須透過修正設計來解決，也就是說，組裝也會與設計產生關係。

透過以上的分析可以提出一個新的自由形體設計組裝的新流程(Figure 3.42)

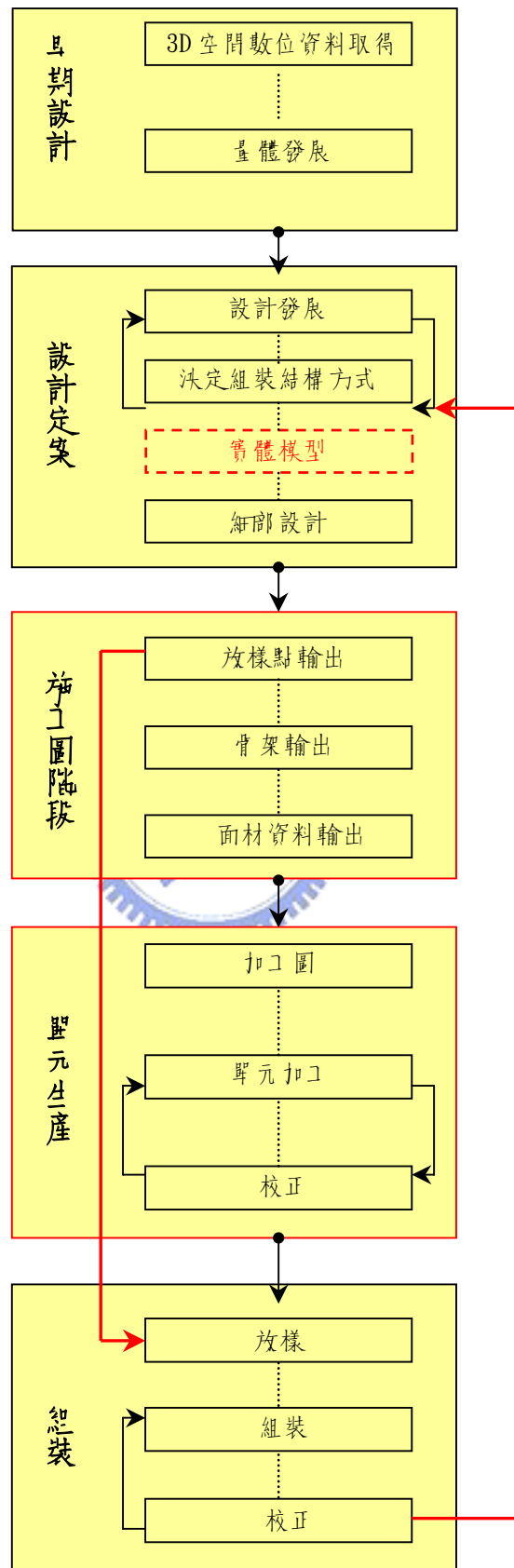


Figure 3.42 完整小型自由形體設計建造流程

四、探索叫型自由形體初步流程

在第三章中本研究透過三個小型自由形體案例的操作，發現在研究上有兩個方向可以進行。首先，在小型案例施工圖階段中，有太多的重複性步驟，不但消耗人力，在資料的輸出上，也較不容易掌握精準度，所以應該將重複的步驟進程式自動化，以減少人力成本並增加資料的正確性。第二，透過小型自由形體的流程，應將進一步發展叫型自由形體的初步流程。所以本研究以大連深圳總部的設計案為實驗題材，以小型的流程進行操作，探索前述研究可繼續被進行的兩部分研究。

4.1 自由形體建築施工圖程式化

過去操作小型的自由形體建築設計中發現，在單元生產階段之前的流程中有許多重複性極高的步驟，但是由於規模較小，施工圖的量都在可控制的範圍內，所以都是純粹透過設計師一步步的操作，也就是用人工重複每個步驟。但是在進入叫型的自由形體建築後，施工圖的資料必然大量增加，小型自由形體用人工輸出資料的方式，不符合經濟效益，而且資料出錯的機會也隨之增加。所以必須透過程式化，將大量重複步驟自動化，以符合經濟效益。

4.1.1 資料輸出標準流程

透過三個小型案例的實驗操作，分析得知整個自由形體施工圖階段中高度重複性的步驟可包含以下幾部份的資料：

(1) 骨架資料輸出

在施工圖階段，骨架資料輸出其標準化的程序可被拆解成數個步驟(Figure 4.1)

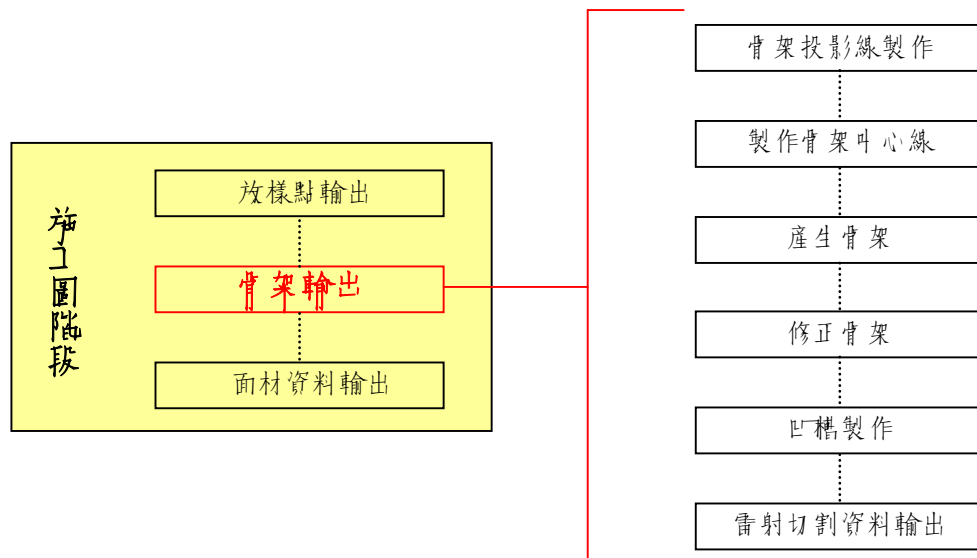


Figure 4.1 骨架輸出階段所需步驟

骨架投影線製作

從過去小型自由形體建築的建造過程，可發現骨架不論材料的形式為何？骨架的分割在幾種特殊形式下 (Figure 4.2)——等距垂直水平、非等距垂直水平、非心圓等距分割、非心圓非等距分割、非角度等距分割、非角度非等距分割。骨架的分割及位置都是有規則可循。此部份是在決定後方式與間距後，便可以透過轉換繪製平面及複製的指令即可完成。

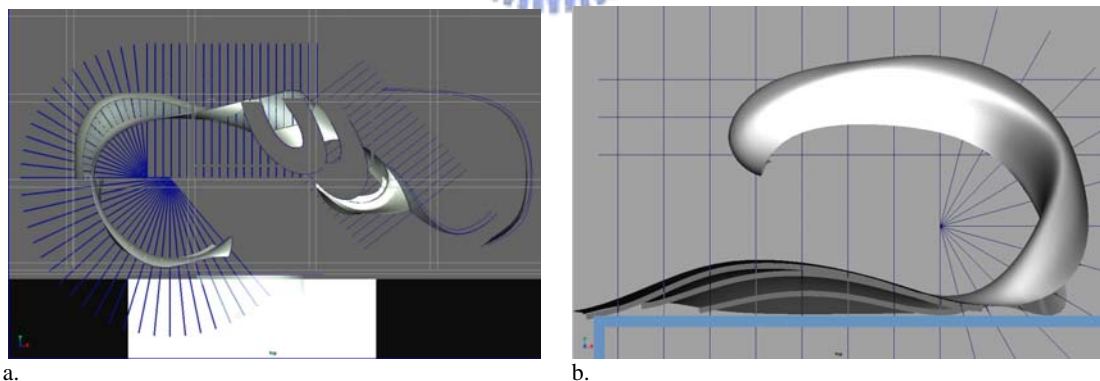


Figure 4.2 骨架分割方式案例(a, b)

製作投影骨架叫心線

骨架製作的第二步驟即是將決定好的投影線 (Figure 4.3)，投影到設計定案的自由形體曲面。輸出所得到的投影自由曲線，作為骨架生產的叫心線。而此步驟是透過電腦軟體的投影指令，指定方向後便可直接輸出。

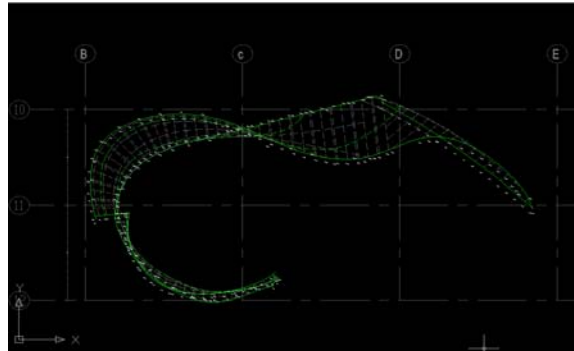


Figure 4.3 製作骨架投影線

產生骨架

得到骨架中心線後，便可依據決定好的骨架斷面產生實體的骨架(Figure 4.4)。此步驟經由電腦指定中心線的路徑及斷面，便可生成所需的骨架。

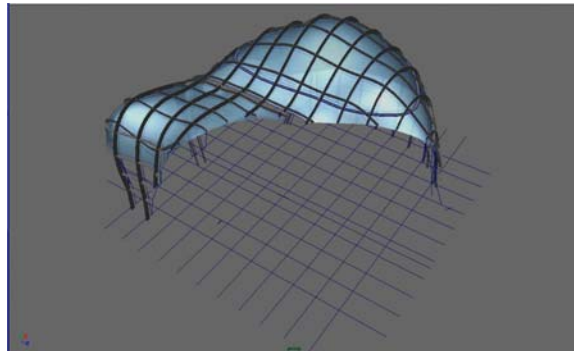


Figure 4.4 產生骨架

修正骨架

透過電腦製作骨架，最後步驟必須考慮實際組裝的問題，如圖面的骨架形式，並無法在真實的過程如預期的組裝起來，所以骨架產生後，必須考慮真實組裝過程，結構骨架不合理的部分予以去除(Figure 4.5)。此步驟必須透過模擬骨架組裝的過程，以測知不合理的骨架部份，最後才接骨架得到最後的資料。此部分如需程式化，則必須加入許多的判別式，並結合骨架組裝的真實經驗才可能達到。

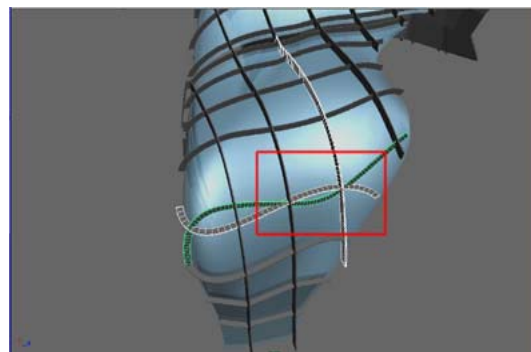


Figure 4.5 骨架不合理部分

骨架凹槽輸出

骨架的凹槽製作可被分成下面幾個步驟，參考物件的製作、布林、輸出 2D 資料、標註。此部份由於數量極為龐大，所以製作時重複的次數也最多，而其程式化的關鍵部份在於參考的布林物件的定位(Figure 4.6)，也就是凹槽深度的決定。其餘部份目前透過既有電腦指令便可解決。

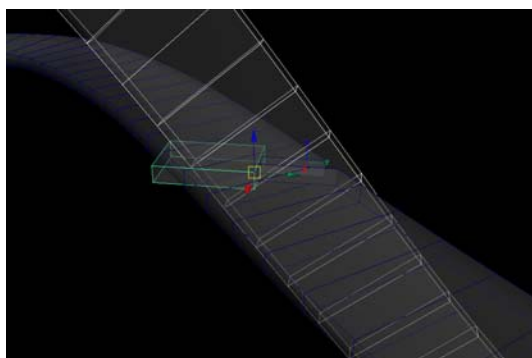


Figure 4.6 製作骨架凹槽

(2) 面材資料輸出

面材的輸出可分成自由曲面與三角化折版資料的輸出兩大類。自由曲面施工圖資料在設計的自由曲面完成後，資料便可直接輸出。而折版的單元生產必須透過雷射切割及折床兩步驟，透過小型案例的經驗，面材資料輸出可被拆解成以下的步驟。

而在上述的步驟中，其從測量夾角到資料輸出部份，是每片單元輸出都必需重複執行的步驟，所以此部分應當程式化，以免去出錯的可能性。而測量夾角到資料輸出之間的程序如 Figure 4.7：

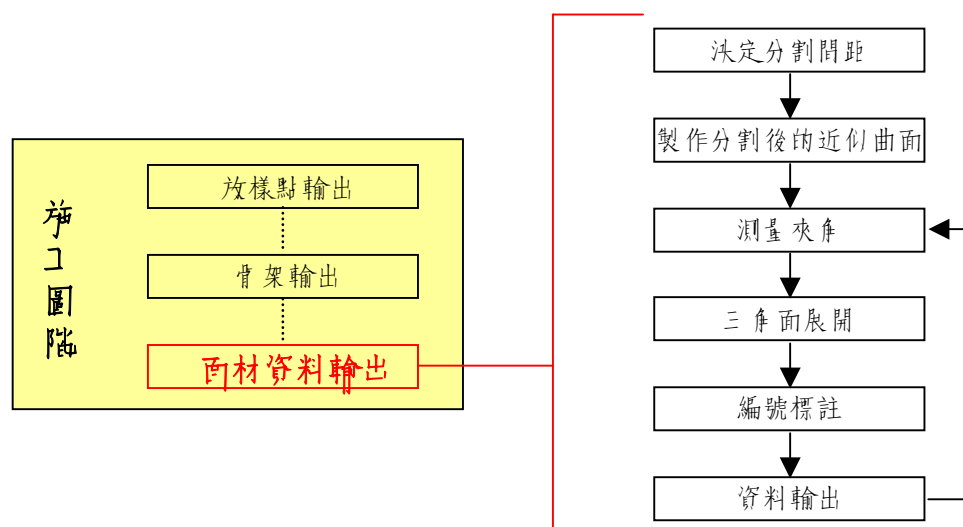


Figure 4.7 面材製作所需步驟

曲面三角化

輸出三角折版前必須將根據原始曲面所製作的近似折版曲面作三角化的分割 (Figure 4.8)，並根據需要調整折版的方向，最後才能做為折版單元製作所需的原始三角化曲面。

轉檔輸出

由於本實驗操作的設計軟體 MAYA，CAD/CAM 的輸出並非為此軟體的主要功能，加上考慮到將來單元製造端的軟體大都以 AutoCAD 為主，所以必須透過轉檔，將資料轉換到 AutoCAD 下去進行操作。

折版對齊 XY 平面

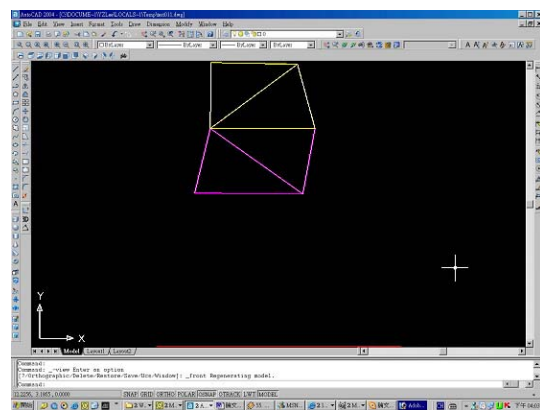
AutoCAD 中的 3D align 指令，將所選取的折版對齊所設定的參考物件，但是這樣的動作必須注意對齊的方式必須一致，否則在資料輸出後，會因為正反面的不同，而導致資料錯誤，無法組裝。

測量角度

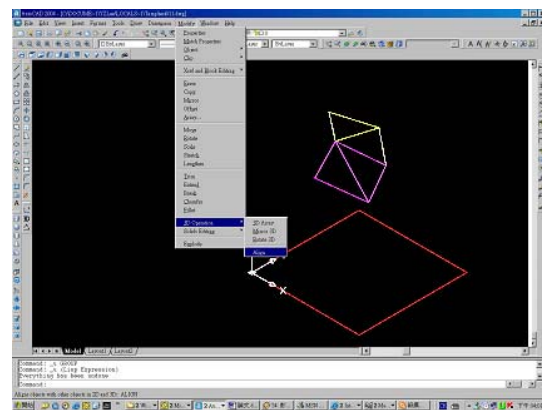
有很多其他的軟體也可以將三角化的曲面作展開的動作，但是這類的軟體展開的方式都是隨機的，當資料量稍多，就會發生資料無法被辨識的情況發生。再者折版加工需要兩三角面的夾角，可是大部分的軟體展開後，並無保留這項資料，所以無法輸出折版輸出所需要的資料。

展開

當測量完夾角後，重複使用 3d align 這項指令，將曲面展開以供雷射切割所使用。



a.



b.

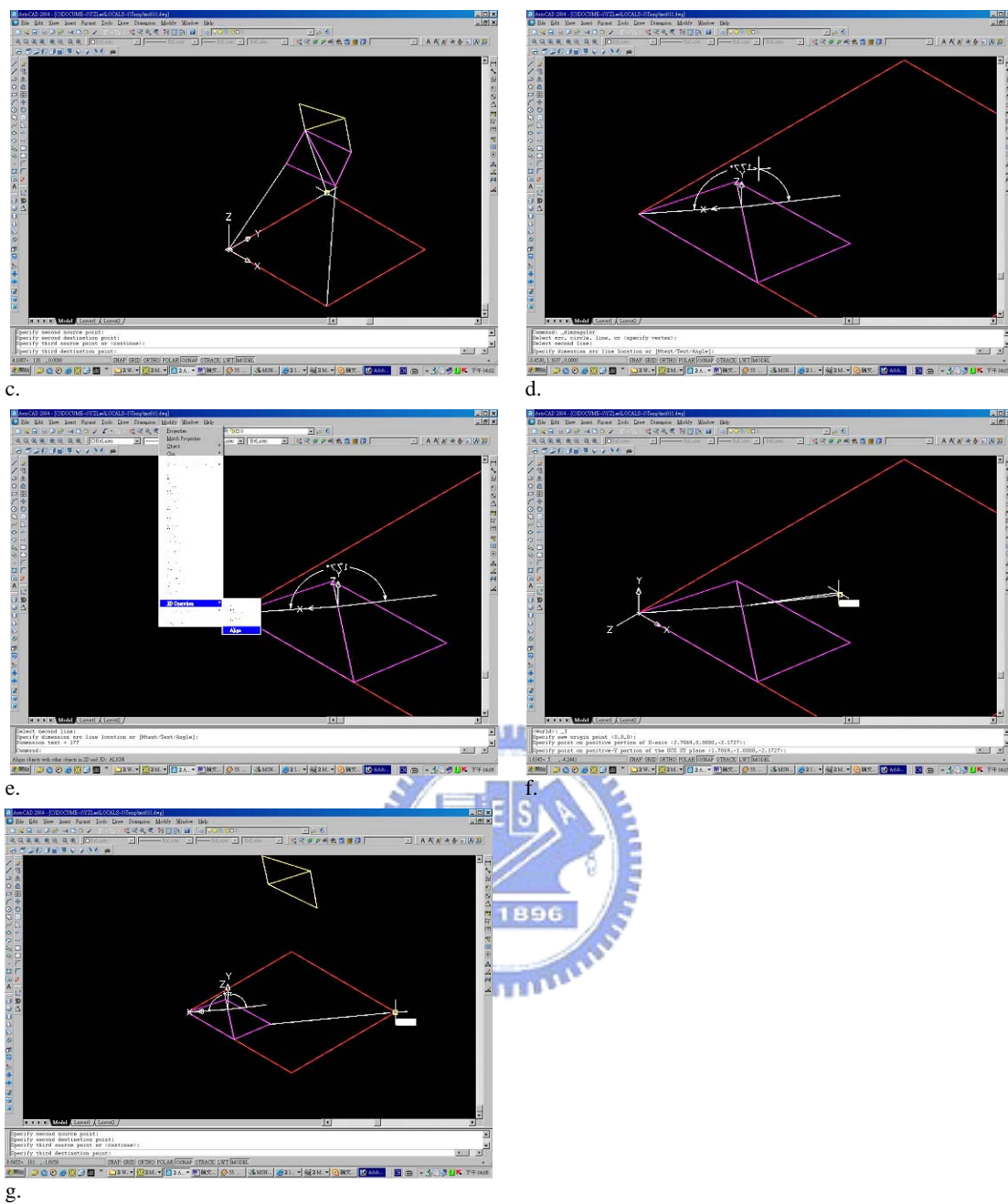


Figure 4.8 三角折版標註尺寸步驟(a-g)

標註尺寸及編號

當所有資料都被紀錄後，最後進行有規則的編號及標註尺寸(Figure 4.9)，以利現場的組裝及減少錯誤的發生。

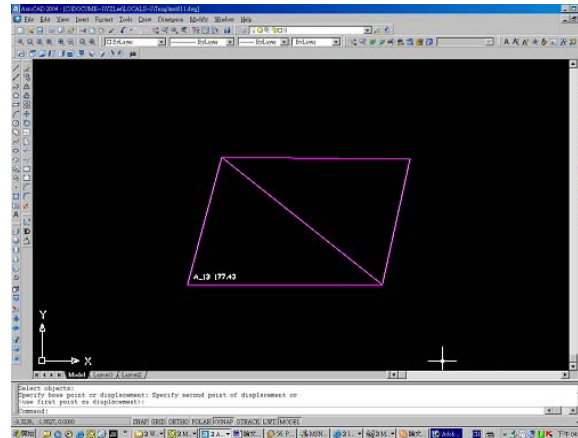


Figure 4.9 標注尺寸

(3) 圓管資料輸出

圓管在製作上只能加工單一半徑的圓弧，所以在設計大致定案後，必須針對圓管部分加以修正，將原本無規則的自由彎曲圓管，用數段有固定半徑的圓弧取代，並標註內外徑。而過去此步驟都是透過人工操作，但是人工操作在取近似圓弧時，全憑設計師主觀認定，精準度的控制上因人而異，所以應該透過程式化，提高精準度。

透過以上的分析可以發現在自由形體的設計及組裝上有許多重複而繁瑣的步驟，要從小型自由形體建構完整的L型自由形體建築設計過程，重複處理資料的步驟漸漸透過媒材的手法，將其健全，才有可能處理因為尺度漸增而資料量隨之增加的L型甚至是大型的自由形體設計。

本研究根據上述的重複性步驟分析，發現在折版資料處理輸出的流程，較為單純，且折版的資料處理量佔整體資料輸出相當高的比例，所以本研究將折版資料的輸出自動化，作為發展自由形體設計組裝媒材科技的第一步。

4.1.2 資料輸出程式化

程式考慮到與單元生產流程軟體的整合，所以選擇 AutoCAD 裡的新開發的 Visual Basic 作為開發的工具，以避免將來透過轉檔資料發生問題。程式執行結果如 Figure 4.13，部份程式如下：

```
'Put the duplicate point to UPt(1) and UPt(2), put another two point to UPt(3) and UPt(4)
'用泡泡排序法，只取前三個點排序，因為重複點一定會出現在前三個L型(第一個3DFace)
For I = 1 To 2
    For j = I + 1 To 3
```

```

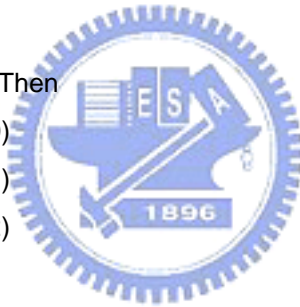
If UPt(l, 1) < UPt(j, 1) Then
    swap UPt(l, 0), UPt(j, 0)
    swap UPt(l, 1), UPt(j, 1)
    swap UPt(l, 2), UPt(j, 2)
End If
Next j
Next l

' DEBUG only
If DEBUGING Then
    For l = 1 To 4
        Debug.Print pointToString(UPt(l, 0)) + " " + If(UPt(l, 1) = 1, "**", "") & " " &
getDistance(UPt(l, 0), theOriginPoint, True)
    Next l
End If

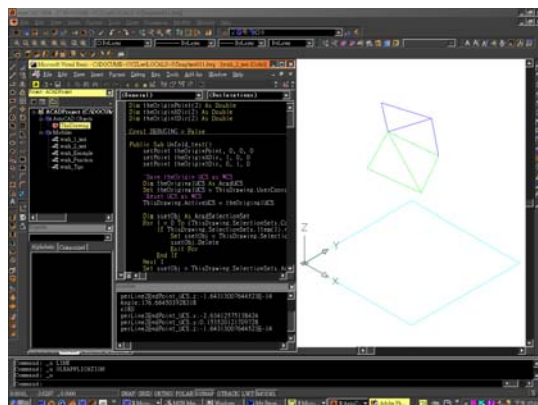
'x 點比較小的定義為 UPt1
If UPt(1, 0)(0) > UPt(2, 0)(0) Then
    swap UPt(1, 0), UPt(2, 0)
    swap UPt(1, 1), UPt(2, 1)
    swap UPt(1, 2), UPt(2, 2)
Exit For
End If
Next l

Set ssetObj = ThisDrawing.SelectionSets.Add("TEST_SSET")

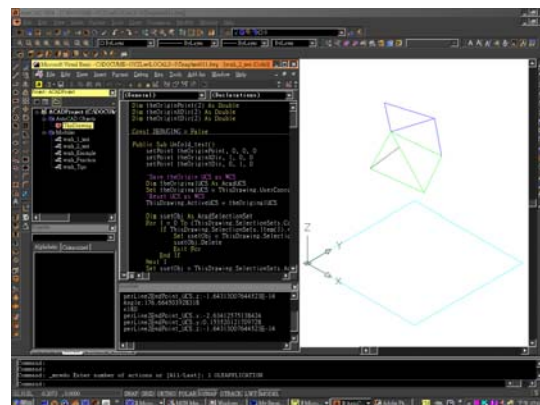
```



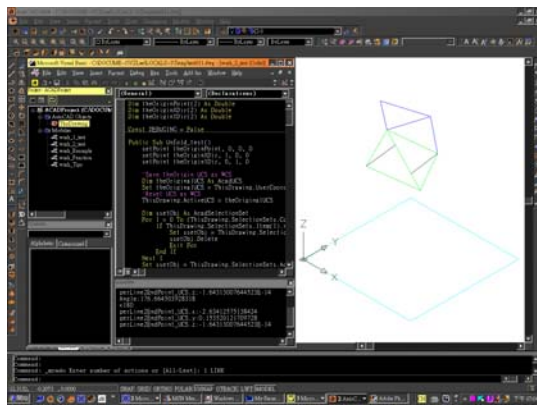
最後以隨機製作的三角面材對程式進行測試(Figure 4.10)



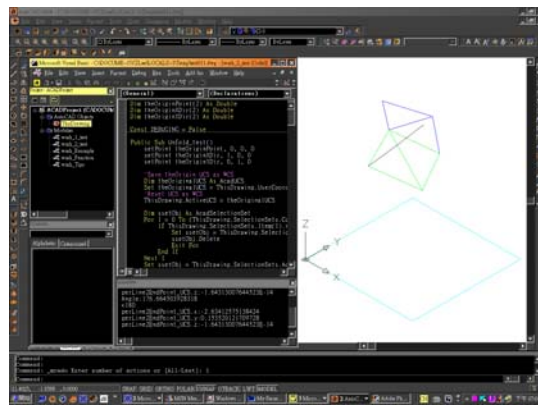
a.



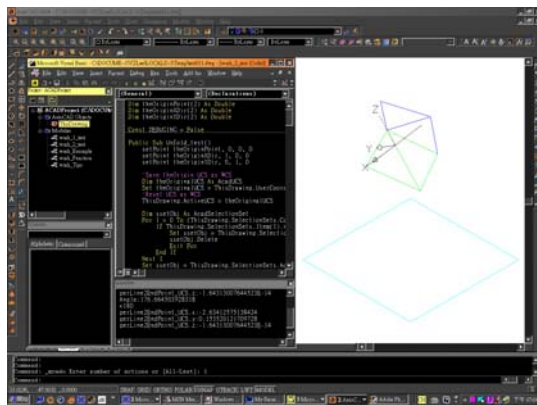
b.



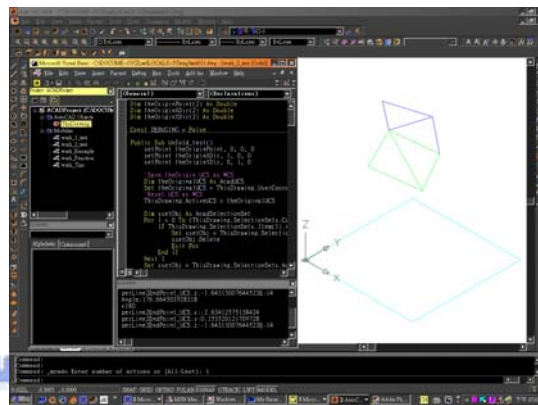
c.



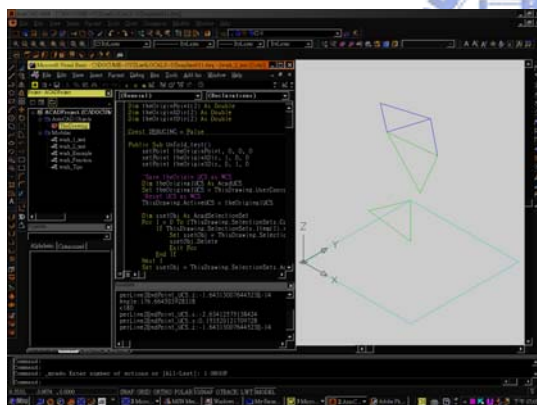
d.



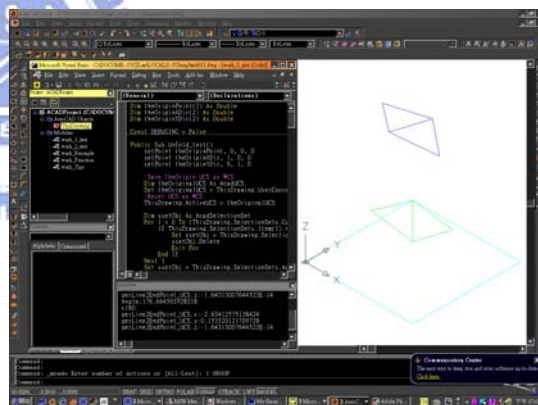
e.



f.



g.



h.

Figure 4.10 程式執行步驟(a-h)

程式最後執行過數次後，及數次的除錯後，已經可以運行。但主程式所滿足的是最基本的功能，在幾方面還有改善的空間。首先，由於轉檔後座標系的不作，加上自由形體的設計上，曲面變化複雜，牽涉太多的判斷式，所以參考點的相對位置不容易定出來，但目前程式應用上開始必須先調整曲面至較容易判斷的位置，以彌補目前程式的不足。第二，目前程式初步發展應加入視覺化的介面，以便操作，並可省掉必須在兩個環境中切換的麻煩。最後，由於原始的折版面必須從另一個程式 MAYA 轉檔過來，在操作上稍嫌繁複，希望將來有機會進一步將折版的產生，直接是由 AutoCAD 產生，可以省去轉檔間的繁複，也降低資料產生錯誤的機會。

4.2 建構卍型自由形體設計建造流程

當折版的資料輸出流程被程式化後，卍型的自由形體建築，有了可以被標準化的基礎。另外，透過三個案例修正公信案卍所提出的設計流程，也獲得了一個小型自由形體建造設計的完整流程。基於小型流程的基礎，本研究將透過卍型的設計，利用相同的設計媒材及流程，並針對卍型自由形體建築基本問題，如結構、室外防水、風等深入討論，探索小型流程的缺失，進而補足其不足，最後希望獲得一個初步的卍型自由形體建築的流程。

4.2.1 大連深圳總部

大連電子深圳總部由於規模比過去所作為實驗的設計案還要大很多，與本研究有關係的大致可以分為辦公大樓大廳設計、雨披、警衛亭、戶外自由形體雕塑幾部份。本案涵蓋了自由形體設計上的幾個方向：

卍型規模結構

小型設計案如公信、銘傳新藝術卍心...等由於尺度小，在結構及防震上，可用經驗值作為結構的基礎，不會有結構上的問題。本案的辦公大樓大廳設計，長 60m、高 14m、深度 20m，在尺度上不能用經驗值加以判斷，這也是建造卍型自由形體，預期卍心須解決的問題。

戶外結構

過去的幾個案例卍，基地都在室內。所以在建造上，無須考慮在戶外所必須遭遇的問題，如防水及風力影響結構等問題，本案例卍的雨披與警衛亭，都是獨立在戶外的，本身有承重、受風力位移及防水等考量。

卍型自由形體折版資料輸出

本案的規模相當大，已不可能用人工的方式將資料加以輸出，所以本研究也正好測試程式的可行性，或是程式本身有不足的部份。

新的工法

過去公信設計案完成後，所能測試的新工法都只有一小部份而已。而大連深圳總部的戶外雕塑及警衛亭的部份，由於必須是獨立於戶外，所以本案卍，所牽涉的建造組裝部份，過去所熟悉之工法，必然無法涵蓋，而必須開發新的生產組裝方式，解決建造卍所遭遇的問題。

以下便以小型流程的架構作為研究分析的步驟：

(1) 早期設計階段

基地調查

此基地位於中國深圳龍崗大工業園區(Figure 4.11, Figure 4.12)，基地面積 50,000 平方米，基地上預計建造兩棟主體廠房、食堂、員工宿舍、台幹宿舍，這幾個最主要的功能。本研究，設計的主要基地位於廠房內的辦公室大廳，及戶外的警衛亭。

大廳主體設計方面，過去的小型自由形體設計案例，都是位於室內而且都是在既有的建築物中再興建自由形體，所以包括管線、樑等 3D 的資料取得上，就顯得相當重要。可是本案是一個全新的建築設計案，免去了現場測量管線配置的問題，可是這是一個跟一般建築設計配合的自由形體設計案，所以在一般建築的資料取得及相互的配合上，顯得非常重要。



Figure 4.11 基地圖



Figure 4.12 基地現況

另外在戶外警衛亭，基地本身是獨立的(Figure 4.13)，在這部份的 3D 資料取得較為單純，只需要確定整地後的高層變化即可。



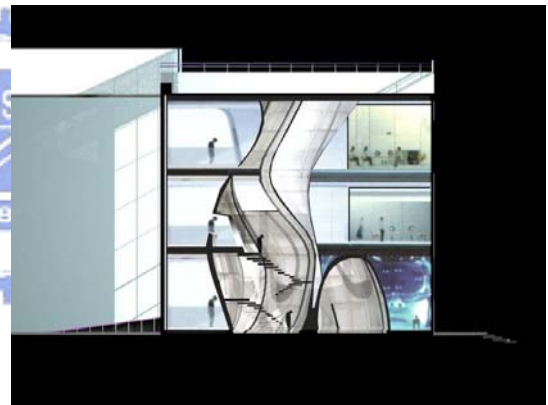
Figure 4.13 警衛亭基地

型體發展階段

在基地的各種條件確定後，在設計的早期，發展了兩個方案(Figure 4.14, Figure 15)，然後進行與業主的溝通與評估，最後選擇 B 案繼續發展設計。

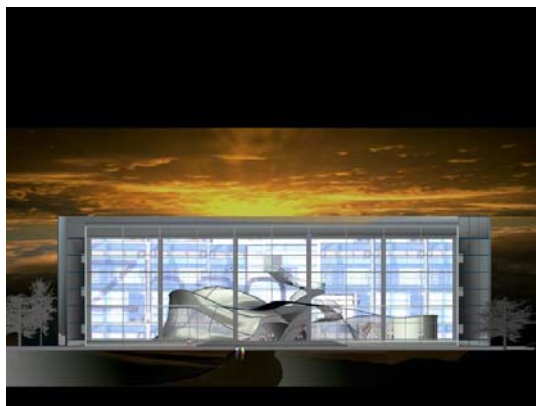


a.



b.

Figure 4.14 方案 A 立面圖(a), 剖面圖(b)



a.



b.

Figure 4.15 方案 B 立面圖(a), 剖面圖(b)

(2) 設計定案

本設計案在經過反覆討論後，A 方案在設計結構上，希望可以將中間主體自由形體，作為主結構，取代傳統結構。這樣的目的，對於整體結構的成本將造成增加，並且增加施工難度。B 方案在主體高度上較低且主體結構除了自重外，並無改變任何廠房主結構，加以在設計功能上 B 方案涵蓋較完整的需求，所以本設計案最後決定以 B 方案繼續發展，便開始進行設計發展步驟如下：

決定組裝製造材料及方式

a. 主體設計

本案的自由形體形式變化較大，設計定案後，決定結構分割方式時發現，若使用依循形體的分割方式較只純粹使用垂直水平的分割方式(Figure 4.16)，在組裝上可以減少許多步驟並減少資料處理的繁瑣。

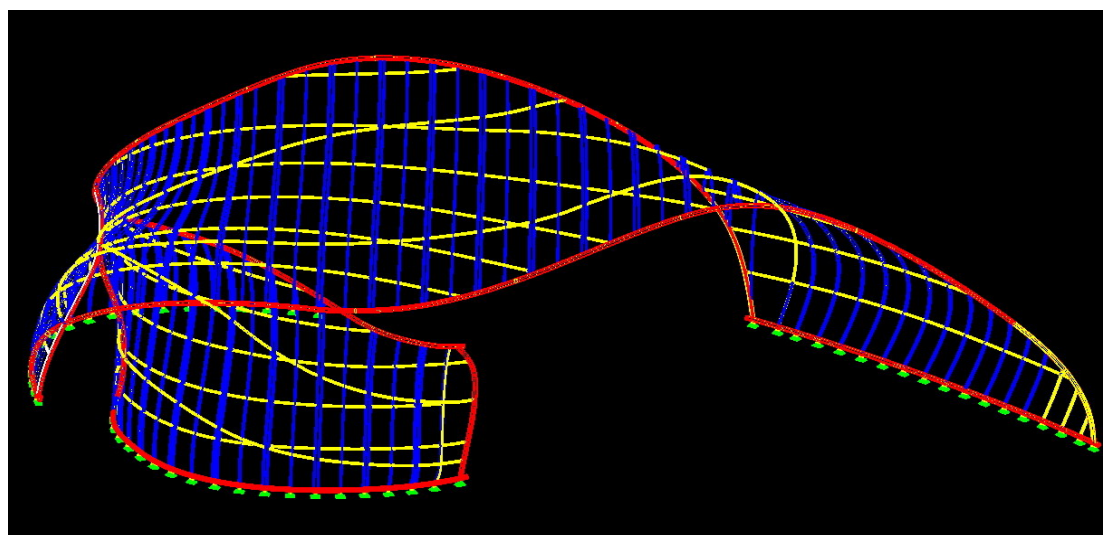


Figure 4.16 主體骨架圖

b. 警衛亭

警衛亭是一個比較完整的單體設計，設計的規模不大，但是由於設計上曲面變化較大，而且位於戶外，所以牽涉的問題相當多。在決定結構方式上，由於變化較大，與主體結構一樣，無法用單純的垂直水平結構解決(Figure 4.17)，在這部份也用了一部分垂直水平，另外一部分則因為放樣容易的考量上，以同心圓的方式解決。但是這樣的設定最後發現，同心圓的方式也還有許多組裝上的問題，最後在這部份也與遠東建築獎數位展區同樣的再修改設計以符合組裝上的需求。

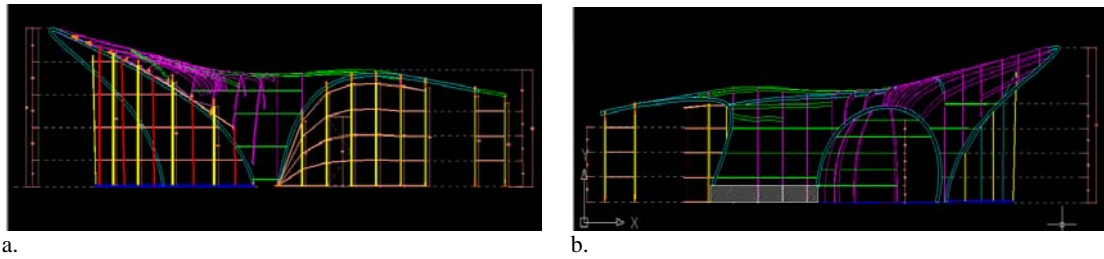


Figure 4.17 警衛亭立面圖(a, b)

c. 雨披

雨披部份，與過去的設計不同，骨架的運用上，由於視覺上的要求，所以運用了一向方管另一向採用圓管的方式進行組裝，所以在這部份的分割方式與過去完全不同，也因為這部份修改了少部分的設計。

結構計算

當所有的骨架都被決定後，並進行結構計算，由於長向空間，自重較大，所以必須經過結構的檢驗。在數位展區的設計中首度應用了結構計算軟體來決定斷面及材料。由於本案的規模相較於過去大很多，此外，部分的設計項目如警衛亭，雨披及食堂戶外雕塑，都會承載風力，所以結構計算與模擬，可以預先在設計上知道會產生多少的位移，及斷面需要多少結構上才不至不足。透過此步驟與修改設計來回確認，最後的結果便可以直接進入施工圖繪製階段。

(3) 施工圖階段

本案中所運用的材料，基本上與過去相同，並無太大的變化，但是由於基地條件及尺度的關係，在設計階段就發現必須透過不同的結構分割方式(Figure 4.18)才能符合組裝的需求。所以在施工圖面的製作上，也因為這樣的原因，在資料的輸出上，必須分割成幾部份加以處理

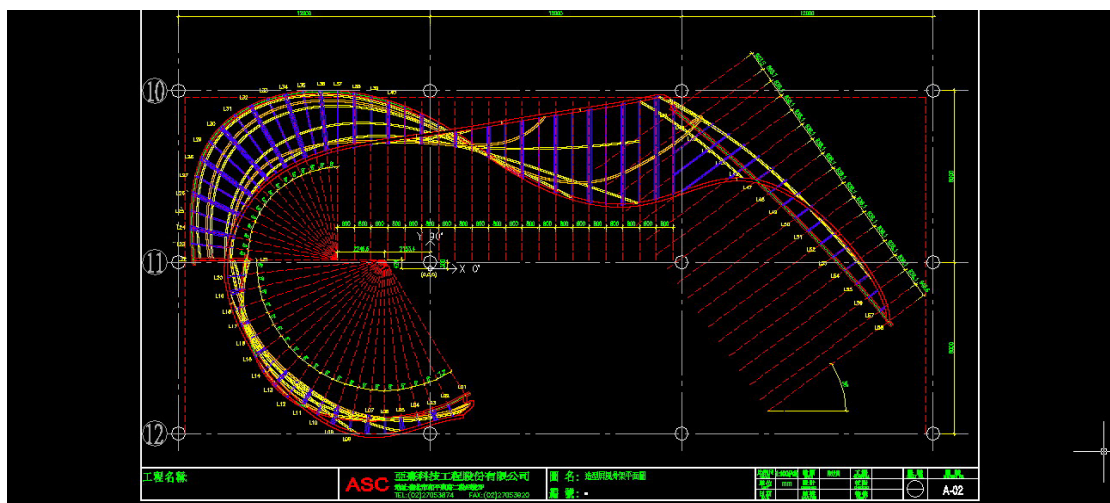


Figure 4.18 大廳設計平面圖

放樣點輸出

基於過去研究所累積的經驗，本案雖然為一新建設計案，但是廠房設計與建築自由形態設計是分別由兩間設計團隊個別進行設計，所以在設計建造的過程中，就必須以廠房設計為主，輸出主要會影響的關鍵基準點，並以這些基準點，繪製放樣圖面(Figure 4.19)，以利將來施工。

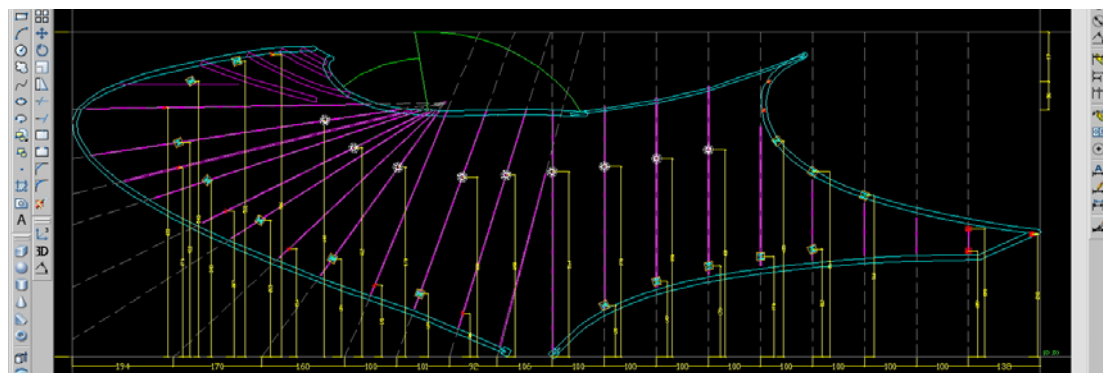


Figure 4.19 警衛亭設計平面圖

骨架

本案由於尺度大，不可能全部使用實心雷射切割骨架，所以本案的主體結構分成雷射切割骨架、方管骨架、圓管骨架這三種。方管骨架在加工上可以採取滾彎加工，但是這樣的加工若不配合 CNC 則精準度上較難掌握，所以在必須採取雷射切割版材最後加以焊接。在資料的輸出上，雷射切割骨架及圓管骨架的資料與過去無異，在方管加工資料則必須增加給內外徑的骨架資料(Figure 4.20)。

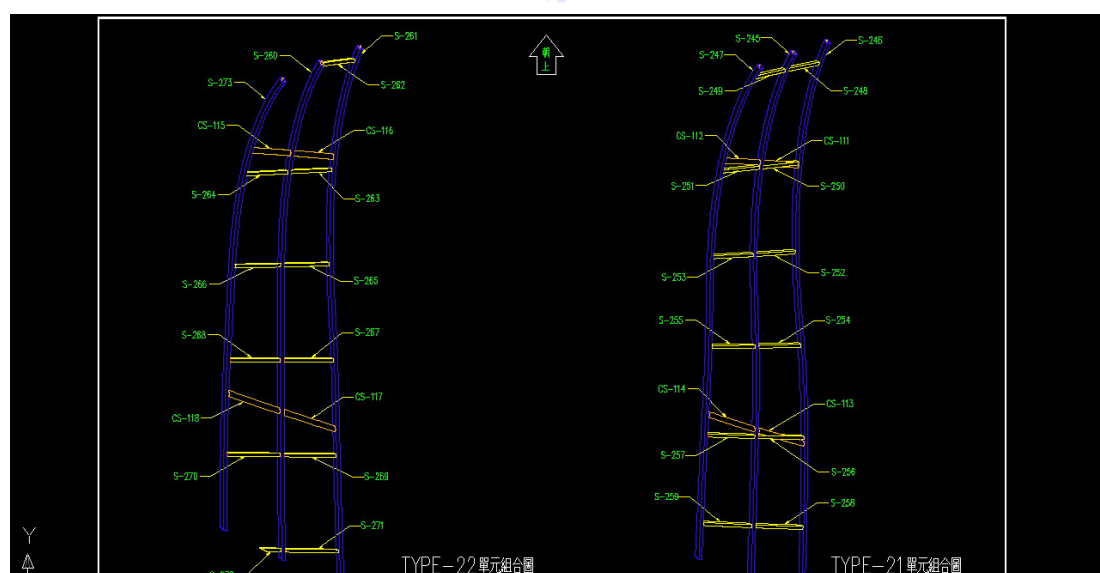


Figure 4.20 骨架單元製造圖

面材

本研究，除了採用先前案例所使用的面材，包括折版、曲面成型版，更進一步採用新的面材，包括金屬浪板、三角玻璃面材、混凝土噴塗面材這幾項材料。希望透過這些新的材料的採用，比較與過去案例中所使用的材料的不同，並解決新材料的使用對於先前研究所提出的流程可能會產生的問題。而各種材料使用說明如下：

a. 面材的折版

透過程式的輔助，在折版資料輸出上，效率上確實提高許多。曲面成型版，由於考量到經濟效益的問題，所以決定不採用預先成型而在現場端版的方式加以製造，所以資料並無需要特別製作加工圖面。

b. 金屬浪板

金屬浪板曾大量被使用在傳統的建築設計上，但過去都僅僅使用在垂直水平的建築上，對於這樣的材料使用在自由形體設計建造上，在過去研究是屬於新的材料。經過案例分析研究，金屬浪板的加工方式可簡單被分成兩種垂直浪紋、平行浪紋兩種。垂直浪板(Figure 4.21)的加工方式與管材方式接近，必須先透過滾彎成型，然後再比對現場骨架，校正後再加以披覆。平行浪紋的方式，則不需要預先將浪板根據彎曲半徑加工，因為平行向的浪板本身就具有可塑性，所以在單元造價上較前者低許多。但兩種方式的加工方式與端版相同，都必須有個骨架作為支撐，所以也不需要位此製作施工圖面的資料。

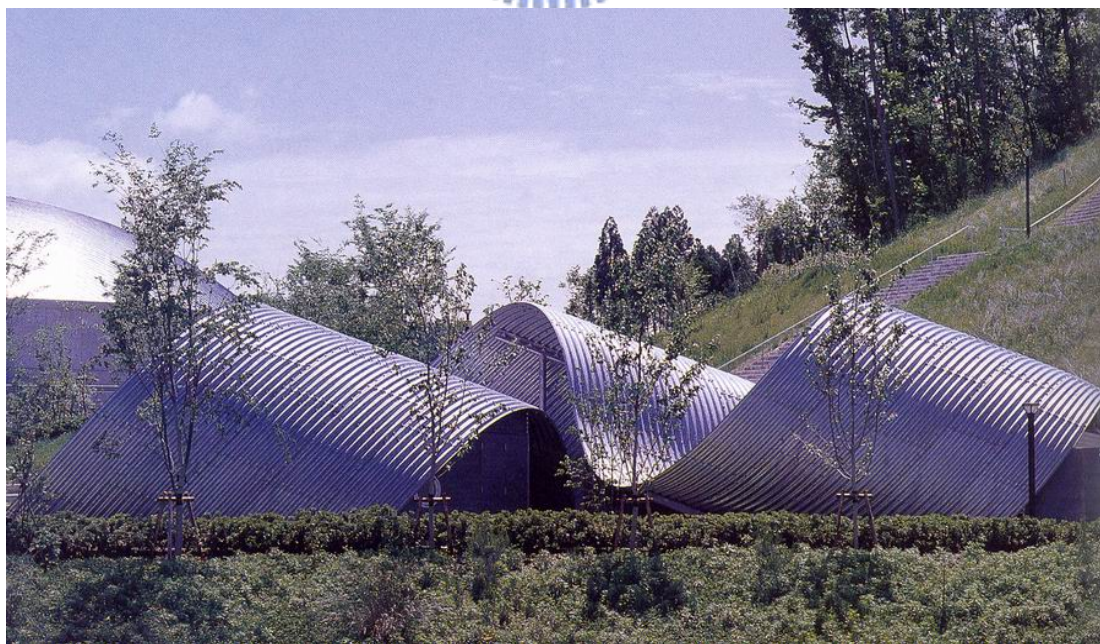


Figure 4.21 連藤秀平作品叫成形後的金屬浪板

c. 三角面的玻璃

主要是應用於雨披部分，但此部份並非在計畫中。雨披的材質原本設定為壓克力，但是經過訪僑及測試，發現壓克力與玻利再造價上相差許多，另外壓克力老化的速度相當快，老化後會產生不透明的龜裂細紋。所以原本資料的製作上，是採取片與折版相片的製作方式。但是發現上述的問題後，必須更改設計由原本的壓克力更換為玻璃。但是玻璃在加工成為折版上，在設計上不可能負荷。所以最後利用三角面的玻璃作為解決的方式。折版在加工上必須保存所有夾角的資料。所以必須另外開發適合的軟體。但是透過三角面的玻璃，只要三角面的分割方式與結構骨架一致，則可透過目前市面上現成的軟體作輸出(Figure 4.22)。



a. b.
Figure 4.22 應用於片模型的展開程式(a), 三角面展開(b)

d. 混凝土噴塗

是過去一般建築常使用的工法。本研究除了過去已知道可以運用的工法以外，也希望從一般建築的工法裡稍做改變調整，即可符合自由形體的組裝建造。研究過混凝土噴塗後，發現，混凝土再噴塗前必須上鐵絲網，而鐵絲網是塑性很高的材料，所以最後決定將食堂雕塑骨架製作完後(Figure 4.23)，再用金屬網包覆，最後以混凝土噴塗。這樣讓自由形體可運用的材料上多了些選擇性。至於資料輸出上，則只需要骨架資料完整，在組裝上便不需要為此種材料做處理。

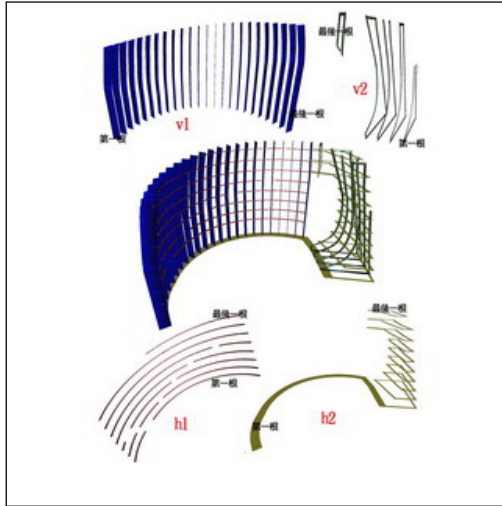


Figure 4.23 餘堂雕塑雷射切割骨架

(4) 單元生產

在深圳大連總部的設計案中，所採用與先前研究相近的材料，如圓管、折版、成行板等，與過去所採用的工法，在設計建造過程中，由於過去研究所獲得的經驗，所以並無遭遇新的問題，所以下面就針對新採用的工法及材料測試過程做敘述。

方管骨材

方管骨材可分成兩種加工方式，一種為滾彎加工 (Figure 4.24)，另一種為雷射切割完骨架四面面材，最後加以焊接。前者加工方式較為快速，但是由於大陸加工方式並無配合數控設備，所以精準度上較低，需要透過比較繁複的校正。後者的加工方式，由於管材半徑及變化都已經被雷射切割的面材所決定，所以精準度較高，但是加工程序較為複雜，成本也相對較高。



a.



b.

Figure 4.24 滾彎方管骨架

三角玻璃面材

此部份雖然是新引進的材料，可是切割玻璃的加工作業，過去在一般建築上已經被大量運用，是個相當成熟的技術，所以加工上也沒有遭遇太大的問題(Figure 4.25)。

本研究所採用的案例，有時間上的限制，加上過去經驗發現，現場組裝過程中容易發生問題，由於設備的限制，要修正問題，變得相當複雜及難以解決。最後由於本案例採用了端版的技術，而端版的生產，必須有結構骨架作為依附；結合以上因素，在此案例中發現，辦公棟主體結構、雨披兩部分，由於組裝上較為複雜，所以必須將自由形體最後一個組裝的步驟拆解成為預組裝及現場組裝兩部份。至於警衛亭、食堂雕塑、戶外捲棚部份，由於尺度小，自重變形部份可以忽略，所以不需要預組裝的過程。

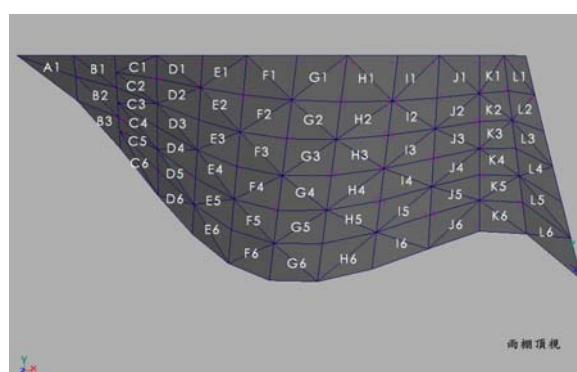


Figure 4.25 雨披三角玻璃面材

(5) 預組裝

由於本研究此次進行的案例，在單元製造及現場組裝上，經過幾次溝通及實驗，發現，單元如發生誤差，必須回到加工廠重新生產，這樣的流程，往往因為誤差的測量不精準，而必須進行數次來回的修改，所以在研究討論後發現，可以透過在加工場預組裝，而降低此部分的來回修正次數，所以便增加過去所沒有進行的預組裝。此部份為過去所沒有的經驗，經過嘗試及修正，可大致被分成以下幾個步驟進行：

測量線基地關鍵 3D 資料

預組裝前必須先從電腦模型中檢視可能與自由形體組裝有妨礙的主體高度，並進行現場測量(Figure 4.26)，確定主體的誤差及三維高度。



Figure 4.26 現場尺寸測量

放樣

獲得現場主體完工後的三維高度及誤差後，必須於預組裝現場，可能影響的關鍵點在預組的場地叫放樣出來，作為自由形體組裝的依據，也可藉此得知自由形體組裝後的誤差。

結構骨架組裝

在進行完放樣後，便進行結構骨架的組裝(Figure 4.27)。由於預組裝現場並無主體建築的結構，所以在預組裝上允許使用大型的機械設備，加上無場地的限制。所以在預組裝上並無太大的問題。



Figure 4.27 骨架預組裝

測量校正

骨架組裝的過程叫，必須進行 3D 空間關鍵點的校正(Figure 4.28)。在此步驟發現，由於結構骨架的扣工是採用彎管的方式，所以有著些微的誤差，加上組裝後，自重產生的變形，所以在少數的骨架，必須拆解重新扣工。



Figure 4.28 放樣現場尺寸核對預組裝尺寸

面材單元組裝

面材分成預生產面材及端版面材、壓克力幾部份。

預生產的三角折板部分(Figure 4.29)，雖然骨架已經過校正，但是在校正並非將所有的 3D 座標做校正，而只校正關鍵 3D 座標點，所以過去預先生產的折板，由於這樣的因素部份無法使用。所以必須在取得骨架組裝後的三維資料。但是由於本案有其時間上的限制，加上誤差的面材數量並不多，所以最後決定以現場測量重新生產面材的方式解決。但是由於這樣問題的發現，由於 H 型的自由形體自重較大，單元生產即使經過校正的組裝元件，在組裝後，還是會產生變形，所以在設計上應避免連續面材的密接，這樣才能避免面材的累積誤差。另一種方式可以使用新媒材---空間掃描器，作為解決方式，也就是利用空間掃描器獲得 3d 骨架的資料，在進行單元生產，但是由於此次的設計方案有時間的壓力，並無法做這樣的實驗進行。

端版部分，由於考慮到搬運到現場過程中，會產生變形。所以端版的製造必須到基地現場才生產。



a.



b.

Figure 4.29 三角折版生產成品(a), 三角折版預組裝(b)

成形壓克力部分由於壓克力本身具有相當高的可塑性，透過電腦檢測發現，由於本案的分割採取 70*140cm，相較於整體的曲面變化，大部份的單元，都在可塑性的容忍度內，所以，此部分用市面上容易取得的曲面展開程式(Figure 4.30)，將所需的面材雷射切割，然後直接組裝(Figure 4.31)。



Figure 4.30 自由曲面展開

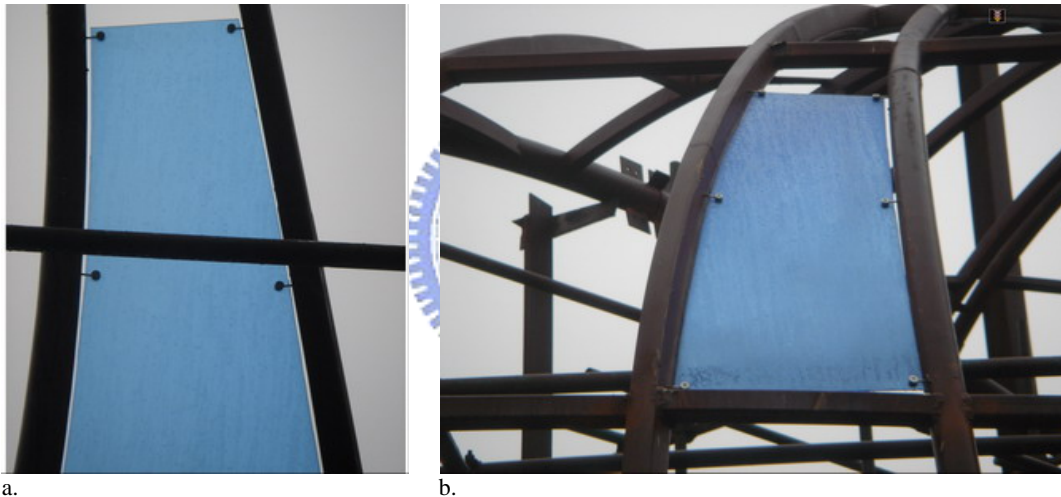


Figure 4.31 壓克力面材試組裝(a, b)

拆解及取得新放樣校正點

拆解並非是將所有的組件一一拆解，以主體而言是將組裝好的主體，拆解成多個元件(Figure 4.32)，以組裝好的形式，至現場組裝。由於預組裝完成後，會產生誤差，所以過去所執行的放樣點，已經不精確，必須重新測量新的放樣點做為現場組裝使用。

而雨披由於尺度相較於運送而言，是可以容許的(Figure 4.33)，所以就以預組裝的成品直接拆解運送到現場與結構物組裝。



Figure 4.32 主體骨架分批拆解



a.



b.

Figure 4.33 捲棚骨架(a, b)

(6) 現場組裝

現場組裝部份進行的步驟如下

放樣

本案的自由形體與過去相比，只是確保組裝後與基地既有現況的建築設計可以配合(Figure 4.34)，所以包括雨披、捲棚、警衛亭、食堂雕塑這幾部份，都與既有建築物無關，所以在放樣上與過去的小型建築設計無異。大廳自由形體及雨披的組裝則與現有建築物有關。

雨披部份由於尺度較小，所以放樣點與原先設計的一致。大廳部份，由於在預組裝過程就發現組裝後會有誤差，所以，施工圖階段的放樣點已經與現場有誤差，所以此階段的放樣必須以預組裝後的放樣點為主，重新製作放樣。如圖所示。



a.



b.

Figure 4.34 現場放樣(a.), 預埋建定位(b.)

骨架運送及組裝

食堂雕塑及警衛亭部分，由於規模較小，所以是將單元運送到現場直接組裝 (Figure 4.35)，與過去的程序並無太大的不同。但在辦公棟自由形體主體設計及搭棚部份，則是將預組裝的主體分成好幾部份作為運送，但是運送的過程會產生變形，所以將骨架運送到現場組裝後必須先將單元校正過才可進行主體組裝。



a.



b.



c.



d.



e.

f.

Figure 4.35 骨架運送組裝(a-e)

主體校正

由於主體在加工廠運送到現場過程必須被拆解才能運送，所以單元的骨架，在進行運送的過程中，由於自重的問題，會產生變形。再者，由於拆解及重新組裝過程中，必須用高溫加熱切割及焊接，冷脹熱縮後，也有變形產生。所以主體骨架在運送到現場組裝完成後由於上述的誤差，所以必須依照預組裝所得到的校正點進行校正 (Figure 4.36)。



Figure 4.36 主體組裝校正

面材製作及組裝

面材的製作及組裝可分兩部份來談。折版面材組裝上，由於在主體預組裝上已經發現有單元製造的面材在折版的部分已經有誤差，在重新製造後已經可以精確的被組裝 (Figure 4.37)。在曲面成型板上，不論是壓克力或是金屬材質，在工法上必須在現場施作，所以在組裝上也沒有太大的問題發生。



a.



b.

Figure 4.37 壓力面材現場組裝(a), 端版現場組裝(b)

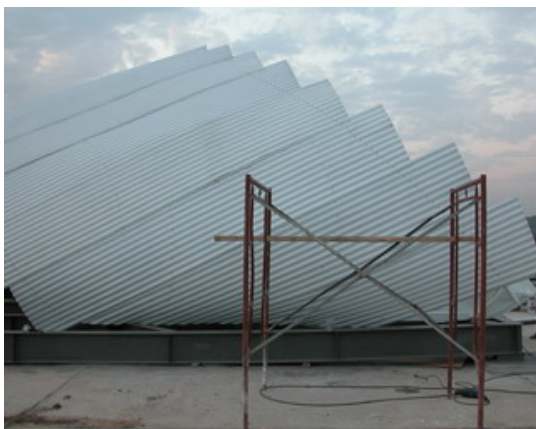
金屬浪板部份，雖然在本案中第一次使用的這樣的新材料，但是由於本次採用的彎曲面與版材垂直的方式施工，由於可塑性大，組裝後經測試，在防水及抗風上，都獲得相當好的解決(Figure 4.38)。



a.



b.



c.



d.

Figure 4.38 屋頂捲棚加工組裝(a—b)

4.2.2 叶型自由形體建築初步流程

透過以上的分析，本研究可分成針對自由形體的組裝的新媒材發展及設計流程兩部分來談，媒材部份的發展，透過第一階段的程式完成，在本案的應用發現程式可被執行，以及透過程式的運用，可大量減少成本及人力。另外更進一步發現在預組裝完成後，由於組裝後的誤差，而面材的組裝與骨架的精確度有關。所以新的媒材應用上，應該加入空間掃描器的使用，來獲得準確的三維骨架資料才能進行製造。最後自由形體的造價高的一部分原因是因為模具的造價，所以應該開發模具多次使用的數控模具，以減少成本。

另一部分談到叶型自由形體的設計流程，基於小型自由形體設計流程執行本案後發現小型流程有幾點不足：

第一、在小型的自由形體流程裡的前三個步驟，並無發現任何的問題，因此表示小型與叶行自由形體在流程上，前三步驟雖然設計方法或工法不同但在流程上是一致可行的。但是小型的流程因為尺度小，所以在組裝上並沒有預組裝這個步驟。但是在叶型尺度，則發現預組裝這個步驟的重要性，所以在單元生產的步驟後，叶型的流程應增加此步驟。

第二、叶型的自由形體在組裝後會有因為自重產生的變形問題，所以在面材的單元生產應該在骨架的預組裝後，如此才能得知誤差，根據實際的自由形體的骨架執行面材的單元生產，如此才能準確，所以預組裝階段應該與單元生產階段產生迴圈的關係。

第三、由於必須考慮組裝後誤差以及運送變形的影響，所以雖然在施工圖階段，已經輸出放樣點，但在預組裝後，必須再次取得新的放樣點，以利最後在現場的組裝。

最後，透過上述的分析可以將得到叶型的自由形體組裝流程(Figure 4.39)。

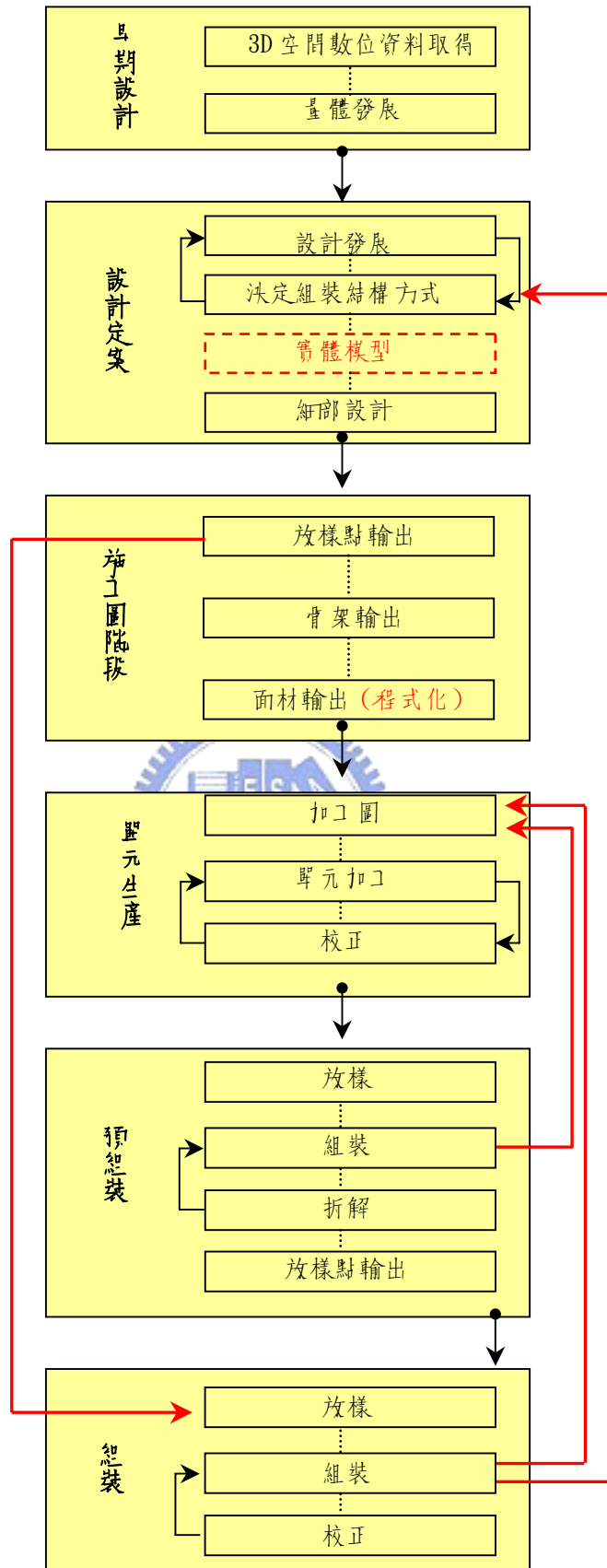


Figure 4.39 叫型自由形體設計組裝初步流程

五、 結論與未來研究

研究結果可分成設計流程與新媒材發展兩方面來談。自由形體設計流程研究方面。首先，本研究以先前研究所提出的設計建造流程為基礎，操作三個規模相近的自由形體，每個案例都設定特定的條件，以釐清先前研究所提出流程中，可能有問題的部分；而透過這樣的操作，首先發現過去所提出的流程，在設計發展早期階段，所提出的幾個步驟，並不會因為建築形式或使用的設計工具不同而有所差異，所以在探討自由形體建築設計流程的研究中，可以不考慮早期設計前的步驟。另外在銘傳新藝術中心及北美館的操作後發現，自由形體建築設計建造流程，實體模型的運用並沒有一定的必要性，而可以靠軟體或其他媒材補其不足。但是由於此步驟一方面只透過三個案例分析研究，加上小型的自由形體研究案例，所涉及的範圍及問題較為狹隘，也較容易掌控，所以實體模型的存廢與否，在未來應將透過更多的案例驗證分析，才能驗證此步驟的正確性。

最後三個小型自由形體案的驗證，分析結果發現先前研究所提的小型自由形體設計流程在設計定案到施工流程中，忽略了施工圖及單元生產兩階段，並且透過實驗發現，這兩個步驟在自由形體設計建造的過程中佔有相當重要的角色，並且施工圖及單元生產兩階段，會與設計最後定案產生相互修正的關係。並根據研究分析結果，提出修正後的完整的小型自由形體設計流程。

研究的第二部份便開始基於所提出的小型流程，進行大連深圳總部的H型自由形體建築案，發展H型自由形體設計流程，設計建造過程中發現小型流程在操作H型設計案的不足，由於尺度不同的關係，小型自由形體建造過程中，忽略了幾項重要的步驟。首先在H型的自由形體，單元生產到組裝過程中，由於牽涉到與設計間相互修改，所以必須在組裝之前，先有預組裝的步驟。透過預組裝可以在設計、施工圖到單元生產過程中，不斷的修改設計，降低最後組裝所會遭遇的錯誤及困難到最少。另外小型自由形體，由於自重較小，且不需要承受風力等外力，所以忽略的結構計算的許多細節，所以H型的在施工圖的過程中，在設計前期對於結構方式的決定及計算佔有相當重要的地位。最後，本研究不但提出了一個H型自由形體建築設計的初步設計流程，並更進一步釐清，小型自由形體設計建造流程與H型流程的不同。

至於在新媒材的發展方面，首先透過實驗過程問題的發現及解決，本研究歸納出幾種新媒材在軟硬體上的發展方向。在執行三個小型案例過程中便發現，施工圖階段所必須處理的單元生產資料量，佔有相當大的工作量，而仔細分析結果歸納出資料的處理上的一個標準的輸出流程，而由於尺度上的不同，H型的自由形體在施工圖處理的量上，遠遠多於小型的自由形體，所以透過程式的撰寫，將此標準流程自動化，便自然而然成為自由形體建造設計過程中不可或缺的一步。而本

研究進行L型自由形體的建造設計前，便挑出較繁複的部份，將其透過程式自動化，最後，也在L型案例中應用，成功的縮短資料輸出的時間，並提高資料的錯誤，驗證程式自動化在自由形體設計建造中的重要性。另外，透過幾個從小到大的案例執行發現，由於面材的非模塊化，所以模具只被使用一次，所以自由形體建築的造價在此部分一直佔有相當大的比例，透過本研究分析，歸納出應發展多次模具的開發，如此便可將造價降低。

在設計建造流程研究限制上，本案雖然修正了先前研究所提出的小型流程，並提出L型自由形體的初步流程，但這樣的所有的設計建造流程所涉指的僅止於本研究案所提出的垂直水平及有特定系統的骨架、面材組裝方式，為主的自由形體設計案，所以對於其他不同於本案的組裝方式，在本研究中並未加以考慮。

另外，小型與L型自由形體設計建造流程比較中，可以發現L型自由形體設計建造流程較小型流程，除了各階段間的關係有改變及修正外，最大的不同在於L型流程多了預組裝的步驟，這樣的步驟在本研究中解決了許多單元生產與現場組裝的問題。但是此步驟與施工團隊的技術與現場條件有關，所以預組裝步驟，雖出現在本研究的L型案例中，但其存在的重要性及是否這樣的步驟僅僅為此案特有的現象，還必須透過更多的案例分析，才能決定此步驟是否為個案還是L型流程的必要條件。也都應該列入研究限制中。

新媒材的發展的研究限制上，首先本研究雖然初步獲得的資料輸出自動化程式，但自動化部份僅解決整個流程中大部分的問題，且並不適用於其他不同於本研究採用的設計建造方式，未來研究上首先應逐步將其他重複性的步驟程式化，以完備整個流程中需要自動化輸出資料的步驟。最後應開始其他不同的結構方式適用性的自動化研究。

另外，透過本案例研究發現，自由形體台灣的設計建造流程，由於工業技術及經費預算限制的因素，歐美的自由形體設計建造流程並無法完全的運用在台灣自由形體設計建造上，如自由形體金屬曲面板的製造，由於在台灣單價過高無法執行。但如先前研究中提出的曲面最佳化，台灣硬體科技的不足，可透過軟體的撰寫彌補不足。也就是將曲面透過程式獲得最佳化，將模具降到最少的程度，以降低造價。因此曲面的最佳化程式撰寫，應為台灣發展自由形體所需要的新媒材中的關鍵的發展要素。

研究貢獻上，過去台灣自由形體建築的設計建造上，都未能有真正落實的機會。也由於缺乏實際案例，在研究上更是尚未開始。本研究提出的小型自由形體設計建造流程及L型初步流程，可為台灣建築在自由形體的設計建造上，提供一個可依循的方向。並透過本研究初步進行的資料程式自動化及歸納出的新媒材發展的方向，為將來的自由形體建築設計，在施工圖的輸出上可以縮短時間降低成本；在建造上可以因為新媒材的幫助標準化施工流程，讓自由形體的設計建造變

得可能。

未來自由形體建造設計流程研究上，由於本研究提出的初步的H型數位建築的設計過程，只是針對單依建築設計的過程H所分析得到的結果，並未透過許多實驗反覆驗證，所以在未來的研究應仿照小型流程操作，透過其他數個規模及問題都相仿的H型建築案例實驗，並訂下特定條件，針對本流程驗證過程的完整性，修正其因各種因素所產生的問題。

但可預見的是，在未來H型的自由形體建築設計H，必定會遭遇幾個問題。首先，在小型案例到H型案例過程H發現，過去小型案例所採用的材料(如生鐵骨架)，及結構方式(如垂直水平分割)，在進入H型案例會因為形體的複雜程度及結構載重的形式不同，而凸顯過去採用方式的不足，而必須尋找新的材料及結構方式替代。所以未來的H型案例H，也必定會遭遇材料及結構方式不足以處理的情況，而必須發展新組裝方式，必然也會相對的衍生流程步驟的修正問題。第二，小型到H型的案例H發現由於過去處理的小型空間單純較為容易掌握，但是H型案例便開始發現空間相互間的關係變得複雜，在空間感的掌握上較不容易控制，此問題除了將來進行H型實驗案例必須面對外，將來可預見的是進行大型的設計案例，此部分的問題應更加的會突顯出來。第三目前不論是小型或是H型的設計案例，都尚未接觸到自由形體本身具有載重的問題，也就是自由形體除了自重及外力的結構處理外，必須進一步面對活載重的考驗，這也是未來研究H必須面對及思考的問題。最後從小型到H型案例過程H發現，小型案例與建築設備及法規檢討並無直接關係，但是H型的案例H已經產生設計主體必需與其他的設備(如燈光、水電)產生相互影響的關係，所以未來大型的案例，必然也會遭遇這類的問題。但也唯有透過將上述的問題逐一解決才可以獲得一個完整的H型的流程，最後並以H型的流程為基礎，進行大型的自由形體建築設計，最後重複操作進而獲得大型的完整流程。

在其他領域相關科技的應用上，如前所述，semi-monocoque 及 monocoque 的應用，很顯然解決了結構問題與空間利用相互角力的難題。透過特殊的結構系統，獲得最大的空間利用。這樣的優點在建築的角度看來，無疑的是項有利的設計建造工法，除了可以擺脫傳統垂直水平的建築結構，讓建築物的形體更加自由外，透過這樣的工法不僅不需要在複雜的空間H增加支撐，還可以獲得更大的空間利用。所以未來研究應嘗試此類的工法與技術使得自由型體的設計建造可以更加解放。

另外在新媒材的未來研究上，首先，本研究提到的自動化部份，僅只針對於實驗案例H的小部份作為開始，為一初步的結果。H型的自由形體施工圖過程H，還有許多其他資料輸出是可被歸納出標準化的流程的，未來研究上應進行這些尚未程式自動化的部份流程的分析，並撰寫程式，將設計到單元生產的施工圖過程縮至最短，也才算是真正的將自由形體建築標準化。至於硬體方面，如前所述應

開發數控的 CNC 模具，讓所有的面材可以透過單一一個可重複使用的模具生產，降低自由形體建造成本。另外在操作由 H 型的案例發現，組裝的誤差是必然產生的現象，所以應透過空間掃描器獲得組裝好的骨架的空間座標，以利面材的生產，這樣的可能性也應列入未來研究。

最後在本文中所提到的自由形體建築，在台灣是個初步的嘗試，所以在設計及建造過程中，不論是在設計或是單元生產階段，可以分析出”試誤”的步驟在整個過程中佔有相當大的比重，這也就是為什麼會在整個流程的步驟中會產生迴圈的原因。這樣的流程無形中也增加了自由形體設計建造的成本及測試的時間與建造時程。而先前研究所提出的 FEM 的分析方式，在進行複雜的資料計算時，在單元的位移上非常的精確，所以在未來的研究中，特別是單元骨架及面材的生產上，如果能及時透過 FEM 的分析方式，便可節省錯誤的時間及經費。透過這樣的未來研究及嘗試，可預見的是，隨著 FEM 的發展越趨完備，自由形體建築設計對這樣的分析方式必定越趨依賴，而也唯有透過更精確且節省經費時間的分析方式，自由形體建築的設計才有漸漸被普及的可能性。



- Akin, O., 1979. An exploration of the design process. *Design Method and Theories*. 12(3/4), pp.115-119. Reproduced in Cross N. 1986 (ed.) *Developments in design methodologies*. New York. John Wiley & Sons, pp. 189-202
- Asanowicz, A., 1996. Using the computer in analysis of architectural form. *Approaches to Computer Aided Architectural Composition*. Asanowicz, A., Jakimowicz, A., (ed.). Poland. Technical University of Bialystok (PL). pp. 25-34
- Asanowicz, A., 1999. Computer in creation of architectural form. *AVOCAAD Second International Conference*. Brussels. Belgium, pp. 131-142
- Ataman, O. and Lonnman, B., 1996. Introduction to concept and form in architecture: An experimental design studio using the digital media. Design computation: collaboration, reasoning, *Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*. Tucson pp. 3-9
- Broek, J.J., Horváth, I., Smit, B. de, Lennings, A.F., Rusák, Z. and Vergeest, J.S.M., 2002. Free-form thick layer object manufacturing technology for large-sized physical models. *Automation in Construction*. **11 (3)**: pp. 335-347
- Burry, M., 1996. The generation and degeneration of form using CAAD: Uncertain certainty. *Approaches to Computer Aided Architectural Composition*. pp. 71-90
- Callicott, N. 2001. *Computer-Aided Manufacture in Architecture*. Oxford. Architectural Press.
- Carter, J. 1973. Computers and the architect. *Series of Four Articles*. Architects' Journal.
- Casale, S., 1987. Free-form solid modeling with trimmed surface patches. *IEEE Computer Graphics and Applications January*. **7**: pp. 33-43
- Cross, N. (ed.) 1984. *Developments in Design Methodology*. London. John Wiley & Sons.
- Dube, R., Herron, G.J. and Little, F.F. 1978. SURFED -- An interactive editor for free-form surfaces. *Computer Aided Design*. **10**: pp. 111-115
- Eastman, M., 1978. The representation of design problems and maintenance of their structure. *Artificial Intelligence and Pattern Recognition in Computer-Aided Design*. Jean-Claude Latombe (ed.), Amsterdam. North-Holland.

- Eastman, M., 1987. Fundamental problems in the development of computer based architectural design models. Yehuda E. Kalay (ed.), *Computability of Design*. New York. John Wiley & Sons.
- Friedman, B., 1989. *Creation in Space*. New York. Kendall/Hunt Publishing Co.
- Friedman, M., 1999. *Gehry talks: architecture + process*. New York. Rizzoli.
- Goldman, G. and Zdepski, M.S., 1990. Twiddling, teaking, and tweening: automatic architecture. *ACSA Annual Meeting*. Washington, DC. ACSA
- Gordon, J. and Riesenfeld, R.F. 1974. Bernstein - bezier methods for the computer-aided design of free-form curves and surfaces. *Journal of the ACM*. **21**: pp. 293-310
- Gordon, J.E., 1988. *The Science of Structures and Materials*. New York. Scientific American Books, Inc.
- Groover, M.P. and Emory W. Zimmers, J., 1984. CAD/CAM computer-aided design and manufacturing. *Englewood Cliffs*. New Jersey. Prentice-hall Inc.
- Huangb, X., Gub, P. and Zernicke, R., 1996. Localization and comparison of two free-form surfaces. *Computer-Aided Design*. **28 (12)**: pp. 1017-1022
- Horváth, I., Vergeest, J.S.M., Broek, J.J., Rusák, Z. and De Smit, B., 1998. Tool profile and tool path calculation for free-form thick-layered fabrication. *Computer-Aided Design*. **30 (14)**: pp. 1097-1110
- Hui, K.C., 2002. Free-form design using axial curve-pairs. *Computer-Aided Design*. **34 (8)** : pp. 583-595
- Jones, J.C. 1992. *Design Methods*, New York. Van Nostrand Reinhold.
- Kilian, A. 2003. Fabrication of partially double-curved surfaces out of flat sheet material through a 3D puzzle approach. *Association for Computer Aided Design in Architecture(ACADIA)*. Indianapolis. pp. 75-83
- Klinger, R., 2001. Making digital architecture: historical, formal, and structural implications of computer controlled fabrication and expressive form, *Architectural Information Management*, Helsinki. pp. 239-244
- Kloft, H. 2001. Structural engineering in the digital workflow. *Digital Real--Blobmeister: First Built Projects*. Schmal, P.C. (ed). Basel. Birkhauser. pp. 198-205.
- Kolarevic, B. 2000. Digital architecture. *Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA): Eternity, Infinity and Virtuality in Architecture*. Washington D.C. pp. 251-256.
- Kolarevic, B. 2001, Digital fabrication. *Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*. New York. pp.10-12
- Kolarevic, B. 2001. Digital fabrication: manufacturing architecture in the

- information age. *Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA): Reinventing the discourse*. Buffalo, New York. Gallagher Printing, Inc. pp. 268-277
- Kolarevic, B. 2003. *Architecture in the Digital Age: design and manufacturing*. New York. Spon Press.
- Kvan, T. and Kolarevic, B. 2002. Editorial: rapid prototyping and its application in architectural design. *Automation in Construction*. **11**: 277-278
- Lartigue, C. Thiebaut, F. and Maekawa, T., 2001, CNC tool path in terms of B-spline curves, *Computer-Aided Design*, **33 (4)**: pp. 307-319
- Leach, N. 2001. *Designing for a digital world*. Cambridge (UK). Wiley-Academy.
- Lee, Y.Z., 2003. A design process for non-geometrical curved spaces. *Education and Research in Computer Aided Architecture Design in Europe*. Austria. Graz - University of Technology. (Poster)
- Liu, Y.T. (ed.) 2001. *Defining Digital Architecture*. Basel. Birkhauser.
- Liu, Y.T. 2002. Reception lobby of Bcom corporation. *Interior*. Taipei. Meei Chu. no. 112: pp. 82-87
- Liu, Y.T. 2003. Reception lobby of Bcom corporation. *Architecture and Urbanism (A+U)*. no. 383: pp. 110-113
- Liu, Y.T. 1996. *Understanding of Architecture in the Computer Era*. Taipei. Hu's.
- Liu, Y.T. (ed.) 2000. *Defining Digital Architecture: 2000 Feidad Award*. Basel. Birkhauser.
- Luca, F.D. and Nardin, M. 2002. *Behind the Scene: Avant-garde Techniques in Contemporary Design*. Basel. Birkhauser.
- Lynn, G. 1995. *Folding in Architecture*. New York. John Wiley & Sons.
- Mitchell, W.J. and McCullough, Malcolm, 1991. *Digital Design Media*. New York. Van Nostrand Reinhold.
- Mitchell, W.J., 1977. *Computer-Aided Architectural Design*. New York. John Wiley & Sons.
- Mitchell, W.J., 1990, A new agenda for computer-aided design, The electronic design studio: architectural knowledge and media in the computer era. *CAAD Futures*. Cambridge (Massachusetts). pp. 1-16
- Mitchell, W.J. 1998. Articulate design of free-form structures. *AI in Structural Engineering*. Ascona. pp. 223-234
- Papadakis, A.C. (ed.), 1987. *Engineering and Architecture*. London. The Academy Group.
- Rahim, A. 2000. *Contemporary Processes in Architecture*. New York. John

- Wiley and Sons.
- Rahim, A. 2002. *Contemporary Techniques in Architecture (Architectural Design)*. New York. John Wiley and Sons.
- Rosa, J. 2003. *Next generation architecture: Folds, Blobs, and Boxes*. New York. Rizzoli.
- Ruby, A. 2001. Architecture in the age of digital producibility. *Digital Real--Blobmeister: First Built Projects*. Schmal, P.C.(ed). Basel. Birkhauser. pp. 206-211
- Sanders, K., 1996. *The Digital Architect*. New York. John Wiley & Sons.
- Schmal, P.C. 2001. *Digital Real--Blobmeister: First Built Projects*. Basel. Birkhauser.
- Simondetti, A. 2002. Computer-generated physical modelling in the early stages of the design process. *Automation in Construction*. **11**: 303-311.
- Turkiyyah, G.M., Storti, D.W., Ganter, M., Hao, C. and Vimawala, M., 1997. An accelerated triangulation method for computing the skeletons of free-form solid models. *Computer-Aided Design*. **29 (1)**: pp. 5-19
- Wang, Y. and Duarte, J.P. 2002. Automatic generation and fabrication of designs. *Automation in Construction*. **11**: pp. 291-302
- Zellner, P. 1999. *Hybrid Space: New Forms in Digital Architecture*. New York. Rizzoli.



作者簡歷

李元榮生於西元 1973 年，1998 畢業於淡江大學建築系，並進入交通大學應用藝術研究所建築組攻讀碩士學位，2002 年進入交通大學土木工程學系任組。目前為 AleppoZONE 設計團隊共同負責人。專長自由形態數位建築的設計與建造、虛擬實境(Virtual Reality, VR)、真實虛擬空間的探討及與數位建築相關的新媒材等。曾有數項獲獎記錄及獲邀參展國內外數項展覽，包括 2000 年參與第七屆威尼斯建築雙年展設計小組、2001 年臺北共生競圖獲得入選獎、第二十四屆日本全國建築系展—數位自然(日本)外國學校邀請展、台北市立美術館遠東數位展區數位展區設計、2003 年第十三屆聖地牙哥建築雙年展受邀參展、第七屆義大利佛羅倫斯建築影像展等。並有其他多項設計作品及學術論文於國內外的書本、雜誌、研討會等發表，其表列如下。

設計作品發表：

- 2005, Demonstration Digital Architecture, 2004 FEIDAD Award。(與劉育東協作)
- 2005, 創意島嶼狂想曲—2050願景台灣，陳郁秀，劉育東共同策劃 台北：遠流出版社(虛擬創意部份，與侯若昊、李家福、林政緣協作主持)
- 2004, Diversifying Digital Architecture, 2003 FEIDAD Award : 56-65。(與劉育東協作)
- 2004, Developing Digital Architecture, 2002 FEIDAD Award : 27-34。(與劉育東協作)
- 2004, Diversifying Digital Architecture, 2003 DEIDAD Award : Reviewer's Digital Explorations。(與劉育東協作)
- 2003, Developing Digital Architecture, 2002 FEIDAD Award : Reviewer's Digital Explorations。(與劉育東協作)
- 2002, Defining Digital Architecture, 2001 FEIDAD Award : Reviewer's Digital Explorations。(與劉育東協作)
- 2003, 虛擬與實體空建共構—廣達虛擬美術館設計，當代設計雜誌 (CONDE) no. 130 : 139-141。(Team Leader)
- 2003. 廣達虛擬美術館，當代設計 no 130: 138-139。
- 2003. 工研院數位博物館—虛擬館與實體館，當代設計 no 130: 140-141。
- 2003. 虛擬長安，當代設計 no 129: 139-141。
- 2003. 台灣建築3D時空館，當代設計 no. 129: 142-143。
- 2003. 大連電子公司 深圳總部，當代設計 no 128: 146-148。
- 2003. 數位生態—交通大學入口廣場，當代設計 no. 128: 148-149。
- 2002, 數位總部—大連電子股份有限公司大廳設計，建築雜誌(Interior) no. 112 : 79。(與劉育東協作)
- 2002, 工研院博物館規劃，建築雜誌(Interior) no. 112: 80-81。(Team Leader)

- 2002, Defining Digital Architecture, 2001 FEIDAD Award : 218。
- 2002, 入可汗的世界展覽空間, 建築雜誌(Interior) no.112:79。(Team Leader)
2002. 數位虛擬自然—0.1mm自由形體實驗, 建築雜誌(Interior) no.112: 82-87。(與劉育東協作)
- 2002, 銘傳大學桃園龜山新藝術中心, 建築雜誌(Interior) no.113。(與劉育東協作擔任設計顧問)
- 2002, 銘傳大學桃園龜山新藝術中心, 建築雜誌(Interior) no.112: 79。(與劉育東協作擔任設計顧問)
2002. Reception Lobby of Bcom Corporation. A+U (Architecture and Urbanism) no. 383: 110-113.。(與劉育東協作)
2002. Hsinchu Museum of Digital Arts. A+U (Architecture and Urbanism) no. 382: 8-11.。(Team Leader)
2001. Princess D “想飛” 電影場景製作
2002. 數位虛擬自然—0.1mm自由形體實驗, 建築雜誌(Dialogue)。(與劉育東協作)
2001. 數碼虛擬自然—0.1mm自由形體實驗, 新建築, 第79期:35-37。(與劉育東協作)
2001. 數碼虛擬自然—0.1mm自由形體實驗, 空間設計(香港)。(與劉育東協作)
2001. 台灣新竹數碼美術館, 建築與設計a+d國際雜誌 no. 3: 31-33(香港/南京)。(Team Leader)
2001. 數位虛擬自然—0.1mm自由形體實驗, 建築師, 第319期:132-138。(與劉育東協作)
2001. 數位虛擬自然—0.1mm自由形體實驗, 建築雜誌(Dialogue) no. 49: 99.。(與劉育東協作)
2000. Digital City Art Center, Association of Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) Quarterly 19, no. 23-36.。(Team Leader)
2000. 數位城市藝術中心規劃, 建築雜誌(Dialogue) no. 42: 58-67. (Team Leader)
2000. 數位城市藝術中心規劃, 空間 no. 134: 21-28. (Team Leader)
2000. Life City. In La Biennale di Venezia 7th International Architecture Exhibition: Less Aesthetics More Ethics, pp. 178-181. Venezia: Marsilio. (with Chu-Yuan Lee and 13 designer members)
2000. 生命城市—第七屆威尼斯建築雙年展台灣館參展, 台灣:國立台灣美術館。(與李祖原等14人協作)
2000. 生命城市—大轉合一、一即生命, 建築師, 第306期:48-53, 第308期:128-132. (與李祖原等14人協作)
2000. 第七屆威尼斯建築雙年展台灣館的東方新思維—生命城市, 空間, 第130期:111-117. (與李祖原等14人協作)
2000. 台灣美術館登陸威尼斯建築雙年展, 典藏(今藝術), 第95期: 43-45. (與李祖原等14人協作)

學術著作：

- Lee, Y. Z., 2003. A design process for non-geometrical curved spaces. Education and Research in Computer Aided Architecture Design in Europe. Austria. Graz - University of Technology. (Poster)
- Lee, Y. Z., 2003. A design process for non-geometrical curved spaces. Conference of European Computer Aided Architectural Design and Education. Warsaw: Warsaw University of Technology. (Poster)
- Lee, Y. J., Chor-Kheng Lim, Yu-Tung Liu, 2003. Multiple digital media in realizing various urban spaces: Project 2050 Taiwan. Conference of European Computer Aided Architectural Design and Education. Warsaw: Warsaw University of Technology.
- Wan, P. H., Liu, Y. T., Lee, Y. Z. 2002. Comparisons of user experience and user interface between physical space and cyberspace: A case study. Conference of European Computer Aided Architectural Design and Education. Warsaw: Warsaw University of Technology.
- Chang, Y. L., Lee, Y. Z. and Liu, Y. T. 2002. Construction of digital city in physical city: Cyber-spatial cognitive approach to the project of Hsin-Chu digital city in Taiwan. Computer Aided Architectural Design and Research In Asia Conference. Cyberjaya, Malaysia: Multimedia University.
- Huang, C. H., Wan, P. H., Lee, Y. Z., Su, J. Y., Lai, T., Chang, C. L. and Liu, Y. T. 2002. Some phenomena of spatial interaction in the networked spaces. Computer Aided Architectural Design and Research In Asia Conference. Cyberjaya, Malaysia: Multimedia University.
- Lee, Y. J. 2000. The relationship between problem-finding and computer media in design creativity. Computer Aided Architectural Design Research in Asia Conference, eds. B. K. Tan, M. Tan, and Y. C. Wong, 277-286. Singapore: National University of Singapore.