

第二章 文獻回顧

2.1 自由形體在結構材料的發展

關於自由形體使用木材作為主體結構的手法上，除了材料質輕、韌性佳，另一個優點可作為綠建築的一環，現代木建築的意義不在只是營造工法的演進，而是設計過程中思考的改變，例如在建築師 Calatrava 在 1987 年瑞士蘇黎士邦 Baden 市建造的展演空間(圖 7)，木建築的型態試圖在一棟四面為 RC 包圍的建築中，營造出拱頂的內部天花板。建築物的空間尺度為 15.65*20.04 平方公尺，設計者以兩邊箱對稱，十個懸臂式預鑄木構造，組成五個三角拱的構造，彎曲的拱廊在造型美學和結構力學產生共鳴(陳啓仁, 2005)。



圖 7. Calatrava(1987)，瑞士蘇黎士邦 Baden 市，展演空間

就近代而言，建築師西沢大良在 2004 年落成的砥用町林業總和中心，木構架的構件以膠合樑及鋼材為主(圖 8)。設計的主軸以理性且簡單的手法解決繁複的空間結構型態，結果是由木材與金屬混合而成的互助系統，輕薄的鋼柱以一米的間隔分佈於外層，屋頂則由間隔兩米的薄型鋼格支撐，斷面尺寸 12cm x 12cm 的杉木形成內部空間二十二米跨度的承重結構，杉木結構從高處逐漸往四周向下散落成與地面呈 45 度角支撐架構。自由形體的杉木構架主導了整體的視覺焦點，由上而下、由一側到另一側，每個四邊型都是直角正交的方式接合每塊杉木，儘管如此，僅有四分之一的木構架是設計作為桁架支撐使用，其餘四分之三的木構架為橫跨了整個內部空間作為連結及視覺使用。這個設計案的基本構想之一就是要對環境友善，也就是近年來逐漸成為主流思考的「綠建築」，因此建物的施工完全沒使用到混凝土，底層的圍牆也採用了杉木做為材料，而基礎使用了鋼構管樁支撐了地樑，使得整棟建築物真正輕量化，更縮短了施工時間(AR, 2005)。



圖 8. 西沢大良(2004)，砥用町林業總和中心

另一個介於傳統木建築和現代的鋼鐵結構就是混凝土。混凝土在現代建築啓蒙的發展中有著和鐵構材完全不同的道路，一方面是由於混凝土無論在歷史淵源上、結構意義上、表面材質的感覺上都是和石材建材相近，它有著如同石頭般的重、但卻又能將整個空間充滿光線，使整個空間輕盈起來，再者它看似如此堅硬、卻又如此的塑形，完全的能滿足現代建築理想對於建築空間的想像力和創造力，混凝土具備著自由、多重與混雜的特質，並且在鋼筋混凝土出現後，傳統的承重型磚石建築迅速被可以塑造成自由形體的混凝土取代(褚瑞基, 1999)。

1912 年在英國出現了一座以混凝土所建的奇異建築:是由 J.J. Joass 在倫敦動物園中為山羊而建的 Mappin 平台，這座幾乎在建築歷史上完全被忽略的建築，是在美國人 Kahn 系統上以混凝土澆灌鐵網作成如同山岩石頭般的自由造型，這可說是全世界最早以混凝土系統作為自由形體發展可能的嘗試(褚瑞基, 1999)。

近代有關於混凝土與自由形體的建造，無非就是以建築師柯比意(Le Corbusier)在 1955 年在法國所建造的廊香教堂(圖 9)，建築透過複雜的曲線壁體、大小不一的開口部以及具有折禱的雙手、船首、風帆、修女的三角帽或隱喻其他許多事物等之厚重屋頂，這棟建築物充滿了象徵的意涵，使得廊香教堂為當代混凝土自由形體最具代表的建築物(劉育東, 2001)。



圖 9. Le Corbusier(1955)，法國，廊香教堂

近年來自由形體在設計結構材料時以鋼鐵最為被廣泛運用，例如 1997 年建築大師 Frank Gehry 在西班牙所完成的畢爾包古根漢美術館(圖 10)，結構工程的部份是交由芝加哥的 SOM 負責，結構工程師 Hal Iyengar 針對此複雜的結構工程，透過 CATIA 的計算將結構中每個型鋼接合的角度和尺寸精確的连接，經由現場工人使用卯鎖、鉚釘或者是點焊的方式將不同的規模的型鋼組裝。在組裝每個實體的曲面金屬牆、玻璃牆、石膏板、石牆時因為連接處的角度和三度空間座標的不同，工程師設計出順應兩種不同曲度的表皮組裝方式，在曲度較為平緩時，使用鋼框架式的建構，此方法是透過程式計算出如何將每面牆與框架板結合時最佳的方式，第二種是當曲度較為多變化時，透過 CATIA 軟體的定位將曲面的三度空間的座標輸出，再使用雷射測量裝置於現場定位並且訂製出可以將每個不同曲度的材料組裝上的特殊構件(Gehry and Mitchell, 2001; Leach and Kolarevic, 2003)。



圖 10. Frank Gehry (1997)西班牙，畢爾包古根漢美術館

CAD/CAM 技術提供給建築設計的選擇上對於許多設計師而言是相當明確的，CAD/CAM 的推進會明顯的提供技術上的解決方式，進而給於設計者經濟上的效應。然而 CAD/CAM 不只是解決結構問題或達成建構效率的選擇，更給予建築師在設計上的應是多元性的啟發，它給我們新的構造方法、材料，它也給我們新的空間經驗、造型與想像力。

2.2 自由形體在建築設計的案例

案例一：在 1999 年 BMW 展示館由建築師 Bernhard Franken 所設計建造完成(圖 11)。“水滴”是建築師初期的設計概念發展的雛形，再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)。

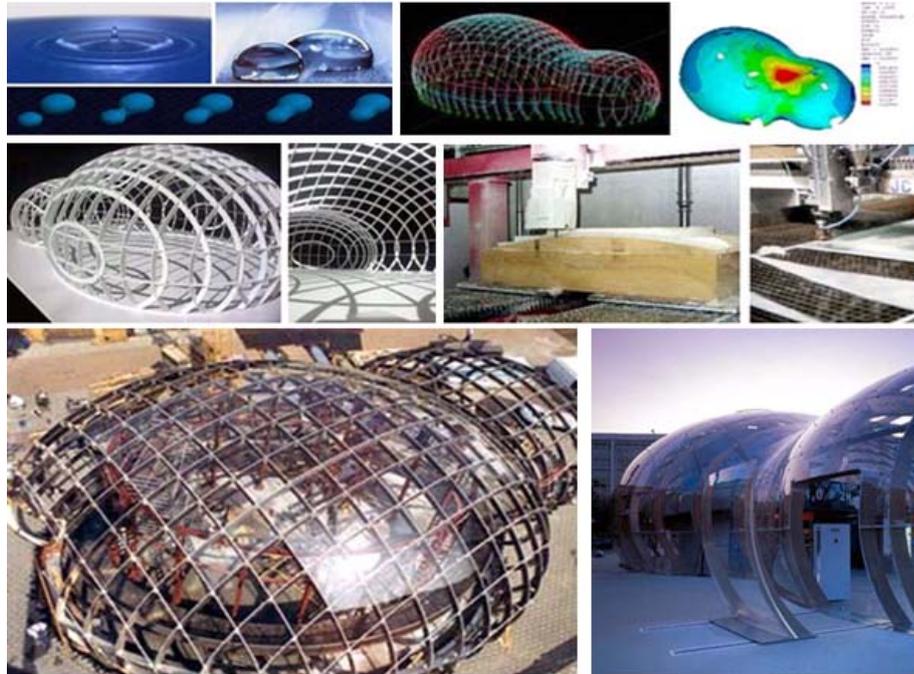
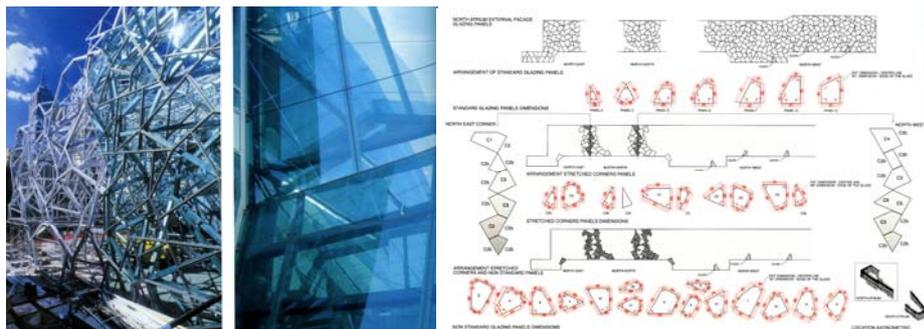


圖 11. Bernhard Franken (1999) , BMW 展示館

案例二：聯邦廣場是由 Bates Smart 在 2003 年墨爾本所建造的(圖 12)，建築內部的共享大廳以一種被稱為風車狀網格的數學幾何學系統，形成了由鋼及玻璃組成的新型結構形式。主要的結構由斷面為中空的正方形鋼管構成，組成的風車狀網格的構件分別構成了內部兩層平面結構，進而形成兩個表面，這些表面上覆蓋一系列的斜邊板塊便形成一個均質的發散式結構網。次要的結構雖然也是鋼結構，卻通過更輕巧的鏤空材料對風車的幾何形進行更精細的詮釋。次要的結構覆蓋了與主要結構層相同的部份，而形成視覺與結構上的統一。玻璃表皮被直接覆蓋在次要結構層上，其外表面可防範日曬雨淋，而內表面則起到擋風的作用。兩層表面之間的空間就像是一層太陽能量被儲存和穿過的煙囪，為共享大廳提供了有效的保溫隔熱手段。玻璃所帶來的反射增強了主要結構層和次要結構層之間的相互作用，擴大了視覺上的深度、表層及光感的錯覺效果(吉田信之, 2005)。



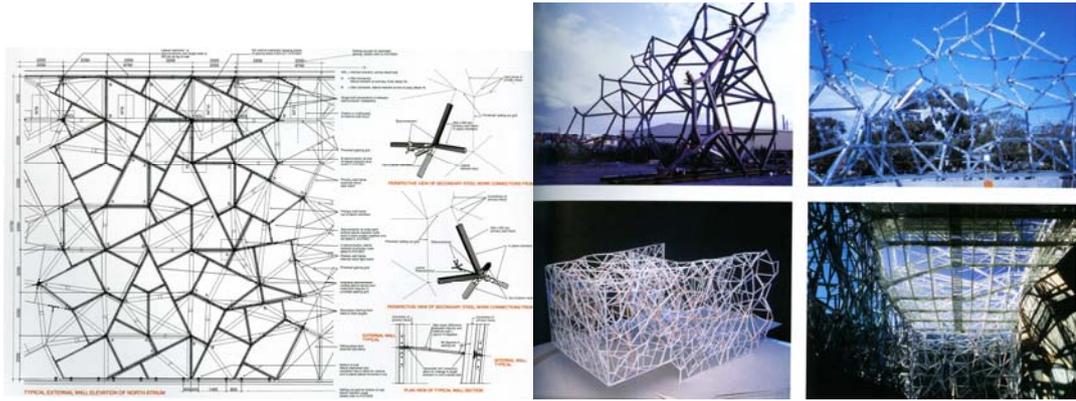


圖 12. Bates Smart (2003) 墨爾本，聯邦廣場

案例三：“天棚”是建於紐約 P.S.1 當代藝術中心庭院內的一個臨時性構築物由安尼建築師事務所建造(圖 13)。天棚採用新鮮的竹竿作為結構材料，到了夏季即將結束時，綠色的竹竿會逐漸轉成黃褐色。它採用了獨特的構造體系，將日蔭、結構體以及不斷變化的環境氣氛結合為一體，進而創造出建築師們所期待的賦予庭院景觀以深度的“深層景觀”。

安尼建築師事務所的挑戰是結構體採用本身具有易變特性的天然素材，如何呈現精確的幾何結構體。在經過各種測試錯誤後，他們創造出一套靈活的施工原則、細部處理的方法和應急的工具，使他們能夠用單一材料解決結構上所面臨的問題。天棚主要的設計方法在於將 3D 模擬的結構系統轉成 2D 的立面圖，並且在上面標出準確的長度和交叉點位置(Narchitects, 2004)。



圖 13. Narchitects (2004) 紐約 P.S.1 當代藝術中心，天棚

案例四：位於中國北京的國家游泳中心是由 PTW 建築設計公司和中國建築工程總公司共同設計的預計 2007 年完成建造(圖 14)。設計構想取自於自然界的氣泡，建築結構設計可分成兩個部份來理解其結構形式：內部結構及表皮結構。

內部結構：由三種接頭和四種桿件構成。接頭由簡單的鋼板組裝而成，包括用於與桿件末端的圓形板及相對應的可以錨固螺栓的接合孔。桿件由三塊長型板材及末端圓形板材所構成。將這兩種構件使用螺栓鎖成一體就形成一組單位。單元與單元相互連結就形成了空間框架。

表面結構：表面結構為長方形的平面網狀結構，在施工現場通過焊接或鉚接來完成。表面結構被疊加在空間框架的頂部和底部，以支撐起整個表面結構，並完成建築物的結構體(吉田信之, 2005)。

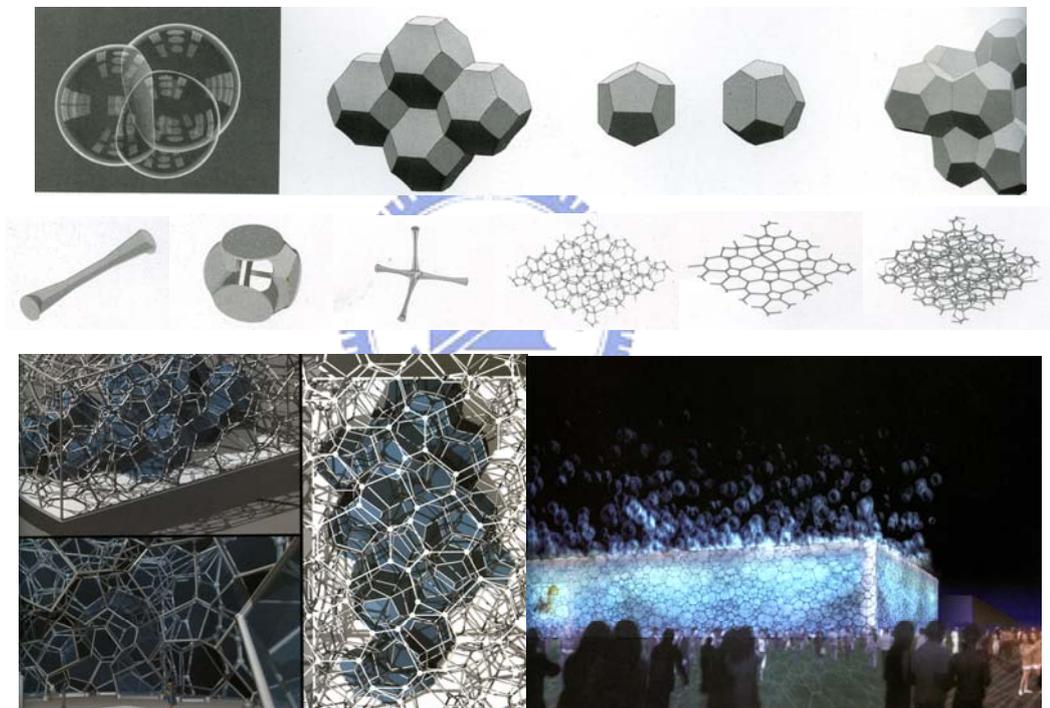


圖 14. PTW 建築設計公司和中國建築工程總公司 (2007) 北京，國家游泳中心

■ 小結：

- (a) 初步的瞭解數位生產過程，如何一步一步的落實從設計的概念發展到建築物的建造。
- (b) 建築師在操作複雜的建築設計時，就算擁有經驗豐富的施工團隊也無法在腦海中勾勒出完整的施工畫面，更不可能預計到施工中各系統潛在的問題，那麼 CAD/CAM 技術保證了建造過程的連續性，不管多複雜只要 CAD 的精確描繪和 CAM 將電腦圖形與數位資訊精確的轉化為建築構件，透過雷射定位器和測量設備的輔助下，並可在現場精確的組裝完成複雜的建築結構。

- (c) 案例中透露出建築師爲了挑戰複雜的結構系統，思考著不同建造的方式，在 CAD/CAM 系統的輔助下排除了每個環節上的問題後就著手進行施工，但是在細部接頭的設計時常被忽略，並且使用強硬的螺栓、鉚釘或者是點焊的方式來組裝結構體，外觀上顯得相當醜陋不具美感，施工的過程也需耗費大量的鐵工，在時間上、經濟上實在不在乎成本利益。

2.3 自由形體在建築設計的技术

CAD：

CAD技術起源於美國，它經歷了一個由2D朝向3D技術發展的過程。CAD的發展過程，以可以精確的計算曲線與曲面的成形最爲突出，它不單是讓建築師將構想由單一的線條或曲面表現出完美的圖形，在製造上更是可依據建築師設計構想落實建造曲面造型的建築物。CAD軟體不斷創新由早期線框造型、曲面造型、實體造型發展至參數化實體造型，繪圖功能的提升造就更多輔助設計的方法。

60年代出現的CAD系統只是極爲簡單的線框造型系統，只能表達基本幾何資訊，不能有效表達幾何資料間的拓撲關係，由於缺乏形體的表面資訊，CAM及電腦輔助工程設計(Computer-Aided Engineering, CAE)均無法實現。70年代法國的達索飛機製造公司的曲面造型系統CATIA爲人類帶來了第一次CAD技術革命，CATIA改變了以往的工作方式，使人們可以用電腦進行曲線、曲面的處理操作。它採用參數化造型技術，允許自動指定或由設計師指定參數化設計、幾何或功能化約束的變數式設計。根據其提供的3D模型線架構，設計師可以精確地建立、修改與分析3D幾何模型。其曲面造型功能包含了高級曲面設計和自由外形設計，用於處理複雜的曲線和曲面定義，並有許多自動化功能。CATIA具有一個NC資料庫，存有刀具、刀具元件、材料和切削狀態等資訊，可自動計算加工時間，CATIA的後處理程式支援銑床、車床和多軸加工。

曲面造型技術只能描述形體的表面資訊，難以準確表達其它特性，如品質、重心、轉動慣量等，對CAE技術十分不利，於是1979年美國的SDRC公司推出了世界上第一個基於實體造型技術的大型CAD/CAM軟體——I-DEAS，實體造型技術是CAD技術上的第二次技術革命。由於實體造型技術能夠精確表達零件的全部屬性，在理論上有助於統一CAD、CAE、CAM的模型表達，因而給設計帶來了驚人的方便。實體造型技術的主要缺陷是無法進行模型尺寸控制，不易實現設計與製造過程的並行作業。80年代末期，美國的參數技術公司PTC(Parameter Technology Corp)發展名爲Pro/ENGINEER的參數化軟體，引起了CAD技術的第三次技術革命。它的主要特點是：尺寸控制系統、參數控制系統、即時修改系統。參數化實體造型技術也有缺陷，即當面臨複雜曲面的模型時，參數化實體造型技術在尺寸控制系統上就顯得有些力不從心。SDRC公司以參數化技術爲藍本，提出了更爲先進的實體造型技術-變數化技術。變數化

技術既保持了參數化技術的優點，同時又克服了它的不足之處。它的成功應用，將為 CAD 技術的發展提供更大的空間和機遇，被視為 CAD 技術的第四次技術革命。CAD 技術發展的技術關鍵-CAD 資料模型，在 CAD/CAM 系統中，CAD 的資料模型是一個關鍵。隨著 CAD 建模技術的進步，CAM 才能有本質的發展。3D CAD 技術發展到現在已經經歷了四次技術革命，因此 3D CAD 技術的發展已趨成熟。(CAD 的歷史發展，參考網站 CAD-History)

CAM :

CAM技術源始於1950~1960年，早期技術主要以CNC為主，是一種減去法的數位生產製作方式，例如3D銑床、水刀切割(water jet cutting)、雷射切割(laser cutting)等技術。

1970年早期，建築設計領域Skidmore Owens Merrill 事務所開始利用3D銑床和雷射切割機來製作建築模型以及生產建築構建單元(Kvan and Kolarevic, 2002)。至1980晚期，電腦自動化控制系統讓CNC技術得以輔助生產建築構造的元件(Mitchell and McCullough, 1995)。在1980年代，CAM技術發展出另外一種由附加的製造的方式，稱為快速成形(Rapid Prototyping, RP) 技術，自從推出之後逐漸受學術界與產業界的注意，其主要原因便是具有省時且易於使用的優點。它可利用CAD中的3D模型快速地將原型(prototype)製作出來，是一種疊層加工(Layered Manufacturing, LM)技術。初期為工業設計所廣泛應用，在1991年時，德國研究者Streich開始利用技術來製作建築模型。

此外還有一種逆向工程的技術可分成非接觸式的3D雷射掃描器(3D laser scanner)和接觸式的3D數位測探器(3d digitizer probe)，數位式逆向工程程序是一種結合傳統逆向工程、正向工程及3D 掃描的技術，其製造操作程序依序為：首先，製作手工模型數位化；利用3D 掃描機量測手工模型的數位幾何模型；最後由CAD調整數位幾何模型，完成設計後將CAD資料模型轉至CAM生產。數位式逆向工程的優點為設計與製造自動化、效率高、設計變更容易及不受限於複雜幾何形狀(Luca and Nardin, 2002)。

CAD/CAM 發展的歷史至今已有 30 餘年，從 1965 年 Lockheed 飛機公司研製 CAD/CAM 系統開始，CAD/CAM 技術迅速發展。隨著電腦及資訊技術的迅速發展和日趨完善，CAD/CAM 技術在機械、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，成為建築設計更新換代的關鍵技術。

2.4 傳統木構造接合系統

關於木構造，不論是中國的斗拱構法、中古世紀的西洋木筋牆，還是近代的框組壁工法，在許多既存的傳統木建築中，大多數的設計者都將木材視為一種受壓的構件。就因力學而言，

木材不同方向的強度各有不同，但由於木纖維的縱向連結最強，因此木材的縱向抗拉和抗壓強度也最高，也因此大多數木建築的古法中，多將木材用作為柱樑構件，就是利用木材縱向高度穩定的抗壓特性，不只如此，木構法在接合上的發展，在不同時代以及背景需求更是發展了無數的構築接合方式，每種接頭各具有其特殊的功能來受力。建築的領域中，接點是設計上的自白，真實的反映出系統作用的原理，以及設計與技術合而為一的最佳語彙。從歷史的演進來看，木建築形式的變革，與結構系統及接點作法的突破，有著密不可分的關係，而其中以結構接點的演進最能反映木建築的發展歷程(王效青, 2003; 陳啓仁, 2005)。

木構造的抗壓特性，意即抵抗來自結構上下方垂直外力的能力，是所有傳統木建築中最常被運用的特性。在東方的古代木建築中，卯榫(mortise-and-tenon joint)是我中國傳統建築常用的技巧，即為將接頭設置在兩塊木材交接面的中心處，當時的工匠製造木構造時，經常使用敲打的技巧將接頭相互卡入，並將多出的木塊鑿掉，木材便會牢固的緊握住，並且在表面上相當的平整，絲毫無突出的異物來破壞外觀。在古老的建築或寺廟中常可發現，運用得當整個結構體可以結合得相當牢固，不需一針一釘。接頭的種類還包含具抗拉功能的楔形榫頭(dovetail joint)、各種搭接(finger joint)、對接(tongue and groove joint)等，更展現強烈的創意及工藝性(陳啓仁, 2005; 趙廣超, 2005; 羅夢彬, 1981)。

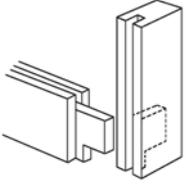
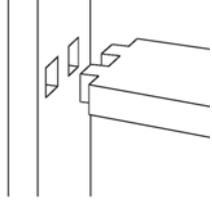
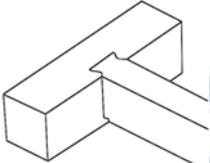
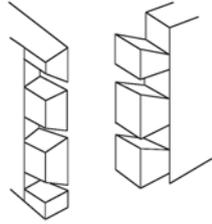
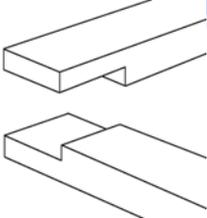
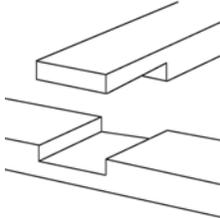
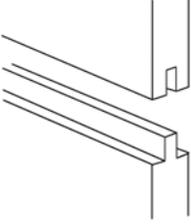
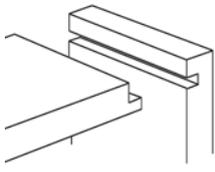
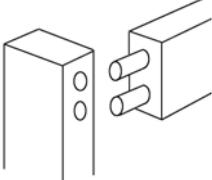
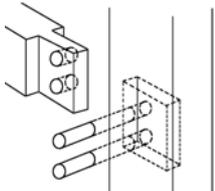
傳統木接頭的種類(羅夢彬, 1981; 網站 W.G.A.):

- (a) 卯榫(Mortise and Tenon Joint) - 卯榫由於它的較高抗壓強度為建造木構時最好的接合之一。多變化的卯榫接點其主要的功能應用在木構上每個骨架的接點。
- (b) 楔形榫頭(Dovetail Joint) - 楔形榫頭被使用在結合兩塊木材的尾部，假如你將雙手擺在一起手指相互交錯在關節處，多少會看到楔形榫頭的接合形式。楔形榫頭被使用在傳統木構上是所有接點中最強壯的，通常是被使用來增加木構建造的價值。
- (c) 搭接(Lap Joint) - 主要的被使用在兩塊木材之間的接合。從木材與木材相互交接之間，各移除一半的面積。在木材邊上隨凸榫的深度制定凹處的寬度與深度。
- (d) 對接(Tongue and Groove Joint)- 對接是個瞬間防止接頭內部和外部分離的接合方式和提供簡單的形式接合相連的表面，透過沿著木材的邊緣設置凸榫，被設計作為緊握住相對應的凹槽。
- (e) 暗榫(Dowelled Joint)-許多的接點透過暗榫被強化。暗榫強化卯榫的接點，樁定卯榫(pegged mortise-and-tenon)意指為透過塊狀物卡入接點(and to butt-join larger pieces edge to edge)。樁定卯榫的接點，暗榫穿過卯和榫可以防止榫脫離卯。
- (f) 端接(Butt Joint)-端接是兩塊邊對邊的接點，隨著這個方法，兩塊木材面上的格紋互相交接，嵌入相等尺寸的缺口並且插入暗榫連結兩端的缺口強化結構，如同使用膠合固定用於形體寬大的表面。
- (g) 指接(Finger joint)-指接是使用在兩塊木材的頂部交接的技術，它比較像是楔形榫頭

外，方形的梢和缺角通常是等距的分配交錯的接點方式，取代了膠合劑的功能雖然它沒有楔形榫頭在細節上的效力。

- (h) 斜邊(Mitre Joint)- 以榫舌(tenon)的頂部形成的斜邊去防止裂開和隱藏榫舌的凸出物所造成的不雅。

本研究將傳統木構接點依其功能性分別舉例彙整成以下表格(表 1)。

(a) 卯榫(Mortise and Tenon Joint)	
	
(b) 楔形榫頭(Dovetail Joint)	
	
(c) 搭接(Lap Joint)	
	
(d) 對接(Tongue and Groove Joint)	
	
(e) 暗榫(Dowelled Joint)	
	

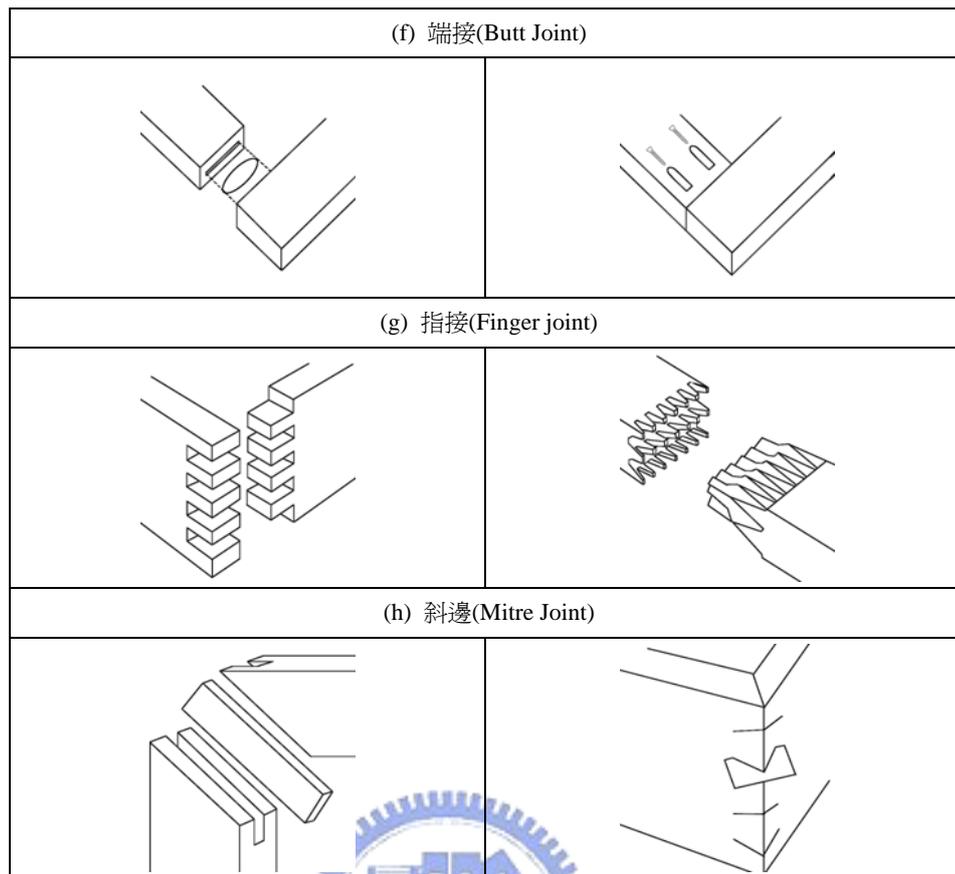


表 1. 傳統木構造接合類型(W.G.A.)

■ 小結：

在上述的分析和歸納完成傳統木構的接頭後，我們發現傳統木構的接合方式相當的繁多，其形式有簡單到極具複雜的接頭，並且不同的接頭各具有的不同功能性和承受外力的能力，傳統木構最大的限制在於建造的方式採用水平垂直的構築，在接頭的應用尚具貢獻，目前卯榫的技法普遍被運用在桌子、椅子上。由於傳統木接點的製造需依賴熟練的匠師的工藝，建造的效率往往不符現代營建成本的考量，所以近代使用純粹木接點的木建築並不常見，即使有也是結合不同材料的特長，例如鐵的金屬構件一同使用，達到結合不同材料的優勢來強化整體結構系統。

2.5 接頭設計在建築的研究

Kilian(2003) 其研究使用 AutoCAD 軟體內的生產設計的語法 (generative design script)AutoLisp，透過編寫 AutoLisp 來設計連接曲面表皮的接頭型式，並運用雷射切割機來製造實體表面的接頭進行組裝和測試原型(圖 15)。

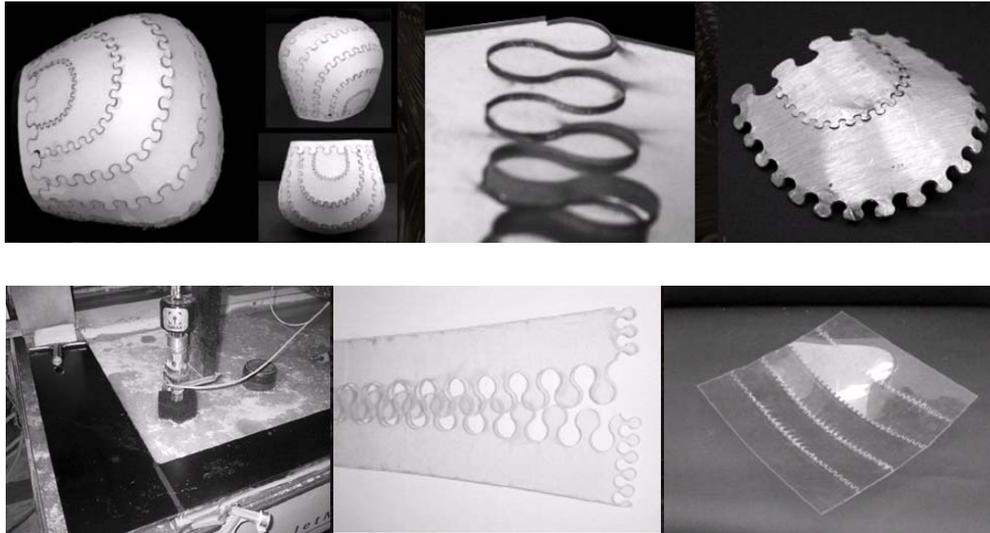


圖 15. Kilian(2003)

創造力的領域像是建築設計需要去生產許多方案來評估設計成果。Sass(2005)在研究如何設計和製造一個特殊比例的自由形體組裝(圖 16)。組裝設計的方法，以結合 RP 技術生產接頭與雷射切割機生產表皮來進行組裝測試，研究結果在反覆生產模型來發現更多組裝自由形體的方法和驗證模型大於 12 吋將有助於設計者能夠做更多的設計結論。

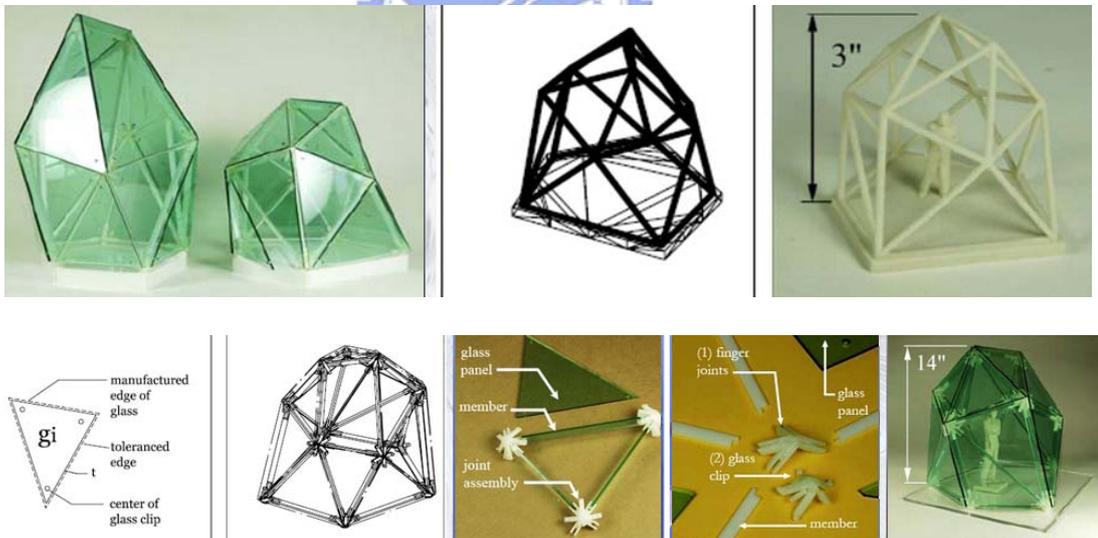


圖 16. Sass(2005)

■ 小結：

- 從案例中可以得知 RP 或者是雷射切割機技術確實推進建築設計，使建築師擁有更多與直覺有關的技術去影響製造的過程。
- 數位技術具有開創建築結構細部的能力，並且允許複雜的設計可以自動化的生產。

- (c) 實體模型的組裝過程可以反覆驗證設計的成果。
- (d) 數位技術可以生產許多的替選方案，讓設計者應映不同的結構需求，提供出解決問題的構造方式。

2.6 快速成型裝置

1987 年美國 3D Systems 公司，率先推出第一部 RP 系統，稱做立體快速成型機(Stereo Lithography Apparatus, SLA)，這個系統的推出，立即獲得工業界熱烈地回響。快速成型的技術近年來被醫學、機械組件開發、工業設計、建築設計廣為被探討。RP 的功能主要結合 CAD/CAM 技術、分層製造技術(Layered Manufacturing, LM)、材料增加成型(Material Added Fabrication, MAF) 技術，不同於傳統的切削成型(如：車、削、刨、磨)、接合成型(如：焊接)或壓迫成型(如：鑄、鍛、粉末冶金) 等加工方法，其原理是由 CAD 建立 3D 模型，以分層(Insight)軟體算出模型每層的斷面，再依不同的 2D 成型方式(如：雷射燒結、噴膠...等)，製作各層斷面模型，在逐層堆積成實體 3D 模型，這種加工方式可製作任意幾何形狀的模型。

RP 若是要輸出實體模型，其所需檔案的格式為 STL(Stereo Lithograph)三角網格檔，通常 RP 生產實體模型的速度，易受 3D 模型的網格數量以及硬體設施的影響，造成快速成型機運作速度緩慢。由此可知網格數目的多寡，容易影響快速成型機的塑模效率，若是在不影響模型外觀下減少網格數目，可達到減少 RP 成型所需耗費的時間。RP 在現階段在市面上主要可以分成六種類型的系統：(a) 雷射光合高分子成型(SLA)。(b) 溶解沈積法(FDM)。(c) 雷射燒結成型(SLS)。(d) 疊層法(LOM)。(e) 固態基礎固化(SGC)。(f) 3D 印刷法(SGC)。如下：(Ryder et al, 2002; Seely, 2004; 賴後權, 2003; 網站 RP-3D Systems)

(a) 雷射光合高分子成型(Stereo Lithography Apparatus, SLA)

雷射光合高分子成型(SLA)為RP的技術中最早期的製作方式。模型製作的流程由電腦控制的雷射紫外線光束，將一層又一層地在液態樹脂上切割出實體的模型，切割的過程是一種光化學作用受雷射光照射的樹脂會快速凝結，未照射到的就保持液態，最後讓固態樹脂和液態樹脂分開，前者就是我們需要的模型。模型製作完成後，必需置入紫外線烤箱將支撐材料去除。完成的模型較為堅硬，可以應用在工業元件的生產(圖 17)。

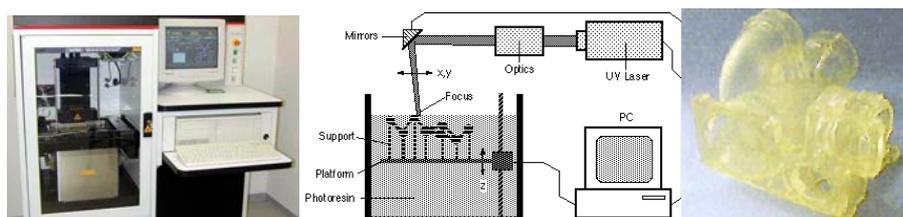


圖 17. 雷射光合高分子成型 (SLA)

(b) 熔解沈積法(Fused Deposition Modeling, FDM)

熔解沈積法成型是以加熱頭(Heated Head)熔化線狀之熱塑性材料，熔化之塑材從加熱頭擠壓出後，一層一層地堆積成型，加熱頭可在水平面上移動，使塑材置於正確的位置，熔化的塑材擠壓在平臺後，在短時間內(約1/10 秒)就會凝固。在成型過程中，塑材溫度需保持在凝固點左右，使塑材層與層間適當地結合。FDM系統會擠出支撐材料，必需置入超音波水箱將支撐材料除去，即可得到所需的模型(圖 18)。

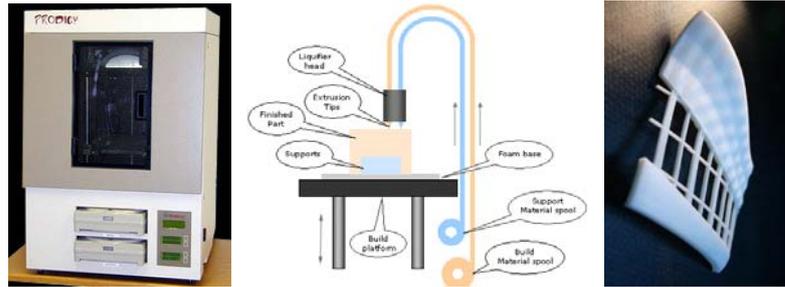


圖 18. 熔解沈積法(FDM)

(c) 雷射燒結成型(Selective Laser Sintering, SLS)

雷射燒結成型是利用二氧化碳雷射光燒結粉末材料（塑膠粉末、金屬粉末或陶瓷粉末），被雷射光照射到的粉末會立刻熔化，隨即再凝結成一團固體，在製作上採用逐層製作成形，如此製成的模型最堅硬，連金屬零件都可能這樣製造出來，此製作方式不需支撐材料，但是完成的模型略為粗糙(圖 19)。

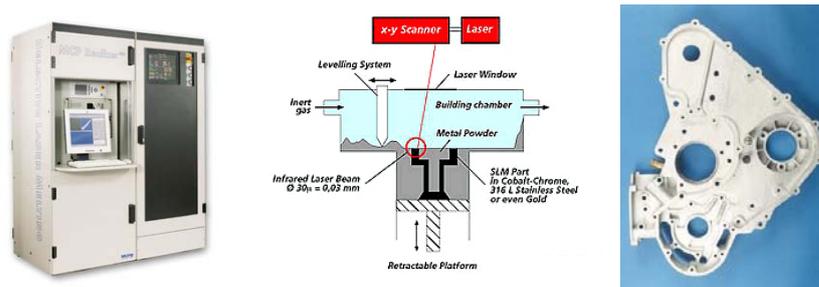


圖 19. 雷射燒結成型(SLS)

(d) 疊層法(Laminated Object Manufacturing , LOM)

疊層法成型透過二氧化碳雷射切割薄片材料(紙)製作所需的形狀，每層間再以加熱黏著劑結合在一起。成型過程中新的一層需加熱加座，使其附著在先完成之塊狀體上，多餘之材料須切割成細塊狀，以便清除，LOM需清除支撐材，多應用在製作大型的模型(圖 20)。

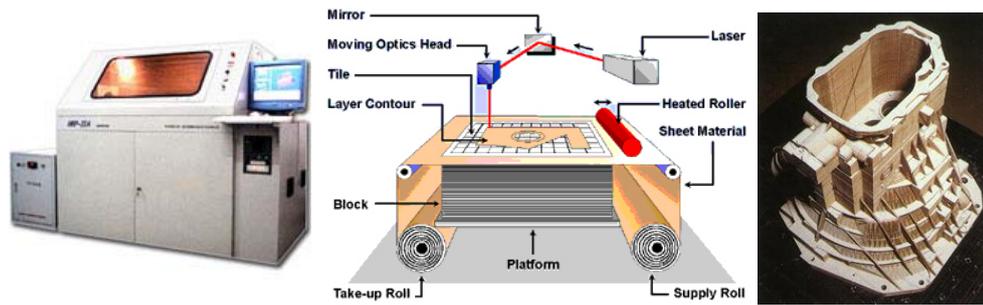


圖 20. 疊層法(LOM)

(e) 固態基礎固化(Solid Ground Curing, SGC)

固態基礎固化成型原理是以紫外線燈光照射依截面形狀所產生的光罩，並穿過光罩透明區域固化光罩下之樹脂，未固化部份樹脂須除去再塗上臘，同一層上之臘及樹脂經機械加工成爲均勻厚度，模型每層都經如此步驟成型後，整個包覆在臘中的模型即可完成，最後將臘熔掉取出模型(圖 21)。



圖 21. 固態基礎固化(SGC)

(f) 3D 印刷法(Three Dimensional Printing, 3DP)

3D印刷法成型可以利用任何原料(如陶瓷、金屬粉末、聚合物和複合材料)來製造出任何形狀，且可以應用於模型的外型確認與功能測試進而發展快速模具，3DP工作原理利用疊層製造的方式來成形，將欲製造的CAD 圖檔，經由切層演算，精確地計算出各層的2D 資料，並將粉末平鋪於工作台上，再使用類似噴墨列印的技術，將黏著劑利用噴頭噴塗至欲成形的粉末上，則粉末與黏著劑相互結合硬化，完成該層的噴塗，其所結合的部份將成爲模型的外形，反覆直到模型完成，接著除掉未結合的粉末，所留下的便是完成的模型(圖 22)。

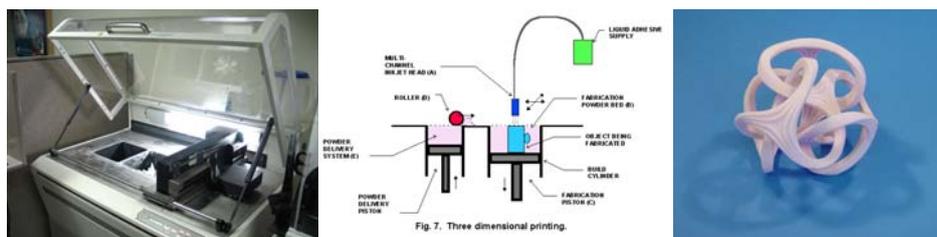


圖 22. 3D 印刷法(3DP)

2.7 快速成型在建築設計的案例

案例一：D 塔是由 NOX 事務所在 2004 年荷蘭所建造的(圖 23)。建築物是一個 12m 高的結構體，利用計算生成的形體技術(CNC 對聚苯乙烯泡棉塑料進行切削)對環氧樹脂材料進行造型塑造。它的表面結構與哥特式穹頂非常相似，即柱子和表面共存於同一個空間連續體。建造 D 塔時，建築師採用了以下兩種方法結合進行：用 CNC 切削聚苯乙烯泡沫塑膠來製作模具；利用手工操作將環氧樹脂及玻璃纖維合成板覆蓋到模具上。CNC 只需簡單的根據雙重曲線的數據資料便可對該泡沫塑膠進行切削造型。模型被分成 19 塊小曲面被組裝成 12m 高的大塊建築表皮，再被運到工地拼接組裝(Lars, 2004)。

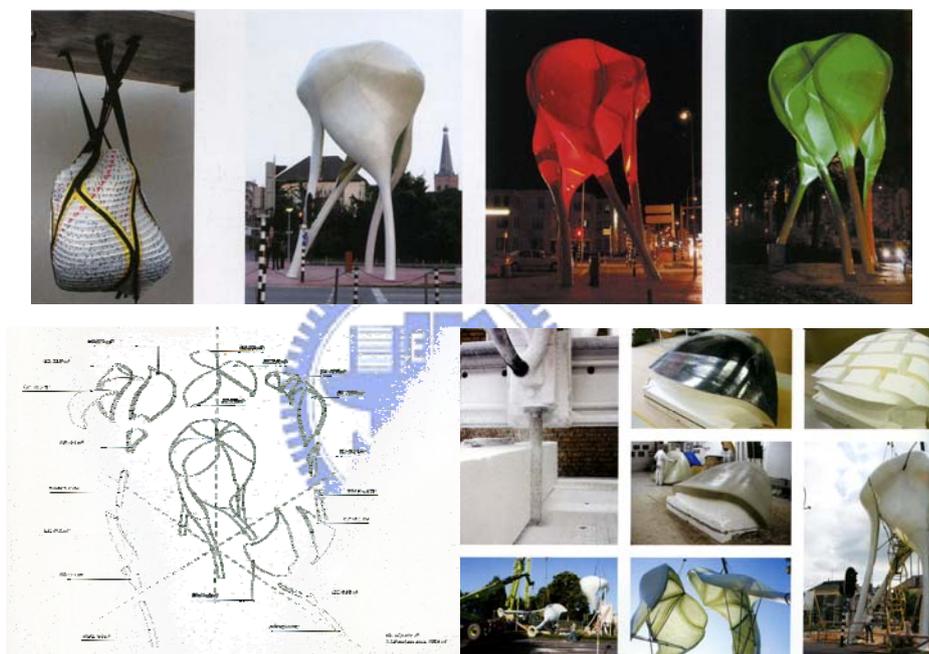


圖 23. NOX(2004)，荷蘭，D 塔

案例二：斯巴恩醫院前庭的霍夫多普巴士站建於 2003 年初由尼奧建築師事務所所建造(圖 24)。它是地方公交服務體系的中轉站，在廣場中央形成一個島嶼式公共領域。這座建築完全採用聚苯乙烯泡沫和聚酯纖維完成，是世界上最大的合成材料結構體，尺寸為 50m*10m*5m。如果採用一般化的建造方法，在預算範圍內將永遠不可能完成這個作品(吉田信之, 2005; 網站 NIO Architecten)。



圖 24. NIO architecten(2003)，荷蘭，霍夫多普巴士站

2.8 快速成型在建築設計的研究

在研究的領域裡，有部分的研究者透過設定規則做為設計的方法和結合 RP 的使用操作自動化的研究過程。例如：Sass(2004b)研究呈現實體模型的製造方式，透過使用 RP 當作創造設計過程的媒材。研究運用 RP 和數位設計生產製造的功能，提出光影的變化、生產複雜形體和組裝型體三個議題去討論改進設計的方法(圖 25)。

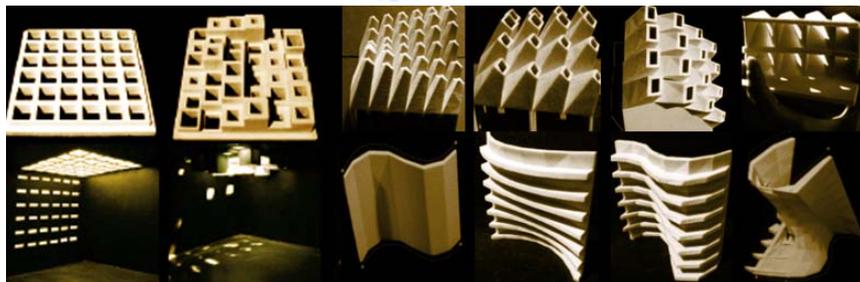


圖 25. Sass(2004)

Mark Burry 在 2000 年運用 CAD/CAM 技術完成在 1926 年 Gaudi 逝世後未完成的聖家堂 (Sagrada Familia church) (圖 26)。Mark Burry 運用了造船工業用的參數化(parametric)軟體 CADD5 結合 RP 技術重新設計與建造教堂翼部 35m 高的玫瑰窗戶。在 Gaudi 這個 Sagrada Familia 案例中，利用 RP 技術在製作大量的臘製模型，目的在反覆的檢視、修正設計的構想，並且提供尺寸給工匠精準的施工。



圖 26. Mark Burry(2004)

■ **小結：**

RP 裝置應用在建築設計上的優缺點，如下列所述：

優點：

- (a) 虛擬的模型可以被輸出成可觸及的實體物件。
- (b) RP 輸出的模型可以用來檢視設計的成果。
- (c) 可精確的輸出 1:1 比例的實體模型。
- (d) 允許複雜設計的可能。
- (e) 自動化的模型製造過程。

缺點：

- (a) 在創造的過程所耗費在生產製造的時間過久，造成模型在呈現和設計之間無法接軌。
- (b) 輸出模型上還有尺寸的問題，較大的模型需要去分割和拼組時間上是相當消耗的。
- (c) 部份 RP 裝置需要支撐材料。
- (d) 材料成本昂貴，價格尚未普及化。
- (e) RP 的顏色尚未健全，僅能呈現單色系，無法表現建築上的材質。