

附錄二 先前研究

1. 設計媒材發展

1.1 歷史發展

在設計過程中，設計者的設計思考受到所使用的不同設計媒材所影響(Zevi, 1981; Liu, 1996)。Zevi(1981)以生動有趣的漫畫來強調不同媒材的使用會影響設計者的設計想法呈現及思考模式(圖 1-1)。設計思考的理論研究中，Schon(1992)認為設計行為是一種設計者與媒材之間對話的過程，不同媒材有不同的使用方法與呈現方式，會改變設計過程中的設計方法與步驟，因此而影響了設計者的思考，由此可知，媒材在設計過程中扮演著重要的角色。

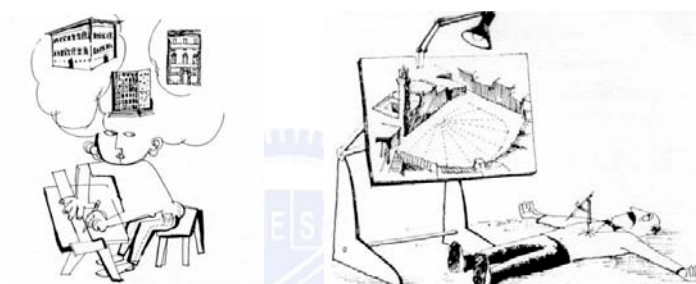


圖 1-1. Bruno Zevi 強調設計媒材影響設計想法 (after Zevi, 1981)

文藝復興以前的呈現媒材

媒材與設計思考的發展，可以追溯到最早 3500BC-1500 古埃及時期，當時的建築師繪製 2D 的平面圖，立面圖及剖面圖來呈現設計想法(圖 1-2)，工匠則依照這些精細圖面來建造。古羅馬時期，從理論家維楚維亞斯(Vitruvius)著名的<建築十書>(Vitruvius, 1960)中可以得知當時建築師已經廣泛利用平面圖，立面圖，剖面圖這些 2D 的媒材來呈現腦中的設計想法。到了中世紀哥德時期，雖然哥德教堂形體更加複雜，但建築師依然以 2D 圖面為主要呈現想法的設計媒材，尤其利用大量的立面圖來呈現哥德教堂的細部雕塑與裝飾。其實從古埃及，希臘，羅馬到中世紀都有發現一些建築模型，但都屬於宗教紀念物而非設計過程中呈現設計意念的媒材。

文藝復興的呈現媒材

到了文藝復興時期，Filippo brunelleschi 認為 2D 的平面圖，立面圖，剖面圖，透視圖，細部圖或者手繪草圖已經不足於呈現腦中想像的複雜形體之間的關係，而且這些僅有二度空間面的圖面也無法表達及解決一些結構上的問題，因此，他在佛羅倫斯大教堂圓頂的設計競圖中開始做三度空間的實體模型來輔助思考(圖 1-3)(Million, 1994)。從他所作的兩個木製模型中可以看出他刻意忽略細部裝飾而清楚以模型呈現空間關係與結構關係。在媒材與設計思考發展上，Brunelleschi 創造出沿用至今的利用 2D 圖面與 3D 模型設計媒材的標準設計過程(Liu, 1996)。另外一位文藝復興的建築大師米開郎基羅也開始利用三度空間的實體模型來思考設計，他在聖彼得教堂圓頂設計中做了大型而可以對半拆開的剖模型來檢視建築內部空間，將結構系統與裝飾之間的關係表達的十分清楚。模型在文藝復興時期的建築設計過程與方法中，扮演著重要的角色，輔助設計思考。建築師為了呈現出腦中設計意象，除了繪製大量圖面外，也以製作大型模型來拉近 2D 圖面與未來實際建造出來的龐大形體之間的差距，他們利用模型來考慮空間關係，結構系統，細部裝飾關係，整體比例，甚至掌控空間光影

變化等(Liu, 1996; Smith, 2004)。

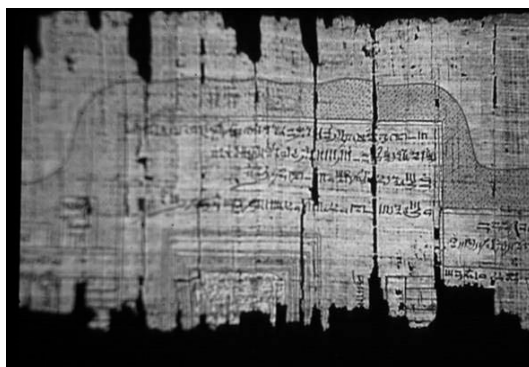


圖 1-2.古埃及時期畫的 2D 圖面



圖 1-3.模型彌補 2D 圖面的不足

數位時代前的呈現媒材

二十世紀開始，1900 年西班牙建築師 Antoni Gaudi 為了實現腦中獨特的空間想像，除了繪製大量的細部圖，他開始改變他的設計過程與方法，利用特殊的設計媒材來完成他那雕塑性強及空間變化性極大的建築形體。在設計 Colonia 教堂的設計過程中，高迪花了 10 年的時間來研究解決教堂的結構系統，大量的圖面無法解決複雜設計型體中無秩序的結構，他創造了一套獨特的模型作為設計媒材，稱為 Estereo Estatica(圖 1-4)，主要以許多具有比例重量的小沙包(1:10000 的比例)，用細線卦在模型上，型成下拱形狀，然後他將這種作好的沙包模型拍成照片，再反過來看，使下拱造型成為拱型，這時就可以看出建築物所需的正確結構，他利用這種特殊的設計方法來計算建築物所需的扶壁力量。這種設計方法與過程非常的複雜，因此高迪留下許多著名的建築，如 Casa Milla, Colonia,等都是歷經許多時間及必需靠技術熟練的工匠來完成，是一件非常艱辛的工作，聖家堂甚至蓋了 40 多年才完成(圖 1-5)。當時高迪建築的非幾何元素與手法，建築上稱之為“有機建築”(organic architecture)。(Collins, 1960; Futagawa and Borrás, 1997)



圖 1-4.Estereo Estatica 模型及模型



圖 1-5.Casa Milla 及 聖家堂

1920 年德裔美籍建築師 Erich Mendelsohn 在波茨坦市(Potsdam)為愛因斯坦 (A. Einstein) 蓋了愛因斯坦天文台(Einstein Tower, 1920-24)，這座用磚和灰泥塑造的建築造型奇特，雕塑性強(圖 1-6)。對於所設計的曲線型體，Erich Mendelsohn 認為這是一件非常艱辛的設計與建造過程，除了需要比一般建築畫更多細部圖及作更多模型之外(圖 1-7)，當時他為了可以建造出與他的草圖線條一樣自由的建築，一度請教其他領域的技術，最後外牆的施作主要靠造船工匠(shipbuilder)才能完成，但原本設計混凝土材料的外牆卻因為技術無法達成而改用磚塊與灰泥來製作。建築師本身在建造完成後深深感嘆再也不願意嘗試第二次此類型的設計過程與建造過程，但是他卻欣慰他這唯一一棟自由型體建築可以將他畫在紙上線條自由的草圖真實呈現。(Von Eckardt, 1960; Zevi, 1982; Barkow, 1998)



圖 1-6.愛因斯坦天文台

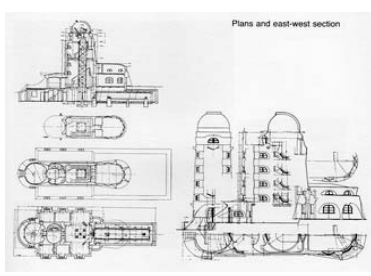
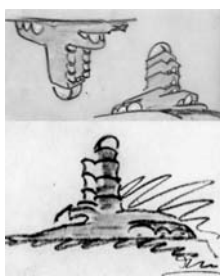


圖 1-7.草圖，施工圖與石膏模型

另外 1930 Rudolf Steiner 在瑞士西北角的第二人類學哲學學院(Second Goetheanum, 1925-28)，也是靠著建築師創造出的新設計方法來建造(圖 1-8)。建築師先做了大小不同比例的實體模型(圖 1-9a,b)，再繪製幾種有關形式變化的示意標準圖做參考(圖 1-10a,b)，由一群訓練有素兼具美感的工匠依照模型及標準圖來建造。史代納爾雖然設計的建築形體非常的複雜，但他開始利用具有“標準化”的概念及參數化模式的圖面來呈現他的設計，並由具有美感工匠的自由組合創造出雕塑性造型的建築。(Steiner, 2003)



圖 1-8.第二人類學哲學學院



圖 1-9a.Rudolf Steiner 與設計量體模型



圖 1-9b.室內柱子剖面模型

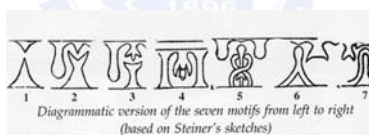


圖 1-10a.七種柱頭樣式的標準圖

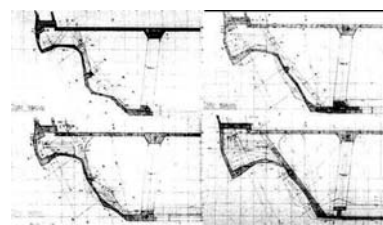


圖 1-10b.建築剖面標準圖

1950 法國建築大師 Le Corbusier 在距離人類學哲學學院僅車程兩小時的地方，有一棟聞名至今的建築作品，廊香教堂(Chapel of Notre Dame at Ronchamp, 1951-53)(圖 1-11)。這座教堂量體造型自由，外觀像是一件精緻的雕塑品，內部空間變化極大，曲型厚實的牆面及開口讓光線在空間中具有戲劇性的變化而使教堂充滿了神聖及莊嚴。對於這種空間表現，建築師必須靠不同設計媒材來輔助設計思考，尤其是三度空間的實體模型。柯比意繪製了大量的草圖，平面圖，立面圖，剖面圖，透視圖及做了很多表現不同材質及型式的實體模型，在設計過程中輔助對非幾何形體的空間關係，結構關係等的設計思考(圖 1-12a,b~1-13a,b)。(Corbusier, 1956; Herbert, 1992)



圖 1-11. 廊香教堂



圖 1-12a.草圖

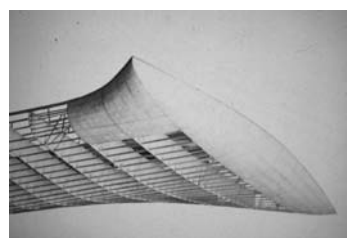


圖 1-12b.屋頂結構圖

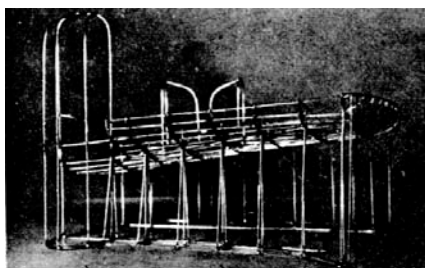


圖 1-13a.結構模型



圖 1-13b.量體模型

20 世紀美國知名建築師 Eero Saarinen 於 1956-62 在美國紐約所建造的紐約甘乃迪機場環球航空公司候機室(Trans World Airlines, TWA Terminal, Kennedy Airport, 1956-62)也是另一件造型奇特的建築形體(圖 1-14)。這棟建築物呈現強烈的雕塑性效果，它具有對稱的平面，運用薄殼及懸索等當時最新的技術作出兩個向外飛展的大型懸臂式混凝土薄殼頂，內部雕塑式的支座和曲線型的樓梯，引起流動的感覺，整個建築表現了飛行的象徵。建築師選擇適於施工曲面的材料-日本製的白色圓形馬賽克來完成流線型的牆面。在設計過程中，建築師先快速繪製草圖後(圖 1-15)，便開始大量依賴實體模型來思考多變化的空間關係，並製作了許多大型比例的模型來感受形體的空間性及探討空間結構關係(圖 1-16)。最後才繪製詳盡的細部施工圖來施工建造。建築師沙利南認為這種形體自由的複雜設計，圖面無法完全表達複雜的空間關係，必須仰賴實體模型才能真正感受所想像的空間感。



圖 1-14.TWA Terminal, 1956-62

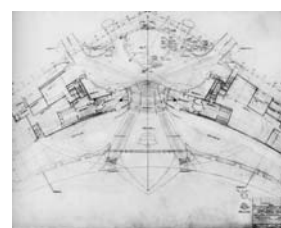
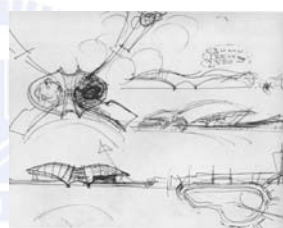


圖 1-15.草圖

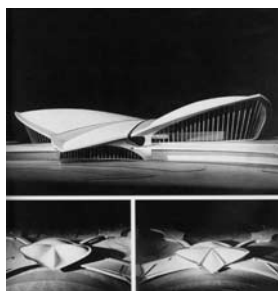


圖 1-16.大量製作比例實體模型



1960 年 John Utzon 在澳洲設計的雪梨歌劇院(Sydney Opera House, 1957-1973)，讓他經歷了非常艱辛的設計與製造過程(圖 1-17)。當時，建築師任意的把腦中帆船的意念用草圖畫出來(圖 1-18)，然而當時施工技術尚未成熟，無法施作設計圖中自由的形體，為了可以尋求可行的施工技術，這個設計案一直拖了 17 年，最後才由薄殼結構解決，但是建築師卻被妥協把非幾何的曲線改為可當時技術施作的幾何線條(圖 1-19)。建築師 Utzon 面臨了施工技術的不足而被迫放棄了自己原始創作，這種煎熬讓他在也不願意回到最後完工的雪梨歌劇院。在設計過程中，Utzon 為了解決屋頂複雜的結構關係，研究了許多不同的材料，也製作了許多探討不同議題的大小模型，甚至靠機械技術來輔助做設計(圖 1-20)。John Utzon 這個例子，仍然依賴大量的實體模型及細部結構圖面，最後為了解決結構問題還藉由機械設備來輔助設計思考過程。(Fromonot, 1998; Murray, 2004)



圖 1-17. 雪梨歌劇院



圖 1-18. 草圖

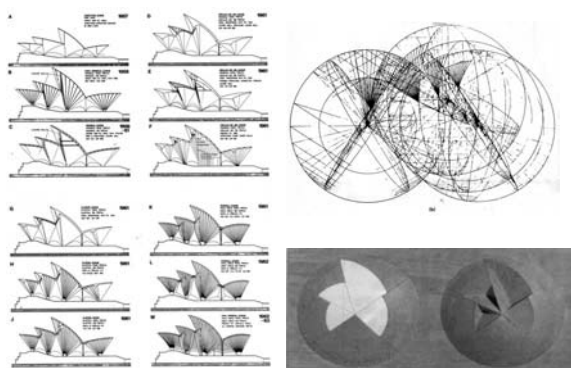


圖 1-19. 從非幾何線條調整成幾何線條



圖 1-20. 製作結構模型

數位時代的呈現媒材

1990 Frank Gehry 開始利用數位媒材輔助設計思考，他在巴塞隆納的自由行體魚型雕塑，就是以數位畫設計過程來完成建造的(圖 1-21)。設計過程中，他先畫草圖，再製作自由形體實體模型，接著藉由 CAD/CAM 技術來進行設計發展與建造過程。他利用 CAM 設備 3D digitizer 把實體模型轉化為數位模型，再用電腦 CAD 軟體進行設計修改(圖 1-22a,b)。此外，還會將數位模型再度以 CAM 設備 RP 及 CNC 輸出成設計發展階段中的模型來進行設計思考(圖 1-23a,b~1-24)。最後在施工階段，CAD/CAM 的運用也更加重要。在 Gehry 其他設計案例中，如畢爾包古根漢美術館(Bilbao Guggenherm Museum)，利用 CNC 技術來施作自由曲面外牆的石材加工。Gehry 以 CAD/CAM 輔助設計的過程成為數位時代許多知名建築師希望操作的數位設計過程，因為藉由數位媒材的輔助，以往為了設計自由形體的複雜及困難的設計過程得以解決，設計師可以重複建造型體更自由及解放的空間。當然，這些數位媒材也影響了設計思考而成為目前許多研究者著重的數位設計思考。(Lindsey, 2001; Ragheb, 2001; Friedman, 2002)



圖 1-21. 自由形體魚型雕塑

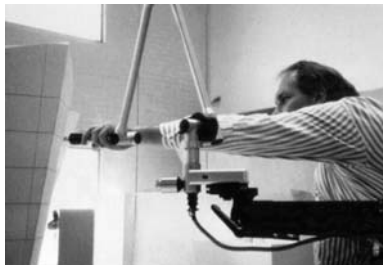


圖 1-22a. 利用 3D digitizer



圖 1-22b. 將草模型轉電腦數位模型

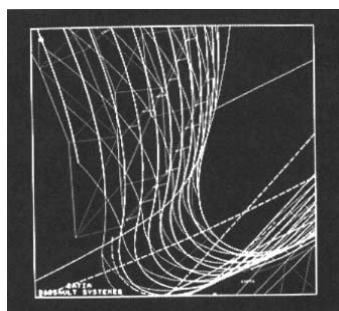


圖 1-23a.供 RP 輸出之電腦圖

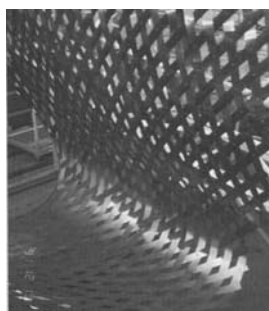


圖 1-23b.LOM 製作的單元

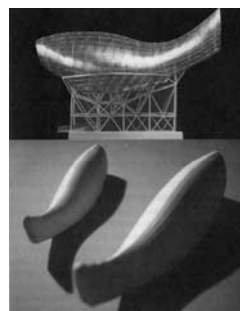


圖 1-24.RP 輸出量體模型

從 Frank Gehry 開始大量以數位化設計過程完成了複雜及行體自由的建築空間之後，目前越來越多年輕設計師與建築師也陸續運用 CAD/CAM 技術來輔助設計過程，其中以台灣年輕設計團隊 *AleppoZone* 為例，設計團隊在設計幾個自由形體設計過程中也大量運用 CAD/CAM 技術的輔助來完成(Liu et al., 2002)。設計師從操作這些設計案(由小型的室內門廳空間到中型的大廳空間)中，嘗試找出製作自由形體的一套設計流程。在設計施工建造過程中，由於自由形體複雜，藉由 CAD/CAM 的數位控制技術 CNC milling 設備來製作每一塊都具有不同曲面的單元元件(圖 1-25a,b)。此外，自由形體的支撐骨架也是由 CNC 雷射切割輸出而成(圖 1-26)，這些由 CAD/CAM 技術輸出的單元精準度很高，因此易於最後施工時的組裝。(李元榮, 2005)



圖 1-25a.CNC milling



圖 1-25b.曲率不同的壓克力表皮



圖 1-26.雷射切割輸出骨架

1.2 設計模型

設計者在設計過程中除了會畫 2D 平面圖、立面圖、剖面圖、透視圖之外，也會利用可以呈現三度空間的 3D 模型來輔助設計思考(Porter and Neale, 2000; Ryder et al., 2002; Breen et al., 2003; Smith, 2004)。一些研究者在探討設計媒材時，對於這些具有不同比例的 3D 模型的特性或角色作討論：Abbo(1996)在其研究中提出 3D 模型具有“空間性”特質(spatial characteristic)，可以讓設計者感受到深度與距離，讓設計者更容易理解設計形體的量體與空間關係。同時，模型是一種模擬真實空間的方式，可以直接呈現空間的視覺化工具，或作為測試結構的工具。此外 Porter and Neale(2000)認為 3D 模型是可以讓設計想法在真實空間中測試的工具。模型也是一種可以提供設計者對 3D 空間的測量方式(Smith, 2004)。由此可知，3D 模型的特性對著重於“空間”的建築設計過程扮演重要的角色。以下分別對模型演變及模型角色作討論。

模型演變

3D 模型在設計過程中扮演重要的角色，其三度空間的特性可以讓設計者更容易理解設計的空間關係。模型的形式可以從歷史演變的角度分成三大類：1. 早期古埃及羅馬時期用來祭祀的小型建築模型(maquette)到文藝復興用來輔助設計過程的手作實體模型(hand-make physical model)，主要是由建築師或工匠親自使用各種材料手工製作的比例模型(scaled model) (Porter and Neale, 2000; Smith,

2004) (圖 1-27~1-28)；2. 到 1960 年數位時代的電腦科技開發出電腦 3D 建模技術而產生了電腦數位模型(digital model)。數位模型主要在電腦 3D 虛擬環境中建造，具備了電腦虛擬的特性如無重力、不同模式的呈現(框線，彩現，材質)、容易修正編輯、模擬真實環境的效果到可以加入動態模擬等(Mitchell and McCullough, 1991) (圖 1-29)。3.1990 年開始，實體模型與電腦技術之間產生了密切的關係(Porter and Neale, 2000)，藉由電腦 CAD/CAM 技術可以製作出實體模型(computer generated physical model)(圖 1-30)，而且還可以反向操作讓實體模型轉換成電腦數位模型(Mitchell, 1998; Ryder et al., 2002)。這種藉由電腦操作形式的模型拓展了以往模型的角色，它可以處理手工製作困難的複雜形體設計，也可以精準生產 1:1 比例的模型(full-scale model)，作為設計檢視或直接輔助建築的真實建構。



圖 1-27.祭祀模型 maquette



圖 1-28.文藝復興設計模型

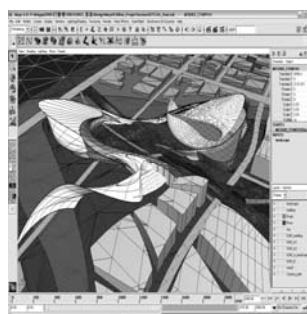


圖 1-29.電腦數位模型



圖 1-30.RP 輸出模型

其實，這些形式的轉變主要都是為了可以改善設計者製作實體模型所需耗費的時間及金錢而引發的。從手工製作實體模型到電腦數位模型，設計者可以更快速的製作 3D 模型及作修改，而且添增了許多電腦特性的輔助，讓設計想法可以更容易呈現(Lin, 1999)。然而，電腦提供的 3D 的虛擬製作模型環境，無法像實體模型一樣讓設計者可以容易理解模型的整體關係，同時也缺乏了實體模型的觸感與真實量體的感覺(Wu, 2003; Chang, 2005)。Breen(2003)認為數位模型太精準而缺了手工製作模型所能呈現出的設計師個人特質或製作過程的質感，加上數位模型依然只是投影在平面螢幕的 3D 模型，缺乏真實的立體感。林政緣(2000)用認知實驗方法來比較實體模型與數位模型在本質上的差異，結論指出實體模型操作過程比數位模型來得複雜，但在量體及尺度感上的掌握比數位模型占優勢，兩者建構程序的方式有極大的不同。因此有些研究者開始針對這些缺點繼續探討出更適合的數位模型製作環境與方式，其中 Wu(2003)提出以結合 VR 技術來增強模型真實感與立體感的 VR 數位模型(VR digital model)。此外也有研究者藉由沉浸的互動機制或數據手套(data glove)來提伸數位模型的真實感(Tsao, 2004)。

至於第三類的電腦製作實體模型則是近年來建築領域從航太工業、汽車工業、工業設計領域吸取利用電腦 CAD/CAM 技術來作為輔助設計過程的經驗。透過 CAD/CAM 技術的輔助，設計者可以在數位模型及實體模型之間進行轉換，CAM 設備(CNC, RP, 3D scanner)將 CAD 系統中的電腦數位模型輸出成實體模型，也可以將實體模型掃描轉換成電腦數位模型(Kalpakjian, 1989; Chris and Jimmie, 1993; Schodek et al., 2005)。研究者將這種利用 CAD/CAM 技術輔助設計的過程稱為數位建構(digital fabrication)(Kolarevic, 2000; Ryder et al., 2002; Sass, 2004)。數位建構過程中結合了數位模型與實體模型，共同具有兩種不同模型形式的本質，同時操作方式也改變，衍伸了以往設計過程中模型製作的角色。它可以輔助製作形體複雜的設計比例模型，甚至還可以輔助建造過程(Mitchell, 2001)。

模型角色

輔助不同設計階段的設計想法呈現

模型是一種可以作為想法的呈現及輔助設計思考的工具(Smith, 2004)。建築設計過程中的模型具有不同的呈現方式，可以輔助不同的設計階段。這些不同呈現的模型大致可以分成四種層級(Porter and Neale, 2000; Ryder et al., 2002; Seely, 2004)：

1. 概念模型(conceptual model)
2. 發展模型(development model)
3. 設計完成後的呈現模型(presentation model)
4. 1:1 比例的大模型(mock-up)

概念模型是設計初期概念階段中所用來呈現抽象想法的工具，因此也可稱為抽象模型(abstract model)。到了設計的發展階段所運用的發展模型，呈現方式比較具體，除了會表現量體關係，也會採用比較多樣的材料表現。此階段的模型呈現對設計過程很重要，因為設計師會為了嘗試各種設計可能性或發展多種設計方案而製作具可行性的設計模型，因此也可把此階段的模型稱為可行性模型(feasibility model)。當設計完成後，設計者會利用完整的模型呈現來作為與業主溝通的工具。這階段的呈現模型除了表現完整的設計形體，也會呈現出設計細部或模擬真實材料的應用，整體模型會比較精緻。前面三種模型呈現都是具有比例的小型設計模型，另外如果將設計某部份製作出比例以 1:1 的模型，則稱為 full scale mock-up，設計師通常會利用這種 mock-up 來測試設計的結構關係、材料特性或用來體驗真實的空間感。

空間性的表現

模型具有量體、材質、結構等三度空間呈現，是一種比 2D 圖面更可以精準表現空間的設計媒材(Hohaus, 1970)。Abbo(1996)也指出模型的“空間性”特質(spatial characteristic)如深度及距離的表現，讓設計師更容易去理解空間設計的三度空間關係。模型就跟真實建築一樣是具有三度空間關係的，但是小型化的(Breen et al., 2003)。由於模型具有表現“空間”的特質，對於建築設計所強調“空間”的設計過程扮演著重要的角色。Burden (1985)在討論“設計模擬”的設計媒材時，說明了當時荷蘭 Tu Delft 建築系學生對於實體模型的使用。為了行伸實體模型的空間呈現，他們將實體模型結合影像技術，作出一種模型模擬器(model simulator)，主要是用機械設備將小型攝影機置入實體模型裡，以人的角度拍攝，模擬行走街道的場景，企圖模擬人在空間中的真實空間感(圖 1-31a,b)。這種以實體模型結合影像技術的模型模擬器所模擬出來的效果就像後來數位模型技術中的動態模擬一樣，可以讓設計者更容易理解空間感。



圖 1-31a. model simulator

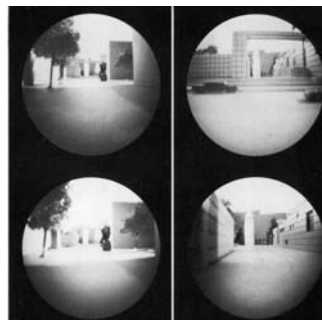


圖 1-31b.攝影鏡頭中的街景

2. CAD/CAM 設計媒材

2.1 CAD/CAM 技術

CAD 發展

1963 年 Ivan Sutherland(1963)提出 Sketchpad 之後，其對電腦影像技術的突破促使電腦輔助設計 (computer-aided design, CAD) 蓬勃發展(圖 1-32)。CAD 繪圖技術的發展與使用，隨著圖形技術從二維繪圖至三維建模的演進，可將 CAD 的圖形呈現分成幾個重要發展階段：從 1960 年代開始以二維簡單的線(lines)架構，再進而發展到 1970~80 年以三維建模的繪圖技術、先是以面為繪圖基礎的表面建模(surface modeling)；再發展非均勻有理 B 樣曲線(non-uniform rational B-spline, NURBS)；最後還融入參數化(Parametric)的技術。CAD 技術發展至今，在基礎理論及軟體產業已經日趨成熟，也推出許多 CAD 繪圖系統，如 AutoCAD, PRO-E, 3D MAX, Microstation 等。這些系統在航太工業，機械電子，建築工程，紡織業等製造業廣泛應用，提高了製造業產品的設計水平。CAD 的三維建模(3D modeling) 技術提供了一個促進 CAD/CAM 技術發展及運用的數位設計環境，以下詳述三維建模技術的發展。(以下 CAD 發展參考網站-The History of CAD)

60 年代—線框造型系統 (wire-frame modeling)

這種初期的線框(wireframe)造型系統只能表達基本幾何資訊，物體只用直線、圓弧、圓來描述，缺乏形體的表面資訊，無法有效表達幾何資料間的拓撲關係。

70 年代—曲面造型系統 (Surface modeling)

飛機和汽車工業蓬勃發展，飛機與汽車製造過程中面臨了大量自由曲面問題，當時所利用的三視圖不足於表達複雜的自由曲面資訊，常常造成設計完成後，製作出來的樣品與設計者所想像的差很多。因此設計者為了可以讓自己更了解所設計的曲面形狀，常常按比例製作油泥模型(圖 1-33)，作為設計評審或方案比較的依據。由於製作實體模型耗費許多時間及製作過程繁瑣，因此設計者開始提出更新設計過程的需求。此時，法國人提出了貝茲(Bezier)演算法，使人們利用電腦處理曲線及曲面問題變得可行。當時，法國達索(Dassault)飛機製造公司研發出可以基於 CADAM (Computer Augmented Drafting and Manufacturing) 的 2D CAD 系統，以表面模型為特點的自由曲面建模方法，推出了 3D 曲面造型系統 CATIA (Computer Aided Three Dimensional Interactive Application)。CATIA 曲面造型系統的推出，解放了 CAD 早期單純模仿繪圖紙的功能。隨著數學演算法及電腦技術的演進，這種表面建模方式從曲線逐漸發展為曲面演算的模式，從貝茲(Bezier)曲線、非均勻有理 B 樣(NURBS)曲線、Coons 曲面、貝茲(Bezier)曲面到最近幾年發展起來的非均勻有理 B 樣(NURBS)曲面。這種曲面造型系統以電腦完整描述設計形體的表面資訊，讓 CAM 製造技術可以結合 CAD 系統來生產與製造，因此 CAD/CAM 技術便開始發展。



圖 1-32. 1963 年 Ivan Sutherland 的 Sketchpad 繪圖系統

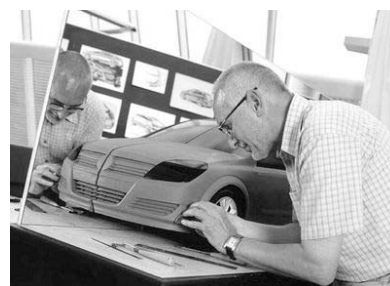
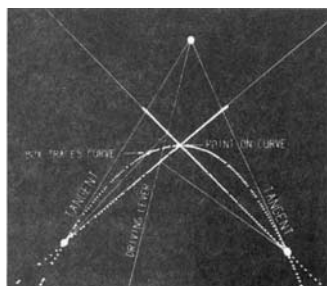


圖 1-33. 汽車工業之汽車油泥模型(clay model)

70 年代末~80 年代初期—實體造型系統 (Solid modeling)

雖然曲面造型系統可以提供的表面資訊讓 CAM 系統可以進行零件製作，然而，表面建模技術無法精

確表達零件的其他特性，如品質，重心，慣性矩等。為了克服物件屬性資訊的不足，在 70 年代中期一些研究者極力發展另外一種可以分析物件特性的演算法：SynthaVision 利用構造立體幾何法 (Constructive Solid Geometry, CSG) 的模型表現方式推出了第一個實體建模程式，主要可以用來分析原子的輻射特性。1978 年英國劍橋大學 Charles Lang 研究團隊的 Herb Voelcker 也基於 CSG 實體建模方法推出了 PADL (Part and Assembly Description Language) Solid Modeler。除此之外，Charles Lang 研究團隊的 Ian Braid 則基於另外一種演算法—由 B. Baumgart 所提出的邊界表示法 (boundary representation, B-rep) 來推出 BUILD Solid Modeler。此後，一些 3D CAD 系統都基於這些演算法來發展為實體造型系統。實體造型系統可以精確表達模型的屬性，這對電腦輔助工程 (Computer Aided Engineering, CAE) 產品分析上有很大的便利，因此基於對 CAD/CAE 一體化技術發展的研究，SDRC 公司於 1982 年推出了一種以實體造型建模技術為主的 CAD/CAE 軟體—I-DEAS。另外，1980 年代個人電腦 (PCs) 的普及化，電腦系統能力增強，3D 渲染 (3D rendering) 的技術發展，CAD 軟體開始轉向 3D 實體造型技術的開發，因此市場上陸續推出實體造型的應用軟體：Unigraphics 推出的 UniSolids、英國 Ian Braid 及 Charles Lang 等研究團隊推出的 Romulus b-rep、IGES、CATIA v2 等。

80 年代中期~90 年代—參數化實體造型系統 (Parametric Solid Modeling)

當 CAD 的實體造型技術逐漸普及時，CV 公司內部有一群人推出了另外一種比實體造型技術更好的演算法—參數化實體造型方法。參數化技術的特點是：基於特徵、全尺寸約束、全數據相關、尺寸驅動設計修改。當時一開始提出時由於技術發展並不完整到可以支援複雜自由曲面的參數運算，加上當時採用 CAD 系統的大多是航太工業與汽車工業，必須依賴大量的自由形體建模系統，因此這個提議被 CV 公司否決了。這群人因此集體離開了 CV 公司而自行建立了另外一家公司，稱為 Parametric Technology Corp，繼續開發參數化實體造型系統，於 1989 年推出了參數化實體建模軟體 Pro-Engineer。90 年代開始，參數化技術越來越成熟，CAD 業界開始紛紛以參數化技術開發軟體。然而對於 CATIA, CV, UG, EUCLID 這些原本是在非參數化模型基礎上開發或集成了許多其他應用的系統，要將系統全部重新改寫並不容易。SDRC 公司開發人員利用多年對參數化技術的研究，發現此技術仍然有許多不足之處，因此基於參數化技術，開發人員提出了一種更先進的實體造型技術—變量化技術，希望作為今後的開發方向。SDRC 公司從 1990 年開始利用三年時間，將原本推出的 I-DEAS 系統重新改寫，於 1993 年推出了新系統的 I-DEAS Master Series 軟體。

CAM 發展

CAM 技術則源始於 1950~1960 年代，應用於美國軍方。早期 CAM 發展的技術源始於自動化控制系統 (numerical control, NC) 的概念。最早自動化控制技術概念，由 1801 年 Jacquard loom 發明查卡織布機 (提花織機) 開始 (Mitchell and McCullough, 1995)。查卡織布機由 Jacquard 所發明，是一種可變程式型自動織布機 (圖 1-34a, b)。它使用不同式樣的厚紙卡來控制紡錘和飛梭的交互作用，使其編出不同花式的布料。這個發明啟動了紡織工業的一次革命，同時也創始了數位化控制技術的概念發展。



圖 1-34a. 查卡織布機

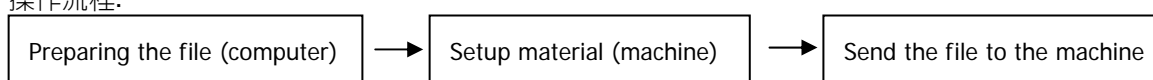


圖 1-34b. 查卡織布機以 Punch Card 作為編織的圖案控制

CNC 技術

從自動化控制技術概念的延伸，利用電腦的更精準化的數位控制，產生了電腦數值控制(computer numerical control, CNC)技術。CNC 技術是一種以減去法(subtractive)的數位生產製作方式，如銑削(milling)、水刀切割(waterjet cutting)、雷射切割(laserjet cutting)等技術。此技術主要大量運用在製造工業上，可以直接把電腦數據利用不同的切割方式精準的生產出來。另外，在製造工業上為了增加製造效益，還以網路結合了多台 CNC 設備來進行數位控制製造，稱為 flexible manufacturing system (FMS)。到了 1970~80 年代由於科技的進步而開發出微型處理器(micro-processor)後，個人電腦廣泛被應用，當時 CAM 也發展出形體較小而容易操作的設備與技術。1980s ~1990s 隨著 CAD 技術廣泛被設計者使用之後，CAM 技術發展也積極跟進。以下以不同的 CNC 技術作介紹:(參考 Kalpakjian, 1989; Chang et al. 1998; Callicot, 2001; Seely, 2004)

操作流程:



CNC 機器設備在操作過程中，都是通過 CAD/CAM 軟體把 2D 圖面轉化為簡單的電腦程式-G-Code 之後，控制介面會讀取這些程式碼，顯示出需要切割的路徑及形狀，在把資訊送到設備進行材料的切割(圖 1-35a,b,c)。

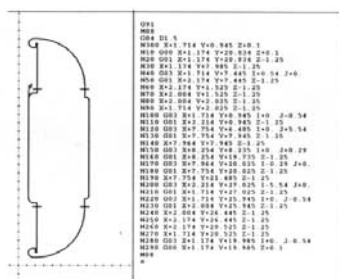


圖 1-35a.G-Code

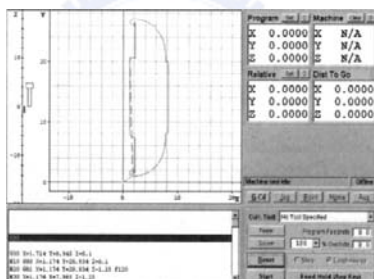


圖 1-35b.CNC 控制介面



圖 1-35c.CNC 切割

1. CNC milling

電腦數控銑床技術主要是以轉動的鑽孔頭切削材料，可作精密的銑削、鑽孔、搪孔及攻螺紋的切削功能。此工具機上的轉動軸具有水平 x,y 方向的線性移動及 z 方向的角度旋轉移動。CNC milling machines 設備是以這些不同方向移動的軸數來作為不同工具機的分類方式。此外，電腦數控銑床工具機可切削的材料屬於小型而呈塊體的材料如：木塊、金屬塊、塑膠、泡沫塑料等。利用這種技術可以製造出小型的單元元件。(圖 1-36a,b)



圖 1-36a.Roland Modela MDX-20



圖 1-36b.銑削堅硬的泡棉

2. 電腦數控打槽機 (CNC Routing)

如同 milling 的技術，但具有比較大的平台式切割工作檯，可同時切割大面積平板材料及小型塊體材料。可以切割的材料有：夾板/膠合板、泡沫塑料等。(圖 1-37a,b)



圖 1-37a.Precix 9100 table router

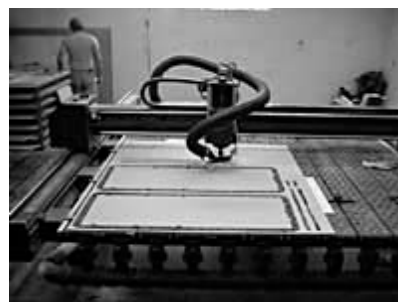


圖 1-37b.切割夾板

3. 電腦數控水刀切割 (CNC waterjet machining)

電腦數控水刀切割比前兩種 CNC 技術更強的功能是可以切割更多樣的材料。利用水刀切割技術可以切割硬度更硬的材料：如夾板/膠合板、泡沫塑料、金屬、石材、玻璃、塑膠等。(圖 1-38a,b)



圖 1-38a.OMAX Waterjet

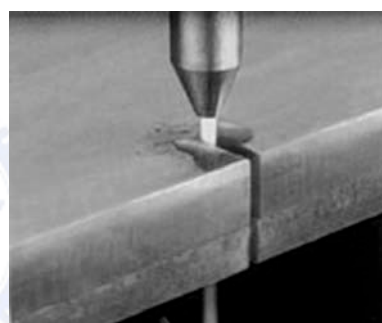


圖 1-38b.水刀切割

4. 電腦數控雷射切割 (Laser cutter)

具有不同大小尺寸的工具機台，小至桌面型而大至工廠大型機台。主要切割技術是以雷射切割材料。可切割平板式及薄的材料：木板、紙、厚紙板、泡沫版、塑膠板、壓克力等。(圖 1-39a,b)



圖 1-39a.X-660 Laser Platform



圖 1-39b.雷射切割

5. Roland CAMM-1 vinyl cutter

類似出圖機的機台，切割技術非常精準而細緻，可以切割非常細薄的材料，如乙烷基(vinyl)、紙、醋酸纖維(acetate)、甚至很薄的銀箔(foil)。(圖 1-40a,b)



圖 1-40a. Roland CAMM-1 vinyl cutter

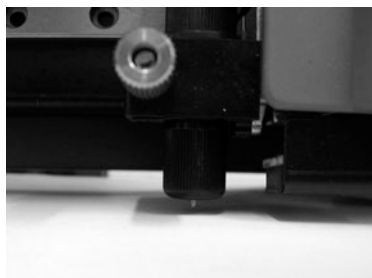
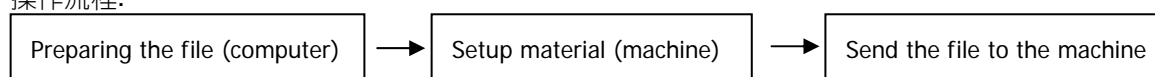


圖 1-40b.

RP 技術

到了 1980 年代，CAM 發展了另外一種製造加工技術—Layer Manufacturing (LM) 技術，也稱為自由成型加工或快速成型(Solid Freeform Fabrication or Rapid Prototyping Process (RP))。LM 是一種附加法 (additive) 的數位生產方式，模型操作過程以材料一層一層附加成形而成。工業產品製造上，此技術為一重要的發展，它是一種利用三度空間立體之 CAD 加工圖形直接製造零件實體模型之製法。以下以不同的 LM 技術作介紹: (參考 Kalpakjian, 1989; Chang et al. 1998; Callicot, 2001; Ryder et al, 2002; Seely, 2004; 網站 <http://check.itgo.com>)

操作流程:



LM 技術主要由不同的概念發展出不同的系統：Concept Modeling, Rapid Prototyping, Rapid Tooling。

1. Concept Modeling

為了可以滿足設計概念初期快速得到複雜形體設計的 3D 實體模型的需求，快速製造自由形體(Fast Freeform Fabrication)這個概念促使了 3D 印刷(Three-dimensional printing, 3DP)系統的發展。3DP 系統是由 MIT 在 1990s 研發出來而開始商業化，當時 3DP 有多種不同的系統。為了符合 concept modeling 概念的需求，系統必須可以快速製造出精準度不高的模型，並且是低價位的。目前市場上的三種 concept modeling 系統設備：

- a. The Z Corporation Z402 3D Printer
- b. The 3D system Thermojet 3D printer
- c. The Stratasys Genisys 3D Concept Modeller

The Z Corporation Z402 3D Printer

Z -Corp 成型操作過程為由黏度(viscosity)低、含水性的(water-based)的黏結劑 (binder) 印在粉末平台 (powder bed)上，作為每一層的輸出，輸出速度可以類似噴墨印表機(inkjet printer)一樣快速。當一層印好後，粉末平台會下降一層，繼續完成另外一層的輸出。整個過程不需支撐材料，因為平台的粉末圍繞著印製出的表面，就已經當成支撐的用途。當模型完成之後把粉末去除就可以得到完整的模型。但是在清除粉末的同時，必須另外加入其他材料來增加強度，如蠟(wax) 或環氧樹脂(epoxy resin)。(圖 1-41a,b,c)

材料：粉末 + 黏結劑

優點：速度最快速的 concept modeling 技術、價位低、容易操作。

缺點：必須額外操作其他步驟來增強模型強度，材料的限制。



圖 1-41a. Z-Corp Printer

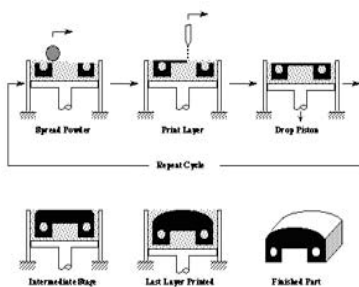


圖 1-41b.系統操作架構



圖 1-41c.粉末硬化之模型

The 3D system Thermojet 3D printer

利用 Multi Jet Modeling (MJM) 成型技術，主要是利用噴頭將材料噴出，製作過程也是一層一層來完成，同時必須有額外支撐材料。所噴射出的模型精準度為 300dpi (x)，200dpi(y)。(圖 1-42a,b,c)

材料：熔點很低的熱塑性塑膠 (thermoplastic)

優點：過程快速，價位低，容易操作。

缺點：材料很脆弱，無法作為結構測試的模型，只是適合用在 concept modeling 的階段。材料的限制、支撐材的表面很粗糙。



圖 1-42a. Thermojet 3D printer

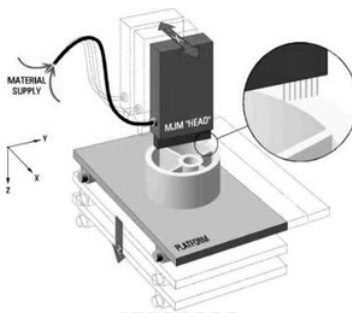


圖 1-42b. 系統操作架構



圖 1-42c. 塑膠模型

The stratasys Genisys 3D Concept Modeller

操作過程與 FDM 相似，都是由 IBM 所研發的 Stratasys 產品。(圖 1-42a,b)

精準度：0.4mm (x, y)

材料：聚酯(polyester)此材料比較堅硬但仍然無法作為結構測試。

優點：過程快速，容易操作，材料比較堅固。

缺點：材料有限，精準度不高，完成品表面不好看。



圖 1-43a. stratasys Genisys 3D Concept Modeller

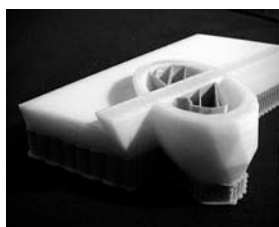


圖 1-43b. 聚酯材料之模型

2. Rapid Prototyping

RP 主要提供了比較佳的精準度及更多樣的材料使用，但卻比較昂貴及必需具備較多的設備。目前市

場上有 4 種 system :

- a. Stereo Lithography (SLA)
- b. Fused Deposition Modeling (FDM)
- c. Selective Laser Sintering (SLS)
- d. Laminated Object Modeling (LOM)

Stereo lithography (SLA)

立體印刷術(Stereo lithography, SLA)於 1988 開始商業化，為 RP 最早的製造技術，屬於最普遍的系統也是擁有最大的使用市場。模型製作流程主要是以具有光感硬化的液體，一層一層噴射在可上下升降的活動平台上，透過紫外線光源照射一層一層硬化方式成形。目前用於此 RP 設備的液體為合成樹脂(resin)，最後硬化成透明而堅硬的模型。除了液體狀的樹脂(resin)為主要基礎材料，另外需要支撐材料。當模型製作完成後，必需置入紫外線烤箱(UV oven)把支撐材去除。目前越來越多材料(具有抵抗高溫及高濕度材料)可以被使用。(圖 1-44a,b,c)

材料：樹脂(resin)

優點：高精準度，可使用的材料多樣。

缺點：昂貴，麻煩的操作過程，需要額外支撐材料，額外剔除支撐材料的過程。



圖 1-44a.SLA system

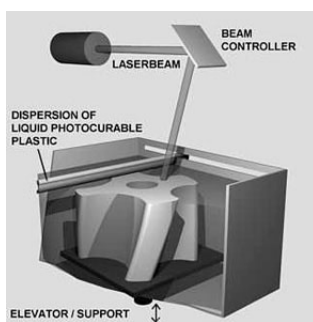


圖 1-44b.系統操作架構

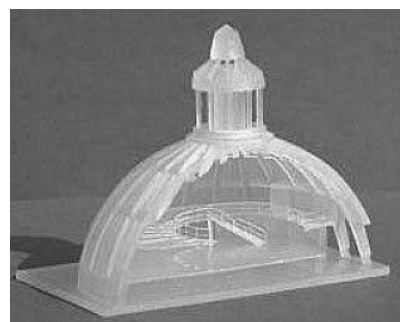


圖 1-44c.樹脂模型

Fused Deposition Modeling (FDM)

熔融擠製成型(Fused deposition modeling, FDM)系統從 1991 年開始商業化，它跟其他大多數系統不同的地方是這個系統不使用雷射光束來成型。過程中，細絲狀的材料由噴頭擠出後，然後以高溫融化成型。同樣的當一層完成時，平台會下降再製作另外一層，同時也會噴出支撐材料作為支撐。當模型成型完成後，必須放進超音波的水箱把支撐材料洗掉。(圖 1-45a,b,c)

材料：ABS 塑膠(ABS plastic)、蠟(wax)、彈性體(elastomer)

優點：精準度高，堅硬的材料可以作為基能測試模型，多樣性材料可使用，操作容易。

缺點：需要支撐材料



圖 1-45a.FDM system

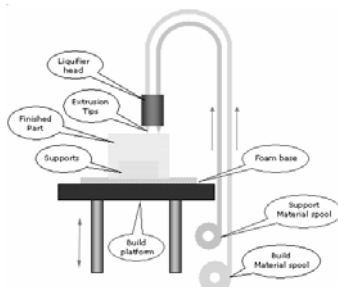


圖 1-45b.系統操作架構



圖 1-45c.ABS 塑膠模型

Selective Laser Sintering (SLS)

可以使用的材料很多，因此是市場上比較多功能的系統。主要操作過程是利用紅外線(infrared)雷射的方式來融化粉末材料，當一層完成噴射成型後，粉末床(powder bed)平台會下降一層繼續另外一層的製作。此系統跟 3DP 一樣不需要額外的支撐材料，因為粉末床上沒溶化的粉末可以當支撐作用。但是完成品的表面比較不細緻，稍微粗糙。(圖 1-46a,b,c)

材料：目前有 7 種使用的材料:尼龍(Duraform(Nylon)，具有尼龍的玻璃(Glass Filled Duraform)，(Fine Nylon)，Trueform，Elastomer，Copper Polyamide，Rapid Steel，Sand form material。

優點：很多材料的使用，精準度高，大型輸出，tooling pathway

缺點：複雜的設備，表面粗糙，curl/growth/Z+



圖 1-46a.SLS system

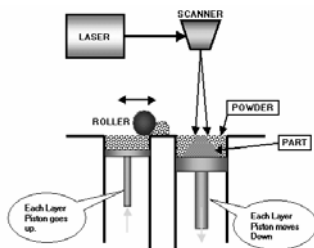


圖 1-46b.系統操作架構

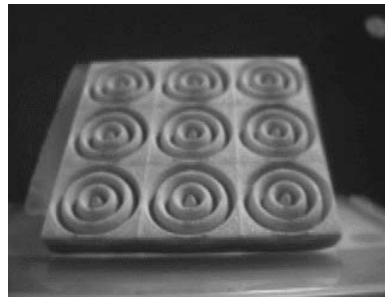


圖 1-46c.粉末硬化模型

Laminated Object Modeling (LOM)

從 1991 年開始商業化的層壓式成型系統(Laminated Object Modeling, LOM)是利用紅外線(infrared laser)雷射光切割薄板材料來製作每一層的資料。被切割剩下的材料會被切割成許多方形塊體，模型完成後可以輕易用手移除。當一層資料被切割完成後，會被高溫的黏著劑將這層與前面完成的那層結合。最後的過程，成型的模型裝進附加的材料中。LOM 過程適合製作大型而沒有複雜細部的模型。(圖 1-47a,b,c)

材料：紙(最廣泛使用)，也有其他材料研發中-塑膠(plastic)及復合材料(composite)

優點：非常精準，大型製造

缺點：材料的限制，材料特性弱，必須清除支撐材料



圖 1-47a.LOM system

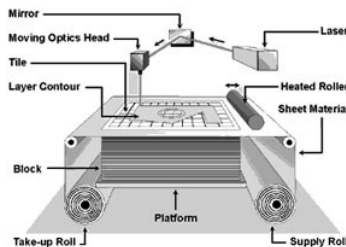


圖 1-47b.系統操作架構

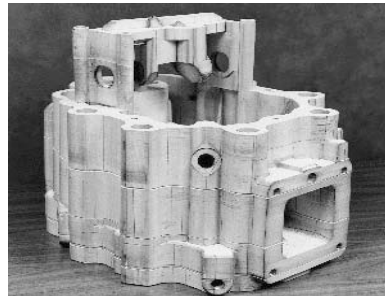
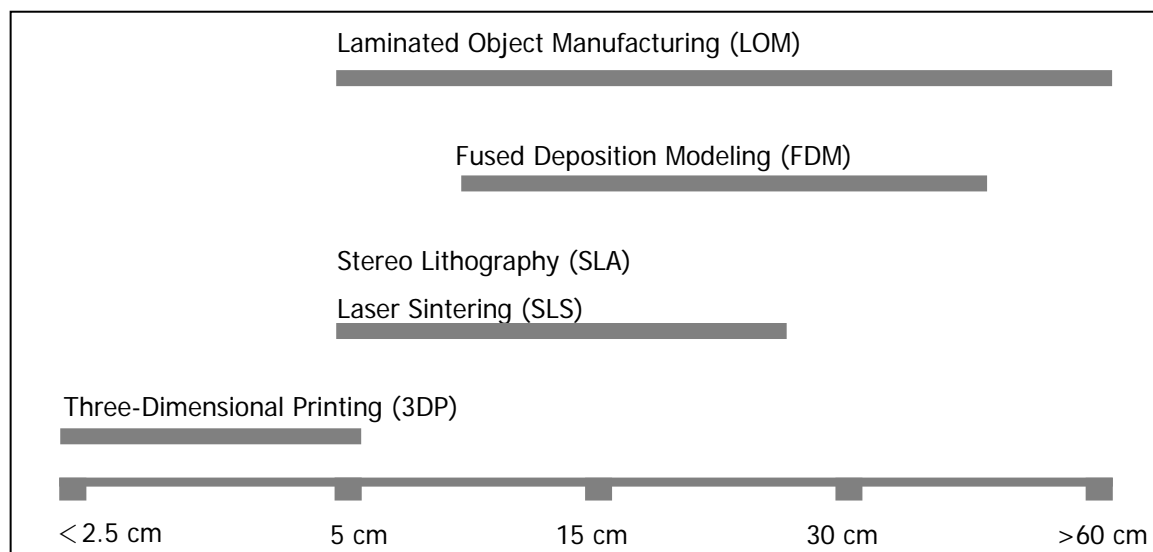


圖 1-47c.模型

以下為不同的 RP 技術所能射出的模型尺寸大小比較圖(Mitchell and McCullough, 1995)。



3D 掃描技術

除了上述的 CNC 及 RP 技術，另外還有一種常用於汽車工業的逆向工程(reversed engineering) 的技術—3D 掃描技術。這種技術從 1970 年開始開發，早期以接觸式的 3D 數位探測器(3D digitizer probe) 及機械座標測量器(coordinate measuring machine, CMM)發展(圖 1-48a)至目前被廣泛應用的非接觸式小型/大型的 3D 雷射掃描器(3D laser scanner) (圖 1-48b,c)及光學式 3D 掃描系統(optical 3D scanner)-如 3D 人體掃描器 (3D body scanner)。藉由 3D 掃描技術設計者可以快速將實體模型轉換為數位模型進行編輯與修改(Friedman, 2002; Luca and Nardin, 2002)。

應用 3D 掃描技術所得到的數位資料為點雲(point cloud)模型，如圖 1-49a，經由軟體格式轉換成 3D CAD 軟體可以進行編輯的 NURBS 數位模型(圖 1-49b)。3D 掃描技術廣泛應用於模具樣品的開發、醫療用人體測量、藝術品或人像的快速成型製作、娛樂遊戲的造型設計等。美國 Stanford 大學的 The Stanford Digital Michelangelo Project(Levoy et al., 2000)成功以 3D 掃描技術將實體的 Michelangelo 及 David 雕像建立高解虛度而精準的數位模型(圖 1-50a,b)。此外建築領域也將此技術應用於歷史建築重建的研究(Shih, 2002)。



圖 1-48a. 3D 數位探測器



圖 1-48b. 3D 雷射掃描器



圖 1-48c. 大型遠距掃描器

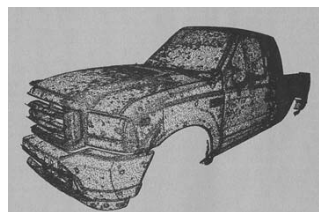


圖 1-49a. 從 3D 掃描器得到的點雲模型



圖 1-49b. 電腦轉換點雲成 NURBS 模型



圖 1-50a. 應用 3D 雷射掃描技術將 David 雕像數位化



圖 1-50b. 高解析度的數位模型

2.2 CAD/CAM 應用於建築設計

背景發展

1970 年代，工業自動生產機器在許多領域的製造過程中廣泛被引用，但有些自動生產機器直接與 CAD 電腦繪圖系統結合，例如 1976 年英國的 Flutter & Rolph 所發明的電腦軟體--POLYSURF (Flutter, 1972)。這個是以互動影像設計 CAD 軟體結合 CAM 數控帶 (numerical control tapes) 機器，製造曲面元件的系統(圖 1-51a,b,c)。這種結合 CAD 設計軟體及 CAM 製造系統的設計與製造過程稱為 CAD/CAM 過程(Mitchell, 1977)。當時，CAD/CAM 技術也開始被建築領域所引用，因為電腦自動化控制系統--CNC 技術得以輔助生產建築構造的元件(Mitchell and McCullough, 1995)。以下舉出 70~80 年代 CAD/CAM 輔助建築單元元件生產的一些例子。

1. 1968 年，英國一家窗戶製造公司 Critals, Ltd 以 CAD/CAM 輔助設計與製造過程，完成了 SEAC 及 SCOLA 的窗戶單元元件設計與製造(Hale, 1968)。

2. Kellenr Industries, in Fresno, California 將 CAD/CAM 這種數控生產技術運用在建築木構架元件的生產過程。

3. Skidmore Owens Merrill 建築設計事務所開始利用 CNC milling 機器及雷射切割機來製作建築模型及生產建築構件的單元(Kolarevic, 2003)。

4. 紐約的 Cathedral of Saint John the Divine 建造時的石材切割及巴塞隆納的 Sagrada Familia Church 的柱子構件。

5. 1975 年，University of Utah 的 Ronald Resch 教授將 CAD 系統-互動式繪圖設計系統與形體結構分析軟體結合 CAM 設備-大型的平床式輸出設備(flat-bed plotter)，生產出平面材料的元件，再將這些單元元件現場組裝，成功在 Canada 建構出橢圓形的烏克蘭復活節彩蛋(Ukrainian Easter Egg)(圖 1-52a,b,c)。這就是以 CAD/CAM 輔助設計與製造過程來完成的完整結構體，顯現出 CAD/CAM 技術輔助建築設計與建造的潛力。

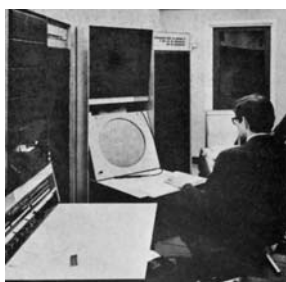


圖 1-51a. POLYSURF 設備

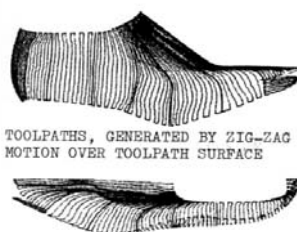


圖 1-51b. 輸出 CNC 之 Zig-Zag 軌跡

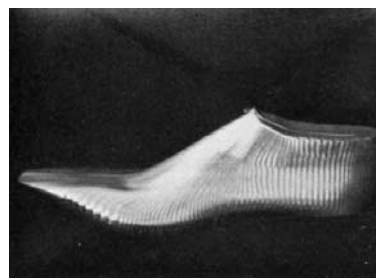


圖 1-51c. 30" Calcomp 切割出的模型



圖 1-52a. 互動式繪圖設計系統



圖 1-52b. 平床式輸出設備

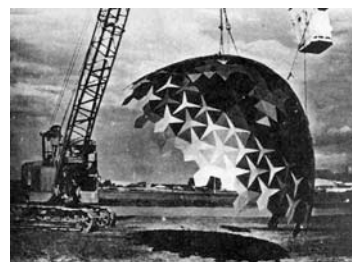


圖 1-52c. 現場組裝

從以上例子可知 CAD/CAM 技術在 1970~80 年代主要運用在輔助建築單元製造的過程。到了 1980 年代 RP 技術開始發展，當時這些 RP 技術被工業設計領域廣泛應用，主要是用來製作設計產品的實體模型(Jacobs, 1992)。直到 1991 年，德國學者 Streich (1991)在其研究電腦技術如何輔助製作模型設計的過程中，開始利用 RP 技術-立體印刷 (stereo lithography) 來製作建築模型(圖 1-53a,b)。由此 RP 技術便開始應用於建築設計過程中的建築模型製作。Simondetti (1997)則開始討論 RP 如何應用於建築設計的早期設計階段，探討數位構成(digital fabrication)在設計過程中的角色。2000 年開始，CAD/CAM 的 CNC 與 RP 技術在建築設計過程中，對於模型的製作與建築構件的生產，已經成為研究者與設計者探討的新數位設計媒材(Bechthold et al., 2000; Kolarevic, 2001; Mitchell, 2001; Ryder et al., 2002)。



圖 1-53a.泡沫塑料的建築模型

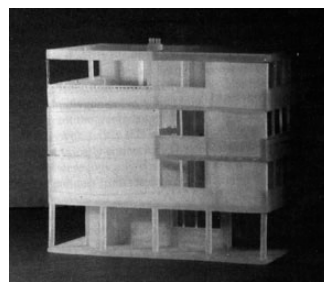


圖 1-53b.RP 射出成型的科比意建築模型

CAD/CAM 輔助自由形體之設計與建造過程應用

2000 年之後，除了研究者對 CAD/CAM 技術在設計過程影響作探討，也可以從一些建築師或設計師如 Frank Gehry、Greg Lynn、dECOi、NOX、ONL、Bernard Frankert、UN Studio 等人的設計案例中看出此技術已經當成複雜形體設計與建構過程的主要輔助工具(Goulthorpe, 1999; Lindsey, 2001; Friedman, 2002; Luca and Nardin, 2002; Oosterhuis et al., 2004; Spuybroek, 2004)。以下舉出一些利用 CAD/CAM 技術 CNC，RP，3D scanner 輔助設計與建造過程的設計案例。

利用 CNC 作為建構的輔助媒材

Frank Gehry 在他多個設計案中將 CAD/CAM 的 CNC 技術協助自由形體建築外牆的鑄造(casting)過程。如美國洛杉磯迪斯耐音樂廳(The Walt Disney Concert Hall, 1992-97) 設計與建造過程，應用電腦 CAD 系統 CATIA 軟體進行電腦模型的結構與材料的分析，再將電腦模型資料轉到 CNC milling 系統切割出不同曲率的面板模子，最後灌注製成水泥牆面(圖 1-54a,b,c)。另外 Gehry 在 2000 年德國設計的 Zollhof Tower 時也運用此技術來完成每片曲率不同的波浪型外牆面板，建築形體以電腦 CATIA 軟體設計與分析後由大型 CNC milling 系統製作出 355 片不同曲率的面板，再依這些面板製作成強化水泥的牆面單元(圖 1-55a~f)。其它設計案例如 2000 年紐約的 Conde Nast Cafeteria 也是運用同樣技術製作曲面複雜的玻璃壁板。(Lindsey, 2001; Glymph, 2003)

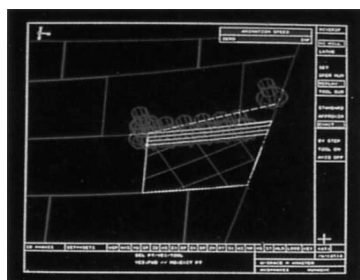


圖 1-54a.電腦 CATIA 系統



圖 1-54b.牆面由 CNC 鍛造製成

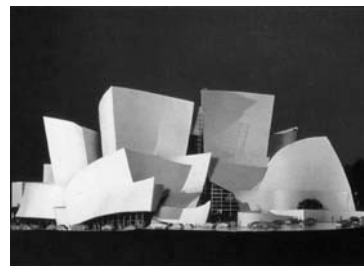


圖 1-54c. 斯耐音樂廳



圖 1-55a. CNC milling



圖 1-55b. .CNC milling



圖 1-55c. .CNC milling 製成的模子



圖 1-55d. 灌注製成水泥牆面



圖 1-55e. 灌注製成水泥牆面



圖 1-55f. Zollhof Tower 牆面組裝

德國建築師 Bernhard Franken 在 1999 年為 BMW 設計的 IAA'99 Auto Show 展示館-Solar Cloud，主要利用 CNC routing 系統來輔助建造。設計的概念是水滴，希望以自由面的氣泡(bubble) 設計形體來表現。設計過程中形體由電腦系統衍生出來之後，利用電腦軟體對曲面模型作分析，如高斯分析 (Gaussian analysis)等，讓曲面合理化，再進行骨架跟表皮的分割。表皮設計由 305 片曲度不相同的表面組成，先由 CNC milling 機器剝削出木頭模子，再依這些精準的模子製作出 8mm 厚的壓克力玻璃的表皮單元。而骨架也是由 CNC 水刀切割機 (water-jet cutter)來切割出 3500 件精準的鋁製扁鐵 (aluminum sheets)單元。這些單元生產完後再到現場組裝(cite Kolarevic, 2003; behind the scene)(圖 1-56a~f)。從這個設計案之後， Franken 持續利用 CAD/CAM 新媒材輔助 BMW 的其他展示館，如慕尼黑 Expo 2000 年的“Wave”展示館、瑞士 2000 年 Auto Show 的“Branscape” 展示館、法蘭克福 2001 年 IAA'01 Auto Show 的“Dynaform” 展示館及瑞士 2002 年 Auto Show 的“LightArc” 展示館。(Luca and Nardin, 2002; Franken, 2003)

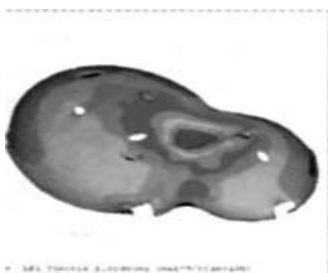


圖 1-56a.曲面高斯分析

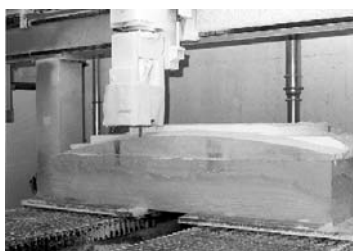


圖 1-56b. CNC milling 製作模子



圖 1-56c.曲率不同的表面



圖 1-56d.骨架組裝與施工



圖 1-56e.現場施工



圖 1-56f.Solar Cloud 展示館

台灣研究自由形體設計團隊 AleppoZONE 在幾個自由形體設計案中利用 CNC milling 及 CNC laser cutter 技術輔助形體表皮及骨架單元生產的製作。在 2000 年公信大廳設計案中，其中一部分表皮生產由 CNC milling 機器製作木材模子，再製成不同曲面的壓克力面板來組裝；另一部分利用金屬板材

料之表皮則是採取三角面形式，直接由 CNC laser cutter 切割。形體之結構骨架也是利用 CNC laser cutter 切割製作再組裝(圖 1-57a,b,c)。此外在 2002 年台北美術館的展示裝置設計團隊進一步測試彎管的製作。而近期完工的大型自由形體深圳大連電子大廳設計案也是大量應用 CNC 製作自由形體骨架(圖 1-58 a,b,c)。這些設計案都運用 CAD/CAM 新媒材的輔助讓複雜形體可以精準的施作與建造。(Liu et al., 2002; Lim, 2004; 李元榮, 2005)



圖 1-57a.CNC milling



圖 1-57b.不同曲率的壓克力表皮



圖 1-57c.雷射切割輸出骨架



圖 1-58a.雷射切割骨架

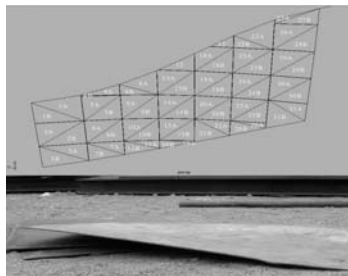


圖 1-58b.金屬板切割



圖 1-58c.骨架測試組裝

利用 CNC 作為表面設計的輔助媒材

Bernard Cache(1995)所成立的 Objectile, 以 CAD/CAM 新媒材來大量輔助新建築表面材料之設計及製作。Cache 以參數化設計產生多種不同形式的錶面樣式，再藉由改變 CNC milling 技術的壓型路徑的花樣(tooling path pattern)，來製作不同形式及不同材料的表面設計(Cache, 1995; Cache, 2002)。設計師 Greg Lynn 也利用同樣的技術來設計與製作室內牆面及天花板形式，如 Numinous Ceilings 及 X-Ray wall system 設計案(Lynn, 1999) (圖 1-59)。另外一向強調建築材料設計的荷蘭年輕設計團 Herzog & De meuron 也試圖利用 CNC 製作舊金山的 De Young Museum 的銅製外牆面板，豐富了建築牆面的表情(圖 1-60)。目前已經有少數利用 CAD/CAM 系統開發新的建築表面材料及面板的商業化產品，如法國的 Marotte 材料公司的 Esthetic panels 產品(圖 1-61)及 Haresh Lalvani 用 AlgoRhythms 技術製作的自由金屬面板等(Hall, 2003)。

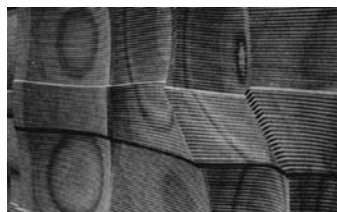


圖 1-59.Greg Lynn 利用 CNC 製作複雜與自由的表面設計

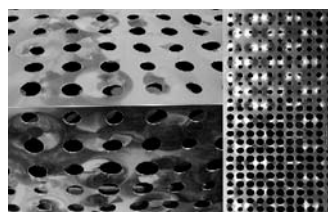


圖 1-60.Herzog & De meuron 設計的銅製外牆面板

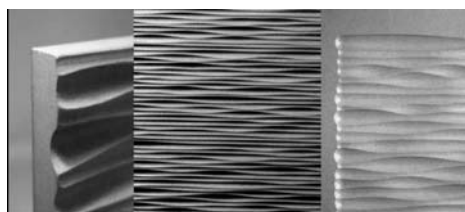


圖 1-61. Marotte 的 Esthetic panels

利用 RP 作為設計模型的輔助媒材

Greg Lynn 已經大量應用 CAD/CAM 新媒材輔助設計過程，也發展出各種的新的設計概念與設計手法。設計過程中他應用 CAD 參數化或動畫軟體產生設計形體，再以 RP 設備製作比例模型或 1:1 模型

(mock-up)來檢視與修改設計。2001 年他在美國俄亥俄州 Wexner Center 的展覽裝置"Predator"，先製作 RP Stereolithography 比例模型來檢討設計量體，最後以真空成型的方式，製作 250 片塑膠材料單元進行組合，而表面雕刻則以 CNC router 製作(圖 1-62a,b,c)。另外，在 Eyebeam Atelier Museum of Art and Technology 競圖設計中，Greg Lynn 也藉由 RP 製作複雜形體的結構模型來理解帷幕牆的結構關係(圖 1-63)。而 2002 年的 Extension of St. Gallen Kunstmuseum 及 Artists Space 設計案，也是以 RP 技術製作比量體模型來檢視(圖 1-64&1-65)。(Lynn, 1999; Lynn, 2002; Liu, 2003)



圖 1-62a.電腦模型

圖 1-62b. RP 模型

圖 1-62c.建造成果

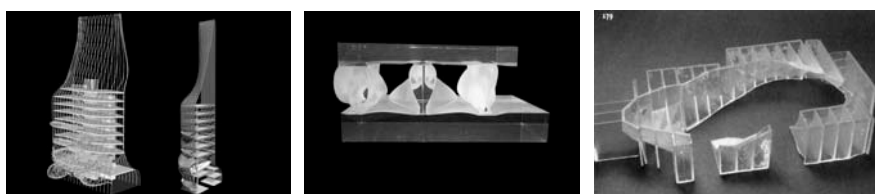


圖 1-63.Eyebeam 的 RP 輸出結構模型

圖 1-64. St. Gallen 的 RP 輸出量體模型

圖 1-65.Artist Space 的 RP 輸出模型

Ocean North 設計團體在參加 1999 年 New York Times 舉辦的“time capsule”競圖時，應用 RP 技術作為技術生產整合(technical-productive synthesis)過程的主要媒材。一開始利用電腦 generic system 作為設計初期模糊性的創作，改變參數衍生多種設計形體可能性。同時，也用 CAD 動畫軟體產生出概念模型。為了要檢視設計形體，直接從數位模型資料轉換到 RP 系統輸出實體模型(圖)，最後也由 RP 系統製作剖開的自由形體模型。(Hensel and Sotamaa, 2000)



圖 1-66a.電腦模型

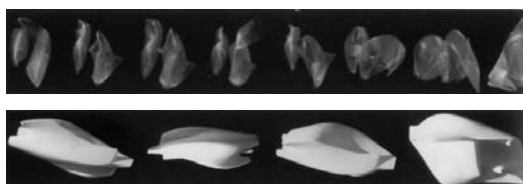


圖 1-66b.電腦模型與 RP 輸出設計形體模型



圖 1-66c.RP 模型

利用 3D scanner 作為設計模型轉換的輔助媒材

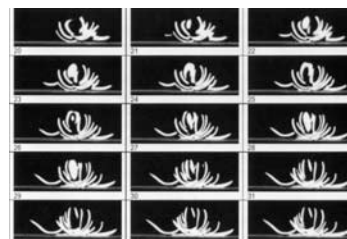
由於 Frank Gehry 的設計過程中，常以手工製作草模型為設計概念發展的設計媒材，因此他大量運用反向工程的 3D scanner 來將所做的實體草模型轉換成數位模型進行編修。Gehry 事務所會依據實體草模型的複雜度不同而採用不同的 3D scanner 技術來取得數位模型。譬如 Experience Musuc Project (EMP)設計案用 FARO converter/digitize 將實體模型轉換到電腦可進行修改的 CATIA 數位模型(圖 1-67)。另外 Gehry 也在 Disney Concert Hall 設計案的花朵形式水池設計過程，藉助應用於醫學的腦部斷層切片掃描器 CAT scan (Computerized Axial Tomography)，將實體花朵進行切片掃描，再由 CATIA 軟體重建為數位模型(圖 1-68a,b)。(Lindsey, 2001)



圖 1-67.FARO digitizer



圖 1-68a. CAT scan 系統圖



1-68b. CAT scan 所掃描的斷面資料

CAD/CAM 輔助自由形體設計與建造專業系統

由於數位 CAD 系統所產生出的自由形體設計比傳統幾何形在執行建構上更複雜及困難，因此許多研究者開始著重於數位建構(digital fabrication)的研究，尤其是探討不同的自由形體建造方式或企圖開發 CAD/CAM 設計與建造系統(Cache, 1995; Mitchell, 1998; Loukissas, 2003; Snoonian, 2003; Dritsas, 2004a; Glymph and Day, 2004)。目前一些由建築專業領域設計師與工程師一起研究開發的 CAD/CAM 設計系統已經在市面上商業化，以下舉出幾個例子。

Gehry Technologies (GT)

Gehry Technologies (GT)成立於 2002 年，是由建築師 Frank Gehry 的事務所 Gehry Partners 利用 15 年對 CAD/CAM fabrication 技術輔助建築設計的經驗，從真實建築案例的實作中，配合工程公司一起整合出的一套自由形體的數位化設計與建造過程(圖 1-69a) (請見參考文獻的網址)。GT 由 Gehry 多年的搭檔 James Glymph 負責管理，而技術指導為 Denis Shelden，是一間建築工業技術公司，提供整合式數位化導向建造工具及方法，企圖將 CAD/CAM 新技術發展為建築設計與建造過程的未來方向。GT 公司也進行軟體開發，於 2004 年底推出應用性系統 Digital Project™(DP)，DP 採用的技術是基於原有航太工業波音(Boeing)所廣泛使用的 CATIA 系統，再增加更符合建築設計的介面與功能性成 CATIA V5 的整合性軟體(圖 1-69b)，主要系統架構如圖 1-69c。

另一方面，GT 除了提供專業建築設計公司與營建製造業一套新的 CAD/CAM 設計與建造系統外，也企圖將新技術推向學術界，目前 GT 藉由不同合作模式如合作設計案或舉辦研討會，工作坊等與 MIT Media Lab、CIFE (Stanford University's Center for Integrated Facility Engineering)、澳洲墨爾本 SIAL (RMIT's Spatial Information Architecture Labotatory)、華盛頓 CERF (Civil Engineering Research Foundation)、美國軍方 CERL (Construction Engineering Research Labotatory)合作。



圖 1-69a. Gehry Technologies

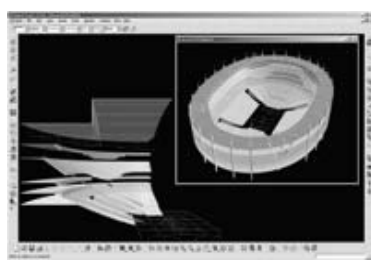


圖 1-69b. Digital Project 軟體

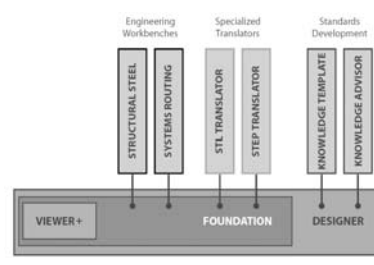


圖 1-69c. Digital Project™ 架構圖

SmartGeometry

2003 年，英國一些知名建築團隊在 Bentley Systems 的贊助下，共同組成了一個 SmartGeometry Group(請見參考文獻的網址)，主要成員有 Lars Hesselgren (KPF), Hugh Whitehead (Foster and Partners), J Parrish (Arup Sport) 及 Robert Aish (Bentley)。SmartGeometry Group 主要理念是希望可

以對建築建造專業推行新科技的施工技術，同時也希望可以在教育與研究領域推廣新的 3D CAD 輔助設計應用，目前此團體也積極在申請成為一個教育機構(educational charity)。SmartGeometry Group 的建築團隊都有實際應用電腦新技術輔助設計過程的經驗與背景，21 世紀一些知名的建築作品如 Swiss Re and GLA in London, the Sydney Olympic Stadium in Sydney, the Waterloo International Station 就是他們應用 3D 參數化建模技術來輔助設計與建造完成的例子。

SmartGeometry 所強調的是“建築設計與運算設計工具”，主要應用的是 Generative Components 技術(圖 1-70a)。此技術是一種與 CATIA 相似的 3D 參數化 CAD 系統。參數化 CAD 系統具有即時自動變更圖面資訊的優點，可以在模型的角度變化中即時自動調整座標系統；也可以在設計模型被改變後，系統自動依此改變更新全套圖面的資訊。以數學運算自動演算(self-programming) 為基礎，但以視覺介面來呈現。Generative Components 是模型導向(model-oriented)設計及程式化環境(programming environment)的系統，結合了 1. 基於特徵建模(feature modeling)及限制條件建模的直接互動式操作設計方法，及 2. 計畫性設計環境 ("programmatic design" environment)，融合了幾何建模及軟體發展。KPF 是目前使用 Generative Components 來輔助真實建造建築設計案的建築事務所(圖 1-70b)，其他建築事務所則仍在測試此工具的階段。

除了對建築專業領域進行推廣外，SmartGeometry Group 也積極到學術界舉辦研討會及工作坊，如 2003 年 6 月在英國 Cambridge 舉辦的暑期研討會，2004 年 7 月在美國 MIT 的 DCC 研討會，2004 年 9 月在美國 Waterloo 的 ACADIA 研討會等。

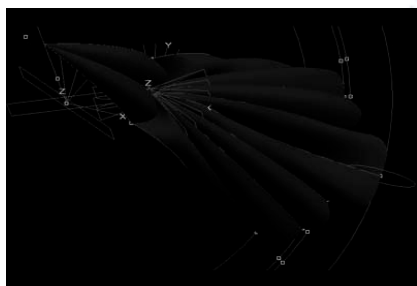


圖 1-70b. Generative Components 參數化軟體

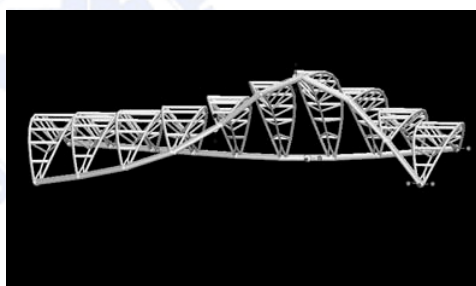


圖 1-70a. KPF 應用 Generative Components 軟體製作複雜建築結構體

Objectile

Bernard Cache, Patrick Beaucé et Jean-Louis Jammot 從 1986 年研究了 10 年，於 1996 年成立 Objectile(請見參考文獻的網址)。主要理念是希望藉由電腦數學運算技術製作非標準(Non-standard)的複雜表面(complex surface)設計(圖 1-71)。Cache 所開發的 Objectile 軟體結合了數學導向的 3D 軟體(mathematically-driven 3D modeling)及 CNC 的系統，可以製作複雜的表面設計。Cache 認為利用數學運算的機制可以產生更多目前傳統 CAD 所無法達成的複雜曲線及表面，強調設計形體是運算衍生而非用畫出來的(Cache, 1995; Cache, 2002)。設計過程中，設計師可以 Objectile 軟體自動演算形體，從動態模擬的形體變化中，找出適合的形體，再自動將資料傳至 CNC 系統直接輸出。此軟體適用於表面材料的設計，目前被設計師應用於設計家具，室內壁板(panel)，牆面，天花板等。dECOI 的設計師 Mark Goulthorpe 於 1997 年應用這個系統來設計 Pallas House 建築外牆(圖 1-72)，嘗試利用新媒材設計出新的建築外牆材料表現(Goulthorpe, 1999)。近年也出現一些類似此技術生產的商業化建築表面隔板產品，如法國的 Marotte (Esthetic Panels)。

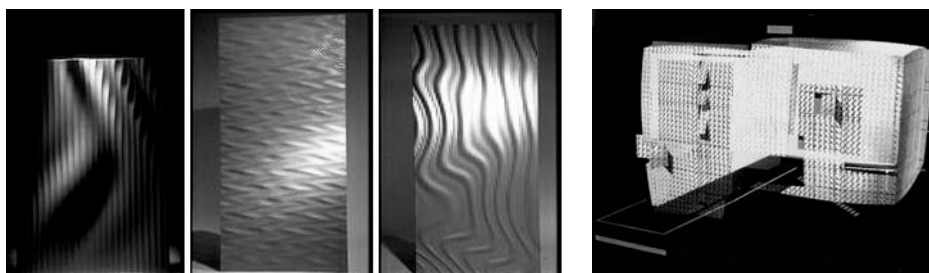


圖 1-71. Bernard Cache objectile 的表面設計

圖 1-72. dECOI 應用 objectile 設計的 Pallas House

CAD/CAM 輔助自由形體設計與建造過程研究

此外除了專業領域開發的商業化系統，研究者如美國 MIT 的 Larry Sass、UPenn 的 Branko Kolarevic、Harvard 的 Schodek & Bechthold、澳洲 RMIT 的 Mark Burry 等人也在探討及研究應用 CAD/CAM 新媒材的設計過程，同時也提出一些標準化的階段或輔助設計工具(digital tools) (Mitchell, 1998; Burry, 2002; Kocaturk et al., 2003; Kolarevic, 2003; Dritsas, 2004; Lee, 2005)。

Mark Burry (2002,2004)將此新技術應用於造型自由的歷史建築設計與建造的過程中，並整合出一些操作流程。Mark Burry 於 2000 年開始接受委託，使用參數化系統結合 RP 技術，將 80 年前 Gaudi 過世後而沒有建造完成的 Sagrada Familia，重新設計及建造教堂翼部 35m 高的玫瑰窗戶。由於 1926 年 Sagrada Familia 仍在建造時 Gaudi 就過世了，他所畫的細部圖面及模型都在 Civil War(1936-39)時期毀了，因此 Gaudi 後繼者很難只根據 Gaudi 的 sketch 來完成未完的部份。然而，Burry 藉由數位時代的新技術，利用造船工業用的參數化系統-CADDS5，依據 Gaudi 後繼者所留下的殘缺 1:25 石膏模型來進行設計模擬(圖 1-73a)，利用參數改變的方式(長度，角度，條件方程式)，快速產生 3800 種相似的形體(圖 1-73b)，經過測試比對，設計者找出最接近 Gaudi 美學而可以配合 Sagrada Familia 的設計。接著，利用 RP 技術 3D printing 製作蠟製比例模型(wax model)檢視設計(圖 1-73c)，再以 Rhino 軟體以卡迪爾座標等距切割斷面，繪製成圖面(800 張 A0 圖面)，再將這些斷面圖傳給 Galicia 石匠進行製作，就這樣花一年時間完成了高達 35m 的玫瑰窗戶設計與建造(圖 1-73d)。Burry 將此 CAD/CAM 新媒材輔助之設計與建造流程繼續製作 Sagrada Familia 的其他未完成部份。另外，Burry 也在 RMIT 跟工程技術研究者合作研究及發展可分析及合理化複雜造型的結構與重力系統 — ESO(Evolutionary Structural Optimization)電腦程式(Xie et al., 2005)。

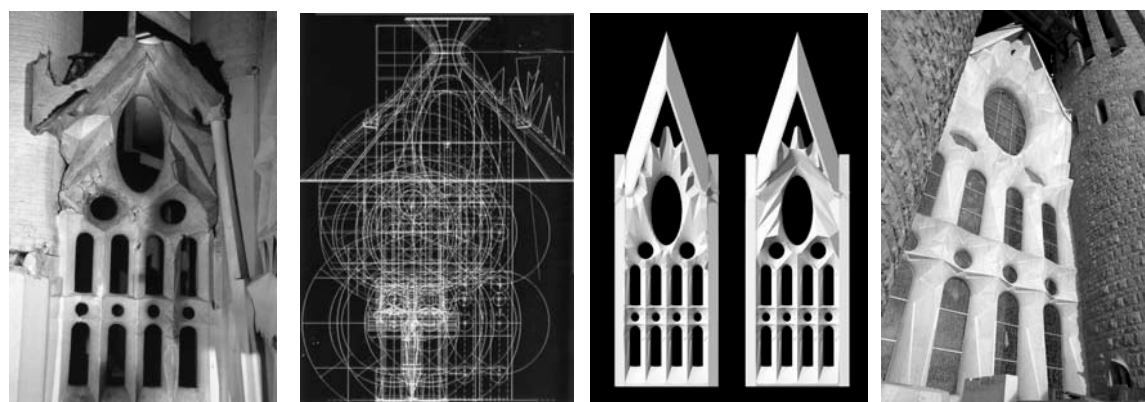


圖 1-73a. 1:25 殘缺石膏模型

圖 1-73b. 參數化設計

圖 1-73c. 玫瑰窗戶 RP 模型

圖 1-73d. 建造完成的 35m 玫瑰窗戶

另外，Kocaturk(2003)企圖研究出一套可輔助解決複雜型體執行的運算電腦系統系統資料結構。

Mitchell(1998) 以 shape grammar 探討自由形體結構的形成與創造。研究中指出利用 Shape Grammar 的機制可讓自由形體的建構更具自由度。同時也推斷未來的結構設計系統(future structural design systems)會以網際網路(World Wide Web)來呈現設計模擬。MIT Larry Sass 的研究小組如 Yanni Loukisas 及 Stylianos Dritsas 也試圖開發一些 CAD/CAM 輔助設計工具。Dritsas(2004a)發展一種直譯電腦程式(computer script)來簡化目前使用 CAD/CAM 技術輔助自由形體設計過程時所面臨的繁瑣電腦操作過程，稱為 MiranScript。這個程式可作為 Rhino 3D 繪圖軟體的外掛系統，自動將 NURBS 的表面路徑(surface-pathes)轉換成交卡的骨架(圖 1-74a)，分解骨架單元及展開(unfold)成平面資料以作為 CNC 輸出資料(圖 1-74b)。設計師 dECOI 在 2005 年 Feidad 的首獎設計作品 Miran Galerie 就是運用此系統來作為設計過程的輔助(Liu, 2004)。

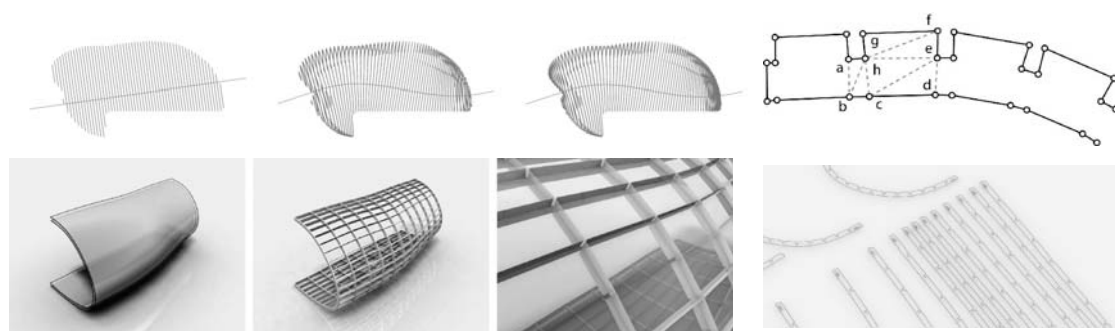


圖 1-74a.MiranScript-自動將 NURBS 切割出不同方向與密度的骨架

圖 1-74b.自動運算骨架的交卡及展開

而在台灣研究自由形體的設計團隊 AleppoZONE，也透過利用 CAD/CAM 新數位媒材實作多件小型至大型的自由形體建築案例，進行分析研究來整合提出自由形體製作的小型與中型自由形體設計建造過程(李元榮, 2005)(圖 1-75a. 1-75b)，所歸納出的兩個過程敘述如下。

1. 「小型自由形體設計與建造過程」

此過程主要是以一個小型室內設計案—公信大廳設計(圖 1-76a)，分析其設計過程歸納出初步過程，再以其他三個規模相似的設計案例—銘傳新藝術中心、北美館遠東建築獎數位展區、竹北大廳櫃檯(圖 1-76b~76d)，來檢驗過程中的各步驟，最後整合出圖 1-75a 的過程。

2. 初步「中型自由形體設計與建造過程」

基於所歸納「小型自由形體設計與建造過程」中的操作過程，李元榮進一步操作中型的室內設計案例—深圳大連電子大廳設計(圖 1-76e)。從此真實設計案例的執行過程中，獲得一個初步「中型自由形體設計與建造過程」(圖 1-75b)。

所歸納的兩個過程的前幾個主要階段相似，設計於早期設計(概念發展階段)就開始應用數位媒材，主要以 CAD 模型(maya)發展設計形體。在設計定案(設計發展階段)中，實體模型的應用為非必要性，但他說明這可能是因為個案關係，因此仍需其他案例驗證。另外在此過程中設計師必須開始考慮及決定結構組裝方式。而對於過程中的施工圖階段，主要是針對自由形體骨架與表皮單元為了讓 CAM 設備可接受而製作的施工圖面，圖面製作完後就進入單元生產階段。接下來的階段對於兩個不同規模的過程就開始不同了，大型過程於組裝階段前比小型過程多了預組裝階段，主要是因為中型自由形體尺度較大，結構骨架必須先預組裝以解決施工誤差等問題。從上述可以看出李元榮研究中偏重於自由形體的數位建構過程的操作步驟。過程步驟研究中，也以電腦自動化(基於 AutoCAD 的 Visual Basic 寫直譯電腦程式)的方式，來簡化自由形體面板分割後展開(unfold)的過程(圖 1-77)。

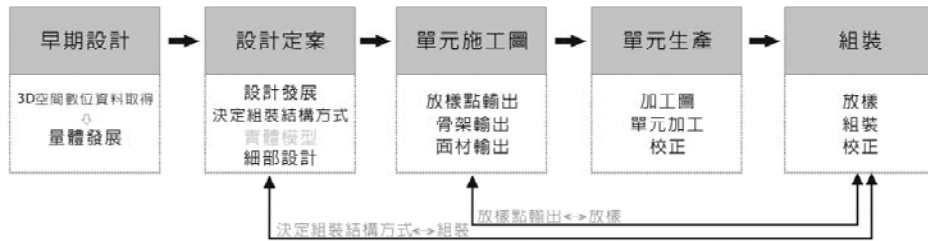


圖 1-75a 「小型自由形體設計與建造過程」(李元榮, 2005)

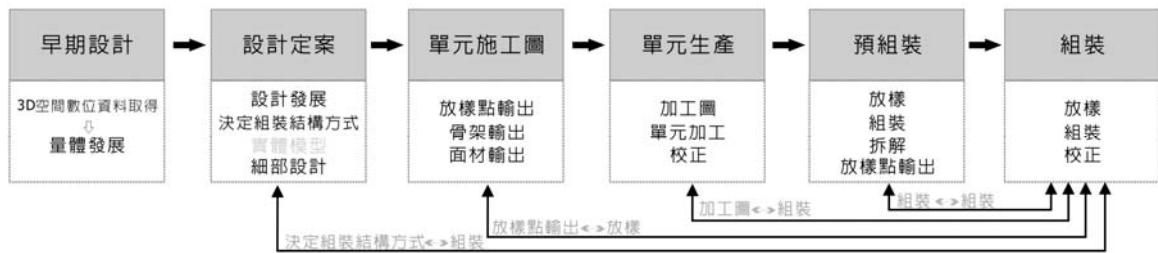


圖 1-75b 初步「中型自由形體設計與建造過程」(李元榮, 2005)



圖 1-76a 公信大廳設計

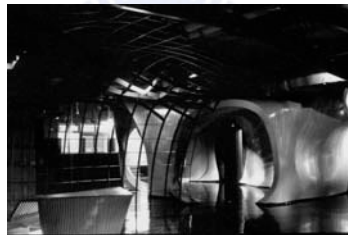


圖 1-76b 銘傳新藝術中心



圖 1-76c 北美館遠東建築獎數位展區



圖 1-76d 竹北大廳櫃檯



圖 1-76e 深圳大連電子大廳設計

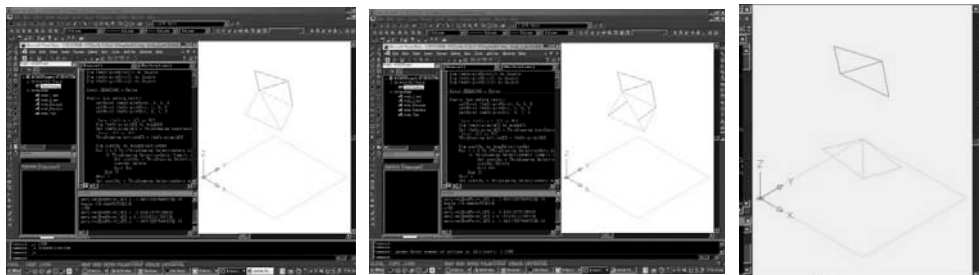


圖 1-77.用電腦程式解決面板展開(unfold)的人工繁瑣操作(基於 AutoCAD 的 Visual Basic 寫程式)

CAD/CAM 媒材於建築教育應用

除了專業領域與研究者企圖尋找 CAD/CAM 數位媒材輔助設計過程的標準流程外，在建築教育課程中，為了讓學生可以進一步了解複雜形體的設計與建造過程，也逐漸在課程規劃加入 CAD/CAM 數位媒材的教學內容。其中 MIT、Harvard、UPenn、Columbia、ETH、AA、RMIT 等歐美知名建築系所已經開設 CAD/CAM 訓練的 CAD/CAM 實驗室或 CAD/CAM 應用的設計課程(Kolarevic, 2003; Schodek et al., 2005; Sass, 2006)。課程目的主要訓練學生操作 CAD/CAM 新媒材並發展相關研究或直接應用於數位設計過程。這種 CAD/CAM 輔助的數位設計過程已經逐漸受許多建築教育所關注(Campbell, 2006; Garber and Jabi, 2006; Kalay, 2006)。此外這些教學課程如 MIT 的 DDFG 課程會結合專業領域所整合的 CAD/CAM 標準化系統如 Gehry Technologies 的 Digital Project 與 SmartGeometry 的 Generative Components，作為主要的教學內容或以短期工作坊(workshop)的形式讓學生操作與應用。而以設計工作室(studio)為導向的數位設計課程如 AA 或 Columbia 的設計教學，除了訓練學生大量應用 CAD/CAM 媒材如 RP, laser cutter 來製作設計模型外(Hemberg, 2001; Sass, 2006)，還會應用研究者所開發的 CAD/CAM 應用程式如 Gern8, Voronoi 等來作為數位設計過程中形體衍生的操作工具。

CAD/CAM 媒材影響設計思考

近年來隨著 CAD/CAM 技術在建築領域廣泛的應用，設計者及研究者察覺電腦已經不再是視覺呈現的工具而開始作為思考工具，影響及改變了傳統的建築設計過程。因此紛紛提出 CAD/CAM fabrication 對設計過程影響之討論議題。以下分別以設計概念及設計方法來整合這些研究議題。

設計概念

藉由電腦 CAD 系統的輔助，設計概念開始被解放。設計師利用電腦動態模擬及自動生成系統來輔助設計思考，產生新的設計形體概念。此外電腦的虛擬狀態衍生出設計概念更多的可能性。Mitchell(1998)在建築構築術的討論中，提出數位技術所引起的反購築(anti-tectonics)本質，數位資訊將使傳統建築的型態瓦解，在電腦虛擬世界中，去物質化的空間與時間創造出新空間。因此新的設計形體概念漸漸趨向於液體狀(liquid)、交疊(folds)、水滴狀(blobs)、表面(surfaces)、動態(dynamic)、去物質化(immaterial)、仿生物之繁衍(breed)等自由形體(free form) (Lynn, 1995; Zellner, 1999; Leach, 2001; Schmal, 2001; Rosa, 2003; Senosiain, 2003)。另外電腦的網路虛擬空間(cyberspace)概念也創造出新的空間型態。這些流體狀(fluid)形體或虛擬空間表現突破了傳統建築垂直水平構件的概念，設計想法已經不受傳統形體及實體建築材料所拘束。而且這些動態的，流體的，不穩定的形體概念發展都可以在數位環境中自由的操作。

設計方法

新一代建築師使用數位科技，不再單只是運用在建造運算，或當成比較複雜的設計工具，而是企圖把它當成一種可以自行進行設計形體衍生(generation)的設計媒材(Leach, 2001)。由於電腦的特性，引發了多種不同的設計方法與過程，最明顯的是形體衍生(form generation)或形體發現(form finding)的數位設計方法或策略。目前一些知名建築師或設計師如 Frank Gehry, Peter Eisenman, Greg Lynn, Zaha Hadid, Asymtote, deCOI, UN studio, NOX, Makoto Sei Watanabe 紛紛利用電腦動態模擬(dynamic simulation)，例如分子動態模擬系統(particle system)、關鍵影格(keyframing)、運動的(kinetic)、形變(morphing)、自動生成演算法(generative algorithm)、基因演算法(genetic algorithm)、metaballs、互動機制(interactive mechanism)等設計方法來操作設計形體(design form)(Rahim, 2000; Luca and Nardin, 2002)。這些數位設計方法改變了傳統利用靜態的 2D/3D 圖面的思考方式，而呈現非穩定(non-static)，非決定性(non-deterministic)、非線性(non-linear)、易變的(mutable)的思考模式(Castle, 2002)。除此之外，CAD/CAM 構成技術如 CNC, RP, 3D scanner 可將數位模型轉換為實體模型，反之

亦然，這些數位化的轉換方式促使設計過程中模型操作步驟更快速及解決了複雜形體製作的問題 (Wang and Duarte, 2002; Kolarevic, 2003; Schodek et al., 2005)。以下舉出一些設計案例來說明這些數位設計方法。

1. wetGRID --荷蘭建築團隊 NOX 的主持人 Lars Spuybroek 藉由電影工業所利用的電腦軟體來模擬動態龍捲風，作為形體衍生的創作過程。他於設計初期階段利用電腦作為“自動編舞機器”(self-choreographing machine)，改變了以往需由 diagram 到製作模型的设计步驟。

2. Aegis project --法國建築團隊 deCOI 的建築師 Mark Goulthorpe 利用聲音與動作創造出表面(surface)的形體改變。設計方法以大量利用 CAD/CAM 構成技術來擴增實體空間之經驗。

3. FluxSpace project --此設計案年輕建築團隊 asymptote, Hani Rashid 所設計的都市空間裝置。設計概念速度(speed)與變遷(flux)以電腦來進行模擬。

4. 國際知名建築師 Zaha Hadid 的合夥人 Patrik Schumacher 研究互動式的機器式形體(robotic forms)。他提出一系列互動解決方式(interactive solutions)，模糊了以往家具與建築之間關係。

