

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

建築數位化構築程序之研究

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫
計畫編號： NSC 96-2221-E-032-057-
執行期間： 96年 8月 1日至 97年 7月 31日

計畫主持人： 陳珍誠
共同主持人：
計畫參與人員： 陳宏銘、李振嘉

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：淡江大學建築系

中 華 民 國 97 年 7 月 31 日

建築數位化構築程序之研究

An Investigation on the Processes of Digital Tectonics in Architecture

計畫編號：NSC 96-2221-E-032-057-

執行期限： 96 年 8 月 1 日至 97 年 7 月 31 日

主持人：陳珍誠 淡江大學建築學系

E-mail: 097016@mail.tku.edu.tw

計畫參與人員：陳宏銘 李振嘉

一、研究背景

如果我們概略的將建築設計程序區分為概念設計、初步設計、細部設計、施工圖說、與現場施工等步驟，可以發現目前在建築師事務所中對於「細部設計」與「施工圖說」這兩個部份已經全面電腦輔助設計（Computer-Aided Design, CAD）化。至於其他電腦化尚未普及的部份：概念設計、初步設計、與現場施工——也就是「數位建築」所強調與目前所想突破的重點。時間點回到 90 年代初期，彼得·艾森曼（Peter Eisenman）在概念設計與初步設計階段就開始將電腦繪圖的方便性與特殊性轉換成為他獨特的設計手法，例如：錯位（Displacement）、疊置（Superimposition）、與漸變（Morph）等手法，或者以新出現的科學圖像作為建築初步設計創意的源頭，例如：DNA、超方塊（Hypercube）、與碎形幾何（Fractal）中的觀念等。這同時，在現場施工的部份，則以法蘭克·蓋瑞（Frank Gehry）的畢爾包古根漢美術館被視為 CAD / CAM 技術的源頭。

另一方面，從建築設計完成品的的角度觀察，「數位建築」可以 De-formation（解形）與 In-formation（成形）兩個主要的方向來討論對於當代建築的新詮釋。De-formation 藉著電腦繪圖的技術，迅速達成非線性的造型，並且結合電腦輔助製造的技術，產生三維的電腦與實體模型，甚至應用於實體建築物的施工上。上一段提到的畢爾包古根漢美術館的完成，更鼓舞著新世代的建築師探索著建築前輩們所未曾嘗試過的美學與空間探索。De-formation 在理論上主要借重德勒茲（Deleuze）的摺疊學說，德希達（Derrida）的解構哲學，曼德博（Mandelbrot）的碎形理論，與聖塔菲研究（Santa Fe）的混沌與複雜非線性科學，...等其他學門的論述。另一方面，In-formation 的手法嘗試將多媒體與資訊技術的觀念加諸於建築設計之中，我們可以從 1987 年尚·努維爾（Jean Nouvel）在巴黎所設計的阿拉伯文化中心看到些端倪。

過去十年來，新一代「數位建築」的努力，主要想架設起艾森曼與蓋瑞之間的橋樑。年輕的「數位建築」工作者例如：葛雷格·林（Greg Lynn）開始將電腦程式衍生形體（Generative Form）、電腦動畫軟體產生「動勢造型」（Animate Form）、以及結合電腦輔助製造（Computer-Aided Manufacturing, CAM）與各種數位控制製造機器（Computer Numerical Control, CNC）以及從參考各種不同領域所發展的新合成材料（Trans-Material），這些新嘗試繪製出了「數位製造」（Digital Fabrication）的藍圖。也就是藉由更快速的硬體、使用者介面更友善的軟體如：非制式理性曲線與曲面（Non-Uniform Rational Bezier Spline, NURBS）、整合性更佳的系統與環境、與跨領域度更高的技術，將建築設計從概念設計以至於現場施工的過程全面數位化的實現。

二、研究目的

後工業時代的建築設計：由以上的說明，我們概略的知道新的介面、軟體、硬體、材料、整合與跨領域將導引出新建築著重的「設計知識」年代。當工具製造機由輸入機器碼的 NC 機器進步到人性化電腦介面的 CNC 機器與新的 3D Printer，使得設計由 CAD 的圖面製作到產品完成的時間不斷的縮短。根據摩爾定律：「每隔 1.5 年，電腦硬體的速度將會加倍，體積與價格將會減半。」的原則下，10 年之後每位設計師都將可能擁有一部價格合理的 3D Printer，而噴頭噴灑的可能不再只是 FRP 一種原料而已，線上訂購產品所接獲的可能只是一份 PDF 檔的藍圖，購買者只須打開家中桌上的 3D Printer 即可將元件生產出來並將其加以組裝。新的「數位設計」時代生產流程將由「大量製造」(Mass Production) 進入「大量客製化」(Mass Customization) 的年代，而「數位構築」之研究將有助於迎接這新設計典範的來臨。

新時代構築的基本精神：Kenneth Frampton 先生在他 1995 年針對構築的議題進行探討的論文《構築文化之研究》(*Studies in Tectonic Culture*)，特別強調當代營建技術對小型單元零件以及發展其接合方式的重視。尤其是當代各種新形式的操作，不但觀念牽涉到許多拓樸形體概念的認識，更必須在實踐的層面特別重視介於空間整體與局部之間的連結技術。因此，構築的過程勢必應該對於新材料、新構造、與新工法有新的認識。這不但是當代的建築設計者實踐空間的重要技能，也是表達新建築形態，以及展現設計意圖最有效的策略。

抽象工藝化的數位構築：由於各種材料具有其各自的特殊性，因此即便是當代的數位化工作機具，也仍然必須透過對構築材料及其組合方式的了解，才能產生合理且有效的結果。這種新的「數位構築」(Digital Tectonics) 方式相較於傳統構築方式，吊詭的衍生出一種「抽象工藝」(Abstracting Craft) 的觀念—使用材料的範圍更廣泛、成品的更為精緻，但是工匠直接碰觸到材料的時間卻相對縮短，藉由虛擬的 CAD 與 CAM 的操作，將工匠的設計邏輯融入 CAD 的模擬中，再以 CAM 模擬工匠的生產思考；最後工匠在 CNC 機器的出口端取得剛出爐的有如組裝模型的建築設計元件，然後再根據組合圖組裝成設計成品—這也就是「抽象工藝」精神極致的發揮。

三、重要性

二十世紀後半葉開始，為了因應龐大的建設需求，因此以鋼筋混凝土與鋼骨為主要結構的建築物以全球化的腳步蔓延開來。快速生產、大量製造、與規模龐大的建築物為過去半世紀以來建設的主要訴求。以台灣而言，我們在這島上剛完成了世界上最高的建築物—台北 101；在海峽另一方，正在準備迎接 2008 奧運會的中國北京市城市建設是這類快速發展典型的極致。如果沒有藉由電腦輔助設計 (CAD) 與電腦視算模擬的幫助，這些史上最龐大與複雜的建設在規模上恐將都大打折扣。這是建築最好的年代，但也說不定是最艱困的年代，當中有著以下的幾點原因：1. 精密分工的結果，設計者與實際施工過程已經有所脫節；2. 設計師在這些龐大工程系統底下，漸漸的成為大型設計機器底下的螺絲釘，掩蓋了大部份設計師的設計渴望；3. 「機構式」的業主訴求，將當代建築推向了另一次柯比意所謂的「建築或是革命」的臨界點；4. CAD 電腦軟、硬體的得不斷推陳出新，以因應日益龐雜的設計活動。以上的想法，並不是全然是批判全球化下的資本主義建築生態；本研究希望提出以下的觀點來思考將數位技術與當代建築結合的可能，思考下一個階段本土建築的可能走向，深信這應該是樂觀且值得關注的方向：

- A. 台灣製造的工作機具在每年台北世貿三個館的展覽中，吸引了眾多的國內、外客戶，從小型輕便的隨身機具到大型的 CNC 工作機具琳瑯滿目。目前這些機具只有非常小部分為建築業所使用，如果能夠將這些電腦輔助製造的機具與電腦輔助建築設計加以整合，深信以台灣在世界上工作機製造龍頭的地位可以將本土建築帶入更高的層次。
- B. 台灣地景中充滿著臨時性的建物，公寓的部分改建與增建（違建）、中小型店面的易手與改裝無時不刻在進行著，看似混雜的城市與鄉村聚落中，建築物與裝潢使用的生命週期其實是非常短暫的。如果可以透過準確的 CAD/CAM 生產過程，節省的粗工開支，將可以運用到更為精緻生活空間的營造上，並增長使用的週期。如果能夠有效的發展以上所提的臨時性與實驗性的「微型建築」(Micro-Architecture) 改造計畫，將有可能在下一個階段讓我們的地景泰變，使得這些「微型建築」成為台灣城鄉創意產業的重要因子。
- C. 目前建築師事務所已經全面電腦化，然而事務所內的設計方案都是在虛擬的無重力狀況下完成。下一個階段如果能夠整合 CAD/CAM 的生產過程，結合本土特有的多元製造與量身訂製營建體系，將可生產出經濟且精緻、並且符合「台灣製造」精神的建築體系與風格。

以我們的鄰國日本為例，可以見到中生代的建築師在這方面的嘗試，例如：渡邊誠所設計的「飯田橋車站」以演算法衍生樹枝狀的鋼結構並以 CNC 生產、牙醫自宅中以石塊銑床洗出波浪狀石頭表面，阿布仁史的所設計的「青葉亭」中以不同大小的充孔板洞，模擬出樹叢的圖案，這些方案其實都可行易懂但是卻又匠心獨具的作品。

四、國內外相關研究與重要參考文獻

本研究首先挑選國內外近五年的 7 件建築案例作品做說明，這些案例的尺度規模都與本研究所操作的案例規模相符，以下就這 7 件案例的技術與精神加以討論：

- A. 2002 年，伊東豐雄於倫敦所設計的 Serpentine Gallery 展覽館中，將一完整之正方體，不斷地碎化為多邊形，建築師一開始以手繪思考發展概念雛形，然後運用電腦演算與分析，繪製出展覽館的各向立面。然後將各向立面拆解並將單元多邊形抽取出來做為結構支撐與材料的選擇，展覽館約 90 坪，整體展覽館立面共 380 片鋁板與玻璃構成，當中沒有兩個元件是相互重覆的。
- B. 2003 年，SHoP 建築團隊為哥倫比亞大學藝術系所設計的學生會客廳家具與裝置，先以電腦 3D 設計形體建構完成之後，依造實際構成材料做切割之劃分，並將每片的構成元件排列在固定尺寸的木板材料內，以方便 CNC 機器的切割作業。最後將每片木夾板依序排列與堆疊，形成單元區塊而後相互組構成為一構造物，每片膠合木板依照所要表達的形狀，層層堆疊並且組裝。
- C. 2003 年，SCI-Arc 嘗試於走道空間中建構一完整之「圖素立面」(Pixelated Surface)，藉由三軸 CNC 銑床技術，製作塑膠表皮立面的鑄模具，之後再透過真空塑形機 (Vacuum-Forming) 加工處理後，將所要的半透明材質之鑲嵌板，固定於主要鋼框架上面。主要鋼構框架經由設計者運用電腦軟體繪圖、計算尺寸、分割切割單元，再送至切割工廠做加工與焊接處理，整件作品全長 18.3 公尺，高 2.4 公尺。
- D. 2003 年，NIO Architecten 於 Hoofddorp 所設計的公車轉運站被分割為五大塊，先送至工廠加工、預鑄，先以機器輔助完成模具，然後澆入合成材料（聚苯乙烯泡沫和聚脂纖維所構成）做為結構體的材料使用，而後再送至現場組裝黏合，轉運站表面再經過噴塗聚脂纖維膜表面處理。此複雜的製造與施工過程，以電腦輔助製造加上特殊的建築材料在有限的預算與時間下完成設計。

- E. 2004 年，NOX 於荷蘭所設計的 Son-O-House 當中，首先以紙張彎折的實驗測試到複雜的手工線條模型，然後透過三維的掃描設備，將數位資料繪入 3D 電腦繪圖軟體中，藉由繪圖軟體的幫助，將尺寸、結構測試等問題確定，並將虛擬的數位模型做輪廓線的單元排列切割，以節省不銹鋼板材料為切割原則，再送至加工廠做切割與焊接處理。
- F. 2005 年，完工的「台灣大連電子總部」，由劉育東教授率領交通大學建築研究所團隊全程參與從概念發展、初步發展、細部設計、施工圖說、現場放樣、與製造的各階段發展。從概念、製造到最後的建構實踐階段，該案呈現數位化設計程序的實踐。在數位建築正在萌芽的台灣，對傳統建築的營造與建築教育的影響，有其重要性與正面意義。
- G. 2006 年，Material Systems Organization 運用先行製作的模具，將熟石膏澆灌入模具內，模具內具有彈性的布料，因為重力的關係布料開始下垂、彎曲、延伸、膨脹，透過隨機點狀物件之支撐，石膏凝固自然顯示出凹凸效果。安裝於牆面後，各單元形成為密佈大小不均、凹凸有致的彈性表面，打上燈光以後，產生動態的效果。

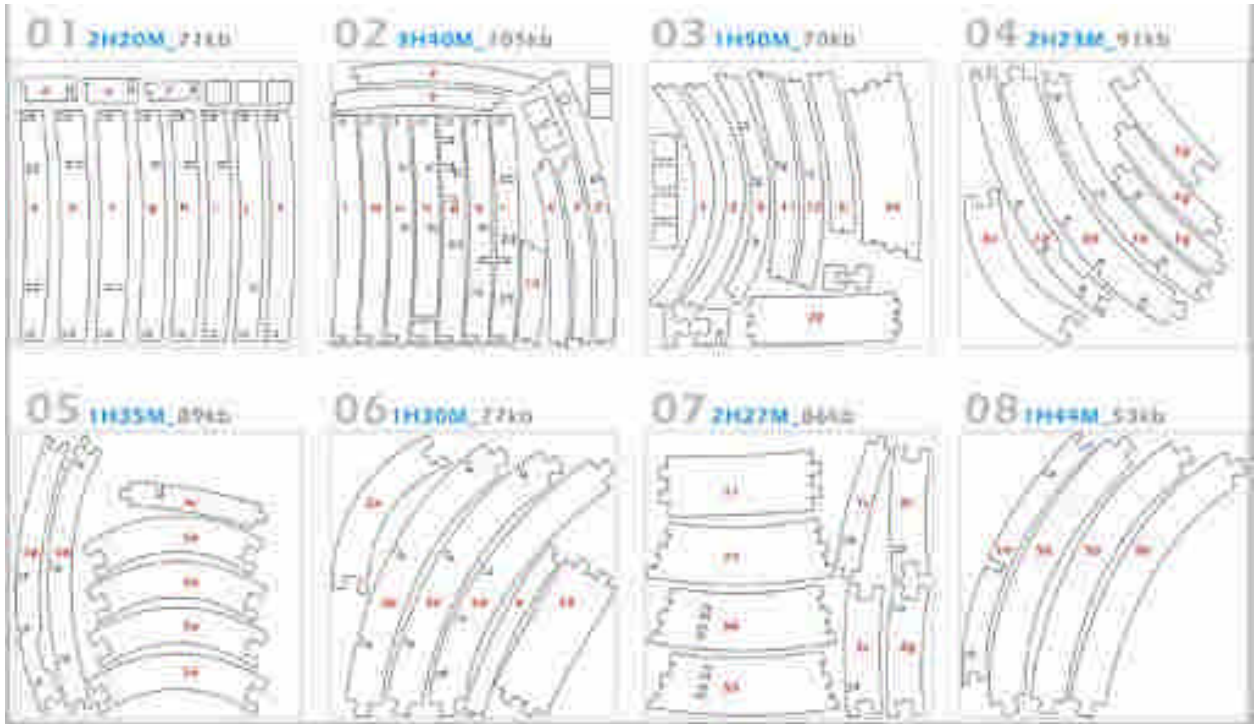
相關的參考文獻可參考倫敦 Wiley Academy 出版的 Architectural Design 雙月刊，其中以 2002 年的 159 期《Versioning: Evolutionary Techniques in Architecture》，2003 年的 162 期《Surface Consciousness》，2004 年的 168 期《Emergence: Morphogenetic Design Strategies》，2005 年的 176 期《Design through Making》，2006 年的 180 期《Techniques and Technologies in Morphogenetic Design》、182 期《Programming Cultures》、184 期《Architextiles》，2007 年的 185 期《Elegance》，2008 年的 192 期《Versatility and Vicissitude》，與本研究較為相關。義大利「IT Revolution in Architecture」系列叢書亦有相關的討論；英國倫敦「建築聯盟」(Architecture Association) 近年的出版品與作品集亦可以當成建築設計教育與未來實驗性方案之參考。

五、電腦輔助設計與製造：實體模型操作

本研究擬建構出一座 2-3-5 公尺直徑之木製橢圓球框架為操作平台，這個尺度的決定是以單人或雙人即可操作與的工作環境為原則。內部機能定義為學生建築作品的各展空間，球體下方裝滾輪可以隨時移動，上方球體並可拆卸組裝成 5 大部分，這球體稱之為「母體」(Womb) — 先行製作一木製橢圓球框架，之後嘗試置入不同工法之的表面。Womb 強調「數位製造」(Digital Fabrications) 之實踐與「數位圖案」(Digital Patterns) 之衍生與製造。Womb 以木製橢圓球框架為操作平台主要是為了挑戰「非正交」幾何型體的構築，並透過實際的 CAD/CAM 技術整合與實作。本研究分成了三個發展階段，主要是以木質材料為主。第一階段乃對於材料板系列、材料接合 (Joint) 系列、RP 生產系列為操作對象，試圖找尋 CAM 系統下的生產限制與其運用的時機，並幫助了解對於設備操作上的經驗累積。第二階段針對建築元素如牆面單元、門窗單元等中尺度構築，了解其對應於設計生產與製造的相關方法；最後，第三階段以一比一的真實構築操作，設定設計條件與方法，結合數位設計與數位生產的機制，反饋於設計操作程序上。設定設計條件與方法，將階段一與二之成果整合於一規模 2-3-5 公尺之橢圓球體木構造框架中，結合數位設計與數位生產的方式，反映於設計操作程序上。透過真實材料的物質特性與潛力，以及不斷地從實作經驗中的發現與解決問題過程，找尋數位構築的可能策略與方法，以構築的實作經驗來闡述「數位構築」。

在 Womb 球體表/立面元素設計一「套框式」的組裝格柵單元，在於球體結構搭設完成後，僅需將組裝好的格柵單元給填充於球體的表/立面上，而球體的立面即告完成。此 2-3

—5公尺橢圓球體之表面格柵，每一單元皆不相同，可以個別設計與生產出來，以達到所要表現的形式；相同地，立面上的窗型單元以及室內的各項單元亦可透過數位設計的特性，達到設計者所要表現的設計意圖。設計操作策略為長向五等分此2—3—5公尺之橢圓球體，將分別利用不同計手法與設計形式；每五分之一的設計形體皆不相同，每一球體空間之結構行為也有所變化，試著由簡至繁的操作過程來幫助本研究達到所要探討的建築實作議題。

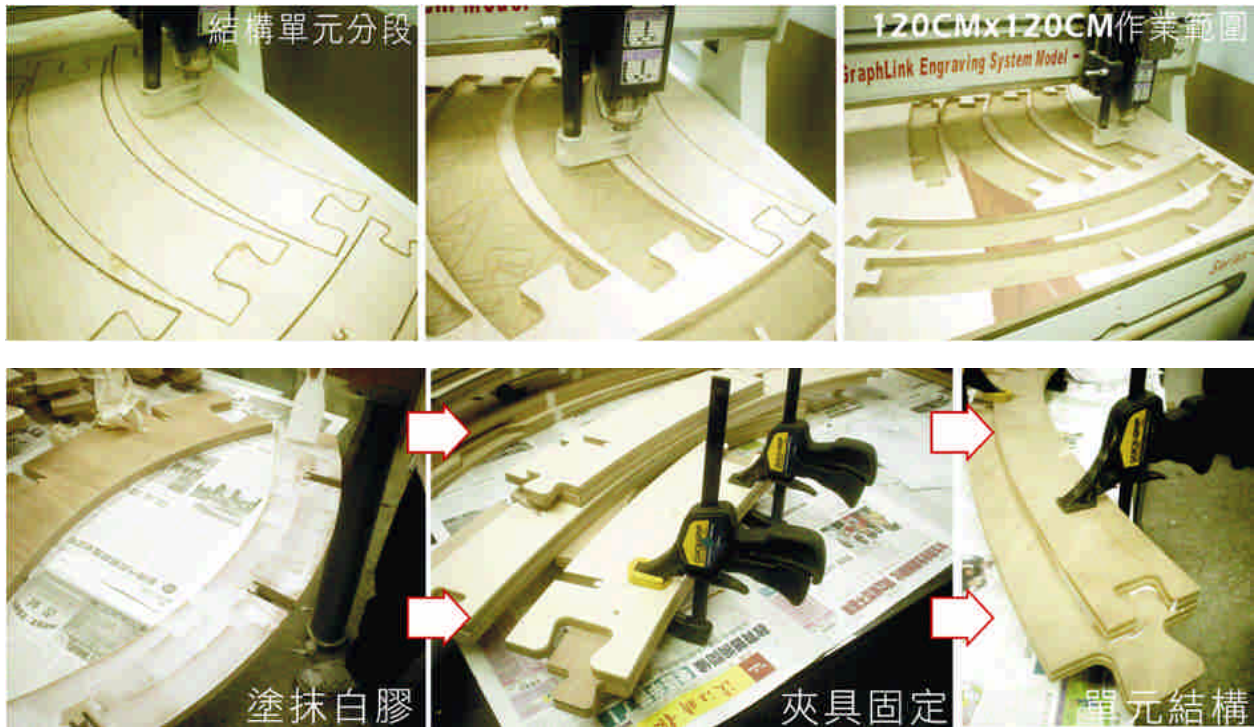


圖一：由FormZ 3D軟體轉換至AutoCAD之2D組合圖面，將可方便CNC機具之切割。

以第一個操作的五分之一球體空間為例——也就是球體的最中央部分，總共由284個切割物件單元所構成，在繪製好設計構想後，運用繪圖的功能指令將相互的物件做卡榫接合的細部處理(如FormZ指令中的Difference、B-Split指令)，同時將每個物件選取定義面以Define Arbitrary Plane的指令定位至相對平面上，以求取正確的物件切割輪廓大小，而後拆解各單元元素以方便後續的CNC切割作業程序，而各物件切割之編號系統更方便了解其組裝與裝設的過程。球體空間設計完成後，在FormZ軟體中一一將各個物件定位與匯出各物件平面，再經過AutoCAD軟體的編輯，適當地排列於120cmx120cm內的切割作業範圍，並輸出成.dxf的檔案格式以方便切割作業流程。同時在每塊木板記錄下所需要的切割時間與NC檔案大小，並給予各個物件做編號系統的整合，以便後續實體模型的組裝作業項目。基於考量剩餘材料的充分使用，需以人工的方式將各物件以目視的方式，排列於120cmx120cm範圍內。目前本研究在機器切割完成後，將各物件以人工的方式，給予各切割物件做上記號。

此五分之一球體空間主要由兩向結構體單元所構成，乃三片18mm之進口夾板所組成，相同地，側邊結構也是由單片18mm的進口夾板所組成。在這五分之一的球體空間之立面元素除了格柵元素之外，更加入了「面磚單元」的元素進去，而此兩種單元皆使用所謂「套框式」的結構方式而形成。如前述格柵單元系統之組裝方式，各「面磚系統」皆可獨立接合與組裝，而後續再置放「面磚單元」於其上；較為不同之設計乃為各「面磚單元」

只限定尺寸為10cmx10cm為基本單位，並不限定所使用的面磚單元材料；因此，可依據設計者的需求與材質表現，任意置換其球體空間上之立面視覺效果。面磚系統預留相同尺寸之孔洞以方便使用者固定材料單元，且整體面磚系統採用9mm木材斷面均質的密集板為材料，以區別開與主要球體結構框架之木材質感。後續置入10cmx10cm單元可與統一均質的框架作為區隔，可增添不少視覺變化上之趣味性。除了可以替換其他的材料以做為整體設計上的視覺質感外，更加速於設計者的施工作業流程。



圖二：受限於工作檯面尺寸(1.20M-1.20M)只好採用分段切割，與切割完畢之構造單元的膠合過程。

球體空間設計完成後，為配合CNC切割作業流程，需將主要長向結構等分，以便於單元結構的拼接組裝。在長向結構單元裡，以傳統木構的「鳩尾嵌槽端搭接合」方式，做為構件相互搭接的方式且運用三片18mm的夾板彼此相互膠合而成。在長向結構的組裝過程中，需先將內側兩片結構單元以膠合的方式先行固定，待主要形體組裝完成後，將最外側之結構單元以暗榫之方式，鑽洞、置入木條並輔佐白膠做為組裝的動作。因此，球體空間的組成方式並非固定不動的，而是可以拆卸、搬移與異地另行組裝之空間型態。

第二部分球體空間（介於前述球體中央部分與頂端部份1公尺長度的範圍）的曲率較高，更顯示出電腦輔助設計軟體在此部份設計中所扮演的角色。相較於第一部份球體在隔柵分割上以較為保守的垂直水平設計，此部份的分割嘗試以更任意的斜交方式切割，所以在卡接的設計與實作上難度大為增加。第三部分球體空間（球體頂端部份）企圖挑戰以不同的幾何面組成球體端點的曲面（參考圖三），捨棄原有以橢圓球體向心性的分割方式，而是以部份「足球」狀的橢圓球體為主要的構築模式。此部份由十二片五邊形與兩片六邊形面體所構成；在面體的交接處則是藉助於繪圖軟體求出類似四面體的三角錐接合元件以固定面體。構築方式極為簡便，但是在切割時得應用三軸切割機的特性，先行銑出各個面體與交接觸之斜角以方便組裝時之膠合。



圖三：透過電腦輔助設計與製造之過程，完工後1:1之Womb橢圓球體。

六、結論

數位科技的發展，引領了建築設計上的變革，建築的空間形式由傳統垂直水平之設計線條已逐漸轉向三維向度的曲線，對於建築的形態有了新的定義與詮釋的方式。藉由電腦輔助設計與電腦輔助製造技術的提升，對於設計者與研究者而言不僅在建築設計與教育上有極大的助益，而且對於傳統構築學領域上也有了新的啟發。

藉由 CAD 系統的 NURBS 功能可實現曲面形體的設計發展，形態的設計概念於是開始被解放。然而，傳統構築方法已經無法因應此類形體之構造方法，因此倚賴 CAM 技術的輔助製造就顯得極為重要。透過電腦輔助製造如：快速鑄型、電腦數值控制、三維掃描、2.5 或三維銑床，傳統構築學上的建造工法、材料、與結構美學等構築因子都將被 CAD/CAM 系統重新詮釋。結合 CAD 與 CAM 的技術優勢來重新看待建築設計或是建築操作的實踐是本研究重要的課題。

透過 CAD/CAM 系統的整合，設計發展程序並非只以單向線性的作業流程；設計者將以更具有效率的方法達到整體設計的發展，如：概念發想、建築設計、細部設計、施工圖說與現場施工等設計階段。透過 CAD/CAM 的資源整合重新回饋於設計操作方法上，以雙向作業方式甚至更多角度的來回檢驗與檢視設計過程。此時，設計者將如同傳統工藝創作者，不僅只是參與設計的構想與思考，更重要的是貫徹整個設計實踐階段的最重要參與者，達到一種的「自產自製」設計態度。

七、參考文獻

- [AA 2003] *Architectural Association Projects Review 02/03*, Architectural Association Publication, London, England, 2003.
- [AA 2004] *Architectural Association Projects Review 03/04*, Architectural Association Publication, London, England, 2004.
- [AA 2005] *Architectural Association Projects Review 04/05*, Architectural Association Publication, London, England, 2005.
- [AA 2006] *Architectural Association Projects Review 05/06*, Architectural Association Publication, London, England, 2006.
- [AA 2007] *Architectural Association Projects Review 06/07*, Architectural Association Publication, London, England, 2007.
- [AD 2002-5] *Versioning : Evolutionary Techniques in Architecture*, Architecture Design, 159, Wiley Academy, London, England, September, 2002.
- [AD 2003-2] *Surface Consciousness*, Architecture Design, 162, Wiley Academy, London, England, March, 2003.
- [AD 2004-2] *Emergence : Morphogenetic Design Strategies*, Architecture Design, 168, Wiley Academy, London, England, March, 2004.
- [AD 2005-4] *Design through Making*, Architecture Design, 176, Wiley Academy, London, England, July, 2005.
- [AD 2006-2] *Techniques and Technologies in Morphogenetic Design*, Architecture Design, 180, Wiley Academy, London, England, March, 2006.
- [AD 2006-4] *Programming Cultures*, Architecture Design, 182, Wiley Academy, London, England, July, 2006.
- [AD 2006-6] *Architextiles*, Architecture Design, 184, Wiley Academy, London, England, November, 2006.
- [AD 2007-1] *Elegance*, Architecture Design, 185, Wiley Academy, London, England, January, 2007.
- [AD 2008-3] *Versatility and Vicissitude*, Architecture Design, 192, Wiley Academy, London, England, March, 2008.
- [AR 1995] *Designs on the Computer*. Architectural Review, January, 1995.
- [IT 2002] 邱信賢譯，”建築新表面：數位化建築的表面張力”，旭營文化。
Alicia Imperiale 原著，”*New Flatness : Surface Tension in Digital Architecture*”。
- [IT 2003] 宋偉祥譯，”數位蓋瑞：探索材料極限的數位建構”，旭營文化。
Bruce Lindsey 原著，”*Digital Gehry : Material Resistance Digital Construction*”。
- [IT 2004] 邱信賢譯，”超（越）建築：電子時代的新建築空間”，旭營文化。
Luigu Prestinzenza Paglisi 原著，”*Hyper Architecture : Spaces in the Electronic Age*”。
- [Frampton 1996] Kenneth Frampton, *Studies in Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture*. The MIT Press, Cambridge, MA, 1996.