

## 第六章 結論

綜合前五章的分析與討論，本章將簡述結論與建議，並說明研究限制、研究貢獻及提出未來研究。

### 6.1 結論與建議

近幾年數位工具廣泛應用於建築設計領域，尤其是 CAD/CAM 技術已經成為輔助建築設計與建造過程的重要新設計媒材。而且藉由這些新媒材的輔助得以將形體複雜及多變化的自由形體建築設計以數位化過程設計與建構。針對本研究的問題，CAD/CAM 技術牽涉許多軟硬體操作及煩瑣步驟，許多設計者並不熟悉此新媒材如何應用於設計與建造過程。因此本研究目的希望可以將 CAD/CAM 新媒材輔助設計與建造過程的步驟研究發展成建築教育的教學應用，讓更多的設計者了解如何應用新媒材創造更解放的設計。經由研究步驟中對於過程步驟的案例研究及技術研究，最後再應用於教學案例的分析討論，所得到的結論與建議敘述如下：

首先從第一步驟的案例研究中，藉由對國內與國際自由形體案例設計與建造過程的分析，將過程及步驟整合出一般(general)的過程，最後提出先期「CAD/CAM 設計與建造過程」(圖 3-114)。從此過程中可知應用 CAD/CAM 新媒材輔助的過程，不僅是設計階段中的建築計畫，概念發展，設計發展與設計細部與施工圖階段都大量應用 CAD 數位軟體及 CAM 技術；建造階段中更大量依賴 CAD/CAM 技術作為數位建構過程的輔助。CAD/CAM 新媒材於設計階段中主要輔助自由的設計形體創作與實體模型的製作；而於建造階段中則作為自由形體建構時所需拆解成骨架與表皮單元生產的應用。從案例研究分析中也清楚理解對於整個過程操作中，骨架與表皮單元的操作步驟重要但卻最繁瑣。此步驟不只操作於設計發展過程的 CAM 實體模型製作，也是數位建構過程中重要的單元生產操作步驟。

接著第二步驟的技術研究，透過前面案例研究所整合的過程及對各步驟的了解，針對重要卻須以人力重複操作的繁瑣步驟：CAM 實體模型製作及單元生產步驟，經由步驟分析歸納出這些操作中不同 CAD/CAM 技術(雷射切割，FDM RP 及 3D 攜帶式雷射掃描)在軟硬體之間的轉檔過程建議準則(圖 4-18, 4-27, 4-32)。從轉檔過程分析結果可知，應用雷射切割技術製作骨架與表皮過程最繁瑣，而且會因重複性操作耗費大量時間甚至產生人為誤差，因此本研究進而將此過程編寫自動化程式來簡化操作過程。骨架製作過程中已將垂直水平的分割及凹槽製作過程自動化；而折板表皮製作過程則將折板編號、夾角計算及 2D 展開過程自動化。這些自動化步驟經過設計案例的驗證，雖不能將過程全部自動化，但卻可以滿足過程中部份步驟的應用，而且也提高了精準度及節省至少 3 倍以上的操作時間。

最後第三步驟的教學案例，主要將前面案例研究及技術研究中對於 CAD/CAM 設計與建造過程及步驟的分析成果發展成為教學應用。所分析的教學課程為交大建築研究所開設的「CAD/CAM 新媒材基礎課程」，從此課程中三次的授課(lecture)教學內容討論及檢討最後歸納出「CAD/CAM 設計過程」的教學綱要建議(參見 Pg.93 表)，課程內容以訓練學生操作設計過程中自由形體骨架表皮的製作及熟悉不同 CAD/CAM 技術的應用為主。另外於第三次教學中所增設的工作室(studio)訓練的教學案例中歸納出「CAD/CAM 設計與建造過程」的先期教學綱要建議(參見 Pg.104 表)。此工作室的教學訓練除了希望學生掌握數位設計與建造過程的操作之外，也企圖訓練學生如何與施作廠商溝通，從中理解設計者與施作廠商之間在自由形體數位建構過程的有效協調方式以利找出適當的施工程序。

## 6.2 研究限制

如前所述，在案例研究中對於自由形體案例的選擇，因目前從設計到建造過程具有完整公開資料的設計案例並不多，僅選擇了較少數但卻具代表性的設計案例來分析，因此對於這些案例研究所整合出的「CAD/CAM 設計與建造過程」，可被應用的普遍性(generalization)目前較具侷限，為本研究的第一類研究限制。然而這個過程會隨著未來公開資料的設計案例增多而繼續作調整，因而過程的普遍性將會隨之改善。

另外在技術研究中的第一部分轉檔過程分析，僅討論 CAD/CAM 技術中三種特定設備(雷射切割，FDM 快速成型，3D 雷射掃描器)的應用，但 CAD/CAM 技術中的 CNC 設備除了雷射切割還有其他也大量應用於 CAD/CAM 建造的 CNC routing，CNC milling 等設備；而 RP 設備也除了 FDM 設備外還有其他也可製作實體模型的 3D 印刷術，SLS 等設備。因此對於所選擇的 CAD/CAM 技術設備為本研究的第二類研究限制。至於第二部份的過程自動化分析，本研究選用特定的 MAYA 軟體撰寫程式，僅將過程中操作最繁瑣的骨架與表皮製作步驟局部自動化，對於局部的過程自動化，只是簡化某些操作步驟成執行指令，而且所撰寫的自動化程式仍然具有應用上的限制，如骨架凹槽自動化目前只有侷限應用於垂直水平分割系統等，為本研究的第三類研究限制。

在教學案例方面，研究結果所提出的兩種教學綱要建議僅基於三次授課的教學案例及一次工作室訓練的教學案例所整合，尤其是工作室教學訓練的案例只有首次的教學應用，因此，目前的成果仍屬於極少數案例下的個案結果，必須在未來持續發展與調整，此為本研究第四類研究限制。但本研究依然希望可以從有限的教學案例中檢討課程內容並探討如何將本研究對於 CAD/CAM 應用過程的案例分析討論及各步驟的技術分析應用於教學課程中，作為 CAD/CAM 新媒材教學應用的先期研究。

## 6.3 研究貢獻

本研究透過技術研究分析不同的 CAD/CAM 技術的應用並提出轉檔建議，可以讓更多設計者了解 CAD/CAM 新媒材的操作。另一方面，本研究對 CAD/CAM 應用中骨架與表皮操作步驟進行自動化技術研究，有效的將之前人力操作時繁瑣且經常出錯的過程簡化，讓設計者省去解決操作性問題而花更多時間思考設計，同時也達到更精準的操作。過程自動化研究促

使 CAD/CAM 設計與建造的數位過程更容易被更多設計者操作，建構出形體複雜及多變化的建築空間設計。

對於教學案例所歸納的授課(lecture)及工作室(studio)兩種形式教學綱要建議，雖然只是初探如何將 CAD/CAM 研究發展成教學課程應用的結果，但卻是目前建築教育領域中的重要議題，希望國內各校在擬定數位設計課程內容時作為參考。從授課的課程教學中訓練學生利用 CAD/CAM 新媒材以數位化過程操作設計過程，創作更解放的設計形體。此外對於工作室的訓練教學除了讓學生學習應用 CAD/CAM 新媒材執行完整的自由形體設計與建造過程外，也企圖透過真實建造過程訓練製作廠商熟悉自由形體的數位建構過程，增加國內製作廠商對於建造複雜形體建築的經驗及提升相關的製作技術。

#### 6.4 後續研究

以下基於 CAD/CAM 設計與建造過程研究、自動化技術研究、CAD/CAM 教學應用及 CAD/CAM 數位理論分別提出未來研究的方向與建議。

##### CAD/CAM 設計與建造過程研究

希望未來可以基於更多公開資料的自由形體設計案例分析，將本研究目前所整合的先期「CAD/CAM 設計與建造過程」作調整與修正，獲得一個普遍化(generalizing)的設計與建造過程。

##### 自動化技術研究

1. 將目前只有局部的自動化研究基於更多的真實案例應用作調整修正，並繼續整合成一套完整的自動化系統。
2. 除了骨架表皮製作步驟自動化研究外，希望可以探討輔助概念發展階段的自動化形體衍生方式，如應用數學幾何程式撰寫自動化形體衍生程式，這些自動化程式的應用除了可製作更多如蜂巢式，群集式等複雜形體外，最重要是可作為形體單元最佳化的輔助。
3. 除了設計過程中探討自動化步驟研究，在建造過程中希望可以跨領域吸取營建工程中的 4D 自動化管理系統及營建誤差解決方式的經驗(Koo and Fisher, 2000; Heesom and Mahdjoubi, 2004)，整合一套可以有效率掌控設計與建造過程的自動化系統。

##### CAD/CAM 教學應用

1. 希望可以基於本研究所歸納的先期教學綱要建議，繼續發展成更完整的課程內容，最後提出可供建築教育領域擬定課程時參考的課程架構與綱要建議。
2. 由於教學中的工作室訓練在執行上會受實作真實設計案的各種不同案條件因素所影響，因此未來對於此教學建議可與業界建築師一起合作的模式進行，因此除了訓練學生也可以藉由合作過程讓目前建築師接觸到新媒材的發展與應用。將教育領域中教學的實驗性操作發展成為可以被執行的真實應用。

### CAD/CAM 數位理論

1. 對於 CAD/CAM 新媒材應用所創造出的數位設計，已可觀察出因新媒材使用而形成新設計概念，如強調連續曲面的自由形體以及由單元組成的複雜形體等。CAD/CAM 新媒材應用已經影響了設計師的設計思考與所呈現的設計成果，未來研究希望可以探討這些數位媒材對於設計創造的影響，以及對設計過程中的風格理論與創造力理論作深入的研究。
2. CAD/CAM 新媒材在設計與建造過程中，可輔助複雜設計形體的數位模型與實體模型製作，設計師為了檢視設計的空間性、材料性與結構性，常需要依賴實體模型，同時數位模型在數位設計過程中也扮演著重要的角色，作為複雜形體之生成及空間模擬等設計的輔助。因此對於數位設計過程中，必須應用 CAD/CAM 媒材製作實體模型來輔助設計，或者僅利用數位模型輔助設計創造，此兩種不同設計方法的比較，應是未來重要的理論研究方向。

