

國立交通大學建築研究所

碩 士 論 文

數位工藝之個人化數位製造工具

A Personal Digital Manufacturing Tool for Digital Craftsmanship



研 究 生：闕凱宇

指 導 教 授：侯君昊 教授

中 華 民 國 一〇一 年 七 月

誌謝

首先，要先感謝交大建築所提供一個這麼多元的環境，讓我在這兩年來，除了在課堂上的學習，也讓我在與來自不同背景的同学互動中受益良多。

再來，要特別感謝我的指導教授侯君昊老師，讓我在論文题目的發想上獲得極大的自由；特別是在進行論文研究中，常常不辭辛勞給予許多務實的技術指導，並在邏輯思考的整理上給予莫大的幫助。

接著我還要謝謝數位組的夥伴們，不管在學習或生活上，一直容忍包容我這個老小孩，非常感謝大家!另外特別謝謝小瑋，在我身邊作為一個最好的學習榜樣。

最後，感謝我的父母讓我可以繼續追求我的夢想。

最後的最後，要謝謝馬一直不離不棄的陪伴我，在許多重要時刻始終是我精神上的依靠。

很高興身為交大人，我永遠都會是交大的一份子!



中文摘要

身處於當代的數位設計/製造環境的背景下，創作者在執行創作的過程中，利用程式運算對概念發展進行數位化的邏輯運算，接著在電腦輔助 3D 設計軟體進行自動化的建模，並通過自行設計組裝的三維立體印表機將數位資料生產實體模型。讓創作者能將數位工具視為手腦的延伸，同時利用強大運算能力的數位設計工具以及符合個人實體化需求的數位製造工具。

在數位設計/製造環境中，對設計流程與生產工具的選用進行討論，並提出以下的問題：生產導向的數位設計流程該如何被制定？而又該如何掌握以加法製造做為數位製造工具並可自行生產改變工具的模式，對最終的設計成品又有何影響？

本研究企圖以一個創作者的角度，透過當今的科技技術，並遵循傳統工藝的思維，將電腦輔助設計/製造視為創作者個人手腦的延伸，並著重於開發製作實體介面的 DIY 數位設計製造套件，使個人創作者能自行開發創作工具，以此探討數位設計環境在廣闊的自由度下，進入實體製造介面仍能使創作者保有自行開發的可能性。

本研究主要分為三個部分：第一部分對數位製造進行分析，主要針對加法製造的快速成形方法進行分析與建構；第二部分為系統的設計與實作。第三部分為實際應用與案例的操作與示範。

關鍵字:數位工藝、加法製造、開源

Abstract

In this study, an attempt to make creators proceed digitization logic computing in concept development by using the program computing during the process of creation executing in the background of digital design / manufacture environment as contemporary , then carried out automated modeling in the computer assisted 3D design software , and produce the digital data into entity model by assembling through self-designed three-dimensional printer. To enable the digital tools as an extension of creator' s hand and brain , while taking advantage of powerful computing capabilities of digital design tools and digital manufacturing tools to meet their personal physical needs.

This study especially focus on the discussion between design process and manufacture tools choosing in the environment of digital design / manufacture , and bring up the questions below :

How does the digital design process of production orientation be established?

And how to master the additive manufacturing as a digital manufacturing tools and also can change and produce the mode of tools by one' s self ?

What is the effect of the final design finished product?

This study attempt as a view of creator , through nowadays technology technique , in the meanwhile follow the though of traditional craft , in addition Computer-aided design / manufacturing regarded as an extension of creator' s personal brain and hand , through VBscript of Rhino to emulate the creation of the drill of computing , and emphasize developing and manufacturing DIY digital design manufacture component of entity interface , enable individual creator can develop creation tools by their own , in order to explore creator still can keep the possible of developing by their own when digital design environment entering entity manufacture interface under a wide range of freedom.

This research mainly separate into three parts : first part analyze the digital manufacture , mainly focus on analyzing and built the fast forming method of addition manufacture ; second part is systemic design and practice ; third part are practical application and operation and demonstration of example.

Keywords : Digital craft, Additive Manufacturing, Open Source

1. 導論.....	1
1.1 研究動機與問題.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 方法步驟.....	3
1.4 研究架構與流程.....	4
2. 研究背景.....	5
2.1 電腦輔助設計環境.....	5
2.2 電腦輔助製造環境.....	6
2.3 數位工藝.....	13
3. 電腦輔助設計/製造工具的選擇與應用.....	15
3.1 Design for Manufacturing(DfM)可製造性設計.....	15
3.2 數位設計製造環境探討.....	16
3.3 數位設計製造環境流程與分析.....	18
3.4 數位設計製造 open source 硬體 RepRap 介紹.....	21
4. 數位設計製造套件設計與實作.....	27
4.1 數位設計製造 open source 硬體分析.....	27
4.2 數位設計製造 open source DIY 套件設計.....	29
4.3 數位設計製造 open source DIY 套件實作.....	36
4.4 實際應用與設計案例操作示範.....	46
5. 結論.....	48
5.1 研究貢獻.....	48
5.2 研究限制.....	48
5.3 未來研究.....	49
參考文獻.....	50

1. 導論

當我們步入數位化的時代，我們與傳統實體的各種媒介越來越疏離，但對於創作者與其作品而言，尤其是那些必須以實體呈現的作品，新科技帶來的新技術固然能讓作品更容易獲得突破的機會，卻也使人開始質疑 - 這些技術的發展將對創作帶來越來越大的侷限。而社會學家 Richard Sennett 認為，當設計師不再用手工繪圖，他們將失去與作品的關聯性。在這個數位的時代，創作者應當將所用的機器視為手的延伸，並感受其動作，以期能從機器的精度和複製能力中獲益。

傳統製造業刺激了工業革命而使我們有了今天的世界，時至今日，製造技術的限制凸顯出對新製造方法的需求。製造的英文源自於法文的“手工製作”。然而，這字源卻不再適合用來形容今日現代製造科技的形態。傳統製造的過程與孩童用對折的紙張去剪裁來創造雪花片相似，這些科技是“減法”的技術，在加工件上減去不需要的材料來創建的物件。鑄造、成型、製模與機器加工是相當複雜的製造過程，牽涉到機床設備、機械、電腦以及自動裝置。而製造工具的能力往往限制了最終的成品。

本研究試圖於當代的數位設計/製造環境的背景下，使創作者在執行創作的過程中，利用程式來發展概念並進行數位運算，接著用電腦輔助設計軟體來進行自動化的建模，並透過自行設計組裝的三維立體印表機，將數位資料生產成實體模型。上述流程讓創作者能將數位工具視為手腦的延伸，同時利用數位設計工具的強大運算能力以及符合個人實體化需求的數位製造工具。

1.1 研究動機與問題

科技是“研究技術和擴展技術” (Pye, 1968)。技術指的是：為達成任務目標或功能，透過感知的方式理解使用的材料以及處理方法。在生產過程中製造方法和材料普遍使用分類系統來分析，藉以考慮設計過程中為達到功能所產生的解決方案，卻無法探索設計。

在製作完成的工件中，可看出製造過程中所採用的材料和技術 (McQuaid, 2005)。因此，製造過程是與完成品密不可分的。

對應用藝術來說，工匠的工作，涉及了知識和技能。工藝提升了技能和知識的“know-how”，提升“技術”的概念至製作方法，經由任務和功能來揭露技術的本質(Sheil, 2005)。然而，技術在許多方面一直被認為是一個不能說的秘密，一

種個人的經驗遺產。其實，任何一種工藝的本質都是在體現材料的選擇和處理的技術。

今天，快速原型技術提供給我們新製造技術的知識。按照傳統製造流程慣例，加工是執行製造過程的一種形式，處於流程的最後階段，但快速工藝的概念不僅僅只是將數位檔案送至數位製造機具生產。作為計師面對高效率的 CAD / CAM / CAE 流程，“File to Factory”確實拓展了我們的視野 (Schodeket al., 2005)，相反的，“Factory to File”卻從未被考慮過。換句話說，機器的執行不應該僅僅被視為一個簡單地物化設計的服務工具，而是一個機會將設計過程作為一個集成在各種規模的生產下的計算機邏輯。材料的選擇和製作方法並不是單純的決定，而是預先確定從開始到結束引導設計的工作和過程的因素。

David Pye 將製作工藝區分為正規(regulated)和自由(free)兩類，他認為後者才具備創造力(Pye, 1968)。據此，自由工藝除了造型創作的任務外，它還能促進了工具的發展，也具備重建與改造材料和應用之間關聯性的能力。

本研究針對在數位設計/製造環境中，設計流程與生產工具的選用進行討論，並提出以下的問題：生產導向的數位設計流程該如何被制定？而又該如何掌握以加法製造做為數位製造工具並可自行生產改變工具的模式，對最終的設計成品又有何影響？



1.2 研究目的

本研究試圖以一個創作者的角度，透過當今的科技技術，並遵循傳統工藝的思維，將電腦輔助設計/製造視為創作者個人手腦的延伸，並著重於開發製作實體介面的 DIY 數位設計製造套件，使個人創作者能自行開發創作工具，以此探討數位設計環境在廣闊的自由度下，進入實體製造介面仍能使創作者保有自行開發的可能性。

本研究針對數位製造技術中的加法製造(Additive Manufacturing)，透過分析目前 open source 的硬體及軟體，比較其優缺點及可行性，並利用開源硬體的易擴充性，設計開發專屬的傾斜式生成平台，以補足利用 FDM(Fuse Deposition Modeling)技術的三維列印機所生產的快速原型成品，在外觀上的工業特徵過於僵化的缺點，使成品的外觀能順應視覺美感。整個設計開發的製作流程也同時符合個人在數位設計/製造環境的 DfM(design for manufacturing)方法，透過設計評價(Design metrics)檢視適當的結構設計資訊，在設計時整合生產知識，選擇適當的材料，流程和組件，並評估替代設計方案，在此標準流程下以簡單的操作便能設計製造出一台開源的

三維立體列印機。

1.3 方法步驟

本研究將實作一 open source 的三維立體列印機，以 RepRap 系統架構為雛型，加以設計改良，設計發展過程將分為：

1.3.1 案例研究與實作式觀察

為實際了解現行開源硬體的三維立體列印機，在使用上以及設計上是否符合使用者的需求，初期先在網路上搜尋現行被大眾所廣為使用的幾種機型，透過網路上的教學說明文件配合相關的參考文獻資料，進行資料收集與分析，透過文字，圖片以及影片的輔助，理解與學習三維立體列印機的相關知識。再藉由實際組裝 MakerBot 的過程，直接取得充足且多樣的經驗作為取樣，由組裝過程中所面臨之問題與困難等各種情況，分析歸納出在設計 DIY 三維立體列印機時，DIY 套件應須解決之問題。再就由探討實際操作流程，製造能力的限制及成品外觀的美感，歸納在設計 DIY 套件時所應具備之特性。

1.3.2 套件設計與實作

透過套件的製作，可以直接反映對照所提出之研究成果是否能解決探討之問題，將概念進行驗證。分析數位設計/製造流程與過去實作 MakerBot 套件經驗下所需組件之功能需求與設計開放性，並依據各種組件的物理運動特性規劃與發展所需設計 DIY 套件的外觀、機構細部，並選取所需之電子、韌體、使用介面與機械裝置，來設計並實作 DIY 三維立體列印機套件系統，並於所歸納的基本軟硬體元件中，透過改變不同操作介面及韌體的組合，挑選出最適合使用者操作數位設計/製造流程的軟體元件，驗證與連結開源硬體套件與生成成品的完整性的最佳組合。

1.3.3 套件操作評估

透過實際操作 DIY 三維立體列印機套件案例，運用 DfM 方法來操作套件之設計流程，驗證數位設計/製造流程在此案例下的適用性。再透過實機操作方式，於數位設計環境進行設計，使用所搭配的韌體及操作介面，將設計出的數位檔案通過電腦演算產生出有別於傳統三維立體列印機的 G-Code 路徑檔，經由本次設計的 DIY 三維立體印表機搭配傾斜式生成平台製造出設計成品，實際評估使用開源硬體設計的 DIY 三維立體列印機與傾斜平台是否能達到預期之效果，即此套件可以幫助減少支撐材料的使用，外觀剖面線跟隨所設計的物件表面曲率傾斜，

在物件本身的結構因層積方式改變而加強結構力。

1.4 研究架構與流程

本論文架構分成五大章節，陳述的研究內容如下：

第一章： 研究動機與研究問題、研究目標以及研究步驟。

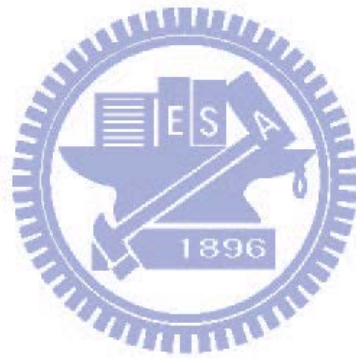
第二章： 電腦輔助設計、電腦輔助製造的環境與背景，以及減法製造、加法製造的應用與設計案例，並延伸至當代數位工藝在採用數位工具輔助下的創造性，以及 open source DIY 3D printer 的案例介紹。

第三章： 數位設計環境下工具的選擇與應用，介紹數位設計所使用的 DFM(design for manufacturing)方法，以及數位設計製造流程與分析。

第四章： 數位設計製造 open source DIY 套件設計與實作，以及使用此套件的實際應用與設計案例操作示範。

第五章：

第六章： 結論、研究重要性與回饋、研究限制和未來研究。



2. 研究背景

運算的進步，與電腦的處理技術有關，Computer Aided Design (CAD) 電腦輔助設計和 Computer Aided Manufacturing (CAM) 電腦輔助製造的軟體不斷的進步，刺激了設計和實現設計的成果。在軟體的開發過程中同時呼應了對設計的需求，並產生新的建築概念與建築知識。CAD 系統利用演算法幫助設計師更容易獲得複雜的幾何圖形，在數位設計中常見複雜的幾何形狀，產生出許多與傳統的施工方法不相關的形式和造型。對數位建築來說，曲面確實是在實體化過程中的問題，即使曲面已經是建築語彙的一部分，使用在設計上仍受限於缺乏足夠的資訊量去說明如何操作它的幾何形狀。最近因為 CAD 系統的廣泛使用，在建築上使用曲面的案例已明顯的增加，延續使用傳統建築技術來建構曲面並不夠精準，現在通常以 CNC 製造技術來處理數位建築對曲面的需求。此外，CAD 系統與 CAM 系統之間的銜接主要依靠描述形狀的中間文件或專有的轉換格式。

此外，在建築上利用電腦數值控制 (CNC) 製造技術已經讓我們意識到，在未來建築的生產可能會發生重大的改變。數位化製造技術幫助建築產業從基於營造廠主導的模式開始轉向數位設計為主，數位建築的建設將不再受限於傳統的建築形式 (Groak, 1992)。因此，數位化製造將對傳統製造產生衝擊，數位製造方式對傳統大規模的重複生產方式將在經濟模式上產生重大變化。在使用 CAM 系統下，變異和定制都將不再因為需一個專門的勞動力或特殊的製造技術而造成額外的成本 (Schodek et al., 2004; Kolaveric, 2003)。

2.1 電腦輔助設計環境

數位化設計環境如 CAD 系統，往往已發展到仿真製造程序。一部分的製造程序是消滅加工物件 (Thompson, 2007)。由基礎材料上減去 (銑、切割) 不需要的部分而塑造出所需的產品或組件。CAD / CAM 軟體經常在開發時考慮到消滅製程這一點，於數位化設計環境模擬這種消滅的過程。錐化、倒角、混合和脫殼是 CAD 軟體常見的功能。操作這些功能的目的是從一個基本量體減去不需要的材料，產生所需的模型。

CAD / CAM 軟體已被開發成不僅用於設計，而且還需自動化產生 Computer Numeric Control (CNC) 電腦數值控制機器用於加工流程的編碼指令。

CAD/CAM 的環境往往直接與加工流程有關。快速製造方法是加法的製程，此法添加材料至物件上直到製造完成。時至今日，快速製造也採用了 CAD/CAM 和數

位化設計環境中類似減法製造的製造程序。

在建築設計中的創新往往遵循技術創新，這種創新可以展現在施工技術或設計工具上。隨著數位化設計環境的發展，新的製造過程中能產生大量的、視環境定制的建築構件。因此，數位製造技術的核心概念擁有不同於傳統建築生產的設計靈活性和施工技術的限制。例如，大量客製化組件的生產。

快速原型啟發不同產業去研究其實際應用上的可能性，使用這些堆積成層式的製造流程於實際生產而不僅為原型打樣。在過去的幾年中，許多研究已經開發出一些實驗流程來測試快速製造應用在建築行業的可能性。尤其是在設計原型物件給混凝土印刷製程時，顯露出對新的設計方法的需求。大尺寸的加法製造將會需要不同的 CAD 環境提供可對自由曲面微調的施工方法。電腦輔助設計環境，必需將構築過程嵌入其建模工具。設計環境的數據轉檔工作流程也需要採用可以被實際操作的刀具路徑。將設計轉換為機具參數化控制刀具路徑，而不僅是具有明確的幾何量。

2.2 電腦輔助製造環境

隨著電腦在過去幾十年的發展，關鍵的論述已經開始質疑電腦“控制”的本質。Malcolm McCullough 在 *Abstracting Craft* (1996) 提出，數位化在設計過程中已經變成“減少把自己處於費力工作中的問題，並使機器發揮最強大的功效 (McCullough, 1996)。”

電腦數值控制 (CNC) 加工機械正在改變我們設計和構建的方式。這些技術已經通過提高效率來增加生產力，並幫助產生新的造型的做法 (Kieran Timberlake, 2003)。然而，有些人認為，這些技術會有失去人性化(人工的痕跡)的影響，將人味從生產的物件上剝奪，並重新分配技藝與機器的連結(Dormer, 1997)。(數位)工藝工作室探索技術和工藝的概念以了解如何及何時設計師應該充分發揮在設計和生產過程中所使用的工具(包括手和機器)。

今天，電腦數值控制 (CNC) 製造技術已經給建築師新的設計方法和施工過程。數位製造技術已經提供更大的可能性來證明自己的價值，因其有能力完成手工無法達到的程度。

在1948年，Sigfried Giedion指出機器在生產的物件上的價值，“特別在其執行運作的方式，在不休息的情況下手工並無法符合精確的精密度，它不能繼續無休止的輪流持續運作(Gideon, 1948)。”

傳統上，數控技術和其在執行連續快速的機械操作的能力已被用於提供我們更高的精度和提升效率。一些人認為這些優勢給設計師帶來了與最終建構的作品更直接，更無縫的連結。儘管如此，這些技術只模仿了手的動作和人工質感卻缺乏手/腦協調所能提供的直覺和自發性(Dormer, 1997)。時至今日，最常用的數控技術最終與“手”在製作上的直接動作並不相關聯，並使其邊緣化，僅只是協助組裝上的勞動力。這必須從技術與工藝的核心之間的張力關係說起。

2.2.1 加法製造

快速成型技術是一種成熟的技術，在製造和產品設計行業已發展 25 年左右。它主要用於加快產品設計週期時間從概念到實體的評估;並在當代建築實踐中獲得了立足點。

這些技術所產生的典型組件是“桌面大小的”建築模型。結合靈活的數位 CAD 環境與製造過程的結果幾乎是無限的幾何自由。如 Foster + Partners 的事務所已充分利用這項技術，它已成為一整個建築設計過程中的一部分(De Kestelier and Peters, 2008)。

在快速原型的概念階段，進一步發展大型印刷建築構件的進程，甚至聲稱有能力生產全建築物。快速原型的發展將給建築師在組件設計方面一個新選擇，並保證所生產的快速原型與設計出的自由幾何外觀的相似度。

然而，快速成型過程不能被簡單地將比例放大。必須相互依賴彼此間的材料特性、處理功能、設計目標所產生的具體問題。在增加尺度和列印解析度的組件時，更需要控制物質的層積，由於層積的影響有視覺衝擊力，因為它是可以被看到的建築構件。傳統的三維 CAD 軟體開始結合實體機具的通訊協定，用於驅動快速原型機的控制。設計環境必需考慮設計組件所使用的材料和工藝的限制，當這技術開始影響建築特色，就必須提供更好的控制以確保解析度。

在 20 世紀 60 年代的製造業開始使用自動化的工業機器人和直接數值控制的機器。20 世紀 70 年代和 80 年代發生了電腦革命，開始開發出電腦輔助設計軟件因而開始了電腦數值控制 CNC (Computer Numerical Control) 的發展(Howe, 2000; Kolarevic, 2003; Schodek et al, 2005)。

在產品設計領域，CAD 環境下允許數位化設計的產品，但生產供審美和/或功能測試的原型模型則需要由手工製造。在 20 世紀 80 年代，第一個 layerbased 製造流程提供了使實體模型直接從 CAD 數據創建的可能性。這顯著降低產品原型的評估的週期時間，快速原型因此產生。

快速成型工程通過兩種方法之一：選擇性材料的相變或選擇性的材料層積。有許多進程，原則上所有這些操作都是建立這些目標物的順序層。

選擇性激光燒結技術，採用尼龍或金屬粉末和激光。粉末遍布一整“片”建立區，激光用於燒結這些必須是實體的區域。然後下一層的粉末融合到上一層。結束時成品被包裹在一堆未被燒結的粉末中，當整個構建過程完成再清除未燒結的多餘粉末。有一些製作法是完全融化而非燒結，所生產的零部件接近 100% 的密度和傳統的鑄造相比甚至比傳統的鑄造缺陷還少。另一個熱門的製程供建築造型的是立體印刷，使用複合粉狀石膏選擇性應用結合劑來產生固體模型。這兩種技術都是選擇性的物質相變的例子。

熔融沉積成型技術(FDM, Fuse Deposition Modeling)(圖 1)，使用選擇性物質沉積和包括連續擠壓一種熱塑性塑膠使其融合在一起。支撐材用於支持懸垂部分;這是必須由成品上拆下並捨棄的部分(Wohlers 2004)。

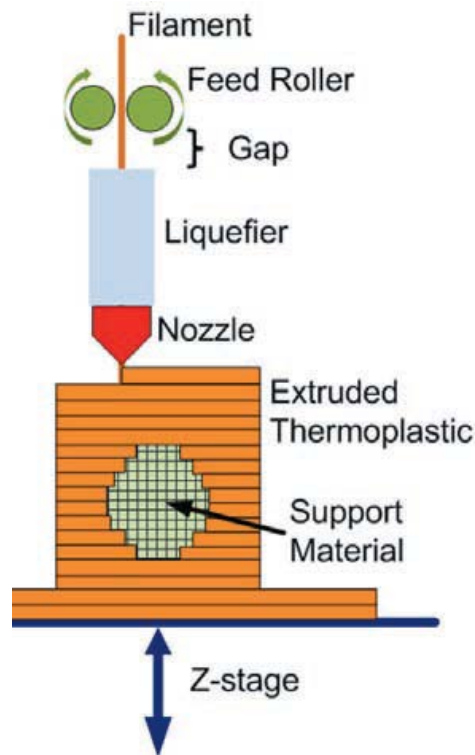


圖1. FDM 原理示意圖(Garrett, 2011)

在過去的 25 年裡，在材料上已經有相當大的發展，這使得最終用途零件得以被這些快速原型機創建，因此，發展出更現代的名字，快速成形。

構建室的尺寸限制了被製作物件的大小。一些製程製作非常小的物件並擁有高精密的公差。某些專門機器都相當大，可達 800 mm x 1000 mm x 2000 mm。有些設備是類似辦公室設備的尺寸，像是一個獨立的複印機的大小。然而，通常情況下，建床(built bed) 在 X，Y，Z 方向使用大小至 500 mm。

快速製造技術的主要好處是，它提供了“無限”可能而不需額外增加成本，因此使元件可以以非常複雜的形式製造，或作為部分的組件或一個完整的實體物件。生產成本和組件體積有一個線性關係，因為部件成本僅是材料成本的一個函數。與此相比，傳統的方法需要回收高加工成本。事實上，(Hopkinson, Dickens 2003) 表明，快速製造對小批量生產可達成有效的成本控制。

任何需要客製化，而且正在改變產品概念和設計方法的產業，都是快速製造正在尋找的利基市場。如:醫學整形外科和牙科產品像是假牙等的例子(Invisalign, 2006 年)。



圖2. 由 Maker Bot 生成的快速原型成品

近年來，已經有一些製程開始採用快速製造應用於建築和建築構件的生產及製造。可能是第一個開發的是一個選擇性相變結合沙子和水泥的製程，其使用的技術是利用汽鍋使材料變硬，但這計畫目前沒有任何進一步的進展(Buswell, 2007)。

2.2.2 加法製造流程

利用快速成型技術來製作建築模型的標準工作流程是由De Kestelier and Peters (2008)所建立。數位三維模型建立於Architectural Engineering and Construction (AEC) 建築工程和施工的CAD軟體內。在完成設計後將3D模型匯出STL檔。

STL是Stereo-Lithography(立體光刻)或Standard Triangulation Language(標準三角語言)的縮寫，是一種檔案格式，它描述了一個三維物體的表面三角幾何形狀。STL不具有代表性的顏色、質地或其他常見的CAD模型屬性。根據所採用的快速原型技術，將STL檔匯入通常是由製造商開發的特定軟體套件中，將檔案轉檔為生產設備可讀的格式，該軟體將三維模型切片為水平切片。切片將定義模型的水平輪廓線，並將這些輪廓線區分出內部或外部，再定義其中的哪些部分是實心的，哪些不是。這些定義將告訴生產設備該在何處層積材料，或開始相變。

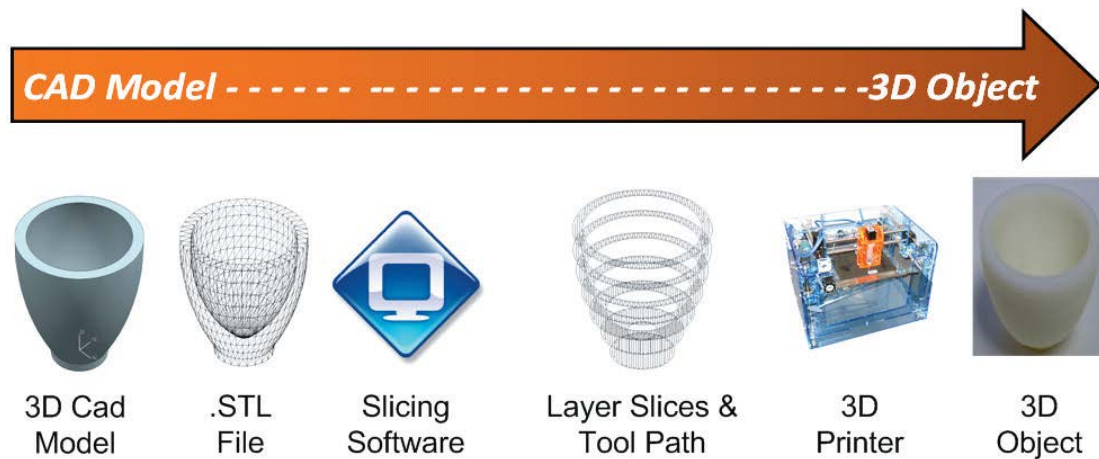


圖3. 加法製造流程(Garrett, 2011)

機器通常會依照順序創造一層層固體層，通常是先追蹤實體/非實體邊界的定義輪廓，然後以剖面線圖騰填滿實體輪廓內的區域。

由上述流程可以得知，快速製造的重要特性是層高度(外觀特徵)，因為這關係到物體表面的品質(解析度)。

2.2.3 混凝土印刷的發展

混凝土印刷的發展是今日建築業在 CAD / CAM 軟體和製造流程之間的新方向，以下並著重討論此技術於自由形式建造流程的可能性。

在建築業發展自由曲面的趨勢下，混凝土印刷目前還處於起步階段，並沒有標準化的 CAD / CAM 設計環境或工作流程。建築模型的快速原型可能是對於混凝土印刷來說最相似的工作流程，可以用來當作參考範例。

全世界目前有三種混凝土印刷技術正在發展。這三種都是大型的快速製造，或自由形式的建設流程：Contour Crafting, D-Shape, Concrete Printing

美國南加州大學的實驗室已證明 Contour Crafting（圖 4）有能力生產原尺寸、自由形式的牆來取代類似砌磚牆體的結構，這與在英國的被發現房屋結構相似。Contour Crafting 的流程是將水泥擠出一個類似快門結構的噴頭以構成外牆的表面，再用水泥材料進行填充。Contour Crafting 的發展重點是用來迅速建立建築物的牆壁。

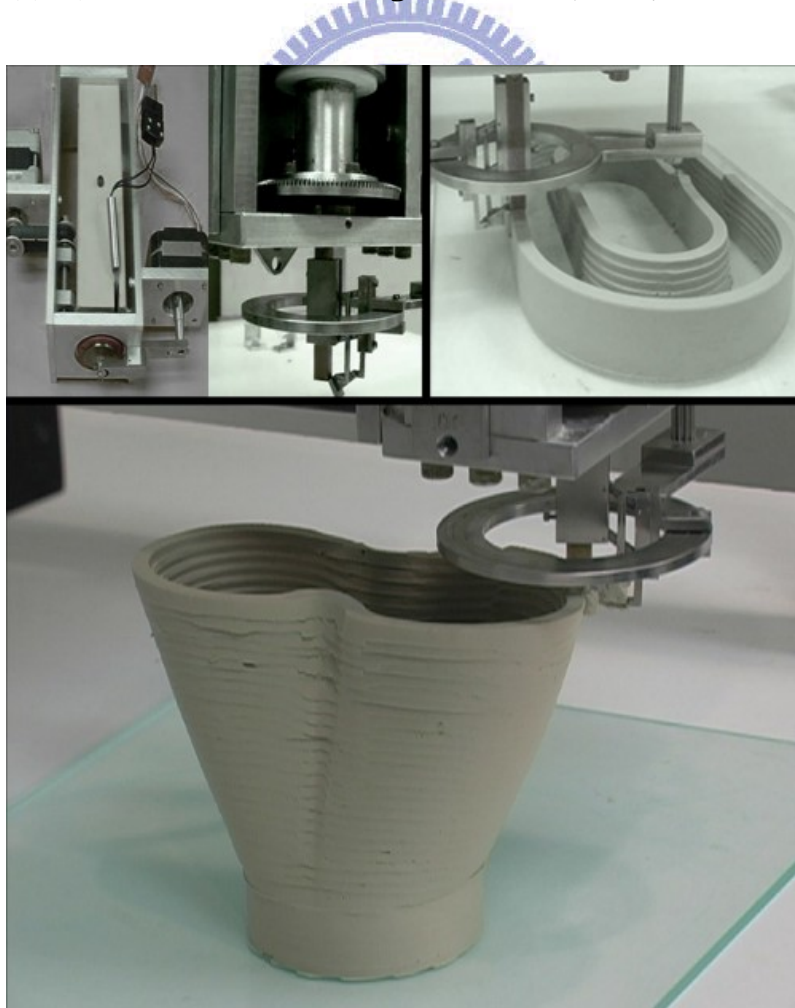


圖4. Contour Crafting (<http://www.contourcrafting.org/>, 2010)

D-Shape (圖 5) 是一個以粉末式快速成形技術為基礎，使用沙子作為構建材料，將黏合劑噴灑在每層的連續表面，隨著生成過程變硬。部件是建立在“粉末”中，粉末必須在成品建構完成後被清除。



圖5. D-Shape (<http://d-shape.com/>, 2010)

Concrete Printing (圖 6) 是英國Loughborough University 正在開發中的新製程，基於和 FDM 類似的成形方式擠出半液態材料的製程。Concrete Printing 的優點是：擠出頭的開孔直徑大小控制了成品的解析度，且此技術可使用不同的材料。生成過程以兩種材料沉積成層，一種是“生成”的材料和一種是“支撐”的材料，支撐材是層積在部件懸垂部分需要支撐的底部，然後在成品構建完成後移除。



圖6. Concrete Printing (<http://www.lboro.ac.uk/>, 2012)

2.3 數位工藝

有實體參與的設計可以促進頭腦與手的連接，擴大工藝的知識和材料的理解。社會學家 Richard Sennett 認為，作為設計師從手工繪圖偏離，他們將失去與他們的作品連結。將使用的機器是為我們的手的延伸，我們同理可以感受其動作，並從機器的精度和複製能力中受益。媒介將包含手和機器的動作記錄成了記憶的痕跡或印象。

我們希望我們的社會，以知識豐富數位的精準度和手工的偶然性。在不依靠勞動力下追求手工的靈敏度，我們可以使用數位構築作為設計的催化劑，而非只是用作生產。我們明確的感興趣在手繪線，材料特性，刀具路徑的運動，使我們能夠揭露有趣設計的機會。每個產品意味著來自一個特定的背景。它們對旁觀者可能看起來微不足道，但對創作者來說，他們將其作為探索的一種手段。

傳統工藝 (Craft) 是勞動者利用生產工具對各種原材料、半成品進行增值加工或處理，最終使之成為製成品的的方法與過程。

制定工藝的原則是：技術上的先進和經濟上的合理。由於不同的工廠的設備生產能力、精度以及工人熟練程度等因素都大不相同，所以對於同一種產品而言，不同的工廠制定的工藝可能是不同的；甚至同一個工廠在不同的時期做的工藝也可能不同。可見，就某一產品而言，工藝並不是唯一的，而且沒有好壞之分。這種不確定性和不唯一性，和現代工業的其他元素有較大的不同，反而類似藝術。所以，有人將工藝解釋為「做工的藝術」。

所謂工藝美術，是指用手工或機械的手段製造物質產品，而該產品既有物質生活的功能性，又有精神生活的審美性。

工藝美術和手工藝的意思基本上是不同的，如要用一句簡單的話來分別，可說是「極致的手工藝之美就是工藝美術」，手工藝的定義涵養了民間美術、一般手工製品，而且往往局限在手工製作的狹義上。但工藝美術一詞卻能包括機器製造出，具有手工質感的物品。而且工藝美術下的物質產品，多為量少質精，價高罕見。

當代工藝隨著時代的發展，開始與數位結合，逐漸產生出數位工藝一詞。從電腦開始出現在人類的生活，隨著科技的發展，電腦輔助設計(CAD)開始被利用在各種產業，因其在虛擬空間中塑造造型的可能性，也使得工業藝術產生新的形態。而由於技術逐漸成熟，CAD 軟體開始普及，讓其他非相關從業人員也能夠開始嘗試數位所帶來的創造力。

對工藝來說，CAD 也有著看似無限的可能性。數位化生產流程是以 CAD/CAM 為技術核心，而其所帶來的優勢為 CAD 可協助我們於虛擬的空間中繪製複雜的結構與造型，提供我們另一種空間角度來檢視作品，而 CAM 則可為我們的製作過程提供自動化與精確的作品完成度。

從數位化的製造端來說，可分為加法與減法兩種，減法為從原有的物質上減去不要的部分，使其最終呈現作品的樣貌，工具有 CNC、雷射切割以及水刀切割。加法的方式是從無中生有，與以往的工業生產方式較為不同，利用機器將材質一層一層疊加上去，最終呈現出作品的樣貌，使用的機器有 RP、雷射燒結、粉末熔接以及 3D printing，也由於此種生產方式與過去有極大的差異，也讓產品有了新的可能性。

數位化流程所造成製造上的突破，促使我們可以利用電腦生成繁複的設計成果，並將電腦中所繪製的複雜造型若原先利用人力可能效率很低或根本無法製作的作品能輕易地被實現出來。利用數位化的優勢可以輕易地完成精細、精確、精緻的一次性成品，也讓操作者有機會創造屬於自己設計語言的工具。然而數位化流程的機器本身昂貴且時間成本高，不容許大量重複試驗及嘗試錯誤，因此設計者花費在 CAD 軟體的時間及成品材料的選擇就顯得格外重要。

我們對於工藝的中心定義在於製作時間、作者的耐心、手工的證據、稀有性、過程中的不確定性、製作時的決定與失誤的風險，以上因素產生作品的魅力和價值。而數位化過程過於線性、僵硬、精確導致失去人性是人們對於數位工藝產生的疑慮與困惑。儘管數位與手工在最終的作品中常常並存又彼此互相重疊，但當代工藝仍不能照風格定義，無論介質為何，工藝家是處於生產過程中的核心，結合了眼、手、腦，工具的掌握能力、材料、美感以及設計能力。

數位工藝因此必須被定義，利用新的數位思維概念與材料語言，核心為利用先進的技術，將作者既有的技術、美感、與材料知識結合數位工具，產生的作品才可被稱為數位工藝。

3. 電腦輔助設計/製造工具的選擇與應用

3.1 Design for Manufacturing(DfM)可製造性設計

3.1.1 Design for Manufacturing (DfM)

DfM 為用於產品開發領域的研究。DfM 的目標是開發資訊可以應用到產品設計以提高製作過程的生產能力。DfM 促使生產效益的重要改進，使產品的生產成本更便宜，品質更高，更容易服務，維護和更換 (Boothroyd et al., 2002)。

在運用 DfM 方法時，這些都是須要慎重的考慮進去：設計師需要適當的結構設計資訊，在設計時整合生產知識，選擇適當的材料，流程和組件，並評估替代設計方案(Boothroyd et al., 2002)。在 DfM 文獻中，往往專注於整合在一個孤立的單一問題，而忽略了它們之間的相互作用。

DfM 模型最初應用於產品開發，其應用從根本上依賴於兩個因素支持；實施啟發式的設計，整合了生產知識和生產評價指標(Boothroyd et al., 2002; Fox et al., 2001)。這樣可在他們變成耗時且極其昂貴之前更改設計。運用 DfM 方法的好處是將設計和生產週期縮短，提高組件品質，降低製造成本(Fox et al., 2001; Susman, 1992, Dertouzos, 1989; Boothroyd et al., 2002)。

3.1.2 DfM in Construction

相較之下，在分工越來越精細的建築行業裡，建築師卻尚未提供同等方法，仍是繼續依靠個人的經驗，並未將生產的知識經驗整合設計階段。也因此，Stephen Fox 主張“建築師應負責著手處理這無章可循的方法其不足之處。建築師的“典型的失誤“包括：指定不適當的材料，缺乏基礎建設的技術知識，不瞭解建造的可行性“ (Fox et al., 2001)。

為了檢試 DfM 在建築生產的適用性，我們使用非常詳細的檢查方法，尋找其在建築生產關係中的異同之處。在這次審查中，我們認同一個建築流程的改變：從傳統上建設流程一直是由現場的原料成型再裝配，轉變為結構組件裝配模式 (Groák, 1992; Fox, 2002)。這種模式是在現場組裝場外製造的部件(Gibb, 1999)。裝配組件模式構成一個基本的知識組織結構，以便在傳統建設系統的建築生產流程結合 CNC 數控加工技術下，發展 DfM 模式。在這項研究中提出的 DfM 模式是基於兩個基本的設計策略；實施啟發式的設計，整合了生產知識和生產評價指標相關的一些設計的可行性。

3.1.3 Extracting Design Heuristics and Metrics from Structured Design Experiences

在這項研究中，形容詞“啟發式”（或指特定的“啟發式設計”）是被用來代表一個流程，透過這個流程了解或找到啟發（Groner et al., 1983b; Groner et al., 1983）。該模式是不追求或提出一個類似演算法的方法，而是顯示在DfM方法的不同階段將如何連接，如何一個設計決策會導致另一個，在不同種類的問題方面追求其相關的解決方案。

3.1.4 Design Heuristics

相較於在固定規則（演算法）下無法做出改變，啟發式設計提供了一個架構來解決設計問題。在這種方式中，設計師使用一套步驟，用以促進解決設計任務，並成功地找到替代方案。在DfM中的一個典型的啟發式設計是“開發模組化設計”，因為如果一個設計模組相當於一個生產模組，這就意味著，生產時它可以被視為一個製造單元，這完全符合本研究對整合的提議。其他一些更細微但卻不可忽視的相關啟發像是“減少部件數量和部件類型”，在建築生產中可以轉變成“減少組件數量和組件類型”，其他像是“在鑄造時盡可能保持壁厚的統一”可在建築生產上對應類似的方式。

3.1.5 Design metrics

為了協助設計師開發可製造的零部件，啟發式設計必須輔與設計指標。這些指標必須客觀，量化，有助於測量組件的可製造性，提供設計師在設計的進展的即時反饋。高效率並有效的指標在不同的領域中被證明是成功的，由Boothroyd和Dewhurst提出這些假設和驗證有關產品的組裝(Boothroyd et al., 2002)。他們的成功在於簡單的使用這些指標（例如，每個人都可以算裝配零件數量）並連結到一個事實，即他們的指標對產品的裝配是有效的，並確實提供一個很好的衡量標準。

3.2 數位設計製造環境探討

三維列印機改變了物理建築模型可以製作的速度、成本、複雜性和一致性。如果建築師利用這個建模過程中的獨特能力，它必須要找到一個輔助手段來幫助概念化的設計和生成三維列印所需的幾何數據。VBScript 是用來在 Rhinoceros 建模環境內編寫執行設計所需的生成腳本。腳本產生數位幾何模型再輸出到三維印機。而編寫的腳本展現出創作者的設計意圖。腳本使用的方法是使用外部參數，生成一個數位的幾何模型。隨後列印模型的外型是計算初始參數，通過改變這些參數，一套設計方案可以生成並三維列印供進行比較。腳本和三維列印的結合允許複雜的設計意圖被管理在一個簡潔、可共享的格式中，且可反覆的模擬而無需人工介

入。

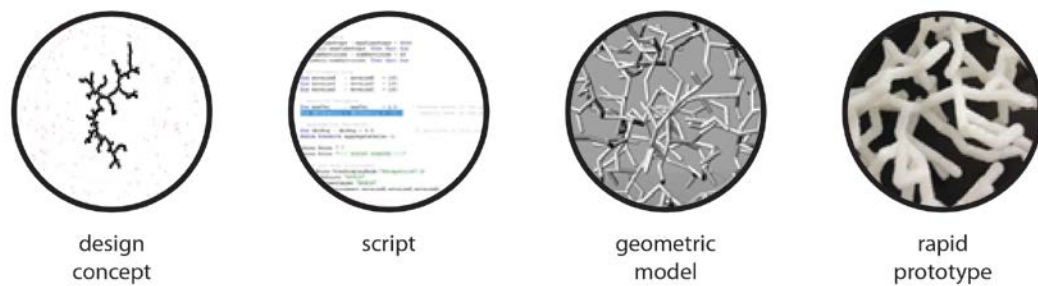


圖7. 透過 VBScript 發展 DLA 概念設計

建築師使許多構件透過此方法到完成設計。這些對象是獨立研究“我們將建築物或畫作或其他完美的的作品視為能夠體現、象徵、代表是相同的文物。” (Porter 2004) 建築設計不僅僅是一個產品，更必須要能用廣泛的文化來作為重要的過程，所以建築師應該利用構件來體現設計過程。這些構件將為本文中提到的進程對象。他們所代表的程序和反應能夠產生構建實體物件的必要的數據。一個程序物件可能編碼一組設計上的限制。程序物件可以提高設計參與者之間的合作，使人們能夠以一個明確的格式分享設計意圖，並根據自己的設計過程反思批判。此外，程序物件也可能與外部因素定義的實體設計環境有明確的關聯性。

由 Stiny 和 March 所描述經由特定的設計意圖為條件產生的設計背景，並藉由設計背景確定了與設計相關的實體物件的表現與建構。“他們改善了意義和目的的必要條件，讓設計必須符合意義並且讓如此設計的物件可以被建構或製造” (Stiny and March, 1981)。程序物件與外部因素有關，在設計過程的早期階段，基於環境性能標準繪製建築設計。此外，程序物件可以幫助建築師使設計意圖與製造的限制產生明確的關連性。

數位設計提出了一種架構，將程序物件作為設計的一部分。下文所提出的 DLA 例子，在 Rhinoscript 軟體環境中所編寫的腳本被用於定義設計意圖。腳本生成數位幾何模型再輸出到三維列印機。腳本、數位幾何模型、三維列印都可以被視為程序物件，因為它們在設計創作的整個過程中彼此鏈接。設計背景的定義則是由 Rhinoceros 軟體的建模環境和三維列印機的製造能力作為代表系統。

3.3 數位設計製造環境流程與分析

3.3.1 Generative Scripting

William Mitchell 在 1987 年於 *The Art of Computer Graphics Programming* 中提出使用腳本或編程來編碼設計理論的概念。Mitchell 建議以程式作為建築設計的生成機制。這本書遵循自 Vitruvius 建立建築設計的基本組成規則以來的傳統論文。不過，Mitchell 的書介紹的 rule building 語言，而不是組成規則本身。

腳本或終端用戶程式 end-user program (EUP) 是一組編寫於計算機代碼中的指令，並於特定的軟體環境中執行。腳本語言的編寫使用相同的基本結構，全面的編程語言：變量、循環、條件和功能。此外，腳本可以使用到母軟體環境已經編碼好的功能，或增加新的功能。不過在特定的軟體環境中腳本的編寫仍有限制。然而，腳本提供的只是適度的存取基礎結構，它允許一個代表個人和計劃的特定設計過程。本文件中所描述的程序物件 RhinoScript 是在 Rhinoceros (Rhino) 的 3D 建模環境中的腳本語言。RhinoScript 是基於由微軟公司開發的 Visual Basic 編程語言的基礎上。這裡描述的技術可以應用到建築設計上任何終端用戶所使用編程語言的或傳統的編程語言。



3.3.2 Digital Fabrication

數位構築一直遵循透過程式設計實體物件的意圖。三維列印機所製作的實體物件工常是由人工設計成數位幾何模型的。為了將數位模型交由列印機製造，數位模型必須轉檔成二維列印路徑。幾何模型需要分解成一系列像紙一樣薄的水平切片。列印路徑是源自這些切片並用於驅動列印噴頭。相較之下，第一台計算機數控 (CNC) 機器被開發出來，操作上直接從符號代碼描述機器路徑。這裡提出的架構回歸到使用代碼，在腳本的形式驅動計算機控制加工機。然而，腳本不直接描述二維路徑。腳本依賴於在母建模程式下的幾何抽象的編碼。腳本使用自動執行的建模程式而不是列印機。過程中體現的腳本並不逃避在傳統的 3-D 建模方案的結構 (點，線，面，體) 處理方式。依上述定義，在此架構內的三維列印機和 Rhinoceros 建模程式都是設計背景的一部分。Rhinoceros 定義實體物件是如何代表設計意圖有關，如何製作實體物件則由三維列印機決定。

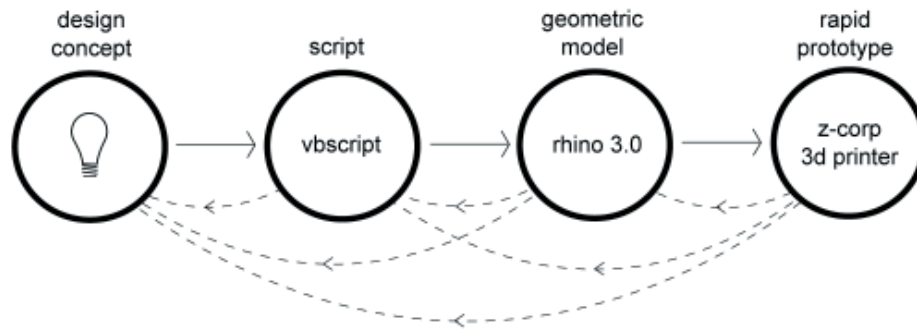


圖8. 數位設計/製造環境下的發展流程(Loukissas, 2004)

3.3.3 DLA(Diffusion Limited Aggregation) Experiment

當數位本身的精確、精密在工藝的定義下並非被視為優勢反而喪失其價值，如何加入新的介質使其產生質變，在既有的技術、美感與材料知識結合數位工具，定義出對數位工藝的新概念與材料語言是本次實驗的目標。

本實驗進行的方式將採用數位化的設計過程，利用複雜的電腦計算生成的造型使原先由人力可能效率過低或根本無法被完成的作品可被實現，並在設計過程中採用 RhinoScript 來創造屬於自己語言的工具。並在 CAD/CAM 實體化的過程中將既有的技術、美感、材料知識結合數位工具，產生精細、精緻的一次性作品。在數位化的創作過程中，避免產生數位特性中過於僵硬，線性等會使作品失去魅力的運算結果，並試圖加入一些不確定性的因子，確使每次操作的過程皆能產生出一系列看似相仿而實際上又具有不同的造型內容，利用此數位自動化流程發展出不可被取代性、不可被複製性的價值，來彌補原傳統手工製作過程中的不確定性與唯一性。

在作品的造型語法上，將採用 DLA 演算法，在有限的空間範圍中，利用隨機的動態粒子碰撞起始定義點，產生出類似珊瑚的枝狀結構，再進一步計算力學與材料的適切性，最後呈現出一個視覺上具有孔隙卻實體豐富的空間。

在相同的 DLA 演算法下，透過改變腳本中的參數設定，產生出一系列相同概念但結果不同的設計結果。即使是使用相同的參數設定，因為 DLA 演算法本身的隨機特性，也會產生出看起來相似實質上卻不同的成品。

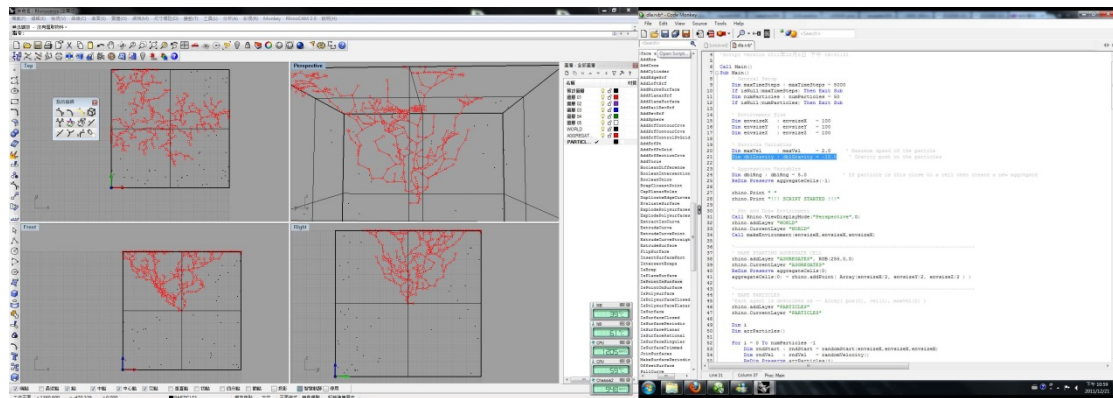


圖9. DLA 演算法下生成的樹狀結構

改寫腳本中的功能(生長範圍)，使粒子在特定範圍內產生碰撞，進而影響作品最終的外觀樣貌。

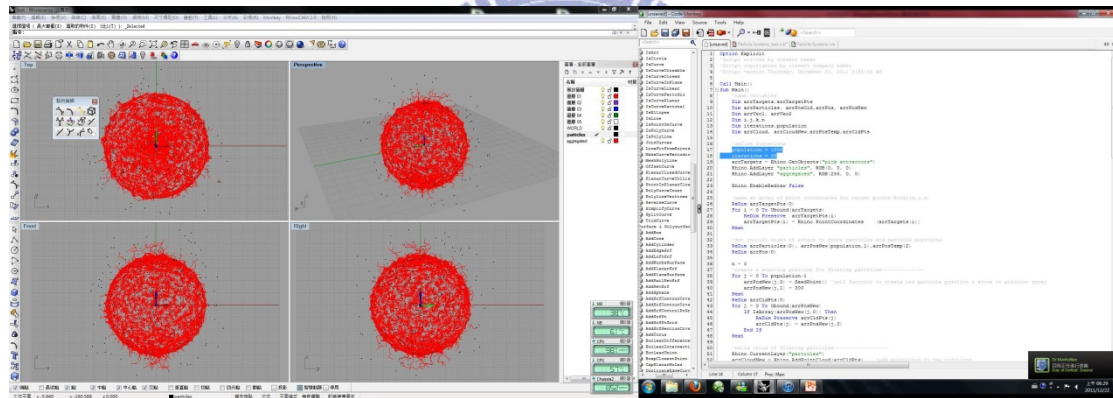


圖10. 在限定範圍內生長 DLA 演算法產生球狀孔隙珊瑚結構

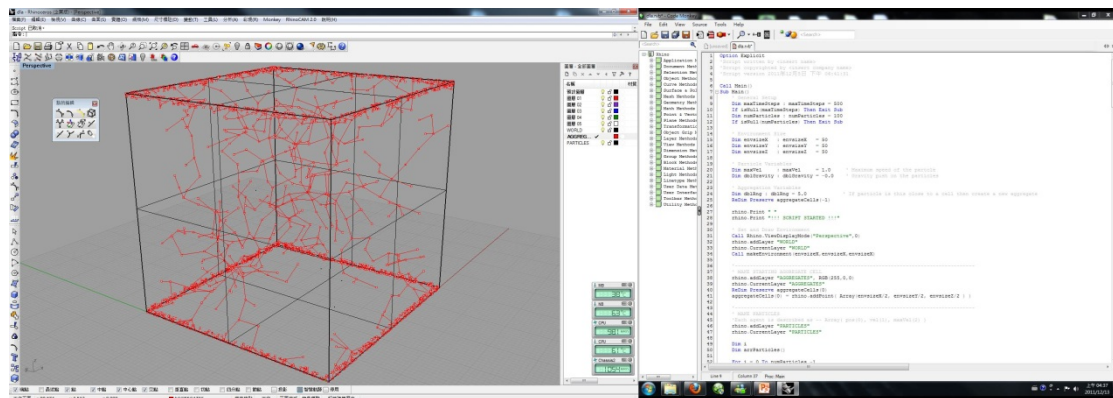


圖11. 以 VBScript 編寫在方形範圍內生長 DLA 樹狀珊瑚

利用 VBScript 所產生的概念模型，進入 Rhino 中進行編修，使其成為可輸出成 .STL 檔的三維模型。

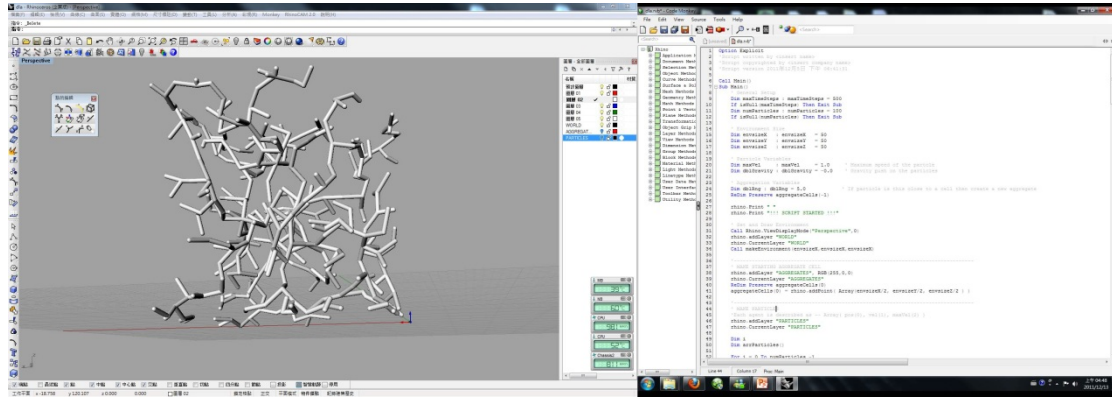


圖12. 在 Rhino 環境下模擬生成示意圖

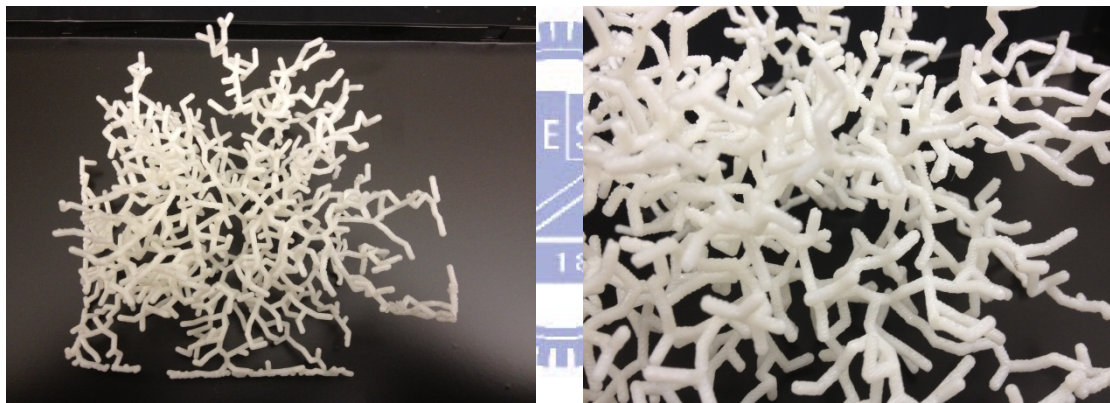
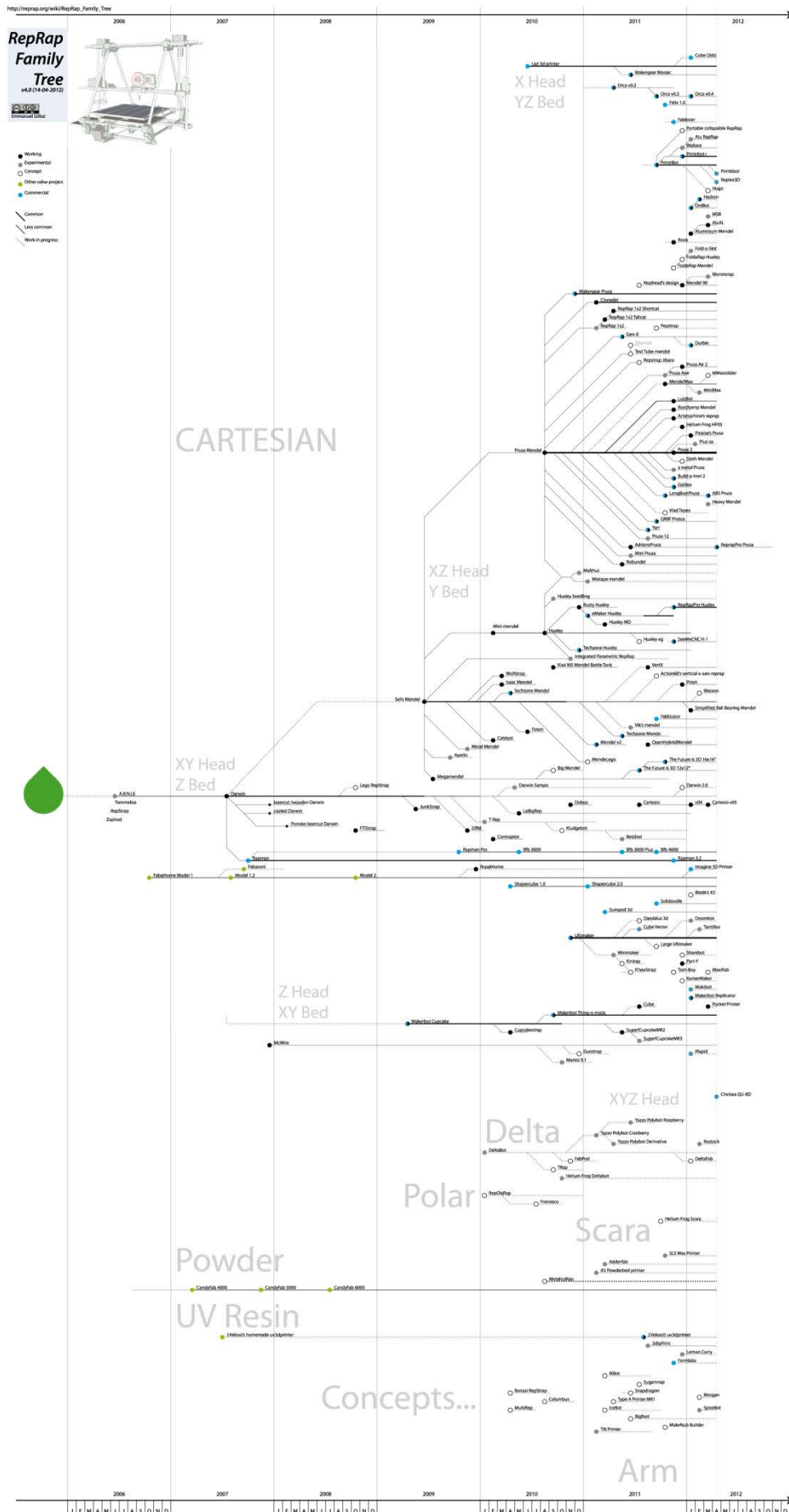


圖13. 將運算的結果輸出至快速原型設備產生的實體模型

3.4 數位設計製造 open source 硬體 RepRap 介紹

RepRap 是一種快速原型製作的開源桌上 3D 印表機. 由 RepRap 可以製作出大部份的設計原型。

負擔得起的 3D 印刷技術使人們能夠自行列印幾乎任何設計出的對象。一旦普及會對我們社會的造成強烈的影響。



3.4.1 RepRap

RepRap 是由螺桿組成的框架以及三維列印的部件所組成。一個平坦的構件平台垂直移動於框架中，由步進馬達連接螺桿驅動。在框架的頂部有兩個擠出頭水平地移動（由齒形皮帶和兩個步進馬達驅動），擠出的熔融塑料的細流在構建基層上形成新的一層。機器列印出一層又一層，形成了固體的物件。然後構建基層將下降一個增量，第二層繼續擠出，然後反覆的持續這樣的動作。機器有兩個擠出頭允許填充材料，第二個也是使用塑料。此填充材料用於支撐正在構建中的部件的懸垂部分，並在過程結束時將其移除。

規格

- 生成體積：230 毫米（X 軸）x 230 毫米（Y 軸）x 100 毫米（Z 軸）
- 工作材料：Polycaprolactone(聚己內酯)和填充/支撐材
- 配置：3 軸直角驅動器，使用步進電機
- 線和空間：0.5 毫米和大約 0.2 毫米
- 特徵尺寸：約 2 毫米
- 定位精度：0.1 毫米
- Z 軸定位解析度：0.3 毫米
- 材料處理：兩個固定的材料沉積擠出機，使用者可自行更換
- 所需電源供應：最大 6A，直流 12V 下連續 3A
- 驅動電腦和操作系統的需求：微軟的 Windows，Linux，Unix 或 Mac
- 外型尺寸：可調，但通常是 600 毫米寬 x 520 毫米深 x 650 毫米高

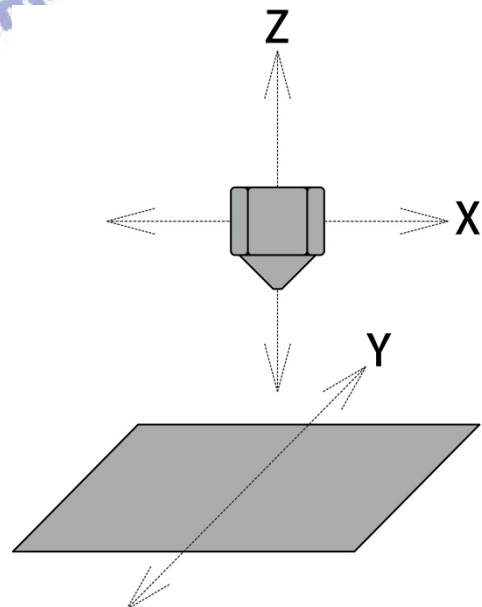
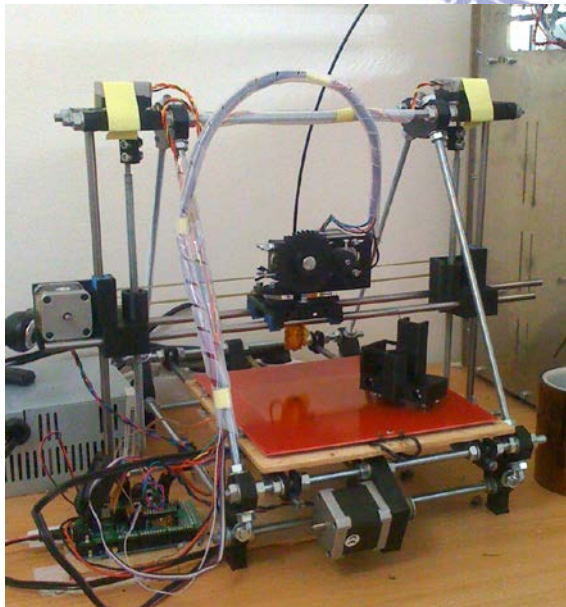


圖14. Prusa Mendel 的噴頭 XZ 軸移動與生成平台 Y 軸移動

(<http://reprap.org/>,2012)

3.4.2 CupCake CNC

CupCakeCNC 和 MakerBot 是一個的 RepRap 計劃的衍生。

MakerBot 的基本結構是：三維定位系統，工作用的擠出頭，電子驅動。

由於 CupCake CNC 是一台 MakerBot，它包含了所有這些元素。三維定位系統是一個標準的笛卡兒 (X, Y, Z) 的系統。其物理運動方向的配置：生成平台在 X 方向和 Y 方向移動，機頭安裝在 Z 軸並上升下降移動。X 軸和 Y 軸由皮帶驅動，Z 軸則是由螺桿驅動。

規格

- 生成體積：100 毫米寬 x 100 毫米深 x 130 毫米高
- X / Y 軸的定位分辨率：0.085 毫米
- Z 軸定位解析度：3.125 微米
- X / Y 軸進給速度：5000 毫米/分鐘
- Z 軸進給速度：200 毫米/分鐘
- 典型的 Z 層高度：0.3725 毫米
- 外型尺寸：350 x 240 毫米 x 450 毫米

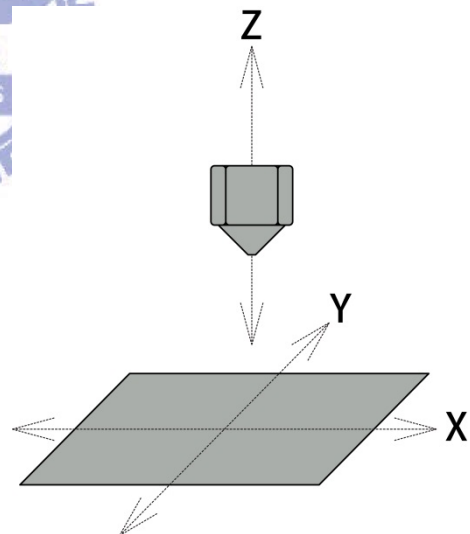
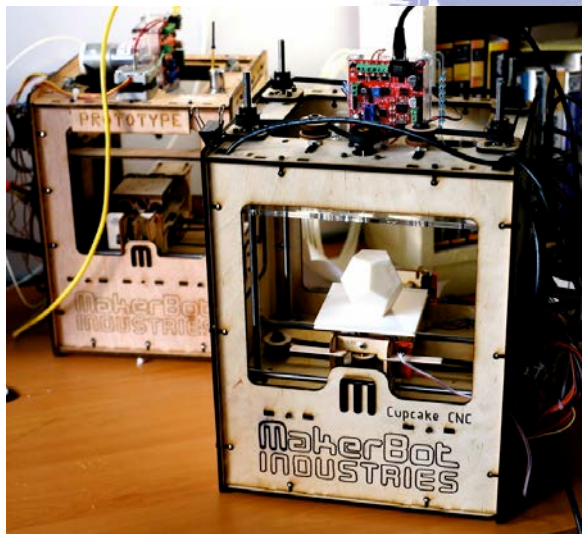


圖15. CupCake CNC 的噴頭 Z 軸移動與生成平台 XY 軸移動
(<http://www.makerbot.com/>, 2012)

3.4.3 Ultimaker

Ultimaker 有方形外框架，與水平移動的列印頭和垂直移動的生成平台，XYZ 運動又稱作“Cartesian bot”。

X，Y 和 Z 軸的運作是由電路板控制三個步進馬達。

第四個步進馬達是控制擠出頭，確保使適量的塑料絲在正確的時間提供給列印頭的噴嘴。

Arduino 的韌體將接受並執行命令來驅動步進馬達和列印成層。

規格

- 生成體積：210 毫米x210 毫米x220 毫米
- 工作材料：PLA 和 ABS
- 配置：3 軸直角驅動器，使用步進電機
- 速度：擠出頭最大行駛速度~400 毫米/ 秒
- 電子：最多支援達 5 具步進馬達。預設情況下為 4 軸
- 解析度：定位比<0.05 毫米更好（1/16 微步進）
- 外型尺寸： 340 毫米寬 x 355 毫米深 x 390 毫米高

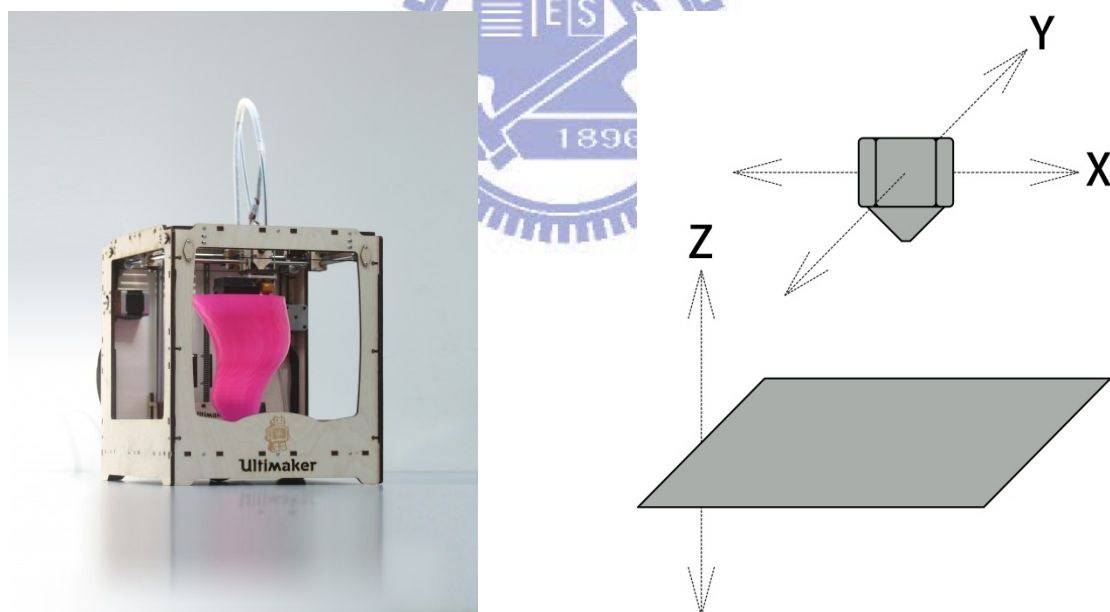


圖16. Ultimaker 的噴頭 XY 軸移動與生成平台 Z 軸移動
(<http://www.ultimaker.com/>, 2012)

3.4.4 軟體

ReplicatorG

ReplicatorG 是一套可用於 Linux、Mac 和 Windows 的免費軟體，它提供了一個控制面板，讓您可以檢視機具的功能：包括移動 X，Y，Z 軸、測試擠出機，並設置所需的溫度。

ReplicatorG 可以列印 STL 格式的 3D 檔案，將其切片成層，由擠出頭輸出列印出來。ReplicatorG 首先將 STL 檔案生成 G-Code，接著 Arduino 執行 G-Code 檔來驅動步進馬達，逐層列印輸出。

建議一開始是以一些簡單的校準檔案來測試。參數調整 - 舉例來說為不同口徑的噴嘴設定所需的流量(擠出頭布進馬達速度)，不同材料原料絲有其特定的工作特性，像最佳的熔融溫度。

Skeinforge

ReplicatorG 包含一個程式，它允許你調整你的 RepRap 的特定設置。它被稱為 Skeinforge。使用 Skeinforge 可以設置和更改每一個列印過程中的參數。Skeinforge 裡對生成結果造成影響的幾個參數，：進給速度（噴嘴運動速度），流量（供給噴嘴的塑料量）和每層厚度。反覆測試這三個參數將使你獲得一個穩定的結果。

特定的材料或物件的設定可以存在 Skeinforge 設定檔中，之後在不同的物件使用相同的材料來產生 G-code 時可以再叫出來使用。

3.4.5 3D 列印程序

加熱的列印頭（擠出頭）將熔融塑料沉積成層在生成平台上。然後生成平台沿 Z 軸降低一小部分，列印頭將沉積新的一層並與前一層熔合。平台再一次下降準備開始下一層，並持續這樣的程序直到結束。

生成東西的基本過程是：

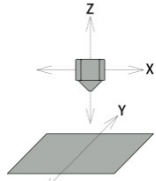
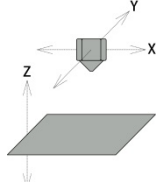
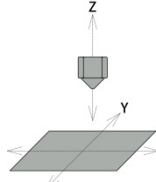
1. 設計一個三維模型（.STL）。
2. 使用 Skeinforger 將你的 STL 轉換成 GCode 檔。
3. 使用 ReplicatorG 運行 GCode，並生成模型。

4. 數位設計製造套件設計與實作

為了實際驗證能否透過 open source 硬體架構來幫助創作者打造個人化的創作工具，將實作出 DIY 的三維立體印表機套件，讓套件設計模組化，以及附加元件的實體應用為此章節的重點，並進一步於設計套件的過程中落實 DfM 方法，自設計過程至實體組裝符合數位設計製造流程，達到以設計者為出發點的數位製造套件。而本論文的操作選用，將採用最具有擴充性的電路控制元件進行實作，搭配工業化的機械元件以及少量的客製化元件，先行驗證數位製造套件對於創作者的應用。

4.1 數位設計製造 open source 硬體分析

前一章節所介紹的案例，經由雛形的規劃，進行各機種的分析，開始就其優缺點比較，選用最符合個人使用的硬體架構來達到理想效果，有可能將其實作架構為詳細的實體製作層面，相關特色優缺點比較表如下表：

物理運動方式	案例	元件特色	優缺點
XZ Head Y Bed 	Prusa Mendel	<ul style="list-style-type: none"> ● 以螺桿及 RP 元件建構機體外框架 ● 使用五顆步進馬達 	<ul style="list-style-type: none"> ● 較原始的 RepRap 架構 ● 可自我複製 ● 可擴充性最佳 ● 耐用度最差
XY Head Z Bed 	Ultimaker	<ul style="list-style-type: none"> ● 以夾板建構機體外框架 ● 擠出頭與送料馬達分離 ● 使用四顆步進馬達 	<ul style="list-style-type: none"> ● 生成體積與框架體積比最大 ● 生成速度最快 ● 耐用度最佳 ● 較易組裝
Z Head XY Bed 	Makerbot	<ul style="list-style-type: none"> ● 以夾板建構機體外框架 ● 使用四顆步進馬達 	<ul style="list-style-type: none"> ● 生成體積與框架體積比最小 ● 耐用度較佳 ● 較易組裝

到了這個層級，套件設計已進入將雛型規劃轉變成實體化實做的部分。然而，實際的問題在於，就算每種機體各有其特色以及優點，基於其本身硬體設計的限制，無法只取每項的優點綜合而成完美的套件設計，必須依使用者的需求，以及實際加工機具的取得搭配設計者的操作經驗，才能確實地知道該選用哪種設計優點，進一步搭配市面上的工業化規格品的取得，來形成有效套件設計達到使用者的需求。

本次的套件設計重點，以提高精密度及生成速度，擴大生成體積以及擁有最大可擴充性為前提，綜觀以上的分析，決定採取 XY Head，Z Bed 的物理運動方式為主架構，因為此架構可以在生成體積與框架體積比獲得最佳的比例，在最小的框架體積下產生最大的生成體積，擁有最佳的空間利用性。

在馬達的使用上也以最小數量四顆步進馬達為前題設計，因為越少的馬達數量對於電子控制板在電流的負擔越小，在初期架構下越少必須的馬達使用對將來的擴充性也保留的越大。

在機體外框架上材料的選擇以較易加工的壓克力板材為主，因為壓克力板材在加工上使用雷射切割，相對於夾板必須使用 CNC 在時間效率上能有較佳的解答，雖然 CNC 加工對於尺寸上的精密度較雷射切割準確，但雷射切割的精密度也能由經驗上控制雷射切割功率來做微調而獲得相近於 CNC 加工的精準度，且壓克力板材在結構上的密度以及硬度對於耐用性也較夾板好，在不考慮保留此套件的自我複製能力以及實際能取得的加工機械為考量下，以壓克力板材為套件主體結構是本研究的選擇。

在套件的擠出頭與送料頭的設計上，採取了分離式的設計，雖然這樣的設計會增加機構的複雜度，但對於擠出頭重量的減輕有相當大的助益，擠出頭重量一但減輕，對於負責它 XY 軸運動的兩顆馬達負擔減輕，避免馬達長時間運作下產生過熱而造成失步的現象，失步往往是此類型機體在長時間工作下會發生的狀況，不但對生成實體物件的外觀出現瑕疵或更甚者失敗，馬達過熱對馬達本身的耐用度也是一種傷害。而重量減輕所帶來的好處便是生成的速度加快，對於時間效率上有相當顯著的優勢。

透過上述的分析，歸納了 DIY 數位製造套件的特性需求，整理了基本架構與組裝元件的設定，然而，若需要將其實體化，需要再進一步思考實際於設計以及製造時，設計者對於數位設計環境與數位設計製造環境的設計/製造流程問題，故接下來會針對設計流程做說明。

4.2 數位設計製造 open source DIY 套件設計

由於本研究所提出的數位設計製造環境需經由 DFM 方法來做前期的設計規劃，並以設計指標在開始製造前做考量，而本次 DIY 數位製造套件也將在數位設計/製造環境下進行，因此將以完整的數位設計製造流程進行，先將所購買的實體機械元件進行尺寸的測繪，再以 CAD 環境下做整體架構的繪製，將需求的元件尺寸以及實體機械元件配置進整體架構中，接著在 Rhino 3D 環境中生成模體立體圖，以此檢視是否有產生元件之間彼此干涉的情況，並進行尺寸上的更動與架構調整，進一步模擬完整的設計下機械運作的路徑，最後將設計完成圖在 CAD 環境下輸出至雷射切割機進行製造。

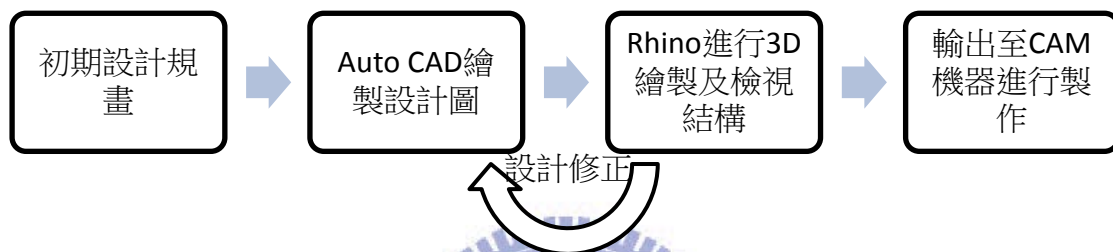


圖17. 套件設計流程

4.2.1 CAD 設計規劃

初期先在 CAD 環境中描繪出預期的整體架構輪廓及配置，並將計畫採用的機械元件進行尺寸繪製，配置到主結構上，在此階段以三視圖的方式簡單的檢視彼此的關係位置，對於設計者而言，在單一平台中需憑過去的經驗需判斷是否整體結構有干涉以及不合理的地方，已能快速於設計階段驗證想法與設計間的可行性，但對於數位設計流程仍須以量化的設計指標來評估整體架構，在此所採用的方法是進入 3D 環境輔助設計者僅行模擬操作。

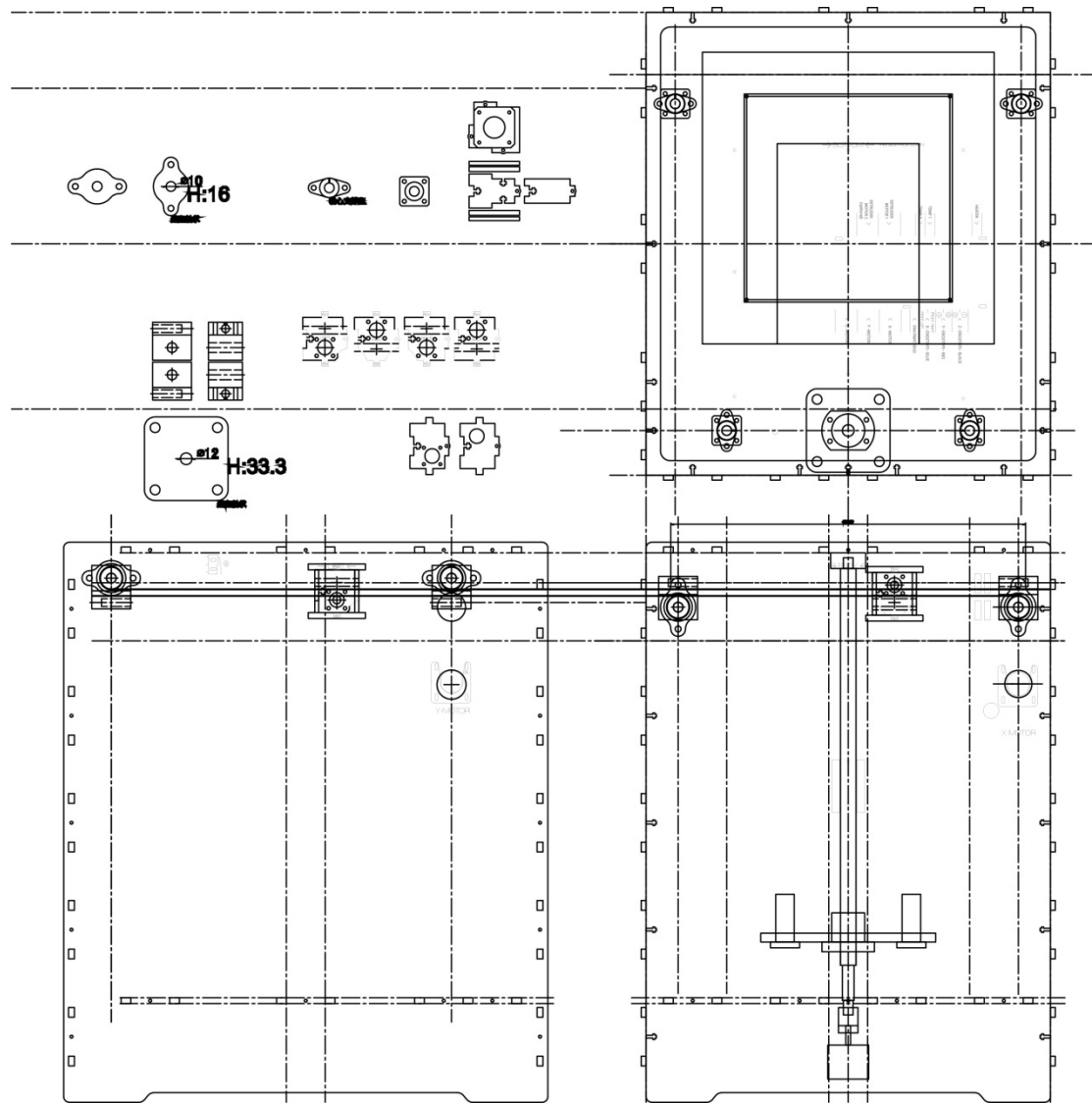


圖18. 套件設計圖 Layout

4.2.2 3D 環境檢視

在此階段將進行設計指標評估，將前一階段所繪製的2D圖面匯入3D建模軟體 Rhino中，利用3D環境視覺化模擬的優勢，完整的建構出整體的架構及所有元件的位置，反覆地審視檢查干涉的情況，並於2D AutoCAD及3D Rhino平台中來回轉換修正錯誤。

由於一個元件的設計決策可能會導致另一個結構問題，試圖在不同種類問題方面追求其相關的解決方案。利用數位設計輔助軟體來進行設計評估，將製造的錯誤風險降低，提供設計師在設計的進展的即時反饋。

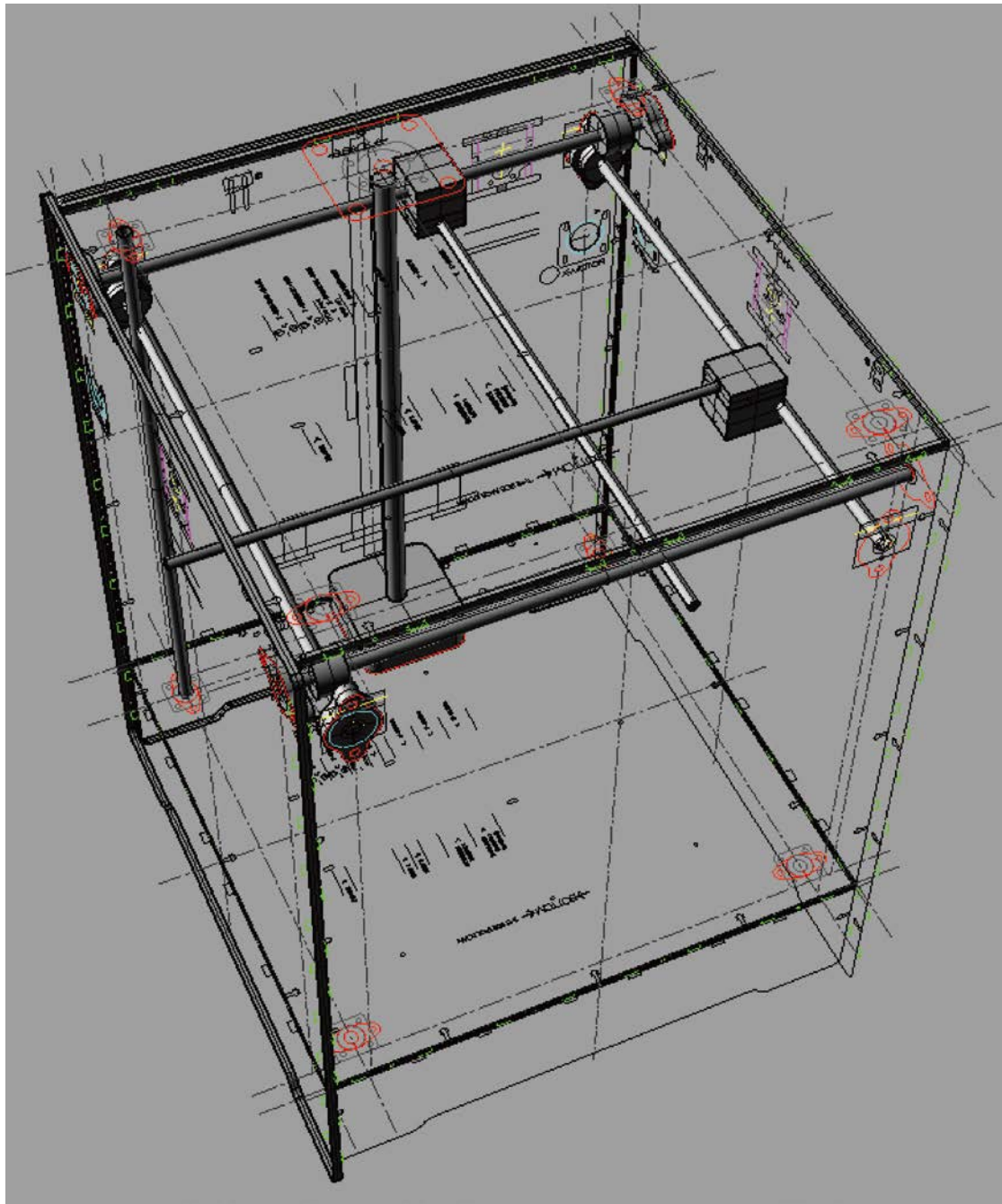


圖19. 套件 3D 環境建模

4.2.3 CAM 輸出製作

在完成最後的設計評估後，將修正過的設計圖面排版規劃，輸出至雷射切割機，進行壓克力板材的裁切，此階段須以經驗輔助雷射功率的調整，因為雷射切割會產生一定量的尺寸誤差，對於數位設計的精密組裝有確實的影響，必須反覆的嘗試出最佳的功率組合，避免微小的誤差累積造成日後組裝上的困難與錯誤。

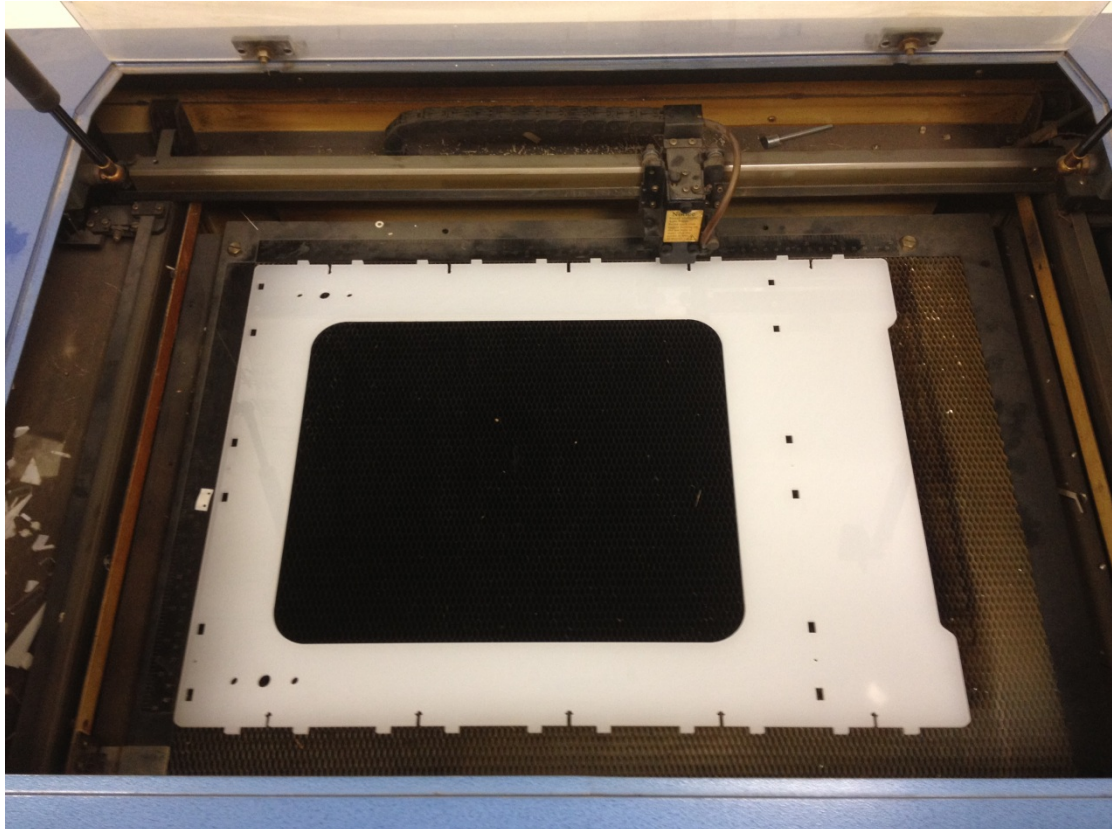


圖20. Laser Cutting 製作外框架構

4.2.4 細部元建設計

前述階段已依照數位設計製造流程完成主要的結構及元件設計，但仍有少部分元件須以傳統加工方式製造，此類元件屬於精密加工的部份，如擠出頭、加熱塊、以及少數其他須以金屬加工製成的元件，此階段的設計仍於 2D 環境下進行，對於加工的原件在尺寸上需有完整的標註，因為在此時的加工是以委外廠商施作，與數位製造不同的是數位製造只需將檔案輸出製加工機器便可進行，產生尺寸精確地完成品，傳統加工是以人工代替電腦與機器，所以圖面須有完整的尺寸標註與三視圖，甚至於像螺牙的攻牙規範也須註明於施工圖上，其餘像材質的選用也須加以註明。

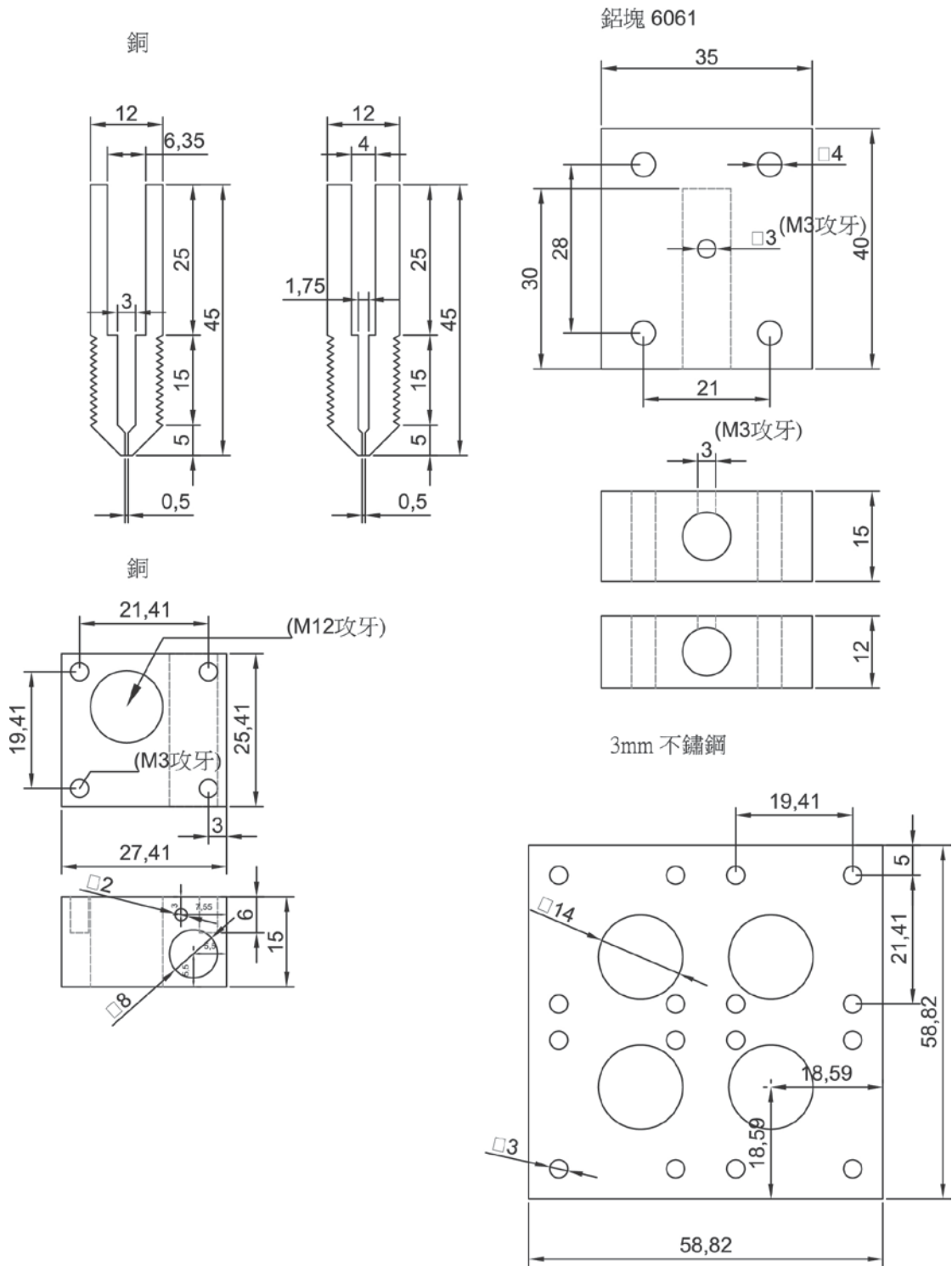


圖21. 擠出頭及加熱塊施工尺寸圖

4.2.5 傾斜平台設計

由之前 DLA 實驗的操作經驗以及成品檢視，可以發現利用 FDM 式的快速原型機所製造的成品，由於生成原理以及材料限制，成品在外觀上除了層積式的外觀特徵明顯，生成的過程也需要支撐材的輔助，才能完成跨距較大或角度超過 45 度的設計。有鑒於以上問題，本研究試圖開發傾斜式生成平台套件以解決 FDM 式快速原型機的生成限制，並期許利用此生成平台能使成品的外觀特徵擺脫工業化的印象，使成品能有較佳的表面精緻度。

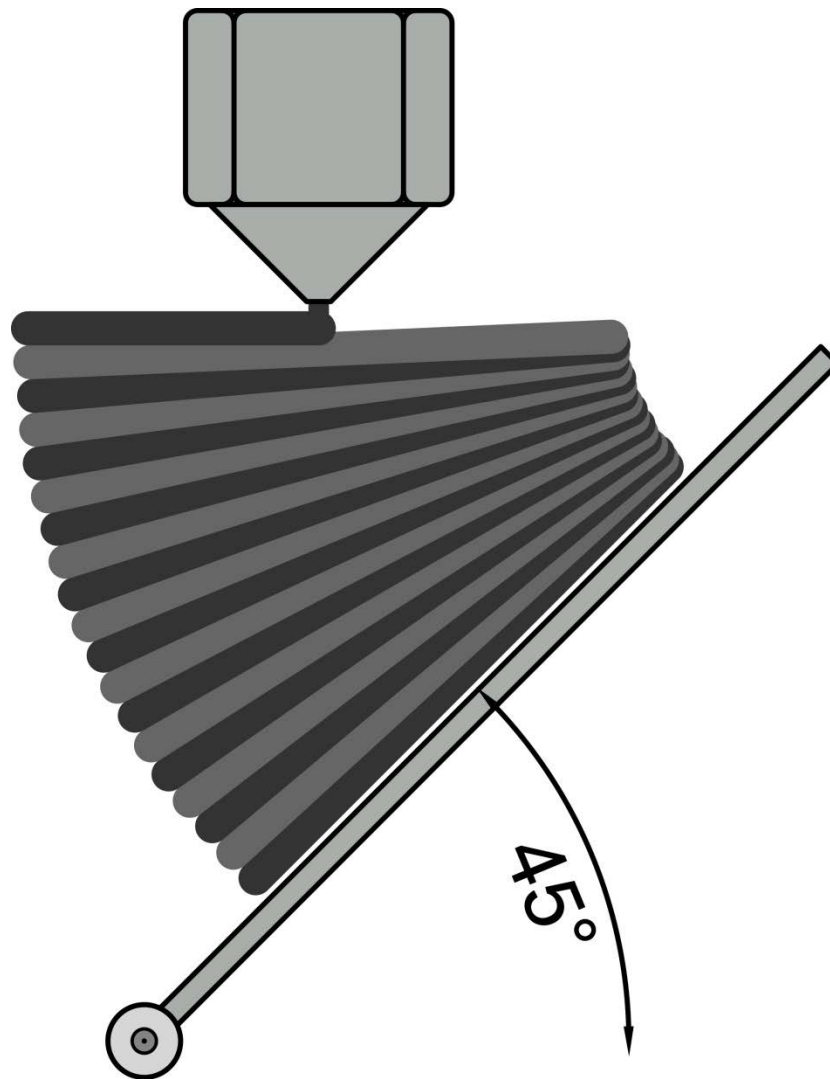


圖22. 傾斜平台生成過程示意圖

加入傾斜生成平台，當生成的過程在每次完成一層的程序後，除了 Z 軸會下降一層的高度，控制傾斜生成平台的馬達也會轉動，使平台與原 XY 平面產生一個夾角的角度傾斜，此角度需經由生成物件的外觀曲線所計算出來，才能使成品的外觀特徵順應外觀的自由曲線，產生細緻且較有手工化的表面。

傾斜生成平台的初始概念是以各可轉動 90 度軸向的雙層平台結構，以達到接近三維的平台傾斜度。在傾斜生成平台的設計上，第一層將馬達配置在 X 軸向，第二層將馬達配置在 Y 軸向。平台上方留有鎖孔保留加入 Heat Bed 的擴充性。

傾斜生成平台的結構以 3mm 壓克力板構成，考量到平台本身的重量以及轉動時的穩定度、精確度和順暢度，在每個軸向的兩端各配置一個 NEMA17 步進馬達。

在完成傾斜生成平台的初始概念後，同樣於 CAD 環境中繪製設計圖(圖 23)。

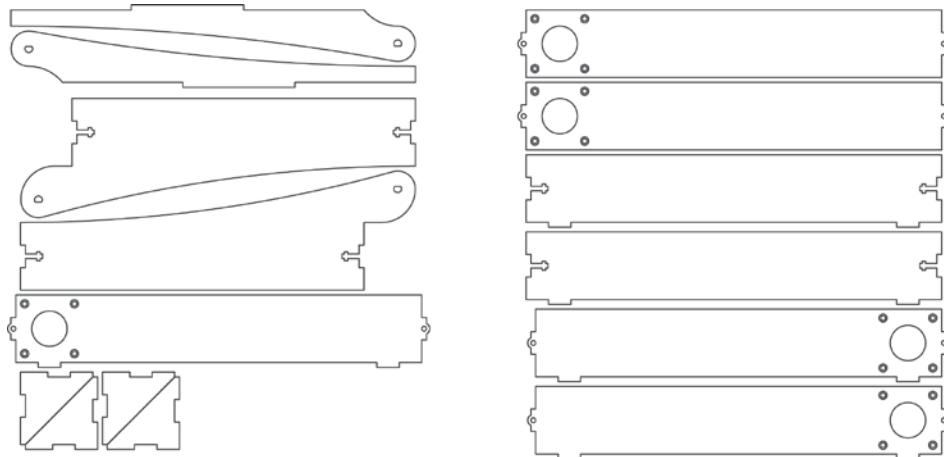


圖23. 傾斜平台 CAD 設計 Layout

在 CAD 環境完成 2D 設計圖後，進入 3D 的環境模擬組裝，檢視設計是否有干涉。

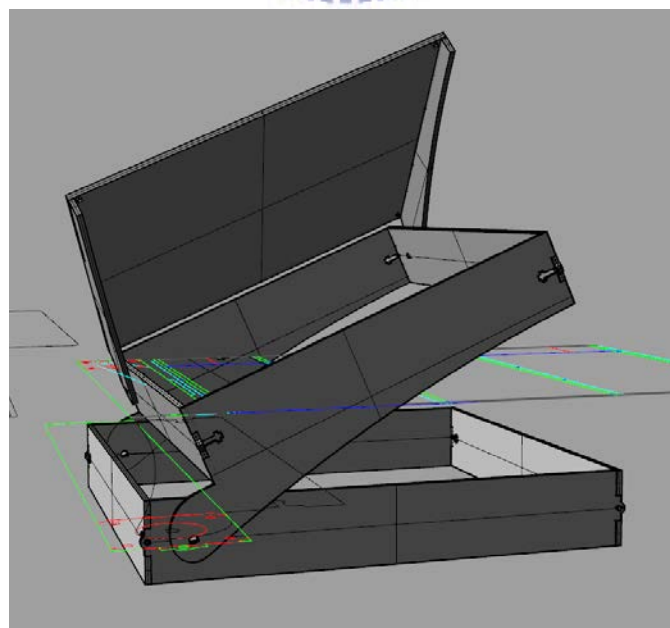


圖24. 傾斜平台 3D 環境檢視

4.3 數位設計製造 open source DIY 套件實作

擠出噴頭上方 XY 軸運動方向結構，主要零件以兩個直線軸承 LMK-8UU 作為主要的滑動結構，線性軸承是由鋼珠之轉動運動的直線運動機構，構造簡單可獲得低摩擦的直線運動。在圓筒形狀的外筒中套入保持器及鋼珠，在兩側端部以止動扣環將保持器固定於外筒上。保持器上的導引迴路使鋼珠能夠順暢地循環滾動，以獲得圓滑且順暢的直線運動。

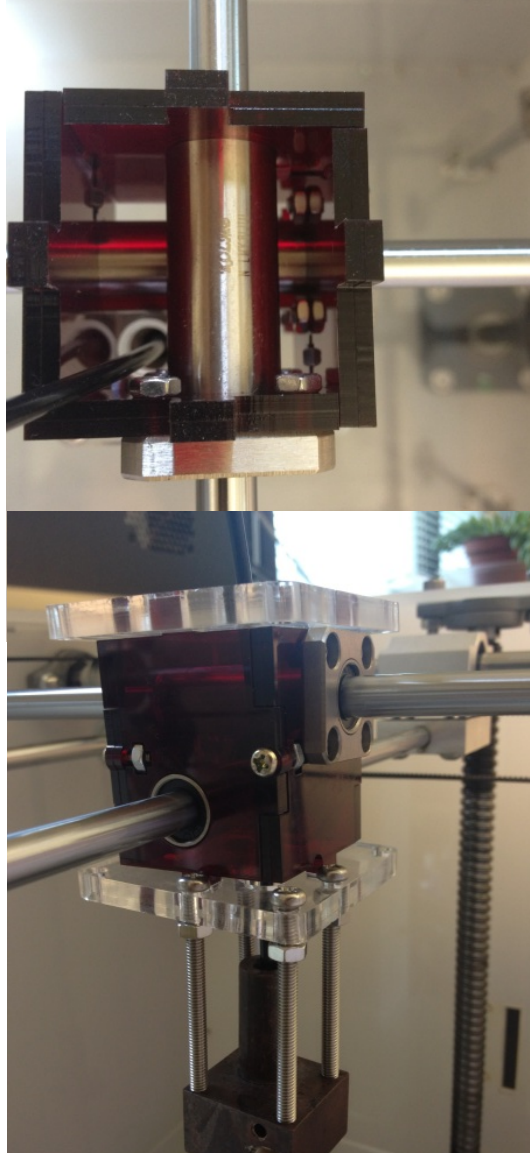


圖25. 擠出頭運動機構外觀

XY 軸運動四周方向主要以四個 SC-10UU 直線軸承為主體架構，上方以訂製鋁塊鎖緊固定 2GT 時規皮帶，時規皮帶為步進馬達所帶動，控制 XY 軸的 SC-10UU 沿著 10mm 鍍鉻軸棒運動，同時上方的鋁塊也固定 8mm 的鍍鉻軸棒控制中央的擠出噴頭在 XY 方向的運動，四周的 10mm 軸棒與中央 8mm 軸棒不同的是除了提供直線軸承的運動路徑，在步進馬達以 2GT 時規齒輪帶動皮帶時，也會帶動皮帶連接到的 10mm 軸棒進行轉動提供軸棒本身相垂直方向的直線軸承滑動。

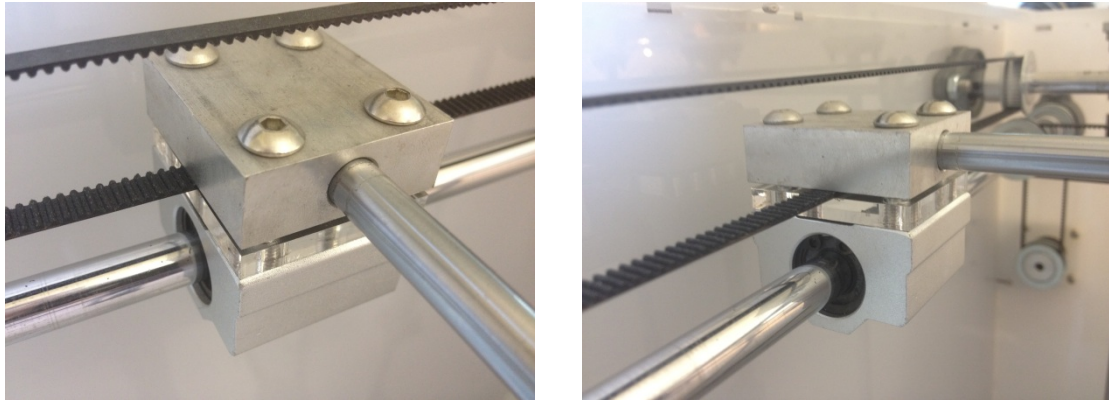


圖26. 四周皮帶牽引滑塊

由於四周 10mm 軸棒除了成為路徑也需要本身轉動傳遞動力，因此在兩端的固定上不能完全鎖死，因此兩端採用迷你型連座軸承 UFL000，為軸棒本身固定的同時也能為其提供轉動的穩定性以及順暢度。



圖27. 迷你型連座軸承以及時規齒輪

XY 軸的動力來源由 NEMA17 步進馬達藉由訂製的 36 齒 2GT 時規齒輪以及時規皮帶傳遞(圖 28)，步進馬達採用的是雙極性驅動、四線式、步距角 1.8 度。

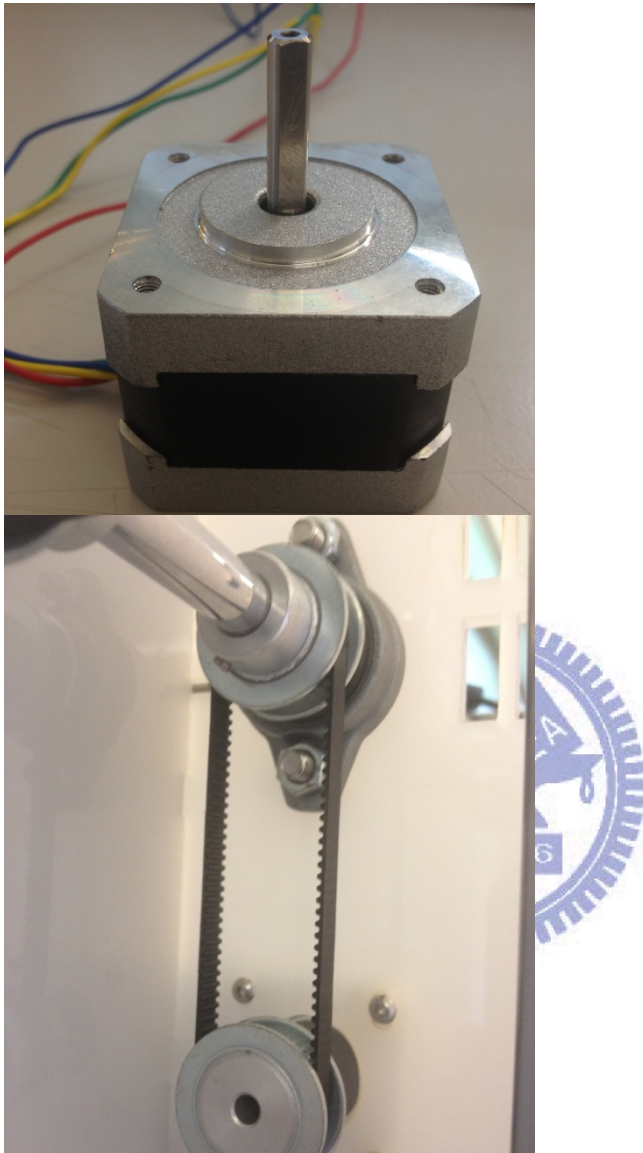


圖28. NEMA17 步進馬達

Z 軸的運動使用滾珠螺桿，滾珠螺桿 (Ballscrew)，是一種鋼珠介於螺帽與螺桿之間做運動，將傳統螺桿之滑動接觸轉換成滾動接觸然後再將螺帽內的鋼珠迴轉運動轉為直線運動的傳動機械組件。滾珠螺桿具有定位精度高、高壽命、低污染和可做高速正逆向的傳動及變換傳動等特性，因具上述特性，滾珠螺桿已成為近來精密科技產業及精密機械產業的定位及測量系統上的重要零組件之一。

使用滾珠螺桿可以提供較一般螺桿更為精確的定位，對於完成品的精細度有決定性的關鍵，因為完成品的表面細緻程度是由每層的高度所決定，滾珠螺桿能提供更精準更細微的 Z 軸移動，穩定性也較一般螺桿佳。

在馬達的負荷上由於轉動較一般螺桿更為順暢使的馬達負荷更輕，缺點為造價比一般螺桿高上數十倍，尺寸的選用及牙距在設計上需注意，傳統 RepRap 所使用

的牙距為 1.25mm，不過可以藉由 Arduino 韌體修改優化定位精準度，所以在此處的滾珠螺桿牙距為 5mm 並未照原始韌體中所採用的滾珠螺桿牙距。



圖29. Z 軸使用滾珠螺桿

在 Z 軸的兩側也安裝了兩個直線軸承提供生成平台的穩定性及順暢度，在滾珠螺桿的上方以及下方另需安裝連座軸承提供直線定位及轉動時的順暢度，而步進馬達連接滾珠螺桿則需訂做連軸器以連接馬達軸心 5mm 以及滾珠螺桿端 10mm。



圖30. Z 軸步進馬達與聯軸器

送料馬達以固定在機殼處而非一般固定於擠出頭上方的方式將 ABS 透過 PTFE 軟管送至擠出頭，使用 PTFE 軟管是利用其高滑順度以及高耐熱性~260 度，避免軟管與擠出頭端因加熱 ABS 的高溫而造成熔融阻塞擠出噴頭。在軟管的兩端須以水管止逆管束固定(圖 31)，避免因 ABS 在送料過程中因擠出壓力過大造成軟管滑出擠出頭端。

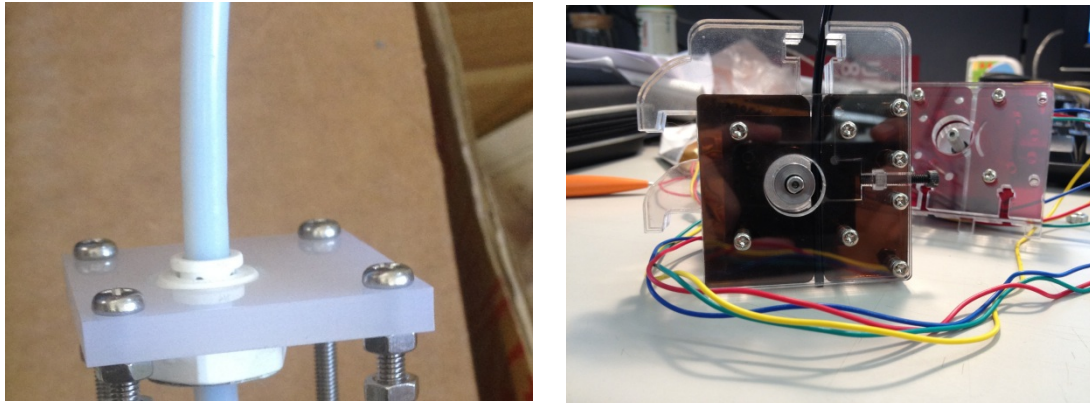


圖31. PTFE 軟管與止逆管束

擠出噴頭為訂製的銅製品(圖 32)，因應未來擴充性，設計兩組，一組為使用 3mm 的 ABS 條，一組為使用 1.75mm 的 ABS 條，兩組噴頭噴嘴孔徑皆為 0.5mm，因孔徑過小在加工時須以氣體放電作精密加工。加熱塊也為銅製訂製品，上有兩孔可為安裝加熱用繞線電阻與熱敏電阻安裝使用。所採用的繞線電阻規格為 10 歐姆 \pm 1%5W，熱敏電阻的規格為 100K。





圖32. 擠出噴頭及加熱塊，加熱電阻，感溫電阻



以上所有的元件及架構組裝完成後，須就水平以及皮帶的鬆緊度作微調，完成後整體如圖 33。

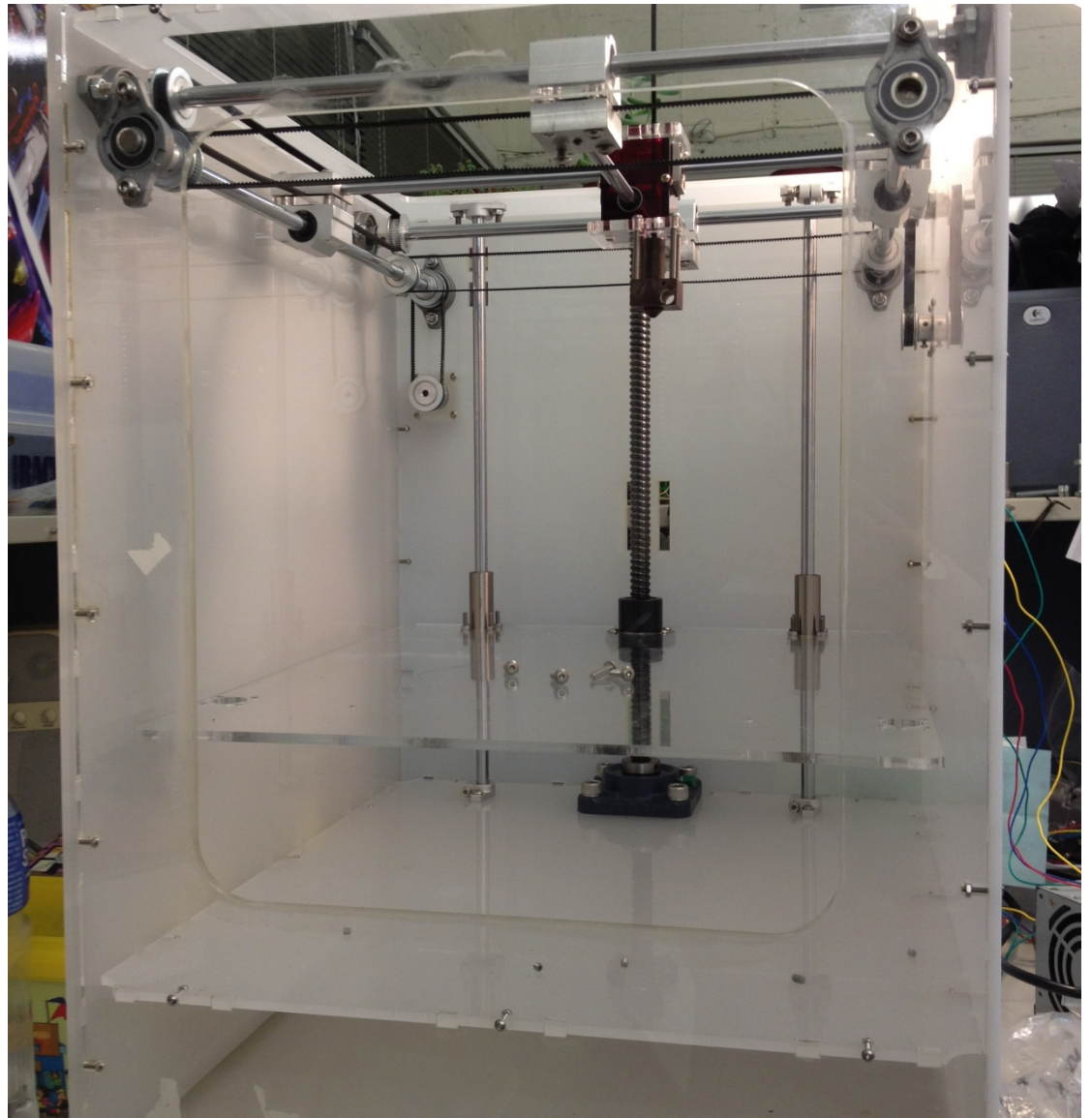


圖33. 套件組裝完成圖

在完成套件組裝後也將傾斜生成平台組裝完成，並在平台上安裝 Heat Bad。

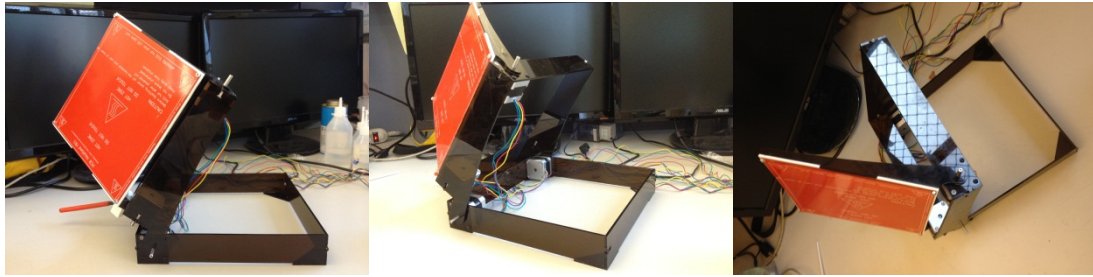


圖34. 傾斜生成平台組裝完成圖

將傾斜生成平台安裝上套件之前，先將馬達接上 Arduino 進行硬體測試，確認馬達運轉正常，但是在測試的過程中發現由於平台重量的關係，馬達無法順利將平台舉起。而如果選用更大的馬達，由於馬達是安裝在平台本身架構上，整體重量依然會增加，馬達仍舊無法順利舉起本身再加上平台的重量。

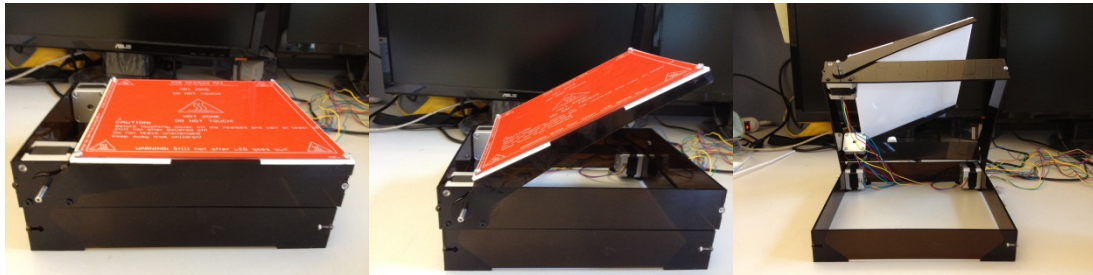


圖35. 傾斜生成平台開闔測試

傾斜生成平台由於整體結構上設計的重量問題，無法順利完成上機前測試，而這在之前的 CAD 環境中是無法透過所使用的軟體進行模擬預測的。由此次經驗可知，平台與馬達需做成分離式設計，以減輕馬達的負擔。



圖36. 傾斜生成平台可開啟最大角度 90 度

將傾斜生成平台安裝置套件上，測試後可以發現由於傾斜式生成平台的重量過重，造成套件的 Z 軸馬達負擔過大，也無法順利將 Z 軸進行升降動作。

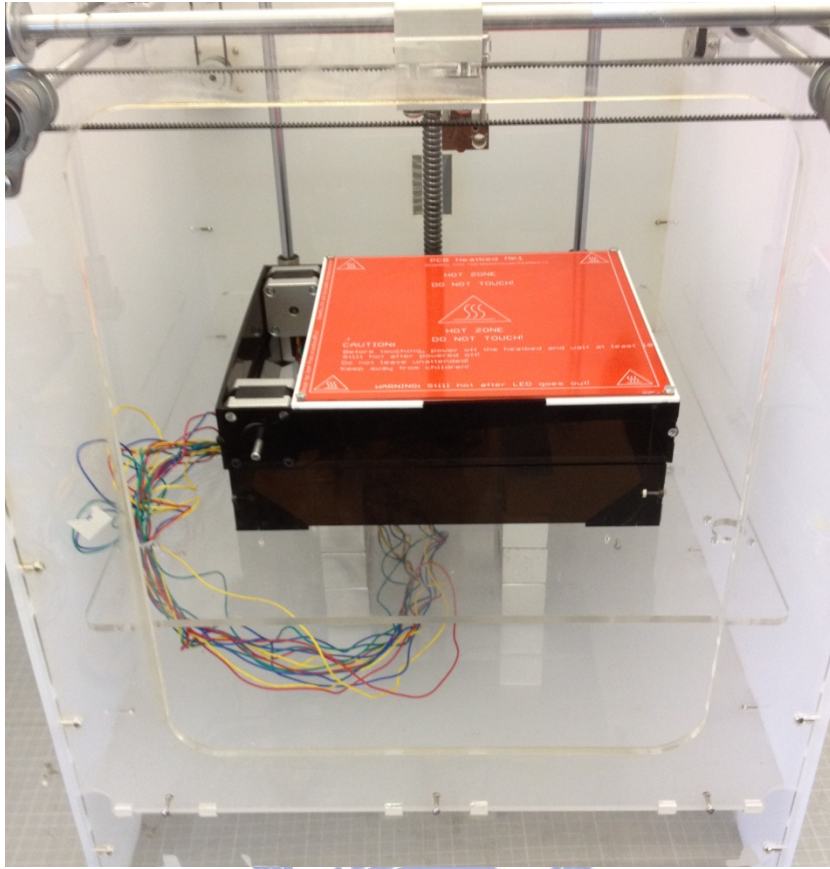


圖37. 套件安裝上傾斜生成平台

由於前述的原因，生成平台在安裝上套件後仍無法順利進行操作，在接下來的測試結果僅能以 3D 示意圖表現。



圖38. 傾斜生成平台上機模擬開闔

在電子控制板的部分採用的是 RAMPS 1.4 與 Arduino Mega 2560，電源供應以兩組 12V，一組為 5A 另一組為 11A，使用此電子控制板組合的原因為其可進入 Arduino 韌體端進行個人化的修改程式碼，為個人使用上的需求作更改，並保留第二組擠出機步進馬達的接口，也提供了伺服馬達的輸出端，為將來的擴充性保留了最大的可能性，可傾斜生成平台也可利用第二擠出頭用步進馬達或伺服馬達端做個人化需求的擴充。相關配置如圖 39。

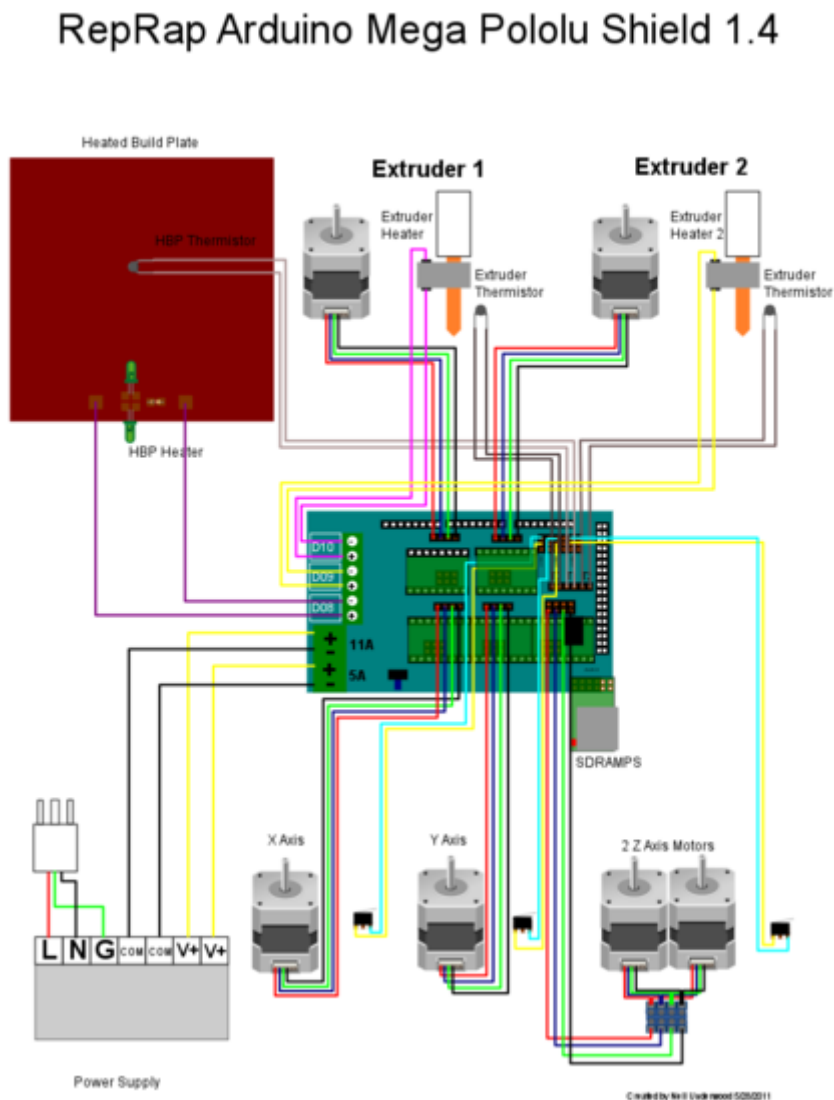


圖39. 電子零件配製圖

在完成上述後，我們試著將套件連接上可傾斜式生成平台進行測試，可傾斜式平台以兩具步進馬達驅動平台的傾斜，步進馬達在電子控制板上的接口端原始設計為提供第二具擠出噴頭所使用，為提供傾斜式生成平台 G-code 訊號，須將 skeinforge 韌體作修改才能順利產生出傾斜角度訊號，此處我們先以人工手動編寫 G-code 代碼代替電腦自動生成運算。

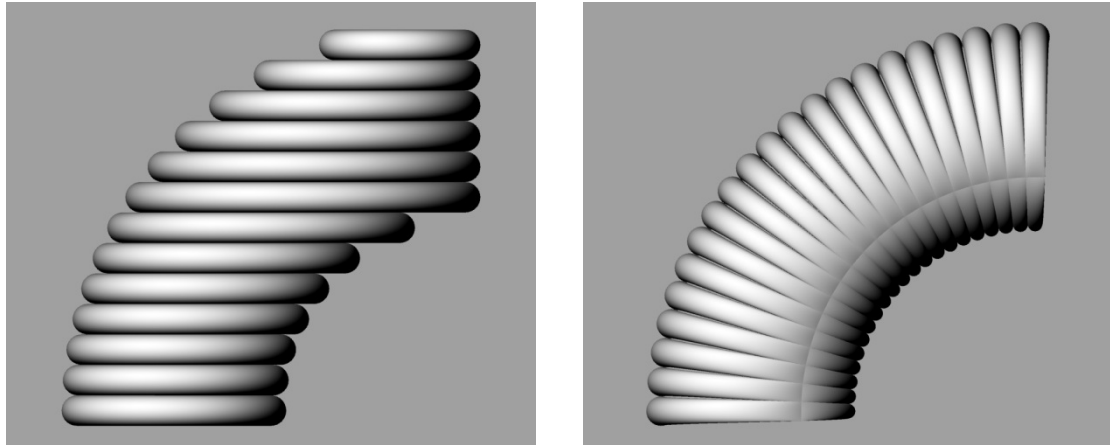


圖40. 生成結果 3D 示意圖

由上圖可見，左圖為未使用可傾斜生成平台所產生的原始模型，右圖為使用可傾斜生成平台所產生的新模型，左圖由於生成平台僅能沿 Z 軸上下移動，所產生的模型在視覺上較為生硬僵化，具有工業生產的外觀特徵，而右圖由於平台除在 Z 軸上線性移動外，還可針對模型每層的生成法向量作相對應的傾斜角度，相較之下，產生的成品在視覺細緻度上較佳，更貼近於傳統工藝的外觀特徵。

透過示意圖可得知，利用傾斜生成平台所生成的結果有可能會造成因傾斜角度產生的空隙。要解決這個問題，可以透過編寫修改擠出頭步進馬達的 G-code，讓擠出進給速率隨著因傾斜所造成的高度差變化，在離傾斜轉向軸心越遠，進給速率就要越大，讓擠出的量更多，以填補因傾斜後造成的空隙問題。

通過上述討論可以得知，在未來的研究中，為了解決空隙以及生成平台傾斜後，整體平面座標軸重新定位等問題，避免手動修改 G-code 編碼可能造成的失誤，針對自動生成 G-code 軟體的編寫將會佔很大的因素。

可傾斜式平台除提供最後成品在外觀上的細緻度，對於支撐材的使用也可減少甚至在合適的 G-code 運算編寫下，可完全免去使用支撐材的可能性。此外，在結構強度上，由於原始的生成方式會造成成品在側向剪力的結構為最弱，因其生成流程是以 2D 等高輪廓線層層堆積而成，在使用可傾斜生成平台後，成品的堆疊方始在結構上更趨近於 3D 的成形方式，在結構強度上也更能承受對應不同方向的施加力量，用有更佳的结构性。

4.4 實際應用與設計案例操作示範

在組裝完成後，需在 Arduino 中安裝韌體，在此選用的是 Marlin，一個基於 Sprinter 所開發出來的韌體，改善了 Sprinter 的一些缺點，使運算的速度更快，完成的表

面更細緻，支援弧形的運算，自動控溫...等。而電腦端的介面操作程式則採用了 Pronterface，以圖形介面面對使用者，使操作更直覺，並內嵌了 skeinforge，使其能接受 3D 模型檔並進行切片運算產生 G-code。

在開始使用 3D 列印的功能之前，我們必須先進入 Arduino 的韌體進行修改，因為本次設計的套件可生成尺寸為 RepRap 的兩倍大，且所使用的元件規格也非制定尺寸，因此必須針對精準度進行調整優化，使最終的生成物件能擁有最佳的表面細節。

操作的電腦端軟體介面 Pronterface 如圖 41。

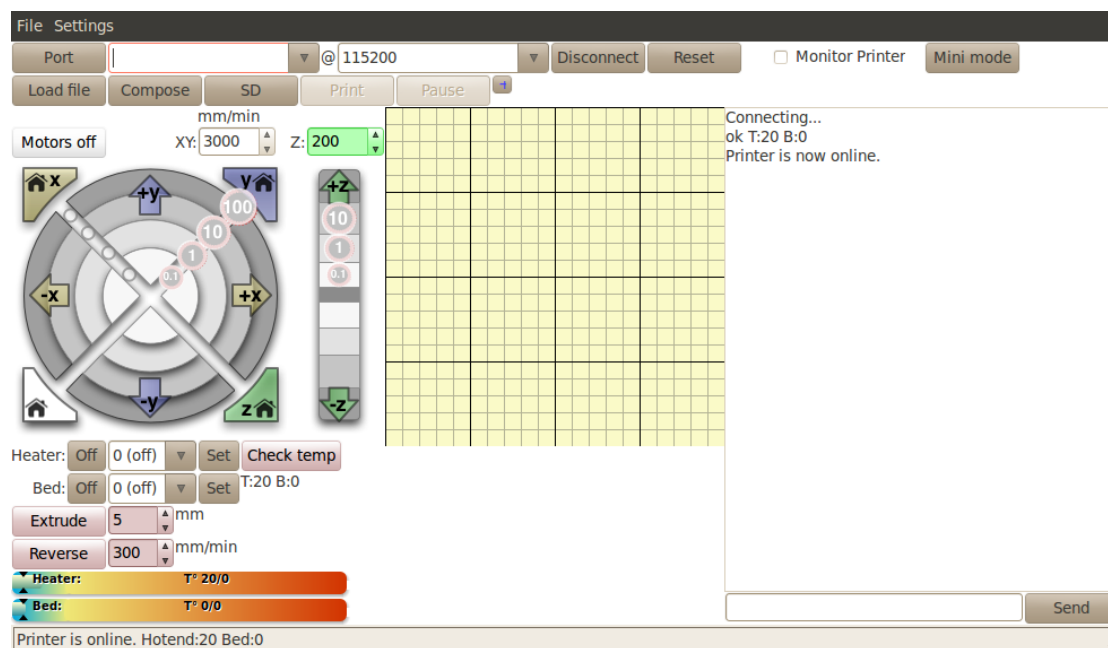


圖41. Pronterface 軟體操作介面

在熟悉界面的操作及設定後我們便可以開始進行案例的實際應用。

實際的操作過程以數位設計/製造流程為根據，先在電腦輔助設計製造環境中建立模型，在 3D 的 Rhino 建模軟體環境中繪製 NURBS 曲面模型，完成後將數位模型檔案輸出成 .stl 檔，以供數位製造接口端的介面軟體 Pronterface 讀取，在 Pronterface 軟體中使用者必須要留意單位大小、模型大小、模型材料等基本設定。由於 FDM 生成方式是利用一層一層的堆疊模型斷面，以等高輪廓線堆積成立體模型的建模方式；因此在此部分的運算必須要先運算出每層斷面的輪廓線，最後運算出既定的工作路徑，便能將運算後產生的 G-code 檔由機器讀取輸出為實體模型。

5. 結論

本研究針對創作者依照個人的需求方式進行數位製造工具套件的設計與製作，套件可以直接輸出創作者的數位設計模型，突破數位環境下在虛擬的設計環境中雖能較容易熟練掌控數位設計工具，當輸出設計至實體數位製造環境也能藉由個人設計製造的三維立體列印機讓設計與製造能有最緊密的連結。結果說明了創作者在熟悉了整個數位設計與製造流程後，便可以據個人的經驗與需求設計製作符合自己創作目標的數位製造套件。本研究的貢獻提供了完整的數位製造工具的基礎觀念與知識，強調開發個人創作工具的可能性，將創作者的手腦延伸至數位工具上，延續了傳統工藝的精神。創作者除了在概念時期將腦中的設計交由電腦輔助運算，進入實體製造介面時也能加強客製化創作者的實體創作工具。從概念的開始至套件的設計到最後的完成，整體流程依照 DFM 方法進行，並藉由完全掌控數位製造工具的開發流程，讓創作者在未來也可依據不同的創作目標進行數位製造工具套件的進行升級。

5.1 研究貢獻

在一般數位環境的設計過程中，設計者在發展概念同時也建立著實體化的模型生產方式，設計者對數位設計與數位製造的經驗會因為最後所採用的製造工具受到影響，因此，設計與製造有著相互作用的關係，久而久之後，設計師開始發展出一套獨特的數位設計製造流程-可製造性設計。本研究利用實作的方式強調從數位設計轉化為數位製造的設計思考過程中，開發個人化數位製造工具的重要性。

本研究讓創作者以開發數位製造工具來達成個人的創作方向需求，數位製造套件可以直接輸出相對應的數位設計模型。創作者在熟悉整個數位設計的過程後，便由於操作經驗所驅使下回饋到數位製造的硬體介面上，對數位製造的套件進行功能上的設計及修正而產生更符合他們想像中需求的實體製造硬體設備。創作者可以在數位設計發展概念時同時考慮進數位製造的限制，並藉由對數位製造套件的掌控能力開發相對應的實體構件，加強了創作者在實體化設計的過程中對創作工具的想像。在應用層面上，數位製造套件除了適合在一般建築概念設計模型的生產外，同時強調了非建築的 3D 創作可能性，應用的層面包括工業設計，工藝設計等實體模型的製作上，當然也可以應用在數位藝術的創作領域上。

5.2 研究限制

由於本研究只有對數位製造環境中的三維立體列印套件硬體部分進行發展，在電腦端的軟體介面以及 Gcode 運算軟體皆是以目前現有的 open source 軟體為來源，

很多的設計方式以及思考模式都會因為軟體對 3D 檔案的詮釋方式與路徑的運算模式而形成限制，對於軟體端的掌控度與開發可以在後續的研究中繼續發展。

在軟體技術發展方面，由於研究者過去為純設計背景，對程式語言間的開發能力較為欠缺，並沒有把電腦端操作軟體中的系統進行客製化的功能更動，對於運算 Gcode 的韌體也無法變更其運算路徑的邏輯：當輸出設計檔案至 Gcode 編碼，針對可傾斜平台的特殊 Gcode，必須以人工計算出合適的對應位置再以手工進行 Gcode 的更改，最後再重新導入進操作端介面運行測試。至於電子控制板部分，因為本次研究利用第二個噴頭(通常用於支撐材)的步進馬達輸出孔位做為可傾斜平台的輸出訊號端，在未來使用上若需要增加支撐材噴頭的功能將會因此而欠缺。另一方面，現在使用者對操作軟體功能或 Gcode 運算編碼的變更，皆只能在程式語言內直接進行，造成使用者操作上額外的困難，對於未來開發客製化的應用在程式語言部分的熟悉與掌控度是絕對需要的。

本研究所利用的電子控制板為架構於 Arduino Mega2560 上的 RAMPS1.4，針對其輸出/輸入端的孔位已做最佳的對應位置，較適合初學者使用，但也由於孔位的數量限制在開發未來的應用有一定的困擾。而本研究在使用步進馬達的選擇時也發現，RAMPS1.4 對於其板子的輸出電壓及電流有保護設計，造成無法使用更高功率的步進馬達於此次研究的套件硬體上，所以電子控制方面的限制也是將來克服的目標。

5.3 未來研究

在未來的後續發展，將補足本研究之限制，針對軟體端的程式語言進行開發，而在硬體端的套件設計，針對三維立體列印技術在今日建築業的發展，模組化的構件是必須具備的條件，並對於所生產目標的尺寸，將發展更巨大的 RP 以滿足在實際應用上的需求。今日建築業已開始發展水泥為材料的 RP 技術，此技術可為客製化的建築構件發展目標，為達成此未來研究，將可改變擠出頭的設計，將 FDM 熔融沉積法改為以針筒為擠出頭的非加熱式噴頭，在初期的研究可以針頭作小型的開發裝置，材料可以陶土為初期的研究方向，因陶土與水泥具有較相似的物理結構與生成方式，若能在小型裝置上掌握關鍵擠出構件設計，在未來即可將模組放大至以人為尺度的三維空間進行設計及應用。

在尺寸上的突破為未來的發展方向之一，而另一方向可為在精密度上的精進，目前 DLP resin 光硬化樹脂的 RP 發展也漸趨成熟，逐漸出現 open source 的開發資源，此法為目前精密度更高的 RP 成型方式，而其硬體架構相對於 FDM 法更為單純，僅需 Z 軸的移動與提供樹脂硬化的光源，目前光源的來源為投影機或液晶螢幕，且複雜模型於此法下並不需要支撐材的結構，以相同的體積下獲得更高自由度的數位設計生產流程無疑是未來小尺寸數位製造的趨勢。

參考文獻

- Araya, S. (2008). Algorithmic Transparency. First International Conference on Critical Digital: What Matters(s)?: 329-340.
- BAERLECKEN, D. and J. REITZ (2009). Combinatorial Productivity. CAADRIA: 761-770.
- Banda, P. (2010). Parametric Propagation of Acoustical Absorbers. ACADIA: 313-319.
- Barczik, G. and W. Kurth (2007). From Designing Objects to Designing Processes: Algorithms as Creativity Enhancers. eCAADe: 887-894.
- Boza, L. E. (2006). (Un) Intended Discoveries Crafting the Design Process. ACADIA: 150-157.
- Burry, J., P. Felicetti, et al. (2005). "Dynamical structural modeling A collaborative design exploration." International Journal of Architectural Computing 3: 27-42.
- BURRY, M. (1998). Handcraft and Machine Metaphysics. eCAADe: 41-50.
- Burry, M., J. Burry, et al. (2001). Sagrada Família Rosassa: Global Computeraided Dialogue between Designer and Craftsperson (Overcoming Differences in Age, Time and Distance). ACADIA: 76-86.
- Celento, D. and D. Harrow (2008). CeramiSKIN: Biophilic Topological Potentials for Microscopic and Macroscopic Data in Ceramic Cladding. First International Conference on Critical Digital: What Matters(s)?: 65-76.
- Celento, D. J. (2009). Digital Craft Meets the Ancient Art of Ceramics: Would the Bauhaus Approve? SIGRADI.
- Cenani, S. and G. Cagdas (2006). Shape Grammar of Geometric Islamic Ornaments. eCAADe: 290-297.
- Cheng, N. Y.-w. and E. Hegre (2009). Serendipity and Discovery in a Machine Age: Craft and a CNC Router. ACADIA: 284-286.
- Choma, J. (2010). CONTESTED BOUNDARIES: Digital Fabrication + Hand Craft. SIGRADI: 146-149.
- Dierichs, K. and A. Menges (2010). Material Computation in Architectural Aggregate Systems. ACADIA: 372-378.
- Dillenburger, B. T., Frank; Kotnik, Toni; Annen, Monika; Fuhr, Claudia; Girot-Ifrah, Yael; Tann, Martin; Shin, Dong Youn; Markovic, Sladjana; Versteeg, Meindert; Wendt, Tobias; Zäh, Matthias (2007). Architectural Use of Computer Controlled Deformation Techniques on the Example of CNC-Bent Tube Structures. eCAADe: 21-26.
- Fischer, T., M. Burry, et al. (2003). Triangulation of Generative Form for Parametric Design and Rapid Prototyping. eCAADe: 441-448.

- Gün, O. Y. (2008). Anti UV: Progressive Component Design in Cross Platforms. eCAADe: 69-76.
- Gün, O. Y. and J. Coersmeier (2008). Progressions in Defining the Digital Ground for Component Making. First International Conference on Critical Digital: What Matters(s)?: 57-64.
- Harzheim, L. and G. Graf (2005). A review of optimization of cast parts using topology optimization. Struct Multidisc Optim: 491 - 497.
- HENRIQUES, G. C. (2009). Crafting New Artefacts. CAADRIA: 205-214.
- HO, T.-F. (2007). The Spatial Interpretation of Freehand Sketch - Using Programming and Rapid Prototyping. CAADRIA: 337-344.
- Jemtrud, M., P. Nguyen, et al. (2006). A Theory of Artistry for 3D Data Fusion - The element of craft in digital reconstruction. eCAADe: 710-713.
- Kaijima, S. and P. Michalatos (2008). Simplicity, the programming craft and architecture production. First International Conference on Critical Digital: What Matters(s)?: 181-194.
- Kanellos, A. and S. Hanna (2008). Topological Self-Organisation. eCAADe: 459-466.
- Kapellos, A., M. Voser, et al. (2006). CNC Morphological Modelling in Landscape Architecture. eCAADe: 336-340.
- Kestelier, X. D. and R. Buswell (2009). A Digital Design Environment for Large-Scale Rapid Manufacturing. ACADIA: 201-208.
- Kolarevic, B. (2006). Manufacturing Surface Effects. ACADIA: 95-103.
- Loukissas, Y. and L. Sass (2004). Rulebuilding: a generative approach to modeling architecture using 3D printers. ACADIA: 176-185.
- Lyon, E. (2006). Component Based Design and Digital Manufacturing - A DfM Model for Curved Surfaces Fabrication using Three Axis CNC Router. eCAADe: 342-350.
- Miranda, P. (2001). Self-design and Ontogenetic evolution. 4th International Conference on Generative Art.
- N.BILORIA, K.OOSTERHUIS, et al. (2006). DESIGN INFORMATICS: (A case based investigation into parametric design, scripting and CNC based manufacturing techniques). CAADRIA: 237-244.
- Oxman, N. (2007). FAB Finding. eCAADe: 785-792.
- Oxman, N. (2007). Rapid Craft: Material Experiments towards an Integrated Sensing Skin System. ACADIA: 182-191.
- Oxman, N. (2008). Oublier Domino: On the Evolution of Architectural Theory from Spatial to Performance-based Programming. First International Conference on Critical Digital: What Matters(s)?: 393-402.
- Oxman, N. (2009). Material-Based Design Computation: Tiling Behavior. ACADIA: 122-129.
- OXMEN, N. and J. L. ROSENBERG (2007). "Material-based Design Computation: An

Inquiry into Digital Simulation of Physical Material Properties as Design Generators." International Journal of Architectural Computing 5: 26-44.

Perez, S. R. (2008). Crafting Complexity: Material / Procedure / Form. ACADIA: 272-277.

Peters, B. and X. D. Kestelier (2008). Rapid Prototyping and Rapid Manufacturing at Foster + Partners. ACADIA: 382-389.

Sopeoglou, E. (2007). Seamless Architecture. eCAADe: 805-811.

Stouffs, R. and M. Wieringa (2006). The generation of Chinese ice-ray lattice designs on 3D surfaces. eCAADe: 316-319.

Tang, C.-S. (2006). Smart Structure: Designs with Rapid Prototyping. Progress in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning: 415-429.

