

東 海 大 學

工業設計學系碩士班

碩士論文

田口方法於 FDM 快速原型機台成品
精度改善之研究

The Product Accuracy Improvement for FDM
Rapid Prototype Machine by Using Taguchi Method

研 究 生：葉至哲

指 導 教 授：王中行

中 華 民 國 九 十 六 年 六 月

碩士學位論文口試委員會審定書

工業設計研究所 葉至哲 君所提供之論文

田口方法於 FDM 快速原型機台成品精度改善之研究

經本委員會審定通過，特此證明。

論文口試委員會

委員：

<u>王中行</u>	<u>黃自生</u>
<u>杜瑞澤</u>	<u>莊漢東</u>
<u>蔣世文</u>	

指導教授：王中行

中華民國 96 年 08 月 02 日

中文摘要

本研究主要是透過田口實驗計劃法，找出快速原型機 FDM (Fused Deposition Modeling) 機型之精度最佳化製程參數研究，達成改善快速原型機之原型成品的品質。傳統的全因子法所需的時間和金錢、人力資源耗費龐大，整體而言並不實用。利用田口實驗計劃法進行參數實驗，再以直交表方式來配置實驗，便可以減少實驗次數，研究上，最後進行實驗數據分析，找出最佳化實驗組合，以實驗驗證來確認其成效。

研究方法上，首先找出影響快速原型機台成品之製程參數，再利用 SolidWorks CAD 軟體，繪出所要進行實驗測試的 3D CAD 模型，轉換成 STL 檔案，輸出至快速原型機台，將找出的因子及水準，利用田口直交表的方式進行實驗配置，進行實驗，並將尺寸加以量測，獲得實驗數據，以進行分析。藉由分析後最佳的參數組合，最後進行最佳化參數驗證實驗，確認其結果。研究顯示由田口實驗直交表 $L_{16}(4^1 \times 2^5)$ ，所找出之最佳化參數組合，經過驗證實驗後確認是有效的，比起預設之參數設定要來的準確，將 FDM 機台的製程參數設定在 Support style : Basic, Part surface : Best horizontal quality, Part interior style : Solid-normal, Layer resolution : 0.254mm, 成形擺放位置 : 正中央, 成型方向 : 橫向, 此設定可以獲得 FDM 快速原型機最精確的成型品質。

關鍵字：快速原型、FDM、田口實驗計劃法、製程參數最佳化。

ABSTRACT

The main purpose of this research is to find the optimization rapid prototyping parameters of Fused Deposition Modeling (FDM) machine by using Taguchi method in order to improve the quality of FDM product. Traditional full-factorial experiments are not practical because it costs a lot of time, outlays and man-power. Therefore, this study uses Taguchi method to set up a parameter experiment. It uses orthogonal array table which can decrease the number of experiment times to set up experiments. Finally, this study analyzes experiment data to find the optimized factors of experiment groups. It processes settled experiments to test and verify the results through producing actual examples.

In this research, it firstly finds out what are the parameters that will affect the quality of RP product and uses SolidWorks 2004 software to draw a 3D CAD model for testing. The 3D model will be transferred into STL file and exports to RP machine for finding out factors and levels. This study uses Taguchi orthogonal array to execute experiments. After the experiment, it measures the final product which is produced by RP machine in order to get practical data. Finally, this study proceeds optimized parameters confirmation experiments in order to testify the result. It is found that the optimized parameters is efficacious because the product proceed by optimized parameters data has more accurate dimensions than the default parameter. The FDM machine is settled as following items. "Support Style: basic" "Part Surface: Best horizontal quality" "Part Interior Style: Solid-normal" "Layer Resolution: 0.254mm" "Position: Center" "Direction: Transverse" Under this kind of conditions, this type of machine can get the most precise quality. It is the results get from the effort of this research.

Keywords: Rapid Prototyping, Fused Deposition Modeling, Taguchi Method, Optimization of Parameter

誌 謝

感謝指導教授王中行博士三年來的指導，並在求學過程中給了我許多建議和方向，也要感謝口試委員莊漢東、黃台生、杜瑞澤及蕭世文老師提供許多寶貴的意見，還有感謝郭宏偉、游正仁學長，讓我在研究過程中的問題以及癥結處的方面有著許多的幫忙，讓論文能夠更加的完整。

另外感謝建南同學以及張晟、文彬、翠蓮、依倫、麗恩等學弟、妹們的協助，不管是在論文研究或是口試過程中幫了不少忙，也分擔了一些組內工作，使我在研究的路上更能安心的前進。

在東海讀了四年大學，研究所讀了三年，總共將近七年的日子，的確是很漫長的。但是在研究所三年的日子中，要說長也不長，但是說短也不算短，當年決定了就讀研究所這條路，也只能義無反顧的走下去，有時會覺得茫然，不知為何而做的時候，研究室中的麒鈞、珍瑋、寬憲、家菁、煜明、靜宜等等同學，都會互相打氣鼓勵，更讓我這三年來的生活多采多姿。

當然再最後還是要感謝我的家人，以及女友敏容在這三年當中照顧及鼓勵以及陪伴，讓我在研究所的三年之中，能夠有足夠的溫情作為衝刺的後盾，而專心的投入研究。

在求學的過程中要感謝的人很多，在這篇致謝裡面並無法一一加以列舉出來，但是我想說的是，在生命之中有了你們，才能讓我生活過的更加精采，而我也將繼續向人生的下一個階段邁進。

目 錄

封面內頁	
簽 名 頁	
中文摘要	IV
誌 謝	VI
目 錄	VII
圖 目 錄	X
表 目 錄	XIV
第一章 緒論	1
1-1 研究背景	1
1-2 研究動機與目的	3
1-3 研究方法及步驟	4
1-4 全文架構	7
第二章 文獻探討	9
2-1 快速原型技術	9
2-2 田口實驗計劃法	11
2-3 應用田口方法於快速原型機	12
2-4 文獻小結	15
第三章 快速原型與田口實驗計劃法	17
3-1 快速原型系統簡介	17
3-1-1 快速原型原理與種類	19

3-1-2 雷射光合高分子成型法 (SLA)	20
3-1-3 雷射燒結成型法 (SLS)	21
3-1-4 熔解沈積法 (FDM)	22
3-1-5 疊層法 (LOM)	23
3-1-6 固態基礎固化法 (SGC)	24
3-1-7 3-D 印刷法(3DP).....	26
3-2 FDM 快速原型系統之特點	27
3-2-1 FDM 使用原料介紹	28
3-2-2 快速原型製程	30
3-3 田口實驗計劃法	35
3-3-1 田口方法	35
3-3-2 田口方法重要名詞	36
3-3-3 因子種類	37
3-3-4 常用實驗方法介紹	38
3-3-5 實驗數據分析	42
第四章 FDM 製程參數特性	45
4-1 LAYER RESOLUTION.....	46
4-2 PART SURFACE	47
4-3 PART INTERIOR STYLE.....	50
4-4 SUPPORT STYLE	52
4-5 成形擺放位置	58
第五章 FDM 製程參數實驗	61
5.1 LAYER RESOLUTION 的影響	61

5.2 PART SURFACE 的影響.....	65
5.3 PART INTERIOR STYLE 的影響	70
5.4 SUPPORT STYLE 的影響.....	73
5.5 成型位置的影響	78
5.6 成型方向的影響	84
第六章 田口實驗	89
6.1 實驗目標	89
6.2 實驗流程	91
6.3 實驗設備	92
6.4 選擇因子與水準	93
6.5 選擇直交表	94
6.6 尺寸量測	97
6.7 數據分析	98
6.8 確認實驗	103
6.9 結果討論	106
第七章 結論及未來展望	108
7-1 結論	108
7-2 未來展望	109
參考文獻	111

圖 目 錄

圖 1.1 本研究流程	6
圖 3.1 三種基礎製造方式	18
圖 3.2 SLA 製程示意圖.....	21
圖 3.3 SLS 製程示意圖	22
圖 3.4 FDM 製程示意圖	23
圖 3.5 LOM 製程示意圖.....	24
圖 3.6 光罩製程示意圖	25
圖 3.7 SGC 製程示意圖	26
圖 3.8 3D PRINTING 製程示意圖	27
圖 3.9 DIMENSION BST	30
圖 3.10 正逆向工程與 RP 之間的關係.....	32
圖 3.11 STL 格式之模型表示與紀錄型態圖.....	34
圖 3.12 品質特性影響圖	38
圖 4.1 CATALYST 軟體介面圖	45
圖 4.2 CATALYST 切層解說圖	46
圖 4.3 解析度設定切層圖	47
圖 4.4 垂直最佳化填充路徑	48
圖 4.5 水平最佳化填充路徑	50
圖 4.6 SOLID-NORMAL 填充方式	51

圖 4.7 SPARSE 填充方式	52
圖 4.8 欲製作之模型圖	53
圖 4.9 支撐料之支撐圖	54
圖 4.10 SPARSE 支撐料內部填充方式	54
圖 4.11 BASIC 支撐料填充方式	55
圖 4.12 SURROUND 支撐料填充方式(之 1).....	56
圖 4.13 SURROUND 支撐料填充方式(之 2).....	56
圖 4.14 SURROUND 支撐料填充方式(之 3).....	57
圖 4.15 BREAK-AWAY 支撐料填充方式	58
圖 4.16 決定擺放位置圖	59
圖 4.17 擺放位置圖	60
圖 5.1 LAYER RESOLUTION 實驗 CAD 圖	62
圖 5.2 LAYER RESOLUTION 實驗 CAD 尺寸圖	62
圖 5.3 CATALYST 載入 CAD 圖檔設定圖.....	63
圖 5.4 LAYER RESOLUTION 實驗數據折線圖.....	64
圖 5.5 LAYER RESOLUTION 實驗成品.....	65
圖 5.6 PART SURFACE 實驗 CAD 圖	66
圖 5.7 PART SURFACE 實驗 CAD 尺寸圖	67
圖 5.8 CATALYST 載入 CAD 圖檔設定圖.....	67
圖 5.9 PART SURFACE 實驗數據折線圖	69

圖 5.10 PART SURFACE 實驗成品圖	69
圖 5.11 PART INTERIOR STYLE 實驗 CAD 圖	71
圖 5.12 PART INTERIOR STYLE 實驗 CAD 尺寸圖	71
圖 5.13 CATALYST 載入 CAD 圖檔設定圖	72
圖 5.14 PART INTERIOR STYLE 實驗數據折線圖	73
圖 5.15 SUPPORT STYLE 實驗 CAD 圖	75
圖 5.16 SUPPORT STYLE 實驗 CAD 尺寸圖	75
圖 5.17 CATALYST 載入 CAD 圖檔設定圖	76
圖 5.18 SUPPORT STYLE 實驗折線圖	77
圖 5.19 SUPPORT STYLE 實驗成品圖	78
圖 5.20 成形位置實驗 CAD 圖	79
圖 5.21 成形位置實驗 CAD 尺寸圖	80
圖 5.22 CATALYST 載入 CAD 圖檔設定圖	80
圖 5.23 實驗成型位置圖	81
圖 5.24 成形位置實驗數據折線圖	83
圖 5.25 成形位置實驗成品圖	83
圖 5.26 成型方向實驗 CAD 圖	85
圖 5.27 成型方向實驗 CAD 尺寸圖	85
圖 5.28 CATALYST 載入 CAD 圖檔直向設定圖	86
圖 5.29 橫向旋轉之 CAD 圖檔設定圖	86

圖 5.30 成形方向位置實驗數據折線圖	88
圖 5.31 成形方向位置實驗成品圖	88
圖 6.1 測試 CAD 圖形.....	90
圖 6.2 測試 CAD 圖形之尺寸圖.....	90
圖 6.3 載入切層軟體設定圖	91
圖 6.4 田口實驗流程圖	92
圖 6.5 MINITAB R 14 軟體介面圖.....	95
圖 6.6 量測成品位置圖	97
圖 6.7 S/N 比因子回應圖	101
圖 6.8 確認實驗成品圖	106
圖 6.9 成品比較圖	107

表 目 錄

表 3.1 一次一因子法實驗數據表	39
表 3.2 全因子法實驗數據表	41
表 3.3 $L_8(2^7)$ 田口直交表	42
表 5.1 LAYER RESOLUTION 實驗數據 (目標尺寸 20mm)	64
表 5.2 PART SURFACE 實驗數據 (目標尺寸 30mm)	68
表 5.3 PART INTERIOR STYLE 實驗數據表 (目標尺寸 25mm) ...	73
表 5.4 SUPPORT STYLE 實驗數據 (目標尺寸 5mm)	77
表 5.5 成形位置實驗數據 (目標尺寸 20mm)	82
表 5.6 成形方向位置實驗數據 (目標尺寸 20mm)	87
表 6.1 因子與水準表	95
表 6.2 $L_{16}(4^1 \times 2^5)$ 直交表	96
表 6.3 實驗量測數據表	98
表 6.4 實驗數據 S/N 比分析表	99
表 6.5 S/N 比因子回應表 (單位: DB)	100
表 6.6 ANOVA 變異數分析表	101
表 6.7 驗證實驗數據 S/N 比分析表	105
表 6.8 實驗成果比較表	107
表 7.1 FDM 精度最佳化製程參數表	109

第一章 緒論

快速原型 (Rapid Prototyping ; RP) 技術是目前在工業設計的流程中，一種非常受到重視的科技，由於科技發展使得在產品設計的流程中，藉由快速原型技術便可以早一步看到產品的打樣 (Mockup)，甚至是產品的功能原型，此技術讓設計師有更多的時間，可以思考整個設計與模型的改善，也大大的縮短的產品設計流程的週期。但是因為快速原型產品對於尺寸的精確度上，並不如 CNC 等電腦加工機所做出來的原型成品。如何在模型品質精確度上，藉由方法與技術的改善，來加以提升，為本論文目標與研究重點。讓現有的快速原型機能透過製程參數設定的改善，以獲得比以往有更好的成形品質以及精確度。

1-1 研究背景

從 80 年代開始，個人電腦，以及 90 年代網路盛行，由於科技的進步加上電腦效能的大幅提升，企業界都以電腦化為目標，也改變了傳統的工作型態，各種利用網路通訊技術所開發出來的程式，使得工作時間縮短進而提升效率，其目的不外於在提升企業的生產力及降低成本還有提升效率。

因此電腦輔助設計 (Computer Aided Design ; CAD) 是目前一項重要工具，因為精確的產品圖檔不但可以提供製造的精確資料，而 3D 電腦輔助設計系統的出現，使產品可以藉由建構 3D 模型加以展示出來，大幅地增加設計與製造生產的效率。

快速原型（RP）和逆向工程（Reverse Engineering；RE）技術以及快速模具（Rapid Tooling；RT）技術，已經非常普遍的應用在各種領域，快速原型技術簡稱 RP，可以在短時間之內讓使用者看到所設計好的產品外型。所以諸如：工業設計、汽機車工業、航空航太工業，以及生物醫學科技或是工藝產品加工...等各個相關領域，都已經非常廣泛的被企業所接受，大家開始採用快速原型和逆向工程技術來加以簡化一個產品的開發過程。

產品生命週期（Product Lifecycle Management）越來越短，快速產品開發（Rapid Product Development）的概念也就被提出，如何達到少量且多樣化的產品是大家所努力的目標，因此快速原型技術變成為一項重要的科技。而快速原型技術是和電腦輔助設計一起搭配使用，此科技是利用各家快速原型廠商所特有的技術，便可以快速的產生出產品的外型出來，在現在的產品設計流程中都佔有相當重要的地位，是將設計者在電腦中所建構好的 CAD 模型，利用層層堆疊加工的方式逐漸的累積原料，便可以迅速的產出產品原型出來。簡單的來說使用快速原型技術便可以有效的縮短產品打樣的時間，相對的就可以減少製作時間和縮短開發成本，這樣一來便可以有更多時間改進產品。而且快速原型可以產生出各種複雜的形狀，甚至任意造型都可以製作的出來，因為 CAD 圖檔經過切層以後便可以視為無數個 2D 平面，然後慢慢的堆疊加工以後就可以獲得一個 3D 實體模型，所以不會有傳統 CNC 切削加工機所加工不到的地方，也不會有製作不出來的模型，更可以克服傳統手工模型精確度不佳的問題，也可以省下製作模具的費用，整體來說使用快速原型技術的好處非常的多，可以快速的反應客戶的需求，使得企業競爭力大幅提

升。

要改善製程參數，企業上大部分所採用的實驗計劃法多為田口實驗計劃法（Taguchi Method），而田口實驗計劃法為日本田口玄一博士所開發提倡使用的，主要內容就是利用簡單的直交表來簡化過去繁雜的實驗次數，達成有效率的實驗設計，不像傳統的實驗設計，需要用全因子法將全部的變數完全的試驗一次才能得到結果，田口方法利用直交表便可以簡化實驗次數，可獲得跟全因子法相當的結果，以有效的指出最佳化的趨勢，因此可行性來說，是遠大於全因子法。田口方法利用變異數分析和 S/N（信號雜訊）比，搭配的直交表所簡化後的實驗次數及數據，進行分析找出影響最大的因子加以改善，以有效的提升產品的品質。

因為快速原型機台的參數設定眾多，任何一個參數設定，都有可能改變最後所獲得的成品，因為想要獲得最佳的產品精確度的話，就必須從眾多設定參數之間，找出最佳的參數設定以及其他影響因子，是值得探討的方向。

1-2 研究動機與目的

熔解沈積法（Fused Deposition Modeling；FDM）之快速原型系統，是最常使用的一種快速原型機，其屬於以 ABS 為原料的快速原型系統，機台的價格不算昂貴，機型體積也不算大，操作中不容易產生粉塵，非常適合辦公室使用。FDM 機型其工作原理為同時加熱溶化製作原料以及支撐材料，再由噴嘴擠出 ABS 原料和支撐料件，因此支撐料和 ABS 原料是互相緊密靠著，因此就會多少產生出尺寸上的誤差，再加上各種機台參數的設定，都會影響到產品的精確度

和產品的品質，因此如何有效的獲得最佳品質的原型，就是一個很重要的課題，因為如果快速原型所獲得的產品精確度誤差太大，那就會浪費不少的時間與金錢加以處理，反而就喪失了快速原型的意義了。

本論文目的就是希望利用實驗的方式，找出影響快速原型成品尺寸精確度最大的因子，但是因為全部的製程參數的水準數目太多，利用單因子實驗方式，一次變化一個因子水準來實驗，卻沒辦法獲得交互實驗的效果。但是要利用全因子法卻會因為要實驗的次數過多，要耗費大量的時間與人力還有金錢。採用田口玄一博士所推廣的田口實驗計劃法方式來進行實驗，便可以有效降低所需的實驗次數，又可以獲得與全因子法近似之最佳化趨勢。最後找出影響尺寸精確度最大的參數，加以進行改善以獲得最佳的效果。然後進行最佳化實驗，進行最後的確認。以提供 FDM 機台的使用者，利用所實驗出來的參數設定，以獲得精確尺寸的成品，避免重複嘗試錯誤而造成時間與金錢的浪費。

1-3 研究方法及步驟

本論文之研究流程，基本上可以分為兩大部分：

(1) 找出影響快速原型成品的 RP 機台設定參數，利用正向工程的方式，建構出測試用的 CAD 模型，進行獨立的參數實驗。

(2) 利用田口實驗計劃法來進行 RP 機台之田口實驗，以找出最佳化趨勢。

在第一部份裡面主要所搭配的軟硬體設備分別為 SolidWorks

2004 軟體和 Dimension BST 快速原型機台，利用 SolidWorks 2004 軟體繪製出所需要測試的 3D CAD 模型，再利用軟體轉換成 STL (Stereo Lithography) 格式，輸出至 RP 機台軟體。然後找出影響快速原型成品精確度之機台程式設定參數以及其他影響因子，像是擺放位置等等。Dimension BST 之快速原型機台的優點為價格便宜，且不會像一般粉末式機台有著縮水率的問題存在，且成品強度足夠，但是卻有著支撐層的問題以及精度方面的小缺點，且完成的成品必須拆除掉支撐物，與支撐物接觸的地方多少都會影響到精度。所以為了改善此缺點就必須了解整個快速原型的製作程序，利用規劃實驗的方式來了解 FDM 快速原型機的特性。

在第一部分找出了影響成品的精確度的製程參數以後，就必須反覆的實驗以找出最佳的製程參數組合，但是因為所有的影響參數眾多，所以導致要實驗的次數非常的繁複且耗時，因此我們採用田口實驗計畫法的方式，來進行最佳化的實驗參數，它可以利用直交表的方式簡化實驗的次數，而且可以指出最佳化趨勢。然後進行尺寸的量測，最後進行實驗數據的分析，然後將所找到的最佳化參數做驗證實驗，用以證實所找到的參數是有效的，圖 1.1 為本研究流程。

在研究限制方面，為了使實驗單純化以及排除其他因素干擾，量測方向上則是以量測單一方向為主，本實驗是選擇量測 Z 軸，因為 RP 機台是屬於層堆疊成型，因此量測 Z 方向的尺寸，可以獲得比量測 XY 方向明顯的實驗數據，進而方便進行最後的實驗數據分析。

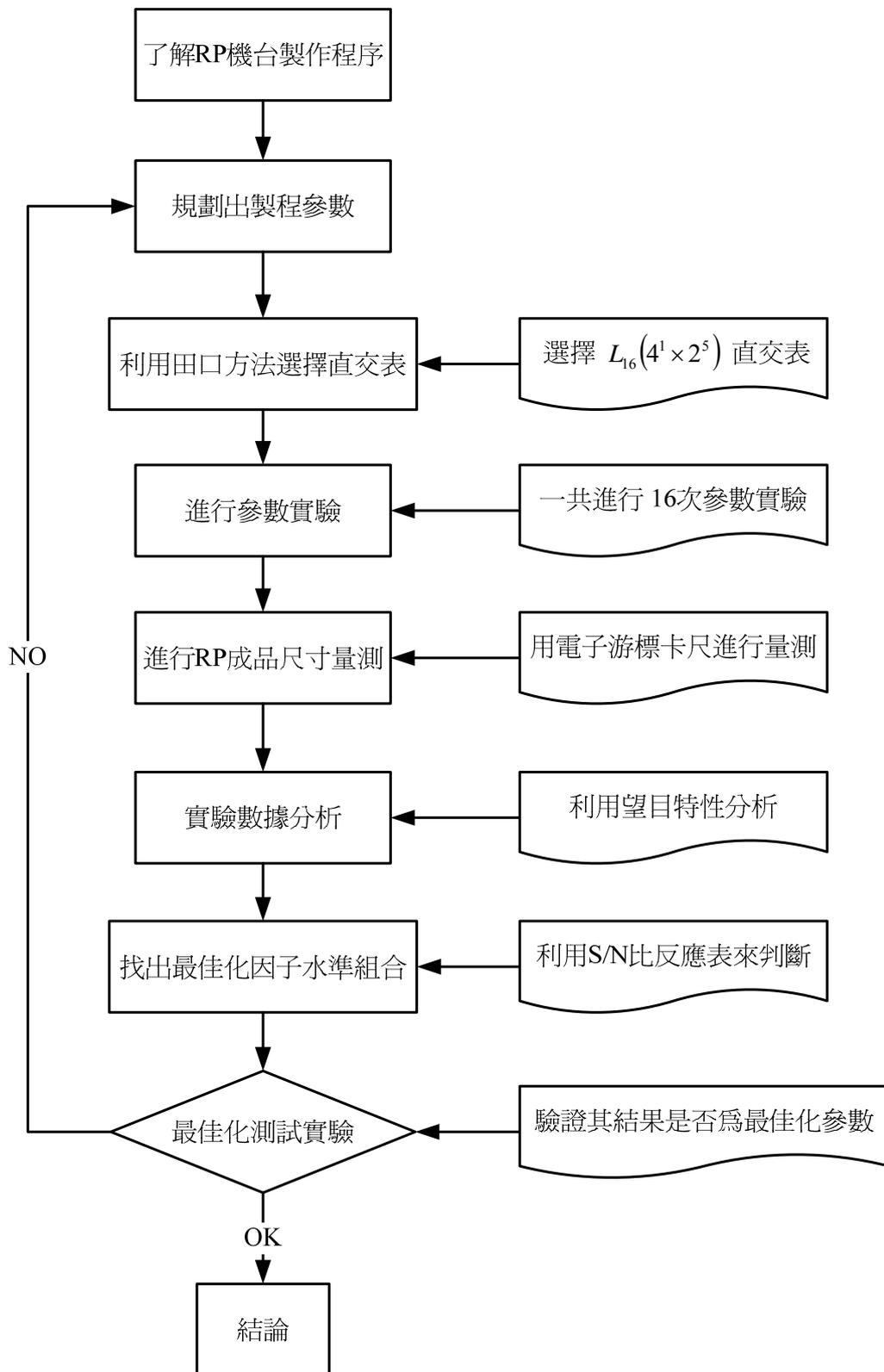


圖 1.1 本研究流程

1-4 全文架構

本研究論文分為七章，各章節內容概述如下：

第一章 緒論

此為針對此論文的研究背景、動機及研究方法步驟，作一個概括性的描述說明，說明為何要作此研究，以及如何達成本研究。

第二章 文獻探討

本章說明目前在快速原型成形，以及其製程參數之相關研究，並針對本研究中所使用的研究方法，及目前所使用的狀況進行文獻探討。

第三章 快速原型技術以及田口實驗計劃法

在本章節主要說明的是何謂快速原型技術，以及本論文所使用的田口實驗計劃法。重點是快速原型的製作方法以及其關鍵技術，以及田口實驗計劃法的步驟和優點，還有田口直交表的實驗配置法，和其數據分析方法，以方便後面的結果分析。

第四章 製程參數介紹

本章節內容主要是介紹所使用的 FDM 快速原型機台，其影響快速原形成品精確度的製程參數，將整個製程參數作詳細的介紹，目的是為了讓實驗設計部分能夠更準確，以便能方便找出影響的參數來加以改善。

第五章 製程參數實驗

本章節主要是將各個參數，利用獨立實驗的方式，確定其對於尺寸的影響，找出影響最大的數個因子與水準，以便進行下一章節的實驗。

第六章 田口直交表實驗

將前一章節裡面所獨立實驗的因子水準，利用田口直交表的方式找出適合的直交表來進行實驗，最後分析實驗數據，找出最佳的實驗組合來進行確認實驗。

第七章 結論及未來展望

說明整個研究之結果及未來可研究之方向。

第二章 文獻探討

本研究主要是在探討如何應用田口方法，找出快速原型機之最佳化製程參數，所以在本研究中文獻探討主要針對三個方向：(1)快速原型技術(2)田口方法(3)應用田口方法於快速原型機。

2-1 快速原型技術

快速原型技術是現在工業設計流程中，一項重要的科技，它可以輔助設計師在短時間之內獲得產品的原型，更可以有效的縮短設計開發的流程，相關研究有：

1.林佳駿（2002），在其論文中提到對工業設計來說，要因應產品「快速設計」以及滿足不同消費群體產品「少量多樣」的方針之下，提出應用逆向工程的方式，建立可以直接塑造產品造形的曲面操作界面，加快產品的產出。

作者在研究中探討如何應用逆向工程的技術對產品快速設計的助益和方式，將掃描過的產品數位化並虛擬在電腦裡，利用設計師所繪製的設計平面圖為基本的產品設計底圖，並直接對電腦中的3D模型樣本產品依據底圖做造形上的改變，經由產品3D模型上的NURBS曲面、曲線架構做直接塑模的修改，並且產生各種產品曲面造形，以期達到產品快速的產出與多樣化的造形設計；並建立一個以逆向工程方式的產品直接塑模界面，有利於設計師在設計時的使用與產出速度；同時並探討應用此方法時，對以往的產品設計流程有何影響及改善也做一說明和比較，以期能產生較佳的設計流程。

2.莊峻超(2001)，作者在研究中導入逆向工程概念，並結合造形摻合理論，建立一套逆向工程技術應用於形態漸變設計的模式，可結合現有 CAD 軟體，提供工業設計師更多更快速的提案構想產生。在產品設計的過程中，設計師常會利用 PU 發泡、油土等材料進行快速且大量的模型製作，將所要表達的意象以實體的方式呈現出來，作為構想檢討的依據。但是傳統模型的製作過程往往耗時費力，無法因應現今瞬息萬變的市場生態。而產品設計的發展趨勢已朝向自由曲面造形發展，設計師亦無法直接在一般 CAD 軟體中以傳統幾何工具來描述或是定義出符合所需的產品外形。如能透過程式的輔助來協助設計師快速且正確的建構出所需的造形曲面，並進一步對於原有的概念模型進行一系列的構想發展衍生，並與後續的 CAD/CAM 系統做結合，將有助於加速產品設計的時程，提高競爭力。

3.林耕莘(2000)在研究中提到，快速原型製造系統是利用分層來堆疊成型，但是成型時所使用的疊層厚度為一固定厚度，較快成型速度的成品有較差的表面精度，較慢成型速度的成品則有較高的表面精度，因此，必須在互相矛盾的成型精度與成型速度之間做取捨，所以選擇適當的疊層厚度是一個難題。因此作者提出了適應性(Adaptive)的疊層製造方法，便能夠減輕以上的困擾，它能夠自動調整疊層厚度來適應與配合成品表面的幾何特性，可達到同時提升精度與縮短成型時間。

4.邱雲堯(2000)針對現有快速原型的層狀成形法(Laminated Object Manufacturing; LOM)的切層方法、十字交叉形切割法則與廢料撥除進行系列研究。在切層方法的研究方面，為了改善現有 LOM

的切層方法造成同一工件同時產生尺寸多餘 (Over-size)，或尺寸不足 (Under-size) 等缺點，使後處理加工時無法獲得期望的尺寸形狀。因此，發展出一種新型的固定層厚的切層方法，以厚度固定為基礎，根據 STL 檔具備的幾何資訊，利用法向量與實際工件加工方向兩者所計算的值，同時參考工件的用途需求，計算出正確的加工路徑。

2-2 田口實驗計劃法

田口實驗計劃法是一個非常著名的實驗計劃法，它可以利用少量的實驗次數，就可以達到與全因子實驗法相近的結果，最後便可以利用結果找出影響最大的因子加以改善，最後獲得品質上的提升，又稱為田口品質工程法。在這方面的相關研究有：

1. 蘇筵仁 (2004)，作者的研究中以被動元件尺寸與材料特性認識為基礎，配合良率分析與製程中檢測，以決定理想之元件基板設計、物料特徵及製程參數，作為國內產業界被動元件組裝製程之研究方向。

作者使用了田口方法並配合實驗設計與分析，希望使用最少之實驗次數，以獲得最多關於被動元件組裝製程之訊息。首先，決定實驗因子與水準數，以配置直交表。其次，透過卡方檢定判定，實驗數據是否符合常態分佈。運用信號雜音比與變異數分析，以獲得實驗中之顯著因子。運用田口累積分析亦期望獲得顯著因子。驗證實驗用以證明最佳製程參數水準組合是否有再現性。最後，執行推力測試以確保被動元件製程之最佳製程參數水準組合。

2. 吳碩傑 (2004)，其研究之目的為四行程機車引擎電子控制系統之建立與控制方法的改良，並找出最大扭力之參數組合及曲線

方程式。

作者的研究以電子噴油點火引擎模式，進行一連串的引擎實驗，經特性要因分析後，選擇節流閥開度與噴油寬度為三水準控制因子，利用 $L_9(3^2)$ 直交表重複兩次實驗，應用田口式品質工程與實驗設計的方法，並配合 Statistica 軟體進行分析。探討改變不同的引擎控制參數，如：空氣量與燃油量，在不同的引擎轉速下，對於引擎性能的影響。

3. 曾彥義 (2003)，在研究中提到高速 CNC 銑削加工本質上為一種轉寫性 (Transformable Writing Process) 的加工，以田口方法的觀點，若程式輸入之尺寸、或幾何形狀，能夠在沒有任何因素之干擾下，完全的轉寫在加工件上，則稱高速 CNC 銑削加工系統達到理想機能。但是，在銑削過程中，難免因為控制因素之參數設計不完美、或受到誤差因素之干擾，使得加工件之尺寸、或幾何形狀之精確度產生變異。為此，本研究使用田口方法動態特性理論，提出「程式輸入尺寸 vs. 輸出加工件尺寸」、「程式輸入幾何形狀 vs. 輸出加工件幾何形狀」、與「雙輸入 vs. 雙輸出理想機能模型」三種理想機能模式，滿足模具製造業對於高速、高品質、與短交期之需求。實驗結果顯示，藉由田口方法動態特性理論、與理想能模型之建立，可增進模具銑削加工之尺寸、與幾何形狀精確度，並可同時滿足高速、高品質、與短交期之需求。

2-3 應用田口方法於快速原型機

結合了田口實驗計劃法便可以有效的減少實驗次數，因此在找出快速原型機最佳化製程參數上有了很大的幫助，目前在這方面的

研究有：

1.曾昱晨 (2001)，探討粉末式快速原型機 Zcorp 402 3DP 系統的粉末材料特性，並且還研究了其膠水噴塗量、成形層厚度、成形位置擺設等加工參數對快速原型件之成形品質的影響，做出了最佳化參數之調整，並且藉由粉末材料特性的研究進行研發新型粉末。

其研究方法是以田口實驗設計法來配置實驗參數，然後進行實驗找出最適之加工參數；在粉末材料特性方面則進行定性與定量分析比較，藉由基本的粉末特性研究，可發現快速原型件品質的好壞，跟粉末顆粒形狀以及粉末顆粒大小息息相關。研究上，最後也研發出新粉末之配方，達到可節省 80% 耗材支出的良好結果。

2.許耀仁 (2002)，主要是以田口方法在逆向工程之 CAD 模型重建及製造，將各設計參數最佳化的應用。作者分別在 CAD 模型重建及製造兩部份都給予參數設定，再利用田口方法的實驗設計法則進行實驗規劃，實驗設計方面則是透過直交表配置，搭配變異數分析以及回應表、回應圖等等方法，找出最佳的設計參數，並且利用貢獻度的比例，進一步的估計出整體品質之最佳化參數組合。最後並使用迴歸分析法，來驗證各個設計參數的影響程度，並統計各設計參數的值，計算出迴歸方程式。

3.黃仲儀 (2005)，使用了田口實驗方法在 3DP-Z402 快速成型機上，利用變更製造參數來控制裝配件的尺寸的變化。研究中選擇成型方向、成型位置、層厚、核心噴膠量、縮水率為控制因子，利用 7 因子、3 水準和 1 因子、2 水準的 L_{18} 直交表，以望目特性執行最佳化實驗。在取得成型品尺寸之後，最後利用信號雜訊比與變異數分析表來探討分析實驗數據，以達到參數最佳化的目標。

4. 詹依蓀 (2006)，則是利用田口實驗方法，以 3DP-Z402 快速成型機為實驗機器，變更製造參數來控制單形狀特徵的尺寸變化。研究中是選擇了成型方向、成型位置、切層厚度為控制因子，利用 2 因子、3 水準和 1 因子、2 水準的 L_9 直交表和望目的特性得虛擬水準法執行最佳化實驗。再利用 HELMEL 三次元規劃路徑取得成品尺寸之後，最後利用信號雜訊比和變異數分析表來探討分析實驗數據，用以達到參數最佳化的目標。

5. Anitha (2001)，提出不同的 FDM 製程參數都會影響到最後的成品，所以利用了田口實驗計劃法，將不同的製程參數加以交互實驗，再將不同實驗的成品量測加以比較分析精確度，最後獲得出一組最佳的實驗組合的參數設定，以達成最佳產品品質的需求。

6. 柯俊宏 (2003)，研究主要探討逆向工程量測後，所獲得龐大的點群資料要如何加以處理，以建立曲線型態模組化，然後利用田口參數設計方法，可縮短實驗次數及時間，配合灰關聯理論找出的最佳組合，再以幾何模型展現擬合曲線特性，進而減少點群資料數，方便後續技術的處理。研究上，並針對醫學影像、複製技術（拓印、掃描圖檔）...等灰階影像資料進行非傳統逆向工程技術處理，經影像處理技術所取得影像輪廓點群資料再配合擬合曲線模組，進行實例驗證。

7. Lee (2005)，提出利用田口方法，來找出 FDM 系統的快速原型機之最佳化製程參數，利用 S/N 比以及 ANOVA 分析來研究製程參數的影響。並且為了實驗設計了一個 CAD 檔讓 FDM 機台成型，最後測試所製作出來的 ABS 成品之彈性的不同，以及彈射的距離遠近，作為彈性測試之依據，最後分析這些使用直交表配置出來

的測試件之實驗數據，算出 S/N 比還有 ANOVA 分析，並且驗證所找出最佳的製程參數。

8. Zhou (1999)，利用了田口方法來降低實驗次數，且設計了一個測試用的 CAD 檔案，讓 SLA 系統的之快速原型機成型，並且使用 3D CMM 量測機器來測量尺寸獲得資料，最後進行 ANOVA 分析，來找出最佳化的製程參數。

9. Raghunath (2006)，為了改善 SLS 系統之快速原型機之成品縮水率問題，而導致尺寸上的誤差，所以利用田口方法來進行實驗，針對機器上的縮水率來進行補償調整，設計一 CAD 模型來成型，並且量測尺寸以獲得數據資料，最後將資料進行 ANOVA 分析，找出影響 X、Y、Z 三個方向的因子，最後得出 SLS 的最佳製程參數。

10. Jeng (2001a, 2001b)，研究目的為改善 SLP 之快速原型系統之過度固化現象，以及原型成品品質改善，使用田口實驗計劃法來進行實驗，並進行 ANOVA 分析，找出了最佳化製程參數，以及使用較短波長的雷射，可以獲得更佳的成形品質的結果，達到品質改善的目的。

11. Onuh (1998, 2001)，為了改善 SLA 技術之 RP 機台所產生出原型表面品質，以及其尺寸精確程度，研究上利用田口方法以及 ANOVA 分析，最後找出了最佳化的製程參數，讓 SLA 之快速原型機的製作品質有了全面性的提升。

2-4 文獻小結

由這些研究中可以瞭解到目前快速原型機的發展，以及田口方法對於品質工程的提昇，並利用田口方法進行原型成品的品質改

善。因此本研究希望可以藉由田口實驗計劃法，搭配變異數分析，找出影響 FDM 系統的快速原型成品的製程參數，並且加以改善，最後加以驗證找出的機台最佳化製程參數，讓以後每次使用 FDM 快速原型機時，都可獲得良好的成型品質。

第三章 快速原型與田口實驗計劃法

快速原型技術 (Rapid Prototyping Technology)，是 80 年代後期所發展的一種新的加工方法，其對製造產業以及產品設計理念造成重大的影響，這項技術被認為是近年來製造領域的一次重大突破。

而快速原型技術所製作出來的成品，在品質精確度上比起傳統的加工機而言精確度較低，而為了改善此缺點，所以我們選用田口方法來進行改善實驗，其優點是可以有效的減少實驗次數，而且找出最佳化趨勢，進而達成品質改良的目的。

本章節主要分為兩大部分，第一部分是介紹快速原型之技術及種類，第二部份是介紹本論文所使用的田口實驗計劃法。

3-1 快速原型系統簡介

快速原型系統它綜合了機械製造、電腦輔助設計、雷射技術還有材料科學技術，可以自動且快速的將設計師所構思出來的產品，將其實體化為具有一定功能的原型或直接製造零件，進而可以對於產品設計進行快速評價、再修改及功能上的測試，快速原型技術整體來說可以有效地縮短了產品的開發週期。而以 RP 系統為基礎發展大部分已經很成熟，已經進展到可以搭配快速模具製造 (Quick Tooling) 技術、快速精鑄技術 (Quick Casting)、快速金屬粉末燒結技術 (Quick Powder Sintering)，有了以上技術就可以實現零件的快速成品生產製造。

有別於一般傳統的切削加工 (Subtractive) 成型方式 (如：車、

削、刨、磨)、接合(Additive)成型(如:焊接)或模具壓迫(Formative)成型(如:鑄、鍛、粉末冶金)等加工方法,快速原型系統的加工觀念是採用材料累積法來製造零件原型,其原理是先將 CAD 軟體建立所設計的 3D 立體模型,利用切層(Slicing)軟體算出模型之每層的 2D 截面輪廓,再依照不同的 2D 成型方式(如:雷射燒結、噴膠黏合...等),來製作各層 2D 截面模型,大量的 2D 截面模型再慢慢堆積變成為 3D 立體模型,這種加工方式可製作任意幾何造型的模型,見圖 3.1 [Chua, et al., 2003]。

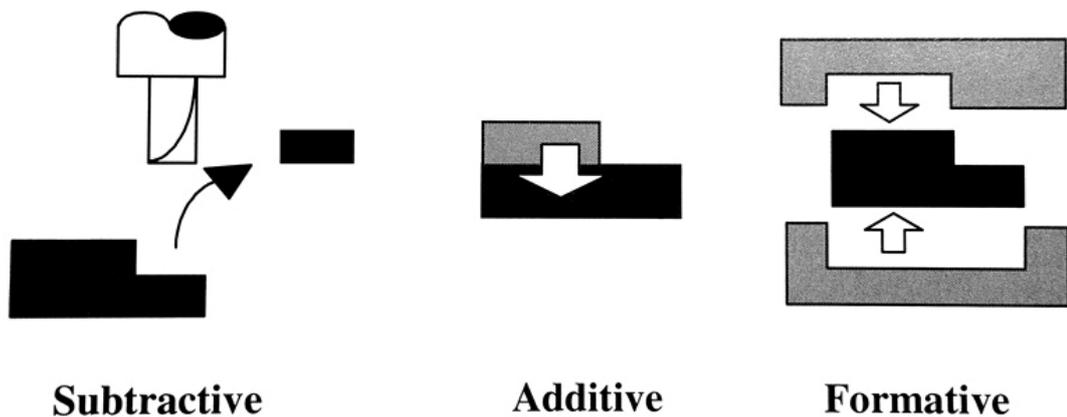


圖 3.1 三種基礎製造方式

下列數點說明為快速成型系統相較於傳統 CNC 加工的優越性 [賴後權, 2003]:

1. 可以製作幾何形狀任意複雜的零件,且不會受到傳統機械加工方法中,如加工刀具無法達到某些所要加工的地方,便無法進行加工的種種限制。

2. 在曲面製造過程中,CAD 資料的切層處理可以百分之百地全自動完成,而不需靠操作者在一旁細心觀察與注意,才能加工製造出完美的工件。

3. 不需要傳統的刀具或夾具等生產準備工具，它可以從任意複雜零件的加工，乃至於組零件，都可以在一台設備上加工完成，因而大大地縮短了新產品的開發成本和週期，其加工效率也遠勝於 CNC 加工。

快速成型系統可視為 CAD/CAM 製造系統的一環，CAD/CAM 系統在國內已行之有年，它所帶來的成果效益是大家所認同的。現行產品開發上，系統設計 (System Design)、概念設計 (Concept Design)、細部設計 (Detail Design)、模具及治具之加工製造等，CAD/CAM 的應用已相當成熟。但是在概念設計方面之應用雖有軟體可使用，但只能在電腦畫面上，評估確認設計的產品，而無法進行實際確認，所以總是有著不夠真實的感覺。利用 RP 系統的導入正可以彌補此一缺點，並可將設計人員 CAD 的設計構想，快速而又精確的產生出可以觸摸的實體，這種方式顯然比將 3D 的幾何造型，將其展示於 2D 的螢幕或圖面上，能夠擁有更好的觀察性以及互動操作、啟示性。正因如此，設計開發人員可以更快、更容易發現概念設計中的錯誤，並能作為後續產品開發過程的參考。使得應用 CAD/CAM 的產品開發過程，能夠從頭到尾資料連貫，不會因為手工製模而使 CAD/CAM 產品開發過程的概念設計資料，無法為後續製程使用。更重要的是，對於成品而言，設計人員就可立刻體驗其新設計產品外觀造型以及美學品質，這更是設計部門與非技術部門間，一個相當重要的溝通與交流媒介。

3-1-1 快速原型原理與種類

快速原型系統可製作出任意複雜造型，或是具有細微機構的原型，優點為可以完全擺脫切削加工先天上的限制，克服手工模型精確度低的缺失，這對製造加工而言是一項重大的突破。目前 RP 系統所製作之工件其材質絕大部分並非實際所使用的工業材料，故無法視為生產設備，但是其完成工件可用來做設計確認、行銷商品展示、功能及組裝測試，甚至可做為多種加工模具之原型。

RP 技術已是眾所矚目的科技，而且各種 RP 技術相繼推出，RP 系統未來將是產品設計開發中不可或缺的工具，而近一、兩年來 RP 系統的需求正快速的成長並吸引業者的注意，利用 RP 技術而成功的案例更是不勝枚舉。現有 RP 系統多已經商品化，每一個技術類型都有代表之系統，以下將對不同類型的 RP 技術系統做一探討 [Pham, et al., 1998] [賴後權，2003] [Chua, et al., 2003]。

3-1-2 雷射光合高分子成型法 (SLA)

在此技術是 3D Systems 公司的雷射光合高分子成型 (Stereo Lithography Apparatus, SLA)，其加工原理如圖 3.2，是利用紫外線 (UV) 雷射掃描光硬化樹脂 (Photo Curable Resin) 的液面，當樹脂受到雷射光照射到適當程度，就會開始產生聚合 (Polymerize) 反應而開始固化 (Solidify)，整個加工過程跟其他快速原型系統的原理一樣，是由物體的底部開始成型，並且利用控制雷射掃描速度，使樹脂吸收足夠的能量，便可以控制樹脂固化深度。掃描固化成的第一層是黏附在一個平台上，之後工作平台的位置降低，比固化的樹脂表面稍微低一點，再進行固化作用。當每一層固化完畢之後，平台就會向下移動一個新的高度，然後將樹脂塗在前一層上，如此

反復動作，每形成新的一層均黏附到前一層上，直到製作完工件的最後一層（就是到達零件的最頂層）。最後將工作平台升高到至液面上，取出工件，進行最後的表面處理，就可完成快速原型之工件。

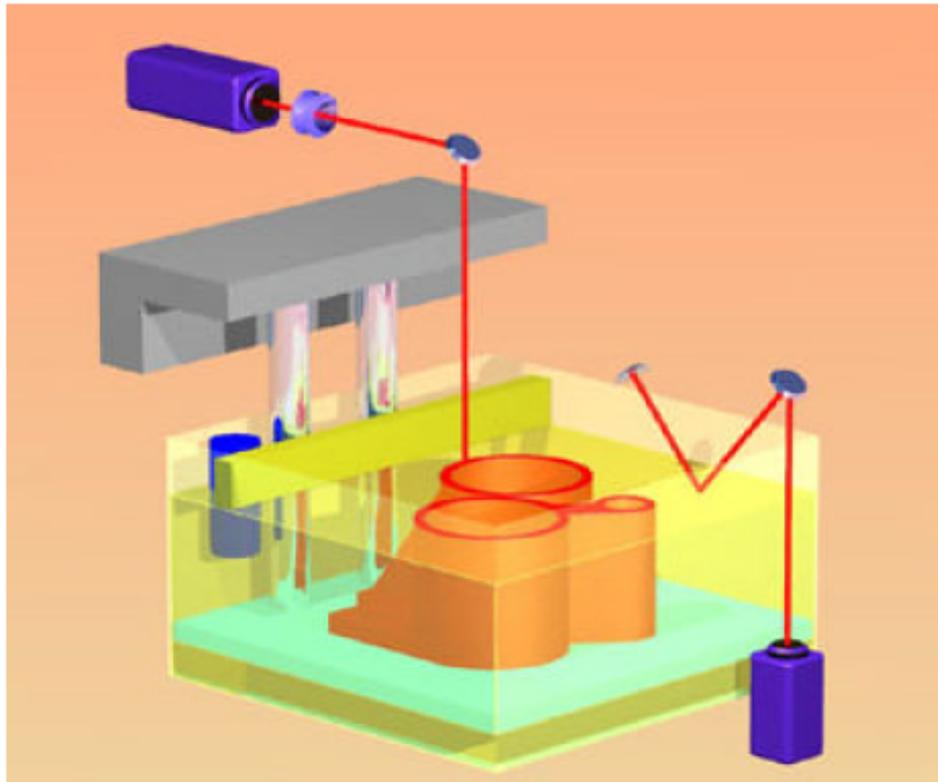


圖 3.2 SLA 製程示意圖

3-1-3 雷射燒結成型法 (SLS)

雷射燒結成型 (Selective Laser Sintering, SLS)，為 DTM 公司之 SLS 系統的加工原理，如圖 3.3，是以二氧化碳紅外線 (Infrared) 雷射燒結粉末狀熱塑性材料，原始為在加工平台上以滾筒 (Powder Leveling Roller) 均勻地鋪上一層粉末，雷射光再根據物體 2D 截面形狀資料，掃瞄適當範圍之粉末，用雷射燒結出需要的形狀，整個工件是在一個可以上下移動的工作台上完成。工作台兩側有移動式

粉末匣，用來供應所需之粉末，旋轉式滾筒則在兩個粉末匣間滾動，作用為將所鋪上的粉末刮平，用以控制粉末的水平度。隨著各層之成型，各個機構重複著上述之動作，而工作台逐漸下降，最後工件包覆在粉末中完成。

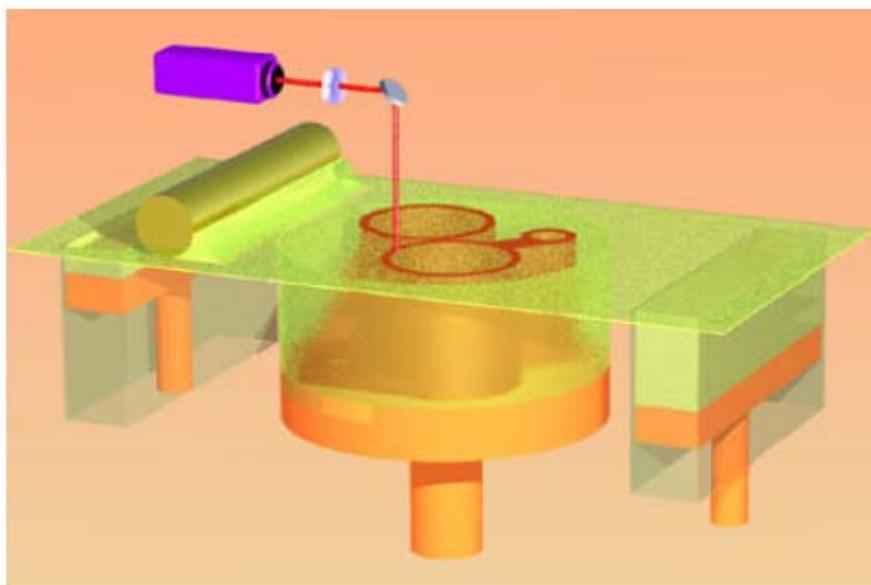


圖 3.3 SLS 製程示意圖

3-1-4 溶解沈積法 (FDM)

溶解沈積法 (Fused Deposition Modeling, FDM)，是由 Stratasys 公司所開發出來的一種快速原型技術，FDM 系統是以加熱頭 (Heated Head) 熔化線狀之熱塑性材料，絕大部分是以 ABS (Acrylnitrile Butadene Styrene, ABS) 料為主，如圖 3.4，熔化之塑膠材料從加熱頭擠壓出後，一層層的堆積成型。熔化的塑膠材料擠壓在成型平台後，在短時間之內就會凝固。在成型過程中，塑膠材料溫度需保持在凝固點左右，使塑膠材料層與層之間能適當的結合後迅速凝固。加熱頭有一組精密的馬達，可在水平面上準確的移動，使原料可以

精確的放置於正確的位置，而工作平台會一層一層的往下降，讓塑膠材料可以不斷的累積成型。FDM 系統加熱模組內有一精密驅動馬達，可準確地控制塑材擠壓出體積，使塑材均勻流出加熱頭，依所需厚度成型。

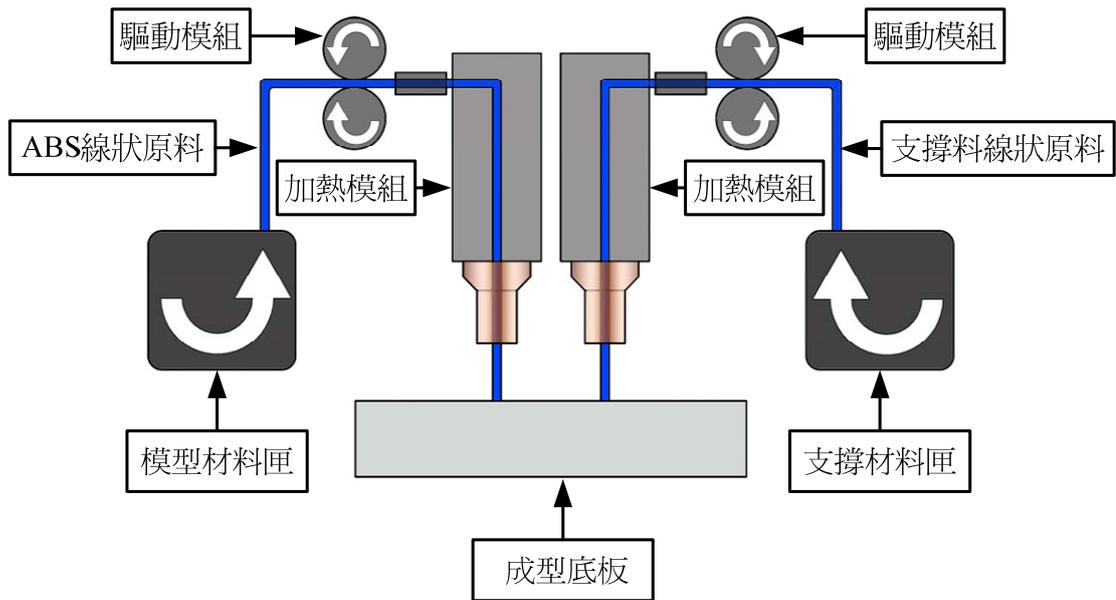


圖 3.4 FDM 製程示意圖

3-1-5 疊層法 (LOM)

疊層法 (Laminated Object Manufacturing, LOM)，Helisys 公司之 LOM 系統以薄片材料 (如：紙捲) 為原料，透過二氧化碳雷射進行切割成需要的形狀，每層之間再以加熱黏著劑結合在一起。所以成型過程中新的一層需加熱加壓，使其附著在先完成之塊狀工件 (Block) 上，多餘之材料須切割成細塊狀 (Tile)，以便清除，如圖 3.5，以兩個滾筒控制薄片材料的進給。薄片材料下為置放在一個上下移動之加工平台上，加熱的滾筒則在切割過的薄片上滾動，加熱並加壓使材料上之黏著劑受熱而發生效用，用以結合工件，完成後

取出並把多餘紙捲原料撥除，便可得到原型。

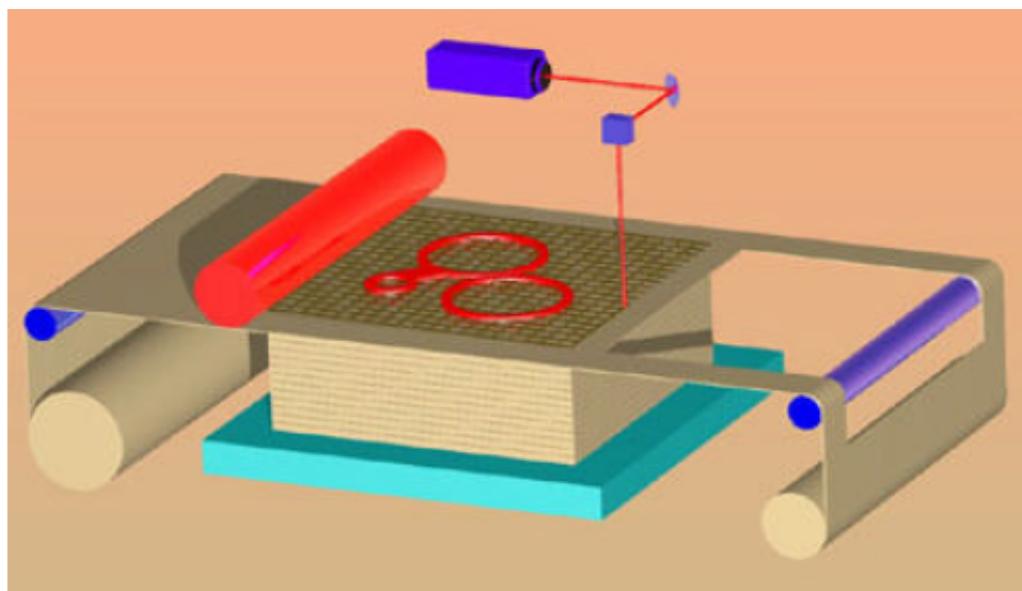


圖 3.5 LOM 製程示意圖

3-1-6 固態基礎固化法 (SGC)

固態基礎固化 (Solid Ground Curing, SGC)，是以色列 Cubital 公司生產的一種較複雜 RP 系統，其須經過多個加工程序才完成一層之成型。這技術成型原理是以紫外線燈光照射依 2D 截面形狀所產生的光罩 (Mask)，紫外線燈光穿過光罩透明區域，固化光罩下之樹脂，尚未固化部份樹脂須除去再塗上臘，同一層上面的臘及樹脂經機械加工成為均勻厚度。工件每層都經如此步驟成型後，整個包覆在臘中的工件即可完成，最後將臘熔掉取出工件。圖 3.6 為光罩產生過程，SGC 系統根據 CAD 系統所提供的工件 2D 截面資料，透過離子化成型 (Ionography) 技術，使光罩上塗滿碳粉，塗碳粉區域就是工件 2D 截面外部不透光部分，因此就不會讓紫外線照射到，也就不會固化此範圍的樹脂 (如步驟 B, C)，光罩使用後可以清除

上面之碳粉，繼續重新製作下一個光罩（如步驟 E）。圖 3.7 為工件成型程序，光聚合樹脂在平台上（步驟 A），經紫外線燈光曝光後，需要的區域則固化成型（步驟 B），多餘的樹脂液，以平移式刀狀氣流（Air-Knife Sweeper）吸除（步驟 C），再用臘充填吸掉樹脂留下之空隙，以加強工件成型時之強度（步驟 D），最後以旋轉式刀具銑平成型面，控制成型厚度（步驟 E）。

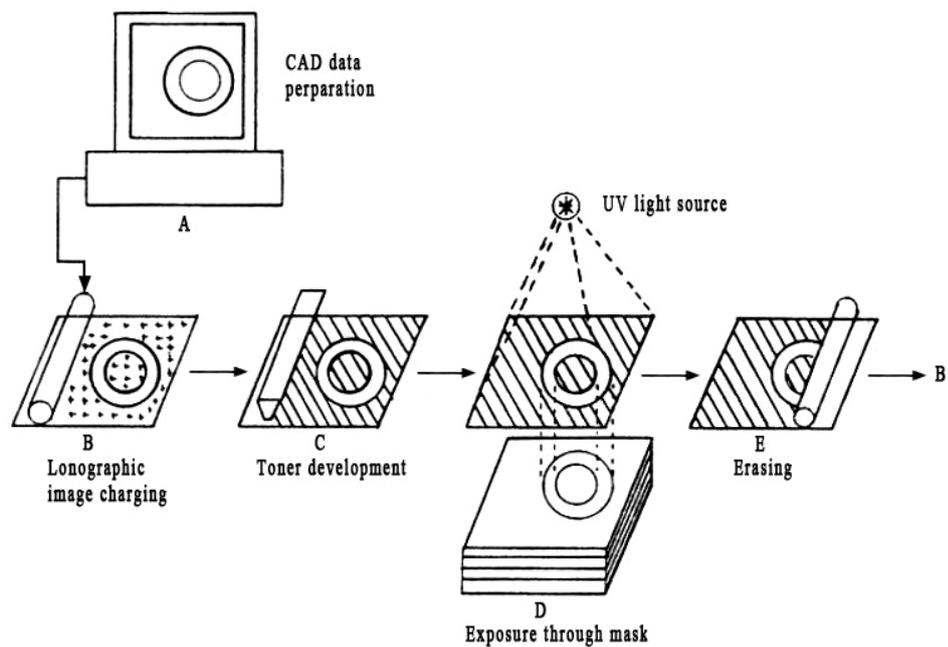


圖 3.6 光罩製程示意圖

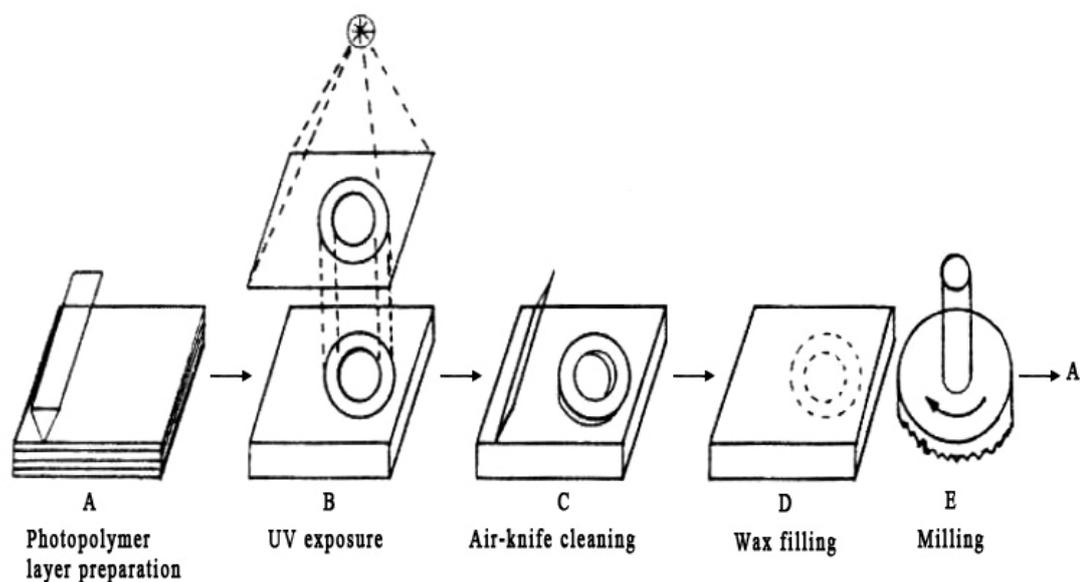


圖 3.7 SGC 製程示意圖

3-1-7 3-D 印刷法(3DP)

3-D 印刷法 (Three Dimensional Printing, 3DP)，是由麻省理工學院 (MIT) 所發展出來的一種快速原型技術，它可以利用任何原料 (如陶瓷、金屬粉末、聚合物和複合材料等) 來製造出任何形狀，且可以應用於工件的外型確認與功能測試，進而發展快速模具等應用。以 Zcorp 402 3DP 快速原型系統為例，其製作流程，如圖 3.8 所示，其工作原理跟其他 RP 機器一樣，也是利用層製造的方式來成形，將欲製造的 CAD 圖檔輸入，經由切層軟體的處理，精確地計算出各層的 2D 截面資料，並將粉末平鋪於工作平台上，再使用類似印表機的噴墨列印的技術，將黏著劑利用噴頭噴塗至欲成形的粉末上，則粉末與黏著劑相互結合硬化，完成該層的噴塗，其所結合的部份將成為工件的外形，反覆直到工件完成。最後再經過後置處理程序，將未結合的粉末去除掉，所留下的便是完成的工件。

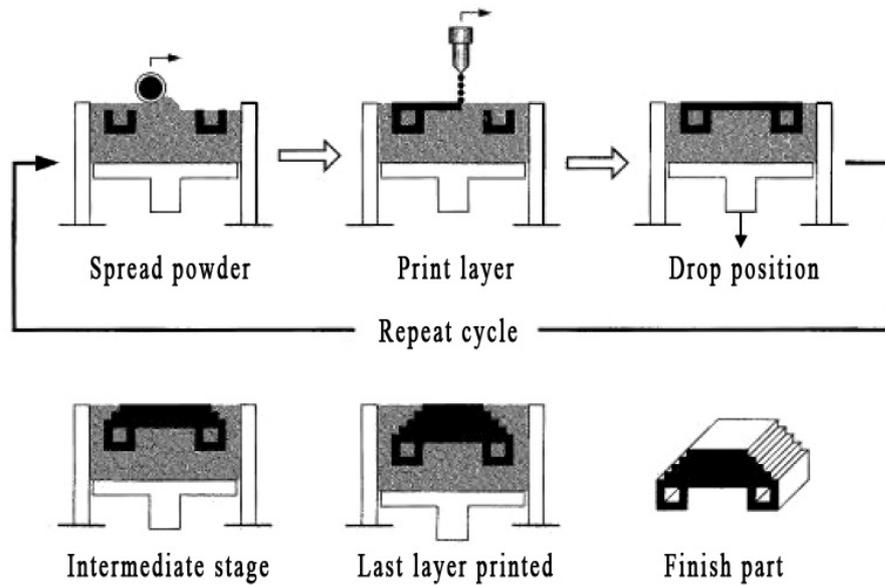


圖 3.8 3D Printing 製程示意圖

3-2 FDM 快速原型系統之特點

FDM 快速原型系統，為本文中所使用的快速原型機器，在此將有別於其他 RP 系統的特點來做詳細說明 [普立德科技，2005]。

FDM 快速原型系統是由 STRATASYS 公司所設計與製造，其原理是採用類似射出成型的原理和概念，係利用熱塑性的材料，經過擠壓然後通過預熱的噴嘴，形成半融狀態的細絲，外表看起來有如釣魚線一般，藉由沉積在層層堆疊基礎上的方式，依據使用者所建立好的 3D CAD 資料直接建構原型。這項技術通常運用在初期的概念設計、零件塑型、裝配確認以及各種實際運用的功能性測試上，也就是所謂的 Working Sample 實作，而並非只有純粹的外觀確認的 Mockup 而已。FDM 的技術非常適合於應用在少量製造以及快速製造上，還有應用在汽車零件的檢治具設計以及常溫模具應用，例如：翻砂、鑄造模具、吹瓶模具、射臘模具、以及塑膠模具等。因為 FDM

技術的材料物理性質穩定，成型過程中只有物理變化，所以尺寸精準度高且不易變形，與塑膠成品相同，又比起其它使用熱固性樹脂材料的快速原型技術而言，更適合應用在產品開發製程上面，來進行功能性原型測試。目前全球的航太業、汽車業、國防工業、家電業、消費性電子產業，以及醫療業的製造廠，很多都採用 FDM 的快速原型製造系統來進行產品的設計與開發。

3-2-1 FDM 使用原料介紹

快速原型的物理性質決定了模型的品質，並決定了其它應用的成敗。因此努力於工業上的需求來，符合這些預計用來生產的材料屬性是很重要的，這也是 FDM 公司方面一項最重要的技術強項之一，STRATASYS 公司目前應用在 FDM 上面的原料有下列四種，以下為詳細介紹。

(1) ABS/ABSi：所有的 FDM 系列產品都可以使用 ABS 當作為材料選項，而且有 90% 的 FDM 原型其實都是由 ABS 這種原料所作成的。而 ABSi 這種材料比起 ABS 來講則是多了兩種特性：一是具有半透明度，另一個則是具有較高的耐衝擊力，所以命名為 ABSi，i 即是代表 impact。根據使用者報告指出 ABS 的原型幾乎可以達到射出 ABS 成型強度約 70%~80%，因為整個成型過程是屬於物理變化，所以成型後的尺寸不會翹曲收縮，也不會受潮和變形。而且其它屬性，像是耐熱性以及抗化學性，也是相當於射出成型的工件，ABS 的耐熱溫度可達 93.3~104°C。這些優點就是讓 ABS 能成為功能性測試應用的廣泛使用材料，不過在顏色方面，無法像 3DP 那樣的機器可以直接在黏合膠水裡面調色，而是由廠商提供了各種顏色的

材料匣供使用者選購或是特別訂製。至於 ABSi 而言，目前大部分的 ABSi 使用者，大多為汽車產業的設計製造業者，它主要是應用在汽車的車尾燈原型，以及其它需透光性零件之初期原型。

(2) Polycarbonate (PC) / PC-ISO：這是在大型 FDM 機台上所用的一種新型的 FDM 材料，而且目前的使用量正快速的成長中。這種增加強度的 PC 材料比起 ABS 材料而言，在製造上所生產出來的原型，更能更禁得起外力與負載，適合在需要高度衝擊的產品功能測試上面，例如：棘輪機構、果汁機、電動工具、氣動工具、汽機車零件等等方面。該材料所生產出來的原型強度都可以達到並且超過射出 ABS 成型的強度特性，而且它的耐熱溫度比起 ABS 還要來的更高，為 $125\sim 145^{\circ}\text{C}$ 。另一種 PC-ISO 原料符合 ISO 10993-1 和 USP Class VI 的標準，它可以經過 γ 輻射或是氧化乙烯 (EtO) 消毒，然後應用在醫療器材方面。

(3) PC-ABS Blend：它是一種由 PC 和 ABS 塑膠所混合的材料，之選擇 PC-ABS 作為產品材料，是因為它結合了 PC 的強度和 ABS 的韌性。應用了這種新材料的廠商，就可以使用如同其最終產品相同材料來進行模型的製作，這樣就可以讓使用者增進預測使用 PC 和 ABS 混合材料的最終產品的機械性質，這個材料特性明顯強於 ABS，而且細緻程度與 ABS 成型材料的成品非常相似，所以特別受到玩具業者以及電子產業製造商的期待。

(4) Polyphenylsulfone (PPSF)：PPSF 這種原料是所有 FDM 快速原型材料裡面，擁有著最高的耐熱性、強韌性以及抗化學性，其耐熱溫度可以達到 $207.2\sim 230^{\circ}\text{C}$ 。對於航太業而言，這種此材料的難燃屬性是非常有幫助的，小家電業以及汽車製造業也可以其應用抗化

學性，以及 200°C 以上的持續運作的能力，對於食品調理業者和醫療產品製造業來講，PPSF 材質也可以直接將原型進行消毒，以進行原型產品的測試，這些都是 PPSF 材質與眾不同的地方。

3-2-2 快速原型製程

本研究以 FDM 系統的 Dimension BST（見圖 3.9）機台為例，由於 FDM 的製程簡單且容易操作，而且產生出來的模型強度夠，又不需要太大的後處理，便可以獲得良好的成品，因此在本研究中，以 FDM 快速成型機做為實驗驗證之用，並探討 RP 系統之製程及製作的過程。



圖 3.9 Dimension BST

1. 建立 CAD 模型

RP 系統是電腦化產品開發過程之一環。不只是 FDM 系統，無

論是使用何種 RP 系統都須先建立工件之 CAD 模型。所謂 CAD 模型，可分為實體模型（Solid Model）與曲面模型（Surface Model），如利用逆向工程來重新建構曲面，其建立方式就是以許多曲面包圍成一個封閉體積。使用實體模型系統或者曲面模型建立 RP 系統之 CAD 模型，都是較快速且方便。所以 CAD 模型製程可包括正向工程（Forward Engineering）的模型建立，與逆向工程（Reverse Engineering）的模型建立，有關正向工程、逆向工程與 RP 間的關係，可參考圖 3.10。

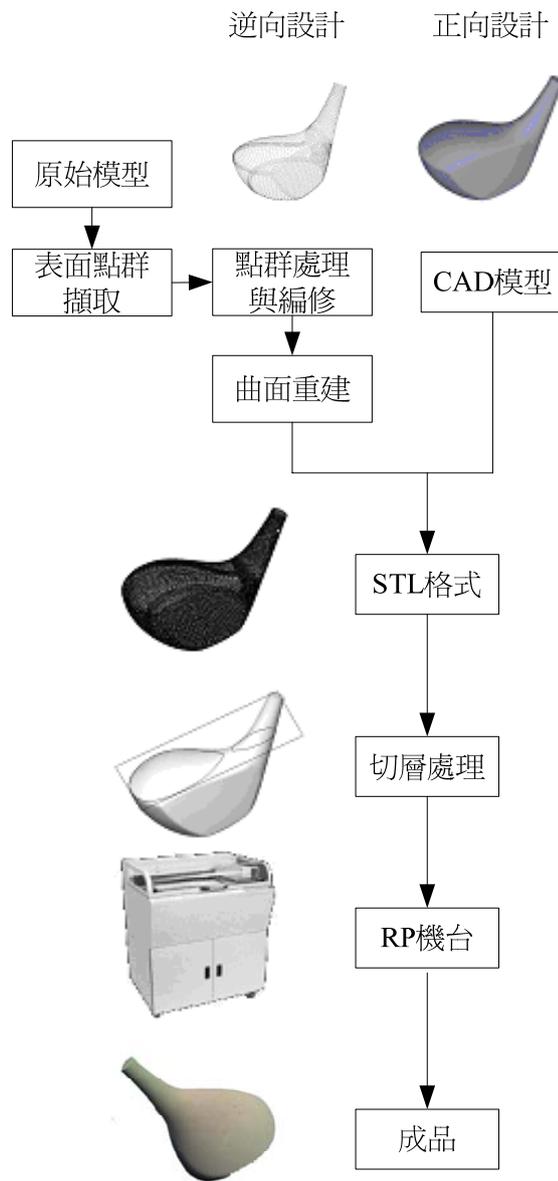


圖 3.10 正逆向工程與 RP 之間的關係

(1) 正向工程模型建立

正向工程模型建立，就是設計者依照產品的設計圖，利用電腦軟體將其繪製成 CAD 圖形，一般依此方法建構出的模型，大部多為實體模型。在很多新產品設計開發時，都是利用此方法來建構模型。

(2) 逆向工程模型建立

逆向工程模型建立，一般應用可分為以複製幾何形狀及重建設

計資料為兩方面。大多情況是在於已經有現成的產品，但是卻沒有該產品的設計圖時，或者產品經過了修改，需做 CAD 資料回饋與重建時，便可以利用 3D 掃描機，來掃描物體表面，進而獲得物體表面的點群資料，在經過檔案處理加以編修後，就可以獲得 CAD 資料。一般依此法所獲得的 CAD 模型時，大多是以曲面模型的方式來表示。曲面與曲面間是形成封閉的空心體，並非實體，要輸出至 RP 時還要進行檔案轉換的步驟，把曲面模型轉成實體模型才能利用 RP 製作原型。

2. 檔案轉換 (File Transform)

各種 CAD 系統所使用的資料結構都不相同，因此在 CAD 模型與快速成型系統間要建立共同的檔案傳輸格式，然後將 CAD 系統內所繪製完成的圖形轉換至 FDM 系統中。目前主要的格式轉換標準為 3D Systems 公司所設計的 STL 格式檔，STL 檔案格式是一種三角網格幾何模型，且以三角面 (Facet) 的方式來趨近似物體表面的形狀進而產生的檔案。它的資料內容是以順序的方式表示所有的三角面之頂點座標及法線向量的集合 (如圖 3.11) [Chua, et al., 2003]。

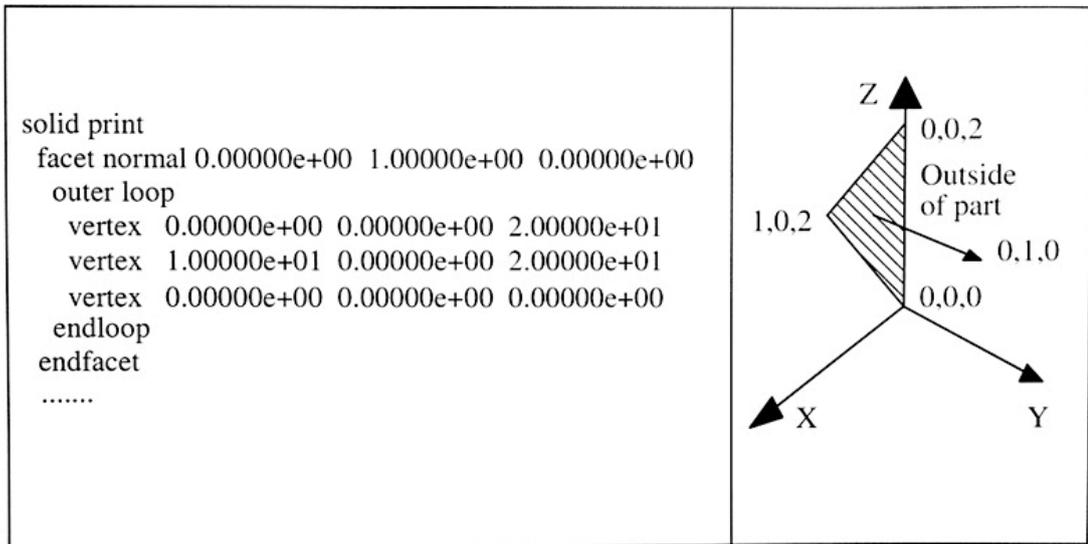


圖 3.11 STL 格式之模型表示與紀錄型態圖

3.RP 製作

以 Dimension BST 為例，在製作工件之前，需考慮幾個重要參數(1)切層厚度；(2)擺放角度。Dimension BST 是屬於熔融擠製成型的技術，而此 BST 機型是屬於最低階的機種，故成型材料只能選擇 ABS 這一種，而且支撐料的選擇也只能選擇易撥除式的原料，沒辦法使用水溶性材料，因此主要就是選擇其切層厚度以及擺放的位置和角度，其他的詳細機台參數設定將在第四章作詳細說明。

4.後處理(Post Processing)

成型完成後的工件，從 Dimension BST 取出後，工件表面會根據所擺放的角度而產生不同的支撐物出來，附著在工件表面上，此時可以利用一些工具或是用手將支撐料分離，把工件與支撐料分開，便可得到成品。完成的成品還可以視應用方向，進行表面加工或是工件的其他處理，例如：補土，打磨、噴漆上色或是將多個快速原型工件加以接著黏合等等。

3-3 田口實驗計劃法

田口實驗計劃法是田口玄一 (Taguchi Genichi) 博士所開發倡導，為利用簡單的直交表實驗設計與簡潔的變異數分析方法，田口博士提出『品質是可以設計的』，在產品的設計開發過程中，根據產品之品質特性、製程參數及相關資訊，先行找出其製程之最佳的加工參數，以最少的資源 (時間、人力、物力、財力) 獲取最大的利益 (減少售後之維修、獲良好的商譽)。田口方法以少量的實驗數據來進行分析，便可以有效提昇產品品質，所以在日本工業界迅速普及，稱之為品質工程 (Quality Engineering)。在 1980 年代後，美國 AT&T、Ford、Xerox、Motorola、柯達等很多的企業都陸續採用此方法，歐美一般稱之為田口方法 (Taguchi Method) [李輝煌，2000]。

3-3-1 田口方法

田口方法簡單的來說最大的特色就是在於可以用比較少的實驗組合，就能夠取得有用的資訊。雖然不像全因子法可以真正的找出確切的最佳化位置，但是能用少數實驗方式，便可以指出最佳化之趨勢，故田口實驗方法的可行性是遠大於全因子法。田口方法有以下幾項特點：(1)基於品質損失函數的品質特性、(2)實驗因子之定義與選擇、(3)S/N 比 (Signal Noise Ratio、信號雜訊比)、(4)田口直交表。

田口方法的實施步驟，可以簡單分為下列十項 [李輝煌，2000]：

1. 選定品質特性。
2. 判定品質特性之理想機能。
3. 列出所有影響此品質特性的因子。

4. 定出信號因子的水準。
5. 定出控制因子的水準。
6. 定出雜訊因子的水準，必要的話，進行雜訊實驗。
7. 選定適當的直交表，並安排完整的實驗計劃。
8. 執行實驗，記錄實驗數據。
9. 資料分析。
10. 確認實驗。

重覆以上步驟，直到達到最佳的品質及性能為止。

3-3-2 田口方法重要名詞

田口方法有一些常用的名詞，在此作一解釋 [陳耀茂，1997]。

- (1) 因子或是因素 (Factor)：為了達成實驗的目的而可以控制之操作條件，或是稱之為實驗變數。例如：列印解析度、環境的溫度... 等等。
- (2) 水準或是階次 (Level)：表示因子的狀態條件稱之為水準，水準的總數目稱之為水準數。例如：若列印的解析度有 720 dpi、1440 dpi、2880 dpi 有三種狀態條件，則水準數為 3。而環境的溫度水準有 30°C、40°C、50°C、60°C 等四種狀態條件，稱其水準數為 4。
- (3) 處理 (Treatment)：因子和水準的特定組合。例如：列印解析度的因子含 720 dpi、1440dpi、2880dpi 三個水準，而列印的紙張種類有普通紙、噴墨紙，以及相片紙三個水準，所以處理量共有 9 種。

(4)品質特性 (Quality characteristic)：是指實驗結果好壞的測量值，例如：輪胎的磨耗度。

3-3-3 因子種類

田口方法中的參數設計目的，就是要找出一組控制的因子 可以讓品質的特性損失到最小 [黎文龍，2000]。

(1)控制因子 (Controllable factors)：在參數設計中控制者可以自行調整控制的因子，就是可以自由設定的參數。簡單的說，就是控制者可掌握控制其在不同水準下，對品質特性影響的因子，而且因子對產品品質變異具有影響性，且藉由控制因子水準改變，可找出降低產品品質變異之最佳因子水準組合。而且當因子水準改變時，並不用花費另外的成本，譬如：RP 機台切層解析度、支撐料處理方式、擺設位置等。

(2)信號因子 (Signal factors)：表示可以由使用者或是工程人員加以調整設定，可以調整信號因子來使得品質的特性有所改變，但是卻不會影響品質的變異，來表示所想要達到的目標。例如：電風扇轉速設定改變的話，就可以變風量大小；汽車轉向角度改變，就可以改變其迴轉半徑。

(3)雜訊因子 (Noise factors)：或稱干擾因子，也就是不可控制的參數，沒有辦法由設計人員掌握。且雜訊因子的水準通常會隨環境而常常變化，所以就無法確定在特定情況下雜訊因子之數值，通常我們是以雜訊因子的平均值來做為水準值。一般來說。雜訊因子會影響品質特性而偏離目標值，所以會帶來損失。基本上凡是參數的水準不容易控制，或是要去控制這些干擾因子的參數時，需要付

出很高的代價及成本者，皆可視為雜音因子。比如說：像是大氣中的塵埃數量，對於無塵室之影響。這些對於品質特性的影響，可見圖 3.12。

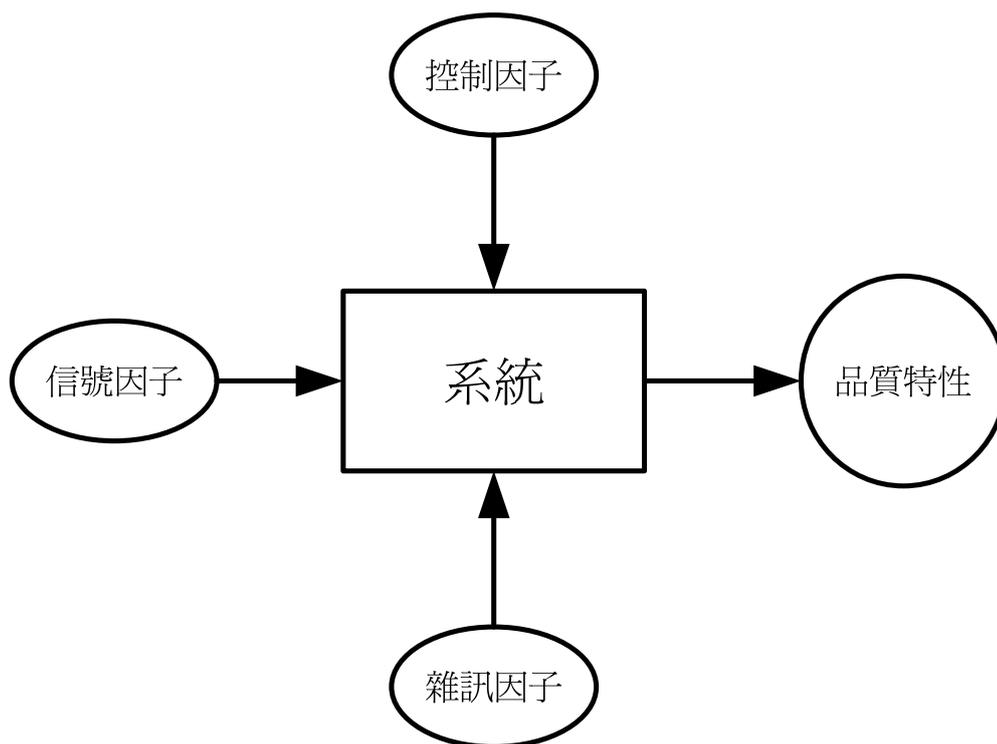


圖 3.12 品質特性影響圖

3-3-4 常用實驗方法介紹

除了田口實驗計劃法之外，另外還有一些常用實驗法，在此簡單介紹[李輝煌，2000]。

(1)試誤法(Trial-and-error):簡單的來說，憑著個人直覺和經驗，選擇一組參數設計來直接嘗試，如果結果不能夠接受的話，那就再換另外一組參數來實驗，如果可以被接受的話，那麼這組參數就可以被採用，其不需要經過任何的資料分析。試誤法不是一種系統化

的方法，太過於依賴個人經驗，有時候雖會很有效率，但是相反的，個人經驗若不足，反而變成浪費時間和人力。即使獲得到一個可以被接受的設計值，其中試誤過程也很難傳承下去，因為它所累積的經驗常常沒有系統，所以很難傳承給其他人。

(2)一次一因子法：每次只變動一個因子，而其他因子則維持於前次實驗的水準，以探討因子、水準變動之效應。表 3.1 說明一次一因子實驗中，探討 7 個 2 水準因子對 y 的影響，目標為使 y 最小化。實驗 1 全固定於水準一，實驗 2 只變動 A 至水準 2，其餘維持不變，是以 A 之效應為 0.3。實驗 3 只變動 B 至水準 2，其餘維持和實驗 2 相同，所以 B 之效應為 0.5。

表 3.1 一次一因子法實驗數據表

Exp	A	B	C	D	E	F	G	y
1	1	1	1	1	1	1	1	1.2
2	2	1	1	1	1	1	1	1.5
3	2	2	1	1	1	1	1	2.0
4	2	2	2	1	1	1	1	1.1
5	2	2	2	2	1	1	1	1.8
6	2	2	2	2	2	1	1	2.2
7	2	2	2	2	2	2	1	1.6
8	2	2	2	2	2	2	2	1.7

如果要求的效應為正，代表該因子變化，對於 y 值而言有加大的趨勢；如果要求的效應為負值，則會有減小的趨勢。故，如果目標是為了使 y 減至最小，則應找出各因子貢獻最小的組合，觀察此表之第 1 和 2 列可以發現，當 A 由 A1 變成 A2 時， y 值由 1.2 變 1.5，

因此可以說 A1 比起 A2 而言較佳。再來看到 2 和 3 列，當 B1 改變為 B2 時，y 值由 1.5 變為 2.0，因此可以發現 B1 比 B2 好，接到看第 3 列和第 4 列，當 C1 改變為 C2 時，y 值由 2.0 變為 1.1，所以可以發現 C2 比 C1 好。依照這樣觀察下去，最好的因子水準組合為 A1、B1、C2、D1、E1、F2、G1。

但是一次一因子法有一個缺失，就是每一個因子效性，都是在特定的條件下的計算值，例如：對 A 而言，是基於其他因子均為水準一的情形下 A 的表現。一旦其他因子一併變動，那麼原先求出 A 之效應就會變成沒有意義。

(3)全因子法：此方法是把全部可能的因子排列組合，全部列出以後，再逐步的一一進行實驗。以表 3.2 為例，擁有 2 水準的 4 個因子，共有 $2^4=16$ 個實驗組合。所以如果實驗目標為想要使得 y 值最小，則應該選取第 3 組的實驗組合 A1、B1、C2、D1。而且因為全部的因子水準組合都會出現，所以全因子法的直交表實驗可以將偏見完全的排除，而且獲得可靠的資訊。但是此方法有個缺點，就是如果當因子或水準愈多，相對的所需的實驗組合就會愈多，變得花費的時間、精力或成本也愈多，可行性愈低，因此也就沒有效率可言。

表 3.2 全因子法實驗數據表

Exp	A	B	C	D	y
1	1	1	1	1	1.1
2	1	1	1	2	1.3
3	1	1	2	1	1.0
4	1	1	2	2	1.8
5	1	2	1	1	2.0
6	1	2	1	2	2.1
7	1	2	2	1	1.5
8	1	2	2	2	1.1
9	2	1	1	1	2.3
10	2	1	1	2	2.2
11	2	1	2	1	1.6
12	2	1	2	2	1.7
13	2	2	1	1	1.8
14	2	2	1	2	2.0
15	2	2	2	1	1.5
16	2	2	2	2	1.3

(4)田口直交表：田口式直交表的構想是以比較少的實驗次數來獲得有用的資訊，雖然理論上對於全因子法而言，會有精度上缺失，但是對於要解決工程上面的問題，田口式直交表通常是足夠。田口直交表以 $L_a(b^c \times d^e)$ 表示，代表共有 a 組實驗，其中最多可容納 b 個水

準的因子 c 個， d 個水準的因子 e 個，而 L 取自 Latin square (拉丁方陣)，為泛指一般矩陣。以常用的 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 代表共有 18 組實驗，其中最多可容納 2 個水準的因子 1 個，3 個水準的因子 7 個(在全因子試驗中，需有 $2^1 \times 3^7 = 4,374$ 組實驗)。表 3.3 為 $L_8(2^7)$ ，代表共有 8 組實驗，其中最多可容納 2 個水準的因子 7 個 (在全因子試驗中需有 $2^7 = 128$ 組實驗)。

表 3.3 $L_8(2^7)$ 田口直交表

EXP	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

3-3-5 實驗數據分析

在田口實驗計劃法中，最主要的是利用信號雜訊比 (Signal to Noise Ratio; S/N 比) 以及變異數分析 (Analysis of Variance; ANOVA) 這兩種方法，來進行實驗數據的分析，我們可以利用這兩種方法，就可以找出對於實驗貢獻度較大的因子，並且加以最佳化來降低產品的變異，而下面為簡單的說明[曾昱晨，2001] [Yao，2002] [陳耀茂，2003] [黃仲儀，2005]。

1. 信號雜訊比：田口博士所提出的 S/N 比，其主要目的在同時考量平均數以及變異數，依照所需要的品質特性種類，加以選擇使用不同的信號雜訊比。田口博士在評價品質特性時，改變了傳統所認為符合規格就是好產品的觀念，主張品質特性應與目標值一致，只要一有偏離，即會對社會造成損失。

S/N 比為田口實驗中衡量產品值的統計量度，S/N 比越高表示在此組因子水準下，品質輸出損失越少，也就是減少變異。品質特性分為靜態與動態兩大類，其中靜態品質特性較常使用，又分為三種：

(1) 望小型(Smaller the better)：

顧名思義是越小越好，最好是趨近於零例如：機械磨損、環境污染指數、產品不良率...等。其 S/N 比 (η) 轉換公式為：

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3.1)$$

(2) 望大型(Larger the better)：

品質特性為越大越好，最好是趨近於無限大，例如：引擎功率、產品壽命...等。其 S/N 比轉換公式為：

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3.2)$$

(3) 望目型(Nominal the best)：

品質特性越接近目標值越好，其最佳值就是目標值，例如：配合件尺寸，產品外觀尺寸...等。其 S/N 比轉換公式為：

$$\eta = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{\sigma^2} \right) \quad (3.3)$$

$$\text{平均數： } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.4)$$

$$\text{變異數： } \sigma^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.5)$$

2. 變異數分析：變異數分析（Analysis of Variance；ANOVA）的目的在於，是用統計檢定的方法來鑑別控制因素的影響效果，此方法可以排除一些影響因素，而不是用個人主觀的意見來加以判斷。一般而言，傳統的變異數分析是由幾個基本的要素來構成的：平方和（Sum of Squares；SS）、自由度（Degree of Freedom；DOF）、均方和、誤差變異、變異比 F 以及貢獻度。

(1) 平方和（SS）： SS_A 、 SS_B 、 SS_C ... 表示來自 A 因子、B 因子、C 因子等之平方和； SS_e 表示誤差平方和； SS_T 表示總平方和。

(2) 自由度（DOF）：每個因子的自由度等於其水準數減去 1，而總自由度個數等於全體測值的個數減 1。

(3) 均方和：平方和除以自由度而得到的值

(4) 誤差變異：為總誤差平方和/總誤差自由度。

(5) 變異比 F：F 值=均方和/誤差變異，由此 F 值大小可以判定該因子對實驗結果的影響是否顯著，F 值愈大表示該因子對於實驗結果的影響愈顯著，F 值愈小則愈不顯著。

(6) 貢獻度：平方和/總平方和 x 100%

第四章 FDM 製程參數特性

FDM 快速原型機台控制軟體中，有很多的選項設定參數，讓使用者可以做各種調整與設定，藉由調整機台的控制參數，都會影響到最後機台所完成的快速原型之品質、精細度、強度、與外觀...等。因為快速原型機有各種不同的製作原理，所以不同原理的機台就會有著不同的設定，本研究所使用的 FDM 機台之 Dimension BST 操作軟體 Catalyst (版本 4.01) 之製程參數設定加以介紹 (圖 4.1)。

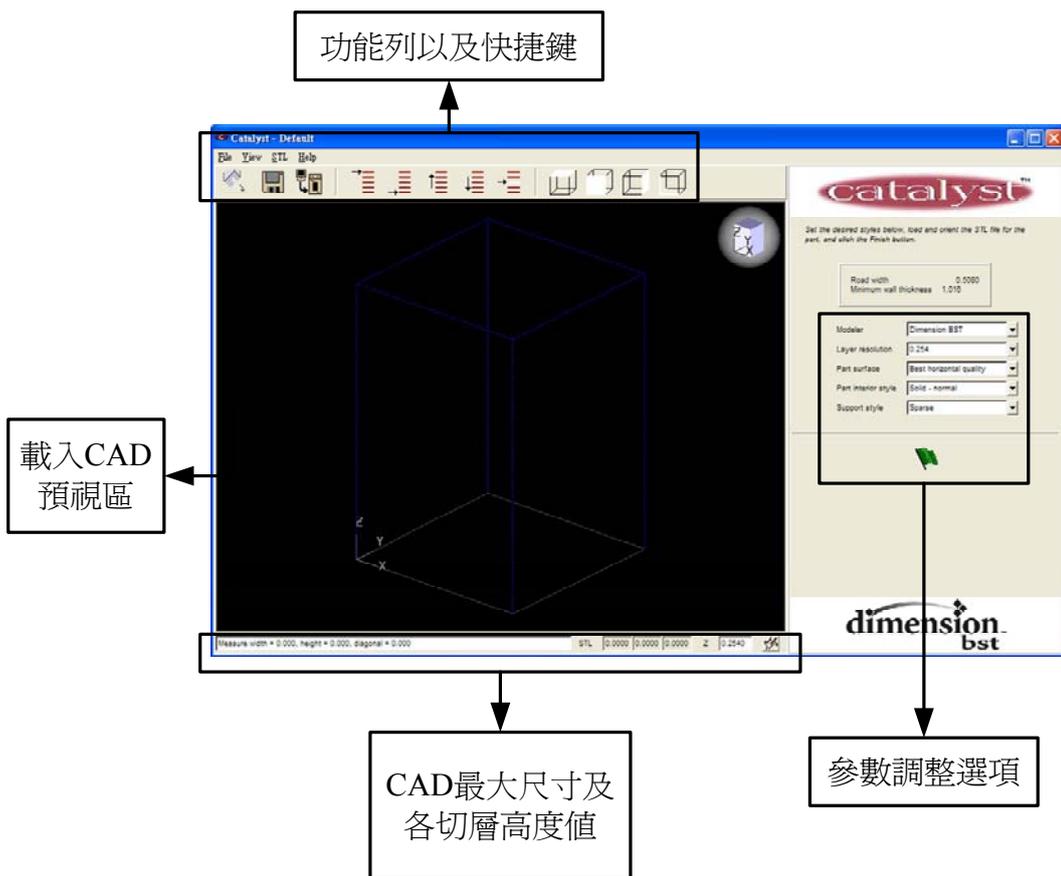


圖 4.1 Catalyst 軟體介面圖

在參數調整選項中，第一項為 Model 機器型號設定，因為此軟

體適用於三種機台，一為 Dimension BST，再來是 Dimension SST，另一種是 Prodigy 機型，本次實驗機種為 Dimension BST，最下面是 CAD 圖形的最大外觀尺寸和各切層高度，以方便使用者逐層檢查工作路徑。介面最上方為功能列和快捷列，中間部分則是載入 CAD 圖的預視區，圖 4.2 則是切層時的各路徑表示說明，包括了主原料路徑、工件輪廓、製作時最大工作路徑輪廓、支撐原料輪廓。

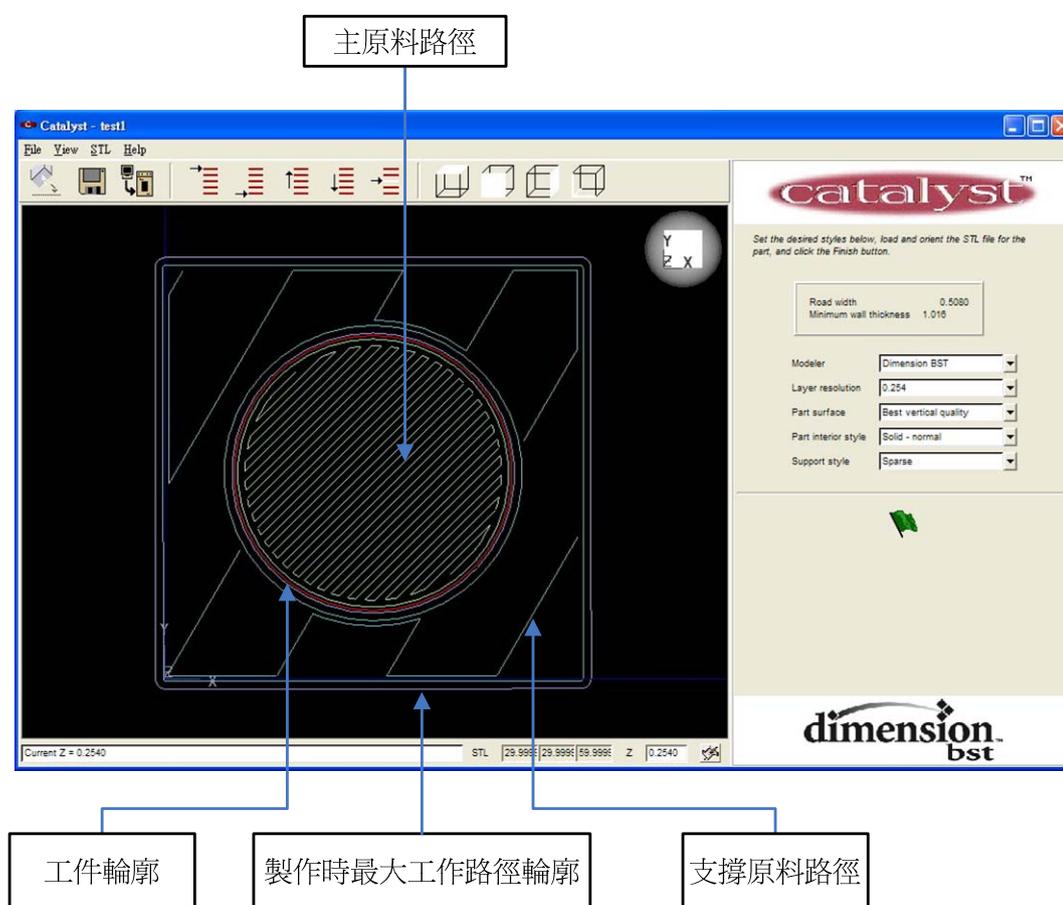
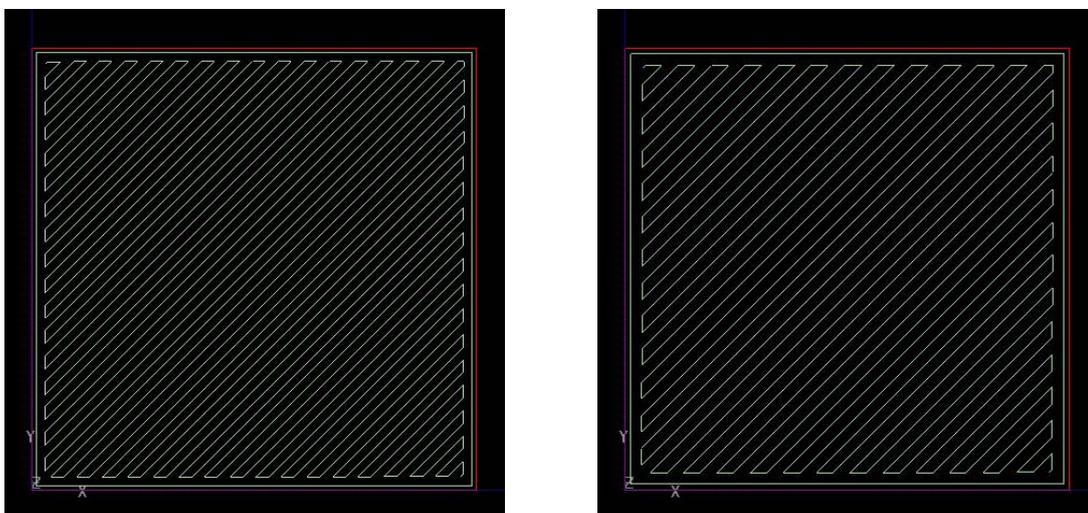


圖 4.2 Catalyst 切層解說圖

4-1 Layer resolution

快速原型機台最主要的一項設定參數，就是機台的切層厚度，為控制快速原型所產生出來的成品之精細程度，一般來說切層厚度

設的越小的話，相對的切層數目也就變多，製作的時間相對的也會變長，機器就要花更多的時間來慢慢產生成品，所以做出來的成品品質以及精緻程度也會提高。如果把切層厚度加厚的話，相對的切層數目就會減少，機器就可以更快的產生出成品出來，但是成品的品質以及精細程度也會打折扣。本快速原型機台可以設定的切層厚度有兩種，一為精細解析度 $0.254mm$ ，見圖 4.3a，另一個為較為粗糙的解析度 $0.3302mm$ ，見圖 4.3b。觀察兩圖可以發現，將切層解析度設定為 $0.254mm$ 之路徑規畫，比設定為 $0.3302mm$ 密集。就使用而言是用軟體內定的精細解析度 $0.254mm$ 來產生成品，所獲得的成品品質最好、也最漂亮，不過如果只是做個產品的外型快速打樣，或是快速的想觀看整體造型的話，便可以選擇 $0.3302mm$ 的解析度來產生成品，就可以有效的節省時間，方便設計之進行。



(a) $0.254mm$ 解析度

(b) $0.3302mm$ 解析度

圖 4.3 解析度設定切層圖

4-2 Part surface

這一個選項基本上而言，是對於產生出來之快速原型物件的表

面精細度的最佳化設定，裡面有兩個選項，一個是 Best vertical quality (最佳垂直方向品質)，另一個則是 Best horizontal quality (最佳水平方向品質)，這兩個選項的設定基本上是根據製作原型的造型而選擇，軟體會根據使用者的選擇，來變更快速原型物件裡面的填充方式，下面將這兩種填充方式做詳細說明。

(1) Best vertical quality：內部填充物的工作路徑是以 45 度角的方式來計算，但是每層之間路徑則是互相 90° 垂直交叉的方式一層一層堆疊起來的。以下面的圖形做為例子，邊框是模型的外為輪廓，裡面細線就是快速原型機之填充物的工作路徑，兩張圖分別為接臨上下層的關係，圖 4.4a 為 Z 軸高度在 0.254mm 的地方，圖 4.4b 的 Z 軸高度是在 0.508mm 的地方，可以看到圖 4.4a 和圖 4.4b 的工作路徑互相成 90° 交錯層層相疊，然後機台的工作路徑就是圖 4.4a 和圖 4.4b 的方式反覆交疊，慢慢的一層層往上增加，最後完成快速原型成品。

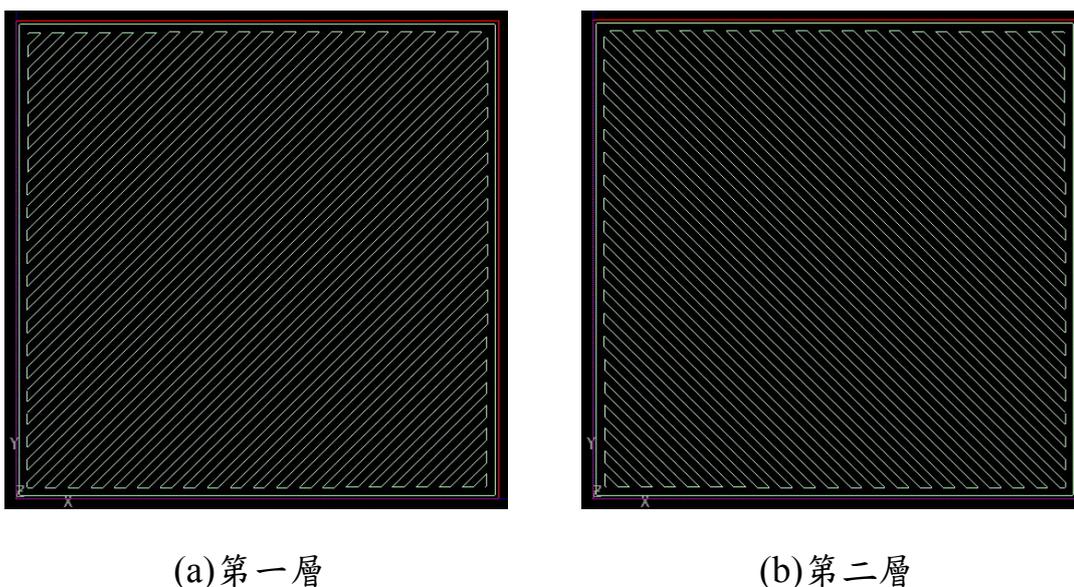


圖 4.4 垂直最佳化填充路徑

(2) Best horizontal quality：內部填充物的工作路徑是以更小的

角度互相交錯層層相疊，大概是在原來的 Best vertical quality 的每兩層之間，再多增加一層更小轉折的角度的方式進行計算其工作路徑，也就是說水平方向的每層工作路徑角度變化的更小，因此可以獲得更好的水平品質，以圖 4.5a 到圖 4.5d 來說明，圖 4.5a 是在 Z 軸高度為 0.254mm 的位置，工作路徑是以正常的 45° 為起始來開始計算，到了圖 4.5b 第二層的時候，Z 軸高度為 0.508mm，工作路徑計算的角度接近 90° 來作規畫，到了圖 4.5c 的 Z 軸高度為 0.762mm，工作路徑的規劃又回原來的 Best vertical quality 的第二層，大概是 135°，接著到了圖 4.5d，Z 軸高度為 1.0160mm 的位置的時候，其工作路徑的角度規劃已經接近 180°，接著的下一層又回到了圖 4.5a 那個角度，如此一層一層的堆積上去，最後完成了快速原型的成品。因為每一層和每一層的工作路徑所相交的角度，比原先的 Best vertical quality 之角度來的更小，所以更能增加其水平方向的品質，不過也就會稍微喪失垂直方向的品質，故使用者應該自行判所欲製作之模型該用哪種方式好，而軟體預設值是 Best vertical quality。

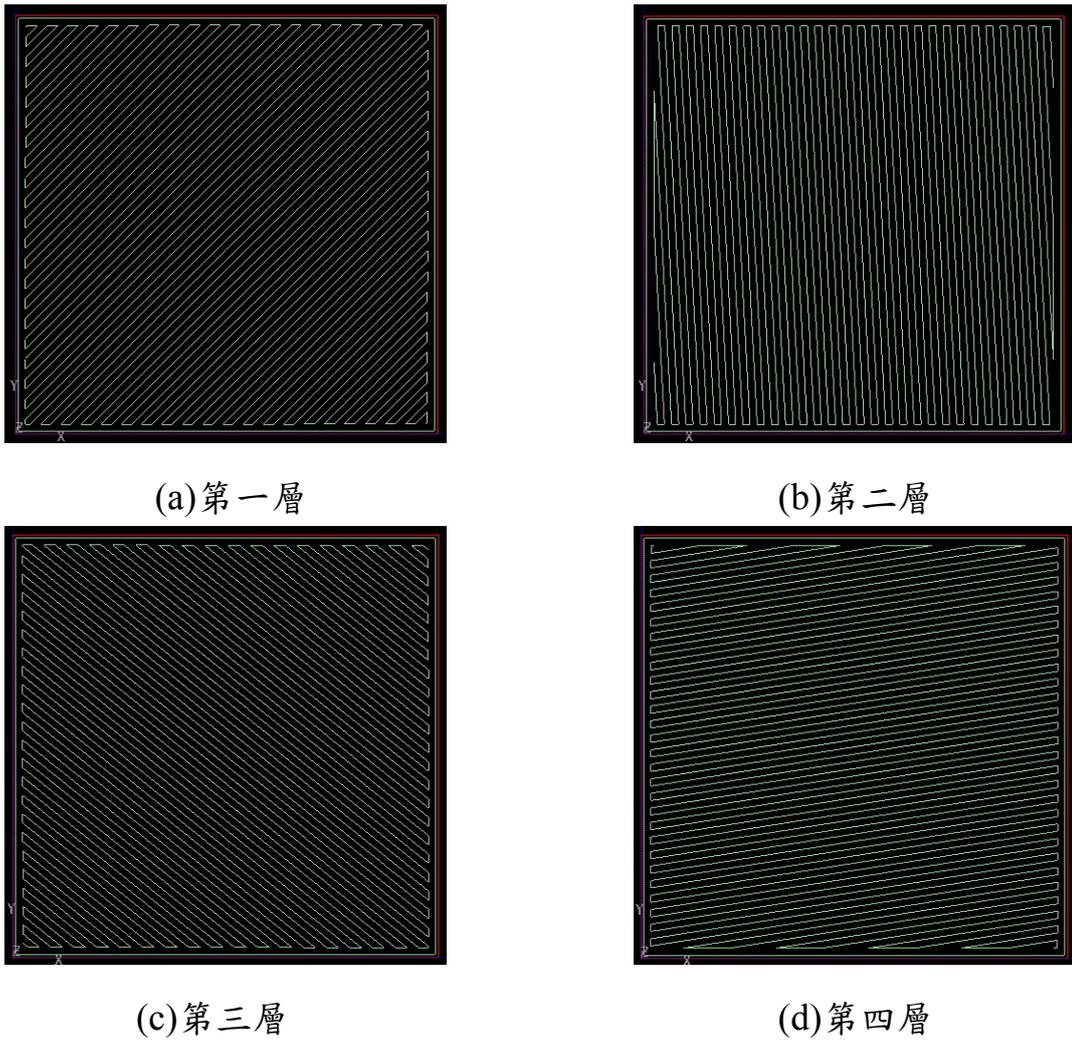


圖 4.5 水平最佳化填充路徑

4-3 Part interior style

此選項為改變快速原型機工件內部製作方式選擇，基本上這選項是除了前面切層解析度以外，是最能夠影響成品製作時間的一項設定，此設定可以改變內部填充物的密度，可說明如下。

(1) Solid-normal：此設定所製作出來的工件強度最好，因為填充方式是為完全實心（圖 4.6），也就是將工件內部完全的填滿 RP 原料，缺點是製作的時間較長，但是其製作出來的工件強度也是最強最好的，軟體預設值是建議使用此設定。

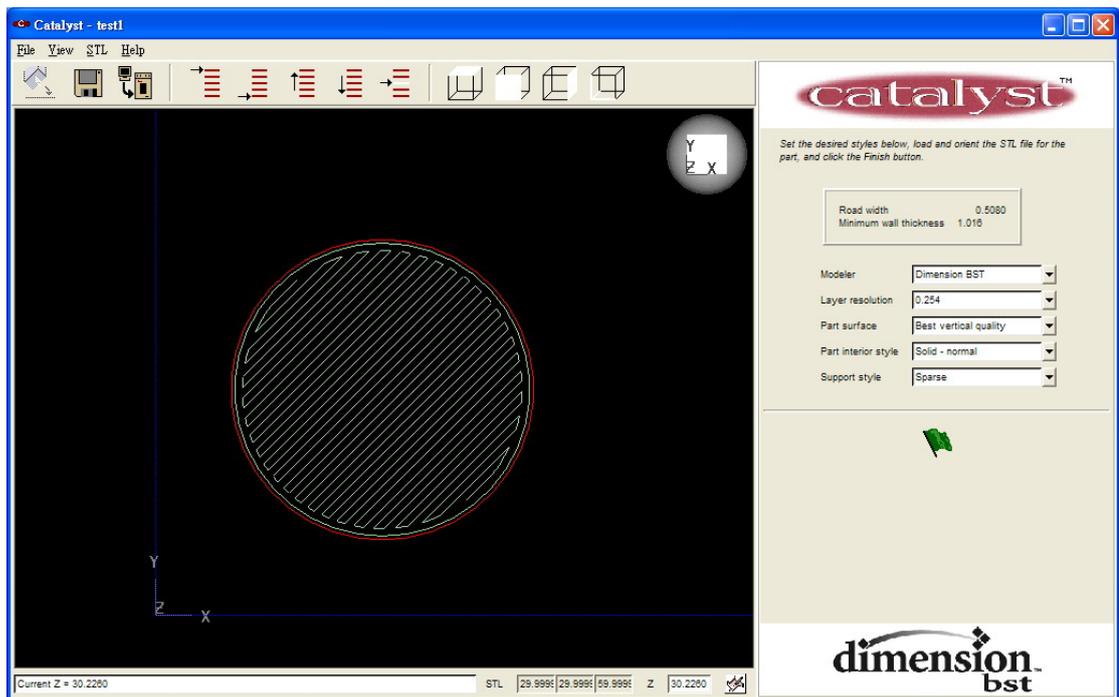


圖 4.6 Solid-normal 填充方式

(2) Sparse：用此設定所製作出來的工件強度比較弱，其內部的填充方式是以較為低的密度進行填充，相對於 Solid 而言，Sparse 方式製作的內部幾乎是空心的（見圖 4.7），但其優點就是製作的時間較快，而處理方式是軟體先將工件的外部輪廓計算好，也就是自動計算出一定厚度的外殼之後將其外殼填滿，接著內部是以相對於 Solid 而言，是非常稀疏的工作路徑來填充。

這項設定比較適合於想要快速的節省時間，而又不想要降低其切層解析度的時候，就可以使用此設定。不過整體來說完成的成品強度會下降很多，比較不適合拿來當作要實地組裝測試的零件，比較適合單純要拿來觀看其整體造型，或是用於靜態展示之物品，乃至於想節省整體 RP 的成本，都是可以使用此設定。

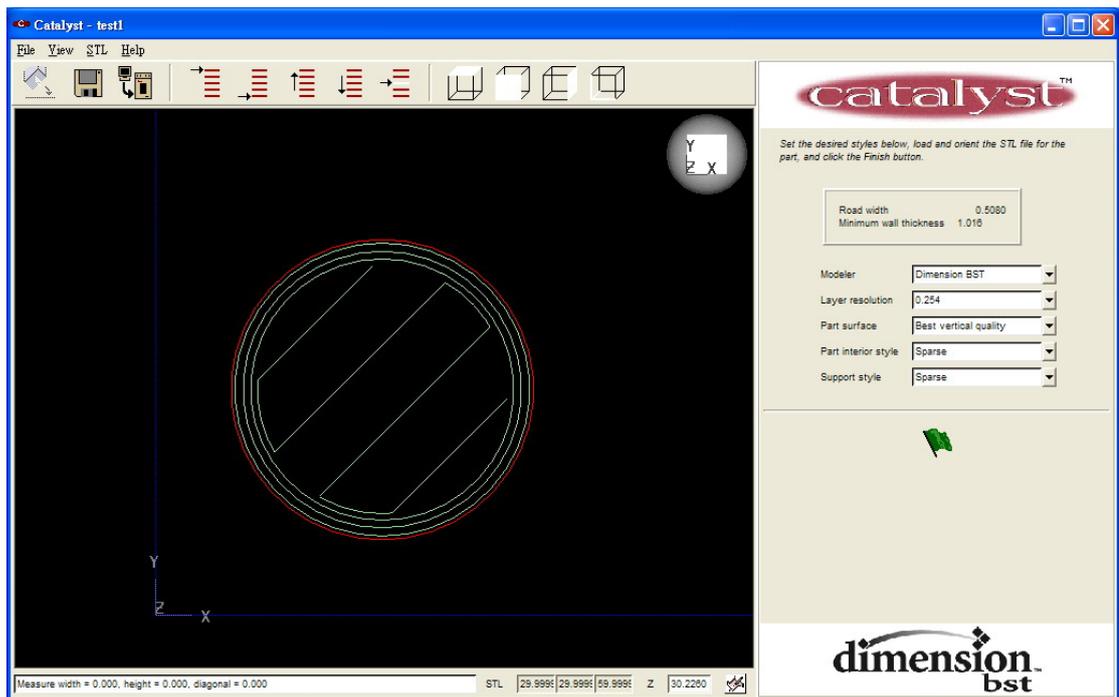


圖 4.7 Sparse 填充方式

4-4 Support style

本設定是改變工件的支撐物的支撐方式，FDM 機型，具備兩個噴嘴，除了噴出 RP 成品的原料 (Model) 以外，另一個噴嘴就是噴出支撐料 (Support)，因此除了可以設定原料的作業方式外，也可以設定支撐料的作業方式，下面以圖 4.8 製作之模型來當作例子說明，解釋各種不同支撐料設定的情況。

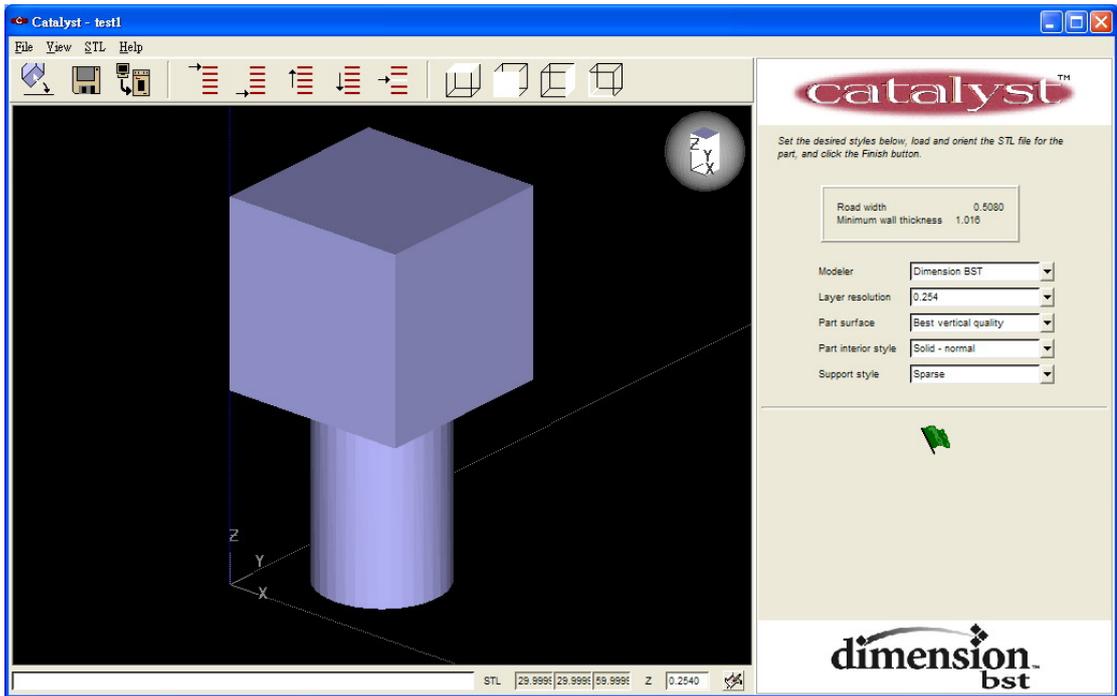


圖 4.8 欲製作之模型圖

(1) Sparse：選完模式以後，按下計算便會產生出預覽圖（圖 4.9），此設定所噴出的支撐料最稀疏（見圖 4.10），甚至比主原料（Model）所設定之 Sparse 還要來的稀疏，但是最外圍還會再加噴一層支撐料將內部的支撐料包圍起來，其優點不外乎是完成之後，易於拆除還有節省其支撐原料。用此設定所製作的支撐料強度中等，但是時間最快而且最省支撐料設定方式，為機台軟體的預設值，建議使用此設定。

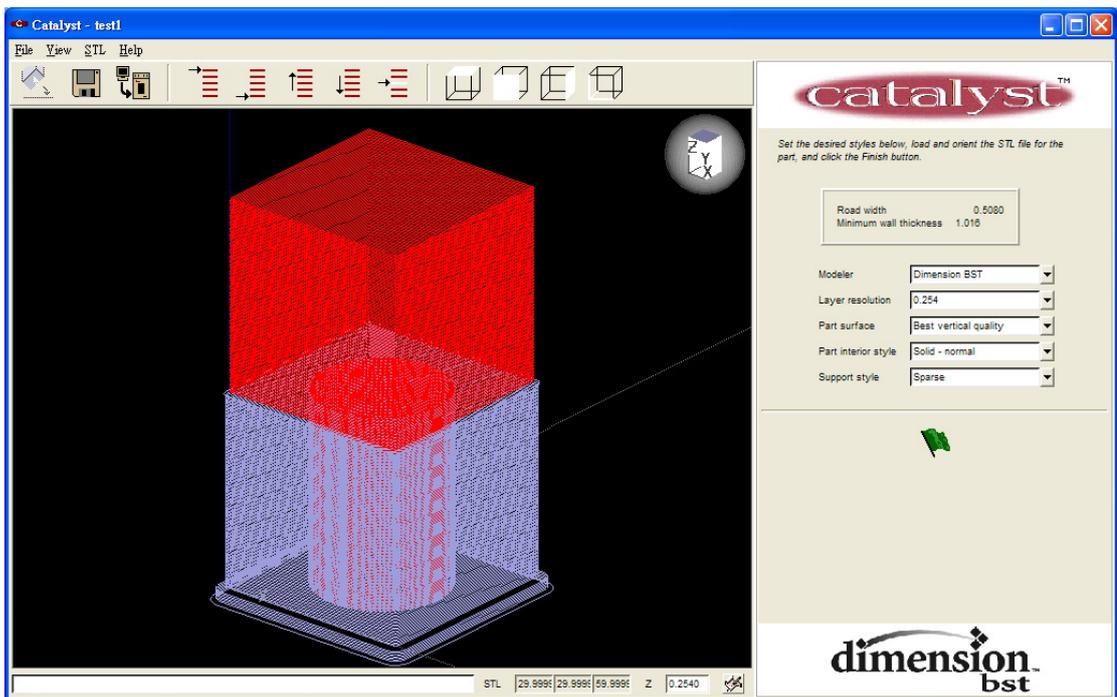


圖 4.9 支撐料之支撐圖

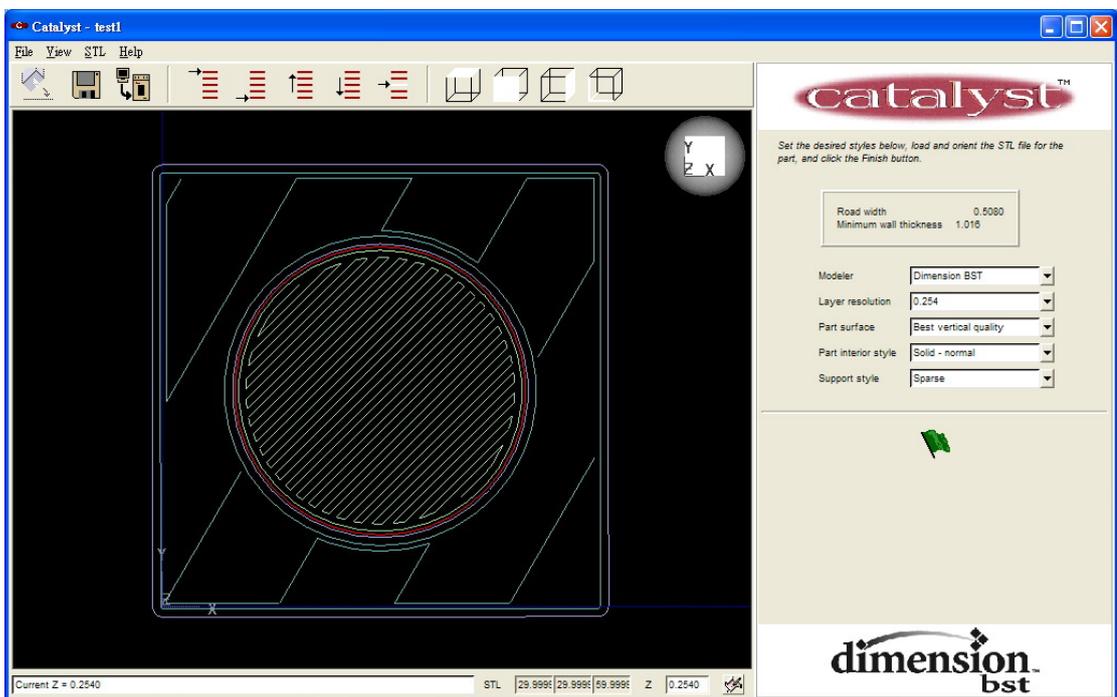


圖 4.10 Sparse 支撐料內部填充方式

(2) Basic：此設定所作的支撐物密度最高，但是製作時並不是以完全實心的方式來進行，其密度高於主原料設定之 Sparse 模式，此

設定所製作出來的支撐物強度相對的也是最強的，但是其缺點就是製作的時間長，且耗損的原料也是最多的，適用的情況在於要製作工件的尺寸比較小，且需要支撐物的情況，見下圖 4.11。

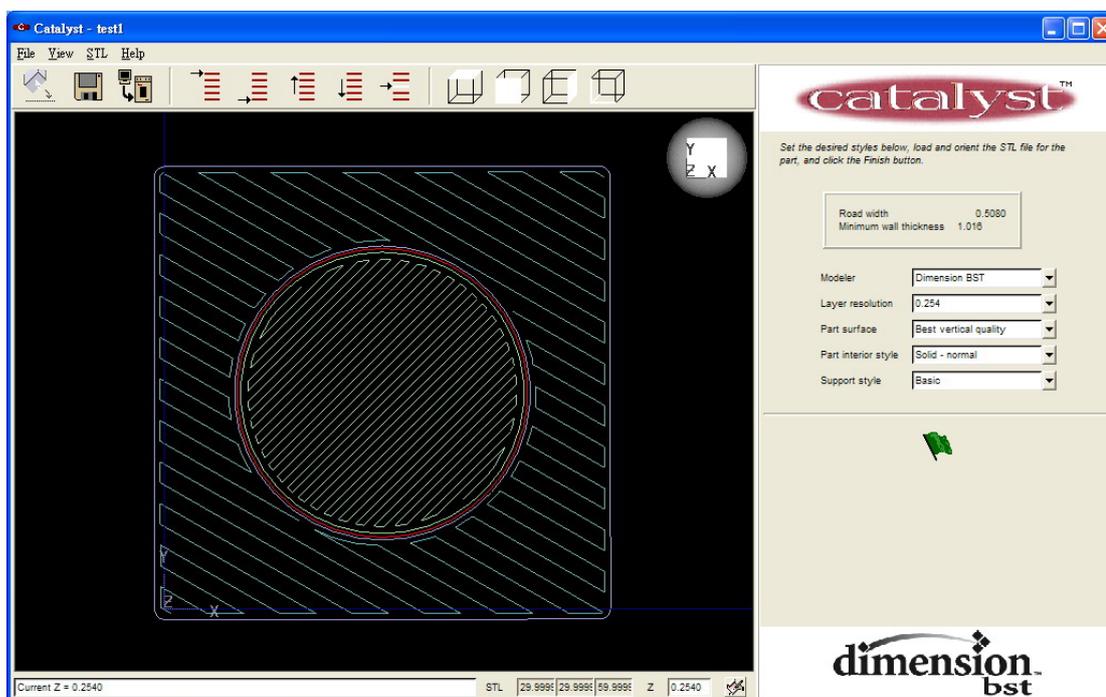


圖 4.11 Basic 支撐料填充方式

(3) Surround：在此設定下支撐物會將整個工件包住，且支撐物的路徑規畫方式相同於 Basic（見圖 4.12），所以其強度也是相當強的，而且還加上將整體包覆住，使得要製作的工件能夠更加安全的地做出來，因為四周有支撐料完整的保護（見圖 4.13），所以製作時間最長，除了 Basic 的製作方式還加強了工件表面全部包覆的噴塗（見圖 4.14），此種設定的適用情況在於物件的高度很高，或是物件厚度很薄的情況，用其他支撐設定的話，因為只有支撐住下面的情況，可能會有倒塌或是變形的機會發生，所以遇到工件是上述造型時，便可以用此種設定來製作。

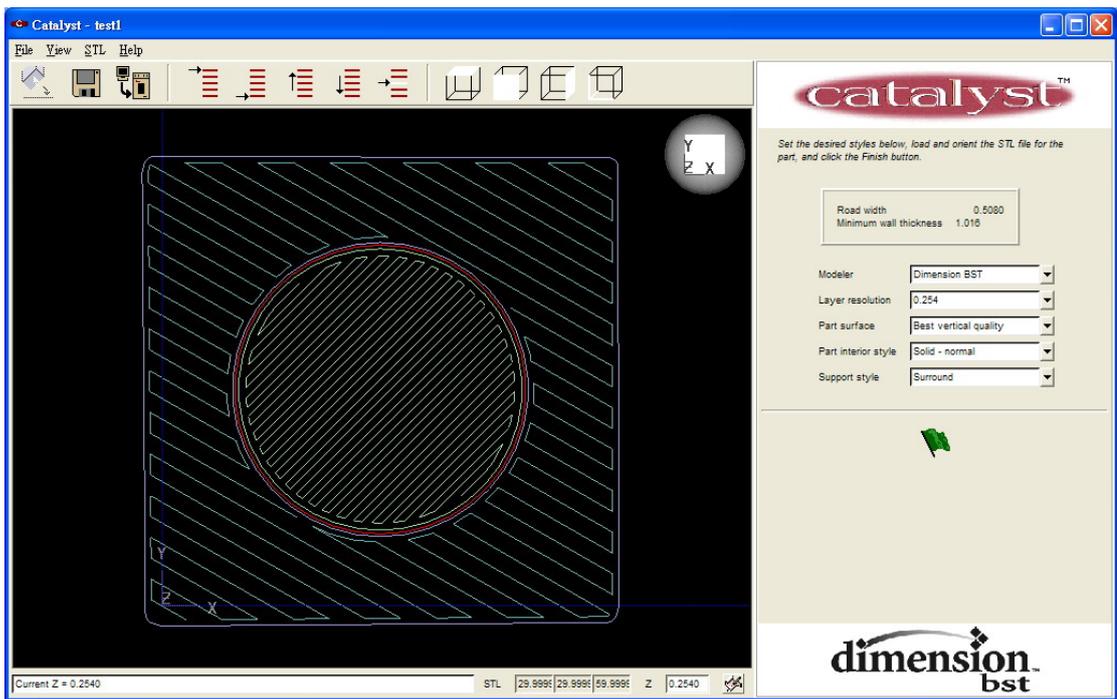


圖 4.12 Surround 支撐料填充方式(之 1)

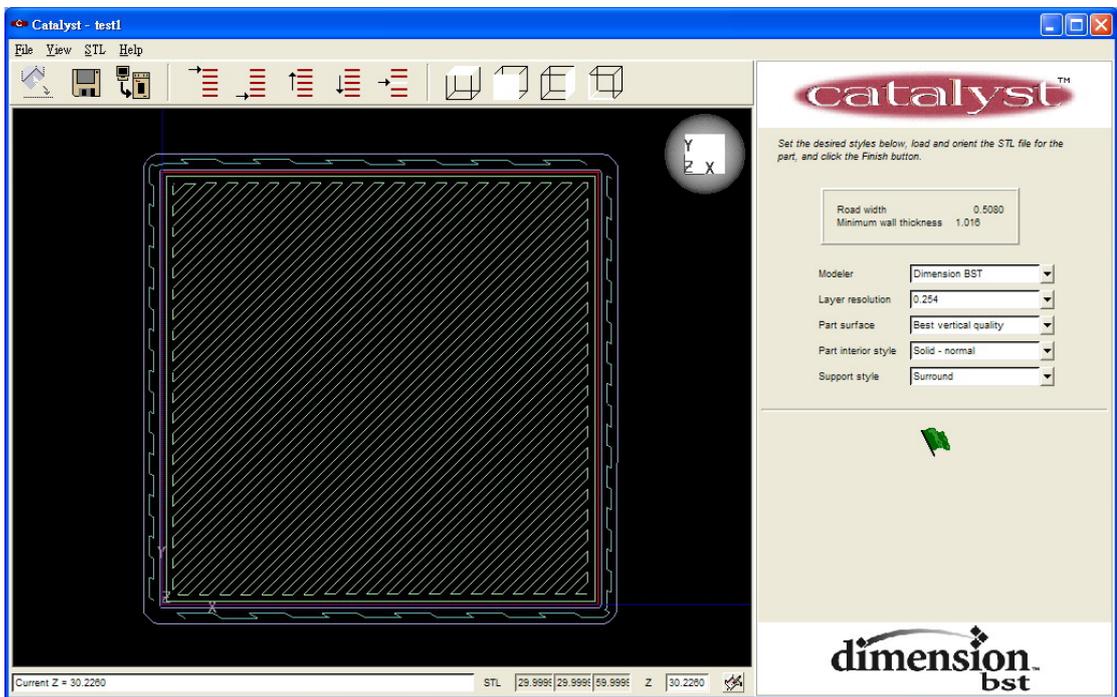


圖 4.13 Surround 支撐料填充方式(之 2)

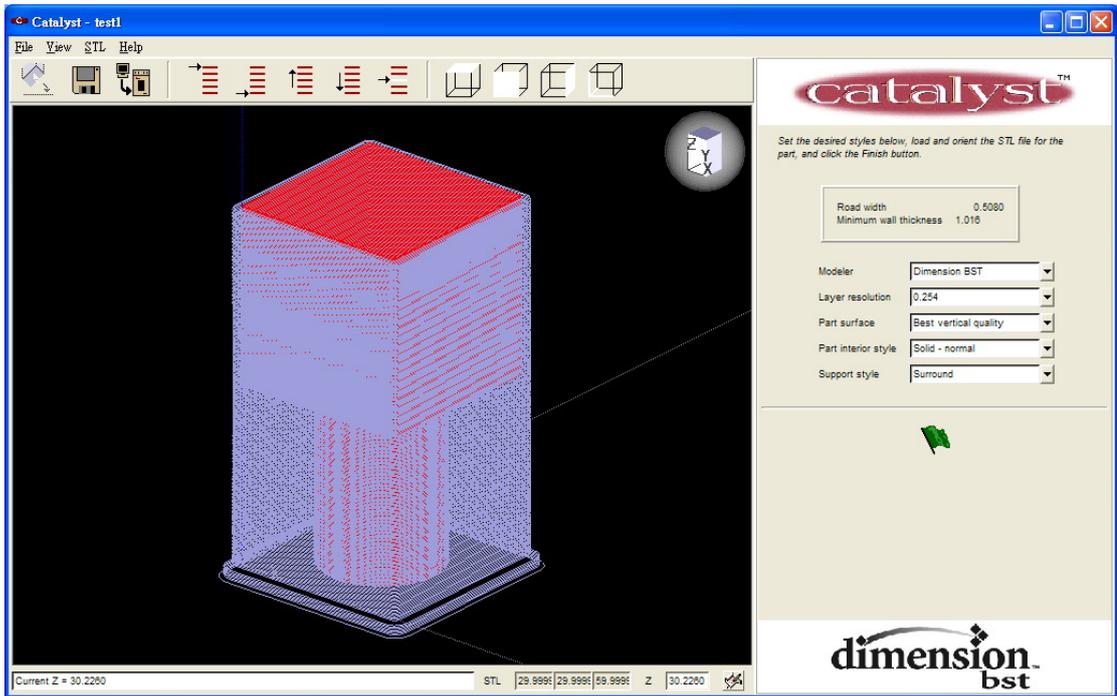


圖 4.14 Surround 支撐料填充方式(之 3)

(4) Break-away：此設定為 Stratasys 公司的專利技術 Breakaway Support Technology，也就是機台型號的縮寫，也代表此機型所擁有的技術，其製作的支撐物方式類似於 Sparse，不過將其作為區塊狀（見圖 4.15），可以觀察到將原本上面的 Sparse 方式的往復式連續路徑噴塗方法，將其分成封閉路徑的方式，變成拆成數個獨立封閉的小區塊，而且最外圍也沒有再加噴一層將整個支撐料完全包住，這個支撐物的優點是在於製作完後，可以方便的把噴塗好的支撐料拆除，製作的時間比 Sparse 要來的長一點，適用情況在於要製作的工件比較大，要製作的支撐物比較多的情況。

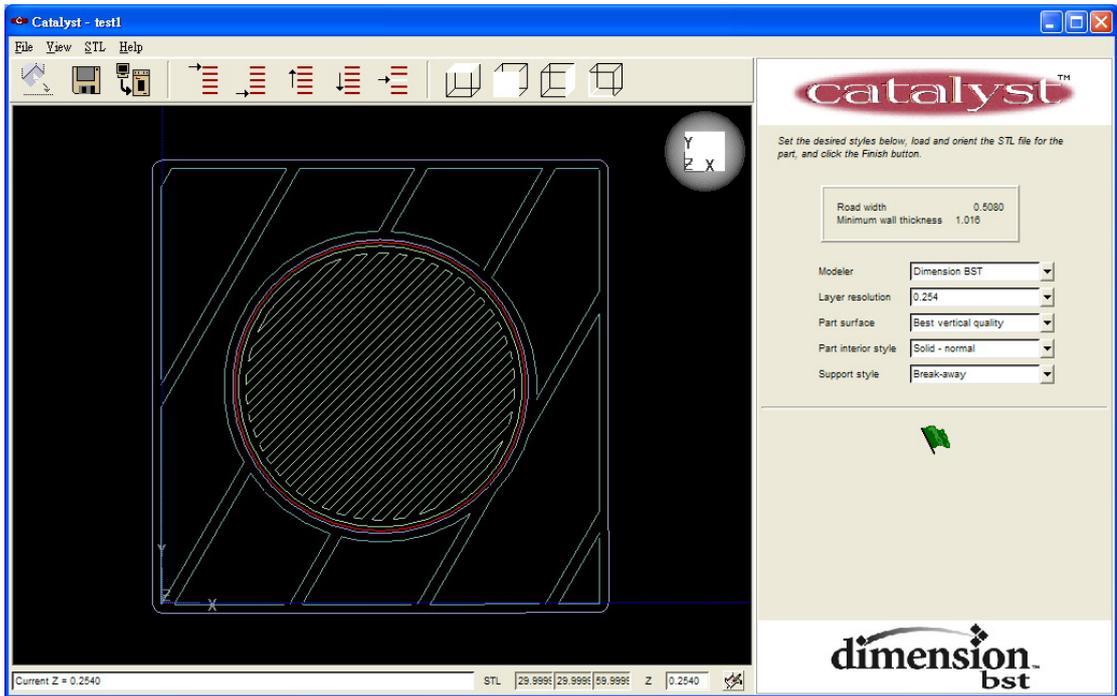


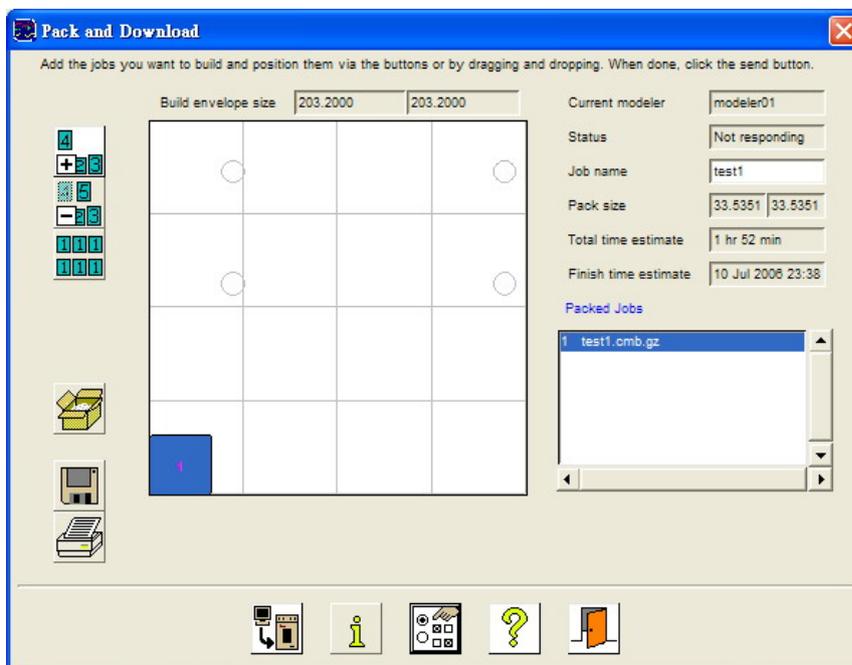
圖 4.15 Break-away 支撐料填充方式

4-5 成形擺放位置

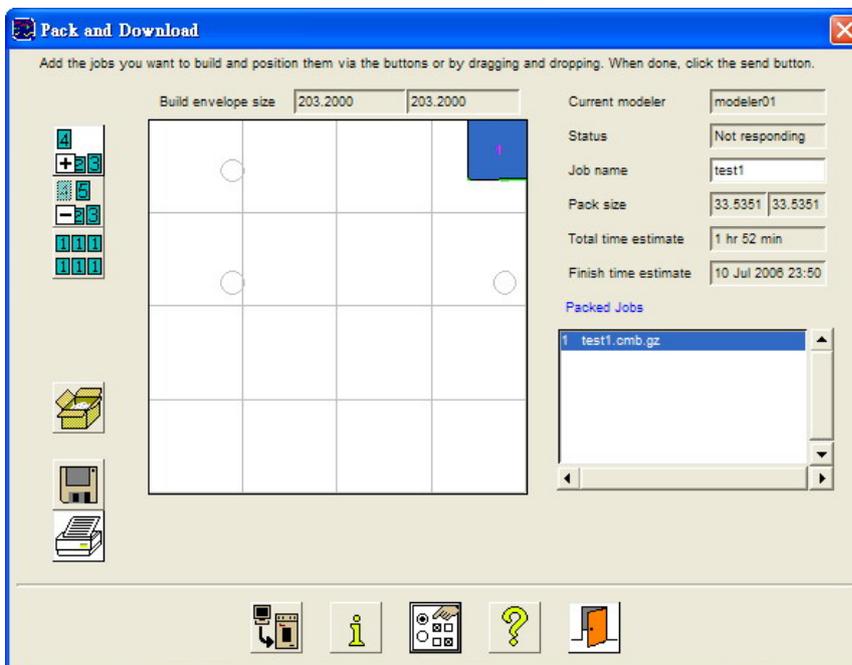
以上是機台軟體的前段製程參數的介紹，主要是決定所載入的 3D CAD STL 檔案所要處理的方式，包括：Layer resolution、Part surface、Part interior style、還有 Support 的方式選擇。選好了參數設定接著按下計算，軟體便會將所選擇的設定來處理所載入的 STL 檔，之後便會傳送到決定擺放位置的視窗（圖 4.16a）。而軟體預設值擺放位置是在左下角，整個白色的放置區域範圍為 $203\text{mm} \times 203\text{mm}$ ，不過使用者可以自行決定想要擺放的位置（圖 4.16b），一般來說在製作時，會以盡量擺的密集一點來節省噴頭在工作平台的移動時間。

而軟體預設為 4×4 共 16 個區域，但是這樣所需要的實驗次數會太多，因此將其區域劃分為 3×3 共 9 個區域，而分為 9 個區域也可

劃分出一個正中央區域。將 9 個區域由左往右、下往上的順序，編號為 1~9（如圖 4.17），靠近噴嘴的位置是編號 9，而靠近機器玻璃門的位置是 1~3 這個方向。



(a)原始擺設位置



(b)移動擺置到右上角

圖 4.16 決定擺放位置圖

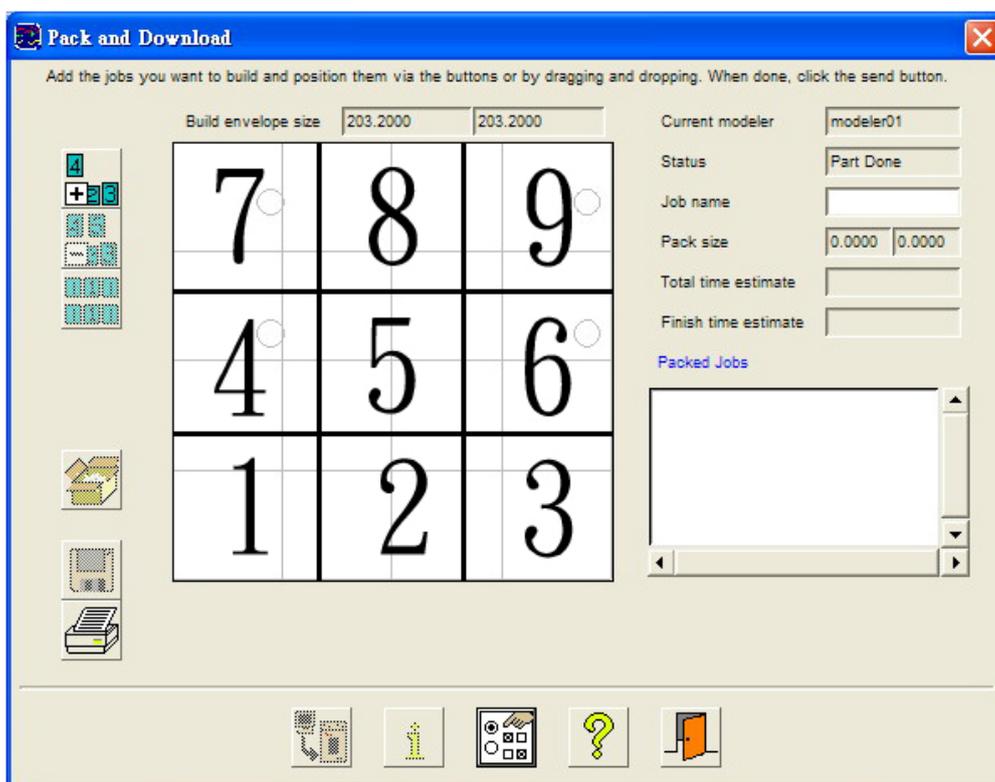


圖 4.17 擺放位置圖

第五章 FDM 製程參數實驗

經由前面章節介紹了 FDM 機台的製程參數以後，本章節是藉由實驗的方式，來找出各種參數設定的特性，主要是探討各種參數設定，對於最後成型出來成品尺寸精度的影響，而不是各個參數設定所得到的成品差異。本章節是以單因子的方式，只改變欲控制的因子，進行參數實驗，而且量測單一方向以排除其他因素干擾，最後來探討其影響。

5.1 Layer resolution 的影響

本實驗利用 SolidWorks 2004 軟體建構一個測試用 CAD 檔（見圖 5.1 和圖 5.2），然後使預設值轉換成 STL 的檔案格式，然後利用 FDM 所附的切層處理軟體 Catalyst 4.0 來進行處理（見圖 5.3），接下來利用 FDM 機台進行成型，得到的成品，再利用電子游標卡尺進行高度的尺寸量測，量測範圍為自左、中、右和下、中、上等六個方向來量測高度。切層厚度對於快速原型系統來說，是一個很重要的參數設定，對於 RP 成品的外型以及精確度上，都有非常直接的影響，而在 FDM BST 機型中，可以有兩種切層解析度來供選擇，一個是 $0.254mm$ ，另一個是 $0.3302mm$ ，本實驗將分別由這兩種解析度設定來製作相同 CAD 檔案進行測試。

實驗條件：

(1) 實驗中以 $0.254mm$ 和 $0.3302mm$ 兩種切層厚度進行成型。

- (2) 其他設定皆保持 Catalyst 原廠預設值。
- (3) 成型完後將底板 Support 支撐料剝除。
- (4) 最後以電子游標卡尺為量測工具，自左中右、下中上共六個方向進行尺寸量測其高度值。

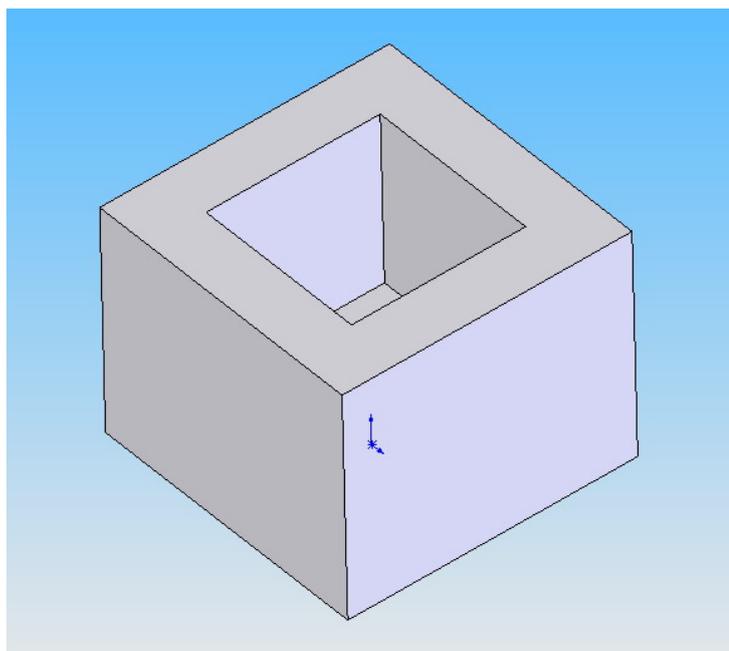


圖 5.1 Layer resolution 實驗 CAD 圖

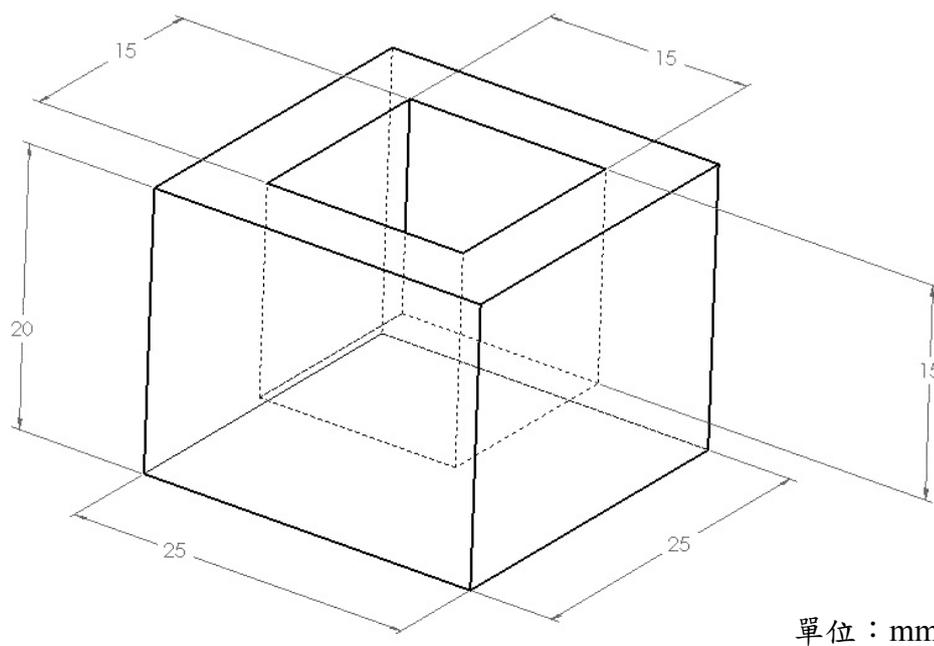


圖 5.2 Layer resolution 實驗 CAD 尺寸圖

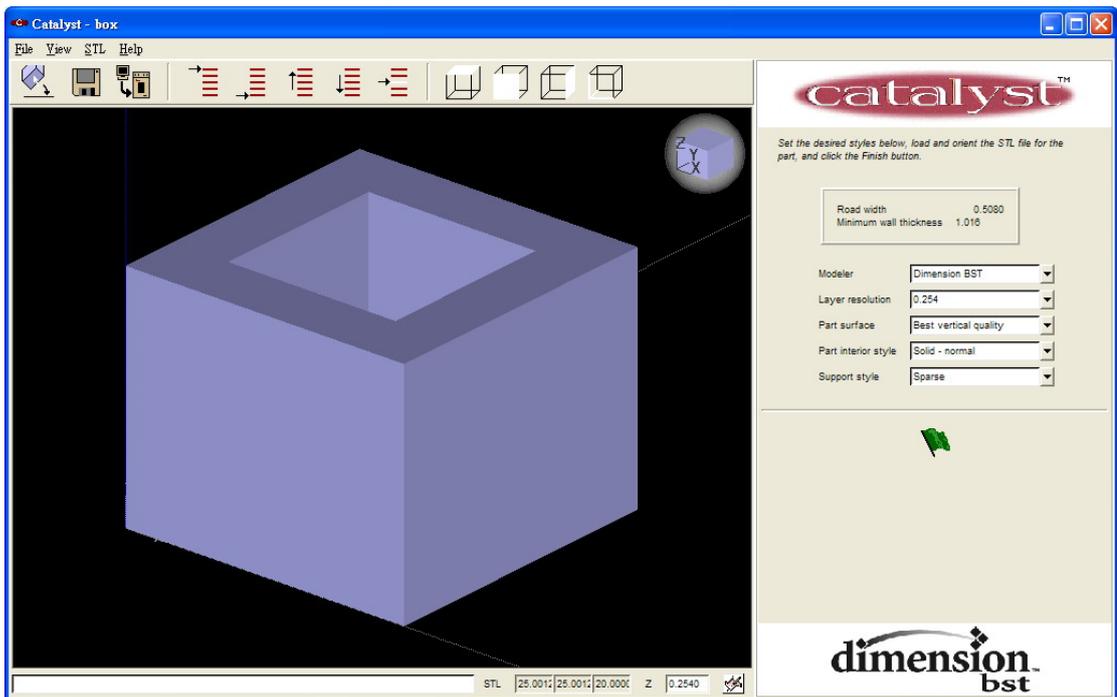


圖 5.3 Catalyst 載入 CAD 圖檔設定圖

本實驗目的為切層解析度對於 RP 成品精度的影響，經由電子游標尺量測後的實驗數據，如表 5.1 和圖 5.4。實驗結果顯示這項參數設定對於成型出來的成品品質，以及精度有著很大的影響，如果此項參數設定設在 0.254mm 的話，切層層數會比較多，成品精細度就會提高，但是相對的製作時間會變多。如果設成 0.3302mm 的話，切的層數會減少，製作時間就會相對的縮短很多，但是精度就會降低。整體而言，實驗參數設定在 0.254mm 的時候可以得到最好的快速原型成品，成品的精細度以及外觀都遠比 0.3302mm 的解析度要來的好，而實驗的成品如下圖 5.5。

表 5.1 Layer resolution 實驗數據 (目標尺寸 20mm)

高度量測 (mm) 參數 設定	1	2	3	4	5	6	平均	標準 差	全距 (R)
0.254mm	20.10	20.09	20.11	20.08	20.11	20.10	20.10	0.10	0.03
0.3302mm	20.32	20.32	20.30	20.39	20.30	20.35	20.33	0.33	0.09

單位：mm

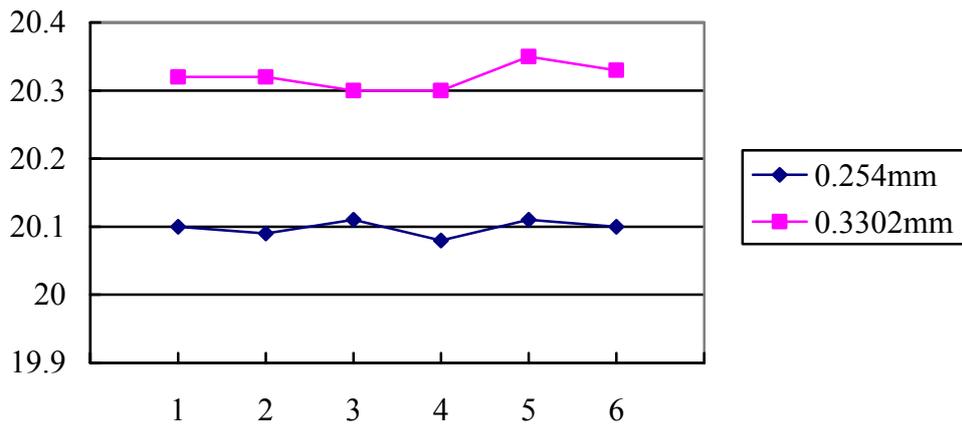


圖 5.4 Layer resolution 實驗數據折線圖

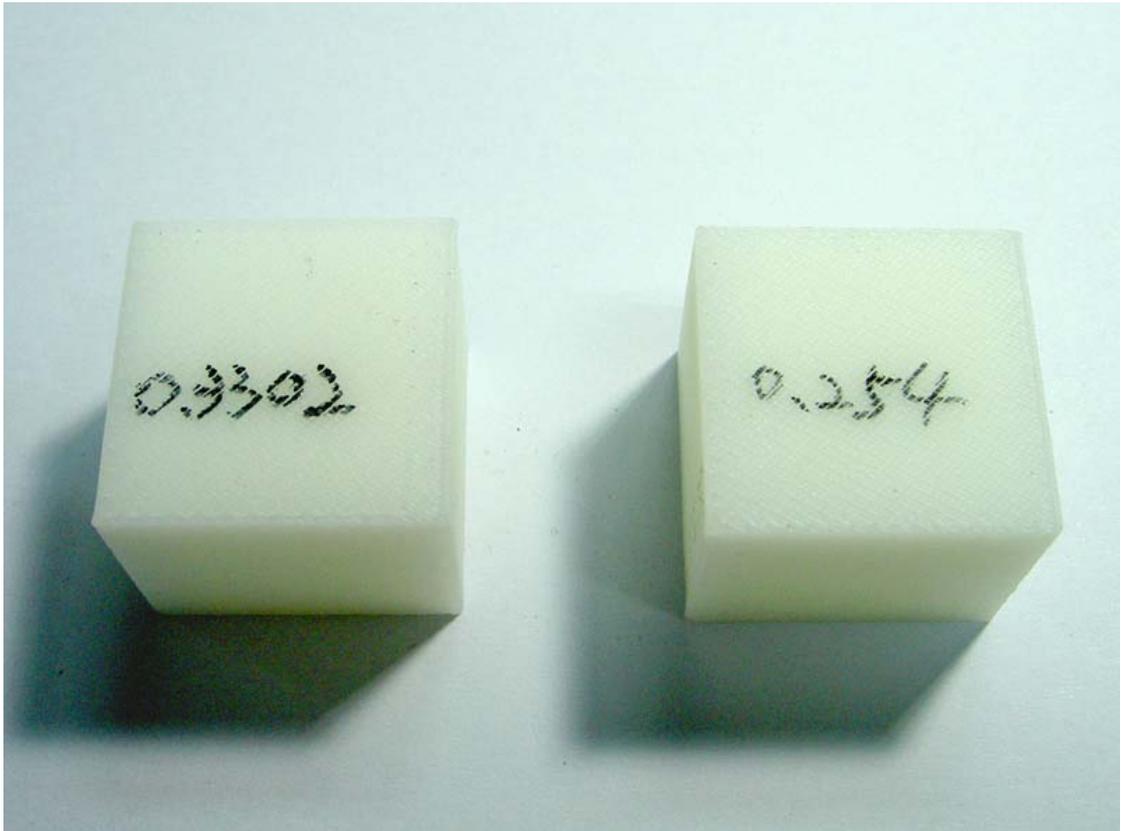


圖 5.5 Layer resolution 實驗成品

5.2 Part surface 的影響

Part surface 的選項設定，主要是針對物件所要成型的表面來做決定，一般來說快速原型是以 Z 軸方向累積成型，所以說機台軟體預設值是以垂直方向來做最佳化，不過也可以調整為水平最佳化。本參數實驗主要目的是找出變化此選項，會不會對尺寸精度造成影響。在測試件上仍利用 SolidWorks2004 建立一個測試用，且具有傾斜面之 CAD 圖形（見圖 5.6 和圖 5.7），讓垂直面和傾斜面都能對此選項有所變化對應，然後載入至切層軟體裡面（見圖 5.8）進行切層處理，最後傳送至機台進行成型。

實驗條件：

- (1) 實驗中以 Best vertical quality 和 Best horizontal quality 兩種表面設定進行成型。
- (2) 其他設定皆保持 Catalyst 原廠預設值。
- (3) 成型完後將底板 Support 支撐料剝除。
- (4) 最後以電子游標卡尺為量測工具，量測兩個垂直邊 30mm 高度處，自左、中、右三個方向，一共六次來進行尺寸量測。

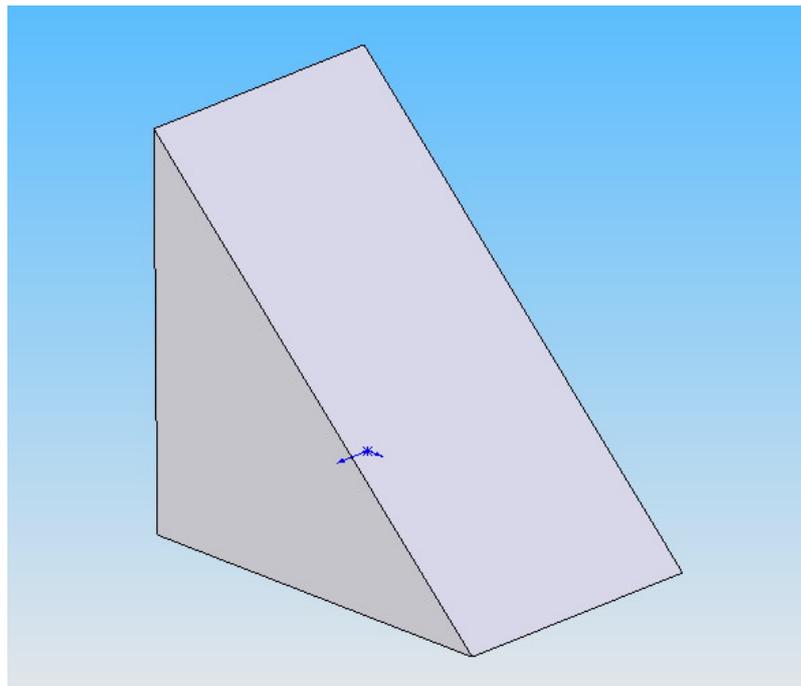
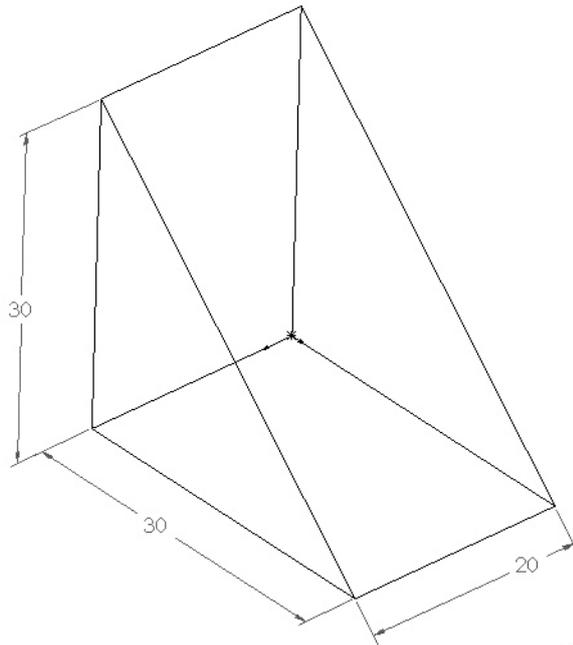


圖 5.6 Part surface 實驗 CAD 圖



單位：mm

圖 5.7 Part surface 實驗 CAD 尺寸圖

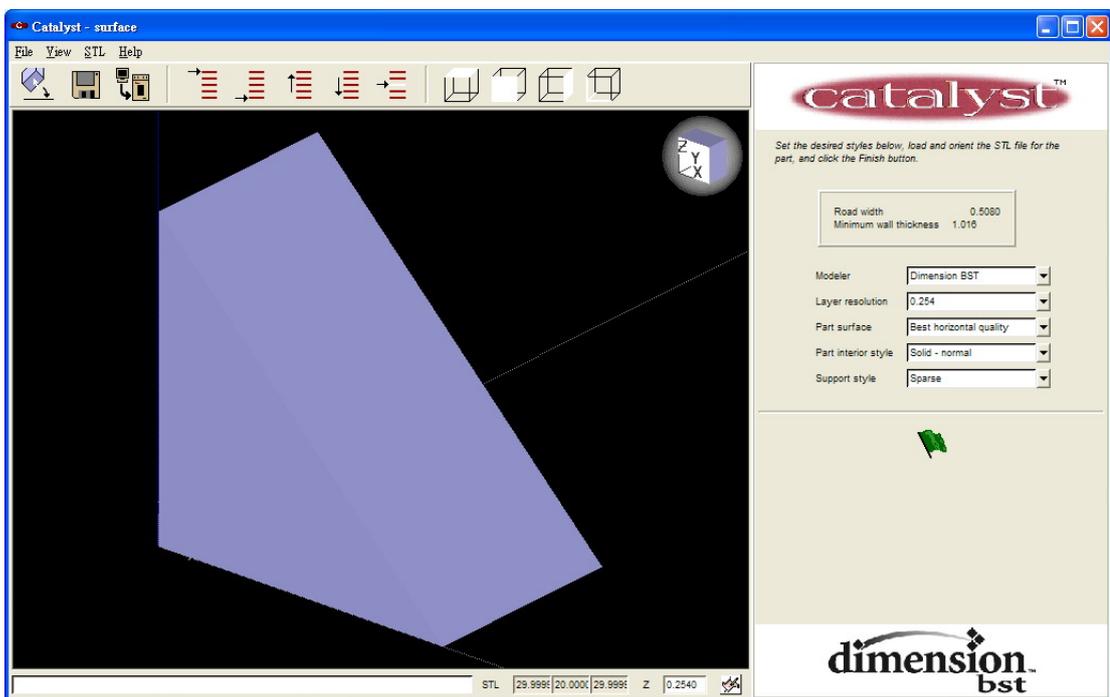


圖 5.8 Catalyst 載入 CAD 圖檔設定圖

本實驗目的為 Part surface 的設定對於 RP 成品尺寸精度的影響，經由電子游標尺量測後的實驗數據，如表 5.2 和圖 5.9。實驗結

果顯示這項參數設定對於成型出來的成品品質，以及精度都有著一定的影響，如果此項參數設定設在 Best vertical quality 的話，量測出的數據和 Best horizontal quality 的設定結果互有上下。整體而言，實驗參數設定在 Best vertical quality 的時候可以比 Best horizontal quality 好一點的成型品質，因為量測出的最大值和最小值範圍比較小，表示穩定度比較高一些，實驗成品圖，如圖 5.10。

表 5.2 Part surface 實驗數據 (目標尺寸 30mm)

高度量測 (mm) 參數 設定	1	2	3	4	5	6	平均	標準差	全距 (R)
Best vertical quality	29.90	29.80	29.75	29.91	29.84	29.86	29.84	0.06088	0.16
Best horizontal quality	29.96	29.85	29.95	29.77	29.79	29.81	29.86	0.08192	0.19

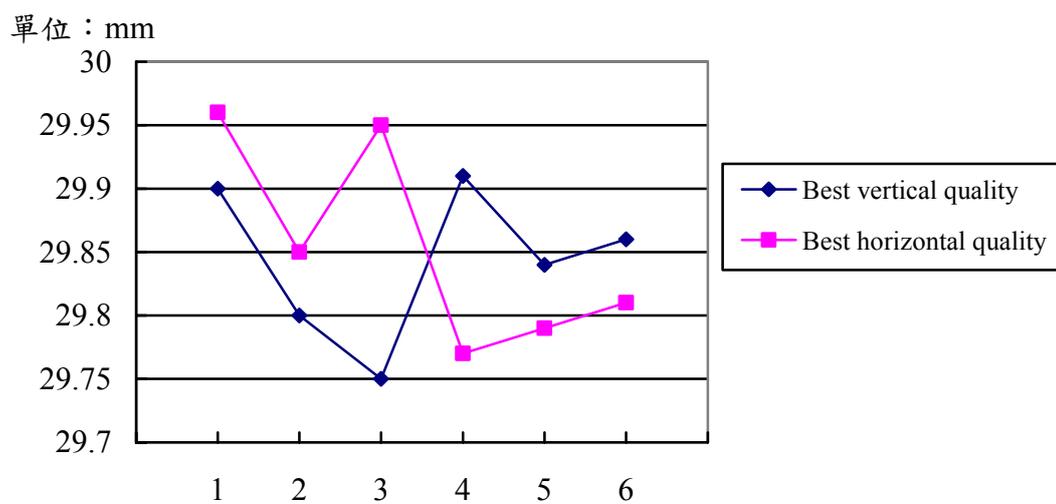


圖 5.9 Part surface 實驗數據折線圖

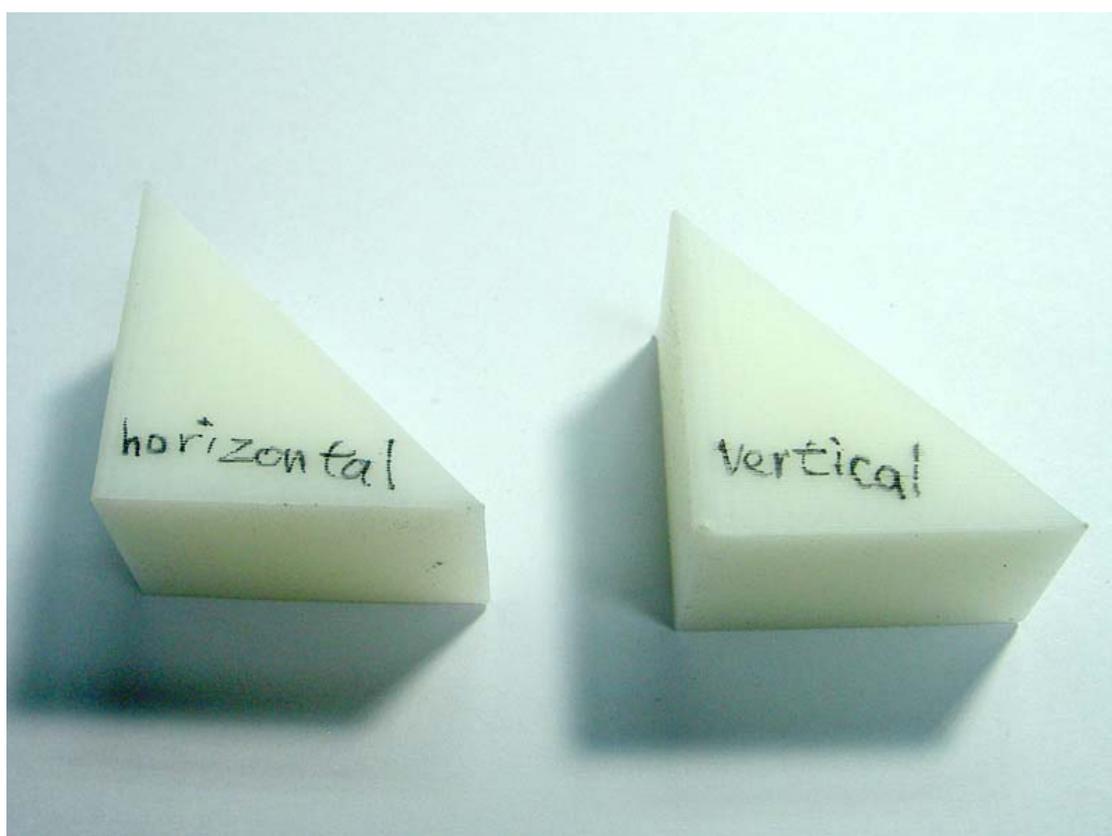


圖 5.10 Part surface 實驗成品圖

5.3 Part interior style 的影響

Part interior style 的選項設定主要是針對欲成型的工件內部，製作時用完全實心方式製作，或是以比較稀疏的空心方式去製作，一般而言機台軟體預設值是以 Solid 為主，也就是說以實心方式製作。本參數實驗主要目的是希望找出，以 Solid 方式或是 Sparse 方式成型的物件，對於尺寸精確度的影響。其測試方式也是利用 SolidWorks2004 建立一個測試用 CAD 圖形（見圖 5.11 和圖 5.12），然後載入至機台切層軟體（見圖 5.13）進行切層處理，最後傳送至機台進行成型。

實驗條件：

- (1) 實驗中以 Solid 和 Sparse 兩種設定進行成型。
- (2) 其他設定皆保持 Catalyst 原廠預設值。
- (3) 成型完後將底板 Support 支撐料剝除。
- (4) 最後以電子游標卡尺為量測工具，自左中右、下中上共六個方向進行尺寸量測其高度值。

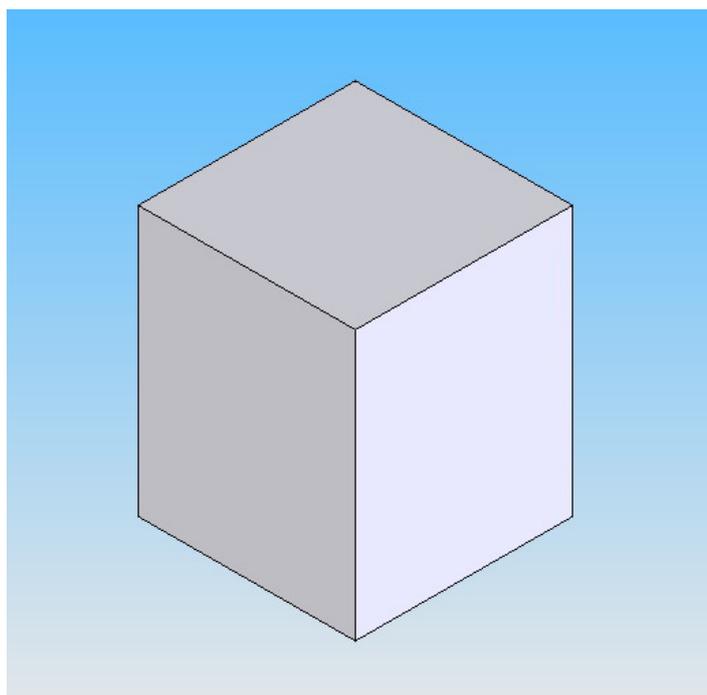
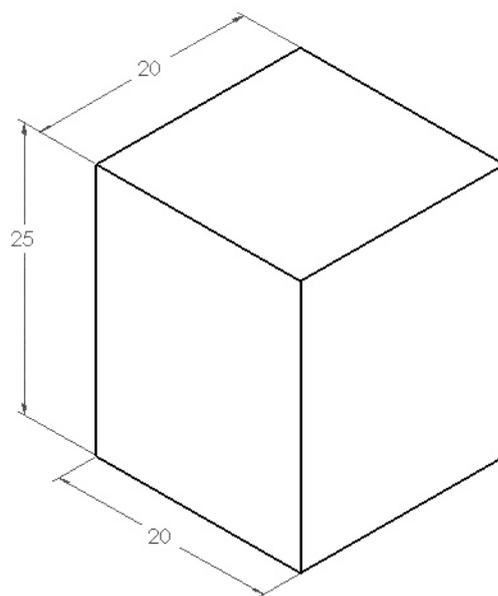


圖 5.11 Part interior style 實驗 CAD 圖



單位：mm

圖 5.12 Part interior style 實驗 CAD 尺寸圖

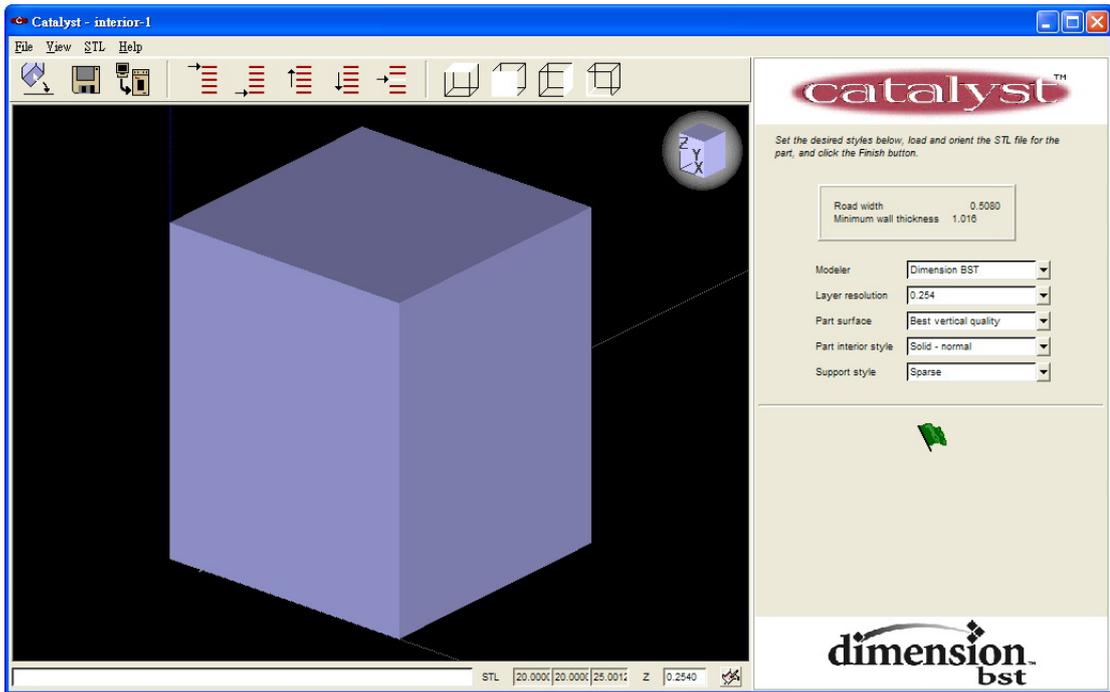


圖 5.13 Catalyst 載入 CAD 圖檔設定圖

本實驗目的為 Part interior style 的不同設定，對於 RP 成品尺寸精度的影響，成品經由電子游標卡尺量測後的實驗數據，如表 5.3 和圖 5.14。實驗的結果顯示此項參數之設定，對於快速原型的成品品質和精度，有著一些影響。觀察數據可以發現如果參數設定設在 Solid 的話，量測出的數據比起 Sparse 更接近目標值 25mm，縱使他的尺寸起伏比起 Sparse 要來的大些，但是整體而言，實驗參數設定在 Solid 的話可以獲得較好的成型品質，而且絕大部分的量測結果顯示，很多次的數據都比 Sparse 要來的更精確。

表 5.3 Part interior style 實驗數據表 (目標尺寸 25mm)

高度量測 (mm) 參數 設定	1	2	3	4	5	6	平均	標準差	全距 (R)
Solid	25.31	25.25	25.27	25.22	25.23	25.22	25.25	0.03521	0.09
Sparse	25.25	25.26	25.30	25.27	25.28	25.26	25.27	0.01788	0.05

單位：mm

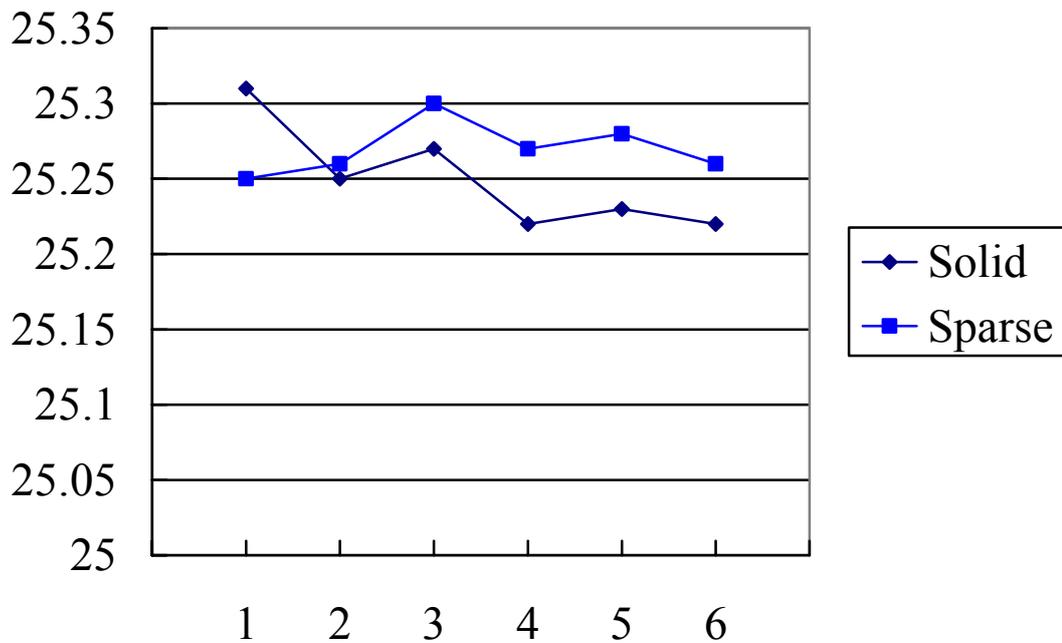


圖 5.14 Part interior style 實驗數據折線圖

5.4 Support style 的影響

Support style 的選項設定主要是針對工件外部的支撐料做改變，裡面有著四種不同的參數設定可供使用，製作時可以根據所要成型的工件形狀，來選擇改變不同的 Support 方式，製作時用可以

選擇省材料的 Sparse，或是較為堅固的 Basic 模式，甚至是完全包覆住工件的 Surround，還有專利的 Break-away 處理方式。因為 FDM 的機台特性之一，就是會產生出 Support 原料去支撐住浮空的 Material 原料，所以就與完成的工件有所接觸，這樣導致多少都會影響到完成後工件的精度，而機台的預設值是以 Sparse 為主，也就是以比較省料的方式製作。此項參數實驗主要目的也是希望找出，到底各種不同的 Support Style 形式，對於最後成品的尺寸精度影響有多大。此項測試方式是使用 SolidWorks2004 建立一個測試用 CAD 圖形（見圖 5.15 和圖 5.16），然後載入至機台切層軟體（見圖 5.17）進行切層處理，最後傳送至機台進行成型。

實驗條件：

- (1) 實驗中以 Sparse、Basic、Surround、Break-away 四種設定進行成型。
- (2) 其他設定皆保持 Catalyst 原廠預設值。
- (3) 成型完後將底板 Support 支撐料剝除。
- (4) 最後以電子游標卡尺為量測工具，自平台的四邊量測其厚度值。

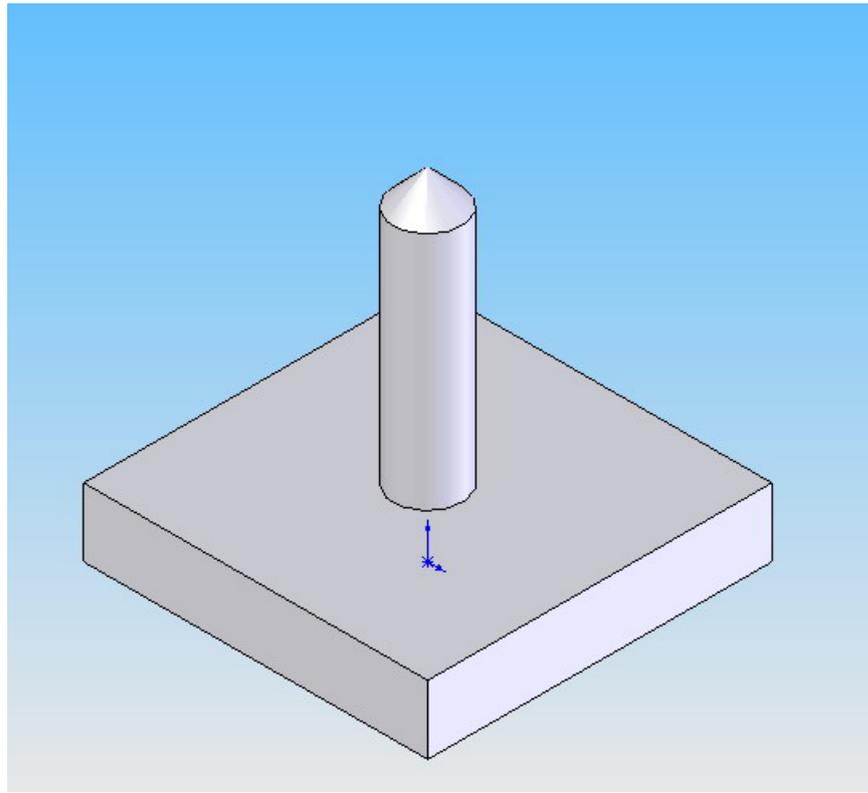


圖 5.15 Support style 實驗 CAD 圖

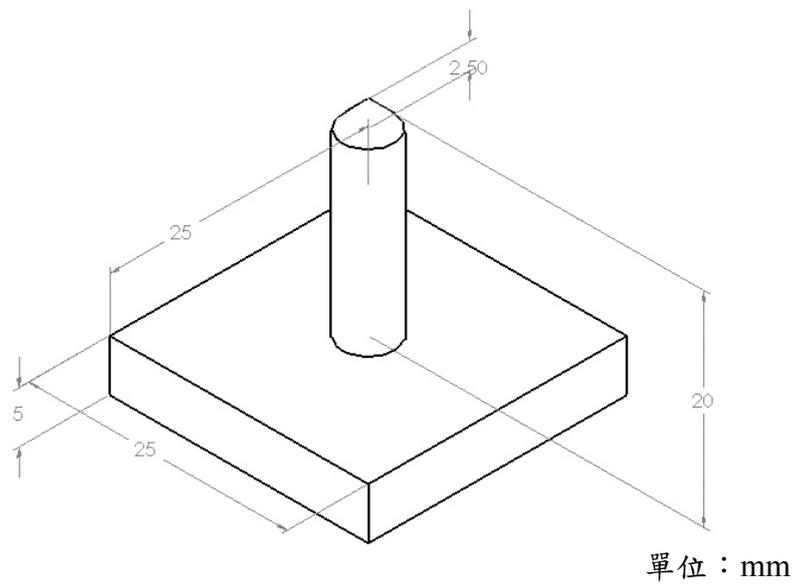


圖 5.16 Support style 實驗 CAD 尺寸圖

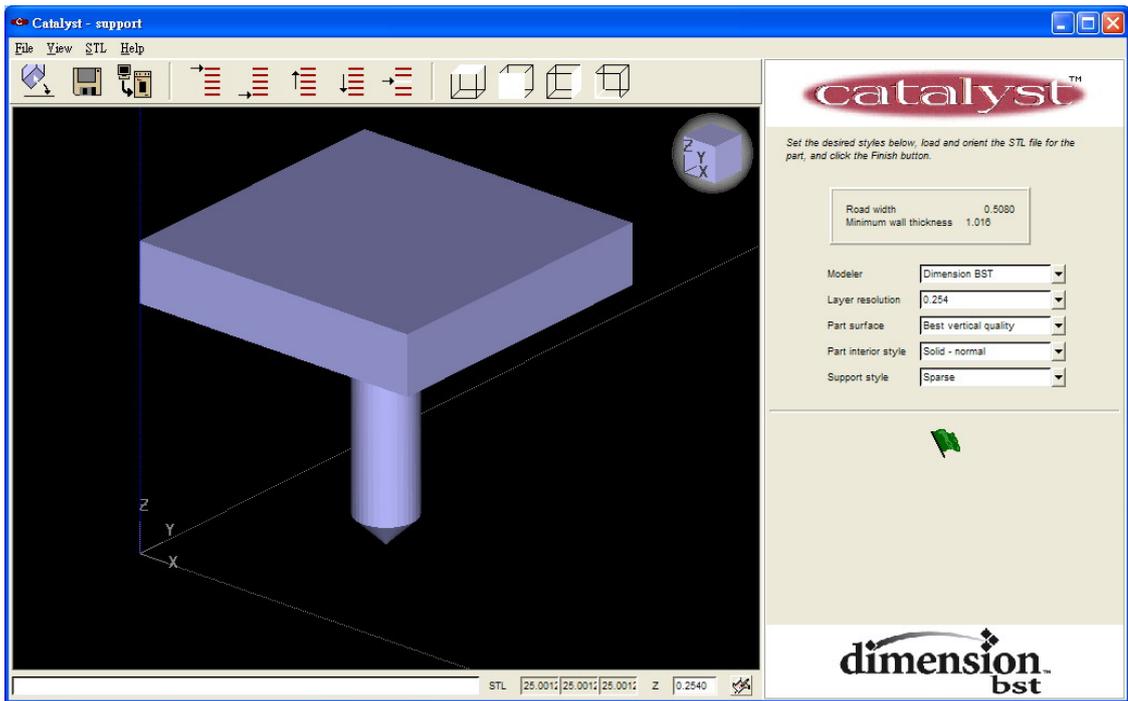


圖 5.17 CATALYST 載入 CAD 圖檔設定圖

本實驗目的為 Support style 的四種不同設定，對於 RP 成品尺寸精確度的影響，成品經由電子游標卡尺量測後的實驗數據，如表 5.4 和圖 5.18，量測地方為平台之厚度，一共量測四次。實驗的結果顯示此項參數之設定，對於快速原型的成品品質和精度，有不同程度之影響。觀察數據可以發現，如果參數設定設在 Break-away 的話，量測出的數據比起其他三項更為接近目標值 5mm，不過就穩定度而言，Surround 的穩定度會比其他設定來的好，因為量測出來的四個數值偏差不大，呈現穩定狀態。不過全體看來偏差度都在 0.25mm 和 0.30mm 之間，差異度其實並不大，嚴格來說四種設定偏差都在一定範圍之內，沒有比較突出的數值出現，而實驗成品如圖 5.19 所示。

表 5.4 Support style 實驗數據 (目標尺寸 5mm)

高度量測 (mm) 參數 設定	1	2	3	4	平均	標準差	全距 (R)
Sparse	5.31	5.24	5.32	5.31	5.30	0.03697	0.08
Solid	5.29	5.24	5.26	5.24	5.26	0.02363	0.05
Surround	5.26	5.27	5.26	5.27	5.27	0.00577	0.01
Break-away	5.24	5.28	5.23	5.25	5.25	0.02160	0.05

單位：mm

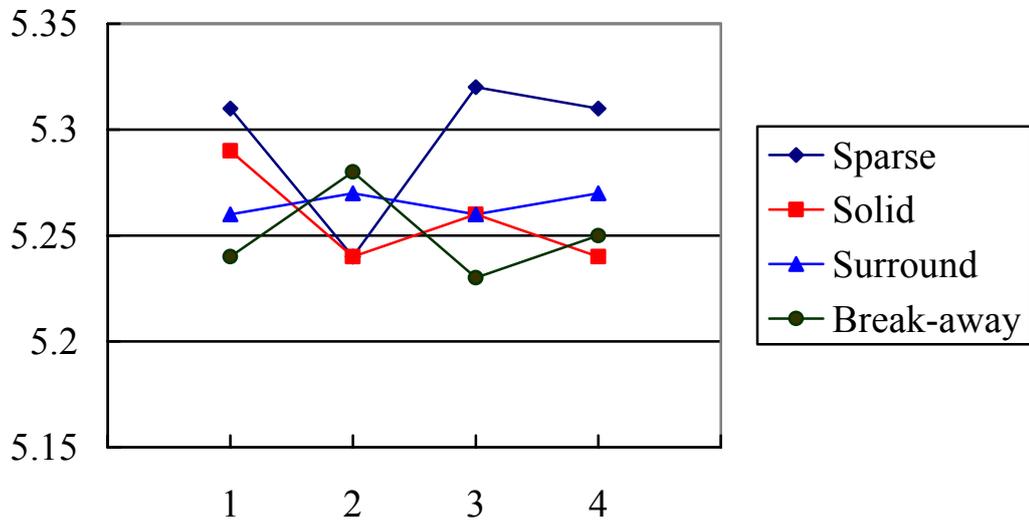


圖 5.18 Support style 實驗折線圖

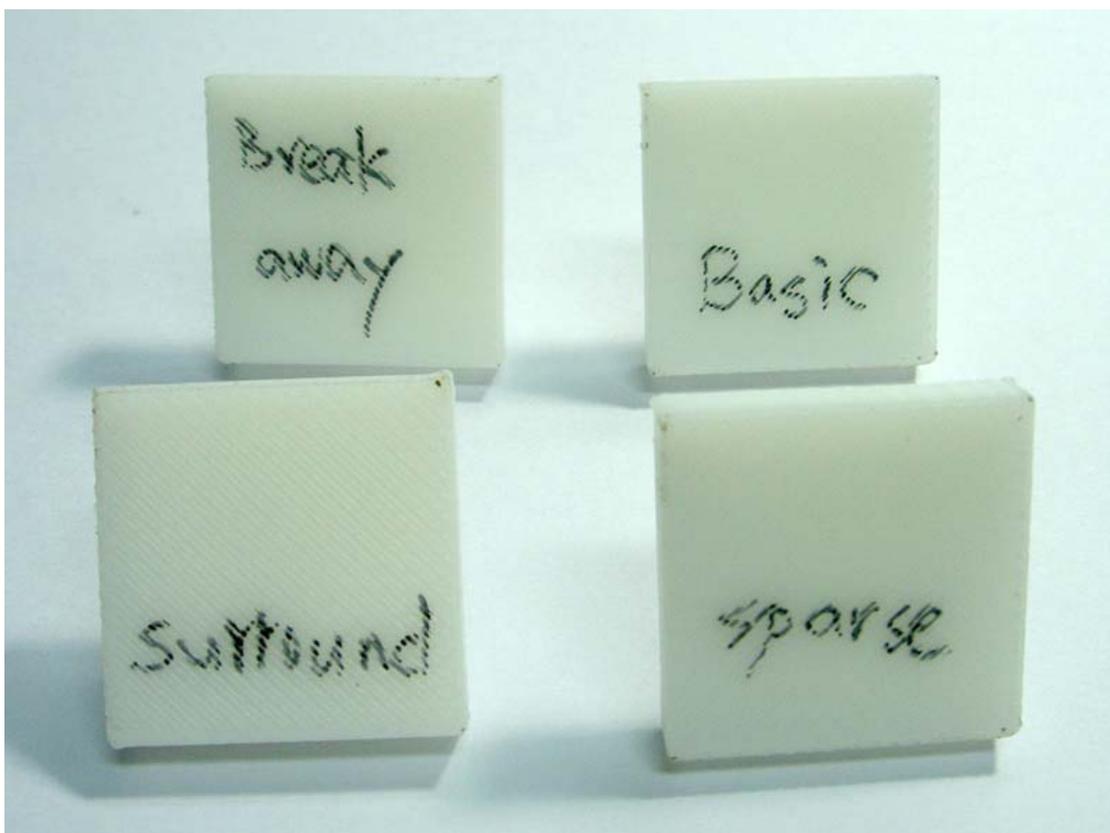


圖 5.19 Support style 實驗成品圖

5.5 成型位置的影響

除了以上幾個由機台軟體可以控制的數值以外，另外還有一個就是可以由使用者控制的參數是成型位置，前面由軟體設定完以後會載入到另一個視窗，可以決定成型的位置，可將其分為九個區域，由左往右、由下往上的方向來分區，分為 1~9 個區域來成型，成型的 CAD 圖和其尺寸如下圖 5.20 和圖 5.21，然後載入至機台切層軟體（見圖 5.22）進行切層處理，最後傳送至機台進行成型。但是在最後決定擺放位置的步驟時，把原廠預設由左下角開始擺放的位置加以改變，將其測試用圖檔放置在每區域中間，最後一次成型（圖 5.23）。

實驗條件：

- (1) 實驗中全部以 Catalyst 原廠預設值設定進行成型。
- (2) 決定擺放位置方面則分為 1~9 個區域進行成形，且測試檔案放於區域正中央。
- (3) 成型完後將底板 Support 支撐料剝除。
- (4) 最後以電子游標卡尺為量測工具，自左中右、下中上共六個方向進行尺寸量測其高度值。

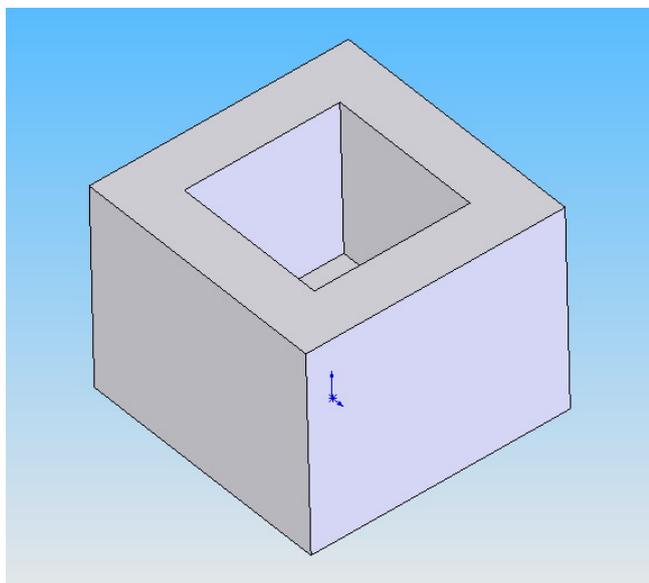
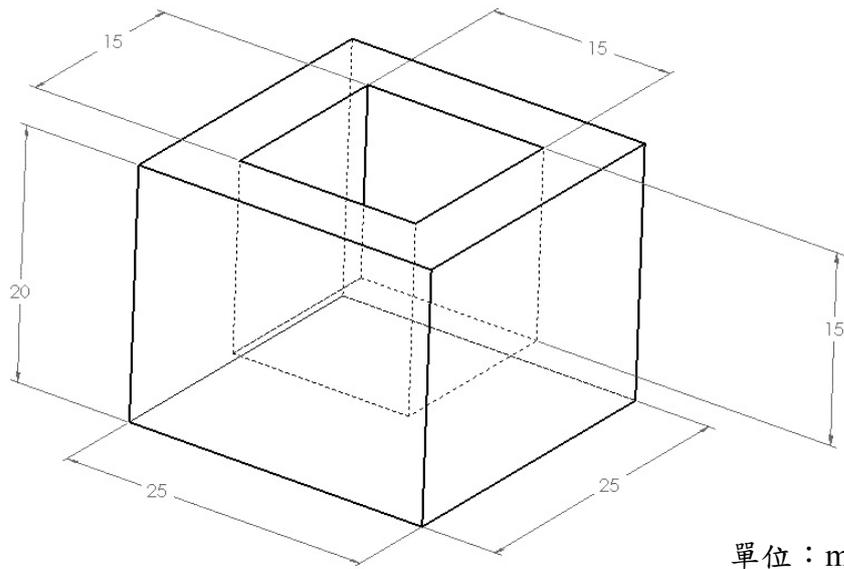


圖 5.20 成形位置實驗 CAD 圖



單位：mm

圖 5.21 成形位置實驗 CAD 尺寸圖

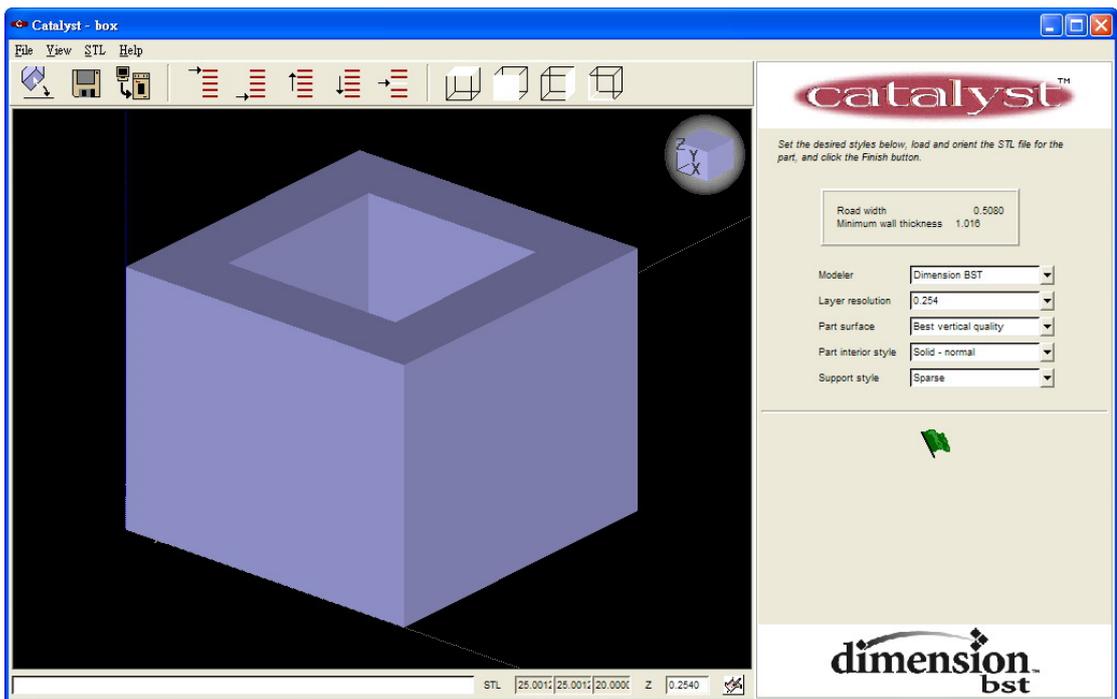


圖 5.22 Catalyst 載入 CAD 圖檔設定圖

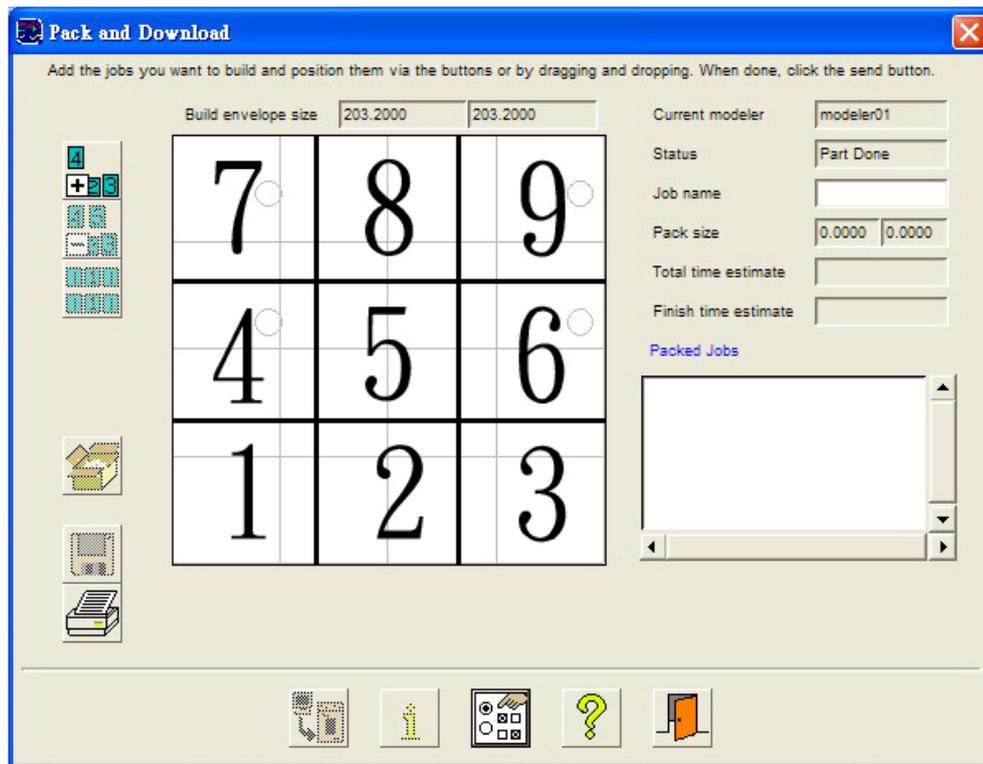


圖 5.23 實驗成型位置圖

本實驗目的為九個成形位置中，對於 RP 成品尺寸精確度的影響，九個工件都是以原始設定不變更進行成形，成品經由電子游標卡尺量測後的實驗數據，如表 5.5 和圖 5.24，量測地方為 Z 軸高度值，一共量測六次。實驗的結果顯示不同的工件成型位置，對於快速原型的精確度，的確有著一些影響。藉由觀察數據發現，如果成形位置選擇在編號第 5 的位置的話，量測出的數據是全部裡面最精確的，比起其八個位置要來的更為接近目標值 20mm，再者觀察其標準差，也可以發現位置 5 的穩定度也是最好，我們可以推測是因為噴嘴馬達經由啟動加速，接著是穩定速度，最後是減速停止，因此在正中央是屬於穩定速度的狀態，所以可以獲得最好的成型品質。

不過全體看來偏差度都在 0.20mm 和 0.27mm 之間，差異度其實並不大，嚴格來說九個區域偏差都在一定範圍之內，而最後的實驗成品，如圖 5.25。

表 5.5 成形位置實驗數據 (目標尺寸 20mm)

量測次數 (mm) 參數 設定	1	2	3	4	5	6	平均	標準差	全距 (R)
1	20.23	20.28	20.29	20.23	20.26	20.26	20.26	0.0248	0.06
2	20.20	20.26	20.22	20.24	20.23	20.23	20.23	0.02	0.06
3	20.26	20.27	20.23	20.27	20.23	20.23	20.25	0.0204	0.04
4	20.24	20.30	20.28	20.26	20.28	20.29	20.28	0.01667	0.06
5	20.18	20.24	20.20	20.18	20.20	20.19	20.20	0.015	0.06
6	20.20	20.26	20.24	20.22	20.22	20.21	20.23	0.0167	0.04
7	20.26	20.32	20.30	20.28	20.30	20.29	20.29	0.015	0.06
8	20.19	20.28	20.26	20.22	20.23	20.23	20.24	0.0233	0.09
9	20.26	20.30	20.26	20.25	20.29	20.25	20.27	0.01778	0.05

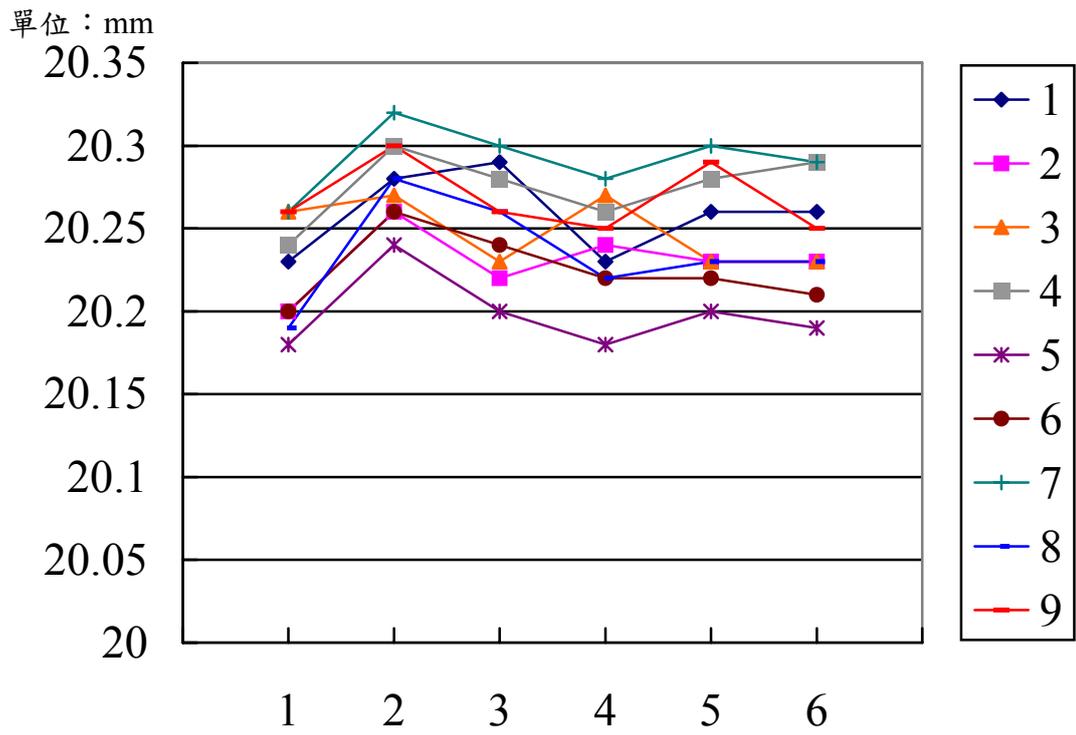


圖 5.24 成形位置實驗數據折線圖

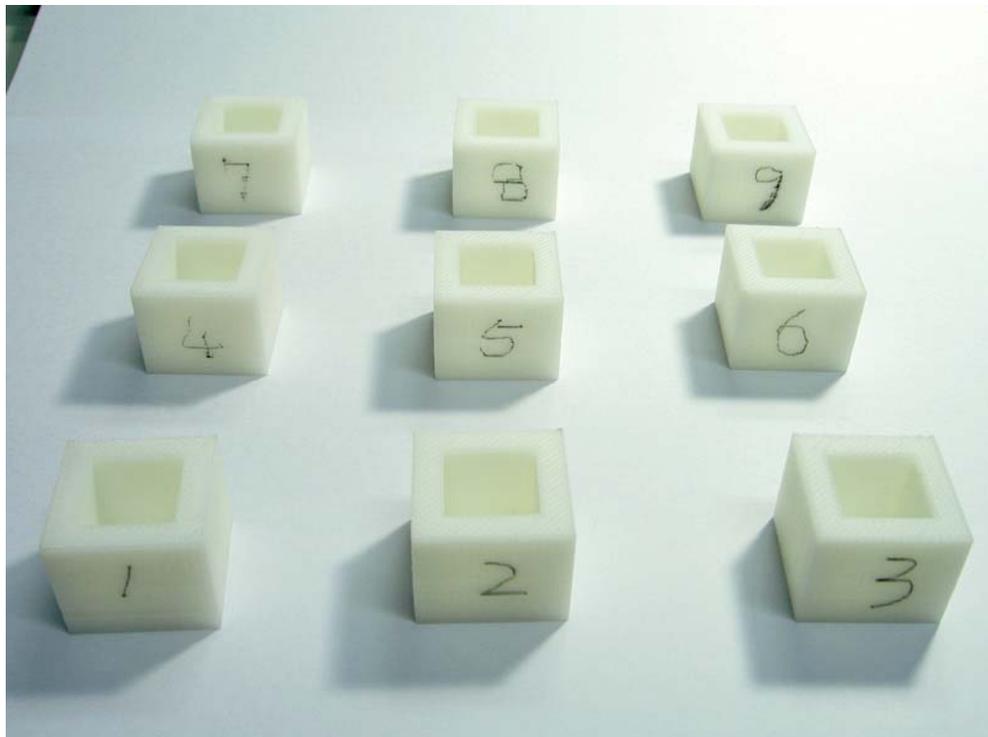


圖 5.25 成形位置實驗成品圖

5.6 成型方向的影響

除了以上幾個由機台軟體可以控制的數值，還有可以由使用者控制的成型位置，根據經驗還會影響到成型品質的就是成型方向，使用者可以在軟體中旋轉決定載入的 CAD 檔的方向，一般來說快速原型是以 Z 軸方向來切層，但是使用者可以旋轉方向來決定所要切層的軸向，在此實驗中，我們預計將成型的方向分為直向和橫向，也就是一個是開口方向朝+Z 軸，另一個是開口方向朝-X 軸的兩個設定來成型，成型的 CAD 圖和其尺寸如下圖 5.26 和圖 5.27，然後載入至機台切層軟體，此時我們將其旋轉了兩個方向（見圖 5.28 和圖 5.29），然後再進行切層處理，最後傳送至機台進行成型。

實驗條件：

- (1) 實驗中將載入的 CAD 圖檔旋轉，分別為直向與橫向來成型。
- (2) 其他設定皆保持 Catalyst 原廠預設值。
- (3) 成型完後將底板 Support 支撐料剝除。
- (4) 最後以電子游標卡尺為量測工具，自左中右、下中上共六個方向進行尺寸量測其高度值。

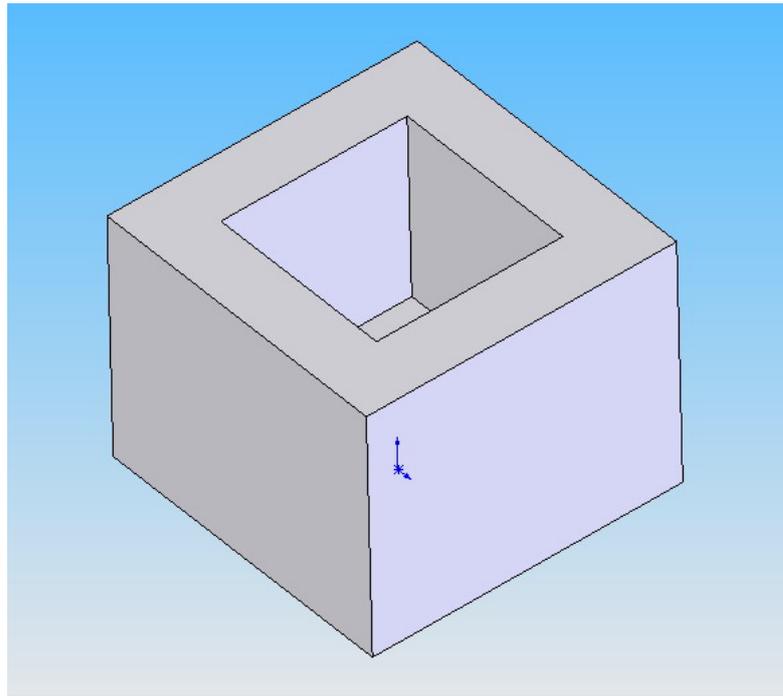
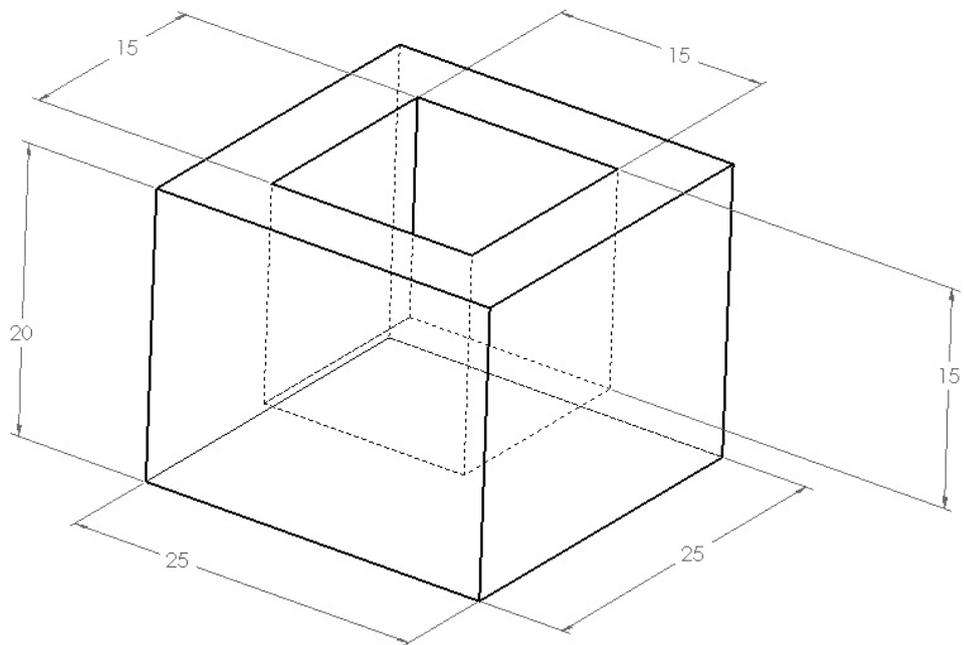


圖 5.26 成型方向實驗 CAD 圖



單位：mm

圖 5.27 成型方向實驗 CAD 尺寸圖

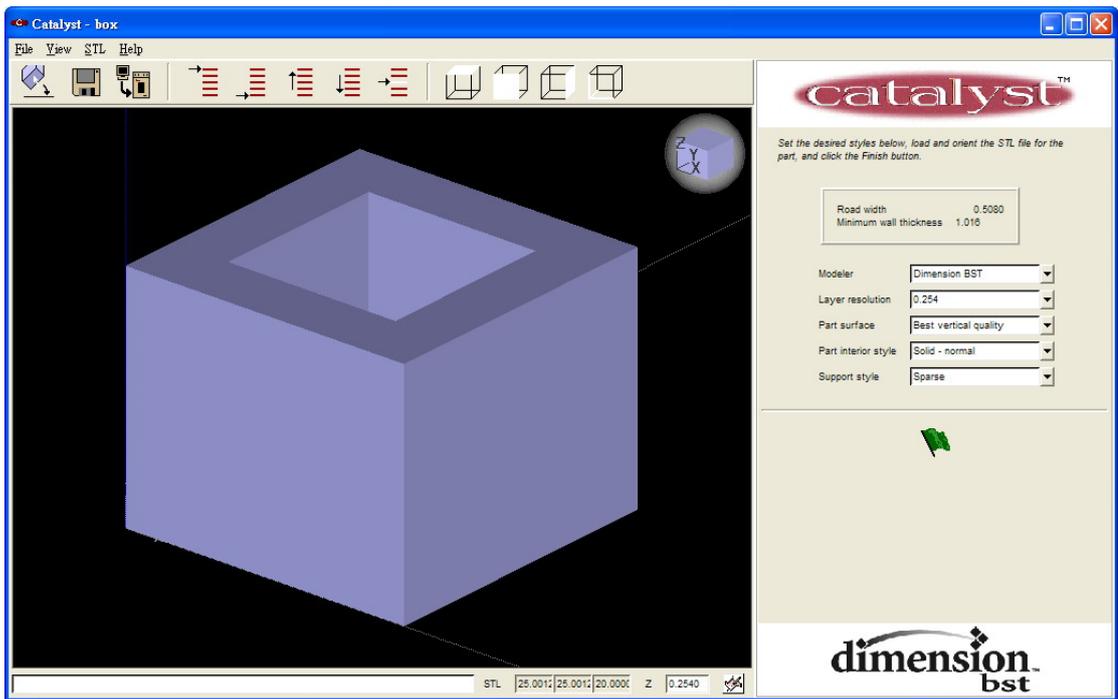


圖 5.28 Catalyst 載入 CAD 圖檔直向設定圖

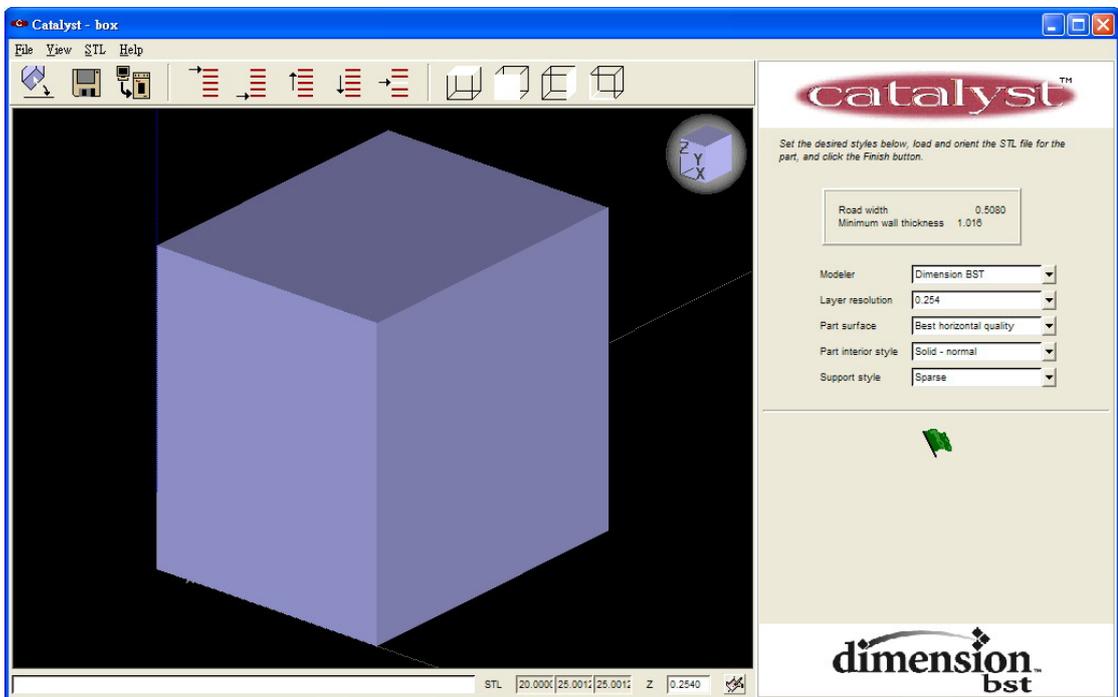


圖 5.29 橫向旋轉之 CAD 圖檔設定圖

本實驗目的為了解成型的方向，對於檔案切層處理加以成型之後尺寸精確度的影響，兩個工件都是只有成型方向不同。成品經由電子游標卡尺量測後的實驗數據，如表 5.6 和圖 5.30，量測地方為高度 20mm 的方向，一共量測六次。實驗的結果顯示不同的成型方向對於工件的精度有著影響。觀察數據可以發現，橫向擺置的話，也就是將其要量測尺寸的位置放在 XY 平面的話，最後得到的成品尺寸比起直向，也就是將要量測的尺寸置於 Z 軸方向要來的精確，整體來說 Z 軸方向的每層累積起來的誤差比較明顯，而 XY 方向的誤差比較小且尺寸穩定精確，就表示 XY 方向的每層偏移是很小的。因此可以確認尺寸的精確度跟所成型的方向是有關係，XY 方向的尺寸偏移比起 Z 軸方向的累積每層偏移要來的小，不過誤差仍然在一定範圍之內，此次實驗成品如圖 5.31。

表 5.6 成形方向位置實驗數據（目標尺寸 20mm）

高度量測 (mm) 參數 設定	1	2	3	4	5	6	平均	標準差	全距 (R)
直向	20.2	20.25	20.28	20.26	20.23	20.25	20.25	0.02739	0.08
橫向	20.13	19.95	20.13	20.01	20.07	20.00	20.05	0.07387	0.18

單位：mm

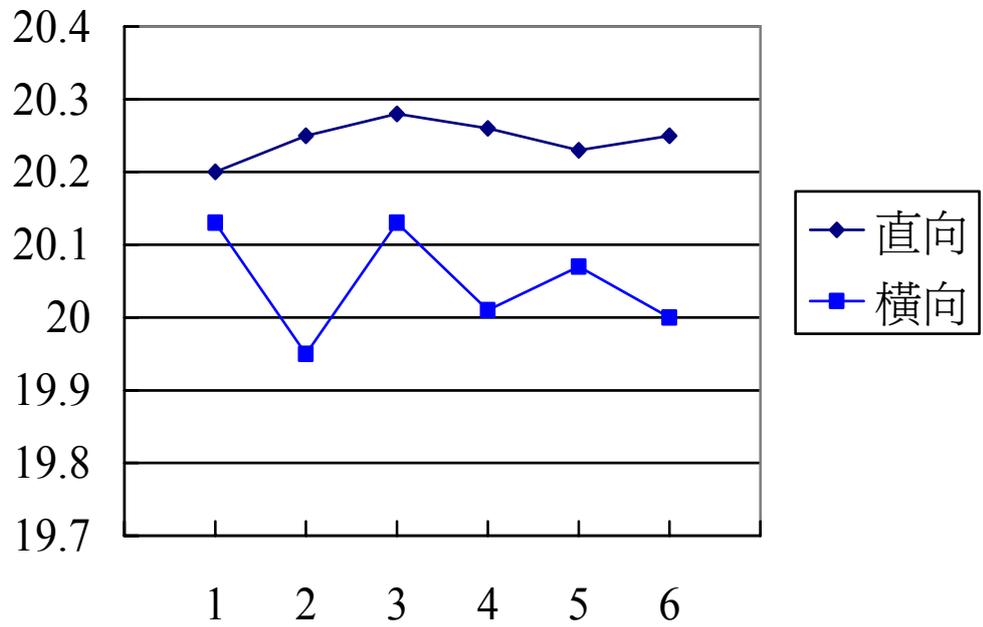


圖 5.30 成形方向位置實驗數據折線圖

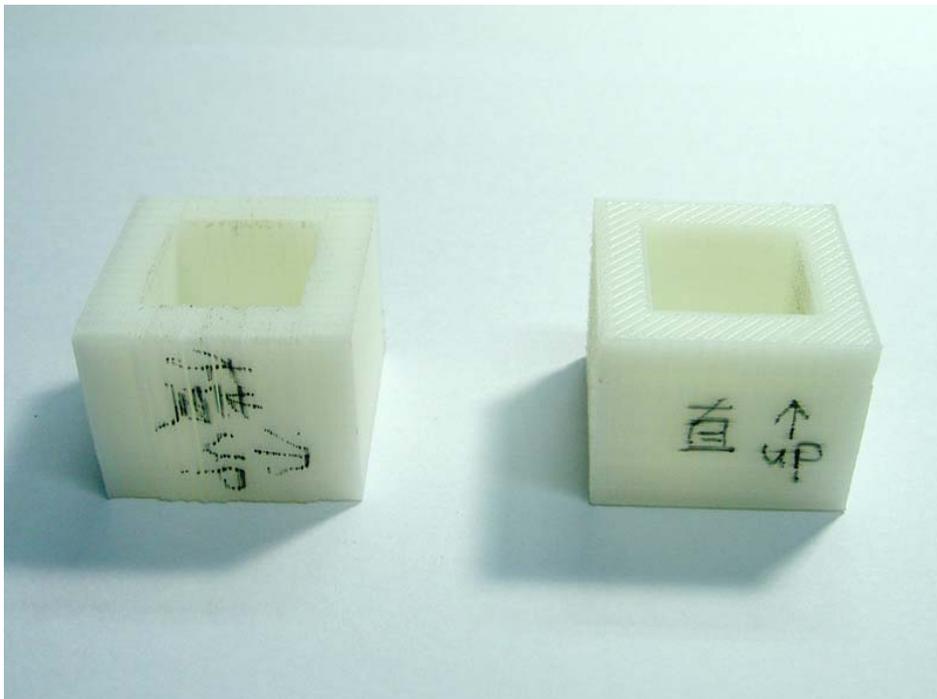


圖 5.31 成形方向位置實驗成品圖

第六章 田口實驗

藉由前面章節的實驗我們可以了解到，各個因子其實對於快速原型所得到的成品尺寸精度都有一定的影響，但是因為都是獨立實驗的關係，並沒有考量這些因子間的互相影響，所以也就不知道到底何種情況下的因子與水準組合才會是最佳的組合。本章節就是要將前面所提到的控制因子，利用田口直交表的方式，將其規劃配對後進行整合性實驗，目的在於了解在各個因子水準皆有變動情況下，何種因子水準的搭配組合可以得到最佳的品質，最後找出最佳的組合，進行驗證。

6.1 實驗目標

藉由前面的製程實驗以及簡單分析，了解到各個製程參數對於成品尺寸精確度的影響，希望可以由田口直交表的實驗，來找出影響 RP 成品尺寸精確度的一些原因，並且分析這些原因，來改善製作品質。研究上利用田口方法裡面的望目特性來計算，以 SolidWorks2004 軟體建構出一個 CAD 圖檔（見圖 6.1 和圖 6.2），然後用預設值轉換成 STL 檔案，載入到 RP 機台軟體（見圖 6.3），最後讓機台成形，並測量完成工件之高度值來進行數據分析。設計此圖形是希望可以讓 FDM 機台的特有 Support 料能夠支撐住物件，而且在直向和橫向的時候皆能有所變化來對應，這樣對於 Support style 的選項才會有所反應，實驗的結果才會更準確有意義。

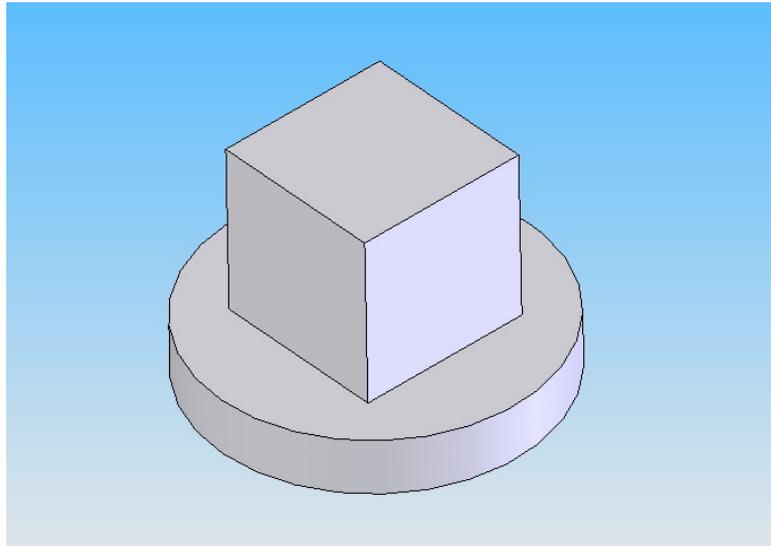


圖 6.1 測試 CAD 圖形

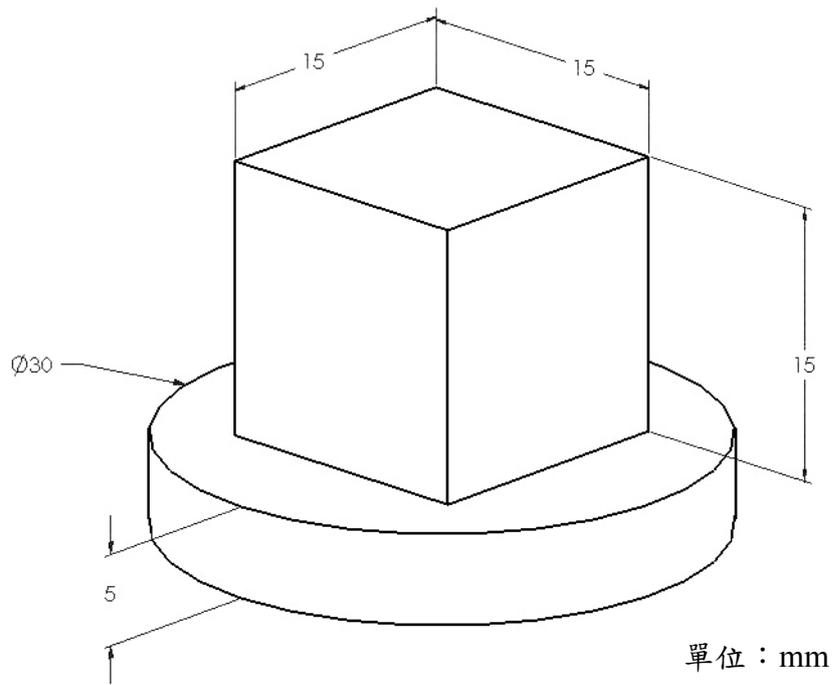


圖 6.2 測試 CAD 圖形之尺寸圖

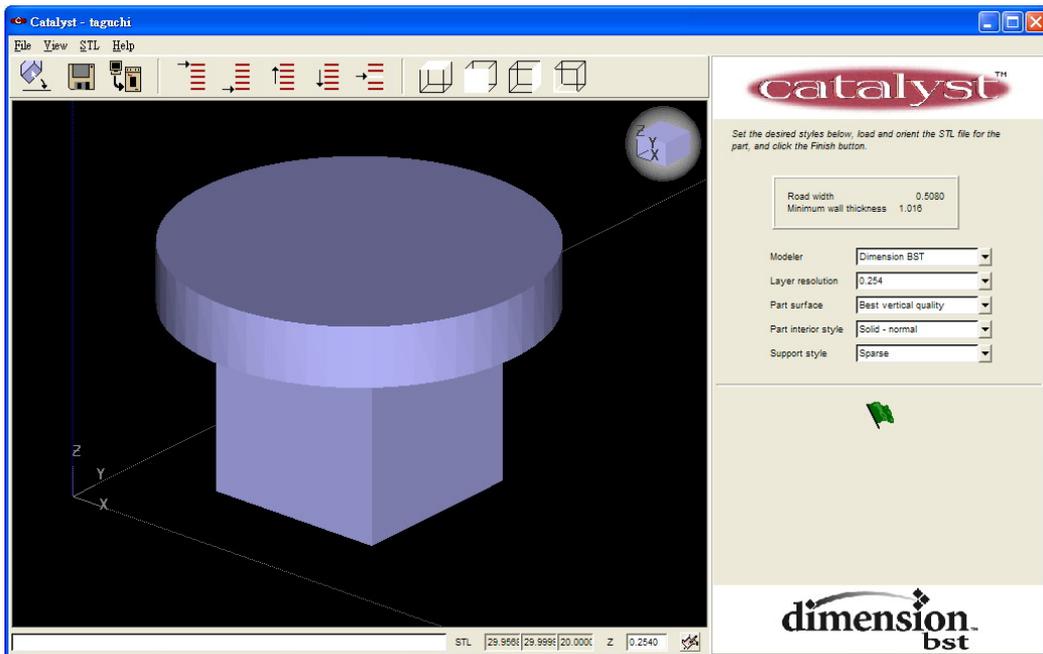


圖 6.3 載入切層軟體設定圖

6.2 實驗流程

本田口實驗的主要流程如下，流程圖為圖 6.4 所示：

- (1) 確定其實驗目標及了解實驗之參數。
- (2) 決定因子與水準並選擇適當直交表。
- (3) 照直交表配置來進行實驗並且量測尺寸。
- (4) 利用望目特別來計算 S/N 比。
- (5) 繪製因子反應圖表。
- (6) 進行 ANOVA 變異數分析。
- (7) 得到最佳化水準並且進行驗證實驗。

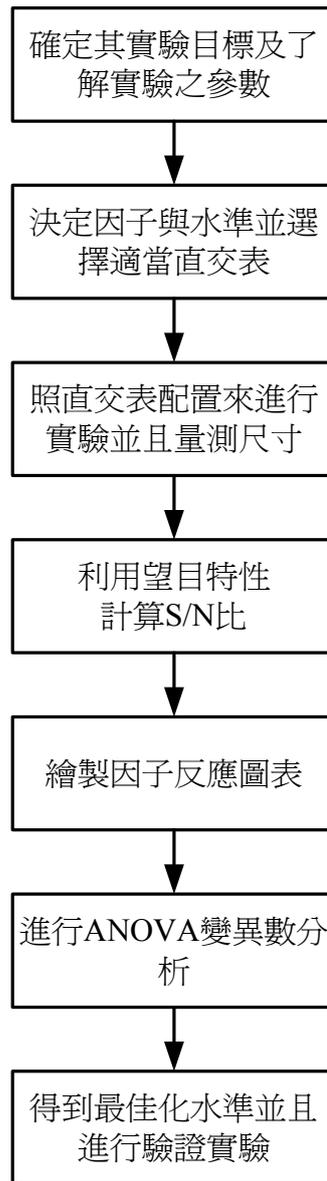


圖 6.4 田口實驗流程圖

6.3 實驗設備

本次實驗主要的設備如下：

- (1) Dimension BST 快速原型機。
- (2) SolidWorks 2004 軟體，用以繪製 3D CAD 圖檔。
- (3) Catalyst 4.0 軟體，為 FDM 機台之配套切層軟體。
- (4) 電子式游標卡尺，為測量 RP 成品尺寸之用。

6.4 選擇因子與水準

在實驗之前必須先對整個快速原型的製程有相當的了解，才能夠選出適合的因子與水準來進行田口實驗，前面章節將每一個控制因子獨立實驗的目的，即在進行規劃實驗所選擇的因子與水準：

(1)Layer resolution：0.254mm 和 0.3302mm

此設定為影響 RP 成品精確度中一個很重要影響因素，而機台也提供了兩種解析度讓使用者選擇，因此將兩個水準都置入直交表來進行實驗。

(2)Part surface：Best vertical quality 和 Best horizontal quality

此兩種設定所影響成品的精細度有著一定的程度，一個是對於垂直方向作最佳化，一個是對於水平方向作最佳化，所以也都將其規劃進入田口直交表來進行實驗。

(3)Part interior style：Solid-normal 和 Sparse

兩種設定基本上雖然對於尺寸的影響差異不大，誤差也都在一定的範圍裡面，但仍會對於尺寸造成影響，所以也將此設定成一個因子進行規劃實驗。

(4)Support style：Sparse、Basic、Surround、Break-away

此四種設定都在一定的誤差裡面，也並沒有特別突出的情況產生，所以將四種設定全部置入田口直交表的水準裡面來進行實驗。

(5)成形擺放位置：位置五和位置六

經過了上面的實驗可以發現成形品質最好的位置是五，因為平均最接近所要的數值，且標準差也最小，表示數值穩定不分散，接著第二準確的是區域六，除了因為平均值略高於位置五以外，再來

標準差的數值也是第二低的，這表示也是有一定程度的穩定性存在，所以選擇了此兩位置，作為田口實驗中的兩種水準。

(6)成型方向：直向和橫向

成型方向的實驗裡可以發現，在橫向與直向的設定時都會有所差異，但是這兩種情況都在其他因子水準沒有改變的狀態下，而做出來的結果，因此為了知道最佳的參數組合，也是決定將此因子置入田口直交表裡面進行實驗。

6.5 選擇直交表

選擇好了以上的因子水準之後，就可以根據所選擇的因子與水準來選擇所需要的直交表，**表 6.1** 是我們將所要實驗的因子、水準整理出的因子水準表，看此表便可以發現是由一個四水準的因子和五個兩水準因子所構成的。而系統上是使用 MINITAB R14 軟體 (**圖 6.5**)，利用 Stat 選項裡面的 DOE (Design of experiment, 實驗設計) 選項裡面，Taguchi (田口) 的選項，就可以利用軟體內建的 Create Taguchi Design 的方式來建立所需要的直交表，所以只要選擇有多少個因子與水準，軟體便可以協助找出直交表，讓實驗者來使用，在此則是選擇可以容納一個四水準與五個兩水準的 $L_{16}(4^1 \times 2^5)$ 直交表 (見**表 6.2**)

表 6.1 因子與水準表

Factor	Levels			
	1	2	3	4
A. Support style	Sparse	Basic	Surround	Break-away
B. Part surface	Best vertical quality	Best horizontal quality		
C. Part interior style	Solid-normal	Sparse		
D. Layer resolution	0.254mm	0.3302mm		
E. 成形擺放位置	位置五	位置六		
F. 成型方向	直向	橫向		

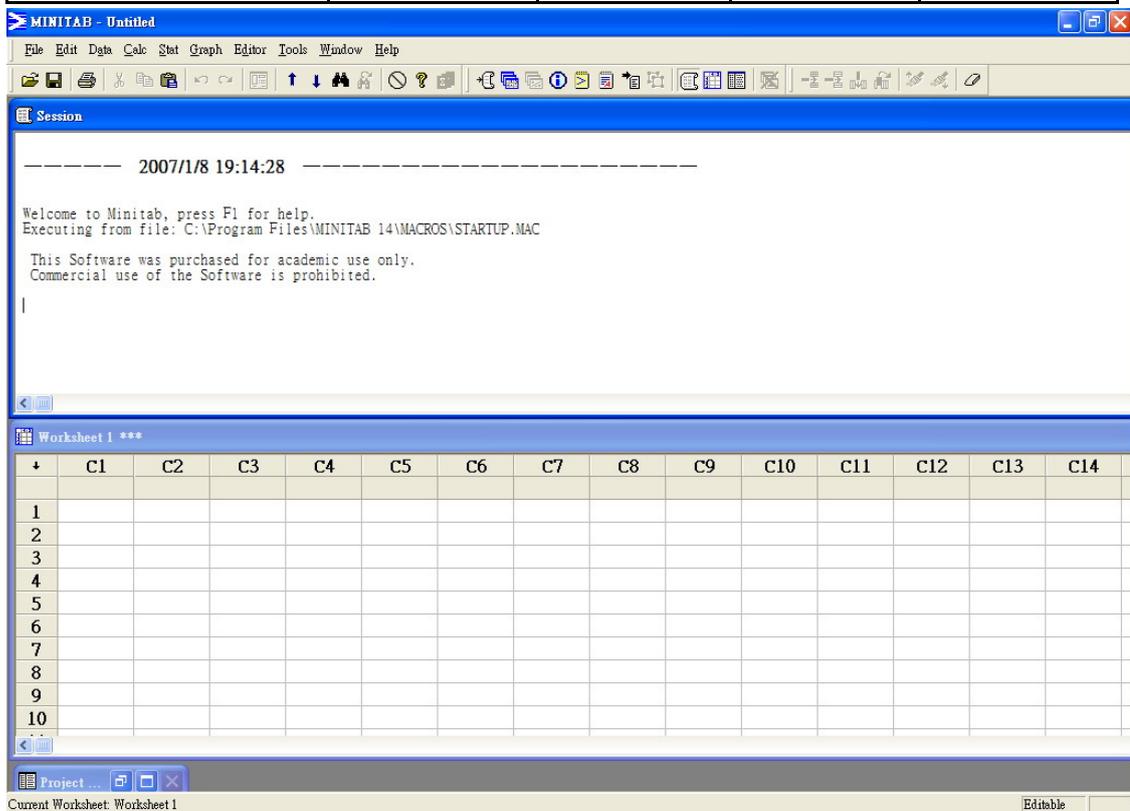


圖 6.5 MINITAB R 14 軟體介面圖

表 6.2 $L_{16}(4^1 \times 2^5)$ 直交表

Expt. NO.	Column					
	A	B	C	D	E	F
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2
3	1	2	2	2	2	1
4	1	2	2	2	2	2
5	2	1	1	2	2	1
6	2	1	1	2	2	2
7	2	2	2	1	1	1
8	2	2	2	1	1	2
9	3	1	2	1	2	1
10	3	1	2	1	2	2
11	3	2	1	2	1	1
12	3	2	1	2	1	2
13	4	1	2	2	1	1
14	4	1	2	2	1	2
15	4	2	1	1	2	1
16	4	2	1	1	2	2

6.6 尺寸量測

利用 L_{16} 的直交表的實驗組合，完成全部田口實驗的時候，就會得到 16 個 RP 成品，此時利用電子游標卡尺來測量其高度值，目的為取得較為精確的數值，而量測部分為圖 6.6，距離為平均分配，標示的紅線為游標卡尺寬度的中央，每一個工件一共量測六次的高度值來進行平均，而全部的量測數據，見表 6.3。

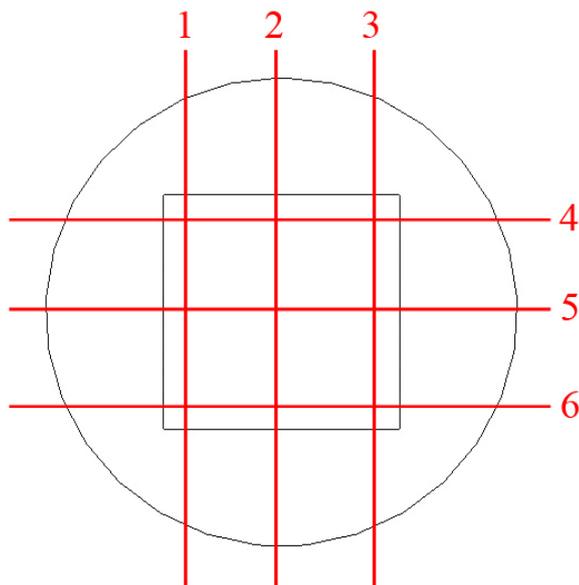


圖 6.6 量測成品位置圖

表 6.3 實驗量測數據表

Expt. NO.	尺寸量測 (單位 mm)					
	1	2	3	4	5	6
1	20.38	20.37	20.36	20.34	20.33	20.34
2	19.99	19.98	20.07	19.98	19.97	20.01
3	20.16	20.15	20.23	20.09	20.11	20.16
4	19.95	19.97	20.00	20.01	19.99	19.98
5	20.36	20.32	20.36	20.26	20.29	20.31
6	20.00	19.99	20.07	20.010	20.05	20.04
7	20.47	20.44	20.49	20.43	20.43	20.45
8	20.09	20.08	20.10	20.09	20.08	20.11
9	20.30	20.30	20.29	20.22	20.23	20.28
10	20.17	20.15	20.22	20.16	20.14	20.10
11	20.50	20.50	20.48	20.46	20.49	20.46
12	20.13	20.12	20.14	20.15	20.16	20.14
13	20.42	20.36	20.36	20.32	20.34	20.36
14	19.99	20.04	20.08	20.08	20.06	20.07
15	20.21	20.21	20.20	20.18	20.18	20.20
16	20.00	19.99	20.09	20.02	20.02	20.07

6.7 數據分析

藉著上面所量測出來的實驗數據，選擇田口方法的望目特性來

進行分析，計算出其變異數 (σ^2) 還有其 S/N 比 (η)，如表 6.4

表 6.4 實驗數據 S/N 比分析表

	量測 1	量測 2	量測 3	量測 4	量測 5	量測 6	平均	σ^2	S/N 比(η)
1	20.38	20.37	20.36	20.34	20.33	20.34	20.35	3.87×10^{-4}	60.298
2	19.99	19.98	20.07	19.98	19.97	20.01	20.00	13.6×10^{-4}	54.685
3	20.16	20.15	20.23	20.09	20.11	20.16	20.15	<u>23.60×10^{-4}</u>	<u>52.356</u>
4	19.95	19.97	20.00	20.01	19.99	19.98	19.98	4.67×10^{-4}	59.322
5	20.36	20.32	20.36	20.26	20.29	20.31	20.32	15.47×10^{-4}	54.265
6	20.00	19.99	20.07	20.01	20.05	20.04	20.03	9.87×10^{-4}	56.092
7	20.47	20.44	20.49	20.43	20.43	20.45	20.45	5.77×10^{-4}	58.605
8	20.09	20.08	20.10	20.09	20.08	20.11	20.09	<u>1.37×10^{-4}</u>	<u>64.703</u>
9	20.30	20.30	20.29	20.22	20.23	20.28	20.27	12.80×10^{-4}	55.065
10	20.17	20.15	20.22	20.16	20.14	20.10	20.16	15.47×10^{-4}	54.196
11	20.5	20.5	20.48	20.46	20.49	20.46	20.48	3.367×10^{-4}	60.955
12	20.13	20.12	20.14	20.15	20.16	20.14	20.14	2.00×10^{-4}	63.071
13	20.42	20.36	20.36	20.32	20.34	20.36	20.36	11.20×10^{-4}	55.683
14	19.99	20.04	20.08	20.08	20.06	20.07	20.05	11.87×10^{-4}	55.299
15	20.21	20.21	20.20	20.18	20.18	20.20	20.2	1.87×10^{-4}	63.396
16	20.00	19.99	20.09	20.02	20.02	20.07	20.03	15.77×10^{-4}	54.056

以第一組數據為例，平均值利用公式 (3.4) 為：

$$(20.38+20.37+20.36+20.34+20.33+20.34)/6=\mathbf{20.3533333}=20.35$$

而變異數 σ^2 利用公式 (3.5)：

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= (20.38-20.35333)^2 + (20.37-20.35333)^2 + (20.36-20.35333)^2 + \\ & (20.34-20.35333)^2 + (20.33-20.35333)^2 + (20.34-20.35333)^2 / (6-1) \\ &= 0.001933333333 / 5 = \mathbf{0.000386666666} = 3.87 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

而 S/N 比有了上面兩個數值，便可使用公式 (3.3)：

$$\eta = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{\sigma^2} \right) = 10 \log \left(\frac{20.35333^2}{0.00038667} \right) = \mathbf{60.298}$$

再來便可以計算出各因子水準的 S/N 比的回應，可以見下 [表 6.5](#) 的 S/N 比因子回應表。

表 6.5 S/N 比因子回應表 (單位：db)

	A	B	C	D	E	F
Level 1	56.665	55.698	58.352	58.126	59.162	57.578
Level 2	58.416	59.558	56.904	57.130	56.094	57.678
Level 3	58.322					
Level 4	57.109					

而表中的各個數據算法如下：

因子 A 的 Level 1 SN 比因子回應數據 (見 [表 6.4](#))：田口實驗中的 (exp1 的 η 值 + exp2 的 η 值 + exp3 的 η 值 + exp4 的 η 值) / 4 = (60.298 + 54.685 + 52.356 + 59.322) / 4 = 226.661 / 4 = **56.665**

而因子 B 的 Level 1 SN 比因子回應數據：田口實驗中的 (exp1 的 η 值 + exp2 的 η 值 + exp5 的 η 值 + exp6 的 η 值 + exp9 的 η 值 + exp10 的 η 值 + exp13 的 η 值 + exp14 的 η 值) / 8 = (60.298 + 54.685 + 54.265 + 56.092 + 55.065 + 54.196 + 55.683 + 55.299) / 8 = 445.583 / 8 = **55.698**

其他的數據以此類推算出來，便可以將上表的數據一一求出，繪製成圖 6.7 的反應圖，便可以易於觀察各因子回應數據的高低。

單位：db

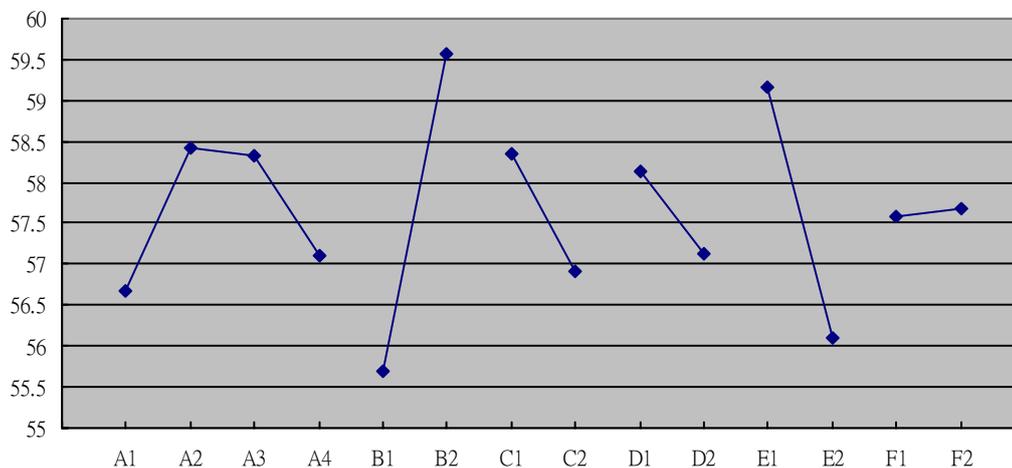


圖 6.7 S/N 比因子回應圖

而由上面的數據可以進行變異數分析，利用 MINITAB R14 軟體可以很方便的分析出數據。分析數據見下表 6.6

表 6.6 ANOVA 變異數分析表

Factor \ Level	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	自由度	平方和	均方和	變異數比 F	貢獻度 %
A	56.665	58.416	58.322	57.109	3	9.184	3.0613	0.2	4.07
B	55.698	59.558			1	59.619	59.6194	3.92	26.44
C	58.352	56.904			1	8.387	8.3872	0.55	3.73
D	58.126	57.130			1	3.962	3.6917	0.26	1.77
E	59.162	56.094			1	37.697	37.6969	2.48	16.72
F	57.578	57.678			1	0.040	0.0403	0.00	0.018
誤差					7	106.542	15.2202		47.26
總和					15	225.431			

表 6.6 各項數據之計算，說明如下：

$$\begin{aligned} & \text{各因子的平方和} = \text{第一水準實驗次數} \times (\text{因子的第一水準 } \eta - \bar{\eta})^2 \\ & + \text{第二水準實驗次數} \times (\text{因子的第二水準 } \eta - \bar{\eta})^2 + \dots + \text{第 } n \text{ 水準實驗次} \\ & \text{數} \times (\text{因子的第 } n \text{ 水準 } \eta - \bar{\eta})^2 \end{aligned} \quad (6.1)$$

$$\text{而 } \bar{\eta} = \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i}{n} \quad (6.2)$$

$$\text{總平方和} = \sum_{i=1}^n (\eta_i - \bar{\eta})^2 \quad (6.3)$$

以此表為例，先用公式 (6.2) (見表 6.4) 求 $\bar{\eta}$ ：

$$\begin{aligned} \bar{\eta} &= (60.298 + 54.685 + 52.356 + 59.322 + 54.265 + 56.092 + 58.605 + 64.703 + 5 \\ & 5.065 + 54.196 + 60.955 + 63.071 + 55.683 + 55.299 + 63.396 + 54.056) / 16 \\ & = 57.6279 \end{aligned}$$

表 6.6 中，A 因子平方和，則是使用公式 (6.1) 便可以求出

$$\begin{aligned} & = 4(56.665 - 57.6279)^2 + 4(58.416 - 57.6279)^2 + 4(58.322 - 57.6279)^2 + \\ & 4(57.109 - 57.6279)^2 = 9.1972 \end{aligned}$$

$$\text{B 因子平方和} = 8(55.698 - 57.6279)^2 + 8(59.558 - 57.6279)^2 = 59.5984$$

$$\begin{aligned} & \text{而總平方和利用公式 (6.3)} = (57.6279 - 60.298)^2 + (57.6279 - 54.685)^2 \\ & + (57.6279 - 52.356)^2 + (57.6279 - 59.322)^2 + (57.6279 - 54.265)^2 \\ & + (57.6279 - 56.092)^2 + (57.6279 - 58.605)^2 + (57.6279 - 64.703)^2 \\ & + (57.6279 - 55.065)^2 + (57.6279 - 54.196)^2 + (57.6279 - 60.955)^2 \\ & + (57.6279 - 63.071)^2 + (57.6279 - 55.683)^2 + (57.6279 - 55.299)^2 \\ & + (57.6279 - 63.396)^2 + (57.6279 - 54.056)^2 = \mathbf{225.412} \end{aligned}$$

因此誤差平方和=225.412-(9.184+59.619+8.387+3.962+37.697+0.040)=
106.523

總自由度為全體測值的個數減 1 =16-1=15

A 因子自由度 =4-1=3

所以誤差自由度=15-(3+1+1+1+1+1)=7

A 因子均方和為 A 平方和除以 A 因子自由度=9.19724006/3=3.0657

變異數比 F (因子 A) =3.0613/15.2202=0.2

變異數比 F (因子 B) =59.6194/15.2202=3.92

貢獻度 (A 因子的數值) =9.184/225.431=0.0407=4.07%

貢獻度 (B 因子的數值) =59.619/224.431=0.2644=26.44%

6.8 確認實驗

經過上面的分析以後，觀察 S/N 比反應圖 6.7，找出各因子數值最高的水準可以發現，最佳的參數因子水準分別是 A2、B2、C1、D1、E1、F2，接著便可以估計最佳化組合的 η_{opt} 範圍 [黃仲儀，2005]。

$$\eta_{opt} = \bar{\eta} + (\eta_{A\text{因子的最佳水準}} - \bar{\eta}) + (\eta_{B\text{因子的最佳水準}} - \bar{\eta}) + (\eta_{C\text{因子的最佳水準}} - \bar{\eta}) + \dots \quad (6.4)$$

$$\frac{1}{n_0} = \frac{1}{n} + \left(\frac{1}{n_A} - \frac{1}{n} \right) + \left(\frac{1}{n_B} - \frac{1}{n} \right) + \left(\frac{1}{n_C} - \frac{1}{n} \right) + \dots \quad (6.5)$$

n_A 、 n_B 、 n_C 為估測 η_{opt} 值時所選擇的影響較大之因子，在田口實驗直交表 (表 6.2) 配置中所出現的次數，例如：A2 因子於本實驗中出現了 4 次 (第 5、6、7、8 次實驗)，B2 因子於本實驗中出現了 8 次 (第 3、4、7、8、11、12、15、16 次實驗)。

$$\sigma_{pred}^2 = \left(\frac{1}{n_0}\right)\sigma_e^2 + \left(\frac{1}{n_r}\right)\sigma_e^2 \quad (6.6)$$

σ_e^2 為誤差值，為 15.2202

n_r 為確認實驗次數，本次實驗為設定七次。

所以利用公式 (6.4)，可求出 η_{opt} ：

$$\eta_{opt} = \bar{\eta} + (\eta_{A2} - \bar{\eta}) + (\eta_{B2} - \bar{\eta}) + (\eta_{C1} - \bar{\eta}) + (\eta_{D1} - \bar{\eta}) + (\eta_{E1} - \bar{\eta}) + (\eta_{F2} - \bar{\eta})$$

$$\bar{\eta} = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} \eta_i = (60.298 + 54.685 + 52.356 + 59.322 + 54.265 + 56.092 + 58.605 +$$

$$64.703 + 55.065 + 54.196 + 60.955 + 63.071 + 55.683 + 55.299 + 63.396 + 54.05$$

$$6) / 16 = 57.628$$

$$\eta_{opt} = \eta_{A2} + \eta_{B2} + \eta_{C1} + \eta_{D1} + \eta_{E1} + \eta_{F2} - 5 \times \bar{\eta} = 58.416 + 59.558 + 58.352 + 58.126$$

$$+ 59.162 + 57.678 - 5 \times 57.628 = 63.152$$

$$n = 16 \text{、} n_{a2} = 4 \text{、} n_{B2} = 8 \text{、} n_{C1} = 8 \text{、} n_{D1} = 8 \text{、} n_{E1} = 8 \text{、} n_{F2} = 8$$

接著利用公式 (6.5) 來計算：

$$\frac{1}{n_0} = \frac{1}{n} + \left(\frac{1}{n_{A2}} - \frac{1}{n}\right) + \left(\frac{1}{n_{B2}} - \frac{1}{n}\right) + \left(\frac{1}{n_{C1}} - \frac{1}{n}\right) + \left(\frac{1}{n_{D1}} - \frac{1}{n}\right) + \left(\frac{1}{n_{E1}} - \frac{1}{n}\right) + \left(\frac{1}{n_{F2}} - \frac{1}{n}\right)$$

$$= \frac{1}{16} + \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{16}\right) + \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{16}\right)$$

$$= \frac{1}{4} + \frac{5}{8} - \frac{5}{16} = \frac{4 + 10 - 5}{16} = \frac{9}{16}$$

接著使用公式 (6.6) 求出 σ_{pred} ：

$$\sigma_{pred}^2 = \left(\frac{9}{16} \times 15.2202\right) + \left(\frac{1}{7} \times 15.2202\right) = \left(\frac{9}{16} + \frac{1}{7}\right) \times 15.2202 = 10.7356$$

因此 $\sigma_{pred} = \sqrt{10.7356} = 3.2765$

所以此 η_{opt} 值之 3 個標準差 σ_{pred} 的範圍值：

$$\eta_{opt} \pm 3\sigma = 62.152 \pm 3 \times 3.2765, \text{ 所以範圍是 } \mathbf{53.323} < \eta_{opt} < \mathbf{72.982}$$

求出了這數據以後，表示如果利用找到最佳化因子、水準進行確認實驗的話，所得到的 RP 成品的 η 都必須在這 $\eta_{opt} \pm 3\sigma$ 範圍裡面，這樣才可以證明此最佳化組合是有效的。

接著便將所預測的參數水準組合來進行驗證實驗，前面設定驗證實驗為七次，因此就把所找到的最佳水準來進行 RP 成形，所得到的七組 RP 成品尺寸，加以量測分析出 S/N 比，而量測數據分析如下表 6.7，而實驗成品如圖 6.8。

表 6.7 驗證實驗數據 S/N 比分析表

	量測 1	量測 2	量測 3	量測 4	量測 5	量測 6	平均	σ^2	S/N 比(η)
1	20.05	20.07	20.12	20.09	20.09	20.12	20.09	7.60×10^{-4}	57.251
2	20.11	20.12	20.18	20.10	20.10	20.10	20.12	9.77×10^{-4}	56.175
3	20.00	19.99	20.09	20.06	20.05	20.02	20.04	14.70×10^{-4}	54.365
4	20.09	20.08	20.12	20.07	20.11	20.06	20.09	5.37×10^{-4}	58.763
5	20.03	20.05	20.1	20.07	20.05	20.07	20.06	5.77×10^{-4}	58.437
6	20.09	20.06	20.16	20.09	20.08	20.10	20.10	11.47×10^{-4}	55.470
7	20.07	20.09	20.14	20.08	20.05	20.08	20.09	9.10×10^{-4}	56.469

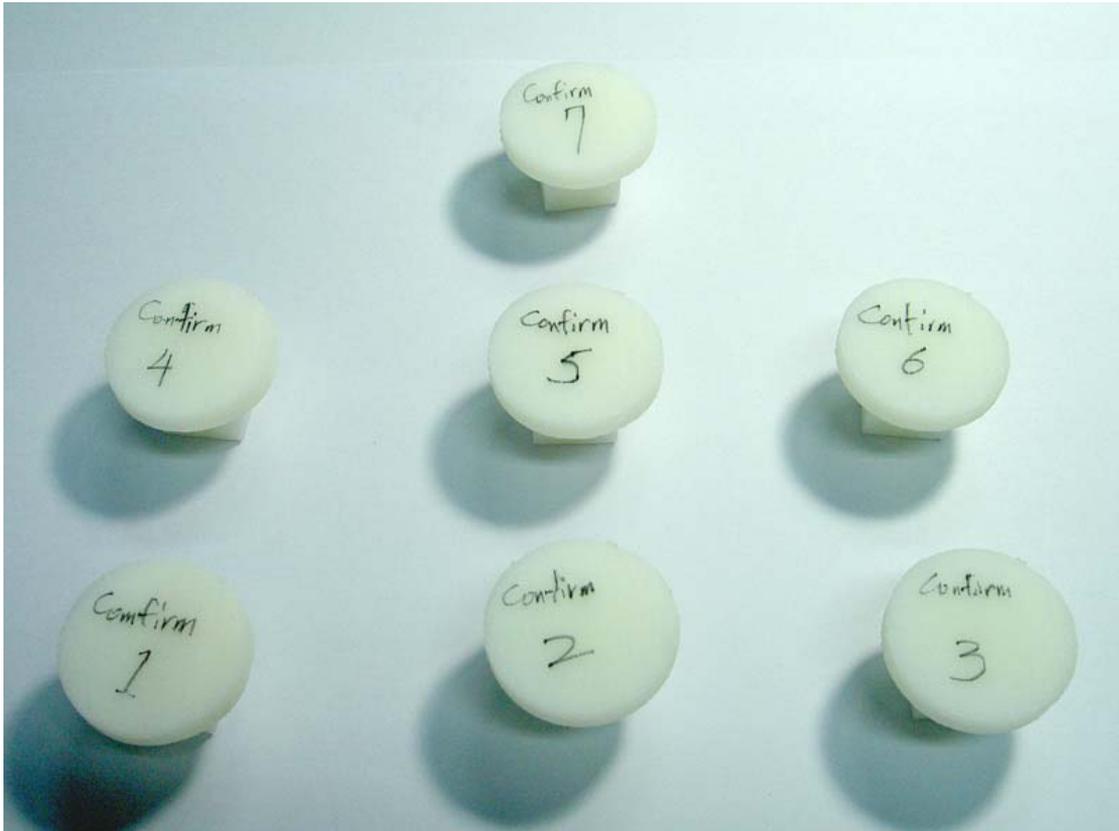


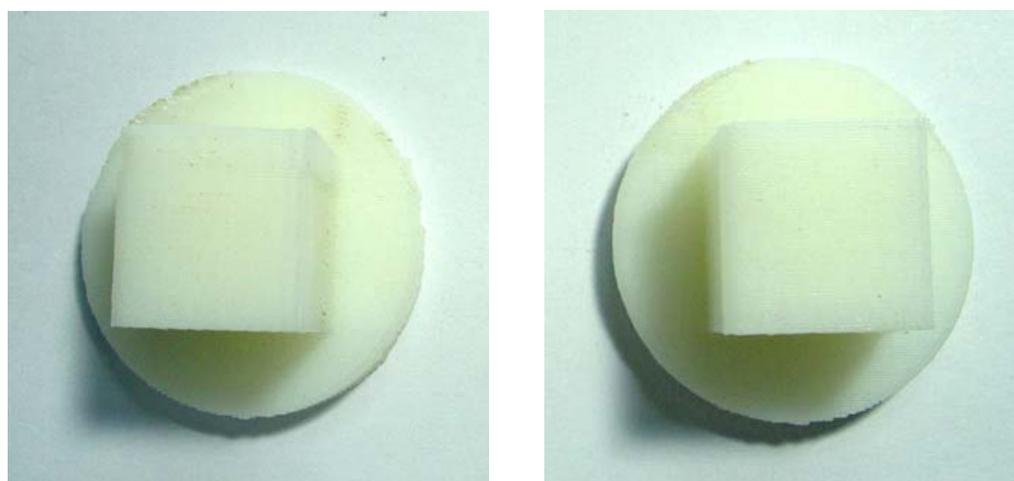
圖 6.8 確認實驗成品圖

觀察確認實驗的結果可以發現，在這七組驗證實驗裡面，所算出的 η 值都在 $\eta_{opt} \pm 3\sigma$ 範圍裡面，也就是在是 $53.3225 < \eta_{opt} < 72.9815$ 這個範圍裡面，因此可以證實所找的精度最佳化參數是有效的。

6.9 結果討論

最後利用預設值參數以及精度最佳化參數，各別去製作一組成品，成品圖如圖 6.9，圖 6.9a 是使用預設值參數所做出來的成品，圖 6.9b 是最佳化參數所做出來的成品，可以發現兩者在外觀上已經有明顯的差異了。觀察上面方柱的部份可以發現，圖 6.9a 的成品甚

至還有偏移的情況產生，而圖 6.9b 並無此現象產生，實際測量過尺寸之後，更可以發現兩者之間的差異，此結果更可以幫助設計者，在產品初期的快速原型成品打樣時之精度提升。而使用預設值參數之製作時間為 47 分鐘，而最佳化製程參數之製作時間為 41 分鐘，製作時間也縮短了，進而縮短設計者在初期構想發展的時間，縮短設計流程。而此也可以證明此精度最佳化製程參數之成效，見表 6.8。



(a)預設值

(b)田口實驗最佳化參數

圖 6.9 成品比較圖

表 6.8 實驗成果比較表

	預設值	最佳化
時間	47 分鐘	41 分鐘
精度	20.35mm	20.08mm

第七章 結論及未來展望

本章節中主要探討本研究所完成的結果，以及未來相關研究方向。

7-1 結論

本研究中提出利用田口實驗計劃法的方式，針對 FDM 快速原型系統的成品精確度的改善。研究中分成兩個部份簡化程序：(1)首先將機台的參數設定一一的加以單獨實驗，用以了解各種設定的影響程度，並且加上了擺放的方向以及成型的位置，這兩種容易影響成品結果的參數進去，最後能夠得知各種參數的交互影響結果。(2)另一個方面就是利用田口方法，用此實驗配置法進行實驗，找出各種參數混合實驗的結果，目的是為了簡化全因子實驗法的龐大實驗次數，並且找出最佳化的方向以及參數設定。並且最後加以驗證實驗證實所找出的因子水準組合是有成效的。而且在製作時間方面，發現精度最佳化製程參數所需的製作時間比起預設值參數要來的短，此結果更可證明本研究之可行性。

本研究具體成果及貢獻：

1. 了解機台各參數對於 RP 成品的影響。
2. 利用田口方法找出最佳化的製程參數組合（表 7.1）。

表 7.1 FDM 精度最佳化製程參數表

製程參數	參數設定
A. Support style	Basic
B. Part surface	Best horizontal quality
C. Part interior style	Solid-normal
D. Layer resolution	0.254mm
E. 成形擺放位置	位置五（正中央）
F. 成型方向	橫向

7-2 未來展望

在本研究中利用田口實驗法，將 FDM 系統的快速原型機來找出它的最佳化製程參數，而另外在應用方面還有發展之空間。

1. 廠商運用方面

本研究中雖然找出了 FDM 系統的最佳化製程參數，但是真正根本的改善還是掌握在製造廠商方面，如果可以將所得到的參數結果給予廠商，來運用在機台製程參數軟體改善，應該可以有著根本上的品質的提升。再者廠商也可以運用田口方法在機台製造上的改善，更能夠達成雙贏的效果，不只有技術方面的改善，連製造上的改善也是可以達成的。

2. 個人未來運用方面

本研究中只探討了末端最後製造上的問題，對於前端像是 STL 精度的取捨，或是以逆向工程的方式來取得點資料，進而轉換成 STL 檔案都沒有更深的研究，未來此方向也是一個可以加以著墨注意的

地方，達成前後端的方法或是製程參數上的改善，更能夠達到對於品質要求上的掌握。

參考文獻

1. Anitha, R., Arunachalam, S., Radhakrishnan, P., 2001, “Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modeling”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 118, pp. 385-388.
2. Chua, C.K., Leong, K.F. and Lim, C.S., 2003, *Rapid Prototyping : Principles and Applications*, 2nd edition, World Scientific Publishing Co. Ltd.
3. Jeng, J.Y., Wong, Y.S., and Ho, C.T., 2001a, “Curing characteristics of the photopolymer used in the Solid Laser-Diode plotter RP system”, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 17, pp.535-542.
4. Jeng, J.Y., Wong, Y.S., and Ho, C.T., 2001b, “Over-curing reduction of parts fabricated by the Solid Laser-Diode plotter rapid prototyping system using the Taguchi Method”, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 18, pp.683-691.
5. Lee, B.H., Abdullah, J., Khan, Z.A., 2005, “Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 169, pp. 54-61.
6. Ouch, O.S., Hon, K.K.B., 1998, “Optimising build parameters for improved surface finish in stereolithography”, *Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 38, pp.329-342.
7. Ouch, S.O., Hon, K.K.B., 2001, “Improving Stereolithography Part Accuracy for Industrial Applications”, *Journal of Advanced*

- Manufacturing Technology, Vol. 17, pp.61-68.
8. Pham, D.T., Gault, R.S., 1998, “A comparison of rapid prototyping”, Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 38, pp. 1257-1287.
 9. Raghunath, N., Pandey, P.M., 2007, “Improving accuracy through shrinkage modelling by using Taguchi method in selective laser sintering”, Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, pp. 985-995.
 10. Yao, W.L., and Tseng, Y.C., 2002, “A robust process optimization for a powder type rapid prototyper”, Rapid Prototyping Journal, Vol. 8, pp. 180-189
 11. Zhou, J.G., Herscovici, D., Chen, C.C., 2000, “Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts”, Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 40, pp. 363-379.
 12. 李輝煌，田口方法：品質設計的原理與實務，2000，高立圖書股份有限公司。
 13. 吳碩傑，應用田口方法於高速引擎參數之最佳化設計，2004，華梵大學工業管理學系碩士論文。
 14. 邱雲堯，快速原型之層狀成型法(LOM)研究，2000，國立台灣大學機械工程系碩士論文。
 15. 林耕莘，快速原型製造系統之有效率的進階適應性切層方法，2000，國立中正大學機械工程系碩士論文。
 16. 林佳駿，應用逆向工程於產品快速設計之直接塑模，2002，國立成功大學工業設計系碩士論文。

- 17.柯俊宏，灰關聯分析結合田口參數設計運用於逆向工程點群資料處理之研究，2003，大葉大學自動化工程系碩士論文。
- 18.莊峻超，應用逆向工程於形態漸變設計模式建立之研究，2001，國立成功大學工業設計系碩士論文。
- 19.許耀仁，田口方法在逆向工程之 CAD 模型重建及製造最佳化參數設計，2002，國立雲林科技大學機械工程系碩士論文。
- 20.普立得科技，2005，<http://www.3dprinting.com.tw/>
- 21.陳耀茂，田口實驗計劃法：Introduction to design of experiment，1997，滄海書局。
- 22.陳耀茂 譯；田口玄一 著，田口統計解析法，2003，五南圖書股份有限公司。
- 23.曾昱晨，粉末基快速原型系統之材料特性及系統參數最佳化設計之研究，2001，國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系碩士論文。
- 24.曾彥義，田口方法應用於高速 CNC 銑削加工製程之最佳參數設計，2003，國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系碩士論文。
- 25.黃仲儀，粉末型快速成型機之成型性質探討，2005，大葉大學機械工程系碩士論文。
- 26.詹依蓓，粉末基 RP 製品的形狀精度之 CMM 量測，2006，大葉大學機械工程系碩士論文。
- 27.黎文龍，工程設計與分析：創新設計分析與模擬，2000，東華書局股份有限公司。
- 28.賴後權，基因演算法於快速成型中網格最佳化與線上影像監視之研究，2003，大葉大學自動化工程學系碩士論文。

- 29.蘇筵仁，應用田口方法於 0201 被動元件製程參數優化，2004，
華梵大學工業管理學系碩士論文。