

快速成型技術與製造精度探討

劉大銘 黃仲儀

大葉大學機械與自動化工程學系

彰化縣大村鄉山腳路 112 號

摘要

快速成型技術為使用分層堆積製造技術直接地經過 STL (standard template library) 網格嵌入 CAD (computer-assisted/computer-aided drafting) 模型生產複雜原型。其優點是減少產品發展週期，一般快速成型製造都有效的以原型製造來協助產品發展，縮短產品發展時間並且提高產品品質。本研究中利用田口實驗法以快速成型機 3DP-Z402 的製造參數最佳化製造裝配件。研究中選擇層厚、弦高、X 列印補償與 Y 列印補償為控制因子，利用 4 因子 3 水準的 L9 直交表與望目特性執行最佳化實驗。利用三次元量床測量取得孔銷直徑。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。

關鍵詞：快速成型，3DP，田口法

A Study of Rapid Prototyping Process Parameters and Its Product Accuracy

TIA-MING LIU and ZHONG-YI HUANG

Department of Mechanical and Automation Engineering, Da-Yeh University

112 Shan-Jiau Rd., Da-Tsuen, Changhua, Taiwan

ABSTRACT

Rapid prototyping technology uses layered manufacturing technology to produce complicated prototypes directly from a CAD (computer-assisted/computer-aided drafting) model through a STL (standard template library) tessellation. Rapid prototyping and manufacturing has been proved to be an effective prototyping process in assisting product development due to its advantages of reducing the product development cycle, shortening product development time, and enhancing the quality of the product. In this study, the Taguchi method is adopted to obtain the optimum process parameters in a 3DP-Z402 machine for making the mating parts. An L9 orthogonal chart and nominal-the-best are used with four factors and three levels, the factors being layer thickness, chordal tolerance, x-bleed compensation, and y-bleed compensation. The quality characteristic is the pin (or hole) diameter measured by CMM (coordinate measuring machine). Finally, the diameter tolerance is analyzed by using signal-to-noise and ANOVA to finish optimization of the factors.

Key Words: rapid prototyping, 3DP, Taguchi method

一、前言

面對企業界產品的快速變化，及產品生命週期的相對縮短，快速成型技術（rapid prototyping, RP）可以將設計者的構想從 CAD（computer-assisted/computer-aided drafting）中直接在短時間實體化。快速成型技術現已成功的在世界上廣泛應用，以降低產品開發週期，加速新產品上市的速度。整合逆向工程技術（reverse engineering, RE）、快速成型技術以及快速模具技術（rapid tooling, RT）的快速製造系統（rapid manufacturing, RM）是目前的產品開發趨勢。

在文獻中 Shapiro 與 Barequet [6] 提出三角網格的最小面積、最小角度等最佳化定義；Barequet 與 Kaplan [1] 和 Dickens [4] 中簡介探討現今快速成型機的資料，包含各類型的檔案格式、優缺點、各機型使用的方向和原理；Chen, Ng 與 Wang [2] 經過縮減的網格為整體 STL（standard template library）中較平滑處，而重要的曲面特徵則被保留；Choi 與 Samavedam [3] 以專家系統幫助設計者選擇 RP 加工參數、表面精確度、建構時間與定位效率等成型關鍵參數；Zhou, Herscovici 與 Chen [8] 利用田口法，使用 RSM（response surface method）和 ANOVA（analysis of variance）分析技術，研究 SLA（stereo lithography apparatus）系統有五個地方影響快速成型部分，分別為切層厚度、固化深度、切層縫隙、零件方向、及雷射強度；Lin, Sun 與 Yan [5] 提出各種模型的最佳化成型方向的定義標準；Stroud 與 Xirouchakis 在 [7] 中提出 CAD 轉換成 STL 檔後所造成體積的影響。

本研究將從 STL 格式到 RP 加工參數中，分析各步驟間對於成品尺寸的關聯變化，以製作符合尺寸公差的孔、銷裝配件為目的。在第 2 節中介紹 3DP（3D-printing）快速成型的加工步驟及原理，第 3 節中分析從 CAD 檔案轉換為 STL 格式中，網格多寡對模型體積、面積的影響；RP 加工參數中，切成厚度，列印補償與孔、銷直徑的關係，分析各參數對尺寸的影響，第 4 節則將第 3 節中的參數利用田口法求取最佳製程參數，已達到裝配尺寸公差的最佳化。以下文中將首先介紹 3DP 快速成型機，接著說明製程參數的參數特徵，再利用田口法與參數配置進行探討，最後針對實驗結果作結論與建議。

二、3DP 快速成型機

快速原型加工方式是一層接著一層分層製造，以連續增加材料方式加工，因為加工原理不同，所以在尺寸精度方面並無法像傳統加工，如車、銑、鑽如此的準確。快速成型使用的材料和加工方式不同可分為 6 種：1. 液態製程；2. 面曝光製程；3. 粉末製程；4. 紙層積製程；5. 塑膠擠出製程；6. 3D 印刷製程。快速成型技術有四個基本的步驟，首先是 CAD 模型的製作，有了 CAD model 之後接下來將檔案轉換成快速成型系統所能編譯的 STL 格式，最後傳到快速成型系統中作切層（slicing）處理，然後一層一層堆疊的方式產生實體模型。3D-Printing 快速成型技術加工原理是以材料膠合的方式進行，使用非傳統加工的方法，可在短時間之內將已設計完成的 CAD 模型，完成其成品的外型製作。

本實驗機器 Z402C 採用 3D 印刷的原理成型，為麻省理工學院（MIT）所發展的快速成型技術，由類似噴墨印表機的噴墨頭，列印出膠水，將切層後的剖面形狀噴附在粉末上，再由刮版將粉末由材料區推至成型區，重覆噴塗，直到原型件製作完成。

三、製造流程參數分析

從 CAD 模型的繪製到 RP 實體模型的製作，這當中有很多製程參數會影響成品的精度與品質，所以必須先挑選出影響較大的控制因子當作實驗配置的依據，以下利用實驗來找尋會影響實驗目標的因子。

（一）分析工具

1. 軟體方面：solidworks2003（模型繪製 CAD 軟體）、Zprint（切層軟體）。
2. 硬體方面：
 - 3DP 快速成型機：機型（402c）、材料（ZP100），縮水率 X、Y、Z 為 0.99、膠水：ZP100、結合劑：Apollo 5005。
 - 三次元量床：西德 ZEISS C7600 型三次元量床。以下實驗所量得的直徑尺寸，都是以此機器在離固定面 15mm 圓周上量取 8 點取得一直徑後，量取 3 次取平均值。

（二）STL 檔案格式探討

STL 對於銷、孔所建構的方式不同，銷是以內切的方式組成，所以 STL 格式的體積、面積會比原來的 CAD 檔小；孔則是以外切的方式構成圓，體積面積則會比 CAD 檔大，

如圖 1。

使用 Solid Works 2003 繪製一個直徑 10mm 長 20mm 銷在 20×20×10mm 正方形的物件，體積和面積分別為 5570.8mm³、2228.32mm²，如圖 2，因底座是由方型所組成，所以三角網格並不會因調整弦高、角度而對矩型有所影響。其角度的定義為 STL 網格中三角形內側最小角的角度，如圖 3 所示。

在 STL 檔案格式中調整偏差（弦高）和角度，分別以弦高 0.04mm、0.03mm、0.02mm、0.01mm、0.008mm、0.006mm、0.004mm，各分配三個角度 30°、20°、10°，以 Surfacer 10.5 取得體積、面積和檔案大小，與 SolidWorks 2003 繪製所計算的體積，面積比較差異，結果如表 1。

由表 1 可看出弦高、角度越小，越接近原始模型的體積面積、在角度在弦高 0.03mm 以後並不影響體積面積和檔案大小，而弦高影響卻很顯著，所以將角度的影響排除，對較大的 CAD 檔，較小的弦高可以將曲面更平滑化，但是快速

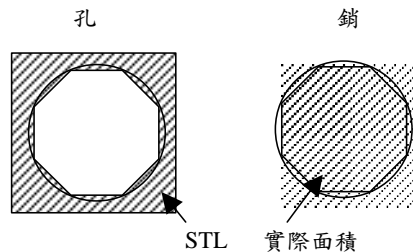


圖 1. 外切圓與內切圓

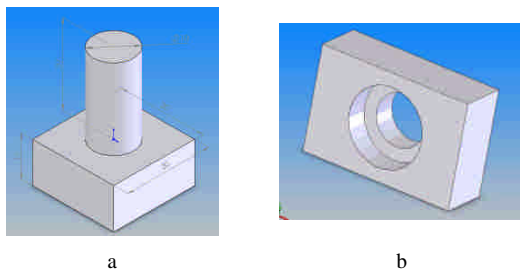


圖 2. CAD 物件

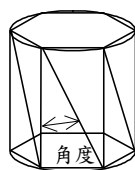


圖 3. 角度示意圖

表 1. 弦高角度影響表

弦高	角度	面積 mm ²	體積 mm ³	網格數	所佔容量 (KB)
0.04	30°	2226.66	5554.63	114	34
	20°	2226.66	5554.63	114	32
	10°	2227.51	5562.82	156	44
0.03	30°	2227.09	5558.74	130	36
	20°	2227.09	5558.74	130	36
	10°	2227.51	5562.82	156	44
0.02	30°	2227.19	5562.82	156	44
	20°	2227.51	5562.83	156	44
	10°	2227.51	5562.82	156	44

成型機製作的物件是否會因為網格增多而更接近原始模型，將在下面進行探討。由圖 2 的 CAD 檔，將角度固定在 30°，選用 0.04mm、0.03mm、0.02mm、0.01mm 的弦高，以粉末型號 zp100，縮水率 X、Y、Z 各為 0.99，再一次加工過程中製作 5 個銷，經由三次元量床量取直徑。

圖 4 中顯示弦高會影響 RP 物件的尺寸，但是相差的值不大，是因為弦高之間的差距僅有 0.01mm，且實驗的直徑僅有 10mm。

(三) 切層厚度

切層厚度對於快速成型系統來說是一個重要的參數，在 RP 的外型上有很大的關聯，而在 3DP Z402 中切層厚度是一個可控制的參數，可以直接在 ZPrint 中選擇切層厚度成型製造。本次實驗當中將利用不同的切層厚度來成型，成型高度為 20mm，成型後探討成型尺寸變化，經過實驗與量測得到圖 5 的實驗圖表，從實驗成型件與資料中得知切層厚度對於成型時間與成型品質有相當大的關係。切層厚度越小，尺寸誤差愈小，表面品質愈佳，但成型時間相對增加；切層厚度愈大，尺寸誤差愈大，表面品質愈差，則成型時間相對減少。

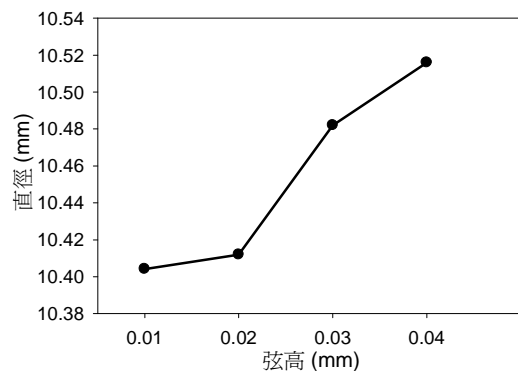


圖 4. 弦高直徑圖

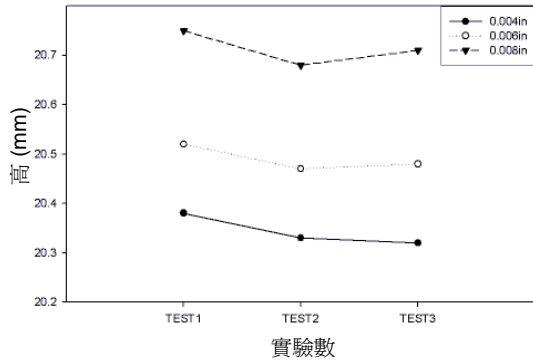


圖 5. 切層厚度關係

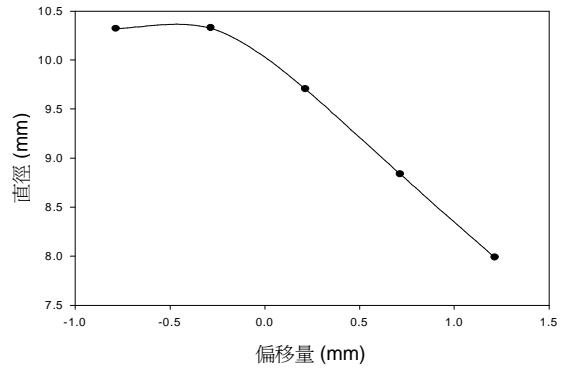


圖 7. 偏移關係

(四) Bleed Compensation 參數設定

Bleed compensation 為改變 RP 機器上 X、Y 軸的偏移量，其值依 3DP 機型和粉末的不同而有變化，預設值製作的裝配物件會有鬆動，故必須找出 bleed compensation 與尺寸的關係。

實驗檔案轉換 STL 的弦高固定在 0.02mm，原廠預設為 0.2159mm，往上下各調整 2 個間距，間距為 0.5mm，每階段各作五件不同的位置，擺放位置如圖 6，量測後的資料如表 2。

實驗資料中顯示，當偏移量增加時，銷的直徑就越小，偏移量越小，量得直徑尺寸越大，但由圖 7 中發現有兩個偏

移量 -0.2841mm、-0.7841mm 所量得的值非常接近，幾乎沒有變化，判斷已超出偏移量大小範圍。而 1.2159mm 的圓柱體已稍微變形，所以適當的偏移量為預設值上下限各 0.5mm。

RP 原理是以增加的方式加工，是以輪廓線增量的方式進行，故偏移量增加時，銷尺寸減少時，孔則是增加，偏移量減少時，銷尺寸增加，孔則是減少。

(五) 成型方向

同一個 CAD model 在快速成型機中可以多種不同的成型方向來成型，依照模型的外型我們給予適當的成型方向，成型方向的不同會影響成型件的表面品質，此實驗我們將研究成型方向對於尺寸的影響。我們依照圖 8 的配置來成型三個相同的立方體，成型後的量測尺寸如表 3 所示，圖表資料顯示切層方向的誤差變化最不穩定，變動最大，所以我們必須加強控制切層的誤差，減低變動。而 Y 方向則會得到最小的誤差。另外 RP 件 3 的擺設方式會得到最接近目標值的尺寸。

(六) 切面面積與成型尺寸的關係

本次實驗利用 Solidwork 建立三個厚度相同，但切面面

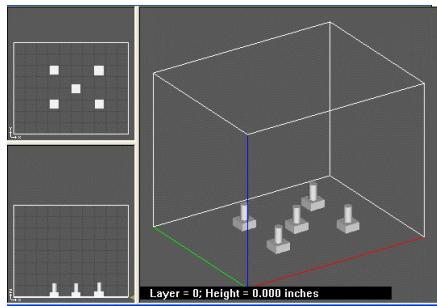


圖 6. 擺放位置

表 2. 直徑實驗數據 (單位: mm)

偏移量	1.2159	0.7159	0.2159	-0.2841	-0.7841
位置 1	8.000	8.780	9.693	10.316	10.321
位置 2	8.002	8.841	9.723	10.378	10.405
位置 3	7.981	8.841	9.659	10.259	10.226
位置 4	7.933	8.854	9.691	10.285	10.251
位置 5	8.009	8.871	9.747	10.387	10.384

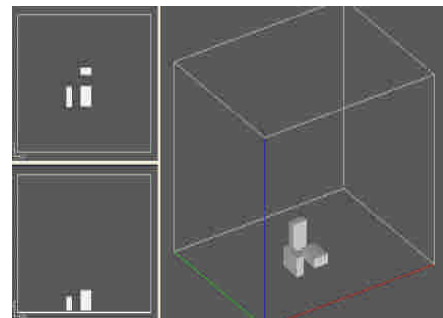


圖 8. 成型方向設定

表 3. 切層方向尺寸關係表（底線表示切層方向）

Test1	長 (30mm)	寬 (20mm)	高 (10mm)
RP 件 1	<u>30.62</u>	20.42	10.19
RP 件 2	30.16	<u>20.23</u>	10.38
RP 件 3	30.20	20.41	<u>10.06</u>
Test2	長 (30mm)	寬 (20mm)	高 (10mm)
RP 件 1	<u>31.09</u>	20.41	10.25
RP 件 2	30.02	<u>21.05</u>	10.44
RP 件 3	30.30	20.28	<u>10.67</u>
Test3	長 (30mm)	寬 (20mm)	高 (10mm)
RP 件 1	<u>31.31</u>	20.60	10.14
RP 件 2	30.00	<u>20.97</u>	10.47
RP 件 3	30.28	20.53	<u>10.31</u>
Test4	長 (30mm)	寬 (20mm)	高 (10mm)
RP 件 1	<u>30.81</u>	20.43	10.24
RP 件 2	30.05	<u>20.38</u>	10.46
RP 件 3	30.24	20.39	<u>10.28</u>
AVG	長 (30mm)	寬 (20mm)	高 (10mm)
RP 件 1	<u>30.78</u>	20.47	10.21
RP 件 2	30.06	<u>20.66</u>	10.44
RP 件 3	30.26	20.40	<u>10.33</u>

積不同的 CAD 模型，並且使用預設值轉換為 STL 檔後成型，完成後針對 RP 件的厚度進行量測分析，觀察切面面積與成品厚度之間的影響。擺設方式如圖 9 所示，量測數據如表 4，從實驗資料中可以發現成品的厚度全部落在 5.20mm 至 5.30mm 之間，長與寬的分佈也都落在一個範圍中，本實驗結果為切面面積在 200mm² 至 600mm² 之間對於切層厚度的影響可能是不顯著或是沒有影響。

(七) 縮水率實驗

本實驗欲研究 Zcrop 中縮水率 (anisotropic scaling) 對於成品的影響，實驗中用一長 30mm 寬 20mm 高 10mm 之長方體來成型測試 (圖 2b)。從縮水率實驗數據圖 (圖 10-12) 中得知，在縮水率設定為 0.9 時，目標尺寸每增加 1mm 則

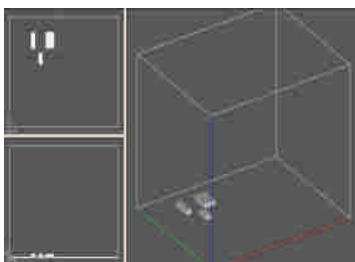


圖 9. 擺放位置

表 4. 實驗量測

RP1	長 (20mm)	寬 (10mm)	高 (5mm)
TEST 1	20.03 mm	10.31 mm	5.26 mm
TEST 2	20.09 mm	10.34 mm	5.20 mm
TEST 3	20.08 mm	10.34 mm	5.19 mm
RP 2	長 (30mm)	寬 (10mm)	高 (5mm)
TEST 1	30.02 mm	10.38 mm	5.28 mm
TEST 2	29.97 mm	10.36 mm	5.22 mm
TEST 3	30.04 mm	10.33 mm	5.25 mm
RP 3	長 (30mm)	寬 (20mm)	高 (5mm)
TEST 1	30.07 mm	20.17 mm	5.28mm
TEST 2	30.01 mm	20.21 mm	5.26 mm
TEST 3	30.04 mm	20.21 mm	5.27 mm

偏差約會增大 0.09mm，即欲成型尺寸愈大，偏差值愈大。當縮水率設定為 1.0 時則偏差值都約在 0.6，偏差值並不會因為尺寸愈大而造成大幅度變化。在縮水率設定為 1.1 時，目標尺寸每增加 1mm 則偏差約會增大 0.11mm，即欲成型尺寸愈大，偏差值愈大。在實驗中縮水率的設定不管是大於 1 或小於 1，在 10mm 到 30mm 的目標尺寸區間中與偏差值比幾乎為線性關係。

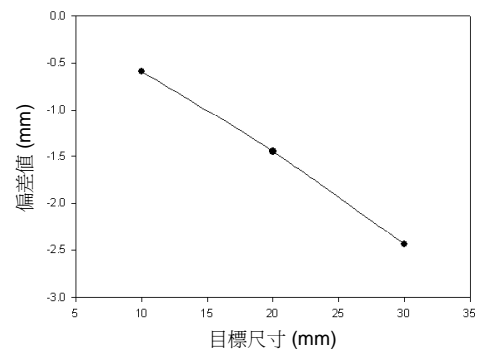


圖 10. 縮水率 0.9 時目標尺寸與偏差值的關係

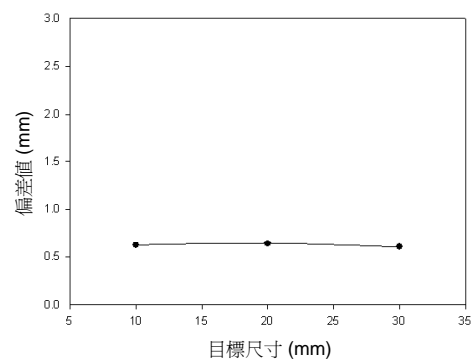


圖 11. 縮水率 1.0 時目標尺寸與偏差值之關係

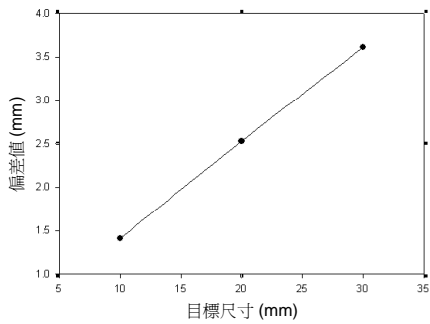


圖 12. 縮水率 1.1 時目標尺寸與偏差值之關係

(八) 膠水噴量比實驗

膠水噴量比在軟體的設定中 Shell 的設定範圍是從 0.5~2 之間,而 Core 值則須比 Shell 小。在實驗中我們對 Shell 跟 Core 進行測試,模型為圖 2b 之長方體,把 Shell 固定為 2 後只調整 Core,實驗後整理數據得到如圖 13 之圖表。從實驗數據中得到 Core 設定在 1.6 時之模型長寬高都為最大值,而 Core 設定為 1 值時最為穩定。接著我們將 Shell 調整至 1.8 後依然只調整 Core 來進行實驗,從實驗圖 14 中發現尺寸並不穩定,在 Core 值為 1.4 時是變化較小的地方。

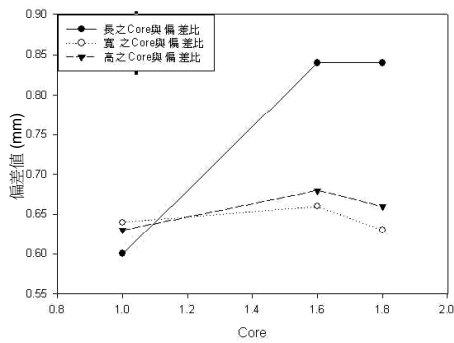


圖 13. Core 與偏差值之關係圖 (Shell:2)

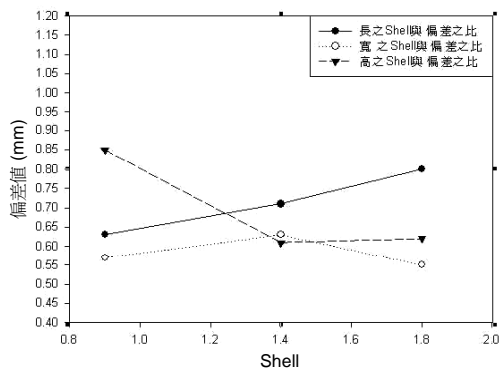


圖 14. Shell 與偏差值關係圖

(九) 列印補償實驗

在一般成型中我們並沒有設定此值,此設定值可以將原來尺寸進行補償的功能,進而改善我們對於尺寸的要求,達到裝配的機能。在本實驗中我們固定膠水噴量比與縮水率以及其他設定,只針對列印補償來調整,我們將數據整理成如圖 15 之圖表。從圖表中我們可以了解長寬高分別在補償值為 0.4、0.2、0.3 中偏差最小,我們假使分別在 XYZ 方向進行補償則可以改變長寬高的成型值,而適當補償可以得到最接近目標尺寸的值。

四、田口式實驗

田口法是以技術的改善而不是科學的研究為原則,以最低成本來改善產品或程式,其中參數設計的目的是在於找出一組控制因子,使品質特性損失為最小;而信號因子則是在品質特性的規格改變時,調整信號因子,使品質特性的平均值與目標值一致,且品質特性的變異維持在最小狀態。

(一) 品質特性

品質特性可分為三類:計量特性、計數特性、動態特性,本文的品質目標為銷、孔直徑的量度,故屬於計量特性;其中計量特性又分為望目、望大、望小,本文研究以孔、銷直徑為目標,所以屬於望目特性,以下為有關望目的信號雜訊比和靈敏度公式。

1. 信號雜訊比 (S/N):

主要目的是同時考量平均值 (\bar{y}) 與變異數 (σ^2),使品質改善的研究更又效率。

$$S/N=10\log (\bar{y}^2 / \sigma^2) \tag{1}$$

其中

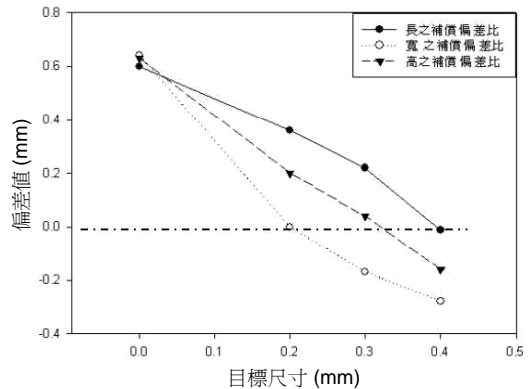


圖 15. 列印補償與偏差之關係圖

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad \sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2)$$

2. 靈敏度 S：

在望目分析時，由於有目標值存在，通常除了減少雜音因子的影響外，還必須利用可調因子，將平均值調整到目標值上，可藉由調整靈敏度將平均值移到目標區內。

$$S = 10 \log \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right] \quad (3)$$

(二) 田口實驗流程

本文目的找出最佳化參數，使孔、銷直徑符合裝配尺寸，下列是使用田口實驗計畫的分析流程：

1. 找出影響尺寸的控制因子和水準：以第 3 節中所探討的弦高、切層厚度和 X、Y bleed compensation 偏移量。
2. 選取適合的直交表：本實驗以 4 個因子各配置 3 個水準來分析，選用 L_93^4 直交表，做 9 次實驗。
3. 求取每次實驗的平均值，S/N 和靈敏度。
4. ANOVA 分析。
5. 繪製靈敏度 S、S/N 的回應表和回應圖。
6. 找出 η 中貢獻度最大值得到最佳化水準。
7. 驗證及分析。

(三) 分析流程

以製作符合孔、銷裝配尺寸為目的，在一件裝配物體上會有數個孔或銷，排放的位置或許會影響銷跟孔的準確度，但 RP 並無法在製作過程中予以更改加工參數，無法一個一個位置予以最佳化，故必需介定在圖 16 中白色矩形範圍內予以最佳化，使成型區中數個銷或孔的尺寸達到目標尺寸並將誤差降到最小。

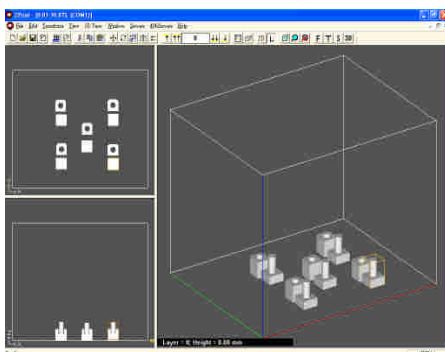


圖 16. 位置分佈

實驗模型如圖 17 所示銷直徑 10mm，底座 20×20×15mm，倒兩個 3mm 的角，孔直徑 10mm，底座 20×20×30mm。實驗配合的尺寸為孔 $10^{+0.07}_{+0}$ mm、軸 $10^{-0}_{-0.07}$ mm，取中間值為孔 10.035mm、軸 9.965mm 為目標值。

實驗中將五個銷、孔放置在如圖 16 中白色矩形中，分別坐落再四個角落和中央，選用直交表 L_93^4 ，做 9 次實驗，因子為弦高、切層和 X、Y 方向的 bleed compensation，各放置三個水準，參數如下：

A 因子（弦高）：0.04mm、0.02mm、0.01mm

B 因子（層厚）：0.088mm、0.1mm、0.125mm

C 因子（X）：0.2159mm、0.0159mm、-0.1841mm

D 因子（Y）：0.2159mm、0.0159mm、-0.1841mm

使用直交表 L_93^4 填入加工參數，分別進行 9 次實驗，品質特性為銷、孔的直徑，每次加工得到孔、銷各五件，使用三次元量床量取直徑，分別對孔、銷進行分析，使用望目公式，得到 S/N 比、靈敏度 S 和正規分析的回應表和回應圖。

(四) 銷參數最佳化

品質特性為銷直徑 9.965mm，實驗結果如表 5，表 6 顯示影響變異的因子由強到弱為 CBDA，表 7 顯示影響平均值的因子強弱為 CDBA，由表 6、7 因子水準數值繪製成圖 18、19，由表 6、圖 18 顯示最佳化組合（1）A2B3C2D2、（2）A2B3C2D1。下列計算中 \hat{u}_η 為預估最佳化水準的 S/N 比； \hat{u}_s 為預估最佳化水準的靈敏度 S； \bar{y} 為預估最佳化水準的平均值。

1. 預估 A2B3C2D2

$$\hat{u}_s = C_2 + D_2 - S_{\text{平均}} = 20.1080, \quad \bar{y} = 10^{20} = 10^{\frac{20.1080}{20}} = 10.125$$

$$\hat{u}_\eta = A_2 + B_3 + C_2 + D_2 - 3 \times \eta_{\text{平均}} = 54.0642$$

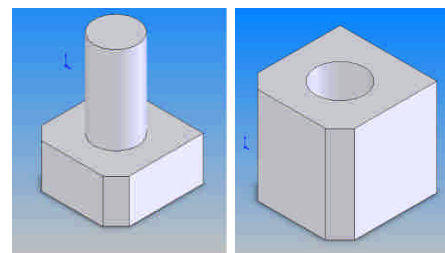


圖 17. 孔、銷模型

表 5. 銷實驗數據

	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5	平均值 (mm)	η (db)	S(db)
實驗 1	9.758	9.823	9.773	9.704	9.789	9.769	46.965	19.797
實驗 2	10.078	10.144	10.156	10.111	10.107	10.119	50.232	20.102
實驗 3	10.277	10.323	10.307	10.251	10.244	10.280	49.518	20.240
實驗 4	10.289	10.300	10.266	10.264	10.229	10.269	51.490	20.231
實驗 5	10.140	10.082	10.165	10.177	10.168	10.146	48.411	20.126
實驗 6	9.918	9.927	9.955	9.970	9.905	9.935	51.373	19.943
實驗 7	10.261	10.290	10.347	10.284	10.318	10.300	49.832	20.256
實驗 8	10.037	10.039	10.137	10.133	10.113	10.091	46.108	20.079
實驗 9	9.881	9.936	9.913	9.874	9.932	9.907	50.798	19.919
平均						10.091	49.414	20.077

表 6. 銷 S/N 回應表及 ANOVA 分析

	Level1	Level2	Level3	自由度	平方和	均方和	貢獻度%
A	48.905	50.424	48.913	2	4.593	2.296	15.922
B	49.429	48.250	50.563	2	8.024	4.012	27.817
C	48.149	50.840	49.254	2	10.979	5.489	38.059
D	48.725	50.479	49.039	2	5.250	2.625	18.200
總和				8	29.181		

表 7. 銷靈敏度回應表 ANOVA 分析

	1	2	3	自由度	平方和	均方和	F 值	貢獻度%
A	20.046	20.100	20.085	(2)	0.0045	0.0022	0.687	2.17
B	20.095	20.102	20.034	(2)	0.0084	0.0040	1.312	4.06
C	19.940	20.084	20.207	2	0.1076	0.0538	16.812	52.08
D	19.947	20.101	20.183	2	0.0859	0.0429	13.406	41.57
總和				8	0.2066			
誤差和				4	0.0129	0.0032		

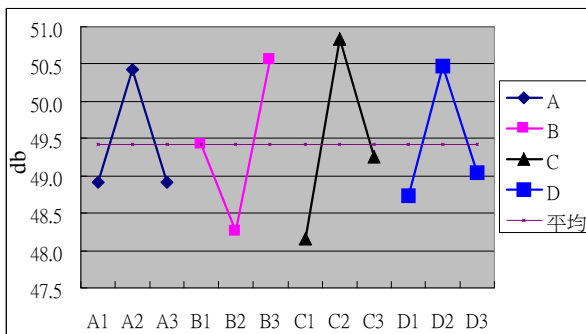


圖 18. 銷 S/N 回應圖

2. 預估 A2B3C2D1

$$\hat{\mu}_S = C_2 + D_1 - S_{\text{平均}} = 19.9545, \quad \bar{y} = 10^{20} = 10^{20} = 9.947$$

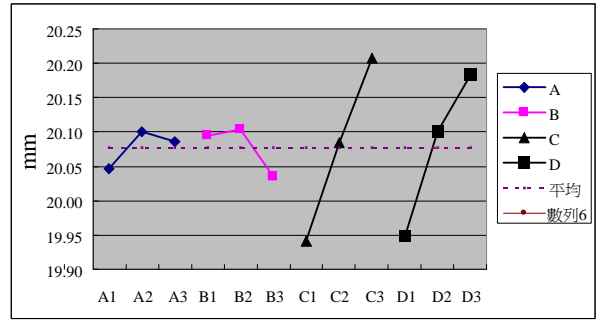


圖 19. 銷靈敏度回應圖

$$\hat{\mu}_\eta = A_2 + B_3 + C_2 + D_1 - 3 \times \eta_{\text{平均}} = 52.3099$$

由銷計算中 (1) (2) 可知, (1) 的預估的 $\hat{\mu}_\eta$ 比 (2) 高, 但是預估的平均值 \bar{y} 卻比 (2) 小, 由 D2 移動到 D1 雖然損失 1.7543db, 但預估的平均值卻接近目標值, 所以以 A2B3C2D1 為最佳化參數。

經過以 A2B3C2D1 參數做驗證後接近預估的值, 平均值由 9.769mm 變動到 9.953mm, S/N 提高且符合銷的裝配公差。

(五) 孔參數最佳化

品質特性為孔直徑 10.035mm, 經過 9 次實驗後, 量得孔直徑如表 8, 計算得的方法和過程與銷相同。

表 9 及圖 20 中影響變異的因子由強到弱為 ADBC, 表 10 及圖 21 中影響平均值的因子強弱為 DCBA, 由表 9 孔 S/N 回應表找出水準最大值为 A3B1C2D2, 因 A1 與 A3 值相近, 且 A1 的網格較少, 所以選擇 A1 水準; B1 與 B3 也十分接近, B3 切層較厚, 製作時間短, 故由 B1 調整到 B3; D2

表 8. 孔實驗數據

	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5	平均值 (mm)	η (db)	S(db)
實驗 1	9.932	9.950	9.850	9.888	9.916	9.932	48.040	19.919
實驗 2	9.538	9.471	9.461	9.538	9.560	9.538	46.597	19.567
實驗 3	9.412	9.436	9.502	9.347	9.411	9.412	44.554	19.482
實驗 4	9.380	9.429	9.408	9.249	9.394	9.380	42.399	19.437
實驗 5	9.537	9.515	9.514	9.574	9.382	9.537	42.338	19.558
實驗 6	9.736	9.655	9.691	9.712	9.603	9.736	45.390	19.717
實驗 7	9.442	9.516	9.497	9.448	9.442	9.442	48.652	19.526
實驗 8	9.562	9.539	9.553	9.479	9.408	9.562	43.344	19.562
實驗 9	9.901	9.807	9.841	9.819	9.850	9.901	48.651	19.863
平均							45.552	19.626

表 9. 孔 S/N 分析表 ANOVA 分析

	Level1	Level2	Level 3	自由度	平方和	均方和	F 值	貢獻度%
A	46.397	43.375	46.882	2	21.666	10.833	29.088	41.13
B	46.363	44.093	46.198	2	9.616	4.808	12.910	18.25
C	45.591	45.882	45.181	(2)	(0.744)	0.372	1.000	1.41
D	46.343	46.879	43.432	2	20.642	10.321	27.714	39.19
總和				8	52.669			
誤差和				2	0.744	0.372		

註：() 為誤差

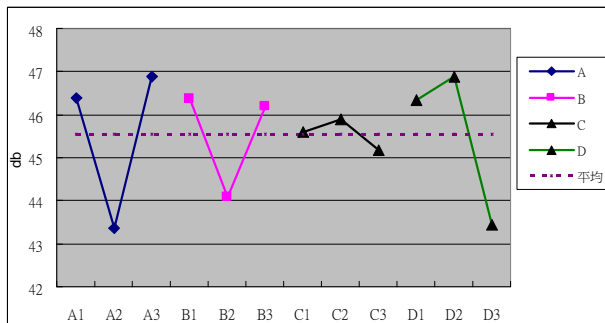


圖 20. 孔 S/N 回應圖

表 10. 孔靈敏度分析表 ANOVA 分析

	Level 1	Level 2	Level 3	自由度	平方和	均方和	F 值	貢獻度%
A	19.656	19.570	19.650	(2)	(0.0136)	0.006	1.000	5.97
B	19.627	19.562	19.687	2	0.0234	0.011	1.715	10.25
C	19.732	19.622	19.522	2	0.0663	0.033	4.851	28.99
D	19.780	19.603	19.493	2	0.1253	0.062	9.161	54.76
總和				8	0.2289			
誤差和				2	0.0130	0.006		

註：() 為誤差

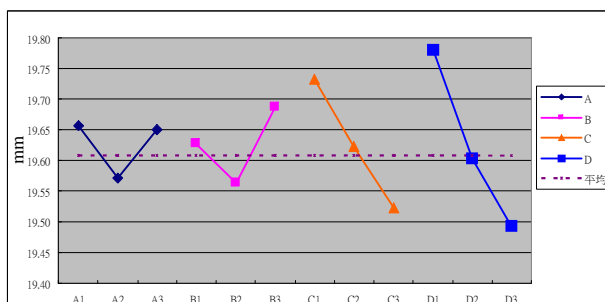


圖 21. 孔靈敏度分析圖

與 D1 差距也很小，由靈敏度中可看出，D2 調整到 D1 更接近目標值，所以最佳化水準為 A1B3C2D1，計算最佳化水準預估值。

(1) 預估 A1B3C2D1

$$\hat{u}_s = B3 + C2 + D1 - 2 \times S_{\text{平均}} = 19.8384$$

$$\bar{y} = 10^{20} = 10^{\frac{\hat{u}_s}{20}} = 10^{\frac{19.8384}{20}} = 9.815$$

平均值與目標值相差 0.22mm，可調整靈敏度貢獻最大但 S/N 貢獻最小的因子將平均值調整到目標值，為 C2 調整到 C1。

(2) 預估 A1B3C1D1

$$\hat{u}_s = B3 + C1 + D1 - 2 \times S_{\text{平均}} = 19.9489$$

$$\bar{y} = 10^{20} = 10^{\frac{\hat{u}_s}{20}} = 10^{\frac{19.9489}{20}} = 9.941$$

與目標值 10.035mm 相差 0.094mm。差距還是太大，但可由線性方式求出 D0 的水準。理想值的 $\hat{s} = 20.03034$ ，由 C1=0.2159、 $\hat{u}_s = 19.9489$ ；C2=0.0159、 $\hat{u}_s = 19.83842$ ，求出 C0 為 0.3633。最佳化水準為 A1B3C0D1，預估 $\hat{u}_\eta = 47.8356\text{db}$ 。

經過以 A1B3C0D1 參數驗證後，結果與預估值十分接近，而所要的值在 10~10.07mm 範圍內都算符合，而且 S/N 比預設的還要高，變異數減少。

由孔驗算過程 (2) 和表 8 發現，當 B1 到 B3，由切層厚度 0.088mm 換到 0.125mm 時，切層厚度變高，減少切層的層數時，孔尺寸會變大。

五、結論與建議

本研究中利用田口法於孔銷配合最佳化，最後達到控制尺寸縮小誤差並也加強了裝配性能。以本實驗的孔銷配合來說，銷於弦高 0.02mm，層厚 0.125mm，X 方向列印補償 0.0159mm，Y 方向列印補償 0.2159mm 之設定成型可以得到符合實驗目標之成型件，而孔於弦高 0.04mm，層厚 0.125mm，X 方向列印補償 0.3633mm，Y 方向列印補償 0.2159mm 之設定成型可以得到符合實驗目標之成型件。而由參數實驗與田口實驗可以得到以下結論：

1. STL 檔是由許多三角網格所建構的，實驗證明較多的網格對 RP 物件上的外型及尺寸精度會有所提升，但是並不是隨意增長，而是在一定的範圍中增加。

2. Bleed compensation 的調整對於尺寸的影響頗大，實驗中可看到過度的偏移會造成 RP 成品的變形，偏移量以不超過預設值上下限 0.5mm 為主，但如果另外調整其他因子則不在此討論之內。
3. 最佳化的參數可以讓 RP 建構範圍的物件得到在公差範圍內的尺寸，但是此參數並對於物件外型並不是最好的，弦高和切層厚度因素對整個 RP 物件尺寸變動不大，但對於製程時間和外型卻影響頗大，因適量的調整變動。

參考文獻

1. Barequet, G. and Y. Kaplan (1997) A data front-end for layered manufacturing. *Symposium on Computational Geometry*, 30(4), 231-243.
2. Chen, Y. H., C. T. Ng and Y. Z. Wang (1999) Data eeduction in integrated reverse engineering and rapid prototyping. *Computer Integrated Manufacturing*, 12(2), 97-103.
3. Choi, S. H. and S. Samavedam (2002) Modeling and optimisation of rapid prototyping. *Computer in Industry*, 47, 39-53.
4. Dickens, P. M. (1994) Rapid prototyping-the ultimate in automation. *Assembly Automation*, 14(2), 10-13.
5. Lin, F., W. Sun and Y. Yan (2001) Optimization with minimum process error for layered manufacturing fabrication. *Rapid Prototyping Journal*, 7(2), 73-81.
6. Shapiro, D. and G. Barequet (1996) History consideration in reconstructing polyhedral surfaces from parallel slices. *Proceedings of the 7th Conference on Visualization'96*, San Francisco, CA.
7. Stroud, I. and P. C. Xirouchakis (2000) STL and extensions. *Advances in Engineering Software*, 31, 83-95.
8. Zhou, J. G., D. Herscovici and C. C. Chen (2000) Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 363-379.

收件：94.04.13 修正：94.06.09 接受：94.06.28