

明新科技大學 校內專題研究計畫成果報告

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

Optimal Parametric Design of CAD Model reconstruction and Rapid Prototyping in Reverse Engineering by Taguchi Method

計畫類別：任務型計畫 整合型計畫 個人計畫

計畫編號：MUST-97 機械-01

執行期間： 97 年 1 月 1 日 至 97 年 9 月 30 日

計畫主持人：廖信德 博士

共同主持人：

計畫參與人員：陳倉生

處理方式：公開於校網頁

執行單位：明新科技大學 機械工程系

中 華 民 國 九 十 七 年 九 月 三 十 日

摘要

此研究計劃主要是利用田口方法分析在應用逆向工程技術於 CAD 模型重建及製造時，找出最佳的參數設定。分別就實體模型之掃瞄、3D CAD 模型重建及快速製造給予設定適當的參數，再利用田口方法的實驗設計法則進行實驗規劃，透過直交表配置，配合變異數分析及回應表、回應圖等方法，找出最佳的設計參數，並利用貢獻度的比例，估計出整體品質之最佳化參數組合，同時找出主控參數。

利用田口實驗法，可以讓設計者很明確的瞭解在實體掃描、模型重建，如何設定參數，以便產生最小的形狀誤差而得到最佳精度的模型。

關鍵字：逆向工程、非接觸式掃瞄、三維檢測、田口方法

ABSTRACT

The main objective of this project is to applying Taguchi method to find out optimal setting of parameters for CAD model reconstruction and rapid prototyping during using the techniques of reverse engineering. Selecting design parameters for CAD model reconstruction and rapid prototyping, the experiments are arranged by optimal parameter design of Taguchi method. The orthogonal array, the analysis of variance and the response table are used to find out optimal levels of design parameters for CAD model reconstruction and rapid prototyping.

The application of Taguchi method can help designers to set optimal parameters for using non-contact scanning machine and constructing a CAD model in order to generate the minimal shape error and obtaining the more accurate geometry shape.

Keywords : Reverse Engineering, Non-contact Scanning, 3-D Inspection, Taguchi method

目 錄

摘要.....	I
Abstract.....	I
目 錄.....	II
圖目錄.....	III
表目錄.....	III
前言.....	1
研究目的.....	1
研究方法.....	2
實驗部份.....	11
結果與討論.....	22
參考文獻.....	23
附表.....	25

圖目錄

圖 1、研究流程.....	2
圖 2、快速原型的製程.....	3
圖 3、快速原型機 EDEN 330.....	3
圖 4、田口實驗計劃法流程圖.....	5
圖 5、直交表定義圖.....	6
圖 6、 $L_9(3^4)$ 直交表及點線圖.....	7
圖 7、95%信賴區間品質管制曲線圖.....	10
圖 8、魚骨圖.....	11
圖 9、控制 UV 光強度電阻圖.....	12
圖 10、成型軸向圖.....	13
圖 11、擺放位置圖.....	13
圖 12、氫氧化鈉溶液.....	14
圖 13、實驗模型圖.....	15
圖 14、成品量測位置圖.....	17
圖 15、S/N 比回應圖.....	19

表目錄

表 1、基本的變異數分析表.....	9
表 2、UV 光照強度表.....	12
表 3、因子水準表.....	16
表 4、實驗因子和水準與 $L_9(3^4)$ 配置說明表.....	16
表 5、實驗量測數據表.....	17
表 6、實驗數據 S/N 比分析表.....	18
表 7、S/N 比因子回應表.....	18
表 8、變異數分析表.....	19
表 9、實驗確認數據表.....	21
表 10、EDEN 330 精度最佳化製程參數表.....	22

前言

隨著科技的日益進步，市場環境發生了相當大的變化當前，製造業面臨了如下發展趨勢：市場競爭激烈且生產經營全球化、用戶需求多樣化、產品生命週期短，更新汰換速度快，因此，製造業要想在現今的趨勢下發展，就必須不斷研究或引進新的技術。過去傳統的零件製造方法是採用多種機械加工機床，以及刀具和模具，還要具有高水準的技術，不僅花費的成本高且製造週期往往長達幾星期，若是零件的造型複雜且多樣化則製造的時間甚至可能多達幾個月，因此快速成型(Rapid prototyping)的開發正是為了解決上述問題並且提升新產品上市速度與競爭力的一種技術。

自 1987 年第一台由 3D Systems 研製的快速成型機問世以後，快速成型便成為新產品開發時不可或缺的一種技術，快速成型主要是利用 CAD 軟體在電腦中建立模型，且使用層層堆疊的方式快速的製造出設計原型，完全擺脫切削加工的限制，較複雜的零件也能輕易製作，快速成型技術能夠節省下昂貴的模具製作費用並且大量的減少加工時間，設計者能夠在一天之內看到所設計的模式，修正模型錯誤改善產品品質，快速成型技術具有節省成本、提高產能的優勢能夠使製造業者大幅提升其競爭力。

研究目的

與一般傳統加工技術比較起來快速原型技術最主要的優勢是可以快速的將設計思想轉變為具有一定功能的原型或直接製造零件，對於產品設計進行快速評估，修改及功能試驗，大大縮短產品的研製週期，並且堆疊成型的方式可以不受零件幾何形狀的限制，能夠製造出造型複雜不易加工的零件，正因為具有可縮短時間及製造的限制，因此快速成型技術大量的被利用在航太、汽車、電子、通訊、醫療、建築、家電、玩具及工藝品製作等眾多領域。

快速原型機雖然可在短時間內製造出設計的原型，但由於使用堆疊成型的加工方式與所使用之材料的關係，往往在尺寸與外型上會呈現出精密度不佳與表面粗糙的問題，而本研究目的在於探討快速原型機在製造過程當中，輸入的各項參數對於產品在外型與尺寸精確度上的影響，選取適當的控制參數搭配直交表與田口法進行實驗的配置與分析，以求出最佳的參數組合與了解各項參數對於尺寸與外型精準度的影響。

研究方法

本文的研究方式，可以分成兩大部分：

- 一、研究快速成型機的製作原理與操作程序，從當中評估可能會造成模型不精準的原因，並且利用 CAD 軟體建構實驗模型並且進行製作。
- 二、使用田口實驗計劃法來安排實驗參數，並且以直交表配置實驗之順序，得到實驗數據後，進行變異數分析確定因子的貢獻度以找出最合適的因子組合。

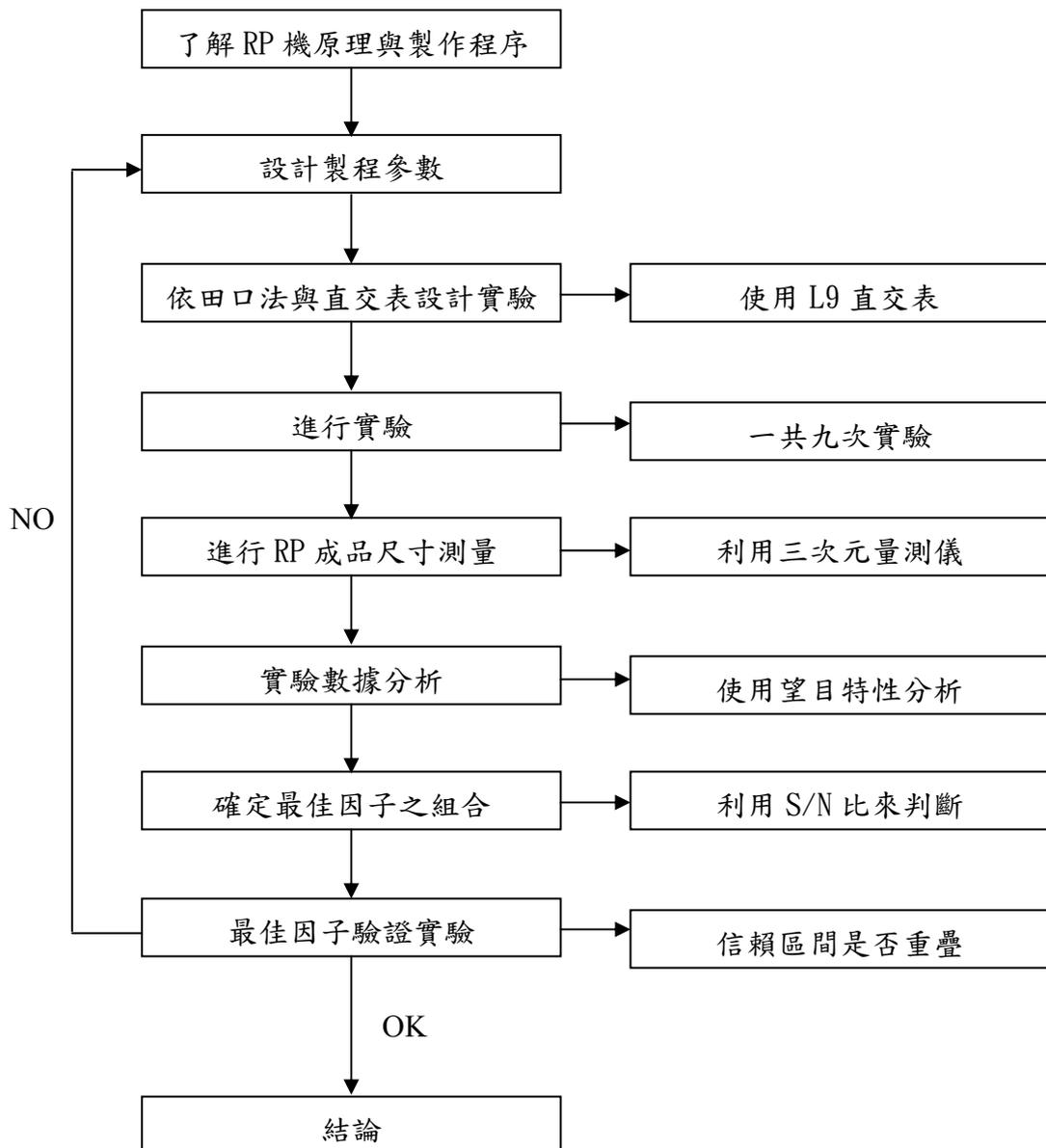


圖 1、研究流程

快速原型加工原理

快速原型機的加工原理是一種非傳統加工的方式，先由 CAD 軟體設計產生出 3D 實體模型，再經由電腦程式將實體模型轉換成為 STL 檔案然後傳輸到快速成型系統當中，軟體系統以使用者的需求將實體模型分割成一層一層，再依各種機器的結合類型的不同，將實體一層一層的堆疊出形狀



圖 2 、快速原型的製程

而本研究所使用的是液態製程(Liquid Process)快速原型機 EDEN 330其加工原理如同噴墨式印表機一般，利用噴頭噴出光敏聚合物於平台上加以UV光線照射，使被照射之光敏聚合物固化，當一層光敏聚合物凝固後，平台機構下降一微量的距離，噴頭在於硬化層上噴出第二層光敏聚合物，UV光再加以照射使其硬化，如此反覆一層層的照射固化利用堆疊形成的三維實體形狀。



建立容量：340mm x 330mm x 200mm
解析度：X:600dpi Y:300dpi Z:1600dpi
主要/支撐材料：光硬化聚合物
最小層厚：EDEN 330:16 microns
輸入格式：STL FILE
機器尺寸：1320mm x 990mm x 1200mm

圖 3 、快速原型機 EDEN 330

田口實驗計劃法

田口實驗計劃法是由田口玄一博士所開發出來的一種以最低成本，製造最高品質的產品為目標的最佳化方法。田口博士在此實驗方法中開發一套直交表設計與變異數分析法，在不失可靠度的情況下大幅的縮減實驗次數，使得開發成本與時間都可降低，如此更增加了產品上市的競爭能力。透過參數設計，並以直交表和信號-雜訊比(Signal Noise Ratio)代替平均值和變異數來分析數據，研析影響產品功能不同的因素後予以最佳化組合，使產品功能受雜訊(Noise)的影響降至最低。在田口實驗計畫法中，可以將受到多因子影響的物件，整理出影響最大的因子並找出最理想的設計參數值。實驗計畫法的特點是在不失準確度的水準下能縮減多數的實驗。田口玄一博士所提倡的品質工程(Quality Engineering)主要有下面兩個內容，第一是品質，特別是機能品質的評價方法。第二為品質的改善方法。不管是品質評價或品質改善，都是以技術觀點來討論而不用統計的理念。此外品質工程是以成本為第一優先來考慮的，因此在做品質評價或品質改善時，也是以成本的高低作為衡量基準。為強調平均反應和變異數的分析，因而導出了信號雜訊比(S/N比)，最簡單的雜訊比便是平均值(信號)與標準差(雜訊)的比值。S/N比為田口實驗設計衡量產品的統計量度，可檢視在不同因子水準及雜訊因子影響下對輸出品質之影響程度，亦即衡量品質穩定性之客觀指標，S/N比越高，表示在此因子水準下，品質輸出損失越少。

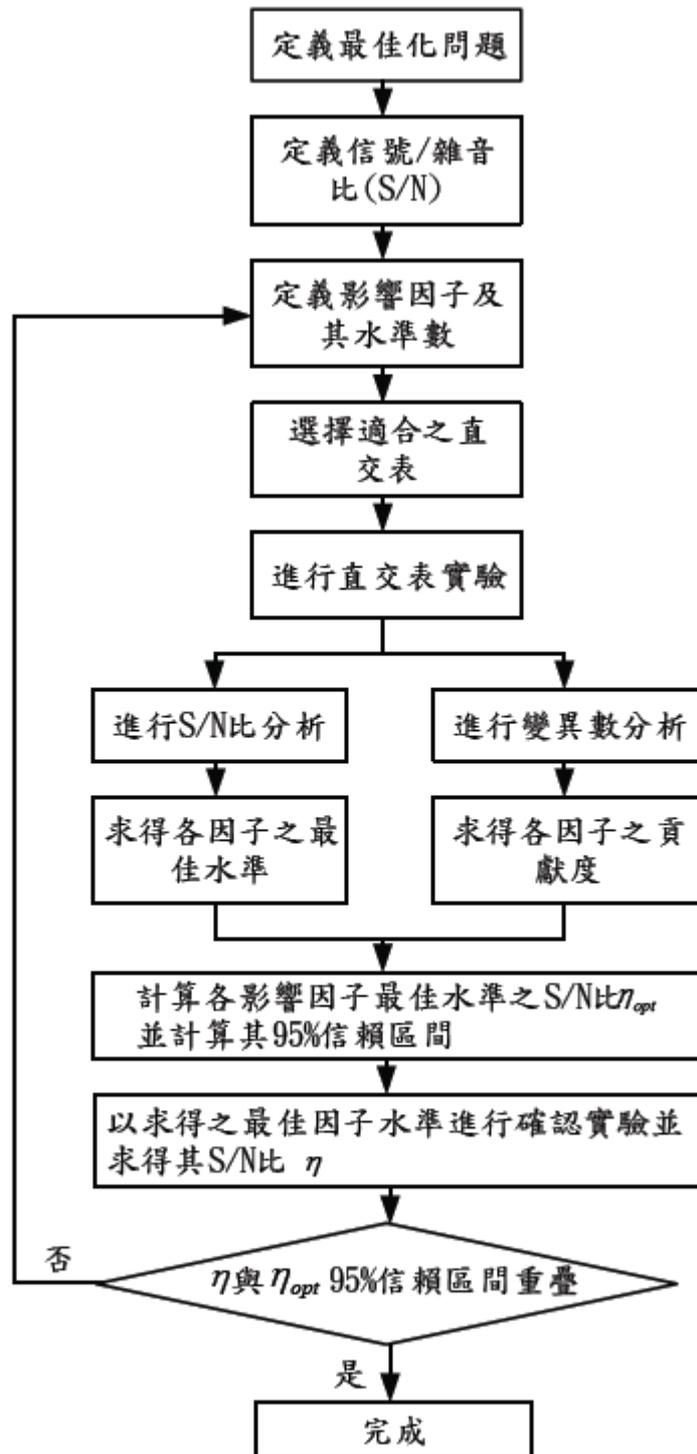


圖 4、田口實驗計劃法流程圖

因子的種類

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。參數設計是田口品質工程中最重要的一環，其目的是在訂定產品或是製程的最佳參數條件，使產品或製程對雜訊最不敏感，使在此水準運作下，受雜訊因子的影響減至最低。典型的參數設計將因子分成以下幾類。

1.控制因子：

設計者可以指定參數為控制因子，而設計的就是在於決定控制因子的最佳值，使品質特性的損失最小。

2.信號因子：

產品可經由調整信號因子使品質特性改變，例如：風扇的轉速設定，可改變風量大小。

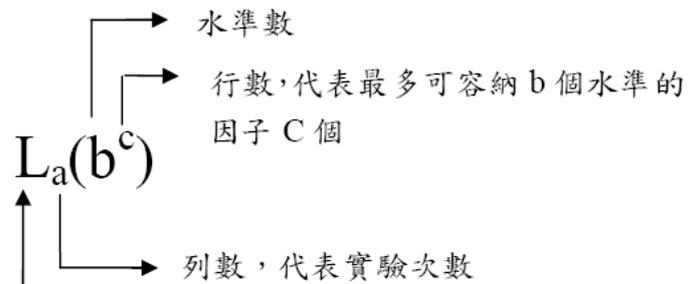
3.噪訊因子：

某些設計者無法控制的參數為噪訊因子，凡是參數的設定值不容易控制，或須花費高成本來控制的參數，皆可視為雜音因子。而噪訊因子的水準通常隨時在改變，係以雜音因子的平均值做為水準值，而無法確知某特定情況下的真值。一般而言，噪訊因子影響品質特性偏離目標值，而此目標值係由信號因子所定義。

直交表

直交表是田口式實驗法中參數主要的配置方法，經由直交表的直交特性所做的實驗有以下兩項點，第一由於存在直交性，在計算後因子的影響效果會互相抵銷，而可增加實驗的再現性。第二為經濟效益的增加，因為直交表的應用使得所需做的實驗數減少，因此大量的減少了時間和成本。以田口法為例， $L_9(3^4)$ 直交表將原先需要組實驗縮減成9組，且能獲得與全因素實驗近似的結果。

在田口實驗方法中，主要是利用直交表來決定整個實驗的組合，而在選擇合適的直交表之前必須先確定因子與水準，這樣才可以依循因子與水準的數量來使用直交表。直交表在使用上如需要考量交互作用，則必須另外參考直交表點線圖來配置交互作用之行。點代表實驗因子所配置之行，線代表交互作用可配置之行。



表示直交表(L 為 Latin Square 的第一個英文字)

圖 5、直交表定義圖

Exp.	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

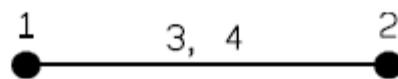


圖 6、 $L_9(3^4)$ 直交表及點線圖

信號雜訊比

在田口實驗中利用信號雜訊比(S/N Ratio)以及變異數分析(ANOVA)來進行整個實驗分析，利用這兩種方法找出對於實驗貢獻度較大的因子，並且以最佳化來縮小產品的變異。

信號雜訊比

田口博士所提出之信號雜訊比(S/N Ratio)主要目的在同時考量平均值與變異數。依品質特性的種類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。

信號雜訊比即為平均值與標準差的比值，此比值為田口實驗中衡量產品品質的統計量度，信號雜訊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：

一、望小特性，此品質特性最佳值為零，愈接近愈好。

$$\text{其望小特性之S/N比如下： } \eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

二、望大特性，此品質特性非負值且愈大愈好，其最佳值為無限大。

$$\text{其望大特性之S/N比如下： } \eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$$

三、望目特性：此品質特性有一目標值，其最佳值與目標值一致。

$$\text{其望目特性之比如下： } \eta = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i^{-2}}{\sigma^2} \right)$$

$$\text{其中平均數： } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

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

變異數分析

變異數分析：變異數分析（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、自由度、均方和、誤差變異、變異比F 以及貢獻度。

(1)平方和： 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：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：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%

表1、基本的變異數分析表

	LV1	LV2	LV3	DOF	SS	V	F	$\rho(\%)$
A								
B								
C								
D								
E								
合併誤差								
T								

註：SS表示平方和、V表示均方和、F表示變異比、 ρ 表示貢獻度

其實田口式品質工程的目的，是藉由開發、設計研究的效率化，使得新產品、改良品的設計比其他公司提早完成，因此，研究的關鍵在於不同的條件下，對市場上產品的機能作充分檢查時，可以利用直交表以及對變異原因的種種雜音來源，擴大其允差，以提升可靠度、降低成本，同時利用重要的安定性設計。

在田口法實驗之前，先針對參數與目標的關係進行分析，如果參數的影響不大或是控制不易，則可以將其定義為噪訊因子，之後便可以決定控制因子，然後安排適合的水準數與直交表。針對改善尺寸誤差到目標值、調整特徵誤差到最小值作為實驗目標。本研究之快速成型系統EDEN 330有著成型速度快的優勢但是因其疊加成型的方式卻會造成尺寸精度不佳的缺點，因此利用田口實驗計畫法來改善成型品質與尺寸達到最佳化的效果。

確認實驗

在本研究當中是使用95%信賴區間管制曲線圖來當成確認實驗中因子組合S/N比值得信賴值，其品質管制曲線圖如下圖所示。

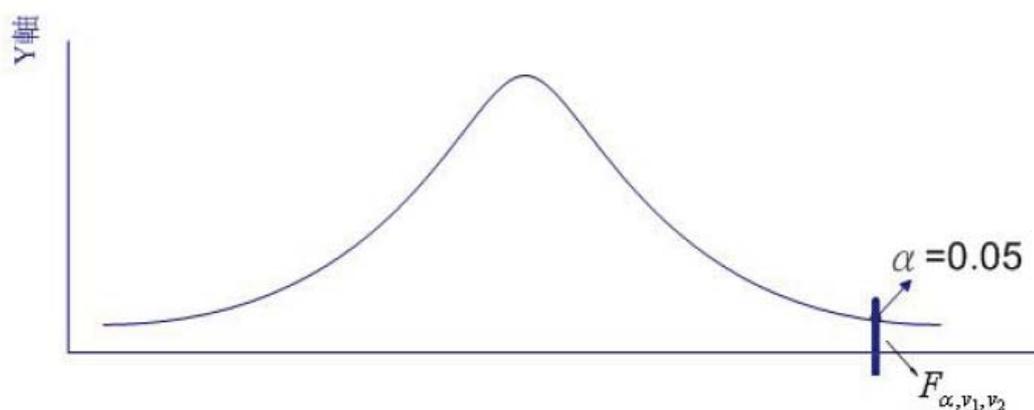


圖7、95%信賴區間品質管制曲線圖

其中信賴區間CI值計算公式如下所示

$$CI = \sqrt{f_{\alpha, v_1, v_2} \times V_E \times \frac{1}{n_{eff}}}$$

$$\alpha = 0.05$$

$$V_E = \text{誤差項變異數}$$

$$V_2 = \text{誤差自由度}$$

$$V_1 = \text{實驗次數 } n - \text{自由度總和}$$

$$n_{eff} = \text{實驗次數 } n / (1 + \text{顯著因子自由度平均值})$$

$$f_{\alpha, v_1, v_2} : \text{由附表查得}$$

實驗部份

進行實驗之前必須對整個製程有相當程度的了解，這樣才能選出適當的因子水準來進行實驗，而經過多次的實際操作以及對於液態類快速成型機的了解，可以從控制因子中挑選出幾個因子來進行田口實驗。以下將一一說明各因子與水準的選擇。

製程參數介紹

影響RP機台所製造之產品尺寸精度的各項因素主要分為製程參數、機台系統、材料、後處理方式、環境及人為因素這六大項，其影響品質細項分子如下圖所示。

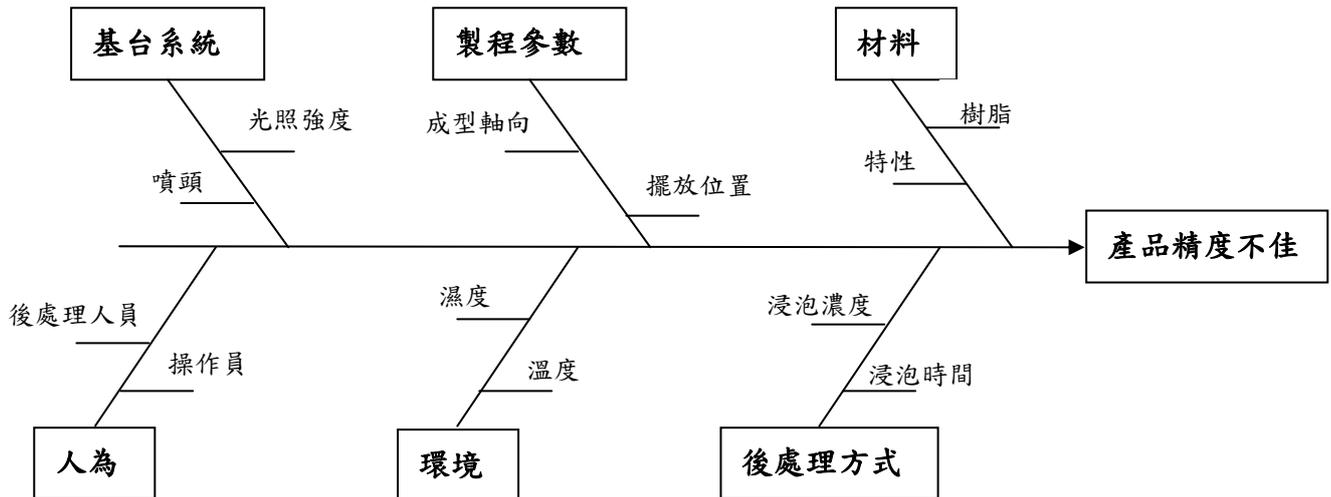


圖8、魚骨圖

為求製造程序及成品品質的最佳化製程，各項製程參數對原型的品質、材料的耗費量和加工時間的長短都會有相當程度的影響。不當的參數設計將會造成原型品質的低落、材料的浪費和成形加工的時間增長，嚴重的可能還會導致原型件無法成形，在多次的實際操作機台過程中與對液態類快速成型機的了解，我們可以從控制因子中挑選幾個因子來進行田口實驗，而分別以UV光照強度、成型軸向、擺放位置、浸泡時間當作我們的實驗因子。以下將對這四個因子一一進行說明並且決定因子的水準數。

(1) UV光照強度

利用UV光照射成型為液態類快速成型系統的主要技術，因此UV光曝曬能量的設定是重要的參數，如果能量釋放太高，不但成型時間增長且支撐架與本體之間不容易分離，分離時還可能會造成原型表面產生坑洞，如果能量釋放太低，液體固化能量不足，原型成品軟化且製程上容易產生脫層現象，甚至成型失敗。因此在考慮品質最佳化時，UV光照強度是控制是影響成型品質的重要因素之一，在EDEN 330系統當中是利用可更換式的電阻來控制UV光照的強度，下表為電阻相對應於UV燈管輸出功率強度，依下表所示8號、10號與14號三個總和差異約為 $0.4\text{W}/\text{cm}^2$ ，因此將UV光照強度之水準數設定為8號、10號與14號三種電阻。

表2、UV光照強度表

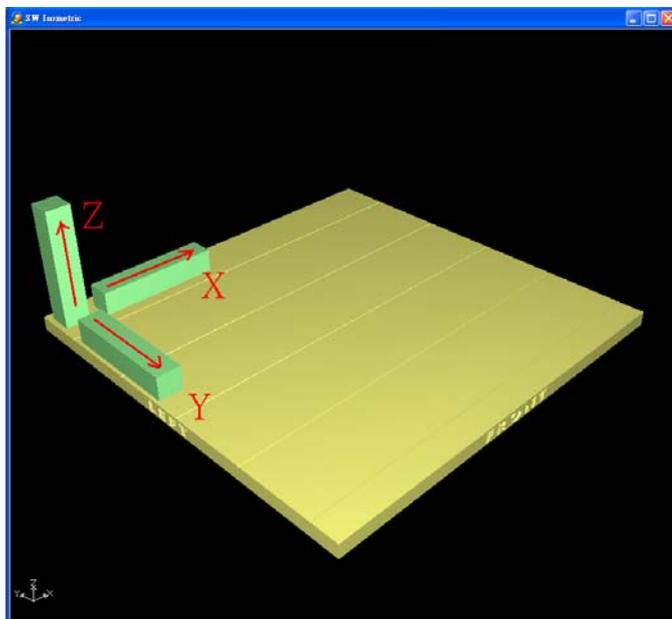
	左燈管(W/cm^2)	右燈管(W/cm^2)	總和(W/cm^2)
8 號電阻	0.742	0.608	1.35
10 號電阻	0.944	0.807	1.751
12 號電阻	1.092	0.868	1.960
14 號電阻	1.253	0.931	2.184
16 號電阻	1.401	0.993	2.394
18 號電阻	1.662	1.067	2.729



圖9、控制UV光強度電阻圖

(2)成型軸向

不同的成型方向依照不同的外形會有不同的成型效果，在EDEN 330系統中，X、Y、Z三軸方向的解析度皆不相同，並且噴頭只能再X與Y軸向上移動，而平台只能在Z軸移動，因此我們將成型軸向的水準數設定為X、Y、Z三軸。



(3)擺放位置

原型製作中所擺放的位置有時會影響原型品質，EDEN 330的工作平台範圍為X與Y方向各為330mm與320mm，因此我們將工作平台等分三個區域，並將擺放位置的水準數設定為左、中、右三區如下圖所示。

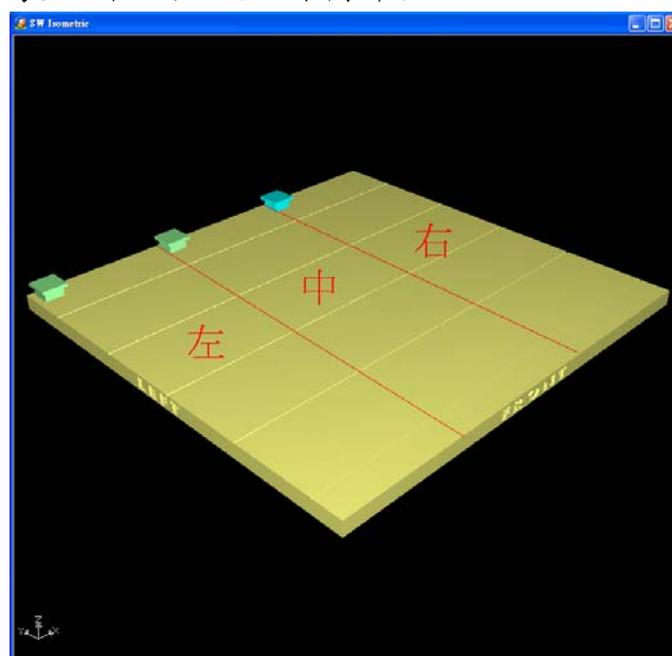


圖11、擺放位置圖

(4)浸泡時間

在RP機將物件製作完成後，我們對物件會進行後處理，後處理的主要目的是為了去除掉支撐材料，雖然將物件浸泡在水中可以使得支撐材料軟化，並且搭配Water Jet以加壓水柱沖洗可較容易去除掉支撐材料，但是模型是以堆疊的方式成型的，在層與層充滿著許多的隙縫，支撐材料在受到UV光照射但尚未凝固之時會滲透進這些細縫當中，使得物件的表面即使受過清洗還會有殘留的樹脂，因此我們使用氫氧化鈉溶液來浸泡模型，氫氧化鈉溶液的優缺點如下。

優點：

1. 可改善模型的表面，排除模型表面殘留的樹脂。
2. 些許程度上的可改善模型的透明度。
3. 讓支撐材料更容易分離，尤其是公差愈度小的工件或是活動零件。
4. 適用於大多數的模型，對於物理上的特性不會影響

缺點：

1. 浸泡時間最好不要超過兩小時，否則模型會有變形的風險。
2. 氫氧化鈉溶液是種鹼性溶液，接觸到眼睛和皮膚會造成傷害。
3. 當物件有薄牆特徵時浸泡溶液會造成變形。

氫氧化鈉的稀釋方法如下：

1. 先放20克的氫氧化鈉顆粒到一個1.5公升左右的容器當中。
2. 加水至1000克(980克的水+20克氫氧化鈉顆粒)。
3. 攪拌直到氫氧化鈉完全溶解於水中(約5分鐘)。
4. 讓溶液冷卻到室溫狀態(氫氧化鈉溶解過程會產生熱量)

由上述之優缺點可以知道雖然浸泡氫氧化鈉溶液可以有效的去除殘留的樹脂，但是也可能會使物件變形造成尺寸上的差異，因此我們設定浸泡時間的三個水準數為浸泡30分鐘、浸泡15分鐘、不浸泡溶液。



圖12、氫氧化鈉溶液

實驗模型

設定CAD 圖檔所標示的尺寸為理想機能的標準值，成型件尺寸精度為品質特性Y 值，當Y 值越接近CAD 圖檔的尺寸越好。本次實驗的品質特性依照理想機能的區分符合靜態的望目特性，實驗原型所量測的數據將以望目特性的方式計算推導。

實驗模型利用PRO-E軟體進行建構，其特徵尺寸如下圖所示單位為mm，然後將其轉換成為STL檔案，並且利用Objet Studio軟體進行切層動作，最後在傳輸資料到RP機台加工成型。

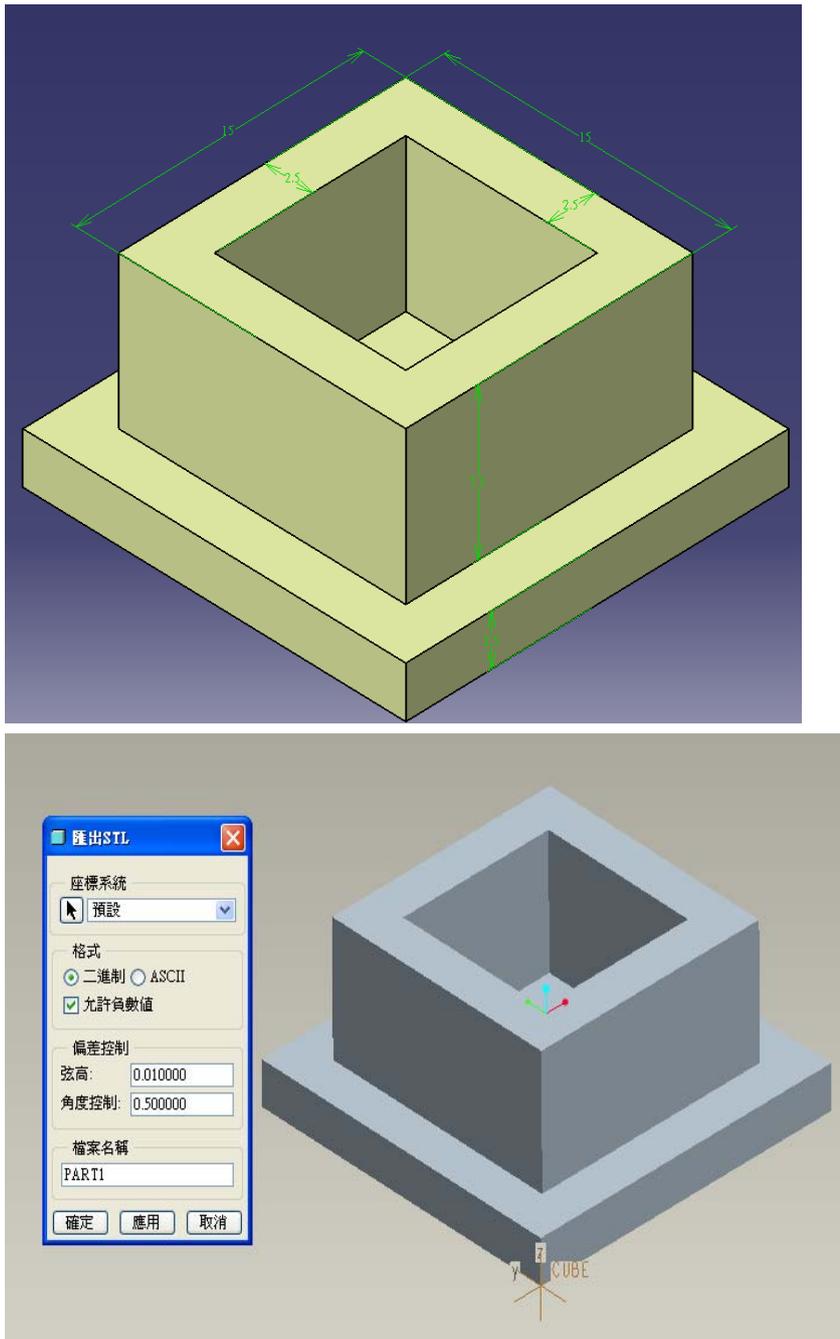


圖 13、實驗模型圖

實驗規劃

本次實驗一共選定了四個因子(Factor)，分別為UV光照強度、成型軸向、擺放位置、浸泡時間，而每一個因子均採用三個水準(Level)的配置，因子將使用 $L_9(3^4)$ 直交表進行因子與水準的配置。

表3、因子水準表

因子	說明	Level 1	Level 2	Level 3
A	UV光強度	1.35	1.751	2.184
B	成型軸向	X軸	Y軸	Z軸
C	擺放位置	置左	置中	置右
D	浸泡時間	30分鐘	15分鐘	不浸泡

實驗配方

Exp	UV光強度	成型軸向	擺放位置	浸泡時間
1	1.350	X軸	置左	30分鐘
2	1.350	Y軸	置中	15分鐘
3	1.350	Z軸	置右	不浸泡
4	1.751	X軸	置中	不浸泡
5	1.751	Y軸	置右	30分鐘
6	1.751	Z軸	置左	15分鐘
7	2.184	X軸	置右	15分鐘
8	2.184	Y軸	置左	不浸泡
9	2.184	Z軸	置中	30分鐘

表4、實驗因子和水準與 $L_9(3^4)$ 配置說明(直交代號)

Exp	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

實驗軟硬體設備如下：

1. 液態類快速原型機 EDEN 330(工作系統)
2. Water Jet 加壓機(清洗設備)
3. 三次元量測儀(量測儀器)
4. PRO-E 軟體(繪圖轉檔軟體)
5. Objet Studio 軟體(切層軟體)

尺寸量測

利用L₉的直交表的實驗組合，完成全部田口實驗的時候，就會得到9個RP成品，此時利用三次元量測儀來測量其尺寸值，目的為取得較為精確的數值，因此將距離為平均分配，每一個工件一共量測六次的尺寸值來進行平均方式如下圖所示，而全部的量測數據如下表所示。

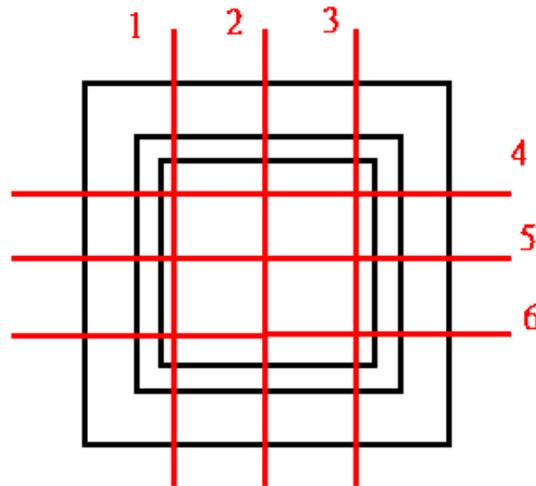


圖14、成品量測位置圖

表5、實驗量測數據表

Exp.	量測數據(單位mm)					
	1	2	3	4	5	6
1	15.126	15.129	15.125	15.083	15.086	15.082
2	15.113	15.116	15.114	15.027	15.03	15.026
3	15.131	15.134	15.131	15.101	15.098	15.098
4	15.132	15.134	15.132	15.019	15.017	15.021
5	15.133	15.131	15.133	15.021	15.019	15.023
6	15.112	15.114	15.115	15.173	15.173	15.169
7	15.141	15.144	15.143	15.028	15.031	15.032
8	15.152	15.152	15.154	15.048	15.053	15.05
9	15.176	15.173	15.174	15.109	15.11	15.111

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，計算出其變異數還有其S/N 比，如下表所示。

表6、實驗數據S/N比分析表

Exp.	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	15.126	15.129	15.125	15.083	15.086	15.082	15.10517	0.000558	56.11487
2	15.113	15.116	15.114	15.027	15.03	15.026	15.071	0.002256	50.02945
3	15.131	15.134	15.131	15.101	15.098	15.098	15.1155	0.000329	58.41517
4	15.132	15.134	15.132	15.019	15.017	15.021	15.07583	0.003878	47.67936
5	15.133	15.131	15.133	15.021	15.019	15.023	15.07667	0.003721	47.8599
6	15.112	15.114	15.115	15.173	15.173	15.169	15.14267	0.001012	53.5511
7	15.141	15.144	15.143	15.028	15.031	15.032	15.0865	0.003788	47.78733
8	15.152	15.152	15.154	15.048	15.053	15.05	15.1015	0.003145	48.60461
9	15.176	15.173	15.174	15.109	15.11	15.111	15.14217	0.001243	52.65917

以第一組數據為例，平均值的計算為：

$$(15.126+15.129+15.125+15.083+15.086+15.082)/6=15.10517$$

而變異數 σ^2 的計算為：

$$\sigma^2 = (15.126-15.10517)^2 + (15.129-15.10517)^2 + (15.125-15.10517)^2 + (15.083-15.10517)^2 + (15.086-15.10517)^2 + (15.082-15.10517)^2 / (6-1) = 0.000558$$

而有了平均值與變異數便可計算出S/N比，S/N比的計算為：

$$\eta = 10 \log \left(\frac{\bar{y}}{\sigma^2} \right) = 10 \log \left(\frac{15.10517^2}{0.000558} \right) = 56.11487$$

依照著上述公式的計算便可求出第一到九組實驗數據的S/N比，如表6當中所示。

再來便可以計算出各因子水準的S/N比的回應，可見下表7的S/N比因子回應表。

表7、S/N比因子回應表(單位：db)

	Level 1	Level 2	Level 3
A	54.85316	49.69679	49.6837
B	50.52719	48.83132	54.87515
C	52.75686	50.12266	51.35413
D	52.21131	50.45596	51.56638

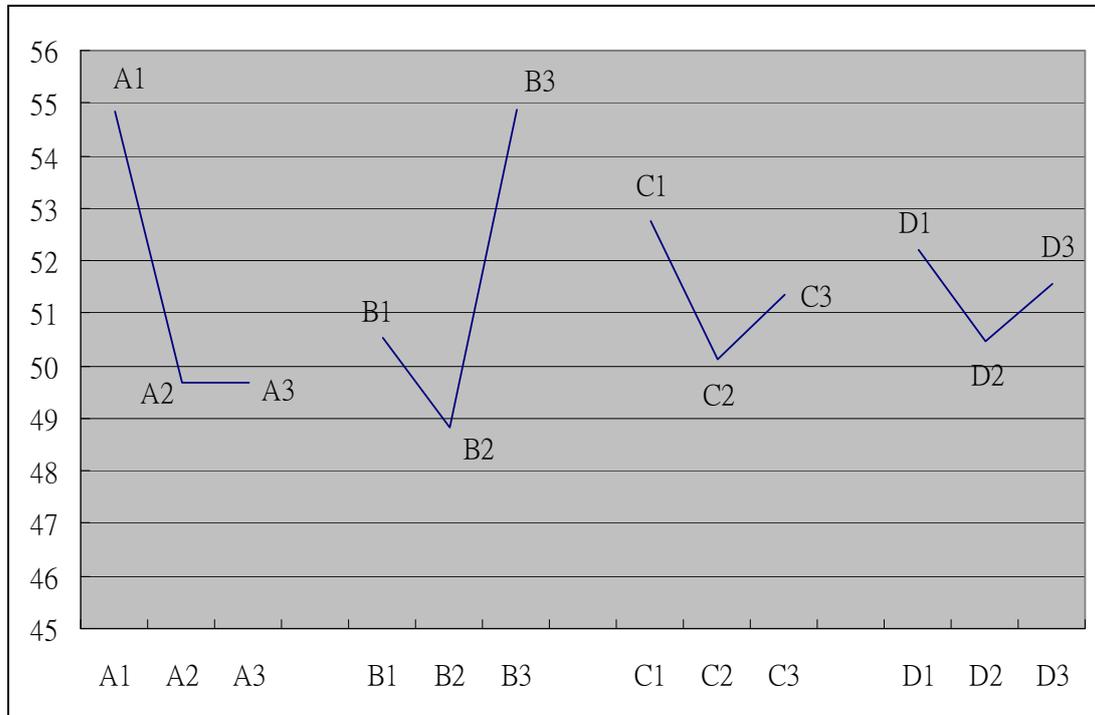
表中數據算法如下：

因子A的Level 1 S/N比因子回應數據：(Exp 1的 η 值+ Exp 2的 η 值+ Exp 3的 η 值)/3=
(56.11487+50.02945+58.41517)/3=54.85316

而因子B的Level 1 S/N比因子回應數據：(Exp 1的 η 值+ Exp 4的 η 值+ Exp 7的 η 值)/3=(56.11487+47.67936+47.78733)/3=50.52719

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，繪製成反應圖，便可以易於觀察各因子回應數據的高低。

圖15、S/N比回應圖



由實驗所得到的S/N比值可以進行變異數分析，其變異數分析結果如下表所示。

表8、變異數分析表

	SS	DOF	V	F	p(%)
A	53.31177	2	26.65588	7.03636	42.05269
B	58.30853	2	29.15427	7.69586	45.99418
C	10.42318	2	5.211591	1.37571	8.221878
(D)	4.730242	2	2.365121	0.62432	3.731248
合併誤差	4.730242	2	2.365121	1	
總和	126.773722	8			

註()為誤差

上表各項數據之計算說明如下：

各因子的平方和=第一水準實驗次數×(因子的第一水準 $\eta - \bar{\eta}$)²+第二水準實驗次

數 \times (因子的第二水準 $\eta - \bar{\eta}$)² + ... + 第n 水準實驗次數 \times (因子的第n 水準 $\eta - \bar{\eta}$)²
 + ... + 第n水準實驗次數 \times (因子的第n水準 $\eta - \bar{\eta}$)²

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

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

以表8為例求出

$$\bar{\eta} = (54.85316 + 49.69679 + 49.6837) / 3 = 51.41122$$

A 因子平方和=

$$3(54.85316 - 51.41122)^2 + 3(49.69679 - 51.41122)^2 + 3(49.6837 - 51.41122)^2 = 53.31177$$

B 因子平方和=

$$3(50.52719 - 51.41122)^2 + 3(48.83132 - 51.41122)^2 + 3(54.87515 - 51.41122)^2 = 58.30853$$

總平方和=

$$(56.11487 - 51.41122)^2 + (50.02945 - 51.41122)^2 + (58.41517 - 51.41122)^2 + (47.67936 - 51.41122)^2 + (47.8599 - 51.41122)^2 + (53.5511 - 51.41122)^2 + (47.78733 - 51.41122)^2 + (48.60461 - 51.41122)^2 + (52.65917 - 51.41122)^2 = 126.773722$$

總自由度為全體測值的個數減1=9-1=8

A 因子自由度=3-1=2

A 因子均方和為A平方和除以A因子自由度=53.31177/2=26.65588

變異數比F (因子A) =26.65588/3.788305=7.03636

變異數比F (因子B) =29.15427/3.788305=7.69586

貢獻度 (A 因子的數值) =53.31177/126.773722=0.4205269=42.05269%

貢獻度 (B 因子的數值) =58.30853/126.773722=0.4599418=45.99418%

透過上述S/N比回應圖與變異數分析所提供的資訊得知，S/N 比越大表示品質越佳，所以因子A、C、D 的水準組合應該設定在水準一，而因子B則設定在水準三，因此產生最佳水準製程參數組合為：**A1、B3、C1、D1**，其因子重要排序為：**B>A>C>D**。

由實驗所得到的變異數分析表中可以知道，誤差向的貢獻度為3.731248%，顯示實驗的結果是適當而且良好的，並由S/N比值的得回應表中我們可以得到最佳的水準配置，因此接下來可進行實驗確認並且計算出S/N比的信賴區間範圍，在本文中採用95%信賴區間計算，當中f值可以由附表查得。

以三個顯著因子的S/N比值來預測實驗確認估計值為：

$$\eta_{opt}=51.41122+(54.85316-51.41122)+(54.87515-51.41122)+(52.75686-51.41122) \\ = 59.662735$$

$$\text{信賴區間：CI}=\sqrt{f_{0.05,1,2} \times V_E \times \frac{1}{n_{eff}}}$$

$$\text{其中 } n_{eff}=\text{實驗次數}/1+\text{顯著因子自由度平均值}=\frac{9}{1+2}$$

$f_{0.05,1,2}$ 可由附表查得，其中 $v_2 = 2$ 為誤差自由度， V_E 為誤差變異數。

$$\text{CI}=\sqrt{18.51 \times 2.365121 \times \frac{3}{9}}=3.8201$$

所以95%的信賴區間範圍為：

$$(59.662735-3.8201) < \text{S/N比} < (59.662735+3.8201)$$

$$55.842635 < \text{S/N比} < 63.482835$$

使用最佳化因子水準組合A1、B3、C1、D1重複進行實驗三次，可得到三個RP零件，依照圖13所表示的量測方式進行測量，將得到的量測數據紀錄如下表所示：

表9、實驗確認數據表

Exp.	因子與水準配置	1	2	3	4	5	6	平均	S/N比
1	A1、B3、C1、D1	15.121	15.121	15.122	15.093	15.095	15.097	15.10817	60.36687
2		15.118	15.124	15.122	15.107	15.096	15.098	15.11083	61.83162
3		15.123	15.121	15.124	15.094	15.094	15.096	15.10867	59.84315

由上表可得知確認實驗1到3的S/N比為60.36687、61.83162、59.84315皆在我們所估算的信賴區間 $55.842635 < \text{S/N比} < 63.482835$ 的範圍內，因此可以證明我們實驗的正確性。

結果與討論

本研究主要是利用田口式實驗計劃法，針對液態類快速原型機EDEN 330系統進行產品精度的改善，搭配L₉直交表配置實驗，其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，在進行9次實驗之後以三次元量測儀量測所製作的零件獲得實驗數據，並且計算出S/N比，以變異數分析探討各因子的貢獻度，進而找出最佳的水準配置，最後加以實驗驗證所找出的因子水準組合是有效的，並且將誤差控制在0.1mm的範圍當中。

本研究具體成果：

1. 理解機台各參數的設定與對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10、EDEN 330 精度最佳化製程參數表

	參數設定
UV光照射強度	1.35W/cm ²
成型軸向	Z軸
擺放位置	置左
浸泡氫氧化鈉溶液之時間	30分鐘

在討論方面提出以下兩點：

1. 利用模型設計消除誤差

以最佳化參數組合所製造的三個RP件之目標尺寸為15mm，但是量測的結果顯示依舊是有誤差存在，在未來的研究方向上可以探討，是否能夠在模型設計之時能夠將誤差一併設在於模型當中，以本實驗為例，當我們設定目標值為15mm，但實際量測尺寸卻大約為15.1mm，所以反推回當我們在設計模型之時若是將尺寸設定為14.9mm輸出至RP機台製造成型，是否產品尺寸會有更接近目標值的可能。

2. 氫氧化鈉溶液的設計

在實驗當中雖然氫氧化鈉溶液貢獻度是最低的，但是在產品的後處理當中氫氧化鈉溶液是一個不可或缺的工具，它可以有效的去除表面細縫難以清除的支撐材料，浸泡過氫氧化鈉溶液的RP件在外觀透明度與實際觸感上與未浸泡的RP件可以明顯感受到差異，因此改變氫氧化鈉溶液的濃度與浸泡時間是否可以使產品外觀與表面觸感有更好的效果。

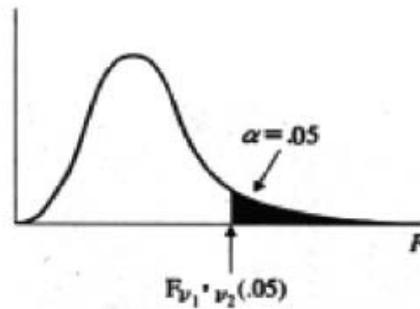
參考文獻

1. 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。
2. 陳耀茂，田口實驗計劃法：Introduction to design of experiment，1997，滄海書局。
3. 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。
4. 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。
5. 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。
6. 周敬誠，快速原型系統適應性體積誤差率切層法之研究，國立台灣科技大學高分子工程研究所碩士論文，2005 年。P14-17；P43-45。
7. 許智超，逆向工程與快速原型整合系統之研究，國立台灣大學機械工程研究所碩士論文，2000 年。P14-17；P43-45。
8. 林享億，三維快速成型之切層技術研究，國立成功大學航太工程研究所碩士論文，2002。
9. 葉至哲，田口方法於FDM快速原型機台成品精度改善之研究，東海大學工業設計學系碩士班碩士論文，2007。
10. 莫健華、劉傑、黃樹槐，“快速成形與快速制模技術的發展”，安徽省模具工業協會，2001。
11. 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，葉大學機械機械工程研究所碩士論文，2002。
12. 吳智偉，新型光罩式快速原型系統之研發，國立台灣科技大學高分子工程研究所碩士論文，2001。
13. 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。
14. 陳柏甫，快速原型應用在裝配件上的製作研究，大葉大學機械與自動化研究所碩士論文，2004。
15. 邱雲堯，快速原型之層狀成型法(LOM 研究)，國立台灣大學機械工程研究所碩士論文，2000。
16. 蔡承陳，快速原型系統支撐方法之研究，台灣科技大學纖維及高分子工程系研究所碩士論文，2003。
17. Fu, Z. M., Li, Y. P., Chang, Y., and Xu, Z. L., “Experimental Teaching of the Rapid Prototype Manufacturing Technology Based on ATOS Measuring System,” Research and Exploration in Laboratory Vol.25, No.12, 2006, pp. 1520-1522。

18. Kochan, D. and Chua, C.K., "State-of-the-art and future trends in advanced rapid prototyping and manufacturing," International Journal of Information Technology Vol. 1, No. 2, 1995, pp. 173-184 °
19. Leong, K.F., Chua, C.K., and Ng, Y.M., "A study of stereolithography file errors and repair Part 1-Generic solutions," International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, accepted for publication °
20. Leong, K.F., Chua, C.K., and Ng, Y.M., "A study of stereolithography file errors and repair Part 2-Special cases," International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, accepted for publication °

附表

表一 F 分配表



$\nu_2 \backslash \nu_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	15	20
1	161.5	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	246.0	248.0
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66
∞	3.84	3.00	2.61	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57

