四軸快速成型系統之研製

胡雅慧[1]* 林高輝[2] 吳元升[3]

[1,3]南亞技術學院機械工程學系，[2]清雲科技大學機械工程學系

摘要

由於快速成型技術係採用分層加工及逐層堆疊之原理建構模型，因此可快速且直接製程複雜之幾何模型，提供工件進行詳細評估與分析，而消失模具有生產成本低、重量輕及環保等特性，相當適合作為快速成型之加工材料，以降低昂貴的研發設計費，故快速成型技術已成為一廣泛應用之成型方式。然而在傳統的快速成型加工中，多以雷射光進行單層垂直面之輪廓加工動作，為了降低階梯誤差，則藉由減小切層厚度以提升加工精度，但卻因切層數的增加而延長加工時間，不易應用於大尺寸工件之製作。本研究以快速成型之分層堆疊原理及消失模鑄造之概念，配合輪廓佈點演算法、座標空間轉換及四軸切割機構，發展一套四軸快速成型系統，進行各層輪廓之斜面切割，以有效改善階梯效應所產生之誤差，並於設定成型誤差範圍內，可採用較厚之加工層以減少切層數，有效提高成型速度，達到提升加工精度與加工速度之目的。

利用本研究發展的四軸快速成型技術及機構進行220 mm x 120 mm x 50 mm範圍內之不規則外型實心瓶加工實驗得知，當層厚為10 mm時，斜面加工與階梯加工之工件誤差分別為0.87 %及2.89 %，加工時間分別為53分鐘及44分鐘，而控制階梯誤差在1 %以下，加工時間則需145分鐘。另由500 mm x 250 mm x 500 mm甜甜圈外型之加工件，進行大尺寸消失模製程流程之說明與成品誤差分析探討，結果顯示，整體理論體積誤差量E_T值約為0.35 %。

由實驗結果顯示，本研究所發展之大尺寸消失模之四軸快速成型系統，在相同誤差量之範圍設定下，所提出之斜面加工技術在速度上約為傳統階梯加工技術之2.8倍，且可實際應用於大尺寸消失模之快速成型製程上，可有效達成提升傳統快速成型之加工精度與加工速度等效能。

關鍵字：消失模，快速成型，四軸切割機構，斜面加工，階梯加工

*Email：yahuihu@nanya.edu.tw Tel：03-4361070#6703 Fax：03-4384670

A Study of Four-axis Rapid Prototyping System

Ya-Hui Hu[1], Kao-Hui Lin[2], Yuan-Sheng Wu[3]

[1,3] Department of Mechanical Engineering, Nanya Institute of Technology, Jhongli, Taiwan

[2] Department of Mechanical Engineering, Ching Yun University, Jhongli, Taiwan

Abstract

By applying the principles of layer-by-layer cutting and layer-by-layer stacking, RP can not only construct a complicated geometrical model rapidly and directly but also offer detailed evaluation and analysis of the result of each workpiece. Yet, in order to lower the cost in research and development, the lost foam, which uses much lighter material and can greatly reduce the cost of production and the damage onto the environment at the same time, is a better alternative for prototyping. All these attribute to the popularity of RP, which has already become a commonly-used prototyping method. However, in traditional RP, single layers are generally processed with laser on a vertical plane. In order to reduce stair errors, the thickness of each single layer has to be reduced to gain better precision, which inevitably prolongs its machining time and makes it difficult for large scale machining.

Based on the principle of layered stack and the concept of lost foam casting and coupled with the methods of Contour Distribution, Spatial Coordinate Transformation and Four-axis Cutting Mechanism, a Four-axis Rapid Prototyping system is developed to process bevel plane cutting and reduce the stair errors. When the error is controlled within a certain range, this system can perform thicker layer machining and reduce the number of layers, so as to achieve better precision and higher forming speed.

By using the Four-axis RP System of this study, the workpiece - a solid bottle of irregular shape whose size is within 220 mm x 120 mm x 50 mm—is processed to compare the bevel error and the stair error. The result shows that, when the slice is as thick as 10 mm, the bevel error and the stair error are respectively 0.87% and 2.89%,

with their machining spans 53 minutes and 44 minutes; yet, the Stairs processing is obtained under 1%, with its procession span as long as 145 minutes. Another workpiece shaped like a doughnut of 500 mm x 250 mm x 500 mm is also processed to illustrate the steps of the large-scale lost foam prototyping system and offer discussion about the error analysis. The result shows that the total volume error E_T of the prototyped workpiece is around 0.35 %.

Therefore, it is concluded in this study that, within the same range in error, the bevel machining speed is greatly improved, which is about 2.8 times as fast as that of the traditional machining. The large scale lost foam Four-axis Rapid Prototyping system indeed helps to raise the precision and speed of the traditional rapid prototyping.

Key Words: Lost Foam, Rapid prototyping(RP), Four-axis Cutting Mechanism, Bevel machining, Stair machining.

*Email：yahuihu@nanya.edu.tw Tel：03-4361070#6703 Fax：03-4384670

壹、前言

在過去幾年，有愈來愈多的三維立體模型應用在製造業、建築學、醫學及藝術等各類領域中[1]。相對於傳統的除料加工技術，快速成型技術（RP-Rapid Prototyping）為一較新穎的成型方式[2]。此技術原理係採用分層加工結合逐層堆疊兩種技術建立模型，且多在CAD/CAM或雷射平臺中進行加工與開發[3]，可直接從所繪製之三維CAD模型，製作複雜幾何外型之工件[2]，故RP技術不但可應用於快速且直接的製作複雜幾何模型，且藉由此方法所建立的模型，可供詳細的評估與分析，有效降低昂貴的研發設計費[4]。

一般而言，RP技術係藉由模擬或三維掃描方式建立物體之三維模型並進行切層，以得到各層截面的輪廓及佈點資料，並依據模型各層二維切層資料點完成工件製作。但即使是相同的模型，因採用不同的加工法、切層厚度及佈點密度，也會有不同的資料結果及模型輪廓，其將影響工件的品質與產量[4]。因此，在進行快速成型加工技術研發時，切層與輪廓佈點之最佳化演算亦為快速成型加工中的關鍵技術之一[3]。

目前市面上之快速成型系統，由於加工原理及疊層製造等因素，其外型輪廓均為階梯狀，具有一定之階梯誤差，為降低其加工精度，一般係藉由改變材料層厚以降低階梯誤差，就液態類[6]RP技術：如立體微影技術（SLA）與紫外線雷射掃繪（SOUP）而言，其切層厚度範圍為0.025 mm ~ 0.5 mm；而固態類[7]RP技術：如分層實體製造（LOM）與熔融沉積成型（FDM），其切層厚度範圍則為0.172mm ~ 0.356mm；至於粉末類[8]RP技術：如選擇性雷射燒結（SLS）與三維印刷（3DP），其切層厚度約為0.005 mm ~ 0.015 mm。此類為了提高精度而減少切層厚度的方法，將造成加工時間的大量增加，因此，快速成型系統之加工尺寸均被限制在較小的工件上。

此外，RP快速成型在加工過程或加工後會留下大量的廢料，不但成本高亦容易造成環境污染。因此，消失模概念逐漸被發展並趨於成熟，目前採用之消失模多以發泡聚苯乙烯（保麗龍）為模型材料，由於其具有生產成本低、重量輕、設備成本低、工作環境佳等特性，較適用於大型且複雜之加工件製作[5]。

有鑑於此，本研究以快速成型之分層堆疊原理及消失模材料之概念，利用斜面加工原理，配合輪廓佈點、座標空間轉換演算法及四軸切割機構，發展一套四軸快速成型之消失模加工系統，用以進行階梯誤差與斜面誤差之分析探討。本研

究發展的四軸切割機構，因可進行斜面加工，可有效降低階梯效應所產生之誤差，故當成型誤差量在設定範圍內時，可採用較厚之加工層以提高成型速度，以達到提升加工精度與加工速度之目的。

貳、研究方法

本研究採用固態快速成型技術，以聚苯乙烯樹脂（即保麗龍）為加工材料，利用斜面加工原理，以有效提升快速成型之切層厚度、增加成型速度並大幅改善傳統加工法在較大斜面加工時之誤差。

本研究所採用之快速成型製程程序大致可分為下列五個步驟：產生CAD模型與STL檔、建立切層與佈點資料、斜面誤差分析、控制點座標轉換及原型加工建構等，以下分就各步驟重點概述如下：

一、產生CAD模型與STL檔

快速成型技術係採分層疊加、堆積成型之原理進行工件加工，其成型過程主要由底層逐層向上堆疊而成。因此在建立各工件之CAD模型後，須依據成型所需精度與加工速度，決定加工件的成型方向與切層厚度。在決定工件切層後，於各層模型重建計算時，需將CAD模型建立之格式轉換為STL格式，以作為建立各切層模型重建資料之依據。

二、建立切層與佈點資料

在確定加工件的成型方向與切層厚度後，即可藉由上述步驟所得之STL網格資料，進行模型空間座標計算，以取得各層模型之輪廓資料，作為輪廓佈點之依據。在本研究中，每切層之佈點原則如下：

(1) 輪廓佈點間距的決定主要和加工精度、機台裁切能力、制動精度、加工材料特性與厚度及工件大小與曲面複雜度有關，因本研究主要先就切層（Z 軸）方向之加工原理和技術進行研究，故佈點間距 d 初步定義為各切層厚度 D 之一半，因本研究所採用之切層厚度為 10mm，故選定之佈點初步間距 d 為 5mm。

(2) 因本研究主要藉由四軸控制進行各層切割，故每層上下平面之佈點個數需相同，假設各層上下平面佈點個數為 n，則其可由 $n = (l_1 + l_2) / 2 / d$ 求得，其

中，n 為四捨五入後之整數值，l_1 為各層下平面之輪廓周長值，l_2 為各層上平面之輪廓周長值。

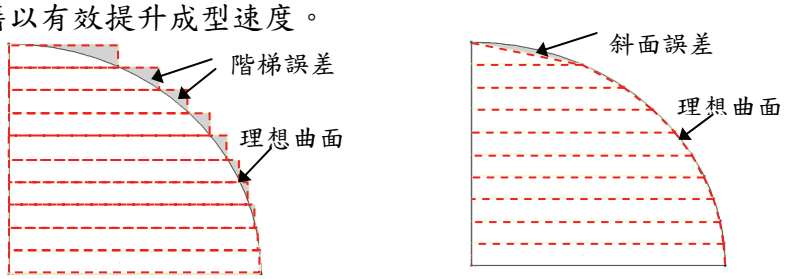
(3)依上下平面輪廓周長（l_1 與 l_2）值和前述步驟所決定之佈點個數 n 值，可求得上下平面實際佈點間距分別為 l_1/n 與 l_2/n，並定義下各平面輪廓線上最大 x 座標值之最小 y 座標值為第一點，以順時針方向依序佈點，故定義各層下平面（$z=0$）之第 m 個點座標表示為(x_{0_m}, y_{0_m})，其對應上平面（$z=D$）之第 m 個點座標為(x_{D_m}, y_{D_m})。

(4)故在進行切割時，係以(x_{0_1}, y_{0_1})點對應(x_{D_1}, y_{D_1})點、(x_{0_2}, y_{0_2})點對應(x_{D_2}, y_{D_2})點…、(x_{0_m}, y_{0_m})點對應(x_{D_m}, y_{D_m})點…及(x_{0_n}, y_{0_n})點對應(x_{D_n}, y_{D_n})點之方式依序加工。

(5)由於本研究在實際加工時，鎳鉻絲線會將保麗龍板熔化而產生加工間隙 g_a，為避免此間隙造成加工上的製程誤差，於實際切割線佈點時，配合最佳加工功率之定率，將所求得之加工間隙所需偏移量 $g_a/2$ 納入考量，以減少加工誤差。

三、 斜面誤差分析

傳統之快速成型加工方式，係以垂直方式進行輪廓切割（底下稱階梯加工），因此會產生階梯誤差，然而本研究所採用之四軸加工技術，可達到斜面切層效果，雖然仍會產生斜面誤差，但可大幅度提升加工精度，圖1為在相同切層厚度情況下，傳統成型與本研究成型於不同加工斜面需求之誤差比較示意圖，其中黑色實線為加工件之理想曲線，紅色虛線為加工面，其所造成之誤差如所示之灰色範圍。由圖中可明顯得知，在單層切層中之理想曲線愈平緩時（即所需切割長度愈長時），因傳統成型方式僅可在層厚方向進行加工（加工長度為定值），故本研究發展之斜面加工方式在相同層厚的加工需求時，較傳統之成型方式可有效提升加工精度。換言之，在相同加工精度需求時，本研究之斜面加工方式可採用較厚之加工材料，藉以有效提升成型速度。



(a)傳統成型之誤差　　(b)本研究成型之誤差

圖 1 傳統成型與本研究成型之誤差比較示意圖

為評估理想曲面與本研究所設計之四軸切割成形斜面間之誤差，本研究另定義誤差分析與其演算法，其說明示意圖如圖 2 所示，其中圖(a)為單一切層之三維空間說明示意圖，圖(b)為圖(a)切層中之 P_1 平面截面座標示意圖，其座標定義與誤差演算法說明如下：

(1) 分別由佈點之 (x_{0_1}, y_{0_1}) 與 (x_{D_1}, y_{D_1}) 兩點、(x_{0_2}, y_{0_2}) 與 (x_{D_2}, y_{D_2}) 兩點、⋯(x_{0_m}, y_{0_m}) 與 (x_{D_m}, y_{D_m}) 兩點、⋯(x_{0_n}, y_{0_n}) 與 (x_{D_n}, y_{D_n}) 兩點，可求得線段 L_1、L_2、L_3、⋯、L_m、⋯及 L_n 之直線方程式，如圖 2(a)所示。

(2) 由加工件之中心軸及線段 L_1、L_2、L_3、⋯、L_m、⋯及 L_n 可分別求得其所在平面 P_1、P_2、P_3、⋯、P_m、⋯及 P_n 平面，如圖 2(a)所示，其中 P_1 平面之截面圖如圖 2(b)所示。

(3) 將各層之下平面（$z = 0$）與上平面（$z = D$）間等分為 10 等份，每等份間距即為 $D/10$，作為誤差分析之取點間隔。

(4) 由垂直 Z 軸的 $z = D/10$ 之直線和加工件之理想曲面與 P_1 平面相交曲線，求得交點 (x_{1_1}, y_{1_1})，如圖 2(b) 所示。

(5) 重複步驟(4)，可求得 $z = 2D/10 \sim z = 9D/10$ 之直線分別和加工件理想曲面與 P_1 平面相交曲線之交點 (x_{2_1}, y_{2_1})、(x_{3_1}, y_{3_1})、⋯(x_{9_1}, y_{9_1})。

(6) 重複步驟(4)(5)，分別求得 $z = D/10 \sim z = 9D/10$ 之平面分別和加工件理想曲線與 P_2 平面 ~ P_n 平面相交曲線之交點 (x_{1_2}, y_{1_2}) ~ (x_{9_2}, y_{9_2})、⋯(x_{1_n}, y_{1_n}) ~ (x_{9_n}, y_{9_n})。

(7) 另外，由 $z = D/10$ 之直線與線段 L_1，可求得其交點為 (x'_{1_1}, y'_{1_1})，如圖 2(b) 所示。

(8) 重複步驟(7)，可求得 $z = 2D/10 \sim z = 9D/10$ 之直線分別與線段 L_1 之交點 (x'_{2_1}, y'_{2_1})、(x'_{3_1}, y'_{3_1})、⋯(x'_{9_1}, y'_{9_1})。

(9) 重複步驟(7)(8)，分別求得 $z = D/10 \sim z = 9D/10$ 之平面與線段 $L_2 \sim L_n$ 之交點 (x'_{1_2}, y'_{1_2}) ~ (x'_{9_2}, y'_{9_2})、⋯ (x'_{1_n}, y'_{1_n}) ~ (x'_{9_n}, y'_{9_n})。又可得 $(x'_{0_n}, y'_{0_n}) = (x_{0_n}, y_{0_n})$、$(x'_{10_n}, y'_{10_n}) = (x_{10_n}, y_{10_n}) = (x_{D_n}, y_{D_n})$。

(10) 因此可獲得 P_1 平面上之差值 D_P 為

$$\mathrm{D}_P = \frac{D}{20} \cdot \sum_{Z=1}^{Z=10} \sqrt{(x_{Z_1} - x'_{Z_1})^2 + (y_{Z_1} - y'_{Z_1})^2} + \sqrt{(x_{Z-1_1} - x'_{Z-1_1})^2 + (y_{Z-1_1} - y'_{Z-1_1})^2}$$

故可得其單層之體積誤差量 E_L 則定義為

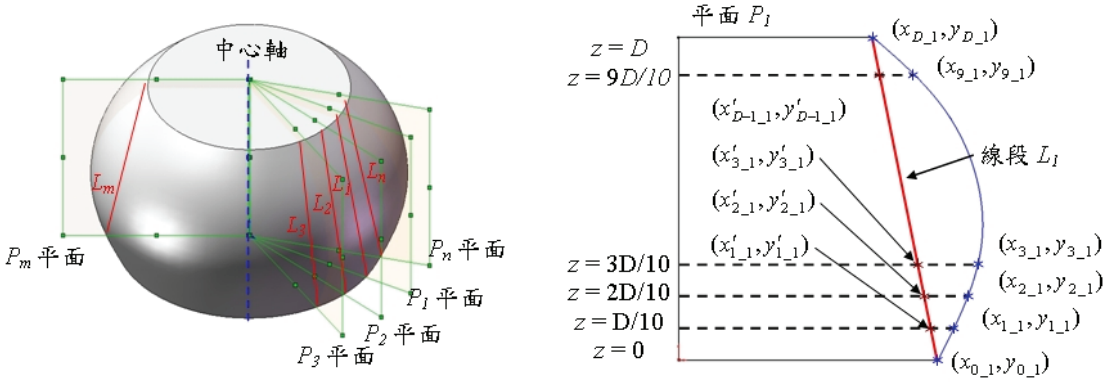
$$E_L = \frac{\text{單層差值}\mathrm{D_L}}{\text{單層理想曲線體積值}} \times 100\% \qquad \text{----------(1)}$$

(11) 其中，P_1 ~ P_n 平面上之累積差值，即該切層之差值 D_L 為

$$\mathrm{D}_L = \frac{l_1 + l_2}{2n} \cdot \frac{D}{20} \cdot \sum_{n=1}^{n} \sum_{Z=1}^{10} \sqrt{(x_{Z_n} - x'_{Z_n})^2 + (y_{Z_n} - y'_{Z_n})^2} + \sqrt{(x_{Z-1_n} - x'_{Z-1_n})^2 + (y_{Z-1_n} - y'_{Z-1_n})^2}$$

(12) 而工件整體差值 D_T 則為所有切層差值之和，即 $\mathrm{D}_T = \sum \mathrm{D}_L$ ，故工件之理論整體體積誤差量 $E_{\mathrm{T}} = \frac{\text{工件整體差值}\mathrm{D_T}}{\text{理想曲線體積值}} \times 100\%$ 。 ----------(2)

(13) 若理論誤差值大於需求精度，則可藉由成型方向與切層厚度的調整，以獲得符合精度之最佳製程設定。



(a)三維空間說明示意圖　(b) P1平面截面圖

圖 2 單一切層斜面誤差分析說明示意圖

四、 控制點座標轉換

由於本研究所研發之四軸機構控制點與加工板上的輪廓佈點不同，因此各分層上下兩平面之佈點座標必須偏移至兩組 XY 軸機構上連接鎳鉻絲線之端點，藉以求得四軸機構之控制點，其座標轉換公式如式(3)及式(4)所示，平面示意圖如圖 3 所示。

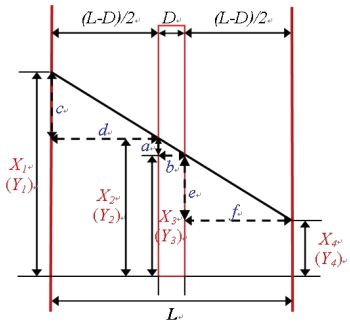


圖 3　座標轉換示意圖

圖中 X_2、X_3 為每層上下平面佈點之 X 座標，X_1、X_4 為控制機構相對應之切割控制點座標，D 為切層厚度，L 為控制機構兩控制點之最短距離，由於 $a:c:e=b:d:f$，且 $a=X_2-X_3$, $c=X_1-X_2$, $e=X_3-X_4$, $b=D$, $d=f=(L-D)/2$，因此可得出 X 方向之座標轉換公式如下：

$$X_1=(L+D/2D)\cdot X_2-(L-D/2D)\cdot X_3 \text{----------(3)}$$
$$X_4=(L+D/2D)\cdot X_3-(L-D/2D)\cdot X_2$$

同理亦可得到 Y 方向之座標轉換公式為：

$$Y_1=(L+D/2D)\cdot Y_2-(L-D/2D)\cdot Y_3$$
$$Y_4=(L+D/2D)\cdot Y_3-(L-D/2D)\cdot Y_2 \text{----------(4)}$$

五、 原型加工建構

由於快速成型技術是利用逐層依序製造、疊黏及撥離等步驟完成工件，因此在原型建構過程中，需利用支撐結構來固定加工件、保持加工件形狀及減少翹曲變形等。由於本研究所採用之固態材質本身即可作為支撐結構，因此不需另加其他輔助材料，故僅需在完成各層之路徑加工後，進行邊框切割，則可作為支撐結構。此外，此支撐結構亦可作為疊層黏合時之基準面結構，故將各加工層對齊支撐結構之基準面、依序逐層疊黏，並將支撐結構撥除，即可獲得成型工件之實體原型。

參、實驗系統

一、 四軸切割機構

本研究之四軸機構主要係由兩組獨立的 XY 軸運動機構和鎳鉻線與加熱器所組成，以達四軸移動與切割之效果，為降低成本且製作一符合本研究需求之運動機構，因此四軸機構係以傳統之設計概念，由馬達、滑軌及螺桿所組成，並自行設計及組裝。其原理係藉由步進馬達驅動螺桿，由螺桿帶動滑塊在線性滑軌上進行直線運動，以達到運動控制與定位。此四軸機構包含有兩組 X 軸移動平台、兩組 Y 軸移動平台、兩個位置控制端及加工板固定座。其機構示意圖如圖 4 所示。

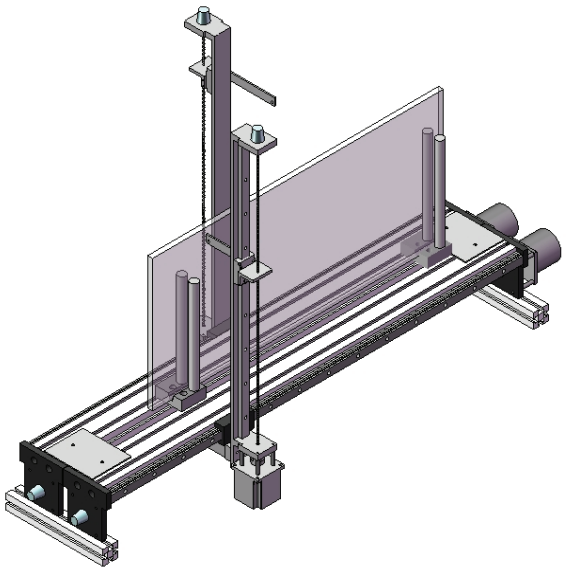


圖 4　四軸切割機構示意圖

1. 四軸切割機構之X軸移動平台

在 X 軸移動平台之設計與製作上，由於係位於四軸切割機構之底部，故除了須具有運動控制定位機構之功能外，亦需支撐 Y 軸運動機構，使整組機構在實際運動時，可達到穩定性及重複性。故在 X 軸機構設計部分，除具有主要的馬達、螺桿、滑塊及滑軌元件外，另設有馬達支撐架、連軸器、基座及基座固定板等夾置具，X 軸移動平台之機構設計示意圖如圖 5 所示，其中步進馬達採 Jamagawa

TS3653N2E5 之兩相式馬達，其規格為電壓 3.6 V、電流 2 A、電阻 1.8 Ω、2000 步/圈，螺桿軸心為 ϕ10 mm、pitch 1.5 mm，滑軌為 IKO LWHS15，X 軸移動平台機構之最大行程為 800 mm。

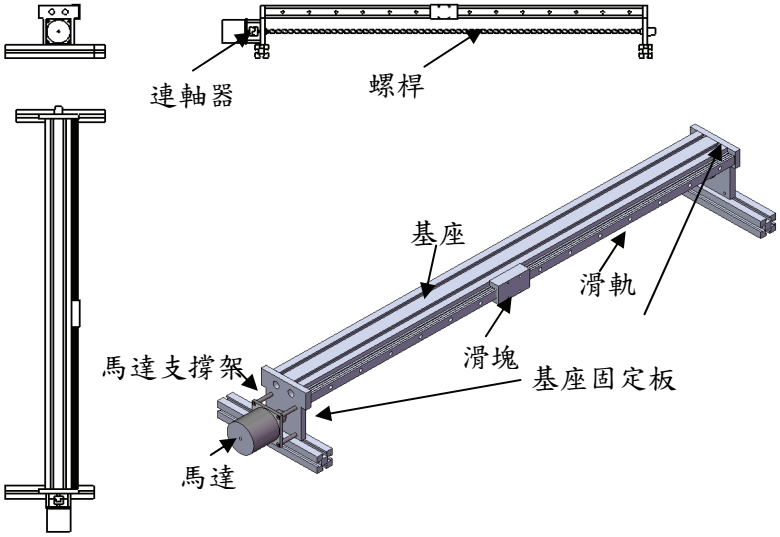


圖 5　X 軸移動平台機構之三視圖及等角視圖

2. 四軸切割機構之Y軸移動平台

本研究之兩組 Y 軸移動平台係分別固定於 X 軸移動平台上，因此在 Y 軸移動平台之設計與製作上，僅需考量運動控制及定位等功能，故採用最基本之設計，以減少整組機構之負載情形。故在 Y 軸機構設計部分，主要有馬達、螺桿、滑塊及滑軌元件，加上馬達支撐架、連軸器、平台固定座、XY 軸連接板及控制端支撐板等夾置具，Y 軸移動平台之機構設計示意圖如圖 6 所示，其中步進馬達及螺桿規格與 X 軸移動平台相同，滑軌為 IKO LWHS8，Y 軸移動平台機構之最大行程為 450 mm。

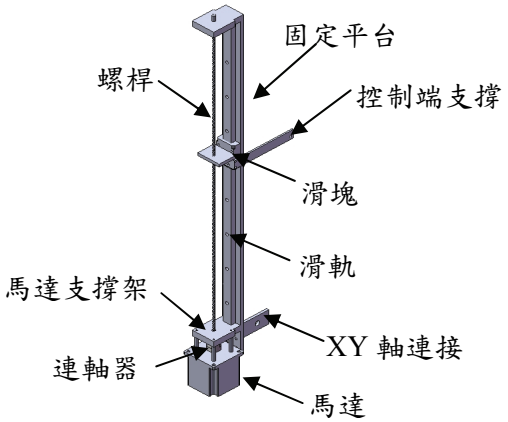


圖 6　Y 軸移動平台機構之等角視圖之螺桿

3. 四軸切割機構之位置控制端

在本研究所設計之四軸切割機構中，主要係以加熱之鎳鉻絲線針對保麗龍板進行斜面切割及加工，故在 Y 軸移動平台之設計上，需另外針對鎳鉻絲線之設置進行設計，以便機構在進行運動控制時，同時具有可加熱及拉伸鎳鉻絲線之功能，以作為四軸機構之兩個空間位置控制。此位置控制端係固定於兩組 Y 軸移動平台之滑塊上，而 Y 軸平台係固定於 X 軸平台上，因此當四軸機構進行運動控制時，位置控制端即可依照馬達及螺桿之移動，依規劃路徑控制兩位置控制端，以達到切割與加工之目的。

位置控制端之設計概念為：首先在兩組 Y 軸之移動平台，各取一 10 mm x 100 mm 之鋁板作為控制端支撐板，並在鋁板兩端鑽孔並置入螺絲，作為四軸切割機構之位置控制端。由於在進行斜面切割時，兩位置控制端之相對距離一直在改變，便得鎳鉻絲線的加工長度也相對在改變，故在兩個鎳鉻絲線之位置控制端，其中一端係將鎳鉻絲線固定，另一端則設計有滑輪組，以作為活動式裝置，位置控制端之相關設計如圖 7 所示。當進行工件加工時，將 ϕ0.2 mm 鎳鉻絲線之兩端分別放置於兩位置控制端上，一端固定於其上，另一端穿過控制端及滑輪組後，與一法碼連接，以形成一可自由變化長度之切割線，因此在切割工件時，兩組 XY 軸可依照規劃之路徑移動並保持鎳鉻絲線為直線，達到斜面切割的目的。而在兩位置控制端之螺絲上，另設置有電源供應器提供電壓及電流，具以加熱鎳鉻絲線，以進行保麗龍板之切割。

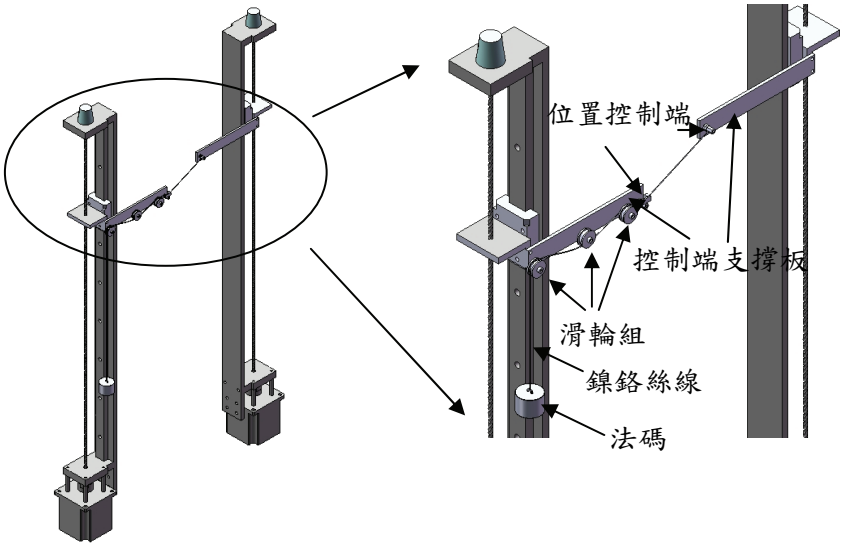
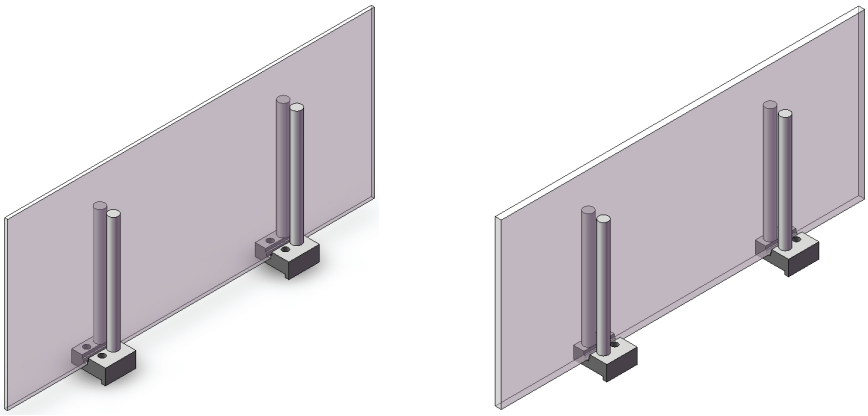


圖 7　位置控制端之相關設計示意圖

4. 四軸切割機構之加工板固定座

由於本研究在進行加工時，係採用切割邊框作為支撐結構，因此在四軸機構上另外設計一組加工板固定座，放置於加工板之左右側，用以固定保麗龍板。由於目前市面上所銷售之保麗龍板原為多為 5 mm 及 10 mm，因此，加工板固定座亦針對此兩種厚度進行設計，其構造如圖 8 所示，其中圖 8(a)為 5 mm 厚保麗龍板固定示意，圖 8(b) 10 mm 厚保麗龍板固定示意。



(a) 5mm 厚度加工板固定示意　　(b) 10mm 厚度加工板固定示意

圖 8　加工板固定座示意圖

加工板固定座主要係由一個物件座及兩根物件桿組成，採活動式設計，可依據加工板大小與調整固定座之位置，以免造成加工限制，其中物件座底部可直接與 X 軸移動平台基座接合。當加工板厚度為 5mm 時，加工板係放置於深度較深且寬度較窄之溝槽，而兩物件桿則放置較近的固定圓孔，當加工板厚度為 10mm 時，則加工板則係放置於深度較淺而寬度較寬之溝槽，兩物件桿則放置於較遠的兩個固定圓孔，如此即可針對兩種不同厚度之加工板進行固定，此設計亦可針對不同加工板厚度另行製造。

二、 四軸機構之控制系統

本研究之控制系統架構如圖 9 所示，主要由電腦經 RS232 傳輸線連接至控制器上，分別控制四個步進馬達驅動器以驅動四軸馬達，形成兩組獨立之 XY 軸運動與控制。控制系統之座標以兩組 Y 軸上裝置支架的位置控制端為參考點，以進行控制系統之位移控制。另於加工時，利用電源供應器連接至兩控制端上，用以加熱鎳鉻絲線以達到切割之功能。由於鎳鉻絲線在切割不同曲率大小斜面時，其

兩端直線長會產生變化而非為固定長度，其將使電流大小產生劇烈變化，故加熱系統中另行製作一定電流回授控制板，藉以保持加工電流大小。

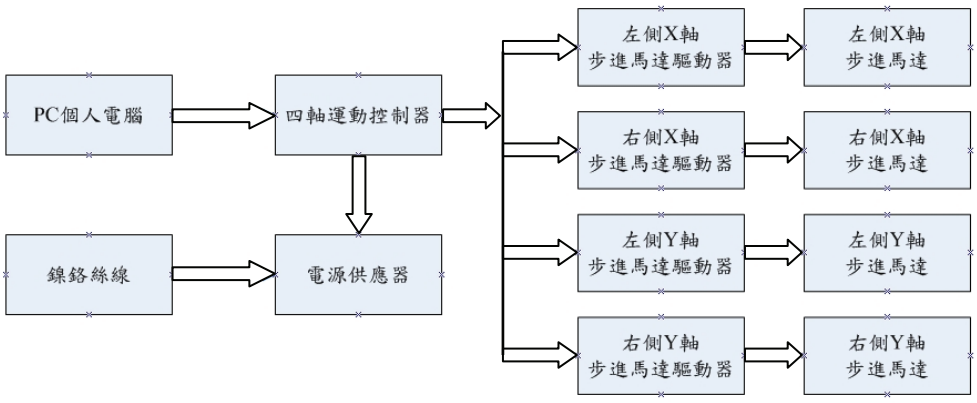


圖 9　控制系統架構示意圖

為求得最佳加工品質，在進行材料加工前，必須先進行切割測試，藉由不同之電流大小，與切割速度來求得最佳之電熱絲溫度。其主要原因為若溫度過高，其切割時所造成的間隙會過大，影響成型後的外形精度；反之，溫度太低，會造成切割延遲，加工材料有破裂之可能，甚至造成鎳鉻絲拉扯變形及斷裂，因此在加工前須先針對不同之馬達速度及電流設定進行切割測試，以作為本研究切割實驗參數設定之依據，其測試結果如表 1 所示。其結果顯示，當電流為 0.7 A 及 0.85 A 時，加工間隙差異均小於 0.1 mm，但是當電流提升至 1.0 A 時，加工間隙則增大 1.5 倍以上，為達到較佳之切割速度與較小之加工間隙，本研究選用切割速度為 225 mm/min，配合 0.85 A 之加工電流，以得最佳加工速度和品質。

表 1　馬達速度、電流大小與加工間隙之關係表

電流 / 加工間隙 / 馬達速度	0.7A	0.85 A	1.0A
90 mm/min	0.85 mm	0.95 mm	1.45 mm
135 mm/min	0.65 mm	0.73 mm	1.15 mm
180 mm/min	0.45 mm	0.50 mm	0.90 mm
225 mm/min	0.35 mm	0.37 mm	0.70 mm

肆、 實驗方法

本研究主要係針對兩類工件進行外型設計、切層、佈點及建構等實驗，以驗證實際加工成效。實驗一係以一 220 mm x 120 mm x 50 mm 範圍內之不規則外型實心瓶為加工件，進行斜面誤差與階梯誤差之分析與討論；實驗二係以一尺寸大小為 500 mm x 250 mm x 500 mm 甜甜圈外型之加工件，進行大尺寸消失模製程流程之驗證與成品誤差分析探討，以下針對各組實驗方法結果進行說明。

一、 實驗一：不規則加工件實驗

本研究係利用目前工業界常用之 SolidWorks 套裝軟體，建構工件之三維輪廓封閉幾何模型，所採用之加工件外型尺寸如圖 10 所示，即一瓶子之外型，其高度為 220 mm、厚度為 50 mm，由於瓶子造型係屬於不規則形狀，因此在寬度上並無固定尺寸。本研究以斜面切割方式進行加工時，係設定整體體積誤差量需低於 1 %，經前述演算法求得利用本研究之四軸切割機構加工於厚度 10 mm 的加工板上，即可達到此設定精度。此外，亦以 10 mm 之加工厚度進行傳統階梯切割方式加工，藉以實際比較二者間之誤差情形及加工時間。

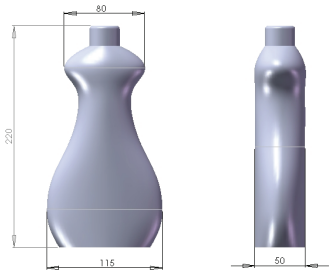
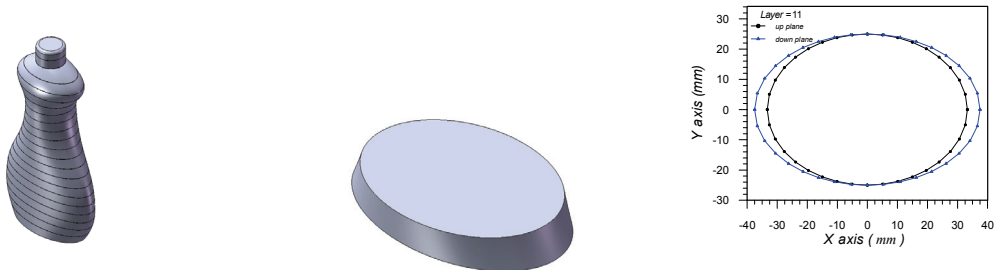


圖 10 不規則加工件外型尺寸示意圖

1. 斜面切割

本研究之工件係藉由 STL 網格點，計算研究工件之空間位置。並以底面為基準面，依序向上每間格 10 mm 求得各層輪廓曲線之座標值，直到向上平行偏移 220 mm 之距離為止。其中，第一平面（底面）與第二平面建構之輪廓外型即為第一層上下面之加工輪廓，故此加工件規劃有二十三個平面，由二十二個加工層加工而成，而每層加工層均可由上述方法獲得上下兩面的佈點資料，以獲得四十四面之佈點資料。

本研究依前述之切層與佈點原理可逐步求得各切層之佈點結果，如圖 11 所示，其中圖 11(a)係藉由切層厚度計算各切層位置，圖 11(b)係第十一層之分層斷面結構圖，圖 11(c)則為該分層之輪廓佈點結果示意圖。



(a) 切層位置圖　　(b) 切層實體圖　　(c) 佈點輪廓圖

圖 11　切層輪廓與佈點示意圖

此後，將所得之分層資料依程序分成二十二組平面切割資料，依序轉換為本研究四軸切割機構中之座標資料，並進行每層之加工。另於每層之加工路徑完成後，續進行支撐結構之切割，其支撐結構尺寸大小為 145 mm × 70 mm × 10 mm，且在一端預留 5 mm 未切割寬度作為支撐結構基準面，以方便各層的疊黏，並達支撐的目的。最後，依序將各層依基準面黏疊成型，並將上下兩部分之支撐結構撥除即可得到疊合後之工件實體。

2. 傳統階梯切割

為了證實本研究利用四軸快速成型系統進行斜面加工技術能夠實際改善傳統階梯加工法造成之階梯誤差，因此針對斜面切割與垂直面切割進行誤差分析與比較。首先，定義以本研究四軸加工系統之斜面切割技術完成之工件，稱之為 T-type，而以傳統階梯方式進行切割之工件，係依據理想加工件各層所對應之中間平面作為該層加工曲線，稱之為 M-type。

在取得各層輪廓資料點後，仍以本研究之四軸快速成型系統進行加工，由於係以傳統階梯方式進行切割，因此不需要進行控制器座標之轉換，而直接將輪廓資料輸入控制器中，針對加工板進行垂直同動加工，即可獲得階梯切割結果，其餘加工與建構之技術均與上述相同。

二、 實驗二：大尺寸加工件實驗

實驗二係建構較大尺寸之三維輪廓封閉幾何模型，所設計之加工件外型尺寸如圖 13 所示，猶如甜甜圈之外型，其中正視投影圖之最大外徑為 500 mm、內徑為 200 mm、截面直徑為 150 mm。本研究以斜面切割方式進行加工時，係設定整體體積誤差量需低於 0.5 %，經前述演算法求得利用本研究之四軸切割機構加工於厚度 10 mm 的加工板上，即可達到此設定精度。

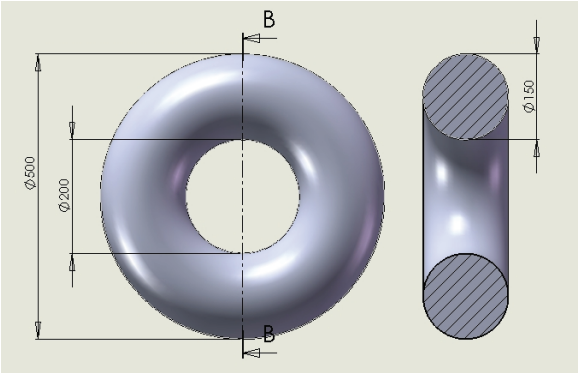
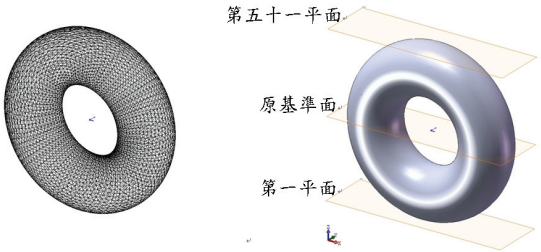


圖 13　加工件外型尺寸示意圖

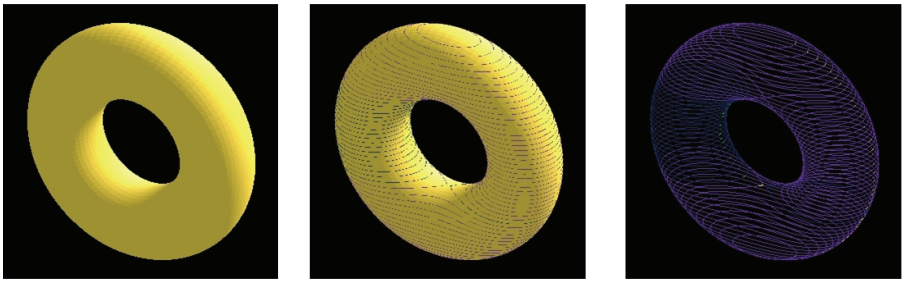
本研究之工件與建構之 STL 檔三角網格點如圖 14(a)所示，藉由 STL 之網格點，可計算得各層輪廓外型及空間位置。此外，亦以原基準面向下平行偏移 250 mm，使其平面正好與最大外徑相切，定義為第一平面，依序向上每間格 10 mm 平移一次，直到原基準面向上平行偏移 250 mm 之距離為止，共計有五十一個平面，如圖 14(b)所示。其中，第一平面與第二平面建構之輪廓外型即為第一層之加工外型，故此加工件規劃共有五十一個平面，由五十個加工層加工而成，而每層加工層均可由上述方法獲得上下兩面的佈點資料，因此需獲得一百面之佈點資料。



(a) STL檔之資料示意圖　　(b)各平面之說明示意圖

圖14　加工件STL檔及CAD模型平面定義示意圖

本研究藉由自行撰寫之軟體，依前述之原理逐步求得佈點結果，其中圖 15(a)係將轉換後之 STL 檔重建為實體圖，以初步確認擷取之 STL 檔數據無誤，圖 15(b)係由切層厚度計算各切層位置，圖 15(c)係計算所得之各切層輪廓並顯示其結果。



(a)實體重建圖　　(b)切層位置圖　　(c)切層輪廓圖

圖15　切層輪廓計算步驟程序及結果示意圖

其中，第三層、第十九層及第三十五層之分層斷面結構圖及輪廓佈點圖如圖 16 及圖 17 所示。

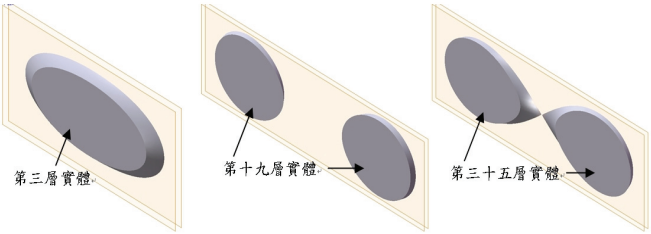


圖16　第三層、第十九層及第三十五層之分層斷面結構圖

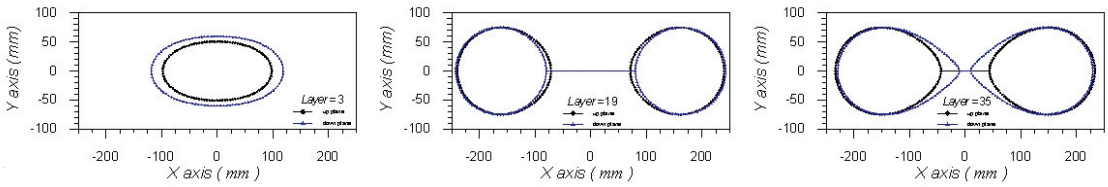


圖17　第三層、第十九層及第三十五層之之輪廓佈點圖

此後，將所得之分層資料依程序分成五十組組平面切割資料，依序轉換為本研究四軸切割機構中之座標資料，並進行每層之加工。另於每層之加工路徑完成後，續進行支撐結構之切割，其支撐結構尺寸大小為 570 mm × 180 mm × 10 mm，且在一端預留 10 mm 未切割寬度作為支撐結構基準面，以方便各層的疊黏，並達支撐的目的，第十九層之切層路徑與支撐結構如圖 18 所示。

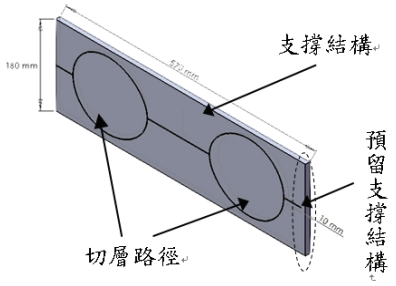


圖18 第十九層切層路徑與支撐結構示意圖

接著，即可按照編號依序將各層依基準面黏疊成型，恢復至加工前的外型，最後，將預留支撐結構部分去除，並將上下兩部分之支撐結構撥除即可得到疊合後之工件實體，如圖 19 所示。

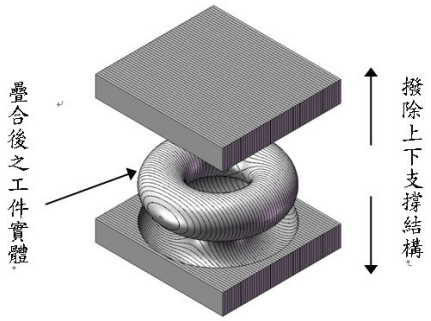


圖19 支撐結構與工件實體示意圖

伍、 實驗結果與討論

5.1 實驗一：不規則加工實驗

圖 20 為本研究以斜面切割方式進行加工後，各層逐一堆疊黏合後之成品。其中，圖 20 左半部為上部支撐結構實體圖，圖 20 右半部則為上部支撐結構材料撥除後之工件與下部支撐結構實體圖。

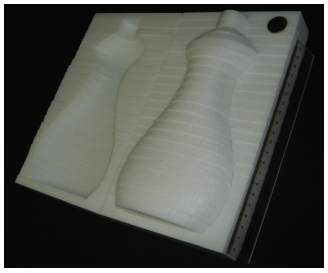


圖20 加工件成品實體圖

為了證實本研究利用四軸快速成型系統進行斜面加工技術能夠實際改善傳統階梯加工法造成之階梯誤差，因此針對斜面切割與垂直面切割進行誤差分析與比較。故本研究繼續採用四軸快速成型系統以階梯切割方式進行 M-type 工件之製作。圖 21(a)及圖 21(b)分別為 T-type 及 M-type 工件實體圖，由 T-type 之工件可明顯看出，由於此工件係以斜面方式進行切割，因此，層與層之間的疊合面間，並不會有太大之誤差量，曲面則因利用折線方式表示而較平滑，故與理想加工件之外形輪廓較接近，但若以階梯加工方式進行切割時，則會有明顯之階梯誤差情形出現，如圖 21(b)所示。其中 T-type 及 M-type 之單層體積誤差量 E_L 理論值如圖(22)所示。

(a) (b)

圖21　T-type及M-type工件實體圖

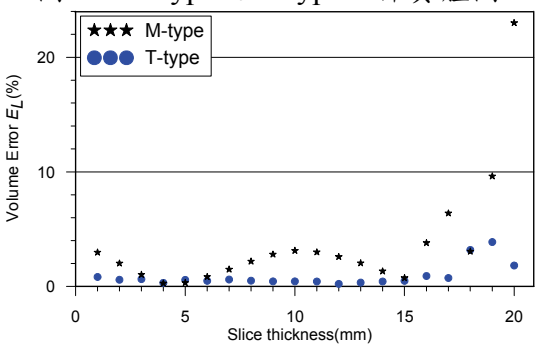


圖22　四組工件之單層體積誤差量E_L比較圖

由圖 22 結果帶入公式(2)中，計算出 T-type 及 M-type 之整體體積誤差量 E_T 值分別為 0.87 %及 2.89 %，由此結果得知，斜面加工較傳統階梯加工方式，有較小之階梯誤差。

此外，另針對此不同加工法在不同層厚下進行整體體積誤差量 E_T 之比較如圖 23 所示，其結果顯示各加工件之誤差量均與層厚成正比，且為類線性關係，而 M-type 工件之誤差量約為 T-type 工件之 3.3 倍，且推估當層厚為 3 mm 時，誤差量可低於 1 %。

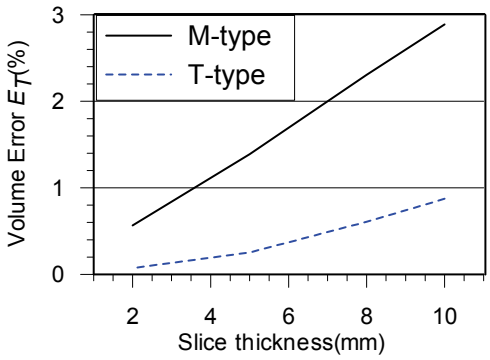


圖23　兩加工法在不同層厚時之誤差量E_T比較圖

圖 24 為 T-type 及 M-type 在切層厚度為 10 mm 時各層加工時間比較圖，由於 T-type 為斜面切割，故切割斜率愈大時，切割時間也愈長，因此整體加工時間較 M-type 長，本研究工件之 T-type 工件之總加工時間為 3162 s，平均每層加工時間約 2 分 24 秒，而 M-type 工件之總加工時間為 2626 s，平均每層加工時間約 2 分鐘。

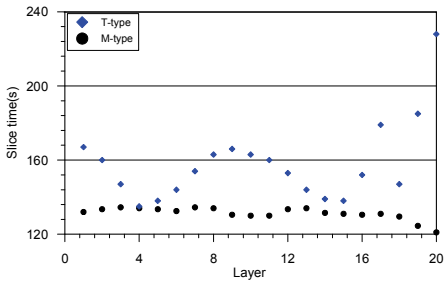


圖24　T-type及M-type之單層加工時間比較圖

由上述結果得知，當本研究設定加工件誤差量在 1 %之範圍內時，T-type 工件之層厚最大可設定為 10 mm，其加工切層數為 22 層，加工時間共需 3162 s，約為 53 分鐘，而以 M-type 進行階梯加工時，最大層厚需為 3 mm，加工切層數為 73 層，而加工時間預估共需 8753 s，約為 145 分鐘。因此，在相同誤差量之範圍設定下，本研究所提出之斜面加工技術在速度上實可有效改善，以本研究實驗一所採用之工件而言，其可較傳統加工節省 2.8 倍的時間。

5.2 實驗二：大尺寸加工實驗

圖 25 為本研究實驗二設計之工件在各切層之理論體積誤差值 E_L 與相對於工件位置示意圖，由於工件於切層方向為對稱，故以下討論僅就第一層至第二十五層進行討論。由圖 1(b)之斜面誤差來源圖中可以得知，在相同曲率半徑情況下，當單層之切割長度愈長時，相對之體積誤差量也愈大。因此，本研究選用之工件依 Z

軸方向上之單層體積誤差量因第一至第三層之切割長度明顯減少而遞減，另在十五至十六層時，由於內圈之切割長度較長而增加其誤差量，其餘切層之誤差值均在 0.6 %以下，此切割長度變化也可由圖 25 中觀察得知。依前述之誤差分析方法可得利用本研究所研發之斜面切割技術，此工件製程後之整體理論積體誤差量 E_T 值約為 0.35 %。

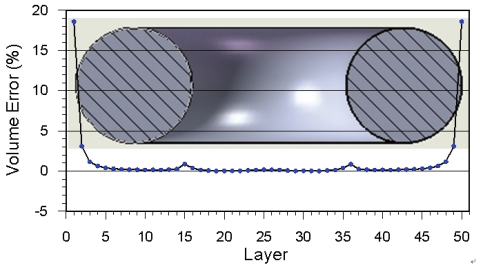
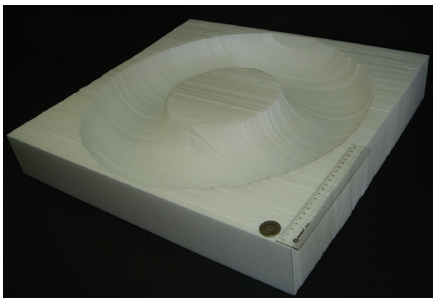


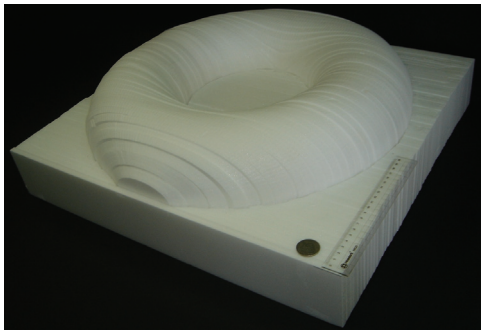
圖25 各切層之體積誤差值

圖 26 為依據圖 13 之加工件外型尺寸加工後，各層逐一堆疊黏合後之成品，圖 26(a)為上部支撐結構之實體圖，圖 26(b)為加工件成品之實體圖，圖 26(c)為上部支撐結構材料撥除後之實體圖。



(a) 上部支撐結構之實體圖

(b) 加工件成品實體圖



(c) 上部支撐結構材料撥除後之實體圖

圖26 加工件成品與支撐結構實體圖

陸、 結論

本研究所發展的大尺寸消失模四軸快速成型系統，係藉由快速成型之分層堆疊原理及消失模概念，以四軸切割機構，配合輪廓佈點演算法、座標空間轉換及誤差分析等技術，驗證斜面切割快速成型製程技術之可行性。本研究研製之四軸機構於 XY 軸的有效行程為 600 mm x 300 mm，實驗加工材料為聚苯乙烯樹脂。

本研究首先針對成品範圍為 220 mm x 120 mm x 50 mm，加工厚度為 10 mm，分層數為二十二層之工件進行實體加工研究，由斜面誤差與階梯誤差之分析與討論結果得知，當層厚為 10 mm 時，T-type 斜面加工之工件誤差與 M-type 階梯加工之工件誤差分別為 0.87 %及 2.89 %，加工時間比為 1：0.833，加工時間分別需 53 分鐘及 44 分鐘。由此得知，在相同層厚下，M-type 之整體體積誤差量 E_T 為 T-type 工件之 3.3 倍，如使二者之 E_T 相當時，則 M-type 工件之加工層厚約為 3 mm 時其階梯誤差才可達到 1 %以下，其加工時間則增長為 145 分鐘。故此可知，本研究所提出之斜面加工技術在相同誤差條件下，於加工速度上實可有效提升，其約可較傳統加工技術節省 2.8 倍的時間。

本研究另針對成品大小為500 mm x 250 mm x 500 mm之大尺寸物件加工進行實體研究，其加工厚度仍為10 mm，加工層數為五十層，採等距佈點方式進行一百面之佈點資料計算與研製，由斜面誤差分析演算法得知，除上下第一至第三層因切割斜率較大而有較大之單層體積誤差量外，其餘各層之誤差量均小於1 %，整體理論積體誤差量E_T值約為0.35 %。由上述實體研製結果得知，本研究所開發之斜面切割快速成型製程技術確實可行，不但可有效提升消失模製程之精度與速度，亦可應用於大尺寸消失模之製程。

柒、 參考文獻

1. D.M.C. Santos, A.E.M. Pertence and P. R. Cetlin, “The development of 3D models through rapid prototyping concepts,” Journal of Materials Processing Technology, Vol.168, pp.270-272, 2005.
2. P. Haipeng and Zhou Tianrui, “Generation and optimization of slice profile data in rapid prototyping and manufacturing,” Journal of Materials Processing Technology Vol.187-188, pp. 623-626, 2007.
3. A. Mirahmadi, S. Saedodin and Y. Shanjani, “Feasibility study of high frequency plasma aided rapid prototyping,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.47, pp.722-728, 2007.

4. W. Cao and Y. Myiamoto, “Direct slicing from AutoCAD solid models for rapid prototyping,” International Journal of Advanced Manufacturing Technology Vol.21, pp.739-742, 2003.
5. P. Rochusa, J.Y. Plesseriaa, M.V. Elsenb, J.P. Kruthb, R. Carrusc and T. Dormalc, “New applications of rapid prototyping and rapid manufacturing technologies for space instrumentation,” Acta Astronautica, Vol.61, pp.352-359, 2007.
6. V. Canellidis, V. Dedoussis, N. Mantzouratos and S. Sofianopoulou, “Pre-processing methodology for optimizing stereolithography apparatus build performance,” Vol.57, pp.424-436, 2006.
7. Y.S. Liao, H.C. Li and M.T. Chen, “The study of rapid prototyping process with embedded functional inserts,” Journal of Materials Processing Technology, Vol.192-193, pp.68-74, 2007.
8. J.L. Song, Y.T. Li, Q.L. Deng and D.J. Hu, “Rapid prototyping manufacturing of silica sand patterns based on selective laser sintering,” Journal of Materials Processing Technology, Vol.192-193, pp.68-74, 2007.