

以田口法規劃曲面切削之研究

Planning for Curved-Surface Milling by Taguchi Method

註:本文 95 年 11 月 11 日曾發表刊登於 2006 第五屆精密製造學術研討會論文集

王雪娥 何應勤

摘要

本研究將統整電腦輔助設計與製造(Computer Aided Design and Manufacturing, CAD/CAM)實際做出馬鞍型拋物曲面工件,再以漢默斯里序列採樣法(Hammersley Sequence Sampling, HSS)由接觸式三次元量測儀(Coordinate Measuring Machine, CMM)系統量得工件幾何公差中曲面輪廓度(Profile of Surface)值,最後應用田口法尋求最後的曲面切削條件及影響因子的貢獻率。

由於目前大部分切削文獻中以探討影響切削的因素為主,而本文藉由田口法切削實驗可以得知影響馬鞍型拋物曲面切削加工過程中以主軸轉速的因素最為顯著,貢獻率高達 59.38%。具體的研究成果期盼能提供給職業教育學界,往後在有時間限制的加工與量測實習課程中有所依據,不用花太多時間去 try and error 而提高實習課程的效益,以達到提升教育投資的產出報酬率。

ABSTRACT

The present research concerns the finding of the optimality condition and associated contribution rates, by the Taguchi method, for a set of cutting parameters used in manufacturing a saddle-shaped object. This object is to be fabricated via an integrated CAD/CAM process, and its surface profile measured by a precision CMM via Hammersley sequence sampling method.

Among all cutting factors considered in making the saddle-shaped object, the cutting speed of the spindle is found by the Taguchi method to be with the most notable contribution rate, reaching as high as 59.38%. This result is thus hoped to provide practical information for vocational trainings in similar conditions such that some painful try-and-error efforts can be eased.

關鍵詞：田口法、馬鞍型拋物曲面切削。

Key words: Taguchi Method、saddle-type curved surface.

王雪娥/高雄市立高級工業職業學校機械科教師
何應勤/國立中山大學機械與機電工程系教授

1. 前言

在曲面切削與量測的過程中，對切削產生影響的不確定因素很多，如刀具磨耗、機台震動、潤滑油老化、加工的環境溫度等等，造成真實加工尺寸與理論尺寸誤差。有部份誤差因素的干擾是無法以數值分析來表示的，若採用電腦模擬與數學演算方法來進行分析，有時候產生的分析結果會失真；採用實驗計劃法，實際進行研究探討，雖較費時但可以獲得較真實的結果。

本研究是利用田口法來規劃 CAM/CMM 實驗，對於曲面加工在 CAM 與 CMM 實驗方面規劃流程為(1)加工圖面檢查是否有破面情況(2)模擬刀具路徑(3)擬定製程順序(4)選定工具機(5)刀具選擇(6)加工參數設定、路徑規劃(7)後處理轉換成 NC 碼(8)CNC 執行加工(9)檢測(10)完成。CAM 製程上也就是先定義切削曲面的重要屬性，依刀具廠商所提供的刀具型錄，訂定主軸轉速、進給速率與切削深度的範圍，採用三因子三水準的 $L_9(3^3)$ 直交表方式，訂出屬性的各水準別及求取最後加工的數據。

在實際切削過程中，銑刀刀數、表面粗度、弦差、切削路徑、潤滑方式、工件夾持方式、加工環境溫度、溼度、振動等視為固定參數。隨後以三軸綜合加工機實作出九塊曲面工件，選用文獻提供採樣速度較快的漢默斯里序列採樣法，以接觸式 CMM 設備測量出量測點座標及曲面輪廓度等數據，應用自己所繕寫的曲面切削田口法程式，求得影響切削最主要因素之貢獻率及一組最後結果的加工參數，而後再以所得的最後結果加工參數切削出原尺寸的曲面工件，來驗證田口法所求出最後結果的加工參數是成立的。

2. 本文

在曲面切削與量測的研究過程中，為提高研究結果的精確度與效率，製造與量測實作方面將採用實驗計劃法中較多數人使用的田口法(Taguchi Method, TM)，以提升工件的品質。田口法是日本 田口玄一 博士於 1950 年代所提出的一種實驗計劃法，它的優點是利用少量實驗數據進行廣泛的實驗趨勢分析，有效改善製程提升加工品質。如[1]田口方法應用於高速 CNC 銑削加工製程之最佳參數設計研究等。

在切削相關研究中，[2]研究論文中採用主軸轉速、進給速率與切削深度作為最佳化的因素。[3]研究利用切削加工之溫度分佈，來預測刀具壽命，其結果顯示，切削速度、進給速率、與刀具傾角之影響較大，其結論認為對精加工而言，切削速度、與進給速率是最主要的加工參數。由以上的研究結果可知，在切削領域最佳化過程中，影響較大的因素為主軸轉速、進給速率與切削深度。

在量測的領域中，[4]採用漢默斯里序列採樣法(HSS)結果顯示在相同的量測精度水準下，HSS 採樣點數比均勻採樣法(Uniform Sampling)的採樣點數以接近平方的減少，可縮短時間與減少花費。[5]三次元量測軟體發展中，建議量測圓錐採樣點至少要 7 點以上。[6]基因演算法應用於三次元座標量測儀之量測路徑選擇規劃，研究中在 $250 \times 250 \text{mm}^2$ 平面上

以不同量測點求得平均真平度標準差，所做的結論可知當採樣點數達到 8 點以上與 12 點之間，所得的真平度公差會趨於一穩定狀態，並較不會產生浪費時間的弊病。歸納以上的文獻，筆者將以 HSS10 點為採樣基準，並以曲面輪廓度量測誤差較小的一方做為採樣法的依據。

2.1 CAD/CAM/CMM 軟體的選用及硬體設備

本研究 CAD 方面採用 Pro/ENGINEER wildfire2.0 軟體來建構馬鞍型拋物曲面加工模型；CAM 方面以 MasterCAM9.0 軟體產生加工碼，作為 CNC 加工依據，切削加工過程採用三軸麗偉 MCV-610P 型綜合加工機。加工所使用的刀具：高速鋼、兩刃球刀，粗加工： $\phi=10$ mm、精加工： $\phi=6$ mm。實驗的材料：鋁合金(ASTM6061)，外型尺寸規格：

(1)50x38x32 mm (2)100x76x64 mm。

CMM 採用義大利 DELTA SP332012DD 型接觸式量測儀；以法國 Metrolog XG3 軟體計算處理運算其數據，軟硬體規格如表 1。

表 1 本實驗所採用接觸式 CMM 軟硬體規格

機器名稱	三次元精密量床		
廠商	DEA	機型	DELTA SP332012 DD
測量範圍	X3300mm Y2030mm Z1200mm	全機大小	L5580mm W4100mm H4316mm
Z 軸至平台高度	766mm	精度要求	4.5+5.5L/1000(u)
工作範圍	L3500mm Y2800mm Z1900mm	軸承形式	空氣軸承
最小讀數	0.001mm	進氣壓力	5BAR min
耗氣量	250 NL/min	耗電量	7 KVA
電源	200/220V	控制系統	DEA FLY

2.2 田口法之基本原理 [7]

田口法是日本 田口玄一 博士應用統計學與工程概念所開發出一系列針對品質維持與參數決策上的方法，強調品質特性與目標值間的差異是造成損失的關鍵。其原理與實驗流程及限制分述如下：

1.損失函數(Loss function)：為各界廣泛地應用在產品的品質評估上。工件的品質是依照需求及期望性能之特性來衡量的，此種損失主要是由於工件的品質特性值偏離工件設計之目標值所造成，當品質特性值與其目標值之差距愈大時，損失也愈大，田口博士認為可用損失函數代表這個理念。利用它可以使得製造者經由減少品質特性值與目標值的差距來不斷地追求品質之提升。

2.品質特性值：決定目標函數及其特性是田口法分析過程中的關鍵第一步，田口法中最大的特色是將目標函數轉換成信雜比（Signal to Noise, S/N）之計算方式，以利後續分析步驟的進行。依理想機能的不同分為三種，分別為望小特性(Smaller the Better)、望大特性(Larger the Better)及望目特性(Nominal the Best)。本論文因以曲面輪廓值愈小愈好，所以只使用望小的特性，將不探討望大及望目的特性。望小特性的信雜比經過推導後可定義為

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

其中， y_i 為第 i 組的實驗數據， n 為總實驗的次數。

3.定義控制因子及水準表：進行田口法分析前，必須先對目標函數的各控制因子設定水準數。

4.選擇直交表：田口博士設計了許多種直交表（Orthogonal Array），應用直交表來做實驗分析，以減少實驗次數，而且依然可保有很高的準確性。直交表乃是進行分析各項控制因子影響目標函數的基礎。一個典型的直交表是以 $L_a(b^c)$ 來命名，它代表共有 a 組實驗、最多可以容納 b 個水準的控制因子 c 個，亦即代表一個 a 列 c 行的直交表，而 L 是取自拉丁方格之英文 Latin 第一個字母為直交表的代號。

5.變異數分析 (Analysis of Variance):主要是評估實驗誤差，決定各控制因子相對重要性。在某一水準下根據整個實驗結果的信雜比來進行變異數分析，分析中目標值與品質特性的差異平方和稱為全變動（Total Variation）

$$\text{全變動} \quad S_T = \sum_{i=1}^n \eta_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n \eta_i)^2}{n} = \sum_{i=1}^n \eta_i^2 - C.F. \quad (2)$$

η_i 其中為各實驗所得之 S/N 比， n 為實驗總次數， $C.F.$ (Correction Factor) 為修正項或平均值變異誤差。

變動的目的在于表示與目標值變化的大小。

自由度為要得到所需的結果，必須提供最少的數據個數。

自由度為 1 的變動稱為變異，表示品質特性對目標值變化的平均值。因子 A 的變異 V_A ：

$$V_A = \frac{S_A}{f_A} \quad (3)$$

從平均變動中減除個別變異的變動稱為純變動。設因子 A 的純變動 S'_A ：

$$S'_A = S_A - f_A \times V_e \quad (4)$$

誤差項 (e) 的純變動 S'_e ：

$$S'_e = S_T - (S'_A + S'_B + \dots) \quad (5)$$

當因子純變動值為零或小於零時，本實驗將此因子忽略，其值併入誤差項的純變動中。

貢獻率(Percent Contribution)的目的在了解個別差或誤差值所佔的比率。A 控制因子的貢獻率：

$$\sigma_A = \frac{S'_A}{S_T} \times 100\% \quad (6)$$

2.3 CMM 設備及操作

工件在量床上先以 3-2-1 定位法則(Locating Principle)來設定工件座標系統可以確保所產生的 X、Y 和 Z 三個軸相互垂直。當座標系統設定完畢後，即可對工件進行詳盡的量測工作。CMM 的量測精度受到許多因素影響，因而產生一些量測誤差，這些誤差包括：(1) 硬體誤差如幾何誤差、靜態誤差及動態誤差等 (2) 軟體誤差:如探頭半徑補正、圓心座標、幾何公差的計算等(3)工件誤差:如加工製程中的表面精度設定所造成的誤差或工件因探針接觸量測所產生的變形誤差等。(4)環境因子:如溫度、濕度、振動等。(5)人為誤差:如看錯量測值、探針選取不當、工件座標系統設置不當、資料分析錯誤等。[8]傳統三維量測儀(CMM)的量測不確定度過大，約在 $1 \mu\text{m}$ 。針對此問題，全球幾個國家的研究機構，如美國國家標準與技術研究院(NIST)、德國聯邦物理技術研究院(PTB)與英國國家物理實驗室(NPL)，幾乎在同一時間挹注大量的經費與人力於開發微型三次元量測儀(μ -CMM)。

在幾何量測過程中，探針半徑補償問題是很重要的因素，當探針接觸工件表面時，資料轉接器會記錄中心點座標並沿量測方向補正一個半徑 r 值，量測方向與法線方向一致時，則補正點卻好會在工件表面，反之，量測方向不適當，則補正點將會產生誤差，如圖 1。

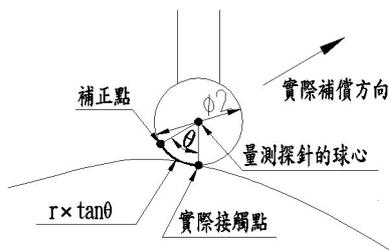


圖 1 探針中心點和實際接觸點

實際接觸點與補正點之間的 $r \times \tan \theta$ 誤差為當測量方向與法線方向方向偏離的角度愈大，誤差也就愈大。對複雜的曲面而言，在曲率變化愈大的地方，量測誤差也愈大。[9]提出四分樹平均曲率分佈法（Quadtree Average Curvature Distribution），根據曲面的曲率大小，先將曲面分區，在曲率大的區域取較多點，反之，平滑而曲率變化小的區域則取較少點，計算曲面各點的曲率平均值及標準差，若標準差很小，表示曲面相當平滑，無須再作分割，但若標準差大於容許值，則將曲面分成四個象限。

本研究所使用的接觸式 CMM 除了以空壓軸承驅動外，還可以自動依照電腦所預先設定的程式執行量測。在整個量測過程中，設定量測環境時首先必須先選定元素名稱（圓錐、球或其他曲面的形狀誤差）及指定一個容許誤差值（Tolerance），並需要考慮足夠的測量點，與測量點的位置，這些點構建成一個截面，經系統內部的探針半徑自動補償後，將法線向量當作補正方向，並重新計算校驗，得到真正曲面輪廓度。

2.4 漢默斯里序列採樣法(HSS)

了確保工件的精密度和可靠性，量測是確保品質的重要關鍵，量測數據可作為加工過程參數選用的依據和說明。現代產品的製造除了要求尺寸精密度外更要求有效率，因此，在加工過程及量測的時間也是重要的考慮之一。根據一個統計觀點，採用[10]所提出的 HSS 在相同的量測精度下，HSS 採樣點數比均勻採樣法的採樣點數以接近平方的減少，可縮短時間與減少花費。

現今在平面量測點位置為多數人採用的採樣法有 HSS、拉丁高立方採樣法(Latin Hypercube Sampling, LHS)、準蒙特卡羅採樣法(Quasi- Monte Carlo Sampling, QMC)、正交陣列採樣法(Orthogonal Array Sampling, OA)等現代設計經驗採樣法(DOE)，應用於本研究的採樣法說明如下：

HSS 是以漢默斯里點(Hammersley points)為基礎所發展出來的一個新的採樣技術，[10] 研究中發現 HSS 可以延伸到各種的幾何特徵的採樣點例如圓形件，圓錐件、圓柱、矩形、球面上。因此，為了量測有多個幾何特徵的工件，結合 HSS 和分層採樣方法以特徵為基礎的方法學被發展出來，研究證明在任何情形下，得到的 HSS 與均勻採樣法和隨機採樣法在相同的精度下做效率的比較，發現分層的 HSS 比分層隨機採樣或均勻隨機採樣提供更準確的結果。[11]實驗證明 HSS 與 QMC 相比較，HSS 是一種確定性超均勻分佈序列採樣法（Low-Discrepancy Sequence Sampling）的選擇，也是一種有系統的配置方法，比其他採樣技術都有較均勻分佈的特質。多種採樣法單位採樣點分佈性質比較，如圖 2。

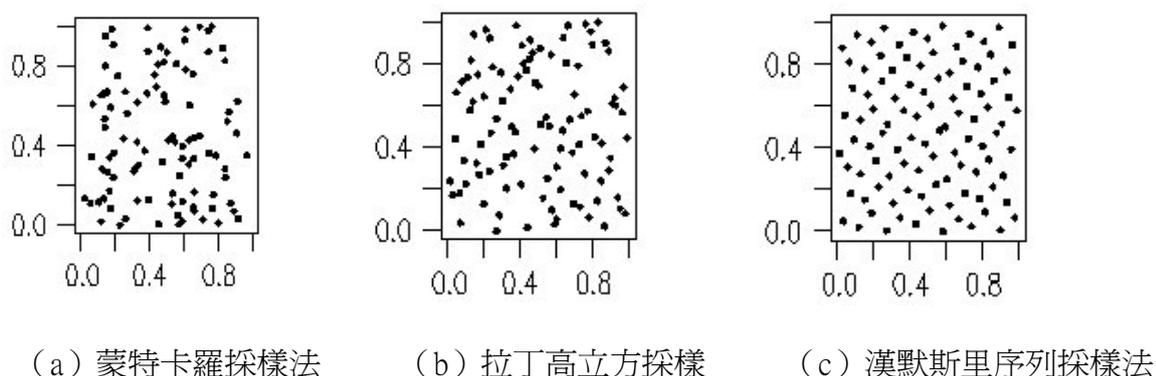


圖 2 多種採樣法單位採樣點分佈性質比較

HSS 的配置就是把平面長、寬各等分成相同等份，再利用二進位的方式。在 X 軸的位置以均等的距離作切割，以 X_i 表示：

$$X_i = \frac{i}{N} \quad i \in (0, N-1) \quad N \text{ 為總量測點數}$$

Y 軸的部分則是使用下列方法判斷量測點的位置，以 Y_i 表示，分佈法則如公式(7)：

$$Y_i = \sum_{j=0}^{k-1} b_{ij} 2^{-j-1} \quad , \text{ 其中 } K = [\log_2 N] \quad (7)$$

若 b_i 為量測點之二進位表示情形； b_{ij} 將 b_i 作映射的動作，把 b_i 作一個轉換，之後 b_{ij} 之二進位的值乘上 2^{-j-1} ，即可得到 Y 軸的 Y_i 值。

然後再依原工件的尺寸去放大，即可得到真正作落在工件上的座標位置。

以 HSS 分佈法則來規劃 10 個採樣點位置說明：

在 X 軸部份 $X_i = \frac{i}{N} \quad i \in (0, N-1)$ 所以 X 軸相對位置分別為 0/10, 1/10, 2/10, 3/10, 4/10, 5/10, 6/10, 7/10。

在 Y 軸部分以 HSS 分佈 $Y_i = \sum_{j=0}^{k-1} b_{ij} 2^{-j-1}$ 法則求得；以 Y 軸第 2 個量測點說明：其二進位的表示為 (0,0,0,1)，透過映射的轉換 b_{ij} 得到為 (1,0,0,0)， $j=0,1,2,3$ 所以 2^{-j-1} 所對應的值分別是 $(2^{-1}, 2^{-2}, 2^{-3}, 2^{-4})$ ，再把 b_{ij} 與對應值相乘，即可得到量測點 Y₂ 軸相對位置 $Y_2 = 1 * (2^{-1}) + 0 * (2^{-2}) + 0 * (2^{-3}) + 0 * (2^{-4}) = 8/16$ 。其餘座標位置，如圖 3 所示。

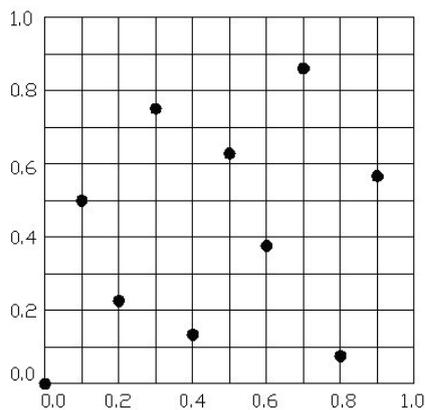


圖 3 HSS 10 點的座標位置

2.5 曲面輪廓度

由於科技的發展快速，加註幾何公差的目的即是由量測資料中決定量測物的尺寸與原物件的設計幾何形狀的誤差，並且藉以計算其他相對應的幾何公差，用以判定產品優劣的一項重要依據，在幾何公差的形態中以單一形態的形狀公差影響配合精確度最大，其他方向公差及位置公差可隨形狀公差精確度提高而提高，形狀公差就是表示一個實際工件之實體外形與設計藍圖上正確外型的誤差範圍。曲面輪廓度公差是指非圓曲面的實際輪廓面，對理想輪廓面的允許變動量。也就是圖樣上給定的，用以限制實際曲面加工誤差的變動範圍。

而本研究所探討的曲面輪廓度，是形狀公差中，精密度最高的一項，其定義如圖 4。

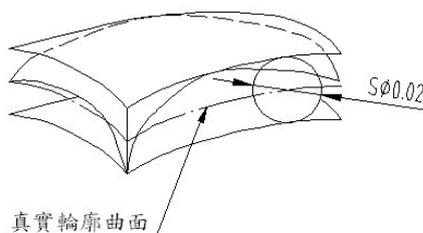


圖 4 曲面輪廓度定義

2.6 CAD/CAM 曲面建構與相關參數設定

CAD 模型常以實體模型或曲面模型表達，建構曲面模型是先以線架構的簡易之外形，再以掃描 (swept) 方式建構成曲面。常用的合成曲面包括 Bezier、B-Spline 及 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) 曲面等等。對於 NURBS 曲線而言，改變加權值與內部節點時，便可與 Bezier 曲線基底函數與 B-Spline 曲線基底函數相容，這個特性在一般的 CAD/CAM 系統中是相通的，因此，在不同軟體檔案格式間，通常可以用資料處理轉檔的 IGES、DXF、DWG、STL、STEP 等格式，來做曲面/曲線的資料庫轉換。大部份的 CAD 系統均大都採用 NURBS 曲線建構法。而目前生活中的曲面物件，以採用拋物線生產出的

曲面物件是最普遍，如太陽能板、照相機鏡面、雷達、飛機飛翼等，因而本文也將以拋物線為基礎，採用 Pro/ENGINEER 軟體掃描出曲面，以 NURBS 曲面作為曲面加工的依據，建構出馬鞍型拋物曲面加工模型。

本文採用三軸工具機加工方式，主要是藉由刀具相對工作台上的工件作幾何形狀運動而完成切削加工，在精加工製程方面是利用田口法來規劃實驗，先定義切削曲面的重要屬性，依 $\phi = 6$ [12] 銑刀型錄所提供高碳鋼球刀之切削條件，訂定主軸轉速為 4000rpm、進給速率為 380mm/min 與切削深度為 0.1 mm/rev 作為實驗三個因子的基礎。再以主軸轉速 4000 ± 500 rpm、進給速率 380 ± 50 mm/min 與切削深度為 0.1 ± 0.05 mm/rev 作為實驗屬性的各三個水準別；利用田口實驗設計法的直交表配置各設計參數，並設定各參數的水準數，進行田口實驗規劃的設計。在不考慮交互作用的條件前題下，選用 $L_9(3^3)$ 直交表方式，共配置 9 種模式實驗每工件精加工都使用一把新的球刀，路徑以雙向切削、曲面流線法沿曲面切削加工完成。

2.7 應用田口法之實驗程序

前置實驗的主要目的為找出影響曲面輪廓度之主要參數。依田口實驗方法之望小特性法，逐一計算各條件下之 S/N 比，找出最後的設計參數。實驗程序如下：

1. CAD/CAM 曲面建構與實作

本論文採用 Pro/ENGINEER 軟體來建構馬鞍型拋物曲面，再將此建構完成的曲面檔案轉換成 IGES 檔案格式，提供給 MasterCAM 軟體作為加工依據。

拋物線方程式 $y^2=4cx$ 及 $x^2=-4cy$ ，兩條曲線的交點同時是 $x^2=-4cy$ 拋物線的極大值與 $y^2=4cx$ 極小值。由拋物線掃描出來的馬鞍型拋物曲面，如圖 5 所示。

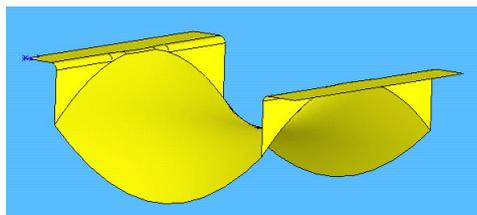


圖 5 馬鞍型拋物曲面

並依照田口實驗方法 $L_9(3^3)$ 直交表上之數據設定加工參數，利用 MasterCAM 轉換為 NC 碼，傳輸到綜合加工機進行切削加工，實作出九塊曲面工件成品。

2. CMM 量測

本實驗採用的 CMM 其電腦軟體是以法國 Metrolog XG3 處理運算其數據，可計算出工件細部的尺寸，精度可達到 0.001mm，因本實驗工件屬於具有規律的拋物曲面，曲率變化較小，所以量測時將整個曲面投影到平面上，直接在平面上依照各採樣法則規劃採樣點位置。測量時，首先在量測前完成 CMM 的校正及設定。本研究所使用接觸式 CMM 的軟體系統 Metrolog XG3 中的曲面輪廓度亦是以最小平方方法來評估圓錐、球或其他曲面的形

狀誤差；也就是 CMM 以所得到的點資料形成一個曲面，並計算此曲面最遠的垂直距離，而形狀誤差即是此距離的兩倍，隨之定義與最小平方曲面兩邊相同的形狀，如圖 6。

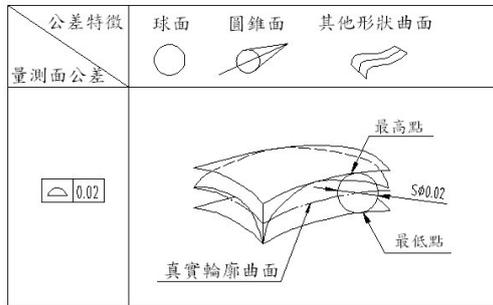


圖 6 Metrolog XG3 中的曲面輪廓度誤差

九塊工件分別以 HSS10 採樣位置加以量測並取得點資料，經由 Metrolog XG3 軟體自動補正計算處理後，曲面輪廓度值如表 2，這些曲面輪廓度值將作為田口法尋求最後加工參數依據。

表 2 曲面切削輪廓度值

工件編號	主軸轉速 rpm	銑削速率 m/min	每轉進刀 mm/rev	第一次 Hss10 曲面輪廓度 mm	第二次 Hss10 曲面輪廓度 mm
1	3500	330	0.05	0.104	0.086
2	3500	380	0.1	0.091	0.125
3	3500	430	0.15	0.062	0.070
4	4000	330	0.1	0.068	0.063
5	4000	380	0.15	0.067	0.074
6	4000	430	0.05	0.070	0.072
7	4500	330	0.15	0.048	0.054
8	4500	380	0.05	0.048	0.049
9	4500	430	0.1	0.060	0.062

3. 求取最後加工參數

以表 2 中第一次和第二次 HSS10 曲面輪廓度之平均數為田口法實驗值，利用曲面切削田口法程式求得一組最後加工的數據。曲面切削 S/N 比回應圖，如圖 7。曲面切削之變異數分析，如表 3。最後所求出的加工參數，如表 4。

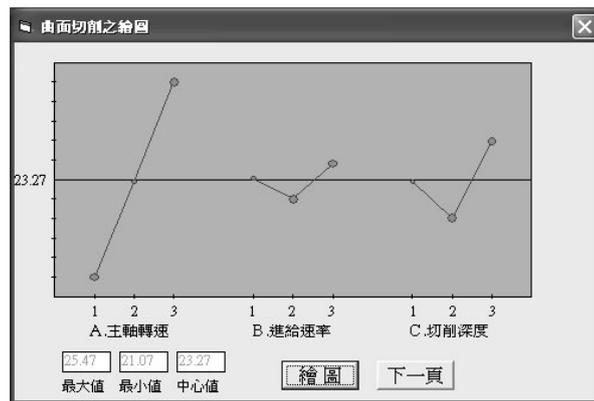


圖 7 曲面切削 S/N 比回應圖

表 3 曲面切削之變異分析

因素	f 自由度	S 變動	V 變異	S' 純變動	ρ 貢獻率%
A. 主軸轉速	2	29.04	14.519	24.87	59.38
B. 進給速率	0	0	0	0	0
C. 切削深度	2	4.5	2.23	0.33	0.78
e	4	8.34	2.085	16.68	39.82
Te	8	41.88			
CF		4867.38			

表 4 曲面切削之最後結果的加工數據

因素	最後結果
A. 主軸轉速	4500
B. 進給速率	430
C. 切削深度	0.15

表 5 最後結果加工條件下曲面輪廓度值

工件編號	主軸轉速 rpm	銑削速率 m/min	每轉進刀 mm/rev	第一次 Hss10 曲面輪廓度 mm	第二次 Hss10 曲面輪廓度 mm
10	4500	430	0.15	0.040	0.038

由變異分析表中，可以得知影響馬鞍型拋物曲面切削加工過程中，以主軸轉速的因素最為主效應 (Main Effect)，對整個實驗影響較大，當要改善品質時對針對主軸轉速改變，較有提升的效果，其貢獻率高達 59.38%。進給速率純變動為零，故此因子忽略不計，其相關值併入誤差純變動中。

因實驗工件編號 1、2 兩次測量所得的曲面輪廓度誤差值較大，為了更周嚴探討，若將兩工件皆以最大曲面輪廓度 0.104mm、0.125mm 為實驗值時，將發現主軸轉速貢獻率降為 56.48%、進給速率仍然為零、切削深度貢獻率上升為 1.22%。若將兩工件皆以最小曲面輪廓度 0.086mm、0.091mm 為實驗值時，發現主軸轉速貢獻率上升為 64.96%、進給速率及切削深度貢獻率為零。最後結果的加工數據仍然維持不變。

以田口法程式求得一組最後結果的加工數據，其餘加工參數皆不變，再切削出原尺寸的曲面工件，當作 CAM 加工實驗驗證的對象。經同樣的量測程序得到最後加工條件下曲面量測點座標。最後加工條件下曲面輪廓度值，如表 5。由最後結果加工條件下曲面輪廓度值可以證明：本論文在馬鞍型拋物曲面切削加工中，以主軸轉速 4500rpm、銑削速率 430m/min、切削深度 0.15mm/rev 的加工條件之下，可以得到更精確的曲面輪廓度。

3. 結論

綜合本文之研究內容，可以歸納出下列成果：

1. 由目前大部分切削文獻中以探討影響切削的因素為主。本論文藉由田口法切削實驗可以得知影響馬鞍型拋物曲面切削加工過程中，以主軸轉速的因素最為顯著，貢獻率高達 59.38%。

2. 由文獻中目前對於曲面的量測的研究，大都只限於圓、球或錐體物件的探討。而本文則針對同時具有凹凸規律特徵的馬鞍型拋物曲面量測做探討，將曲面量測技術再往前跨出一步。

3. 在使用 CAD 軟體來建構曲面模型時，必須選擇有足夠功能的 CAD 軟體，以應付在不同軟體檔案格式轉檔過程中，避免複雜的曲面發生破面的情況，及 CAM 刀具路徑轉折處需要依曲率方式延伸的功能，以得到平順的刀具路徑，才能滿足使用者的基本需求，若 CAD 軟體功能不強，或使用者不熟悉，則 CAM 程式製作的效率將會受到影響。

4.在 CAM 製造時，首先夾具與工件的垂直度與水平度等基準面定位是加工過程的一切基礎，往往由於細微的誤差會造成全部必須重新製作，浪費很多時間與精神，且在使用雙向或單向走刀加工方式時，需要考慮機台的動態特性，而不只是單純的走刀方式，才可避免過切。

5.在購買 CAM 軟體時需將 NURBS 及控制器特殊指令包含於後處理器在中，當使用 NURBS 功能在無稜線要求且弧度需平順的工件時，可以縮小程式，並使曲面圓弧化，同時保持較高的切削速度。

以上具體的研究成果期盼能提供給職業教育學界，往後在有時間限制的加工與量測實習課程教學過程中有所依據，提高實習課程的效益。不論 CAD/CAM /CMM 軟體如何更新，機台及刀具如何進步，使用者永遠是技術的核心。如何正確地了解軟體與機台，配合實際的加工經驗選擇加工條件，熟習的量具使用，是使用者必須不斷努力學習的課題，也是技職教育中培養機械工業基礎人才的目標之一。

4. 致謝

在實驗過程中，感謝高雄高工機械科與瑞利公司提供 CAM/CMM 設備及指導。

5. 參考文獻

- [1] 曾彥羲，田口方法應用於高速CNC銑削加工製程之最佳參數設計，國立高雄第一科技大學，碩士論文，高雄，2003.
- [2] 莊信源，類神經模糊系統與遺傳演算法在加工參數最佳化之應用，國立台灣海洋大學，碩士論文，台北，2000.
- [3] J. A. Cabrera, A. Simon and M. Prado, "Optimal Synthesis of Mechanisms with Genetic Algorithms," Mechanism and Machine Theory, Vol. 37, pp. 1165-1177, 2002.
- [4] G. Lee , J. Mou, and Y. Shen, " Sampling Strategy Design for Dimensional Measurement of Geometric Features Using Coordinate Measuring Machine," Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 37, No. 7, pp.917-934 , 1997.
- [5] 陳崧景，三次元量測軟體發展，國立中央大學，碩士論文，台北，2000.
- [6] 許裕隆，基因演算法應用於三次元座標量測儀之量測路徑選擇規劃，朝陽科技大學，碩士論文，台中，2001.
- [7] 田口玄一著，陳耀茂譯，田口統計解析法，五南圖書出版社，2003.
- [8] 翁漢甫，吳乾琦，許正治，"奈米三維形貌量測系統研究分析"，量測資訊，第 108 期，2006.
- [9] 江育民，三次元量測於逆向工程與自動化檢驗之系統發展，國立清華大學，博士論文，新竹，1997.

- [10]G. Lee, J. Mou, and Y. Shen, “ Sampling Strategy Design for Dimensional Measurement of Geometric Features Using Coordinate Measuring Machine,” Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 37, No. 7, pp.917-934, 1997.
- [11]J. R. Kalganmam, and U. M. Diwekar, “An Efficient Sampling Technique for Off-Line Quality Control ,” Technometrics, Vol. 39, No. 3, pp.308, 1997.
- [12]日本不二越株式會社, 銑刀型錄, 2003.