

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

子計畫三：彈性量測與逆向工程系統

Flexible Measurement and Reverse Engineering

計畫編號：NSC 89-2218-E-002-050

執行期限：89/08/01~90/07/31

主持人：范光照 fan@ccms.ntu.edu.tw

執行單位：國立台灣大學機械工程學系

一、中文摘要

本計畫為國科會整合型研究總計畫「智慧型檢測與逆向工程系統」子計畫三「彈性量測與逆向工程系統」，本計畫第三年度目標在於完成第四軸加工系統。

本計畫以三軸工具機架裝精密旋轉台及雷射掃描系統組成一逆向工程快速加工中心，並以電腦輔助製造系統製造（CAM）系統模組重建掃描表面及產生對應之工具機數值控制（NC）程式。為確保生產精密度，對工具機之線性位移及重覆性之精密度以及旋轉台之旋轉角度精密度實施校正。為增加工具機之研磨加工功能，研究中更研發一研磨系統，將因主軸旋轉誤差、熱膨脹、以及自發性振動而產生之加工誤差清除，以提升工件尺寸及表面精度，最後以切削測試來確認所研發系統之效率。

最後將三軸 NC spline 路徑精細化加工程式及點群資料以遠距 Internet 傳輸。
關鍵詞：逆向工程、四軸製造系統、CAD/CAM

Flexible Measurement and Reverse Engineering (3/3)

Abstract

This subproject “Flexible Measurement and Reverse Engineering” is one of the joint research projects entitled “Intelligent

Inspection and Reverse Engineering”. In this year, a four axes fabrication system had been developed.

A three-axis machining center equipped with a precision rotary table was integrated with a laser scanning system to form a reverse engineering rapid fabrication cell. A CAM modulus was used to reconstruct the scanned surface and generate the corresponding NC code. To ensure production quality, the linear displacement accuracy and repeatability of the machining center as well as the angular displacement accuracy of the rotary table were calibrated. An integrated grinding module was developed to elevate the grinding capability of the machining center by reducing the potential machining error results from spindle run out, thermal related expansion, and regenerative chattering. Thus, the workpiece surface finish can be significant improved. The developed system was validated with cutting test.

Finally, the surface merge technique will be applied to construct the entire 3D profile to very fine resolution, and the entire profile data had been transferred via Internet.

Keywords: Reverse Engineering, Four axes fabrication system, CAD/CAM

二、計畫緣起與目的

逆向工程技術的發展，長久以來一直是個令人們感興趣的課題，而逆向工程技術的應用，更可以使我們在最短的時間內完成產品原型的製作，若是使用在模具製造上，更可以達到量產化的目的，對於產業的競爭力著實有著很大的助益。伴隨著人們生活品質的提升，產品的需求逐漸趨向流行及個性化，市場的供需亦被消費者的好惡深深地影響著，供應者疲於奔命，被迫不斷推陳出新，為的就是要掌握潮流的脈動，迎合大眾的口味；在網路時代降臨，百家爭鳴，創意起飛的同時，商品需求趨向小量多樣的時代亦宣告來臨。正所謂一寸光陰一寸金，逆向工程亦逃不過時代的洪流，勢必要朝快速化及多元化發展，除了要兼顧速度與精度，產品的製作亦是刻不容緩。而近年來國內外相關的研究不斷，於逆向工程上有：將量測資料點以 least squares fitting 方式產生 B-spline 曲線及曲面[1]。由雷射掃描產生加工路徑，以雷射掃描得到的量測點產生 NURB 曲面[2]。於加工路徑產生及誤差判斷之研究有：整合型模具電腦輔助製造系統[3]。以 Z-map 實體模型以及 Swept-volume 用於加工模擬[4]。於曲面形狀誤差補償及表面光製的論文有：將六軸環形的力量感測器裝置在研磨頭上，利用力量感測器本身的適應控制及迴授，在 CNC 加工機上模擬人工定力研磨的情形[5]。建立模具加工的自動化系統的基本架構，以 CAD/CAM 系統設計模具曲面，配合光學量測系統作加工誤差分析，並用控制面 (Control Surface) 的方式產生下一次補償加工的路徑，並在 CNC 的工具機台上加裝高速電動磨頭作為每次補償加工的切削刀具，以反覆量測及補償加工

的方式來提高模具曲面的精度[6]。設計出雙軸迴轉式的研磨主軸(Dual-axis micro-grinding tool)，並將其加裝在 CNC 工具機的主軸上，經實驗結果顯示，經研磨後之模具表面粗糙度可低於 $3\mu\text{m Rz}$ [7]。

綜觀歷年來的研究與逆向工程技術產品原型的製作需求，本研究擬利用已成熟發展之三軸電腦數值控制工具機 (CNC) 做為研究的基礎，借重工具機電腦數值控制的高精密度，配合實驗室發展之雷射非接觸式快速掃描系統，期望能在三軸電腦數值控制工具機上，建立一可加工由雷射非接觸式快速掃描系統所量測得之 360 度三維點群資料之四軸加工系統，並冀望能將工具機上快速輪磨系統與四軸加工系統加以整合，進而完成量測工件之表面精製作業。

而於進行快速的原形製作，必須要有 CAM 的軟體，因此開發一套四軸加工的 CAM 軟體則是本計畫完成逆向工程整合的最終目的。而現有市面上的 CAD/CAM 軟體動則數十萬或上百萬元，本計畫擬發展 PC 級三軸及四軸的 CAM 軟體，並將現有的三軸工具機擴增功能至四軸來應用，使前項的量測結果可立即原形加工出來。在需五軸加工的外形，則經網路傳輸至成大及南澳大，由他們已有的五軸加工機來發展五軸的 CAM 軟體，以達到遠距合作資源互享的功能。

三、研究方法與研究結果

本計畫第三年度包含下列項目：

1. 四軸加工系統的建立：

本研究使用 RS-232 介面做為電腦與控制器之間的運動指令 (NC Code) 傳輸介面。如圖 1 所示：以個人電腦為主體，將 PC 之 RS-232 端與綜合加工機

(CNC) 和 HAAS 精密切度盤連線，並將 NC Code 給予特殊之編碼；當 PC 以 DNC 的方式，由 RS-232 將運動指令下達給綜合加工機時，程式便檢查每一筆即將送出的 NC Code 資料；當程式檢查到特殊的編碼時，便會立即暫停對綜合加工機的資料傳輸，同時將資料傳輸的接收權切換至 HAAS 精密切度盤（第四軸），而此時第四軸便依照此特殊編碼所指定的角度旋轉，待轉動至定位後，再將資料傳輸的接收權移轉回等待並暫停中的綜合加工機，綜合加工機便繼續接收 NC Code 並執行所接收之運動指令；如此便完成一個 3.5 軸加工的動作。

2. 輪磨系統之建立：

本研究利用一自行設計之夾治具，將市售普遍使用於模具修整之手持研磨器，利用夾治具加裝於綜合加工中心主軸上來進行自動化輪磨加工的作業（如圖 2 所示）。由此可知，夾治具本身的設計以及手持研磨器的性質將直接影響到加工後工件的品質。

在機上輪磨系統建立後，曲面的高速輪磨便是本研究的最終目的。藉由馬鞍型自由曲面的加工，針對同一鋼材 (S50C) 進行切削及輪磨加工，並給予相同之進給率 (1000mm/min)、Cross Feed(0.01mm) 及切深 (200 μ m)，且在最後的一道加工皆施以交錯式路徑。銑削時綜合加工中心主軸以高轉速運轉 (6000rpm) 下的球銑刀實驗；而輪磨則以手持研磨器夾持鎢鋼滾磨刀，並加裝於綜合加工中心主軸之上，輪磨頭以 60000rpm 進行高速輪磨並針對切削後的工件表面粗糙度以 X 及 Y 兩個方向的量測值進行評估。實驗數據如表 1 所示：

3. 雷射掃瞄資料處理及 3.5 軸加工

由於一般雷射掃瞄影像掃瞄的資料點都非常的龐大，藉著重新建構曲面，可以利用少量的曲面控制點來代表大量的

資料點，大量的減少影像掃瞄資料量儲存的空間；而重建的曲面更可以透過 CAD/CAM 的軟體產生刀具加工路徑。

本研究採取均勻 B-Spline 參數三次函數曲線來做為曲線的數學模式。圖 3 為 B-Spline Curve Fitting 後之貝多芬點群資料。

在實切削實驗中，我們選擇貝多芬石膏像作為逆向工程系統驗證之實驗對象（如圖 4）；貝多芬石膏像以其曲面複雜度高、曲率變化大為特色，不僅可以驗證資料處理中的 Least Square 濾波之適當與否，及 CAM Modulus 中對量測資料施以曲面重建 (B-Spline Curve Fitting) 後的效果，以及四軸加工輪磨系統曲面加工的精度外，更可以透過加工成品的再量測進而驗證非接觸式雷射掃瞄系統的曲面量測精度。在加工材料的選擇方面，本研究採用圓柱型母材，目的為節省材料及方便第四軸夾持；材料為聚合物 (PE)，取其易於切削，幾乎不會造成刀具的磨損，及價格低廉，適合於實驗階段使用。圖 5 即為貝多芬之加工成品。

4. 點群資料遠距傳送：

寬頻伺服的應用，已經成功地連接台大「精密量測實驗室」，簡稱 A 端，及台大「機器人實驗室」，簡稱 B 端，其連線示意圖如圖 6 所示。

此應用為完全由 A 端來操控 B 端的機器手臂及應用軟體，並且進行物體 (招財貓) 的 3D 掃瞄量測 (圖 7)。在兩端連上線後，便啟動 T.120 通訊協定開始資料會議的進行，並由 B 端開啟 Application Sharing 將其應用軟體分享給 A 端，如此一來，使可由 A 端來操控 B 端之硬體及軟體，待機器手臂轉完一圈後，便可得到物體的 3D 量測資料點，並且將 B 端所量得的資料傳回 A 端，由 A

端利用 Digipoly™ 進行資料的處理 (圖 8), 如: 平均濾波、高斯濾波、資料點縮減、錯誤量測點刪除、疊合……等。

因此, 利用寬頻伺服可在本端使用遠端的儀器設備, 就如在現場操控一般。未來可擴展至遠距維修, 或是利用在危險地區的機器操控, 以維護人員的安全。

四、結論與討論

本計畫憑藉著四軸加工系統的建立, 已有能力將經由雷射掃瞄之 360 度三維工件予以重現; 配合機上輪磨系統的應用, 主軸因處於靜止不動的狀態, 故我們可自動避免許多因工具機主軸轉動而產生的誤差 (如機台剛性不足所造成的震動, 熱誤差等), 有利於改善曲面的表面精度及粗糙度。

而藉由個人電腦中普遍的 RS-232C 介面, 來作為四軸加工系統的主體, 以及透過簡單的夾具設計來達成曲面高速輪磨的目的, 對於降低設備成本及系統的通用性有很大的助益。

五、參考文獻

1. Ma, Weiin and Jean-Pierre Kurth, 1995, "Parameterization of Randomly Measured Points for Least Squares Fitting of B-Spline Curves and Surfaces," *Computer-Aided Design*, Vol. 27, No. 9, pp. 663-675.
2. Lai, Jiing-Yih, Hua-Shing Chen, and Weei-Bin Lai, 1995, "NC Cutting-Path Generation from Laser-scan Measurement Data," *Journal of Chinese Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 245-255.
3. Choi, B. K., Y. C. Chung, J. W. Park, and D. H. Kim, 1994, "Unified CAM

System Architecture for Die and Mold Manufacturing," *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 3, pp. 235-243.

4. Oliver, J. H. and E. D. Goodman, 1990, "Direct Dimensional NC Verification," *Computer-Aided Design*, Vol. 22, No. 1, pp.3-10.
5. Hatamura, Y., T. Nagao, M. Mitsuishi, and H. Tanaka, 1989, "Development of a Force Controlled Automatic Grinding System for Actual NC Machining Center," *Annals of the CIRP*, Vol. 38, No. 1, pp. 343-346.
6. Dinaner, W. R., N. A. Duffie and M. L. Philpott, 1994, "Error Compensation Algorithms for Sculptured Surface Production," *ASME Transactions on Journal of Engineering For Industry*, Vol. 116, No. 2, pp. 144-152.
7. Miyoshi, Takashi, 1996, "Development of a Special Grinding Tool for Finishing the Free-Form Metal Surface of Mold Cavity," *Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 307-320.

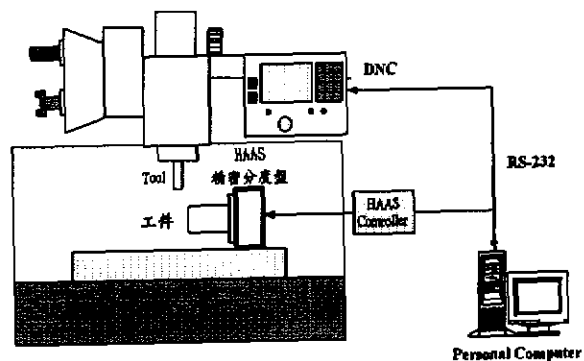


圖 1 四軸加工系統連線圖

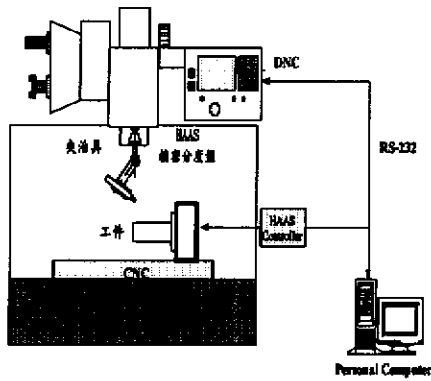


圖 2 輪磨系統架構圖



圖 3 B-Spline Curve Fitting 後之貝多芬點群資料。



圖 4 貝多芬石膏像掃瞄資料圖



圖 5 貝多芬加工成品圖

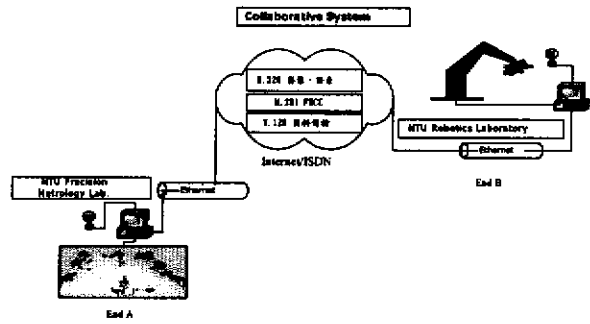


圖 6 台大兩地連線圖



圖 7 遠端操控過程圖--機器手臂轉動量測招財貓

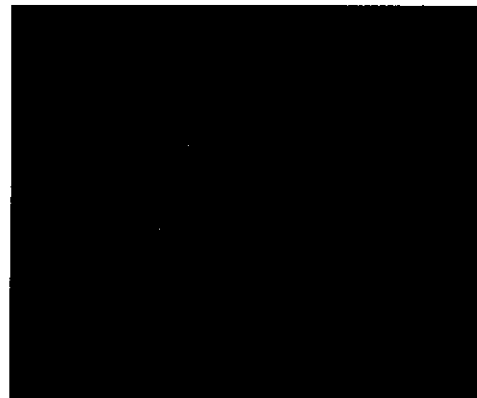


圖 8 量測結果—前視圖

表 1 銑削後之馬鞍面表面粗糙度

	沿 x 方向量測值	沿 y 方向量測值
Ra μm	2.20	2.54
Rq μm	2.90	2.96
Rz μm	8.6	9.2
Rt μm	12.0	12.5
Ry μm	12.0	10.8
Sm μm	134	192