

逆向工程中複合曲面的拼疊法則的研究與應用

The Investigation and Application of Registration and Alignment of Surface Patches for Reverse Engineering

計畫編號：NSC88-2212-E-009-030

執行期限：87/8/1~88/7/31

主持人：鄭璧瑩 副教授

pycheng@cc.nctu.edu.tw

國立交通大學機械工程學系

摘要

本研究首先探討無框式器械臂量測儀(文中簡稱量測儀)相關機構參數的分析與量測方法,研究中規劃設計量測實驗,進行機構設計參數修正補償校正,使重現性等精度改善。此外,本研究透過量測儀做曲面的量測,也針對曲面間的特徵比對發展解析程式,並應用於複合曲面的拼疊,在輔助量測儀在逆向工程中複合曲面的建構有實質的幫助。

關鍵詞：無框式、重現性、曲面拼疊

Abstract

In this study, frameless arm type measurement device is adopted as 3D coordinates locator. Thus, the evaluation and improvement method of the proposed device becomes one of the major topics in the project. In this topic, methodology establishment and experimental device implement are fulfilled. The kinematics parameters of the device are re-corrected. As viewing from the results, the repeatability and accuracy of the device are improved.

The second topic is to investigate the registration and alignment algorithm of two surface patches. The feature recognition and registration of surfaces are also demonstrated based on the minimal surface patch error criteria proposed by this research.

Keywords: frameless, repeatability, surface patch registration

計畫緣由及目的

無框式器械臂的定位精度與重現性是影響其工作品質非常重要的因素[1,2]。影響定位誤差的因素,有來自控制系統誤差,電位計或編碼器的誤差、機構幾何尺寸誤差、裝配軸承搖晃、偏心等[3,4]。動態方面則由重心配置不佳、軸心偏置量等因素在某些特定區間容易造成晃動與不穩定情況[5,6]。

機械桿臂組裝後大都是固定不能輕易調整,也不易測量,惟若在組裝前確實調整其硬體裝置,或組裝後精確量出各幾何參數尺寸及針對機

械臂內建的軟體幾何參數做補償與校正,是提升機械臂精度直接且十分有效的方式,因此,本研究規劃設計量測實驗設備與系統,採取直接量取組裝後各機構幾何參數的實際值的方式,做機構設計參數修正,取代一般所採用的設計圖尺寸值,以軟體補償校正方式,使重現性等精度可以更為改善。

研究過程中使用 JOEY 繪圖函數庫實作一套應用軟體,使其可動態手動或自動量測點資料,並互動式地觀查所量測的點資料及點資料所成的曲面,所實作的介面軟體可動態地選取欲比對的點資料,欲比對的點資料所形成的曲面將成為比對曲面,如此可彈性的在電腦上工作,相當方便。

研究方法

無框式器械臂

本研究選用的無框式量測系統,量測儀如同一機械手臂,由鋁質的桿件配合六個旋轉軸組成。旋轉軸內皆安裝電位計 (potentiometer),以手動方式將量測臂末端接觸點移至待測點時,電位計其電壓值透過經由控制盒收集經由類比數位 (A/D) 轉換介面卡轉換,由程式計算成各旋轉軸角度與一相對於量測手臂原點的座標值。

三次元雷射追蹤量測儀

雷射追蹤量測儀可用來量測三度空間運動物體的軌跡,當反射鏡固定在運動之物體上時,所得的數據資料,即是該物體的運動軌跡。

輔助量測工具:

1. 反射鏡球窩與輔助固定座

雷射追蹤儀其量測性能與敏感性高,在量測時以球窩輔助固定在量測點上,可避免人為疲勞及抖動的量測誤差因素。

2. 量測標準塊

以量測臂探頭量測參考距離點,作量測相對距離準確度標定使用。

量測儀原理

器械臂式三次元量測儀其量測原理可運用機器手臂手端位置、方位與各關節軸之間的相互關係，以機器手臂運動學來描述。當機器手臂的座標轉換是相對於一固定參考座標系，並以轉換矩陣 Z 來表示，且手臂末端有裝設一工具以座標 E 來描述，則工具末端相對於固定座標系的方向及位置可由

$$X = ZT_N E$$

來求得，其中 X 、 Z 、 T 、 E 皆為 4×4 正交矩陣。 X 的表示方式為 n 、 o 、 a 代表手臂末端工具上的座標系相對於固定座標系的方向， p 代表其位置。代入各連桿參數後求得轉換矩陣中的 P 向量，即可量測所得座標值。

空間軌跡法

空間軌跡法應用軸轉動時量測移動連桿上某點的運動軌跡，計算出軸線的方向。找出每個旋轉軸線 Z 的方向後，將整個手臂座標系統建立依照 D-H 模型定義求出手臂運動學參數。由幾何學原理，空間中三個點可作為形成一個圓的條件，三點為軸旋轉時連桿的運動軌跡點，設為 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 及 $P_3(x_3, y_3, z_3)$ ，由此三點所形成的圓，可找出此旋轉軸的軸線及方向，其中各點座標的量測是採用三次元雷射量測儀加以精密量測追蹤。

當已知軸線方向及通過點時， Z_i 旋轉軸的直線參數式即可求得，將所有旋轉軸（以下稱 Joint）線找出後，再依序建立手臂座標系。由 D-H 模型的定義，當手臂的座標系建立之後，只需運用兩軸線的夾角及公垂線長度的計算，即可找出此手臂的機構連桿參數。

量測儀手端定位誤差

由機器手臂運動學原理，在空間中的運動準確度依賴每一組關節的 4 個連桿參數的正確性。對於一個 N 個自由度的機器手臂於末端的位置和方向矩陣，以基底參考座標系描述時，若考慮 $4N$ 個幾何誤差參數時，可表示成

$$\begin{aligned} T_N + dT_N &= (A_1 + dA_1) * (A_2 + dA_2) * \dots * (A_N + dA_N) \\ &= T_N + \sum_{i=1}^N (A_1 * A_2 * \dots * A_{i-1} dA_i * A_{i+1} * \dots * A_N) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 dT_N 表示機器手端由於 $4N$ 個運動參數誤所形成的總微變量。其 6 個線性方程式可以用矩陣方程式簡單地表示成

$$\{DX\} = [J]\{Dq\} \quad (2)$$

其中

$$\{DX\} = [dx^N, dy^N, dz^N, \delta x^N, \delta y^N, \delta z^N]^T_{6 \times 1}$$

$$\{Dq\} = [\Delta\theta_1, \Delta d_1, \Delta a_1, \Delta\alpha_1, \dots, \Delta\theta_N, \Delta d_N, \Delta a_N, \Delta\alpha_N]^T_{4N \times 1}$$

其中 $[J]$ 一般稱做節可賓(Jacobian)矩陣，是一個 $6 \times 4N$ 矩陣，代表機械手臂末端其卡氏座標系微變量和 $4N$ 個軸連桿參數微變量之間關係。

曲面誤差比對

研究過程中使用 JOEY 繪圖函數庫實作一套應用軟體，使其可動態手動或自動量測點資料，並互動式地觀查所量測的點資料及點資料所成的曲面，所實作的介面軟體可動態地選取欲比對的點資料，欲比對的點資料所形成的曲面將成為比對曲面，如此可彈性的在電腦上工作，相當方便。

比對的建構過程有以下的一些步驟：

步驟一：利用雷射追蹤儀或無框式器械臂量測曲面上的點座標。

步驟二：將點群資料三角化 (Triangular)，並建構三角 BEZIER 曲片。

步驟三：若為雷射追蹤儀所量測的點資料，三角網格則須沿法線方向偏移反射器的半徑距離。

步驟四：等間距化。將 Y-Z 平面或 X-Z 平面對近似三角曲面做切割，以求得每一條曲線的 X 值和 Y 值保持一定，或依極座標的方式在 Θ 、 Φ 的方向作等間距化。

使用上面的步驟建構比對曲面和主要曲面，並等間距化此兩曲面。

步驟五：以 B-SPLINE 數學模型建構主要曲面，以利最佳化比對。

步驟六：使用最佳化方法將相關曲面特徵曲面貼合起來以形成 3-D 的模型。

電腦曲面模型與量測誤差比對

曲面相似最佳化設計分析

藉由曲面形狀誤差最佳化之分析，我們可以將兩曲面”相似”之模糊的定義量化，將其轉換為目標函數 (Objective Function) 之函數值，並得到其設計變數，而得知二個不同的座標系所量得的資料的座標轉換。

最佳化目標函數之建立

首先計算出此相比對的兩曲面之形心

位置，將二曲面以形心為原點的區域座標系來描述，這有一些好處可降低計算之數值且增加計算上之速度。其次，我們將主要曲面座標軸固定不動，只對比對曲面做平移、旋轉。

在本研究比對曲面點資料(可以是直角座標或極座標)經平移、旋轉後各比對曲面的點資料至主要曲面之垂直距離定義為曲面形狀誤差，所以取得最佳化曲面形狀誤差時，目標函數即為比對曲面經平移、旋轉各點資料至主要曲面之垂直距離的平方和。

最佳化的目標函數，寫成式 3 所示。 $g(x, y)$ 為主要曲面經 B-SPLINE 方法建構的自由曲面所計算出之投影點 Z 值，茲以極座標的方式表示為如下的式子：

$$\text{目標函數} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [R' - g(\theta', \phi')]_{ij}^2 \quad (3)$$

將曲面誤差總和值除以 n 個比對點，然後再取平方根值；如(式 4.4-5)。即可算出平均每點的誤差值。

$$\text{平均每點的誤差值} = \sqrt{\frac{Err}{n}} \quad (4)$$

實驗結果與討論

器械式量測儀精度改進

參數補償結果

本實驗採用空間軌跡法共量測並計算出修正後的連桿參數，並取代控制器原內定的連桿參數值，經量測比對後，各組連桿參數修正值如表 1 所示。本文以相對距離準確性精度，作為參數修正後精度是否提升的驗證依據。實驗結果參數校正過後相對距離量測的準確性在測試位置皆有改善 4 組結果，平均誤差的下降 0.5mm。如圖 1 所示。顯示直接就機構幾何參數精密量測修正即有明顯的精度改善。

幾何參數校正與量測偏差

本研究以校正後量測值為主，與校正前的量測值比較其位置偏差量，從偏差量分佈狀態找出較佳的工作區間，如圖 2 所示。圖中虛線是測試工作區間，將此工作區在量測儀左、右側及正前方位分別取一次，在區間內取 60 組量測姿勢，分別以設計內定值及校正過後之參數值代入系統讀出其量測座標值，計算每組偏差量繪出偏差值分佈圖。測試結果校正前後偏

差值分佈其共同的趨勢在量測儀伸展至較外側工作區時其偏差量較小，而在靠近量測儀手臂基座及上半部的工作區時則較大，因此建議選擇在偏差量較小的地方做量測應用。

座標量測儀重現性測試

茲將立體工作區間規劃成五層網格平面，以之做為重現性量測之檢驗區。測試結果在每個靠近座標儀基座工作區部分其重現性不理想，而在較中間區域的工作區其誤差較小且較分佈則較為平均。操控性與量測性能分析本文應用操控性定義，應用軟體模擬座標量測儀操控上的問題，將分析結果與實際量測結果做一討論。

曲面相似最佳化

測試範例一：(自由曲面貼合比對，等方向角間隔處理)

首先由滑鼠模型上所量測到的滑鼠曲面點資料輸入本實驗所開發的軟體中依下列的步驟進行最佳化比對。執行步驟簡介於後。

步驟一：使用量測儀測量比對曲面及主要曲面點資料。如圖 6。

步驟二：將主要曲面點資料讀入。如圖 7。

步驟三：將主要曲面點資料三角化。如圖 8。

步驟四：選取欲比對主要曲面點資料。

步驟五：在選單上選“Optimum”鈕並輸入欲比對的檔案名稱(上為主要曲面檔案名稱，下為比對曲面檔案名稱)。

步驟六：按下 OK 鈕作最佳化處理。

MOST 計算結果如下：

```
*** Cost function at optimum = 9.103518e+02
***
```

由結果得到的數據看來，平均每一點的誤差約為：

$$\sqrt{\frac{910.3518}{15852}} = 0.239846(\text{mm}/\text{每點})。$$

由前面所建的曲面模型可用來作為誤差的校正，其作為標準的曲面模型如圖 5 與圖 9 所示，取出某一曲面作為標準，所量測的點資料是以十字符號表示，由此可應用在複合曲面特徵曲面疊合誤差解析並做為複合曲面拼疊的法則。

三次元器械臂量測儀應用實例

產品藉由電腦輔助設計可事先模擬加工路徑節省時間及成本。在模擬前若物體實體模型已設計完成，可利用逆向工程量測其外型資料建立電腦模型。但一般量測工具，對複雜實體外型無法完整呈現。無框式三次元量測儀具有多自由度、靈活的量測姿勢，

因此本研究對無框式三次元量測儀在定位之功能外，對其建構實體電腦模型的功能做實際的示範。本研究中以一實體機車架為代表，將複雜形體的各區域曲面量測，建立各部份點群資料，再完成各曲面拼疊貼合，建構成具體的曲面模型。

使用電腦輔助設計軟體把量測儀量測的點資料經由讀檔、繪出建構模組的步驟如下：

- 1、讀入點資料並繪出量測點，如圖 10 所示。
- 2、將點以 B-spline 連結，構成車架外型的線架構，如圖 11 所示。
- 3、把線條以舉昇 (loft) 模型的方式建構成面，並將各面以縫合方式組合在一起構成實體模組，如圖 12 所示。

結論與成果

量測儀因為製造及組裝上的問題，使桿長與軸線偏移、夾角等參數設計值與實際值存在差量，常造成使用時精度不符理想。

本研究以空間軌跡法為主，配合參數量測實驗進行，以修正參數至較接近實際值為方法提高量測儀精度，經由相對距離準確度的測試，其誤差可由平均 $\pm 1.5\text{mm}$ 下降至 $\pm 1\text{mm}$ 左右。經由工作區間內重現性檢驗，與討論影響運動的奇異點狀況及操控性指數後，提出之建議是量測時宜避免靠近基座部分與避免在奇異點姿勢附近做量測。本研究並找出兩種改良結構之方法，與最佳量測姿勢，作為日後量測儀設計改良與使用之參考。量測儀以其多自由度、靈活的量測姿勢，配合本研究在精度及操控上之研究成果，將可以改善輔助器機械臂在應用上的精確度與穩定度，保障使用的安全。本研究所發展的曲面貼合誤差分析法則及最佳拼疊程式結合量測系統，可進行線上裝配校正補償的功效，值得汽機車裝配業參考。並在其他工業等應用逆向工程電腦模型的建立上提供助益。

參考文獻

1. Mooring, B.W. and Pack, T.P. "Determination and Specification of Robot Repeatability" Pro. IEEE International Conference Robotics and Automation, pp. 1017-1023, 1986
2. W. K. Veitschegger and C.H. Wu, "Robot accuracy analysis based on kinematics" IEEE J. Robotics Automation, Vol. RA-2 No.3, pp171-179, september 1986
3. 王景瑞, "精密定位用機械手機構參數 的評估與運動軌跡動態特性研究" 國立交通大學機械工程研究所碩士論文, 民國八十六年
4. 李松賢, 曾清秀 "機器人定位精度的校準" 國立中央大學機械工程所碩士論文, 民國八十二年

5. Yoshikawa U., "Manipulability of Robotic Mechanism" International J. of Robotics Research Vol.4 No.2 pp3-9. 1985
6. Aleksander Matuszok, "On Avoiding Singularities in Redundant Robot Kinematics" Robotica, Vol.13,

圖表彙整

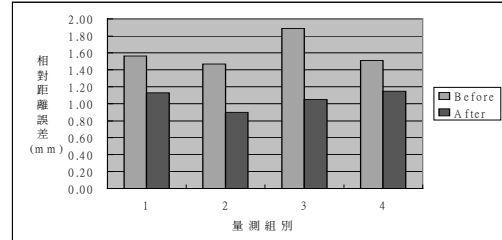


圖 1 相對距離量測誤差的改善結果

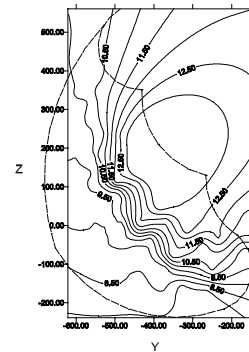


圖 2 量測儀左側測試區誤差偏差量分佈圖
單位:mm

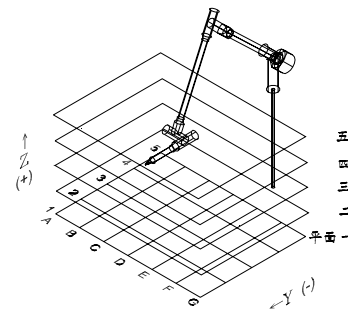


圖 3 重現性測試相關位置

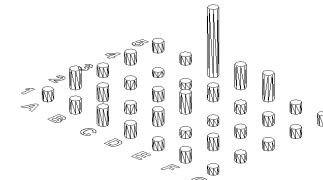


圖 4 重現性實驗檢測結果 (平面五) 單位 mm

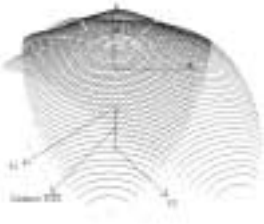


圖 5 比對之點資料投影至主要曲面點群



圖 10 曲面點群座標圖



圖 11 曲面線架構圖

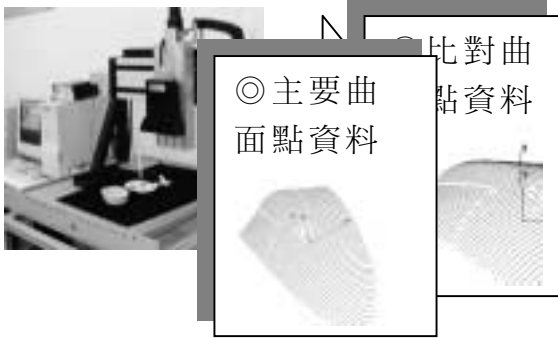


圖 6 使用鐳射三次元量測儀測量點資料



圖 12 實體模型圖

表 1 連桿參數修正值

參數修正值			
參數	$\Delta \alpha$	Δd	Δa
1	0	0	0
2	-0.087	0.122	-0.276
3	0.576	1.033	0.381
4	-0.324	0.594	0.217
5	-0.172	0.543	0.465
6	-0.178	0.42	0

角度單位:Degree 長度單位:mm



圖 7 將主要曲面點資料讀入

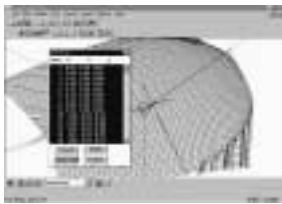


圖 8 將主要曲面點資料三角化並選取欲比對主要曲面點資料

表 2 重現性實驗檢測數據 (平面五) 單位 mm

5	± 0.4	± 0.35	± 5.78	± 0.95	± 1.09	± 0.39	± 0.43
4	± 0.46	± 0.21	± 0.27	± 0.59	± 0.38	± 0.41	± 0.38
3	± 0.4	± 0.37	± 0.44	± 0.82	± 0.28	± 0.39	± 0.35
2	± 0.77	± 0.59	± 0.37	± 0.61	± 0.3	± 0.53	± 0.34
1	± 0.43	± 0.55	± 0.72	± 0.55	± 0.39	± 0.48	± 0.29
	A	B	C	D	E	F	G

誌謝

本研究承蒙國科會計畫 NSC88-2212-E-009-030 贊助,謹此致謝。



圖 9 曲面模型誤差比對