

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## Probe-ball 量測系統應用於不同型式五軸工具機之研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2212-E-216-011-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：中華大學機械與航太工程研究所

計畫主持人：徐永源

計畫參與人員：王信舜 蔡其周

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 14 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

計畫編號：NSC 93-2212-E-216-011

執行期限：93 年 8 月 1 日至 94 年 7 月 31 日

主持人：徐永源 中華大學機械系

計畫參與人員：蔡其周 王信舜

## 1. 摘要

本研究主要成果是將 Probe-ball 量測系統所建立的五軸工具機誤差模型為基礎，完整實現五軸工具機的幾何誤差補償。藉由之前研究的誤差量測及誤差項鑑定結果，而初步建立完整的幾何誤差模型。本研究則接續成果而建立一新的五軸工具機誤差補償方法---拆解法(Decouple method)，其要點是指向誤差與線性運動軸的運動量無關，但轉動運動軸的運動量則與刀具端點位置有關，依此可個別先補償轉動軸再補償線性軸的補償量，亦即改變一般同時計算線性軸及轉動軸補償量的方法，拆解成個別計算據此建立補償方法，其模擬結果顯示此一方法相當有效。接著將補償機制實現於 CAM 系統的後處理器中，最後利用補償後之 NC 程式碼，以實機切削驗證誤差補償的效果，結果顯示此誤差補償機制，可有效補償五軸工具機的幾何誤差。

關鍵字：五軸工具機、誤差補償、幾何誤差、後處理器

## Abstract

Although the extra two rotary axes deliver the advantages of five-axis machining, the increasing kinematical complexity makes it difficult to measure the overall positioning errors and to find a suitable compensation method. Therefore, a new measurement device, the probe-ball, has been developed which can be used to measure the overall position errors of

five-axis machine tools directly. The errors can be estimated and compensated based on the measured overall positioning errors.

The purpose of this paper is to development a new error compensation method named decouple method for five-axis machine tools. Although the extra two rotary axes deliver the advantages of five-axis machining, the increasing kinematical complexity makes it difficult to measure the overall positioning errors and to find a suitable compensation method.

Based on the fully known error model of five-axis machine tools, a new error compensation function is developed in UG/postprocessor. According the results of experience, the new error compensation method has been proved.

Keywords: error compensation, five-axis machine tools

## 2. 前言

五軸加工越來越受到重視，其主要因素為五軸加工較三軸加工有額外兩個機構上的轉動自由度，在五軸同步運動控制下，刀具可對切削之自由曲面做最佳的方向配合。因此，五軸加工的優點包括有較高的切屑移除率、較佳的表面精度及可有效降低切削時間。

在工具機的精度改善方面，大部份的研究皆集中在三軸工具機之幾何誤差及熱變形對精度的影響[1,2]，利用其所建立的誤差模型，發展相關的誤差補償技術以改善 CNC 工

具機的精度[3]。

目前有數種量測裝置可量測工具機的幾何誤差，最常用且最有效率的量測裝置為 6D 雷射干涉儀[4]，該量具可同時量測線性運動軸上之 6 個自由度。另外，循圖量測儀(DBB)亦常用來檢驗線性運動軸的動態誤差[5]。

就五軸工具機的誤差補償技術方面，由於工件座標上的誤差必需由驅動工件的五個運動軸之機器座標上進行誤差補償，而五軸工具機的機器座標與工件座標間的關係為非線性，所以有必要對五軸工具機的誤差補償技術進行研究。Srivastava 等[6]發展五軸工具機誤差補償技術，即計算五軸工具機之五個運動軸運動至理想機器時應至的位置與指向時所需的運動量。Veldhuis 及 Elbestawi [7]則利用類神經網路以補償因溫度改變及五軸運動所導致的誤差。另外，Mahbubur 等[8]利用 Newton-Raphson 方法建立五軸工具機的位置誤差補償機制，並將其實現於後處理器中，以提升其五軸工具機的精度。

基於上述說明，近年來，Lei 及 Hsu[9]發展可直接量測五軸工具機總成誤差之探頭-球桿(Probe-ball) 量測裝置，可藉以評估五軸工具機的精度。而藉由探頭-球桿所量得數據及建構之探頭-球桿誤差模型，對於部份不可直接由量具量得之誤差項，即可由最小平方誤差估算法精確估算[10]。此時，誤差模型為已知，而完成五軸工具機控制器的 Jacobian 補償機制[11]，唯此一補償機制當轉動軸在特定的角度時無法有效得到適當的補償量，且其補償機制建構於開放式架構的五軸工具機控制器中，無法應用於一般封閉式的控制器中。因此，本文建立一新的補償方法，並將此一補償方法建構於 CAM 系統的後處理器，使其可應用於各式不同的控制器中。

### 3. 誤差模型的建立

應用 4x4 HTM[1]推導五軸工具機機器軸座標與工件座標間的關係，並以[10]中研究的 RRTTT 型的五軸工具機為研究對象(如圖 1 所示)，建立五軸工具機幾何誤差模型。

#### 3.1 工件座標系誤差模型

依五軸工具機的架構及圖 2 之座標設定，其  $r$  參考座標原點定義在機器 Z 軸歸原點(Home position)的位置上，則  $w$  工件座標相對

於  $r$  參考座標間的關係為：

$${}^rT_w = {}^rT_y {}^yT_x {}^xT_a {}^aT_c {}^cT_b {}^bT_{w_0} {}^{w_0}T_w \quad (1)$$

同理， $t$  刀具座標系相對於  $r$  參考座標系間的關係為：

$${}^rT_t = {}^rT_z {}^zT_s {}^sT_h {}^hT_t \quad (2)$$

則  $t$  刀具座標系相對  $w$  工件座標的關係可藉由下式得到：

$${}^wT_t = ({}^rT_w)^{-1} {}^rT_t \quad (3)$$

取  ${}^wT_t$  矩陣的第四行前三項，此三項分別代表刀具端點在工件座標系上的位置誤差量  $P_{e,w}$ ，如下式

$$P_{e,w} = {}^wT_t [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T = [\Delta X_w \ \Delta Y_w \ \Delta Z_w \ 1]^T \quad (4)$$

而刀具指向誤差  $O_{e,w}$  則可由下式表示

$$O_{e,w} = {}^wT_t [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T - {}^wT_{t,i} [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T = [\Delta I_w \ \Delta J_w \ \Delta K_w \ 0]^T \quad (5)$$

其中  ${}^wT_{t,i}$  矩陣為理想機器刀具座標系相對於工件座標系的轉換矩陣，可由原誤差模型之誤差項刪除得到。

#### 3.2 參考座標系誤差模型

將工件座標的位置誤差量以座標轉換方式將其轉換至參考座標系，即可得到參考座標系上的位置誤差量，如下式所示：

$$P_{e,r} = {}^rT_w P_{e,w} = [\Delta X_r \ \Delta Y_r \ \Delta Z_r \ 1]^T \quad (6)$$

因參考座標系與三線性運動軸幾近平行，在位置誤差為微量的前提下，各線性運動軸與參考座標系座標軸不平行誤差量可忽略不計。

#### 3.3 正轉換及逆轉換

五軸工具機進行正機構轉換較為容易且可得唯一解，相對的逆機構轉換其轉動軸位置會有兩個解。理想機器的五軸工具機正機構座標轉換可由矩陣  ${}^{w_0}T_{p,i}$  得到，藉由此一矩陣其任一機器軸座標的位置可得相應於工件座標的刀具位置  $P$  及指向  $O$ ，並可藉由以下兩個式子得到：

$$[P \ 1]^T = {}^{w_0}T_{t,i} [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (7)$$

$$[0 \ 0]^T = {}^{w_0}T_{t,i} [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T \quad (8)$$

完整的五軸工具機正機構座標轉換方程式為：

$$X_w = Z_m \sin(C_m) \sin(A_m) - Y_m \sin(C_m) \cos(A_m) - X_m \cos(C_m) - X_{w_0} \quad (9)$$

$$Y_w = Z_m \cos(C_m) \sin(A_m) - Y_m \cos(C_m) \cos(A_m) + X_m \sin(C_m) - Y_{w_0} \quad (10)$$

$$Z_w = Z_m \cos(A_m) + Y_m \sin(A_m) - Z_3 - Z_{w_0} \quad (11)$$

$$I_w = \sin(A_m) \sin(C_m) \quad (12)$$

$$J_w = \sin(A_m) \cos(C_m) \quad (13)$$

$$K_w = \cos(A_m) \quad (14)$$

其中  $X_m, Y_m, Z_m, A_m$  及  $C_m$  為各運動軸之伺服控制位置，且  $Z_m = Z_2 + Z_1 - Z_0 + L_t$ 。

逆轉換方程式可藉由正轉換方程式推導，其結果如下：

$$X_m = \cos(C_m)(X_w + X_{w_0}) + \sin(C_m)(Y_w + Y_{w_0}) \quad (15)$$

$$Y_m = \cos(A_m) \sin(C_m)(X_w + X_{w_0}) - \cos(A_m) \cos(C_m)(Y_w + Y_{w_0}) + \sin(A_m)(Z_w + Z_{w_0} + Z_3) \quad (16)$$

$$Z_m = \sin(A_m) \sin(C_m)(X_w + X_{w_0}) + \sin(A_m) \cos(C_m)(Y_w + Y_{w_0}) + \cos(A_m)(Z_w + Z_{w_0} + Z_3) \quad (17)$$

$$A_m = \cos^{-1}(K_w) \quad (18)$$

$$C_m = \tan^{-1} \left( \frac{I_w}{J_w} \right) \quad (19)$$

#### 4. 誤差補償方法

機器的誤差除組裝誤差外，尚有隨機器的運動位置不同所造成的定位誤差，這些誤差會造成在工件座標上工件誤差。因此，就誤差補償流程而言，應先知道機器軸座標的位置，再經由誤差模型估算在工件座標上刀具端點的位置及指向誤差，藉此推得在工件座標系的補償量。但要補償此一補償量，最終則需回到

機器軸座標的層面上驅動各機器運動軸，使其能補償相應於工件座標上的補償量。但由於五軸工具機的機器座標與工件座標間的關係為非線性，以下本文提出以下的補償方法。

#### 4.1 拆解法(Decouple method)誤差補償

從誤差模型中可知，刀具指向誤差與線性運動軸的運動量無關，而刀具指向誤差量也唯有驅動轉動軸方可進行指向誤差的補償；另外，轉動運動軸的運動量則與刀具端點位置有關，亦即，在不驅動線性軸只驅動轉動軸的前提下，因機器轉動軸的機構參數，仍會使刀具端點運動至另一位置上。

藉此，提出一新的五軸工具機誤差補償方法，稱之為拆解法(Decouple method)，其要點是將轉動軸及線性軸的補償量拆解後分別求出，即先補償轉動軸再補償線性軸的補償量。圖 3 說明此一補償技巧，其中 Pose A 及 Pose B 分別是理想機器與實際機器的刀具位置及指向，而刀具端點的誤差向量為  $V_a$ 。首先，將工件座標系上實際刀具指向  $(I_w, J_w, K_w)_e$  修正為理想刀具指向  $(I_w, J_w, K_w)_i$ ，此時機器運動至 Pose C，因為修正刀具指向需驅動轉動運動軸，卻同時因機器機構型式造成刀具端點位置的改變，而有  $V_e$  向量的發生，因此，刀具端點位置的誤差補償量，除了補償原誤差模型中位置誤差向量  $V_a$ ，需再補償因修正指向誤差而造成的誤差向量  $V_e$ ，如(18)式所示。

$$V_s = V_a + V_e \quad (20)$$

因此，此一方法的要點是先計算 A,C 旋轉軸的補償量，再將此一轉動軸的補償量所造成的三個線性軸向的運動量與原誤差模型中的三個線性運動軸的補償量相加，得到完整的刀具指向與位置誤差的補償量。此補償機制的步驟如下：

步驟一：計算 A 軸補償角

於式(14)中可知， $K_w$  是由 A 軸的轉動角度所決定。設  $K_w$  為理想機器的指向，而實際機器上有一指向誤差  $\Delta K_w$  而到達  $K_w^*$ 。為補償此一指向誤差可在 A 軸轉動軸上加一補償角  $A_{m,c}$ ，如式(19)所示。

$$K_w^* = \cos(A_m^*) \quad (21)$$

其中  $K_w^* = K_w + \Delta K_w$  及  $A_m^* = A_m + A_{m,c}$ ，則

$$A_{m,c} = \cos^{-1}(K_w^*) - A_m \quad (22)$$

步驟二：計算 C 軸補償角

同理，若在  $I_w$  及  $J_w$  指向上有指向誤差  $\Delta I_w$  及  $\Delta J_w$ ，為補償此兩個指向誤差可在 C 軸轉動軸上有一補償角  $C_{m,c}$ ，則由式(12)及(13)可得

$$I_w^* = \sin(A_m^*)\sin(C_m^*) \quad (23)$$

$$J_w^* = \sin(A_m^*)\cos(C_m^*) \quad (24)$$

其中  $I_w^* = I_w + \Delta I_w$ ， $J_w^* = J_w + \Delta J_w$  及  $C_m^* = C_m + C_{m,c}$  式(21)/(22)可得

$$C_{m,c} = \tan^{-1}(I_w^*/J_w^*) - C_m \quad (25)$$

步驟三：計算 A,C 軸補償角之線性移動量

因 A,C 軸補償角所造成的三線性運動軸的移動量，可由式(15)~(17)得到如下

$$\Delta X_{m,c} = \cos(C_m^*)(X_w + X_{w0}) + \sin(C_m^*)(Y_w + Y_{w0}) - X_m \quad (26)$$

$$\Delta Y_{m,c} = \cos(A_m^*)\sin(C_m^*)(X_w + X_{w0}) - \cos(A_m^*)\cos(C_m^*)(Y_w + Y_{w0}) + \sin(A_m^*)(Z_w + Z_{w0} + Z_3) - Y_m \quad (27)$$

$$\Delta Z_{m,c} = \sin(A_m^*)\sin(C_m^*)(X_w + X_{w0}) + \sin(A_m^*)\cos(C_m^*)(Y_w + Y_{w0}) + \cos(A_m^*)(Z_w + Z_{w0} + Z_3) - Z_m \quad (28)$$

步驟四：計算三個線性運動軸的總成補償量

$$X_{m,o} = \Delta X_{m,c} + \Delta X_r \quad (29)$$

$$Y_{m,o} = \Delta Y_{m,c} + \Delta Y_r \quad (30)$$

$$Z_{m,o} = \Delta Z_{m,c} + \Delta Z_r \quad (31)$$

## 4.2 誤差補償流程

將上述所建立的補償機制建立於 UG/CAM 的後處理器中，如圖 4 所示。應用其後處理器中的事件處理器(Event handler)取

得 CAM 系統刀具路徑的工件座標系刀具姿態向量(位置與指向)  $v_s$ ，並透過機構逆轉換公式將其轉換至機器軸位置向量  $u_s$ ，此時，可藉由補償系統中的幾何誤差模型估算出刀具姿態誤差向量  $dv$ ，再利用拆解法補償方法將此誤差量轉換至機器伺服控制軸的修正向量  $du$ ，進行誤差補償。

## 5. 實驗

利用後處理器所產生的具誤差補償 NC 程式碼，以控制機器運動軸位置完成誤差補償，接著則透過實際切削以驗證其誤差補償機制後處理器的誤差補償效果。

### 5.1 實驗方法

為能量測五軸工具機誤差補償前及誤差補償後的刀具位置及指向，本文設計如圖 5 所示的 path\_F 的孔銑削刀具路徑，此一刀具路徑是沿著半圓球面的表面螺旋上升，且其刀具指向皆指向球心，為能使補償前與補償後的機器切削加工條件一致，以消除因夾治具的安裝誤差並保持加工後的量測條件一致。因此將補償前及補償後的孔加工以間格方式安排在同一工件上。同時，應用高精度的球形端銑刀，進行定位孔的銑削加工，則加工後的孔中心位置為刀具端點位置，其孔的軸心則為刀具的指向，藉此檢測其補償效果。

由於本文所建立的是幾何誤差補償機制，因此，將其加工的切削速度以 10mm/min 低進給速度加工，圖 6 顯示進行此一加工路徑的加工情形。另外，為避免加工時因切削力造成的刀具撓曲並增加加工的精度，切削路徑上的所有孔皆以四個加工步驟完成，包括以 5mm 較小直徑的平端銑刀於球面上銑削出一小平面，以便使第二加工步驟的中心鑽進行精確的定位孔加工，而此中心鑽加工有助於第三步驟的 7mm 球端銑刀進行中加工，最後則用 8mm 的球端銑刀完成精加工，圖 7 為加工完成的工件。接著利用三次元量測儀測定刀具位置與指向，比較補償前與補償後之五軸工具機的幾何誤差改善效果。

### 5.2 實驗結果

圖 8 為銑削孔的位置與指向的量測結

果，其實際機器的位置誤差量以 X 軸為例，介於  $\pm 200\mu\text{m}$  間，補償後誤差則介於  $\pm 20\mu\text{m}$  間，另在刀具軸向誤差量方面以 I 方向為例，原誤差介於  $-0.02$  度至  $0.04$  度間，施以誤差補償後，可有效降至  $\pm 0.005$  度間，有效改善誤差。

## 6. 結論

本文建立一新的五軸工具機誤差補償機制，並將其建構於後處理器中，此一補償機制透過實驗的驗證，確實有效的補償五軸工具機之幾何誤差。工業界可直接引用此一研究成果，有效提升五軸工具機的加工精度。

## 參考文獻

1. A.H. Slocum, Precision Machine Design, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1992.
2. V.S.B. Kiridena, P.M. Ferreira, Kinematic modeling of quasistatic errors of three-axis machining centers, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.34(1), pp. 85-100, 1994.
3. P.M. Ferreira, C.R. Liu, A method for estimating and compensating quasistatic errors of machine tools, Journal of Engineering for Industry, Vol.115, pp. 149-157, 1993.
4. K. Lau, Q. Ma, X. Chu, Y. Liu and S. Olson, An advanced 6-degree-of-freedom laser system for quick CNC machine and CMM error mapping and compensation, Automated Precision, Inc. Gaithersburg, MD 20879 U.S.A.
5. J.B. Bryan, A simple method for testing measuring machines and machine tools, part I: Principle and applications, Precision Engineering, Vol.4(2), pp. 61-69, 1982.
6. A.K. Srivastava, S.C. Veldhuis, M.A. Elbestawit, Modelling geometric and thermal errors in a five-axis CNC machine tool, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.35(9), pp. 1321-1337, 1995.
7. S.C. Veldhuis and M. A. Elbestawi, A strategy for the compensation of errors in five-axis machining, Annals of the CIRP, Vol.44(1), pp. 373-377, 1995.
8. R.M.D. Mahbubur, J. Heikkala, K. Lappalainen and J.A. Karjalainen,

Positioning accuracy improvement in five-axis milling by post processing, Vol.37(2), pp. 223-236, 1997.

9. W.T. Lei and Y.Y. Hsu, Accuracy test of five-axis CNC machine tools with 3D probe-ball, part I: design and modeling, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.42(10), pp. 1153-1162, 2002.
10. W.T. Lei and Y.Y. Hsu, Accuracy test of five-axis CNC machine tools with 3D probe-ball, part II: errors estimation, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.42(10), pp. 1163-1170, 2002.
11. W.T. Lei and Y.Y. Hsu, Accuracy enhancement of five-axis CNC machines through real-time error compensation, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.43, pp. 871-877, 2003.

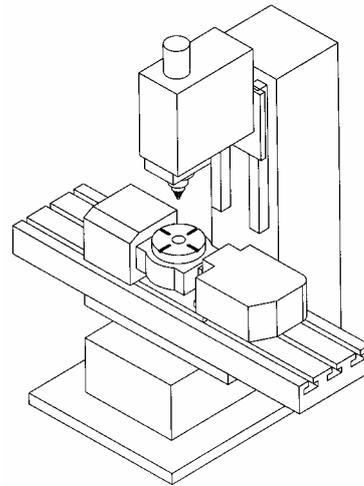


圖 1. RRTTT 五軸工具機

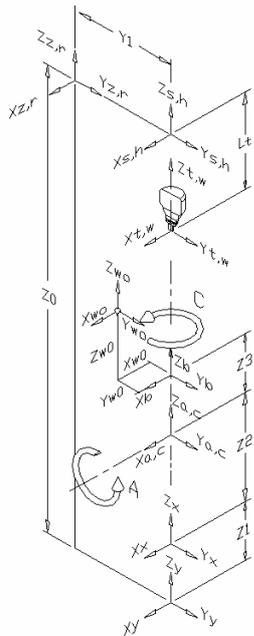


圖 2. 座標系統設定

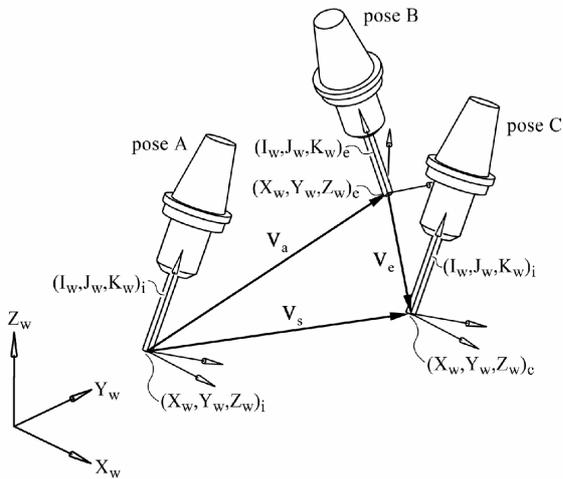


圖 3. 拆解補償法說明圖

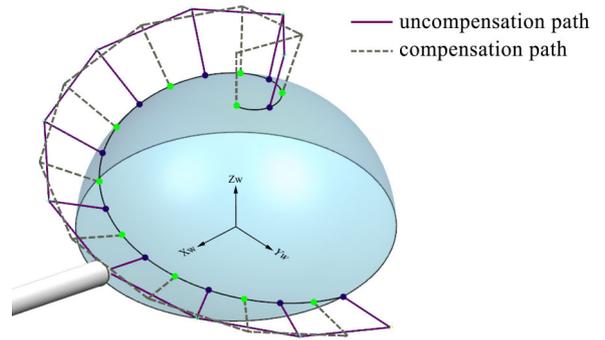


圖 5. 孔銑削 path\_F 刀具路徑



圖 6. 銑削過程

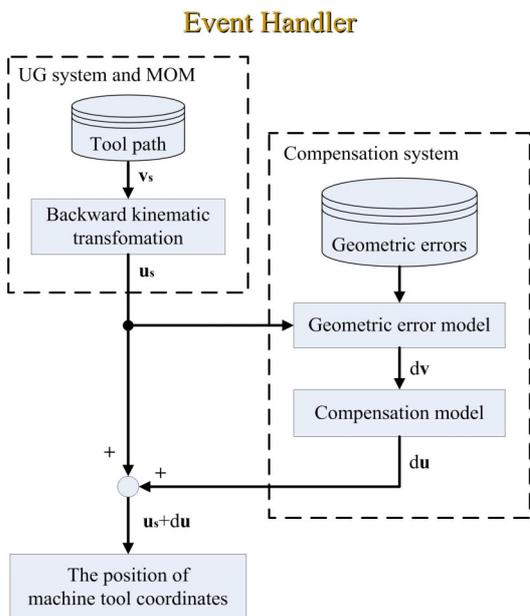


圖 4. 誤差補償機制



圖 7. 完成工件

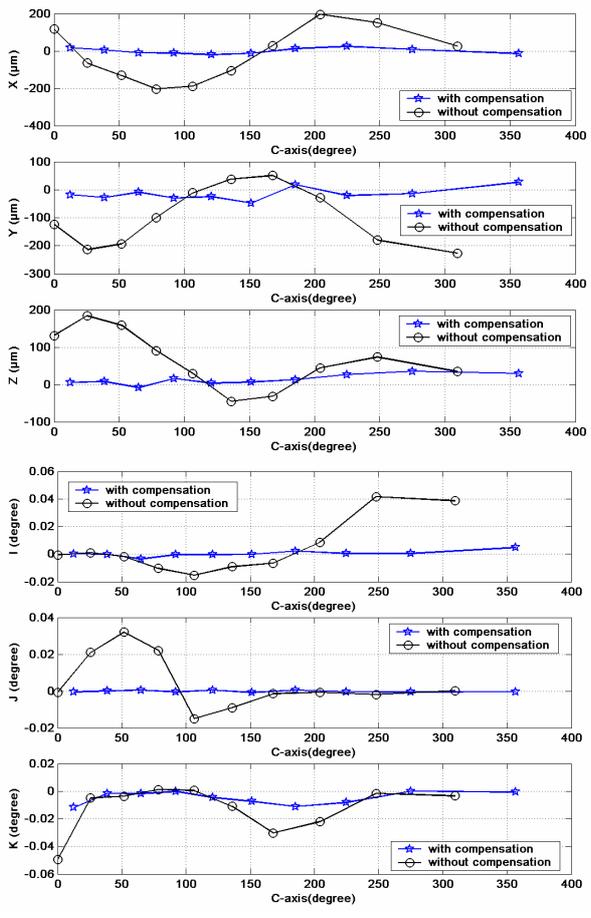


圖 8. 補償前與補償後之結果

## 可供推廣之研發成果資料表

可申請專利

可技術移轉

日期：94 年 10 月 5 日

<b>國科會補助計畫</b>	計畫名稱：Probe-ball 量測系統應用於不同型式五軸工具機之研究 計畫主持人：徐永源 計畫編號：NSC 93-2212-E-216-011 學門領域：自動化學門
<b>技術/創作名稱</b>	建構於後處理器之五軸誤差補償系統
<b>發明人/創作人</b>	徐永源
<b>技術說明</b>	<p>中文：本研究則接續成果而建立一新的五軸工具機誤差補償方法---拆解法(Decouple method)，其要點是指向誤差與線性運動軸的運動量無關，但轉動運動軸的運動量則與刀具端點位置有關，依此可個別先補償轉動軸再補償線性軸的補償量，亦即改變一般同時計算線性軸及轉動軸補償量的方法，拆解成個別計算據此建立補償方法，其模擬結果顯示此一方法相當有效。接著將補償機制實現於CAM 系統之後處理器中，最後利用補償後之 NC 程式碼，以實機切削驗證誤差補償的效果，結果顯示此誤差補償機制，可有效補償五軸工具機的幾何誤差。</p> <p>英文：The purpose of this paper is to development a new error compensation method named decouple method for five-axis machine tools. Although the extra two rotary axes deliver the advantages of five-axis machining, the increasing kinematical complexity makes it difficult to measure the overall positioning errors and to find a suitable compensation method. Based on the fully known error model of five-axis machine tools, a new error compensation function is developed in UG/postprocessor. According the results of experience, the new error compensation method has been proved.</p>
<b>可利用產業及可開發之產品</b>	CAM 系統之後處理器及五軸工具機製造業
<b>技術特點</b>	建立五軸工具機幾何誤差補償系統於後處理器
<b>推廣及運用價值</b>	五軸工具機製造商及 CAM 軟體產業，可有效補償誤差提升加工精度。

1. 每項研發成果請填寫一式二份，一份隨成果報告送繳本會，一份送 貴單位研發成果推廣單位（如技術移轉中心）。
2. 本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。
3. 本表若不敷使用，請自行影印使用。