

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

油壓系統與切削力對平行式五軸加工機動態之影響分析及
其控制

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2212-E-009-036-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立交通大學機械工程學系

計畫主持人：秦繼華

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 10 月 1 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

油壓系統與切削力對平行式五軸加工機動態之影響分析及其控制

Research on the dynamics of parallel five-axis machine tools subjected
by hydraulics and cutting force and its control

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 92 - 2122 - E - 009 - 036 -

執行期間：92年8月1日至93年7月31日

計畫主持人：秦繼華

共同主持人：

計畫參與人員：鄭淵明、陳昱丞、彭祥恩

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：交通大學機械工程學系

中華民國 93 年 9 月 30 日

一、中文摘要

本計畫的目的主要研究新型加工機上，以油壓系統作為六軸平台機構的驅動器，探討油壓對平台系統的影響性，並運用能在受干擾環境中改善控制精度的 LQG 調整器控制法。在研究中也考慮切削過程中刀具切削工件產生的切削力。並探討切削力對油壓致動軸與六軸平台機構的動態特性的影響性，以提升新型工具機加工精密度。最後結合交叉耦合預補償方法來控制機器軌跡的精密度。

在計畫中探討以油壓系統作為六軸平台機構驅動器，油壓對平台機構的影響，並運用 LQG 調整器控制各軸的定位精度，以發展出適用於油壓驅動的六軸史都華平台的交叉耦合預補償法。研究中也考慮油壓運動平台在真實切削過程中切削力對性系統的影響，已達到加工上的精密度。最後發展一套演算法來決定作為載具的史都華平台與 X-Y 加工機的互動，以完成 3D 空間裡精密軌跡的行走。

關鍵詞：史都華平台、油壓系統、LQG 調整器、交叉耦合預補償、軌跡控制

Abstract

This project is to develop a new machining tool that combined two kinds of precision positioning tool. One is the six axial Stewart platform, and the other X-Y table of a CNC machine tool. The advantage of high accurate positioning of Stewart Platform is used to carry the workpiece, and the X-Y table is used as tool-driver devices to solve the lack of the workspace. We will develop an excellence in machining method (precision positioning and path tracking) on new machining tool.

In this project, it is to analyze effect of hydraulic system that drives actuator of Stewart platform. The precision positioning of an axis is used to control from LQG regulator, and develops to adapt cross-coupling precompensation method (CCPM) of a hydraulic actuator Stewart platform in this research. Effect of cutting force in the cutting process was carefully

considered on hydraulic parallel mechanism that improved machining precision. Finally, adequate control algorithms will be approached and developed. The control schemes that we develop are expected to process precise freedom-surface in 3D space.

Keywords : Stewart platform、hydraulic system、LQG regulator、Cross-coupling Precompensation Method (CCPM)、tracking control

二、緣由與目的

發展新型的五軸加工機勢必要加入生產行列，因此在加工過程中必不可忽略切削力對新型機構的影響性。而銑削加工是精密製造系統中不可缺少的一部份，怎樣使加工品質達到精度一直是學術界及工業界重要的課題。銑削過程中刀具切削工件產生的切削力是主要重要因素之一，因此 Martelloti[1] 及 Tlusty[2]對切削提出基本分析及建立銑刀切削力模型，之後許多學者依不同的刀具形狀、幾何角度及工件材料等發展端銑刀[3-4]、面銑刀[5-6]、球刀[7]等不同刀具的切削力模型以預測切削力，並由切削力的大小決定切削條件的最佳參數。

Sutherland et.[8]、Altintas et.[9-10]及 Ismail et.[11]運用切削力模型結合工具機主軸及工件發展切削動態系統，以預測加工工件表面的粗糙度及表面精度。但在銑削加工過程中，工件的表面精度固然重要，但工件的輪廓精度亦不可忽略。而在輪廓加工方面單由切削動態系統考量是不足的，需結合軌跡進給控制才能使工件輪廓切削達到精度值。

傳統交叉耦合控制器運用在 X-Y table 上已有相當的成果，它是以交叉耦合方式補償輪廓誤差，使得機具可以行走連續路徑，但目前研究多侷限在平面上，其在空間中的發展並不成熟；至於其在五軸工具機上的使用，至今仍屬少見。另外，六軸史都華平台發展至今，主要是運用在飛行模擬器上，但

由於電腦運算速度快速進步，史都華平台已逐漸受到工業界的重視。因此將 X-Y table 搭配史都華平台，組合成五軸工具機的概念應運而生，它是利用具有高精度定位特性的史都華平台作為工件載具，並且以 X-Y table 延伸史都華平台的行程，以彌補史都華平台工作空間之不足。

在控制方法上，Koren (1980)提出利用交叉耦合控制器(Corss Coupling Controller)的架構[12]，藉著協調各軸的伺服位置誤差，以消除兩軸因動態特性不一致所產生的輪廓誤差，又在 1991 年提出可變增益(Variable Gain)交叉耦合控制器[13]。本計劃研提單位(1997)提出交叉耦合預補償(CCPM)方法，它是將交叉耦合控制器加上路徑預補償的觀念，將其運用在 X-Y 加工平台上，經由實驗證明可以得到良好的軌跡精度。除此之外，將交叉耦合控制器運用在平面 X-Y table 的相關發展已經有相當的成果[14~21]，但目前此法皆侷限在平面的運用，其在多軸的運用上[22]，則屬剛開始醞釀。

史都華平台(Stewart Platform)的空間機構在分析上相當複雜，這方面的研究包含機構分析與設計[23~26]、運動速度與軌跡[27~29]、工作空間分析[30]、奇異曲面[31~33]與驅動控制[34~37]等等。當平台運用在飛行模擬時，可以在迴避奇異曲面時接受微量的軌跡誤差，其偏重於奇異點迴避策略；但是運用為工具機時，卻不可以接受任何軌跡誤差，必須優先將奇異點排除在工作空間外。Vladimir(2001)在所提出的論文[38]中，將史都華平台做為加工件的載具，搭配三軸加工機，達到 3D 曲面加工的目的。未來需要大量高精度、高切削速度與高進給的自由曲面加工[39~44]，這些工作若以五軸加工機進行，將更有效率。

本計劃的目的在結合兩種定位機具，即搭配 CNC 加工機台與高精度史都華平台，發展出兼具兩者優點的加工方法(定位及軌跡方式)。本計劃擬以更嚴謹的數學式表示以油壓作為驅動軸的平行機構，運用 LQG 調整器控制各軸的定位精度，以發展出適用於油壓驅動的六軸史都華平台的交叉耦合預補償法。並研究油壓運動平台在真實切削過程中切削力對性系統的影響，以達到加工上的

精密度。並發展一套演算法來決定作為載具的史都華平台與 X-Y 加工機的互動，以完成 3D 空間裡精密軌跡的行走。

三、研究方法

首先將交叉耦合預補償法移植到油壓驅動的六軸史都華平台上，使得油壓運動模擬平台與同樣具備交叉耦合預補償能力的 X-Y 加工機合作，藉由插補器將曲面上加工軌跡的加工點位置與方向，轉換成 X-Y table 與史都華平台的驅動軸的位置。經由電阻尺將實際位置傳回控制器，由輪廓誤差計算器計算出相對的誤差量，其中包含將平台的誤差量解耦成各油壓缸的誤差量；並同時計算出各驅動軸預補償量，再藉由控制器將訊號傳至各驅動軸，即完成控制的流程。

3.1 切削力模型的推導

切削力模型[1-2]的推導主要是將刀具切削工件時的軸向切深 L 分成 n 段，即 $(n+1)$ 個切刃元素，而每個切刃元素高度為 dz 。每個切刃元素視為一個獨立的切削過程，將刀具上所有切刃元素上產生的切削力向量相加總和，即為該刀具的切削力。

3.2 史都華平台裝配與機構驅動特性

3.2.1 機構驅動特性：

逆向運動學可得到 6 根油壓桿長 $|L_i| = |{}^b E_i - {}^b B_i|, i = 1 \sim 6$ ；至於前向運動學，考慮封閉迴路 $(B_i O_b O_c E_i), i = 1 \sim 6$ ，可以得到一組六個非線性聯立方程式：

$$F_i(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) = [({}^b E_i - {}^b B_i)_x^2 + ({}^b E_i - {}^b B_i)_y^2 + ({}^b E_i - {}^b B_i)_z^2] - L_i^2, i = 1 \sim 6 \quad (1)$$

3.2.2 各軸切削力的分配

在切削過程中所產生的切削力會對平台產生作用力，因此計畫中將推導平台受負載時，計算各軸的受力。圖 1 為六軸平行機構受力圖，將軸 1 與軸 2、軸 3 與軸 4、軸 5 與軸 6 分別延伸後，兩軸會交於一點因此兩軸的軸長相等，在交會的三點可繪製一平面。而各軸的受力可由圖 2 中分別計算推

導：

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & -n & \frac{\sqrt{3}}{2}m - \frac{1}{2}n & \frac{\sqrt{3}}{2}m + \frac{1}{2}n & -\frac{\sqrt{3}}{2}m - \frac{1}{2}n & -\frac{\sqrt{3}}{2}m + \frac{1}{2}n \\ -m & -m & \frac{1}{2}m + \frac{\sqrt{3}}{2}n & \frac{1}{2}m - \frac{\sqrt{3}}{2}n & \frac{1}{2}m - \frac{\sqrt{3}}{2}n & \frac{1}{2}m + \frac{\sqrt{3}}{2}n \\ -q & -q & -q & -q & -q & -q \\ rq & rq & -\frac{rq}{2} & -\frac{rq}{2} & -\frac{rq}{2} & -\frac{rq}{2} \\ 0 & 0 & \frac{rq\sqrt{3}}{2} & \frac{rq\sqrt{3}}{2} & -\frac{rq\sqrt{3}}{2} & -\frac{rq\sqrt{3}}{2} \\ m & -m & m & -m & m & -m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 $m = \cos \alpha \cos \beta$; $n = \cos \alpha \sin \beta$;
 $q = \sin \alpha$

將 Jacobin 反矩陣可計算各軸受力

$$[f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4 \ f_5 \ f_6]^T = J^{-1} \cdot [F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z]^T \quad (3)$$

3.3 油壓制動軸的分析

在本計畫中，以油壓作為六軸平台的驅動器，要控制致動軸的定位精度，必須探討致動軸的油壓特性。因此本章節將探討油壓制動軸的動態方程式推導。

3.3.1 油壓缸動態方程式

圖 3 為一般油壓缸與伺服閥的結合圖，在圖中假設油壓缸是一二階系統因此根據油壓動態[41-44]可表示成

$$P_{in}A_m - P_oA_o = M_p \cdot \ddot{x}_p + C_p \cdot \dot{x}_p + K_p \cdot x_p + f_i + f_{load} + f_f \quad (4)$$

油壓缸位置整理為如下

$$x_p = \frac{\frac{K_q}{A_{in}} x_s - \frac{K_{ce}}{A_{in}^2} (1 + \frac{V_t}{4\beta_e K_{ce}}) F_L}{s(\frac{s^2}{w_h^2} + \frac{2\delta_h}{w_h} s + 1)} \quad (5)$$

其中

$$G_{act} = \frac{\frac{K_q}{A_{in}}}{s(\frac{s^2}{w_h^2} + \frac{2\delta_h}{w_h} s + 1)} \quad (6)$$

$$G_G = \frac{\frac{K_{ce}}{A_{in}^2} (1 + \frac{V_t}{4\beta_e K_{ce}})}{s(\frac{s^2}{w_h^2} + \frac{2\delta_h}{w_h} s + 1)} \quad (7)$$

3.3.2 伺服閥的動態方程式

在研究中為了更精準的控制油壓制動軸的定位精度，因此必須考慮伺服閥的動態性，在計畫裡考慮閥軸受摩擦力、電磁力及流體（穩流與暫態）的影響，假設伺服閥的

動態方程式為所示。

$$M_s \cdot \ddot{x}_s + C_s \cdot \dot{x}_s + 2k_s \cdot x_s = t_{steady} + t_{transiet} + t_f + F_e \quad (8)$$

3.4 LQG regulator 控制方法

LQG 調整器藉由連接 kalman 控制法求得估測器並以狀態回饋增益所組成的調節器，運用二次價值函數（quadratic cost function）得到調節器的性能與控制效益。Kalman 用來設計卡門狀態估測器，卡門濾波器可用於連續與離散估測問題並求得最佳解。將致動軸油壓缸與伺服閥的動態特性結合控制方法 LQG 調整器可繪成圖 4 的方塊圖。

3.5 空間中軌跡誤差補償

假設加工曲面為一連續性曲面，在加工路徑的規劃上，將 v 方向值固定，以 u 為變數，所以在 $v=v_c$ 的情況下，理想的路徑軌跡 $P_i(u, v_c)$ 可視為空間裡的任意連續曲線，參考圖 5 (a、b)，為了使加工機能達到理想曲面的要求，所必須考慮的輪廓誤差模式包含路徑與方向。

主要以 X-Y Table 作為刀具驅動裝置，搭配史都華平台作為工件載具；並且以我們所設計規劃的多軸交叉預補償法作為整合系統的控制核心，其演算流程如圖 6，其說明如下：

1. 給定曲面的參數資料經由插補器計算出 X-Y table 兩軸的位置 x_b 、 y_b 與史都華平台的六支油壓缸所需長度 $L_i (i=1 \sim 6)$ 。
2. 藉由電阻尺回授實際的位置，並計算出輪廓誤差，在 3D 空間曲面加工需要兩組的輪廓誤差，包含五個變量，因史都華平台主要控制著三個變量，所以必須將其解耦成各油壓缸的誤差： $E_{Li} (i=1 \sim 6)$ 。
3. 經由討論得到速度與角速度預補償量，經由計算所得的參數值做路徑預補償，同步驟 2. 必須將其解耦以求得油壓缸進給速度：

$$\dot{L}_i (i=1 \sim 6) = InvKinematics(V_z, \omega_a, \omega_b) \quad \circ$$

4. 因曲面參數資料是建立在史都華平台的可動板，是故其加工軌跡與方向，將隨平台的作動而變化。透過迭代的方式將加工軌跡的偏移量傳回路徑插補器，並做適當的路徑修正。重複步驟 1~3 即完成演算流程。

四、結果與討論

在本計畫裡運用系統辨識法 (ARX) 找出史都華平台上六根驅動軸的轉移函數，因為在致動軸的設計上均為相同的尺寸、規格，故僅對其中一軸進行系統辨識，其他五軸均套用相同的轉移函數，故得到史都華平台驅動軸的脈波與位移量的轉移函數：

$$L_i(S) = \frac{0.1479S^2 + 3.161S + 297.8}{S^3 + 18.79S^2 + 1142S + 651.2}, i = 1 \sim 6 \quad (9)$$

圖 7 為史都華平台驅動軸實驗輸入與輸出訊號圖，圖 8 為史都華平台驅動軸實驗位移量與模擬位移量的比較，可知史都華平台驅動軸實驗位移量與模擬位移量數據相近，表示 arx 所得的轉移函數可以真實模擬史都華平台驅動軸的反應。

以同樣的方式，求得 x-y table 的 x 軸與 y 軸驅動軸的脈波與位移量的轉移函數：

$$X(S) = \frac{0.237S^2 + 9.691S + 462.2}{S^3 + 12.79S^2 + 2526S + 43.27} \quad (10)$$

$$Y(S) = \frac{0.2041S^3 + 19.76S^2 + 878.7S + 18840}{S^4 + 48.05S^3 + 2865S^2 + 110900S + 9507} \quad (11)$$

在本計畫設計一條空間中的軌跡進行模擬，而設計的空間軌跡方程式如公式 12，圖 9 為路徑軌跡圖。

T=0~10sec ; sample time=0.02sec

Position=[x(t),y(t),z(t),α(t),β(t),γ(t)]

$$\begin{aligned} X(t) &= t * \cos(t) & Y(t) &= t * \sin(t) & ; \\ Z(t) &= 3 * t + 260\alpha(t) = 0 & \beta(t) &= 0 & ; \gamma(t) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

在模擬中分別比較，三種軌跡控制法。圖 10 為分別使用未耦合系統(US)、交叉耦合合法(CCS)、交叉耦合預補嘗法(CCPM)模擬上述軌跡，所得到的路徑輪廓誤差，可很明顯看出交叉耦合預補嘗法(CCPM)的成效優於其他二種控制法。

五、參考文獻：

1. M. E. Martelloti, An analysis of the milling process, Transactions ASME, 1941, 63, 677.
2. J. Tlustý, Dynamics of Cutting Forces in End Milling, Annals of the CIRP, Vol. 24, 1975.
3. Y. S. Tarn, C. I. Cheng and J. Y. Kao, Modeling of three-dimensional numerically controlled end milling operations, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 35, No. 7, pp.939-950, 1995.
4. L. Zheng, Y. S. Chiou and S. Y. Liang, Three dimensional cutting force analysis in end milling, Int. J. Mech. Sci. Vol. 38, No. 3, pp.259-269, 1996.
5. H. S. Kim and K. F. Ehmann, A cutting force model for face milling operations, Int. J. Mach. Tools Manuf. Vol. 33, No. 5, pp.651-673, 1993.
6. P. J. Cheng, J. T. Tsay and S. C. Lin, A study on instantaneous cutting force coefficients in face milling, Int. J. Mach. Tools Manuf. Vol. 37, No. 10, pp.1393-1408, 1997.
7. G. Yucesan and Y. Altintas, Prediction of ball end milling force, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry Vol. 118, February 1996, pp.95-103.
8. J. W. Sutherland and R. E. DeVor, An improved method for cutting force and surface error prediction in flexible end milling system, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry Vol. 108, November 1986, pp.269-279.
9. D. Montgomery and Y. Altintas, Mechanism of cutting force and surface generation in dynamic milling, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry Vol. 113, May 1991, pp.160-168.
10. E. Budak and Y. Altintas, Peripheral milling conditions for improved

- dimensional accuracy, *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 34, No. 7, pp.907-918, 1994.
11. F. Ismail, M. A. Elbestawi, R. Du and K. Urbasik, Generation of milled surfaces including tool dynamics and wear, *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry* Vol. 115, August 1993, pp.245-252.
 12. Koren, Y., "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems", *ASME Trans Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, Vol.102, No.4, (1980) , pp.265-272
 13. Koren, Y., and Lo, C.C., "Variable Gain Cross Coupling Control for Contouring", *Annals of the CIRP*, Vol.40, (1991) , pp.371-374
 14. Zong-Mu Yeh, "A cross-coupled bistage fuzzy controller for biaxis servomechanism control", *Fuzzy Sets and Systems* 97 (1998) , pp.265-275
 15. Hua-Yi Chuang and Chang-Huan Liu, "Cross-Coupled Adaptive Feedrate Control for Multiaxis Machine Tool", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 1991 Vol.113, pp.451-457
 16. Y.S. Tarng, H.Y. Chuang, W.T. Hsu, "Intelligent cross-coupled fuzzy federate controller design for CNC machine tools based on genetic algorithms", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39 (1999) pp.1673-1692
 17. Yaw-Shih Shieh, An-Chen Lee, and Chin-Sheng Chen, "Cross-Coupled Biaxial Step Control for CNC EDM" , *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol.36, No.12 (1996) , pp.1363-1383
 18. L. Feng, Y Koren. and J. Borenstein, "Cross-Coupling Motion Controller for Mobile Robots", *IEEE Control System*, pp.35-43, 1993
 19. P.K. Kulkarni, K. Srinivasan, "Optimal Contouring Control of Multi-Axial Feed Drive Servomechanisms" , *Journal of Engineering for Industry*, Vol.111, 1989, pp.140-148
 20. Hua-Yi Chuang and Chang-Huan Liu, "A Model-Referenced Adaptive Control Strategy for Improving Contour Accuracy of Multiaxis Machine Tools" *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.28, No.1, 1992, pp.221-227
 21. Hyun C. LEE, etc. "Real-time compensation of two-dimensional contour error in CNC machine tools", *IEEE/ASME International. Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp.623-628, 1999.
 22. Syh-shiuh Yeh and Pau-Lo Hsu, "Design of Precise Multi-Axis Motion Control Systems", *IEEE, 6th International Workshop on Advanced Motion Control* , pp.234-239, 2000.
 23. Chang-de Zhang, Shin-Min Song, "Forward Kinematics of a Class of parallel (Stewart) Platforms with Closed-Form Solutions", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robots and Automation*, pp.2676-2681, 1993.
 24. Bhaskar Dasgupta and T.S. Mruthyunjaya, "A constructive predictor-corrector algorithm for the direct position kinematics problem for a general 6-6 stewart platform", *Mechanism and Machine Theory* 31, No.6, pp.799-811, 1996.
 25. Z. Jason Geng and Leonard S. Haynes, "A 3-2-1 Kinematic Configuration of a Stewart Platform and its Application to Six Degree of Freedom Pose Measurements", *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, Vol.11, No.1, pp.23-34, 1994.
 26. Partrick Huynh, etc. "Maximum Velocity Analysis of Parallel Manipulators", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3268-3273, 1997.

27. Timo Ropponen, etc. "Accuracy analysis of a modified Stewart platform manipulator", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.521-525, 1995.
28. Jian Wang, etc. "On the accuracy of a Stewart platform- I. The effect of manufacturing tolerances" , IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.725-731, 1993.
29. Oren Masory, etc. "On the accuracy of a Stewart platform- II. Kinematic calibration and compensation", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.114-120, 1993.
30. Xinhua Zhao, etc. "A successive approximation algorithm for the direct position analysis of parallel manipulators", Mechanism and Machine Theory 35, pp.1095-1101, 2000.
31. Zhe Wang, etc. "A study on workspace, boundary workspace analysis and workpiece positioning for parallel machine tools", Mechanism and Machine Theory 36, pp.605-622, 2001.
32. S. Bhattacharya, etc. "Comparison of an exact and an approximate method of singularity avoidance in platform type parallel manipulators", Mechanism and Machine Theory 33, No.7, pp.965-974, 1998.
33. W. Khalil, D. Murareci "Kinematic analysis and singular configurations of a class of parallel robots", Mathematics and Computers in Simulation, Vol.41, pp.377-390, 1996.
34. Prasun Choudhury, etc. "Singularity and controllability analysis of parallel manipulators and closed-loop mechanisms", Mechanism and Machine Theory 35, pp.1455-1479, 2000.
35. D. Li, etc. "Modeling, Simulation, and Control of a Hydraulic Stewart Platform", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3360-3366, 1997.
36. C.C. Nguyen, etc. "Experimental study of motion control and trajectory planning for a Stewart Platform robot manipulator", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1873-1878, 1991.
37. Kazuhiro Kosuge, "Force Control of Parallel Link Manipulator with Hydraulic Actuators", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.305-310, 1996.
38. Vladimir T. Portman, Ben-Zion Sandle, Eliahu Zahavi, "Rigid 6-DOF parallel platform for precision 3-D micromanipulation", International Journal of Machine Tools & Manufacture 41(2001), pp.1229-1250.
39. Jui-Jen Chou, D.C.H Yang, "On the Generation of Coordinated Motion of Five-Axis CNC/CMM Machines", Journal of Engineering for Industry.
40. Jianxin Pi, Edward Red and Greg Jensen, "Grind-free tool path generation for five-axis surface machining", Computer Integrated Manufacturing Systems , Vol.11, No.4, pp.337-350, 1998.
41. Chih-Ching Lo, "Real-time generation and control of cutter path for 5-axis CNC machining", International Journal of Machine Tools & manufacture , Vol.39 (1999), pp.471-488.
42. Y. Koren, "Five-Axis Surface Interpolators", Annals of CIRP, Vol.44, 1995.
43. Jih-Hua Chin and Wen-Che Fu, "Analysis of an electrohydraulic servo system subject to Stribeck-type friction", INT. J. systems SCI., 1994, Vol. 25, No. 6, pp.1015-1037.
44. Herbert E. Merritt, "Hydraulic control systems". John Wiley and Sons, 1967.

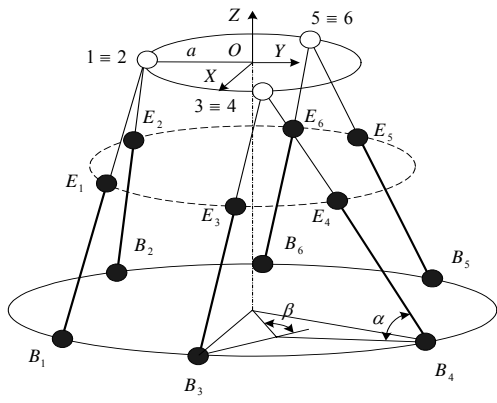
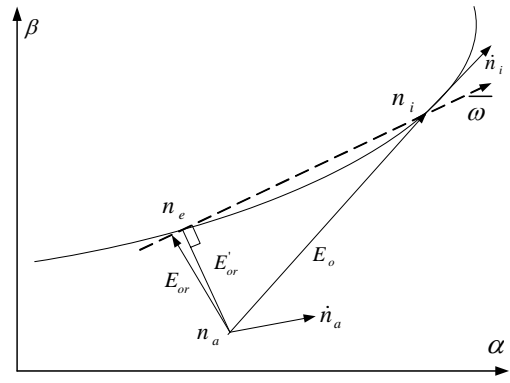


圖 1、Stewart platform 概念圖



(b)

圖 5、空間加工軌跡所包含路徑與方向輪廓誤差圖

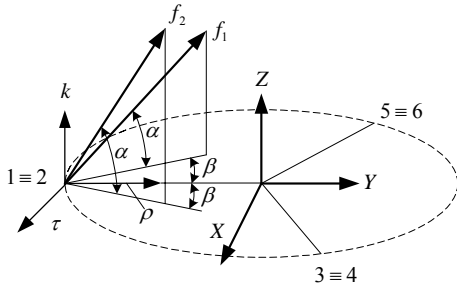


圖 2、各軸分力圖

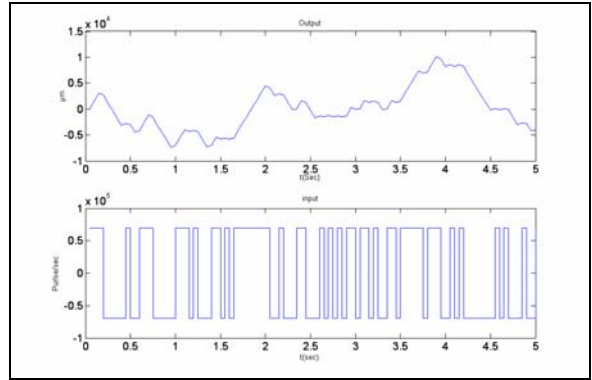


圖 7、史都華平台驅動軸實驗輸入與輸出訊號圖

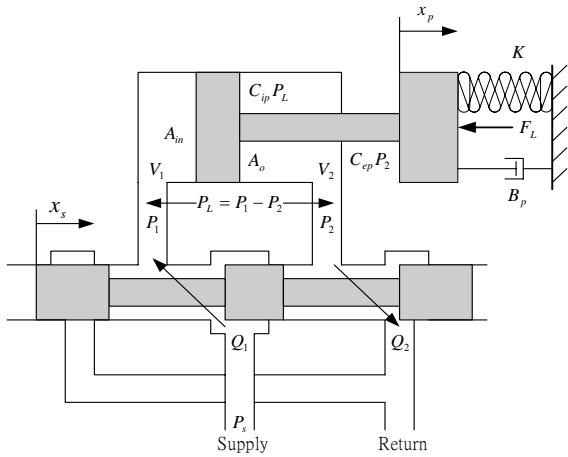


圖 3、伺服閥與油壓缸結合圖

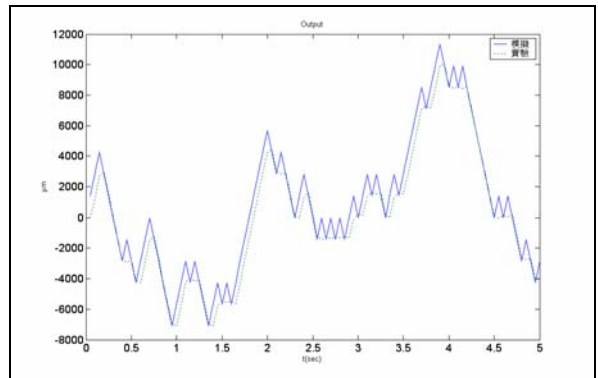
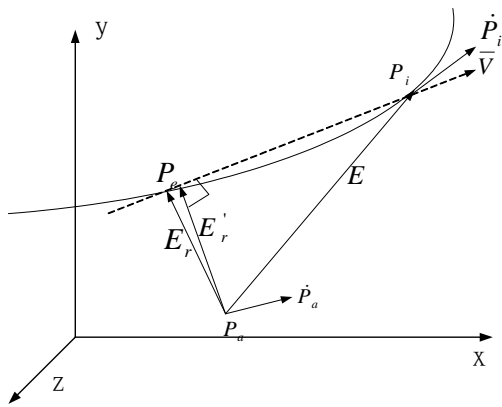


圖 8、史都華平台驅動軸實驗位移量與模擬位移量的比較



(a)

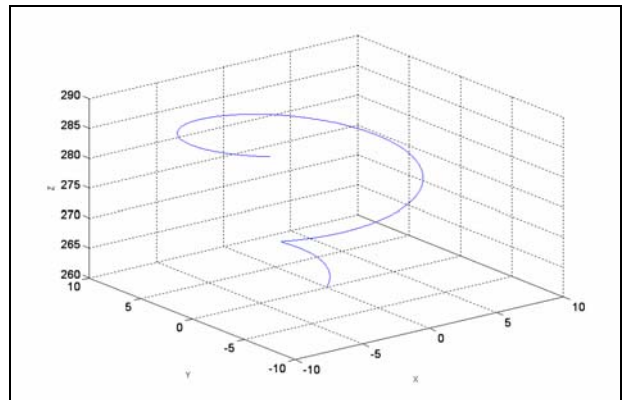


圖 9、路徑軌跡圖

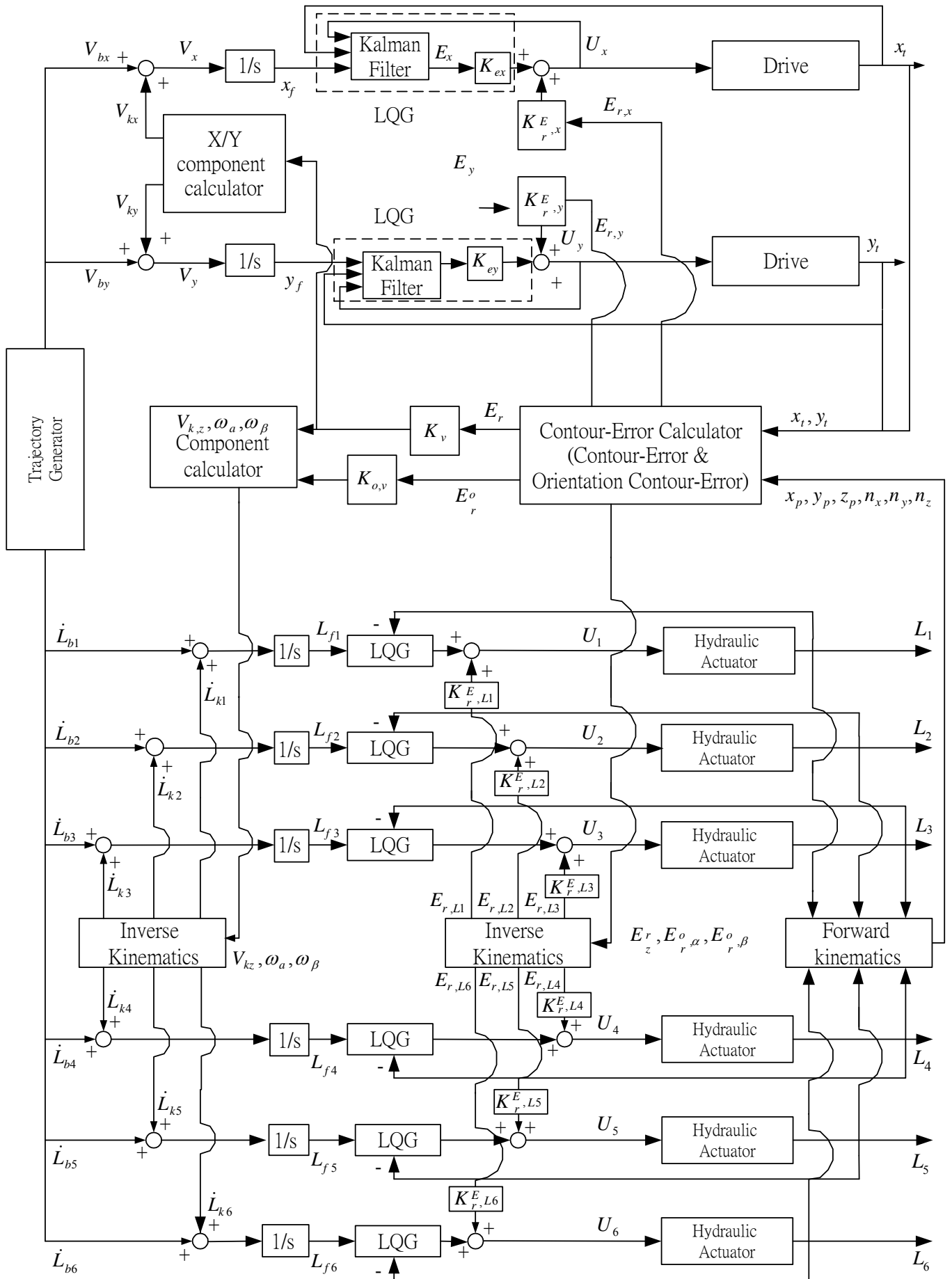


圖 6、綜合五軸工具機交叉耦合預補償系統方塊圖