

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

一種新型精密混合式運動平台之完整系統發展與動態控制

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2212-E-009-021-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立交通大學機械工程學系(所)

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 94 年 10 月 24 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

一種新型精密混合式運動平台之完整系統發展與動態控制

System Design and Dynamic Control of a Reconfigurable
Precision Hybrid Motion Platform

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 93 - 2212 - E - 009 - 021 -

執行期間：93 年 8 月 1 日至 94 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、孫晏晞、黃國緯

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 9 4 年 1 0 月 2 0 日

1、中文摘要

本計畫研究一種新穎的可重組式精密混合式機器 (RHMT, reconfigurable precision hybrid machine tool), 結合兩大機器模組: 並聯式工具機及傳統CNC xy-平台, 兼具並聯式機器 (PMT, parallel machine tool) 的高剛性、高精度優點, 與CNC工具機成熟的連續路徑追蹤能力, 產生一種新穎的多用途機器載具。在前兩年的研究中, 已經初步探討系統構建, 建立空間軌跡追蹤能力, 但尚未考慮動態, 本計畫完成動態方程式的推導, 提出適當的系統控制。

2、系統構建

本計畫係延續初階段之系統 [1], 進一步考慮動態3_PRU並聯式機器 (圖1與圖2) 的動力方程式, 並做系統整建與控制。

2.1 運動學分析

2.1.1 逆向運動學

位置分析: 給予運動平台姿態

(z 、 α 、 β), 求各軸移動距離

(L_1 、 L_2 、 L_3)。

經推導, 得各軸驅動長度函數如下:

$$L_i = Z - r \cdot \cos\theta_i \cdot \sin\beta + r \sin\theta_i \cdot \sin\alpha \cdot \cos\beta - \sqrt{l^2 - S_{ix}^2 - S_{iy}^2}$$

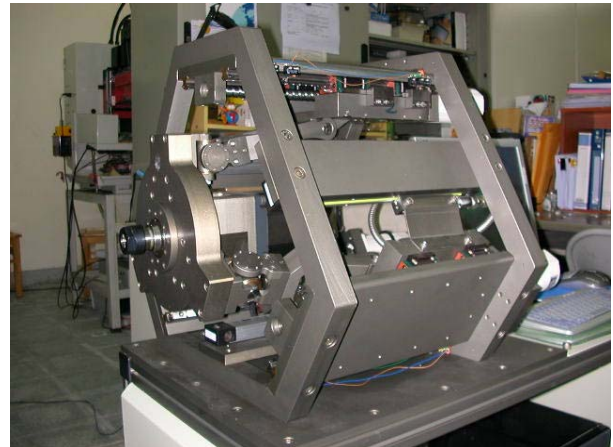


圖1: 3_PRU並聯式機器本體

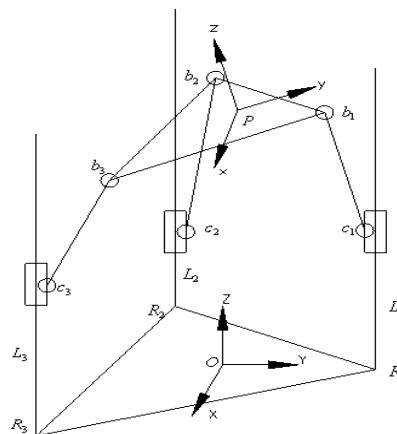


圖2: 3_PRU並聯式機器之空間配置圖

速度分析: 給予動平板姿態及其速度, 求各驅動軸速度。將逆向位置運動學方程式直接微分, 可得逆向速度方程式

$$\dot{L}_i = \frac{\partial L_i}{\partial q} \cdot \dot{q} = J_{pi} \cdot \dot{q}$$

另外可以導出動平板質心速度、角速度與搖臂角速度間的關係式如下:

$$\omega_i = Jw_i \begin{bmatrix} V_p \\ \omega_p \end{bmatrix}$$

加速度分析: 給予動平板姿態、速度、加速度, 求各驅動軸加速度。

驅動軸加速度 \ddot{L}_i :

$$\ddot{L}_i = \frac{1}{S_{iz}} (S_i^T a_{bi} - S_i^T B)$$

搖臂角加速度 :

$$\Omega_i = \frac{1}{l^2} (A_s a_{bi} - A_s a_{ci})$$

2.1.2 前向運動學

前向運動學定義為：已知各軸位置、速度、加速度進，而求解動平板形心的位置、速度以及加速度。

位置分析：

給予各軸伸長量 L ，求對應之姿態。

定義目標函數：

$$ObjF = inverse_kinematics(q) - L = 0$$

若機構設計得當，其工作空間中沒有奇異點，則可用 Newton_Raphson method：

Step.1 將量得的驅動軸長 L_i 與給定的初始姿態 q_0 帶入上式。

Step.2 由 $J^{-1}\Delta F$ 的關係可得到誤差值 Δq 。

Step.3 藉由 $q^{k+1} = q^k + \Delta q$ 計算出新的姿態，並將所得的 q^{k+1} 代入 Step 2 去算新的誤差值 Δq^{k+1} 。

Step.4 重複上述步驟直到誤差值 $\Delta q \leq$ 容許誤差，則 $q^{k+1} = q^k + \Delta q$ 即為所求之可

動板姿態。

速度分析：由逆向速度運動學方程式可得前向解：

$$\dot{q} = J^{-1} \cdot \dot{L}_i$$

2.2 動力學分析

本計畫以虛功原理推導 3_PRU

並聯式機構的動態方程式。

2.2.1 逆向動力學

逆向動力學的定義為：給定可動板的姿態 q 、速度 \dot{q} 、加速度 \ddot{q} ，求各驅動軸所需的出力 $[\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ 。

先將作用在動平板質心位置的外力與外力矩表示為

$$Fp = \begin{bmatrix} \hat{f} \\ \hat{n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{ext} + Mp \cdot g - Mp \cdot a_p \\ n_{ext} - I\Omega_p - \omega_p \times (I\omega_p) \end{bmatrix}$$

作用在搖臂質心位置的力與力矩可表示為：

$${}^i F_i = \begin{bmatrix} \hat{f}_i \\ \hat{n}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_r {}^i R_o g - m_r {}^i a_{Gi} \\ -{}^i I_r {}^i \Omega_i - {}^i \omega_i \times {}^i I_r {}^i \omega_i \end{bmatrix}$$

3_PRU 平台的虛功方程式可寫成

$$\delta L^T (\tau - m_s \ddot{L}) + \delta q^T Fp + \sum_{i=1}^3 \delta^i x_{Gi}^T {}^i F_i = 0$$

可得：

$$\tau = J_{platform}^{-T} (-Fp - \sum_{i=1}^3 J_{Li}^T {}^i F_i) + m_s \ddot{L}$$

上式是此平行機器的逆向動力學方程式，輸入要求之姿態、速度、加速度，

即可計算得各驅動軸所需出力。

2.2.2 前向動力學

整個系統的動態方程式可改寫為

$$M(q) \ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) = \tau$$

令 $h(q, \dot{q}) = V(q, \dot{q}) + G(q)$ ，則加速度向量可以由下式得到：

$$\ddot{q} = M^{-1}(q)(\tau - h(q, \dot{q}))$$

若某個瞬時的姿態 q 以及速度 \dot{q} 為已知，則下一個瞬時的 q 、 \dot{q} 就可以由上式算出來。

3、並聯式機構軌跡追蹤策略

3.1 軸空間交叉耦合控制策略

本計畫提出在軸空間中作輪廓誤差補償的交叉耦合控制策略，以計算力矩法為基礎，加上軸空間 (link space) 的誤差補償，降低在實際工作空間中的輪廓誤差，所提出之策略架構如圖 3：

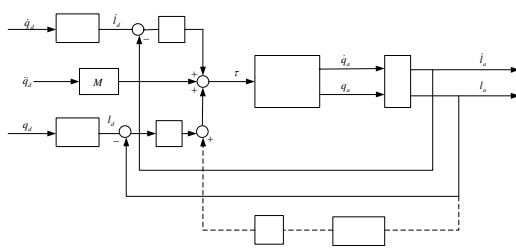


圖3：軸空間交叉耦合控制策略

圖 3 中 F 為軸空間中輪廓誤差模型，控制法則包含了部分簡化的系統動態 ($M \cdot \ddot{q}$)、各軸誤差 PD 控制以及軸空間輪廓誤差補償，數學式如下：

$$\tau = M \cdot \ddot{q} + K_v \cdot \dot{e}_L + K_p \cdot e_L + K_c \cdot e_c$$

3.2 增益值最佳化

本計畫中，根據輸入命令及輸出結果的累積絕對值差，乘上時間，作為目標函數，進行增益值最佳化：

$$\text{cost} = \text{sum}(\text{abs}(\text{in} - \text{out}) \cdot \text{time})$$

因為在上式中被最小化的是『integrated time*absolute error』，所以也叫做ITAE法則。

4、驗證與討論

4.1 機台規格

本計畫中之並聯式機器如圖1所示，其驅動軸進給長度為 $L=0 \sim 100\text{mm}$ ，翻轉角 α 、 β 在 $\pm 30^\circ$ 之間。本計畫依該機台之規格，進行模擬驗證。

4.2 機台參數與運動軌跡規劃

由 C A D 圖及其材質 AL-6061T6 可計算各項質量參數如下：

動平板質量及轉動慣量（以動平板座標系表示）

$$M_p = 1.9158\text{kg}$$

$$I_p = \begin{bmatrix} 4533.4 & 0 & 0 \\ 0 & 4533.4 & 0 \\ 0 & 0 & 8867.2 \end{bmatrix} \text{kg} \cdot \text{mm}^2$$

搖臂質量及轉動慣量（以旋轉接頭動座標系表示）：

$$m_r = 0.5522\text{kg}$$

$$I_r = \begin{bmatrix} 5464.7 & 0 & 0 \\ 0 & 565.4 & 0 \\ 0 & 0 & 323.6 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

滑塊質量：

$$m_s = 1.3764 \text{ kg}$$

搖臂長度： $l_o = 150 \text{ mm}$

圖 (2-3) 中大、小圓半徑：

$$R = 180 \text{ mm} ; r = 120 \text{ mm}$$

萬向接頭位置：

$$b_1 = [120.0000 \quad 0 \quad 0]^T \text{ mm}$$

$$b_2 = [-60.0000 \quad 103.9230 \quad 0]^T \text{ mm}$$

$$b_3 = [-60.0000 \quad -103.9230 \quad 0]^T \text{ mm}$$

滑軌在 XY 平面上位置：

$$R_1 = [180.0000 \quad 0 \quad 0]^T \text{ mm}$$

$$R_2 = [-90.0000 \quad 155.8846 \quad 0]^T \text{ mm}$$

$$R_3 = [-90.0000 \quad -155.8846 \quad 0]^T \text{ mm}$$

本計畫中所規劃之軌跡為動平板中心位置保持固定，而旋轉角以一固定角速率變化的路徑： $z=220(\text{mm})$ 、

$$\alpha = 0.15 \cos(\omega \cdot t) \quad \beta = 0.15 \sin(\omega \cdot t)$$

其中 t 為時間 (seconds)，角速率 $\omega = 4\pi \text{ rad/sec}$ 。

4.3 模擬結果結果分析與討論

策略 (一)：單獨選用計算力矩控制法(computed torque control, CTC)，其方塊圖如下：

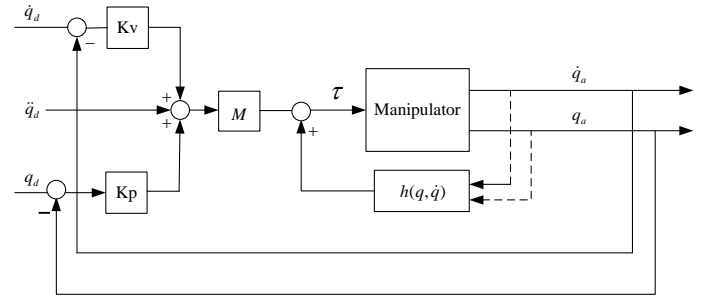


圖 4：CTC 控制方塊圖

策略 (二)：選用計算力矩控制法加輪廓誤差交叉耦合補償(cross-coupled compensation)，以下稱之為 CTC+CC，其方塊圖如下：

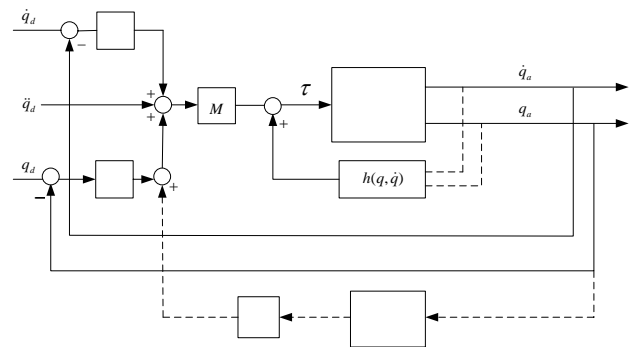


圖 5：CTC+CC 控制方塊圖

策略 (三)：軸空間 PD 控制法則(link space PD control, LSPD)，其方塊圖如下：

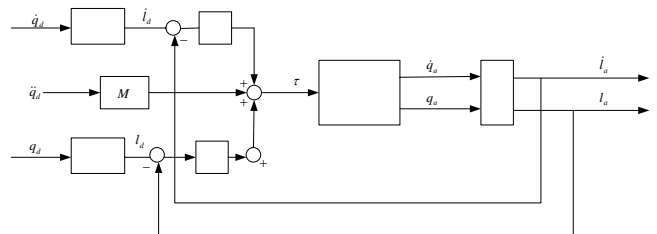


圖 6：LSPD 控制方塊圖

策略 (四)：軸空間 PD 控制法則加軸空間輪廓誤差補償 (LSPD+CC)，其

方塊圖如下：

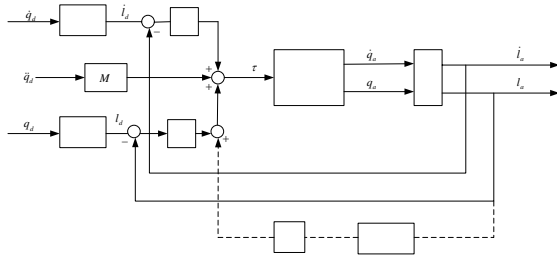


圖 7：LSPD+CC 控制方塊圖

表（一）CTC 控制策略之 IAE 值

	Z	α	β
Tracking error	0	0.0208	0.0226
Contour error	2.8354e-017	0.0057	0.0055

表（二）CTC+CC 控制策略之 IAE 值

	Z	α	β
Tracking error	0	0.0212	0.0225
Contour error	2.6508e-017	0.0037	0.0034

表（三）LSPD 控制策略之 IAE 值

	L1	L2	L3
Tracking error	0.6861	0.6852	0.6385

	L1	L2	L3
Contour error	0.5965	0.6516	0.6239

表(四) LSPD+CC 控制策略之 IAE 值

	L1	L2	L3
Tracking error	0.4802	0.4610	0.4246
Contour error	0.3766	0.4160	0.3982

$$\text{Inv} \quad \text{Kv} \quad (2.2.17)$$

5 結論

本計畫係針對可重組式精密混合式機器架構中之並聯式機器，考慮動態，提出一控制策略，將以往使用在正交序列工具機的輪廓誤差補償技術轉移至非正交並聯式工具機，成功的避免昂貴感測儀器的使用以及複雜的數學運算，並增進並聯式工具機的循跡性能。

計畫中利用虛功原理推導出 3_PRU 並聯式機構的動力學方程式，提出軸空間交叉耦合控制策略。

藉由軸空間補償概念，可以不需要利用前向運動學計算或使用昂貴感測儀器來測量出機台在實際工作空間的姿態，再由其姿態得出輪廓誤差，而後由其輪廓誤差解耦成各軸所需的

補償量，而是直接測量各軸位置，在軸空間（link space）中利用其幾何關係，計算出各軸應補償向量。由於過程中不需要複雜的前向運動學（forward kinematics）計算，因而其控制的取樣時間（sampling time）可以縮短、控制性能相對可以獲得提升，又因為不需要昂貴的感測儀器，其成本可以下降，如此較低成本卻可獲得較高循跡性能的控制策略，在工業應用上具有相當大的競爭潛力。

參考文獻

- [1] Chih-Wei Lue, Cheng, Yuan-Ming and Chin, Jih-Hua, 2004, "System Structure and Contour Tracking for a Hybrid Motion Platform", the International Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI 10.1007/s00170-004-211-2. NSC 91-2212-E-009-023.
- [2] Stewart, "A platform with six degree of freedom", Proc. Institute of Mechanical Engineers, v 108, n 3884, 1965, pp. 371-386.
- [3] Geng, Zheng and Haynes, Leonard S., "Six-degree-of-freedom active vibration isolation using a Stewart platform mechanism", Journal of Robotic Systems, v 10, n 5, Jul, 1993, pp. 725-744.
- [4] J.M. Wendlant and S.S.Sastry, "Design and control of a simplified Stewart platform for endoscopy", Proc. of the 33rd IEEE conf. on Decision and Control, v1, 1994, pp.357-362.
- [5] Raghavan, M., "Stewart platform of general geometry has 40 configurations", Trans. ASME, Journal of Mechanical Design, v 115, n. 2, 1993, pp.277-280.
- [6] Su, Y.X. and Duan, B.Y., "Mechanical design and kinematics accuracy analysis of a fine tuning stable platform for the large spherical radio telescope", Mechatronics, v 10, n 7, 2000, pp. 819-834.
- [7] Giddings and Lewis, Giddings and Lewis machine tools, Fond du Lac, WI, 1995
- [8] Dasgupta and Mruthyunjaya, "Stewart platform manipulator: A review", Mechanism and Machine Theory, v 35, n 1, Jan, 2000, pp.15-40.
- [9] Dasgupta and Mruthyunjaya, "Newton-Euler formulation for the inverse dynamics of the Stewart platform manipulator", Mechanism and Machine Theory, v 33, n 8, 1998, pp.1135-1152.
- [10] Geng, Zheng, Haynes, Leonard S., Lee, James D. and Carroll, Robert,

- L. , “On the dynamic model and kinematic analysis of a class of Stewart platforms”, *Robotics and Autonomous Systems*, v 9, n 4, 1992, pp.237-254.
- [11] Zhang, C. D. and Song, S. M. , “An efficient method for inverse dynamics of manipulators based on the virtual work principle”, *Journal of Robotic Systems*, v 10, n 5, 1993, pp.605-207.
- [12] Tsai, Lung-Wen , “Solving the inverse dynamics of a Stewart-Gough manipulator by the principle of virtual work”, *Journal of Mechanical Design*, Transactions of the ASME, v 122, n 1, 2000, pp.3-9.
- [13] Chiu, George T.-C and Tomizuka, Masayoshi, “Contouring control of machine tool feed drive systems: A task coordinate frame approach”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v 9, n 1, 2001, pp.130-139.
- [14] Sarachik,P. and Ragazzini, J.R. , “A two dimensional feedback control system”, *Trans.AIEE.* , v76, Part II, 1957, pp.55-61.
- [15] Koren, Y. and Ben-Uri J., “Digital control of multi-axis motion system”, *IFAC 5th World Congress, Paris, 1972*, Proceedings, v 1. Section II.
- [16] Koren, Y. , “Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems”, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Transactions of the ASME, v 102, n 4, 1980, pp.265-272.
- [17] Kulkarni, P.K., “Optimal contouring control of multi-axial feed drive servomechanisms”, *Journal of Engineering for Industry, Transactions ASME*, v 111, n 2, May, 1989, pp.140-148.
- [18] Srinivasan, K., “Cross-coupled control of biaxial feed drive servomechanisms” *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Transactions ASME, v 112, n 2, Jun, 1990, pp.225-232.
- [19] Koren, Y. and Lo, Ch.-Ch., “Variable-gain cross-coupling controller for contouring”, *CIRP Annals*, v 40, n 1, *Manufacturing Technology*, 1991, pp. 371-374.
- [20] Chuang, H.Y. and Liu, C.H., “Cross-coupled adaptive feedrate control for multi-axis machine tools”, *Trans. of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, v 113, 1991, pp.451-457.
- [21] Chin, Jih-Hua and Lin, Tsung-Ching, “Cross-coupled

- precompensation method for the contouring accuracy of computer numerically controlled machine tools”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v 37, n 7, 1997, pp. 947-967.
- [22] Chin, Jih-Hua and Lin, Hu-Wai, “Algorithms of the cross-coupled precompensation method for generating the involute-type scrolls”, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, v 121, n 1, 1999, pp.96-104.
- [23] Chin, Jih-Hua, Cheng, Yuan-Ming and Lin, Jin-Huei, “Improving contour accuracy by fuzzy-logic enhanced cross-coupled precompensation method”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v 20, n 1, 2004, pp.65-76.
- [24] Katz, Reuven, Yook, John and Koren, Yoram, “Control of a non-orthogonal reconfigurable machine tool”, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, v 126, n 2, 2004, pp.397-405.
- [25] 鄭淵明, “Precision trajectory tracking for multi-axis motion platform of serial and parallel structure”, Dissertation, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, ROC, 2004
- [26] Chang, Y.H., I. Inasaki, K.Morihara and Hsu, J.J., “The development of parallel mechanism of 5 d.o.f hybrid machine tool”, Y2000 Parallel Kinematic Machines International Conference, Ann Arbor, Mi.USA, 2000.
- [27] Fan, Kuang-Chao, “Sensitivity analysis of the 3-PRS parallel kinematic spindle platform of a serial-parallel machine tool”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v 43, n 15, 2003, pp.1561-1569.
- [28] Tsai, Meng-Shiun, “Direct kinematic analysis of a 3-PRS parallel mechanism”, *Mechanism and Machine Theory*, v 38, n 1, 2003, pp.71-83.
- [29] Harib, K. and Srinivasan, K., “Kinematic and dynamic analysis of Stewart platform-based machine tool structures”, *Robotica*, v 21, n 5, 2003, pp.541-554.
- [30] Chuang, H.Y., “Evaluation of an adaptive weighting cross-coupled controller for a 3-PRPS platform”, *JSME International Journal, Series C: Mechanical Systems, Machine*

Elements and Manufacturing, v 44,
n 1, 2001, pp.164-170.

- [31] Lee, S.H., Song, J.B., Choi, W.C.
and Hong, D.H. , “Position control
of a Stewart platform using
inverse dynamics control with
approximate
dynamics” ,Mechatronics, v 13, n
6, 2003, pp.605-619.
- [32] Jang, J.S.R., Sun , C.T. and E.
Mizutani , “Neuro-Fuzzy AND
Soft Computing” 1997, Prentice
Hall.