

強健性模糊類神經網路控制之雙軸運動控制系統

林法正

國立中央大學 電機工程學系教授

國科會工程處電力學門召集人

Email : linfj@ee.ncu.edu.tw

TEL : 03-4227151 ext. 34532 FAX : 03-4255830

摘要

本文利用計算轉矩控制的技巧設計一強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統控制由兩台單軸永磁線型同步馬達(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, PMLSM)所組成的X-Y平台雙軸運動控制系統。利用所設計的控制系統，將使得系統在運動追跡效能上能有顯著的改善且對於參數變化、雜訊、交叉耦合的干擾和摩擦力等因素可加強其強健性。所設計的所有控制法則實現在以TMS320C32數位訊號處理器為核心的單板控制電腦配合磁場導向控制之馬達驅動器可有效的控制雙軸的X-Y平台。最後以多種軌跡追隨之實測結果驗證所提出的控制系統其動態特性對於以上所提之干擾具有相當的強健性。

關鍵字：計算轉矩控制、模糊類神經網路、滑動模態控制、永磁線型同步馬報、X-Y平台

1. 前言

現代的製造系統中電腦數值控制(Computer Numerical Controlled; CNC)工具機扮演相當重要的角色[1-4]。一般的電腦數值控制工具機可以分為兩部份：其一為機械部份包含伺服驅動系統；另一部份為用來控制機械部份作多軸運動的伺服控制器。一般而言，CNC機器是由X-Y平台和Z軸運動機構所組成，而每一軸的運動都是由獨立的致動器驅動，像是直流或是交流馬達機構。這種架構通常在各軸間會造成未模式化的動態特性、耦合干擾、無法量測的摩擦力以及擾動，導致機械加工過程中系統的性能受到破壞[1]。因此，為了改善機械加工中的追隨性能，許多研究提出改善控制性能方法。

在現代的製程中，雙軸系統的控制必須配合具備高效能與高準確性的機器。本文將以兩台永磁線型同步馬達所組成之X-Y平台的運動控制為主。此種系統的應用相當廣泛，像是機械工具和積體電路的製程設備。直接以永磁線型同步馬達驅動之機構具有下列的優點：(1)不受齒隙(Backlash)影響和具有較小的摩擦力；(2)長距離的高速移動及高精密度；(3)具有高可靠性和堅硬的結構；(4)高推力(Thrust Force)[5]。同時，永磁線型同步馬達的邊界效應(End Effect)相較線型感應馬達易於控制。因此，永磁線型同步馬達適合於高性能伺服應用，其廣泛應用於工業界的機器人、工具機、半導體製程系統和X-Y雙軸驅動器...等等。然而，因為永磁線型同步馬達驅動系統並沒有齒輪或滾珠螺桿(Ball Screw)...等配備，所以易受漣波力、參數變化和外來負載干擾所影響，而且邊界效應

亦使得推力的控制更加困難。此外，因為線型同步馬達的運動牽涉到兩個相接的部分，不可避免地運動控制力包含了摩擦力。此外，摩擦力的特性會因接觸力的大小、溫度和溼度而改變[6,7]，而且在閉迴路控制系統中，摩擦力會造成穩帶誤差、有限週期(Limit Cycle)和低頻寬[6,7]。一般而言，在設計控制法則補償摩擦力時，通常需要適合的摩擦力模型來預測和補償摩擦力，例如一些研究中就是利用適應性與可變結構控制的方法來補償摩擦力。然而摩擦力是一種自然現象，非常難將其模式化，而且對其特性尚未完全了解，所以實際上要獲得一個準確的摩擦力模型是不可能的。因此，如何設計高性能的運動控制系統以補償不確定性與非線性摩擦力的干擾，並且快速且直接地施加在永磁線型同步馬達驅動系統上是非常的重要。

本文以32位元浮點運算數位訊號處理器TMS320C32為主的單板控制電腦來實現所設計的強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統與磁場導向控制機構。具浮點運算能力的數位訊號處理器除了擁有常見的數位訊號處理器的優點外同時結合了準確的浮點運算。另一方面，許多數位訊號處理器的實驗板已經開始支援即時控制的設備。透過內建的類比/數位轉換器、數位/類比轉換器、並列處理的輸入/輸出埠與編碼器介面，這些實驗板大大地減少了利用桌上型電腦所完成的數位控制器的體積。

2. X-Y 平台之單軸永磁線型同步馬達數學模式

圖1[8]所示為本專題所使用之X-Y平台雙軸運動控制系統，此雙軸運動控制系統由兩台鐵心式永磁線型同步馬達所組成，每一台永磁線型同步馬達是由一短的”一次側”線圈，包含霍爾元件感測器(Hall Sensing Element)；和一長的固定(Stationary)”二次側”線圈，包含永磁和線性滑軌與線型光學尺(Linear Scale)所組成其具有結構簡單、高推力、高速、高精密度與長距離移動等諸多優點。其邊界效應較一般線型感應馬達易於控制，而其所使用之驅動器為一般控制永磁線型同步馬達之磁場導向電流控制的脈寬調變(Pulse-Width-Modulation, PWM)電壓源反流器(Voltage Source Inverter, VSI)所驅動。當電磁推力直接應用在沒有耦合機構的動子上，則動子的移動為高度可控。因此，線型永磁同步馬達適合用來實現X-Y平台雙軸運動控制系統，而在控制器的設計上為X軸與Y軸分開設計。本專題所使用來組成X-Y平台雙軸運動控制系統的永磁線型同步馬達其規格為額定電壓220伏特、額定連續最大電流5.0安培、連續推力475牛頓。永磁極距(Pole Pitch)為3.2公分。



圖1 X-Y平台雙軸運動控制系統

圖2為單軸磁場導向控制之永磁線型同步馬達伺服驅動架構圖，其中 d_{mi} 為動子命令； d_i 為動子位置； v_{mi} 為速度命令； v_i 為動子的線性速度； i_{ai}^* 、 i_{bi}^* 和 i_{ci}^* 為三相電流命令； i_{ai} 和 i_{bi} 分別為 A 相和 B 相的電流； T_{ai} 、 T_{bi} 和 T_{ci} 為送給反流器的切換訊號。此驅動系統是由永磁線型同步馬達、電流控制的脈波寬度調變電壓型反流器、磁場導向的機構、座標轉換器、速度及位置控制迴路、線型光學尺和霍爾元件感測器所組成。永磁線型同步馬達的磁通位置係經由霍爾元件感測器所得之 (U_i, V_i, W_i) 三相訊號和動子位置訊號 d_i 所判斷。在永磁線型同步馬達的動子上加裝不同大小的載重，可以改變系統動子的質量大小。在履行磁場導向控制後，X-Y 平台之永磁線型同步馬達伺服驅動系統的電磁推力方程式可簡化如下：

$$F_{ei} = K_{fi} \dot{i}_{qi}^* \quad (1)$$

$$K_{fi} = 3\pi n_{pi} \lambda_{PMi} / (2\tau_i) \quad (2)$$

其中 $i = x, y$ (x, y 表示軸)； K_{fi} 為推力係數； i_{qi}^* 為推力的命令電流。動子之動態方程式可表示如下：

$$F_{ei} = M_i \ddot{x}_i + D_i \dot{v}_i + F_{Li} + f_i(v) \quad (3)$$

其中 M_i 表示動子的全部質量； D_i 表示黏滯係數和鐵損係數； F_{Li} 表示包含交叉耦合干擾在內的外來干擾； $f_i(v)$ 為摩擦力，所有係數皆為時變。考慮庫倫摩擦、黏滯摩擦和 Stribeck 影響，摩擦力的方程式可表示如下[6,7]：

$$f_i(v) = F_{Ci} \operatorname{sgn}(v_i) + (F_{Si} - F_{Ci}) e^{-(v_i/v_{Si})^2} \operatorname{sgn}(v_i) + K_{vi} v_i \quad (4)$$

其中 F_{Ci} 為庫倫摩擦； F_{Si} 為靜態摩擦； v_{Si} 為 Stribeck 速度係數； K_{vi} 為黏滯摩擦係數； $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 為符號函數。

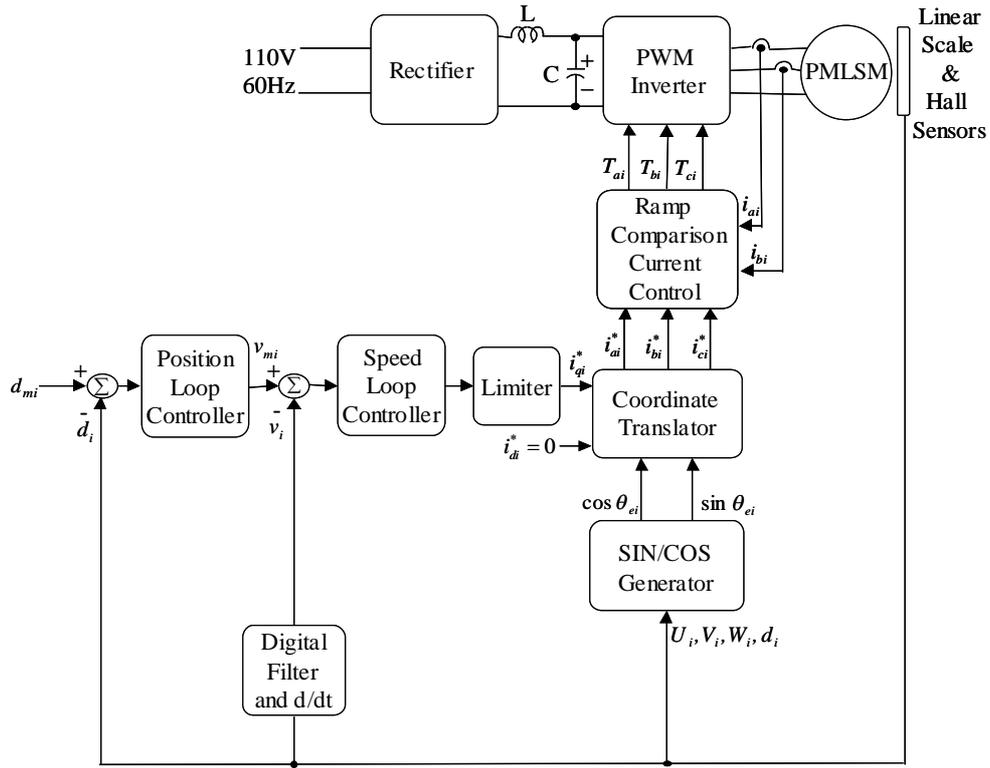


圖2 單軸磁場導向控制之永磁線型同步馬達伺服驅動系統

3. 強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統

本文設計強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統來控制X-Y平台的運動，而X軸與Y軸得運動分開控制。針對單軸永磁線型同步馬達所設計之強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統如圖3所示。在圖3和以下的推導中為了簡化符號將省略下標 i 。根據(1)式與(3)式，每一組磁場導向控制之永磁線型同步馬達伺服驅動系統可改寫如下：

$$\ddot{x}(t) = -\frac{D}{M}\dot{x}(t) + \frac{K_f}{M}i_q^*(t) - \frac{1}{M}[F_L + f(v)]\underline{\Delta}A_p\dot{x}(t) + B_p U(t) + C_p[F_L + f(v)] \quad (5)$$

其中 $A_p = -D/M$ ； $B_p = K_f/M > 0$ ； $C_p = -1/M$ ； $U(t)$ 為控制推力。假設系統所有的參數已知，同時忽略外來干擾、交叉耦合干擾和摩擦力的影響，則標準情況之永磁線型同步馬達伺服驅動系統可表示如下：

$$\ddot{x}(t) = A_n\dot{x}(t) + B_n U(t) \quad (6)$$

其中 A_n 與 B_n 分別代表 A_p 與 B_p 的標準值。當不確定項發生時，也就是說系統的參數發生變動或是外來干擾、交叉耦合干擾和摩擦力加入系統，則控制系統的動態方程式可改寫如下：

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) &= (A_n + \Delta A)\dot{x}(t) + (B_n + \Delta B)U(t) + (C_n + \Delta C)(F_L + f(v)) \\ &= A_n\dot{x}(t) + B_n U(t) + D(t) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 C_n 為 C_p 的正常值； ΔA 、 ΔB 和 ΔC 表示不確定； $D(t)$ 則稱為總集不確定項，定義如下：

$$D(t) = \Delta A\dot{x}(t) + \Delta B U(t) + (C_n + \Delta C)(F_L + f(v)) \quad (8)$$

在此假設總集不確定項為有限值且其邊限已知。為了克服這些存在於永磁線型同步馬達伺服驅動系統中不可預期的不確定項，設計一強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統。

控制的目的是在於找出一控制法則使狀態變數 $d(t)$ 可追隨任一軌跡命令 $d_m(t)$ ，定義追隨誤

差 $e(t) = d_m(t) - d(t)$ ，其中 $d_m(t)$ 表示每軸的運動命令。定義順滑面如下[9]：

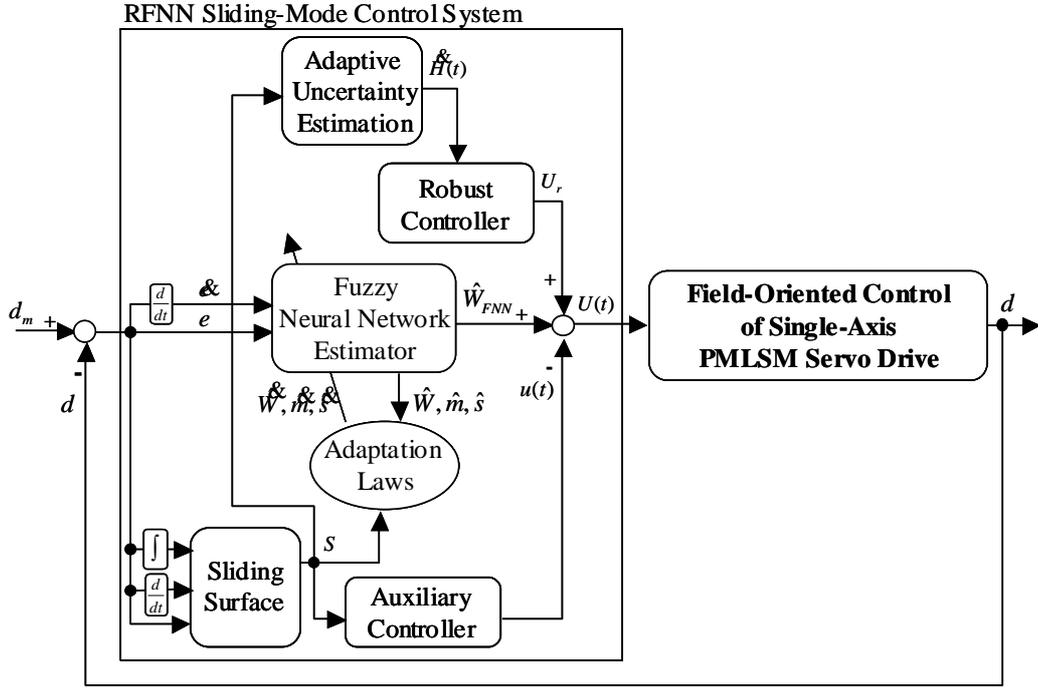


圖3 強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統架構圖

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^2 \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (9)$$

其中 λ 為正常數。因此將(9)式對時間微分並利用(7)式可推得下式：

$$\mathcal{S}(t) \Big|_{U(t)=U_{eq}(t)} = 0 \quad (10)$$

在滑動模態控制的設計中，當上式條件成立時可推導出決定系統動態維持順滑面上的理想等效控制力 $U_{eq}(t)$ 如下所示：

$$U_{eq}(t) = B_n^{-1} [d_m^{(n)}(t) - A_n d^{(n)}(t) - D(t) + 2\lambda \mathcal{S}(t) + \lambda^2 e(t)] \quad (11)$$

適當的選取 λ 的大小，可透過簡單的設計確保系統的動態特性。但是當系統的參數受到干擾或是未知的情形下，(11)式並不能確保系統的性能同時控制系統的穩定性可會受到破壞。為了確保包含不確定項在內的系統穩定性，將利用計算轉矩控制的技巧設計強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統。

根據(9)式、(10)式和(11)式，則理想等效控制法則可改寫如下：

$$-B_n^{-1} \mathcal{S}(t) = B_n^{-1} A_n S(t) - U_{eq}(t) + W \quad (12)$$

其中非線性函數 W 定義如下：

$$W = B_n^{-1} \{-A_n [d_m^{(n)}(t) + 2\lambda e(t) + \lambda^2 \int_0^t e(\tau) d\tau] - D(t) + d^{(n)}(t)\} \quad (13)$$

計算轉矩控制用來近似理想等效控制法則，將其設計如下：

$$U_{eq}(t) = W - u(t) \quad (14)$$

其中 $u(t)$ 為輔助控制器。將(14)式代入(12)式則閉迴路系統可寫成下式：

$$-B_n^{-1} \mathcal{S}(t) = B_n^{-1} A_n S(t) + u(t) \quad (15)$$

在計算轉矩控制中，將輔助控制器 $u(t)$ 設計成PID控制器則

$$u(t) = -[K_s \mathcal{E}(t) + K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau] \quad (16)$$

其中 K_s 、 K_p 和 K_I 為控制增益值且為正常數。若選擇 K_p 和 K_I 為下列型式：

$$K_p = K_s \times 2\lambda ; K_I = K_s \times \lambda^2 \quad (17)$$

然後將(17)式代入(16)式，則

$$u(t) = -K_s [\mathcal{E}(t) + 2\lambda e(t) + \lambda^2 \int_0^t e(\tau) d\tau] = -K_s S(t) \quad (18)$$

根據(18)式，則閉迴路系統(15)式可改寫如下：

$$-B_n^{-1} \mathcal{E}(t) = B_n^{-1} A_n S(t) - K_s S(t) = (B_n^{-1} A_n - K_s) S(t) \quad (19)$$

利用李亞普諾夫穩定理論(Lyapunov Stability Theorem)和巴巴拉輔助定理(Barbalet's Lemma)[9]可驗證計算轉矩控制的設計是穩定的。此外，控制系統的追隨誤差也會因為 $S(t) \rightarrow 0$ 而收斂到零。

從(13)式可知非線性函數 W 包含了系統的參數變化、外來干擾、交叉耦合干擾和摩擦力等不確定項的影響。由於系統的參數變化很難估測，同時實際系統的外來干擾、交叉耦合干擾和摩擦力的正確值也很難得知，故(14)式所示之控制法則無法實際實現。因此，設計一計算轉矩控制器如下式來近似非線性函數 W ：

$$U(t) = \hat{W} - u(t) \quad (20)$$

其中智慧型控制器 \hat{W} 是用來學習非線性函數 W 且定義如下：

$$\hat{W} = \hat{W}_{FNN} + U_r \quad (21)$$

其中 \hat{W}_{FNN} 為模糊類神經網路控制器的輸出； U_r 為強健控制器。模糊類神經網路 \hat{W}_{FNN} 是用來學習因為不確定的系統動態所產生的非線性函數 W ，而強健控制器 U_r 是設計來補償 W 和 \hat{W}_{FNN} 之間的誤差。其中模糊類神經網路的輸出權重值及歸屬函數中的平均值與標準差值均為線上可調整，且 U_r 亦是採用適應性控制法則設計之。

4. 軟硬體系統說明

圖4所示為以數位訊號處理器單板控制電腦為基礎之雙軸運動控制系統方塊圖。控制電腦的核心為具浮點運算能力的TMS320C32數位訊號處理器，此外，控制電腦還具備多通道的類比/數位轉換器、數位/類比轉換器、並行處理埠與編碼器介面。電流控制電壓型反流器利用智慧型功率模組(Intelligent Power Module, IPM)來實現，其操作頻率為15kHz。內建在編碼器介面電路的數位濾波器(Digital Filter)和四倍頻電路，可增加位置回授的精確度，實測的精確度為1微米。磁場導向機構和所設計之適應性模糊類神經網路控制系統利用C語言以及組合語言實現在數位訊號處理器。所有的程式先在電腦以微軟的環境發展然後再燒錄到可消除程式化唯讀記憶體(EPROM)，將可消除程式化唯讀記憶體插入單板控制電腦後接上控制板電源即可透過小鍵盤與液晶顯示操作單板控制電腦實踐馬達精密定位伺服控制，而不需個人電腦輔助。X軸與Y軸的三相命令電流透過數位/類比轉換器送至馬達驅動器。所設計之即時控制與強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統與數位訊號處理器的主程式結合，透過一個中斷服務程式與一個控制副程式來執行。主程式首先設定參數和輸入輸出的初使值然後設定中斷程式的中斷時間。中斷致能後，中斷服務程式每0.2毫秒讀取一次編碼器介面與執行一次磁場導向機構。中斷服務程式透過編碼器讀取動子位置同時由控制副程式取得控制推力 i_{qxx}^* 、 i_{qsy}^* ，經由磁場導向機構計算出三相命令電流透過數位/類比轉換器送至X軸與Y軸的馬達驅動器。

由於數位訊號處理器單板控制電腦只提供一個硬體中斷，因此在中斷服務程式中設定一變數 ξ 來紀錄中斷服務程式執行的次數。當變數等於5時將控制副程式致能也就是說其取樣時間為1毫秒。控制副程式先從編碼器讀入動子位置再根據所設計的適應性模糊類神經網路控制演算法計算出馬達速度 v_x 、 v_y 及控制推力 i_{qxx}^* 、 i_{qxy}^* 。

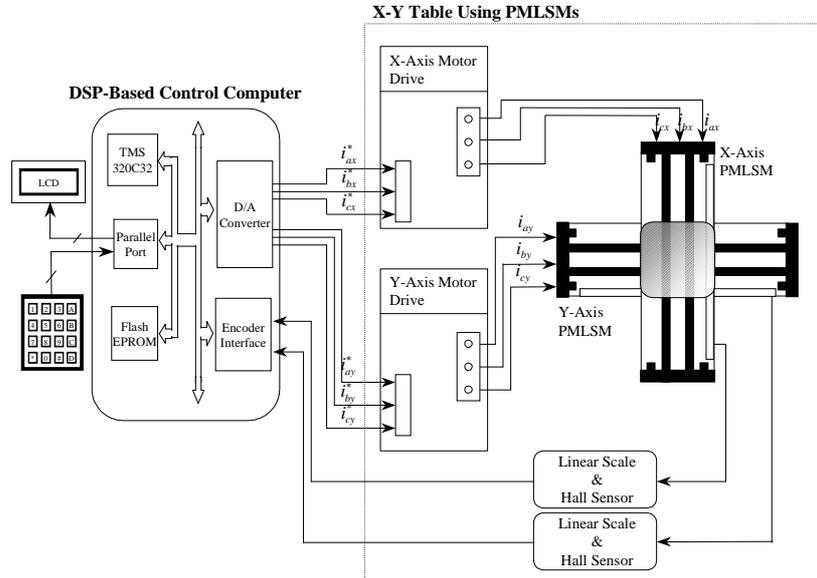


圖4 以數位訊號處理器單板控制電腦為基礎之雙軸運動控制系統

5. 性能指標

為了測量強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統在軌跡追隨時的控制性能，定義最大追隨誤差 T_M 、追隨誤差平均值 m 和追隨誤差標準差值 T_S 如下：

$$T_M = \max_k \sqrt{T_x(k)^2 + T_y(k)^2}, \text{ where } T_i(k) = d_{mi}(k) - d_i(k), i = x, y \quad (22)$$

$$m = \sum_{k=1}^n T(k) / n, \text{ where } T(k) = \sqrt{T_x(k)^2 + T_y(k)^2} \quad (23)$$

$$T_S = \sqrt{\sum_{k=1}^n (T(k) - m)^2 / n} \quad (24)$$

利用最大追隨誤差和追隨誤差平均值可以輕易的看出控制性能的比較。此外，軌跡追隨的切跳現象可以由追隨誤差的標準差值量測而得。

6. 實測結果

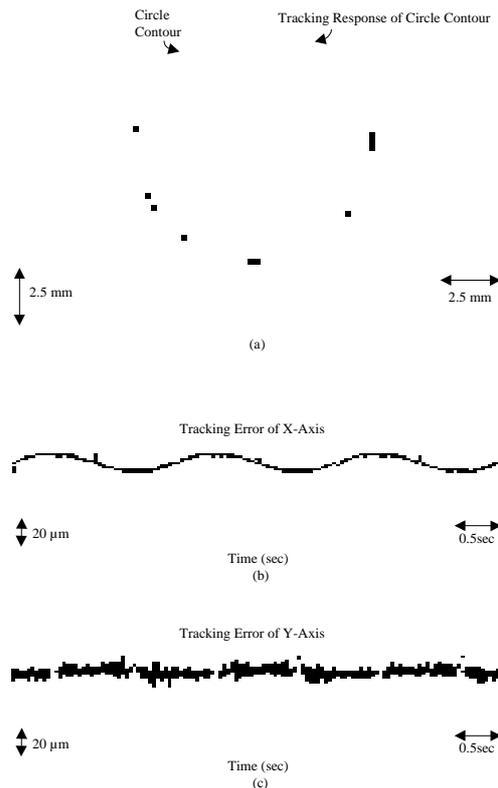
本文將利用圓形以及四瓣葉形來驗證所設計之控制系統在面對不同軌跡命令時的控制性能。為了顯示所設計的控制系統在較少的規則下的控制性能，本文所使用的模糊類神經網路其輸入層、歸屬函數層、規則層和輸出層分別有2個、6個、9個和1個的神經元。此外，為了達到有效的測試，本文設計了兩種狀況做為測試條件，分別為：標準狀況和參數變化狀況。其中，參數變化狀況是將20公斤的砝碼直接加在X-Y平台運動控制系統的動子上。

圖5所示為標準狀況下利用強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統追隨圓形與四瓣葉形軌跡之X-Y平台追隨響應及X軸與Y軸之追隨誤差。另一方面，圖6所示為參數變化狀況下

利用強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統追隨圓形與四瓣葉形軌跡之X-Y平台追隨響應及X軸與Y軸之追隨誤差。由實測結果可知，無論在標準狀況或是參數變化狀況X-Y平台均能具備良好的追隨響應；此外，所設計的控制系統面對參數變化的狀況下具備了強健性。表一所示為所設計之強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統在標準狀況與參數變化狀況下追隨圓形與四瓣葉形軌跡之性能測量表。

7. 結論

本文成功地利用李亞普諾夫穩定理論推導出模糊類神經網路的適應性學習法則，並且成功的發展出強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統來克服X-Y平台雙軸運動控制系統中包含摩擦力與交叉耦合干擾在內的外來干擾及近似誤差。此外，所設計的智慧型控制系統成功地利用TMS320C32單板控制電腦加以實現，以控制X-Y平台雙軸運動控制系統追隨不同的軌跡命令，並達到精密與強健等控制特性之需求。另一方面，本文所提供之方法大大地減少數位控制器的體積與價格，同時配合具備浮點運算能力的數位訊號處理器不但可以執行較複雜的控制法則，透過更換可消除程式化唯讀記憶體的方式更可執行不同的控制法則以配合不同應用時之控制規格與軌跡需求，對於未來工業界在發展智慧型控制系統及其應用上相信具有相當的參考價值。



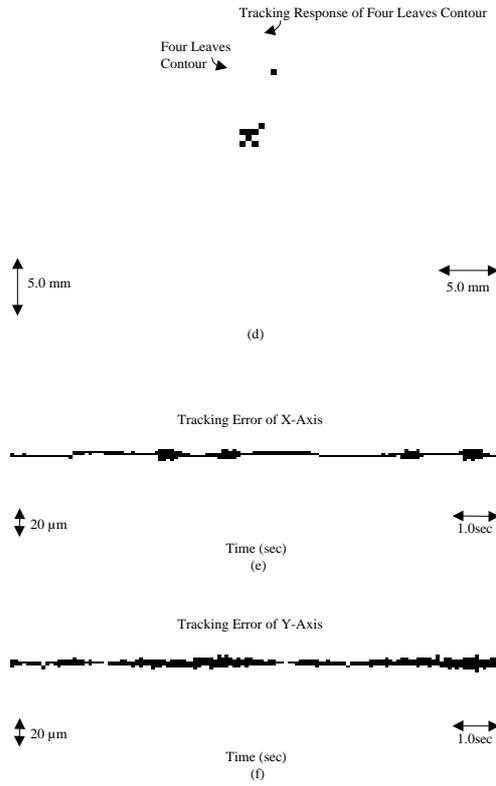
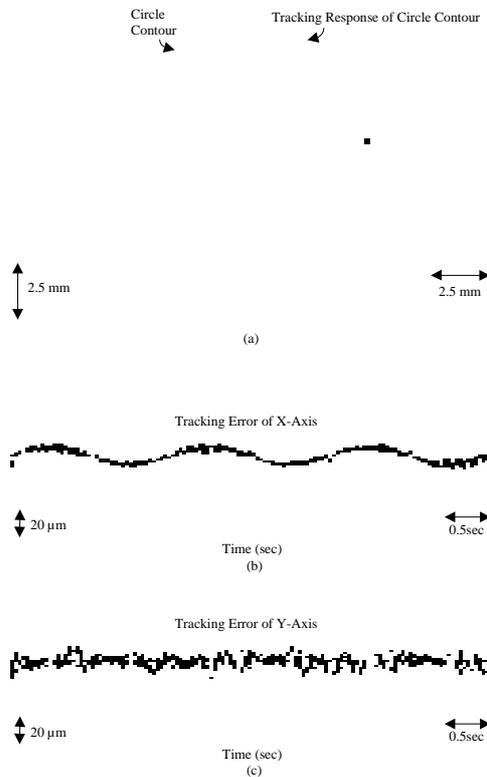


圖5 強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統在標準狀況下實測結果：(a) 圓形軌跡之追隨響應；(b) X軸之圓形軌跡追隨誤差；(c) Y軸之圓形軌跡追隨誤差；(d) 四瓣葉形軌跡之追隨響應；(e) X軸之四瓣葉形軌跡追隨誤差；(f) Y軸之四瓣葉形軌跡追隨誤差。



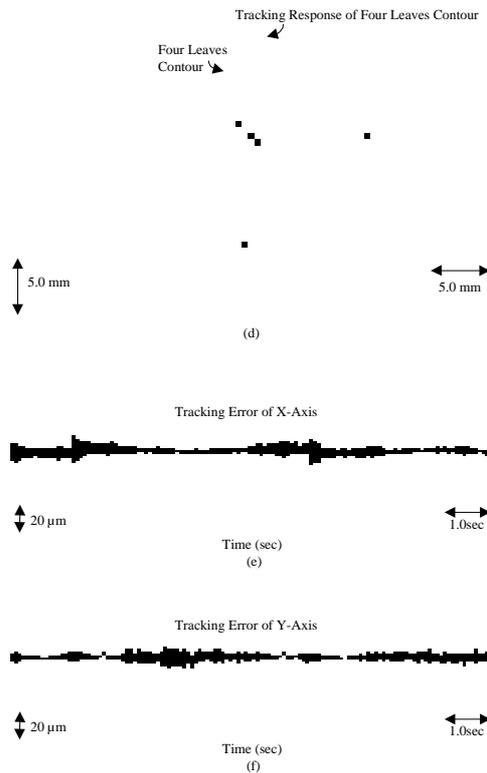


圖6 強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統在參數變化狀況下實測結果：(a) 圓形軌跡之追隨響應；(b) X軸之圓形軌跡追隨誤差；(c) Y軸之圓形軌跡追隨誤差；(d) 四瓣葉形軌跡之追隨響應；(e) X軸之四瓣葉形軌跡追隨誤差；(f) Y軸之四瓣葉形軌跡追隨誤差。

表一 強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統之性能測量表

μm / Contours & Cases / Tracking Errors	Circle at Nominal Case	Four Leaves at Nominal Case	Circle at Parameter Variation Case	Four Leaves at Parameter Variation Case
Maximum	17.2148	28.3535	23.3007	33.4330
Average	6.8997	3.5212	14.3890	10.0130
Standard Deviation	2.7953	2.5082	7.3447	5.9044

8. 參考文獻

1. Groover, M. P., *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Process, and Systems*, Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall, 1996.
2. Kim, D. I., and Yim, C. H., All Digital High Performance Controller for Spindle Motor in CNC Machine Tool, in *Proc. IEEE Int. Conf. Electric Machines and Drives*, USA, 1997.
3. Hanafi, D., Tordon, M., and Katupitiya, J., An Active Axis Control Ssystem for a Conventional CNC Machine, in *Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1188-1193, 2003
4. Lim, H., Seo, J. W., and Choi, C. H., Position Control of XY Table in CNC Machining Center with Nonrigid Ballscrew, in *Proc. American Control Conf.* Chicago, Illinois, pp. 1542-1546, 2000

5. Boldea, I., and Nasar, S. A., *Linear Electric Actuators and Generators*, London, Cambridge, University Press, 1997.
6. Tan, Y., Chang, J., and Tan, H., Adaptive Backstepping Control and Friction Compensation for AC Servo with Inertia and Load Uncertainties, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 50, No. 5, pp. 944-952, 2003.
7. Ferreti, G., Magnani, G., and Rocco, P., Single and Multistate Integral Friction Models, *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 49, No. 12, pp. 2292-2297, 2004.
8. Shen, P. H. and Lin, F. J., Intelligent Backstepping Sliding-Mode Control Using RBFN for Two-Axis Motion Control System, *IEE Proc. Electric Power Appl.*, Vol. 152, No. 5, Sept. pp. 1321-1342, 2005.
9. Slotine, J. -J. E., and Li, W., *Applied Nonlinear Control*, Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall, 1991.