

工具機循徑運動控制精度改善策略之研究(2/2)

Strategies in the Improvement of Contouring Accuracy for CNC Motion Control (2/2)

計畫編號：NSC 90-2212-E-009-041

執行期限：90年8月 - 91年7月

主持人：李安謙 E-mail: aclee@cc.nctu.edu.tw

執行單位：交通大學機械系

一、中文摘要(關鍵詞：運動控制、類神經網路、摩擦)

本計畫為二年期之計劃，計畫第二年的研究目標包含三部份：

1. 摩擦力之模型建立。
2. 類神經網路補償器架構建立。
3. 實機測試及性能評估。

在本計畫中，我們先建立摩擦力模型與系統轉移函數。因為運動系統使用伸縮蓋而且存在摩擦力，本研究中將採用干擾觀測器來建立一個供設計控制器之參考之系統轉移函數，接著利用它來設計前饋控制器與回授控制器，來達到精密循跡控制的目的。干擾觀測器可以使回授控制更具強健性。前饋控制器被設計成為線性馬達轉移函數的反函數，理想上可達到反應快速與降低追蹤誤差的效果。而回授控制器的誤差補償能處理前饋控制器因鑑別參數的差異或變化而產生的誤差。對於干擾觀測器無法消除之非線性摩擦力的影響，則使用了非線性補償器。可分成兩種類別，一種是參數式的摩擦力補償器，用來估測與補償摩擦力；另一種則是類神經網路補償器，以學習方式克服摩擦力。類神經補償器又可分為兩種架構，分別利用了誤差訊號與速度回授訊號做為網路輸入來產生補償命令，使系統能夠達到更好的循跡精確度。

在線性馬達的運動控制實驗中，比較數種補償器架構於來降低摩擦力所造成之誤差的程度，除了比較補償效果好壞外，也證明本文的非線性補償器的可行性。

英文摘要(Keyword: motion control, neural network, friction)

This is a two-year project. The purpose of the second year including three parts: (1) establishing of the friction model; (2) establishing the structure of the neural network compensator; (3) experimenting on a machine and evaluating the performance.

In this paper, the friction model and system transfer function will be found first. Because the dust cover and the existing friction force will interfere the estimation of system transfer function, we will use a disturbance observer to confine the system transfer function to a nominal model. Then the feed forward controller and feedback controller are applied to achieve good tracking control. The disturbance observer can let system have a more robust property. The feed forward controller is designed to be the inverse function of the system nominal model, therefore, the system response become faster and error become less. The feedback controller can take care the residual error due to un-modelled system and parameter variation. The other part of the nonlinear friction, which is not been taken care by the observer, can not be compensated by disturbance observer. This nonlinear friction can be dealt with by nonlinear compensators. These compensators have two kinds, one is a parameterized friction model, which can be

used to estimate friction force and then compensate it. The other is a neural network compensator which can compensate friction force by learning. The latter can be further separated into two different structures, they individually use the error and velocity signals as the input signals to produce the compensating command for improving the performance of system.

We compare several compensating methods for reducing the friction effect by experiments. The results show that these compensators can reduce errors and are also feasible.

二、計劃緣由與目的

精密的軌跡控制是許多製造系統的基本要求，尤其是CNC加工機。多軸軌跡控制除了要求個別單軸定位精度之外，在運動過程中各軸之相對位移必須維持一定的關係，精密地執行多軸之間的直線、圓弧甚至高階之軌跡運動，所以本計畫第一年研究交叉耦合控制方法，第二年則研究如何降低或消除摩擦力的影響。現今機械的加工精度的不斷提昇，其加工精度要求已進步至數 $\sim m$ ，如何提高機械加工精度便成為一個主要的課題。影響機械精密度的因素很多，其中摩擦力對工具機加工精度的影響是一個很嚴重的問題，因為只要有表面接觸的相對運動，必定有摩擦力的存在，但是摩擦力對於運動控制系統來說是一種高度的非線性現象，無法用一般線性控制的方式來妥善處理，造成了高精度控制上極大的問題。在精度要求不高的系統中，摩擦力經常是被忽略不計的；但是當精度要求接近 $\sim m$ 之後，摩擦力的影響就不容忽視了。

本研究以一個伺服線性馬達運動控制系統作一研究平台，對運動控制中的摩擦

力現象作分析，並且發展適當的非線性補償方法，以克服摩擦力現象的影響，使系統能夠滿足高精密度的控制要求。其中所要面對的問題是：

- (1) 精度補償：為了達到良好的追蹤精度，使用了前饋補償器，使其成為系統模型的反函數，以降低追蹤誤差。這需要利用二個系統參數-慣量、黏滯係數，前饋與迴授控制器設計需要準確的系統參數，系統鑑別所得之參數影響控制系統的精度，誤差太大時會造成系統不穩定。所以利用系統參數的鑑別再加上干擾觀測器的應用，使系統實際模型趨近於期望的模型。如此即可良好地設計迴授及前饋控制器。
- (2) 速度估測：為了達成閉迴路中速度與位置的控制，必須獲得系統即時位置與速度的資訊。本研究中的伺服控制系統使用感測器(Encoder)獲得真實的位置量測，但是並不能直接得到即時速度以及加速度的資訊。利用估測手段難免會受到雜訊的干擾，所以必須使用一些訊號處理的技術來解決問題。
- (3) 非線性摩擦力補償：當要發生相對運動時，在初始過程中須先克服較大的靜摩擦力才開始運動，但是等到運動開始後由於所要克服的動摩擦力比靜摩擦力小，會造成位置誤差的突然增加，這是摩擦力主要造成的誤差。在換向時也有近似的情況。

三、研究方法及成果

摩擦力是一個高度非線性的函數，其大小受到很多因素的影響。一般而言，與正向力、位置、速度有關以外，有時也是加速度(作用力)之函數。影響摩擦力的因素尚有溫度、潤滑程度、磨耗程度及操

作環境等，可見其特性極為複雜。圖 1 是一個常用的模型。

在電流迴路中，利用一輸入步階命令 u ，得到其輸出響應 y ，則公式為

$$J\ddot{y} + B\dot{y} = u - T_c \operatorname{sgn}(\dot{y}) \quad (1)$$

其中 J ：慣量參數

B ：黏滯摩擦力參數

T_c ：動摩擦力參數

並且輸入夠大的步階命令 u ，輸出響應為 y ，則取比較不受黏滯靜摩擦力影響的區域，即不是暫態響應的範圍，資料獲取後再由最小平方系統鑑別法，可以得到各參數值如下

$$\begin{bmatrix} J \\ B \\ T_c \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{Y}} & \dot{\mathbf{Y}} & \operatorname{sgn}(\dot{\mathbf{Y}}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{Y}} & \dot{\mathbf{Y}} & \operatorname{sgn}(\dot{\mathbf{Y}}) \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{Y}} & \dot{\mathbf{Y}} & \operatorname{sgn}(\dot{\mathbf{Y}}) \end{bmatrix}^T \mathbf{U} \quad (2)$$

其中

$\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$ 為輸出響應的向量

$\mathbf{U} = [u_1, u_2, \dots, u_N]^T$ 為輸入命令的向量

這裡的 N 為在鑑別中使用的資料數。

除了鑑別得到的系統參數，為了配合參數式摩擦力的設計，必須求得到最大靜摩擦力的值。我們利用直接實驗的方法，逐步的增加輸入的控制命令，直到突破靜摩擦力而線性平台開始啟動的時候，此時的輸入命令就當作最大靜摩擦力的值。

速度估測採 \hat{a} - \hat{a} 濾波器，可大幅降低高頻雜訊，如圖 2 所示。位置濾波與速度估測之方程式如下所示。

$$\frac{\hat{X}(z)}{Y(z)} = \frac{z(r+s)-r}{z^2 + (r+s-2)z + (1-r)} \quad (3)$$

$$\frac{\hat{V}(z)}{Y(z)} = \frac{s}{T} \frac{z(z-1)}{z^2 + (r+s-2)z + (1-r)} \quad (4)$$

整個伺服迴路控制架構如圖 3，主要的

組成可分為四個部分：

- 回授控制器：位置迴路採比例控制器；速度迴路採比例、積分控制器。
- 前饋控制器。
- 使用位置迴授的干擾觀測器。
- 摩擦力的補償器。

其中

y	系統實際輸出
x	參考命令輸出
K_t	力量常數
K_a	電流常數
\hat{J}	期望的慣量參數
\hat{B}	期望的黏滯摩擦參數
J	真實系統的慣量參數
B	真實系統的黏滯摩擦參數
K_p	速度迴授比例增益
K_f	速度迴授微分項增益
K_s	位置誤差比例增益
$Q(s)$	低通濾波器
F_v	α - β 速度濾波器
F_p	α - β 位置濾波器

在授控制器的部分，由電流驅動器規格中得知電流迴路頻寬約為 800Hz，則速度迴路頻寬設計為前者之 $\frac{1}{10}$ 或以下；位置

迴路控制器的設計，則基於 cascade control 的觀念，在設計位置迴路時，使速度迴路之頻寬為位置迴路頻寬之 3 倍以上。

前饋控制器可以消除線性馬達的慣量作用與黏滯效應，以增加系統的路徑追蹤性能。在圖 4 中，將系統視為一個線性系統其輸入為 x 、輸出為 y ；所以，系統的轉移函數方程式描述如下

$$\frac{y}{x} = \frac{C_b P + P_m^{-1} P}{1 + C_b P} \quad (5)$$

其中

P	實際的受控體
P_m	受控體的模型
C_b	回授控制器

如果 P 與 P_m 相等，則系統就能夠達到理想的追蹤性，即式(4.6)成為 $y=x$ ，實際輸出響應為輸入的位置命令。

採用圖 5 干擾觀測器的架構，其輸入與輸出間的關係為

$$y(s) = \frac{P(s)}{1 + Q(s)\left(\frac{P(s)}{P_n(s)} - 1\right)} u(s) + \frac{P(s)(1 - Q(s))}{1 + Q(s)\left(\frac{P(s)}{P_n(s)} - 1\right)} d(s) - \frac{\frac{P(s)}{P_n(s)} Q(s)}{1 + Q(s)\left(\frac{P(s)}{P_n(s)} - 1\right)} \dot{\prime}(s) \quad (6)$$

其中

$$P(s) = \frac{K_a K_t}{Js^2 + Bs} \text{ 實際之系統轉移函數}$$

$$P_n(s) = \frac{K_a K_t}{\hat{J}s^2 + \hat{B}s} \text{ 期望之系統轉移函數}$$

$u(s)$: 控制器輸入

$d(s)$: 干擾輸入

$\dot{\prime}(s)$: 量測雜訊

$Q(s)$: 低通濾波器

若將系統動態的不確定性描述成乘法性誤差方式，即 $P(s) = P_n(s)(1 + \Delta(s))$ ，其中 $\Delta(s)$ 為系統模型的不確定性。所以輸出 $y(s)$ 轉移函數表示如下

$$y(s) = \frac{P_n(s)(1 + \Delta(s))}{1 + \Delta(s)Q(s)} u(s) + \frac{P_n(s)(1 - \Delta(s))}{1 + \Delta(s)Q(s)} d(s) - \frac{(1 + \Delta(s))Q(s)}{1 + \Delta(s)Q(s)} \dot{\prime}(s) \quad (7)$$

進一步地討論，若(7)式中 $Q(s) = 0$ ，此時沒有觀測器之迴授值，可表示成

$$y(s) = P_n(s)(1 + \Delta(s)) u(s) + P_n(s)(1 + \Delta(s)) d(s) = P(s)u(s) + P(s) d(s) \quad (8)$$

由(8)式很明顯可看出模型誤差與外界干擾對系統輸出的影響。若 $Q(s) = 1$ ，即

$$y(s) = P_n(s) \cdot u(s) - \dot{\prime}(s) \quad (9)$$

上式可以看出輸出響應中僅與輸入命令及量測誤差相關，和系統模型誤差及外界干擾皆無關。假設系統無量測雜訊，即 $\dot{\prime} = 0$ ，顯然令觀測器中 Q 為一，干擾觀測器的補償讓系統具有抗干擾的能力，並且使實際系統成為期望的系統模型，利於控制之設計。

為了解 $Q(s)$ 的作用，令 $P(s) = P_n(s)$ 即 $\Delta(s) = 0$ 時，則式(7)寫成

$$y(s) = P(s)u(s) + P(s)(1 - Q(s))d(s) - Q(s)\dot{\prime}(s) \quad (10)$$

因為 $P(s)$ 為系統特性無法改變，(10)式中之 $(1 - Q(s))$ 影響干擾 $d(s)$ 對輸出 $y(s)$ 之貢獻，所以可視 $(1 - Q(s))$ 為一靈敏度函數，而 $Q(s)$ 為其互補的靈敏度函數，並影響量測誤差 $\dot{\prime}(s)$ 對輸出 $y(s)$ 之貢獻。所以前者可視為權衡外部干擾對於系統輸出的影響程度，後者則為權衡量測誤差對系統輸出的影響程度。

由前述敘述可知，若 $Q(s) = 1$ 則外部干擾 $d(s)$ 可消除。但是 $Q(s)$ 之頻寬若是全頻域為一，則量測雜訊明顯會影響觀測器的性能；所以考量外部干擾大部份在低頻範圍的情況下，適當的設計選擇使 $(1 - Q(s))$ 成為一高通濾波器，達到抗拒干擾和系統的不確定性的能力。而低通濾波器 $Q(s)$ 也能夠衰減大部分屬於高頻的量測誤差。

注意在干擾觀測器架構中，因為函數 $\frac{1}{P_n(s)}$

全部都是微分器，考慮量測雜訊對微分過於敏感，本身是不能夠實現在實際的系統上，但是藉由 $\frac{Q(s)}{P_n(s)}$ 的方式使其成為 proper

函數而實現，所以 $Q(s)$ 對 $P_n(s)$ 的相對階數至少要大於或階數相等，另外系統必須為極小相位的系統。以本研究中的伺服系統來說，對於利用位置迴授的干擾觀測器而言，要滿足以上的性能規格需求，只要設計一個二階的濾波器即可，但考量三階

可使 $\frac{Q(s)}{P_n(s)}$ 成為一個 strict proper 函數並且濾波效果也比較顯著，本文研究中採用(11)式的設計。

$$Q(s) = \frac{1}{f^3 s^3 + 3f^2 s^2 + 3fs + 1} \quad (11)$$

其中 f 與設計的頻寬有關，其倒數為截止頻率。

摩擦力補償架構在本研究中使用兩類摩擦力補償架構作為補償器，分別是參數式的摩擦力補償器與類神經網路補償器。

參數式的摩擦力補償器如圖 6 所示，其補償值公式描述如式(12)。主要利用鑑別系統中庫倫摩擦力和靜摩擦力等系統參數，以估測速度命令作判斷，決定補償器的補償值。

$$\begin{cases} T_c & \text{if } v(t-1) > V \text{ and } v(t) \geq -V \\ -T_c & \text{if } v(t-1) < -V \text{ and } v(t) \leq V \\ T_s & \text{if } |v(t-1)| \leq V \text{ and } v(t) > V \\ -T_s & \text{if } |v(t-1)| \leq V \text{ and } v(t) < -V \\ u(t-1) & \text{if } |v(t-1)| \leq V \text{ and } |v(t)| \leq V \\ T_c & \text{others} \end{cases} \quad (12)$$

其中

- T_c 庫倫摩擦力
- T_s 最大靜摩擦力
- V 趨近零速度的極小速度範圍值
- $v(t)$ 現在速度迴授值
- $v(t-1)$ 前一次速度迴授值
- $u(t-1)$ 前一次控制器的總輸出

類神經網路系統架構，主要可以分為兩類：

- (1) 學習摩擦力模型，如架構一。在圖 7，類神經網路在伺服迴路中，利用與摩擦力相關的資訊速度與前一次輸出命令當作網路輸入值，網路輸出值則附加在系統電流控制命令上。網路訓練則使用伺服迴路中的誤差訊號去調整網路值，達到補償摩擦力現象。
- (2) 補償整體誤差，如架構二。在圖 8，類神經網路在伺服迴路中，利用迴授式的類神經網路補償器，去補償整體系統的非線性現象。因為主要消除摩擦力所造成的位

置與速度誤差，網路輸入使用位置與速度迴路之追蹤誤差，網路輸出則附加在電流迴路的致動命令上，並使用位置迴路的追蹤誤差訊號調整網路加權值，達到補償摩擦力影響，改善追蹤精度的目標。但是此一方法事實上不只是針對摩擦力，因為在本研究中，只採用啟動與換向區的資料學習，並且限定在這兩區域作用，所以事實上大部分是補償摩擦力的影響。

摩擦力測試之命令將採三種不同快慢速度下的補償情況，如表一所示。比較的標準分別由啟動區、換向區和整體的累積平方誤差(Integrated square error, 簡稱 ISE)與最大絕對值誤差(Maximum absolute error, 簡稱 MAE) 三方面來評估。在表二中的控制器部分，FB 表示 feedback controller，FF 表示 feed forward controller，DO 表示 disturbance observer，而 PFC 表示參數式摩擦力補償器。由結果得知，加入參數式補償器確實可以改善誤差。表三則比較三個不同之補償器，其正規化誤差比較則如圖 9 所示。

四、結論與討論

由實驗結果比較，我們可以有以下結論：

- (1) 由表二得知，對於參數式補償器而言，觀測器的加入使得啟動區的誤差補償效果改善良好，換向區的誤差補償效果則不論觀測器是否加入都不錯。
- (2) 由表三及圖三得知，在摩擦力影響的克服方面，三個補償器都能有效降低摩擦力效應所造成的現象，整體而言以誤差輸入的類神經網路架構二補償誤差改善較好，速度輸入的類神經網路架構一較差。首先觀察在啟動區的誤差補償效果也是神經網路架構二最好，約可將誤差降成原本的 35%，參數式補償器稍差約為原本誤差的 40%，其他補償後誤差也有原本的 50% 以下。然後換向區的誤差補償效果也是神經

網路架構二最好，誤差降成原本的 27%，其餘的補償後誤差也差不多降成原本的 42%。

(3) 在系統的追蹤能力方面，三個補償器整體的誤差大約都能降成有原本的 50%左右的誤差補償效果，最大的誤差也有改善。其中以誤差輸入的類神經網路架構二改善較好，整體的誤差的改善能力能降低誤差到原本的 40%，最大的誤差降成原本的 35%。

(4) 類神經網路架構二的方法是使用位置與速度的誤差做為輸入，以電流補償命令做為輸出，這種方法是屬於高增益控制，雖然有效但是要注意穩定問題。

五、參考文獻

- [1] W. Yen, T.Z. Liu, and T.Y. Wang, "A neural-network-based velocity tracking control method for direction-changing motions," *Control Practice*, vol.5, No.8, pp.1071-1076, 1997.
- [2] O. Masory, "Improving Contouring Accuracy of NC/CNC Systems with Additional Velocity Feed Forward Loop", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol.108, pp.227-230, 1986
- [3] T. Umeno, and Y. Hori, "Two Degree of Freedom Controllers for Robot Manipulators without Speed Sensors", *Proceedings of the 1990 International Workshop on Advanced Motion Control*, pp.179-188, 1990
- [4] J. Suhada, "Feedforward Controllers and Tracking Accuracy in the Presence of Plant Uncertainties", *Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol.117, pp.490-495, December 1995
- [5] C.J. Kempf, "Robust Digital Tracking Controller Design for High-Speed Positioning Systems", *Control Eng. Practice*, Vol.4, No4, pp.527-536, 1996.
- [6] B. Armstrong-Helouvry, P. Dupont, and C. Canudas de Wit, "A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction," *Automatica*, vol.30, no.7, pp.1089-1138, July 1994
- [7] C.Y. Hunang, and T.C. Cheng, "Robust Control of Induction Motor with A Neural-Network Load Torque Estimator and A Neural-Network Identification" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.46, No.5, October 1999.
- [8] 張家銘，「類神經網路在 DSP-Based 運動控制系統上的非線性補償」，國立交通大學，碩士論文，2000.
- [9] I. Akio, and F. Takeshi, "A Neural Network Compensator for Uncertainties of Robotics Manipulator," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol.39, NO.6, December 1992.
- [10] Gerco, Otten, and J.A. Theo, "Linear Motor Motion Control Using a Learning Feedforward Controller," *IEEE Trans. on Mechatronics*, Vol.2, No.3, September 1997.
- [11] DIGITAL FILTERING: AN INTRODUCTION, E.P. Cunningham, 1992.

六、圖表

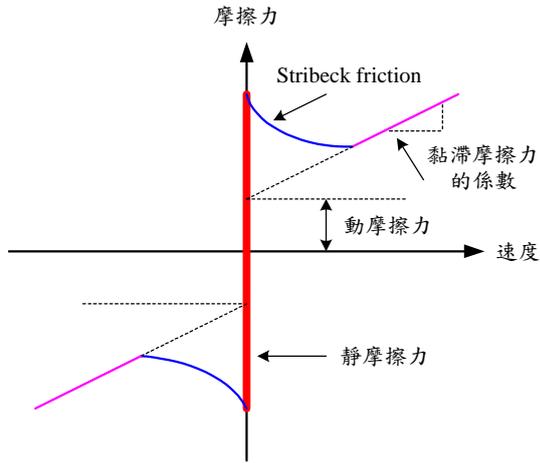


圖 1 卡諾普摩擦力模型

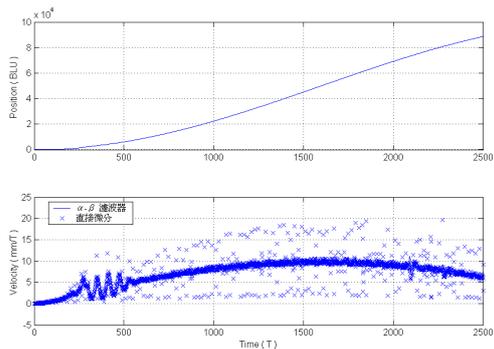


圖 2 $\alpha-\beta$ 濾波器與直接微分速度估測值

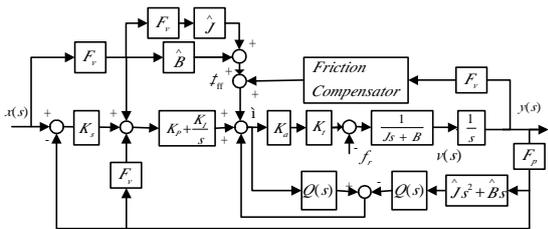


圖 3 伺服迴路控制架構圖

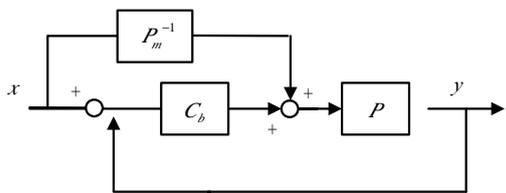


圖 4 前饋控制器的結構圖

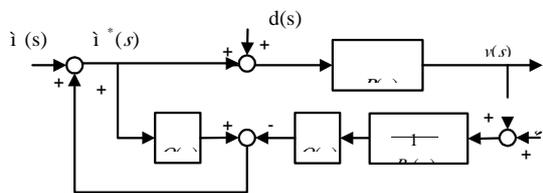


圖 5 干擾觀測器的結構圖

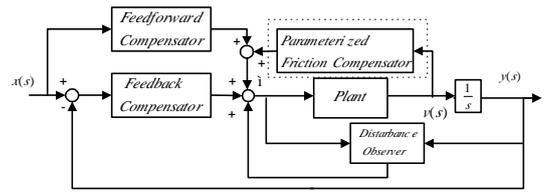


圖 6 參數式摩擦力補償器的方塊圖

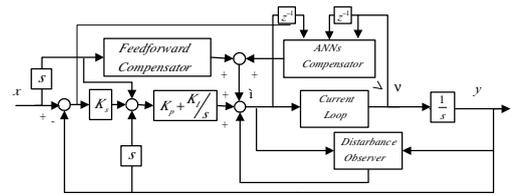


圖 7 類神經網路補償器系統架構一

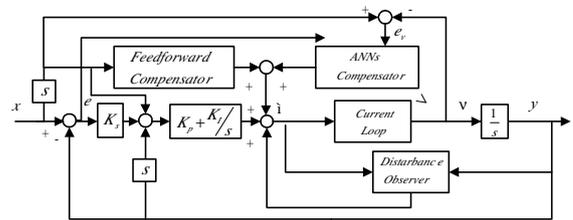


圖 8 類神經網路補償器系統架構二

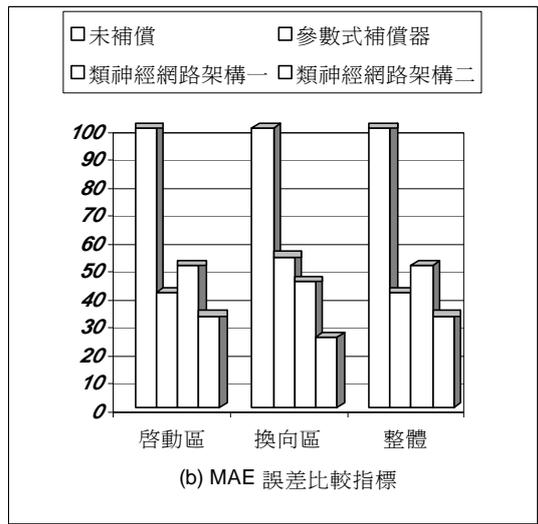
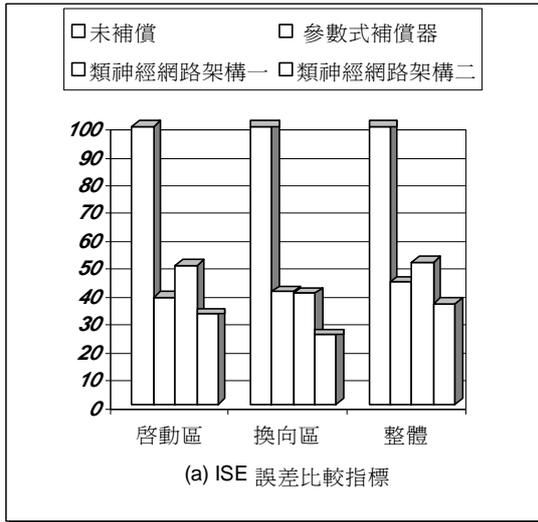


圖 9 採用不同之指標來比較三個不同之補償器之效果: (a)ISE, (b)MAE

表 2 參數式補償器的誤差補償效果比較

控制器	區域	補償值	
		ISE	MAE
FB + FF + DO	啟動	4818.12	516
	換向	3232.09	351
	整體	6072.48	516
FB + FF + PFC	啟動	3463.56	493
	換向	1157.10	150
	整體	4232.05	493
FB + FF + DO + PFC	啟動	1859.74	212
	換向	1297.07	170
	整體	2661.33	212

表 3 不同補償器之實驗補償效果

補償器	區域	補償前		補償後	
		ISE	MAE	ISE	MAE
參數式	啟動	4818.12	516	1859.74	212
	換向	3232.09	351	1311.07	190
	整體	6072.48	516	2661.33	212
類神經網路一	啟動	4818.12	516	2404.02	262
	換向	3232.09	351	1291.04	158
	整體	6072.48	516	3104.66	262
類神經網路二	啟動	4818.12	516	1566.86	169
	換向	3232.09	351	805.52	88
	整體	6072.48	516	2196.81	169

表 1 三種不同輸入命令測試摩擦力補償

輸入命令	命令規格
Command 1 (弦波速度命令)	$P = 10000 BLU$ $V_{max} = 20 (mm/sec)$
Command 2 (弦波速度命令)	$P = 5000 BLU$ $V_{max} = 10 (mm/sec)$
Command 3 (弦波速度命令)	$P = 20000 BLU$ $V_{max} = 40 (mm/sec)$