

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

使用自我建構模糊類神經網路設計線型超音波馬達定位控制 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 96-2218-E-216-001-
執行期間：96年08月01日至97年07月31日
執行單位：中華大學電機工程學系

計畫主持人：許駿飛

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：黃法乾
碩士班研究生-兼任助理人員：彭凱麟

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 97年08月26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

使用自我建構模糊類神經網路設計線型超音波馬達定位控制

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 96 - 2218 - E - 216 - 001

執行期間：96年08月01日至97年07月31日

計畫主持人：許駿飛 助理教授

共同主持人：

計畫參與人員：黃法乾、彭凱麟

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：中華大學

中 華 民 國 97 年 07 月 31 日

中文摘要

超音波馬達具有體積小、響應快速、位移量小、消耗功率低等特色，但也有一些使用上的限制，例如其特性易受溫度影響，故而直接影響超音波馬達的性能。本計畫提出一適應性自我建構模糊類神經網路控制器來控制線型超音波馬達，此控制系統包括一個類神經網路控制器與一個強健控制器，其中類神經網路控制器利用一具有自我網路建構能力之模糊類神經網路，主要用來線上學習近似一理想控制器，而強健控制器主要用來克服因類神經網路控制器之學習誤差對控制性能的影響並達到強健追蹤性能。

整個控制系統學習過程包含網路架構學習與網路參數學習兩部分：在網路架構學習部分，當網路學習能力不佳時，自我建構模糊類神經網路將可自動生長模糊規則來加強網路學習能力，而當網路學習過程中，自我建構模糊類神經網路亦可自動刪除一些不重要之模糊規則來減少運算量。在網路參數學習部分，依據李亞普諾夫穩定定理推導出所需之學習法則來線上即時調整網路參數，如此將可確保整個系統穩定性。最後，為了驗證所設計控制法則之效能，以個人電腦為基礎實現整個線型超音波馬達定位控制實驗環境，經由實驗結果可得知所提出之自我建構適應性模糊類神經網路控制系統可以作超音波馬達精準位置追蹤控制。

關鍵詞：線型超音波馬達；適應性控制；類神經網路控制；網路架構學習；網路參數學習

Abstract

The linear ultrasonic motor (LUSM) has much merit, such as high precision, fast control dynamics and large driving force, etc.; however, the dynamic characteristics and the dynamic model of the LUSM is difficult to obtain for practical applications. To tackle this problem, this project proposed an adaptive self-structuring fuzzy neural network control (ASFNNC) system for the LUSM driver system. The proposed ASFNNC system is composed of a neural controller and a robust controller. The neural controller utilizes a self-structuring fuzzy neural network (SFNN) to mimic an ideal controller, and the robust controller is designed to compensate for the approximation error introduced by neural controller.

The SFNN can online create and cancel the fuzzy rules by using the proposed structure learning algorithm. In the parameter learning phase, the adaptive laws are derived in the sense of Lyapunov, so that the stability of the closed-loop system can be guaranteed. Finally, the PC-based experimental setup has been setup. From the experimental results, the proposed ASFNNC scheme can achieve favorable tracking performance for the LUSM driver system.

KeyWords: linear ultrasonic motor; adaptive control, neural control, structure learning, parameter learning.

一、前言

近 40 年來，超音波馬達突破了傳統電磁馬達的觀念，沒有了線圈與磁鐵，也就是不依靠電磁的相互作用來轉換能量，取而代之的是利用壓電陶瓷的逆壓電效應產生超音波振動，透過摩擦來轉換能量[1]。另外，壓電陶瓷材料在超音波馬達內扮演著極為重要的角色，一般而言，壓電陶瓷材料具有體積小、響應快速、位移量小、消耗功率低等特色，但也有些使用上的限制，例如材質易脆等。雖然可以承受較大的正向壓力，但是當它承受不均勻的力量時，也很容易造成材料的破壞，且其特性受溫度影響大也是一種限制，直接影響超音波馬達的性能[2-4]。另外，IT 產業常常需要機台本身提供線性運動，一般均利用旋轉型馬達配以齒輪、皮帶及滾珠螺桿等機械傳動裝置來完成，但因傳動機構易磨耗、噪音大且精確性低，故可信賴度大打折扣且維修不易，所以線型超音波馬達已成為近幾年來重要之研究對象。

由於超音波馬達具有不同於傳統電磁馬達的特性，在不適合應用傳統電磁馬達的場合，如低速時高推力、間歇性的運動、空間形狀受限制或有特殊要求，以及極需安靜的場所，均可考慮採用線型超音波馬達。未來在自動化、機械手臂、視聽音響元件、照相機，以及其它光學儀器、雙軸繪圖機等之應用均具有相當大的潛力[2, 3]。因為其運轉時極安靜，未來亦相當適合應用在 OA 及 AV 機器上。線型超音波馬達輸出的性能會因為運轉的時間不同而有所差異，還有正轉與反轉的動態特性亦不大相同，目前它的動態數學模型很難精確獲得，因此在控制器的設計上成為一項嚴格的挑戰[2, 4]。

二、研究目的

圖(一)為一摩擦力驅動系統，主要包含有垂直力、驅動力及摩擦力，線性超音波馬達的垂直力是結合預力和表面電場的等效力，驅動力則隨著傳動子的軌跡而改變且由傳動子傳送到平台，除此之外馬達的摩擦力包括靜摩擦力、庫倫摩擦力及黏滯摩擦力等。根據牛頓定律表示其動態運動方程式如下[4]:

$$[M + m]\ddot{x} = F(x) + G(x)u \quad (1)$$

其中 M 為移動滑塊質量， m 為馬達負載質量， $\mathbf{x} = [x \ \dot{x}]^T$ 分別為移動滑塊之位置與速度， $F(x)$ 為摩擦力與外來干擾， $G(x)$ 為控制增益和 u 為輸入控制量。重寫方程式(1)可得下式

$$\ddot{x} = \frac{F(x)}{M + m} + \frac{G(x)}{M + m}u = f(x) + g(x)u \quad (2)$$

其中 $f(x) = \frac{F(x)}{M + m}$ 與 $g(x) = \frac{G(x)}{M + m}$ 。在解決線性超音波馬達控制問題時，整個控制系統之目的為設計一控制法則使得線性超音波馬達移動滑塊位置 x 可以準確地追隨到滑塊位置命令 x_c 。首先定義一位置追蹤誤差

$$e = x_c - x \quad (3)$$

假如系統動態方程式 $f(x)$ 與 $g(x)$ 均可以明確獲得，則可利用線性迴授控制理論獲得一理想

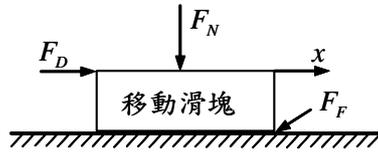
控制法則如下[5]:

$$u^* = \frac{1}{g(\mathbf{x})}(-f(\mathbf{x}) + \ddot{x}_c + k_1\dot{e} + k_2e) \quad (4)$$

將方程式(4)帶入方程式(2)後可得

$$\ddot{e} + k_1\dot{e} + k_2e = 0 \quad (5)$$

如果上式中 k_1 與 k_2 適當選取使得方程式(5)為一 Hurwitz 多項式(其根皆在左半平面)，則暗示著 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ ，即為控制系統達到控制目的[5]。但假若系統參數是具有不確定量或未知的，那所設計的理想控制法則(4)並不能保證符合方程式(5)的動態響應，將會破壞受控系統的穩定性，換句話說，實際上方程式(4)的理想控制法則 u^* 並無法輕易地實現。尤其針對線型超音波馬達系統而言，其動態方程式 $f(\mathbf{x})$ 與 $g(\mathbf{x})$ 到目前為止依舊很難獲得，因此在控制器的設計上成為一項嚴格的挑戰。



圖(一) 摩擦力驅動系統

三、文獻探討

對於線型超音波馬達定位控制問題並不是本計畫第一個針對其困難度來討論研究，已經有著各式各樣的控制理論被提出，尤其近 10 年來，各式各樣的智慧型控制器更是被廣泛地提出討論[6-10]。在參考文獻[6]中提出了一強健型小腦模型類神經網路控制器，其所使用之 CMAC 類神經網路可視為一種使用有著重疊接受區部分的非全連結感知機網路，具有良好的一般化能力、較快的學習特性與較少的神經元數量等優點，非常適用於線上即時學習的應用。在參考文獻[7]中提出了一小波類神經網路控制器，將原本類神經網路之激發函數選取以小波理論機制來完成，使其具有較佳之函數近似與控制能力。在參考文獻[8, 10]中提出了遞迴式小腦模型控制器，在傳統 CMAC 類神經網路中加入一遞迴單元，藉由此一遞迴單元來改善傳統 CMAC 只有靜態映射的特性，使得遞迴式小腦模型控制器將具備動態映射之功能，藉此獲得系統之動態特性，而達到更佳之近似能力。在參考文獻[9]中提出了適應性類神經網路控制，利用依據李亞普諾夫穩定定理推導出所需之學習法則來線上即時調整網路參數，達到良好控制目的。

雖然在上述參考文獻[6-10]裡所發表眾多不同形式之控制法則，其控制效能與追蹤響應均可以被接受，其主要成功關鍵在於類神經網路具有良好的近似特性，該特性說明了類神經網路經過適當學習後，將能夠近似任何未知系統的動態方程式或理想的控制法則。但是，所提出之學習演算法中只有包含網路參數的學習，並未曾探討過網路結構的學習部分，

在一般實際運用上，如果類神經網路神經單元數選取較多時即可獲得不錯之響應，但是就會產生過多的計算負擔，如此一來造成實現的複雜與困難。相反的，如果類神經網路神經單元數選取較少時，雖在硬體實現上可以快速實現，但是就可能無法如預期地達到所預期的學習效果。

為了解決此問題，一些學者專家提出具有網路架構學習與網路參數學習之自我建構模糊類神經網路架構[11-13]，在網路參數學習方面，跟一般常見之學習方式一樣，大多採用倒傳遞演算法或李亞普諾夫演算法來學習網路參數，而在網路架構學習方面，主要想法為當類神經網路學習能力不佳時，即分裂或生長神經元來增加隱藏層神經元個數，期望可以加強類神經網路之學習能力，而當類神經網路學習完成時，即檢查是否有功能過於類似之神經元，假如有功能過於類似時則刪除之以減少運算負擔。在參考文獻[11]中所提出之網路架構學習方法，主要利用 QR 分解方式來辨別過於類似之神經單元，並將類似之模糊規則合併以減少模糊規則數，但該方法之計算過程過於複雜，不利於實際硬體實現。在參考文獻[12, 13]中提出之學習方法利用倒傳遞演算法來學習調整，其參數學習法則並不能確保系統穩定性，且所提出方法中並沒有考慮不重要之模糊規則刪除演算法，如此，類神經網路架構可能過大而造成過多的運算負擔。

四、研究方法

本計劃之研究方法如下：

1. 自我建構模糊類神經網路

本計畫所使用之自我建構模糊類神經網路架構如圖(二)所示，整個類神經網路的輸出值可表示如下[14]

$$y = \sum_{k=1}^n w_k \Phi_k \quad (6)$$

其中 n 表示類神經網路當時所擁有之規則數， w_k 表示第 k 條模糊規則的輸出強度與 Φ_k 表示第 k 條模糊規則的激發強度，且 Φ_k 可定義為

$$\Phi_k = \exp\left(-\sum_{i=1}^l \frac{(x_i - m_{ik})^2}{\sigma_{ik}^2}\right) \quad (7)$$

其中 σ_{ij} 與 m_{ij} 分別代表第 i 個語言變數輸入值對應第 j 個神經元內所屬高斯函數的標準偏差與平均值。

由於所設計開發之自我建構模糊類神經網路之網路架構並不固定且隨時一直改變，在網路架構學習部分，採用模糊群聚法為來判斷是否需要增加一模糊規則，首先求出輸入資訊對已存在之規則庫中最大激發函數[13, 14]

$$\beta_{\max} = \max_{1 \leq k \leq n(t)} y_k^3 \quad (8)$$

假如最大激發函數 β_{\max} 很小的話，即暗示著輸入資訊遠離已存在之規則庫，此時模糊類神

經網路需要增長一新的模糊規則；同理，假如最大激發函數 β_{\max} 很大的話，即暗示著輸入資訊接近已存在之規則庫，此時模糊類神經網路不需增長一新的模糊規則。依據此想法，定義一模糊規則增長判別式如下所示，用來判別是否要增長模糊規則

$$\beta_{\max} \leq \beta_{th} \quad (9)$$

其中 $\beta_{th} \in (0,1)$ 為一設計者可設定的參數。假如規則增長判別式(9)成立的話，則網路將建立一條模糊規則，其歸屬函數與模糊規則之初始參數給定如下[14]

$$m_i^{new} = x_i^1 \quad (10)$$

$$\sigma_i^{new} = \sigma_i \quad (11)$$

$$w^{new} = 0 \quad (12)$$

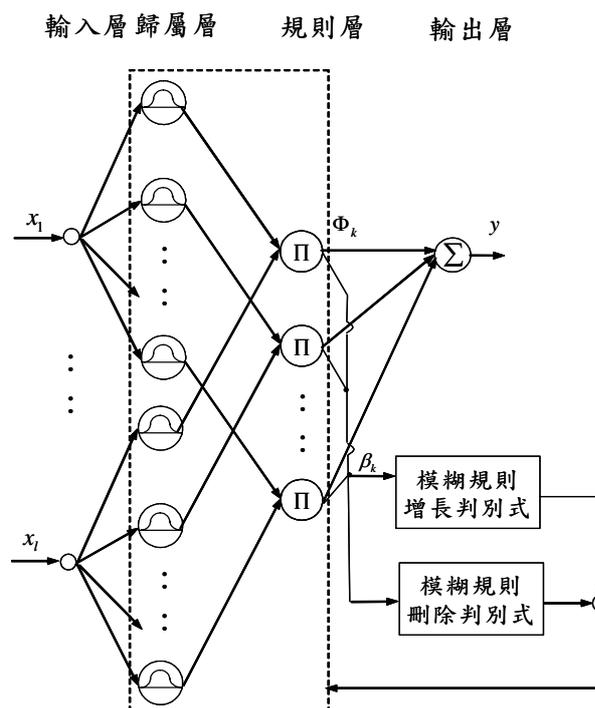
其中 x_i 是輸入資訊與 σ_i 是所屬高斯函數的標準偏差值。而在模糊規則刪減演算法方面，定義一規則貢獻函數來辨別該模糊規則是否對整個模糊類神經網路有所貢獻，第 i 條規則規則貢獻函數定義如下[14]

$$I_k(t+1) = \begin{cases} I_k(t) \exp(-\tau), & \text{if } \beta_k < \rho \\ I_k(t) & , \text{if } \beta_k \geq \rho \end{cases}, k = 1, 2, \dots, n(t) \quad (13)$$

其中 ρ 為激發閾值與 τ 為衰減常數。藉由方程式(13)隨時計算每一條規則之貢獻度，當該模糊規則不常被激發時則遞減該規則貢獻度，該貢獻度低到某程度的話即刪除該模糊規則。依據此想法，定義一模糊規則刪除判別式如下所示，用來判別是否要刪除模糊規則

$$I_k \leq I_{th}, k = 1, 2, \dots, n(t) \quad (14)$$

其中 $I_{th} \in (0,1)$ 為一設計者可設定的參數。假如規則刪除判別式(14)成立的話，則網路將刪除第 k 條模糊規則。



圖(二) 自我建構模糊類神經網路架構

2. 控制系統設計

本計畫所提出一適應性自我建構模糊類神經網路控制器之方塊圖如圖(三)所示，包括一個類神經控制器與一個強健控制器，其公式可表示如下

$$u = u_{mn} + u_{rb} = \mathbf{w}^T \Phi(\mathbf{m}, \sigma) + u_{rb} \quad (15)$$

其中類神經控制器 u_{mn} 用所開發之自我建構模糊類神經網路來即時線上近似理想控制器，而強健控制器 u_{rb} 主要用來克服類神經控制器之學習誤差。參數向量定義為 $\mathbf{m} = [m_{11} \dots m_{ij}]^T$ 、 $\sigma = [\sigma_{11} \dots \sigma_{ij}]^T$ 、 $\mathbf{w} = [w_1^4 w_2^4 \dots w_n^4]^T$ 與 $\Phi = [\Phi_1 \Phi_2 \dots \Phi_n]^T$ 。為了確保控制系統之穩定性證明，本計畫引進了滑動模式控制技巧進來，如參考文獻[15]所示

$$s = \dot{e} + k_1 e + k_2 \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (16)$$

並選取一李亞普諾夫函數如下

$$V(s, \tilde{\mathbf{w}}, \tilde{\mathbf{m}}, \tilde{\sigma}) = \frac{1}{2} s^2 + \frac{\tilde{\mathbf{w}}^T \tilde{\mathbf{w}}}{2\eta_w} + \frac{\tilde{\mathbf{m}}^T \tilde{\mathbf{m}}}{2\eta_m} + \frac{\tilde{\sigma}^T \tilde{\sigma}}{2\eta_\sigma} \quad (17)$$

其中 $\tilde{\mathbf{w}} = \mathbf{w}^* - \hat{\mathbf{w}}$ ； $\tilde{\sigma} = \sigma^* - \hat{\sigma}$ ； $\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{m}^* - \hat{\mathbf{m}}$ ； \mathbf{w}^* 、 \mathbf{m}^* 與 σ^* 分別為 \mathbf{w} 、 \mathbf{m} 與 σ 之最佳參數向量； $\hat{\mathbf{w}}$ 、 $\hat{\mathbf{m}}$ 與 $\hat{\sigma}$ 分別為 \mathbf{w} 、 \mathbf{m} 與 σ 之估測參數向量； η_w 、 η_m 與 η_σ 為正的常數。假如適應性學習法則設計如下

$$\dot{\hat{\mathbf{w}}} = -\dot{\tilde{\mathbf{w}}} = \eta_w s g(\mathbf{x}) \hat{\Phi} \quad (18)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{m}}} = -\dot{\tilde{\mathbf{m}}} = \eta_m s g(\mathbf{x}) \mathbf{A} \hat{\mathbf{w}} \quad (19)$$

$$\dot{\hat{\sigma}} = -\dot{\tilde{\sigma}} = \eta_\sigma s g(\mathbf{x}) \mathbf{B} \hat{\mathbf{w}} \quad (20)$$

其中 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 為針對 $\hat{\Phi}$ 線性展開泰勒展開線性矩陣；而且強健控制器如下

$$u_{rb} = E \operatorname{sgn}(s) \quad (21)$$

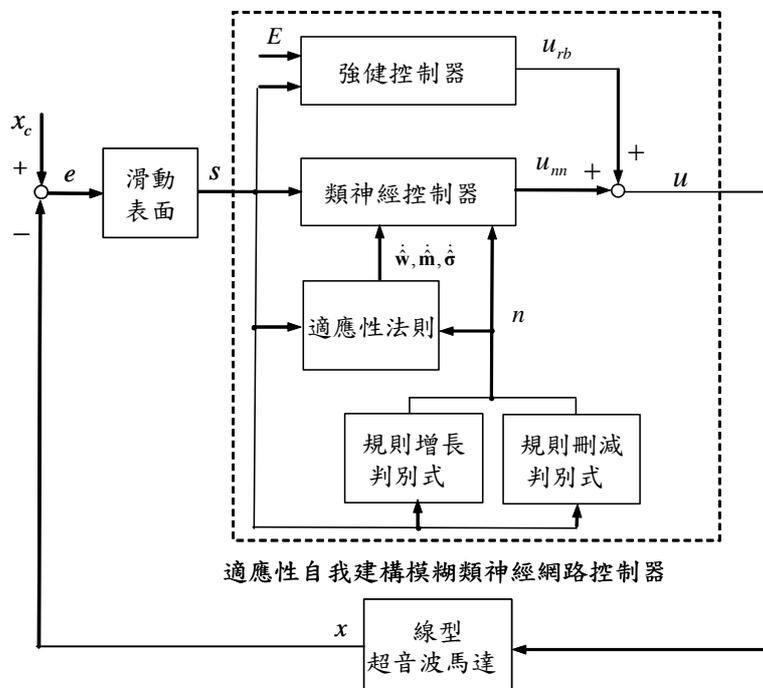
其中 E 為一很小之正常數，如此可得 $\dot{V}(s, \tilde{\mathbf{w}}, \tilde{\mathbf{m}}, \tilde{\sigma}) \leq 0$ 達到系統穩定證明。適應性學習法則中有使用到系統動態方程式 $g(\mathbf{x})$ ，一般而言 $g(\mathbf{x})$ 不能獲得，為解決此問題，將適應性學習法則改寫成

$$\dot{\tilde{\mathbf{w}}} = \eta_1 s \hat{\Phi} \quad (22)$$

$$\dot{\tilde{\mathbf{m}}} = \eta_2 s \mathbf{A} \hat{\mathbf{w}} \quad (23)$$

$$\dot{\tilde{\sigma}} = \eta_3 s \mathbf{B} \hat{\mathbf{w}} \quad (24)$$

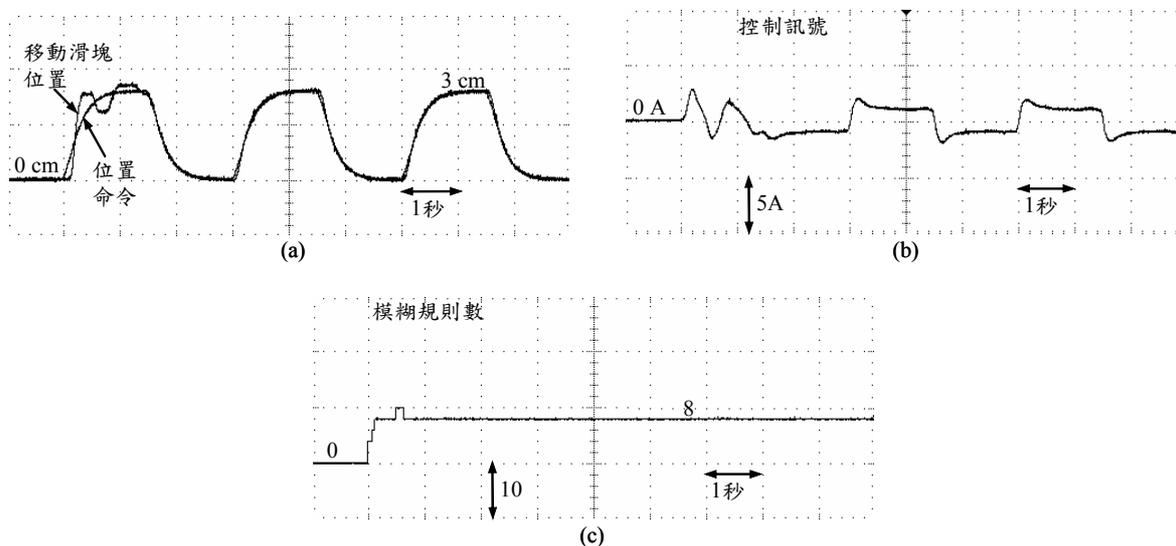
其中 $\eta_1 = \eta_w g(\mathbf{x})$ 、 $\eta_2 = \eta_m g(\mathbf{x})$ 與 $\eta_3 = \eta_\sigma g(\mathbf{x})$ 為不正的常數。如此將原學習速率與系統增益值合併成一新的學習速率，即可解決硬體實現問題。



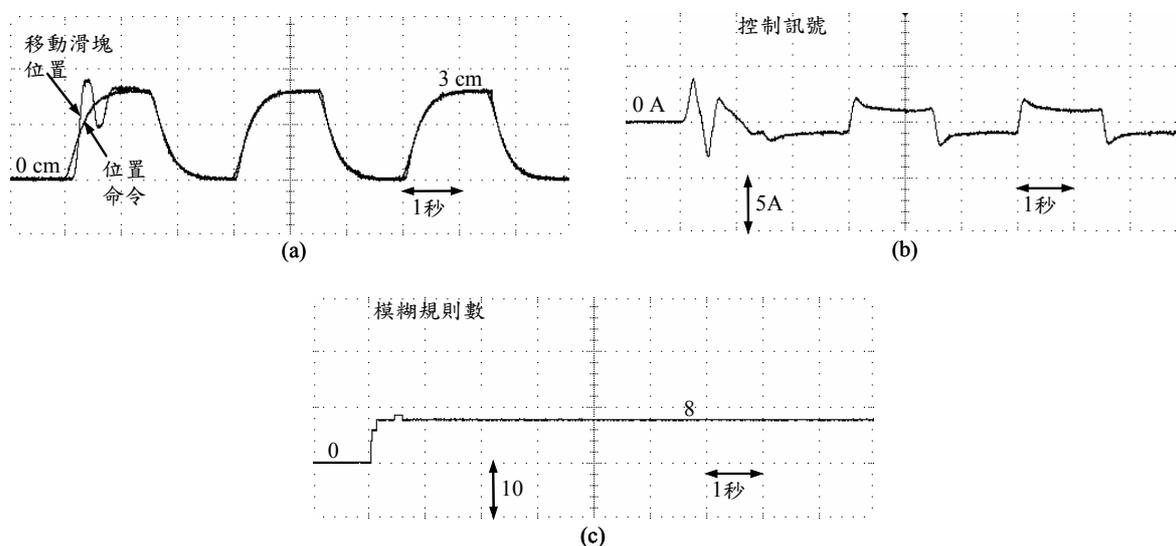
圖(三) 適應性自我建構模糊類神經網路控制器方塊圖

五、結果與討論

使用由 Nanomotion 公司所製造的 HR8 線型超音波馬達[16]，利用個人電腦來控制線型超音波馬達驅動系統，主要是利用伺服介面卡來控制驅動電路，伺服介面卡本計畫共使用研華公司所生產的兩張介面卡[17]，其中 PCI-1712 介面卡內含多通道的 A/D、D/A、PIO 及 PCI-1784 介面卡內含編碼器介面，控制系統之執行週期為 2msec，且控制程式由 Turbo C 語言來完成，如此一來，電腦控制系統架構便可以隨時將所設計的控制器加以實驗驗證。在實作中測試的狀況分為標準狀況和參數變化狀況，而參數變化的狀況則是在平台上加了 2.4 公斤的砝碼。圖(四)所示為自我建構模糊類神經網路控制器對標準狀況時實作的結果，圖四(a)、(b)、(c)分別為追隨響應、控制命令大小和模糊規則數。圖(五)所示為自我建構模糊類神經網路控制器對參數變化時實作的結果，圖五(a)、(b)、(c)分別為追隨響應、控制命令大小和模糊規則數。觀察圖(四)與圖(五)之實驗結果可以發現，本計畫所提出之適應性自我建構模糊類神經網路控制器法則可以精密定位控制線型超音波馬達。整個控制系統學習過程包含網路架構學習與網路參數學習兩部分：在網路架構學習部分，當網路學習能力不佳時，自我建構模糊類神經網路將可自我生長模糊規則來加強網路學習能力，而當網路學習過程中，自我建構模糊類神經網路可自我刪除一些不常使用或不重要之模糊規則來減少運算量。在網路參數學習部分，依據李亞普諾夫穩定定理推導出之學習法則來線上即時調整參數。當網路架構與網路參數學習完畢後，即可以精確控制線性超音波馬達追蹤所下達之位置命令，當改變線性超音波馬達負載重量時依舊可以達到精確控制目的。



圖(四) 標準狀況時之控制響應圖



圖(五) 參數變化時之控制響應圖

六、參考文獻

- [1] T. Sashida and T. Kenjo, *An Introduction to Ultrasonic Motors*, Clarendon Press, Oxford, 1993.
- [2] 林法正, 魏榮宗 (2002) 電機控制, 滄海書局。
- [3] 蔡明祺, 蕭仕偉, 謝旻甫 (2003) 顛覆傳統的無聲馬達—超音波馬達, 科學發展。
- [4] S. Devos (2006) Development of Fast Stiff and High-resolution Piezoelectric Motors with Integrated Bearing-driving Functionality. PhD thesis, Katholieke Universiteit Leuven.
- [5] J. J. E. Slotine and W. P. Li (1991) *Applied Nonlinear Control*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- [6] R. J. Wai, C. M. Lin, and Y. F. Peng (2003) Robust CMAC neural network control for LLC resonant driving linear piezoelectric ceramic motor. *IEE Proc. Control Theory Application*, vol. 150, pp. 221-232.
- [7] F. J. Lin, R. J. Wai, and M. P. Chen (2003) Wavelet neural network control for linear ultrasonic motor drive via adaptive sliding-mode technique. *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 50, pp. 686-698.

- [8] R. J. Wai, C. M. Lin, and Y. F. Peng (2004) Adaptive hybrid control for linear piezoelectric ceramic motor drive using diagonal recurrent CMAC network. *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 15, pp. 1491-1506.
- [9] 國科會計畫，線型壓電陶瓷馬達之驅動與控制。(NSC 91-2213-E-155-063、NSC 92-2213-E-155-063、NSC 93-2213-E-155-022)
- [10] 國科會計畫，線型超音波馬達之適應性滑動模式遞迴小腦模型控制研究。(NSC 94-2213-E-231-014)
- [11] S. Wu and M. J. Er (2000) Dynamic fuzzy neural networks - a novel approach to function approximation. *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, vol. 30, pp. 358-364.
- [12] F. J. Lin, C. H. Lin, and P. H. Shen (2001) Self-constructing fuzzy neural network speed controller for permanent-magnet synchronous motor drive. *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 9, pp. 751-759.
- [13] F. J. Lin and C. H. Lin (2004) A permanent-magnet synchronous motor servo drive using self-constructing fuzzy neural network controller. *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 19, pp. 66-72.
- [14] C. F. Hsu (2007) Self-organizing adaptive fuzzy neural control for a class of nonlinear systems. *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 18, pp. 1232-1241.
- [15] C. M. Lin and C. F. Hsu (2004) Adaptive fuzzy sliding-mode control for induction servomotor systems. *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 19, pp. 362-368.
- [16] <http://www.mtt.com.tw/>
- [17] <http://www.advantech.com/>

七、計畫成果自評

本計畫研究報告內容與原計畫相符並有達到預期目標成果，尤其本計畫是本人之國科會新進人員研究計畫，計畫內容主要將本人一些研究成果做進一步延伸並且實驗驗證，期望達到理論研究與實做驗證雙贏之局面，歸納本計畫之貢獻可條列如下

- (1) 完成 PC-Based 線型超音波馬達實驗系統環境架設工作
- (2) 完成自我建構模糊類神經網路之架構學習法則與參數學習法則開發
- (3) 完成適應性自我建構模糊類神經網路控制器實際驗證工作
- (4) 成果已發表在機械月刊。許駿飛與林志民，智慧型線性超音波馬達位置追蹤控制，*機械月刊*，第 393 期，4 月號，第 48-59 頁，2008 年。

並進一步將網路架構學習機制進一步延伸使用至類神經網路與遞迴式類神經網路，亦有些成果產出如下所列

- (5) 成果已發表在中華理工學刊。Chun-Fei Hsu, "Intelligent position control for a linear ceramic motor using a self-constructing neural network," *Chung Hua Journal of Science and Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 1-8, 2007.
- (6) 成果已投稿至國際期刊 *Control Engineering Practice*，題目為 Intelligent position tracking control for LCM drive using stable online self-constructing recurrent neural network controller with bound architecture。