

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

自組織模糊控制理論應用於三自由度模擬平台運動之研究  
Study on Self-Organizing Fuzzy Control Theory Applied to the Motion Control of  
a Three-Degree-of-Freedom Simulator

計畫編號: NSC88-2212-E-002-044

執行期限: 87年08月01日至88年07月31日

主持人: 陳義男教授 臺灣大學造船及海洋工程研究所

## 一. 中文摘要

本文利用本所液壓實驗室設計之三自由度船舶運動模擬平台，針對其機構特性，推導出此模擬平台之運動方程式，並設計控制器，透過電液伺服控制系統驅動此模擬平台，以進行快艇在海上航行時船體縱搖、橫搖及起伏運動之模擬。利用於一艘二十米巡邏艇上量測得之船體運動資料進行模擬實驗，經實驗結果證明其模擬效果良好。

在控制方面，我們將此一模擬平台運動姿態問題轉換為液壓缸之位置控制問題，利用模糊控制並不需要系統之數學模式的優點，本文設計一自組織模糊控制器，使系統在閉迴路控制過程中不需要人工調適，能夠不斷修正模糊規則，實現自調控制規則改善控制性能的目的，避免僅靠經驗設計模糊控制器的不合理性。由實驗結果證明，自組織模糊控制器對具有非線性及負荷作用下之液壓缸位置控制有非常令人滿意的結果。

**關鍵詞**：自組織模糊控制器，電液伺服系統，船舶運動模擬機

## Abstract

In this study, an alternative design of a three-degree-of-freedom, in-parallel, electro-hydraulic servo system driven

manipulator based on the concept on a simulator for the motion of ship is presented and the kinematic equation for use of the manipulator is derived. The experimental results show that the performance of the manipulator is excellent.

In the aspect of control, the problem of manipulator's state is converted into the matter of the position control of servo-hydraulic cylinders. Therefore, a self-organizing fuzzy controller that contains a basic fuzzy controller and a self-organizing mechanism is designed. Fuzzy rules are adjusted in response to the performance of the feedback control system. The result indicates that the proposed controller is one of the possible approaches to control a nonlinear and time-varying hydraulic system.

**Keywords** : self-organizing fuzzy controller, electro-hydraulic servo system, ship motion simulator

## 二. 緣由與目的

船舶在海上航行時，以橫搖、縱搖、起伏的運動對人員之影響最為明顯，對於船員的工作效率影響甚鉅。快艇由於速度快、質量小，受到風浪的影響也特別大。為使新船員在陸地上就能適應船舶的運動狀態，可以利用船舶運動模擬機來訓練船員，以減少上船後所需要的適應時間。

模擬機最大的優點在於提供操作者較多經驗，使操作者能有應付緊急狀況的能力或較早適應工作環境。為重現快艇在海上航行時的運動狀態，本文自行設計並製作一具有縱搖、橫搖、起伏三個運動自由度之模擬機，藉著液壓伺服控制達到精確定位與運動控制，進行快艇船體運動模擬之可行性研究。

針對模擬平台運動姿態問題，我們將其轉換為液壓缸之位置控制問題。利用自組織模糊控制器來控制模擬機之運動，除了可簡化控制器設計外，更期能達到重現快艇在波浪上航行時之船體運動狀態的目的。

### 三. 逆向運動學

三自由度平行結構機械臂之示意圖如圖 1 所示，此機械臂主要是由一在上方的可動平台與三根液壓缸，以及一在下方的基座平台所構成，可動平台以萬向接頭與三根液壓缸連結，而液壓缸的另一端也同樣地以萬向接頭與基座平台連結。由於此結構缺乏足夠之拘束條件，為一不穩定之結構，因此在兩平台之間加裝一固定長度之連桿以提供可動平台所需的拘束條件，此連桿一端以萬向接頭與可動平台連結，而另一端則以插銷連結基座平台。隨著三根液壓缸的伸長與縮短，可動平台就可相對於基座平台做出起伏、縱搖、與橫搖的運動。

此三根液壓缸的端點在可動平台形成三支撐點，若能決定這三支撐點的軌跡就可以決定可動平台的運動姿態。在基座平台採用卡氏座標系統  $OXYZ$ ，其座標原點  $O$  固定在後方兩根液壓缸端點之中點處， $Z$ -軸垂直基座平台向上， $X$ -軸則向前指向前方液壓缸之端點。相同地，在可動平台上採用直角座標系統  $ouvw$ ，其座標原點  $o$  位於後方兩根液壓缸端點之中點處， $w$ -軸垂直可動平台向上， $u$ -軸則向前

指向前方液壓缸之端點。當前方之液壓缸作伸縮運動時，則平台便繞著  $P$  點做出縱搖的動作。橫搖運動則是藉由後方兩液壓缸作不同相位的伸縮運動來產生，此時平台便繞著  $OU$  軸做橫搖運動，而當  $O$  點之  $Z$  座標有變動時，則此時便伴隨著起伏之運動。

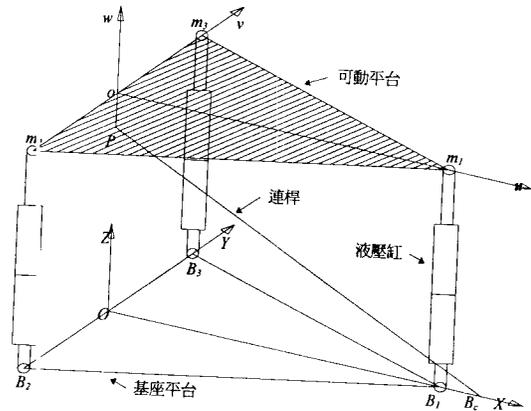


圖 1 三自由度平行結構機械臂之示意圖

可動平台上三端點之絕對座標為：

$$\begin{bmatrix} u_m \\ v_m \\ w_m \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} C\theta & 0 & -S\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ S\theta & 0 & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S\theta \cdot C\phi + C\theta & -S\theta \cdot S\phi & -S\theta \cdot C\phi(1-C\phi) & 0 \\ S\theta \cdot S\phi & C\phi & C\theta \cdot S\phi & 0 \\ -S\theta \cdot C\phi(1-C\phi) & -C\theta \cdot S\phi & C\theta \cdot C\phi + S\theta & 0 \\ d \cdot S\theta(1-C\phi) & d \cdot S\phi & d \cdot C\theta(1-C\phi) & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ X_P & Y_P & Z_P & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} u_{mi} \cdot C\theta + S\theta \cdot (w_{mi} \cdot C\phi + v_{mi} \cdot S\phi + d - d \cdot C\phi) + X_P \\ S\phi \cdot (d - w_{mi}) + v_{mi} \cdot C\phi + Y_P \\ -u_{mi} \cdot S\theta + C\theta \cdot (w_{mi} \cdot C\phi + v_{mi} \cdot S\phi + d - d \cdot C\phi) + Z_P \\ 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} X_{mi} \\ Y_{mi} \\ Z_{mi} \\ 1 \end{bmatrix}^T$$

.....(1)

由於連桿長度  $R$  為一固定值，因此  $X_P$ ,  $Y_P$ ,  $Z_P$  間的關係可以下式表示：

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \\ 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} X_{Bc} - \sqrt{R^2 - Z_P^2} \\ 0 \\ Z_P \\ 1 \end{bmatrix}^T$$

$X_{Bc}$ :  $B_c$  點之  $X$  座標。

.....(2)

則可動平台上直角座標系統原點  $O$  之座標值與  $P$  點座標值之關係為：

$$\begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \\ 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} X_P - d \cdot S\theta \\ 0 \\ Z_P + d \cdot C\theta \\ 1 \end{bmatrix}^T \quad \dots\dots\dots(3)$$

式(2)及式(3)中，

$U_{mi}, V_{mi}, W_{mi} (i=1\sim3)$ ：液壓缸三端點  $m_i (i=1\sim3)$  相對於  $P$  點之座標。

$C$ ：餘弦函數

$S$ ：正弦函數

$\theta$ ：縱搖角度

$\phi$ ：橫搖角度

$d$ ： $P$  點與  $O$  點間之距離

$X_P, Y_P, Z_P$ ： $P$  點相對於固定座標  $OXYZ$  之座標值。

$X_o, Y_o, Z_o$ ： $O$  點相對於固定座標  $OXYZ$  之座標值。

$X_{mi}, Y_{mi}, Z_{mi} (i=1\sim3)$ ：液壓缸三端點  $m_i (i=1\sim3)$  之絕對座標。

#### 四. 自組織模糊控制器

自組織模糊控制器的整體架構(圖2)可分為兩大部分：

1. 基本模糊控制部分(basic level)
2. 自組織法則部分(self-organizing level)

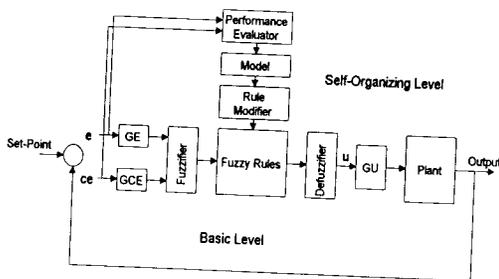


圖 2 自組織模糊控制器之基本架構

自組織模糊控制器是採用性能評定決策表來修正模糊規則，以達到自我學習的目的。但是，在性能評定決策表的規劃上並不比規劃規則表來得容易，而且自組織模糊控制器是以模糊關係矩陣間的運算來修正規則表，

雖然適合利用現有之數學運算工具來進行，但是就實際運用上，卻會耗費相當多的記憶空間及計算時間，並不適合做線上的處理。因此我們採用參考文獻[8]及[9]提出的另一種學習方法的自組織模糊控制器，避免以上所述之缺點。

#### 五. 實驗結果與討論

實驗系統以C語言撰寫控制器程式，由電腦接受控制命令後經數位/類比轉換送出命令訊號，經伺服閥驅動液壓缸，並由陀螺儀及位移感測器感測平台縱搖、橫搖之角度及液壓缸位置，再經類比/數位轉換將訊號送回電腦。圖3為實驗裝置之示意圖：

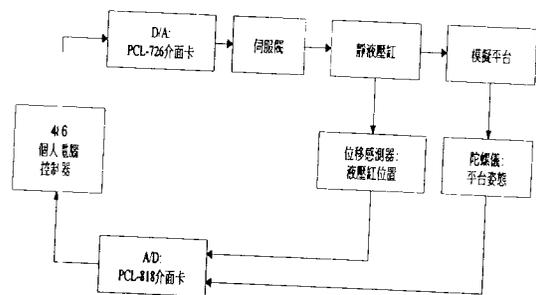


圖 3 實驗裝置示意圖

實驗標準狀況定義如下：

供油壓力：70 kgf/cm<sup>2</sup>

作動油溫度：30°C

步階響應實驗之取樣頻率為 300Hz，循跡控制實驗之取樣頻率為 30Hz。

圖 4 至圖 6 為供油壓力分別為 50kgf/cm<sup>2</sup>, 70kgf/cm<sup>2</sup>, 100 kgf/cm<sup>2</sup> 之實驗結果，圖中顯示，在供油壓力一定下，系統由於剛開始從零條規則學習，因此系統之輸出表現並不理想有著相當大的誤差，但隨著學習次數的增加，系統之輸出表現也逐次地趨近理想。

供油壓力：50 kgf/cm<sup>2</sup> 作動油油溫：30°C  
 取樣頻率：300 Hz 時間延遲：1/75 s (m=4)  
 GE=0.18 GCE=4.5 GU=5  $\gamma=0.02$   $\zeta=0.4$

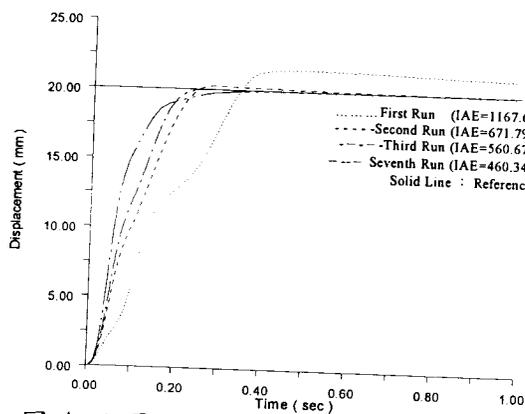


圖 4 液壓缸位置控制之時間響應圖

供油壓力：70 kgf/cm<sup>2</sup> 作動油油溫：30°C  
 取樣頻率：300 Hz 時間延遲：1/75 s (m=4)  
 GE=0.18 GCE=4.5 GU=5  $\gamma=0.02$   $\zeta=0.4$

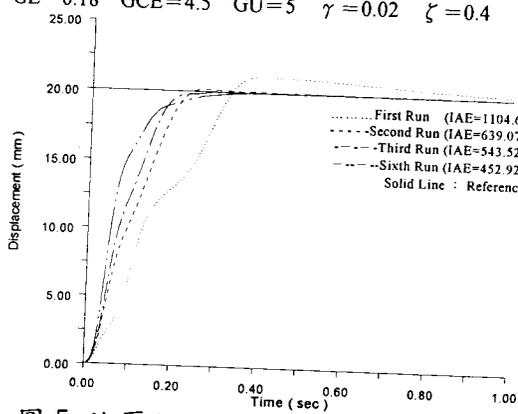


圖 5 液壓缸位置控制之時間響應圖

供油壓力：100 kgf/cm<sup>2</sup> 作動油油溫：30°C  
 取樣頻率：300 Hz 時間延遲：1/75 s (m=4)  
 GE=0.18 GCE=4.5 GU=5  $\gamma=0.02$   $\zeta=0.4$

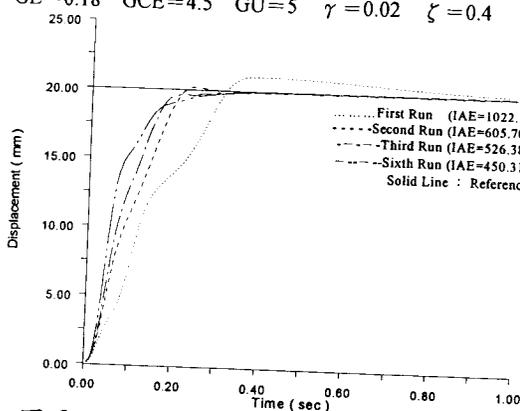


圖 6 液壓缸位置控制之時間響應圖

在循跡控制實驗中，對系統輸入振幅為 20mm，頻率分別為 0.1 Hz，0.5 Hz 及 4 Hz 之正弦波，讓自組織模糊控制

器從零條規則自我學習，實驗中之各項參數如表 1 所示。

正弦波頻率	GE	GCE	GU	$\Gamma$	Z	學習次數
0.1Hz	0.18	5.0	5.0	0.02	0.5	2
0.5Hz	0.18	1.0	5.0	0.02	0.4	6
4.0Hz	0.18	0.12	3.0	0.02	0.35	11

表 1 實驗參數表

在實驗中以一個正弦波為一次學習過程，實驗結果如圖 7 至圖 9 所示。由圖中可看出，在頻率較低的情況下，由於單位時間內輸入之變動較小，系統有較充裕之時間學習，所以在一開始即有相當不錯之表現，且學習次數亦較少，而隨頻率的增加，學習次數也跟著增加，但最終都有良好的表現。在 4 Hz 之正弦波循跡控制中，雖然到終了仍存在明顯之相位落後，但就針對模擬快艇運動而言，因船體運動頻率都在 0.5 Hz 之下，因此系統之表現已足夠符合此一目的之要求。

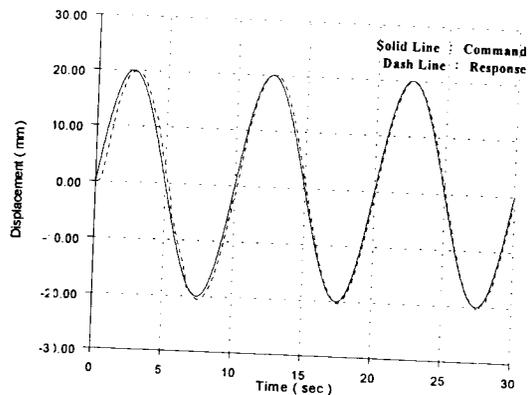


圖 7 0.1Hz，正弦波之時間響應圖

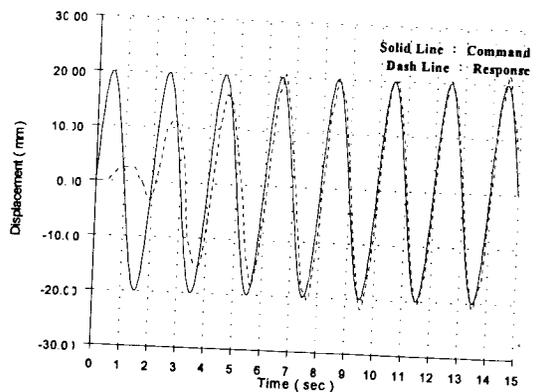


圖 8 0.5Hz，正弦波之時間響應圖

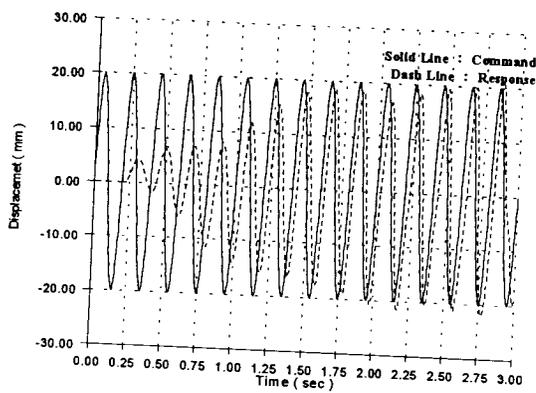


圖 9 4.0Hz, 正弦波之時間響應圖

## 六. 結論與建議

(1) 自組織模糊控制器為一學習型之控制器，藉由學習的方式，逐步修正或建立其模糊規則庫，大大地簡化設計控制規則的過程，對於所知有限的系統，可藉此種方式慢慢獲得所不足的資訊。應用在電液伺服系統上面，由本研究之實驗結果得知：在操作環境改變下，自組織模糊控制器能依照學習法則來修正其控制規則，並獲得理想的控制效果。

(2) 自組織模糊控制器所學得之控制規則，無法得知其是否為最佳結果，僅能說是在某一操作條件下，採用此一組參數值(取樣頻率，GE，GCE，GU， $\gamma$ ， $\zeta$ )所得之結果較好，因此對於學習結果之最佳化之課題，必須還要針對以上參數對控制效果的影響做更深入的研究。

(3) 在本文中將模擬機之運動姿態問題轉換為液壓缸之位置控制問題，然而在模擬機作動過程中，液壓缸不僅只做伸縮運動，缸體本身也會隨著擺動，產生科氏力及離心力項，而本文並未將其考慮進去，因此未來若需要模擬較高頻之運動，則在控制器之設計上必須對模擬機完整之動態響應作考量。

## 七. 參考文獻

1. Braae, M. and D.A. Rutherford, "Selection of Parameters for a Fuzzy Logic Controller.", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.2, pp.185-199, 1979.
2. CHEN, Pey-Chung and Ming-Chang SHIH, "An Experimental Study on the Position Control of a Hydraulic Cylinder using a Fuzzy Logic Controller.", *JSME, International Journal Series III*, Vol. 34, No. 4, pp.481-489, 1991.
3. LEE, Kun Chang and Sung Joo PARK, "A Knowledge-Based Fuzzy Decision Tree Classifier for Time Series Modeling.", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.33, pp.1-18, 1989.
4. Mamdani, E.H., S. Assilian, "A Fuzzy Logic Controller for a Dynamic Plant," *Int. J. Man Maching Study*, 7, pp.1-13, 1975.
5. Merritt, H.E., "Hydraulic Control Systems.", John Wiley and Sons, pp.74-94, 1967.
6. Pfreundschuh, G.H., T.G. Sugar and Vijay Kumar, "Design and Control of a Three-Degrees-of-Freedom, in-Parallel, Actuated Manipulator.", *Journal of Robotic Systems*, Vol. 11(2), pp.103-115, 1994.
7. Zhang, B.S., J.M. Edmunds, "Self-organising fuzzy logic controller.", *IEE Proc.-D*, Vol. 139, No. 5, pp.460-464, Sept. 1992.
8. 王紫峰, "自組織模糊控制在垂直負載液壓伺服系統上之應用.", 國立台灣工業技術學院碩士論文, 1995.
9. 楊清任, "及時語意式自組織模糊控制器之設計.", 國立台灣大學碩士論文, 1992.