

模糊理論應用於機械手臂適應性控制之研究

吳堅本* 呂振榮** 胡永楠*

*大葉工學院電機工程研究所 彰化縣大村鄉山腳路112號

**中州工商專校電子科 彰化縣員林鎮山腳路三段2巷6號

收件：83.7.11 修訂：83.9.7 接受：83.9.17

摘要

在對一個不明確且具非線性、高耦合系統之機械手臂實體，且無數學模式下，設計一模糊控制器並結合追隨參考模式達成適應性控制。模糊控制器之設計全靠試誤法來規劃模糊規則表及歸屬函數，方式推得適應於DC伺服馬達的模糊控制增益表，並深入考量DC馬達（手臂）對不同角度之電氣死區偏壓補償表，將二表匯聚成近似三維(3D)控制增益表，最後以電腦整合軟硬體系統，以即時索引查表方式作線上執行實體控制，以驗證模糊適應控制之可行性。結果顯示，在模糊適應(參考模式)控制架構下，非線性高耦合之機械手臂確實能成功地追隨參考模式。

(關鍵詞：追隨參考模式適應性控制；模糊歸屬函數；非線性高耦合)

An Approach Using Fuzzy Theory in Adaptive Control for a Robot System

Jan-Ban Wu* · Jean-Zon Lue** · Yung-Nan Hu*

*Dept. of Electrical Engineering, Da-Yeh Institute of Technology
112, Shan-Jeau Rd., Dah-Tsuen, Chang-Hwa, Taiwan

**Dept. of Electronic Engineering, Chung-Chou College
6, Lane 2, Section 3, Shan-Jeau Rd., Yuan-Lin, Chang-Hwa, Taiwan

Received: July 11, 1994 Revised: Sep. 7, 1994 Accepted: Sep. 17, 1994

ABSTRACT

In control system design, one of the most difficulty things is that the mathematical model is hardly to obtain if the plant of the system has the properties of highly coupling and nonlinearity. In order to conquer these difficulties, we propose a method that combine fuzzy with adaptive model following

control theories on a highly coupling, nonlinearity robot arm system. Under this application, without any mathematical model need to be known, the output of robot arm can follow the reference model completely. The simulation results show that the idea we proposed is really suitable for highly coupling, nonlinearity and time-varying systems. Besides, the implementation of the hardware robot arm with the software controller is also proposed.

(KEY WORDS: model following adaptive control; fuzzy membership function; nonlinearity and highly coupling)

緒 言

在產官學界一片工業升級與自動化的熱潮中，身為龍頭之控制界是責無旁貸的，從古典控制理論及近代控制理論，至近幾年的模糊理論、類神經網路、控制理論…等等均為吾人可則。然自1965年美國加州大學柏克萊分校扎德(L.A. Zadeh)教授發表『Fuzzy Set』^[20]之模糊理論萌芽以來，蓬勃發展，到80年代已真正開花結果，研究人員更是不計其數，其深具二值邏輯的推廣，對適應人性化的需求更為強健，像圖型辨識^[13]、結構工程^[1,10]、社會經濟^[4,19]、專家系統^[1,8,6,12]等具有大量參數、變數、不精確性之複雜系統均有較佳的適應性，再結合類神經網路^[16,17,14]後，其應用的範圍更為廣泛，如冷氣機(溫控)、洗衣機(位控、量控)等家電用品一一問世，但仍較罕見應用於產業界以取代人工，這仍有待從機電整合上加以著手，期望利用電腦來整合模糊控制之實體應。

無論古典控制理論或現代控制理論在解決非線性、時變系統的控制問題時，其共同特點是，控制器的設計都建立在被控制對象精確數學模型的基礎上，再將系統

(或回授)線性化^[15]或降階處理體^[2]等處理，以簡化運算求解的過華，以便對真實系統做數學抽象的近似描述，把現實系統表現出來。然而近代複雜高非線性的工業控制系統中(如機械手臂)，有些控制過程卻難以實現自動控制，但在實際的例子卻可發現，某些很困難的自動化控制過程，如操控水泥旋窯(溫控、量控、速控)之熟練專業人員憑藉豐富的實際經驗而控制自如。由此事實告訴吾人，能否避開機械手臂之精確數學模式的建立，而直接把專業人員的經驗推導成一系列之控制法則，因此吾人提出設計一個模糊適應控制器來實現適應這些法則於機械手臂，實際應用於機械手臂上，以克服在設計控制器時，對建立精確數學模式所可能遭遇的盲點。

模糊邏輯控制理論^[7]應用上須藉著豐富的控制知識及專家經驗以作控制器設計的依據，尤其是應用在高度非線性的系統上(如機械手臂)，往往缺乏專家系統控制工程師的經驗來引導，為改善上述之缺點，本文先以由粗入細的不斷地試誤法實驗所換得之經驗與資料，來規劃出模糊控制法則表(即不斷地修改歸屬函數值，



依據系統每次的實際響應情況，適時適度的修正，直到其響應近似最佳化或合理化），故與一般傳統直接模擬設計一系統之可能歸屬函數方法不同，其原因是由於在高度非線性系統特性中，單一法則並無法完全符合任一情況的需求，而須由多數個法則中擇一來匹配(Match)某一情況之需求(一對一)，而 Fuzzy 模式正是由多個控制對象法則的集合體，即全盤性(Global)，此乃是與一般 P I D 控制(單一式)最大不同的地方。其重點主要是對系統的整個執行過程作區域規劃並執行該區域之法則，使其整個過程仍不失為連續性與完整性，故可容易地擴大控制範圍(即作大範圍控制)^[5]，則馬達之工作偏壓即能隨操作點、目標點、速度等之不同而作即時之變化調整。

本文乃採用誤差值(Error)及誤差變化量($dError$)作為模糊控制器的輸入^[11]，近似指數型的歸屬函數(模糊化)，經模糊推論法則(IF_Then 及推論機)^[8,9]與最小最大重心座標法(解模糊化)^[3]，而求得一增益值作為控制器的輸出以控制受控系統的行為。模糊控制器相當於一個比例微分控制器，但卻比比例微分控制器更為靈敏，因其比例(P)值隨誤差大小而調整，優點為它係操控於誤差訊號及變化率，可在誤差訊號變得過大之時，施與大增益，當誤差變化量太大時，即產生一校正訊號，作預期之校正動作，因而不但可提高響應速度(縮短上升時間)，又可增進系統之穩定性，相當具有人性化。在高度非線性的機械手臂設計中，應用傳統 PID 控制器往往仍會有震盪現象，並非吾人所期望。乃改採用模糊適應控制器

^[3]，即追隨模式(穩定)的響應。但因模糊控制器之運算(需時 330ms)，不能快速達到控制之效果，本文乃改以離線(Off-Line)方式先建立模糊控制規則表，再以查表(索引)方式(需時 3ms)，再做線上(On-Line)操作。此外，由於馬達先天具有的死區(Dead Zone)，且因角度不同而有所不同(非線性)，無法以 Fuzzy 模式化來建立其歸屬表，因此本文提出以實測算得一偏壓補償表，結合模糊控制規則表而形成近似三維(3D)控制表，以克服死區在控制上盲點，並可增強其適應性。

本文內容編排為四部分：一、模糊控制器之設計：內容包括，如何採用近似指數型歸屬函數，重心座標推論法等來建立一模糊控制規則表(控制器)。二、模適應控制在機械手臂之適應性探討：主要說明由一個無數學模式的機械手臂受控系統，以模糊控制器結合適應追隨參考模式之架構下，對機械手臂作適應性控制之探討。三、硬體架構與軟體流程簡介：介紹機械手臂之硬體架構及各部份之規範。四、模擬與應用結果：吾人先以一般系統模擬來驗證此模糊控制器在追隨模式架構下之可行性，最後將此架構應用在二軸的機械手臂上，並顯示其應用結果之可行性。

模糊控制器

一般 DC 馬達響應特性曲線(如圖 1-1)為依據，採用輸出與輸入之間的誤差量(Error)及誤差的變化量($dError$)等設計一模糊控制器。



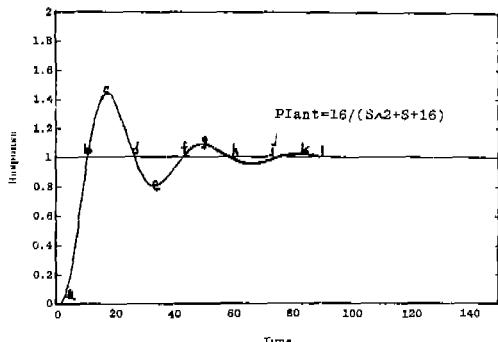


圖1-1、DC馬達響應特性曲線圖。

設計流程如圖1-2 所示。

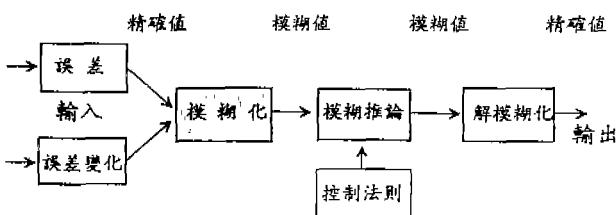


圖1-2、模糊控制器設計流程。

a. 定義誤差、誤差變化量

$$Error_n = U_n - Y_n \quad (1)$$

$$\begin{aligned} dError_n &= Error_{n-1} - Error_n \\ &= Y_n - Y_{n-1} \end{aligned} \quad (2)$$

$$Error[+] \Rightarrow [a, b], [d, f], [h, j]$$

$$Error[-] \Rightarrow [b, d], [f, h], [j, l]$$

$$dError[+] \Rightarrow [a, c], [e, g], [i, k]$$

$$dError[-] \Rightarrow [c, e], [g, i], [k, l]$$

由誤差(Error)，誤差變化量(dError)之大小，依一般控制理念規劃出控制法則(Control Law)，因此將轉置為一平面座標表示法，即一粗略模糊規則表(如表1)。

PB : Positive Big

NB : Negative Big

PM : Positive Middle

NM : Negative Middle

PS : Positive Small

NS : Negative Small

ZO : Zero

b. 模糊化

在製定歸屬函數過程時，因缺乏控制專家之引導，故完全以試誤法(Trial and Error)不斷地修正歸屬函數值，其結果為一近似指數型歸屬函數(如圖1-3)，其量化程度(如表2)。

表1、粗略模糊規則表。

ERROR							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	零	正小	正小	正中	正大	正大	正大
PM	負小	零	正小	正小	正中	正大	正大
PS	負小	負小	零	正小	正小	正中	正大
dError ZO	負中	負小	負小	零	正小	正小	正中
NS	負大	負中	負小	負小	零	正小	正小
NM	負大	負大	負中	負小	負小	零	正小
NB	負大	負大	負大	負中	負小	負小	零



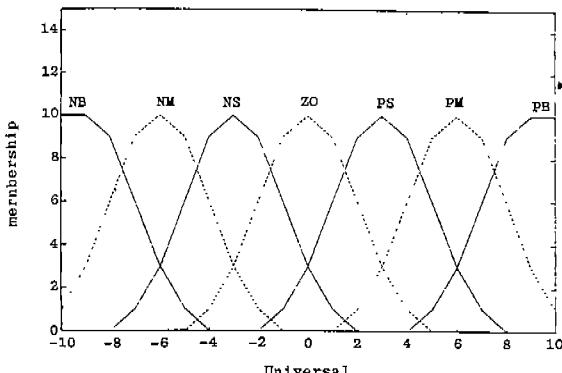


圖1-3、歸屬函數圖。

表2、模糊量化程度表。

	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	6	9	10	10	10	10	
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	6	9	10	9	6	3	1		
PS	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	6	9	10	9	6	3	1	0	0	0	
ZO	0	0	0	0	0	0	1	3	6	9	10	9	6	3	1	0	0	0	0	0	
NS	0	0	0	1	3	6	9	10	9	6	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
NM	1	3	6	9	10	9	6	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
NB	10	10	9	6	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

c. 模糊推論及解模糊化

控制規則庫為

R1: 假如 Err(正大) and dErr(零) 則

K(t) 正中

R2: 假如 Err(零) and dErr(正大) 則

K(t) 正中

R3: 假如 Err(負大) and dErr(零) 則

K(t) 負中

R4: 假如 Err(零) and dErr(負大) 則

K(t) 負中

R5: 假如 Err(負大) and dErr(正大)

則 K(t) 零

Ri: IF X is A and Y is Bi

前題部

then Z is Ci
後題部

Rn: 假如 Err(零) and dErr(零) 則 K

(t) 零

推論方法(採用 max-min 法)與解模糊化，如圖1-4所示。

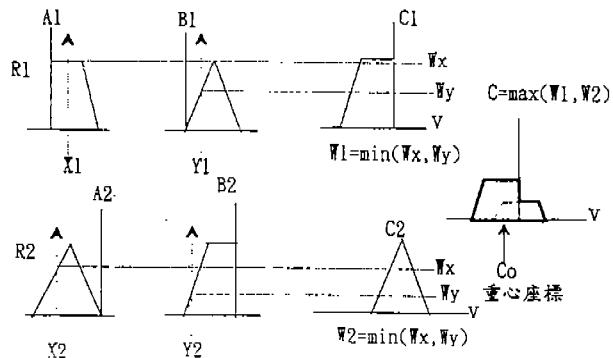


圖1-4、max-min 推論與重心座標法。

$$W_1 = \min(W_x, W_y) \quad (4)$$

$$W_2 = \min(W_x, W_y) \quad (5)$$

$$C = \max(W_1, W_2) \quad (6)$$

解模糊化(重心座標法)

$$C_o = \frac{\sum M_C(V)*V}{\sum M_C(V)} \quad (7)$$

此 C_o 即為模糊控制器之輸出量(受控系統輸入量)。

則吾人可得一模糊控制規則表(如表3)及一立體圖(mesh)如圖1-5 所示。

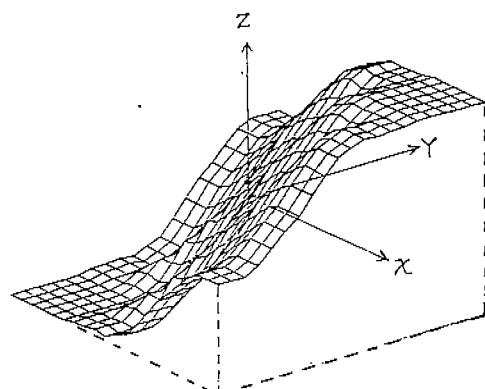


圖1-5、模糊控制規則立體圖(mesh)。

表3、模糊控制規則表。

Y軸

模糊適應控制在機械手臂之適應性探討

a. 模糊控制與適應控制(模式追隨)
之探討

在傳統的負回授(圖2-1)其角度控制

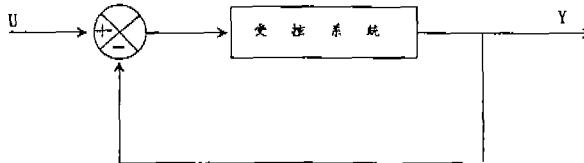


圖2-1、單一負回授角度控制圖。

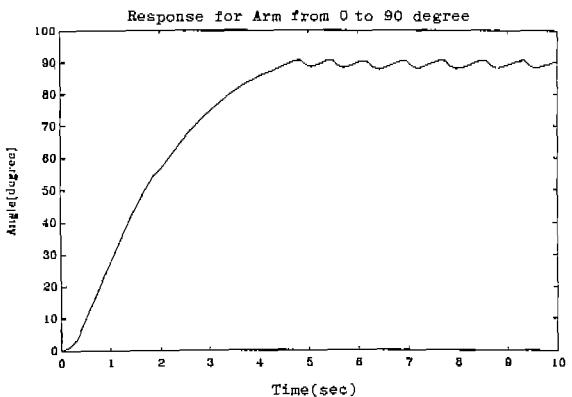


圖2-2、單一負回授角度控制響應圖。

響應如圖2-2所示，在目標值附近具有振盪現象。

當吾人以模糊控制器取代負回授(如圖 2-3)，且隨時調整增益參數(K)，而達控制的目的(如圖 2-4)，但仍有穩態誤差存在(原因是馬達及機械架構都有死區)。故本文乃採用適應性控制(追隨參考模式)，並力圖克服死區問題。

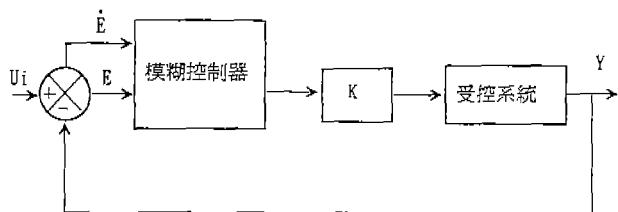


圖2-3、模糊控制器架構圖。

基本上適應控制之架構(如圖2-5)，其目的在當系統存在著參數不明確或時變的情況下，而能維持調和系統的一致性，故其大多數的應用於掌握系統的參數變化與參數不明確之處理上，及降低人為調整

參數的數目。

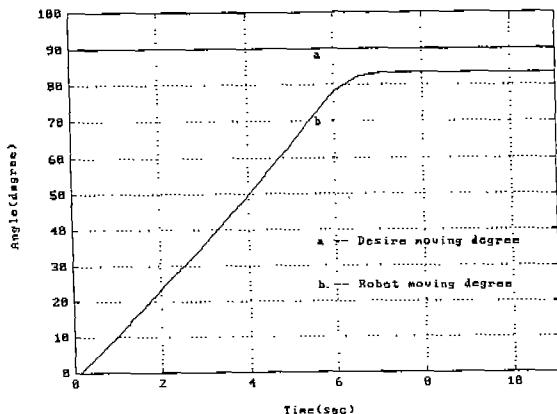


圖2-4、模糊控制器角度響應圖。

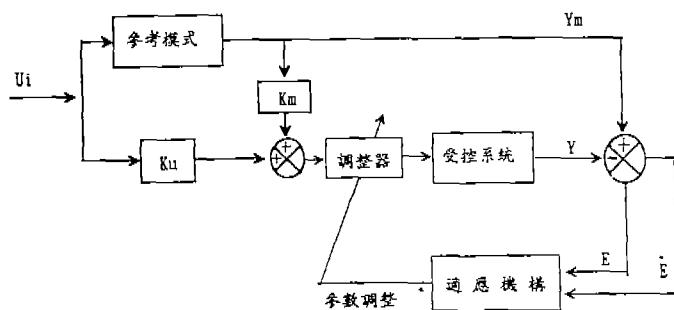


圖2-5、適應控制參考模式(MRAC)架構圖。

今改以 Fuzzy 控制器來取代人為的適應機構(參數調整)，不但可增進工程效率及實用性，更具有人性化。如此可避免數學模式的繁複運算，不必作參數預估，而僅以觀測量的變化情形，預估參數值，因所得參數與誤差值成近似線性正比關係，恰與非線性系統作線性回授不謀而合，故模糊控制器可取代線性參數化適應機構之作用，自動參數調整，使得受控系統的響應能追隨參考模式(Reference Model)，且追蹤誤差(Tracking Error)

漸近收斂 (Asymptotically Convergence)：零，以確保受控系統(非線性)為全盤性(Gobally)漸近穩定。系統誤差收斂為零。由誤差(Error: θ)、誤差變化量(dError: $\dot{\theta}$)之關係轉換成相位平面(phase plane)法來表示(如圖2-6所示)，可發現最後誤差收斂為零。

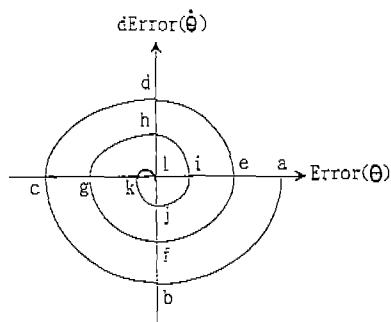


圖2-6、相位平面表示法。

b. 機械手臂在模糊適應控制上可能之盲點

由於本論文所採用之機械手臂，機構上相當粗糙，軸1為齒輪帶動，軸2為齒輪及鏈條帶動，機構之死區角分別為1.5度、3度(均不易克服)。而且馬達之電氣死區又隨手臂之角度之不同而不同，在此解決之道，乃實測馬達之電氣死區電壓臨界值(如圖2-7)，再換得一偏壓補償表(如表4)作為克服電氣死區之用，儘可能消除死區之穩態誤差，以期改善其適應性。

V_r ：馬達額定電壓

死區偏壓臨界值(V_{cr})與偏壓補償值(Offset)之換算公式：

$$1. \text{Arm_up} : \text{Offset}_{up} = \left(\frac{V_{crup}}{V_r} \right) \times 255 \quad (8)$$

$$2. \text{Arm_down} : \text{Offset}_{dn} = \left(\frac{V_{crdn}}{V_r} \right) \times 255 \quad (9)$$

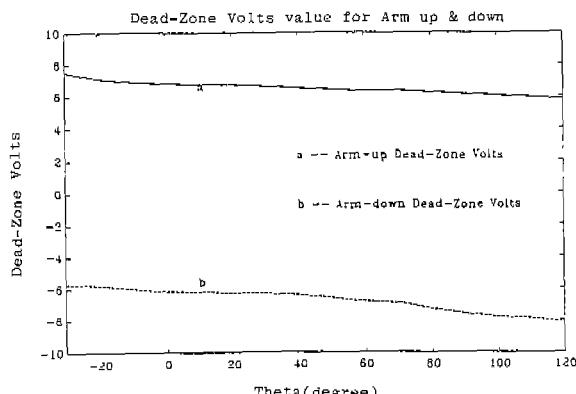


圖2-7、馬達電氣死區臨界電壓與手臂角度關係圖。

硬體架構與軟體流程簡介

a. 硬體架構

本文之硬體架構分為電腦(PC)、PC 介面卡(Interface card)、轉換器(D/A)、驅動器(Driver)、機械手臂(Robot)、察覺器(Sensor)等六部份(如圖3-1所示)。

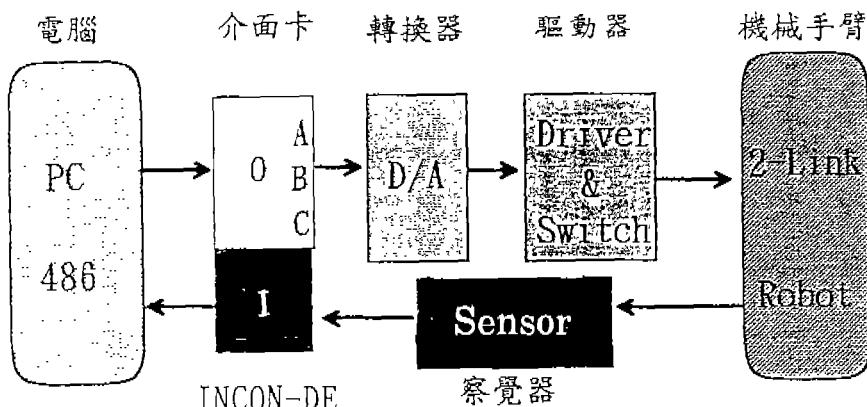
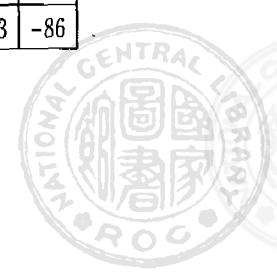


圖3-1、電腦整合機械手臂硬體架構圖。

表4、馬達電氣死區偏壓補償表。

角度	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
上	80	75	73	72	71	71	70	69	68	67	67	66	65	64	63	62
下	-60	-61	-63	-65	-65	-66	-66	-68	-70	-72	-73	-77	-80	-82	-83	-86



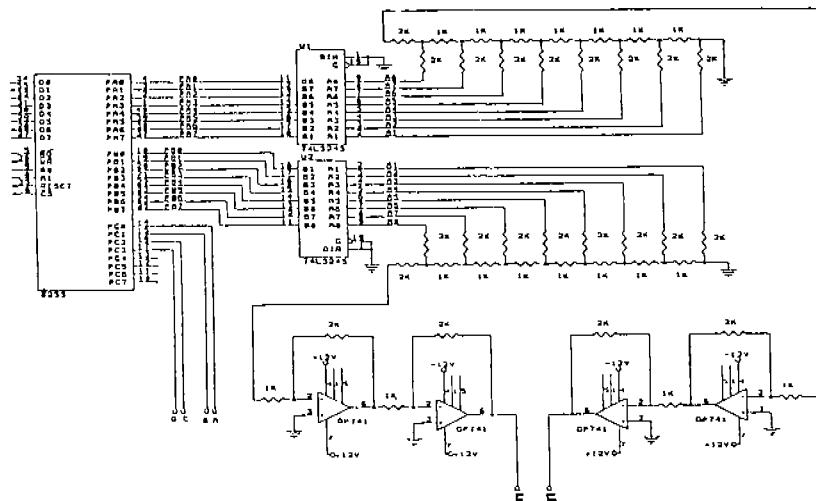


圖3-2、數位、類比轉換器電路圖。

5. 索覺器(Sensor)：旋轉編碼器(Rotary Encoder)*2，

Resolution: 1000 Pulse/Rev

Model: OEW-10-2

分別安裝於軸1與軸2中心處，可直接測得手臂真正角度。

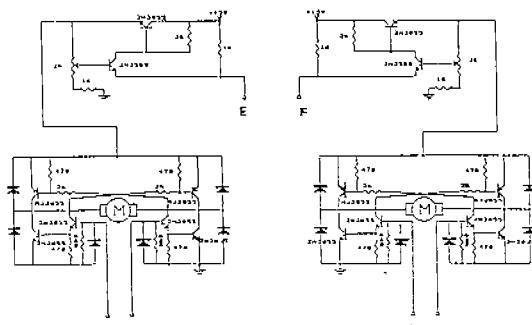
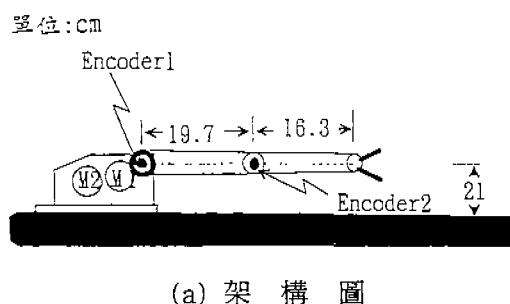


圖3-3、驅動器與正逆轉開關電路圖。

6. 機械手臂(Robot)：為簡易型2-D(2-link)手臂架構，如圖3-4所示

直流馬達*2，24Vdc。



(a) 架構圖

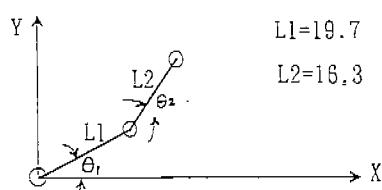


圖3-4、二軸機械手臂外觀及簡圖。

手臂 1 為齒輪傳動。(機械死區:1.5 度)

手臂 2 為鏈條傳動。(機械死區:3 度)
故因機械死區可能造成之最大誤差值

為

角度:

位置:

依矩陣推導得出

之公式如下：

$$[\theta_1, \theta_2] = \text{fun}(x, y, L_1, L_2) \text{ 之公式如下:} \\ \theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{L_2 \sin \theta_2}{\sqrt{x^2 + y^2 - L_2^2 \sin^2 \theta_2}}\right) \text{ rad} \quad (10)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{-\sqrt{(2L_1L_2)^2 - (x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2)^2}}{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}\right) \text{ rad} \quad (11)$$

同理亦可依矩陣推導出

之公式如下：

$$x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2) \\ = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (12)$$

$$y = L_1 \sin \theta_1 + L_2 (\cos \theta_1 \sin \theta_2 + \sin \theta_1 \cos \theta_2) \quad (13) \\ = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

量測得此 2 軸之手臂角度範圍為：

$$\theta_{1\min} = -34.2^\circ \quad \theta_{2\min} = -111.78^\circ \\ \theta_{1\max} = 120.5^\circ \quad \theta_{2\max} = 50^\circ$$

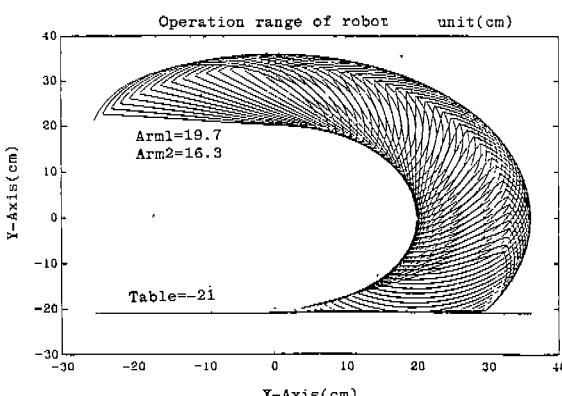


圖3-5、二軸(2-Link)機械手臂工作空間。

依此範圍可運算出手臂之工作空間如圖3-5所示。

b. 軟體流程

本文之軟體採用“MATLAB”、“C語言”作為控制程式語言，其流程如圖3-6所示。

模擬與應用結果

a. 追隨參考模式模糊適應控制在線性系統之模擬

在一般實際系統中，很可能是高階系統或非線性系統，甚至於兩者皆有，必

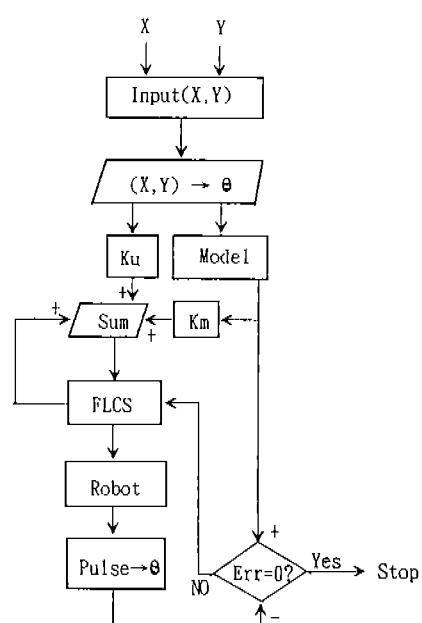


圖3-6、軟體訊號流程圖。

為複雜難懂，但分析時可經由模式簡化及線性化，使原系統成為二階或三階來取代加以描述，在此將以二階系統來做模擬。首先選取二階的參考模式系統，滿足我們需求的特性。其轉移函數(Transfer Function)為：

$$\frac{Y_m}{U} = \frac{4}{s^2 + 3.2s + 4} \quad (14)$$

現以圖4-1為模擬架構(速度控制)：

情況1.

$$\text{受控系統 Plant : } P(s) = \frac{64}{s^2 + 5s + 64}$$

$$\text{參考模式 Model : } \frac{Y_m}{U} = \frac{2}{s^2 + 3s + 2}, \zeta = 1.0, \omega_n = \sqrt{2} \text{ rad/sec}$$

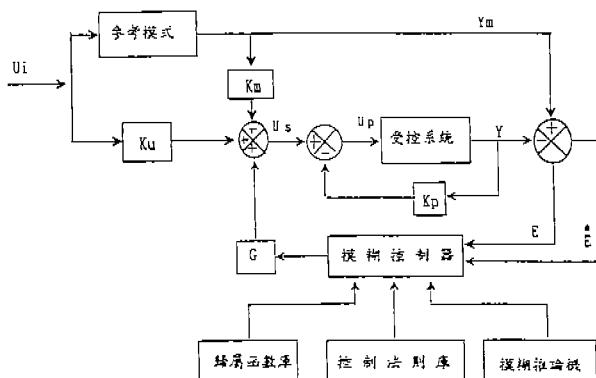


圖4-1、模糊追隨模式適應控制模擬架構。

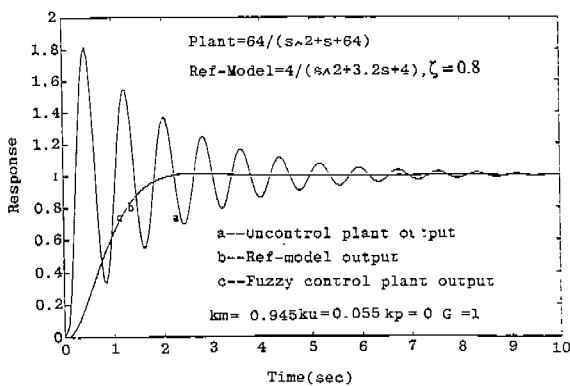


圖4-2、
模糊追隨模式適應速度控制步階響應圖。

機械手臂適應控制之應用

經由模糊控制後可得理想步階響應為圖4-2所示，其誤差(Error=Ym - Y)如圖4-3所示。收大數為零，故可知此模糊控制器之適應性佳。

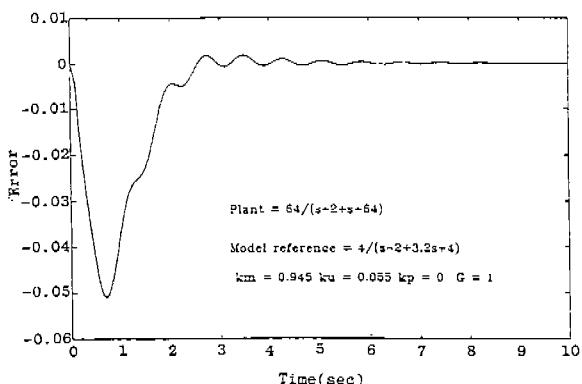


圖4-3、
模糊追隨模式適應速度控制誤差圖。

情況2.

同情況1. 且1~2秒時的回授加上10%輸入的雜訊(Noise)其步階響應如圖4-4所示，誤差如圖4-5所示，振盪幾次後即可誤差收斂為零。

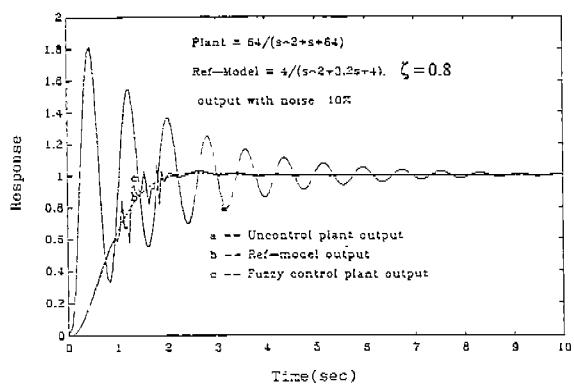


圖4-4、
回授(2-1)秒加雜訊(10%)模糊適應控制
步階響應圖。



情況3.

受控系統的穩態輸出值($=0.5$)小於模式時，則需以 K_p 來補償。

受控系統

參考模式 Model : 同情況1.

回授補償 $K_p = -1.0$ 時，其步階響應如圖4-6 所示，仍可追隨參考模式的響應。

情況4.

當輸入訊號為正弦波時，

受控系統 Plant : 同情況1.

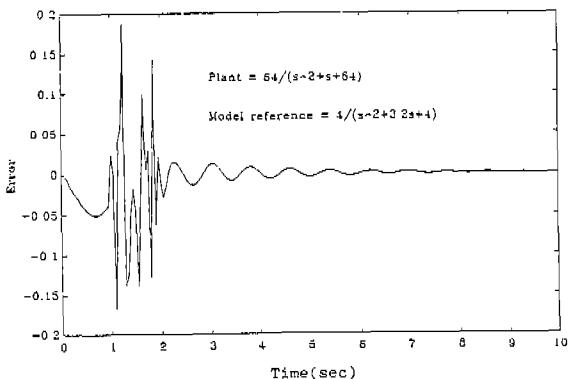


圖4-5、

回授(1-2)秒加雜訊(10%)模糊適應控制誤差圖。

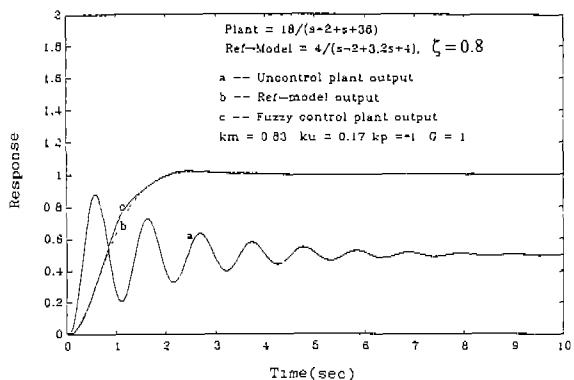


圖4-6、

模糊適應控制步階響應圖。

參考模式 Model : 同情況1.

其輸出響應均可追隨模式之響應，如圖4-7 所示

情況6.

當輸入訊號為方波時，

受控系統 Plant : 同情況1.

參考模式 Model : 同情況1.

其輸出響應均可追隨模式之響應，如圖4-8 所示。由於方波之正負峰值切

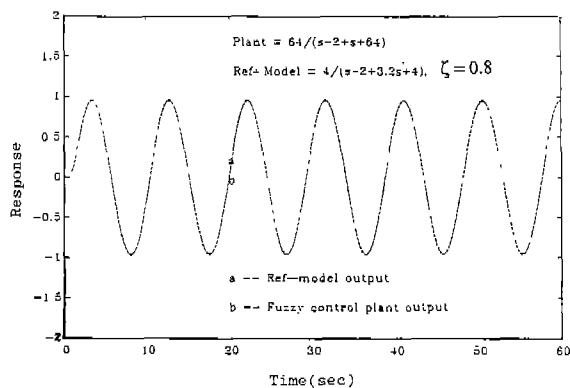


圖4-7、

輸入正弦波之模糊適應控制響應圖。

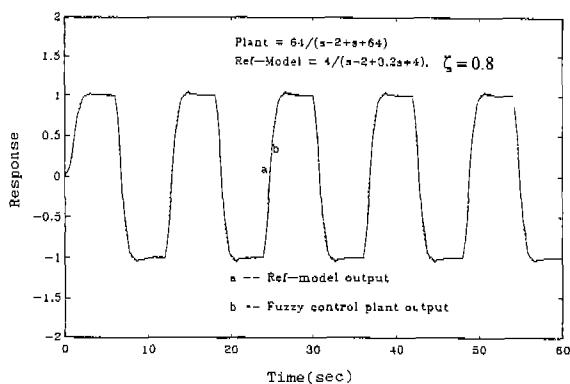


圖4-8、

輸入方波之模糊適應控制響應圖。

換時間相當短暫(幅度變化率 dv/dt 過大)，致使得略有小振盪後仍能追隨上。

b. 模糊追隨模式適應位置控制於機械手臂之應用

傳統的負回授控制器，應用在實際的位置(角度)控制上往往會有如圖2-2所示之振盪不已現象，其可能原因有機械傳動架構之死區、馬達電氣之死區、控制器參數不良等等。因機構已定型，不易加以改善，參數的調整可由模糊控制器加以克服，接下來即為考量電氣之問題。由電機機械直流馬達之『電壓轉速』、『轉速轉矩』特性曲線，可知需測得馬達之偏移電壓(Bias)值對手臂角度變化之關係曲線，如圖2-7所示，再將此關係曲線轉換成一『偏壓補償(Offset)表』(如表4)，以解決電氣死區之問題。本論文之實體(機械手臂角度、位置)控制，採用圖4-9為基本架構，其響應結果如圖4-10所示。(其中參考模式採用

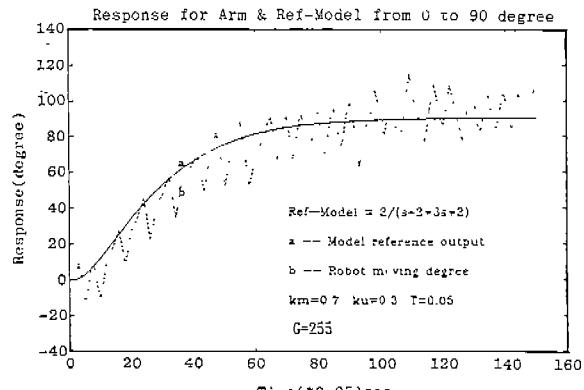


圖4-10、直接模糊適應控制位置控制響應圖。

無超越量，無瞬間正反轉 適合馬達之位置控制)。

由結果顯示之不理想狀況，其原因是模糊控制器每執行一值需時330ms，不能滿足線上即時操作需求，造成馬達失控330ms。其解決方法為先離線(Off-line)求得此增益控形，其架構如圖4-11所示，操作時再根據量測之誤差量差變化量、手臂角度為等索引(Index)值，快速查表方式求得操控值(需時3ms)，如此可大大縮短馬達失控時間。

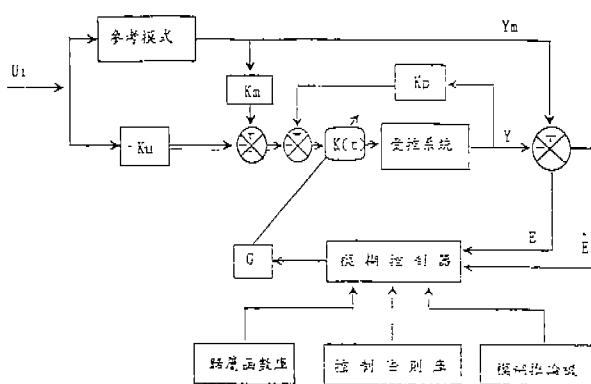


圖4-9、直接模糊適應控制位置控制架構圖。

機械手臂適應控制之應用

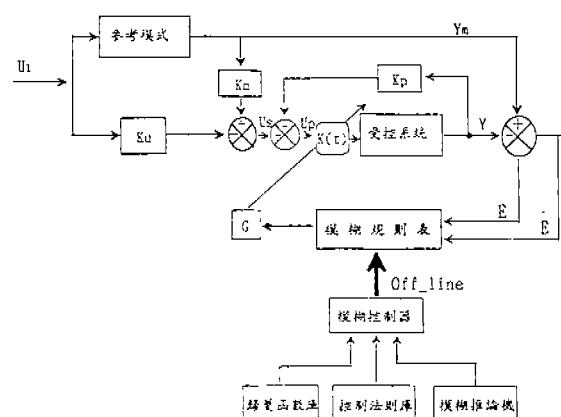


圖4-11、間接模糊適應控制位置控制架構圖。

情況a.

未考慮馬達之電氣死區偏壓時，其響應如圖4-12所示，將會造成嚴重穩態誤差及慢速響應。

情況b.

考慮馬達之電氣死區偏壓時，其偏壓為固定值($=100$)響應如圖4-13所示，將會造成嚴重不穩定現象(尤其在模式響應接近穩定時)。因為固定大偏壓值下，在反轉時，大轉矩及機械運動慣性等因作用，而形成振盪不已。

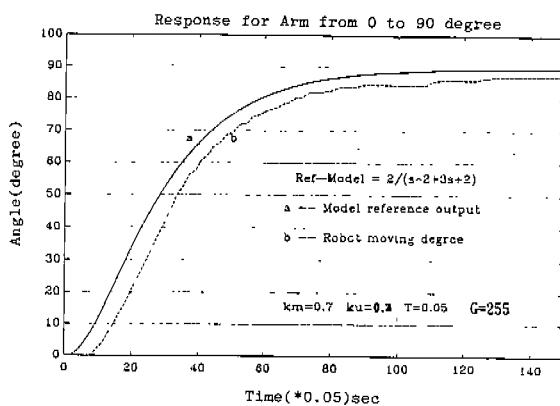


圖4-12、未考慮馬達電氣死區偏壓響應圖。

情況c.

考慮馬達之電氣死區偏壓時且偏壓值隨手臂角度而不同，再轉換為偏壓補償表(表4)，與模糊規則表(表3)合併成一近似參維(3D)之操控表，其架構如圖4-14所示，結果響應如圖4-15所示。將可克服電氣死區問題。而手臂角度與模式之誤差如圖4-16所示，收斂為零。

本機械手臂由於軸1與軸2之間的運動具有耦合(Coupling)關係，若兩軸同

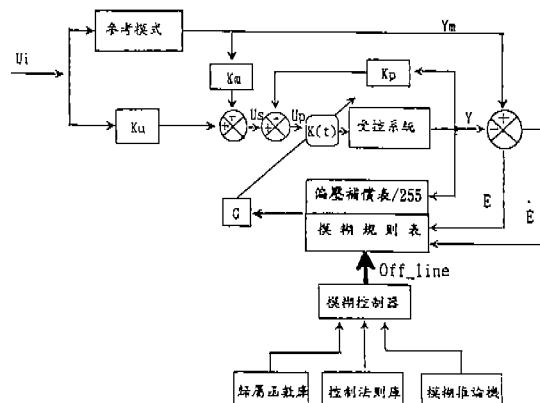


圖4-14、間接模糊+偏壓補償適應控制位置控制架構圖。

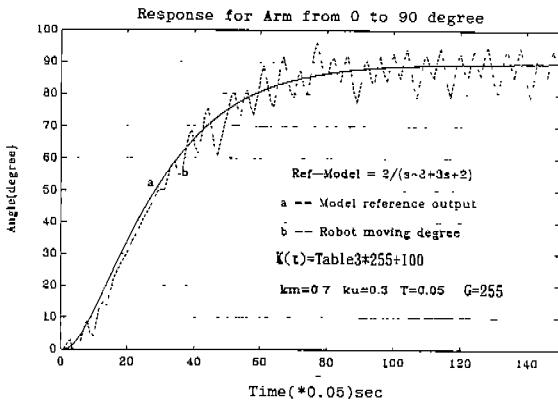


圖4-13、慮馬達電氣死區偏壓值($=100$)響應圖。

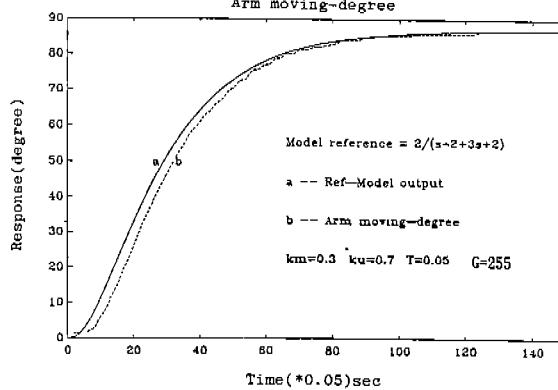


圖4-15、間接模糊+偏壓補償適應控制位置控制響應圖。

時運動（連動），會有相互拉扯牽制現象，導致不合理運動，故只能以單動來實地操作。而圖 4-17 為誤差與誤差變化量的收斂情形。

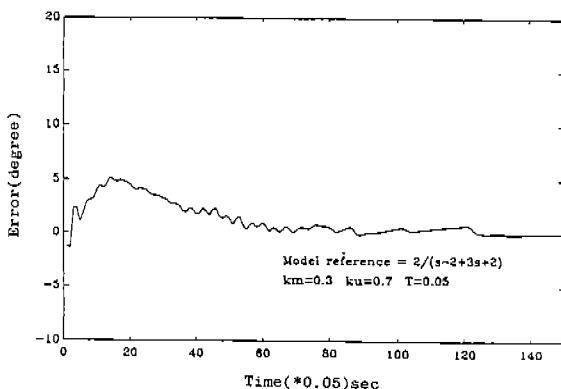


圖4-16、手臂角度與模式之誤差圖。

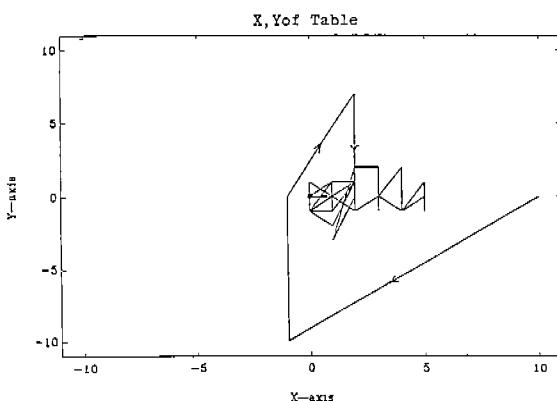


圖4-17、X,Y索引值(相平面索引)圖。

情況d.

$(36,0) \rightarrow (0,36)$ 逐段完程，響應如圖 4-18 所示。

$$Y=0:1:36 \quad X=36-Y$$

情況e.

$(36,0) \rightarrow (0,36)$ 一次完成，響應如圖 4-19 所示。

動作次序：軸1 → 軸2 → Stop。
而其手臂實際運動響應如圖 4-20 所示。因手臂 2 機械死區較大，故其穩定態誤差較不易為零。

情況f.

同情況 e，且來回重複 5 次，其結果仍在設定的目標點附近。其誤差值仍在最大機械死區範圍之內。如圖 4-21 所示。

情況g.

$(36,0) \rightarrow (0,36)$ 作圓周 (半徑 R=36

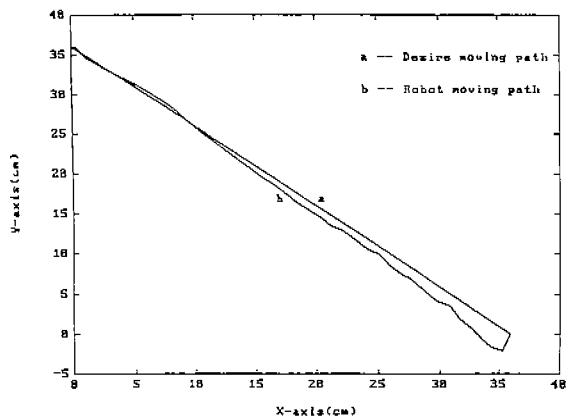


圖4-18、單動逐段 $(36,0) \rightarrow (0,36)$ 運動路徑圖。

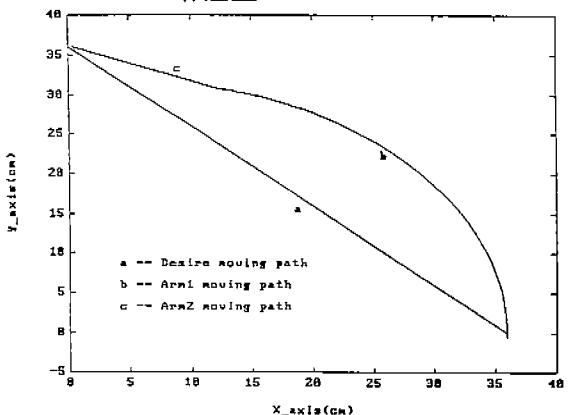


圖4-19、單動一次 $(36,0) \rightarrow (0,36)$ 運動路徑圖。

cm) 移動逐段完成，響應如圖 4-22 所示。其結果相當好。

結論與建議

無論在學術研究或工業發展中，線性控制理論之應用均建立在線性系統的數學模式下，利用多種不同且強功能的數學工具去作分析、設計、模擬控制器。但當我們嘗試將傳統線性回饋控制理論應用在高耦合非線性的機械手臂系統上，並作大範圍控制時，卻面臨相當大的限制，尤其是

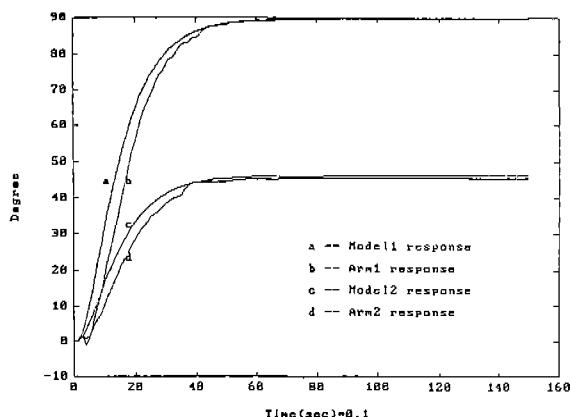


圖4-20、機械手臂實際運動響應圖。

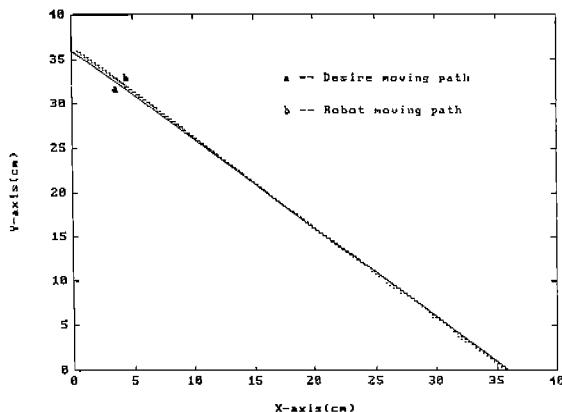


圖4-21、機械手臂在(0,36),(36,0)兩點間來回重覆運動圖。

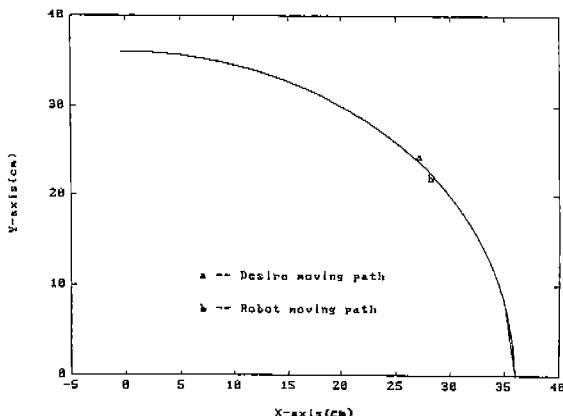


圖4-22、半徑=36cm之圓周移動(36,0)
→(0,36)路徑圖。

天生的非線性死區問題(含機械、電氣)最為棘手。本論文之主旨基於實體控制之考量，乃深入研究非線性電氣死區問題及在無數學模式下，探討模糊理論在機械手臂上適應性控制之可行性，不但已克服電氣死區問題，而且更加強適應性、穩定性及作大範圍控制。首先以離線方式求得一模糊控制增益表(2D)，電氣死區臨界偏壓補償表，匯成近似三維(3D)控制增益表，依實際之輸出、誤差、誤差變化量為指標，以索引查表方法即可作即時(Real time)性實體控制，並成功地應用在機械手臂上。由結果顯示，模糊理論在機械手臂上適應性控制確為高可行性。

使用模糊控制器有下列好處：對系統不必建立數學模式、具有人性化、容易擴大控制範圍(並靠實作以換取經驗(如本文))。

建議

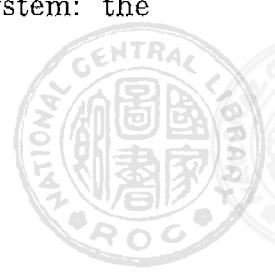
1. 對不同性質的系統必有不同的控制方式，而對模糊控制器而言，必有不同的歸屬函數值，故最好有該方面專家的指導，則控制器之設計將易如反掌。



2. 本文曾提及的機械死區問題，可將機械傳動系統改善為旋桿(Screw)傳動系統，雖可能降低運動速度(可提高馬達轉速改善)，但卻有提高精確度及大大地改善機構死區問題、降低故障率等好處。
3. 本文因機構問題，無法將馬達3加以更換為直流馬達(原為步進馬達)，故只能作平面(2D)的控制是為遺憾有朝一日應再完成三度空間的位置控制，將可提高其價值性。

參考文獻

1. 王安培，丁正良。1993。模糊控制理論在橋樑結構控制系統之應用。中原大學土木系。
2. 李明華。1990。A study of boundary layer ability problem of singularly perturbed system in flight vehicles。逢甲大學自動控制工程研究所碩士論文。
3. 林志穎。1992。模糊理論應用於追隨模式架構之研究。中興大學機研所碩士論文。
4. 徐繼達。1993。廠商經濟理論分析--模糊數學之應用。逢甲大學。
5. 許毅然。1992。Hybird control for special nonlinear unstable System. 成功大學航太所博士論文。
6. 陳錫明。1993。A methodology to fuzzy reasoning for rule-based expert systems.
7. 楊英魁博士校閱，中國生產力中心技術引進服務組編譯。Fuzzy Control, Fuzzy 理論與應用實務。全華科技圖書。
8. 楊棟樑，朱銘祥。1993。以自然法則為基礎之適應模糊控制。成功大學機械系。
9. 模糊數學在工程上應用研討會參考書。1993。中央大學土木研究所編印。
10. 鄭魁香，蔣偉寧。1993。模糊概率方法在邊波穩定分析之應用。中央大學土木系。
11. Buckley, J. J. 1992. Universal fuzzy controllers. International Federation of Automatic Control.
12. Chen, Bor-Tow, Chen, Yung-Sheng, and Hsu, Wen-Hsing. 1993. An automatic fuzzy based image processing systems.
13. Chen, Liang-Chia and Shyh-Fung Kuo. 1993. Pattern recognition using fuzzy corre.
14. Chien, Yuzn-Cheng, Chen, Yie-Chien, and Teng, hing-Cheng. 1993. An optimal control structure using fuzzy neural network.
15. E Jean-Jacques, E. and Li, Slotine Weiping. Applied nonlinear control. pp. 53-57.
16. Jou, hi-Cheng and Chen, hung. 1993. A new neural fuzzy system: the fuzzy cerebellar model arithmetic computer.



17. Lin, Chin-Teng. A neural fuzzy control/ decision system and its applications.
18. Sun, Ching-Ming and Wu, Berlin. 1993. Fuzzy analyzing and modeling in linguistic semantics.
19. Trappey, A. J. C., Trappey C. V., Lay, J. S., and Hwang, S. J. 1993. Fuzzy merchandise portfolio model and its model management.
20. Zadeh, L. A. 1965. Fuzzy sets. Inform Contr. Vol. 8:338-353 .

