

具學習人類技能的智慧型控制系統研製  
Building of Intelligent Machine with Principles of  
Human Skill Acquisition

計畫編號：NSC-87-2213-E-009-146

執行期間：86年8月1日至87年7月31日

主持人：林進燈 教授 ctlin@fnn.cn.nctu.edu.tw

執行機關：國立交通大學電機與控制工程研究所

摘要

為了應付二十一世紀更高科技發展的需求，許多工程師極力想模仿人類複雜動作表現的許多特徵，以建構出動作敏捷而靈巧的機器人。這些特徵包括對於過多(redundant)自由度的肢體的完美協調控制，藉持續的學習與反覆的練習獲得正確動作技巧，基於過去經驗的延伸表現(generalization)，隨意性動作與反射性動作的運動技巧互換，以及知識與控制法則的有效率的分散式處理。在這個五年計畫中，我們將發展一套智慧型機器人控制系統，設計製作一個單手單腳、型態機制都像人的機器人，稱為擬人機。其次發展模糊邏輯的智慧型控制系統。本年度研究重點在於油壓缸控制與感測系統整合及穩定性分析。

關鍵字：擬人機，智慧型控制系統，穩定性分析，模糊邏輯，油壓。

Abstract

There are many features of human motor performance that engineers would like to emulate in developing dexterous robotic systems for operation in the 21<sup>st</sup> century. These features include smooth coordination of redundant degrees of freedom, on-line acquisition of skills through learning and practice, generalization on past

experience, and computationally efficient distribution of knowledge and control. The proposed five-year research involves the development of intelligent robotic control systems patterned after the structural, functional, and behavioral aspects of human motor control and skill acquisition. Specifically, we will design and build an anthropomorphic manipulator with one-armed, one-legged human figure for experimental tested, and investigate fuzzy logic integrated technologies for intelligent control. This year, our research focused on the fuzzy control of hydraulic system and its stability analysis.

Key words: anthropomorphic manipulator, intelligent controlsystem, system stability, fuzzy logic, hydraulic.

簡介

本五年計畫將設計製造一個六軸類人機構，稱為擬人機。此六軸擬人機模仿一個單手單腳的人體而可用於探討當學習人類動作技巧時所需要同時具有的四種能力：定點控制(endpoint positioning)、平衡(balance)、姿態控制(posture control)，及障礙物躲避 (obstacle avoidance)。所發展的擬人機中有五個旋轉關節(rotary joints)，每一關節都用類似人類肌肉結

構成反肌配對的油壓致動器。此篇報告裏，我們提出油壓缸的系統設計，包括油壓系統架構、控制器及穩定分析。

油壓系統主要包含油壓致動器、比例型控制閥、感測元件(sensor)與油壓泵浦 (pump) 等相關元件。

控制方面我們首先嘗試用傳統PID，為了改進傳統PID的缺點，我們發展了其他三種控制模式，分別為適應性 PI 控制 ( Adaptive PI Control )、模糊控制 ( Fuzzy Control )、平滑性模糊控制(Smooth Fuzzy Control)。

由於油壓缸有蠻大的非線性特性，為了分析控制器是否穩定，我們採用Popov Criterion Stability Theorem來分析所設計的控制器之穩定性。

## 油壓系統

油壓致動器(油壓缸)：

油壓致動器的控制量主要為位置、速度。而控制方法主要有兩種，一種為閥控制方式，其使油壓源的輸出量為一個定值，利用改變控制閥的節流開度，達到控制致動器之流量。另一種為泵浦控制方式，使泵浦只發生致動器所需之流量。省能量效率高於閥控制方式，但是響應特性不好。所謂的油壓缸是將油壓動力轉換成不同推力（隨截面積之大小而變），不同速度（隨流量大小而變），且運動為線性。油壓缸又稱為直線運動致動器。其構造大致可以分為液壓筒 (Cylinder barrel)、活塞 (Poston)、活塞桿 (Piston rod) 和蓋 (Cover) 等幾部份。而本系統是採用德國 Bosch 的單桿型油壓缸。

控制閥：

為了驅動油壓致動器，必須使用控制閥，來控制所需要油壓的壓力、流量及流向。而控制閥主要分成兩種：伺服閥和比例閥。伺服閥是指以電氣或其他的輸入訊號來控制流量或

是壓力的閥，其特性乃是出力大、精度高、反應快，可以做位置、速度與力量的控制，可是在價格方面其較為昂貴。比例閥所使用的為開回路方式，其精度較差，可是其價格較為便宜。本系統是採用方向比例閥和壓力比例閥。

其他油壓元件：

1. 蓄壓器亦為德國 Bosch 製造，用來儲存壓力以供更大的輸出。
2. 馬達與油壓泵為大同電機製造，可提供三匹馬力。
3. 油壓驅動卡：我們共採用六個油壓驅動卡來分別驅動六個油壓控制閥。

4. 感測部份：

感測部份的主要功能是要將連桿的伸長，縮短的值感測出來，以作為整個系統的回授訊號。感測部份是採用線性比例尺 ( linear potentiometer )。

## 控制方法

適應性 PI 控制(Adaptive PI Control)

傳統的 PI 控制器對於油壓系統，容易造成超越量及衝量過大。因此將 PI 控制器作適應性的調適。我們在設計適應型 PI 控制器時首先我們會有一組經過實驗經驗的 PI 值，並且在設定的目標點和下一個目標點之間作控制的調適，使整個區間分為三個部分，加速區，等速區，和減速區。其中加速區和減速區是作線性加速和減速。如此可以讓每兩個設定目標點間經過先遞增速度後等速進行最後再遞減速度，以改善油壓系統響應的超越量和衝量。

模糊控制(Fuzzy Control)

在規則庫設計部份，我們考慮三種狀況：

- (1) 我們使用的油壓缸可以作雙向運動並藉由輸入電壓的正負號來改變運動方向，所以我們在設計規則庫時採用對稱性的方式。

- (2) 當誤差量為大(Large)的時候，其誤差變化量影響甚小，而我們為了簡化規則庫，所以不考慮誤差的變化量的大小，其激發量皆為大(Large)。
- (3) 當誤差量為小(Small)，誤差變化量為反方向的時候，為了避免油壓系統產生過大的超越量，因此設其激發量為零(Zero)。

### 平滑性模糊控制(Smooth Fuzzy Control)

當一般的模糊控制器用於油壓系統作連續性的控制時，常會在控制器接收新的位置命令時，產生瞬間的衝力或是因為到達指定位置後速度降為零而感受到瞬間的停頓感，為了達到平滑控制的目的，我們將改進一般的模糊控制器並加上前後濾波器，而成為平滑性模糊控制器。

### 穩定性分析

在這一節我們將探討油壓缸之穩定性分析，首先利用流體力學方程式和油壓公式及牛頓定理來分析油壓缸的一些動態特性，接下來假設一些狀態變數並進一步化簡而得到系統的狀態空間；最後利用 Popov Criterion Stability Theorem 來驗證系統的穩定性。

#### (一)油壓缸動態方程式的推導：

我們所採用的油壓系統圖，控制訊號經過閥的放大增益之後轉成輸入電流，並控制比例伺服閥的開口和流量大小。其中 F 為負載力的大小，M 是負載的重量，而整個油壓系統的動力來源為一個三相式的交流馬達。我們可用流體力學方程式，油壓公式以及牛頓定理，逐一推論而得所需之油壓缸的動態方程式。

#### (二)穩定性分析：

採用 Popov Criterion Stability Theorem。在之前分析我們的系統時，發現系統本身的狀態方程式會出現非線性的特徵，因此一般線性系統之穩定分析並不適用於此，因此我們採用 Popov Criterion Stability Theorem。

Popov 定理主要由下列三個條件構成：

#### (條件一)

經我們定義之系統的非線性項必須 Bounded，且初始值需為 0，也就是說(3.9)式之非線性項必須滿足

$$qV < \frac{\phi_{VAV} V}{AV} < qV, \text{ 且 } \phi_{VAV} \Big|_{AV=0} = 0$$

#### (條件二)

經我們定義一個非線性項，且把系統狀態空間化成一般的線性化空間後，其系統矩陣 A 必須為一 Hurwitz 矩陣。

#### (條件三)

前面兩個條件都成立後，我們必須找到一個正實數 r，使得

$$\inf_{\omega \in \mathbb{R}} \operatorname{Re} \left[ (1 + j\omega r) G(j\omega) \left( 1 + \frac{1}{q_1 - q_2} \right) \right] > 0$$

若上面三個條件都成立則系統將會是 globally stable。這裡 G(jw) 為系統經過線性化後，其系統的轉移函數，定義為

$$GB^T B^T C B^T - AB^T B$$

而 q1, q2 為非線性項之 Bounded Values。

### 實驗結果

#### A. 控制部分

##### (一) Step response:

從 Step Response 比較圖(圖一)中可以看出適應性 PI 控制器和模糊控制器的比較，在上升時間(rise time)部份，模糊控制器的效果比適應性 PI 控制器好。而從 Step Response 誤差遞減圖(圖二)可以看出模糊控制器的誤差很快就遞減，適應性 PI 控制器則遞減較慢。

##### (二) Ramp response:

從 Ramp Response 比較圖(圖三)中可以看出平滑性模糊控制器(Smooth Fuzzy Control)在

追 ramp 曲線時，具有比較平滑的反應，適應性 PI 控制器和模糊控制器則會產生不平滑的反應。在反應速度方面模糊控制器的反應最快，平滑性模糊控制器次之，而適應性 PI 控制器則是反應最慢。

### (三) 路徑規劃(Path):

#### (1) 疏鬆性設定點:

從疏鬆性路徑比較圖（圖四）中可以看出，平滑性模糊控制器在綜合性路徑規劃裡讓使用者感覺到平順，適應性 PI 控制器和模糊控制器則會讓使用者感覺到停頓感或是瞬間的衝力。

#### (2) 密集性設定點:

由於適應性 PI 控制器必須使用在兩個相鄰設定點間距夠大，才能發揮分成三個區間調適的功效。從密集性路徑比較圖（圖五）中可以看出適應性 PI 控制器在設定點過於密集下，其反應會使油壓系統震動，使反應圖上產生鋸齒的圖形。在模糊控制器和平滑性模糊控制器則不會，但模糊控制器會降低反應速度，將變得很慢且會產生停頓感。

## B. 穩定分析

我們實際獲得模糊控制之 Control Surface（如圖六），然後將此控制曲面分割成由 8x8 區塊所構成之區域，在用數值分析方法近似每一小塊區域之控制曲面。而因為每一近似區域都有一組特徵值(a1,a2,a3)代表(見(3.10)式)，因此我們可將此特徵值代入所需的三個穩定條件檢查是否成立；成立的話就代表此區域可視為 globally stable。我們舉一個區域為例，用數值分析法得到相關之特徵值(a1,a2,a3)=(17.04,-6.63,1.56)則我們開始代入三個條件中驗證穩定性問題。

#### (1) 對條件一而言:

因為由  $\phi_1 A v_1$  的定義得知，根據

$$\sqrt{Ps - \text{sgn}(Av)(P_L)}$$

的範圍為

$$(\sqrt{Ps - \text{sgn}(Av)(P_L)} < \sqrt{Ps})$$

所以在此條件中

$$\frac{\beta}{Vt} K v - \sqrt{Ps} v < \phi v A v < \frac{\beta}{Vt} K, \text{ 且}$$

$$\phi v A v \Big|_{Av=0} = 0 \text{ 成立，故此條件成立。}$$

#### (2) 對條件二而言:

由求得的特徵值(a1,a2,a3)代入系統矩陣 A

$$\text{中，可得 } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.000336 & 0 & 0 & 0.00000057 \\ -0.02 & 0.008 & -317.40 & 0 \\ 0 & -1475.384615 & 1092085911.5426 & -11.820 \end{bmatrix}$$

$\lambda_{9A} = -317.4603, -0.000279 + 0.01889i, -0.000279 - 0.01889i, -11.8197$  皆在左半平面，因此條件二成立。

#### (3) 對條件三而言:

因為滿足  $\inf_{\omega} \text{Re}[(+j\omega r)(G(+j\omega)) > \frac{1}{\alpha - \alpha}]$  之 r 值不好求取，我們可定義出一個 Lyapunov function  $V^T X^T + r = X^T P X + r \int \phi \tau \sigma \tau d\sigma$  求得之正實數 r 值將符合條件三所需之 r 值。這裡我們利用 Matlab 裡面的 LMI Tool Box 求得正定矩陣 P 以及正實數 r 之值其值分別為  $r=2.182620544241641e-009$

$$P = \begin{bmatrix} 160268.147906645 & 39.1233009842 & 140964986406 & 35.594257702 \\ 391.233009842 & 12761.54806079 & -0.793970381 & 0.140697936 \\ 140.964986406 & -0.793970381 & 40.531501393 & -0.167739940 \\ 35.594257702 & 0.140697936 & -0.16773994 & 0.033119841 \end{bmatrix}$$

而將 r 值代回條件三式中驗證確實條件成立。所以綜合三個條件成立，可證明此控制區域確實是 globally stable；同理其他控制區域的穩定性也可依此驗證。對於平滑性模糊控制器，也以此方法，得証其為 globally stable。

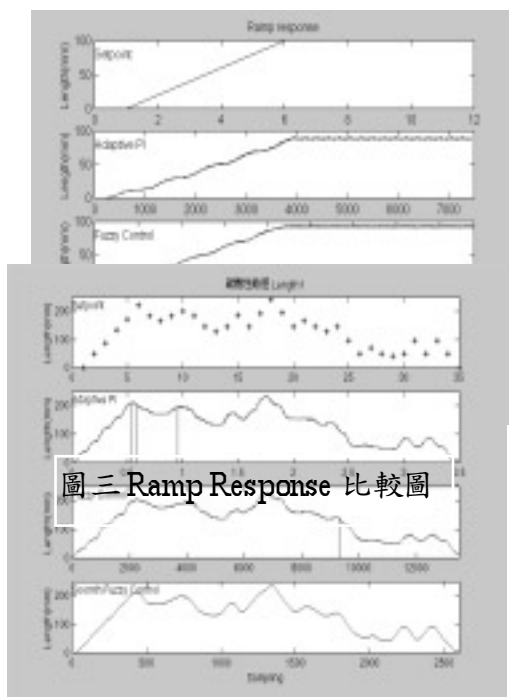
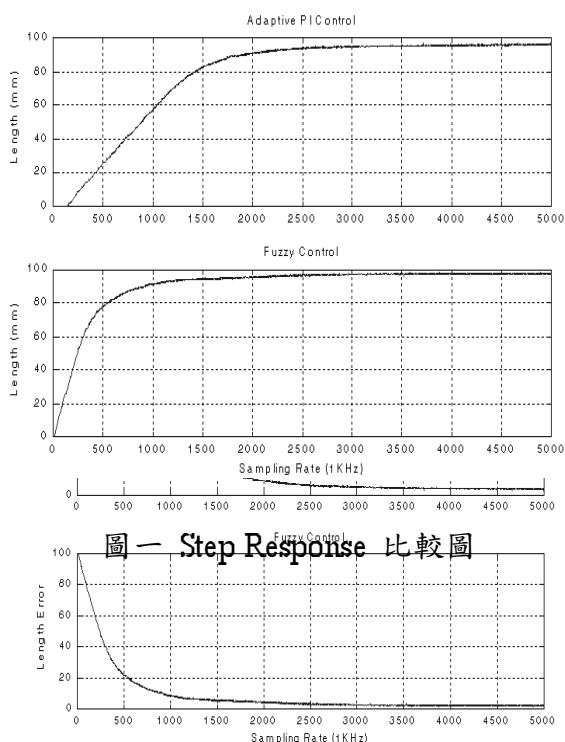
## 討論

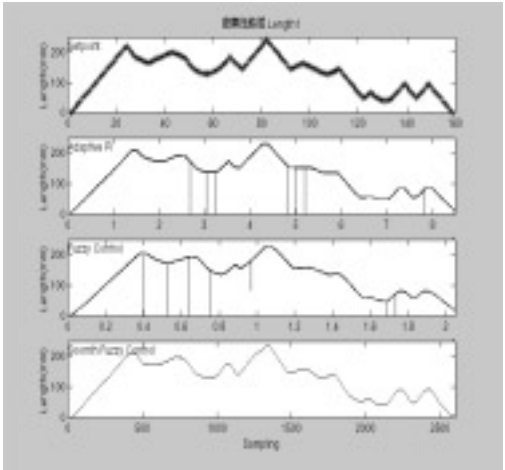
在本計畫中，我們完成了初步的油壓系統架構。在控制部份，設計了三種位置控制法

則，其響應優於傳統的PID控制，但在應用方面仍會有所限制，未來可以進一步做速度控制和加速度控制，以便達到更好的控制效果。為了配合速度及加速度控制，在感測部份可以加裝具有量測速度及加速度的感測器。在穩定性分析部分，初步我們利用 Popov Criterion Stability Theorem 來驗證單軸油壓缸的穩定性。未來將可進一步探討整個系統的穩定性分析。

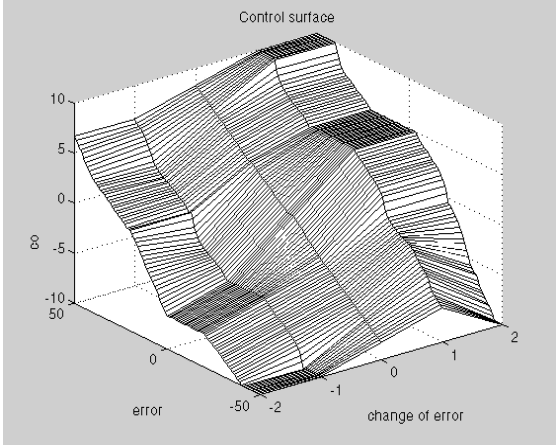
### 參考文獻

- [1] Zadeh, L.A. "Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility", Fuzzy Sets and System, vol.1, pp 3-28, 1978.
- [2] M. Vidyasagar, "Nonlinear System Analysis", Prentice Hall, 1993.
- [3] J.K. Aggarwal and M. Vidyasagar, "Nonlinear Systems Stability Analysis", Dowden Hutchinson, 1977.
- [4] 許正道, "油控壓的數位控制與應用", 全華科技圖書股份有限公司, 1989.





圖五 密集性路徑比較圖



圖六 Control surface 圖