



聖約翰科技大學

自動化及機電整合研究所

碩士學位論文

學號：93M12015

二自由度氣壓肌肉機械臂之混合控制

The Hybrid Control for a Two Degree of Freedom Arm
Actuated by Four Pneumatic Muscle Actuators

研 究 生：吳瑞啟

指導教授：張銘崑 博士

中華民國 九十五年 七月 六日

二自由度氣壓肌肉機械臂之混合控制

研 究 生： 吳瑞啟

指導教授： 張銘崑

時 間： 九十五年 七月 六日

論 文 摘 要

氣壓肌肉驅動器是一種具有高功率自重比及高功率體積比的新型驅動器，因為具有這些優於傳統氣壓驅動器的優點，近年來引起學者專家的廣泛注意並投入研究。然而，氣壓的壓縮性及橡膠的非線性彈性引起參數的變化，使其不能達到高精度控制。本研究採用四根氣壓肌肉驅動器構成兩個轉動關節的二自由度氣壓肌肉機械臂當作復健機器人，並且使用四種智慧型控制器，希望能夠克服氣壓肌肉非線性行為，達到優良的控制性能。

本文採用四種不需數學模式的智慧型控制器，分別是：1.基本模糊控制器(FLC)、2.模糊滑動模式控制器(FSMC)、3.適應性模糊滑動模式控制器(AFSMC)、4.結合適應比例因子之適應性模糊滑動模式控制器(AFSMC_ASF)，以這四種智慧型控制器，進行肩部及肘關節的角度同步控制及手臂末端位置的追蹤控制，並比較與分析其控制性能。從實驗結果證明，適應性模糊滑動模式控制器及結合適應比例因子之適應性模糊滑動模式控制器，這二種具有自我學習功能的控制器能夠有效地克服氣壓肌肉系統的非線性行為，達到高精度的控制性能及強健性。

ABSTRACT

Pneumatic muscle actuators (PMAs) have the highest power/weight ratio and power/volume ratio of any actuator. Therefore, it is widely applied to industrial automation or rehabilitation engineering. Due to compressibility of air and the nonlinear elasticity of bladder container caused parameter variation, it can not attain excellent control performance.

In this study, the two degree of freedom arm actuated by four pneumatic muscle actuators is used as a rehabilitation robot. We use four intelligent controllers to implement synchronous control of angle and end-effector's tracking control. From experimental results show that the adaptive fuzzy sliding-mode controller(AFSMC) and the adaptive fuzzy sliding-mode with adaptive scaling factor(AFSMC-ASF) can achieve excellent control performance.

誌 謝

本論文承蒙指導教授 張銘崑 老師的殷切指導及適時給予的協助，才得以順利付梓。在六年的求學期間，老師在學業上的鼓勵與教誨，以及日常生活上的照顧，使學生在為人處事及學問研究上的態度深受陶冶，在此致上最深摯的感謝與敬意。

研究所兩年的訓練使我對問題的思維模式與專業知識成長了許多，感謝口試委員 林守儀 教授與 顏炳郎 教授，對本論文之斧正提供寶貴的意見，同時也要感謝我的同窗好友 楷元、欽嘉、慈昇、芄宇、建友、宜政 在學習過程中所給予許多的協助與鼓勵，還有學弟 贊修 給予各方面的支持與協助。

最後，要感謝我的父母親二十多年來的辛苦栽培，讓我完成碩士學位，以及我的家人在這兩年裡對我精神上的鼓勵，更要感謝女友－林玟勤 小姐，謝謝她四年多來的陪伴與支持，使我得以順利完成學業，最後謹以本論文，獻給所有關愛我的每一個人。

目 錄

摘要	I
Abstract	II
誌謝	III
目錄	IV
圖目錄	VII
表目錄	XVI
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 文獻回顧	3
1.3 論文大綱	4
第二章 系統架構與數學模式	5
2.1 系統架構	5
2.1.1 氣壓肌肉	7
2.1.2 壓力比例閥	8
2.1.3 旋轉式電位計	8
2.1.4 PCL-812 界面卡	9
2.1.5 PCL-726 界面卡	9
2.2 二自由度機械臂動態方程式	10
2.3 氣壓肌肉特性分析	13
2.4 二自由度機械臂運動學	14
2.4.1 順向運動學	16
2.4.2 逆向運動學	18
2.5 二自由度機械臂工作空間	20
2.6 路徑規畫	21

第三章 控制理論	26
3.1 模糊邏輯控制理論	26
3.1.1 模糊化界面	26
3.1.2 知識庫	28
3.1.3 決策邏輯	29
3.1.4 解模糊化界面	30
3.2 滑動模式控制理論	30
3.2.1 可變結構控制	31
3.2.2 滑動模式控制原理	31
3.3 模糊滑動模式控制理論	33
3.4 適應性模糊滑動模式控制理論	35
3.4.1 適應模糊規則表	36
3.4.2 適應比例因子	38
3.4.3 穩定性分析	39
第四章 實驗研究	41
4.1 二自由度角度同步追蹤控制	41
4.1.1 傳統模糊控制器(FLC)之實驗結果	42
4.1.2 模糊滑動模式控制器(FSMC)之實驗結果	48
4.1.3 適應性模糊滑動模式控制器(AFSMC)之實驗結果	53
4.1.4 結合適應比例因子之適應性模糊滑動模式控制器(AFSMC_ASF)之實驗 結果	56
4.1.5 小結	66
4.2 二自由度軌跡追蹤控制	68
4.2.1 傳統模糊控制器(FLC)之實驗結果	68
4.2.2 模糊滑動模式控制器(FSMC)之實驗結果	86
4.2.3 適應性模糊滑動模式控制器(AFSMC)之實驗結果	103

4.2.4 結合適應比例因子之適應性模糊滑動模式控制器(AFSMC_ASF)之實驗 結果	122
4.2.5 小結	144
第五章 結論與建議	147
5.1 結論	147
5.2 建議	148
參考文獻	149
作者簡介	151

圖 目 錄

圖 1 - 1	氣壓肌肉驅動器構造圖	2
圖 2 - 1	實驗系統架構實體圖 1	5
圖 2 - 2	實驗系統架構實體圖 2	6
圖 2 - 3	系統架構圖	6
圖 2 - 4	氣壓肌肉作動示意圖	7
圖 2 - 5	氣壓肌肉外觀圖	8
圖 2 - 6	壓力比例閥外觀圖	8
圖 2 - 7	旋轉式電位計結構圖	9
圖 2 - 8	二自由度機械臂示意圖	10
圖 2 - 11	連桿參數及座標轉換	15
圖 2 - 12	二自由度機械臂空間座標定義圖	16
圖 2 - 13	機械臂的幾何關係圖	18
圖 2 - 14	二自由度機械臂工作空間	20
圖 2 - 15	鉛錘線路徑軌跡	21
圖 2 - 16	鉛錘線路徑兩軸旋轉角	22
圖 2 - 17	水平線路徑軌跡	22
圖 2 - 18	水平線路徑兩軸旋轉角	23
圖 2 - 19	圓形路徑軌跡	23
圖 2 - 20	圓形路徑兩軸旋轉角	24
圖 2 - 21	曲線路徑軌跡	24
圖 2 - 22	曲線路徑兩軸旋轉角	25
圖 3 - 1	基本模糊控制器架構	26
圖 3 - 2	吊鐘型歸屬函數	27
圖 3 - 3	三角型歸屬函數	27

圖 3 - 4	梯型歸屬函數.....	28
圖 3 - 5	mamdani 模糊推論法	29
圖 3 - 6	滑動模式示意圖	31
圖 3 - 7	滑動條件示意圖	32
圖 3 - 8	模糊滑動平面示意圖	34
圖 3 - 9	模糊滑動平面系統方塊圖	35
圖 3 - 10	適應模糊滑動模式控制系統方塊圖	36
圖 4 - 1	FLC 同步控制步階響應.....	43
圖 4 - 2	FLC 同步控制步階響應誤差.....	44
圖 4 - 3	FLC 同步控制步階響應兩關節的壓力差.....	44
圖 4 - 4	FLC 同步追蹤控制正弦波響應(0.1Hz)	45
圖 4 - 5	FLC 同步追蹤控制正弦波響應誤差(0.1Hz)	45
圖 4 - 6	FLC 同步追蹤控制正弦波兩關節的壓力差(0.1Hz)	46
圖 4 - 7	FLC 同步追蹤控制正弦波響應(0.5Hz)	46
圖 4 - 8	FLC 同步追蹤控制正弦波響應誤差(0.5Hz)	47
圖 4 - 9	FLC 同步追蹤控制正弦波兩關節的壓力差(0.5Hz)	47
圖 4 - 10	FSMC 同步控制步階響應	49
圖 4 - 11	FSMC 同步控制步階響應誤差	49
圖 4 - 12	FSMC 同步控制步階響應兩關節的壓力差	50
圖 4 - 13	FSMC 同步追蹤控制正弦波響應(0.1Hz).....	50
圖 4 - 14	FSMC 同步追蹤控制正弦波響應誤差(0.1Hz).....	51
圖 4 - 15	FSMC 同步追蹤控制正弦波兩關節的壓力差(0.1Hz).....	51
圖 4 - 16	FSMC 同步追蹤控制正弦波響應(0.5Hz).....	52
圖 4 - 17	FSMC 同步追蹤控制正弦波響應誤差(0.5Hz).....	52
圖 4 - 18	FSMC 同步追蹤控制正弦波兩關節的壓力差(0.5Hz).....	53
圖 4 - 19	AFSMC 同步控制步階響應	55

圖 4 - 20	AFSMC 同步控制步階響應誤差	55
圖 4 - 21	AFSMC 同步控制步階響應兩關節的壓力差	56
圖 4 - 22	AFSMC 同步追蹤控制正弦波響應(0.1Hz).....	56
圖 4 - 23	AFSMC 同步追蹤控制正弦波響應誤差(0.1Hz).....	57
圖 4 - 24	AFSMC 同步追蹤控制正弦波兩關節的壓力差(0.1Hz).....	57
圖 4 - 25	AFSMC 同步追蹤控制正弦波響應(0.5Hz).....	58
圖 4 - 26	AFSMC 同步追蹤控制正弦波響應誤差(0.5Hz).....	58
圖 4 - 27	AFSMC 同步追蹤控制正弦波兩關節的壓力差(0.5Hz).....	59
圖 4 - 28	AFSMC_ASF 同步控制步階響應.....	61
圖 4 - 29	AFSMC_ASF 同步控制步階響應誤差	61
圖 4 - 30	AFSMC_ASF 同步控制步階響應兩關節的壓力差	62
圖 4 - 31	AFSMC_ASF 同步控制步階響應 G_u 變化情形	62
圖 4 - 32	AFSMC_ASF 同步追蹤控制正弦波響應(0.1Hz).....	63
圖 4 - 33	AFSMC_ASF 同步追蹤控制正弦波響應誤差(0.1Hz).....	63
圖 4 - 34	AFSMC_ASF 同步追蹤控制正弦波兩關節的壓力差(0.1Hz).....	64
圖 4 - 35	AFSMC_ASF 同步追蹤控制正弦波 G_u 變化情形(0.1Hz).....	64
圖 4 - 36	AFSMC_ASF 同步追蹤控制正弦波響應(0.5Hz).....	65
圖 4 - 37	AFSMC_ASF 同步追蹤控制正弦波響應誤差(0.5Hz).....	65
圖 4 - 38	AFSMC_ASF 同步追蹤控制正弦波兩關節的壓力差(0.5Hz).....	66
圖 4 - 39	AFSMC_ASF 同步追蹤控制正弦波 G_u 變化情形(0.5Hz).....	66
圖 4 - 40	FLC 鉛錘線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：20 秒).....	70
圖 4 - 41	FLC 鉛錘線路徑軌跡追蹤誤差(X 方向)(響應時間：20 秒).....	70
圖 4 - 42	FLC 鉛錘線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：20 秒).....	71
圖 4 - 43	FLC 鉛錘線路徑兩關節的壓力差(響應時間：20 秒).....	71
圖 4 - 44	FLC 鉛錘線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：5 秒).....	72
圖 4 - 45	FLC 鉛錘線路徑軌跡追蹤誤差(X 方向)(響應時間：5 秒).....	72

圖 4 - 46	FLC 鉛錘線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：5 秒).....	73
圖 4 - 47	FLC 鉛錘線路徑兩關節的壓力差 (響應時間：5 秒).....	73
圖 4 - 48	FLC 水平線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：20 秒).....	74
圖 4 - 49	FLC 水平線路徑軌跡追蹤誤差(Y 方向)(響應時間：20 秒)	74
圖 4 - 50	FLC 水平線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：20 秒).....	75
圖 4 - 51	FLC 水平線路徑兩關節的壓力差(響應時間：20 秒).....	75
圖 4 - 52	FLC 水平線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：5 秒).....	76
圖 4 - 53	FLC 水平線路徑軌跡追蹤誤差(Y 方向)(響應時間：5 秒)	76
圖 4 - 54	FLC 水平線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：5 秒).....	77
圖 4 - 55	FLC 水平線路徑兩關節的壓力差(5 秒).....	77
圖 4 - 56	FLC 圓形路徑軌跡追蹤響應(響應時間：20 秒).....	78
圖 4 - 57	FLC 圓形路徑軌跡追蹤誤差(響應時間：20 秒).....	78
圖 4 - 58	FLC 圓形路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：20 秒).....	79
圖 4 - 59	FLC 圓形路徑兩關節的壓力差(響應時間：20 秒).....	79
圖 4 - 60	FLC 圓形路徑軌跡追蹤響應(響應時間：6 秒).....	80
圖 4 - 61	FLC 圓形路徑軌跡追蹤誤差(響應時間：6 秒).....	80
圖 4 - 62	FLC 圓形路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：6 秒).....	81
圖 4 - 63	FLC 圓形路徑兩關節的壓力差(響應時間：6 秒).....	81
圖 4 - 64	FLC 曲線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：20 秒).....	82
圖 4 - 65	FLC 曲線路徑軌跡追蹤誤差(響應時間：20 秒).....	82
圖 4 - 66	FLC 曲線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：20 秒).....	83
圖 4 - 67	FLC 曲線路徑兩關節的壓力差(響應時間：20 秒).....	83
圖 4 - 68	FLC 曲線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：6 秒).....	84
圖 4 - 69	FLC 曲線路徑軌跡追蹤誤差(響應時間：6 秒).....	84
圖 4 - 70	FLC 曲線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：6 秒).....	85
圖 4 - 71	FLC 曲線路徑兩關節的壓力差(響應時間：6 秒).....	85

圖 4 - 72	FSMC 鉛錘線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：20 秒).....	87
圖 4 - 73	FSMC 鉛錘線路徑軌跡追蹤誤差(X 方向)(響應時間：20 秒).....	88
圖 4 - 74	FSMC 鉛錘線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：20 秒).....	88
圖 4 - 75	FSMC 鉛錘線路徑兩關節的壓力差(響應時間：20 秒).....	89
圖 4 - 76	FSMC 鉛錘線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：5 秒).....	89
圖 4 - 77	FSMC 鉛錘線路徑軌跡追蹤誤差(X 方向)(響應時間：5 秒).....	90
圖 4 - 78	FSMC 鉛錘線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：5 秒).....	90
圖 4 - 79	FSMC 鉛錘線路徑兩關節的壓力差(響應時間：5 秒).....	91
圖 4 - 80	FSMC 水平線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：20 秒).....	91
圖 4 - 81	FSMC 水平線路徑軌跡追蹤誤差(Y 方向)(響應時間：20 秒).....	92
圖 4 - 82	FSMC 水平線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：20 秒).....	92
圖 4 - 83	FSMC 水平線路徑兩關節的壓力差(響應時間：20 秒).....	93
圖 4 - 84	FSMC 水平線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：5 秒).....	93
圖 4 - 85	FSMC 水平線路徑軌跡追蹤誤差(Y 方向)(響應時間：5 秒).....	94
圖 4 - 86	FSMC 水平線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：5 秒).....	94
圖 4 - 87	FSMC 水平線路徑兩關節的壓力差(響應時間：5 秒).....	95
圖 4 - 88	FSMC 圓形路徑軌跡追蹤響應(響應時間：20 秒).....	95
圖 4 - 89	FSMC 圓形路徑軌跡追蹤誤差(響應時間：20 秒).....	96
圖 4 - 90	FSMC 圓形路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：20 秒).....	96
圖 4 - 91	FSMC 圓形路徑兩關節的壓力差(響應時間：20 秒).....	97
圖 4 - 92	FSMC 圓形路徑軌跡追蹤響應(響應時間：6 秒).....	97
圖 4 - 93	FSMC 圓形路徑軌跡追蹤誤差(響應時間：6 秒).....	98
圖 4 - 94	FSMC 圓形路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：6 秒).....	98
圖 4 - 95	FSMC 圓形路徑兩關節的壓力差(響應時間：6 秒).....	99
圖 4 - 96	FSMC 曲線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：20 秒).....	99
圖 4 - 97	FSMC 曲線路徑軌跡追蹤誤差(響應時間：20 秒).....	100

圖 4 - 98	FSMC 曲線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：20 秒).....	100
圖 4 - 99	FSMC 曲線路徑兩關節的壓力差(響應時間：20 秒).....	101
圖 4 - 100	FSMC 曲線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：6 秒).....	101
圖 4 - 101	FSMC 曲線路徑軌跡追蹤誤差(響應時間：6 秒).....	102
圖 4 - 102	FSMC 曲線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：6 秒).....	102
圖 4 - 103	FSMC 曲線路徑兩關節的壓力差(響應時間：6 秒).....	103
圖 4 - 104	AFSMC 鉛錘線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：20 秒).....	106
圖 4 - 105	AFSMC 鉛錘線路徑軌跡追蹤誤差(X 方向)(響應時間：20 秒).....	106
圖 4 - 106	AFSMC 鉛錘線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：20 秒).....	107
圖 4 - 107	AFSMC 鉛錘線路徑兩關節的壓力差(響應時間：20 秒).....	107
圖 4 - 108	AFSMC 鉛錘線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：5 秒).....	108
圖 4 - 109	AFSMC 鉛錘線路徑軌跡追蹤誤差(X 方向)(響應時間：5 秒).....	108
圖 4 - 110	AFSMC 鉛錘線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：5 秒).....	109
圖 4 - 111	AFSMC 鉛錘線路徑兩關節的壓力差(響應時間：5 秒).....	109
圖 4 - 112	AFSMC 水平線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：20 秒).....	110
圖 4 - 113	AFSMC 水平線路徑軌跡追蹤誤差(Y 方向)(響應時間：20 秒).....	110
圖 4 - 114	AFSMC 水平線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：20 秒).....	111
圖 4 - 115	AFSMC 水平線路徑兩關節的壓力差(響應時間：20 秒).....	111
圖 4 - 116	AFSMC 水平線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：5 秒).....	112
圖 4 - 117	AFSMC 水平線路徑軌跡追蹤誤差(Y 方向)(響應時間：5 秒).....	112
圖 4 - 118	AFSMC 水平線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：5 秒).....	113
圖 4 - 119	AFSMC 水平線路徑兩關節的壓力差(響應時間：5 秒).....	113
圖 4 - 120	AFSMC 圓形路徑軌跡追蹤響應(響應時間：20 秒).....	114
圖 4 - 121	AFSMC 圓形路徑軌跡追蹤誤差(響應時間：20 秒).....	114
圖 4 - 122	AFSMC 圓形路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：20 秒).....	115
圖 4 - 123	AFSMC 圓形路徑兩關節的壓力差(響應時間：20 秒).....	115

圖 4 - 124	AFSMC 圓形路徑軌跡追蹤響應(響應時間：6 秒).....	116
圖 4 - 125	AFSMC 圓形路徑軌跡追蹤誤差(響應時間：6 秒).....	116
圖 4 - 126	AFSMC 圓形路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：6 秒).....	117
圖 4 - 127	AFSMC 圓形路徑兩關節的壓力差(響應時間：6 秒).....	117
圖 4 - 128	AFSMC 曲線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：20 秒).....	118
圖 4 - 129	AFSMC 曲線路徑軌跡追蹤誤差(響應時間：20 秒).....	118
圖 4 - 130	AFSMC 曲線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：20 秒).....	119
圖 4 - 131	AFSMC 曲線路徑兩關節的壓力差(響應時間：20 秒).....	119
圖 4 - 132	AFSMC 曲線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：6 秒).....	120
圖 4 - 133	AFSMC 曲線路徑軌跡追蹤誤差(響應時間：6 秒).....	120
圖 4 - 134	AFSMC 曲線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：6 秒).....	121
圖 4 - 135	AFSMC 曲線路徑兩關節的壓力差(響應時間：6 秒).....	121
圖 4 - 136	AFSMC_ASF 鉛錘線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：20 秒)	124
圖 4 - 137	AFSMC_ASF 鉛錘線路徑軌跡追蹤誤差(X 方向) (響應時間：20 秒).....	125
圖 4 - 138	AFSMC_ASF 鉛錘線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：20 秒)	125
圖 4 - 139	AFSMC_ASF 鉛錘線路徑兩關節的壓力差(響應時間：20 秒)	126
圖 4 - 140	AFSMC_ASF 鉛錘線路徑兩關節的比例因子 Gu 變化情形(響應時間：20 秒)	126
圖 4 - 141	AFSMC_ASF 鉛錘線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：5 秒)	127
圖 4 - 142	AFSMC_ASF 鉛錘線路徑軌跡追蹤誤差(X 方向) (響應時間：5 秒).....	127
圖 4 - 143	AFSMC_ASF 鉛錘線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：5 秒)	128
圖 4 - 144	AFSMC_ASF 鉛錘線路徑兩關節的壓力差(響應時間：5 秒)	128
圖 4 - 145	AFSMC_ASF 鉛錘線路徑兩關節的比例因子 Gu 變化情形(響應時間：5 秒)	129
圖 4 - 146	AFSMC_ASF 水平線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：20 秒)	129
圖 4 - 147	AFSMC_ASF 水平線路徑軌跡追蹤誤差(Y 方向) (響應時間：20 秒).....	130

圖 4 - 148	AFSMC_ASF 水平線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：20 秒)	130
圖 4 - 149	AFSMC_ASF 水平線路徑兩關節的壓力差(響應時間：20 秒)	131
圖 4 - 150	AFSMC_ASF 水平線路徑兩關節的比例因子 Gu 變化情形(響應時間：20 秒)	131
圖 4 - 151	AFSMC_ASF 水平線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：5 秒)	132
圖 4 - 152	AFSMC_ASF 水平線路徑軌跡追蹤誤差(Y 方向)(響應時間：5 秒)	132
圖 4 - 153	AFSMC_ASF 水平線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：5 秒)	133
圖 4 - 154	AFSMC_ASF 水平線路徑兩關節的壓力差(響應時間：5 秒)	133
圖 4 - 155	AFSMC_ASF 水平線路徑兩關節的比例因子 Gu 變化情形(響應時間：5 秒)	134
圖 4 - 156	AFSMC_ASF 圓形路徑軌跡追蹤響應(響應時間：20 秒)	134
圖 4 - 157	AFSMC_ASF 圓形路徑軌跡追蹤誤差(響應時間：20 秒)	135
圖 4 - 158	AFSMC_ASF 圓形路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：20 秒)	135
圖 4 - 159	AFSMC_ASF 圓形路徑兩關節的壓力差(響應時間：20 秒)	136
圖 4 - 160	AFSMC_ASF 圓形路徑兩關節的比例因子 Gu 變化情形(響應時間：20 秒)	136
圖 4 - 161	AFSMC_ASF 圓形路徑軌跡追蹤響應(響應時間：6 秒)	137
圖 4 - 162	AFSMC_ASF 圓形路徑軌跡追蹤誤差(響應時間：6 秒)	137
圖 4 - 163	AFSMC_ASF 圓形路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：6 秒)	138
圖 4 - 164	AFSMC_ASF 圓形路徑兩關節的壓力差(響應時間：6 秒)	138
圖 4 - 165	AFSMC_ASF 圓形路徑兩關節的比例因子 Gu 變化情形(響應時間：6 秒)	139
圖 4 - 166	AFSMC_ASF 曲線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：20 秒)	139
圖 4 - 167	AFSMC_ASF 曲線路徑軌跡追蹤誤差(響應時間：20 秒)	140
圖 4 - 168	AFSMC_ASF 曲線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：20 秒)	140
圖 4 - 169	AFSMC_ASF 曲線路徑兩關節的壓力差(響應時間：20 秒)	141

圖 4 - 170	AFSMC_ASF 曲線路徑兩關節的比例因子 Gu 變化情形(響應時間：20 秒)	141
圖 4 - 171	AFSMC_ASF 曲線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：6 秒)	142
圖 4 - 172	AFSMC_ASF 曲線路徑軌跡追蹤誤差(響應時間：6 秒)	142
圖 4 - 173	AFSMC_ASF 曲線路徑兩關節角度的追蹤誤差(響應時間：6 秒)	143
圖 4 - 174	AFSMC_ASF 曲線路徑兩關節的壓力差(響應時間：6 秒)	143
圖 4 - 175	AFSMC_ASF 曲線路徑兩關節的比例因子 Gu 變化情形(響應時間：6 秒)	144

表 目 錄

表 2.1	元件列表	7
表 2.2	二自由度機械臂 D-H 參數表	16
表 2.3	二自由度機械臂規格	20
表 3.1	規則表	37
表 4.1	傳統模糊規則表	42
表 4.2	歸屬函數	48
表 4.3	模糊滑動模式初始規則表	48
表 4.4	AFSMC 於 Step 響應修正後規則表	54
表 4.5	AFSMC 於 Sin0.1hz 響應修正後規則表	54
表 4.6	AFSMC 於 Sin0.5hz 響應修正後規則表	54
表 4.7	AFSMC_ASF 於 Step 響應修正後規則表	60
表 4.8	AFSMC_ASF 於 Sin0.1hz 響應修正後規則表	60
表 4.9	AFSMC_ASF 於 Sin0.5hz 響應修正後規則表	60
表 4.10	控制性能比較表 1	67
表 4.11	AFSMC 於鉛錘線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：20 秒)	104
表 4.12	AFSMC 於鉛錘線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：5 秒)	105
表 4.13	AFSMC 於水平線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：20 秒)	105
表 4.14	AFSMC 於水平線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：5 秒)	105
表 4.15	AFSMC 於圓形路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：20 秒)	105
表 4.16	AFSMC 於圓形路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：6 秒)	105
表 4.17	AFSMC 於曲線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：20 秒)	105
表 4.18	AFSMC 於曲線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：6 秒)	105
表 4.19	AFSMC_ASF 於鉛錘線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：20 秒)	123
表 4.20	AFSMC_ASF 於鉛錘線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：5 秒)	123

表 4. 21	AFSMC_ASF 於水平線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：20 秒)....	123
表 4. 22	AFSMC_ASF 於水平線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：5 秒).....	124
表 4. 23	AFSMC_ASF 於圓形路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：20 秒).....	124
表 4. 24	AFSMC_ASF 於圓形路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：6 秒).....	124
表 4. 25	AFSMC_ASF 於曲線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：20 秒).....	124
表 4. 26	AFSMC_ASF 於曲線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：6 秒).....	124
表 4. 27	控制性能比較表 2	144

第一章 緒論

1.1 前言

目前，許多國家紛紛發展新型驅動器—人工肌肉驅動器的研究。早在 20 世紀 60 年代，美國醫生 Joseph L. McKibben[1]就發明了一種模仿真實肌肉運動的氣壓驅動器，就是一般所謂的 McKibben 人工氣壓肌肉。

在新式人工肌肉驅動器的研究中，又以人工氣壓肌肉驅動器最受到學者們的注意，人工氣壓肌肉除了有類似於生物肌肉的運動方式、力的表現，以及外型之外，仍有其他特有的優點，如：1. 結構簡單，重量輕，易於小型化，2. 具有柔性，不會損害操作對象，3. 動作平滑，無相對摩擦運動件，4. 輸出力量以及自重的比率大[2]，能量轉換效率高，5. 在操作過程中不產生熱、或其他有害物質，6. 價格低廉，維護方便，應用領域廣泛。

人工氣壓肌肉所具有的這些優點，使得它在工業及醫學界等，將會有極其廣泛的應用前景。有些人甚至將人工氣壓肌肉的出現稱為氣壓技術的一場革命[3]。然而，由於人工氣壓肌肉是一種柔性的驅動器，要精確表達它的特性比較困難，因此若要使人工氣壓肌肉驅動器實用化，還需要解決許多問題，例如研究簡便通用的分析方法，和簡單高效率的控制方式等，而這些研究目前仍處於起步階段。

人工氣壓肌肉驅動器主要是由內部的橡膠管以及在外部的呈菱狀的編織纖維所構成，如圖 1 - 1 所示。其外部的編織網是由剛性很高的纖維所組成。當對橡膠管內部充氣時，橡膠管因彈性變形壓迫外部的編織網，由於編織網的剛性很高，限制其只能徑向變形，直徑變粗，長度縮短。此時，若將人工氣壓肌肉驅動器與負載相連，就會產生張力；反之，當排氣時，人工氣壓肌肉驅動器就會彈性回復，直徑變小，長度伸長，張力變小；因此可看作為一種會改變截面積的一種氣壓缸，但是，較特別的是氣壓人工肌肉在無壓狀態下，其輸出力為零，無承載能力。

人工肌肉驅動器因其應用相當廣泛，吸引許多國家皆紛紛投入發展，其中又由於氣壓肌肉具有與人體真實肌肉相仿的特性，更是最近幾年國外學者積極研究的對象。從國外許多研究文獻資料中可得知，氣壓肌肉具有其他形式驅動器所沒有的優點，使其無論在醫療設備、護理照顧、復健工程，甚至在工業上的應用皆相當廣泛，然而國內這方面研究卻相當缺乏，幾乎找不到氣壓肌肉的相關研究，因此提出氣壓肌肉驅動器的研究，希望能對氣壓肌肉的研究有所貢獻，並能提昇國內醫療器具的發展。

在許多研究中發現，實現氣壓肌肉高精度控制有其困難度，且大多數的研究都止於電腦模擬，缺乏實驗的驗證，造成氣壓肌肉的應用仍不廣泛。故在本研究中，採用四根氣壓肌肉構成兩個轉動關節的二自由度氣壓肌肉機械臂作為實驗機台，以四種智慧型控制器進行控制，希望以實驗方式，驗證所提出的控制器的確能夠克服氣壓肌肉非線性行為，達到高精度的控制。

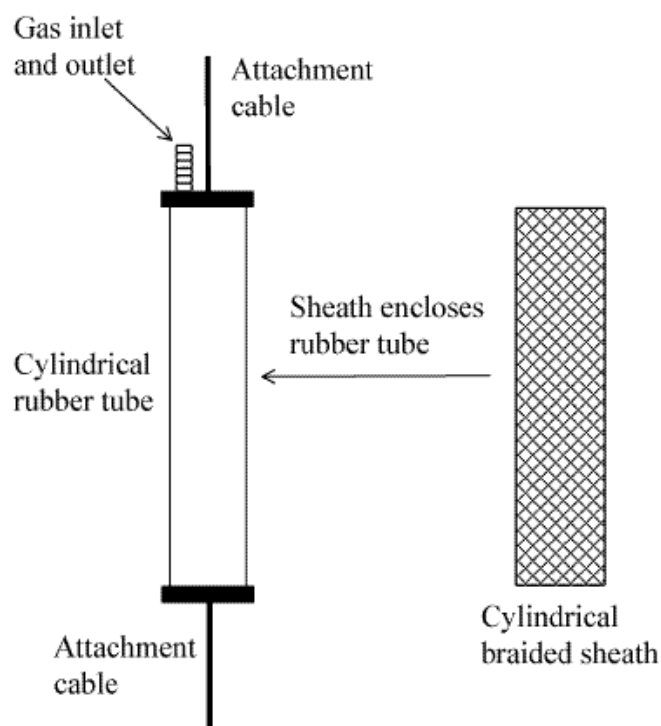


圖 1 - 1 氣壓肌肉驅動器構造圖

1.2 文獻回顧

第一個發展的氣壓肌肉驅動器為 McKibben artificial muscle[1]，它是由壓縮到 6bar 的二氧化碳氣體所驅動，經過改良後，直到最近學者專家才主動積極的發展研究。

由於氣壓伺服系統為一高階非線性系統，因此不易導出其真實的數學模式，因此，許多學者嘗試使用現代控制理論，來克服氣壓肌肉驅動器的非線性行為，以期達到高性能、高精度的控制。

Lilly[4]使用 Adaptive Tracking Control，進行單根氣壓肌肉單關節角度的追蹤模擬，Medrano-Cerda, Bowler 和 Caldwell [5]則是利用兩根氣壓肌肉構成單自由度的活動對，並使用適應控制器進行角度控制研究，Carbonell, Jiang 和 Repperger [6]，利用 Fuzzy Backstepping Controller 進行氣壓肌肉系統的模擬，Ahn 和 Thanh [7]利用 LVQNN 控制單自由度關節，採用角度定位控制，穩態誤差可達 0.1 度，Chan, Lilly, Repperger 和 Berlin [8]使用模糊參考模式控制器，採用外加負載於吊立式氣壓肌肉上進行位置追蹤控制，從實驗結果可看出，由氣壓肌肉內部橡膠管所造成的非線性行為，而 Lilly 和 Liang [9]則是利用滑動模式控制器，應用於外加負載的單關節吊立式氣壓肌肉臂上，進行角度追蹤模擬，追蹤精度達 0.3 度，然而上述的控制理論，大都只強調在單自由度的活動關節或單根氣壓肌肉上，並不適用本研究所使用的二自由度氣壓肌肉機械臂系上，而 Lilly 和 Quesada[10]於 2004 年提出，兩輸入的滑動模式控制器應用於由四根氣壓肌肉所構成二自由度氣壓肌肉手臂上，其系統架構與本研究相似，然而僅止於模擬部份，且第二個轉動關節控制精度僅達 1.4 度。

有鑑於氣壓肌肉系統為高階非線性系統，難以推導出其真實的數學模型，故本研究採用不需要數學模式的智慧型控制器，選用已廣泛應用在氣壓伺服系統上的模糊控制器以及模糊滑動模式控制器。而模糊控制器與滑動模式的結合，其主要是利用模糊控制器不需數學模式，而滑動模式對非線性系統，以及不確定系統具有良好的強健性。此外，再透過 Huang 和 Lin [11]所提出的適應調變技巧，線上進行規則表的調整，以及 Wang 和 Chang[12]所提出的適應模式匹配，線上調整解模糊化比例因子，使系統強健性提高。

1.3 論文大綱

第一章 緒論

說明本論文研究動機和目的，以及對現今氣壓肌肉的控制方法，作一概述。

第二章 系統架構與數學模式

介紹二自由度氣壓肌肉機械臂的硬體架構，並且建立二自由度機械臂的動態方程式，以及透過運動學推導出兩軸的座標轉換，應用在二自由度氣壓肌肉機械臂的路徑規畫。

第三章 控制理論

介紹本論文所使用的控制理論。

第四章 實驗研究

本章將把推導出來的控制理論運用在二自由度氣壓肌肉機械臂，以驗證本論文的控制理論的效果。

第五章 結論與建議

對於本文的研究結果做結論，並建議未來的研究方向。

第二章 系統架構與數學模式

本章將對本研究中所使用的二自由度氣壓肌肉機械臂之系統架構加以說明，此外為了解此機台之動態特性，本章也將對二自由度氣壓肌肉機械臂系統之數學模式加以描述推導。

2.1 系統架構

本研究採用自己設計的二自由度氣壓肌肉機械臂作為實驗機台，圖 2-1 與圖 2-2 為系統架構之實體圖。此機台主要可分為二個部分，分別為二自由度氣壓肌肉機械臂機構及電控系統。機構部份包括機械臂機械結構和氣壓迴路等部分，而電控系統則包括驅動裝置、硬體界面以及個人電腦等裝置。

二自由度氣壓肌肉機械臂實驗架構，主要是由四根氣壓肌肉、四顆壓力比例閥、兩顆旋轉式電位計、四顆壓力感測器、一張研華 PCL-812 A/D 卡、一張研華 PCL-726 D/A 卡以及一部個人電腦所組成，其配置如圖 2-3 所示，詳細元件如表 2.1。

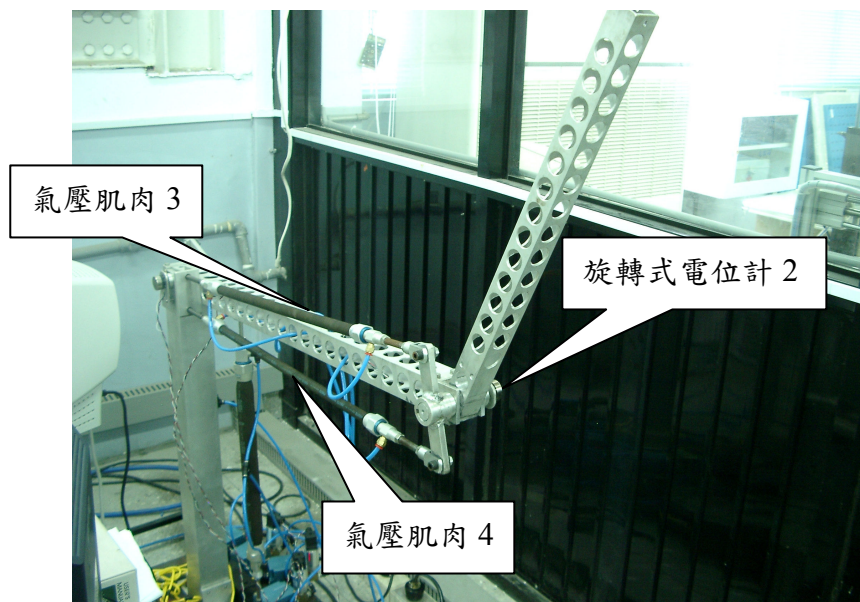


圖 2-1 實驗系統架構實體圖 1

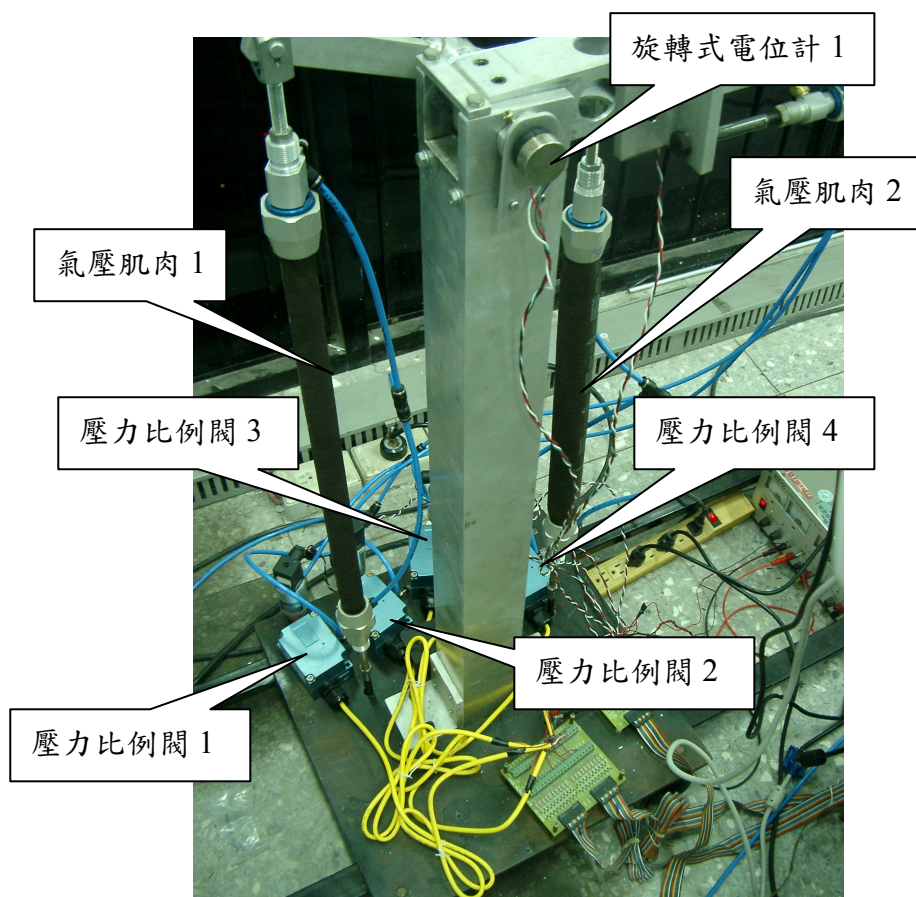


圖 2-2 實驗系統架構實體圖 2

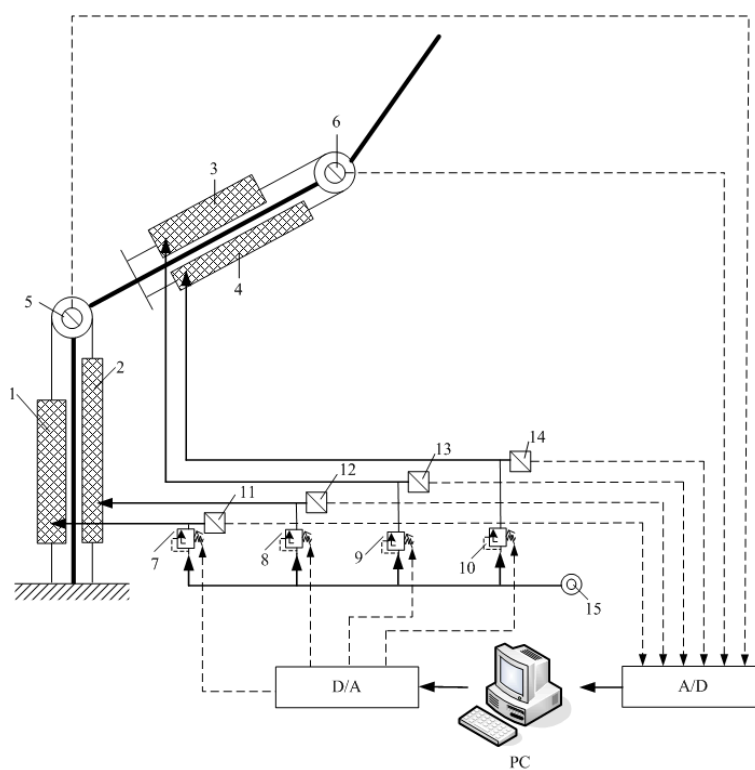


圖 2-3 系統架構圖

表 2.1 元件列表

編號	元件名稱	編號	元件名稱	編號	元件名稱
1	氣壓肌肉 1($\phi 20\text{mm}$)	6	旋轉式電位計 2	11	壓力感測器 1
2	氣壓肌肉 2($\phi 20\text{mm}$)	7	壓力比例閥 1	12	壓力感測器 2
3	氣壓肌肉 3($\phi 10\text{mm}$)	8	壓力比例閥 2	13	壓力感測器 3
4	氣壓肌肉 4($\phi 10\text{mm}$)	9	壓力比例閥 3	14	壓力感測器 4
5	旋轉式電位計 1	10	壓力比例閥 4	15	壓力源

2.1.1 氣壓肌肉

氣壓肌肉主要是由彈性橡膠及菱狀纖維所組成，當管內壓力升高，則沿半徑方向膨脹，並透過內部纖維力轉換，產生軸向收縮力，其作動方式如圖 2 - 4 所示。因此，只須改變管內的壓力大小，就能調節氣壓肌肉的收縮和伸長的狀態，所以，使用二根氣壓肌肉，可構成一組類似人體拮抗肌的功能，本實驗即是使用四根氣壓肌肉，構成二個自由度的活動關節，藉此模擬人體上臂及下臂的功能，本研究使用 FESTO 所生產的型號為 MAS-10-520N-AA-MO-K 以及 MAS-20-520N-AA-MO-K 兩種氣壓肌肉，分別為管內徑 10 mm 以及管內徑 20 mm 的氣壓肌肉，外觀如圖 2 - 5 所示。

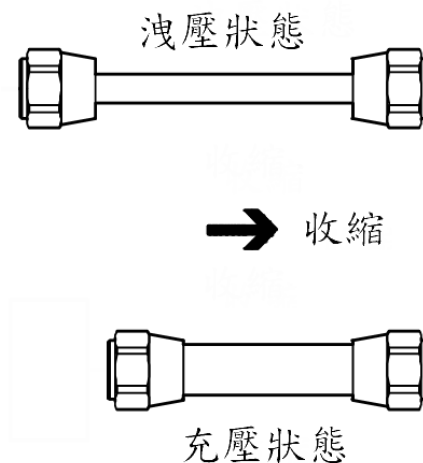


圖 2 - 4 氣壓肌肉作動示意圖



圖 2 - 5 氣壓肌肉外觀圖

2.1.2 壓力比例閥

壓力比例閥是根據輸入電壓大小來決定輸出的壓力大小，因此我們可以直接控制電壓就可以得到我們所期望氣壓肌肉的收縮量。本實驗四根氣壓肌肉內部壓力的調節皆採用 MAC-PPC5C 型壓力比例閥，輸入電壓 0 ~ 10 V，輸出壓力 0 ~ 100 psi，壓力比例閥外觀如圖 2 - 6 所示。



圖 2 - 6 壓力比例閥外觀圖

2.1.3 旋轉式電位計

如圖 2 - 7 所示，此結構是將電阻絲繞成圓形(可繞成單圈或數圈)，當電阻兩端給予一激勵電壓後，經碳刷所做成的滑帶在電阻絲上滑動，形成之分壓電路。當待測物帶動滑帶，於不同旋轉角度(θ)下量測出不同的電壓，而由此輸出電壓可得知待測物之角位移量，其輸入與輸出關係式為

$$V_{out} = \frac{R_b}{R_a + R_b} V_{in}$$

本研究採用輸入電壓 V_{in} 為 30V，電位計總旋轉角為 270° ，取前三分之一為所使用的活動範圍即 $0^\circ \sim 90^\circ$ ，PCL-812 輸入電壓設定為 $0 \sim 10V$ ，解析度 12bits，故可量測之最高解析度 $\frac{90^\circ}{4095} = 0.021978^\circ \approx 0.022^\circ$

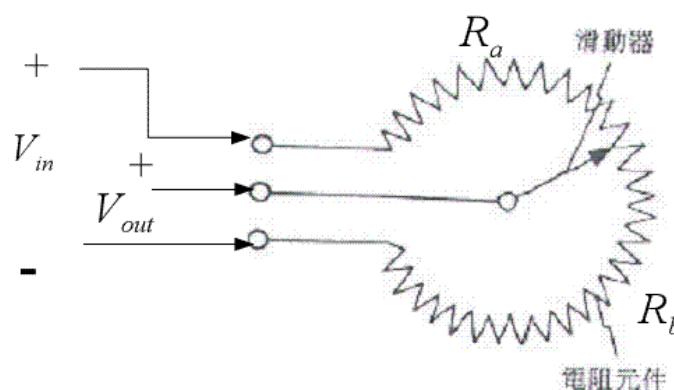


圖 2-7 旋轉式電位計結構圖

2.1.4 PCL-812 界面卡

本研究使用研華的 PCL-812 數位類比轉換卡作為輸入介面。PCL-812 本身具有 16 組數位類比通道，每個通道具有 12 bits 的解析度，最高取樣頻率為 30kHz，輸入範圍為 $\pm 10V$ ，本研究使用 PCL-812 作為壓力感測器以及旋轉式電位計的輸入介面，其中 Channel 0 連接旋轉式電位計 2、Channel 1 連接旋轉式電位計 1、Channel 2 連接壓力感測器 3、Channel 3 連接壓力感測器 4、Channel 4 連接壓力感測器 1、Channel 5 連接壓力感測器 2。

2.1.5 PCL-726 界面卡

本研究使用研華的 PCL-726 數位類比轉換卡作為輸出介面。PCL-726 是一張六通道的數位類比轉換卡，每個通道具有 12 bits 的解析度，輸出電壓範圍最大為 $\pm 10V$ 。除了數位類比的輸出外，PCL-726 還具有 16 bits 數位 I/O 輸出入的功能，可以用來連接數位訊號。本研究使用 PCL-726 來作為壓力比例閥命令的輸出介面，其中 Channel 1 連

接壓力比例閥 3、Channel 2 連接壓力比例閥 4、Channel 3 連接壓力比例閥 1、Channel 4 連接壓力比例閥 2。

2.2 二自由度機械臂動態方程式

二自由度機械臂示意圖如圖 2-8 所示，圖中 l_1 與 l_2 分別為連桿長度， m_1 與 m_2 為連桿之質量， l_{c1} 與 l_{c2} 為連桿重心離開節處之距離， I_1 與 I_2 為連桿轉動慣量。 q_1 為 l_1 與 x 軸之夾角，而 q_2 為 l_1 與 l_2 之夾角， τ_1 與 τ_2 各為機械臂關節之扭力， g 為重力。

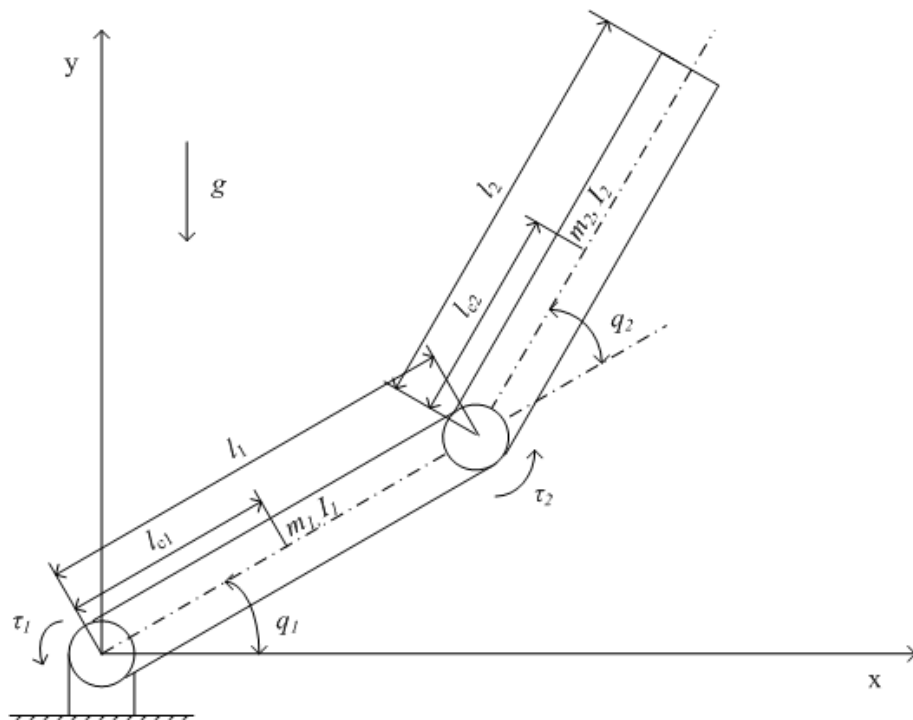


圖 2-8 二自由度機械臂示意圖

考慮圖 2-8 之機械臂系統，為了計算系統之總動能 K 及總位能 Z ，我們先求連桿質心相對於 X - Y 座標原點的位置與速度如下：

位置：

$$x_{c1} = l_{c1} \cos q_1 \quad (2.1)$$

$$y_{c1} = l_{c1} \sin q_1 \quad (2.2)$$

$$x_{c2} = l_1 \cos q_1 + l_{c2} \cos(q_1 + q_2) \quad (2.3)$$

$$y_{c2} = l_1 \sin q_1 + l_{c2} \sin(q_1 + q_2) \quad (2.4)$$

速度：

$$\dot{x}_{c1} = -l_{c1} \sin(q_1) \dot{q}_1 \quad (2.5)$$

$$\dot{y}_{c1} = l_{c1} \cos(q_1) \dot{q}_1 \quad (2.6)$$

$$\dot{x}_{c2} = -l_1 \sin(q_1) \dot{q}_1 - l_{c2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_1 + q_2) \quad (2.7)$$

$$\dot{y}_{c2} = l_1 \cos(q_1) \dot{q}_1 + l_{c2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_1 + q_2) \quad (2.8)$$

連桿質心速度的平方為

$$v_{c1}^2 = \dot{x}_{c1}^2 + \dot{y}_{c1}^2 = l_{c1}^2 \dot{q}_1^2 \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} v_{c2}^2 &= \dot{x}_{c2}^2 + \dot{y}_{c2}^2 \\ &= l_1^2 \dot{q}_1^2 + l_{c2}^2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \\ &\quad + 2l_1 l_{c2} \cos(q_1) \cos(q_1 + q_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) \\ &\quad + 2l_1 l_{c2} \sin(q_1) \sin(q_1 + q_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) \\ &= l_1^2 \dot{q}_1^2 + l_{c2}^2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) + 2l_1 l_{c2} \cos(q_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) \end{aligned} \quad (2.10)$$

動能 K_1 為

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 \dot{q}_1^2 \quad (2.11)$$

動能 K_2 為

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 \left[l_1^2 \dot{q}_1^2 + l_{c2}^2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) + 2l_1 l_{c2} \cos(q_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) \right] \quad (2.12)$$

所以總動能為

$$K = K_1 + K_2 \quad (2.13)$$

位能 Z_1 為

$$Z_1 = m_1 g l_{c1} \sin(q_1) \quad (2.14)$$

位能 Z_2 為

$$Z_2 = m_2 g l_1 \cos(q_1) + m_2 g l_{c2} \cos(q_1 + q_2) \quad (2.15)$$

所以總位能為

$$Z = Z_1 + Z_2 \quad (2.16)$$

得知系統之總動能與總位能後，定義 Lagrangian 能量函數為

$$L = K - Z \quad (2.17)$$

求得函數 L 後，代入 Euler-Lagrange 方程式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1, 2 \quad (2.18)$$

經整理之後，機械臂之動態方程式可寫成矩陣形式為

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (2.19)$$

其中

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_1 l_{c1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos q_2) + I_1 + I_2 & m_2 (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos q_2) \\ m_2 (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos q_2) & m_2 l_{c2}^2 + I_2 \end{bmatrix}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_{c2} \sin q_2 \dot{q}_2 & -m_2 l_1 l_{c2} \sin q_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ m_2 l_1 l_{c2} \sin q_2 \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g \cos q_1 + m_2 l_{c2} g \cos(q_1 + q_2) \\ m_2 l_{c2} g \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

$M(q)$ 為 2×2 維度的機械臂質量矩陣； $C(q, \dot{q})$ 為 2×2 維度的向心力(Centripetal)與柯

氏力(Coriolis)的和矩陣， $G(q)$ 則為 2×1 維度的重力向量； \ddot{q} 、 \dot{q} 及 q 分別代表角加

速度、角速度與角位移向量，都是 2×1 維度； τ 則是 2×1 維度的輸入力矩向量。

2.3 氣壓肌肉特性分析

本節將介紹氣壓肌肉較為特別之物理特性。在此引用目前較為廣泛使用的 Chou[2] 氣壓肌肉的數學模型：

$$F = P \left[a(1 - \varepsilon)^2 - b \right] \quad (2.20)$$

其中

$$a = \frac{3\pi D_0^2}{4 \tan^2 \theta_0}$$
$$b = \frac{\pi D_0^2}{4 \sin^2 \theta_0}$$
$$\varepsilon = \frac{(L_0 - L)}{L_0}$$

在式(2.20)中， F 為氣壓肌肉的輸出力； P 為氣壓肌肉管內壓力； θ_0 和 D_0 分別為氣壓肌肉充氣前，外部纖維編織網的夾角以及氣壓肌肉的直徑； L_0 和 L 分別代表充氣前、後氣壓肌肉的長度； ε 為氣壓肌肉的收縮率。

另外從(2.20)可知，氣壓肌肉產生的收縮力 F 與充氣的壓力 P 和收縮率 ε 有關。當 ε 一定時，收縮力 F 和與充氣的壓力 P 成正比例關係；當 P 固定時，其收縮力 F 與收縮率 ε 成非線性二次式關係，如由圖 2-9 所示。

此外，一般在控制上是採用二根氣壓肌肉之間的壓力差作為關節角度的輸入，而本研究為簡化控制器設計，採二根氣壓肌肉之間的電壓差作為關節角度的輸入，其實驗方法，首先將四顆壓力比例閥初始電壓皆設定為 5V，接著進行振幅 $\pm 5V$ 正弦波測試，即當壓力比例閥 1、3 輸入電壓為 10V 時，壓力比例閥 2、4 輸入電壓為 0V，輸入電壓差為 10V，再分別量測氣壓肌肉 1、氣壓肌肉 2 以及氣壓肌肉 3、氣壓肌肉 4 可得二對氣壓肌肉組之間的壓力差，作動時間為 20 秒，其電壓差與壓力差的關係如圖 2-10 所示，由此圖可看出，其電壓差與壓力差之間的關係線性度頗高，其比例約為 1：0.65。

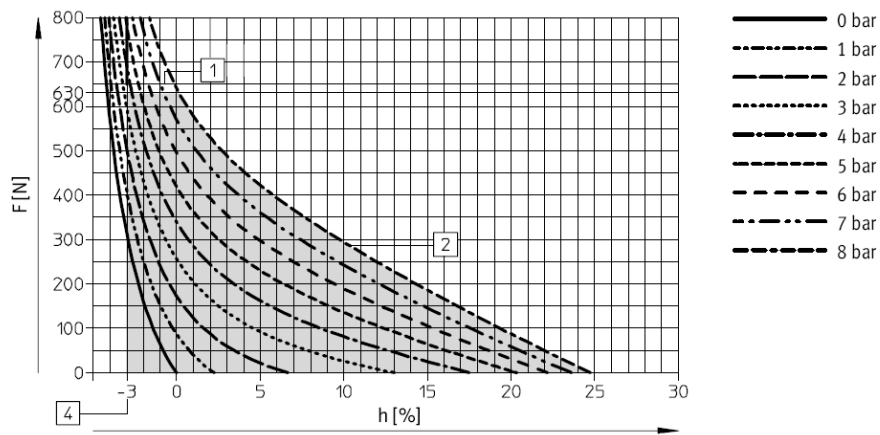


圖 2-9 定壓力下的力與收縮率關係(摘自 Festo 使用手冊)

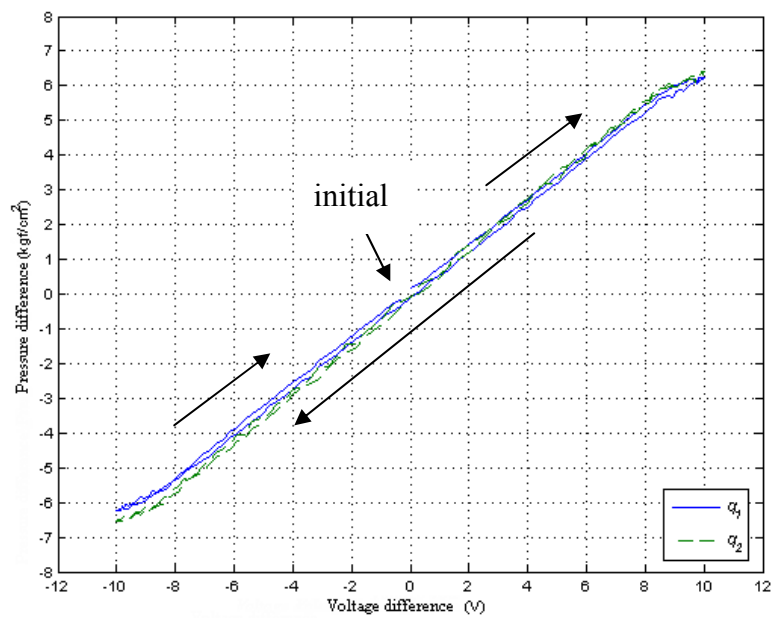


圖 2-10 兩關節的電壓差與壓力差關係

2.4 二自由度機械臂運動學

運動學主要是在探討機械臂的座標隨著時間在空間中的轉換，包括了時間、位置、速度等變數，並無考慮運動的力或是力矩的作用[13]。

運動學又分為順(正)向運動學與逆向運動學，順(反)向運動學是給予各軸要轉動的角度(q_1, q_2, \dots)來推算出機械手臂末端的位置(x, y, z)；逆向運動學是給予機械臂末端的座標，反推回機械臂各軸所要轉動的角度。針對機器手臂連桿機構，一般都使用 Denavit-Hartenberg 座標轉換表示，此座標轉換矩陣簡稱為 D-H 變換矩陣，如圖 2 - 11 所示，各個參數定義為：

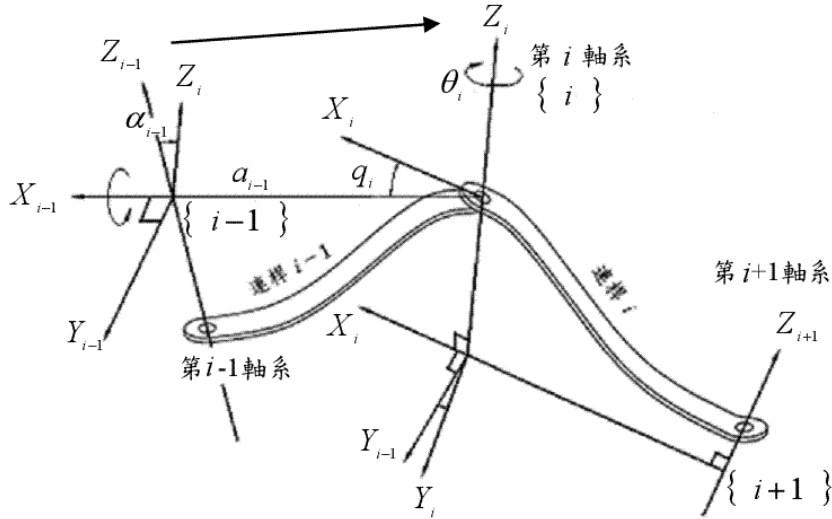


圖 2 - 11 連桿參數及座標轉換 (參考[14])

q_i ：為沿著 Z_i 軸由 X_{i-1} 軸旋轉至 X_i 軸的夾角。

d_i ：為沿著 Z_i 軸第 $\{i-1\}$ 系原點到第 $\{i\}$ 系原點間的位移。

α_{i-1} ：為沿著 X_{i-1} 軸由 Z_{i-1} 軸旋轉到 Z_i 軸的夾角。

a_{i-1} ：為沿著 X_i 軸第 $\{i-1\}$ 系原點到第 $\{i\}$ 系原點間的位移。

利用上述各個座標參數，兩個相鄰軸座標 $\{i-1\}$ 到 $\{i\}$ 轉換的轉換矩陣如下：

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos q_i & -\sin q_i & 0 & a_{i-1} \\ \cos \alpha_{i-1} \sin q_i & \cos \alpha_{i-1} \cos q_i & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \alpha_{i-1} \sin q_i & \sin \alpha_{i-1} \cos q_i & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

2.4.1 順向運動學

由圖 2 - 12 所示，建立二自由度機械臂的空間座標參數(表 2.2)，再把座標參數帶入 (2.21)式的 D-H 座標轉換矩陣來求得各個座標之間的轉換矩陣。

表 2.2 二自由度機械臂 D-H 參數表

第 i 軸座標	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	q_i
1	q_1	0	0	0
2	q_2	L_1	0	0
3	0	L_2	0	0

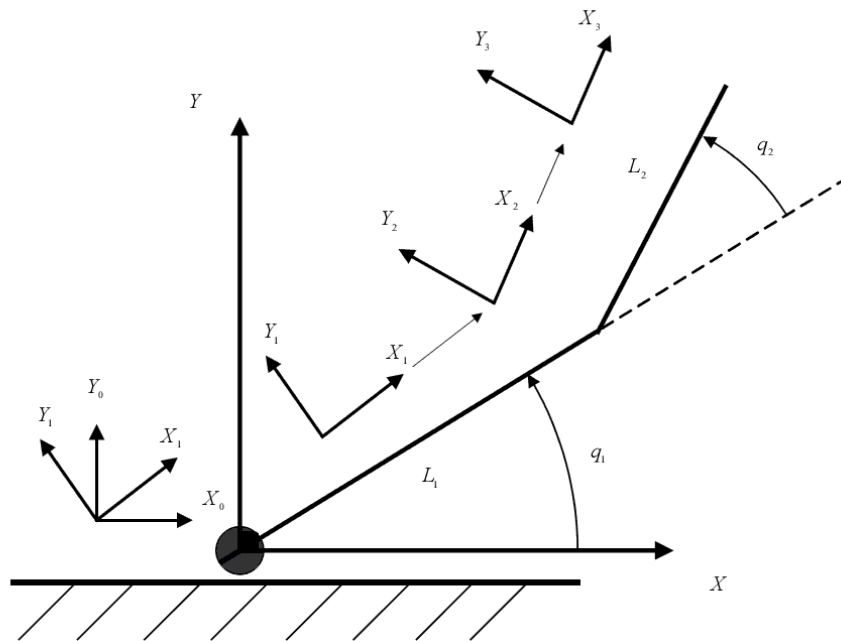


圖 2 - 12 二自由度機械臂空間座標定義圖

各軸的座標轉換矩陣為：

$${}^1_0T = \begin{bmatrix} Cq_1 & -Sq_1 & 0 & 0 \\ Sq_1 & Cq_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^2_1T = \begin{bmatrix} Cq_2 & -Sq_2 & 0 & L_1 \\ Sq_2 & Cq_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^3_2T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由於順向運動方程式是根據已知各關節活動角度，進而計算出機械臂末端相對於基底座標系的位置及方向。所以座標系 $\{n\}$ 相對於基座 $\{0\}$ 之齊次轉換矩陣 ${}^H_R T$ 可以表示為：

$${}^H_R T = {}^1_0 T \cdot {}^2_1 T \cdot \dots \cdot {}^n_{n-1} T \quad (2.22)$$

把各軸的座標轉換矩陣代入(2.22)式，可以得知二自由度氣壓肌肉機械臂座標系 $\{0\}$

相對於座標系 $\{3\}$ 的轉換矩陣為：

$${}^3_0 T = {}^1_0 T \cdot {}^2_1 T \cdot {}^3_2 T = \begin{bmatrix} C_1 C_2 - S_1 S_2 & -C_1 S_2 - S_1 C_2 & 0 & L_2 (C_1 C_2 - S_1 S_2) + C_1 L_1 \\ S_1 C_2 + C_1 S_2 & C_1 C_2 - S_1 S_2 & 0 & L_2 (S_1 C_2 + C_1 S_2) + S_1 L_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中

$$C_1 : \cos q_1 \quad C_2 : \cos q_2 \quad S_1 : \sin q_1 \quad S_2 : \sin q_2$$

又機械臂末端相對於基座的齊次轉換矩陣包括手臂姿態(${}^H_R R$)以及手臂位置向量(\vec{P})，如下式：

$${}^H_R T = \begin{bmatrix} {}^H_R R & \vec{P} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由此可知，關於機械臂位置之順向運動學方程式為：

$$x_d = L_1 \cos q_1 + L_2 \cos(q_1 + q_2) \quad (2.23)$$

$$y_d = L_1 \sin q_1 + L_2 \sin(q_1 + q_2) \quad (2.24)$$

其中

x_d ：機械臂末端 x 方向的座標位置

y_d ：機械臂末端 y 方向的座標位置

2.4.2 逆向運動學

逆向運動學主要是已知機械臂末端的空間座標位置，進而要求得各軸關節的旋轉角度。在此可以由二自由度機械臂的幾何關係圖(圖 2 - 13)來求得。

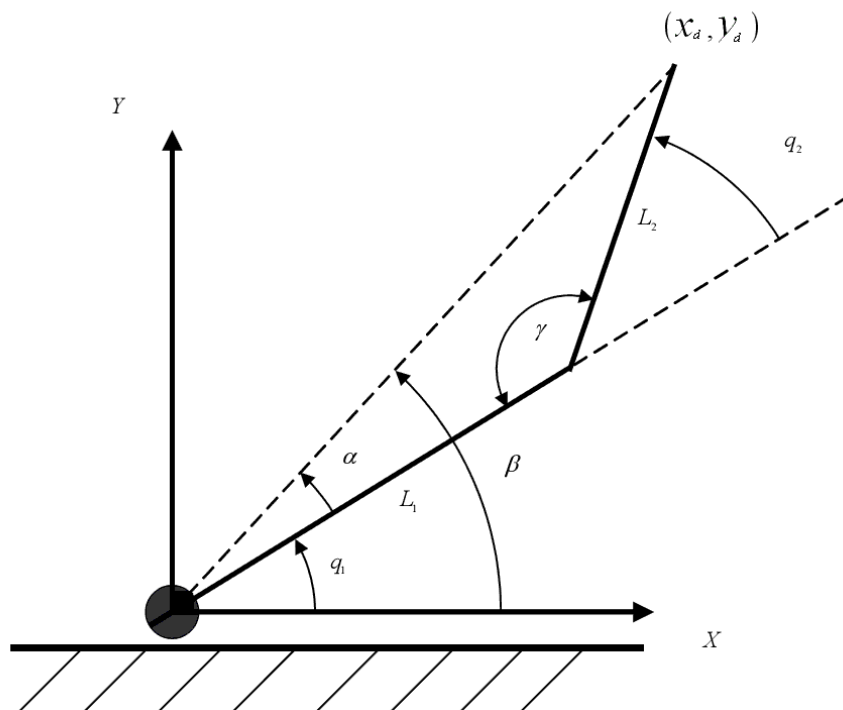


圖 2 - 13 機械臂的幾何關係圖

首先利用我們所求得的順向運動學方程式(2.23)和(2.24)，把兩式平方再相加，如下式：

$$\begin{aligned}
 x_d^2 + y_d^2 &= [L_1 \cos q_1 + L_2 \cos(q_1 + q_2)]^2 + [L_1 \sin q_1 + L_2 \sin(q_1 + q_2)]^2 \\
 &= L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2 [\cos q_1 \cos(q_1 + q_2) + \sin q_1 \sin(q_1 + q_2)] \\
 &= L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2 \cos[q_1 - (q_1 + q_2)] \\
 &= L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2 \cos q_2
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

得

$$\begin{aligned}
 \cos q_2 &= \frac{x_d^2 + y_d^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \\
 \Rightarrow q_2 &= \cos^{-1} \left(\frac{x_d^2 + y_d^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \right)
 \end{aligned}$$

又因為

$$q_1 = \beta - \alpha \quad (2.26)$$

且

$$\tan \beta = \frac{y_d}{x_d}$$
$$\tan \alpha = \frac{L_2 \sin q_2}{L_1 + L_2 \cos q_2}$$

所以

$$\tan q_1 = \tan(\beta - \alpha) = \frac{\tan \beta - \tan \alpha}{1 + \tan \beta \tan \alpha} = \frac{y_d (L_1 + L_2 \cos q_2) - L_2 x_d \sin q_2}{x_d (L_1 + L_2 \cos q_2) + L_2 y_d \sin q_2} \quad (2.27)$$

故

$$q_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y_d (L_1 + L_2 \cos q_2) - L_2 x_d \sin q_2}{x_d (L_1 + L_2 \cos q_2) + L_2 y_d \sin q_2} \right) \quad (2.28)$$

或

$$q_1 = \beta - \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{y_d}{x_d} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{L_2 \sin q_2}{L_1 + L_2 \cos q_2} \right)$$

所以可以求得二自由度機械臂的逆運動學方程式為：

$$q_1 = \beta - \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{y_d}{x_d} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{L_2 \sin q_2}{L_1 + L_2 \cos q_2} \right) \quad (2.29)$$

$$q_2 = \cos^{-1} \left(\frac{x_d^2 + y_d^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2} \right) \quad (2.30)$$

2.5 二自由度機械臂工作空間

工作空間是指機械臂最末端的端點所能到達所有位置的集合，即機械臂的自由端點能形成的最大空間，以表 2.3 二自由度機械臂規格，我們可推得如圖 2 - 14 所示之機械臂位移區域圖，藍色區域為本論文機械臂的工作空間，黑色實線為連桿一、二起始位置。所以機械臂末端所要到達之路徑必須包含在這個範圍裡面，並受控制以便跟隨我們所要求的軌跡路徑。

表 2.3 二自由度機械臂規格

連桿	連桿長度 (m)	可旋轉角度 (deg.)
連桿一	0.92	-20 ~ 20
連桿二	0.60	15 ~ 75

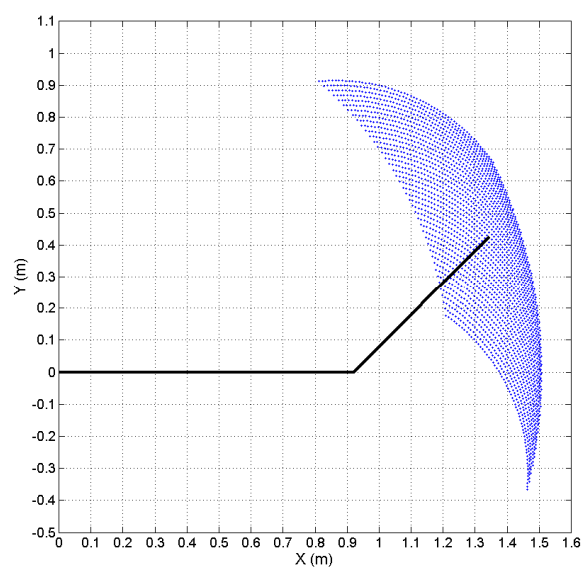


圖 2 - 14 二自由度機械臂工作空間

2.6 路徑規畫

在此根據 2.4 節的機械臂工作空間，設計了鉛錘線、水平線、圓形以及曲線等四種軌跡路徑，並透過逆向運動學運用在機械臂上反推出機械臂所需要跟隨之 q_1 和 q_2 角度，測試其軌跡追蹤的效果。

一、鉛錘線路徑

首先由機械臂起初位置(1.3443 m, 0.42426 m)移動到鉛錘線起點(1.31 m, 0.21 m)，接著沿著我們所規畫之路徑運動，如圖 2-15 所示。

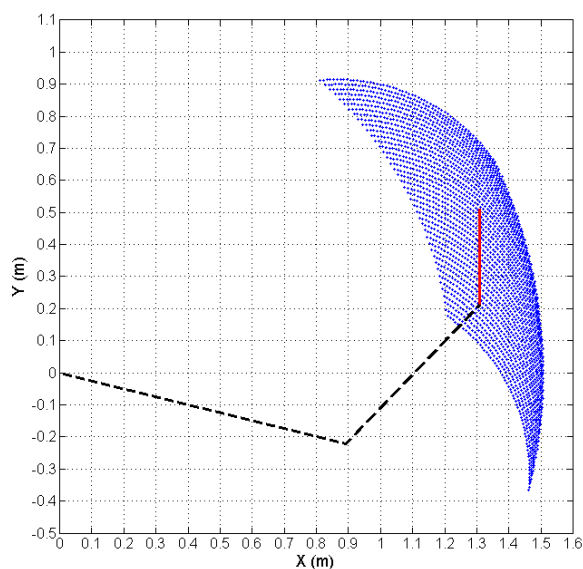


圖 2-15 鉛錘線路徑軌跡

圖中虛線部份為鉛錘線軌跡追蹤路徑起始點，機械臂所在位置，而實線部份，則是我們規畫的軌跡路徑，其數學方程式定義如下：

$$x_d(t) = 1.31 \text{ m} \quad (2.31)$$

$$y_d(t) = 0.21 + 0.15 \left[1 + \sin\left(0.2\pi t - \frac{\pi}{2}\right) \right] \text{ m} \quad (2.32)$$

透過逆向運動學推得兩軸旋轉角如圖 2-16 所示。

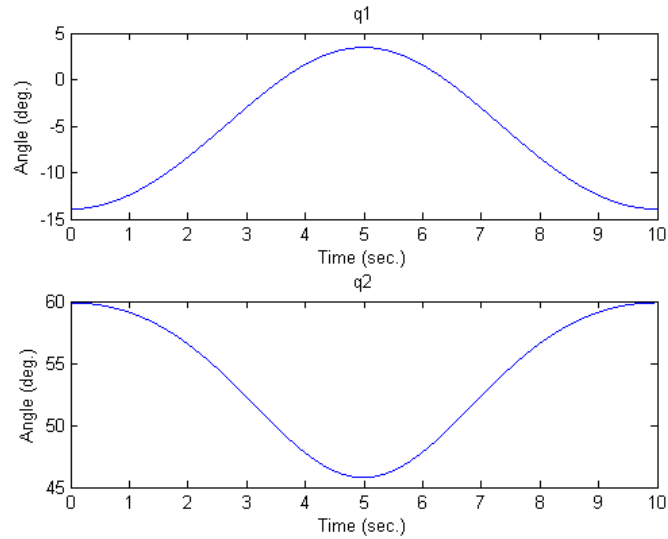


圖 2 - 16 鉛錘線路徑兩軸旋轉角

二、水平線路徑

首先由機械臂起初位置(1.3443 m, 0.42426 m)移動到鉛錘線起點(1.16 m, 0.61 m) ，
接著沿著我們所規畫之路徑運動，如圖 2 - 17 所示。

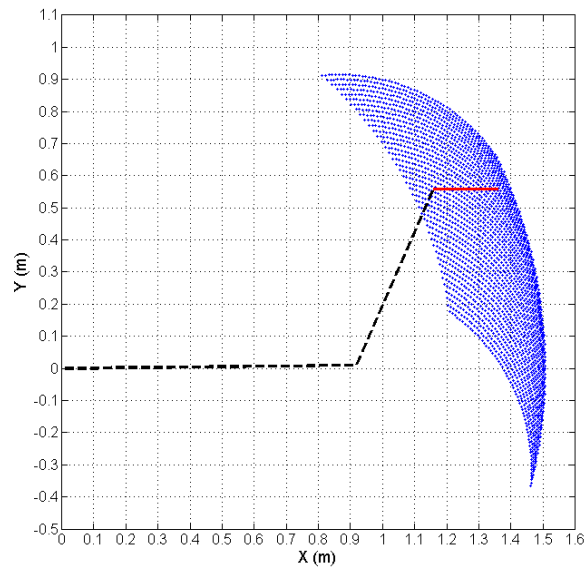


圖 2 - 17 水平線路徑軌跡

圖中虛線部份為水平線軌跡追蹤路徑起始點，機械臂所在位置，而實線部份，則是我們規畫的軌跡路徑，其數學方程式定義如下：

$$x_d(t) = 1.16 + 0.1[1 + \cos(0.2\pi t + \pi)] \text{ m} \quad (2.33)$$

$$y_d(t) = 0.56 \text{ m} \quad (2.34)$$

透過逆向運動學推得兩軸旋轉角如圖 2 - 18 所示。

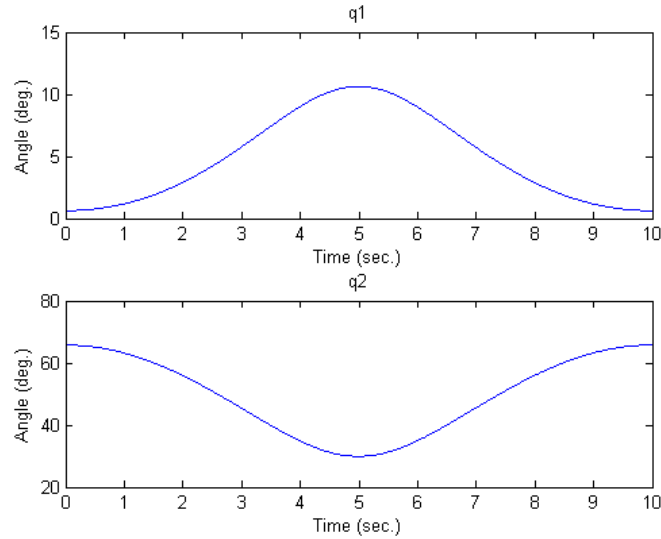


圖 2 - 18 水平線路徑兩軸旋轉角

三、圓形路徑

首先由機械臂起初位置(1.3443 m, 0.42426 m)移動到圖形起點(1.31 m, 0.31 m)，接著沿著我們所規畫之路徑運動，如圖 2 - 19 所示。

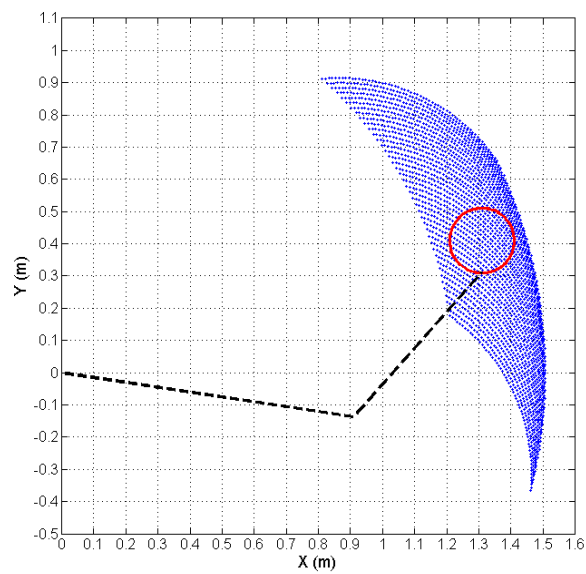


圖 2 - 19 圓形路徑軌跡

圖中虛線部份為圓形軌跡追蹤路徑起始點，機械臂所在位置，而實線部份，則是我們規畫的軌跡路徑，其數學方程式定義如下：

$$x_d(t) = 1.31 - 0.1 \cos\left(0.2\pi t - \frac{\pi}{2}\right) \text{ m} \quad (2.35)$$

$$y_d(t) = 0.41 + 0.1 \sin\left(0.2\pi t - \frac{\pi}{2}\right) \text{ m} \quad (2.36)$$

透過逆向運動學推得兩軸旋轉角如圖 2 - 20 所示。

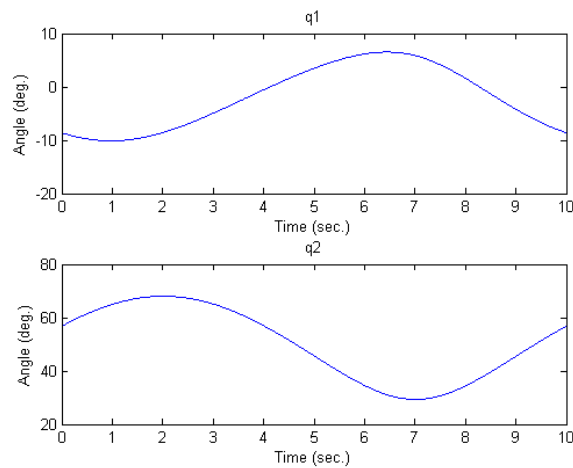


圖 2 - 20 圓形路徑兩軸旋轉角

四、曲線路徑

首先由機械臂起初位置(1.3443 m, 0.42426 m)移動到曲線起點(1.21 m, 0.21 m)，接著沿著我們所規畫之路徑運動，如圖 2 - 21 所示。

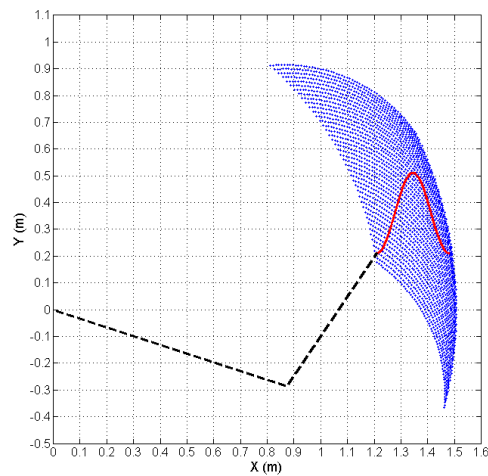


圖 2 - 21 曲線路徑軌跡

圖中虛線部份為曲線軌跡追蹤路徑起始點，機械臂所在位置，而實線部份，則是我們規畫的軌跡路徑，其數學方程式定義如下：

$$x_d(t) = 1.21 + 0.000135t \text{ m} \quad (2.37)$$

$$y_d(t) = 0.21 + 0.15 \left[1 + \sin \left(0.2\pi t - \frac{\pi}{2} \right) \right] \text{ m} \quad (2.38)$$

透過逆向運動學推得兩軸旋轉角如圖 2 - 22 所示。

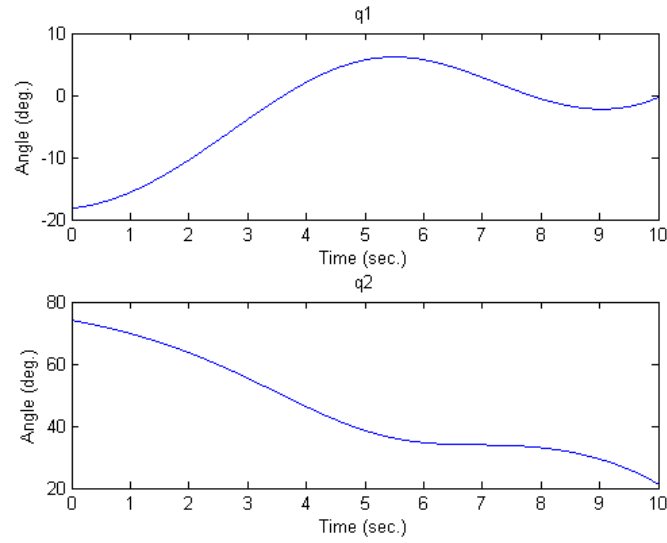


圖 2 - 22 曲線路徑兩軸旋轉角

第三章 控制理論

本章將介紹實驗所使用的控制理論，3.1 節介紹模糊邏輯控制理論(Fuzzy Logic Control ; FLC)， 3.2 節介紹滑動模式控制理論(Sliding Mode Control ; SMC)，3.3 節介紹模糊滑動模式控制理論(Fuzzy Sliding Mode Control ; FSMC)，3.4 節介紹適應性模糊滑動模式控制理論(Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control ; AFSMC)以及結合適應比例因子的適應性模糊滑動模式控制理論(Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control with Adaptive Scaling Factor ; AFSMC_ASF)。

3.1 模糊邏輯控制理論

基本的模糊邏輯控制器，主要可分為四個部份，分別為模糊化界面(Fuzzification Interface)、知識庫(Knowledge Base)、決策邏輯(Decision Logic)、解模糊化界面(Defuzzification Interface)，如圖 3 - 1 所示。

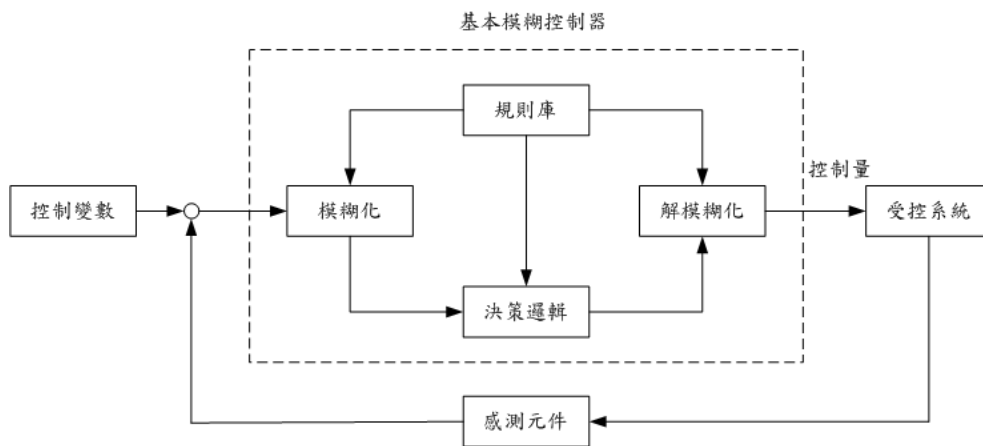


圖 3 - 1 基本模糊控制器架構

3.1.1 模糊化界面

在進行模糊化動作之前，必須先定義模糊變數，一般在控制問題上大都以受控系統的誤差量 e 、以及 ce 誤差變化量，作為模糊控制器的輸入變數，而模糊控制器的輸出變數則是以受控系統的控制變數 u 來表示，以本研究為例， u 即為壓力比例閥驅動電壓值。

模糊化過程即是將輸入之明確變數，如 e 或 ce ，依適當比例轉換到另一個論域內的模糊子集合，並依據其比例數值求得相對應的歸屬度。

至於歸屬函數的選擇，常用的歸屬函數有下列幾種：

1. 吊鐘型：以統計學上常態分配圖為主的歸屬函數，如圖 3-2 所示。其數學表示式為

$$\mu(x) = \exp(-k(x-a)^2), \quad k > 0 \quad (3.1)$$

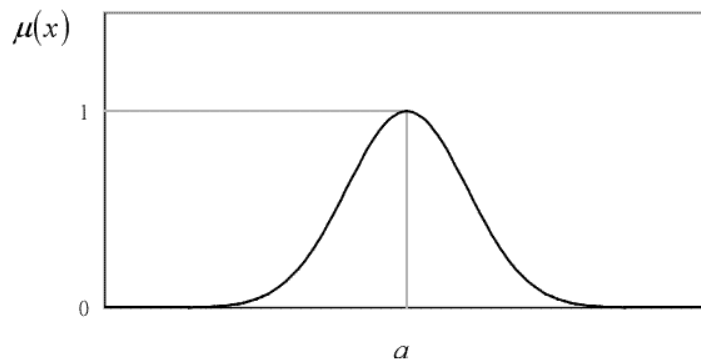


圖 3-2 吊鐘型歸屬函數

2. 三角型：一種以標準值的歸屬度為 1，向左右遞減至零的歸屬函數，如圖 3-3 所示。其數學表示式為

$$\mu(x) = \frac{-|x-a|+c}{c}, \quad c > 0 \quad (3.2)$$

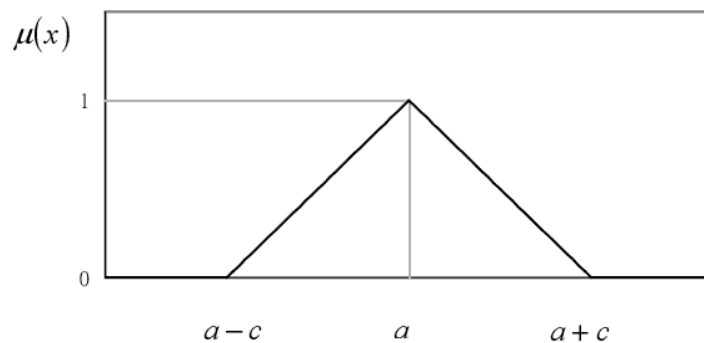


圖 3-3 三角型歸屬函數

3. 梯型：其歸屬函數之的型式和三角型類似，如圖 3 - 4 所示。其數學表示式為

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \\ \frac{c+x-a}{c-b} & , \quad 0 < x \leq a-c \\ 1 & , \quad a-c < x \leq a-b \\ 1 & , \quad a-b < x \leq a+b \\ \frac{c-x+a}{c-b} & , \quad a+b < x \leq a+c \\ 0 & , \quad a+c \leq x \end{cases} \quad (3.3)$$

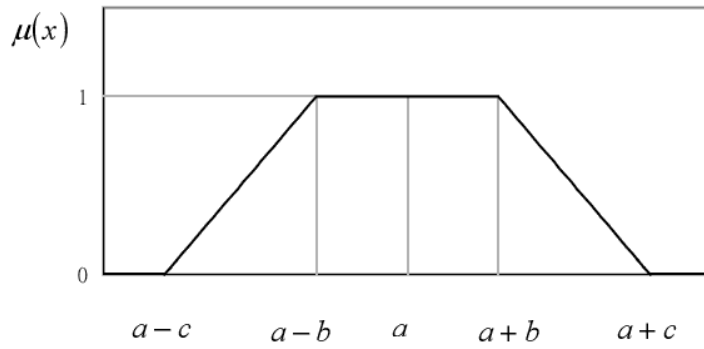


圖 3 - 4 梯型歸屬函數

其中，選擇描述輸入與輸出的模糊變數的語意值，通常使用負大(NB)、負中(NM)、負小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)以及正大(PB)這些語意變數來描述。

而根據一些實作經驗、三角型與吊鐘型的歸屬函數控制結果並沒有太大的差異，但若以軟體程式來製作模糊控制器的觀點來看，三角型歸屬函數的計算比吊鐘型歸屬函數簡單，因此，本研究採用三角型的歸屬函數。

3.1.2 知識庫

知識庫可分為資料庫及規則庫兩部分，其中資料庫是提供模糊化和解模糊化中明確值和模糊變數間的定義；規則庫是藉由一群語言控制規則描述控制目標和策略。

以兩輸入單輸出的模糊系統而言，控制規則一般表示如下：

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{命題部} \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{|c|} \hline \text{推論部} \\ \hline \end{array}$$

$$RULE_i : IF \ e = A_i \text{ and } ce = B_i \text{ THEN } u = C_i \quad (3.4)$$

其中

i :控制規則的編號

e, ce :命題部的輸入變數

u :推論部的輸出變數

A_i, B_i, C_i :模糊集合

3.1.3 決策邏輯

仿照人類下判斷時的模糊概念，運用模糊邏輯和模糊推論法則進行推論，而得到模糊控制訊號，此部份是模糊邏輯控制器的重點，而決策的依據則是來自於知識庫。

應用於模糊系統中的模糊推論方法有許多種，例如：Mamdani 的 min-min-max 模糊推論法、Larsen 之 min-product-max 模糊推論法等。由於在本文是使用 min-min-max 模糊推論法所以針對 min-min-max 模糊推論法做說明：

Mamdani 的 min-min-max 模糊推論法，推論示意圖如圖 3 - 5 所示，其定義如下

$$\begin{aligned}\mu_{C_i}(z) &= \alpha \wedge \mu_{C_i}(z), i = 1, 2 \\ \Rightarrow \mu_{C_i}(w) &= \mu_{C_i} \vee \mu_{C_i'} \\ &= [\alpha_1 \wedge \mu_{C_1}(z)] \vee [\alpha_2 \wedge \mu_{C_2}(z)]\end{aligned}\quad (3.5)$$

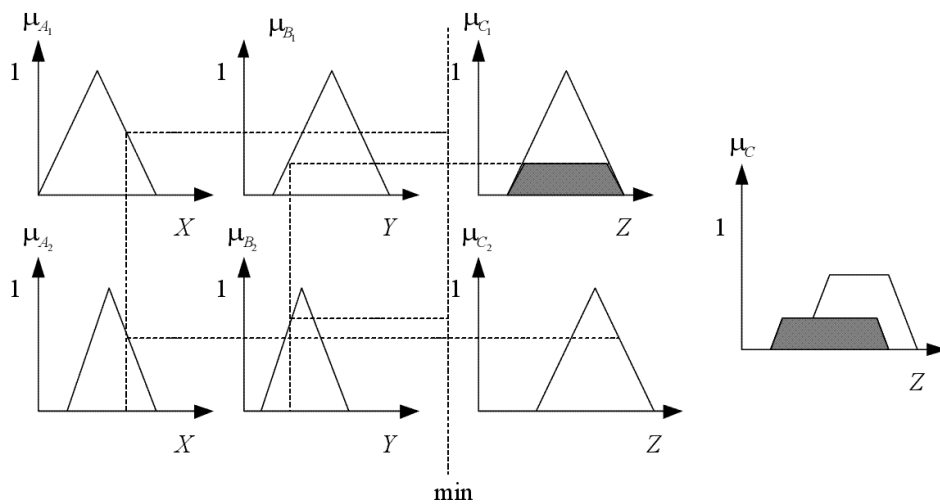


圖 3 - 5 mamdani 模糊推論法

3.1.4 解模糊化界面

將由決策邏輯所得的模糊值，依適當比例關係轉換為明確值的控制量訊號，以便作為受控系統的實際輸入值。

解模糊化的方法也有很多，常用的有下列幾種：

1. 重心法(Center of Gravity)

是最常用的方法，可惜計算上稍費工夫，其定義如下：

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_C(y_i) y_i}{\sum_{i=1}^m \mu_C(y_i)} \quad (3.6)$$

2. 面積法(Area)

與重心法類似，其定義如下：

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^m y_i \left(\sum_{k=1}^m \mu_{C^k}(y_i) \right)}{\sum_{i=1}^m \left(\sum_{k=1}^m \mu_{C^k}(y_i) \right)} \quad (3.7)$$

3. 高度法(Height)

此法的特點是計算簡單，故本研究採用此法當作解模糊化的方法，其定義如下：

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{y}^i \mu_{C^i}(\bar{y}^i)}{\sum_{i=1}^m \mu_{C^i}(\bar{y}^i)} \quad (3.8)$$

3.2 滑動模式控制理論

滑動模式控制理論是以一不斷切換的控制輸入，使得系統狀態產生滑動模式，藉以達成控制目的。在本節中，將先介紹滑動模式控制理論的特性及優點，其次在根據滑動模式控制理論的設計程序，一一簡介當中較為重要的理論。

3.2.1 可變結構控制

可變結構系統（Variable Structure System）是指，在整個系統中包含了有兩個以上的系統，並藉由一組切換條件用來決定子系統的切換時機。根據這樣的描述，可變結構控制便可定義為：先使受控系統產生兩個以上的子系統，再利用切換條件來達成控制目標的一種方法[15]。

根據文獻上的紀錄，早在 1950 年代，前蘇聯便有一批學者與工程師運用了此技術於馬達控制上。他們並發現一種有趣的系統行為：滑動模式（Sliding Mode），近來可變結構控制的運用幾乎架構在滑動模式的行為下。滑動模式控制便是要設計一個滑動面（Sliding Surface），經由控制的手段迫使系統軌跡進入滑動面上運動，並朝著控制目標點前進。所以對於滑動模式控制可以定義為：先使系統產生兩個以上的子系統，在利用刻意加上的切換條件來產生“滑動模式”以達成控制目標的手段。

3.2.2 滑動模式控制原理

對 SISO 系統而言，滑動模式控制輸入可表示如：

$$u(x) = \frac{u^+(x) \quad s(x) > 0}{u^-(x) \quad s(x) < 0} \quad (3.9)$$

在此 $s(x)$ 為切換條件，此函數必定是連續的空間並包含平衡點 $x=0$ ，其規劃的目的在使系統狀態在此空間滑動，所以 $s(x)$ 又可以說是滑動函數（Sliding Function）。

對於單一切換條件系統而言，滑動模式在滑動平面上產生，但對一個多切換條件的系統而言，其具有多個滑動平面，而滑動模式則發生在每個滑動模式的交集空間處，如圖 3-6 所示。

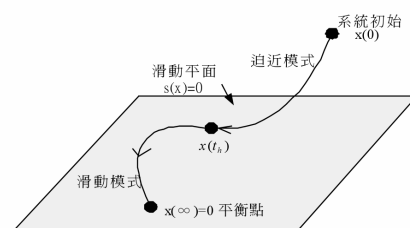


圖 3-6 滑動模式示意圖

1. 滑動條件

當系統狀態變數的軌跡接近滑動平面 $s(x)=0$ 時，軌跡會在滑動平面上滑動，欲達成這樣的效果，在 $s(x) \rightarrow 0$ 時，必須有下列的條件：

(1) 當 $s(x) > 0$ 時， $s(x)$ 的值必須隨時間的遞減，亦即 $\dot{s}(x) < 0$ 。

(2) 當 $s(x) < 0$ 時， $s(x)$ 的值必須隨時間的遞增，亦即 $\dot{s}(x) > 0$ 。

若以數學式表示則為：

$$\lim_{s \rightarrow 0} s\dot{s} < 0 \quad (3.10)$$

此式即所謂的滑動條件，如圖 3 - 7 所示。

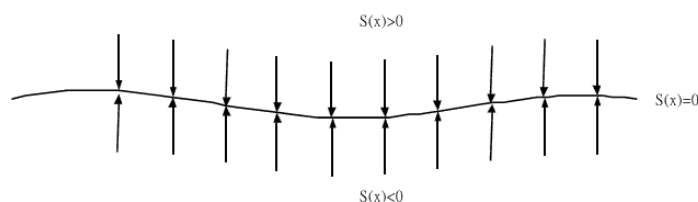


圖 3 - 7 滑動條件示意圖

2. 迫近條件

迫近條件簡單的說就是讓系統在有限的時間內，抵達滑動模式。一個系統所存在的迫近條件並非唯一，一般最常使用的逼近條件為：

$$s\dot{s} < -\sigma|s| \quad (3.11)$$

選取 Lyapunov 函數：

$$V = s^2 \quad (3.12)$$

$$\dot{V} = 2s\dot{s} \quad (3.13)$$

從我們假設的迫近條件可知：

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} < -2\sigma|s| = -2\sigma\sqrt{V} < 0 \quad (3.14)$$

所以當 Lyapunov 函數 $V = s^2 > 0$ 且 $\dot{V} < 0$ ，根據 Lyapunov 原理可得知， $V(t)$ 必在時間 $t = \frac{\sqrt{V(0)}}{\sigma}$ 之內收斂至 0，接觸到滑動平面 $s(x)=0$ 。

3. 等效控制

當系統在迫近條件時是屬於連續軌跡，但當系統到達滑動模式時卻變成不斷高速切換的不連續軌跡；我們可以將此時的軌跡視為連續，則滿足此連續滑動模式軌跡的控制輸入稱為“等效輸入”。

考慮一個以狀態變數表示的單輸入系統，其數學模式為

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (3.15)$$

在逼近條件下， u 不會切換且 $f(x, u)$ 為連續的函數。當其抵達滑動條件時， u 會不斷切換且 $f(x, u)$ 為不連續，令控制輸入為

$$u = \begin{cases} u^+ & s(x) > 0 \\ u^- & s(x) < 0 \end{cases} \quad (3.16)$$

根據 Filippov 提出的等效控制觀念，若滑動模式存在時，則在滑動平面 $s(x) = 0$ 中的 u 可視為連續的等效控制輸入 u_{eq} ，使得

$$f(x, u_{eq}) = \mu f(x, u^+) + (1 - \mu) f(x, u^-) \quad (3.17)$$

其中 $0 < \mu < 1$

換言之，滑動模式下的系統可表示為

$$\dot{x} = f(x, u_{eq}) \quad (3.18)$$

對整個控制輸入 u 來說，等效輸入可以是為其中低頻部分，所以 u 可表示為

$$u = u_{eq} + \Delta u \quad (3.19)$$

其中 Δu 為控制輸入中不斷高頻切換的部分。

3.3 模糊滑動模式控制理論

在實現模糊控制器會遇到的一個常見的問題，那就是對於一個較為複雜或對控制性能要求較為高的控制系統，常常需要建立一組龐大的模糊規則庫。對於建立一組龐大的規則庫，不只需要相當的專家經驗，而且還需要有足夠的硬體支援（如：記憶體），然

而在實際使用的即時控制（Real time control）系統中，硬體設備往往不足以支援一個過大的規則庫，所以必須配合硬體實際狀況，縮減規則庫的規模，使得控制器的性能受到影響。為了能有效簡化模糊規則庫且不犧牲控制性能，本節提出結合傳統模糊控制及滑動模式控制的模糊滑動平面控制器。

一般模糊系統是以兩個輸入變數誤差 e 與誤差變量 \dot{e} 來判斷系統響應，因此會需建立一組二維的模糊規則庫，也就是說在建立模糊規則庫時需要同時考慮誤差 e 與誤差變量 \dot{e} 對系統輸出狀態的影響。而模糊滑動平面系統則是將傳統模糊系統的輸入變數誤差 e 與誤差變量 \dot{e} 組合成一個滑動平面 $s = \lambda e + \dot{e}$ ，將此滑動平面取代誤差 e 與誤差變量 \dot{e} ，成為新的輸入變數。意即將原本二維的模糊規則庫改為一維的模糊滑動平面規則庫，而且此一維的模糊滑動平面規則庫仍可達到一般二維模糊規則庫的效果，圖 3 - 8 為模糊滑動平面示意圖，圖 3 - 9 為模糊滑動平面系統方塊圖。

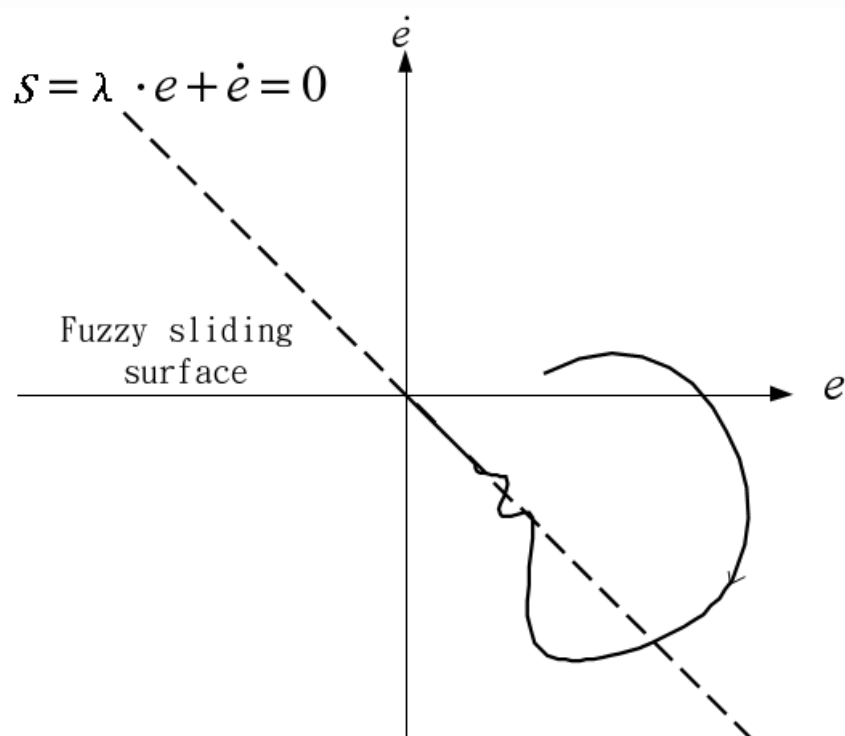


圖 3 - 8 模糊滑動平面示意圖

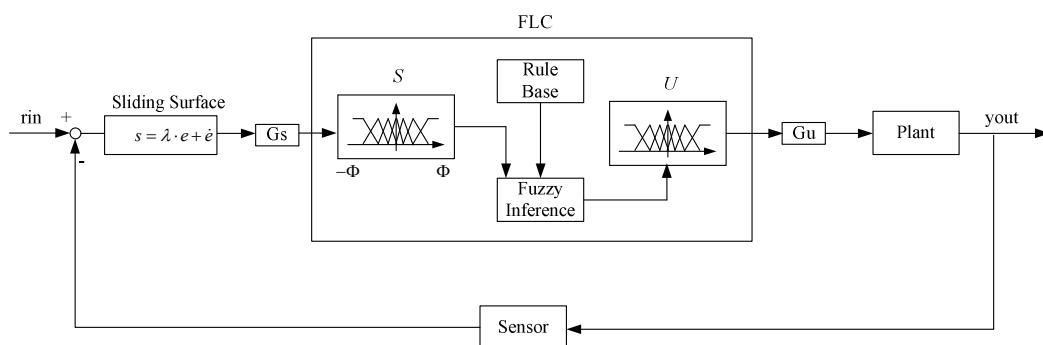


圖 3 - 9 模糊滑動平面系統方塊圖

模糊滑動平面控制器包括兩個主要部分：滑動平面估測器（Sliding Surface Estimator）與基本模糊控制器兩部分。

- (1) 滑動平面估測器：將迴授回來的輸出訊號，轉換成誤差 e 以及誤差變量 \dot{e} ，然後將誤差 e 與誤差變量 \dot{e} 組合成所預先規劃的滑動平面方程式 $s = \lambda \cdot e + \dot{e}$ 。
- (2) 基本模糊控制器：此部分基本上仍然算是一個基本的模糊控制器，包括模糊化機構、解模糊化機構、模糊推論引擎、模糊規則庫等部分。與傳統不同的是，此基本模糊控制器用來判斷系統響應的輸入變數不是誤差 e 與誤差變量 \dot{e} ，而是一個滑動平面參數 $s = \lambda \cdot e + \dot{e}$ 。而控制的目標不再是 $e \rightarrow 0$ 與 $\dot{e} \rightarrow 0$ ，而是滑動平面參數 $s = \lambda \cdot e + \dot{e} \rightarrow 0$ 。換句話說，就是使輸出狀態在滑動平面上滑動的。

3.4 適應性模糊滑動模式控制理論

此一控制系統主要是延續上一節所提出之模糊滑動平面控制器為主體，再引入兩種適應控制理論，其一為 Huang 和 Lin[11]所提出之適應調變技巧，進行線上調整模糊表的中心值，進而建立適合系統的規則表，其二為採用 Wang 和 Chang[12]所提出模式匹配的技巧去線上調整 Gu ，適應性模糊滑動模式系統方塊圖如圖 3 - 10 所示。

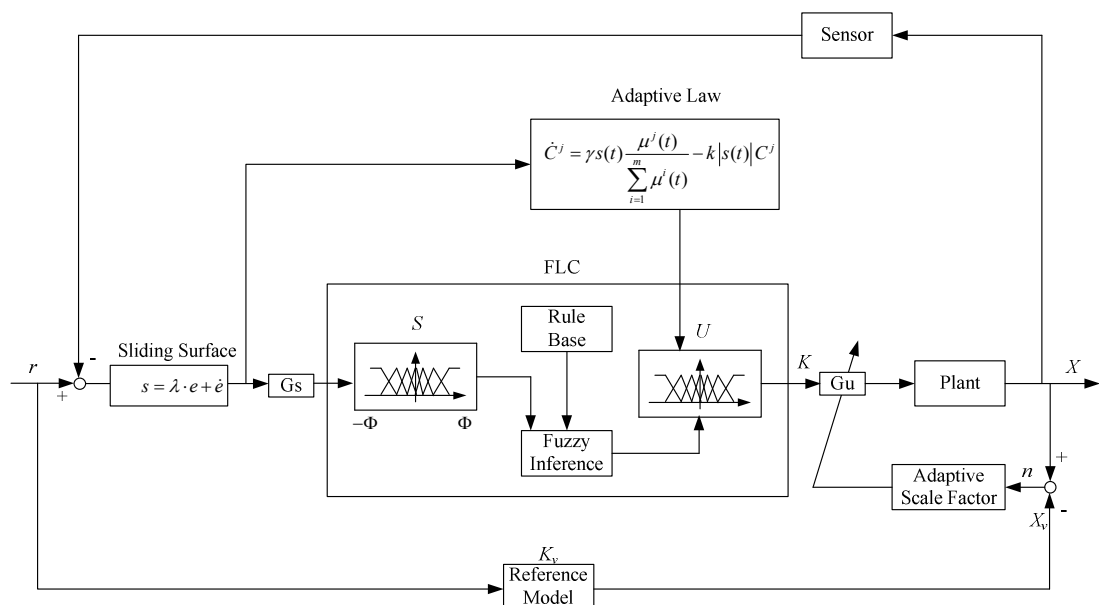


圖 3 - 10 適應模糊滑動模式控制系統方塊圖

3.4.1 適應模糊規則表

規則庫建立的完整性與精確性，一直是影響傳統模糊控制器控制性能好壞的最大因素。但是這種只憑經驗法則建立出的規則庫往往無法滿足現實條件，尤其是需要高精密的控制或是有著許多外界干擾的複雜系統，建立的難度就越高。

所以我們在原本的模糊滑動平面控制器加上 Shieh-Jer Huang 和 Wei-Cheng Lin[11] 所提出之適應法則(Adaptive Law)，它可以即時線上修正模糊控制器的規則庫，使規則庫不斷被修正。這樣一來，不僅可以改善之前因為經驗不足而使規則庫無法達到真正完善的缺點，也可免除以嘗試錯誤法(Trial and Error)等繁瑣步驟來調整規則庫，進而增進控制性能。

首先我們在模糊控制方面的輸入變數 s 與解模糊化變數 u ，均是採用單排七個如：NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB 的模糊變數值，並採用三角型歸屬函數。

在滑動模式控制器之滑動條件($s\dot{s} < 0$)，得知若(1) $s > 0$ 則增加控制量 u 將會使 $s\dot{s}$ 減小，(2) $s < 0$ 則減少控制量 u 將會使 $s\dot{s}$ 減小。基於上述定性上分析，我們能夠設計控制量 u 去滿足不等式($s\dot{s} < 0$)，其規則表如(3.1)所示：

表 3.1 規則表

<i>S</i>	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
<i>U</i>	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB

表 3.1 中控制法則如下述：

$$IF\ S\ is\ PB, THEN\ U\ is\ PB \quad (3.20)$$

對於第 j 個規則 R_j 可寫成：

$$R_j : IF\ S = S_s^j, THEN\ U^j = C^j \quad (3.21)$$

其中

S_s^j ：模糊化前件部 S 之第 j 個規則

U^j ：解模糊化後件部第 j 個規則

C^j ：解模糊化後件部第 j 個規則表中心值

將模糊化前件部 S 之第 j 個規則所得之歸屬度值 μ^i 對應到解模糊之 U^i ，則可將控制量 u 寫成：

$$u = \frac{\sum_{i=1}^m \mu^i \cdot U^i}{\sum_{i=1}^m \mu^i} = \frac{\sum_{i=1}^m \mu^i \cdot C^i}{\sum_{i=1}^m \mu^i} \quad (3.22)$$

上式中，超始時 C^j (Consequent Parameter) 可設定皆為零即所謂的零規則，之後在控制過程當中，我們使用適應法則(Adaptive Law)產生 C^j 來更新它。

基於滑動模式控制器的觀念裏，透過適應法則使得 C^j 的更新，使滿足滑動條件 ($ss < 0$)，則由誤差所組成的 Switch Function 將會收斂至零。根據最陡梯度法則(Gradient Descent Rule)， C^j 的更新方式如下：

$$\dot{C}^j = -\Gamma \frac{\partial s(t) \dot{s}(t)}{\partial C^j(t)} \quad (3.23)$$

其中 Γ 是 Adaptive Rate

利用鏈鎖法則，上式(3.23)式可變成如下所示：

$$\begin{aligned}
 \dot{C}^j &= -\Gamma \frac{\partial s(t) \dot{s}(t)}{\partial u(t)} \frac{\partial u(t)}{\partial C^j(t)} \\
 &= \Gamma b(\underline{e}) s(t) \frac{\partial u(t)}{\partial C^j(t)} \\
 &= \gamma s(t) \frac{\partial u(t)}{\partial C^j(t)} \\
 &= \gamma s(t) \frac{\mu^j(t)}{\sum_{i=1}^m \mu^i(t)}
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

其中

m ：規則庫的數目

$i : 1, 2, \dots, m$

γ ：學習速率

b ：控制量 u 的方向

一般具有自我學習功能的控制器，皆必須定義其性能指標，以避免過度學習造成系統發散，有鑑於此，在此我們利用 Narendra 和 Annaswamy[16]，於 1987 年所提出的 e-modification 的適應法則，因此我們可將(3.24)式改寫成

$$\dot{C}^j = \gamma s(t) \frac{\mu^j(t)}{\sum_{i=1}^m \mu^i(t)} - k |s(t)| C^j \tag{3.25}$$

上式中的 k 值的選用，需由機台特性決定。

至於穩定性分析，在 Huang 和 Lin [11]的研究中，有完整的理論證明。

3.4.2 適應比例因子

此外，本節再利用 Ying-Tsai Wang 和 Ming-kun Chang [12]所提出之模式匹配的技巧來線上進行比例因子 Gu 的調整。

在此首先定義

$$J(t) = \frac{1}{2} n(t)^2 = \frac{1}{2} ((x(t) - x_v(t))^2 \quad (3.26)$$

其中 n 表示真實系統與參考模式的輸出誤差，因此使用梯度下降法(Gradient Approach Method)，取一定步長 α ，所以：

$$\begin{aligned} \frac{dGu(t)}{dt} &= -\alpha \frac{\partial J}{\partial Gu} \\ &= -\alpha \frac{\partial J}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial Gu} \\ &= -\alpha n \frac{\partial n}{\partial Gu}, \quad \alpha > 0 \end{aligned} \quad (3.27)$$

其中 α 稱為適應增益(Adaptation Gain)，為了減少電腦負擔，系統模式經過簡化後，真實輸出為

$$x(t) = \frac{KGuM}{1 + KGuM} r(t) \quad (3.28)$$

K 稱為模糊增益(Fuzzy Gain)，它是整個模糊滑動模式控制器解模糊化的結果。參考模式的輸出為

$$x_v(t) = k_v r(t) \quad (3.29)$$

k_v 是想要的零階參考模式，將(3.28)和(3.29)式代入(3.26)式得到：

$$\dot{Gu} = -\alpha n \left[KM(1 + KGuM)^{-1} - K^2 GuM^2 (1 + KGuM)^{-2} \right] \quad (3.30)$$

因為氣壓系統一般只應用在低頻，同時系統頻率遠小於取樣頻率，在此直接使用

Backward Approximation 方式，將(3.30)式簡化成離散形式：

$$\begin{aligned} Gu_j(k+1) &= Gu_j(k) - \alpha_j n(k) \left[K(k)M(1 + K(k)Gu_j(k)M)^{-1} \right. \\ &\quad \left. - K(k)^2 Gu_j(k)M^2 (1 + K(k)Gu_j(k)M)^{-2} \right] T \end{aligned} \quad j=1,2 \quad (3.31)$$

3.4.3 穩定性分析

本節則是應用 Lyapunov 穩定性理論，證明所設計的控制運算是穩定的[12]。

$$\begin{aligned} n(t) &= x(t) - x_v(t) \\ &= KMGue(t) - k_v r(t) \end{aligned} \quad (3.32)$$

Lyapunov 函數定義為：

$$V = \frac{1}{2}n^2 \quad (3.33)$$

另外，由梯度下降法：

$$\begin{aligned} \frac{dK}{dt} &= -\beta \frac{\partial J}{\partial K} \\ &= -\beta \frac{\partial J}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial K} \\ &= -\beta n \frac{\partial n}{\partial K}, \quad \beta > 0 \end{aligned} \quad (3.34)$$

因此，對 V 的微分為：

$$\begin{aligned} \dot{V} &= n\dot{n} \\ &= n \frac{\partial n}{\partial Gu} \frac{\partial Gu}{\partial t} + n \frac{\partial n}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial t} \\ &= n \left(\frac{\partial n}{\partial Gu} \right) \left(-\alpha n \frac{\partial n}{\partial Gu} \right) + n \left(\frac{\partial n}{\partial K} \right) \left(-\beta n \frac{\partial n}{\partial K} \right) \\ &= -\alpha n^2 K^2 M^2 e^2 - \beta n^2 M^2 Gu^2 e^2 \end{aligned} \quad (3.35)$$

由於 α 與 β 皆大於零，(3.35)式中 $\dot{V} < 0$ ，依照 Lyapunov 穩定性理論證明在平衡點為漸近穩定，所以所提議的控制運算並不會使系統造成發散。

第四章 實驗研究

本研究所探討的重點為二自由度氣壓肌肉機械臂之追蹤性能，將控制目標分成兩大部份，一為二自由度角度同步追蹤控制，另一為二自由度軌跡追蹤控制，其中控制器採用傳統模糊控制器(FLC)、模糊滑動模式控制器(FSMC)、適應性模糊滑動模式控制器(AFSMC)以及結合適應比例因子之適應性模糊控制器(AFSMC_ASF)等來實現二自由度氣壓肌肉機械臂控制，並且將分別討論其控制流程、控制參數的設定以及不同輸入時的追蹤性能。

另外在訊號處理方面，雜訊時常會造成不必要的訊號被擷取，對控制器的處理與運算造成干擾，因此必須將雜訊濾除。實驗中，旋轉式電位計以及壓力感測器迴授訊號參雜了許多雜訊，其雜訊的來源有：外界環境的雜訊干擾、數值差分時的放大雜訊、A/D轉換時的雜訊以及感測器本身跳動雜訊等因素，故本研究中採用一階低通數位濾波器：

$$y(k) = 0.1y(k) + 0.9y(k-1) \quad (4.1)$$

本實驗使用 Turbo C 3.0 程式語言撰寫簡單的人機界面，其實包含了實驗起始的設定、位置控制中斷以及資料儲存等功能。為了保持實驗資料的真實度，系統取樣的頻率設定為 200Hz。

4.1 二自由度角度同步追蹤控制

本節將使用第三章所提及之四種控制器，分別為傳統模糊控制器(FLC)、模糊滑動模式控制器(FSMC)、適應性模糊滑動模式控制器(AFSMC)以及結合適應比例因子之適應性模糊控制器(AFSMC_ASF)，應用於兩關節角度同步追蹤控制，參考輸入為步階以及正弦波輸入，並比較其控制性能，以作為下一節二自由度軌跡追蹤控制，控制參數的設定依據。

4.1.1 傳統模糊控制器(FLC)之實驗結果

在傳統模糊控制器部份，前件部的模糊化函數，採用正規化且計算簡單對稱的三角形歸屬函數，在模糊化的函數中選用 7 個模糊子集合，模糊論域為 ± 1 ，控制規則表如表 4.1 所示，此外，由於壓力比例閥輸入電壓為 0~10V，輸出壓力為 0~100 psi，故控制方式採四根氣壓肌肉皆先充 4kgf/cm^2 壓力，當作初始狀態，初始電壓 u 皆為 6V，而模糊化後的輸出為 Δu ，必須經過比例因子調變以及控制量的疊代（即輸出為增量型），才能當作控制器的輸出，如式(4.2)，FSMC、AFSMC 及 AFSMC_ASF 亦是利用同樣的技巧。且為了使 FLC 能適應各種參考輸入型式，本節實驗中參數設定為固定值， $Ge_1 = 0.2$ 、 $Gce_1 = 5$ 、 $Guf_1 = 0.009$ 、 $Ge_2 = 0.3$ 、 $Gce_2 = 6$ 、 $Guf_2 = 0.011$ 。

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (4.2)$$

表 4.1 傳統模糊規則表

$\begin{matrix} e \\ ce \end{matrix}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	-1	-1	-1	-1	-0.66	-0.33	0
NM	-1	-1	-1	-0.66	-0.33	0	0.33
NS	-1	-1	-0.66	-0.33	0	0.33	0.66
ZO	-1	-0.66	-0.33	0	0.33	0.66	1
PS	-0.66	-0.33	0	0.33	0.66	1	1
PM	-0.33	0	0.33	0.66	1	1	1
PB	0	0.33	0.66	1	1	1	1

圖 4-1 ~ 圖 4-9 為 FLC 實際應用於兩關節角度同步控制結果。圖 4-1、圖 4-2 為兩關節同步控制之步階響應圖及誤差圖，由圖 4-1 可看出， q_1 之上升時間為 1.575 秒，而安定時間為 2.825 秒，最大超越量百分比為 0.8%，穩態誤差為 0.27° ； q_2 上升時間則為 1.65 秒，安定時間為 2.375 秒，超越量百分比則為 0.3%，穩態誤差為 0.24° ，圖 4-3 為兩關節之氣壓肌肉內部壓力變化情形，4 根氣壓肌肉初始壓力皆設定為 4kgf/cm^2 ，其中 ΔP_1 為 q_1 之 2 根氣壓肌肉之間的壓力差， ΔP_2 則為 q_2 之 2 根氣壓肌肉之間的壓力差。

而圖 4 - 4 ~ 圖 4 - 9 則為兩關節同步追蹤正弦波角度控制結果、誤差及壓力變化圖，其中正弦波輸入頻率分別為 0.1hz 以及 0.5hz，由圖 4 - 4 可看出 q_1 最大振幅誤差為 1.18° ，相位落後為 18° ，而 q_2 最大振幅誤差為 0.25° ，相位落後為 12.15° ，圖 4 - 5 為同一響應時間，參考輸入與系統實際輸出誤差圖，圖 4 - 6 則為兩關節壓力變化圖，可以看出其 ΔP_1 、 ΔP_2 兩關節壓力差與 q_1 、 q_2 角度變化軌跡成比例變化。圖 4 - 7 則是參考輸入為 0.5hz 正弦波之控制結果， q_1 最大振幅誤差為 1.93° ，相位落後 54° ， q_2 最大振幅誤差為 5.17° ，相位落後 42.75° ，由以上結果可看出， q_1 相位落後情形皆較 q_2 差，這主要是由於第一個關節承受整支手臂的重量，以及使用的氣壓肌肉規格為內徑為 20mm，因此充氣時間較長，故作動反應時間較慢。

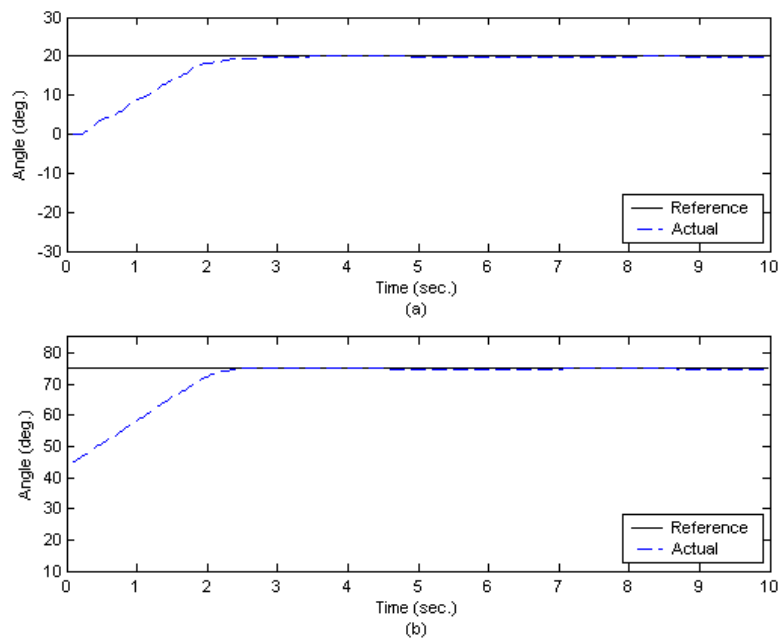


圖 4 - 1 FLC 同步控制步階響應

(a) q_1 、(b) q_2

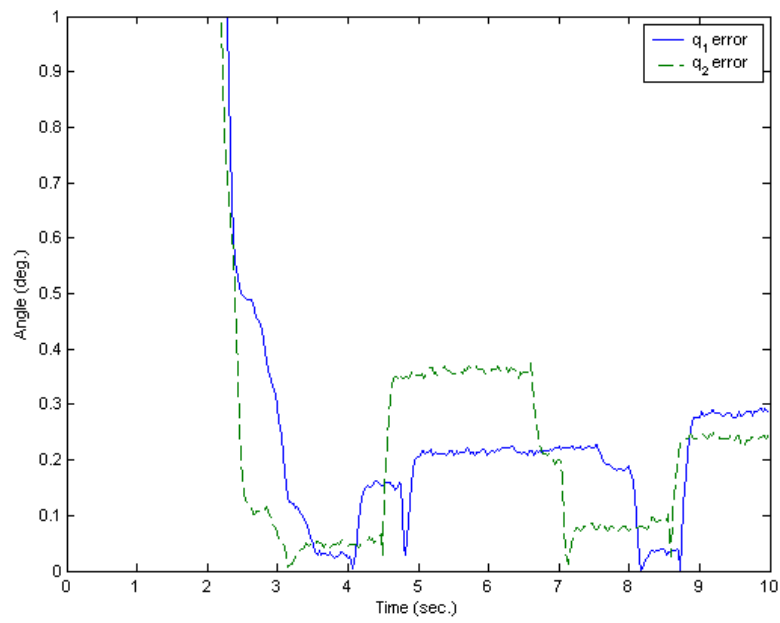


圖 4-2 FLC 同步控制步階響應誤差

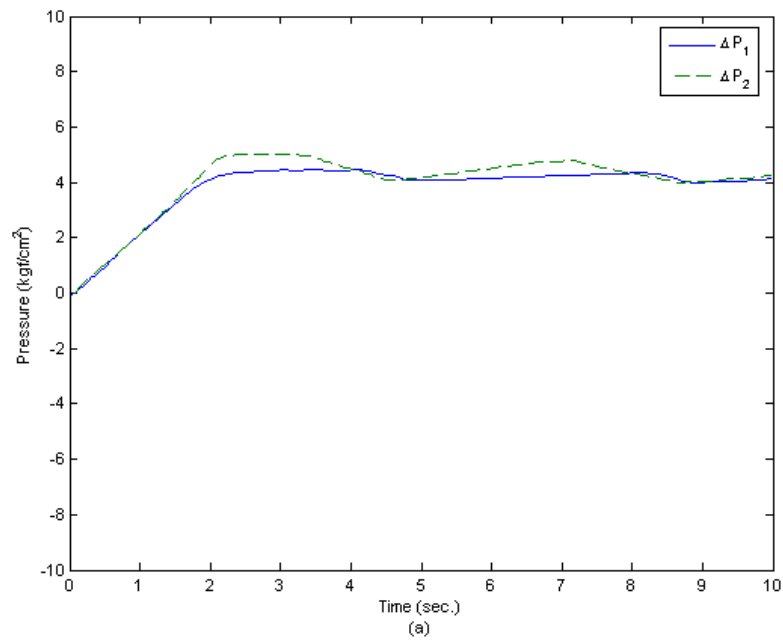


圖 4-3 FLC 同步控制步階響應兩關節的壓力差

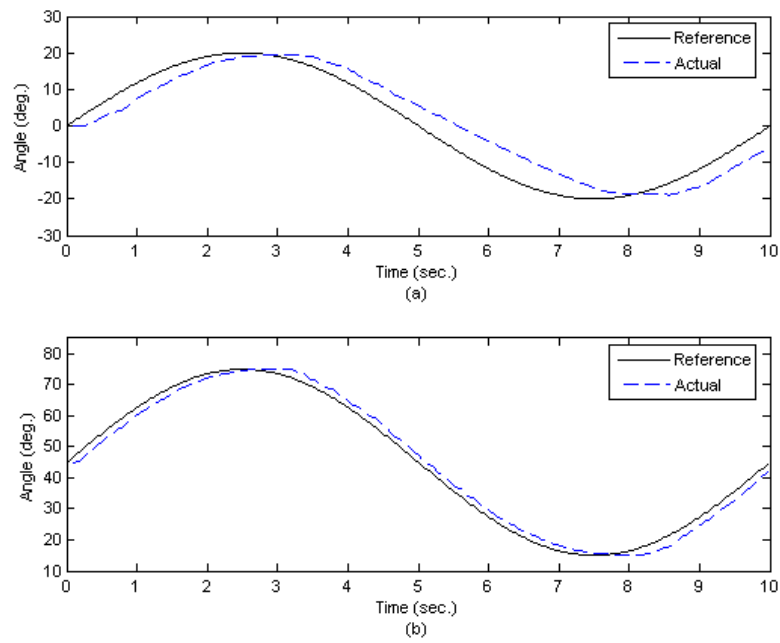


圖 4 - 4 FLC 同步追蹤控制正弦波響應(0.1Hz)
(a) q_1 、(b) q_2

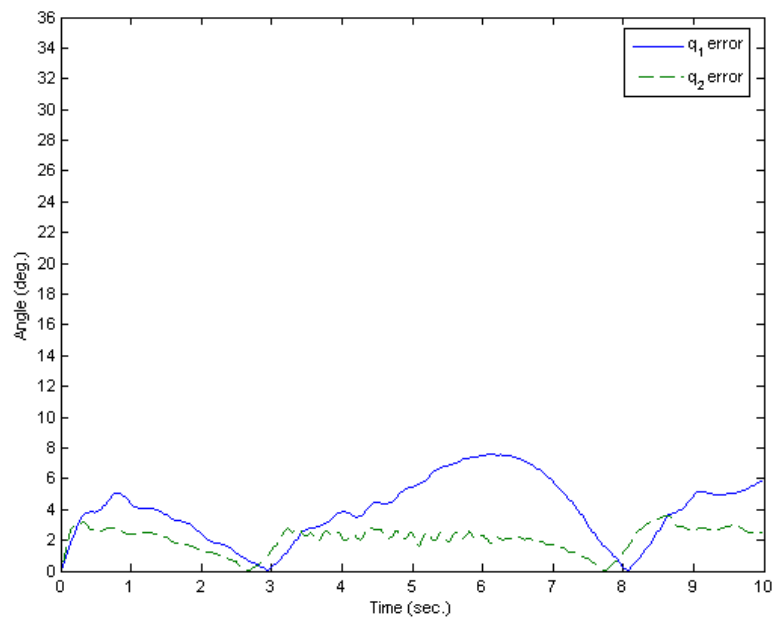


圖 4 - 5 FLC 同步追蹤控制正弦波響應誤差(0.1Hz)

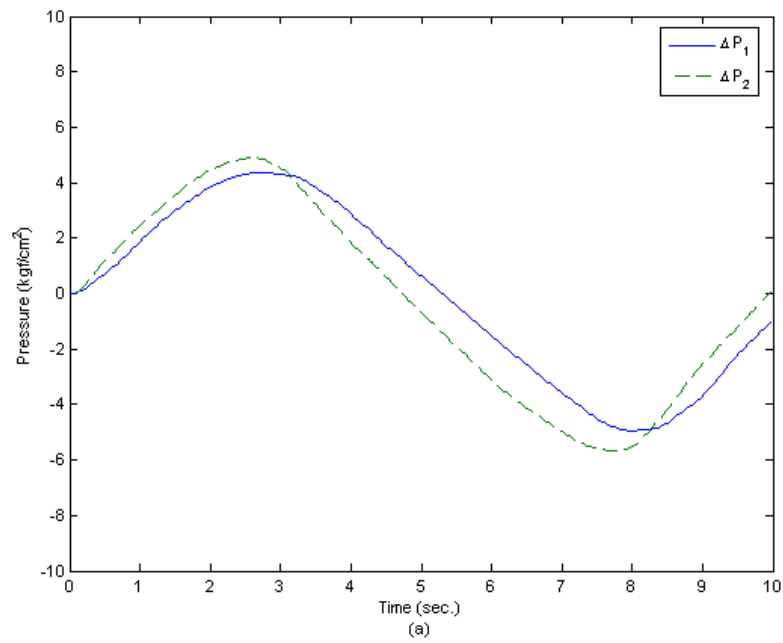


圖 4 - 6 FLC 同步追蹤控制正弦波兩關節的壓力差(0.1Hz)

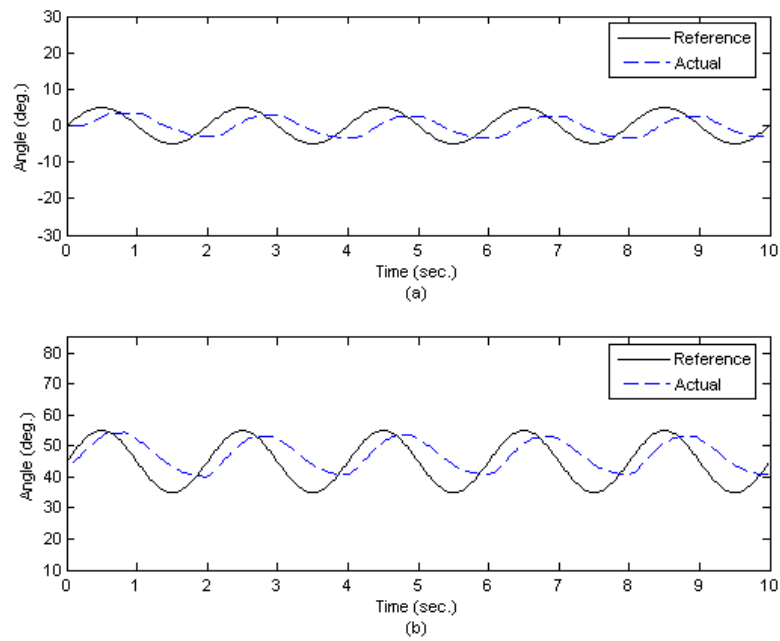


圖 4 - 7 FLC 同步追蹤控制正弦波響應(0.5Hz)

(a) q_1 、(b) q_2

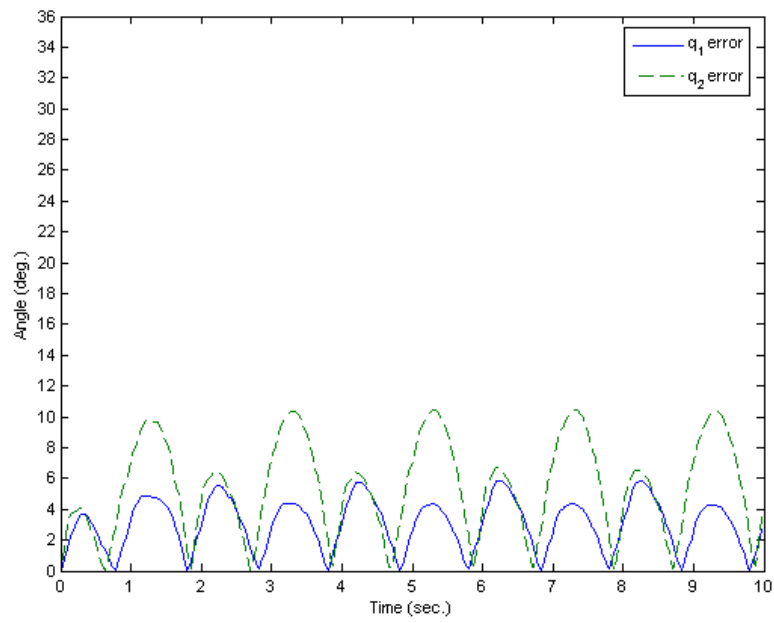


圖 4 - 8 FLC 同步追蹤控制正弦波響應誤差(0.5Hz)

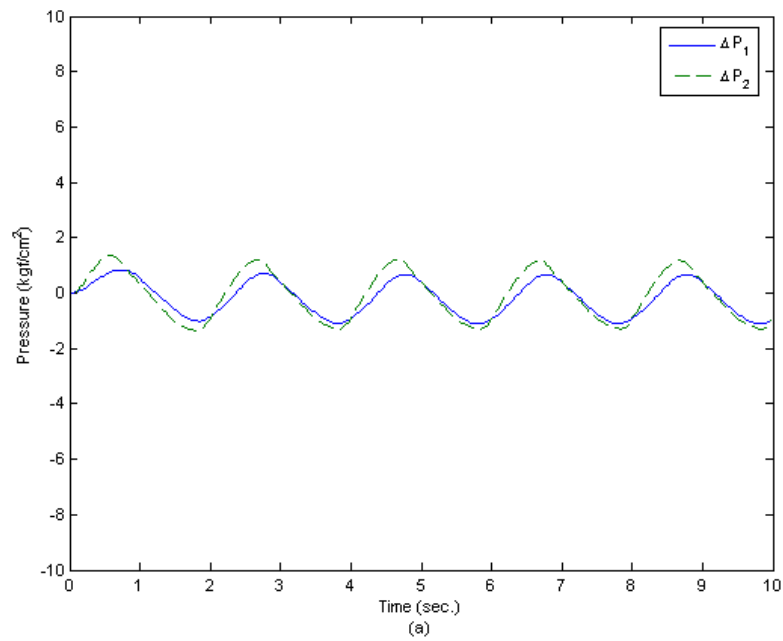


圖 4 - 9 FLC 同步追蹤控制正弦波兩關節的壓力差(0.5Hz)

4.1.2 模糊滑動模式控制器(FSMC)之實驗結果

本實驗中為了能與前面 4.1.1 節 FLC 做比較，因此選用正規化的三角型歸屬函數，等間距分成 7 個模糊子集合如表 4.2 所示；規則庫選用以單排 7 個規則，如表 4.3 所示，而解模糊化採用高度法來完成，為了使 FSMC 能適應各種參考輸入型式，本節實驗中參數設定為固定值， $G_{S_1} = 0.075$ 、 $G_{us_1} = 0.009$ 、 $G_{S_2} = 0.05$ 、 $G_{us_2} = 0.011$ 、 $\lambda_1 = 10$ 、 $\lambda_2 = 10$ 。

表 4.2 歸屬函數

S	-1	-0.66	-0.33	0	0.33	0.66	1
U	-1	-0.66	-0.33	0	0.33	0.66	1

表 4.3 模糊滑動模式初始規則表

規則中心	C_i						
q_1	-1	-0.66	-0.33	0	0.33	0.66	1
q_2	-1	-0.66	-0.33	0	0.33	0.66	1

圖 4-10 ~ 圖 4-18 為 FSMC 實際應用於兩關節角度同步控制結果。圖 4-10、圖 4-11 為兩關節同步控制之步階響應圖及誤差圖，由圖 4-10 可看出， q_1 之上升時間為 1.45 秒，而安定時間為 2.075 秒，最大超越量百分比為 1.215%，穩態誤差為 0.031° ； q_2 上升時間則為 1.275 秒，安定時間為 2 秒，超越量百分比則為 1.136%，穩態誤差小於 0.022° ，圖 4-12 為兩關節之氣壓肌肉內部壓力變化情形，4 根氣壓肌肉初始壓力皆設定為 4kgf/cm^2 。

而圖 4-13 ~ 圖 4-18 則為兩關節同步追蹤正弦波角度控制結果、誤差及壓力變化圖，其中正弦波輸入頻率分別為 0.1hz 以及 0.5hz，由圖 4-13 可看出 q_1 最大振幅誤差為 0.52° ，相位落後為 2.25° ，而 q_2 最大振幅誤差為 0.077° ，相位落後為 5.85° ，圖 4-14 為同一響應時間，參考輸入與系統實際輸出誤差圖，圖 4-15 則為兩關節壓力變化圖，可以看出其 ΔP_1 、 ΔP_2 兩關節壓力差與 q_1 、 q_2 角度變化軌跡成比例變化。圖 4-16 則是參考輸入為 0.5hz 正弦波之控制結果， q_1 最大振幅誤差為 0.88° ，相位落後 36° ， q_2 最大振幅誤差為 2.79° ，相位落後 36° ，由以上結果可發現，在結合滑動模式控制後，整體響應速度變快，控制精度也有提高的現象。

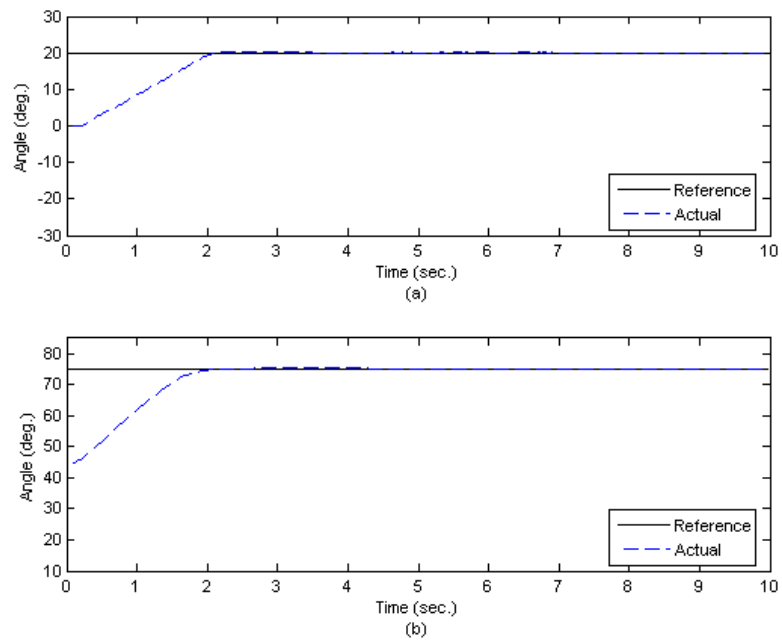


圖 4 - 10 FSMC 同步控制步階響應
(a) q_1 、(b) q_2

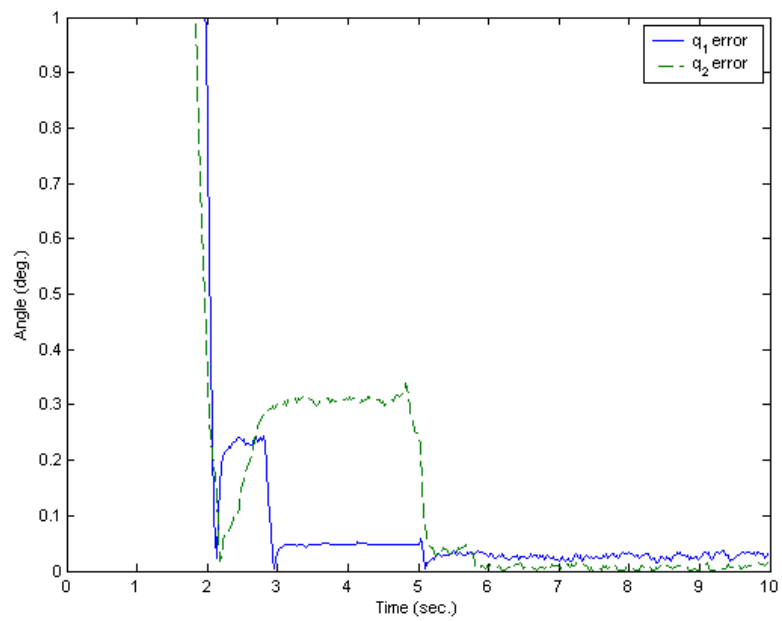


圖 4 - 11 FSMC 同步控制步階響應誤差

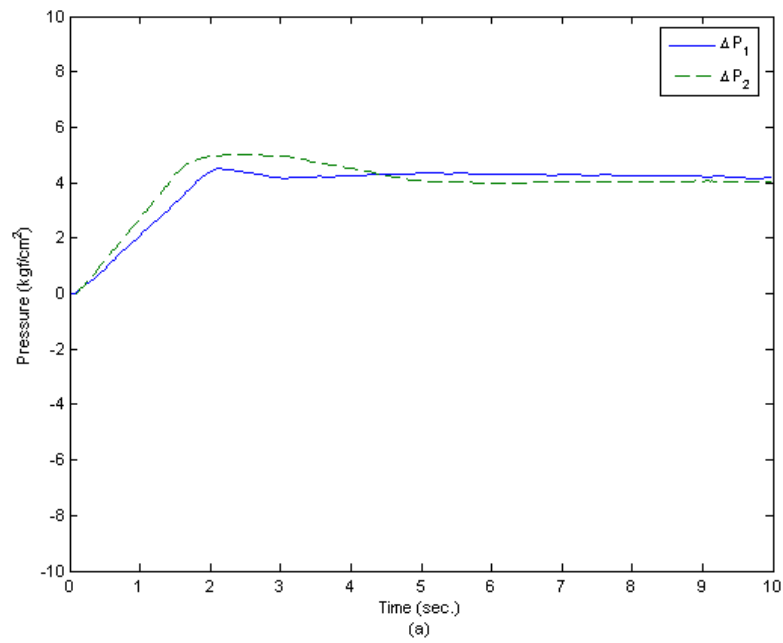


圖 4 - 12 FSMC 同步控制步階響應兩關節的壓力差

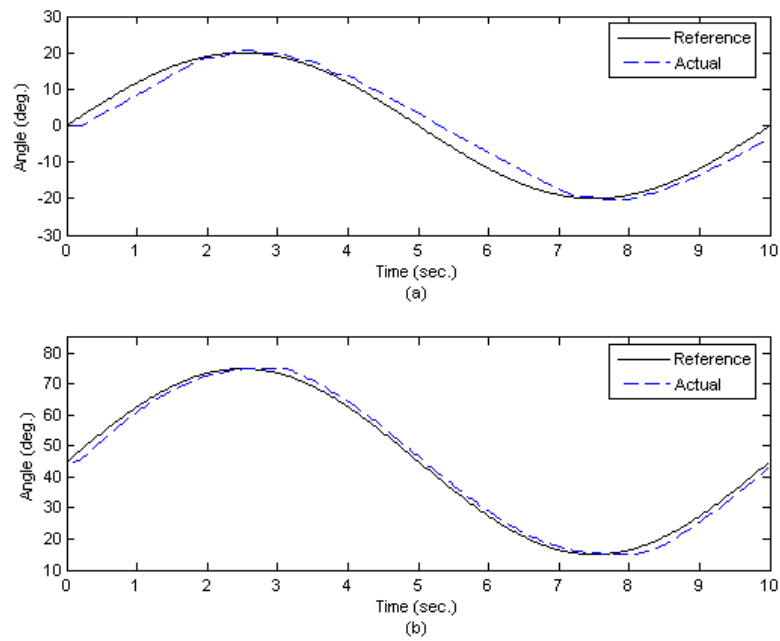


圖 4 - 13 FSMC 同步追蹤控制正弦波響應(0.1Hz)

(a) q_1 、(b) q_2

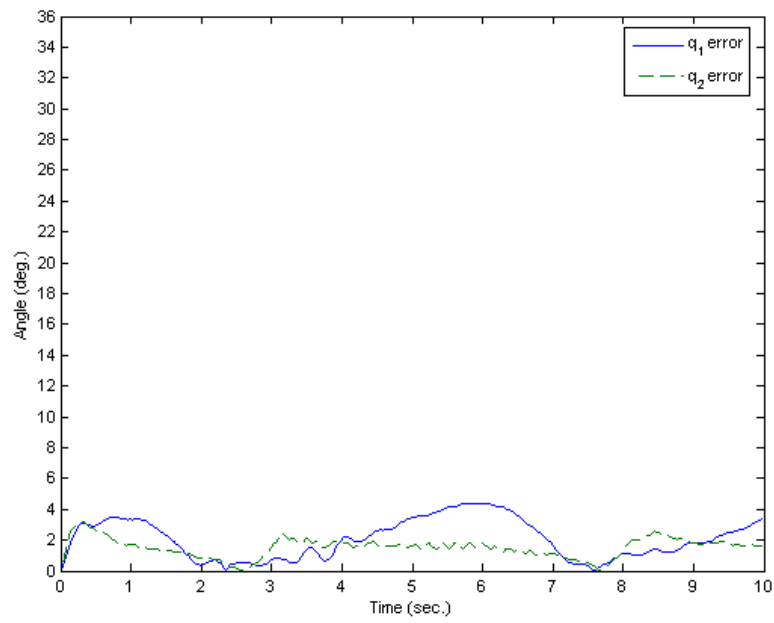


圖 4 - 14 FSMC 同步追蹤控制正弦波響應誤差(0.1Hz)

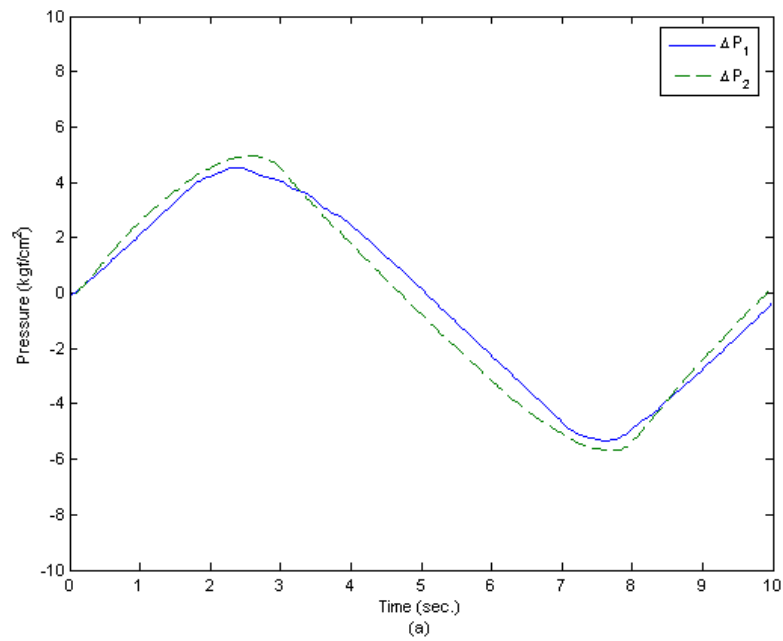


圖 4 - 15 FSMC 同步追蹤控制正弦波兩關節的壓力差(0.1Hz)

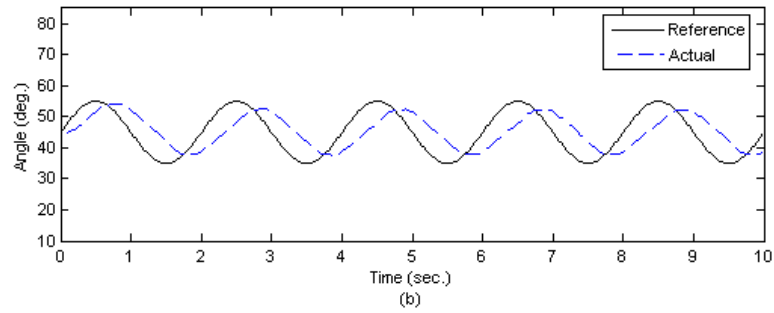
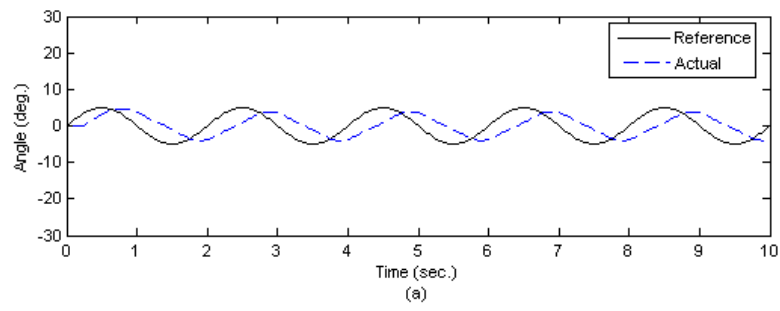


圖 4 - 16 FSMC 同步追蹤控制正弦波響應(0.5Hz)
(a) q_1 、(b) q_2

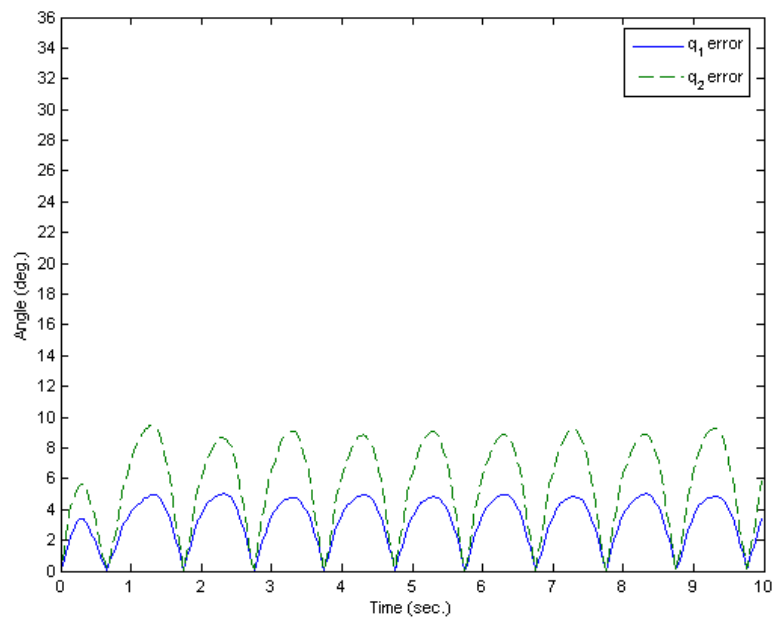


圖 4 - 17 FSMC 同步追蹤控制正弦波響應誤差(0.5Hz)

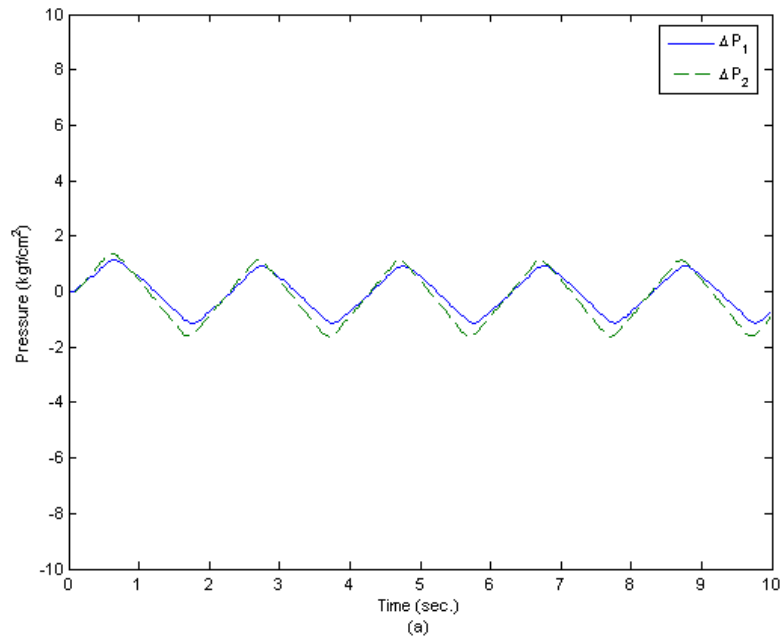


圖 4 - 18 FSMC 同步追蹤控制正弦波兩關節的壓力差(0.5Hz)

4.1.3 適應性模糊滑動模式控制器(AFSMC)之實驗結果

此節所使用之適應性模糊滑動模式控制器，主要是由前一節 FSMC 再加上一個適應模糊規則表線上調整後件部規則表中心值，進而使控制性能提高，為了使 AFSMC 能適應各種參考輸入型式，本節實驗中參數設定為固定值， $G_{S1} = 0.075$ 、 $G_{us1} = 0.009$ 、 $G_{S2} = 0.05$ 、 $G_{us2} = 0.011$ 、 $\lambda_1 = 10$ 、 $\lambda_2 = 10$ 、適應性學習率 $\gamma_{S1} = 0.00003$ 、 $\gamma_{S2} = 0.00003$ 、e-modification 參數 $k_{a1} = 0.00001$ 、 $k_{a2} = 0.00001$ 。

圖 4 - 19 ~ 圖 4 - 27 為 AFSMC 實際應用於兩關節角度同步控制結果。圖 4 - 19、圖 4 - 20 為兩關節同步控制之步階響應圖及誤差圖，由圖 4 - 19 可看出， q_1 之上升時間為 1.175 秒，而安定時間為 1.55 秒，最大超越量百分比為 1.67%，穩態誤差為 0.045° ； q_2 上升時間則為 0.95 秒，安定時間為 1.375 秒，最大超越量百分比則為 1.59%，穩態誤差小於 0.022° ，圖 4 - 21 為兩關節之氣壓肌肉內部壓力變化情形，4 根氣壓肌肉初始壓力皆設定為 4kgf/cm^2 ，一次實驗過後規則表修正情形如表 4. 4 所示，可發現其中以 C_7 規則修正幅度較大，這主要是由於起始誤差較大的關係。

而圖 4 - 22 ~ 圖 4 - 27 則為兩關節同步追蹤正弦波角度控制結果、誤差及壓力變化圖，其中正弦波輸入頻率分別為 0.1hz 以及 0.5hz，由圖 4 - 22 可看出 q_1 最大振幅誤差為 0.13° ，相位落後為 1.8° ，而 q_2 最大振幅誤差為 0.022° ，相位落後為 1.8° ，圖 4 - 23 為同一響應時間，參考輸入與系統實際輸出誤差圖，由圖中可看出整體誤差比 FSMC 來得小，圖 4 - 24 則為兩關節壓力變化圖，可以看出其 ΔP_1 、 ΔP_2 兩關節壓力差與 q_1 、 q_2 角度變化軌跡成比例變化，一次實驗過後規則表修正情形如表 4. 5 所示，其中以 C_1 與 C_7 修正較大。圖 4 - 25 則是參考輸入為 0.5hz 正弦波之控制結果， q_1 最大振幅誤差為 0.59° ，相位落後 33.75° ， q_2 最大振幅誤差為 1.92° ，相位落後 31.5° ，在經過幾次波形學習後，最終 q_1 振幅誤差可達 0.35° ，相位落後可達 20.25° ， q_2 振幅誤差可達 0.225° ，相位落後可達 20.25° ，一次實驗過後規則表修正情形如表 4. 6 所示，由以上結果可發現，在加上適應法則進行線上即時修正規則表後，其 AFSMC 整體響應的確有優於 FSMC 的表現。

表 4. 4 AFSMC 於 Step 響應修正後規則表

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1	-0.66	-0.3431	0	0.3397	0.4806	1.5615
q_2 修正後	-1	-0.6667	-0.3430	0	0.3464	0.4740	1.8651

表 4. 5 AFSMC 於 Sin0.1hz 響應修正後規則表

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1.2207	-0.6189	-0.3547	0	0.3470	0.6059	1.2544
q_2 修正後	-1.0943	-0.7008	-0.3578	0	0.3590	0.7338	1.1724

表 4. 6 AFSMC 於 Sin0.5hz 響應修正後規則表

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1.4558	-0.5233	-0.3386	0	0.3386	0.5252	1.4515
q_2 修正後	-1.6315	-0.1745	-0.3497	0	0.3483	0.5067	1.7901

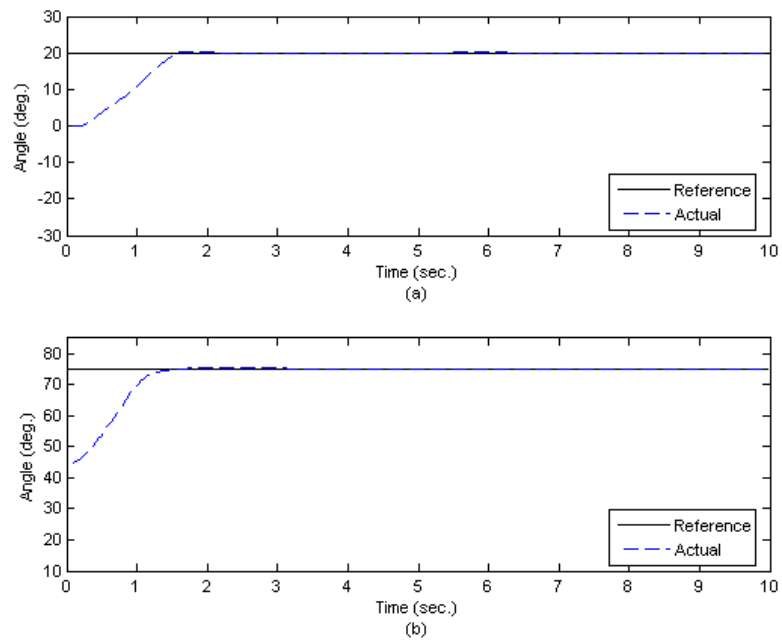


圖 4 - 19 AFSMC 同步控制步階響應
(a) q_1 、(b) q_2

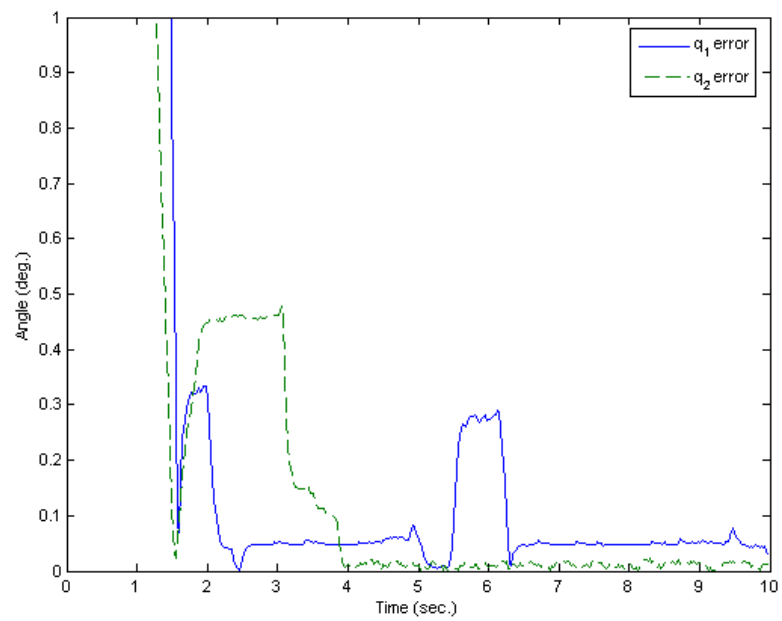


圖 4 - 20 AFSMC 同步控制步階響應誤差

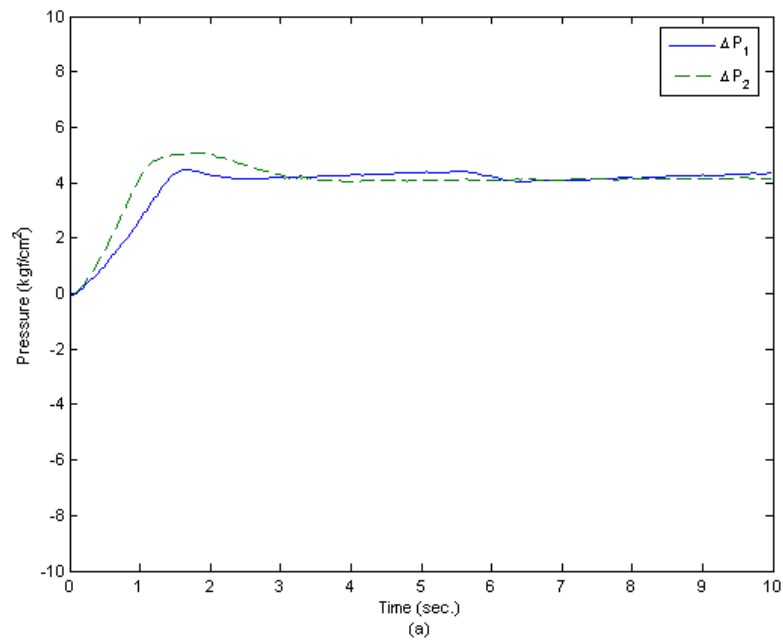


圖 4 - 21 AFSMC 同步控制步階響應兩關節的壓力差

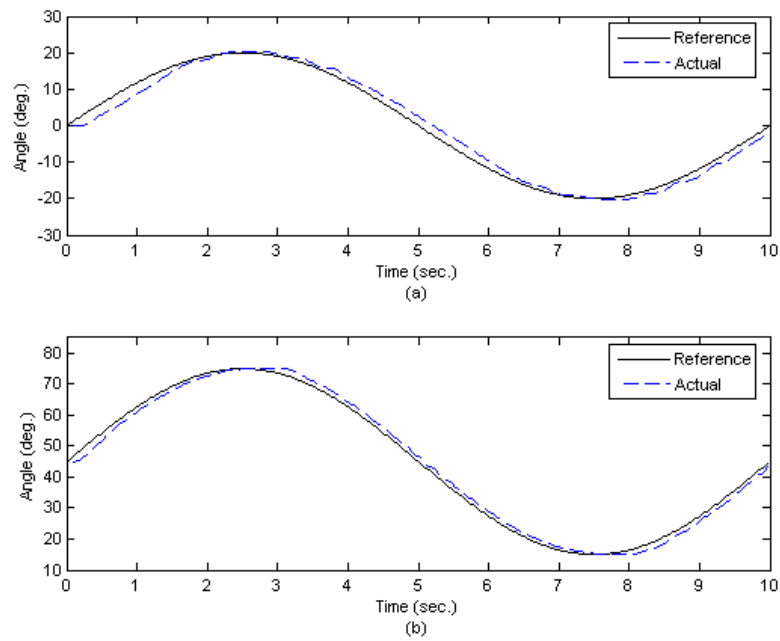


圖 4 - 22 AFSMC 同步追蹤控制正弦波響應(0.1Hz)
(a) q_1 、(b) q_2

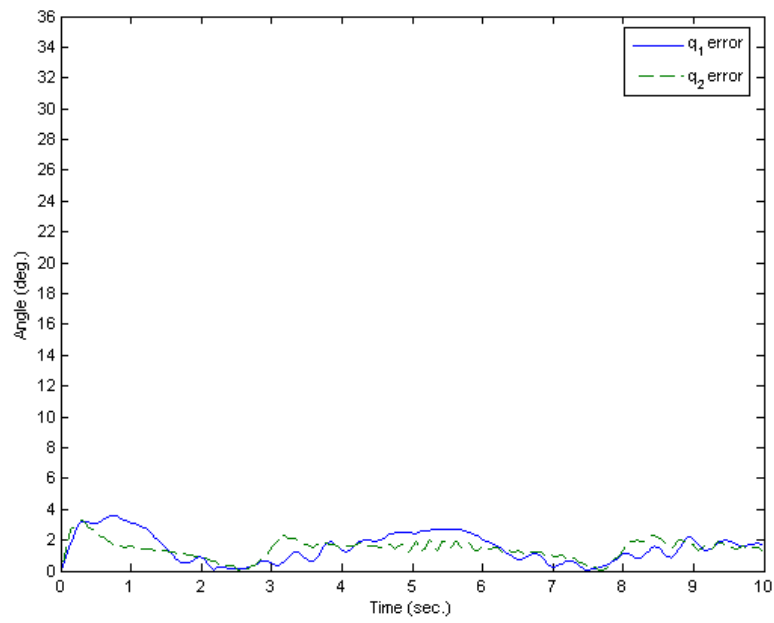


圖 4 - 23 AFSMC 同步追蹤控制正弦波響應誤差(0.1Hz)

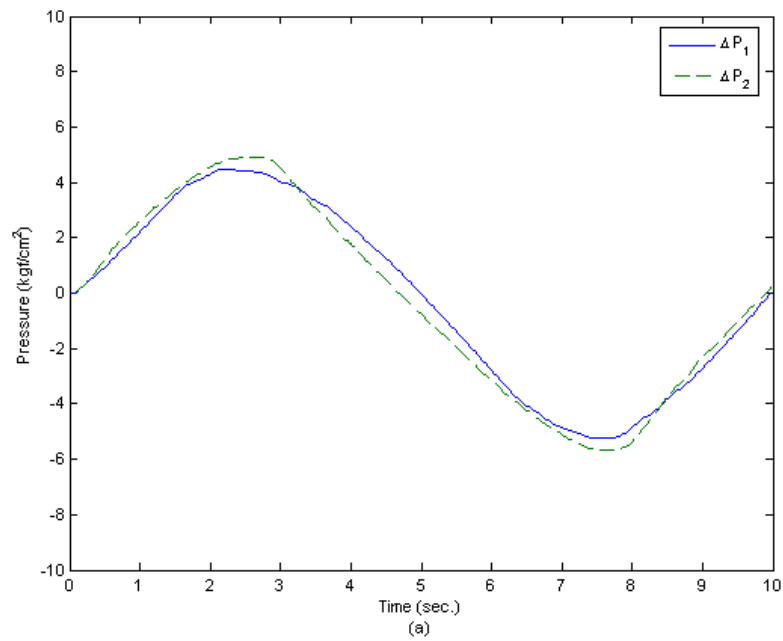


圖 4 - 24 AFSMC 同步追蹤控制正弦波兩關節的壓力差(0.1Hz)

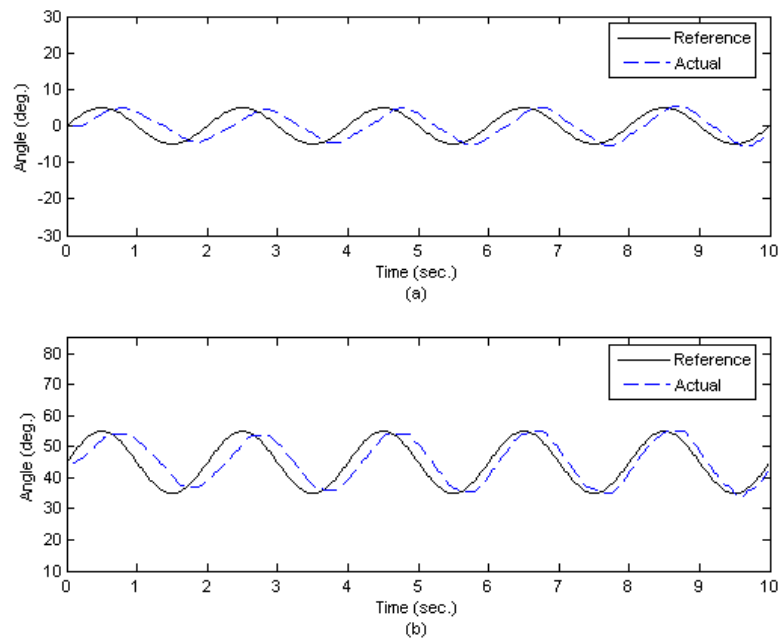


圖 4 - 25 AFSMC 同步追蹤控制正弦波響應(0.5Hz)
(a) q_1 、(b) q_2

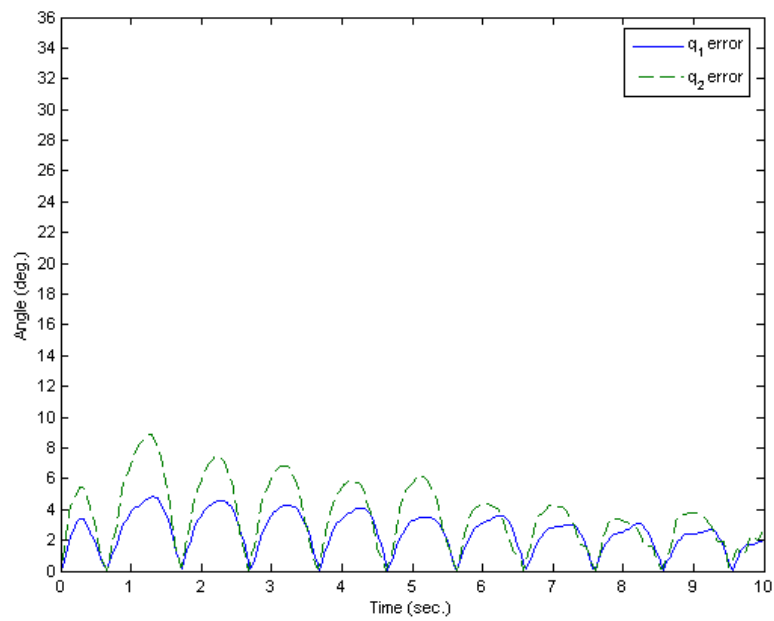


圖 4 - 26 AFSMC 同步追蹤控制正弦波響應誤差(0.5Hz)

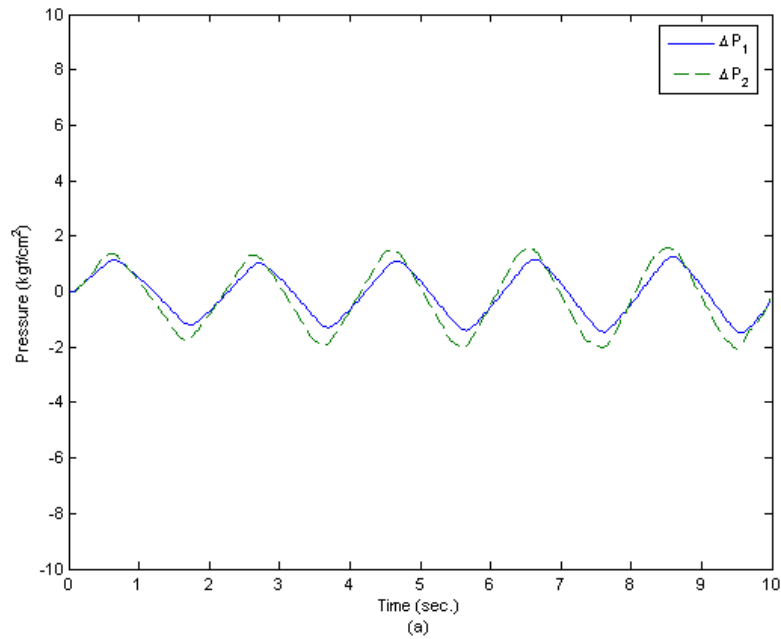


圖 4 - 27 AFSMC 同步追蹤控制正弦波兩關節的壓力差(0.5Hz)

4.1.4 結合適應比例因子之適應性模糊滑動模式控制器(AFSMC_ASF)之實驗結果

結合適應比例因子之適應性模糊滑動模式控制器(AFSMC_ASF)，主要是由前一節所使用之 AFSMC，再加上一個使用模式匹配技巧的學習機構，達到線上調整解模糊化之比例因子，同樣為了使 AFSMC_ASF 能適應各種參考輸入型式，本節實驗中參數設定為固定值， $G_{s1}=0.075$ 、 $G_{us1}=0.009$ 、 $G_{s2}=0.05$ 、 $G_{us2}=0.011$ 、 $\lambda_1=10$ 、 $\lambda_2=10$ 、適應性學習率 $\gamma_{s1}=0.00003$ 、 $\gamma_{s2}=0.00003$ 、e-modification 參數 $k_{a1}=0.00001$ 、 $k_{a2}=0.00001$ 、適應比例因子學習率 $\alpha_1=0.00003$ 、 $\alpha_2=0.00003$ 。

圖 4 - 28 ~ 圖 4 - 39 為 AFSMC_ASF 實際應用於兩關節角度同步控制結果。圖 4 - 28、圖 4 - 29 為兩關節同步控制之步階響應圖及誤差圖，由圖 4 - 28 可看出， q_1 之上升時間為 1 秒，而安定時間為 1.525 秒，最大超越量百分比為 1.4%，穩態誤差為 0.022° ； q_2 上升時間則為 0.775 秒，安定時間為 1.375 秒，最大超越量百分比則為 1.8%，穩態誤差小於 0.022° ，圖 4 - 30 為兩關節之氣壓肌肉內部壓力變化情形，4 根氣壓肌肉初始壓力皆設定為 4kgf/cm^2 ，圖 4 - 31 為 AFSMC_ASF 之比例因子修正情形，一次實驗過後規則表修正情形如表 4.7 所示。

而圖 4 - 32 ~ 圖 4 - 39 則為兩關節同步追蹤正弦波角度控制結果、誤差及壓力變化圖，其中正弦波輸入頻率分別為 0.1hz 以及 0.5hz，由圖 4 - 32 可看出 q_1 最大振幅誤差為 0.08° ，相位落後為 0° ，而 q_2 最大振幅誤差小於 0.022° ，相位落後為 0° ，圖 4 - 33 為同一響應時間，參考輸入與系統實際輸出誤差圖，由圖中可看出整體誤差比 AFSMC 來得小，圖 4 - 34 則為兩關節壓力變化圖，可以看出其 ΔP_1 、 ΔP_2 兩關節壓力差與 q_1 、 q_2 角度變化軌跡成比例變化，圖 4 - 35 為 AFSMC_ASF 之比例因子修正情形，由圖中也可看出修正的軌跡與參考輸入成比例變化，一次實驗過後規則表修正情形如表 4.8 所示。圖 4 - 36 則是參考輸入為 0.5hz 正弦波之控制結果， q_1 最大振幅誤差為 0.61° ，相位落後 31.5° ， q_2 最大振幅誤差為 2° ，相位落後 31.5° ，在經過幾次波形學習後，最終 q_1 振幅誤差可達 0.35° ，相位落後可達 20.25° ， q_2 振幅誤小於 0.022° ，相位落後可達 20.25° ，一次實驗過後規則表修正情形如表 4.9 所示。由以上結果可發現，在加上適應比例因子進行線上即時修正 Gu 後，其整體響應與無修正比例因子之 AFSMC_ASF 並太大差異，這主要是由於 Gu 已設定為最佳值，故修正幅度不大。

表 4.7 AFSMC_ASF 於 Step 響應修正後規則表

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1	-0.6667	-0.3396	0	0.3342	0.4852	1.5472
q_2 修正後	-1	-0.6667	-0.3369	0	0.3379	0.4777	1.8364

表 4.8 AFSMC_ASF 於 Sin0.1hz 響應修正後規則表

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1.2074	-0.6268	-0.3491	0	0.3426	0.6115	1.2395
q_2 修正後	-1.1525	-0.6373	-0.3630	0	0.3624	0.7399	1.1540

表 4.9 AFSMC_ASF 於 Sin0.5hz 響應修正後規則表

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1.4575	-0.5227	-0.3383	0	0.3389	0.5271	1.4480
q_2 修正後	-1.6487	-0.1514	-0.3506	0	0.3476	0.5086	1.7845

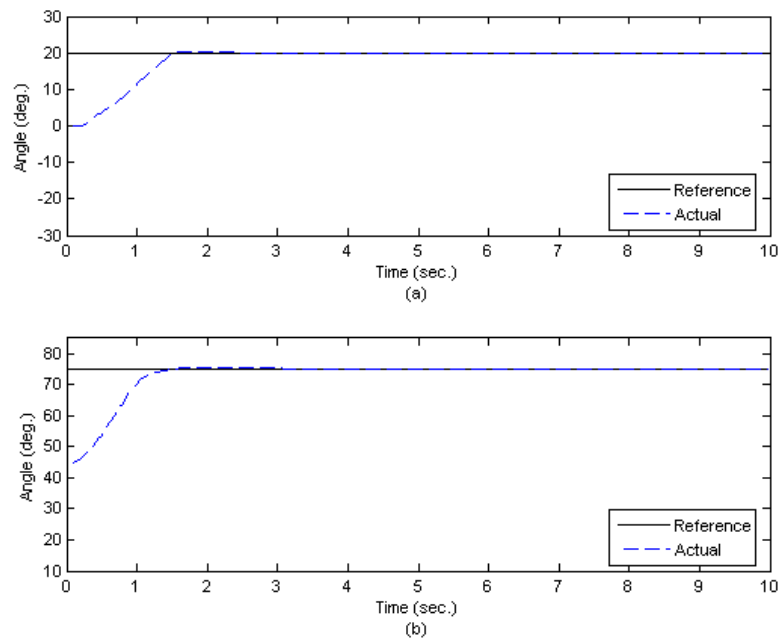


圖 4 - 28 AFSMC_ASF 同步控制步階響應
(a) q_1 、(b) q_2

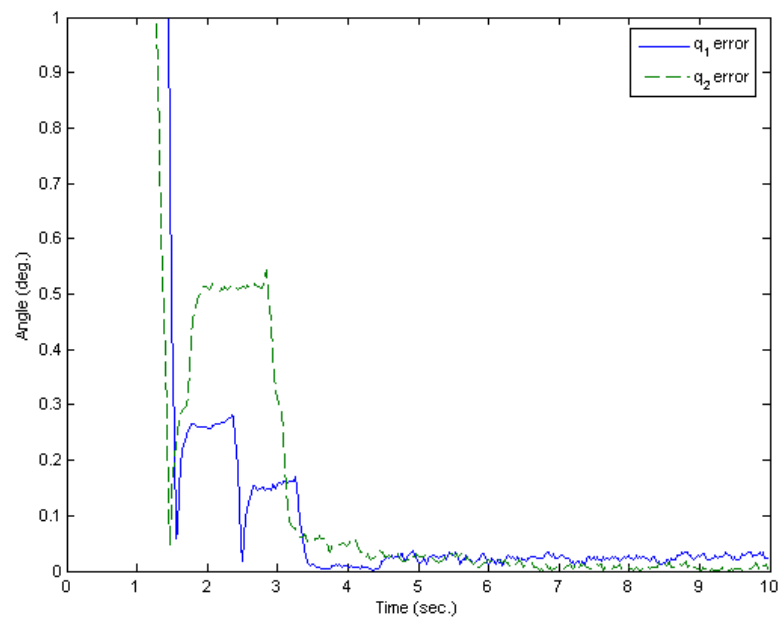


圖 4 - 29 AFSMC_ASF 同步控制步階響應誤差
(a) q_1 、(b) q_2

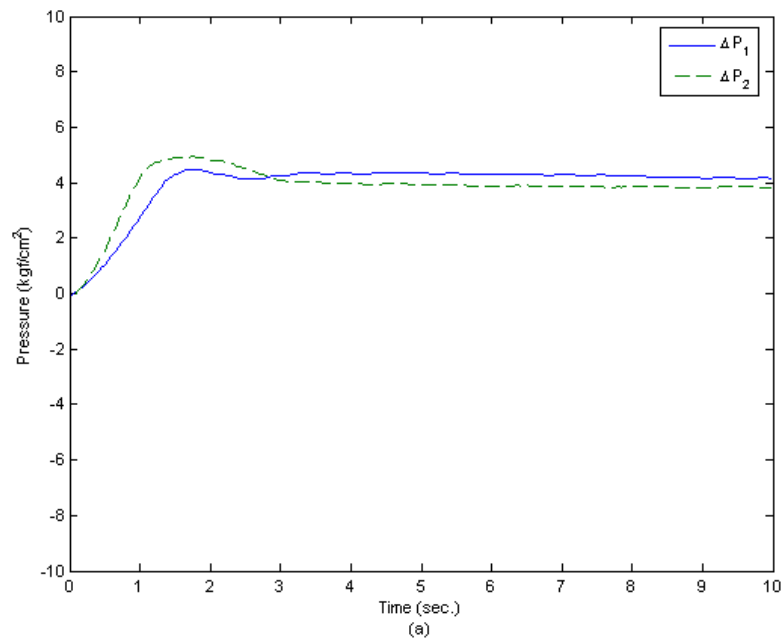


圖 4 - 30 AFSMC_ASF 同步控制步階響應兩關節的壓力差

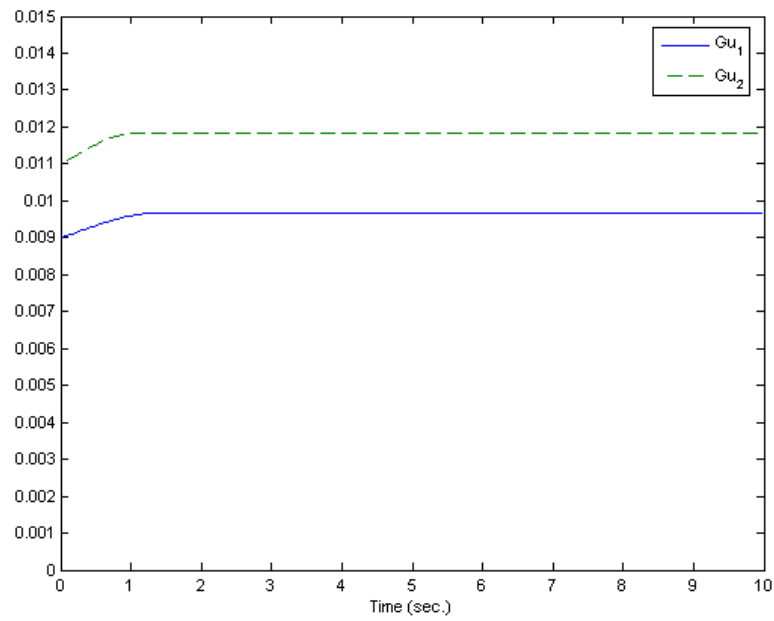


圖 4 - 31 AFSMC_ASF 同步控制步階響應 G_u 變化情形

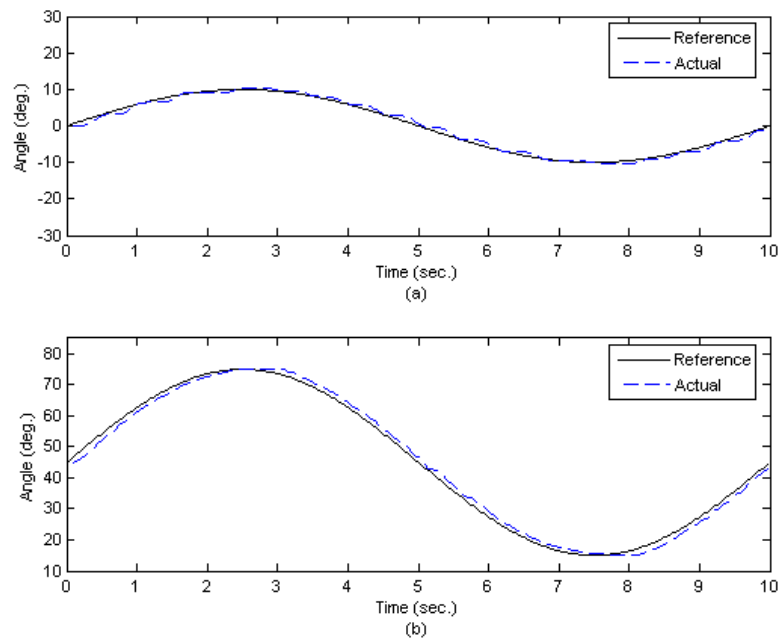


圖 4 - 32 AFSMC_ASF 同步追蹤控制正弦波響應(0.1Hz)
(a) q_1 、(b) q_2

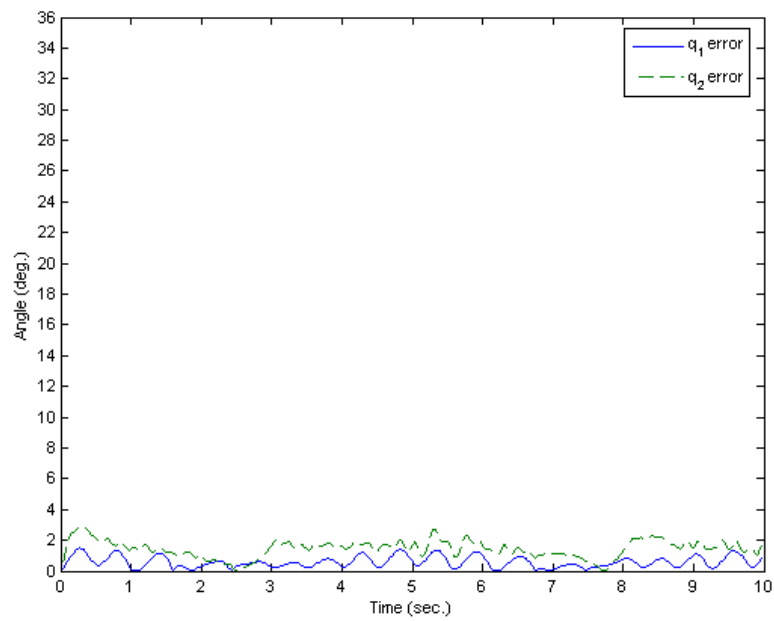


圖 4 - 33 AFSMC_ASF 同步追蹤控制正弦波響應誤差(0.1Hz)

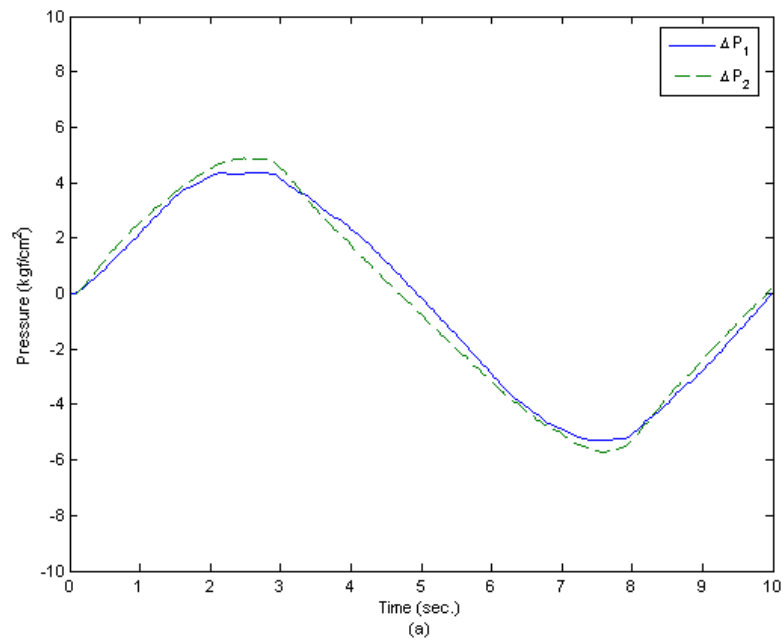


圖 4 - 34 AFSMC_ASF 同步追蹤控制正弦波兩關節的壓力差(0.1Hz)

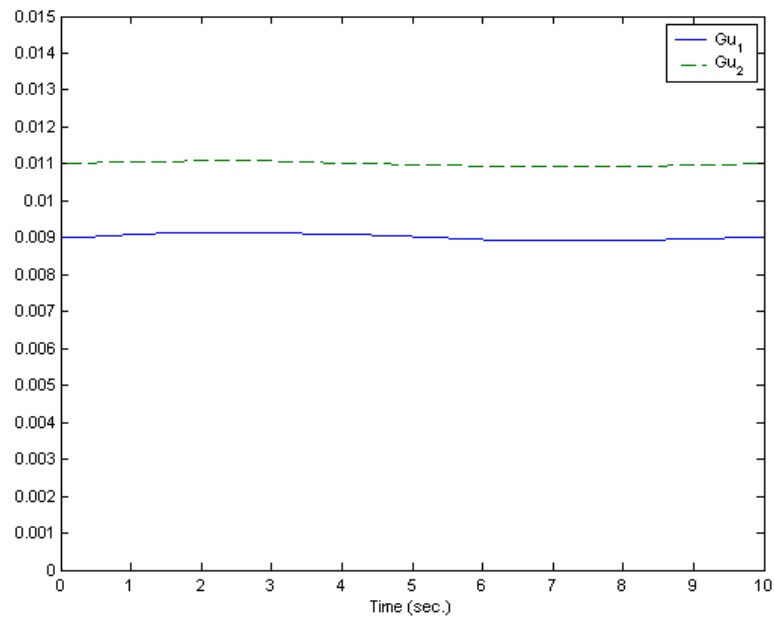


圖 4 - 35 AFSMC_ASF 同步追蹤控制正弦波 Gu 變化情形(0.1Hz)

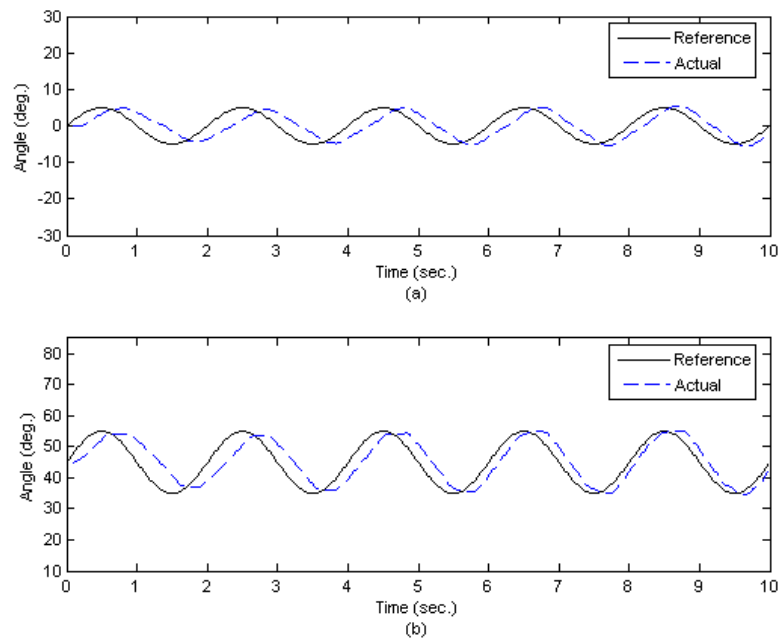


圖 4 - 36 AFSMC_ASF 同步追蹤控制正弦波響應(0.5Hz)
(a) q_1 、(b) q_2

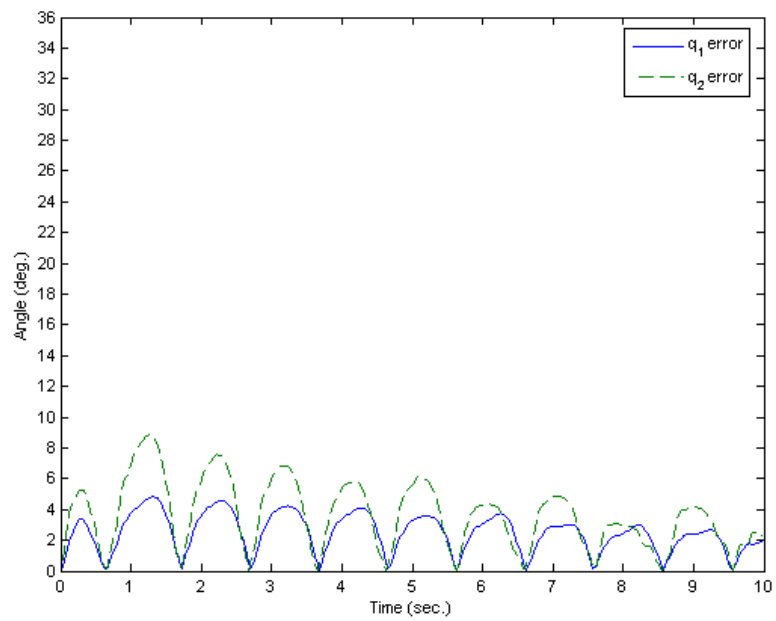


圖 4 - 37 AFSMC_ASF 同步追蹤控制正弦波響應誤差(0.5Hz)

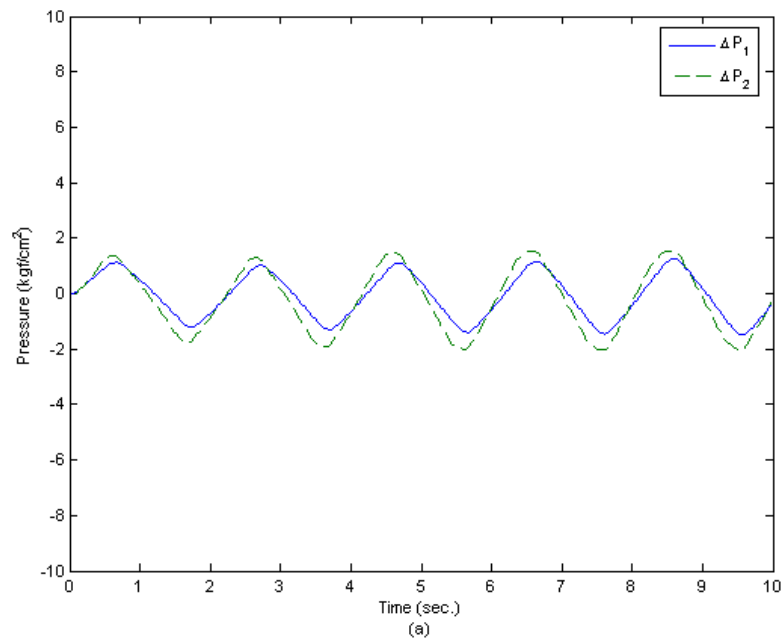


圖 4 - 38 AFSMC_ASF 同步追蹤控制正弦波兩關節的壓力差(0.5Hz)

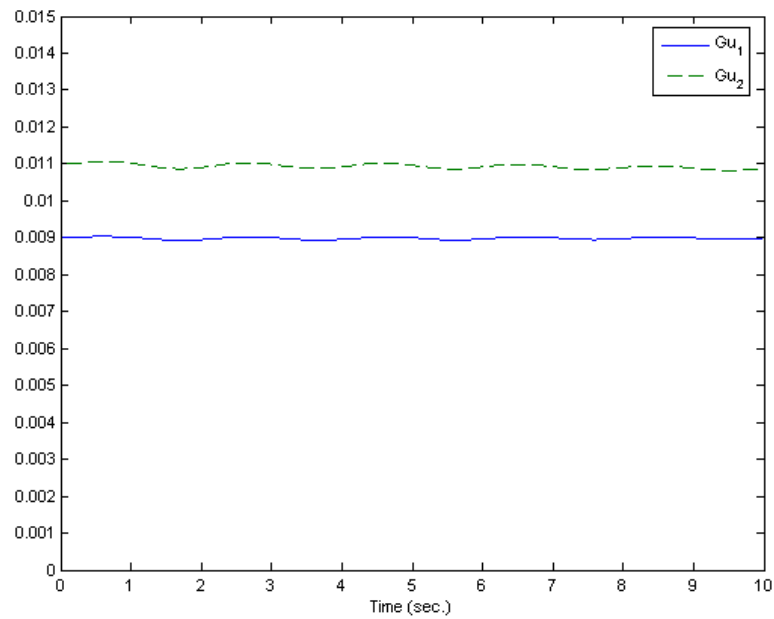


圖 4 - 39 AFSMC_ASF 同步追蹤控制正弦波 Gu 變化情形(0.5Hz)

4.1.5 小結

本節主要是將 4.1.1 ~ 4.1.4 小節所做的各種實驗結果，一一整理並比較各個控制器性能。

一般控制器比較其性能不外乎是看暫態或穩態的結果，如：上升時間、安定時間、穩態誤差、最大超越量等。

表 4.10 為比較各控制器的性能，此表是針對步階與正弦波角度追蹤的控制效果。

表 4.10 控制性能比較表 1

<div> <div>performance</div> <div>controller</div> </div>			FLC	FSMC	AFSMC	AFSMC_ASF
Step	上升時間 (sec.)	q_1	1.575	1.45	1.175	1
		q_2	1.65	1.275	0.95	0.775
	安定時間 (sec.)	q_1	2.825	2.075	1.55	1.525
		q_2	2.375	2	1.375	1.375
	最大超越量 (%)	q_1	0.8	1.215	1.67	1.4
		q_2	0.3	1.136	1.59	1.8
	穩態誤差 (deg.)	q_1	0.27	0.031	0.045	0.022
		q_2	0.24	< 0.022	< 0.022	< 0.022
Sin (0.1hz)	最大振幅誤差 (deg.)	q_1	1.18	0.52	0.13	0.08
		q_2	0.25	0.077	0.022	< 0.022
	相位落後(deg.)	q_1	18	2.25	1.8	0
		q_2	12.15	5.85	1.8	0
Sin (0.5hz)	最大振幅誤差 (deg.)	q_1	1.93	0.88	0.35	0.35
		q_2	5.17	2.79	0.22	0.07
	相位落後(deg.)	q_1	54	36	20.25	20.25
		q_2	42.75	36	20.25	20.25

(Resolution : 0.022°)

由表中可以看出傳統模糊控制器(FLC)整體控制性能較差，也可看出模糊滑動模式控制器(FSMC)，響應明顯優於 FLC，控制精度也較高，而另二種具有自我學習功能的控制器，其控制性能皆不錯，此外強健性也都優於另二種不具自我學習功能的控制器。

4.2 二自由度軌跡追蹤控制

此節主要是利用第二章所推導出之四個路徑軌跡，作為實驗的參考輸入，控制器部份則是使用傳統模糊控制器(FLC)、模糊滑動模式控制器(FSMC)適應性模糊滑動模式控制器(AFSMC)以及結合適應比例因子之適應性模糊控制器(AFSMC_ASF)，並比較其控制性能。四個路徑分別為鉛錘線路徑、水平線路徑、圓形路徑以及曲線路徑，其中鉛錘線路徑分別進行響應時間為 20 秒以及響應時間為 5 秒兩組實驗；水平線路徑也同樣進行響應時間為 20 秒以及響應時間為 5 秒兩組實驗；其中，圓形路徑以及曲線路徑因關節角度改變幅度較大，經實驗結果發現，響應時間 5 秒已超出系統本身作動速度，因此改為響應時間為 20 秒以及響應時間為 6 秒兩組實驗。而空間軌跡追蹤誤差定義如下

$$|e| = \sqrt{(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2} \quad (4.3)$$

其中

x_d 為 X 方向的期望位置

x 為 X 方向的實際位置

y_d 為 Y 方向的期望位置

y 為 Y 方向的實際位置

4.2.1 傳統模糊控制器(FLC)之實驗結果

圖 4 - 40 ~ 圖 4 - 43 為 FLC 應用於響應時間為 20 秒之鉛錘線路徑追蹤結果，控制參數設定與 4.1 節相同，並藉此比較控制器之強健性，由圖 4 - 40 及圖 4 - 41 可觀察出，其 X 方向位置追蹤誤差，最大誤差值為 13 mm，誤差平均值為 4.5 mm，圖 4 - 42 為透過逆向運動所計算出的兩關節角度之追蹤誤差圖，由圖中可看出 q_1 的誤差明顯大於 q_2 ，最大角度誤差分別為， 1.61° 和 0.81° 。圖 4 - 43 則為兩關節氣壓肌肉內部壓力差變化曲線圖。圖 4 - 44 ~ 圖 4 - 47 為響應時間縮短為 5 秒後，FLC 之控制結果，由圖 4 - 44 結果可看出，當響應時間縮短為 5 秒後，FLC 追蹤誤差有變大的趨勢，其 X 方向位置追

蹤誤差，最大誤差值為 28.3 mm，誤差平均值為 12.8 mm，另外從圖 4 - 46 也可看出 q_1 及 q_2 角度誤差分別達到 5.16° 及 2.59° ，角度誤差平均值為 0.2789° 、 0.1952° ，此外也可由圖 4 - 43 及圖 4 - 47 觀察出，兩種響應時間的壓力差變化曲線也有些許不同，可發現當響應時間為 5 秒的狀況下，壓力差變化較為平滑，這主要是由於當響應時間縮短後，其氣壓肌肉彈性變形較不明顯的緣故。

圖 4 - 48 ~ 圖 4 - 51 為響應時間 20 秒，FLC 水平線軌跡追蹤結果，Y 方向位置最大誤差為 21.6 mm，平均誤差為 7.1 mm，兩關節角度最大誤差， q_1 為 0.2213° ， q_2 為 0.1791° 。圖 4 - 52 ~ 圖 4 - 55 則是響應時間縮短為 5 秒之追蹤結果，圖 4 - 53 可看出，最大 Y 方向位置誤差已達 50.2 mm，整體平均誤差也有 26.3 mm，而兩關節角度最大誤差， q_1 為 2.9683° ， q_2 為 4.6575° ，由此可知， q_2 響應速度明顯不足。

圖 4 - 56 ~ 圖 4 - 63 為 FLC 之圓形路徑追蹤結果，一樣可以看出當響應時間縮短為 6 秒後，追蹤結果並不理想，當響應時間為 20 秒時，平均追蹤誤差為 17.5 mm，最大誤差為 33.4 mm，響應時間縮短為 6 秒後，其平均追蹤誤差為 42.7 mm，最大誤差為 78.5 mm，差異相當大。

圖 4 - 64 ~ 圖 4 - 71 為 FLC 追蹤曲線路徑結果，由圖 4 - 64 可看出其追蹤誤差集中於前 10 秒，這主要是由於前 10 秒兩關節角度變化較大，故造成較大的誤差，其最大誤差為 48.2 mm，另外由圖 4 - 66 也可看出，主要誤差來自於 q_1 角度追蹤的誤差，當響應縮短為 6 秒後，由圖 4 - 69 可看出，產生了 122.7 mm 最大追蹤誤差，其 q_1 角度追蹤的誤差也達 5.8023°

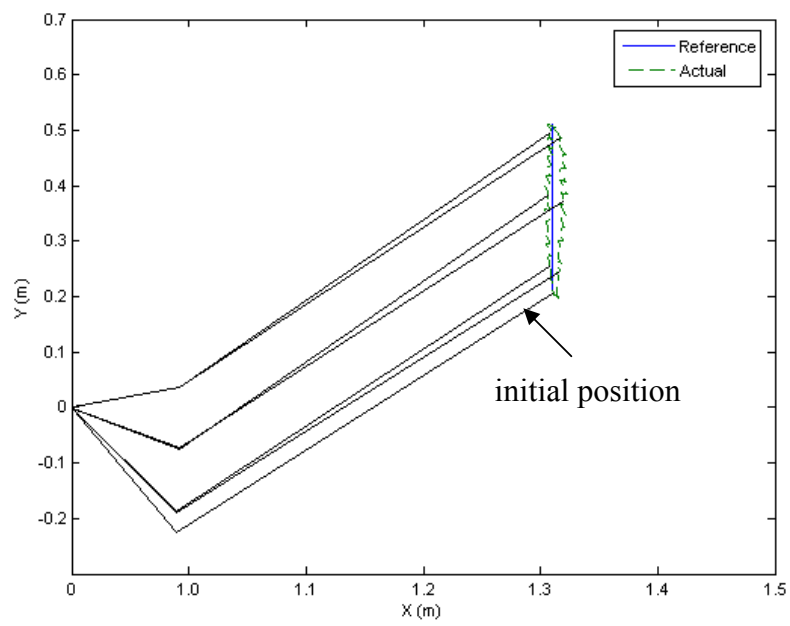


圖 4 - 40 FLC 鉛錘線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：20 秒)

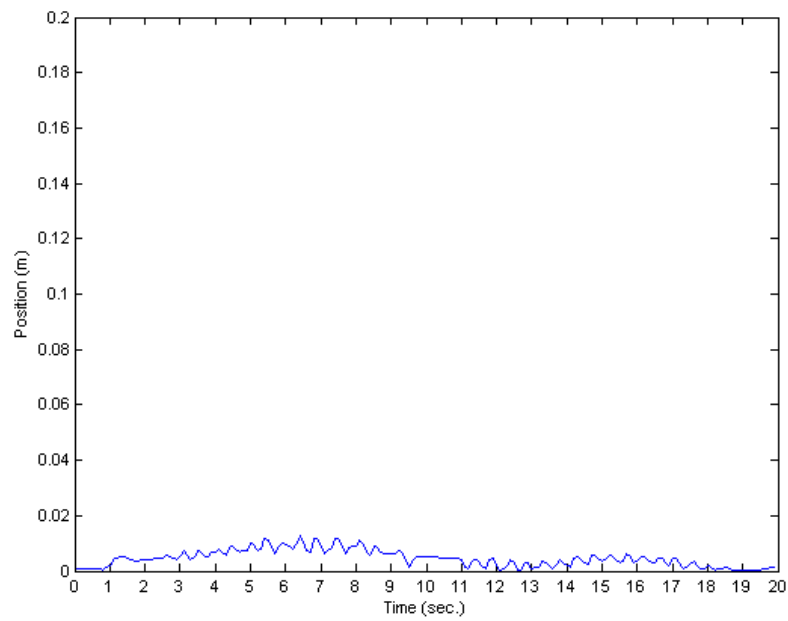


圖 4 - 41 FLC 鉛錘線路徑軌跡追蹤誤差(X 方向)
(響應時間：20 秒)

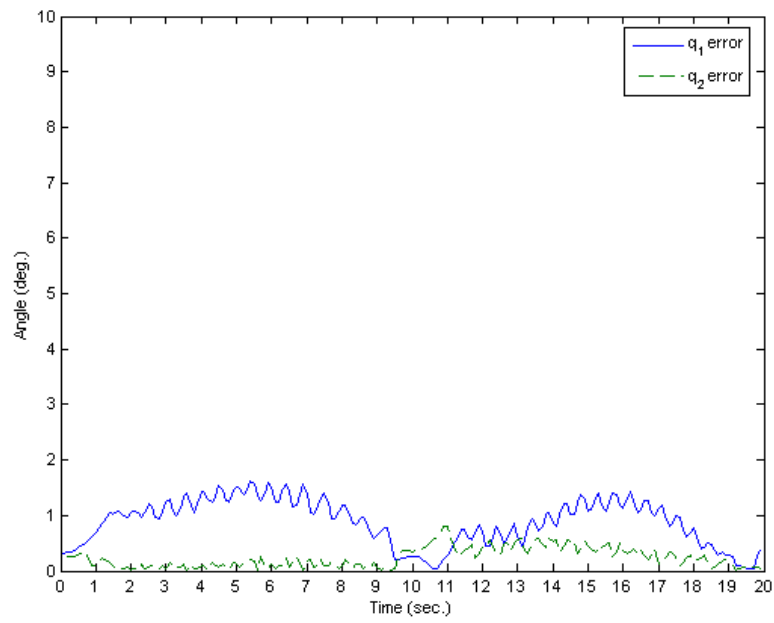


圖 4 - 42 FLC 鉛錘線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

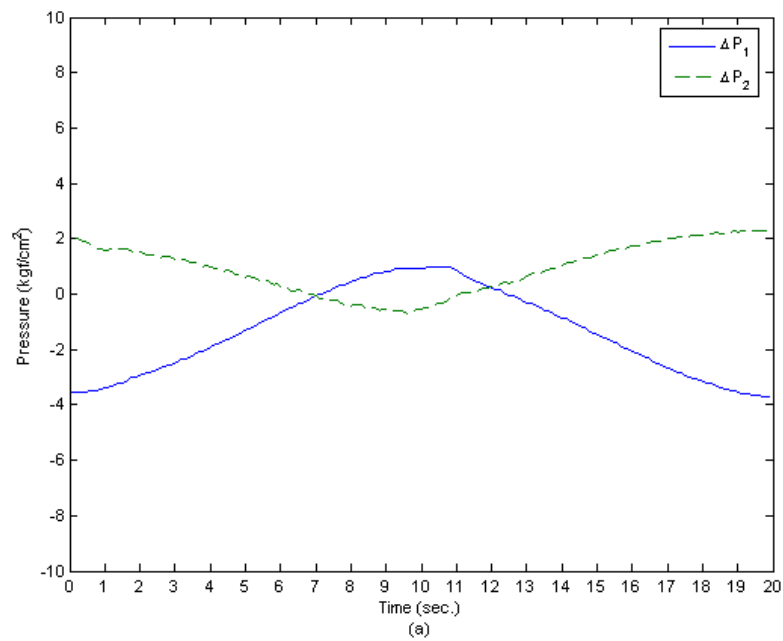


圖 4 - 43 FLC 鉛錘線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：20 秒)

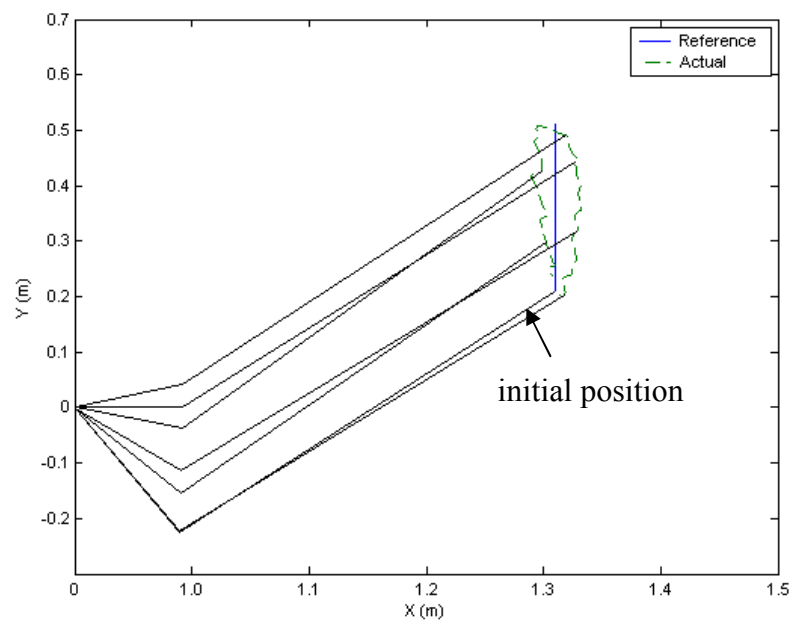


圖 4 - 44 FLC 鉛錘線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：5 秒)

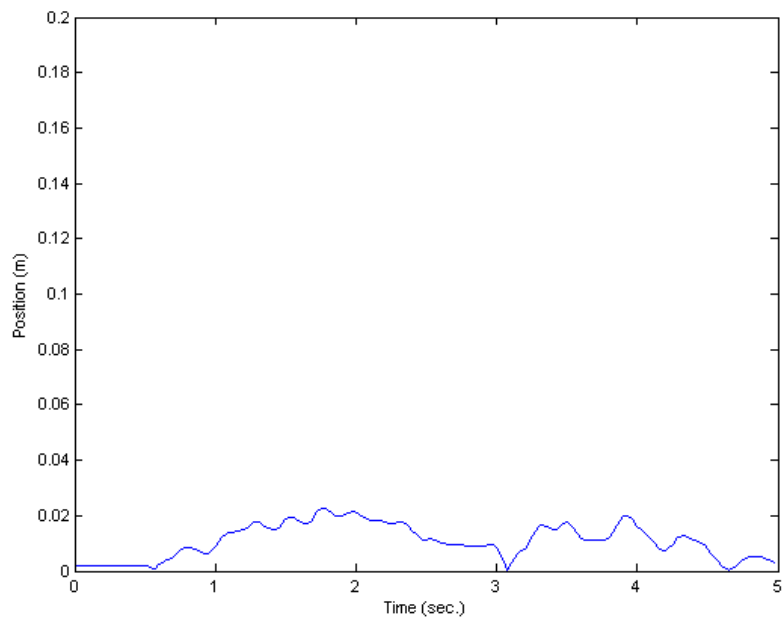


圖 4 - 45 FLC 鉛錘線路徑軌跡追蹤誤差(X 方向)
(響應時間：5 秒)

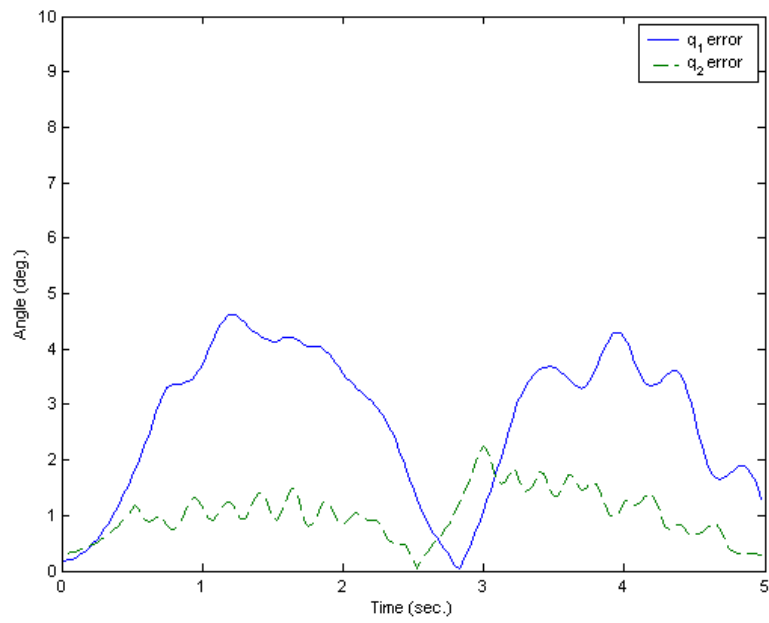


圖 4 - 46 FLC 鉛錘線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：5 秒)

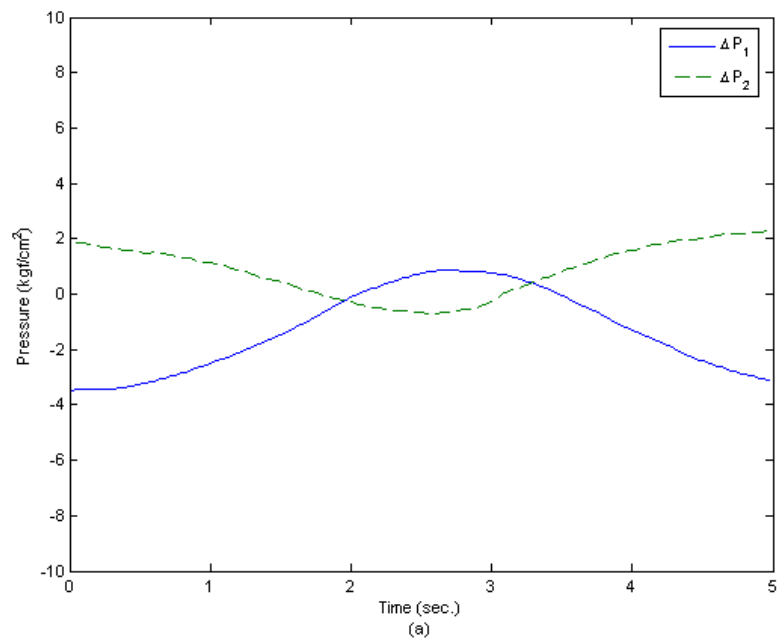


圖 4 - 47 FLC 鉛錘線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：5 秒)

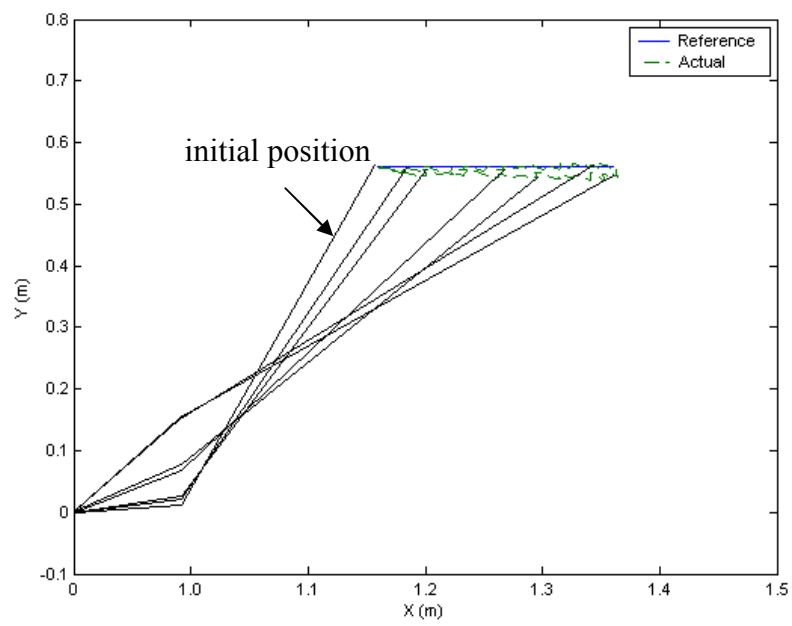


圖 4 - 48 FLC 水平線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：20 秒)

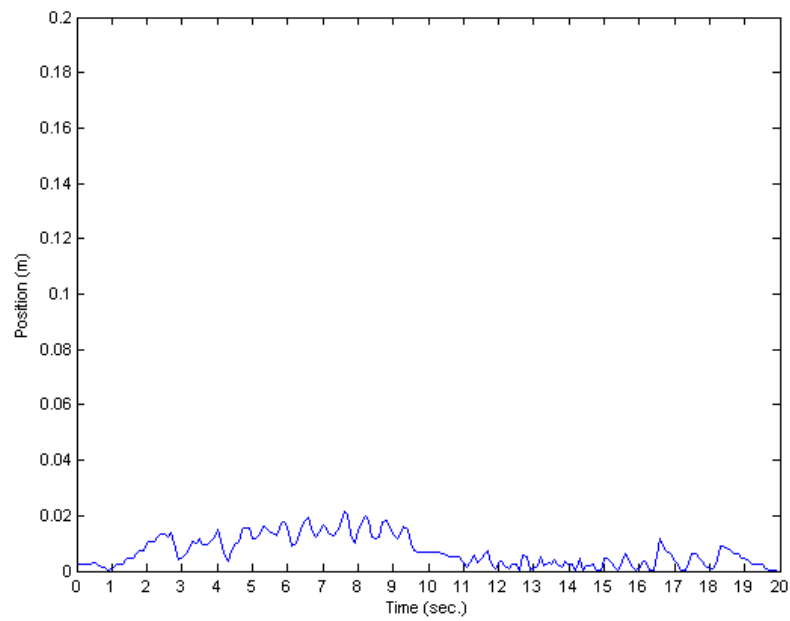


圖 4 - 49 FLC 水平線路徑軌跡追蹤誤差(Y 方向)
(響應時間：20 秒)

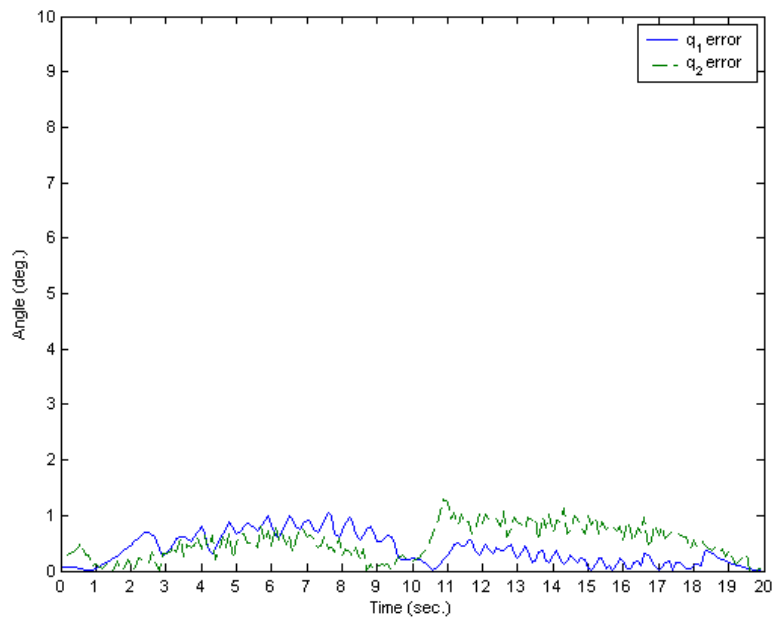


圖 4 - 50 FLC 水平線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

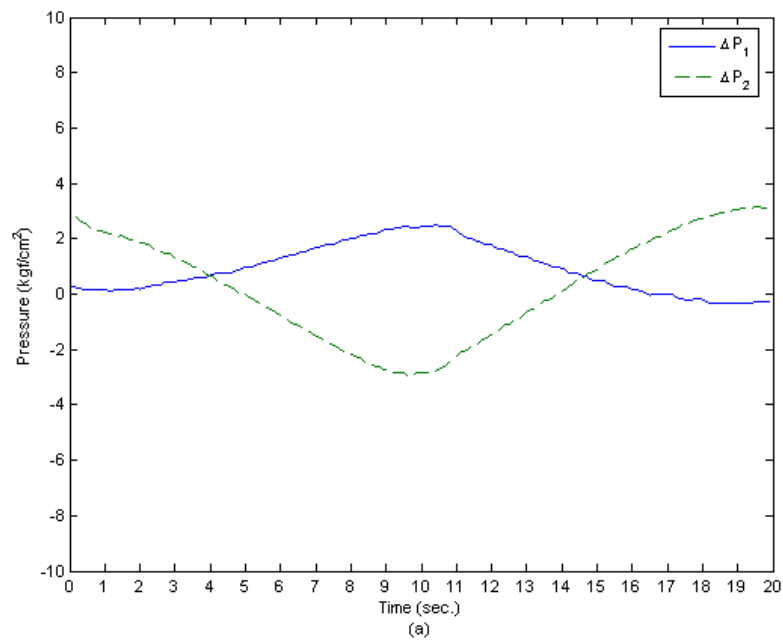


圖 4 - 51 FLC 水平線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：20 秒)

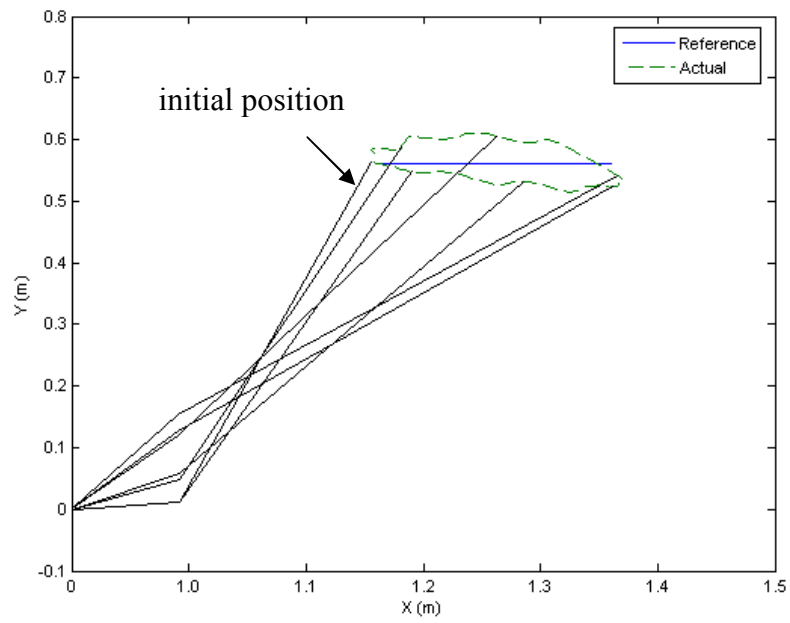


圖 4 - 52 FLC 水平線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：5 秒)

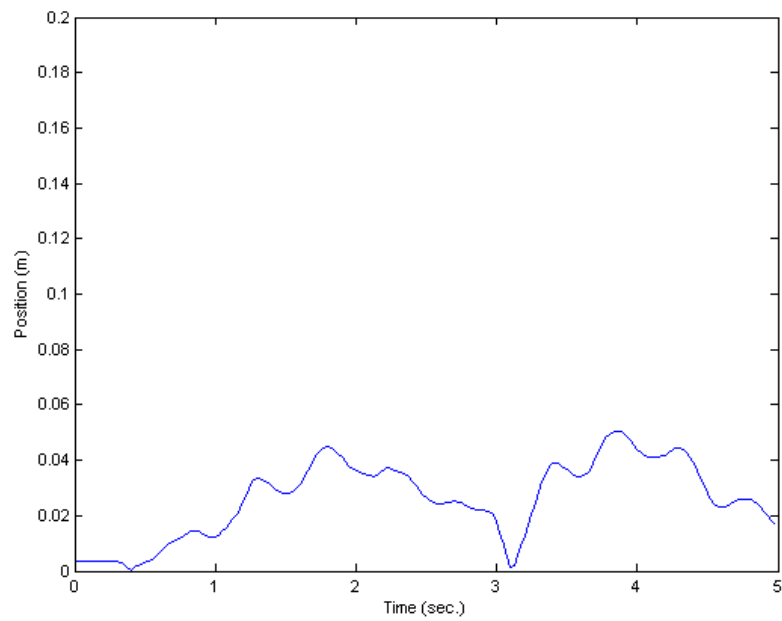


圖 4 - 53 FLC 水平線路徑軌跡追蹤誤差(Y 方向)
(響應時間：5 秒)

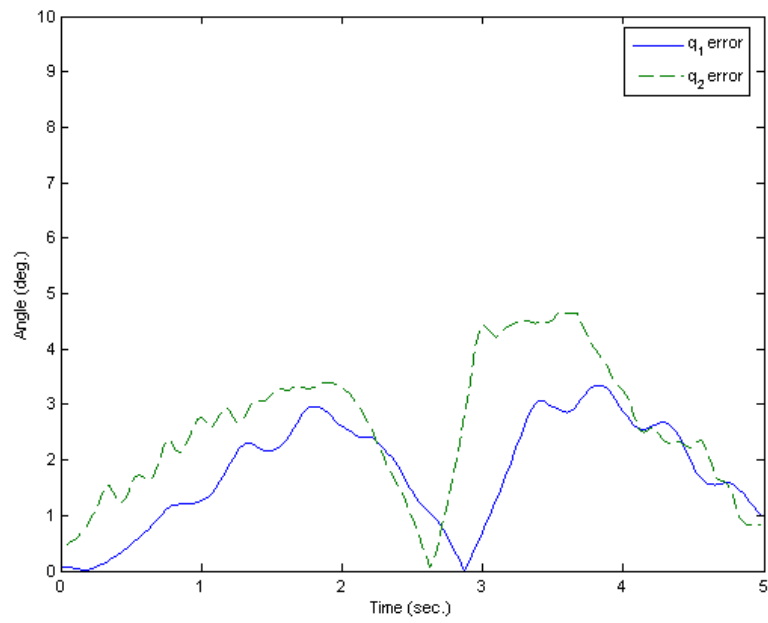


圖 4 - 54 FLC 水平線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：5 秒)

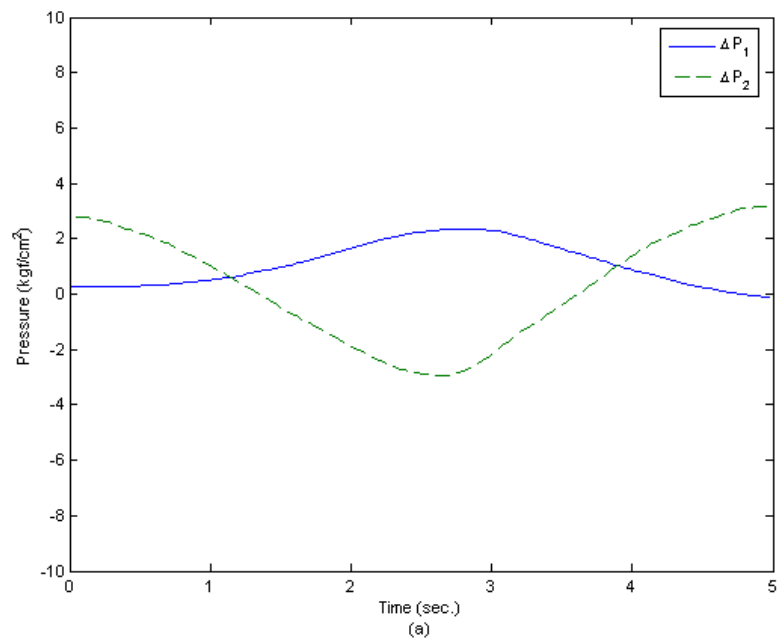


圖 4 - 55 FLC 水平線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：5 秒)

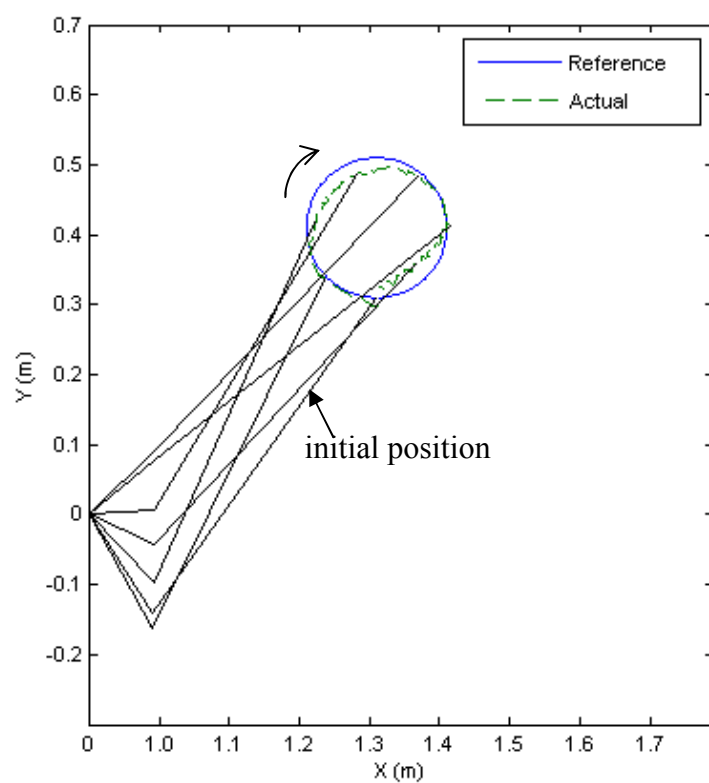


圖 4 - 56 FLC 圓形路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：20 秒)

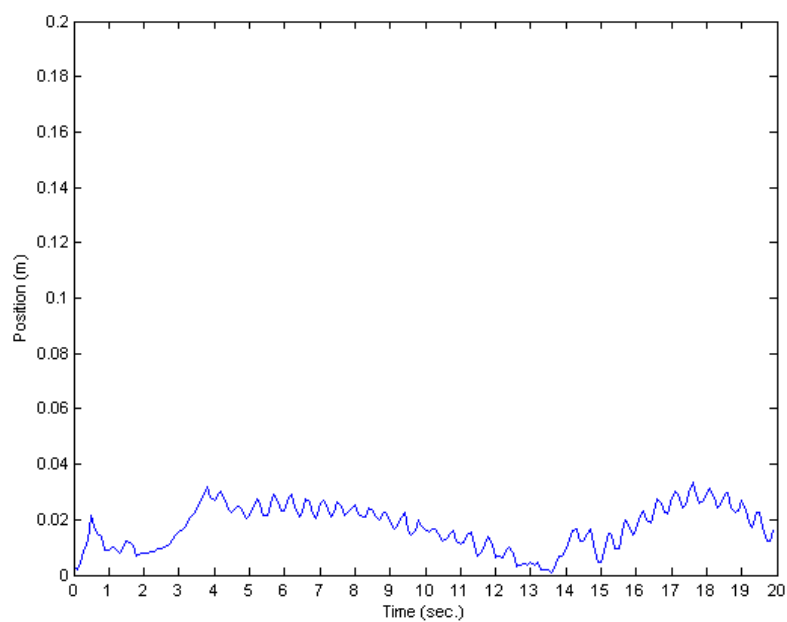


圖 4 - 57 FLC 圓形路徑軌跡追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

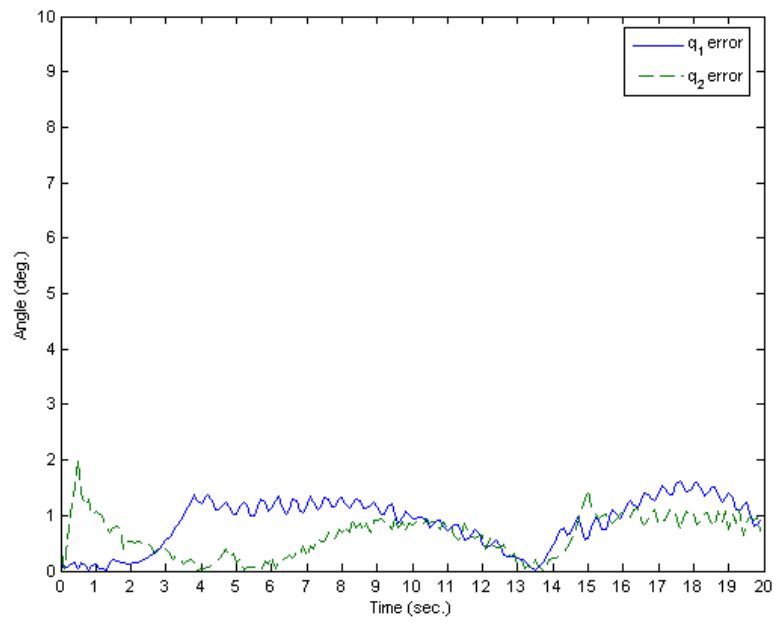


圖 4 - 58 FLC 圓形路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

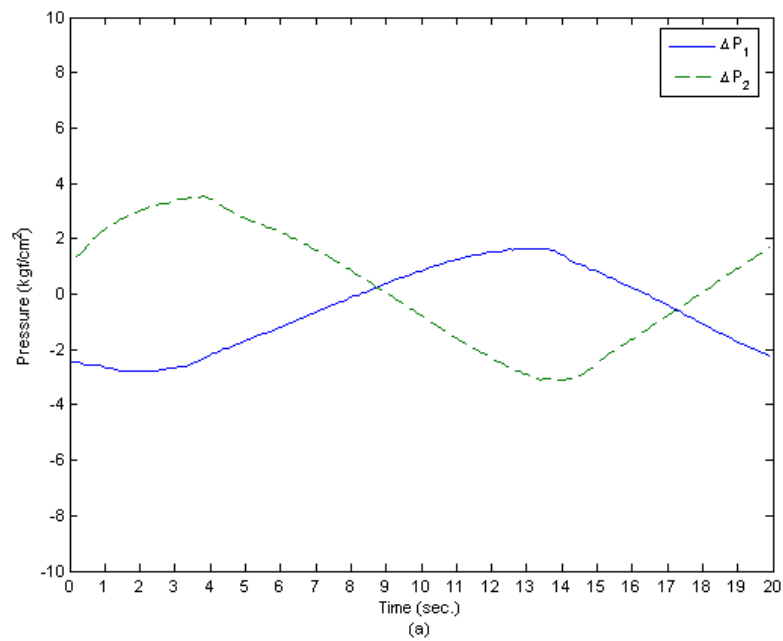


圖 4 - 59 FLC 圓形路徑兩關節的壓力差
(響應時間：20 秒)

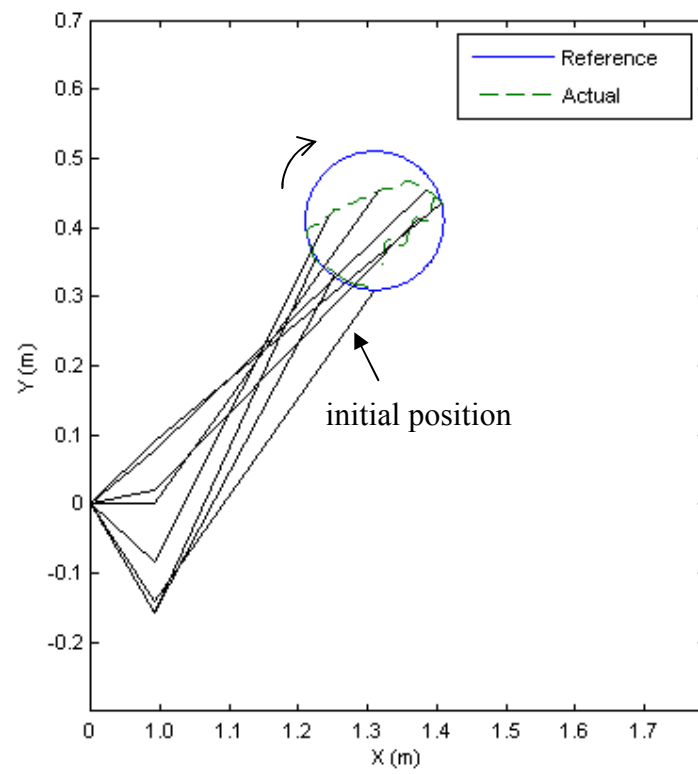


圖 4 - 60 FLC 圓形路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：6 秒)

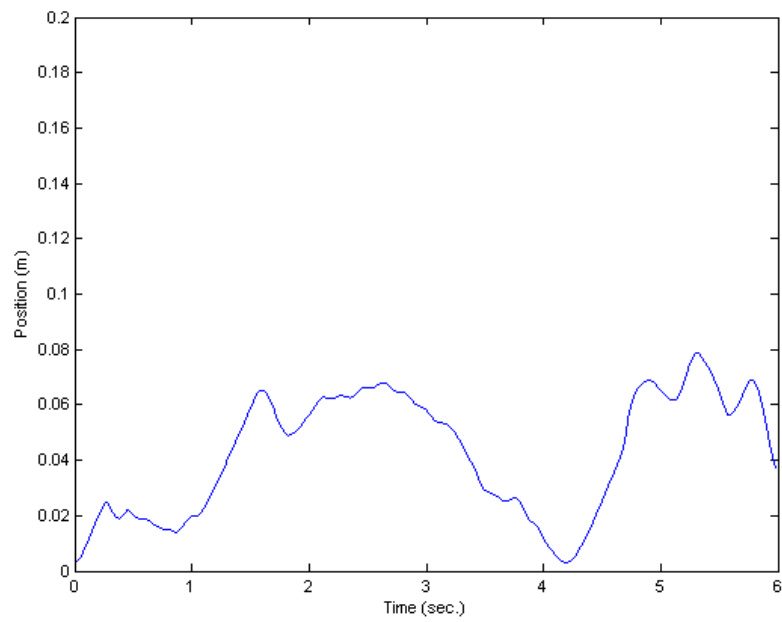


圖 4 - 61 FLC 圓形路徑軌跡追蹤誤差
(響應時間：6 秒)

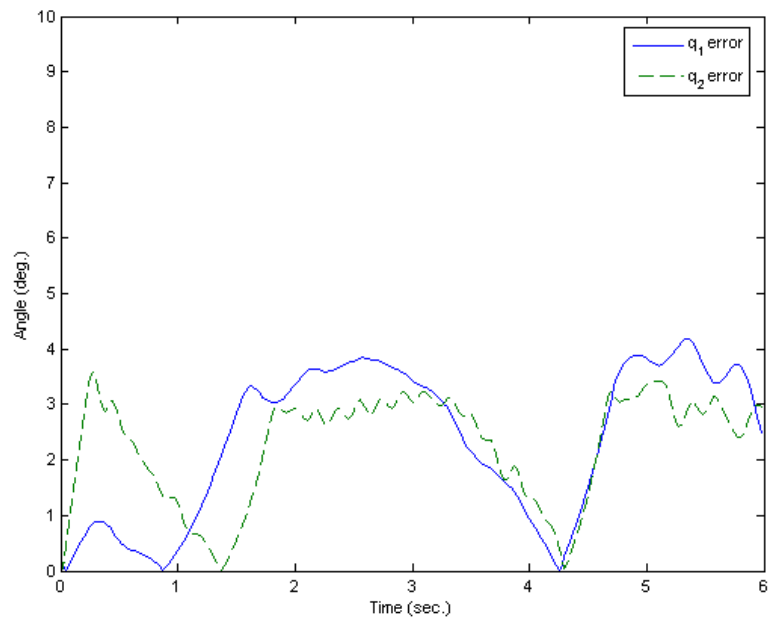


圖 4 - 62 FLC 圓形路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：6 秒)

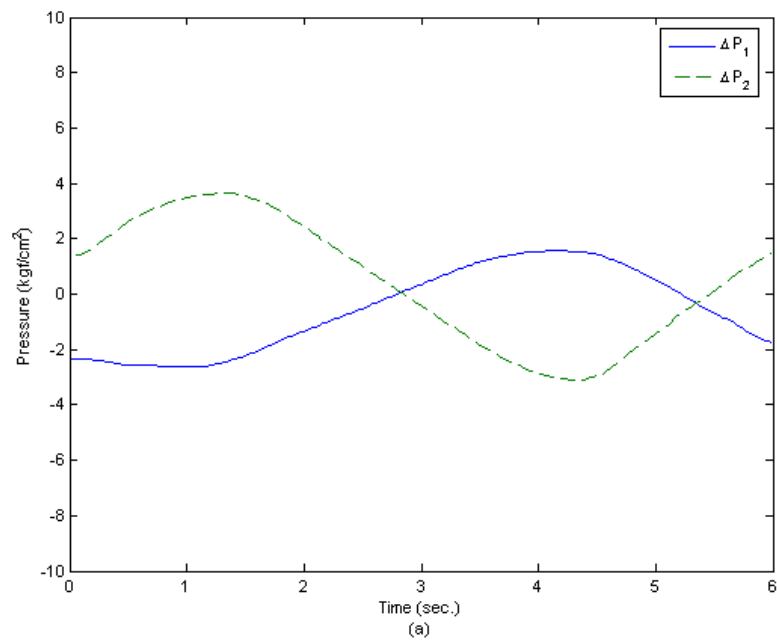


圖 4 - 63 FLC 圓形路徑兩關節的壓力差
(響應時間：6 秒)

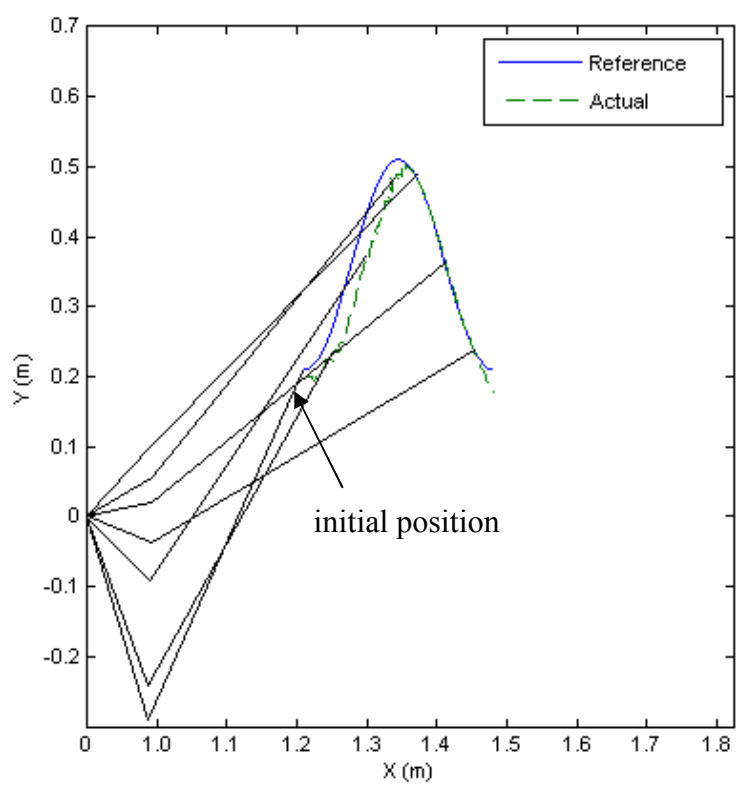


圖 4 - 64 FLC 曲線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：20 秒)

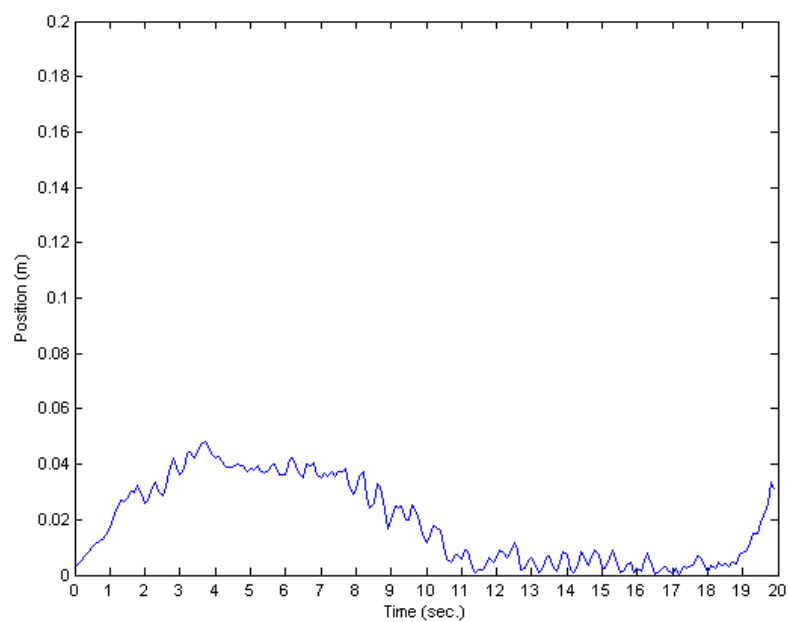


圖 4 - 65 FLC 曲線路徑軌跡追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

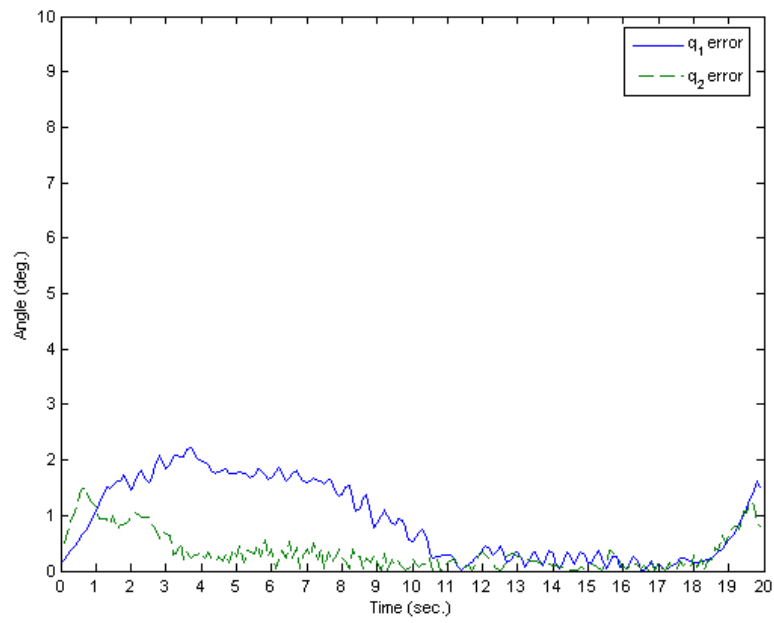


圖 4 - 66 FLC 曲線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

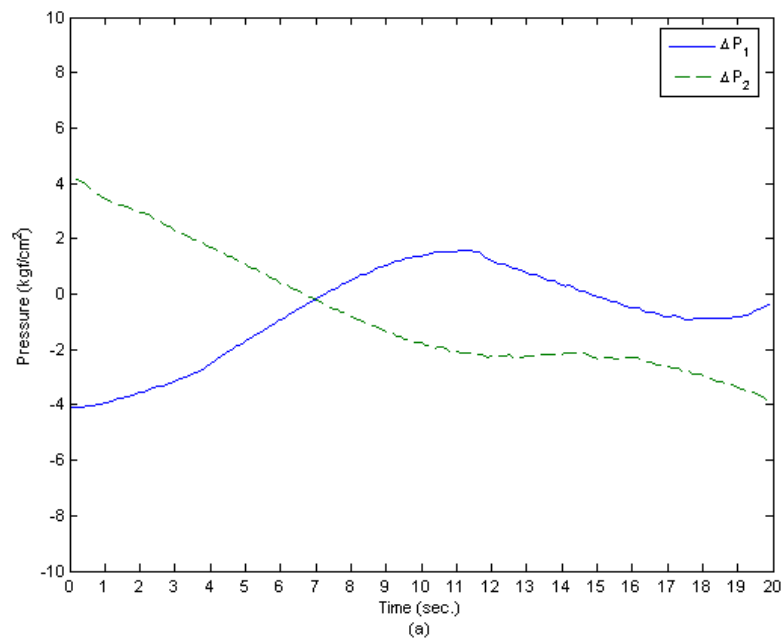


圖 4 - 67 FLC 曲線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：20 秒)

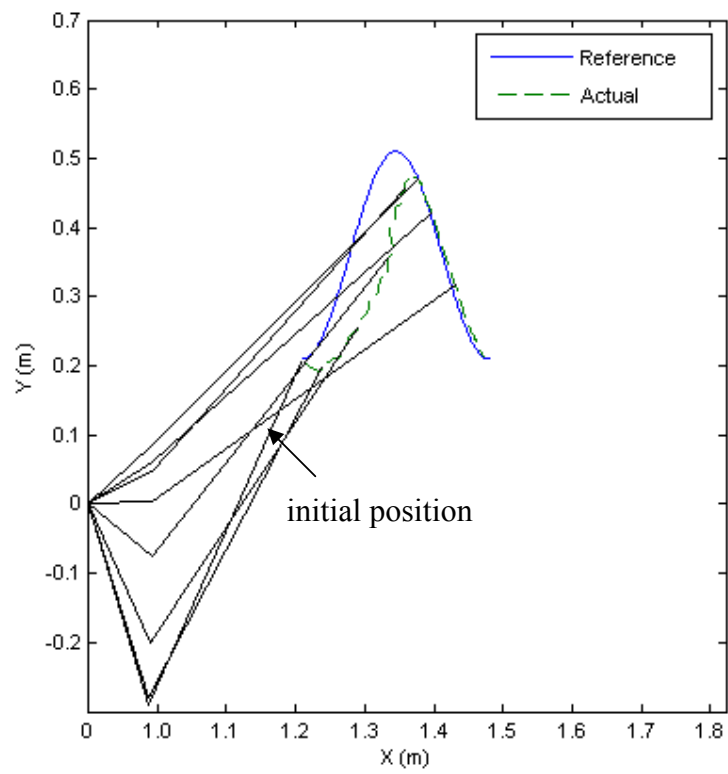


圖 4 - 68 FLC 曲線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：6 秒)

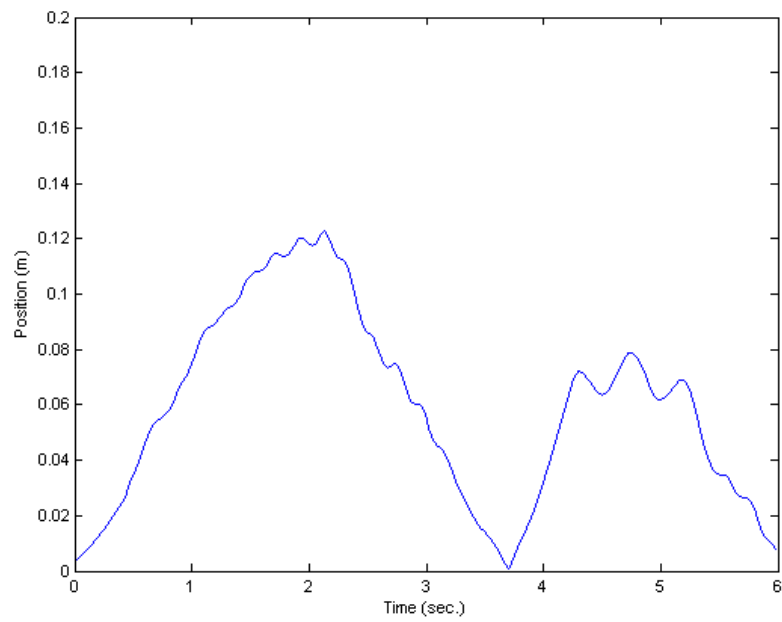


圖 4 - 69 FLC 曲線路徑軌跡追蹤誤差
(響應時間：6 秒)

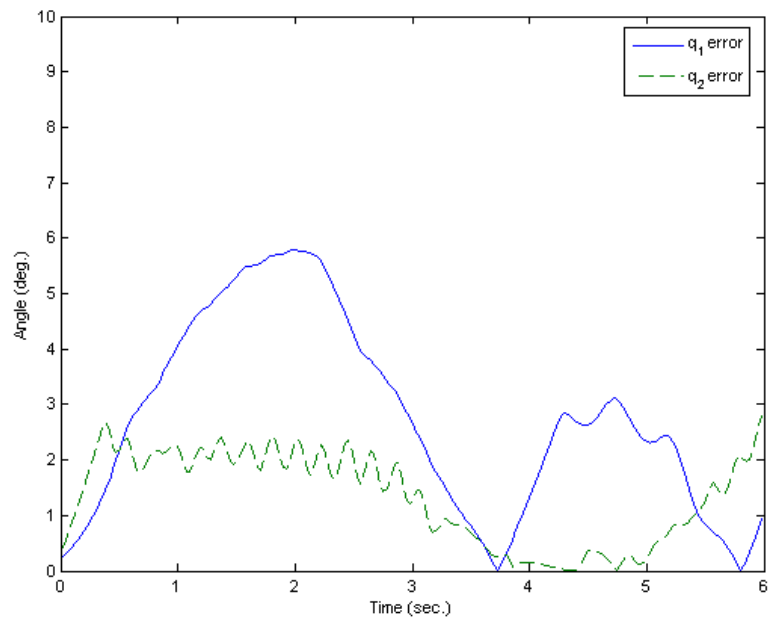


圖 4 - 70 FLC 曲線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：6 秒)

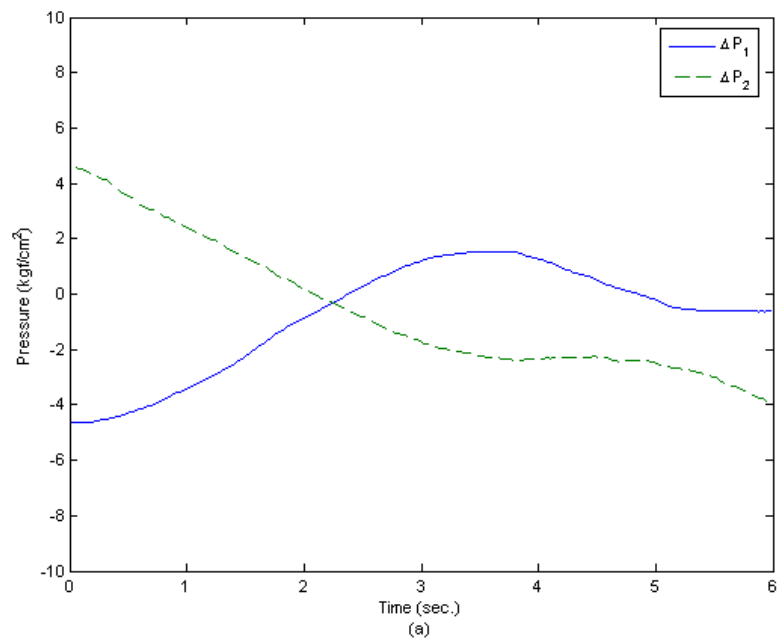


圖 4 - 71 FLC 曲線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：6 秒)

4.2.2 模糊滑動模式控制器(FSMC)之實驗結果

圖 4 - 72 ~ 圖 4 - 75 為 FSMC 應用於響應時間為 20 秒之鉛錘線路徑追蹤結果，控制參數設定與 4.1 節相同，並藉此比較控制器之強健性，由圖 4 - 72 可看出追蹤性能良好，由圖 4 - 73 可觀察出，其 X 方向位置追蹤誤差，最大誤差值為 5.6 mm，誤差平均值為 1.5 mm，圖 4 - 74 為透過逆向運動所計算出的兩關節角度之追蹤誤差圖，由圖中可看出 q_1 和 q_2 的追蹤誤差相去不遠，最大角度誤差分別為， 0.6740° 和 0.6605° 。圖 4 - 75 則為兩關節氣壓肌肉內部壓力差變化曲線圖，可看出其 q_1 的壓力差變化有較明顯的抖動。圖 4 - 76 ~ 圖 4 - 77 為響應時間縮短為 5 秒後，FSMC 追蹤結果，由圖 4 - 76 結果可看出，當響應時間縮短為 5 秒後，FSMC 追蹤誤差有稍微變大的趨勢，其 X 方向位置追蹤誤差，最大誤差值為 11.2 mm，誤差平均值為 4.5 mm，另外從圖 4 - 78 也可看出 q_1 及 q_2 角度誤差分別達到 2.7029° 及 1.7196° ，角度誤差平均值為 0.2118° 及 0.0710° ，此外也可由圖 4 - 75 及圖 4 - 79 觀察出，兩種響應時間的壓力差變化曲線也有些許不同，可發現當響應時間為 5 秒的狀況下，壓力差變化較為平滑。

圖 4 - 80 ~ 圖 4 - 83 為響應時間 20 秒，FSMC 水平線軌跡追蹤結果，Y 方向位置最大誤差為 9.9 mm，平均誤差為 3.4 mm，兩關節角度最大誤差， q_1 為 0.5637° ， q_2 為 1.0986° 。圖 4 - 84 ~ 圖 4 - 86 則是響應時間縮短為 5 秒之追蹤結果，圖 4 - 85 可看出，最大 Y 方向位置誤差為 33.5 mm，整體平均誤差為 10.7 mm，而兩關節角度最大誤差， q_1 為 1.5205° ， q_2 則為 6.5981° 。

圖 4 - 88 ~ 圖 4 - 95 為 FSMC 於響應時間 20 秒及 6 秒之圓形路徑追蹤結果，由圖 4 - 89 觀察得知，其平均追蹤誤差為 6.2 mm，最大誤差為 15.5 mm， q_1 和 q_2 最大角度追蹤誤差分別為 0.7307° 及 1.1805° ，當響應時間縮短為 6 秒後，其平均追蹤誤差為 16.2 mm，最大誤差為 28 mm， q_1 和 q_2 最大角度追蹤誤差分別為 1.6265° 及 3.0772° 。

圖 4 - 96 ~ 圖 4 - 103 為 FSMC 追蹤曲線路徑結果，由圖 4 - 97 可看出其平均追蹤誤差為 6.7 mm，最大誤差為 16.6 mm，由此可看出雖然前 10 秒兩關節角度變化較大，然 FSMC 響應速度仍跟得上，另外由圖 4 - 98 也可看出，兩個關節角度追蹤平均誤差為 0.1408° 及 0.3193° ，差異不大。當響應縮短為 6 秒後，由圖 4 - 101 可看出，於 2.2 秒產生了 48 mm 最大追蹤誤差，整體平均誤差為 22.7 mm，由圖 4 - 102 則可看出 q_1 和 q_2 兩關節追蹤最大誤差，分別為 2.4710° 及 2.1412° 。

由以上實驗可看出，在結合滑動模式控制後，整體響應速度變快，控制精度也有提高的現象。

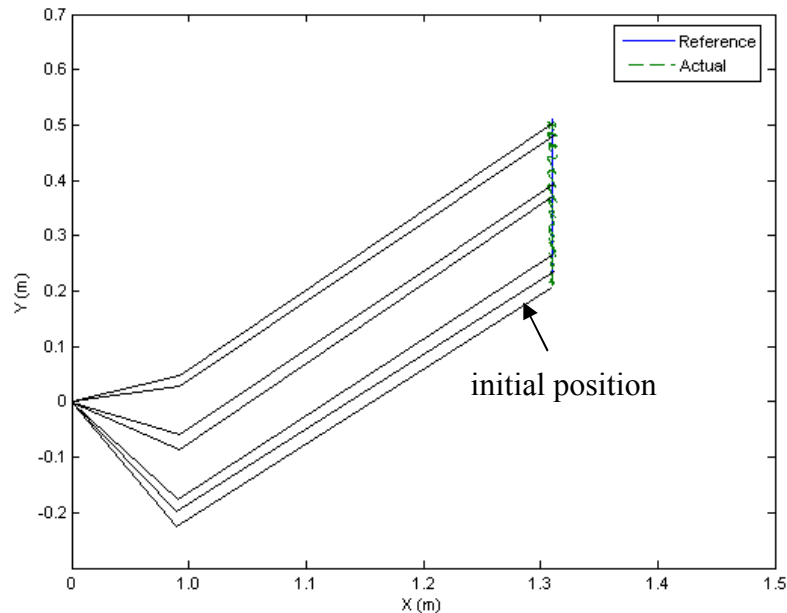


圖 4 - 72 FSMC 鉛錘線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：20 秒)

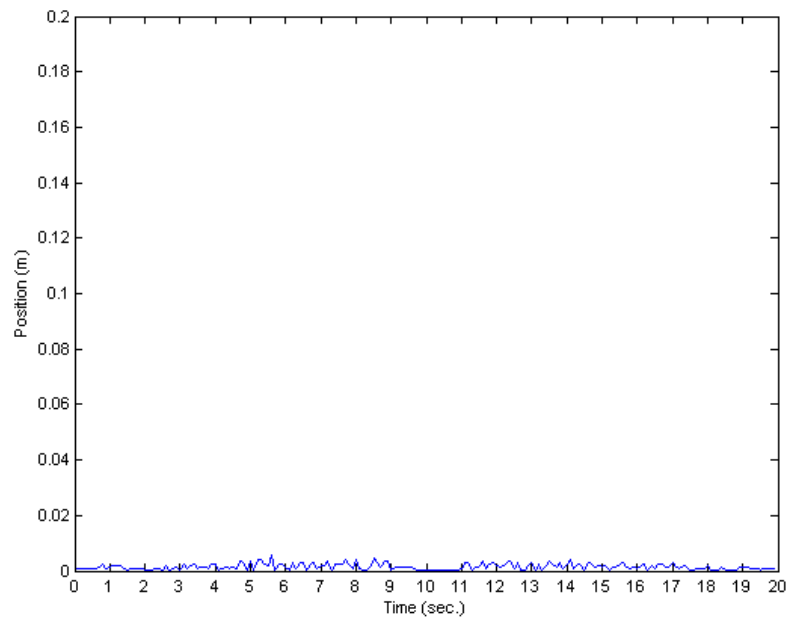


圖 4 - 73 FSMC 鉛錘線路徑軌跡追蹤誤差(X 方向)
(響應時間：20 秒)

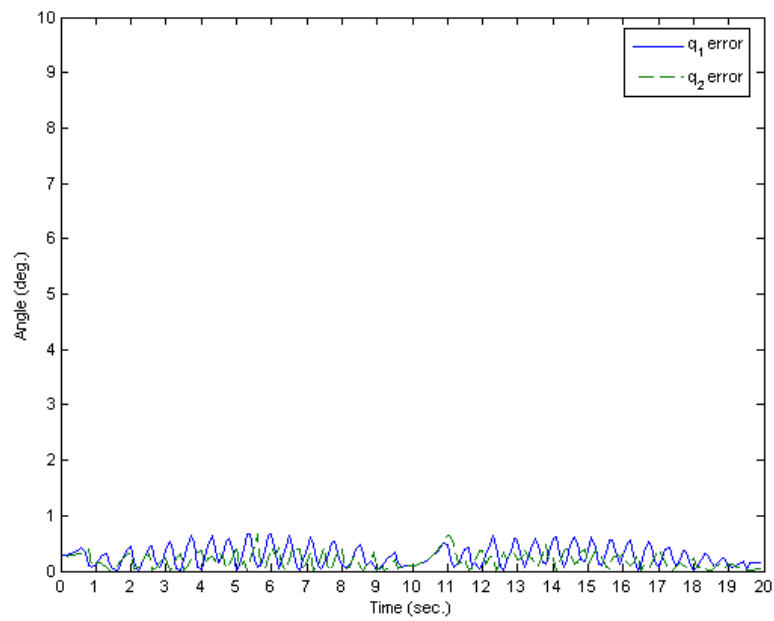


圖 4 - 74 FSMC 鉛錘線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

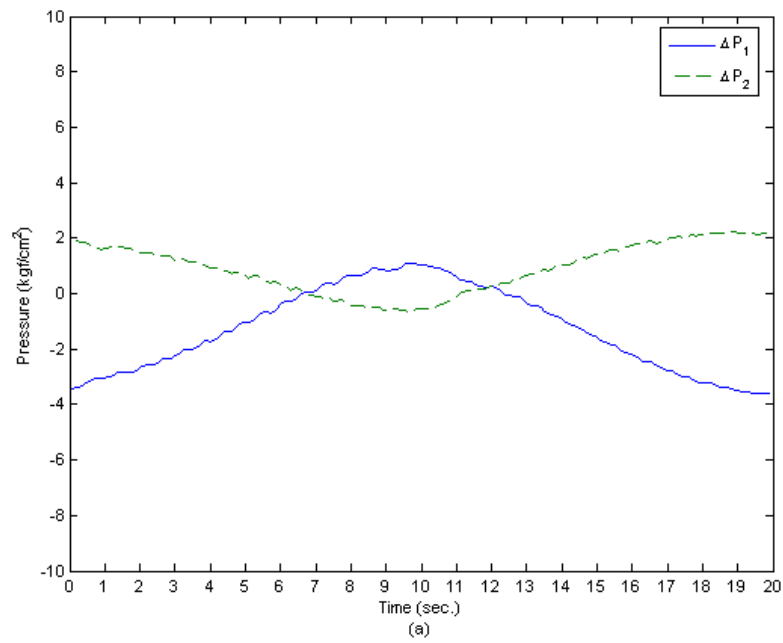


圖 4 - 75 FSMC 鉛錘線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：20 秒)

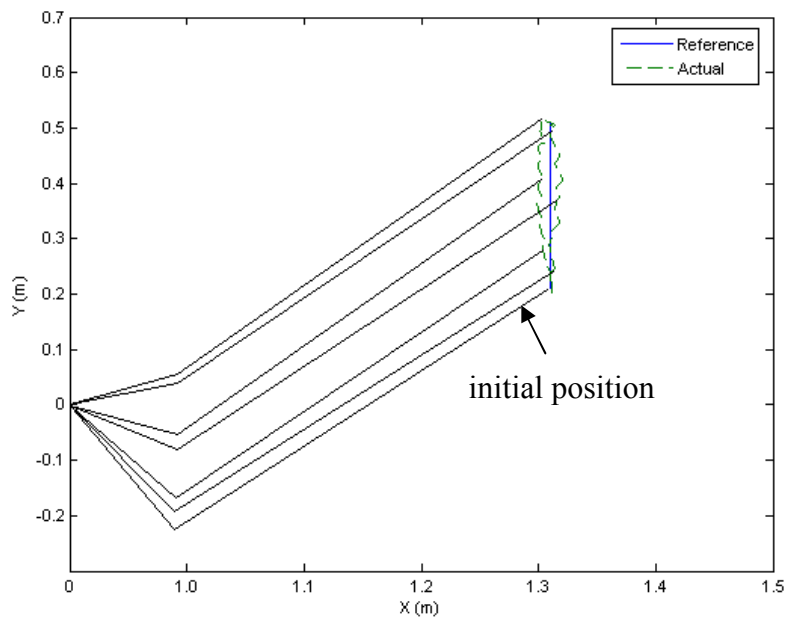


圖 4 - 76 FSMC 鉛錘線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：5 秒)

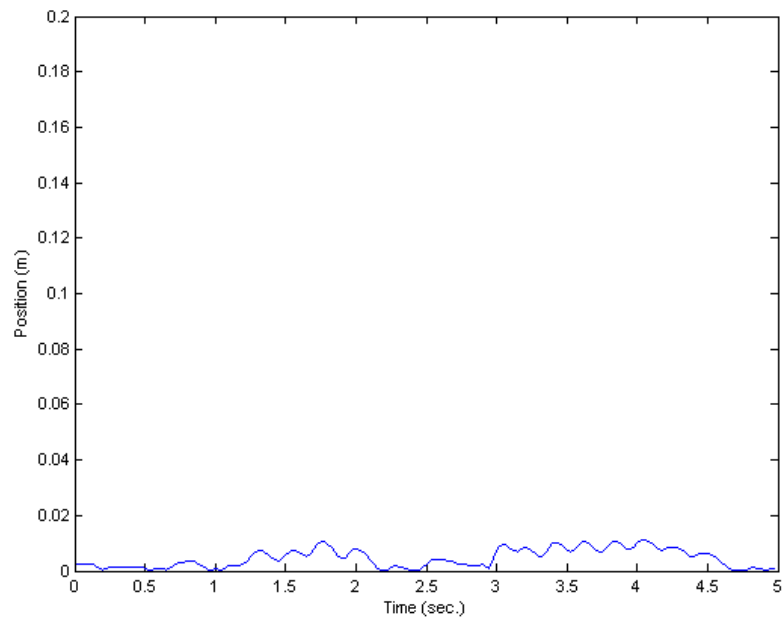


圖 4 - 77 FSMC 鉛錘線路徑軌跡追蹤誤差(X 方向)
(響應時間：5 秒)

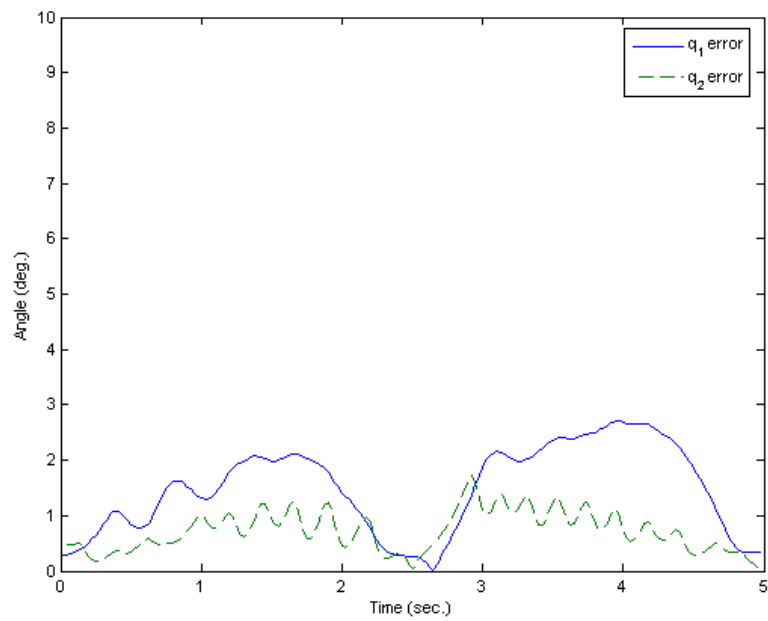


圖 4 - 78 FSMC 鉛錘線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：5 秒)

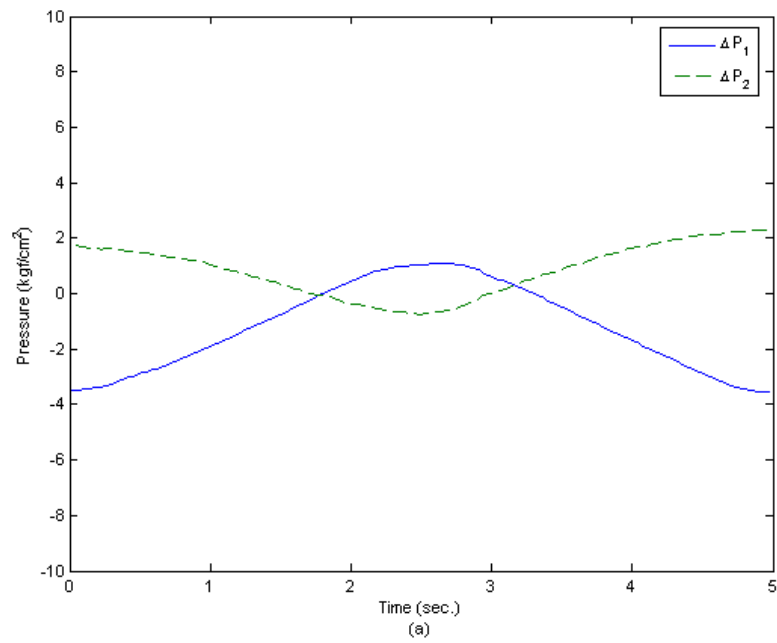


圖 4 - 79 FSMC 鉛錘線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：5 秒)

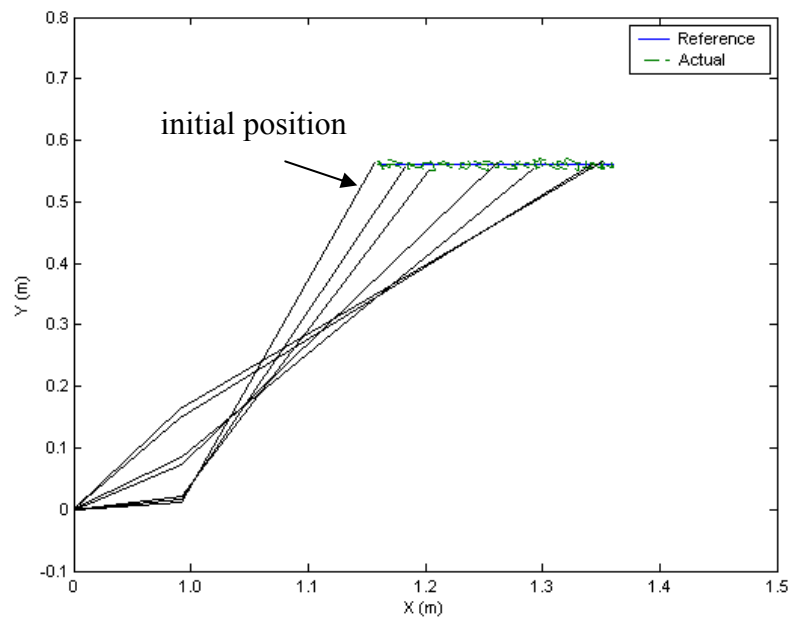


圖 4 - 80 FSMC 水平線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：20 秒)

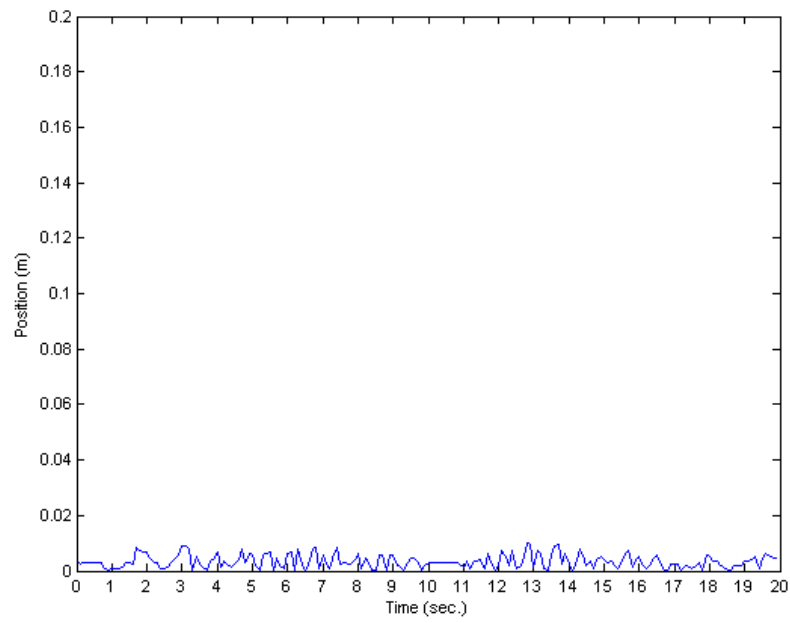


圖 4 - 81 FSMC 水平線路徑軌跡追蹤誤差(Y 方向)
(響應時間：20 秒)

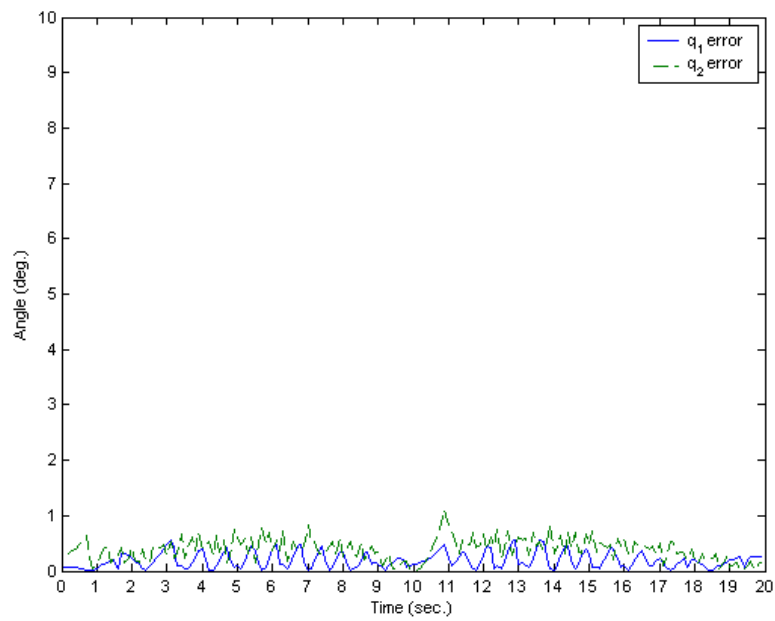


圖 4 - 82 FSMC 水平線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

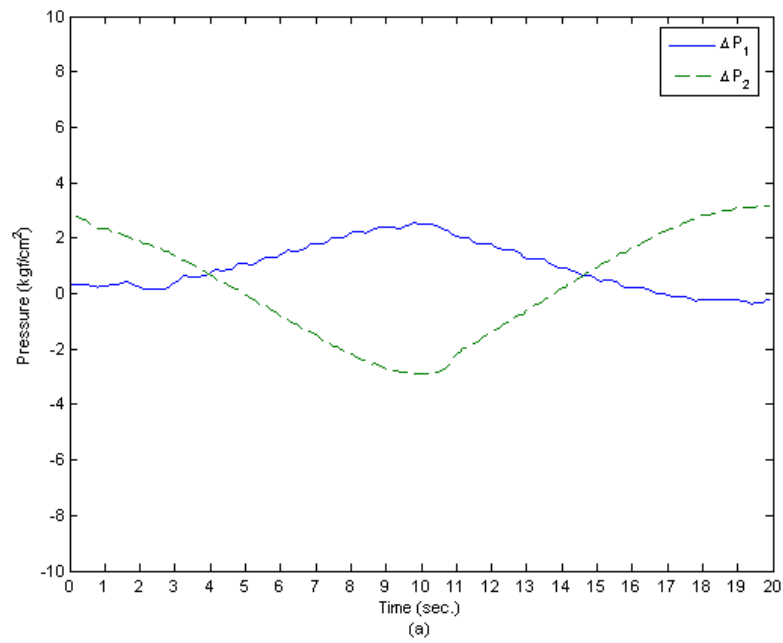


圖 4 - 83 FSMC 水平線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：20 秒)

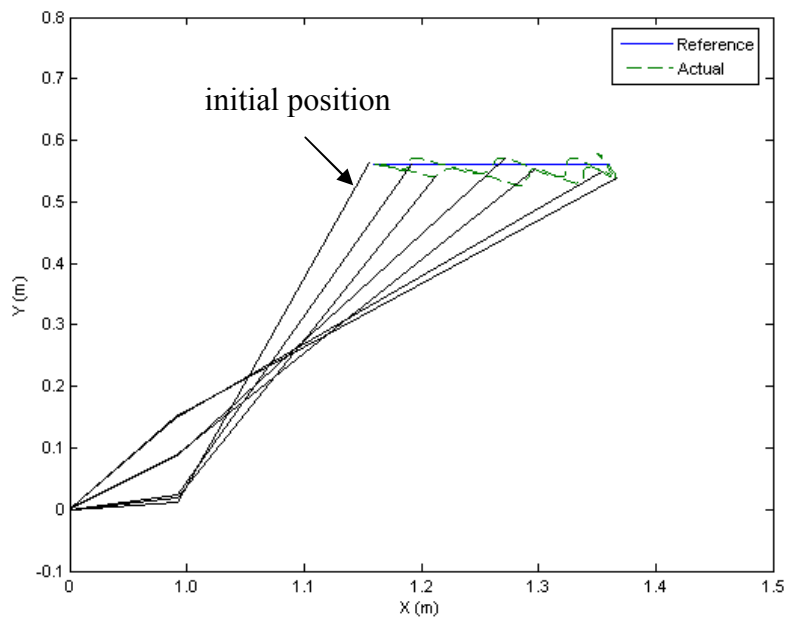


圖 4 - 84 FSMC 水平線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：5 秒)

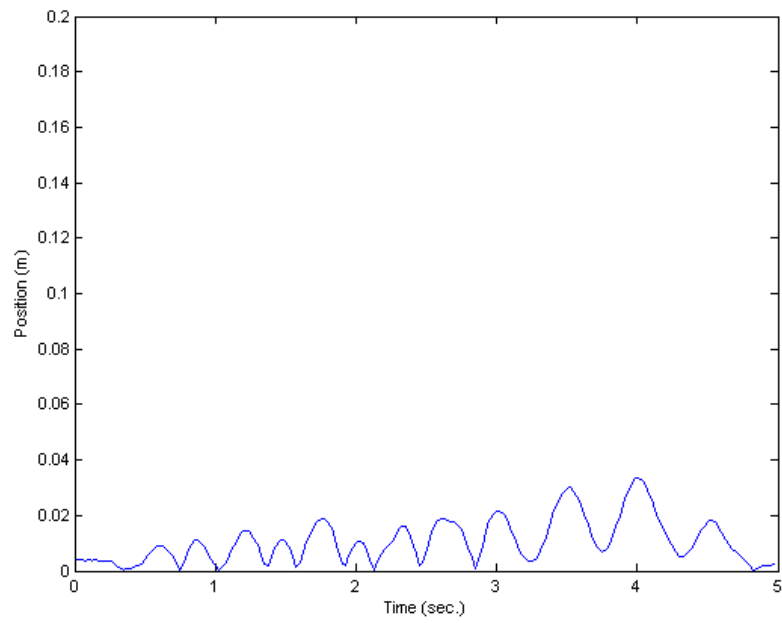


圖 4 - 85 FSMC 水平線路徑軌跡追蹤誤差(Y 方向)
(響應時間：5 秒)

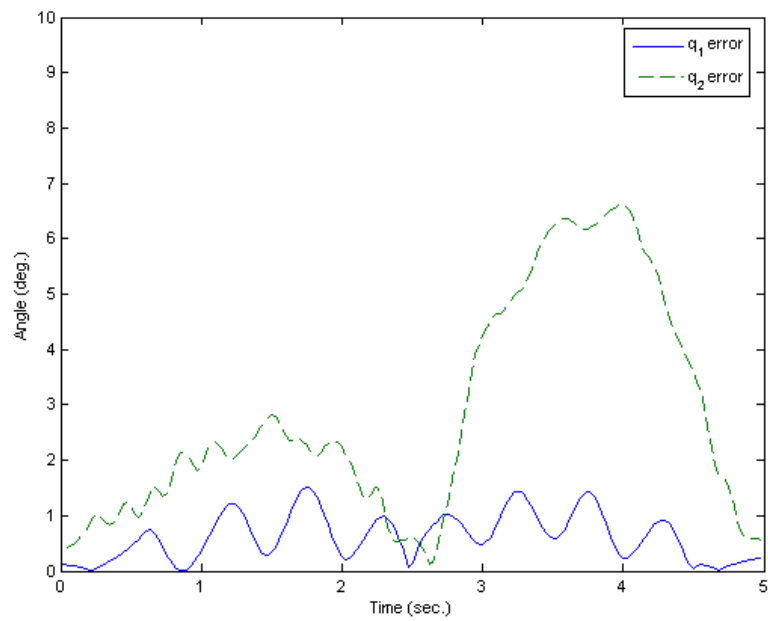


圖 4 - 86 FSMC 水平線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：5 秒)

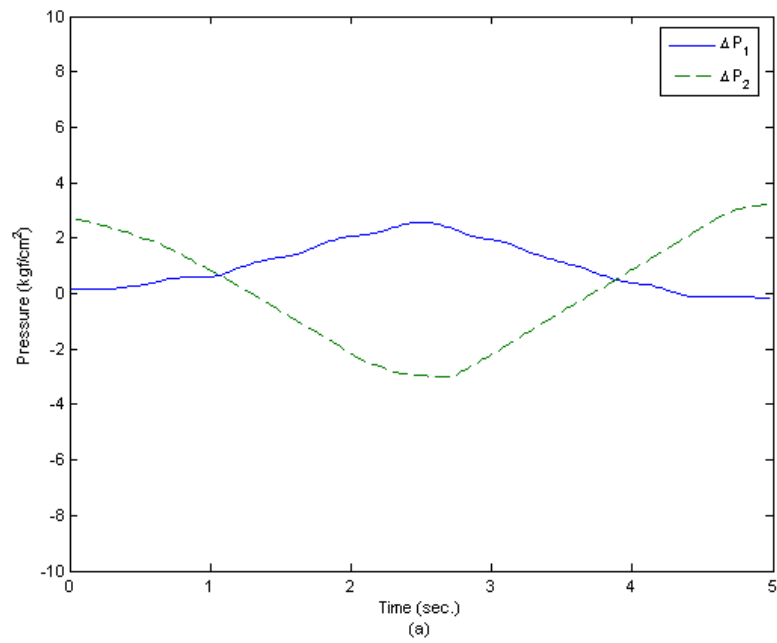


圖 4 - 87 FSMC 水平線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：5 秒)

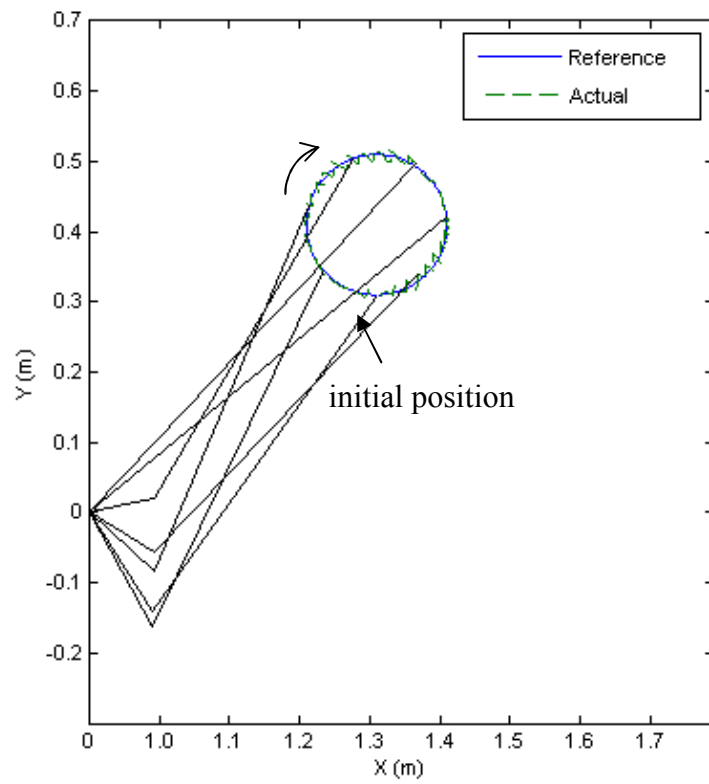


圖 4 - 88 FSMC 圓形路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：20 秒)

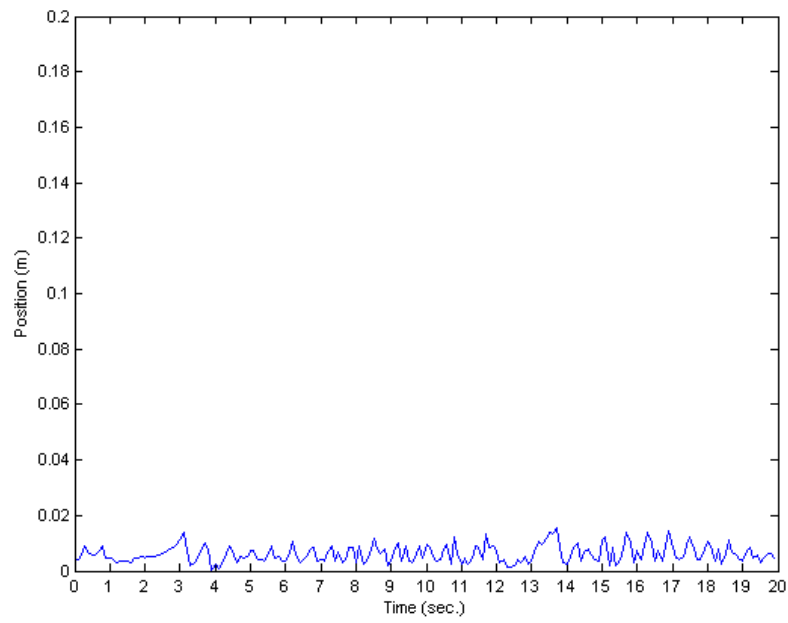


圖 4 - 89 FSMC 圓形路徑軌跡追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

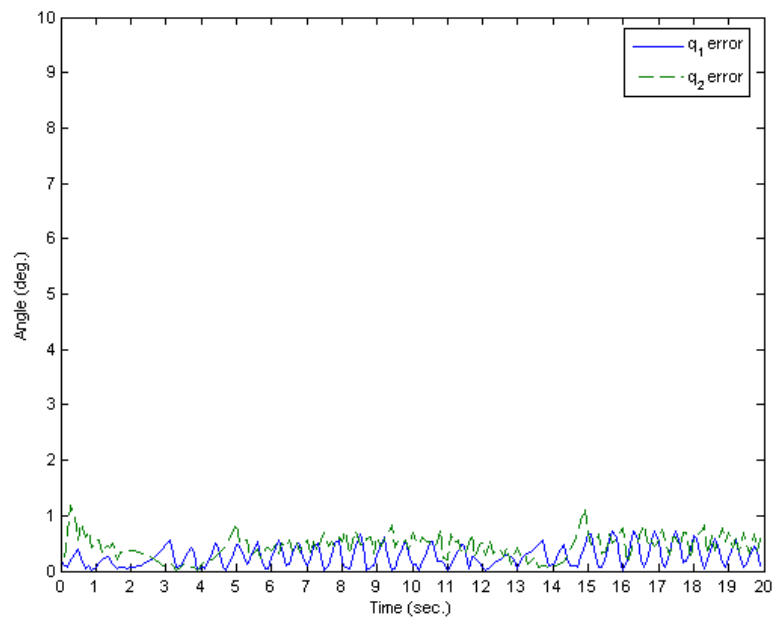


圖 4 - 90 FSMC 圓形路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

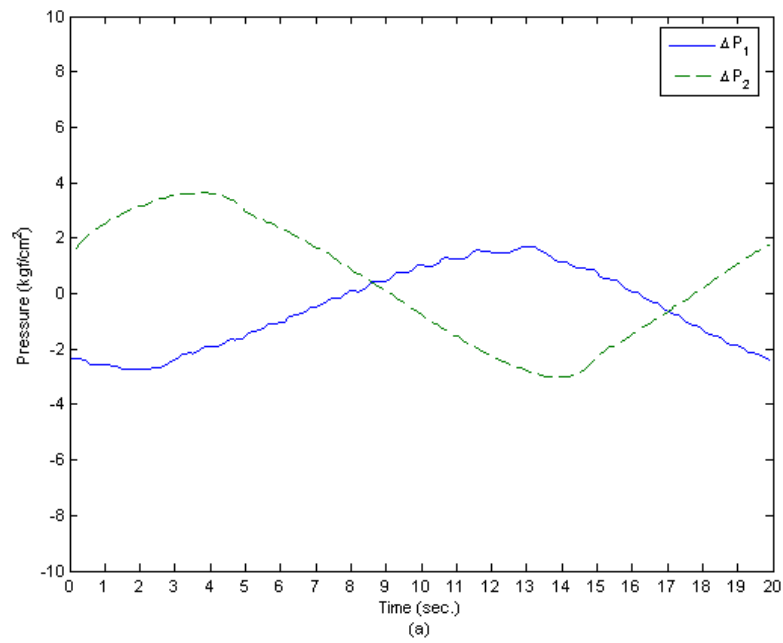


圖 4 - 91 FSMC 圓形路徑兩關節的壓力差
(響應時間：20 秒)

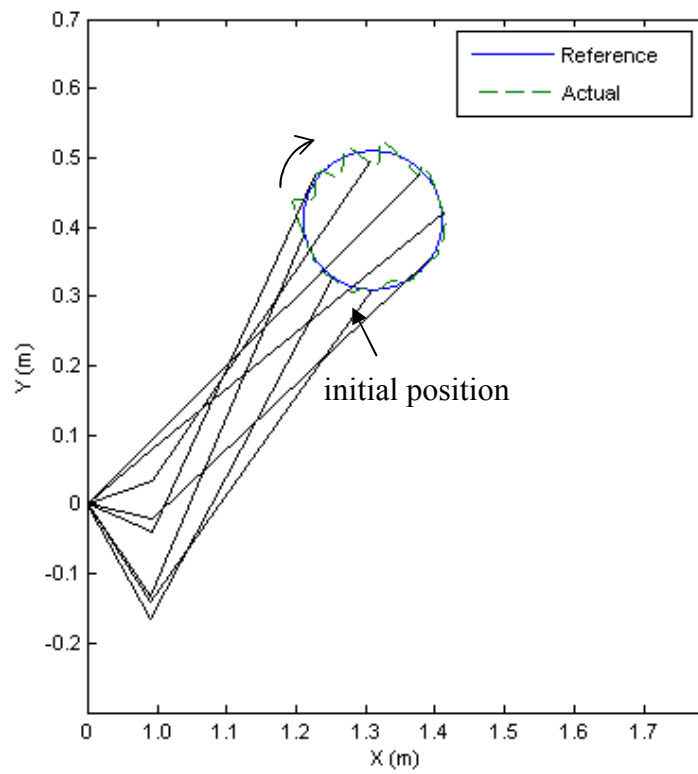


圖 4 - 92 FSMC 圓形路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：6 秒)

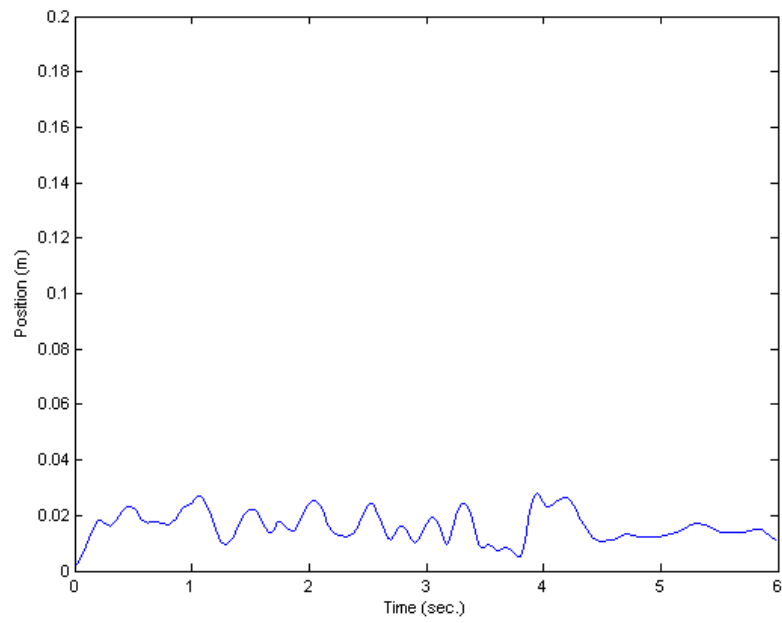


圖 4 - 93 FSMC 圓形路徑軌跡追蹤誤差
(響應時間：6 秒)

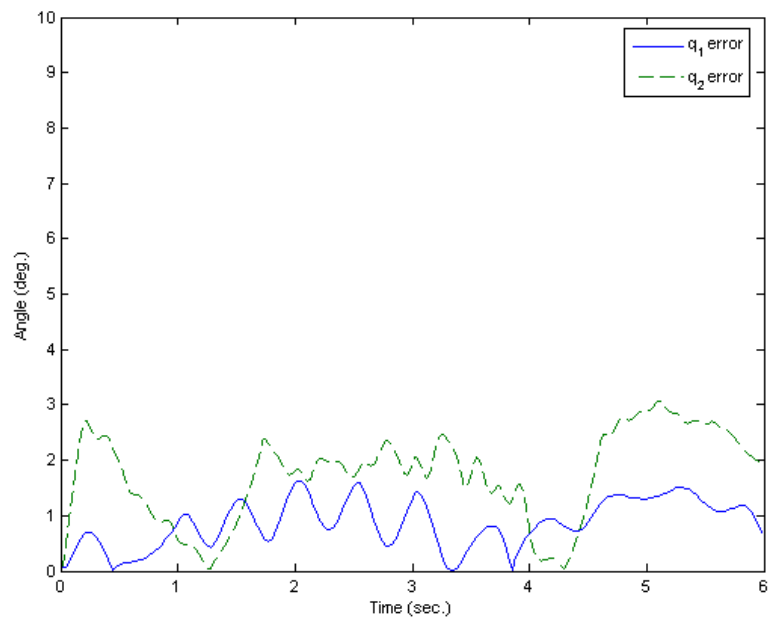


圖 4 - 94 FSMC 圓形路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：6 秒)

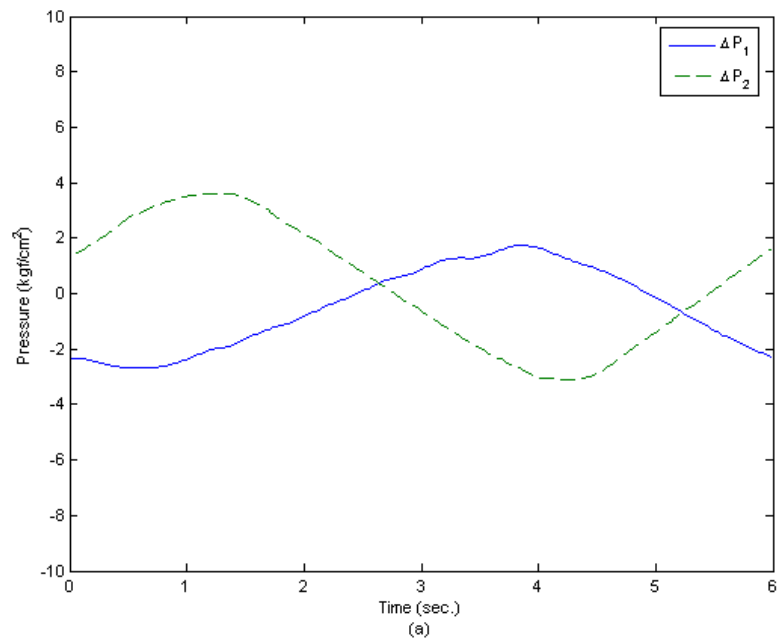


圖 4 - 95 FSMC 圓形路徑兩關節的壓力差
(響應時間：6 秒)

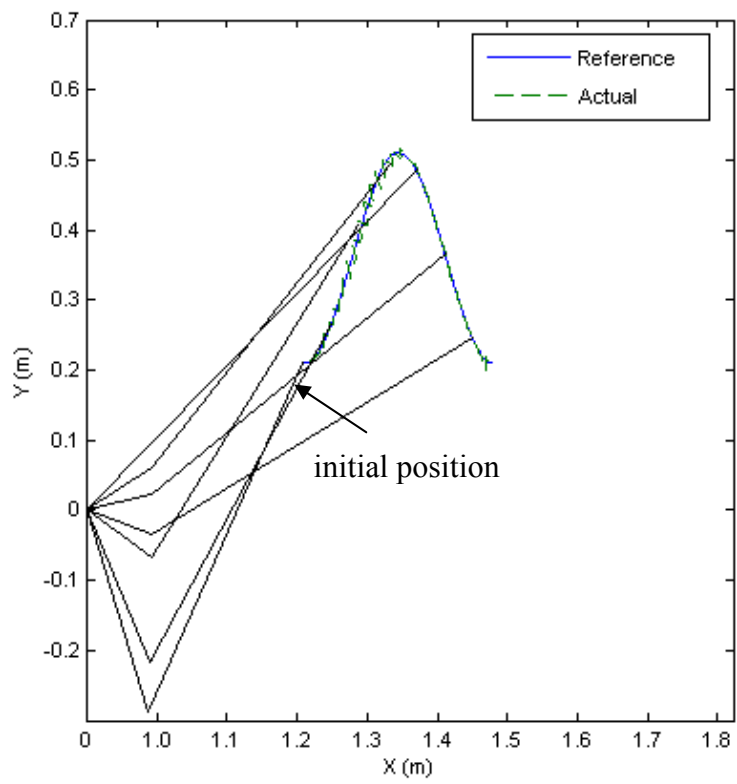


圖 4 - 96 FSMC 曲線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：20 秒)

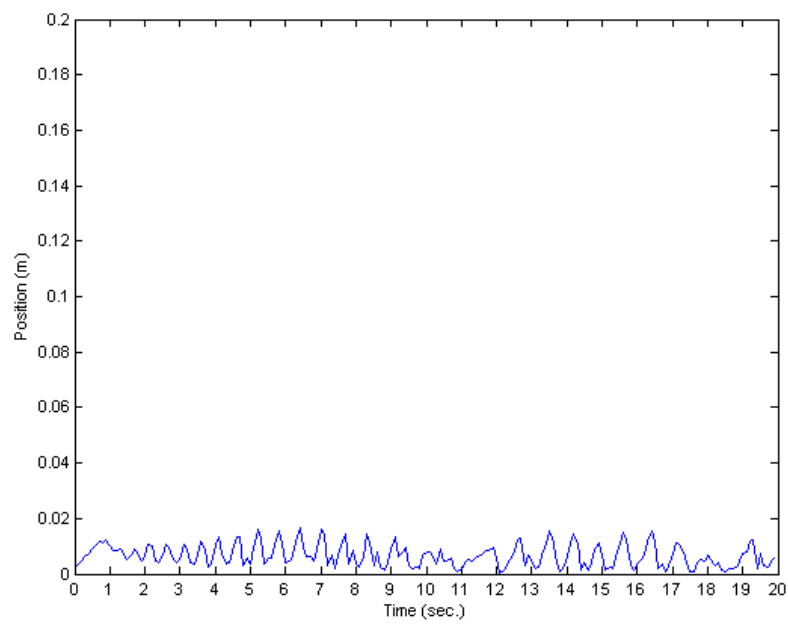


圖 4 - 97 FSMC 曲線路徑軌跡追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

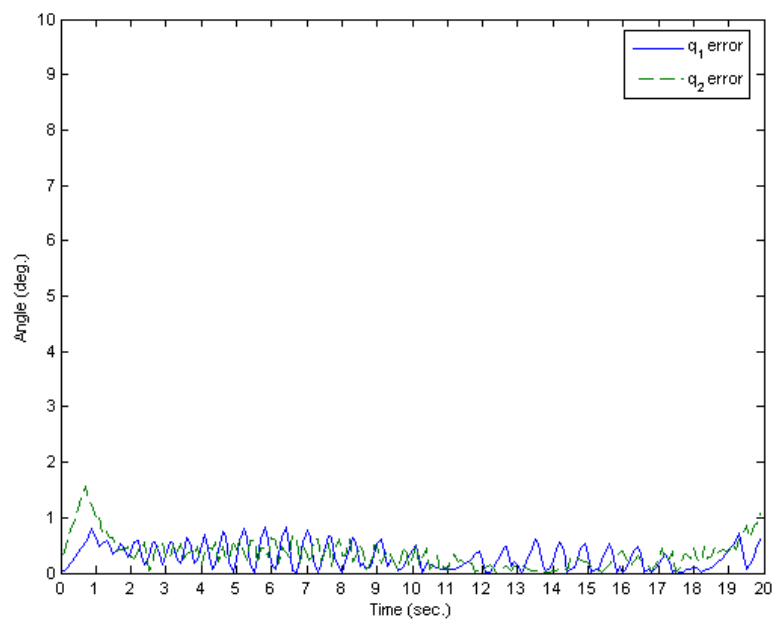


圖 4 - 98 FSMC 曲線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

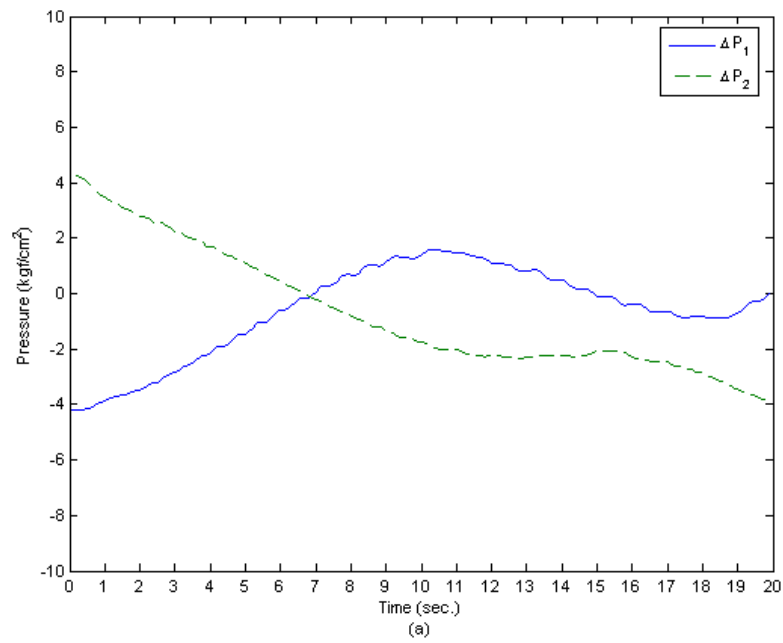


圖 4 - 99 FSMC 曲線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：20 秒)

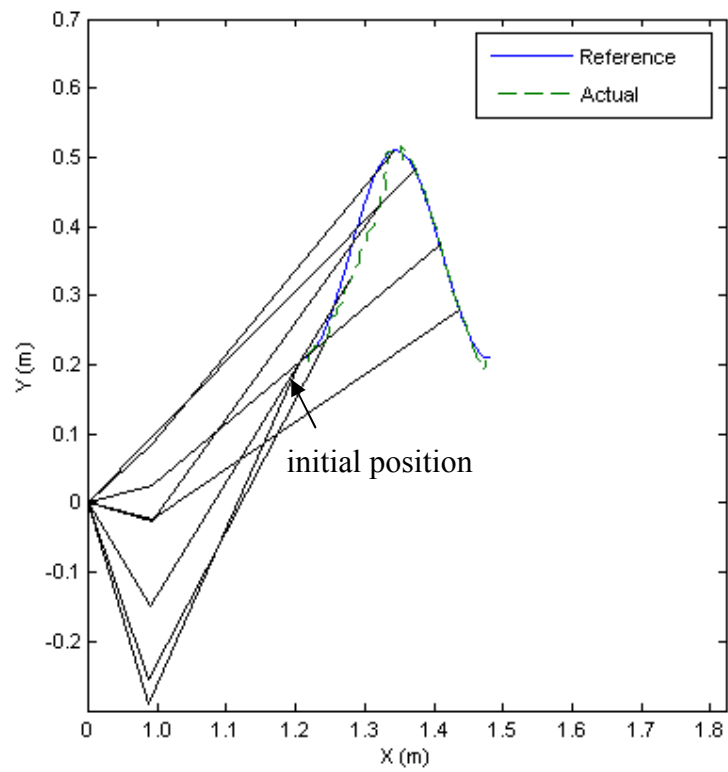


圖 4 - 100 FSMC 曲線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：6 秒)

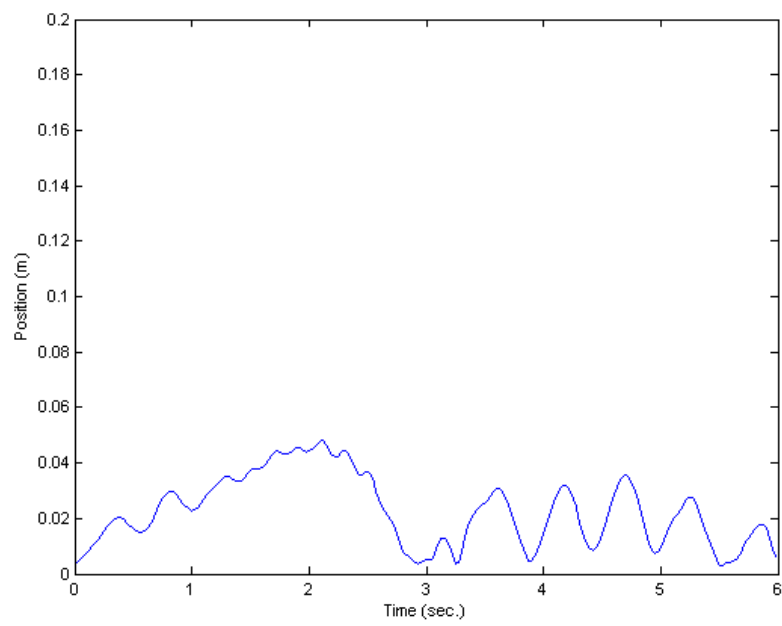


圖 4 - 101 FSMC 曲線路徑軌跡追蹤誤差
(響應時間：6 秒)

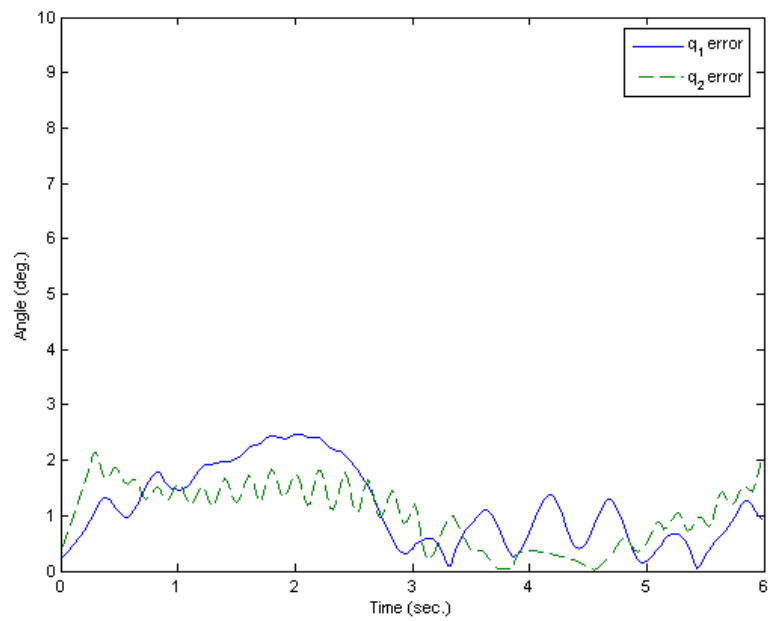


圖 4 - 102 FSMC 曲線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：6 秒)

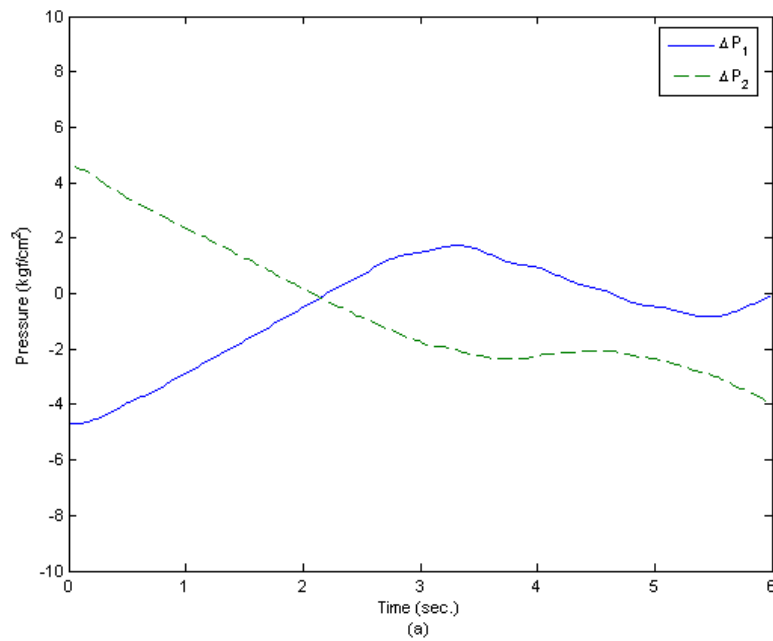


圖 4 - 103 FSMC 曲線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：6 秒)

4.2.3 適應性模糊滑動模式控制器(AFSMC)之實驗結果

圖 4 - 104 ~ 圖 4 - 107 為 AFSMC 應用於響應時間為 20 秒之鉛錘線路徑追蹤結果，控制參數設定也與 4.1 節相同，並藉此比較控制器之強健性，由圖 4 - 104 可看出追蹤性能良好，由圖 4 - 105 可看出，其 X 方向位置追蹤誤差，最大誤差值為 6.3 mm，誤差平均值為 1.5 mm，圖 4 - 106 為透過逆向運動所計算出的兩關節角度之追蹤誤差圖，由圖中可看出 q_1 和 q_2 最大角度追蹤誤差分別為 0.6863° 及 0.8338° 。圖 4 - 107 則為兩關節氣壓肌肉內部壓力差變化曲線圖，一樣可看出其 q_1 的壓力差變化有較明顯的抖動，實驗後規則修正情形如表 4. 11 所示，從表中可發現，由於響應較長，相對誤差也較小，故規則修正集中在 C_2 、 C_3 、 C_5 及 C_6 附近。圖 4 - 108 ~ 圖 4 - 111 為響應時間縮短為 5 秒後，AFSMC 追蹤結果，由圖 4 - 108 結果可看出，當響應時間縮短為 5 秒後，AFSMC 追蹤誤差有稍稍變大，其 X 方向位置追蹤誤差，最大誤差值為 9.7 mm，誤差平均值為 3.1 mm，另外從圖 4 - 110 也可看出 q_1 及 q_2 角度誤差分別為 2.1627° 及 1.8792° ，角度誤差平均值為 0.0650° 及 0.0689° ，此外也可由圖 4 - 111 觀察出，當響應時間縮短為 5 秒的狀況下，壓力差變化較為平滑，實驗後規則修正情形如表(4.12)所示。

圖 4 - 112 ~ 圖 4 - 115 為響應時間 20 秒，AFSMC 水平線軌跡追蹤結果，Y 方向位置最大誤差為 13.1 mm，平均誤差為 4.2 mm，兩關節角度最大誤差， q_1 為 0.6920° ， q_2 為 1.0331° ，實驗後規則表修正情形如表 4. 13 所示。圖 4 - 116 ~ 圖 4 - 119 則是響應時間縮短為 5 秒之追蹤結果，圖 4 - 117 可看出，最大 Y 方向位置誤差為 18.2 mm，整體平均誤差為 7.5 mm，而兩關節角度最大誤差， q_1 為 1.4090° ， q_2 則為 4.6233° ，實驗後規則表修正情形如表 4. 14 所示。

圖 4 - 120 ~ 圖 4 - 127 為 AFSMC 於響應時間 20 秒及 6 秒之圓形路徑追蹤結果，由圖 4 - 121 可看出，其平均追蹤誤差為 6.3 mm，最大誤差為 15.2 mm， q_1 和 q_2 最大角度追蹤誤差分別為 0.8017° 及 1.4709° ，實驗後規則表修正情形如表 4.15 所示。當響應時間縮短為 6 秒後，其平均追蹤誤差為 15.8 mm，最大誤差為 31.5 mm， q_1 和 q_2 最大角度追蹤誤差分別為 1.5344° 及 2.5695° ，實驗後規則表修正情形如表 4. 16 所示。

圖 4 - 128 ~ 圖 4 - 135 為 AFSMC 追蹤曲線路徑結果，由圖 4 - 129 可看出其平均追蹤誤差為 6.5 mm，最大誤差為 19.1 mm，由此可看出雖然前 10 秒兩關節角度變化較大，然 AFSMC 響應速度仍跟得上且更勝 FSMC，另外由圖 4 - 130 也可看出，兩個關節角度追蹤平均誤差為 0.1219° 及 0.2416° ，實驗後規則表修正情形如表 4. 17 所示。當響應縮短為 6 秒後，由圖 4 - 132 可看出，其最大追蹤誤差為 38.3 mm，整體平均誤差為 19 mm，由圖 4 - 133 則可看出 q_1 和 q_2 兩關節追蹤最大誤差，分別為 2.1538° 及 1.8507° ，實驗後規則表修正情形如表 4. 18 所示。

由以上實驗可看出，在加入適應法則線上調整規則表後，系統能因應外在環境的變化，即時修正規則表，使系統強健性提高。

表 4. 11 AFSMC 於鉛錘線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：20 秒)

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1	-0.6813	-0.4253	0	0.4212	0.6801	0.9998
q_2 修正後	-1	-0.6667	-0.3828	0	0.4064	0.6683	1

表 4.12 AFSMC 於鉛錘線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：5 秒)

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1.1097	-0.6409	-0.3421	0	0.3477	0.6540	1.0843
q_2 修正後	-1.0017	-0.6883	-0.3595	0	0.3639	0.6941	1.0194

表 4.13 AFSMC 於水平線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：20 秒)

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1	-0.6667	-0.4195	0	0.4136	0.6692	1
q_2 修正後	-1	-0.6675	-0.4196	0	0.4709	0.6830	0.9999

表 4.14 AFSMC 於水平線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：5 秒)

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1.0044	-0.6927	-0.3592	0	0.3491	0.6718	1.0225
q_2 修正後	-1.0967	-0.6405	-0.3448	0	0.3439	0.6200	1.2564

表 4.15 AFSMC 於圓形路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：20 秒)

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-0.9979	-0.6989	-0.4133	0	0.4349	0.6775	0.9998
q_2 修正後	-1	-0.6798	-0.4536	0	0.4828	0.6927	1.0035

表 4.16 AFSMC 於圓形路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：6 秒)

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1.0489	-0.6764	-0.3519	0	0.3521	0.6789	1.0475
q_2 修正後	-1.1093	-0.6401	-0.3438	0	0.3468	0.6740	1.1398

表 4.17 AFSMC 於曲線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：20 秒)

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1	-0.6681	-0.4056	0	0.4427	0.7207	0.9952
q_2 修正後	-1.0009	-0.6855	-0.4986	0	0.3711	0.6666	1

表 4.18 AFSMC 於曲線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：6 秒)

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1.0229	-0.6724	-0.3455	0	0.3460	0.6488	1.1304
q_2 修正後	-1.0888	-0.6787	-0.3722	0	0.3418	0.6692	0.9999

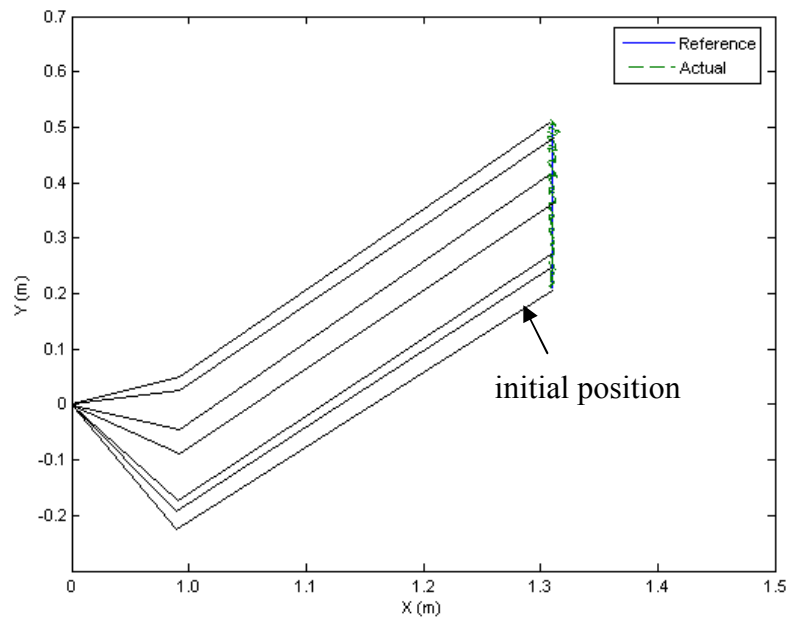


圖 4 - 104 AFSMC 鉛錘線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：20 秒)

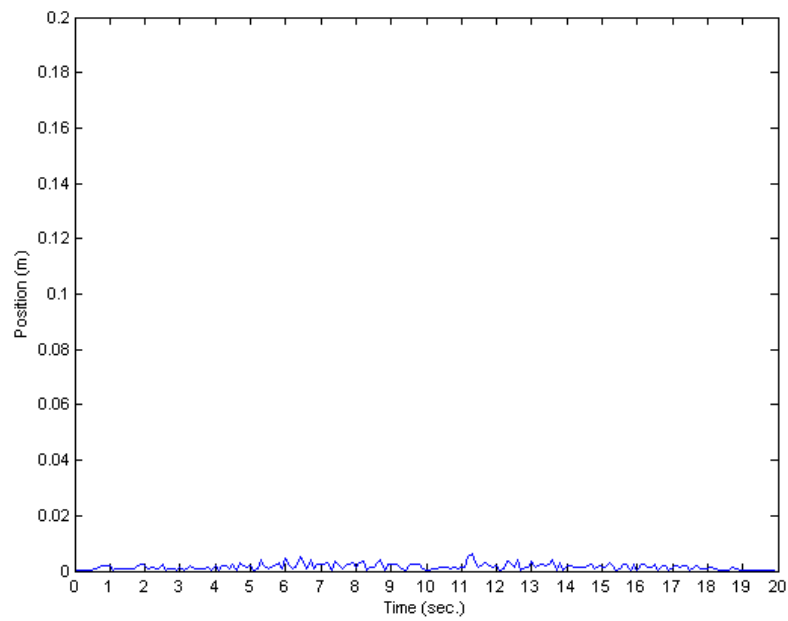


圖 4 - 105 AFSMC 鉛錘線路徑軌跡追蹤誤差(X 方向)
(響應時間：20 秒)

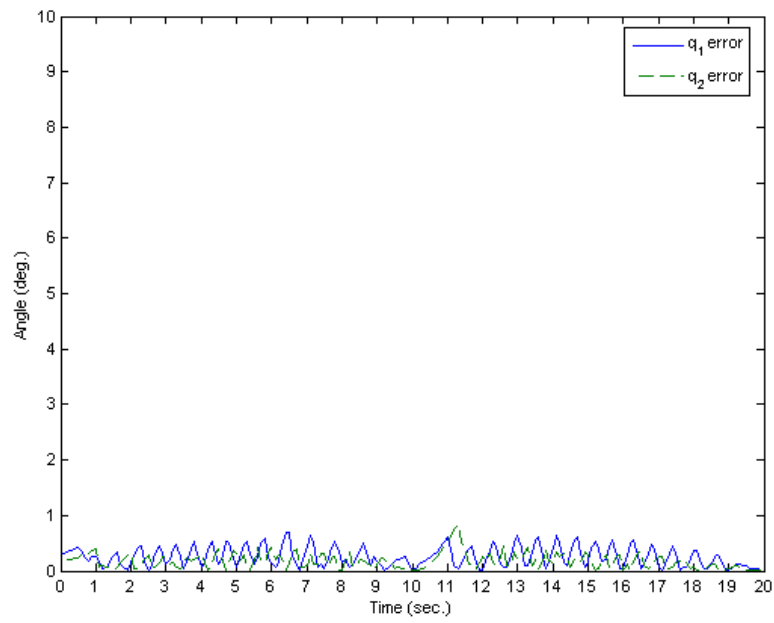


圖 4 - 106 AFSMC 鉛錘線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

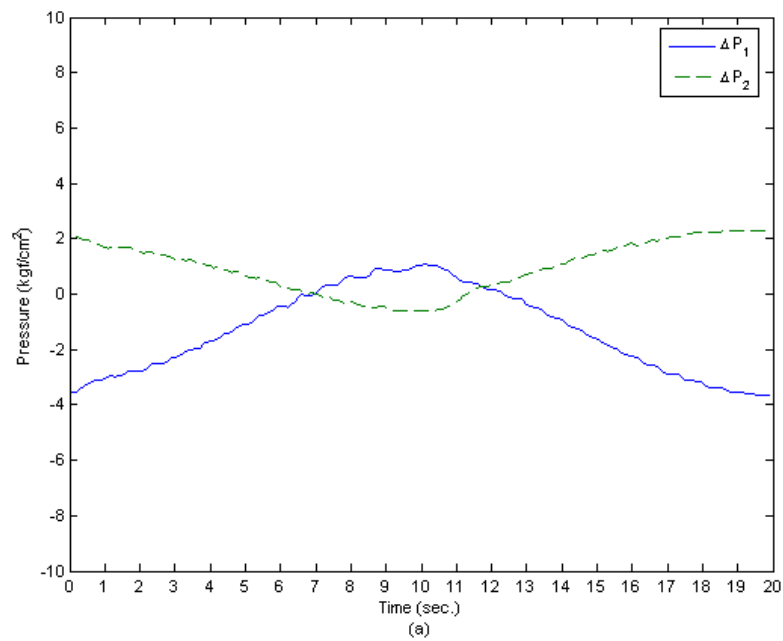


圖 4 - 107 AFSMC 鉛錘線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：20 秒)

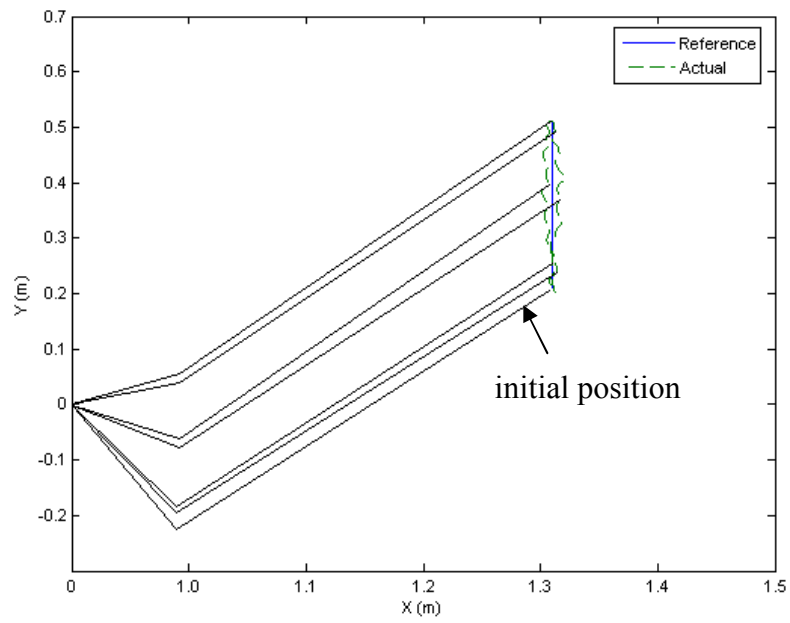


圖 4 - 108 AFSMC 鉛錘線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：5 秒)

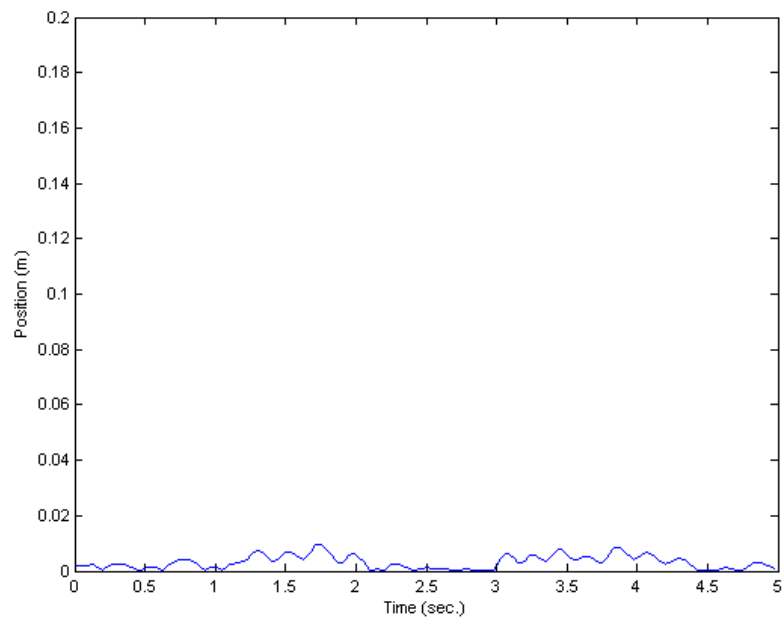


圖 4 - 109 AFSMC 鉛錘線路徑軌跡追蹤誤差(X 方向)
(響應時間：5 秒)

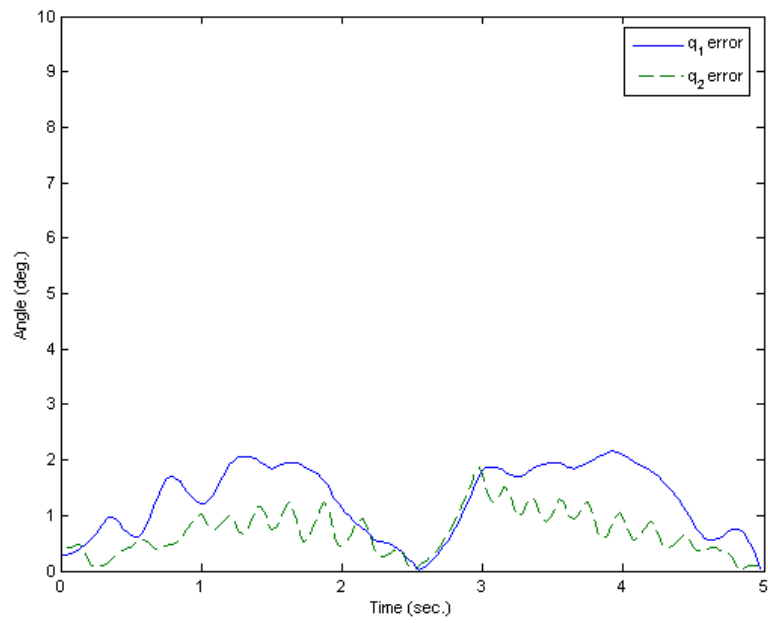


圖 4 - 110 AFSMC 鉛錘線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：5 秒)

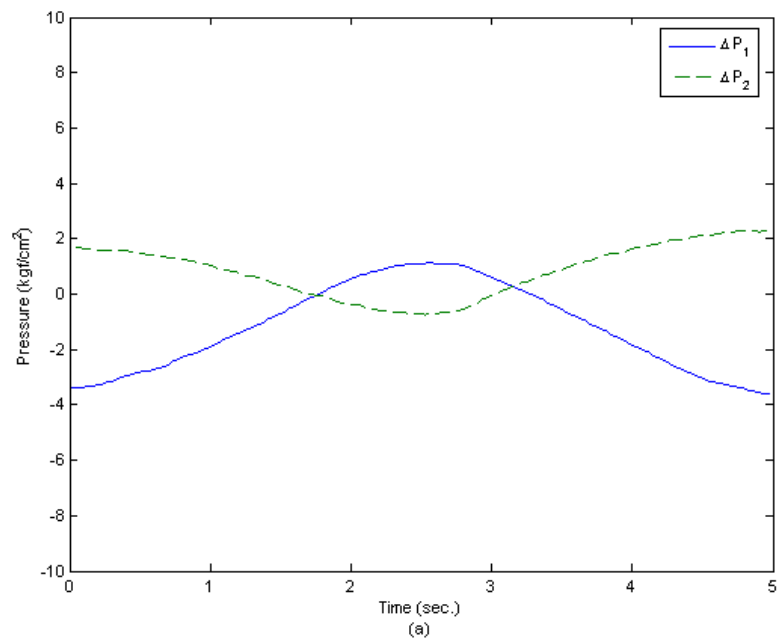


圖 4 - 111 AFSMC 鉛錘線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：5 秒)

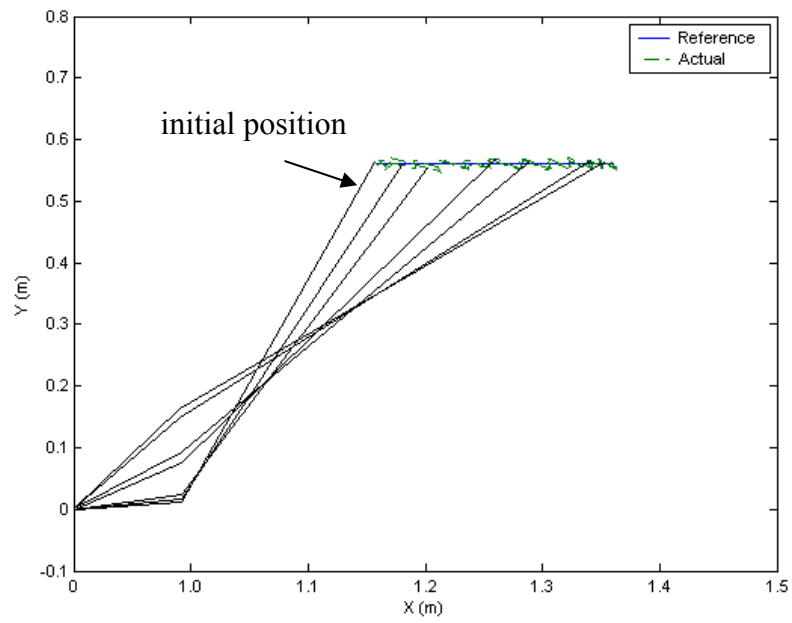


圖 4 - 112 AFSMC 水平線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：20 秒)

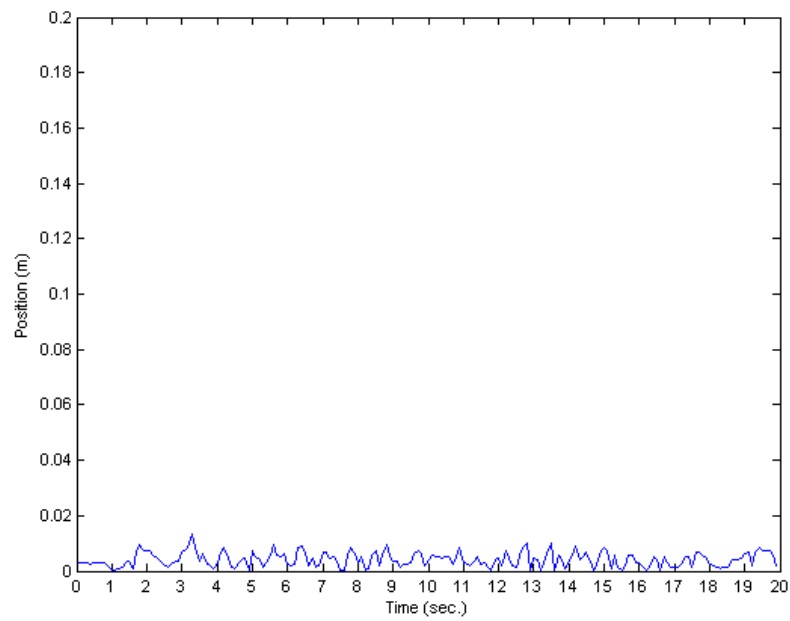


圖 4 - 113 AFSMC 水平線路徑軌跡追蹤誤差(Y 方向)
(響應時間：20 秒)

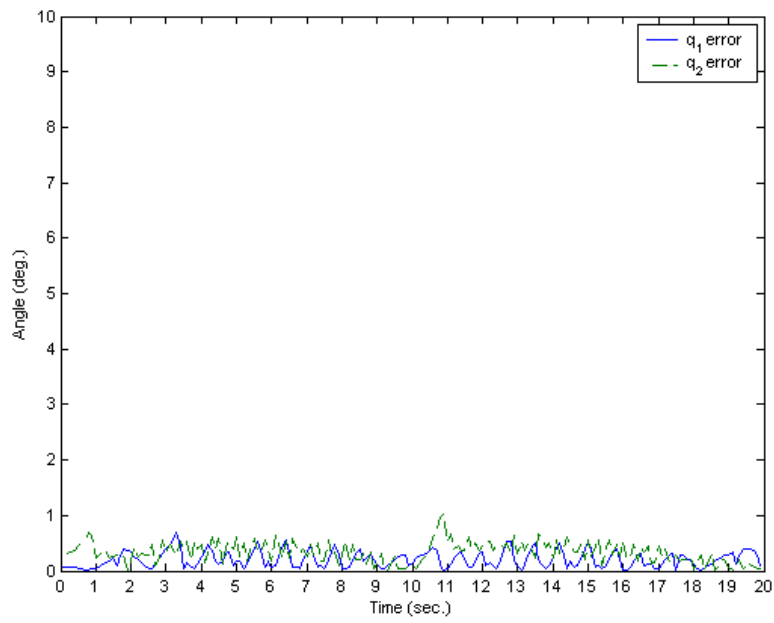


圖 4 - 114 AFSMC 水平線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

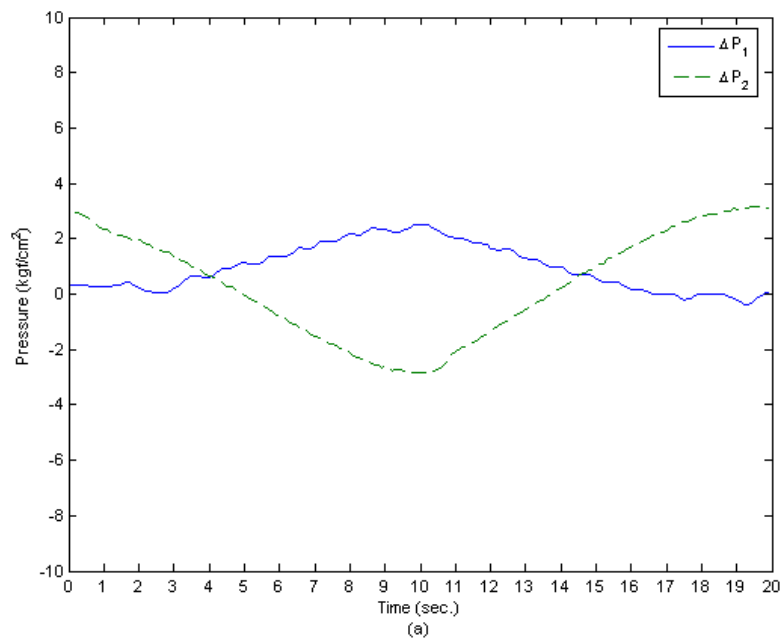


圖 4 - 115 AFSMC 水平線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：20 秒)

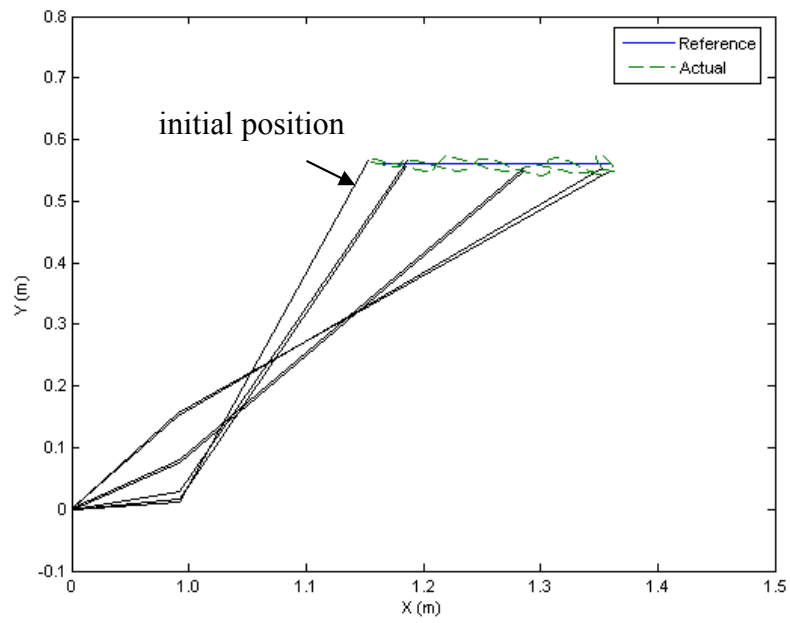


圖 4 - 116 AFSMC 水平線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：5 秒)

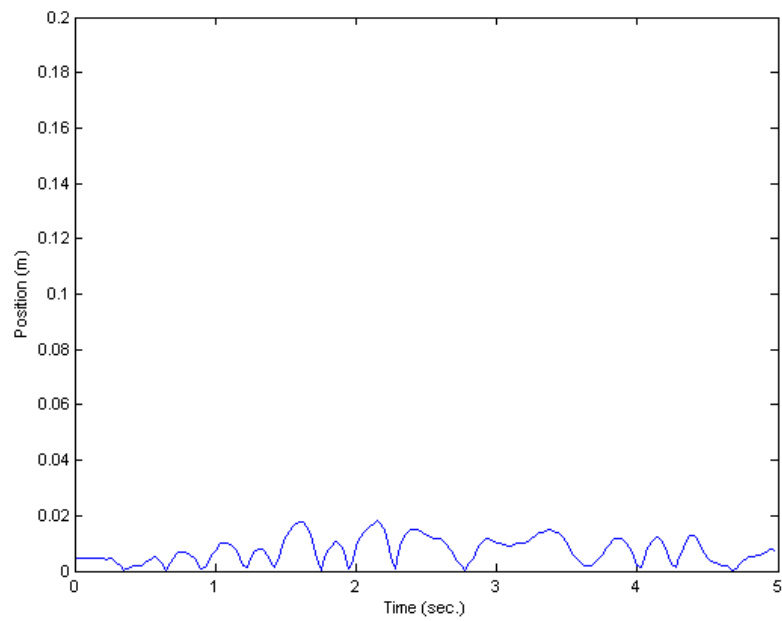


圖 4 - 117 AFSMC 水平線路徑軌跡追蹤誤差(Y 方向)
(響應時間：5 秒)

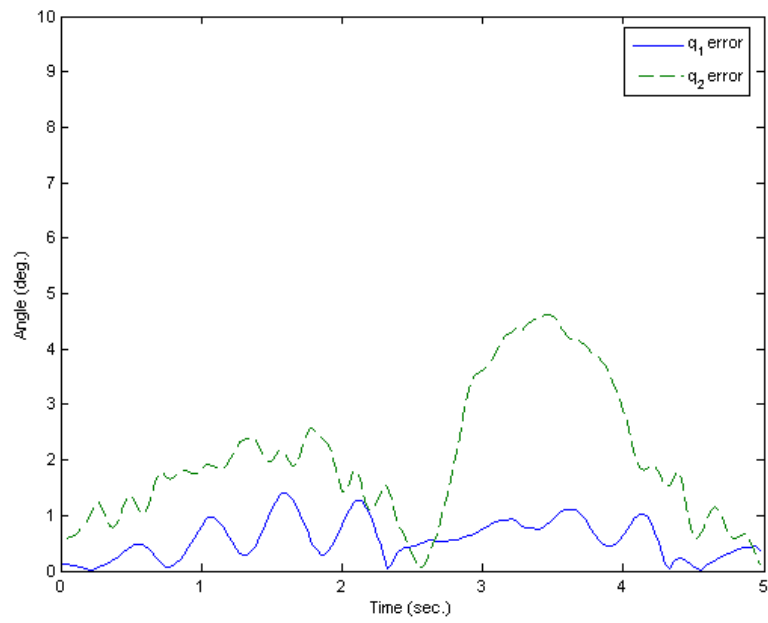


圖 4 - 118 AFSMC 水平線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：5 秒)

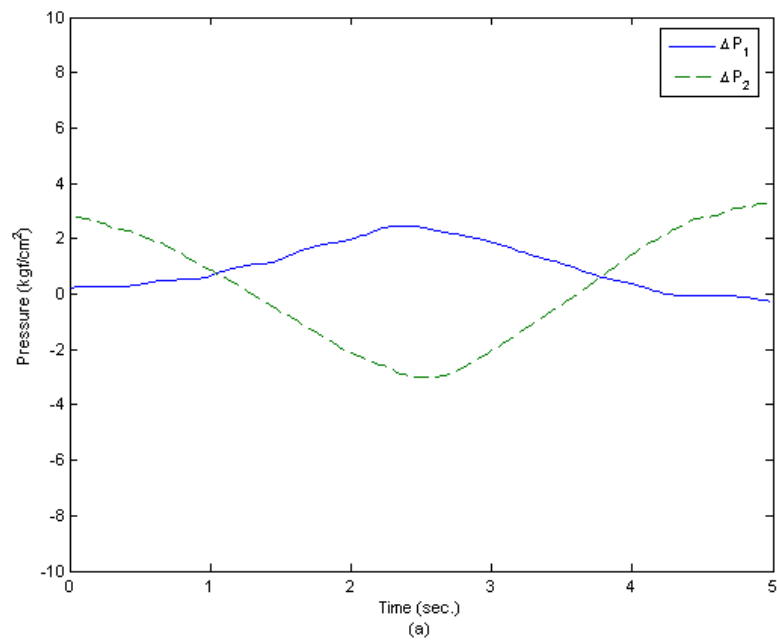


圖 4 - 119 AFSMC 水平線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：5 秒)

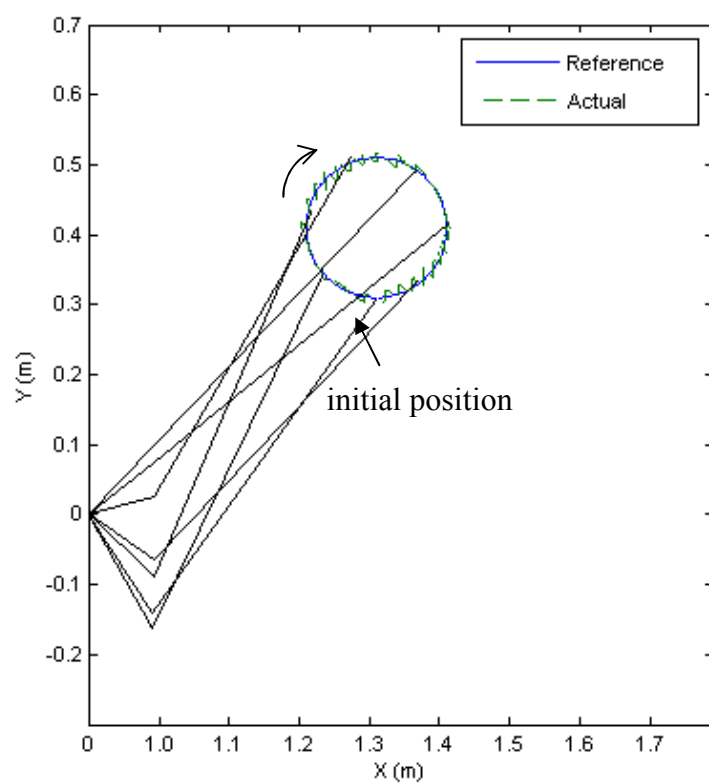


圖 4 - 120 AFSMC 圓形路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：20 秒)

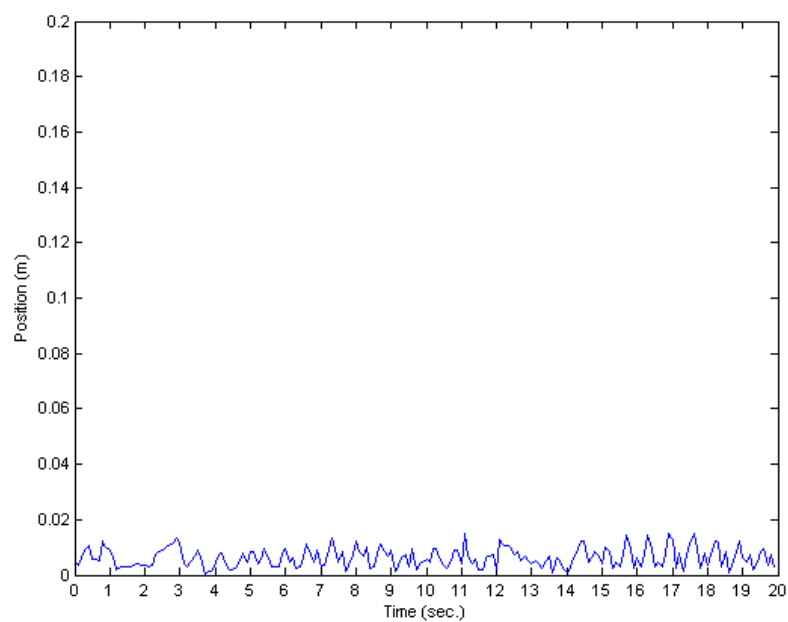


圖 4 - 121 AFSMC 圓形路徑軌跡追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

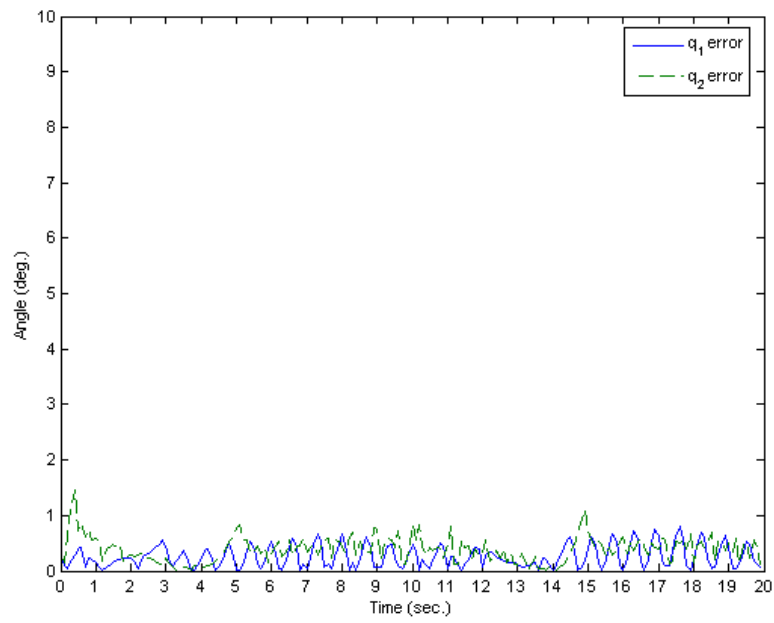


圖 4 - 122 AFSMC 圓形路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

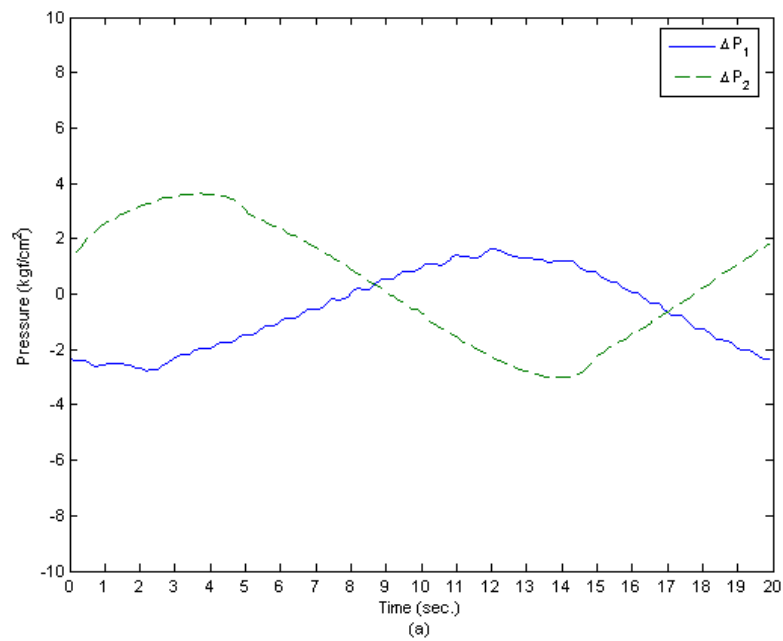


圖 4 - 123 AFSMC 圓形路徑兩關節的壓力差
(響應時間：20 秒)

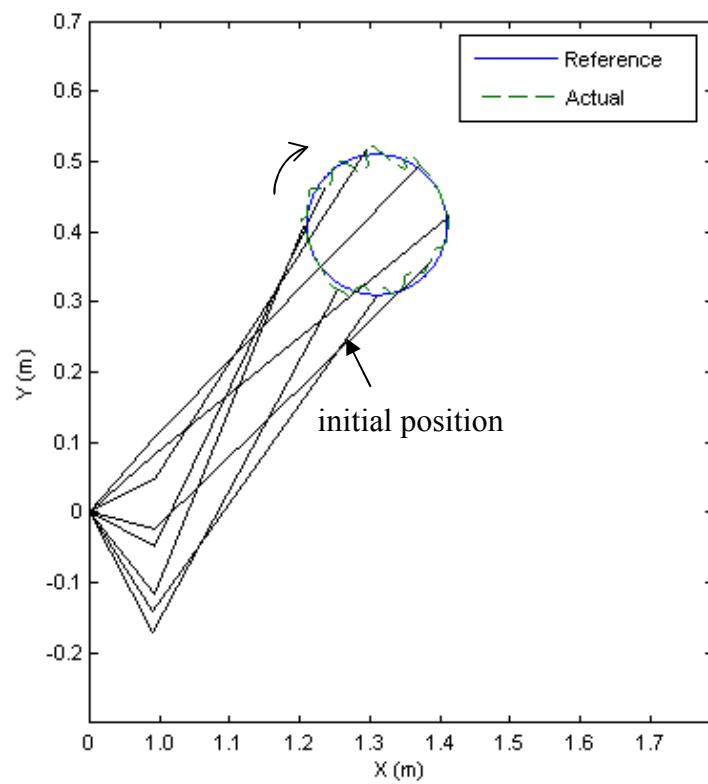


圖 4 - 124 AFSMC 圓形路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：6 秒)

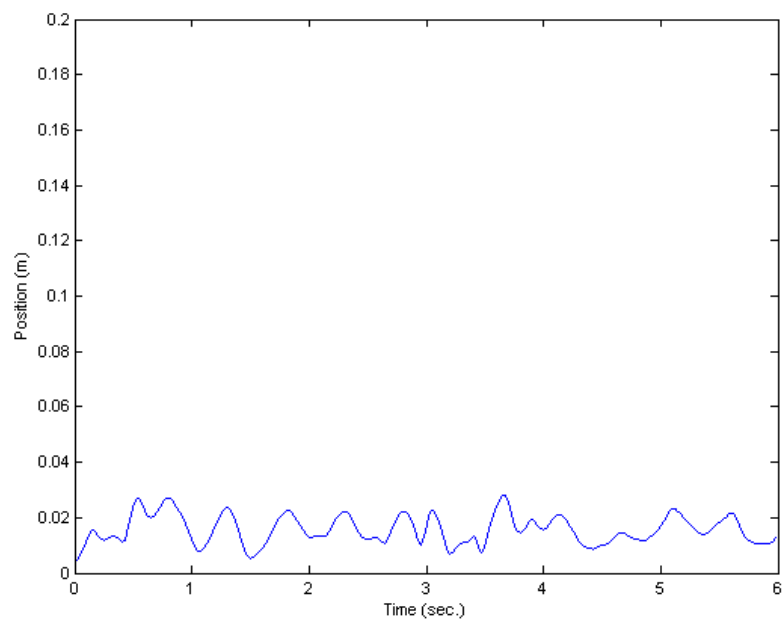


圖 4 - 125 AFSMC 圓形路徑軌跡追蹤誤差
(響應時間：6 秒)

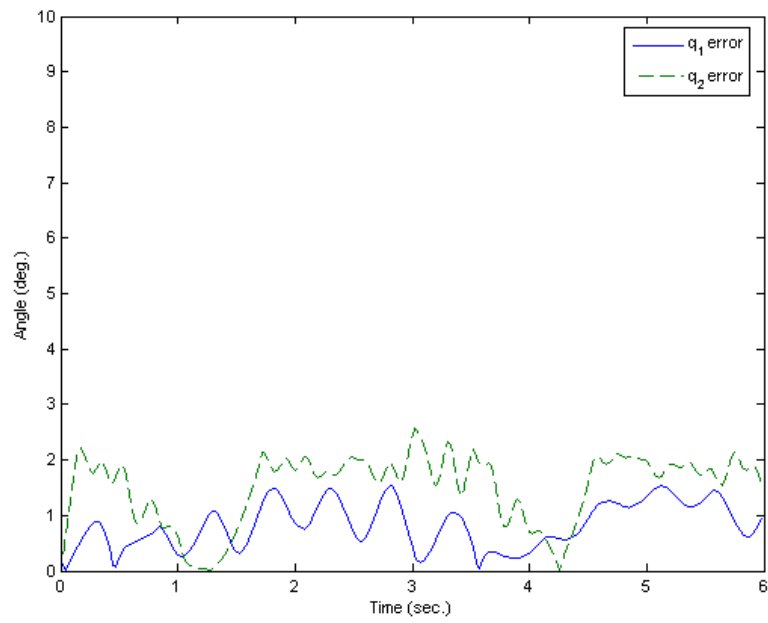


圖 4 - 126 AFSMC 圓形路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：6 秒)

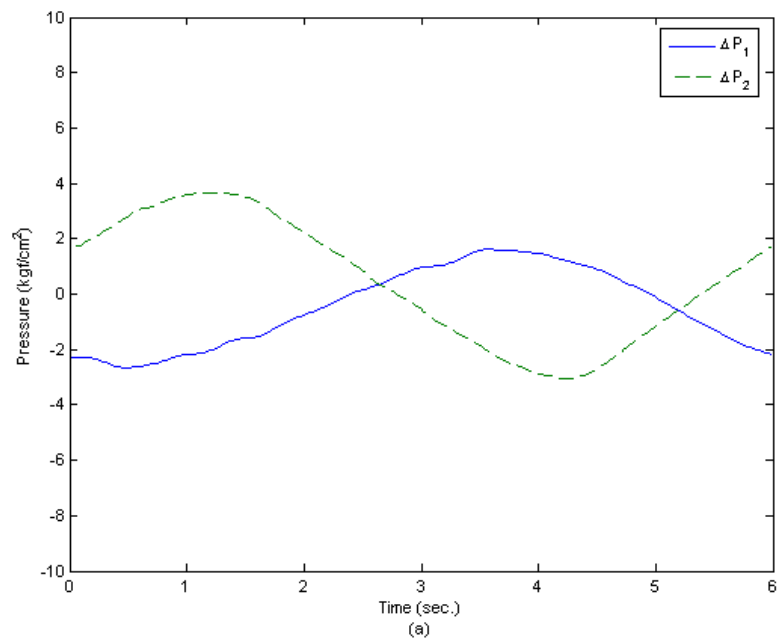


圖 4 - 127 AFSMC 圓形路徑兩關節的壓力差
(響應時間：6 秒)

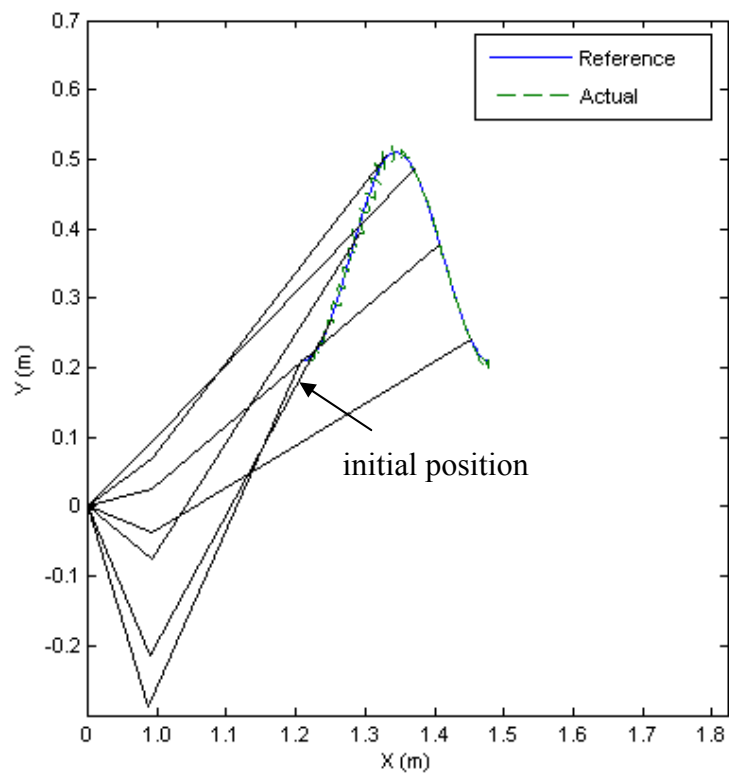


圖 4 - 128 AFSMC 曲線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：20 秒)

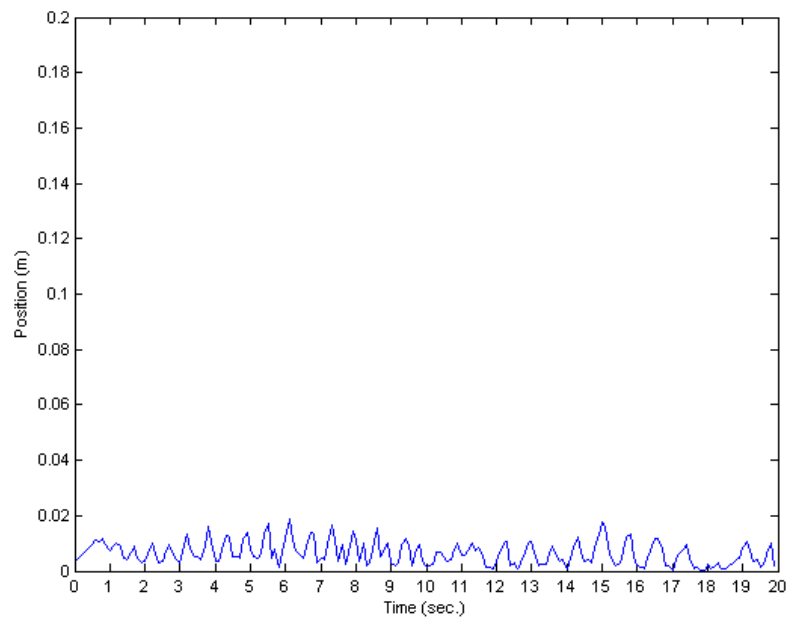


圖 4 - 129 AFSMC 曲線路徑軌跡追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

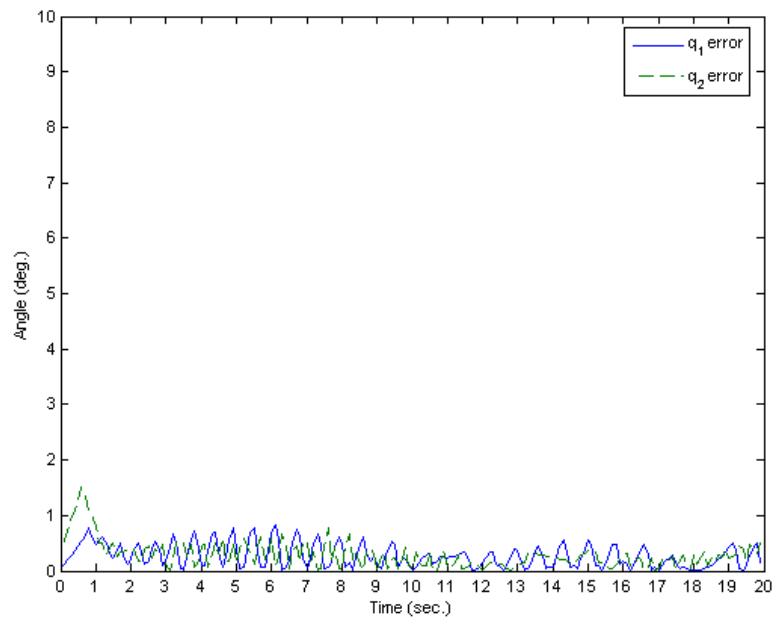


圖 4 - 130 AFSMC 曲線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

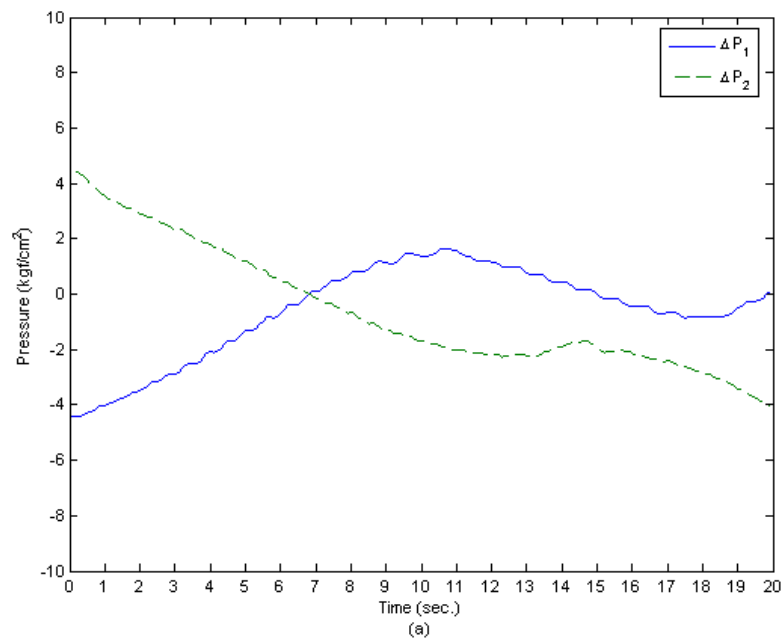


圖 4 - 131 AFSMC 曲線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：20 秒)

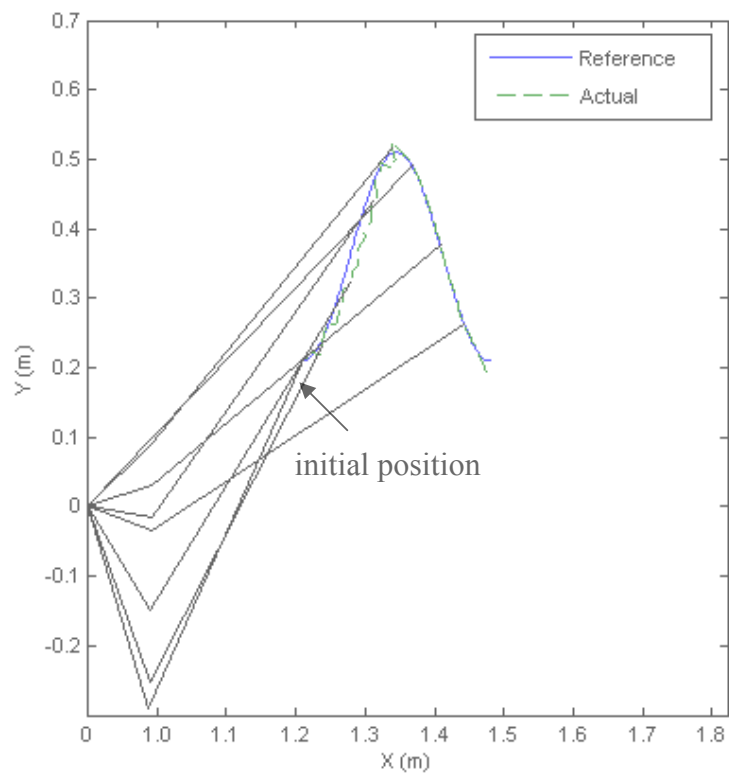


圖 4 - 132 AFSMC 曲線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：6 秒)

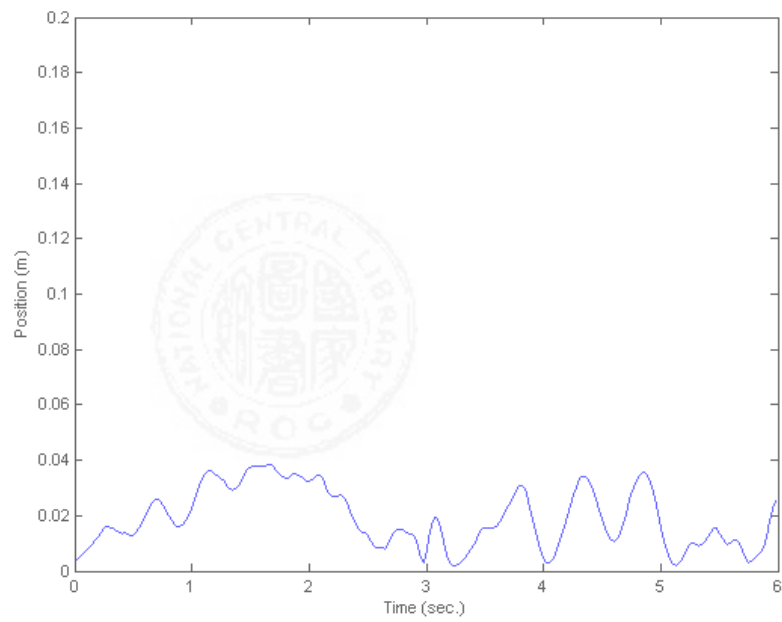


圖 4 - 133 AFSMC 曲線路徑軌跡追蹤誤差
(響應時間：6 秒)

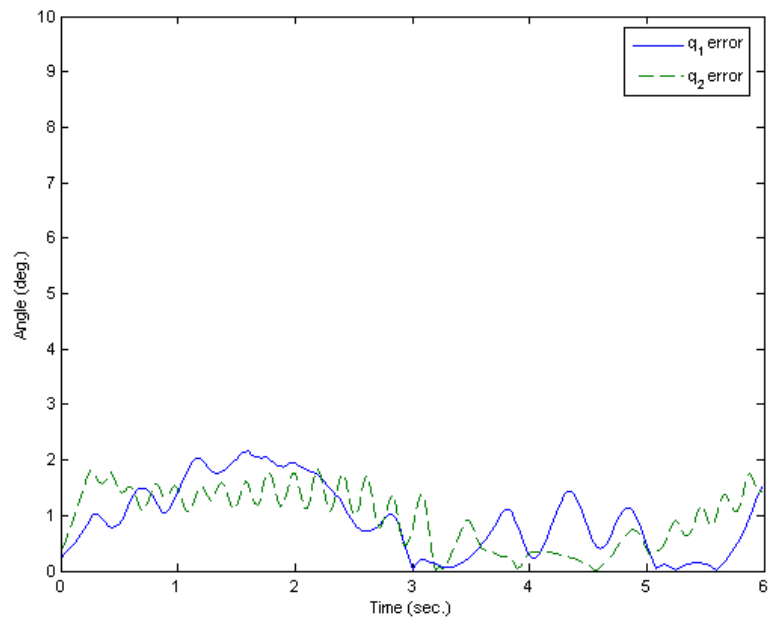


圖 4 - 134 AFSMC 曲線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：6 秒)

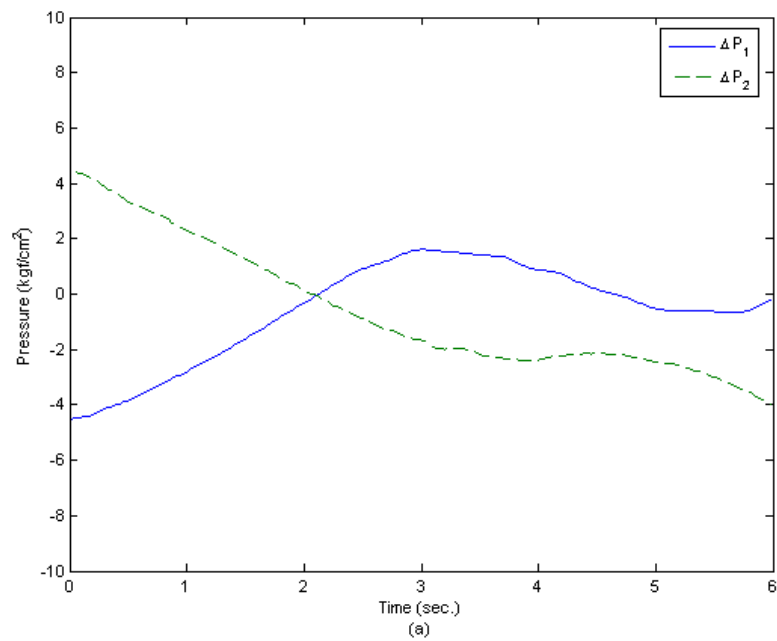


圖 4 - 135 AFSMC 曲線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：6 秒)

4.2.4 結合適應比例因子之適應性模糊滑動模式控制器(AFSMC_ASF)之實驗結果

圖 4 - 136 ~ 圖 4 - 140 為 AFSMC_ASF 應用於響應時間為 20 秒之鉛錘線路徑追蹤結果，其控制參數設定也與 4.1 節相同，並藉此比較控制器之強健性，由圖 4 - 136 可看出追蹤性能良好，由圖 4 - 137 可看出，其 X 方向位置追蹤誤差，最大誤差值為 6.9 mm，誤差平均值為 1.5 mm，圖 4 - 138 為透過逆向運動所計算出的兩關節角度之追蹤誤差圖，由圖中可看出 q_1 和 q_2 最大角度追蹤誤差分別為 0.7102° 及 0.8355° 。圖 4 - 139 則為兩關節氣壓肌肉內部壓力差變化曲線圖，一樣可看出其 q_1 的壓力差變化有較明顯的抖動。圖 4 - 140 則是實驗過程中，比例因子 Gu 修正情形，由圖中可看出由於整體誤差不大，故修正幅度也不大，實驗後規則表修正結果如表 4. 19 所示。圖 4 - 140 ~ 圖 4 - 145 為響應時間縮短為 5 秒後，AFSMC_ASF 追蹤結果，由圖 4 - 142 結果可看出，當響應時間縮短為 5 秒後，AFSMC_ASF 追蹤誤差改變並不大，其 X 方向位置追蹤誤差，最大誤差值為 6.9 mm，誤差平均值為 2.5 mm，另外從圖 4 - 143 也可看出 q_1 及 q_2 角度誤差分別為 2.0069° 及 1.8918° ，角度誤差平均值為 0.0335° 及 0.0579° ，此外也可由圖 4 - 144 觀察出，當響應時間縮短為 5 秒的狀況下，壓力差變化較為平滑，實驗後規則表修正結果如表 4. 20 所示。由圖 4 - 145 則可看出，當響應時間縮短後，其比例因子 Gu 有較大幅度的修正。

圖 4 - 146 ~ 圖 4 - 150 為響應時間 20 秒，AFSMC_ASF 水平線軌跡追蹤結果，Y 方向位置最大誤差為 10.9 mm，平均誤差為 4.9 mm，兩關節角度最大誤差， q_1 為 0.5821° ， q_2 為 0.9983° ，實驗後規則表修正結果如表 4. 21 所示。圖 4 - 116 ~ 圖 4 - 119 則是響應時間縮短為 5 秒之追蹤結果，圖 4 - 117 可看出，最大 Y 方向位置誤差為 18.2 mm，整體平均誤差為 7.5 mm，而兩關節角度最大誤差， q_1 為 1.4090° ， q_2 則為 4.6233° ， q_1 和 q_2 角度追蹤平均誤差為 0.0421° 及 0.4178° ，實驗後規則表修正結果如表 4. 22 所示。圖 4 - 150 和圖 4 - 155 則分別為響應時間 20 秒及 5 秒比例因子 Gu 的修正情形。

圖 4 - 156 ~ 圖 4 - 165 為 AFSMC_ASF 於響應時間 20 秒及 6 秒之圓形路徑追蹤結果，由圖 4 - 157 可看出，其平均追蹤誤差為 6.1 mm，最大誤差為 17 mm，由圖 4 - 158 則可看出 q_1 和 q_2 最大角度追蹤誤差分別為 0.7178° 及 1.5605° ，實驗後規則表修正結果如表 4. 23 所示，當響應時間縮短為 6 秒後，其平均追蹤誤差為 16.3 mm，最大誤差為 32.5 mm， q_1 和 q_2 最大角度追蹤誤差分別為 1.6691° 及 2.6430° ，實驗後規則表修正結果如表 4. 24 所示。圖 4 - 160 和圖 4 - 165 則分別為響應時間 20 秒及 6 秒比例因子 Gu 的修正情形。

圖 4 - 166 ~ 圖 4 - 175 為 AFSMC_ASF 追蹤曲線路徑結果，由圖 4 - 167 可看出其平均追蹤誤差為 6.4 mm，最大誤差為 17.2 mm，由此可看出雖然前 10 秒兩關節角度變化較大，然 AFSMC_ASF 響應速度仍跟得上且更勝 AFSMC，另外由圖 4 - 168 也可看出，兩個關節角度追蹤平均誤差為 0.1143° 及 0.2427° ，實驗後規則表修正結果如表 4. 25 所示。當響應縮短為 6 秒後，由圖 4 - 172 可看出，其最大追蹤誤差為 39.5 mm，整體平均誤差為 17.8 mm，由圖 4 - 173 則可看出 q_1 和 q_2 兩關節追蹤最大誤差，分別為 1.7746° 及 2.2508° ，實驗後規則表修正結果如表 4. 26 所示。

由以上實驗可看出，在加入適應法則進行線上調整規則表及解模糊化比例因子 Gu 後，系統更能因應外在環境的變化，即時修正規則表和比例因子，使得系統強健性提高。

表 4. 19 AFSMC_ASF 於鉛錘線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：20 秒)

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-0.9999	-0.6837	-0.4226	0	0.4170	0.6844	0.9998
q_2 修正後	-1	-0.6662	-0.3858	0	0.4118	0.6689	1

表 4. 20 AFSMC_ASF 於鉛錘線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：5 秒)

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1.0953	-0.6484	-0.3424	0	0.3488	0.6577	1.0762
q_2 修正後	-0.999	-0.6864	-0.3646	0	0.3643	0.6949	1.0183

表 4. 21 AFSMC_ASF 於水平線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：20 秒)

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1	-0.6687	-0.417	0	0.41	0.6647	1
q_2 修正後	-1	-0.6692	-0.4461	0	0.4716	0.6906	0.9999

表 4.22 AFSMC_ASF 於水平線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：5 秒)

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1.0292	-0.6785	-0.3461	0	0.3503	0.6765	1.0225
q_2 修正後	-1.1019	-0.6366	-0.3451	0	0.3451	0.4149	1.2603

表 4.23 AFSMC_ASF 於圓形路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：20 秒)

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-0.9996	-0.6879	-0.4239	0	0.4298	0.6785	1
q_2 修正後	-1	-0.6766	-0.4602	0	0.4828	0.6938	1.0053

表 4.24 AFSMC_ASF 於圓形路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：6 秒)

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1.0505	-0.6757	-0.3561	0	0.3514	0.6780	1.0504
q_2 修正後	-1.1066	-0.6472	-0.344	0	0.3478	0.6744	1.1419

表 4.25 AFSMC_ASF 於曲線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：20 秒)

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1	-0.6686	-0.4046	0	0.4425	0.7194	0.9944
q_2 修正後	-1	-0.6829	-0.4918	0	0.3617	0.6669	1

表 4.26 AFSMC_ASF 於曲線路徑軌跡追蹤之修正後規則表(響應時間：6 秒)

規則中心值	C_i						
q_1 修正後	-1.0296	-0.6703	-0.3427	0	0.3462	0.6638	1.1102
q_2 修正後	-1.0965	-0.6768	-0.367	0	0.3407	0.6687	1

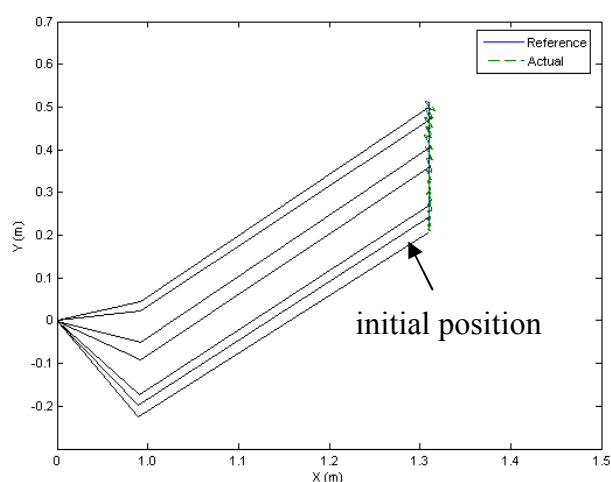


圖 4 - 136 AFSMC_ASF 鉛錘線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：20 秒)

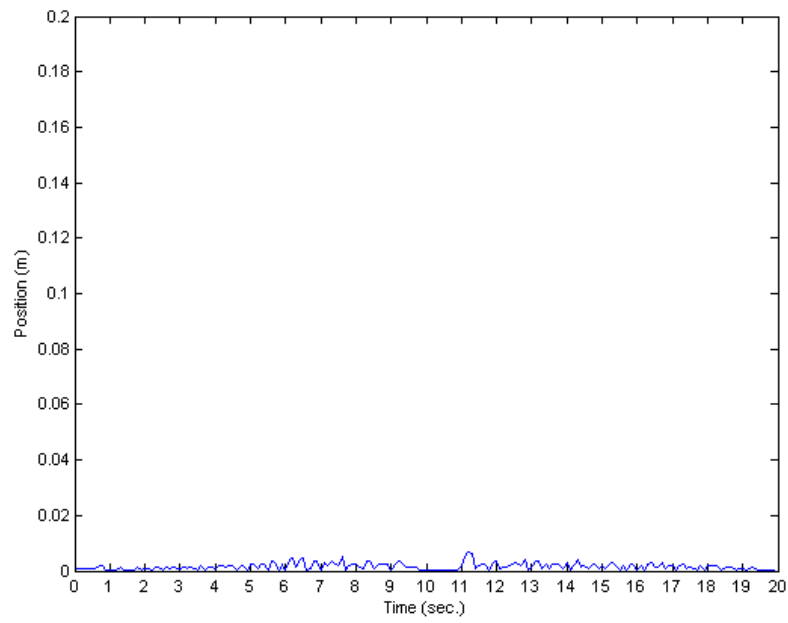


圖 4 - 137 AFSMC_ASF 鉛錘線路徑軌跡追蹤誤差(X 方向)
(響應時間：20 秒)

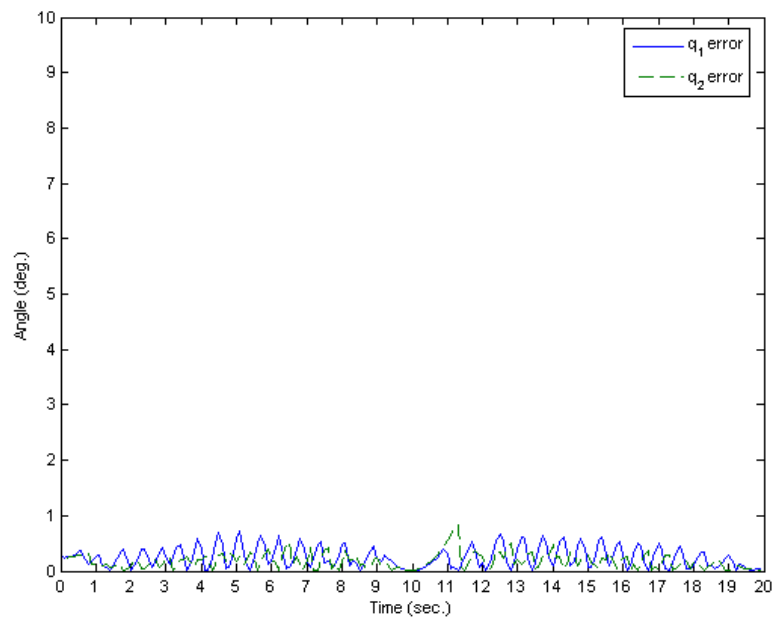


圖 4 - 138 AFSMC_ASF 鉛錘線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

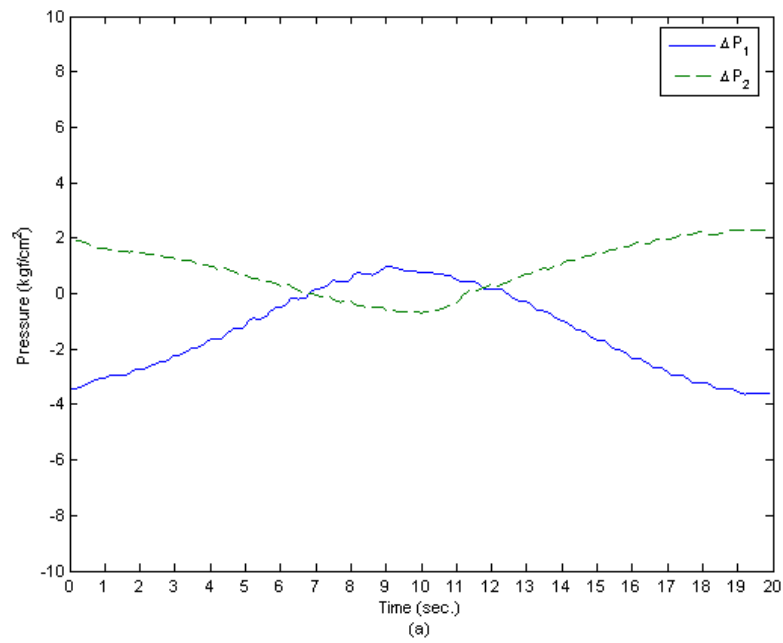


圖 4 - 139 AFSMC_ASF 鉛錘線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：20 秒)

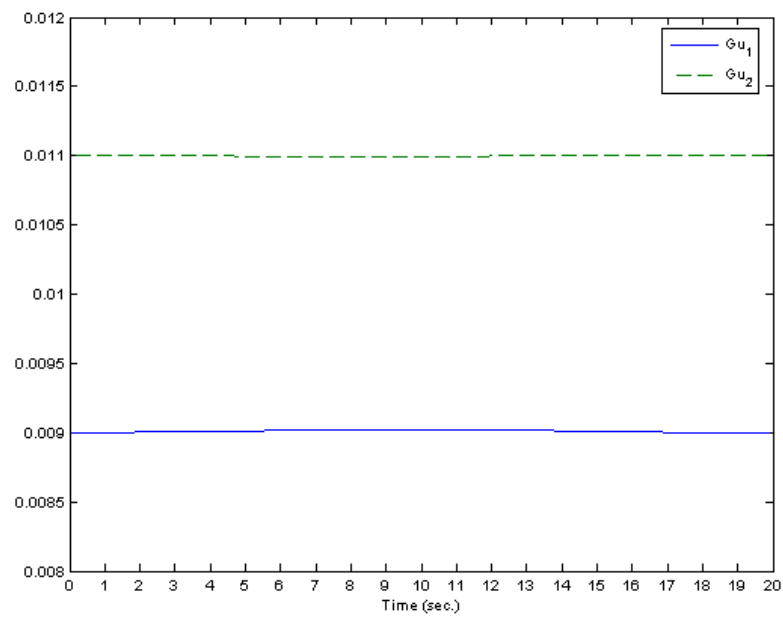


圖 4 - 140 AFSMC_ASF 鉛錘線路徑兩關節的
比例因子 G_u 變化情形(響應時間：20 秒)

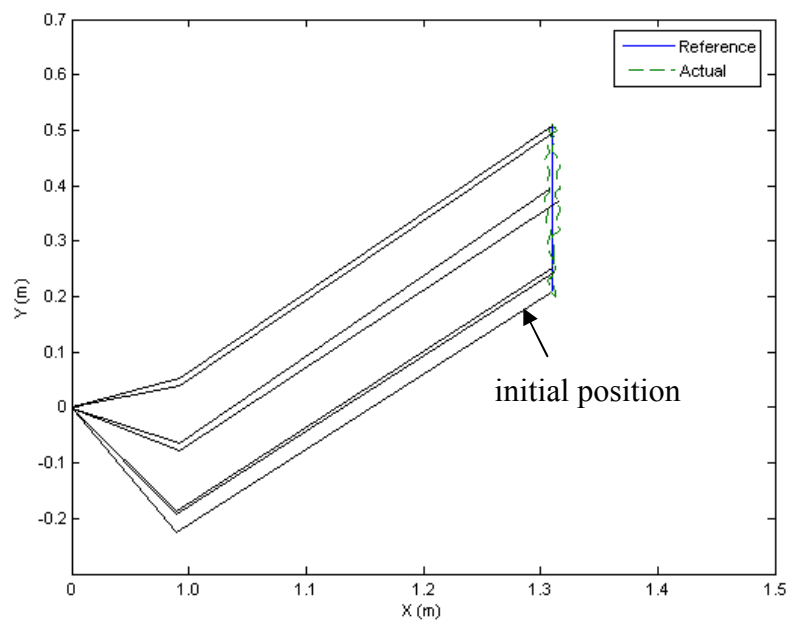


圖 4 - 141 AFSMC_ASF 鉛錘線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：5 秒)

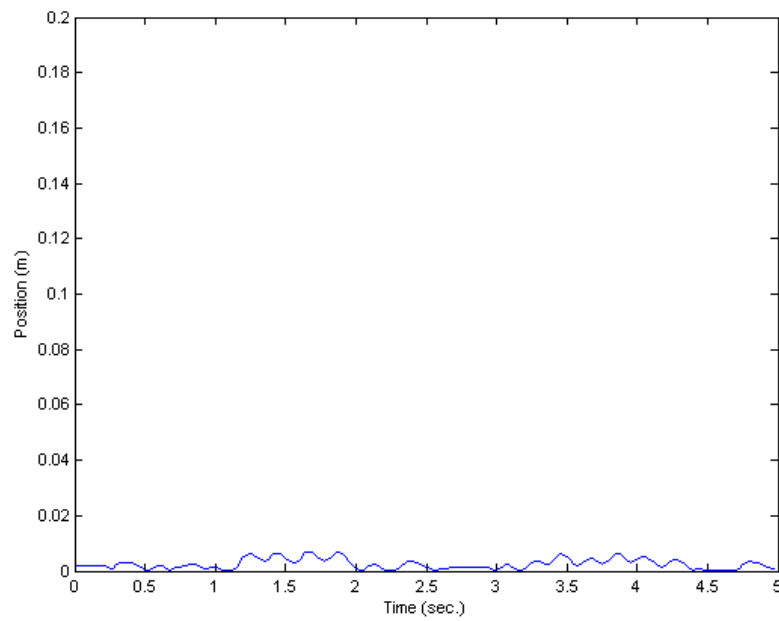


圖 4 - 142 AFSMC_ASF 鉛錘線路徑軌跡追蹤誤差(X 方向)
(響應時間：5 秒)

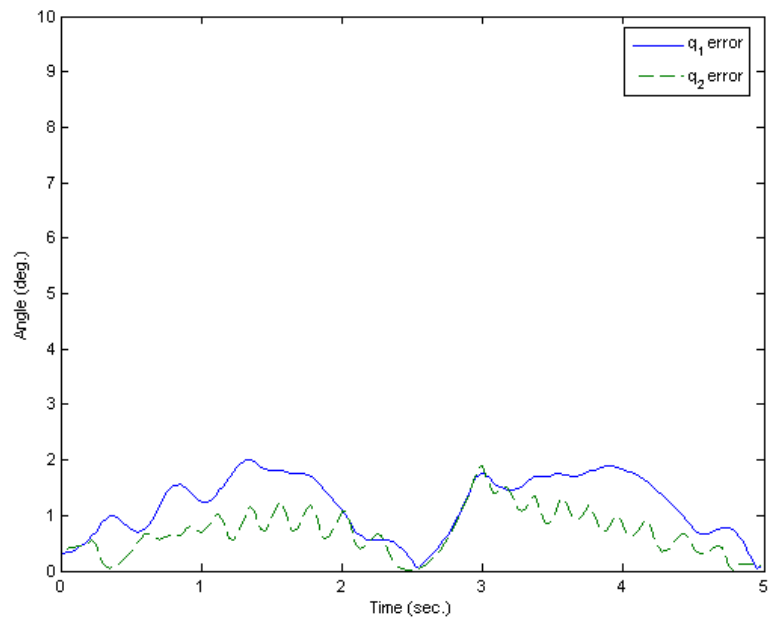


圖 4 - 143 AFSMC_ASF 鉛錘線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：5 秒)

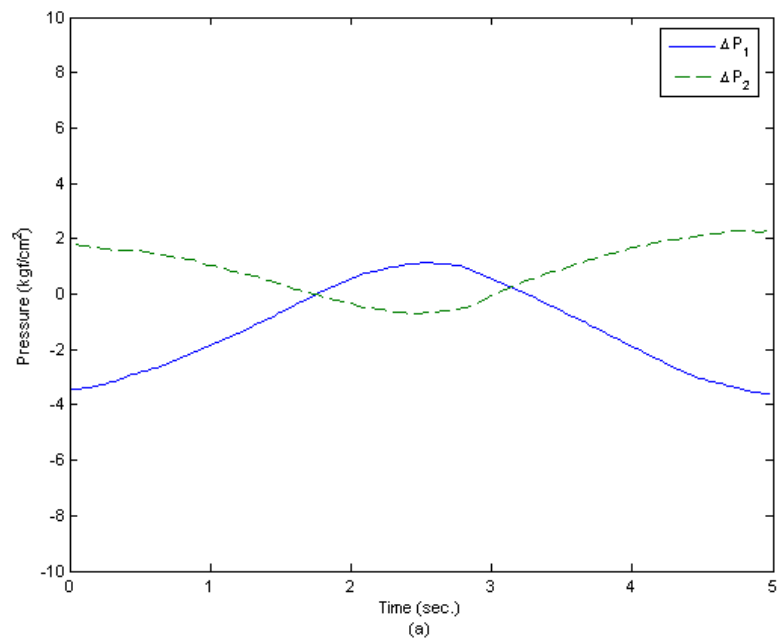


圖 4 - 144 AFSMC_ASF 鉛錘線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：5 秒)

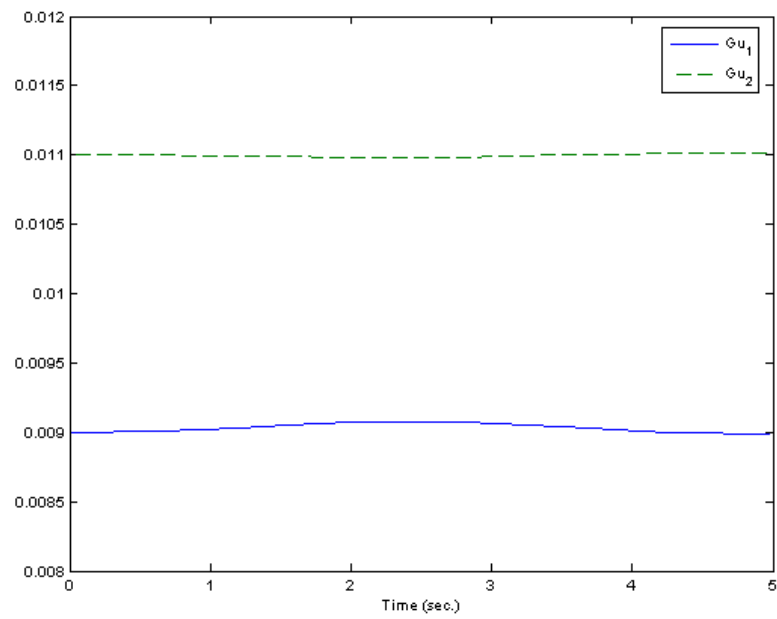


圖 4 - 145 AFSMC_ASF 鉛錘線路徑兩關節的比例因子 G_u 變化情形(響應時間：5 秒)

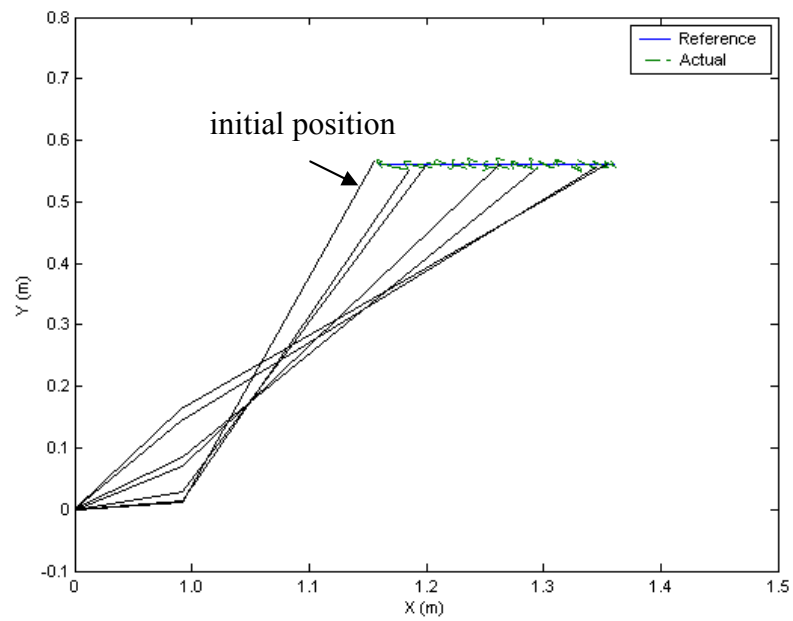


圖 4 - 146 AFSMC_ASF 水平線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：20 秒)

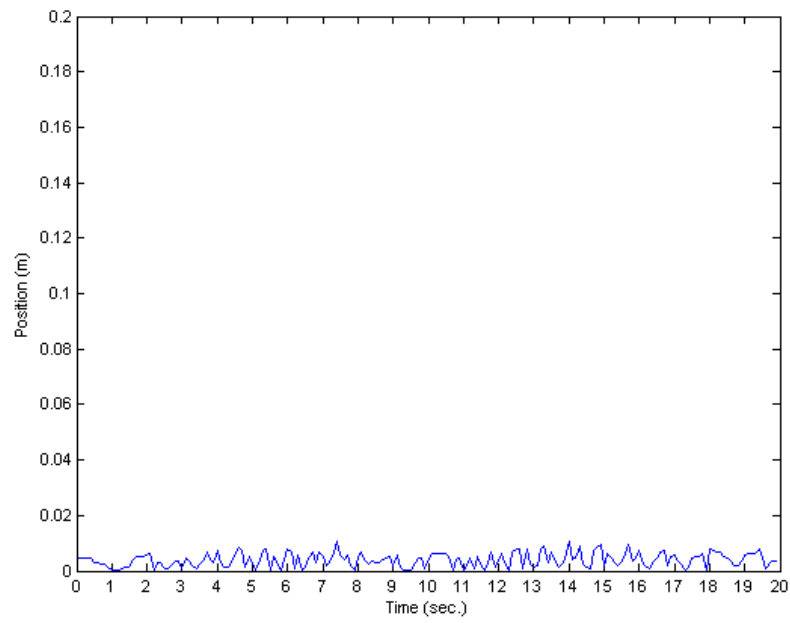


圖 4 - 147 AFSMC_ASF 水平線路徑軌跡追蹤誤差(Y 方向)
(響應時間：20 秒)

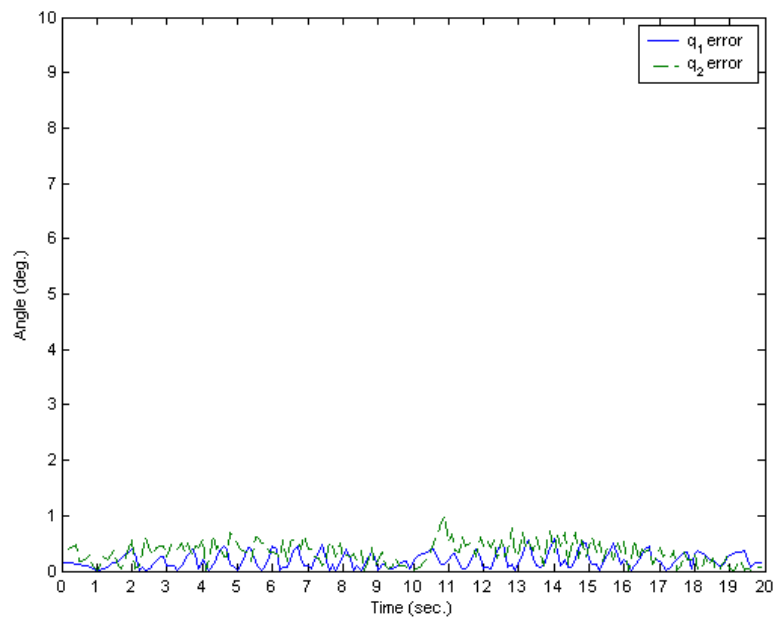


圖 4 - 148 AFSMC_ASF 水平線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

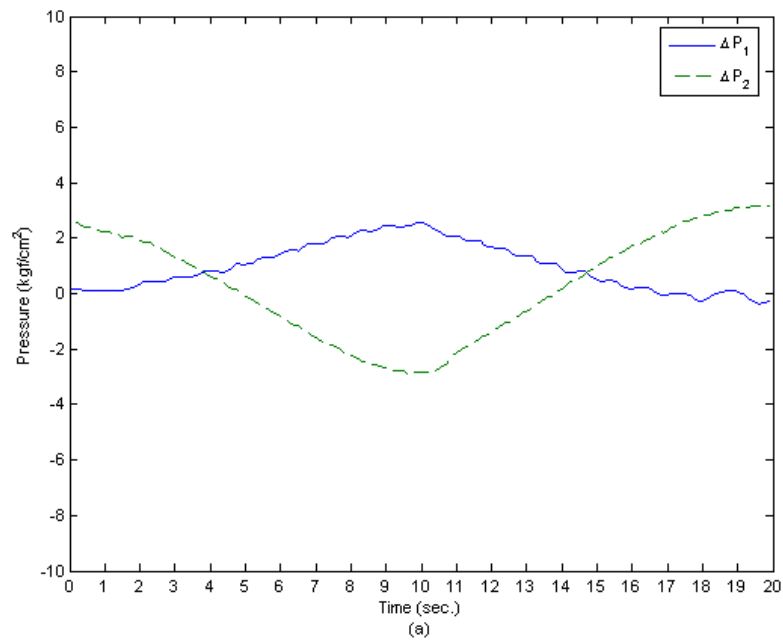


圖 4 - 149 AFSMC_ASF 水平線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：20 秒)

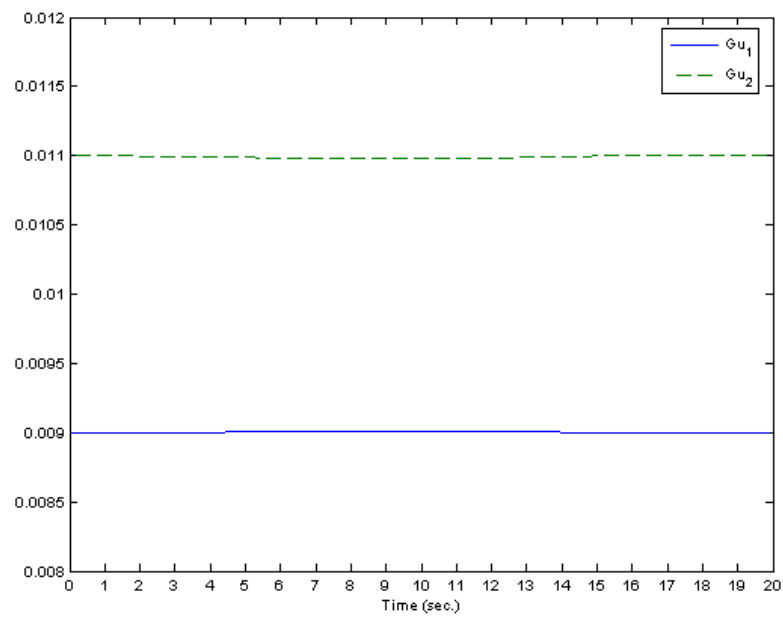


圖 4 - 150 AFSMC_ASF 水平線路徑兩關節的
比例因子 G_u 變化情形(響應時間：20 秒)

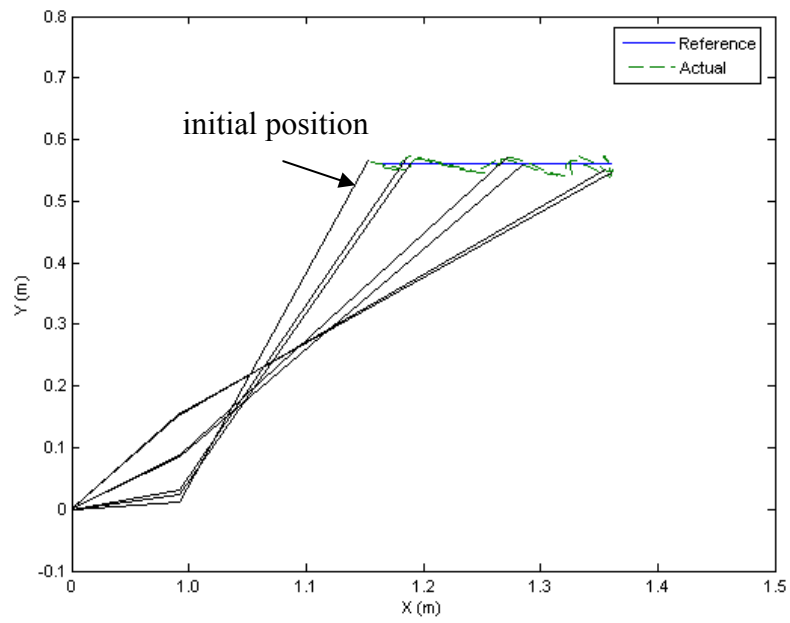


圖 4 - 151 AFSMC_ASF 水平線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：5 秒)

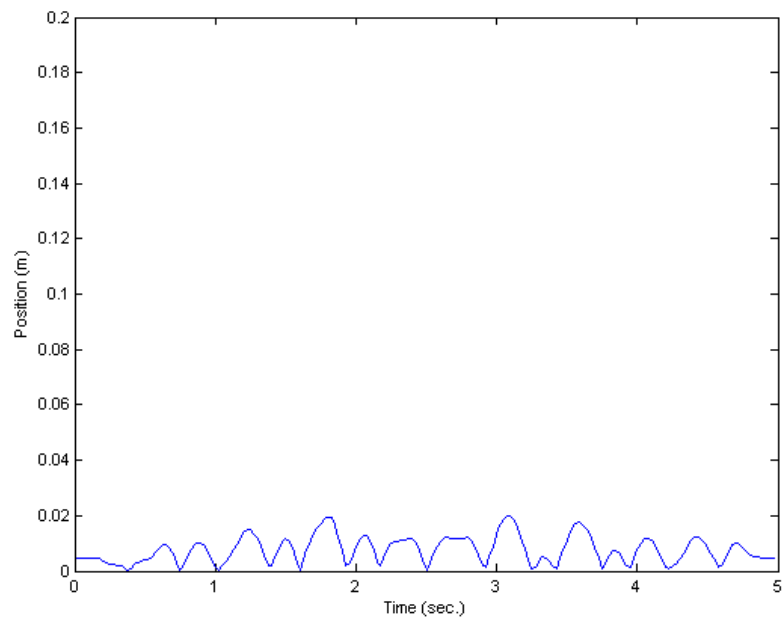


圖 4 - 152 AFSMC_ASF 水平線路徑軌跡追蹤誤差(Y 方向)
(響應時間：5 秒)

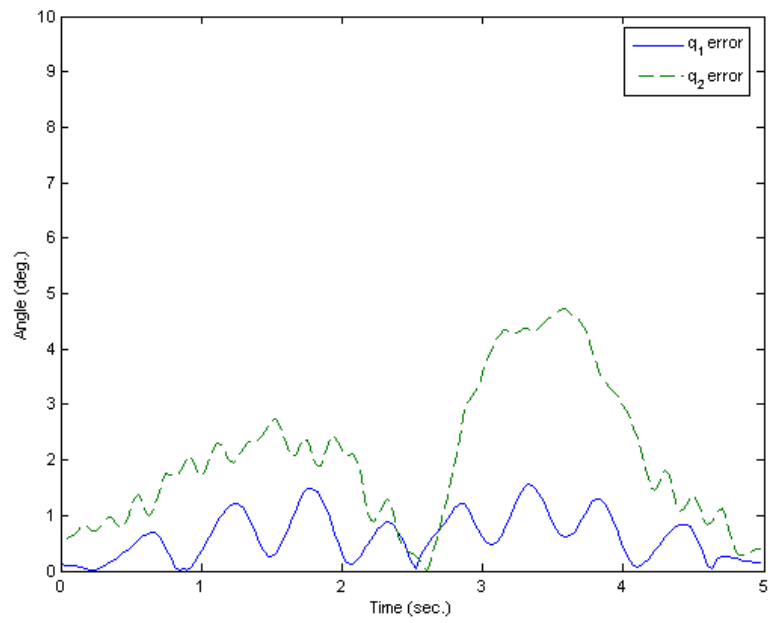


圖 4 - 153 AFSMC_ASF 水平線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：5 秒)

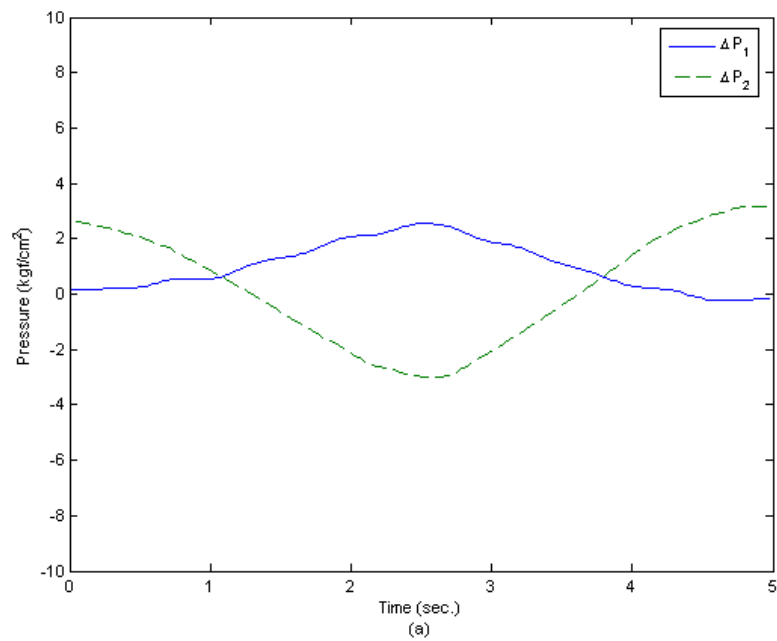


圖 4 - 154 AFSMC_ASF 水平線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：5 秒)

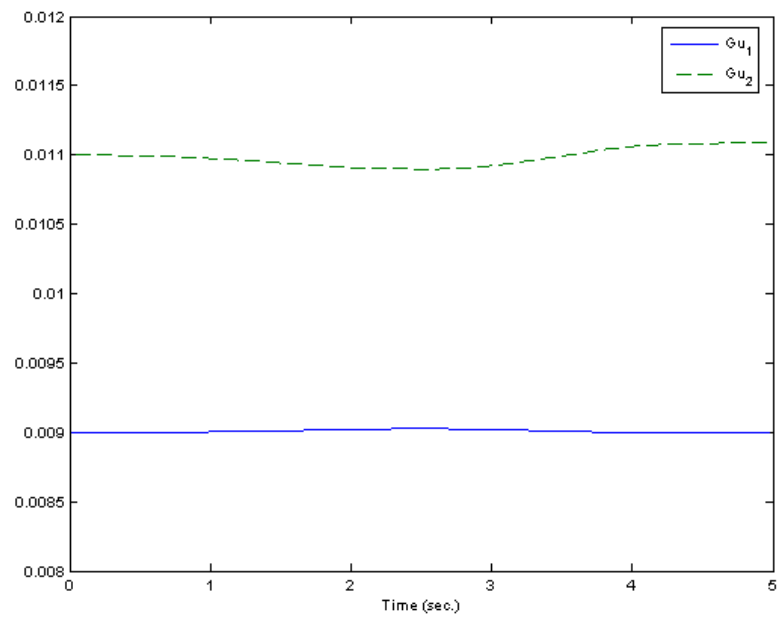


圖 4 - 155 AFSMC_ASF 水平線路徑兩關節的比例因子 G_u 變化情形(響應時間：5 秒)

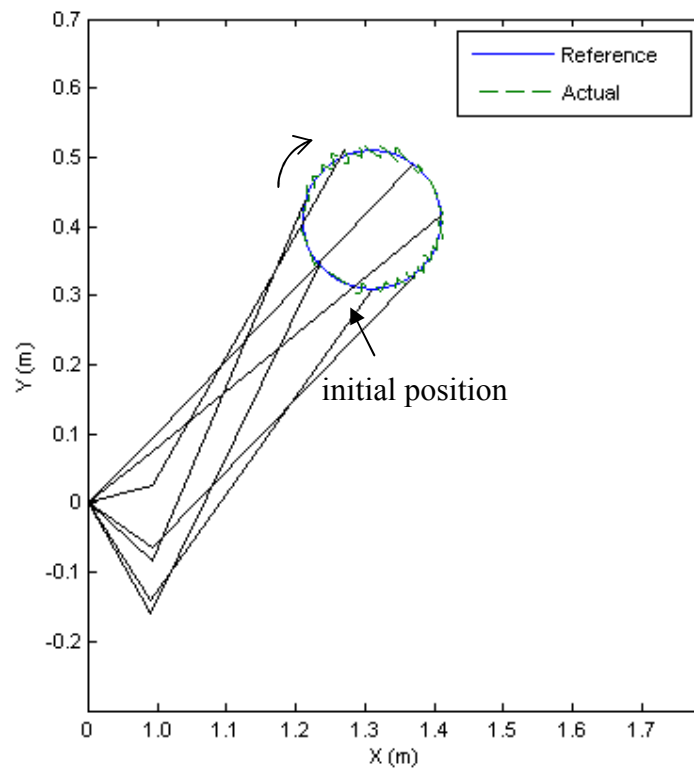


圖 4 - 156 AFSMC_ASF 圓形路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：20 秒)

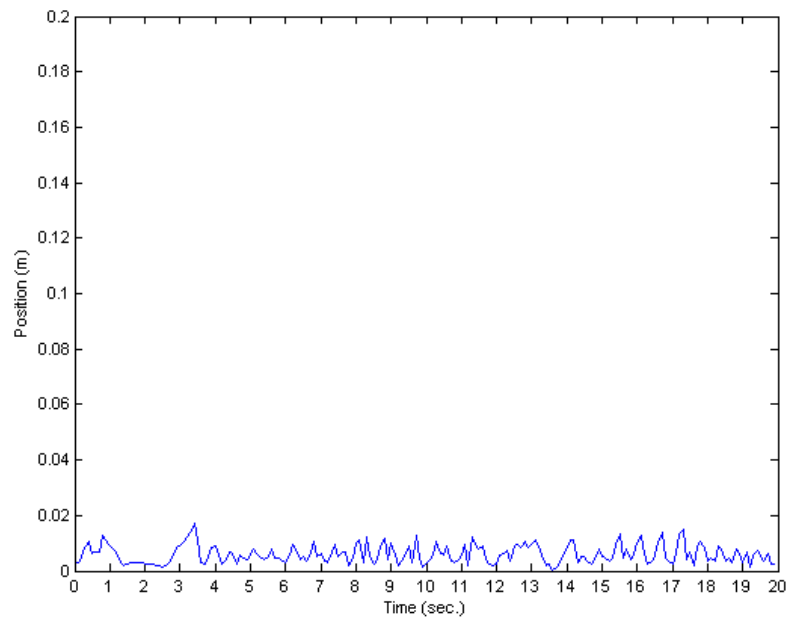


圖 4 - 157 AFSMC_ASF 圓形路徑軌跡追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

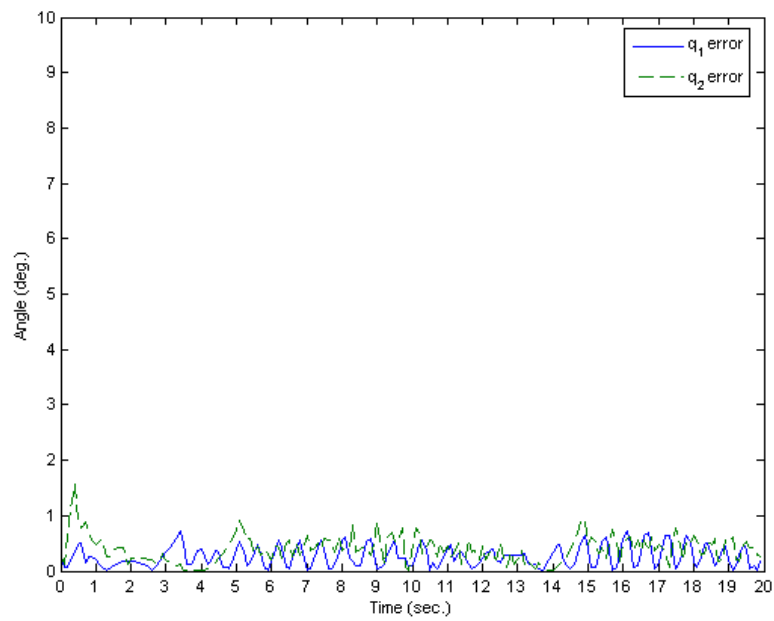


圖 4 - 158 AFSMC_ASF 圓形路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

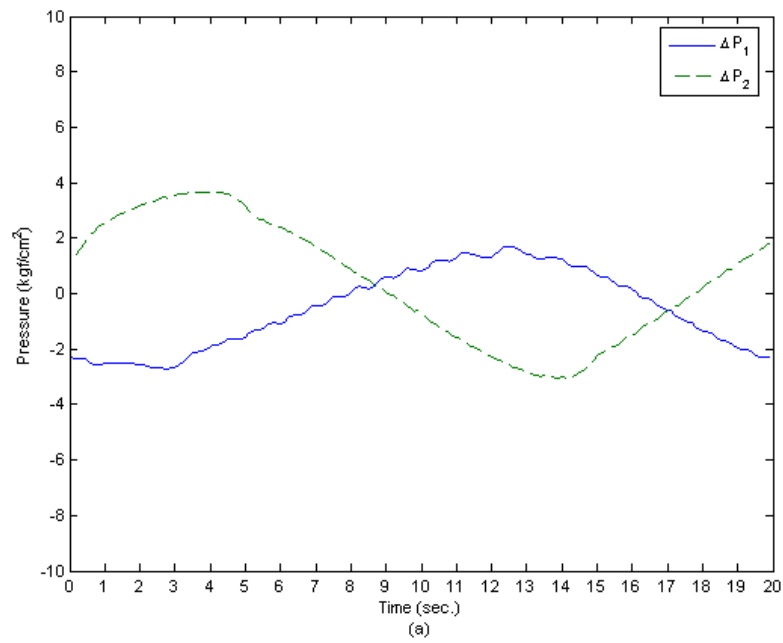


圖 4 - 159 AFSMC_ASF 圓形路徑兩關節的壓力差
(響應時間：20 秒)

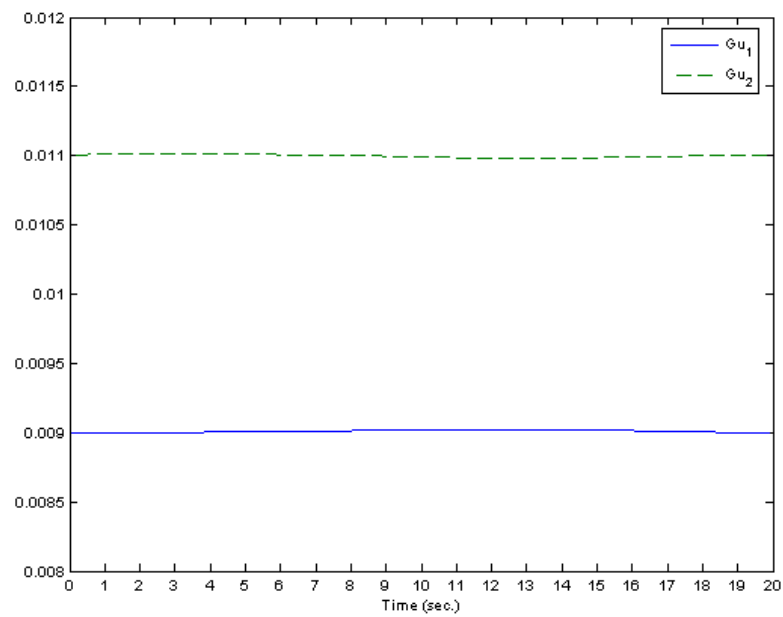


圖 4 - 160 AFSMC_ASF 圓形路徑兩關節的
比例因子 G_u 變化情形(響應時間：20 秒)

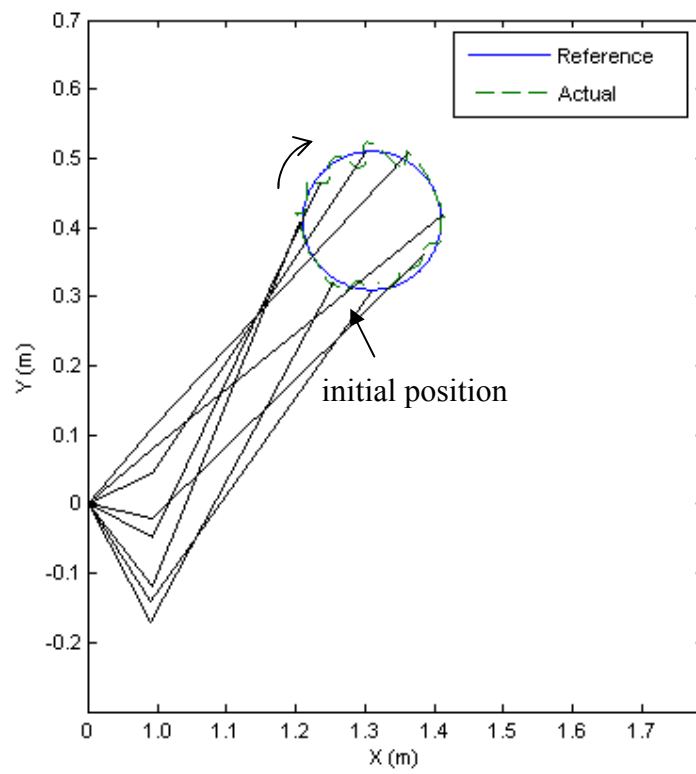


圖 4 - 161 AFSMC_ASF 圓形路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：6 秒)

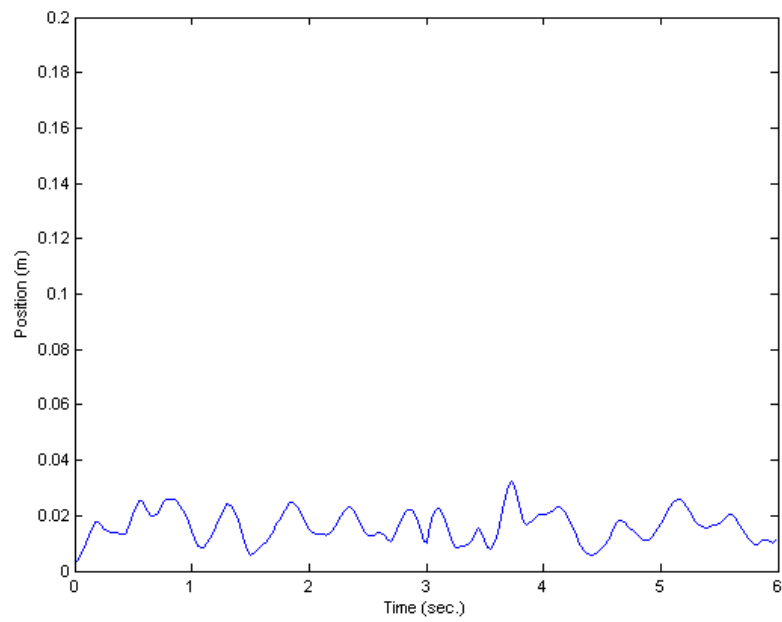


圖 4 - 162 AFSMC_ASF 圓形路徑軌跡追蹤誤差
(響應時間：6 秒)

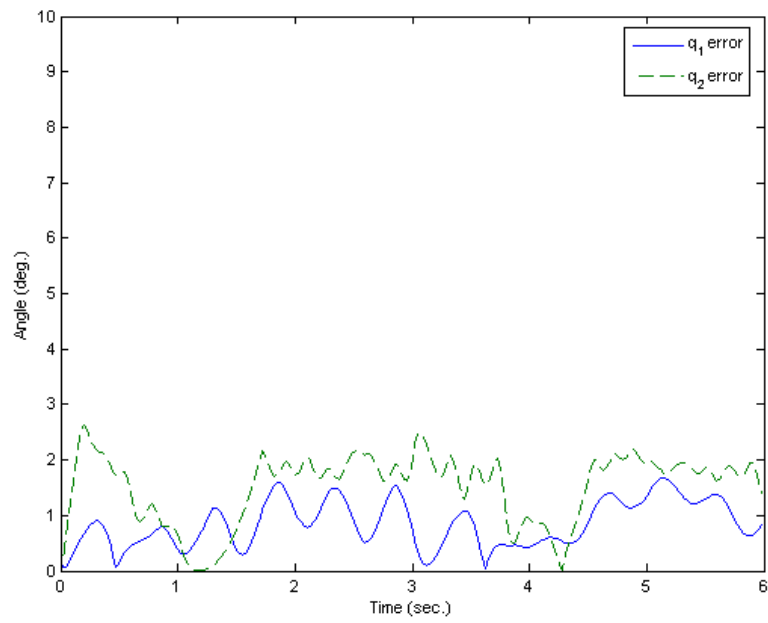


圖 4 - 163 AFSMC_ASF 圓形路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：6 秒)

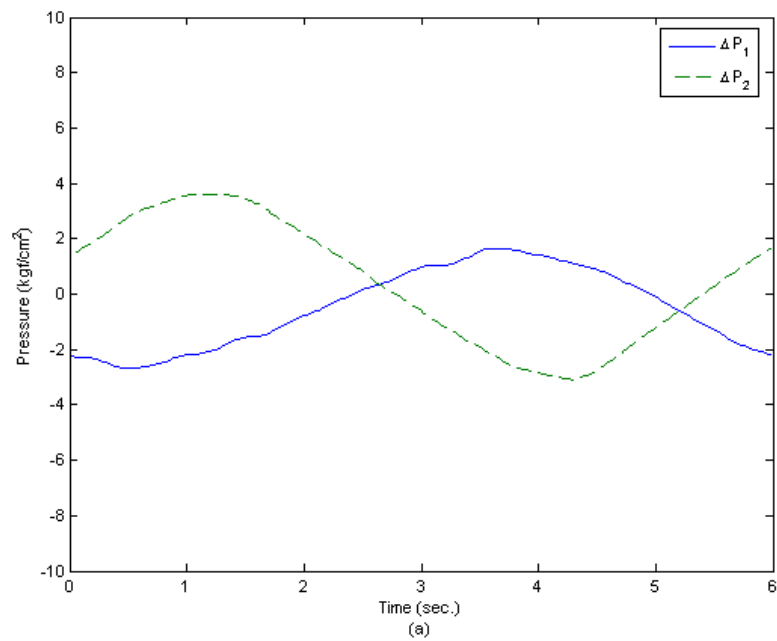


圖 4 - 164 AFSMC_ASF 圓形路徑兩關節的壓力差
(響應時間：6 秒)

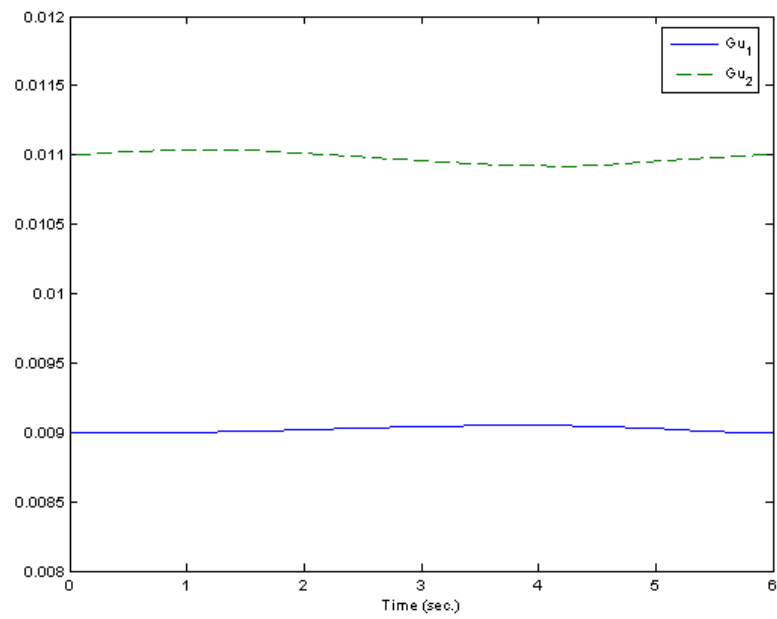


圖 4 - 165 AFSMC_ASF 圓形路徑兩關節的比例因子 G_u 變化情形(響應時間：6 秒)

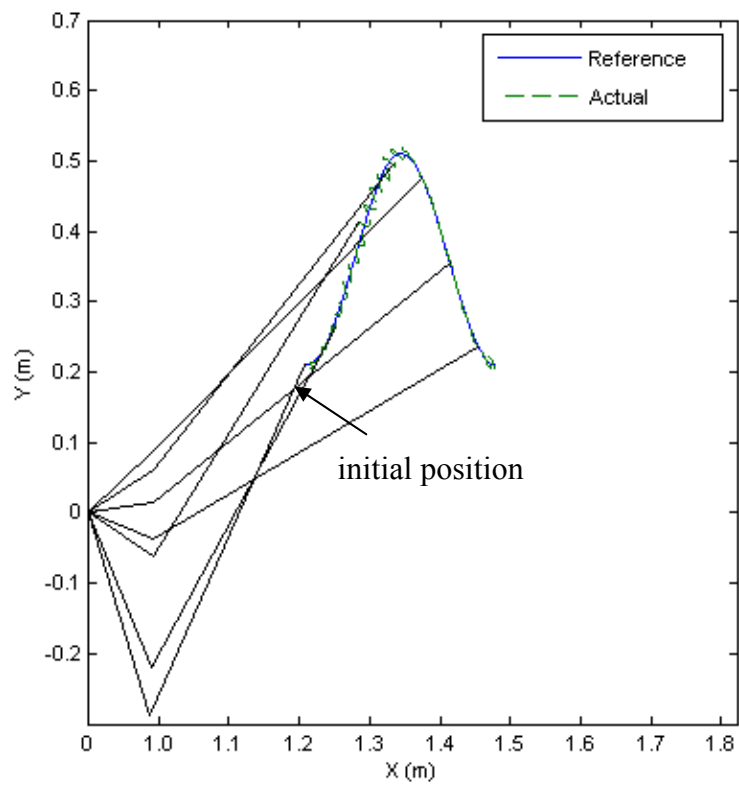


圖 4 - 166 AFSMC_ASF 曲線路徑軌跡追蹤響應(響應時間：20 秒)

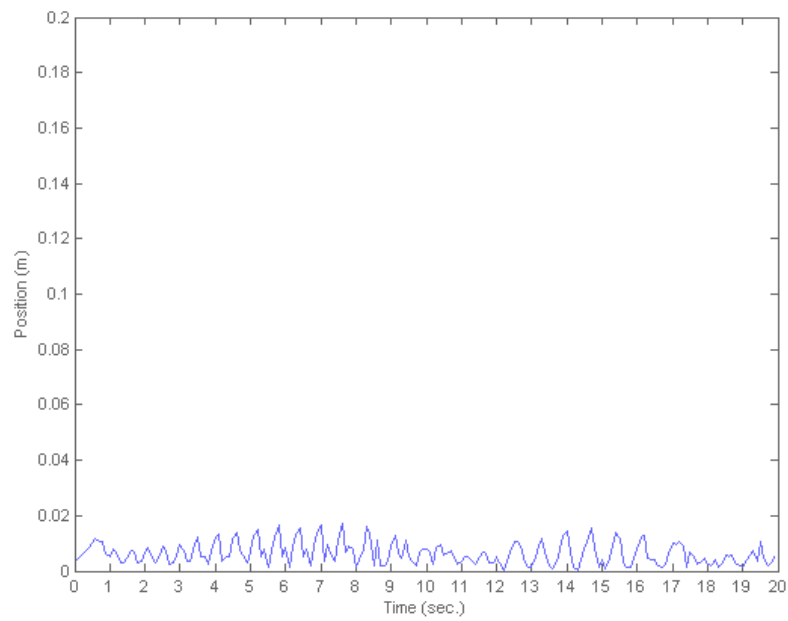


圖 4 - 167 AFSMC_ASF 曲線路徑軌跡追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

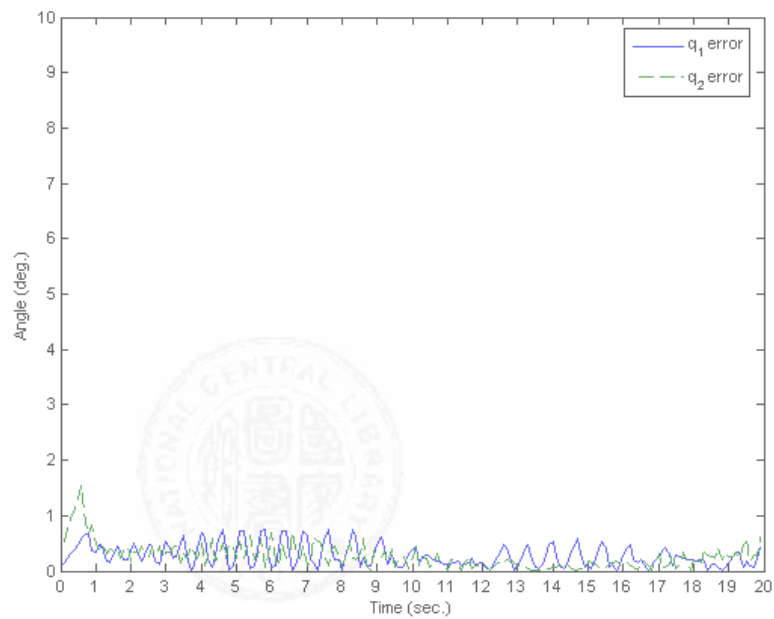


圖 4 - 168 AFSMC_ASF 曲線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：20 秒)

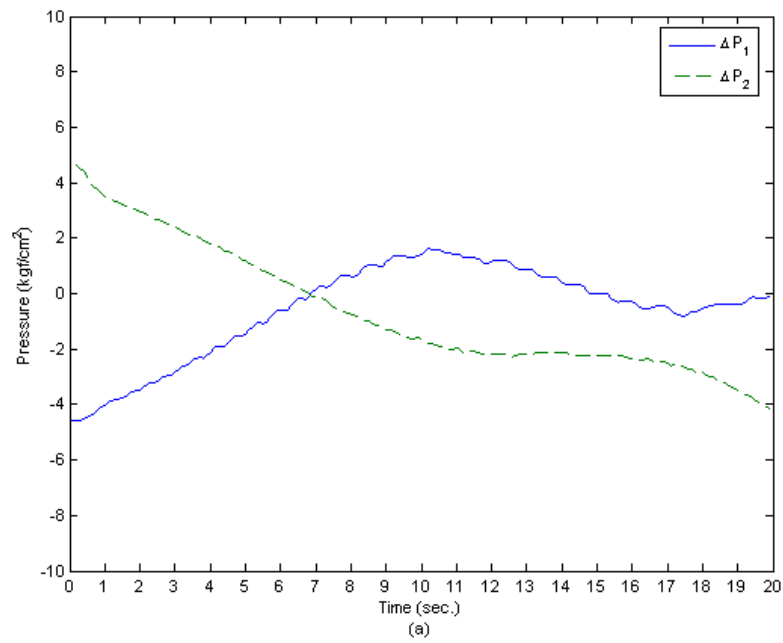


圖 4 - 169 AFSMC_ASF 曲線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：20 秒)

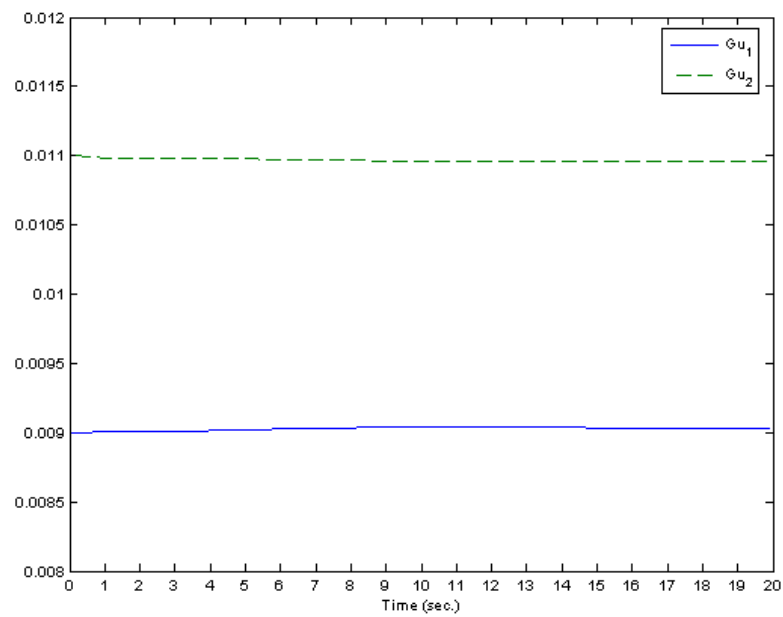


圖 4 - 170 AFSMC_ASF 曲線路徑兩關節的
比例因子 G_u 變化情形(響應時間：20 秒)

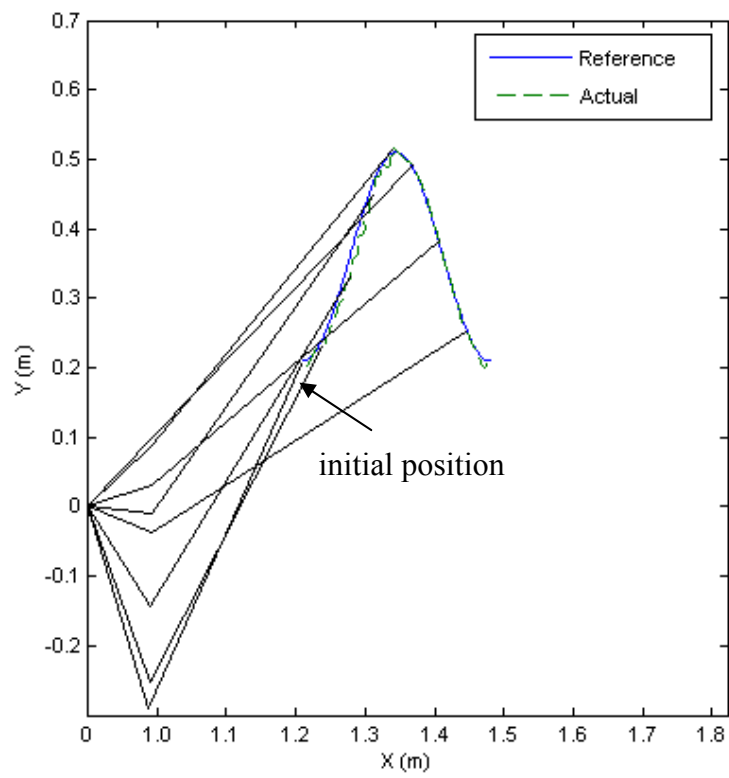


圖 4 - 171 AFSMC_ASF 曲線路徑軌跡追蹤響應
(響應時間：6 秒)

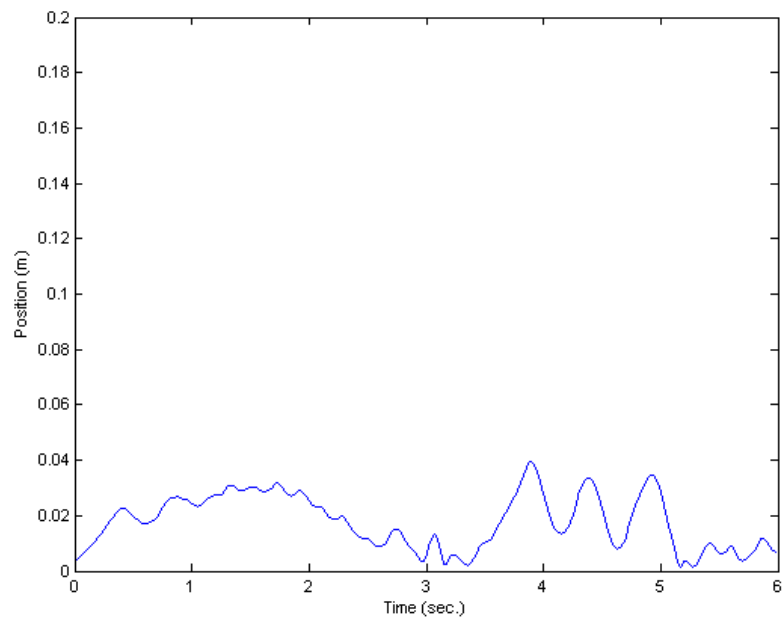


圖 4 - 172 AFSMC_ASF 曲線路徑軌跡追蹤誤差
(響應時間：6 秒)

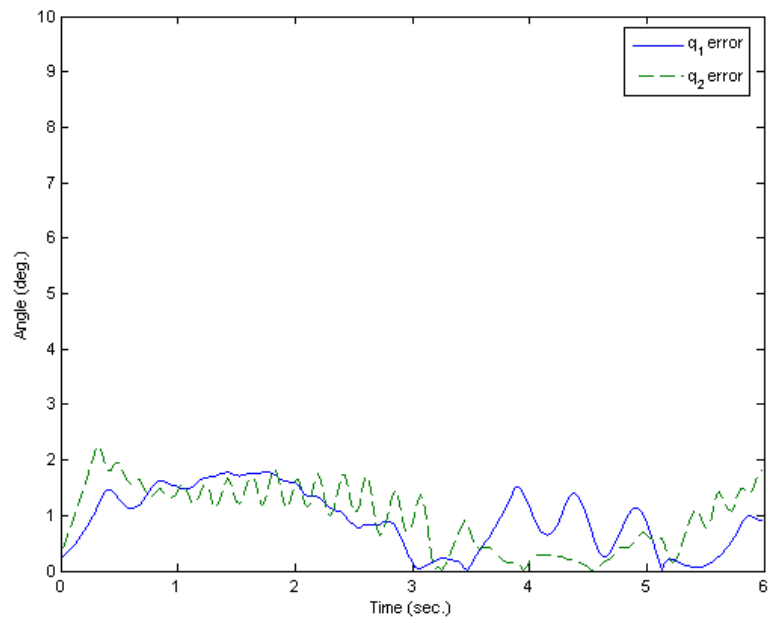


圖 4 - 173 AFSMC_ASF 曲線路徑兩關節角度的追蹤誤差
(響應時間：6 秒)

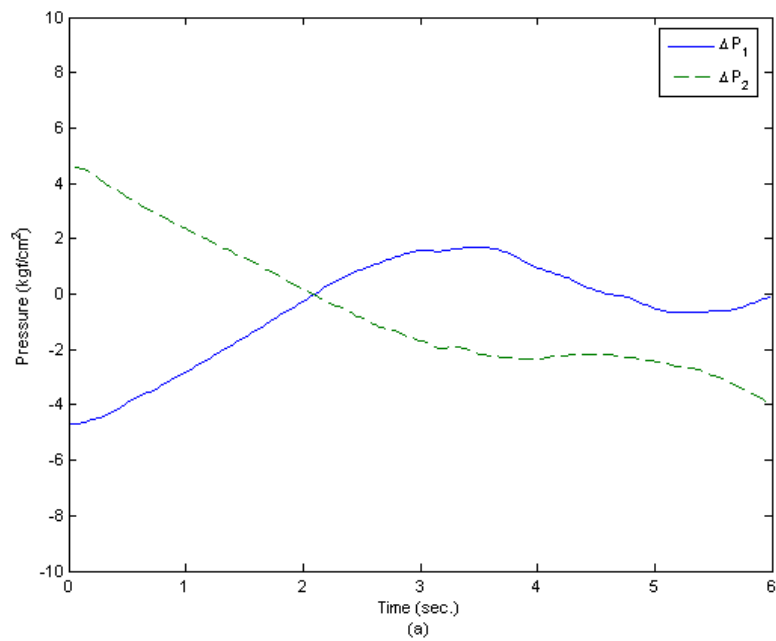


圖 4 - 174 AFSMC_ASF 曲線路徑兩關節的壓力差
(響應時間：6 秒)

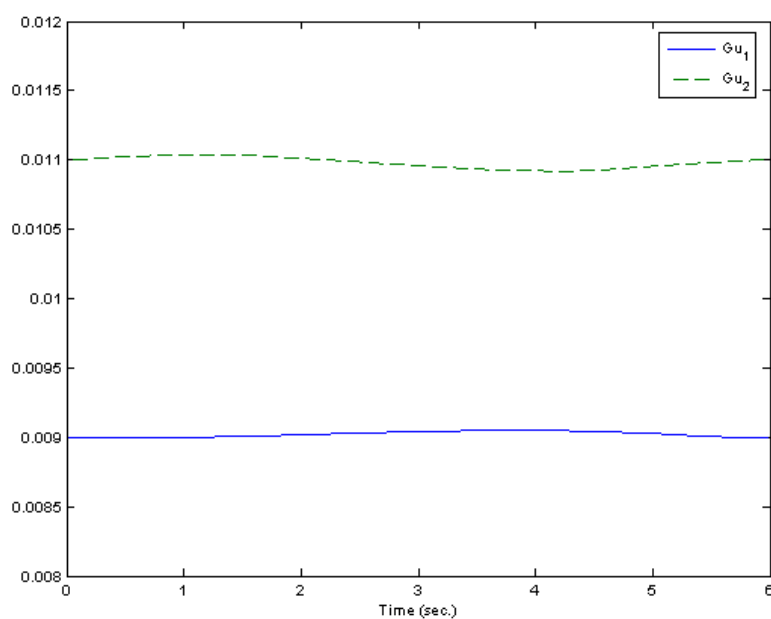


圖 4 - 175 AFSMC_ASF 曲線路徑兩關節的比例因子 G_u 變化情形(響應時間：6 秒)

4.2.5 小結

本節主要是將 4.2.1 ~ 4.2.4 小節所做的各種實驗結果，一一整理並比較各個控制器軌跡追蹤性能。

表 4. 27 為比較各個控制器軌跡追蹤的性能，此表主要是針對鉛錘線路徑、水平線路徑、圓形路徑以及曲線路徑追蹤的控制效果。

表 4. 27 控制性能比較表 2

<i>controller</i> <i>performance</i>		響應時間 (sec.)	FLC	FSMC	AFSMC	AFSMC_ASF
鉛錘線路徑	X 方向位置誤差平均值 (mm)	20	4.6	1.5	1.5	1.5
		5	12.8	4.5	3.1	2.5
	最大 X 方向位置誤差 (mm)	20	12.9	5.6	6.3	6.9
		5	28.3	11.2	9.7	6.9

水平線路徑	Y 方向位置誤差平均值 (mm)	20	7.1	3.4	4.2	4.0
		5	26.3	10.7	7.5	7.7
	最大 Y 方向位置誤差 (mm)	20	21	9.9	13.1	10.9
		5	50.2	33.5	18.2	20.0
圓形路徑	位置誤差平均值 (mm)	20	17.5	6.2	6.3	6.1
		6	42.7	16.2	15.8	16.3
	最大位置誤差 (mm)	20	33.4	15.5	15.2	17.0
		6	78.5	28.0	28.3	32.5
曲線路徑	位置誤差平均值 (mm)	20	19.0	6.7	6.5	6.4
		6	59.5	22.7	19.0	17.8
	最大位置誤差 (mm)	20	48.2	16.6	19.1	17.2
		6	122.7	48.0	38.3	39.5

從表中可以看出其 FSMC、AFSMC、AFSMC_ASF 三種控制器於響應時間為 20 秒之鉛錘線路徑，X 方向位置誤差平均值皆可達 1.5 mm，相較於 FLC 的 4.6 mm，結合滑動模式控制的確擁有較高的控制精度，於響應時間為 20 秒之水平線路徑，FSMC、AFSMC、AFSMC_ASF 三種控制器，Y 方向位置誤差平均值也皆能達到 4.2 mm 以下的控制精度，而響應時間為 20 秒之圓形路徑，FSMC、AFSMC、AFSMC_ASF 三種控制器，位置誤差平均值則皆能達到 6.3 mm 以下的控制精度，響應時間為 20 秒之曲線路徑，FSMC、AFSMC、AFSMC_ASF 三種控制器，其位置誤差平均值則皆能達到 6.7 mm 以下的控制精度。

不同的響應時間下，則可看出其控制器的強健性，當鉛錘線路徑響應時間由原本 20 秒縮短為 5 秒後，則可看出其二種具有自我學習功能的 AFSMC 及 AFSMC_ASF 依舊能達到 3.1 mm 的控制精度，其中 AFSMC_ASF 更達到 2.5 mm，響應時間為 5 秒之水平線路徑，AFSMC 及 AFSMC_ASF 亦能保持 7.7 mm 的控制精度，而當圓形路徑響應時間由 20 秒縮短 6 秒後之控制結果，則可發現 FSMC、AFSMC、AFSMC_ASF 三種控制器，控制精度差異不大，而這應該是由於參數剛好設定為圓形路徑之最佳值，所以適應控制作用並不大，而曲線路徑由響應時間由 20 秒縮短為 6 秒後，其 AFSMC 及 AFSMC_ASF 仍可達 19 mm 的控制精度，其中 AFSMC_ASF 更能達到 17.8 mm，顯示其控制器強健性良好。

第五章 結論與建議

5.1 結論

由於氣壓肌肉系統本身為高階非線性系統，難以推導出其真實的數學模型，因此採用四種無需數學模式的智慧型控制器，分別是傳統模糊控制器(FLC)、模糊滑動模式控制器(FSMC)、適應性模糊滑動模式控制器(AFSMC)、結合適應比例因子之適應性模糊滑動模式控制器(AFSMC_ASF)等，將其應用在二自由度氣壓肌肉機械臂系統上，比較其控制結果。

本研究的主要控制目標可分為：二自由度角度同步追蹤控制及二自由度軌跡追蹤控制。由實驗結果可得到下列結論：

1. 傳統模糊控制器(FLC)整體控制性能較差，而模糊滑動模式控制器(FSMC)，響應明顯優於 FLC，控制精度也較高。
2. AFSMC 與 AFSMC_ASF 具有自我學習的功能，不但能抵抗外在干擾的影響，亦有效克服滑動模式之切跳現象，因此，具有優異的強健性。
3. 當縮短了鉛錘線路徑響應時間後，AFSMC 及 AFSMC_ASF 這二種具有自我學習功能的控制器，依舊能達到一定水準的控制精度，其中又以 AFSMC_ASF 尤佳。
4. 在響應時間為 5 秒之水平線路徑，AFSMC 及 AFSMC_ASF 亦能保持其控制精度。
5. 當圓形路徑響應時間縮短後之控制結果，則可發現 FSMC、AFSMC、AFSMC_ASF 三種控制器，控制精度差異不大，這應該是由於參數剛好設定為圓形路徑之最佳值，所以適應控制作用並不大。
6. 曲線路徑由響應時間縮短後，AFSMC 及 AFSMC_ASF 依舊可達到優良的控制精度，其中 AFSMC_ASF 較 AFSMC 為佳，顯示其控制器強健性良好。

由於模糊規則表所建立的完整性與精確性，一直是影響模糊控制器控制性能好壞的最大因素。而一般規則表的建立，通常使用人為的經驗，經過不斷的 Trial and Error，但是這種只憑經驗法則建立出的規則庫，往往無法滿足現實條件，尤其是需要高精密的控制，或是有著許多外界干擾的複雜系統，建立的難度就越高。

綜合上述的分析可得到下列結論：

1. 具有適應模糊規則表的 AFSMC，的確能夠因應外在的改變，線上進行規制表的修正，建立更適合系統的規則表。
2. 具有結合適應比例因子的 AFSMC_ASF，透過線上進行解模糊化比例因子的調整，的確使系統更能適應各種情況，強健性更為提高。

5.2 建議

在本研究中，以二自由度氣壓肌肉機械臂作為實驗機台，進行四種智慧型控制器的控制，雖然從實驗中可看出控制器的確能夠克服氣壓肌肉非線性行為，達到高精度的控制，但由於硬體以及時間上的限制，仍有所缺失，因此對於本實驗提出幾點建議：

1. 由於機械臂本身為結構耦合系統，往後研究可考慮利用解耦合控制，使控制性能更佳，此外，本研究完成手臂末端的位置追蹤，但未考慮其手臂出力的大小，往後研究也可考慮將手臂的力量控制納入其中。
2. 在本研究中，所使用的滑動平面參數 λ 以及滑動層 Φ ，皆設定為固定值，往後研究也可加入遺傳演算法尋優，進行參數最佳化。
3. 由於本研究中所設計之機構，仍稍嫌龐大，機構可考慮朝小型化發展。

由於氣壓肌肉具有與人體真實肌肉相仿的外型、重量，以及動力的輸出，其作動方式也與實際肌肉相似，因此十分適合應用在生物醫學及復健工程的領域。然而國內這方面研究卻相當缺乏，因此希望此研究對氣壓肌肉的研究能有所貢獻，並能應用在國內醫療器具的發展。

參 考 文 獻

- [1] H.F Schulte, “The characteristics of the McKibben artificial pneumatic muscle,” *The Proceedings of the Application of External Power in Prosthetics and Orthotics Conference*, Appendix H. Publ. 874, National Academy of Sciences, Washington, DC. pp94-115, 1961.
- [2] D. G. Caldwell, G. A. Medrano-Cerda, and M. Goodwin, “Control of pneumatic muscle actuators,” *IEEE Control Syst. Mag.* , pp. 40 – 48, Feb. 1995.
- [3] C.-P. Chou and B. Hannaford, “Static and dynamic characteristics of McKibben pneumatic artificial muscles,” *in Proc. IEEE Robotics Automation Conf.*, pp. 281 – 286. , 1994.
- [4] J. Lilly, “Adaptive tracking for pneumatic muscle actuators in bicep and tricep configurations,” *IEEE Transactions on Neural System and Rehabilitation Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp333-339, 2003.
- [5] G. A. Medrano-Cerda, C. J. Bowler, and D. G. Caldwell, “Adaptive position control of antagonistic pneumatic muscle actuators,” *in Proc. IEEE Int. Conf. Intelligent Robots Systems*, vol. 1. , pp. 378 – 383, 1995.
- [6] P. Carbonell, Z. P. Jiang, and D. W. Repperger, “A fuzzy backstepping controller for a pneumatic muscle actuator system,” *in Proc. IEEE Int. Symp. Intelligent Control*, Mexico City, Mexico, pp. 353 – 358, 2001.
- [7] K. K. Ahn and T.D.C. Thanh, “Performance improvement of artificial pneumatic muscle manipulator, ” *Science and Technology*, Vol. 1, pp.99 – 104. 2004.
- [8] S. W. Chan, J. Lilly, D. W. Repperger, and J. E. Berlin, “Fuzzy PD+I learning control for a pneumatic muscle,” *in Proc. 2003 IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems*, St. Louis, MO, pp. 278 – 283, 2003.

- [9] J. Lilly and Yang Liang, "Sliding Mode Tracking for Pneumatic Muscle Actuators in Opposing Pair Configuration," *IEEE Control Syst. Mag.*, Vol. 13, pp. 550 – 558. , 2005.
- [10] J. Lilly and P.M Quesada, "A Two-Input Sliding-Mode Controller for a Planar Arm Actuated by Four Pneumatic Muscle Groups," *IEEE Trans. Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. Vol. 12, pp. 349 – 359. , 2004.
- [11] Shiuh-Jer Huang and Wei-Cheng Lin, "Adaptive fuzzy controller with sliding surface for vehicle suspension control" , *Fuzzy Systems, IEEE Transactions*. Volume 11, Issue 4. pp. 550 – 559, 2003.
- [12] Ying-Tsai Wang and Ming-kun Chang, "Experimental Implementaions of Decoupling Self-Organizing Fuzzy Control to a TITO Pneumatic Force Control System" , *Jorunal of the Chinese Society of Mechanical Engineerings*, Vol.20, No. 6, pp.535-542, 1999.
- [13] 陳芳雄, "機械手臂之非線性遞回步階控制設計", 碩士論文, 暨南國際大學, 電機工程學系, 2004。
- [14] J. J. Craig, "Introduction to Robotics: Mechanics and Control" , Second Edition, USA: Addison-Wesley, 1989.
- [15] 陳永平, "可變結構控制設計", 全華科技出版社, 1999.
- [16] K.S. Narendra and A.M. Annaswamy, "A New Adaptive Law for Robust Adaptation Without Persistent Excitation," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol.AC-32, No.2, pp.134-145, 1987.

作 者 簡 介

基本資料

作者：吳 瑞 啟

性別：男

生日：民國 70 年 12 月 3 日

永久住址：彰化縣福興鄉福興村福三路四段 154 號

電話：04-7784855

學歷

國立秀水高工 機工科

聖約翰技術學院 機械工程系

聖約翰科技大學 自動化及機電整合研究所 碩士