



國立台灣科技大學  
自動化及控制研究所

碩士學位論文

---

長行程微米精度之氣壓缸—氣壓肌肉致動  
器精密伺服定位控制之研究

**Development of a Pneumatic-Fluidic  
Muscle Hybrid Servo Positioning System  
with Large Stroke and Micrometer  
Accuracy**

研究生：江友良

學號：M9312902

指導教授：江茂雄 博士  
郭中豐 博士

中華民國 九十七 年 七 月 二十四 日



M9312902



## 碩士學位論文指導教授推薦書

指導教授：郭中豐

共同指導教授：江茂雄

本校 自動化及控制研究所 江友良 君

所提之論文：

長行程微米精度之氣壓缸--氣壓肌肉致動器精密伺服定位控制之研究

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授

年

月

日



# 碩士學位考試委員審定書



M9312902

指導教授：郭中豐

共同指導教授：江茂雄

本校 自動化及控制研究所 江友良 君

所提之論文：

長行程微米精度之氣壓缸--氣壓肌肉致動器精密伺服定位控制之研究

經本委員會審定通過，特此證明。

學校考試委員會

委

員：

鍾情枝

郭中豐

江茂雄

指導教授：

郭中豐

江茂雄

學程主任：

系主任（所長）：

郭中豐

中華民國 年 月 日

## 摘要

本文旨在應用氣壓無桿缸與氣壓肌肉致動器之結合，發展單軸長行程微米精度伺服定位平台與控制，大行程以流量伺服閥進行無桿氣壓缸粗定位，小行程由壓力伺服閥控制氣壓肌肉致動器進行較精密之定位補償。本文主要探討在純氣壓伺服控制於單軸之定位效果以及不同尺寸之氣壓肌肉致動器的特性。

控制器以不需氣壓肌肉致動器數學模型的模糊滑動控制理論為基礎，發展氣壓無桿缸控制器及氣壓肌肉致動器之模糊滑動控制器，希望能改善傳統氣壓伺服定位的控制性能。實驗證實，三種不同尺寸的氣壓肌肉致動器在模糊滑動控制器控制下定位誤差可達  $10\mu\text{m}$  以內。而氣壓無桿缸與氣壓肌肉致動器結合之混合定位系統，可達大行程 200mm 及定位誤差亦可達  $10\mu\text{m}$  以內。



**關鍵字：** 氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器伺服定位控制、氣壓無桿缸、氣壓肌肉致動器、模糊滑動控制、定位控制

# Abstract

This thesis aims to develop an intelligent hybrid pneumatic-muscle fluidic single axis platform with large stroke and micrometer precision. In the axis the pneumatic servo system serves to position in coarse stroke and the fluidic muscle actuator (FMA) compensates fine stroke. This single-axis system is constituted with a rodless cylinder and a fluidic muscle actuator combined. The thesis focuses on the study of the positioning control of axis and the characteristics of variant size of fluidic muscles.

The fuzzy sliding mode controller (FSMC) is used to develop the controllers of pneumatic rodless cylinder and fluid muscle actuator. The experimental results show that the system can achieve positioning response and accuracy deviation of 10  $\mu\text{m}$  for single axis with high response for maximum stroke of 200mm.

**Keywords:** pneumatic rodless cylinder-fluidic muscle actuator hybrid servo positioning platform, rodless cylinder, fluidic muscle actuator, fuzzy sliding mode control, positioning control.



# 目 錄

摘 要.....	I
Abstract.....	II
致 謝.....	錯誤! 尚未定義書籤。
目 錄.....	IV
表目錄.....	VII
圖目錄.....	IX
符號索引.....	XVI
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 文獻回顧 .....	3
1.2.1 氣壓缸系統之文獻回顧 .....	3
1.2.2 氣壓肌肉致動器之文獻回顧 .....	4
1.2.3 控制理論之回顧 .....	5
1.3 研究動機及本文架構 .....	6
1.3.1 研究動機 .....	6
1.3.2 本文架構 .....	6
第二章 實驗架構與設備 .....	2
2.1 實驗設備 .....	4

2.1.1 無桿氣壓缸(Rodless Pneumatic Cylinder).....	4
2.1.2 氣壓流量比例伺服閥 .....	5
2.1.3 氣壓肌肉致動器(PMA).....	6
2.1.4 氣壓壓力比例伺服閥 .....	16
2.1.5 光學尺 .....	17
2.1.6 壓力感測器 .....	19
2.1.7 電腦控制介面與實驗環境 .....	20
2.2 氣壓無桿缸伺服定位平台架構 .....	21
2.3 氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器伺服定位平台架構.....	22
第三章 控制理論.....	24
3.1 模糊滑動控制理論 .....	24
3.1.1 模糊滑動控制(Fuzzy Sliding Mode Control, FSMC)...	24
3.1.2 歸屬函數模糊規則與解模糊化 .....	26
3.1.3 參數 $\Phi$ 、 $u_0$ 、 $G_u$ 設定 .....	29
第四章 控制器設計 .....	31
4.1 氣壓無桿缸伺服定位控制器設計 .....	31
4.1.1 模糊滑動平面規則庫之選取 .....	32
4.1.2 模糊滑動平面參數之選取 .....	33
4.2 氣壓肌肉致動器伺服精密定位控制器設計 .....	34
4.3 氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器伺服定位控制器設計.....	38
第五章 實驗結果與討論 .....	39



5.1 氣壓無桿缸伺服定位實驗 .....	40
5.2 氣壓肌肉致動器伺服定位實驗 .....	45
5.2.1 $\phi 40$ 於不同行程之伺服定位實驗 .....	45
5.2.2 $\phi 20$ 於不同行程之伺服定位實驗 .....	49
5.2.3 $\phi 10$ 於不同行程之伺服定位實驗 .....	53
5.3 氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器伺服定位實驗 .....	57
5.3.1 $\phi 40$ 不同切換範圍及不同行程之定位實驗 .....	57
5.3.2 $\phi 20$ 不同切換範圍及不同行程之定位實驗 .....	70
5.3.3 $\phi 10$ 不同切換範圍及不同行程之定位實驗 .....	86
第六章 結論與建議 .....	102
參考文獻 .....	104
作者簡介 .....	錯誤! 尚未定義書籤。



## 表目錄

表 2-1 實驗設備規格表 .....	3
表 2-2 氣壓肌肉致動器磁滯誤差表 .....	11
表 4-1 氣壓無桿缸模糊滑動控制器規則 .....	32
表 4-2 氣壓無桿缸模糊滑動控制器參數 .....	33
表 4-3 氣壓肌肉致動器模糊滑動控制器規則 .....	36
表 4-4 氣壓肌肉致動器模糊滑動控制器參數 .....	37
表 5-1 氣壓無桿缸伺服定位系統步階響應實驗比較 .....	40
表 5-2 $\phi 40$ 伺服定位實驗不同行程之比較 .....	45
表 5-3 $\phi 20$ 伺服定位實驗不同行程之比較 .....	49
表 5-4 $\phi 10$ 伺服定位實驗不同行程之比較 .....	53
表 5-5 $\phi 40$ 伺服定位切換範圍 0.25~0.35mm 於不同行程實驗結果比較 .....	58
表 5-6 $\phi 40$ 伺服定位切換範圍 0.95~1.05mm 於不同行程實驗結果比較 .....	62
表 5-7 $\phi 40$ 伺服定位切換範圍 1.95~2.05mm 於不同行程實驗結果比較 .....	66
表 5-8 $\phi 20$ 伺服定位切換範圍 0.25~0.35mm 於不同行程實驗結果比較 .....	71
表 5-9 $\phi 20$ 伺服定位切換範圍 0.95~1.05mm 於不同行程實驗結果比較 .....	76
表 5-10 $\phi 20$ 伺服定位切換範圍 1.95~2.05mm 於不同行程實驗結果比較 .....	81
表 5-11 $\phi 10$ 伺服定位切換範圍 0.25~0.35mm 於不同行程實驗結果比較 .....	87
表 5-12 $\phi 10$ 伺服定位切換範圍 0.95~1.05mm 於不同行程實驗結果比較 .....	92

表 5-13  $\phi 10$  伺服定位切換範圍 1.95~2.05mm 於不同行程實驗結果比較 ...97



## 圖目錄

圖 2-1 (a)無桿氣壓缸與滑軌外觀(b)無桿氣壓缸符號(c)剖面圖 .....	5
圖 2-2 (a)伺服閥實體外觀照 (b)伺服閥構造剖面示意圖(c)閥流量與電壓關係圖 (d)伺服閥符號[65] .....	6
圖 2-3 (a)氣壓肌肉致動器實體外觀照 (b)氣壓肌肉致動器模型構造剖面示意圖 (c)氣壓肌肉致動器符號[65] .....	7
圖 2-4 (a)氣壓肌肉致動器結構簡圖 (b)氣壓肌肉致動器纖維層幾何參數關係示意圖[66] .....	8
圖 2-5 (a)氣壓肌肉致動器與一般氣壓缸作用力及行程比較概念圖 (b) $\phi 40$ 氣壓肌肉致動器作用力與位移圖[65] .....	9
圖 2-6 測量 $\phi 40$ 氣壓肌肉致動器磁滯曲線之電壓訊號 .....	11
圖 2-7 測量 $\phi 20$ 氣壓肌肉致動器磁滯曲線之電壓訊號 .....	12
圖 2-8 測量 $\phi 10$ 氣壓肌肉致動器磁滯曲線之電壓訊號 .....	12
圖 2-9 $\phi 40$ 氣壓肌肉致動器磁滯曲線，位置與(a)輸入電壓(b)輸出壓力(c)輸出電壓 關係圖 .....	13
圖 2-10 $\phi 20$ 氣壓肌肉致器磁滯曲線，位置與(a)輸入電壓(b)輸出壓力(c)輸出電壓 關係圖 .....	14
圖 2-11 $\phi 10$ 氣壓肌肉致動器磁滯曲線，位置與(a)輸入電壓(b)輸出壓力(c)輸出電壓 關係圖 .....	15
圖 2-12 氣壓肌肉致動器蠕動示意圖 .....	16
圖 2-13 (a)伺服閥實體外觀照 (b)伺服閥構造剖面示意圖(c)閥壓力與	

電壓關係圖 (d)伺服閥符號.....	17
圖 2-14 義大利 Givi 玻璃透射式光學尺.....	18
圖 2-15 HP HCTL-2032 接腳圖 .....	19
圖 2-16 解碼電路接線圖 .....	19
圖 2-17 (a)壓力感測器的外觀、(b) 量測壓力與輸出電壓關係圖以及(c) 符號.....	20
圖 2-18 實驗系統架構實體圖 .....	21
圖 2-19 氣壓(無桿缸)伺服定位平台系統方塊圖 .....	22
圖 2-20 氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器伺服定位平台系統方塊圖 .....	22
圖 2-21 氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器伺服定位平台架構圖 .....	23
圖 3-1 傳統模糊控制器方塊圖 .....	25
圖 3-2 模糊滑動平面控制器方塊圖 .....	25
圖 3-3 滑動平面示意圖 .....	25
圖 3-4 模糊滑動平面輸入變數 $\sigma$ 歸屬函數.....	27
圖 3-5 模糊滑動平面輸出變數 $u$ 歸屬函數.....	27
圖 3-6 (a)模糊滑動平面推論示意圖(b)傳統 $7 \times 7$ 模糊規則推論 .....	30
圖 4-1 氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器定位平台系統方塊圖 .....	31
圖 4-2 氣壓無桿缸模糊滑動控制系統方塊圖 .....	31
圖 4-3 氣壓肌肉致動器模糊滑動控制系統方塊圖 .....	34
圖 5-1 氣壓無桿缸伺服定位實驗行程 50 mm結果(a)步階響應(b)控制訊 號放大(c)定位誤差放大 .....	41

圖 5-2 氣壓無桿缸定位實驗行程 100 mm結果(a)步階響應(b)控制訊號放大(c)定位誤差放大 .....	42
圖 5-3 氣壓無桿缸定位實驗行程 150 mm結果(a)步階響應(b)控制訊號放大(c)定位誤差放大 .....	43
圖 5-4 氣壓無桿缸定位實驗行程 200 mm結果(a)步階響應(b)控制訊號放大(c)定位誤差放大 .....	44
圖 5-5 $\phi 40$ 氣壓肌肉致動器伺服定位控制實驗行程 0.3mm 結果(a)步階響應(b)控制與回饋壓力訊號(c)定位誤差放大 .....	46
圖 5-6 $\phi 40$ 氣壓肌肉致動器伺服定位控制實驗行程 1mm 結果(a)步階響應(b)控制與回饋壓力訊號(c)定位誤差放大 .....	47
圖 5-7 $\phi 40$ 氣壓肌肉致動器伺服定位控制實驗行程 2mm 結果(a)步階響應(b)控制與回饋壓力訊號(c)定位誤差放大 .....	48
圖 5-8 $\phi 20$ 氣壓肌肉致動器伺服定位控制實驗行程 0.3mm 結果(a)步階響應(b)控制與回饋壓力訊號(c)定位誤差放大 .....	50
圖 5-9 $\phi 20$ 氣壓肌肉致動器伺服定位控制實驗行程 1mm 結果(a)步階響應(b)控制與回饋壓力訊號(c)定位誤差放大 .....	51
圖 5-10 $\phi 20$ 氣壓肌肉致動器伺服定位控制實驗行程 2mm 結果(a)步階響應(b)控制與回饋壓力訊號(c)定位誤差放大 .....	52
圖 5-11 $\phi 10$ 氣壓肌肉致動器伺服定位控制實驗行程 0.3mm 結果(a)步階響應(b)控制與回饋壓力訊號(c)定位誤差放大 .....	54
圖 5-12 $\phi 10$ 氣壓肌肉致動器伺服定位控制實驗行程 1mm 結果(a)步階響應(b)控制與回饋壓力訊號(c)定位誤差放大 .....	55
圖 5-13 $\phi 10$ 氣壓肌肉致動器伺服定位控制實驗行程 2mm 結果(a)步階響應(b)控制與回饋壓力訊號(c)定位誤差放大 .....	56

圖 5-14 $\phi 40$ 伺服定位控制實驗行程 50mm 結果，切換範圍 0.25 ~ 0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	59
圖 5-15 $\phi 40$ 伺服定位控制實驗行程 100mm 結果，切換範圍 0.25 ~ 0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	60
圖 5-16 $\phi 40$ 伺服定位控制實驗行程 150mm 結果，切換範圍 0.25 ~ 0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	61
圖 5-17 $\phi 40$ 伺服定位控制實驗行程 50mm 結果，切換範圍 0.95 ~ 1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	63
圖 5-18 $\phi 40$ 伺服定位控制實驗行程 100mm 結果，切換範圍 0.95 ~ 1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	64
圖 5-19 $\phi 40$ 伺服定位控制實驗行程 150mm 結果，切換範圍 0.95 ~ 1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	65
圖 5-20 $\phi 40$ 伺服定位控制實驗行程 50mm 結果，切換範圍 0.95 ~ 1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	67
圖 5-21 $\phi 40$ 伺服定位控制實驗行程 100mm 結果，切換範圍 0.95 ~ 1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	68
圖 5-22 $\phi 40$ 伺服定位控制實驗行程 150mm 結果，切換範圍 0.95 ~	



1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力 回饋訊號(d)定位誤差放大.....	69
圖 5-23 $\phi 20$ 伺服定位控制實驗行程 50mm 結果，切換範圍 0.25 ~ 0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力 回饋訊號(d)定位誤差放大.....	72
圖 5-24 $\phi 20$ 伺服定位控制實驗行程 100mm 結果，切換範圍 0.25 ~ 0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力 回饋訊號(d)定位誤差放大.....	73
圖 5-25 $\phi 20$ 伺服定位控制實驗行程 150mm 結果，切換範圍 0.25 ~ 0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力 回饋訊號(d)定位誤差放大.....	74
圖 5-26 $\phi 20$ 伺服定位控制實驗行程 200mm 結果，切換範圍 0.25 ~ 0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力 回饋訊號(d)定位誤差放大.....	75
圖 5-27 $\phi 20$ 伺服定位控制實驗行程 50mm 結果，切換範圍 0.95 ~ 1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力 回饋訊號(d)定位誤差放大.....	77
圖 5-28 $\phi 20$ 伺服定位控制實驗行程 100mm 結果，切換範圍 0.95 ~ 1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力 回饋訊號(d)定位誤差放大.....	78
圖 5-29 $\phi 20$ 伺服定位控制實驗行程 150mm 結果，切換範圍 0.95 ~ 1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力 回饋訊號(d)定位誤差放大.....	79
圖 5-30 $\phi 20$ 伺服定位控制實驗行程 200mm 結果，切換範圍 0.95 ~ 1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力	



回饋訊號(d)定位誤差放大.....	80
圖 5-31 $\phi 20$ 伺服定位控制實驗行程 50mm 結果，切換範圍 1.95 ~ 2.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	82
圖 5-32 $\phi 20$ 伺服定位控制實驗行程 100mm 結果，切換範圍 1.95 ~ 2.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	83
圖 5-33 $\phi 20$ 伺服定位控制實驗行程 150mm 結果，切換範圍 1.95 ~ 2.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	84
圖 5-34 $\phi 20$ 伺服定位控制實驗行程 200mm 結果，切換範圍 1.95 ~ 2.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	85
圖 5-35 $\phi 10$ 伺服定位控制實驗行程 50mm 結果，切換範圍 0.25 ~ 0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	88
圖 5-36 $\phi 10$ 伺服定位控制實驗行程 100mm 結果，切換範圍 0.25 ~ 0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	89
圖 5-37 $\phi 10$ 伺服定位控制實驗行程 150mm 結果，切換範圍 0.25 ~ 0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	90
圖 5-38 $\phi 10$ 伺服定位控制實驗行程 200mm 結果，切換範圍 0.25 ~ 0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	91

圖 5-39 $\phi 10$ 伺服定位控制實驗行程 50mm 結果，切換範圍 0.95 ~ 1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	93
圖 5-40 $\phi 10$ 伺服定位控制實驗行程 100mm 結果，切換範圍 0.95 ~ 1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	94
圖 5-41 $\phi 10$ 伺服定位控制實驗行程 150mm 結果，切換範圍 0.95 ~ 1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	95
圖 5-42 $\phi 10$ 伺服定位控制實驗行程 200mm 結果，切換範圍 0.95 ~ 1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	96
圖 5-43 $\phi 10$ 伺服定位控制實驗行程 50mm 結果，切換範圍 1.95 ~ 2.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	98
圖 5-44 $\phi 10$ 伺服定位控制實驗行程 100mm 結果，切換範圍 1.95 ~ 2.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	99
圖 5-45 $\phi 10$ 伺服定位控制實驗行程 150mm 結果，切換範圍 1.95 ~ 2.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	100
圖 5-46 $\phi 10$ 伺服定位控制實驗行程 200mm 結果，切換範圍 1.95 ~ 2.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大.....	101

## 符號索引

$G(x)$	氣壓肌肉致動器轉移函數
$x(t)$	系統軌跡， $t$ 為時間
$s(x)$	滑動函數
$V$	Lyapunov 函數
$u(x)$	控制輸入
$u_{eq}(x)$	等效控制輸入
$e$	系統誤差
$\dot{e}$	系統誤差變化量
$\sigma$	滑動平面
$\alpha$	滑動平面斜率
$\Phi$	滑動平面邊界層
$G_u$	邊界層比例增益因子
$u_d$	解模糊控制輸入
$u_0$	控制輸入偏移量
$u_f$	控制器輸入
$\text{sig}(z)$	系統輸入輸出關係函數
$G_s$	模糊化歸一增益因子
$x_{set}$	系統參考輸入
$x$	系統之參考輸出
$\sigma_{cyl}$	氣壓無桿缸滑動平面
$\alpha_{cyl}$	氣壓無桿缸滑動平面斜率
$e_{cyl}$	分配給氣壓無桿缸之誤差
$\dot{e}_{cyl}$	分配給氣壓無桿缸之誤差變化量
$\sigma_{pma}$	氣壓肌肉致動器滑動平面
$\alpha_{pma}$	氣壓肌肉致動器滑動平面斜率
$e_{pma}$	氣壓肌肉致動器之誤差

$\dot{e}_{pma}$	氣壓肌肉致動器之誤差變化量
$u_{cyl}$	氣壓無桿缸控制量
$u_{pma}$	氣壓肌肉致動器控制量
$e_{xx}$	系統回授誤差
$\sigma_{x\_pneu}$	氣壓模糊滑動控制器滑動平面
$u_{x\_pneu}$	氣壓模糊滑動控制器輸出
$T(\sigma_{pma})$	氣壓肌肉致動器模糊滑動控制器輸入歸屬函數
$T(u_{pma})$	氣壓肌肉致動器模糊滑動控制器輸出歸屬函數
$t_r$	上升時間(rising time)
$t_s$	安定時間(settling time)
$e_{ss}$	穩態誤差



# 第一章 緒論

## 1.1 前言

氣壓驅動系統具有乾淨、低成本元件、易獲取、設備簡單、大儲存能量等優點，因此 1960 年漸漸開始被大量運用在各種產業上，成為自動化工業主要技術[1]，尤其是在航太、軍事武器方面氣壓伺服系統更是不可或缺的項目。目前業界所用的氣壓自動化設備大部分仍以位置感測器、可程式控制器，搭配氣壓缸和方向閥做簡單順序控制，這是屬於開迴路控制，無法達到快而穩的精密控制，所以為了因應精密化的工業發展趨勢，勢必要引入閉迴路控制來克服種種新環境挑戰。

在末端致動器以動力能源上分有電動致動器、液壓致動器和氣壓致動器等。隨著技術水準的提升，生產線複雜度跟著提高，低污染、無塵環境等要求嚴格，導致液壓系統在某些方面被氣壓缸系統所取代。成本是企業家投資考量的重點要素，高單價的步進或伺服馬達驅動模組除非必要，儘管系統模型簡單易於控制與分析，研發單位通常都會想辦法用其他方式替代掉，氣壓伺服系統是個很好的替代方案。因此，氣壓伺服相關之研究有逐漸增加的趨勢。

由於氣壓缸系統本身擁有許多不易控制的缺點，如剛性差、低黏性阻尼(Low viscosity)、洩漏(Leakage)、氣壓缸與活塞間及滑軌上的摩擦力大[2]等問題，使得建立起來的氣壓缸系統模型為複雜的多階高非線性[3]，另外再加上閥軸運動時的無感應區(Threshold)、伺服閥的磁滯現象及伺服閥零點飄移現象[4][5]等造成系統不易控制，以致傳統氣壓伺服系統精度一直無法達到相當程度的效果。因此，學者們紛紛開始嘗試利用各種智慧型控制理論來處理這個高階高非線性的氣壓伺服系統，又計算機(電腦)運算速度提升及軟體功能的大幅提升，

不管在使用大量數值運算或模擬得以順利進行，造就了氣壓伺服控制研究領域的蓬勃發展。

由於傳統的氣壓致動器，如直線運動氣壓缸，均有上述的缺點。近年來，隨著材料及機械加工技術的日新月異，發展出各種新型驅動器，包括壓電致動器、電熱式致動器、奈米致動器、氣壓肌肉致動器…等都是用電能、熱能、化學能、光能量或壓力能等轉換成機械能的作用元件，各種不同的致動器都有其發揮特點的地方。在新式驅動器的研究與在機器人這方面，運用比較廣泛的就屬氣壓肌肉致動器(Pneumatic Muscle Actuators)，簡稱 PMA 或 FMA(Fluidic Muscle Actuators)。

在 1960 年代，美國醫生 Joseph L.Mckibben[6]就發明了這種模仿真實肌肉運動的氣壓驅動器，就是一般所謂的 McKibben 人工氣壓肌肉致動器。它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，製造成本低
2. 具有柔性，安全性高，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，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，污染性低
6. 價格低廉，安裝簡易，維護方便，應用領域廣泛。

氣壓肌肉致動器所具有的這些優點，使得它在工業及醫學界等，將會有極其廣泛的應用前景，吸引許多國家皆紛紛投入發展，英國 Shadow 公司、美國 Imagesco 公司、德國 Festo 公司相繼推出商品化的氣壓肌肉致動器。然而，由於它是一種柔性的驅動器，要精確表達其特性比較困難，因此若要使它實用化，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[6][7][8]。

故本研究是結合傳統對稱氣壓缸與氣壓肌肉致動器的純氣壓伺服控制系統，把整個定位行程分兩部份：以流量伺服控制無桿氣壓缸進行大行程粗定位；同時以壓力伺服控制氣壓肌肉致動器進行小行程精密定位，形成一個二進一出(Dual-Input Single-Output)之高精度純氣壓精密伺服定位系統。由於氣壓肌肉致動器材料是經過橡膠包覆多層纖維所合成，因橡膠之特性於受氣壓壓力的作用，產生非線性的運動曲線，此現象只要採取閉迴路控制隨時補償即可改善此缺點。

本文延續著實驗室在氣壓無桿缸-壓電混合伺服定位系統的研究，將壓電致動器更改為氣壓肌肉致動器，以單軸定位控制，實際應用的可行性為目標。



## 1.2 文獻回顧

### 1.2.1 氣壓缸系統之文獻回顧

氣壓缸系統控制方面的研究可考於 1954 年及 1956 年由麻省理工學院 Dr. Shearer 所提出的文獻[9]，旨在推導出氣壓缸系統在操作點附近的數學模型並設計控制器。十多年後，文獻[10]開始針對不同操作點用線性化來近似氣壓缸系統的非線性項，並討論系統參數變化的影響。之後有學者[11]開始對氣壓缸系統的非線性模型進行電腦模擬，但尚未應用到實際系統上。80 年代起，由於電腦運算速度加快，使得學者可以將設計出的控制器實際應用到系統上。1984 年，文獻[12]利用回授補償原理作控制，但文中並沒有作干擾對系統影響的討論。1986 年，文獻[13]把近代控制理論應用到真實氣壓伺服系統上。1987 年，文獻[14][15]利用 PID 及 PWM 來改善速度及位置控制。90 年代初，文獻[16][17]利用線上自調適應性控制器改善系統的非線性現

象。文獻[18]將定位控制分成兩個階段，初期用速度控制，到目標點附近改以位置控制，同時達成快速與精密定位的目的，在無荷重情況下誤差可控制到  $5\mu\text{m}$  以下。以上的論文研究，常常因氣壓本身的非線性和高壓縮性而影響到整個系統的強健性和控制效果[19][20]，使得氣壓缸系統遲遲未被廣泛運用。文獻[21-24]中研究氣壓伺服系統的黏滯效應(Stick-Slip)對系統的影響。接著始有學者將現代控制理論應用到真實氣壓缸系統上[25]。文獻[26]為利用自調式適應控制理論採用線上調整參數的方法，在無荷重情況下之精度可達  $5\mu\text{m}$ 。文獻[27]結合兩致動器以氣壓缸和旋轉氣壓馬達搭配滾珠螺桿來改善控制定位精度，並應用 PID 控制理論，控制精度為  $50\mu\text{m}$ 。文獻[28]使用正規化比例因子即時自調式類神經模糊控制器來改善氣壓缸的定位精度，精度亦達到  $5\mu\text{m}$ 。文獻[29]藉量測氣壓缸之速度、加速度及力量，離線計算出氣壓缸摩擦力對速度的關係，用以克服非線性動摩差力問題，並以實驗驗證控制器定位效能與可靠度，將精度提升到  $1\mu\text{m}$  範圍以內。文獻[30]以氣壓缸與步進馬達結合進行雙軸運動的位置控制研究。2003 年，文獻[31]利用 PD 控制器和模糊控制器加上速度補償器控制線性氣壓驅動平台，此方法可有效改善黏滯效應，實驗最大行程  $50\mu\text{m}$ ，約 3 秒達定位精度  $20\text{nm}$ 。

### 1.2.2 氣壓肌肉致動器之文獻回顧

第一個 PMA 的原型是在 1950 年代，由美國醫生 Joseph L.McKibben[6]發明了一種模仿真實肌肉運動的氣壓驅動器，內層為橡膠管，外層用特殊纖維呈菱狀交叉編織而成，即為 McKibben 型的氣壓肌肉致動器。

在單根氣壓肌肉致動器的研究方面，文獻[32]做了靜態與動態數學模型的推導，在動態響應上，充氣跟放氣時間有一些落差，在此篇的研究數據，充氣時間為  $30\text{ms}$ ，放氣時間為  $53\text{ms}$ 。文獻[33]利用



feedback controller 來控制單軸氣壓肌肉。文獻[34]做單根肌肉動態系統模擬之研究。文獻[35]，利用 fuzzy back -stepping controller 做單根氣壓肌肉系統模擬。文獻[36]使用 adaptive tracking control 進行單根氣壓肌肉器驅動吊立式和仰式單關節角度運動。文獻[37]利用增益規劃加  $H_{\infty}$  來控制單根氣壓肌肉致動器。文獻[38]等人利用回授控制單根氣壓肌肉致動器加負載的情況，可以達到 0.1mm 的定位誤差。文獻[39]研究單根氣壓肌肉致動器之數學模型推導及動態響應比較。

### 1.2.3 控制理論之回顧

模糊控制的優點在於是簡單易懂、不須受控體的數學模型，所以使得模糊理論的相關研究蓬勃發展；缺點在於是專家經驗不足、所需資料庫龐大，這些缺點使得系統無法達到高精度控制的要求。於是具有自我學習能力的智慧型控制器陸續被提出，文獻[40]提出的自組織模糊控制器(Self-Organizing Fuzzy Controller)。後來相繼有文獻[41]及[42]提出修正。另外在模糊規則庫的設計上，為了簡化過於複雜的規則庫，以模糊滑動平面取代傳統以誤差及誤差變化量為輸入的規則庫，稱之為模糊滑動理論，如文獻[43-47]。之後有學者研究出以距離觀點來使系統狀態在滑動平面逼近到平衡點，稱作距離基礎之模糊滑動平面控制理論[48][49]。由於縮小滑動平面上邊界層有助於降低穩態誤差以提升精確度，但會失去原本該有的強健性，這方面有學者提出加入強健項的改良方法[50][51]。

本文所採用的控制理論為模糊滑動控制理論，具有簡化規則庫資料量及線上即時修正規則庫，為提升控制器的性能在加入變邊界與強健項，使用模糊滑動平面控制器以達到長行程高精度定位之目標。

本實驗室除了在氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器方面使用模糊滑動理論，在液壓系統也有相關理論的研究與應用，有關這類的發表有文獻[52-62]，驗證模糊滑動平面控制理論在液壓與氣壓缸系統皆有不錯

的控制效果。

## 1.3 研究動機及本文架構

### 1.3.1 研究動機

本文目的在應用比例流量伺服閥控制氣壓無桿缸，及結合以比例壓力伺服閥控制氣壓肌肉致動器發展出氣壓控制精密伺服定位，以氣壓無桿缸與氣壓肌肉致動器組合而成的二進一出系統，大行程由氣壓無桿缸伺服系統進行粗定位，小行程由氣壓肌肉致動器作補償。本文主要探討固定在一起的單軸之定位效果。

控制器以不需數學模型之模糊滑動控制器(Fuzzy Sliding Mode Control)為基礎，希望能達到最佳的控制性能。實驗證實本理論應用在此系統可成功將定位到位置感測器解析度誤差範圍在  $10\mu\text{m}$  以內。

### 1.3.2 本文架構

#### 第一章 緒論

收集有關氣壓伺服系統及氣壓肌肉致動器之相關文獻，控制器部分以模糊滑動控制理論為主。

#### 第二章 實驗架構與設備

針對本實驗系統各元件以及對氣壓伺服系統及氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器定位平台系統作介紹。

### 第三章 控制理論

介紹本實驗所使用的模糊滑動控制理論，發展為模糊滑動控制器。

### 第四章 控制器設計

設計模糊滑動控制器，控制氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器平台定位系統，並作控制器的參數列表。

### 第五章 實驗結果與討論

將模糊滑動控制器分別實現於氣壓缸系統與氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器定位平台系統，設計不同實驗條件做定位，並討論其結果。

### 第六章 結論與建議

對研究結果做個總結與建議。



## 第二章 實驗架構與設備

本文所探討之氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器混合精密伺服定位單軸平台，由氣壓源、無桿氣壓缸、比例伺服流量閥、氣壓肌肉致動器、比例伺服壓力閥、光學尺、AD/DA 卡、計數解碼卡、微電腦等所構成。元件規格如表 2-1 所列，本章先分別針對系統各主要元件做逐一介紹，再進一步介紹整個單軸平台架構。



表 2-1 實驗設備規格表

元件	廠牌	型號	規格
無桿氣壓缸	FESTO	DGPL	軸缸徑：25 mm 有效行程：500 mm
氣壓肌肉致動器	FESTO	MAS-40-120N MAS-20-103N MAS-10-103N	有效收縮率：25% 供應最大壓力：6 或 8bar
AD/DA 卡	台灣研華科技	PCL-726	D/A：6 Channel DIO：16 Channel
AD/DA 卡	台灣研華科技	PCL-818HD	A/D：16 single-ended Or 8 differential
比例伺服流量閥	FESTO	MPYE	五口三位 輸入電壓：0-10VDC (5VDC 為中位)
比例伺服壓力閥	FESTO	MPPE5	操作壓力：max 6 bar 輸入電壓：0-10VDC
光學尺	義大利 Givi	SCR3923	行程長度：320 mm 精度：1 $\mu$ m
壓力感測器	FESTO	SDE1	壓力範圍 MAX. 6bar 電壓輸出 0~10VDC
空氣壓縮機	CompAir 康普愛	L 15-7.5	15KW, Max. 7.5bar 3 $\phi$ , 220V, 60Hz
乾燥機	Star 石大	LD-20HA	3/4HP, 1 $\phi$ , 220V, 60Hz

## 2.1 實驗設備

### 2.1.1 無桿氣壓缸(Rodless Pneumatic Cylinder)

無桿氣壓缸因為沒有活塞桿，因此行程可比傳統有桿氣壓缸長很多，且也較為節省裝配空間，很適合我們發展微小長行程系統。無桿氣壓缸活塞上連接著滑塊，再由滑塊帶動負載進行運動，而在滑塊與氣壓缸接縫處有橡膠帶密封以防高壓器體外洩，所以無桿氣壓缸的摩擦力導致黏滯效應相較於有桿氣壓缸嚴重，其作動方式是藉由缸內兩端活塞之間的壓力差所致，故壓力需加到可以克服最大靜摩擦力後才開始運動。另外又因氣體具有可壓縮性，必須充入足夠氣體壓力氣壓缸才會作動，所以在使用上會有時間延遲的現象產生。本實驗採用 FESTO：DGPL-25-500-PPV-A-B-KF-GK-SH-D2 型號雙滑塊無桿氣壓缸，文獻[65]。如圖 2-1(a)為氣壓缸與滑軌外觀圖、(b)為其符號、(c)為無桿氣壓缸之剖面圖。



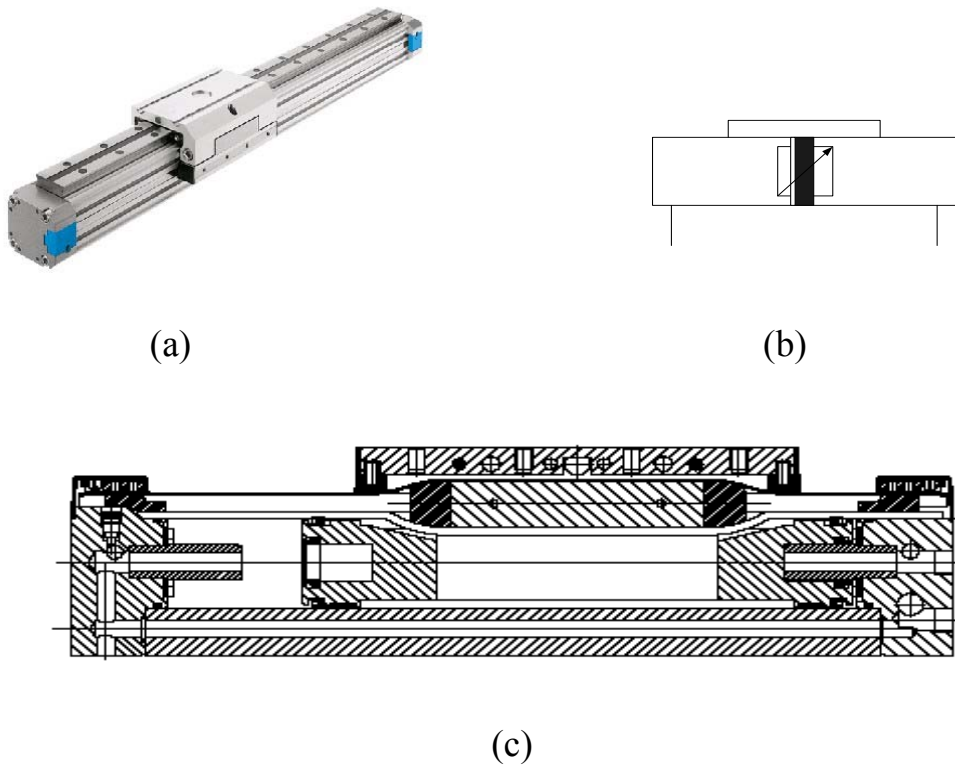


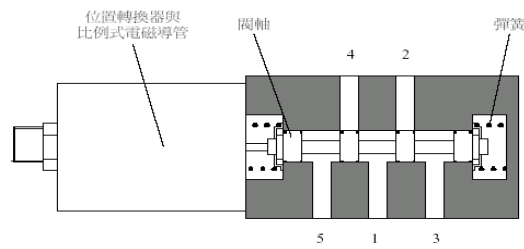
圖 2-1 (a)無桿氣壓缸與滑軌外觀(b)無桿氣壓缸符號(c)剖面圖

## 2.1.2 氣壓流量比例伺服閥

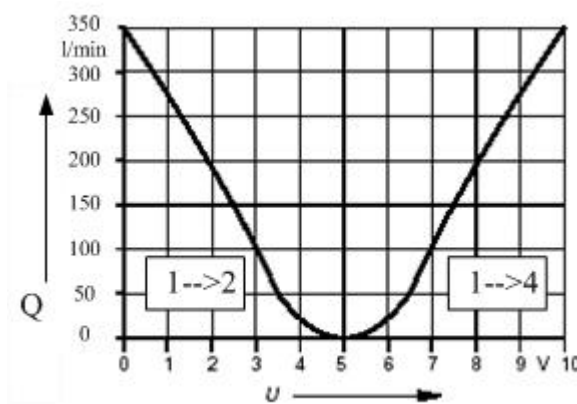
流量比例伺服閥是根據輸入電壓大小來決定閥開口的大小，因此靠控制電壓就可以得到所期望的流量或壓力。伺服閥輸出輸入訊號均為連續，相較之下就比電磁開關閥來的容易控制，但是此伺服閥本身會有零點漂移現象，會使閥在中位電壓(5V)時的控制較為困難，不過只要在實驗之前先做零點飄移值加入修正電壓即可改善此閥不良因素。本實驗採用 FESTO:MYPE-5-1/8-LF-010B 型的流量伺服閥，5-10V 為正向，0-5V 為逆向。圖 2-2(a)為伺服閥的外觀、(b)構造、(c)閥流量與電壓關係圖以及(d)符號。



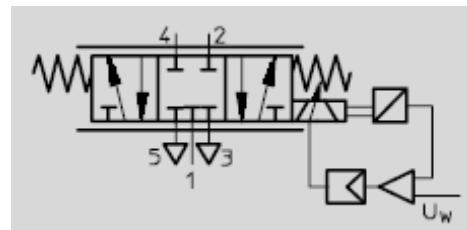
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 2-2 (a)伺服閥實體外觀照 (b)伺服閥構造剖面示意圖  
(c)閥流量與電壓關係圖 (d)伺服閥符號[64]

### 2.1.3 氣壓肌肉致動器(PMA)

氣壓肌肉致動器是一種拉伸驅動器，它模仿自然肌肉的運動。氣壓氣壓肌肉致動器由一個收縮系統和合適的連接器組成。這個收縮系統由一段被高強度纖維包裹的密封橡膠管組成。纖維形成了一個三維的菱形網狀架構。當內部有壓力時，管道就在球面方向上擴張，因此產生了拉伸力和肌肉縱向的收縮運動。拉伸力在收縮開始時最大，並與行程成線性比例關係減小。氣壓肌肉致動器的可使用工作有效行程高達其額定長度的 25%。本實驗採用 FESTO：MAS-40-120N、



MAS-20-103N 與 MAS-10-103N 氣壓肌肉致動器。氣動肌肉致動器的應用如：單動氣壓缸或氣壓彈簧。圖 2-3(a) 氣壓肌肉致動器的外觀、(b)模型構造以及(c) 符號。

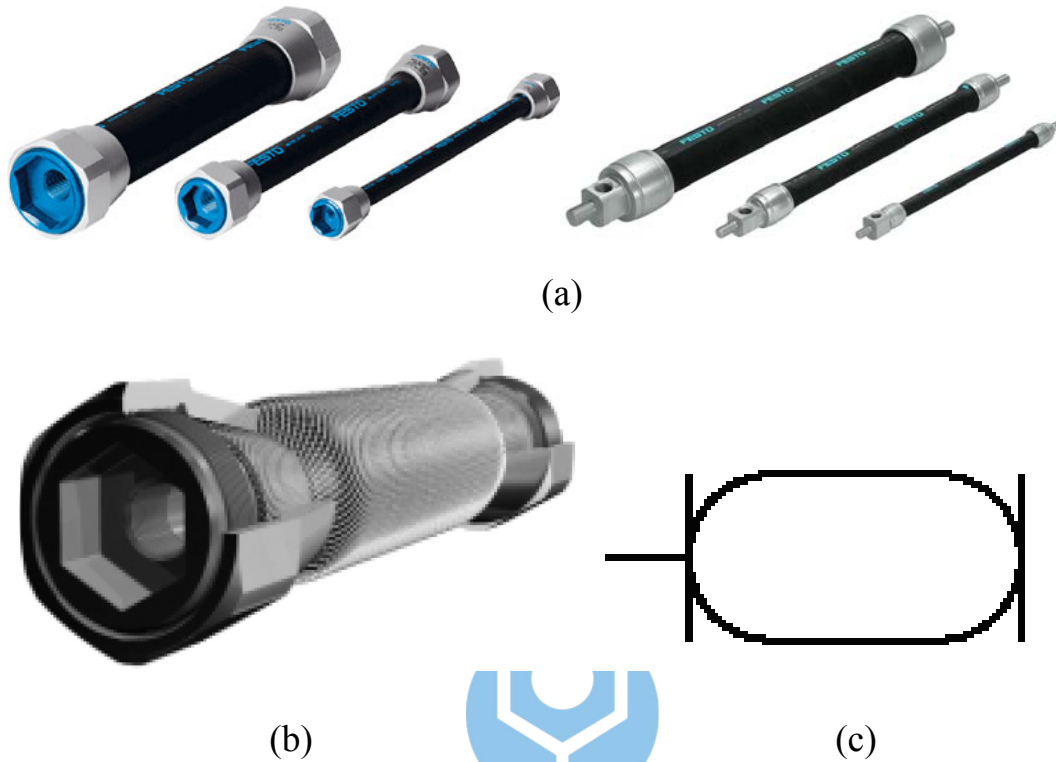


圖 2-3 (a)氣壓肌肉致動器實體外觀照 (b)氣壓肌肉致動器模型構造剖面示意圖 (c)氣壓肌肉致動器符號[64]

### 2.1.3.1 氣壓肌肉致動器材料簡介

氯丁二烯為氣壓肌肉致動器之橡膠筒材質，它的工作特性與其獨特的結構特點是密不可分的。在氣壓肌肉致動器的工作過程中，其纖維層起了非常關鍵的重要作用。當氣壓肌肉致動器充氣後，橡膠筒開始膨脹，由於纖維層對橡膠筒運動的約束，橡膠筒的徑向膨脹力被轉換為氣動人工肌肉的軸向收縮力，從而使氣壓肌肉致動器產生徑向膨脹運動和軸向收縮運動，這就是氣壓肌肉致動器充氣後收縮運動的原因。圖 2-4(a) 氣壓肌肉致動器結構簡圖以及(b) 纖維層幾何參數關係示意圖。

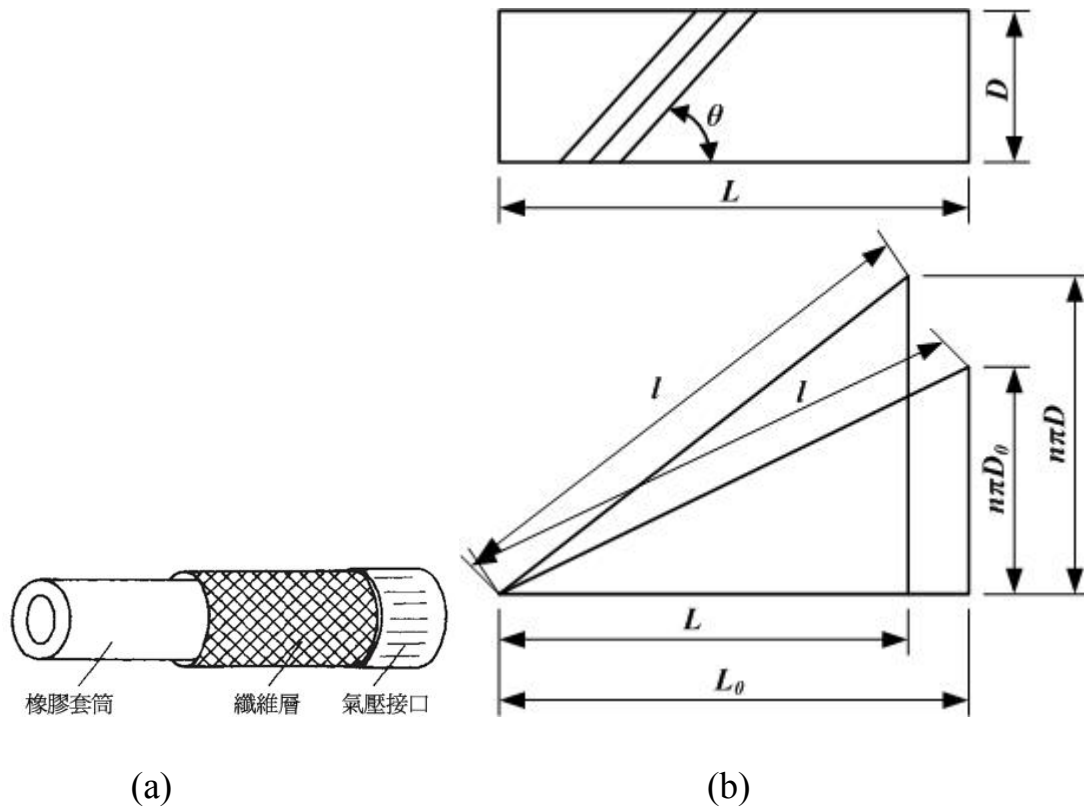


圖 2-4 (a)氣壓肌肉致動器結構簡圖 (b)氣壓肌肉致動器  
纖維層幾何參數關係示意圖[65]

### 2.1.3.2 氣壓肌肉致動器作用力簡介

氣壓肌肉致動器的作用力的狀況與一般氣壓缸不同，乃利用輸入至腔室之壓力高低來控制其作用力大小，且改變運動行程位移長短，而一般氣壓缸無法用此方式同時控制作用力與運動行程位移。圖 2-5(a) 氣壓肌肉致動器與一般氣壓缸作用力及行程比較概念圖以及 (b)  $\phi 40$  氣壓肌肉致動器作用力與位移圖。

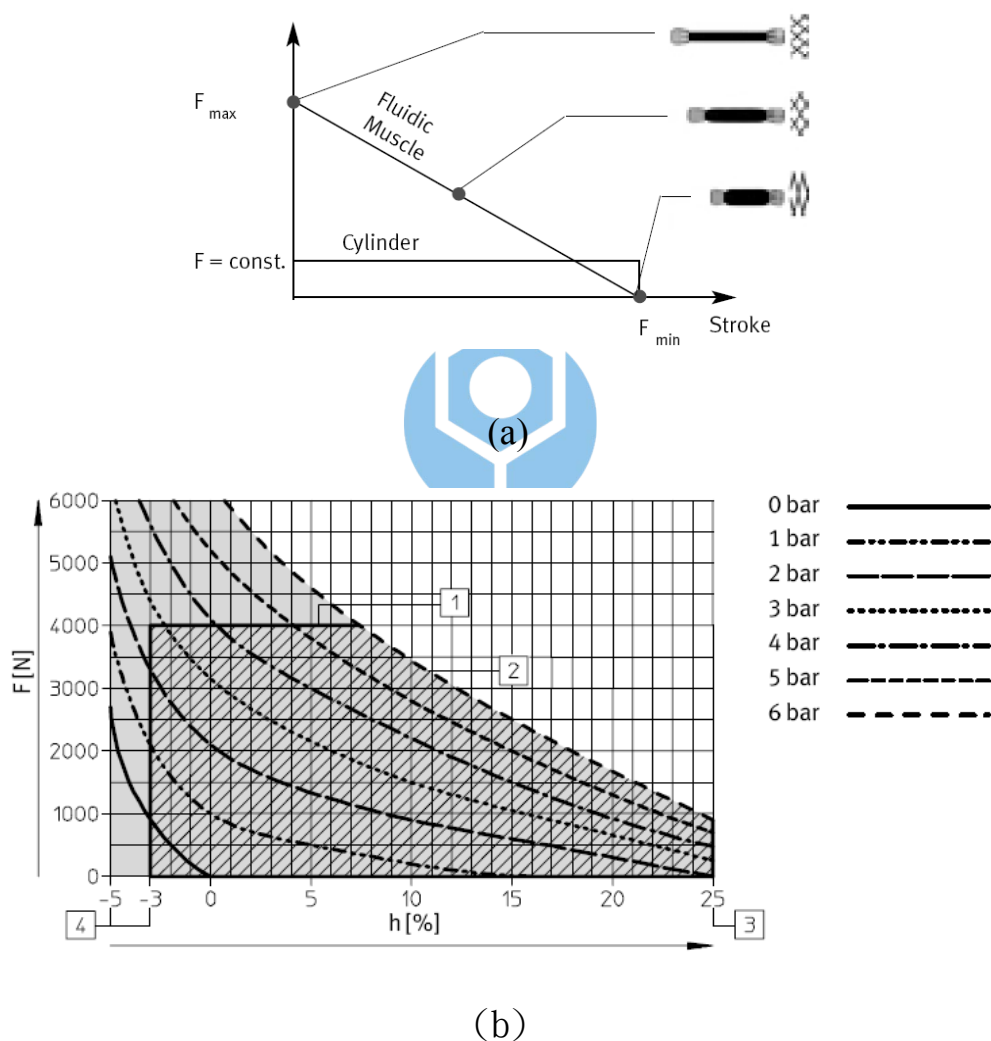


圖 2-5 (a)氣壓肌肉致動器與一般氣壓缸作用力及行程比較概念圖 (b)  $\phi 40$  氣壓肌肉致動器作用力與位移圖[64]

### 2.1.3.3 氣壓肌肉致動器之優缺點

氣壓肌肉致動器的優點如下：

結構簡單、出力大、無磨耗與黏滯現象、不受磁場影響、操作容易、適用於惡劣環境下。

氣壓肌肉致動器的缺點如下：

響應慢、磁滯現象(Hysteresis)、蠕動現象、無法承受太大的扭力和徑向力。

### 2.1.3.4 氣壓肌肉致動器之磁滯現象

由於氣壓肌肉材料為一彈性的橡膠材質，導致輸入相同的電壓，所得到之縮回軌跡和伸長軌跡不一致。

為說明磁滯現象影響定位精度甚大，因此我們針對所使用的氣壓肌肉致動器，分別對它輸入壓力 0-6bar(電壓 0-10VDC)訊號來驅動氣壓肌肉致動器及量測到的壓力與電壓值，如圖 2-6、2-7 與 2-8，藉此觀察它的磁滯曲線，如圖 2-9、2-10 與 2-11 位置輸出與(a)訊號輸入、(b)輸出壓力以及(c)訊號輸出。

由圖 2-9 至 2-11 中明顯可看出氣壓肌肉致動器在上升路徑和下降路徑，其伸長量完全不同，表 2-2 為其誤差範圍。所以在定位控制方面，磁滯現象在氣壓肌肉材料領域中是個很值得去探討並加以改善的課題。而在控制領域裡，只要利用閉迴路控制即可以改善此現象。

表 2-2 氣壓肌肉致動器磁滯誤差表

氣壓肌肉尺寸	$\phi$ 40-120	$\phi$ 20-103	$\phi$ 10-103
誤差範圍mm	14.432	8.095	7.047

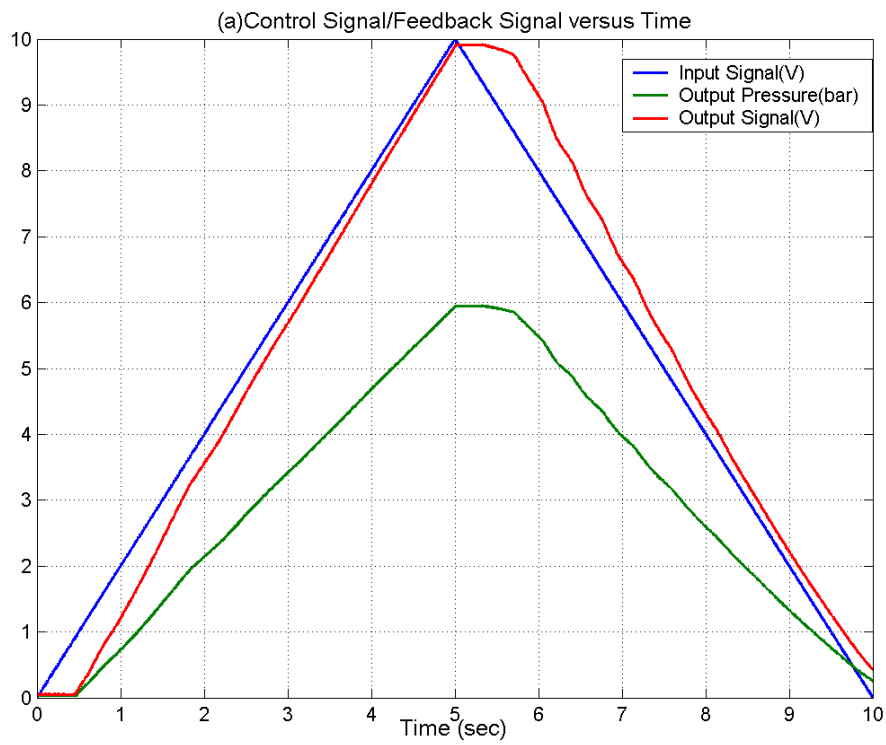


圖 2-6 測量  $\phi$  40 氣壓肌肉致動器磁滯曲線之電壓訊號

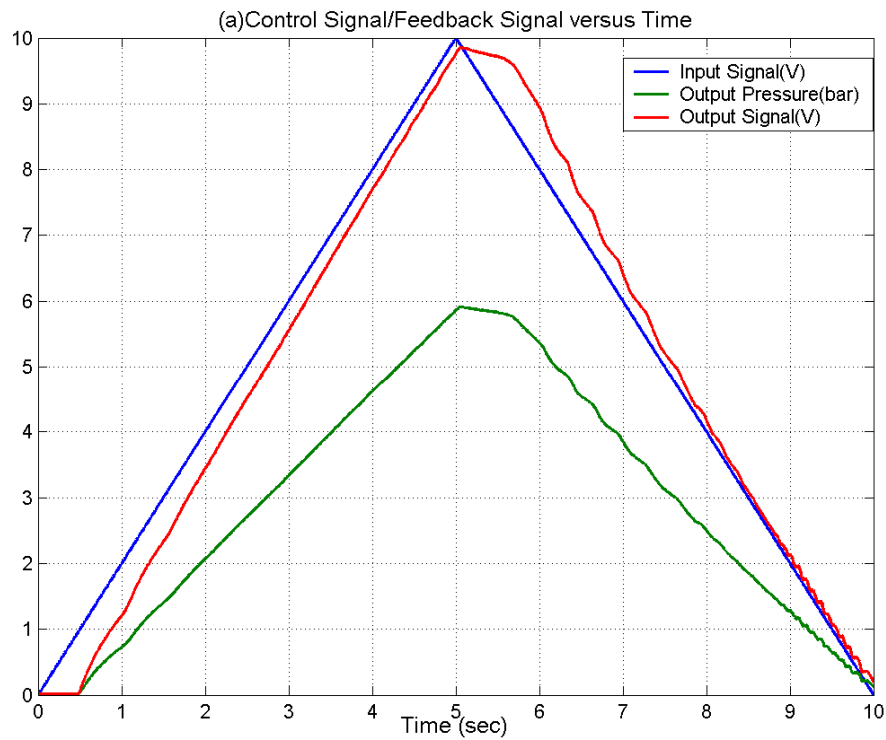


圖 2-7 測量  $\phi 20$  氣壓肌肉致動器磁滯曲線之電壓訊號

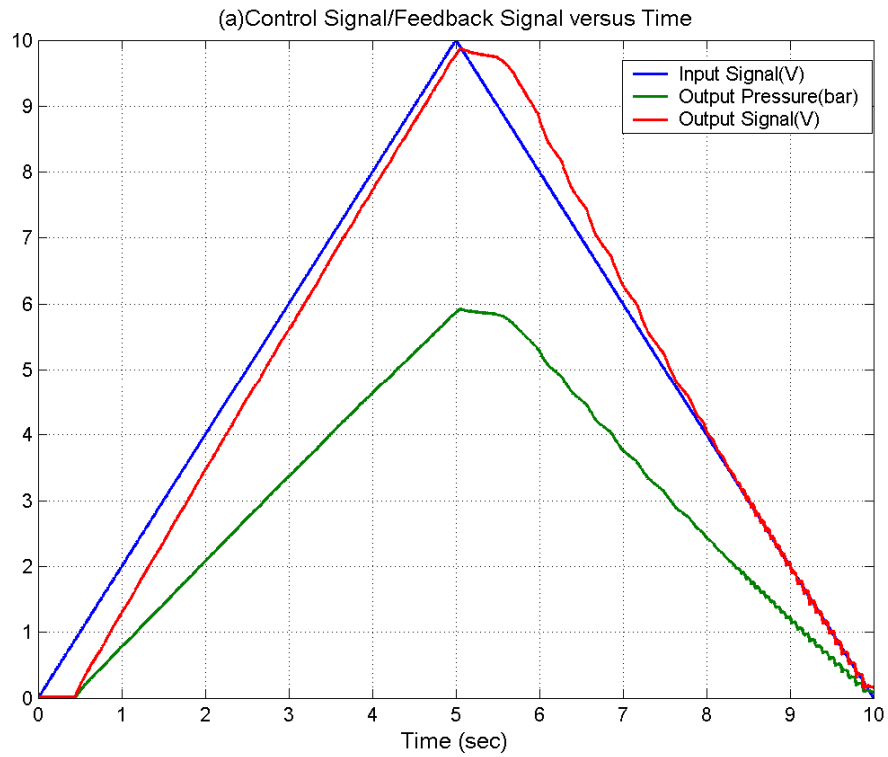


圖 2-8 測量  $\phi 10$  氣壓肌肉致動器磁滯曲線之電壓訊號

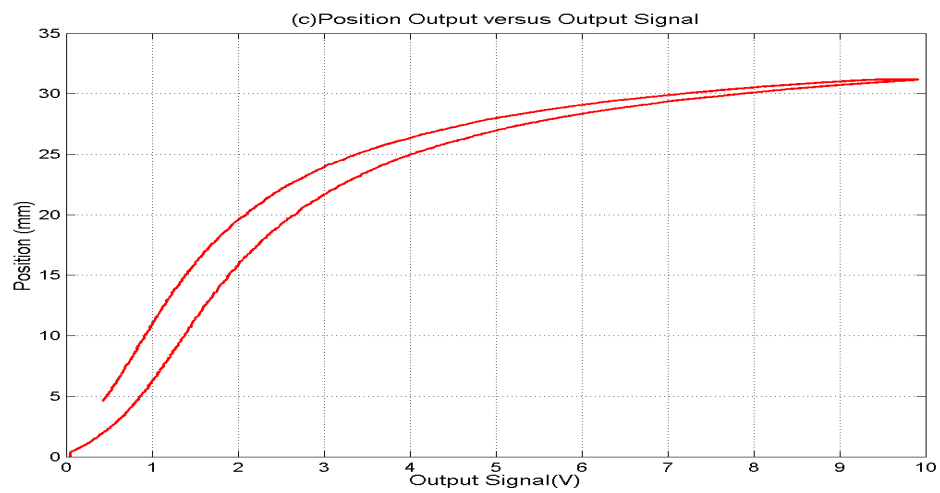
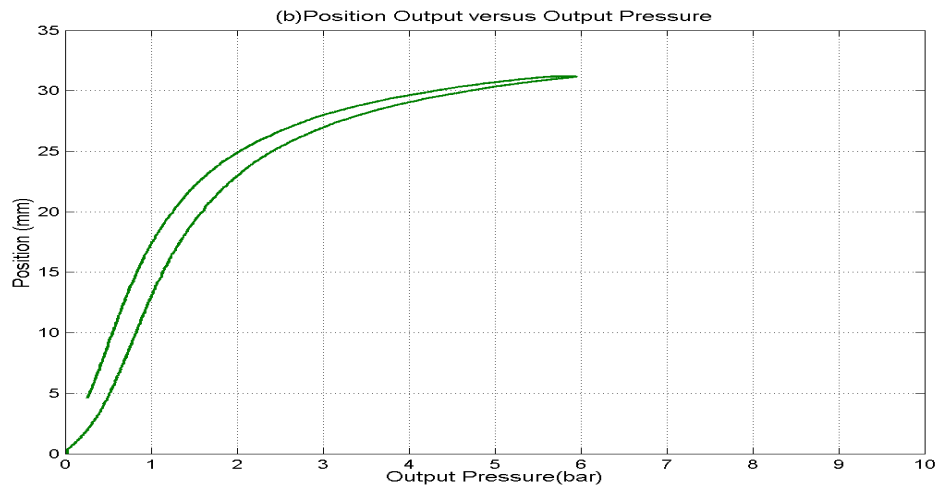
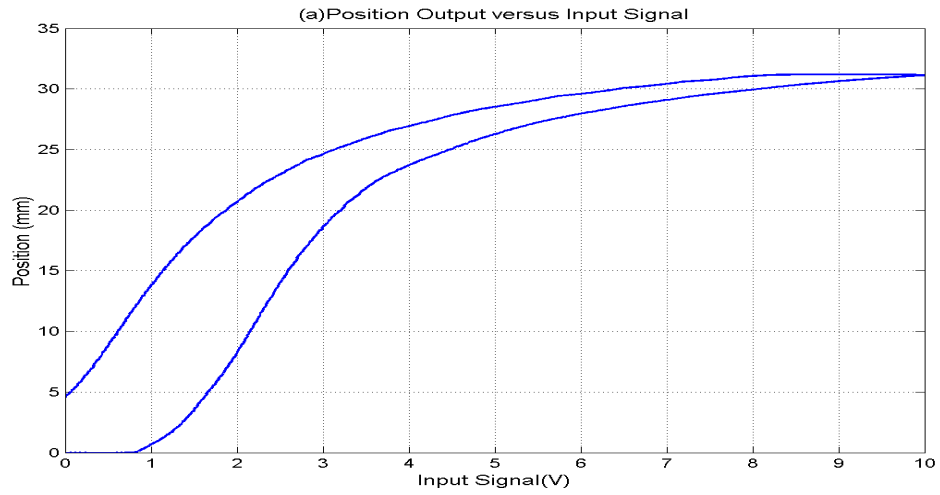


圖 2-9  $\phi 40$  氣壓肌肉致動器磁滯曲線，位置與(a)輸入電壓  
(b)輸出壓力(c)輸出電壓 關係圖

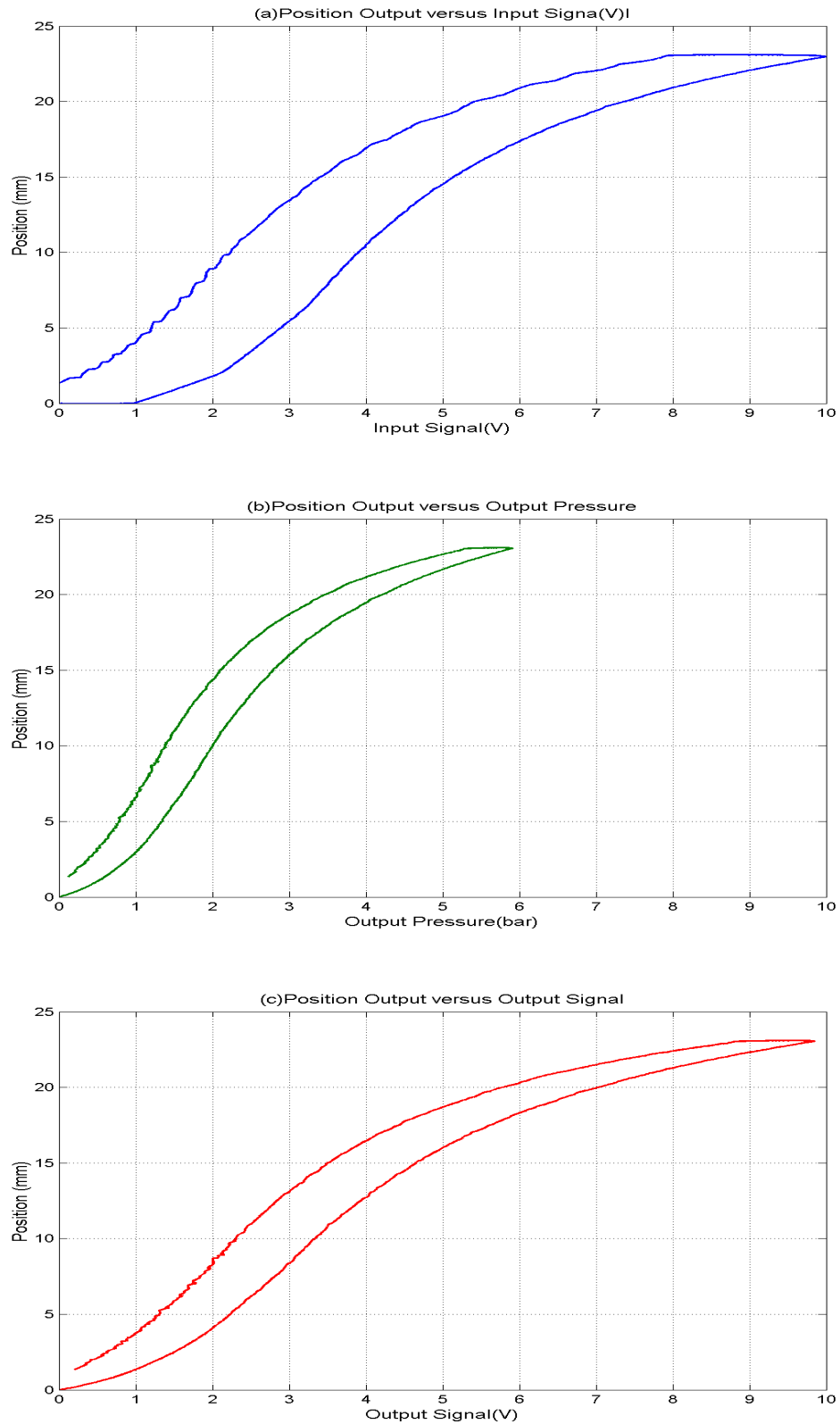


圖 2-10  $\phi 20$  氣壓肌肉致器磁滯曲線，位置與(a)輸入電壓  
(b)輸出壓力(c)輸出電壓 關係圖



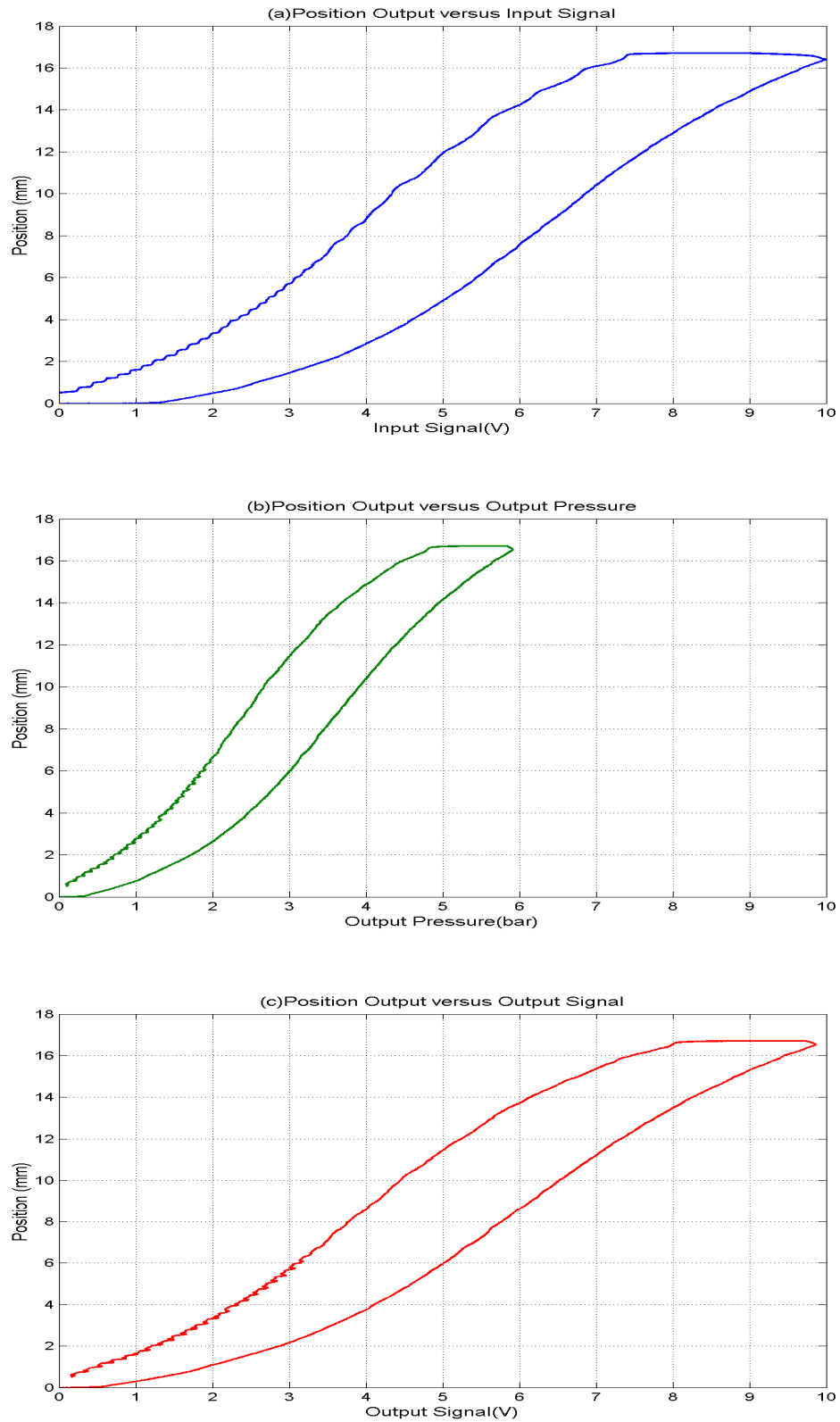


圖 2-11  $\phi 10$  氣壓肌肉致動器磁滯曲線，位置與(a)輸入電壓(b)輸出壓力(c)輸出電壓 關係圖

### 2.1.3.5 氣壓肌肉致動器之蠕動現象

當氣壓肌肉致動器材料輸入壓力或釋放壓力時，由於為彈性體，會使得位移量慢慢增加或減少，稱為蠕動現象，如圖 2-12 所示。只要利用閉迴路控制即可補償蠕動造成位置偏移的情形，並達到期望的目標位置。

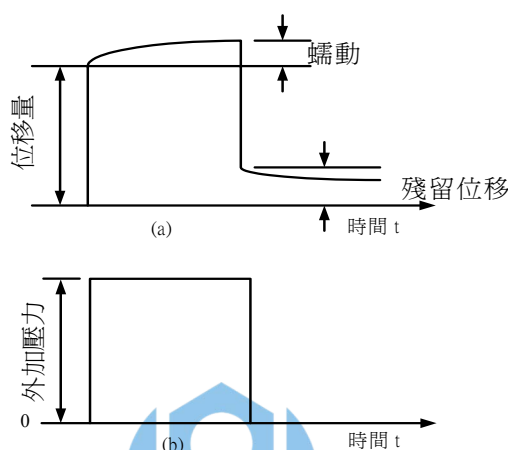
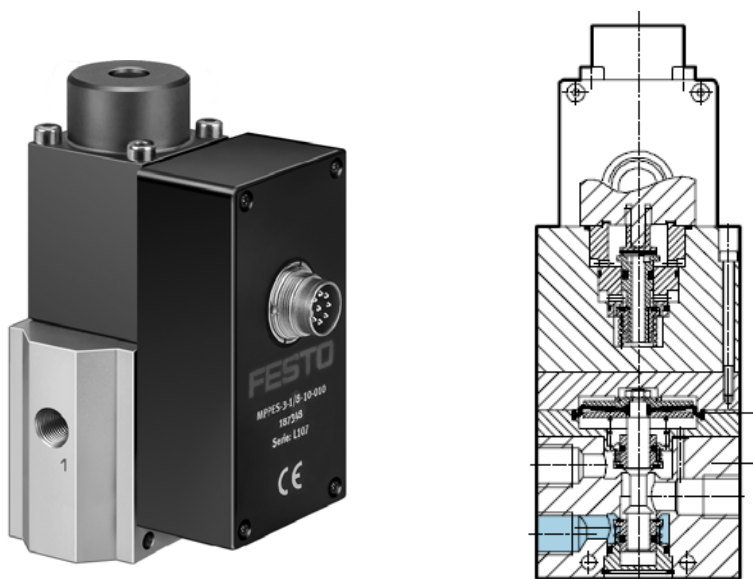


圖 2-12 氣壓肌肉致動器蠕動示意圖

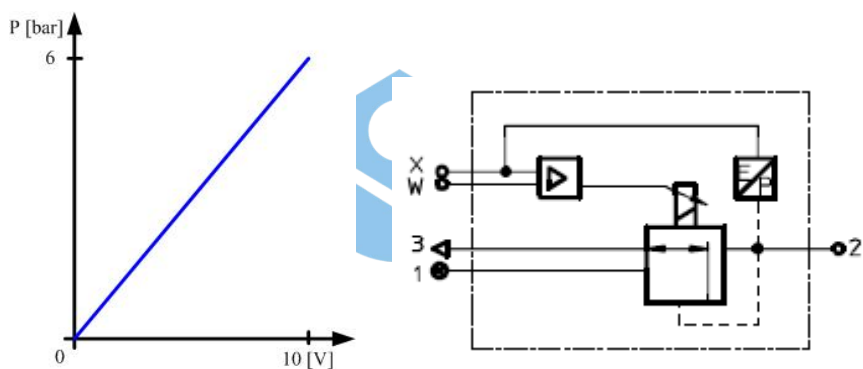
### 2.1.4 氣壓壓力比例伺服閥

壓力比例伺服閥是根據輸入電壓大小來決定調壓閥開口的大小，因此靠控制電壓就可以得到所期望的壓力。伺服閥輸出輸入訊號均為連續，相較之下就比電磁開關閥來的容易控制，因壓力與電壓成線性比例關係，又較流量伺服閥更容易控制。本實驗採用 FESTO：MPPE3-3-1/8-6-010B 型的壓力伺服閥。圖 2-13(a)為伺服閥的外觀、(b)構造、(c)閥壓力與電壓關係圖以及(d)符號。



(a)

(b)



(c)

(d)

圖 2-13 (a)伺服閥實體外觀照 (b)伺服閥構造剖面示意  
圖(c)閥壓力與電壓關係圖 (d)伺服閥符號[64]

## 2.1.5 光學尺

閉迴路控制系統具有輸入源、控制器、授控廠、感測器等四大部分，其中在開迴路系統的差異為感測器部分，感測器訊號解析的精度將關係到整個系統的價值，本系統回授訊號是位移量，故以光學尺作為感測器。以下將針對光學尺的構造原理、解碼電路(計數解碼卡)及

解碼電路與氣壓缸行進速度的關係做一簡介。

### 2.1.5.1 光學尺構造與原理

光學尺是由固定光柵、直線性光柵、發光模組與受光模組等組成。利用發光模組照射光柵，由受光模組接收所產生相位差  $90^\circ$  的 A、B 相訊號，藉由觀察 A、B 相相位的領先或落後來判斷移動方向。波形訊號經四倍頻電路分割後，經解碼電路(計數解碼卡)計數其輸出脈波數即可得到位置增量。本實驗採用義大利 Givi 之玻璃透射式光學尺(如圖 2-14)，解析度為  $1\mu\text{m}$ 。



圖 2-14 義大利 Givi 玻璃透射式光學尺

### 2.1.5.2 計數與解碼電路

解碼電路(計數解碼 IC)的功用在於接受光學尺 AB 相脈波訊號，並加以計數，再將計數值傳回電腦換算成位置增量。使用硬體解碼的好處在於可以接受高速輸入，且不會造成電腦(微處理器)的負擔。本實驗台計數解碼部份採用 HP HCTL-2032，為一解碼兼計數專用 IC，其接腳如圖 2-15 所示，解碼電路接線圖如圖 2-16。

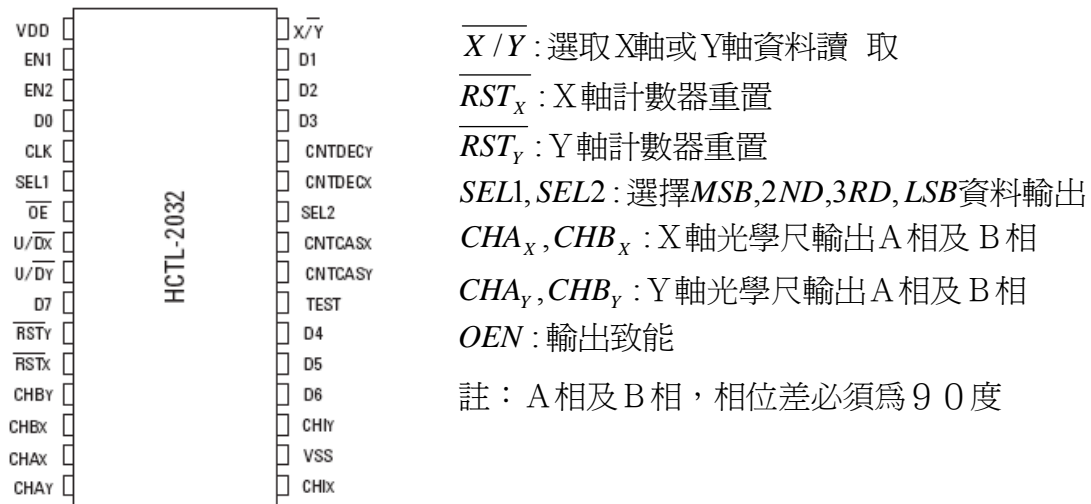


圖 2-15 HP HCTL-2032 接腳圖[63]

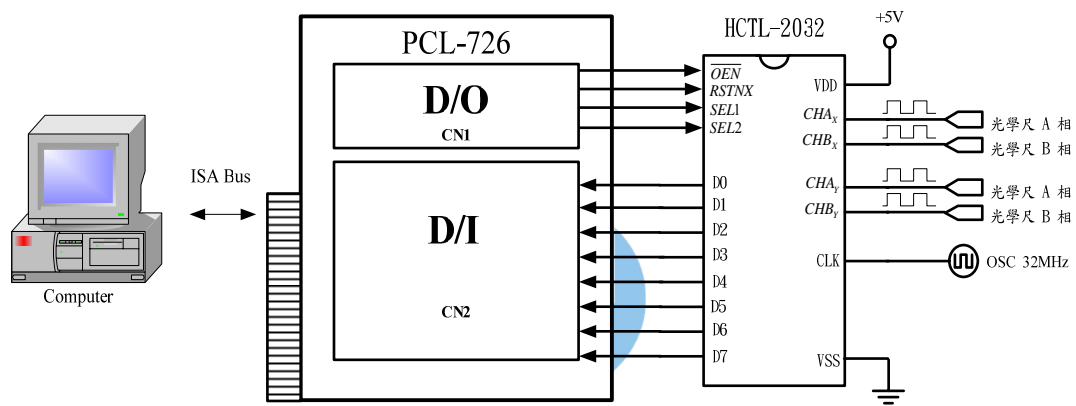


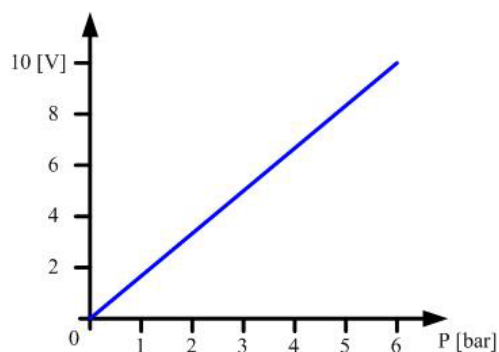
圖 2-16 解碼電路接線圖

## 2.1.6 壓力感測器

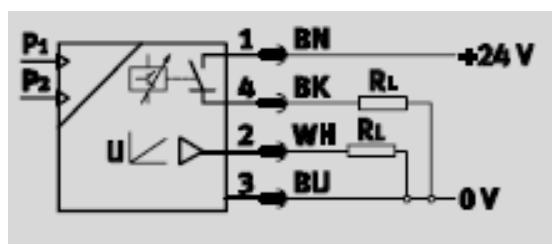
為即時檢知氣壓肌肉致動器於運動過程中的壓力值變化，轉換為電壓訊號需用壓力感測器加以量測。本實驗採用 FESTO：SDE1-D6-G2-HG4-PU 型的壓力感測器，量測壓力與輸出電壓成線性比例關係，可經介面卡直接讀取。圖 2-17(a)為壓力感測器的外觀、(b)量測壓力與輸出電壓關係圖以及(c)符號。



(a)



(b)



(c)

圖 2-17 (a)壓力感測器的外觀、(b)量測壓力與輸出電壓關係圖以及(c)符號[64]

### 2.1.7 電腦控制介面與實驗環境

本實驗系統為即時回授控制系統，以 PC 作為運算控制器，其介面卡採用 ISA 介面，為工業控制採用之介面。本實驗採用研華 PCL-726 之介面控制卡，其中 A/D 分別將類比電壓輸出給流量與壓力伺服閥使用，D/I 及 D/O 分別用於接受及傳送訊號至解碼 IC。HP HCTL-2032 解碼計數專用 IC 負責光學尺解碼計數與回授以達成閉迴路控制的功能。而壓力感測器回授訊號折採用研華 PCL-818HD 介面控制卡，將電壓直傳回運算控制器，控制程式以程式語言 Turbo C 3.0 作開發。圖 2-18 為實驗系統架構實體圖。

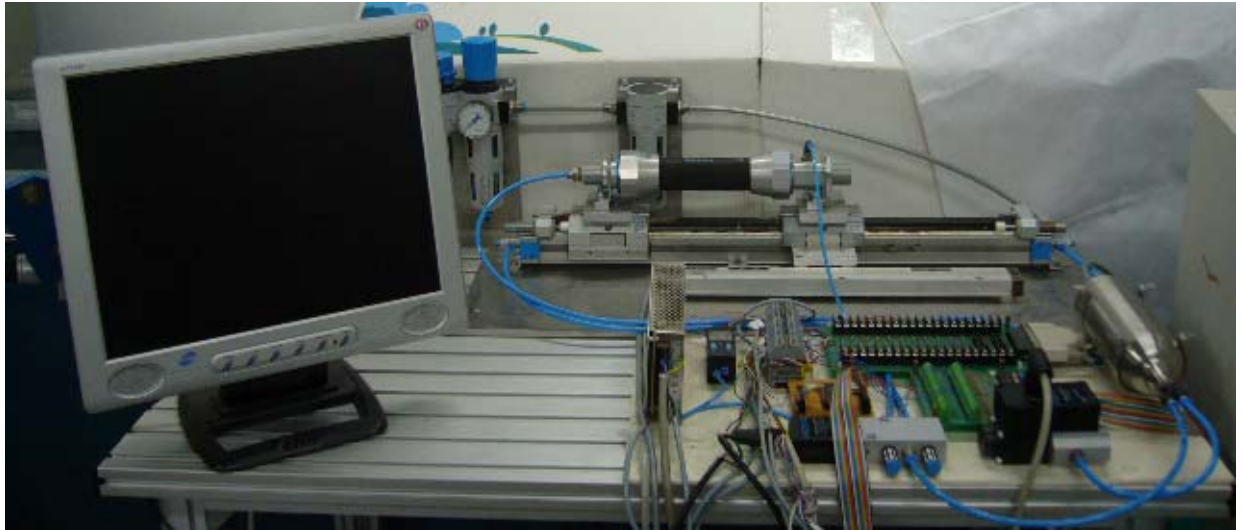


圖 2-18 實驗系統架構實體圖

## 2.2 氣壓無桿缸伺服定位平台架構

本氣壓無桿缸伺服定位平台系統方塊圖如圖 2-18 所示，；架構圖如圖 2-19 所示。控制流程首先由空氣壓縮機將空氣打入過濾調壓閥，並將壓力設定在 6bar，壓縮空氣進入軸伺服閥等待開始實驗指令，接著設定目標值與作動時間，此時電腦會計算控制電壓值，經由介面卡 D/A 埠轉換成相對應的電壓值(0-10VDC)輸出到伺服閥，伺服閥會根據輸入電壓值來決定閥口大小，即控制氣體進入氣壓缸的流量及方向，使氣壓缸產生位移，以上是開迴路系統。位移量由光學尺來讀取送出 AB 相的方波訊號進入解碼 IC，解碼後的數值傳回電腦，再由程式換算出實際位移量完成一閉迴路架構。根據總位移量與目標值的誤差即誤差變化量計算下一個時間之控制量，經由不斷的回授補償，最後達到所期望的目標值。



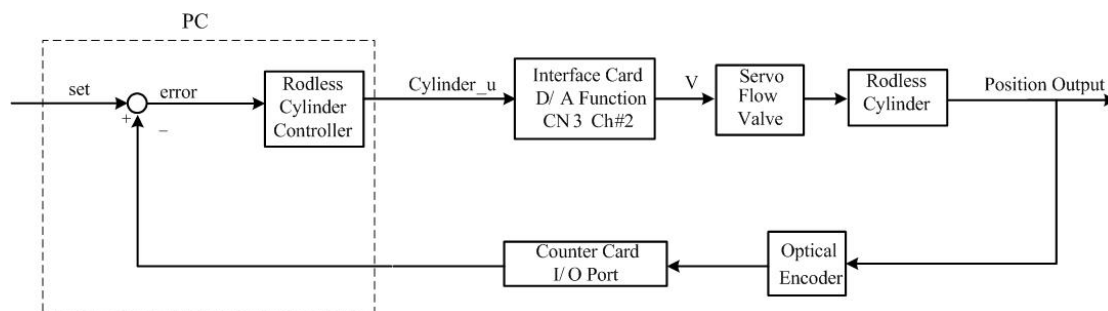


圖 2-19 氣壓(無桿缸)伺服定位平台系統方塊圖

## 2.3 氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器伺服定位平台架構

氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器定位平台架構，乃結合氣壓流量伺服系統與壓力伺服系統而來，其方塊圖如圖 2-20 所示。整個控制流程與前面所述氣壓伺服系統相似，主要差異在於氣壓肌肉致動器驅動這部分，控制器計算出的控制量經由介面卡 D/A 轉換成 0~10VDC 的控制電壓氣壓肌肉致動器供給產生微小位移，並結合氣壓無桿缸產生之大位移合成一個大行程氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器混合精密伺服開迴路系統。再加上光學尺回授訊號補償誤差形成一個完整的閉迴路系統。

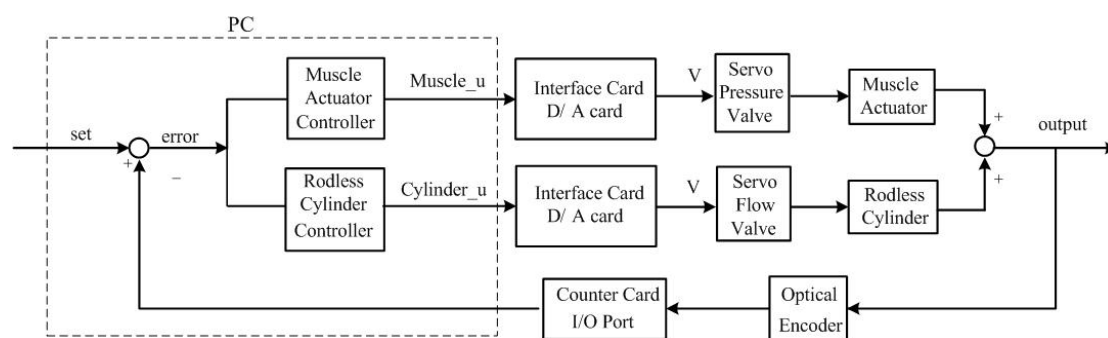
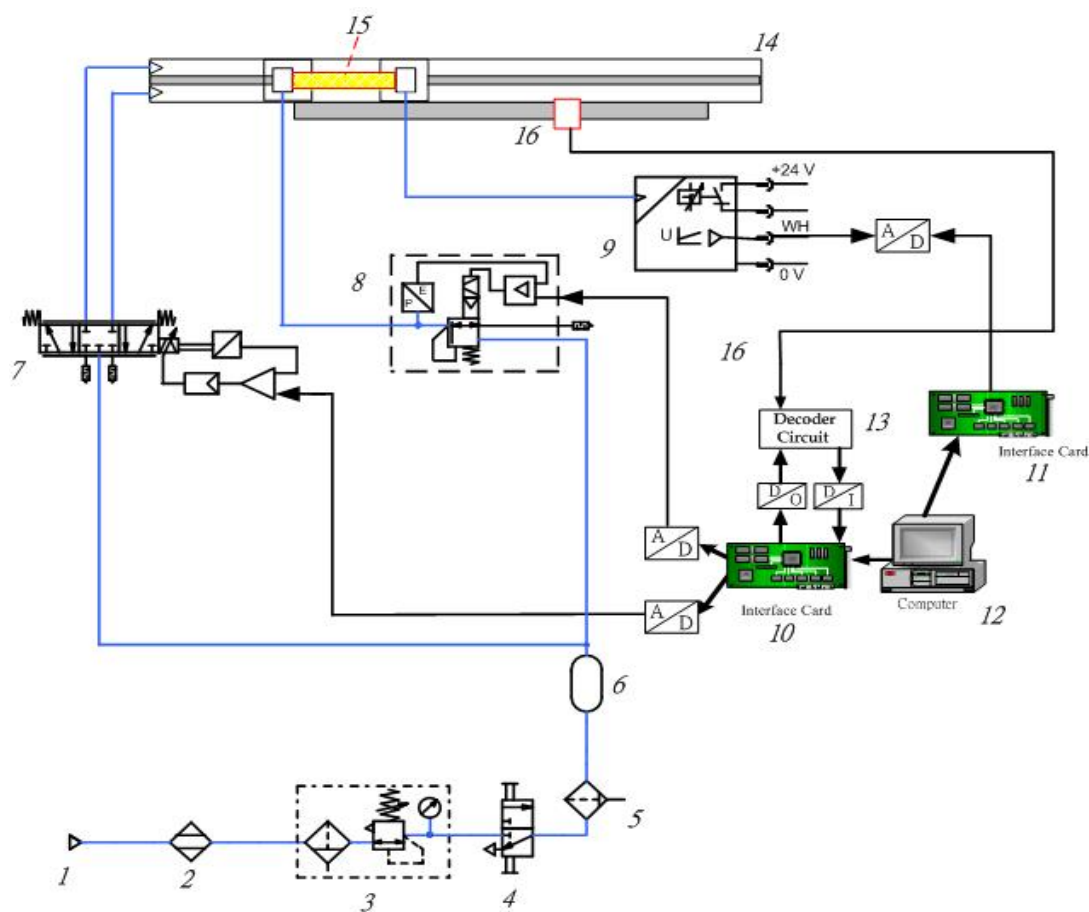


圖 2-20 氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器伺服定位平台系統方塊圖

圖 2-21 為本系統架構圖，為提供較佳品質的壓縮空氣媒介，以驅動氣壓無桿缸(14)與氣壓肌肉致動器(15)，空壓機供應壓縮空氣(1)後乾燥機處(2)理降溫乾燥，經過濾調壓(3)單元，做第一級過濾且設



定壓力為 6bar，在以 3/2 開關閥(4)做為氣源開關，後用精密過濾器(5)做第二級過濾，以得到較高品質的壓縮空氣，而輔助氣瓶(6)作用在於(1)或(2)在高速運動時，防止因流速過快而導致壓力降過大。比例流量伺服閥以控制(14)運動，比例壓力伺服閥以控制(15)運動，因此光學尺(16)產生位移訊號回授至解碼電路(13)，壓力感測器(9)是為量測(15)的壓力變化。



1. 壓力源	2. 乾燥機	3. 空氣調理組 40 $\mu$ m
4. 氣源開關閥	5. 微過濾器 5 $\mu$ m	6. 輔助氣瓶
7. 流量伺服閥	8. 壓力伺服閥	9. 壓力感測器
10. 介面卡 PCL726	11. 介面卡 PCL818HD	12. 微電腦
13. 解碼電路	14. 氣壓無桿缸	15. 氣壓肌肉致動器
16. 光學尺		

圖 2-21 氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器伺服定位平台架構圖

## 第三章 控制理論

本文採用的模糊滑動控制理論(Fuzzy Sliding Mode Control)，自從被發表以來，受各大研究領域的重視，後來許多學者將此理論結合其他理論成為更實用的理論，例如自組織模糊滑動控制等。以下將介紹模糊法則和具有滑動平面所組成的模糊滑動平面控制器。

### 3.1 模糊滑動控制理論

#### 3.1.1 模糊滑動控制(Fuzzy Sliding Mode Control, FSMC)

模糊滑動控制大致可分為兩部分，滑動平面估測器和基本模糊控制器。本節將說明如何將模糊控制器與滑動平面控制器做整合，變為模糊滑動控制器。傳統模糊控制器，是以誤差  $e$  與誤差變化量  $\dot{e}$  兩個輸入變數建立一個二維規則庫來決定控制訊號的輸出量，如圖 3-1 所示。模糊滑動控制系統是將傳統模糊器的輸入變數誤差  $e$  與誤差變化量  $\dot{e}$  組合成一個線性方程式  $\sigma = \alpha \cdot e + \dot{e}$ ，此方程式即為滑動模式控制理論中的滑動平面，用滑動平面  $\sigma$  取代誤差  $e$  與誤差變量  $\dot{e}$  成為新的控制器輸入，所以控制的目標不再是  $e \rightarrow 0$  與  $\dot{e} \rightarrow 0$ ，而是滑動平面  $\sigma \rightarrow 0$ ，如圖 3-2 所示。經過結合滑動模態理論後原本二維的模糊規則庫簡化成一維的模糊滑動平面規則庫，且仍可達到二維規則庫的控制效果。圖 3-3 為滑動平面示意圖。

滑動平面估測器：將系統回授訊號誤差  $e$  與誤差變化量  $\dot{e}$  轉換成預先規劃好的滑動平面方程式  $\sigma = \alpha \cdot e + \dot{e}$ 。

基本模糊控制器：控制目標便成是將滑動平面參數  $\sigma \rightarrow 0$ 。

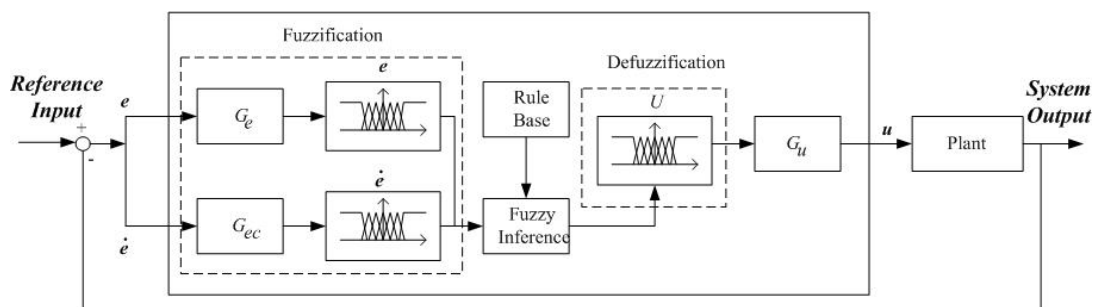


圖 3-1 傳統模糊控制器方塊圖

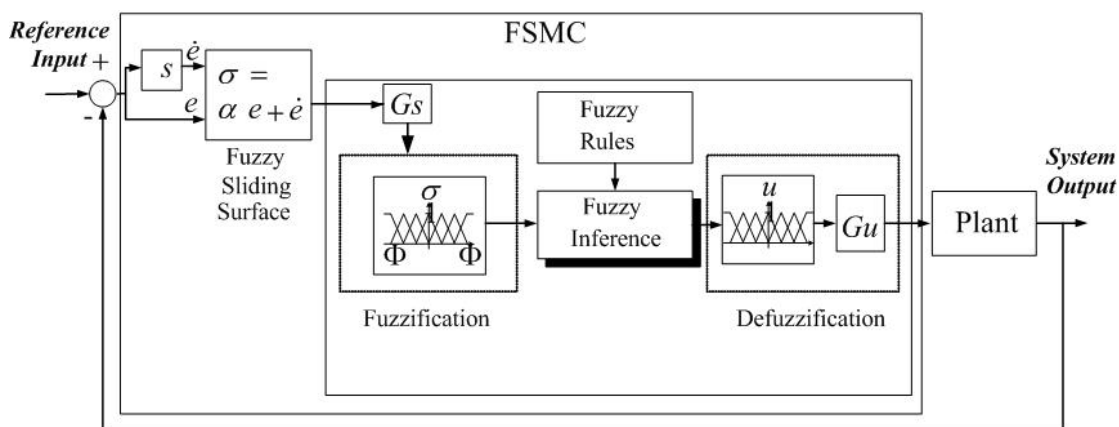


圖 3-2 模糊滑動平面控制器方塊圖

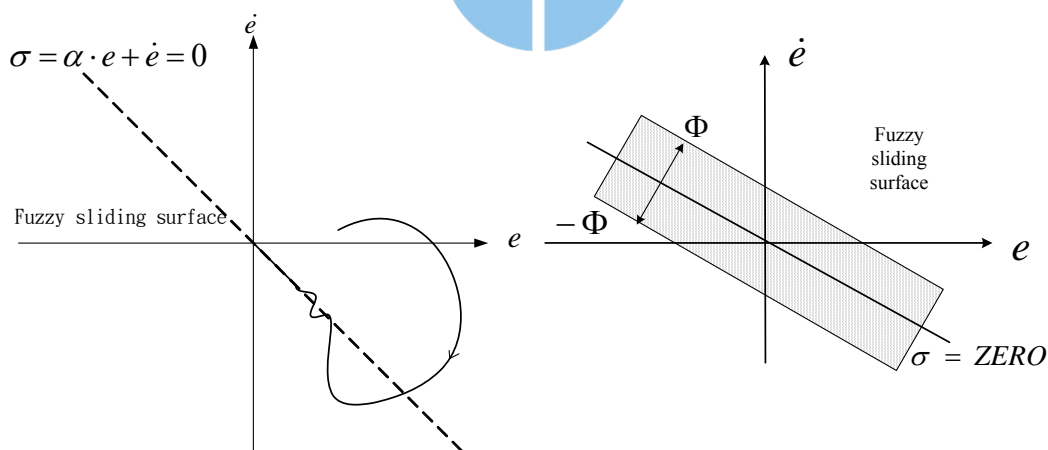


圖 3-3 滑動平面示意圖

模糊滑動平面  $\sigma = \alpha \cdot e + \dot{e}$  的斜率  $\alpha$  影響到系統的收斂速度和穩定性。原則上  $\alpha$  值越大系統收斂速度越快，但過大會造成系統產生震盪。反之， $\alpha$  值越小系統會越穩定逼近目標，但是卻會使系統達到穩態的時間拉長。所以此值的選定必須先對受控系統作充分的瞭解。然

後針對實際的輸出性能響應與穩定性作適當的評估，才能決定此 $\alpha$ 值的大小。

舉例來說，假設希望步階響應系統實際輸出值在 1 秒達到目標值得 95%， $\alpha$  值應選擇多少？

假設滑動平面： $\sigma = \alpha \cdot e + \dot{e}, \alpha > 0$ ，

另外設期望目標值為常數  $r$ ，系統實際輸出  $y$ ，則：

$$\begin{cases} e = r - y \\ \dot{e} = -\dot{y} \end{cases}$$

經運算後得到  $y(t) = r - r \cdot e^{-\alpha t}$ ， $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) \approx r$

把需求數值代入得  $y(t) = r - r \cdot e^{-\alpha \cdot 1} \geq 0.95r$

$$\therefore \alpha \geq 2.996$$

由上面簡單計算可知 $\alpha$ 設定在 3 的話此系統將可達到規格要求。

### 3.1.2 歸屬函數模糊規則與解模糊化

設定輸入變數 $\sigma$ 與輸出變數 $u$ 的模糊歸屬函數，如式(3-1)、。

$$T(\tilde{\sigma}) = \{NB, NM, NS, ZR, PS, PM, PB\} \quad (3-1)$$

$$T(\tilde{u}) = \{NB, NM, NS, ZR, PS, PM, PB\} \quad (3-2)$$

其中 NB 表示大的負數，NM 表示中的負數，NS 表示小的負數，ZR 表示零，PB 表示大的正數，PM 表示中的正數，PS 表示小的正數。

根據以上區間建立歸屬函數利用模糊理論中的三角歸屬函數以圖表示之，圖 3-4 為輸入變數 $\sigma$ 歸屬函數，圖 3-5 為輸出變數 $u$ 歸屬

函數。

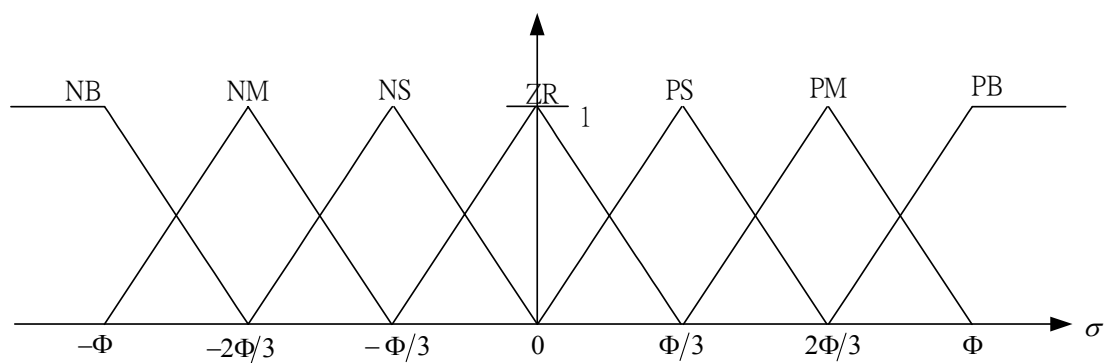


圖 3-4 模糊滑動平面輸入變數  $\sigma$  歸屬函數

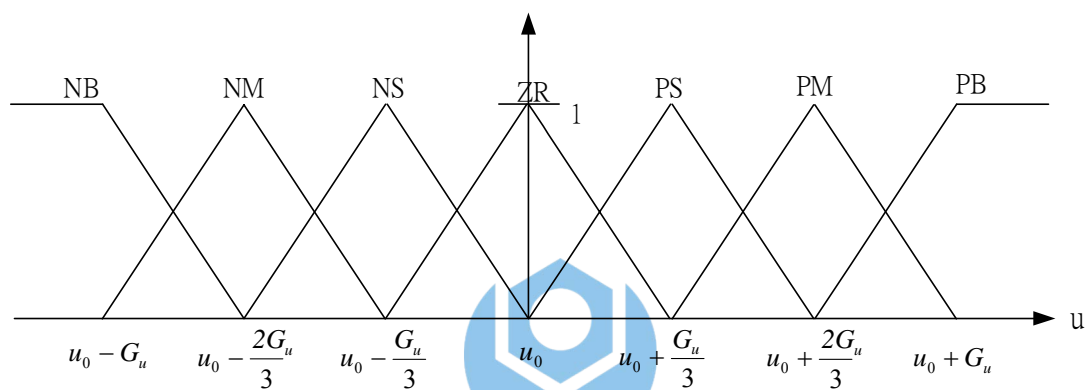


圖 3-5 模糊滑動平面輸出變數  $u$  歸屬函數

再依照所建立的模糊集合與歸屬函數，訂定以下模糊規則：

- $R^1$  : If  $\sigma$  is NB , then  $u$  is NB (NB, Negative Big)  
 $R^2$  : If  $\sigma$  is NM, then  $u$  is NM (NM, Negative Medium)  
 $R^3$  : If  $\sigma$  is NS , then  $u$  is NS (NS, Negative Small)  
 $R^4$  : If  $\sigma$  is ZR , then  $u$  is ZR (ZR, Zero)  
 $R^5$  : If  $\sigma$  is PS , then  $u$  is PS (PS, Positive Small)  
 $R^6$  : If  $\sigma$  is PM , then  $u$  is PM (PM, Positive Medium)  
 $R^7$  : If  $\sigma$  is PB , then  $u$  is PB (PB, Positive Big)

或

$$R^j : \text{If } \sigma \text{ is } \tilde{F}_\sigma^j \text{ then } u \text{ is } \tilde{F}_u^j \quad j=1,2,\dots,7$$

使用最小—最大複合推論規則，令  $X$  及  $Y$  分別為模糊規則的輸入及輸出，任何一個在  $X$  中的模糊集合  $\tilde{A}_\sigma$ ，都可用模糊規則決定一個在  $Y$  中的模糊集合  $\tilde{A}_\sigma \circ R^j$ 。

$$u_{\tilde{A}_\sigma \circ R^j}(u) = \sup_{s \in X} \min[u_{\tilde{A}_\sigma}(\sigma), \min[u_{\tilde{F}_\sigma^j}(\sigma), u_{\tilde{F}_u^j}(u)]] \quad (3-3)$$

假如  $\tilde{A}_\sigma$  為模糊單值 (singleton)，且只有在  $s=\alpha$  時，輸出  $u_{\tilde{A}_\sigma}(\sigma)=1$ ，其餘部分  $u_{\tilde{A}_\sigma}(\sigma)=0$ ，我們可以將式(3-3)簡化如下式：

$$u_{\tilde{A}_\sigma \circ R^j}(u) = \min[u_{\tilde{F}_\sigma^j}(\sigma), u_{\tilde{F}_u^j}(u)] \quad (3-4)$$

輸出歸屬函數

$$u_{\tilde{F}_u}(u) = \max[u_{\tilde{A}_\sigma \circ R^1}(u), \dots, u_{\tilde{A}_\sigma \circ R^7}(u)] \quad (3-5)$$

解模糊化的方法主要有最大準則法(MCM , max criterion method)、最大平均法(MOM , mean of maximum method)、重心法(COA , center-of - area)，本文是利用重心法應解模糊化，因為應用此法可

以得到較佳的穩態響應，另外最大平均法可得較佳的暫態響應，最大準則法暫態及穩態效果都不佳。解完模糊化後將會得到一明確輸出  $u_d$ ：

$$u_d = G_u(x, t) \cdot \frac{\int u \cdot u_{\tilde{F}_d}(u) du}{\int u_{\tilde{F}_d}(u) du} \quad (3-6)$$

最後，模糊滑動平面  $\sigma$  與控制輸出  $u_c$  的數學關係如下：

$$u_c = u_0 - u_d = u_0 - G_u(X, T) \cdot \text{sig}\left(\frac{\sigma}{\Phi}\right) \quad (3-7)$$

由(3-7)式中可知控制器輸入  $u_c$  是由解模糊控制輸入  $u_d$  與等效控制力  $u_0$  兩個控制力所構成，其中模糊推論而來的控制力目的是讓系統盡快進入穩態邊界層，等到進入邊界層後再由等效控制力將系統保留在邊界內，也就是說等效控制力是為了把系統狀態保留在邊界層裡的控制力，而比例因子  $G_u(x, t)$  的大小是由有界的非線性函數  $F(x, t)$  與干擾  $D(t)$  所決定。模糊滑動平面控制理論的穩定性，可用 Lyapunov 穩定性理論來驗證。

### 3.1.3 參數 $\Phi$ 、 $u_0$ 、 $G_u$ 設定

為確保系統的狀態軌跡能在邊界層內順滑到目標值，需先設定一邊界層  $\Phi$ ，以及需設定  $u_0$  初值補償控制量和解模糊化後所乘上之比例因子  $G_u$ ，其值為  $u_d$ ，最後  $u_c = u_0 + u_d$  為最後 AD/DA 卡之輸出電壓，來作動致動器，但參數  $\Phi$ 、 $u_0$ 、 $G_u$  會影響整個系統的響應，而此參數需視實際情況下做微調。

當選擇適當的模糊控制器後，將設計出的模糊控制器加上適當的滑動平面，便可運用在不同控制系統上。

綜合以上所述得知，在模糊滑動平面規則庫中，若將原先判斷輸入由  $e=0$  與  $\dot{e}=0$  簡化成  $\sigma = \alpha \cdot e + \dot{e} = 0$ ，將大幅降低了規則庫建立時的

複雜度，圖 3-6 所示為滑動平面參數 $\sigma$ 與控制輸入 $u$ 之推論示意圖，圖 3-7 所示為一傳統 $7 \times 7$ 模糊規則之模糊推論，與模糊滑動平面比較，明顯看出複雜多了；且僅需將系統的狀態維持在滑動平面 $\sigma = \alpha \cdot e + \dot{e} = 0$ 上，則系統最終輸出狀態將會收斂至所設定的理想目標值。

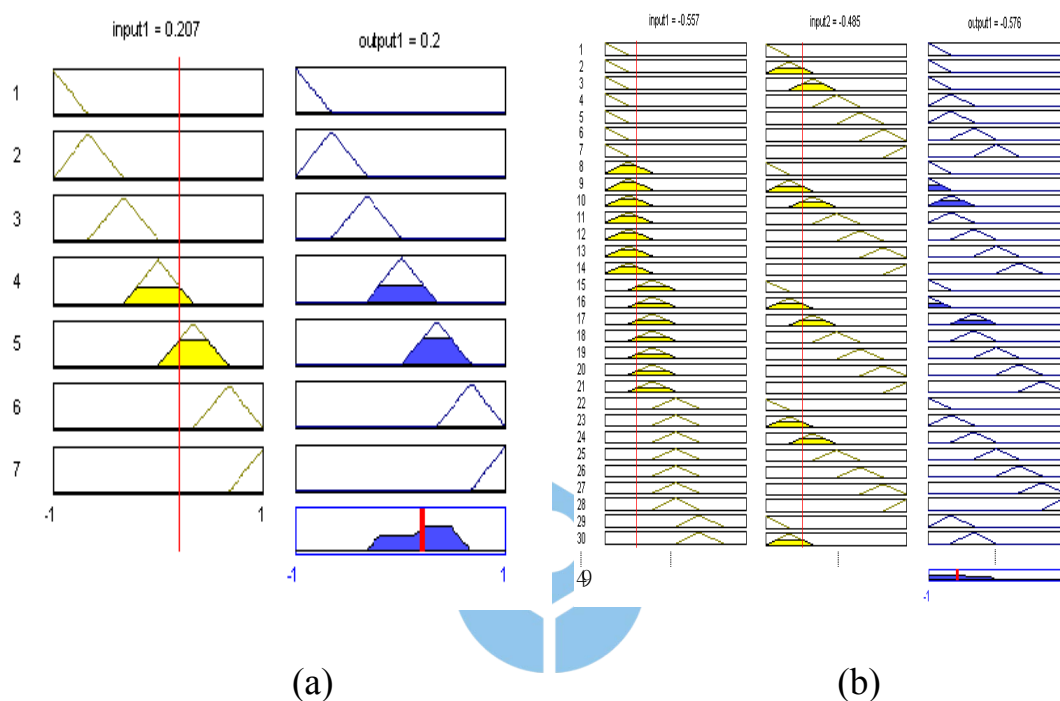


圖 3-6 (a)模糊滑動平面推論示意圖(b)傳統  $7 \times 7$  模糊規則推論



## 第四章 控制器設計

本文主要研究方向為應用不需數學模型的模糊滑動控制理論於結合氣壓無桿缸與氣壓肌肉致動器之純氣壓伺服系統進行二階段大行程高精密之二進一出定位控制。本實驗延續文獻[61]及[62]所使用之模糊滑動理論將系統精度控至微米等級。以下各節將詳細說明控制系統之控制器設計概念及參數設定，系統方塊圖如圖 4-1 所示。

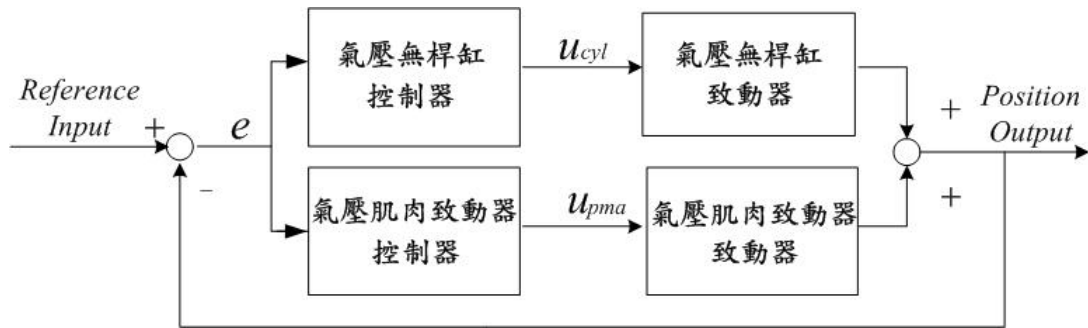


圖 4-1 氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器定位平台系統方塊圖

### 4.1 氣壓無桿缸伺服定位控制器設計

本節將針對氣壓無桿缸定位平台，設計一模糊滑動控制器來控制氣壓缸，氣壓無桿缸伺服系統之模糊滑動控制器方塊圖如圖 4-2 所示。

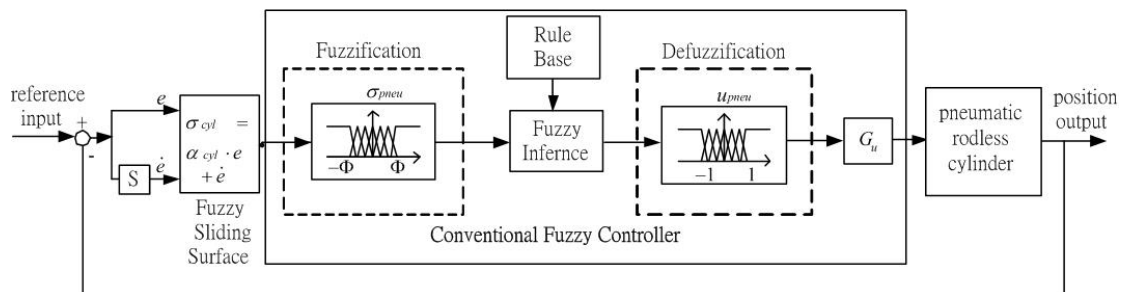


圖 4-2 氣壓無桿缸模糊滑動控制系統方塊圖

### 4.1.1 模糊滑動平面規則庫之選取

設計模糊滑動控制器首先必須找出最佳模糊規則庫，使得系統可達到所期望的精度，若無最佳規則庫系統會來回震盪，則無法快速進入 NS~PS 範圍內，使誤差進不到用微小控制力輸出的階段，一直來回輸出中、大控制訊號給系統，這就是必須先找出最佳模糊規則庫的原因。表 4-1 為氣壓無桿缸控制器規則表。

滑動平面  $\sigma_{cyl}$  輸入之歸屬函數：

$$T(\sigma_{cyl}) = \begin{bmatrix} NB & NM & NS & ZR & PS & PM & PB \\ [-2.0 & -1.0 & -0.5 & 0.0 & 0.5 & 1.0 & 2.0] \end{bmatrix}$$

輸出  $u_{cyl}$  之歸屬函數：

$$T(u_{cyl}) = \begin{bmatrix} NB & NM & NS & ZR & PS & PM & PB \\ [-1.0 & -0.8 & -0.233 & 0.0 & 0.233 & 0.8 & 1.0] \end{bmatrix}$$

表 4-1 氣壓無桿缸模糊滑動控制器規則

	輸入變數 $\sigma_{cyl}$	輸出變數 $u_{cyl}$
$R_1$	If $\sigma$ is PB	Then $u$ is PB
$R_2$	If $\sigma$ is PM	Then $u$ is PM
$R_3$	If $\sigma$ is PS	Then $u$ is PS
$R_4$	If $\sigma$ is ZR	Then $u$ is ZR
$R_5$	If $\sigma$ is NB	Then $u$ is NB
$R_6$	If $\sigma$ is NM	Then $u$ is NM
$R_7$	If $\sigma$ is NS	Then $u$ is NS

### 4.1.2 模糊滑動平面參數之選取

$\alpha$  值為模糊滑動平面  $\sigma = \alpha \cdot e + \dot{e}$  的斜率(slope)，此值選取是否適當，將直接影響整個系統的收斂速度和穩定性，而此值越大則系統收斂越快，但易造成超越量增加，而過小系統則穩定時間增長。 $\alpha$  的大小的選取可根據取樣頻率來決定， $\alpha$  的限制為  $\alpha$  不可超過取樣頻率的四分之一 ( $\alpha < (2\pi \cdot 200)/4 = 314$ )。另外，流量伺服閥控制電壓為 0-10V，以 5V 為中位，5-10V 為正向，0-5V 為反向。所以一開始需給  $u_0$  為 5V，讓控制訊號可以正確對應到 0-10V。表 4-2 為氣壓無桿缸模糊滑動控制器參數。

表 4-2 氣壓無桿缸模糊滑動控制器參數

模糊滑動	$\sigma_{cyl} = \alpha_{cyl} \cdot e + \dot{e}$	參數 $G_u$ 、 $\Phi$ 、 $u_0$
Axis Control	$\sigma_{cyl} = 34 \cdot e + \dot{e}$	$G_u = 0.004$ $\Phi = 1/1.85$ $u_0 = 5$

## 4.2 氣壓肌肉致動器伺服精密定位控制器設計

氣壓肌肉致動器是以橡膠材料包覆布織纖維製成筒狀的致動器，其運動特性為高度非線性是缺點，在控制上使用閉迴路架構即可克服這個缺點，但橡膠材料尚有另一項缺點而無法解決，當使用一段時間後材料會有疲勞變質現象，失去原先的伸縮量比例，其非線性狀態也隨之改變。在此節中，將針對氣壓肌肉致動器設計模糊滑動控制器，確保將其應用於定位時，能達到精確的定位效果。圖 4-3 為氣壓肌肉致動器控制系統方塊圖。

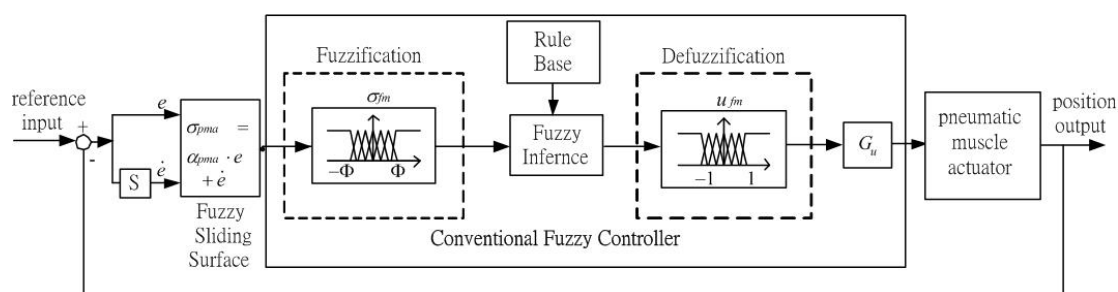


圖 4-3 氣壓肌肉致動器模糊滑動控制系統方塊圖

由於本實驗所用之氣壓肌肉致動器分別有 3 種尺寸如下：

$\phi 40 \times 120 \text{mm}$

$\phi 20 \times 103 \text{mm}$

$\phi 10 \times 103 \text{mm}$

其最大有效伸縮量比為氣壓肌肉致動器約長度的 25%。以  $\phi 40 \times 120 \text{mm}$  氣壓肌肉致動器為例，當供應壓力從 0 升至 6 bar 時其長度變化從 120mm 縮至 90mm，約有 30mm 的變化量，當氣壓無桿缸定位誤差小於  $\pm 15 \text{mm}$  後用氣壓肌肉致動器補償才有意義。本實驗針對三種尺寸不同的氣壓肌肉致動器分別做 2 mm、1 mm 與 0.3 mm 位移之定位，由第二章之 2.1.3.4 節得知磁滯現象，僅實驗縮回而不伸長的定位，又考慮氣壓肌肉致動器本體為一彈性體，一開始先給初始壓力，為初

始值電壓 5VDC(氣壓壓力為 3bar)，讓它先縮回一半(約)，主要作為雙向補償。控制器的設定方法類似同上一節。表 4-3 為氣壓肌肉致動器模糊滑動控制器規則。表 4-4 為氣壓肌肉致動器模糊滑動控制器參數。

滑動平面  $\sigma_{pma}$  輸入之歸屬函數：

$$T(\sigma_{pma}) = [NB \quad NM \quad NS \quad ZR \quad PS \quad PM \quad PB]$$

$$[-1.0 \quad -0.9 \quad -0.1 \quad 0.0 \quad 0.1 \quad 0.9 \quad 1.0]$$

輸出  $u_{pma}$  之歸屬函數：

$\phi 40 \times 120 \text{mm}$

$$T(u_{pma}) = [NB \quad NM \quad NS \quad ZR \quad PS \quad PM \quad PB]$$

$$[-10.0 \quad -2.0 \quad -0.1795 \quad 0.0 \quad 0.012 \quad 9.0 \quad 10.0]$$

$\phi 20 \times 103 \text{mm}$

$$T(u_{pma}) = [NB \quad NM \quad NS \quad ZR \quad PS \quad PM \quad PB]$$

$$[-10.0 \quad -2.0 \quad -0.0775 \quad 0.0 \quad 0.003 \quad 9.0 \quad 10.0]$$

$\phi 10 \times 103 \text{mm}$

$$T(u_{pma}) = [NB \quad NM \quad NS \quad ZR \quad PS \quad PM \quad PB]$$

$$[-10.0 \quad -2.0 \quad 0.001115 \quad 0.0 \quad 0.175 \quad 9.0 \quad 10.0]$$

表 4-3 氣壓肌肉致動器模糊滑動控制器規則

	輸入變數 $\sigma_{pma}$	輸出變數 $u_{pma}$
$R_1$	If $\sigma$ is PB	Then $u$ is PB
$R_2$	If $\sigma$ is PM	Then $u$ is PM
$R_3$	If $\sigma$ is PS	Then $u$ is PS
$R_4$	If $\sigma$ is ZR	Then $u$ is ZR
$R_5$	If $\sigma$ is NB	Then $u$ is NB
$R_6$	If $\sigma$ is NM	Then $u$ is NM
$R_7$	If $\sigma$ is NS	Then $u$ is NS

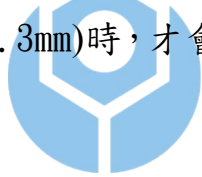


表 4-4 氣壓肌肉致動器模糊滑動控制器參數

模糊滑動	$\sigma = \alpha \cdot e + \dot{e}$		參數 $G_u$ 、 $\Phi$ 、 $u_0$
$\phi 40 \times 120 \text{mm}$	$\sigma_{pma} = \alpha \cdot e + \dot{e}$		$G_u = 0.00015$ $\Phi = 1/1.85$ $u_0 = 5$
	位移量 2mm	$\alpha = 340$	
	位移量 1mm	$\alpha = 460$	
	位移量 0.3mm	$\alpha = 200$	
$\phi 20 \times 103 \text{mm}$	$\sigma_{pma} = \alpha \cdot e + \dot{e}$ 、		$G_u = 0.00015$ $\Phi = 1/1.85$ $u_0 = 5$
	位移量 2mm	$\alpha = 336$	
	位移量 1mm	$\alpha = 480$	
	位移量 0.3mm	$\alpha = 490$	
$\phi 10 \times 103 \text{mm}$	$\sigma_{pma} = \alpha \cdot e + \dot{e}$		$G_u = 0.00015$ $\Phi = 1/1.85$ $u_0 = 5$
	位移量 2mm	$\alpha = 337$	
	位移量 1mm	$\alpha = 400$	
	位移量 0.3mm	$\alpha = 700$	

### 4.3 氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器伺服定位控制器設計

由於本實驗設定氣壓肌肉致動器有效最大定位行程為 2 mm，所以控制器設計上，當誤差值大於氣壓肌肉致動器能補償範圍時，啟動氣壓肌肉致動器並無意義。而當誤差範圍到了氣壓肌肉致動器可補償的範圍時，此時氣壓肌肉致動器啟動，但氣壓無桿缸部分並不作關閉，而是給予一個中位電壓讓它保持閥位狀態，在系統有干擾時，氣壓無桿缸部分可以快速補償誤差，使誤差又重新回到氣壓肌肉致動器可補償範圍。因此我們分別以 2 mm、1 mm 與 0.3 mm 做為氣壓無桿缸的單向偏移量，當定位誤差落入此範圍內，氣壓肌肉致動器可以快速的補償此誤差，所以分配的權重需較大。所以當誤差大於 2 mm、1 mm 與 0.3 mm 時 ( $|e| > 2\text{mm}, 1\text{mm or } 0.3\text{mm}$ )，氣壓  $e$  肌肉致動器就無法作補償，所以在此情況下我們僅讓氣壓無桿缸動作，等到誤差小於 2 mm、1 mm 與 0.3 mm ( $|e| \leq 2\text{mm}, 1\text{mm or } 0.3\text{mm}$ ) 時，才會再度開啟氣壓肌肉致動器。





## 第五章 實驗結果與討論

本實驗主要使用模糊滑動控制理論以 Turbo C 撰寫控制程式，由電腦計算出的控制量經由 AD/DA 卡送出給流量與壓力比例伺服閥，來控制氣壓無桿缸與氣壓肌肉致動器，再由光學尺讀取位移量，並回授至電腦計算出下一時間的控制量，在進行氣壓肌肉致動器實驗時，先須給與預壓 3bar 的壓力進入到腔室內，使氣壓肌肉致動器在有效行程的中位，除做縮回與伸長的補償，亦保持一定的作用力，。實驗可分為以下幾部分：

### 5.1 氣壓無桿缸伺服定位實驗

### 5.2 氣壓肌肉致動器伺服定位實驗

#### 5.2.1 $\phi 40$ 於不同行程之伺服定位實驗

#### 5.2.2 $\phi 20$ 於不同行程之伺服定位實驗

#### 5.2.3 $\phi 10$ 於不同行程之伺服定位實驗

### 5.3 氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器伺服定位實驗

#### 5.3.1 $\phi 40$ 不同切換範圍及不同行程之定位實驗

#### 5.3.2 $\phi 20$ 不同切換範圍及不同行程之定位實驗

#### 5.3.3 $\phi 10$ 不同切換範圍及不同行程之定位實驗

## 5.1 氣壓無桿缸伺服定位實驗

本實驗主要使用比例流量伺服閥控制氣壓無桿缸伺服定位，並使用 4.1 節所設計的控制器進行實驗，受控軸為無載定位，目標精度控制在 $\pm 50\mu\text{m}$  以內，以為氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器伺服定位實驗做準備。系統所設定的取樣頻率為 200 HZ，氣壓供給壓力為 6 bar，實驗時間為 10 sec。根據氣壓無桿缸伺服定位實驗以時域響應中的上升時間(rise time)、穩態誤差(steady-state error)及安定時間(settling time)等性能值來對不同行程的控制結果做比較。

圖 5-1 到圖 5-4 為氣壓無桿缸伺服定位實驗結果，包含不同行程：50、100、150、200mm，由圖中可看出穩態誤差均可維持在  $50\mu\text{m}$  以內，且系統達到穩態的時間幾乎與上升時間相差無幾。表 5-1 為氣壓無桿缸伺服定位系統步階響應實驗比較表。

表 5-1 氣壓無桿缸伺服定位系統步階響應實驗比較

實驗行程 (mm)	50	100	150	200
上升時間 $t_r$ (sec)	0.615	1.200	1.695	2.245
安定時間(sec) $t_s (e < 50\mu\text{m})$	0.665	1.300	1.915	2.925
穩態誤差 $e_{ss}$ ( $\mu\text{m}$ )	23	21	37	45
穩態時間點(sec)	0.775	1.820	2.515	3.295

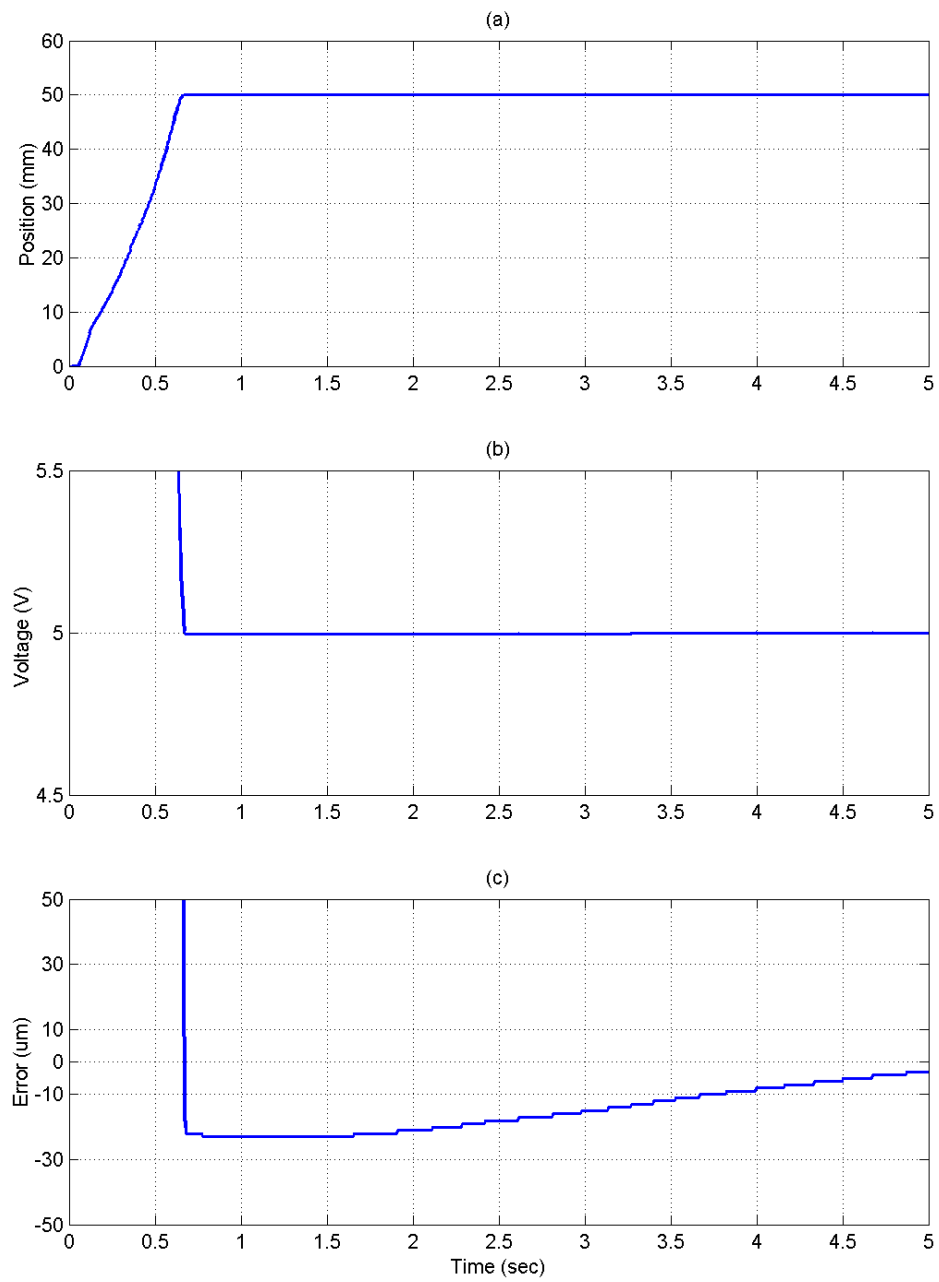


圖 5-1 氣壓無桿缸伺服定位實驗行程 50 mm 結果(a)步階響應(b)控制訊號放大(c)定位誤差放大

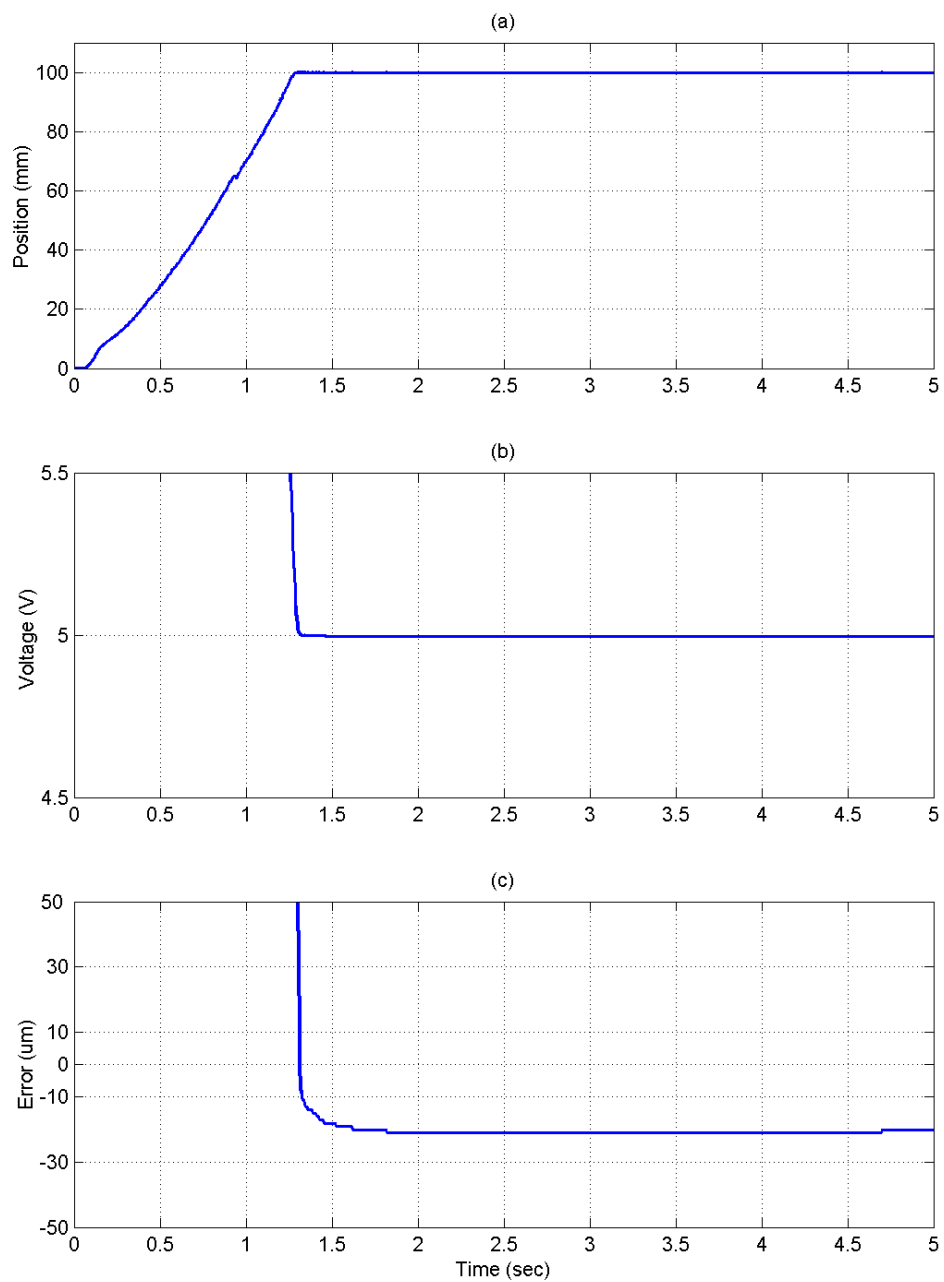


圖 5-2 氣壓無桿缸定位實驗行程 100 mm 結果(a)步階響應(b) 控制訊號放大(c)定位誤差放大

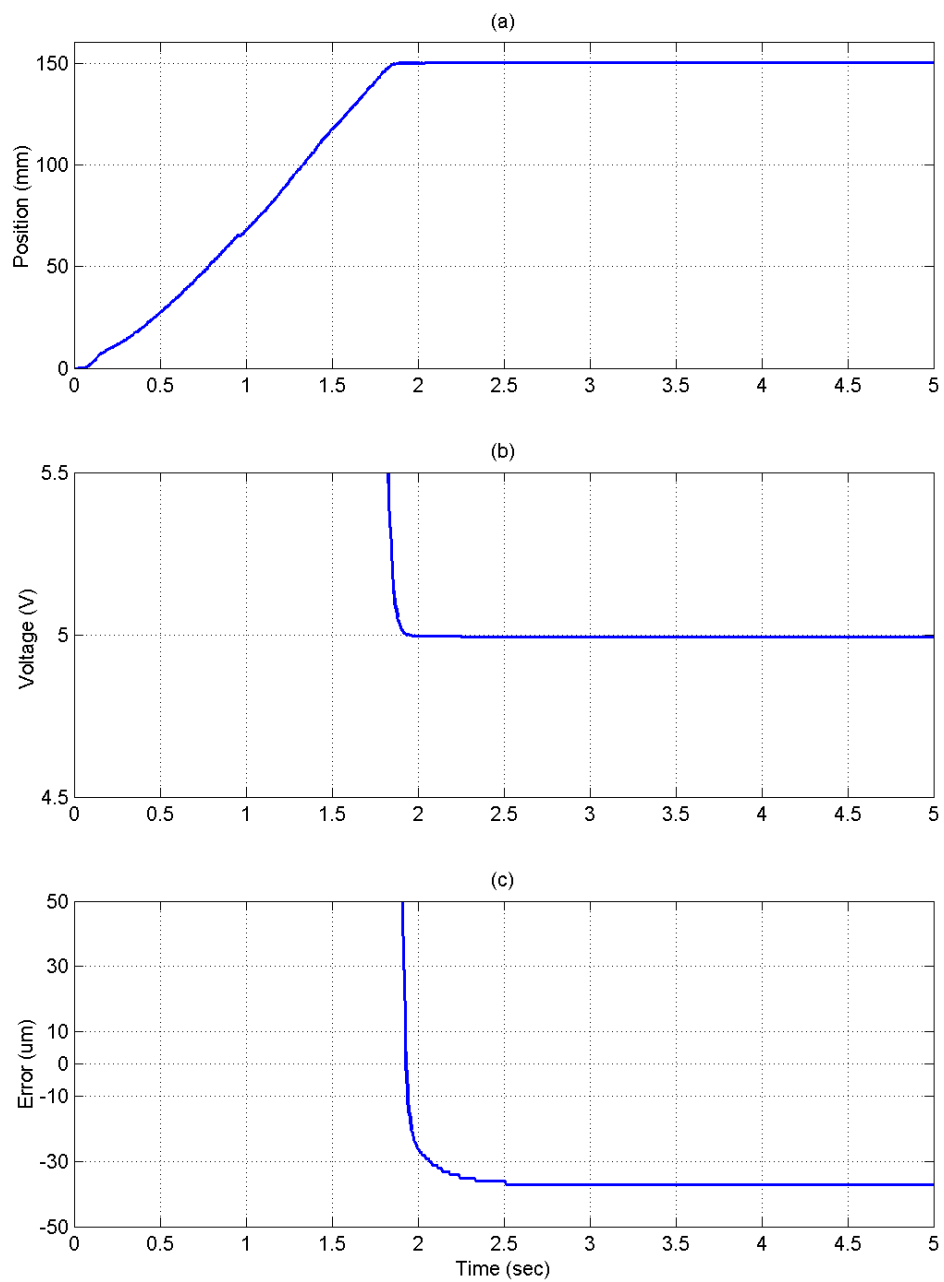


圖 5-3 氣壓無桿缸定位實驗行程 150 mm 結果(a)步階響應(b)  
控制訊號放大(c)定位誤差放大

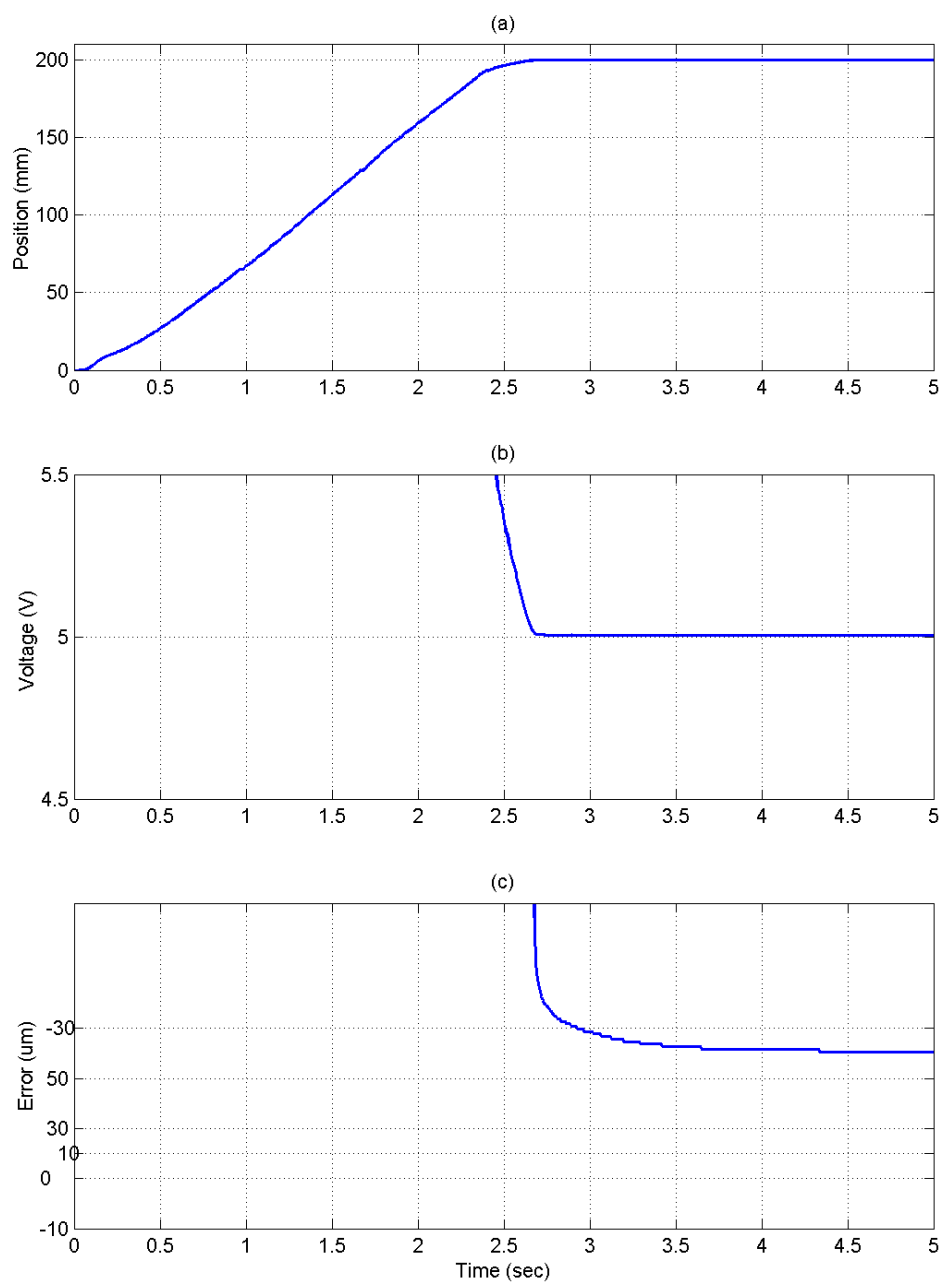


圖 5-4 氣壓無桿缸定位實驗行程 200 mm 結果(a)步階響應(b)  
控制訊號放大(c)定位誤差放大

## 5.2 氣壓肌肉致動器伺服定位實驗

本實驗將使用模糊滑動控制器來對氣壓肌肉致動器作定位控制，系統方塊圖如圖 2-22 所示，實驗流程大致上與氣壓無桿缸伺服定位實驗相同，，乃針對不同尺寸的氣壓肌肉致動器做實驗，包含：尺寸  $\phi 40 \times 120\text{mm}$ 、 $\phi 20 \times 103\text{mm}$  及  $\phi 10 \times 103\text{mm}$ ，如下：

### 5.2.1 $\phi 40$ 於不同行程之伺服定位實驗

### 5.2.2 $\phi 20$ 於不同行程之伺服定位實驗

### 5.2.3 $\phi 10$ 於不同行程之伺服定位實驗

### 5.2.1 $\phi 40$ 於不同行程之伺服定位實驗

圖 5-5 到圖 5-7 為  $\phi 40 \times 120\text{mm}$  氣壓肌肉致動器於不同行程 0.3、1 及 2mm 之伺服定位實驗結果，表 5-2 為控制性能之比較，包含：上升時間、安定時間、穩態誤差及其時間點，可看出氣壓肌肉致動器可達到微米精度等級  $7\mu\text{m}$  以內。

表 5-2  $\phi 40$  伺服定位實驗不同行程之比較

實驗行程(mm)	0.3	1	2
上升時間 $t_r$ (sec)	2.300	0.670	1.100
安定時間(sec) $t_s (e \leq 10\mu\text{m})$	2.805	0.775	2.700
穩態誤差 $e_{ss}$ ( $\mu\text{m}$ )	4	7	3
穩態時間點(sec)	4.415	1.125	3.485

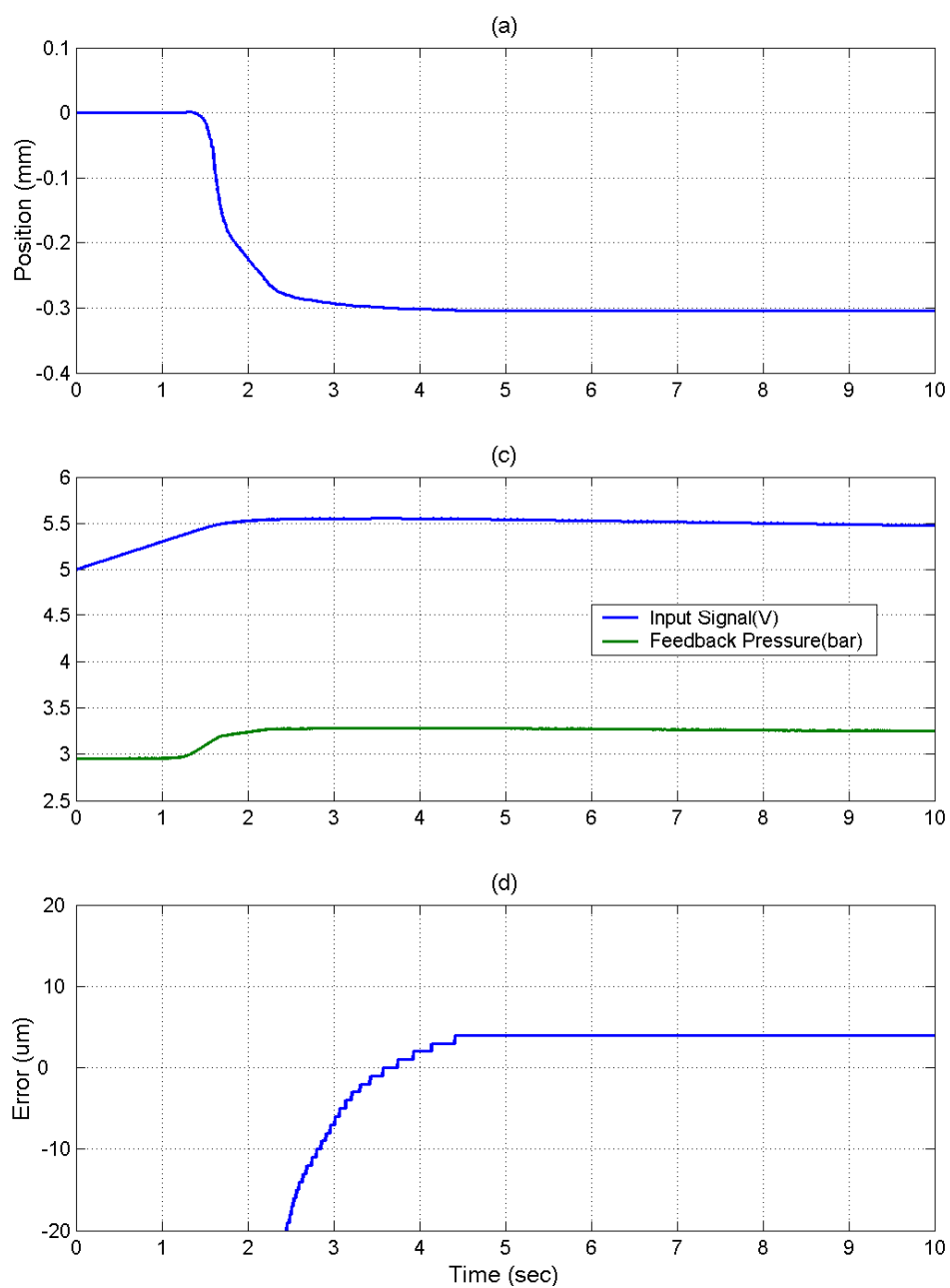


圖 5-5  $\phi 40$  氣壓肌肉致動器伺服定位控制實驗行程 0.3mm  
結果(a)步階響應(b)控制與回饋壓力訊號(c)定位誤差放大



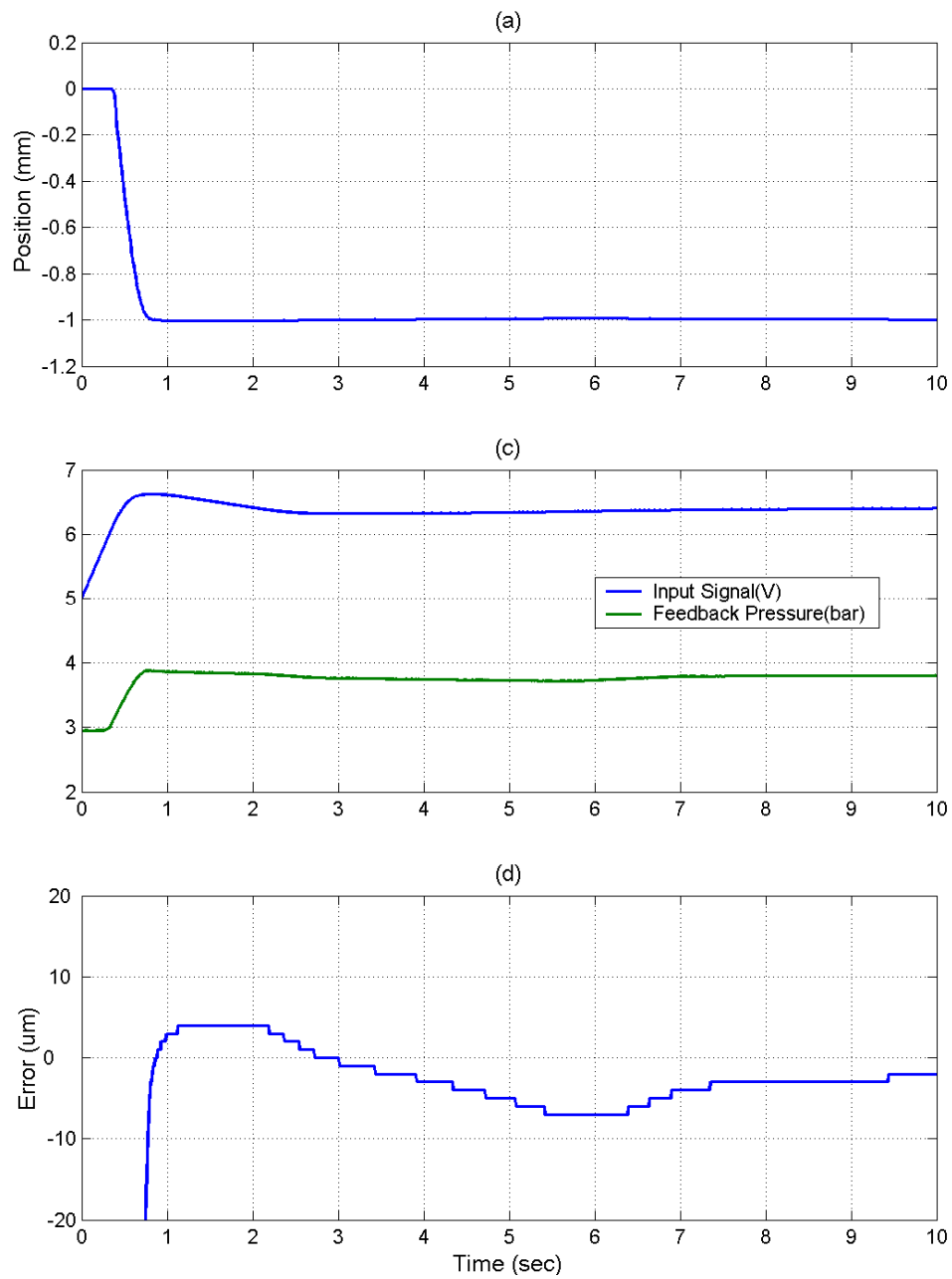


圖 5-6  $\phi 40$  氣壓肌肉致動器伺服定位控制實驗行程 1mm  
結果(a)步階響應(b)控制與回饋壓力訊號(c)定位誤差放大

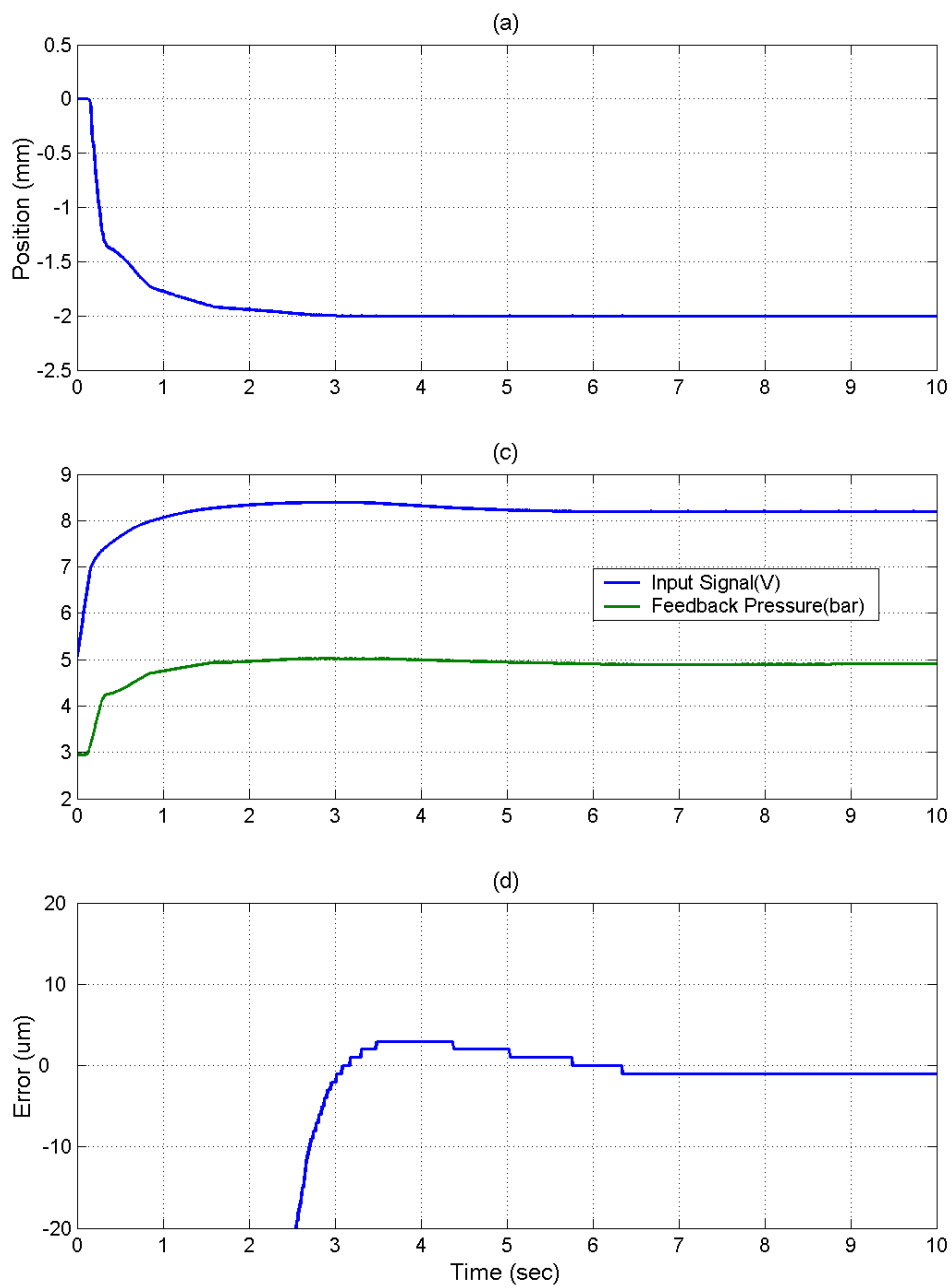


圖 5-7  $\phi 40$  氣壓肌肉致動器伺服定位控制實驗行程 2mm  
結果(a)步階響應(b)控制與回饋壓力訊號(c)定位誤差放大

### 5.2.2 $\phi 20$ 於不同行程之伺服定位實驗

圖 5-8 到圖 5-10 為  $\phi 20 \times 103\text{mm}$  氣壓肌肉致動器於不同行程 0.3、1 及 2mm 之伺服定位實驗結果，表 5-3 為控制性能之比較，包含：上升時間、安定時間、穩態誤差及其時間點，可看出氣壓肌肉致動器可達到微米精度等級  $8\mu\text{m}$  以內。

表 5-3  $\phi 20$  伺服定位實驗不同行程之比較

實驗行程 (mm)	0.3	1	2
上升時間 $t_r$ (sec)	3.490	2.490	2.605
安定時間 (sec) $t_s (e \leq 10\mu\text{m})$	4.050	3.145	5.535
穩態誤差 $e_{ss}$ ( $\mu\text{m}$ )	5	7	8
穩態時間點 (sec)	5.150	4.360	7.050

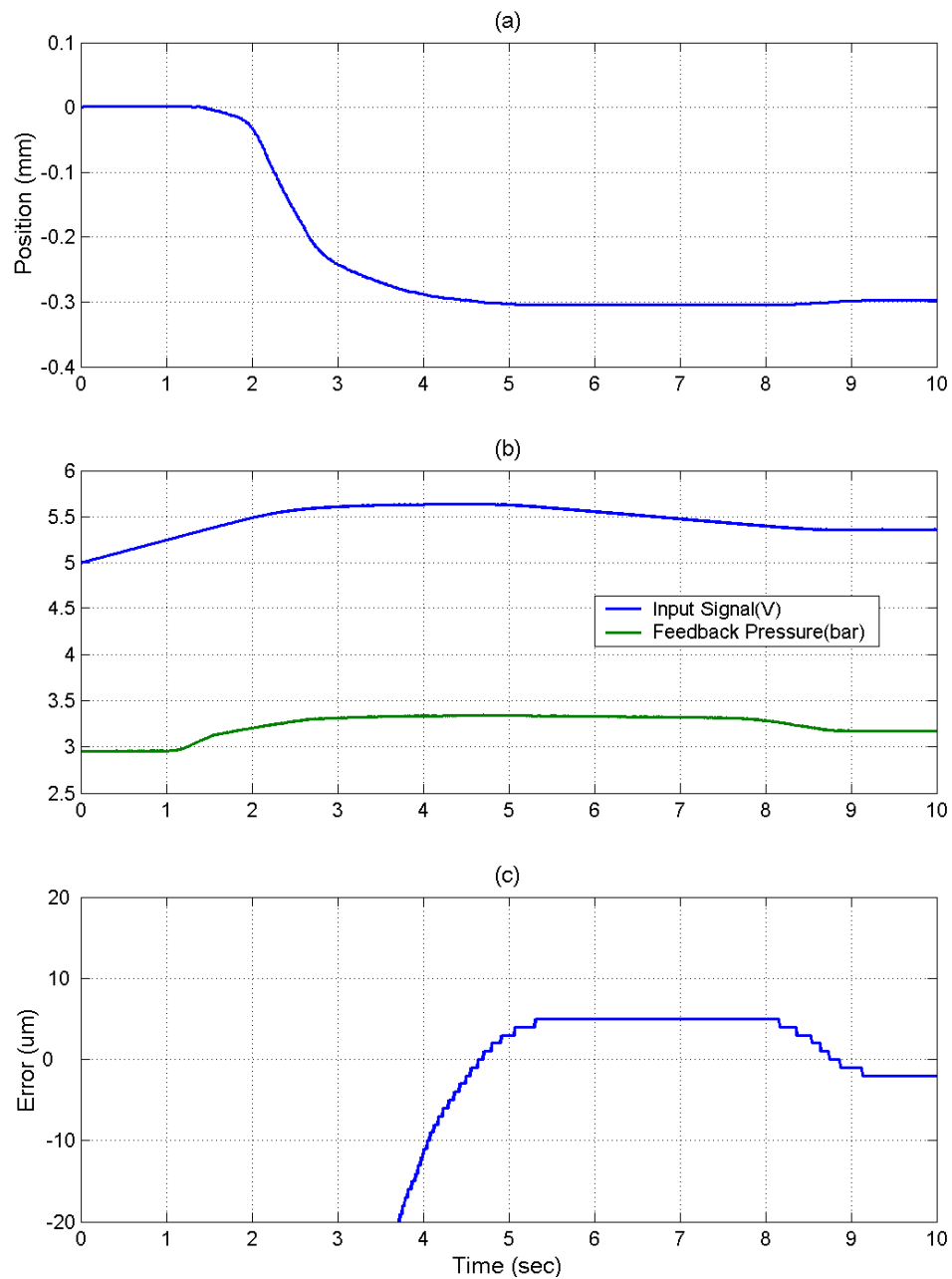


圖 5-8  $\phi 20$  氣壓肌肉致動器伺服定位控制實驗行程 0.3mm  
結果(a)步階響應(b)控制與回饋壓力訊號(c)定位誤差放大

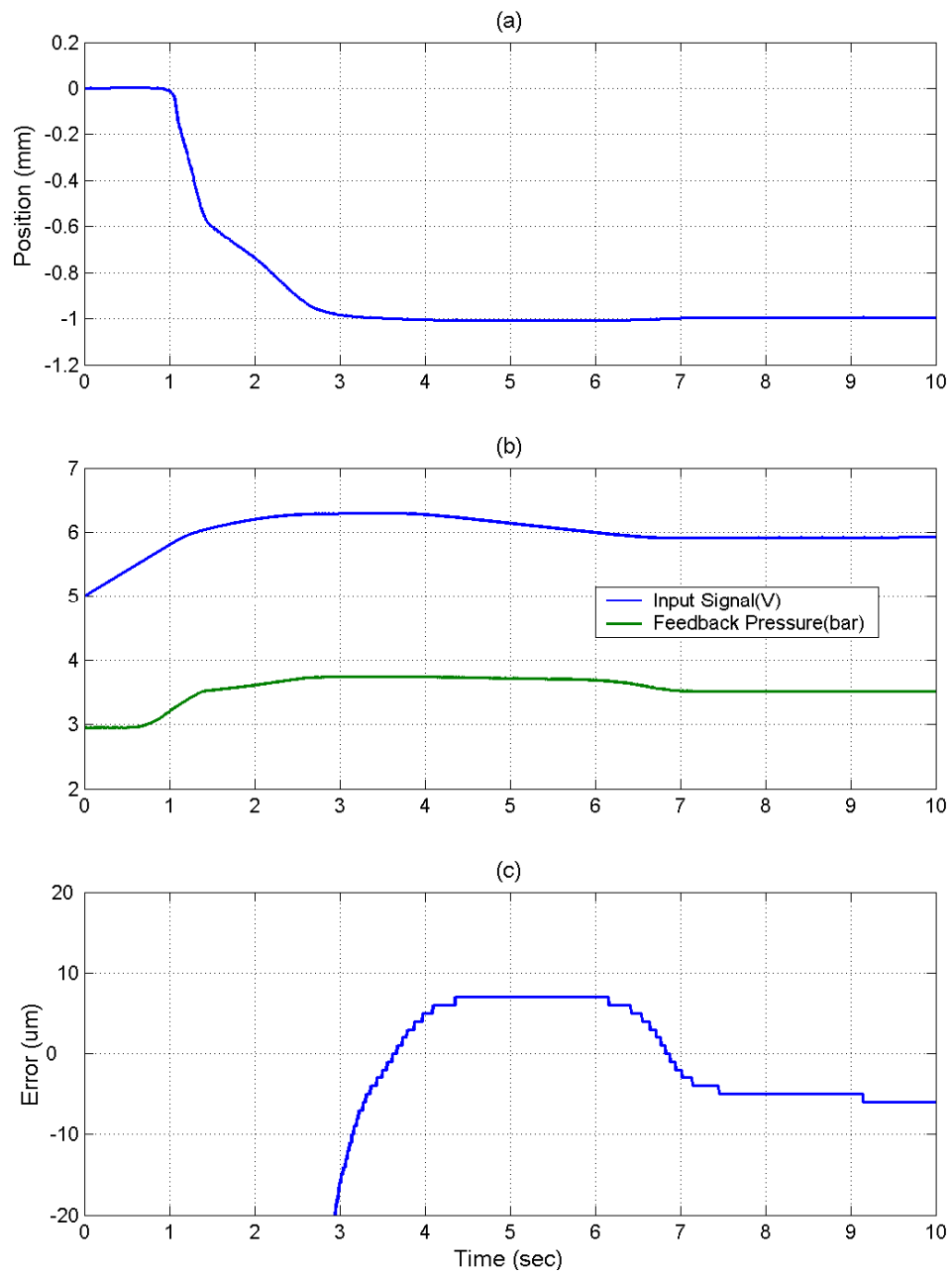


圖 5-9  $\phi 20$  氣壓肌肉致動器伺服定位控制實驗行程 1mm  
結果(a)步階響應(b)控制與回饋壓力訊號(c)定位誤差放大

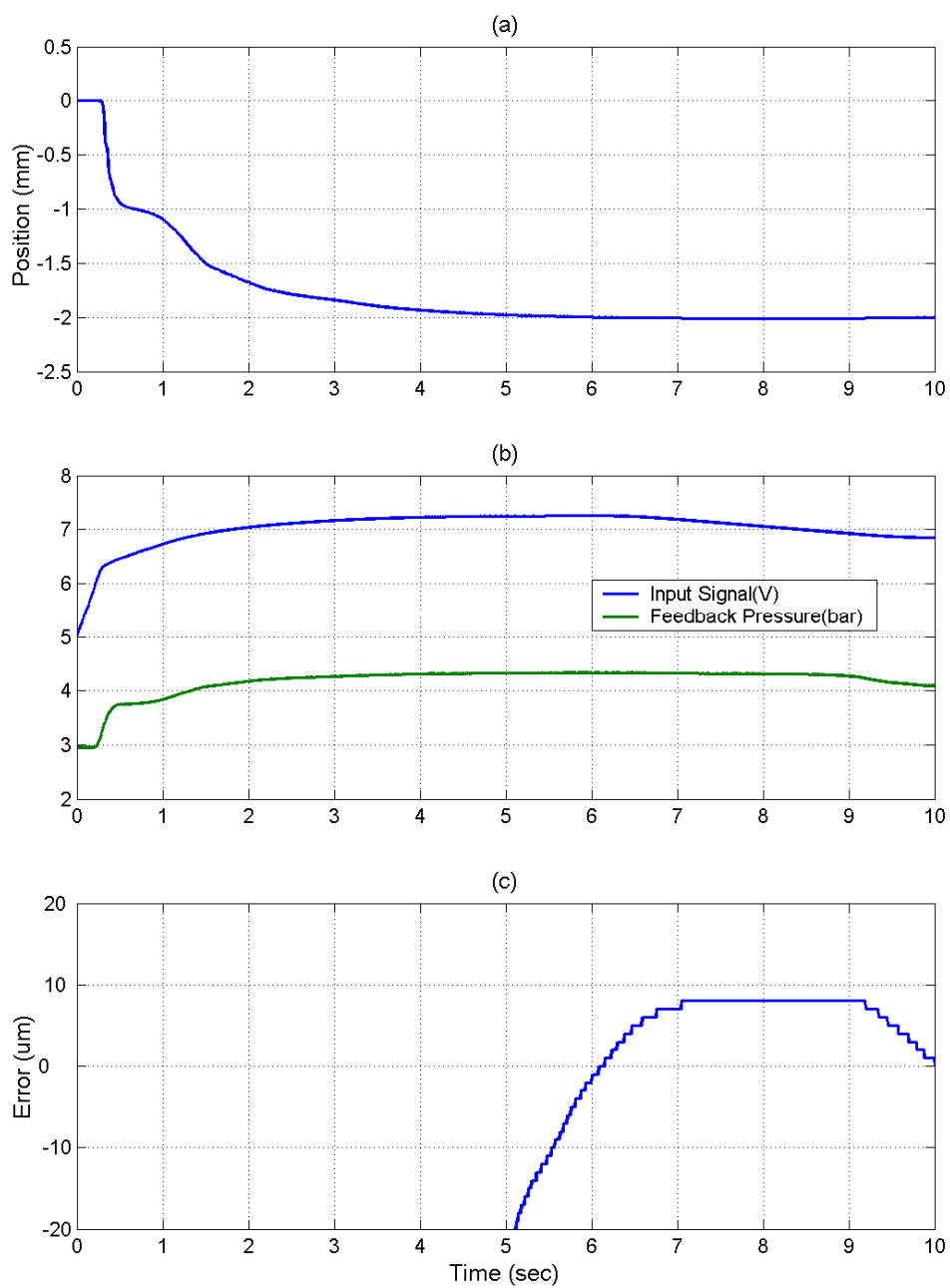


圖 5-10  $\phi 20$  氣壓肌肉致動器伺服定位控制實驗行程 2mm  
結果(a)步階響應(b)控制與回饋壓力訊號(c)定位誤差放大

### 5.2.3 $\phi 10$ 於不同行程之伺服定位實驗

圖 5-11 至圖 5-13 為  $\phi 10 \times 103\text{mm}$  氣壓肌肉致動器於不同行程 0.3、1 及 2mm 之伺服定位實驗結果，表 5-4 為控制性能之比較，包含：上升時間、安定時間、穩態誤差及其時間點，可看出氣壓肌肉致動器可達到微米精度等級  $10\mu\text{m}$  以內。

表 5-4  $\phi 10$  伺服定位實驗不同行程之比較

實驗行程(mm)	0.3	1	2
上升時間 $t_r$ (sec)	2.430	3.080	2.445
安定時間(sec) $t_s (e \leq 10\mu\text{m})$	3.505	6.180	6.655
穩態誤差 $e_{ss}$ ( $\mu\text{m}$ )	8	10	7
穩態時間點(sec)	5.350	7.490	7.910

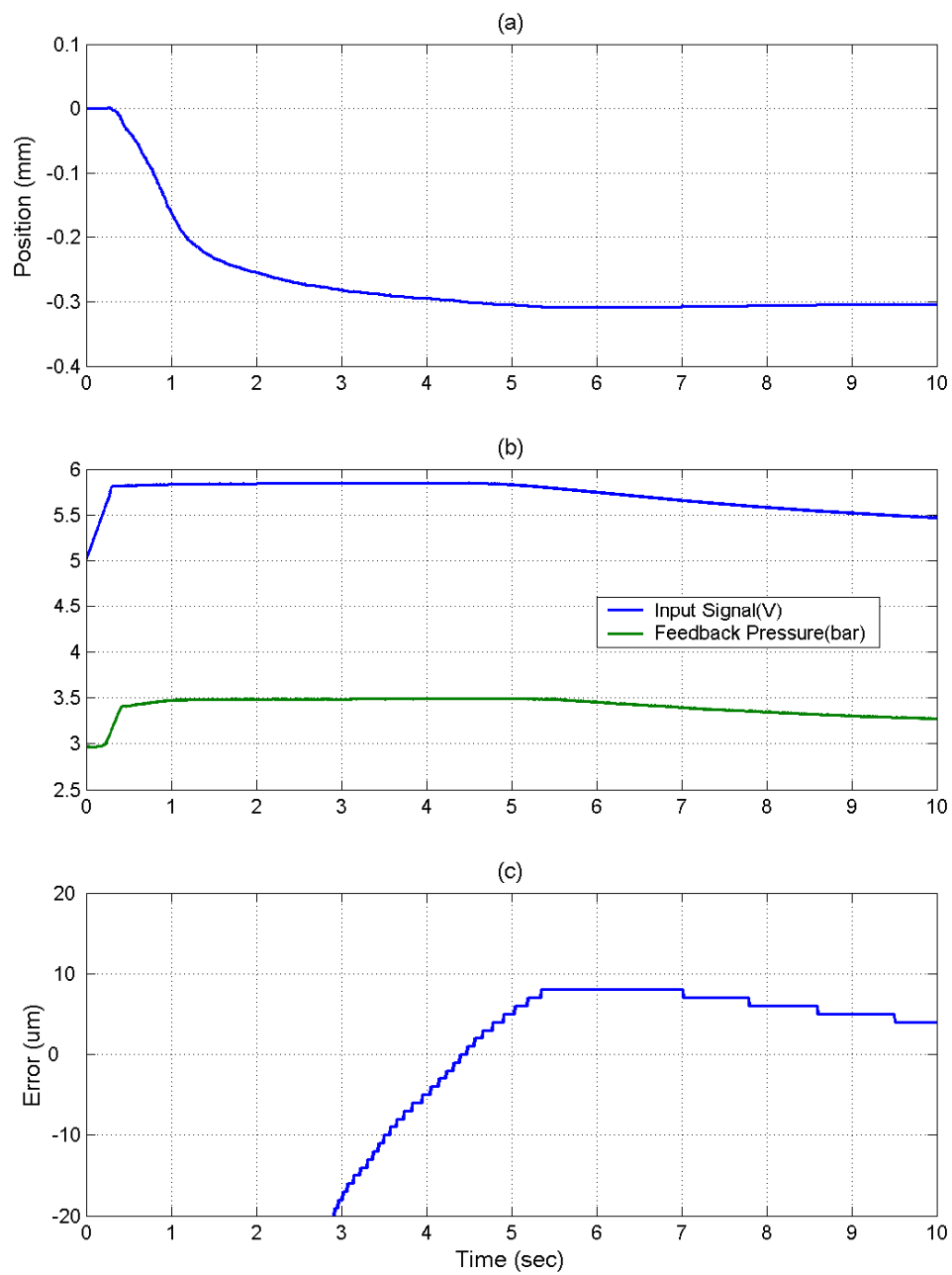


圖 5-11  $\phi 10$  氣壓肌肉致動器伺服定位控制實驗行程 0.3mm  
結果(a)步階響應(b)控制與回饋壓力訊號(c)定位誤差放大



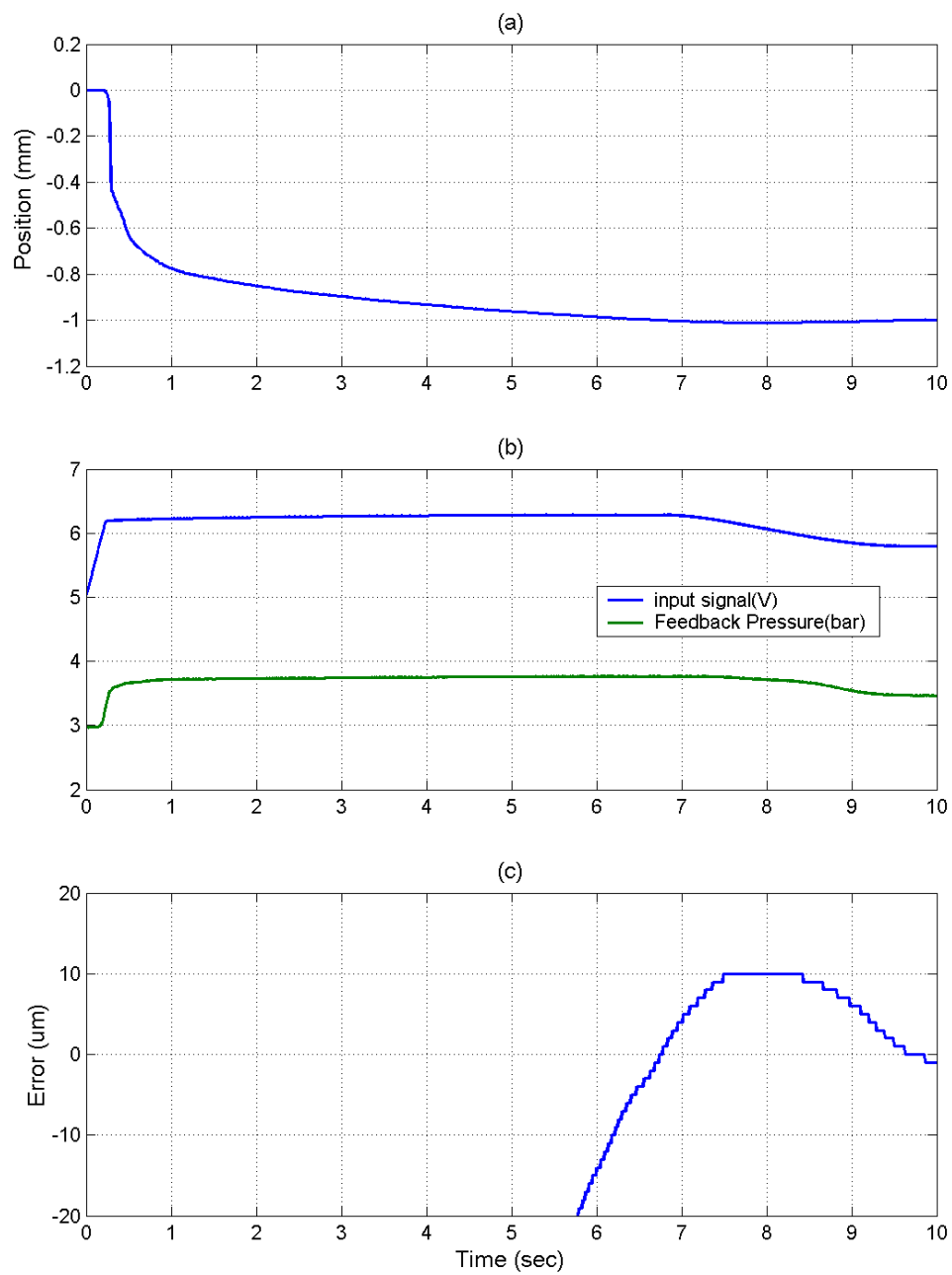


圖 5-12  $\phi 10$  氣壓肌肉致動器伺服定位控制實驗行程 1mm  
結果(a)步階響應(b)控制與回饋壓力訊號(c)定位誤差放大

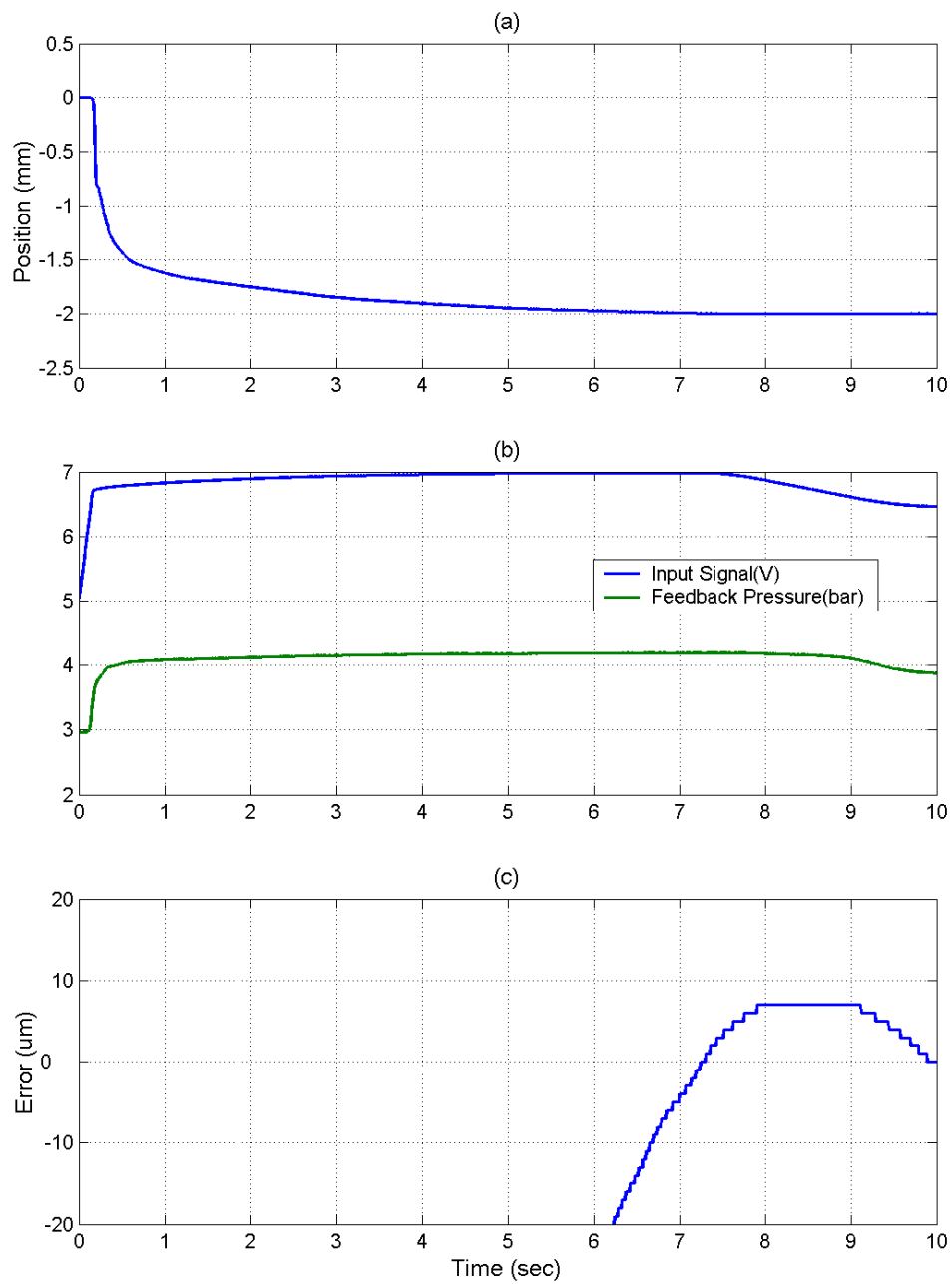


圖 5-13  $\phi 10$  氣壓肌肉致動器伺服定位控制實驗行程 2mm  
結果(a)步階響應(b)控制與回饋壓力訊號(c)定位誤差放大

## 5.3 氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器伺服定位實驗

在本節中主要利用氣壓無桿缸結合氣壓肌肉致動器作二進一出之伺服定位控制，取樣時間為 5ms，氣壓源壓力為 6 bar，而實驗時間設定為 15sec。實驗包含：

5.3.1  $\phi 40$  不同切換範圍及不同行程之定位實驗

5.3.2  $\phi 40$  不同切換範圍及不同行程之定位實驗

5.3.3  $\phi 40$  不同切換範圍及不同行程之定位實驗

### 5.3.1 $\phi 40$ 不同切換範圍及不同行程之定位實驗

以下將進行氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器  $\phi 40 \times 120\text{mm}$  不同行程及不同切換範圍之定位實驗，不同行程包含：50，100 以及 150mm，不同切換範圍係指氣壓無桿缸與氣壓肌肉致動器當定位誤差小於切換範圍時，即進行兩致動器之切換，換言之，當誤差大於切換範圍時，由氣壓無桿缸驅動；而當誤差小於切換範圍，由氣壓肌肉致動器進行精密補償。

5.3.1.1  $\phi 40$  切換範圍 0.25~0.35mm 於不同行程之定位實驗

5.3.1.2  $\phi 40$  切換範圍 0.95~1.05mm 於不同行程之定位實驗

5.3.1.3  $\phi 40$  切換範圍 1.95~2.05mm 於不同行程之定位實驗

### 5.3.1.1 $\phi 40$ 切換範圍 0.25~0.35mm 於不同行程之定位實驗

首先以氣壓無桿缸伺服定位控制，當誤差於 0.25~0.35mm 時，氣壓肌肉致動器伺服定位控才啟動，如此氣壓肌肉致動器作動才有效，定位精度可達微米等級。圖 5-14 至圖 5-16 為氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器不同行程：50，100 以及 150mm 之定位實驗結果。表 5-5 為控制性能之比較，包含：上升時間、安定時間、穩態誤差及其時間點，可知定位控制穩態誤差於 50，100，150mm 不同行程，皆可達 9 $\mu$ m 以內。

表 5-5  $\phi 40$  伺服定位切換範圍 0.25~0.35mm 於不同行程  
實驗結果比較

實驗行程(mm)	50	100	150
上升時間 $t_r$ (sec)	0.790	1.240	1.705
安定時間(sec) $t_s(e \leq 10\mu m)$	4.555	5.550	5.975
穩態誤差 $e_{ss}$ ( $\mu m$ )	7	9 $\mu m$	9 $\mu m$
穩態時間點(sec)	5.915	7.200	8.105

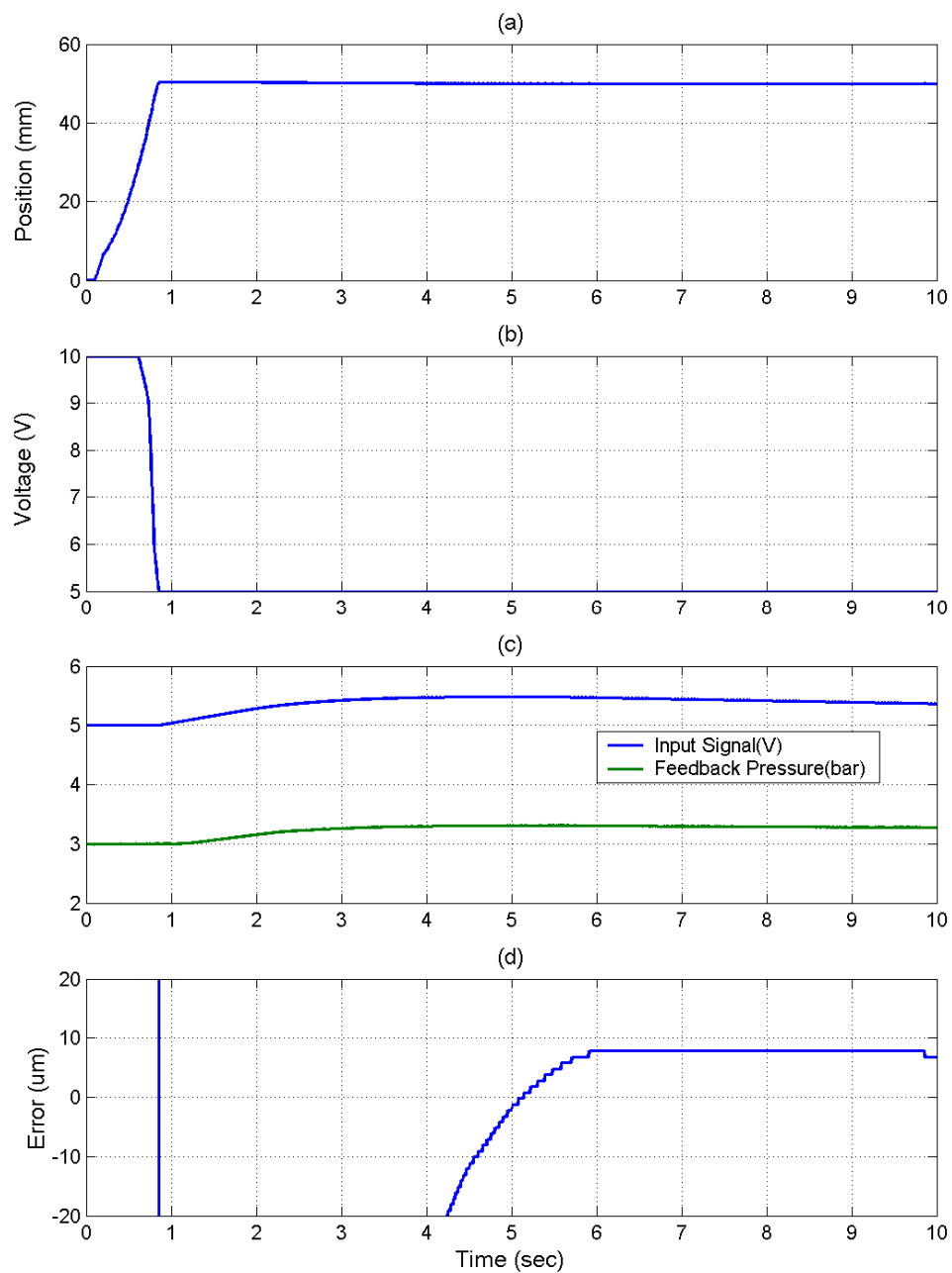


圖 5-14  $\phi 40$  伺服定位控制實驗行程 50mm 結果，切換範圍 0.25~0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

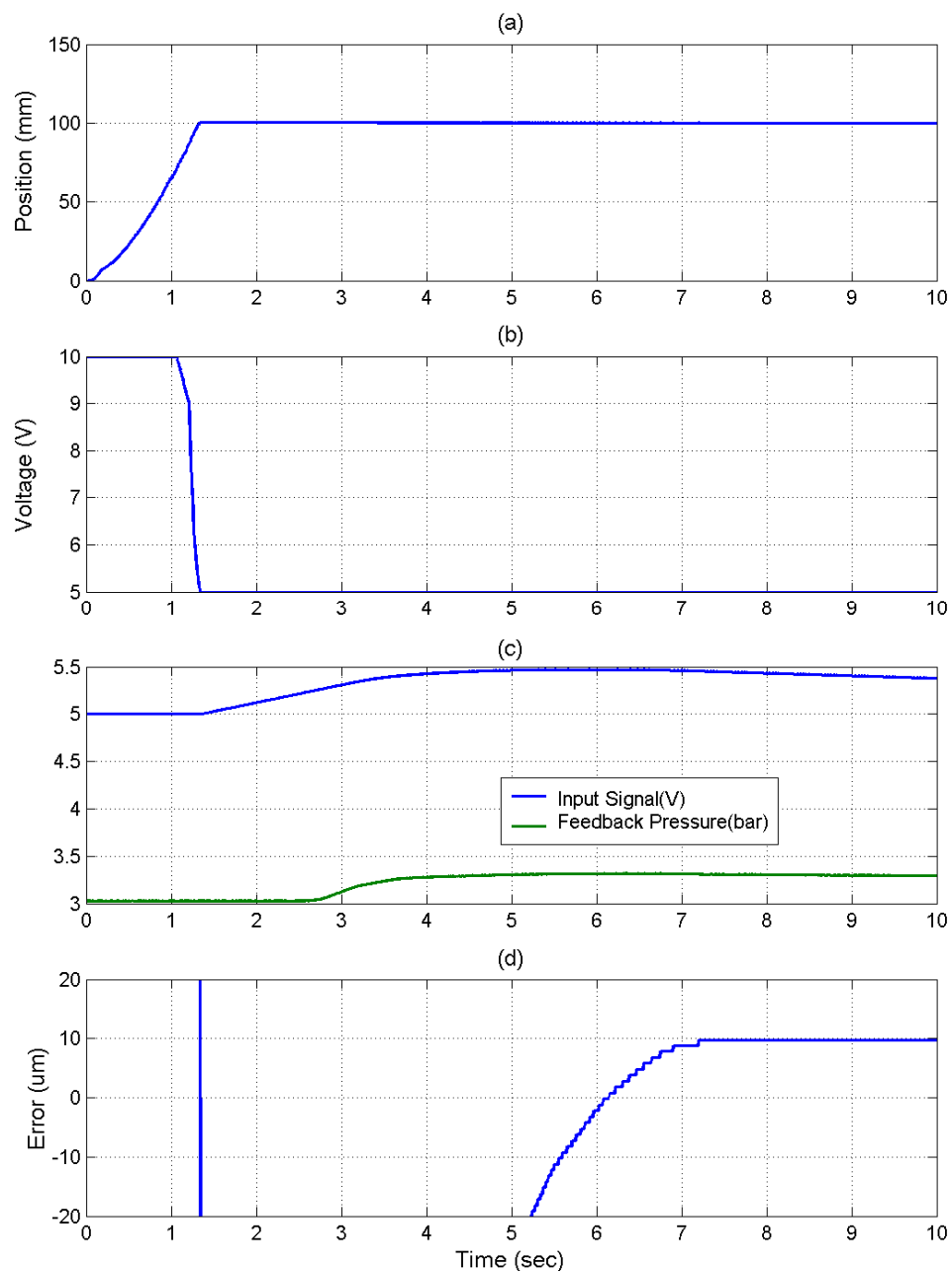


圖 5-15  $\phi 40$  伺服定位控制實驗行程 100mm 結果，切換範圍 0.25~0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

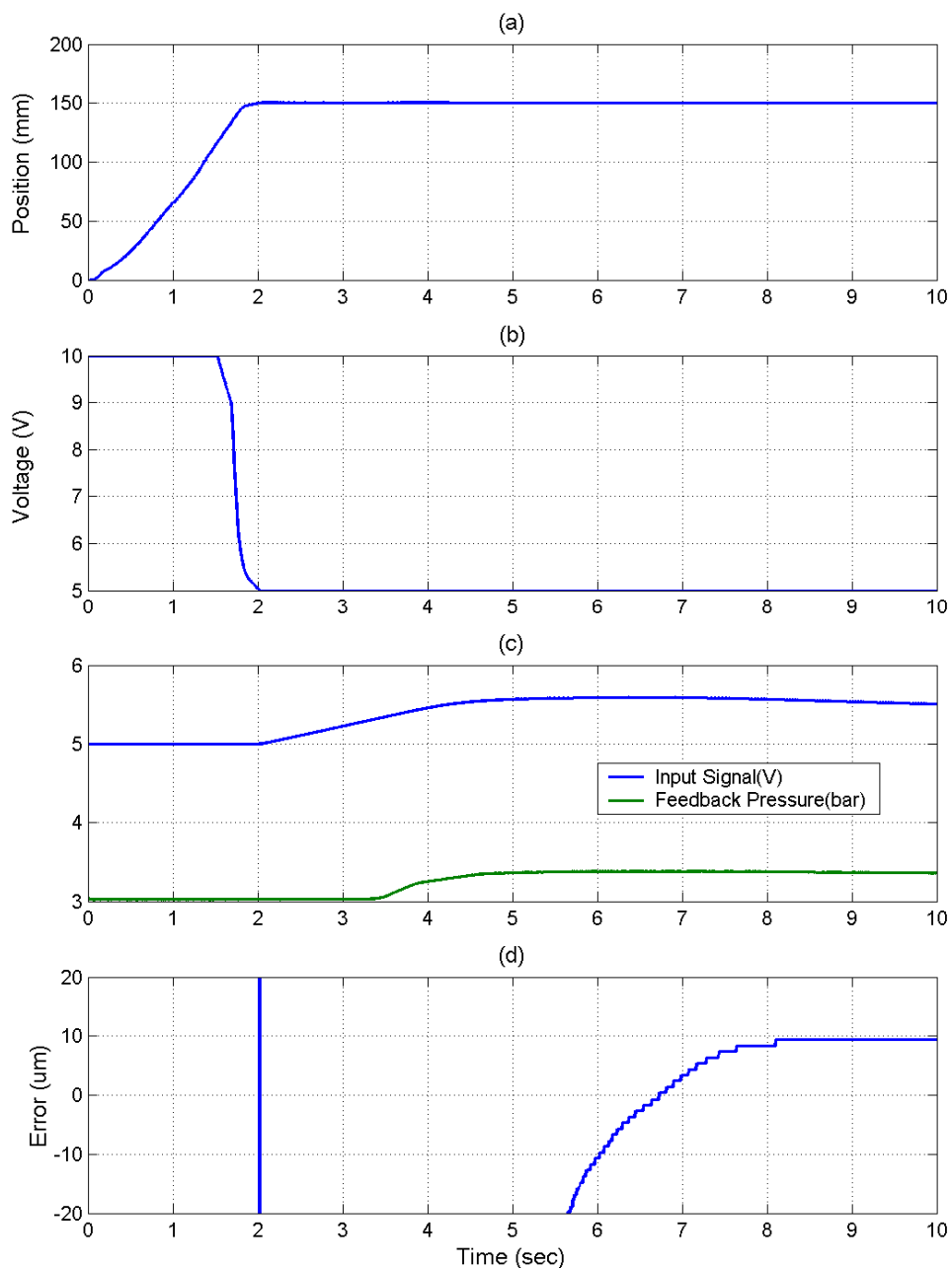


圖 5-16  $\phi 40$  伺服定位控制實驗行程 150mm 結果，切換範圍 0.25~0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

### 5.3.1.2 $\phi 40$ 切換範圍 0.95~1.05mm 於不同行程之定位實驗

首先以氣壓無桿缸伺服定位控制，當誤差於 0.95~1.05mm 時，氣壓肌肉致動器伺服定位控才啟動，如此氣壓肌肉致動器作動才有效，定位精度可達微米等級。圖 5-17 至圖 5-19 為氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器不同行程：50，100 以及 150mm 之定位實驗結果。表 5-6 為控制性能之比較，包含：上升時間、安定時間、穩態誤差及其時間點，可知定位控制穩態誤差於 50，100，150mm 不同行程，皆可達  $8\mu\text{m}$  以內。

表 5-6  $\phi 40$  伺服定位切換範圍 0.95~1.05mm 於不同行程  
實驗結果比較

實驗行程(mm)	50	100	150
上升時間 $t_r$ (sec)	0.660	1.270	1.350
安定時間 sec $t_s (e < 10\mu\text{m})$	3.640	5.280	5.715
穩態誤差 $e_{ss}$ ( $\mu\text{m}$ )	8	$6\mu\text{m}$	$6\mu\text{m}$
穩態時間點(sec)	4.695	6.090	6.695



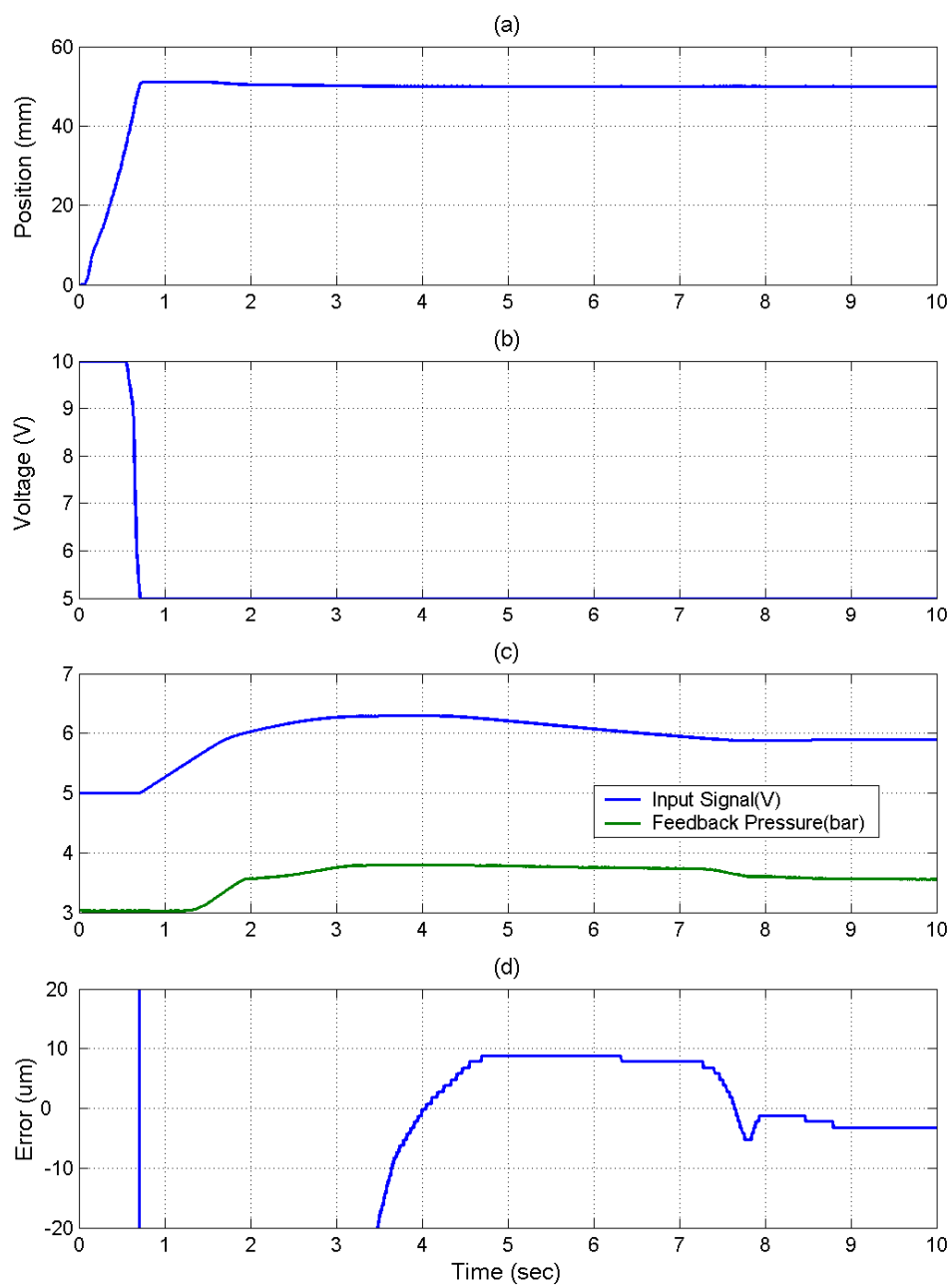


圖 5-17  $\phi 40$  伺服定位控制實驗行程 50mm 結果，切換範圍 0.95~1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

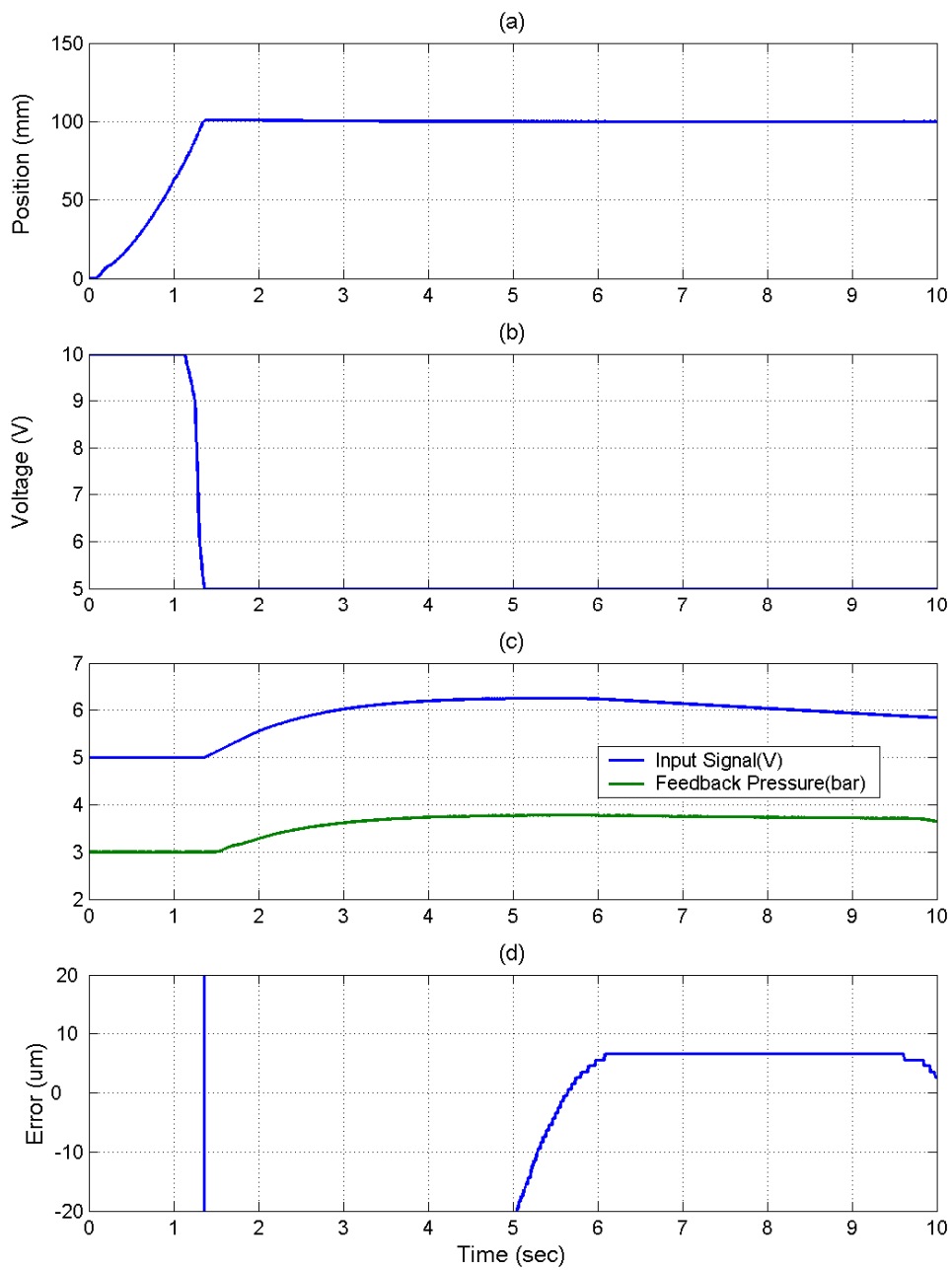


圖 5-18  $\phi 40$  伺服定位控制實驗行程 100mm 結果，切換範圍 0.95~1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

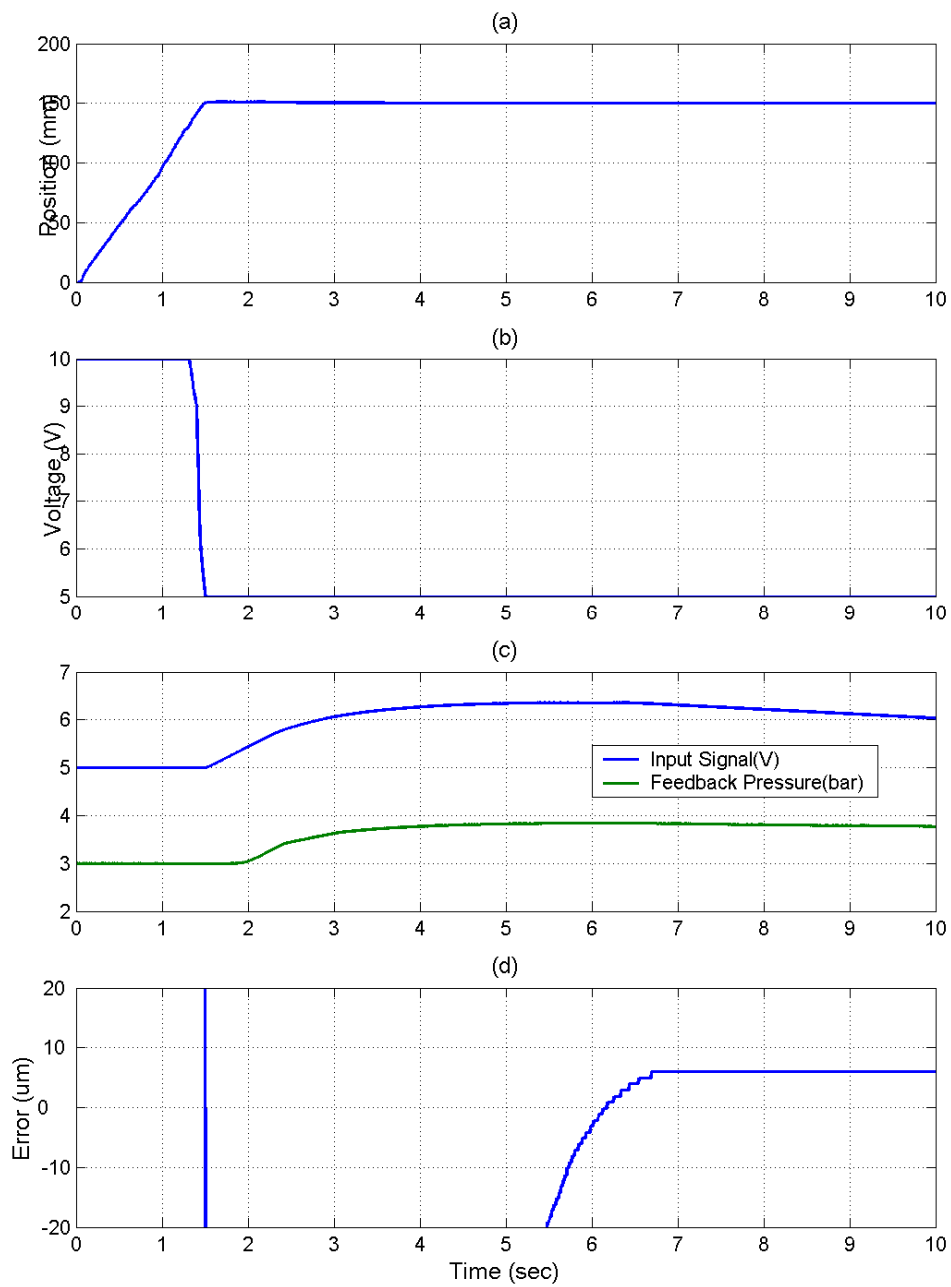


圖 5-19  $\phi 40$  伺服定位控制實驗行程 150mm 結果，切換範圍 0.95~1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

### 5.3.1.3 $\phi 40$ 切換範圍 1.95~2.05mm 於不同行程之定位實驗

首先以氣壓無桿缸伺服定位控制，當誤差於 1.95~2.05mm 時，氣壓肌肉致動器伺服定位控才啟動，如此氣壓肌肉致動器作動才有效，定位精度可達微米等級。圖 5-20 至圖 5-22 為氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器不同行程：50，100 以及 150mm 之定位實驗結果。表 5-7 為控制性能之比較，包含：上升時間、安定時間、穩態誤差及其時間點，可知定位控制穩態誤差於 50，100，150mm 不同行程，皆可達  $7\mu\text{m}$  以內。

表 5-7  $\phi 40$  伺服定位切換範圍 1.95~2.05mm 於不同行程  
實驗結果比較

實驗行程(mm)	50	100	150
上升時間 $t_r$ (sec)	0.650	1.195	1.560
安定時間 sec $t_s (e < 10\mu\text{m})$	5.830	6.845	5.715
穩態誤差 $e_{ss}$ ( $\mu\text{m}$ )	3	7	6
穩態時間點(sec)	7.370	8.250	8.370

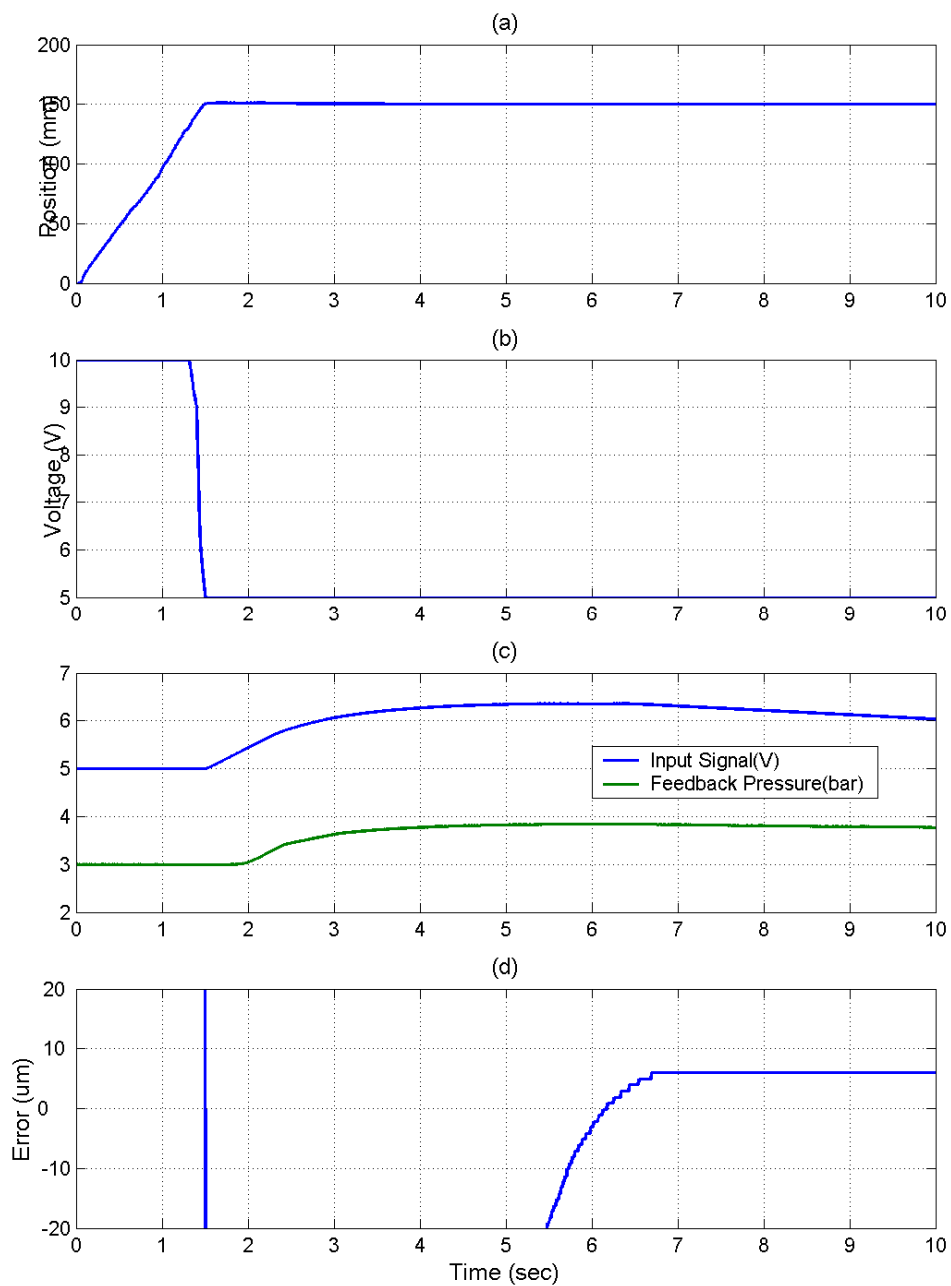


圖 5-20  $\phi 40$  伺服定位控制實驗行程 50mm 結果，切換範圍 0.95~1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

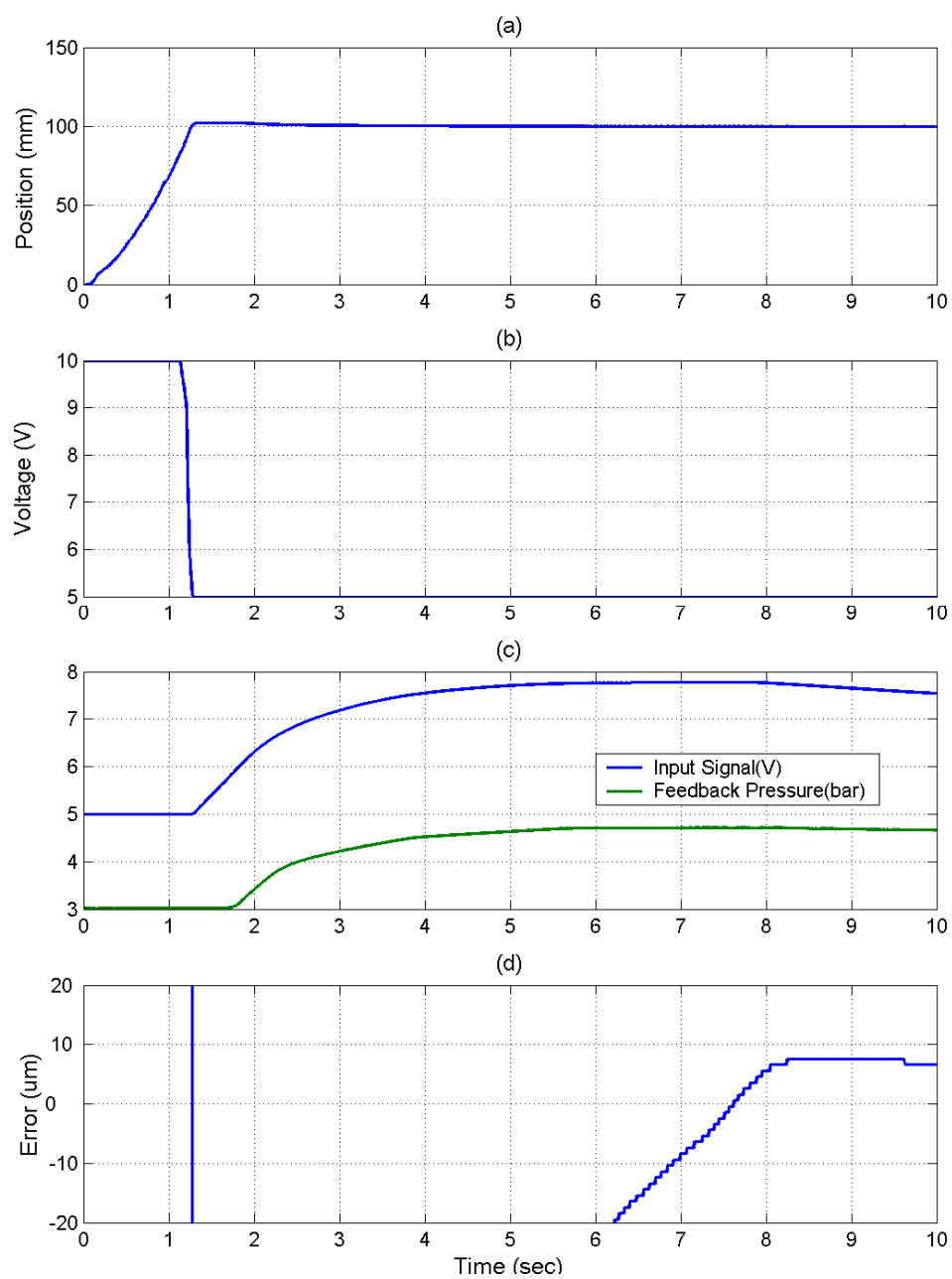


圖 5-21  $\phi 40$  伺服定位控制實驗行程 100mm 結果，切換範圍 0.95~1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

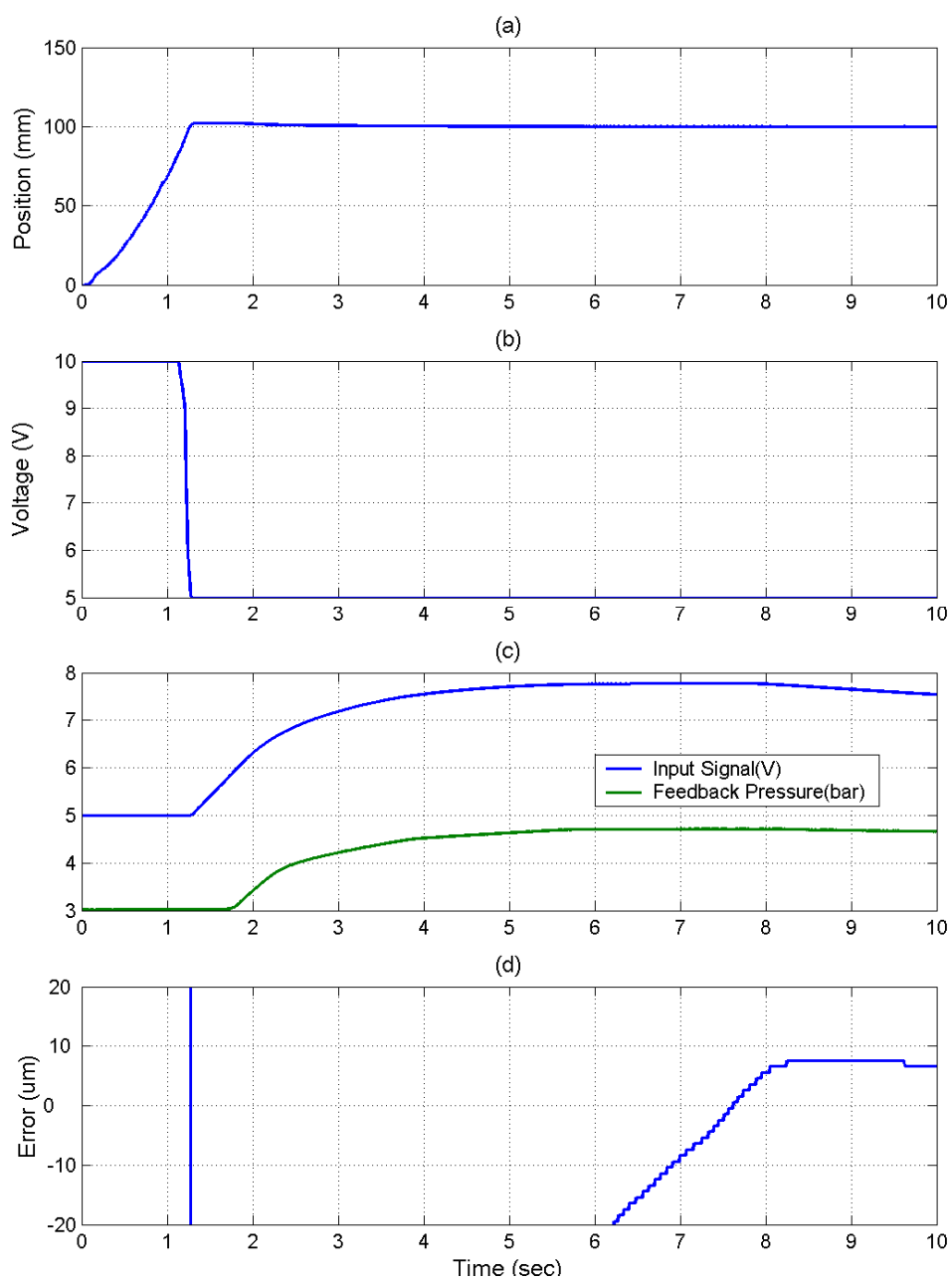


圖 5-22  $\phi 40$  伺服定位控制實驗行程 150mm 結果，切換範圍 0.95~1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

### 5.3.2 $\phi 20$ 不同切換範圍及不同行程之定位實驗

以下將進行氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器  $\phi 20 \times 103\text{mm}$  不同行程及不同切換範圍之定位實驗，不同行程包含：50，100，150 以及 200mm，不同切換範圍係指氣壓無桿缸與氣壓肌肉致動器當定位誤差小於切換範圍時，即進行兩致動器之切換，換言之，當誤差大於切換範圍時，由氣壓無桿缸驅動；而當誤差小於切換範圍，由氣壓肌肉致動器進行精密補償。實驗包含：

5.3.2.1  $\phi 20$  切換範圍 0.25~0.35mm 不同行程之定位實驗

5.3.2.2  $\phi 20$  切換範圍 0.95~1.05mm 不同行程之定位實驗

5.3.2.3  $\phi 20$  切換範圍 1.95~2.05mm 不同行程之定位實驗





### 5.3.2.1 $\phi 20$ 切換範圍 0.25~0.35mm 於不同行程之定位實驗

主要利用當誤差於時氣壓肌肉致動器則開啟，如此氣壓肌肉致動器作動才有效，定位精度可達微米等級。圖 5-23 至圖 5-26 為氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器定位控制實驗結果。

首先以氣壓無桿缸伺服定位控制，當誤差於 0.25~0.35mm 時，氣壓肌肉致動器伺服定位控才啟動，如此氣壓肌肉致動器作動才有效，定位精度可達微米等級。圖 5-23 至圖 5-26 為氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器  $\phi 20$  不同行程：50，100，150 以及 200mm 之定位實驗結果。表 5-8 為控制性能之比較，包含：上升時間、安定時間、穩態誤差及其時間點，可知定位控制穩態誤差於 50，100，150 以及 200mm 不同行程，皆可達 9 $\mu$ m 以內。



表 5-8  $\phi 20$  伺服定位切換範圍 0.25~0.35mm 於不同行程實驗結果比較

實驗行程(mm)	50	100	150	200
上升時間 $t_r$ (sec)	0.345	0.725	1.245	1.605
安定時間 sec $t_s (e < 10\mu m)$	4.610	5.645	6.530	7.695
穩態誤差 $e_{ss}$ ( $\mu m$ )	9	6	6	6
穩態時間點(sec)	6.375	7.000	8.175	9.695

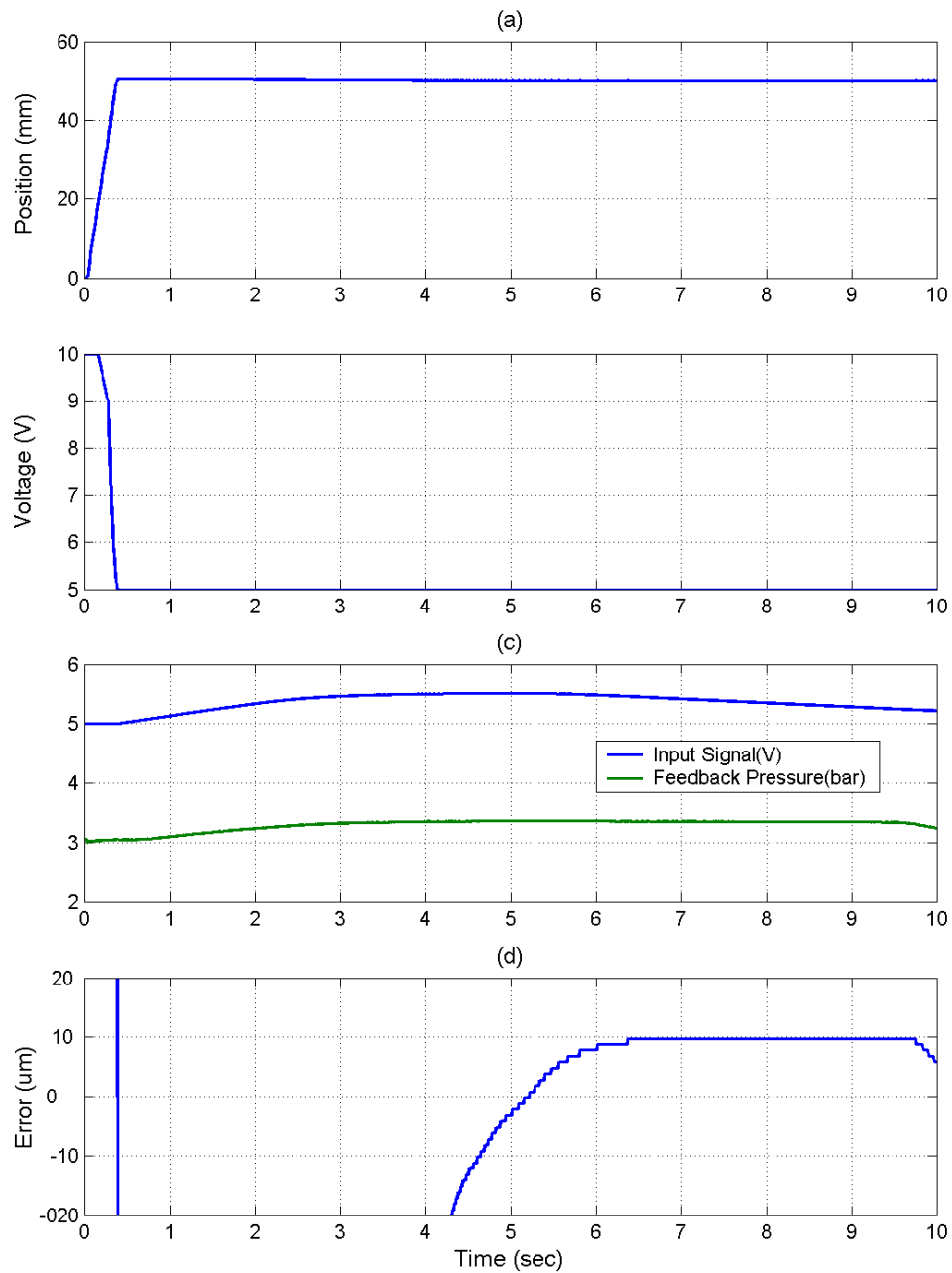


圖 5-23  $\phi 20$  伺服定位控制實驗行程 50mm 結果，切換範圍 0.25~0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

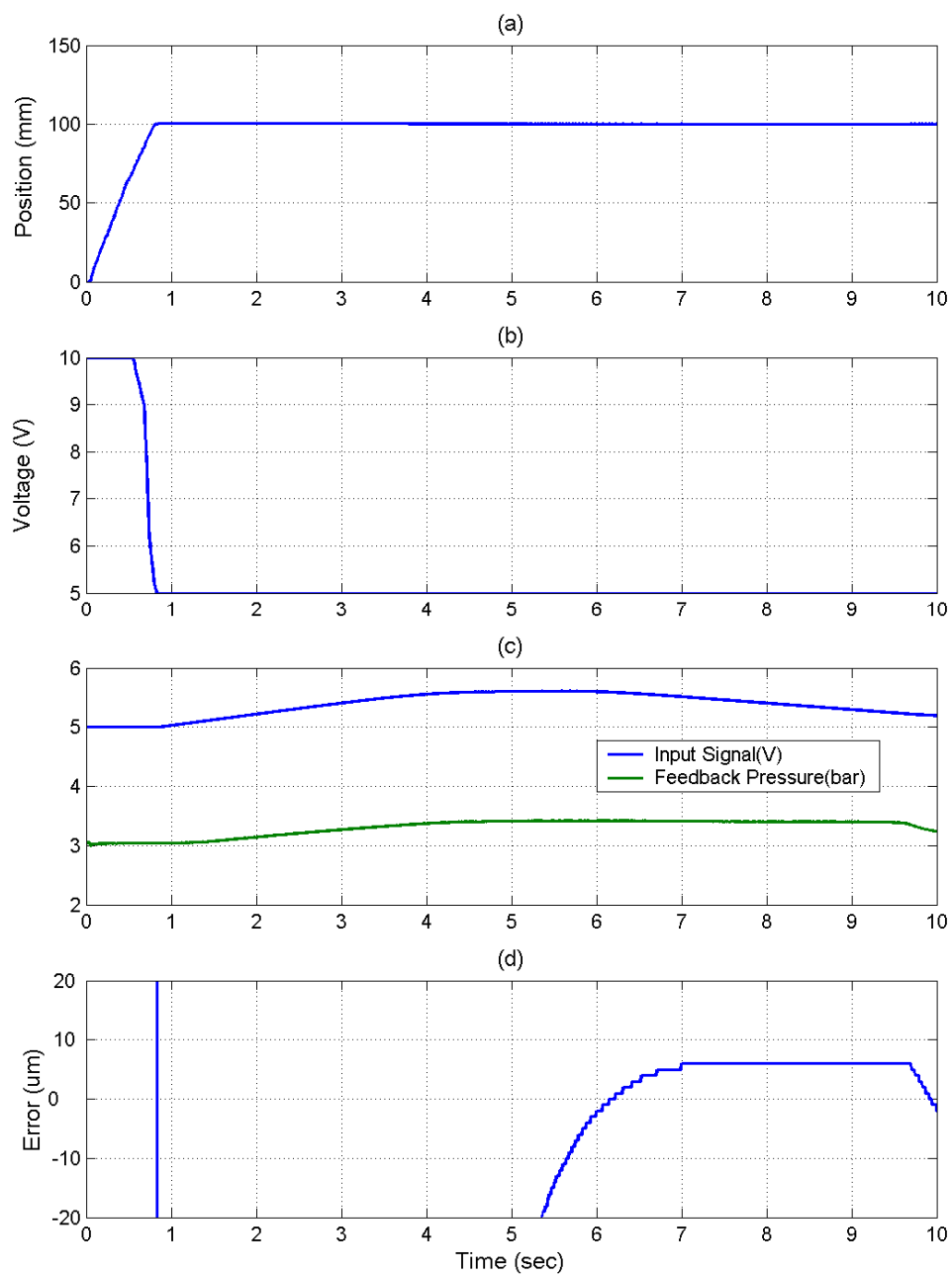


圖 5-24  $\phi 20$  伺服定位控制實驗行程 100mm 結果，切換範圍 0.25~0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

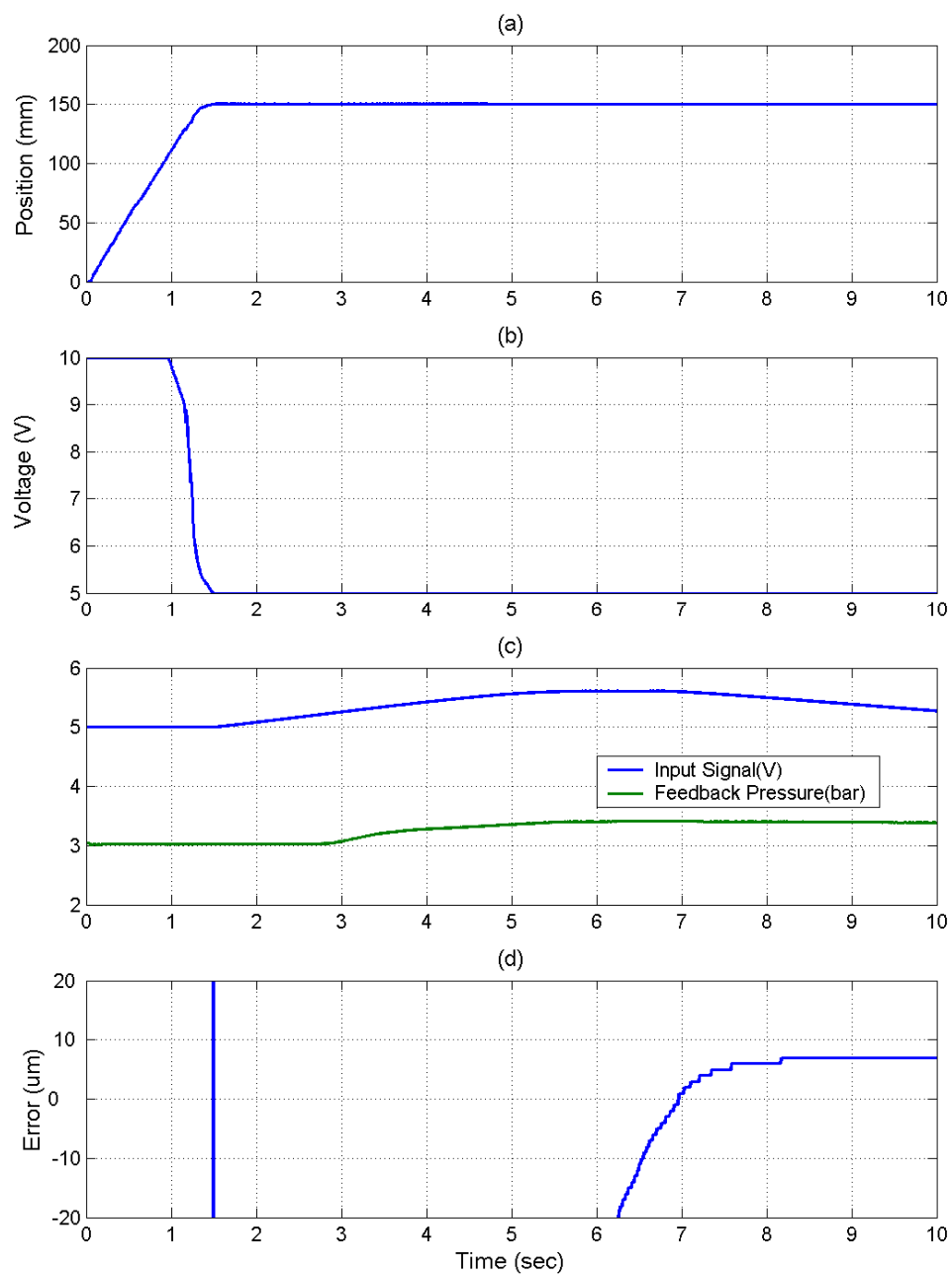


圖 5-25  $\phi 20$  伺服定位控制實驗行程 150mm 結果，切換範圍 0.25~0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

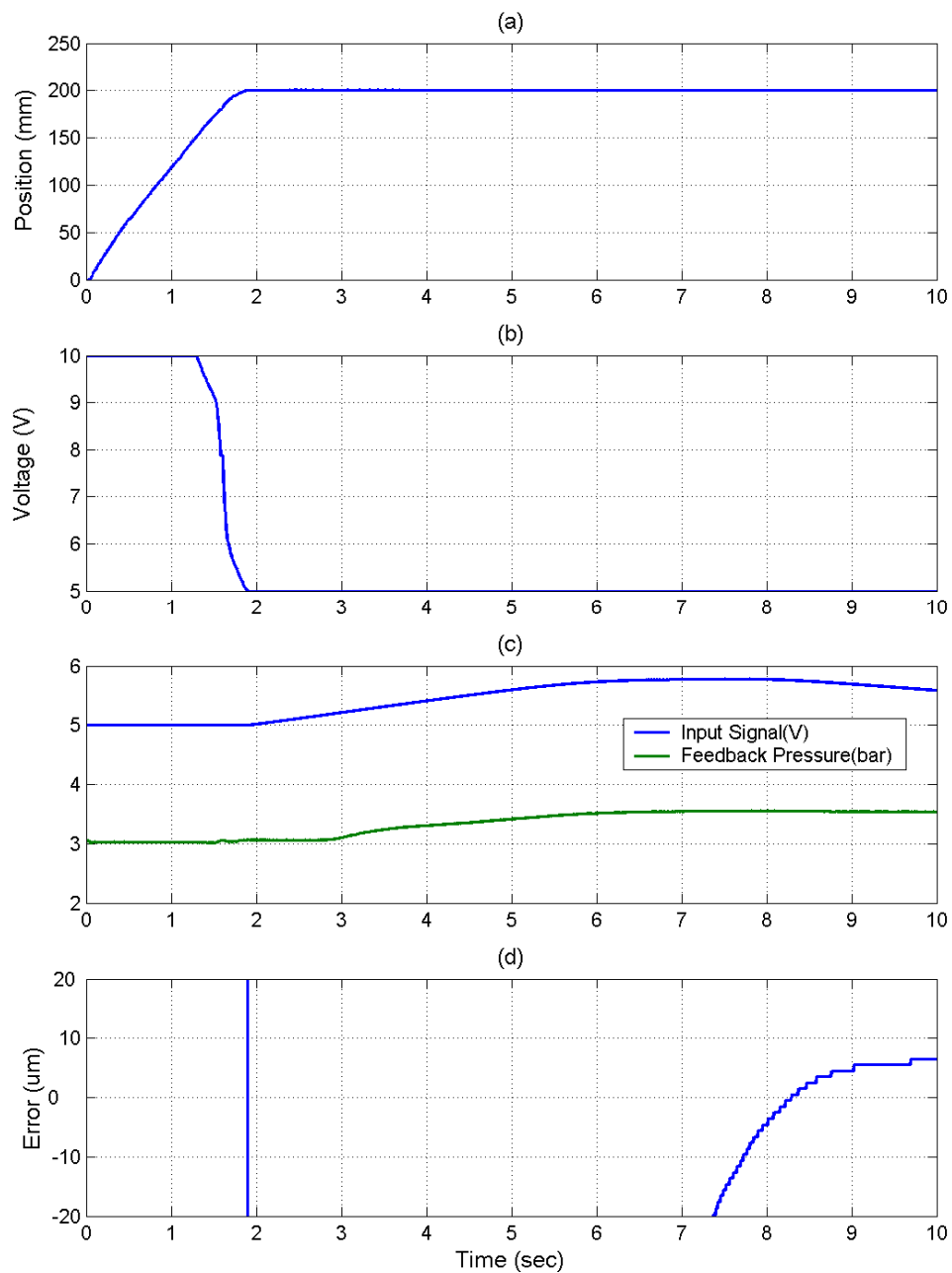


圖 5-26  $\phi 20$  伺服定位控制實驗行程 200mm 結果，切換範圍 0.25~0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

### 5.3.2.2 $\phi 20$ 切換範圍 0.95~1.05mm 於不同行程之定位實驗

首先以氣壓無桿缸伺服定位控制，當誤差於 0.95~1.05mm 時，氣壓肌肉致動器伺服定位控才啟動，如此氣壓肌肉致動器作動才有效，定位精度可達微米等級。圖 5-27 至圖 5-30 為氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器不同行程：50，100，150 以及 200mm 之定位實驗結果。表 5-9 為控制性能之比較，包含：上升時間、安定時間、穩態誤差及其時間點，可知定位控制穩態誤差於 50，100，150 以及 200mm 不同行程，皆可達 10 $\mu$ m 以內。

表 5-9  $\phi 20$  伺服定位切換範圍 0.95~1.05mm 於不同行程實驗結果比較

實驗行程(mm)	50	100	150	200
上升時間 $t_r$ (sec)	0.340	0.750	1.235	1.630
安定時間 sec $t_s (e < 10\mu m)$	5.335	6.930	5.725	6.865
穩態誤差 $e_{ss}$ ( $\mu m$ )	8	6	7	10
穩態時間點(sec)	7.650	8.635	6.970	8.525
穩態時間點(sec)	7.650sec	8.635sec	6.970sec	8.525sec

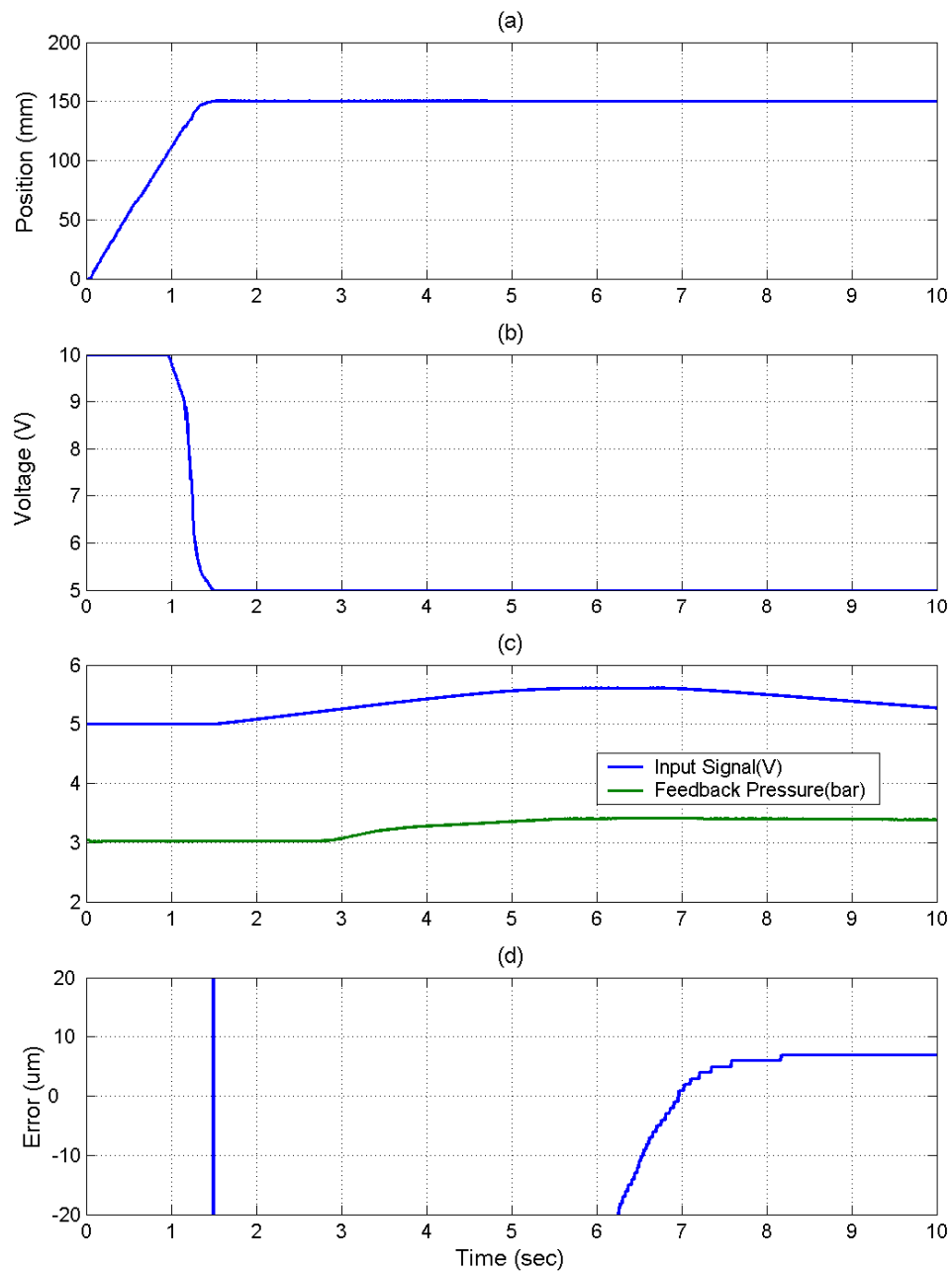


圖 5-27  $\phi 20$  伺服定位控制實驗行程 50mm 結果，切換範圍 0.95~1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

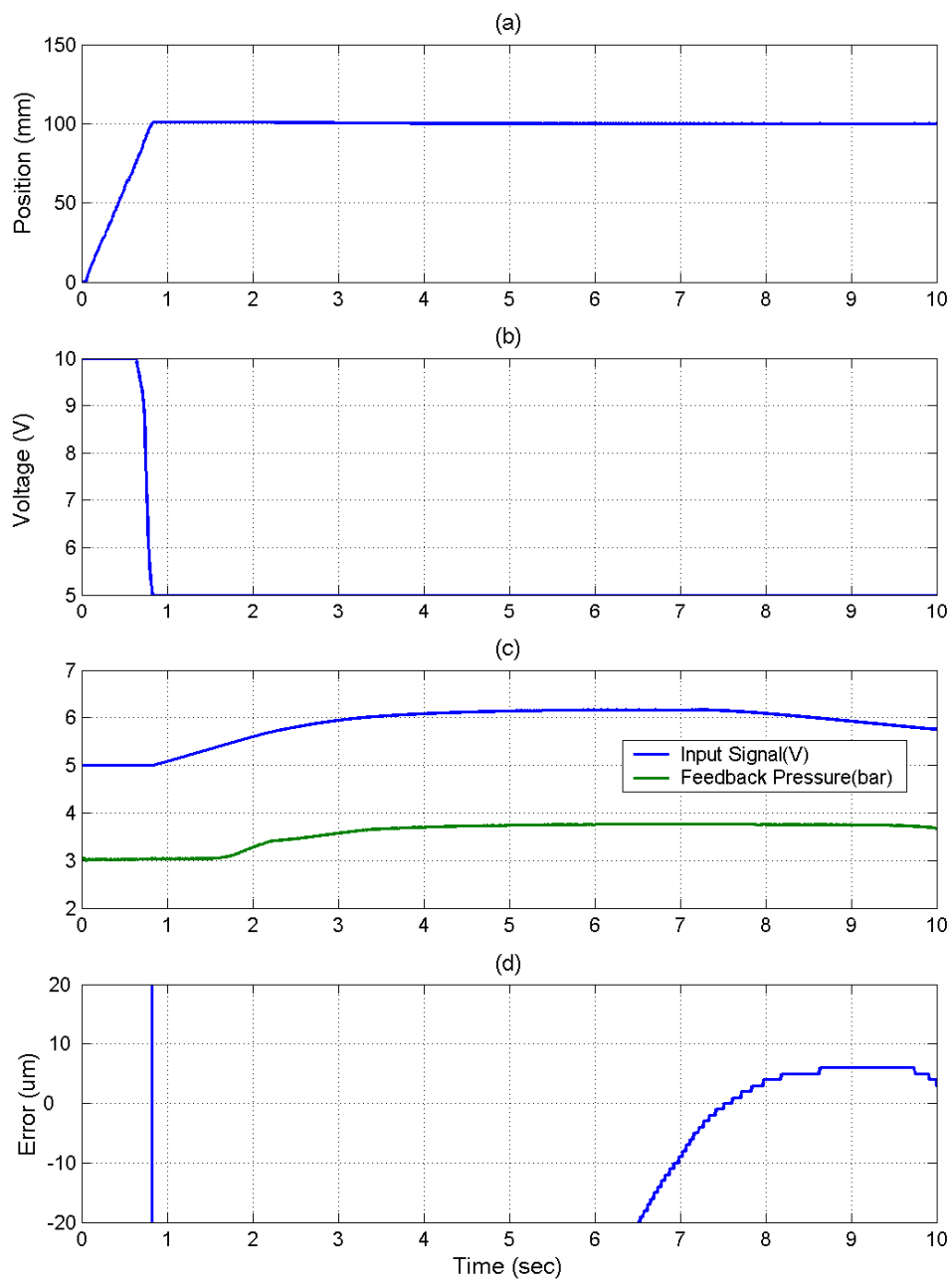


圖 5-28  $\phi 20$  伺服定位控制實驗行程 100mm 結果，切換範圍 0.95~1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大



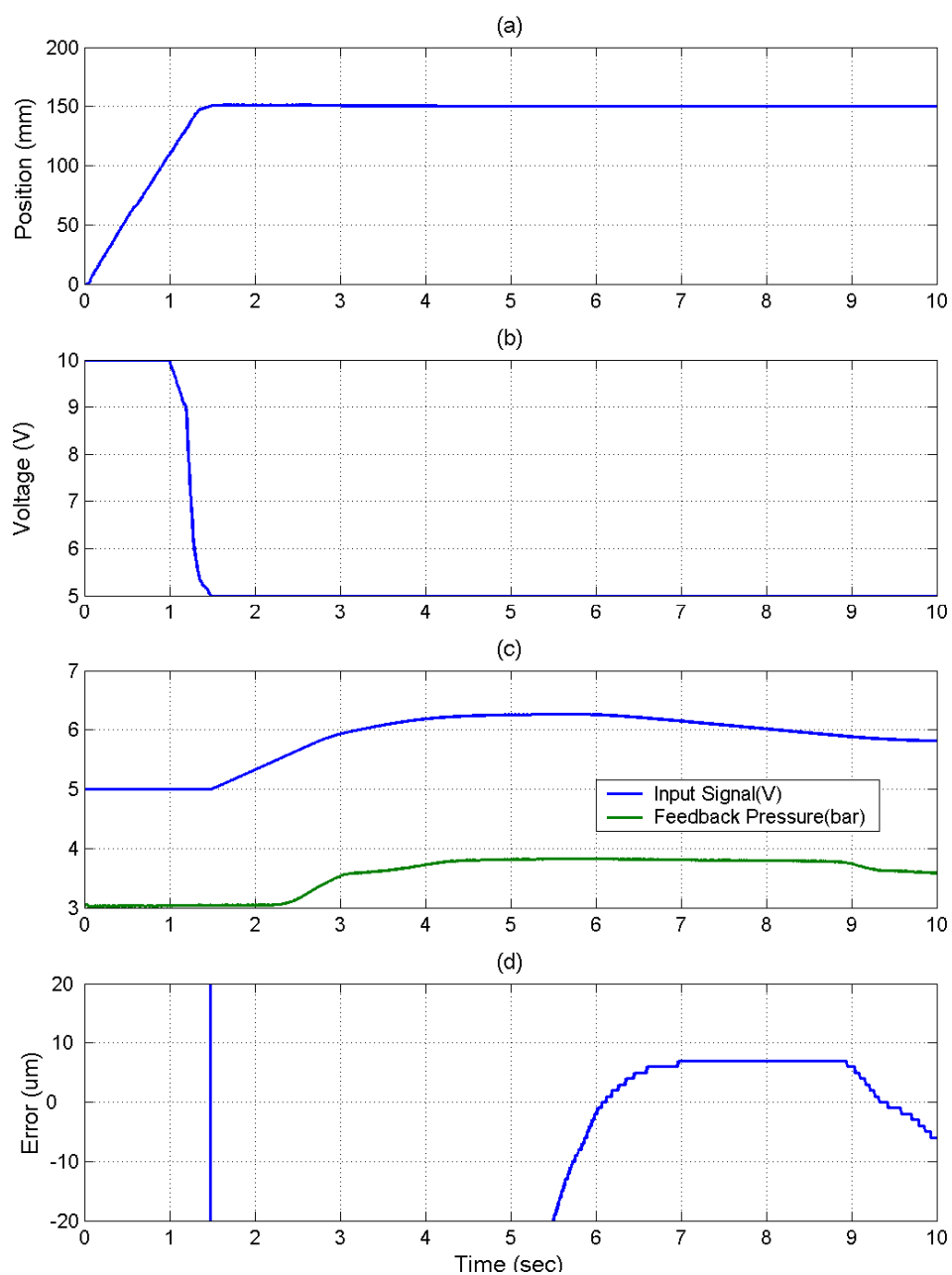


圖 5-29  $\phi 20$  伺服定位控制實驗行程 150mm 結果，切換範圍 0.95~1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

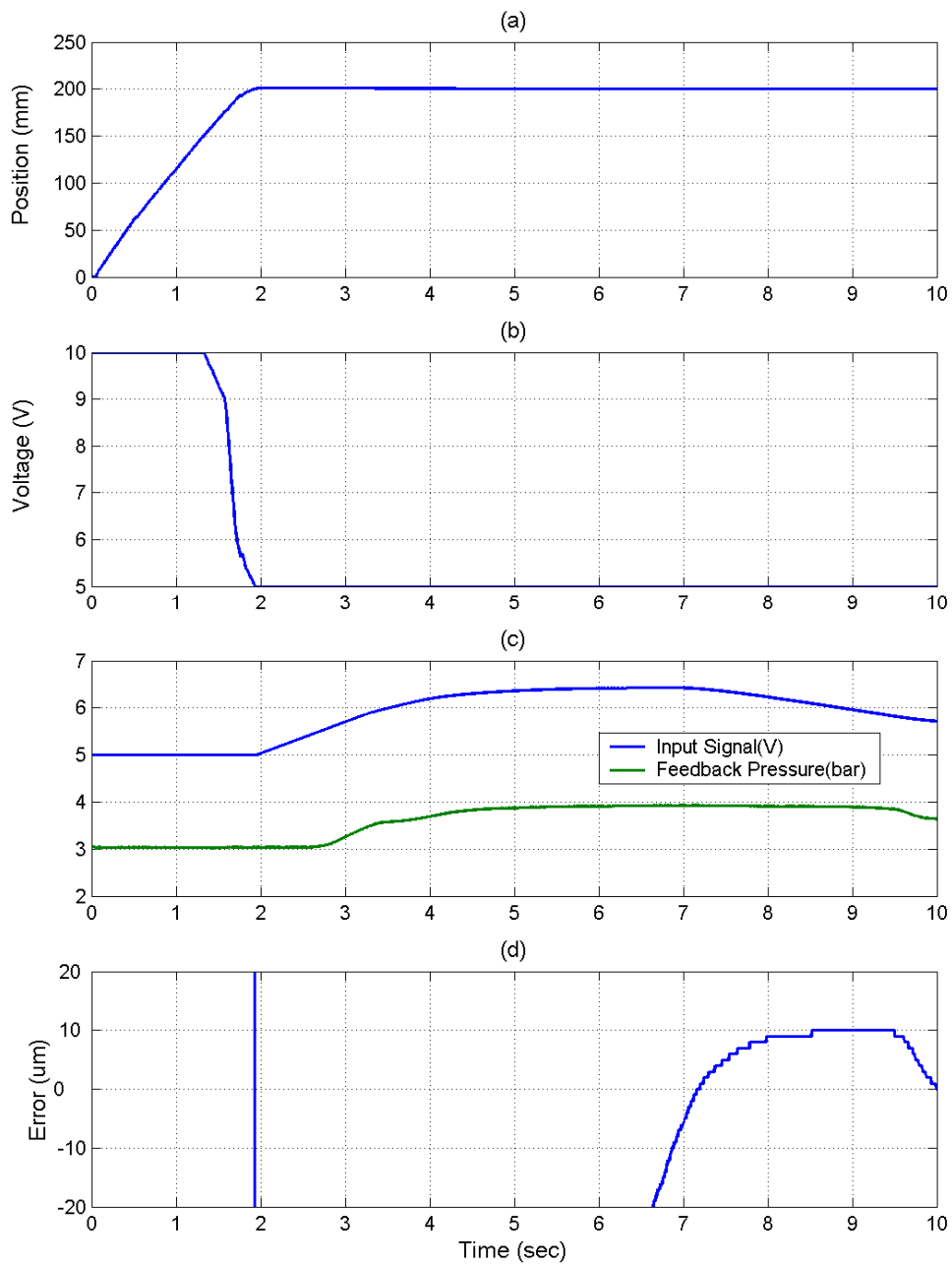


圖 5-30  $\phi 20$  伺服定位控制實驗行程 200mm 結果，切換範圍 0.95~1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

### 5.3.2.3 $\phi 20$ 切換範圍 1.95~2.05mm 於不同行程之定位實驗

首先以氣壓無桿缸伺服定位控制，當誤差於 1.95~2.05mm 時，氣壓肌肉致動器伺服定位控才啟動，如此氣壓肌肉致動器作動才有效，定位精度可達微米等級。圖 5-31 至圖 5-34 為氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器不同行程：50，100，150 以及 200mm 之定位實驗結果。表 5-10 為控制性能之比較，包含：上升時間、安定時間、穩態誤差及其時間點，可知定位控制穩態誤差於 50，100，150 以及 200mm 不同行程，皆可達 10 $\mu$ m 以內。

表 5-10  $\phi 20$  伺服定位切換範圍 1.95~2.05mm 於不同行程實驗結果比較

實驗行程(mm)	50	100	150	200
上升時間 $t_r$ (sec)	0.365	1.615sec	1.235sec	1.645sec
安定時間 sec $t_s (e < 10\mu m)$	7.505	7.490	8.545	9.275
穩態誤差 $e_{ss}$ ( $\mu m$ )	10	9	9	8
穩態時間點(sec)	9.36	8.495	9.875	10.250

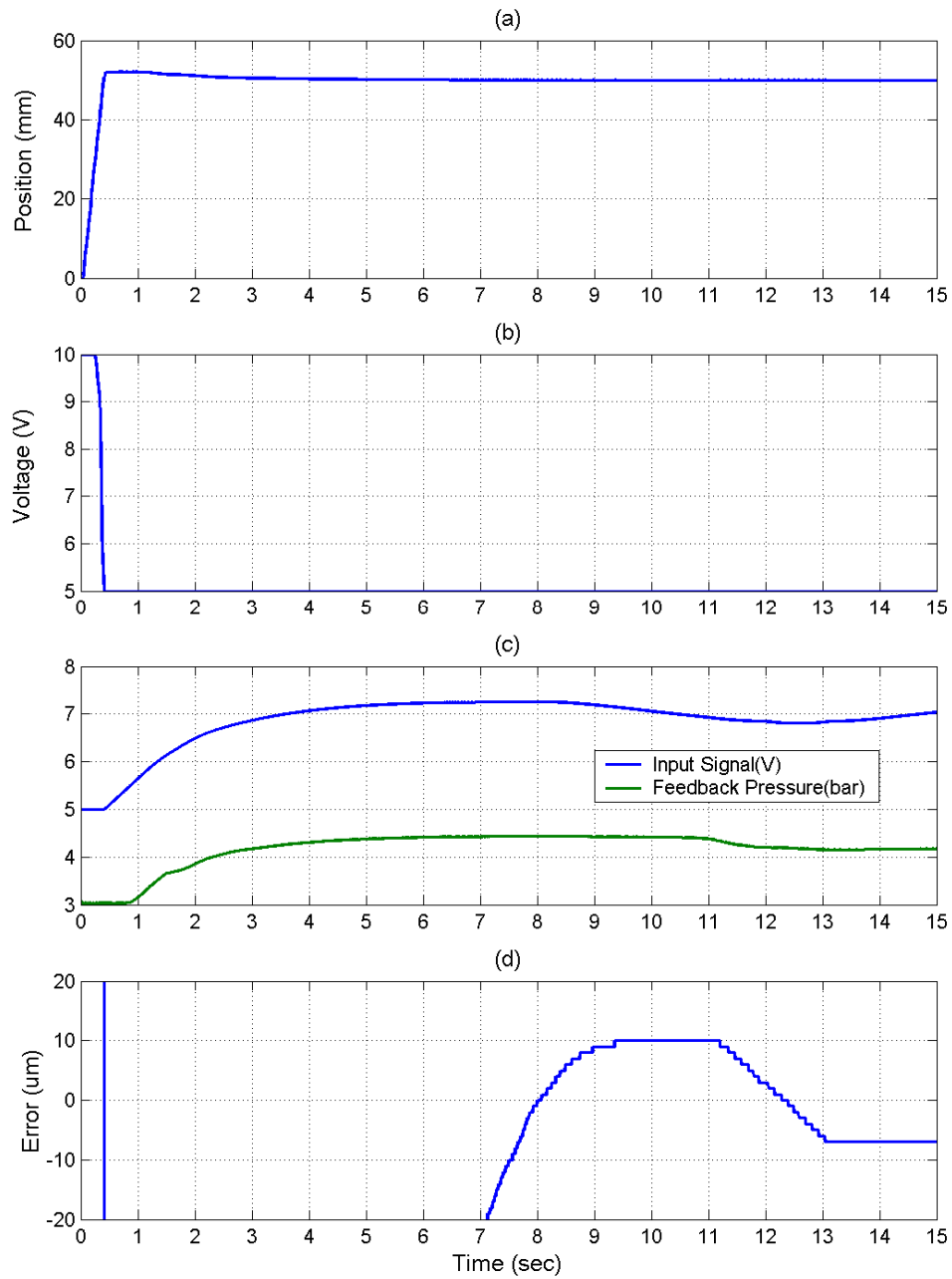


圖 5-31  $\phi 20$  伺服定位控制實驗行程 50mm 結果，切換範圍 1.95~2.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

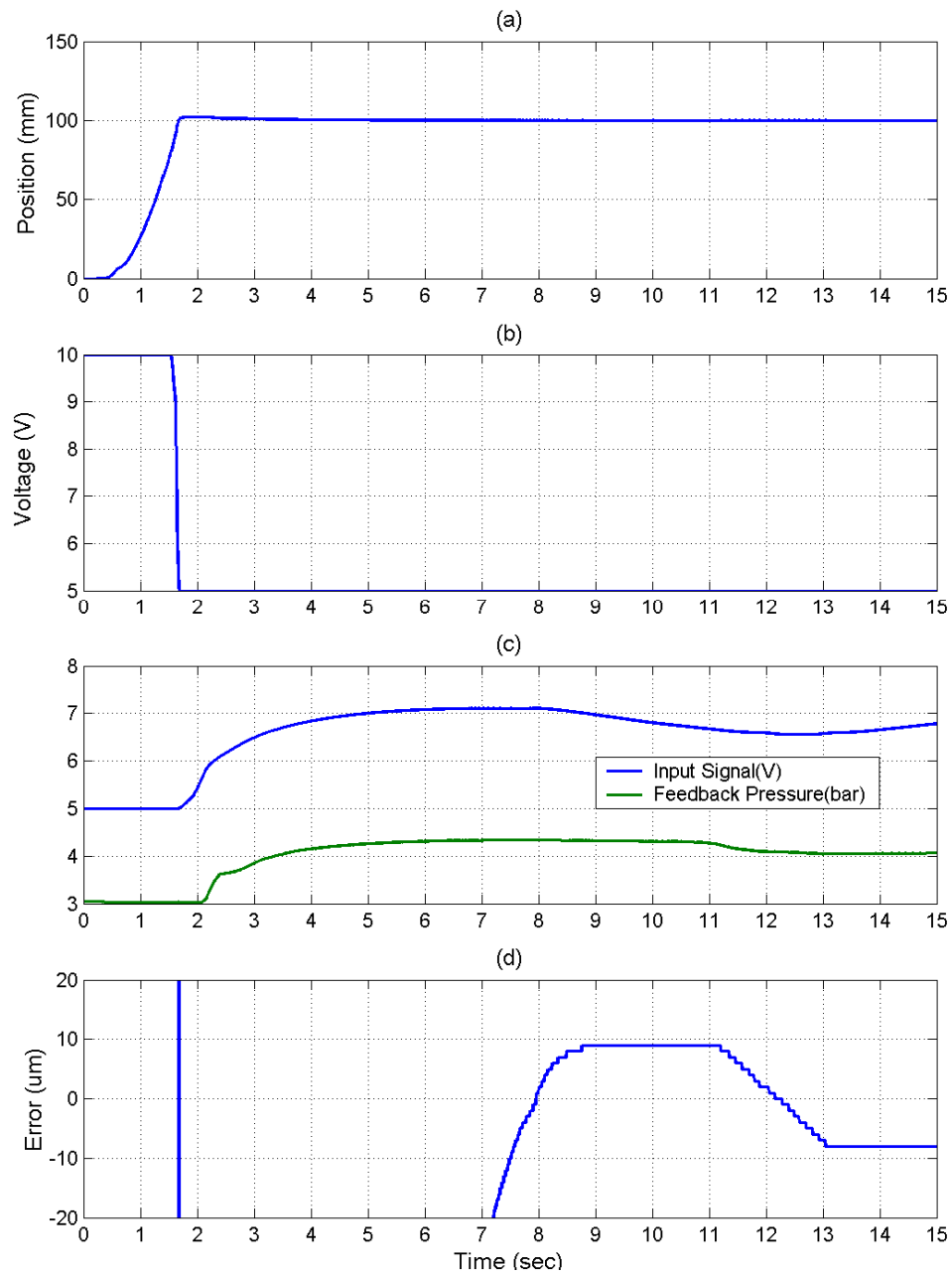


圖 5-32  $\phi 20$  伺服定位控制實驗行程 100mm 結果，切換範圍 1.95~2.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

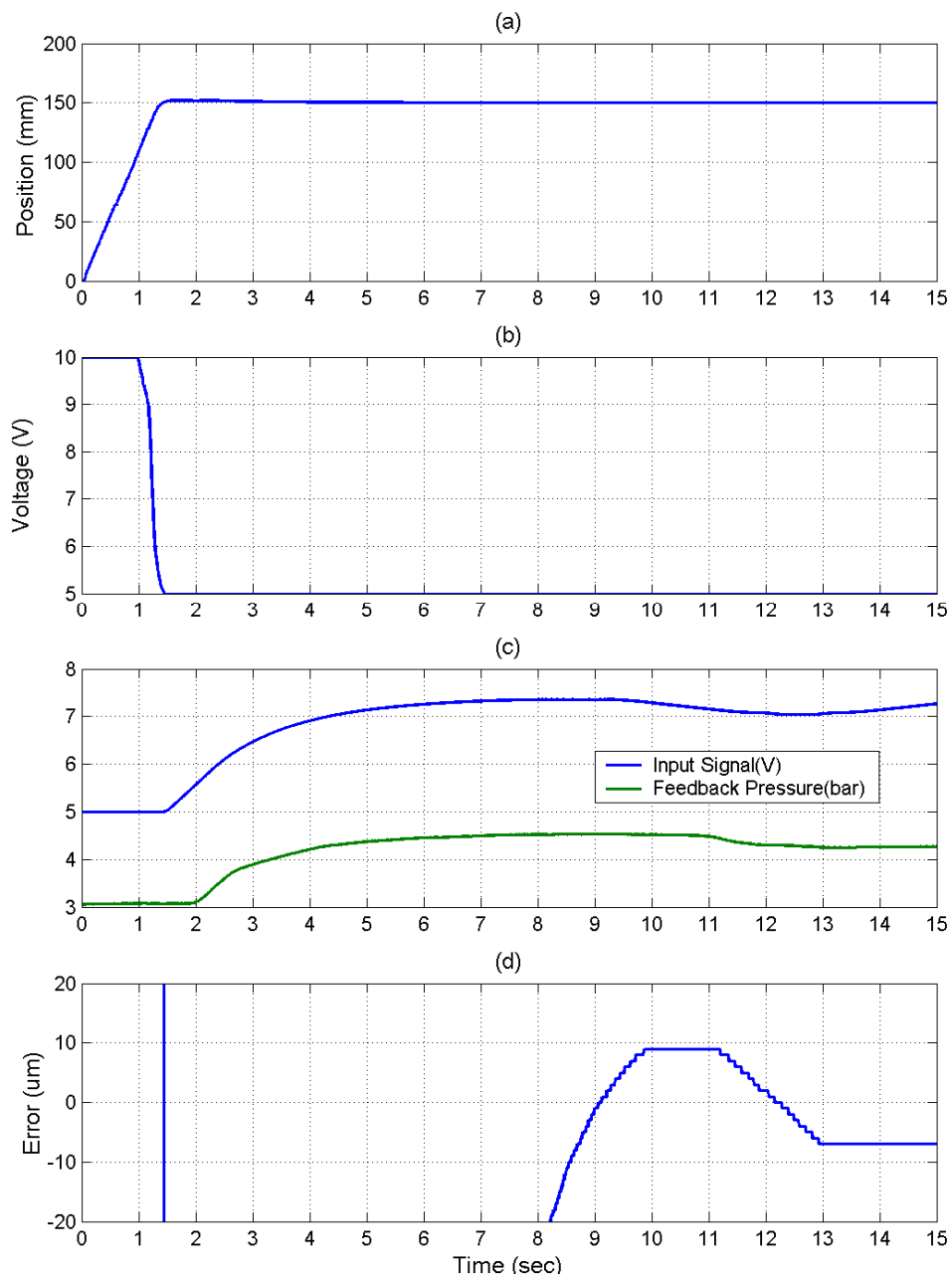


圖 5-33  $\phi 20$  伺服定位控制實驗行程 150mm 結果，切換範圍 1.95~2.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

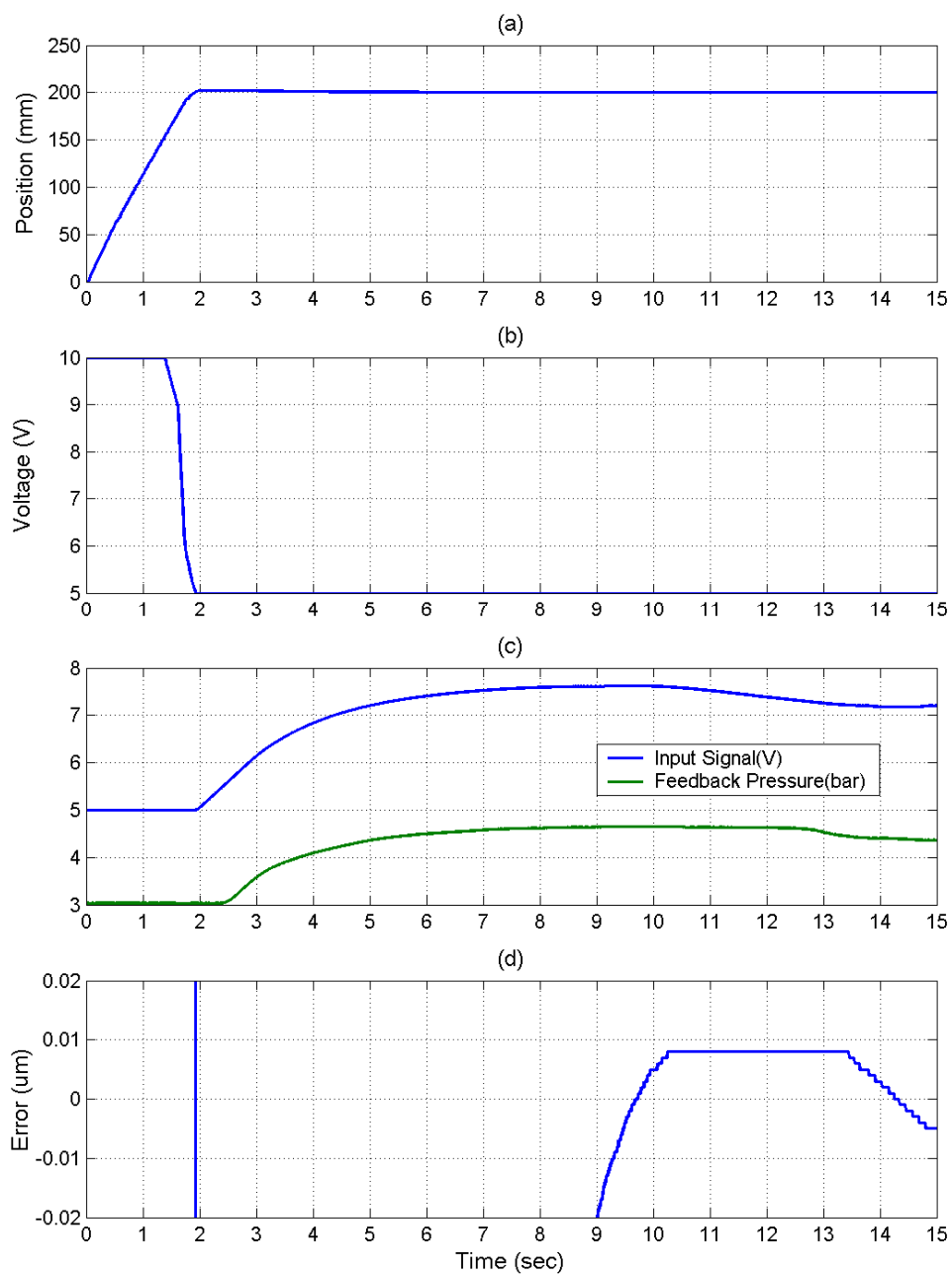


圖 5-34  $\phi 20$  伺服定位控制實驗行程 200mm 結果，切換範圍 1.95~2.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

### 5.3.3 $\phi 10$ 不同切換範圍及不同行程之定位實驗

以下將進行氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器  $\phi 10 \times 103\text{mm}$  不同行程及不同切換範圍之定位實驗，不同行程包含：50，100，150 以及 200mm，不同切換範圍係指氣壓無桿缸與氣壓肌肉致動器當定位誤差小於切換範圍時，即進行兩致動器之切換，換言之，當誤差大於切換範圍時，由氣壓無桿缸驅動；而當誤差小於切換範圍，由氣壓肌肉致動器進行精密補償。實驗包含：

- 5.3.3.1  $\phi 10$  切換範圍 0.25~0.35mm 於不同行程之定位實驗
- 5.3.3.2  $\phi 10$  切換範圍 0.95~1.05mm 於不同行程之定位實驗
- 5.3.3.3  $\phi 10$  切換範圍 1.95~2.05mm 於不同行程之定位實驗





### 5.3.3.1 $\phi 10$ 切換範圍 0.25~0.35mm 於不同行程之定位實驗

主要利用當誤差於時氣壓肌肉致動器則開啟，如此氣壓肌肉致動器作動才有效，定位精度可達微米等級。圖 5-35 至圖 5-38 為氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器定位行程實驗結果。

首先以氣壓無桿缸伺服定位控制，當誤差於時，氣壓肌肉致動器伺服定位控才啟動，如此氣壓肌肉致動器作動才有效，定位精度可達微米等級。圖 5-35 至圖 5-38 為氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器  $\phi 10 \times 103\text{mm}$  不同行程：50，100，150 以及 200mm 之定位實驗結果。表 5-11 為控制性能之比較，包含：上升時間、安定時間、穩態誤差及其時間點，可知定位控制穩態誤差於 50，100，150 以及 200mm 不同行程，皆可達  $9\mu\text{m}$  以內。

表 5-11  $\phi 10$  伺服定位切換範圍 0.25~0.35mm 於不同行程實驗結果比較

實驗行程(mm)	50	100	150	200
上升時間 $t_r$ (sec)	0.445	0.860	1.260	1.695
安定時間 sec $t_s (e < 10\mu\text{m})$	7.865	8.930	9.820	11.010
穩態誤差 $e_{ss} (\mu\text{m})$	8	6	7	9
穩態時間點(sec)	9.710	10.625	11.590	12.915

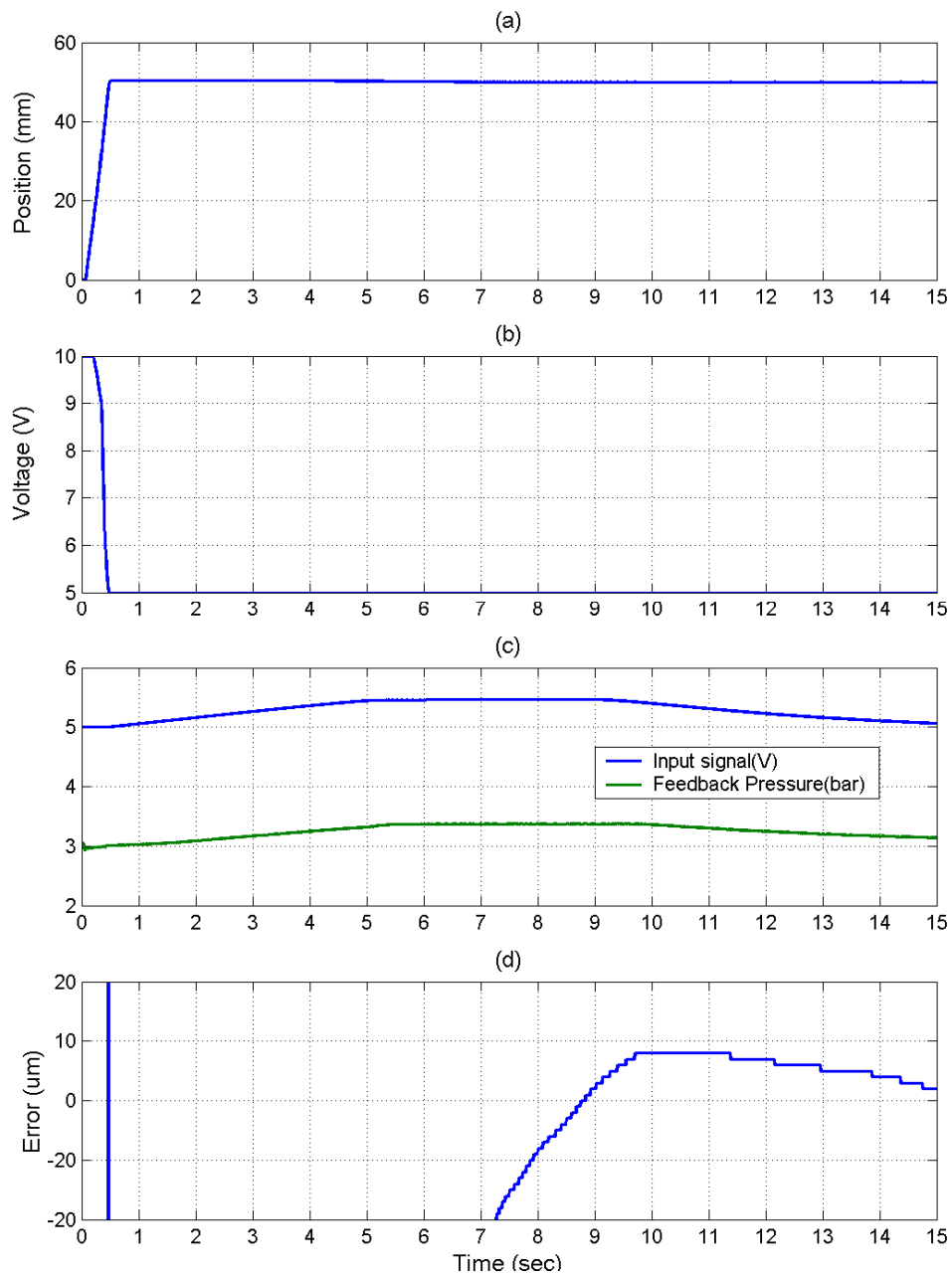


圖 5-35  $\phi 10$  伺服定位控制實驗行程 50mm 結果，切換範圍 0.25~0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

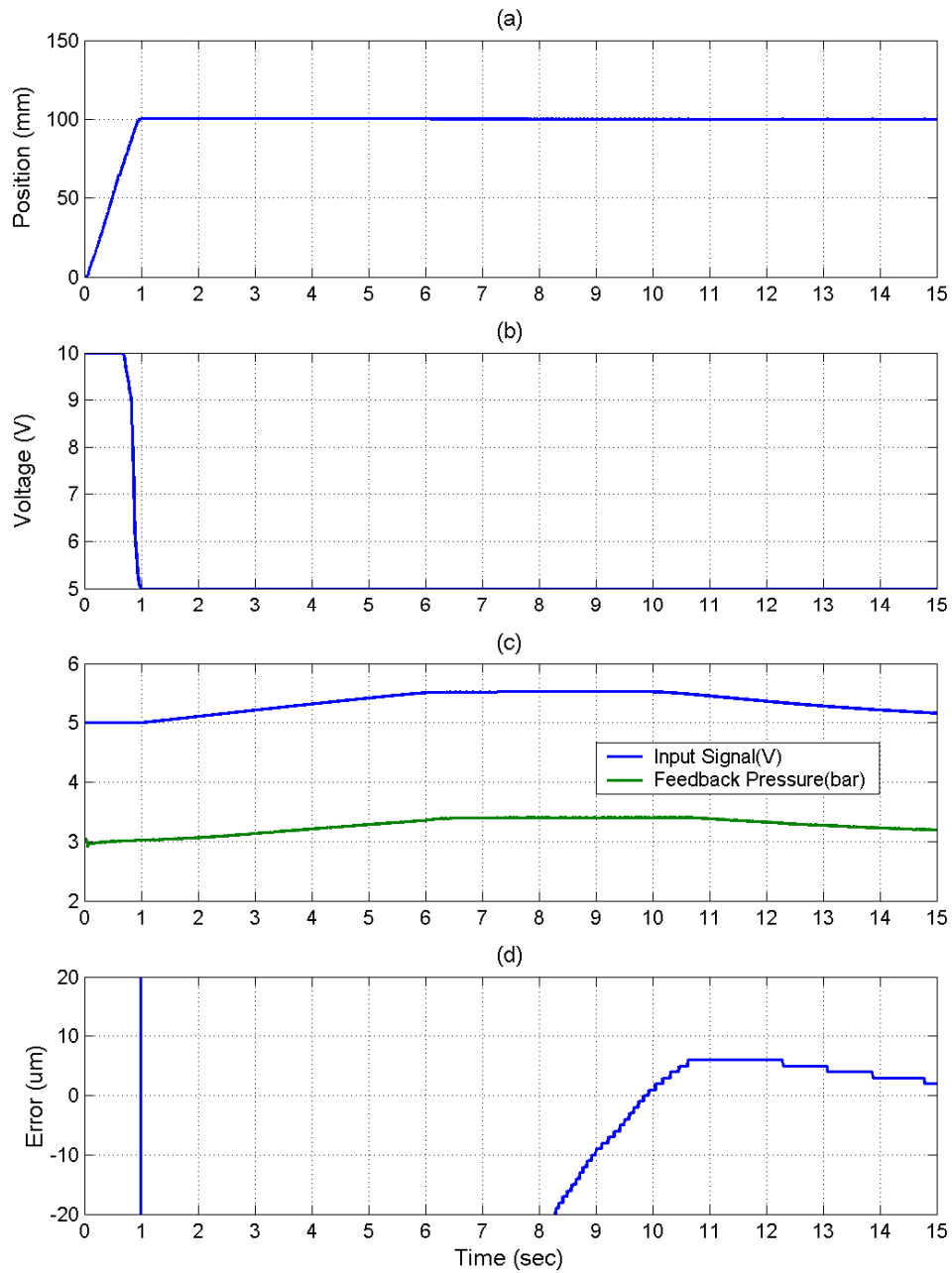


圖 5-36  $\phi 10$  伺服定位控制實驗行程 100mm 結果，切換範圍 0.25~0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

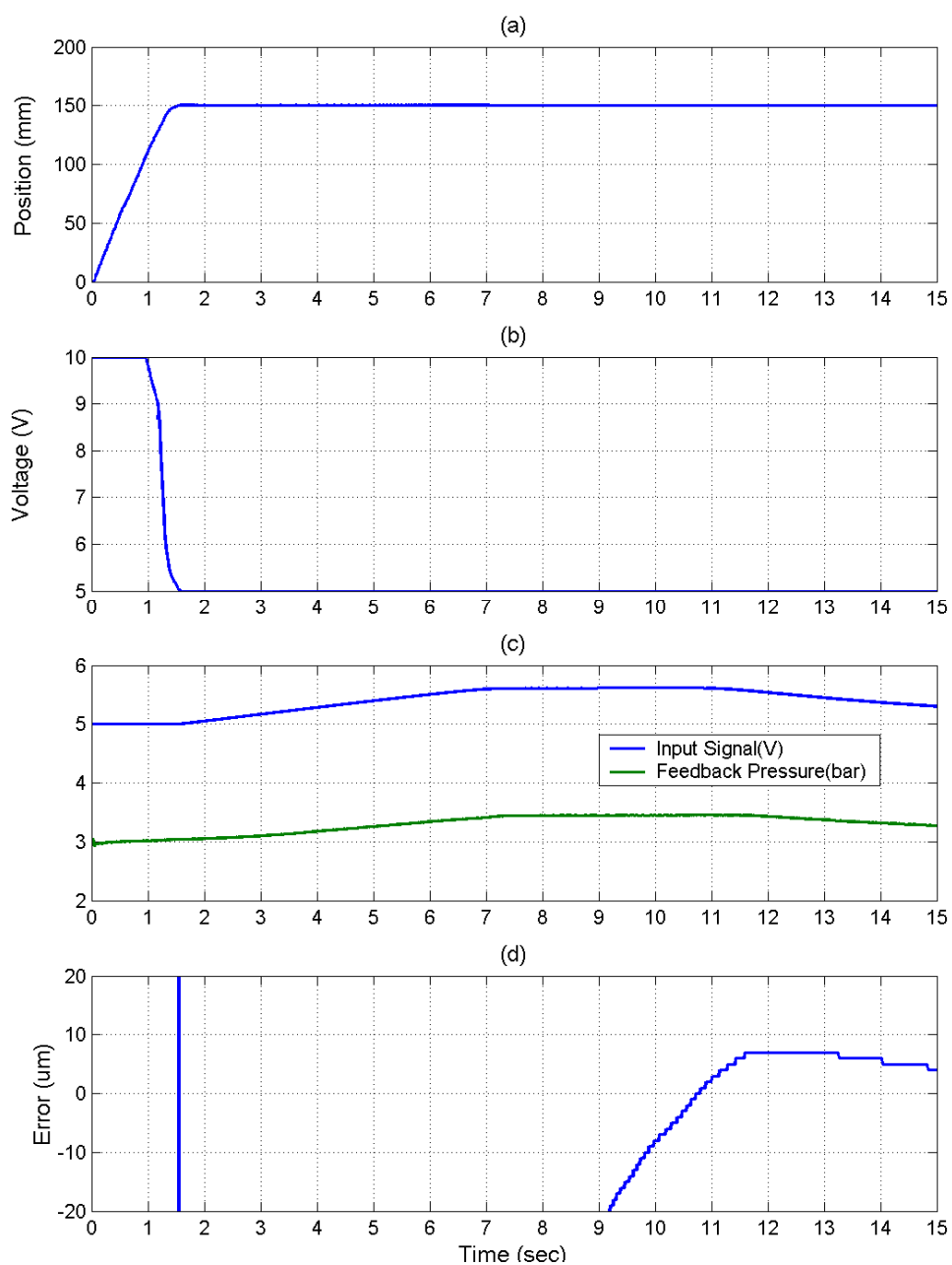


圖 5-37  $\phi 10$  伺服定位控制實驗行程 150mm 結果，切換範圍 0.25~0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

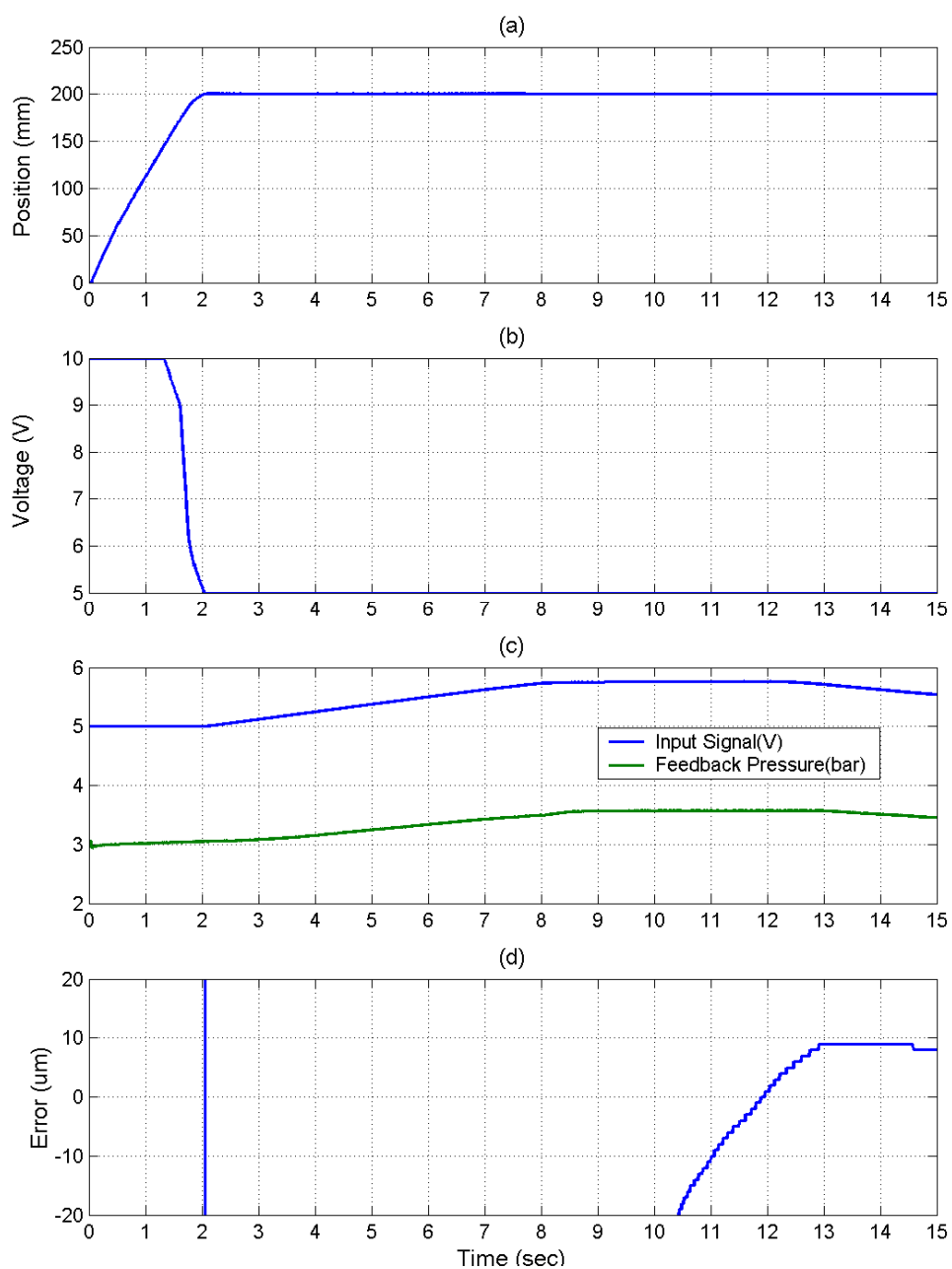


圖 5-38  $\phi 10$  伺服定位控制實驗行程 200mm 結果，切換範圍 0.25~0.35mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

### 5.3.3.2 $\phi 10$ 切換範圍 0.95~1.05mm 於不同行程之定位實驗

首先以氣壓無桿缸伺服定位控制，當誤差於 0.95~1.05mm 時，氣壓肌肉致動器伺服定位控才啟動，如此氣壓肌肉致動器作動才有效，定位精度可達微米等級。圖 5-39 至圖 5-42 為氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器  $\phi 10 \times 103\text{mm}$  不同行程：50，100，150 以及 200mm 之定位實驗結果。表 5-12 為控制性能之比較，包含：上升時間、安定時間、穩態誤差及其時間點，可知定位控制穩態誤差於 50，100，150 以及 200mm 不同行程，皆可達 9 $\mu\text{m}$  以內。

表 5-12  $\phi 10$  伺服定位切換範圍 0.95~1.05mm 於不同行程實驗結果比較

實驗行程(mm)	50	100	150	200
上升時間 $t_r$ (sec)	0.435	0.815	1.250	1.865
安定時間 sec $t_s(e < 10\mu\text{m})$	9.915	10.725	11.605	12.225
穩態誤差 $e_{ss}(\mu\text{m})$	8	7	9	8
穩態時間點(sec)	11.145	11.910	12.865	13.445

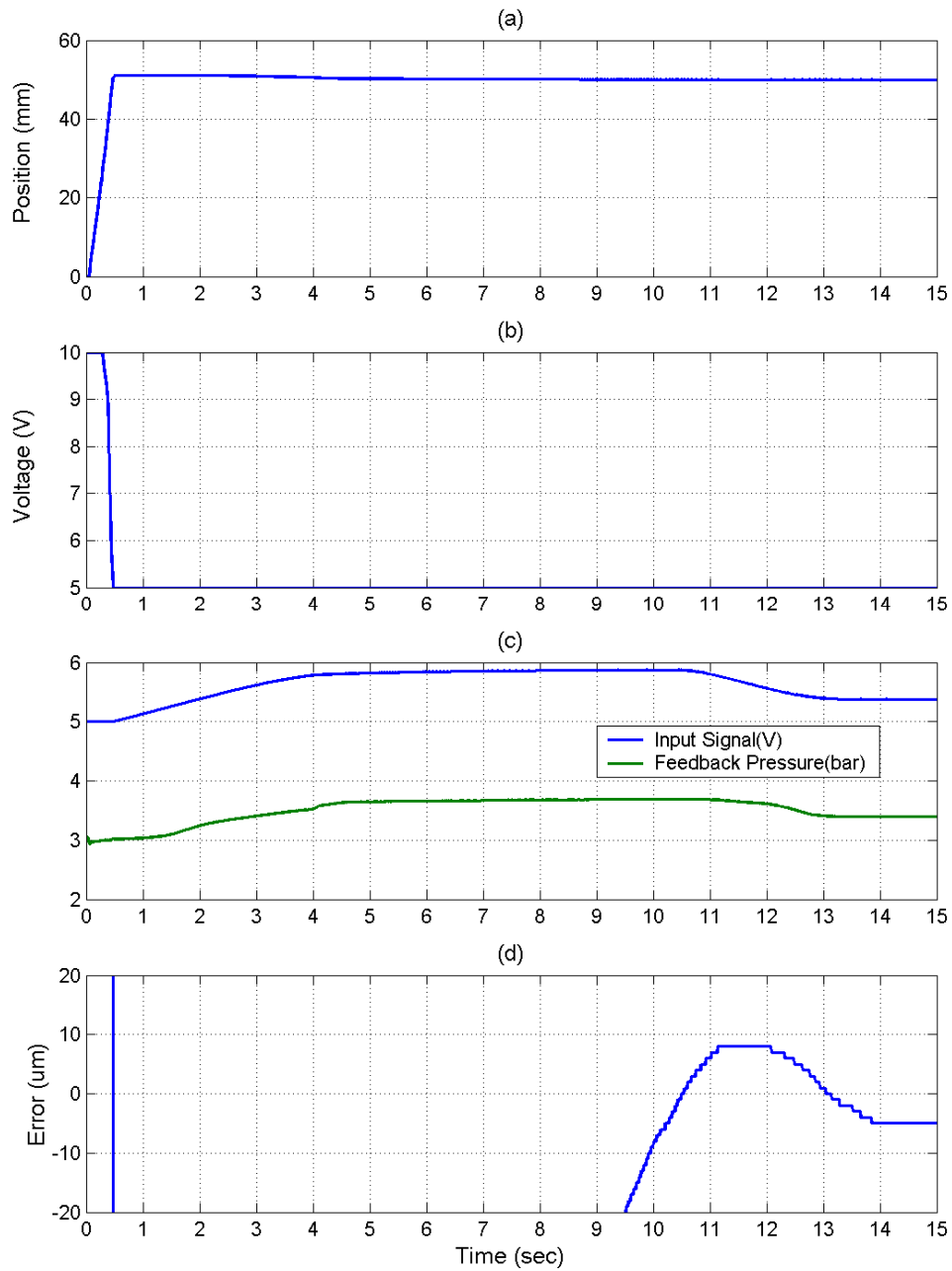


圖 5-39  $\phi 10$  伺服定位控制實驗行程 50mm 結果，切換範圍 0.95~1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

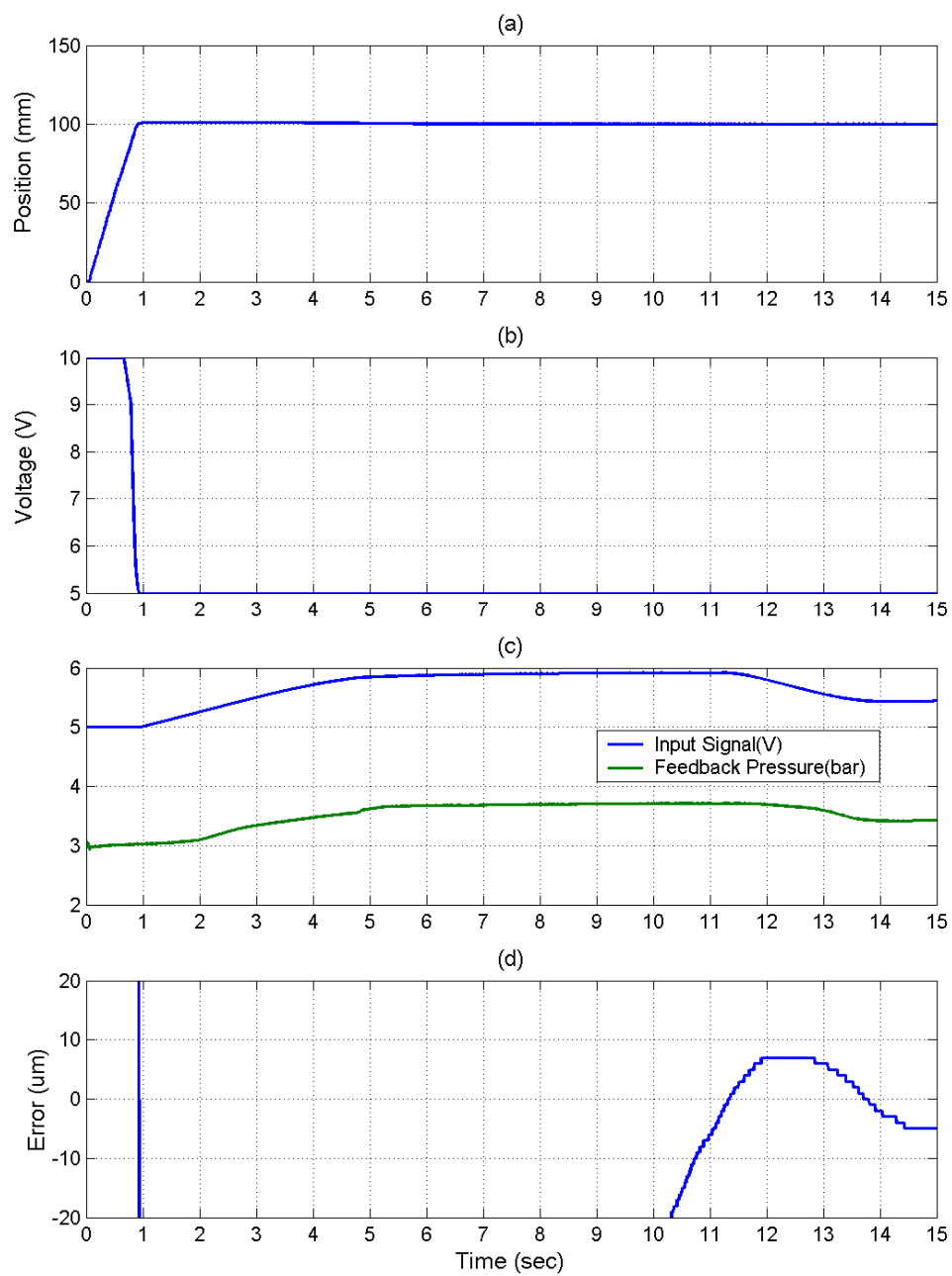


圖 5-40  $\phi 10$  伺服定位控制實驗行程 100mm 結果，切換範圍 0.95~1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大



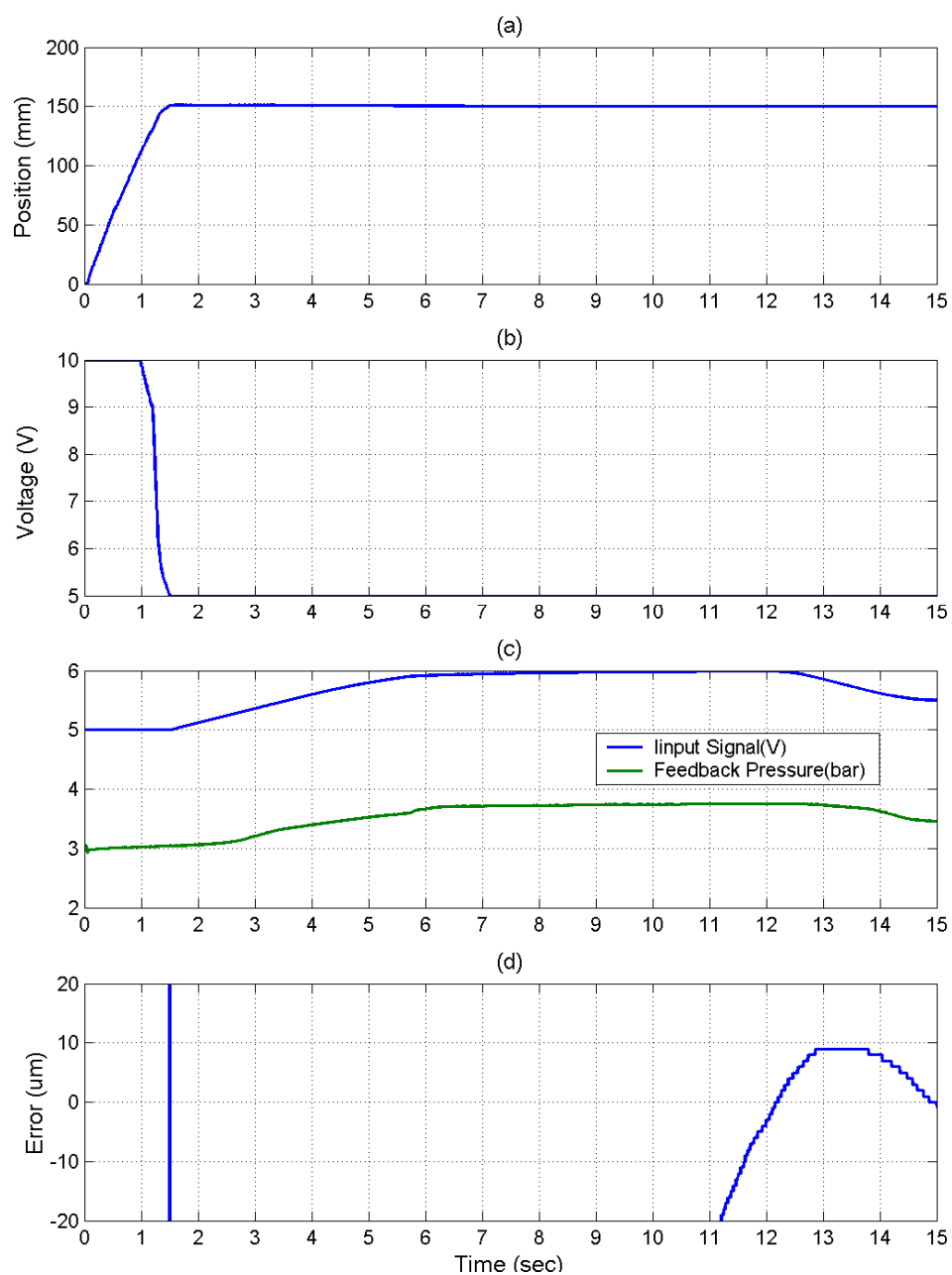


圖 5-41  $\phi 10$  伺服定位控制實驗行程 150mm 結果，切換範圍 0.95~1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

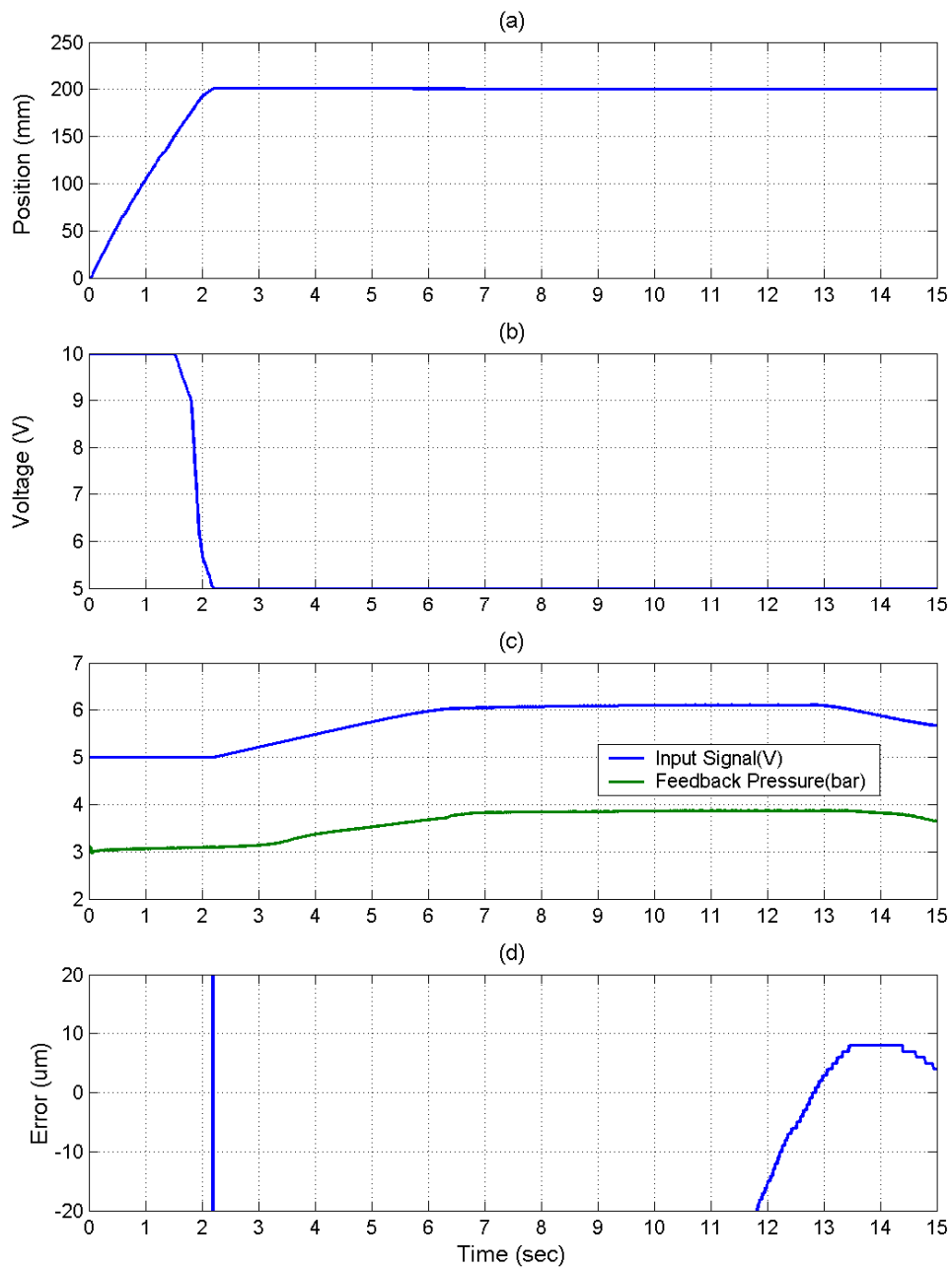


圖 5-42  $\phi 10$  伺服定位控制實驗行程 200mm 結果，切換範圍 0.95 ~ 1.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

### 5.3.3.3 $\phi 10$ 切換範圍 1.95~2.05mm 於不同行程之定位實驗

首先以氣壓無桿缸伺服定位控制，當誤差於 1.95~2.05mm 時，氣壓肌肉致動器伺服定位控才啟動，如此氣壓肌肉致動器作動才有效，定位精度可達微米等級。圖 5-43 至圖 5-46 為氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器  $\phi 10 \times 103\text{mm}$  不同行程：50，100，150 以及 200mm 之定位實驗結果。表 5-13 為控制性能之比較，包含：上升時間、安定時間、穩態誤差及其時間點，可知定位控制穩態誤差於 50，100，150 以及 200mm 不同行程，皆可達  $9\mu\text{m}$  以內。

表 5-13  $\phi 10$  伺服定位切換範圍 1.95~2.05mm 於不同行程實驗結果比較

實驗行程(mm)	50	100	150	200
上升時間 $t_r$ (sec)	0.375	0.665	1.235	1.685
安定時間 sec $t_s (e < 10\mu\text{m})$	10.230	9.900	10.870	12.730
穩態誤差 $e_{ss} (\mu\text{m})$	9	8	6	8
穩態時間點(sec)	11.565	11.195	12.080	14.025

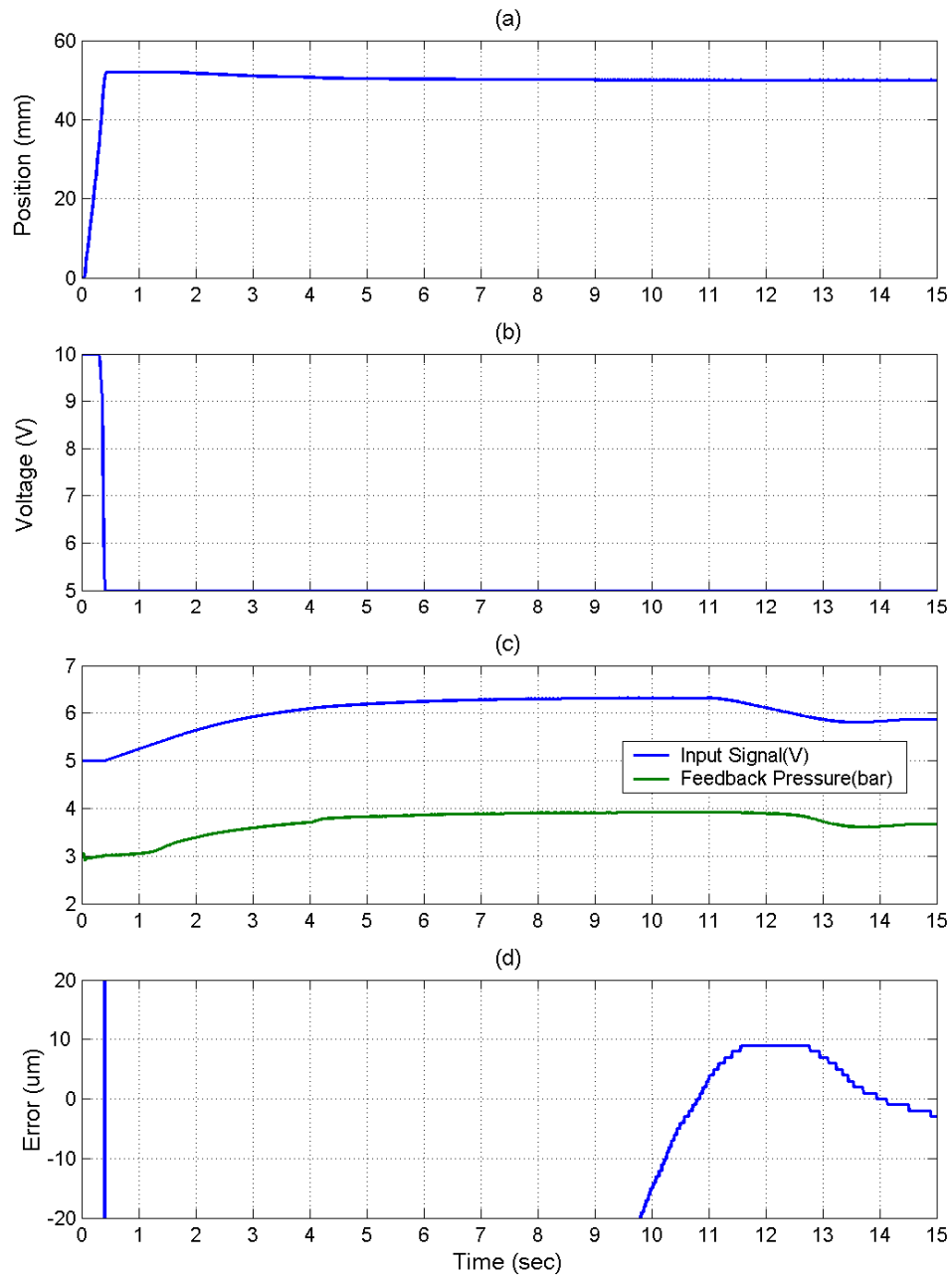


圖 5-43  $\phi 10$  伺服定位控制實驗行程 50mm 結果，切換範圍 1.95~2.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

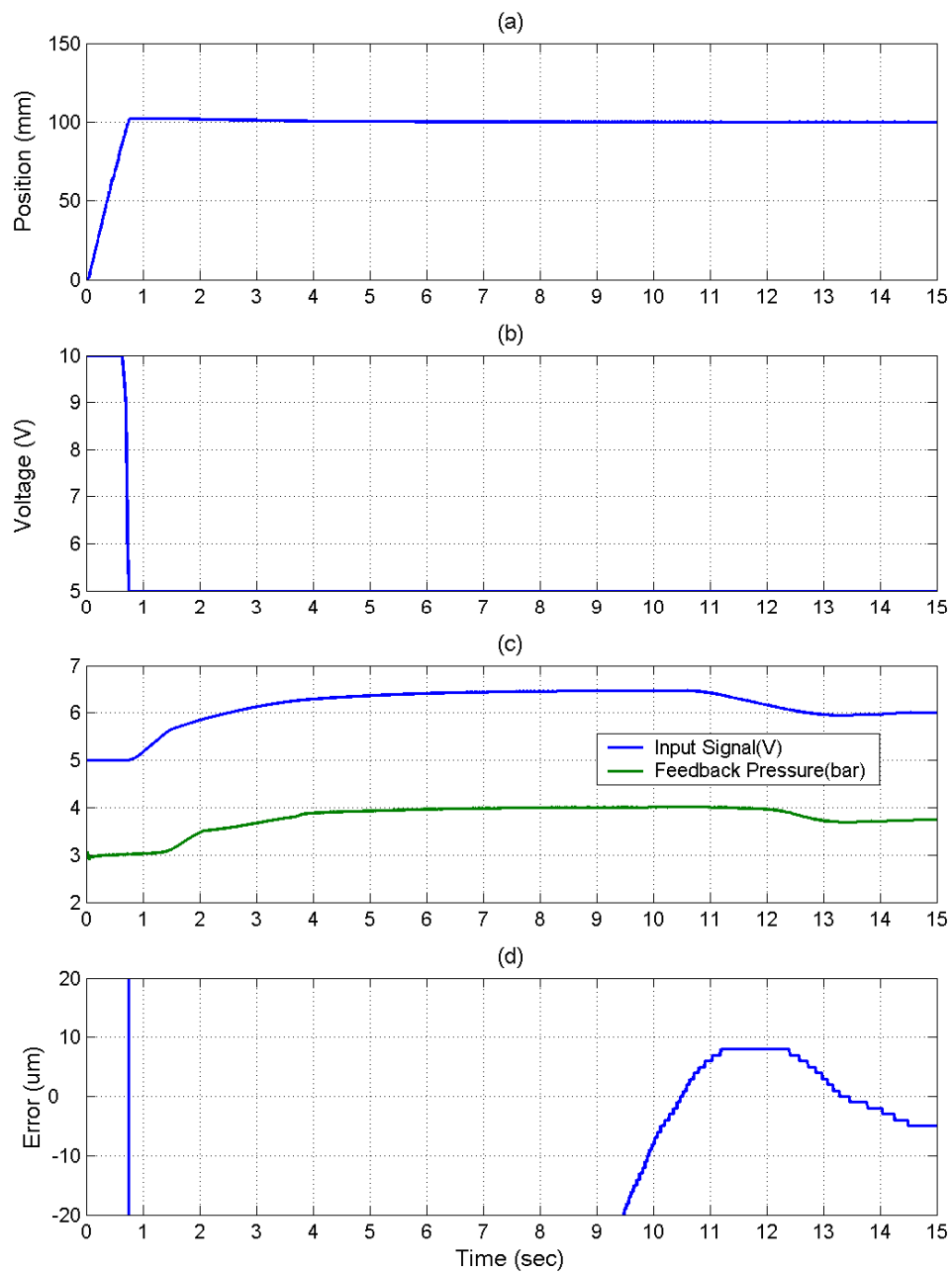


圖 5-44  $\phi 10$  伺服定位控制實驗行程 100mm 結果，切換範圍 1.95~2.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

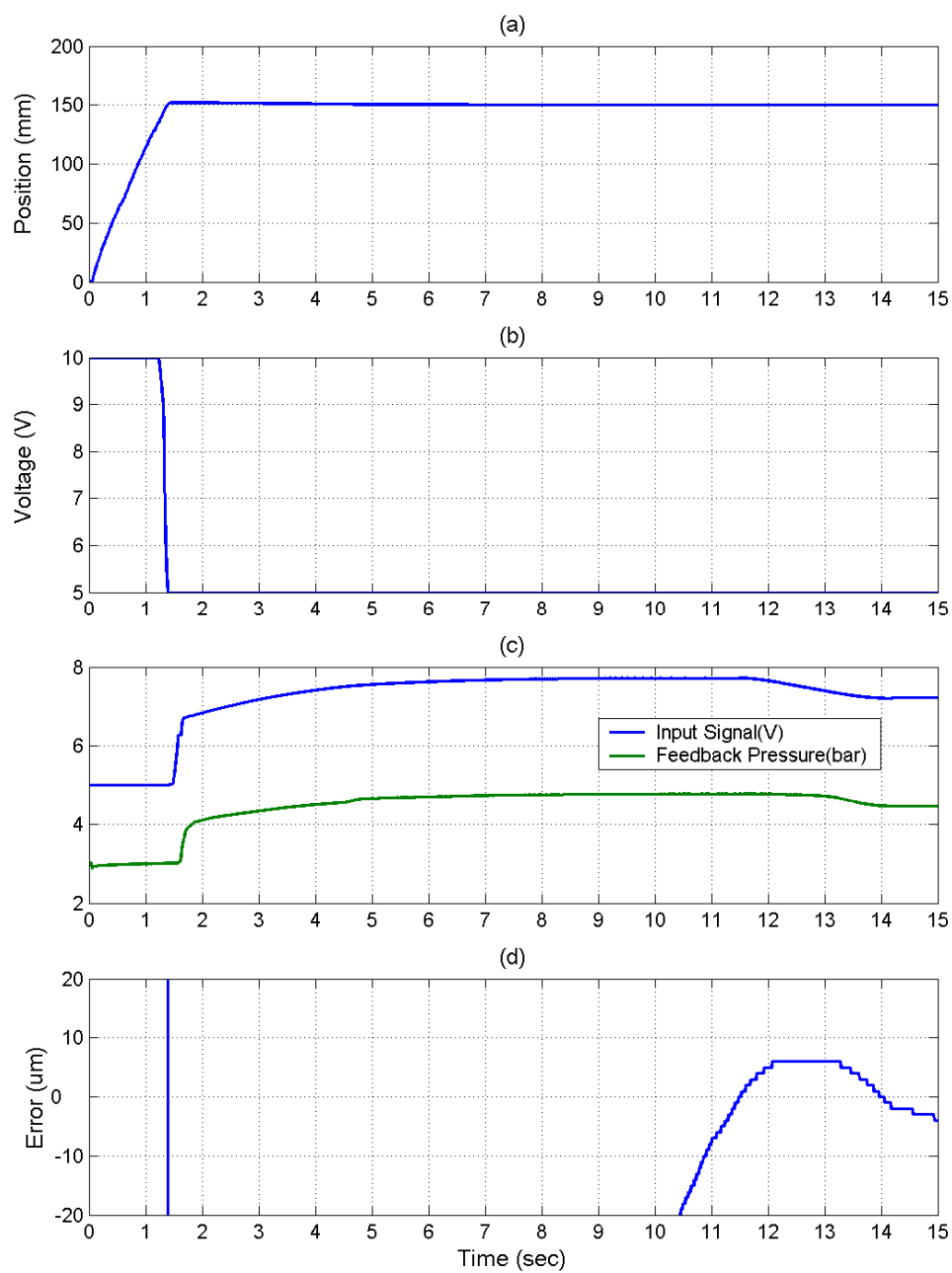


圖 5-45  $\phi 10$  伺服定位控制實驗行程 150mm 結果，切換範圍 1.95~2.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

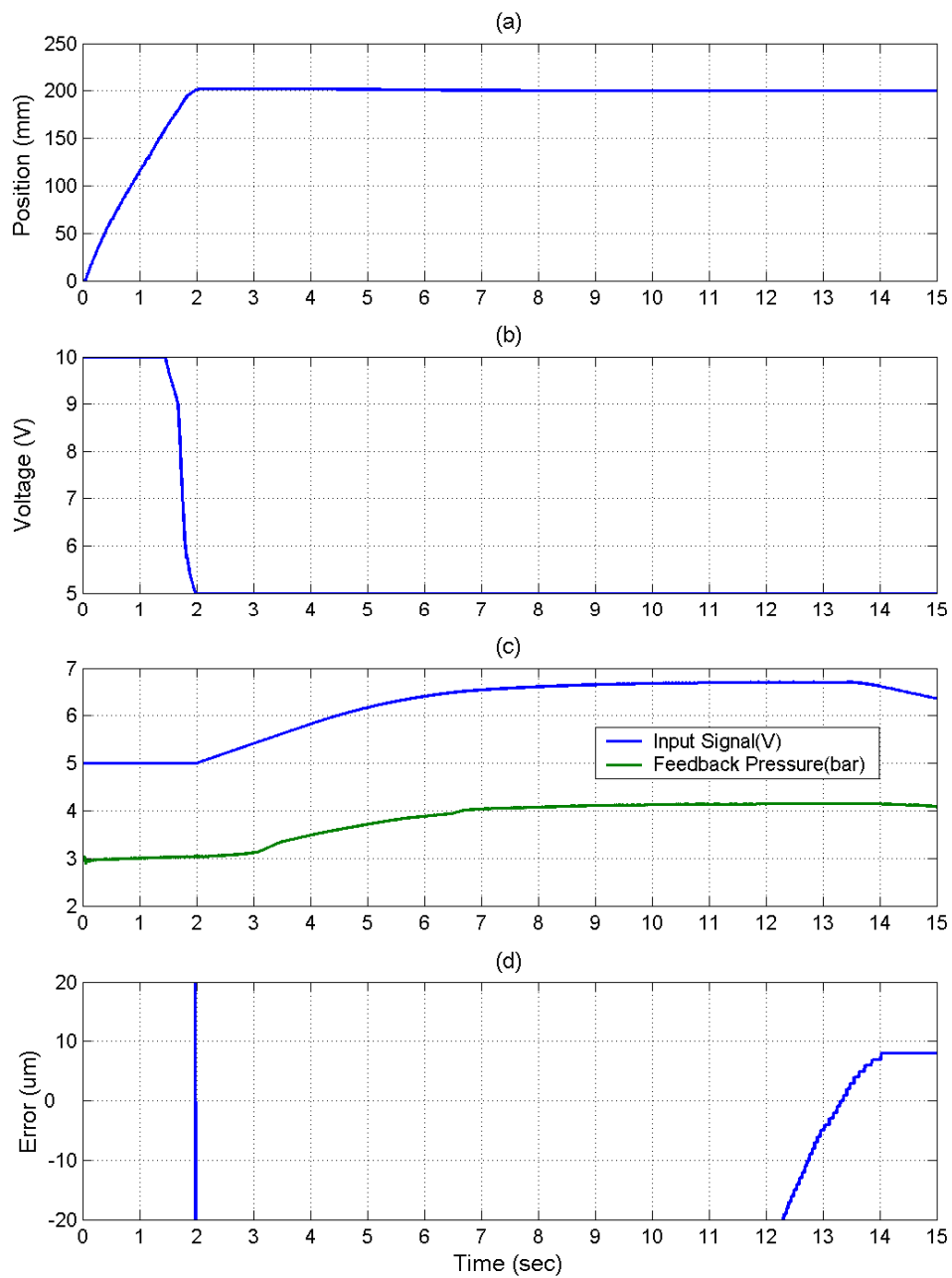


圖 5-46  $\phi 10$  伺服定位控制實驗行程 200mm 結果，切換範圍 1.95~2.05mm(a)步階響應(b)流量閥控制訊號(c)壓力閥控制與壓力回饋訊號(d)定位誤差放大

## 第六章 結論與建議

本文發展氣壓無桿缸-氣壓肌肉致動器伺服定位平台，藉由氣壓無桿缸與氣壓肌肉致動器致動器構成二進一出的精密定位控制系統，使用模糊滑動控制器進行控制器設計。由氣壓無桿缸進行大行程的粗定位，氣壓肌肉致動器致動器進行小範圍精密補償動作，如此一來可以改善傳統氣壓缸定位系統精度不足的問題。

經由實驗結果驗證可得下列結論：

1. 單獨控制氣壓無桿缸或是氣壓肌肉致動器，在模糊滑動控制器控制之下，均有不錯的性能表現：氣壓無桿缸定位於 50、100、150 及 200 mm 距離時，定位誤差可達 50 $\mu$ m 以內；氣壓肌肉致動器定位於 0.3 mm、1 mm 以及 2 mm 距離時，定位誤差在 10 $\mu$ m 以內。
2. 實驗時發現，氣壓肌肉致動器在同一定位距離下，其縮回與伸長效果有所差異，以  $\phi 40$  定位距離 2 mm 為例，縮回運動至穩態時間點需 3.485sec，穩態誤差為 3 $\mu$ m，而伸長時則需 5.275sec，穩態誤差則為 9 $\mu$ m。又氣壓肌肉致動器在縮回時狀態較伸長時有較佳的剛性及致動力，因此本實驗僅針對縮回運動的定位控制。
3. 由於的氣壓肌肉致動器腔室容積不同，除了控制參數設定有所差異，內徑越大(腔室容積越大)控制效果越好，內徑越小者則控制時間加長。以  $\phi 40$  與  $\phi 10$  定位同一距離 0.3 mm， $\phi 40$  運動至穩態時間點需 4.415sec，穩態誤差為 4 $\mu$ m，而  $\phi 10$  則需 5.350sec，穩態誤差則為 8 $\mu$ m。
4. 為解決二進一出的耦合現象，本實驗當氣壓無桿缸定位於 50、100、150 及 200 mm 距離時誤差於 0.3 mm、1 mm 以及 2 mm 時，才開啟氣壓肌肉致動器三種內徑尺寸  $\phi 40$ 、 $\phi 20$  與  $\phi 10$ ，定位誤差可達 10 $\mu$ m 以內。



5. 由於流量比例伺服閥本身零點漂移現象、滑軌與缸之間的摩擦力，使得伺服閥之中位電壓會因為環境因素不斷改變。因此若我們送出中位電壓希望使氣壓無桿缸不要作動，但因為上述的關係，使得缸體仍會微微向前或向後作動，雖然系統為閉迴路控制可即時修正。但是上述現象仍會增加控制的困難度，使安定時間加長。因此有必要對氣壓缸進行零點漂移補償，或是每次進行實驗先確認中位電壓，如此一來不僅氣壓缸的控制精度可以更好，加上氣壓肌肉致動器以後也不會因零點漂移的關係使得氣壓肌肉致動器必須持續作輸出來抗衡此現象。
6. 雖然使用線性化之壓力比例伺服閥控制極度非線性之氣壓肌肉致動器收縮量來達成定位控制，由於其本體材料之可撓性與磁滯現象，導致同一定位距離之回饋壓力值有所差異，以  $\phi 40$  為例，如圖 5-6 可看出定位 1 mm 距離於修正誤差在  $-7\mu\text{m}$  時回饋壓力有 0.04bar 的壓差。為改善此現象，建議設計一壓力修正控制器以對應位移量變化作為補償。
7. 模糊滑動控制器藉由滑動平面的使用，可大幅降低模糊規則庫的規則數及複雜度。若能在以後採用自組織修正器，則可以彌補模糊規則庫設計時，因專家經驗不足及環境因素所造成之誤差。

## 参考文献

- [ 1 ] P. Moore, J.S. Pu, "Pneumatic servo actuator technology", Actuator Techonlogy, Current Practice and New Developments., IEE Colloquium, pp. 3/1-3/6, 1996.
- [ 2 ] T. Kagawa, "Heat Transfer Effects on the Frequency Response of a Nozzle Flapper", ASME, Vol.107, pp.332-336, 1985.
- [ 3 ] K. Kawashima, T. Fujita, T. Kagawa, "The Effect of Nonlinear Characteristics on Pneumatic Servo Systems", Departement of Mechanical Engineering, Tokyo Mertropolitan College Technology, 2000.
- [ 4 ] F. Blackburn, G. Reethof, J. L. Shearer, "Fluid Power Control", M.I.T. Press, 1960.
- [ 5 ] H. E. Merrit, "Hydraulic Control System", John Willey & Sons Inc., New York, 1967.
- [ 6 ] H. F. Schulte, "The characteristics of the McKibben artificial pneumatic muscle", The Proceedings of the Application of External Power in Prostherics and Orthotics Conference, Appendix H. Publ. 874, National Academy of Sciences, Washington,DC. pp94-115, 1961
- [ 7 ] D. G. Caldwell, G. A. Medrano-Cerda, and M. Goodwin, "Control of pneumatic muscle actuators", IEEE Control Syst. Mag. , pp. 40-48, Feb. 1995.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] J. J. Shearer, "The Study of Pneumatic Process in the Continuous Control of Motion with Compressed Air-I", ASME Trans., pp. 233-242, 1956.
- [ 10 ] C. R. Burrows, "Effect of Position on the Stability of Pneumatic Servo Mechanisms", J. Mech. Engrs. Sci., Vol. 11, No. 6, pp. 615-616, 1969.
- [ 11 ] P. C. Chiu, T. P. Leung, "Modeling and Microcomputer Control of a Nonlinear Pneumatic Servomechanism", Trans. Inst. Measurement and Control, Vol.10, pp.71-78, 1988.
- [ 12 ] R. H. Weston, P. R. Moore, T. W. Thatcher, and G. Morgon, "Computer Controlled Pneumatic Servo Drives", Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol.198B, pp.275-281, 1984
- [ 13 ] E. Pachnicke, "Entwicklung von Methoden zur Verbesserung des Positionierverhaltens servopneumatisches Zylinderantriebe durch Mikroprozessoreinsatz", Dissertation der RWTH Aachen, 1986.
- [ 14 ] T. Noritsugu, "Electro-Pneumatic Feedback Speed Control of a Pneumatic Motor. Part I : With an Electro-Pneumatic Proportional Valve", Journal of

Fluid Control, pp. 17-37, 1987.

- [ 15 ] T. Noritsugu, "Development of PWM Mode Electro-Pneumatic Servomechanism. Part II : Position Control of a Pneumatic Cylinder", Journal of Fluid Control, Vol.66, pp. 65-80, 1987.
- [ 16 ] Y. Ning, M. Betemps, S. Scavarda & A. Jutard, "A Servo Controlled Pneumatic Actuator for small Movement-Application to an Adaptive Gripper", IEEE 15<sup>th</sup> Inter. Conf. on Advanced Robotics, vol.2, pp. 1582-1585, 1991.
- [ 17 ] M. C. Shih, Y. F. Huang, "Pneumatic Servo-Cylinder Position Control Using a Self-Tuning Controller", International Journal of JSME, May, Series II, vol.35, No.2, pp.247-254, Japan, 1992.
- [ 18 ] 許進順, "氣壓系統之快速定位控制", 國立清華大學動力機械工程研究所碩士論文, 1994.
- [ 19 ] H. Murrenhoff, C. Boes, R. Eschmann, E. Mostert, "Stand der Entwicklung in der Servopneumatik Antriebstechnik", O+P Ölhydraulik und Pneumatik 39, Nr.4, 264-281, 1995.
- [ 20 ] K. Schillings, "Servopneumatische Antriebssysteme und Handhabungsgerät – Modellbildung, Auslegung und Systemtechnik", Dissertation der RWTH Aachen, 2000.
- [ 21 ] X. Chen, M. Leufgen, "Erfassung des Reibverhaltens von Kolbendichtungen und deren Einfluß auf die Positionierung von pneumatischen Systemen", O+P Ölhydraulik und Pneumatik 31, Nr. 12, 914-917, 1987.
- [ 22 ] R. Eschmann, "Reibkräften an Pneumatikdichtungen, 10", Aachener Fluidtechnisches Kolloquium, Aachen, Bahn 3, 49-69, 1992.
- [ 23 ] T. Fujita, R. Tokashiki, T. Kagawa, "Stick-slip motion in pneumatic cylinders driven by meter-out circuit", Proc. of the 4<sup>th</sup> JHPS International Symposium on Fluid Power, Tokyo, 131-136, 1999.
- [ 24 ] T. Kazama, M. Fujiwara, "Experiment on frictional characteristics of pneumatic cylinders", Proc. of the 4<sup>th</sup> JHPS International Symposium on Fluid Power, Tokyo, 453-458, 1999.
- [ 25 ] K. Schillings, "Antriebe und nichtlineare Regelungsverfahren für servopneumatische Handhabungsgeräte", O+P Ölhydraulik und Pneumatik 37, Nr.3, 200-208, 1993.
- [ 26 ] M. C. Shih, Y. F. Huang, "Pneumatic servo cylinder position control using a self-tuning controller", International Journal of Japanese Society of Mechanical Engineering, Series C, 35(2), 247-254, 1992.
- [ 27 ] C. Ferraresi, G. Quaglia, "High pneumatic positioner made up of two cooperating actuators", Proc. of the 4<sup>th</sup> JHPS International Symposium on Fluid Power, Tokyo, 131-136, 1999.
- [ 28 ] 羅年良, "氣壓缸位置與壓力伺服控制系統之研究," 國立成功大學機械工程研究所碩士論文, 1999.

- [ 29 ] 黃建銘, 白凱仁, 施明璋, “速度回授補償於氣壓無桿缸伺服精密定位之研究”, 第十八屆機械工程研討會, 台北, 2002.
- [ 30 ] 何啟吉, “氣壓缸與步進馬達作雙軸運動之位置控制研究,” 國立成功大學機械工程研究所碩士論文, 2002.
- [ 31 ] K. R. Pai, M. C. Shih, “Nanoaccuracy Position Control of A Pneumatic Cylinder Driven Table”, International Journal of JSME, Series C, Vol.46, No.3, p.1062-1068, 2003.
- [ 32 ] C. P. Chou and B. Hannaford, “Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial”, IEEE, 1994.
- [ 33 ] D. W. Repperger, K. R. Johnson, C. A. Philips, “Nonlinear feedback controller design of a pneumatic muscle actuator system”, American Control Conference, 1999. Proceedings of the 1999.
- [ 34 ] G. K. Klute, J. M. Czerniecki, B. Hannaford, “McKibben artificial muscles: Pneumatic actuators with biomechanical intelligence”, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM, 1999.
- [ 35 ] P. Carbonell, Z. P. Jiang, D. W. Repperger, “A fuzzy backstepping controller for a pneumatic muscle actuator system”, Intelligent Control, 2001. (ISIC '01). Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium, 2001.
- [ 36 ] J. H. Lilly, “Adaptive tracking for pneumatic muscle actuators in bicep and tricep configurations”, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, September, 2003.
- [ 37 ] S. M. Djouadi, D. W. Repperger, J.E. Berlin, “Gain-scheduling  $H_{\infty}$  control of a pneumatic muscle using wireless MEMS sensors”, Circuits and Systems, 2001. MWSCAS 2001. Proceedings of the 44th IEEE, 2001.
- [ 38 ] A. Hildebrandt, O. Sawodny, R. Neumann, A. Hartmann, “A flatness based design for tracking control of pneumatic muscle actuators Control”, Automation, Robotics and Vision, 2002. ICARCV, 2002.
- [ 39 ] S. Davis, D. G. Caldwell, N. Tsagarakis, J. Canderle, “Enhanced modelling and performance in braided pneumatic muscle actuators”, International Journal of Robotics Research, 2003.
- [ 40 ] T. J. Procky and E. H. Mamdani, “A linguistic Self-Organizing Process Controller”, Automatica, Vol.5, pp.15-30, 1979.
- [ 41 ] S. H. Shao, “Fuzzy self-organizing controller and its application for dynamic processes”, Fuzzy Sets and System 26, pp.151-164, 1988.
- [ 42 ] B. S. Zhang, J. M. Edmunds, “Self-Organizing Fuzzy Logic Controller”, IEE Proceedings-D, Vol.139, No.5, pp.460-464, 1992.
- [ 43 ] J. C. Wu, T. S. Liu, “A sliding-mode approach to fuzzy control design”, IEEE Trans. Control Systems Technology, vol. 4, no. 2, 141-151, 1996.
- [ 44 ] S. W. Kim, J. J. Lee, “Design of a fuzzy controller with fuzzy sliding surface”,

Fuzzy Sets & Systems, vol.71, no.3, pp.359-67, 1995.

- [ 45 ] J. C. Lo, Y. H. Kuo, "Decoupled Fuzzy Sliding-Mode Control ", IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol.6, No.3, pp.426-435, Aug. 1998.
- [ 46 ] J. F. Shiu, C. M. Lin, "Decoupled Fuzzy Controller Designed with Fuzzy Sliding Surface", 2000 Automatic control Conference, pp.463-468. 2000.
- [ 47 ] C. M. Lin, C. F. Hsu, "Decoupled Fuzzy Sliding-Mode Control of a Nonlinear Aeroelastic Structure", Fuzzy Systems, 2002. FUZZ-IEEE'02. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on , Vol.1, pp.662 -667 , 2002.
- [ 48 ] B. J. Choi, S. W. Kwak, and B. K. Kim, "Design of a single-input fuzzy logic controller and its properites", Fuzzy Sets and Systems, pp.299-308, 1999.
- [ 49 ] S. Y. Chen, F. M. Yu, and H. Y. Chung, "Decoupled fuzzy controller design with dingle input fuzzy logic", Department of Electrical Engineering, National Central University, Fuzzy Set and Systems 129, pp.335-342, 2002.
- [ 50 ] D. Q. Zhang and S. K. Panda, "Chattering-free and fast-response sliding mode controller", IEE Proc.,-Control Theory Appl., Vol. 146, No. 2, pp.171-177, Mar. 1999.
- [ 51 ] 楊旻政, "基於距離可變控制法則模糊滑動模糊控制器之設計", 大同大學, 電機所, 2003.
- [ 52 ] M. H. Chiang, D. N. Chou, "Adaptive Variable Structure Control for a Pneumatic-Piezoelectrical Hybrid Positioning System", The 18<sup>th</sup> National Conference on Mechanical Engineering of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Taipei, Taiwan , 2001.
- [ 53 ] F. L. Yang, M. H. Chiang, C. N. Wu, C. H. Kuo, Y. N. Chen, and Y. C. Yeh, "Study on Force Control and Load-Sensing Control of a Hydraulic Valve-Controlled Cylinder Systems with Decoupling Self-Organizing Fuzzy Sliding Mode Controller", Bulletin of the College of Engineering, N.T.U., No. 92, pp. 21-34, 2004.
- [ 54 ] M. H. Chiang, F. L. Yang, Y. N. Chen, and Y. P. Yeh, "Integrated Control of Clamping Force and Energy-Saving in Hydraulic Injection Moulding Machines Using Decoupling Fuzzy Sliding-Mode Control", International Journal of Advanced Manufacturing Engineering, published online: 12 Jan. 2005.
- [ 55 ] M. H. Chiang, Y. W. Chien, "Parallel control of velocity control and energy-saving control on a hydraulic valve controlled system using self-organizing fuzzy sliding mode control", JSME International Journal, Series C, Vol.46, No.1, pp.224-231, 2003.
- [ 56 ] M. H. Chiang, L. W. Lee, G. H. Huang, "Development of a Hydraulic-Piezo-Actuator for Hybrid Positioning Control with Large Stroke and Sub-Micrometer Accuracy", IEEE International Conference on Mechatronics (ICM2005), Taipei, Taiwan, 2005.
- [ 57 ] M. H. Chiang, L. W. Lee, G. H. Huang, "大行程高出力次微米精度之液壓-

- 壓電混合定位系統設計與控制”，The 21<sup>st</sup> National Conference on Mechanical Engineering of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Kaoshiung, Taiwan, 2004.
- [ 58 ] M. H. Chiang, I. C. Yeh, “Parallel Control of Path Control and Energy-Saving Control for a Hydraulic Valve-Controlled Cylinder System Using Decoupling Fuzzy Sliding Mode Control”, The 13rd National Conference on Automation Technology, Taipei, Taiwan, Jun. 2004.
- [ 59 ] M. H. Chiang, Y. P. Yeh, “解耦合自組織模糊滑動模式控制應用於閥控液壓缸系統變排量節能控制與速度控制之平行控制研究”, The 20<sup>th</sup> National Conference on Mechanical Engineering of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Taipei, Taiwan, 2003.
- [ 60 ] M. H. Chiang, Y. W. Chien, “Integration of path control and load-sensing control on a hydraulic valve controlled system using fuzzy sliding mode control”, The 18<sup>th</sup> National Conference on Mechanical Engineering of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Taipei, Taiwan, 2001.
- [ 61 ] 吳佳勳, “智慧型長行程奈米精度氣壓-壓電混合精密伺服 YZ 定位控制”, 國立台灣科技大學工程技術所自動化及控制研究所碩士論文, 2005.
- [ 62 ] 楊文賢, “長行程奈米精度之氣壓-壓電混合精密伺服XYZ 三軸定位系統設計與智慧型控制”, 國立台灣科技大學工程技術所自動化及控制研究所碩士論文, 2006.
- [ 63 ] Agilent, “Datasheet of HCTL-2032 Quadrature Decoder”, 2005.
- [ 64 ] Festo AG., “xDKI 2008 Products Catalogues Software”, 2008.
- [ 65 ] 李寶仁, 劉軍, 楊鋼, “氣動人工肌肉系統建模與仿真”, Chinese Journal of Mechanical Engineering”, Vol.39, No.7, Jul, 2003.

# 國立臺灣科技大學博碩士論文授權書

(本授權書裝訂於紙本論文內)

本授權書所授權之論文為江友良〔M9312902〕在國立臺灣科技大學自動化及控制研究所  
96 學年度第 2 學期取得碩士學位之論文。

論文題目：長行程微米精度之氣壓缸-氣壓肌肉致動器精密伺服定位控制之研究  
指導教授：江茂雄 郭中豐

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文〔含摘要〕，依下述授權範圍，以非專屬、無  
償授權本校圖書館及國家圖書館，不限地域、時間與次數，以紙本、微縮、光碟或其他數  
位化方式將上列論文重製典藏，並提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索書目、館內閱  
覽、或複印。

授權人

江友良

簽章

(請親筆正楷簽名)

江友良

備註：

1. 茲確認本論文之著作權係江友良單獨擁有。

指導教授簽章：

江茂雄 郭中豐

2. 授權人不因本授權而喪失上述著作之著作權。
3. 本授權書請授權人簽章後，裝訂於紙本論文內。

中 華 民 國 年 月 日