國立臺灣師範大學機電科技學系

碩士論文

指導教授：陳俊達博士 張國維博士

以嵌入式系統實現人工肌肉氣壓缸之系統識別

System Identification of a Pneumatic Artificial Muscle Using an Embedded System

研究生：金冠霖　撰

中　華　民　國　1　0　2　年　6　月

國 立 臺 灣 師 範 大 學

博碩士論文授權書

（提供授權人裝釘於紙本論文書名頁之次頁用）

本授權書所授權之論文為授權人在國立臺灣師範大學_____系所__
_____組_____學年度第____學期取得_____士學位之論文。

論文題目：_____

指導教授：_____

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文（含摘要），授權本校圖書館及國家圖書館，提供讀者基於個人非營利性質之閱覽與列印。

☐ 讀者基於非營利性質之閱覽或列印上列論文，應依著作權法相關規定辦理。

指導教授：

授 權 人

研究生姓名：　　（請親筆正楷簽名）

中　華　民　國　　年　　月　　日

摘要

人工肌肉氣壓缸的內部摩擦力，使其具高度非線性特性難以精確控制，故本文以 ***LuGre 摩擦模型***建立***人工肌肉氣壓缸***的摩擦模型，並以***粒子群優化演算法(PSO)***求解未知的摩擦參數，以完成人工肌肉氣壓缸的系統識別。

本研究並以***可程式系統單晶片 PSoC***作為人工肌肉氣壓缸實驗平台的資料擷取卡，藉由感測器所測量得到的訊號得到人工肌肉氣壓缸的壓力與位置，並將取得之訊號資料繪製成人工肌肉氣壓缸的遲滯曲線(Hysteresis curve)以為摩擦模型識別用。

關鍵詞 ： LuGre 摩擦模型、人工肌肉氣壓缸、遲滯曲線(Hysteresis loop)、粒子群優化演算法(PSO)

Abstract

Pneumatic artificial muscle is a highly nonlinear system because of the internal friction effects, so the ***LuGre friction model*** is developed for the friction model of the ***pneumatic artificial muscl***e in this paper, and the ***Particle Swarm Optimization Algorithm (PSO)*** is used to solve the unknown parameters of the friction model for the system identification of the pneumatic artificial muscle.

In addition, the ***Programmable System on Chip (PSoC)*** is used for the data acquisition of the pneumatic artificial muscle system. The data about the displacement and the pressure of pneumatic artificial muscle are measured for the development of the hysteresis loop in the pneumatic artificial muscle.

Key word: LuGre Friction Model、Pneumatic Artificial Muscle、Hysteresis loop、Particle Swarm Optimization Algorithm (PSO)

誌謝

這兩年在師大的日子裡，我學到了很多，在此要感謝我的指導教授陳俊達老師與張國維老師於這兩年間的悉心指導，讓原本非工程科系出身的我，有機會可以初窺工程領域的大門，對於程式語言與嵌入式系統可以從陌生到有進一步的瞭解，也因此才有這篇論文的誕生。

感謝實驗室同學俊廷與世昌在這段時間的陪伴，無論是在研究上提供的建議與協助，或是生活方面的互相照顧與幫助，都使我的研究所生涯有了更豐富的色彩。

最後要感謝我的父母對我的養育與栽培之恩，以及家人、朋友在這段時間內的支持與鼓勵，使我在遇到挫折與心情不佳時還能有可以繼續向前走的動力，讓我得以完成學業。最後僅以此篇論文獻給所有我愛的及愛我的父母、家人以及朋友。

摘要……i
Abstract…….……ii
誌謝……...iii
目錄……...iv
表目錄……..vii
圖目錄…….....viii

目錄

第一章 緒論
1.1 研究動機…….……...1
1.2 文獻回顧……5
1.3 研究目的……7

第二章 人工肌肉氣壓缸之系統識別
2.1 人工肌肉氣壓缸致動平台…….……8
2.1.1 實驗平台…….…….……8
2.1.2 人工肌肉氣壓缸輸出力之數學模型…….……9
2.2 LuGre 摩擦模型…….……..……..……..10
2.2.2LuGre 摩擦模型之穩態參數….……..……....14
2.2.3 LuGre 摩擦模型之動態參數….……..……...14
2.3 LuGre 摩擦參數識別…….……..……....15
2.4 粒子群演算法(Particle Swarm Optimization Algorithm ,PSO) ….....18

第三章 人工肌肉氣壓缸之實驗平台

3.1 實驗平台設計……..……..……....20

3.1.1 人工肌肉氣壓缸(Pneumatic artificial muscle) ……....21

3.1.2 脈衝寬度調變(Pulse width modulation, PWM) …...……....22

3.1.3 比例壓力閥……..…….....26

3.1.4 雷射位移感測器……..…….....27

3.1.5 PSoC CY8C29466-24PXI 晶片與 CY3210 開發板…….....28

3.2 可程式化系統單晶片(PSoC) ……..……...29

3.3 圖形使用者介面(GUI)設計……..……..34

第四章 結果與討論

4.1 實驗流程……...……...36

4.2 測試結果……...……...38

4.2.1 人工肌肉氣壓缸之特性曲線……...……...38

4.2.2 量測數據之曲線擬合……..……...43

4.3 結果與討論…….....48

4.3.1 LuGre 摩擦模型之動態參數…….....48

4.3.2 LuGre 摩擦模型之穩態參數…….....51

4.3.3 模擬結果…….....55

4.3.4 討論…….....59

第五章 結論…….....60

參考文獻

附錄

附錄一 PSoC 程式碼

附錄二 Visual Basic 程式碼

表目錄

表 2-1 穩態的 LugGre 摩擦模型參數……...…14

表 3-1 人工肌肉氣壓缸之規格……...…..……...21

表 4-1 人工肌肉氣壓缸充氣遲滯曲線之擬合方程式……..…45

表 4-2 人工肌肉氣壓缸排氣遲滯曲線之擬合方程式……..…46

表 4-3 LuGre 摩擦模型之動態參數……...…..…48

表 4-4 LuGre 摩擦模型之穩態參數……...…..…51

圖目錄

圖 1-1 人工肌肉氣壓缸……1

圖 1-2 人工肌肉氣壓缸構造……2

圖 1-3 人工肌肉氣壓缸的容積為定值……2

圖 1-4 遲滯曲線(hysteresis loop) ……4

圖 1-5 橡皮軟管與網狀編織結構……....5

圖 1-6 網狀編織結構……....6

圖 2-1 實驗平台簡圖……....8

圖 2-2 刺毛為靜止狀態，速度為 0……10

圖 2-3 刺毛為黏滯狀態，速度趨近為 0……10

圖 2-4 刺毛為滑動狀態，速度大於 0……11

圖 2-5 g(v)模擬 F_s 與 F_c 對速度的關係……12

圖 2-6 Stribeck 曲線……..13

圖 2-7 前置作業流程圖……16

圖 2-8 粒子優化演算法(PSO)運作流程圖……..17

圖 3-1 實驗平台……20

圖 3-2 人工肌肉氣壓缸(Pneumatic Artificial Muscle) ……...21

圖 3-3 將被調變之類比訊號轉變為 PWM 脈衝波……23

圖 3-4 PWM 脈衝波……24

圖 3-5 三種不同工作週期的 PWM 訊號……25

圖 3-6 比例壓力閥……...26

圖 3-7 雷射位移感測器放大器模組……...27

圖 3-8 雷射發射接收裝置……27

圖 3-9 CY8C29466-24PXI 晶片……28
圖 3-10 CY3210 開發板……29
圖 3-11 PSoC Designer 程式撰寫介面……31
圖 3-12 PSoC Designer 電路配置介面 ……31
圖 3-13 晶片佈線圖……32
圖 3-14 內建電子元件……32
圖 3-15 PSoC 之程式流程圖……33
圖 3-16 GUI 之設計與運作流程圖……35
圖 3-17 電腦端人機介面……35
圖 4-1 系統運作流程圖……37
圖 4-2 電壓對位移的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線……38
圖 4-3 壓力對位移的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線……39
圖 4-4 人工肌肉氣壓缸之長度變化量(位移) ……40
圖 4-5 PWM 所調變輸出之電壓值……40
圖 4-6 人工肌肉氣壓缸之遲滯曲線圖……41
圖 4-7 人工肌肉氣壓缸內部壓力值……42
圖 4-8 匯入曲線擬合工具箱之人工肌肉氣壓缸遲滯曲線圖……43
圖 4-9 使用 4 次多項式的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線之擬合曲線圖……44
圖 4-10 使用 5 次多項式的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線之擬合曲線圖……44
圖 4-11 人工肌肉氣壓缸遲滯曲線之擬合曲線圖……47
圖 4-12 σ_0 粒子分布圖……49
圖 4-13 σ_1 粒子分布圖……49
圖 4-14 粒子群優化演算法之粒子位置圖……50
圖 4-15 全域最佳適應值……50
圖 4-16 F_C 粒子分布圖……52

圖 4-17 F_S 粒子分布圖…...…… 52

圖 4-18 v_S 粒子分布圖…… 53

圖 4-19 σ_2 粒子分布圖……..……..… 53

圖 4-20 全域最佳適應值……..……..…… 54

圖 4-21 最佳化粒子之數值……..……..…… 54

圖 4-22 氣壓值與電壓值比例圖……..……..…… 56

圖 4-23 模擬所得之電壓……..……..…… 57

圖 4-24 擬與實驗所得的電壓對照……..……..…… 57

圖 4-25 模擬所得之電壓對位移的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線…… 58

圖 4-26 模擬對照實驗所得之電壓對位移的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線……. 58

第一章 緒論

1.1 研究動機

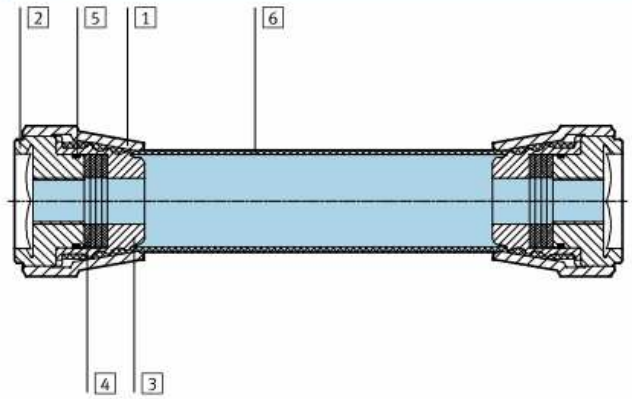
人工肌肉氣壓缸或稱人工氣壓肌肉驅動器，最早於 1960 年代由一位美國的醫生 Joseph L.Mckibben 所發明，就是所謂的 McKibben 人工氣壓肌肉致動器[1]。

人工肌肉氣壓缸是一種模仿自然界中生物的肌肉運動機制所開發出來的可拉伸型柔性制動器，如圖 1-1 所示，人工肌肉氣壓缸的主體主要由高強度纖維編織成的外層三維網格結構和內層的彈性橡膠管所組成，如圖 1-2 所示。當人工肌肉氣壓缸內部的壓力升高的時候，由於外層編織網的縱向方向的剛性很大，縱向方向的長度不太會伸長，內部的容積為一個定值，如圖 1-3 所示，因此內層的彈性橡膠管的直徑將會變大而使縱向方向的長度縮短，進而產生軸向的收縮力，因此只要改變橡膠管內的壓力大小，就可以調整人工肌肉氣壓缸的收縮的狀態與伸長的狀態。

圖 1-1 人工肌肉氣壓缸

Materials

Sectional view



Fluidic muscle		
1	Union nuts	Wrought aluminium alloy, clear anodised
2	Flange	Wrought aluminium alloy, blue anodised
3	Internal cone	Wrought aluminium alloy, clear anodised
4	Cup springs	Steel
5	Sealing ring	Nitrile rubber
6	Diaphragm hose	Chloroprene, aramide
–	Adhesive	Loctite 243 (thread locking agent)
–	Lubricant	Klüberplex BE 31-102
	Note on materials	Copper, PTFE and silicone-free

圖 1-2 人工肌肉氣壓缸之構造[2]

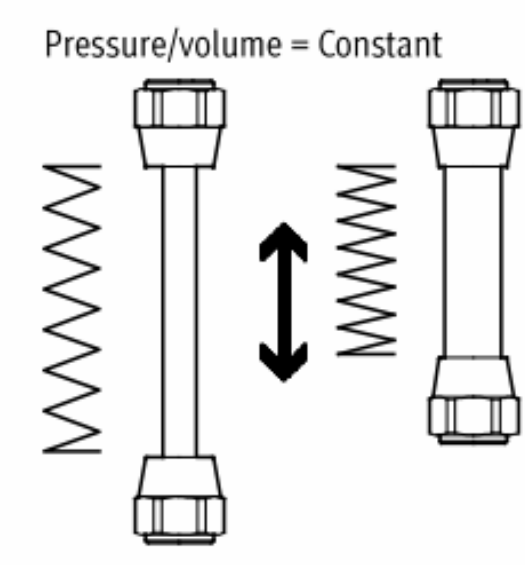


圖 1-3 人工肌肉氣壓缸的容積為定值 [2]

人工肌肉氣壓缸除了有類似於生物肌肉的運動方式以及外型之外，還具有以下幾點優點：(1)結構簡單、易於小型化、製造成本低;(2)具柔順性、安全性;(3)動作平滑，無相對摩擦運動件;(4)能量轉換效率高;(5)可實現多自由度的運動及操作;(6)操作過程中不產生熱或其他有害物質。基於以上所述的優點，美國、英國及德國等工業大國皆有投入資源發展相關的技術與應用並相繼推出商品化的產品，本研究使用的即是由德國 Festo 公司所生產的人工肌肉氣壓缸[2]。

雖然人工肌肉氣壓缸具有上述之優點，卻是具有高度非線性的系統，因為其壓力與長度變化或者是壓力與體積之關係是非線性，又加上人工肌肉氣壓缸內層的彈性橡膠管與外層的纖維網在內部壓力變化而產生長度改變時，會有些微的摩擦，因此會產生遲滯現象[3]，所以對比一般的系統而言，人工肌肉氣壓缸的系統相對複雜的許多。因此，為了可以準確地控制人工肌肉氣壓缸，達到高精度的定位，對於人工肌肉氣壓缸遲滯模型的建立是必須且重要的。

遲滯現象(hysteresis effect)是在非線性系統中所發生的一種現象[3]，在材料、機械等工程科學方面有不少的例子存在，如壓電材料的壓電遲滯現象與橡皮軟管的彈力遲滯現象，或是物體間摩擦力所產生的摩擦遲滯現象等等。而除了工程科學方面的例子與應用，在生物學與經濟學方面也會發生所謂的遲滯現象，其影響層面相當地廣。

假設有一個非線性的系統 S，遲滯現象是系統 S 從某一狀態 A 到新狀態 B 所經過的路徑，在此稱由 A 至 B 的路徑為路徑一，與系統從狀態 B 回到狀態 A 所經過的路徑，在此稱由 B 至 A 的路徑為路徑二，路徑一與路徑二兩條路徑並不會重合，而路徑一與路徑二所形成封閉的曲線就稱為遲滯曲線(hysteresis loop) ，如圖 1-4 所示。遲滯曲線可以看作是非線性系統的一種特徵，藉由分析遲滯曲線之特徵可以得知系統的特性，藉由系統的特性則可以

建立非線性系統的遲滯現象及相關數學模型，並可藉由系統識別來求解遲滯模型的未知參數。

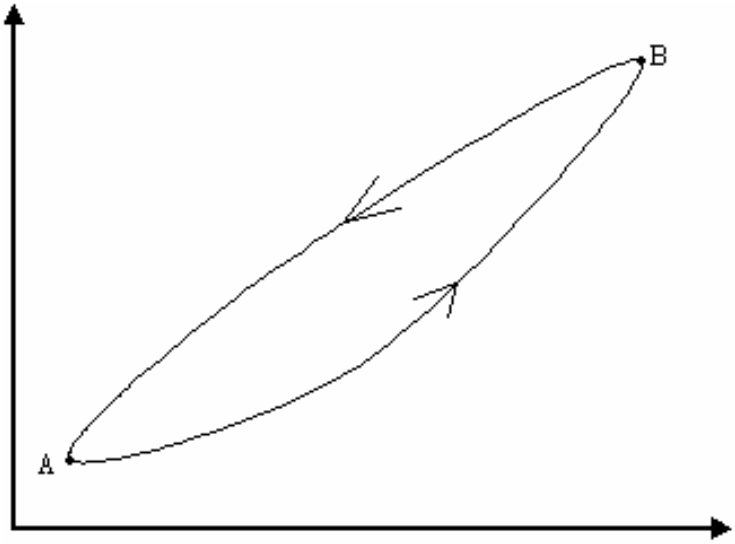


圖 1-4 遲滯曲線

1.2 文獻回顧

人工肌肉氣壓缸在充氣與排氣的過程中會發生遲滯現象的，但因人工肌肉氣壓缸具有高效能比，因此有許多人工肌肉氣壓缸的研究，都放在建立人工肌肉氣壓缸的遲滯曲線模型。

1.2.1 人工肌肉氣壓缸的構造與遲滯現象

人工肌肉氣壓缸是由外層的網狀編織結構與內部的橡皮軟管所組成，而網狀編織結構間的相互摩擦與網狀編織結構與橡皮軟管的摩擦是發生遲滯現象的原因[4,5]，如圖 1-5 與圖 1-6 所示。

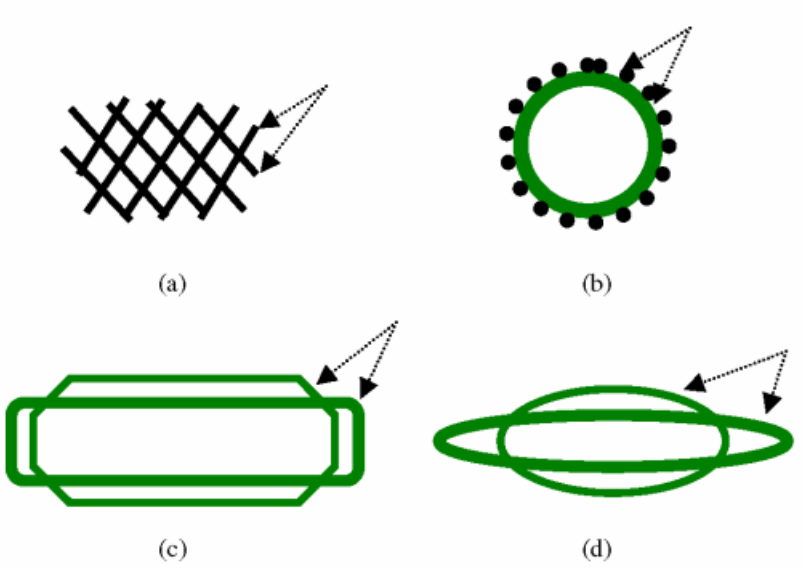


圖 1-5 橡皮軟管與網狀編織結構 [4]

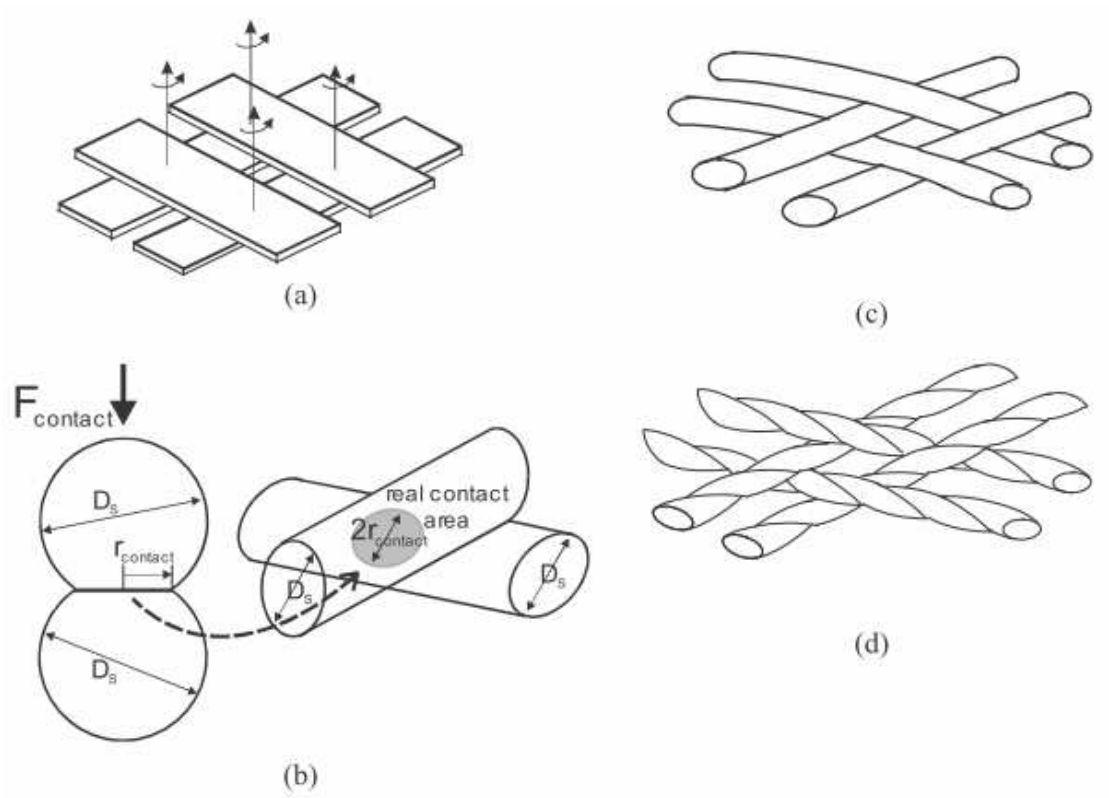


圖 1-6 網狀編織結構 [5]

1.2.2 摩擦模型

關於摩擦模型方面，在 Bertrand Tondu[5]所著的文獻中就使用了馬克斯威爾滑動摩擦模(Maxwell-Slip Model)建立人工肌肉氣壓缸遲滯曲線之模型，而於李傑仁先生[6]的論文中有關於馬克斯威爾滑動摩擦模型相關的介紹與評論。Canudas de Wit,Olsson,htrom,Lischinsky 等人於 1995 提出了一種用於系統控制的摩擦模型，稱為 LuGre Friction Model[7,8][10]。LuGre 摩擦模型結合 Dahl Model[8,9]與摩擦力的 Stribeck 效應，建構出一個具有完整描述任何狀態下的摩擦力行為與遲滯效應的摩擦模型。本研究使用 LuGre 摩擦模型為[7,8][10]為人工肌肉氣壓缸的摩擦模型。

1.2.3 系統識別

本文的主要目標之一為使用摩擦模型與參數最佳化法完成人工肌肉氣壓缸之系統識別，Zhang Wenjing 於文獻[11]中將粒子群演算法(Particle Swarm Optimization Algorithm ,PSO)搭配 LuGre Friction Model[4]使用，粒子群優化演算法的步驟簡單，只需要簡單的數學運算，並且可以用少量的程式碼就能在電腦上實作，由於粒子群演算法(PSO) [12]運算成本的低廉並且採用了社會行為的模型，許多實際的應用都有使用這個演算法為工具。本研究使用粒子群演算法(PSO)為分析與處裡的工具。

1.3 研究目的

本研究的目的，首先是建立人工肌肉氣壓缸的數學模型，並以 LuGre 摩擦模型作為人工肌肉氣壓缸的摩擦模型，再以粒子優化演算法(Particle Swarm Optimization Algorithm ,PSO)進行系統識別，進而完成人工肌肉氣壓缸的系統識別，以達到控制的目的。其中實驗訊號量測與實驗控制訊號是利用韌體的撰寫與設計再配合可程式化系統單晶片(PSoC)內電子元件的配置，以獲得相關輸出入類比/數位訊號。

第二章 人工肌肉氣壓缸之系統識別

2.1 人工肌肉缸致動平台

2.1.1 實驗平台

本研究的實驗系統由實驗平台與負載所組成，實驗平台之簡圖如圖 2-1 所示，圖 2-1(a)為人工肌肉氣壓缸未充氣前之系統模型，圖 2-1 右圖(b)為人工肌肉氣壓缸充氣後之系統模型，此時人工肌肉氣壓缸產生軸向拉力將負載向上提拉，其運動的數學表示式可以式(1)表示，而式(1)可改寫為式(2) ，因為式(2)的右式皆為已知的數值，如此即可找出左式摩擦力 F_f 的數值。

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = F - mg - F_f \tag{1}$$

$$F_f = F - mg - ma \tag{2}$$

圖 2-1 中 x 為負載的位移量;m 為負載的質量(mass);g 為重力(gravity); a 為加速度(acceleration); F 為人工肌肉氣壓缸輸出力之(force) ;F_f 為人工肌肉氣壓缸之摩擦力(friction)。

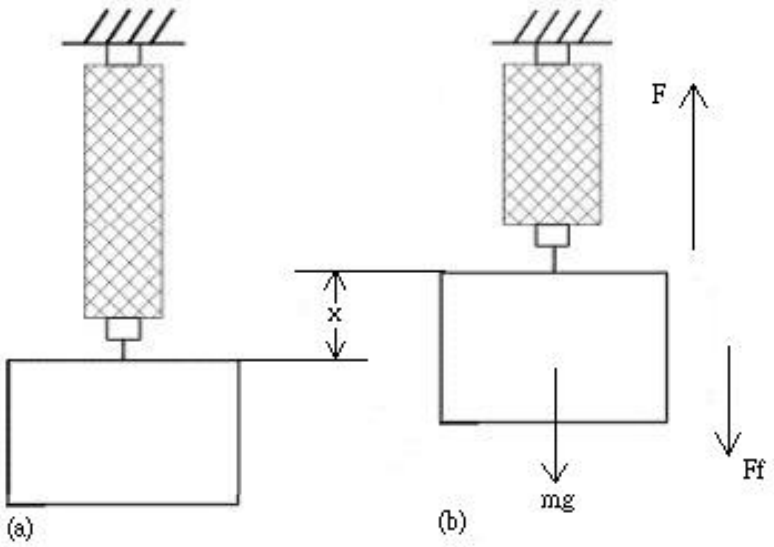


圖 2-1 實驗平台簡圖

2.1.2 人工肌肉氣壓缸輸出力之數學模型

本研究藉由兩種不同的感測裝置，比例壓力閥內部壓力感測器與雷射位移感測器，測量人工肌肉氣壓缸在充放氣時的內部的氣壓變化和人工肌肉氣壓缸的長度變化，因為人工肌肉氣壓缸的長度變化與內部壓力相關，所以由壓力與長度的變化可以得知人工肌肉氣壓缸的輸出力的大小。目前人工肌肉氣壓缸較廣泛使用的理想數學模型，是以 Ching-Ping Chou 等所提出的人工肌肉氣壓缸輸出力之數學模型，如式(3)所示[1][13]，其中 A 與 B 為自訂之變數。

$$F = \Delta P[A(1-\varepsilon)^2 - B] \qquad \varepsilon = \frac{L_0 - L}{L_0} \text{、} A = \frac{3\pi D_o^{\ 2}}{4\tan^2\theta_0} \text{、} B = \frac{\pi D_o^{\ 2}}{4\tan^2\theta_0} \qquad (3)$$

以下為式(3)相關參數的說明:

F:人工肌肉氣壓缸的輸出力

$\triangle P$:人工肌肉氣壓缸內部的絕對壓力與外部的大氣壓力之差

ε: 人工肌肉氣壓缸的收縮率

L_0:人工肌肉氣壓缸的初始長度

L:人工肌肉氣壓缸脹縮時的瞬間長度

D_0:人工肌肉氣壓缸的初始直徑

θ_0:人工肌肉氣壓缸編織網的初始角度

2.2 LuGre 摩擦模型

LuGre 摩擦模型(LuGre Friction Model)[7,8][10]是由 Canudas de Wit 於 1995 所提出，Canudas de Wit 結合了 Dahl 模型[8,9]與摩擦力的 Stribeck 效應，將兩個接觸面的摩擦視為是兩組刺毛之間的接觸，並將刺毛的形變量定義為狀態變數 z，由 Dahl 模型[9]得狀態變數 $z=\frac{F}{\sigma_0}$，而為了簡化刺毛之間的相對運動，於是就將下層的刺毛視為是剛體，如圖 2-2、圖 2-3 與圖 2-4 所示。圖 2-2 所示為靜止狀態，此時的速度為 0; 圖 2-3 所示為黏滯狀態，此時的速度為 0; 圖 2-4 所示為滑動狀態，此時的速度大於 0。

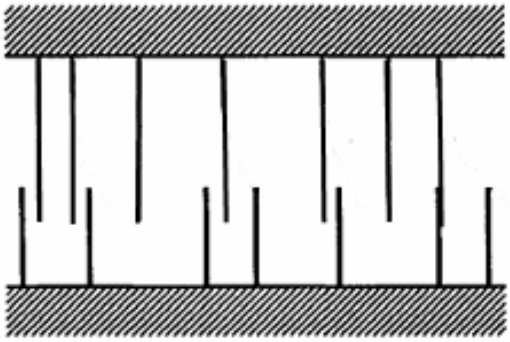


圖 2-2 刺毛為靜止狀態，速度為 0

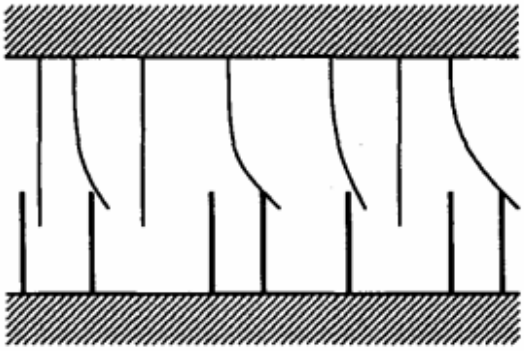


圖 2-3 刺毛為黏滯狀態，速度為 0

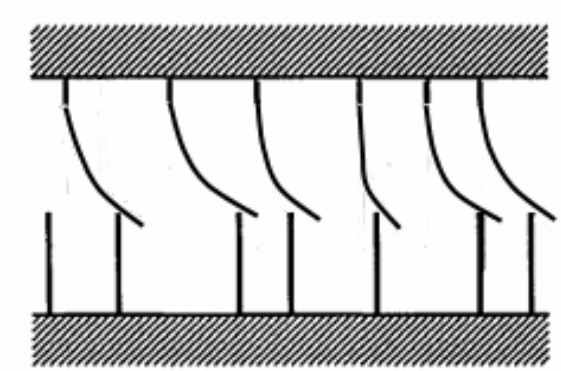


圖 2-4 刺毛為滑動狀態，速度大於 0

LuGre 摩擦模型可以描述在所有狀態下的摩擦力行為，可分為穩態情況下的摩擦力與動態情況下的摩擦力，其中穩態指的是速度固定下的狀態，動態則是指速度會改變的狀態。

LuGre 摩擦模型的數學方程式:

$$F_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \tag{4}$$

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{|v|}{g(v)} z \tag{5}$$

式(4)與式(5)為描述在動態情況下的摩擦力行為，其中 v 代表兩個接觸面的相對速度; σ_0 代表的是刺毛的剛性; σ_1 代表的是刺毛的阻尼係數; σ_2 代表的是刺毛的黏滯阻尼係數;g(v)是一個與速度相關的函數，Canudas de Wit 假設 g(v)的數值恆為正值且為有界，可以描述在定速下的摩擦力行為[14]，而 g(v)較為常見的表示式如式(6)所示，

$$\sigma_0 g(v) = F_c + (F_s - F_c) e^{(-(v/v_s)^2)} \tag{6}$$

其中 F_c 為庫倫摩擦力(Coulomb friction);F_s 為最大靜摩擦力(static friction);V_s 為 Stribeck 速度。

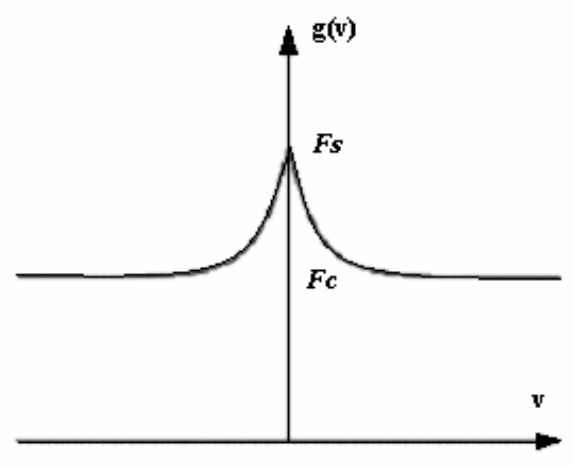


圖 2-5　g(v)模擬 F_s 與 F_c 對速度的關係 [8]

(6)式是模擬摩擦力的 Stribeck 效應，也就是 g(v)可以模擬 F_s 與 F_c 對速度的關係，如圖 2-5 所示，令 $\frac{dz}{dt}=0$ 可從式(5)得到式(7)，

$$z_{SS}=g(v)\mathrm{sgn}(v) \tag{7}$$

z_{SS} 為 z 在為穩態下的值，此時式(4)可簡化為式(8)，

$$F_f=\sigma_0 z_{ss}+\sigma_2 v \tag{8}$$

合併式(7)與式(8)可得到

$$F_{ss}(v)=\sigma_0 z_{ss}+\sigma_2 v \tag{9}$$

將式(6)帶入式(9)可得到穩態下的摩擦力。

$$F_{ss}(v)=[F_c+(F_s-F_c)e^{(-(v/v_s)^2)}]\mathrm{sgn}(v)+\sigma_2 v \tag{10}$$

式(10)可以描述 Stribeck 曲線在速度等於 0 與速度大於 0 的行為，其中 F_S 為最大靜摩擦力，F_C 為庫倫摩擦力，如圖 2-6 所示。

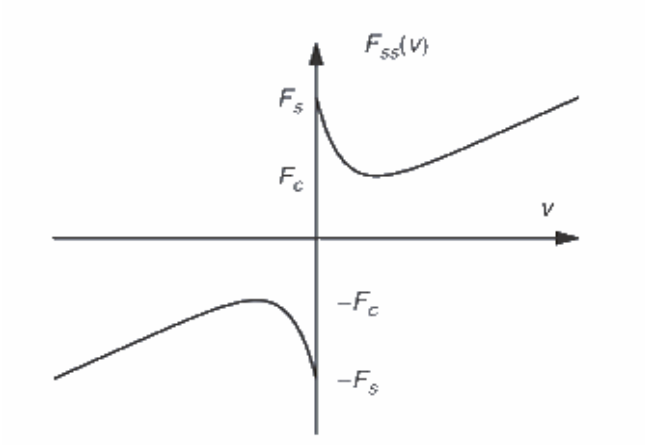


圖 2-6 Stribeck 曲線［8］

本研究要使用 LugGre 摩擦模型作為系統的模型，並且由實驗求出 F_C、F_S、V_S、σ_0、σ_1 與 σ_2 等參數以達到系統識別的目的，參考[11]將以上六個摩擦參數分為穩態參數與動態參數以進行後續章節的分析。

2.2.1 LuGre 摩擦模型之穩態參數

穩態的 LuGre 摩擦模型[7,8]參數可由式(10)及圖 2-6 的 Stribeck 曲線所得，式(10)的待定參數分別為 F_C, F_S, V_S 與 σ_2 等四個穩態的 LugGre 摩擦參數。以速度 v 區分，可將四個穩態的參數分為速度 v 大於 0 的四個參數與速度 v 小於 0 的四個參數等共八個參數。而八個參數分別為 F_C^+, F_S^+, V_S^+, σ_2^+、F_C^-, F_S^-, V_S^-與 σ_2^-，如表 2-1 所示。

表 2-1 穩態的 LugGre 摩擦模型參數

v>0	F_C^+, F_S^+, V_S^+, σ_2^+
V<0	F_C^-, F_S^-, V_S^-, σ_2^-

2.2.2 LuGre 摩擦模型之動態參數

LuGre 摩擦模型在動態情況下可以將黏滯係數項 σ_2 忽略，則式(4)可以修改為：

$$F_{dynamic} = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} \tag{11}$$

其中式(11)的待定參數分別為 σ_0 與 σ_1，而此兩個參數即為動態的 LuGre 摩擦模型參數。

2.3 LuGre 摩擦參數識別

人工肌肉氣壓缸與負載所構成之系統的運動方程式，如式(2)，其中質量 m 與重力 g 的數值皆為已知，加速度 a 與力量 F 也可由實驗求得，所以唯一的未知數為摩擦力 F_f。摩擦力 F_f 分為穩態摩擦力與動態摩擦力，於 LuGre 摩擦模型(LuGre Friction Model)[7,8]中，穩態摩擦力與動態摩擦力有不同的數學模型，如式(10)與式(11)所示。經由實驗數值計算得到的摩擦力的 F_f 數值代入式(10)與式(11)中，

$$F_f = F_{dynamic} = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} \tag{12}$$

$$F_f = F_{SS}(v) = [F_C + (F_S - F_C)e^{(-(v/v_S)^2)}]\mathrm{sgn}(v) + \sigma_2 v \tag{13}$$

其中式(12)為動態摩擦模型，式(13)為穩態摩擦模型。

定義誤差函數為：

$$E = \Sigma e = \Sigma \left| ma - F + mg + F_f \right| \tag{14}$$

當誤差 E→0 時代表 Ff 的數值為最佳，而以 LuGre 摩擦模型進行參數識別即是要求解誤差函數值為最小時之 LuGre 摩擦模型參數。

本文將以粒子群優化演算法尋找最佳的 LuGre 摩擦模型參數 F_C、F_S、V_S、σ_0、σ_1 與 σ_2，可分為兩個步驟進行。第一個步驟將 LuGre 摩擦模型分類為動態摩擦模型及穩態摩擦模型，並撰寫動態摩擦模型適應函數如式(15)，穩態摩擦模型適應函數如式(16)，之後將式(15)與式(16)分別代入已編寫好的粒子優化演算法(PSO)的電腦程式中作計算，運作方式如圖 2-7 所示。粒子群優化演算法(PSO)的程式一開始將粒子數目、設定適應函數之變數數目與加權權重等相關條件，將初始位置帶入適應函式中進行運算，經由迭代運算與評估粒子的適應度及判斷是否需更改位置與速度以求得最佳解，如圖 2-8 所示。

$$E1 = \Sigma e = \Sigma \left| F - ma - mg - \sigma_0 z - \sigma_1 \dot{z} \right| \tag{15}$$

$$E2 = \Sigma e = \Sigma \left| F - ma - mg - [F_C + (F_S - F_C) e^{-(\frac{V}{V_s})^2}] \right| \mathrm{sgn}(v) + \sigma_2 v \tag{16}$$

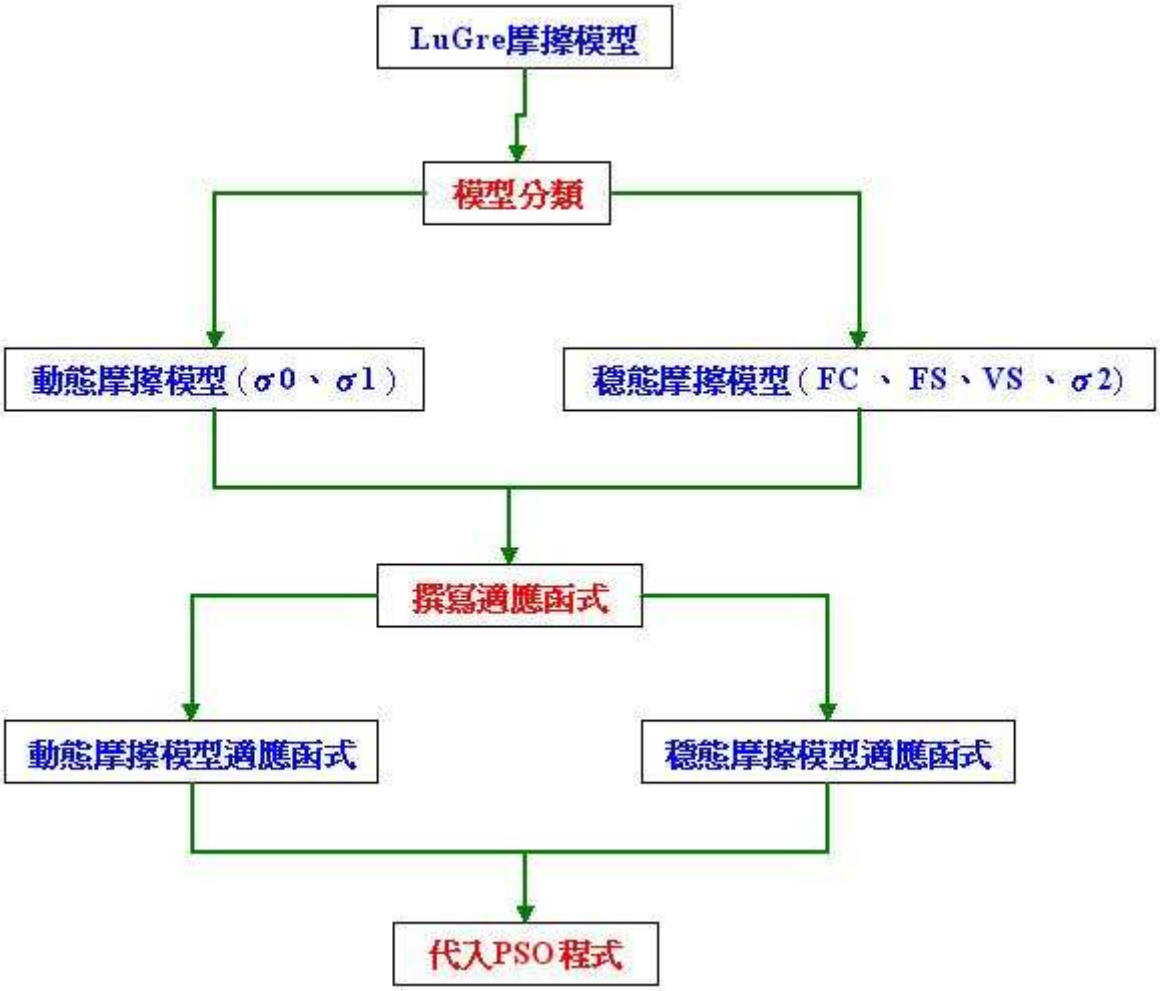


圖 2-7 前置作業流程圖

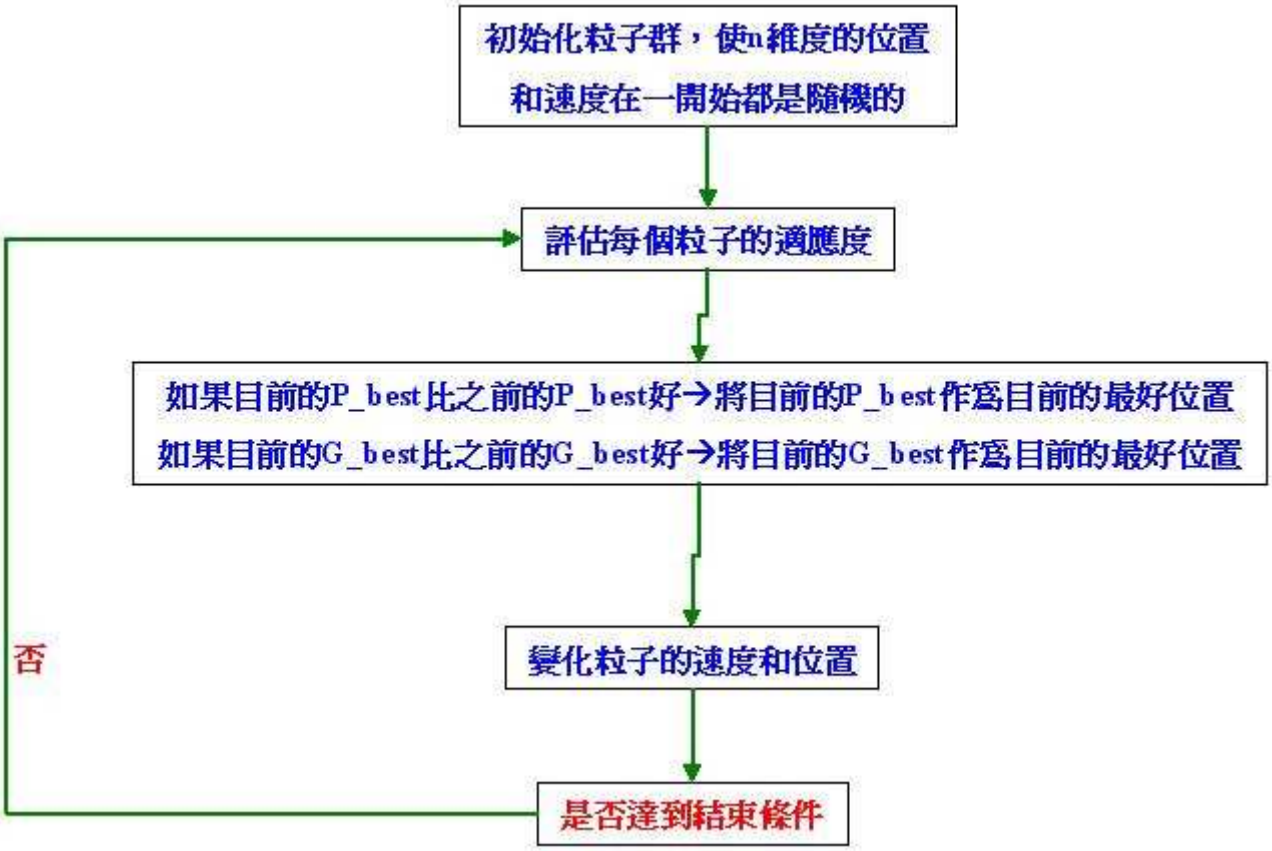


圖 2-8 粒子優化演算法(PSO)運作流程圖

2.4 粒子群優化演算法(Particle Swarm Optimization Algorithm ,PSO)

為求解式(14)之最佳化問題，本研究以粒子群優化演算法來求解 LuGre 摩擦模型[7, 8]之未知摩擦參數。

粒子群優化演算法(PSO)[12]是 Kennedy 和 Eberhart 於 1995 年時提出[12][15]，屬於尋優式演算法，粒子群優化演算法(PSO)的概念源自群體行為理論，啟發自觀察鳥群或魚群行動時，能透過個體間特別的訊息傳遞方式，使整個團體朝同一方向、目標而去，是模仿此類生物行為反應來尋求完成群體最大利益的方法。粒子群優化演算法(PSO)[12]的執行原理是將大量的搜尋解當成一個仿生物的族群來操作，並在一開始使用亂數來初始整個族群，粒子在移動時會往個體最佳經驗的方向與群體最佳經驗的方向來改變位置，而在安排粒子決定的移動方向須乘上一個隨機的值，讓粒子的移動方向不會只侷限在單一方向，以避免只會找到某個區域的最佳解。粒子群優化演算法(PSO)[12]只需要簡單的數學運算，並且可以用少量的程式碼就能在電腦上實作，由於粒子群優化演算法(PSO)[12]運算成本的低廉並且採用了社會行為的模型，許多實際的應用都有使用這個演算法為工具。

粒子群優化演算法(PSO)[12]的數學模型可寫為以下的式(17)與式(18) ，其中 W 代表的是權重值;V_{id} 代表第 i 個粒子目前在第 d 維度的速度; X_{id} 代表第 i 個粒子目前在第 d 維度裡之數值;rand( )代表一個介於 0 與 1 之間的隨機亂數; C_1 代表的是區域解的相關係數，是一個常數值; C_2 代表的是全域解的相關係數，是一個常數值;Pbest_X_{id} 代表的是第 i 個粒子曾找到的最佳值中在第 d 維度的數值; Gbest_X_d 代表的是全域中最佳解中在第 d 維度之數值。

$$V_{id} = W * V_{id} + C_1 * rand() * (Pbest_X_{id} - X_{id}) + C_2 * rand() * (Gbest_X_d - X_{id}) \quad (17)$$

$$X_{id} = X_{id} + V_{id} \quad (18)$$

粒子群優化演算法(PSO)的流程如下：

1. 初始化一群粒子，使 n 維度的位置和速度在一開始都是隨機的。
2. 評估每個粒子的適應度。
3. 將每個粒子的適應值和每個粒子所到過的最好位置 P_best 作比較，如果目前的 P_best 比之前的 P_best 好，則將目前的 P_best 作為目前的最好位置;將每個粒子的適應值和全部粒子所到過最好的位置 G_best 作比較，如果目前的 G_best 比之前的 G_best 好，則重新設置 G_best。
4. 依照式(17)與式(18)變化粒子的速度和位置。
5. 如未達到結束條件，則回到步驟 2。

第三章 人工肌肉缸之實驗平台

3.1 實驗平台設計

本實驗的實驗平台是由人工肌肉氣壓缸、雷射位移感測器、比例壓力閥與 PSoC 控制板所組成，如圖 3-1 所示，讓實驗平台直立的目的是使人工肌肉氣壓缸在作動的時候減少其他誤差干擾。

圖 3-1 實驗平台

3.1.1 人工肌肉氣壓缸(Pneumatic Artificial Muscle)

本研究使用的人工肌肉氣壓缸(Pneumatic Artificial Muscle)是由德國的 Festo 公司所生產，如圖 3-2 所示。圖 3-3 是人工肌肉氣壓缸的規格表，本研究使用的人工肌肉氣壓缸的內徑為 20mm，在沒有通入氣體時的初始長度為 300mm，可以承受的壓力為 6bar。

圖 3-2 人工肌肉氣壓缸(Pneumatic Artificial Muscle)

表 3-1 人工肌肉氣壓缸之規格[3]

General technical data				
Size		10	20	40
Pneumatic connection		➔ Adapter MXAD-... from page 30		
Design		Contraction diaphragm		
Mode of operation		Single-acting, pulling		
Internal dia.	[mm]	10	20	40
Nominal length	[mm]	40 ... 9000	60 ... 9000	120 ... 9000
Max. additional load, freely suspended	[kg]	30	80	250
Max. permissible pretensionsing[1)]	Without force compensator	3% of nominal length	4% of nominal length	5% of nominal length
	With force compensator	3% of nominal length	3% of nominal length	3% of nominal length
Max. permissible contraction		25% of nominal length		
Max. hysteresis		≤ 3% of nominal length	≤ 2.5% of nominal length	
Max. relaxation		≤ 4% of nominal length		≤ 3% of nominal length
Repetition accuracy		≤ 1% of nominal length		
Type of mounting		With accessories		
Assembly position		Any (an external guide is required if lateral forces occur)		

3.1.2 脈衝寬度調變(Pulse width modulation,PWM)[16][17]

為了使機器達成所指定的動作，就需要對要控制的系統下達控制訊號，一般而言訊號可以分為類比訊號(analog signal)與數位訊號(digital signal)兩種。類比信號的值可以連續變化，在理想的情況下類比信號的時間和幅度的解析度都沒有限制，具有無窮大的解析度，與數位訊號相比，類比訊號的訊息密度更高。雖然使用類比訊號進行控制的原理簡單易懂，但是類比訊號的抗雜訊能力薄弱，且成本比較昂貴，不過隨著技術的進步與電腦的普及，使用數位訊號進行控制除了可降低成本，最重要的是數位訊號不易被雜訊所干擾，所以目前的研究也都以數位訊號作為控制訊號。

許多的單晶片微控制器都內建有脈衝寬度調變(Pulse-Width Modulation, PWM)[16]的功能，本研究將使用可程式化系統單晶片中的 PWM 元件控制比例壓力閥的充放氣的動作，脈衝寬度調變(Pulse-Width Modulation, PWM)是由脈波寬度的長短來呈現訊號強弱的一種概念，其運作原理是以脈衝波(pulse)作為載波，之後使用脈衝波對類比訊號進行掃描，並透過比較器將脈衝波與被調變訊號的波形相減，把被調變訊號的波形小於脈衝波則將其值設定為零，把被調變訊號的波形大於脈衝波則將其值設定為一，如此即可將類比訊號轉換為脈波，如圖 3-3[16]所示，上圖的鋸齒狀曲線代表三角脈衝波，上圖的正弦波曲線代表被調變訊號，下圖的曲線代表脈衝寬度調變(PWM)訊號。須要注意的是載波的頻率高低不可小於被調變訊號的頻率，載波的頻率越高失真的程度也會越小，此外載波的振幅同樣的也不可小於被調變訊號的振幅。

脈衝寬度調變(Pulse-Width Modulation, PWM)也可以如下數學式表達，

$$\bar{y} = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)dt \tag{19}$$

$$f(t) = y_{\max}, 0 < t < D \cdot T \text{ 、 } f(t) = y_{\min}, D \cdot T < t < T \tag{20}$$

將式(20)代入式(19)可得

$$\bar{y}=\frac{1}{T}\left(\int_{0}^{D\cdot T} y_{\max}dt+\int_{D\cdot T}^{T} y_{\min}dt\right)=\frac{D\cdot T\cdot y_{\max}+T\cdot(1-D)\cdot y_{\min}}{T}$$
$$=D\cdot y_{\max}+(1-D)\cdot y_{\min} \tag{21}$$

設 $y_{min}=0$ 代入式(21)，則可得

$$\bar{y}=D\cdot y_{\max} \tag{22}$$

其中 f(t)為脈衝波、y_{min} 為脈衝波的最小值、y_{max} 為脈衝波的最大值、$\bar{y}$ 為脈衝波的平均值、T 為脈衝波的週期、D 代表工作週期(Duty Cycle) ，結果如圖 3-4 所示[16]。

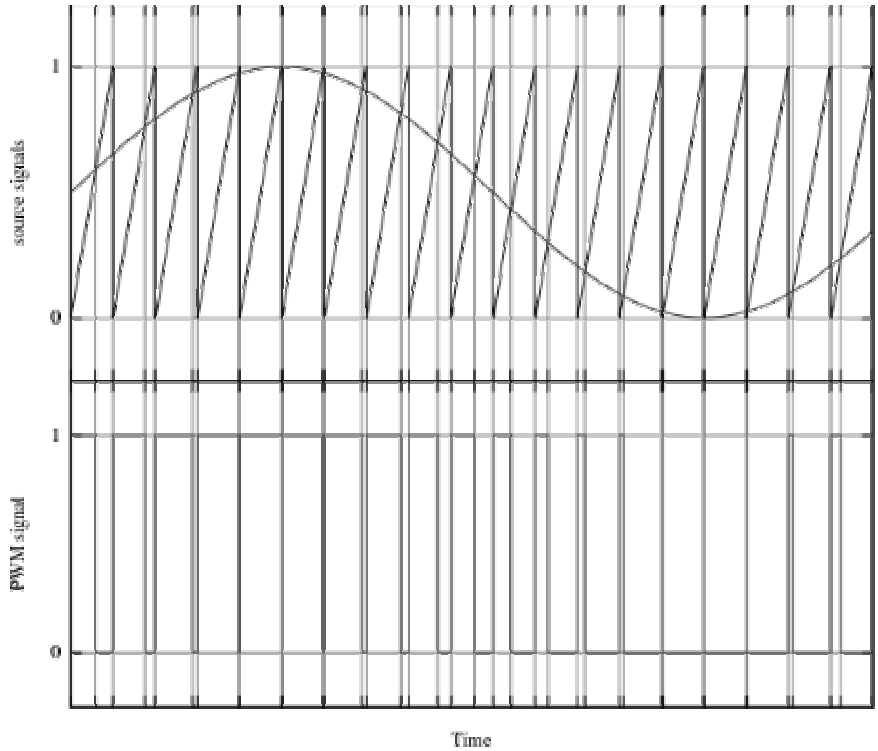


圖 3-3 將被調變之類比訊號轉變為 PWM 脈衝波 [16]

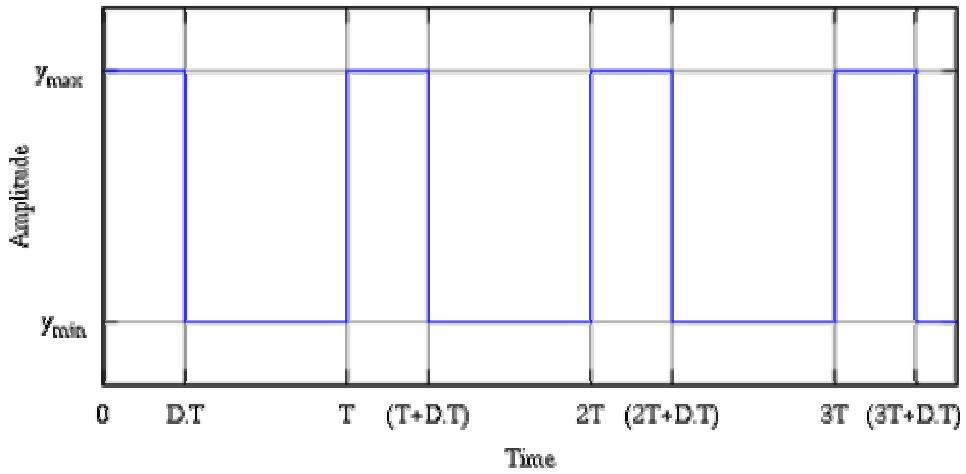


圖 3-4 PWM 脈衝波 [16]

經轉換過後的脈波的週期與原本的類比訊號是一樣的，不過脈波的工作週期則是要根據類比訊號的強弱而定，而工作週期指的是在一段連續工作時間內脈衝佔用的時間與總時間的比值，如下式(23)所示

$$P_D = P_W \div P_T \times 100\% \tag{23}$$

其中 P_D 代表的是脈波的工作週期、P_W 代表的是脈波的寬度、P_T 代表的是脈波的週期，工作週期的比值越大代表脈衝的密度越密集，訊號的強度也越強，如圖 3-5[17]所示。圖 3-5 顯示了三種不同的 PWM 信號，圖 3-5 之(a) 是一個工作週期為 10%的 PWM 輸出，圖 3-5 之(b)是一個工作週期為 50%的 PWM 輸出，圖 3-5 之(c)是一個工作週期為 90%的 PWM 輸出，以本研究所使用的比例壓力閥的電壓輸出 10v 為例，圖 3-5 之(a)、(b)與(c)分別代表 1.0v、5.0v 與 9.0v 的電壓輸出。

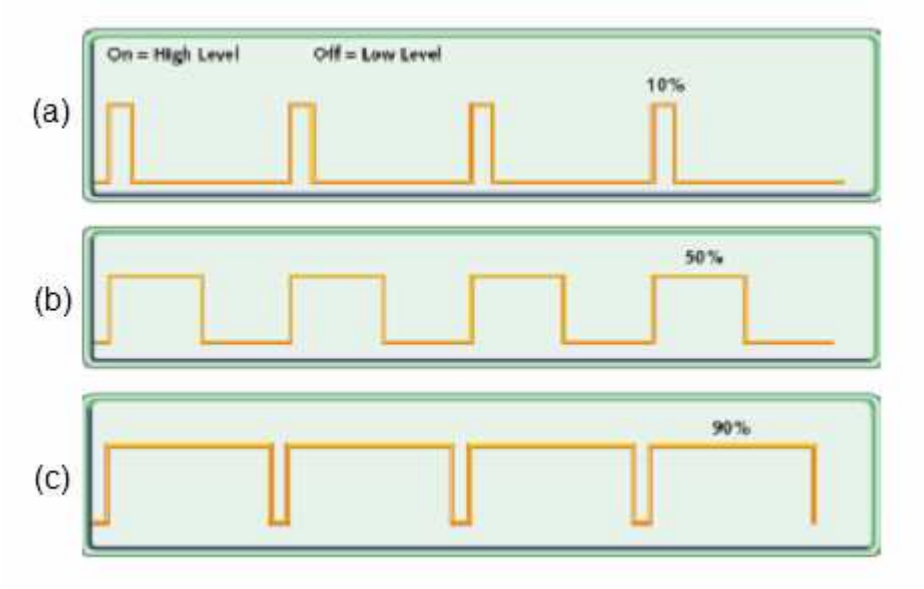


圖 3-5 三種不同工作週期的 PWM 訊號 [17]

3.1.3 比例壓力閥

本研究使用的比例壓力閥是由德國的 Festo 公司所生產，如圖 3-6 所示。比例壓力閥可以隨著輸入不同的 PWM 脈衝寬度調變電壓調整輸出的壓力，並藉此控制人工肌肉氣壓缸的充氣與放氣的狀態，當輸入最大電壓為 10v 時，輸出的最大壓力為 6bar。

圖 3-6 比例壓力閥

3.1.4 雷射位移感測器

本研究使用的雷射位移感測器是由日本的 KEYENCE 公司所生產的 IL300 雷射發射接收裝置如圖 3-7 所示，及 IL1000 放大器模組如圖 3-8 所示。放大器模組可以即時讀取目前量測數據，並進行功能調整與設定。雷射發射接收裝置的最小量測距離為 160mm，量測的範圍為 160mm 至 450mm，精度可達 30 μm。

圖 3-7 雷射位移感測器放大器模組

圖 3-8 雷射發射接收裝置

3.1.5 PSoC CY8C29466-24PXI 晶片與 CY3210 開發板

本研究使用的可程式化系統單晶片(PSoC) [18]與開發板是由美國的 Cypress 公司所出產，如圖 3-9 所示及圖 3-10 所示，分別為 CY8C29466-24PXI 晶片與 CY3210 開發板。CY8C29466-24PXI 晶片有三個 Port 分別為 Port0、Port1 與 Port2 ，加上 3 個 Power 接腳與 1 個重置接腳，共有 28 隻 PIN 腳。Port0~Port2 的 24 隻 PIN 腳皆可做為數位輸入/輸出，而 Port0 及 Port2_0~Port2_3 共 12 隻 PIN 腳皆可作為類比輸入，Port0_0~Port0_3 等 4 隻 PIN 腳則可作為類比輸出。CY3210 開發板上的 IC 座上可以插上 CY8C29466-24PXI 晶片與 CY8C27443-24PXI 晶片，還有可以進行實驗的麵包版、LCD 與 RS232 傳輸接頭等等的配備。

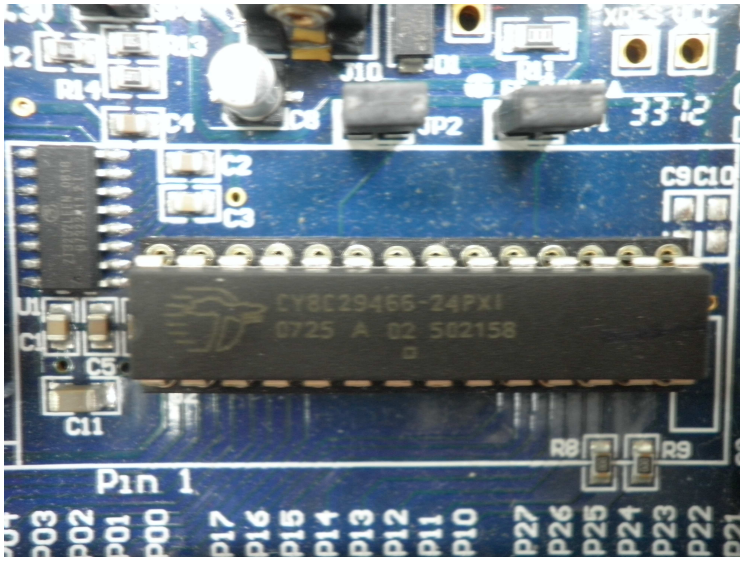


圖 3-9 CY8C29466-24PXI 晶片

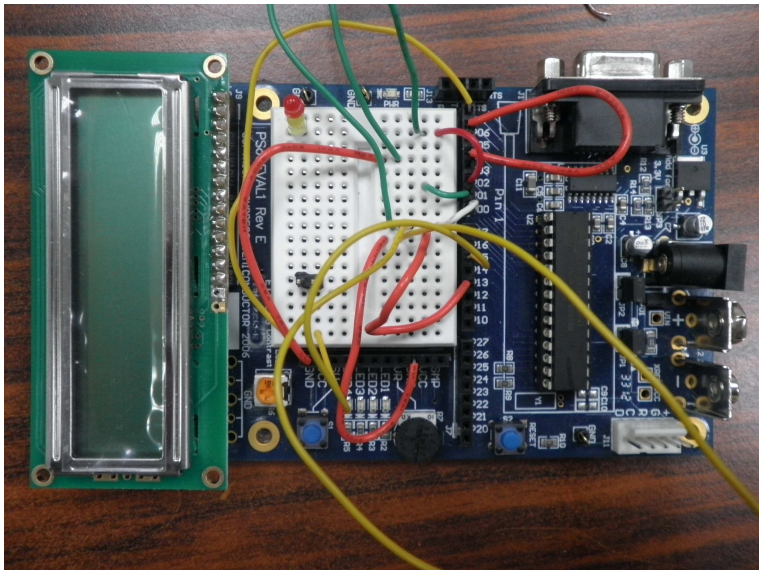


圖 3-10 CY3210 開發板

3.2 可程式化系統單晶片(PSoC) [18]

隨者科技的進步，單晶片的功能已變的越來越強大，傳統的微控制器(Microcontroller Unit ,MCU)如果想要完成不同的功能可能就要重新更改電路配置並更換或添加 IC，不但開發的時間會增加也會使研究的成本變高。Cypress 公司生產可程式化系統單晶片(PSoC) [18]已於晶片內部內建許多實用的電子元件並且可自由配置電路與更換電子元件，還有可撰寫韌體的圖形化的使用者介面(Graphic User Interface, GUI)如圖 3.11，使得開發的時間可以減少，而且便利性也提高不少。市面上的資料擷取卡通常都所費不貲，如果可以使用較為便宜的單晶片達到接近資料擷取卡的功能，除了可以降低研究的所需的花費，對於作為裝配人工肌肉氣壓缸之裝置的控制器應該也有相當的潛力。

可程式化系統單晶片(PSoC) [18]內建的電子元件模組有 16 位元的脈衝寬度調變模組 PWM16、三組 12 位元的類比/數位轉換模組 ADCINC12、一組 UART 傳輸模組、三組 16 位元的計數器模組 Counter16、四組可程式調變增益放大器模組 PGA、及 LP F 低通濾波器模組與顯示用的 LCD 模組一組。

可程式化系統單晶片(PSoC) [18]提供了兩種撰寫程式程式語言的方式[19]，一為組合語言，一為 C 語言，本研究以 C 語言進行韌體程式撰寫，韌體程式撰寫介面如圖 3-11 所示。雖然以在進行編譯的時間上而言組合語言會比較快，但是以現在電腦的速度而言，時間的差距很小，而且 C 語言的可讀性也比組合語言來的要好。除了撰寫程式的介面，可程式化系統單晶片(PSoC)也提供可自行進行電路配置的介面，如圖 3-12 所示，圖 3-13 為晶片的電路佈線圖，圖 3-14 為晶片內建電子元件。

首先宣告七個全域變數，其中五個是未設定數值的正整數變數，是用來儲存類比/數位轉換模組與計數器模組的數值;另一個數值設定為 1920 的變數是給 Counter16 用以計算實驗的時間之用，由於用來提供時間的 Counter16 的時脈已設定為 2HZ，所以整體實驗所需的時間為 960 秒，也就是 16 分鐘;最後一個全域變數為字元陣列，用來提供輸出數字的索引值，使輸出的數字能顯示數字。

第二步驟將要設計幾個副程式，使主程式看起來可以簡潔一點，並且便於之後程式的修改與維護，這些副程式的功用在於啟動元件與顯示及類比/數位轉換模組的讀取與轉換數據之用。接著就會進入主程式中，主程式裡面的程式的功能分別為讀取感測器訊號、提供電壓給比例壓力閥、顯示數據於 LCD 與傳輸數據給電腦，讀取感測器訊號的是三組類比/數位轉換模組 ADCINC12;提供電壓給比例壓力閥的是脈衝寬度調變模組 PWM16，而兩個 for 迴圈則是輸出三角波電壓訊號之用;顯示數據於 LCD 使用的是 LCD 模組與顯示用的副程式;傳輸數據使用的是 UART 傳輸模組，輸出給電腦的數據是 16 進位的數據，還有之後在 GUI 介面分離資料會用到的分離字元。

以上就是整體程式的架構與說明，詳細的細節可參考以下的 PSoC 之程式流程圖，如圖 3-15 所示，以及附錄一的程式碼。

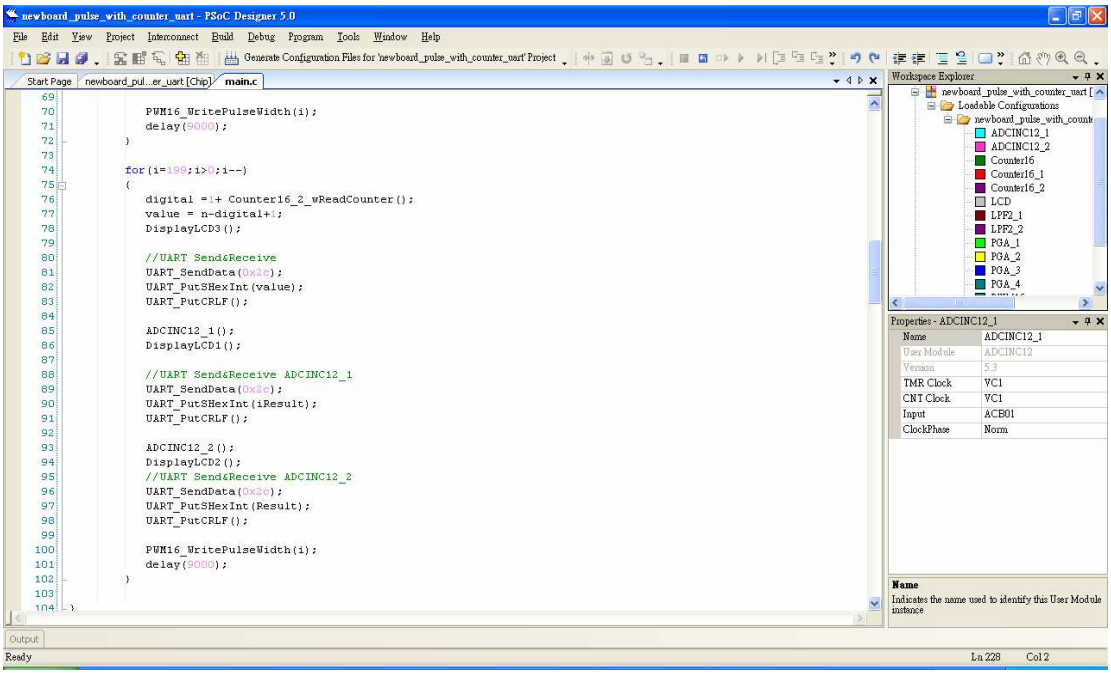


圖 3-11 PSoC Designer 程式撰寫介面

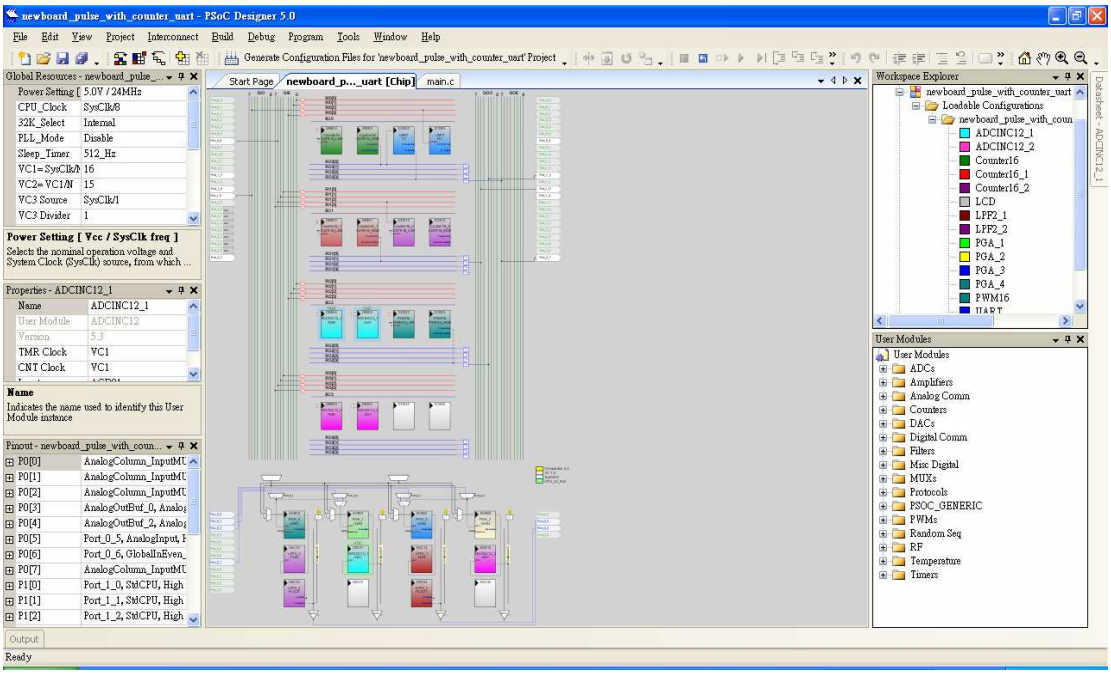


圖 3-12 PSoC Designer 電路配置介面

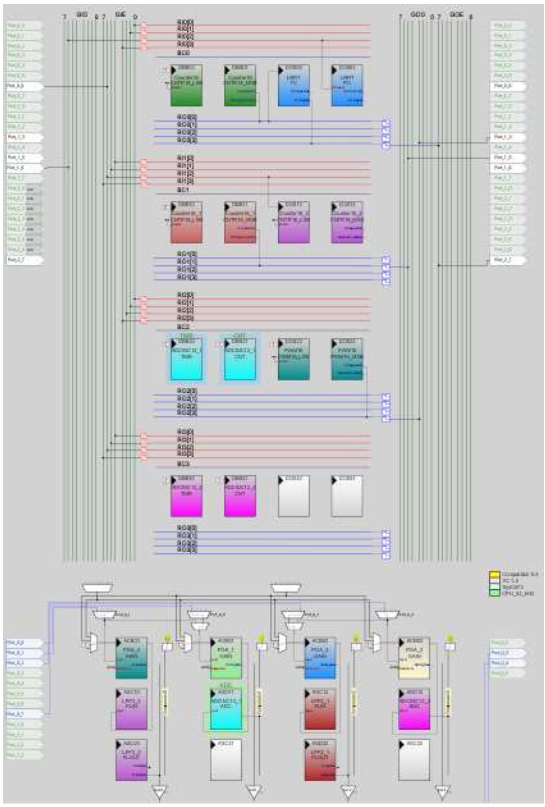


圖 3-13 晶片佈線圖

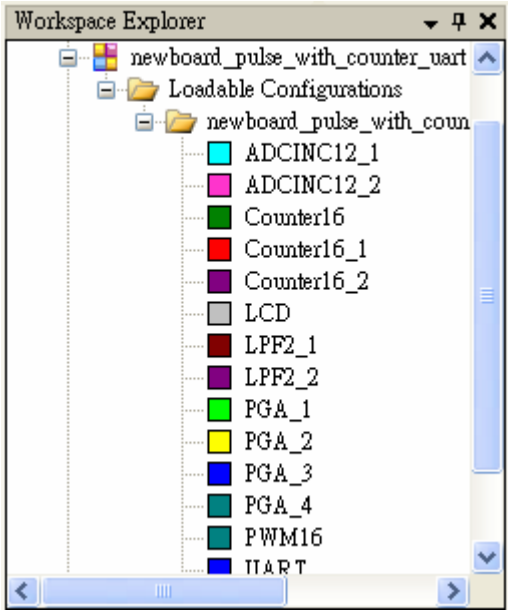


圖 3-14 內建電子元件

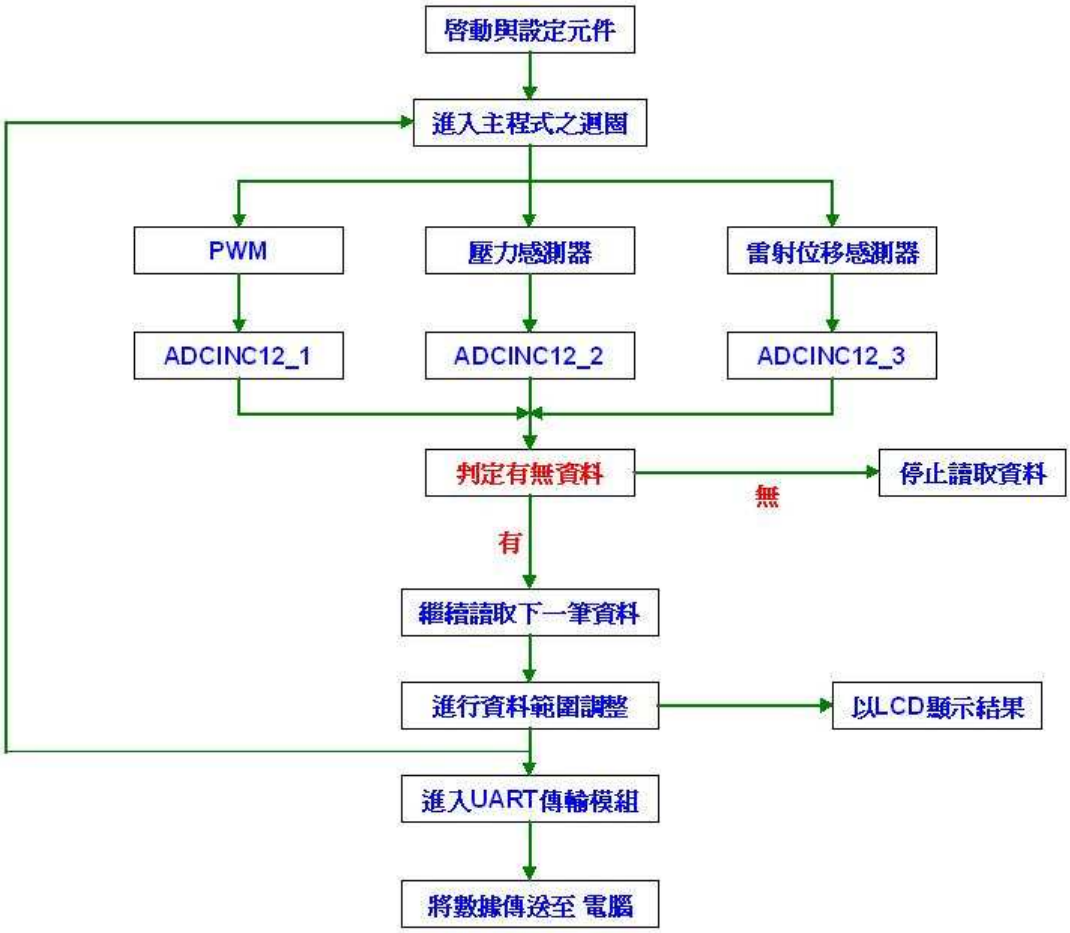


圖 3-15 PSoC 之程式流程圖

3.3 圖形使用者介面(GUI)設計

人機介面(GUI)意指機器與人溝通的介面，目前可以用來設計人機介面而較為學校使用的有 Matlab、LabView 與 Visual Basic，本研究使用 Visual Basic 2010 做為設計系統在電腦端的人機介面 GUI 的工具。

本研究所設計的人機介面 GUI 主要的功能與需求在於以下幾點，分別是資料的讀取、資料的分離、資料的進位轉換與資料的儲存。在資料的讀取方面使用的是 Visual Basic 2010 的 Timer 計時器做為收集原始資料的工具，將接收的動作放於 Timer 的事件中，只要有資料就會自動被接收進來。因為可程式化系統單晶片(PSoC)的 UART 傳輸模組所傳送給電腦的資料是將好幾組不同的資料混合在一起，所以就要使用一個分離字元將資料給區分開來，而分離字元已於可程式化系統單晶片(PSoC)的程式中寫好，並與資料一起傳送進電腦端，如此就可完成資料的分離。由於 UART 傳輸模組所傳送給電腦的資料是 16 進位的資料，為了方便之後的處裡與分析，所以需要把 16 進位的資料轉換為 10 進位的資料，轉換的方法都寫於執行轉換的 Click 事件之中。在本實驗中有四組重要的數據，分別是雷射位移感測器的電壓訊號、PWM 提供給比例壓力閥的電壓訊號、比例壓力閥所測量到的電壓訊號與實驗的時間，而這些資料的儲存都會分別建立不同的存檔事件進行檔案的儲存，以方便可以分別觀看想要的資料檔案。

詳細的細節可參考以下的 GUI 之設計與運作流程圖，如圖 3-16 所示，以及附錄二的程式碼。圖 3-17 為電腦端人機介面。

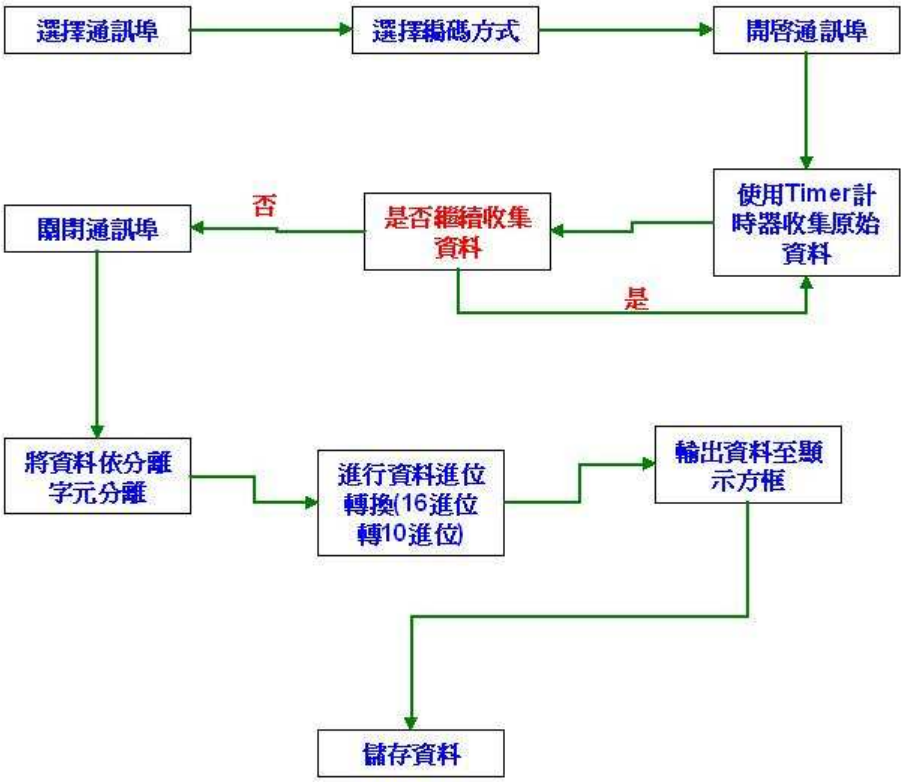


圖 3-16 GUI 之設計與運作流程圖

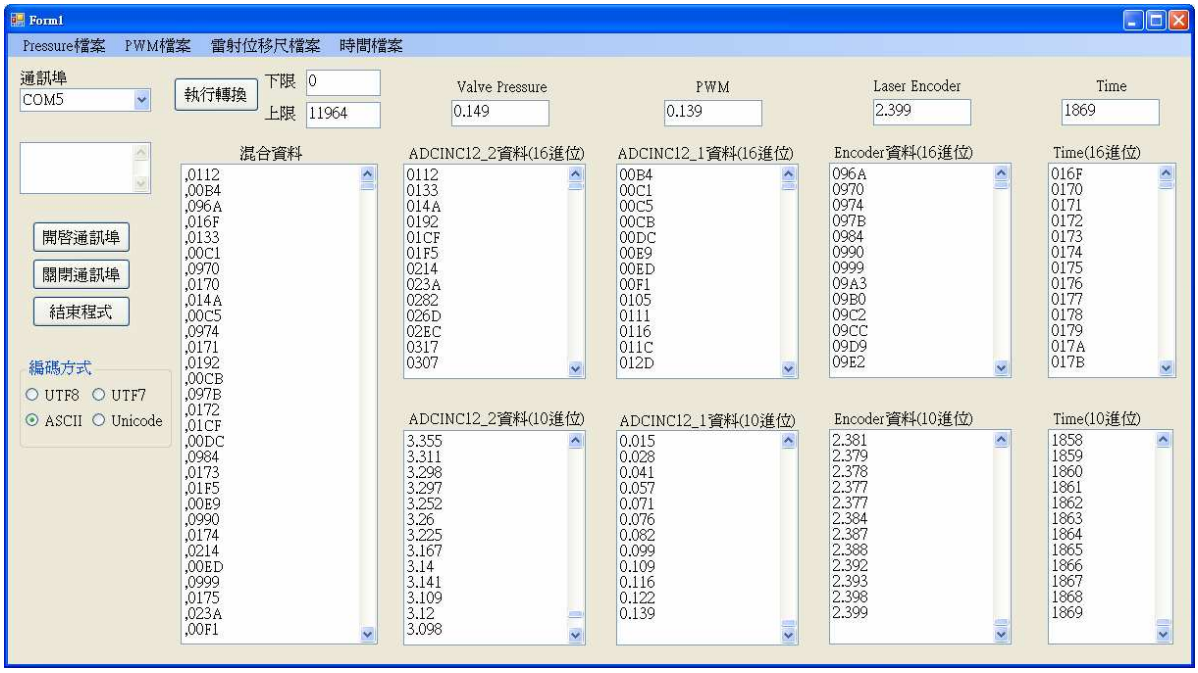


圖 3-17 電腦端人機介面

第四章 結果與討論

4.1 實驗流程

本研究以 PSoC CY8C29466-24PXI 晶片[18]作為系統的控制核心，而 PSoC 又可稱為混合信號陣列系統晶片，以此可程式化系統晶片可同時支援數位以及類比訊號處理，使其能夠具有傳統為控制器晶片在處理數位及類比訊號時需要外接的 AD(類比轉數位)轉換模組與 DA(數位轉類比)轉換模組，使用一顆 PSoC 晶片就可以同時完成資料的擷取、運算處理以及傳送信號控制硬體作動的工作。整個系統的運作流程如圖 4-1 系統運作流程圖所示，可分為以下幾個步驟:

(1) 由晶片中的 PWM(脈衝寬度調變)元件送出控制訊號至比例壓力閥，控制進入人工肌肉氣壓缸進行充氣或放氣的動作，進而使人工肌肉氣壓缸產生伸長或是縮短的動作。

(2) 藉由兩種不同的感測裝置，比例壓力閥內部壓力感測器與雷射位移感測器，測量人工肌肉氣壓缸在充放氣時的內部的氣壓變化和人工肌肉氣壓缸的長度的變化。

(3) 由雷射位移感測器產生的電壓訊號將會傳送至晶片中的類比/數位轉換器(ADCINC12)進行電壓訊號的轉換與計算，並比較人工肌肉氣壓缸在最大長度時所測量得到的電壓訊號以確定人工肌肉氣壓缸的長度，此外還可以將數值顯示在 LCD 上。由比例壓力閥內部壓力感測器產生的類比訊號將會傳送至晶片中的 A 類比/數位轉換器(ADCINC12)，將電壓值藉由比例轉換為數值以得到人工肌肉氣壓缸的壓力值。

(4) 將測量得到的數據藉由晶片內建的 UART 介面與 RS232 串列通訊介面溝通，以進行與電腦端的雙向資料傳輸。因為晶片的 TTL 準位

與電腦不同，所以在 PSoC 晶片與 RS232 中間還需要加上一顆轉換 IC(MAX232)。

(5) 電腦端在收到數據後可藉由 RS232 串列通訊介面傳送指令到晶片端控制 PWM (脈衝寬度調變)元件以調整比例壓力閥的氣流流通量。

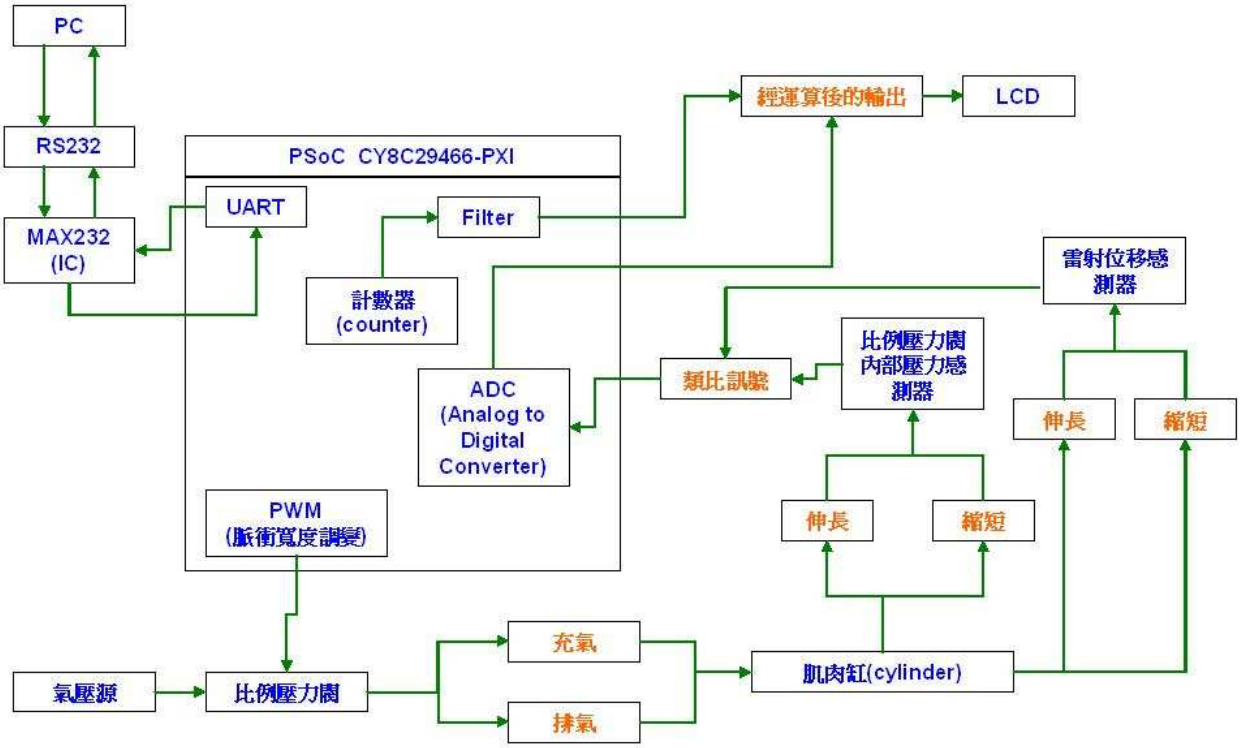


圖 4-1 系統運作流程圖

4.2 測試結果

4.2.1 人工肌肉氣壓缸之特性曲線

人工肌肉氣壓缸因為先天就是一個高度非線性的系統，所以在充氣(inflate)與放氣(deflate)的過程中會產生遲滯現象[2]，因此會造成充氣過程的曲線與放氣過程的曲線不一致，這表示在給予比例壓力閥相同的電壓時，人工肌肉氣壓缸的位移不會相同，如圖 4-2 電壓對位移的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線所示，圖 4-2 的橫軸為電壓，縱軸為位移，單位是 cm;或是給予人工肌肉氣壓缸相同的壓力時，人工肌肉氣壓缸的位移也不會相同，如圖 4-3 壓力對位移的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線所示，圖 4-3 的橫軸為壓力，單位是 bar，縱軸同樣為位移，單位是 cm。

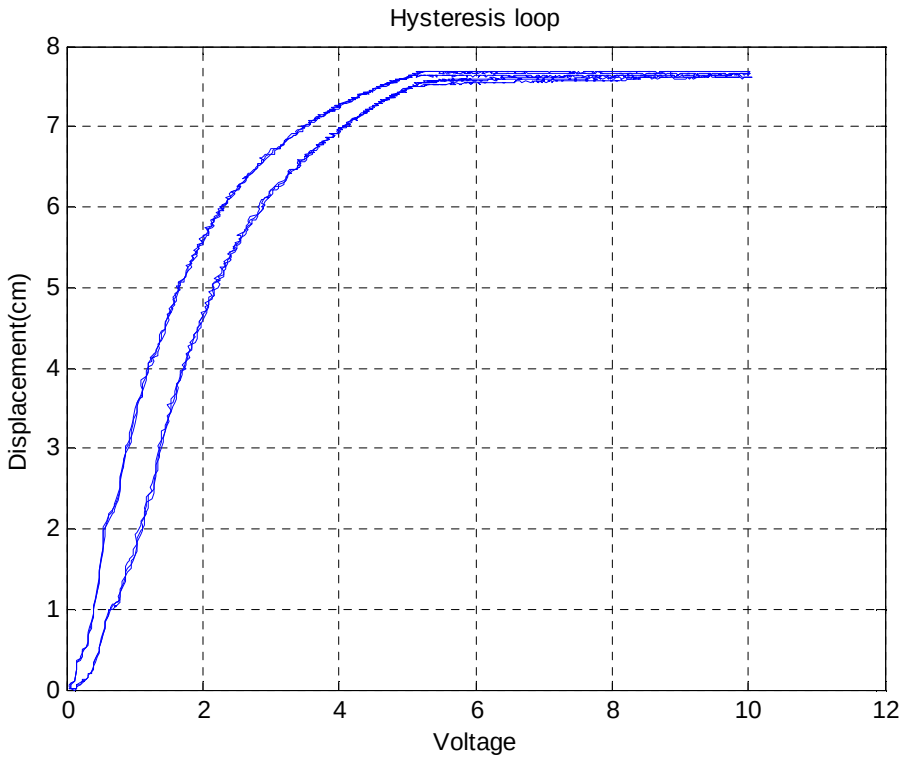


圖 4-2 電壓對位移的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線

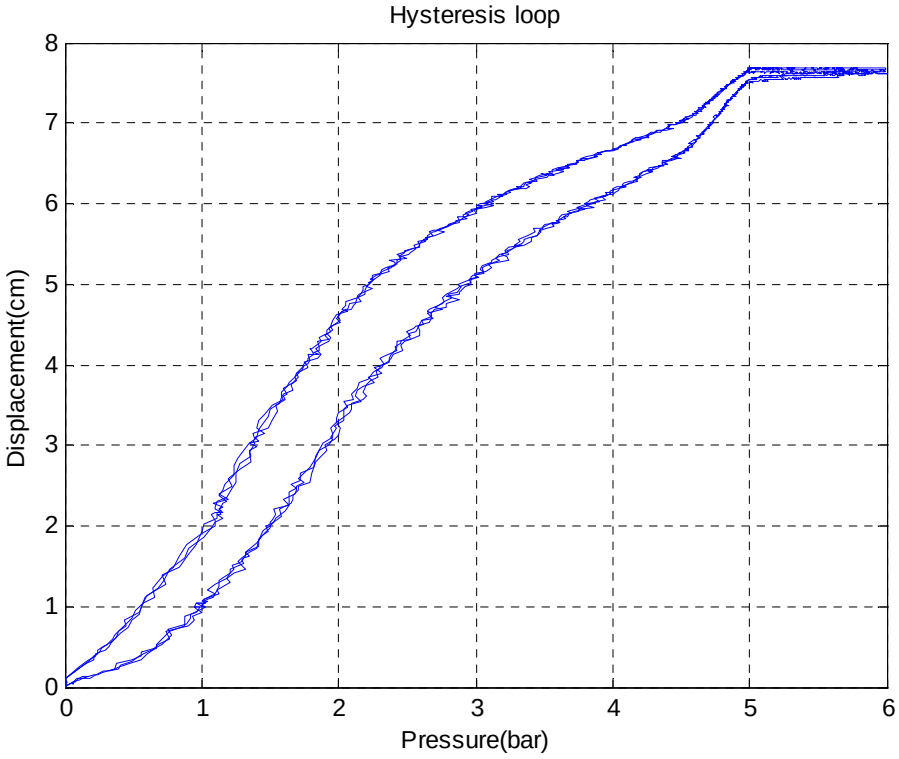


圖 4-3 壓力對位移的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線

利用 PSoC 控制板、感測器與人工肌肉氣壓缸之實驗平台所測量得到的結果曲線圖，如圖 4-4 所示為人工肌肉氣壓缸之長度變化量(位移) ，圖 4-5 PWM 所調變輸出的電壓值。由圖 4-4 與圖 4-5 的資料可以繪得人工肌肉氣壓缸之遲滯曲線，如圖 4-4 所示，該的遲滯曲線包含人工肌肉氣壓缸的特徵，這些特徵與人工肌肉氣壓缸與負載的速度及加速度等等有關。

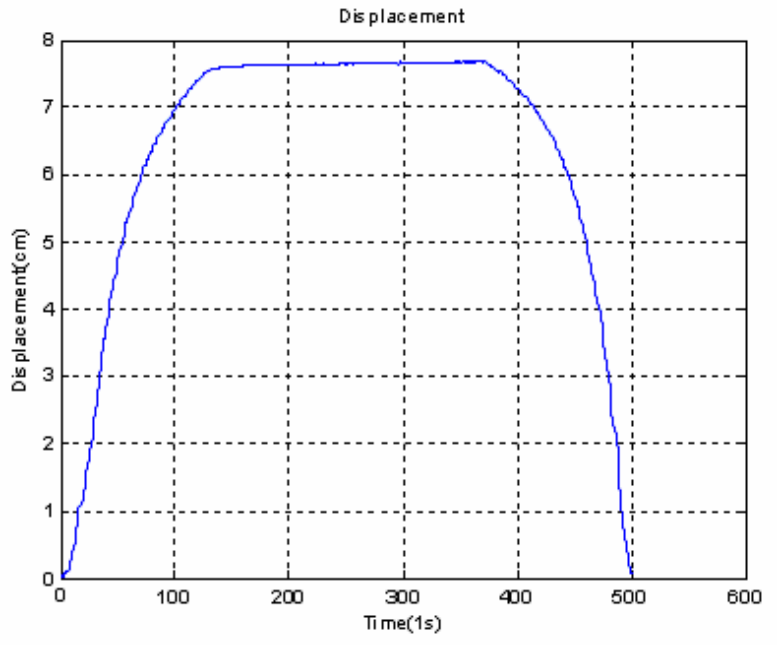


圖 4-4 人工肌肉氣壓缸之長度變化量(位移)

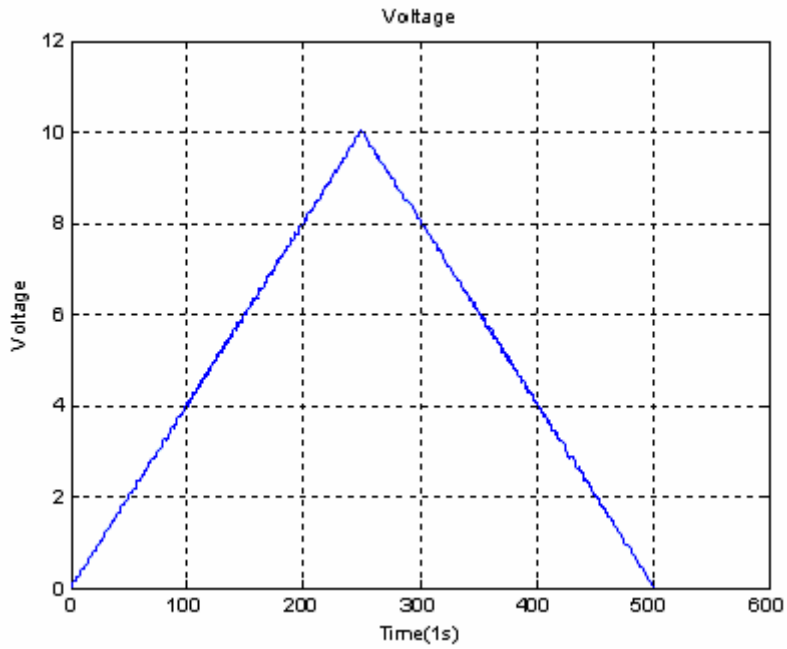


圖 4-5 PWM 所調變輸出之電壓值

圖 4-6 的縱軸為人工肌肉氣壓缸長度的變化量(位移) ，單位為公分(cm) ，橫軸為由 PWM 所調變輸出給壓力比例閥的電壓值。由圖 4-4 可以看出人工肌肉氣壓缸長度的變化量約為 7.5 公分，即為原長 30 公分的 25%，與 Festo 公司所提供之 Datasheet 的內容相吻合，而由圖 4-6 還可以看出電壓值於 6 伏特至 10 伏特間的長度變化的變化量很小，與實驗平台所觀測得到的情形也相符合。圖 4-7 為比例壓力閥內部的壓力感測器所測量得到之壓力值。

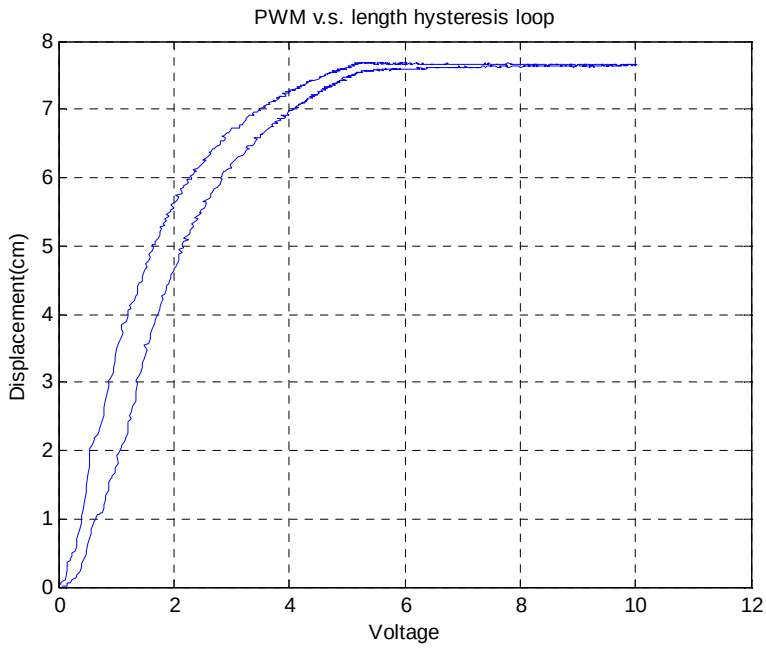


圖 4-6 人工肌肉氣壓缸之遲滯曲線圖

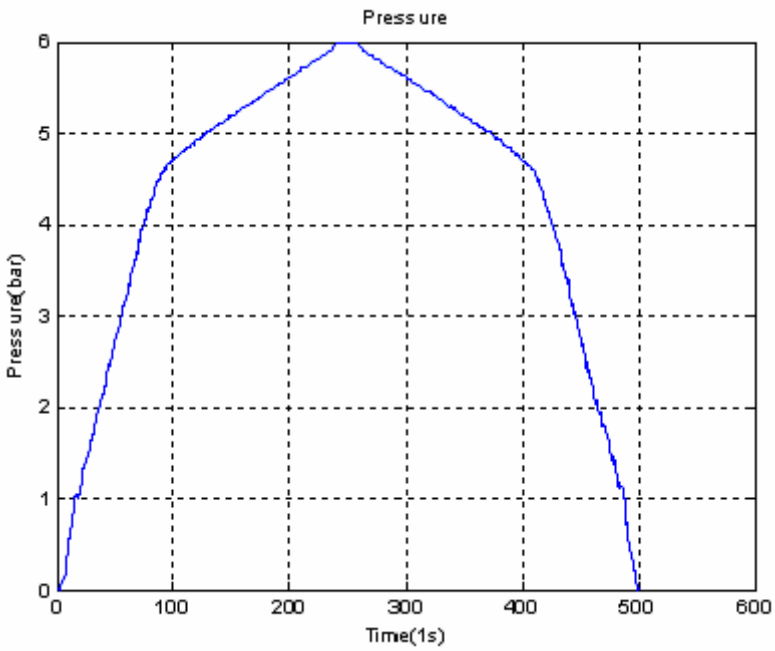


圖 4-7 人工肌肉氣壓缸內部壓力值

4.2.2 量測數據之曲線擬合

由 4.2.1 的實驗結果所量測的曲線圖，可以藉由 matlab 所內建的曲線擬合工具箱得到人工肌肉氣壓缸充氣與排氣的遲滯曲線數學方程式。圖 4-8 為匯入曲線擬合工具箱之人工肌肉氣壓缸遲滯曲線圖，圖 4-9 為使用 4 次多項式的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線之擬合曲線圖，圖 4-10 為使用 5 次多項式的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線之擬合曲線圖，圖 4-11 為人工肌肉氣壓缸遲滯曲線之擬合曲線圖。比較圖 4-9 與圖 4-10 中使用虛線圓形標示處，5 次多項式之擬合曲線的擬合程不如度 4 次多項式之擬合曲線，所以本研究使用 4 次多項式進行人工肌肉氣壓缸的遲滯曲線之曲線擬合。表 4-1 和表 4-2 為圖 4-9 曲線擬合得到充氣排氣的數學方程式。

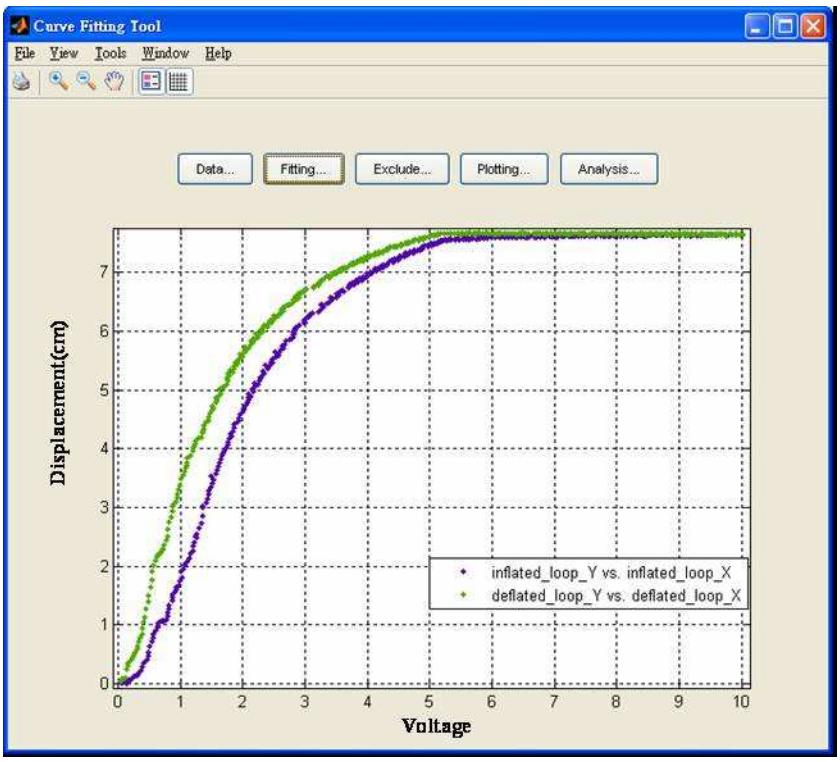


圖 4-8 匯入曲線擬合工具箱之人工肌肉氣壓缸遲滯曲線圖

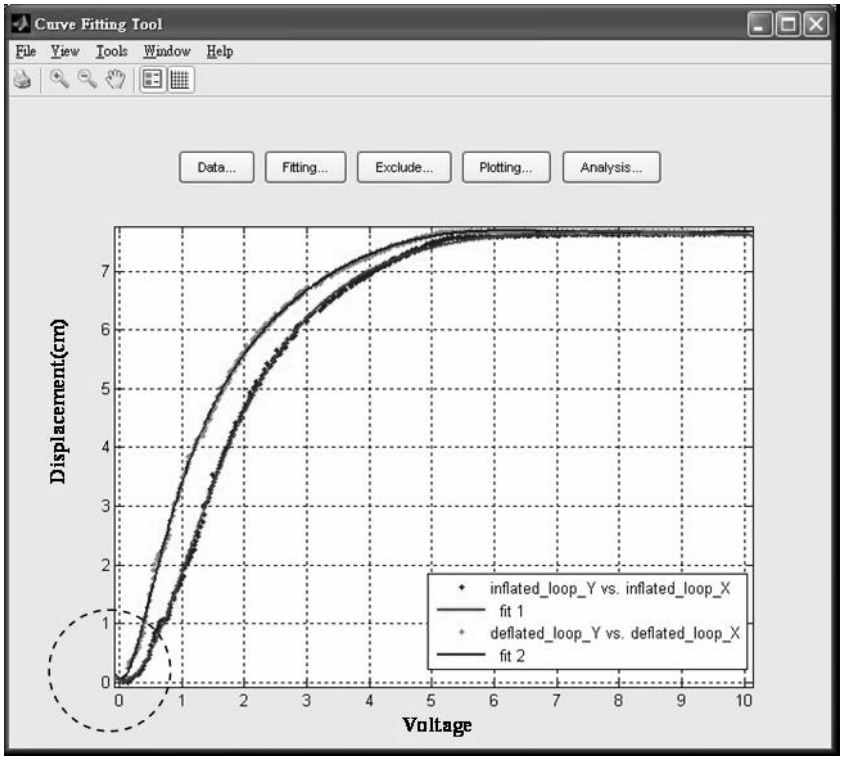


圖 4-9 使用 4 次多項式的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線之擬合曲線圖

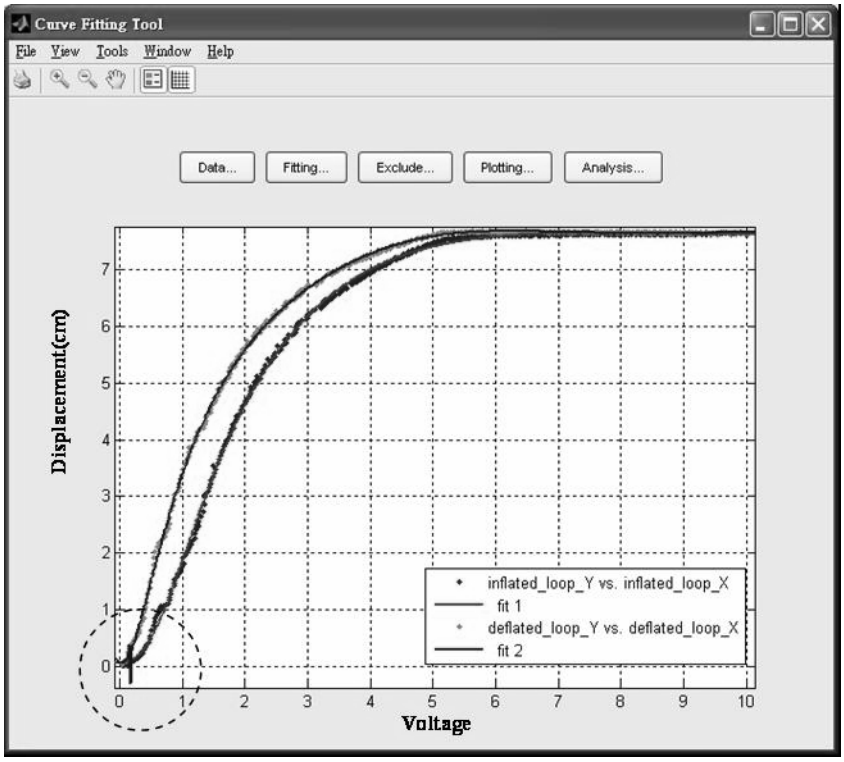


圖 4-10 使用 5 次多項式的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線之擬合曲線圖

表 4-1 人工肌肉氣壓缸充氣遲滯曲線之擬合方程式與參數

inflated_loop:				
General model Rat44:				
f(y) = (p1*y^4+p2*y^3 +p3*y^2 +p4*y +p5) /(y^4+q1*y^3+q2*y^2+q3*y +q4)				
Coefficients :				
p1 = 5.04	p2 = 146.3	p3 = -24.28	p4 = 2.807	p5 = -0.0967
q1 = 14.57	q2 = 4.726	q3 = 51.15	q4 = -2.338	

將 inflated_loop 的曲線擬合方程式進行一次微分後可得到速度方程式，如式(22)，其中 Vinflatedy 為人工肌肉氣壓缸充氣時之速度 ；將 inflated_loop 的曲線擬合方程式進行二次微分後可得到加速度方程式，如式(23)，其中 Ainflatedy 為人工肌肉氣壓缸充氣時之加速度。

Vinflatedy = (4*p1*y^3 + 3*p2*y^2 + 2*p3*y + p4) /

(4*y^3 + 3*q1*y^2 + 2*q2*y + q3) (22)

Ainflatedy = (12*p1*y^2 + 6*p2*y + 2*p3) /

(12*y^2 + 6*q1*y + 2*q2) (23)

表 4-2 人工肌肉氣壓缸排氣遲滯曲線之擬合方程式與參數

deflated_loop:				
General model Rat44:				
f(y) = (p1*y^4+p2*y^3+p3*y^2+p4*y+p5) /(y^4+q1*y^3+q2*y^2+q3*y+q4)				
Coefficients :				
p1 =8.358	p2 =-88.45	p3 =344	p4 = -14.78	p5 =1.877
q1 = -9.556	q2 =31.35	q3 =22.44	q4 =28.64	

將 deflated_loop 的曲線擬合方程式進行一次微分後可得到速度方程式，如式(24)，其中 Vdeflatedy 為人工肌肉氣壓缸排氣時之速度；將 deflated_loop 的曲線擬合方程式進行二次微分後可得到加速度方程式，如式(25)，其中 Adeflatedy 為人工肌肉氣壓缸排氣時之加速度。

Vdeflatedy=(4*p1*y^3+3*p2*y^2+2*p3*y+p4)/
(4*y^3+3*q1*y^2+2*q2*y+q3) (24)

Adeflatedy=(12*p1*y^2+6*p2*y+2*p3)/
(12*y^2+6*q1*y+2*qd2) (25)

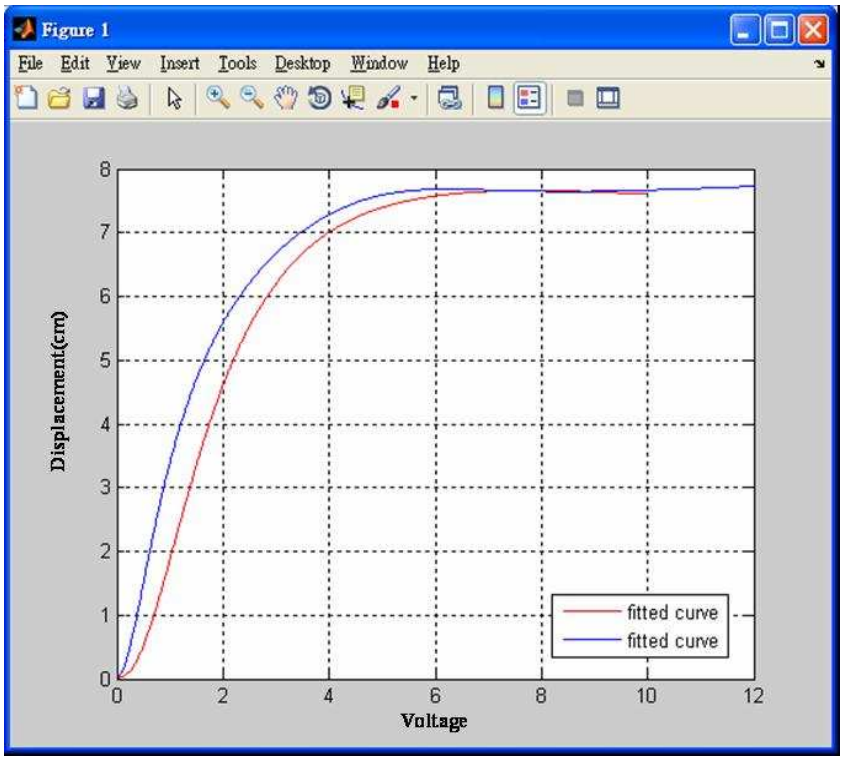


圖 4-11 人工肌肉氣壓缸遲滯曲線之擬合曲線圖

4.3 結果與討論

本研究藉由使用 matlab 內建的曲線擬合工具箱分析人工肌肉氣壓缸的遲滯曲線，找出人工肌肉氣壓缸於充氣與排氣時的遲滯曲線擬合方程式，利用人工肌肉氣壓缸遲滯曲線擬合方程式，可以得到人工肌肉氣壓缸的速度與加速度之方程式，將加速度與速度的值代入 2.3 節之式(14)所示之誤差函數後，即可建立粒子群優化演算法的適應函式如 2.3 節之式(15)與式(16)，並將適應函式分別代入已編寫好的粒子優化演算法(PSO)的電腦程式中作計算，找出使式(15)與式(16)為最小的 LuGre 摩擦模型之動態參數。其中粒子群優化演算法程式需要設定的參數有粒子個數、粒子搜尋的次數、區域解之加速常數與全域解之加速常數及權重值。

4.3.1 LuGre 摩擦模型之動態參數

圖 4-12σ_0 粒子分布圖，顯示粒子大多分布於接近 170.1 之數值；圖 4-13 為 σ_1 粒子分布圖，顯示粒子大多分布於接近 12.04 之數值；圖 4-14 為粒子群優化演算法之粒子位置圖，圖 4-14 為全域最佳適應值，由圖 4-13 及圖 4-14 可得到 LuGre 摩擦模型之動態參數，如表 4-3。

表 4-3 為使用式(15)代入粒子群優化演算法所得到的 LuGre 摩擦模型之動態參數。

表 4-3 LuGre 摩擦模型之動態參數

參數	數值	單位
σ_0	170.106	[N/m]
σ_1	12.039	[Ns/m]

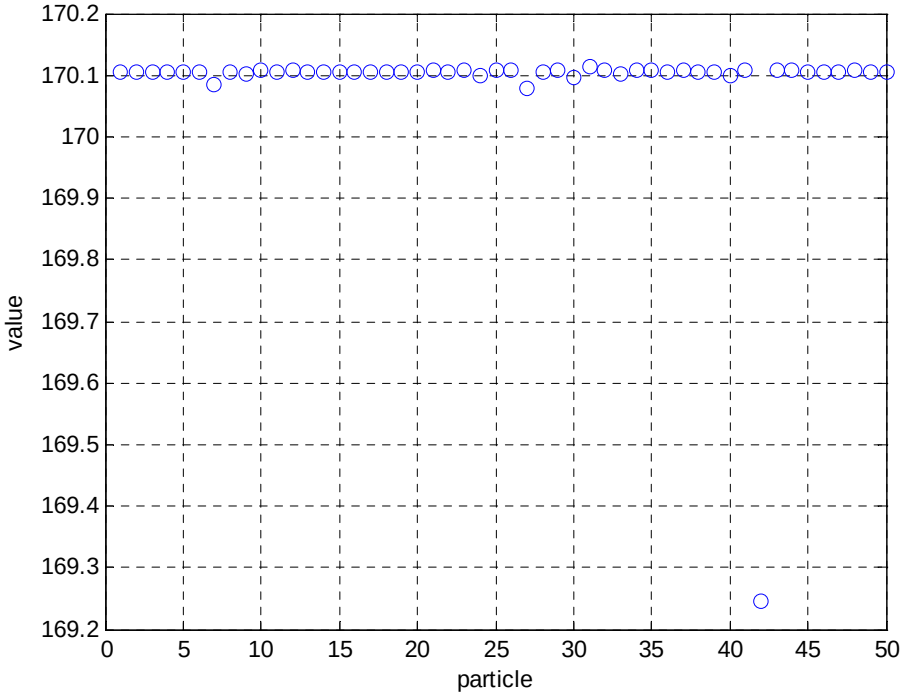


圖 4-12 σ_0 粒子分布圖

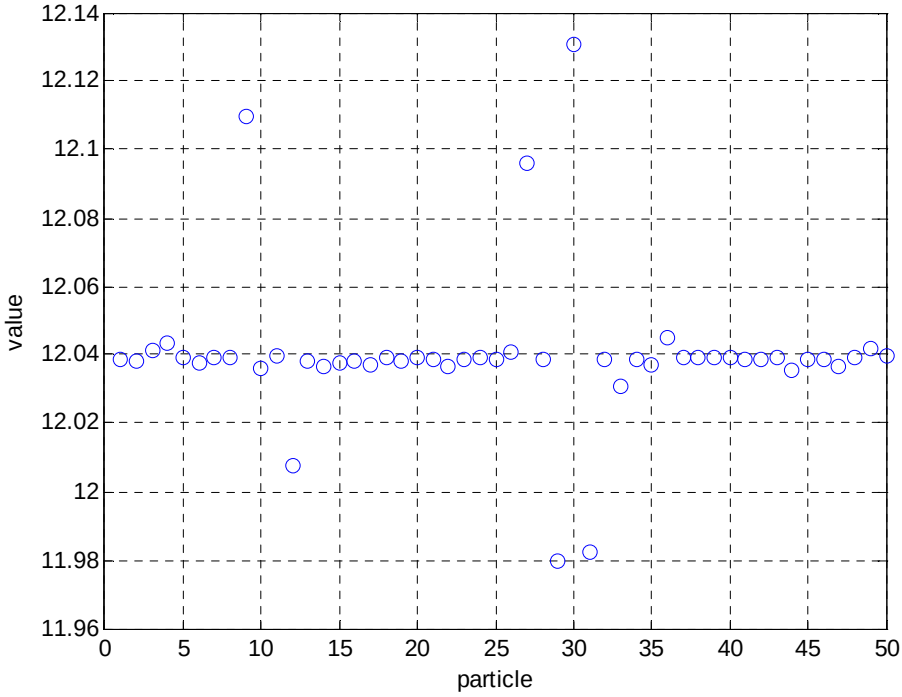


圖 4-13 σ_1 粒子分布圖

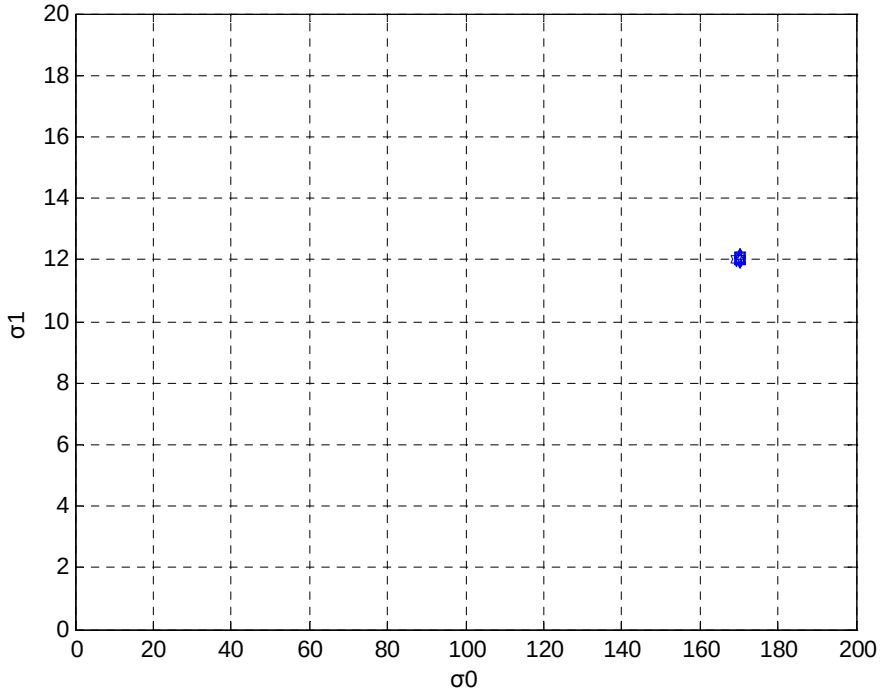


圖 4-14 粒子群優化演算法之粒子位置圖

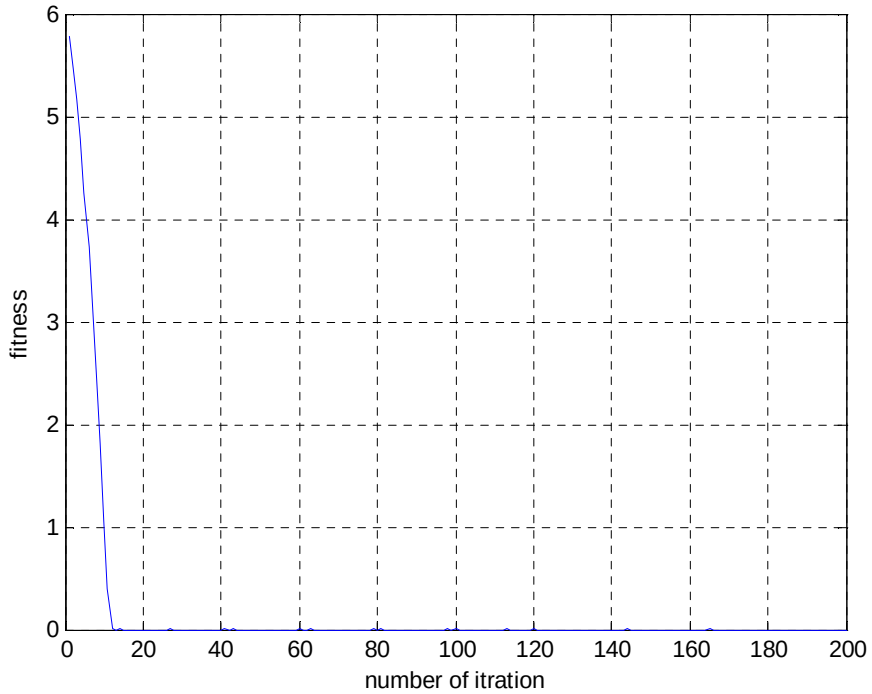


圖 4-15 全域最佳適應值

4.3.2 LuGre 摩擦模型之穩態參數

圖 4-16 為 F_C 粒子分布圖，顯示粒子大多分布於 5.5 至 6 間之數值；圖 4-17 為 F_S 粒子分布圖，顯示粒子大多分布於接近 14.0 之數值；圖 4-18 為 v_S 粒子分布圖，顯示粒子大多分布於接近 2.5 之數值；圖 4-19 為 σ_2 粒子分布圖，顯示粒子以分布於接近 10.4 至 10.6 間之數值；圖 4-20 為全域最佳適應值，圖 4-21 為最佳化粒子之數值圖，由圖 4-20 及圖 4-21 可得到 LuGre 摩擦模型之穩態參數，如表 4-4。

表 4-4 為使用式(16)代入粒子群優化演算法所得到的 LuGre 摩擦模型之穩態參數。

表 4-4 LuGre 摩擦模型之穩態參數

參數	數值	單位
F_C	5.7877	[N]
F_S	13.8915	[N]
v_S	2.4820	[m/s]
σ_2	10.5304	[Ns/m]

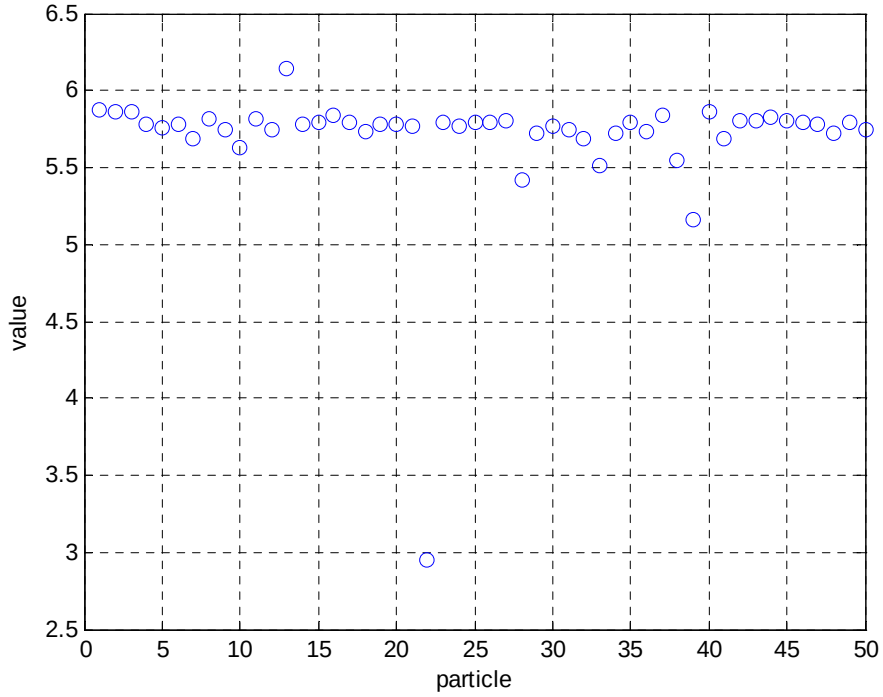


圖 4-16 F_C 粒子分布圖

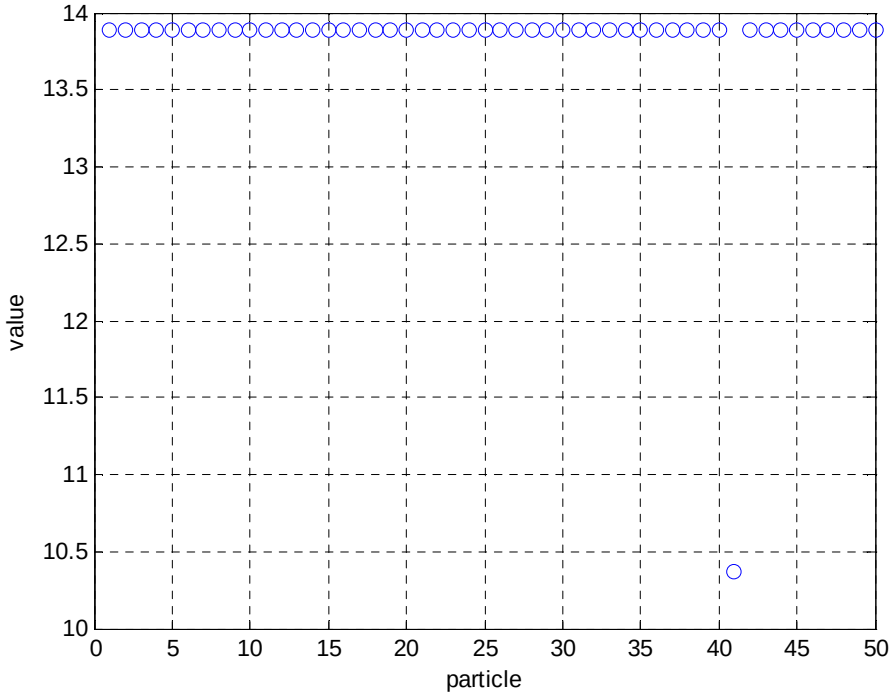


圖 4-17 F_S 粒子分布圖

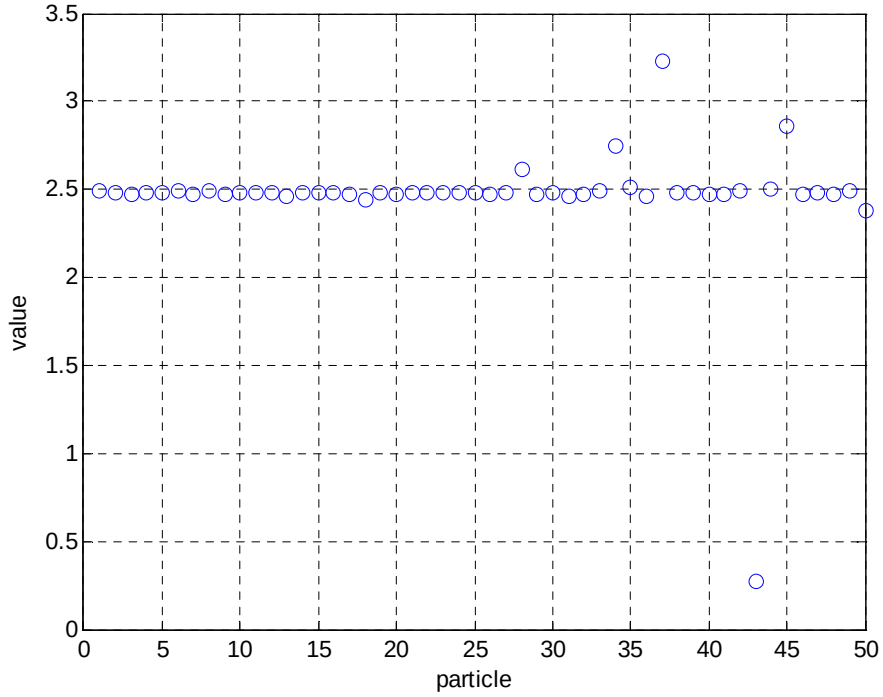


圖 4-18 v_S 粒子分布圖

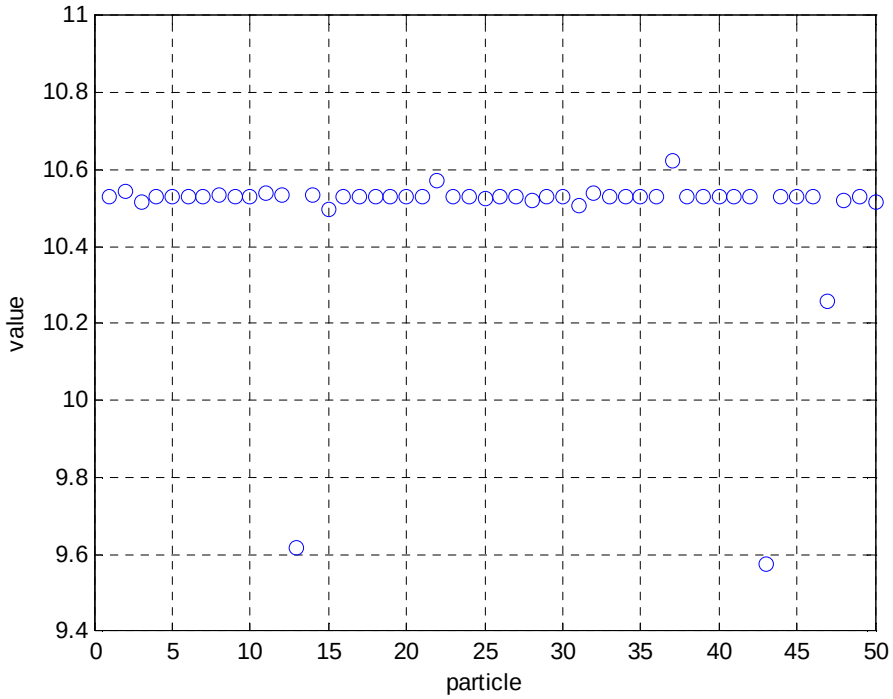


圖 4-19 σ_2 粒子分布圖

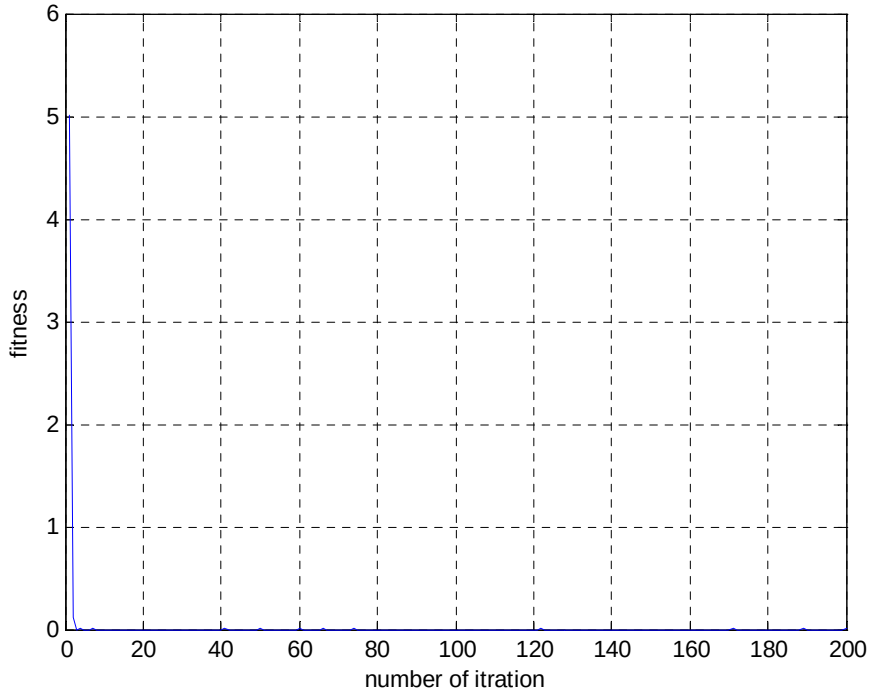


圖 4-20 全域最佳適應值

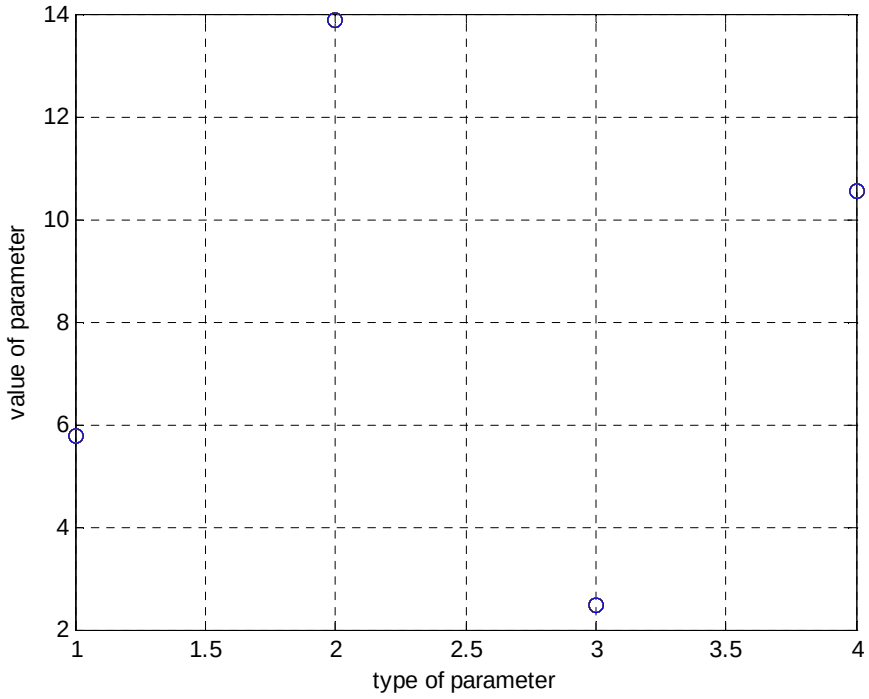


圖 4-21 最佳化粒子之數值

4.3.3 模擬結果

本小節使用 4.3.1 與 4.3.2 小節的 LuGre 摩擦模型參數進行人工肌肉氣壓缸遲滯曲線的模擬，以對照驗證得到的摩擦模型參數的準確性。將式(12)與式(13)代入式(2)可得人工肌肉氣壓缸輸出力 F 的方程式，F 代表模擬所得的人工肌肉氣壓缸輸出力，如式(25)與式(26)。

$$F = ma + mg + F_{dynamic} = ma + mg + \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} \tag{25}$$

$$F = ma + mg + F_{SS}(v) = ma + mg + [F_C + (F_S - F_C)e^{(-(v/v_S)^2)}]\mathrm{sgn}(v) + \sigma_2 v \tag{26}$$

將 LuGre 摩擦模型的動態參數與穩態參數分別代入式(25)與式(26)可得到人工肌肉氣壓缸於動態與穩態的模擬的輸出力。將式(3)改寫得到人工肌肉氣壓缸氣壓的方程式，pressure 代表模擬所得的氣壓，如式(27)。

$$pressure = \frac{F}{A(1-\varepsilon)^2 - B} \tag{27}$$

輸入比例壓力閥的電壓與輸入至人工肌肉氣壓缸的氣壓有相對的比例關係存在，如圖 4-22 所示，Voltage 除以 Pressure 可以得到描述電壓與氣壓比例關係 proportion 的方程式，Voltage 與 Pressure 分別代表實際輸入比例壓力閥的電壓與實際輸入至人工肌肉氣壓缸的氣壓，如式(28)。

$$proportion = \frac{Voltage}{\mathrm{Pr}essure} \tag{28}$$

將氣壓 pressure 乘以一個比例參數 proportion 可以得到模擬所得之電壓，如圖 4-23 所示。圖 4-24 為模擬與實驗所得的電壓的對照圖，線條比較粗而形狀為三角形的是實驗所得的電壓，線條比較細而形狀較為不規則的是由模擬所得的電壓。由模擬所得之電壓與人工肌肉氣壓缸的位移可以得到電壓對位移的模擬的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線，如圖 4-25 所示。圖 4-26 為模擬與實驗所得的電壓對位移的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線圖之對照，線條比較粗的是實驗所得的人工肌肉氣壓缸遲滯曲，線條比較細的是的由模擬所得的人工肌肉氣壓缸遲滯曲。圖 4-24 所示的模擬所得的電壓值比實驗量測的值小，而曲線的形狀也不太符合，由於模擬所得的電壓值與實驗值不太符合，所以造成模擬所得之電壓對位移的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線與實驗量測得到的缸遲滯曲線也不太符合。於 4.3.4 將探討可能造成模擬結果與實驗結果不太符合的原因與可能的解決方法。

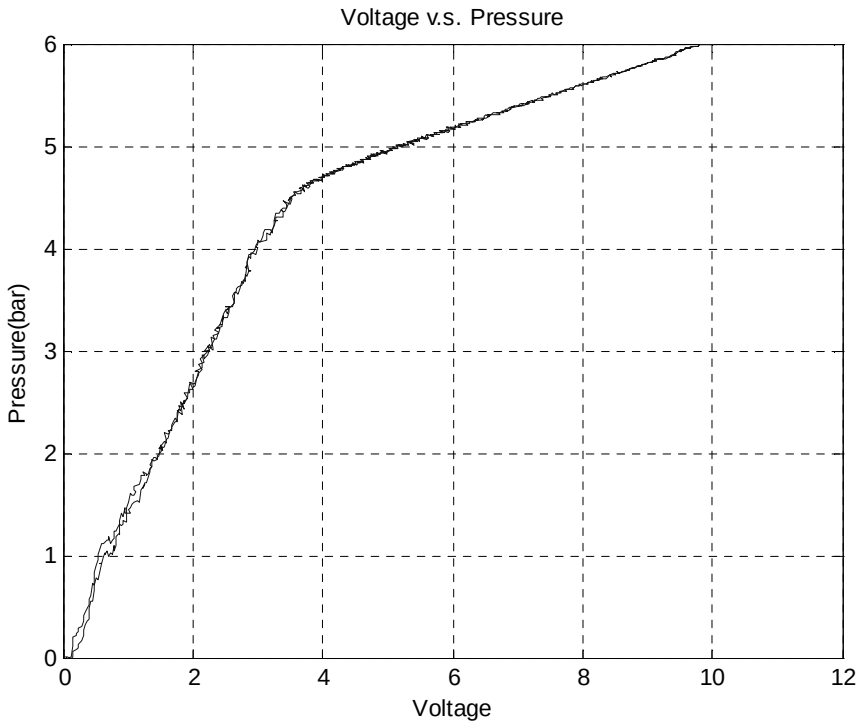


圖 4-22 氣壓值與電壓值比例圖

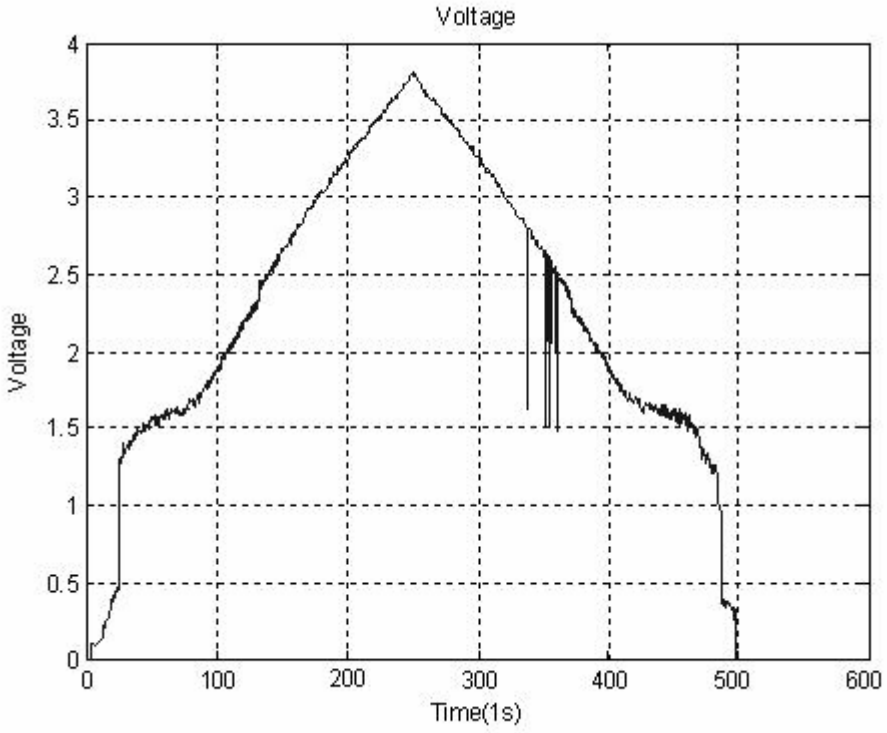


圖 4-23 模擬所得之電壓

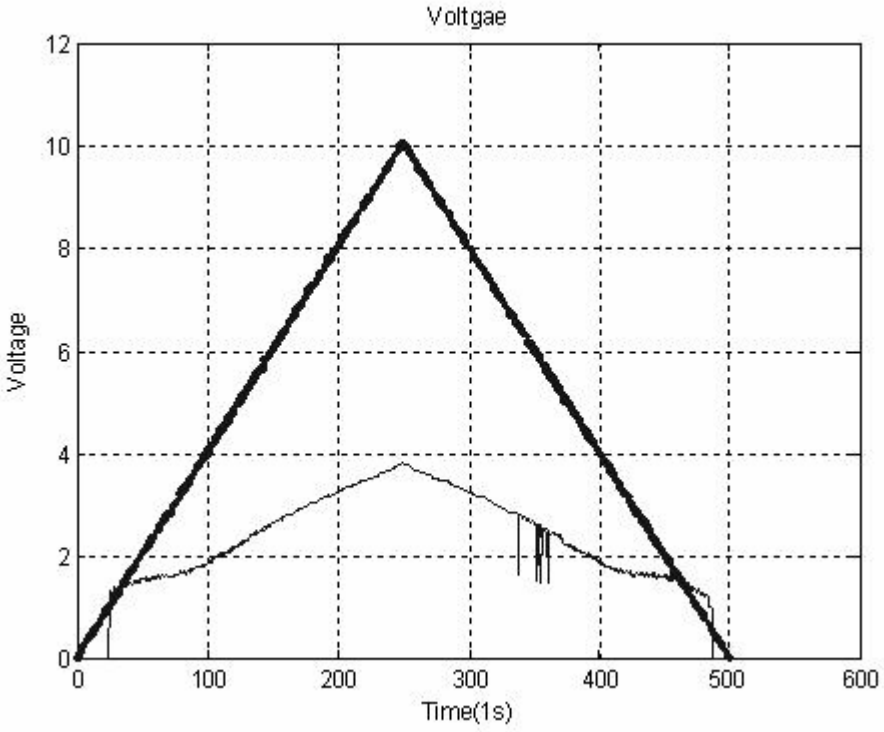


圖 4-24 模擬與實驗所得的電壓對照

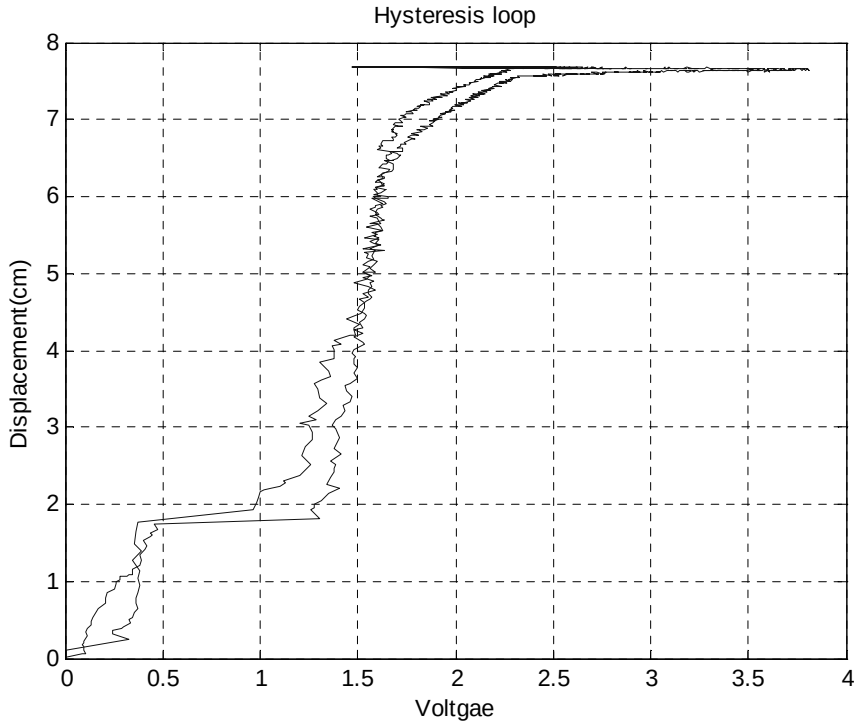


圖 4-25 模擬所得之電壓對位移的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線

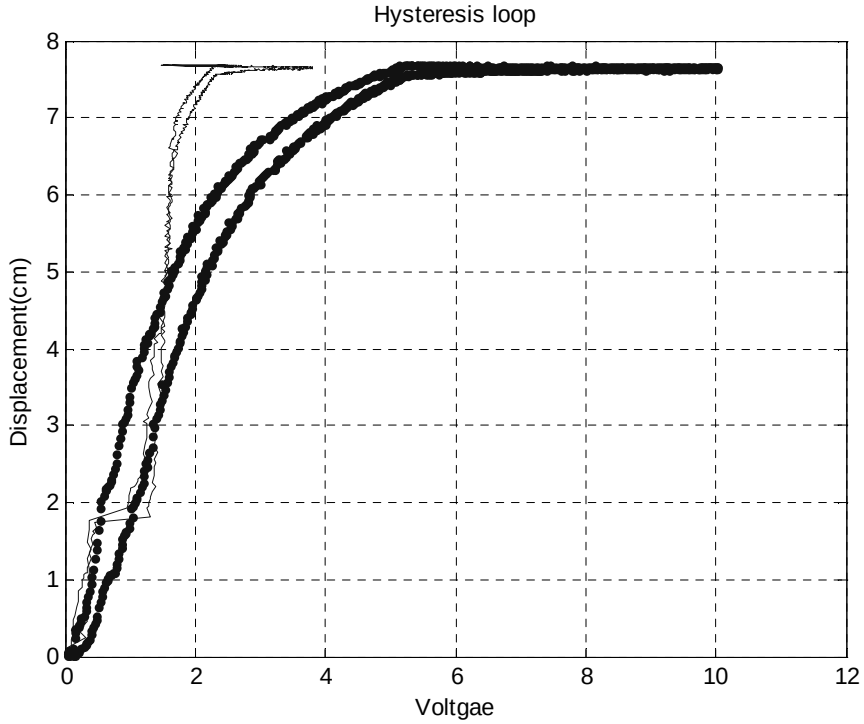


圖 4-26 模擬對照實驗所得之電壓對位移的人工肌肉氣壓缸遲滯曲線

4.3.4 討論

因為 4.3.3 小節中的模擬結果與實驗結果不甚符合，本小節提出兩個可能導致模擬結果與實驗結果不甚符合的原因與可能的解決方式，如本小節之第二段與第三段所述。

人工肌肉氣壓缸之輸出力是使用數學模型計算所得，與本研究使用的人工肌肉氣壓缸實際的輸出力之數值可能無法完全相符合，可能的解決方式或許可以考慮以壓力感測器(Load Cell)測量人工肌肉氣壓缸實際的輸出力。

式(15)與式(16)中使用到的人工肌肉氣壓缸的速度與加速度是利用 4.2.2 小節中人工肌肉氣壓缸遲滯曲線的擬合曲線的一次微分與二次微分所求得，與實際的速度與加速度的數值相比無法達到百分之一百相同，還是會有誤差存在，可能的解決方式或許可以考慮以加速規(Accelerometer)測量人工肌肉氣壓缸實際的速度與加速度。

第五章 結論

本文主要以嵌入式系統建立人工肌肉氣壓缸之摩擦模型。相關的文獻以馬克斯威爾滑動摩擦模型作為人工肌肉氣壓缸之摩擦模型，本文則以 LuGre 摩擦模型作為人工肌肉氣壓缸的摩擦模型，並以此模型分析人工肌肉氣壓缸之遲滯曲線以了解其特性，文中並以粒子群優化演算法求解 LuGre 摩擦模型的動態參數。由實驗並證明所設計之可程式系統單晶片 PSoC 具有控制卡和資料擷取卡的功能。

本文為人工肌肉氣壓缸系統特性與識別提出了一個研究方向，期許可以為以後相關的研究帶來幫助。

參考文獻

[1] Ching-Ping Chou,Blake Hannaford,” Measurement and Modeling of McKibben Pneumatic Artificial Muscles”, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, Vol. 12，No. 1，FEBRUARY, 1996

[2] FESTO, ” 人工肌肉氣壓缸技術資料” http://www.festo.com/cat/zh-tw_tw/data/doc_engb/PDF/EN/DMSP-MAS_EN.PDF

[3] Ewing, J. A. "On hysteresis in the relation of strain to stress". British Association Reports: 502.

[4] Tri Vo-Minh, Tegoeh Tjahjowidodo,Herman Ramon,Hendrik Van Brussel”, A New Approach to Modeling Hysteresis in a Pneumatic Artificial Muscle Using The Maxwell-Slip Model” ,IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, Vol. 16, No. 1, FEBRUARY, 2011

[5] Bertrand Tondu,” Modelling of the McKibben artificial muscle: A review”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures”, Mar 29, 2012

[6] 李傑仁，「具非對稱型磁滯系統控制及其於壓電驅動平台定位控制之應用」，國立成功大學，航空太空工程研究所碩士論文，中華民國 92 年 7 月

[7] C. Canudas de Wit,H. Olsson，K. J. htrom, Fellow, P. Lischinsky,” A New Model for Control of Systems with Friction”，IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, Vol. 40，No. 3，MARCH ,1995

[8] KARL JOHAN ÅSTRÖM,CARLOS CANUDAS-DE-WIT ,”Revisiting the LuGre Friction Model” ,IEEE CONTROL SYSTEMS MAGAZINE, DECEMBER ,2008

[9] Daniel Helmick, William Messner, ”Describing Function Analysis of Dahl Model Friction” ,2009 American Control Conference Hyatt Regency Riverfront，St. Louis, MO，USA June 10-12,2009

[10] Jiapeng Han, Yongli Sun, Yanyang Wang, ”Parameter Identification of LuGre Tire Model for the Simplified Motion Dynamics of a Quarter-vehicle Model Based on Ant Colony Algorithm”, IEEEInternational Conference on Automation and Logistics, Jinan, China ,August 18 - 21, 2007

[11] Zhang Wenjing, ” Parameter Identification of LuGre Friction Model in Servo System Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm”, Proceedings of the 26 th Chinese Control Conference, Zhangjiajie Hunan China ,July 26-31, 2007

[12] R. C. Eberhart, J. Kennedy, “A new optimizer using particle swarm theory”, in: Proc. IEEE Int. Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, pp. 39-43, 1995.

[13] 楊鋼、李寶仁、傅曉雲，“氣動人工肌肉系統動態特性研究”，中國機械工程，第 17 卷第 12 期 2006 年 6 月下半月，pp. 1294-1298。

[14] Jan Swevers, Farid Al-Bender，Chris G. Ganseman，Tutuko Prajogo, An “Integrated Friction Model Structure with Improved Presliding Behavior for Accurate Friction Compensation”, IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, Vol. 45, No. 4, APRIL, 2000

[15] J. Kennedy and R. C. Eberhart, “Particle swarm optimization”, in: Proc. IEEE Int. Conf. on Neural Networks, Perth, Australia, vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.

[16] 脈衝寬度調變，http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation

[17] Barr, Michael. "Pulse Width Modulation," Embedded Systems Programming, September 2001, pp. 103-104.

[18] Cypress， CY8C29x66 Final Data Sheet

[19] 梁志穎，PSoC 嵌入式系統晶片實做入門，旗標出版有限公司，台北市杭州南路一段 15-1 號 19 樓，2011 年 8 月

附錄

附錄一 PSoC 程式碼

```
#include <m8c.h>
#include "PSoCAPI.h"
#include "PWM16.h"
#include "LPF2_1.h"

unsigned int digital;
unsigned int value;
unsigned int Result1;
unsigned int Result2;
unsigned int Result3;
int n = 1920;
const char A[]="0123456789ABCDEF";

void systemset(void);
void DisplayLCD1(void);
void DisplayLCD2(void);
void DisplayLCD3(void);
void DisplayLCD4(void);
void ADCINC12_1(void);
void ADCINC12_2(void);
void ADCINC12_3(void);
void delay(unsigned int x);
```

```
void main( )
{
systemset( );
        while(1)
        {
                for(i=0;i<199;i++)
                {
                        ADCINC12_3( );
                        DisplayLCD3( );
                        //UART Send&Receive ADCINC12_3 with laser P0_1
                        UART_SendData(0x2c);
                        UART_PutSHexInt(Result3);
                        UART_PutCRLF( );

                        ADCINC12_1( );
                        DisplayLCD1( );
                        //UART Send&Receive ADCINC12_1 with PWM P0_0
                        UART_SendData(0x2c);
                        UART_PutSHexInt(Result1);
                        UART_PutCRLF( );

                        ADCINC12_2( );
                        DisplayLCD2( );
                        //UART Send&Receive ADCINC12_2 with valve pressure P0_2
```

```
        UART_SendData(0x2c);
        UART_PutSHexInt(Result2);
        UART_PutCRLF( );

        PWM16_WritePulseWidth(i);
        digital =1+ Counter16_2_wReadCounter();
        value = n-digital+1;
        DisplayLCD4( );
        //UART Send&Receive Time
        UART_SendData(0x2c);
        UART_PutSHexInt(value);
        UART_PutCRLF( );
        delay(9000);
    }

    for(i=199;i>0;i--)
    {
        ADCINC12_3();
        DisplayLCD3();
        // UART Send&Receive ADCINC12_3 with laser P0_1
        UART_SendData(0x2c);
        UART_PutSHexInt(Result3);
        UART_PutCRLF();

        ADCINC12_1( );
```

```
            DisplayLCD1( );
            // UART Send&Receive ADCINC12_1 with PWM P0_0
            UART_SendData(0x2c);
            UART_PutSHexInt(Result1);
            UART_PutCRLF( );

            ADCINC12_2( );
            DisplayLCD2( );
            // UART Send&Receive ADCINC12_2 with valve pressure P0_2
            UART_SendData(0x2c);
            UART_PutSHexInt(Result2);
            UART_PutCRLF();

            PWM16_WritePulseWidth(i);
            digital =1+ Counter16_2_wReadCounter();
            value = n-digital+1;
            DisplayLCD4( );
            //UART Send&Receive Time
            UART_SendData(0x2c);
            UART_PutSHexInt(value);
            UART_PutCRLF( );
            delay(9000);
        }
    }
}
```

附錄二 Visual Basic 程式碼

```
Imports System.IO
Imports System.IO.Ports
Imports System.Text
Public Class Form1
Dim instring As String

'*************************************************************
'表單的 Load 事件中先將所有的通訊埠先列出來
'將通訊埠排序，並將第一個通訊埠設為預設
'*************************************************************
Private Sub Form1_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles MyBase.Load
For Each sp As String In SerialPort.GetPortNames()
CmbBox.Items.Add(sp)
Next
CmbBox.Sorted = True
CmbBox.SelectedIndex = 0
End Sub
```

```
'*************************************************************
'『開啟通訊埠』按鈕的 Click 事件
'此事件將設定通訊埠參數，並開啟通訊埠
'*************************************************************
Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button1.Click
Dim EncodeType As Encoding
RS232.PortName = CmbBox.SelectedItem.ToString
RS232.BaudRate = 2400
RS232.Parity = Parity.None
RS232.DataBits = 8
RS232.StopBits = StopBits.One

'檢查編碼方式
If rbtnCode1.Checked Then EncodeType = Encoding.UTF8
If rbtnCode2.Checked Then EncodeType = Encoding.UTF7
If rbtnCode3.Checked Then EncodeType = Encoding.ASCII
If rbtnCode4.Checked Then EncodeType = Encoding.Unicode

If Not RS232.IsOpen Then
RS232.Open()
Timer1.Interval = 10
Timer1.Enabled = True
Else
```

```
MsgBox("通訊埠開啟錯誤(通訊埠已被開啟)", MsgBoxStyle.Critical Or
MsgBoxStyle.OkCancel)
End
End If
End Sub

'*************************************************************
'『關閉通訊埠』按鈕的 Click 事件
'以 C l ose 方法關閉通訊埠，並釋放物件所佔用的資源
'*************************************************************
Private Sub Button2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button2.Click
If RS232 Is Nothing OrElse Not RS232.IsOpen Then
MsgBox("通訊埠尚未開啟", MsgBoxStyle.Critical Or MsgBoxStyle.OkCancel)
Else
Timer1.Enabled = False
RS232.Close( )
End If
End Sub
```

```
'*************************************************************
'『結束程式』按鈕 的 Click 事件
'此事件將設定通訊埠參數，並開啟通訊埠
'*************************************************************
Private Sub Button3_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button3.Click
If Not RS232 Is Nothing Then
If RS232.IsOpen Then RS232.Close()
End If
End
End Sub

'*************************************************************
'通訊埠的 KeyPress 事件，在此不讓使用者輸入資料
'*************************************************************
Private Sub txd1_keypress(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles TextBox1.KeyPress
If e.KeyChar = vbCr Then
If Not RS232 Is Nothing Then
RS232.Write(TextBox1.Text)
End If
End If
End Sub
```

```
'*****************************************************************
'傳送文字框的 KeyPress 事件，當檢測到 Enter 按鍵時
'將所有的資料送出
'*****************************************************************
Private Sub TextBox1_keypress(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.KeyPressEventArgs) Handles CmbBox.KeyPress
e.KeyChar = ChrW(0)
End Sub


'*****************************************************************
'計時器控制項的 Timer 事件
'將接收的動作放於其中，只要有資料就會被接收進來
'*****************************************************************
Private Sub Timer1_Tick(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Timer1.Tick
instring = ""
RS232.ReadTimeout = 1000
instring = RS232.ReadExisting()
If instring.Length = 0 Then
Exit Sub
Else
rxdmix.Text += instring
End If
End Sub
```

```
'*************************************************************
'『執行轉換』按鈕 的 Click 事件
'將接收進來的資料以手動按鈕進行進位轉換
'*************************************************************
Private Sub TransBtn_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles TransBtn.Click

instring = rxdmix.Text
Dim datasep() = instring.Split(",")

Dim i0 = datasep.GetLowerBound(0)
Dim i1 = datasep.GetUpperBound(0)
'Dim j = 0, k = 1, L = 2
Dim j = 1, k = 2, L = 3, m = 4
Dim HexnumberADCINC12_2 As String, tenADCINC12_2
Dim Hexnumbercounter As String, tencounter
Dim HexnumberADCINC12_1 As String, tenADCINC12_1
Dim HexnumberTime As String, tenTime

mixnumber_i0.Text = i0
mixnumber_i1.Text = i1
```

```
'****************************************
'ADCINC12_2 (Pressure signal)
rxdADCINC12_2_16.Text = datasep(1)
HexnumberADCINC12_2 = datasep(1)
tenADCINC12_2 = "&H" & HexnumberADCINC12_2
rxdADCINC12_2_10.Text = (0.001 * Val(tenADCINC12_2)) & vbCrLf
Do
j += 4
rxdADCINC12_2_16.Text &= datasep(j)
HexnumberADCINC12_2 = datasep(j)
tenADCINC12_2 = "&H" & HexnumberADCINC12_2
rxdADCINC12_2_10.Text &= (0.001 * Val(tenADCINC12_2)) & vbCrLf
Loop While j <= i1 - 4
Valve_Pressure_number.Text = (0.001 * Val(tenADCINC12_2))

'****************************************
'ADCINC12_1 (PWM signal)
rxdADCINC12_1_16.Text = datasep(2)
HexnumberADCINC12_1 = datasep(2)
tenADCINC12_1 = "&H" & HexnumberADCINC12_1
rxdADCINC12_1_10.Text = (0.001 * Val(tenADCINC12_1)) & vbCrLf
Do
k += 4
rxdADCINC12_1_16.Text &= datasep(k)
HexnumberADCINC12_1 = datasep(k)
```

```
tenADCINC12_1 = "&H" & HexnumberADCINC12_1
rxdADCINC12_1_10.Text &= (0.001 * Val(tenADCINC12_1)) & vbCrLf
Loop While k <= i1 – 4
PWM_number.Text = (0.001 * Val(tenADCINC12_1))

'****************************************
'counter    (Laser Encoder)
rxdcounter_16.Text = datasep(3)
Hexnumbercounter = datasep(3)
tencounter = "&H" & Hexnumbercounter
rxdcounter_10.Text = (0.001 * Val(tencounter)) & vbCrLf
Do
L += 4
rxdcounter_16.Text &= datasep(L)
Hexnumbercounter = datasep(L)
tencounter = "&H" & Hexnumbercounter
rxdcounter_10.Text &= (0.001 * Val(tencounter)) & vbCrLf
Loop While L <= i1 - 4
Laser_number.Text = (0.001 * Val(tencounter))

'****************************************
'Counter (Time signal)
rxdTime_16.Text = datasep(4)
HexnumberTime = datasep(4)
tenTime = "&H" & HexnumberTime
```

```
rxdTime_10.Text = Val(tenTime) & vbCrLf
Do
m += 4
rxdTime_16.Text &= datasep(m)
HexnumberTime = datasep(m)
tenTime = "&H" & HexnumberTime
rxdTime_10.Text &= Val(tenTime) & vbCrLf
Loop While m <= i1 - 4
Time_number.Text = Val(tenTime)

End Sub

'*****************************************
'存檔功能表 Click 事件(檔案一 ADCINC12_2 valve pressure signal)
'呼叫存檔對話方框，讓使用者輸入檔名
'依檔名建立檔案物件
'並使用資料流將資料寫入
'*****************************************
Private Sub 儲存資料 ToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles 儲存資料
ToolStripMenuItem.Click
Dim fName1 As String
SaveFileDialog1.Filter = "文字檔(*.txt)|*.txt" '設定檔案類型
DialogResult = SaveFileDialog1.ShowDialog() '顯示存檔對話方框
If DialogResult = Windows.Forms.DialogResult.Cancel Or DialogResult =
```

```
Windows.Forms.DialogResult.No Then Exit Sub
Dim ADCINC12_2 As String = rxdADCINC12_2_10.Text

fName1 = SaveFileDialog1.FileName '取得檔名
Dim SaveFile As New FileInfo(fName1) '建立 FileInfo 物件
Dim FS As FileStream = SaveFile.Create() '建立 FileStream 物件

'轉字串轉為字元陣列
Dim ChArrayADCINC12_2() As Char = ADCINC12_2.ToCharArray
Dim a As Integer
For a = 0 To ChArrayADCINC12_2.GetUpperBound(0)
FS.WriteByte(Asc(ChArrayADCINC12_2(a))) '寫入檔案
Next a

End Sub

'*****************************************
'存檔功能表 Click 事件(檔案二 ADCINC12_1 PWM signal)
'呼叫存檔對話方框，讓使用者輸入檔名
'依檔名建立檔案物件
'並使用資料流將資料寫入
'*****************************************
Private Sub 儲存資料 ToolStripMenuItem1_Click(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles 儲存資料
ToolStripMenuItem1.Click
```

```
Dim fName2 As String
SaveFileDialog2.Filter = "文字檔(*.txt)|*.txt" '設定檔案類型
DialogResult = SaveFileDialog1.ShowDialog() '顯示存檔對話方框
 If DialogResult = Windows.Forms.DialogResult.Cancel Or DialogResult =
 Windows.Forms.DialogResult.No Then Exit Sub

Dim ADCINC12_1 As String = rxdADCINC12_1_10.Text

fName2 = SaveFileDialog1.FileName '取得檔名
Dim SaveFile As New FileInfo(fName2) '建立 FileInfo 物件
Dim PWMFS As FileStream = SaveFile.Create() '建立 FileStream 物件

'轉字串轉為字元陣列
Dim ChArrayADCINC12_1() As Char = ADCINC12_1.ToCharArray
 Dim b As Integer
For b = 0 To ChArrayADCINC12_1.GetUpperBound(0)
PWMFS.WriteByte(Asc(ChArrayADCINC12_1(b))) '寫入檔案
Next b

 End Sub
```

```
'*****************************************
'存檔功能表 Click 事件(檔案三 Counter16_2 Laser encoder)
'呼叫存檔對話方框，讓使用者輸入檔名
'依檔名建立檔案物件
'並使用資料流將資料寫入
'*****************************************
Private Sub 儲存檔案 ToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles 儲存檔案
ToolStripMenuItem.Click
Dim fName3 As String
SaveFileDialog3.Filter = "文字檔(*.txt)|*.txt" '設定檔案類型
DialogResult = SaveFileDialog3.ShowDialog() '顯示存檔對話方框
If DialogResult = Windows.Forms.DialogResult.Cancel Or DialogResult =
Windows.Forms.DialogResult.No Then Exit Sub

Dim counter As String = rxdcounter_10.Text

fName3 = SaveFileDialog3.FileName '取得檔名
Dim SaveFile As New FileInfo(fName3) '建立 FileInfo 物件
Dim VRFS As FileStream = SaveFile.Create() '建立 FileStream 物件

'轉字串轉為字元陣列
Dim c As Integer
Dim ChArrayCounter() As Char = counter.ToCharArray
For c = 0 To ChArrayCounter.GetUpperBound(0)
```

```
VRFS.WriteByte(Asc(ChArrayCounter(c))) '寫入檔案
Next c

End Sub

'****************************************
'存檔功能表 Click 事件(檔案四  Time signal)
'呼叫存檔對話方框，讓使用者輸入檔名
'依檔名建立檔案物件
'並使用資料流將資料寫入
'****************************************
Private Sub  儲存資料 ToolStripMenuItem2_Click(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles  儲存資料
ToolStripMenuItem2.Click
Dim fName4 As String
SaveFileDialog4.Filter = "文字檔(*.txt)|*.txt" '設定檔案類型
DialogResult = SaveFileDialog4.ShowDialog() '顯示存檔對話方框
If DialogResult = Windows.Forms.DialogResult.Cancel Or DialogResult =
Windows.Forms.DialogResult.No Then Exit Sub

Dim Time As String = rxdTime_10.Text

fName4 = SaveFileDialog4.FileName '取得檔名
Dim SaveFile As New FileInfo(fName4) '建立 FileInfo 物件
Dim VRFS As FileStream = SaveFile.Create() '建立 FileStream 物件
```

```
'轉字串轉為字元陣列
Dim ChArrayTime() As Char = Time.ToCharArray
Dim d As Integer
For d = 0 To ChArrayTime.GetUpperBound(0)
VRFS.WriteByte(Asc(ChArrayTime(d))) '寫入檔案
Next

End Sub

End Class
```