

淡江大學電機工程學系碩士在職專班
碩士論文

指導教授：翁慶昌 博士

夾爪控制器的設計與實現

Design and Implementation of Gripper
Controller

研究生：彭千恩 撰

中華民國 105 年 6 月

誌謝

本論文承蒙指導教授翁慶昌老師的教導與關照，以及不辭辛苦指導並協助論文的校正與定稿，才使本論文可以順利完成，在此致上最誠摯的感謝。同時感謝口試委員李世安老師與范俊杰老師的建議與指導，使本論文能更加完整。

碩士在職專班的這段期間，感謝家潤學長的各種指導，使我的專業能力更加提升、感謝翔麟學長、育昇學長、與瀚升學長在實驗期間給予各種的建議與指導。此外，謝謝昇丞、政君、宥澄，因為有你們的協助與幫忙，讓我無後顧之憂。

最後，感謝我的家人一直以來給我的支持與鼓勵，讓我能在工作之餘可以專心研究，順利完成學業。

彭千恩 謹誌

2016 年 7 月

於台北淡水

論文名稱：夾爪控制器的設計與實現

頁數：52

校系(所)組別：淡江大學

電機工程學系

碩士在職專班

畢業時間及提要別：

104 學年度第 2 學期

碩士學位論文提要

研究生：彭 千 恩

指導教授：

翁 慶 昌 博士

論文提要內容：

本論文提出一個可選擇夾爪力道模式之控制方法來設計實現一個夾爪系統，本論文使用 Arduino 微處理器為系統的控制板來確認夾爪是否有夾緊物件。依據不同的夾爪力道模式以及夾取時電流感測器所感測的電流值，本論文設計一個模糊控制器來決定一個可以夾取物件之直流有刷馬達的速度。其原理是當夾爪接觸物件時會產生阻力，並且會使馬達的電流產生變化，利用電流的變化來控制馬達轉速。由實驗結果可知，本論文所提之控制方法確實可以提升夾爪的開合速度與精準度。

關鍵字：夾爪、電流感測器、模糊控制器

表單編號：ATRX-Q03-001-FM030-02

Title of Thesis: Design and Implementation
of Gripper Controller

Total pages: 52

Key words:

Gripper, Current Transducer, Fuzzy Controller

Name of Institute:

Department of Electrical Engineering, Tamkang University

Graduate date: June 2016

Degree conferred: Master

Name of student: Chien-En Peng

Advisor: Dr. Ching-Chang Wong

彭千恩

翁慶昌 博士

Abstract:

In this thesis, a control method which can select a force control mode of the gripper is proposed to design and implement of a gripper system. In this system, an Arduino microprocessor is used as a main control platform in order to confirm whether the gripper tightly grips an object. According to a force control mode of gripper and a current value measured by a current sensor while gripping, a fuzzy controller is designed to decide a motor speed of the DC brush motor to grip objects. The principle is that a resistance will arise when the gripper touches an object and the current of motor will be changed. The proposed method uses the change of current to control the motor speed. From the experimental results, we can see that the proposed control method can effectively improve the opening and closing speed and the accuracy of the gripper.

表單編號：ATRX-Q03-001-FM031-01

目錄

中文摘要	I
英文摘要	II
目錄	III
圖目錄	V
表目錄	IX
第一章 緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 論文架構	2
第二章 夾爪系統介紹	3
2.1 夾爪機構設計	4
2.2 夾爪傳動機構	4
2.3 夾爪機構	7
2.4 夾爪系統架構	8
第三章 電流感測器介紹	16
3.1 霍爾效應	16

3.2 電流之量測	16
3.3 電流感測器架構	17
3.4 電流感測器之工作原理	19
第四章 模糊控制器於夾爪系統之應用.....	20
4.1 前言	20
4.2 模糊控制器基本架構	20
4.3 模糊控制器架構之夾爪系統	24
第五章 實驗結果	30
5.1 夾爪系統夾取各種物件的測試	30
5.2 模糊控制器用於夾爪系統夾取各種物件的測試.....	32
第六章 結論與未來展望	51
6.1 結論	51
6.2 未來展望	51
參考文獻.....	52

圖目錄

圖 2.1、機構設計流程圖	4
圖 2.2、夾爪傳動機構圖	5
圖 2.3、正齒輪示意圖	6
圖 2.4、齒輪計算結果圖	7
圖 2.5、夾爪的 3D CAD 圖及實體圖	8
圖 2.6、夾爪系統架構圖	9
圖 2.7、ARDUINO 控制板	9
圖 2.8、弗萊明左手定則及直流馬達示意圖	11
圖 2.9、直流馬達結構	12
圖 2.10、無鐵芯微型直流有刷馬達 2342W012CR 的實體圖	12
圖 3.1、電流傳感示意圖	16
圖 3.2、電流感測元件	17
圖 3.3、WCS2702 原理方塊圖	18
圖 3.4、WCS2702 輸出電壓變化量與感測電流關係	19
圖 4.1、模糊控制器的基本架構	20
圖 4.2、模糊控制器輸入與輸出變數	24
圖 4.3、輸入變數 I _{CURRENT} 的歸屬函數圖	26

圖 4.4、輸出變數 PWM 的歸屬函數圖.....	27
圖 5.1、夾取網球	30
圖 5.2、夾取軟式網球	31
圖 5.3、夾取高爾夫球	31
圖 5.4、夾取雞蛋	31
圖 5.5、量測流程圖	32
圖 5.6、夾取網球之未使用模糊控制器的馬達電流曲線圖.....	35
圖 5.7、夾取網球之未使用模糊控制器的馬達速度曲線圖.....	35
圖 5.8、夾取網球之 IMODE=1(弱)的馬達電流曲線圖	36
圖 5.9、夾取網球之 IMODE=1(弱)的馬達速度曲線圖	36
圖 5.10、夾取網球之 IMODE=2(中)的馬達電流曲線圖	37
圖 5.11、夾取網球之 IMODE=2(中)的馬達速度曲線圖	37
圖 5.12、夾取網球之 IMODE=3(強)的馬達電流曲線圖	38
圖 5.13、夾取網球之 IMODE=3(強)的馬達速度曲線圖	38
圖 5.14、夾取軟式網球之未使用模糊控制器的馬達電流曲線圖.....	39
圖 5.15、夾取軟式網球之未使用模糊控制器的馬達速度曲線圖.....	39
圖 5.16、夾取軟式網球之 IMODE=1(弱)的馬達電流曲線圖	40
圖 5.17、夾取軟式網球之 IMODE=1(弱)的馬達速度曲線圖	40

圖 5.18、夾取軟式網球之 IMODE=2(中)的馬達電流曲線圖	41
圖 5.19、夾取軟式網球之 IMODE=2(中)的馬達速度曲線圖	41
圖 5.20、夾取軟式網球之 IMODE=3(強)的馬達電流曲線圖	42
圖 5.21、夾取軟式網球之 IMODE=3(強)的馬達速度曲線圖	42
圖 5.22、夾取高爾夫球之未使用模糊控制器的馬達電流曲線圖.....	43
圖 5.23、夾取高爾夫球之未使用模糊控制器的馬達速度曲線圖.....	43
圖 5.24、夾取高爾夫球之 IMODE=1(弱)的馬達電流曲線圖	44
圖 5.25、夾取高爾夫球之 IMODE=1(弱)的馬達速度曲線圖	44
圖 5.26、夾取高爾夫球之 IMODE=2(中)的馬達電流曲線圖	45
圖 5.27、夾取高爾夫球之 IMODE=2(中)的馬達速度曲線圖	45
圖 5.28、夾取高爾夫球之 IMODE=3(強)的馬達電流曲線圖	46
圖 5.29、夾取高爾夫球之 IMODE=3(強)的馬達速度曲線圖	46
圖 5.30、夾取雞蛋之未使用模糊控制器的馬達電流曲線圖.....	47
圖 5.31、夾取雞蛋之未使用模糊控制器的馬達速度曲線圖.....	47
圖 5.32、夾取雞蛋之 IMODE=1(弱)的馬達電流曲線圖	48
圖 5.33、夾取雞蛋之 IMODE=1(弱)的馬達速度曲線圖	48
圖 5.34、夾取雞蛋之 IMODE=2(中)的馬達電流曲線圖	49
圖 5.35、夾取雞蛋之 IMODE=2(中)的馬達速度曲線圖	49

圖 5.36、夾取雞蛋之 $iMODE=3$ (強)的馬達電流曲線圖 50

圖 5.37、夾取雞蛋之 $iMODE=3$ (強)的馬達速度曲線圖 50



表目錄

表 2.1、四款馬達類型的特性表	3
表 2.2、ARDUINO 控制板規格表	10
表 2.3、無鐵芯微型直流有刷馬達 2342W012CR 的規格	13
表 2.4、光學尺 IE2-16 的規格	14
表 2.5、光電開關 PM-K24 的規格	14
表 2.6、馬達驅動器規格	15
表 3.1、WCS2702 規格表	18
表 4.1、直流有刷馬達的輸入與輸出資料庫（語言值表示方式）	28
表 4.2、直流有刷馬達的輸入與輸出資料庫（數字表示方式）	28

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

德國政府 2011 年提出第四次工業革命(又稱「工業 4.0」)概念[1]，其技術基礎是智慧整合感控系統(Cyber-Physical System, CPS)及物聯網(Internet of Things, IoT)，力求推動製造業技術革新，建構智慧工廠優化生產流程。這股浪潮席捲全球，也帶動智慧機器人需求及應用發展，特別是為因應人口老齡化、勞動人口萎縮問題，所研發的工業型與服務型機器人。根據國際機器人聯合會(International Federation of Robotics, IFR)估計[2]，2014 年全球工業機器人市場銷量約 22.5 萬台，創歷史新高，未來市場需求將持續成長。而服務型機器人也深具發展潛力，大致分為專業用、個人或家庭用兩類，IFR 預測其 2014 年至 2017 年市場總銷量，可望突破 3,100 萬台。

隨著產業自動化需求加速攀升，機械手臂應用無疑成為發展重點，不僅要能滿足產線作業需求，還需要能與人近距離合作，正考驗著機器人的可靠性及安全性。目前世界較知名的工業機械手臂公司有德國的 KUKA 工業機械手臂公司[3]、瑞典的 ABB 工業機械手臂公司[4]以及日本的 FANUC 工業機械手臂公司[5]等等。

根據以上的分析，因此本論文之目的為而是透過電流感測器的電流變化來控制抓物力道，在夾爪碰到物件時會產生阻力，這種阻力會讓馬達的電流產生變化，因而可控制力道，提升機械手臂夾爪的開合速度與精準度，來提升整體的生產量。

1.2 論文架構

本論文架構總共分為六章。第一章為緒論。第二章主要介紹夾爪系統以及其機構。第三章介紹電流感測器以及工作原理。第四章主要針對夾爪系統的控制設計一個模糊控制器，來控制夾爪開合時的力量，並且介紹模糊控制器的設計流程。第五章會呈現使用模糊控制器來控制夾爪的實驗結果。第六章為本論文的結論與未來展望。



第二章 夾爪系統介紹

本論文所使用的是由實驗室自行開發、設計及組裝的夾爪。實驗室於 2011 年投入機械手臂的設計與開發外也開發了夾爪系統。夾爪為機械手臂的末端執行器，在設計上都必須考量機械手臂的荷重、工件物的重量、形狀以及大小來設計。由於對夾爪的精準度與速度上，為了提升其精準及速度的需求，其馬達比較如表 2.1 所示[6]。尺寸與重量也變得越來越小，尺寸變小可以使得機械手臂在路徑規劃上不會因為夾太大，導致會有許多路徑規劃上的限制。重量的變小是為了減輕機械手臂的負擔，不會因為夾爪的重量太重，導致各軸的馬達使用壽命減短。

表 2.1、四款馬達類型的特性表

馬達類型	步進馬達	直流無刷馬達	直流有刷馬達	音圈馬達
優點	1.馬達步進角固定 2.扭力大 3.價格便宜	1.調速範圍寬 2.轉矩特性優異 3.高效率、省電	1.閉迴路控制 2.容易控制 3.精密定位	1.速度快 2.閉迴路控制 3.容易控制
缺點	1.馬達體積大 2.容易失步 3.開迴路控制	1.不易控制 2.驅動器體積大 3.價格昂貴	1.扭力小 2.碳刷會耗損 3.不適用高溫	1.推力小 2.重量重 3.價格昂貴

2.1 夾爪機構設計

本論文所使用的夾爪機構設計，在機構的設計流程中，如圖 2.1 所示，首先要訂定目標規格，再來訂定材料規格以及收集相關所需市購材料型錄，以上都訂定好後繪製 3D CAD 圖再利用繪製好的 3D CAD 圖進行分析，確保設計出的結構是否有符合需求，以及結構組裝是否有干涉、餘隙過大等問題，若符合所訂定的目標，再繪製工程圖並且送工廠加工來完成所有的設計[7]。

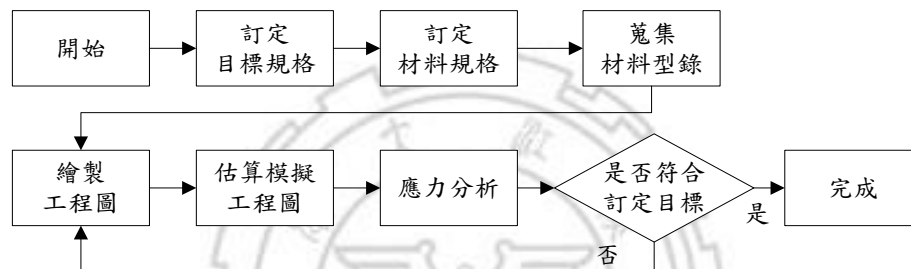


圖 2.1、機構設計流程圖

2.2 夾爪傳動機構

本論文在設計夾爪的傳動機構以齒輪、螺桿以及連桿的搭配，使得夾爪能夠平行開合。設計一個 1 比 6 的齒輪箱，再利用螺桿使得夾爪部分可以平行開合運動，如圖 2.2 所示。

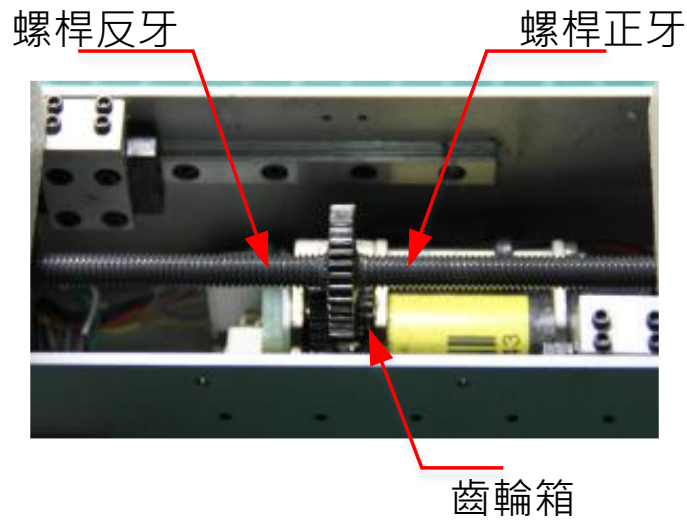


圖 2.2、夾爪傳動機構圖

齒輪的種類可以分為正齒輪、螺旋齒輪、齒條、內齒輪、傘齒輪以及蝸桿[8]，本論文所傳動機構所使用的為正齒輪與齒條。正齒輪，正齒輪的齒線為直線，是在平行的兩軸之間以旋轉的方式傳遞動力的圓柱齒輪，因為容易加工所以廣泛的應用在動力傳動上，齒輪的傳動比，齒輪傳動比可分為減速傳動與增速傳動，減速傳動，齒輪一為驅動齒輪，齒輪二為被動齒輪，增速傳動，齒輪二為驅動齒輪，齒輪一為被動齒輪， T 傳動比， N_2 為被動齒輪的齒數， N_1 為驅動齒輪的齒數，傳動比的計算方式如下：

$$T = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.1)$$

驅動齒輪與被動齒輪的旋轉方向相反，如圖 2.3 所示。

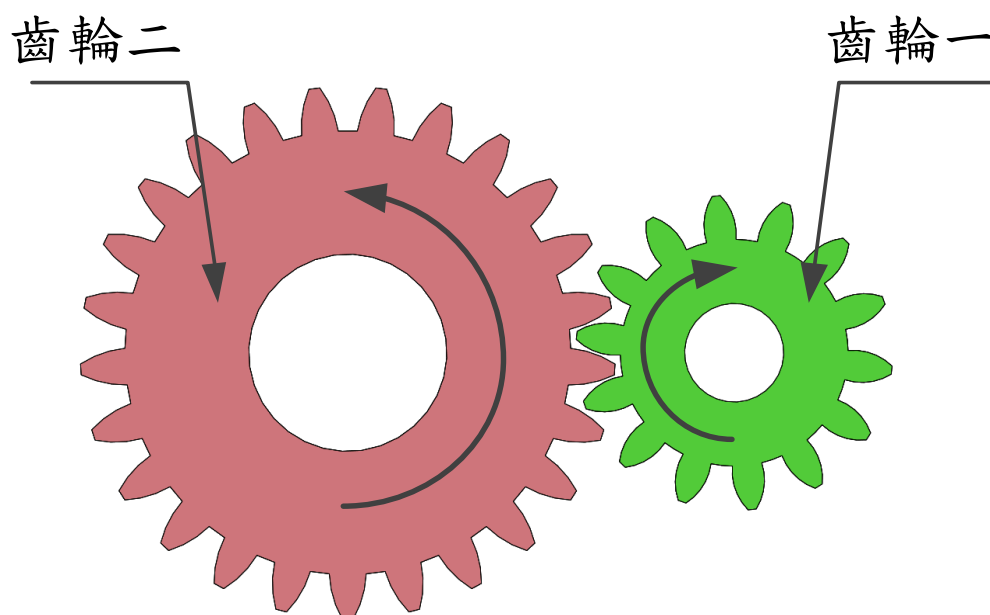


圖 2.3、正齒輪示意圖

在齒輪的設計中齒輪模數 m 、齒數 N 、節圓直徑 D 、節點以及中心距 C 是相當的重要，首先要先決定好傳動比，之後決定齒輪模數，最後確定中心距是否符合定義規格，其計算公式如下：

$$m = \frac{D}{N} \quad (2.2)$$

$$D = m \times N \quad (2.3)$$

$$C = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (2.4)$$

假設齒輪一與齒輪二的模數都為 0.6、齒輪一齒數為 14 齒、齒輪二為 25 齒，利用公式 2.3 與 2.4 分別計算出，節圓直徑與中心距離，如圖 2.4 所示計算出之結果。

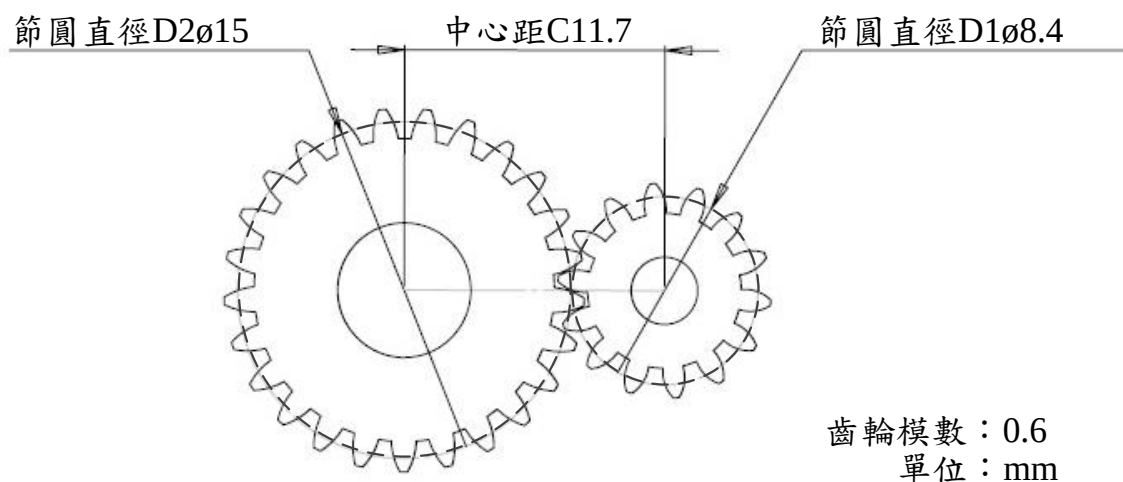
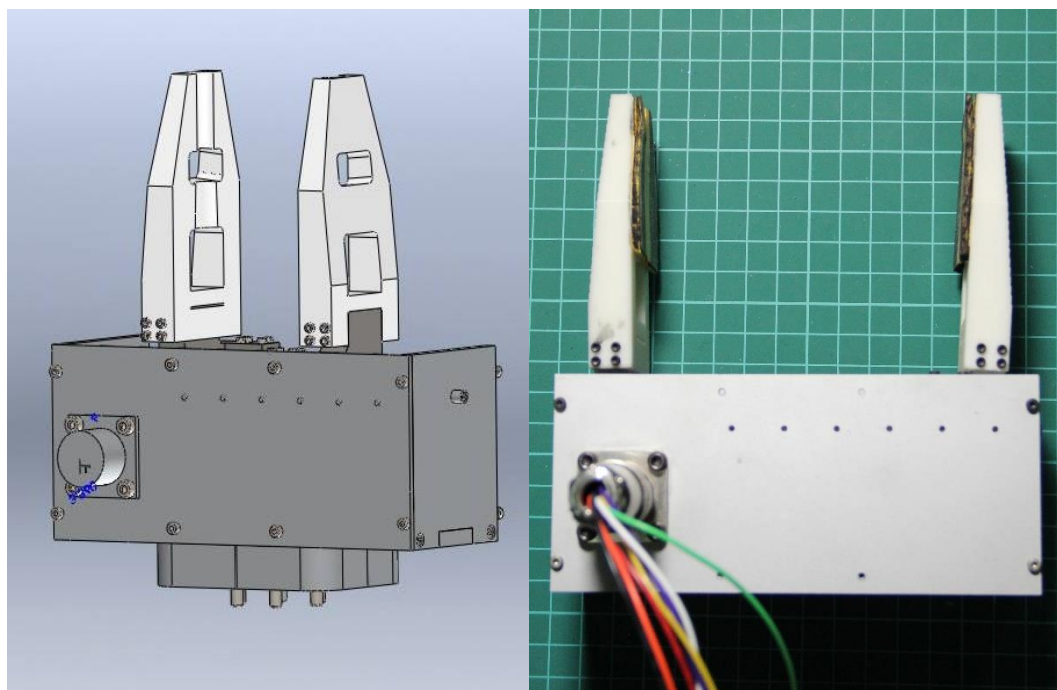


圖 2.4、齒輪計算結果圖

2.3 夾爪機構

設計完傳動機構之後，再利用 SolidWorks 繪圖軟體繪製 3D CAD 圖，該草圖會依據各個挑選好的馬達的大小以及位置的配置來繪圖，並且利用 SolidWorks 繪圖軟體檢查繪製出來的 3D CAD 圖，檢查市購材料與設計零件的形狀、大小是否符合所要的尺寸、餘隙、干涉、孔位以及安裝方式等，將檢查完確認沒有任何不符合上述的條件，接下來繪製工程圖，將工程圖送到工廠加工，材質選用 6061 鋁合金以 CNC 銑床加工製作各部分零件，並且經過陽極處理，如圖 2.5(a)及(b)夾爪的 3D CAD 圖，及實體圖。



(a)3D CAD 圖

(b)實體圖

圖 2.5、夾爪的 3D CAD 圖及實體圖

2.4 夾爪系統架構

夾爪系統架構圖如圖 2.6 所示，主要的系統控制流程從 Arduino 控制板開始，Arduino 控制板會讀取直流馬達編碼器(Encoder)的回授來測量目前直流馬達的所在位置，以及光電開關(Photoelectric Sensor)來感測直流馬達帶動的夾指是否會與其他機構碰撞以及直流馬達位置的歸零校正，在 Arduino 控制板內編寫了一個夾具控制器會根據電腦送的夾具命令轉換成直流馬達要移動的距離去改變 PWM (Pulse Width Modulation)模組的工作週期寬度的大小，來控制直流馬達的速度。夾爪系統的硬體設備主要可以分為 4 個部分：(1) Arduino UNO 微控制器，(2) 直流馬達(DC

Motor)，(3) 編碼器(Encoder)，以及(4) 光電開關(Photoelectric Sensor)，分別介紹如下：

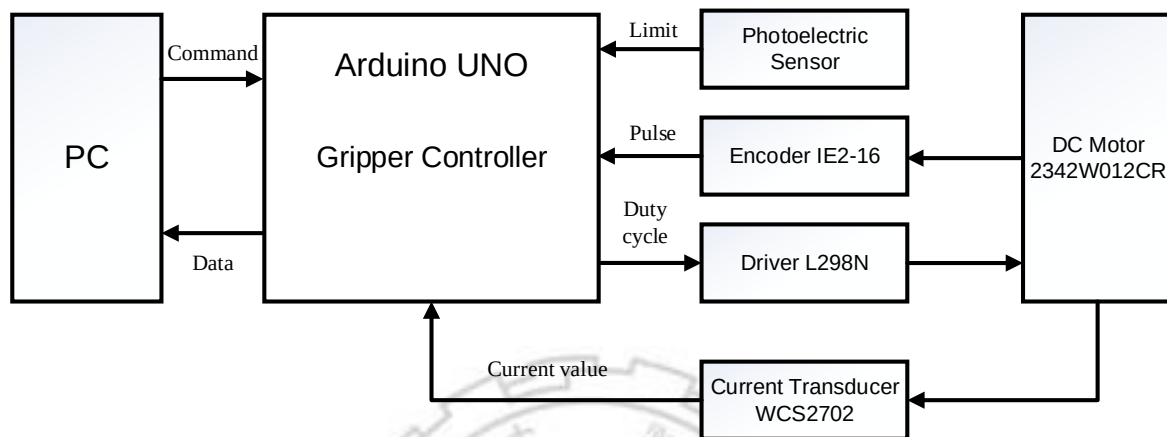


圖 2.6、夾爪系統架構圖

(1) Arduino 控制板

Arduino 控制板如圖 2.7 所示，透過 PC 接收軟體策略端的訊號來控制夾爪，接著回傳現在夾爪的狀況，規格如表 2.2 所示。

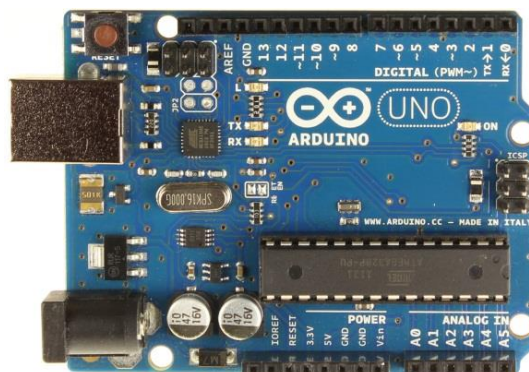


圖 2.7、Arduino 控制板

表 2.2、Arduino 控制板規格表

Digital I/O	13 個數位輸出/輸入端
	(pin 13 為 LED 指示用)
Analog Out	6 個 Digital I/O 可做 Analog Out
	(pin 3,5,6,9,10,11)
Analog In	6 個類比輸入(pin 0~5)
Tx/Rx	支援 Tx/Rx 訊號輸入輸出
	(使用中 pin 0,1 不可做為數位接腳使用)
USB 傳輸與供電	支援 USB 供電與資料傳輸
輸出電壓	5V,3.3V 兩種
LED13	pin13 內建 LED 燈
支援線上燒錄	免插拔晶片

(2) 直流馬達

直流馬達(Direct Current, DC Motor)的工作原理可以「弗萊明左手定則」來說明[交通大學電力電子晶片設計與 DSP 控制實驗室-電動機控制簡介 URL:<http://pemclab.cn.nctu.edu.tw/>]，弗萊明左手定則可以用來判斷一根載有電流的導線置於磁場中時其受力的方向。如圖 2.8 所示左手的食指為磁場方向，中指為電流方向，則大姆指為導線受力的方向，因此圖

2.8 所示的電流方向，則環狀線圈受磁場作用，將順正時鐘方向旋轉，其產生扭矩 T ，如式 2.5 所示。

$$T = KIB[N \cdot m] \quad (2.5)$$

其中 K 為比例常數， I 為流經線圈的電流， B 為永久磁鐵所產生之磁場強度。

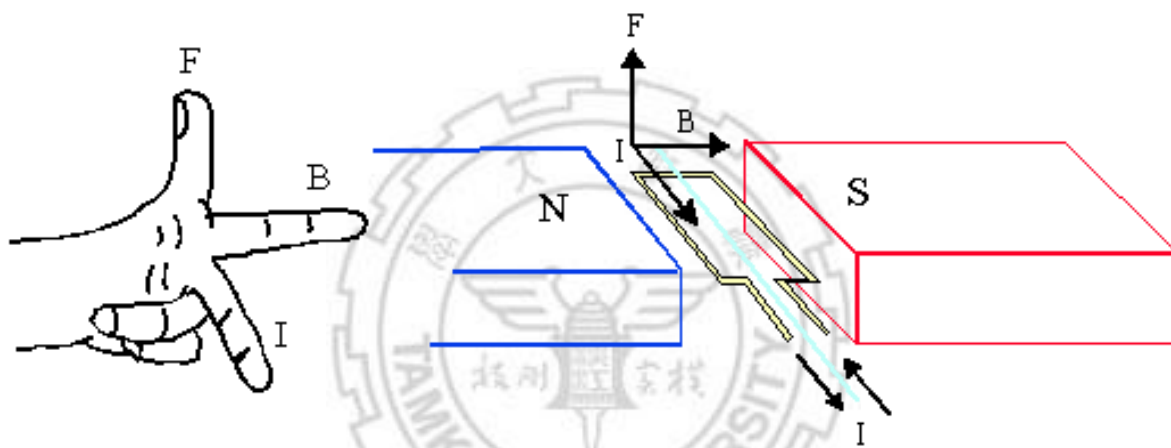


圖 2.8、弗萊明左手定則及直流馬達示意圖

直流馬達主要是由永久磁鐵、電梳線圈、換向器(commutator)與碳刷(carbon brush)所組成的，如圖 2.9 所示，經由換向器與碳刷，在電梳線圈的電梳電流所產生的磁場會與永久磁鐵所形成的磁場保持垂直，因此在永久磁鐵磁場維持固定的情況下，直流馬達產生的扭矩會與電梳電流成正比。直流馬達之所以易於控制，也就是因為電梳電流與扭矩間有此一線性關係，而馬達控制的關鍵正在於如何有效率且線性的控制其產生之扭矩[]。

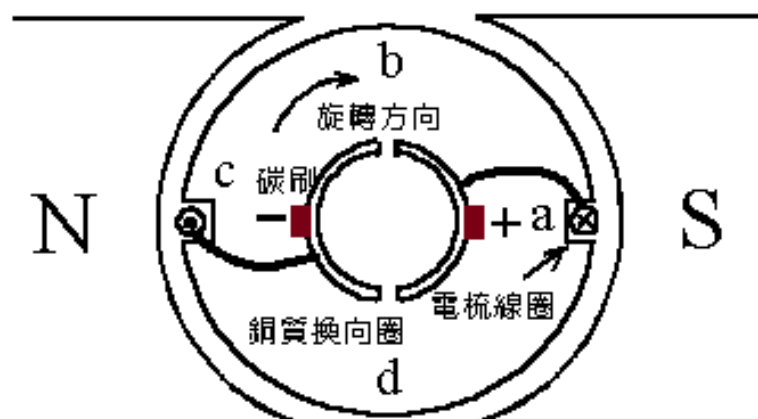


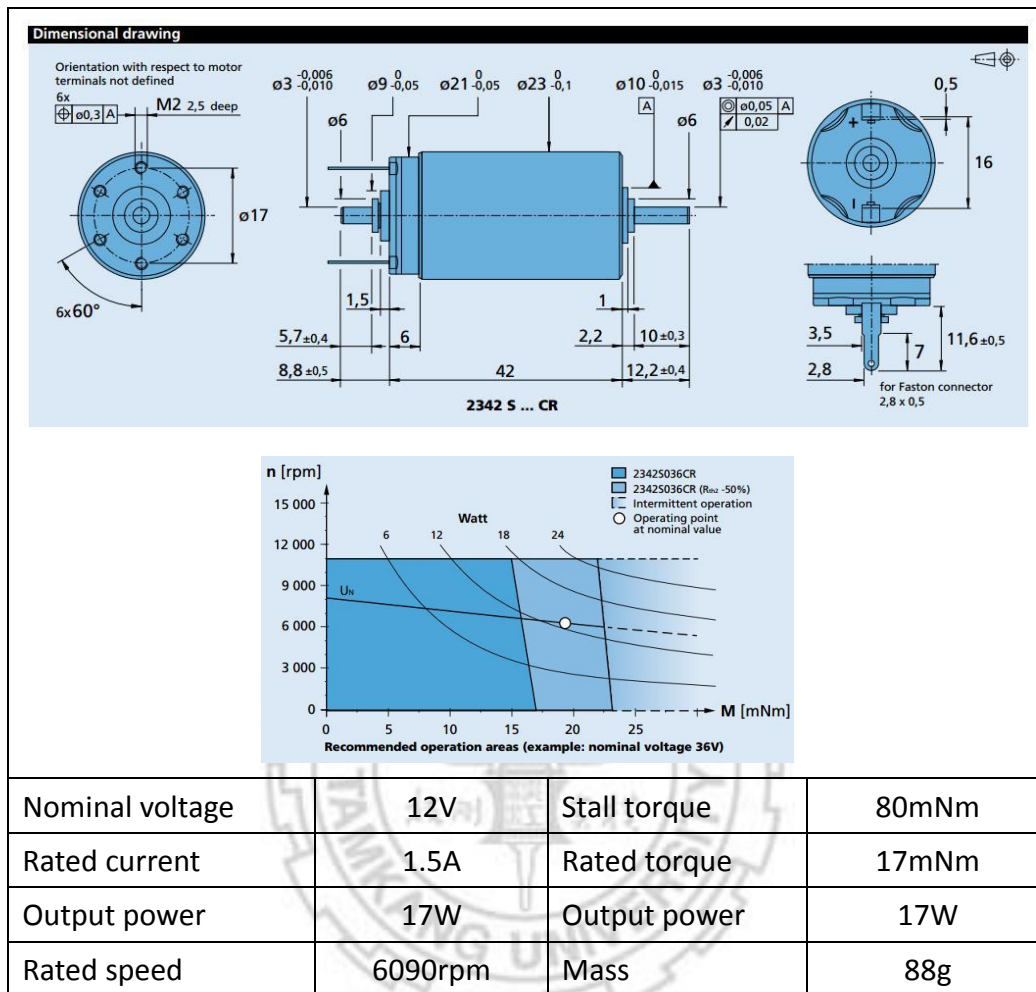
圖 2.9、直流馬達結構

本論文選用德國 FAULHABER 公司所生產之型號為 2342W012CR 的無鐵芯微型直流馬達，此革命性的創新發明，改變了傳統永久磁鐵直流馬達的應用，其特點為體積小、功率高、低慣性、快速啟動、精密定位、電壓與轉速及電流與轉矩的關係呈線性關係，再加上壽命長的優點，實現了微型化精密機電控制的可能性，其實體如圖 2.10 所示，規格與特性如表 2.3 所示。



圖 2.10、無鐵芯微型直流有刷馬達 2342W012CR 的實體圖

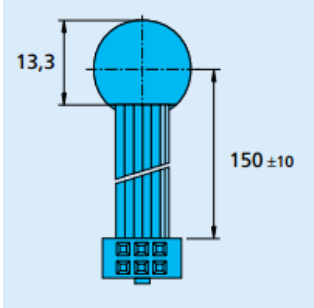
表 2.3、無鐵芯微型直流有刷馬達 2342W012CR 的規格



(3) 編碼器

編碼器是使用磁場來感測其位置，並將位置轉換為數位訊號後輸出給控制器計算。本論文使用的編碼器為德國 FAULHABER 公司所生產之型號為 IE2-16_的磁性編碼器，規格如表 2.4 所示。

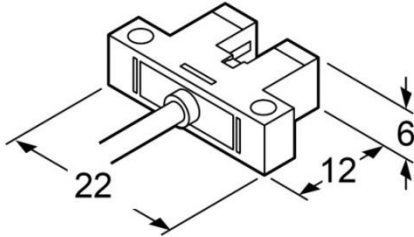
表 2.4、光學尺 IE2-16 的規格

	
Supply voltage	4-18V
Accuracy	22.5°

(4) 光電開關

光電開關是用來限制機構移動的範圍，防止機構超出最大工作範圍而受損，本論文使用的光電開關為日本 Panasonic 公司所生產之型號為 PM-K24 的光電開關，規格如表 2.5 所示。

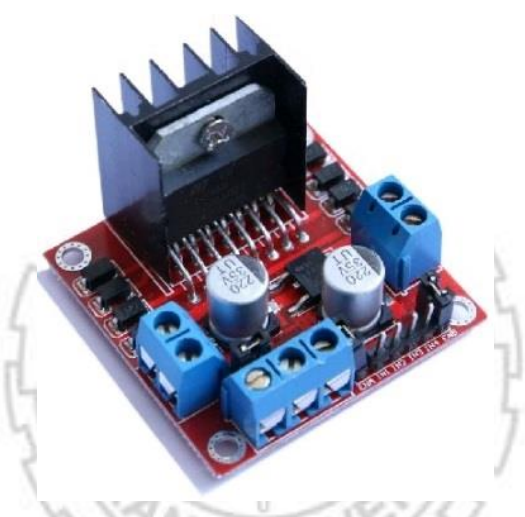
表 2.5、光電開關 PM-K24 的規格

	
感應範圍	5 mm
最小可感應物件	0.8 × 1.8 mm
工作電壓	5 to 24 V DC ±10 %
額定電流	15 mA
重量	10g

(5) 馬達驅動器

馬達驅動器是需要與馬達搭配使用，馬達驅動器主要的功能是由 Arduino 輸出脈波寬度(Pulse Width Modulation, PWM) 來進行馬達的速度控制，使得夾爪能夠開合，其馬達驅動器規格如表 2.6 所示。

表 2.6、馬達驅動器規格



驅動晶片	L298N
邏輯電壓	5V
驅動電壓	5-35V
邏輯電流	0-36mA
驅動電流	2A
重量	30g

第三章 電流感測器介紹

3.1 霍爾效應

霍爾效應(Hall Effect)是 1879 年由 E. H. Hall 所發現[9]，在某些特殊材質之晶體如銻化銦(InSb)、砷化銦(InAs)、砷化鎵(GaAs)等，於其上通以電流並將此晶體置於磁場中，則會有一電位差跨於該晶體正、反兩面的邊緣上(V_H)。

3.2 電流之量測

待測電流之導線穿過霍爾裝置的圓孔，另控制電流，則可由霍爾電壓代入 3.1 式求得磁通密度，再由 推得待測導線之電流 I ，如圖 3.1 所示。此裝置亦稱為電流傳感器(Current Transducer)。電流量測用霍爾裝置之輸出 與輸入 I 間之關係，可由廠商提供之規格表中得知。

$$B = \frac{V_H}{\frac{K}{d} \times I_H \times \cos \theta} \quad (3.1)$$

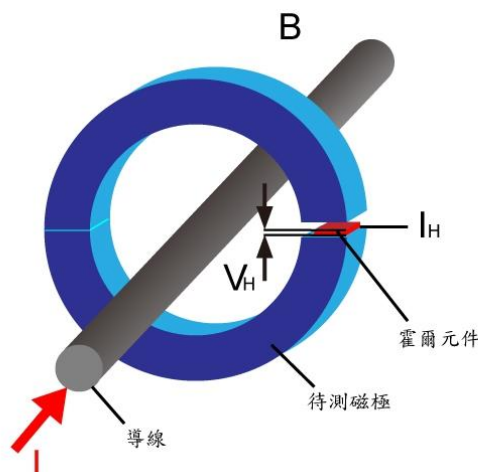


圖 3.1、電流傳感示意圖

3.3 電流感測器架構

本論文所使用的 Winson WCS2702 霍爾磁感線性電流感測元件[10]，如圖 3.2 所示。提供經濟實惠與精準的交流/直流的電流感測解決方案，特別適用於工業，商業，通訊系統以及各類智慧型電源管理系統，其規格如表 3.1 所示。

WCS2702 常用的應用如馬達電機控制，負載偵測與管理，以及系統過電流偵測與保護等；它的原理是當電流通過內部電流通道時，電流轉換器會將此電流成比例的轉換成磁場，而線性霍爾 IC 又會將此一磁場成比例的轉換成輸出電壓，其方塊圖如圖 3.3 所示。



圖 3.2、電流感測元件

表 3.1、WCS2702 規格表

型號	WCS2702
工作電壓(V)	3.0 - 12
工作電流(mA)	3.5
零電流電壓輸出(V)	2.4 - 2.6
靈敏度(V/A)	0.85 - 1.15
通過電流(A)	2.5

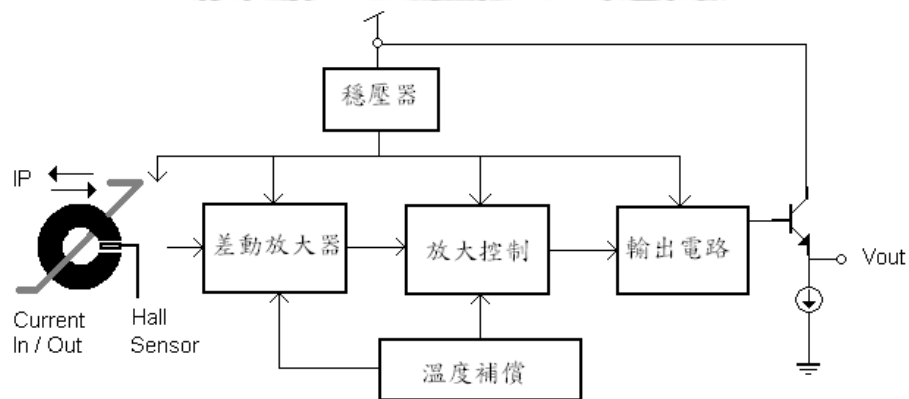


圖 3.3、WCS2702 原理方塊圖

3.4 電流感測器之工作原理

電流感測器的原理是當電流通過內部電流通道時，電流轉換器會將此電流成比例的轉換成磁場，而線性霍爾 IC 又會將此一磁場成比例的轉換成輸出電壓；如圖 3.4 所示表示當 $\Delta V_{out} = 100\text{mV}$ 所對應的感測電流為 0.1A ，而 $\Delta V_{out} = 500\text{mV}$ 所對應的感測電流為 0.5A 依此類推。

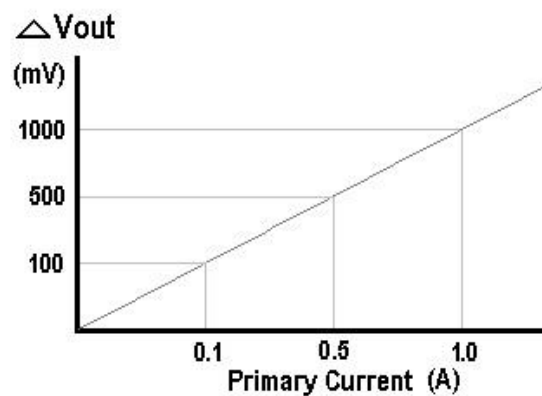


圖 3.4、WCS2702 輸出電壓變化量與感測電流關係

第四章 模糊控制器於夾爪系統之應用

4.1 前言

本節模糊理論是由美國加州大學柏克萊分校的札德(Lotfi. A. Zadeh)教授於 1965 年所提出的一門理論，它是用來表現某些無法明確定義的模糊性概念，尤其是在表現人類語言特有的模糊現象，也是為了解決真實世界當中普遍存在的模糊現象而發展的一門學問。

4.2 模糊控制器基本架構

圖 4.1 為模糊控制器的基本架構[11][12][13]，一般來說，模糊控制器主要有四大部分：(1) 模糊化(fuzzifier)，(2) 模糊知識庫(fuzzy knowledge base)，(3) 模糊推論引擎(fuzzy inference engine)，(4) 解模糊化(defuzzifier)。其分別說明如下：

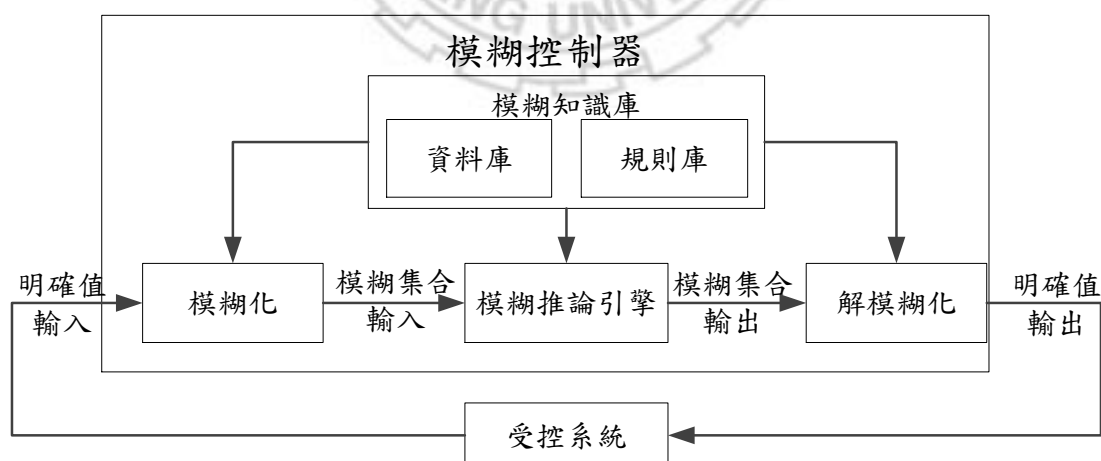


圖 4.1、模糊控制器的基本架構

(1) 模糊化

由於在模糊控制系統當中輸入到模糊推論運算所使用的輸入變數，是經由語言化的規則所描述出的模糊值，因此若要將實際受控系統所量測到的明確值，如速度、溫度以及位置等輸入到模糊控系統中，必須皆由模糊化將明確的資料轉換成模糊的資料。

(2) 模糊知識庫

模糊知識庫是由資料庫(data base)與規則庫(rule base)所組成，其儲存著受控系統所涉及的相關應用領域的知識及參與控制目標、策略等的資料。其主要組成有兩項(a) 資料庫與(b) 規則庫，期分別說明如下：

(a) 資料庫

資料庫提供了語言變數所需的定義，如變數論域、語言項集合與歸屬函數的規劃等，以方便提供控制規則與模糊控制中的模糊資料管理。

(b) 規則庫

規則庫儲存了許多條以語言形式所表達的控制規則，是用來描述專家對於控制系目標的特性所推導出來的控制策略。其規則是以如式(4.1)所示的 IF-THEN 條件式敘述語句來表達。IF 的部分為前件部，是用來判斷此條規則是否成立的條件，THEN 的部分稱為後件部，是用來表現符合條件所應輸出之結果。

$$\text{IF } \langle \text{condition} \rangle \text{ THEN } \langle \text{result} \rangle \quad (4.1)$$

(3) 推論推論引擎

模糊推論引擎是模擬人類的近似推理方式所做出的決策判斷，其依據專家所建立的模糊知識庫並，來推論出模糊的輸出結果。

(3) 解模糊化

解模糊化是一種將模糊推論引擎所有推論出的模糊輸出結果轉換成明確輸出值的轉換介面。

模糊控制器是一種結合操控者的直覺與經驗的控制器，設計時不需要使用數學模型來完整的描述受控系統。設計一個模糊控制器主要可以分為六個步驟：

(1) 決定輸入與輸出的變數

模糊控制器的輸入變數通常是取自受控系統的觀測量，也可以是推導出來的資料，而模糊控制器的輸出變數則是操控系統所需的操作量。

(2) 決定輸入與輸出變數的論域

輸入到模糊控制器的資料可能是受控系統的觀測量的明確數值(crisp value)，也可能是帶有模糊性的干擾訊號。因此設計模糊控制器必須先考慮輸入訊號的各種可能形式，選擇適當變數論域範圍與模糊化方式，以便系統的狀態轉換成語言項。

(3) 決定輸入輸出變數的語言項

模糊控制器是採用語言變數而非數值變數的方式來描述系統的特性，

因此設計模糊控制器必須考慮到受控系統輸出入變數的量測與操作範圍、系統的特性等因素，以便決定輸出入變數的語言項。

(4) 決定輸入與輸出變數的歸屬函數

模糊集合的語言項與歸屬函數是根據系統輸出入變數的特性，來決定受控系統輸出入空間的模糊分割方式與模糊化策略，以便把每個輸出入變數的明確值轉換成語言變量的形式。

(5) 決定規則庫

模糊控制器是利用語言化的條件是控制規則來表示一項操控系統的控制策略，由多個控制規則所組成的集合稱為規則庫，通常模糊控制器的規則庫可以由操控人員的經驗和專家的知識推導出來。

(6) 決定模糊推論引擎與解模糊化的方法

模糊推論引擎是模糊控制器內部負責推理運算的核心單元。解模糊化就是把模糊控制器推論完成的模糊輸出量轉換成明確的數值，才能控制實際的受控系統，而解模糊化常用的方法有最大歸屬度法、重心法、高度法以及面積法等。

4.3 模糊控制器架構之夾爪系統

以下根據操作夾爪系統來設計具有模糊控制器之夾爪系統，並且以 4.2 節的六個設計步驟來完成本模糊控制器的設計流程。

(1) 決定輸入與輸出的變數

本論文所設計的夾爪系統模糊控制器為一個直流有刷馬達所組成，只要控制直流有刷馬達的速度，就可以控制直流有刷馬達旋轉快慢或停止，進一步來控制夾爪夾取物件時的鬆緊度。本論文針對直流有刷馬達所設計的模糊控制器為兩個輸入變數與一個輸出變數的模糊控制器，其架構如圖 4.2 所示。

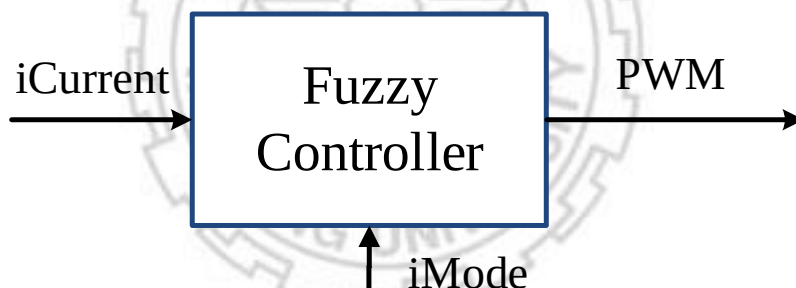


圖 4.2、模糊控制器輸入與輸出變數

此兩個輸入變數分別為：iMode 為夾爪夾取物件時的鬆緊模式，iCurrent 為馬達目前的電流值。對應此模糊控制器的輸出變數為 PWM，改變 PWM (Pulse Width Modulation) 的週期寬度的大小(Duty Cycle)，來改變直流有刷馬達的速度。

(2) 決定輸入與輸出變數的論域

模糊控制器的兩個輸入變數：iMode 為夾爪夾取物件時的鬆緊模式，iCurrent 為馬達目前的電流值，而定義其論域的範圍如式子(4.2)以及式子(4.3)所示，一個輸出變數 PWM 為 PWM 的週期寬度的大小，並定義其論域的範圍如式子(4.4)所示。

$$iMode \in [1,2,3] \quad (4.2)$$

$$iCurrent \in [0,2.5] \quad (4.3)$$

$$PWM \in [0,100] \quad (4.4)$$

由於模糊控制器的輸入變數 iMode 是由操作者來決定夾具夾取物件時的力道模式，夾爪力道模式可設定三種參數 1、2、3，分別表示弱、中、強的夾取力道，而輸入變數 iCurrent 為馬達目前的電流量根據馬達特性曲線可以知道電流量與扭力成正比，在以上兩個已知的輸入變數的論域範圍，所對應之最大輸入的範圍。而本論文將此控制器的輸出為直流有刷馬達的移動速度，直接對應到 PWM 的週期寬度的大小以控制直流有刷馬達速度，在此 PWM 的週期寬度的大小是控制直流有刷馬達移動速度的範圍，當 PWM 為 100 時表示馬達為全速運轉每秒 40mm；當 PWM 為 0 時即馬達停止。

(3) 決定輸入輸出變數的語言項

本論文的輸入變數 iCurrent 以及輸出變數 PWM 分別為四個語言項以及三個語言項，其語言項分別表示為

$$T(iCurrent) = \{VPS, PS, PM, PB\} = \{B_0, B_1, B_2, B_3\} \quad (4.5)$$

$$T(PWM) = \{ZO, PM, PB\} = \{C_0, C_1, C_2\} \quad (4.6)$$

其中輸入變數 $iCurrent$ 的四個語言項依序分別代表正很小(VPS)、正小(PS)、正中(PM)以及正大(PB)，輸出變數 PWM 的三個語言項依序分別代表零(ZO)、正中(PM)以及正大(PB)。

(4) 決定輸入與輸出變數的歸屬函數

如圖 4.3 所示，本系統用三角形的歸屬函數來描述模糊控制器的輸入變數 $iCurrent$ 的模糊集合，而對於輸出變數 PWM 的模糊集合，則使用模糊單點(singleton)，如圖 4.4 所示。

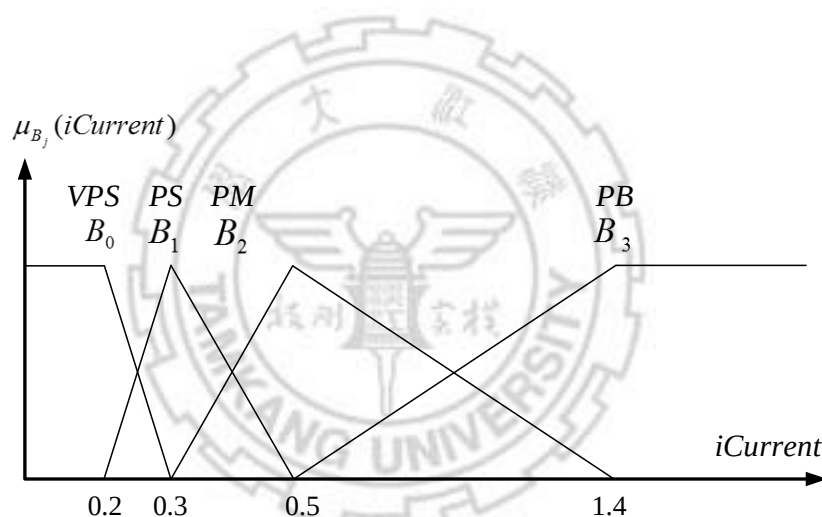


圖 4.3、輸入變數 $iCurrent$ 的歸屬函數圖

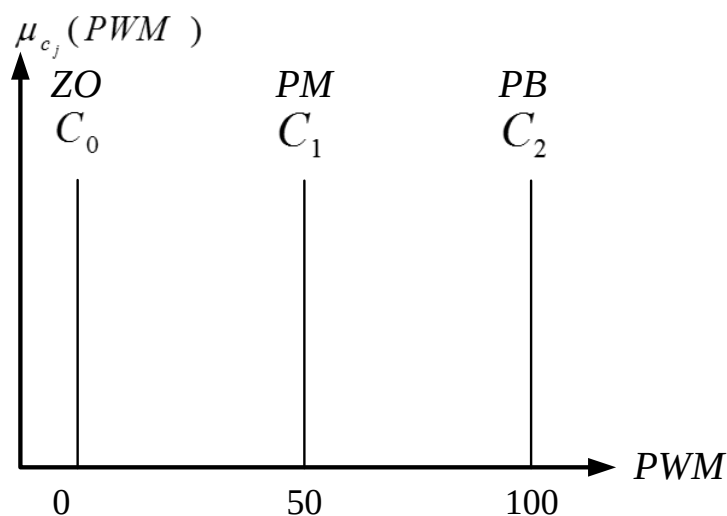


圖 4.4、輸出變數 PWM 的歸屬函數圖

(5) 決定規則庫

在規則庫的建立上，本論文所建構的規則表如表 4.1 與表 4.2 所示。根據兩個輸入兩個語言變數的所有語言向排列組合，可以用表 4.1 所示的 $3 \times 4 = 12$ 條語言化的條件式控制規則的通式來表示模糊控制器的策略，式 4.7 為此 12 條規則的通式。

規則 $R_i(j_1, j_2)$ ：

$$\text{IF } iMode \text{ is } A_{j_1} \text{ and } iCurrent \text{ is } B_{j_2}, \text{ THEN PWM is } C_{f(j_1, j_2)} \quad (4.7)$$

其中 A_{j_1} 、 B_{j_2} 分別為輸入變數 $iMode$ 與 $iCurrent$ 的模糊集合。 $C_{f(j_1, j_2)}$ 則為輸出變數 PWM 的模糊集合。也就是 $A_{j_1} \in T(iMode)$ 、 $B_{j_2} \in T(iCurrent)$ 、 $C_{f(j_1, j_2)} \in T(PWM)$ ，並且其中 $j_1 \in \{0, 1, 2\}$ 、 $j_2 \in \{0, 1, 2, 3\}$ 、 $f(j_1, j_2) \in \{0, 1, 2\}$ 。舉例來說，在 12 條規則中的第 $R_1(2, 3)$ 條規則，如式 4.8 所示。

$$\text{IF } iMode \text{ is } A_2 \text{ and } iCurrent \text{ is } B_3, \text{ THEN PWM is } C_4 \quad (4.8)$$

此條規則的語意為“當輸入變數 iMode 為 3(強)且輸入變數 iCurrent 為正大(PB)，則輸出變數 PWM 為零(ZO)”，其他所有規則的表示可依此類推。

表 4.1、直流有刷馬達的輸入與輸出資料庫（語言值表示方式）

PWM		iMode		
		1	2	3
iCurrent	VPS	PB	PB	PB
	PS	ZO	PM	PM
	PM	ZO	ZO	PM
	PB	ZO	ZO	ZO

表 4.2、直流有刷馬達的輸入與輸出資料庫（數字表示方式）

$f(j_1, j_2)$		j_1		
		0	1	2
j_2	0	2	2	2
	1	0	1	1
	2	0	0	1
	3	0	0	0

(6) 決定模糊推論引擎與解模糊化的方法

在模糊推論引擎方面是使用 Mamdani 的模糊推論法，每一條規則被觸動規則的前件部輸入個命題各命題部的歸屬度採用邏輯積演算法（及取小(min)運算），所以第 (j_1, j_2) 條規則之前件部的適合度 $w(j_1, j_2)$ ，如式(4.9)所示。

$$w(j_1, j_2) = \min(\mu_{A_{j_1}}(\text{iMode}), \mu_{B_{j_2}}(\text{iCurrent})), \begin{matrix} j_1 \in \{0,1,2\} \\ j_2 \in \{0,1,2,3\} \end{matrix} \quad (4.9)$$

在解模糊化的方法上，採用加權平均法(weighted average method)，所以模糊控制器的輸出 PWM，如式(4.10)所示。

$$\text{PWM} = \frac{\sum_{j_1=2}^3 \sum_{j_2=4}^3 w(j_1, j_2) \times C_{f(j_1, j_2)}}{\sum_{j_1=2}^3 \sum_{j_2=4}^3 w(j_1, j_2)} \quad (4.10)$$

其中 $C_{f(j_1, j_2)}$ 為模糊集合單點輸出所代表的明確值(crisp value)。



第五章 實驗結果

本論文的實驗目的設計一夾爪系統，可以穩定夾取各種物件，並將模糊控制器設計在夾爪系統上，使夾爪能夠根據不同的夾爪力道模式，在電流感測器所感測的電流變化來控制夾取物件時的鬆緊度。

5.1 夾爪系統夾取各種物件的測試

本論文先測試夾爪系統在其工作範圍內是否可以夾取各種大小的物件。本測試主要為夾取網球、軟式網球、高爾夫球以及雞蛋，圖 5.1 至圖 5.8 為夾爪夾取各種物件前後的比較圖。

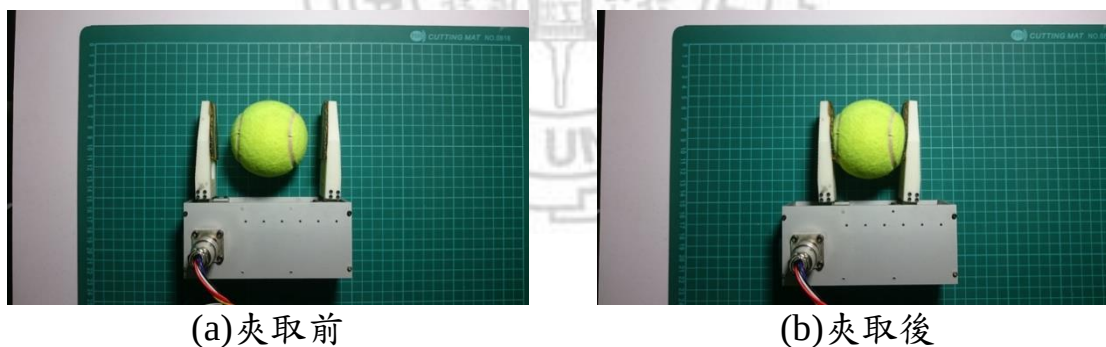


圖 5.1、夾取網球



(a)夾取前



(b)夾取後

圖 5.2、夾取軟式網球

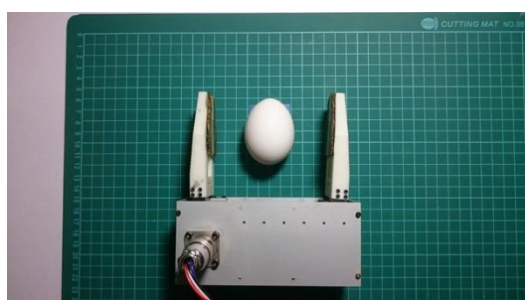


(a)夾取前

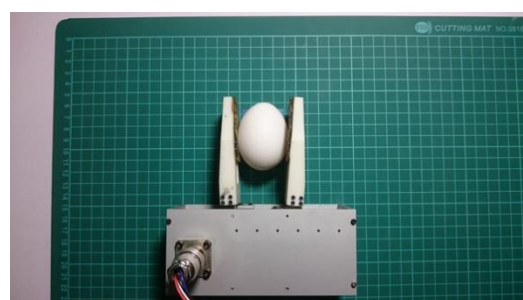


(b)夾取後

圖 5.3、夾取高爾夫球



(a)夾取前



(b)夾取後

圖 5.4、夾取雞蛋

5.2 模糊控制器用於夾爪系統夾取各種物件的測試

本論文會根據使用者所設定的夾爪力道模式來控制夾取物件時的鬆緊度。因此量測的方式如圖 5.5 的流程，首先設定夾爪模式，然後執行夾取指令使夾爪往內移動直到夾取物件停止，最後夾爪打開回歸起始位置。

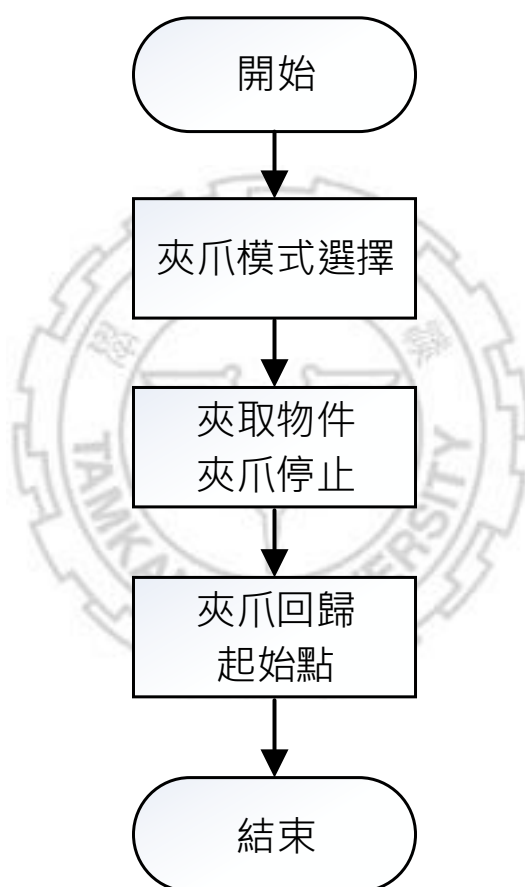


圖 5.5、量測流程圖

比較無使用模糊控制器及使用模糊控制器後在三種夾爪力道模式下，夾取物件時馬達的速度與電流變化，如圖 5.6 至圖 5.37 所示。首先說明在每個電流曲線圖 0.3 秒皆有一個瞬間大電流，這是因為直流有刷馬達剛啟動時需要大電流來克服機構齒輪之最大靜摩擦力所造成的現象，故實驗中的模糊控制器必須在此現象發生後才能加入，避免夾爪誤動作的發生。

圖 5.6、圖 5.14、圖 5.22 及圖 5.30 為無模糊控制器的馬達電流變化結果，可以發現夾爪接觸物件後使電流值升高，但因為馬達沒停止所以造成電流持續在飽和狀態，這會易造成馬達的耗損，像是功率下降、溫度提升等；而圖 5.7、圖 5.15、圖 5.23 及圖 5.31 為無模糊控制器的馬達速度變化結果，PMW 皆為 100 表示馬達為全速運轉每秒 40mm。

圖 5.8 至圖 5.13 為有模糊控制器夾取網球的馬達電流與速度變化結果，夾爪接觸物件後使電流值升高，並會依照使用者所設定的三種力道模式，在不同的電流情況使馬達停止並成功夾取物件且不會鬆脫，隨後電流值也降至趨近於零。

圖 5.16 至圖 5.21 為有模糊控制器夾取軟式網球的馬達電流與速度變化結果，夾爪接觸物件後使電流值升高，並會依照使用者所設定的三種力道模式，在不同的電流情況使馬達停止並成功夾取物件，隨後電流值也降至趨近於零。由於軟式網球比網球更軟，所以電流值上升較為平緩，使三種力道模式也較為明顯。

圖 5.24 至圖 5.29 為有模糊控制器夾取高爾夫球的馬達電流與速度變化結果，夾爪接觸物件後使電流值升高，由於高爾夫球較硬，所以夾爪

接觸時讓電流瞬間上升太快，所以三種力道模式皆在相近的大電流情況使馬達停止並成功夾取物件，隨後電流值也降至趨近於零。

圖 5.32 至圖 5.37 為有模糊控制器夾取雞蛋的馬達電流與速度變化結果，夾爪接觸物件後使電流值升高，但由於雞蛋表面也屬於硬材質，所以夾爪接觸時也讓電流瞬間上升太快，所以三種力道模式皆在相近的大電流情況使馬達停止並成功夾取物件，隨後電流值也降至趨近於零。

根據這些曲線圖可看出在在夾取網球與軟式網球其電流變化趨勢較小，在不同的夾取模式下使馬達停止在不同的電流值狀態，以達到控制夾取物件時的鬆緊度，而在夾取高爾夫球與雞蛋其電流變化趨勢較大，在不同的夾取模式下使馬達停止在相同的電流值狀態，則無法控制夾取物件時的鬆緊度。由此實驗結果可以發現在較軟的物件上，電流感測器所感測的電流值上升較為平緩，而在較硬的物件上，則因為阻力瞬間太大造成電流值直接衝高。

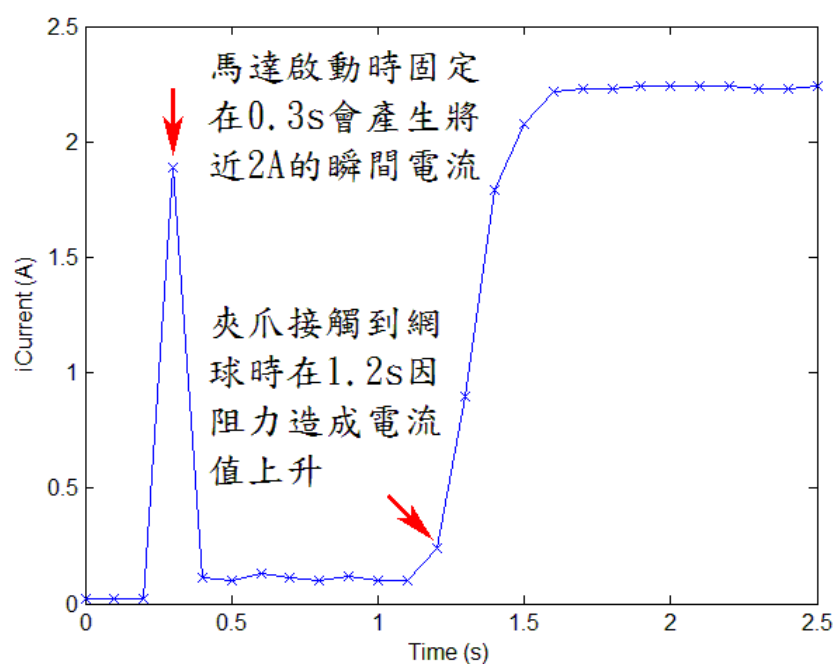


圖 5.6、夾取網球之未使用模糊控制器的馬達電流曲線圖

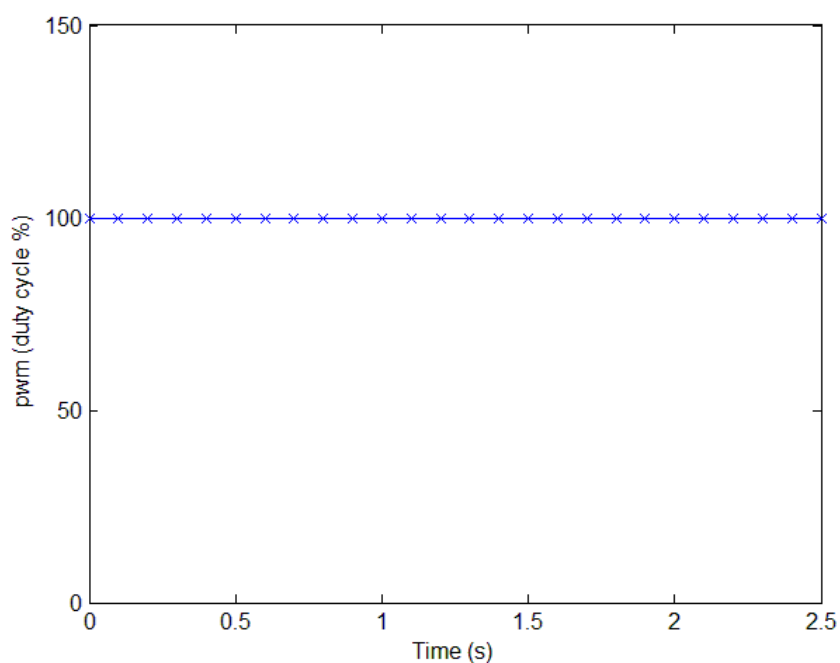


圖 5.7、夾取網球之未使用模糊控制器的馬達速度曲線圖

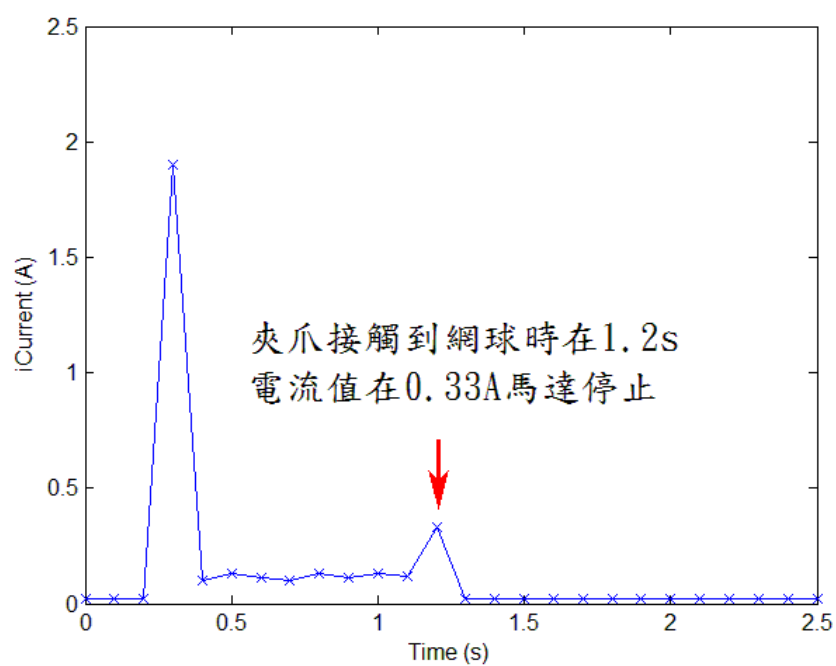


圖 5.8、夾取網球之 iMode=1(弱)的馬達電流曲線圖

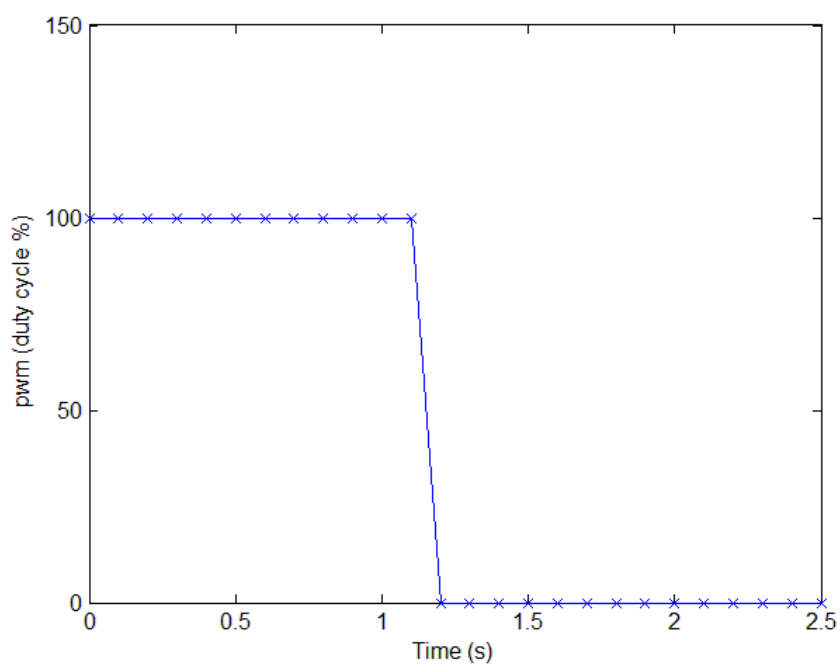


圖 5.9、夾取網球之 iMode=1(弱)的馬達速度曲線圖

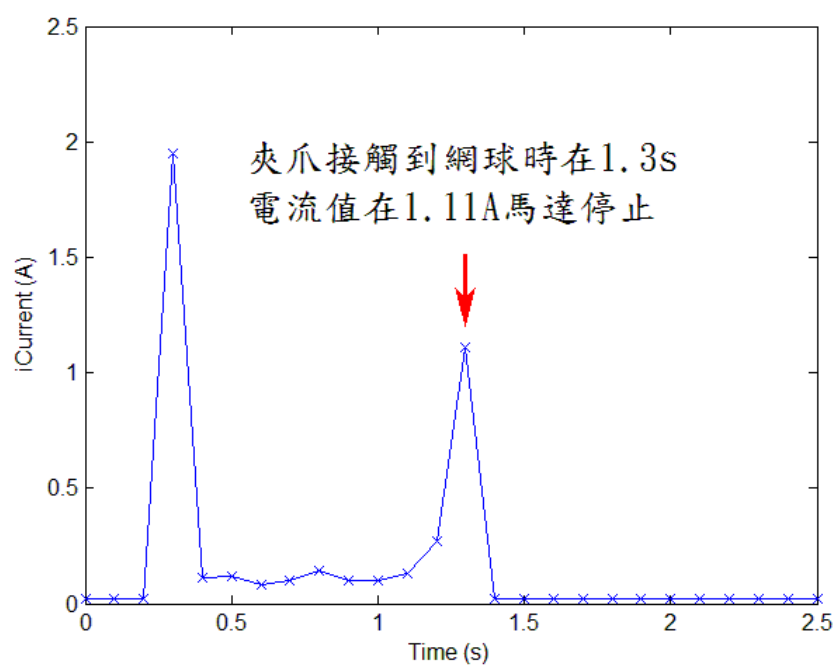


圖 5.10、夾取網球之 iMode=2(中)的馬達電流曲線圖

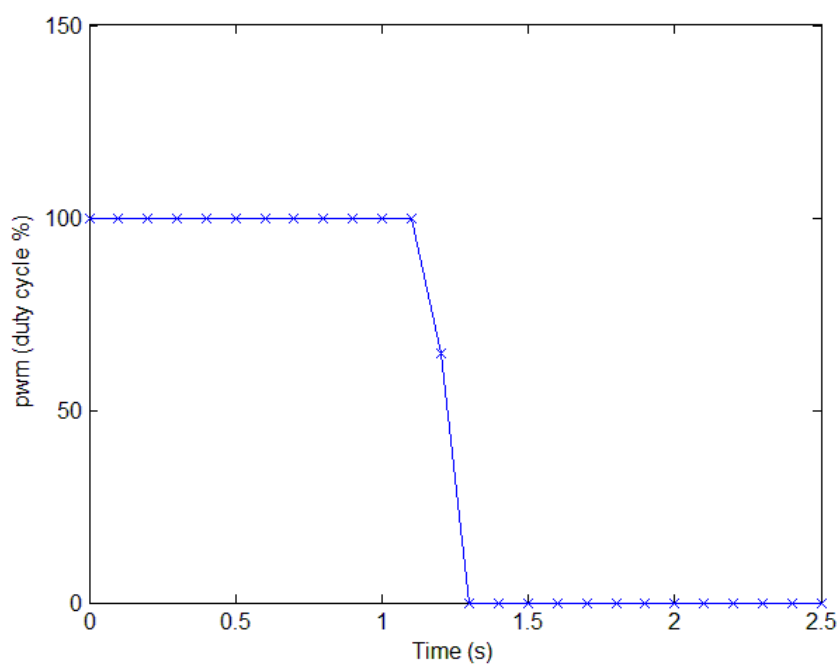


圖 5.11、夾取網球之 iMode=2(中)的馬達速度曲線圖

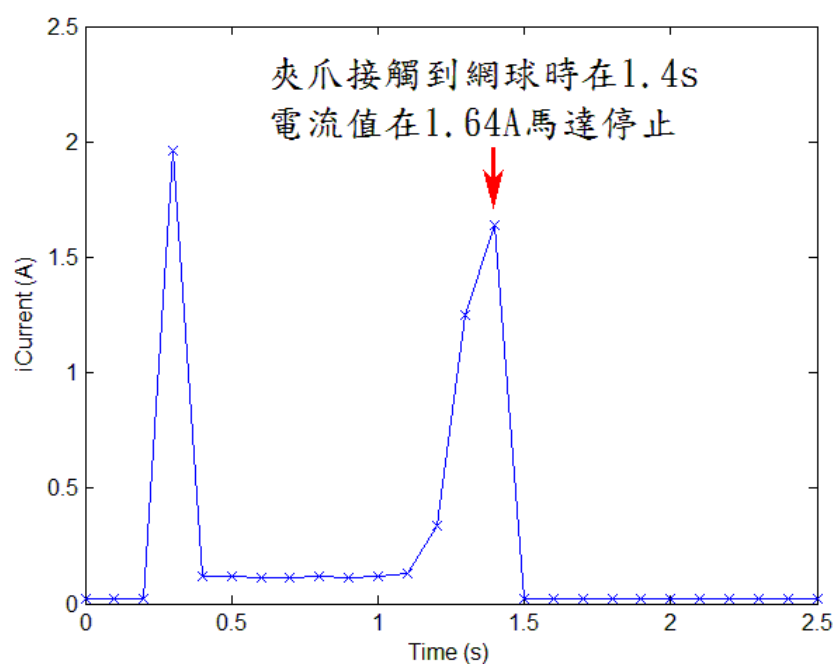


圖 5.12、夾取網球之 iMode=3(強)的馬達電流曲線圖

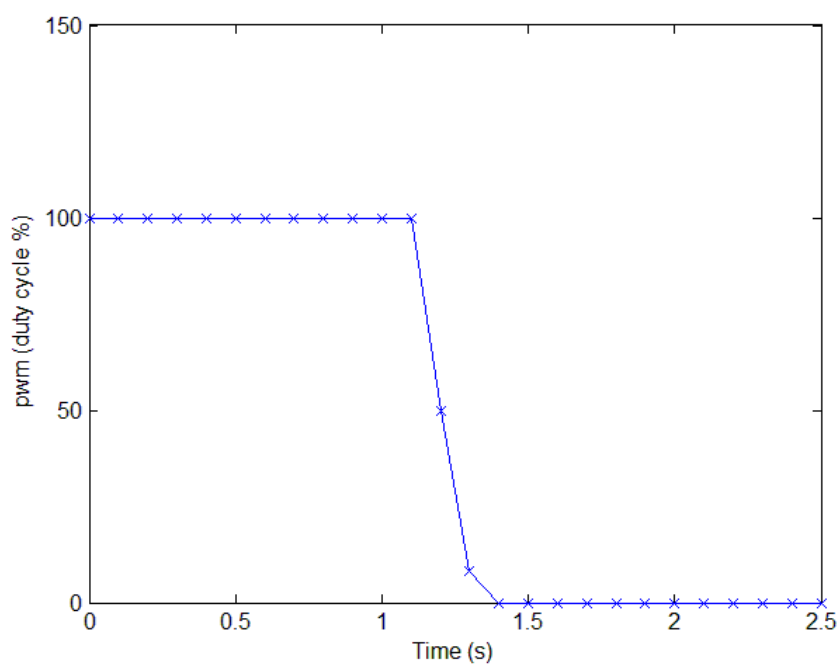


圖 5.13、夾取網球之 iMode=3(強)的馬達速度曲線圖

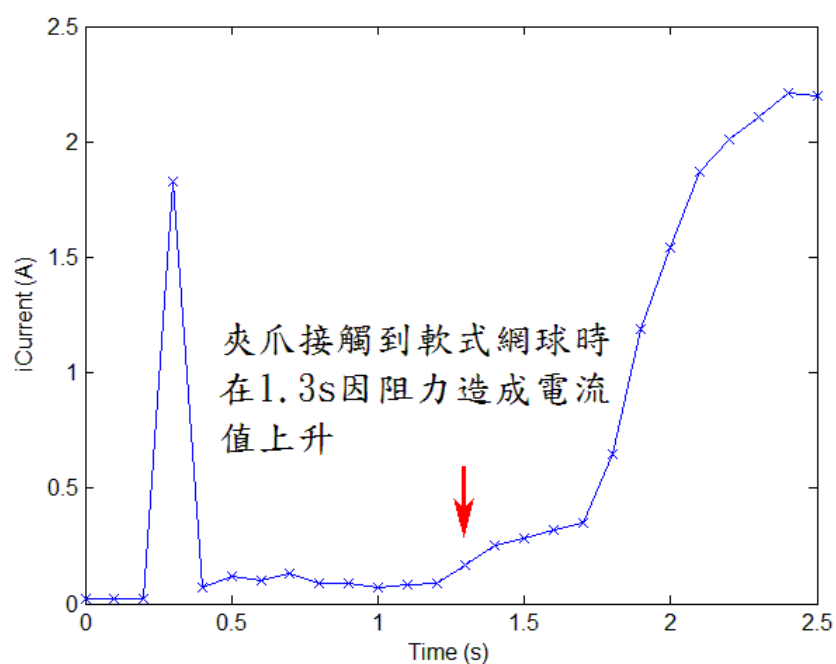


圖 5.14、夾取軟式網球之未使用模糊控制器的馬達電流曲線圖

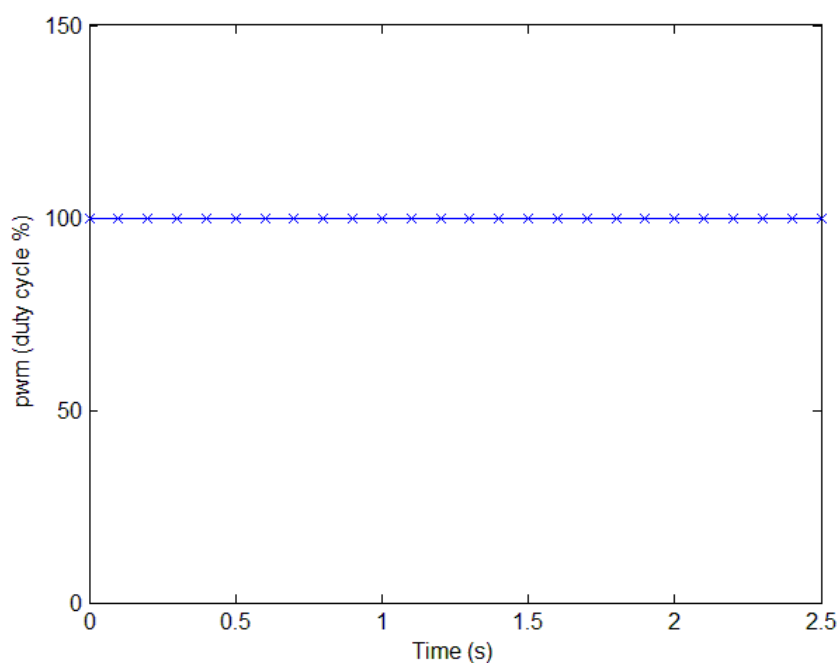


圖 5.15、夾取軟式網球之未使用模糊控制器的馬達速度曲線圖

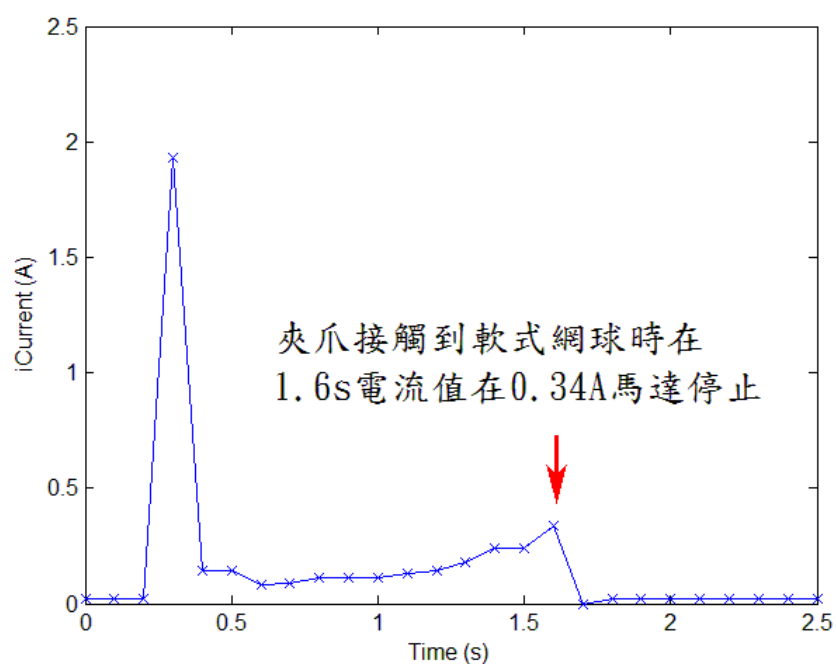


圖 5.16、夾取軟式網球之 iMode=1(弱)的馬達電流曲線圖

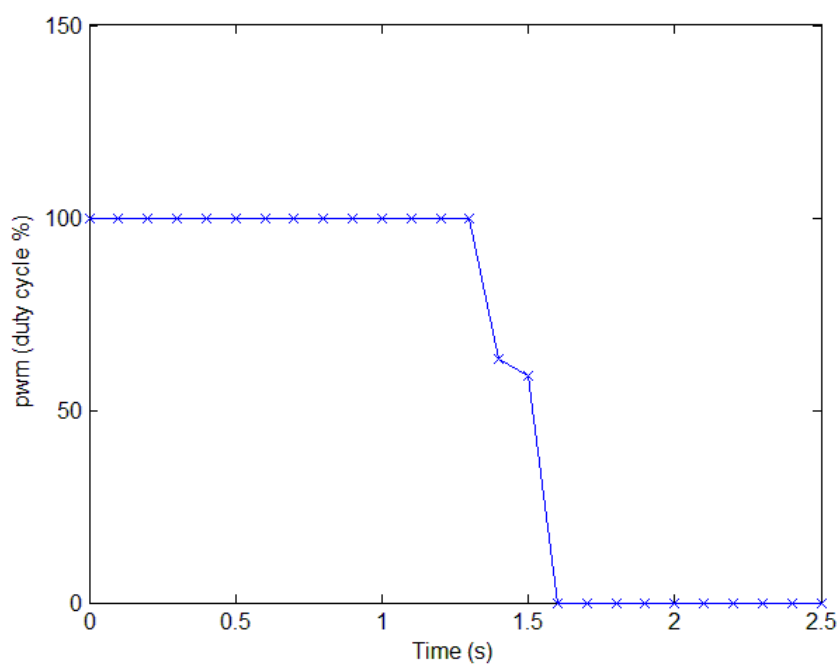


圖 5.17、夾取軟式網球之 iMode=1(弱)的馬達速度曲線圖

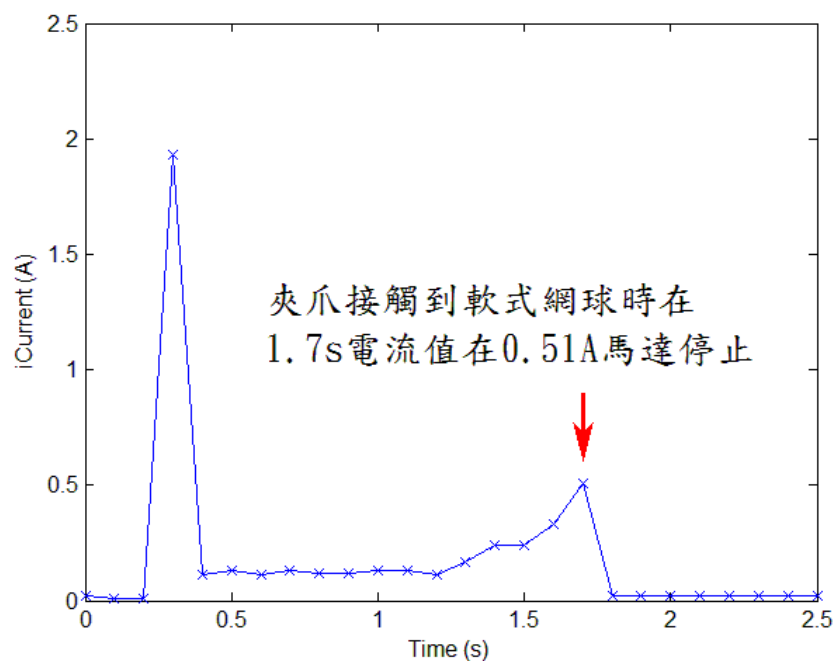


圖 5.18、夾取軟式網球之 iMode=2(中)的馬達電流曲線圖

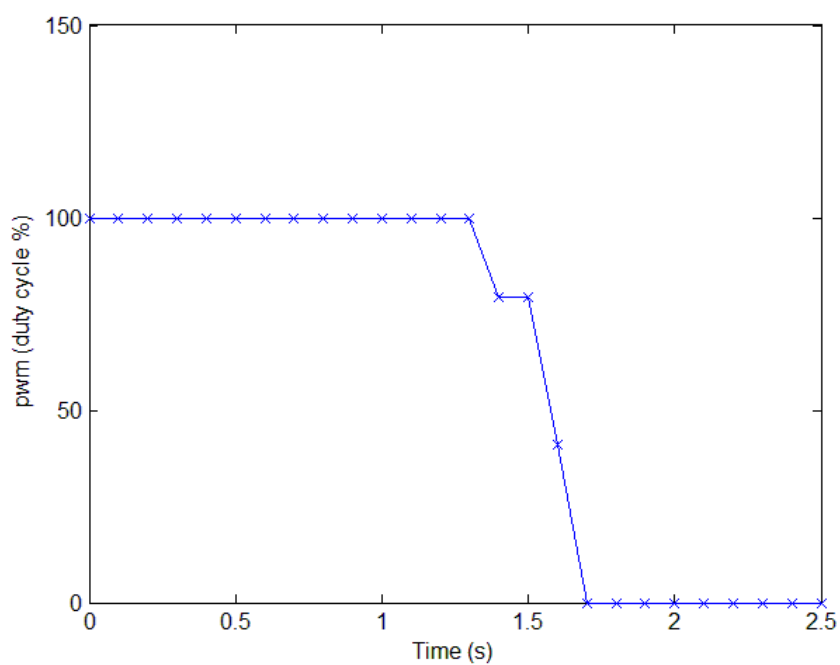


圖 5.19、夾取軟式網球之 iMode=2(中)的馬達速度曲線圖

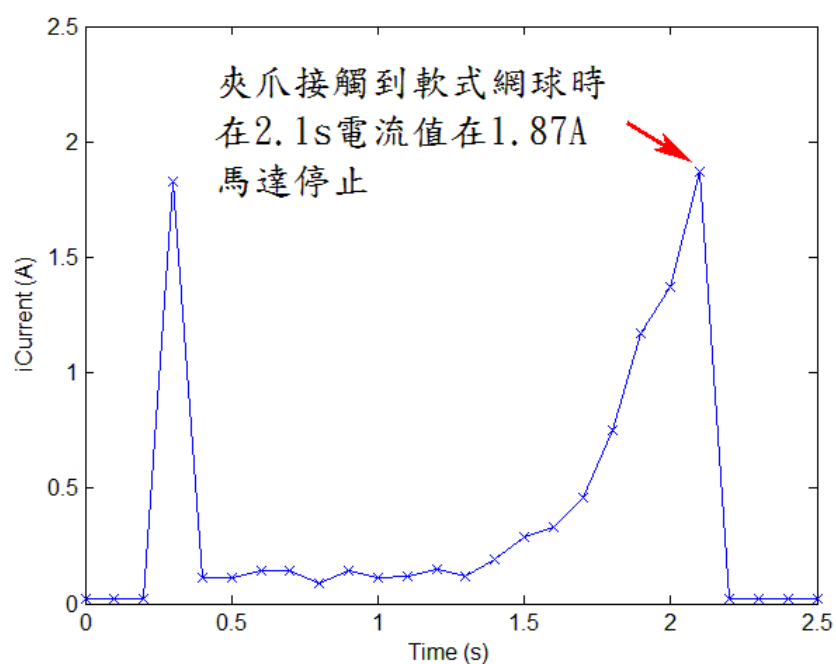


圖 5.20、夾取軟式網球之 iMode=3(強)的馬達電流曲線圖

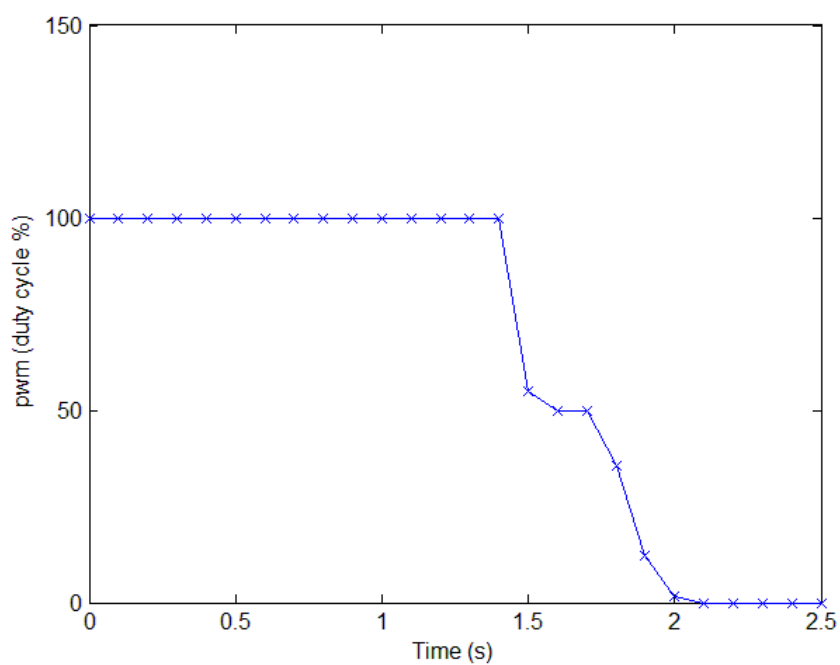


圖 5.21、夾取軟式網球之 iMode=3(強)的馬達速度曲線圖

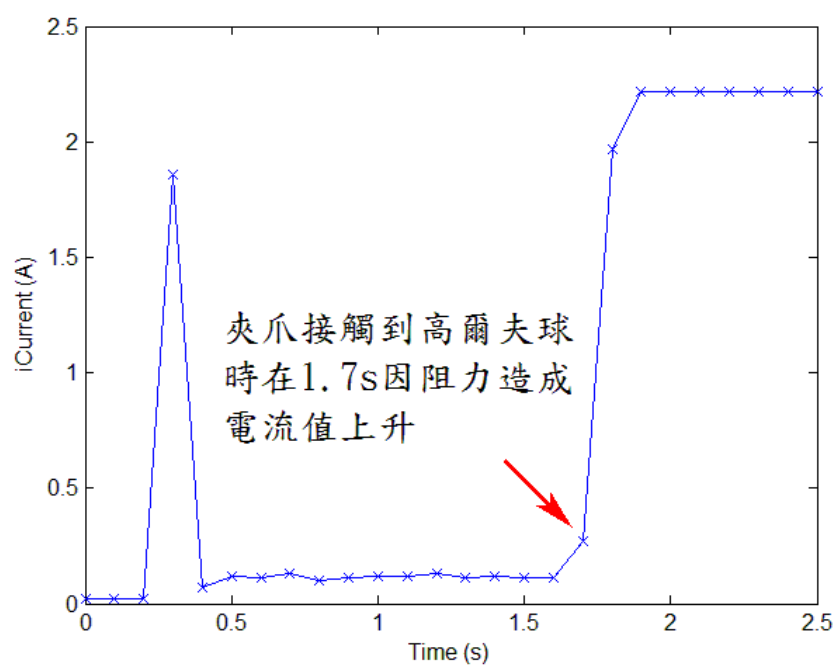


圖 5.22、夾取高爾夫球之未使用模糊控制器的馬達電流曲線圖

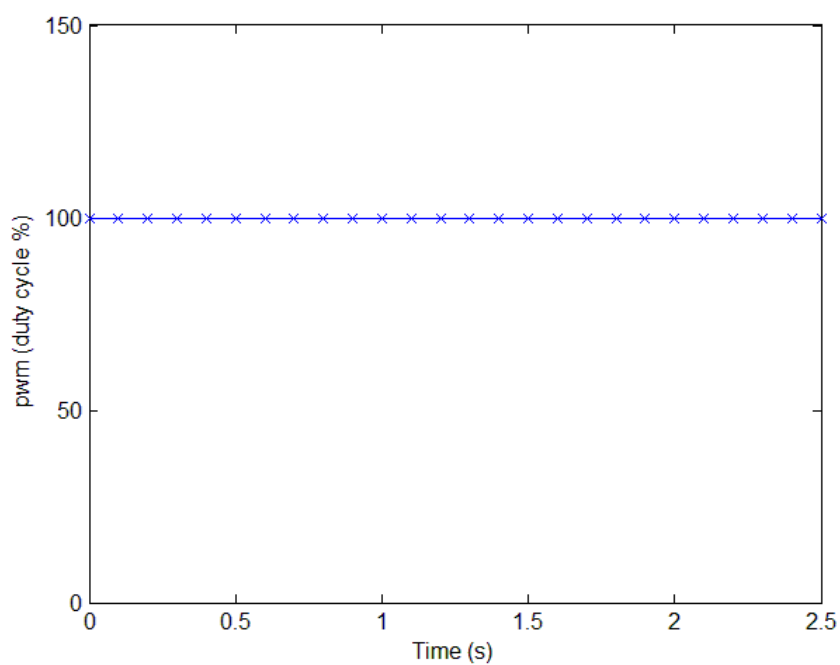


圖 5.23、夾取高爾夫球之未使用模糊控制器的馬達速度曲線圖

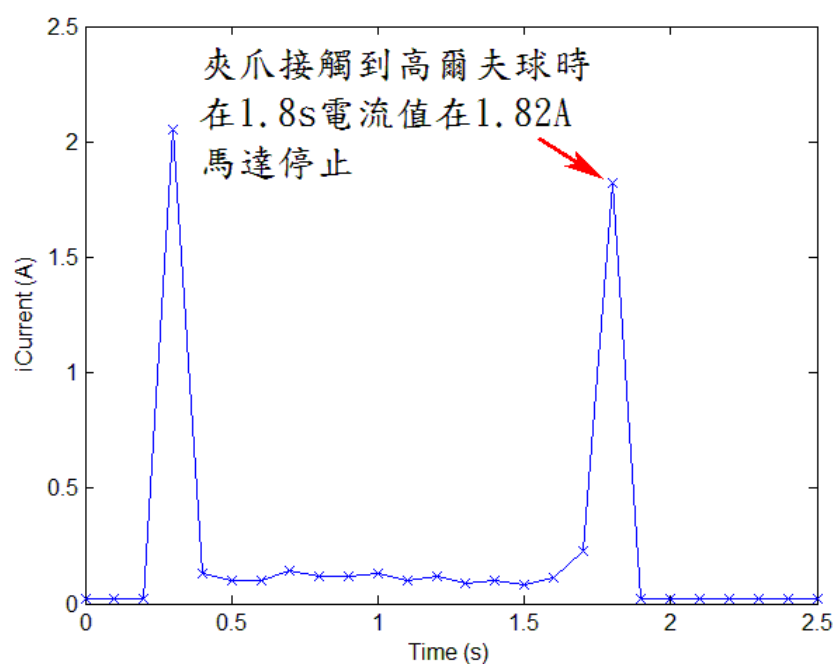


圖 5.24、夾取高爾夫球之 iMode=1(弱)的馬達電流曲線圖

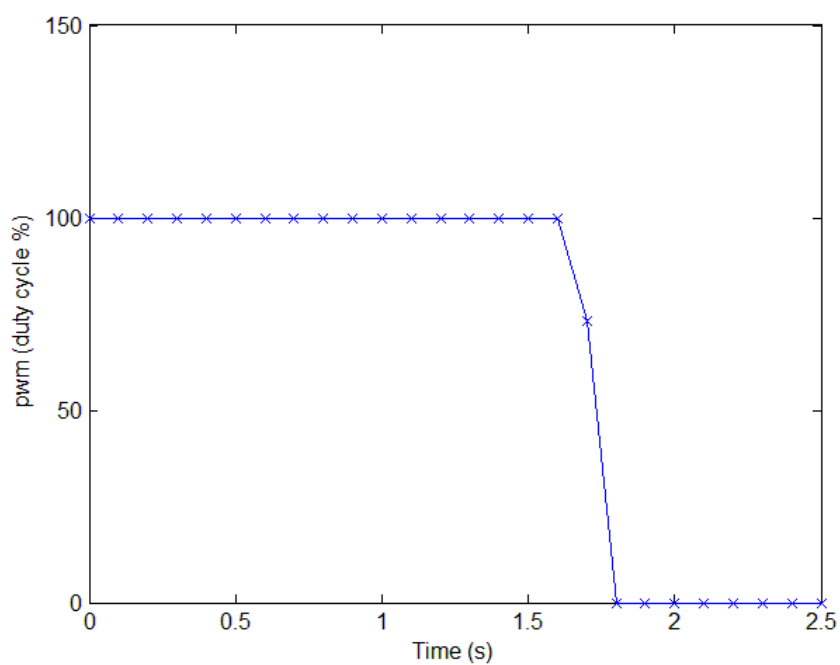


圖 5.25、夾取高爾夫球之 iMode=1(弱)的馬達速度曲線圖

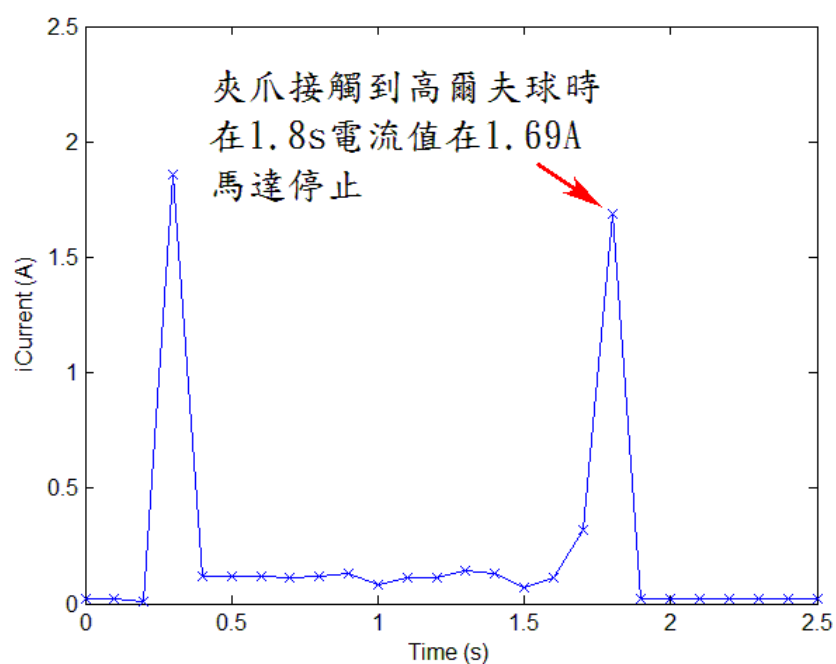


圖 5.26、夾取高爾夫球之 iMode=2(中)的馬達電流曲線圖

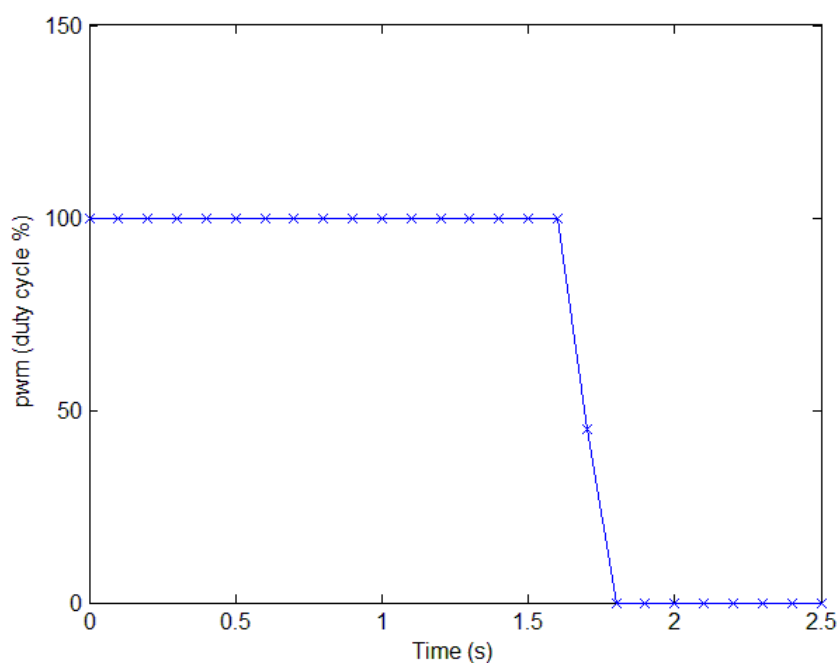


圖 5.27、夾取高爾夫球之 iMode=2(中)的馬達速度曲線圖

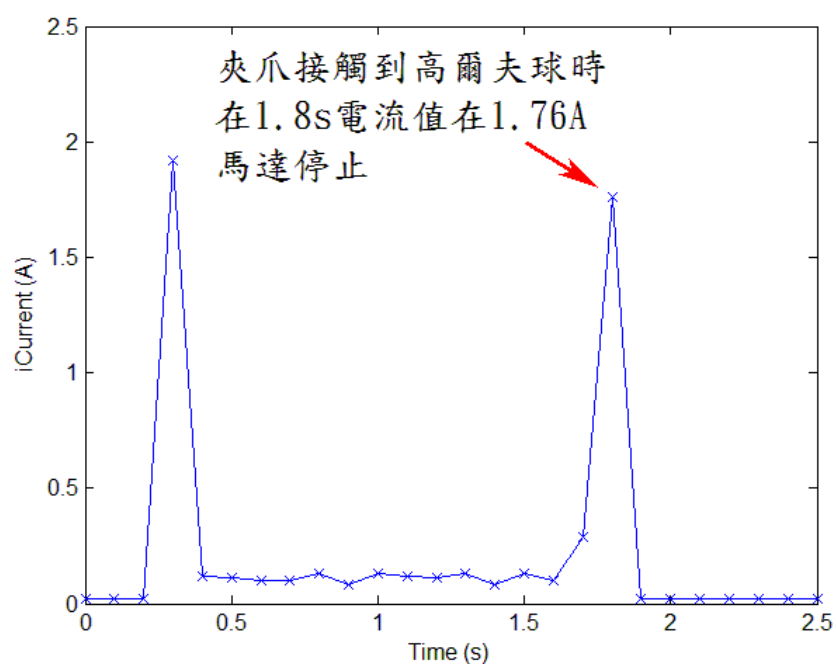


圖 5.28、夾取高爾夫球之 iMode=3(強) 的馬達電流曲線圖

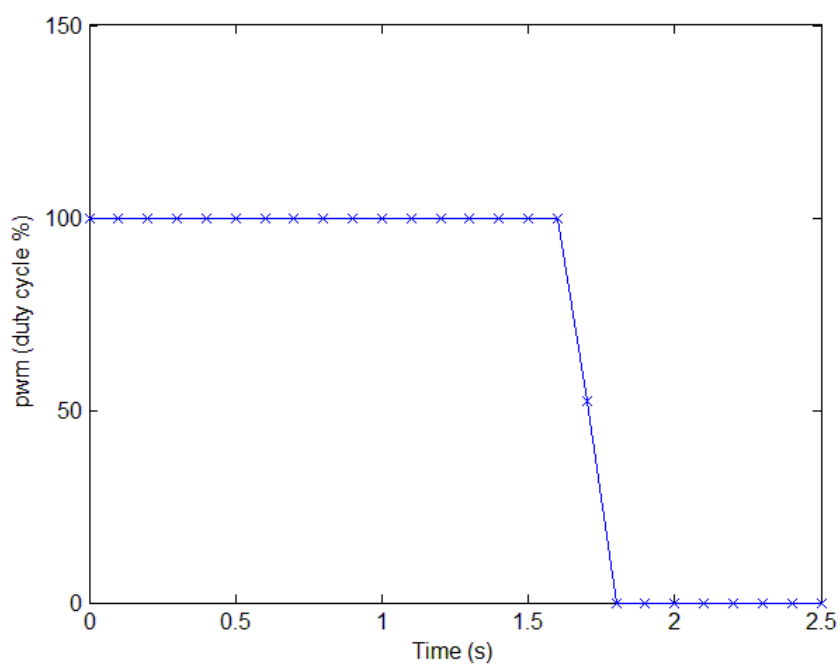


圖 5.29、夾取高爾夫球之 iMode=3(強) 的馬達速度曲線圖

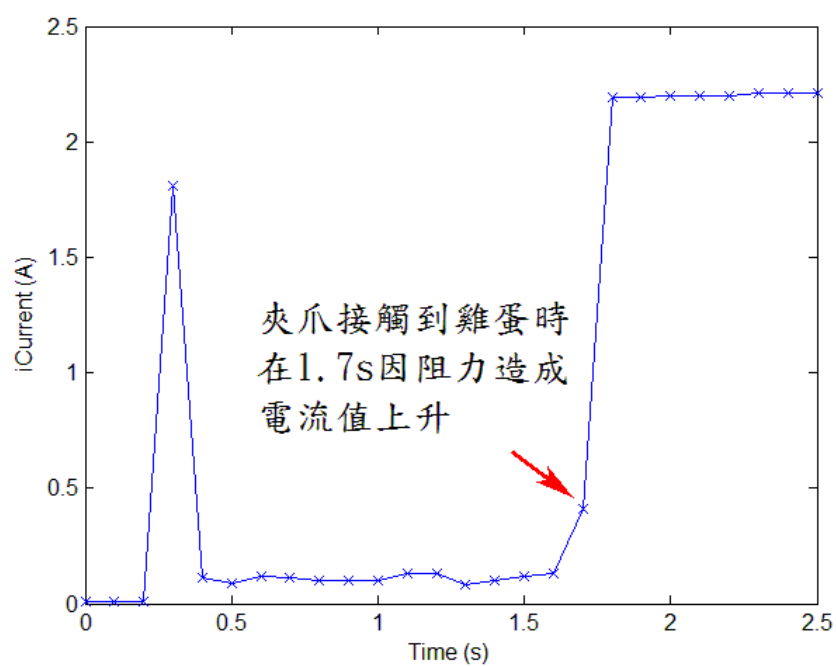


圖 5.30、夾取雞蛋之未使用模糊控制器的馬達電流曲線圖

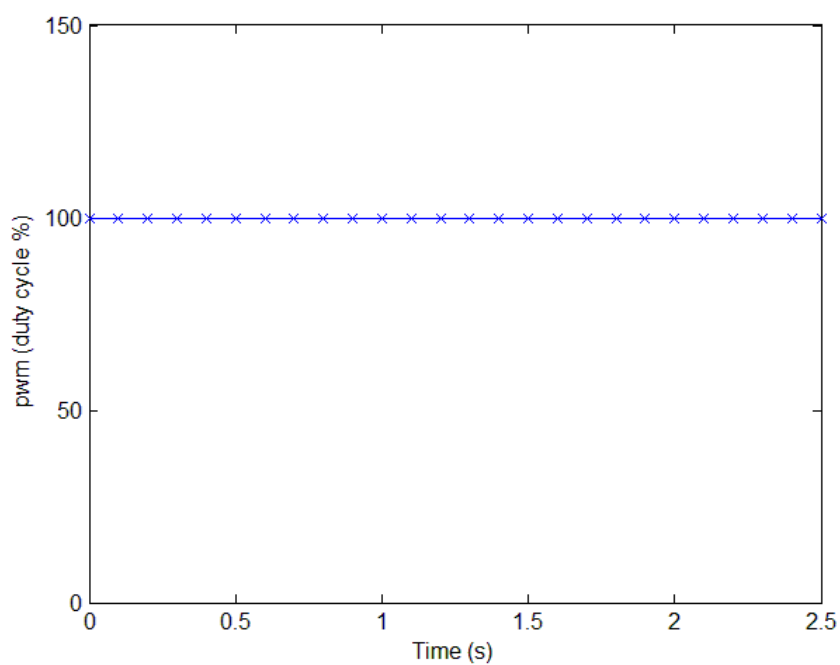


圖 5.31、夾取雞蛋之未使用模糊控制器的馬達速度曲線圖

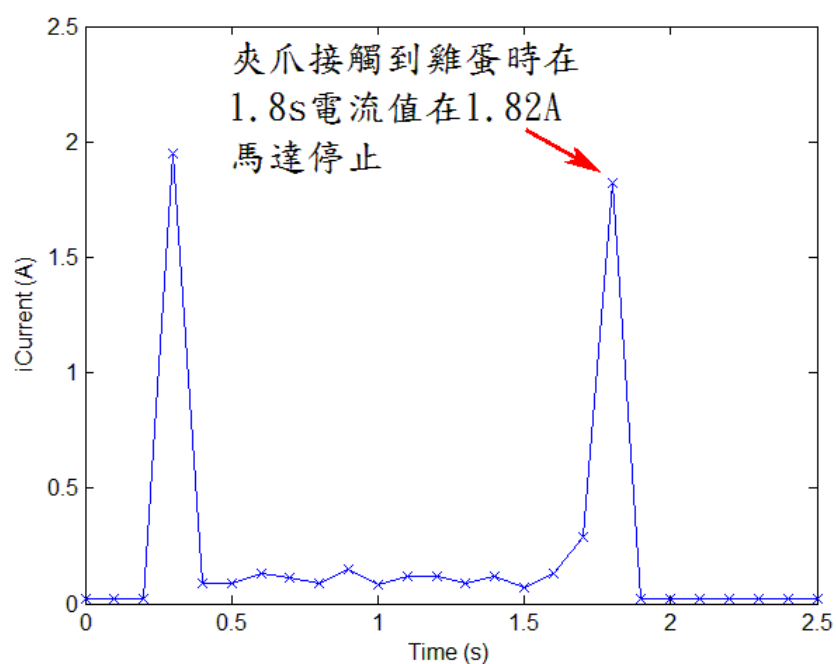


圖 5.32、夾取雞蛋之 iMode=1(弱)的馬達電流曲線圖

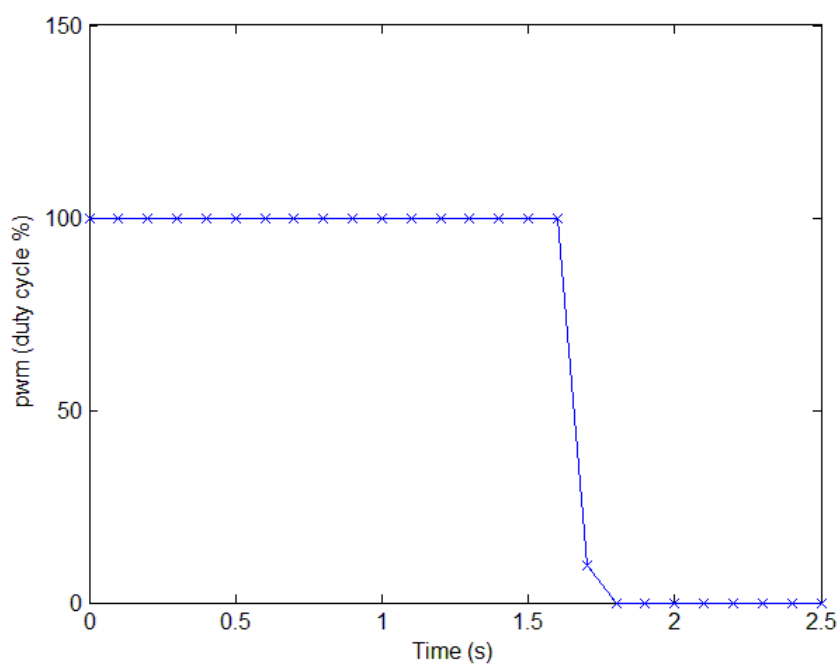


圖 5.33、夾取雞蛋之 iMode=1(弱)的馬達速度曲線圖

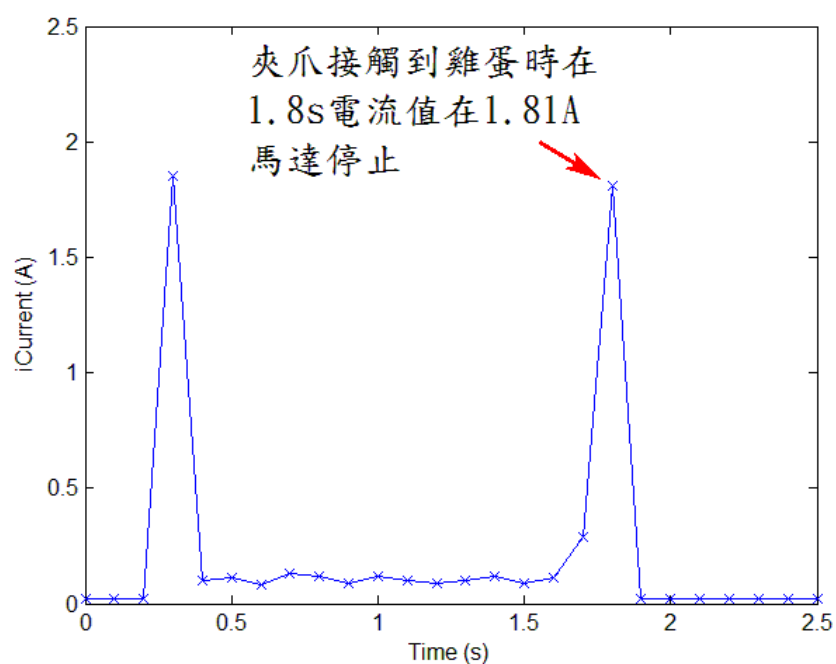


圖 5.34、夾取雞蛋之 iMode=2(中)的馬達電流曲線圖

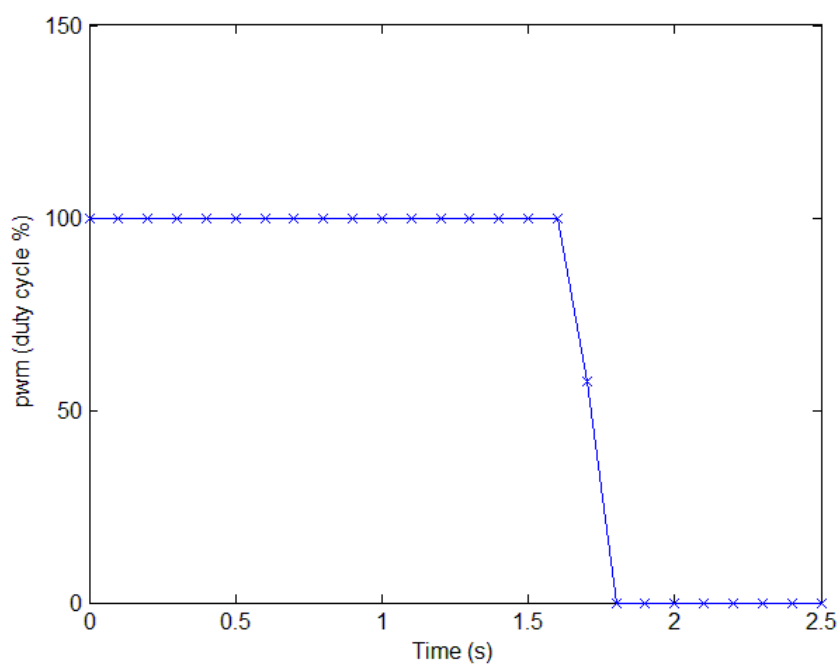


圖 5.35、夾取雞蛋之 iMode=2(中)的馬達速度曲線圖

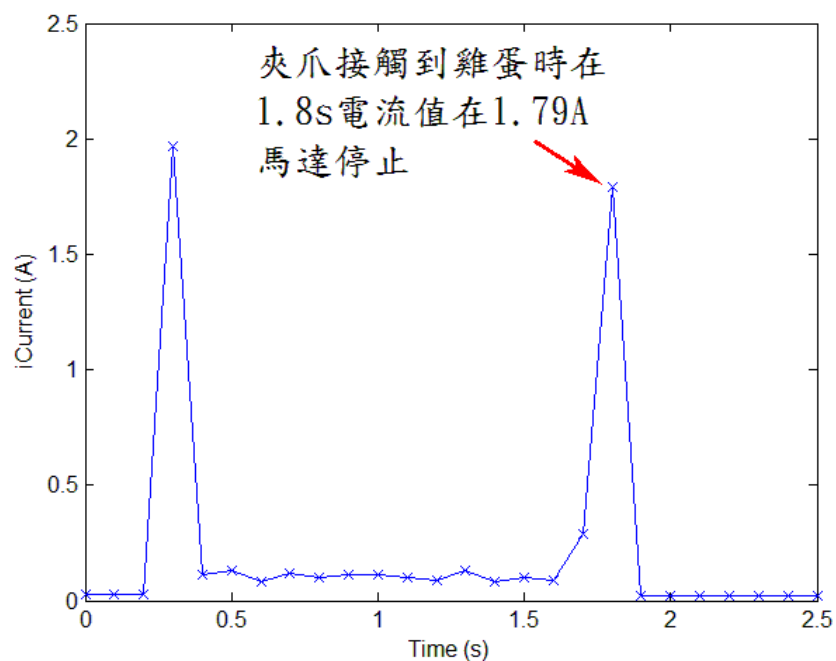


圖 5.36、夾取雞蛋之 iMode=3(強)的馬達電流曲線圖

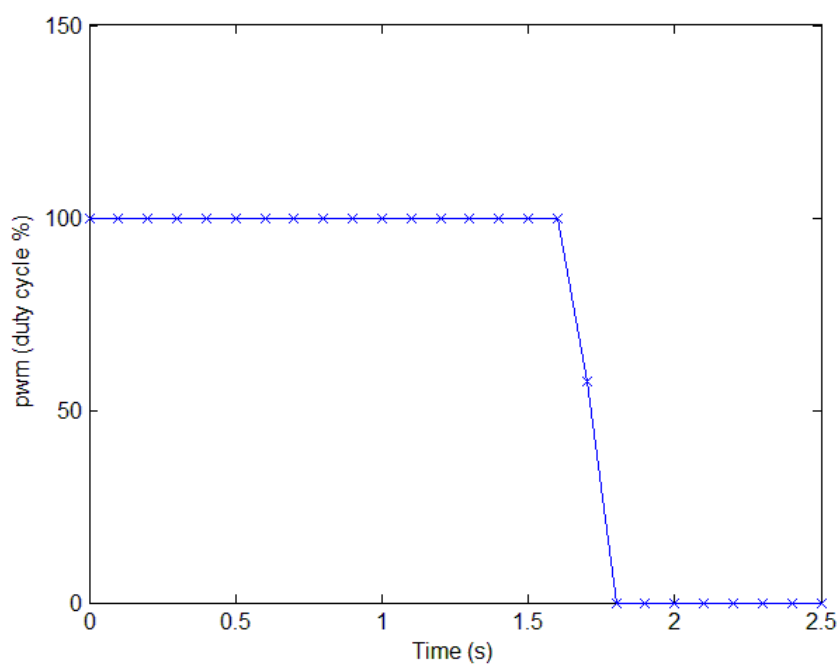


圖 5.37、夾取雞蛋之 iMode=3(強)的馬達速度曲線圖

第六章 結論與未來展望

6.1 結論

本論文主要研究是夾爪系統搭配電流感測器偵測電流值，並設計模糊控制器來控制夾取物件時的力量。透過電流數值來判斷夾取物件何時馬達該停止，進而提升夾爪開合時的穩定度。其主要改善了目前實驗室夾爪的控制方法，本論文提出之方法使夾爪不須設定距離參數來控制夾爪夾取物件，而是透過電流感測器所感測之電流來決定夾爪馬達停止的位置，可以避免因為使用距離參數控制夾爪時所產生的誤差，而造成物件沒夾緊導致鬆脫的問題，並且能夠對直流有刷馬達有限流保護的功能，提升夾爪系統的效率。

6.2 未來展望

本論文提出的夾爪控制方法在軟性材質的物件上有不錯的成果，然而針對較硬材質的物件，還有許多可以改善的方向，像是修改夾爪機構的材質，利用彈性的材質可以模擬人手抓取物件；在未來可以改使用直流無刷馬達，將可以減少夾爪重量，進而提升整體機械手臂的負重，並可以結合壓力感測器來控制物件夾取時的力量，除了可以避免馬達啟動時瞬間的電流所造成的誤動作外，更能提升夾爪精準的力量控制及穩定。

參考文獻

- [1] Technews, URL: <http://technews.tw>
- [2] IFR, URL: <http://www.ifr.org>
- [3] KUKA, URL: <http://www.kuka.com>
- [4] ABB, URL: <http://new.abb.com/products/robotics>
- [5] FANUC, URL: <http://www.fanuc.co.jp>
- [6] 李育昇，六軸機械手臂與音圈馬達夾爪的設計，淡江大學電機工程學系碩士論文(指導教授：翁慶昌)，2014。
- [7] 張瀚升，自適應性夾具機構及其模糊力量控制器設計，淡江大學電機工程學系碩士論文(指導教授：翁慶昌)，2015。
- [8] 小原敏治，齒輪 ABC，小原齒車工業株式會社，2006。
- [9] 揚善國，感測與量度工程，全華圖書出版有限公司，2012。
- [10] 育陞半導體股份有限公司：<http://www.winson.com.tw/>
- [11] 劉智誠，全方位模糊運動控制器之設計與實現，淡江大學電機工程學系碩士論文(指導教授：翁慶昌)，2007。
- [12] 蔡政興，全方位移動系統之設計與實現，淡江大學電機工程學系碩士論文(指導教授：翁慶昌)，2003。
- [13] 林昇甫、徐永吉，遺傳演算法及其應用，五南圖書出版有限公司，2009。