

國立臺灣師範大學應用電子科技學系

碩士論文

指導教授：呂藝光博士

兩輪移動車模糊控制

Fuzzy Control for Two-Wheeled Mobile Robots



研究生：汪志宇 撰

中華民國一百零一年六月

兩 輪 移 動 車 模 糊 控 制

學生：汪志宇

指導教授：呂藝光 博士

國立臺灣師範大學應用電子科技學系碩士班

摘 要

本論文主要是研究與製作一個兩輪移動車。兩輪移動車之機構分成車身與兩輪部份，在兩輪的左、右各裝有一個 DC 直流馬達，帶動兩輪移動車。兩輪移動車之控制架構包括由單晶片 82g516 為控制核心、TLP250 光耦合器和 H-bridge 組成之馬達驅動電路、由三軸加速度計組成之電路測得角度類比信號以及馬達編碼器上之脈波信號所組成之感測電路。

本論文包含模擬和實驗。模擬方面包含：模糊控制器、LQR 控制器和 PID 控制器之三種控制方法來模擬兩輪移動車之平衡控制器；實驗方面包含：PID 控制器定速控制實驗、PID 控制器的左右兩輪同步實驗、模糊控制器平衡實驗來驗證所製作兩輪移動車之性能。

關鍵字：兩輪移動車、控制系統、模糊控制。

Fuzzy Control for Two-Wheeled Mobile Robots

Student: Chih-Yu Wang

Advisors : Dr. Yih-Guang Leu

Institute of Applied Electronics Technology
National Taiwan Normal University

ABSTRACT

This thesis is to research and produce a two-wheeled mobile robot. There are two parts of the robot, two left, right, each equipped with a DC motor to drive the car of two mobile robot. The architecture for the control is composed of single chip 8255 for the core controller, optical coupler TLP250, H-bridge motor driver circuit, three-axis accelerometer (to measure the angle on the analog signal) and the motor encoder pulse signal for the sensing circuit.

This thesis contains the simulation and experiment. Contains the simulation aspects: fuzzy controller, LQR controller and PID controller, three control methods to simulate the balance of the two mobile robot controller. Experiments contain: PID controller constant speed control experiment, the PID controller about two wheel synchronization experiment and the fuzzy controller balanced experiment to verify that produced the performance of the two-wheeled mobile robot.

Keywords: Two- wheeled mobile robots, Control system, Fuzzy control.

誌 謝

自從進入研究所、確定研究方向後，總是期盼著完成論文的這一天。而隨著論文即將完成、研究所生涯進入尾聲，憶起這兩年來在師大應用電子所的一切，所有的人事物都是如此的值得感恩。

本篇論文得以順利完成，首先要感謝的便是指導教授呂藝光老師。從兩年前進入師大應用電子所至今，呂老師在學業上給了我許多指導，並帶領我參與國科會計畫，擴大了我在電子領域的視野；在論文寫作與實驗設計上，也是因為呂老師的大力指導與協助，我才能一路走到論文完成。

其次要感謝本篇論文的口試委員——杜國洋、吳政郎、莊鎮嘉、陶金旺幾位教授。

再者要感謝實驗室同學林育正、李承洲、黃克勤，還有學弟林裕勝、陳碩甫、黃嘉煒、溫彥侯。謝謝你們的時相討論，帶給我許多靈感與啟發；謝謝你們的大力幫忙，讓我的實驗能順利完成；謝謝你們在研究所生涯中的一路陪伴，讓我在因論文遇到瓶頸而備感煎熬的夜晚，感受到不少友情的安慰。

最後要感謝我的家人。謝謝爸媽的養育之恩與開明的教育模式，以及對我論文進度的關注與督促，謝謝妹妹及親戚們的加油打氣。因為你們，讓我有不斷前進的動力，我的人生，也因此展開了新的一頁，感恩！

目 錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
目 錄.....	iii
圖 目 錄.....	vi
表 目 錄.....	vii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 論文架構.....	3
第二章 兩輪移動車之硬體架構與設計.....	4
2.1 單晶片 82g516 馬達控制.....	5
2.2 鉛酸電池、直流馬達和馬達驅動器.....	6
2.3 三軸加速度計.....	9
2.4 兩輪移動車之動態方程式.....	10
第三章 控制器與模擬.....	15
3.1 模糊控制器.....	16
3.1.1 歸屬函數.....	17
3.1.2 模糊規則庫.....	17
3.1.3 推論引擎與解模糊化.....	18
3.2 LQR 控制器.....	18
3.3 PID 控制器.....	19
3.3 模擬結果.....	21
第四章 實驗與討論.....	25
4.1 PID 車身定速控制.....	26
4.2 PID 兩輪同步.....	29

4.1	模糊控制器平衡實驗	32
第五章	結論與未來展望	41
5.1	困難之處與解決辦法	41
5.2	未來展望	43
參考文獻		44

圖 目 錄

圖 2-1	兩輪移動車整體架構.....	4
圖 2-2	本論文之兩輪移動車.....	5
圖 2-3	兩輪移動車之內部電路板擺設.....	5
圖 2-4	單晶片 82G516 與周邊電路	6
圖 2-5	12V/12AH 鉛酸電池.....	6
圖 2-6	直流馬達及輪圈.....	7
圖 2-7	PWM 波型	7
圖 2-8	PWM DUTY	8
圖 2-9	H-BRIDGE 直流馬達驅動電路.....	8
圖 2-10	ADXL335 三軸加速度計實體圖	9
圖 2-11	ADXL335 內部架構圖	10
圖 2-12	ADXL335 輸出電壓與傾斜角度關係	10
圖 2-13	兩輪移動車之扶桿受力、力矩分析圖	12
圖 2-14	兩輪移動車之輪受力、力矩分析圖	13
圖 3-1	模糊邏輯系統架構流程.....	15
圖 3-2	輸入歸屬函數 θ	16
圖 3-3	輸入歸屬函數 $\dot{\theta}$	16
圖 3-4	輸出歸屬函數 u_d	17
圖 3-5	LQR 系統架構圖	18
圖 3-6	PID 系統架構圖	20
圖 3-7	使用模糊控制器之車身傾斜角度	21
圖 3-8	使用模糊控制器之輸入電壓	22
圖 3-9	使用 LQR 控制器之身傾斜角度	22
圖 3-10	使用 LQR 控制器之輸入電壓.....	23
圖 3-11	使用 PID 控制器之身傾斜角度	23

圖 3-12	使用 PID 控制器之輸入電壓	24
圖 4-1	兩輪移動車程式流程圖	25
圖 4-2	PWM DUTY 為 10%時馬達編碼器輸出信號(8.143kHz).....	26
圖 4-3	PWM DUTY 為 20%時馬達編碼器輸出信號(40.01kHz).....	26
圖 4-4	PWM DUTY 為 30%時馬達編碼器輸出信號(48.82kHz).....	27
圖 4-5	PWM DUTY 為 40%時馬達編碼器輸出信號(52.63kHz).....	27
圖 4-6	PWM DUTY 為 50%時馬達編碼器輸出信號(59.51kHz).....	28
圖 4-7	馬達編碼器輸出脈波頻率對應 DUTY	29
圖 4-8	PID 車身定速控制架構如圖	29
圖 4-9	PID 兩輪同步架構如圖	30
圖 4-10	兩輪同步示意圖	31
圖 4-11	在 0.2 徑度、0.1 每秒徑度時三軸加速度計輸出之電壓	33
圖 4-12	在 0.2 徑度、0.1 每秒徑度時 82G516 輸出到左馬達之 PWM 信號..	33
圖 4-13	在 0.2 徑度、0.1 每秒徑度時 82G516 輸出到右馬達之 PWM 信號..	34
圖 4-14	在 0.2 徑度、0.1 每秒徑度時左馬達兩端之電壓.....	34
圖 4-15	在 0.2 徑度、0.1 每秒徑度時右馬達兩端之電壓.....	35
圖 4-16	在 0.2 徑度、0.1 每秒徑度時左馬達編碼器輸出脈波.....	35
圖 4-17	在 0.2 徑度、0.1 每秒徑度時右馬達編碼器輸出脈波.....	36
圖 4-18	在-0.2 徑度、-0.1 每秒徑度時三軸加速度計輸出之電壓	37
圖 4-19	在-0.2 徑度、-0.1 每秒徑度時 82G516 輸出到左馬達之 PWM 信號	37
圖 4-20	在-0.2 徑度、-0.1 每秒徑度時 82G516 輸出到右馬達之 PWM 信號	38
圖 4-21	在-0.2 徑度、-0.1 每秒徑度時左馬達兩端之電壓	38
圖 4-22	在-0.2 徑度、-0.1 每秒徑度時右馬達兩端之電壓	39
圖 4-23	在-0.2 徑度、-0.1 每秒徑度時左馬達編碼器輸出脈波	39
圖 4-24	在-0.2 徑度、-0.1 每秒徑度時右馬達編碼器輸出脈波.....	40
圖 5-1	馬達反電勢過強.....	42

表 目 錄

表 2-1	三軸加速度計(ADXL335)規格.....	9
表 2-2	兩輪移動車運動方程式變數表.....	11
表 3-1	感測訊號輸入對照表.....	17
表 4-1	兩輪同步實驗比較表.....	31

第一章 緒論

在本章節中，首先介紹兩輪移動車之產生背景及文獻有關國內及國外的相關研究和實際應用。最後，說明研究目的及本論文大綱。

1.1 研究動機與背景

近年來，由於環境保護意識興起，世界各國紛紛提倡環保與永續發展，其中以1997年12月在日本京都由聯合國氣候變化綱要公約參加國三次會議制定的「京都議定書」最具代表性，到2009年2月，一共有183個國家通過了該條約（超過全球排放量的61%）[1]、溫室氣體會造成地球溫度上升，美國冰雪資料中心和太空總署也發現北極冰層正漸漸縮小[2]，造成海平面上升，對於許多小型海島國家造成威脅。

也因人口增加(全球人口從1804年的10億人到2011年已經達到70億人[3])、車輛等交通工具數量的增加和居住空間越來越擁擠，空氣汙染、噪音、停車不方便...等問題常常為人詬病。有鑒於此，低碳排放量、低噪音、體積小、停車方便的電動交通工具漸漸受到市場重視，以至於引起相關研究單位開始發展和推動電動車。最具代表性的為美國發明家狄恩·卡門與他的DEKA研發公司（DEKA Research and Development Corp.）所發明的一種具有低噪音、無排放、體積小的兩輪自我平衡車「Segway」[4]，Segway的運作原理主要是建立在一種被稱為「動態穩定」（Dynamic Stabilization）的基本原理上，也就是車輛本身的自動平衡能力。以內置的精密固態陀螺儀（Solid-State Gyroscopes）來判斷車身所處的姿勢狀態，透過精密且高速的中央微處理器計算出適當的指令後，驅動馬達來做到平衡的效果[5]，Segway的控制核心是使用德州儀器(Texas Instruments, TI)[6]所出產之數位信號處理器 (Digital Signal Processing, DSP)、並且馬達方面使用的是直流無刷馬達(BLDC)來推動Segway、電源方面早期是使用鎳氫電池(Ni-MH)，後期車種則是使用無記憶性、低自放[7]之鋰離子電池。

此外，美國的工程師T.Blackwell在2002年，也利用8-bit的Atmel微控制器實現

了名為「Blancing Scooter」的兩輪自我平衡車[8]。日本的日立公司(HITACHI)也在2005年也推出EMIEW[9]，EMIEW是類似以Segway為基礎的兩輪機器人。同年(2005)日本也有學者Makiko Sasaki、Naoto Yanagihara、Osamu Matsumoto和Kiyoshi Komoriya發表了Personal Riding-type Wheeled Mobile Platform(PMP)的個人騎式移動平台[10]-[11]、2006年澳洲Ben Cazzolato的團隊發表了SON of EDGAR[12]，其運作原理是利用狀態空間的控制方法、2008年Toyota推出Personal Transport Assistance Robot 'Winglet'[13]以及在2009年Honda也推出單輪U3-X Personal Mobility Device[14]。在實際應用上，也被廣泛使用，例如：美國芝加哥市的交通警察[5]。

國內亦有研究有關Segway的團隊，例如王文俊教授之團隊，利用FPGA和電腦來實現兩輪自我平衡機器人[15]。蔡清池教授之團隊，以人的體重為負載的自平衡兩輪電動車[16]、簡忠漢和陳家宏教授之團隊，藉由3D繪圖軟體輔助，自行設計之智慧型兩輪車[17]以及蘇國和教授之團隊之以類神經模糊控制器之演算法則實現的兩輪式智慧型機器人[18]。

無論單輪或雙輪，其運作原理皆與 Segway 類似，可藉由陀螺儀或是加速度計感測車身的傾斜角度或是角速度做為控制的依據，進而達到使車輛平衡的功能。若能克服平衡上先天不穩定等問題，其俱備之碳排放量、低噪音、體積小、停車方便的優勢就能進一步對空氣汙染、綠色環境和交通的雍塞等...問題產生更大的優勢。

1.2 研究目的

由於兩輪移動車屬於倒單擺系統，因為具有非線性與不穩定的特性，在控制器的設計上會相當複雜，所以一直是用來驗證控制方法的受控系統。本論文使用模糊控制、LQR 控制和 PID 控制方法來設計模擬兩輪移動車之控制器，並經由Matlab 模擬所設計之控制器，再經由模糊控制實驗來驗證所製作兩輪移動車之性能。

1.3 論文架構

本論文內容，主要分為五個章節：

第一章 緒論：說明研究背景及目的。

第二章 兩輪移動車之硬體架構與設計：介紹兩輪移動車之機構、硬體架構、感測系統以及兩輪移動車動態方程式，與其操作方法。

第三章 控制器設計與模擬：包含模糊控制器、LQR 控制器和 PID 控制器之設計與模擬結果。

第四章 實驗與討論：包含車身定速控制、兩輪同步控制、模糊控制器實驗。

第五章 結論：為論文總結及未來展望。

第二章 兩輪移動車之硬體架構與設計

本論文兩輪移動車整體架構以圖 2-1 說明之：系統電源主要是以 2 顆 12V 鉛酸電池供給，包含：馬達驅動電路使用兩個鉛酸電池串聯成 24V 的電源、單晶片及周邊電路使用的是鉛酸電池 12V 經由穩壓 IC7805 轉成 5V 的電源；另外三軸加速度計則是單獨使用 2 個乾電池串聯成 3V 的電源。

本論文兩輪移動車是以 82g516 單晶片為控制核心，首先將三軸加速度計之類比信號傳送至 82g516，接著經由 82g516 內建之 8-bit A/D converter 將三軸加速度計類比信號轉換為 8-bit 的數位信號，再經過所設計之理論運算，將 PWM 訊號經由光耦合器 TLP250 傳送給 H-bridge 馬達驅動電路驅動左右一對之直流馬達，兩馬達在運轉同時，分別將各自的編碼器脈波回傳到 82g516 作為兩馬達同步和定速的輸入信號。

兩輪移動車是屬於可載人的載具，故機構尺寸必須考慮有適合的大小、還有要考慮電路板以及電池等放置的空間。此外，由於駕駛者可能是不同人，所以機構必須堅固方能承載不同體重之駕駛者。此兩輪移動車之機構分成扶桿、底板，扶桿長約為 75cm、底板長 45cm*寬 32cm*高為 5cm，如圖 2-2、2-3 所示。

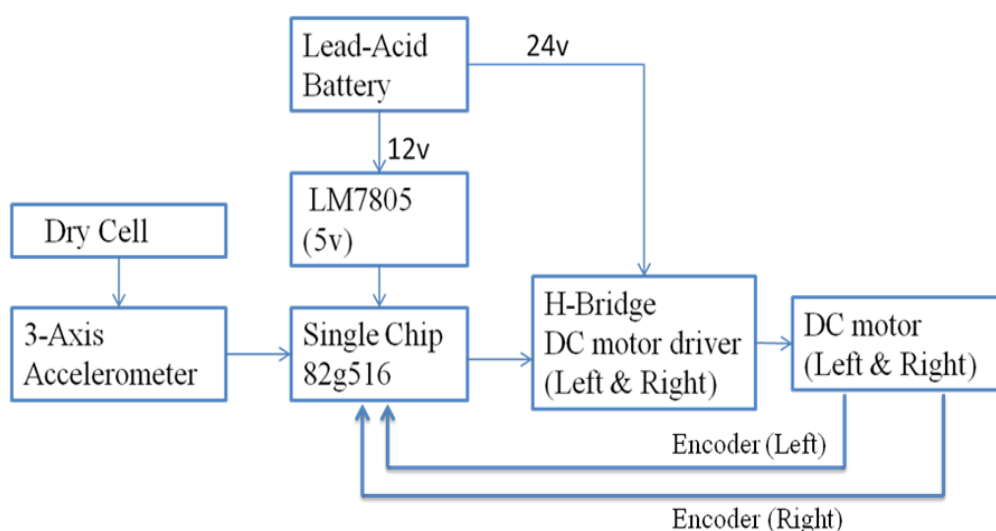


圖 2-1 兩輪移動車整體架構



圖 2-2 本論文之兩輪移動車

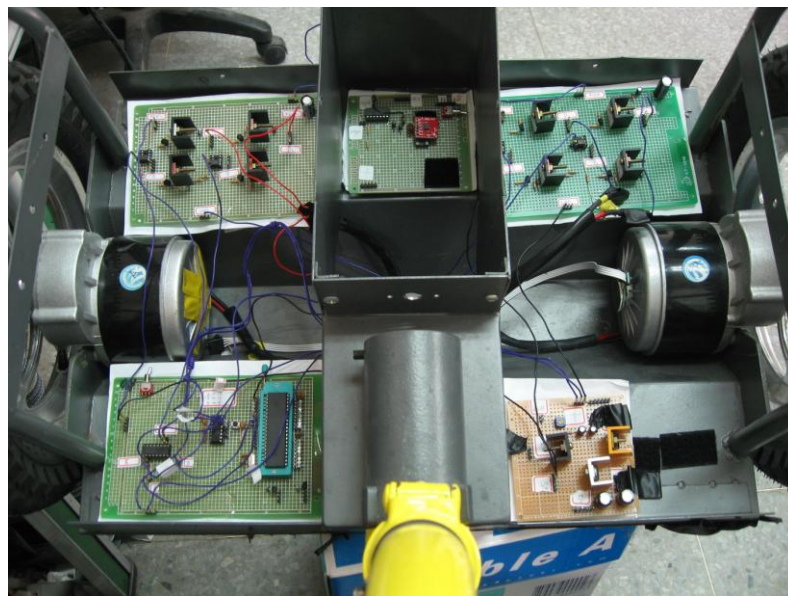


圖 2-3 兩輪移動車之內部電路板擺設

2.1 單晶片(82g516)之馬達控制[19]

本論文所選擇的單晶片 82g516，如圖 2-4 所示。然而，這個 82g516 的電路都是 Low 動作的，所以當使用者接到外部電路並不會受到影響。目前預設的震盪

頻率為 24M(Hz)，也可以換成 22.1184M(Hz)的震盪器方便給使用者使用。本論文透過撰寫程式 Keil C 程式來實現 82G516 單晶片模糊控制，主要之功能為透過內建之 PWM 模組和 8-bit A/D converter 模組產生訊號給 H-bridge 馬達驅動器。

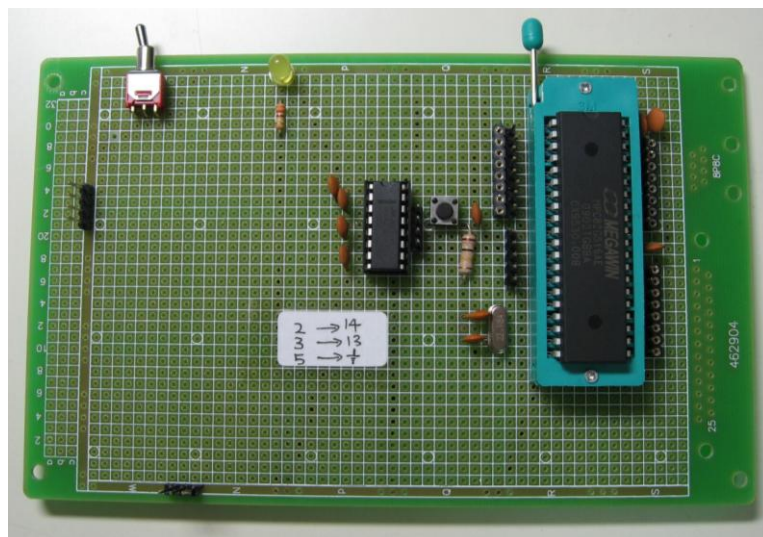


圖 2-4 單晶片 82g516 與周邊電路

2.2 鉛酸電池、直流馬達和馬達驅動器

本論文為了兩輪移動車之續航力考量、而且直流馬達起動電流高達10A以上，鉛酸電池瞬間可輸出之功率較大，常用於汽車中啟動引擎之馬達[12]，所以電源選用兩顆12V/12Ah之鉛酸電池作為系統電源，其中將電池串聯成24V，以提供馬達電源、12V則提供穩壓IC7805轉成5V供給單晶片及其他電路使用。

12V/12Ah鉛酸電池如圖2-5所示。



圖 2-5 12V/12Ah 鉛酸電池

由於此兩輪移動車須能夠載人，故馬達須選用功率較大之馬達，本論文採用 30V/200W 之直流馬達並且含有減速齒輪箱及編碼器，編碼器經實際實驗測試，旋轉輪子一圈，可輸出 10000 個脈波，解析度相當高。同時輪圈方面採用 12 吋輪圈，馬達以及輪圈如圖 2-6 所示。



圖 2-6 直流馬達及輪圈

兩輪移動車的動作有正轉、反轉和不送電，欲控制馬達速度需使用 PWM(Pulse Width Modulation, PWM)技術，PWM 波型圖 2-7 所示，PWM 是在固定週期之下，利用信號之 ON、OFF 之責任週期(Duty cycle)的切換來控制馬達速度，當責任週期變化時，馬達兩端之平均電壓及平均電流發生改變，如此一來馬達轉速就可以產生加速或減速，在固定週期下，ON 的時間越長，平均電壓、電流越大，馬達轉速越快，反之則越慢。如圖 2-8 所示。

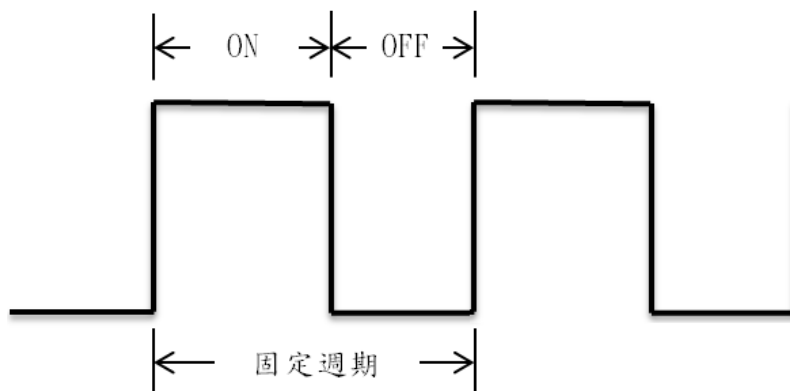


圖 2-7 PWM 波型

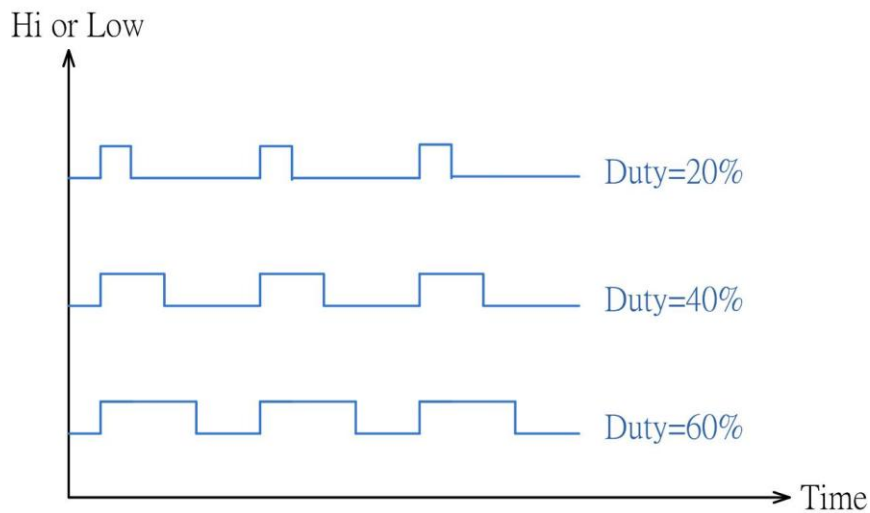


圖 2-8 PWM Duty

驅動電路方面，本論文選用 H-bridge 形式馬達驅動電路並結合 TLP250 光耦合器，其特點是利用 2 個 NMOS 和 2 個 PMOS 組成之 4 個 MOSFET 的開關，並配合 TLP250 光耦合器防止馬達雜訊干擾控制晶片。H-bridge 作動原理為：觸發其中一對 MOSFET 可令馬達正轉，反之觸發另一對 MOSFET 可令馬達反正轉。MOSFET 選用 IRF540 和 IRF9540，最大可承受 28A 電流，並且搭配 15A 保險絲以防止誤動作時電路燒毀。其電路如圖 2-9 所示。

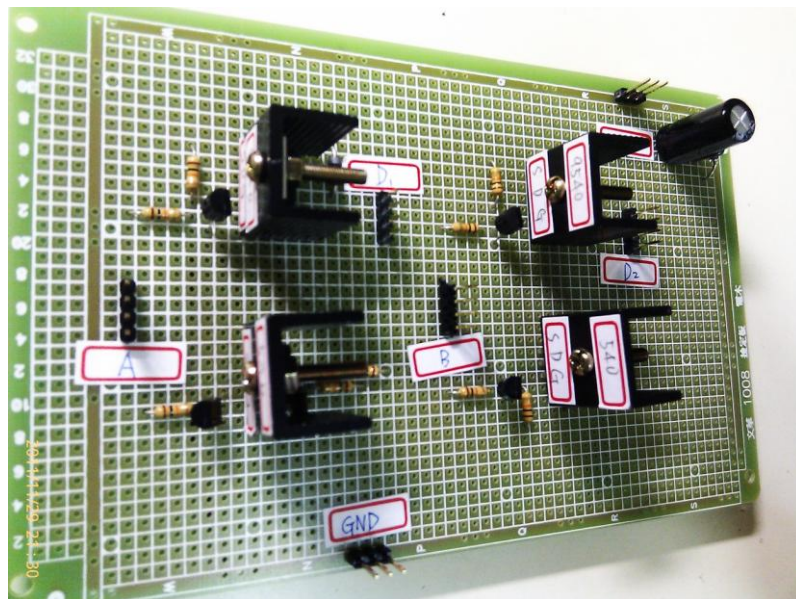


圖 2-9 H-bridge 直流馬達驅動電路

2.3 三軸加速度計

本論文選用 ADXL335 三軸加速度計感測車身傾斜角度。其規格如表 2-1 所示。而輸出的訊號為類比電壓[21]。三軸加速度計 ADXL335 以及其周邊電路如圖 2-10 所示、ADXL335 內部架構圖如圖 2-11 所示、放大 3 倍之後輸出電壓與傾斜角度關係如圖 2-12 所示。

表 2-1 三軸加速度計(ADXL335)規格

項目	規格	單位
工作電壓	1.8~3.6	V
工作電流	350(typical)	μA
工作環境溫度	-40~+85	$^{\circ}C$
尺寸(長*寬*高)	4*4*1.45	mm
感測 G 值範圍	+/-3	g
非線性度	± 0.3	%
靈敏度	300	mV/g

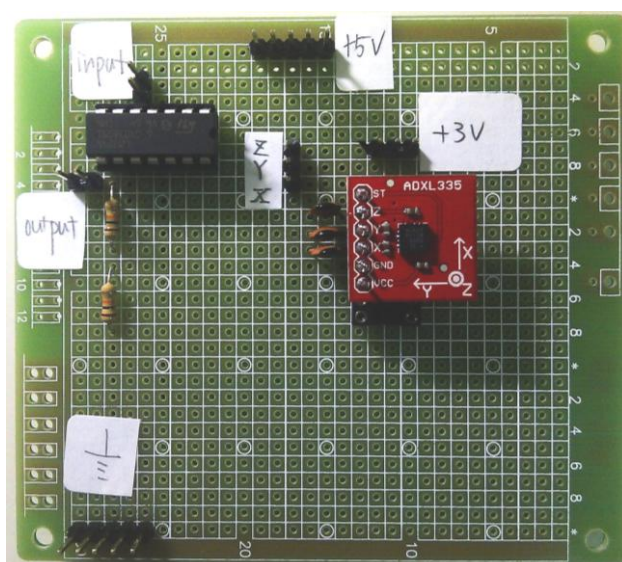


圖 2-10 ADXL335 三軸加速度計實體圖

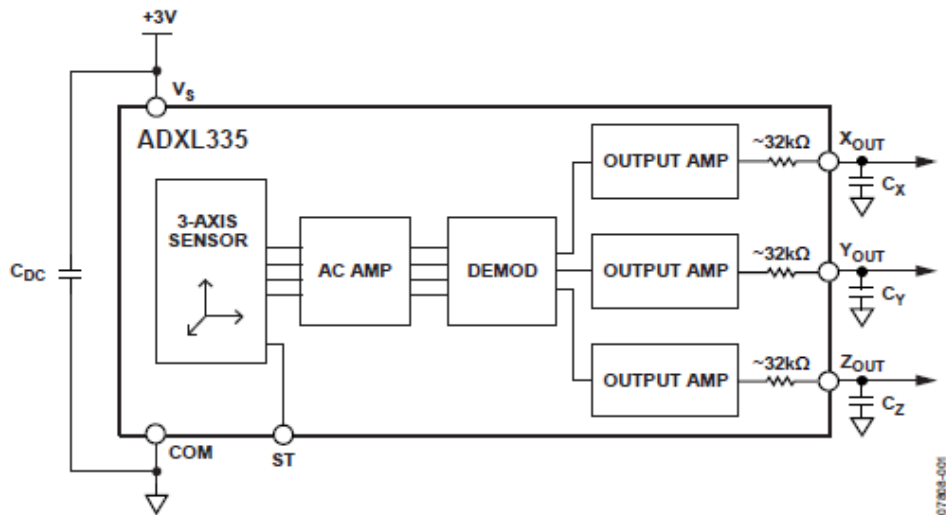


圖 2-11 ADXL335 內部架構圖[21]

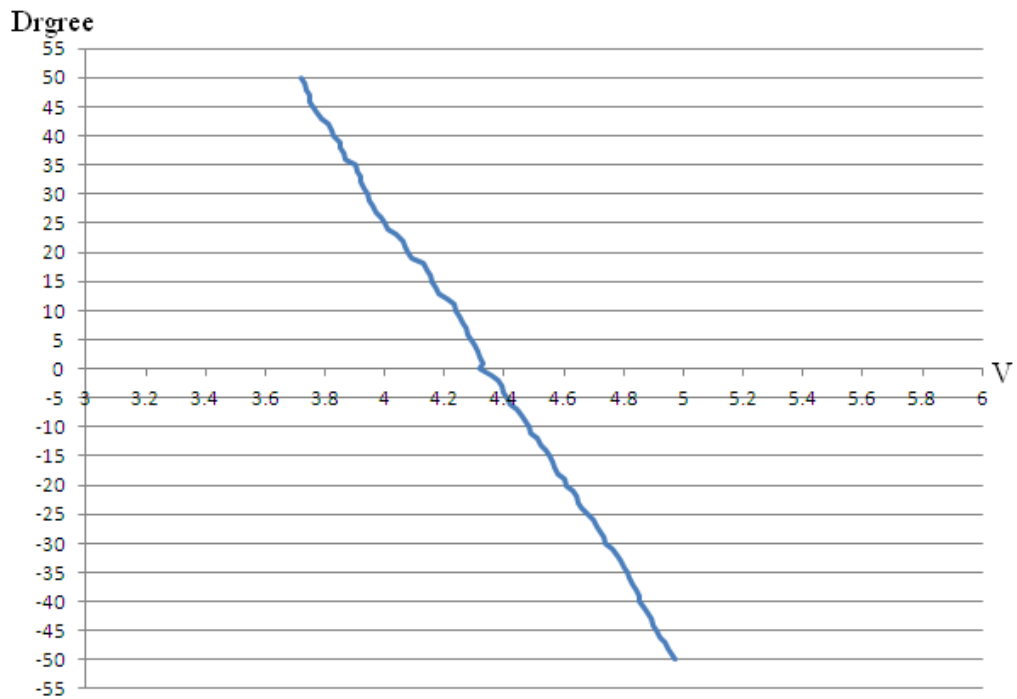


圖 2-12 ADXL335 輸出電壓與傾斜角度關係

2.4 兩輪移動車之動態方程式[22]

根據牛頓第二定律(Newton's Second Law)如方程式 2-1 和 2-2，系統總合力等於系統總質量乘以系統加速度、系統總合力矩等於系統轉動慣量乘以系統角加速度。兩輪平衡車運動方程式變數表如表 2-2。

表 2-2 兩輪移動車運動方程式變數表

符號	單位	意義
g	m/s^2	重力加速度
θ	rad	扶桿傾斜角度(對地垂直線)
ϕ	rad	輪轉動角度(對地垂直線)
T_m	Nm	扶桿對輪產生之扭力
m_p	kg	扶桿質量
r_p	m	扶桿長度
I_p	kgm^2	扶桿轉動慣量
m_w	kg	輪質量
r_w	m	輪半徑
I_w	kgm^2	輪轉動慣量
F_p	N	扶桿對輪正向力
F_a	N	扶桿對輪磨擦力
F_f	N	輪對地磨擦力
F_{nw}	N	輪對地正向力
r_m	ohm	馬達內阻
k_v	Vs/rad	馬達反電勢
k_t	Nm/A	馬達扭力常數

$$\sum F = m\ddot{x} \quad (2-1)$$

$$\sum T = j\ddot{\theta} \quad (2-2)$$

接著對兩輪移動車進行受力、力矩分析如圖 2-13，由系統合力可得方程式 2-3、由系統合力矩可得方程式 2-4。且輪子的角加速度可以決定車身的加速度如方程式 2-5、直流馬達端電壓轉換扭力如方程式 2-8。若只看水平方向扶桿的受力如方程式 2-7。

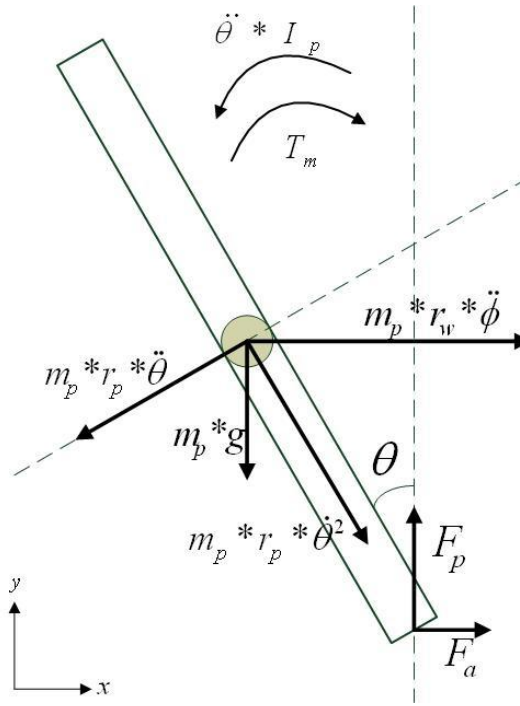


圖 2-13 兩輪移動車之扶桿受力、力矩分析圖

$$m_p \ddot{x} \cos \theta = F_a \cos \theta + F_p \sin \theta - m_p g \sin \theta - m_p r_p \ddot{\theta} \quad (2-3)$$

$$I_p \ddot{\theta} = -F_a \cos \theta r_p - F_p \sin \theta r_p - T_m \quad (2-4)$$

$$\ddot{x} = \ddot{\phi} r_w \quad (2-5)$$

$$T_m = \frac{2k_t V}{r_m} - \frac{2k_t k_v \dot{\phi}}{r_m} \quad (2-6)$$

$$m_p \ddot{x} = F_a + m_p r_p \dot{\theta}^2 \sin \theta - m_p r_p \ddot{\theta} \cos \theta \quad (2-7)$$

綜合方程式 2-3 到 2-6 可推導出方程式 2-8，如下所示。

$$\ddot{\theta} = \frac{m_p g r_p r_m \sin \theta - m_p \ddot{\phi} r_w r_p r_m \cos \theta + 2k_t k_v \dot{\phi} - 2k_t V}{r_m (m_p r_p^2 + I_p)} \quad (2-8)$$

接下來推導兩輪移動車之輪受力、力矩分析，如圖 2-14 所示，作用在輪上之合力為方程式 2-9、作用於輪上之合力矩為方程式 2-10。

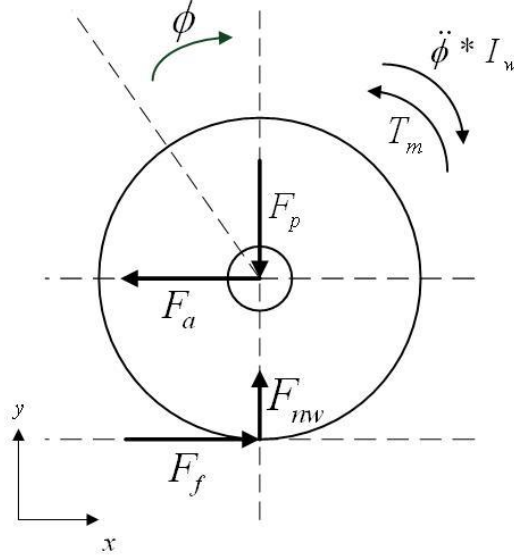


圖 2-14 兩輪移動車之輪受力、力矩分析圖

$$m_w \ddot{x} = F_f - F_a \quad (2-9)$$

$$I_w \ddot{\phi} = T_m - F_f r_w \quad (2-10)$$

綜合方程式 2-5、2-7、2-9、2-10 可推導出方程式 2-11，如下所示。

$$\ddot{\phi} = \frac{r_m r_w m_p r_p \dot{\theta}^2 \sin \theta - r_m r_w m_p r_p \ddot{\theta} \cos \theta - 2k_t k_v \dot{\phi} + 2k_t V}{r_m (I_p + m_p r_w^2 + m_w r_w^2)} \quad (2-11)$$

簡化方程式，將方程式 2-12 中 α 、 β 、 γ 帶入方程式 2-8 和 2-11 分別得方程式 2-13 和 2-14。

$$\begin{cases} \alpha = r_m (m_p r_p^2 + I_p) \\ \beta = r_m (I_p + m_p r_w^2 + m_w r_w^2) \\ \gamma = m_p r_p r_m \end{cases} \quad (2-12)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{\beta \gamma g \sin \theta + \gamma r_w \cos \theta (2k_t(k_v \dot{\phi} - V) - \gamma r_w \sin \theta \dot{\theta}^2) + 2\beta k_t(k_v \dot{\phi} - V)}{(\alpha\beta - \gamma^2 r_w \cos \theta)} \quad (2-13)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{\gamma r_w \sin \theta (\alpha \dot{\theta}^2 - \gamma g \cos \theta) + 2\gamma r_w \cos \theta k_t(V - k_v \dot{\phi}) + 2\alpha k_t(V - k_v \dot{\phi})}{(\alpha\beta - \gamma^2 r_w \cos \theta)} \quad (2-14)$$

最後線性化方程式並加以整理，可得兩輪移動車之動態方程式 2-15。

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\beta\gamma g - r_w^2 \gamma^2}{\beta\alpha - \gamma^2 r_w^2} & 0 & 0 & \frac{2k_t k_v (\gamma r_w + \beta)}{\beta\alpha - \gamma^2 r_w^2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{\gamma r_w \alpha - \gamma^2 r_w g}{\beta\alpha - \gamma^2 r_w^2} & 0 & 0 & \frac{2k_t k_v (-\gamma r_w - \alpha)}{\beta\alpha - \gamma^2 r_w^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2k_t k_v (-\gamma r_w - \beta)}{\beta\alpha - \gamma^2 r_w^2} \\ 0 \\ \frac{2k_t k_v (\gamma r_w + \alpha)}{\beta\alpha - \gamma^2 r_w^2} \end{bmatrix} V \quad (2-15)$$

第三章 控制器與模擬

本論文之模糊控制器之輸入有兩個，分別為車身傾斜角度 θ 與車身傾斜之角速度 $\dot{\theta}$ 。車身傾斜角度可由三軸加速度計測得、車身傾倒之角速度可由車身傾斜角度經由程式編譯求得。

3.1 模糊控制器

在現實世界的真實應用當中，由於在實際過程中包含著許多不確定因素，包然非人為的和人為的，非人為的因素包含壓力、溫度、濕度等因素干擾而導致物理量有誤差或是產生雜訊、人為的因素如語意的不確定，同樣一件事情每個人各有自己主觀的判斷，故會對同樣一件事情產生不同的定義[23][24]，會造成不一樣的結果。

然而模糊理論就是利用類似概念，模糊數學最早是在 1965 年由美國加州大學柏克萊分校 L. A. Zadeh 教授 所提出「模糊集合 (Fuzzy Sets)」的概念[25]，成為模糊理論的濫觴，此概念是利用連續多值(continuous mult-value)的數學取代傳統的數學 0 與 1 的二值邏輯(binary logic)，較接近人類思考的方式，以降低複雜度。之後 Zadeh 教授在 1973 年提出使用 If-Then 的語意變數概念，將人類的知識公式化於數學當中。

模糊邏輯系統的架構包含了模糊化(Fuzzifier)、模糊規則庫(Fuzzy Rule Base)、模糊推論引擎(Fuzzy Inference Engine)和解模糊化(Defuzzifier)四個流程，如圖 3-1 所示為模糊邏輯系統之架構流程。

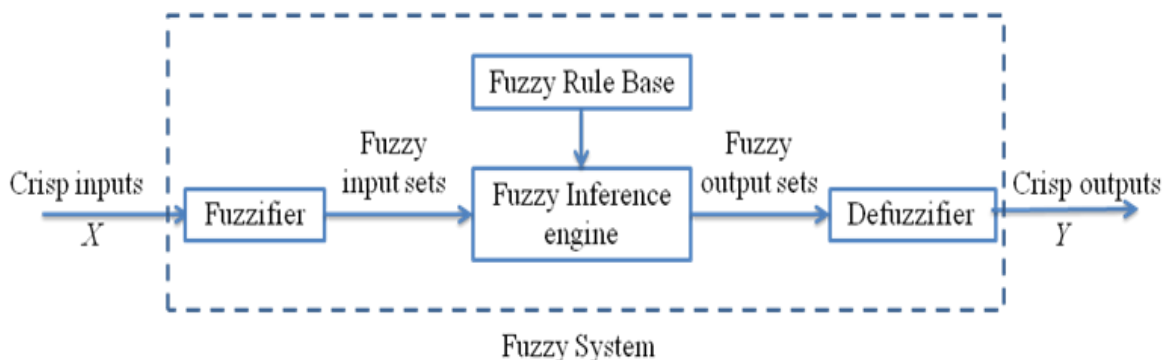


圖 3-1 模糊邏輯系統架構流程

3.1.1 歸屬函數

本論文針對兩輪移動車之輸入歸屬函數皆採用三角形歸屬函數(Triangular Membership Function)、輸出歸屬函數採用單點型歸屬函數(Singleton Membership Function)。輸入歸屬函數 θ 如圖 3-2 所示、輸入歸屬函數 $\dot{\theta}$ 如圖 3-3 所示、輸出歸屬函數 u_d 如圖 3-4 所示。

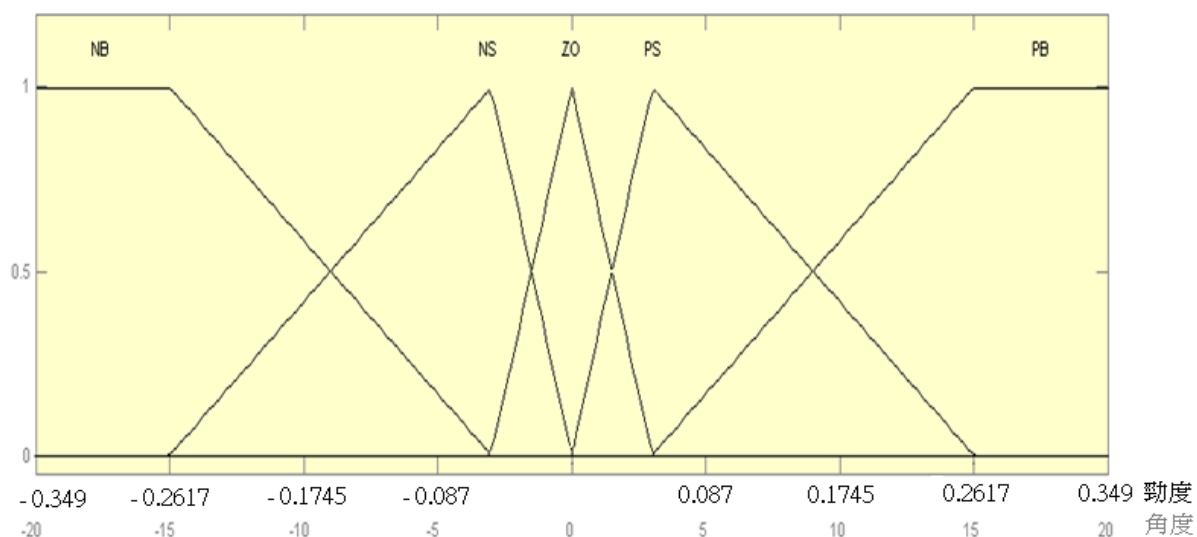


圖 3-2 輸入歸屬函數 θ

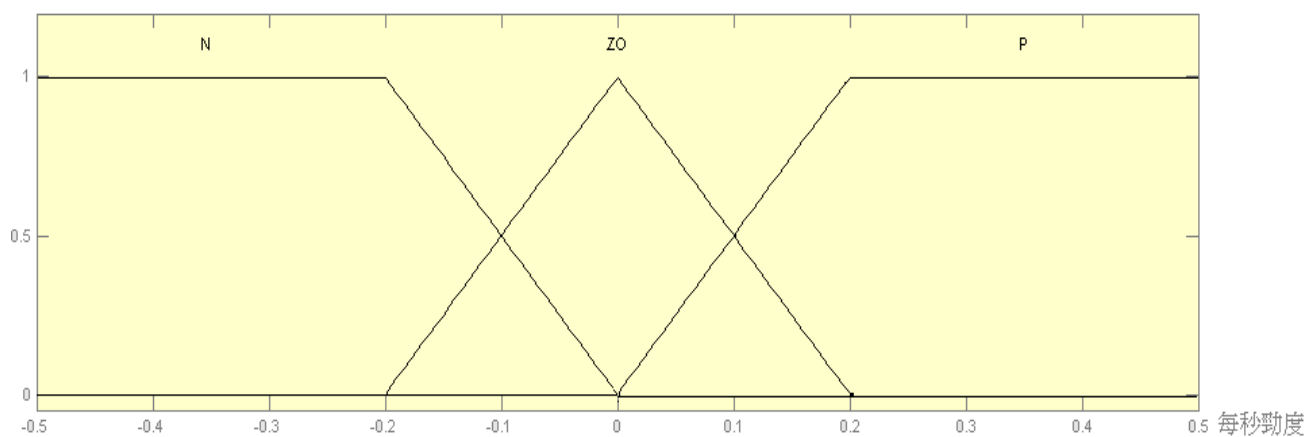


圖 3-3 輸入歸屬函數 $\dot{\theta}$

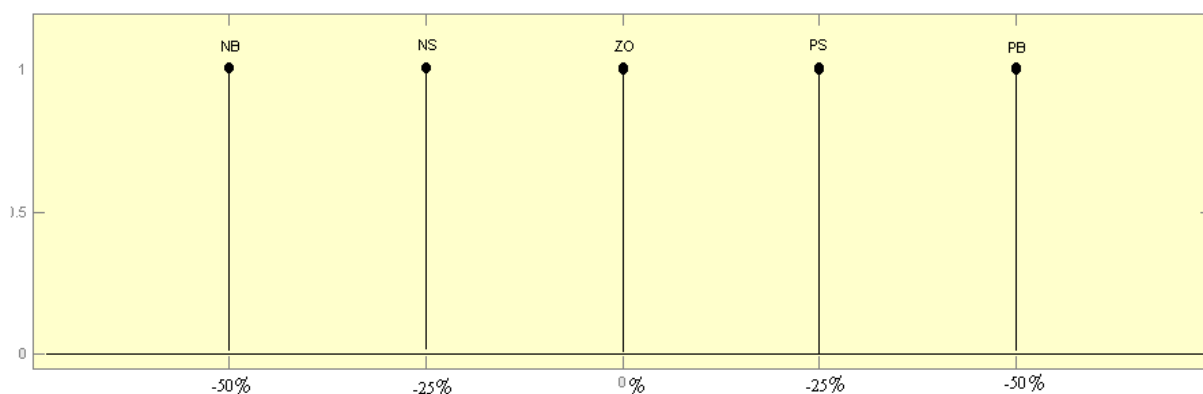


圖 3-4 輸出歸屬函數 u_d

3.1.2 模糊規則庫

本論文利用倒單擺之物理特性和 If-Then 方法，訂定一個模糊規則庫如表 3-1 所示。舉其中一個為例(如表 4-1 紅色框所示)，假設車身傾斜角度 θ 為 PS(正的小)、且傾斜角速度 $\dot{\theta}$ 為 P(正)，則輸出 u_d 必須為 NB(負的大)，車身才符合物理特性，讓兩輪移動車維持平衡。

If θ is PS and $\dot{\theta}$ is P, then u_d is NB。

表 3-1 感測訊號輸入對照表

u_d		θ				
		NB	NS	ZO	PS	PB
$\dot{\theta}$	N	PB	PB	PS	NS	NS
	ZO	PB	PS	ZO	NS	NB
	P	PS	PS	NS	NB	NB

3.1.3 推論引擎與解模糊化

推論引擎應用於模糊控制器的方法有許多種，如下面條列所示[26]：

1. 乘機推論引擎(Product Inference Engine)
2. Lukasiewicz 推論引擎
3. Dienes-Rescher 推論引擎
4. Takagi-Sugeno 模糊推論法

5. 最小值推論引擎 (Minimum Inference Engine)

6. Zadeh 推論引擎

7. Tsukamoto 模糊推論法

由以上可知，推論引擎有許多種，其選擇方式或標準可以用下列兩點來考慮：

(1)可根據前人的經驗累積或知識觀點來選擇

(2)滿足某種特殊性為目的

本論文使用乘積推論引擎(Product Inference Engine)再利用重心法解模糊(Center of Area Defuzzifier)解模糊化求得輸出。重心法解模糊化所得之模糊控制器之輸出值如方程式 3-1 所示。

$$V = \frac{\sum_{i=1}^{15} [\theta_n(s1) \times \dot{\theta}_n(s2) \times u_d^n]}{\sum_{i=1}^{15} [\theta_n(s1) \times \dot{\theta}_n(s2)]} \quad (3-1)$$

其中 n 為模糊規則數目、 $\theta_n(s1)$ 為當車身傾斜角度為 $s1$ 時使用乘積推論引擎帶入歸屬函數 θ 之歸屬程度、 $\dot{\theta}_n(s2)$ 為當車身傾斜角速度為 $s2$ 時使用乘積推論引擎帶入歸屬函數 $\dot{\theta}$ 之歸屬程度、 u_d^n 為當下輸出歸屬函數之歸屬程度、 V 為輸出到馬達端 PWM 的責任週期(Duty Cycle)。

3.2 LQR 控制器[27]

LQR 控制器則讓狀態空間回授控制(State Space Feedback Control)的方法之一，主要是求出讓系統穩定之最佳 k 值，如圖 3-5 所示。

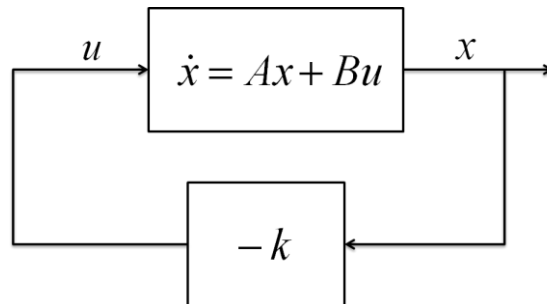


圖 3-5 LQR 系統架構圖

假設一系統表是動態方程式如方程式(3-2)。首先考慮調節問題，(Regulation Problem)希望當 $t \rightarrow \infty$ 時， $x \rightarrow 0$ 。首先定義系統的成本函數(Cost Function) J 如方程式(3-3)，其目的是要選擇系統輸入 u 使得系統穩定而且成本函數 J 達到最小，

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = cx \end{cases} \quad (3-2)$$

$$J = \int_0^{\infty} x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t) dt \quad (3-3)$$

其中 Q 為系統狀態 x 的權重矩陣、 R 為系統輸入 u 的權重矩陣，同時 Q 為半正定矩陣(Positive Semi-Definite Matrix)、 R 為正定矩陣(Positive Definite Matrix) 兩者皆可自行設定。在解 u 的過程中如下所示，

$$u = -kx \quad (3-4)$$

其中 k 為

$$k = R^{-1}B^T P \quad (3-5)$$

又 P 為 Algebraic Riccati Equation (ARE)之解，ARE 如方程式 3-6 所示，

$$A^T P + PA^T - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (3-6)$$

將以上方程式 3-6 到 3-4 反推可得 LQR 最佳化之系統輸入 u 。在 Matlab 模擬當中， Q 矩陣為單位矩陣、 $R=10$ 。

3.3 PID 控制器[28][29]

PID 控制器是在工業界和控制領域應用中常見的回授迴路部件。PID 控制器會把收集到的數據和參考值作相減比較，然後利用此誤差計算出新的輸入值，新的輸入目的是讓系統保持或達到參考值，並且可以根據歷史數據來調整輸入值可讓系統更加穩定與準確。

PID 控制器主要是由比例單元 P(Proportional)、積分單元 I(Integral)和微分單元 D(Derivative)所組成。P 控制器是最常見與最簡單的控制方式，是將誤差乘以一個特定的比例增益 k_p 當作受控體(Plant)的輸入，可使系統響應速度加快，同樣的穩定性可能變差產生震盪。I 控制器是將過去一段時間的誤差合累積起來，然後乘上一個積分常數作為受控體的輸入，其優點是可以消除穩態誤差，但是會影響暫態響應。D 控制器是將誤差作微分的動作做為受控體的輸入，D 控制器可以解決輸出的變化總是落後於誤差的變化，可改善暫態響應。P、I、D 三種控制器，使用者可以選擇最適合的組合來搭配使用，使用者主要是經由設計與調整三個參數增益(k_p 、 k_i 、 k_d)來達到預期之性能。PID 控制器由於具有良好性能、結構簡單、低成本等…優點，在工業界和控制領域已被廣泛運用、然而因三個參數的互相影響造成參數調整不易，是 PID 控制器的缺點。

PID 控制器的架構如圖 3-6 所示，其中 r 為參考信號、 $e(t)$ 為系統輸出值和參考信號的誤差、 $u(t)$ 為 PID 控制器的輸出，可表示成方程式 3-7。

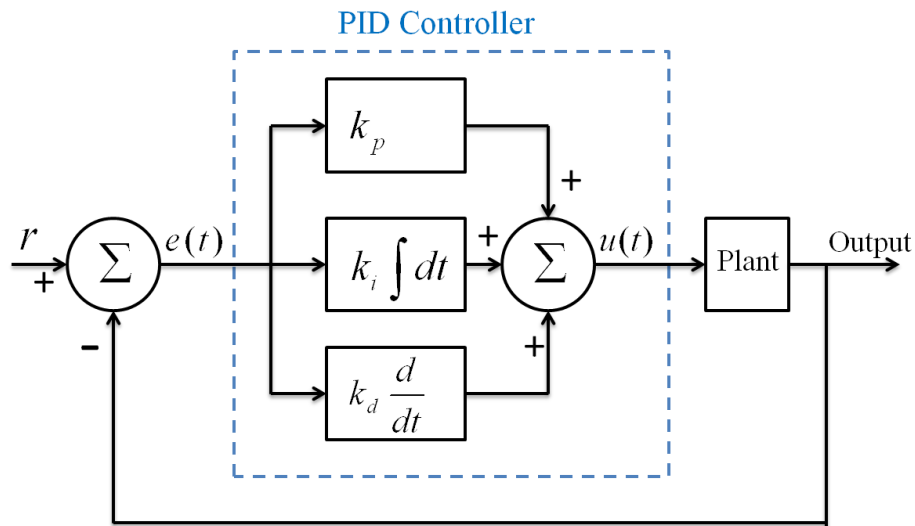


圖 3-6 PID 系統架構圖

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3-7)$$

本論文使用的 PID 控制器有三個，其中一個是車身移動控制模擬、第二是是車身

定速控制實驗、第三個是兩輪同步控制實驗。車身移動控制模擬當中，經由多次測試後選用 PID 控制器($k_p=6$ 、 $k_i=0.1$ 、 $k_d=8$)。

3.3 模擬結果

本論文以 Matlab 模擬，並假設在初始車身傾斜角度 θ 為 0.2 徑度 (約 11.44 度)、角速度 $\dot{\theta}$ 為 0.1 每秒徑度為例時使用模糊控制器、LQR 控制器、PID 控制器作模擬比較。車身傾斜角度和時間關係模糊控制器如圖 3-7 所示、LQR 控制器如圖 3-8 所示、PID 控制器如圖 3-9 所示(x 軸為時間、y 軸為車身傾斜之徑度)；輸入電壓方面，模糊控制器之輸入電壓和時間關係如圖 3-10 所示、LQR 控制器如圖 3-11 所示、PID 控制器如圖 3-12 所示(x 軸為時間、y 軸為馬達兩端電壓)。由模擬結果可知，收斂速度最快的為模糊控制器和 LQR 控制器(皆為 0.7 秒左右角度收斂到 0.03 徑度)，PID 控制器最慢(1.6 秒左右)最後由於考慮程式撰寫的靈活性和複雜度，決定使用模糊控制器作為平衡實驗的控制器。

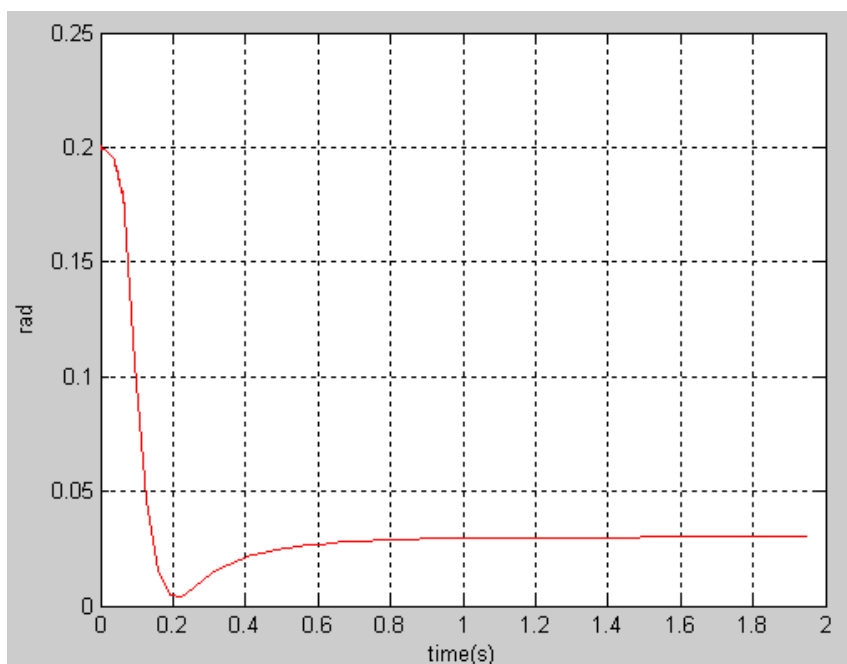


圖 3-7 使用模糊控制器之車身傾斜角度

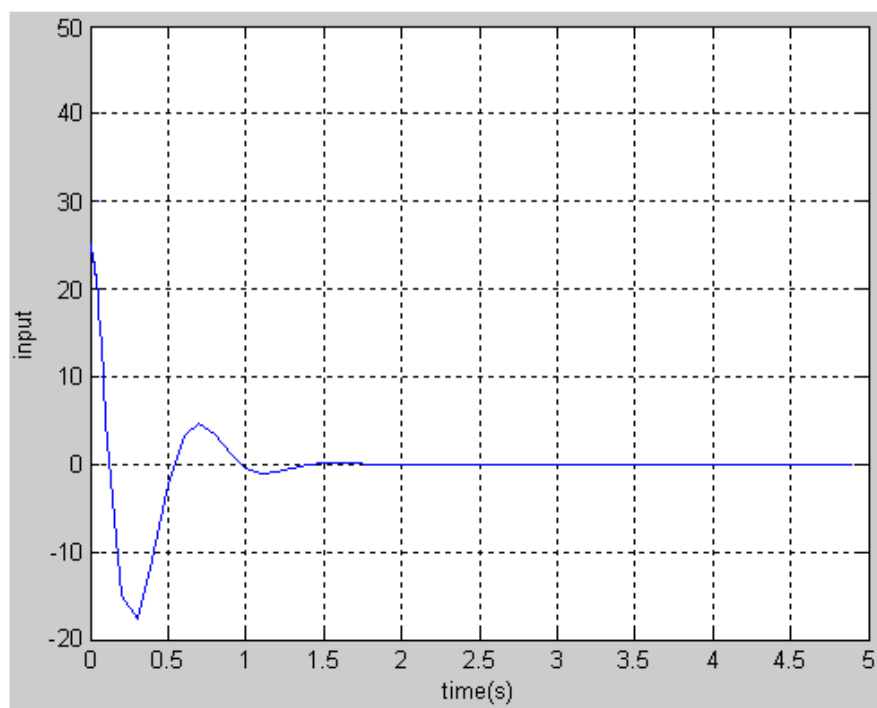


圖 3-8 使用模糊控制器之輸出電壓

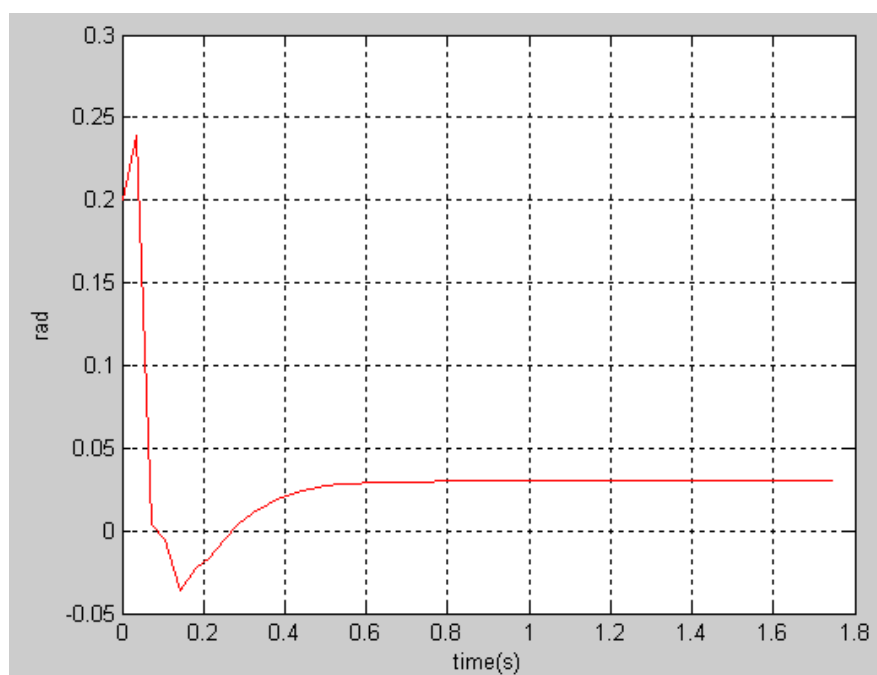


圖 3-9 使用 LQR 控制器之身傾斜角度

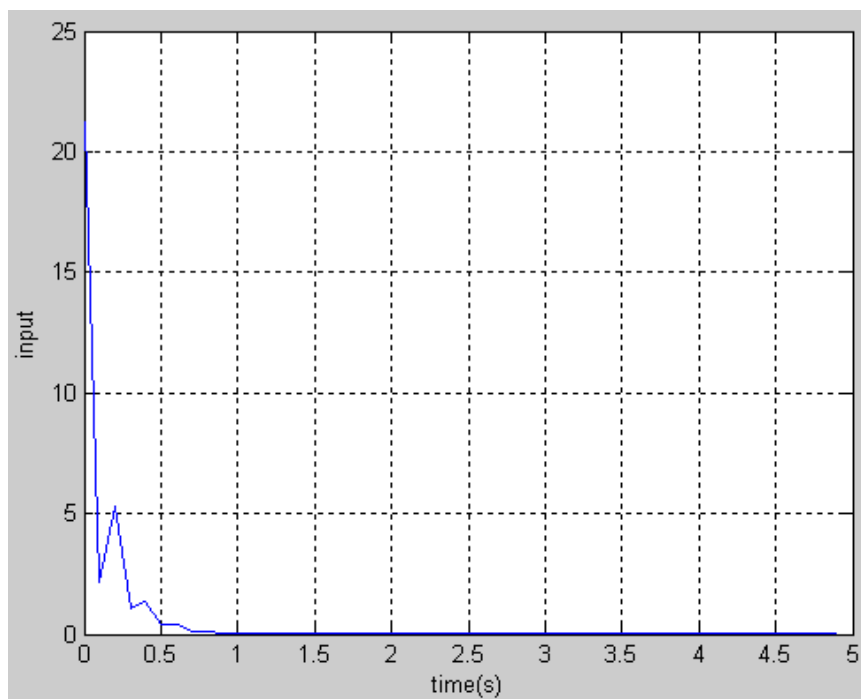


圖 3-10 使用 LQR 控制器之輸出電壓

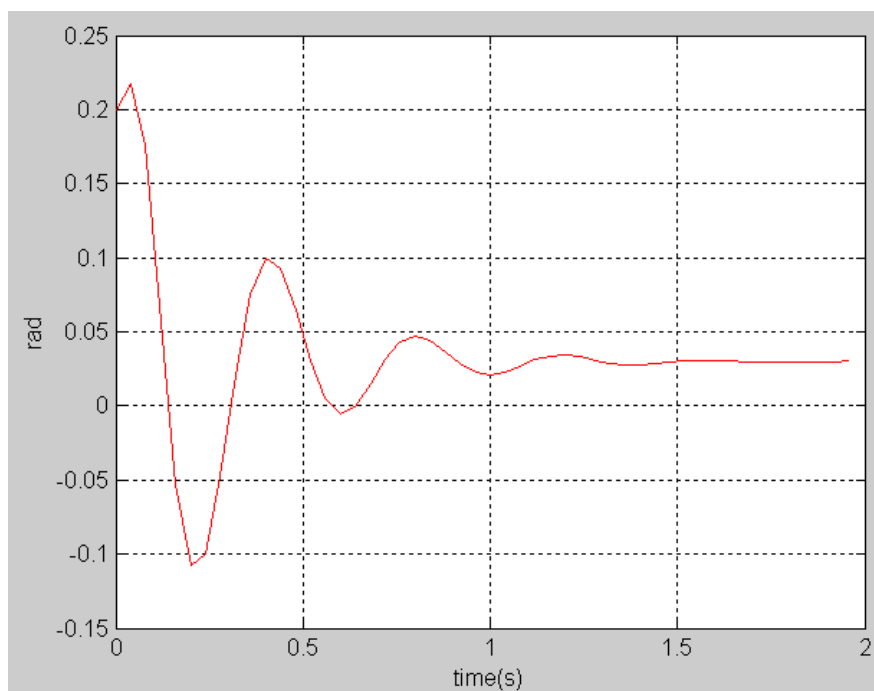


圖 3-11 使用 PID 控制器之身傾斜角度

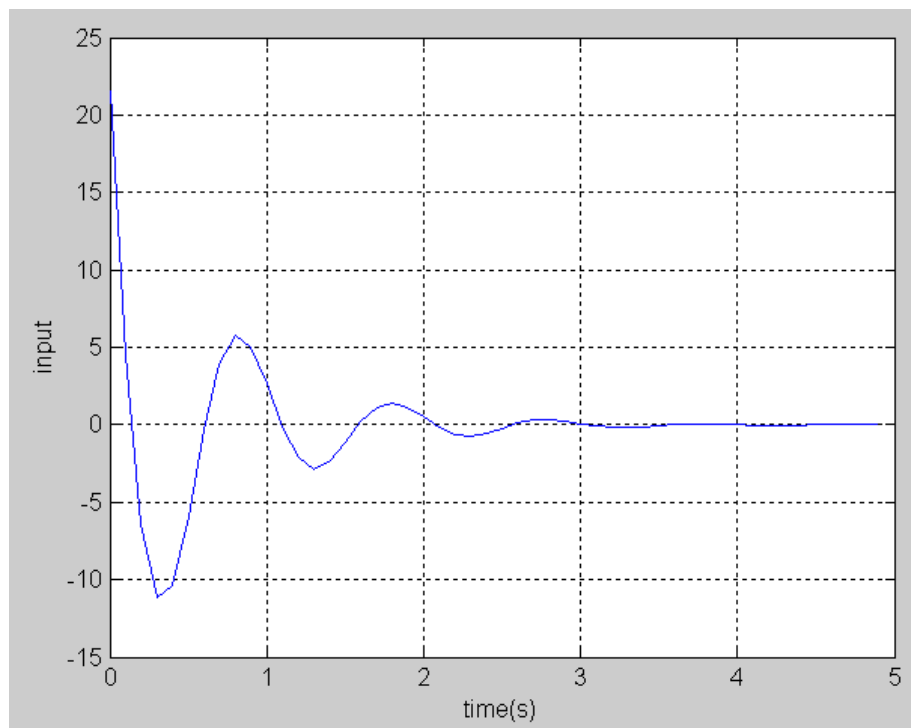


圖 3-12 使用 PID 控制器之輸出電壓

第四章 實驗與討論

首先為簡介，本論文實驗方面有三個，第一個是 PID 控制器定速控制實驗、第二個是 PID 控制器的左右兩輪同步實驗、第三是模糊控制器平衡實驗。整體程式流程圖如圖 4-1 所示。

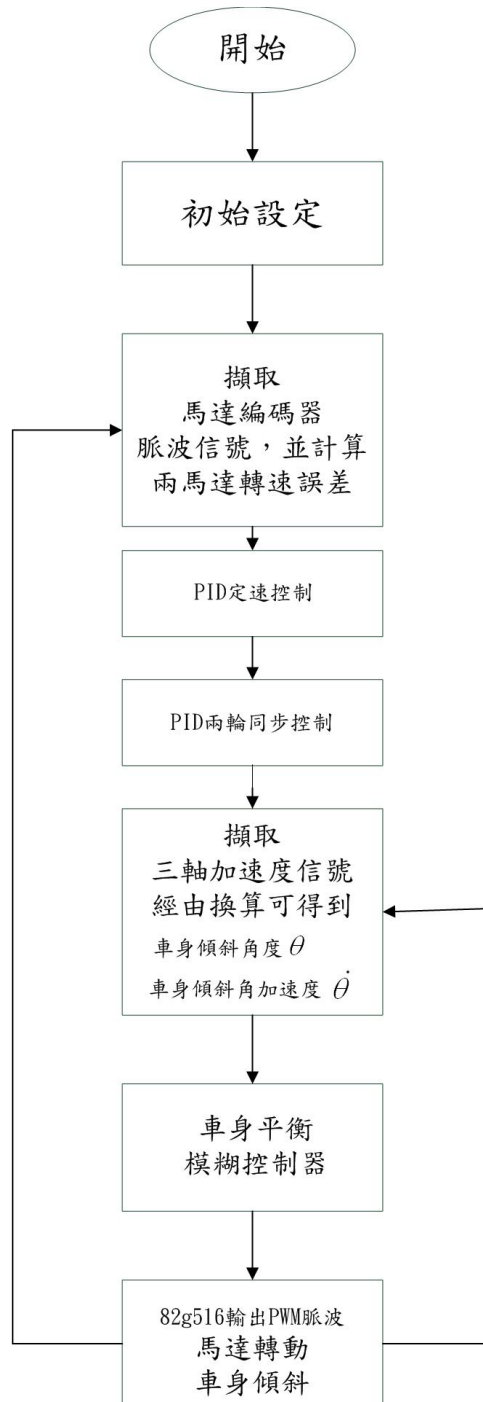


圖 4-1 兩輪移動車程式流程圖

4.1 PID 車身定速控制

要了解兩輪移動車的移動速度，所以將馬達編碼器輸出脈波頻率對應 82g516 的 PWM 脈波輸出 Duty 之曲線圖量測了出來，如以下圖所示。

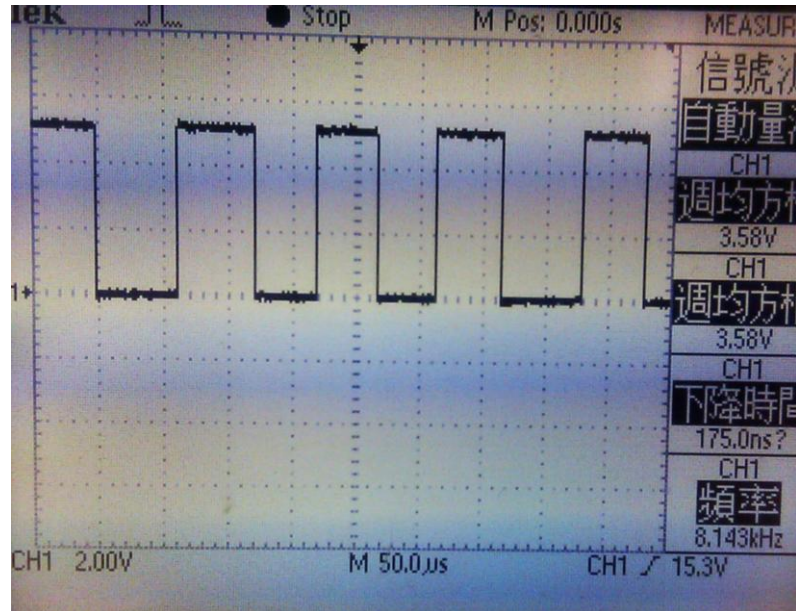


圖 4-2 PWM Duty 為 10%時馬達編碼器輸出信號(8.143kHz)

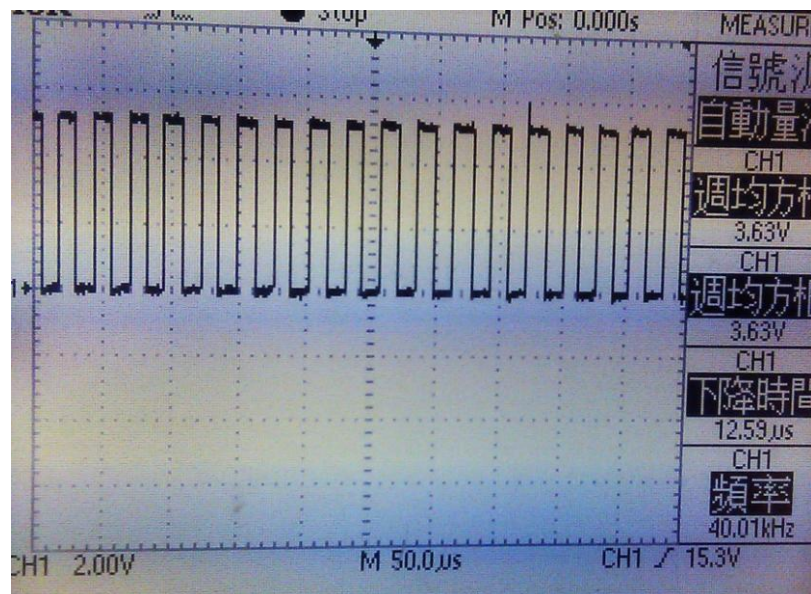


圖 4-3 PWM Duty 為 20%時馬達編碼器輸出信號(40.01kHz)

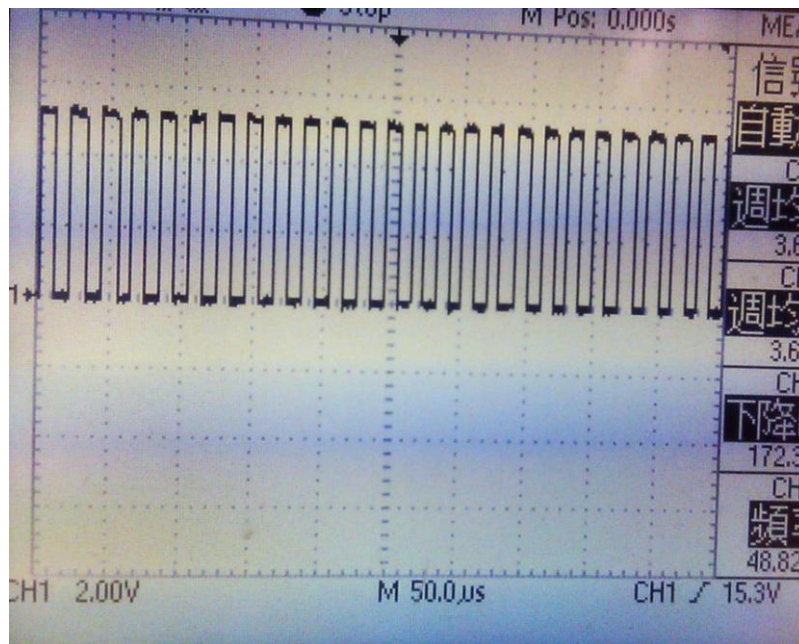


圖 4-4 PWM Duty 為 30%時馬達編碼器輸出信號(48.82kHz)

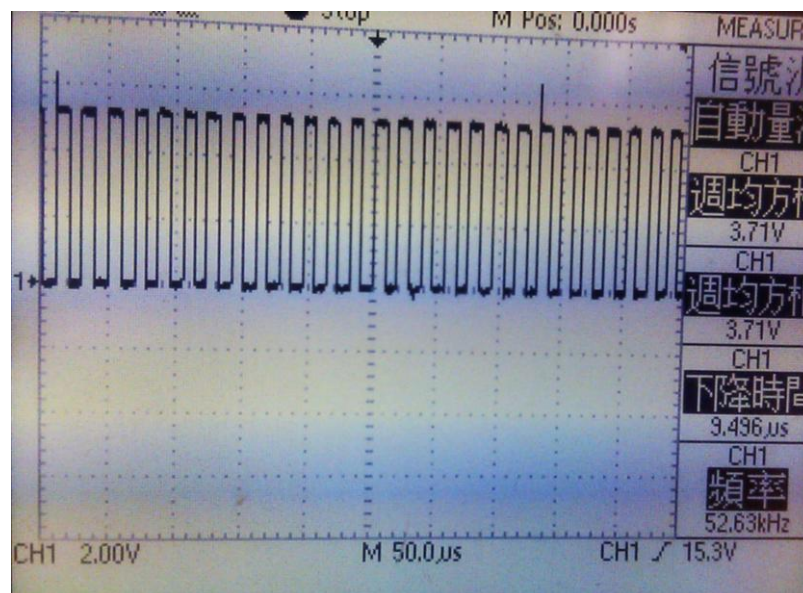


圖 4-5 PWM Duty 為 40%時馬達編碼器輸出信號(52.63kHz)

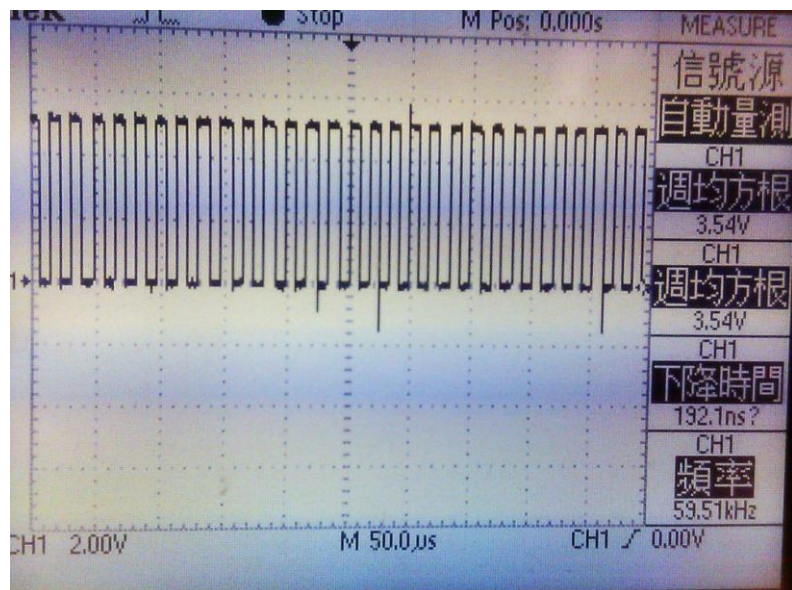


圖 4-6 PWM Duty 為 50%時馬達編碼器輸出信號(59.51kHz)

由於，本論文之兩輪移動車之輪胎半徑為 0.16 公尺，而且馬達編碼器轉一圈會輸出 10000 個脈波，所以兩輪移動車之移動速度可以被換算出來如方程式 4-1。

$$Speed(m/s) = \frac{1}{(frequency\ of\ encoder) \times 10000} \quad (4-1)$$

例如，在 82g516 輸出 Duty 為 10%時，馬達編碼器輸出之脈波頻率為 8.143kHz，將其代入方程式 4-1，可得兩輪移動車之速度為 0.814(m/s)：

$$\frac{1}{(8.143k) \times 10000} \cong 0.814(m/s)$$

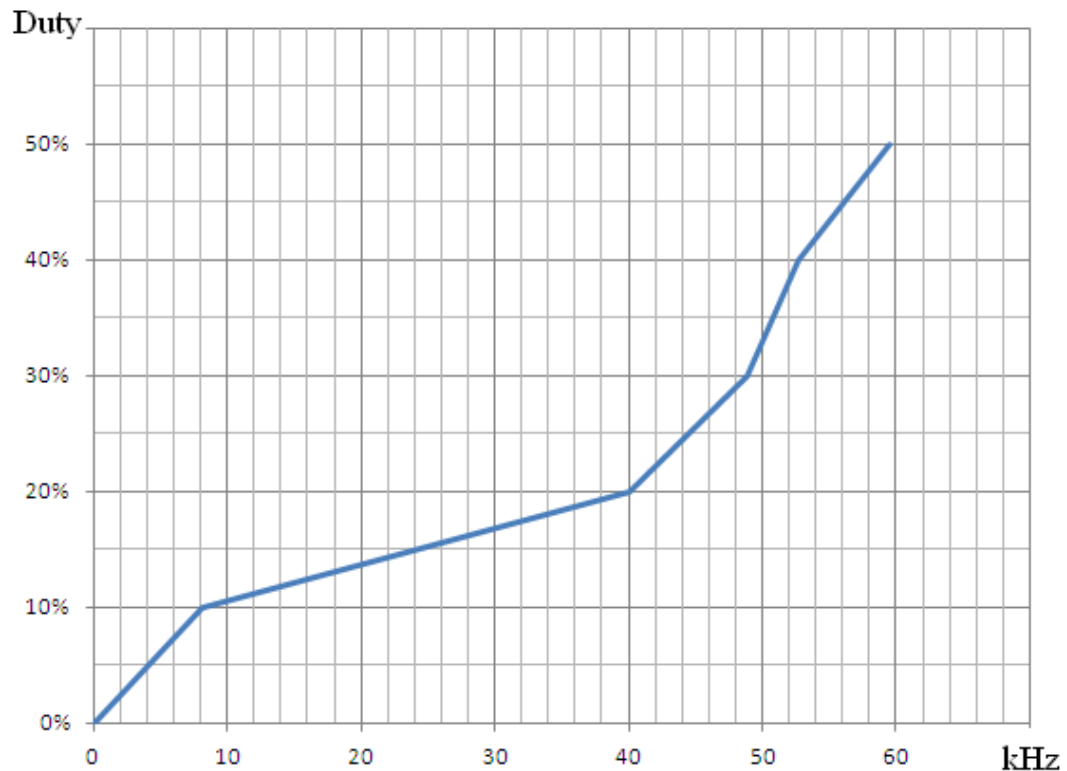


圖 4-7 馬達編碼器輸出脈波頻率對應 Duty

首先是 PID 車身定速控制實驗方面，架構圖如圖 4-8 所示，車身定速是以左輪的馬達邊馬器信號和參考速度作比較，計算其左輪與理想速度的誤差，並藉由 PD 控制器做為控制，經實驗結果測得較好的一組增益值($k_p=2$ 、 $k_i=0$ 、 $k_d=1$)。

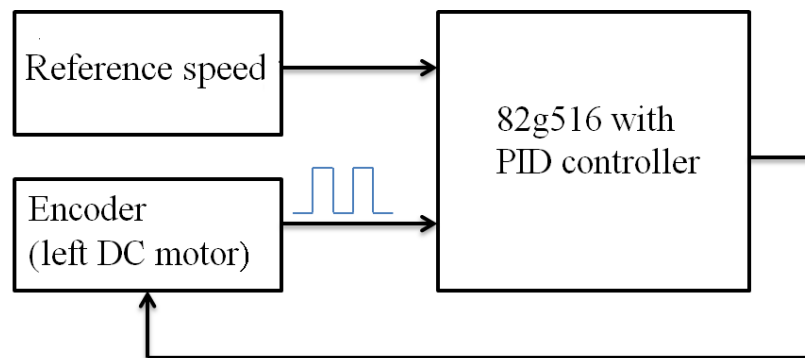


圖 4-8 PID 車身定速控制架構如圖

4.2 PID 兩輪同步控制

接著是 PID 兩輪同步控制實驗。兩個相同的馬達，在製造、組裝過程中，必然存在許多公差、相同型號的電子元件也可能存在類似的問題；另一方面，在實際實驗當中，也發現其中一輪軸承有些磨損，造成同時施加相同 PWM 脈波時，

因為磨擦阻力的影響而造成兩輪不同步。有鑑於此，本論文除了在制作電路板之前，盡量選擇兩組匹配型號的電子原件(例如：電阻值、電容值、BJT 的 β 值、MOSFTE 型號.....等)以外，同時也必須加入控制器來做修正的動作。在控制器方面，本論文使用的是 PID 控制器中的 PD 控制器，並經實驗後的到一組較佳的增益值($k_p=16$ 、 $k_i=0$ 、 $k_d=1$)。

兩輪同步控制方面，由於脈波數量在單位時間內數量多(馬達繞一圈時編碼器可產生 10000 個脈波)，加入 I 控制器在時計實驗裡發現，有時會導致系統不穩定，有鑑於此選用 PD 控制器，兩輪同步架構如圖 4-9 所示，將兩輪之編碼器信號當作輸入，輸入到 82g516，並以左輪編碼器的輸出脈波信號為基準，計算其左輪與右輪編碼器輸出之脈波數量誤差，並藉由 PID 控制器($k_p=16$ 、 $k_i=0$ 、 $k_d=1$)，以調整兩輪同步。

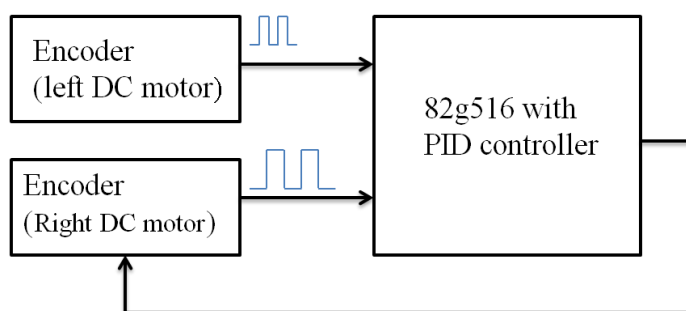


圖 4-9 PID 兩輪同步架構如圖

左右兩輪同步實驗如圖 4-10 所示之，A 為預計行進方向，L 為平均最大車身偏移量，虛線為兩輪移動車實際行走路徑。實驗方法為，將兩馬達之編碼器脈波當作輸入，輸入到 82g516 計數脈波，在藉由兩脈波數量的誤差當作輸入，輸入到 PD 控制器，達成便兩輪同步。下表 4.1 為輪子旋轉五圈(輪半徑 0.16 公尺，轉五圈約 5 公尺)後取 10 次數據作平均比較。

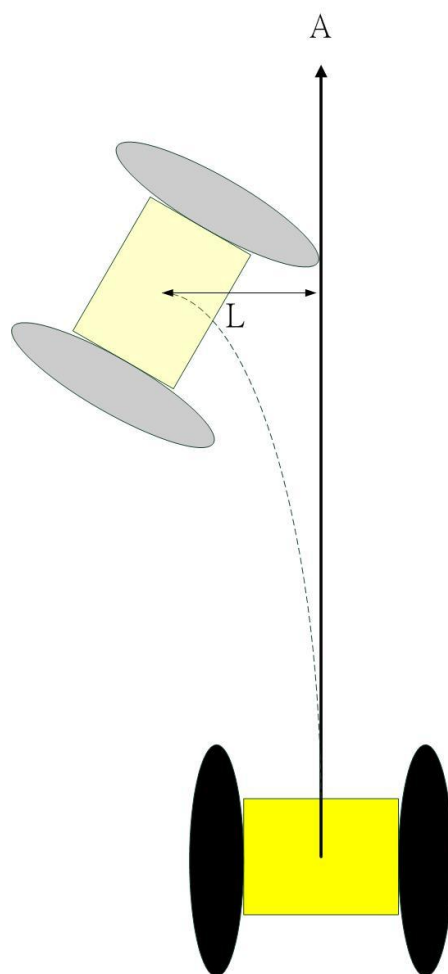


圖 4-10 兩輪同步示意圖

表 4.1 兩輪同步實驗比較表

	未加控制器	PD 控制器
平均最大左右輪圈數差	0.179 圈	0.043 圈
平均最大車身偏移量 L	2.152 公分	0.1229 公分

由表 4.1 可知，加入 PD 控制器之後，平均圈數差可減少約 24%、平均車身偏移量 L 可減少約 17.51%。

4.3 模糊控制器平衡實驗

在模糊控制器平衡實驗方面分為車身傾斜實驗一和車身傾斜實驗二。在車身傾斜實驗一，以車身傾斜之程度 θ 為 0.2 程度(11.46 度)、角速度 $\dot{\theta}$ 為 0.1 每秒程度為例時，其模糊規則庫為：

If θ is PB and $\dot{\theta}$ is Z, then u_d is NB。

If θ is PB and $\dot{\theta}$ is P, then u_d is NB。

If θ is PS and $\dot{\theta}$ is Z, then u_d is NS。

If θ is PS and $\dot{\theta}$ is P, then u_d is NB。

將 $\theta=11.46$ 、 $\dot{\theta}=0.1$ 帶入模糊規則庫，並且使用乘機推論引擎，則得到模糊規則庫的輸出為：

$$V = \left(\frac{0.2 \times 50\% + 0.2 \times 50\% + 0.3 \times 25\% + 0.3 \times 50\%}{0.2 + 0.2 + 0.3 + 0.3} \right) = 42.5\%$$

由於電池電壓是 25.5V，所以理論上碼達兩端之 PWM 輸出為
 $25.5 \times 42.5\% = 10.8375V$

在實際實驗上，圖 4-11 為感測器輸出之電壓、圖 4-12 為 82g516 輸出到左馬達 PWM(duty=42.5%)信號、圖 4-13 為 82g516 輸出到右馬達 PWM(duty=42.5%)信號、圖 4-14 為左馬達兩端之電壓、圖 4-15 為右馬達兩端之電壓、圖 4-16 為左馬達編碼器輸出脈波、圖 4-17 為右馬達編碼器輸出脈波。由圖 4-14 和 4-15 可知實際實驗所測得知馬達兩端電壓(左約 11.8V、右約 11.6V)和模糊規則庫推導出的輸出在馬達兩端之電壓(10.8375V)相當接近，誤差約 8.8%和 7%。

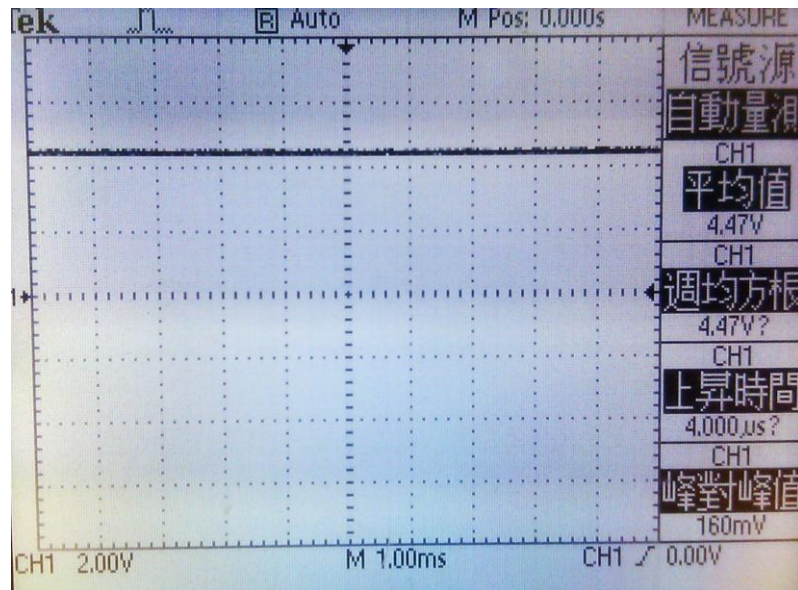


圖 4-11 在 0.2 徑度、0.1 每秒徑度時三軸加速度計輸出之電壓

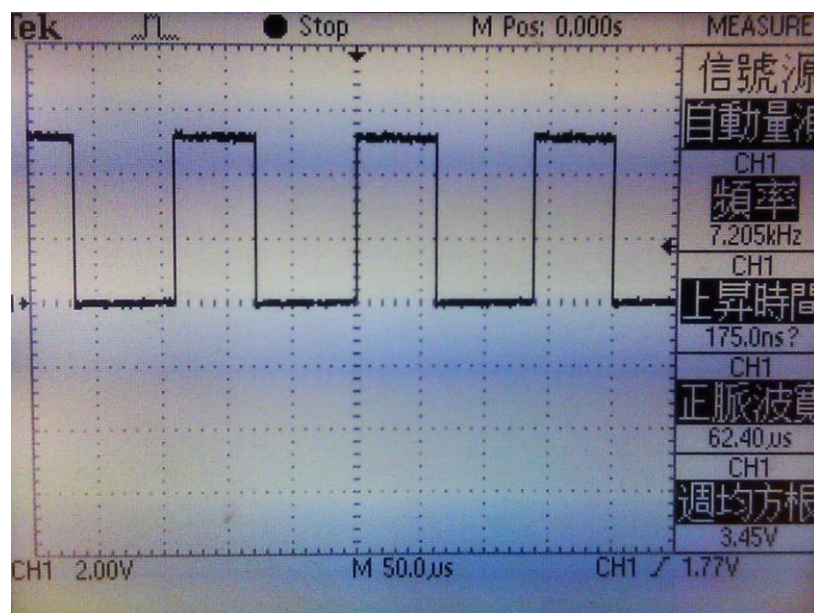


圖 4-12 在 0.2 徑度、0.1 每秒徑度時 82g516 輸出到左馬達之 PWM 信號

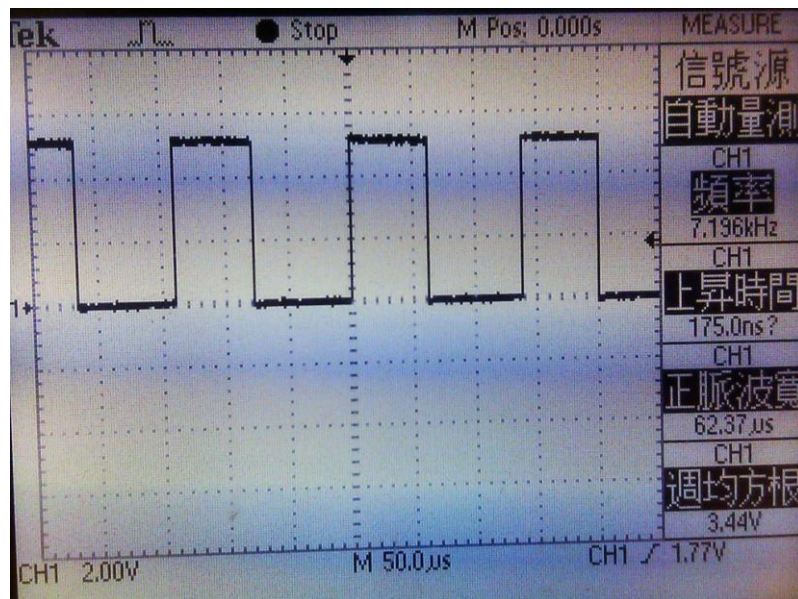


圖 4-13 在 0.2 徑度、0.1 每秒徑度時 82g516 輸出到右馬達之 PWM 信號

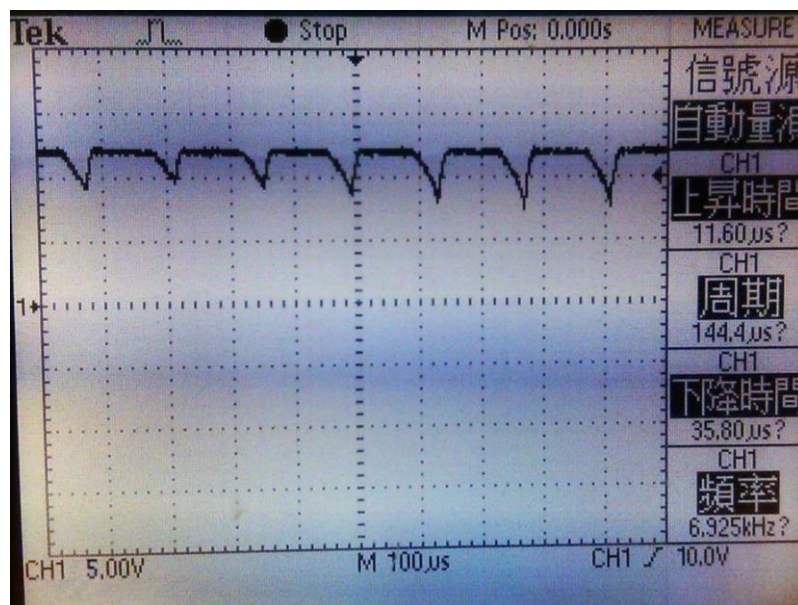


圖 4-14 在 0.2 徑度、0.1 每秒徑度時左馬達兩端之電壓

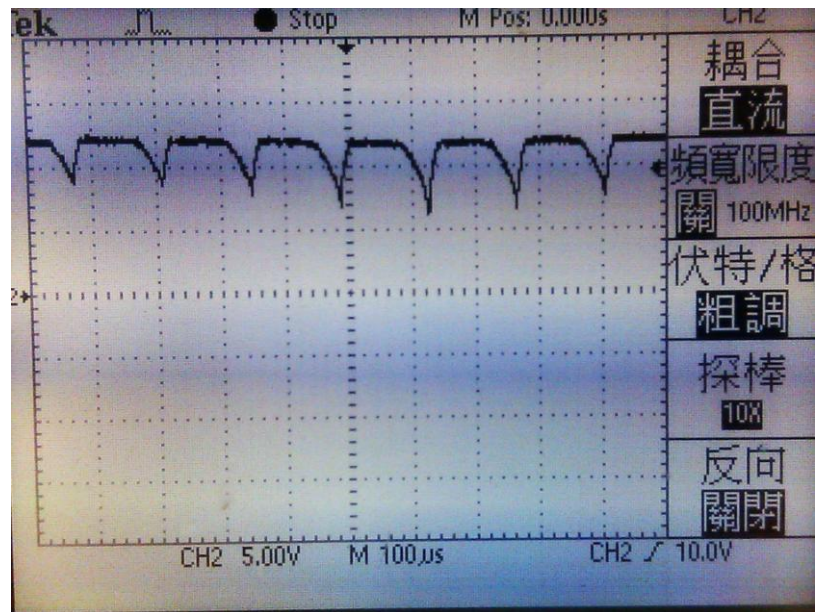


圖 4-15 在 0.2 徑度、0.1 每秒徑度時右馬達兩端之電壓

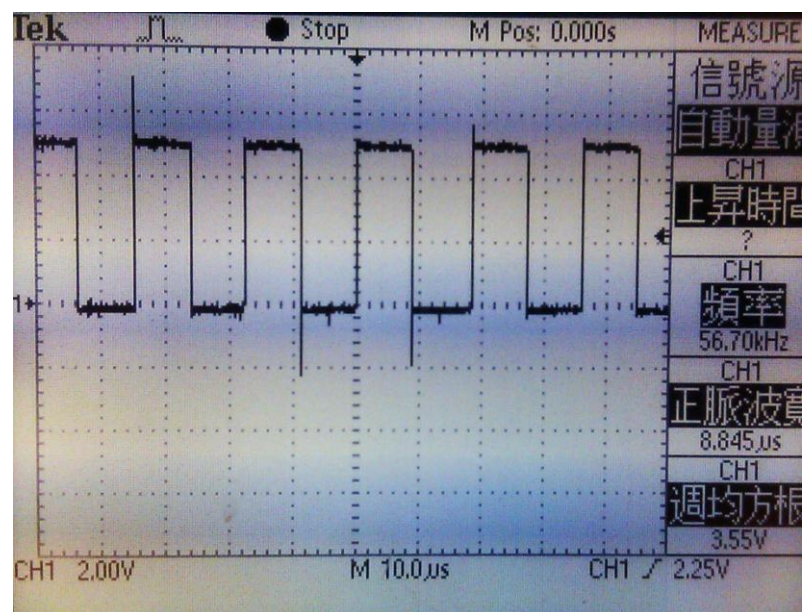


圖 4-16 在 0.2 徑度、0.1 每秒徑度時左馬達編碼器輸出脈波

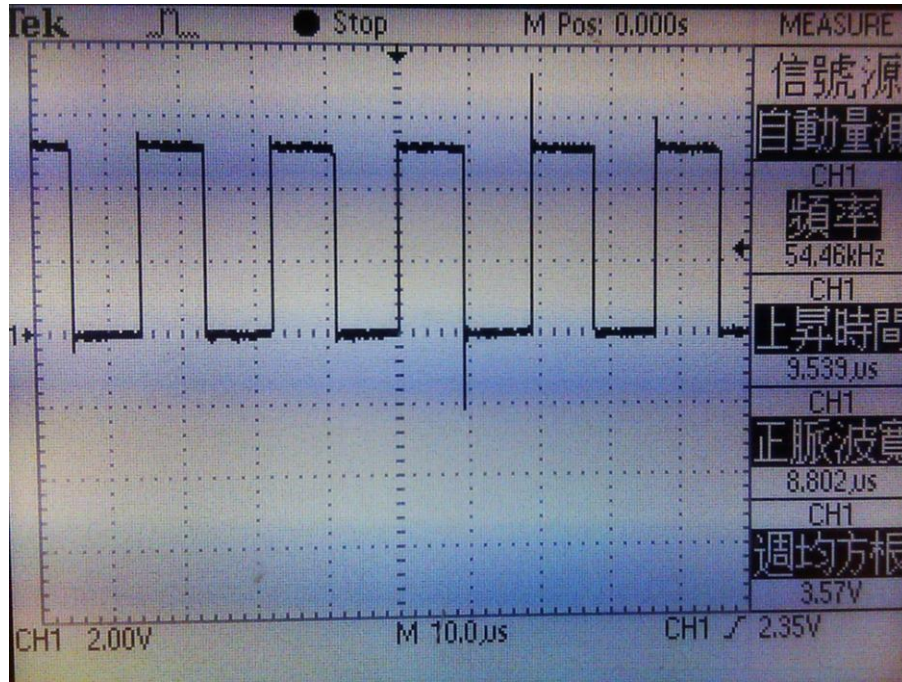


圖 4-17 在 0.2 徑度、0.1 每秒徑度時右馬達編碼器輸出脈波

車身傾斜實驗二，同理，以車身傾斜之徑度 θ 為 -0.2 徑度 (-11.46 度)、角速度 $\dot{\theta}$ 為 -0.1 (每秒徑度) 為例時，其模糊規則庫為：

If θ is NB and $\dot{\theta}$ is Z, then u_d is PB。

If θ is NB and $\dot{\theta}$ is N, then u_d is PB。

If θ is NS and $\dot{\theta}$ is Z, then u_d is PS。

If θ is NS and $\dot{\theta}$ is N, then u_d is PB。

將 $\theta = -11.46$ 、 $\dot{\theta} = -0.1$ 帶入模糊規則庫，並且使用乘機推論引擎，則得到模糊規則庫的輸出為：

$$V = -\left(\frac{0.2 \times 50\% + 0.2 \times 50\% + 0.3 \times 25\% + 0.3 \times 50\%}{0.2 + 0.2 + 0.3 + 0.3}\right) = -42.5\%$$

由於電池電壓是 25.5V，所以理論上碼達兩端之 PWM 輸出為

$$25.5 \times -42.5\% = -10.8375V$$

在實際實驗上，當車身傾斜之徑度 θ 為 -0.2 徑度、角速度 $\dot{\theta}$ 為 -0.1 (每秒徑度) 時，圖 4-18 為感測器輸出之電壓、圖 4-19 為 82g516 輸出到左馬達 PWM 信號、

圖 4-20 為 82g516 輸出到右馬達 PWM 信號、圖 4-21 為左馬達兩端之電壓、圖 4-22 為右馬達兩端之電壓、圖 4-23 為左馬達編碼器輸出脈波、圖 4-24 為右馬達編碼器輸出脈波。由圖 4-21 和 4-22 可知實際實驗所測得知馬達兩端電壓(左約 $-11.7V$ 、右約 $-11.6V$)和模糊規則庫推導出的輸出在馬達兩端之電壓($-10.8375V$)相當接近，誤差分別約為 7.9%和 7%。

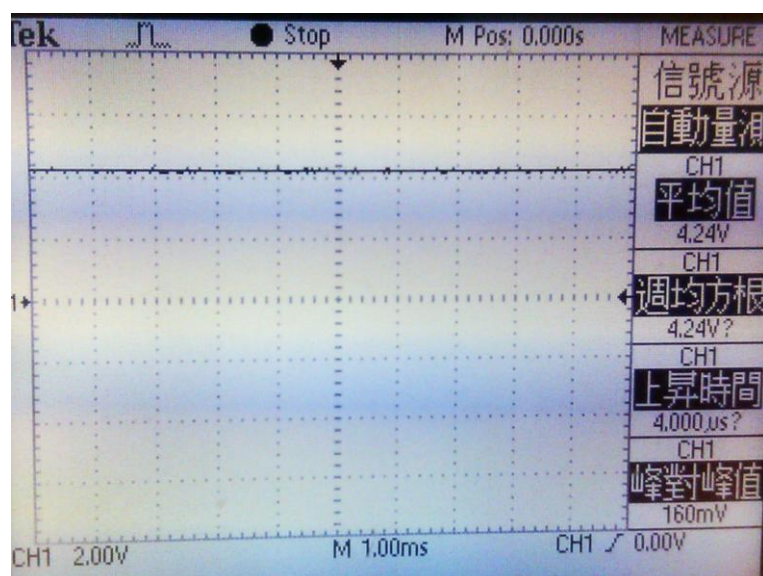


圖 4-18 在-0.2 徑度、-0.1 每秒徑度時三軸加速度計輸出之電壓

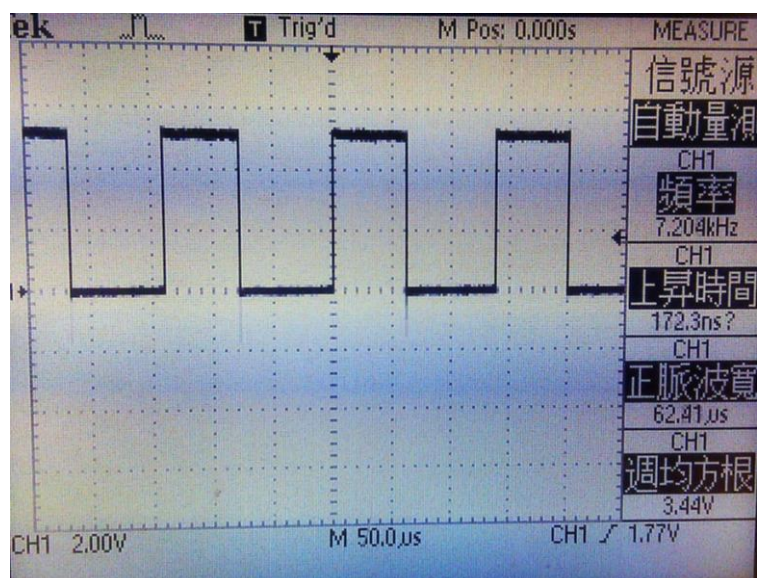


圖 4-19 在-0.2 徑度、-0.1 每秒徑度時 82g516 輸出到左馬達之 PWM 信號

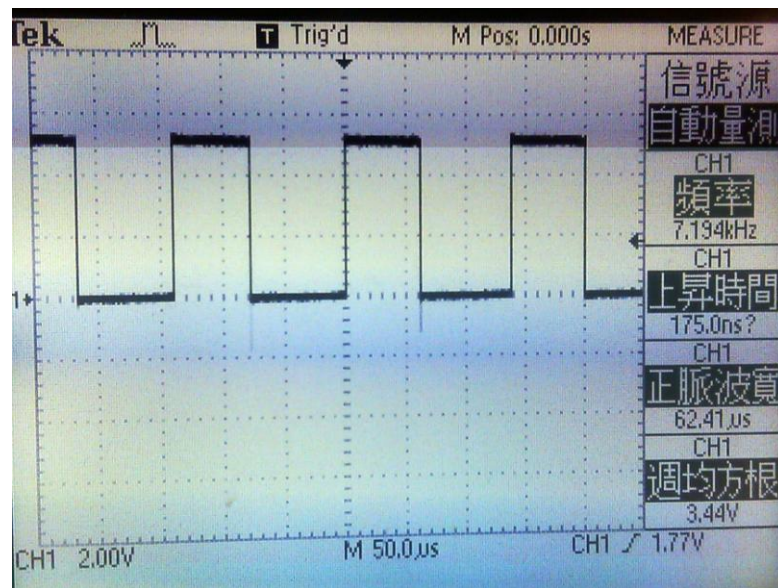


圖 4-20 在-0.2 徑度、-0.1 每秒徑度時 82g516 輸出到右馬達之 PWM 信號

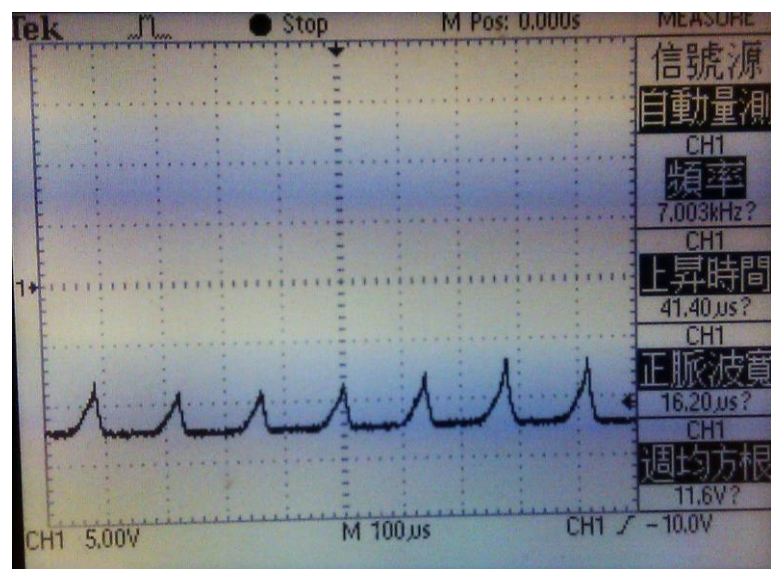


圖 4-21 在-0.2 徑度、-0.1 每秒徑度時左馬達兩端之電壓

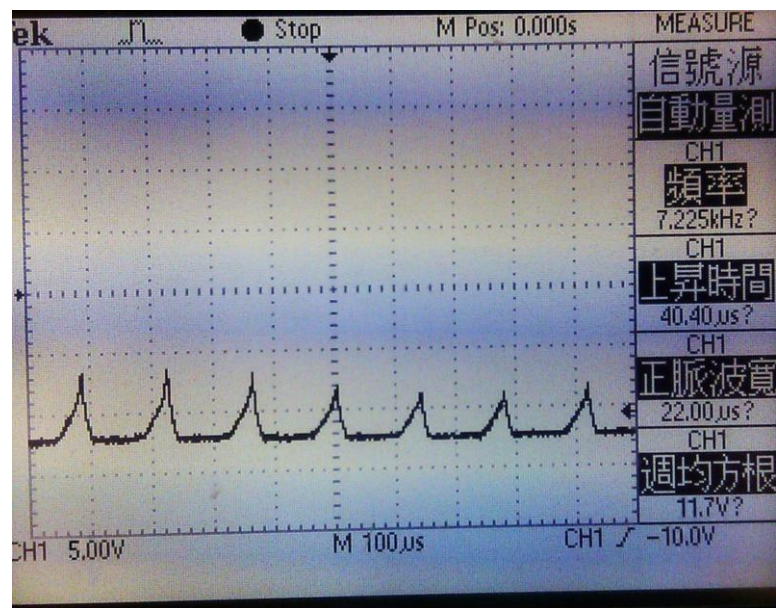


圖 4-22 在-0.2 徑度、-0.1 每秒徑度時右馬達兩端之電壓

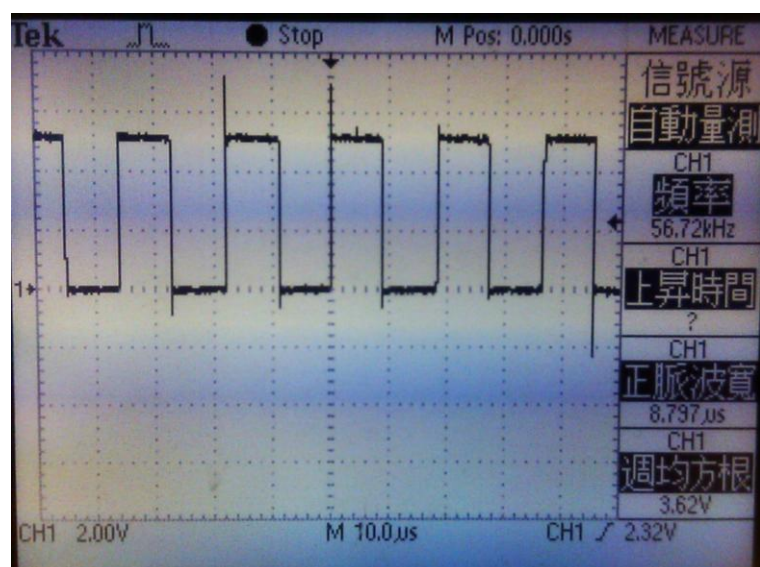


圖 4-23 在-0.2 徑度、-0.1 每秒徑度時左馬達編碼器輸出脈波

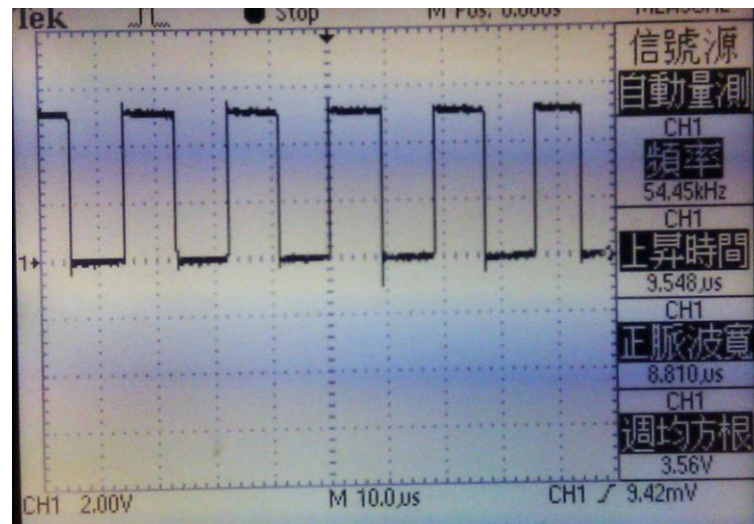


圖 4-24 在-0.2 徑度、-0.1 每秒徑度時右馬達編碼器輸出脈波

第五章 結論與未來展望

本論文主要是研究結合模糊理論、單晶片 82g516、三軸加速度計...等，製作一台兩輪移動車，並且包含模擬和實作部分。模擬方面，包含模糊控制器、LQR 控制器和 PID 控制器的車身平衡模擬。模擬結果模糊控制器和 LQR 控制器角度收斂時間兩者接近，PID 控制器較慢，最後，由於考慮到程式撰寫上的靈活性和複雜度，決定使用模糊控制器作為平衡實驗的控制器。實驗方面有三個實驗分別是 PID 控制器定速控制實驗、第二個是 PID 控制器的左右兩輪同步實驗、第三是模糊控制器平衡實驗，其中在 PID 控制器的左右兩輪同步實驗中加入 PD 控制器之後，平均圈數差可減少約 24%、平均車身偏移量 L 可減少約 17.51%；在模糊控制器平衡實驗中最大輸出在馬達兩端之電壓誤差為 8.8%以內。

由於兩輪移動車是從零開始實現，所以過程中也遇到不少困難，尤其是在電路硬體方面，如三軸加速度計上之雜訊、MOSFET 的選用、馬達反電勢過強...等。

5.1 困難之處與解決辦法

本論文在整個兩輪移動車的實作過程中，由於從零開始實現，過程中遭遇許多困難，例如：。

1.ADXL335 三軸加速度計容易受到車身震動雜訊干擾，有時會使 ADXL335 訊號輸出不穩定，為了解決此問題，按照其 datasheet 上的說明建議加上了 $10\mu F$ 的電容低通濾波器並且在輸入到單晶片 82g516 端時加以緩衝放大器，同時也降低 ADXL335 對單晶片 82g516 之負載效應>Loading effect)。。

2.ADXL335 三軸加速度計操作電壓為 3V，原本是使用單顆鉛酸電池的 12V 經由 M7805 穩壓 IC 轉成 5V 再接 LM317 轉成 3V，以供應 ADXL335 的電源，因為單晶片 82g516、光耦合器 TLP250、...等周邊電路也是使用 LM7805 所輸出之 5V，如此一來造成 LM7805 功率超過負荷容易過熱，所以最後決定取消 LM317 改用 1.5V 乾電池兩顆串聯成 3V 單獨供應 ADXL335 之電源，如此一來可降低 LM7805 過熱問題。

3.在隔離電路的部分，原先是使用 PC817 光耦合器由於其上升時間(Rise time)

及下降時間(Fall time)反應不夠快(Rise time= $4\mu s$ 、Fall time= $3\mu s$)導致輸出到馬達兩端電壓會較高，解決方法是換成 TLP250(tpLH= $0.15\mu s$ 、tpHL= $0.15\mu s$)，以提升反應速度。

4.由於兩輪移動車所選用之直流馬達啟動電流高達 10A 以上，所以原先在有經過馬達負載的導線上皆選用過細，導致導線發熱有時馬達無法轉動，解決方法是，之後全數換上安全電流 24A 以上之粗線以對應。

5.由於兩輪移動的體積小為其特點之一，所以內部空間有限，所以電路板製作前除了線路的整齊、面積的規劃以外、高度也不可超過空間內不容許高度，否則蓋板將無法闔上。

6.程式撰寫上的錯誤，造成 PWM 信號誤動作，馬達反電勢過強造成抖動和 MOSFET 切換損失(switching loss)，如圖 5-1 所示，在負電壓方向產生極大之反電動勢導致妨礙馬達正常旋轉。以至於導致馬達驅動器上的 MOSFET 雖然有加散熱片，但還是過熱燒毀並且溶化其排母，解決方法是加入保險絲、程式撰寫方式以及改成單一條線控制線控制一顆 MOSFET 的開或關。

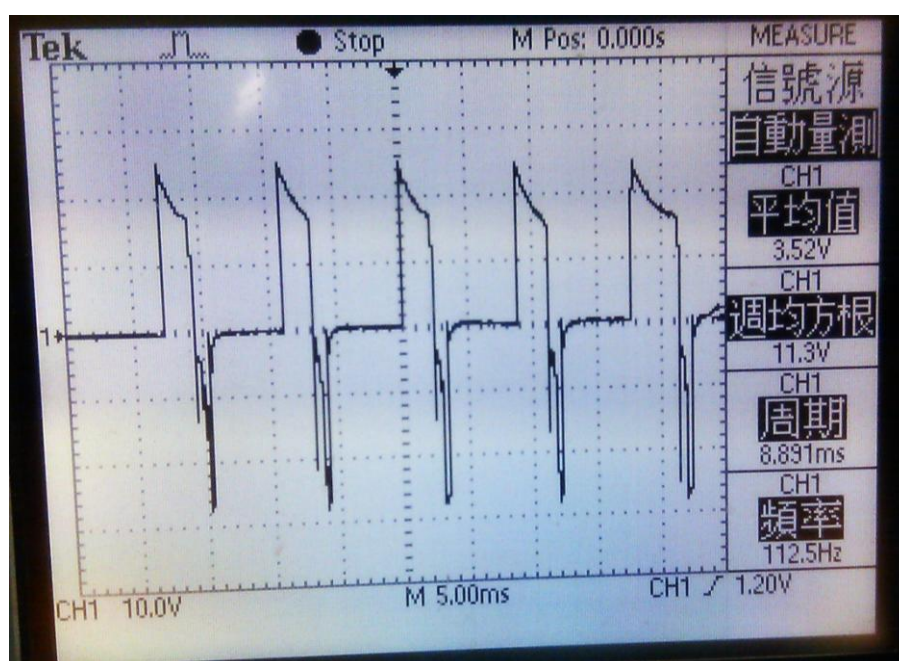


圖 5-1 馬達反電勢過強

5.2 未來展望

在未來展望的部分，分成幾個方向：

1.在控制核心方面：使用功能更多、速度更快之控制核心。雖然 82g516 已經有 A/D 內建有 converter 和 PWM 模組，可以在使用上已經減少設計這兩項電路，但是 82g516 的 A/D converter 和 PWM 模組腳位共用(可由暫存器調整)，同時使用 A/D converter 和 PWM 模組在本兩輪移動車的實驗當中，可調整隻腳位皆已佔滿、若要擴充其他感測器就必須使用第二組 82g516 或是其他軟硬體方法或是更強之控制核心。

2.馬達驅動器方面：由於 H-bridge 電路是自行製作，不當的 PWM 信號輸入進去，會導致 MOSFET 誤動作造成短路、若能選購更適合之馬達驅動器，配合短路保護或誤動作保護...等等，能加速兩輪移動車之後續的性能以及發展。

3.感測器方面：由於兩輪移動車是屬於初步製作，感測器方面只有使用 ADXL335 三軸加速度計，角速度 $\dot{\theta}$ 必須經由軟體方式換算，會有些許誤差產生，若能使用更強之控制核心，加入陀螺儀便可直接使用其輸出信號 $\dot{\theta}$ 。

初步實作一台兩輪移動車，須要具備電路硬體、軟體、機構、物理特性、...等相關知識。過程中發費了許多心血、成本、以及工夫，希望藉由以上未來展望的方向，對未來的目標功能，如平衡穩定性、續航力、左右轉...等功能有正面的幫助與發展。

參考文獻

- [1] http://unfccc.int/kyoto_protocol/status_of_ratification/items/2613.php
- [2] <http://nsidc.org/>
- [3] <http://www.segway.com/>
- [4] <http://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%BA%E5%8F%A3>
- [5] <http://zh.wikipedia.org/wiki/Segway#.E5.AF.A6.E9.9A.9B.E9.81.8B.E7.94.A8>
- [6] <http://www.ti.com.tw>
- [7] <http://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%8B%B0%E9%9B%A2%E5%AD%90%E9%9B%BB%E6%B1%A0>
- [8] T.Blackwell, “Building a Balancing Scooter” , <http://tlb.org/scooter.html>
- [9] http://www.hitachi.co.jp/rd/research/robotics/emiew2_01.html
- [10] M. Sasaki, N. Yanagihara, O. Matsumoto and K.Komoriya, “Steering Control of the Personal Riding-type Wheeled Mobile Platform (PMP),” *Proc. of 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS05)*, pp.3821-3826, August 2005.
- [11] M. Sasaki, N. Yanagihara, O. Matsumoto and K. Komoriya, “Forward and Backward Motion Control of Personal Riding-type Wheeled Mobile Platform,” *International Conference on Robotics & Automation*, New Orleans, LA April 2004.
- [12] http://sites.mecheng.adelaide.edu.au/robotics/robotics_projects.php?wpage_id=44&title=31&browsebytitle=1
- [13] http://www.toyota.co.jp/en/news/08/0801_1.html
- [14] <http://www.engadget.com/2009/09/24/hondas-u3-x-personal-mobility-device-is-the-segway-of-unicycles/>
- [15] 黃正豪, 「兩輪自走車之設計與實現-以 NIOS 為核心之行動控制」, 碩士論文, 國立中央大學電機所, 中壢、台灣, 2006。
- [16] 顧耀宏, 「自平衡兩輪電動車之設計與控制」, 碩士論文, 國立中興大學電機工程研究所, 台灣, 2005。
- [17] 王志凱, 「智慧型兩輪車之平台研製與平衡控制」, 碩士論文, 聖約翰科

- 技大學電機工程研究所，台灣，2009。
- [18] 江東穎，「兩輪式智慧型機器人之設計與實現」，碩士論文，中國文化大學數位機電科技研究所，台灣，2009。
- [19] http://yschen.ee.yzu.edu.tw/Courses/Micro8051Ex/981/MPC82G516_ICE_TOOL_UserManual_V10.pdf
- [20] <http://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%94%B5%E6%B1%A0>
- [21] <http://www.aroboto.com/shop/goods.php?id=265>
- [22] <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/99385.pdf>
- [23] H. Hagnas, "Type-2 FLCs: A new Generation of Fuzzy Controllers", *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 2, no. 1, pp. 30-43, February 2007.
- [24] Q. Liang and J. M. Mendel, "Interval type-2 fuzzy logic systems: Theory and design," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 8, no. 5, pp. 535–550, Oct. 2000.
- [25] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets," *Information and Control*, vol. 8, pp. 338-353, June 1965.
- [26] 鐘宏見，「DNA 演化模糊系統應用於移動機器人控制」，碩士論文，國立台灣師範大學應用電子科技所碩士班，台灣，2008。
- [27] 陳上澍，「以數位信號處理器為基礎之旋轉型雙節倒單擺系統甩上與平衡控制」，碩士論文，國立成功大學工程科學系碩士班，台灣，2006。
- [28] <http://zh.wikipedia.org/wiki/PID>
- [29] 吳國駿，「PID 與狀態回受控制器應用於倒單擺系統之分析比較」，碩士論文，國立高雄應用科技大學電機工程系碩士班，台灣，2007。