

國立交通大學

電機與控制工程研究所

碩士論文

車輛自動駕駛之模糊控制設計與實現

Design and Implementation of Fuzzy Control
for the Autonomous Vehicle

研究生：蔡雨坤

指導教授：徐保羅 博士

中華民國九十六年七月

車輛自動駕駛之模糊控制設計與實現

Design and Implementation of Fuzzy Control for the Autonomous Vehicle

研究生：蔡雨坤

Student: Yu-Kuen Tsai

指導教授：徐保羅 博士

Advisor: Prof. Pau-Lo Hsu



A Thesis

Submitted to Department of Electrical and Control Engineering
College of Electrical and Computer Engineering
National Chiao-Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master
in
Electrical and Control Engineering
July 2007
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年七月

車輛自動駕駛之模糊控制設計與實現

研究生：蔡雨坤

指導教授：徐保羅 博士

國立交通大學電機與控制工程學系

摘要

隨著汽車的普及率愈來愈高，智慧型運輸系統逐漸成為熱門的研究話題，而其中車輛的智慧型自動駕駛更是人類長久以來的夢想。本論文的研究目的即為車輛自動駕駛，讓車輛能夠偵測周圍環境的情況，自行判斷操作行駛到目的地。為了要得知車輛與週遭狀況，需要使用各種不同的感測器偵測；而要讓實驗車能夠自動駕駛，必須用不同的致動器操作車輛。因此本研究實際建立了一套自動駕駛系統架構，使用 CAN 整合雷射掃瞄器、加速度計與電子羅盤等感測器的資訊，傳輸至電腦進行自動駕駛控制的運算，然後將控制命令給予 DSP 操作方向盤、油門與煞車等致動器，達成車輛的自動駕駛。

傳統的比例控制器有準確性與穩定性不足的缺點，本論文提出使用模糊邏輯控制器來改善之。模糊邏輯控制器的設計是依據人類的直覺操作與專家的經驗推論，因此對於參數的變化有很強的適應性，而且能夠提供類似人類思考模式的控制，可以克服自動駕駛控制的困難。由實驗結果可以發現，模糊邏輯控制器可以改善比例控制器的不準確與震盪過大的缺點，而其中設計較詳細的模糊邏輯控制器，其改善自動駕駛的準確性與穩定性較多。本論文提出之自動駕駛系統，已應用於一實驗車(高爾夫球車)上，並於實際校園環境中完成障礙路徑之自動駕駛測試。

Design and Implementation of Fuzzy Control for the Autonomous Vehicle

Student : Yu-Kuen Tsai

Advisor : Dr. Pau-Lo Hsu

Department of Electrical and Control Engineering

National Chiao-Tung University

ABSTRACT

An automatic driving system for intelligent vehicles by detecting the environments through the integration of the laser scanner, accelerometer, and electronic compass has been developed in this thesis. All the steering wheel, the accelerator motor, and the brake of the vehicle have been integrated so that the vehicle can be controlled by a DSP microcontroller through the CAN (controller area network) bus efficiently.

Since the traditional P controller presents unreliable performance in real experiments, this thesis further proposed two fuzzy logic controllers, FLC_1 and FLC_2 with different number of fuzzy rules, to improve automatic driving performance. Experimental results indicate that both FLCs improve the accuracy and stability of the autonomous driving system. In addition, the more fuzzy rules are adopted in the FLC design, the better the performance of the real system can be obtained. This automatic driving system realized on a golf car has been tested successfully on complicated paths in NCTU campus to prove the feasibility of the proposed method.

誌謝

首先要感謝我的指導教授徐保羅老師，老師兩年來對我的指導，讓我在研究上遇到瓶頸時，能夠適時地找到正確的出路，使得本論文能夠順利地完成。同時也要感謝口試委員李祖添老師、洪哲文老師與葉賜旭老師於本論文的建議與指教，讓本論文能夠更加完善。另外也要感謝王伯群老師給予的指點，讓我能夠從不同的角度去思考問題的解決方法。

感謝實驗室的學長姐、同學與學弟們：李俊賢學長、謝鎮洲學長、幸琮政學長、張昭琳學長、黃煒生學長、賴建良學長、李尚玲學姐、鄭景文學長、林宗翰學長、莊孝麟學長、許瑞原學長、劉興漢學長、鄧元銘學長、宗勝、文諒、林億、建龍、也強、醇偉，在我的學業與研究中，互相勉勵，讓我能夠在遇到困境時，給予我意見，並且在做實驗時，給予我幫助，讓我能夠順利完成本論文。另外也在我的研究所生活中，帶給我歡樂，讓我能夠保持愉悅的心情來面對挑戰。

最後要感謝我的父母與兄弟們，長久以來在我生活上的支持，讓我能夠無後顧之憂、專心地讀書以及做研究，使我能夠順利地完成碩士學位。

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	iv
表目錄	vii
圖目錄	viii
第一章 緒論	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 研究背景與發展概況	2
1.3 問題定義	3
1.4 研究方法	3
1.5 論文架構	4
第二章 車輛運動特性與自動駕駛系統架構	5
2.1 車輛運動特性	5
2.2 自動駕駛系統軟硬體架構	6
2.2.1 eZdsp™ F2812 DSK	8
2.2.2 CAN Bus	10
2.3 感測器	12
2.3.1 雷射掃瞄器	12
2.3.2 加速度計	15
2.3.3 電子羅盤	19
2.4 致動器	22

2.4.1	方向盤	22
2.4.2	車輛動力馬達	26
2.4.3	煞車	28
2.5	控制系統	28
第三章	自動駕駛模糊控制系統	30
3.1	模糊邏輯控制器之簡介	30
3.1.1	模糊邏輯控制器之特點	30
3.1.2	模糊邏輯控制器之結構	31
3.2	模糊邏輯控制器之設計	32
3.2.1	模糊化	33
3.2.2	模糊規則庫	35
3.2.3	推論引擎	36
3.2.4	解模糊化	38
3.3	模糊邏輯控制器之改善結果	39
第四章	車輛自動駕駛之實現與實驗結果	42
4.1	實驗架設	42
4.2	實驗結果	43
4.2.1	通過一組障礙物：從左右 100 cm 處出發	43
4.2.2	連續通過三組障礙物：S 形路徑	46
4.2.3	繞廣場一圈：長方形路徑	48
4.3	結果分析	50
4.3.1	準確性	51
4.3.2	穩定性	52
4.3.3	駕駛路徑	54



4.3.4 小結	55
第五章 結論與未來發展	56
5.1 結論	56
5.2 未來發展	57
參考文獻	59



表目錄

表 2-1	信號處理前與信號處理後的特性比較	19
表 3-1	模糊規則表(FLC_1)	35
表 3-2	模糊規則表(FLC_2)	36
表 3-3	各種控制器於直線行走的平均誤差量比較	41
表 4-1	各種控制器於不同實驗下的 IAE 比較	51
表 4-2	兩種模糊邏輯控制器的 IAE 改善率比較	52
表 4-3	各種控制器於不同實驗下的標準差比較	53
表 4-4	兩種模糊邏輯控制器的標準差改善率比較	53



圖目錄

圖 2-1	車輛運動模型參數示意圖	5
圖 2-2	實驗車實體圖	7
圖 2-3	系統架構圖	8
圖 2-4	TMS320F2812 功能方塊圖	9
圖 2-5	典型的 CAN Bus 架構	10
圖 2-6	eZdsp™ F2812 DSK 的 eCAN 方塊圖與介面電路	11
圖 2-7	USBCANII 外觀	11
圖 2-8	雷射掃瞄器 LMS 221	13
圖 2-9	SICK 雷射掃瞄器偵測結果	14
圖 2-10	基本的彈簧質量系統	15
圖 2-11	Hitachi H48C 三軸加速度計模組外觀	16
圖 2-12	加速度計 H48C 靜態分析結果	17
圖 2-13	加速度計 H48C 頻譜圖	18
圖 2-14	加速度計 H48C 靜態分析經低通濾波的結果	19
圖 2-15	TDCM3 電子羅盤模組外觀	20
圖 2-16	電子羅盤 TDCM3 靜態分析結果	21
圖 2-17	電子羅盤 TDCM3 動態分析結果	21
圖 2-18	方向盤改裝圖	22
圖 2-19	AC 伺服馬達 MSMA041A1E 與其驅動器	23
圖 2-20	馬達控制周邊電路設計簡圖	23
圖 2-21	DAC 7625 內部功能方塊圖	24
圖 2-22	方向盤馬達控制迴路	25
圖 2-23	方向盤馬達控制結果	25
圖 2-24	馬達控制器 Model 1204/5 安裝圖	26

圖 2-25 車輛動力馬達控制迴路	27
圖 2-26 車輛動力馬達控制結果	27
圖 2-27 煞車改裝圖	28
圖 2-28 實驗車自動駕駛控制系統	29
圖 2-29 PC 程式介面	29
圖 3-1 模糊邏輯控制器的基本結構	31
圖 3-2 輸入參數示意圖	33
圖 3-3 FLC_1 的歸屬函數設計	34
圖 3-4 FLC_2 的歸屬函數設計	35
圖 3-5 Max-min operation 的計算流程	37
圖 3-6 解模糊化(COA)	38
圖 3-7 直線控制的結果	40
圖 4-1 實驗架設	42
圖 4-2 從右邊 100 cm 出發的結果	44
圖 4-3 從左邊 100 cm 出發的結果	46
圖 4-4 連續通過三組障礙物的結果	48
圖 4-5 繞長方形廣場一圈的結果	50
圖 4-6 各種控制器的駕駛路徑比較	54



第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

智慧型運輸系統(intelligent transportation system, ITS)是利用電腦、資訊、電子、通訊與感測等科技的應用，透過即時感測資訊的溝通與整合，改善人、車、路等運輸系統間的互動關係，進而增進運輸系統之安全、效率與舒適，同時減少交通環境衝擊之有效整合型運輸系統。ITS 於 1930 年代後陸續被提出來[1-3]，但是礙於當時技術面不成熟而未受到人們重視，直到 1986 年，歐洲 19 個國家聯合成立 Prometheus 計畫(program for European traffic with highest efficiency an unprecedented safety project)才改變整體趨勢，尤其自 90 年代後，汽車成為陸地上最重要的交通工具，也由於汽車的普及率愈來愈高，使得交通日漸壅塞，交通意外事件愈加頻繁，汽車的安全性受到了嚴苛的考驗。因此，各先進國家都投注了相當大的心力，積極發展先進車輛控制及安全系統(advanced vehicle control and safety system, AVCSS)，結合感測器、電腦、通訊、電機及控制技術，應用於車輛及道路設施上，提高行車安全、增進駕駛便利性、減低能源消耗、增加道路容量、減少交通擁擠。

智慧型運輸系統的實現有兩種方式，一種是屬於基礎建設的方法，另一種是自主式系統。基礎建設的作法是在道路與車輛上皆安裝電子元件，透過兩邊的相互輔助，進而輔助控制車輛行駛，此種做法最著名的就是 PATH 計畫[4]，於高速公路上加裝磁性元件，車輛上裝設磁力感測器，藉此讓高速公路的車隊能夠保持相當短的行車間距，大量增加了高速公路的車流容量[5]。而自主式系統(autonomous systems)則是指車輛控制所需的輸入資訊，不需要依靠外界的設備，而是使用車輛上的感測器來取得的系統，感測器獲得的資訊可以有：車輛週遭障礙物距離、車輛前方影像、車輛目前的速度或方向等。自主式系統的優點在於較容易架設實現，只需要對現有的車輛進行改裝或是加裝感測器與致動器即可。由於基礎建設的方式較耗費工程，而且使用的環境條件會受到限制，因此本論文採用自主式系統。

本研究的目的是為車輛的智慧型自動駕駛，讓實驗車(高爾夫球車)能夠藉由擷取到的雷達掃瞄器、加速度計與電子羅盤的資訊，判斷出車輛與目的地的位置與狀態，經過使用模糊控制器的自動駕駛控制系統，將此駕駛命令傳送給實驗車，讓實驗車自行操作方向盤、油門與煞車，行駛到目的地。藉此成果來讓實驗車在校園中自動行駛。

1.2 研究背景與發展概況

自主式系統一直以來都是 ITS 研究的重點項目，自主式車輛最大的問題就在於如何讓實驗車在沒有人類的幫忙下，自行決定要採取的動作，以完成目標。因此，運動規劃(motion planning)是自主式車輛最重要的研究討論，而最基本的運動規劃問題，就是如何在起點與終點之間，規劃一條不會碰到障礙物的路徑。對於一般車輛而言，必須要多考慮非全向性(nonholonomic)限制，一般車輛的行進方向必須與其路徑相切，而且其旋轉半徑有上限，因此車輛的運動路徑受到了很大的限制。

因此，多數研究都著重在如何解決非全向性限制的問題。許多研究提出路徑規畫(path planning)，讓車輛能夠以最佳化的路徑行進到目的地。例如 Scheuer [6]與 Fraichard [7]提出的連續曲率路徑規畫，可以讓路徑的曲率具有連續性，而非以多條直線連接而成；而 Martínez-Marín [8]與 Weng [9]則是在有障礙物的環境中，規劃出最佳的車輛行進路徑。

而另外一些研究則使用模糊邏輯控制器，藉由模糊規則與學習機制，模擬專業駕駛員操作車輛。Surmann [10]、Li [11]與 Lu [12]將模糊邏輯控制運用在小型的類車輛機器人上，藉由小型的機器人來模擬大型車輛行駛的情況；而運用在大型車輛上，Leu [13]、Baturone [14]與 Chiu [15]則是將重點放在探討停車(parking)問題。

到目前為止，自主式系統的自動駕駛仍然在發展階段，許多研究探討問題時仍需在一定的限制條件之下，要讓車輛能夠實際自動駕駛於各種不同的道路上，還有一大段路需要完成。

1.3 問題定義

要完成自主式智慧型車輛自動駕駛，所需要解決的問題如下：

1. 整合感測器與控制器的系統架構於實驗車輛：

為了要讓自動駕駛系統能夠得知車輛與週遭狀況，需要使用各種不同的感測器，並能夠取得與解析感測器的資訊；而要讓自動駕駛系統能夠操作實驗車，也必須用不同的致動器操作車輛，並讓致動器執行需求的操作命令。要如何透過感測器的資訊，對致動器進行適當的控制，就需要建立一套系統架構，使其能夠整合不同感測器的資訊，並控制各個致動器的操作。

2. 控制器的準確性與穩定性不佳：

使用傳統的比例控制器的自動駕駛系統，雖然能夠達成目標，但是會有無法準確抵達目的地與行駛路徑震盪過大的兩大缺點。如何改進這些缺點，讓實驗車的自動駕駛路徑更加準確且平穩，如同人在駕駛一般，提高自動駕駛的安全性與舒適感，是本論文最主要的重點。



3. 於障礙環境中的實際操作：

自動駕駛控制系統目前仍未廣泛地應用於實際生活環境中，多數只是使用在一小部分的特定情況，如停車等，因此要如何讓實驗車在各種有障礙的環境情況中自動駕駛，是本研究主要探討的問題之一。

1.4 研究方法

以下為本論文提出的研究方法：

1. 建立實驗車系統架構：

感測器方面，使用雷射掃瞄器偵測週遭狀況、加速度計與電子羅盤取得實驗車狀況；致動器方面，改裝實驗車，使其能夠利用馬達或電路操作方向盤、油門與煞車。接

著分析各種不同的感測器與致動器的原理與特性，讓電腦能夠取得並解析感測器的資訊，以及下達控制命令給致動器操作。本論文利用 CAN (controller area network) 整合感測器的資訊並傳輸到電腦進行控制，然後將控制命令傳輸至 DSP (digital signal processor) 進行致動器的控制。

2. 使用模糊邏輯控制器改善比例控制器的缺點：

對於車輛駕駛這種不甚精確的資訊與控制，模糊邏輯控制器具有多項優點可以克服自動駕駛控制的困難：(1) 有較大的容忍性，(2) 對於參數的變化有很強的適應性，而且(3) 能夠提供類似人類思考模式的控制等。因此本論文選擇使用模糊邏輯控制器，作為自動駕駛控制系統的核心，來改善比例控制器的缺點。

3. 障礙測試於實際校園環境中：

為了驗證本研究成果於實際障礙環境中的實行性，故設計一些不同實驗，讓實驗車於校園環境中進行自動駕駛，設計的實驗有：駕駛行為較複雜的 S 形路徑以及在一廣場行駛長方形路徑。透過完成這些實驗，來證明本論文所提之自動駕駛控制系統可以實現於實際生活中的障礙環境。



1.5 論文架構

本論文分為五章，第一章介紹本研究的動機、目的與背景，並界定所要解決的問題與研究的方法。第二章分析實驗車的運動特性，推導出其運動方程式，並介紹實驗車的系統架構，包含使用的控制晶片、網路、感測器與致動器的規格、特性，以及實驗車的改裝方式，另外也說明整體控制系統的迴路。第三章介紹本論文使用的自動駕駛控制系統，將介紹模糊邏輯控制器與本研究的設計方式。第四章為實驗的架設與結果，並透過結果進行分析。第五章則對本論文做一個結論，並提出未來的改進與發展方向。

第二章 車輛運動特性與自動駕駛系統架構

本章將分析車輛的運動特性，並推導出其運動方程式，以便於設計車輛控制器，達到車輛自動駕駛的目的。另外本章也將介紹本論文使用的實驗車的系統架構，其硬體的架設與軟體的使用。

2.1 車輛運動特性

車輛運動模型如圖 2-1 所示，其後輪固定與車輛平行，前輪可以左右轉動，但是兩前輪必須平行且轉動幅度限制在 $\pm 30^\circ$ 。

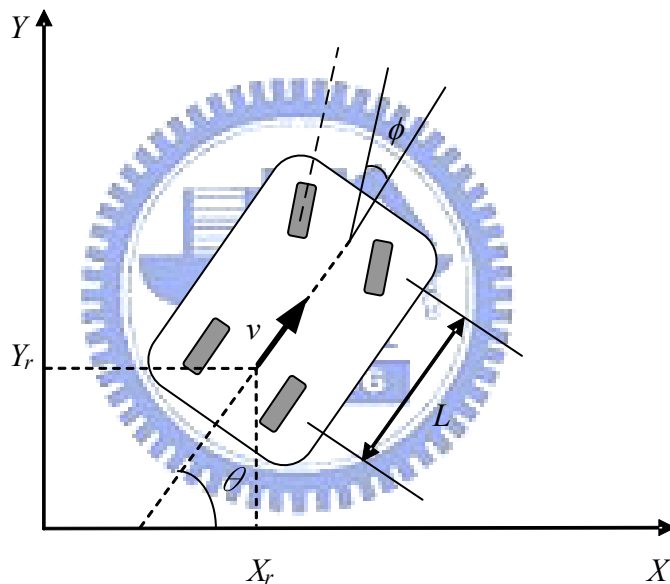


圖 2-1 車輛運動模型參數示意圖

車輛運動模型參數定義如下：

X_r 、 Y_r ：兩後輪中心的 X 軸與 Y 軸位置。

L ：前輪中心與後輪中心的距離。

θ ：車身方向與 X 軸之間的夾角。

ϕ ：前輪轉向與車身方向之間的夾角。

v ：車輛速度。

車輛模型必須受到非全向性(nonholonomic)限制：

$$\dot{Y}_r \cos \theta - \dot{X}_r \sin \theta = 0 \quad (2-1)$$

駕駛車輛時，駕駛員可以控制的自由度有二：方向盤與油門，意即車輛前輪轉角與車輛速度。車輛前進時，後輪的運動方程式(kinematics' equation)如下[11][16]：

$$\begin{aligned} \dot{X}_r &= v \cos \phi \cos \theta \\ \dot{Y}_r &= v \cos \phi \sin \theta \\ \dot{\theta} &= \frac{v \sin \phi}{L} \end{aligned} \quad (2-2)$$

此方程式可以整合成：

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_r \\ \dot{Y}_r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} v \cos \phi + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} v \sin \phi \quad (2-3)$$

則此系統可以視為一非線性系統，其輸入為速度 v 與車輛轉角 ϕ ，輸出為車輛後輪中心位置 X_r 、 Y_r 與車輛前進角度 θ 。

2.2 自動駕駛系統軟硬體架構

圖 2-2 為實驗車實體圖，於實驗車上裝設雷射掃瞄器(laser measurement system)、加速度計(accelerometer)與電子羅盤(compass)作為感測器，並改裝方向盤、油門馬達與煞車做為致動器，透過 CAN (controller area network)網路整合，讓實驗車能夠藉此自動駕駛。

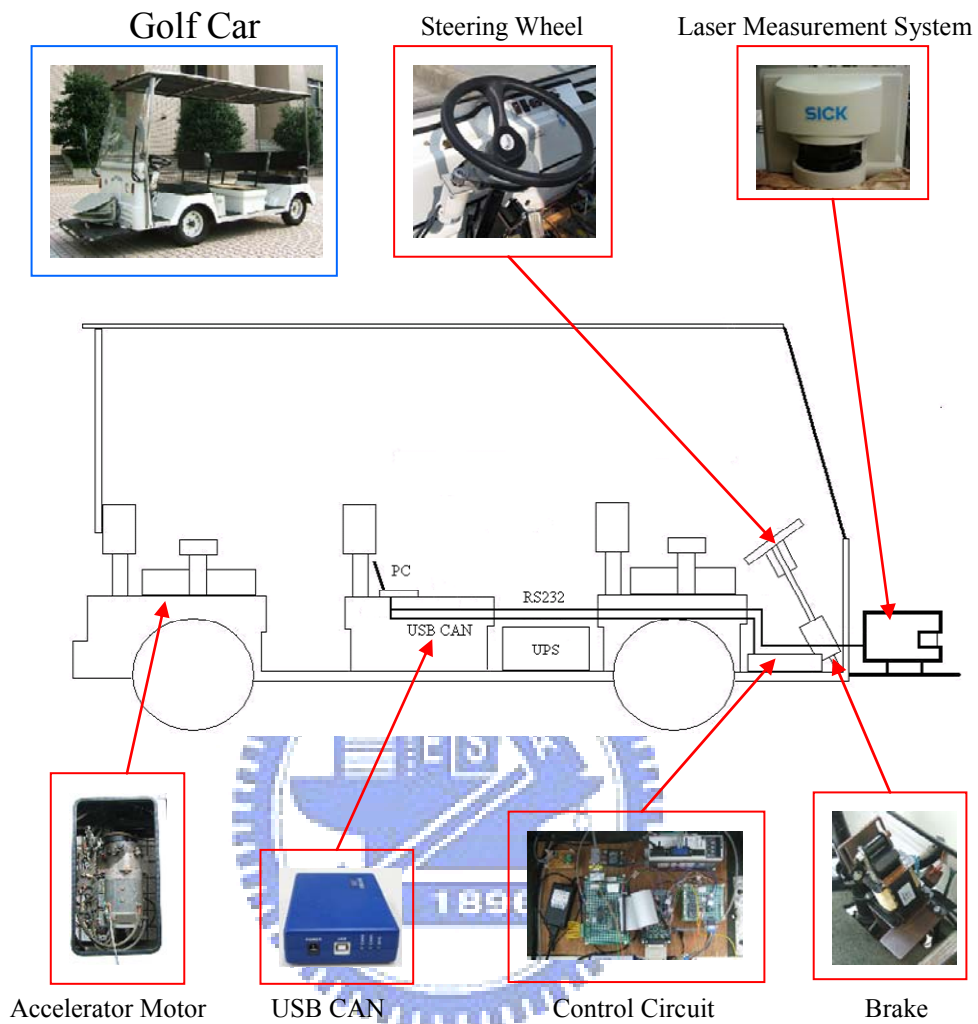


圖 2-2 實驗車實體圖

本論文提出之自動駕駛控制系統的流程如下，首先將加速度計與電子羅盤得到的數據利用 DSP (digital signal processor)擷取，透過 CAN 傳輸到一電腦，另外此電腦由 RS232 傳輸介面取得雷射掃瞄器的資訊，利用這三個感測器得到的資訊作為控制器的輸入，然後將其輸出透過 CAN 傳輸至 DSP，用 DSP 控制方向盤、油門馬達與煞車，達到車輛自動駕駛，系統整體架構圖如圖 2-3 所示，詳細軟硬體內容於後面章節介紹。

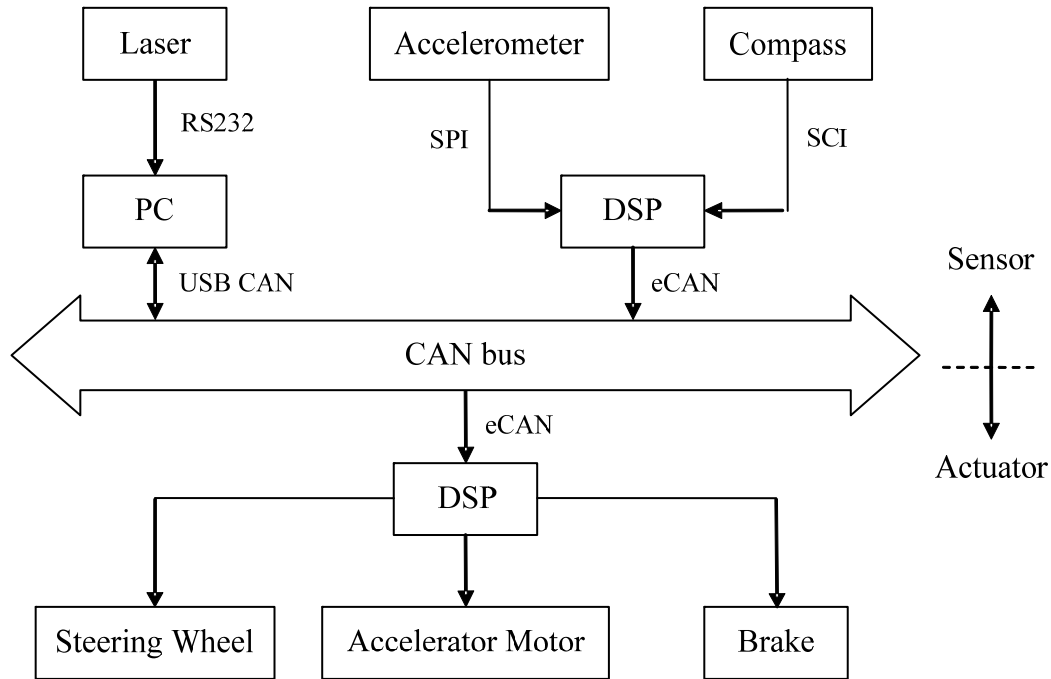


圖 2-3 系統架構圖

2.2.1 eZdsp™ F2812 DSK

近年來由於超大型積體電路(VLSI)的技術迅速發展,使得 DSP 數位訊號微控器的運算速度及周邊處理功能有大幅的提升,取代了傳統的微處理器(microprocessor),在許多應用領域如行動通訊、資訊家電與馬達驅動等都被廣泛的使用。因此本研究採用由德州儀器(Texas Instrument, TI)公司研發的 TMS320F2812 這顆 DSP 作為控制核心。

利用 DSP 強大的數學運算能力,可以最少的硬體周邊電路實現馬達控制所需要的功能。而在德州儀器公司所生產的 DSP 中,'C2000 系列的硬體發展卡是專為馬達控制而設計的,其中本論文所使用的是此系列中目前最高等級的 F2812 晶片控制器,其擁有 150 MHz (6.67 ns cycle time)的高速運算處理能力,比 TI 早期出產的 DSP 'C240 快 7 倍,比傳統 8051 單晶片快約 150 倍。為了提升運算效能,核心部份的算數邏輯單元(ALU)、累積器(ACC)均採用 32 位元定點運算,並以硬體方式實現乘法器、位移器等,如此僅需一個指令週期(instruction cycle)即可完成乘加運算。在整數計算方面,為減少數值計算所衍生的問題如溢位(overflow)等,採用硬體式的位移器來提高軟體執行的精確度。

F2812 主要擁有的記憶體有 $28K \times 16$ Flash EEPROM、兩組 $4K \times 16$ Single-Access RAM (SARAM)與一組 $8K \times 16$ SARAM，並採用哈佛匯流排(Harvard bus)架構。舊型的 DSP 大部分是採用分離式的程式記憶體、資料記憶體與 I/O 記憶體，而新型的 DSP 如 F2812 則是使用包含上述三種記憶體的單獨記憶體空間，使用起來更為有彈性，也可以減少不同記憶體之間搬動資料的指令集。

Spectrum Digital 公司利用 F2812 晶片結合自行開發的周邊模組，發展出 eZdsp™ F2812 初學板(DSP Started Kit, DSK)，其週邊包含 16 個通道的 12 位元類比數位轉換器 (ADC)，串列傳輸支援四種常用的型式：SPI (serial peripheral interface)、SCI (serial communications interface)、eCAN (enhanced controller area network) 與 McBSP (multi-channel buffered serial port)，另外最高可支援 56 個 GPIO (general-purpose I/O)。圖 2-4 為 TMS320F2812 功能方塊圖。

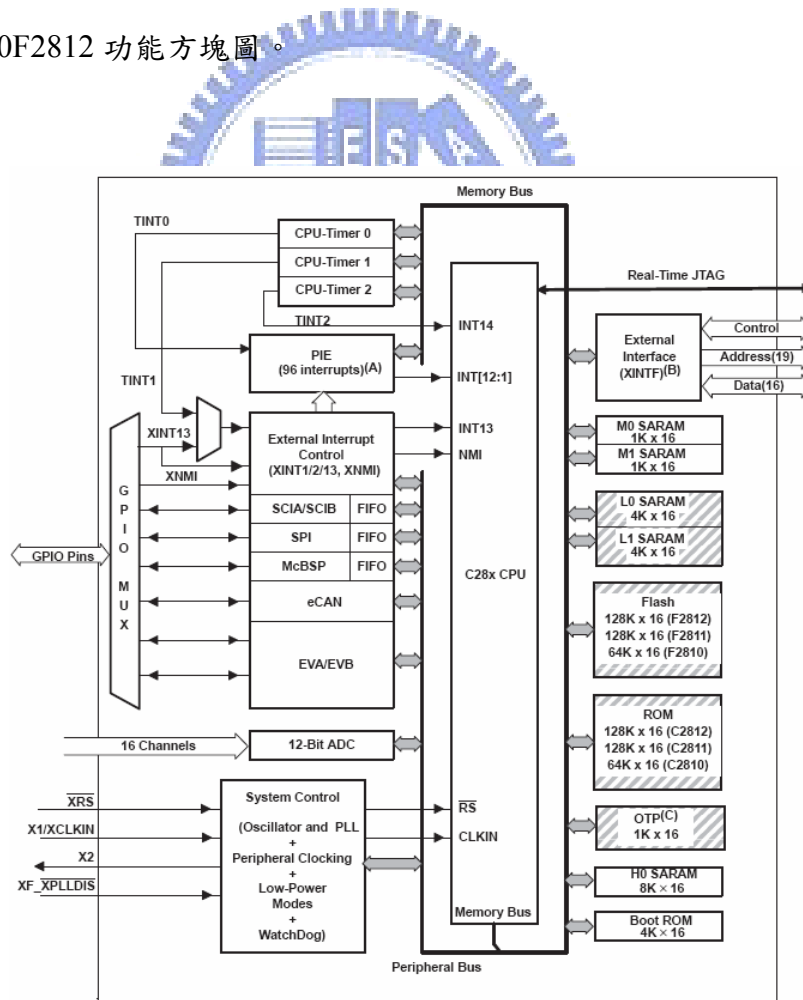


圖 2-4 TMS320F2812 功能方塊圖

2.2.2 CAN Bus

CAN 是在 1990 年由德國 Robert Bosch 公司所制定的一種具有高度安全性且支援即時分散式控制的通訊協定，其傳輸速度最高可達 1 M bit per second (bps)。CAN 起初是應用在汽車上，用來連接防鎖死煞車系統(ABS)或是引擎控制單元等各個電子裝置，取代傳統複雜的硬體接線，CAN 優點在於，可以自由地新增或移除網路上的各個電子裝置，而不需要改變舊有的接線。由於 CAN 提供可靠快速的連線，可用於即時系統 (real-time system)，且價格低廉，所以也可應用於各種控制系統。目前 CAN 已成為國際標準規格(ISO11898)。

CAN 的接線方式是用 CANH、CANL 兩條訊號線佈線，每一個節點都可以透過此兩條接線來存取 CAN 上的資訊，在此兩條接線的兩端必須以 $120\ \Omega$ 的終端電阻做連結，如圖 2-5 所示。

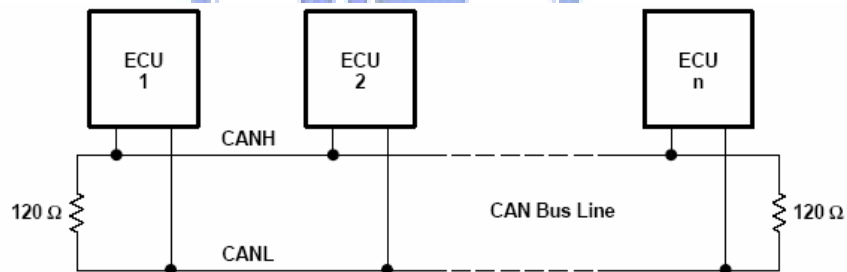


圖 2-5 典型的 CAN Bus 架構

本研究使用的 eZdspTM F2812 DSK 週邊設計中包含 CAN bus，作為傳輸資訊的網路接線，因 eZdspTM F2812 DSK 已將 CAN 的控制器都嵌入在晶片中，只需要接上 CAN 的收發機即可，本論文使用的收發機為 TI 公司出產的 3.3V CAN transceiver SN65HVD230。圖 2-6 為 eZdspTM F2812 DSK 的 eCAN 方塊圖與收發機介面電路。

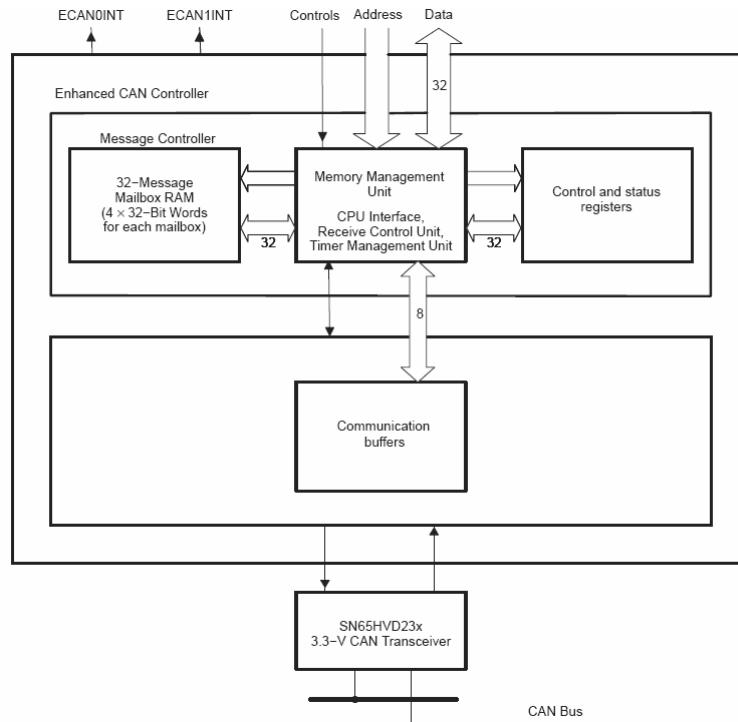


圖 2-6 eZdsp™ F2812 DSK 的 eCAN 方塊圖與介面電路

USB CAN [17]可以讓電腦透過 USB 介面連接到 CAN 上，使電腦成為 CAN 上面的一個節點，讓電腦能夠擷取 CAN 上的訊息，或是傳輸訊息到 CAN 上各節點。本論文採用的 USB CAN 為周立功單片機發展有限公司開發出來的 USBCANII 智能 CAN 接口卡，USBCANII 有兩個 CAN 通道，可以同時連到兩個不同的 CAN，並且附有 ZLGVCII 接口函式庫，方便使用者搭配不同的開發程式進行開發。圖 2-7 為 USBCANII 外觀。



(a)



(b)

圖 2-7 USBCANII 外觀 (a) 正面 (b) 背面

USBCANII 智能 CAN 接口卡的硬體規格：

- PC 接口：USB1.1。
- CAN 控制器：PHILIPS SJA1000。
- CAN 收發器：PHILIPS PCA82C250。
- CAN 網路傳輸速率：5 Kbps ~ 1 Mbps。
- CAN 通訊接口：DB9，符合 DeviceNET 和 CANOpen 標準。
- 支援 CAN 網路協定：CAN 2.0B 兼容 CAN 2.0A，符合 ISO/IS 11898。
- 最高 Frame 流量：每個通道 5000 Frame/sec。
- 供電方式：USB 供電或外接+9 V ~ +25 V、400 mA 的電源。

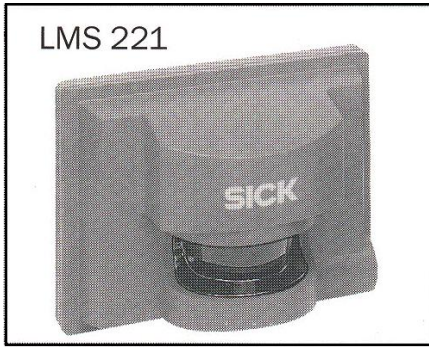


2.3 感測器

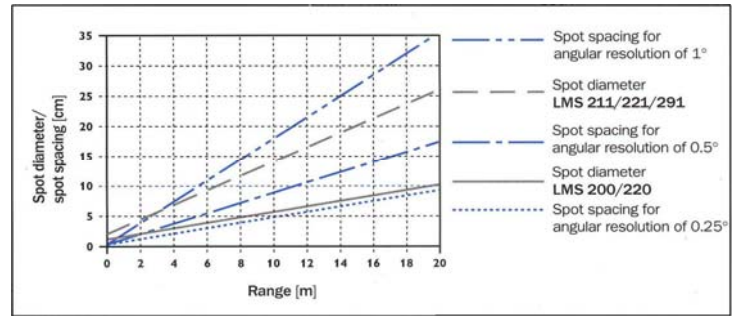
本實驗車使用的感測器有三：雷射掃瞄器、加速度計與電子羅盤。雷射掃瞄器用來掃描前方障礙物，讓實驗車能夠避開障礙物並偵測出目的地；加速度計與電子羅盤可以偵測實驗車目前的速度與方向，作為控制器的輸入參數。下面三小節將詳細介紹此三種感測器的規格與特性。

2.3.1 雷射掃瞄器

本論文採用施克(SICK)公司製作的雷射掃瞄器 LMS (laser measurement system) 221，為一光學式雷射掃瞄器，使用紅外線雷射光，經過美國國家標準協會(American national standards institute, ANSI)認證安全等級為 Class 1，意即該雷射掃瞄器所發射的雷射光束對人眼及身體不會造成危險。雷射掃瞄器外觀如圖 2-8 (a)所示。



(a)



(b)

圖 2-8 雷射掃瞄器 LMS 221 (a) 外觀 (b) 雷射光點直徑與相對距離

LMS 221 發射一脈衝為 3 ns 的紅外線雷射光，以接近光速(3×10^8 m/s)的速度在空間中移動，因此不會造成都普勒效應(Doppler effect)，移動中的光的頻率、波長也許會發生變化，但是速度是不變的，利用飛行時間法(time-of-flight, TOF)可以測得與障礙物之間的距離。發射的光點直徑與相對距離如圖 2-8 (b)所示，可以看出相對距離越遠光點直徑越大，如此在反射接收上較不容易造成漏接。

LMS 221 的硬體規格如下：

- 掃描間隔：0.25° / 0.5° / 1° (可自行選擇)。
- 反應時間：53 ms / 26 ms / 13 ms。
- 解析度：10 mm。
- 傳輸介面：RS232 / RS422。
- 掃描角度：180°。
- 檢測範圍：最大 80 m / 10 m (10 %反光率)。
- 準確度：±30 mm。

由雷射掃瞄器可以得到兩種資訊：角度與距離，意即在某個角度的某個距離有障礙物。利用這些資訊可以繪出實驗車前方環境中的障礙物情況，如圖 2-9 所示，由圖中可以看出，左右兩側各有一面牆，而實驗車前方有兩個障礙物。

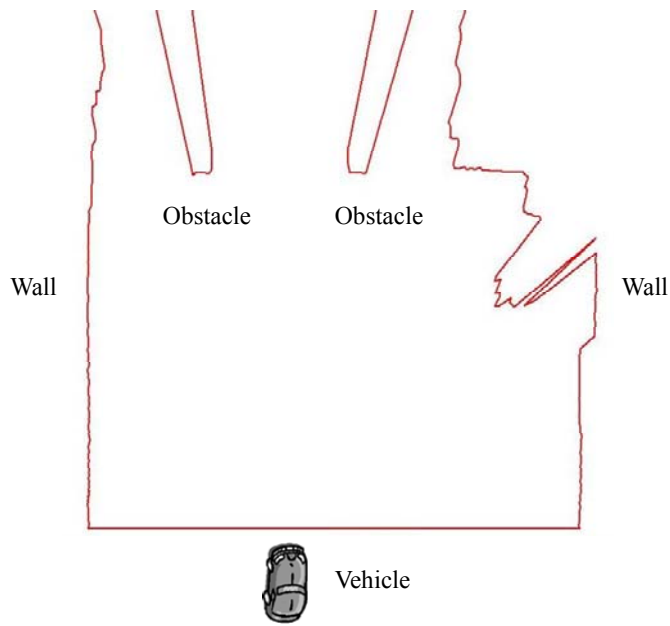


圖 2-9 SICK 雷射掃瞄器偵測結果

雷射掃瞄器偵測法則：

本研究的實驗目的在於讓實驗車通過兩個目標障礙物的中心，而實驗環境中的目標障礙物是放置於一空曠處，因此可以用下述步驟來偵測目的地：

1. 將原始的距離-角度($r-\theta$)資訊轉換為 $x-y$ 座標。
2. 比較相鄰兩筆資訊的位置座標，如果兩者位置距離差距較大，則將距離實驗車較近者定義為障礙物。
3. 藉由實驗限制條件選定兩目標障礙物，本實驗的限制條件為兩目標障礙物相距 200 cm。若沒有找到目標障礙物，則回到步驟 2。
4. 在目標障礙物舊位置的一定範圍(Region of Interest, ROI)內進行追蹤障礙物的動作，將距離舊位置最接近的障礙物視為目標障礙物新的位置。若在該範圍內沒有找到障礙物，則回到步驟 2。
5. 將兩個目標障礙物位置的中點設定為目的地。

2.3.2 加速度計

加速度計的原理是結合牛頓的質量加速定律和虎克的彈簧動作定律[18]。牛頓定律：如果有一個力量 F 作用於一個質量 m 上，則該質量會有加速度 a ，意即 $F = ma$ 。虎克定律：如果有一個力量 F 作用於一個彈性係數為 k 的彈簧上，則該彈簧會伸長距離 Δx ，表示為 $F = k\Delta x$ 。

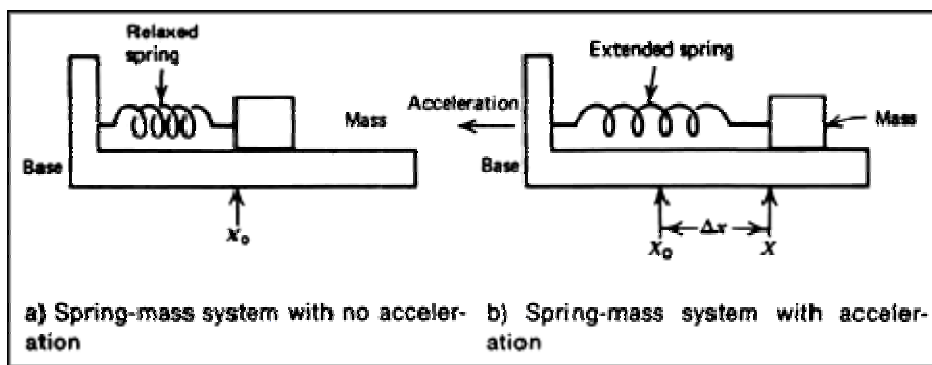


圖 2-10 基本的彈簧質量系統 (a) 無加速度 (b) 有加速度

在圖 2-10 (a) 中有一個彈簧質量系統，彈簧位於未延伸狀態。在圖 2-10 (b) 中，系統向左進行加速，而彈簧延伸以提供將質量加速所需的力。這種情形可以用牛頓定律和虎克定律來加以描述：

$$ma = k\Delta x \quad (2-4)$$

其中 k 為彈性係數 (spring constant)， Δx 為彈簧延伸距離， m 為質量， a 為該質量的加速度。(2-4) 可以整合為：

$$a = \frac{k}{m} \Delta x \quad (2-5)$$

意即將加速度的測量轉變為彈簧延伸距離的度量，這種方法稱為試驗質量 (test mass) 或振盪質量 (seismic mass)。

本論文所使用的加速度計為 Parallax 公司研發的 Hitachi H48C 三軸加速度計模組。加速度計 H48C 是一個可以量測三軸加速度的整合模組，其中包含一穩壓裝置用以提供電源，以及 A/D 轉換器 MCP3204 用來將加速度計 H48C 的類比輸出轉換為數位訊號輸出。加速度計 H48C 可以透過同步串列訊號傳輸與接收資訊，可用 eZdsp™ F2812 DSK 的 SPI 傳輸介面來接收加速度計 H48C 的資訊。加速度計 H48C 是利用微機電(Micro Electro Mechanical System, MEMS)技術製作，因此不需校正(calibration)。圖 2-10 為模組外觀。

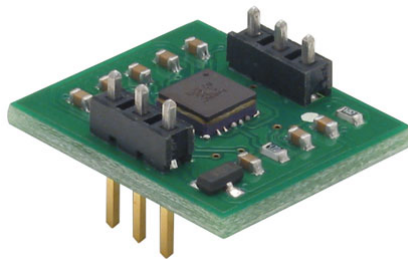


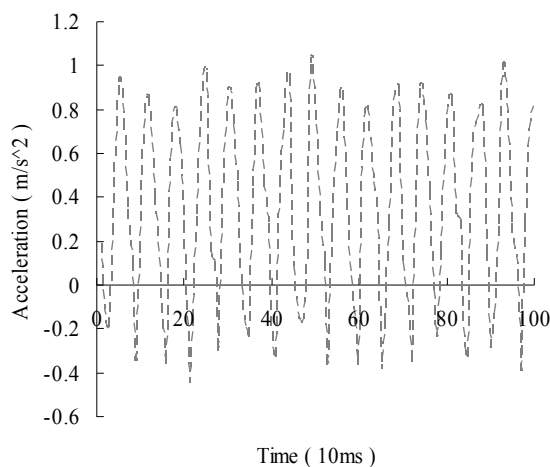
圖 2-11 Hitachi H48C 三軸加速度計模組外觀

Hitachi H48C 三軸加速度計模組的硬體規格：

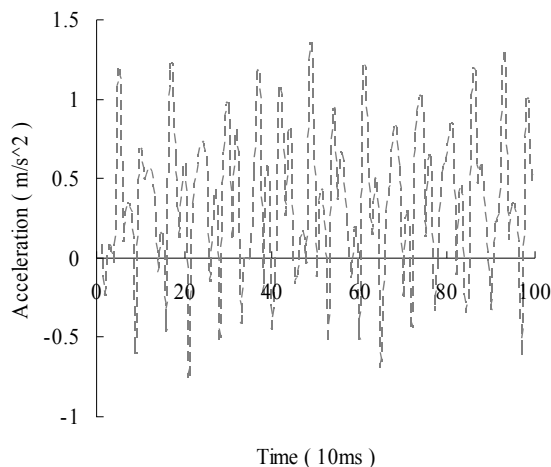
- 可偵測自由落體(free-fall)。
- 操作溫度：-25°C ~ 75°C。
- 量測範圍：±3 g。
- 準確度：10 %。
- 非線性度：±2 %。

由於加速度計等的感測器會受到週遭環境如溫度等的影響，因而產生誤差，因此在使用加速度計之前必須先進行分析，觀察其得到的資訊是否會有誤差，如果有誤差則需進行校正的動作。

當實驗車靜止時，其加速度值必為零，因此可以將加速度計靜置一段時間，觀察其輸出的數據，進行誤差分析。圖 2-12 為靜態分析的結果，取樣時間為 10 ms。



(a)



(b)

圖 2-12 加速度計 H48C 靜態分析結果 (a) X 軸 (b) Y 軸

為了分析靜態結果的特性，在此使用兩種參數作為依據，分別是平均數與標準差 (standard deviation, σ)，其公式如下所示：

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \quad (2-6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (x_k - \bar{X})^2}{N}} \quad (2-7)$$

其中 x_k 為取樣次數 k 時的數值， \bar{X} 為總取樣數的平均值， N 為實驗的總取樣次數， σ 為標準差。

圖 2-12 的結果經過(2-6)與(2-7)的公式計算後，可以得知加速度計 H48C 的特性：X 軸的 \bar{X} 為 0.289 m/s^2 ， σ 為 0.422 m/s^2 ；Y 軸的 \bar{X} 為 0.284 m/s^2 ， σ 為 0.435 m/s^2 。靜態分析的結果不甚理想，不但有一偏差量值，且雜訊也很大，要用這個數據來積分求速度與位置很容易會有積分誤差，因此需要對加速度計 H48C 的信號做處理。

加速度計信號處理方法：

1. 減去靜態的平均偏差量值。X 軸為 0.290 m/s^2 ，Y 軸為 0.285 m/s^2 。
2. 使用低通濾波器(Low-Pass Filter, LPF)濾除高頻雜訊。由圖 2-13 的加速度計 H48C 頻譜圖可以決定截止頻率，X 軸為 3 Hz，Y 軸為 2 Hz。

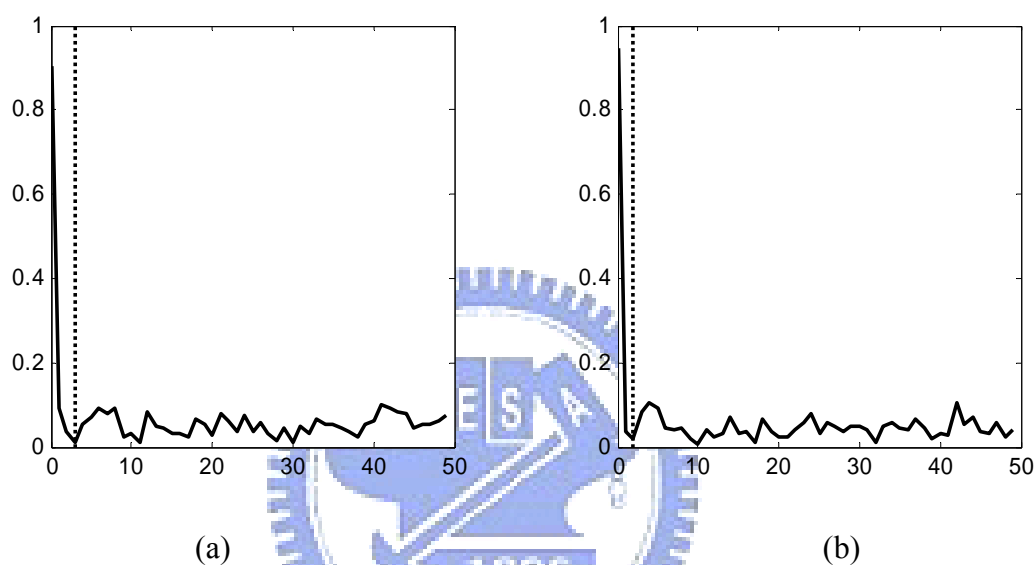


圖 2-13 加速度計 H48C 頻譜圖 (a) X 軸 (b) Y 軸

圖 2-14 為信號處理前與信號處理後的比較圖，經過信號處理後，X 軸的 \bar{X} 為 0.000 m/s^2 ， σ 為 0.015 m/s^2 ；Y 軸的 \bar{X} 為 -0.001 m/s^2 ， σ 為 0.009 m/s^2 ，大幅改善偏差量值與雜訊的問題，讓加速度計 H48C 可以應用於取得實驗車的速度與位置。

表 2-1 為信號處理前與信號處理後的特性比較與改善率。改善率的公式如下：

$$\text{改善率} = \frac{\text{改善前數值} - \text{改善後數值}}{\text{改善前數值}} \times 100\% \quad (2-8)$$

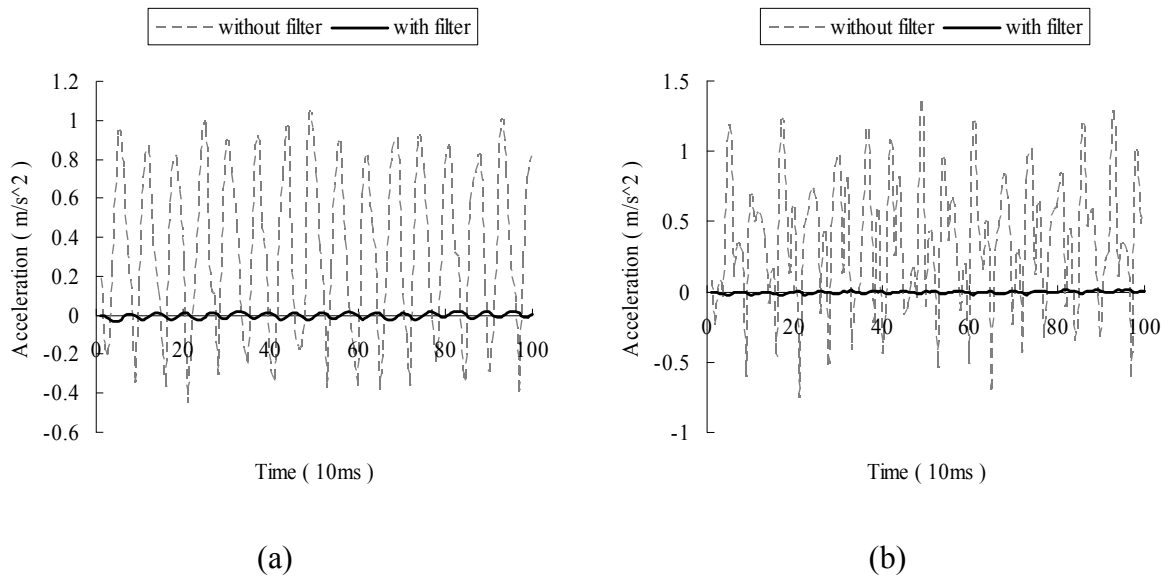


圖 2-14 加速度計 H48C 靜態分析經低通濾波的結果 (a) X 軸 (b) Y 軸

表 2-1 信號處理前與信號處理後的特性比較

		信號處理前	信號處理後	改善率
X 軸	\bar{X} (m/s^2)	0.289	0.000	100.00 %
	σ (m/s^2)	0.422	0.015	96.45 %
Y 軸	\bar{X} (m/s^2)	0.285	-0.001	99.65 %
	σ (m/s^2)	0.435	0.009	97.93 %

2.3.3 電子羅盤

電子羅盤是利用量測地球感應磁場的大小與方向，推算出角度的變化，其原理主要是利用一對互相垂直的線圈，其電磁效應所產生的磁通密度(Tesla, T)，來測量磁場的大小與方向，進而計算出角度值。電子羅盤很容易受到週遭環境的電磁波影響，如實驗車的鋼鐵車體造成的感應磁場，控制電路的電流產生的磁場等，故需要進行校正以降低週遭磁場干擾。

本研究使用的電子羅盤是太群(TOPTEAM)公司生產的 TDCM3 電子羅盤模組。電子羅盤 TDCM3 的傳輸介面為通用型同步與非同步收發器 (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter, USART), 可以利用 eZdsp™ F2812 DSK 的 SCI 傳輸介面與之溝通。內建磁場扭曲偵測, 可以在周圍的金屬或電流造成磁場扭曲時送出錯誤訊息, 讓使用者透過內建的校正程式進行磁場校正。圖 2-15 為其外觀。



圖 2-15 TDCM3 電子羅盤模組外觀

TDCM3 電子羅盤模組的硬體規格：

- 操作溫度：0°C ~ 70°C。
- 準確度：±3°。
- 解析度：0.5°。
- 重複性：±3°。

與加速度計相同, 在使用電子羅盤之前也必須進行靜態分析, 觀察其是否需要進行誤差校正。圖 2-16 為電子羅盤靜置一段時間, 所擷取到的數據。由圖中可以得知, 電子羅盤 TDCM3 得到的數據變化不會超過±1°, 在(2-6)與(2-7)的計算下, 其 \bar{X} 為-0.28°, σ 為 0.45°, 顯示電子羅盤 TDCM3 得到的數據相當地穩定。

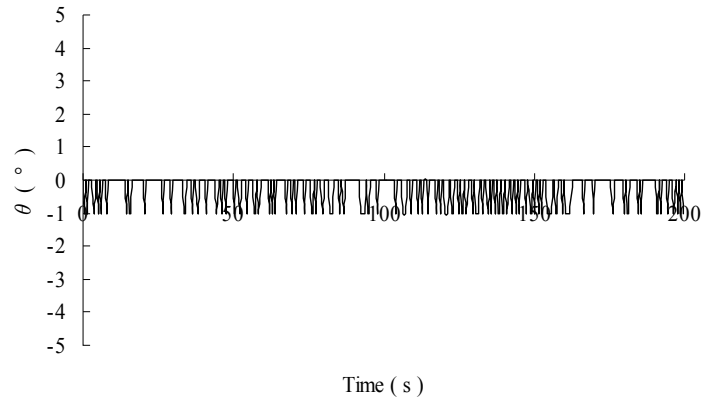


圖 2-16 電子羅盤 TDCM3 靜態分析結果

為了觀察電子羅盤 TDCM3 的角度資訊的準確性，對電子羅盤 TDCM3 進行動態分析，將電子羅盤 TDCM3 放置於實驗車上，繞一方形路徑，即實驗車會直線前進一段距離，再進行 90° 轉彎，重複這個動作四次。圖 2-17 為動態分析的結果。由結果圖可以看出，每轉一次彎，電子羅盤 TDCM3 得到的數據也會跟著改變約 90°，顯示電子羅盤 TDCM3 所得到的資訊相當地準確。而當所得到的角度大於 360° 時會自動變成 0°，小於 360° 時會自動變成 0°，不需要另外換算角度。

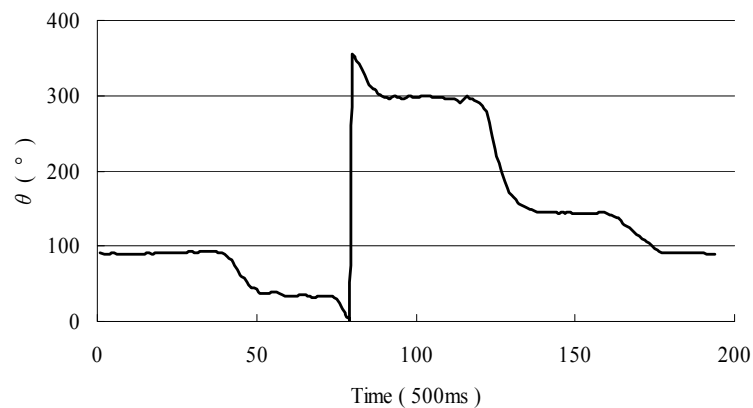


圖 2-17 電子羅盤 TDCM3 動態分析結果

由靜態與動態分析的結果，可以得知電子羅盤 TDCM3 夠準確且穩定，可以直接以其信號的數據作為實驗車目前方位角度，輸入到控制系統。

2.4 致動器

為了讓實驗車能夠透過電腦自動駕駛，對實驗車進行改裝，將一般人類駕駛員操控的方向盤、油門與煞車，於其上加裝一些電子裝置，使其能用電子信號操控，並且不會影響到一般人類駕駛員的駕駛，以便在緊急狀況時能夠切換為手動駕駛。

2.4.1 方向盤

使用一馬達透過皮帶轉動方向盤。改裝的方式為，在方向盤的軸上加裝皮帶輪，將馬達懸吊於其旁邊，在馬達與皮帶輪上套上時規皮帶，當馬達轉動時會帶動時規皮帶，進而轉動方向盤[19]。改裝完成圖如圖 2-18。馬達與方向盤的轉動比為 1：5。



圖 2-18 方向盤改裝圖

驅動的馬達使用松下(Panasonic)公司製造的 AC 伺服馬達 MINAS-A 系列的 MSMA041A1E，其驅動器(driver)為 MSDA041A1A，為一低起動轉矩類型，圖 2-19 為外觀，其硬體規格如下：

- 額定輸出：400 W。
- 額定回轉速度：3000 r/min。
- 編碼器：增量式，脈波數 2500 P/r，解析度 10000，接線數 11 芯。
- 馬達結構：無油封、無煞車、鑰匙溝軸心。



圖 2-19 AC 伺服馬達 MSMA041A1E 與其驅動器

本論文使用 eZdsp™ F2812 DSK 傳送速度指令給驅動器，以控制馬達的轉動。由於 eZdsp™ F2812 DSK 為初期開發用的學習板，功能較為陽春，因此要達到控制馬達的目的，需要外加數位類比轉換器(Digital-Analog Converter, DAC)、編碼器(encoder)等周邊電路加以輔助。圖 2-20 為設計的馬達控制周邊電路。

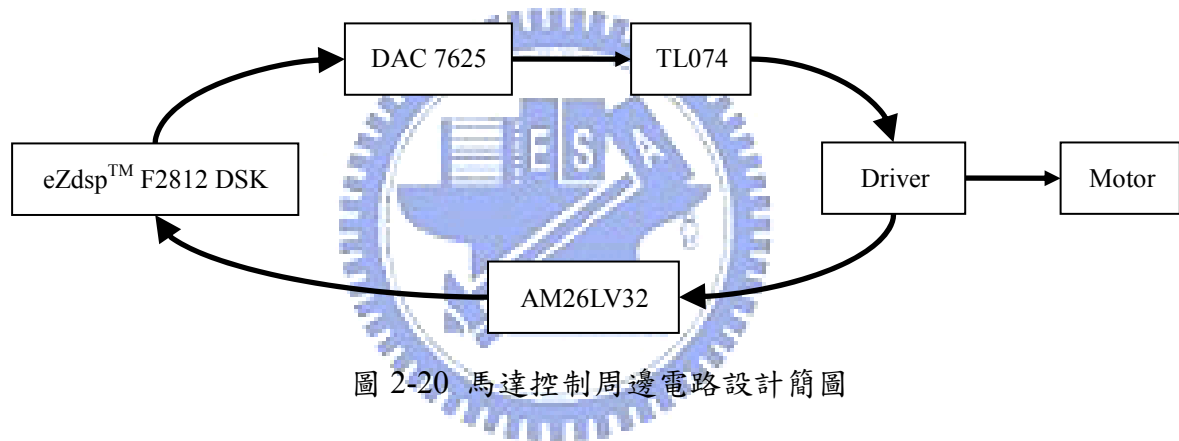


圖 2-20 馬達控制周邊電路設計簡圖

輸入驅動器的速度指令必須為-10 V ~ +10 V 的類比電壓值，而 eZdsp™ F2812 DSK 的輸出僅有數位信號，因此需要用 DAC 進行轉換。在此使用 Burr-Brown 公司出產的專用於馬達控制用途的 DAC 7625，將數位信號轉換為類比信號。圖 2-21 為內部功能方塊圖。其主要特色如下：

- 可選擇單極性(unipolar)或雙極性(bipolar)的運作模式。
- 穩定時間約為 10 μs。
- 解析度為 12 位元。
- 數位資料並列輸入。
- 支援 4 通道(channel)同步輸出。

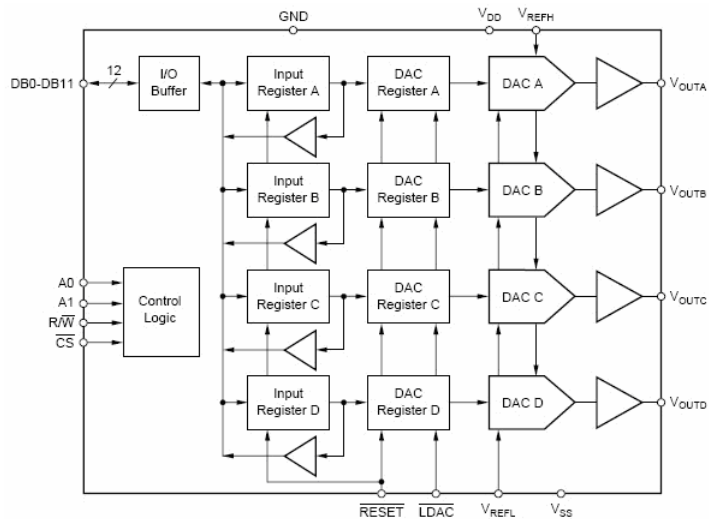


圖 2-21 DAC 7625 內部功能方塊圖

利用 A0 與 A1 選擇通道，將數位值由 DB11 ~ DB0 輸入，四個通道的數位值會存放於各自的暫存器中，當 LDAC 控制接腳變為低電位時，才一次同時轉換為類比訊號輸出，轉換公式如下：

$$V_{out} = V_{REFL} + \frac{(V_{REFH} - V_{REFL}) \times D_{value}}{4096} \quad (2-9)$$

其中 V_{REFH} 與 V_{REFL} 分別為參考電壓的上下限值 +2.5 V 與 -2.5 V， D_{value} 為輸入的數位值， V_{out} 為輸出電壓值。由於驅動器輸入的速度命令須為 -10 V ~ +10 V，而 DAC 7625 的輸出電壓上限僅能達到 +2.5 V，因此外接一放大器 (Operation Amplifier, OP) TL074，將輸出電壓放大五倍，才能符合驅動器的需求。

從驅動器傳回的馬達 A、B 相信號需經過編碼器將之轉為 3.3 V 信號，才能夠輸入 eZdsp™ F2812 DSK 的接腳。本論文使用德州儀器公司出產的 AM26LV32，其主要特色如下：

- 切換率 (switching rates) 高達 32 MHz。
- 超低功率消耗，一般消耗功率為 27 mW。
- 開路、短路和終端防錯功能。
- 在 3.3 V 的運作電壓下容許 5 V 電壓輸入。

藉由圖 2-20 的控制電路，可以從 eZdsp™ F2812 DSK 傳送速度命令給馬達，並接收馬達目前的位置。接著設計一比例積分控制器(PI Controller)，用來控制馬達的位置，以達到操控方向盤的目的，設計的控制迴路如圖 2-22 所示。

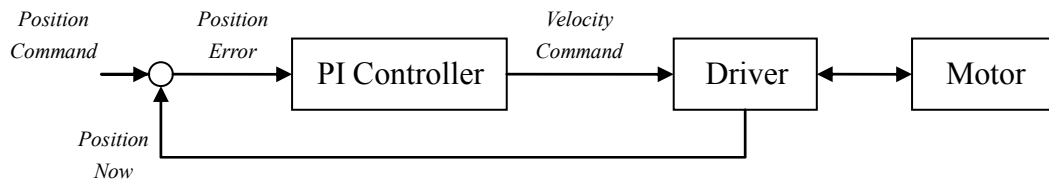


圖 2-22 方向盤馬達控制迴路

設計的 PI 控制器，其 P 增益(gain)值為 0.001，I 增益值為 0.00000005。圖 2-23 為控制結果，圖 2-23(a)為無負載時空轉的情形，圖 2-23(b)為裝在方向盤上控制的情形。由馬達命令追蹤的結果可看出，無論是無載或是有載的情況，其追蹤速度與穩定性皆相當良好。因此，設計的 PI 控制器已能夠控制方向盤轉動到命令的位置。

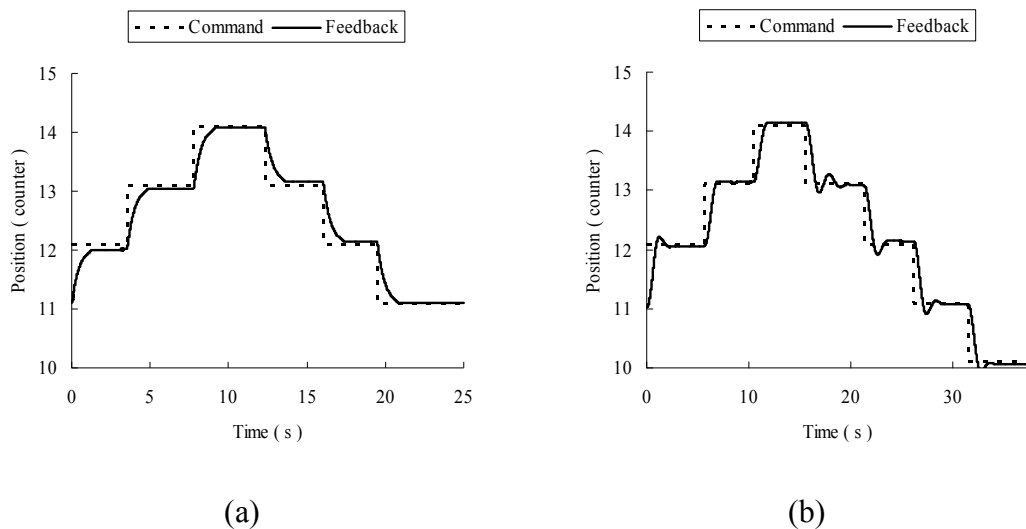


圖 2-23 方向盤馬達控制結果 (a) 無負載 (b) 有負載

2.4.2 車輛動力馬達

由於實驗車的速度控制是電動式的，因此只需要找出控制車輛動力馬達的電路，就能夠透過控制電路進行車輛速度的控制。本實驗車所用的車輛動力馬達控制器是 Curtis 公司所研發的 Curtis PMC Model 1204/5，其安裝圖如圖 2-24 所示。其中 POTBOX 為手動控制速度的腳踩踏板，踩動它時，會使該線路的電壓值產生變化，而讓實驗車加速。因此，只要對此處的線路輸入一定的電壓值，就能夠操控實驗車的速度。利用前述的 eZdsp™ F2812 DSK 與 DAC 7625 即可輸出需求速度的電壓值。

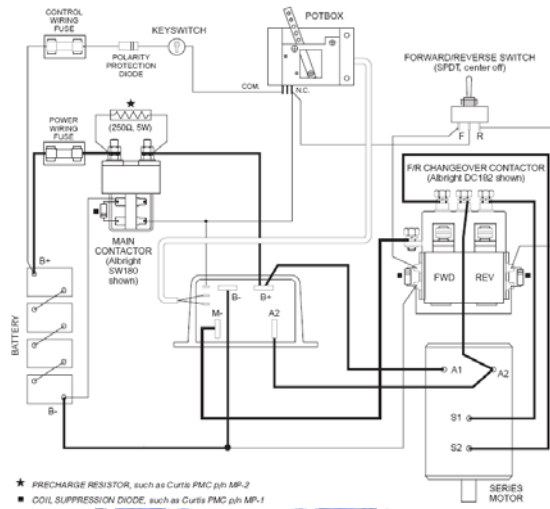


圖 2-24 馬達控制器 Model 1204/5 安裝圖

上述的車輛動力馬達速度操控，搭配 2.3.2 節介紹的加速度計，即可達到實驗車速度控制。利用加速度計得到的加速度值，經過積分後，可以計算出實驗車的速度與位置，公式如(2-10)[20]所列，加速度計的 X 軸為切線方向，Y 軸為法線方向。

$$\begin{aligned}
 V_n(k) &= V_n(k-1) + A_n(k-1) \times T_s \\
 V_t(k) &= V_t(k-1) + A_t(k-1) \times T_s \\
 \theta(k) &= \theta(k-1) + \frac{A_n(k-1)}{V_t(k-1)} \times T_s \\
 X(k) &= X(k-1) + V_t(k-1) \times \cos(\theta(k)) \times T_s - V_n(k-1) \times \sin(\theta(k)) \times T \\
 Y(k) &= Y(k-1) + V_t(k-1) \times \sin(\theta(k)) \times T_s - V_n(k-1) \times \cos(\theta(k)) \times T
 \end{aligned} \tag{2-10}$$

其中 A_n 為法線加速度， A_t 為切線加速度， V_n 為法線速度， V_t 為切線速度， θ 為車輛前進方向與 X 軸之間的夾角， X 、 Y 為車輛位置。有了目前的實驗車速度，以及車輛動力馬達的操控方式，可以設計一 PI 控制器以控制實驗車速度，控制迴路如圖 2-25 所示。

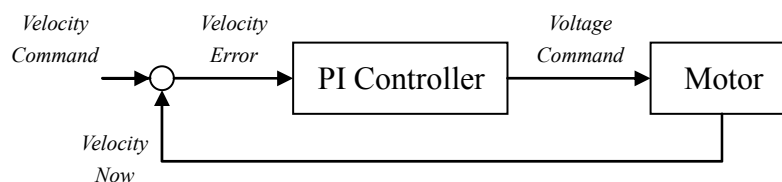


圖 2-25 車輛動力馬達控制迴路

首先只使用 P 控制器，觀察其控制結果是否良好，由圖 2-26(a)可以看出，使用 P 控制器控制速度可以達到一定的效果，其中 P 的增益值調成 800 時表現最佳。但是不論 P 的增益值調為多少，都會有一穩態誤差(steady-state error)，車速無法追到命令，因此需要加上 I 控制器來改善穩態誤差。圖 2-26(b)是使用 PI 控制器控制速度的結果，其中 P 的增益值固定為 800。加入了 I 控制器之後，穩態誤差明顯地減少，而其中 I 的增益值為 0.1 時，控制速度的結果最好。因此，PI 控制器的參數設定為 P 的增益值為 800，I 的增益值為 0.1。

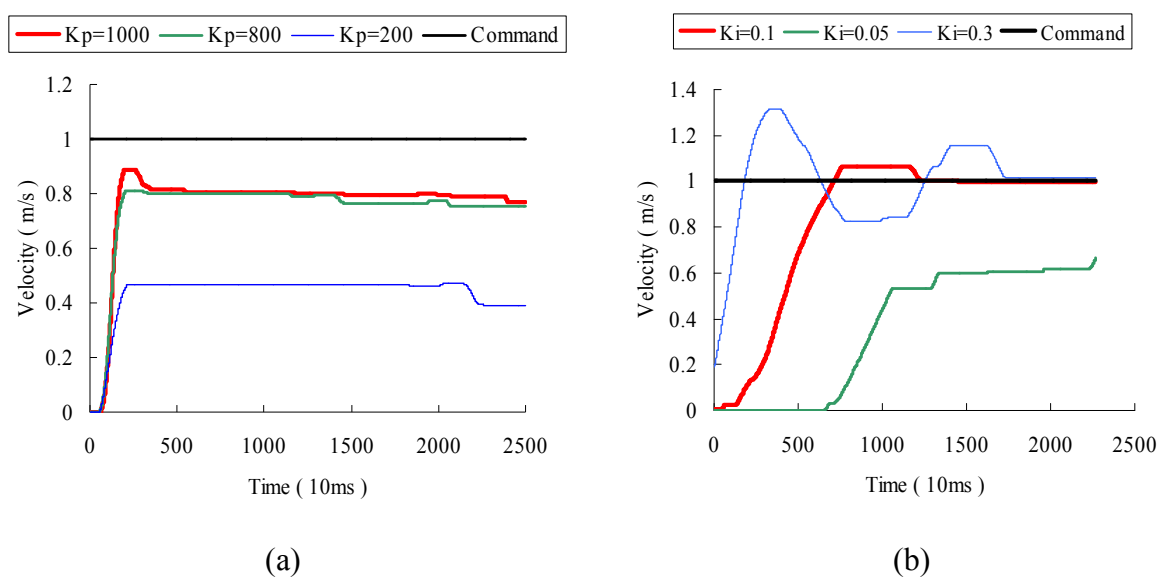


圖 2-26 車輛動力馬達控制結果 (a) P 控制 (b) PI 控制

2.4.3 煞車

本實驗車的煞車裝置是作為緊急措施，因此只需要在發生危急狀況時，能夠踩住煞車即可。改裝的方法是在煞車踏板上加裝一電磁吸鐵的裝置，當電磁吸鐵通電時，會將煞車踏板踩住，改裝圖如圖 2-27 所示。



圖 2-27 煞車改裝圖

使用的電磁吸鐵是昶皓公司生產的交流電磁吸鐵(AC Solenoids) EL-AC50，其硬體規格如下：

- 輸入電壓：110 V / 220 V。
- 流入電流：50.0 A / 25.0 A。
- 維持電流：3.2 A / 1.6 A。
- 額定拉力：10 kg。
- 額定衝程：40 mm。

2.5 控制系統

2.4.1 節與 2.4.2 節完成方向盤與車輛動力馬達的控制，而要達成自動駕駛的目的，則還需要有一個控制系統，將實驗車目前的位置、角度與速度作為輸入，判斷目前的情況，輸出適當的方向盤轉向與車輛速度，透過方向盤與車輛動力馬達控制器，自動操控實驗車的駕駛行為。圖 2-28 為本論文的自動駕駛控制系統。

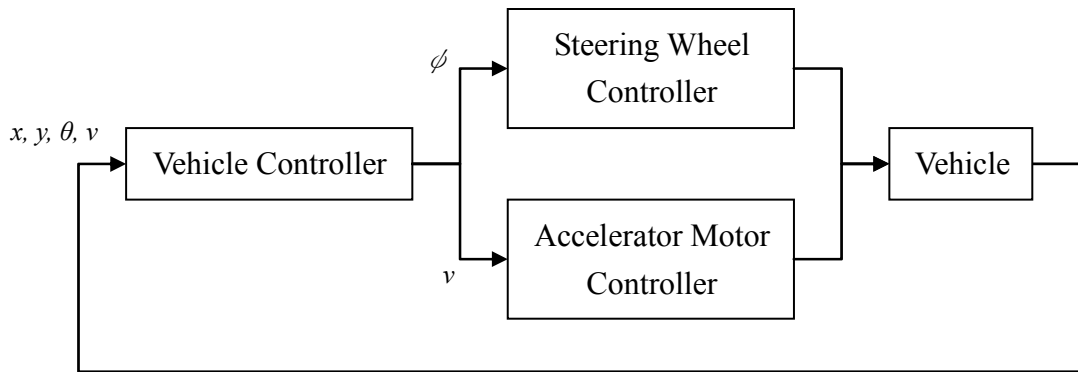


圖 2-28 實驗車自動駕駛控制系統

自動駕駛控制器的程式是於一台電腦上執行，該程式是由Borland公司開發的C++ Builder 6所撰寫而成，程式介面如圖2-29所示。此程式可以開啟RS232的通訊埠[21]，接收雷射掃瞄器的資訊，並將結果繪製出來，另外還可整合從CAN上接收加速度計與電子羅盤的資訊，作為控制器的輸入，在控制器中進行計算[22]，然後將方向盤與車輛動力馬達控制命令經由CAN傳輸到DSP，對方向盤與油門進行控制。

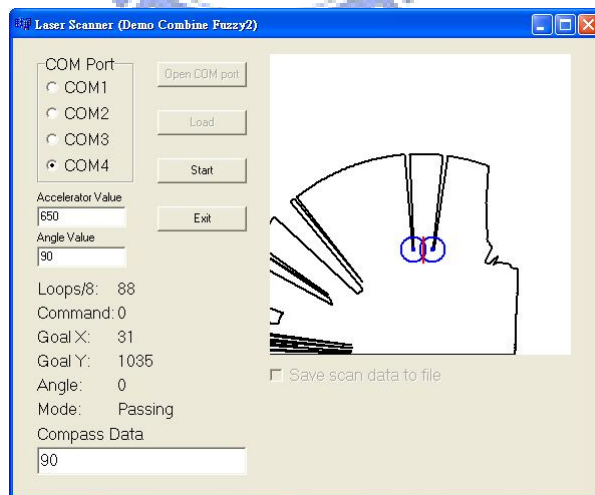


圖 2-29 PC 程式介面

第三章 自動駕駛模糊控制系統

智慧型車輛的自動駕駛控制系統，是將感測器偵測到的周圍環境資訊，作為控制系統的輸入，透過控制器的運算，操控方向盤、油門以及煞車的輸出，讓車輛能夠自動行駛到目的地。使用傳統的比例控制器(P Controller)[23]雖然能夠達成此目標，但是會有震盪、穩態誤差等缺點，導致車輛於行駛過程中左右晃動，無法準確抵達目的地。本論文提出使用模糊邏輯控制 FLC (fuzzy logic control)以克服上述之缺點，讓車輛能夠有人性化的自動駕駛，平穩且準確地行駛到目的地。

3.1 模糊邏輯控制器之簡介

模糊邏輯為一種多值邏輯(many-valued logic)，以區間 $[0,1]$ 上的任何數字來表示資料的歸屬(membership)程度，而能夠做近似推論(approximate reasoning)，也就是從一個不精確的前提，推論出一個不精確的結論，人類的思考與行為即是一種不精確的表現。因此，模糊邏輯可以實現人類的直覺操作或是專家的經驗推論。模糊邏輯控制是讓輸入資料依歸屬程度的高低給予區間 $[0,1]$ 中的數字來表示，透過若-則規則(IF-THEN rule)推論出一個特定歸屬程度的輸出。

3.1.1 模糊邏輯控制器之特點

智慧型車輛的自動駕駛控制有許多困難處需要克服，例如車輛的數學模型難以取得、車輛為非線性系統、感測器取得的資訊不夠精確等。而模糊邏輯控制具有下列特點可以克服前述自動駕駛控制的困難：

1. 有較大的容忍性，可以接受不精確的資訊。
2. 不需要知道控制對象的數學模型。
3. 能控制非線性系統。
4. 對於參數的變化有很強的適應性。
5. 提供類似人類思考模式的控制。

3.1.2 模糊邏輯控制器之結構

模糊邏輯控制器的基本結構包含下列四個主要部份[24]，如圖 3-1 所示：

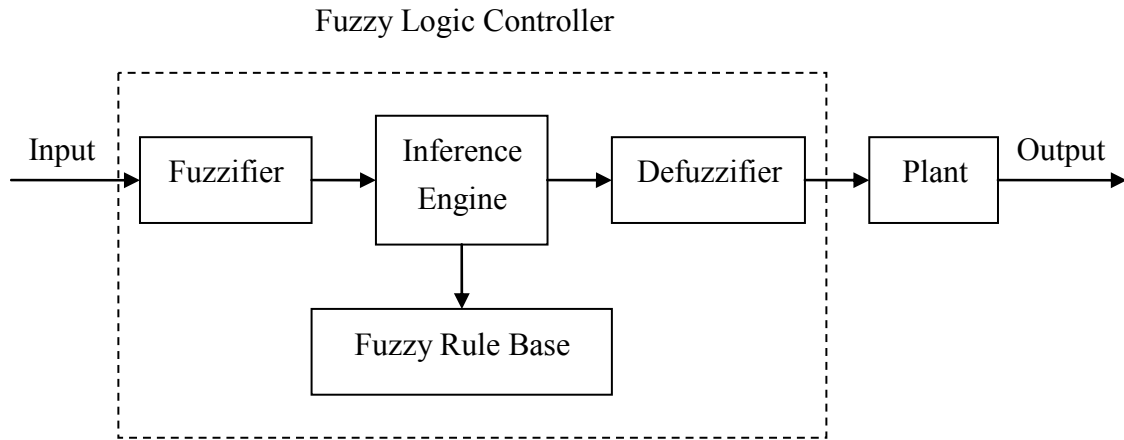


圖 3-1 模糊邏輯控制器的基本結構

(1) 模糊化(fuzzifier)

將量測到的輸入數據轉換為主觀的數值，意即將一個實數轉換為一個模糊歸屬函數 (membership function) 的程度值。例如： $X_e = -70$ cm 模糊化後為“ X_e 是 NB (negative big) 的程度為 1”， $\theta_e = 5^\circ$ 模糊化後為“ θ_e 是 P (positive) 的程度為 0.5”。經過模糊化的數據才能夠作為模糊邏輯控制器的輸入。

(2) 模糊規則庫(fuzzy rule base)

由包含語言變數(linguistic variable)的模糊若-則規則的集合所組成，此集合象徵出該系統的輸入與輸出之間的關係。在 MISO (multi-input-single-output) 的系統中，典型的模糊若-則規則如(3-1)所示：

$$R^i : \text{IF } x \text{ is } A_i, \dots, \text{AND } y \text{ is } B_i, \text{ THEN } z \text{ is } C_i, \quad i=1,2,\dots,n \quad (3-1)$$

其中 x, \dots, y 與 z 為語言變數，分別代表輸入與輸出參數； A_i, \dots, B_i 與 C_i 為模糊歸屬函數。

(3) 推論引擎(inference engine)

為模糊邏輯控制器的核心，透過模糊邏輯與近似推論的架構，模擬人類的決策模式。舉例如(3-2)所示：

假設 1： IF x is A , THEN y is B .

假設 2： x is A' . (3-2)

結論： y is B' .

此模糊關係為 $A \rightarrow B$ 。常用的模糊關係運算有下述四種：

1. max-min operation。
2. max product operation。
3. max bounded operation。
4. max drastic product operation。

(4) 解模糊化(defuzzifier)

與模糊化相反，將一個模糊歸屬函數的程度值轉換為一個實數數值，作為控制器的輸出。此為必要的步驟，因為實際的控制行為需要有實數數值才能進行機器的控制。常用的兩種解模糊化方法為 COA(center of area)與 MOM(mean of maximum)。

3.2 模糊邏輯控制器之設計

實驗車上的感測器獲得的資訊有：雷射雷達偵測兩障礙物的中心位置(X)以及電子羅盤偵測的車頭角度(θ)，如圖 3-2 所示，也就是用位置以及角度兩個參數，與目標之間的誤差(X_e 與 θ_e)作為控制器的輸入。輸出則為方向盤轉動量(*Command*)，藉此控制車輛前進之方向。

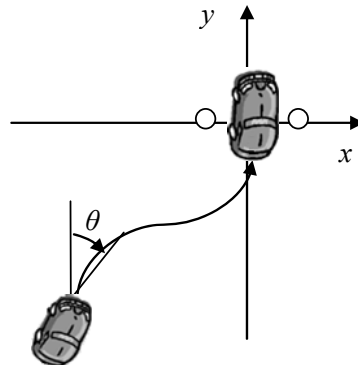


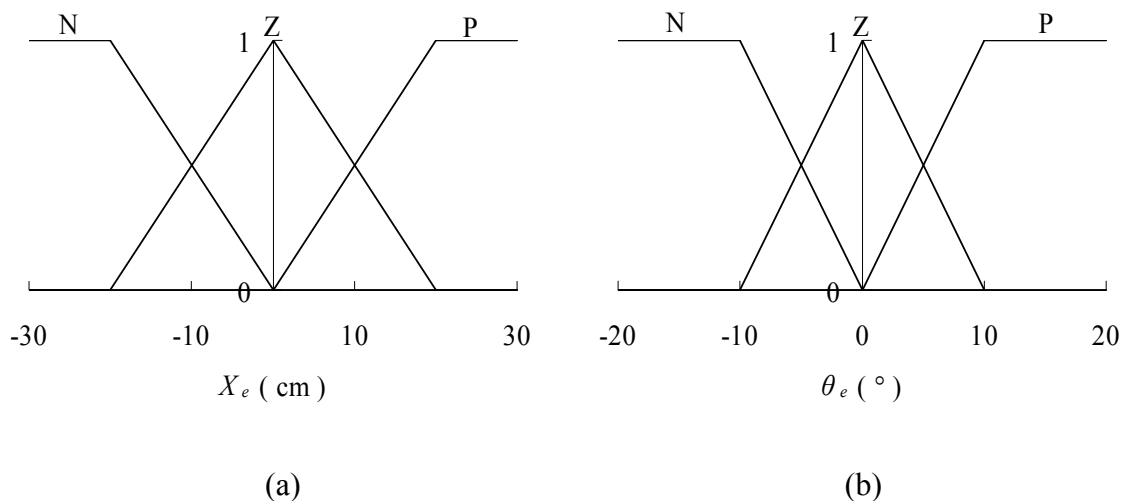
圖 3-2 輸入參數示意圖

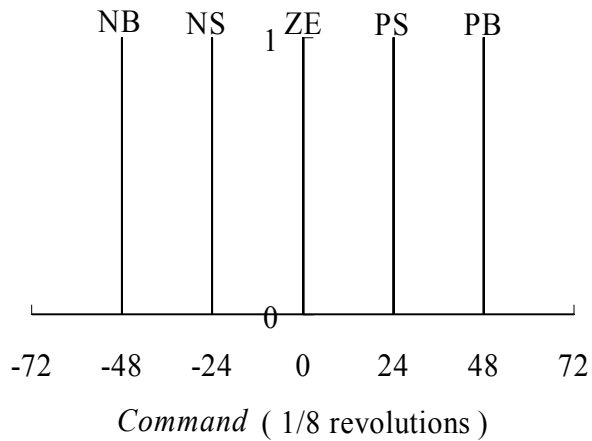
3.2.1 模糊化

模糊化過程中，歸屬函數的設計受主觀因素影響較大，因此本論文設計了兩種模糊邏輯控制器，藉此比較不同的歸屬函數設計對控制結果的影響。

輸入參數的歸屬函數使用較為簡單的三角形或梯形函數，簡化模糊化的轉換過程、減少程式運算量。輸出參數的歸屬函數則設計為脈衝型，以便簡化解模糊化時的計算。而其中設計的數值大小是依據實際開車情形所決定。

圖 3-3 為第一種模糊控制器(FLC_1)的輸入與輸出參數的歸屬函數設計。輸入參數 X_e 與 θ_e 皆有三個歸屬函數：N (negative)、Z (zero)、P (positive)，輸出參數方向盤馬達轉動量則有五個歸屬函數：NB (negative big)、NS (negative small)、ZE (zero)、PS (positive small)、PB (positive big)。

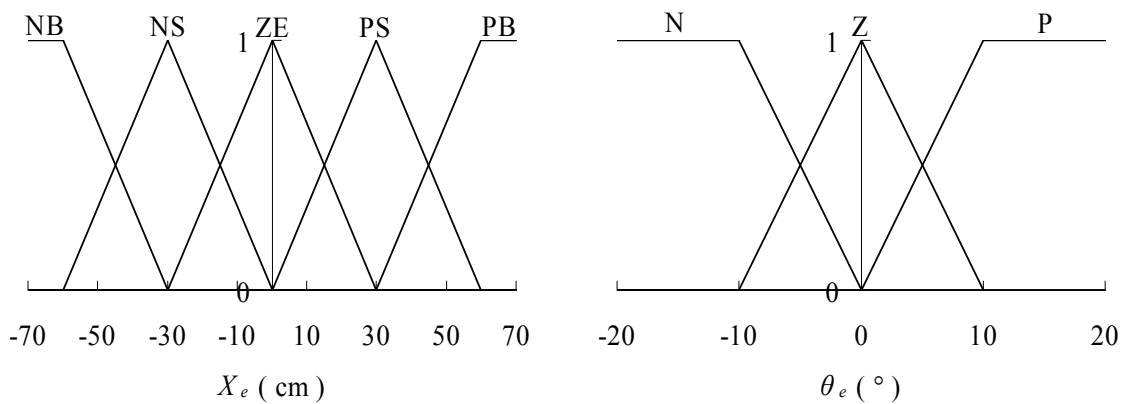




(c)

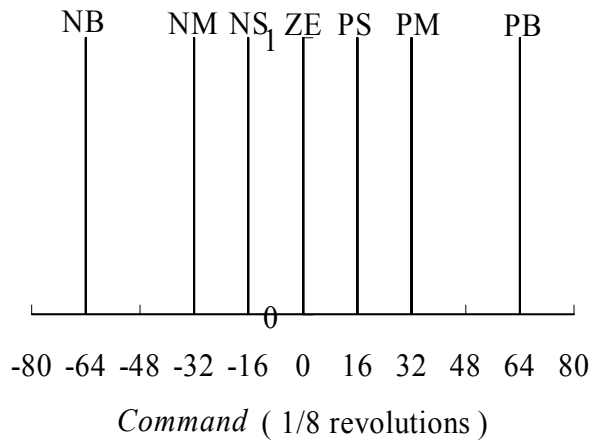
圖 3-3 FLC_1 的歸屬函數設計 (a) 輸入參數 X_e (b) 輸入參數 θ_e (c) 輸出參數 $Command$

圖 3-4 為第二種模糊控制器 (FLC_2) 的輸入與輸出參數的歸屬函數設計。與 FLC_1 不同之處在於， X_e 的歸屬函數增加為五個，輸出參數的歸屬函數也增加為七個，新增加的函數為 NM (negative medium)、PM (positive medium)，藉此增加控制時的精密度，以達到更好的控制效果。



(a)

(b)



(c)

圖 3-4 FLC_2 的歸屬函數設計 (a) 輸入參數 X_e (b) 輸入參數 θ_e (c) 輸出參數 $Command$

3.2.2 模糊規則庫

模糊若-則規則也是依據人類的直覺與專家的經驗所建立。例如：若 X_e 是 N (車輛在目標處的右方)、 θ_e 是 N (車頭朝右方)，則方向盤轉動量是 NB (方向盤往逆時鐘方向大幅轉動) 等。將各個輸入參數的歸屬函數互相對應，依照前述例子的模式設計若-則規則。

FLC_1 的輸入參數 X_e 與 θ_e 各有三個歸屬函數，因此可以列出 $3 \times 3 = 9$ 條規則。而 FLC_2 的輸入參數 X_e 的歸屬函數增加為五個，所以總共有 $5 \times 3 = 15$ 條規則。將這些規則列表如表 3-1 與表 3-2 所示。

表 3-1 模糊規則表(FLC_1)

$\theta_e \backslash X_e$	N	Z	P
N	NB	NS	ZE
Z	NS	ZE	PS
P	ZE	PS	PB

表 3-2 模糊規則表(FLC_2)

$\theta_e \backslash X_e$	NB	NS	ZE	PS	PB
N	NB	NM	NS	ZE	PS
Z	NM	NS	ZE	PS	PM
P	NS	ZE	PS	PM	PB

3.2.3 推論引擎

本論文的推論引擎使用 max-min operation，計算方式說明如下：假設使用的控制器為 FLC_1，輸入參數 X_e 為 $x_0 = -10$ cm， θ_e 為 $\theta_0 = 2.5^\circ$ ，則會使用到以下四條若-則規則：

R^1 : IF X_e is N AND θ_e is Z, THEN Command is NS,

R^2 : IF X_e is N AND θ_e is P, THEN Command is ZE,

R^3 : IF X_e is Z AND θ_e is Z, THEN Command is ZE,

R^4 : IF X_e is Z AND θ_e is P, THEN Command is PS.

由輸入的數值所決定的程度 α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 分別如下列：

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 &= \mu_N(x_0) \wedge \mu_Z(\theta_0) = 0.5 \wedge 0.75 = 0.5 \\
 \alpha_2 &= \mu_N(x_0) \wedge \mu_P(\theta_0) = 0.5 \wedge 0.25 = 0.25 \\
 \alpha_3 &= \mu_Z(x_0) \wedge \mu_Z(\theta_0) = 0.5 \wedge 0.75 = 0.5 \\
 \alpha_4 &= \mu_Z(x_0) \wedge \mu_P(\theta_0) = 0.5 \wedge 0.25 = 0.25
 \end{aligned} \tag{3-3}$$

依據第 i 條模糊控制規則的控制決定為

$$\mu_{Command_i}(w) = \alpha_i \wedge \mu_{Command_i}(w) \tag{3-4}$$

最後推論的結果為

$$\begin{aligned}
 \mu_{Command}(w) &= \mu_{Command_1} \vee \mu_{Command_2} \vee \mu_{Command_3} \vee \mu_{Command_4} \\
 &= [\alpha_1 \wedge \mu_{PS}(w)] \vee [\alpha_2 \wedge \mu_{NS}(w)] \vee [\alpha_2 \wedge \mu_{NS}(w)] \vee [\alpha_2 \wedge \mu_{NS}(w)]
 \end{aligned} \tag{3-5}$$

詳細計算方式的流程圖如圖 3-5 所示。

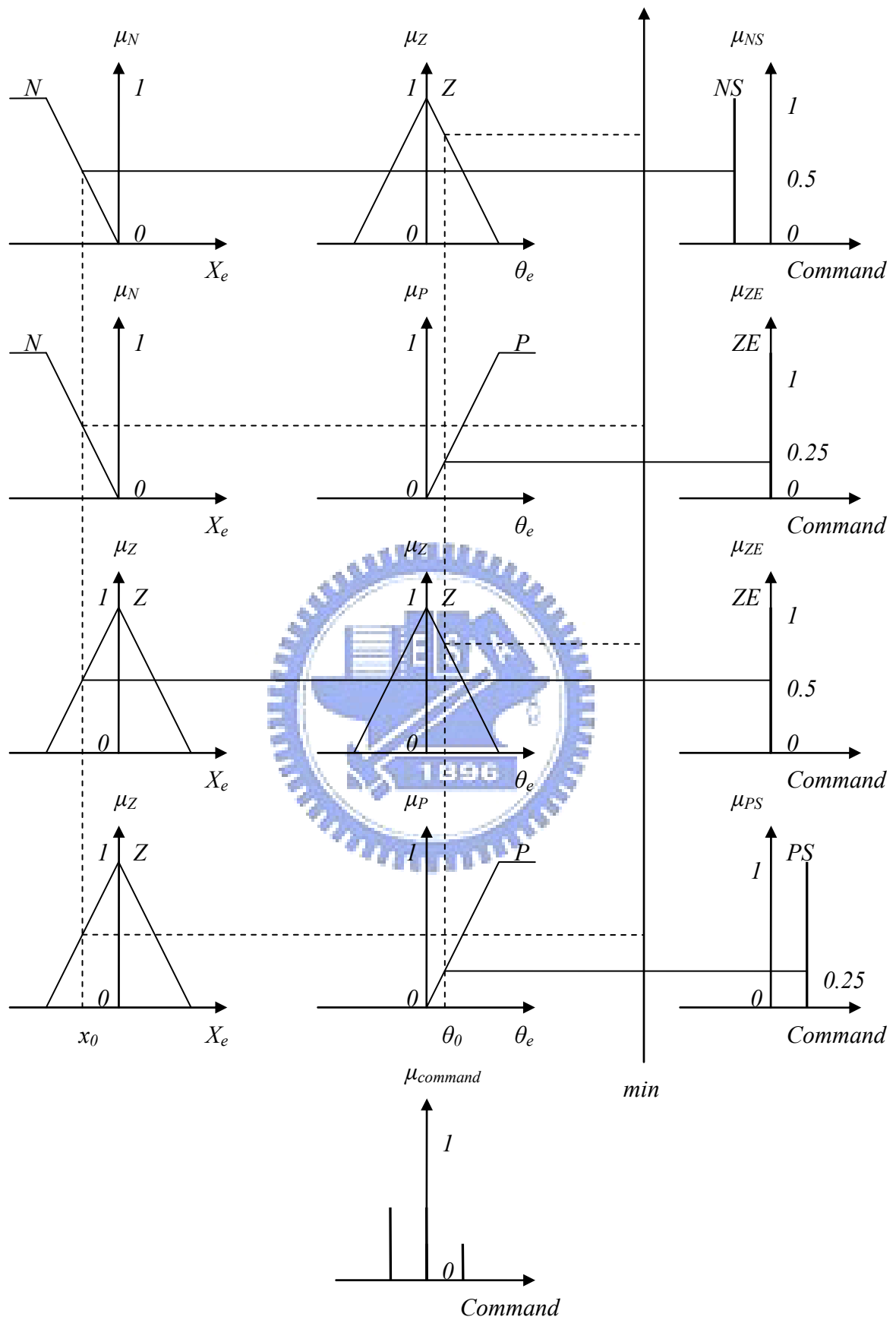


圖 3-5 Max-min operation 的計算流程

3.2.4 解模糊化

本論文使用 COA 作為解模糊化的方法，其公式(3-6)如下：

$$z_{COA}^* = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_C(z_j) z_j}{\sum_{j=1}^n \mu_C(z_j)} \quad (3-6)$$

其中 n 是輸出的量化等級， z_j 是量化等級 j 的控制輸出量， $\mu_C(z_j)$ 是輸出模糊集合 C 的歸屬數值。此公式之意義為將 3.2.3 節中最後推論出的輸出圖，尋找其重心，將該重心點作為解模糊化後的輸出值，如圖 3-6 所示。以 3.2.3 節的數據為例子，則 COA 解模糊化方法的計算為

$$z_{COA}^* = \frac{0.5 \times (-24) + 0.25 \times 0 + 0.5 \times 0 + 0.25 \times 24}{0.5 + 0.25 + 0.5 + 0.25} = -4$$

因此輸出的命令為-4，即方向盤馬達逆時鐘旋轉半圈($-4 \times 1 / 8 \text{ loops} = -0.5 \text{ loops}$)，而方向盤馬達與方向盤轉動比為 1:5，所以此輸出結果會讓方向盤逆時鐘旋轉 1/10 圈($-0.5 / 5 = -0.1$)。

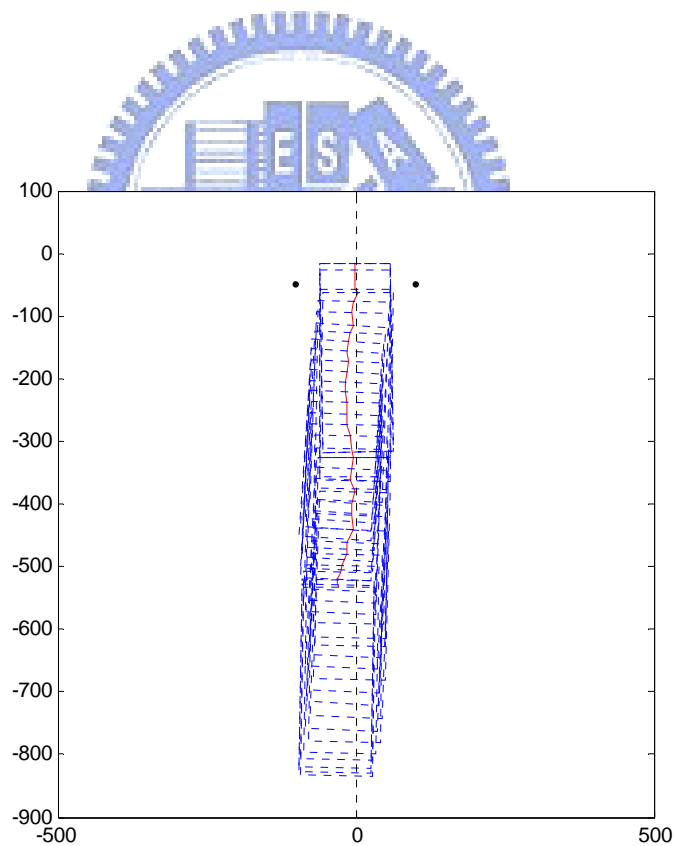


圖 3-6 解模糊化(COA)

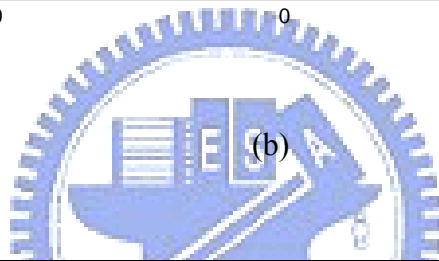
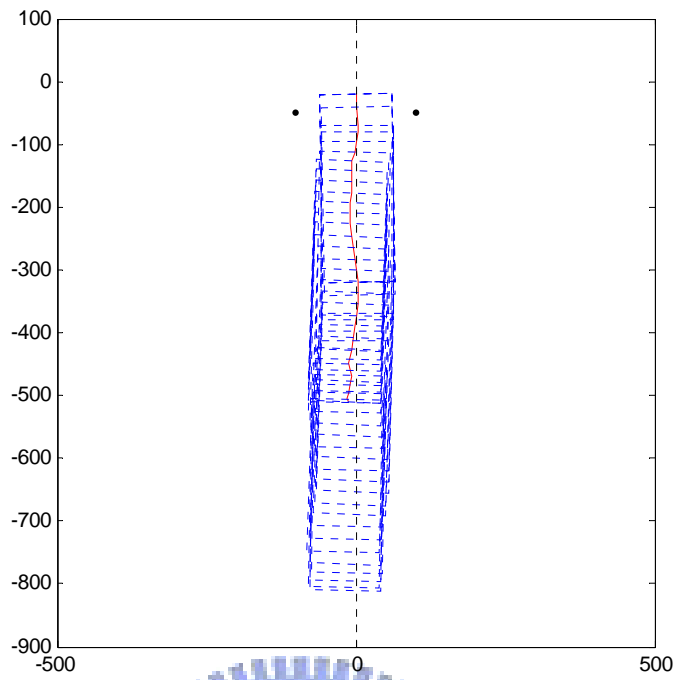
3.3 模糊邏輯控制器之改善結果

本節設計一簡單的實驗，藉由此實驗來觀察模糊邏輯控制器與比例控制器的基本控制結果，並比較之間的差異。實驗的目標是直線通過一組障礙物，在此以兩根旗桿作為障礙物，兩障礙物之間的距離為 200 cm，實驗車起始位置距離兩障礙物中心的 x 軸距離為 0 cm，y 軸距離為 500 cm。

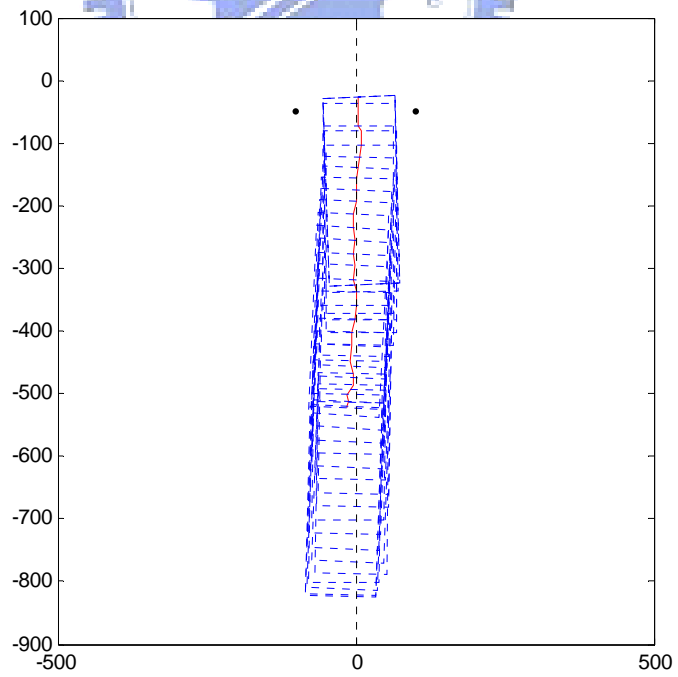
圖 3-7 為 FLC_1、FLC_2 與 P 控制器直線前進的實驗結果。虛線的長方形為實驗車各取樣時間的位置與方向，中間的實線為實驗車的行走路徑，上方兩黑點是目標障礙物，圖中 x 軸與 y 軸單位皆為 cm。



(a)



(b)



(c)

圖 3-7 直線控制的結果 (a) P 控制器 (b) FLC_1 (c) FLC_2

在此使用平均誤差量作為實驗數據的比較依據，其公式如下：

$$\text{平均誤差量} = \frac{\sum_{k=1}^N |e_k|}{N} \quad (3-7)$$

其中 e_k 為取樣次數 k 時的誤差， N 為實驗的總取樣次數。由平均誤差量可以看出控制器對系統控制的準確度，誤差愈小，控制的結果愈精準。表 3-3 為三種控制器在五次重複的實驗中的平均誤差量比較。由表中可以看出，FLC_1 與 FLC_2 在位置控制的結果，誤差皆比 P 控制器來得小，尤其是 FLC_2 的誤差明顯減少很多，顯示 FLC_2 的控制結果最精準，FLC_1 次之，而 P 控制器最差。至於角度方面的控制結果，雖然 P 控制器的數據是最好的，但是與 FLC_1 以及 FLC_2 相差不大。因此可以得到結論：模糊邏輯控制器可以有效改善比例控制器在控制系統時，準確度不足的問題。

表 3-3 各種控制器於直線行走的平均誤差量比較

平均誤差量	X_e (cm)			θ_e (°)		
	P	FLC_1	FLC_2	P	FLC_1	FLC_2
第一次	6.60	5.79	3.80	1.48	2.56	2.47
第二次	8.82	5.24	8.20	1.77	1.48	1.44
第三次	9.16	5.11	4.65	2.02	1.59	1.72
第四次	13.74	11.51	6.43	1.91	2.69	2.06
第五次	6.14	11.25	6.57	1.82	1.00	2.10
平均	8.89	7.78	5.93	1.80	1.86	1.98

第四章 車輛自動駕駛之實現與實驗結果

前面兩章介紹了實驗車的硬體架構以及自動駕駛模糊控制系統，本章為驗證本自動駕駛系統的實際可行性，於校園環境內設計一些實驗進行測試，並由其結果探討不同的控制系統設計對於自動駕駛的準確性與穩定性的影響。

4.1 實驗架設

為驗證本論文所提之自動駕駛控制系統在各種情況下皆能夠成功運作，設計了三種不同的實驗來進行測試。實驗一：測試實驗車能否從不同的出發點通過兩目標障礙物的中間，觀察基本的自動駕駛控制結果；實驗二：測試實驗車能否連續通過三組障礙物，以及觀察實驗車在行駛 S 形路徑上的表現；實驗三：測試實驗車能否在校園廣場中行走一長方形路徑，觀察實驗車在轉彎後自動駕駛控制的表現以及在實際環境中行駛的情形。其中實驗車車速皆固定為 50 cm/s。圖 4-1 為實驗中所拍攝之照片。

每種實驗皆分別使用 FLC_1、FLC_2 以及 P 控制器三種控制器重複同樣的實驗五次，以求此自動駕駛控制系統的重現性與實驗數據的準確性。

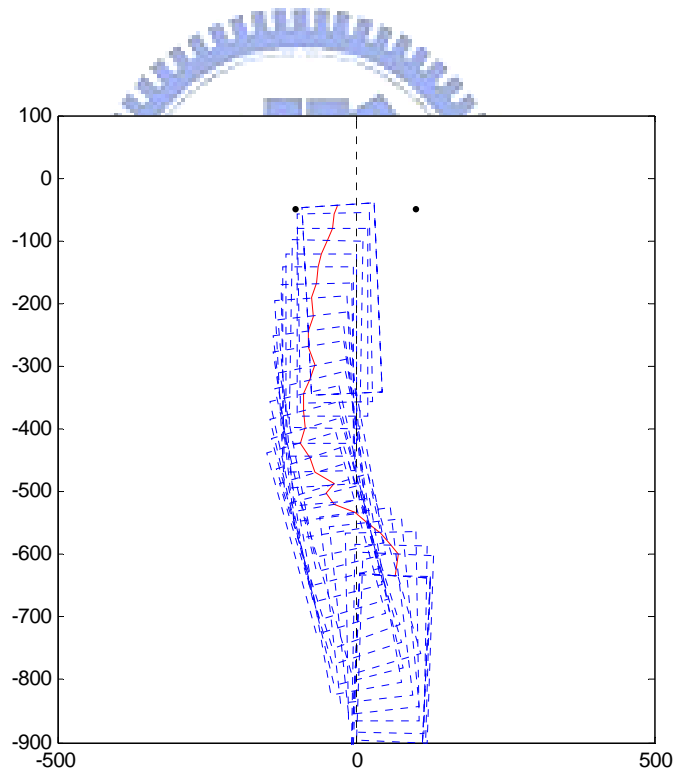


圖 4-1 實驗架設

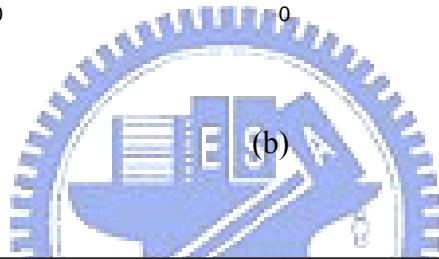
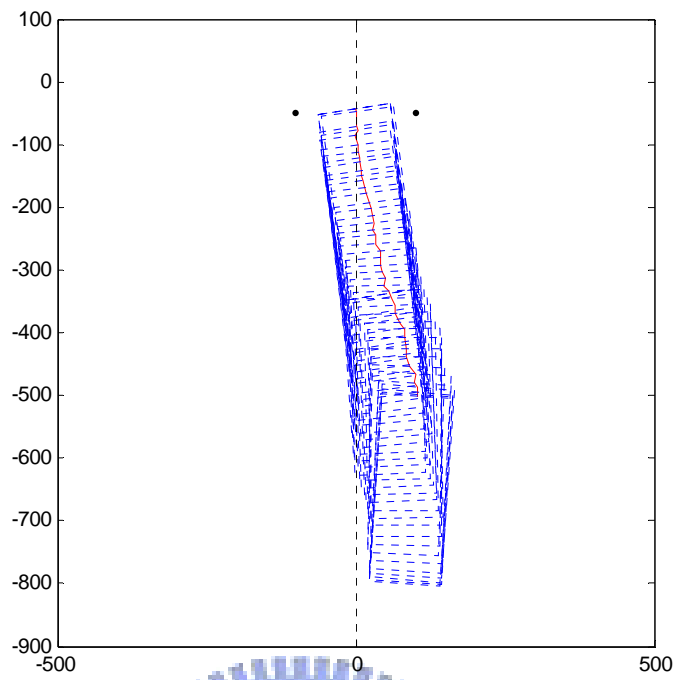
4.2 實驗結果

4.2.1 通過一組障礙物：從左右 100 cm 處出發

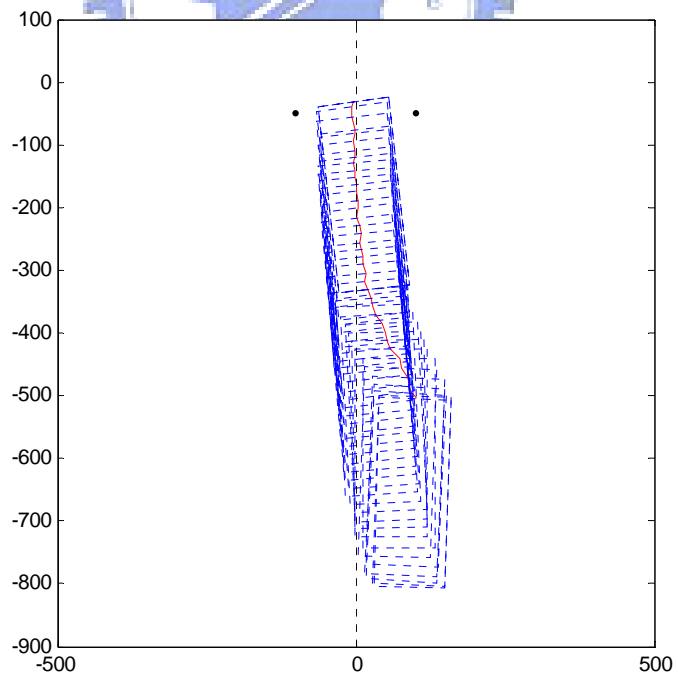
以兩根旗桿作為障礙物，兩障礙物之間的距離為 200 cm，實驗車的起始位置距離兩障礙物中心的 x 軸距離為左右 100 cm，y 軸距離為 500 cm，讓實驗車與目的地有一定的偏差，以驗證自動駕駛控制系統能夠從不同的起始位置出發，順利通過目標。圖 4-2 為 FLC_1、FLC_2 與 P 控制器從右邊 100 cm 處出發的結果。而圖 4-3 則為三種控制器從左邊 100 cm 處出發的結果。



(a)

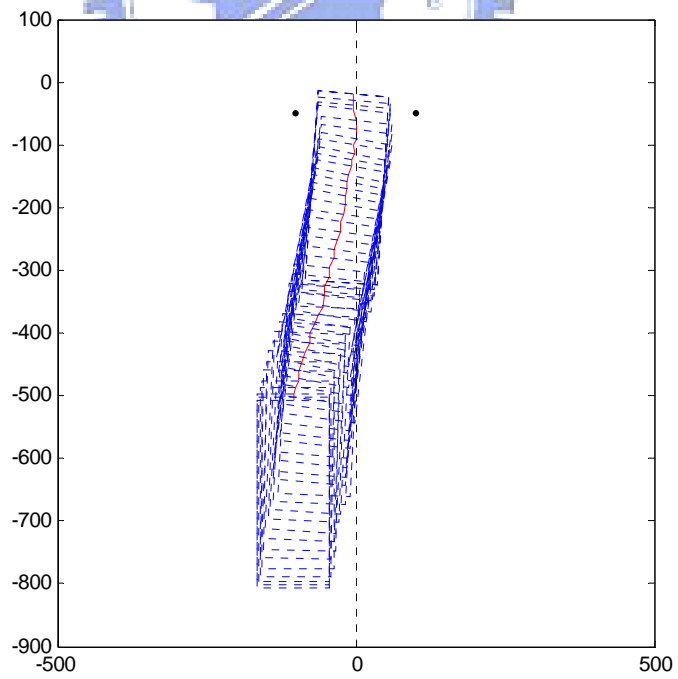
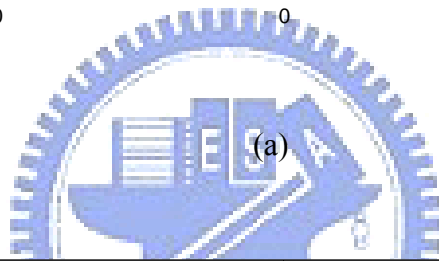
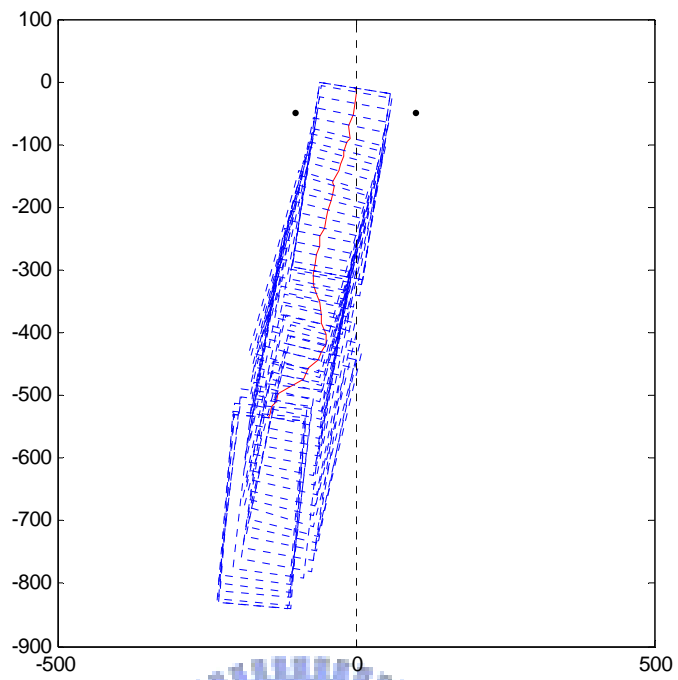


(b)



(c)

圖 4-2 從右邊 100 cm 出發的結果 (a) P 控制器 (b) FLC_1 (c) FLC_2



(b)

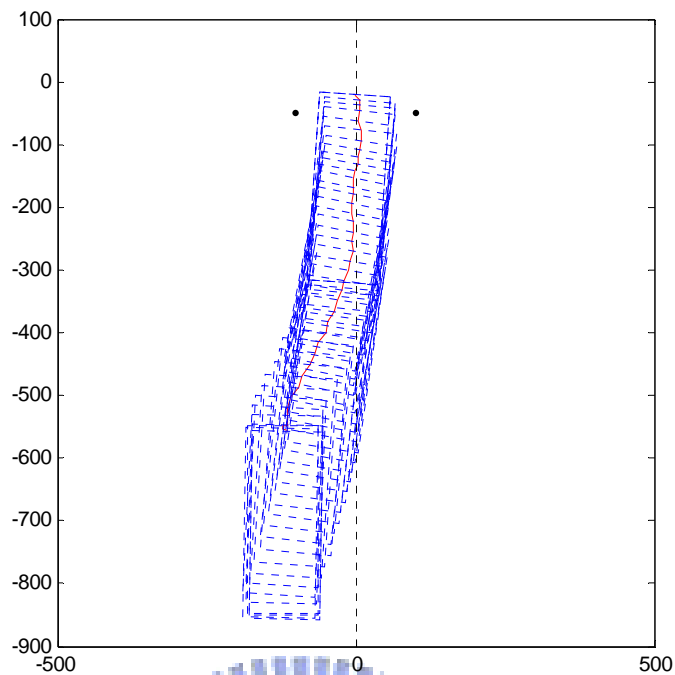
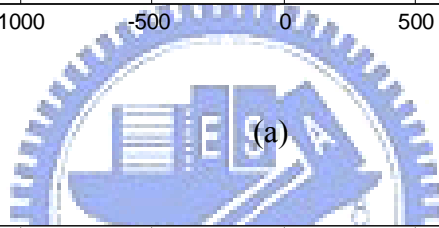
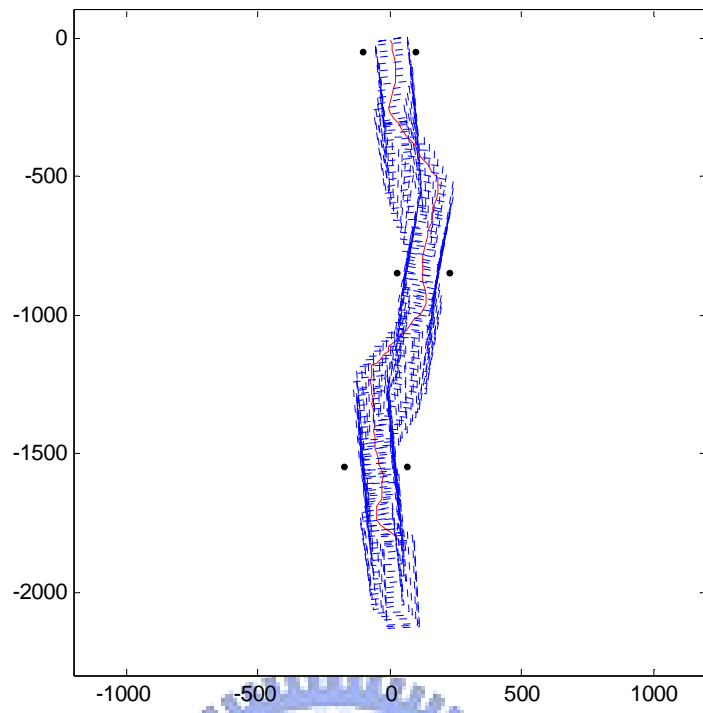


圖 4-3 從左邊 100 cm 出發的結果 (a) P 控制器 (b) FLC_1 (c) FLC_2

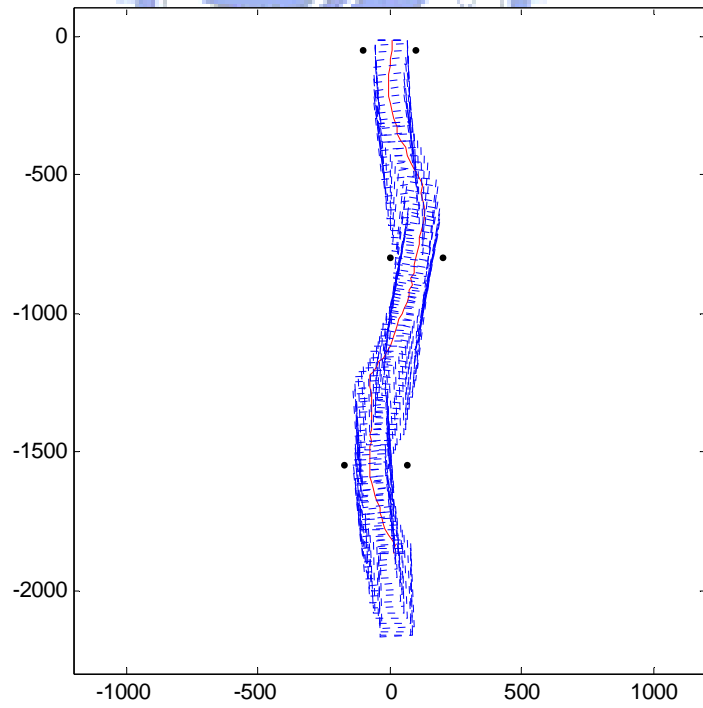
由結果圖可以看出，FLC_1 與 FLC_2 都能夠準確抵達目標位置，而 P 控制器則有些許偏差。FLC_1 的行走路徑是直線朝目標前進，因此在抵達終點時無法讓車頭方向達到朝向前方的目標；而 FLC_2 的行駛方式就非常類似人類在駕駛的方式，讓實驗車能夠平滑地行駛到目的地，並且會讓車頭方向朝向前方；至於 P 控制器的穩定性非常差，實驗車的左右震盪幅度都很大。

4.2.3 連續通過三組障礙物：S 形路徑

在實驗車前方設置三組障礙物，每組障礙物由兩根旗桿組成，兩旗桿之間的距離為 200 cm，第一組障礙物中心距離實驗車的 x 軸距離為左邊 100 cm，y 軸距離為 550 cm；第二組障礙物中心距離第一組障礙物中心的 x 軸距離為右邊 200 cm，y 軸距離為 650 cm；第三組障礙物中心距離第二組障礙物中心的 x 軸距離為左邊 100 cm，y 軸距離為 650 cm。圖 4-4 為 FLC_1、FLC_2 與 P 控制器連續通過三組障礙物的結果。



(a)



(b)

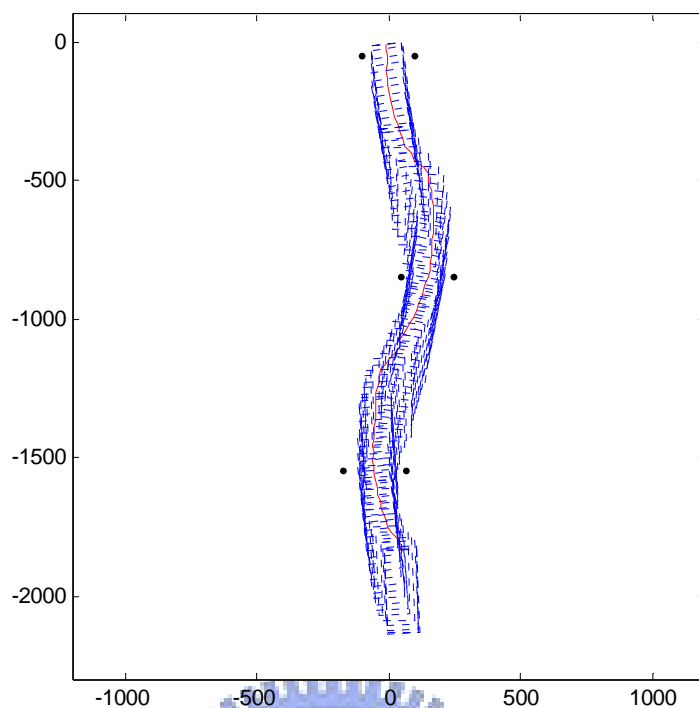
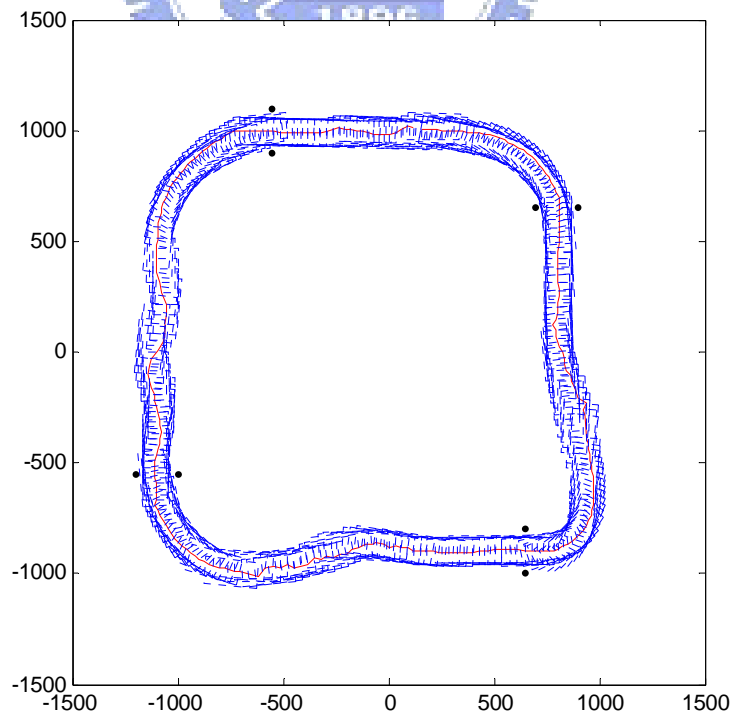
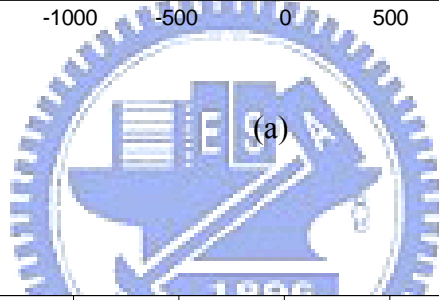
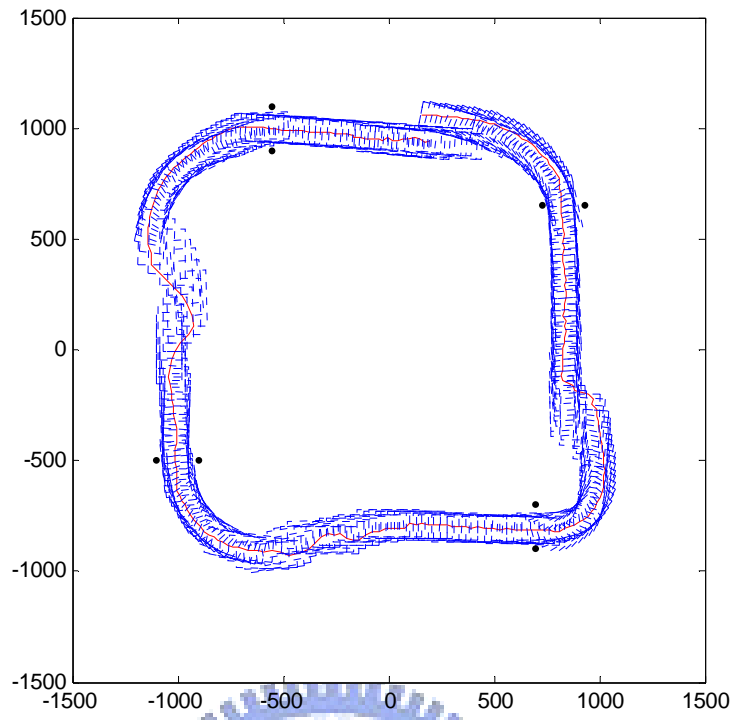


圖 4-4 連續通過三組障礙物的結果 (a) P 控制器 (b) FLC_1 (c) FLC_2

實驗結果顯示，FLC_1 與 FLC_2 的控制結果皆能夠穩定且平滑地抵達目標，兩者的結果很相近；而 P 控制器雖然能夠抵達目標，但是穩定性非常差，實驗車的行駛路徑會左右震盪。

4.2.4 繞廣場一圈：長方形路徑

長方形路徑的長約為 2500 cm，寬約為 2000 cm，在長方形路徑的四個角落各設置一組障礙物作為實驗車行走的指標，每組障礙物由兩根旗桿組成，兩旗桿之間的距離為 200 cm，當實驗車通過一組障礙物之後，即進行轉彎的動作，轉完 90° 之後搜尋下一組障礙物，偵測到障礙物之後即向該組障礙物前進，藉此達成繞廣場一圈的目標。圖 4-5 為三種不同控制器繞長方形廣場一圈的結果。



(b)

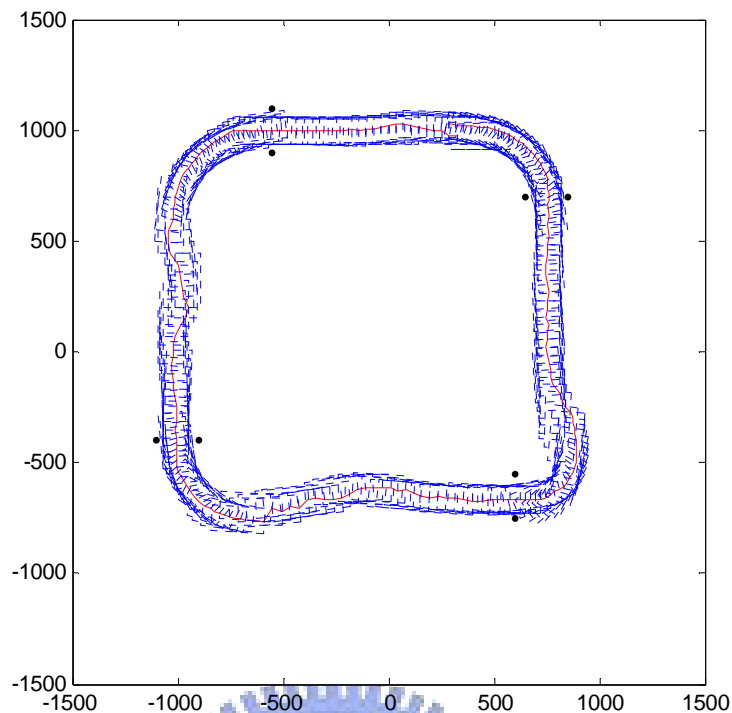


圖 4-5 繞長方形廣場一圈的結果 (a) P 控制器 (b) FLC_1 (c) FLC_2

行走長方形路徑的結果與前面幾項實驗結果很類似，FLC_1 與 FLC_2 的穩定性與準確性皆不錯；而 P 控制器的結果不夠穩定，行駛路徑的震盪較大，而且需要較長的時間才能穩定下來。

4.3 結果分析

本論文使用兩種參數作為自動駕駛系統控制結果好壞的判斷依據，分別是絕對誤差累積值(integral of absolute error, IAE)與標準差，用來觀察此控制系統的準確性與穩定性。為了驗證此自動駕駛控制系統的重現性與提高結果分析的正確性，在此重複了 4.2 節中同樣的實驗三到五次，並將其結果作平均之後進行分析。

4.3.1 準確性

準確性可以說是一個控制器最重要的指標，如果一個控制器的準確性很差的話，那麼可以說這個控制器完全沒有達到目標。本論文使用 IAE 作為自動駕駛控制系統是否快速準確地抵達目標的評量標準。IAE 的公式如(4-1)所示：

$$IAE = \sum_{k=1}^N |e_k| \quad (4-1)$$

其中 e_k 為取樣次數 k 時的誤差， N 為實驗的總取樣次數。IAE 可以表現出實驗整體情況的誤差總量，IAE 愈小，代表實驗車愈快速愈準確地抵達目標。

表 4-1 為 FLC_1、FLC_2 與 P 控制器在五種不同情況的實驗下的 IAE 數值比較。在此利用公式(2-8)來計算 FLC_1 與 FLC_2 對 P 控制器的改善率，其結果如表 4-2 所示。從表中可以看出，FLC_2 在位置(X_e)的控制結果於五種實驗下表現都是最好，IAE 的平均改善率為 30.89%，而 FLC_1 的平均改善率為 16.69%。至於在角度(θ_e)的控制結果，三種控制器的表現雖然各有輸贏，但是平均的結果仍是 FLC_1 與 FLC_2 較佳，FLC_1 的平均改善率 13.06% 較 FLC_2 的 10.62% 來得優異，但兩者差距不大。

表 4-1 各種控制器於不同實驗下的 IAE 比較

IAE	X_e (cm)			θ_e (°)		
	P	FLC_1	FLC_2	P	FLC_1	FLC_2
中間	186.74	163.35	124.53	37.76	39.12	41.10
右邊 100 cm	906.16	640.08	546.83	129.67	103.98	101.77
左邊 100 cm	1045.82	933.46	637.54	217.30	129.85	143.66
S 形	2669.59	2372.08	2350.43	281.84	224.13	253.41
長方形	3792.81	3047.33	2637.00	262.37	292.83	271.67

表 4-2 兩種模糊邏輯控制器的 IAE 改善率比較

改善率	X_e		θ_e	
	FLC_1	FLC_2	FLC_1	FLC_2
中間	12.53 %	33.31 %	-3.60 %	-8.85 %
右邊 100 cm	29.36 %	39.65 %	19.81 %	21.52 %
左邊 100 cm	10.74 %	39.04 %	40.24 %	33.89 %
S 形	11.14 %	11.96 %	20.48 %	10.09 %
長方形	19.66 %	30.47 %	-11.61 %	-3.54 %
平均改善率	16.69 %	30.89 %	13.06 %	10.62 %

4.3.2 穩定性

穩定性對於車輛自動駕駛而言，相當於車上乘客感受到的舒適度，如果該車輛的穩定性不夠，車上的乘客會左搖右晃而感到不舒適。標準差可以作為穩定性的評量標準，公式如(4-2)：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (x_k - X)^2}{N}} \quad (4-2)$$

其中 x_k 為取樣次數 k 時的位置或角度， X 為目標位置或角度， N 為實驗的總取樣次數。此標準差可以顯示出實驗車各取樣時間點的位置離目標之間的離散程度，若標準差愈小，代表實驗車行駛愈穩定。

表 4-3 為 FLC_1、FLC_2 與 P 控制器在五種不同情況的實驗下的標準差數值比較。而 FLC_1 與 FLC_2 對 P 控制器的改善率比較列於表 4-4。從表中可以看出，在位置的穩定性上，FLC_2 的表現是最好的，平均改善率為 19.46 %，而 FLC_1 為 9.79 %。角度

的穩定性則是三種控制器的結果都有所長，但是平均結果是 FLC_1 最佳，平均改善率為 11.77 %，FLC_2 的平均改善率 10.07 %次之，P 控制器的穩定性最差，不過 FLC_1 與 FLC_2 的改善率相差不多。

表 4-3 各種控制器於不同實驗下的標準差比較

標準差	X_e (cm)			θ_e (°)		
	P	FLC_1	FLC_2	P	FLC_1	FLC_2
中間	10.36	9.62	7.75	2.09	2.11	2.18
右邊 100 cm	48.00	40.37	38.69	6.95	5.50	5.29
左邊 100 cm	59.52	56.37	44.17	10.77	6.98	7.49
S 形	95.24	85.62	88.46	7.70	6.36	7.07
長方形	55.42	49.60	44.45	3.44	3.91	3.71

表 4-4 兩種模糊邏輯控制器的標準差改善率比較

改善率	X_e		θ_e	
	FLC_1	FLC_2	FLC_1	FLC_2
中間	7.14 %	25.19 %	-0.96 %	-4.31 %
右邊 100 cm	15.90 %	19.40 %	20.86 %	23.88 %
左邊 100 cm	5.29 %	25.79 %	35.19 %	30.45 %
S 形	10.10 %	7.12 %	17.40 %	8.18 %
長方形	10.50 %	19.79 %	-13.66 %	-7.85 %
平均改善率	9.79 %	19.46 %	11.77 %	10.07 %

4.3.3 駕駛路徑

本論文提出的模糊邏輯控制器，其目的為達成類似人類的車輛駕駛，在此藉由上述的實驗結果，來分析三種控制器與人類駕駛結果的比較。

人類在駕駛車輛時，若欲通過前方兩目標障礙物中間，首先會將方向盤朝目標的方向轉動，藉此讓車輛朝向目標中心線前進。當車輛接近兩目標障礙物中心線時，將車輛轉正，以便讓車輛能夠直線通過兩目標障礙物。因此可以將人類駕駛行為分成兩步驟：(1) 轉動方向盤，朝目標中心線移動，(2) 到達中心線附近時，將車輛轉正，直線朝目標前進。本研究就以此兩步驟來做為分析各種控制器是否有類似人類駕駛行為的依據。圖 4-6 為實驗車從左邊 100 cm 處出發，使用各種控制器直線駕駛行走的比較圖。

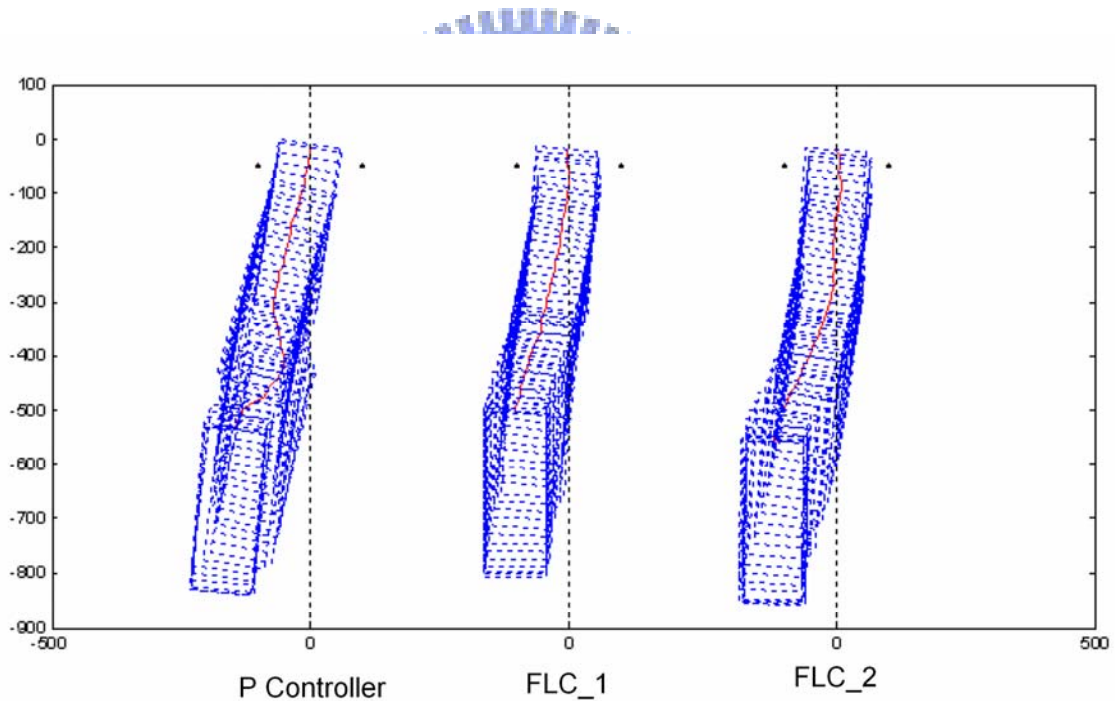


圖 4-6 各種控制器的駕駛路徑比較

由於 P 控制器對於方向盤的控制反應過大，因此造成其自動駕駛的路徑過於震盪，而且其路徑是慢慢接近中心線，從起點直線往目標點前進，這樣會造成車輛抵達目標時，車身方向與目標方向有一角度差，無法達到實驗的目標需求。

而由 FLC_1 的結果可以觀察出，車輛的行駛路徑已無振盪的現象，但是由於 FLC_1 的歸屬函數設計較為簡單，因此無法做較細微的自動駕駛控制。其行駛路徑也為直線朝向目標點前進，故無法讓車輛抵達目標時，其車身方向符合實驗目標要求。

FLC_2 增加歸屬函數的設計，藉此改善 FLC_1 的缺點。圖 4-6 可以看出，FLC_2 的自動駕駛結果最佳，其駕駛行為與人類非常相近，於一開始會迅速地朝中心線移動，當接近中心線時，會將車身方向修正，使車輛能夠以直線前進的方式，通過兩目標障礙物中間，達到實驗的目標需求。

4.3.4 小結

由本章的實驗結果以及數據的分析，可以得到以下結論：

1. 本論文提出之自動駕駛控制系統可以讓實驗車順利行駛到目的地，並且能夠行走直線、S 形、長方形等不同的路徑。
2. 本論文提出之模糊邏輯控制器，在位置與角度的控制上，較比例控制器來得準確且穩定，而且能夠達成人性化的駕駛車輛。
3. 不同的模糊邏輯控制器對位置與角度控制的結果有些差異，其中設計較詳盡的控制器控制結果比較好，較為人性化。

因此，在自動駕駛控制系統上，使用模糊邏輯控制器可以讓實驗車比較準確、穩定且人性化地行駛於複雜路徑上。

第五章 結論與未來發展

5.1 結論

由前面各章的架設與實驗成果，在此為本論文做出下列結論：

1. 整合自動駕駛控制系統：

使用雷射掃瞄器、加速度計與電子羅盤作為感測器，偵測車輛狀態與其週遭情況，並將其信號處理為可用資訊；改裝方向盤、油門與煞車為致動器，使其能夠透過馬達或電路控制操作。利用 CAN 傳輸整合感測器的資訊至電腦，經由電腦下控制命令給控制晶片 DSP，操控致動器駕駛實驗車。完成實驗車的自動駕駛控制系統之架設與 CAN 的整合。

2. 使用模糊邏輯控制器改善自動駕駛：

本文初步使用的 FLC₁ 僅有 9 條規則，可以改善比例控制器準確性與穩定性不足的缺點，而對系統程式執行時間不會造成太大負擔。與比例控制器比較，FLC₁ 的準確性平均改善率為 16.69%(位置)、13.06%(角度)，而穩定性的平均改善率為 9.79%(位置)、11.77%(角度)。由於 FLC₁ 有時會無法達成目標，故將模糊邏輯控制器作解析度更大的設計，增加準確性與穩定性。FLC₂ 的規則增加為 15 條，讓實驗車能夠做更細微的控制，由實驗結果得知，其平均改善準確性 30.89%(位置)、10.62%(角度)，改善穩定性 19.46%(位置)、10.07%(角度)，整體改善率明顯提高，讓車輛的自動駕駛控制系統駕駛的路徑更加準確、穩定且人性化。

3. 實現於校園環境：

讓車身寬 1.2 m 的實驗車自動駕駛通過相距 2 m 的兩根旗桿，並利用此成果延伸應用至更複雜的情況：a) 連續通過三組旗桿(S 形路徑，兩組旗桿相距約 7 m，左右交錯約 1~2 m)；b) 繞長方形廣場一週(長 25 m、寬 20 m)。證明此自動駕駛控制系統能夠實際行駛於校園環境中。

5.2 未來發展

本論文為車輛自動駕駛的研究建立了基礎架構，未來還有許多地方需要研究發展，在此列出數點未來發展的方向：

1. 增加安全性偵測的感測器：

本研究所使用的雷射掃瞄器僅能偵測實驗車前方 180°的障礙物情況，而對於實驗車側方與後方的障礙物則無法偵測，因此如果實驗車的側方與後方有障礙物進入時，自動駕駛控制系統無法得知，有可能造成實驗車與障礙物碰撞而造成危險。所以為了增加自動駕駛的安全性，可以在實驗車四周加裝超音波感測器(ultrasonic sensor)，增進實驗車對周邊情況的偵測，當有障礙物接近實驗車時，讓實驗車能夠做相對的迴避行為或是緊急停止行駛。

2. 針對不同情況設計適合的模糊邏輯控制器：

本論文設計的模糊邏輯控制器僅適合使用於向前行駛的情況，若是遇到轉彎或是倒車的狀況時，此模糊邏輯控制器的自動駕駛效果有限。要讓實驗車在各種不同的地方自動行駛，就必須要針對各個不同的情況，分別設計適合該狀況的模糊邏輯控制器，以達到最佳的自動駕駛結果。

3. 實現於環校道路中：

由於雷射掃瞄器僅能偵測障礙物資訊，並不能辨識出道路資訊，因此需要加裝影像擷取裝置，讀取車輛週遭影像。藉由影像取得的大量資訊，經過影像處理之後，得到實驗車周圍道路的資訊，以便讓自動駕駛系統能夠做出正確的道路駕駛行為。藉此讓實驗車能夠自動行駛於環校道路上。



參考文獻

- [1] M. Tomizuka, "Advanced Vehicle Control Systems (AVCS) Research for Automated Highway Systems in California Path", *Proceedings of the IEEE Vehicle Navigation and Information Systems*, pp. 41-45, 1994.
- [2] S. E. Shladover, "Research and Development Needs for Advanced Vehicle Control Systems", *IEEE Micro*, vol. 13, pp. 11-19, Feb. 1993.
- [3] I. Masaki, "Machine-Vision Systems for Intelligent Transportation Systems", *IEEE Intelligent systems*, pp. 24-31, 1998.
- [4] T. Hessburg and M. Tomizuka, "Fuzzy Logic Control for Lateral Vehicle Guidance", *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 14, Issue 4, pp. 55-63, Aug. 1994.
- [5] D. Yanakiev and I. Kanellakopoulos, "Longitudinal control of automated CHVs with significant actuator delays", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 50, Issue 5, pp. 1289-1297, Sept. 2001.
- [6] A. Scheuer and T. Fraichard, "Continuous-Curvature Path Planning for Car-Like Vehicles," *Intelligent Robots and Systems, IROS '97*, vol. 2, pp. 997-1003, 7-11 Sept. 1997.
- [7] T. Fraichard and J. M. Ahuactzin, "Smooth path planning for cars," *Robotics and Automation, ICRA*, vol. 4, pp. 3722-3727, 2001.
- [8] T. Martínez-Marín, "Optimal Path Planning for Car-Like Vehicles in the Presence of Obstacles," *Intelligent Transportation Systems*, vol. 2, pp. 1161-1164, 12-15 Oct. 2003.
- [9] L. Weng and D. Y. Song, "Path Planning and Path Tracking Control of Unmanned Ground Vehicles (UGVs)," *System Theory, SSST '05*, pp. 262-266, 0-22 March 2005.
- [10] H. Surmann, J. Huser, and J. Wehking, "Path Planning for a Fuzzy Controlled Autonomous Mobile Robot," *Fuzzy Systems, IEEE*, vol. 3, pp. 1660-1665, 8-11 Sept. 1996.

- [11] T. H. S. Li, S. J. Chang, and Y. X. Chen, "Implementation of Human-Like Driving Skills by Autonomous Fuzzy Behavior Control on an FPGA-Based Car-Like Mobile Robot," *Industrial Electronics, IEEE Transactions*, vol. 50, Issue 5, pp. 867-880, Oct. 2003.
- [12] H. C. Lu and C. Y. Chuang, "The Implementation of Fuzzy-Based Path Planning for Car-Like Mobile Robot," *Proc. of 2005 International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems, ICMENS'05*, pp. 467-472, Jul. 2005.
- [13] M. C. Leu and T. Q. Kim, "Cell Mapping Based Fuzzy Control of Car Parking," *Robotics and Automation, 1998*, vol. 3, pp. 2494-2499, 16-20 May 1998.
- [14] I. Baturone, F. J. Moreno-Velo, S. Sánchez-Solano, and A. Ollero, "Automatic Design of Fuzzy Controllers for Car-Like Autonomous Robots," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 12, pp. 447-465, Aug. 2004.
- [15] C. S. Chiu, K. Y. Lian, and P. Liu, "Fuzzy Gain Scheduling for Parallel Parking a Car-Like Robot," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 13, no. 6, pp. 1084-1092, Nov. 2005.
- [16] J. P. Laumond, P. E. Jacobs, M. Taix, and R. M. Murray, "A Motion Planner for Nonholonomic Mobile Robots," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 10, pp. 577-593, Oct. 1994.
- [17] "USBCAN-III 智能 CAN 接口卡用户手册 V1.2," 廣州周立功單片機發展有限公司, 2003.
- [18] NI Developer Zone, <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/6242>.
- [19] 陳維昭, "車輛駕駛操控輔助機構設計與控制," 國立交通大學電機與控制工程學系碩士論文, 2004.
- [20] 黃俊凱, "微機電感測器於地面車輛定位系統之應用," 國立台灣科技大學機械工程系碩士論文, 2005.
- [21] 范逸之, 江文賢, 陳立元, "C++ Builder 與 RS-232 串列通訊控制," 文魁, 2002.
- [22] Welstead, Stephen T., "Neural network and fuzzy logic applications in C/C++," New

York/John Wilen & Sons, Inc. /c1994.

[23] G. F. Franklin, J. D. Powell and M. Workman, “Digital Control of Dynamic Systems,”
third edition, ADDISION-WESLEY, 1996.

[24] C. T. Lin and C. S. G. Lee, “Neural Fuzzy Systems,” Prentice Hall., 1996.

