

國立臺灣大學工學院機械工程學系

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

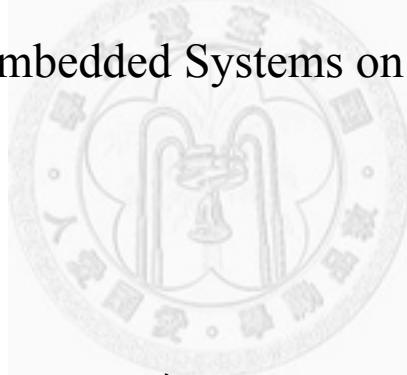
College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

嵌入式系統在移動機器人上之應用

Applications of Embedded Systems on the Mobile Robots



李政昕

CHENG-HSIN LI

指導教授：林沛群 博士

Adviser : Pei-Chun Lin, Ph.D.

中華民國 99 年 7 月

July, 2010

國立臺灣大學碩士學位論文

口試委員會審定書

嵌入式系統在移動機器人上之應用

Applications of Embedded Systems on the Mobile
Robots

本論文係李政昕君 (R97522822) 在國立臺灣大學機械工程學系完成之碩士學位論文，於民國 99 年 7 月 00 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明



口試委員：

(簽名)

(指導教授)

系主任

(簽名)

誌 謝

碩士兩年的時光匆匆就過了，想當初大學要畢業時還沒有特別想念研究所，若是有考上的話是運氣，考不上就當大頭兵吧！剛進實驗室時我還只是第二屆，各式各樣的技術屬於剛起步的狀態，很多的東西都必須要自己學，藉由每週兩次的 meeting 跟我的指導老師 林沛群討論研究的方向才慢慢上了軌道。老師是一個很厲害的人，非常聰明而且內斂，很多事情都是讓我們自己決定，也不會管我們的生活作息，只需要進度有按時出來就可以了。老師對於研究方向能夠看得很遠，而且也教了我許多做人處事的道理，對於碩士能夠畢業我最需要感謝的就是我的老師。

在實驗室的這兩年我每天都過得很愉快，這都要歸功於我的同學：很愛搞怪的王紹帆、假鬼假怪的小智中、喜歡日文的巨人兆慶，還有已經畢業的學長：有趣的啟瑋、溫和的宣諭和很亂的 log，另外就是明年準備要畢業的學弟：外星人阿強、認真的均聖、同屬於雙輪組的小捲和小白交，能和你們一起過這一段是很好的經驗。我還必需要感謝我的家人，能夠一直在背後默默的支持我，在經濟上也一直讓我無後顧之憂，讓我能夠順利的完成學業。在最後雙輪平衡的實驗硬體一直不穩定，那時是我壓力最大的時候，感謝游歲舜幫忙把電路板跳好，黃科融、鄒亞成的壓克力製作。最後特別感謝 7-11 的店員小姐黃鈺茹，若是因為那一直不變的親切態度，可能我會想要放棄碩士的學位，也讓我有重新瞭解自己的機會。

現在我覺得人生又將開始新的一段旅程，從學生到出社會，實在是非常令人期待。或許我是一個非常懶惰且胸無大志的人，不過我會記得在碩士這兩年碰到的所有人事物，努力去開創一個有趣的平凡生活。

2010 年 8 月 李政昕

中文摘要

移動機器人(Mobile robot)總體而言是一個複雜的高自由度運動系統，其運作需涵蓋如機械、機電、控制、與程式等許多領域來進行整合方能達成。本論文主要的目的是藉由相近的嵌入式系統架構，來快速設計規劃並建構出「輪腳複合式運動平台 Quattroped」和「雙輪移動平台」等兩個平台的基礎運動功能。

輪腳複合式運動平台的設計理念在於期望以單一的平台來達到多樣化且有效能的運動行為：在輪模式下的平台能有效率的在平面上移動，在腳模式下的平台則能穿越障礙地形。因此，在機電和程式的架構上就必須涵蓋各式行為模式的開發，如定位校正、輪腳變換、站立、輪驅動、腳步行、腳上下樓梯等。雙輪移動平台的設計理念在於測試輪式平台本身可達的機動性與速度性，並同時作為開發載具智慧化功能的基礎測試平台。因此，工作重點包含了平台移動、測程與定位、避障整合、和平衡功能實現等。實體測試則使用美商國家儀器(National Instruments)所推出的嵌入式系統 CompactRIO 和 sbRIO，以圖形化程式 labVIEW 為軟體來進行編程，完成軟硬體整合及開發平台之運動行為。

關鍵字：嵌入式系統、輪腳複合平台、雙輪平台

Applications of Embedded Systems on the Mobile Robots

Abstract

Robot itself is a complicated system with high degree of freedom, it should integrate in areas such as mechanical, electrical, control and program. The main purpose of this thesis is to rapidly construct basic function of the two robots, hybrid platform and wheeled mobile platform, using almost the same embedded system.

In the hybrid platform, since we expect a single platform to achieve a variety of behaviors: wheel and leg, the design will include the use of motor to realize actions and the ideas about every action available. In wheeled mobile platform, the ultimate goal is to implement intelligent functions, the platform now will contain basic mobile functions, measurement of position, obstacle avoidance and balance function. We use the embedded system of National Instruments, CompactRIO and sbRIO, with graphical programming labVIEW to develop control systems.

目 錄

口試委員會審定書	II
誌 謝	III
中文摘要	IV
英文摘要	V
圖 目 錄	VIII
表 目 錄	XI
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究動機與目的	1
1.3 文獻回顧	3
1.4 論文貢獻與架構	11
第二章 輪腳複合式機器人硬體與機電架構	12
2.1 輪腳複合式機器人硬體	12
2.2 馬達與馬達驅動電路	17
2.3 嵌入式控制系統介紹	18
2.4 機電架構	20
第三章 輪腳複合式機器人控制系統與實驗	23
3.1 座標制定	23
3.2 馬達控制	24
3.3 系統架構	27
3.4 實際控制	29
3.5 目前具備機制	34
3.6 測試程式與保護機制	41

3.6 人機介面與實驗	42
3.8 問題與討論	45
第四章 雙輪平台硬體與機電架構	46
4.1 雙輪平台介紹	46
4.2 馬達與馬達驅動電路	47
4.3 升壓電路	49
4.4 感測儀器	50
4.5 嵌入式系統	52
4.6 機電架構	53
第五章 雙輪平台控制系統與實驗	55
5.1 輪平台座標和重心	55
5.2 基本功能	56
5.3 測程法	58
5.4 避障程式介紹	60
5.5 感測器資料擷取與校正	62
5.6 平衡理論	65
5.7 平衡程式實做	73
5.8 平衡實驗與討論	75
第六章 結論與未來展望	78
參考文獻	79

圖 目 錄

圖 1 (a)可原地迴轉的載具 (b)一般載具需進行複雜的路徑	3
圖 2 Robot Roller-Walker	4
圖 3 (a)Robot PAW (b)Robot AirHopper	4
圖 4 (a)Robot Wheeleg (b)保全機器人原型	5
圖 5 (a)Robot AZIMUT (b)Robot Rhex	6
圖 6 德國學者研發的 JOE	7
圖 7 Segway	8
圖 8 (a)馬來西亞工藝大學研發的平台 (b)nBot (c) 奧克蘭大學研發的平台	8
圖 9 (a)中興大學所研發的載具 (b)成功大學研發的平台	9
圖 10 LEGO NXT 平台所做的雙輪自走車	9
圖 11 The Segway Robotic Mobility Platform, RMP	10
圖 12 擁有輪和腳模式的複合平台 Quattroped	13
圖 13 Quattroped 每組驅動桿擁有兩個自由度：平移和旋轉	14
圖 14 輪腳變換機構	15
圖 15 切換裝置	16
圖 16 轉向機構	17
圖 17 直流有刷馬達 Maxon RE30 60W	18
圖 18 馬達驅動電路晶片 APEX SA60	18
圖 19 CompactRIO 主要部份	19
圖 20 無線模組 ASUS 330g	21
圖 21 複合式平台系統機電架構	22
圖 22 輪腳複合式機器人座標制定	23

圖 23 PID 方塊流程圖	25
圖 24 馬達閉回路回授示意圖	25
圖 25 馬達模型	26
圖 26 實際使用的馬達控制方塊流程圖	27
圖 27 系統整體結構	28
圖 28 雙自由度機構傳動系統：(a)旋轉自由度機構 (b)平移自由度機構	30
圖 29 機器人腳位置換算	32
圖 30 輪腳複合式機器人定位程式流程	33
圖 31 輪腳複合式機器人定位 labVIEW 程式	33
圖 32 目前輪腳複合式機器人所具備模式	34
圖 33 磁力感測器所放置的位置	35
圖 34 校正示意圖	36
圖 35 微型伺服機 Hitec HS-85MG	36
圖 36 輸入訊號和伺服機的轉向關係	37
圖 37 行走腳步步態	38
圖 38 四輪模式運動：(a)直線前進(b)前輪轉向運動	39
圖 39 輪腳複合式機器人過彎示意圖	40
圖 40 包含轉向的輪驅動模式	41
圖 41 輪腳複合式平台保護機制	42
圖 42 labVIEW 人機介面	43
圖 43 實驗影片截圖	44
圖 44 雙輪可傾式平台	46
圖 46 馬達驅動電路 MD03	48
圖 47 馬達驅動電路 MD01B 和規格	48
圖 48 實驗室自製升壓電路板	49

圖 49 雷射測距儀 LMS-291.....	50
圖 50 慣性量測儀 3DM-GX1.....	50
圖 51 實驗室製作 IMU	51
圖 52 傾斜儀 SCA100T-D02	52
圖 53 嵌入式系統 sbRIO-9642	52
圖 54 雙輪平台機電架構圖	54
圖 55 雙輪平台座標制定	55
圖 56 馬達控制示意圖	56
圖 57 雙輪平台驅動示意圖	57
圖 58 測程法示意圖	58
圖 59 避障程式流程圖	61
圖 60 平衡實驗示意圖	62
圖 61 使用 IMU 量測角度示意圖 (a)垂直校正 (b)量測角度	64
圖 62 平台狀態量測程式流程圖	65
圖 63 平台簡化示意圖	66
圖 64 倒單擺模型側面示意圖	67
圖 65 倒單擺模型俯視圖	67
圖 66 雙輪平衡示意圖	73
圖 67 平衡實驗截圖	76

表 目 錄

表 1 馬達驅動電路 MD01B 功能機制	56
-----------------------------	----



第一章 緒論

1.1 前言

嵌入式系統(Embedded System)通常是為了要控制、監測或是輔助某種設備、機器或是工廠運作的裝置，主要是用來執行特定功能而設計的。嵌入式系統由微電腦與周邊硬體（記憶體、硬碟等等）構成核心，並具有嚴格的時序與穩定度，設計者必須依據不同領域來決定要使用那一種微處理機，設計出硬體平台、周邊I/O裝置，以讓該平台可以處理需要的運算。

與個人電腦上的作業系統(Windows)比較，嵌入式作業系統並未要求全能，但必須能夠依據系統設計規格，有效率的發揮出硬體的運算能力，由於是針對一項特殊的任務，設計人員便能夠對它進行最佳化，減小尺寸降低成本，也就是客制化(Customize)，在各項領域上，使用嵌入式系統也幾乎變成開發軟體的主流[1]。

本論文是將嵌入式系統應用在兩種移動式機器人：輪腳複合式機器人(Quattroped)[2]和雙輪移動平台[3]上，運用嵌入式系統的穩定性結合現有技術，開發具智能化的實際系統。

1.2 研究動機與目的

由於科技的發展，人類發明了許多自動運行的交通工具，如火車、汽車、船、飛機等等，這些發明本身具有強大運行能力，但是大多數交通工具都須有特定的環境才能發揮其運行能力，如火車需架設軌道、汽車需鋪設道路、飛機需起降跑道等。但在人類所發明的地面交通工具，輪子可以說是一大特色，當在平坦的地

面上滾動時，其優秀效能以及移動速度得以完全展現。

反觀自然界中，無論在任何地形生存的動物，其快速敏捷的運動能力及多樣化的運動行為，如行走、奔跑、跳躍、爬行、蠕動等，仍是人類目前發明所無法達到的。生物系統之所以具有迅速敏捷的運動能力及多樣化的運動行為，主要是因為生物本身演化出具特定型態的高自由度（Degree of freedom）系統，以適應各種不同的外在環境及維持生命機能，並且有強健的控制系統來操作自身所具有的各個具自由度的關節，加上生物關節上驅動系統之能量密度仍遠高於人類所發明的各式致動器，所以可表現出迅速敏捷的運動能力及多樣化的運動行為。

我們的目的是建構出一個可以到處移動的機器人，可以在任何地形上運動。由於人類發明的交通工具與生物系統演進而來的構造皆有優點，將結合彼此的優點發展出一個「複合式運動平台」(Hybrid mobile platforms)，此平台將包涵輪的模式和腳的模式，並利用嵌入式系統發展所以必須具備的功能並控制此機器人展現極高地形適應性。

在另一方面，由於近年來石油枯竭的議題興起，油價開始高漲，人們在生活習慣上過分仰賴汽機車所帶來的便利，都會區中高密度的個人汽機車，使用時不僅造成交通擁擠也帶來了空氣污染和噪音污染，替代能源或再生能源的呼聲此起彼落。台灣受限於地理環境因素：地狹人稠，城市交通擁擠，所以環保和交通等公共議題格外獲得重視，因此國內外許多科學家致力研發使用非石化燃料的替代能源車輛，例如太陽能車和電動車，只是太陽能車或是電動車的價格居高不下，一般人並不會去購買。

基於台灣的環境考量，我們希望可以研發出一台個人的移動載具，除了使用電能之外，還希望能夠以較低的成本達到便利性和智慧功能。在便利性方面，一個是可攜帶性：希望可以帶著載具到處走，另一個則是希望載具可以往任何的方向移動，像是載具可以進行原地旋轉，如此一來不需要回轉半徑也能過彎，如圖 1 所示，對於正右方的目的地，載具可以先原地進行迴轉再直接直走，一般四輪載

具則需要較複雜的移動步驟才能到達。

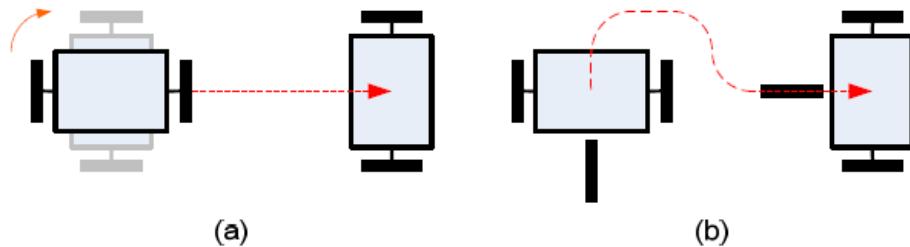


圖 1 (a)可原地迴轉的載具 (b)一般載具需進行複雜的路徑

另外在智慧功能方面，目前不論汽車機車電動車等各式載具的設計，在具備「產生移動」的基本功能之後，均朝向「智慧化」的方向發展，而研究目的正是要為載具提供智慧化的功能，具體的功能有「基本避險、自動回站充電、召喚、與自動跟隨」。由於這些功能都需要實際做測試，在載具完成之前，必須確保所有的功能都能正常運作，於是我們將製作一個小型的測試平台，並利用嵌入式系統在此平台上開發所有會用到的功能技術，最後再整合到載具上。為了達到原地旋轉的功能，將以差速控制（Differential drive）作為過彎基礎設計並製作出雙輪平台，雖然以雙輪加一惰輪的方式同樣可以達到原地迴轉的功能，但是在高速時過彎容易因為重心不穩而傾倒，因此除了基本的控制外，車體平衡將會是另一重點。

各式平台雖然自由度數目不同、功能也不同，但整體機電架構相近，不管是在複合式運動平台或是雙輪移動平台，主要皆是利用馬達的控制配合機構和其他的感測器來達到各式各樣的功能，由於我們希望能快速建構出所需要的基本功能，在此將利用相近的嵌入式系統架構，快速設計並建構出完整的系統。

1.3 文獻回顧

透過觀察自然界生物的運行機制，從這些生物系統取得機器人設計的靈感，模仿其形態、構造、控制策略、運動及行為模式等，為「仿生機器人」（Bio-inspired

robots) 的概念。為了要達到如自然界中生物敏捷的移動行為，機器人將運用自然界生物的步態，如馬奔馳的步態[4]、動物的跳躍步態 (Bounding gait)、螃蟹行走的步伐[5]等等，也有能模仿特殊蜥蜴 (Basilisk) 快速奔跑在水上的機器人 Water Runner[6]。

以「輪」和「腳」結合的複合式運動平台來講，若是根據平台的型態 (Morphology) 來區分，大約可以分成鉸接式(Articulated-wheeled)和分離式 (Leg-wheel separated hybrid platform)。鉸接式的輪腳複合平台特徵是直接在腳的末端安裝主動輪或是被動輪，例如：以四足動物 (Quadruped) 為基礎，較早期發展出來的為 Roller-Walker[7-8] (圖 2)，可透過機構將被動輪轉成滑行模式 (Skating mode) 與行走模式 (Walking mode)；另外參考 Scout II[9]而製作的 PAW[10-11] (圖 3(a))，利用彈簧機構儲存能量來達成跳躍，並在腳末端加裝主動輪以利平地滑動；還有能跳高的四足機器人 AirHopper[12] (圖 3 (b))，在機構方面刻意將身體輕量化，腳經過特殊設計能以汽缸 (Air cylinder) 和彈簧的瞬間發動來完成跳躍，跳躍高度大約可接近五倍身體高度。

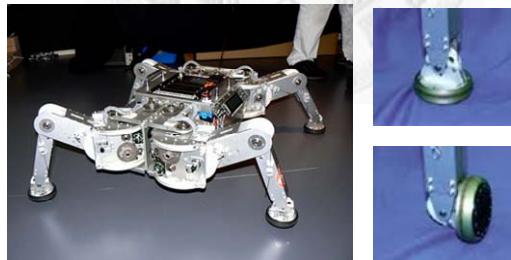


圖 2 Robot Roller-Walker



圖 3 (a)Robot PAW (b)Robot AirHopper

分離式輪腳複合運動平台的不是將輪銜接在腳的末端，而是將輪和腳以任意

組合安裝在身體上，大多是針對環境而設計的，如四足機器人 Wheeleg[13]（圖 4(a)），在前方安裝兩個 3 自由度前腳，並在後方裝置兩個大型主動輪，平地時靠輪子前進，遇到阻礙時則用前腳改變身體高度，讓機器人可以跨越障礙。另外還有以保全為目的所製作的機器人[14]（圖 4(b)），以雙輪作為主要驅動，機身上裝有距離感測器，並在後面加上了以彈簧作為主要元件的腳，當遇到障礙物時可以跳過大約四倍的身體高度。



圖 4 (a)Robot Wheeleg (b)保全機器人原型

輪腳複合式平台還有其他的種類，像是 AZIMUT[15]（圖 5 (a)）使用輪與腳的履帶混合機構，使用履帶的好處在於使用輪模式的履帶前進時，對較不平整的地面也能順利通過，當遇到遇到更高的障礙物，也可以切換成腳的模式跨越，甚至可以攀爬樓梯。另外還有使用六隻半圓形腳的 RHex[16]（圖 5 (b)），我們參考此機器人的許多長處去設計複合式平台，RHex 每隻腳擁有一個可連續旋轉的自由度，當快速旋轉時其軌跡可視為虛擬的輪子，每次著地時至少都會有三隻腳在地面上（Tripod gait），並使用兩組 tripod gait 的步態以隨時保持身體平衡，使用六支腳的好處在於不需複雜的控制，直接由開路控制腳連續旋轉並快速交換兩組 tripod gait 即可達到穩地且有效率的快速移動，RHex 已經發展了相當長的時間，目前已經能跨越障礙、上下樓梯甚至能在水中移動。



圖 5 (a)Robot AZIMUT (b)Robot Rhex

我們所希望發展的輪腳變換複合平台，除了希望能保有複合平台的優點：在平地上使用四輪模式行進，發揮輪型快速節能的效果；在崎嶇地、障礙物以及階梯的環境時能切換至四足模式跨越，也希望能夠設計出不同於以往機器人的機構，達到輪腳變換的功能。

在雙輪平台的部份，過去許多年中，已經有相當多的人針對雙輪平衡車做了相關的研究，雙輪平衡屬於倒單擺系統（Inverted pendulum system）為一個不穩定系統，是一個典型的控制題目，由於倒單擺系統機械結構並不複雜，因此被廣泛的用在驗證各種控制理論與教學上。不管是純粹學理上或是需要應用到實際的生活中，雙輪平衡車也漸漸屬於成熟的技術了，因此也發展出了許多有趣的研究。本論文參考了許多資料做為雙輪平台的理論基礎，希望能夠在短時間內完成平台的設計和控制，作為之後相關研究的基礎平台。以下將提出幾個比較具有代表意義的成品與論文：

其實平衡理論很早就已經發展出來了，1994 年日本學者發表了一篇關於可以自行穩定及追蹤控制的雙輪平衡車論文[17]，使用 Lagrange motion equation 推導出系統的動態方程式，並利用現代控制系統的極點設計（Pole placement design）做出控制回授，使雙輪平衡車可以在二維的平面下做路徑規劃並且平衡移動，不過行走在不平滑的路面時，控制器的穩定效果並不好。

之後比較有代表性的要屬於 JOE，由德國學者在 2002 年所發表[18]，利用陀

螺儀得到傾斜角度和角速度作為回授控制，並使用狀態回授來控制雙輪倒單擺車。此論文將倒單擺平衡車分為前進和轉向兩個子系統來做控制，並利用力學性質推導出了系統動態，有仔細的分析和討論，此篇論文顯示出已有可行走的實驗成品，雖然速度最快只能達到約 5 公里每小時，但是穩定性已經很高了。



圖 6 德國學者研發的 JOE

在商品化方面，最有名的就是 2002 年美國出產的一款雙輪代步電動車賽格威 (Segway) [14, 19-21]，由 Dean Kamen 所發明，擁有 20 公里/小時左右的最高車速。這輛車上裝置了五個固態陀螺儀 (Solid-State Gyroscopes) 積得不同方向的角度資料，來判斷車身所處的姿勢狀態。其實實際上運用只需要三個陀螺儀就可以完全掌控車身的前後傾與側傾程度，因此多出的兩個陀螺儀是用來確保行車安全的備用裝置。陀螺儀的資料會由頻率每秒 100 次處理速度將資料傳回判斷車體重心，藉此推測使用者的身體傾角度加以控制，確保系統在穩定的狀態下行動。雖然 Segway 曾經一度被認為是劃時代的科技發明前景一片看好，但由於諸多現實因素：如各國的法規限制和高達 5000 美元的單價，Segway 的產品並沒有在上市後獲得原本預期的迴響。



圖 7 Segway

其他還有很多學校機關或是業餘人員從事這方面的研究，像是由馬來西亞工藝大學 (Universiti Teknologi Malaysia) 所研發的雙輪平台[22]，比較特別的是此平台以 matlab 作為主要的控制介面來即時驅動平台上的控制版，在運行中可以即時控制輸出參數，並將數據讀回來。另外由美國的 David P. Anderson 所製作的 nBot[23]，使用了陀螺儀和加速規的融合訊號作平衡，目的雖然純粹是自我娛樂，但 nBot 已經可以在崎嶇的地面上做移動。另外還有紐西蘭奧克蘭大學 (University of Auckland) 所研發的雙輪平台[24]，此平台使用了兩種不同的控制器，一種是 PID 控制器，主要用來控制平台的轉向，另一個 LQR 控制器用來保持平台的穩定並控制馬達前後移動。

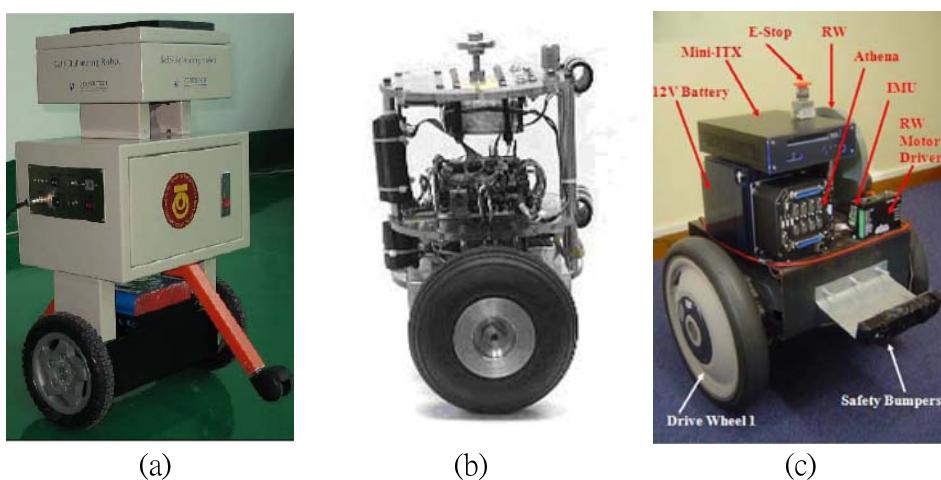


圖 8 (a)馬來西亞工藝大學研發的平台 (b)nBot (c) 奧克蘭大學研發的平台

在國內也有中興大學所研發類似 Segway 的移動型載具[25]，主要是使用適應

性控制 (Adaptive control) 中的類神經網路 (Neural network) 作為控制演算法，此種演算法的優點是經過多次的實驗後，演算法將自動調整參數使效能越來越好，目前已可達到穩定的平衡和移動轉向，可以當成短程的移動工具。另外成功大學也開發了一個類似的雙輪平台，此平台使用類似神經網路的自我調適 PID 控制系統[26]，同樣在歷經多次實驗後可使平衡的結果變的更好，論文裡也有完整的實驗結果和討論。

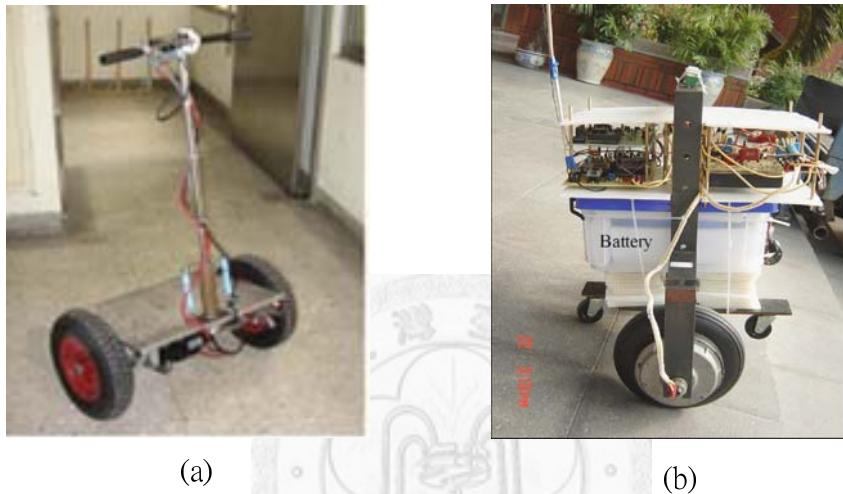


圖 9 (a)中興大學所研發的載具 (b)成功大學研發的平台

比較有趣的是樂高 (LEGO) 公司推出的 NXT 機器人模組，由於此模組包含簡單的嵌入式系統和馬達，使用者可以依自己需要設計程式達到想要的功能，另外還有許多感測器可以加購，因此也有人利用此模組完成了雙輪的平衡自走車。平衡方面將會使用紅外線感測器或是陀螺儀來量測角度，目前看到的結果已經可以平衡得非常好，包含遠距遙控前進後退轉向，並能穩定的上下坡[27]。



圖 10 LEGO NXT 平台所做的雙輪自走車

以雙輪平衡的平台來講，除了要應用在載具上，大部分都是希望藉由雙輪差速驅動的敏捷性當作實驗平台，大部分的實驗平台能穩定移動後都會當成感測器的測試平台發展避障理論、地圖繪製[28]或是做成機器人[29]應用在別的地方。因此 Segway 的公司（賽格威責任有限公司，Segway LLC.）另外推出以 Segway 底座為主，可載運物品的兩輪移動運平台，稱為“RMP”（The Segway Robotic Mobility Platform, RMP）[30]，除了搭載平衡的功能，可以載重之外，還能改裝成適合的實驗平台，重點是價格較 Segway 便宜很多。許多機關或學校也利用此底座做成合適的平台。



圖 11 The Segway Robotic Mobility Platform, RMP

而我們要做的平台和 Segway 公司出的平台 RMP 很相似，同樣是為了當作測試平台而製作。本論文的目的是先將平台具備基本移動功能和雙輪自我平衡，之後再把所有需要的智慧化功能運用在此平台上。

嵌入式系統的發展大約有 40 年的歷史了，在市面上也有非常多的選擇，為了希望可以快速的開發程式，選用美商國家儀器 (National Instruments) 所出的 cRIO-9014 和 9104 嵌入式即時控制系統做為複合式平台主要的控制器，並選用 sbRIO-9642 作為雙輪測試平台的嵌入式控制系統，此兩種嵌入式系統皆使用 LabVIEW 作為主要的開發程式。LabVIEW 的好處是為圖形化介面，對於沒有寫過程式的人也可以很容易上手，且具有可以達到平行迴圈處理的功能。若是使用 C 語言來作主要撰寫工具的話，雖然擴充性很高，也能達到所需要的性能，不過我們會選用 LabVIEW 最重要的

是在和硬體溝通的方面。由於在開發的時候需要做馬達控制、擷取訊號、資料分析處理等等，將會使用到「元件可編程邏輯閘陣列」(FPGA，Field Programmable Gate Array)。NI 在軟硬體溝通方面擁有許多容易使用的方案，只需要熟悉單一程式 LabVIEW 即可輕易完成即時端 (RT) 和 FPGA 端的程式，對於快速的開發和機電整合有非常大的助益。

1.4 論文貢獻與架構

本論文主要是使用美商國家儀器 (National Instruments) 所推出的嵌入式系統 CompactRIO 和 sbRIO，配合圖形化程式 labVIEW 作為軟體架構，在兩種不同的機器人平台：複合式運動平台 Quattroped 和雙輪移動平台硬體開發完成後建構出基礎的運動功能和程式架構，當具備了基本的移動能力後，之後各種功能的開發將能更為迅速。

論文範圍將會介紹兩個平台的特殊機構、控制系統介紹和實驗。第二章將會介紹複合式運動平台 Quattroped 的硬體部分，包含特殊的機構和機電部分；第三章為主要的控制架構，除了基本的馬達控制，還有目前所具備行為的設計理念，第三章最後包括了實驗和討論。第四章和第五章則為雙輪移動平台的介紹，第四章同樣包含了雙輪平台的硬體部分，第五章將會介紹基本功能的實現和平衡理論，最後為初步的實驗結果。第六章為結論與未來展望。

第二章 輪腳複合式機器人硬體 與機電架構

2.1 輪腳複合式機器人硬體

A. 設計理念

最初的設計理念的要建構一個可以到處移動的機器人，具有感測環境的能力，可以在任何地形上運動。自然界中無論在任何地形演化出來的動物，大部分都具有快速敏捷的運動能力及多樣化的運動行為，而很有趣的陸地上的生物除了蛇之外大多以「腳」的方式來達到運動的功能。

從自然界的觀點來看，地表上能快速移動的動物以哺乳類居多，經過長時間的演化，哺乳類的動物幾乎都擁有四足，可以在站立時保持身體平衡，動態運動時調整四足步態，適應多種地形。因此，在腳的部份，我們以四足哺乳類動物作為參考，為了使平台能夠透過腳調整身體高度，適應各個地形，又不會過多的自由度造成重量、成本增加以及控制複雜，所以參考目前一般仿生四足機器人。

而在平地上，人類數千年的工藝演化出以「輪」的方式來進行運動，在平坦地面上輪的運動效率無懈可擊，因為四輪在行進中能夠保持車身的穩定，所以在平地上，運動平台也希望需具備有四個輪子。

因此，我們在設計時以下列幾點作為設計考量：

- (1)具有「四足模式」的功能，且能適應崎嶇的地形。
- (2)具有「四輪模式」的功能，能在平地上駕駛。
- (3)提高致動器的使用率，使其發揮最高成本效益。
- (4)減少致動器維持不動的情形，以降低能量的損耗。
- (5)減少腳的轉動慣量，將致動器安裝在身體內。

因此，若能建構輪腳雙模式的機器人，則能有效的適應外在環境：在平地時，能利用輪滾動的物理特性，使機器人在平面行駛可以達到快速且節能的效果；當遇到地形為不平整的路面或是樓梯時，則可以使用生物系統中演化出的腳的方式，克服地形，表現出生物系統中獨特的行為如行走、攀爬以及跨越等動作來克服阻礙。結合這些優點，我們發展出「輪腳複合式運動平台—Quattroped」[31]，來展現出對各式地形極高的適應性。在機構的部份為沈宣諭所設計並製作完成[2]，而我所負責的部分是機器人基本的行為實現。

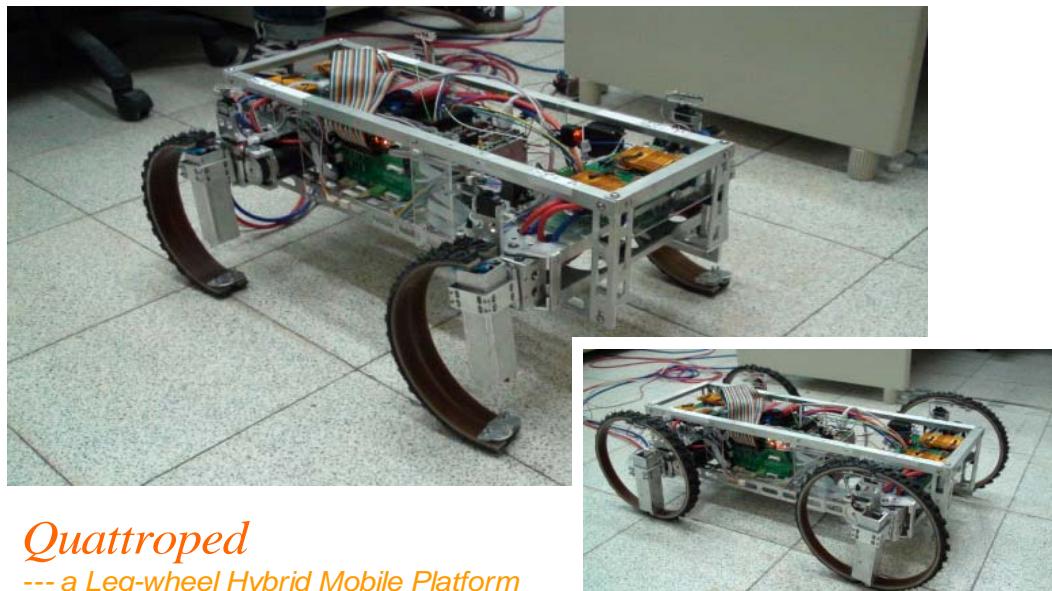


圖 12 擁有輪和腳模式的複合平台 Quattroped

B. 機構特色

設計出來的機器人有四個主要驅動軸，輪模式為四輪驅動，腳模式為四足運動。為了達到切換的功能，最大的特色是「輪腳變形機構」，透過「輪腳變形機構」以及切換機制，讓運動平台可變形成四輪模式或是四腳模式。因為考慮到平台必須能在平地上自由行走，另外設計有「雙輪轉向機構」。

機器人的每個驅動軸具有兩個自由度，一個是以驅動軸為旋轉中心的旋轉自由度，另一個是變化輪腳末端點和驅動軸之間長度的徑向線性自由度。每一驅動軸使用兩顆馬達來達到雙自由度的功能，因此機器人共使用八顆驅動用DC直流馬達，我們並自製馬達控制電路以驅動馬達。我們以極座標作為描述運動的廣義座標，驅動桿轉動（Rotate）的自由度為 θ ，徑向線性（Translate）自由度的位移為 γ 。

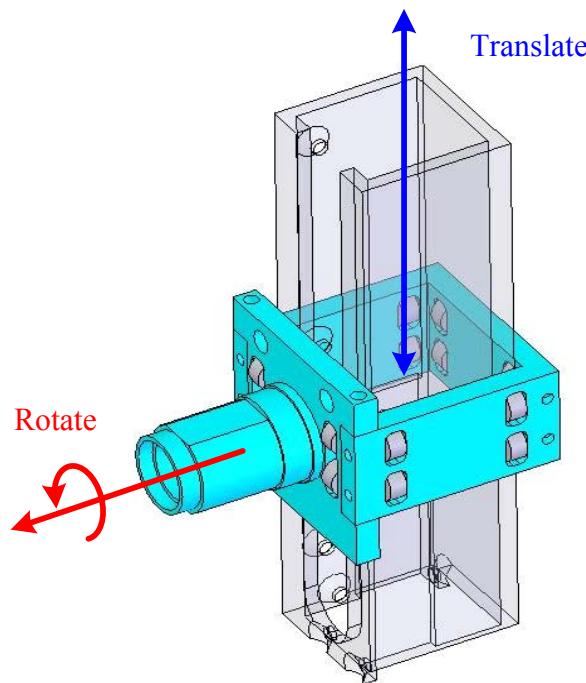


圖 13 Quattroped 每組驅動桿擁有兩個自由度：平移和旋轉

C. 輪腳變換機構

輪與腳的變形機構是針對圓形輪框與半圓形腳之間的變換而設計的，其中包含兩個半圓形組合的輪框，一個驅動桿，和一個DC直流馬達。我們在驅動桿內裝上一個小型的直流馬達，驅動小型直流馬達可以帶動半圓形腳：若使半圓輪框展開，即成為一個圓形輪框，反方向則是使半圓輪框重疊，成為半圓形腳，達到

輪與腳之間的切換。

在半圓形腳部分，我們選用兼具機械強度高與具有彈性的玻璃纖維為半圓形輪框的材料，由於半圓形輪框在四足模式時，其強度需能負荷平台的重量，且機器人在行進過程中，當與地面接觸時，腳部的衝擊會直接傳達給馬達，所以也需要有緩衝的設計，因此讓半圓形腳具有彈性，不但可以當作減震的緩衝設計，還可利用其具有的彈性位能當作被動儲能的裝置，以改善馬達能量密度的不足，讓機器人具有更豐富的動態行為，而玻璃纖維正好符合以上的特點。

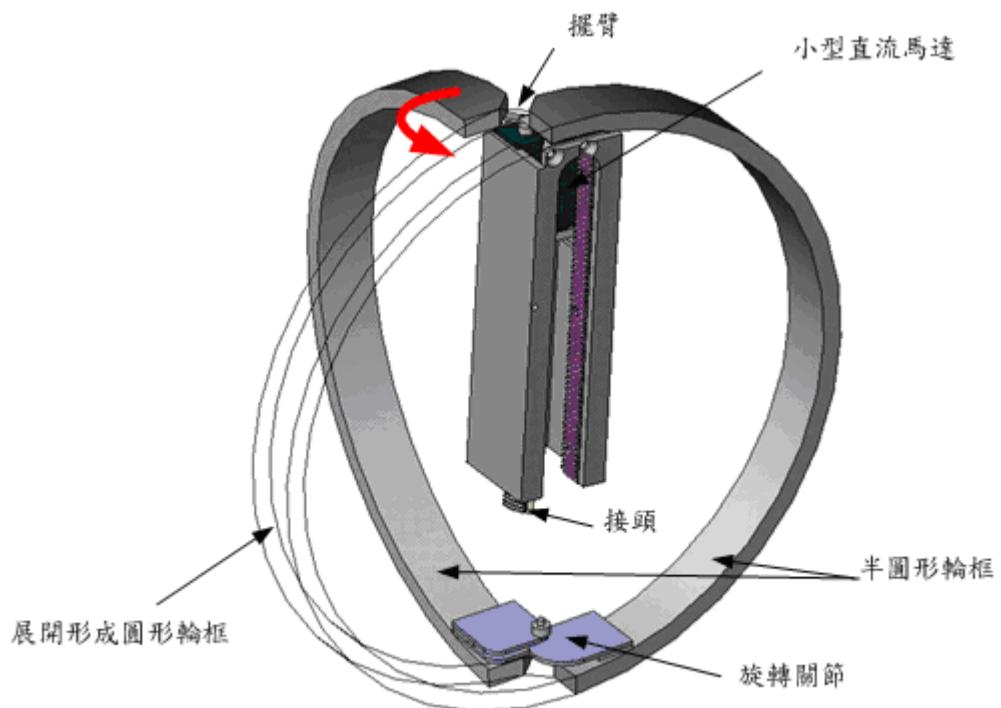


圖 14 輪腳變換機構

D. 切換裝置

在輪腳變換機制裡需要提供電源給小型直流馬達才能發揮功用，但由於機器人的腳具有雙自由度，若是使用電線做連接的話，在運動的期間很容易因為電線的纏繞使馬達無法動彈，更有短路的危險，於是我們設計了一個電源切換裝置：將供電線路安裝在伺服機上，透過接觸式開關來傳遞電源，並設計一組接頭，一

個裝置於身體上，另一個裝在驅動桿之末端，當需要切換時，在使兩者碰觸，當要做輪腳變換時，透過伺服機的轉動，使電傳到腳的驅動馬達上，換完型態後再將電極收回，非常方便，為伺服機傳動接頭。至於可以作輪腳變換的位置，需要整隻腳在切換過程中不會碰觸地面，使其不受地面的摩差力影響，才能輕易的完成切換，故伺服機的位置需要跟著腳的長度作調整才能讓腳在切換位置不碰觸地面。

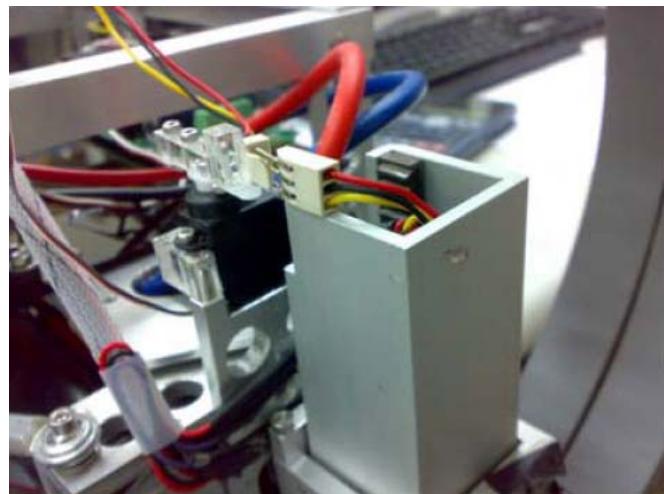


圖 15 切換裝置

E. 轉向機構

轉向驅動方式是透過四連桿機構，由高扭力 RC 伺服馬達來驅動。四連桿機構以擺臂作為輸入桿，連接桿分別與擺臂和馬達座以球關節連結，馬達座上與連接桿相連的位置到轉向關節的位置作為輸出桿，擺臂旋轉軸與轉向關節的距離為固定桿，如圖所示，為轉向的機構。

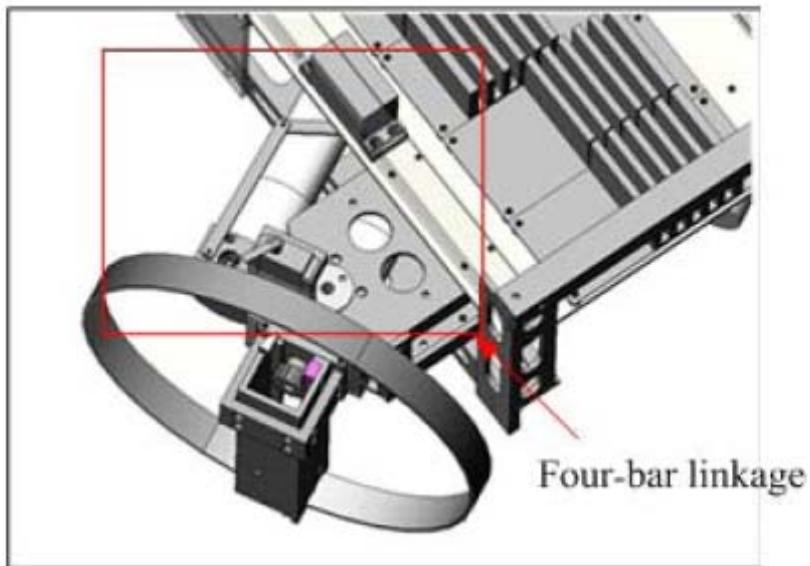


圖 16 轉向機構

2.2 馬達與馬達驅動電路

我們挑選型號為 Maxon RE 30 60W 268214 之直流馬達（圖 17），並使用馬達編碼器（Encoder）做為馬達位置的回授，馬達編碼器的主要功能是量測馬達轉的角度，一般常見的編碼器可分為光學式以及磁式兩種，在此使用型號 Maxon Encoder MR, Type L, 500CPT 磁式馬達編碼器量測馬達輸出的狀態，並經由 Line Receiver 晶片，型號為 TEXAS INSTRUMENT MC3486D，將馬達編碼器的訊號整理並簡化，使原本編碼器的輸出的 4 種相位(A, A,B,B)，簡化成 2 種相位(A,B)，減少 DI 訊號的使用通道。

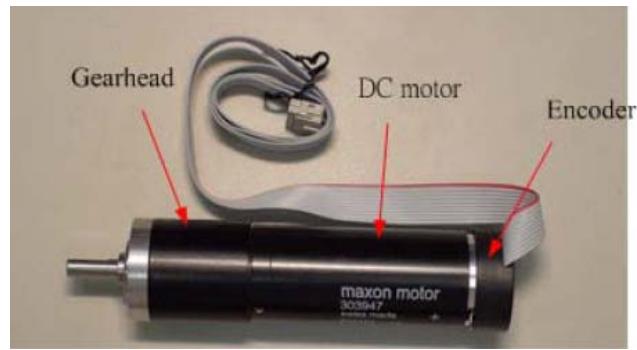


圖 17 直流有刷馬達 Maxon RE30 60W

在馬達驅動電路的部份是選用 APEX SA60 晶片，最大可以達到 10A 的連續輸出，如圖 18 所示。本論文使用的是類比輸入模式，控制電壓為 4V~8V，並且以 6V 為中立點，可線性放大輸出端的電壓。



圖 18 馬達驅動電路晶片 APEX SA60

其線性關係為：輸入電壓 $4V \rightarrow 6V \rightarrow 8V$ 則輸出放大電壓(-供應電壓) $\rightarrow 0V \rightarrow (+$ 供應電壓)，驅動範圍與供應電壓有關。以本論文的例子來說，使用的電壓為 24V，當輸入的類比訊號為為 8V 時，輸出馬達的電壓將會為供應最大的 24V。

2.3 嵌入式控制系統介紹

National Instruments CompactRIO(cRIO-9014)嵌入式即時控制系統(Real-time embedded control system)，其具備控制及擷取系統，以可重設組態 I/O(RIO) FPGA (Field-Programmable Gate Arrays) 技術，具有極高的效能及自訂功能彈性。其結合一顆即時處理器及可重設組態 FPGA，用於穩定的獨立嵌入式或分散式應用，

並具備內建訊號處理、可熱插拔的 I/O 模組，可以直接連接至感測器及致動器。並使用 LabVIEW 圖形化程式設計工具進行開發，屬於較高階的程式語言，在撰寫程式時較簡易，以達到快速開發的目的。如圖 19 所示，cRIO-9014 平台主要包含三個部份：

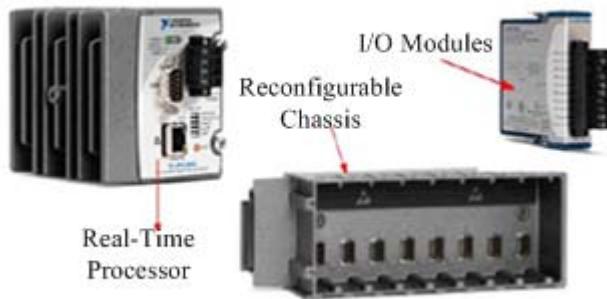


圖 19 CompactRIO 主要部份

(1) 即時處理器

CompactRIO-9014 嵌入式系統採用 400 MHz Freescale MPC5200 處理器，可以穩定地執行 Real-Time(RT)應用程式，提供 1KHz 迴圈運算速度(loop rate)與可應用於即時控制、分析、資料記錄及通訊。控制器亦具備一個 10/100 Mb/s 乙太網路連接埠，可以透過網路進行程式化通訊。其電源輸入範圍為 11V 至 30 V 直流電壓。

(2) 可重設組態的機箱

可重設組態機箱是 NI CompactRIO 嵌入式系統的中心，具備 RIO FPGA 核心，提供控制邏輯、輸入／輸出、計時、觸發，以及同步化設計，最快可以達到 40MHz 的迴圈運算速度。LabVIEW 內建資料轉換機制使 RIO FPGA 晶片可以直接存取各 I/O 模組，以便在計時、觸發及同步化時獲得精確的控制。cRIO-9104 在此最高可容許 8 個熱插拔的 I/O 模組。

(3) I/O 模組

熱插拔的 I/O 模組，可根據需求以及擷取訊號的類別選擇合適的 I/O 模組，使得應用上更為彈性。這裡我們使五個 I/O 模組，分別為一組 NI 9205 類比輸入模組，規格為 32 個通道，輸入電壓範圍 ± 200 mV 到 ± 10 V, 16-Bit 的類比輸入。一個 NI9624 類比輸出模組，規格為 16 個通道，輸出電壓 ± 10 V, 16-Bit 類比電壓輸出。一個 NI9403 數位 TTL 輸入/輸出模組，規格為 32 個通道，可輸入/輸出 TTL 數位訊號，輸入電壓範圍 0.25V to 5.25V，輸入電壓高準位(High) V_{IH} 最小為 2.2V，輸入電壓低準位(Low) V_{IL} 最大為 0.8V。輸出電壓高準位 V_{OH} 最大為 5.2 V_{max}，輸出電壓低準位 V_{OL} 最大為 0.1V，每個通道最大輸出電流為 2 mA，整個模組最高可輸出電流 64mA。兩個 NI9401 高速數位 TTL 輸入/輸出模組，可提供較高速的讀取速度，用於截取馬達編碼器的訊號。其規格為 8 個通道，可輸入/輸出 TTL 數位訊號，八通道同時使用時，輸入切換頻率(signal switching frequency)最高可達 9 MHz，輸出則為 5MHz。



2.4 機電架構

目前對運動平台規劃可由遠端操作者 (Remote operator) 控制，以無線傳輸模組 (Wireless module) 進行其與運動平台之間指令傳遞及訊息交流，此無線傳輸模組使用 ASUS 330g(圖 20)無線 AP(Access Point)，可作為一個無線網卡，其最大優點可直接透過網路線與嵌入式控制系統(cRIO-9401)溝通，不須要配合其他作業系統如 Windows、Mac 等，使遠端操作者可經由無線路由器 (Wireless Router) 偵測到 cRIO-9401，並與其進行指令傳遞及訊息交流。



圖 20 無線模組 ASUS 330g

運動平台(platform)則配置有嵌入式即時控制系統(cRIO-9401)，可進行主控制系統迴圈運算，其指令及訊號經由數位類比 IO 模組(digital and analog input/output module)，包含兩組 NI9401(8 channel)、一組 NI9403(32 channel)數位輸出/輸入模組，以及 NI9405 類比輸入模組(32 channel)、NI9264 類比輸出模組(8channel)。為簡化線路以及拆裝檢測容易，使用實驗室自製的訊號分配版(signal processing board)，分別為 AI/AO 類比訊號分配版(AI/AO board)以及數位訊號分配版(DI/DO board)，與運動平台上之致動器(Actuator module)以及感測器(sensor module)，進行訊號交流。

在致動器模組部份分為直流馬達系統(DC motor)與 RC 伺服機(RC servo)系統。直流馬達系統總共使用兩組驅動電路模組(Motor Amplifier)，而一組驅動電路模組有四個驅動晶片，需輸入四組類比訊號(AO)分別控制四組馬達的放大功率，一個數位訊號(DO)同時控制四個晶片的開關，且配置有四個溫度感測器(Temperature Sensor)，回受類比訊號(AO)給系統，以監測驅動晶片是否過熱。平台身體上則裝有電流感測器、測量馬達電壓之分壓電路、主程式迴圈指示燈、Hall Effect Sensor LED 指示燈等，透過分配版與 I/O 模組溝通。

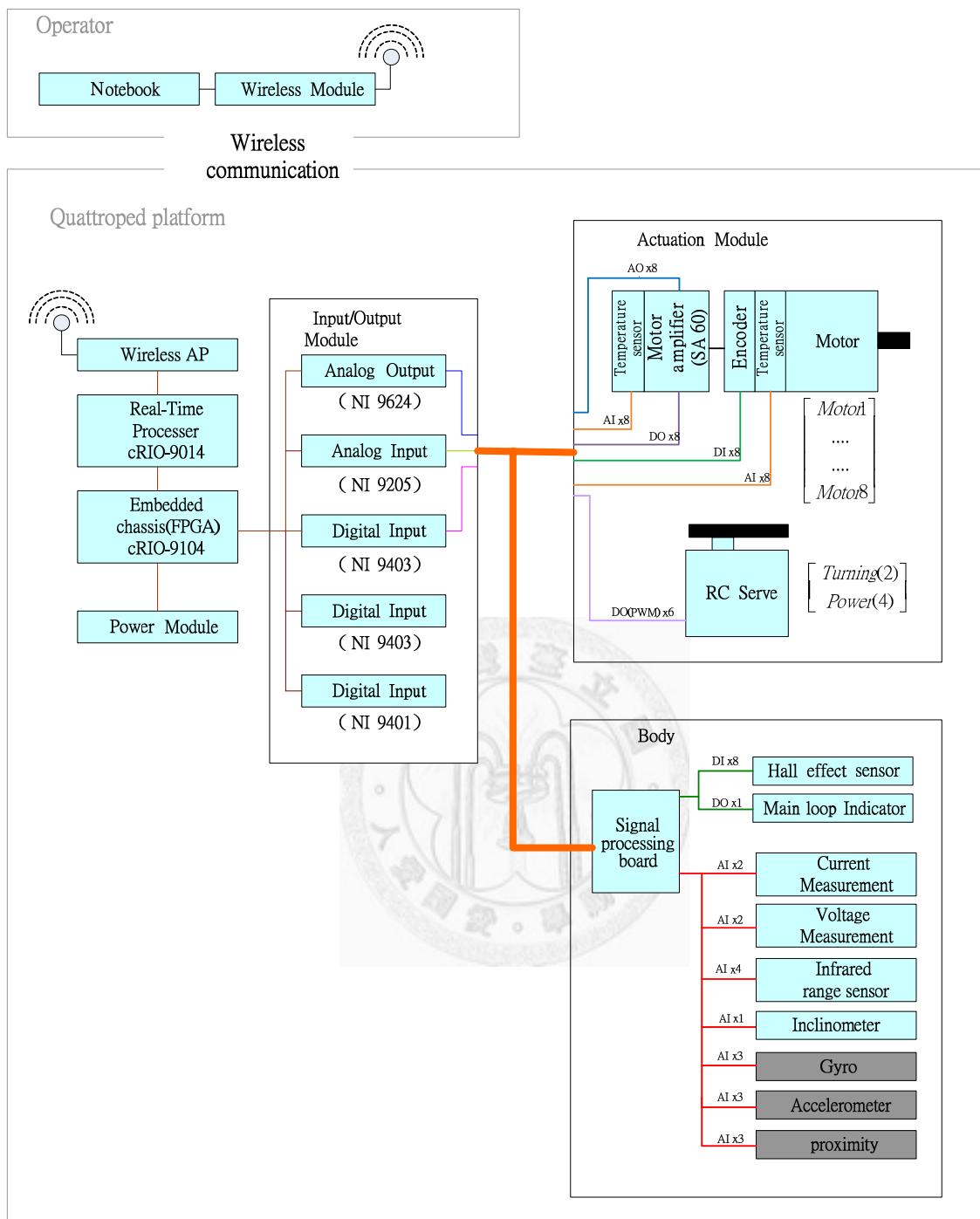


圖 21 複合式平台系統機電架構

第三章 輪腳複合式機器人控制系統 與實驗

3.1 座標制定

目前制訂座標的方式是以站起來的姿勢為基準，在旋轉方面，以垂直撐在地上的角度為零，一圈 360 度分成正 180 度和負 180 度，順時針為正，逆時針為負；在伸長的方面則是以校正完後的位置為主，以腳可使機器人抬高方向為例，伸長定為正向，縮短定為負。

在 3D 空間座標方面，我們以機器人的站姿為標準，從右側看向機器人，將機器人正前方的方向定為 Y 軸，右側為 X 軸，上方則為 Z 軸，方便以後行為的撰寫。

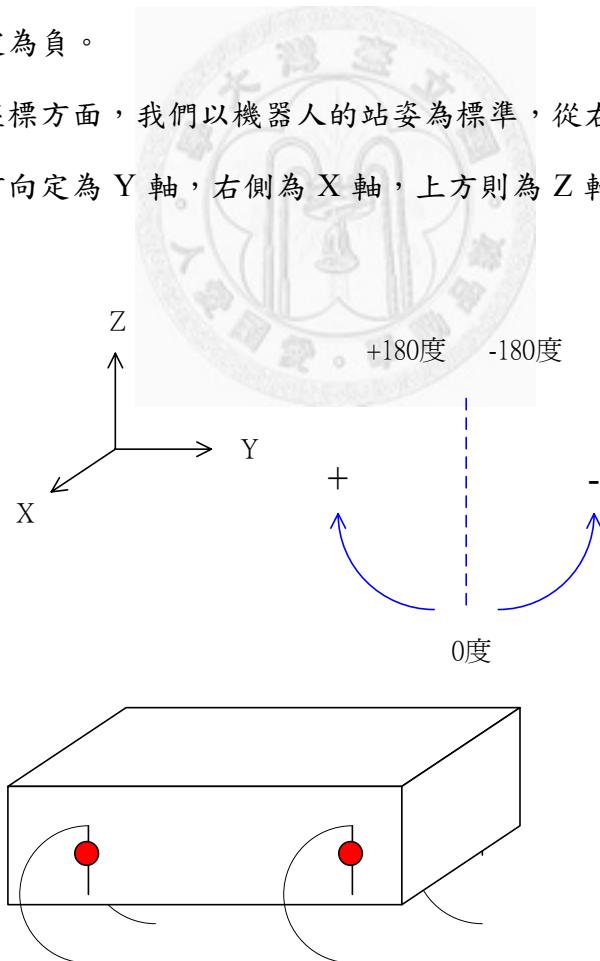


圖 22 輪腳複合式機器人座標制定

3.2 馬達控制

在馬達控制方面，使用馬達編碼器來感測馬達的位置，馬達編碼器讀回來的訊號分為 A、B 和 I 項，我們使用的編碼器在馬達轉一圈將會有 500 個脈衝訊號，A 項有 500 個，B 項也有 500 個，利用相位差來辨識正轉或是反轉，I 項則是每一圈會有一次的脈衝訊號，為了量測圈數才會使用到，目前為了減少數位訊號的使用量，暫時沒有將 I 項考慮進來。在程式方面的寫法是每次的變化（上下緣）都會讀到一次值，故一個脈衝訊號會讀到兩次，因為又有 A 項和 B 項，故讀到一圈的值將會有 $500*2*2$ 倍 = 2000，馬達轉一圈在程式裡將會得到 2000。在使用的馬達上面又有加裝上齒輪箱使扭力提高，我們選用 $529/16$ 的齒輪箱，所以實際上最後的效果將會是馬達轉一圈，讀到的 count 數為 $2000*529/16 = 66125$ 。

控制系統都需要有回授 (Feedback) 控制器來達成閉迴路 (Close loop) 控制，以補償開路控制造成的誤差。一般來講，最通用的控制器為 PID 控制器，分為比例增益、積分增益、微分增益三個部分，如圖 23 所示，輸入指令 (Setpoint) 會和實際控制的回授做比較，經過 PID 控制器處理後輸出。在 PID 的各個控制參數方面，比例控制器參數 K_p 能加速系統的響應，但會增加最大超越量 (Overtshoot)；積分控制器參數 K_i 能改善穩態響應，但是使暫態響應變差；相對的微分控制器參數 K_d 可以改善暫態響應，使最大超越量減少，卻會使穩態響應變差。PID 控制器可寫成

$$PID = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int de(t) dt$$

或是

$$PID = K_c \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{T_i} \int de(t) dt \right)$$

的形式。

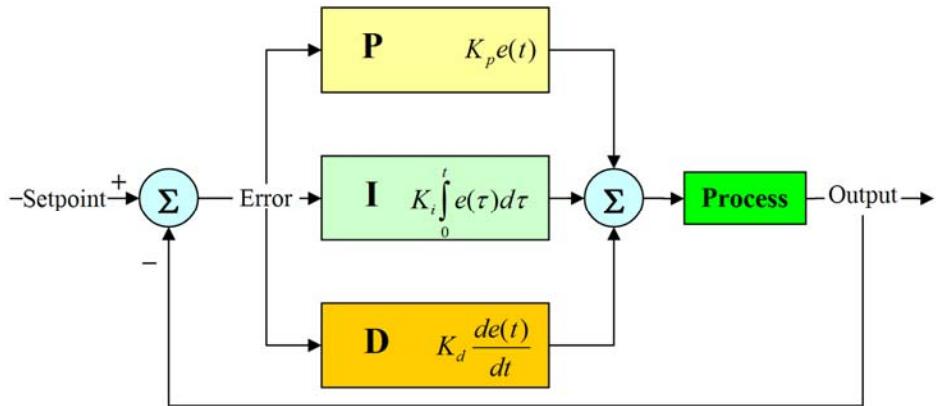


圖 23 PID 方塊流程圖[32]

本論文將 PID 控制器寫在控制系統端，搭配上馬達編碼器 (Encoder) 的回授值來達成最接近理想的馬達控制。目前本論文所做的馬達控制是為位置控制，也就是 Tracking control，給定一理想的路徑給馬達，之後依據回授的編碼器值來瞭解當下馬達所轉的位置，再將編碼器的值傳入 PID 控制器後輸出當下最理想的控制訊號，這樣一來能夠控制馬達依循一開始給定的理想路徑做出反應（圖 24）。

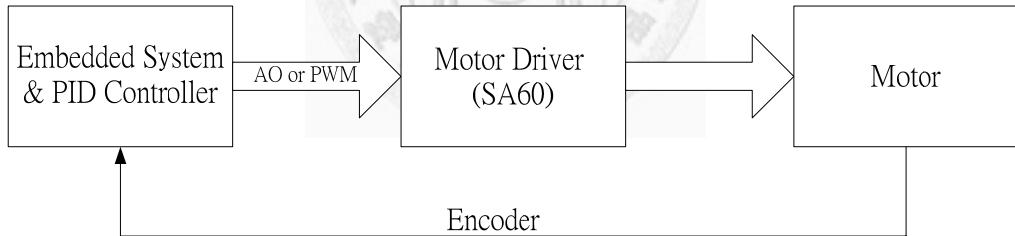


圖 24 馬達閉回路回授示意圖

為了達到更好的控制效果，除了用 PID 來控制馬達的位置，還必須要做馬達速度的回授控制，如圖 25 所示基本的馬達模型，馬達內部將會包含一個電阻 (R)，一個電感 (L) 還有馬達因為轉速而造成的反電動式 ($V_{emf} = K_b \dot{\theta}$)。我們主要的目的就是要補償馬達所造成的反電動式，使輸入的電壓可以直接和扭力成正比。

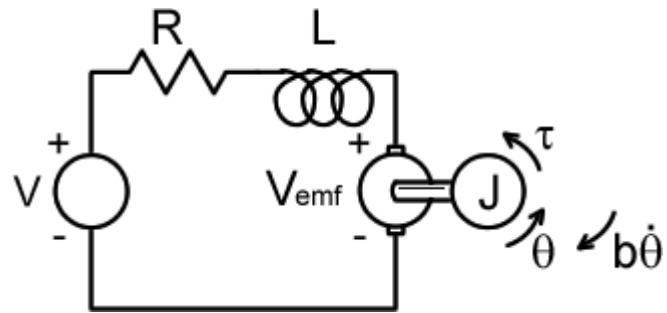


圖 25 馬達模型[33]

由克希荷夫電壓定律，整個迴圈

$$v_s = Ri + L \frac{di}{dt} + K_b \dot{\theta} \quad (\text{式 3-1})$$

原本設定的 PD 控制器為

$$v_s = K_p(\theta - \theta^*) + K_d(\dot{\theta} - \dot{\theta}^*) \quad (\text{式 3-2})$$

為了消除反電動式的項，將輸入電壓定為

$$v_s = K_p(\theta - \theta^*) + K_d(\dot{\theta} - \dot{\theta}^*) + K_b \dot{\theta} \quad (\text{式 3-3})$$

K_b 為馬達的參數，單位為 volt/rpm，數值同等於馬達速度常數的倒數，可由馬達的性質表查出。多了一個補償項後帶回原式

$$K_p(\theta - \theta^*) + K_d(\dot{\theta} - \dot{\theta}^*) + K_b \dot{\theta} = Ri + L \frac{di}{dt} + K_b \dot{\theta} \quad (\text{式 3-4})$$

由於馬達的電感通常很小，於是再忽略電感所造成的項，最後發現所控制的 PID 將會和電流成正比，

$$K_p(\theta - \theta^*) + K_d(\dot{\theta} - \dot{\theta}^*) = Ri \quad (\text{式 3-5})$$

而電流和扭力又是成正比的關係，故經過修正過後的控制器，所控制的電壓將可以直接相等於控制馬達的扭力。

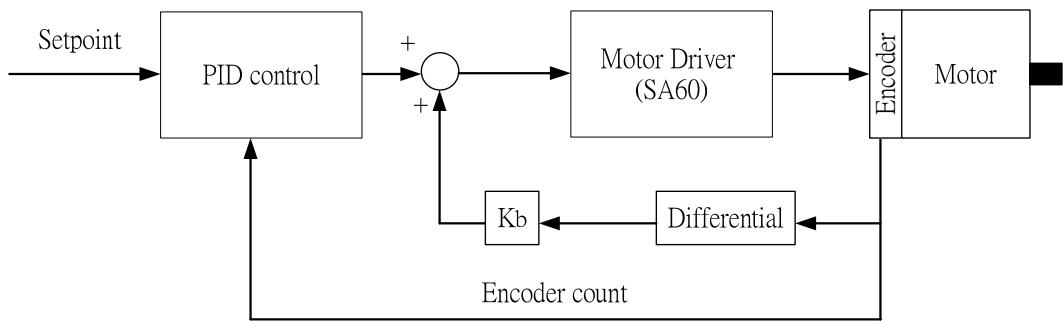


圖 26 實際使用的馬達控制方塊流程圖

3.3 系統架構

在系統架構方面，嵌入式系統又分為即時控制處理器（RT），嵌入式系統底盤（FPGA），和輸入輸出模組（I/O module）。我們使用的 FPGA 容量只有 2MB，雖然空間是最小的，但是速度最快，預設時脈為 40MHz，每一個機器運算的時間（tick）為 $1/40MHz = 25\text{ns}$ ，最重要的是 FPGA 以硬體取向為目的，所有的指令皆是靠邏輯閘的切換達成，故設定迴圈速度將會很準確，機器人所有核心功能將會在 FPGA 做處理；壞處則是每次修改過程式後皆需要做燒錄的動作才可以執行，燒錄的時間依程式複雜度大約為十分鐘到一個半小時之間；RT 的容量大約有 2GB，內建處理器，迴圈速度最高可以到達 1KHz，好處是和 FPGA 的溝通為即時處理控制，若資料量在處理器的允許範圍內，迴圈時間也能夠按照預設的執行，能夠和 FPGA 做重要資訊交換及調整參數，我們主要使用的程式將會在 RT 端做執行運算；輸入輸出模組則為嵌入式系統和外界溝通的管道，每種模組都有不同的功能，最多可以支援到八張模組，是所有的輸入輸出訊號間的橋樑。並使用無線傳輸模組讓電腦端和 CompactRIO 作溝通，在筆記型電腦上可以製作控制介面，發送需要執行的行為給嵌入式系統，電腦端在機器人運行時並不會做程式計算，只會做輸入訊號控制並讀取感測器的資料，需要的話也可將資料抓下

來做資料的分析。包含以上所述，整體架構將可如圖 27 所示

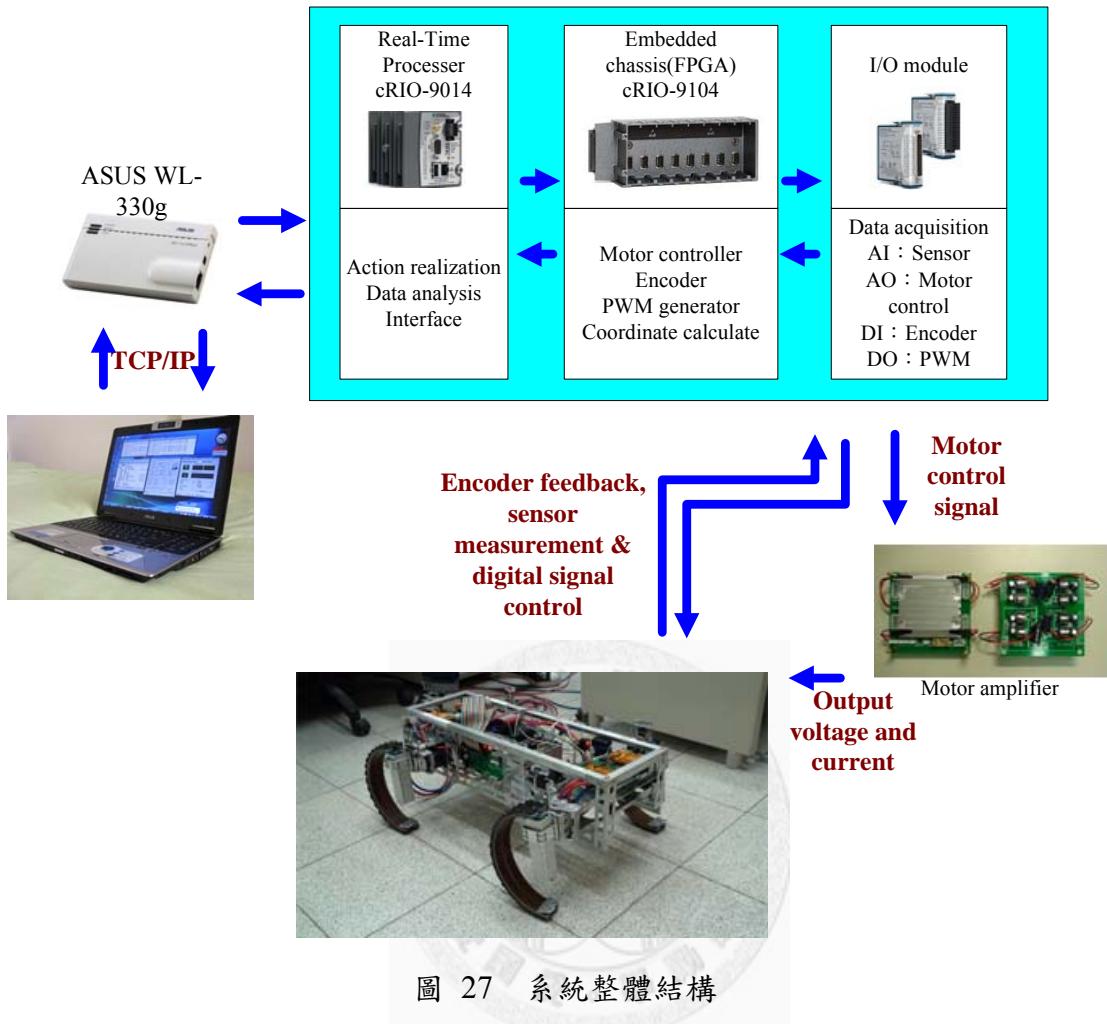


圖 27 系統整體結構

在迴圈速度方面，本論文使用各種的時脈來做不同的事情，主要是為了能夠達到功能的完整並且減少資源消耗。為了達到即時控制的效果，主迴圈在 RT 下以 1 KHz 進行，進行軌跡產生與後續高階控制器架設，但在讀取如溫度感測器的數據方面，由於感測器本身響應較慢，因此在 RT 下以另一個 10 Hz 的迴圈來讀值，減少系統資源的使用。馬達控制用 PID 回圈則是在 FPGA 下以 10 KHz 進行，較快的控制回圈能使軌跡追尋（Tracking）結果更為優化。馬達後端編碼器的讀值則以 10 MHz 最高速進行，以避免有漏讀造成控制上的誤差。

3.4 實際控制

A. 馬達控制

以輪腳複合式機器人來說，一圈等於 360 度，定校正完以後向上的角度為 180 度，順時針為正 180 度，逆時針為負 180 度，需要把馬達編碼器 (Encoder) 回授的資訊的訊號轉換成我們看的懂的角度座標，再將角度換到-180～+180 之間，轉換公式為： $(\theta + 180)/360$ 的餘數-180，將可以把角度轉換到-180～+180 之間。若是想要在交界點上移動，如從-180 度的地方轉到+180 度，由於是不連續的角度軌跡，我們使用的方法是：若新位置的差值大於 180 度，則把差值減掉 360，若新位置的差值小餘-180 度，則把差值加上 360，利用計算目的地和目前狀態差值的方式來做角度運算，如此一來將可以使交界點變成連續的狀態，不會有突然跳一圈的問題。

最後為了可以藉由讀值知道目前腳的狀態，再把每次編碼器讀回的數值再轉換為實際物理的值，物理值將會使用我們所定的座標下去轉換。相對的，在控制馬達方面，還是需要使用編碼器的單位去控制馬達，所以本論文也做了互相溝通轉換的程式。由於每一個時間四隻腳皆需要給予命令並且將編碼器的值換算回物理值，為了不在 RT 端造成很大的負擔，本論文把轉換的程式寫在 FPGA 端，由於 FPGA 是直接使用硬體的方式去達到程式所需要的邏輯，所以不會有時序上的問題，穩定性也較高，只要程式不寫的太大，將可以解決效能不足的問題。值得一提的是由於 FPGA 不支援小數點的運算，在設計的時候本論文把角度的單位定為 0.1 度，長度的值單位定為 10^{-3} cm，使每次運算出來的值能以整數表示，且不會有小數點的問題。

B. 差速驅動

在此移動與轉動的雙自由度傳動系統中，最為特別的是差速驅動(Differential

drive)，如圖 28 所示

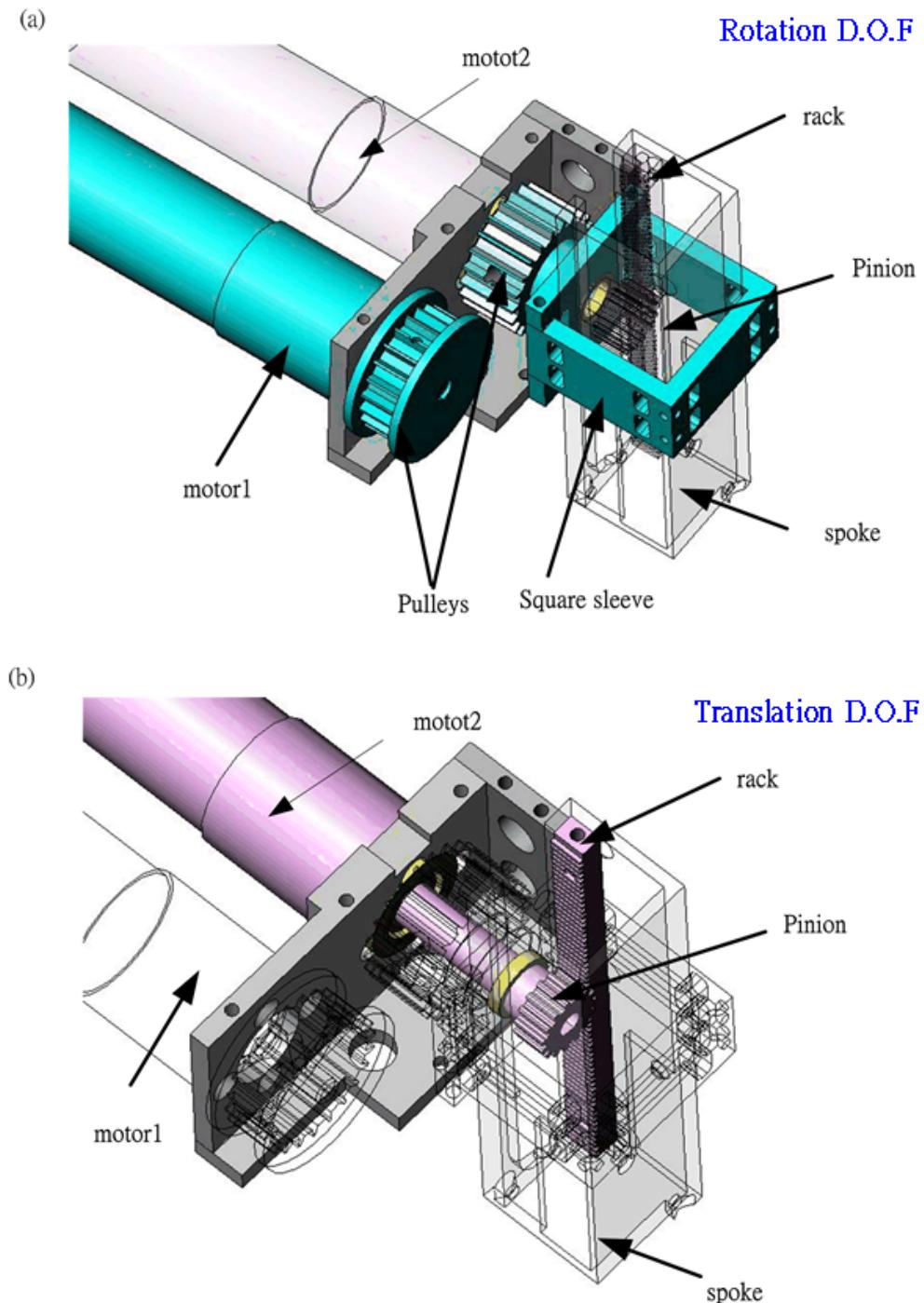


圖 28 雙自由度機構傳動系統：(a)旋轉自由度機構 (b)伸長自由度機構

在方型套筒與驅動桿之間相對移動的位移我們定義為 γ ，帶動驅動桿轉動的角度定義為 θ ，馬達 1 的轉動角度定義為 ϕ_1 ，馬達 2 轉動角度定義為 ϕ_2 ，齒輪的截圓

半徑定義為 P 。在移動自由度的傳動系統中，齒條與小齒輪的切線速度需一樣，又驅動桿與小齒輪可繞著同一旋轉軸轉動，若使驅動桿上的齒條與小齒輪相對轉動，會影響小齒輪與齒條相對位移，使 γ 改變。又驅動桿的轉動由馬達 1 驅動，小齒輪的轉動由馬達 2 驅動，因此，雙自由度傳動系統中，驅動桿的運動方程式可推導為：

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -p & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} \quad (\text{式 3-6})$$

從相對移動的運動方程式： $\dot{\gamma} = p * (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2)$ ，馬達 1 與馬達 2 的轉速差決定相對移動的速度，因此稱為差速驅動(Differential drive)。

若希望腳以固定的長度旋轉，由以上的運動方程式可知。當 $\dot{\phi}_1 = \dot{\phi}_2$ ， $\dot{\gamma} = p * (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) = 0$ ，且 $\dot{\theta} = \dot{\phi}_1$ ，腳將會以馬達 1 的角速度旋轉，所以若是想要固定腳長做旋轉，只需要馬達 2 轉速跟馬達 1 一樣即可使腳長固定，馬達 1 的轉速將可以決定腳旋轉的速度。反過來說，若希望腳只有伸長而沒有旋轉的運動，我們需要使 $\dot{\theta} = 0$ ，故 $\dot{\phi}_1 = 0$ ，且 $\dot{\gamma} = p * \dot{\phi}_2$ ，伸長的速度將會等於馬達 2 的轉速乘上齒輪的截圓半徑。

上面的推導為控制馬達的轉速改變實際腳的變化，相對的，在控制時希望給予物理性質而得到兩個馬達的轉速，故我們將上面的驅動方程式取反矩陣後可得：

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{P} \begin{bmatrix} P & 0 \\ P & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (\text{式 3-7})$$

我們可以輸入需要到達的角度和腳長，換算成轉速後將直接提供給馬達做為訊號輸入。

綜合以上來說，只需要給出要到達的角度和長度位置，程式將會自動將馬達轉到相對應的位置，此種方法同等於機器人學裡的正運動學和逆運動學 (Forward and inverse kinematics) 的應用，且程式在執行的過程中，將會自動反算出機器人腳目前所在的位置，非常方便 (圖 29)。以爬樓梯的步態來說，設計步態者將會

給出每一個時間的角度和長度，配合時間當作輸入訊號，馬達將會自動移動到需要旋轉的角度和該伸縮的長度，即可讓機器人按照需要的爬樓梯步態行走。

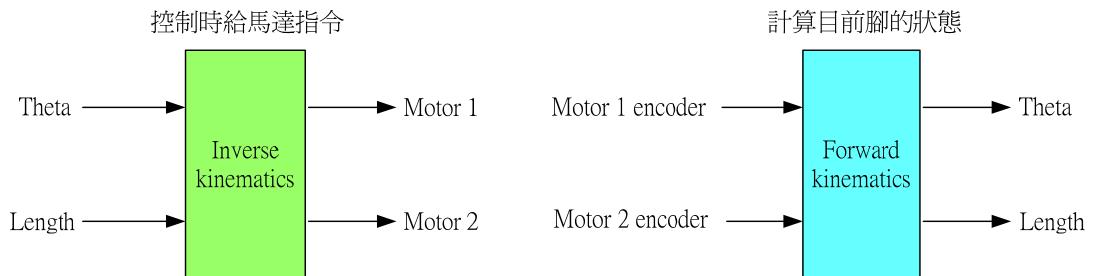


圖 29 機器人腳位置換算

另外，在即時控制處理器（RT）端方面，在給予腳的軌跡時需要做圓滑化的動作，才能馬達使平順得轉動，為了讓撰寫程式更佳方便，本論文也設計了幾個副程式，只需要給出目標點的位置，程式將會自動將軌跡以每一毫秒 0.1 度的方式讓馬達轉到目標位置，這樣子的方式可使腳的運動更為連續且平順，且為了要使四隻腳的運動速度一樣快，程式必須寫在相同的迴圈下，計算時才不會有時間差的問題。程式流程如下：先讀取馬達編碼器的起始位置 → 檢查每隻腳是否到達目標 → 算出需要正轉還是反轉，讓馬達慢慢往上追值 → 當所有的腳都到達定位後結束程式。程式流程圖如圖所示。

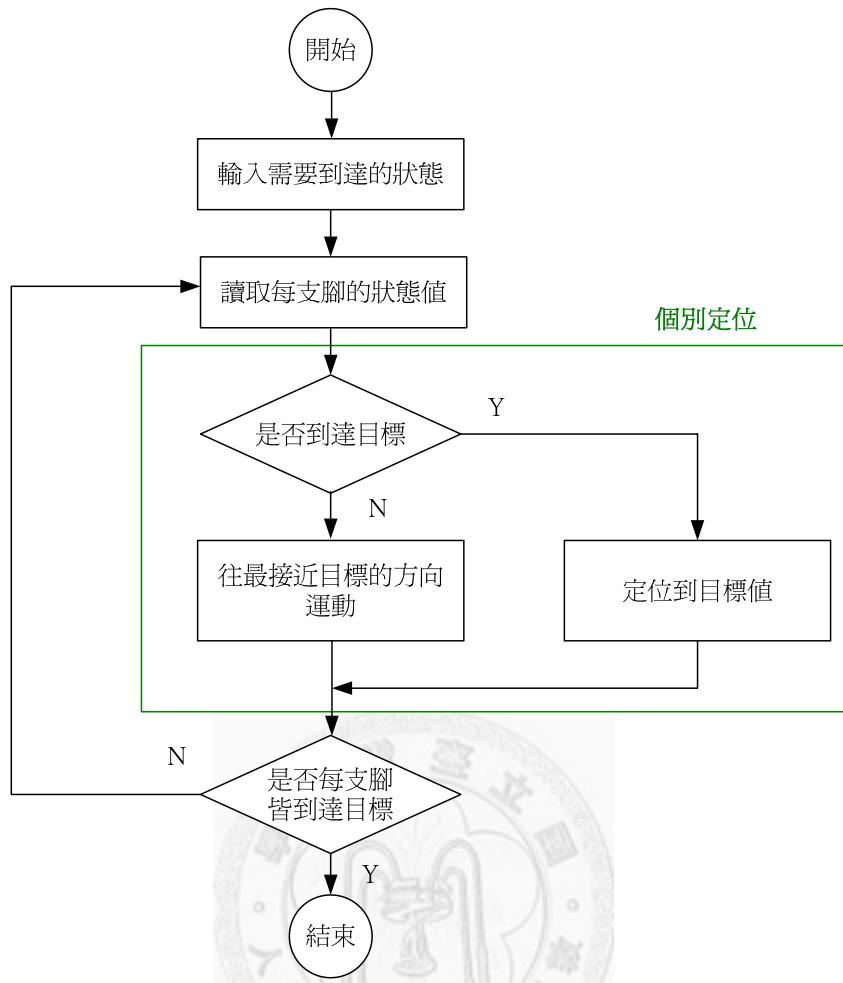


圖 30 輪腳複合式機器人定位程式流程

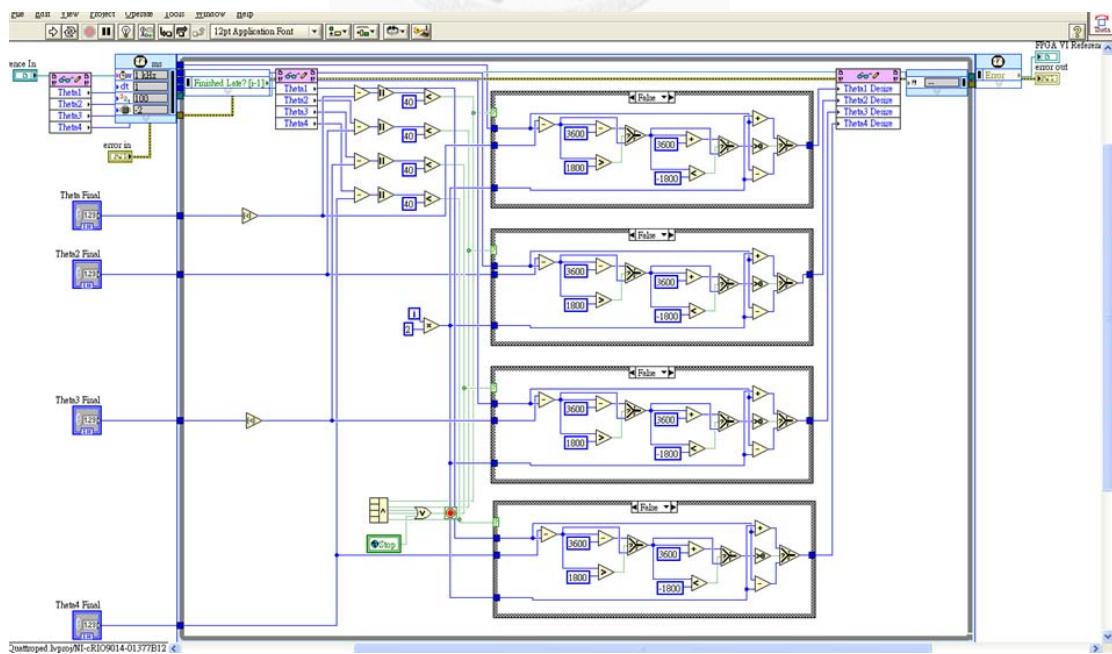


圖 31 輪腳複合式機器人定位 labVIEW 程式

3.5 目前具備機制

在機制的考量方面，機器人必須是要能夠到處移動，並且具備輪和腳兩種模式的切換，在行為接續的部份必須是要連續且平順。目前機器人完成了基本的運動行為規劃，包括一開始的校正(Calibration mode)，還有輪腳兩種模式間的切換，而在輪(Wheel)的模式和腳(Leg)的模式下都設計了轉換起立、運動和坐下等的狀態，且每種狀態都可以自由的切換成另一種狀態或是接回校正模式，如圖 32 所示。各模式均以模組化的方式建構在 RT 主迴圈下，目前正在持續開發出各式不同的運動行為，如爬樓梯、跑、跳、越障等行為，後續均可以直接附加在主迴圈內。

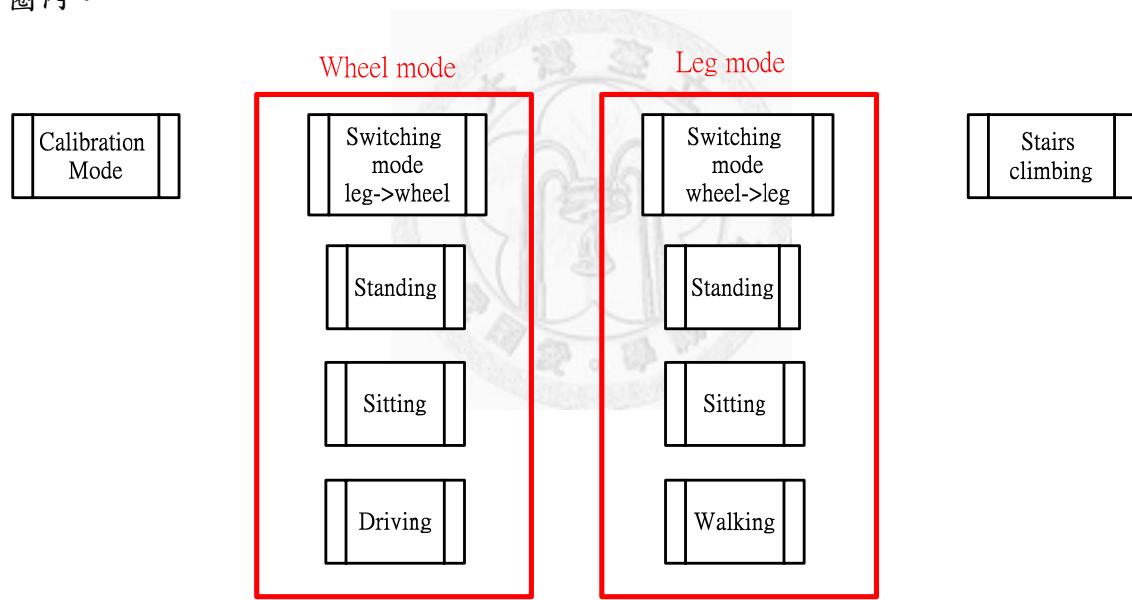


圖 32 目前輪腳複合式機器人所具備模式

A. 校正

校正(Calibration)的意義在於：因為透過馬達編碼器只能感測腳的相對位移，無法得知其絕對的位置，由於在剛開始不知道所有腳的位置狀態，所以我們必須先將腳定位到一個已知的位置，當定位結束知道位置後，之後所有的行為控制就

是以此位置為基準所做的改變，所以校正需要非常準確，才不會對之後的行為造成影響。

假設初始是無電壓的狀態，機器人應該是以不受力的姿勢坐在地上，我們使用兩組磁力感測器（Hall effect sensor）來定位，如圖所示。

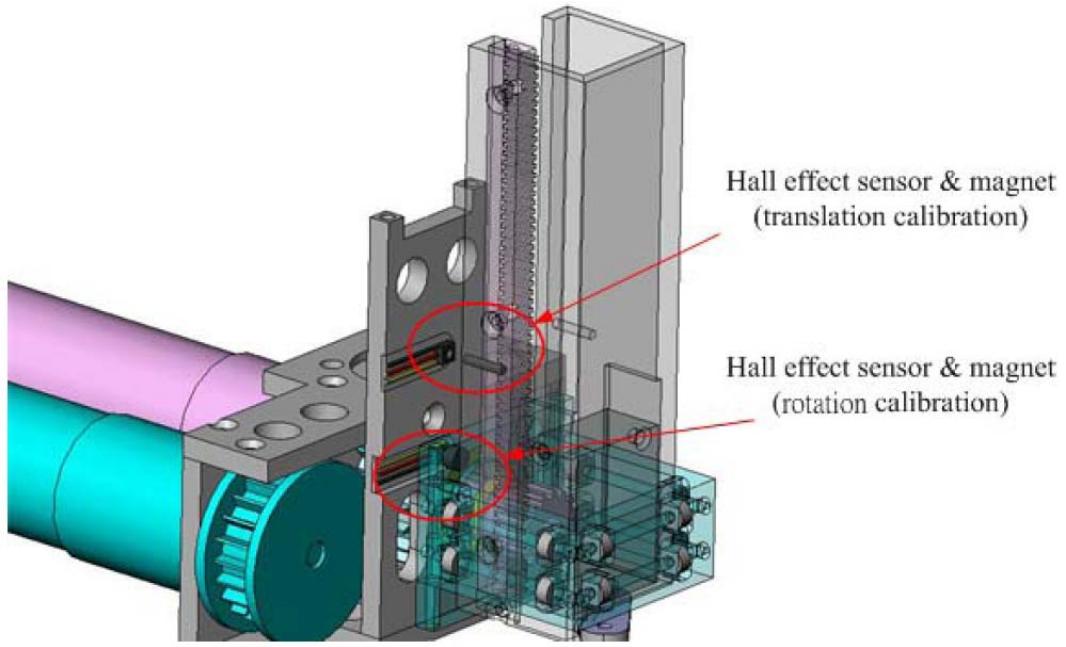


圖 33 磁力感測器所放置的位置

我們在機器人腳上裝磁鐵，在身體上裝磁力感測器，當腳轉到一定位置時磁力感測器將會傳回 5V 訊號，藉由讀取此訊號將可以達成腳位置的校正。在旋轉的自由度方面，本論文以腳轉到垂直的位置做為基準，由於磁力感測器能讀到磁鐵的位置為一個範圍，故讀到訊號時並非是在中間的位置，還需要做另一次校正。校正主要的流程是：當腳轉到接近垂直的時候，會因為磁鐵的感應傳回 5 伏特的電壓，利用 DIO 卡來擷取這個訊號，當感應到訊號時，再讓腳轉一個角度來修正到垂直的位置，方便第二個自由度的定位，第二個自由度只需要第一個角度定位到垂直的位置，再直直向上伸長，使磁力感測器偵測到腳上的磁鐵就定位完成了。

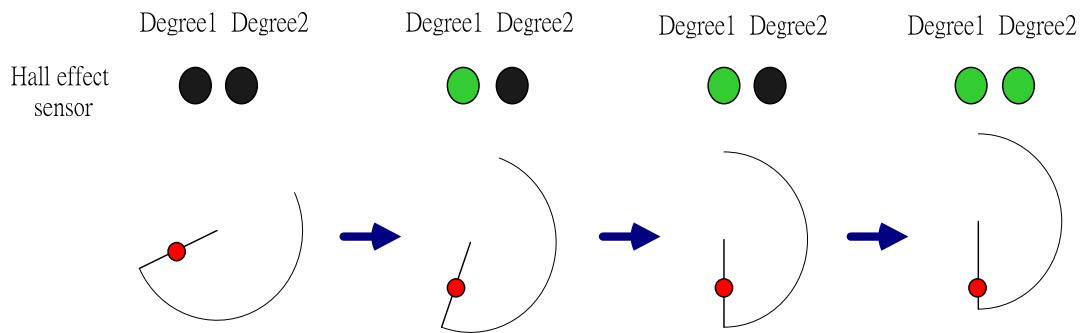


圖 34 校正示意圖

在定位時，有可能會造成誤差的地方在於磁力感測器感應到的位置不同，之後進行修正定位的時候也有可能發生些微誤差，造成第二個自由度定位不準。現在的程式寫法是可以四隻腳一起進行定位或是分別對四隻腳進行定位，當發現無法正確定位的時候可以對個別的腳進行定位並修正參數，好處是不需要重來一遍，可以一直定位到成功為止。

B. 輪腳變換

伺服機使用的是脈衝寬度調變(Pulse Width Modulation, PWM)訊號控制，伺服機內建有位置調控的電路，當輸入的的週期性脈衝訊號 (Pulse train or duty cycle) 輸入到伺服機上，會因為不同的脈衝寬度決定伺服機的角度位置，其高電壓的平均時間(脈衝寬度)通常介於 1ms ~ 2ms 之間，週期時間為 20ms，透過控制 duty cycle 即可達到所需要控制的位置，示意圖如圖 36 所示。我們使用 Hitec HS-85MG 的微型伺服機。



圖 35 微型伺服機 Hitec HS-85MG[34]

由於每顆伺服機安裝時角度不一樣，且每顆伺服機之間都有些為的差異，在給脈衝寬度調變訊號的時候都要依實際的角度下去調整。

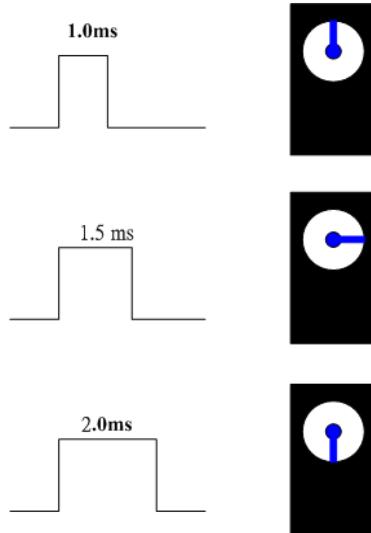


圖 36 輸入訊號和伺服機的轉向關係

程式的寫法是利用 DIO 輸出訊號調整方波的週期和高準位的時間，即可達到 PWM 的效果。之前在腳上使用的是伺服機，雖然伺服機操控方便且準確，但是若是在不給電的情況下，施加外力將可使伺服機轉動，當腳在運作時，就是處於沒有供電的狀態，容易因為受到外力而使腳變形，所以現在改為直流式的小馬達，加裝的齒輪箱擁有很多的減速比，外力無法輕易的驅動，且供給的電壓只需要 5 伏特，扭力也非常強，由於是直流馬達，故只需要 5 伏特和地兩隻腳位供給電壓。當我們使用調整 PWM 的方法將伺服機轉動，伺服機將會帶動切換裝置，使電傳到直流馬達上，直流馬達將進一步帶動半圓形腳的開合，現在的設計是調整腳的高度來讓接頭碰觸的位置不同，如此將可讓小型直流馬達正轉或是反轉，達到輪變腳或是腳變輪的功能。

C. 腳步步態

在四足的模式裡，我們先做了一個初步的步態構想：模仿四足哺乳類在慢速走路時的動作，規劃一個簡易的步態來測試四足的功能。此步態為：每次動對角

線的兩隻腳，每次換腳時將會有兩隻腳在空中，兩隻腳在地面，交錯進行運動步態，為了避免機器人只有兩個支撐點而傾倒的狀況，此步態頻率必須夠快，且為了簡單的實現，本論文使用最基本的三角波和正弦波來達到如上的功能，如圖 37 所示。使用三角波在旋轉的馬達上是因為希望在行走的時候馬達是以等速運動，帶動身體以等速的方式前進，使用半個週期的正弦波在伸長的馬達上則是希望在空中時腳運動平順，在地面時則純粹以腳半徑形成的圓弧做抬升的動作，以利機器人更平順的前進。因為此種步態沒有任何一個時態是所有馬達角度皆為零的，表示無法從直接站立的姿勢開始，故需要先踏第一步，使機器人的步態之後可以接續原本的構想前進，停止時也是如此，需要先做回正的動作才可以使機器人以垂直的姿勢站立。機器人前進的速度則是靠三角波和正弦波的頻率來決定，頻率越高機器人將會動越快。

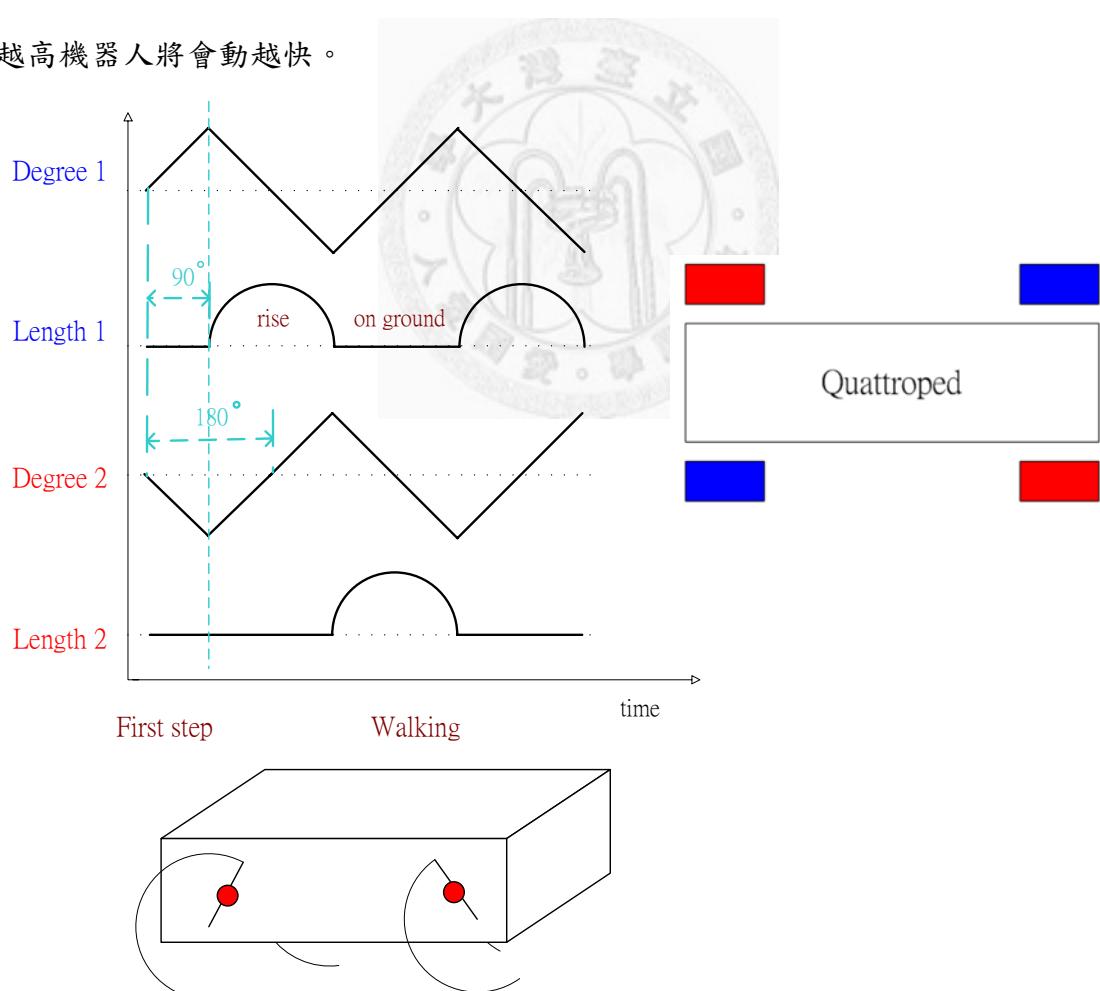


圖 37 行走腳步步態

D. 輪模式

在平面地形上，運動平台會進入「四輪模式」，以四輪驅動的方式前進，如圖 38 所示，

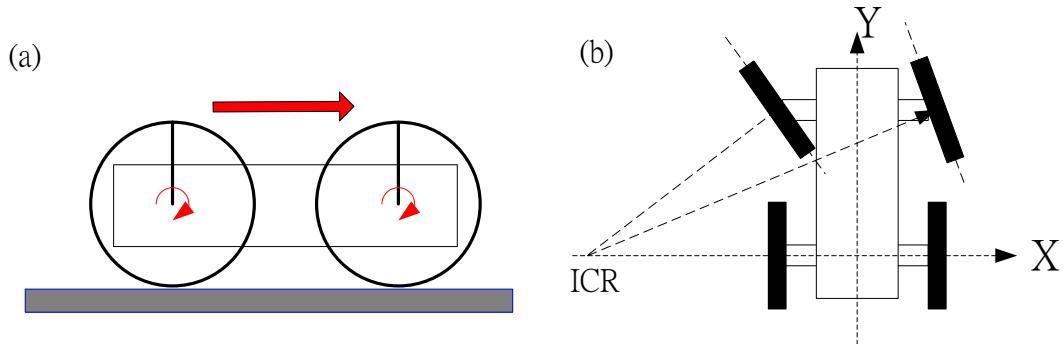


圖 38 四輪模式運動：(a)直線前進(b)前輪轉向運動

先將「輪腳變形機構」以完整的圓形輪框展開，如同四輪驅動車一樣，具有前進、後退以及轉向的運動。由於本論文馬達是以位置控制做為基準，於是輪子前進主要是使用連續的位置控制，在固定的時間內，當控制的間隔變大，前進的速度也會跟著變快。

四輪車在轉向時，因為四輪皆為主動驅動輪，為了使輪胎與地面不發生打滑，其四輪的轉速與轉向角度，有著特定的關係。如圖 39 所示，以運動學的瞬心法作運動分析，若要使四輪不發生打滑，其四輪的瞬心作用線須交在同一點，亦即運動平台的瞬時轉動中心 ICR (Instant center of rotation)。瞬心的作用線會與速度垂直，由於四輪模式是前輪轉向設計，後輪的轉動方向固定，所以後輪的瞬心作用線為通過兩輪軸的連線，與身體方向 X_R 垂直，此連線可視為 ICR 的軌跡，前輪的作用線必須交於此連線上。其中，轉向前平台身體的方向為 X_R ，轉向時瞬間速度方向為 X_I ，轉向角度為 X_R 與 X_I 的夾角 α ，前輪轉向角度各為 β_1 、 β_2 ，四輪的半徑皆為 ρ ，轉速各為 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 、 ϕ_4 。則可由幾何形狀及三角學的關係求得運動平台以速度 V_I 轉向時，運動平台轉向角度 α 與前輪轉向角度 β_1 、 β_2 之間

的關係如下：

(1) 前輪 1 轉向角度：

$$\beta_1 = \tan^{-1} \frac{2d}{d \cdot \cot \alpha - a} \quad (\text{式 3-8})$$

(2) 前輪 2 轉向角度：

$$\beta_2 = \tan^{-1} \frac{2d}{d \cdot \cot \alpha + a} \quad (\text{式 3-9})$$

(3) 運動平台的速度與各輪轉速之間關係：

$$\phi_1 = \frac{[\sqrt{(2d)^2 + (d \cdot \cot \alpha - a)^2} - b] \cdot V_I \cdot \sin \alpha}{\rho d} \quad (\text{式 3-10})$$

$$\phi_2 = \frac{[\sqrt{(2d)^2 + (d \cdot \cot \alpha - a)^2} + b] \cdot V_I \cdot \sin \alpha}{\rho d} \quad (\text{式 3-11})$$

$$\phi_3 = \frac{[d \cdot \cot \alpha + a + b] \cdot V_I \cdot \sin \alpha}{\rho d} \quad (\text{式 3-12})$$

$$\phi_4 = \frac{[d \cdot \cot \alpha - a - b] \cdot V_I \cdot \sin \alpha}{\rho d} \quad (\text{式 3-13})$$

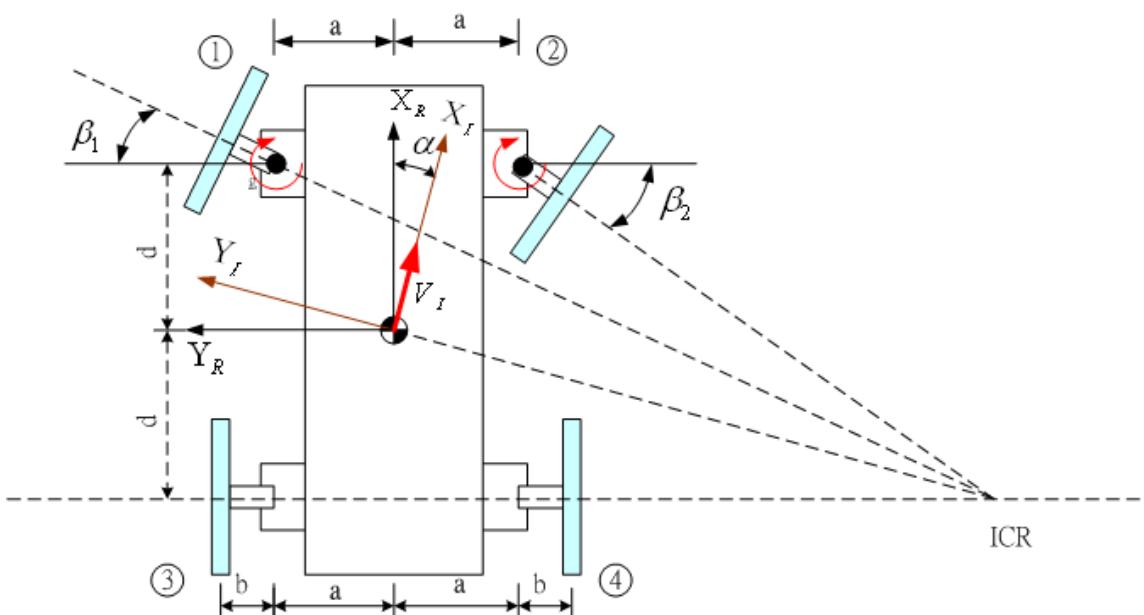


圖 39 輪腳複合式機器人過彎示意圖

在硬體方面，我們選用兩顆較高功率的伺服馬達，使用者可以控制需要的前進速度和轉彎角度，程式會自動轉為伺服馬達的 PWM 訊號，達成轉向的功能。

Labview 程式則如圖 40 所示

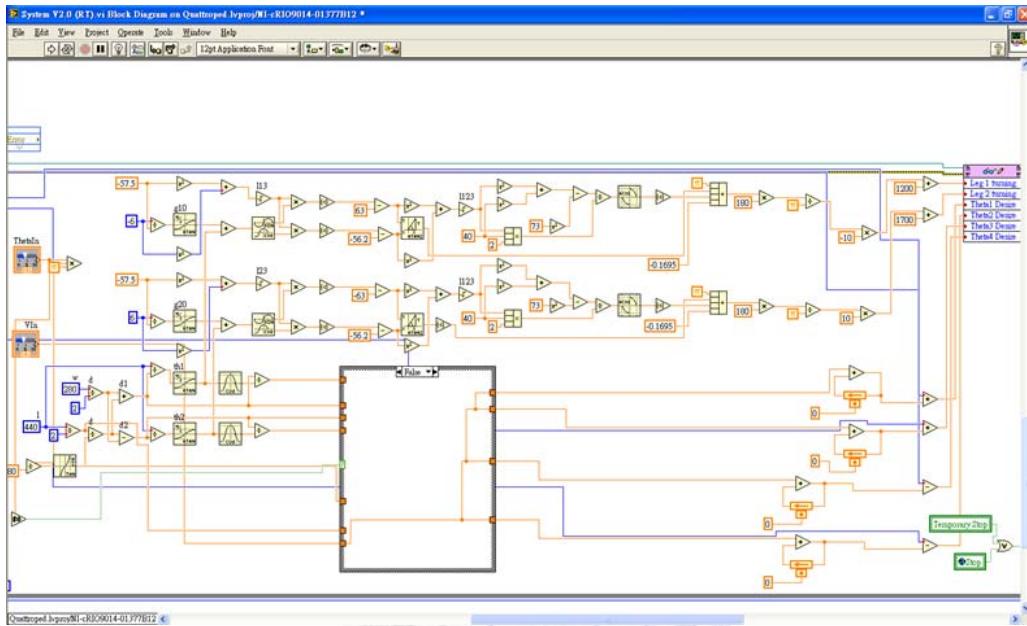


圖 40 包含轉向的輪驅動模式

3.6 測試程式與保護機制

為了在硬體發生問題時，能夠更快的找出錯誤所在，也做了許多的測試程式，像是測試 I/O 模組是否有出問題，測試每個自由度的的馬達是否可以正確控制，馬達的編碼器讀值的正確性，或是量測所有輸入訊號的讀值等等，現在這些程式大部分都整併到 FPGA 的程式裡面，要使用前可以做非常快速的測試，確保所有的機制皆是處於正常狀態。

在保護機制方面，由於是使用無線網路，最怕發生的就是因為網路不穩，機器人因為無法接收到訊號而失去控制的狀況，目前的辦法是偵測網路是否有正常，若發生訊號無法接收的狀況機器人將會自動停止供應馬達的電。另外考慮到馬達編碼器若是突然壞掉，產生無法知道馬達現在位置的狀況，PID 控制器也有

設置 PID 誤差限制，若是超過限制，將會使馬達定住，要是馬達發生問題也不會爆走。若是馬達或是馬達驅動電路過熱，因為在上面我們裝有溫度感測器，經過 NI 類比輸入的擷取卡，我們也可以由製作的面板上直接看到是否有過熱的狀況，可以視情況按下緊急停止扭，停止所有的運動。另外在電路版和馬達驅動電路上也裝有保險絲，在電流太大的時候將會燒斷，以避免發生危險。

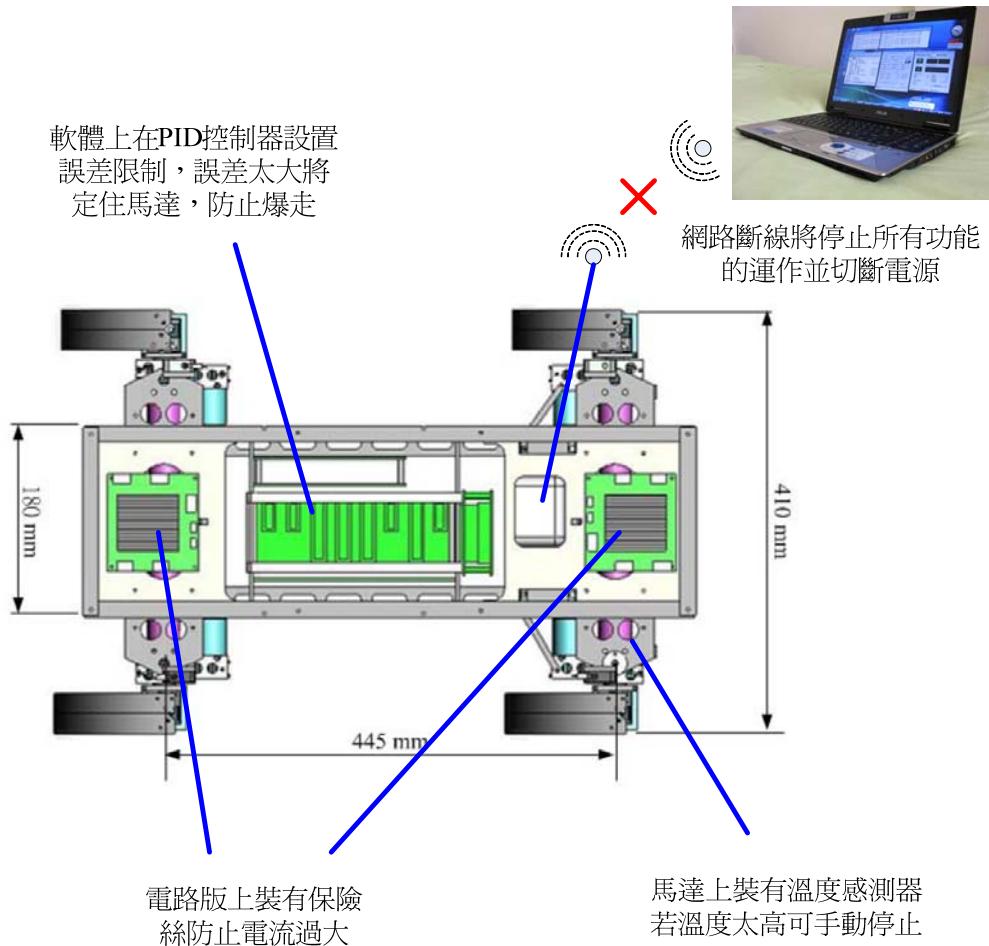


圖 41 輪腳複合是平台保護機制

3.6 人機介面與實驗

在控制面板上，我們做了一個緊急停止按鈕，此按鈕按下後將會把所有的行為停下來，並停止馬達的供電，要是發生意外可以立刻按下。為了使操作方便，本論文也做了幾個比較常會調到的參數值，像是在校正時若是碰到磁力感測器時

需要再修正多少角度；在輪腳變換時腳必須要固定到的高度等等，這些值會因為每次拆裝而有些微的改變，造成定位不準的問題，故在面板上當作可調參數。為了提供以後在戶外的使用，介面必須做到方便觀察和操作簡單，方便觀察目的是可以隨時觀察到所有感應器的狀態，包括電壓電流和溫度感測器等等，若是發現馬達過熱，可以立刻按下停止鍵；改變行為也考慮到需要便利的操作，故介面做成按下按鈕即可觸發相對應的行為。將來考慮使用搖桿來控制所有的行為，只需要一個面板一支搖桿即可控制。

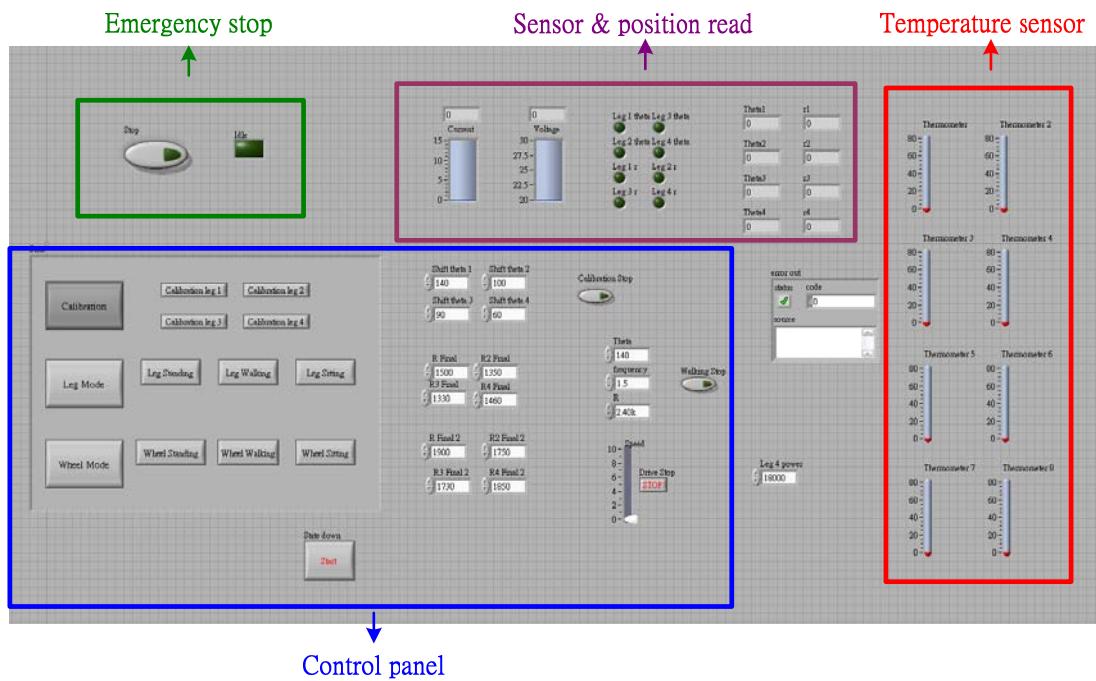


圖 42 labVIEW 人機介面

實驗截圖如圖 43 所示，我們先展示腳模式再進行輪模式，動作由機器人以輪的模式坐在地上開始 (a)，之後進行校正 (b)、(c)、(d)，校正完後將可知道所有腳實際位置，將輪轉變為腳的模式 (e)、(f)、(g)，由於在站立時馬達扭力有可能不足，故我們將以很快的速度控制馬達做站立的動作 (h)、(i)，之後以規劃的步態行走 (j)、(k)、(l)，最後 (m)、(n) 則是慢慢將身體放下，並停止馬達的供電，完成坐下的動作。在輪模式時，主要展示的是轉向移動模式，由 (o)、

(p)、(q) 開始進行輪模式並站立到定位，(r) ~ (u) 則是以一定的迴轉半徑做繞行動作。

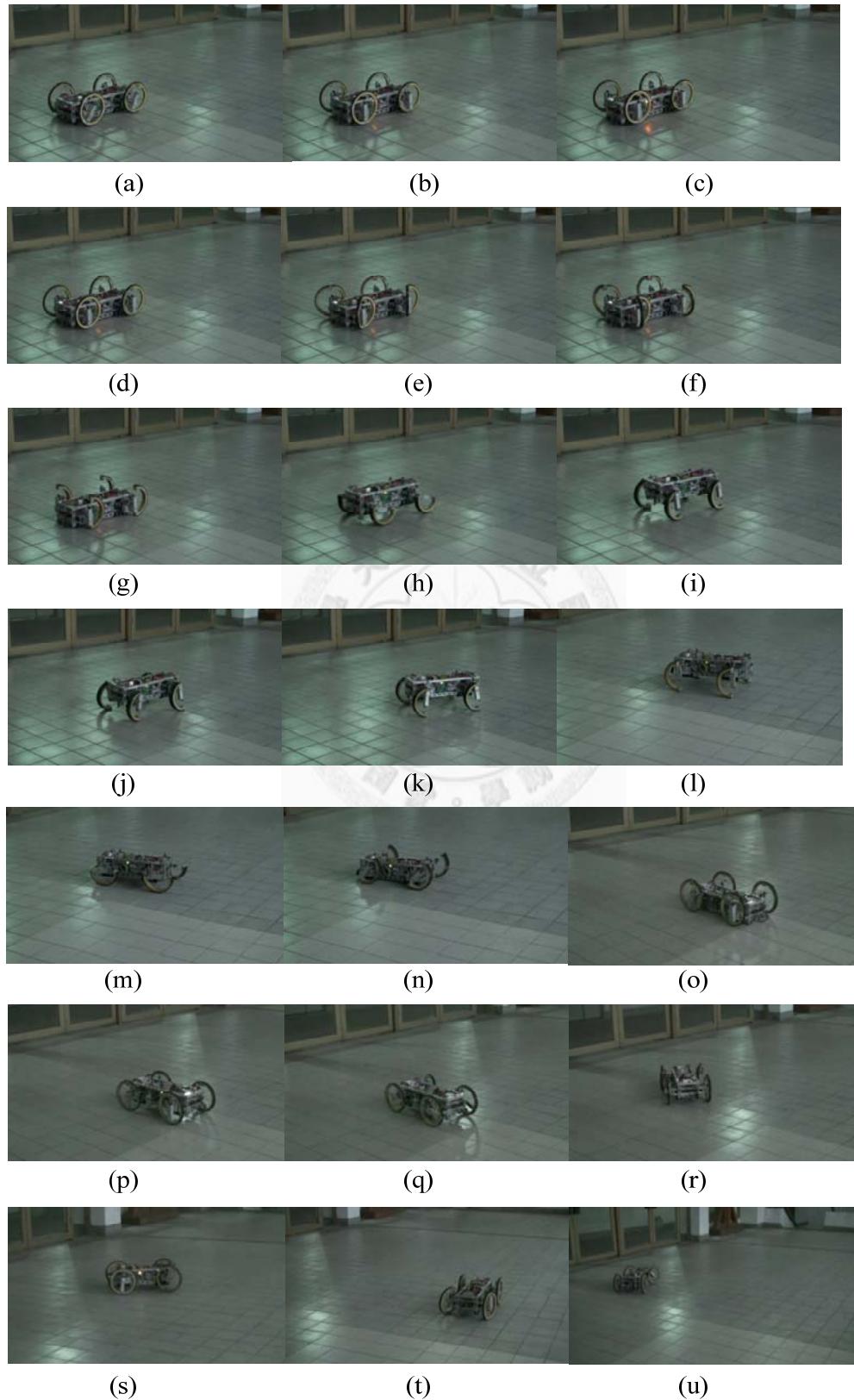


圖 43 實驗影片截圖

3.8 問題與討論

目前的腳步步態還沒有很穩定，走的速度不快而且不一定能夠穩定走直線，主要原因是一次只有兩隻腳著地，重心無法落在兩隻腳著地腳所連成的線上，容易因為重心傾倒而走不直，本來希望能將腳步的步態頻率調高使重心能夠瞬間轉移，不過效果不是很好，將來應該會發展出不同的步態來穩定機身，甚至是能夠跑和跳。

另外在輪模式經過轉向後，因為差速的關係會讓左右兩邊的腳轉的角度不同，當希望機器人再度回到站姿時也會因為回正的角度不同，使腳在地面上摩擦，造成機身移動，將來還有很多可以改善的空間。

當腳步步態越來越多樣化，程式也會相對的複雜，在 CompactRIO 的主迴圈不一定能夠在 1KHz 的速度下順利完成，若是在沒有完成迴圈的狀態下讓機器人繼續跑，將會產生步態不完整或是步態延遲的問題。目前的解決辦法是將會重複使用到的程式寫成副程式，並使用更好的寫法增加程式的效益，另一方面也將一部份的運算換到 FPGA 下執行，減少 RT 端處理器的負擔，不過 FPGA 的容量很小，將來若是需求更大，將會考慮更新硬體來達到效能。

第四章 雙輪平台硬體與機電架構

4.1 雙輪平台介紹

由於我們計畫主要的目的是提供個人載具智慧化和概念功能的實現，在載具還沒完成之前，必須確保所有的功能都可正常運作，於是製作了一個小型的測試平台，將會利用此平台開發所有會用到的功能技術，經過測試後再整合到載具上，故此平台必須依照載具所要達到的規格作設計。

最初考量是速度的限制，智慧化個人載具需要達到 20~40Km 每小時的極速，並且具有高度的機動性。於是設計了一個雙輪平台，藉由雙輪獨立驅動的方式來提升載具本身可具有的敏捷度。雖然使用雙輪驅動將可有機動性和靈巧性的優勢，但是在高速過彎時，可能會因為輪胎打滑或是重心過高而翻覆。為了避免翻覆的情況發生，在設計平台時另外加上了特殊的傾斜機構，當需要高速過彎時，平台可藉由類似壓車的傾斜方式改變重心並使迴轉半徑縮短，如此一來將可使平台具有較高的穩定性。除了傾斜過彎，由於是以雙輪作為平台的基準，「以雙輪來保持自我平衡」的功能也是一大重點。

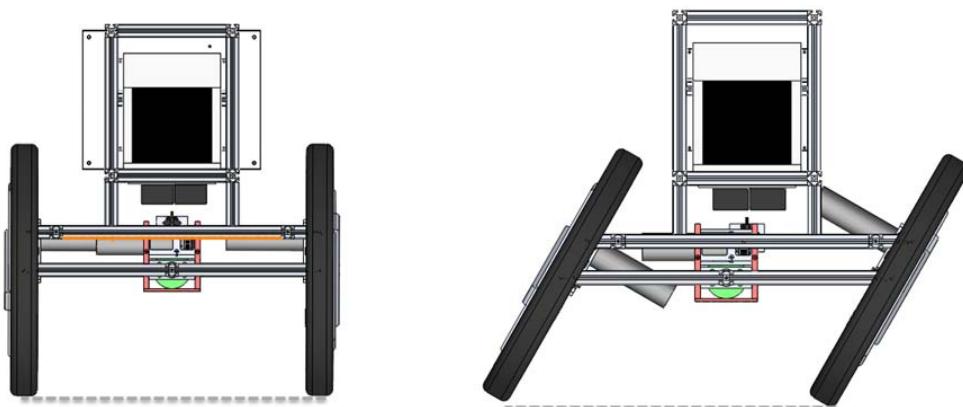


圖 44 雙輪可傾式平台

另外為了使載具更容易被大眾所接受，我們將會在載具上搭載智慧化的功

能，像是「基本避險、召喚、與自動跟隨」之功能，由於這些功能需要比較長的時間才能完整具備，我們主要先針對自動避險做開發。「避險」(Obstacle avoidance)之研究分為兩階段，一為障礙物偵測 (Obstacle detection) --- 載具以感測器感測周遭狀態，經訊號處理與融合彙整成有用的障礙物訊息。第二階段則為避障路徑規劃 (Path planning)，以演算法依據障礙物分佈推算出避障路徑。為了達到自動避險的功能，將在平台上搭載許多的距離感測器，包括雷射、紅外線、超音波、聲納，雖然雷射是個量測距離遠又準確的距離感測器，但是價格非常昂貴，若是希望載具價格可以讓一般大眾接受，雷射測距儀將不會是個好選擇。故我們目前規劃在平台上裝了許多較為便宜的距離感測器，希望利用特殊的演算法來取代雷射距離感測器，等未來量產時渴望雷射測距儀價格可以大減。

在雙輪平台的部分，機構主要由鄭智中設計並組裝完成，而我所負責的部分是一部份的機電架構和使用嵌入式系統讓平台達到基本的移動功能、避障的程式整合和雙輪自我平衡。

4.2 馬達與馬達驅動電路

在馬達方面，為了使平台能夠高速的前進，我們必須選用較高功率的馬達，於是挑選 Maxon 公司的 RE 40 150W 直流馬達當作我們的驅動器，使用 24V 作為驅動電壓，並搭配馬達編碼器(Encoder)做為馬達位置的回授(型號 Maxon Encoder MR, Type L, 500CPT 磁式馬達編碼器)，另外為了提高扭力，我們也使用比例為 13/3 的齒輪箱。

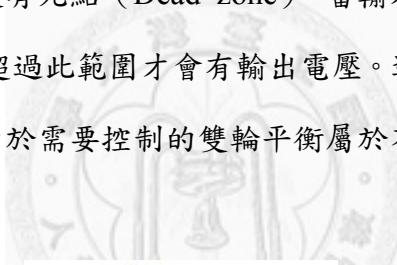
最初在建構系統時，我們的馬達驅動晶片是沿用之前複合式平台的 APEX SA60 晶片，此晶片最大可以達到 10 安培的連續輸出。控制電壓為 4V~8V，並且以 6V 為中立點，可線性放大輸出端的電壓，但是之後發現選用的馬達功率太高，在起步時容易因為啟動電流太大，瞬間電流超過 10 安培，為了避免燒壞馬達

驅動晶片，我們決定使用可以承受較高電流的馬達驅動晶片。



圖 45 馬達驅動電路 MD03

後來測試了另一片馬達驅動電路 MD03 如圖 45 所示，此塊驅動電路最高可以承受 20 安培的電壓，訊號輸入可以選擇類比或是 PWM 輸入，當選擇類比輸入時，輸入電壓為 $0V \sim 5V$ ，以 $2.5V$ 為停止點， $5V$ 是全速正轉， $0V$ 是全速逆轉，此款驅動電路最大的缺點是有死點 (Dead zone)，當輸入電壓在 $2.5V \pm 0.3V$ 時馬達的輸出電壓皆會是 $0V$ ，超過此範圍才會有輸出電壓。這對於需要穩定控制的系統算是還不錯的特性，但由於需要控制的雙輪平衡屬於不穩定的系統，電壓的輸出最好是能精細且穩定。



Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
V_{CC}	Operating supply voltage		5.5	36		V
R_{ONHS}	On state high side resistance	$I_{LOAD}=12A; T_j=25^\circ C$		23	30	$m\Omega$
R_{ONLS}	On state low side resistance	$I_{LOAD}=12A; T_j=25^\circ C$		11	15	$m\Omega$
R_{ON}	On state leg resistance	$I_{LOAD}=12A$			90	$m\Omega$
I_s	Supply current	ON state; $V_{INA}=V_{INB}=5V$ OFF state			15	mA
V_f	High Side Free-wheeling Diode Forward Voltage	$I_f=12A$		0.8	1.1	V
$I_{L(off)}$	High Side Off State Output Current (per channel)	$T_j=25^\circ C; V_{OUTX}=EN_X=0V; V_{CC}=13V$ $T_j=125^\circ C; V_{OUTX}=EN_X=0V; V_{CC}=13V$			3	μA
					5	μA

圖 46 馬達驅動電路 MD01B 和規格

最後我們選用 Pololu 公司出的 MD01B 馬達驅動電路如圖 46 所示，晶片是 VNH3SP30，此晶片可以承受 30A 的電流，輸入的電壓可以到達 36V，符合我們

的供應電流 24V 並且可以容許較高電流的通過，體積非常小不佔空間。唯一的缺點是晶片體積小且功率高，將會導致快速的發熱，故使用此晶片一定需要加裝散熱片或是風扇才不會過熱使晶片當掉。

4.3 升壓電路

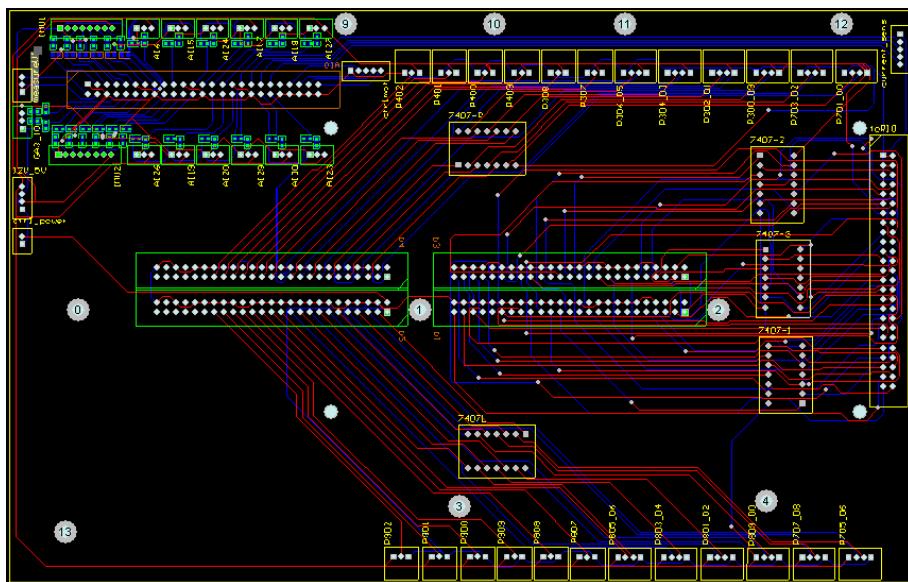


圖 47 實驗室自製升壓電路板

圖 47 為實驗室學弟溫詠仁做的訊號輸入輸出板，此電路板會將所有的訊號都彙整後，和嵌入式系統做連接。由於我們選用 sbRIO 作為雙輪平台的嵌入式系統，此系統最大不同之處在於數位訊號的輸出輸出額定都只有 3.3V，但是輸入可以容許 5V，由於在馬達驅動電路和各種感測器都必須是 5V 的觸發訊號，故必須要將嵌入式系統輸出的電壓做升壓的動作才能提供正確的訊號。

另外我們還自己做了電源板和馬達驅動電路版，前者的功用是將電壓作降壓並分配給其他所有平台上的元件，後者則是將馬達的訊號彙整後和訊號輸入輸出版做連接。

4.4 感測儀器

A. 雷射測距儀



圖 48 雷射測距儀 LMS-291

我們使用 SICK 公司的 LMS-291 作為量測環境最主要的儀器，可以量測前方 180 度的範圍，解析度為 0.25 度，最大量測範圍為 80 公尺，供給電壓 24 伏，單價高但是量測的距離非常精確，可以當成和其他感測器比較的標準值，目前當成避障主要的感測器。



B. 慣性量測儀 (Inertial Measurement Unit, IMU)

慣性量測儀是用來量測平台的傾斜角度、角速度和加速度，是我們做平衡時最主要的感測器，本論文嘗試過兩款 IMU：

i、市售的 IMU (3DM-GX1)



圖 49 慣性量測儀 3DM-GX1

3DM-GX1 是由 MicroStrain 公司出產的，此 IMU 內建加速規 (Accelerometer)、陀螺儀 (Gyro)、磁力計 (Magnetometer)，可以量測三軸的加速度、角速度和傾斜度，並且內建用來過濾雜訊的濾波器，此款 IMU 可說正式符

合我們的需要，不過因為輸出是使用 rs232 的傳輸介面，我們要使用的雷射測距儀也是相同的介面，而在嵌入式系統 sbRIO-9642 上只有一個 rs232 的接頭，故只能找替代方案。

ii、自行製作 IMU

尋找過市面上的加速規和陀螺儀後，我們採用加速規 ADXL330：由 Analog Device 所生產的，是一款集成在單晶片上的小尺寸、薄型、低功耗、完全 3 軸加速規，內置信號調理電壓輸出電路，加速度範圍 $\pm 3g$ ；和陀螺儀 ADXRS610：由 Analog Device 所生產，為一單軸陀螺儀，功耗低，易於使用，尺寸小，成本低並且具有更高的可靠性。

實驗室學長何啟偉設計電路板將 ADXL330 及 ADXRS610 整合成小型 IMU，由於 ADXRS610 只有單軸量測，因此為了達成空間中三軸正交角速度的量測，將電路板相互垂直焊接，且陀螺儀晶片位在整體 IMU 的內側，可保護晶片不受外界碰撞。我們在電源部份提供 12V 級 IMU 當作輸入電源，經過內部的小型變壓器後轉為 3V 和 5V 的電壓供給加速規和陀螺儀，最後將會輸出 6 個類比訊號，分別代表三軸的加速度和三軸的角加速度。經過測試，自製 IMU 也能夠得出精確的狀態值，故本論文最後採用此款慣性量測儀。

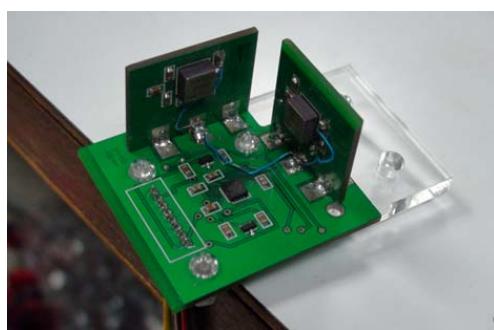


圖 50 實驗室製作 IMU

C. 傾斜儀 (Inclinometer)



圖 51 傾斜儀 SCA100T-D02

在量測傾斜角度方面，我們另外選擇了一款芬蘭 VTI 公司所出產的傾斜儀 (SCA100T-D02)，目的是為了要和自己做的 IMU 數值交叉比對。此傾斜儀可以量測兩個軸的傾斜度，並內建率波器，訊號將會經過處理後才輸出。量測範圍 ± 90 度，解析度為 0.0025 度，輸出為類比訊號，我們也自製電路版和壓克力將傾斜儀固定在平台上。



4.5 嵌入式系統

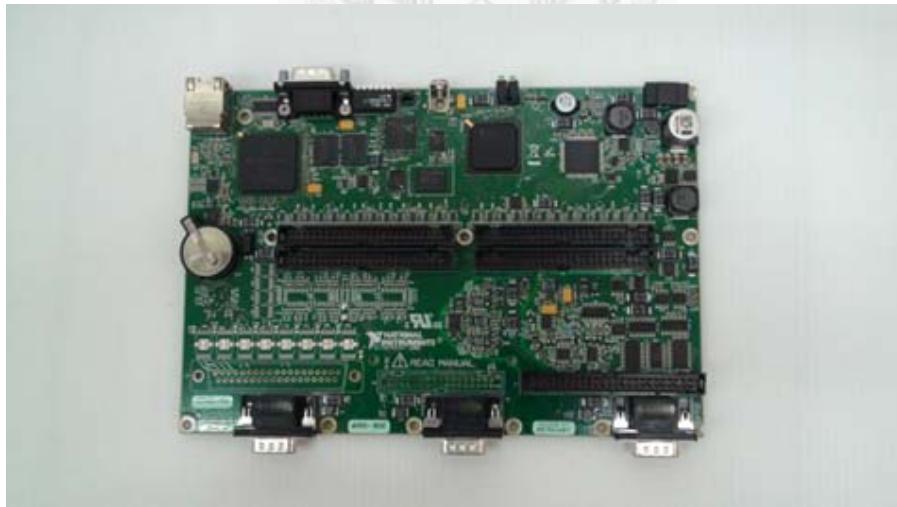


圖 52 嵌入式系統 sbRIO-9642

我們選擇 NI 的產品 sbRIO-9642 做為主要的嵌入式系統。會選擇此款嵌入式系統的理由是它內建有許多類比和數位的輸入輸出孔位 (I/O port)，體積輕薄短小，且是使用 LabVIEW 作為撰寫程式的語言，配合自行設計的電路分配板

(Breakout Board) 可以將所有的訊號統整到嵌入式系統，加上此張版子上有備有許多可以固定的穿透孔，安裝在測試平台上非常方便。我們利用此嵌入式電路版當作控制系統與外界訊號進行溝通，建構起整個資料擷取與馬達運動控制模組。sbRIO-9642 的擁有的特點如下：

sbRIO-9642 使用 400 MHz 處理器、256MB 非揮發性儲存裝置，與 128 MB DRAM，可進行精確控制與分析作業。可重設 I/O(RIO)的整合式 2M Gate FPGA，適用於客制時脈、行內(Inline)處理，與控制作業；在訊號輸入輸出的部份擁有 110 個 3.3 V (5 V 容錯)DIO 通道、32 個 16 位元類比輸入和 4 個 16 位元類比輸出；另外還具有 10/100BASE-T 乙太網路埠和電腦連接與 RS232 序列埠來做傳輸，使用 19~30VDC 電源供應輸入。



4.6 機電架構

目前運動平台規劃由筆電的無線網路和嵌入式系統上裝的無限傳輸模組 (Wireless module) 進行指令傳遞及訊息交流，此無線傳輸模組和輪腳複合式機器人上同樣使用 ASUS 330g 無線 AP(Access Point)，操作者可藉由 LabVIEW 製作的面板對平台下命令進行控制操作和資料的回傳。

由於在平台上裝有許多的感測器 (Sensor module)，為了使接線方便，所有的感測器將會經過自製的訊號分配版(Signal processing board)，再和嵌入式系統 sbRIO 做溝通。另外運動平台上之致動器(Actuator module)也會經過我們製作的馬達驅動電路版 (Motor breakout board) 控制馬達訊號並讀回編碼器的值，如圖 53 所示：

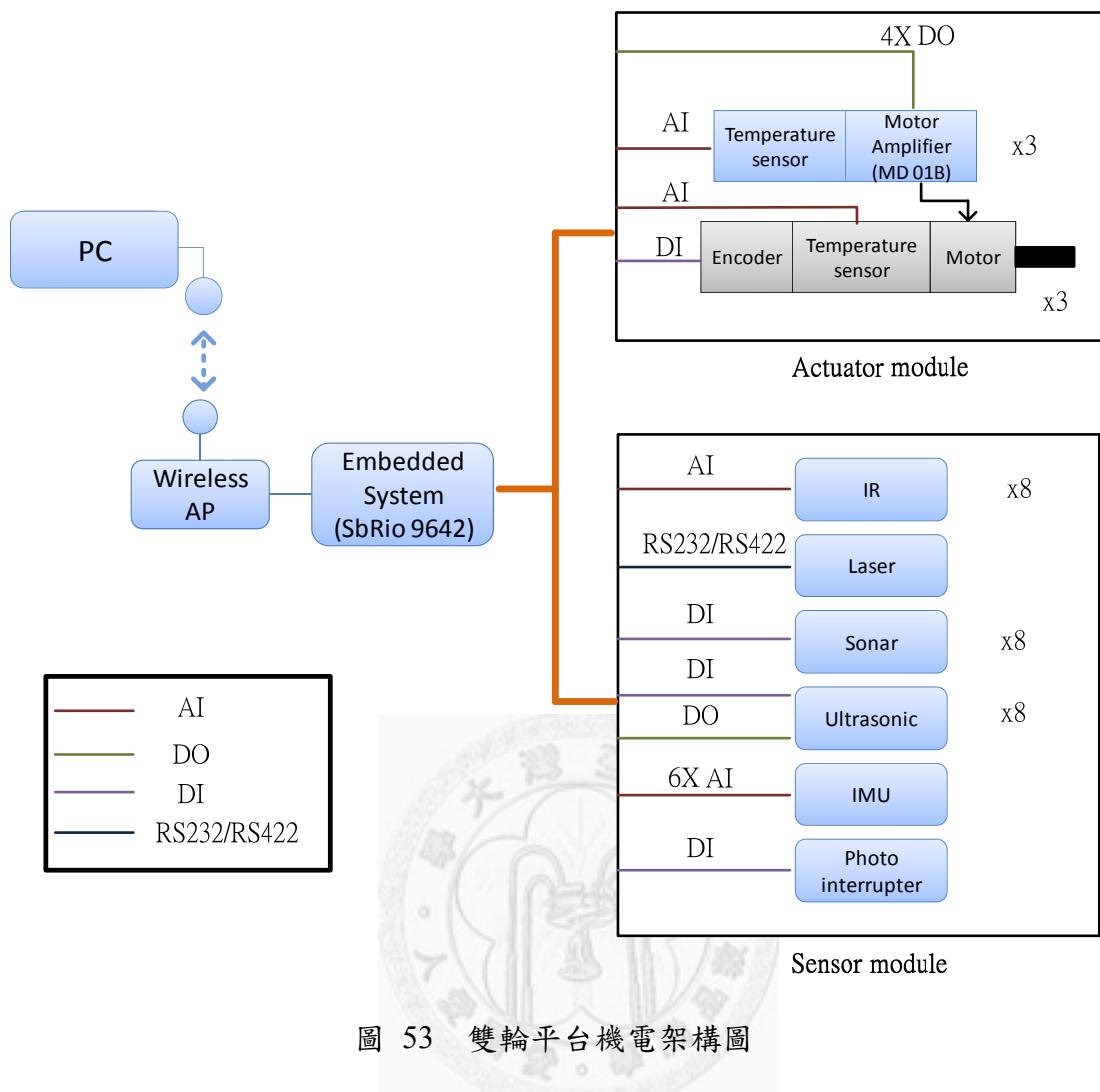


圖 53 雙輪平台機電架構圖

第五章 雙輪平台控制系統與實驗

5.1 輪平台座標和重心

本論文使用一般車子系統使用的座標，平台前方定為 X 軸，側面定為 Y 軸，下方定為 Z 軸。以右手定理 X 軸的旋轉方向為 roll angle (ϕ)，Y 軸的旋轉方向為 pitch angle (θ)，Z 軸的旋轉方向為 yaw angle (ψ)。

由於我們的平台平衡需要做雙輪的平衡，因此在所有感測器都安裝好後還必須調整重心的位置，在 X、Y 軸平面上將重心調到了輪軸的中心處，在 Z 軸方向的重心則是經過測試後發現在輪軸的上方處，實際位置大約如圖 54 所示。我們在此處裝設慣性量測儀，如此一來可以知道車身的狀態以維持平衡。

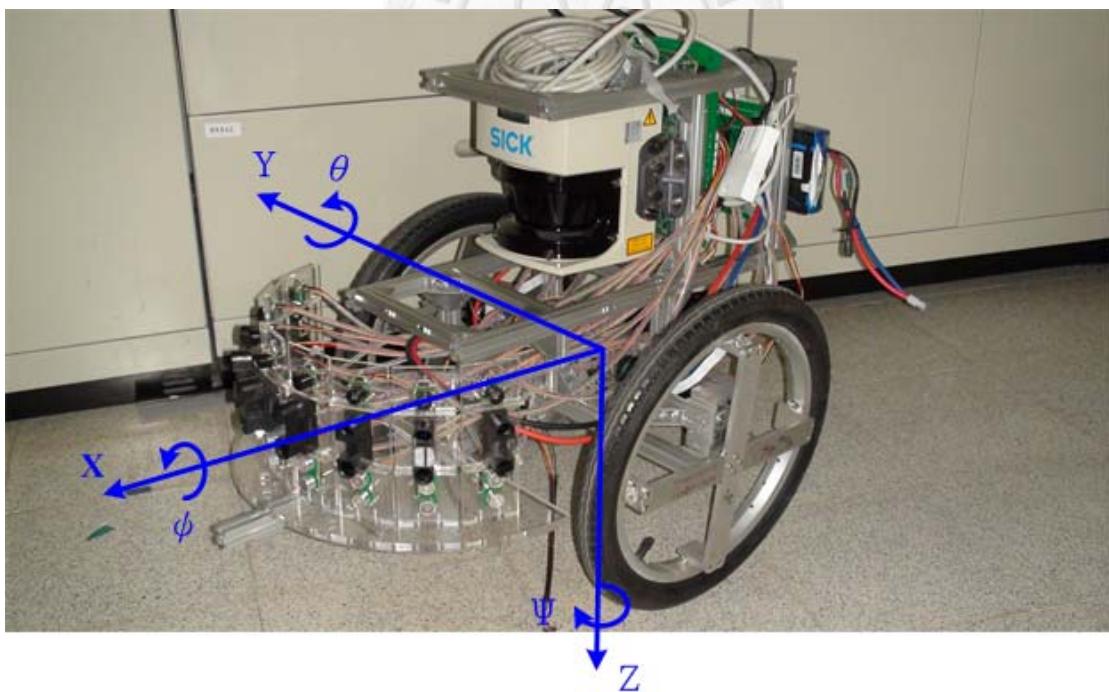


圖 54 雙輪平台座標制定

5.2 基本功能

本論文最後選用 Pololu 的 MD01B 做為馬達驅動電路，此塊驅動電路共需要 4 個控制訊號來達到所有功能：Enable 腳位為啟動馬達驅動晶片，InA、InB 腳位則是控制馬達的前進和後退，並使用 PWM 訊號來控制馬達的輸出電壓達到速度的控制，詳細的控制細節如表所示：1 代表輸入 5V，0 代表接地，H 和 L 分別表示馬達輸入電壓的高準位和低準位。

表 1 馬達驅動電路 MD01B 功能機制

InA	InB	Enable	A OUT	B OUT	Operating mode
1	1	1	H	H	Brake to V _{cc}
1	0	1	H	L	Clockwise(CW)
0	1	1	L	H	Counterclockwise(ccw)
0	0	1	L	L	Brake to GND

另外此塊晶片還附有煞車的功能，唯一的缺點是 PWM 訊號的工作週率 (Duty cycle) 並沒有和輸出電壓成正比，沒有辦法藉由輸出的 PWM 訊號得知輸出電壓。我們還是使用 PID 的位置控制，藉由讀回馬達編碼器的值，讓馬達自動去達到控制的位置。

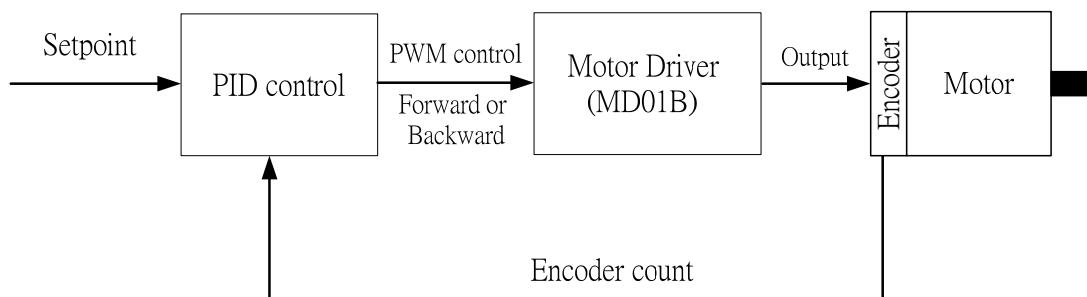


圖 55 馬達控制示意圖

最開始的平台為了簡單起見，我們先把輔助的舵輪加上去，變成三個輪子後不需要考慮平衡的問題，將可以先把基本的功能具備後再去進行雙輪平衡的測

試。平台最基本的功能是線傳控制 (X by wire)，線傳控制主要是以電子訊號來控制平台上系統如轉向、煞車、變速系統等，取代過去藉由機械裝置來控制的機制，減少了許多系統與系統間整合上的限制。基本功能要讓平台具備像是遙控車一樣前進、後退、轉彎的功能，前進就是利用位置控制去追值 (Tracking)，轉彎則是利用平台的中間當圓心做差速旋轉，雙輪差速的好處是可以原地旋轉，不需要迴轉半徑，又前進和轉彎可視為相互獨立的雙自由度系統，當要前進又旋轉時，只需要把前進的控制電壓 (V_m) 和轉向的控制電壓 (V_θ) 分別依照各自的系統輸入右輪馬達 (V_r) 和左輪馬達 (V_l) 即可。

$$V_r = V_m + V_\theta \quad (\text{式 5-1})$$

$$V_l = V_m - V_\theta \quad (\text{式 5-2})$$

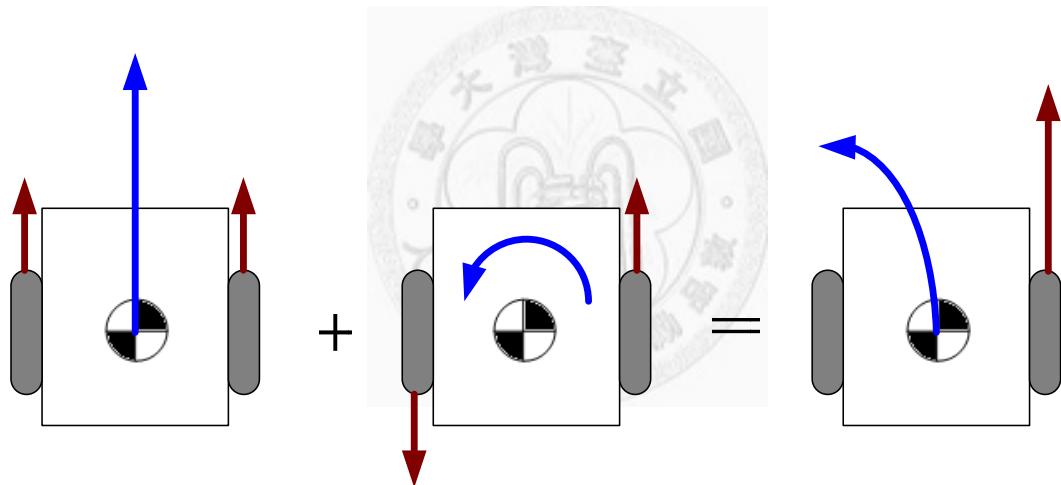


圖 56 雙輪平台驅動示意圖

另外再程式上還做了煞車機制，我們平台的目的就是要測試高速的運動，當平台要停下來時，為了避免平台速度太快，本論文將會偵測馬達的轉向，之後馬達驅動電路將會給予反向的電動勢，此電動勢將會和馬達速度成正比，使馬達慢慢的停下來。

5.3 測程法

測程法 (Odometry) 是應用在機器人上一種量測位置的方法，其基本原理是量測機器人本身馬達轉的角度去做機器人整體位置的預測，當知道位置後，就可以做之後的導向、定位等等，此方法雖然說會有誤差，但是卻不需要多加裝額外的感測器，算是比較簡單的推測位置方法，本論文參考 SIEGWART 的書[35]實際應用到我們的平台上。

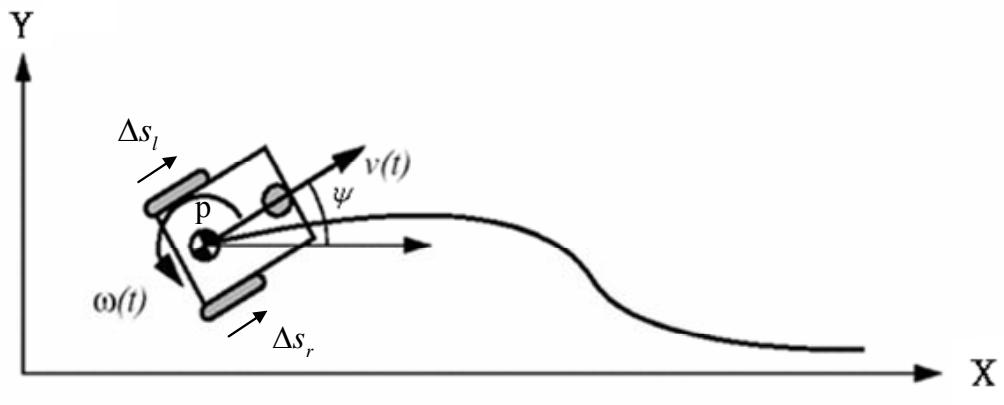


圖 57 測程法示意圖

如圖所示，在平台行走時，我們需要知道平台現在在平面上的座標 (X、Y)，並且知道現在平台轉的角度，故定 P 為目前平台的狀態

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \psi \end{bmatrix} \quad (\text{式 5-3})$$

而我們的平台轉向是以平台的中心利用差速的方式做旋轉，再定 Δs_r 為右輪行走的距離， Δs_l 為左輪行走的距離，平台中心行走的距離 (Δs) 將會是左右輪的平均，故

$$\Delta s = \frac{\Delta s_r + \Delta s_l}{2} \quad (\text{式 5-4})$$

而旋轉的角度 ($\Delta \psi$) 將會是

$$\Delta \psi = \frac{\Delta s_r - \Delta s_l}{b} \quad (\text{式 5-5})$$

b 為左右輪間的距離

當知道行走距離和旋轉角度後，在平面上的移動座標（ Δx ， Δy ）將會是

$$\Delta x = \Delta s \cos(\psi + \Delta\psi / 2) \quad (\text{式 5-6})$$

$$\Delta y = \Delta s \sin(\psi + \Delta\psi / 2) \quad (\text{式 5-7})$$

取 $\Delta\psi / 2$ 的用意在取此一瞬間的平均旋轉角度，其結果對於推算出來座標將會較為準確。

當平台在移動時，我們可以定每次更新過後的狀態為 p' ， p' 將可表示為原狀態加上移動的狀態：

$$p' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \psi' \end{bmatrix} = p + \begin{bmatrix} \Delta s \cos(\psi + \Delta\psi / 2) \\ \Delta s \sin(\psi + \Delta\psi / 2) \\ \Delta\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta s \cos(\psi + \Delta\psi / 2) \\ \Delta s \sin(\psi + \Delta\psi / 2) \\ \Delta\psi \end{bmatrix} \quad (\text{式 5-8})$$

此即為最後推算平台狀態的方法，需要注意的是：由於我們是利用累加的方式來做位置估測，所以更新的時間需要很快，不然將會忽略微小的變動，造成位置不準的情況。

在平台上，我們利用馬達編碼器讀回來的值當作馬達轉的角度，馬達是經過齒輪箱和皮帶輪後傳動到輪子上，故輪子動的距離將會是（馬達轉的距離）*（齒輪箱比例）*（皮帶輪比例）*輪子半徑，我們使用齒輪箱比例為 13：3，皮帶輪比例為 1，輪子半徑（R）為 0.197 公尺，左右輪間的距離（b）為 0.45 公尺，代入式後將可知道每次變動的狀態，而式將為平台狀態變動後，也就是我們需要的狀態資料。在控制方面，我們將會可以控制前進距離（ Δs ）和前進方向（ $\Delta\psi$ ），給予輪子需要轉到的位置讓 PID 控制器自己去追值，之後馬達回授將會自動算出目前的位置。

5.4 避障程式介紹

為了讓平台擁有避障的功能，我們必須先知道環境的狀態，行進路線上是否有障礙物。初步的避障使用的是精確的雷射測距儀，雷射測距儀使用的是 RS232 傳輸介面，擁有正前方 180 度的量測範圍，每 0.5 度會回傳前方距離的值。有了基本的控制、測程法、可以讀取雷射測距儀的值，只要再加上避障演算法，即可讓平台做避障。方向區間柱圖法 (Vector Field Histogram, VFH) 為我們使用的避障演算法，此部分為實驗室同仁鄭智中所建構，而我負責的是將避障演算法整合到平台上，流程是將雷射測距儀讀回的環境當作輸入，當周圍的物體太靠近平台時將會進入 VFH 演算法，VFH 演算法為將會給出可以避過障礙的前進角度，我所負責的部分則是將前進角度的資料做為平台的輸入，達到避障的效果。當附近沒有障礙時，平台將會直接朝目的地前進，前進的過程中平台會一直使用測程法計算目前在座標上的位置。程式流程圖如所示。



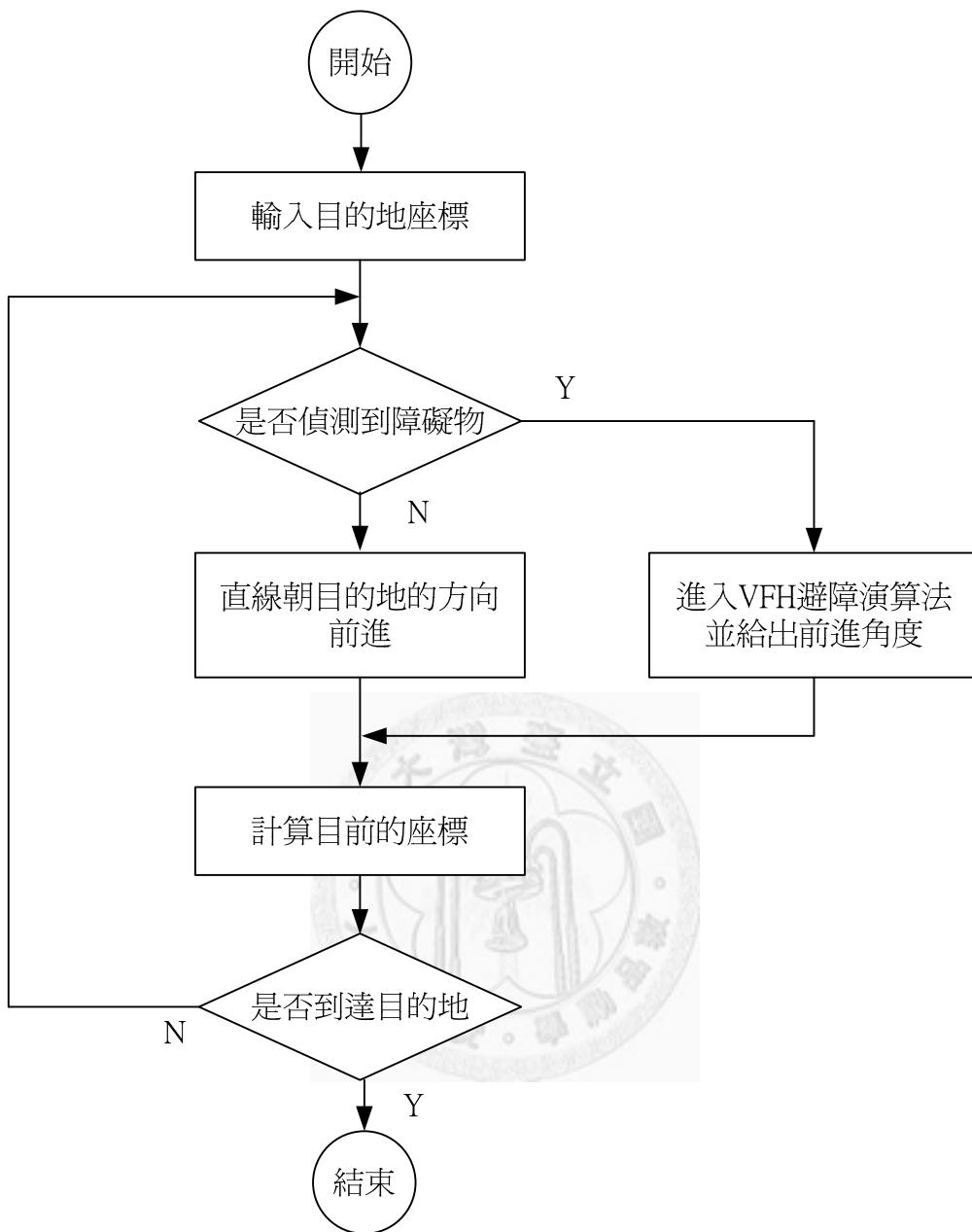


圖 58 避障程式流程圖

為了印證避障程式和基本功能是否能成功，我們設計了三種實驗，藉由不同障礙物擺放的位置和數量，來驗證平台是否能實際到達目的地，如圖所示。剛開始平台大約距離目的地 3 公尺，第一種實驗我們在中間擺放一個障礙物 (a)；第二種是在中間交錯擺放兩個障礙物，兩個障礙物之間的距離容許平台通過 (b)；對於這兩種狀況，平台皆可以藉由避障演算法按照我們所希望的路徑前進，並在

目的地的附近停下來。為了驗證準確性，我們設計了第三種實驗：在路徑兩旁各擺設一個障礙物，觀察平台是否能順利通過。結果顯示雖然會感測到障礙物，但不至於影響到前進的道路，平台將會選擇較中間的位置通過。由此三個實驗可以顯示：實驗平台確實可以藉由我們所設計的避障演算法到達目標，不過美中不足的是目前只能做到低速避障。由於避障演算法並非本論文的重點，若想知道演算法的詳細情況和實驗討論，可以參考鄭智中的論文。

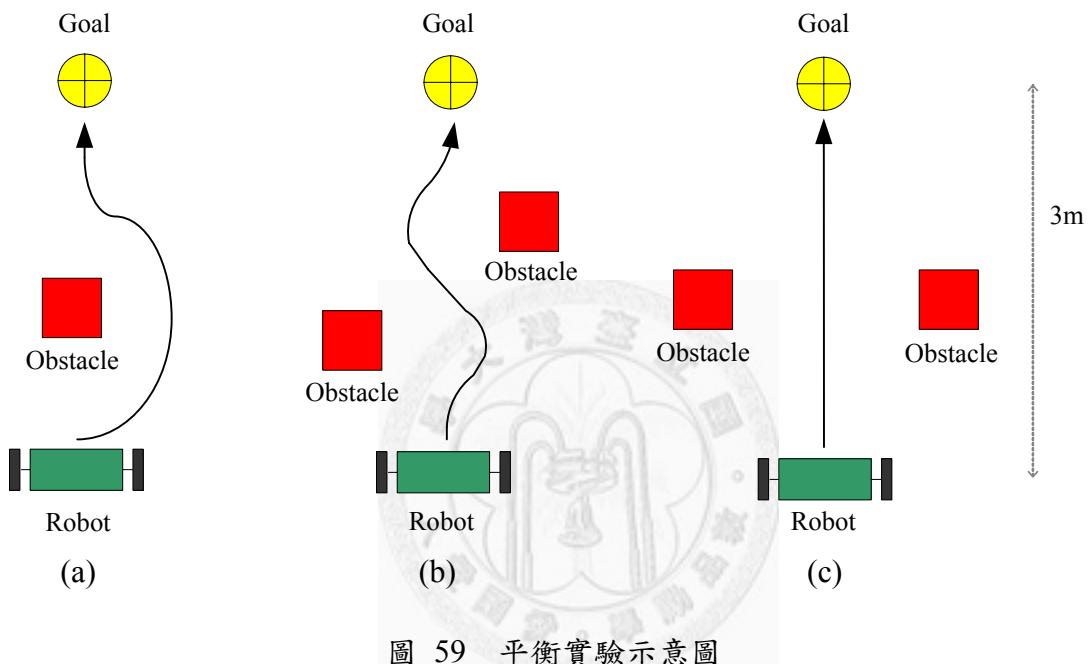


圖 59 平衡實驗示意圖

5.5 感測器資料擷取與校正

我們在平台上裝置了一個慣性量測儀 (Inertial measurement unit, IMU) 和一個傾斜儀 (Inclinometer) 來得知平台是否有傾斜，由於每次 IMU 的準位都會有點不一樣，於是剛開始的時候需要先做校正的動作。本論文校正的方法是：剛開始平台處於垂直平衡的狀態時，X、Y、Z 軸皆取出二～三千筆的資料做平均，平均完後的數值當作準位值，之後讀取的數值減掉準位值就是 IMU 量取的狀態變化

值。在讀取 IMU 數值的時候，本論文利用移動式平均 (Moving average) 的作法，將最近的十筆資料取平均值當作輸出，每 1ms 更新一次，目的是要濾掉高頻雜訊並使訊號平緩。以 IMU 內的加速規為例，本論文利用重力來感測平台是否有傾斜，由加速規的數據表可知每增加 0.33V 表示受到 1G 的重力，在 Z 軸方向，平台垂直時會受重力影響增加 0.33V， V_i 為每次量到的電壓， V_z 為初始的準位值

$$V_z = \frac{\sum_{i=1}^k V_i}{k} \quad (\text{式 5-9})$$

k 為讀取的資料數，假設初始狀態平台為平衡站立，重力將完全施加在 Z 軸方向，故基準直還需要再扣掉 0.33V 的重力影響，將式改為

$$V_z = \frac{\sum_{i=1}^k V_i}{k} - 0.33 \quad (\text{式 5-10})$$

令 V_z' 為目前量到 Z 方向加速規電壓值，則 Z 方向所受加速度

$$a_z = \frac{V_z' - V_z}{0.33} \quad (\text{式 5-11})$$

，單位為重力 (G)，同樣的在 X 方向無重力的基準值

$$V_x = \frac{\sum_{i=1}^k V_i}{k} \quad (\text{式 5-12})$$

k 為讀取的資料數，令 V_x' 為目前量到 X 方向加速規電壓值，則 X 方向所受加速度

$$a_x = \frac{V_x' - V_x}{0.33} \quad (\text{式 5-13})$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{a_x}{a_z} \right) \quad (\text{式 5-14})$$

如此一來將可使用加速規得知平台的傾斜角度。

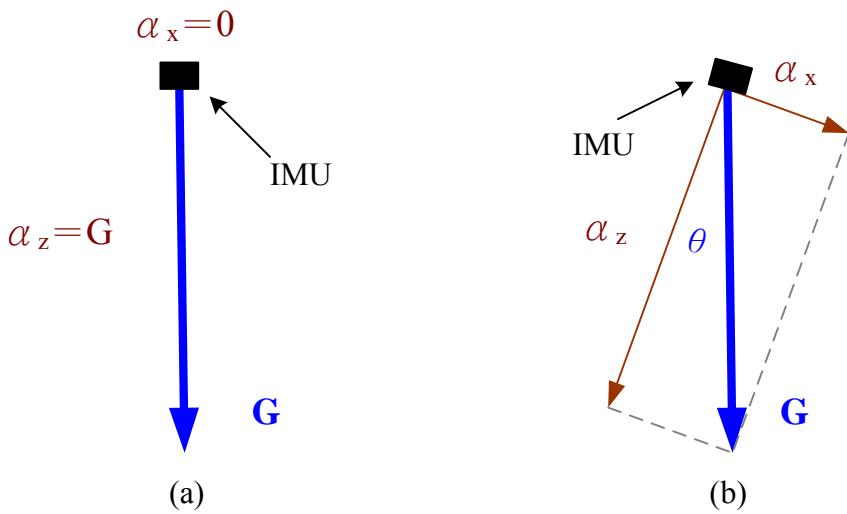


圖 60 使用 IMU 量測角度示意圖 (a)垂直校正 (b)量測角度

另一個量測平台傾斜狀態的方法是使用陀螺儀 (Gyro) 的角速度計算目前傾斜狀態，由 datasheet 可知每陀螺儀量到的角速度 ω 為

$$\omega = \frac{V_{out} - offset}{sensitivity} , \text{ offset 為靜止時的電壓值，sensitivity 為 } 0.006V/\text{s}.$$

將陀螺儀讀到的電壓利用角速度積分的方法得出目前的角度：

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \omega \Delta t \quad (\text{式 5-15})$$

i 表示目前的角度，i-1 是前一刻的角度， Δt 為每次讀值的間隔時間，且 Δt 必須夠小積分才會比較準確。不過利用加速規來積分角度會有訊號飄移的問題，由於加速規量到的電壓值會因為晶片溫度上升而使數值飄移，而積分將會累積誤差，當積分的時間越久，算出的角度將會越不準。

最後量測傾斜角度的方法是使用傾斜儀，傾斜儀內建濾波器，且數值將會計算過才做輸出，所以響應速度慢，但是好處是傾斜儀在平台移動速度不快的時候比較準確，起初我們將傾斜儀當作參考數值，確認加速規和陀螺儀算出的數值是否合理。由 datasheet 可知傾斜儀得到的角度 θ 為

$$\theta = \arcsin\left(\frac{V_{out} - offset}{sensitivity}\right) , \text{ offset 為靜止時的電壓值，sensitivity 為 } 2V/g$$

當角度很小的時候可以線性化成 $\theta = \frac{V_{out} - offset}{sensitivity}$ 。

由於傾斜儀的反應速度較慢，且加速規量到的值會受到車身的加速度影響，所以我們目前規劃實際讀到的角度值將會使用陀螺儀的角速度積分。為了避免飄移的狀況，再利用加速規做校正：當量到加速規的 X 軸和 Z 軸向量和為加速度 G 時，我們就可以確定車身並無前進的加速度，並利用式計算角度，校正陀螺儀的角度。

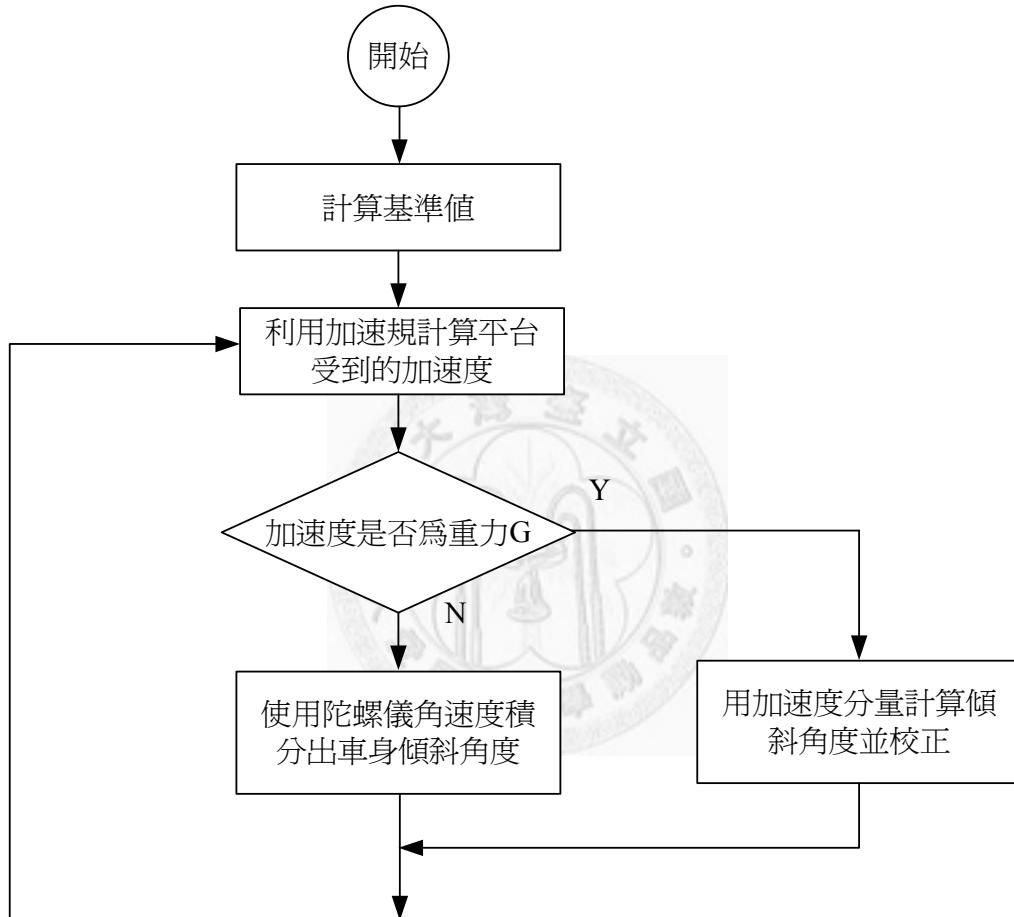


圖 61 平台狀態量測程式流程圖

5.6 平衡理論

雙輪平台平衡的模型可以近似於倒單擺的模型，而本節主要在探討倒單擺的模型推導。在課本上大部分的模型都是侷限於 2D 平面上，而本論文這裡的推導是參考[36]，所做的 3D 倒單擺模型，更可以符合之後控制的需求，首先可以把平

台想成一個長方體連接上兩顆輪子，而輪子的中心正對長方體的底部，簡化的示意圖如圖 62 所示。

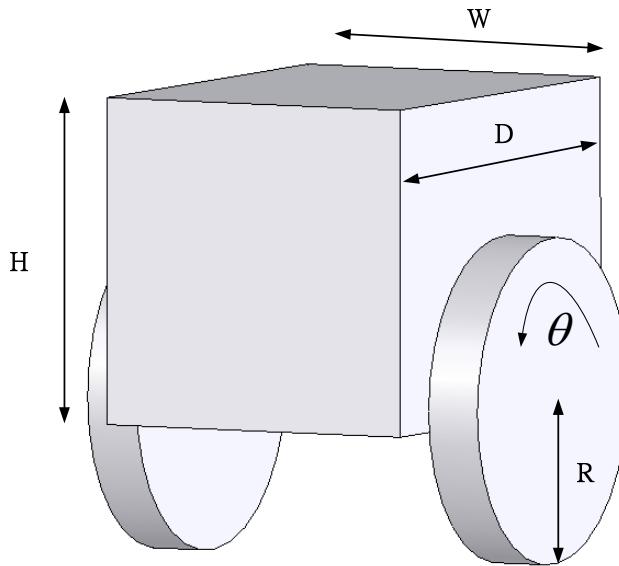


圖 62 平台簡化示意圖

在推導模型之前，我們需要先定義符號：

$$g = 9.81 \quad (\text{m/sec}^2) \quad : \text{重力加速度}$$

$$m = 1.01 \quad (\text{kg}) \quad : \text{車輪重量}$$

$$R = 0.197 \quad (\text{m}) \quad : \text{車輪半徑}$$

$$J_w = mR^2/2 \quad (\text{kgm}^2) \quad : \text{車輪轉動慣量}$$

$$M = 20.11 \quad (\text{kg}) \quad : \text{車身重量}$$

$$W = 0.45 \quad (\text{m}) \quad : \text{車身寬度}$$

$$D = 0.534 \quad (\text{m}) \quad : \text{車身長度}$$

$$H = 0.353 \quad (\text{m}) \quad : \text{車身高度}$$

$$L = H/2 \quad (\text{m}) \quad : \text{重心到輪軸的長度}$$

$$J_\phi = ML^2/3 \quad (\text{kgm}^2) \quad : \text{車身在 pitch 方向的轉動慣量}$$

$$J_\psi = M(W^2 + D^2)/12 \quad (\text{kgm}^2) \quad : \text{車身在 yaw 方向的轉動慣量}$$

$$J_m = 1.38 \times 10^{-5} \quad (\text{kgm}^2) \quad : \text{直流馬達轉動慣量}$$

$n = 13/3$

: 齒輪比 (Gear ratio)

$K_b = 0.0301$

(V*sec/rad) : 直流馬達反電動勢常數 (back EMF constant)

如圖所示，在 Z 軸的平面上， θ_r 、 θ_l 為右輪和左輪左輪轉的角度， θ_{m_r} 、 θ_{m_l} 為右輪和左輪馬達轉的角度

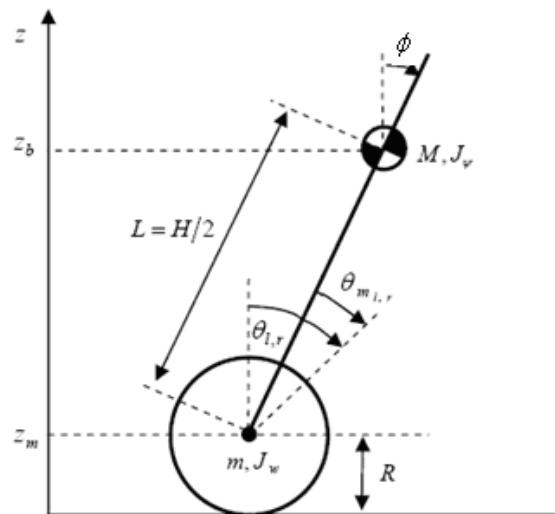


圖 63 倒單擺模型側面示意圖

在 X、Y 軸的平面俯視圖，如圖所示，r、l 代表右輪和左輪，b 代表車身重心，m 代表輪軸中心，x、y 表示在座標上點的位置，

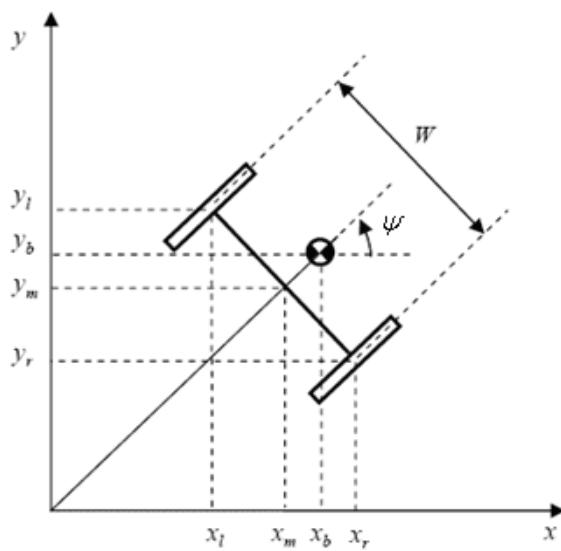


圖 64 倒單擺模型俯視圖

倒單擺的三個自由度可以看成

θ ：左右輪旋轉平均的角度

ϕ ：車身側向軸 (pitch) 方向的角度

ψ ：車身垂直軸 (yaw) 方向的角度

車身的狀態可以寫成

$$(\theta, \psi) = \left[\frac{1}{2}(\theta_r + \theta_l), \frac{R}{W}(\theta_r - \theta_l) \right] \quad (\text{式 5- 16})$$

$$(x_m, y_m, z_m) = \left(\int \dot{x}_m dt, \int \dot{y}_m dt, R \right) \quad (\text{式 5- 17})$$

$$(\dot{x}_m, \dot{y}_m) = (R\dot{\theta} \cos \psi, R\dot{\theta} \sin \psi) \quad (\text{式 5- 18})$$

$$(x_r, y_r, z_r) = (x_m + \frac{W}{2} \sin \psi, y_m - \frac{W}{2} \cos \psi, z_m) \quad (\text{式 5- 19})$$

$$(x_l, y_l, z_l) = (x_m - \frac{W}{2} \sin \psi, y_m + \frac{W}{2} \cos \psi, z_m) \quad (\text{式 5- 20})$$

$$(x_b, y_b, z_b) = (x_m + L \sin \phi \cos \psi, y_m + L \sin \phi \sin \psi, z_m + L \cos \phi) \quad (\text{式 5- 21})$$

倒立單擺之動態方程式 (dynamic equation) 可由 Lagrange's Equation 獲得。 L 稱為 Lagrange 函數，定義為系統動能 K 與系統位能 V 之差：

$$L = K - V \quad (\text{式 5- 22})$$

由 Lagrange's Equation :

$$\frac{d \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right)}{dt} - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (\text{式 5- 23})$$

其中 q_j 是在系統動能與系統位能中定義的廣義座標變數。此系統有三個自由度，

所以選廣義座標 $q_j = (\theta, \phi, \psi)$ 。 \dot{q}_j 為廣義速率 (generalized velocity)，也就是 q_j

對時間的變化量，而 Q_j 則是廣義座標所對應的外力。

系統動能 K 為整個系統的移動動能 (T_1)

$$T_1 = \frac{1}{2}m(\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2 + \dot{z}_r^2) + \frac{1}{2}m(\dot{x}_l^2 + \dot{y}_l^2 + \dot{z}_l^2) + \frac{1}{2}M(\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2 + \dot{z}_b^2) \quad (\text{式 5-24})$$

加上轉動動能 (T_2)，考慮齒輪比造成的效應，式子可以寫成：

$$T_2 = \frac{1}{2}J_w\dot{\theta}_r^2 + \frac{1}{2}J_w\dot{\theta}_l^2 + \frac{1}{2}J_\phi\dot{\phi}^2 + \frac{1}{2}J_\psi\dot{\psi}^2 + \frac{1}{2}n^2J_m(\dot{\theta}_r - \dot{\phi})^2 + \frac{1}{2}n^2J_m(\dot{\theta}_l - \dot{\phi})^2 \quad (\text{式 5-25})$$

最後是系統的位能：

$$U = mgz_r + mgz_l + Mgz_b \quad (\text{式 5-26})$$

故 Lagrange 函數將為

$$L = T_1 + T_2 - U \quad (\text{式 5-27})$$

三個自由度的 Lagrange's Equation 可寫成

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} &= F_\theta \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \phi} &= F_\phi \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\psi}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \psi} &= F_\psi \end{aligned} \quad (\text{式 5-28})$$

將 T_1 、 T_2 、 U 代入後可寫為式

$$[(2m+M)R^2 + 2J_w + 2n^2J_m]\ddot{\theta} + (MLR\cos\phi - 2n^2J_m)\ddot{\phi} - MLR\dot{\phi}^2\sin\phi = F_\theta \quad (\text{式 5-29})$$

$$(MLR\cos\phi - 2n^2J_m)\ddot{\theta} + (ML^2 + J_\phi + 2n^2J_m)\ddot{\phi} - MgL\sin\phi - ML^2\dot{\psi}^2\sin\phi\cos\phi = F_\phi$$

$$(\text{式 5-30})$$

$$\left[\frac{1}{2}mW^2 + J_\psi + \frac{W^2}{2R^2}(J_w + n^2J_m) + ML^2\sin^2\phi\right]\ddot{\psi} + 2ML^2\dot{\phi}\dot{\psi}\sin\phi\cos\phi = F_\psi \quad (\text{式 5-31})$$

之後計算外力值 F_θ 、 F_ϕ 、 F_ψ ，由於這三個自由度皆是以角度的方式來表示，故外力的計算將會以力矩值呈現。為了使動態方程式更加的完整，本論文將考慮馬達的內部效應和摩擦力， n 為齒輪比， i 為馬達的電流， K_t 為馬達力矩常數， f_m 為車身和直流馬達之間的摩擦係數， f_w 則為輪子和地板間的摩擦係數，外力將可寫成：

$$(F_\theta, F_\phi, F_\psi) = \left(F_r + F_l, F_\phi, \frac{W}{2R}(F_r - F_l) \right) \quad (式 5-32)$$

$$F_r = nK_t i_r + f_m(\dot{\phi} - \dot{\theta}_r) - f_w \dot{\theta}_r \quad (式 5-33)$$

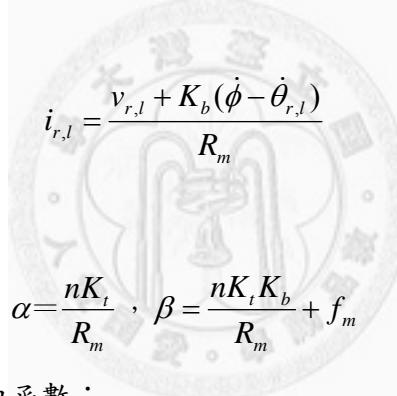
$$F_l = nK_t i_l + f_m(\dot{\phi} - \dot{\theta}_l) - f_w \dot{\theta}_l \quad (式 5-34)$$

$$F_\phi = -nK_t i_r - nK_t i_l - f_m(\dot{\phi} - \dot{\theta}_r) - f_m(\dot{\phi} - \dot{\theta}_l) \quad (式 5-35)$$

由於在實際控制時，可以控制的將會是直流馬達的電壓或是 PWM 訊號而不是電流，故必須再將電流的方程式以電壓的方式表示。

$$L_m i_{r,l} = v_{r,l} + K_b(\dot{\phi} - \dot{\theta}_{r,l}) - R_m i_{r,l} \quad (式 5-36)$$

L_m 為馬達的電感係數， K_b 為馬達的反電動式係數， R_m 為馬達的電阻值，再將式的電流提出：



$$i_{r,l} = \frac{v_{r,l} + K_b(\dot{\phi} - \dot{\theta}_{r,l})}{R_m} \quad (式 5-37)$$

將電流代入式，令

$$\alpha = \frac{nK_t}{R_m}, \beta = \frac{nK_t K_b}{R_m} + f_m \quad (式 5-38)$$

故外力矩可寫為馬達電壓的函數：

$$F_\theta = \alpha(v_r + v_l) - 2(\beta + f_w)\dot{\theta} + 2\beta\dot{\phi} \quad (式 5-39)$$

$$F_\phi = -\alpha(v_r + v_l) + 2\beta\dot{\theta} - 2\beta\dot{\phi} \quad (式 5-40)$$

$$F_\psi = \frac{W}{2R}\alpha(v_r - v_l) - \frac{W^2}{2R^2}(\beta + f_w)\dot{\psi} \quad (式 5-41)$$

之後為了要實際應用並推導出動態方程式，必須將簡化資料。由於在倒單擺平衡時，pitch 方向將只會有些微的角度改變，為了簡化複雜度，我們將忽略摩擦力，並利用現代控制理論將 Lagrange's equation 在平衡點做線性化，故將會令 $\phi \rightarrow 0$ 摘 ($\sin \phi \rightarrow \phi, \cos \phi \rightarrow 1$) 並且忽略二次項的係數，例如 $\dot{\phi}^2, \dot{\psi}^2$ ，由式簡

化後的方程式如式所示：

$$[(2m+M)R^2 + 2J_w + 2n^2J_m]\ddot{\theta} + (MLR - 2n^2J_m)\ddot{\phi} = F_\theta \quad (\text{式 5-42})$$

$$(MLR - 2n^2J_m)\ddot{\theta} + (ML^2 + J_\phi + 2n^2J_m)\ddot{\phi} - MgL\phi = F_\phi \quad (\text{式 5-43})$$

$$\left[\frac{1}{2}mW^2 + J_\psi + \frac{W^2}{2R^2}(J_w + n^2J_m) \right] \ddot{\psi} = F_\psi \quad (\text{式 5-44})$$

簡化後將可發現 θ 和 ϕ 方向的自由度和 ψ 方向的自由度可以分開成兩式做計算，這也代表在平衡點附近的運動，平衡和轉向的控制將為互相獨立 (Independent) 的事件，忽略摩擦力後將式寫成

$$\alpha = \frac{nK_t}{R_m} \quad , \quad \beta = \frac{nK_t K_b}{R_m} \quad (\text{式 5-45})$$

再將 θ 和 ϕ 方向寫成左右輪馬達電壓的關係式：

$$E \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + F \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + G \begin{bmatrix} \theta \\ \phi \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} v_r \\ v_l \end{bmatrix} \quad (\text{式 5-46})$$

其中

$$E = \begin{bmatrix} MLR - 2n^2J_m & (2m+M)R^2 + 2J_w + 2n^2J_m \\ ML^2 + J_\phi + 2n^2J_m & MLR - 2n^2J_m \end{bmatrix}, \quad F = 2 \begin{bmatrix} \beta & -\beta \\ -\beta & \beta \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -MgL \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} \alpha & \alpha \\ -\alpha & -\alpha \end{bmatrix}$$

ψ 方向和電壓的關係將寫成式

$$I\ddot{\psi} + J\dot{\psi} = K(v_r - v_l) \quad (\text{式 5-47})$$

$$\text{其中 } I = \frac{1}{2}mW^2 + J_\psi + \frac{W^2}{2R^2}(J_w + n^2J_m), \quad J = \frac{W^2}{2R^2}(\beta), \quad K = \frac{W}{2R}\alpha$$

最後令狀態為：

$$x_1 = [\theta, \phi, \dot{\theta}, \dot{\phi}]^T, \quad x_2 = [\psi, \dot{\psi}]^T \quad (\text{式 5-48})$$

控制輸入為：

$$u = [v_r, v_l]^T \quad (\text{式 5-49})$$

最終的動態方程式將可寫成：

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= A_1 x_1 + B_1 u \\ \dot{x}_2 &= A_2 x_2 + B_2 u\end{aligned}\quad (\text{式 5-50})$$

將式用符號表示，寫成

$$E = \begin{bmatrix} MLR - 2n^2 J_m & (2m+M)R^2 + 2J_w + 2n^2 J_m \\ ML^2 + J_\phi + 2n^2 J_m & MLR - 2n^2 J_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E(1,1) & E(1,2) \\ E(2,1) & E(2,2) \end{bmatrix} \quad (\text{式 5-51})$$

動態方程式可表示為：

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & A_1(3,2) & A_1(3,3) & A_1(3,4) \\ 0 & A_1(4,2) & A_1(4,3) & A_1(4,4) \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ B_1(3) & B_1(3) \\ B_1(4) & B_1(4) \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -J/I \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ K/I & -K/I \end{bmatrix}$$

其中

$$A_1(3,2) = -gMLE(1,2) / \det(E)$$

$$A_1(4,2) = gMLE(1,1) / \det(E)$$

$$A_1(3,3) = -2[\beta E(2,2) + \beta E(1,2)] / \det(E)$$

$$A_1(4,3) = 2[\beta E(1,2) + \beta E(1,1)] / \det(E)$$

$$A_1(3,4) = 2\beta [E(2,2) + E(1,2)] / \det(E)$$

$$A_1(4,4) = -2\beta [E(1,1) + E(1,2)] / \det(E)$$

$$B_1(3) = \alpha [E(2,2) + E(1,2)] / \det(E)$$

$$B_1(4) = -\alpha [E(1,1) + E(1,2)] / \det(E)$$

$$\det(E) = E(1,1)E(2,2) - E(1,2)^2$$

5.7 平衡程式實做

A. 初步構想：

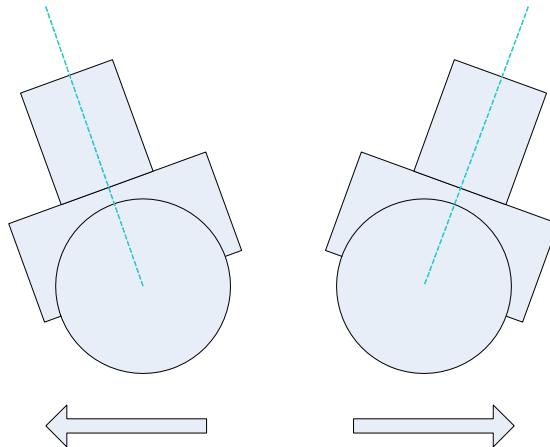


圖 65 雙輪平衡示意圖

本論文最初步的構想如圖所示，利用 IMU 來量測 Y 軸（傾斜）方向的角度，當發現平台有傾斜，將會回授訊號給馬達，平台向前傾斜馬達就往前進，平台向後傾斜馬達就往後退，利用平台的前進後退來維持平衡。

若是想要達到上述的功能，我們可設計一個比例增益控制器（P 控制器），由於是控制馬達的電壓 (V_m)，令

$$V_m = K(\phi_{ref} - \phi) \quad (\text{式 5-52})$$

K 為比例參數，可依實際狀況調整， ϕ_{ref} 為要控制到的角度值，在這裡我們設定為 0，也就是平台在平衡時的位置， ϕ 為目前量到的車身傾斜角度。雖然看似可行，不過實際上控制起來穩定性並不好，稍微受到外力影響或是不平的地面平台就會傾倒。

B. 實際作法

我們主要參考了[28]的作法，將控制系統分成兩個子系統：平衡系統和轉向系統，平衡系統包括了控制平衡和車身的前進後退，而轉向系統則是單純控制車身差速迴轉。

在平衡系統方面，可將平台視為在 2D 平面上的倒單擺，在 2D 平面上左右輪為相同的控制，若只先考慮平衡不考慮車身的前進後退，我們將可使用 PD 控制器，令 ϕ 為車身的傾斜角度，控制器馬達電壓 (V_m) 輸出為：

$$V_m = K_p(\phi_{ref} - \phi) + K_d(\dot{\phi}_{ref} - \dot{\phi}) \quad (\text{式 5-53})$$

和初步想法相比，只多了 K_d 的項，目的是改善暫態響應，不使用 I 控制器的原因是因為倒單擺系統一直是處於不穩定的狀態，而 I 控制器是為了改善穩態響應，所以不是那麼重要。另外我們希望平台一直處於平衡狀態，故可將 ϕ_{ref} 和 $\dot{\phi}_{ref}$ 設為 0，在平台狀態的讀取方面，利用裝在車身重心上的慣性量測儀，可藉由加速規得知目前平台的傾斜角度，利用陀螺儀可以知道目前平台的角速度，為了使平台能更穩定，設定讀取資料的速度為 1KHz。

之後將平台的前進後退考慮進來，令輪子轉動的角度為 θ ，控制的馬達電壓將為：

$$V_m = K_p(-\phi) + K_d(-\dot{\phi}) + K_1(\dot{\theta}_{ref} - \dot{\theta}) + K_2 \int (\dot{\theta}_{ref} - \dot{\theta}) dt \quad (\text{式 5-54})$$

加入了 K_1 和 K_2 項作為前進的補償，在 K_1 項使用輪子的角速度當作係數，除了可以作為前進的速度控制，也是對於馬達反電動式的補償項。 K_2 則是以輪子角速度的積分項作為係數，其中一個目的是使用積分項使前進的速度可以較為穩定，另一個目的則是補償量測角度時的誤差。

接下來考慮轉向系統，由於轉向系統就是我們之前所使用的雙輪差速系統，可以將馬達輸出定為：

$$V_m = K_3(\psi_{ref} - \psi) + K_4(\dot{\psi}_{ref} - \dot{\psi}) \quad (\text{式 5-55})$$

此即為 PD 控制器，利用之前提到的測程法算出目前平台朝向的角度 (ψ)，即可控制平台的轉動角度和角速度。

由於在平衡狀態時，平衡系統和轉向系統互為獨立，故最後的控制可直接做相加：

$$V_m = K_p(-\phi) + K_d(-\dot{\phi}) + K_1(\dot{\theta}_{ref} - \dot{\theta}) + K_2 \int (\dot{\theta}_{ref} - \dot{\theta}) dt + K_3(\psi_{ref} - \psi) + K_4(\dot{\psi}_{ref} - \dot{\psi}) \quad (式 5- 56)$$

(式 5- 57)即為最後需要的控制器。

考慮到實際在機構上左右兩輪的旋轉方向不同，再把右輪馬達的電壓取正，左輪馬達電壓取負即可。另外馬達在轉換方向時將會造成平台的震動，在讀取 IMU 資料時另外做了一個 50HZ 的低通濾波器濾掉車身的震動雜訊，使讀到的值可以更穩定。

5.8 平衡實驗與討論

目前平衡的部份使用遠端電腦遙控，可以在較慢速的狀態控制車身的前後左右運動，實驗時使用訂製的 24V 鋰電池作為動力來源。在實驗之前，為了確保機身的安全，我們在車身的前後加裝防護桿防止傾倒，另外在防護桿上加上泡綿減輕衝擊力。實驗截圖如圖 66 所示，(a) 為最初的狀態，剛開始時先利用墊塊確保平台處於垂直的狀態，在 IMU 經過初始值的校正後開始平衡程式。(b) 為平台保持平衡的狀態。(c) ~ (h) 為平台保持平衡的狀態下，進行前後左右的遠端遙控，在控制時可以進行原地的差速轉向。

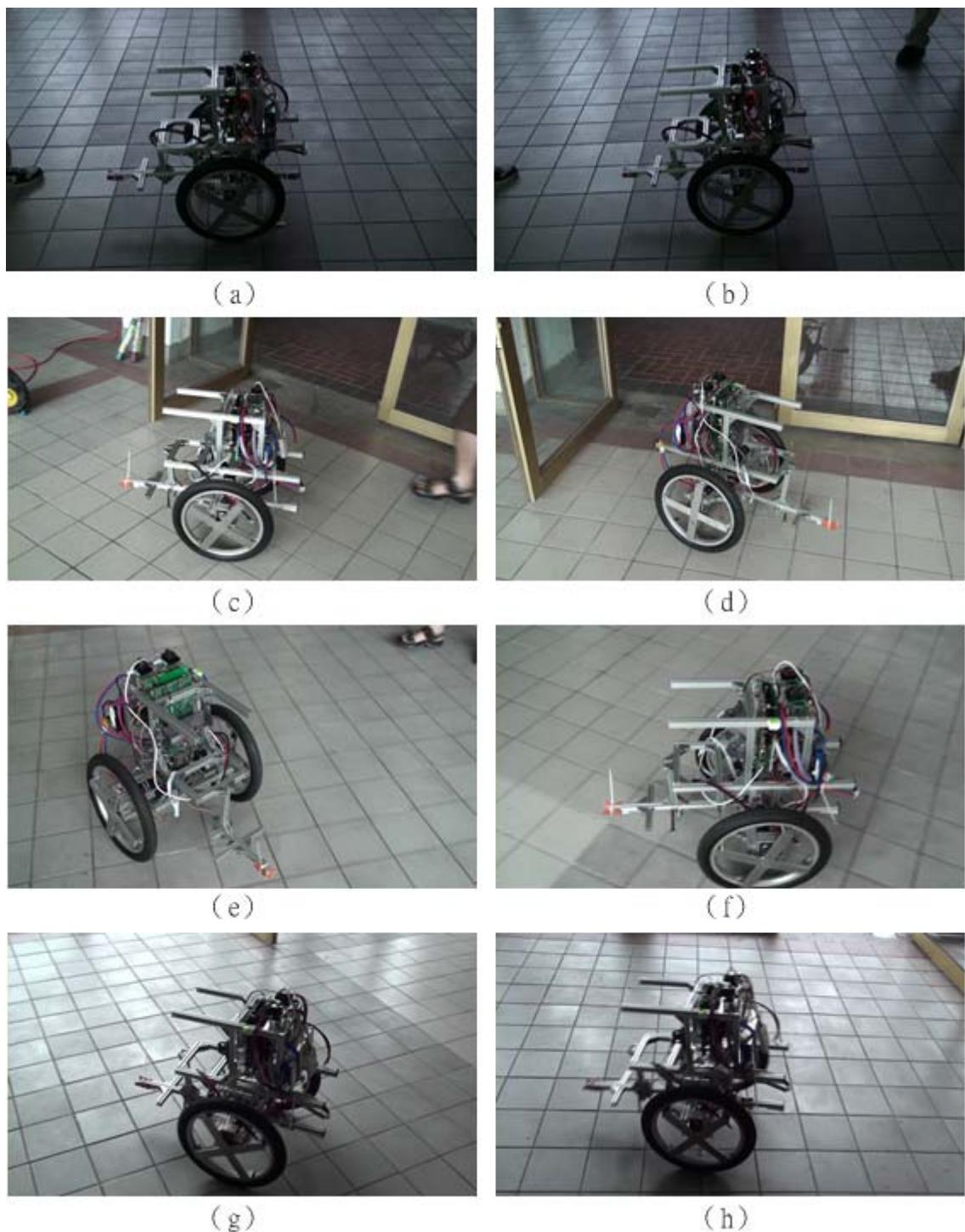


圖 66 平衡實驗截圖

目前必須先保持平台在垂直狀態才可以做 IMU 的校正，將來會製作一個校正程式：平台以傾斜的狀態開始，利用馬達的前進使車身擺到垂直狀態並平衡。如此一來將可節省許多校正的時間。

另外在實驗時我將給予馬達 PWM 的訊號記錄下來，發現目前使用到的平均功率 (Duty cycle) 都在 30% 之下，表示我們的平台還有許多餘力作更多的事情。未來希望能使平衡結果能更優化，並能精確控制所要到達的位置，在將所有的智慧化功能運用到此平台上。



第六章 結論與未來展望

本研究使用了相近的嵌入式系統架構，設計規劃並建構出「輪腳複合式運動平台 Quattroped」和「雙輪移動平台」等兩個平台的基礎運動功能，獲得成果如下：

在輪腳複合式平台的部分，目前硬體方面已經趨於完備，各種機構和電路版都可以正常運作，程式方面現在完成了輪和腳模式的各式基本功能，若需要開發新步態時，只需要提供機器人腳的旋轉角度和伸長長度即可直接使用；機器人上也製作各種保護機制防止各式的突發狀況。由於我們的最終目的是讓機器人能在各種地形上自由移動，因此未來將會全力開發各種步態，包括上樓梯的步態和各種越障模式，並改良目前的程式，使每種動作都能夠更穩定並順暢的運行。

在雙輪平台的部分，目前具備了基本的移動模式、低速避障和雙輪平衡的功能。基本的移動模式包含車身的前進、後退、轉向等動態行為；低速避障則是使用 VFH 演算法作為基礎完成了避障初步的測試；最後雙輪平衡的部份目前已能在平衡的狀態下進行各種基本移動功能。未來工作將會把更多的智慧化功能運用到此平台上，包括召喚和跟隨模式等等；另外在避障方面我們將會提升避障的速度，達到預定 30 公里/小時的避障功能；我們也將使雙輪平衡的功能更加完整並穩定，以期最後整合到實際的載具上時能更加順利。

參考文獻

- [1] 嵌入式系統開發導論. Available:
http://www.jollen.org/blog/2006/09/_run_pc_8.html
- [2] 沈宣諭, "輪腳雙模式運動平台之研發," 國立台灣大學機械所碩士論文, July, 2009.
- [3] 鄭智中, "具避障功能之可傾式平台設計與實現," 國立台灣大學機械所碩士論文, July, 2010.
- [4] D. W. Marhefka and D. E. Orin, "Intelligent Control of Quadruped Gallops," presented at the TM, Transactions on Mechatronics. IEEE/ASME, 2003.
- [5] J. Estremera and P. G. d. Santos, "Generating Continuous Free Crab Gaits for Quadruped Robots on Irregular Terrain," presented at the T-RO, Transactions on Robotics. IEEE., 2005.
- [6] S. Floyd and M. Sitti, "Design and Development of the Lifting and Propulsion Mechanism for a Biologically Inspired Water Runner Robot," *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 698-709, 2008.
- [7] S. Hirose and K. Kato, "Study on quadruped walking robot in Tokyo Institute of Technology-past, present and future," in *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on*, 2000, pp. 414-419 vol.1.
- [8] H. Takemura, *et al.*, "Slip-adaptive walk of quadruped robot," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 53, pp. 124-141, 2005.
- [9] I. Poulakakis, *et al.*, "Experimentally Validated Bounding Models for the Scout II Quadrupedal Robot," presented at the ICRA, International Conference on Robotics and Automation. IEEE., 2004.
- [10] J. A. Smith, "Galloping, Bounding and Wheeled-Leg Modes of Locomotion on Underactuated Quadrupedal Robots," Doctor of Philosophy, Mechanical Engineering, McGill University, Montreal, Canada, 2006.
- [11] J. A. Smith, *et al.*, "Bounding with Active Wheels and Liftoff Angle Velocity Adjustment," *IJRR, The International Journal of Robotics Research*, vol. 0, p. 0278364909336807v1, 2009.
- [12] T. TANAKA and S. HIROSE, "Development of Leg-wheel Hybrid Quadruped "AirHopper"Design of Powerful Light-weight Leg With Wheel," presented at the IROS, International Conference on Intelligent Robots and

- Systems. IEEE/RSJ., 2008.
- [13] S. Guccione and G. Muscato, "The wheeleg robot," *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 10, pp. 33-43, 2003.
- [14] S. Guangming, *et al.*, "A surveillance robot with hopping capabilities for home security," *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 55, pp. 2034-2039, 2009.
- [15] M. Lauria, *et al.*, "Kinematical Analysis of a Four Steered Wheeled Mobile Robot," in *Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on*, 2006, pp. 3090-3095.
- [16] L. Pei-Chun, *et al.*, "Sensor data fusion for body state estimation in a hexapod robot with dynamical gaits," *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 932-943, 2006.
- [17] Y.-S. H. a. S. Yuta, "Trajectory Tracking Control for Navigation of Self-contained Mobile Inverse Pendulum," presented at the IEEE/RSJ/GI Int. Conf. On Advanced Robotic Systems and the Real World, 1994.
- [18] A. D. A. Felix Grasser, Silvio Colombi, Member, IEEE, and Alfred C. Rufer, Senior Member, IEEE, "JOE: A Mobile, Inverted Pendulum," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. vol. 49, 2002.
- [19] Segway. Available: <http://www.segway.com/>
- [20] Segway PT - Wikipedia, the free encyclopedia. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Segway_PT
- [21] J. B. Morrell and D. Field, "Design of a closed loop controller for a two wheeled balancing transporter," in *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*, 2007, pp. 4059-4064.
- [22] M. N. A. S. W. Nawawi, and J. H. S. Osman, "Real-Time Control of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 39, 2008.
- [23] nBot Balancing Robot. Available: <http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/>
- [24] S. L. Vivien C., "Hardware Integration of a Mobile Two-Wheel Balancing Platform for Autonomous Applications," *The UoA Undergraduate Mechatronics Research Journal* vol. 1, 2008.
- [25] L. Shui-Chun, *et al.*, "Adaptive Neural Network Control of a Self-balancing Two-wheeled Scooter," in *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE*, 2007, pp. 868-873.
- [26] T. J. Ren, *et al.*, "Motion control for a two-wheeled vehicle using a self-tuning PID controller," *Control Engineering Practice*, vol. 16, pp. 365-375, 2008.
- [27] LEGO NXT 雙輪自走車. Available:

- <http://www.techbricks.nl/My-NXT-projects/nxt-self-balancing-segway-nxtway-robot.html>
- [28] R. I. Toshinobu Takei, and Shin'ichi Yuta, Fellow, IEEE, "Baggage Transportation and Navigation by a Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*,, vol. VOL. 56, 2009.
- [29] B. T. P. Deegan, and R. Grupen, "Designing a Self-Stabilizing Robot For Dynamic Mobile Manipulation," *Robotics: Science and Systems-Workshop on Manipulation for Human Environments*, 2006.
- [30] *Segway RMP* Available:
<http://www.spawar.navy.mil/robots/land/SegwayRMP/SegwayRMP.html>
- [31] C.-H. L. Shuan-Yu Shen, Chih-Chung Cheng, Jau-Ching Lu, Shao-Fan Wang, and Pei-Chun Lin, "Design of a Leg-Wheel Hybrid Mobile Platform," presented at the IROS, International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE/RSJ, 2009.
- [32] *PID Controller Simplified*. Available:
<http://radhesh.wordpress.com/2008/05/11/pid-controller-simplified/>
- [33] *DC Motor Control*. Available:
http://robotics.ee.uwa.edu.au/courses/embedded/tutorials/tutorials/tutorial_6/Tutorial_6.htm
- [34] *Hitec*. Available: http://www.hobbyhorse.com/hitec_hs85mg.shtml
- [35] I. R. N. Roland Siegwart, "Introduction to Autonomous Mobile Robots ", ed, 2004, p. P186~188.
- [36] Y. Yamamoto. NXTway-GS Model-Based Design-Control of self-balancing two-wheeled robot built with LEGO Mindstorms NXT -.