

# 兩輪平衡機器人之研究

Research of Two- Wheeled Balancing Robotics

研究生：陳世一 撰

指導教授：莊景文 博士

義守大學

電機工程研究所碩士專班

碩士論文

A Thesis Submitted to the  
Department of Electrical Engineering  
of I-Shou University  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Master Degree  
with a  
Major in Electrical Engineering  
June 2010  
Kaohsiung, Taiwan  
Republic of China

中華民國 九十九 年 六 月

義守大學  
電機工程研究所  
碩士論文

兩輪平衡機器人之研究

Research of Two-Wheeled Balancing Robotics

研究生：陳世一 撰

本論文業經審查及合格特此證明

論文考試委員

指導教授：莊景文

審查委員：高志

審查委員：馮介川

所長：莊景文

莊景文

\_\_\_\_\_

中華民國 九十九 年 六 月

# 義守大學數位論文系統

## 致謝

在兩年來的研究所生活裡，首先要感謝我的指導老師莊景文教授，在公務繁忙中仍在學業上給予學生最大的指導與鼓勵，不僅培養獨立思考的能力，更在論文上提供諸多建議，使論文得以順利完成，在此向吾師致上最高謝意。

同時也要感謝口試委員高志成博士、馮介川博士在百忙之中撥空前來擔任我的口試委員，非常細心審閱學生的論文，給予學生許多的指正與教導，對此學生由衷感謝。

此外更要感謝盈佐學長、阿尼學長在研究和課業上指導，還有碩專班的書瑤同學、咸齊同學、永江同學、景耀同學以及研究室的同學振銘、國軒在研究上的切磋與生活上的諸多照顧，還有各地好友們在課業上關心與建議。最後，我衷心感謝我摯愛的父母及家人在背後默默辛勞付出與支持是我精神上的最大支柱，讓我在此能無憂無慮的學習，沒有他們的支持與鼓勵，不可能有我今天的小小成果。

# 義守大學數位論文系統

## 兩輪平衡機器人之研究

研究生：陳世一

指導教授：莊景文 博士

義守大學電機工程研究所碩士專班

### 中文摘要

本篇論文旨在探討兩輪平衡機器人之控制，研究目的是利用樂高 LEGON X T 模組作為硬體設備配合 NXT 陀螺儀感測器，將感測器和馬達等機器人元件寫成獨立的模組、使用者可將實體元件連接各個模組，加上程式編寫即可使機器人做出預期的結果。

關鍵字：樂高模組、陀螺儀感測器

ISU Etheses System

# Research of Two-Wheeled Balancing Robotics

Student: Shih-Yi Chen

Advisor: Chin-Wen Chuang

Department of Electrical Engineering

I-Shou University

## Abstract

The main topic in this thesis is to discuss the control of the two-wheeled balancing robotics. Based on the Lego NXT, combine with gyro sensor to establish the two-wheeled balancing robotics. By proper programming, the expected results will be shown in this thesis.

Key word : Lego NXT 、 Gyro sensor

ISU Etheses System

# 義守大學數位論文系統

## 目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目錄.....	III
圖目錄.....	IV
表目錄.....	V
第一章 緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 研究動機.....	2
1-3 文獻回顧.....	3
1-4 研究步驟.....	5
1-5 論文架構.....	6
第二章 實驗硬體系統.....	7
2-1 機器人介紹 .....	7
2-2 賽格威兩輪平衡車介紹.....	9
2-3 NXT 控制器介紹.....	15
2-4 NXT 控制面板說明.....	16
2-5 NXT 感測器特性.....	16
2-6 NXT 伺服馬達特性.....	18
2-7 伺服器電腦 .....	18
2-8 機器人 LEGO 積木零件認識與使用.....	21
2-9 陀螺儀介紹 .....	22
第三章 兩輪平衡機器人動作原理分析 .....	25
3-1 機器人運動描述.....	25
3-2 陀螺儀感測器特性.....	28

# 義守大學數位論文系統

3-3	PID自動控制理論.....	30
3-4	車身平衡控制器.....	31
3-5	NXT機器人動作流程圖.....	32
3-6	角度控制與電壓平衡.....	33
3-7	設定陀螺儀傾斜角度及角速度.....	34
3-8	兩輪同步控制.....	35
3-9	陀螺儀及馬達PID 控制.....	36
第四章	實驗結果分析與討論.....	39
4-1	實驗一：陀螺儀感測器輸出電壓平衡.....	39
4-2	實驗二：兩輪同步控制.....	40
4-3	實驗三：車身平衡控制.....	43
4-4	分析討論.....	47
第五章	結論.....	48
5-1	討論.....	48
5-2	改進方向.....	48
5-3	未來展望.....	49
	參考文獻.....	50



# 義守大學數位論文系統

## 圖目錄

圖 1-1	兩輪機器人組裝完成圖	4
圖 1-2	研究步驟圖	5
圖 2-1	工業型機器人(industrel-type robot)	8
圖 2-2	服務型機器人(service-type robot)	8
圖 2-3	Segway 實體圖	9
圖 2-4	賽格威兩輪平衡車(segway HT)	11
圖 2-5	NXT 控制面板說明圖	16
圖 2-6	伺服馬達	18
圖 2-7	筆記型電腦	20
圖 2-8	Lego 積木圖	21
圖 2-9	基本陀螺儀圖	23
圖 3-1	兩輪車模型示意圖	25
圖 3-2	直立、前傾與後仰圖	26
圖 3-3	車身前傾平衡圖	26
圖 3-4	車身後傾平衡圖	27
圖 3-5	車子靜止未做控制時的情形	27
圖 3-6	Hitechnic 陀螺儀圖	28
圖 3-7	陀螺儀感測器垂直平面軸測量圖	28
圖 3-8	PID 控制結構圖	30
圖 3-9	車身平衡流程方塊圖	31
圖 3-10	機器人動作流程圖	32
圖 3-11	陀螺儀傾斜角度定義圖	34
圖 3-12	平衡演算法示意圖	36
圖 3-13	PID 控制器方塊圖	36

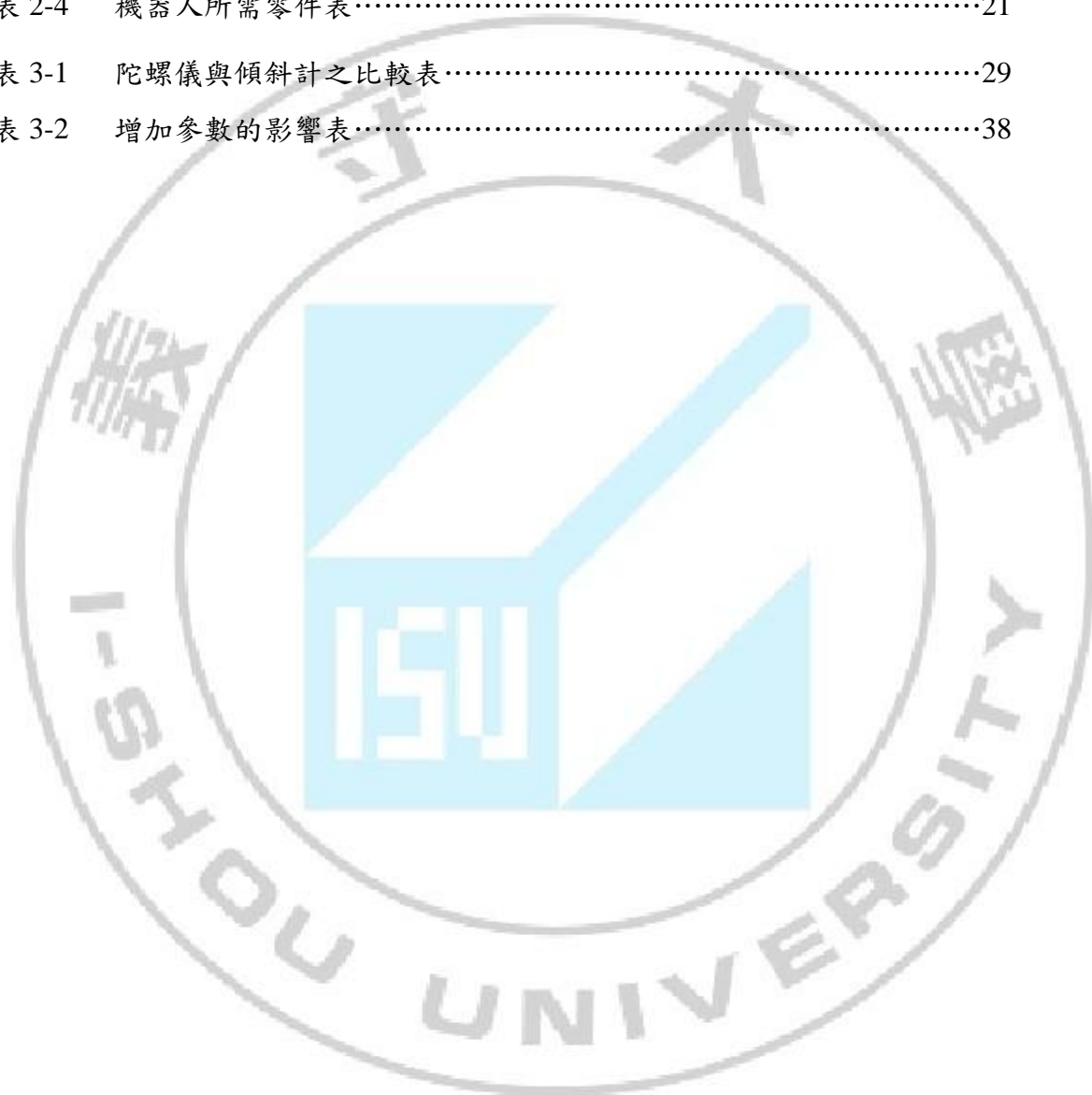


圖4-1 無偏移量狀態下陀螺儀輸出電壓偏移情形圖.....	39
圖 4-2 經偏移量補償狀態下陀螺儀輸出電壓偏移情形圖.....	40
圖 4-3 未加控制之兩輪位置差響應圖.....	41
圖 4-4 未加控制之兩輪速度差響應圖.....	41
圖 4-5 控制後的兩輪位置差響應圖.....	42
圖 4-6 控制後的兩輪速度差響應圖.....	42
圖 4-7 車身平衡速度差及位置差響應圖.....	43
圖 4-8 車身平衡連續圖.....	44
圖 4-9 加往前碰撞之速度差及位置差響應圖.....	44
圖 4-10 加往前碰撞之連續圖.....	45
圖 4-11 加往後碰撞之速度差及位置差響應圖.....	46
圖 4-12 加往後碰撞之連續圖.....	47

# 義守大學數位論文系統

## 表目錄

表 2-1	NXT 控制器性能參數·····	15
表 2-2	NXT 感測器列表·····	16
表 2-3	伺服端電腦·····	18
表 2-4	機器人所需零件表·····	21
表 3-1	陀螺儀與傾斜計之比較表·····	29
表 3-2	增加參數的影響表·····	38



ISU Etheses System

# 義守大學數位論文系統

## 第一章 緒論

### 1-1 前言

機器人基本概念：所謂的機器人並不一定要長得像人，才算是機器人，但他卻擁有某種特定的功能。樂高公司（LEGO）[1]和美國麻省理工學院（MIT）[2]合作，發展出一系列機器人創意科學課程[3]，讓我們可以設計組合出會動的、會依照程式動作的機器人[4]，透過這個課程可以讓我們對機器人有更深一層的認識與了解。近年來機器人不僅是在卡通或電影裡才能出現的虛擬人物，在這個真實世界的各個領域中以扮演非常重要的角色。例如：在日常生活中，幫日理萬機、終日忙碌的人們而沒時間整理家中的吸塵機器人或是幫行動不便的殘障人士、老人做事的自動機器人。在工廠中也有許多機械手臂在機台上做許多重複性的工作，而軍用機器人也被運用在許多著名戰爭中。

在不久的未來，機器人將在這個世界中扮演越來越舉足輕重的角色。隨著機器人學及相關軟硬體的發展，機器人將會有越來越多的用途，在家庭、學校、工廠、醫院或交通、工業、金融、、、等等，機器人將會隨時陪伴或協助人類做更多事情。

在現今講求電腦化、機器化、智慧化的時代裡，自動化機器設備的應用相當受到重視，原因是自動化設備的應用可以減少人們所需付出的勞動力，增加產量，並可從事一些危險性之工作。台灣也在2005 年行政院產業科技發展策略會議中，將「智慧型機器人」列入發展議題。

在機器人逐漸成熟之際，今日機器人的發展是全球驅勢，是逐漸跨大機器人的應用層面，朝向服務型機器人發展。越來越多的機器人設計，源自於教育、民生工程、娛樂、保全和家庭照護等不同的需求。面對這些以服務以及應用導向機器人的研發上，研究人員將更需要具備新的思維與能力，以研究出符合人所需的智慧化機器人，讓這些機器人技術逐漸走入家庭、走入人們的生活環境中。

## 1-2 研究動機

現在這個世界中不論是轎車、機車各種車輛是越來越多，而空氣汙染也越來越嚴重，於是人們也越來越重視環保，開始提倡節能減碳的觀念，台灣受限於地理環境因素，城市環境多半是地狹人稠的型態，所以交通與環保等公共議題必須獲得重視。人口的增加與科技的進步，人們開始在生活習慣上過分仰賴汽機車所帶來的便利。汽機車數量高度飽和帶來許多問題，造成空氣汙染、噪音與交通壅塞，對於環境保護與生活品質更是嚴重的危害。國內外許多科學家致力研發非使用汽油的替代能源車輛，例如太陽能車、電動車，試圖發展較無汙染且較低噪音的交通工具。

在 2001 年，美國發明家 Dean Kamen 發明一種兩輪代步的電動車- 賽格威 (Segway) [5]，在 11 月時將公司名稱改為賽格威責任有限公司，卡門在 12 月 3 日正式公開了賽格威隨意車 (Segway HT) 的原型車，並且聲稱它是人類史上第一輛能夠自主平衡 (Self-Balancing) 的運輸工具。看似結構簡單的 SEGWAY，其實動作原理大有學問，當人站在上面時，可以自動平衡，時時保持直立，而且會根據整體重心的改變而產生前進或後退的行動模式。除了擁有一般電動車所具備的低汙染、低噪音等優點，更因為體積小、易停車、操作容易，所以移動俐落靈活，被廣泛應用，亦可取代機車成為中短程的交通工具，所以在美國造成一股流行。目前要推廣賽格威這樣的兩輪電動車，最大的難處在於昂貴的價格很難被一般人接受。基於這樣的靈感與想法，我們嘗試自行設計與研發製作這樣的兩輪電動車。

樂高 NXT 模組提供許多豐富及實用的機構元件，例如：光感測器、超音波感測器、觸覺感測器、音波感測器等。NXT 模組在組裝上也是非常的多元化，利用積木讓使用者可以有足夠的想像空間去表現創意。我的研究也就是利用這樂高 NXT 模組試著把工程問題轉換為機器人的設計概念，並從機構設計、感測器整合、程式撰寫[6]、與任務測試，逐步去模擬兩輪平衡機器人的實用性[7]。



### 1-3 文獻回顧

在以往的幾年當中，有相當多的學者與研究人員針對兩輪電動車提出不少相關的研究。以下提出幾個比較具代表性的作品與論文，各自有其優缺點，給了我們不少的啟發與幫助，亦被我們在研究製作兩輪車的過程中所參考。

首先就是發明家 Dean Kamen 所發明的賽格威 (Segway) [8]，在平衡感應模組方面採用五個立體狀環震式角度量測的感測器 (陀螺儀)，並以特殊角度安裝在車身上，用以測量多方向的角度數值，並且利用五組感測器的資訊用來相互比對，來判別錯誤與補償校正；另外裝有兩個水平傾斜儀，提供有如人類內耳的重力平衡資訊；採用德州儀器生產的數位訊號處理器作為主要控制晶片，以每秒 100 次的反應頻率監控整個賽格威系統，載乘者是否向前傾或向後傾，隨時根據所有感測器所測得回傳的車身資訊判斷車子應該前進或後退，迅速反應而做出最有利的控制。如此完善的感測器的配置，使得賽格威在平衡與行走上均有很優良的穩定度。同一家公司另外推出以賽格威底座為主，可載運物品的兩輪移動運平台，稱為“RMP” (The Segway Robotic Mobility Platform)。

在 1988 年，日本人 T.Kawamura and K.Yamafuji[9] 提出了一篇單軸兩輪自我車輪式倒單擺的論文，由於它是用一顆馬達來同時驅動兩個輪子，所以它只能夠平衡、前後行走，並無法轉彎。

在 1991 年，O.Matsumoto, S.Kajita and K.tani[10] 使用適應控制理論，但仍然沒有讓車子在平面上行走的部份。

在 1992 年，E.Koyanagi-[11] 等人提出了一篇二維軌道追縱的控制演算法。雖然可以在平面上行走，但只能在很慢的速度下平衡移動。

而在 1994 年，Y. Ha and S. Yuta[12] 發表了一篇能在一平面上自我保持平衡並完成軌跡追蹤的兩輪式倒單擺機器人” YamabicoKurara”，此篇是以 Lagrange motion equation 來求系統的狀態方程式以控制車身的平衡。並利用陀螺儀來測量車身傾斜角速度和角度以及使用編碼器來讀取車輪位置。此篇論文的演算法包括了 3 個部份：平衡及

速度控制、導航控制和軌道控制。其實驗結果顯示，雖然會有模擬誤差、參數變動以及陀螺儀的傾斜角累積誤差，但車身仍然能夠依所要的速度移動並保持平衡。

2002 年，在瑞士，有以系統狀態變數狀態回授(state feedback)的方法來維持車身的平衡的研究。其控制系統使用二個解耦狀態空間控制器來輸出轉矩以分別控制車身傾斜及自轉。並使用傾斜計來直接測量車身傾斜角，但其缺點是反應與車身動態比起來太慢。用陀螺儀來測量車身傾斜角速度，並使用二個加速度計測量二個方向的加速度。它能夠由遙控器來操控，並且包含了低電源警示及倒下時自動停止運轉的設計。

除此之外，在美國也有許多機器人狂熱份子自行從事這方面的研究與實作，例如：由David. P Anderson 所製作的類似JOE 的nBot兩輪自我車輪式倒單擺[13]，它也是使用陀螺儀來讀取車身的傾斜角度並使用馬達編碼器來讀取位置使車子保持平衡。其控制方法簡單的說就是由感測器量得四個變數：車身傾斜角及角速度、車輪位置及轉動速度。當車身開始傾向一個方向時，即驅動車輪往那個方向轉動，以維持車身的直立平衡。



圖 1-1 兩輪機器人組裝完成圖



## 1-4 研究步驟

控制理論研讀、硬體組裝、軟體程式撰寫符合實驗結果，使用圖形流程圖來說明本論文研究流程。



圖 1-2 研究步驟圖

## 1-5 論文架構

# 義守大學數位論文系統

本篇論文為研究以 NXT 模擬兩輪平衡機器人的控制系統。本篇論文架構說明如下：

第一章 [ 緒論 ]：介紹本篇論文的前言、研究動機、文獻回顧、研究步驟。

第二章 介紹本篇論文的[ 實驗硬體系統 ]：分為機器人、兩輪平衡車介紹。

硬體方面分為 NXT 控制器、感測器、伺服馬達、陀螺儀介紹。

第三章 兩輪平衡機器人動作原理分析：本章介紹機器人運動基本描述，及介紹陀螺儀感測器特性，再簡略介紹 PID 自動控制理論後，利用 PID 自動控制理論來實行車身平衡控制器及兩輪同步控制器讓兩輪機器人得以平衡。

第四章 實驗結果分析與討論對兩輪自我平衡機器人的車身平衡、兩輪同步以及兩個控制器之相互關係進行測試。

第五章 結論將本論文作結論，並且對實驗所遇到的困難以及解決的方法加以討論，最後陳述本實驗的未來展望。

## 第二章 實驗硬體系統

### 2-1 機器人介紹

機器人(robot)一詞，源自 1921 年捷克作家 Karel Capek 的科幻小說(Rossum's Universal Robot)[14]，該書的機器人是由一堆零件所構成，足夠聰明、且能取代特定工作範圍的人類。其後，機器人的概念便在更多的電影與戲劇中出現，使得人們對於機器人的出現與發展更有著深切的期待。

所謂的智慧型機器人是一種可自主運作的機械生物，它是結合機械、自動化、電機、光學、電子、資訊軟體、通訊、安全系統、創意設計等跨領域技術的產物，它是一種高度技術整合、高關聯性、且具備高附加價值的產業。機器人設計的知識涉及相當廣泛的領域，其可分略為四層：

1. 硬體層(hard ware layer)：決定機器人的硬體能力，就如同人類身體的物理功能。此層包括機構元件(manipulators)、感測元件(sensors)、驅動元件(actuators) 控制元件(controller)等，其建構需要具備機械、自動化、電機、光學、電子、資訊軟體、通訊、安全系統、創意設計等知識專家方能達成。

2. 軟體層(software layer)：機器人的反應決定於此，等同於人類的感知及反射能力一般，此層的範疇包括並行程式(concurrent programming)、機器人的感知(perception)與模擬(simulation)等議題，需要資訊軟體與通訊技術方能建構之。

3. 應用層(application layer)：決定機器人的用途與應用領域，同於人類的專長與專業，此曾涉及領域問題(domain problems)、工程設計(engineering design)與系統整合(system integration)，這些就仰賴工業工程與跨領域的人才，並需要各領域的專家參與。

4. 使用者介面層(user interface layer)：前三者是工業型機器人(industrial robot)的組成要件，但隨著機器人學的發展及其用途的日益廣泛，一種新型態的機器人—服務型機器人(service robot)以無法單由前三層的知識技術來建構，使用者介面層的加入便油然而生。該層涵蓋了使用者導向設計(User-Centered Design：UCD)、人機互動

(robot-human interaction)、機器人教育(education)等議題，在此教育學、心理學等人文科學領域之知識便顯得相當重要。

前面提過從功能性可將機器人分為工業型與服務型，其工業型機器人的使用以製造業為大宗，由於其環境以之且單純，故常被固定在某處，其目標發展朝向精密控制為主，不須以人工智慧為重點，也不需要大量的電腦運算能力，是機器人發展史上最久、亦最成熟的類型，且系統穩定可靠。典型的範例如圖 2-1 所示：



圖 2-1 工業型機器人(industrel-type robot) [14]

而服務型機器人的主要目的在於提供人們所需要的各類服務。由於更貼近人類的生活，於是所處環境顯得不確定，必須隨時應付突如其來的變化。在任務的執行上，服務型機器人可能同時執行多種不同的任務，面對未知情境的判斷與決策能力須比工業型機器人來的快速、確實，故服務型機器人無論在硬體或軟體的設計難度均較高，必須具備高彈性的硬體架構、高處理的任務執行能力、可快速與簡易的調整與修改，且在人機互動上也需特別重視，典型的範例如圖 2-2 所示：

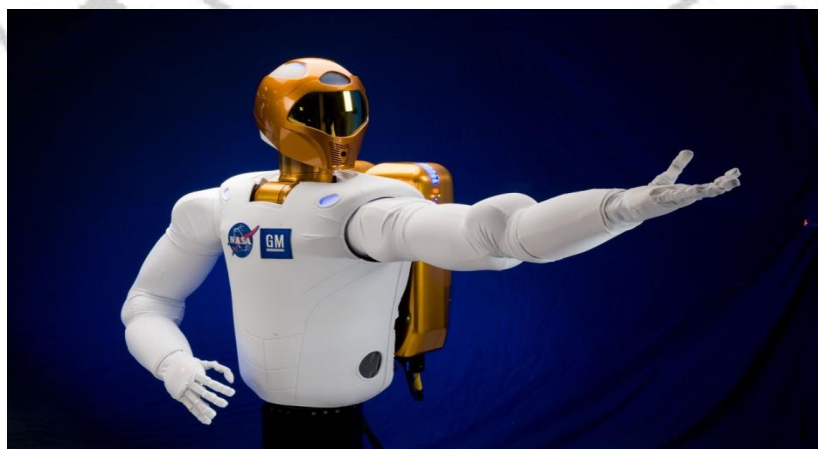


圖 2-2 服務型機器人(service-type robot) [14]



## 2-2 賽格威兩輪平衡車介紹

賽格威 (Segway) 是一種電力驅動、具有自我平衡能力的個人用運輸載具，是都市用交通工具的一種如圖 2-3 所示。由美國發明家狄恩·卡門 (Dean Kamen) 與他的 DEKA 研發公司 (DEKA Research and Development Corp.) 團隊發明設計，並創立賽格威責任有限公司 (Segway LLC.)，自 2001 年 12 月起將賽格威商業化量產銷售。雖然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所致，賽格威的產品並沒有在上市後獲得原本預期的迴響。



圖 2-3 Segway 實體圖[5]

### 簡介

由於賽格威是一種前所未見的嶄新交通工具，因此很難用傳統的分類方式定義它的種類。有人認為賽格威應該是一種雙輪版的單輪車 (Unicycle)，有人認為它應該是動力滑板車 (Stand-up Scooter) 的一種，但它是單軸雙輪設計，與雙軸雙輪的傳統滑板車有些不同。而在某些比較正式的場合 (例如官方的道路法規) 中，賽格威這種交通工具又被稱作「電動個人輔助機動裝置」 (Electric Personal Assistive Mobility Device, EPAMD)，俗稱電動代步車。賽格威的產品名稱「Segway」起源於英文單字「Segue」，意指「流暢平順地走」，用來形容這種交通工具可以讓人們騎著在都市裡面毫無障礙地移動。

## 原理

賽格威的運作原理主要是建立在一種被稱為「動態穩定」(Dynamic Stabilization)的基本原理上,也就是車輛本身的自動平衡能力。以內置的精密固態陀螺儀(Solid-State Gyroscopes)來判斷車身所處的姿勢狀態,透過精密且高速的中央微處理器計算出適當的指令後,驅動馬達來做到平衡的效果。

假設我們以站在車上的駕駛人與車輛的總體重心縱軸作為參考線。當這條軸往前傾斜時,賽格威車身內的內置電動馬達會產生往前的力量,一方面平衡人與車往前傾倒的扭矩,一方面產生讓車輛前進的加速度,相反的,當陀螺儀發現駕駛人的重心往後傾時,也會產生向後的力量達到平衡效果。

因此,駕駛人只要改變自己身體的角度往前或往後傾,賽格威就會根據傾斜的方向前進或後退,而速度則與駕駛人身體傾斜的程度呈正比。原則上,只要賽格威有正確打開電源且能保持足夠運作的電力,車上的人就不用擔心有傾倒跌落的可能,這與一般需要靠駕駛人自己進行平衡的滑板車等交通工具大大不同。

車輛的能量來源是兩個鎳氫(NiMH)充電電池,較後期的車款上也可以選配蓄電量更大的鋰充電電池。除了前後傾修正與前進後退外,賽格威的轉向可透過兩種不同的方式達到,其中一種是如同大部分的腳踏車類或摩托車類交通工具一般,駕駛人在車輛持續前進(或者後退,這就是只有賽格威辦得到的動作)的狀態中將自己的身體重心往左右傾斜,利用自身重量所產生、與車身縱軸垂直的分量,作為轉彎時的向心力而達到轉向的目的。

除此之外駕駛人也可以扭轉賽格威的龍頭(把手)部分,使車輛左右兩個車輪產生轉速差,例如當龍頭向左轉時,右輪的轉速會比左輪快,達到向左轉的效果。必要時,賽格威甚至可以做出一輪向前一輪向後的動作,達到原地轉向的效果,因此大幅提升這種交通工具的機動性。因為這種高度的機動性,再加上熱塑材質製成的輪圈,其踏面面積其實不比人類的雙腳大上多少,因此理論上賽格威可以到達得了人類所能走到的大部分地方,甚至包括路邊的人行道或落差不會太大的階梯(雖然部分地區的交通法規,禁止賽格威在這類地點行駛)。



## 歷史

賽格威的誕生源起，最早是起因於迪恩·卡門的 DEKA 與美國大型醫療器材生產商嬌生（Johnson & Johnson）的子公司獨立科技（Independence Technology）所合作開發的一種自動平衡式動力輪椅——iBOT。

卡門觀察人類走路的姿勢特性，領悟到其實人類之所以可以平穩地直立行走，是因為體內靈敏的平衡器官可以精確地判斷出身體重心的改變量，透過小腦的即時反應，然後利用腿部的肌肉即時出力來平衡傾倒的態勢。所以當人類的身體前傾時，這種不自主的反應會促使人類伸出其中的一隻腳往前踩來平衡身體，所以透過這種前傾、往前踏腳、前傾、往前踏腳的動作循環，即構成了「步行」這種動作。因此卡門嘗試使用精密的陀螺儀來代替人類的前庭與耳蝸等平衡器官，以電動馬達與車輪代替人類的雙腳，發展出所謂的「動態穩定」概念。

1999 年 7 月 27 日卡門創立了雅克羅責任有限公司（Acros LLC.），主旨是利用動態穩定技術來開發生產一種高效率、零污染的運輸工具。

2001 年 2 月，新的研發與製造廠在美國新罕布夏州貝福特（Bedford, New Hampshire）破土動工，並且在 11 月時將公司名稱改為賽格威責任有限公司，卡門在 12 月 3 日正式公開了賽格威隨意車（Segway HT）的原型車，如圖 2-4 並且聲稱它是人類史上第一輛能夠自主平衡的運輸工具。



圖

2-4 賽格威兩輪平衡車(segway HT) [5]

第一輛賽格威的預產車是在 2002 年 1 月推出。2 月 15 日時，該公司所在地新罕布夏州通過州法案，允許賽格威這種電動個人輔助機動裝置（EPAMD）能在該州內的路旁人行道上行駛，而透過賽格威公司的到處遊說，在 2002 年底之前，美國共有 31 個州通過立法，允許 EPAMD 能在人行道上使用。

第一輛實際量產的產品，一輛序列編號 022111000001 的 Segway HT i167 正式出廠，而這輛具有紀念價值的量產車，當然很自然地變為狄恩·卡門個人的收藏。2002 年 4 月 23 日，喬治亞州的亞特蘭大市政府向賽格威採購了一批新車，使得該市成為這種新運具的第一個官方使用單位，之後陸續又有許多不同等級的官方單位跟進。而 2002 年 11 月 18 日時，賽格威正式在亞馬遜網站上進行預購活動，開始實際量產銷售給一般的民眾。

2003 年 1 月 16 日，一家法國的私人運輸公司凱歐利（Keolis）與賽格威公司簽署協議，要在法國發展利用賽格威便利車作為大眾運輸工具的計畫。除了在法國各地的火車站、機場設置賽格威的出租服務點外，也包含了一個名為「氧氣站」（Station Oxygène）的創新計畫，這個計畫預計在全法國各大城市建立一個賽格威便利車與其他零污染交通工具的出租網路，讓旅客可以用甲地租車乙地還車、只以計時定價的方式租賃適當的交通工具，來降低人員運輸在都市地區所造成的空氣污染問題，這也是賽格威第一次銷售到美國之外的其他國家。該公司的計畫已經在 2003 年中時實現，第戎（Dijon）的市觀光辦公室是其第一個客戶，開始提供到當地遊玩的旅客賽格威車作為市區遊覽的工具。除此之外，在巴黎的香榭麗舍大道（Champs-Élysées）、拉德芳斯（La Défense）等行人徒步區內，也可以租到賽格威車作為徒步之外的另外一種替代。

2003 年 2 月，隸屬美國國防部的國防先進研究計畫署（Defense Advanced Research Projects Agency，DARPA）與賽格威簽約，將 15 架賽格威便利車改裝成機器人移動平台（Robotic Mobility Platforms，RMP），讓各相關研究機構作為一種穩定、低廉的機器人系統發展平台。不久之後，隸屬美國海軍、位於加州聖地牙哥的空海作戰系統司令部（Space and Naval Warfare Systems Command，SPAWAR）也跟進採購了 14 架 RMP，並且配佈給各政府與大學研究單位，作為機器人研究計畫的載台，是賽格威實

際應用於軍事與科技發展上的衍生案例。

2003 年 10 月 29 日，賽格威與美國大型家庭用品通路商布魯克史東（Brookstone）達成協議，成為賽格威第一個全國性的實體銷售網，期望以實際展示讓潛在消費者試期的方式，拯救賽格威在上市初期，只透過網路郵購的虛擬銷售方式而侷限住的推廣狀態（賽格威原本預計新車在開始上市後的頭一年之內應可達到 5 到 10 萬輛的銷售，但結果是他們在 21 個月內只賣出 6000 輛新車）。

2005 年 3 月 1 日，賽格威一口氣發表了三種新款的衍生車型，其中包括了賽格威越野車（Cross-Terrain，XT）與高爾夫球車（Golf Transporter，GT）的特殊用途版本。

### 實際運用

賽格威在推廣上的困難點，主要集中在價格與法規問題上。首先，由於大量使用最先進的科技來製造隨意車，每輛新車的價值都頗為高昂。以最入門的 i2 車款而言，售價也高達 5,000 美元上下，而台灣的 i2 則定價為 26 萬新台幣上下，相當於 5 輛 125cc. 等級速克達摩托車的價格，更別說價格只有摩托車一半的電動腳踏車），使得賽格威仍然只能保持它高收入階層消費者才使用得起的狀況，與當初人人皆可利用的遠景有點距離。

除此之外，像賽格威這種過去在道路法規中從未存在過的新產品，到底應該分類在哪種等級的交通工具裡面，各地區皆有不同的認知。雖然賽格威當初在開發時，就是希望其不受地形限制的特性能夠將動力輔助交通工具的使用範圍擴及到人行道、階梯這種傳統有動力的車輛不能遍及的地點，但在實際上，卻有許多國家在法令上限制了如此的使用方式。各國的相關規定概述如下：

### 美國

在美國，賽格威原本被歸類為動力腳踏車類的低輸出動力車輛，因此必須行使於標準的慢車道上，而無法普遍用於它原本開發時所鎖定的主要使用環境——人行道。為此，賽格威公司花費了非常多的力量在遊說美國各州政府，終於在 30 個州順利地讓賽格威可以行駛的範圍擴展到當初的預期。但是，仍然有些地區或城市禁止這樣的使用方式。



## 歐洲

在荷蘭，除了少數心肺方面疾病的患者可以使用賽格威作為醫療性輔助器材之外，賽格威因為安全上的考量並不被允許在公共道路上使用。由於被分類為有動力機械車輛卻又無法通過車輛的基本規格認證，在英國跟瑞典也是禁止賽格威在公共道路上行駛。

而在德國，一般而言除非特別申請獲得通過，否則賽格威只被允許用於部分私人擁有的土地或道路上，而無法進入公共道路，但在部分地區也有將賽格威視為電動輪椅類型的設備，而允許行駛於腳踏車專用道或人行道的情况。

## 亞洲

在日本，賽格威是被分類為與排氣量介於 50 到 125 立方釐米的摩托車相同等級的有動力車輛，因此要求必須配備有煞車與頭燈、煞車燈、方向燈等輔助設備，車主也需繳稅註冊車牌並擁有駕駛執照。但由於在賽格威上加裝這些設備有其困難度（尤其是煞車裝置），因此在公共道路上使用可能會導致車主違反「上路車輛整備不良」的法規而受罰<sup>[3]</sup>，間接等於禁止了賽格威的使用。

台灣在 2007 年 7 月 4 日時修正了負責管理道路使用的道路交通處罰條例，賽格威由於符合第 69 條中對於電動自行車分類定義，因此得以以機慢車的身份，在符合第 69-1 條中所列的要求，經車輛型式審驗合格並黏貼合格標章之後行駛於公共道路上<sup>[4]</sup>，成為亞洲地區第一個在公共道路上可以合法行駛賽格威的地方。

## 2-3 NXT 控制器介紹

為了詳細介紹 NXT 控制器性能參數方便容易尋找規格，使用表格方式陳列。

表 2-1 NXT 控制器性能參數[15]

性能參數	特點描述
主處理器	32 位 ARM7 處理器 AT91SAM7S256，256K 快閃記憶體，64K 靜態記憶體，主頻 48MHZ
輔助運算器	8 位 AVR 處理器 ATmega48，4K 快閃記憶體，512 位元組靜態 記憶體，主頻：9MHZ
藍芽無線通訊	藍芽核心規範 2.0+EDR 系統，支援串口規範，內置 47KRAM，外置 8Mbit 快閃記憶體，主頻 26MHZ
USB2.0 通訊	傳輸速度 12Mbit/s
輸入埠	4 個 6 線數位介面，支援數位和類比介面，1 個高速埠，符合 國際匯流排標準 IEC61158TYPE-4/歐洲標準 EN50170
輸出埠	3 個 6 線數位介面，支援解碼器信號輸入
顯示幕	100x64 像素黑白圖像顯示，可視區域 26mm x 40.6mm
揚聲器	8 位元解析度的輸出頻道，支持 2—16KHZ 採樣率
電源	6 顆 AA 電池，1400mA 的鋰電池板
連接線	6 線工業標準連接線 RJ12 右側卡口

## 2-4 NXT 控制面板說明



圖 2-5 NXT 控制面板說明圖[4]

## 2-5 NXT 感測器特性

NXT 除了套件內付的感應器，一些廠商也提供不少相容的感應器。有了這些感應器，機器人就可以有更多的功能。礙于 NXT 只有四個輸入口，所以最多也不過只能同時使用四個感應器。所以才有廠商開發各種實驗板，增加 NXT 的感應功能。

表 2-2 NXT 感測器列表[16]

名稱	英文	功能
觸碰感應器	Touch Sensor	觸碰感應
光源感應器	Light Sensor	光源強弱感應
聲音感應器	Sound Sensor	聲音強弱感應



超音波感應器	Ultrasonic Sensor	距離，障礙物感應
角度感應器	Tachometer	馬達轉向及傳動角度
電子羅盤	Compass	地磁方向判別
陀螺儀	Gyro	單軸的角加速度
加速度計	Acceleration (Tilt)	三軸向的加速度
紅外線感應器	Infrared Seeker	尋找紅外線來源
紅外線傳輸	Infrared Link	以紅外線傳輸信號
RFID	RFID	無線射頻識別
攝影機	NXTCAM	影像識別
PS2 搖桿接收器	PS2 controller interface	接收 PS2 搖桿信號
紅外線距離感測	Infrared distance sensor	紅外線距離感測
紅外線障礙感測	Dual Infra Red Obstacle Detector	紅外線障礙感測
空壓感測器	Pneumatic Pressure Sensor	氣壓元件的壓力偵測
即時時鐘	Realtime Clock	現在時間

## 2-6 NXT 伺服馬達特性

伺服馬達，如圖 2-6，內置角度感測器可以測量速度和距離可以精準控制：當機器人運行時，可以校準速度；控制精度可以精確到 1 度。



圖 2-6 伺服馬達[4]

## 2-7 伺服端電腦

為了詳細介紹伺服端電腦性能參數方便容易尋找規格，使用表格方式陳列。

表 2-3 伺服端電腦

性能參數	特點描述
作業系統	Windows XP™ Home Premium
CPU	AMD Tuurion™64x2 雙核心處理器 TL-66 2.3 GHz ，2x512 KB L2 快取記憶體
作業平台	Mobile AMD Sempron™3500+(1.80 GHz，512KB) AMD Athion™64x2 TK-55 1.8GHz
系統記憶體	2 GB DDR2 667 MHz 記憶體
天線	Acer DVB-T 天線(UHF/VHF 接收效果)
顯示器	15.4" WXGA(220-nit) Acer CrystalBrite TFT 液晶螢幕 1280x800 像素解析度 8ms 反應時間

視訊卡 & 記憶體	NVIDIA® GeForce® 8400M G ， 1024MB TurboCache  256MB GDDR2 VRAM 768 MB 的共  用系統記憶體
圖形能力	896 MB TurboCache NVIDIA GeForce 7000M 繪圖晶片 支援 HDCP、DVI-D
硬碟	250GB
光碟機	DVD Super Multi Light Scribe
讀卡機	5-in-1 card reader： SD， MMC， MS，  MS PRO、xD
攝影機	16.7 百萬畫素視訊攝影機
音訊	Dolby Home Theater 音效強化功能  支援 S/PDIF  相容 MS-Sound  內建麥克風
通訊功能	整合型 Acer Crystal Eye  Acer Xpress VoIP  WLAN： 802.11b/g Wi-Fi CERTIFIED  WPAN： Bluetooth 2.0+EDR  LAN： Gigabit 乙太網路  56K ITU V.92 數據機
體積與重量	366(長)x274(寬)x33.6/42.6(高)  2.75 公斤， with 6-cell battery
電源系統	44,4W 4000 mAh 鋰電池  3-pin 90W 電源轉換器

鍵盤	2.35mm travel
I/O 連接	ExpressCard/54 插槽 4 個 USB 2.0 插槽 IEEE 1394 插槽 CIR 紅外線插槽 外接顯示器(VGA)槽 RF 輸入插孔 AV 視聽輸入槽

上頁性能參數，如圖 2-7 筆記型電腦



圖 2-7 筆記型電腦

## 2-8 機器人所需零件介紹

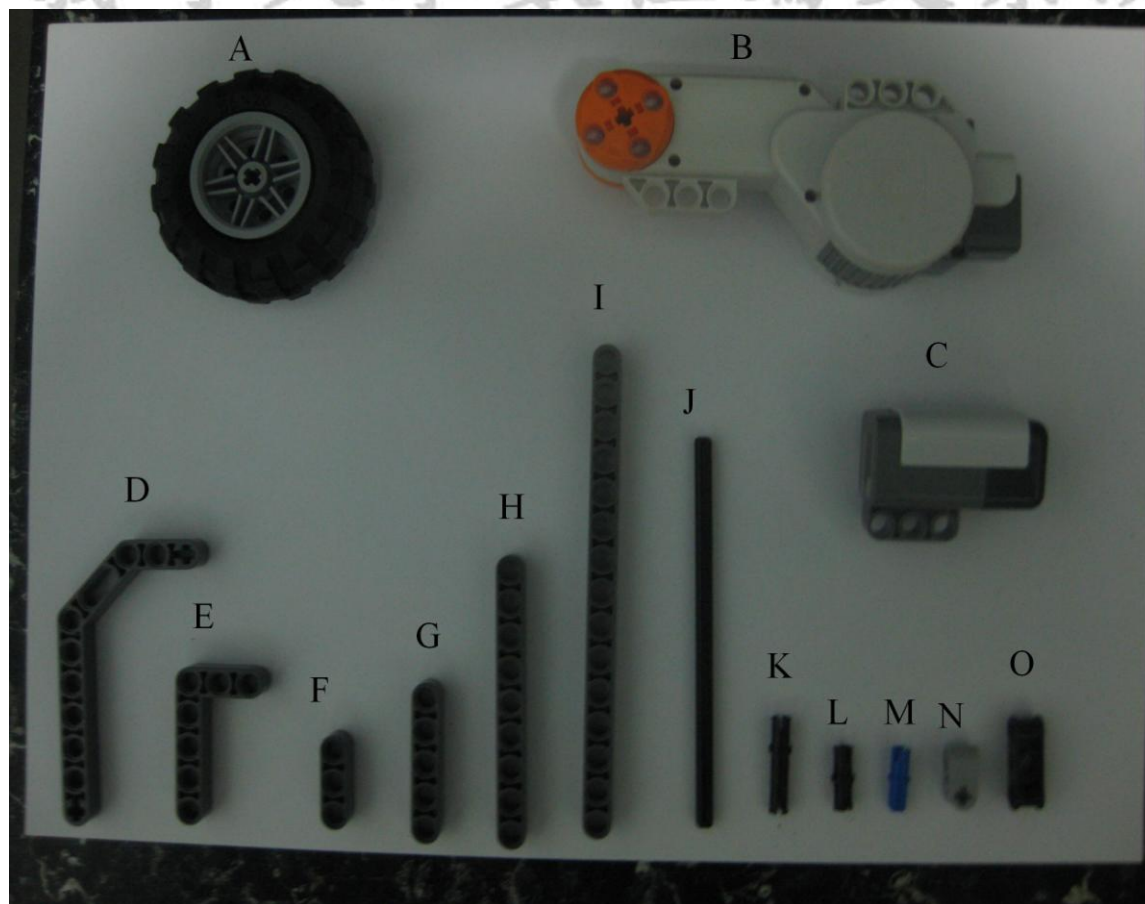


圖 2-8 Lego 積木圖

表 2-4 機器人所需零件表

積木名稱	數量
A：輪子	×2
B：伺服馬達	×2
C：陀螺儀感測器	×1
D~I：長條積木	×15
J：十字軸	×2
K~M：連接栓	×22
N、O：連接器	×8
連接信號線	×4



## 2-9 陀螺儀介紹

陀螺儀[17]，是一種用來感測與維持方向的裝置，基於角動量守恆的理論設計出來的。陀螺儀主要是由一個位於軸心可以旋轉的輪子構成。陀螺儀一旦開始旋轉，由於輪子的角動量，陀螺儀有抗拒方向改變的趨向。人們利用陀螺的力學性質所製成的各種功能的陀螺裝置稱為陀螺儀(gyroscope)，它在科學、技術、軍事等各個領域有著廣泛的應用。比如：回轉羅盤、定向指示儀、炮彈的翻轉、陀螺的章動、地球在太陽（月球）引力矩作用下的旋進（歲差）等。

### 歷史

1850 年法國的物理學家萊昂·傅科 (J.Foucault) 為了研究地球自轉，首先發現高速轉動中的轉子 (rotor)，由於慣性作用它的旋轉軸永遠指向一固定方向，他用希臘字 gyro (旋轉) 和 skopein (看) 兩字合為 gyro scopei 一字來命名這種儀錶。

自從上個世紀七十年代以來，現代陀螺儀的發展已經進入了一個全新的階段。1976 年等提出了現代光纖陀螺儀的基本設想，到八十年代以後，現代光纖陀螺儀就得到了非常迅速的發展，由於光纖陀螺儀具有結構緊湊，靈敏度高，工作可靠等等優點，所以目前光纖陀螺儀在很多的領域已經完全取代了機械式的傳統的陀螺儀，成為現代導航儀器中的關鍵部件。和光纖陀螺儀同時發展的除了環式鐳射陀螺儀外，還有現代集成式的振動陀螺儀，集成式的振動陀螺儀具有更高的集成度，體積更小，也是現代陀螺儀的一個重要的發展方向。

### 結構

從力學的觀點近似的分析陀螺的運動時，可以把它看成是一個剛體，剛體上有一個萬向支點，而陀螺可以繞著這個支點作三個自由度的轉動，所以陀螺的運動是屬於剛體繞一個定點的轉動運動。更確切地說，一個繞對稱軸高速旋轉的飛輪轉子叫陀螺。將陀螺安裝在框架裝置上，使陀螺的自轉軸有角轉動的自由度，這種裝置的總體叫做陀螺儀，如圖 2-9 所示。



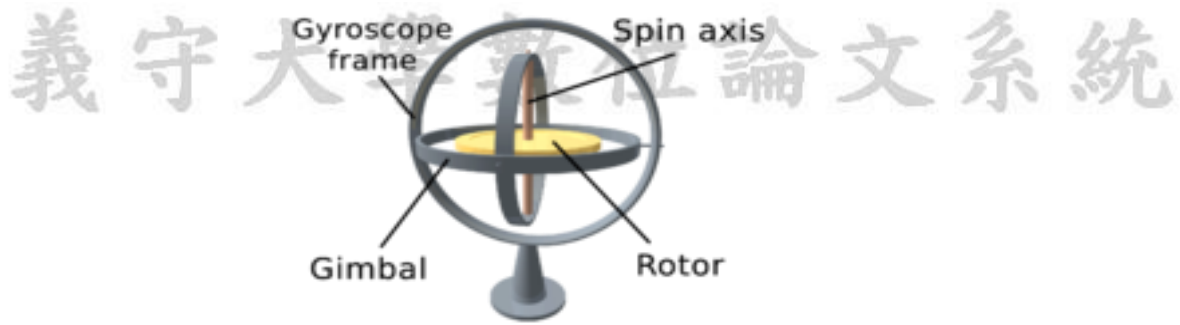


圖 2-9 基本陀螺儀圖[17]

陀螺儀的基本部件有：

- (1) 陀螺轉子(常採用同步電機、磁滯電機、三相交流電機等拖動方法來使陀螺轉子繞自轉軸高速旋轉，並見其轉速近似為常值)；
- (2) 內、外框架(或稱內、外環，它是使陀螺自轉軸獲得所需角轉動自由度的結構)；
- (3) 附件(是指力矩馬達、信號感測器等)。

#### 特性

陀螺儀被用在飛機飛行儀錶的心臟地位，是由於它的兩個基本特性：一為定軸性 (inertia or rigidity)，另一是逆動性 (precession)，這兩種特性都是建立在角動量守恆的原則下。

#### 定軸性

當陀螺轉子以極高速度旋轉時，就產生了慣性，這慣性使得陀螺轉子的旋轉軸保持在空間，指向一個固定的方向，同時反抗任何改變轉子軸向的力量，這種物理現象稱為陀螺儀的定軸性或慣性。其慣性隨以下的物理量而改變：

1. 轉子質量愈大，慣性愈大
2. 轉子旋轉半徑愈大，慣性愈大
3. 轉子旋轉速度愈大，慣性愈大。

#### 逆動性

在運轉中的陀螺儀，如果外界施一作用或力矩在轉子旋轉軸上，則旋轉軸並不沿施力方向運動，而是順着轉子旋轉向前 90 度垂直施力方向運動，此現象即是逆動性。

逆動性的大小也有三個影響的因素：

- 1.外界作用力愈大，其逆動性也愈大；
- 2.轉子的質量慣性矩（moment of inertia）愈大，逆動性愈小；
- 3.轉子的角速度愈大，逆動性愈小。

而逆動方向可根據逆動性原理取決於施力方向及轉子旋轉方向。

## 原理

陀螺儀的原理就是，一個旋轉物體的旋轉軸所指的方向在不受外力影響時，是不會改變的。人們根據這個道理，用它來保持方向，製造出來的東西就叫陀螺儀。我們騎自行車其實也是利用了這個原理。輪子轉得越快越不容易倒，因為車軸有一股保持水準的力量。陀螺儀在工作時要給它一個力，使它快速旋轉起來，一般能達到每分鐘幾十萬轉，可以工作很長時間。然後用多種方法讀取軸所指示的方向，並自動將數據信號傳給控制系統。

## 應用

陀螺儀器最早是用於航海導航，但隨著科學技術的發展，它在航空和航太事業中也得到廣泛的應用。陀螺儀器不僅可以作為指示儀錶，而更重要的是它可以作為自動控制系統中的一個敏感元件，即可作為信號感測器。根據需要，陀螺儀器能提供準確的方位、水準、位置、速度和加速度等信號，以便駕駛員或用自動導航儀來控制飛機、艦船或穿梭機等航行體按一定的航線飛行，而在導彈、衛星運載器或空間探測火箭等航行體的制導中，則直接利用這些信號完成航行體的姿態控制和軌道控制。作為穩定器，陀螺儀器能使列車在單軌上行駛，能減小船舶在風浪中的搖擺，能使安裝在飛機或衛星上的照相機相對地面穩定等等。作為精密測試儀器，陀螺儀器能夠為地面設施、礦山隧道、地下鐵路、石油鑽探以及導彈發射井等提供準確的方位基準。由此可見，陀螺儀器的應用範圍是相當廣泛的，它在現代化的國防建設和國民經濟建設中均佔重要的地位。

# 義守大學數位論文系統

## 第三章 兩輪平衡機器人動作原理分析

### 3-1 機器人運動描述

本論文所設計之兩輪車，如圖3-1 所示，若以輪子與地面之接觸點為支點，而重心明顯位於高於支點的地方，如此此兩輪車即為一不穩定平衡之系統[18]。因此，如果我們想要讓車身仍然可以維持平衡直立的狀態，就必須借助兩輪前後轉所造成的反作用力來使上半身的桿子後仰或前傾，進而達到車身平衡、定位與兩輪同步的控制。

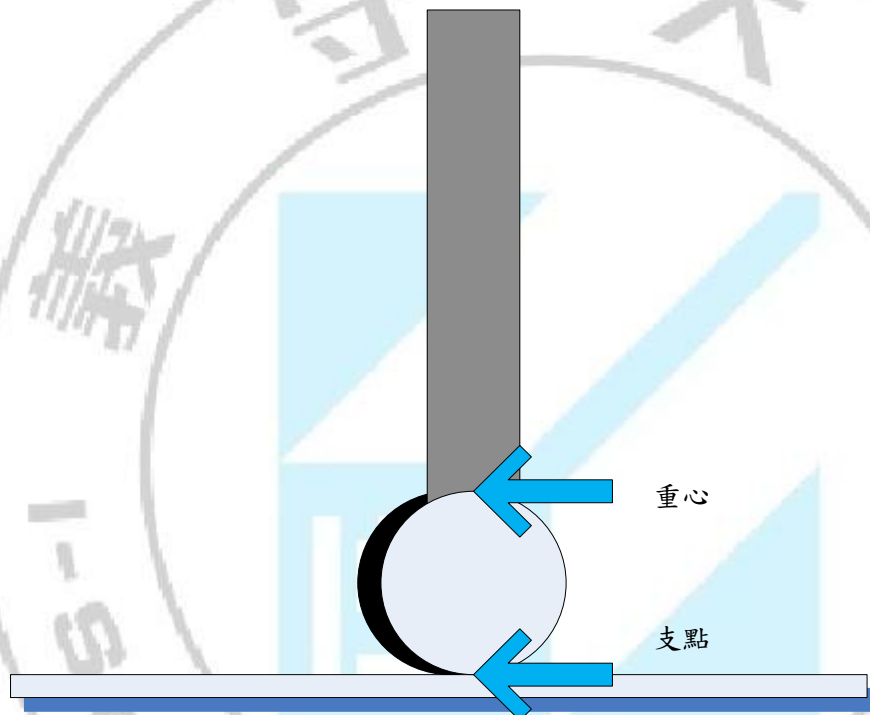
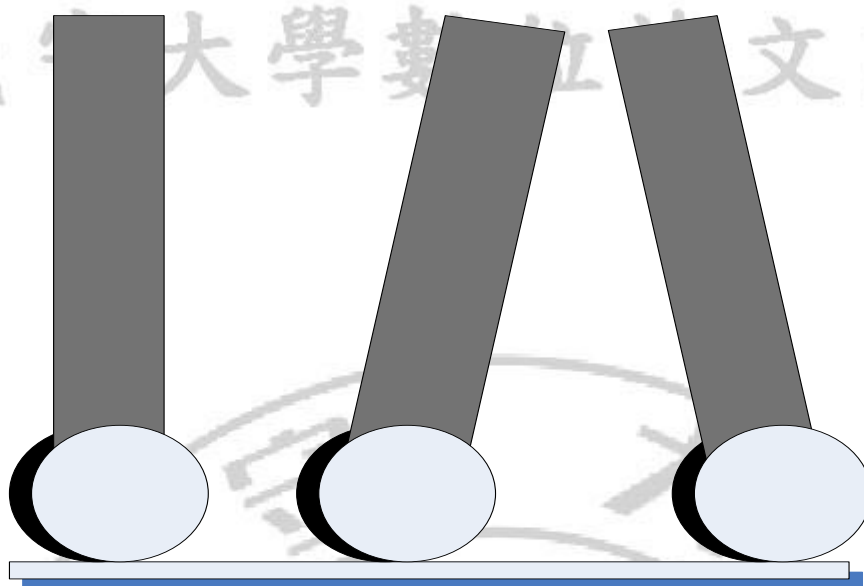


圖 3-1 兩輪車模型示意圖

車子的基本動作有三種：（1）在原地維持平衡(直立)。（2）前傾。  
（3）後仰。

原地維持平衡時，車身會有三種狀態：直立、前傾、後仰，如圖3-1  
當直立時，車身保持不動，則輪子靜止，不做任何控制。若車身前傾時，必需控制輪子向前轉動，利用車身慣性，讓車身回到直立的狀態，並依據車身傾斜的角度與角速度大小，來控制輪子所需轉動的力量。若車身後仰時，與前傾的控制方式相反。

ISU Etheses System



1. 靜止

2. 前傾

3. 後傾

圖 3-2 直立、前傾與後仰圖

三種行動方式與決策模式分別如下所述：

1. 靜止：若車身重心落於左、右兩輪與地面接觸點的連線中心位置，則車身將保持平衡不動，則輪子靜止不做任何控制。
2. 前傾：若車身重心偏前，車身將向前傾斜，則控制輪子前進，依據輪子轉動與車身傾斜的相對角度及相對角速度大小，控制輪子前進的力量大小，以維持車身平衡。

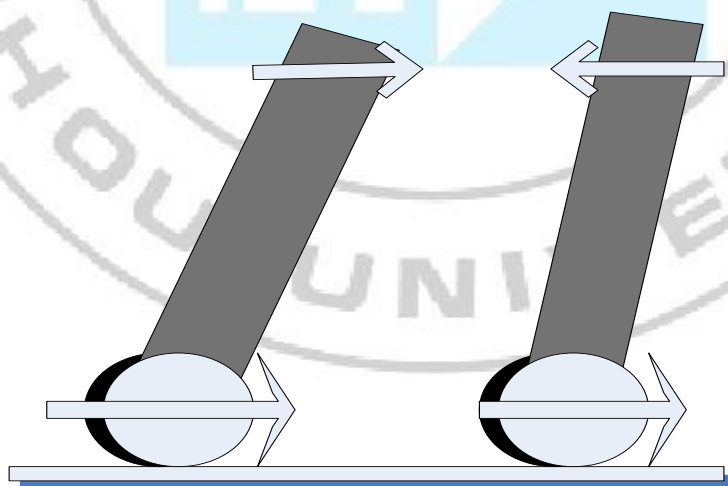


圖 3-3 車身前傾平衡圖



3. 後傾：若車身重心偏後，則車身將向後傾斜，則控制輪子後退，依據輪子轉動與車身傾斜的相對角度及相對角速度大小，控制輪子後退的力量大小，以維持車身平衡。

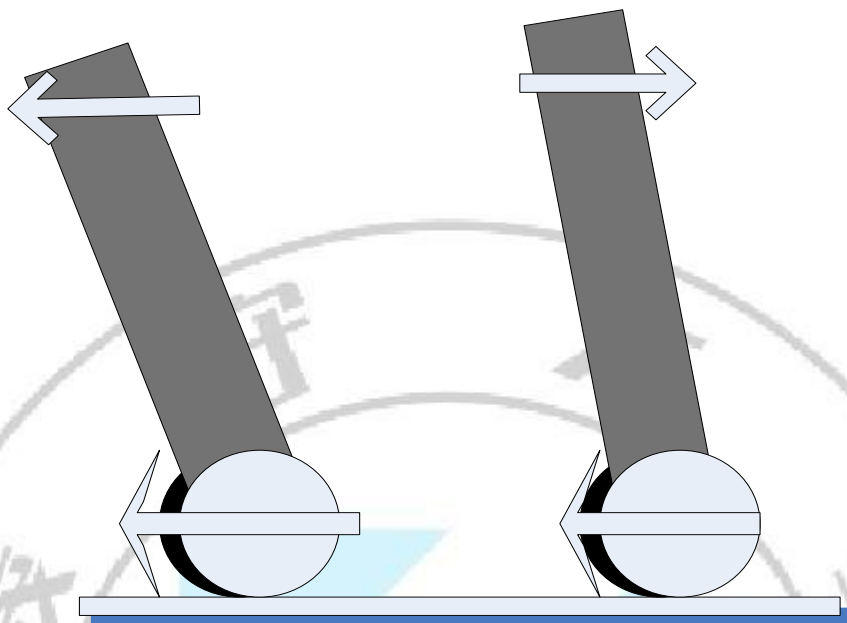


圖 3-4 車身後傾平衡圖

當輪子轉動的角度大於車身傾斜的角度且輪子轉速大於車身傾斜速度，則須控制馬達減速甚至往相反方向加速使輪子當時轉動方向的力量減小；當輪子轉動的角度小於車身傾斜的角度且輪子轉速小於車身傾斜速度，則須控制馬達加速使輪子當時轉動方向的力量增加；由此我們可以得知輪子與車身之間的相對角度及相對角速度會影響到車身的平衡角度、角速度及最後馬達輸出力量的大小。當未做控制時，不論車身往前傾或往後傾，左右輪都是靜止的狀態，也就是車身前後擺動與輪子轉動是互相獨立的如圖3-5所示。

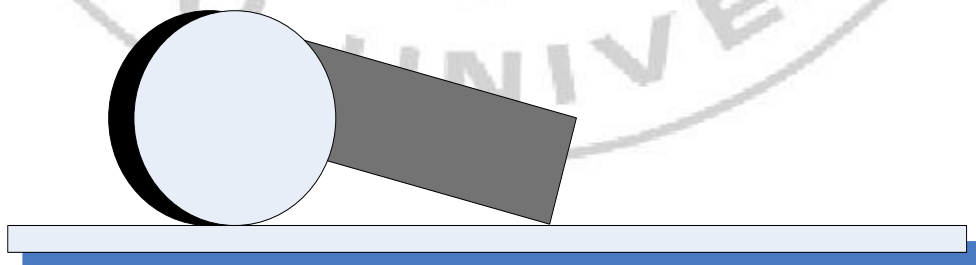


圖 3-5 車子靜止未做控制時的情形

### 3-2 陀螺儀感測器特性

我所使用的陀螺儀感測器為 Hitechnic 陀螺儀感測器[19] 如圖3-6所示，陀螺儀感測器是由一個單軸的陀螺儀傳感器組合而成，它可以偵測單一軸向的角速度，更精確來說它所讀出來的值是一種頻率變化，而其中的變化為角速度。當頻率變化越大代表轉動越快，即有較大的角速度的值。NXT Gyro 陀螺儀感應器可偵測正負360 度/秒之角速度變化，它可以辨別旋轉並且每0.003 秒更新一個旋轉角度的值，也就是說旋轉的比率每秒大概可以被更新333 次，而感應器讀出的原始值範圍在0~1024 之間。陀螺儀感測器使用標準導線連接到NXT主機端口，它也是一個標準的NXT感測器，可以和其他NXT感測器配合使用。通過下圖3-7所示位於黑色頂端位置的陀螺儀感測器來完成垂直平面軸的測量。



圖3-6 Hitechnic陀螺儀圖[19]

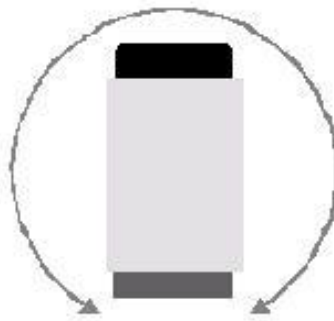


圖3-7 陀螺儀感測器垂直平面軸測量圖[19]

陀螺儀檢測器靜止狀態下輸出準位的變化特性稱為偏移。根據內部迴路或檢測組件的內部溫度上升、外在環境溫度上升等等因素，會使輸出電壓準位產生變化，這樣的情形造成我們在求角度時，“累積誤差”增加的特別快，導致實際車身的角度與電腦計算出的角度相差甚多，使得車身平衡的控制器無法精確的控制馬達輸出的力量大小，導致無法維持車身平衡。所以，通常都會搭配一個使用一維機械加速度感應元件為一傾斜計，以其直流響應來測量相對於垂直地面的傾斜角，傾斜計共同的優點是角度的測量準確，不像陀螺儀會有飄移的現象；但共同的缺點即是反應速度慢，所以無法即時地判斷車身的傾斜角而達到平衡的效果。

底下為陀螺儀與傾斜計之比較。

表3-1 陀螺儀與傾斜計之比較表

	陀螺儀	傾斜計
優點	反應較快 (>10Hz)	角度量測準確
缺點	訊號飄移 累積誤差 溫度影響	反應較慢 (6Hz)

但Hitechnic 陀螺儀感測器可用於檢測傾斜角度，故不須搭配一傾斜計。Hitechnic 陀螺儀感測器包含單軸陀螺感測器檢測旋轉並返回一個值表示的每秒的旋轉度數，並可確定陀螺儀偏移量，因為陀螺感測器可偵測值受溫度和製造公差。

- 防止在機器人無法維持車身平衡（由車身傾斜控制使用）。
- 防止機器人暴走（使用位置控制）。
- 允許以很長時間（使用陀螺漂移補償）平衡機器人。

### 3-3 PID自動控制理論

PID 控制器是一個在工業控制應用中常見的一種自動控制物件。是由比例控制器（P，Proportional）、積分控制器（I，Integral）和微分控制器（D，Derivative）三個部份所組成。通過 $K_p$ ， $K_i$  和 $K_d$  三個參數來做設定。這個控制器把收集到的數據和一個經過設定的參考值來進行比較，然後把比較後所得的相差值用於計算新的輸入值，這個新的輸入值的目的是可以讓系統的數據達到或者保持在參考值，進一步的使系統可以保持穩定，如圖3-8 所示。和其他簡單的控制運算不同，PID 控制器可以根據歷史數據和比較後的差別的出現率來調整輸入值，這樣的做法可以使系統更加準確，更加穩定。簡單的說，PID 控制器就是根據系統的誤差利用比例積分微分計算出控制量。已經有過數學方法的證明，在其他控制方法導致系統有穩定誤差或過程反覆的情況下，一個PID 回饋回路可以幫助保持系統的穩定。

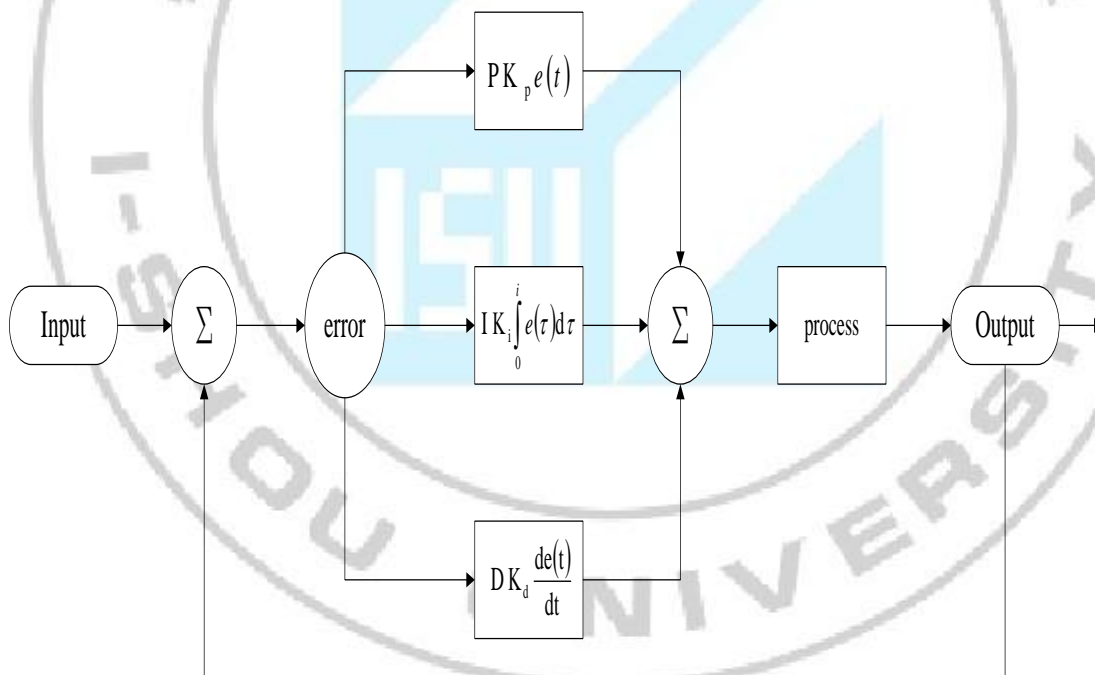


圖3-8 PID控制結構圖



### 3-4 車身平衡控制器

本節將詳述車身平衡控制器的設計概念及方法。接著說明如何使兩輪平衡車達到平衡的流程，最後則是說明如何運用陀螺儀與馬達PID 的整合輸出馬達，以達到兩輪車平衡的實現。

首先使用一個流程圖來說明控制車身的平衡，如圖3-9所示，在車子偏擺時，一開始陀螺儀偏移後會產生一個初始電壓，將這一個參數先透過陀螺儀比例計算的方式固定出偏移量，然後計算出角度同時解決角度誤差的問題，再以PID 來控制陀螺儀以及馬達，經過加總後控制馬達的power 輸出。馬達動作後，經由運算輸出產生出新的角速度，再重新計算出角度，然後繼續對陀螺儀及馬達轉速編碼做PID 的控制，加總後一樣對馬達做功率輸出，如此週而復始，便能讓此系統方塊圖趨於穩定。

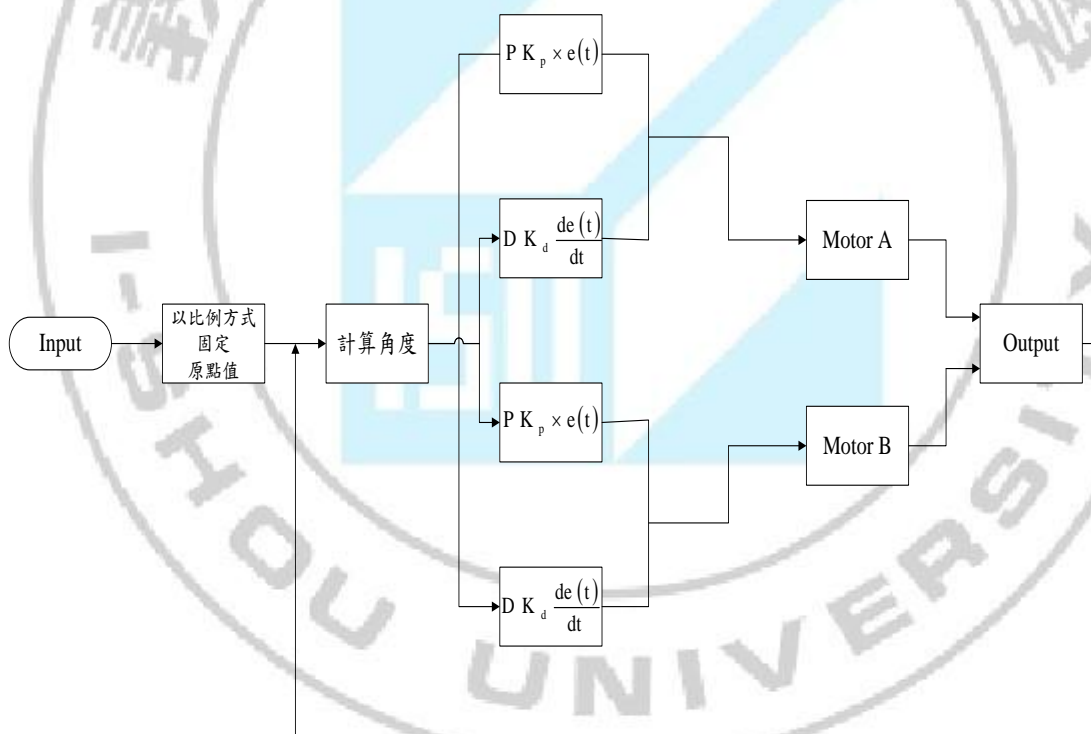


圖3-9 車身平衡流程方塊圖

### 3-5 NXT 機器人動作流程圖

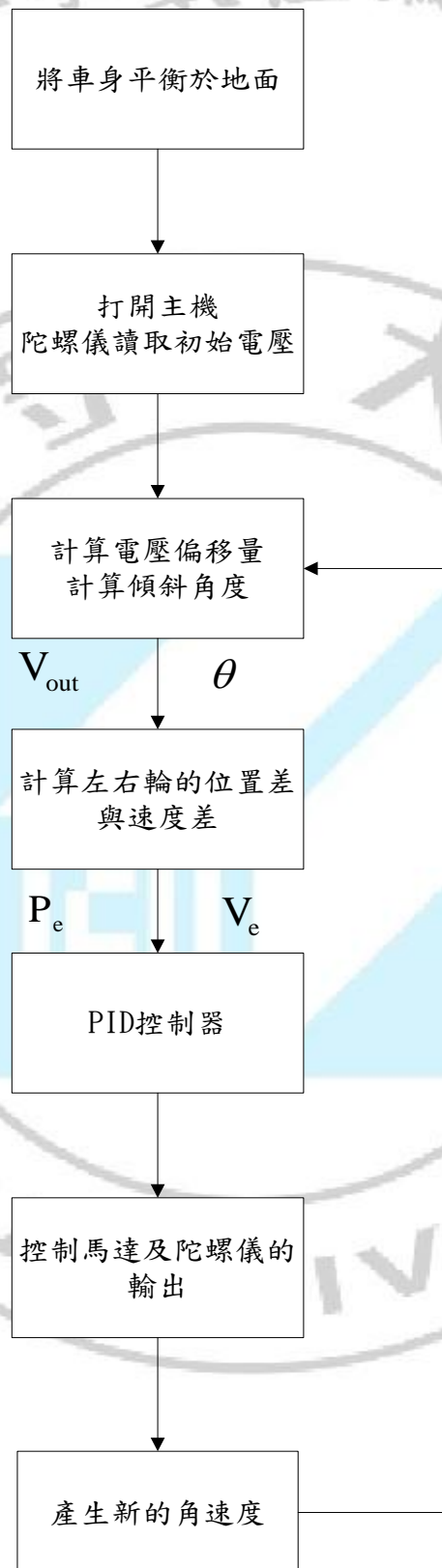


圖3-10 機器人動作流程圖

### 3-6 角度控制與電壓平衡

在陀螺儀取值中，已經解決陀螺儀讀值時飄移的問題，但是在陀螺儀偏擺時，在計算上會逐漸產生出累積誤差，並且會直接影響到零點值，所以當在雙輪車平衡時，陀螺儀持續偏擺，誤差便會逐漸累積上去。由於陀螺儀是一種動態的檢測器，必須在振動下進行。其量測角速度的變化，利用類比電壓的輸出表示角速度的值，在靜止的狀態下，也就是角速度為零時，其輸出電壓為2.5V左右，當順時針轉動時，輸出電壓大於2.5V；當逆時針轉動時，輸出電壓小於2.5V；其所能偵測到角速度變化以2.5V為中心。

根據內部迴路或檢測組件的內部溫度上升、外在環境溫度上升等等因素，會使輸出電壓準位產生變化。一般陀螺儀正常的操作溫度為23度、輸入電壓5V，則靜止時輸出電壓準位大小為2.5V，若溫度升高或降低時，靜止時輸出電壓準位會升高或降低，當溫度升高時其電壓準位為2.508伏特左右，因此我們無法精確的以2.5V當作車身靜止不動的電壓準位，這樣的情形造成我們在求角度時，“累積誤差”增加的特別快，導致實際車身的角度與電腦計算出的角度相差甚多，使得車身平衡的控制器無法精確的控制馬達輸出的力量大小，導致無法維持車身平衡。所以，為了能夠精確的找到陀螺儀訊號偏移的範圍，我們在車身靜止的狀態下先取某一筆數的陀螺儀輸出電壓值，然後取其平均值以求得當時陀螺儀在靜止時其輸出電壓的準位如3-1式其中  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$  為任意取某一筆數的陀螺儀輸出電壓值， $V_{avg1}$ 、 $V_{avg2}$  為某一筆數的陀螺儀輸出電壓值其平均值，將所求得的準位減去2.5V後求得其平均的偏移量如3-2式其中  $V_{out}$  為實際輸出電壓準位。之後，每次陀螺儀訊號進來以後減去偏移量當作補償，處理後的電壓準位相當接近2.5V。

$$V_{avg1} = \frac{V_1 + V_2}{2}, \quad V_{avg2} = \frac{V_3 + V_4}{2} \quad (3-1)$$

$$V_{out} = V_{in} - \frac{(V_{avg1} - 2.5) + (V_{avg2} - 2.5)}{2} \quad (3-2)$$

### 3-7 設定陀螺儀傾斜角度及角速度

在圖3-11裡面G1 為NXT 的中心軸，也同時是陀螺儀裡所選的中心軸，Oa 及Ob 各是左右兩邊圓形輪子的中心點(圓心)，O1 是Oa 及Ob 所連起的直線之中心點，同時也是G<sub>1</sub> 中心軸垂直坐落的重心，另外則是身體前傾或後仰的情況，G<sub>2</sub>、G<sub>3</sub>是G<sub>1</sub> 偏移時的軸心， $\theta$  為前傾或後仰的角度，S<sub>1</sub> 為兩顆輪子向前的力量，S<sub>2</sub> 為兩顆輪子向後的力量。車身一開始是平衡於地面，輪子並無轉動，也沒有傾斜角度，所以將G<sub>2</sub>、G<sub>3</sub>設為零如3-3式，S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>也設為零如3-4式，當車身使動作後便會產生傾斜角度，其中傾斜角的計算方法如公式3-5 所示

$$\theta = \begin{Bmatrix} G_2 \\ G_3 \end{Bmatrix} = 0 \quad (3-3) \quad U = \begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{Bmatrix} = 0 \quad (3-4)$$

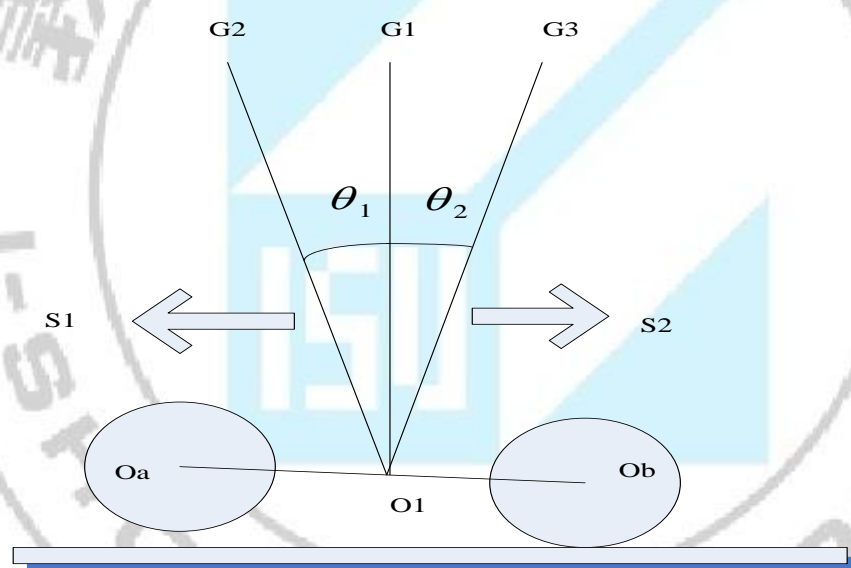


圖3-11 陀螺儀傾斜角度定義圖

$$\theta = \sin^{-1} \left[ \frac{G_2 - G_1(\text{zero})}{\text{Sensitivity}} \right] \quad (3-5)$$

若我們所須要的操作角度介於 $\pm 20^\circ$ 以內的話，則其傾斜角的計算方法可簡化為

$$\theta = \left[ \frac{G_2 - G_1(\text{zero})}{\text{Sensitivity}} \right] \quad (3-6)$$

此簡化計算的誤差範圍小於 2%。如此即可免去計算反正弦函數(sin-1)

的麻煩，並增加程式計算的速度。

我們將圖3-11 做一個解釋，在圖3-11 中可以看出由車輪的車身及車輪角度改變後



產生  $G_2$ 、 $G_3$ 。此時的  $G_3$  不一定等於  $G_2$ 。故為了讓車身保持平衡，我們須使  $G_3$  轉  $G_2^\circ$ ，所轉的距離如(3-7)式所示

$$S = r \times G_2 \quad (3-7)$$

其中  $r$  為車輪半徑，此距離即為命令值。最後根據感測器所量得之車角速度  $G_s$  如(3-8)式所示，經過PID 控制器算出車輪應以多少角速度旋轉，使車身能夠維持直立平衡的狀態。

$$G_s = \frac{S}{b} \quad (3-8)$$

其中  $b$  為兩輪之間的徑距(Span)

### 3-8 兩輪同步控制

在要求兩輪轉速一致與控制器設計方式簡單的前提下，由運動力學可以得知，二輪式的NXT移動平台底座所施給機器人的力為兩輪所出之力的和  $U$  (如圖3-12所示)，如果在其中一輪的輸出上加上兩輪位置差之誤差，另一輪減掉兩輪位置差之誤差，那麼合力依舊為原來的力，不會破壞掉原來平衡演算法所需要的力矩。又由於兩輪的輸出力量不同，會造成速度差， $S_e$  是控制兩輪同步的速度差公式如(3-9)式所示； $P_e$  是控制兩輪同步的位置差公式如(3-13)式所示。

$$S_e = V_{\text{right}} - V_{\text{left}} \quad (3-9)$$

$$\text{其中 } V_{\text{right}} = U + P_e : \text{右輪轉速} \quad (3-10)$$

$$V_{\text{left}} = U - P_e : \text{左輪轉速} \quad (3-11)$$

$$U = V_{\text{right}} + V_{\text{left}} : \text{兩輪所出之力的和} \quad (3-12)$$

$$P_e = P_{\text{right}} - P_{\text{left}} \quad (3-13)$$

$$\text{其中 } P_{\text{right}} = U + \frac{1}{2}\theta : \text{右輪位置} \quad (3-14)$$

$$P_{\text{left}} = U - \frac{1}{2}\theta : \text{左輪位置} \quad (3-15)$$

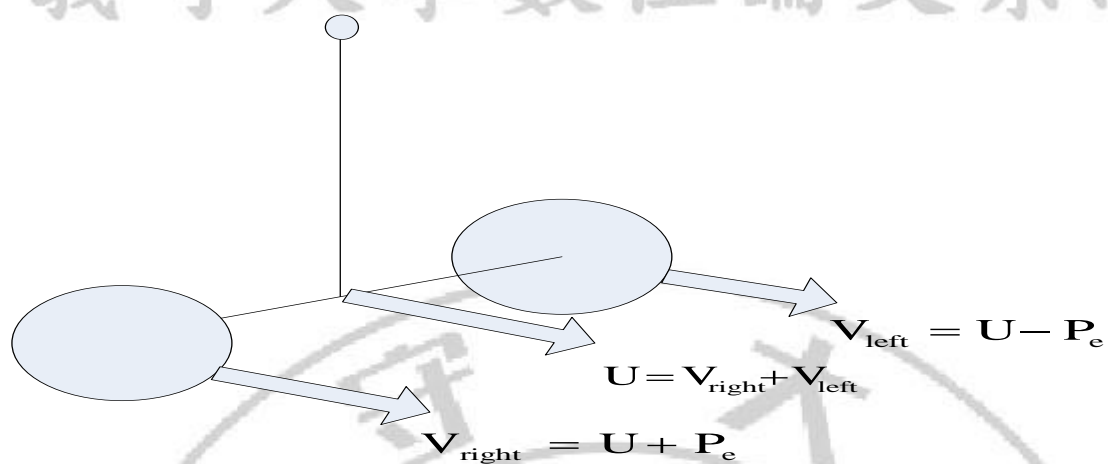


圖3-12 平衡演算法示意圖

## 3-9 陀螺儀及馬達PID 控制

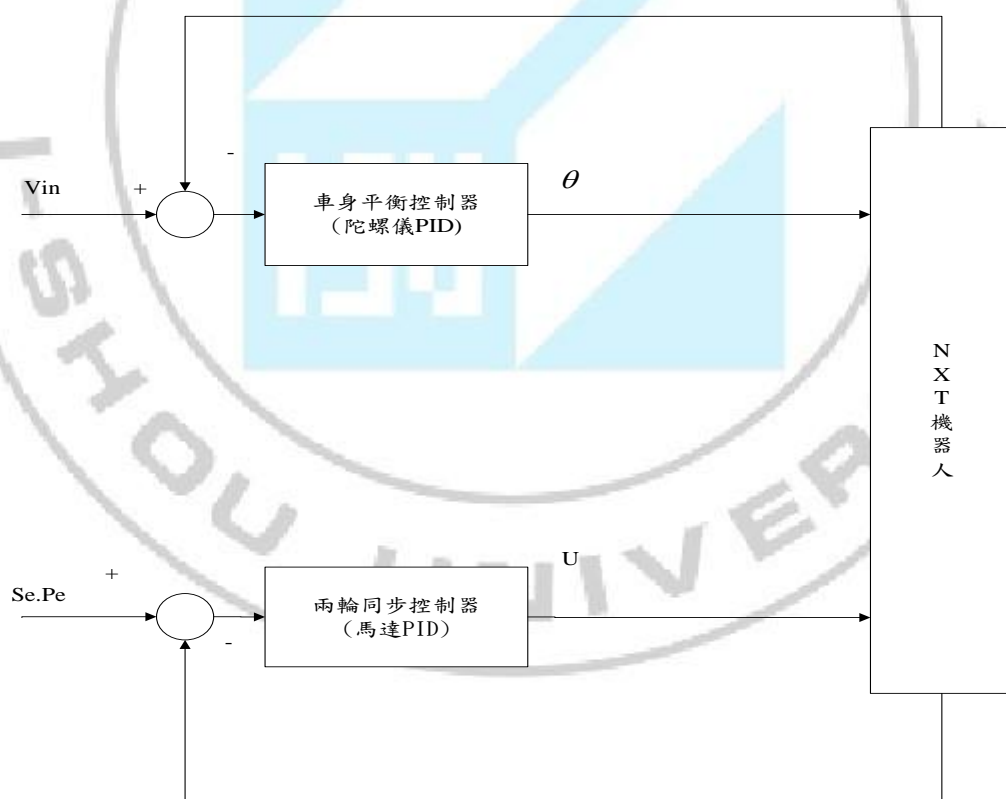


圖3-13 PID控制器方塊圖

在之前設計的 PID 控制器中，我只用了一個 PID 控制器根據  $V_{in}$  的改變來對  $\theta$  做 PID 控制，使得  $\theta$  能維持在  $0^\circ$  附近而達到平衡，但是車子並沒有同步定位的功能，所以即使車身平衡了，但車子本身會在平衡的過程中到處跑。所以接下來我另外設計一種雙 PID 控制器以改進上述之缺點，而達到讓車子能同步定位平衡如圖 3-13 為雙 PID 控制器之一種。先將  $V_{in}$  與  $V_e$ 、 $P_e$  分別經過各自的 PID 控制器後，將結果相加再將產生的信號送到馬達產生轉速以維持平衡。由於此法比第一種方法多了對於同步定位平衡的控制，因此在車身平衡的過程中比較不會只顧到平衡而忽略了車輪位置是否保持在原點附近平衡，而使車子到處亂跑。

在車身平衡控制器上，現在已經運用偏移量的方式將陀螺儀的電壓原點值固定，且經由計算出偏移量的值，將運用PID理論在陀螺儀上，在本次研究中I 參數的值皆沒使用，類似將此值預設為0，電壓原點值和角速度用來當做 $\theta$ 平衡控制的迴授，其中電壓原點值作為P 控制，角速度作為D 控制，將此兩者相加便是陀螺儀的PD。

在兩輪同步控制器部分，相同的運用PID 理論去控制，跟陀螺儀一樣的是I 參數的部分不使用，類似將此值預設為 0 一樣，而由馬達所測量之位置則用來做U(兩輪所出之力的和)做控制迴授，其中位置差作為P控制，速度差作為D 控制，將上面所得的兩個 P 參數及兩個D 參數做加總便是馬達的PD。

$$\theta \text{ 控制} : = (K_{P1} \times V_{out}) + (K_{D1} \times G_s)$$

$$U \text{ 控制} : = (K_{P2} \times P_e) + (K_{D2} \times S_e)$$

由於調整  $K_p$  值對於馬達的加速度反應最大，因在PID 控制的過程中須乘上電壓原點值與位置差，而馬達轉一圈為  $360^\circ$ ，所以車輪只要轉動一下，電壓原點值與位置差就會大於等於原來的值，因此馬達就會以最高速旋轉，導致車輪狂衝。因此我們將馬達編碼器之電壓原點值與位置差除以一數值，以免即使車輪只是稍微轉動一下就造成馬達高速運轉而不穩定。

在 $\theta$ 控制中， $K_D$ 值須乘上由陀螺儀所測得的車身傾斜角速度值，因為此數值很小，所以若我們把 $K_D$ 值設得很小，乘上角速度後所得到的值幾乎為0，效果等於沒加一樣。所以結果須另乘上一增益才能讓車身的穩定產生效果，但為減少程式運算時間，我們將

此增益乘入KD值，因此所得到的KD值夠大而足以改善車身的過衝狀況。

在 U 控制中，KD 值須乘上由兩輪同步控制器所測得的速度差，因為此數值很小，所以若我們把 KD 值設得很小，乘上速度差後所得到的值幾乎為 0，效果等於沒加一樣。所以為了減少程式運算時間，在計算過程中我們而按比例將增益乘入 KD 值。

下方表格為我測試將不同參數代入後對兩輪平衡機器人的影響：

表 3-2 增加參數的影響表

增加參數的影響				
參數	上升時間 Rise time	過衝 Overshoot	建立時間 Settling time	錯誤平衡 Error at equilibrium
KP	減少	增加	小變化	減少
KD	小變化	減少	減少	無



## 第四章 實驗結果分析與討論

在本研究的實作後，透過 NXT 可程式的 USB 連線功能擷取數據，以數據製成圖表的方式呈現平衡所得結果，能夠清楚的觀察陀螺儀的輸出電壓的漂移現象以及偏移量修正後的結果和馬達的功率輸出數據圖表，經由圖表的變化來觀察平衡車各數據的變化情形，以呈現 NXT 兩輪平衡車在平衡狀態下的實際變化。本論文的實驗將針對機器人的陀螺儀感測器輸出電壓平衡和兩輪的同步進行測試。

### 4-1 實驗一：陀螺儀感測器輸出電壓平衡

在讀取陀螺儀輸出電壓發現，其值是呈現不斷跳動的情形，如圖 4-1 為陀螺儀呈現在範圍 2.5~2.515 急速跳動的折線圖。故必須求得較為準確的輸出值，在此利用比例的方式將輸出值從 2.515 不斷逼近到一個趨於穩定的值，而從數據觀察中得知，其值趨近於 2.5，如圖 4-2。從多個陀螺儀輸出值測試中發現，不同的陀螺儀有不同的偏移量，所以在每顆新的陀螺儀之前都必須經過偏移量的測試，否則會有誤差產生。

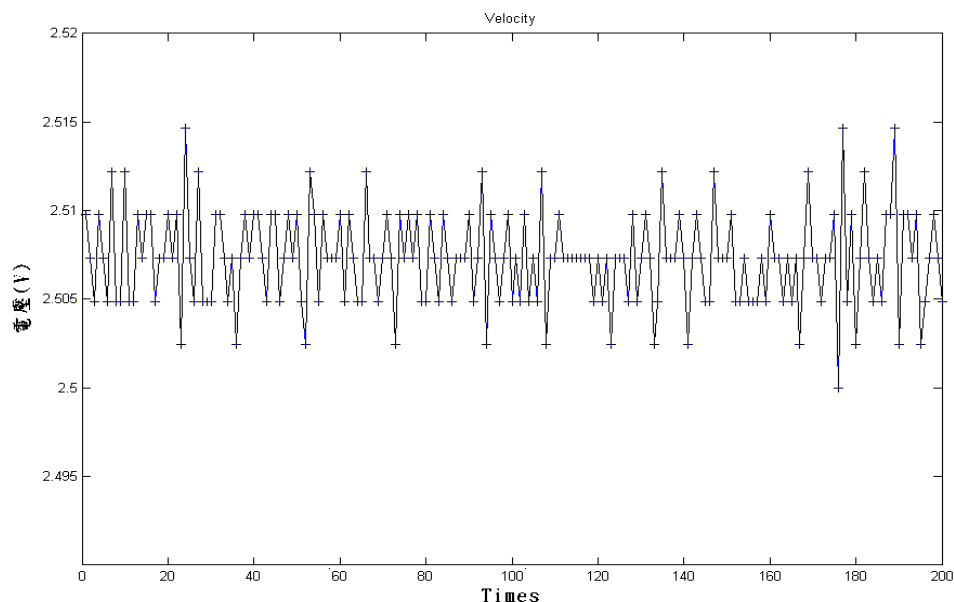


圖4-1無偏移量狀態下陀螺儀輸出電壓偏移情形圖

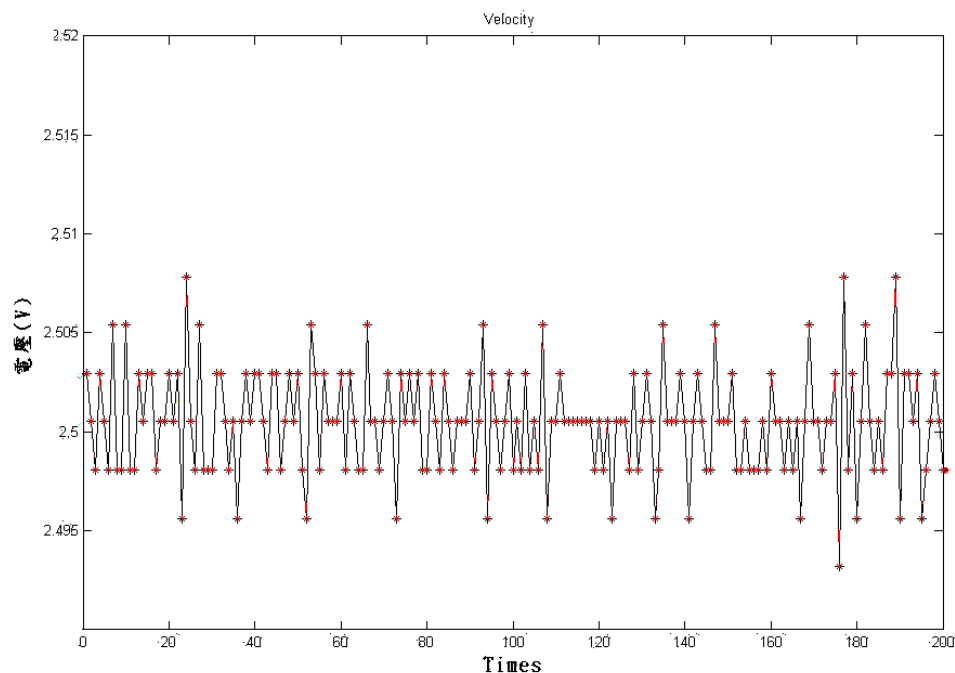


圖4-2 經偏移量補償狀態下陀螺儀輸出電壓偏移情形圖

## 4-2 實驗二：兩輪同步控制

實驗二是針對兩輪同步的能力進行測試，在這一系列的實驗是在兩輪無載下做的實驗，我們將比較未加入兩輪同步控制器與加入兩輪同步控制器的情況，以測驗同步控制器的成效。圖4-3 所示，為未加入同步控制器的情形，可以從圖4-4 發現兩輪的轉速差不是很大，但是其累積的位置誤差卻非常的嚴重，如此兩輪平衡機器人是無法直線行走的。接著我們加入兩輪同步控制器在做相同的實驗，如圖4-5所示，兩輪的位置誤差不僅受到相當的控制，並且誤差也只在一定的範圍之內，當然回復同步時會有一些超越量 (Overshoot)，但仍滿足兩輪同步的基本要求。

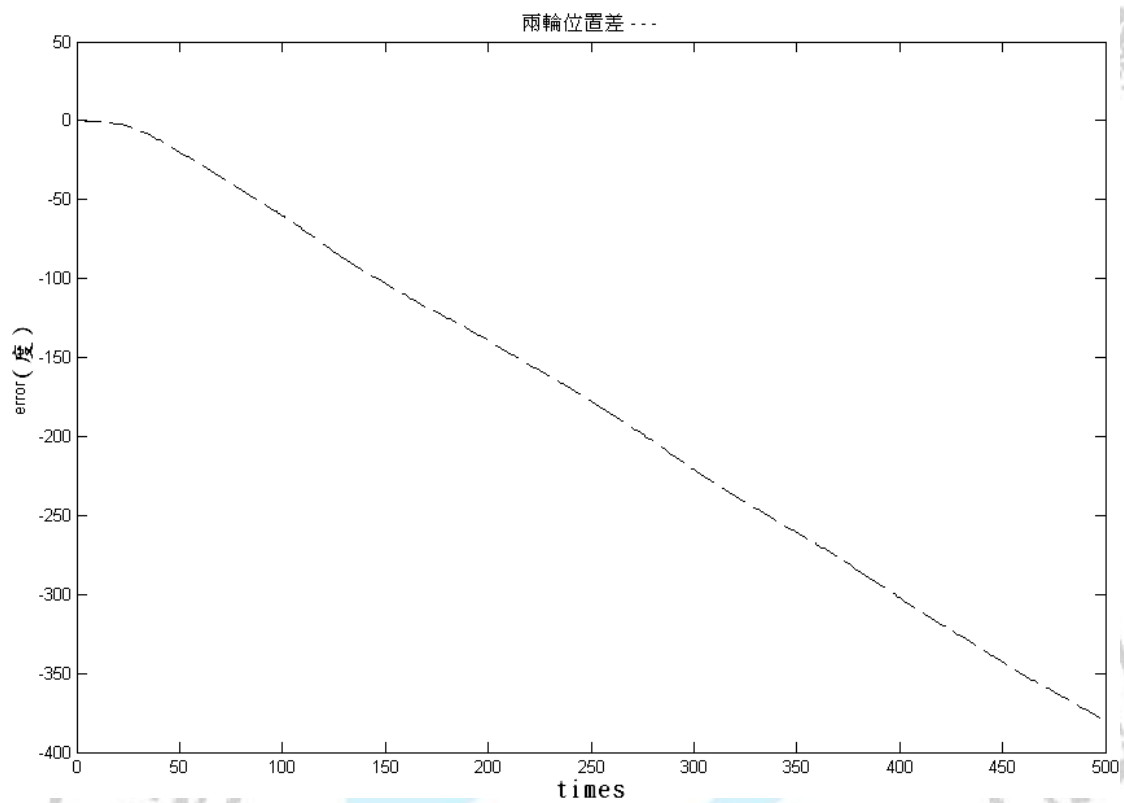


圖 4-3 未加控制之兩輪位置差響應圖

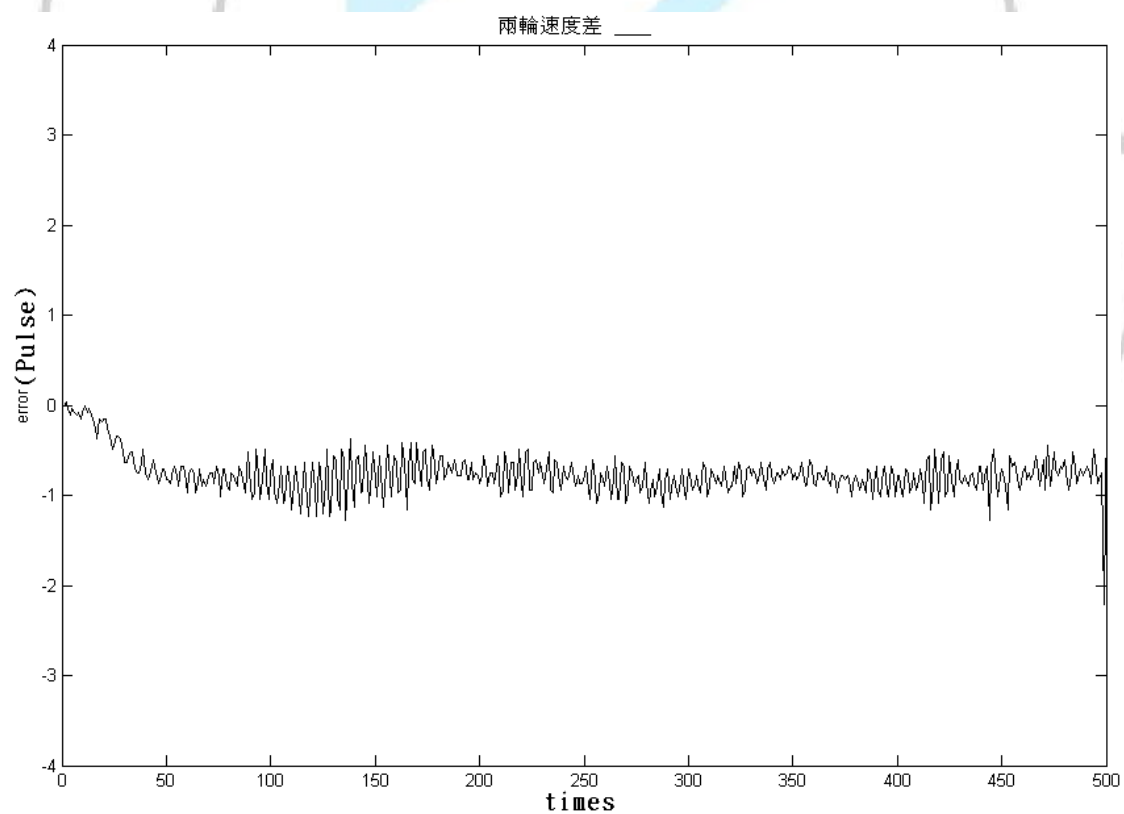


圖 4-4 未加控制之兩輪速度差響應圖

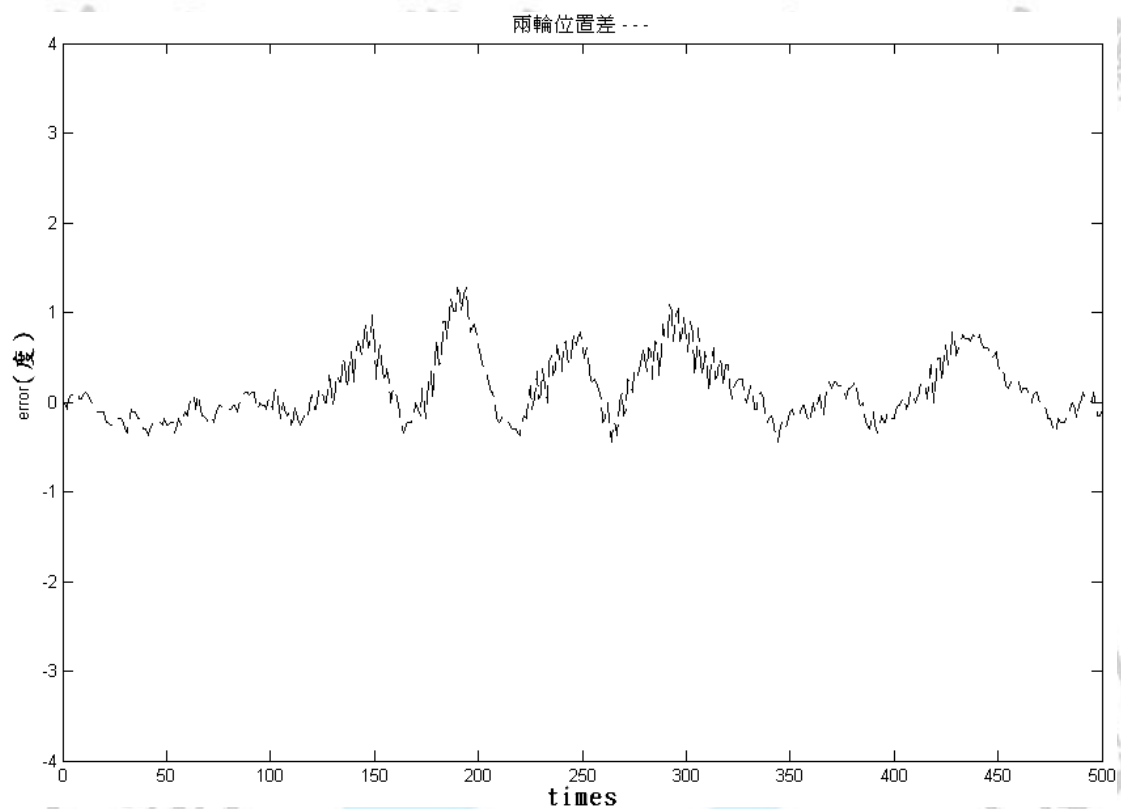


圖4-5 控制後的兩輪位置差響應圖

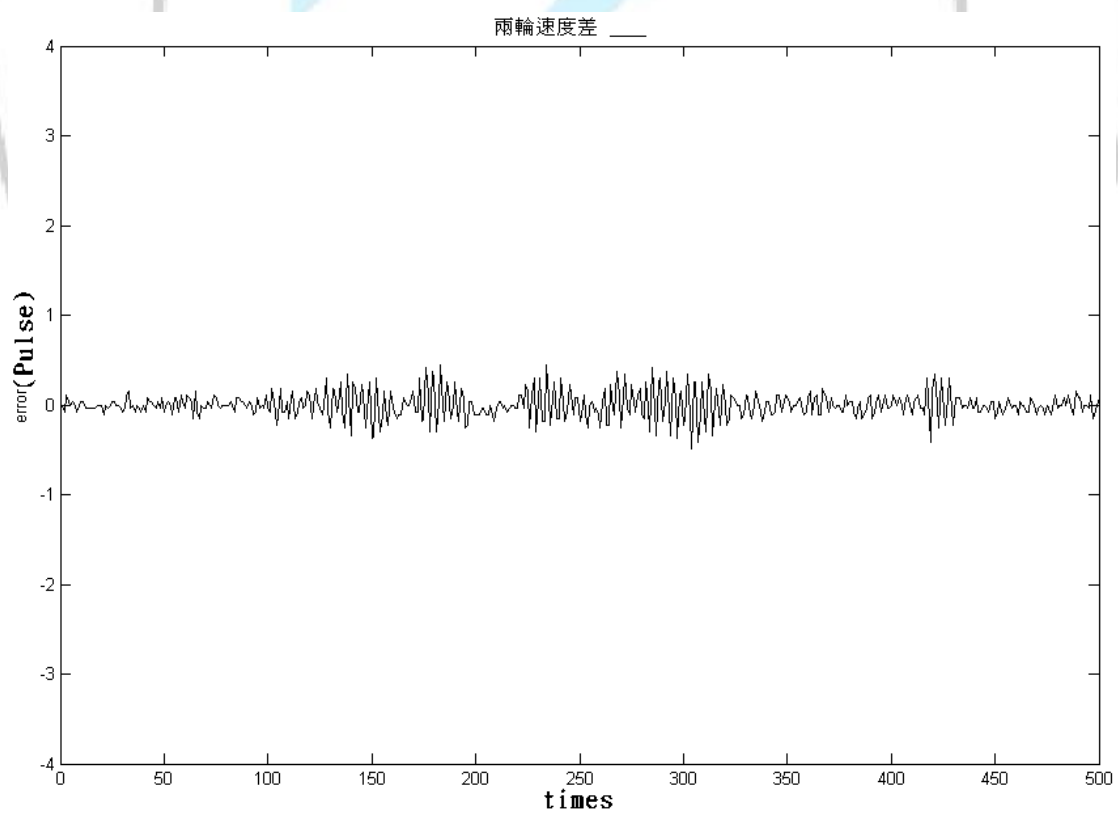


圖4-6 控制後的兩輪速度差響應圖



### 4-3 實驗三：車身平衡控制

此實驗中，在兩輪同步控制下，將針對車身的平衡能力與加入碰撞後系統的穩定度進行測試。首先是將車身由垂直地面且靜止的狀態下放開，進行車身平衡的控制，其響應圖如圖4-7所示，其連續圖如圖4-8所示，接著再加入碰撞，也就是拿一阻擋物放在車身前面，其響應圖如圖4-9所示，其連續圖如圖4-10所示。接著再拿一阻擋物放在車身後方，其響應圖如圖4-11所示，其連續圖如圖4-12所示。在此橫座標為取樣的次數，每次取樣時間為25毫秒。由圖4-7可知當車身垂直放下，在第58筆取樣資料也就是約1.2秒後車身開始往前傾，達到車身平衡的時間約為3.45秒後，此時為第196筆取樣資料。由4-9圖在第75次取樣時加了一往前之碰撞，在第236次取樣時保持車身平衡，大約需3.95秒。由4-11圖在第80次取樣時加一往後之碰撞，第203次取樣時車身恢復平衡，大約需3.08秒。

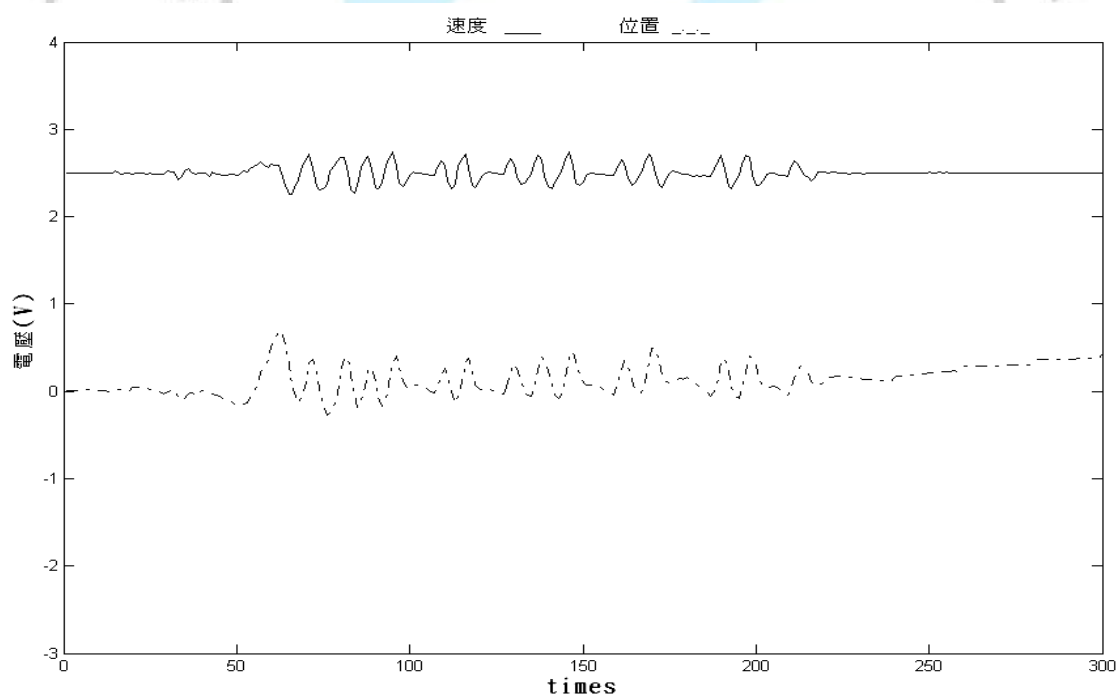


圖 4-7 車身平衡速度差及位置差響應圖



圖 4-8 車身平衡連續圖

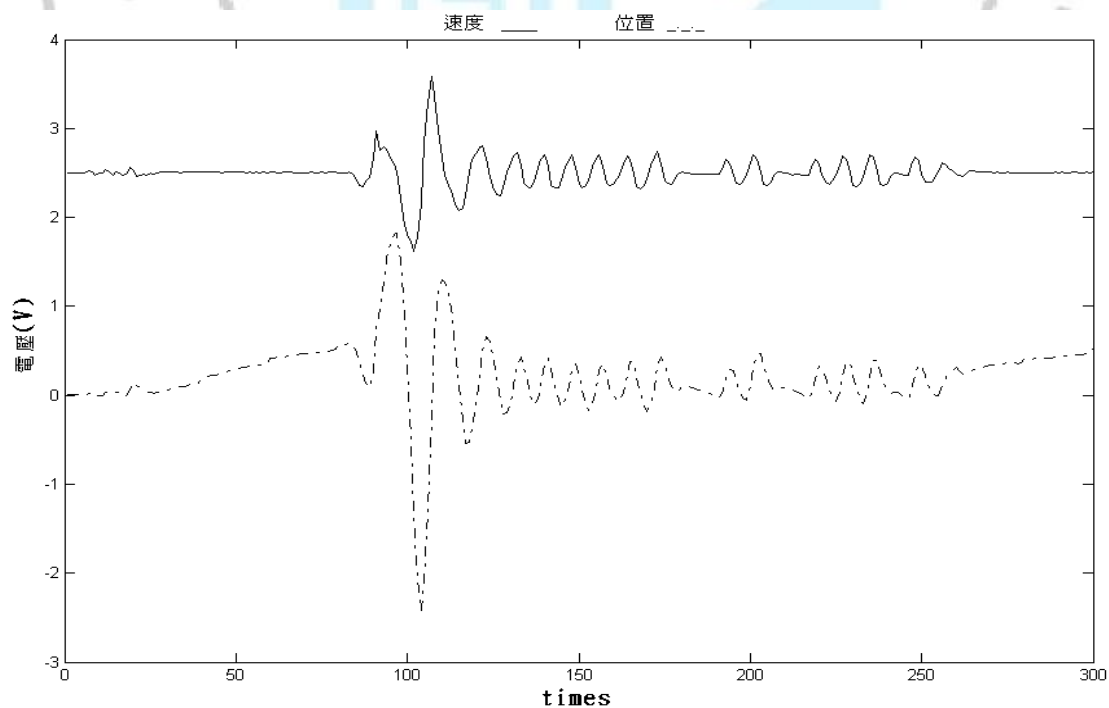


圖 4-9 加往前碰撞之速度差及位置差響應圖





圖 4-10 加往前碰撞之連續圖



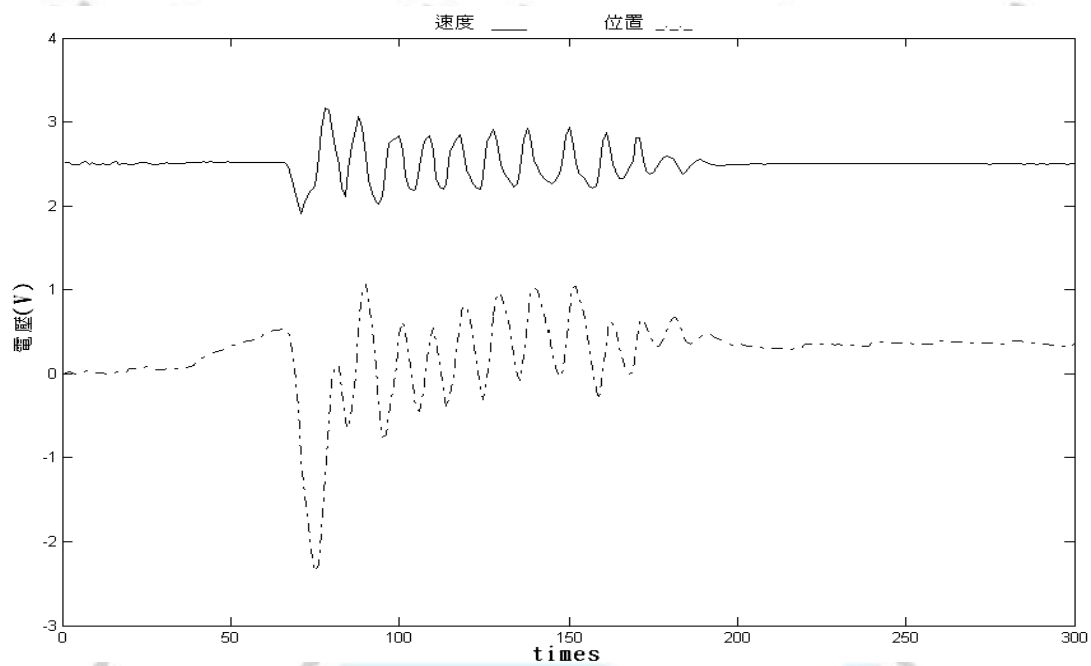


圖 4-11 加往後碰撞之速度差及位置差響應圖



ISU Etheses System



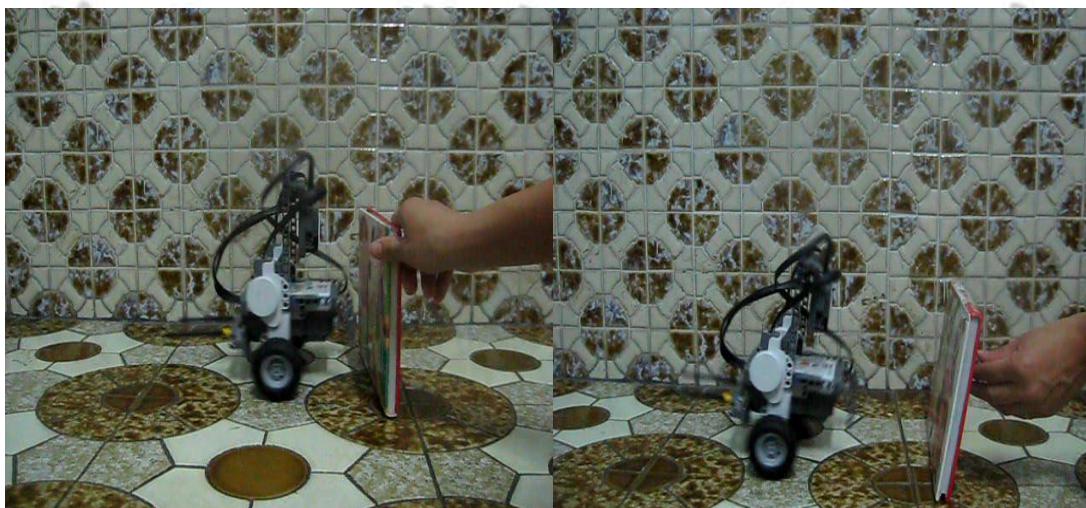


圖 4-12 加往後碰撞之連續圖

#### 4-5 分析討論

在實驗一、二及三中，車身平衡控制器可以迅速的使陀螺儀輸出電壓趨近於2.5V，且車身達到並維持平衡的狀態；兩輪同步控制器可以讓車身方位保持在同一速度差及位置差而保持同一角速度，而在實驗中，更可以看出這些控制器優異的抗干擾能力。綜合以上的實驗，驗證了學生所設計之控制器皆可以成功的達到預期的目標。

# 義守大學數位論文系統

## 第五章 結論

### 5-1 討論

本論文整合了 NXT 硬體組裝、PID 控制器、陀螺儀感測器的技術，設計出具有平衡感知能力的智慧型兩輪自我平衡機器人系統，使得機器人利用陀螺儀感測器，進而正確的判斷出車身傾斜的狀態，使機器人平衡[20]。當然在這過程中我們遭遇到許許多多的困難，尤其是機器人硬體從無到有的架構要考慮許多問題，諸如車體架構、馬達與感測器(Gyro)的選用，整體系統的整合及訊號方面的處理等等。

在車體架構上，所希望的车體是重量要輕且重心要低，因為重心低車體的晃動才不會過於劇烈，會比較容易控制，本來是將NXT平台採直立組裝，但是加上馬達後，將使重心上升，若任意的增加車體重量使重心降低，會造成馬達轉矩不夠，所以我們採用將NXT平台平放組裝，就能使重心降低，容易保持平衡。

在車身感測器方面，一般使用傾斜器或是陀螺儀感測水平角度的變化，但是傾斜器只能針對靜止或不會劇烈移動時所產生的角度變化作偵測，不像陀螺儀能對移動中的物體做立即的動態量測，所以我選用陀螺儀當作我們的感測器，但在使用上又遇到很多問題如雜訊、偏移與電壓穩定性等。

兩輪自我平衡機器人在製作上遇到許多問題，以上所述是我們主要的問題，而這些問題並非單獨一人可以輕易完成，因此我們在相互討論與不斷嘗試錯誤下，將以上問題一一解決，完成此一題目。

### 5-2 改進方向

對於前後擺動的慣性系統，必須隨時且精確的知道其目前的位置與速度，陀螺儀本身易受到外在溫度、高頻訊號與其他因素所干擾，造成其訊號輸出的飄移現象與訊號跳動現象，飄移的情形本論文中已能將此影響降至最低，至於訊號跳動的情形，雖經過車身平衡控制器的處理情已大有改善，但是還是會造成累積誤差的產生，使的機器人沒辦法長時間保持平衡，必須在訊號的處理上採用更加精確且合乎機率的方法所以我加上

兩輪同步控制器，讓機器人可以長時間保持平衡。

在硬體架構上，由於整個機器人的底部較重，使得整體重心偏低，造成一有碰撞會造成車身振盪劇烈，所以將NXT平台前後裝上四個碰撞緩衝十字軸，在碰撞時就不會直接撞到NXT平台，並且也要跟著調整陀螺儀的位置，將陀螺儀放置在整個機器人的重心位置，才能確實的感測到整個機器人的變動狀態。

### 5-3 未來展望

目前論文是以電腦為主要的控制器，控制兩輪自我平衡機器人保持車身的平衡，未來可以朝著前進、後退與左右轉等動作來發展，甚至將控制器完全寫在晶片之中加上無線模組如遙控器，便可以遙控機器人前進、後退與轉彎等，進而成為人們的代步車。

若要在各種路面行走控制，在機構的設計上、在馬達的選用上，將要更嚴謹的評估與建構，將兩輪車的體積規模做大，就可以開發成類似 Segway 的交通代步工具，或亦可以開發成像 RMP 那樣實用的運載機具；將兩輪車體體積規模做小，即是特殊新穎的迷你兩輪遙控車，兼具寓教於樂的意義。可以看出兩輪車系統的確可以應用在各個領域，亦在機器人控制的這個領域上增添更多的能量與樂趣。

RMP：賽格威的機器人移動平台原本是為了美國軍方的需要而開發出來的，但後來也開始提供商業用途的客戶



# 義守大學 參考文獻 論文系統

- [1]<http://mindstorms.lego.com> LEGO MINDSTORMS NXT 教育機器人官方網站
- [2]<http://web.mit.edu/6.270/>麻省理工學院 Autonomous Robot Design Competition
- [3]<http://robot.caece.net/>
- [4]<http://www.lego.com>
- [5] Segway 來源網站：<http://www.segway.com/>
- [6] Sara Morgan, Microsoft Robotics Studio 程式開發-新一代超智慧型機器人開發平台，悅知文化，中華民國 97 年。
- [7] 康仕仲，智慧型機器人程式開發與實作，悅知文化，中華民國 98 年。
- [8] 維基百科-segway 來源網站
- [9] T. Yamakawa, "Stabilization of an Inverted Pendulum by a High-Speed Fuzzy Logic Controller Hardware System," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 32, pp. 161-180, 1989.
- [10] O. Matsumoto, S. Kajita and K. Tani, "Estimation and control of the attitude of a dynamic mobile robot using internal sensors," *Advanced Robotics*, Vol. 7, No. 2, pp. 159-178, 1993.
- [11] D. Kuar, E. Konga, and E. Konga, "Fuzzy traffic light controll," *IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, pp. 1507-1510, 1995.
- [12] Y. Ha and S. Yuta, "Trajectory Tracking Control for Navigation of Self-Contained Mobile Inverse Pendulum," *IEEE/RSJ/GI Int. Conf. Advanced Robotic Systems and the Real World*, vol. 3, pp. 12-16, September 1994.
- [13] F. Grasser, A. D'Arrigo, S. Colombi and A.C. Rufer, "JOE: a mobile, inverted pendulum," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.39, No. 1, pp. 107-114, Feb. 2002.
- [14] 維基百科-機器人來源網站
- [15]<http://www.isogawastudio.co.jp/legostudio/toranomaki/en/index.html>



[16] NXT相關感應器介紹-NXT sensors <http://translate.googleusercontent.com>

[17] 維基百科-陀螺儀來源網站

[18] 鄭鈞元，碩士論文，“兩輪自我平衡機器人之平衡控制”，國立中央大學電機所，2003 年六月。

[19]<http://www.semia.com>- Hitechnic 陀螺儀感測器使用說明

[20] 王禎祥，“兩輪自我平衡機器之前後行走控制”，國立中央大學電機所碩士論文，2003 年六月。



ISU Etheses System