

逢 甲 大 學
自動控制工程學系專題製作
專 題 論 文

電動兩輪自平衡車

Electric two-wheeled balancing car

指導教授：吳穎強 博士

學 生：張亦喬、曾上原

中華民國九十七年六月

逢 甲 大 學
自動控制工程學系專題製作
專 題 論 文

電動兩輪自平衡車

Electric two-wheeled balancing car

學生：張亦喬、曾上原

經專題口試合格特此證明

評審委員
陳杏圓

賴啓智

指導教授
吳穎玲

系主任
黃榮興

考試日期：中華民國 年 月 日

感謝

專題研究從開始到現在也經過了好長的一段日子，路上遇過了許多挫折與灰心，但我們也學到了許多寶貴的經驗和對待事情的態度和應變能力。在此我們首先要首先誠摯的感謝指導教授 吳穎強 老師，不管在我們專題上或生活上給予我們正確的態度和方向，使我們獲益匪淺。當然還要感謝我們的班級導師 陳杏圓先生，不吝嗇的交授我們，適時的給予指點，讓我們得以完成這分論文，而嚴謹。

幾個多月以來的日子裡，各與實驗室與學長討論如何製作平衡車和如何編寫程式，到圖書館找尋相關的資料。特別感謝明憲同學不厭其煩的指出我們研究中的缺失，且總能困惑時給予解答，也感謝威宇同學的幫忙，幫助了我們更正許多程式上的缺失，還有陳建樺、謝文廷同學與我們討論專題，也感謝自控系的每一位成員，當我們專題做到煩悶時，總可為我們帶來歡笑、解悶，實驗室的學長們當然也要一並致謝你們的幫忙。

最後，謹以此文獻給我們可愛的自控系成員

中文摘要

最近，由於發明出兩輪自平衡代步車(segway)，他的靈活性和無污染，使得兩輪自平衡車漸受市場注目。因為這項發明為新的科技產品，因此新的兩輪自平衡車控制技術不斷的被研究；另外，而原本產品(segway)之售價超過新台幣二十萬以上，價格非常昂貴，本論文致力於研究兩輪自平衡車之操縱控制，以及如何便宜的製作出相同的產品。

在兩輪自平衡車之控制技術上，本論文提出一種簡易且有效的兩輪自平衡車操縱控制，此技術為使用加速規判別平衡車之傾斜程度，來對馬達做適當的輸出補正。實驗結果顯示出，本論文所提出的操縱控制，以及使用替代物品來做出價格稍微低廉的平衡車，具有可行性和實用性。

Abridgment

In recent years, because of invent the electric two-wheeled balancing car has become more and more popular due to its responsive yet precise and pollution-free. This is a new technology product, so there are a lot of new electric two-wheeled balancing car's technology be studied continuously; By the way, the original product's (segway) price is more than 200 thousand, it's very expensive. So, this dissertation is devoted to investigating both the pilot control, and used another material to make a same product which is more cheaper.

In this dissertation, we convert a two joysticks' commands into two torque directives for movement. This technology is used adxl 322 to read the electric two-wheeled balancing car's tilt side angle, and give a revise to the motor. The experimental results substantiate that the proposed pilot control and used another material to make a cheap electric two-wheeled balancing car have the ability and practice.

目錄

感謝	I
中文摘要	II
英文摘要	III
圖目錄	VI
表目錄	VIII
前言	1
1.1 研究目的	1
1.2 文獻探討	2
1.3 研究背景和動機	3
1.4 預期研究成果	3
第二章 理論探討	4
2.1 兩輪車體平衡基本原理	4
2.2 兩輪車體傾斜判斷原理	5
2.2 加速規原理及特性	6
2.2.1 加速規基本原理	6
2.2.2 加速規選用	8
第三章 設計	11
3.1 車體平衡設計流程	11
3.2 車體分析	11
3.3 系統建模	13
3.4 控制法則	14
3.5 機械設計	15
3.6 電路設計	16

3.6.1 訊號轉換電路	16
3.6.2 馬達驅動電路	18
第四章 構造和結果	21
4.1 結構圖	21
4.2 電路圖	22
4.3 實體製作和實驗結果	24
第五章 貢獻說明、探討	25
5.1 創見和成果	25
5.2 後續發展與可行性	25
參考文獻	26

圖目錄

圖 1.1	賽格威 (Segway) 圖	1
圖 2.1	靜止，前傾、後傾圖	4
圖 2.2	兩輪車體平衡流程圖	5
圖 2.3	車體傾斜判斷流程圖	5
圖 2.4	基本的彈簧質量系統加速度規	6
圖 2.5	典型加速規示意圖	7
圖 2.6	微加速規構造圖	7
圖 2.7	ADXL322 接腳圖	8
圖 2.8	ADXL322 工作圖	9
圖 2.9	ADXL322 實體圖	10
圖 2.10	ADXL322 大小示意圖	10
圖 3.1	設計流程圖	11
圖 3.2	車體前視圖	11
圖 3.3	車體側視圖	12
圖 3.4	車體上視圖	12
圖 3.5	車體實體圖	12
圖 3.6	兩輪自平衡車側面架構圖	13
圖 3.7	控制法則流程圖	14
圖 3.8	直流馬達圖	15
圖 3.9	直流馬達安置圖	15
圖 3.10	intersil ACD0804 圖	16
圖 3.11	ADC0804 接腳圖	17
圖 3.12	ACD0804 基本接法圖	17
圖 3.13	H 型電路圖	18

圖 3.14	L293D 電路示意圖	18
圖 3.15	L293D 實體圖	19
圖 3.16	L293D 內部電路圖	19
圖 3.17	L293D 接腳圖	19
圖 3.18	全橋驅動電路示意圖	20
圖 3.19	L293D 全橋驅動電路圖	20
圖 4.1	組合尺寸圖	21
圖 4.2	車體實體圖	21
圖 4.3	電路圖	22
圖 4.4	電路實體圖(正面)	23
圖 4.5	電路實體圖(背面)	23

表目錄

表 2.1 ADXL322 接腳定義表 8

表 3.1 全橋驅動電路真值表 20

第一章 前言

1.1 研究目的

台灣目前為汽機車高度密度的國家之一，城市環境多半是地狹人稠的型態，隨著人口的增加及科技的進步，車輛密度越來越多了，停車是越來越難，交通越來越擁擠，這使得我們必須尋求新的代步工具，必須具備輕便、移動、靈活、體積小、停車方便且易操控的優點。近年來美國發明家 Dean Kamen 發明一種兩輪代步的電動車—賽格威 (Segway) 如圖 1.1，正好集合了以上的優點。當人站在車子上面時，車子具有自我平衡功能，只要人往前傾，車子就會往前進；相反的，人往後面仰，車子就會後退，另外也可以經由手把來控制方向，使車子轉彎，亦可取代機車成為中短程的交通工具，所以在國外造成一股流行。[1]



圖 1.1 賽格威 (Segway) 圖 取自 Segway 網站

1.2 文獻探討

1995 年美國著名發明家 Dean Kamen 開始研發賽格威 (Segway)，賽格威 (Segway) 包括車體、車輪、和驅動電路，帶有電動機的車輪安裝在車體的兩側，電源、控制電路、驅動電路以及感測器和控制開關等安裝在車體上。採用的感測器包括速度感測器和角速度感測器，藉由它們可以量測出車體的工作情況及平衡的狀況，包括兩輪的轉角和車體的傾斜角度的訊號，這些訊號藉由控制電路計算出兩輪和車體的角速度及角加速度，進而計算出兩輪所需的轉矩，平衡車體。[2]

當車體不運動也不傾斜時，角速度感測器得到車體傾角訊號，並送入控制電路，控制電路根據此訊號並綜合左、右輪速度傳感器的訊號算出兩輪所需的電動機力矩控制量，將該控制量送入驅動電路中，經功率放大等處理後傳送到驅動車輪的電動機中，保持平衡。

當車體前進時，駕駛者使車體稍微向前傾，角度感測器得到車體傾角訊號，並送入控制電路，控制電路根據此訊號並綜合左、右輪速度傳感器的訊號算出兩輪所需的電動機力矩控制量，將該控制量送入驅動電路中，經功率放大等處理後傳送到驅動車輪的電動機中，控制車輪向前轉動並保持車體平衡。傾角越大，加速越快。

當車體需要減速、煞車或後退時，駕駛者使車體稍微向後傾斜，控制電路同樣可以根據感測器所給的訊號計算出所需的反力矩，進而控制車輪減速或向後反轉並保持車體的平衡。傾角越大，反向加速越快。

當車體需要轉彎時，駕駛者藉由手把上的控制器給初一個訊號，控制電路根據該訊號算出左、右輪的不同力矩大小，進而控制車輪分別以不同的速度或方向轉動並保持車體平衡，藉此可以控制車體轉動而得到所需的方向。

由於兩輪為左右分布，使得車體轉彎的半徑為零，容易在小空間範圍活，例

如電梯。藉由軟體及控制電路計算輸出控制量，分別控制兩側車輪，不但使車體能夠自動保持平衡，而且不需要機械構造的煞車、倒車、平衡系統，使得構造簡單，操作方便。且具有廣泛的用途，例如，可做為大型廣場的步行人員、高爾夫球場的代步工具；也可以作為密集城市裡的短暫交通工具。

1.3 研究背景和動機

賽格威 (Segway) 由於兩輪左右分布，使車輛迴轉半徑為零，可在小空間範圍裏活動，機動性高，適何於在空間密集的台灣。但在台灣，一部賽格威 (Segway) 售價仍高達十幾萬元，售價過於昂貴，在推廣上不是如此的容易。而基於這樣的想法，我們嘗試設計一個簡易的基本模型，藉此來驗證兩輪平衡的可行性，來實現我們的想法。

1.4 預期研究成果

照次我們研究的重點，在於車體的平衡。首要完成的目標就是以最簡單的機構、程式、和最低的制造成本及日後維修保養上簡易的前提下做到平衡。我們選擇使兩顆馬達，兩顆輪胎，一塊電路板，一些 IC，以及設計一些電路，使平衡車可以達到自我判斷、自我平衡的目的。這樣設計改善了以往的複雜結構設計、和高成本及不易維修等問題，並輕易的完成車體自平衡。

第二章 理論探討

2.1 兩輪車體平衡基本原理

車身在直立的狀態下放開，會有靜止、前傾與後傾三種狀態如圖 2.1 所示，加上我們決定的控制法則，使車身維持在平衡的狀態。[3]

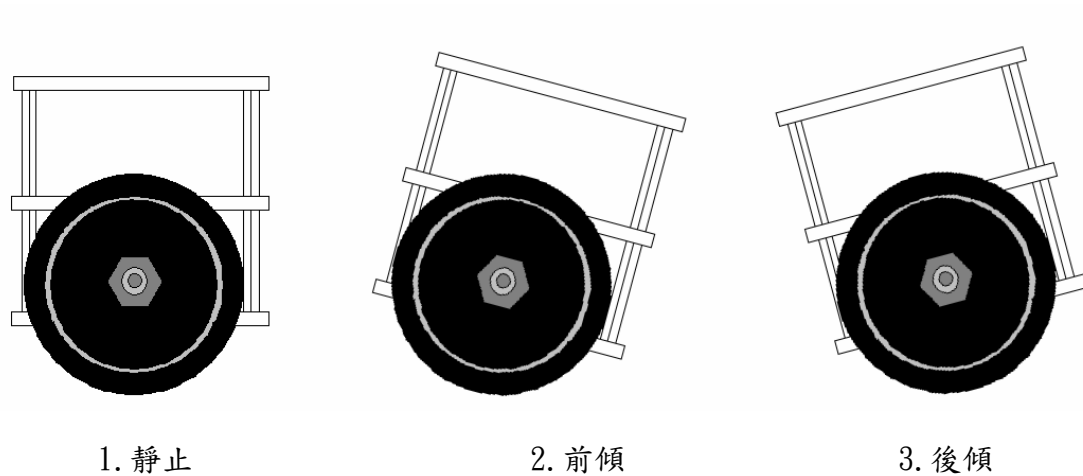


圖 2.1 靜止，前傾、後傾圖

三種狀態與控制法則分別如下所述（如圖 2.2）：

- 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，則車身將向前傾斜，則控制輪子前進，以維持車身平衡。
- 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，以維持車身平衡。

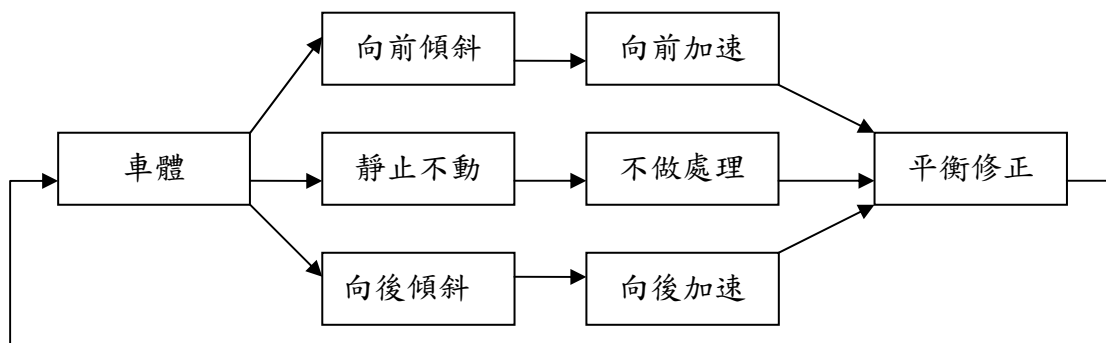


圖 2.2 兩輪車體平衡流程圖

2.2 兩輪車體傾斜判斷原理

由於加速規靜止時的輸出訊號為 1.5V 左右，車體中心改變時，車身開始傾斜，訊號開始改變。當順時針轉動時，輸出電壓大於 1.5V；當逆時針轉動時，輸出電壓小於 1.5V。

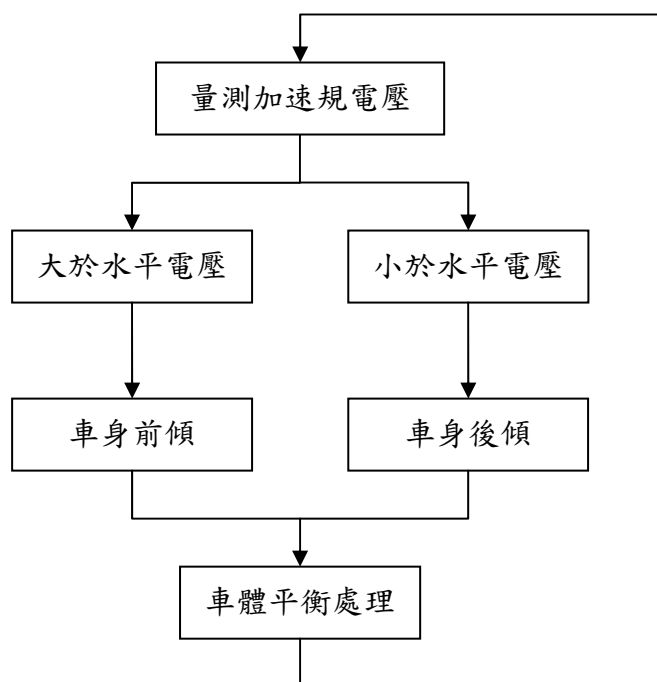


圖 2.3 車體傾斜判斷流程圖

2.2 加速規原理及特性

2.2.1 加速規基本原理

加速規是以旋轉質量為基礎。最常見的設計是結合牛頓的質量加速定律和虎克的彈簧動作定律。牛頓定律表示：如果一個質量 m 受到加速度 a ，那麼必然有一個力量 F 作用於該質量上，可敘述為 $F = ma$ 。虎克定律也指出，如果一個彈性常數為 k 的彈簧從它的平衡位置拉長至 Δx 距離，那麼必然有一個力量作用於彈簧上，表示為 $F = k\Delta x$ 。

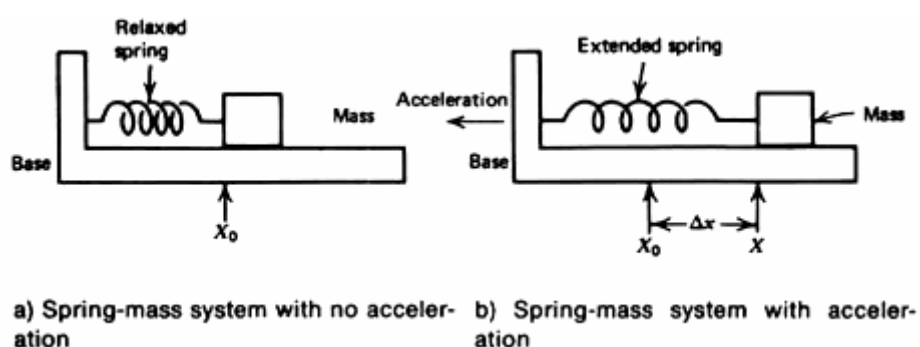


圖 2.4 基本的彈簧質量系統加速度規 取自 <http://www.ni.com/>

在圖 2.4 中，我們看到一個質量，平放在基板上，沒有滑動。這個質量用彈簧連接至基板，彈簧位於未延伸狀態，未對質量施加力量。在圖 2.4 中，整個總成向左加速，如圖所示。現在彈簧延伸，以提供將質量加速所需的力。這種情形可以用牛頓定律和虎克定律的等式來加以描述：

$$ma = k\Delta x$$

其中 k = 彈簧常數 (spring constant), N/m

Δx = 彈簧延伸，單位公尺 (m)

m = 質量，單位公斤 (kg)

a = 加速度，單位 m/s^2

將加速度的測量歸納為彈簧延伸量的度量（線性位移），因為

$$a = \Delta x \cdot k/m$$

如果加速作用的方向相反，同樣的物理原則亦適用，只是彈簧是受到壓縮，而非延長。等式仍然描述彈簧位移和加速度的關係。彈簧質量原理適用於許多常見的加速規設計。[4]

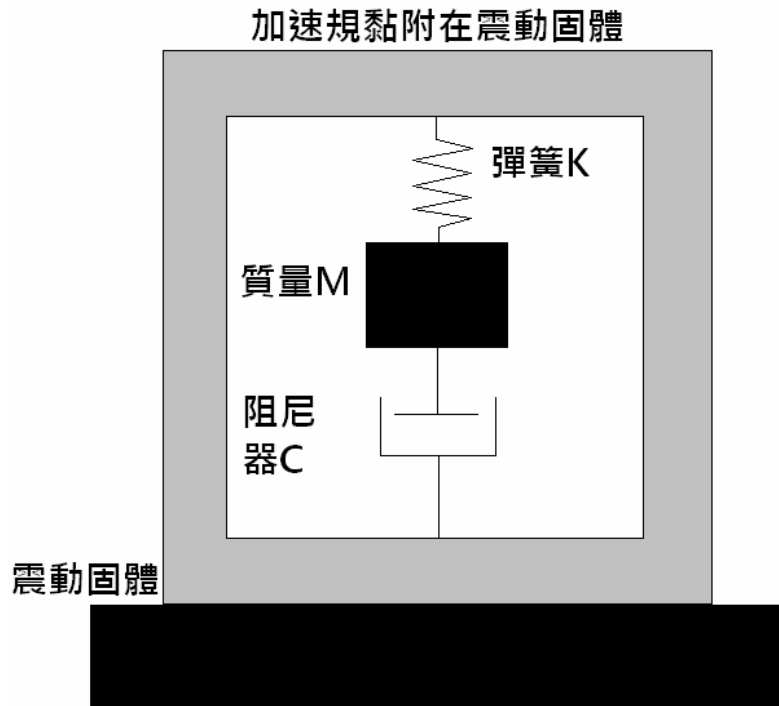


圖 2.5 典型加速規示意圖

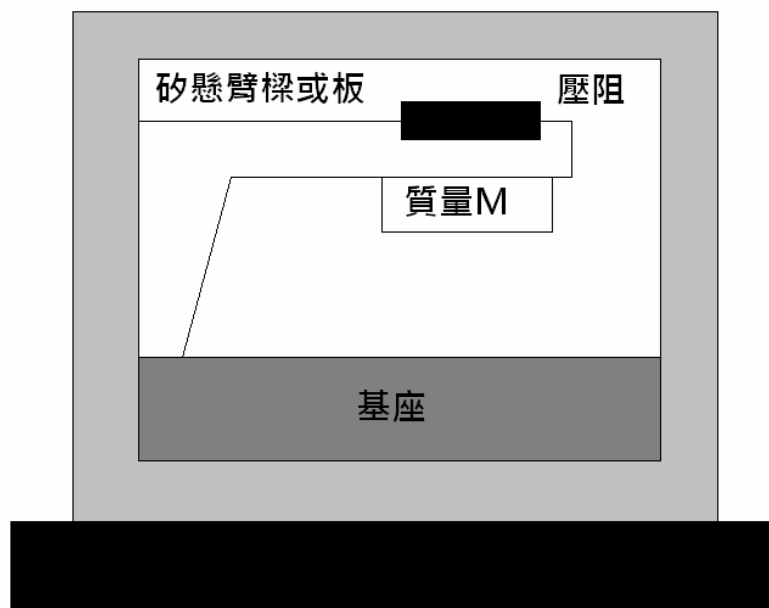


圖 2.6 微加速規構造圖

2.2.2 加速規選用

這次的專題實驗我們採用的加速規型號是 ADXL322，採用微型機械技術，2 軸，可量測 $\pm 2\text{ g}$ 的加速度，頻寬範圍為 0~60Hz，靈敏度為 420mv/g，體積微小且精確度高。

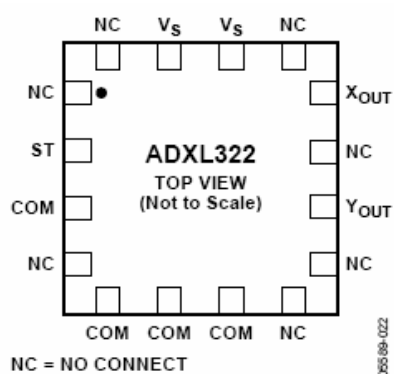


圖 2.7 ADXL322 接腳圖 取自 ADXL322 規格書

表 2.1 ADXL322 接腳定義表 取自 ADXL322 規格書

Pin No.	Mnemonic	Description
1	NC	Do Not Connect
2	ST	Self-Test
3	COM	Common
4	NC	Do Not Connect
5	COM	Common
6	COM	Common
7	COM	Common
8	NC	Do Not Connect
9	NC	Do Not Connect
10	Y _{OUT}	Y-Channel Output
11	NC	Do Not Connect
12	X _{OUT}	X-Channel Output
13	NC	Do Not Connect
14	V _S	2.4 V to 6 V
15	V _S	2.4 V to 6 V
16	NC	Do Not Connect

ADXL322 工作電壓 3V 時，平放於地表時所得到的 X_{OUT} 讀出值為 1.5V，直立於地表 90 度時 X_{OUT} 讀出值為 1.08V，倒立於地表 90 度時 X_{OUT} 讀出值為 1.92V。

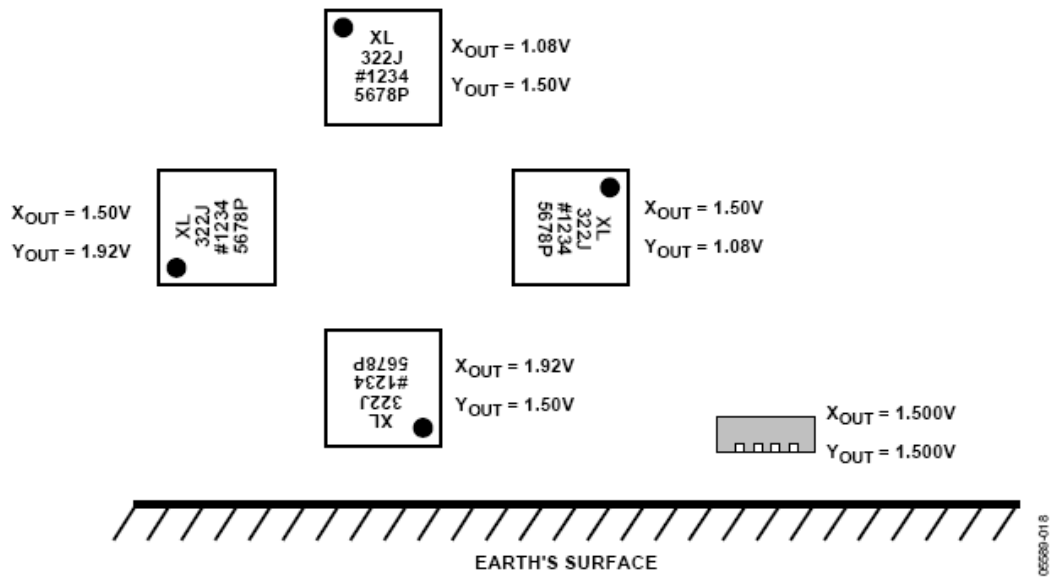


圖 2.8 ADXL322 工作圖 取自 ADXL322 規格書

依照規格書所給定的公式：

$$\Theta = \text{ASIN}(A_X/1 \text{ g})$$

$$A_X = (X_{OUT} - 1.5V) / 420\text{mv/g}$$

A_X ：X 軸的加速度

依以上之公式，可計算出傾斜角 Θ

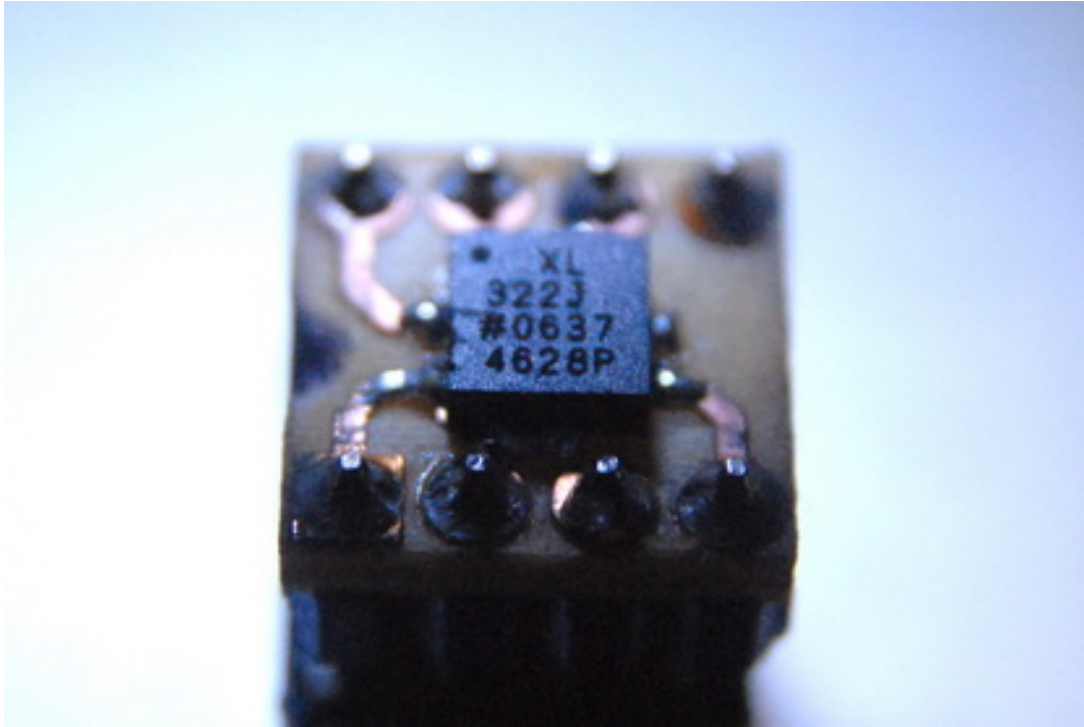


圖 2.9 ADXL322 實體圖

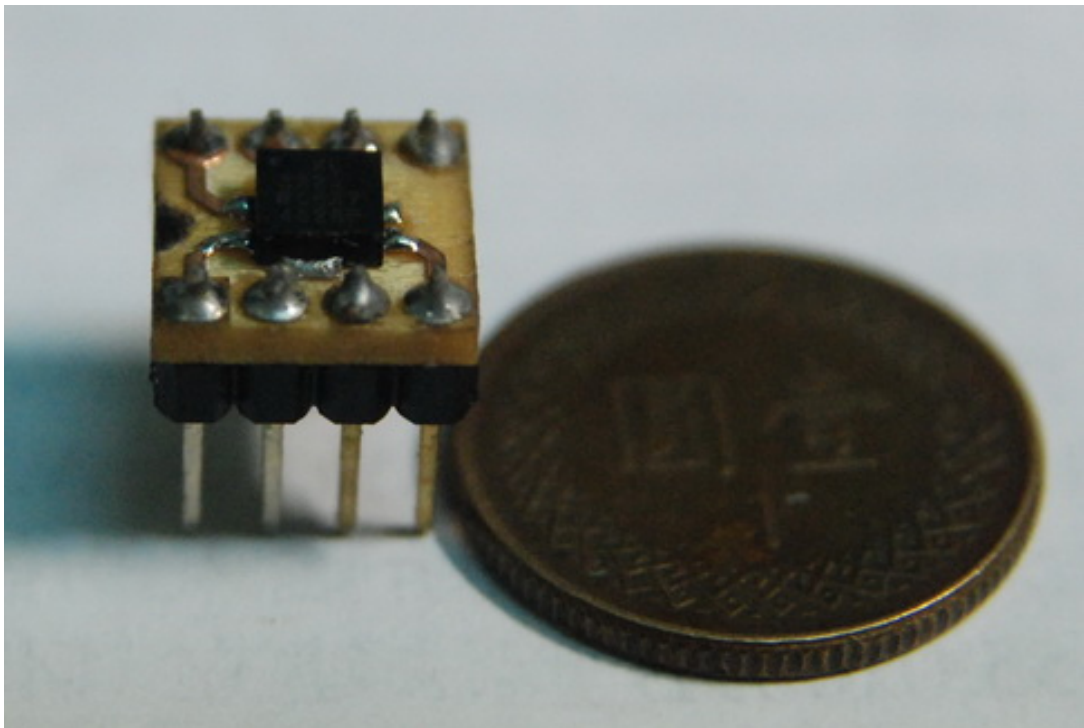


圖 2.10 ADXL322 大小示意圖

第三章 設計

3.1 車體平衡設計流程

兩輪自平衡車，集結了許多的理論。因此在設計上顯得繁雜許多，我們把設計流程分為六大區塊：車體分析、系統建模、控制法則、機械設計、電路設計、測試調整。[2]如圖3.1所示。

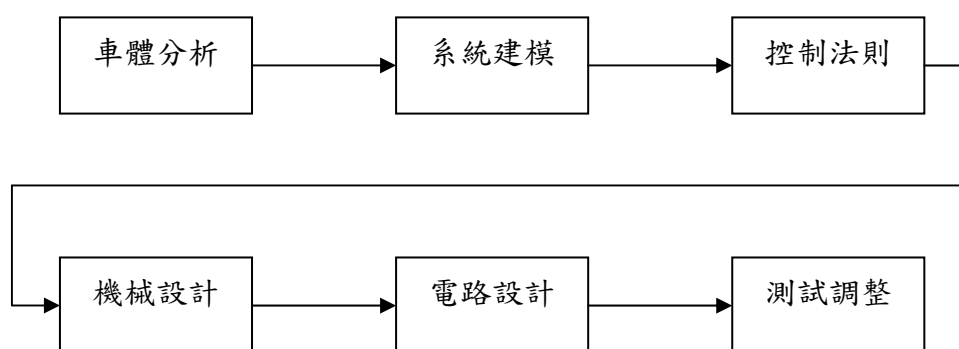


圖 3.1 設計流程圖

3.2 車體分析

自平衡車車體是有左右兩邊各一個車輪所構成，如圖 3.2，這樣的結構可使迴轉半徑為零，車身更靈活、機動性高。

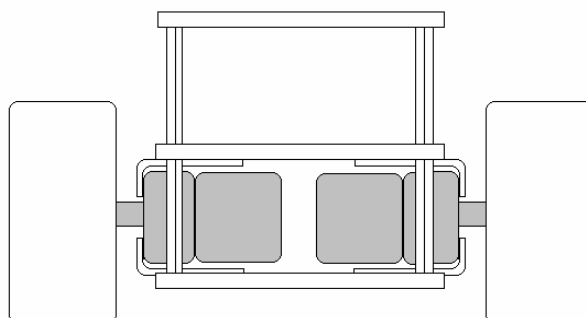


圖 3.2 車體前視圖

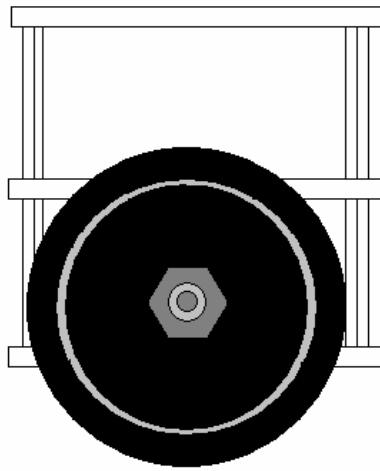


圖 3.3 車體側視圖

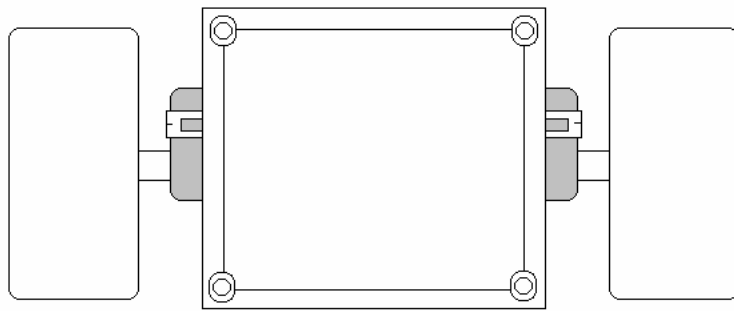


圖 3.4 車體上視圖

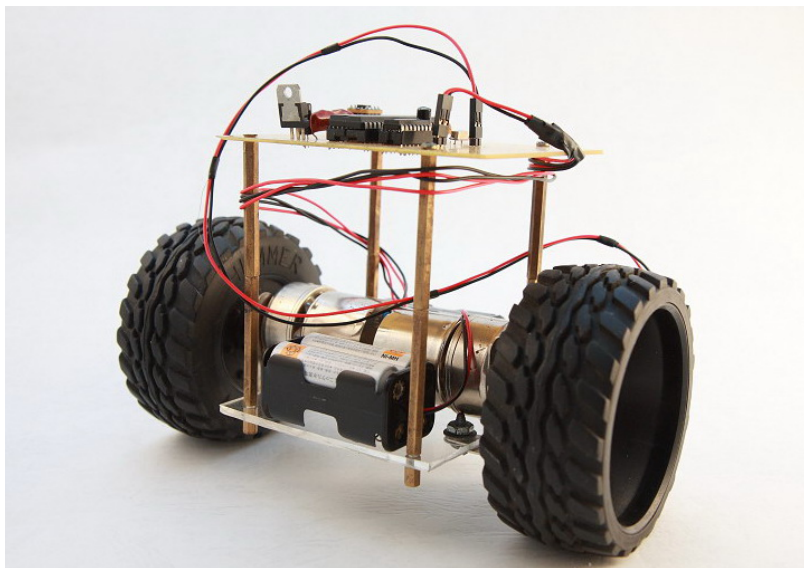


圖 3.5 車體實體圖

3.3 系統建模

車體部份為以馬達軸心為中心做前後的擺動，若以直立車體垂直地面為0度，則車身可擺動範圍為-35度~35度，如圖3.6，這樣的設計是為了避免當車身失去平衡時，頂端的平台直接撞擊地面進而影響到裝在頂端平台上的電路。[5]

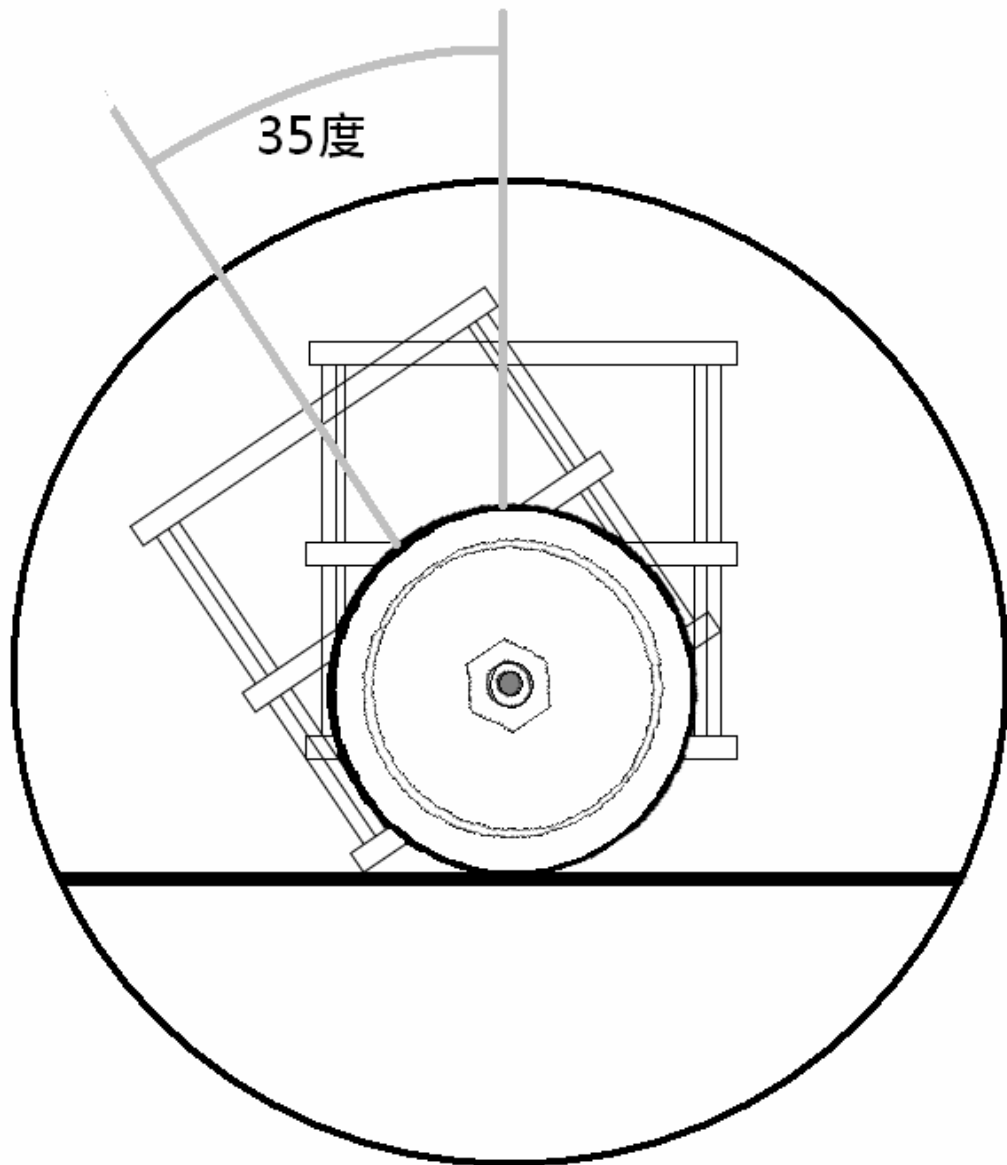


圖 3.6 兩輪自平衡車側面架構圖

3.4 控制法則

量測加速規訊號，將訊號由類比轉換成數位信號，輸入微處理器。運算所需要的方向及輸出量，再藉由驅動電路驅動直流馬達，控制車輪方向及轉速，維持車體平衡。在藉由車體上的加速規偵測傾斜量，反覆做動，如下圖 3.7。

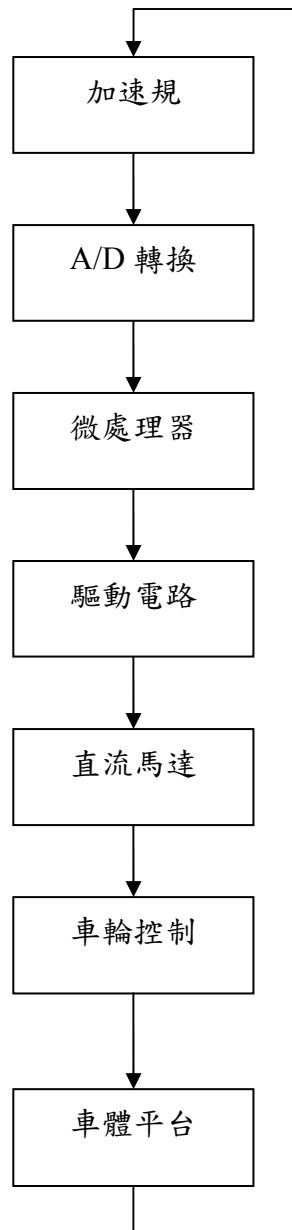


圖 3.7 控制法則流程圖

3.5 機械設計

馬達如圖 3.8 所示由 PHOTONIC 公司製造，包含減速齒輪組，用來帶動車體，其型號：CG-309A 12060；額定電壓：12V；額定轉速：60rpm。



圖 3.7 直流馬達圖

安裝於車體的底層，轉動車輪，帶動車體。藉由驅動電路，來控制轉向和轉速用以達到車體平衡。

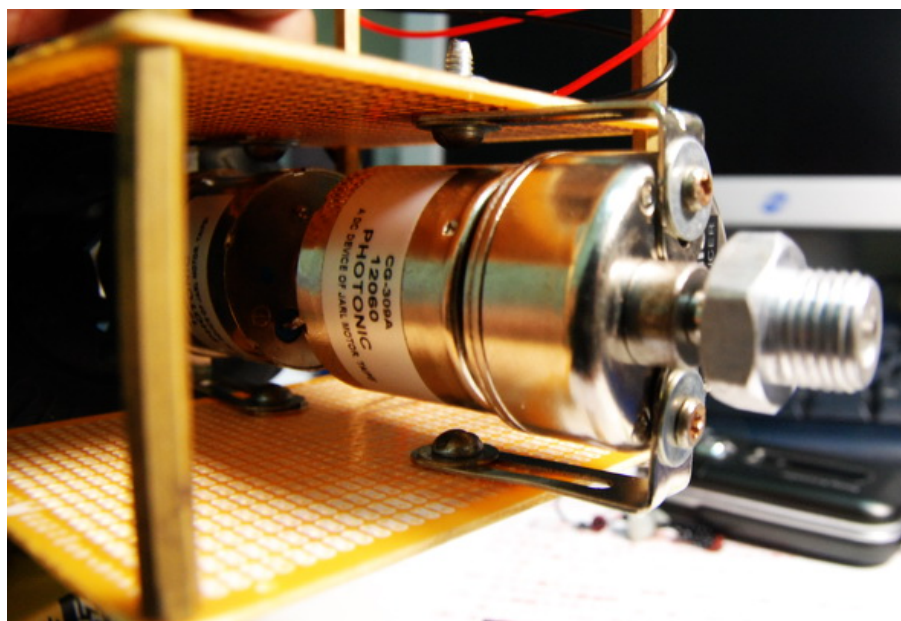


圖 3.9 直流馬達安置圖

3.6 電路設計

車體電路可分為兩大部分，訊號轉換電路、馬達驅動電路。訊號轉換電路用以將加速規給定的類比訊號轉為數位訊號，輸入單晶片中。馬達驅動電路，將單晶片給定的訊號，驅動馬達正反轉和轉速。

3.6.1 訊號轉換電路

本次專題實驗 A/D 轉換採用 intersil 公司製造的 ACD0804，ACD0804 是個常見的類比轉數位的晶片，具有 8 位元的輸出，電壓解析度為 $5V/28=0.01953125V$ ，最大誤差值為 $\pm 1 \text{ LBS}$ ，轉換時間為 $100 \mu s$ 。



圖 3.10 intersil ACD0804 圖

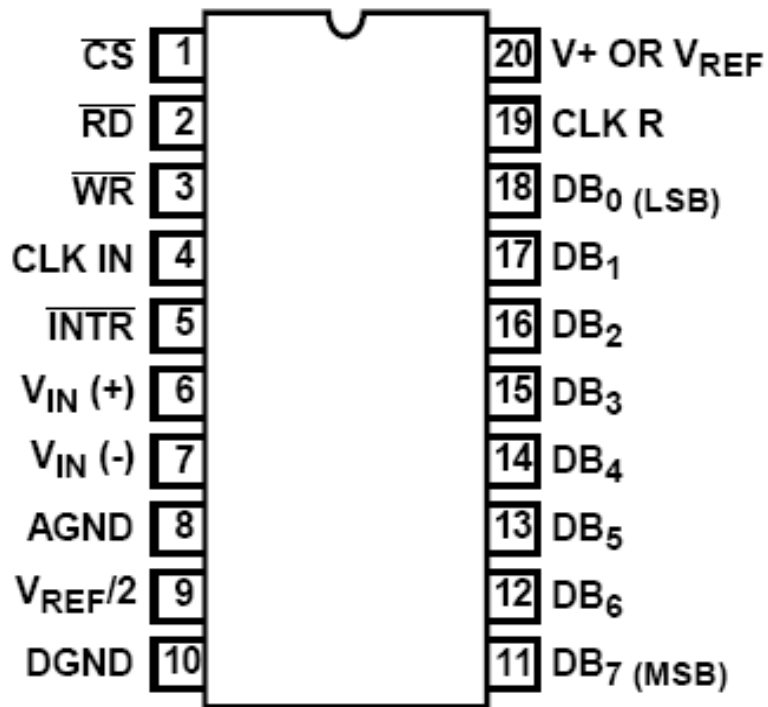


圖 3.11 ADC0804 接腳圖 取自 8051 規格書

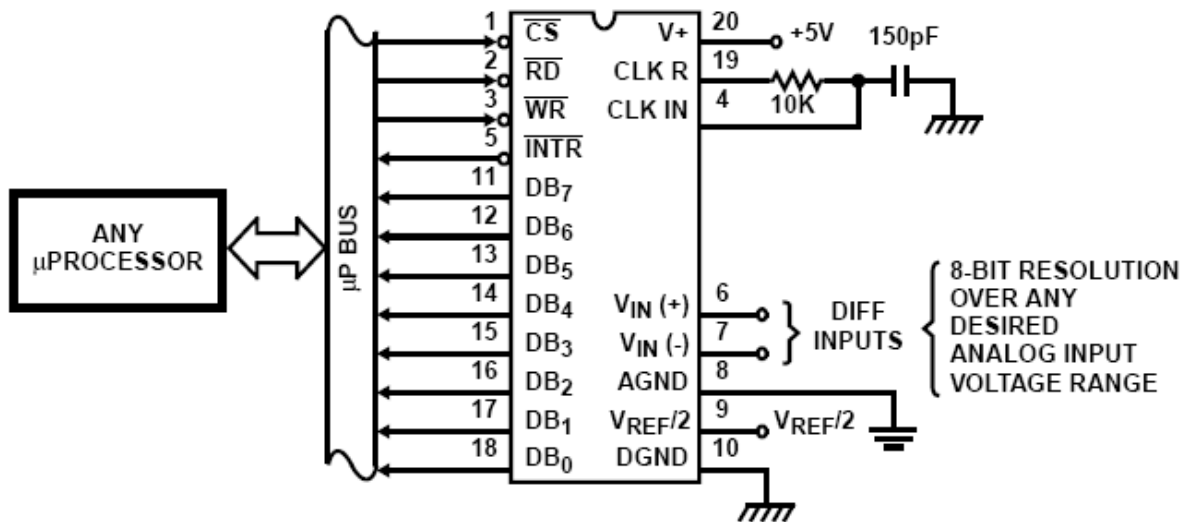


圖 3.12 ACD0804 基本接法圖 取自 8051 規格書

3.6.2 馬達驅動電路

馬達驅動電路，是由四顆電晶體所構成的H型電路如圖3.13所示，以電晶體的導通與截止來控制馬達的正反轉；以電晶體的導通時間快慢來控制馬達轉速的快慢。

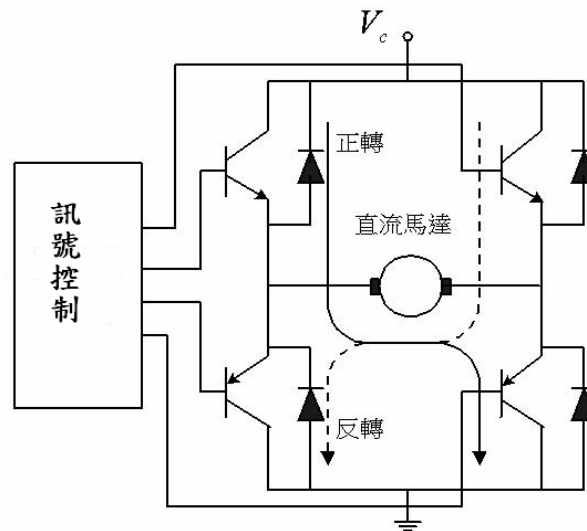


圖 3.13 H型電路圖 取自蔡宗成，PIC_SERVER教材(4)-近端馬達控制

本次專題實驗採用SGS-THOMSON製造的L293D，L293D，是一顆推挽式(Push-Pull)半H電橋(Half H-Bridge)電子開關，它們可以送出(source)電流，也可以吸入(sink)電流，直流負載接在輸出點output與正電源Vcc之間，或是輸出點output與地線GND之間均可[6]，如圖3.14。

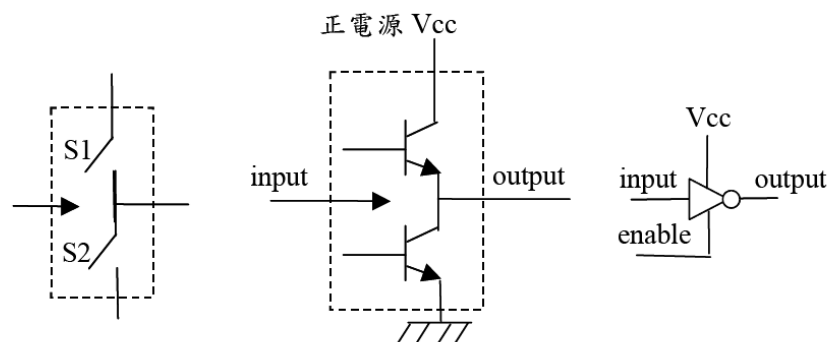


圖 3.14 L293D電路示意圖 取自蔡宗成，PIC_SERVER教材(4)-近端馬達控制

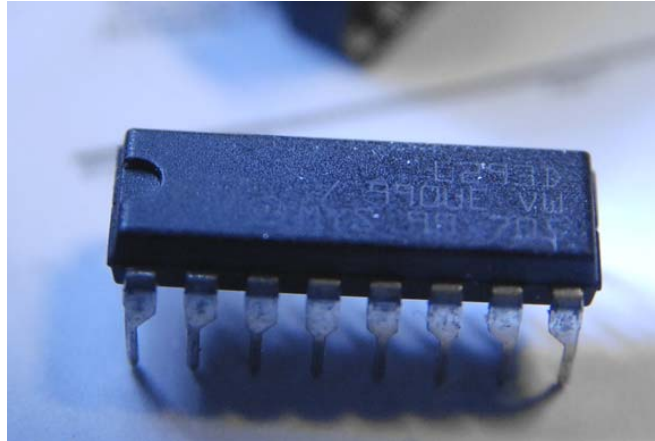


圖 3.15 L293D實體圖

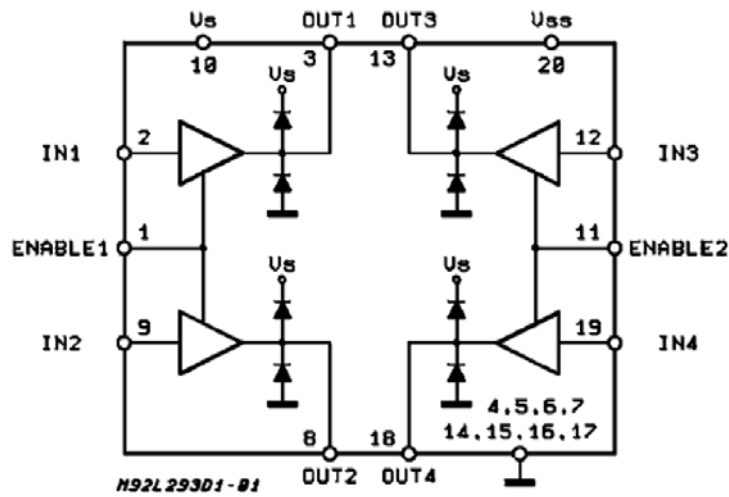


圖 3.16 L293D內部電路圖 取自蔡宗成，PIC_SERVER教材(4)-近端馬達控制

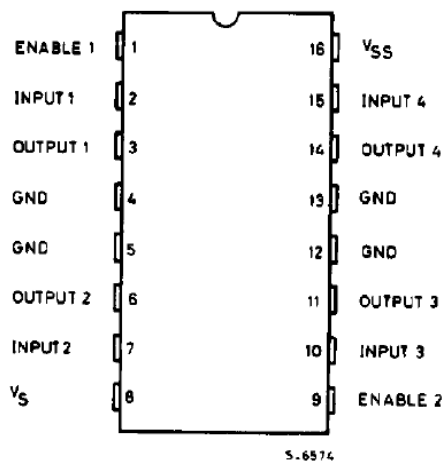


圖 3.17 L293D接腳圖 取自L293D規格書

控制馬達正反轉必須結合兩組半橋驅動器，如圖3.18所示，一個半橋驅動器有兩組電子開關，如S1與S2或者S3與S4，將直流馬達兩端接於這兩組半橋的輸出(Output)，成為一個全橋驅動電路。Enable狀態都為High，當輸入Input_1為High（S1導通，OUT1為High）且Input_2為Low（S4導通，OUT2為Low）時，形成一迴路(Vcc-S1-直流馬達-S4-GND)，馬達正轉；同理當Input_1為Low(S2導通，OUT1為Low)與Input_2為High(S3導通，OUT2為High)，形成一迴路(Vcc-S3-直流馬達-S2-GND) [6]。

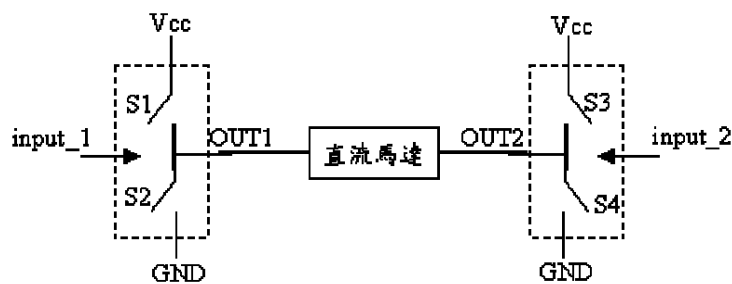


圖 3.18 全橋驅動電路示意圖 取自蔡宗成，PIC_SERVER教材(4)-近端馬達控制

表 3.1 全橋驅動電路真值表 取自蔡宗成，PIC_SERVER教材(4)-近端馬達控制

input_1	input_2	直流馬達負載
H	L	正轉，S1、S4導通，S2、S3不導通
L	H	反轉，端電壓同上但反向
H/L	H/L	快速停車

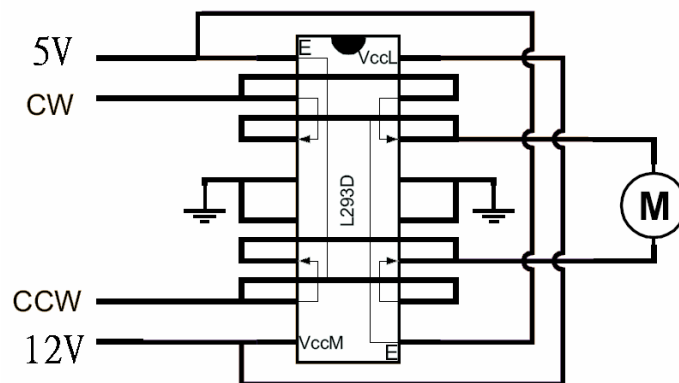


圖 3.19 L293D全橋驅動電路圖 取自L293D規格書

第四章 構造和結果

4.1 結構圖

車體結構主要以方便取材為主，如同之前實驗目的所提到的要降低實驗成本，以及方便維修。所以我們車體結構以一般容易取得材料為主。我們以8×8的萬用實驗蜂巢板做為車台，四邊鎖上5公分長的銅柱，兩層相疊以完成車體。

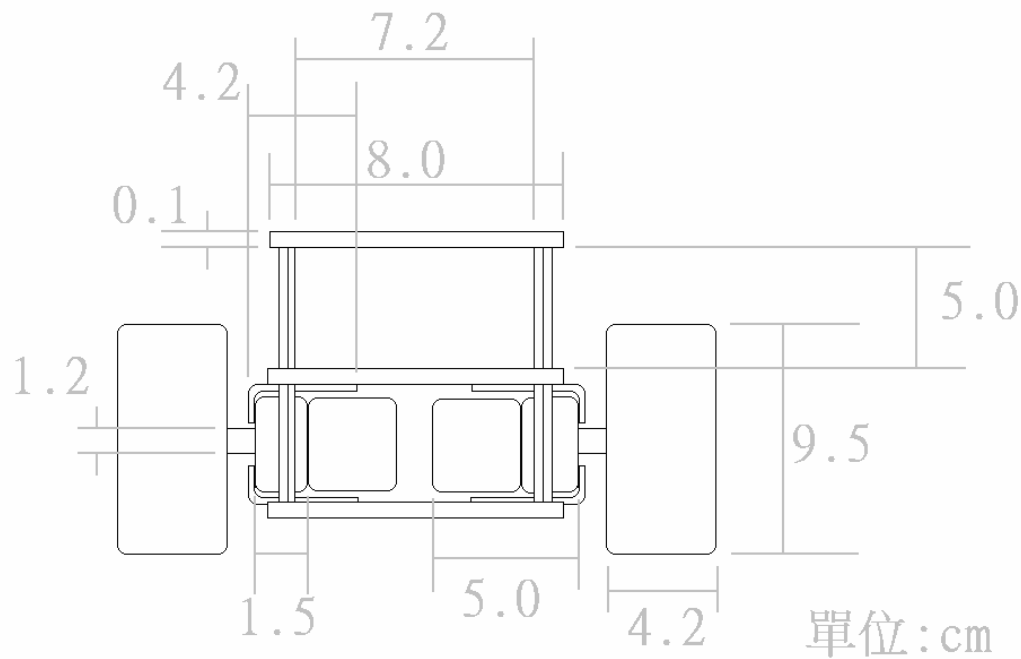


圖 4.1 組合尺寸圖

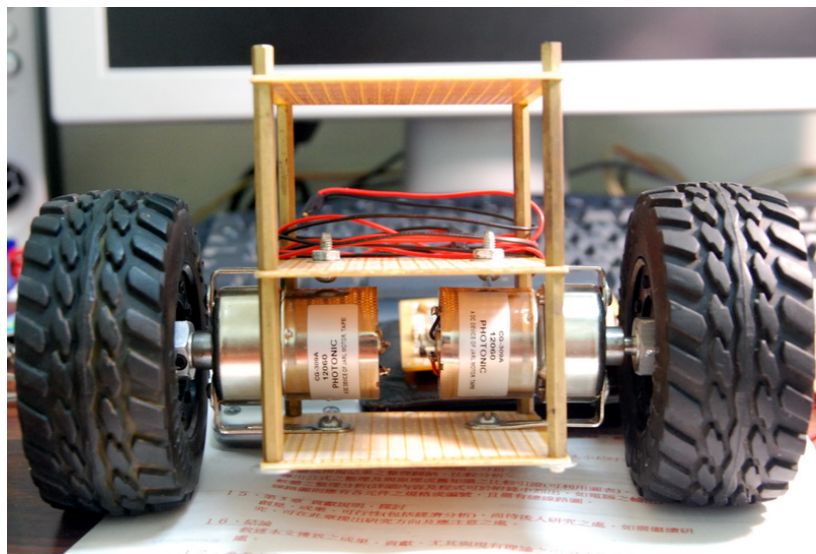


圖 4.2 車體實體圖

4.2 電路圖

電路設計主要以越簡單的電路越好，以方便日後維修、檢查、保養。電路作動，先擷取加速規的電壓值，輸入ADC8004的第六之接腳。轉換其輸入電壓為8 bit的2進位編碼，存入8051。藉由8051的運算、判斷、輸出，來控制L293D這類馬達驅動電路IC。

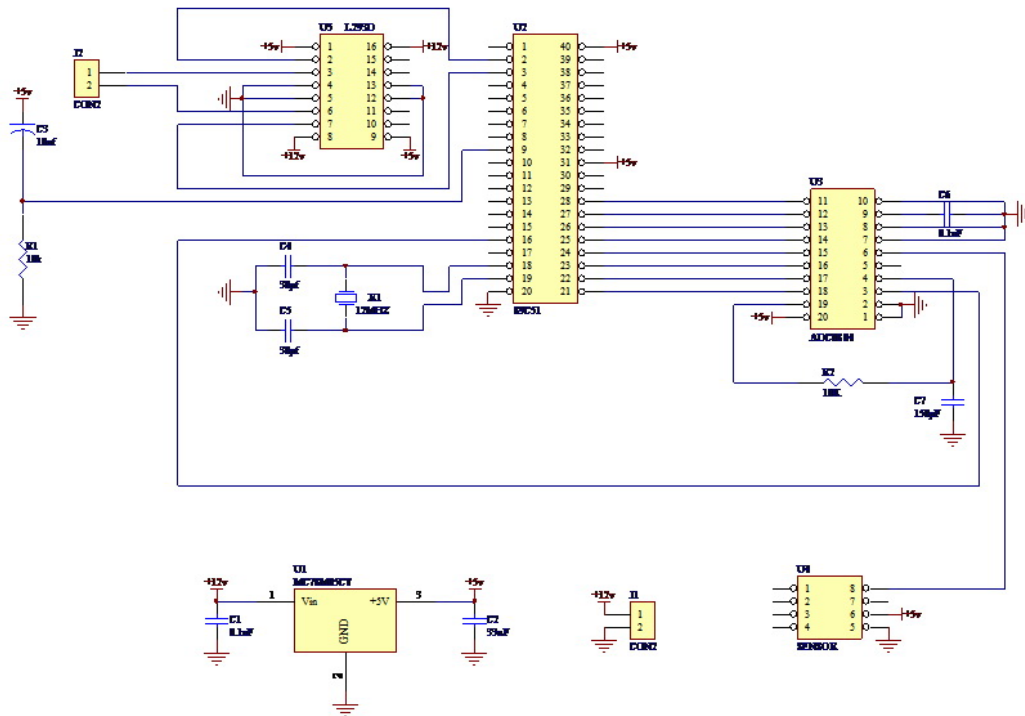


圖 4.1 電路圖

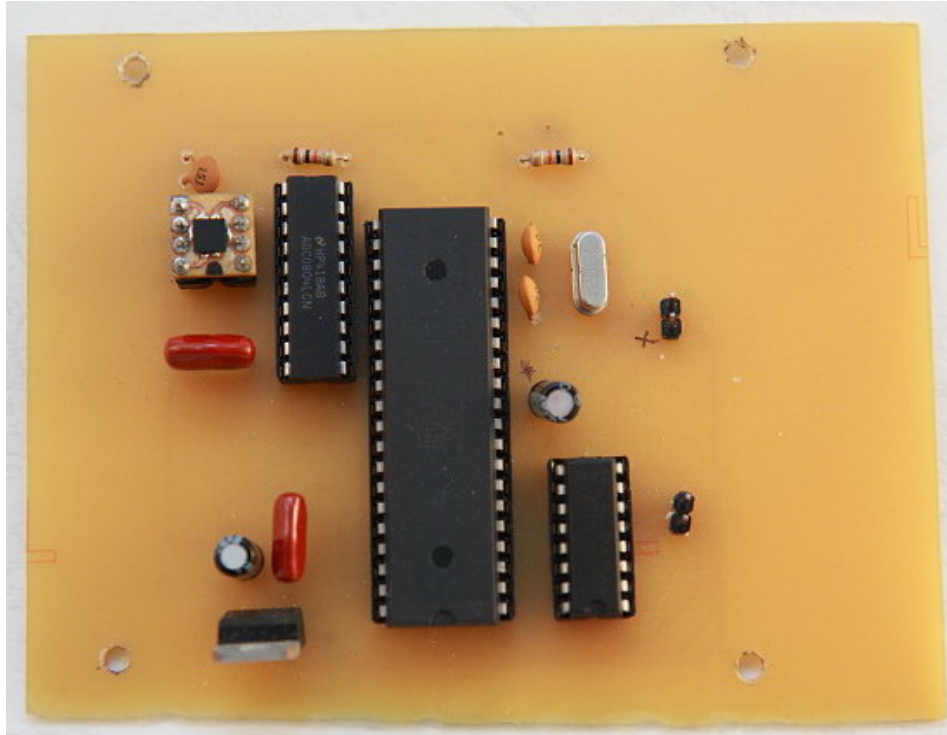


圖 4.2 電路實體圖(正面)

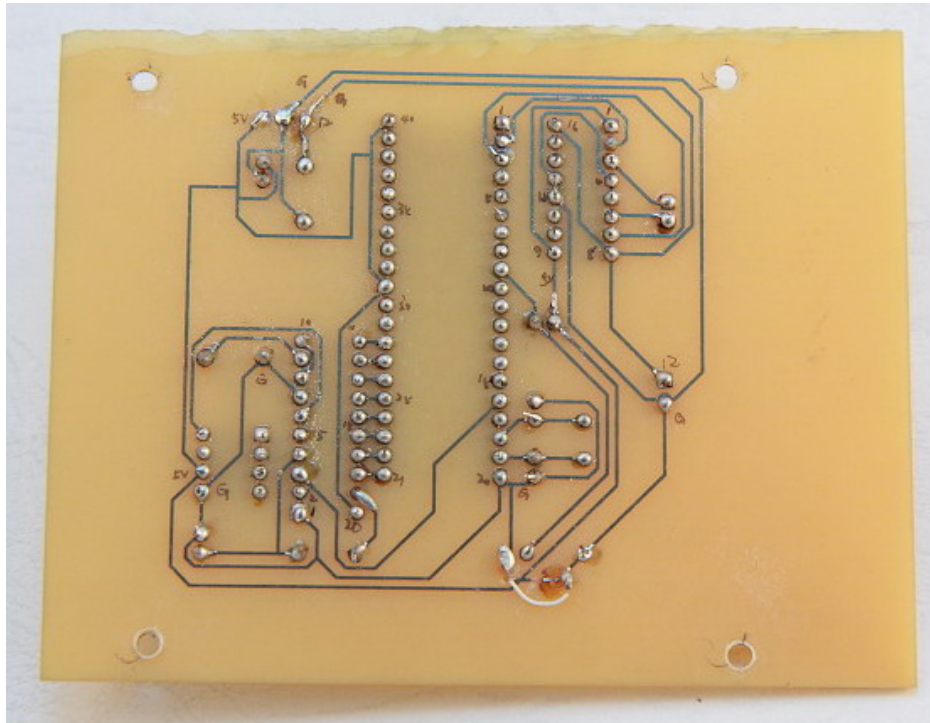


圖 4.3 電路實體圖(背面)

4.3 實體製作和實驗結果

以這次的專題實驗而言，由於馬達直接與車輪相接和所以因齒輪間距所產生的時間延遲因素較小，也因此減少了許多不必要的摩差力造成的誤差。

在車體架構上，所希望的車體是重量要輕且重心能夠降低，因為重心低車體的晃動才不會太過於強烈會比較容易控制，但是加上馬達與所需的驅動電路及電池後，將使重心上降，若任意的增加車體重量使重心降低，會造成馬達轉矩不夠，所以我們採用現行的架構，使重量減輕。馬達方面，在與步進馬達比較下，並考慮轉矩大與控制佳的因素下，我們選用直流馬達。

在感測器方面，一般使用傾斜器或是陀螺儀感測水平角度的變化，但是由於經費上的考量我們只選用一顆加速規，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，但在使用上又遇到很多問題如雜訊、偏移與電壓穩定性等。

第五章 貢獻說明、探討

5.1 創見和成果

這次實驗在於以簡單的機構、電路以及最低的成本考量下完成車體平衡，所以在精密度上比不上其他的設計，但卻有著方便維修及高發展的可能性存在。但在平衡性上卻不若其它的機種那樣有著高度的穩定。因為沒有濾波電路所以雜訊是個令人頭痛的問題，導致車身不斷的前後做修正。

5.2 後續發展與可行性

這次的專題實驗設計上雖然不為上選，但卻也達到既定的目標，就以實體的經濟效應而言製作成本低於 1500 新台幣，但如果大量的生產降低一些零件的運費，意味著成本可以往下探。但這次的專題實驗，我們只是一個基本的架構平台，既然為一個基本架構平台，那還可以加上許多原件，例如加上旋轉編碼器、陀螺儀等感測元件，重新改寫程式可以增加車子的穩定性；再組合一些外部元件，如機械手臂之類的可以增加整個專題的可玩性。

參考文獻

- [1]黃正豪，兩輪自走車之設計與實現-以 NIOS 為核心之行動控制，碩士論文，國立中央大學，2006 年
- [2]張培仁、張志堅，基於 16/32 位元 DSP 機器人控制系統 設計與實現，清華大學出版社，2006 年
- [3]鄭鈞元，兩輪自我平衡機器人之平衡控制研究，碩士論文，國立中央大學，2003 年
- [4]MyNI - National Instruments，<http://www.ni.com/>
- [5]周烜達，兩輪自走車之設計與實現，碩士論文，國立中央大學，2007 年
- [6]蔡宗成，PIC_SERVER 教材(4)—近端馬達控制
- [7]李垂憲，兩輪自走車之設計與實現-以 NIOS 為核心之基本控制，碩士論文，國立中央大學，2006 年
- [8]陳小鐘、黃寧、趙小俠，單晶片介面技術及應用程式，全華科技圖書，2006 年
- [9]李齊雄、游國幹，8051 單晶片為電腦原理與實作，儒林圖書，2000 年