

# 第十八屆旺宏科學獎 成果報告書



參賽編號：SA18-018

作品名稱：

Spherical Robot 延伸應用-球形輪胎

姓名：陳韋翰

關鍵字：Spherical、輪胎、全向移動

# 目錄

壹、簡介 .....	3
貳、摘要 .....	3
參、研究動機.....	4
肆、研究目的.....	4
一、自由度 .....	4
二、穩定內部機構.....	4
三、平衡重心.....	4
伍、研究方法與過程 .....	5
一、概述 .....	5
二、電機結構.....	5
三、程式運用.....	8
四、平台結構分析.....	9
五、數據運算.....	11
研究一 .....	12
研究二 .....	12
研究三 .....	13
研究四 .....	13
研究五 .....	13
陸、作品結構製作 .....	14
柒、第二代作品製作 .....	17
捌、作品差異比較.....	21
玖、結論 .....	22
參考資料 .....	23
附錄一 .....	24
附錄二 .....	25










# 壹、簡介

球形機器人是一種特殊類型的移動機器人，擁有特殊的形態學，與傳統的輪式或腿式機器人相比，機器人具有多項優勢

- (1) 完全覆蓋的外殼可以保護整個系統
- (2) 該動作類似於輪式運動，具有很高的動力效率和運動平穩性
- (3) 由於幾何對稱的內在本質，運動可以是全向的
- (4) 外殼的每個接觸面都可起作用

作為“腳”，它能夠快速碰撞恢復及自動接觸適應柔軟/不平坦的地形。

而許多球型機器人根據他們的驅動機制大致上可分為三類：直接驅動，重力和角動量方法，若在以普遍製作原理能再細分為表中九大類。

Robot Configuration										
Driving mechanism	Driving	D	D	D	D	D	G	A	D/A	A
	Steering	D	D	D	D	D	G	A	A	G
Input needed		2	≥2	2	2	2	4	2	3	2
Sharp turn		V	V	V*	V	V	V	V*	V	
Omnidirectional locomotion				V*	V	V	V	V*		

▲表 1、球形機器人種類

# 貳、摘要

球型機器人在行動上與機構上有一般機器人無法取代的優勢，若成功製作穩定型態機構，未來將能推廣於球形輪胎上作為應用，克服目前汽車輪胎的許多不便利性。

過程中，設計許多實驗與研究來進行探討與分析，<研究一>分析球殼慣性運動後與馬達停止轉動產生摩擦力之比較，<研究二>計算平面傾斜角度產生之摩擦力與地球殼接觸地面摩擦力，<研究三>內部機構使用陀螺儀控制球體平衡之設計，<研究四>摩擦力作用行走斜向之理想線與實際線的比較，<研究五>探討其行走路徑偏差與穩定性，運用諸類設計實驗來測試此球形輪胎之可實現性。

而在最終預期達到理想狀態為內部馬達行走速率(motor speed)能夠與外部球殼行走速率(ball speed)相等，再比較與現今普遍設計之重心控制球型機器人之使用效率是否提升及改善。



## 參、研究動機

在一次上網的過程中，無意間發現了球型機器人這類的相關題材，發現網路上亦有許多相關的研究，而在電影<星際大戰>中也出現了球型機器人 BB-8，因此這項題材已經不是新穎的話題。



▲圖 1、BB-8 球型機器人



▲圖 2、球形輪胎概念圖

認識這個題材後，心想為何不結合球型機器人與時下熱烈討論的球形輪胎、球形馬達，而輪胎大廠固特異 (Goodyear) 也提出了球形輪胎的概念，並且說明了其相關有別於一般輪胎的優點，因此想投入此項主題進行研究，若成功地做出球型機器人，想必球形輪胎在未來的世界也是遲早會出現的產品。

## 肆、研究目的

### 一、自由度

由於是球形輪胎，因此有別於一般輪胎最大的區別想必移動的方向，必須能做到擁有超過一個方向的方向的自由度。

### 二、穩定內部機構

機構整體屬球形，因此若使內部機構跟著轉動將會造成很大的不穩定性，因此必須製作能夠與外旋轉球殼隔離的平台或機構來使內部元件永遠保持穩定。

### 三、平衡重心

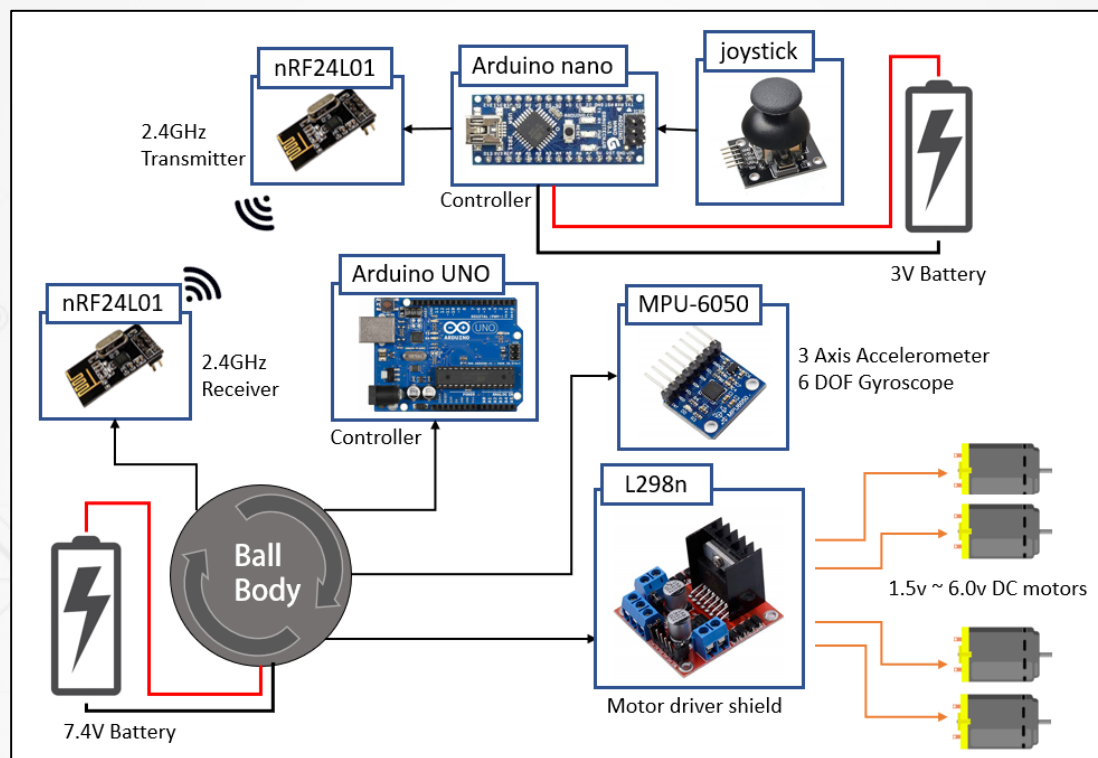
球形的結構與地面的接觸點極小，造成整體容易產生重心不穩之問題，在整個作品中，重心的控制是一項不可忽視及困難的課題。

現階段輪胎只能以單方向前進，期望能做出球形輪胎，目的於增加車身靈活性、減少交通事故發生，更進一步能夠減少引擎放置空間及運用電力來代替汽油的消耗，最終甚至能推廣到衛星無人車、球形鏡頭等。

## 伍、研究方法與過程

### 一、概述

使用 Arduino 作為控制器基礎，在無線傳輸方面使用 2.4GHz 傳輸模組，並且使用 L9110S 作馬達驅動帶動球體，最後以 MPU-6050 陀螺儀與加速度計來測量其穩定性及運動數據。

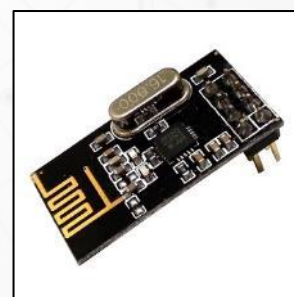


▲圖 3、作品機構流程圖

### 二、電機結構

#### (1) nRF24L01 無線傳輸模組

nRF24L01 模組每個頻段有 6 個通道(Pipe)，亦即允許  $6 \times 126 = 756$  個設備同時收發互不干擾，最高傳輸速率 2Mbps，VCC 工作電壓 1.9~3.6V，但其他接腳可與 5V 系統的微控器如 Arduino 等直接相連，不需使用位準轉換器。超低功耗設計在發射模式下發射功率 6dBm 時電流消耗為 9.0mA，接收模式為 12.3mA，比一顆 LED 耗電還低。



▲圖 4、nRF24L01 模組

Parameter	Value	Unit
Minimum supply voltage	1.9	V
Maximum output power	0	dBm
Maximum data rate	2000	kbps
Supply current in TX mode @ 0dBm output power	11.3	mA
Supply current in RX mode @ 2000 kbps	12.3	mA
Temperature range	-40 to +85	°C
Sensitivity @ 1000 kbps	-85	dBm
Supply current in Power Down mode	900	nA

▲表 2、nRF2L01 模組 Datasheet

## (2) MPU-6050 陀螺儀 (附載 DMP 運算器\*附錄一)

其概念為每次計算出的角度做累加就會等到當前所在位置的角度，  
假設最初陀螺儀是與水平面平行，單片機每  $t$  讀一次陀螺儀的角速度，當讀了三次角速度以後  $z$  軸轉到圖 5 的位置，則在這段時間中轉過的角度為  $x$ ：

$$\angle x = \angle 1 + \angle 2 + \angle 3$$

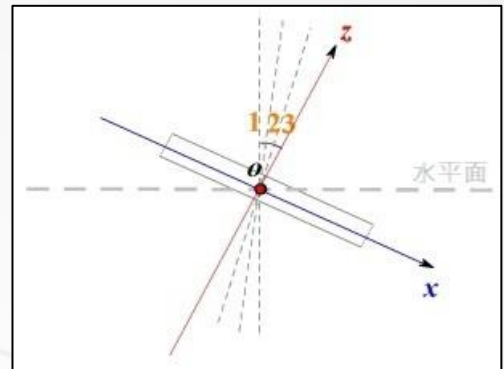
假設從陀螺儀讀出的角速度為  $w$ ，那總角度為：

$$X = \frac{(\omega_1 \cdot t_1 + \omega_2 \cdot t_2 + \omega_3 \cdot t_3)}{1000}$$

假設經過  $n$  次，那麼總角度如下：

$$X = \frac{(\omega_1 \cdot t_1 + \omega_2 \cdot t_2 + \omega_3 \cdot t_3 \cdots + \omega_n \cdot t_n)}{1000}$$

此運算也存在一定誤差，而且總角度是經過累加得到的，這樣誤差就會越累積越大，最終導致計算出的角度與實際角度相差很大。於是可以使用卡爾曼濾波器把加速度計讀出的角度結合在一起，使計算出的角度更準確。

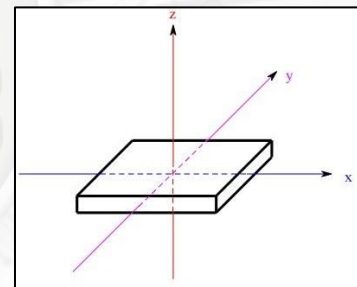


▲圖 5、角度運算示意圖

## (3) MPU-6050 加速度計

加速度計可以測量某一時刻  $x, y, z$  三個方向的加速度值，而所測出的結果是重力加速度與平台運動加速度合成得到一個總加速度在三個方向上的分量。

▶圖 6、立體三軸示意圖



若先從二維方向思考，圖 7 為由  $y$  軸正向平視圖， $y$  軸經簡化和坐標系的原點  $o$  重合在了一起。

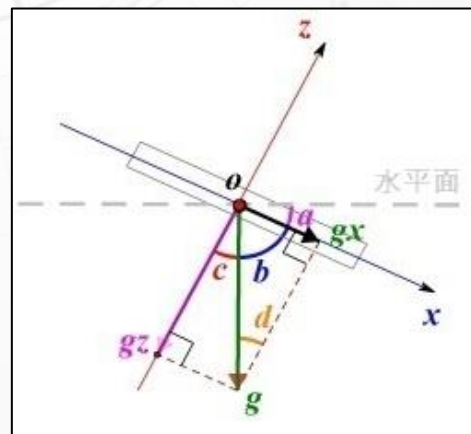
平台傾斜角為夾角  $a$ ，重力加速度為  $g$ ，  
而  $g_x$ 、 $g_z$  分別是  $g$  在  $x$  軸和  $z$  軸的分量。

$$\therefore \angle a + \angle b = 90^\circ, \quad \angle c + \angle b = 90^\circ$$

$$\therefore \angle a = \angle c = \angle d$$

計算出角度  $d$  就等同於計算出了  $x$  軸與桌面的夾角  $a$ ，由正弦定理得出：

$$\sin d = \frac{g_x}{g}$$



▲圖 7、XZ 平面分析圖

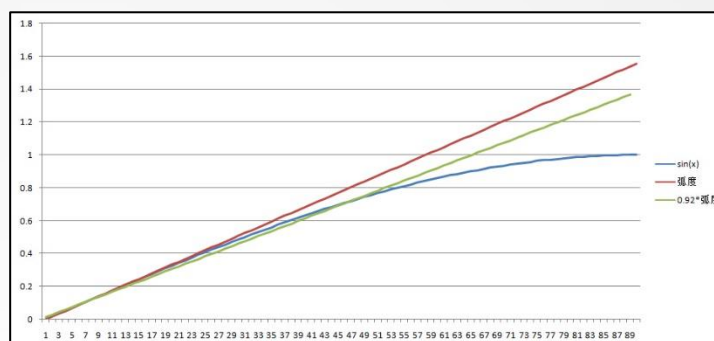


角度的正弦與角度對應的弧度成線性關係。如圖：

從圖上可以看出，當角度範圍是 0~29 度時：

$$\sin x = \frac{x \cdot 3.14}{180}$$

▶表 3、正弦值與弧度關係



平台擺動範圍為 $-29^{\circ} \sim 29^{\circ}$ ，而若須超過此範圍可乘係數  $K = 0.92$ ，來使範圍擴大到 $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ，最終得到角度換算法為：

$$\sin x = \frac{K \cdot x \cdot 3.14}{180} \Rightarrow \sin x = \frac{gx}{g} = \frac{k \cdot d \cdot 3.14}{180}$$

那麼角度就可以通過如下公式計算出：

$$d = \frac{180 \cdot gx}{(k \cdot g \cdot 3.14) \cdot d}$$

而  $gx$  可以從加速度計裡讀出，因此可求得平面傾斜角  $d$ 。最後再將加速度計與陀螺儀讀出的角度結合起來並用卡爾曼濾波器得到更精確數據。

#### (4) 卡爾曼濾波器

卡爾曼濾波器是一個最小均方誤差估計器，後驗狀態誤差估計為：

$$X_k - \hat{X}_{k|k}$$

最小化這個矢量幅度平方的期望值， $E[|X_k - \hat{X}_{k|k}|^2]$ ，這等同於最小化後驗估計協方差矩陣  $P_{k|k}$  的跡 (trace)。將上方程中的項展開、抵消，得到：

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k H_k P_{k|k-1} - P_{k|k-1} H_k^T K_k^T + K_k S_k K_k^T$$

當矩陣導數是 0 的時候得到  $P_{k|k}$  的跡 (trace) 的最小值：

$$\frac{d \operatorname{tr}(P_{k|k})}{d K_k} = -2(H_k P_{k|k-1})^T + 2K_k S_k = 0$$

此處須用到一個常用的式子，如下：

$$\frac{d \operatorname{tr}(BAC)}{d A} = B^T C^T$$

從這個方程解出卡爾曼增益  $K_k$  為：

$$K_k S_k = (H_k P_{k|k-1})^T = P_{k|k-1} H_k^T$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1}$$

此增益稱為最優卡爾曼增益，在使用時得到最小均方誤差。

### 三、程式運用

#### (1) 流程

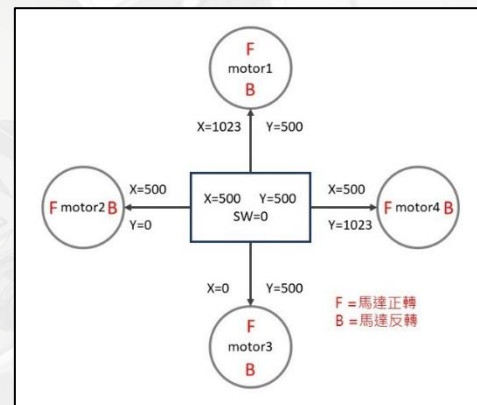
其程式流程，分為 Transmitter 與 Receiver，Transmitter 傳輸控制訊號指令給 Arduino NANO，透過 nRF24L01 進行無線傳輸給 Receiver 的 nRF24L01，接收端再傳送接收到的字串給 Arduino UNO 並且告訴馬達驅動板執行驅動。



▲圖 8、指令傳輸流程圖

#### (2) 結構數據圖

最終將整體機構數值繪製成如圖 9 圖表，標記搖桿動作數據位置，垂直方向為 X 數值 0~1023，水平方向為 Y 數值 0~1023，並標記出直流馬達正轉反轉方向，能夠快速分析出整體結構數值分布。



▶圖 9、整體機構數據

#### (3) 卡爾曼濾波

使用卡爾曼濾波器來求得陀螺儀最優增益，在圖 10-1 中先運算測量之加速度值平均值，再運算 X 軸加速度平均值與 Y 軸加速度平均值，再由圖 10-2 中得到方差，將 P 值加上 0.0025 並且計算卡爾曼增益，將陀螺儀角度與加速度計速度疊加，最後更新 P 值算出其 agx、agy、agz 值，得到圖 11 較平滑曲線。

```

Sx = 0; Rx = 0;
Sy = 0; Ry = 0;
Sz = 0; Rz = 0;

for(int i=1;i<10;i++)
{
    a_x[i-1] = a_x[i];
    Sx += a_x[i];
    a_y[i-1] = a_y[i];
    Sy += a_y[i];
    a_z[i-1] = a_z[i];
    Sz += a_z[i];
}

a_x[9] = aax;
Sx = aax;
Sx /= 10;
a_y[9] = aay;
Sy = aay;
Sy /= 10;
a_z[9] = aaz;
Sz = aaz;
Sz /= 10;

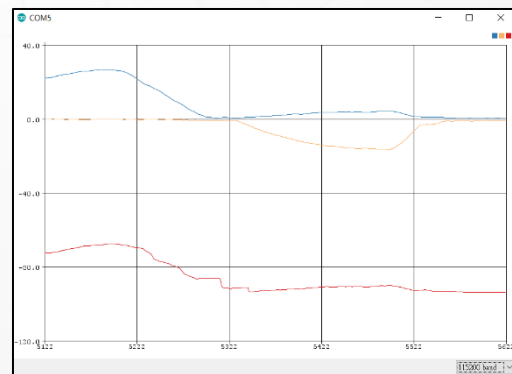
for(int i=0;i<10;i++)
{
    Rx += sq(a_x[i] - Sx);
    Ry += sq(a_y[i] - Sy);
    Rz += sq(a_z[i] - Sz);
}

Rx = Rx / 9;
Ry = Ry / 9;
Rz = Rz / 9;

Px = Px + 0.0025;
Kx = Px / (Px + Rx);
agx = agx + Kx * (aax - agx);
Px = (1 - Kx) * Px;

Py = Py + 0.0025;
Ky = Py / (Py + Ry);
agy = agy + Ky * (aay - agy);
Py = (1 - Ky) * Py;

Pz = Pz + 0.0025;
Kz = Pz / (Pz + Rz);
agz = agz + Kz * (aaz - agz);
Pz = (1 - Kz) * Pz;
    
```



▲圖 11、agx、agy、agz 線性表示圖

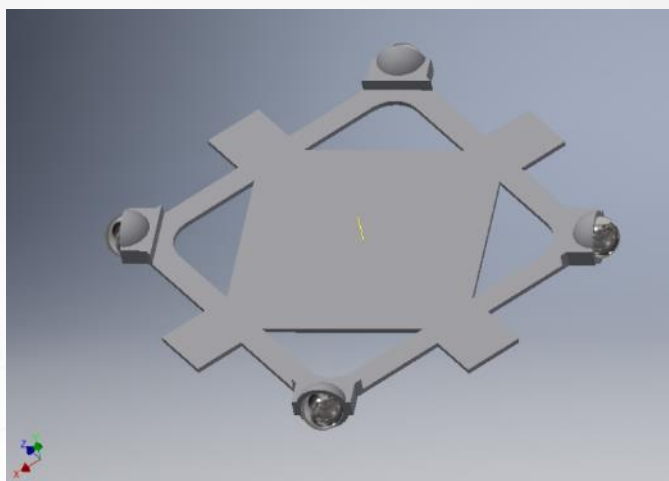
▲圖 10-1、圖 10-2、卡爾曼濾波程式碼



#### 四、平台結構分析

在球殼內部的平台，必須製作能夠放置四顆 130 直流馬達、電路板、18650 雙節電池盒。

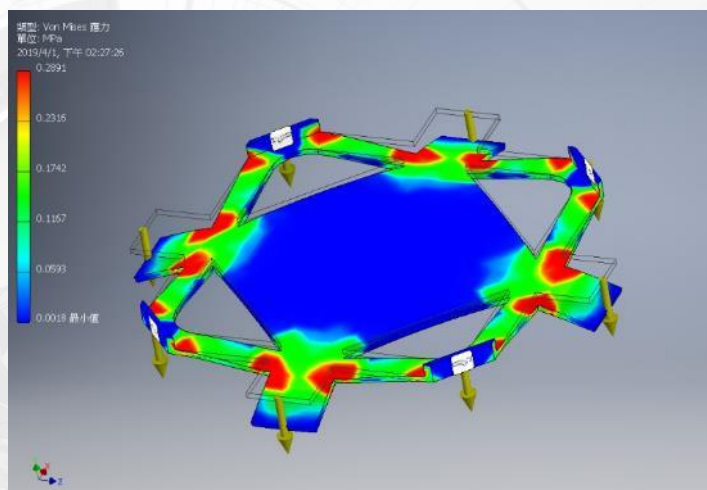
其平板結構使用 Inventor 作初步設計，而因需要使平台在運動過程中保持水平，因此第一個想法是使用滾珠的方式，所以設計了運用彈珠與球體的四個角接觸，如圖 12 所示。



▲圖 12、平台設計圖

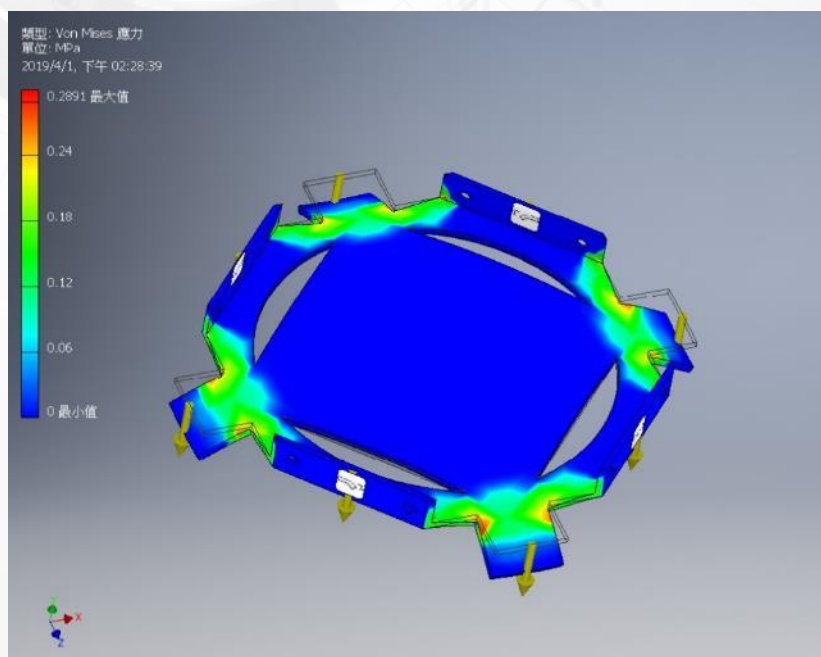
透過 Inventor 應力分析的模擬，評估其結構強度是否足夠，每顆 130 馬達重量為 16.5g，其餘約 12g，經由換算成牛頓單位並分析得到圖 13 結果。

▶圖 13、平台應力分析圖

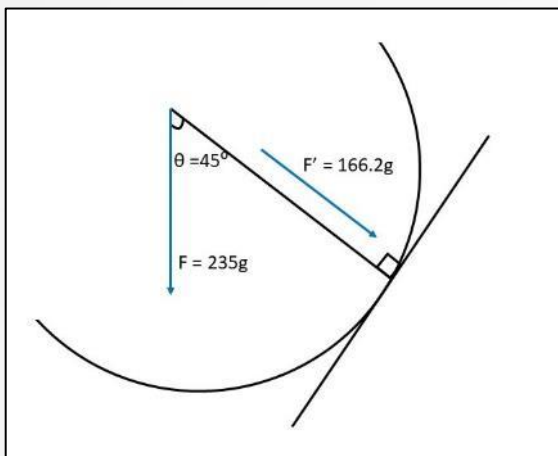


經過模擬，了解其脆弱位置，並加以補強，經過相同重量模擬得到下圖 14，從結果可看出在相同的最大值顏色列中，明顯改良過版本紅色部分較少，達到改善效果。

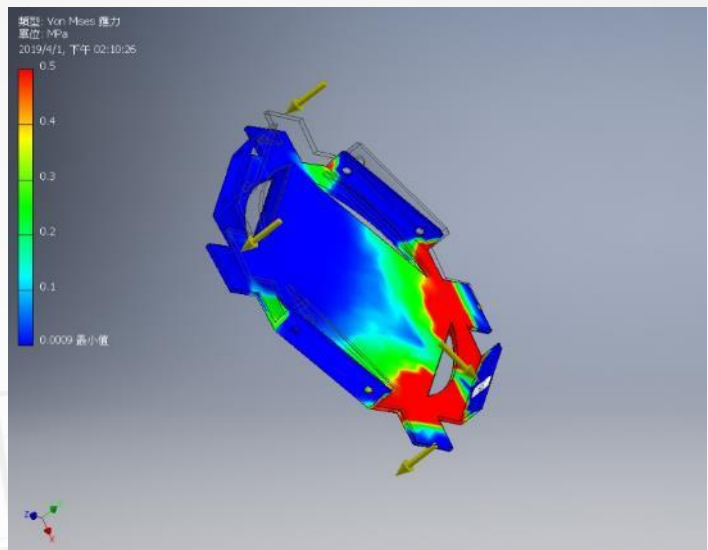
▶圖 14、平台應力分析圖



而若平台摩擦力過大將會使平台傾斜，因此透過計算並運用應力分析，分析在平台傾斜 45 度角最極端的情況下，此時負載之數值。



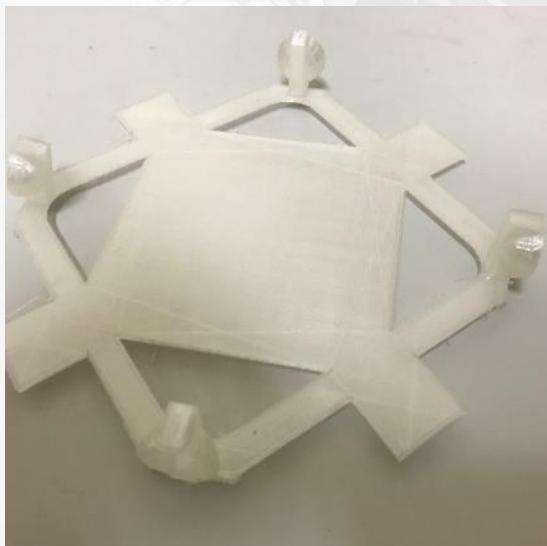
▲圖 15、分力分析圖



▲圖 16、45 度傾斜應力分析圖

而起初設計是使用彈珠，但發現彈珠與 3D 列印材質摩擦力仍過大，平台在轉動過程中仍無法保持水平，因此購買滾珠輪(萬向輪)來進行測試，最終讓平台能夠維持水平。

▲圖 17、滾珠輪



▲圖 18、第一代 3D 列印平台



▲圖 19、第二代 3D 列印平台

#### 問題檢討

經過改良後並且放入球體內測試，發現在旋轉過程中平面仍會稍微傾斜，但因測試過程是旋轉外面球殼，平面以被動式的旋轉，若待作品完成，平面將會是以主動式的旋轉，期望能夠略為降低此問題。而因 PLA 材質仍屬脆弱物品，未來將不排除考慮使用金屬材質或壓克力做改良。

## 五、數據運算

比較電能轉換為機械能之比較，改變電壓與電流並探討其輸出機械功率與輸出力矩：

設輸入功率  $P_{in}$ 、輸出功率  $P_{out}$ 、角速度  $\omega$ 、轉速  $n = \text{r.p.m}$

$$P_{in} = I \times V, P_{out} = \tau \times \omega, \omega = \frac{2\pi n}{60}$$

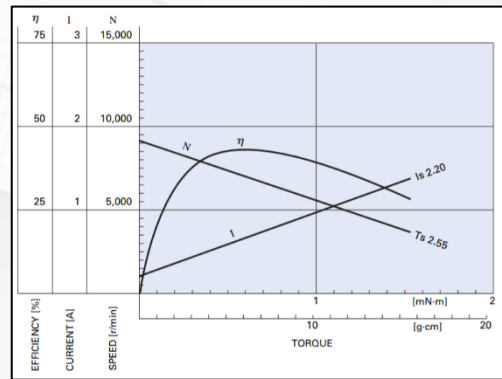
可得馬達效率  $E = \frac{P_{in}}{P_{out}}$

$$P_{out} = P_{in} \times E \Rightarrow \tau \times \omega = I \times V \times E \Rightarrow \frac{\tau \cdot n \cdot 2\pi}{60} = I \times V \times E$$

$$\text{故 } \tau = \frac{I \cdot V \cdot E \cdot 60}{2\pi \cdot n}$$

從 130 直流馬達特性曲線中，以馬達效率峰值 43% 計算，其轉速為 7500rpm、電流 0.6A，計算其電壓探討從 1.5V~6.0V 其轉矩  $\tau_0$  之值。

▶ 圖 20、130 馬達特性曲線



MODEL	VOLTAGE		NO LOAD		AT MAXIMUM EFFICIENCY				STALL			
	OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED r/min	CURRENT A	SPEED r/min	CURRENT A	TORQUE mN-m	OUTPUT g-cm	TORQUE mN-m	CURRENT g-cm	CURRENT A	
FA-130RA-2270	1.5~3.0	1.5V CONSTANT	9100	0.20	6990	0.66	0.59	6.0	0.43	2.55	26	2.20

▲ 表 4、130 馬達規格

$$\text{設定常數 } K = \frac{I \cdot E \cdot 60}{2\pi \cdot n} = 0.000328$$

$$\Rightarrow \tau_0 = K \times V (\text{應變電壓})$$

經計算後得各應變電壓之轉矩  $\tau$  值。

電壓(V)	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
$\tau(\text{g-m})$	5.0184	6.6912	8.364	10.0368	11.7096	13.3824	15.0552	16.728	18.4008	20.0736

▲ 表 5、各電壓所產生力矩

設摩擦力係數  $\mu$  輪子半徑為  $r(\text{m})$  平台總重量為  $N$  需求扭力為  $\tau$

$$\tau = \mu \cdot N \cdot r (\text{N-m})$$

計算出平台摩擦係數所產生的需求扭力後，比較應變電壓產生的轉矩  $\tau_0$ ，因此若需使平台轉動必須為  $\tau_0 \geq \tau$

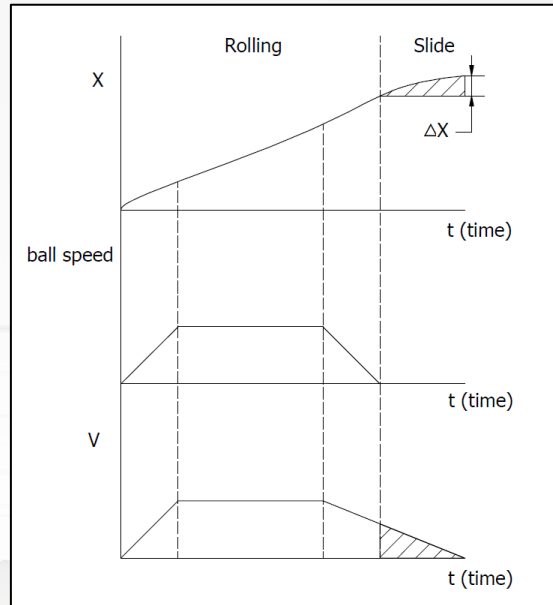
摩擦力係數  $\mu = 0.17$  (\*附錄二)，輪子半徑為  $r(\text{m}) = 0.026$ ，總重量  $N(\text{g}) = 380$

$$\tau = 0.17 \cdot 380 \cdot 0.026 = 1.6796 (\text{N-m}) = 16.796 (\text{g-m})$$

故若需使平台轉動必須使  $\tau_0 \geq \tau$ ，因此在電壓範圍值為 5v - 6v。

## 研究一

分析球殼慣性運動後與馬達停止轉動產生摩擦力之比較，若在理想狀態下，球殼速度 (ball speed) 隨馬達速度 (motor speed) 上升，當馬達減速直至停止時，球殼亦隨之停止，但在非理想狀態下，當 motor speed 停止時，球殼會存在一貫性，因此會進入滑動狀態 (slide)，馬達輪胎接觸面也將從靜摩擦力轉換為動摩擦力，因此建立模型來找出其對應之 $\Delta X$  值。



▶表 6、整體位移、轉速、速度對時間關係圖

圖中  $V$  = 整體行走速度、 $X$  = 整體行走距離、 $t$  = 行走時間，其公式如下：

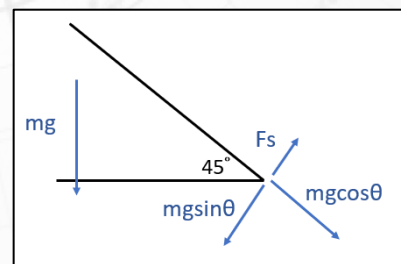
$$\Delta X = \frac{1}{2}at^2$$

$$a = g \cdot \mu \quad , \quad t = \frac{v}{g\mu}$$

$$\Rightarrow \Delta X = \frac{v^2}{2g\mu}$$

## 研究二

計算出球殼內部平台傾斜時輪胎對球殼作用摩擦力，來比較球殼對地產生之摩擦力，而在理想情況下，最終須達到的目的為馬達每單位時間行走距離 (motor speed) 必須與球殼每單位時間行走距離相等 (ball speed)，因此需探討其摩擦力對於速度改變之影響，而如公式其摩擦力之產生變因為摩擦力係數，並且重力不會造成力量大小的改變，即改變二種物體摩擦力係數使其相等，所以必須改變球殼外部材質來完成任務。



▲圖 20、45 度角分力探討

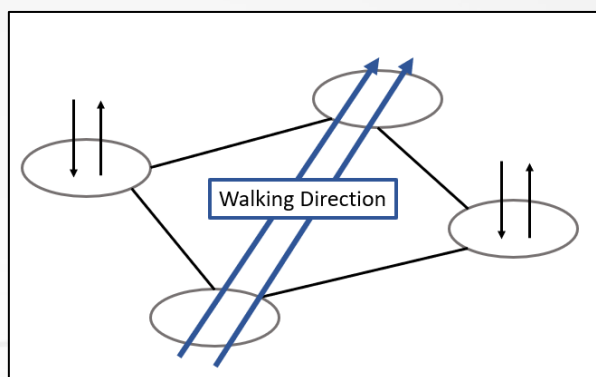
$$\text{motor speed} = \text{ball speed} \Rightarrow \frac{\mu_{\text{motor}} \cdot N_i}{N_i} = \frac{\mu_{\text{ball}} \cdot N}{N}$$

$$\rightarrow \mu_{\text{motor}} = \mu_{\text{ball}}$$



## 研究三

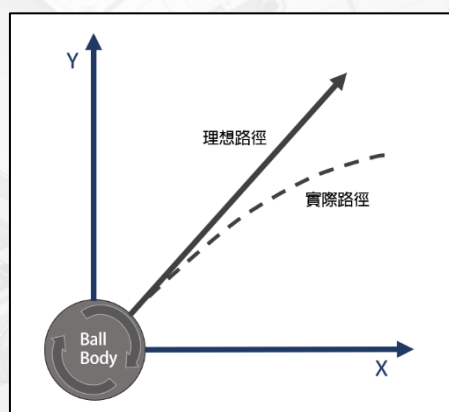
在重心控制部分，由於球殼與地面接觸點只有一點，行走時只有一線，因此其重心控制部分非常重要，而使用 MPU-6050 模組計算出其姿態數據，並且透過數據讀取來驅動除行走外的左右二顆馬達，期望能達成重心的平衡校正。



▲圖 21、自動平衡控制示意圖

## 研究四

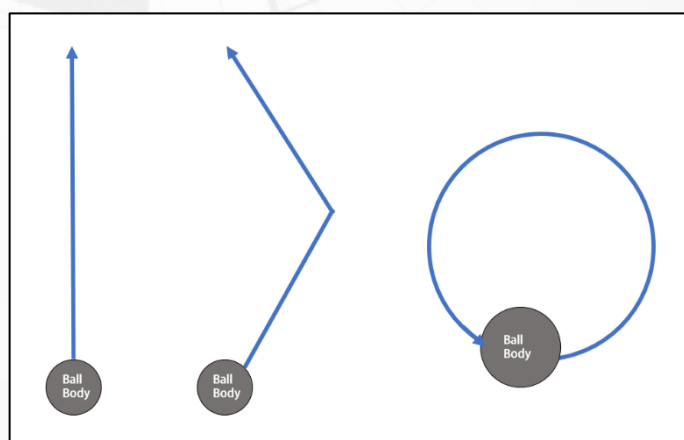
在理想條件下，若使正向 X 軸馬達正轉、正向 Y 軸馬達正轉，其理想線為  $Y=X$  之斜直線，探討在摩擦力作用下，此理想直線所產生之偏差方向，比較兩者差異，並透過多次實驗，得到其實際行走路線。



▲圖 22、理想路線與實際路線

## 研究五

設計多種行走路徑，設法遙控球殼使其沿指定路線行走，探討其在路線上行走時之穩定性與所產生的偏差，來調整並縮小每次行走時所產生之誤差，最後設法藉由<研究三>來輔助行走穩定度。

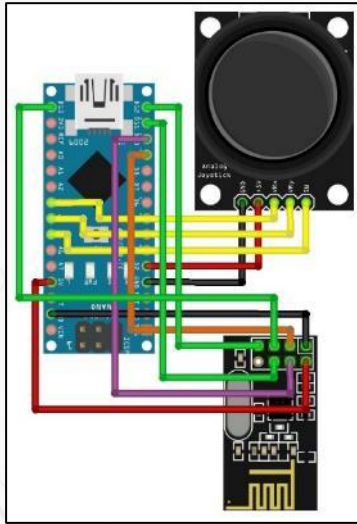


▲圖 23、球殼實驗路徑設計

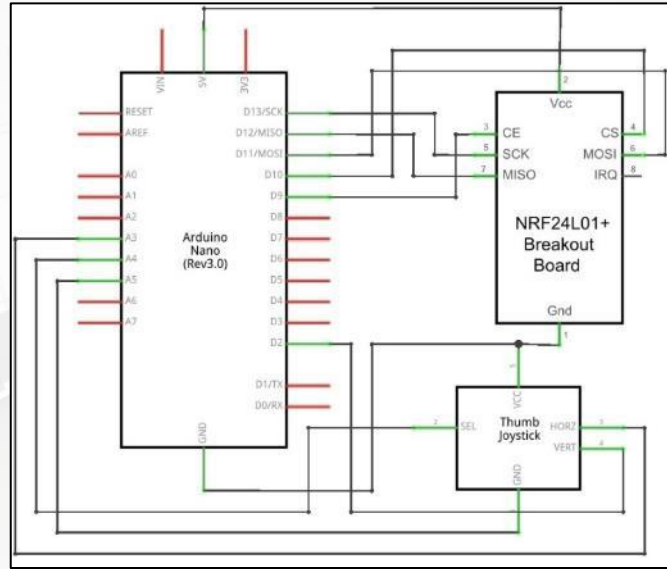
## 陸、作品結構製作

### 一、Transmitter 部分

初步考量，認為使用 Joystick 能夠較方便控制機構，因此需製作一組遙控器設備，其運算控制器，使用與 Arduino UNO 功能完全一樣但體積相對較小的 Arduino nano 作為主機，連結 nRF24L01 無線傳輸模組與 Joystick 搖桿，其接線圖與電路圖如下。

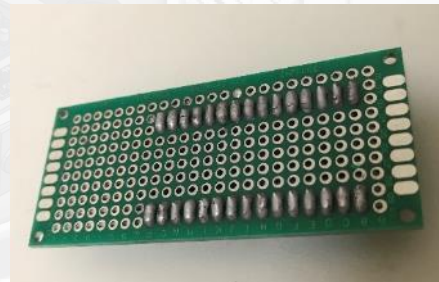


▲圖 24-1、Transmitter 接線圖



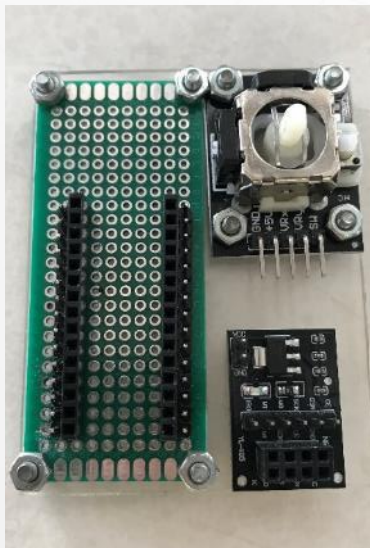
▲圖 24-2、Transmitter 腳位配線圖

使用洞洞板焊接母座端子與公座端子並連接，母座提供 Arduino nano 放置使用，公座提供其模組連接功能。



▶圖 25、PCB 焊接圖

其 nRF24L01 部分，多使用一塊 3.3v 轉 5v 底板，讓 nRF24L01 訊號更穩定，也增加杜邦線連接的方便性。



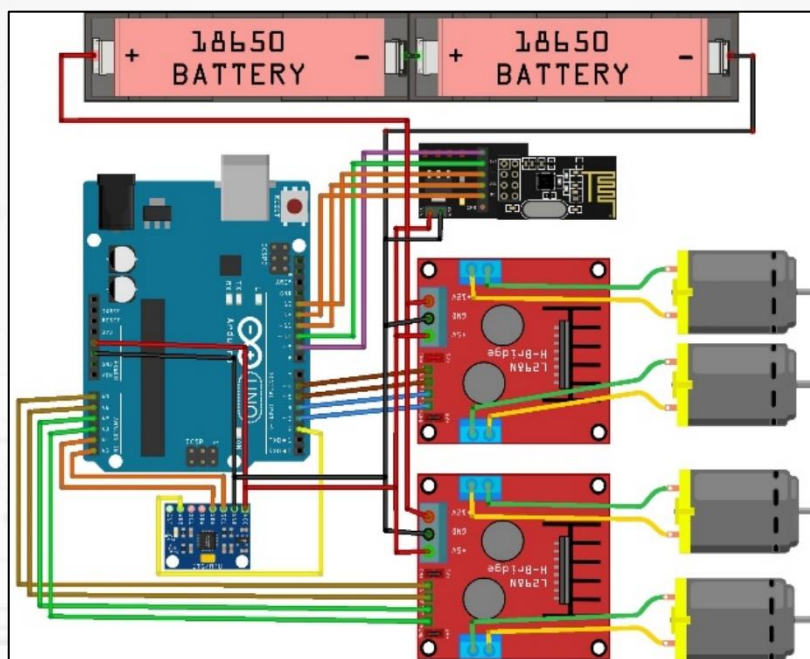
▲圖 26、Transmitter 結構分布



▲圖 27、Transmitter 完成圖

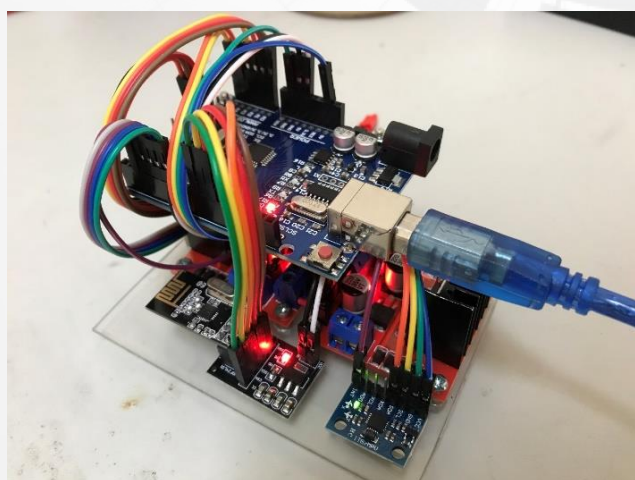
## 二、Receiver 部分

球殼內部控制系統，使用 Arduino UNO 作為計算系統，在馬達驅動部分使用 L298n 模組，由於此模組附載散熱片，可增加發熱晶片散熱速度以維持運作效能，在電源供應部分，使用 2 顆 18650 電池串聯，電壓達到 7.4v，最後安裝 MPU-6050 模組，搭載加速度計與陀螺儀來完成平衡重心之任務。

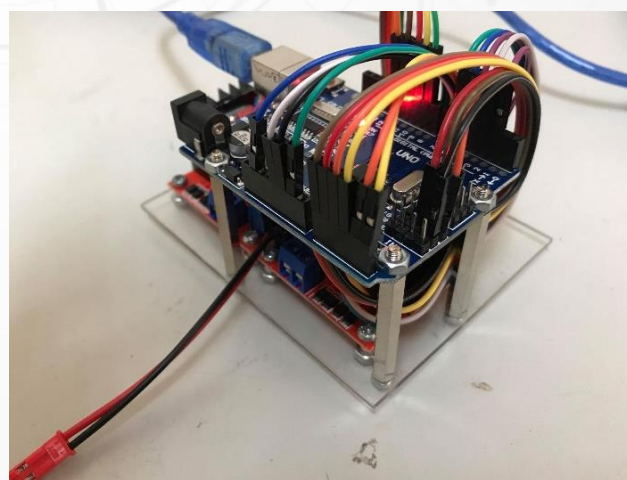


▲圖 28、Receiver 接線圖

由於平面放置空間大小限制，因此若須放置整個電機結構，必須使用雙層的方式來減少空間占用，最後將 2 塊 L298n 模組放置下方，將 Arduino UNO 主控版覆蓋其上，並且使用杜邦線進行連接，完成最後電機系統的機構。



▲圖 29-1、Receiver 成品圖



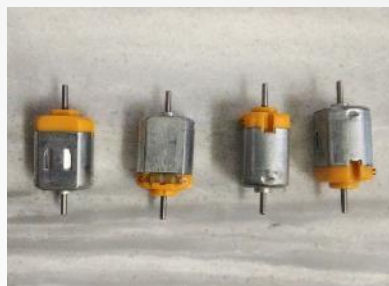
▲圖 29-2、Receiver 成品圖



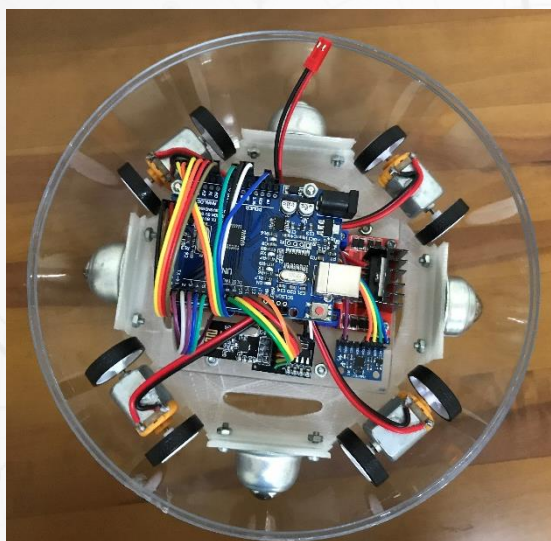
### 三、球體結構部分

為求馬達上的輪子能夠更穩定的在球體內部行走，因此考量使用二顆輪子的方式來進行，所以購買了雙頭馬達作為驅動電機，使用馬達為 130-size motor，而其此馬達特殊功能為輸入電壓介於 1.5v~6.0v，因此應用性非常廣泛。

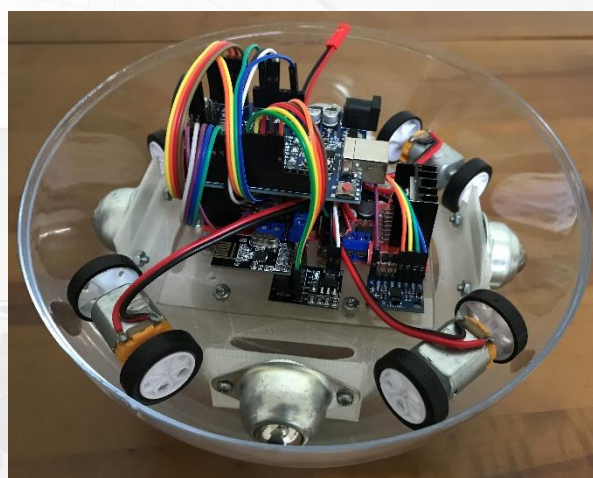
►圖 30、130 雙頭馬達



而整體部分，將 8 顆外徑 26mm 的輪子放置於直流馬達二軸，並讓直流馬達上的輪子恰好接觸到塑膠球殼內部，使滾珠輪也能順利切觸到球殼，讓平面在運作過程中保持水平。



▲圖 31-1、球形輪胎成品

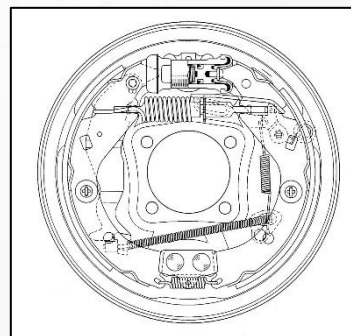


▲圖 31-2、球形輪胎成品

### 四、延伸

若未來想製作成球形輪胎，首先必須擁有充電功能及與車體結構連結之機構，初步想法為在能夠永遠保持水平平面像方加裝電磁感應無線充電系統，並製作無線充電板，當車子開上無線充電板時即能達成充電效果。而連接車體部分，初步想法為在平面上方加裝磁鐵結構，讓車體能夠吸著輪胎外殼卻又不隨著輪胎跟著轉動，但此作法仍會產生摩擦力必須克服。

此外，輪胎除了基本結構，另一個重要機構莫過於煞車系統，若想完整代替輪胎，煞車系統是不可或缺的機構，而在傳統輪胎使用煞車系統為碟煞系統與鼓煞系統，但在碟煞系統上有一定的方向性，無法成為球形輪胎煞車系統，但有別於碟煞，鼓煞系統沒有作動之方向性，因此未來可以考慮使用鼓煞來做為汽車煞車系統。



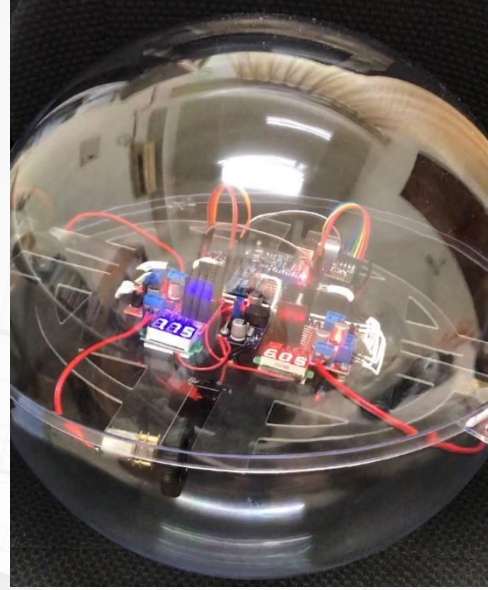
▲圖 32、鼓式煞車結構圖



## 柒、第二代作品製作

### 一、概述

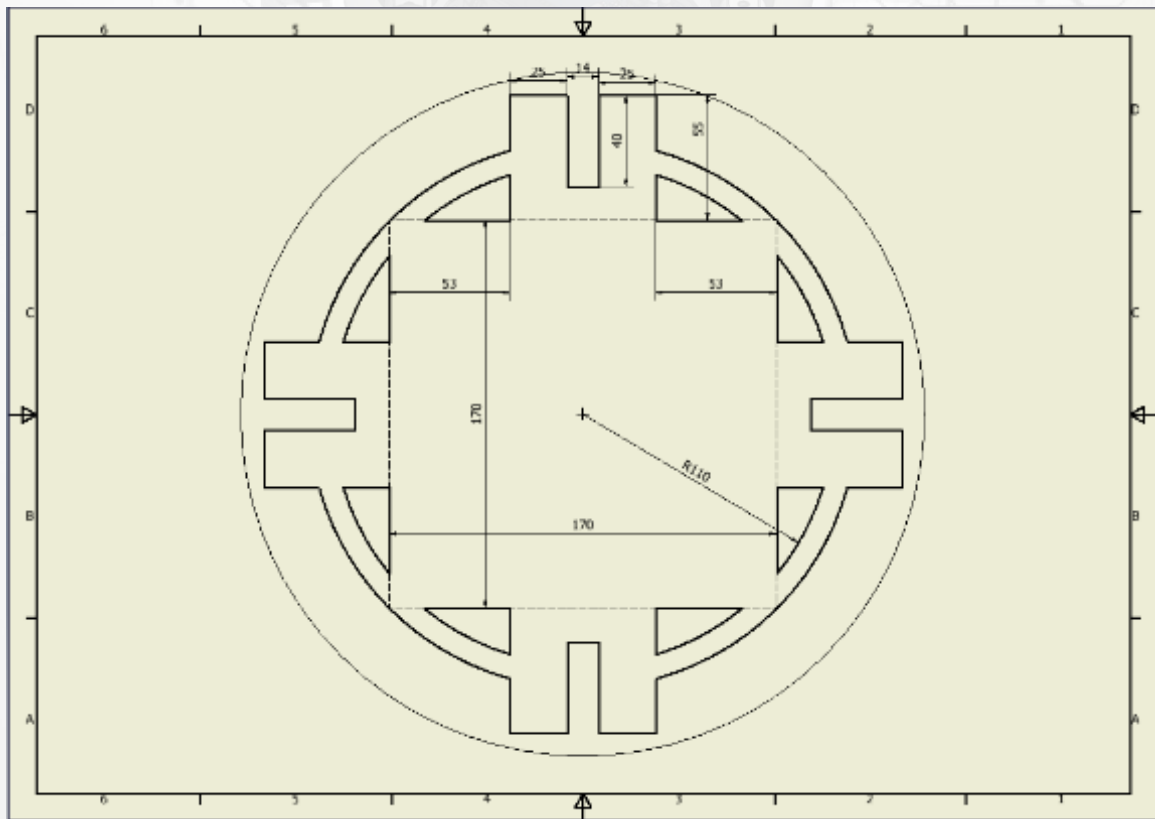
經過第一代作品遇到問題後，重新設計第二代作品，平面亦有重新設計，並且使用壓克力材料製作，控制系統方面增加降壓模組來達成穩壓及調壓效果，並且安裝二個電壓顯示器，分別顯示電池電壓與內部運作電壓，馬達部分改採用 N20 帶行星齒輪馬達，使扭力更大，能夠驅動整體機構，而在接線部分將部分連接以單芯線取代杜邦線，減少線芯斷裂風險，完成第二代作品。



▲圖 33、第二代作品

### 二、平面設計

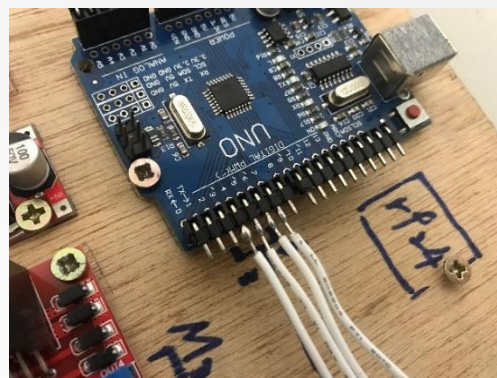
因考量到需放置更多電子零件於平面上，並且須配合馬達位置，因此重新設計，設計圖如右，將主要控制系統位置放置中間，馬達位置從原本四個角落更改至四邊來增加穩定性，並且設計輔助肋來防止斷裂。



▲圖 34、第二代平面設計圖

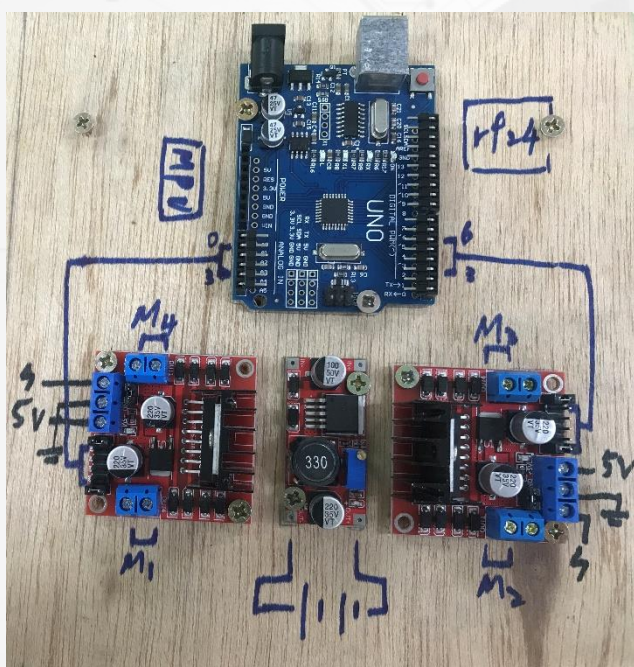
### 三、單芯線連接

由於杜邦線材會產生些許問題，如：杜邦線頭掉落、內部線芯斷外表卻看不出來等，因此決定使用單芯線作為連接，但部分訊號傳輸線，因考量到訊號傳輸速度，因此不做單芯線替代之更改。

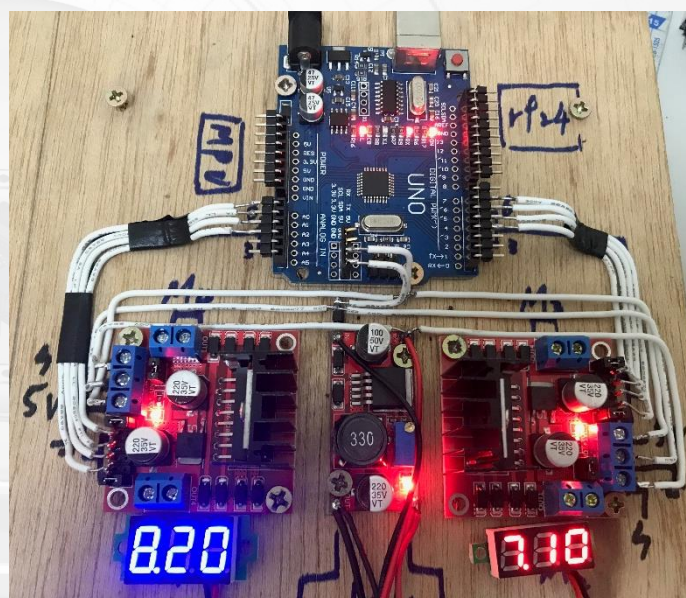


▲圖 35、單芯線焊接

而連接方式為先將所有所需電子零件放在木板上規劃位置及線路，並使用攻牙螺絲做固定，開始焊接單芯線，等待線路確認完畢，拔除電線及電子零件，並在壓克力上依照木板位置鑽孔，最後將電子零件鎖上壓克力板並將電路接回。



▲圖 36、木板規劃電路配置

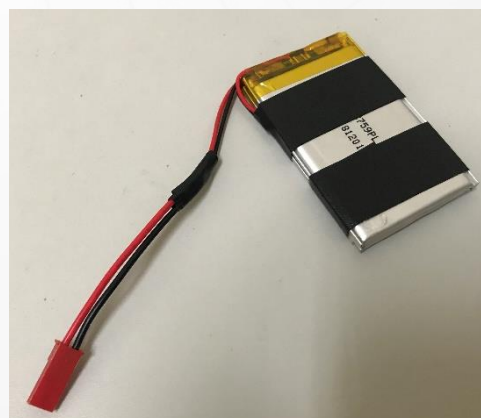


▲圖 37、整體電路

### 四、控制系統

#### (一)電池

將原先 2 顆 18650 電池轉換為 2 顆 3.7v 650mAh 聚合物鋰電池串聯使用，達成減輕重量之效果。

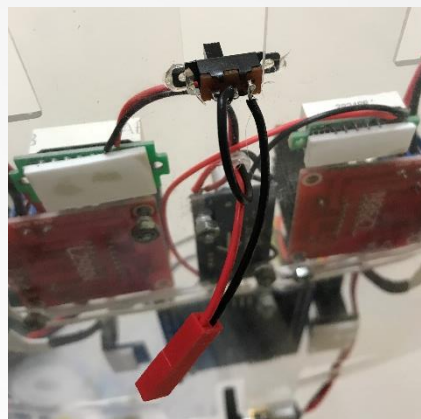


▲圖 38、聚合物鋰電池串聯



## (二)開關設計

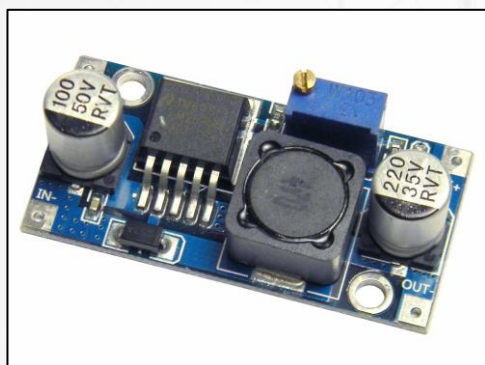
將開關安裝於電池與系統負極線上，來設計總電源開關，亦能在未來接上無線充電系統後作為接換充電與放電模式開關。



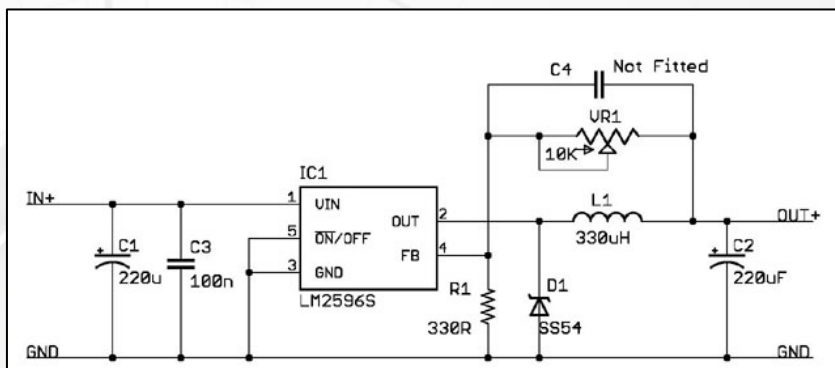
▲圖 39、開關設計

## (三)降壓模組

使用 Arduino 模組 LM2596 降壓模組，設計於開關之路徑後方，來達成降壓及穩壓效果，不僅能使系統能夠因應需求調整所需電壓，亦能達成穩壓效果減少馬達不穩定性。



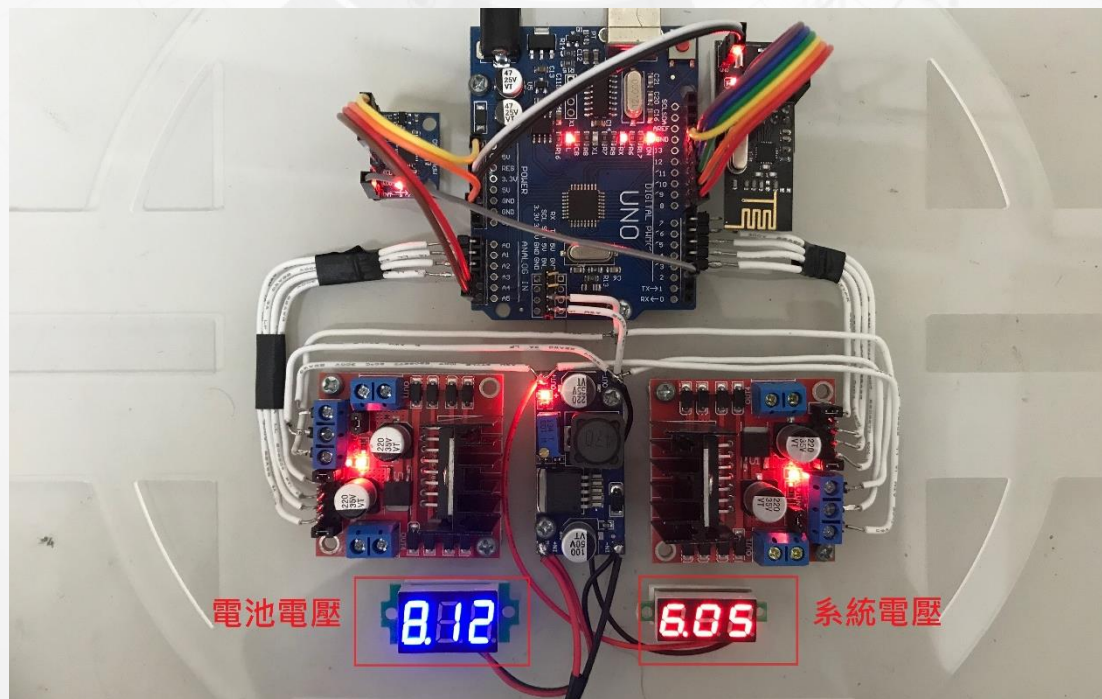
▲圖 40、LM2596 模組



▲圖 41、LM2596 模組電路

## (四)電壓顯示

使用二組電壓顯示器，並以紅色及藍色區分電壓部位，藍色表示電池電壓，紅色表示內部系統運作電壓，不僅能夠清楚知道系統內電壓運作穩定性，還能知道電池電壓來注意電池電量與變化。



▲圖 42、電池電壓與系統電壓顯示

## 五、馬達更換

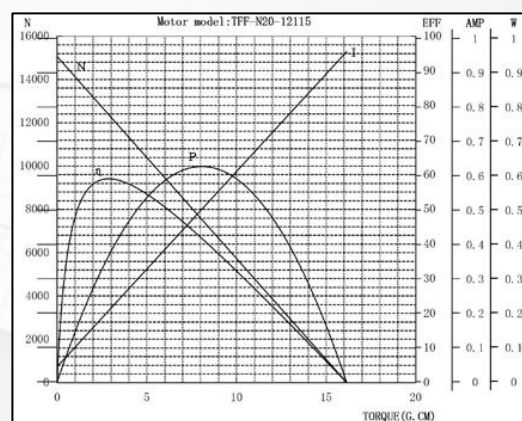
使用 N20 作為動力馬達取代原先的 130 馬達，因著 N20 馬達有自帶行星齒輪，將可以提供更大轉矩來帶動球殼，而 N20 之軸心有 D 軸設計，方便固定輪胎之接合，使整體系統能夠產生更大的動力。



▲圖 43、N20 馬達

Model	DC Voltage		Main Parameter		
	Range	Rated	Speed	Current	Torque
HGA12-N20-3V-250rpm	1.5V - 5V	DC 3V	250 rpm	0.08 A	70 g-cm
HGA12-N20-3V-150rpm			150 rpm	0.08 A	100 g-cm
HGA12-N20-3V-75rpm			75 rpm	0.08 A	150 g-cm
HGA12-N20-3V-50rpm			50 rpm	0.06 A	200 g-cm
HGA12-N20-3V-37rpm			37 rpm	0.06 A	250 g-cm
HGA12-N20-3V-25rpm			25 rpm	0.06 A	500 g-cm
HGA12-N20-6V-500rpm	3V - 9V	DC 6V	500 rpm	0.16 A	150 g-cm
HGA12-N20-6V-300rpm			300 rpm	0.16 A	200 g-cm
HGA12-N20-6V-150rpm			150 rpm	0.16 A	300 g-cm
HGA12-N20-6V-100rpm			100 rpm	0.16 A	400 g-cm
HGA12-N20-6V-74rpm			74 rpm	0.12 A	600 g-cm
HGA12-N20-6V-50rpm			50 rpm	0.12 A	1.5 kg-cm

▲表 5、N20 馬達 Datasheet



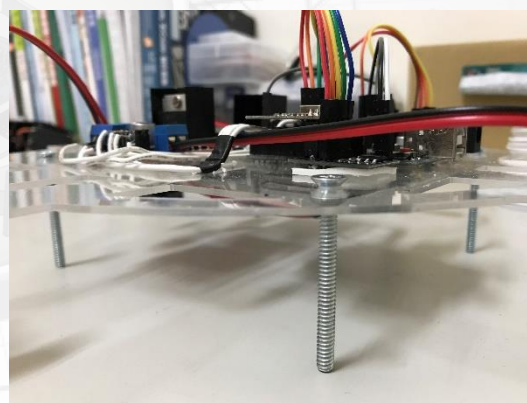
▲表 7、N20 馬達特性曲線

## 六、調整

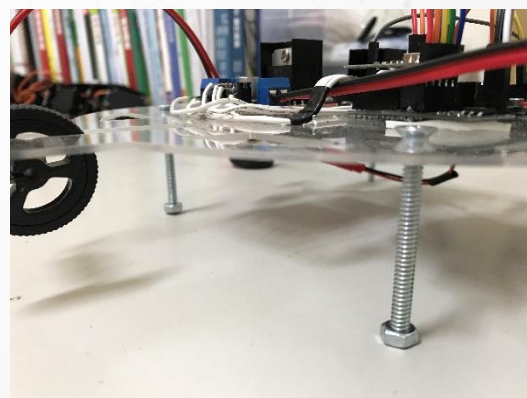
由於平台上方放置許多控制系統，在運行過程中將產生翻滾或重心不穩之問題，而在平台四個角落加裝四根螺絲，再以螺帽作為負重物，不僅能穩定重心，亦能調整螺帽數量來找到最佳重量附載。

## 七、小結

整體第二代作品設計直徑從原先第一代 200mm 增加為 300mm，而平台結構改用更穩定之壓克力結構，內部電路亦經設計較為穩定及方便更改與操作，在測試階段中，若將平台獨立移出做運動，能成功完成二自由度之移動，若將平台放置於球殼內，仍有少部分重心問題等待克服，未來將針對重心問題進行更一步的調整與設計，倘若成功克服重心問題，將朝向球型輪胎之需求條件設計，如：上方磁吸結構、無線充電等，由於在電路上設計已考量到未來方向，因此加裝諸類結構並不會遇到太大問題，期許未來能夠實現球型輪胎的雛型架構與模型。



▲圖 44、安裝調整螺絲



▲圖 45、使用螺帽微調重心



## 捌、作品差異比較

第一代作品遇到問題	第二代作品解決方式
平台穩定度	使用壓克力材質並重新設計來增強結構
線路連接穩定度	使用單芯線作為連接線並進行焊接，來減少杜邦線內部銅絲斷裂等問題
電池重量過重	使用 2 顆 3.7v 聚合物鋰電池串聯作為電源供應
電池充電與放電切換	設計一開關於機構上，來達成電池在充電與放電上之轉換
電壓穩定度	使用 LM2596 降壓模組達成穩壓效果
電壓可調性	使用 LM2596 降壓模組來調整電壓，減少馬達耗損及增加系統穩定度，並且使用電壓顯示器來清楚觀測機器狀態
馬達速度與力矩	將 N20 馬達代替 130 馬達，能夠產生更大力矩並且克服更大之摩擦力
重心問題	在四角安裝螺絲，增加平面下方重量來調整重心，並且可以安裝螺帽於螺絲上來調整最佳狀態

▲表 8、兩代作品差異表

# 玖、結論

## 一、此作品發展優勢

### (一)自由度：

擁有雙向的行動自由度，不僅能提高汽車車體靈活度，還能解決路邊停車等駕駛困難，增加停車場容納量。

### (二)空間運用：

因著作動系統都放於輪胎內部，因此能夠有效節省引擎空間，而又因使用無線充電板，還能節省油箱空間，在整體空間有很大的提升。

### (三)結構運用：

相較於其他作品使用的行動方式，將二個移動方向結構獨立分開，能夠快速達成轉向功能，未來若使用萬向輪作為內部驅動，將能增加更多方向的運用，又因直接以摩擦力作動球殼，因此能夠克服比起運用重心作動的更大障礙物及坡度。

## 二、研究討論

### 研究一：

藉由計算出 $\Delta X$  值後，能夠更準確了解球殼狀態，並且利用控制系統來調整其所產生之滑動距離，並且能夠藉由此數據來控制球殼煞車距離，在運動狀態上能夠擁有更穩定的發揮。

### 研究二：

藉由平台分析了解，期望做到馬達移動距離與球殼移動距離能夠達到最大轉換效率，使整體功率提高，效率增加，減少損耗能源。

### 研究三：

透過 MPU-6050 模組來分析球殼姿態，並透過控制系統來平衡球殼，達到讓球殼在行走時能夠更加穩定，不受重心問題干擾而產生路徑偏差。

### 研究四：

探討在行走斜線時，摩擦力所帶來之偏差，藉由實驗統計其偏差路線，得到重複性最高之路徑，並做調整，使實際路線與理想路線之誤差達到最小。

### 研究五：

藉由設計各種不同方向及角度路徑，了解球殼整體穩定性，探討在實際行走與理想之偏差大小，做整體調整，讓球殼能夠達到最完美的理想行走狀態。

## 參考資料

- (1) Wei-Hsi Chen, Ching-Pei Chen, Jia-Shiuan Tsai, Jackie Yang, Pei-Chun Lin. Design and implementation of a ball-driven omnidirectional spherical robot
- (2) A. Halme, T. Schönberg, Y. Wang, Motion control of a spherical mobile robot, Proceedings., 4th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC '96-MIE), vol. 1, 1996, pp. 259–264.
- (3) Q. Zhan, Y. Cai, C. Yan, Design, Analysis and Experiments of an Omnidirectional Spherical Robot, Presented at the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai International Conference Center, Shanghai, China, 2011.
- (4) D. Liu, H. Sun, Q. Jia, A family of spherical mobile robot: driving ahead motion control by feedback linearization, 2<sup>nd</sup> International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics (ISSCAA), 2008, pp. 1–6.
- (5) D. Liu, H. Sun, Q. Jia, L. Wang, Motion control of a spherical mobile robot by feedback linearization, 7th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), 2008, pp. 965–970.
- (6) Gyroscopes and Accelerometers on a Chip
- (7) nRF24L01 Datasheet
- (8) FA-130RA motor datasheet
- (9) L9110s datasheet
- (10) MPU6050-Digital Motion Processor

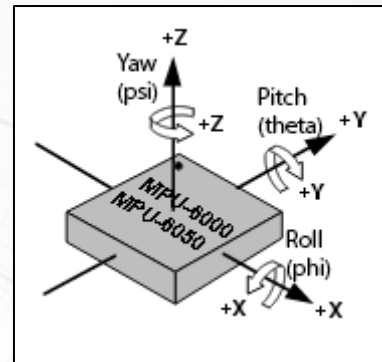


# 附錄一

## MPU-6050 DMP 運算器

MPU-6050 模組其內部搭載數字運動處理器 (**Digital Motion Processor**)，簡稱為 DMP，它將加速度計和陀螺儀數據融合在一起，以最大限度地減少每個傳感器固有誤差的影響。

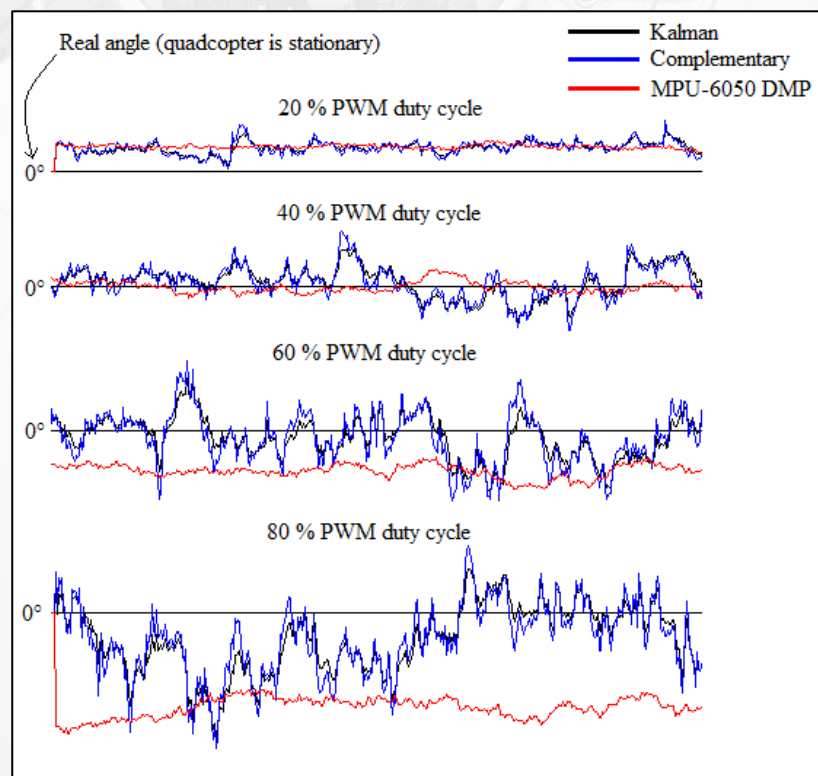
DMP 根據四元數計算結果，可以將結果轉換為歐拉角，並對數據執行其他計算，最終得到如圖 33 其姿態數據值中的 Yaw 值、Roll 值及 Pitch 值。



▶ 圖 46、Yaw、Row、Pitch 示意圖

DMP 主要的用途在於處理即時性的需求，並且分擔一些運算的工作，一般來說 DMP 會以很高的計算速度 (大約是 200Hz) 來進行運動處理演算法的運算，降低延遲以提供精準的數據，甚至在低取樣速度 (如 5Hz) 的應用上，DMP 還是會保持這樣的運算速度，以確保資料的精準性。

而如圖在四軸飛行器上搭載陀螺儀與加速度計，並記錄其卡爾曼濾波 (Kalman Filter)、互補濾波器 (complementary Filter)與數字運動處理器 (DMP)之差別與比較。



▲ 圖 47、Kalman、Complementary、DMP 比較圖

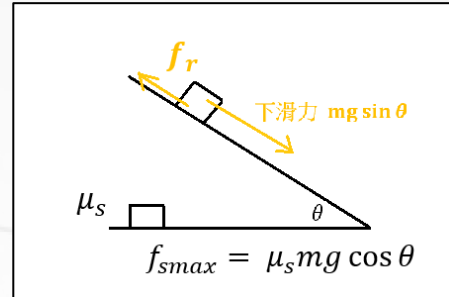
## 附錄二

### 摩擦力係數測量

令斜面為  $\theta$  角時，物體恰滑動，設  $\mu_s$  為摩擦力係數， $mg$  為物體重量。

$$\begin{aligned} \text{下滑力} &= f_{smax} \\ mg \sin \theta &= \mu_s mg \cos \theta \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \tan \theta = \mu_s$$



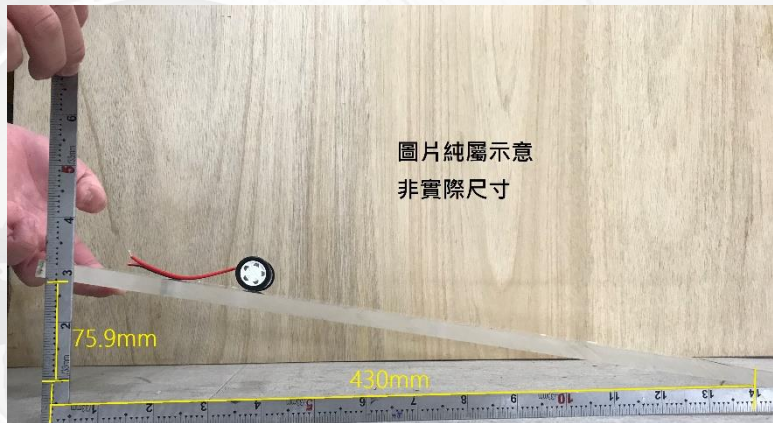
▲圖 48、摩擦力分析圖

經過測量，輪子對壓克力板傾斜角長為 430mm 高為 75.9mm，因此其  $\tan \theta$  值

為  $\frac{75.9}{430}$ ，摩擦力係數值為

$$\mu_s = 0.17$$

►圖 49、摩擦力測量示意圖



經過測量，球殼對木板傾斜角長為 500mm 高為 16.5mm，因此其  $\tan \theta$  值

為  $\frac{16.5}{500}$ ，摩擦力係數值為

$$\mu_s = 0.033$$

►圖 50、摩擦力測量示意圖

