

科會大專生參與研究計畫  
軟性可變外形球機器人

專題學生：黃群凱

指導教授：林沛群

---

目錄

|                          | page |
|--------------------------|------|
| 壹、摘要                     | 3    |
| 貳、前言                     | 4    |
| 參、文獻回顧與探討                | 5    |
| 一、Spheroidz              | 5    |
| 二、Gyrosphere robot       | 5    |
| 三、Spherical Soft Robots  | 6    |
| 四、Solar Powered Miniball | 6    |
| 五、GroundBot              | 7    |
| 六、小結                     | 7    |
| 肆、研究內容                   | 8    |
| 一、致動器的選擇                 | 8    |
| 1-1 致動器的比較與選擇            | 8    |
| 1-2 自製電磁鐵與實驗             | 8    |
| 1-3 MAXWELL 軟體模擬         | 12   |
| 1-4 市售電磁鐵                | 13   |
| 1-5 小結                   | 15   |
| 二、電路設計與機電整合              | 16   |
| 2-1 整體架構                 | 16   |
| 2-2 電源管理電路               | 17   |
| 2-3 升壓電路設計               | 18   |
| 2-4 儲能電容及充電開關            | 19   |
| 2-5 電磁鐵驅動板設計             | 19   |
| 2-6 sbRIO                | 20   |
| 三、外殼幾何形狀設計               | 21   |
| 3-1 外觀幾何形狀分析             | 21   |
| 3-2 機器人外殼設計              | 23   |
| 3-2-1 線切割外型              | 23   |
| 3-2-2 壓克力外型              | 24   |
| 3-2-3 玻璃纖維外型             | 26   |

---

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 3-2-4 內部結構的設計         | 29 |
| 3-3 玻璃纖維製作流程          | 32 |
| 3-3-1 製作方式            | 32 |
| 3-3-2 製作流程圖           | 34 |
| 3-4 機器人腳的設計           | 36 |
| 3-5 小結                | 37 |
| 四、步態規劃與程式設計           | 38 |
| 4-1 二十面體的步態分析與規劃      | 38 |
| 4-2 LABVIEW 程式架構      | 40 |
| 4-2-1 labview 程式架構    | 40 |
| 4-2-2 RT 人機介面         | 40 |
| 4-2-3 FPGA 介面         | 43 |
| 伍、結果呈現                | 45 |
| 一、概述                  | 45 |
| 二、致動器的一致性實驗           | 46 |
| 2-1 實驗目的              | 46 |
| 2-2 設備                | 46 |
| 2-3 架構                | 47 |
| 2-4 步驟                | 47 |
| 2-5 結果                | 49 |
| 三、DUTY CYCLE 實驗       | 52 |
| 3-1 目的                | 52 |
| 3-2 設備與架構             | 52 |
| 3-3 步驟                | 52 |
| 3-4 結果一：翻越落點與分析       | 52 |
| 3-5 結果二：質心與支點的位移曲線及分析 | 55 |
| 3-6 結果三：電磁鐵提供軟球的電能    | 60 |
| 四、運動軌跡圖               | 62 |
| 4-1 翻滾側拍圖             | 62 |
| 4-2 直線前進俯拍圖           | 63 |
| 陸、問題與改進               | 64 |
| 柒、結論                  | 65 |
| 捌、致謝                  | 65 |
| 玖、參考資料                | 66 |

## 壹、摘要

本計畫目標為製造出一台能達成全向性移動的軟殼球形機器人，旨在改進過去球形機器人的缺失，創造一全新的驅動方法。基於軟殼可變形的條件，我們可讓此機器人適應不同的接觸環境，進而達到更自由的運動。藉由內部數支足狀結構操作外表軟球形狀來達成各式各樣的運動形式。在驅動上，我們曾考慮電磁鐵、線性馬達以及氣壓驅動當作致動器；在控制上，我們將設立一套控制系統，自動規劃複雜的足部操作時序，簡化成電腦上幾個按鈕指令；在材料上，我們為了彈性及韌性的考量，嘗試使用玻璃纖維、碳纖維等材料；在設計上，考慮亞里斯多德多面體為我們的設計基礎。以下我們將逐一討論之。

## 貳、 前言

人類對新知識的好奇具有雄心壯志般的渴望，追求科技的慾望是無窮的，尤其是在交通運輸方面，現有的交通工具仍有不少運動上的限制，一直以來，我們都在找尋能克服所有障礙、全方位無死角的移動方式，來達到全向性的運動。

古人發明了「輪」後人類的運輸能力大大提升。經過三千年的改革，輪式移動已演化成生活中不可或缺的一部份。然而輪式移動卻非完美，天生的幾何形狀限制了移動方向，若不加以組合轉向機構，單輪本身無法做到側向移動。於是乎我開始思考是否存在一新式移動方式能除去此缺陷。

全向性移動最直接的想法就是「球形」，基於其完全對稱的幾何條件，在運動上應該更全方位。在翻閱眾多論文期刊後，發現到目前球形機器人的驅動構造並無法做到無死角運動、或者能做到但移動路徑非常不精確，面對較極端的障礙更突顯出無力感。

我們想克服這些缺點，製造出一球形機器人不但能完美實現全向性運動，還能用「跳」的方式越過極端障礙。另外球形可密封的關係，未來此構造能潛入水中在水裡游動，甚至加入探測器，在其他星球複雜地表環境下進行探勘。我想球形機器人未來發展是相當有潛力！

## 參、文獻回顧與探討

### 一、Spheroidz [1]



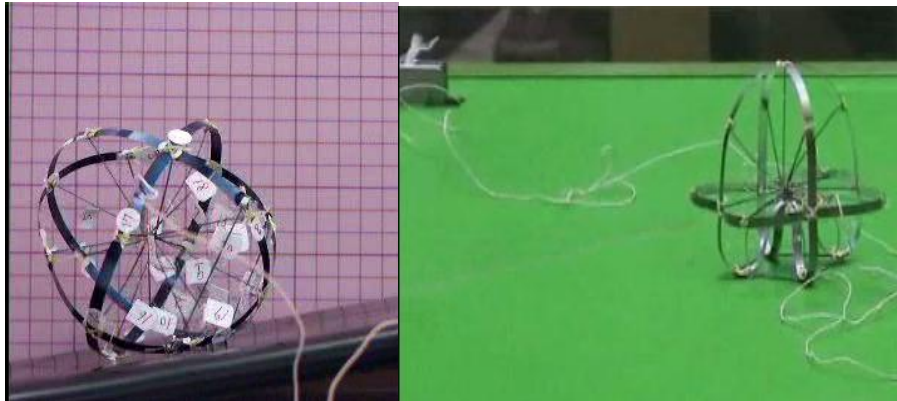
|      |                                                          |
|------|----------------------------------------------------------|
| 簡介   | 靈感來自於電影「Bubble Boy」，整體為一個類似泡泡的充氣球裡面裝置一雙輪遙控車，可以在陸地及水面上行走。 |
| 運動方式 | 驅動遙控車時，利用輪胎與充氣球間的摩擦力使其前進。                                |
| 優點   | 機構簡單，比重輕，可以在水上行走，從高處落下時不易損壞，因為充氣球可透過變形吸收與地面衝擊的能量。        |
| 缺點   | 只能前進且無法精確控制方向，遇到尖刺物時充氣球可能會破掉。                            |

### 二、Gyrosphere robot [2]



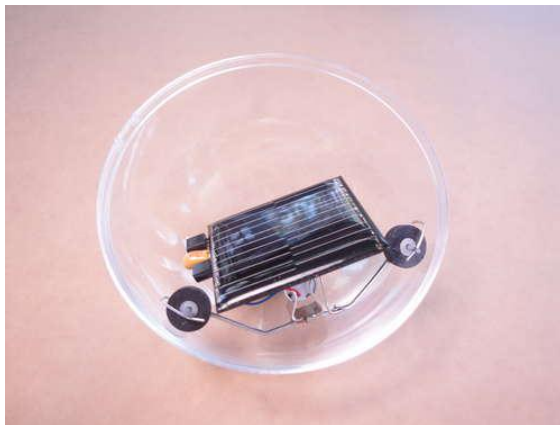
|      |                                                                                                         |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 簡介   | 由 MIT 學生 Greg Schroll 所設計，他認為球形機器人用單擺來改變球的重心使其運動的方法，會受限於地形，無法克服陡坡或是樓梯，他運用一組陀螺儀，使球形機器人在障礙物前能產生足夠的扭力越過障礙。 |
| 運動方式 | 在球殼內裝置一前一後兩個驅動馬達，利用馬達快速旋轉產生陀螺儀的效果，提供驅動動力。                                                               |
| 優點   | 能克服障礙物，且轉動慣量大，所以運動較為穩定。                                                                                 |
| 缺點   | 只能前進與後退，無懸吊系統，從高空落下時可能會損壞。                                                                              |

### 三、Spherical Soft Robots [3、4、5]



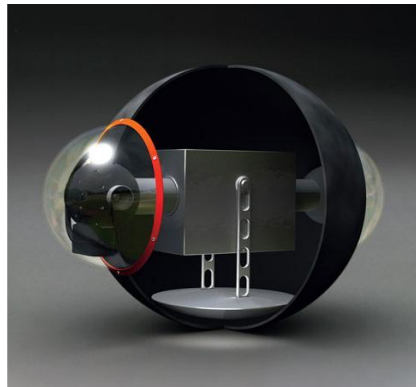
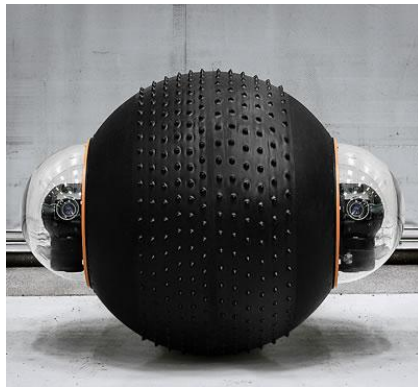
|      |                                                                          |
|------|--------------------------------------------------------------------------|
| 簡介   | 此種機器人是以前彈簧鋼做為外殼，中間為電源和電路所組成的核，透過形狀記憶合金的變形來運動。                            |
| 運動方式 | 施一電動勢加熱使形狀記憶合金產生變形，透過形變使其重心改變，達成移動的目的，若讓外殼之彈簧鋼變形達一定程度後再使其變回原狀，即可達到彈跳的效果。 |
| 優點   | 可以移動也可以彈跳，外殼具彈性，從高處落下不易損壞。                                               |
| 缺點   | 形狀記憶合金的形變為單一方向，運動緩慢且無法精確控制方向。加熱記憶合金會生熱，所以運動一段時間後須待其冷卻以免過熱。               |

### 四、Solar Powered Miniball [6]



|      |                                                                         |
|------|-------------------------------------------------------------------------|
| 簡介   | 外殼為一塑膠球，內含太陽能電池及儲存能量用的電容，不須額外提供能量，運用太陽能推動馬達轉動使其前進。                      |
| 運動方式 | 當電容儲存足夠的能量時，太陽能電池釋放電能推動馬達，馬達帶動輪子旋轉，利用類似第一類球型機器人「spheroidz」的運動方式達到前進的目的。 |
| 優點   | 設計簡單，節能且環保。                                                             |
| 缺點   | 只能單一方向運動，需先儲存能量才能運動。                                                    |

## 五、 GroundBot [7、8]



|      |                                                                      |
|------|----------------------------------------------------------------------|
| 簡介   | 兩側裝有攝影機及陀螺儀，能提供即時影像。能以手動控制，也可以用 GPS 導航，可用來做外星探勘，也可在機場、發電廠等場所做安全監測工作。 |
| 運動方式 | 用馬達擺動擺錘使其前進。                                                         |
| 優點   | 能在沙地、泥地，甚至是水上行走，外殼密封，可保護內部元件，外層為橡膠材質，能有效吸震，且移動速度快(約 10km/ hr)且安靜。    |
| 缺點   | 無法克服地形障礙，只能在地面上行走。                                                   |

## 六、小結

由以上的比較我們發現到，現有的球形機器人在運動軌跡上受限較多，通常都只能走直線，而不能靈活的做轉彎，也就是說，都無法做到靈活的「全向性運動」，所以我們才會構想出「軟球機器人」，用許多致動器當作機器人的腳，透過腳的伸縮來驅動機器人，用不連續的驅動方式達到連續運動的效果，來克服此一問題。



## 肆、研究內容

### 一、致動器的選擇

#### 1-1 致動器的比較與選擇

|    | 電磁鐵                                            | 氣壓式唧筒                                           | 線性馬達                          |
|----|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------|
| 優點 | 1. 通電開動，無延遲性<br>2. 價格相對便宜<br>3. 操作簡單，壽命長       | 1. 操作溫度廣<br>2. 氣體取得容易<br>3. 力道較大<br>4. 操作簡單，壽命長 | 1. 進程為可變式，可調至任意位置<br>2. 可精確定位 |
| 缺點 | 1. 線圈發熱，有溫度限制<br>2. 進程為固定，無法調控                 | 1. 氣體具可壓縮性，無法精確定位<br>2. 進程為固定，無法調控              | 1. 價格相對高<br>2. 操作複雜           |
| 結論 | 考慮經費以及架設難易度，我們決定使用電磁鐵當我們的致動器。<br>以下皆為電磁鐵的相關研究。 |                                                 |                               |

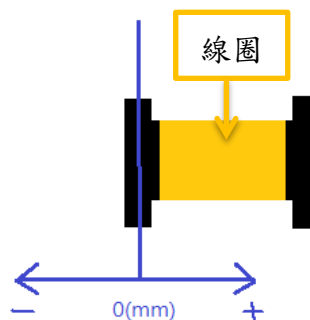
#### 1-2 自製電磁鐵的研究與實驗

在選擇電磁鐵前，為了了解電磁鐵的特性，我們自己以纏繞線圈的方式自製電磁鐵並做了幾個簡單的實驗，期望得到磁力與進程的關係，線圈細紮的長度是否影響磁力與線圈是否擁有加成性的關係。

##### (1)實驗方法：

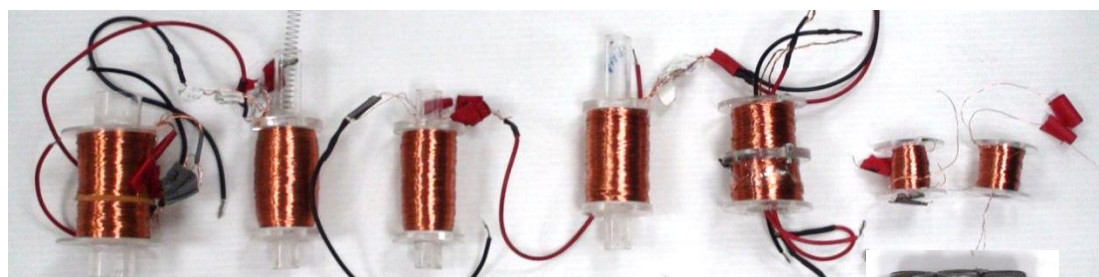
圖中座標為永久磁石中心點位置。透過移動永久磁石的位置(mm)與力規上所量測到的力(T)作圖。

利用改變永久磁石的數量與線圈的長短，來了解電磁鐵之性質。



##### (2)實驗器材：

(a) 線圈：下圖為各種不同長度及串、並聯數的自製電磁鐵。



(b) 永久磁石：鈦鐵硼永久磁石(台灣磁鐵公司)。(右圖)





根據螺線圈磁場公式： $B = \mu_0 N I$

( $\mu_0$ :導磁常數，N:磁力線通過的圈數，I:線圈通過電流)

我們知道當通過線圈的電流越大，或所纏繞的匝數越多，其所產生的磁場變越大，也就是磁力也越大。

但根據電阻公式： $R = \rho \frac{L}{A}$  ( $\rho$ :電阻常數，L:電阻長度，A:電阻表面積)

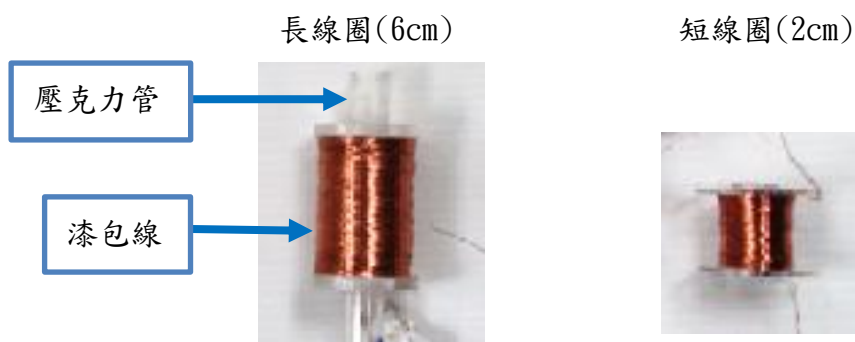
我們發現若我們將線圈纏繞越多圈，雖然匝數變多，但其電阻變大而導致電流變小，磁場的增加並不明顯，但因電阻較大較不易發熱。倘若將兩個螺線圈並聯，可增加磁場的強度，但電阻值變小，線圈較易發熱。

○漆包線串聯\*N、並聯\*M：  
N 越大→強度不變→發熱下降  
M 越大→強度變大→發熱上升

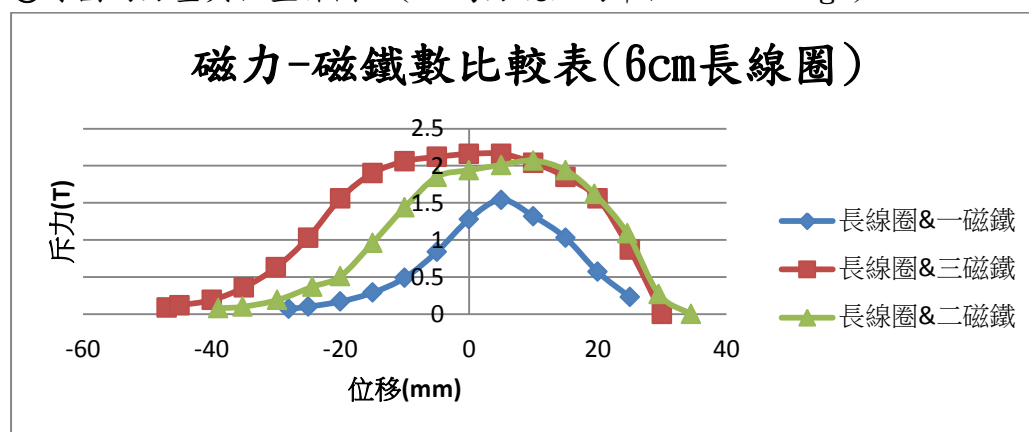
### (3)實驗數據與討論：

實驗中，透過改變線圈的長度及不同數量的永久磁石做各種探討。

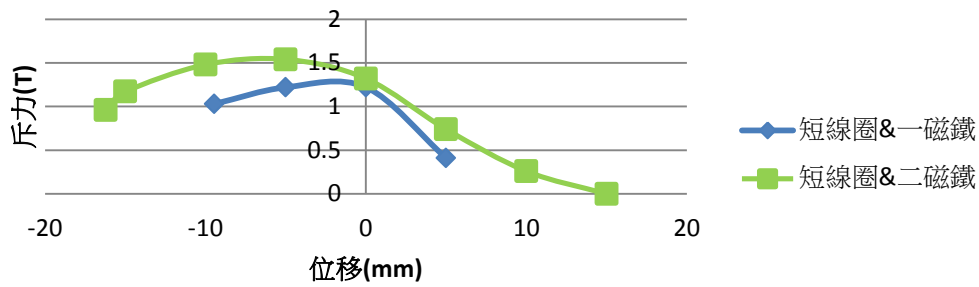
註：線圈長度分為長線圈(6cm)與短線圈(2cm)兩種：



○線圈的力量與位置作圖 ( T 為力規上的單位：1T=0.5kg )



磁力-磁鐵數比較表(2cm短線圈)

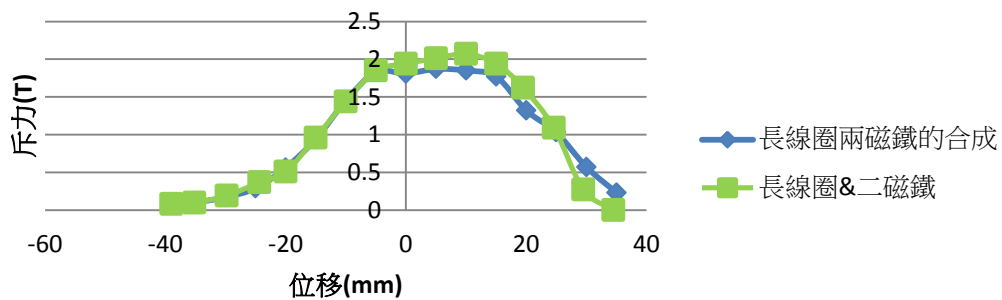


由量測數據可知：

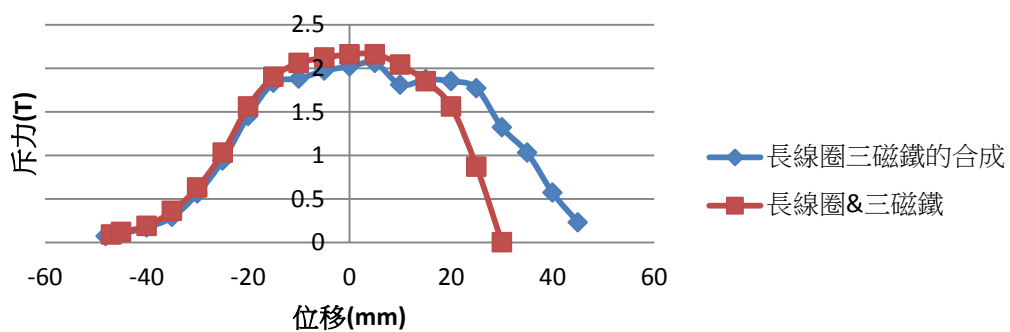
- (1) 當永久磁石移動至座標原點時，力道最強。反之，在磁石移動至線圈中點時，力量為零。
- (2) 永久磁石數量越多，磁力越大。
- (3) 線圈長短只會影響到力的有效範圍，但不影響力的極值，也就是說，短線圈力的作用範圍較短，長線圈力的作用範圍較長，但在原點處的力與長線圈大致相同。

○ 探討磁鐵的加成性 ( T 為力規上的單位：1T=0.5kg )

磁鐵合成比較圖(6cm線圈)

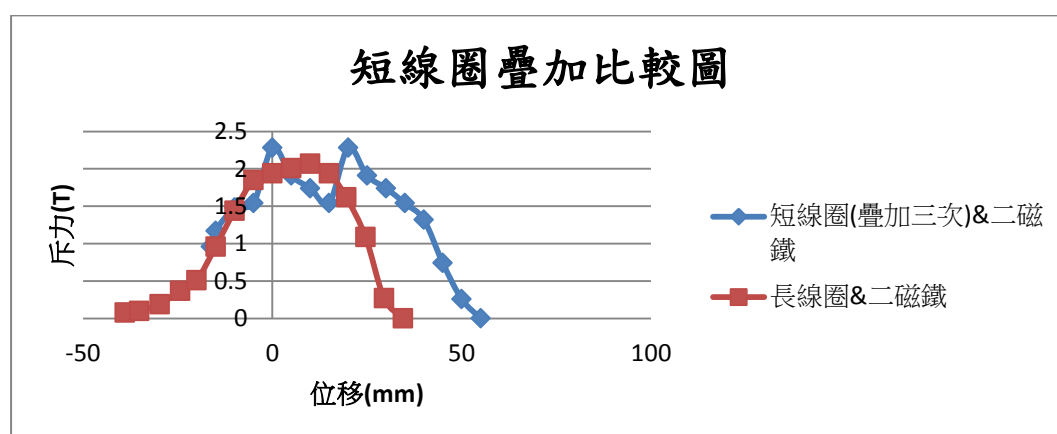
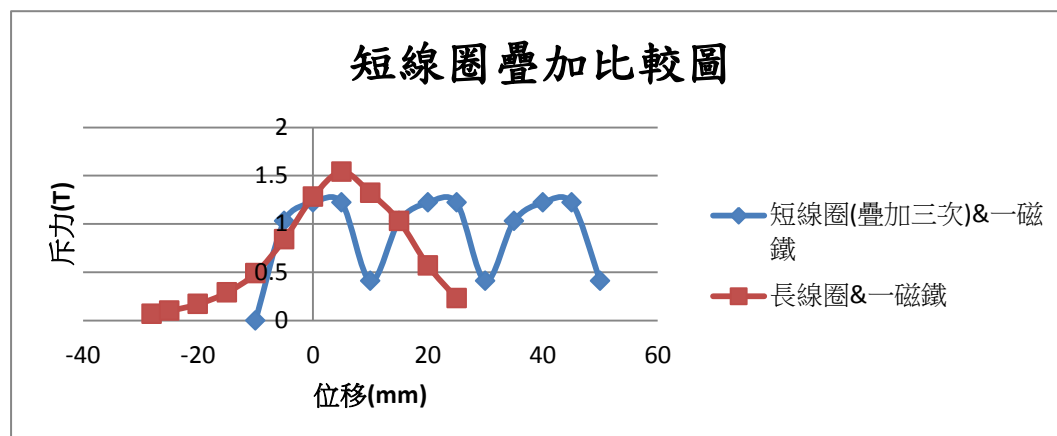


磁鐵合成比較圖(6cm線圈)



由前面數據已知，永久磁石數量越多，力道越大，更進一步探討，將數據做適當的位移與疊加，發現「永久磁石的數量與力道具有加成性」。也就是說，當永久磁鐵數量從一顆增加為兩顆時，其效果等同於將一顆永久磁鐵的實驗數據作適當的平移與疊加。

○ 探討線圈的加成性（ $T$  為力規上的單位： $1T=0.5kg$ ）



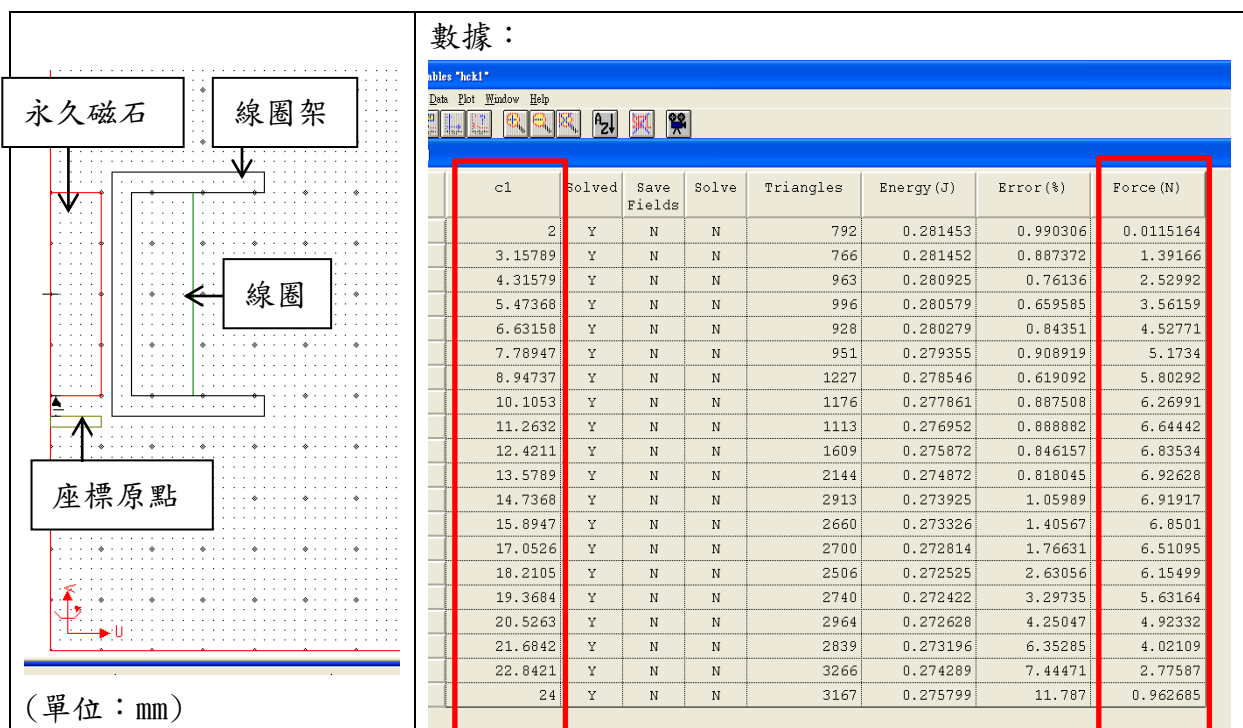
由圖表可見，我們將短線圈(2mm)作適當的位移與疊加，模擬成長線圈(6mm)，發現「線圈沒有加成性」，也就是說，我們無法用三個 2mm 的短線圈模擬成一個 6mm 的長線圈。

○ 實驗結果統整：

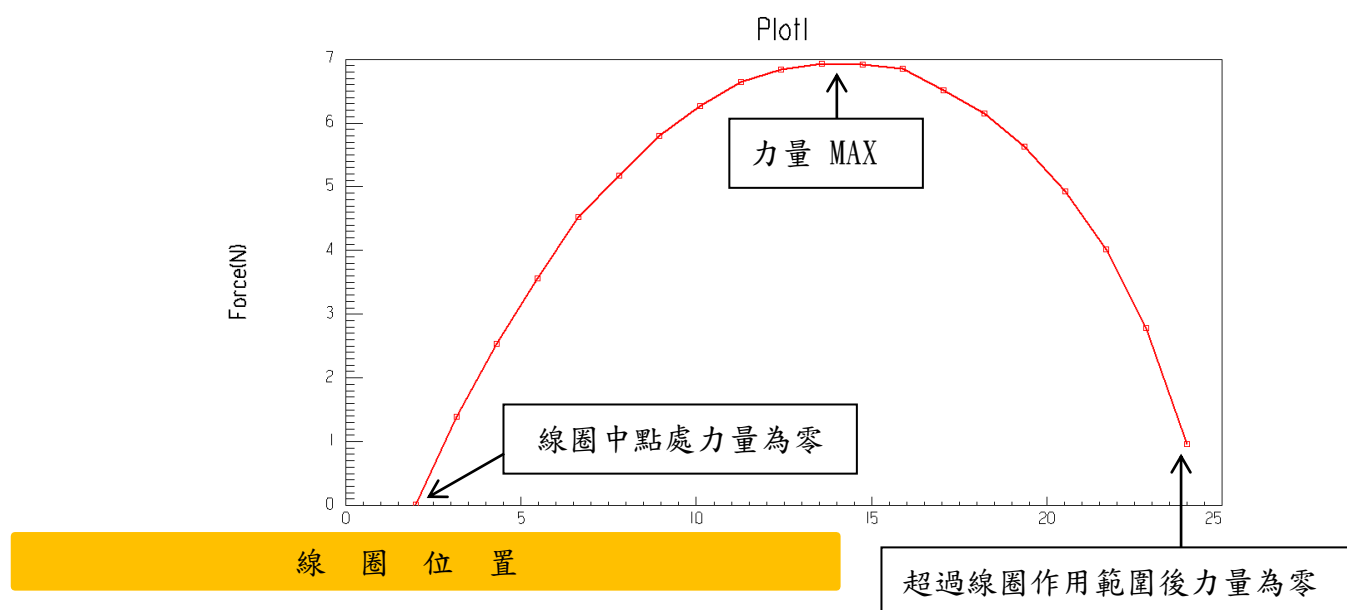
- (1) 當磁鐵位於座標原點處的磁力最大
- (2) 電磁鐵其線圈越長，進程就越大
- (3) 永久磁石的數量與力道具有加成性
- (4) 線圈沒有加成性

### 1-3 MAXWELL 軟體模擬

有了之前的實驗結果，我們利用電磁軟體「MAXWELL」模擬自製電磁鐵之型態，並驗證實驗數據。此模擬圖為R- $\theta$ 座標，設定各位置的材質與性質，並透過電腦模擬觀察其結果。

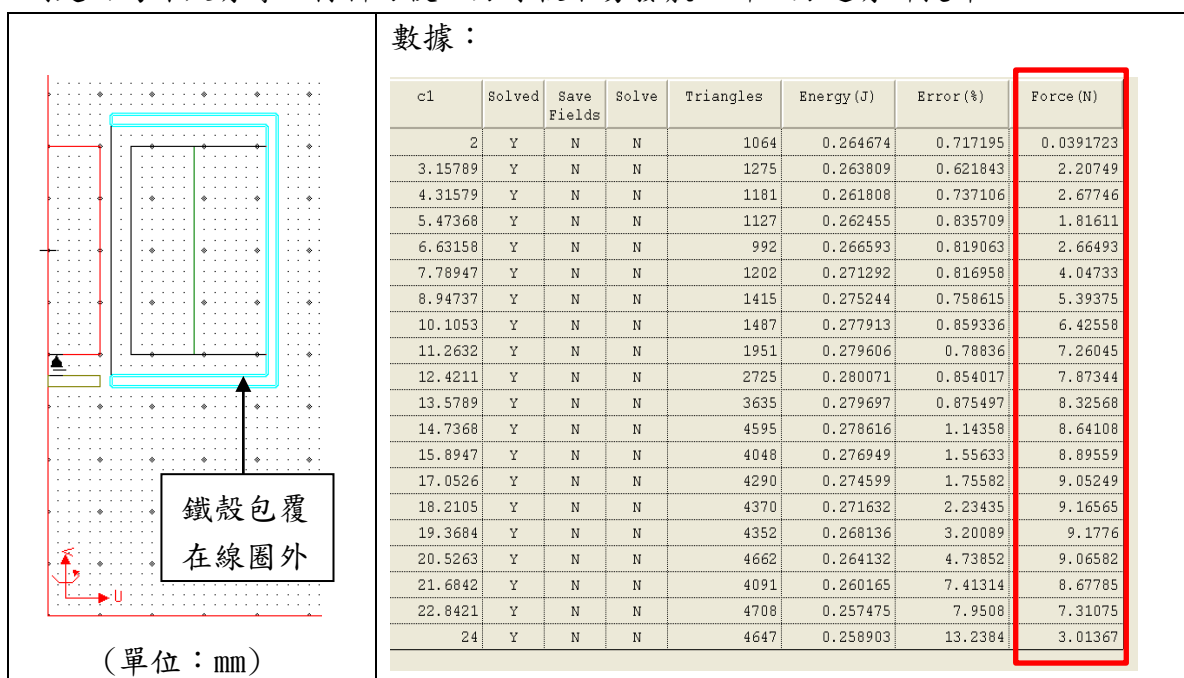


F(N)-x(mm)圖



由模擬結果可知，永久磁石在線圈中點處所受到的磁力為零，而在線圈的開口端(之前自製電磁鐵實驗時所訂的座標原點)力道最大，與實驗結果相符。

進一步，我們將剛剛的設計的外層加上一層導磁材料(鐵殼)，再跑一次模擬，由結果(如下圖所示)可發現到，若在線圈外包覆鐵殼，產生的磁力較大。推測是因為外殼有導磁材料可使磁力線較不易發散，所以力道有所提升。

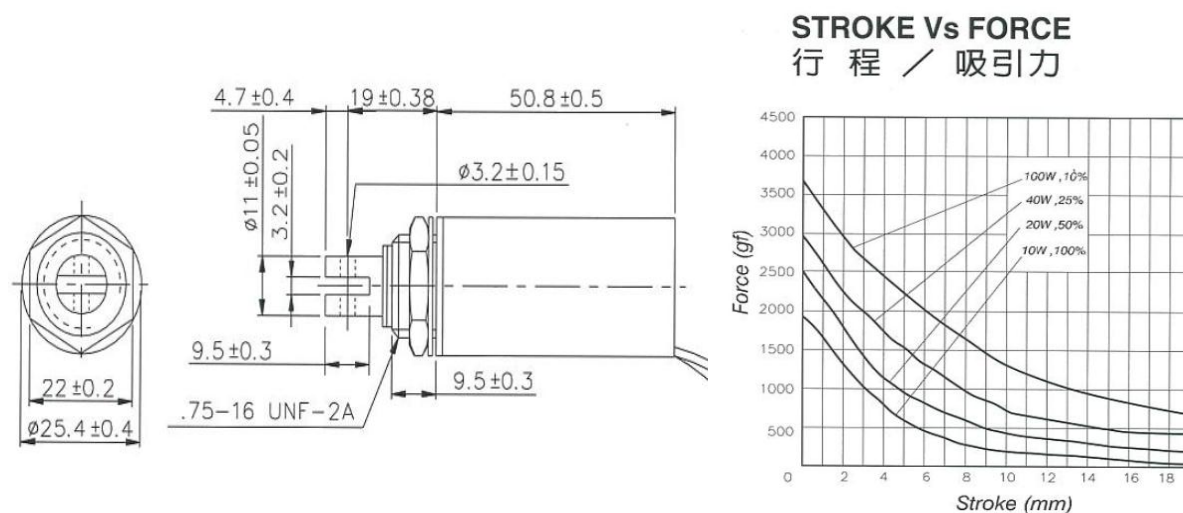


#### 1-4 市售電磁鐵

我們購買了兩種市售的電磁鐵來跟我們自製的電磁鐵做比較：

(1) Tubular solenoid SMT-2551

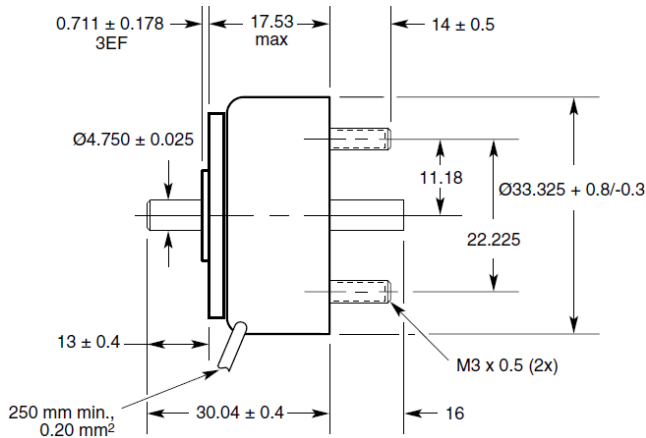
|       |            |
|-------|------------|
| 電磁鐵名稱 | SMT-2551   |
| 製造商   | 台興電子股份有限公司 |
| 重量    | 178g       |



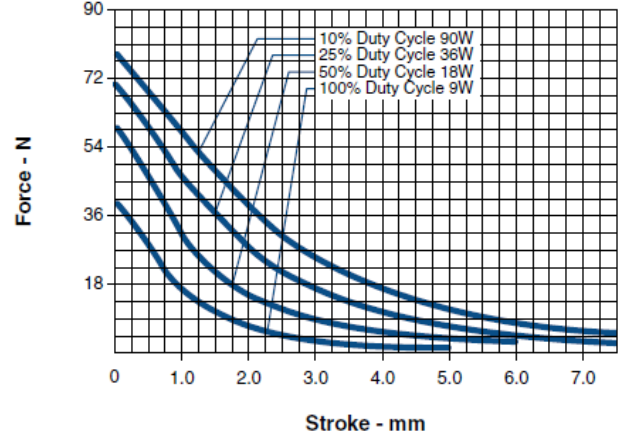
(附註:行程/吸引力的關係圖中，其行程為0時為可動鐵心與鐵殼相碰時。)

(2) Low profile ,push and pull solenoid ,3ECM

|       |                                           |
|-------|-------------------------------------------|
| 電磁鐵名稱 | Low profile ,push and pull solenoid, 3ECM |
| 製造商   | Ledex                                     |
| 重量    | 106.3g                                    |



Size 3ECM— Typical Force @ 20°C



○SMT-2551 和 Low profile ,push and pull solenoid ,3ECM 比較:

長形電磁鐵:

tubular solenoid SMT-2551



寬扁形電磁鐵:

Low profile,3ECM



(a)從重量的角度

|       | SMT-2551 | Low profile 3ECM |
|-------|----------|------------------|
| 單顆重   | 178g     | 106.3g           |
| 12 顆重 | 2.1kg    | 1.3kg            |

由上表可知，十二顆的重量差距 0.8kg。而重量越輕，軟球機器人就越容易翻過。

(b)從尺寸的角度

Low profile 3ECM 電磁鐵較 SMT-2551 電磁鐵短，這代表著整個機器人球體的尺寸亦會變小，從轉動慣量  $I = mR^2$  可知，尺寸越小的球會越好翻。

### (C)從力道和進程的角度

Low profile 3ECM 電磁鐵特點為表面積較大，整體呈現寬扁型，進程較小。而 tubular 電磁鐵則較長，進程較大。

我們知道若表面積越大，通過的磁力線會越多，其產生的磁場就越大。可以推測 Low profile 3ECM 電磁鐵的力道會比 SMT-2551 電磁鐵來的大，由上面數據可知 Low profile 3ECM 最大力道可達到 80(N)，而 SMT-2551 則差不多 34.3(N) (假設兩者 duty cycle:10%)，力道相差超過 2 倍。

但 SMT-2551 的進程(2cm)又較 Low profile 3ECM 的進程(7.6mm)佳，考量電磁鐵撞擊地面提供機器人衝量為短時間，故力道的重要性應高於進程，再加上重量機器人整體重量的因素，因此 Low profile 3ECM 會是較佳的選擇。

### 1-5 小結

自製的電磁鐵與市售的點磁鐵最大的不同處在於其作用原理。我們自製的電磁鐵是透過「通電線圈與永久磁石的相斥及相吸作用」來產生動力，而市售的電磁鐵則是利用線圈通電後，「磁力線為達成最短的封閉迴路」而讓電磁鐵的鐵心與外殼相吸」。

以下是兩者的比較：

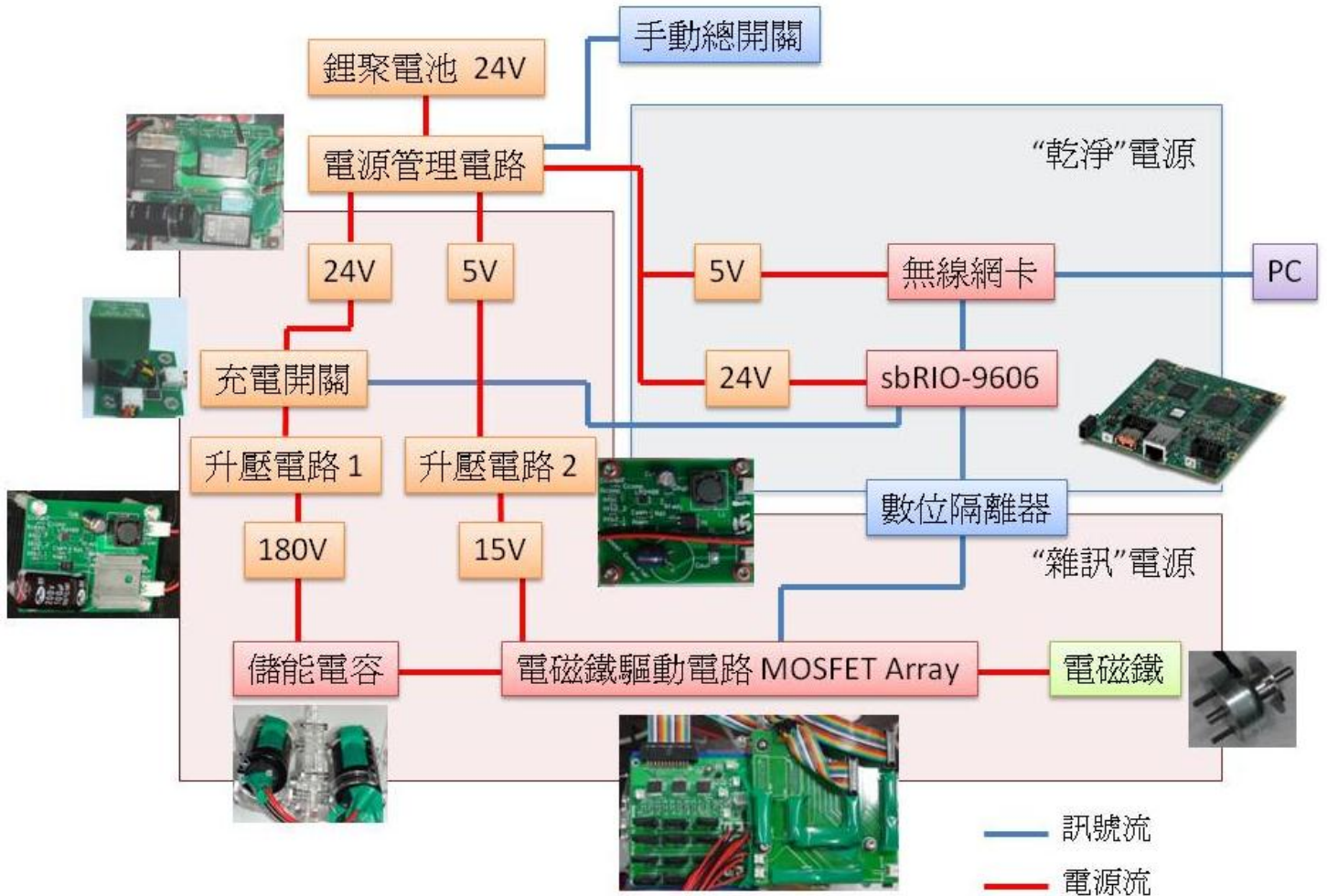
|      | 自製電磁鐵 | 市售電磁鐵 | 說明                                                      |
|------|-------|-------|---------------------------------------------------------|
| 重量   | 重     | 輕     | 自製電磁鐵需要很多層的線圈才能達到一定的力道，故重量與體積都很大。                       |
| 體積   | 大     | 小     |                                                         |
| 可靠度  | 不佳    | 佳     | 自行加工的產品精確度較差。                                           |
| 可調整性 | 佳     | 不佳    | 自製的電磁鐵可自行調整線圈的串、並聯與線圈的線徑及長度。                            |
| 發熱程度 | 嚴重    | 較佳    | 自製電磁鐵的線圈數較市售的電磁鐵多。                                      |
| 方向   | 雙向    | 單向    | 因為作用原理不同，自製電磁鐵的軸心為永久磁石，固有 N、S 兩極，所以具有相斥及相吸兩種方向，市售電磁鐵則無。 |

自製電磁鐵雖然有較佳的「可設計性」，但是考量到機器人整體的重量與大小(機器人體積愈大，翻越所需克服的位能越多)，以及電磁鐵的發熱程度，最後決定使用市售的電磁鐵，我們決定使用體積較小且力道較大的「Low profile 3ECM」作為我們的致動器。



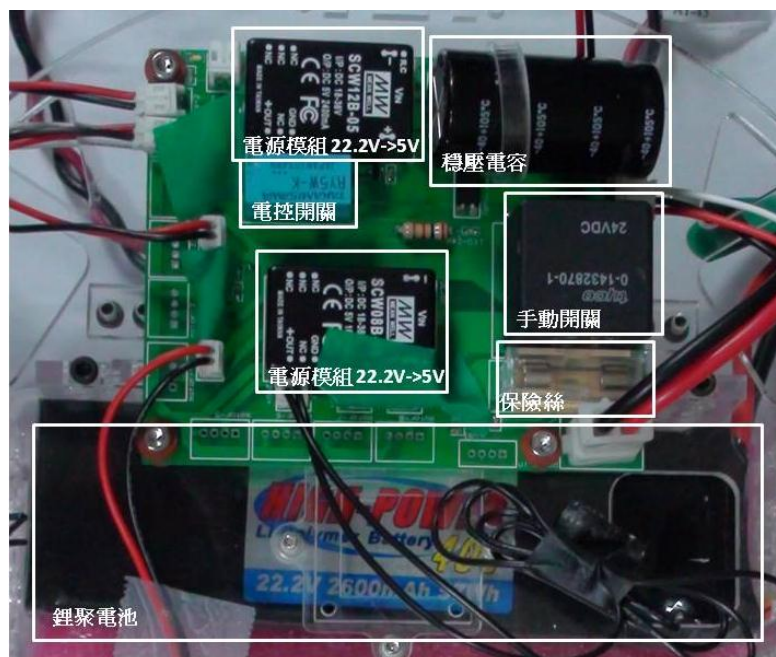
## 二、電路設計與機電整合

### 2-1 整體架構



機電硬體架構如上圖所示。電力來源是由22.2V鋰聚合物電池提供，並且為了因應各部件所需的不同電壓，在此設計了幾塊升降壓電路來處理。運算中心使用的是National Instruments美商國家儀器(以下簡稱NI)的Single-Board RIO-9606(以下簡稱sbRIO)配合NI的LabVIEW作為人機介面以及演算法的處理平台。最後將控制訊號經電磁鐵驅動板來驅動電磁鐵完成機器人的行動。

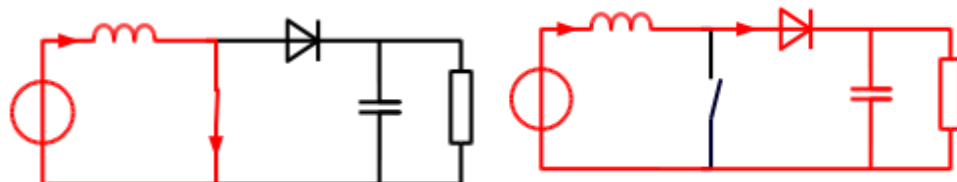
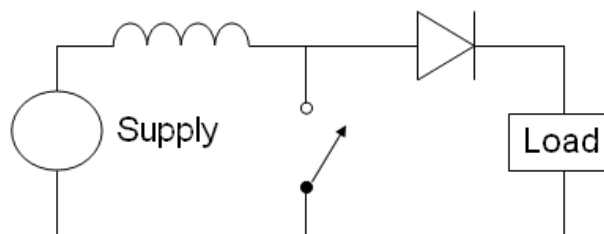
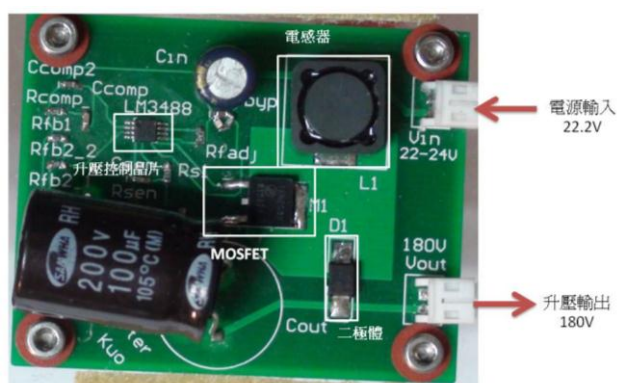
## 2-2 電源管理電路



電力來源使用的是22.2V鋰聚合物電池(亞拓)，其內部構造為六個鋰聚合物電池單元串聯而成。鋰聚合物電池在單位體積電容量和快速放電能力皆勝過其他種類電池，故非常符合機器人應用上高電流、高能量密度、重量輕的要求。

在電路保護設計上為避免大量電流進入電路造成部件損壞，在電源輸入部分設置了一個限流保險絲，之後設置了兩個開關，一為手動的機械式開關(照片中未包含按鈕)，啟動sbRIO以及無線網卡，另一個則是sbRIO控制的電控開關，來啟動外圍周邊設備。此兩階段設計在外圍電路因突發狀況需要關閉時，能夠由電腦端程式下指令給sbRIO進行緊急關閉，防止損壞。sbRIO的電源供應要求較低的電壓波動，因此設置了一個大穩壓電容來防止電壓降低使得sbRIO當機的情況發生。最後為了提供其他周邊元件不同電壓供應，板上放置了兩個電源模組，將電池電壓轉換成元件所需。

## 2-3 升壓電路設計



在實驗過程中我們發現由電池(22.2 伏特)直接提供的功率不足以推動機器人。為了解決這問題我們加上了升壓模組，將電壓提升至 180 伏特，並儲存於兩個電容中(見上方圖)，然後將電容連接到電磁鐵驅動板由 sbRIO 去控制啟動哪一支腳。另外為了電磁鐵驅動板上 MOSFET 所需要的 GATE 電壓，我們使用另一塊升壓電路將 5 伏特升壓至 15 伏特。

其中升壓電路採用的是上方圖右的電路結構，整體由電感、二極體、MOSFET 開關和控制 IC 組成。整個升壓過程分成兩部分，首先為充電過程，控制 IC 將 MOSFET 導通，二極體處於逆偏壓的狀態，電池將電能儲存在電感當中，再來是放電過程，控制 IC 將 MOSFET 斷開，此時電感電壓極性反轉，二極體處於正偏壓，電感對負載放電，電池電壓加上電感電壓達成升壓目的。

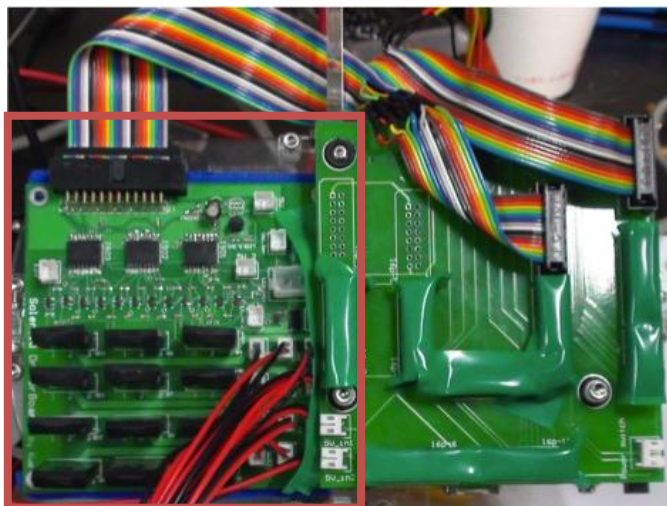


## 2-4 儲能電容及充電開關



右圖為 180V 升壓電路的控制開關，可由 sbRIO 來控制對儲能電容的充電時間。經過升壓電路，流過電磁鐵的電流峰值可達約 10 安培，與電池直接供電相比，力道大大提升了。

## 2-5 電磁鐵驅動板設計



我們設計了一塊電磁鐵驅動板，由 12 個 MOSFET 開關對應 12 顆電磁鐵來讓 sbRIO 控制啟動哪一支腳，還可以由 sbRIO 產生 PWM 訊號調整電磁鐵力道。並且為了不使放電過程中的大電流影響敏感的 sbRIO 訊號，中間使用數位隔離器分隔兩邊的電路。另外還放置了電流感測元件，感測流過電磁鐵的電流，面向未來可以做更精細的調控。

## 2-6 sbRIO [9]



NI sbRIO-9606 嵌入式控制與擷取介面卡，於單一印刷電路板（PCB）上整合 I/O、Real-Time 處理器、可由使用者重設的 FPGA。搭載 1 組 400 MHz 工業級處理器、1 組 Xilinx Spartan-6 LX45 FPGA、1 組 RIO Mezzanine Card 接頭。RIO Mezzanine Card 為高速、高頻寬的接頭，可銜接處理器與 96 個 3.3 V 數位 I/O FPGA 通道。sbRIO-9606 並可達  $-40 \sim 70^{\circ}\text{C}$  作業環境溫度範圍，搭配 9 ~ 30 VDC 電源供應輸入範圍。另具備 256 MB DRAM 適用於嵌入式作業；512 MB 非揮發性記憶體適用於程式儲存與資料記錄。

NI sbRIO-9606 並內建 1 組 10/100 Mbps/s 乙太網路埠，透過網路與內建的 Web (HTTP) 與檔案 (FTP) 伺服器，即可針對通訊作業進程式設計。sbRIO-9606 亦內建 CAN、RS232 序列、USB 通訊埠，可控制週邊設備。

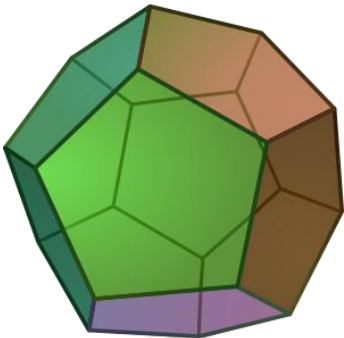
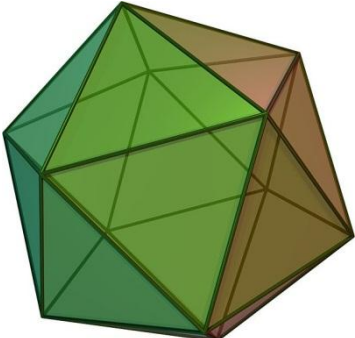
### 三、外殼幾何形狀設計

#### 3-1 外觀幾何形狀分析

球體在空間中任何方向皆為對稱，故致動的電磁鐵也需安裝在空間中對稱的位置，如此一來在球面任何位置著地下致動器的控制方法才會相同，但若將伸縮的電磁鐵裝滿整個球體會造成球體重量過重的問題或是某些致動器因為步態的間距而閒置，因此選擇端點同樣是在空間中對稱的正多面體做為致動器的放置方法。

首先，先來描述正多面體的定義：(1)正多面體的面皆由正多邊形組成 (2)正多面體的各頂角相等 (3)正多面體的各條棱邊都相等。世界上存在之正多面體僅有五個，分別為：正四面體、正六面體(立方體)、正八面體、正十二面體、正二十面體，我們選擇將電磁鐵安裝在每個正多邊形的頂點上而非組成面上，一來只要將致動器固定在頂點上並將頂點與頂點做適當的固定就可以將組合面的位置鏤空以減少球體重量，二來可避免球體在翻越時凸出的頂角產生觸地之情形，這種選擇下致動器不論是安裝在何種多面體內一定會使組成面與地面平行並由組成面端點上的電磁鐵站立在地面上，由於前三種正多面體的頂點太少會造成球體滾動不流暢或是單一致動器需提供極大的能量才能使球體翻轉到下一個啟動狀態故不採用，以下我們將就剩下的正十二面體以及正二十面體做優缺點的討論：

○二十面體、十二面體之優缺點比較 [10]

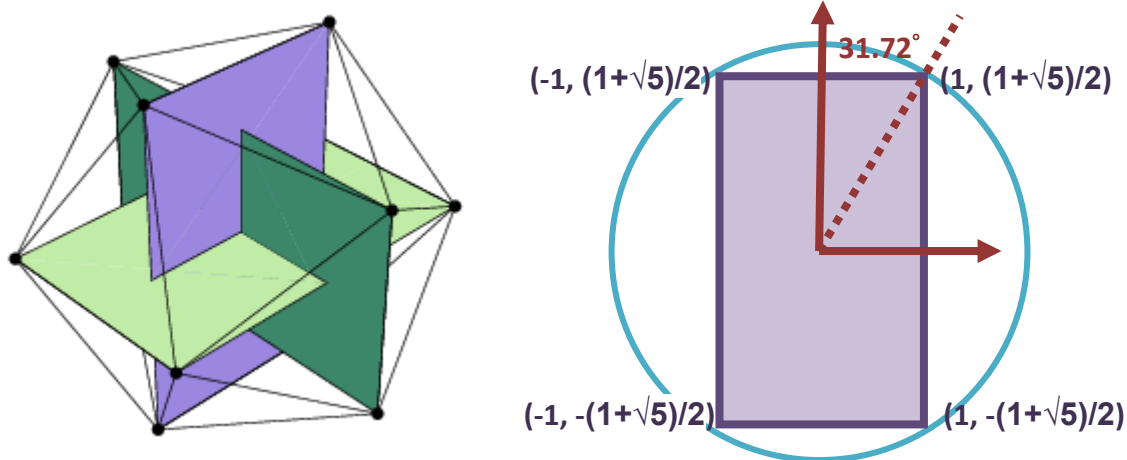
| 名稱   | 正十二面體                                                                               | 正二十面體                                                                                |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 圖形展示 |  |  |
| 組成面  | 正五邊形                                                                                | 正三邊形                                                                                 |
| 面    | 12 (個)                                                                              | 20 (個)                                                                               |
| 邊    | 30 (個)                                                                              | 30 (個)                                                                               |
| 頂點   | 20 (個)                                                                              | 12 (個)                                                                               |

其中這兩個多面體分別互為對方之「對偶多面體」，(在幾何學中若一種多面體的每個頂點均能對應到另一種多面體上的每個面的中心他就是對方的對偶多面體)。



在十二面體中，頂點有高達 20 個，在靜止狀態時會以五邊型的方式著地，而在二十面體中，頂點有 12 個且在靜止狀態時會以三邊型的方式著地，雖然十二面體單一之腳所需承受的重力會比二十面體來的小而且五腳著地會比三腳著地來的穩固，但穩固也就代表較難使球體翻越過去，同時二十面體的兩面夾角( $138^\circ$ )比十二面體( $116^\circ$ )來的大，故致動器需要造成翻到下一面的角度較十二面體小較易達到，另外考慮到作動時僅啟動一隻電磁鐵，單一隻致動器需將力用在克服其他致動器的重力位能上而不能轉變成球體的動能，故越多的電磁鐵就越難翻越。

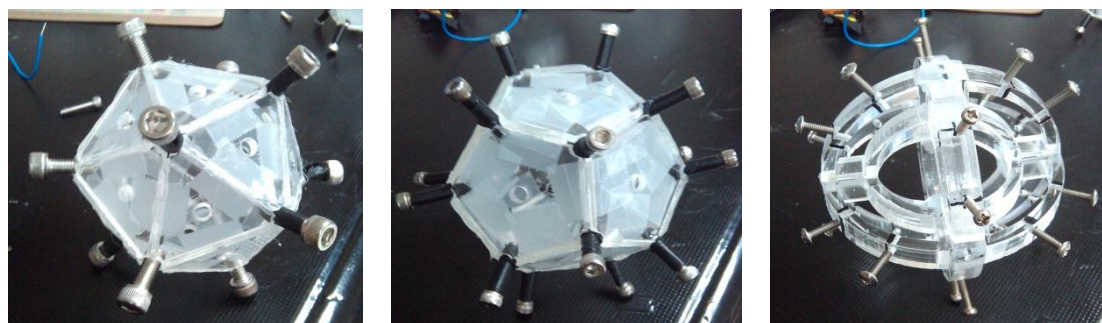
綜合以上來說，我們決定以正二十面體的十二個端點作為我們放置致動器之位置。



[圖片來源：維基百科]

利用二十面體頂點分佈的特性我們可以將其十二個頂點分在相互垂直的 X.Y.Z 平面上，單就一個平面來看各頂點的座標分別為  $(1, \frac{1+\sqrt{5}}{2})$   $(1, -\frac{1+\sqrt{5}}{2})$   $(-1, \frac{1+\sqrt{5}}{2})$   $(-1, -\frac{1+\sqrt{5}}{2})$ ，而  $\frac{1+\sqrt{5}}{2}$  為黃金分割數，因此在各平面所形成的矩形便稱為「黃金矩形」。設計目標為一可滾動的球體，所以概念中保留各座標點做為放置致動器之位置但將「三個圓環」取代矩形外型。

#### ○ 我們在實驗中做的各種模型

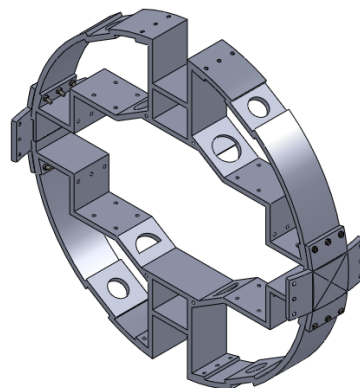
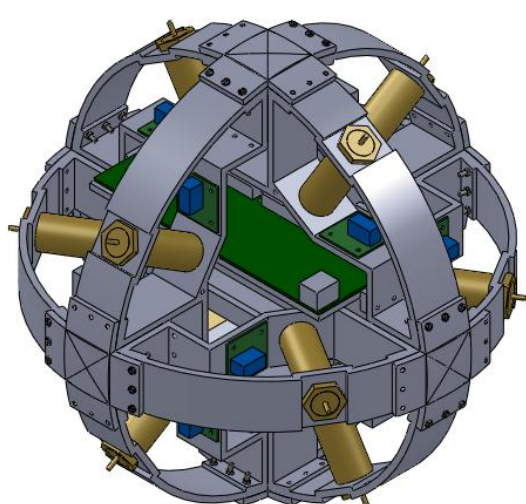




## 3-2 機器人外殼設計

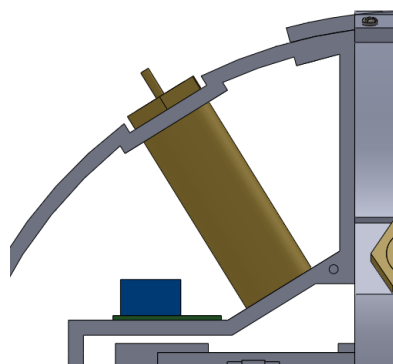
嘗試了許多方法與材料來製作球機器人的外殼，其中包括：(1)線切割外型(2) 壓克力外型(3) 玻璃纖維外型與(4)碳纖維外型，以下將一一介紹。

### 3-2-1 線切割外型



此結構是由三個如上圖所示之圓環，以兩兩互相垂直的方式，組合而成。

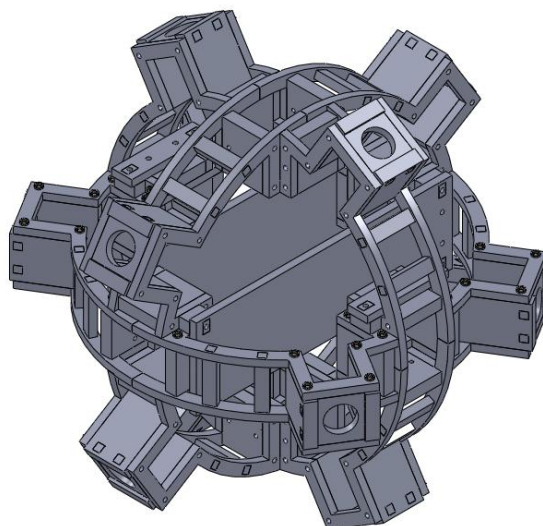
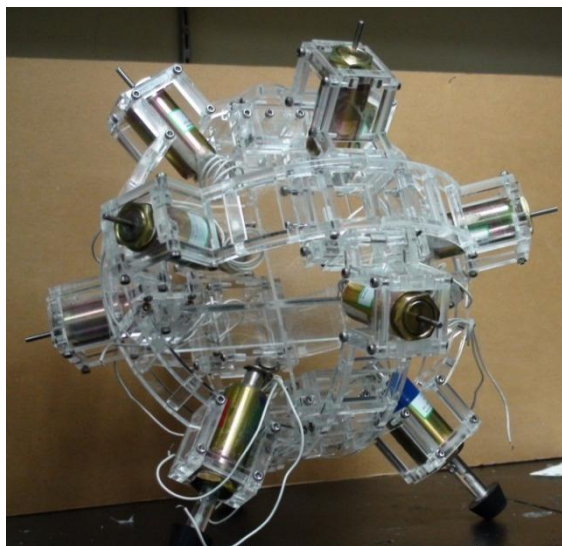
本架構為機構設計一個初步的概念原型，在圓環中有做兩組的正反凹槽，如此一來可以使圓環互相組裝時可以在結構中有相互限制的效果。結構中有一個內外環的設計(如右圖所示)目的在於將電磁鐵固定得更穩定，長型電磁鐵(設計此圖時，還未購入短型電磁鐵，所以是使用長形電磁鐵)的固定鎖點在其前端，然而其包含其大部分重量的線圈卻都在後頭，假使電磁鐵的出力過大有可能使後方的線圈產生晃動，因此利用內圈結構將電磁鐵線圈末端包覆來避免此一情形發生。



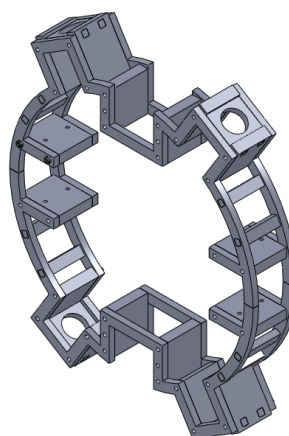
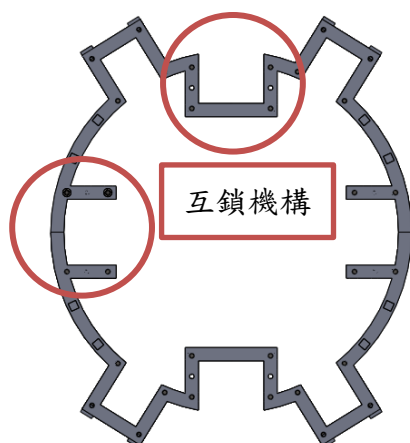
另外，內環也區隔出一放置及固定機電系統的空間，在內圈正中間有一個利用兩個夾板隔成的位置為電池的放置處，目的在於使機電系統中重量最重的電池對球體在旋轉時的影響達到最小，否則球體在轉動時的轉動慣量會因電池在球體中位置的移動忽大忽小而造成某幾個姿態下球體較難翻越，雖然置於球體的正中心仍會因電池幾何形狀為長方形的關係造成翻滾時轉動慣量的改變，但影響效果最小。在大小配置方面因為電池必須擺在正中間而同時在同一平面上又必須擺入長型電磁鐵，因此球體的直徑大小就被限制在約 320mm 左右。

對於機器人的翻滾來說直徑越小因所需克服的位能較小所以越容易翻越，320mm 直徑的球體似乎是大了點，另外外框與固定的零件過於複雜無法自行加工以及沒有考慮到加速規與陀螺儀擺放的位置一定要位於機器人的正中間，因此最終這個設計並沒有進入實體化的階段。

### 3-2-2 壓克力外型



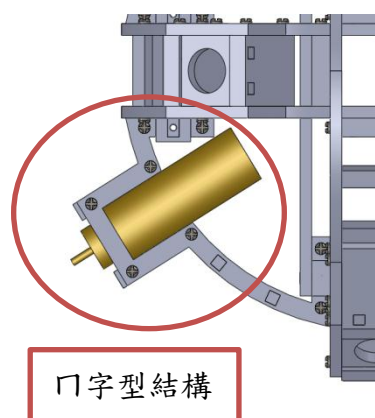
壓克力機體誕生的目的為做為一真實的測試平台，想在建立數學模型前先藉由這個平台來觀察一些球體的翻滾或是機器是否能照預測的姿態前進，為了使測試平台有足夠的剛性，在材料方面選用 5mm 的壓克力板，在設計上保留原型球體中由 X、Y、Z 三個平面圓環所組成的構想，但在實際中三個圓環不能相互嵌入，因此我們便將圓環設計成半圓環以及加強半環中卡槽的部分使其在組合時不再僅僅是利用結構本身的形狀將零件互相卡住(如左下圖)，而是能將不同的零件相互的鎖在一起而形成六塊非常堅固的邊，因此就算不是利用一體成型的圓環也可以使整個球體的結構非常穩固。



由(右上圖)中可以看到每一個環都是由兩個夾邊及中間的支撐柱所組成，這是因為在測試階段我們選用加工快速的雷射切割機的緣故，雷射切割機雖然精準方便但卻有最大加工厚度的限制，實驗室的雷射切割機(60W)最多只能加工 10mm 厚的壓克力板，然而每一個環的寬度卻是受限於電磁鐵的直徑(25)mm，而且勢必要大於這個厚度，所以使用支撐柱的設計將每一個環的厚度撐起，另一方面這樣的設計也恰好減少每一個環上所使用的材料，達到使機體輕量化的目的。

在觀察電磁鐵後可發現，其實不需要內外圈佔空間的設計就可將電磁鐵牢牢固定，但存在的另一個問題是電磁鐵的中心軸其實非常的細而且行程相較於機體大小也非常的短，如果直接以中心軸推地不僅僅可能會容易打滑或斷裂也有可能根本因為太短而無法碰觸在地面上，因此在電磁鐵的末端我們特地加了一個壓克力套筒來將中心軸延長，然而在原型機的設計下會需要很長的套筒延伸幫助下才能使電磁鐵碰觸在地上，這樣一來在電磁鐵施力時就可能會在中心軸或套筒上產生 bending。

為了避免此一情況的發生，我們在圓環上加了一個口字型的結構(如右圖所示)，將電磁鐵由圈內向圈外移出，口字型的結構目的在於利用電磁鐵線圈本身的長度來彌補套筒本身的長度，如此一來套筒的長度就可以被縮短較不易產生 bending，另一方面將電磁鐵向外延伸之後也就可以同時避免掉機腹著地的問題了。

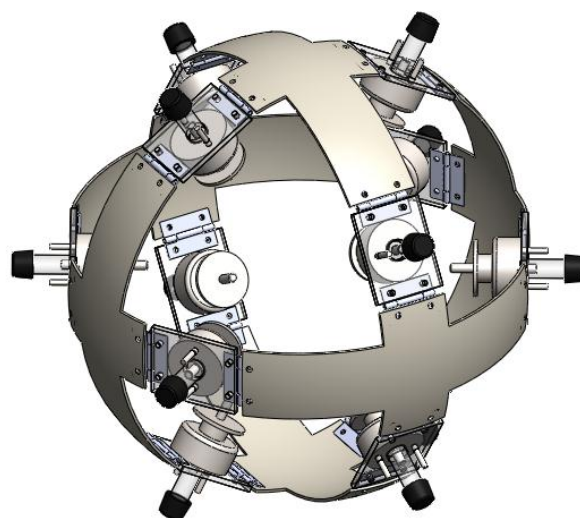
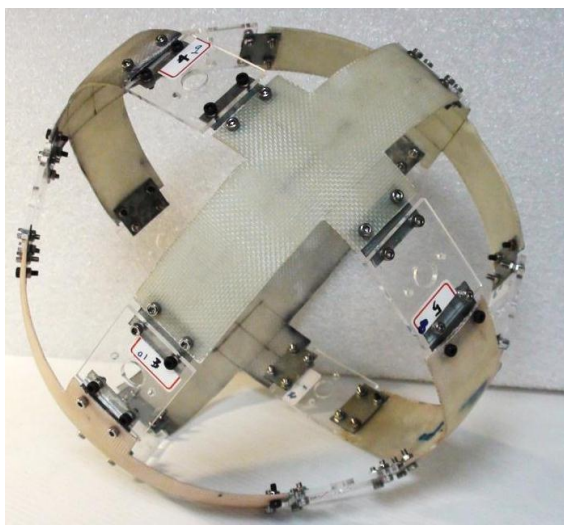


在展示圖中兩塊平板間為放置電池的空間，另外板子上鑽孔後便可以做為電路板的放置，不過基本上因為電路板當時都還未設計完全所以中心的部分僅是一個粗略的架構。

在多方的測試之後我們發現長型的電磁鐵所施與的力不足以提供壓克力平台翻越的能量，原因在於不論是做為移動的電磁鐵或是做為結構的壓克力重量都太重的關係，兩者的重量相加後約有 3 公斤，若再包含機電系統則球體將更加不能翻越，同時壓克力還是屬於較軟性的材質，因此在一次次的衝擊之下接合處會漸漸的被擴孔而造成零件的鬆動。最後決定放棄長型的電磁鐵，並以力量更強的寬扁型電磁鐵取代，寬扁型電磁鐵除了有進程比長形電磁鐵短的缺點之外，不僅力量較大，重量也較長形電磁鐵輕，且體積較小，可讓球殼的內部空間加大，所以寬扁型電磁鐵可說是較佳的選擇。

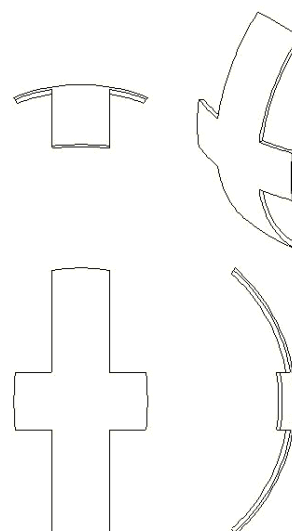
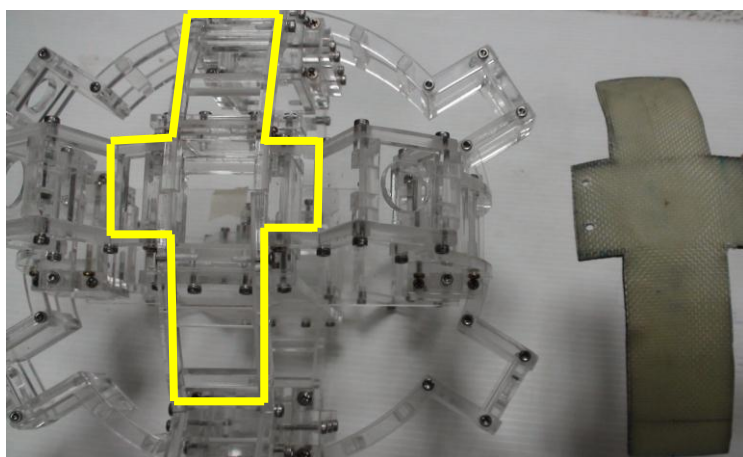


### 3-2-3 玻璃纖維外型



#### (1)構想：

基於重量及強度的考量，我們考慮使用玻璃纖維來做為球殼的材料。在外環處利用玻璃纖維來取代壓克力的部分，但形狀上已不再是做為一個半圓形，而是取自平台中電磁鐵與電磁鐵間壓克力結構的形狀(圖下圖所示)，使用玻纖的目的在於減輕重量與增加外環的彈性，以玻纖做出的外環重量甚至不到壓克力外環的一半，另外是希望可以利用外殼含有的一點彈性對機器人翻越產生一些助力，在玻纖與固定電磁鐵的壓克力片中間則是以薄鋁片固定，目的在於容許外球殼做微量的變型使組裝上更加便利。



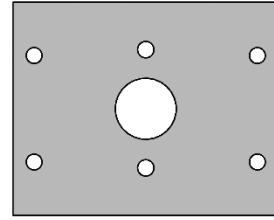
#### (2)材料特性：

使用 E 型玻璃纖維，為低鹼性玻璃，根基於硼硅酸鋁，此玻璃具有相當好的電絕緣性及機械性能。我們選用基本平織的編織布，密度  $330\text{g/m}^2$ ，雙向(0 度、90 度)的玻璃纖維。玻璃纖維的拉伸強度一般為  $1000\sim 3000\text{ MPa}$ 。

玻璃纖維的延伸率比其他有機纖維的延伸率低，一般為 3 %左右。

### (3)尺寸規格：

我們依照壓克力外型的幾何形狀，將其設計成六個全等的十字曲面，以長邊連接壓克力板(用於固定電磁鐵)再連接短邊的模式來組成球狀。用於固定電磁鐵的壓克力板為長 60mm 寬 40mm，厚度 3mm，中心有直徑 11.5mm 的孔用於讓電磁鐵伸縮(如右圖)。我們設定球殼的直徑為 250mm，因此，計算十字曲面的：

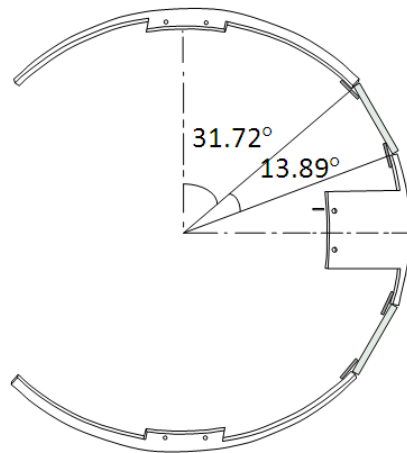


$$\text{長邊弧長} : (31.72^\circ - 13.89^\circ) \times 2 \times \frac{\pi}{180} \times 125 = 77.8$$

$$\text{短邊弧長} : (180^\circ - 31.72^\circ \times 2 - 13.89^\circ \times 2) \times \frac{\pi}{180} \times 125 = 193.7$$

角度計算示意如右圖，十字曲面的寬度我們選定 40mm。

纖維厚度方面，我們嘗試試驗過不同層數的玻璃纖維來尋找最適當的厚度，最後考量重量與強度之間的關係，(厚度越厚，強度越強，不過重量較重)我們選定五層為最恰當的厚度，約 1.8mm 在彈性及強度及重量上皆符合我們的需求。



### (4)組裝：

玻璃纖維與壓克力板的連接上，我們起初考慮其可能需要較大的自由度，使用絞鍊做為連接，在十字曲面及壓克力上鑽孔，以鎖螺絲、螺母的方式做固定。但實驗測試後，發現使用絞鍊的連接方式使整體結構較為不固定、可扭動，因此在利用程式執行步態移動時，仍然無法使球體翻越，原因是在於絞鍊所造成的微量變形會將所有施與在球殼上的力全數抵銷而使力沒有作用在移動上，於是我們將絞鍊用薄鋁片來替代以解決變形的問題。我們使用長 31mm，寬 18mm，厚度 1mm 的鋁板(如右圖所示)，並在兩側各鑽兩個 M3 的洞，以螺絲搭配螺帽的方式與玻纖和壓克力板作固定。組裝完成後，整體結構變堅固，不再任意扭動。



### (5)結果討論：

- (a)玻璃纖維本身的限制：基於三維曲面的形狀與玻纖本身材料的限制，造成我們烤出來的十字曲面有些許的不平整，根據「微裂紋假說」[11]，在經歷後來的組裝、切削、鑽孔及鎖螺絲的壓力後，受力不均，產生應力集中，在危害最大的微裂紋處，產生開裂，



瑕疵逐漸擴大，在側邊甚至能以肉眼觀察出層與層之間稍有分離的現象，造成強度降低。又因纖維的老化，玻璃纖維存放一段時間後，受空氣中水分，及施加負荷時間的影響，其強度降低。

- (b)實驗上的問題：玻璃纖維有一定的韌性，造成當電磁鐵啟動時，有部分的力量被玻璃纖維的變形所吸收，亦有小部分力量被玻璃纖維與鋁片連接處變形所吸收。

#### (6)改良-----碳纖維外型

(a)材料特性：首先先簡略的比較玻璃纖維與碳纖維

|      | 密度 | 剛性 | 延展性 | 價錢  |
|------|----|----|-----|-----|
| 玻璃纖維 | 較高 | 較差 | 較好  | 較便宜 |
| 碳纖維  | 較低 | 較好 | 較差  | 較昂貴 |

基於上述玻璃纖維的缺點，我們考慮剛性及重量都較優秀的碳纖維。碳纖維依種類不同，其楊氏係數約在 200-600GPa 之間。

- (b)尺寸規格：尺寸規格與玻璃纖維相同，僅厚度方面，若比照玻璃纖維的厚度，以碳纖維來說，五層稍嫌太過薄脆，在經過不同層數的試驗後，我們修改碳纖維的厚度為八層較適當，約 2mm。
- (c)製作方式：我們採用的製作方式大抵與烤製玻璃纖維的方式相同，雖此非烤製碳纖維的正統作法，但實驗上成果還不錯。另外，由於纖維層數的不同，所需的樹脂量也不同，共需 A 劑 15.2g、B 劑 13.6g，及少許 C 劑。
- (d)組裝成球：其方式亦與玻璃纖維球殼相同。
- (e)結果討論：相較於玻璃纖維，碳纖維烤製出來的成品較無瑕疵狀況，曲面也較平整，經歷一段時間後，也較無纖維老化的問題。

○ 碳纖維與玻璃纖維成品



### 3-2-4 內部結構的設計

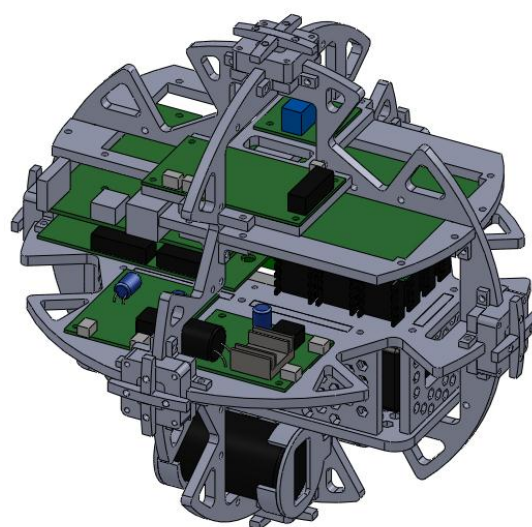
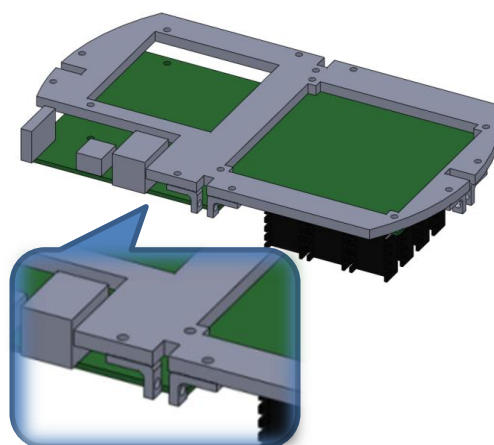
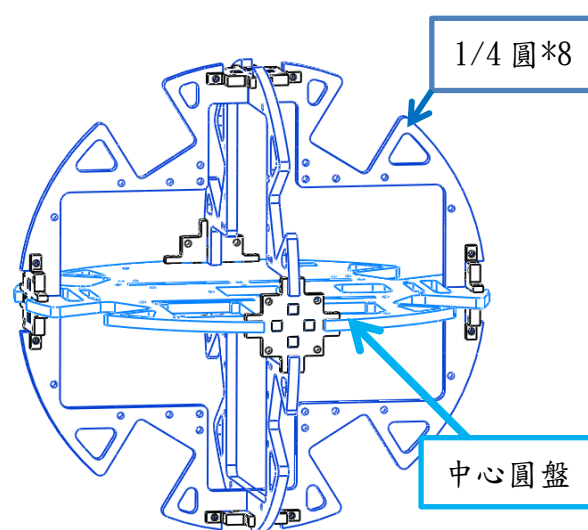
在內圈中是將 6 個半圓環的設計改成了 8 個 1/4 圓的支撐環及一個中心圓盤，內圈的材料選擇仍是壓克力，因為雷射切割機另一個限制在於只能加工平面的形狀，因此需要支撐柱將球型撐出，另外在球體中會再邊緣或是接合處看到許多小零件(如右中圖)也都是用來將 2D 的壓克力轉成 3D 的球型。

機電系統配置上的構想是將支撐架中放置一層層平行中心圓盤的間隔再將電路板依 size 大小或功能逐層放入，而中心圓盤除了提供電路板的放置作用外也做為電路板與供電系統的區隔，在整個機電系統中電池與大電容相較於其他設備來說較不穩定，因此區分開來是有保護電路板的作用。

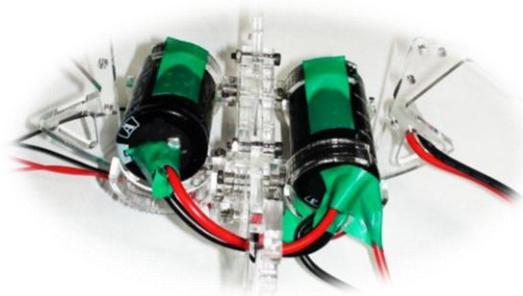
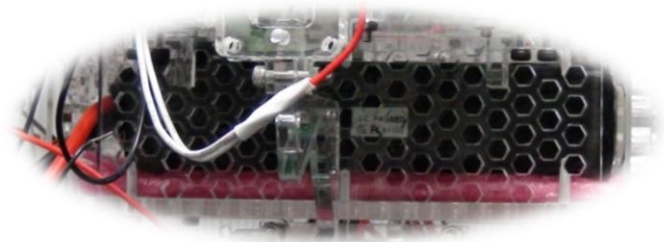
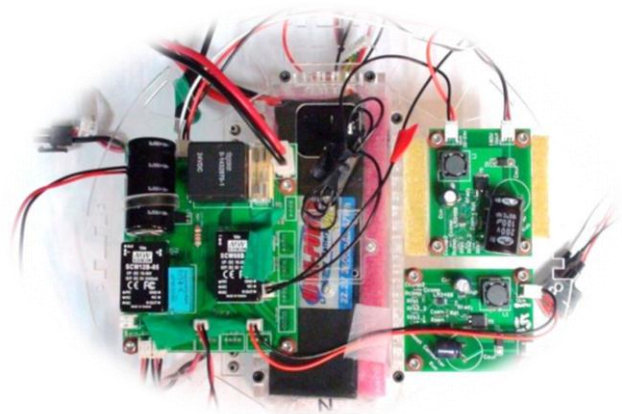
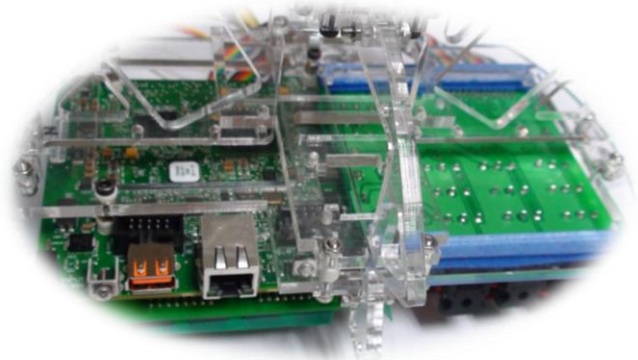
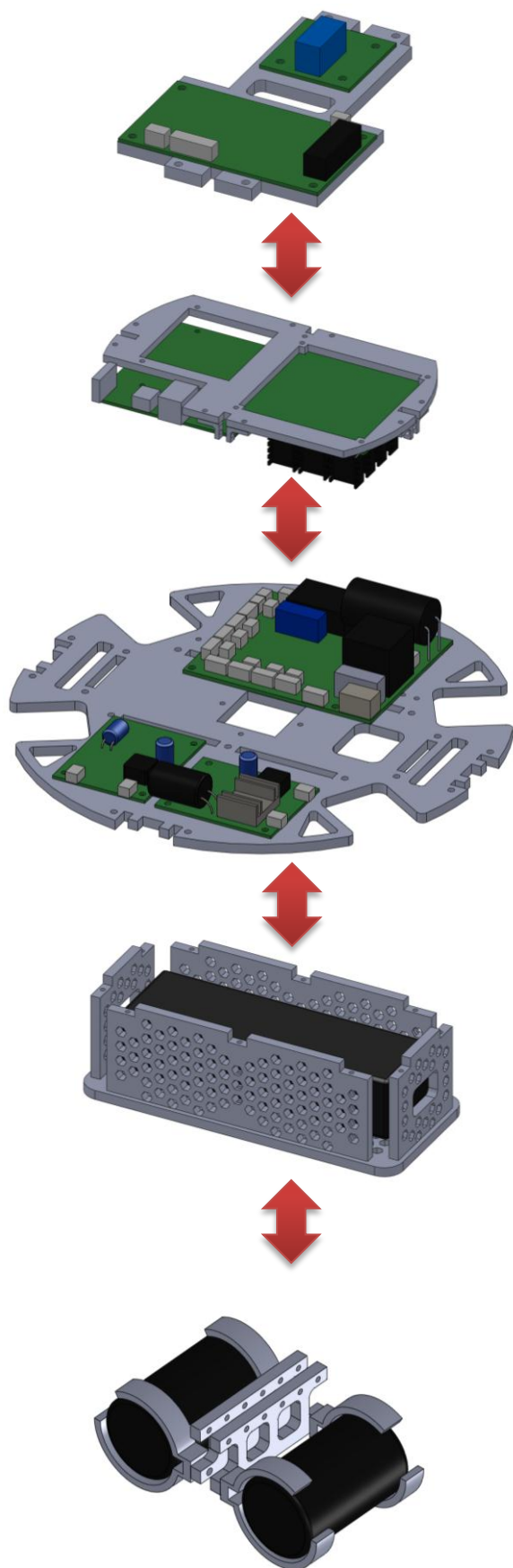
電池這次沒有安排機體的中心但仍然是放在最靠近中心的位置，電池依舊是機電系統內最重的物件，因此電池座是固定在一體成型的中心圓盤上而非支撐架上，而電池座上的蜂巢結構是為了在減輕壓克力的情況下仍可以使壓克力保持穩固。

內圈為何在之前擴孔的經驗下仍然選擇壓克力作為內圈材料的原因在於內圈在與外圈接合時除了用螺絲固定之外在兩者的接縫之間有用橡膠作為襯墊已達到防震的效果。

內部結構與外層球殼的固定方面，我們在每片十字曲面正中央鑽一 M6 的孔，以螺絲搭配螺帽的方式來與內部結構做固定。

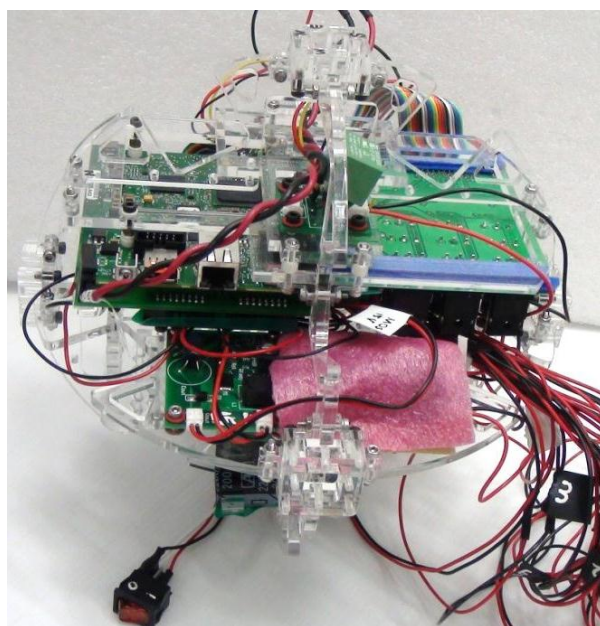


○ 內部結構分解圖

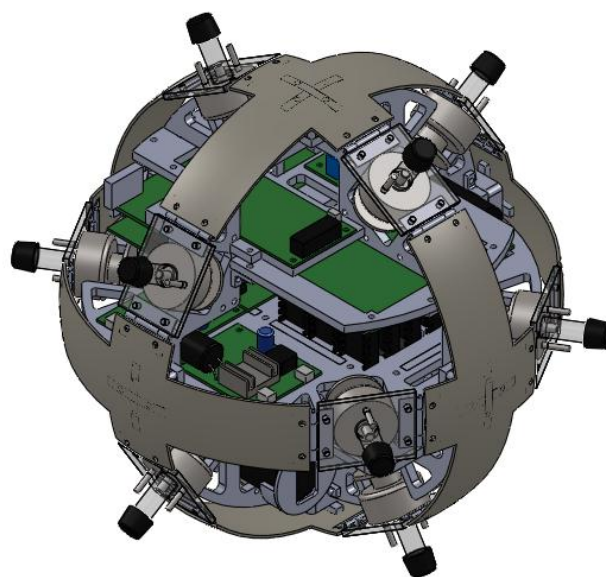
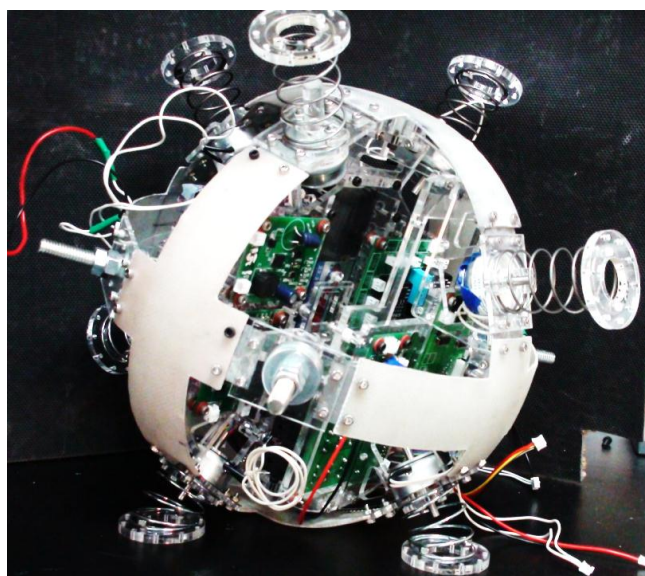




最後組裝完成的形狀如圖所示(如右圖)。這次的設計實體化前所有的機電系統業以完成，因此在將所有的零件拼裝完成後，我們的「可變型軟球機器人」的機構也算完全完成，但因為這次的設計是先決定球體的大小後才對內部的架構做規劃，因此在電路板的位置安排上有些地方顯得過於狹窄，加上在電路中有 180V 的電壓存在，若電線不小心脫落而造成短路也是會對實驗者或是機器人造成傷害，所以有在系統上做保護措施，用絕緣膠帶將可能造成短路的地方封起來，以避免發生危險。



最後，將內外球做連結後(如下圖)，即完整整個機器人的硬體架構。



### 3-3 玻璃纖維製作流程

#### 3-3-1 製作方式

##### (1) 模具：

因我們所要製作之十字曲面為一三維的曲面，在製作上稍微有難度，我們需要一球狀模具來形塑我們所要的形狀。我們嘗試以黏土、石膏來做為模具，但此兩者皆含水氣，在烤製的過程中散發出水氣，造成烤出來的成果不如預期。

最後，我們選擇以「消失模」的方式來鑄造一鋁製球模，才成功烤製出我們要的成品。但也由於在尺寸大小方面，受限於製作消失模的保麗龍球的大小而做得比原先預期更小一點。

##### ○ 消失模操作步驟

|                                                                                   |                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 建造模型                                                                           |   |
| 使用保麗龍切割器，將保利龍塊切割成型。                                                               |                                                                                      |
| 2. 模型組樹                                                                           |  |
| 將做好的模型黏在管上，將模型、澆道、冒口以黏膠結合成一模型組合。                                                  |                                                                                      |
| 3. 模型塗層                                                                           |                                                                                      |
| 以浸漿、噴覆或塗刷等方式將保利龍模型塗上一層耐火材料。                                                       |                                                                                      |
| 4. 模型乾燥                                                                           |  |
| 將塗層後之模型置於大氣或爐中乾燥。                                                                 |                                                                                      |
| 5. 造模                                                                             |                                                                                      |
| 將乾燥後之保利龍模型組合置於一桶中，該桶置於震動台上，然後以乾砂填充直到保利龍模型被完全覆蓋為止。在填砂過程中施以震動，以增加乾砂之堆積密度。           |                                                                                      |
| 6. 澆鑄                                                                             |  |
| 將高溫之鑄造合金熔液直接澆注在保利龍模型上，保利龍模型接觸到高溫熔液後瞬間即被熔化或氣化，而原來保利龍模型所佔據之空間即被金屬熔液所取代，最後凝固冷卻後形成鑄件。 |                                                                                      |
| 7. 脫模                                                                             |  |
| 鑄件凝固冷卻後，直接將乾砂傾倒即可得到鑄件，把自己的鑄件切下來即可。                                                |                                                                                      |

保麗龍模型

震動平台

造模過程

模具成品



## (2)烤製方式：

使用真空輔助樹脂注入施工法 VARTM(Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding)[12]，為 RTM 的一種，亦為封閉模具施工法，與一般 RTM 不同處在於驅動樹脂流動之力量，模具為單面模，纖維預型材置於模具上，上面(以 RTM 來說，為另一模具面)再以真空袋覆蓋後，利用真空幫浦將空氣抽出，接著樹脂藉著大氣壓差引入纖維中，再等樹脂硬化後脫模。

## (3)黏合劑：

使用環氧樹脂(EPOXY)來將層與層之間做黏合的動作，環氧樹脂為在現階段可取得之樹脂中性能最佳者，為一種熱固性高分子材料，對於纖維等強化物有相當好的黏著性，拉伸強度高，壓縮及耐擊強度亦極優良。其中環氧樹脂可分為樹脂A劑與固化用的B劑，另外尚需添加少量的C劑作為促進劑。其中樹脂的各劑調配須依照固定比例，否則成效不彰，A劑與B劑與C劑的比例為100：90：0.5。以我們所需的厚度(五層玻璃纖維)而言，我們所需的樹脂比例為9.5：8.5：極少量的C劑。

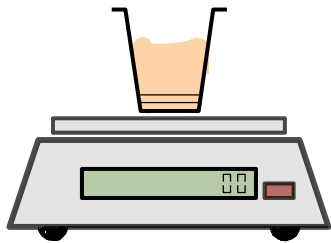
## (4)前置作業：

由於烤製出來的玻璃纖維，其外圍會有些許的毛邊，因此，在烤製時，我們先將玻璃纖維布剪成略大於十字曲面的尺寸，待考完後再以帶鋸機加工成我們所要的確切形狀。我們將玻璃纖維布剪成長邊202mm，短邊92mm，寬50mm的形狀。另外，準備紅色的release film、白色的peel ply、不織布breather vacuuming bag film、及透明的vacuum bagging film塑膠袋用於真空密閉。將release film及peel ply剪成各兩片略大於欲考形狀的大小；將不織布剪成略大於欲考形狀的長邊的長條及略大於欲考形狀的短邊短條各三條。

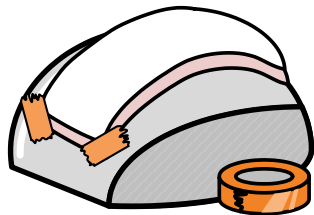
## (5)烤製環境：

送入烤箱後，先接上吸頭抽真空，然後以 80℃ 的溫度烤四小時，接著再以 120℃ 烤四小時。結束後，待其冷卻數小時待其冷卻後便可取出。

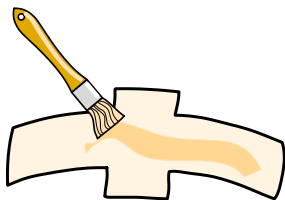
### 3-3-2 製作流程圖



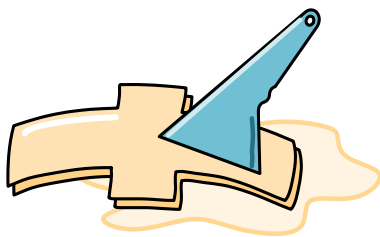
首先，先依重量比例調配出所需的樹脂。



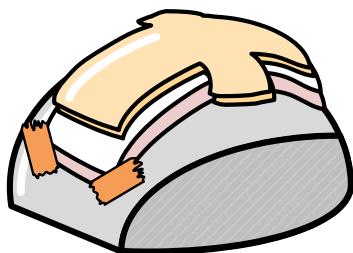
接著，先後將剪好的紅色的 release film 及白色的 peel ply 依序鋪上鋁製模具。



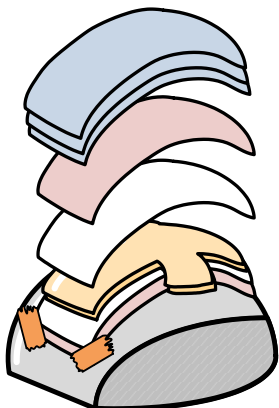
用刷子沾取樹脂，均勻塗抹在玻璃纖維布上。



每塗完兩片玻璃纖維，便將其疊放在一起，並以刮勺單向輕刮以括出多餘的樹脂。

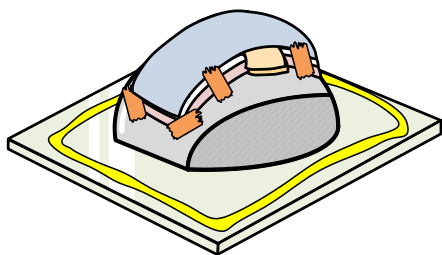


以兩片為單位，放上模具，並以手輕壓撫平。



當所需的玻璃纖維層數都已塗抹完畢，接著在上方在依序鋪上白色的 peel ply、紅色的 release film 及不織布。

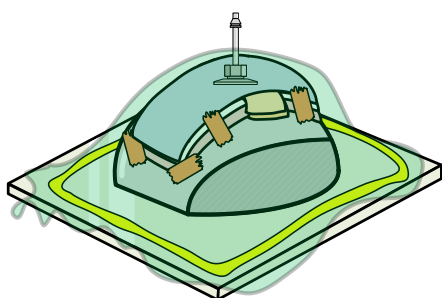
※註：不織布層數為玻璃纖維層數的一半。



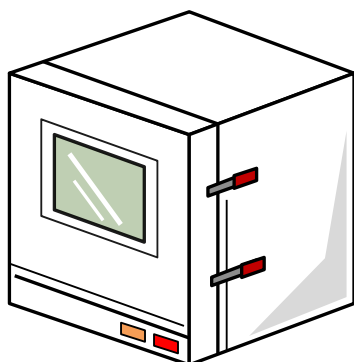
將模具搬到烤箱的玻璃架上，並將氣密封膠帶黏貼在模具四周。



將 vacuum bagging film 鋪在模具上，並與氣密膠帶黏合。



最後，送入烤箱即可。



# ○製作過程



### 3-4 機器人腳的設計

#### ○套筒測試與分析

|           | 外觀                                                                                                           | 討論                                                                                   |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 設計<br>(1) |                             | <b>方法：</b><br>將一壓克力圓筒固定於電磁鐵上，再將其前端加上橡皮套以增加觸地的摩擦力。                                    |
|           |                                                                                                              | <b>測試結果：</b><br>電磁鐵開啟瞬間，無法使球體翻躍，只有些微晃動，並造成外殼的變形。                                     |
|           |                                                                                                              | <b>結論：</b><br>電磁鐵放電時間過短且機器人過重，電磁鐵短暫放出的力量只讓外殼變形，沒有用於翻躍。                               |
| 設計<br>(2) |                            | <b>方法：</b><br>我們將每隻腳的外圍加上彈簧，希望彈簧可以分擔每隻腳所承受的重力，讓電磁鐵出力時，不要受到過大的重力抵抗，改善前一設計的缺點。         |
|           |                                                                                                              | <b>測試結果：</b><br>結果類似前一設計，只是晃動有比前一次劇烈，但仍無法翻躍。                                         |
|           |                                                                                                              | <b>結論：</b><br>雖然此設計有助於電磁鐵出力，不過依然無法克服出力時間過短與機殼重量過重的問題。                                |
| 設計<br>(3) |                           | <b>方法：</b><br>此設計改變電磁鐵出力的方式，將電磁鐵前端改裝上較硬的彈簧，當電磁鐵伸長時壓縮彈簧，將力量先存於彈力位能中再釋放。               |
|           |                                                                                                              | <b>測試結果：</b><br>我們嘗試了各種形狀不同 K 值的彈簧，球體劇烈前後晃動，但仍無法翻躍。                                  |
|           |                                                                                                              | <b>結論：</b><br>此設計有改善施力時間過短的問題，有助於電磁鐵出力，不過當球體想往前翻時，會壓縮到支撐腳的彈簧，因此會抵抗球體往前翻，造成球體前後晃動的情形。 |
| 結論        | 由多次的實驗發現到，無法翻越的主因是因為機殼並非完全的剛體，許多連接點在電磁鐵開啟後，會產生變形而導致沒有足夠的動力使球體翻越。再加上致動器本身進程與失利時間過短的限制，即使我們改變腳的設計，也無法成功使機器人翻越。 |                                                                                      |

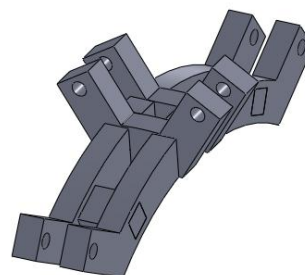


### 3-5 小結

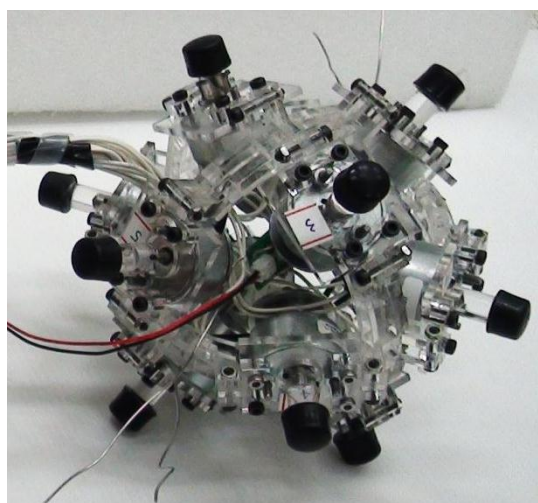
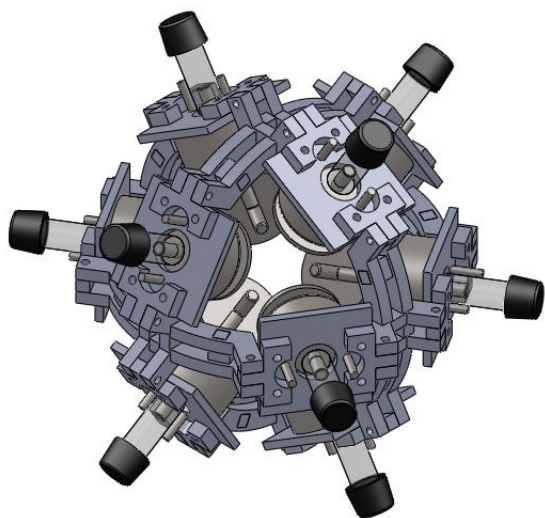
對於之前的測試結果我們歸納出幾個失敗的原因：第一，電磁鐵提供的力雖然大但是為一瞬間力，若在推出的瞬間無法利用爆發力將球體翻越，就算持續供給強大的電壓與電流球體也無法翻越；第二，相較於一個直徑 250mm 的球體，電磁鐵所能提供的進程只有很少的 6mm，因此在啟動腳進程推到最底的情況下對於大球質心的改變量也非常的微小，對於改變位能幫助不大；第三，越大的球體所需要克服的位能越大，再加上考慮電磁鐵的轉換效率加上一些外力的影響，可以推論「球越大翻越成功的機會越小」。

另外，在先前的討論中所提到球殼會將電磁鐵所出的力消耗掉的問題也是失敗的原因之一，基於以上幾點，我們決定製作一個小型的機構，目的在於在現有致動器的限制下來證明我們對於步態控制的想法是正確可行的。

球體將所有的電路板拉到球體外面以一束長線連接球內的電磁鐵，小球的直徑大小設定在 12cm，為電磁鐵縮在進程最短處恰好不會互相干擾的大小，在設計上選用鋼性較高的壓克力作為我們機構的材料，結構的選擇上則保留玻纖的外型，目的在於使球體中心可以保留最大的空間，若使用先前壓克力外型的设计則內部的空間無可避免的有將不同零件固定在一起的結構而干擾電磁鐵的安置使得球體縮減的有限。在模仿的結構中可以看到在四邊有凸起，若不如此會因為球體 size 太小而造成形狀的短邊太短而無法固定，結構也因為是壓克力切割的關係而需要支撐柱將結構撐起，模仿結構與固定電磁鐵的平面之間，則用一 T 字形的壓克力形狀(圖右圖所示)做為聯結，方便電磁鐵的拆卸與組裝。



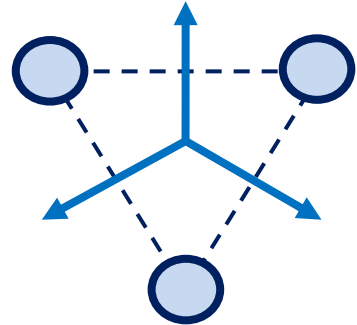
#### ○成品



## 四、步態規劃與程式設計

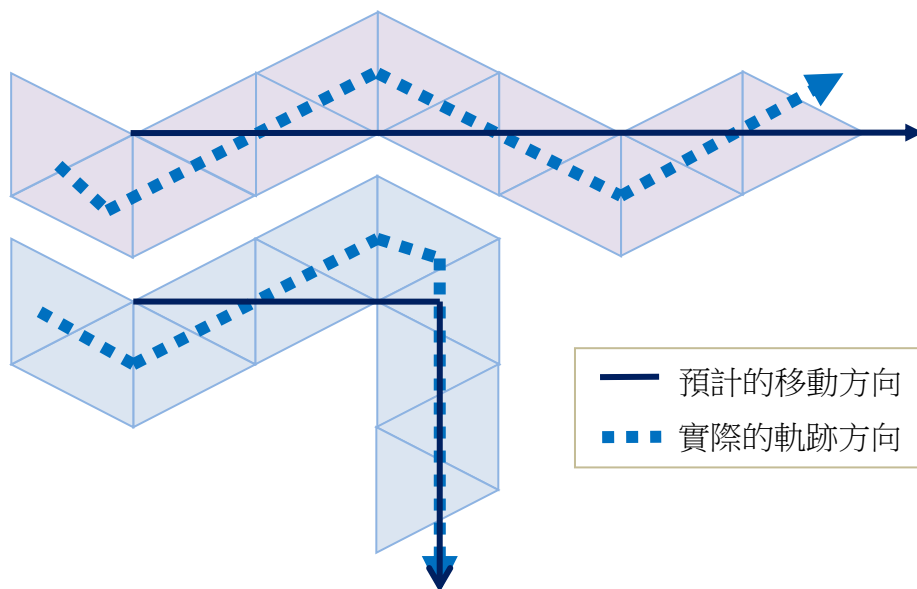
### 4-1 二十面體的步態分析與規劃

在球體靜止的狀態下或是步伐與步伐之間總是會以三個電磁鐵末端觸地的方式使球站立，每次移動時則啟動三隻電磁鐵中的一隻施與推力並以另外兩隻電磁鐵為支點，故每次可以移動的方向僅有三個，因此在控制球體移動的方向時就必須以三個方向來做合成。

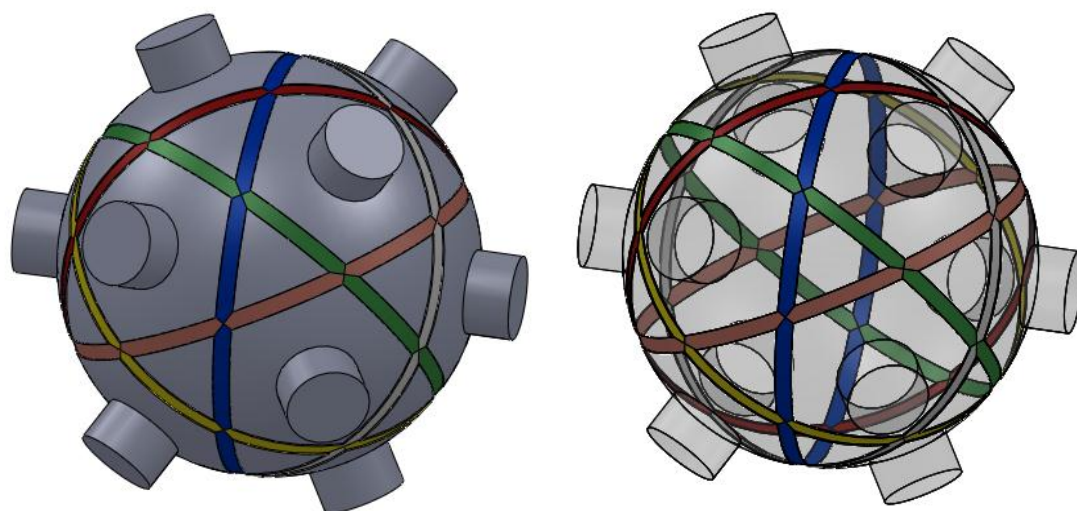


上述也曾提到在移動時須等到多面體的組成面與平地平行後才會再進行下一步的動作，所以在移動的姿態上來說每一步之間會顯得有些不連續，同時移動是三個方向合成前後左右的關係因此在移動上會有一些先天的限制，如：在某一方向上的移動軌跡並不與移動的方向相同，或是距離方面的解析度不好，每次移動的最小距離被底部三角型的大小所限制有可能使某些位置點到達不了等等。

步態規劃中最基本的就是直線路徑，因此在規劃軟球機器人行走時便以行走直線為優先考慮，如果知道平行於地面的平面包含哪三個致動電磁鐵以及依照特定的啟動順序就可以以三個方向合成出「預計的移動方向」與「軌跡方向」相同的直線路徑。



# ○路徑示意圖與剖視圖



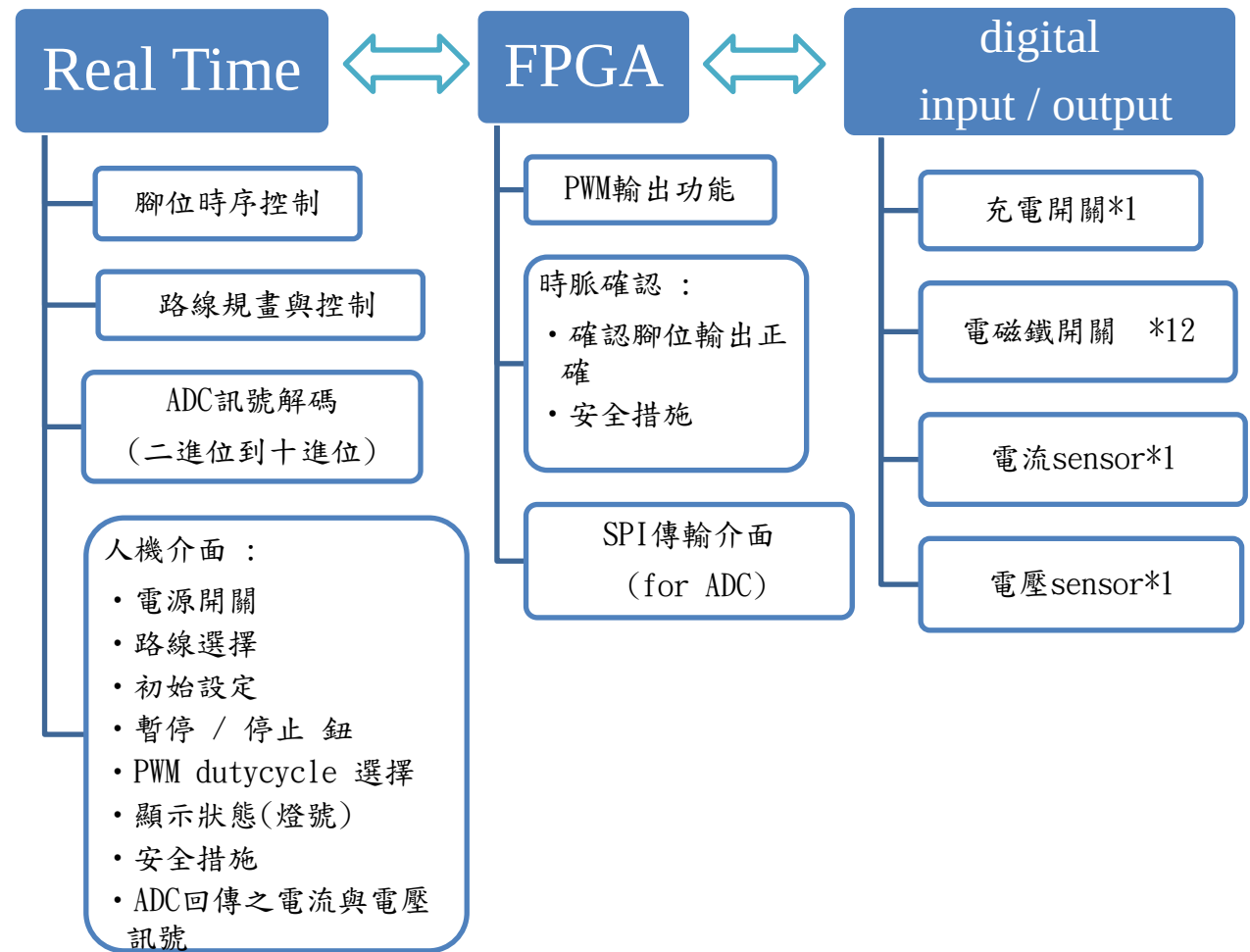
在 20 個組合面中總共可以合成出 6 條這樣的路徑(紅、藍、綠、白、黃、橘)，另外，在每一個組合面中都有 3 條這樣的路徑可以選擇，雖然只要知道與地面接觸的三隻電磁鐵是哪幾個編號就能用來更換路徑但使用上並不直觀，目前因為沒有在每一個電磁鐵的末端安裝 sensor，故我們的機器沒有 feedback 回來的訊號產生，不能直接控制球的方向，因此測試階段中我們都是將已經在程式中排序好的 6 條路徑獨立使用。

# ○腳的順序與路徑表

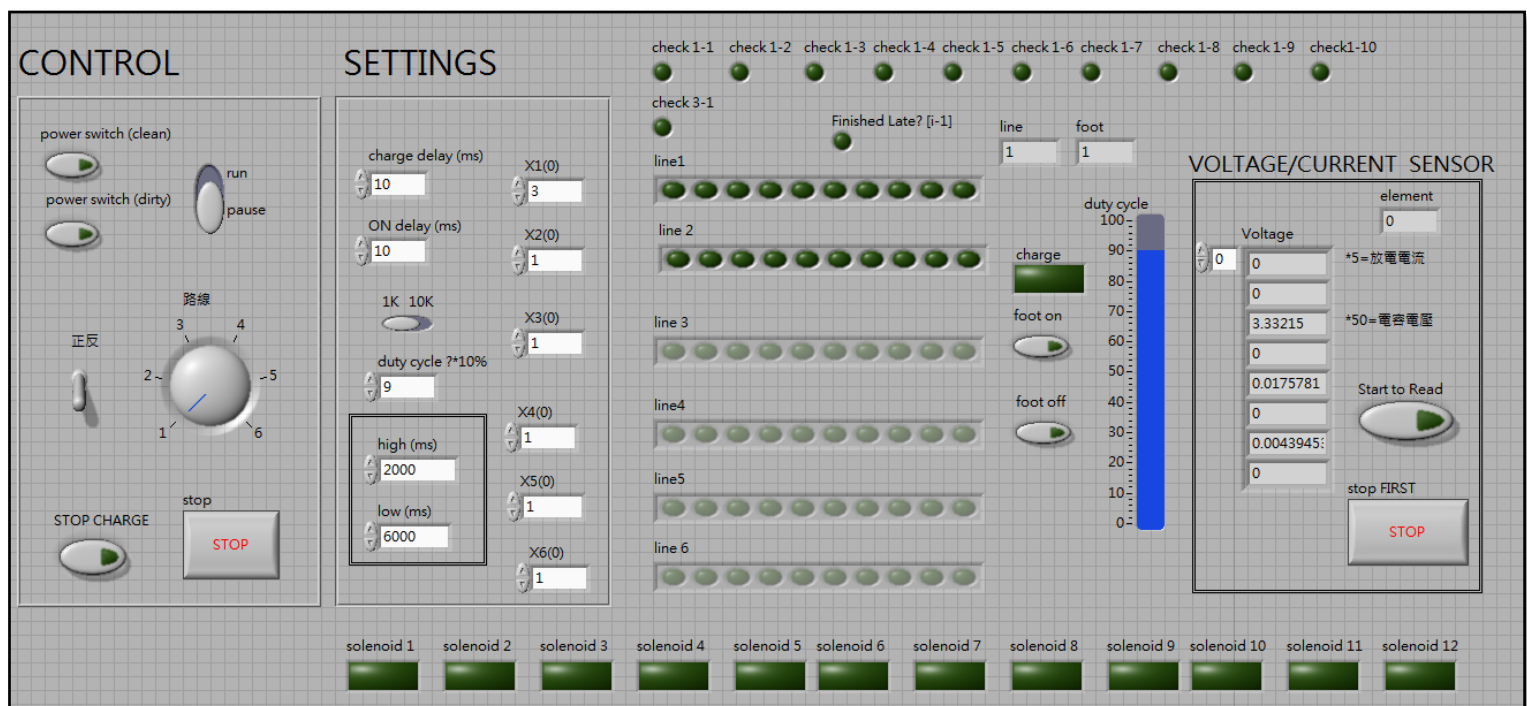
| 路徑 | 順序 |    |   |    |    |   |    |   |    |    |
|----|----|----|---|----|----|---|----|---|----|----|
| 紅  | 1  | 2  | 3 | 4  | 5  | 6 | 7  | 8 | 9  | 10 |
| 藍  | 1  | 3  | 2 | 4  | 11 | 6 | 8  | 7 | 9  | 12 |
| 綠  | 2  | 1  | 3 | 12 | 5  | 7 | 6  | 8 | 11 | 10 |
| 白  | 2  | 4  | 3 | 5  | 12 | 7 | 9  | 8 | 10 | 11 |
| 黃  | 1  | 10 | 2 | 11 | 4  | 6 | 5  | 7 | 12 | 9  |
| 橘  | 1  | 12 | 3 | 5  | 4  | 6 | 11 | 8 | 10 | 9  |

## 4-2 LabVIEW 程式設計

### 4-2-1 LabVIEW 程式架構



### 4-2-2 RT 人機介面



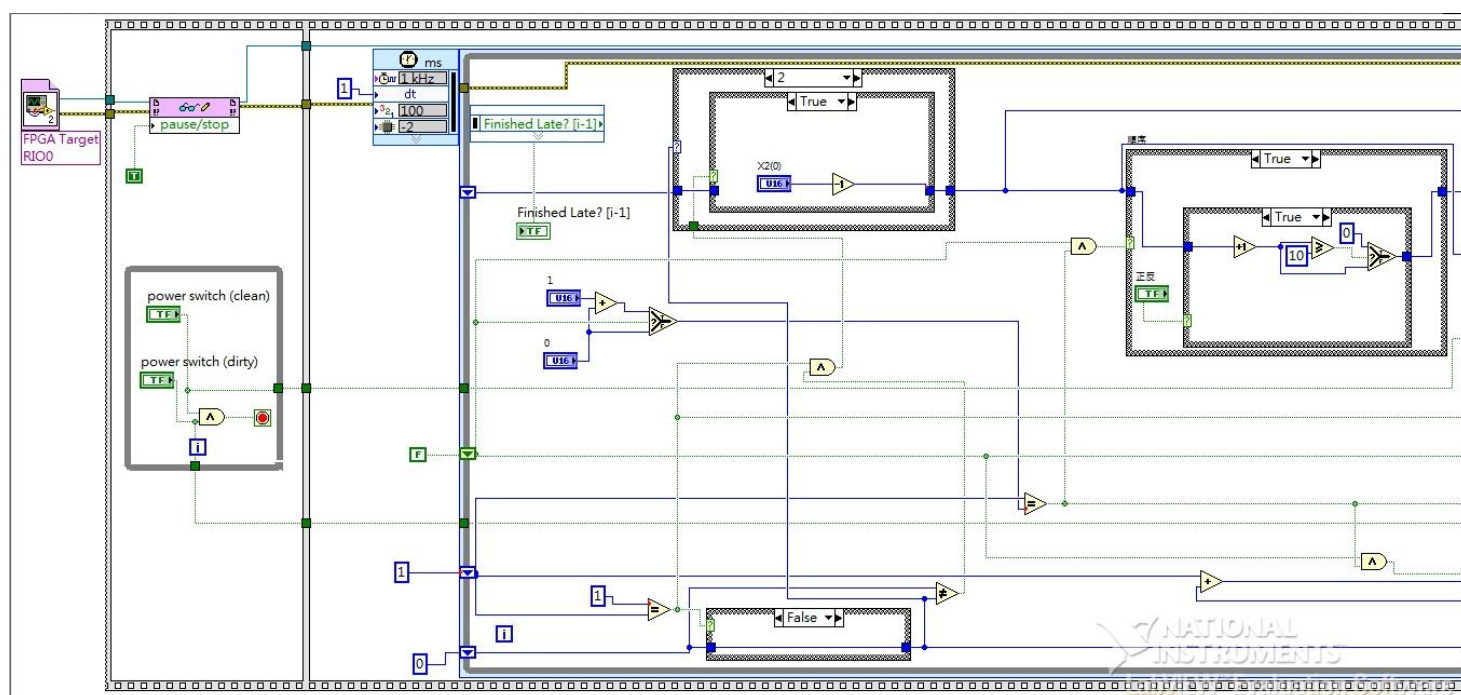


## 1. 各介面功能

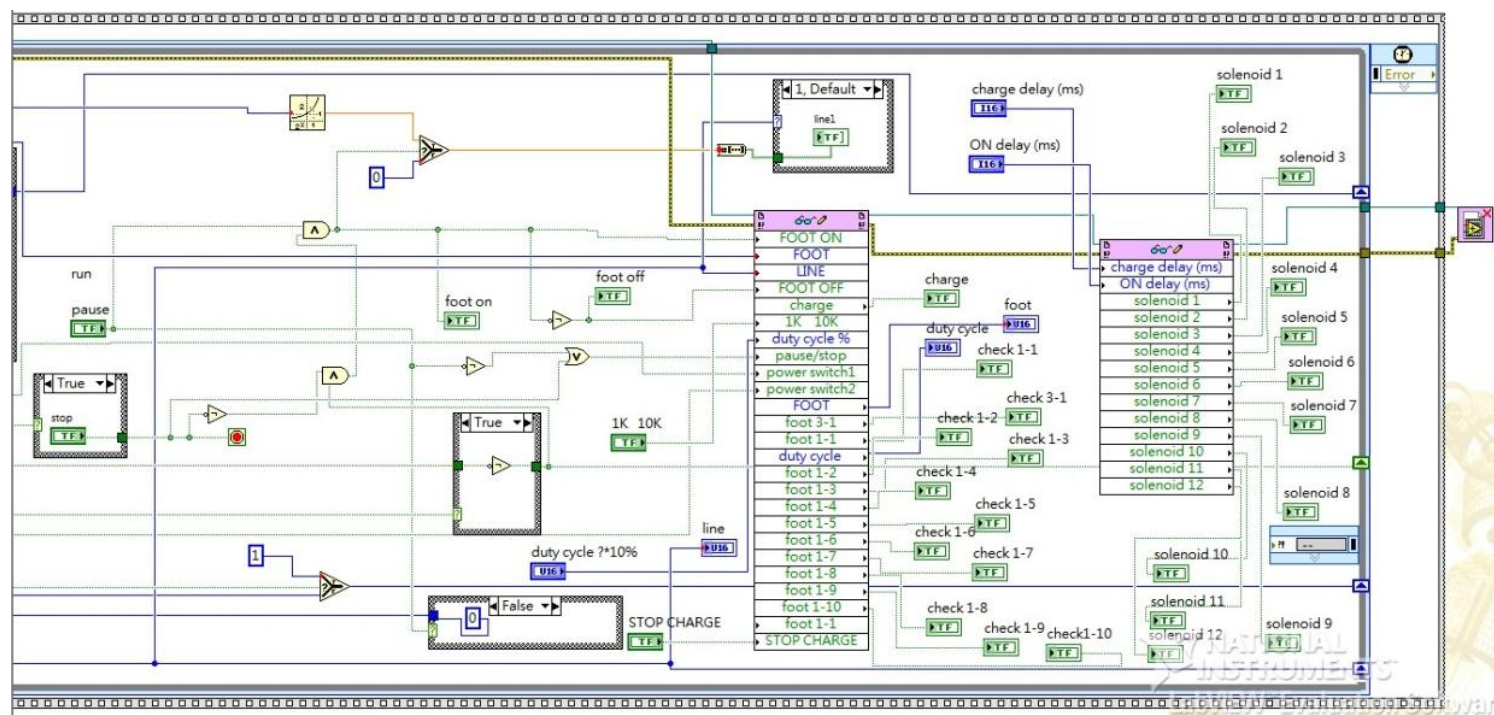
| 「CONRTAL」                                                  | 「SETTINGS」                                                                             | 「VOLTAGE/CURRENT SENSOR」                                             | 其他為「顯示介面」                |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1. 電源開關。<br>2. 啟動/暫停/停止。<br>3. 路線選取。<br>4. 「不充電」按鈕 (安全措施)。 | 1. 電磁鐵啟動與關閉(充電)的時間。<br>2. PWM 功能的 duty cycle。<br>3. PWM 功能頻率 (1k or 10k)。<br>4. 起始腳設定。 | 1. 放電電流訊號經 ADC 後的讀值。<br>2. 電容充電電壓訊號經 ADC 後的讀值。<br>3. 開始/停止量測 ADC 訊號。 | 顯示機器人目前狀態。如：充電、腳位、步態……等。 |

## 2. RT 程式碼

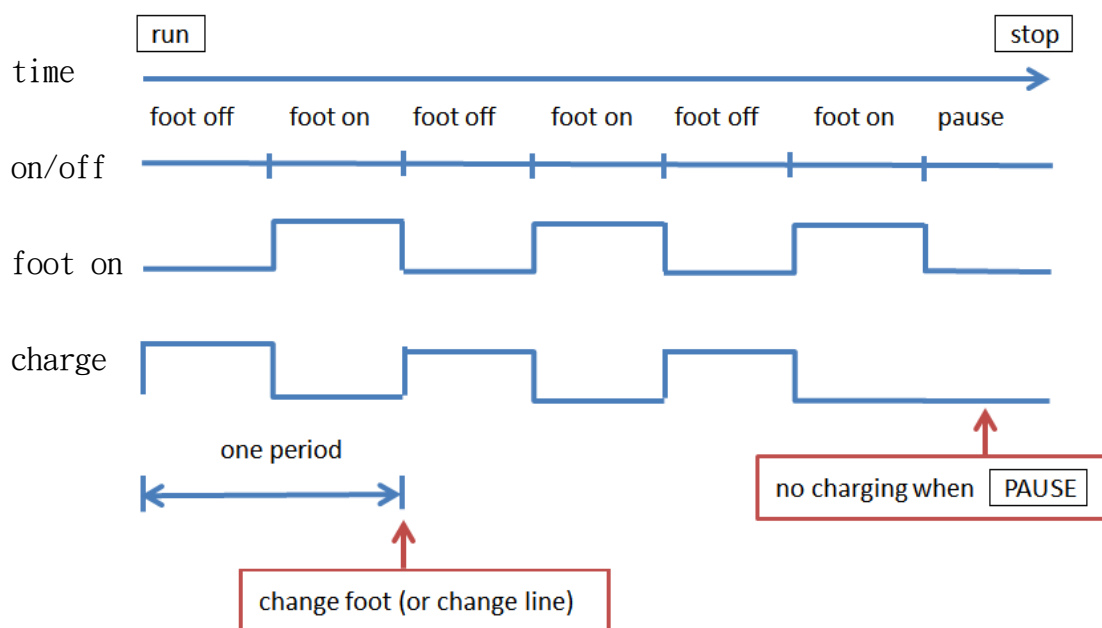
### ○ RT 主程式碼(左半)



### ○ RT 主程式碼(右半)



### 3. RT 主程式架構

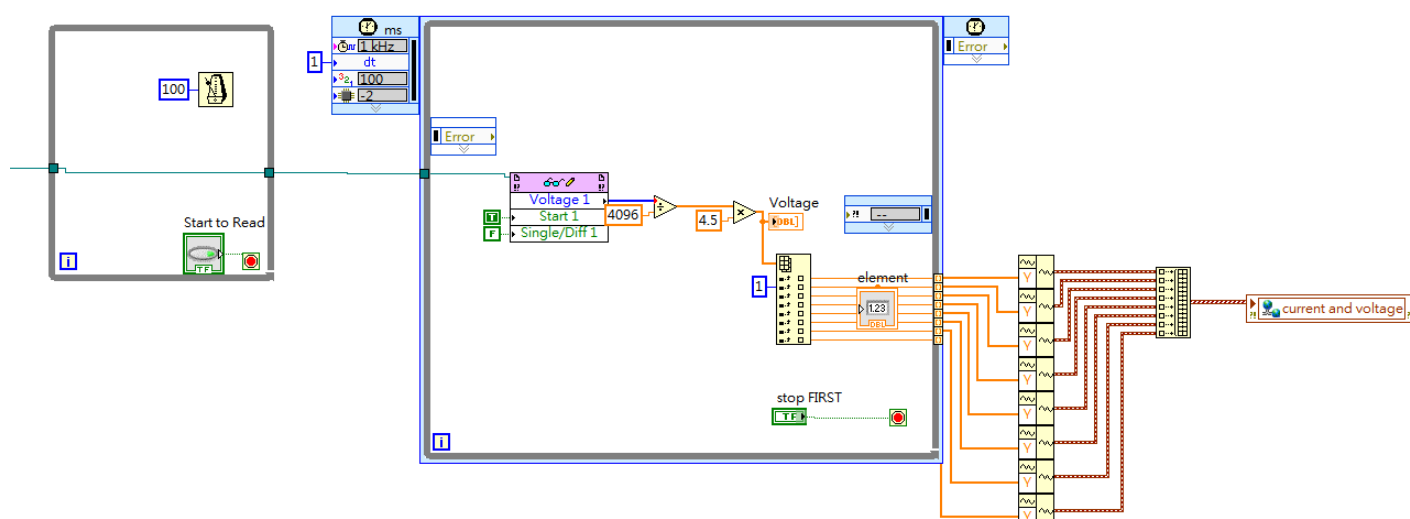


上圖為 RT 端程式的架構圖。程式的主架構就是利用一「時間軸」來控制電磁鐵的開與關，當電磁鐵關閉時，升壓電路會進行充電，當電磁鐵開啟時，電路停止充電並且使控制電磁鐵的 MOS 開關打開，如此依序地開啟每一個電磁鐵，並且在一個開關週期後，判斷是否有更換路線的指令。

程式的最左邊為電源的開關，當開關開啟後就會開始執行主程式。程式中設有「暫停」的功能，方法就是將程式的時間軸停止，而「STOP」鈕為了安全考量，會在一個電磁鐵開關週期完成後，即電磁鐵放完電後才會被觸發。另外，還有一「STOP CHARGE」鈕，當機器人出現問題時，可按此鈕停止升壓電路(180V)的充電，以策安全。

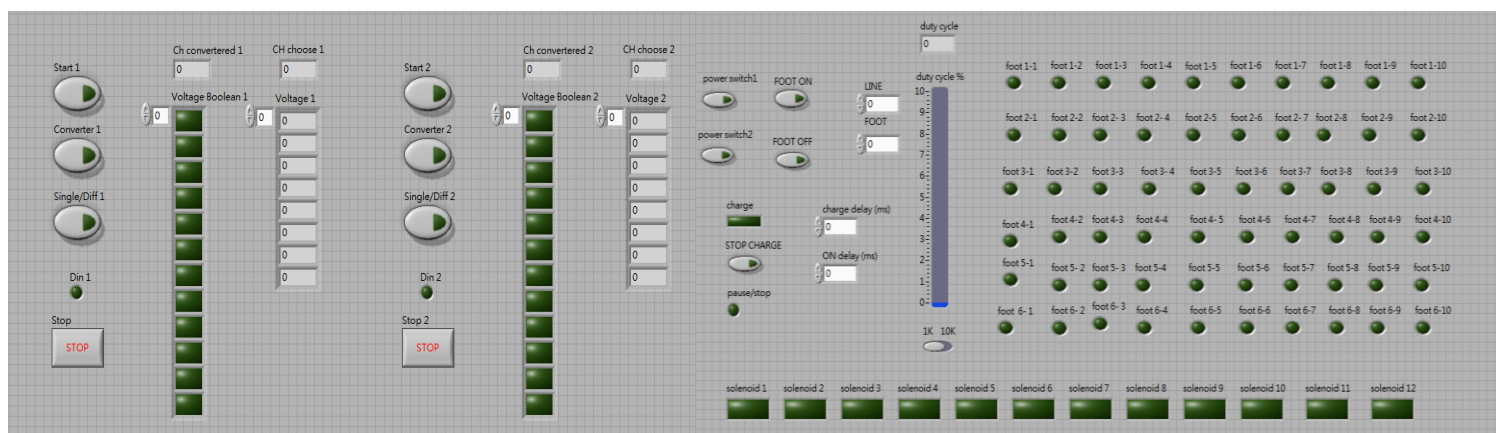
### 4. ADC 訊號的讀取

此部分將 FPGA 讀到 ADC 的二進位訊號進行解碼，轉換成十進位。



## 4-2-3 FPGA 介面

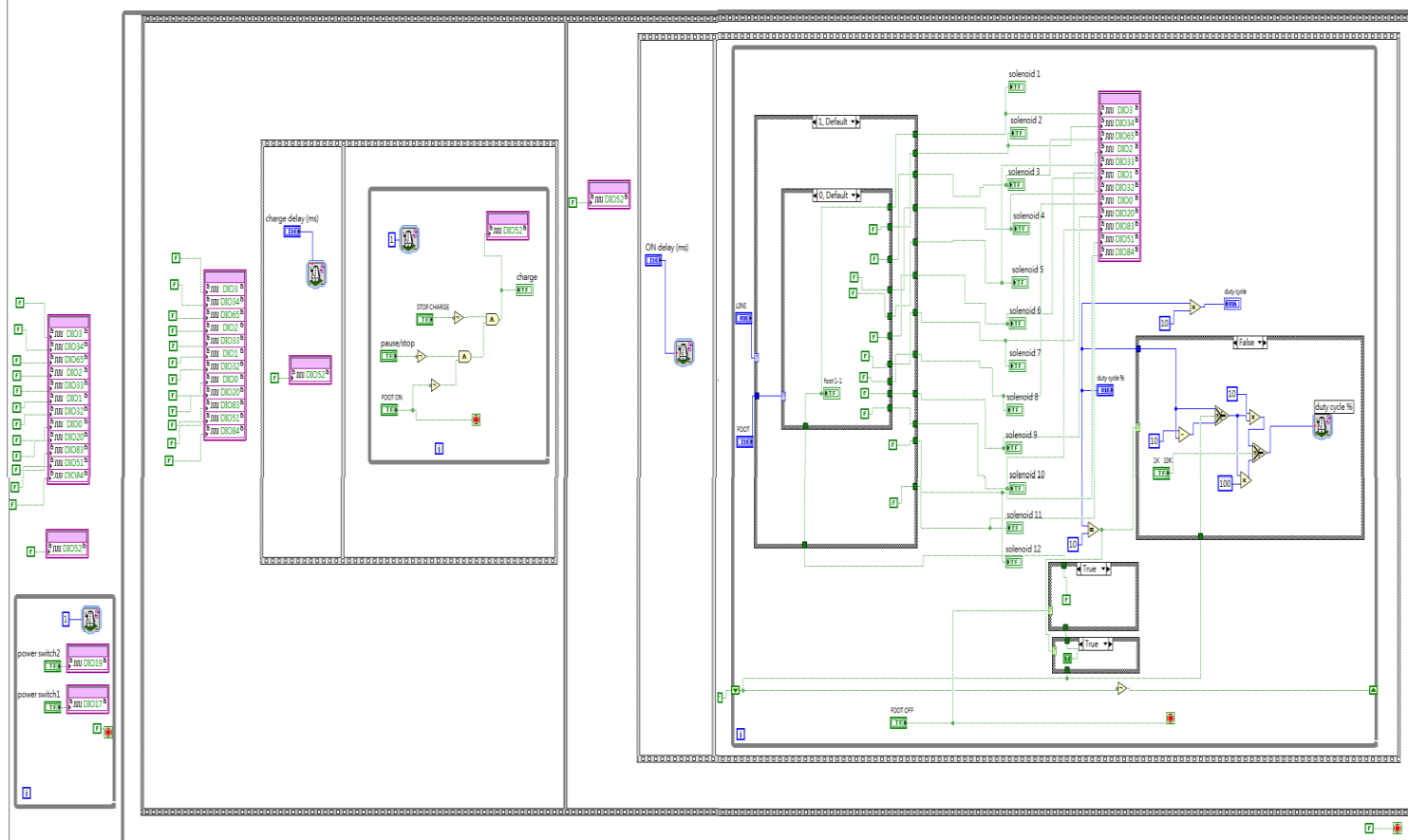
### 1. FPGA 功能



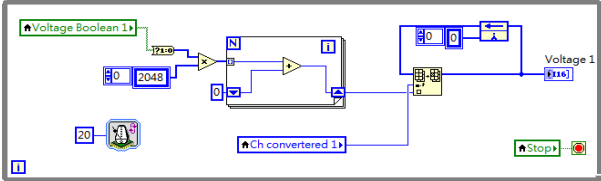
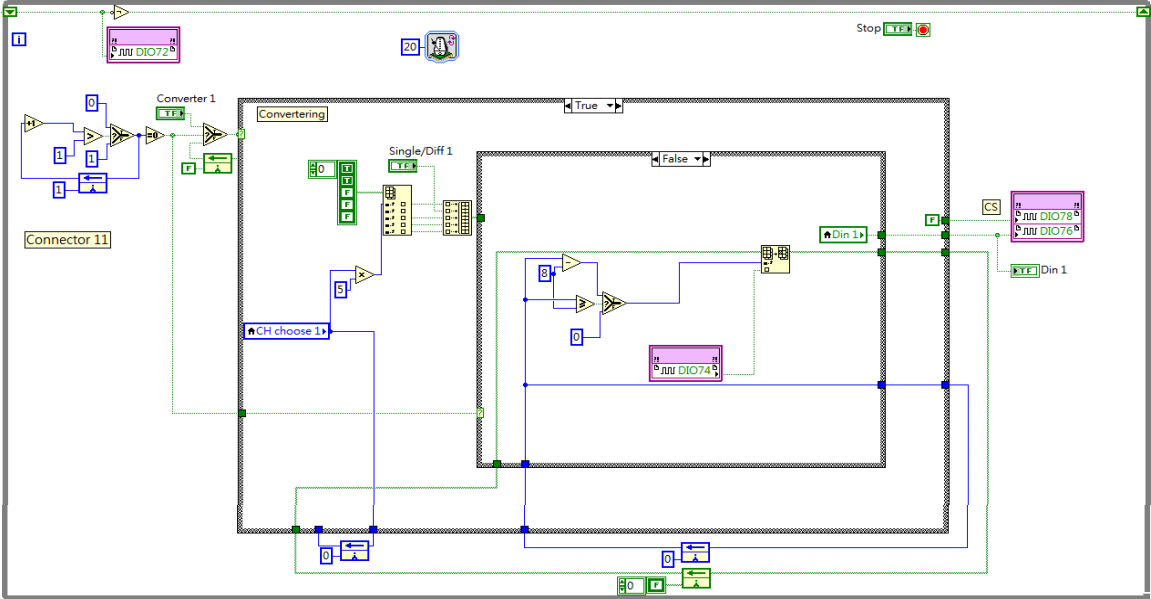
FPGA 程式方面，因為 FPGA 的運算速度較快，所以將「PWM」功能寫於此處。PWM 功能是希望我們能夠藉由調整 PWM 的「duty cycle」，來控制電磁鐵的出力的大小。另外，PWM 的頻率有 1k 及 10k 可選擇。另外，FPGA 寫有 SPI 通訊與 ADC 溝通。

### 2. FPGA 程式碼

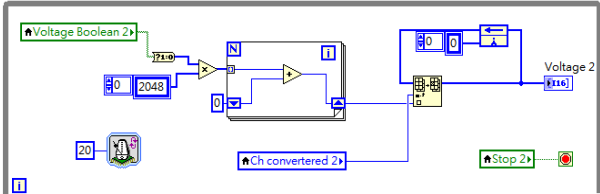
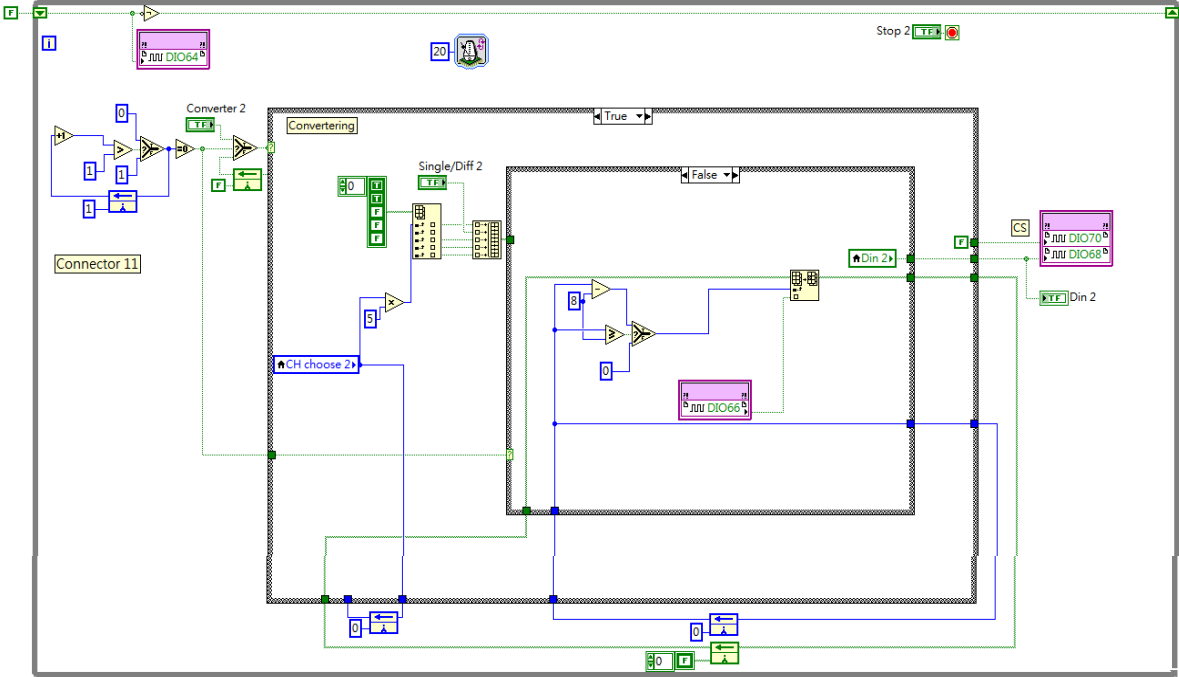
#### ○FPGA 主程式碼（控制 PWM 與充電）



## ADC 1 SPI 傳輸 (for ADC)



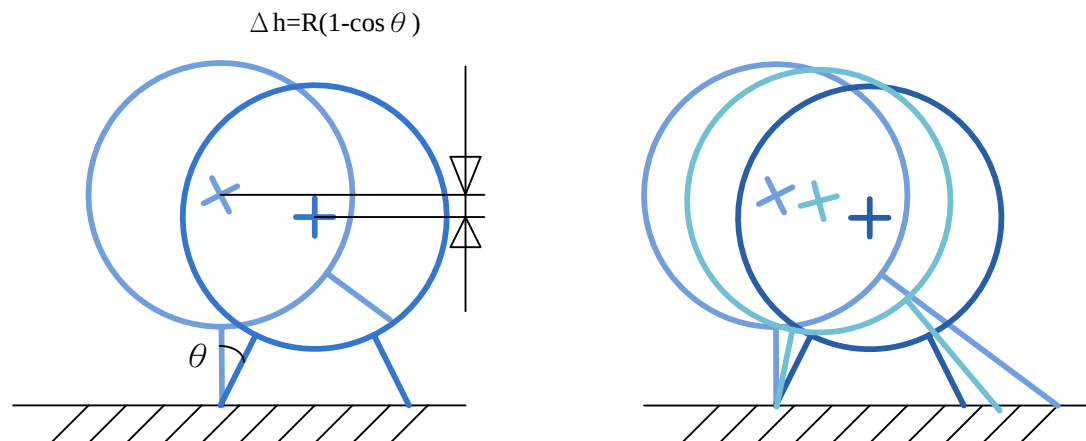
## ADC 2



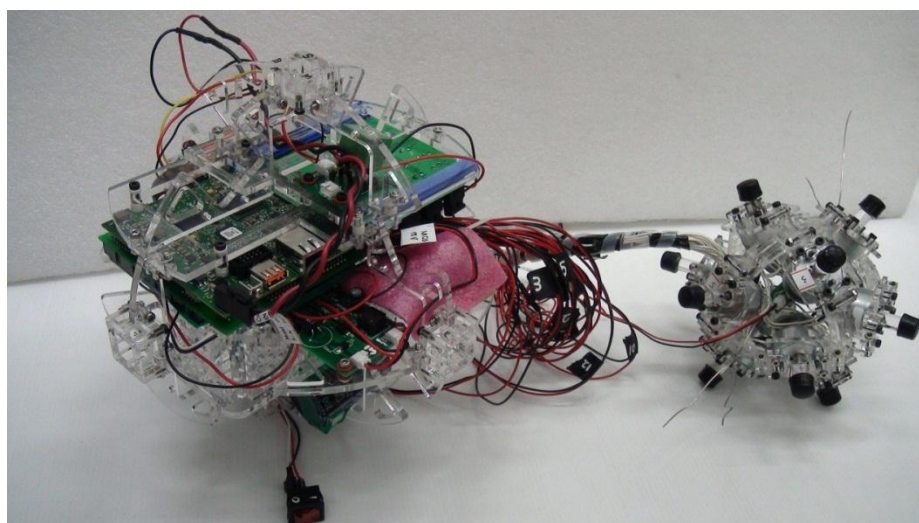


## 伍、 結果呈現

### 一、概述



對於使一個球體翻動首要克服的便是其重力位能，而重力位能  $U = mg(\Delta h)$  之中高度的改變量則是與球的半徑與電磁鐵之伸長量有關，由左上圖  $\Delta h = R(1 - \cos \theta)$  可表示球體半徑與質心上升高度的關係，而因為電磁鐵與球體的夾角是結構上的限制所以所需克服最低位能的夾角以被固定，因此若球體的半徑越小所需克服的位能便越小，另外，由右上圖所示若電磁鐵的進程越大越可以幫助球體質心推到所要的高度，綜合以上兩點我們可以發現只要將球體做小不但球的半徑  $R$  可以變小，另一方面雖然我們無法改變市售電磁鐵進程的長度但只要球體  $R$  值變小進程相對的伸長量就會變大。



上圖為我們設計的小型機構，將球機器人的機電系統放置在外，目的在於在現有致動器的限制下來證明我們對於步態控制的想法是正確可行的，以下皆為球機器人的實驗結果。

## 二、致動器的一致性實驗

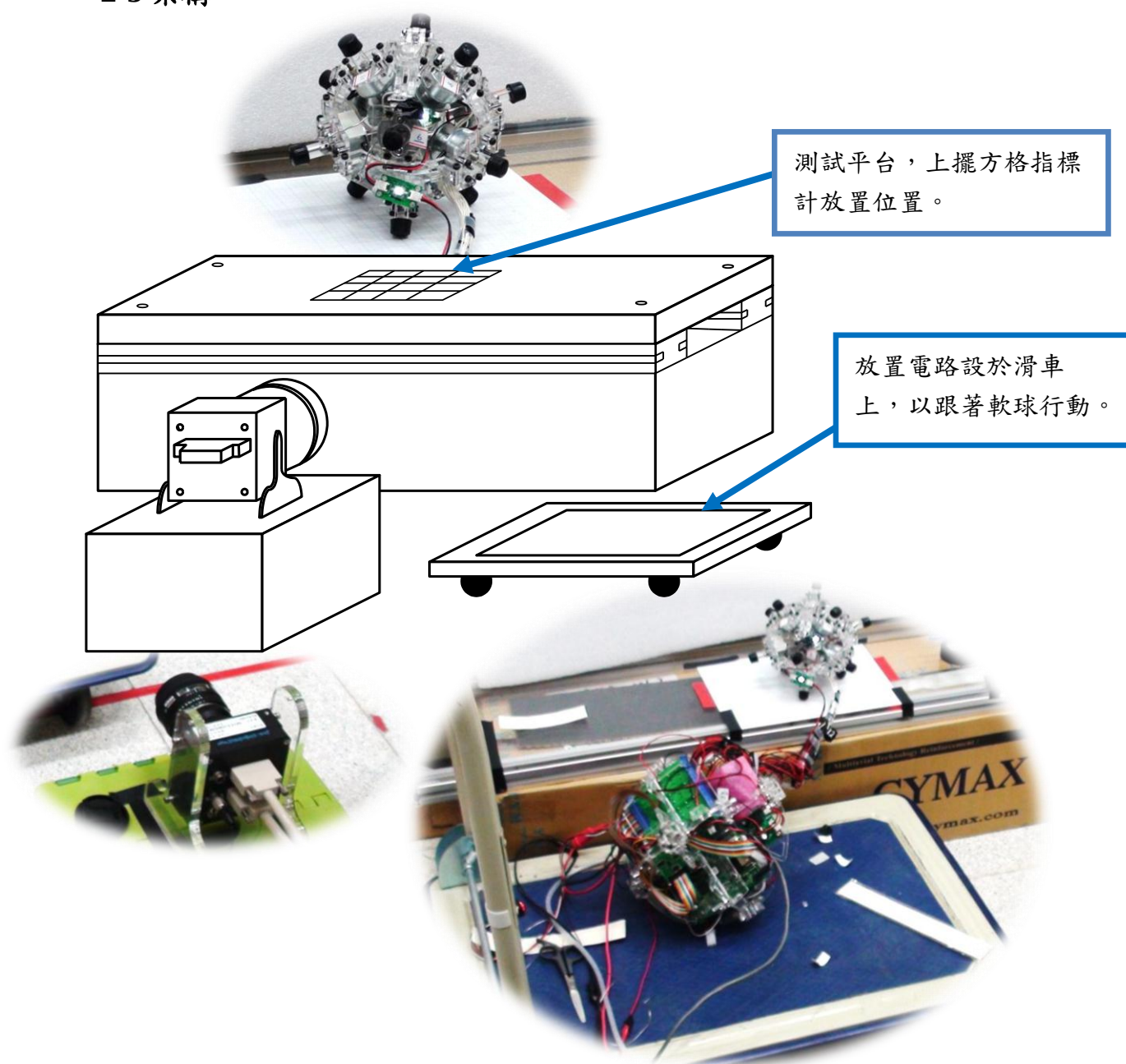
### 2-1 實驗目的

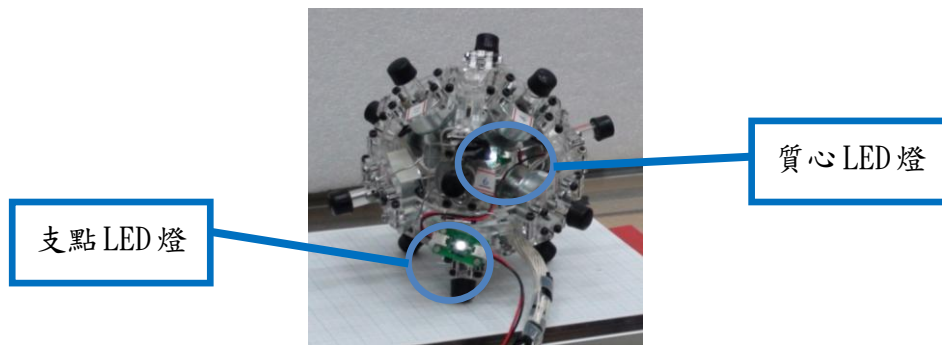
分別測試軟球十二隻電磁鐵觀測其運動軌跡曲線，期望每一隻不同的電磁鐵對於軟球姿態的影響皆相同，以高的重複性來達到在控制上的穩定性。

### 2-2 設備

電源供應器、高速攝影機、image J 軟體、方格紙、滑車、測試平台、高亮度 LED 燈、鐵絲、魔鬼氈。

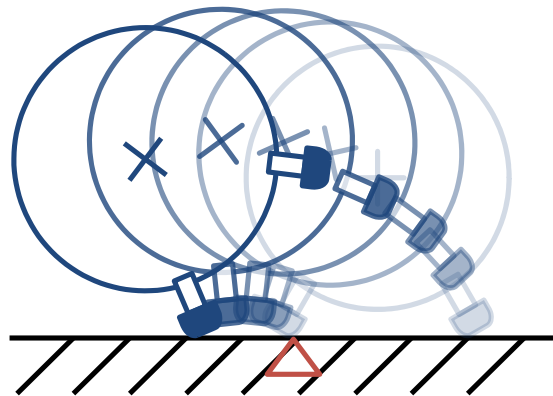
### 2-3 架構



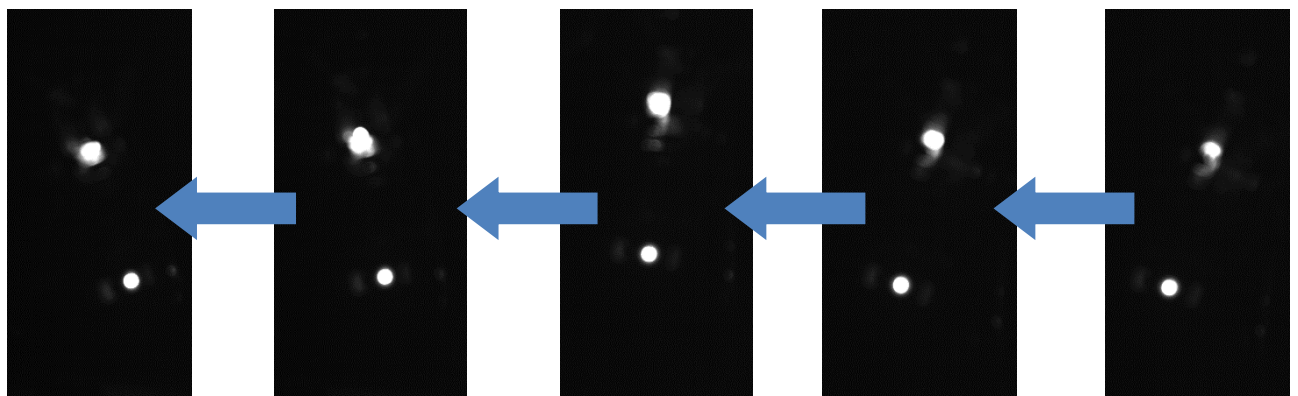


## 2-4 步驟

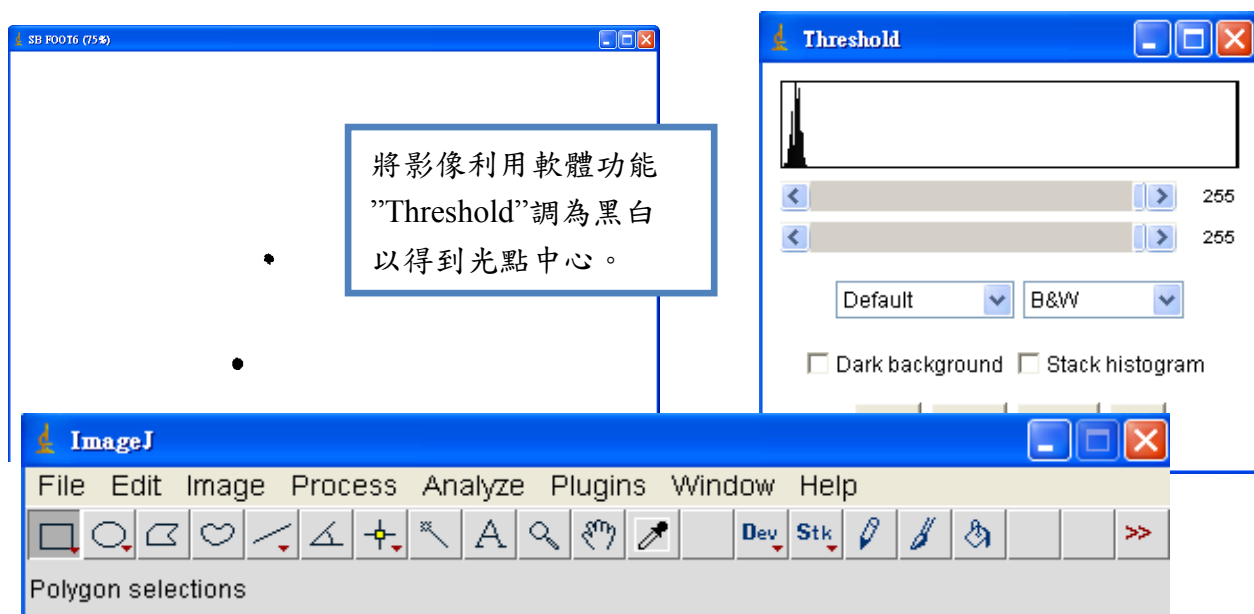
1. 將方格紙固定在測試平台上並標記腳位放置位置。
2. 利用鐵絲與魔鬼粘將 LED 固定在球體質心及支點角位的上方。
3. 關閉室內光源，開啟電源供應器提供高亮度 LED 燈運作。
4. 啟動攝影系統並調整高速攝影機焦距。
5. 預錄一測試影片，檢查程式中 LED 燈是否明顯，並以手動的方式翻滾球體以觀察整個翻滾過程中 LED 燈是否會被球體結構遮住或是否有出現被壓克力折射出來多餘的光點，調整 LED 的位置以及用黑色膠布將多餘的光點遮住。
6. 正式啟動錄影程式以及球體的驅動程式，讓球「走一步」，並以每秒 250 張的拍攝速度來拍攝球體光源的移動。



高速攝影機照出的順序圖如下：



7. 由腳位一到腳位十二重複上述步驟。
8. 將拍攝的照片輸出並把多餘的照片刪除。
9. 利用軟體 Image J 對拍攝的影像作後處理，標示出每張影像的質心和支點的座標。



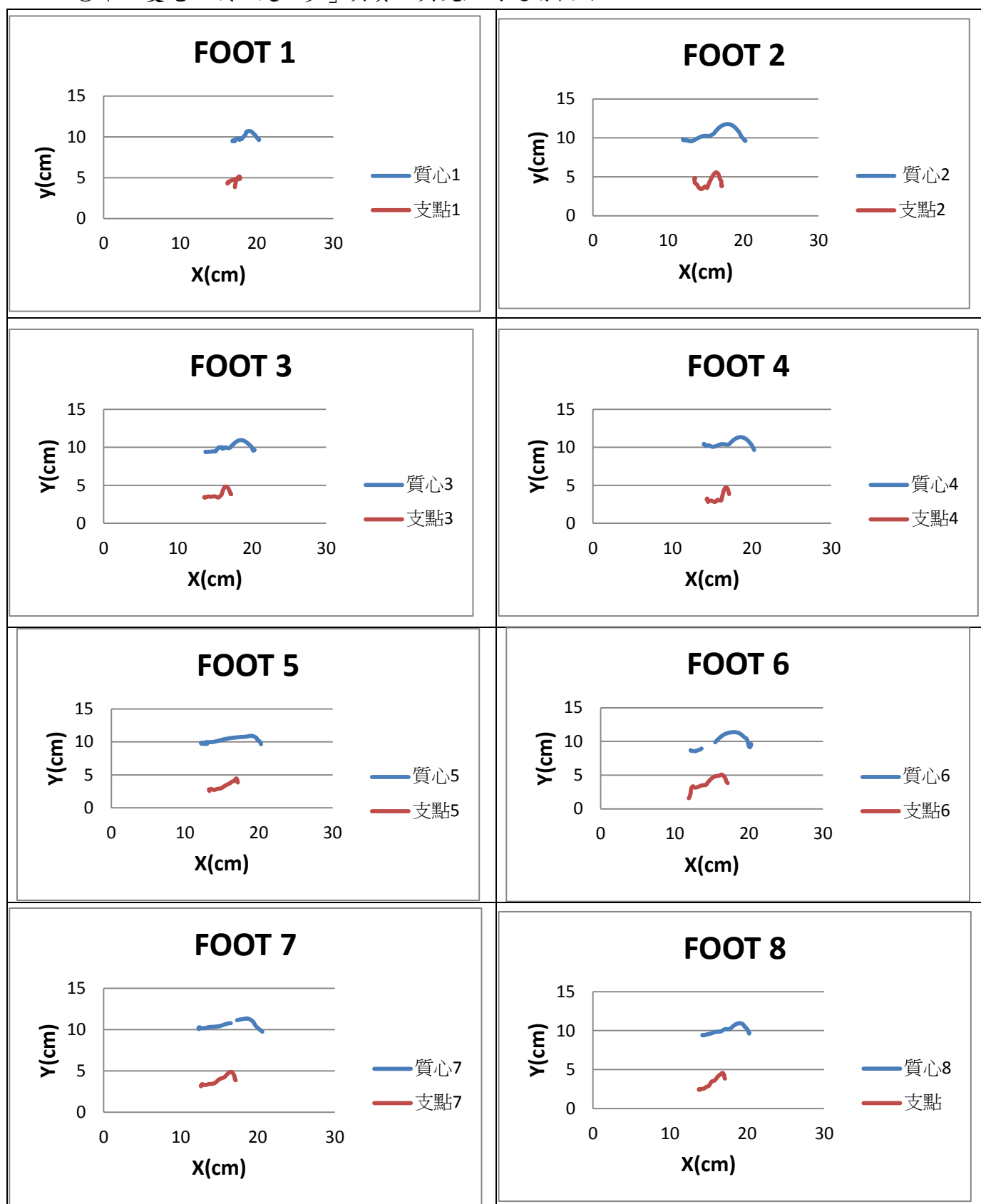
10. 匯入 Excel 作分析運算與後處理。

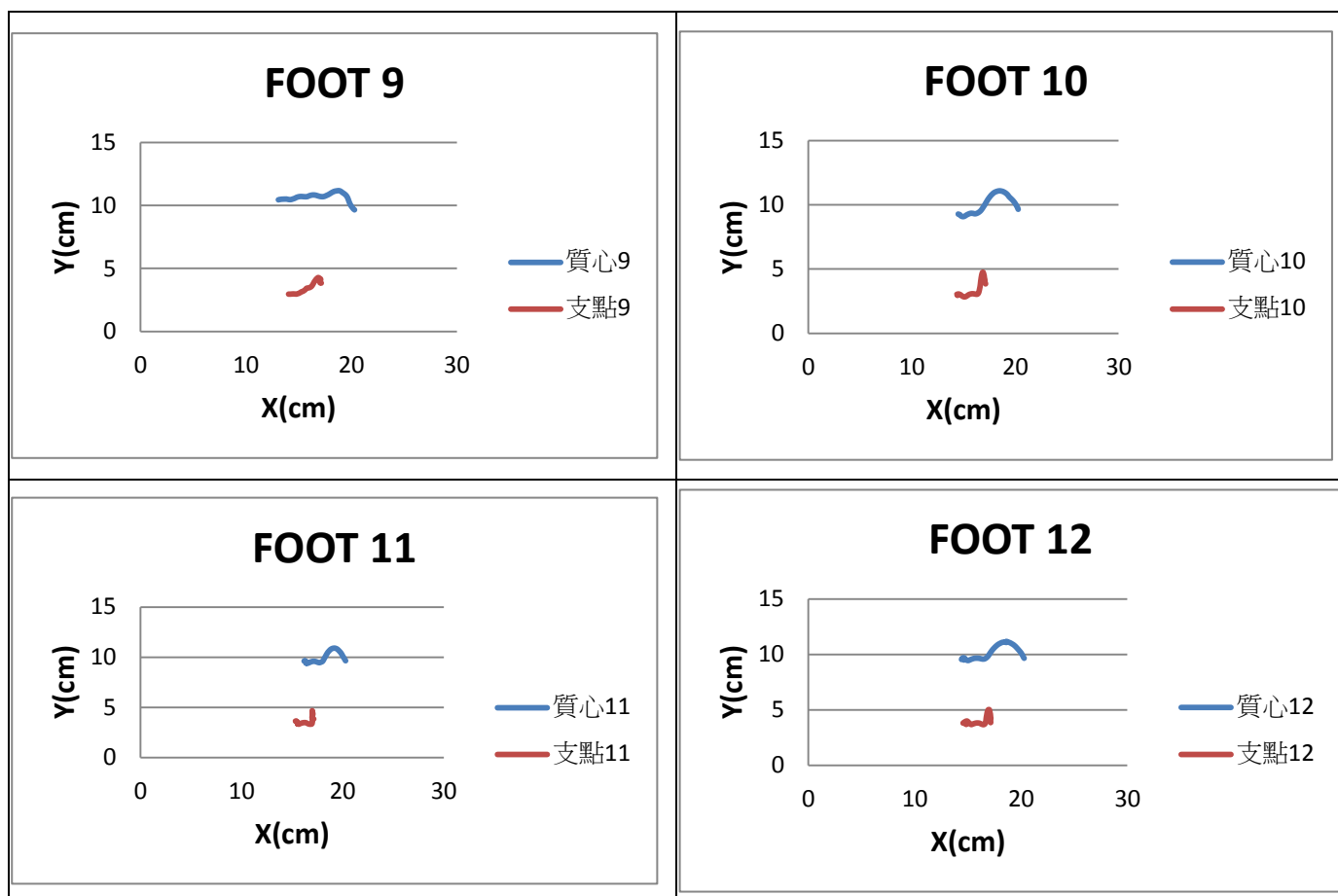
|    | A            | B            | C            | D           | E            | F            | G           | H           |
|----|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| 1  | 質心X位置(pixel) | 質心Y位置(pixel) | 質心X位置(pixel) | 質心Y位置(cm)   | 支點X位置(pixel) | 支點Y位置(pixel) | 支點X位置(cm)   | 支點Y位置(cm)   |
| 2  | 726.093      | 295.907      | 20.28149548  | 9.648932817 | 609.5        | 357.3        | 17.14341085 | 3.843669251 |
| 3  | 725.7111     | 296.2889     | 20.27288307  | 9.649008398 | 609.178      | 357.14404    | 17.13301034 | 3.838631783 |
| 4  | 725.44446    | 296.55554    | 20.25552326  | 9.649008398 | 608.95       | 357.13336    | 17.12564599 | 3.838286822 |
| 5  | 724.907      | 297.093      | 20.2442345   | 9.654942829 | 608.6803     | 357.15576    | 17.11693475 | 3.839010336 |
| 6  | 724.5575     | 297.4425     | 20.22622739  | 9.655542636 | 608.178      | 357.14404    | 17.10071059 | 3.838631783 |
| 7  | 724          | 298          | 20.20972674  | 9.65869832  | 607.95       | 357.13336    | 17.09334625 | 3.838286822 |
| 8  | 723.48914    | 298.51086    | 20.1864874   | 9.668178295 | 607.5492     | 357.2541     | 17.08040052 | 3.842186693 |
| 9  | 722.76965    | 299.23035    | 20.17356492  | 9.670130491 | 606.95       | 357.13336    | 17.06104651 | 3.838286822 |
| 10 | 722.36957    | 299.63043    | 20.14727196  | 9.676603682 | 606.5806     | 357.19354    | 17.04911499 | 3.84023062  |
| 11 | 721.55554    | 300.44446    | 20.12632429  | 9.682743863 | 605.9068     | 357.0593     | 17.02735142 | 3.835894703 |
| 12 | 720.907      | 301.093      | 20.09869832  | 9.687242571 | 605.4365     | 357.0238     | 17.01216085 | 3.834748062 |
| 13 | 720.0517     | 301.9483     | 20.07289406  | 9.690069444 | 604.8333     | 357.0333     | 16.99267765 | 3.83505491  |
| 14 | 719.2528     | 302.7472     | 20.04609496  | 9.696623385 | 604.05       | 356.7833     | 16.96737726 | 3.826979974 |
| 15 | 718.4231     | 303.5769     | 20.01379522  | 9.704663114 | 603.4516     | 356.7742     | 16.9480491  | 3.826686047 |
| 16 | 717.4231     | 304.5769     | 19.98039083  | 9.708212532 | 602.5161     | 356.6613     | 16.91783269 | 3.823039406 |
| 17 | 716.3889     | 305.6111     | 19.94388243  | 9.716119832 | 601.5328     | 356.5984     | 16.88607235 | 3.821007752 |
| 18 | 715.2586     | 306.7414     | 19.90268572  | 9.724968669 | 600.5968     | 356.5806     | 16.85583979 | 3.820432817 |
| 19 | 713.98315    | 308.01685    | 19.85864244  | 9.732552649 | 599.5635     | 356.51587    | 16.82246447 | 3.818342054 |
| 20 | 712.61957    | 309.38043    | 19.8119551   | 9.74471447  | 598.43445    | 356.4836     | 16.78599645 | 3.817299742 |
| 21 | 711.17413    | 310.82587    | 19.75753036  | 9.754690568 | 597.12714    | 356.21185    | 16.74377067 | 3.808522287 |
| 22 | 709.48914    | 312.51086    | 19.69714373  | 9.765077519 | 595.6475     | 356.18854    | 16.69597868 | 3.80776938  |
| 23 | 707.61957    | 314.38043    | 19.63350775  | 9.777014212 | 593.9828     | 356.0517     | 16.6422093  | 3.803349483 |
| 24 | 705.6494     | 316.3506     | 19.55986983  | 9.787340439 | 592.38525    | 355.7295     | 16.59060885 | 3.792942506 |



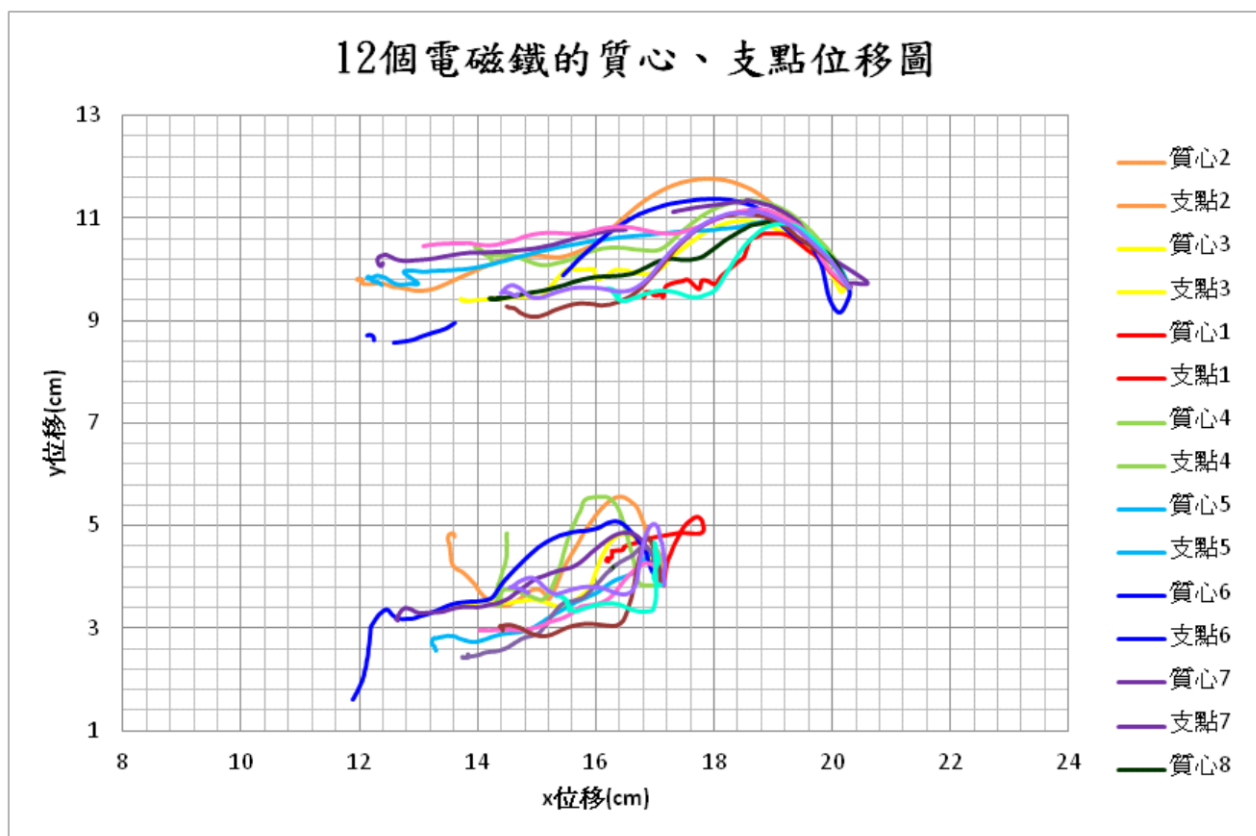
## 2-5 結果

○十二隻電磁鐵「走一步」其質心與支點的運動軌跡





○十二支電磁鐵分別走一步的質心和支點運動軌跡疊加圖



由上圖結果可發現，質心運動曲線大致上分成前半段近似半圓弧線及後半段小波浪型曲線。前半段半圓弧曲線為電磁鐵作動將球體往上推送，期間球體獲得動能翻越至高點，並有出現「飛躍」的現象發生，球體完全離開地面，在空中短暫飛行後落下。由於落下力道很大，所以在最後形成數次的彈跳而呈現出曲線上波浪狀的運動軌跡。

將十二支電磁鐵產生之運動軌跡疊加後可以看出整體球形機器人每次運動的重複性，大致上來說，前半段電磁鐵往上推送的部分，十二支電磁鐵的曲線幾乎是完美重合的，一直到半圓弧曲線後半段，球體升到最高點至下落碰地的部分，開始出現部分差異，原因可能是各支電磁鐵腳套筒加工並非完全雷同所導致。當到了後半段波浪型曲線也就是第一次落地碰撞後，各支電磁鐵曲線差異非常大，推測應為各支腳落地碰撞變因不一樣才產生這結果。

雖然後半段曲線呈現極大差異，但未來在連續運動中各腳將在前腳第一次落地後按照順序啟動，所以後半段彈跳的情況將不會發生，而前半段圓弧曲線呈現的一致性，可以使球形機器人穩定的前進。

### 三、DUTY CYCLE 實驗

#### 3-1 目的

觀察由單一隻電磁鐵在不同的放電 Duty cycle 下放出不同的能量對於軟球姿態表現上的影響，藉不同 Duty cycle 下不同的運動軌跡來觀察能量與運動的關係，並同時求出表現最適合的 Duty cycle。

#### 3-2 設備與架構

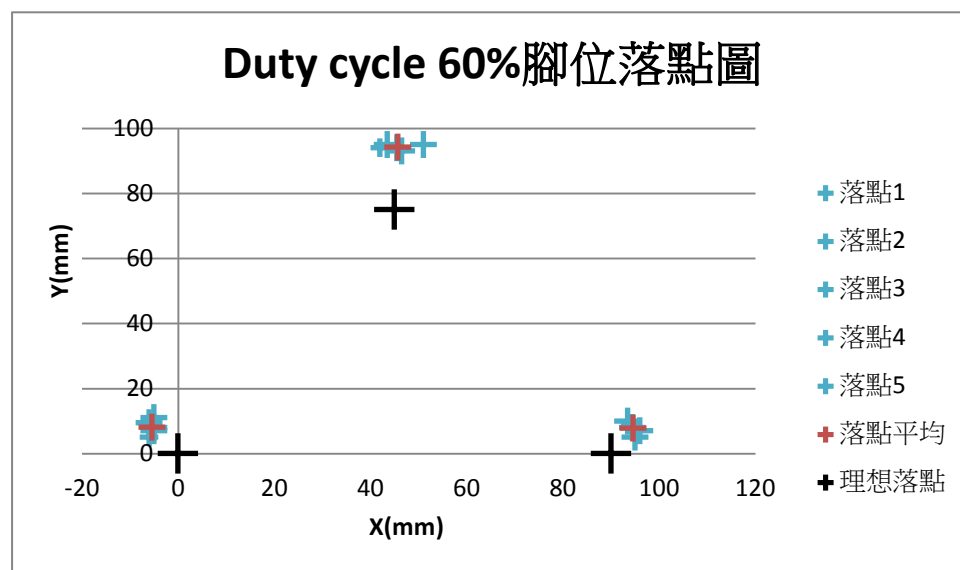
與「致動器的一致性實驗」相同。

#### 3-3 步驟

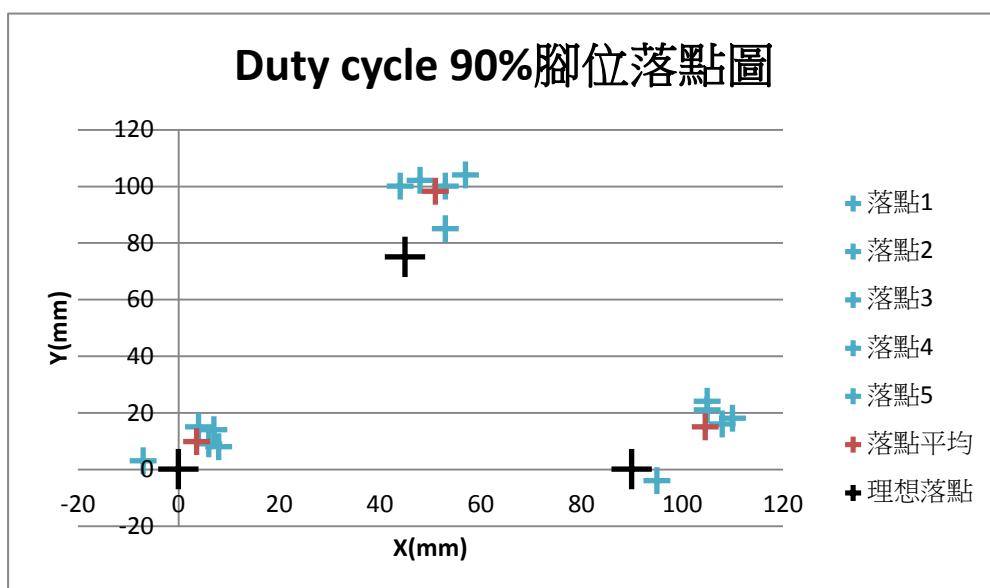
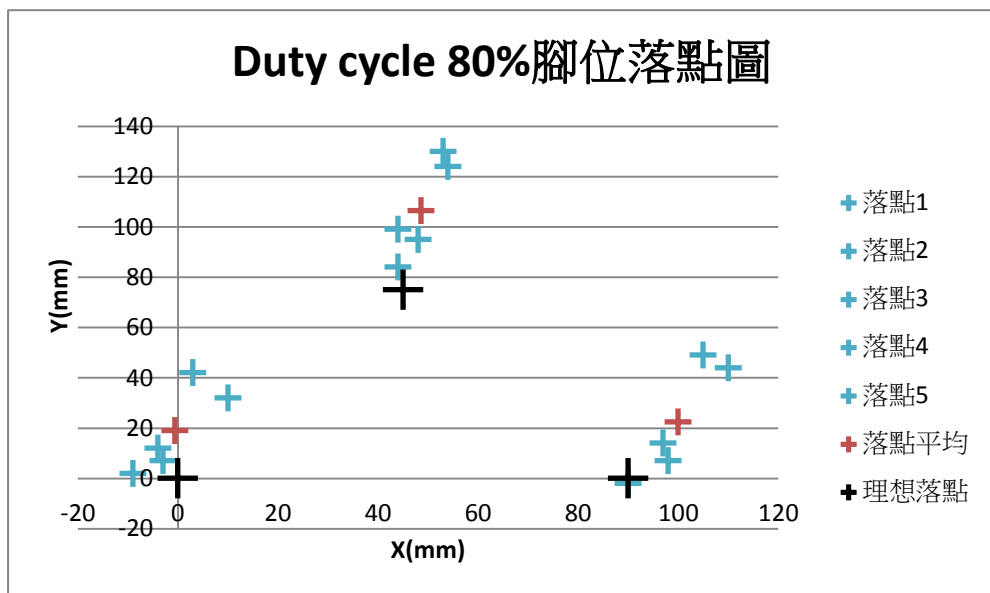
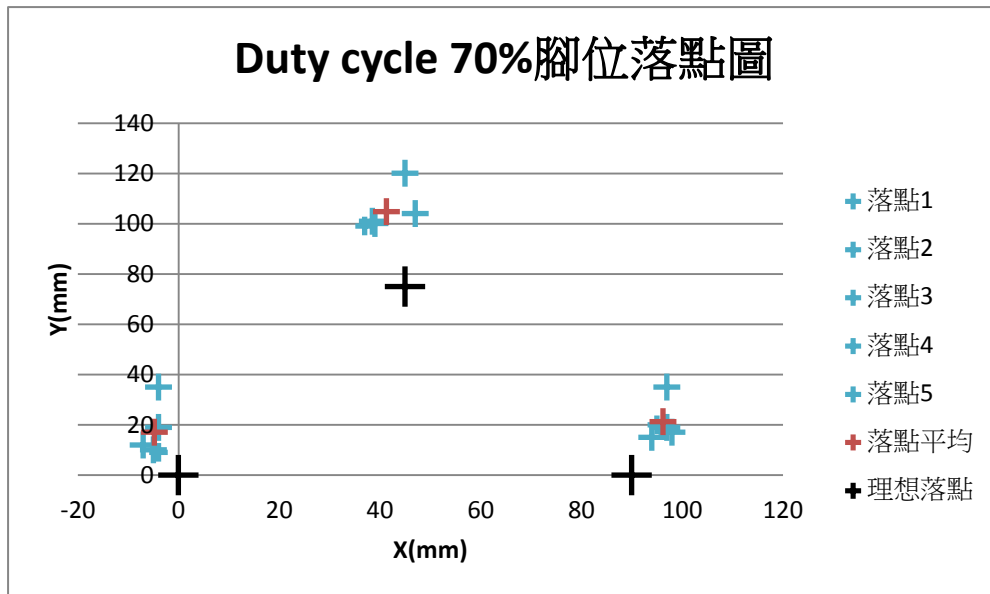
1. 重複[實驗一]步驟 1~5。
2. 以 100% 的 Duty cycle 對相同的腳位重複啟動 5 次。
3. 以每秒 250 張的拍攝速度來拍攝球體「走一步」的光源的移動。
4. 記錄每一次球體運動過後著地時腳位的位置。
5. 以 ADC 讀取每次的電流、電壓訊號。
6. 改變 Duty cycle 為 90%，80%，70%，60% 重複 1~5 的步驟。
7. 利用方格紙的格點計算之前記錄下腳位著地的位置。
8. 將拍攝的照片輸出並把多餘的照片刪除。
9. 利用 Image J 對拍攝的影像作後處理，標示出每張影像的質心和支點的座標，匯入 Excel 作分析運算。

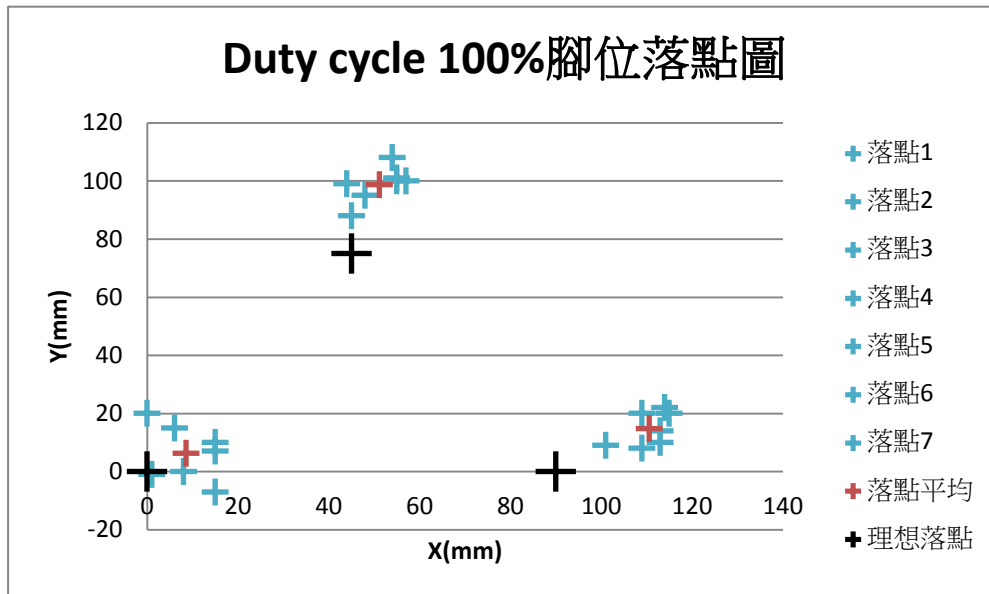
#### 3-4 結果一：翻越落點與分析

○以不同 Duty cycle 開啟電磁鐵後「走一步」的落點









由圖形可以觀察到在不同的 Duty cycle 下球體走一步之後的落點，在 Duty cycle 100%，90%，80%中落點皆偏向在理想落點的右方而在 Duty cycle 70%及 60%中落點的方向較向前方，推測應該是受到：

1. 拉出來長導線之影響，放置在左側的導線被捲曲而有一樣右的回復力，在高 Duty cycle 下球體受較大的力而懸空因此無法抵抗向右的推力導致落點向右，而小 Duty cycle 下球體的兩隻前腳在翻越時仍未離地，因此有摩擦力可以抵抗捲曲導線所施加的外力。
2. 有可能是啟動腳腳墊的方向擺放歪斜或是支點長短腳，而在大能量下使得導致跳躍的方向向右方。
3. 有可能是因為壓克力重力分配不均勻而在大的 Duty cycle 下記錄到的落點位置是球體跳起後再度落下的位置，因此在當時的姿態下右方較重而使球體向右方傾倒。

另外，由上方的表格中我們可以觀察出來在 Duty cycle 60%時可以得到最佳的重複性。

### 3-5 結果二：質心與支點的位移曲線及分析

○不同 Duty cycle 的質心、支點位移圖和能量

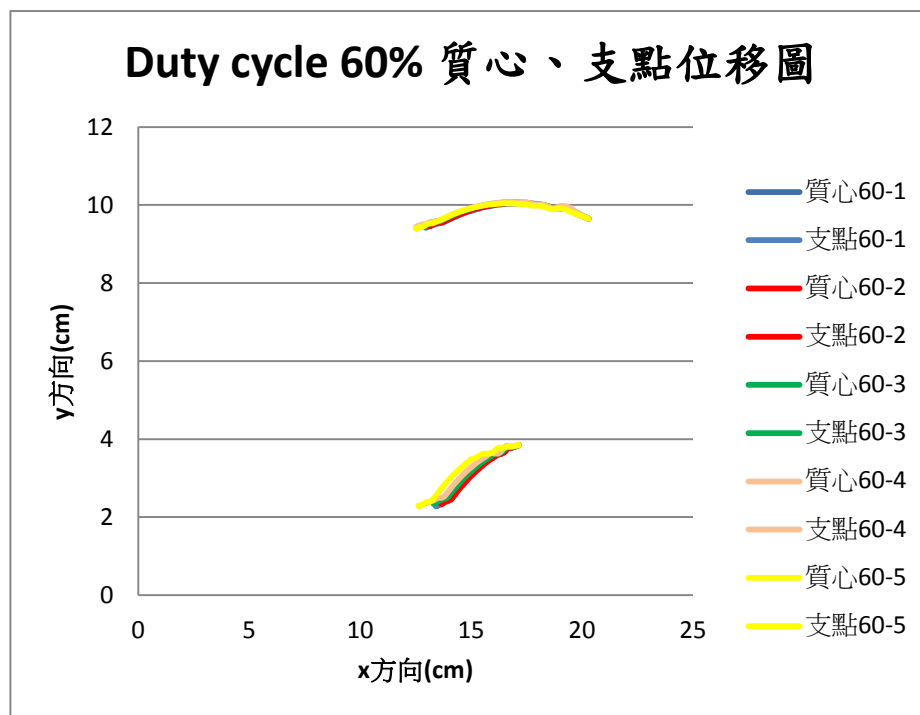
※ $m=1.55\text{kg}$     $Ke=0.5*m*V^2$     $Le=0.5*I*W^2$     $U=mgH$

對質心的轉動慣量  $I=m*r^2=1.55*0.06^2$

#### 1. Duty cycle 60%(最高點)

| 次數 | X 方向質心速度(m/s) | 角速度(rad/s) | 質心移動(m)  |
|----|---------------|------------|----------|
| 1  | -0.157        | 1.34       | 0.003848 |
| 2  | -0.103        | 0.59       | 0.004073 |
| 3  | -0.165        | 1.49       | 0.004228 |
| 4  | -0.170        | 1.30       | 0.004295 |
| 5  | -0.126        | 0.87       | 0.003959 |

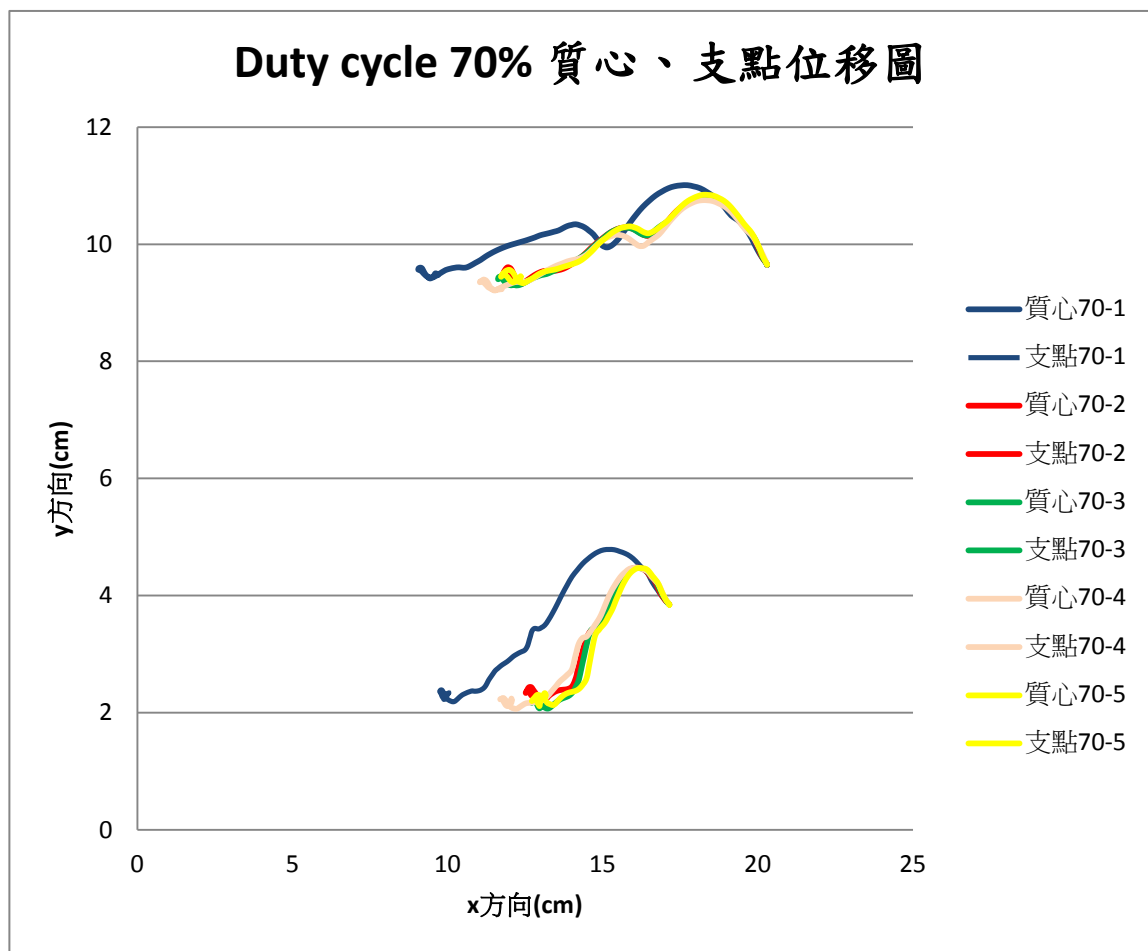
| 次數 | 線動能(J)  | 角動能(J)  | 位能(J)   | 總能量(J)  |
|----|---------|---------|---------|---------|
| 1  | 0.01915 | 0.00501 | 0.05851 | 0.08268 |
| 2  | 0.00827 | 0.00098 | 0.06193 | 0.07118 |
| 3  | 0.02115 | 0.0062  | 0.06428 | 0.09164 |
| 4  | 0.02264 | 0.00477 | 0.06530 | 0.09272 |
| 5  | 0.01235 | 0.00211 | 0.06019 | 0.07467 |
| 平均 | 0.01671 | 0.00381 | 0.06204 | 0.08258 |



## 2. Duty cycle 70%(最高點)

| 次數 | X 方向質心速度(m/s) | 角速度(rad/s) | 質心移動(m)  |
|----|---------------|------------|----------|
| 1  | -0.539        | 1.73       | 0.013589 |
| 2  | -0.442        | 2.78       | 0.011450 |
| 3  | -0.431        | 2.77       | 0.011396 |
| 4  | -0.432        | 2.50       | 0.011024 |
| 5  | -0.415        | 4.20       | 0.011955 |

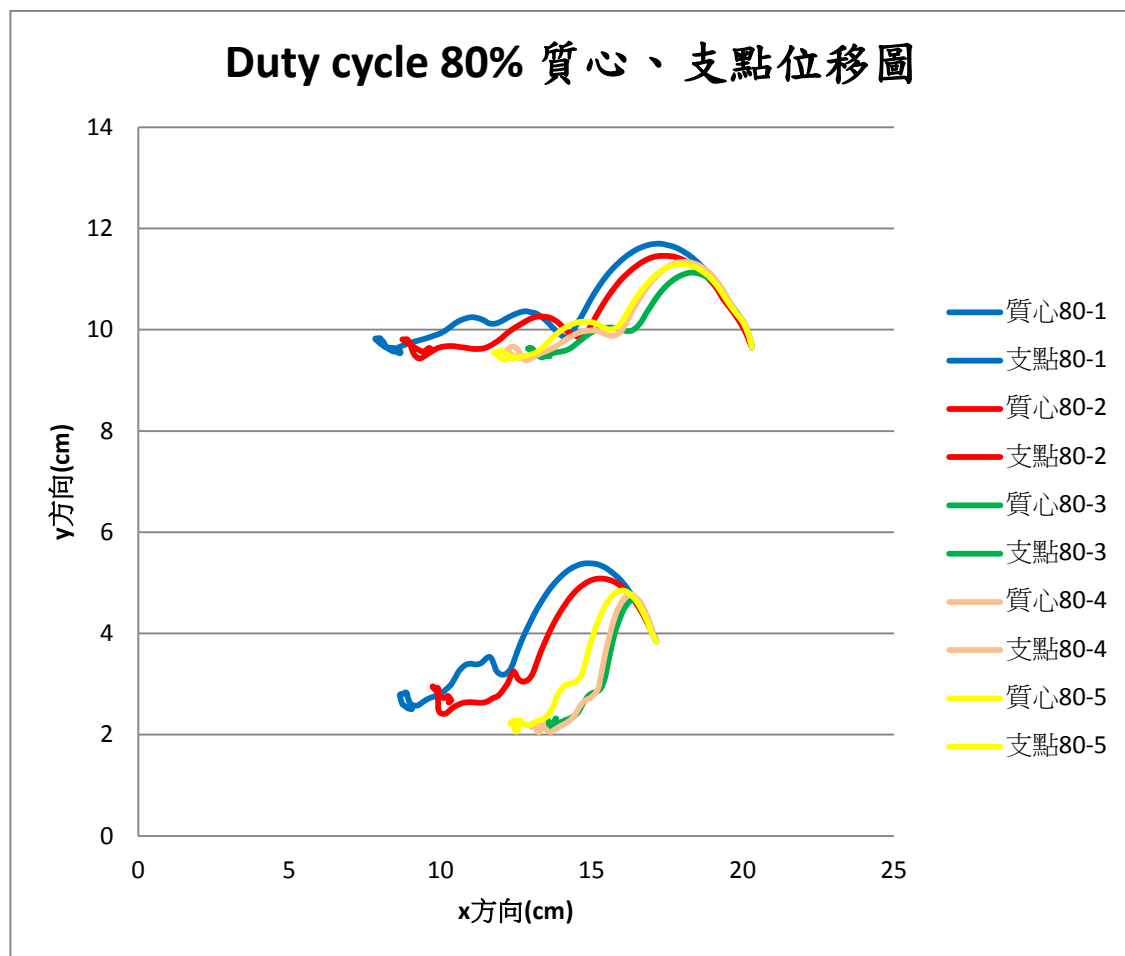
| 次數 | 線動能(J)  | 角動能(J)  | 位能(J)   | 總能量(J)  |
|----|---------|---------|---------|---------|
| 1  | 0.22542 | 0.00842 | 0.20662 | 0.44047 |
| 2  | 0.15179 | 0.02156 | 0.17410 | 0.34746 |
| 3  | 0.14461 | 0.02151 | 0.17328 | 0.33941 |
| 4  | 0.14518 | 0.01743 | 0.16762 | 0.33025 |
| 5  | 0.13391 | 0.04929 | 0.18178 | 0.36499 |
| 平均 | 0.16018 | 0.02364 | 0.18068 | 0.36451 |



### 3. Duty cycle 80%(最高點)

| 次數 | X 方向質心速度(m/s) | 角速度(rad/s) | 質心移動(m)  |
|----|---------------|------------|----------|
| 1  | -0.500        | 1.34       | 0.020496 |
| 2  | -0.505        | 1.97       | 0.018092 |
| 3  | -0.383        | 3.81       | 0.014763 |
| 4  | -0.428        | 3.83       | 0.016916 |
| 5  | -0.415        | 3.00       | 0.016447 |

| 次數 | 線動能(J)  | 角動能(J)  | 位能(J)   | 總能量(J)  |
|----|---------|---------|---------|---------|
| 1  | 0.19427 | 0.00506 | 0.31165 | 0.51099 |
| 2  | 0.19828 | 0.01089 | 0.27509 | 0.48428 |
| 3  | 0.11374 | 0.04050 | 0.22447 | 0.37873 |
| 4  | 0.14219 | 0.04095 | 0.25721 | 0.44036 |
| 5  | 0.13350 | 0.02519 | 0.25008 | 0.40878 |
| 平均 | 0.12970 | 0.02452 | 0.26370 | 0.44463 |

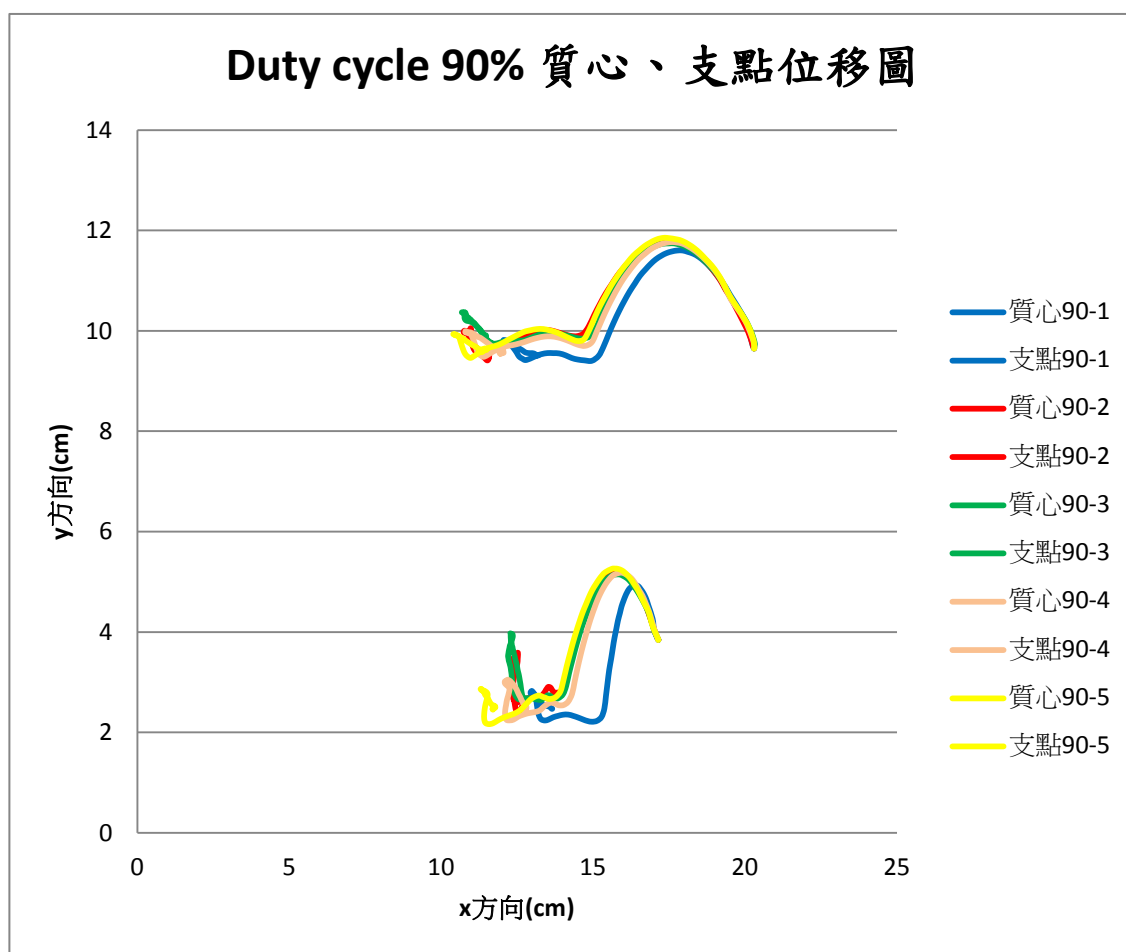




#### 4. Duty cycle 90%(最高點)

| 次數 | X 方向質心速度(m/s) | 角速度(rad/s) | 質心移動(m)  |
|----|---------------|------------|----------|
| 1  | -0.446        | 4.4175     | 0.019506 |
| 2  | -0.467        | 3.0908     | 0.021374 |
| 3  | -0.473        | 3.0112     | 0.020942 |
| 4  | -0.481        | 3.3267     | 0.021206 |
| 5  | -0.448        | 3.1451     | 0.02204  |

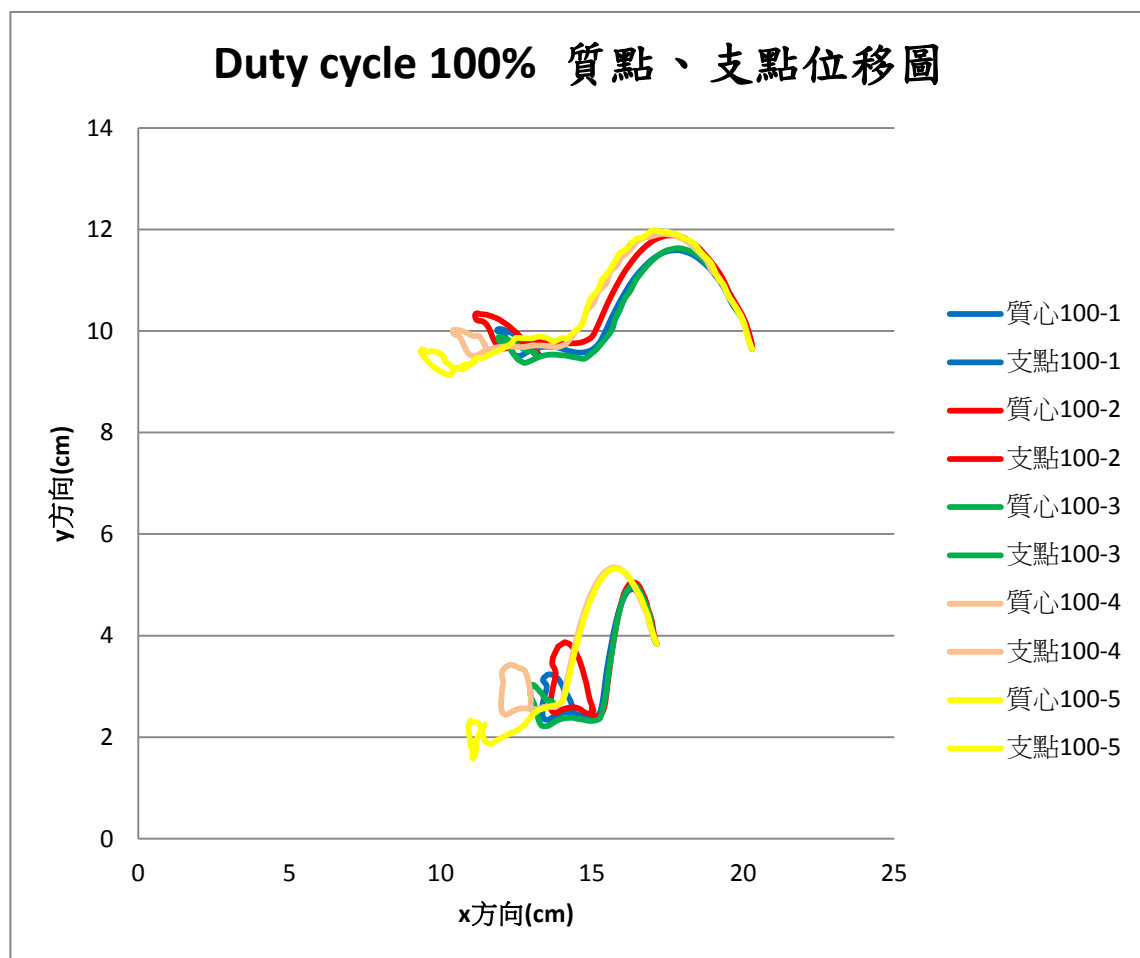
| 次數 | 線動能(J)  | 角動能(J)  | 位能(J)   | 總能量(J)  |
|----|---------|---------|---------|---------|
| 1  | 0.15427 | 0.05444 | 0.29659 | 0.50532 |
| 2  | 0.16909 | 0.02665 | 0.32500 | 0.52074 |
| 3  | 0.17403 | 0.02529 | 0.31843 | 0.51776 |
| 4  | 0.17978 | 0.03087 | 0.32244 | 0.53310 |
| 5  | 0.15589 | 0.02759 | 0.3351  | 0.51862 |
| 平均 | 0.16661 | 0.03297 | 0.31952 | 0.51911 |



## 5. Duty cycle 100%(最高點)

| 次數 | X 方向質心速度(m/s) | 角速度(rad/s) | 質心移動(m) |
|----|---------------|------------|---------|
| 1  | -0.455        | 4.3948     | 0.01939 |
| 2  | -0.446        | 4.2477     | 0.02232 |
| 3  | -0.421        | 4.3467     | 0.01979 |
| 4  | -0.472        | 3.2342     | 0.02263 |
| 5  | -0.484        | 4.3293     | 0.02334 |

| 次數 | 線動能(J)  | 角動能(J)  | 位能(J)   | 總能量(J)  |
|----|---------|---------|---------|---------|
| 1  | 0.16081 | 0.05388 | 0.29483 | 0.50953 |
| 2  | 0.15460 | 0.05033 | 0.33938 | 0.54433 |
| 3  | 0.13745 | 0.05271 | 0.30091 | 0.49108 |
| 4  | 0.17320 | 0.02917 | 0.34410 | 0.54648 |
| 5  | 0.18192 | 0.05229 | 0.35489 | 0.58911 |
| 平均 | 0.16160 | 0.04762 | 0.32682 | 0.53611 |



由以上表格可知，不管是哪個 Duty cycle，質心和支點在第一次升高時的軌跡大致上相同，由此可證明實驗的準確性。而我們也用 ImageJ 軟體將質心和支點不同時間的位置求出來，匯入 excel 做處理，得到質心最高點時的速度，角速度以及 y 方向的高度差，由此可得到軟球在最高點時的機械能(=動能+角動能+位能)，此機械能與軟球的動態表現息息相關。在機械能中，位能和線動能占大多數，由此可知軟球的移動相較於轉動多很多。

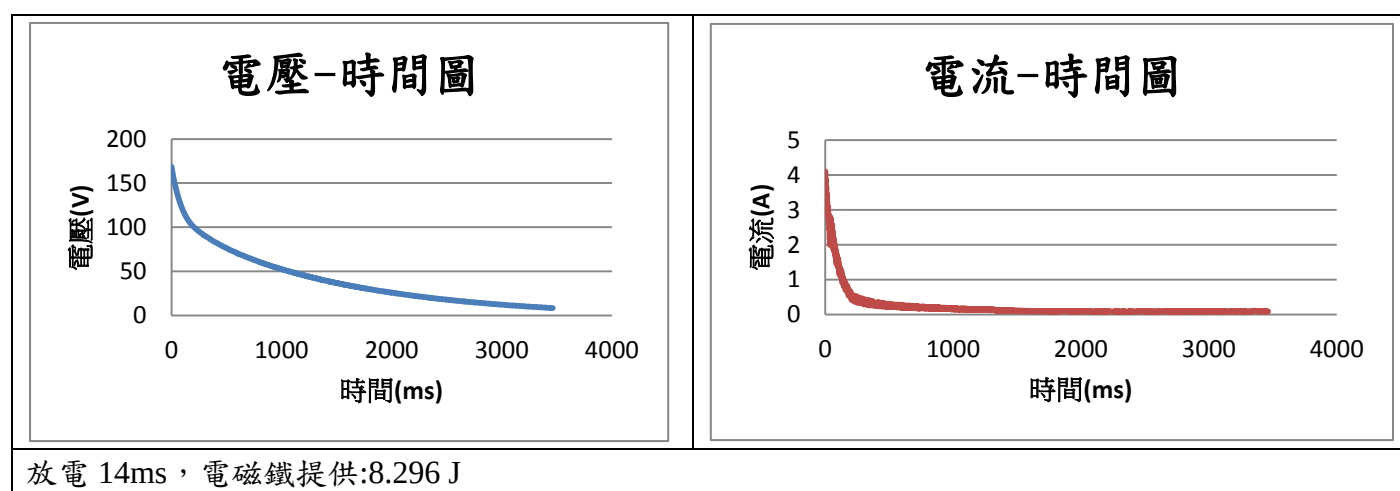
我們知道隨著 duty cycle 的增大，電磁鐵所獲得的電能也會變大，而由上表實驗結果也證明了軟球所獲得的機械能亦變大，因此目前可大致推論，其中電能的轉換效率是穩定的。

### 3-6 結果三:電磁鐵提供軟球的電能

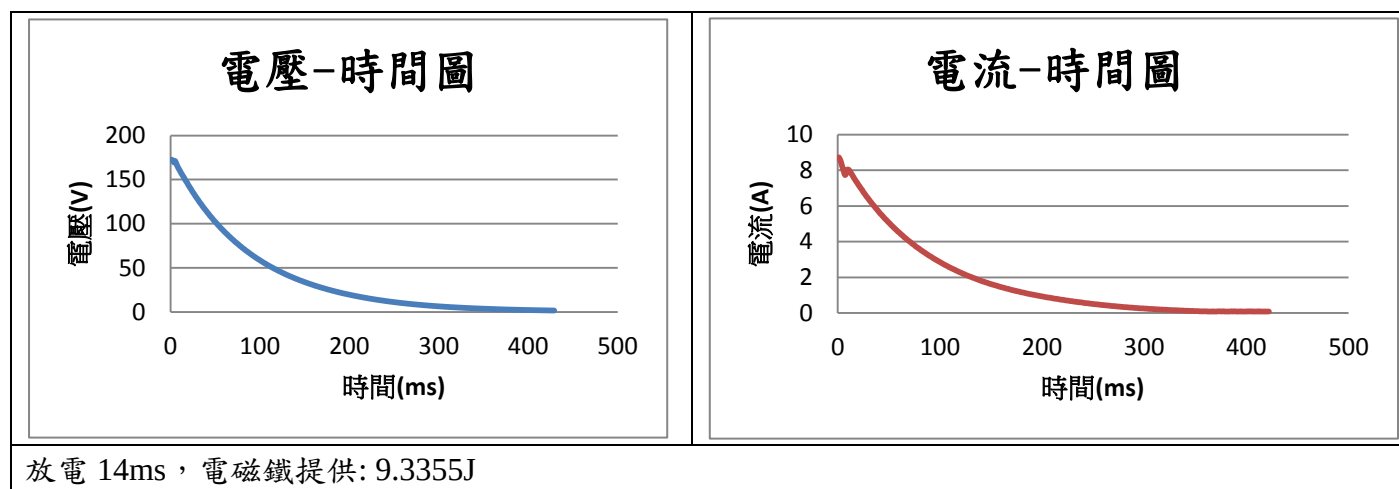
由結果二可知軟球的機械能，現在我們要討論的是電磁鐵提供的電能。藉由類比數位轉換器(ADC)獲得電流和電壓的資訊。並由  $E=i*v*t$  的關係式，將電流和電壓相乘再乘上時間可求得電磁鐵得到之電能。這裡的時間是指電磁鐵從進程零開始變大至完全離地。由高速攝影機可得，時間為： $1.4*10^{-3}sec$ 。

以下為不同 duty-cycle 下，電流和電壓對時間的關係圖：

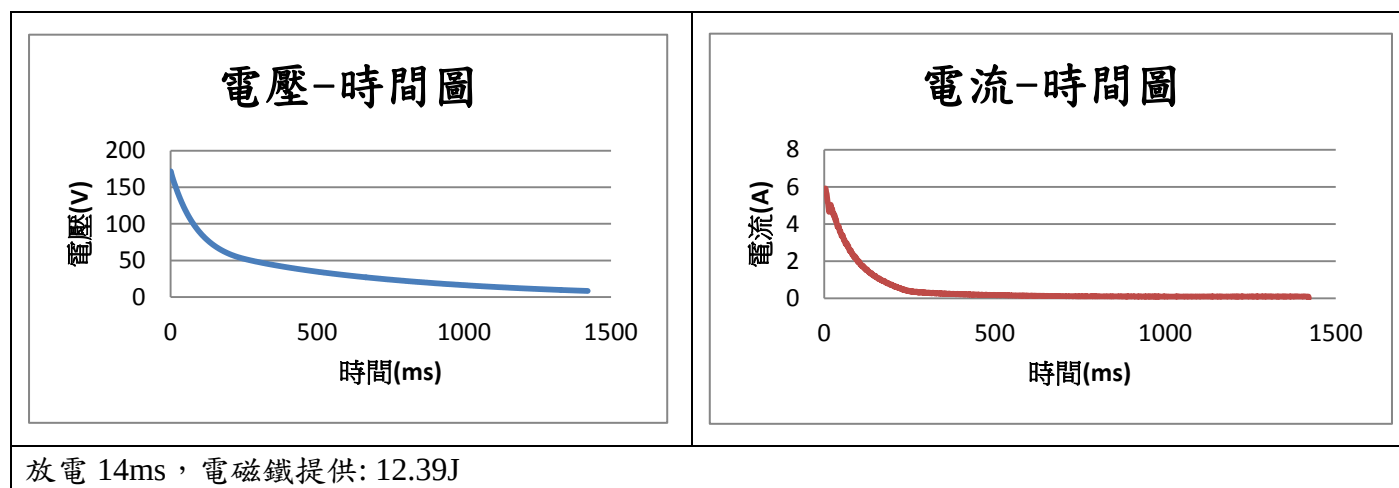
#### 1. Duty-cycle 60% 電壓、電流對時間關係圖



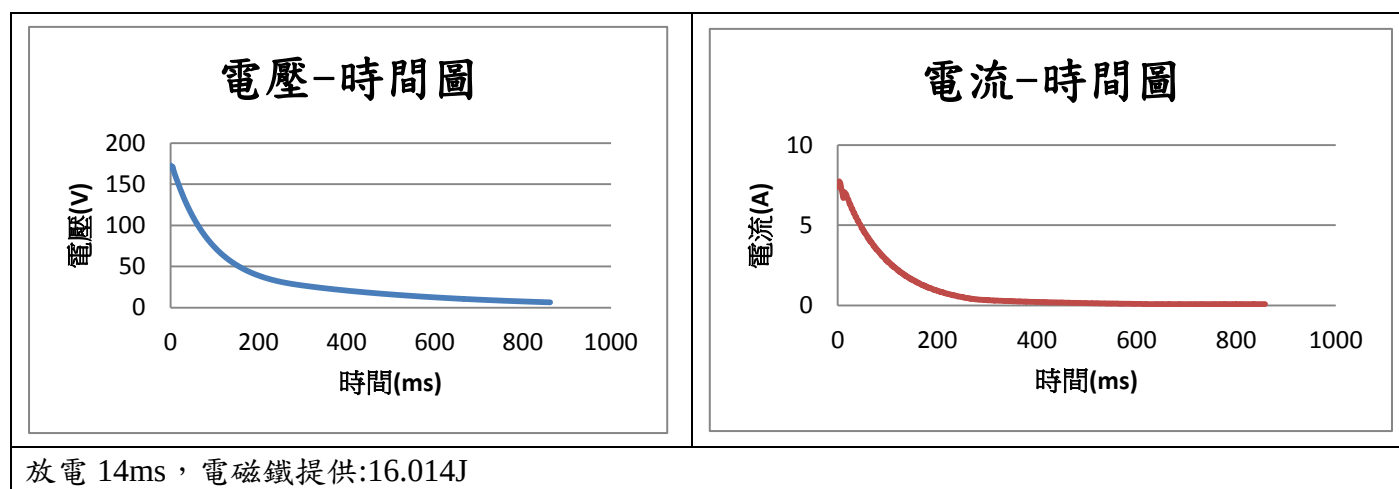
## 2. Duty cycle 70% 電壓、電流對時間關係圖



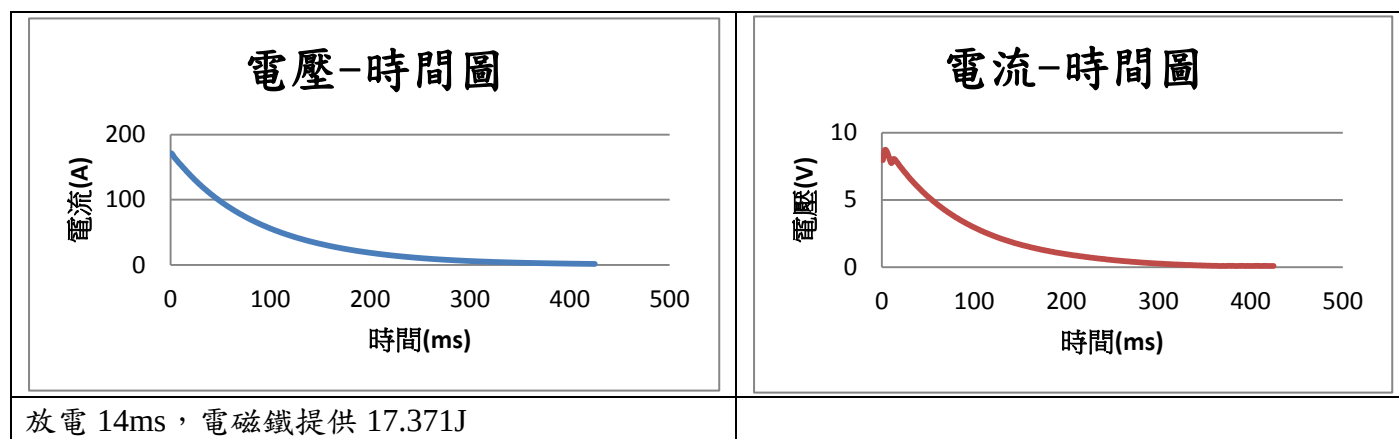
## 3. Duty cycle 80% 電壓、電流對時間關係圖



## 4. Duty cycle 90% 電壓、電流對時間關係圖



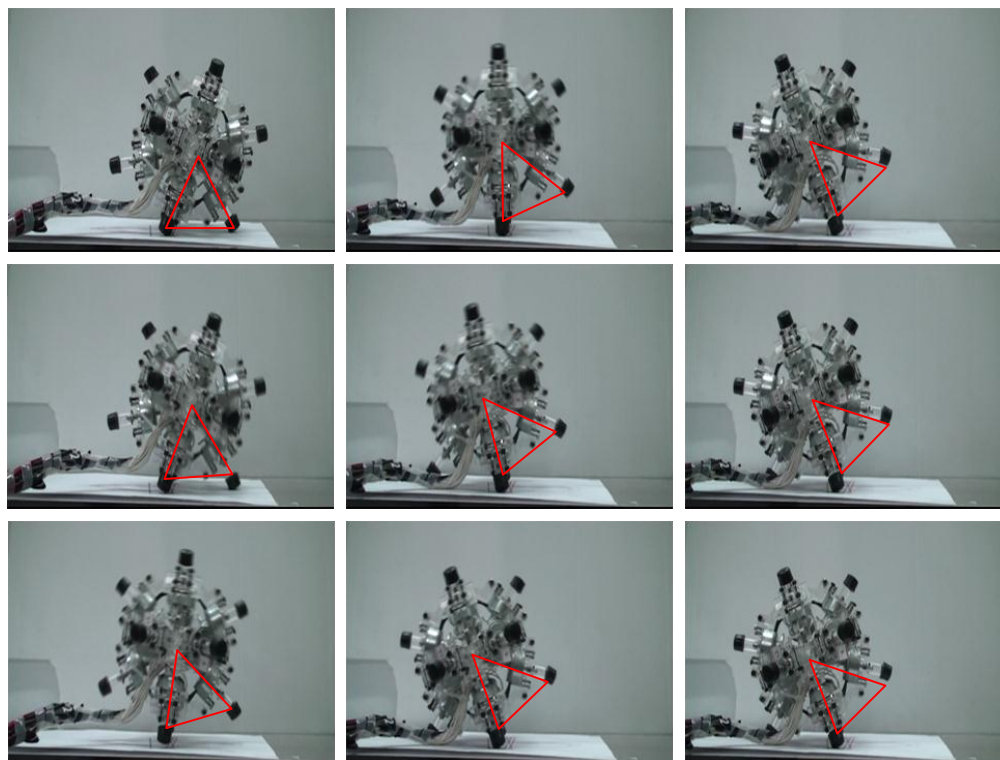
## 5. Duty cycle 100% 電壓、電流對時間關係圖



由於電磁鐵在放電前先經由升壓電路升壓，而升壓電路內含電容，因此整體放電曲線呈現 RC 放電，為自然指數的衰減趨勢。由上表可知，Duty cycle 越高的放電曲線，其電流的初始值亦越高，由此可推測電磁鐵提供的力道亦越大，軟球所獲得的機械能亦越好，和結果二相符。而 Duty cycle 越高，電磁鐵獲得的電能也越大，和結果二的機械能相比，轉換效率差不多落在 3% 左右。

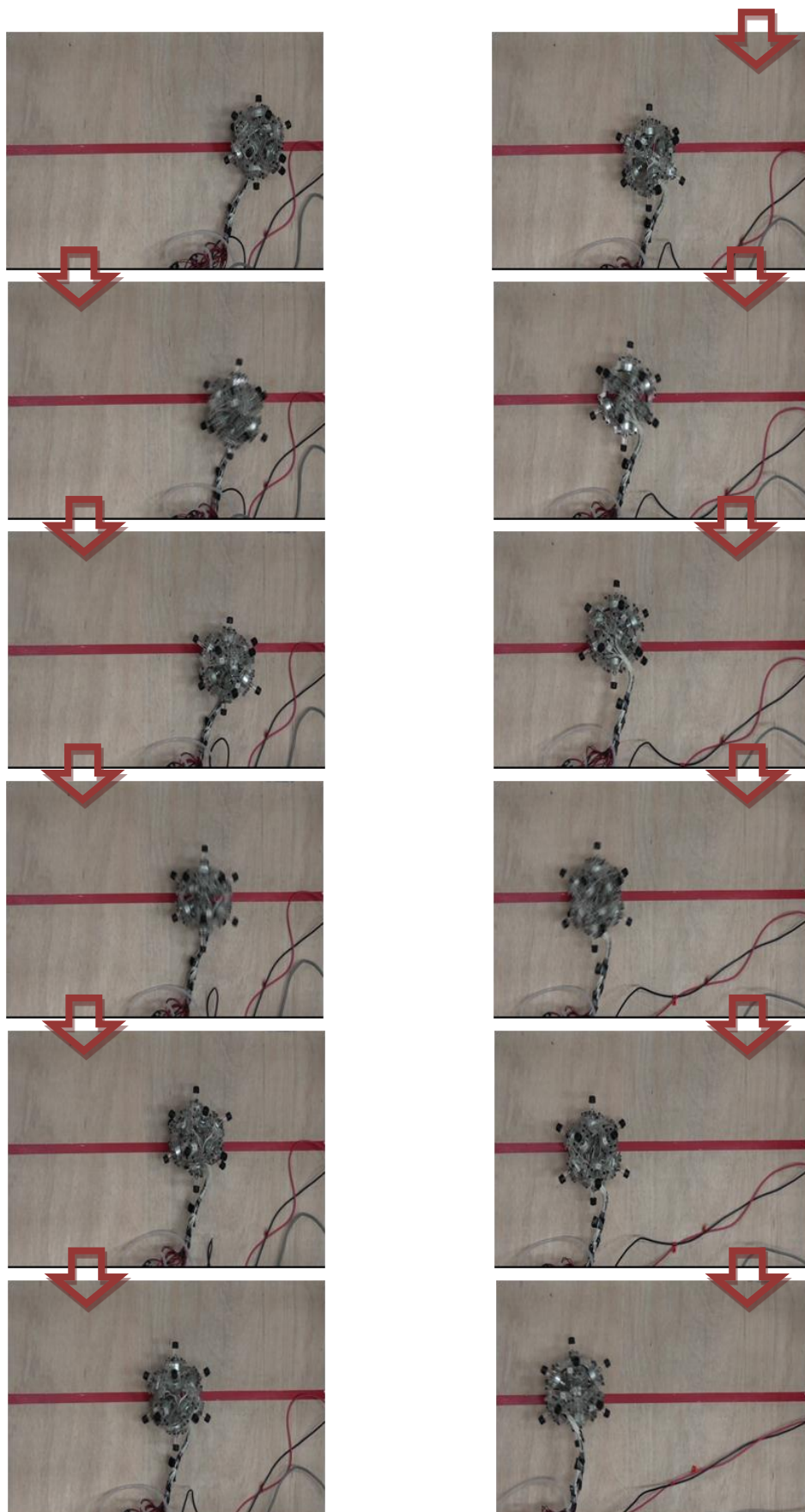
## 四、運動軌跡圖

### 4-1 翻滾側拍圖（一秒三張截圖）





4-2 直線前進俯拍圖 (一秒兩張截圖)



## 陸、 問題與改進

| 層面     | 改進方法與未來目標                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 致動器方面  | <p>我們現階段所使用的致動器「電磁鐵」，遇到以下幾點問題：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 在「力量」方面，由於機器人本身重量的限制，市售電磁鐵所提供的力道是不足以拿來當作動力，在這方面，我們雖然設計「升壓電路」讓電壓升到 180V，但如此一來，我們電磁鐵所提供的力道變成瞬間力，而瞬間力的缺點在於，如果放電的一瞬間所提供的能量不足，則機器人則無法翻越，且瞬間力常常只會造成機器人機殼的變形而無法產生足夠的動力。</li> <li>2. 在「進程」方面，市售電磁鐵的進程通常都只有數毫米，而我們機器人的機殼直徑都需要數百毫米才夠裝進所有的電路板及電池，如此一來，造成電磁鐵的進程完全不足以讓球機器人翻越。</li> </ol> <p>也就是說，未來還會選用其他的致動器來做研究。</p> |
| 電路方面   | <p>電路方面，首先是希望電路板的尺寸可以再縮小，如此一來求機器人可以做得更小，然後再加上「sensor」與「IMU」，提供機器人即時步態的 feedback 的訊號。</p> <p>整體規劃方面，因為電路中有 180V 的大電流，所以希望可以做出「雙電源系統」，將控制電源與大電源徹底區隔，以策安全。</p>                                                                                                                                                                                                                            |
| 結構方面   | <p>結構方面，主要要改進的有三個層面「重量」、「體積」與「剛性」。</p> <p>重量方面當然是希望越輕越好，簡單來說就是輕量化。體積方面，由於體積越大，機器人要翻越所需克服的位能越多，所以，機器人的體積希望越小越好。最後，提升機殼的剛性，讓致動器在驅動球體時，讓球體較不易產生變形，提高轉換效率。</p>                                                                                                                                                                                                                             |
| 程式控制方面 | <p>現階段程式的撰寫是將球機器人分為六條路徑，然後直接手動控制路徑，在控制方面還不夠直觀，希望在之後加上 sensor 與 IMU 後，讓系統有 feedback 訊號提供機器人姿態的訊息，讓控制可以很直觀的直接控制球機器人前進的方向。</p>                                                                                                                                                                                                                                                            |

## 柒、結論

時光飛逝，不知不覺的一年就過去了，經過將近一年的努力，我們從零開始，在黑暗中慢慢地摸索與成長。一開始，我們自己纏電磁鐵的線圈，研究了整整一個暑假的電磁鐵。接著在結構上，從自製小模型，到試驗各種的材料與外形的可行性，最後決定使用玻璃纖維與碳纖維做外殼，在製作玻璃纖維與碳纖維的過程中，我們從造模到製作到成形，都是自己加工完成，過程中一一克服每個問題，從挫折中成長，在失敗中學習，這是一個很寶貴的經驗。在架設硬體機電與程式軟體的過程中，我們花了不少時間在撰寫 LabVIEW 程式碼與電路版的製作，也因為電路中有大電壓的通過，我們在安全措施上下了不少功夫。在經過了好幾個月的努力，過程中不斷的嘗試與 DEBUG，最後總算是把球形機器人的系統完成。

接著就是進入實際測試的部分，我們嘗試了各式各樣機器人腳的設計，過程中，做了無數次的實驗，嘗試了各式各樣的機構，也花了許多心思在整體機殼的輕量化上面，就這樣我們陷入了做實驗的無限迴圈中。最終，因為受限於市售致動器以及現階段結構方面的缺陷，我們決定做一簡易的機器人模型，將機電系統至於機器人外部來進行測試，以證明我們「軟性可變外形球機器人」的想法的可行性，最後的結果是令人滿意的。

原來，要完成一個機器人系統真的很不容易，從致動器的選擇、電路的設計、程式的撰寫、結構的設計到內部零件的配置，每一個環節都是一門學問。經過這一年下來的研究與學習，著實讓我成長不少，而我們也會繼續研究「軟性可變外形球機器人」，持續的改良與創新，期盼能夠在不久的將來，實現我們最初的夢想，完成一台可以全方位靈活運動的球形機器人！

## 捌、致謝

要在一年的時間裡，從零開始，做出一台完整的機器人系統真的需要很多人的幫助，在各個方面都需要很多人的集思廣益才能夠完成，固本專題是整個團隊共同努力的成果。

感謝 郭哲男同學在電路設計與電路板製作方面的幫忙。

感謝 胡家睿同學在機器人外型設計方面的幫忙。

感謝 林昱辰同學 林巧雯同學在工件加工及製造與實驗數據分析方面的幫忙。

最後要特別感謝 林沛群教授在這次計畫中給我們的指導，以及實驗室的學長們以及機械工廠的師傅們在經驗上的傳承與各種技術方面的指導，才能讓本次的計畫順利完成。

## 玖、 參考資料

- [1] Spheroidz is an RC Car in a Bubble  
<http://www.i4u.com/34011/spheroidz-rc-car-bubble-video>
- [2] 10 Most Brilliant Innovators of 2009: The Ball-Shaped Robot  
<http://www.popularmechanics.com/science/robotics/4332921.html?series=88>
- [3] Yuuta Sugiyama and Shinichi Hirai, Crawling and Jumping by a Deformable Robot, International Journal of Robotics Research, Vol.25, No.5-6, pp.603-620, May-June, 2006  
<http://www.mint.se.ritsumei.ac.jp/articles/06/ijrr2006sugiyama.pdf>
- [4] Crawling and Jumping Soft Robots  
<http://www.ritsumei.ac.jp/se/~hirai/research/softrobot-e.html>
- [5] Spherical Soft Robots Can Roll And Jump  
<http://www.cybertron.tv/2009/09/07/spherical-soft-robots-can-roll-and-jump/>
- [6] Solar Powered Miniball Wannabe  
<http://www.instructables.com/id/Solar-Powered-Miniball-Wannabe/>
- [7] Ground Bot  
<http://www.popsci.com/bown/2008/product/ground-bot>
- [8] Rotundus  
<http://www.rotundus.se/>
- [9] NI 官網  
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/zht/nid/210003>
- [10] 維基百科 多面體  
<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%9A%E9%9D%A2%E4%BD%93>
- [11] 複合材料的補強材料  
<http://crawler.ksu.edu.tw/utility/webpageCustomize/DTCMED/2789/files/%E8%A4%87%E5%90%88%E6%9D%90%E6%96%99/%E5%BB%96%E5%9F%B9%E5%87%B1-981%E8%A4%87%E5%90%88%E6%9D%90%E6%96%99/%20%E7%AC%AC%E5%9B%9B%E7%AB%A0%20%E8%A4%87%E5%90%88%E6%9D%90%E6%96%99%E7%9A%84%E8%A3%9C%E5%BC%B7%E6%9D%90%E6%96%99.pdf> accessed 2012/3/17
- [12] 經濟部能源科技研究發展計畫（風力機關鍵元件開發計畫）