

國科會大專生參與專題研究計畫

球型機器人

專題學生：陳為熙

指導教授：林沛群

目錄

一、摘要.....	2
二、前言.....	3
三、文獻回顧.....	4
四、研究方法.....	6
4.1 預設目標.....	6
4.2 研究理論.....	7
4.2.1 自由度分析.....	7
4.2.2 死點問題.....	7
4.3 設計構想.....	8
4.3.1 設計一；單點摩擦驅動球設計.....	8
4.3.2 設計二；三顆小球驅動設計.....	9
4.4 機器人實體化.....	11
4.4.1 幾何架構之設計.....	11
4.4.2 加壓系統之設計.....	14
4.4.3 接觸穩定機構設計.....	15
4.4.4 雷射加工與組裝設計.....	17
4.4.5 運動計算.....	18
4.4.6 馬達選用.....	19
4.4.7 驅動裝置之設計.....	21
4.4.8 機電控制系統.....	23
4.4.9 電力供給系統.....	25
五、結果與討論.....	26
5.1 實體成果.....	26
5.2 運動測試.....	30
5.3 改進與調整.....	32
六、總結與心得.....	34
七、致謝.....	34
八、附錄.....	35
8.1 Bill of Materials.....	35
8.2 總組合圖.....	36
九、參考文獻.....	38

一、摘要

深入剖析現今已研發之幾款球型機器人，發現其具有無法在平面上隨時變動行進方向之共同缺點；原因在於其機構設計之限制，使其不能在平面上做出較大幅度以及銳角的轉彎。本研究的目標在於探索有別於以往的機械結構和傳動模式，藉著電腦輔助製圖、簡單機構分析，創新設計出一架利用單點摩擦力傳動，並能達成全方位平面運動的球型機器人；透過結構的配置、電路控制以及各種元件及材料的選配，將設計的構想付諸實行。雖然尚未完美，但此機器人已能達成運動的目的，並能從中探討出單點摩擦力傳動是否有繼續發展的價值。

二、前言

媒體時常報導許多機器人的議題，顯然機器人已在我們的生活中扮演不可或缺的角色。隨著科技的進步，機器人也變的越來越複雜，越來越聰明。不過，越複雜的構造是否真的越好？是否我們可以創作一架機器人，不僅外型單純、構造簡單、還能容易地操作？例如一台像球的機器人？



球型機器人的靈感源自於電影中常利用球為主題的特殊效果。在《少林足球》或一些運動漫畫中，運動員可隨心所欲控制球的路徑及軌跡；但實際運動中，人對於球的控制並沒有辦法達到盡善盡美。球的運動會受到技巧、體能狀況、以及氣流性質、球的重心配置與表面性質影響，因此球賽的輸贏總是這麼難以預測。既然人為的運動控制技巧不能使球達到完美的定量，那麼，是否可以直使用機械原理與控制器去調整與操控它呢？

搜尋各種運動型機器人影片與資訊，發現目前在運動的機器領域上，最常見到的設計就是爬行機器人與輪動機器人兩種。很明顯地，球型機器人還有很大的發展空間。觀察現今已研發的幾部球型機器人，發現他們在運動上時常會出現兩種奇怪的現象；一是有時候機器人從一點移動到另一點時無法依循最短路徑，二是有些機器人無法作較大幅度的轉向。深入了解之後，發現這是機構設計產生的限制。

從上述可知，球型機器人確實有改進的空間。故以「簡單」及「無運動死角」這兩點為設計理念，試圖克服其他機器人的缺點，創造出一架有別以往的球型機器人。球型機器人，可以發展成為商業用的玩具，亦可用於環境探索等學術用途，確實是一個極具發展潛力的主題。

三、文獻回顧與探討

搜尋現在已研發的球型機器人，試著在不同的機器人了解其原理，並且思考是否有更好的改良。下表是目前球型机器人的主要趨勢設計和對他們的探討。

機器人與原理	探討
Spheroidz⁽¹⁾ 	優點 <ol style="list-style-type: none"> 1. 只需要遙控車與充氣球，構件單純成本低，現已商品化。 2. 充氣球能吸收衝擊，即使從高處落下也不易損壞。 3. 機器人整體重量輕，且比重小於水，能夠在平靜的水面上行走 缺點 <ol style="list-style-type: none"> 1. 僅能前進後退，無法側向滾動。 2. 遙控車在充氣球內不穩定，無法精確控制。
<p>圖 3-1</p> <p>將遙控車置入充氣球內，利用輪胎與充氣球的摩擦力來驅動。</p>	<p>相似設計：</p> <p>BEAM robot by Solarbotics⁽⁵⁾</p>
Gyrosphere robot⁽²⁾ 	優點 <ol style="list-style-type: none"> 1. 由於是利用陀螺儀原理，Gyrosphere robot 可以產生較大的扭力，能夠越過一般球形機器人無法越過的障礙。 2. 轉動慣量大，穩定性也高。 缺點 <ol style="list-style-type: none"> 1. 僅能前進後退，無法側向滾動。 2. 構造複雜成本高，控制方法也複雜。 3. 球殼材料為壓克力，內部機構沒有懸吊系統，從高處落下容易損壞。
<p>圖 3-2</p> <p>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。</p>	

Orbs⁽³⁾

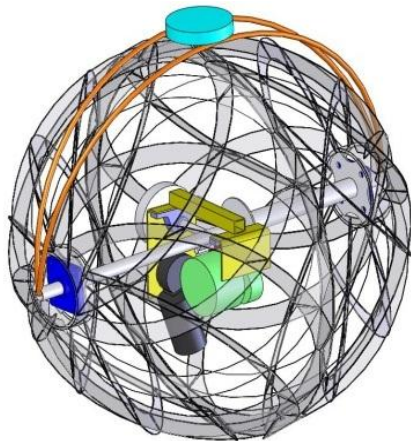


圖 3-3

由兩組馬達構成，一組用於提供前進的動力，一組用於改變質心位置，使機器人傾斜達成轉向

優點

1. 機械原理單純。
2. 穩定性高，結構堅固。
3. 高互動。可自動感知其他 Orbs 的位置，亦可和人互動。

缺點

1. 僅能前進後退，無法側向滾動。
2. 太過龐大，有空間方面的限制。

相似設計：

Rotundus⁽⁶⁾已有商品

Spherical soft robot⁽⁴⁾

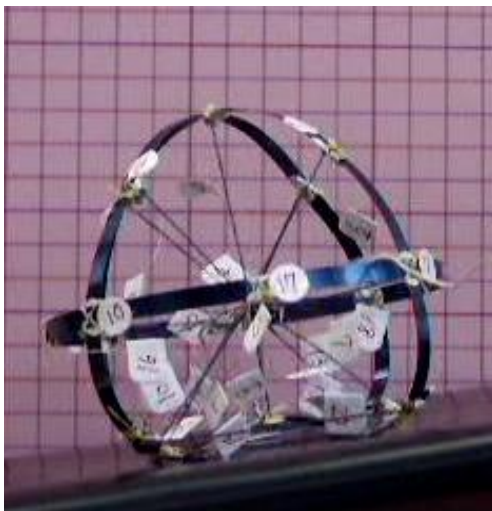


圖 3-4

利用形狀記憶合金改變外型來達成移動或彈跳。

優點

1. 除移動之外，也具有彈跳能力。
2. 並非單純滾動，可朝任何方向移動。
3. 整體為彈性材料，從高處落下不易損壞。

缺點

1. 運動控制複雜度高。
2. 無法確切控制它至運動目標。
3. 每次的運動需重新通電以儲存彈性能。預備時間較久，移動也緩慢。

四、研究方法

4.1 預設目標

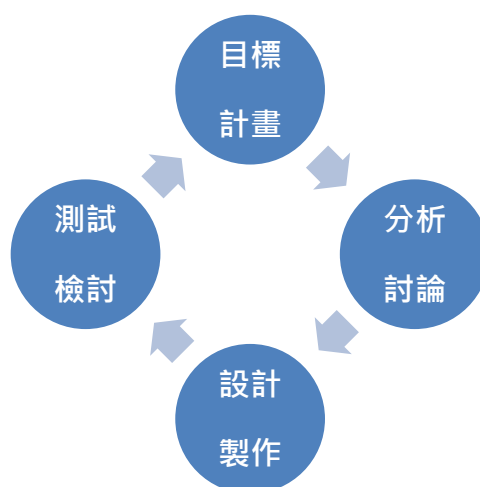


圖 4-1 研究步驟示意圖

執行計畫前，應先設定好個階段想要達成的目標與進度，以免過於完美主義，過於急進導致問題。接著針對各階段的目標，討論分析決定機構的概念設計，再依據概念設計，從製圖、採買等等，挑選適合的零件並決定整體結構，將整台機器製造出來。最後進行測試與討論，檢討後再進行改進與加強，進入下一階段的目標（圖 4-1）。



圖 4-2 階段性目標示意圖

球型機器人的發展，可以分為結構設計、運動控制、與應用推廣三個部份（圖 4-2）。由於是第一次進行，所以將第一階段的目標訂在結構設計的部分，並且按照計畫準時於九十九年的暑假完成，機器人可以依照構想進行運動，但還需要些微調整。第二個階段目標訂在一百年寒假，運動控制，藉由結構、配重等等的調整，將機器人調整為穩定可由搖控器控制的機器。

接下來的應用部份，希望能藉由感測器與電路版的控制系統，達到遠端控制的目標；並且利用這種性能，將球型機器人推廣應用，進入人類難以到達的地區或進行人類難以達到的運動。但因為計畫為一年的關係，則留待未來處理。

4.2 研究理論

4.2.1 自由度分析

球型機器人主要藉著改變重心的位置，來製造跌落的運動效果，進而前進。若將球殼視為地桿，則我們需要六個自由度，才能使球殼內一個點任意移動（圖 4-3）。考慮到機械設計的複雜度，使球殼中的主體不能放大縮小，而且主體的中心永遠在球殼之球心上，則主體上任意點僅剩下三個自由度，也就是說主體僅能在球殼內做出三個方向的旋轉（圖 4-4）。

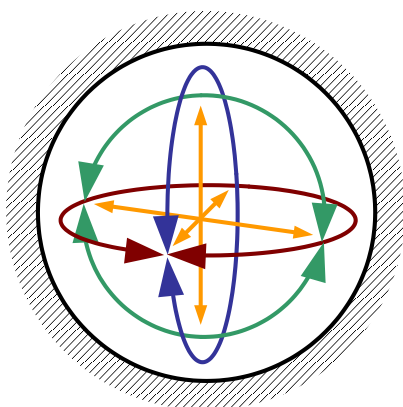


圖 4-3 六個自由度

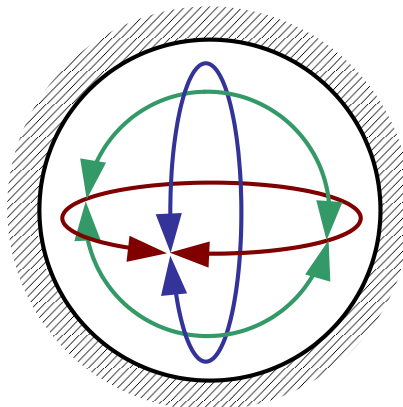


圖 4-4 三個自由度

4.2.2 死點問題

前言和文獻中提到現今已研發的幾款球機器人都有所謂的死角問題。將此問題分成兩個部分來看：一者是機器人僅能直線前進以及大幅度轉向，另一者是機器人從一點移動到另一點時無法依循最短路徑。

關於第一個問題，可以先從輪型機器人下手。輪型機器人無法做出側向移動，當重心向側邊偏移輪子前進的路徑時，就會因為角動量守恆而偏轉方向。Gyrosphere robot⁽²⁾也是如此。

第二問題和空間幾何有關，主要發生在由幾個旋轉軸構成的機器中（圖 4-5）。

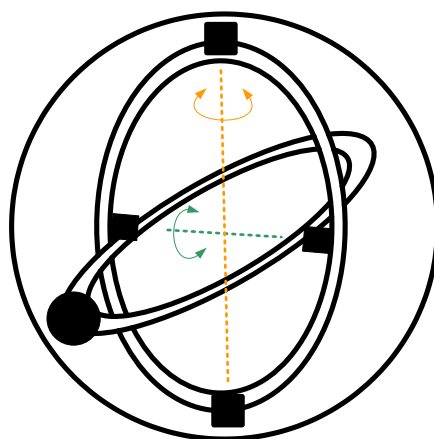


圖 4-5 旋轉軸式球型機器人

這種機器人的運動操縱可以看成歐拉角的合成(圖 4-6)。這種直觀的設計方式造成兩個缺點：一者隨著座標轉移，在絕對座標中運動的控制必須不同。第二是當三個旋轉軸的其中兩個重合時，原本兩個自由度會重和造成 idle degree of freedom，造成某一個方向少一個自由度，不能向此方滾動，這就是萬向結鎖的問題 (Gimbal lock) (圖 4-7)。

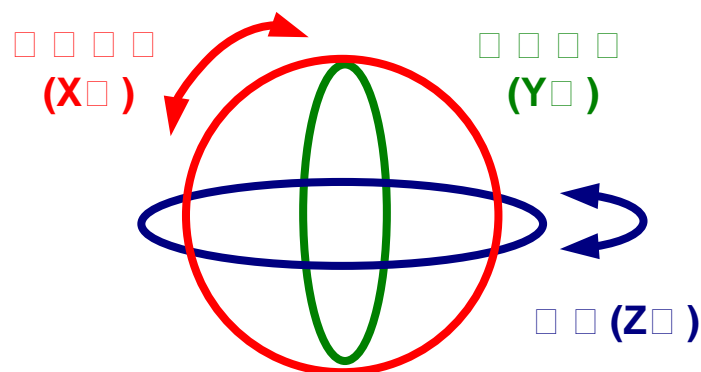


圖 4-6

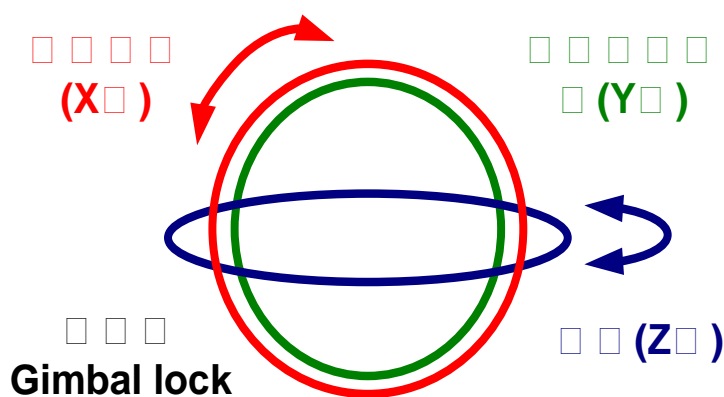


圖 4-7 萬向結鎖

所以此時若球型機器人要從 A 滾到 B，他的最短路徑可能不是走直線 (圖 4-8 黃線)，而是奇怪的弧形。(圖 4-8 紅線)

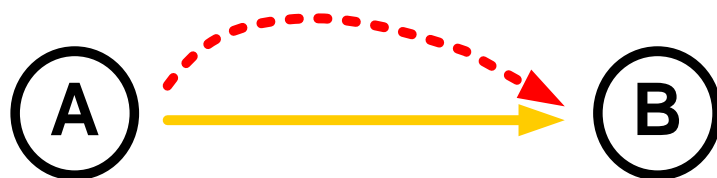


圖 4-8 最短路徑

4.3 設計構想

綜觀各種機構後，發現「利用角動量守恆」以及「由軌道帶動重物而改變球體整體重心」的這種想法不合預先設定的設計理念。因此想出利用摩擦力做為主要驅動力的設計，分別是兩種不同的機構：第一種是將滑鼠反過來運用的摩擦球驅動裝置。第二種是使用三顆內部的驅動球，藉由向量的加成，以摩擦帶動外球殼驅動設計。

4.3.1 設計一；單點摩擦驅動球設計

滑鼠的工作原理是利用橡膠球的滾動來轉動 X 和 Y 方向的轉桿，如今反過來運用滑鼠的設計，以 X 和 Y 方向的轉桿的轉動來帶動橡膠球的滾動。利用兩組馬達趨動一顆驅動球產生全方位的運動，再藉由摩擦力驅使外球殼轉動。為了保持系統穩定，水平平台四周設置滑動球的設計，以避免兩點接觸產生的球體搖晃與不穩定現象。上方有頂住球殼的摩擦力加壓機構，輔助重力加壓的效果。(圖 4-9)

雖然不能自轉，但無須向量的計算，即可使用簡單控制兩馬達的運轉方向與速度達到軌跡與速度的運動要求。不僅省成本及材料，直觀上也容易進行設計與製作。故在第一階段的測試製作選用該設計，更詳細的結構設計，之後會再詳細討論。

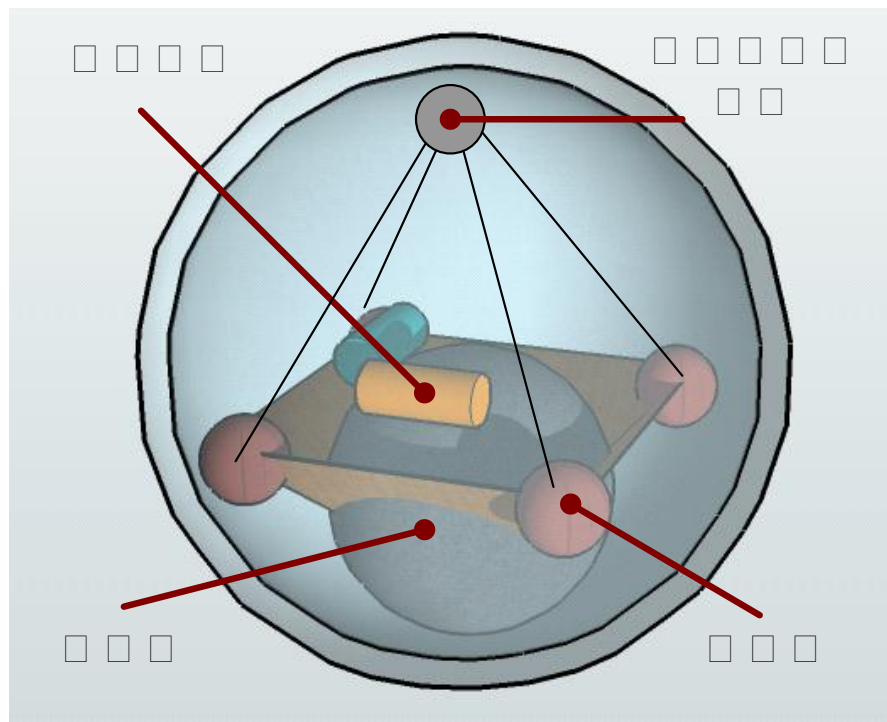


圖 4-9 單驅動球設計示意圖

4.3.2 設計二；三顆小球驅動設計

想法源自全向輪，先在球殼內建一個理想上為保持水平的平台，在此平台建力控制與電源供應系統，利用三組馬達帶動三顆驅動球，再藉由摩擦力驅動外部的球殼進行運動。利用三個彈性材質支撐內部結構，再加上摩擦力加壓機構，好使驅動球的摩擦力足夠驅動球體移動，並產生四點接觸的穩定結構（圖 4-10）。

由於是三顆驅動球向量的合成，因此能順利的向任何方位前進後退的運動，甚至原地自轉。但加壓後三顆球與外球殼並不一定是點接觸，面接觸可能會導致三顆驅動球在運動上的互相干涉問題，導致能量損耗。另外，三組馬達的向量控制較第一種設計複雜，因此暫時不考慮此設計。

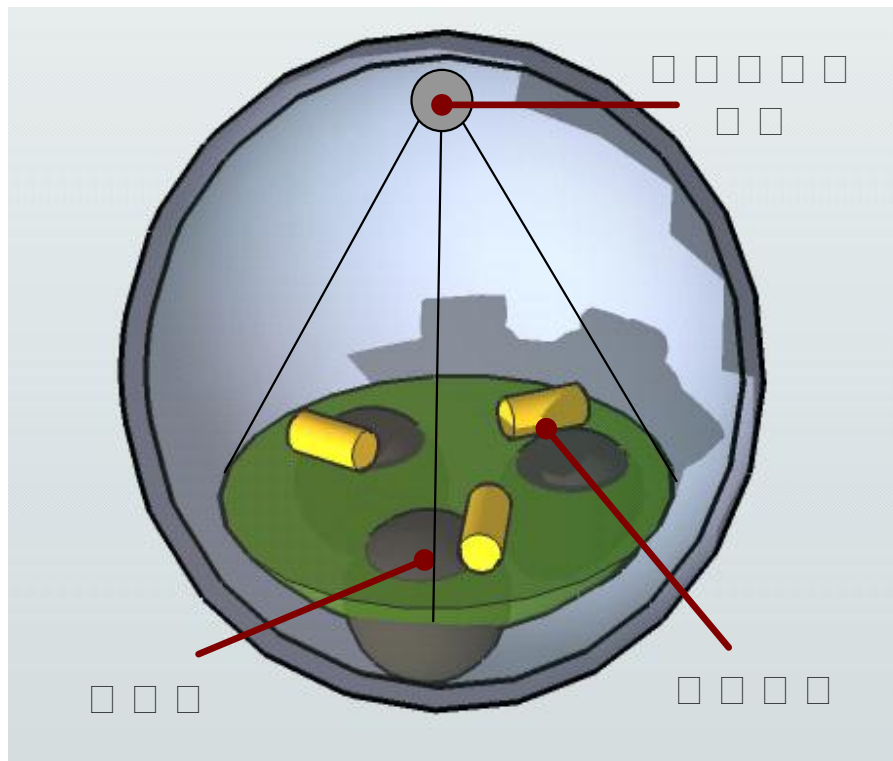


圖 4-10 三顆小球驅動設計示意圖

4.4 機器人實體化

在設計構想階段決定以單點摩擦驅動球這個設計後，便開始設計細部細節。所遇到的第一個問題，便是非常難尋找的球殼以及驅動球。所幸在網路上搜尋到製作地球儀的富加順實業股份有限公司⁽⁷⁾願意提供他們的地球儀供此專題使用，也在路邊攤販找到適合作為驅動球的主體的塑膠球。這兩項材料的大小無法再做更動，因此以下的設計都將兩者之大小固定。

在機器人實體化這個階段，將龐大的機器人系統拆解成許多小部分來進行設計，較能將困難簡化。最後再將所有的小部分拼湊成完整的藍圖，進而將機器人實體化。

4.4.1 幾何架構之設計

輔助支持點

驅動球要利用單點傳動力量給球殼，摩擦力是一個重要的因素。影響摩擦力之因素除了表面材質之外，就是作用於摩擦體上的正向力。為了使驅動球與球殼之間的摩擦力能有最好的傳遞效率，必須使壓在球上的各重力總和剛好落在驅動球與球殼的接觸點上，如此就能有最大的正向力。

重心最好落在驅動球與球殼的接觸點上，然而單點站立的物體若沒有藉著回饋控制系統的調整，很難維持平衡，因此必須有好的支持結構。整部機器人的主體設於球殼之中，恰好能利用球殼壁作為支撐。設計支撐架時有兩點考量，第一是整體盡量對 z 軸承環狀對稱，使重心落於 z 軸上。第二，由於主體和球殼接觸也會產生摩擦力，因此接觸點越少越好。

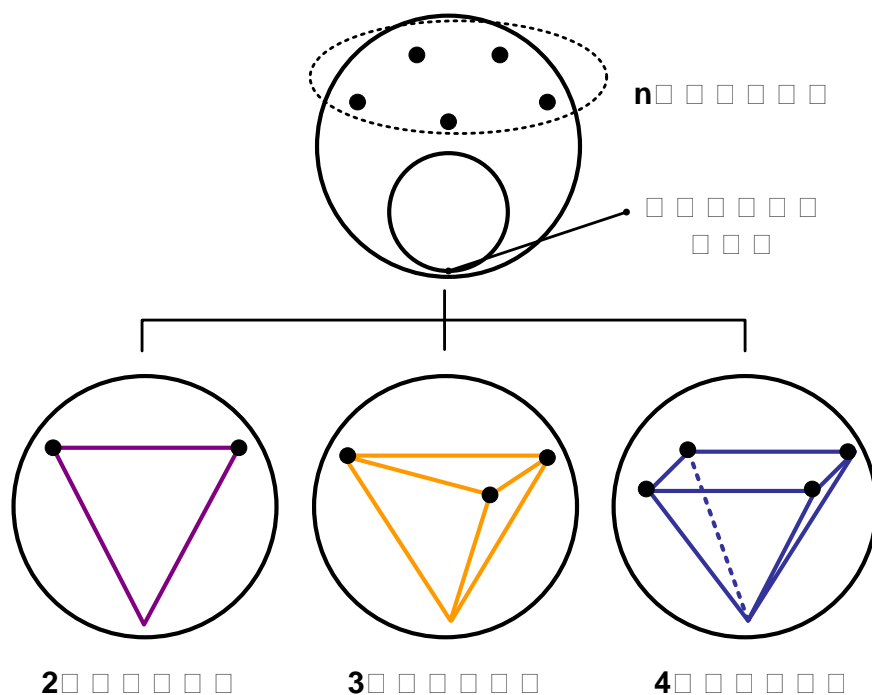


圖 4-11 輔助支持點數量設計

首先考慮僅有 2 個輔助支持點。雖然符合以上兩要求，實際上機器人主體必

然是 3D 立體的，要使重心落於由 2 個輔助支持點和驅動球與球殼接觸點形成的平面中是有難度的，一旦重心在平面之外，主體就容易傾斜。另外，若只有 2 個輔助支持點，在運動時他們要承擔因重心對地面產生的力矩負荷會非常的大，造成摩擦力而損耗能源。因此更進一步考慮 3 個輔助支持點，發現這樣的結構是比較平衡安定的。若再更進一步考慮 4 個輔助支持點，雖然更加安定，卻多了一個會產生摩擦力消耗的接觸點。因此整體考量結果決定用 3 個輔助支持點（圖 4-11）。

決定用 3 個輔助支持點後接著要確定他們的位置。把 3 個輔助支持點和驅動球與球殼接觸點視為一個四面體，就能畫出（圖 4-12）的簡圖。假設 3 個輔助支持點的位置像圖中（a）&（d）、（b）&（e）、（c）&（f）排列成低腰四面體、正四面體以及高腰四面體，並假設他們都是均質的立體幾何。由（a）、（b）、（c）三圖中可以清楚的看見四面體的重心以及球心的相對關係，發現（c）圖不是一個平衡的狀態，要維持這樣的狀態勢必要許多的能量以及回饋控制系統。（a）圖示穩定平衡，而（b）是隨遇平衡。

圖 4-12 中的（d）、（e）、（f）是假設所需之正向力一樣時 3 個輔助支持點造成的力效果以及力平衡圖。輔助支持點上的正向力由於幾何緣故，必定通過球心。因此可以看見（d）圖中輔助支持點上的正向力和我們要和驅動球與球殼接觸點上的正向力垂直，完全沒有增加正向力的效果。（f）圖中輔助支持點上的正向力能輕易地傳遞到驅動球與球殼接觸點上，增加其正向力來穩定其摩擦力。（e）圖則剛好介於其中（圖 4-12）。

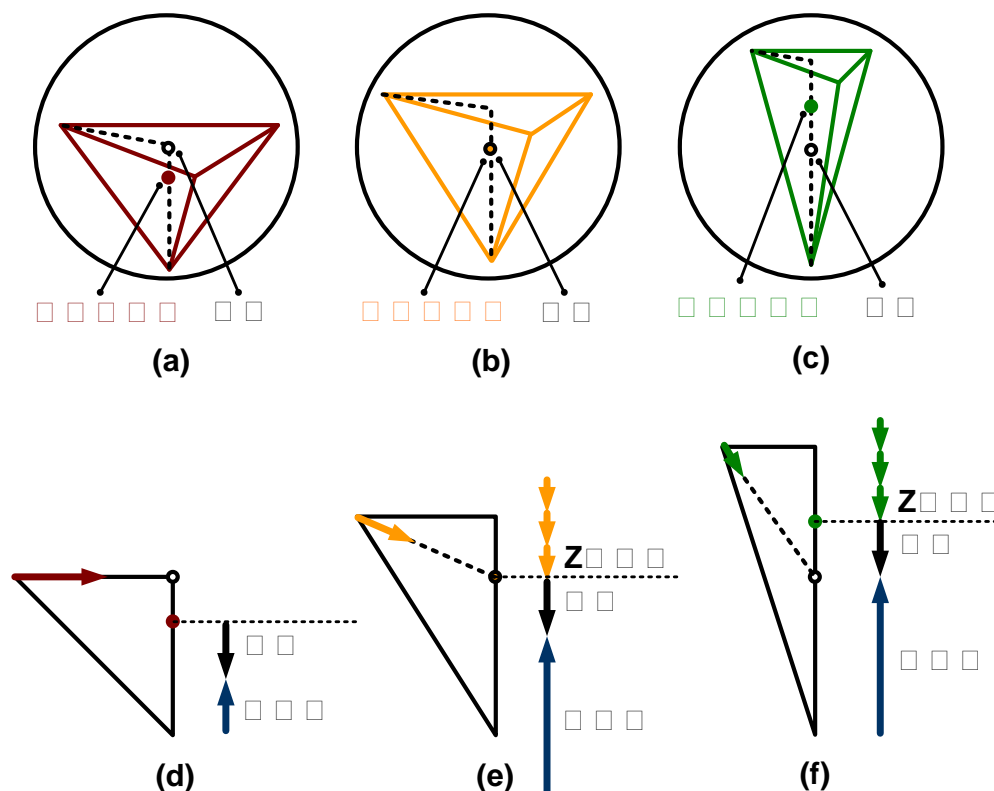


圖 4-12 輔助支撐點位置設計

綜觀來看，發現正四面體在力的傳遞以及穩定性上合起來看有較好的表現，因而選擇其作為整體幾何架構的設計。

重心配置

重心的位置對這部機器人很重要，重心越低系統越容易穩定。直到目前為止設計出的機器人主要分為機器人主體以及驅動球。根據重心公式，兩者加起來的重心必在兩重心之間，重心無法壓得更低（圖 4-13）。

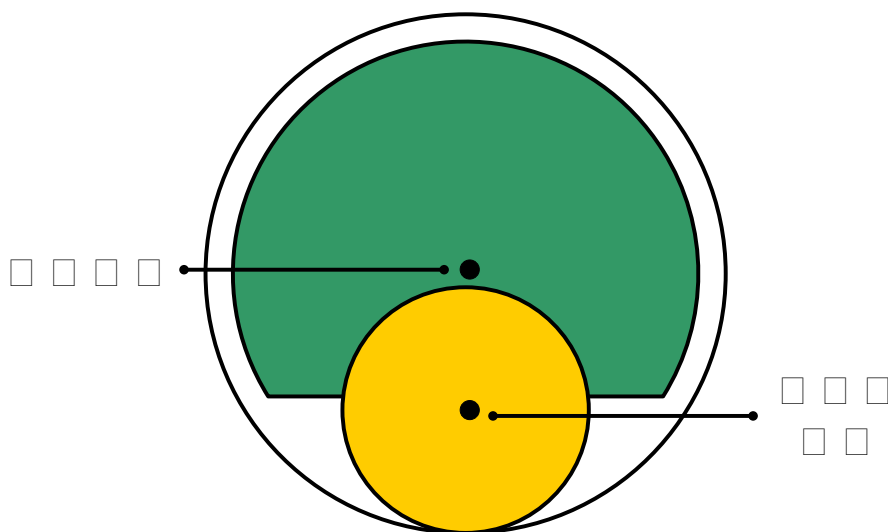


圖 4-13 球機器人設計演變圖之一

但若再加上一個下底板（圖 4-14），則重量總和形成的重心就有可能比（圖 4-13）更低。為了更好的穩定性，決定多加這個底板，可以將較重的物體，例如電池，放在上面以降低整體重心。

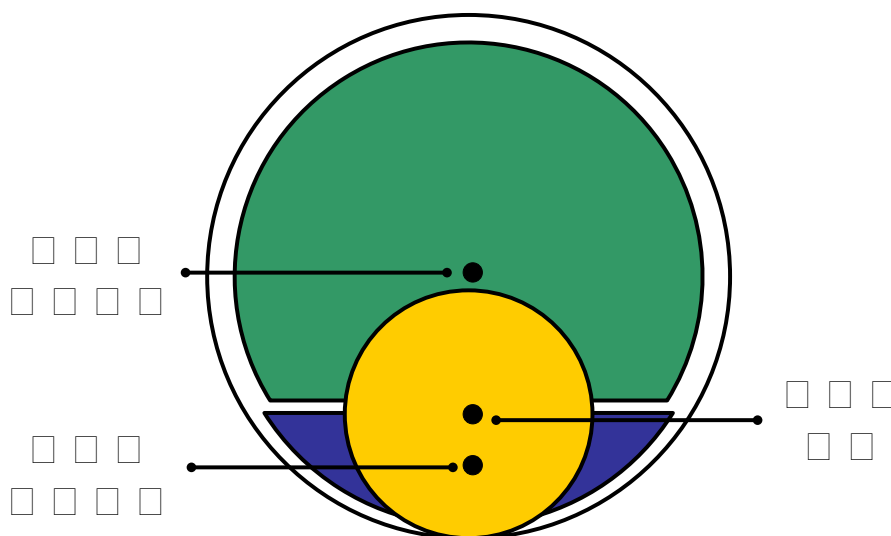


圖 4-14 球機器人設計演變圖之二

4.4.2 加壓系統之設計

加工精準度不是現階段能克服的問題，在球殼中的四個點會受球殼內部的表面粗糙度影響，有時可能會有一個點碰不到球殼面的情況。在球殼中，把任三個點形成的三角形放入球殼中，三個頂點必然能與球殼內表面接觸。而四個點形成的任意形狀就不能保證每個頂點都能接觸到球殼內表面。

為了使球機器人中的四個球殼接觸點都能隨時與球殼接觸，因此設計一個加壓機構，使得四個點能隨時觸碰球殼面（圖 4-15）。附加的好處是這個加壓機構能增加驅動球與球殼接觸點上的正向力。

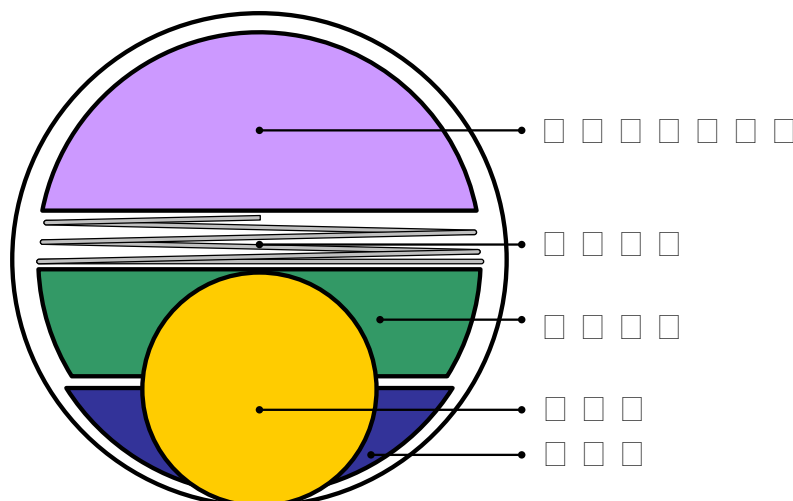


圖 4-15 球機器人設計演變圖之三

加壓機構是將彈簧置於上輔助支持機構與中間主體中間來製造預壓的機構。實際在找尋彈簧時，發現像（圖 4-15）中這樣大的彈簧不存在，因此以三個小彈簧來替代。又為了使三個彈簧能均勻受力，因此設計三個柱子，插在上輔助支持機構與中間之間，將彈簧分別套在柱子外側（圖 4-16）。如此一來，不但能保留彈簧的預壓，還能抑制住上輔助支持機構與中間主體之間不必要的相對移動。

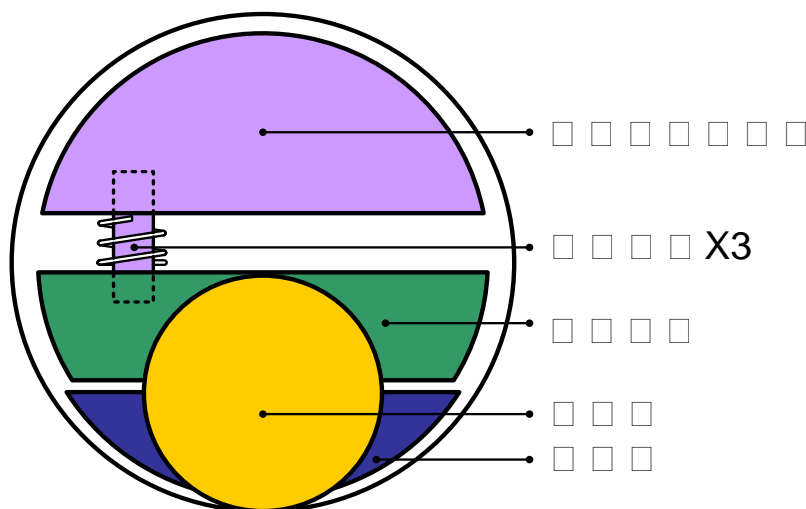


圖 4-16 球機器人設計演變圖之四

4.4.3 接觸穩定機構設計

在幾何架構之設計時推論出若要在球殼中內接一個立體形狀，最少需要四個點與球殼接觸。另外也用逼近法找到四個點的最佳排列位置；正四面體的頂點，其中最底部的頂點是驅動球與球殼接觸點，其餘的三個是輔助支持點。為了在接觸設計時能精準畫出輔助支持點的位置，因此作了以下的數學計算。

已知在正四面體當中，四條由頂點和對側正三角形重心的連線會交叉於正四面體的中心（圖 4-17）。在球內接正四面體中，任一個頂點到正四面體的重心連線必會與球接觸點垂直，這正是輔助支撐點要的性质。所以要找出輔助支持點的傾斜角，只要找到頂點到正四面體重心的連線與水平面的角度，即可。

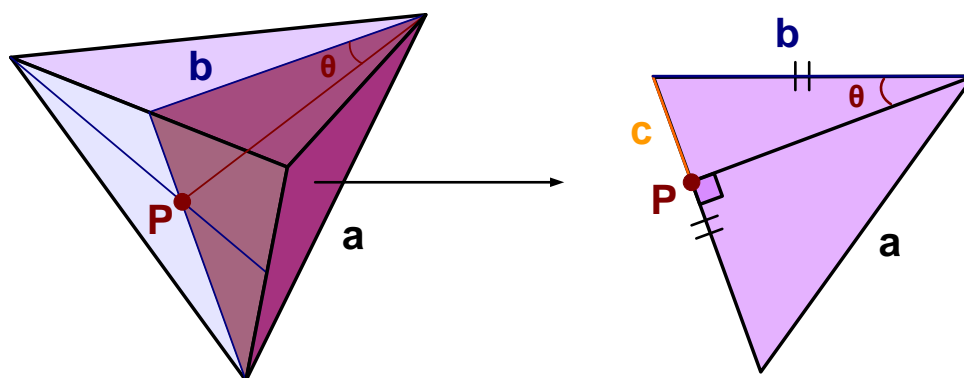


圖 4-17 求解頂點與重心連線傾斜角

觀看由邊線 a 和正三角形中線 b 形成的平面等腰三角形，可以得到（圖 4-17）的右圖。P 為三角形的重心，因此 c 的長度如（4-1）式所示：

$$c = \frac{1}{3}b \quad (4-1)$$

根據反三角函數，可以求得 θ ，也就是輔助支撐機構的傾斜角（4-2）式：

$$\theta = \sin^{-1} \frac{c}{b} = \sin^{-1} \frac{1}{3} \cong 20^\circ \quad (4-2)$$

概念設計時，以球接頭作為輔助支持結構。但是找了許久，卻找不到適合的球形接頭。後來透過「飆機器人」⁽¹¹⁾ 網站順利找到國外生產的小型塑膠球接頭（圖 4-18），於是訂購來做輔助支持用。



圖 4-18 塑膠球接頭

但機器人測試後，發現這種塑膠球接頭不敷使用，原因有二：第一，這種尺寸的球接頭對於整體機器人來說太小了，成受不了整體的重量，造成疑似應力集中的損壞現象。第二，球接頭的間隙中有些許潤滑液，但是由於已壓力太大，球接頭的間隙被擠壓，使得潤滑液被擠出，反而造成球與接頭間的磨擦力。整體機器無法在球殼中順利滑動，因此決定找其他材料。

最後在五金材料行找到牛眼輪，雖然非常重，然而卻能在承受很大的負荷下依然保持良好的滑動性。於是修改原設計而以牛眼輪作為輔助支持結構。為了能降低重心的位置，因而將輔助機構沒有必要的部分都簍空。利用壓克力板做出簡單的結構，並將傾斜 20 度的牛眼輪和加壓機構的彈簧一並放入（圖 4-19）。

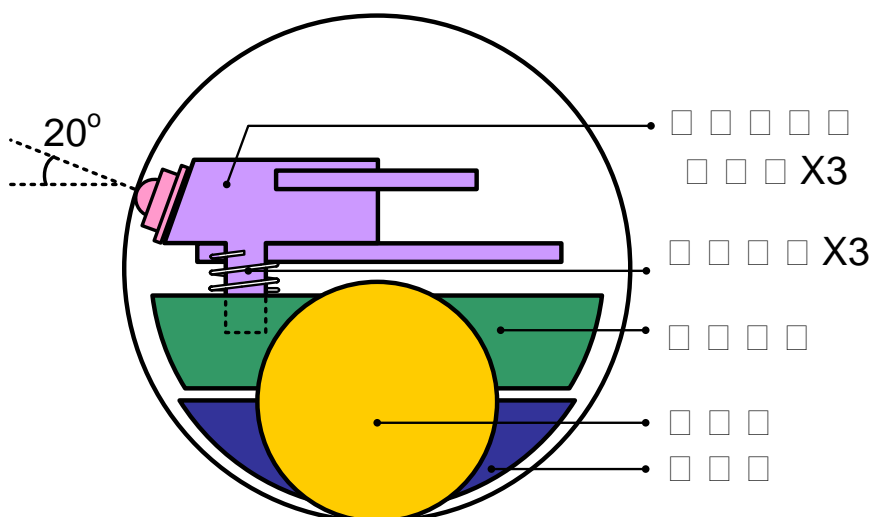


圖 4-19 球機器人設計演變圖之五

4.4.4 雷射加工與組裝設計

機器人的主體是利用壓克力組成的，利用林沛群教授實驗室中的雷射切割機，順利地切出需要的零件來組裝。第一次切出零件來組裝時，卻發現雷射切割切出來的邊緣不是垂直的。原因是壓克力受雷射加熱時，雷射從上表面照射到下表面，造成切割邊界產生梯形的樣子，這種現象特別容易發生在厚度較厚的壓克力板上。

為了能切出加工誤差較小的零件，因此將影響雷射加工的兩個主要因素：功率和速度做一的比較分析。發現功率調得越大，梯形的狀況越容易發生；調得太小，卻不容易切穿。速度調得太慢，也容易發生梯形的狀況，但若調得太快，則會形成融化不完全的彎月形地帶（圖 4-20）。

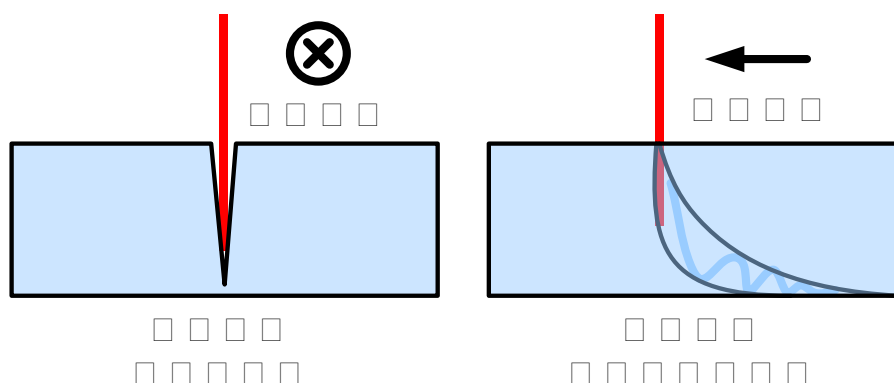


圖 4-20 雷射切割壓克力造成的兩種應避免的現象

在多次的實驗後，終於找到適合切 5mm 壓克力板的功率與速度，但梯形的狀況還是難免存在。球機器人有許多的零件是垂直組合的，當兩片壓克力板依照（圖 4-21）所示以螺絲鎖緊時，會因為接觸表面傾斜而導致壓克力板無法完全垂直。原本不理會這種狀況繼續組裝下去，卻發現這影響到市售的組裝，造成其他零件的互相干涉。

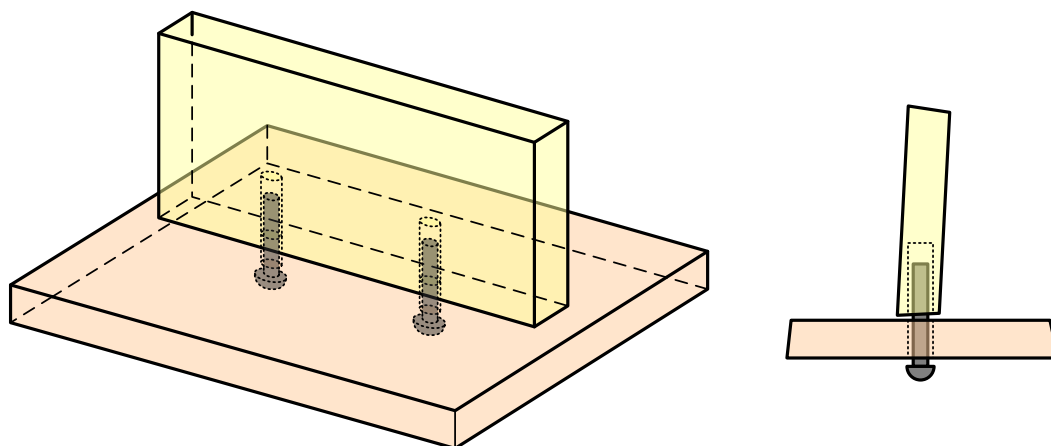


圖 4-21 因梯形切割造成組裝的傾斜

為了改善這種狀況，因此在互相垂直的壓克力零件上多設計了一個插槽，讓壓克力板以相嵌的方式保持垂直，最後同樣以螺絲鎖緊以防脫落（圖 4-22）。

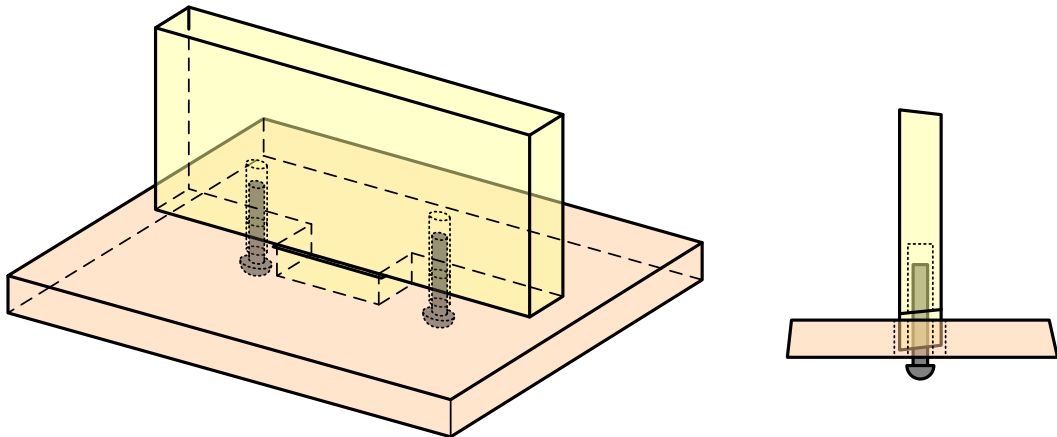


圖 4-22 解決方案

4.4.5 運動計算

設計的球機器人利用兩相互垂直的驅動桿，藉由摩擦力對驅動軸做出滾動驅動（圖 4-23）。在運動時，可以視為由 x 軸以及 y 軸的運動向量加總而成（圖 4-25）。驅動桿和驅動球之間為摩擦點接觸，假設完全不打滑，驅動球和驅動桿之間能作相對滾動，且驅動球能任意自轉，合起來是一個可控制的自由度與一個不可控自由度（唯一的限制是兩個軸必須要互相垂直，且他們與驅動球的接觸點和驅動球的圓心必須要共面）。當 x 軸驅動軸旋轉時，驅動球會跟著滾動；由 y 軸驅動軸的接觸點限制，像是在驅動球的 y 軸上接了一個旋轉接頭（圖 4-24 紅圈所示），使得驅動軸僅能繞 y 軸旋轉，進而使機器人在 x 軸上移動。

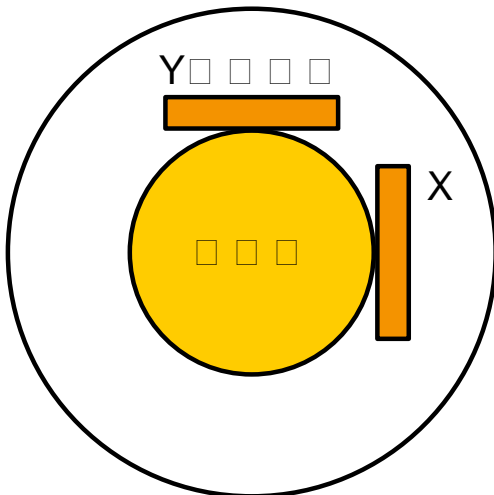


圖 4-23 驅動裝置俯視簡圖

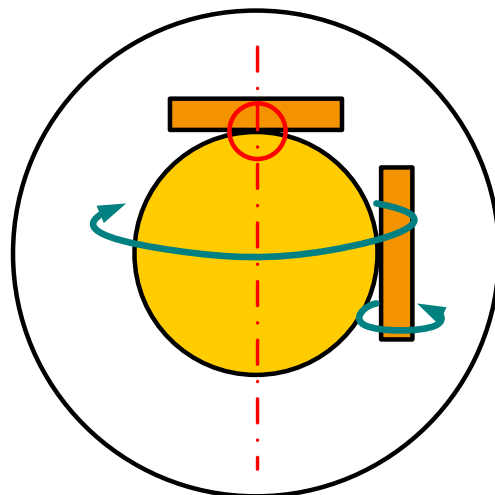


圖 4-24 x 軸驅動軸旋轉示意圖

反之，若 y 軸驅動軸旋轉，x 軸驅動軸即扮演著旋轉接頭的角色。如果兩個驅動軸同時運動，就能使驅動球產生不同的運動方位。

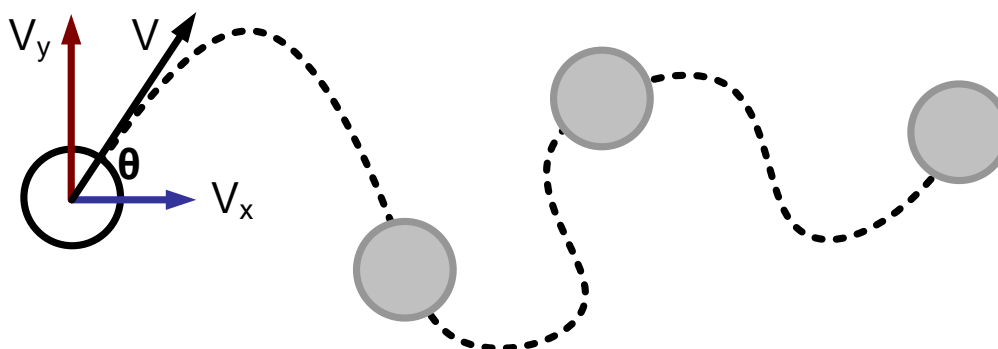


圖 4-25 運動向量拆解

如果球機器人要朝 θ 方向以速度 V 前進（圖 4-25），則可以將 V 分成 V_x 和 V_y 兩個向量（4-4）式、（4-5 式）：

$$V_x = V \cdot \cos\theta \quad (4-4)$$

$$V_y = V \cdot \sin\theta \quad (4-5)$$

球機器人的前進方向與馬達的轉速成正比，而馬達的轉速與供給之電壓成正比。因此只要調控兩個馬達的電壓輸入，即可合成所需的各種運動方向。

4.4.6 馬達選用

在有限的空間內要裝入馬達就已經頗有難度，要馬達以某種動力傳動方式帶動驅動球而滾動整顆球也不簡單。因此選擇馬達時，除了考慮其扭力與轉速之外，也要考慮其大小。瀏覽祥儀馬達⁽⁸⁾的列表，找到型號 IG-12GM; Type 01 的馬達，直徑非常小，長度也不長。試畫其零件圖，並放入機器人組合圖後發現，他能剛好放在驅動球以及球殼中的間隙中，因此決定用該型號之馬達作為驅動，轉速比則待確定速度後再決定。

連接驅動馬達和驅動桿的是一組齒輪機構，由兩個直徑 16mm 的齒輪組成，因此改變的只有轉向而非轉速。由（圖 4-26）可以將整體運動機制視為一個在 2D 平面上由摩擦輪和齒輪形成的機構。（圖 4-26）中可以看到驅動馬達、驅動球以及外球殼都有相同轉向，而驅動桿呈反向旋轉。觀察驅動馬達與驅動桿之間的齒輪接頭、驅動桿與驅動球之間的滾動接頭、以及驅動球和外球殼之間的滾動接頭，可以發現牠們的切線速率 v 都一樣，可以表示成為（4-6）式

$$v = \omega_m \cdot r_m = \omega_1 \cdot r_1 = \omega_2 \cdot r_2 \quad (4-6)$$

v 也是整部球型機器人的滾動速度。

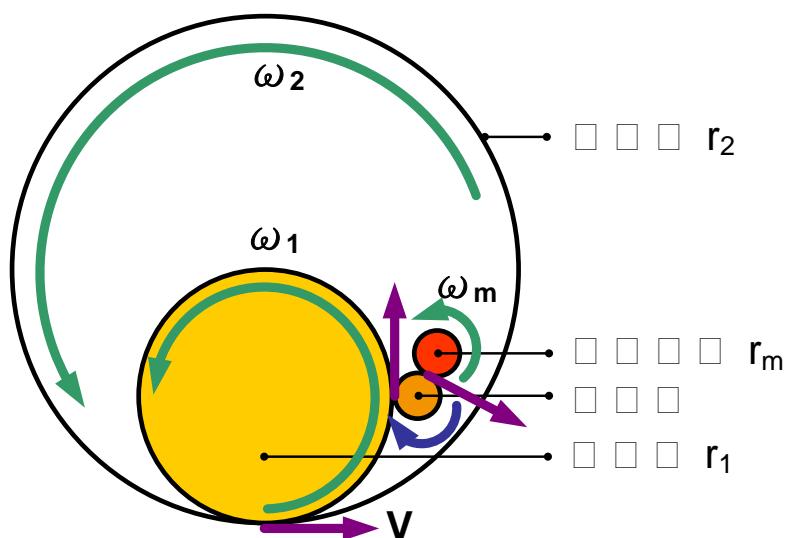


圖 4-26 轉動方向圖

由 (4-6) 式可以知道，如果給定切線速率，就能求出馬達的轉動速率。假設希望球機器人每分鐘能走 10 個自己的身長 (圖 4-27)，可以算出：

$$v = 240(\text{mm}) \times \frac{10-1}{1(\text{min})} = 2160(\text{mm}/\text{min}) = 3.6(\text{cm}/\text{s}) \quad (4-7)$$

套入 (式 4-6) 的公式可以找到轉速：

$$\omega_m = \frac{v}{r_m} = \frac{2160(\text{mm}/\text{min})}{8(\text{mm})} = 270(\text{rad}/\text{min}) = 43.0(\text{rpm}) \quad (4-8)$$

對照祥儀馬達⁽⁸⁾，IG-12GM；Type 01 的 data sheet。可以看到減速比為 1/256 的馬達，其定格轉速為 38，最為接近理論計算出的答案，故選用此。

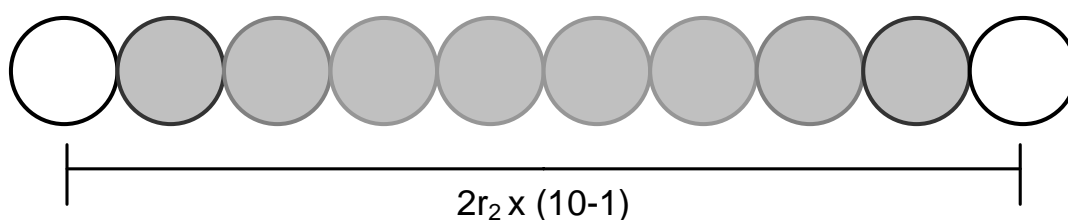


圖 4-27 欲達成 10 個球身的距離

但機器人完成後的第一次試跑，卻發現速度比預期來得慢很多。由於機器人穩定度不高，因此每次的試跑無法超過 20 秒，加上摩擦耗損及電壓不足，導致這幾秒間機器人看起來不太動。所以重新選擇下一個轉速比為 1/16 的馬達作為驅動。再次對照 data sheet 與 (4-6) 式，算出滾動速度：

$$v = \omega_m \cdot r_m = 155(\text{rpm}) \cdot 8(\text{mm}) = 7791(\text{mm}/\text{min}) = 13.0(\text{cm}/\text{s})$$

4.4.7 驅動裝置之設計

驅動桿屬於特殊零件，市面上找不到適合的零件，因此自行到學校的實習工廠，利用車床將鋁棒車出桿麵棍狀的驅動桿。鋁製的驅動桿和驅動球之間的摩擦力非常弱，因此在美工材料行裡找了橡皮管套在驅動桿外圍以增加其摩擦力。

驅動桿利用摩擦力來帶動驅動球，因此驅動軸施於驅動球的正向力成為關鍵的要素。為了使驅動球能有效將正向力施在驅動球上，因此在兩個軸的對面都加上牛眼輪，使得機構維持靜力平衡（圖 4-28 左圖）。但是牛眼輪實在太重，造成機器人嚴重傾斜，因而決定將牛眼輪減少一個，放在（圖 4-28 右圖）所示的位置。雖然牛眼輪承受的負荷增強，但卻還在他能承受的範圍中，因而形成立一個靜力平衡。

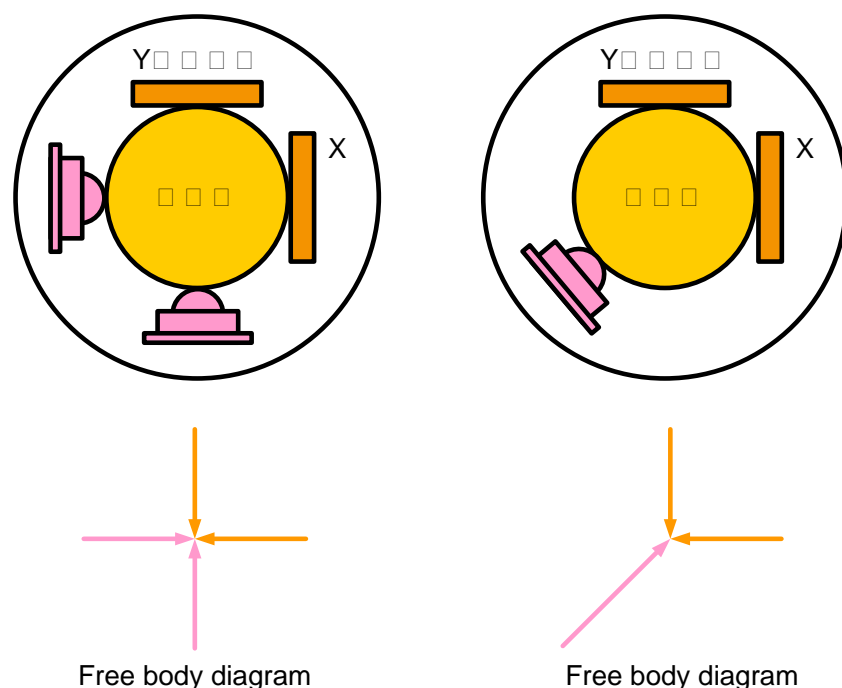


圖 4-28 Free Body Diagram

原本將驅動軸和牛眼輪之間的距離設計得比驅動球的直徑短，利用驅動球自己的彈性變形造成個接觸點之間的預壓，以提供摩擦力所需的正向力。實驗後卻發現這樣的摩擦力比預期的要小，帶不動整體機器人。因此決定給驅動軸施加彈力，以增加其正向力。

兩個軸必須要互相垂直，且他們與驅動球的接觸點和驅動球的圓心必須要共面，因此驅動軸的位置不能任意改變。如果要施加彈性力，勢必要將力施於驅動球接觸點和驅動球圓心的連線上，才能滿足兩驅動軸不相互干涉的條件。於是設計出側向加壓機構（圖 4-29），側向加壓機構由壓克力板和彈簧構成，利用彈力造成的力矩繞著支點對驅動球施壓。由於弧線改變非常小時近似於直線的改變，可以視為一個力直接施在水平面上。

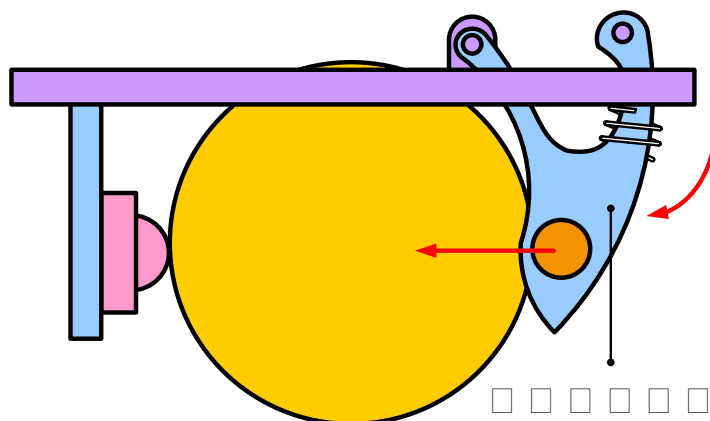


圖 4-29 側向加壓機構

最後，在驅動球正上方加上一個牛眼輪，防止驅動球被壓入主體裡面，也使機器人主體之重量能傳遞到驅動球上，形成較大的正向力，進而增強驅動球與外球殼之間的摩擦力。於是整體機器人的機構全部被設計出來，圖 4-30 為球機器人的機構示意圖。

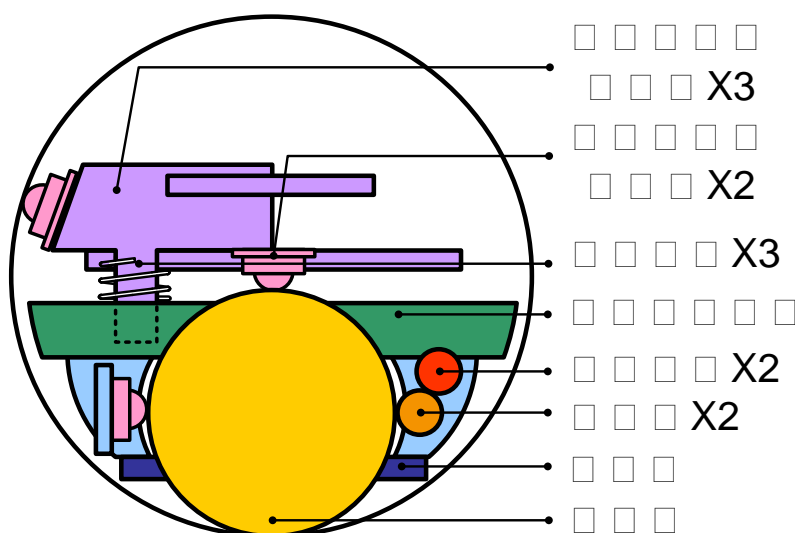


圖 4-30 球機器人設計演變圖之六

圖 4-31 為用較直覺方法繪成的能量傳遞簡意圖。假設中間主體是地桿不動，則可以看到一條主要的能量傳遞線以及兩條輔助支持的能量傳遞線。主要能量傳遞線從馬達開始，藉由螺絲鎖合傳到齒輪組，再藉螺絲鎖合傳到驅動軸，接著以摩擦力的形式傳給驅動球，並再以摩擦力傳到外球殼（圖 4-31 綠色線）。

驅動球支持線從主體開始，藉由彈簧施加彈力，透過軸承傳到驅動桿，再以正向力的形式傳到驅動球上，最後以正向力的方式從牛眼輪回到主體（圖 4-31 紫色線）。最後外球殼支持線從外球殼開始，以正向力的方式從牛眼輪傳到主體，再從牛眼輪傳到驅動球，最後以正向力的形式重新傳回外球殼（圖 4-31 藍色線）。

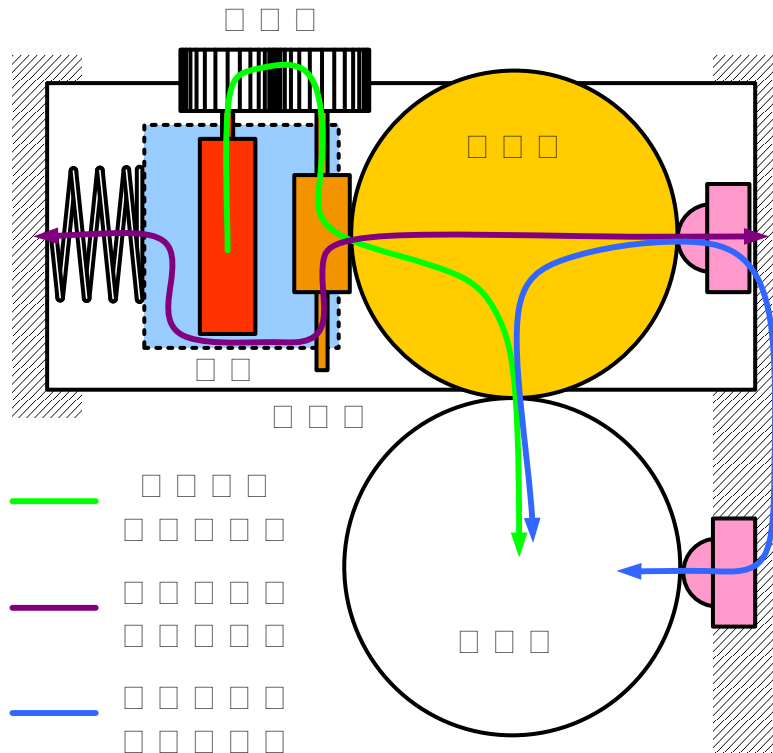


圖 4-31 能量傳遞圖

4.4.8 機電控制系統

透過無線遙控器，將訊號透過發射器以無線訊號傳送到接收器中，再將 PWM 訊號以馬達放大器放大其訊號。馬達接收到不同的 PWM 訊號後便以不同轉速運轉（圖 4-32）。所有的機電系統組成元件可見於表 4-1。

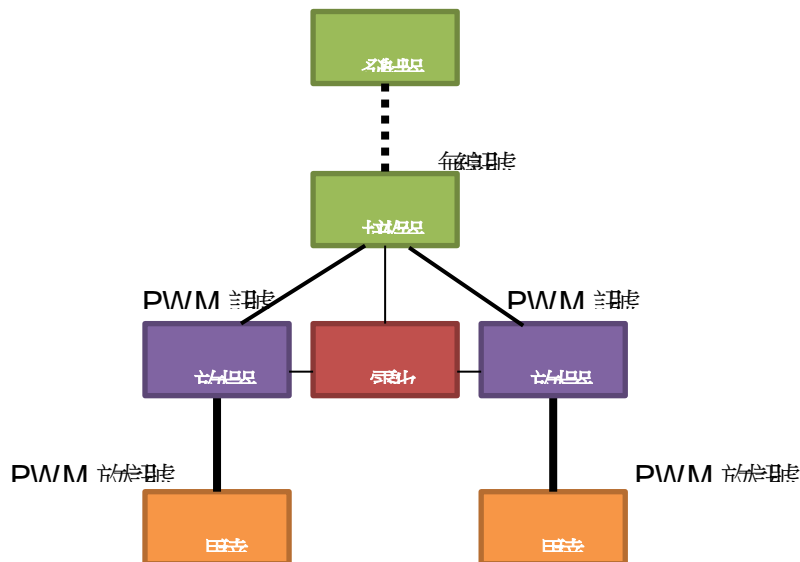


圖 4-32 機電系統架構

表 4-1 機電系統組成元件

名稱	特性	數量
1. 電池 NiMH	額定電壓 1.2V，2800mAh，適合大電流需求使用。	6
2. 馬達放大器 TAMIYA ELECTRONIC SPEED CONTROLLER, TEU-101BK	接收 PWM 訊號，輸出相應的 PWM 放大訊號。	2
3. 馬達 IG-12GM 01Type 減速比 1/64	小尺寸小功率馬達，減速比大。	2
4. 遙控器（發射器、接收器） Futaba ,4-Channel Digital Proportional R/C System,4EX-FM	四動遙控器，發射器與接受器搭配使用，接受器收到發射器的無線訊號後，產生相應的 PWM 訊號。	2

實際操縱機器人前，先測試遙控器和接受器的訊號。球機器人需要藉著兩個驅動軸以不同的轉速比例來決定行進的方向，馬達的轉速與電壓成正比，因此要確認從接收器傳出的電壓是否為線性系統。

於是先將接收器接上示波器，開始操縱遙控器。測試不同比例的輸入角度，卻發現示波器顯示的電壓一直沒有改變。請教指導教授後，才發現遙控接收器傳出的訊號並非類比訊號，而是一種名為 PWM（Pulse Width Modulation）的數位訊號，藉由固定週期，不同的脈波占空比模擬不同振幅大小的訊號（圖 4-33）。

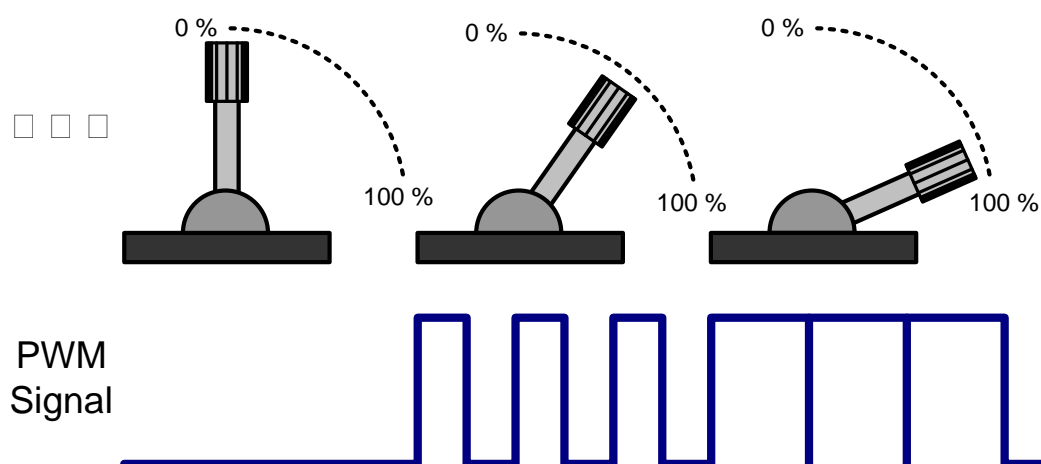


圖 4-33 遙控器下壓比例及 PWM 訊號

了解 PWM 的運作原則後便開始實際的遙控測試，發現馬達確實能藉著遙控桿下壓的程度來改變其轉動速度，兩顆馬達也能順利合成不同的向量。

4.4.9 電力供給系統

以現在工業的發展近況而言，凡是需要運動、需要耗能的機器，大多以供給電力為主要能量來源，球機器人亦無意外。考量到機動性及便利性，因此使用 NiMH 充電電池 6 顆串聯（共 7.2V）作為球機器人的機體電力來源。

當初選用電池電壓與容量所依循的原則，第一是參考馬達的功率，依照 data sheet（圖 4-34）上說明的需求伏特數再加以計算，以「能順利運轉 30 分鐘以上」的條件求得電池容量需求值再依此選購合適電池，爾後接著設計串、並聯電路，以符合本次計畫所需。

照當初計算出的數據，想正常驅動兩顆 IG-12GM 01Type（減速比 1/64）馬達是使用 5 顆電池（6.0V）為佳，不過計劃中期發覺馬達扭力又不如預期，無法順利使內小球驅動外大球，因此萌生更換馬達的念頭。但由於訂購置或到需要數周的工作天，於是詢問教授後決定先增加電壓逼出馬達的潛能，後來果然順利達到預期效果，因此便沿用 6 顆電池組為主驅動來源。

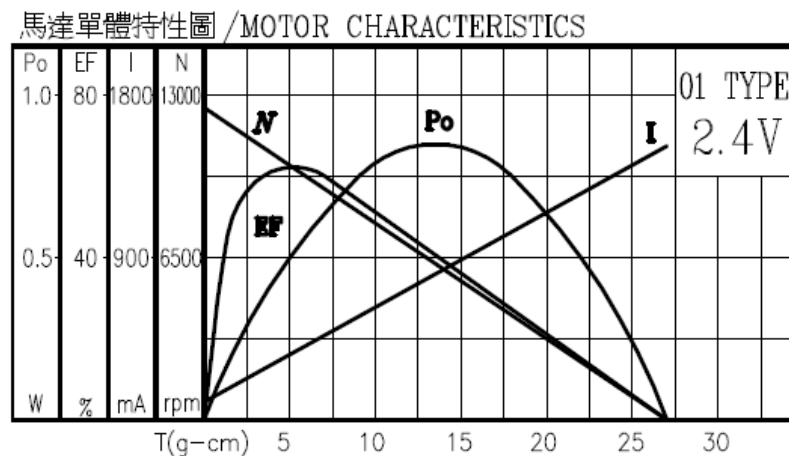


圖 4-34 IG-12GM 01Type 的 Data sheet⁽⁸⁾

五、結果與討論

5.1 實體成果

主體結構

機器人的主體部分，結構使用壓克力板材質，製造上以 CAD 電腦輔助繪圖程式繪製所需原件，再使用雷射切割機進行切割（圖 5-1）。

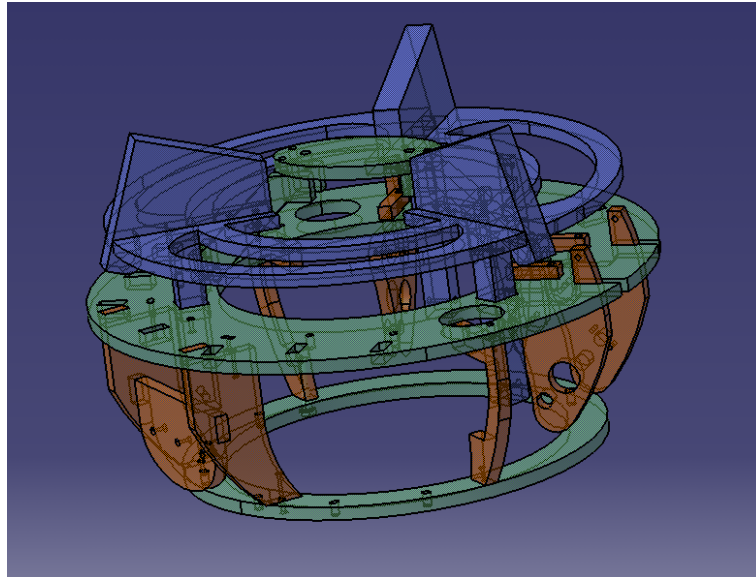


圖 5-1 機器人主體壓克力部份

穩定裝置

為了讓機器人主體在球殼內保持一定位置，我們在主體的周圍加上了牛眼輪，以使其可以在球殼內順利移動（圖 5-2、圖 5-3）。在驅動軸的斜對角與驅動球的上方位置，也使用牛眼輪保持其無摩擦力的接觸。另外在主體上版與下版的連結部份，使用彈簧作為支撐，以確保其與外殼可以四點接觸，並提供除了重力以外的第二個正向力，增加驅動球與球殼間的摩擦力。

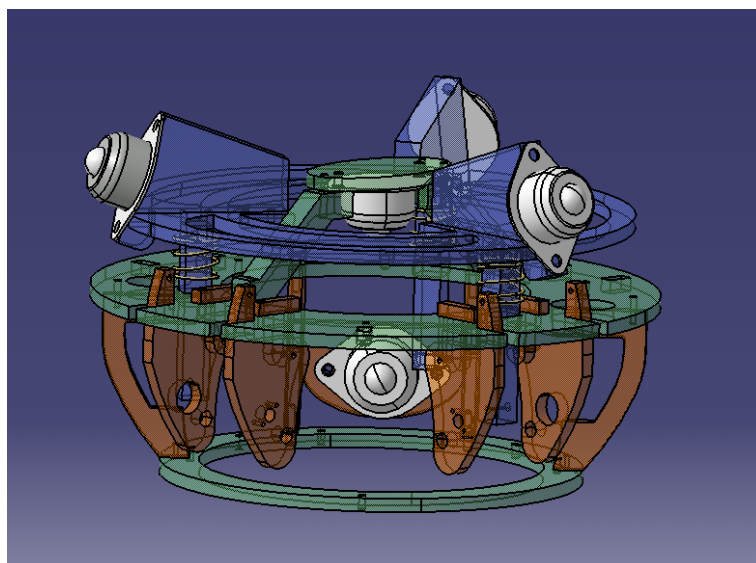


圖 5-2 主體加入穩定裝置示意圖



圖 5-3 輔助支稱機構實體

驅動系統

驅動軸使用車床加工鋁棒，搭配軸承使用，再套上橡皮管增加表面的摩擦力（圖 5-4）；驅動的部分為祥儀 IG-12GM 馬達和編碼器，搭配放大器、遙控器與接收器，藉由齒輪傳動到驅動軸（圖 5-6、圖 5-7、圖 5-8）。



圖 5-4 驅動鋁軸與軸承

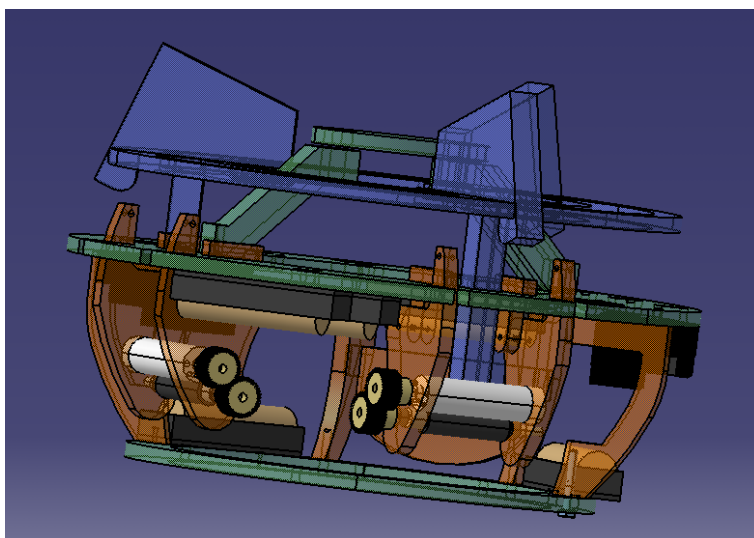


圖 5-5 主體加入驅動系統示意圖

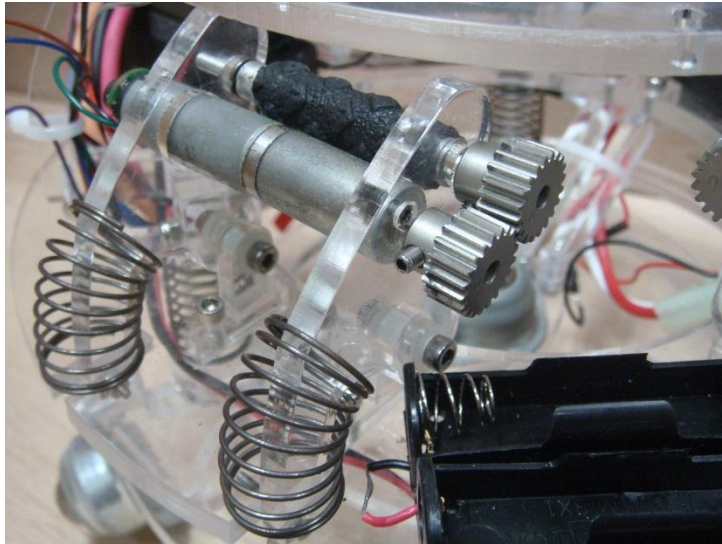


圖 5-6 側向加壓系統

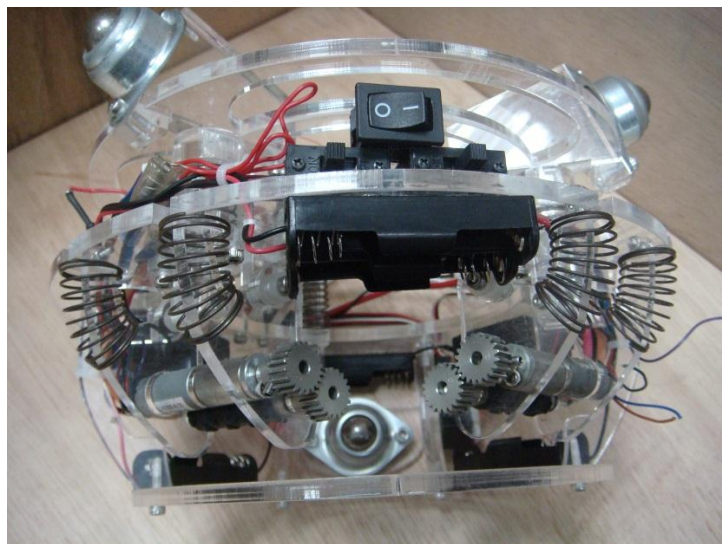


圖 5-7 驅動系統

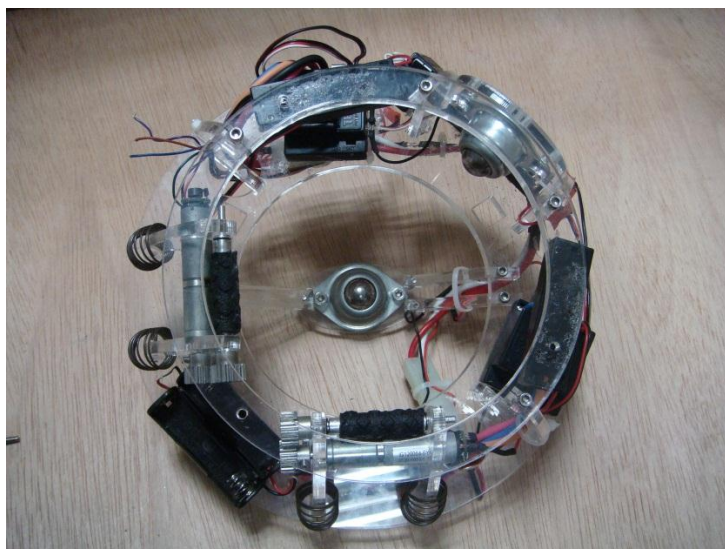


圖 5-8 驅動系統與接觸穩定機構

整體組裝

最後我們將富加順公司⁽⁷⁾免費提供給我們研究使用的地球儀球殼，與購買的驅動球置入，完成製造組裝的工作（圖 5-9、圖 5-10、圖 5-11）。

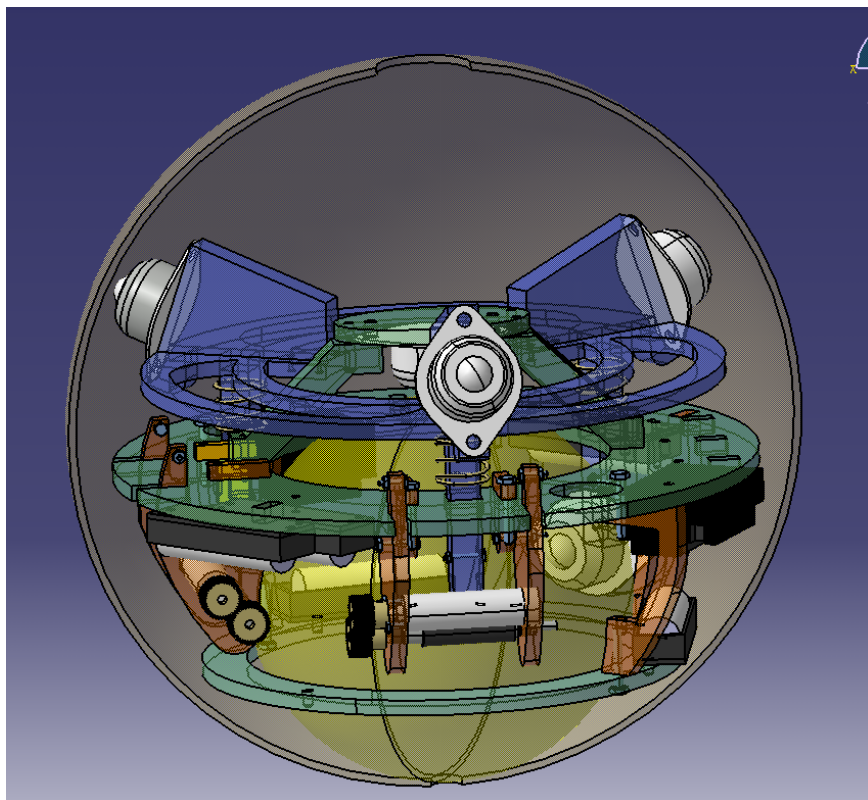


圖 5-9 機器人製造組裝完成圖

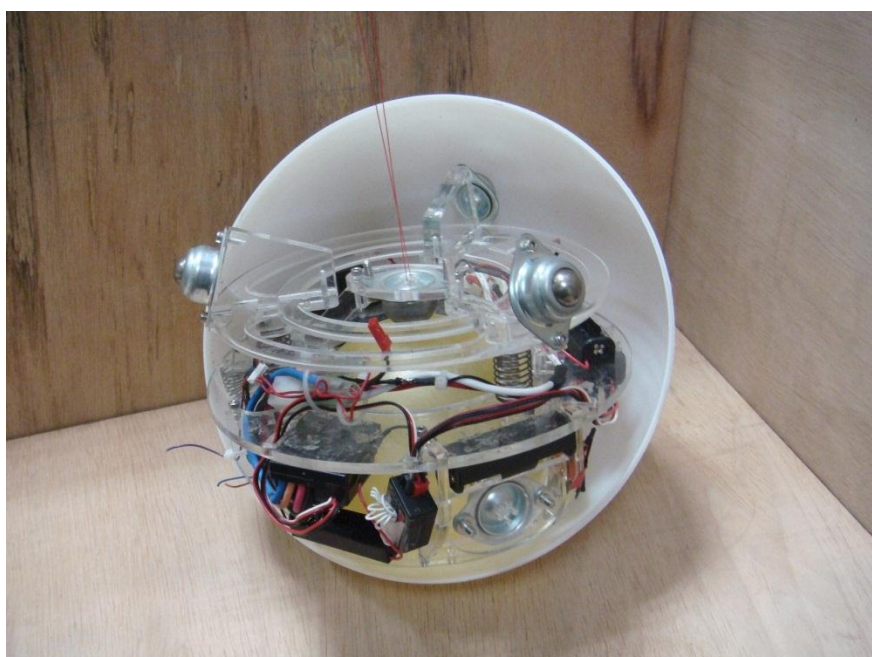


圖 5-10 機器人實圖



圖 5-11 封裝入球殼後的機器人成品

由於球機器人的運動軌跡搖搖晃晃的，看起來像是在跳華爾滋，取其特性命名 Waltz。又在前面加了一個 T，意為台灣製作，所以將此球機器人命名為 TWaltz。

5.2 運動測試

球型機器人組裝完後，從外面無法清楚辨認內部主體之方位，因此決定在裡面裝上 LED 燈，並且設計一遮罩使 LED 燈投射到外球殼時有圖案，以辨認其方位（圖 5-12、圖 5-13）。

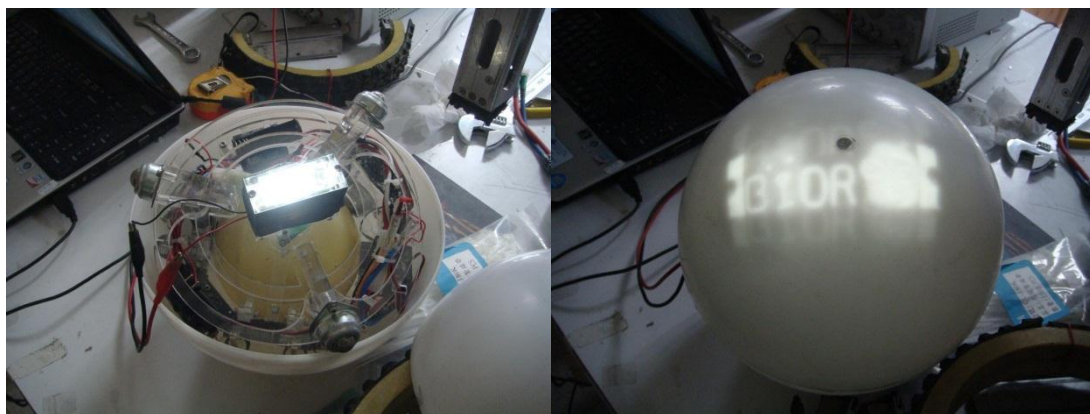


圖 5-12

圖 5-13

而實際上測試卻因為電壓不太夠，且燈罩太重而取消打燈的念頭。

測試的路徑包括室內、草地行走，坡度測試以及手控路徑測試。球經過修正後在室內路徑大致上都能控制，不容易空轉，晃動的情形一直都有。由於加工誤差和其他原因造成的摩擦力的緣故，當操縱球機器人直線前進時，他的前進方向會漸漸地跑位，變成轉彎。在草地上行走時，由於地面較軟，晃動的情形被吸收掉，因此較室內時穩；但也是因為草地較軟，造成馬達必須提供更大的扭力方能前進，造成空轉的次數增多。上坡以及下坡都不是非常好控制。手控路徑測試受限於球機器人無法好好地前進而有難度；然而，若習慣其遙控操作，還是走完整個路徑（圖 5-14 上、圖 5-14 下）。

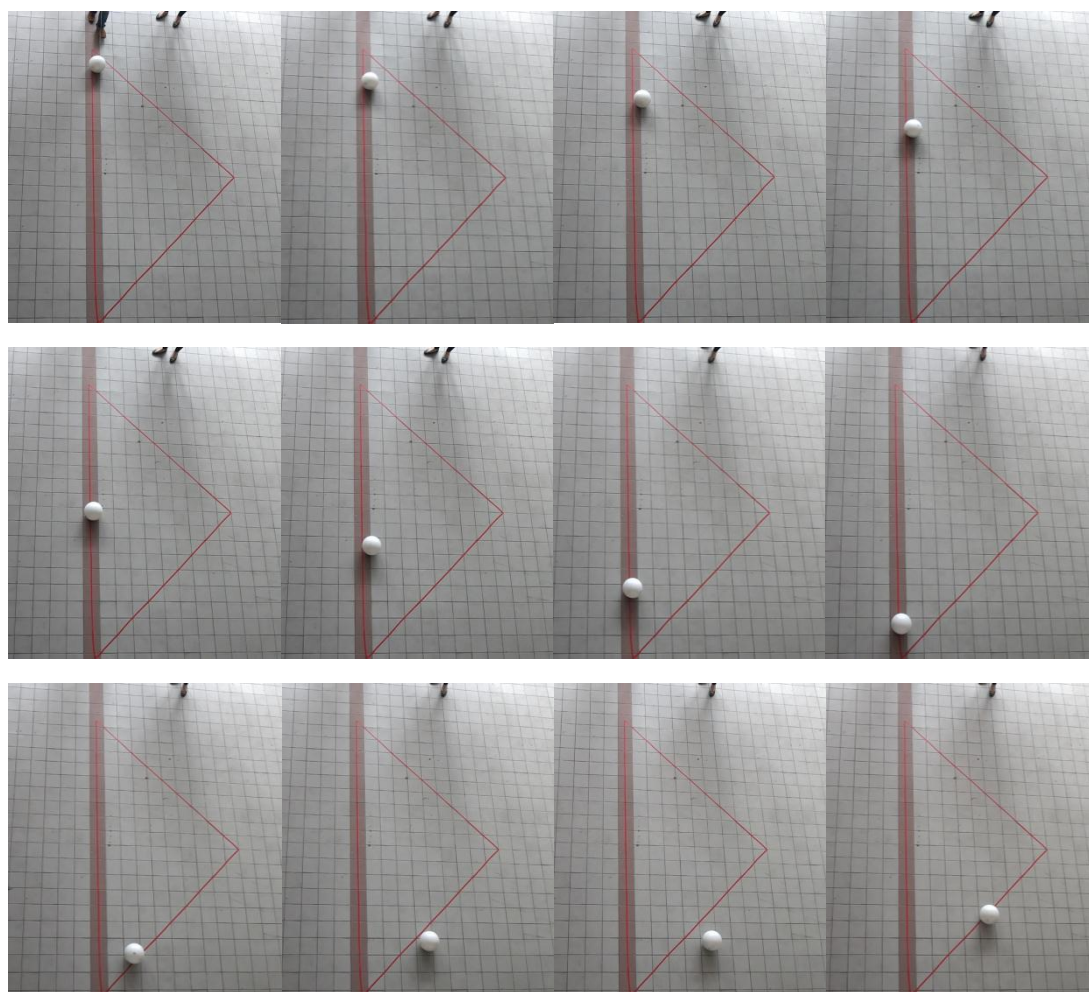


圖 5-14 上 手控路徑測試。圖陣由左到右、上至下，每張圖片間隔 3 秒鐘，總費時 1 分 12 秒。

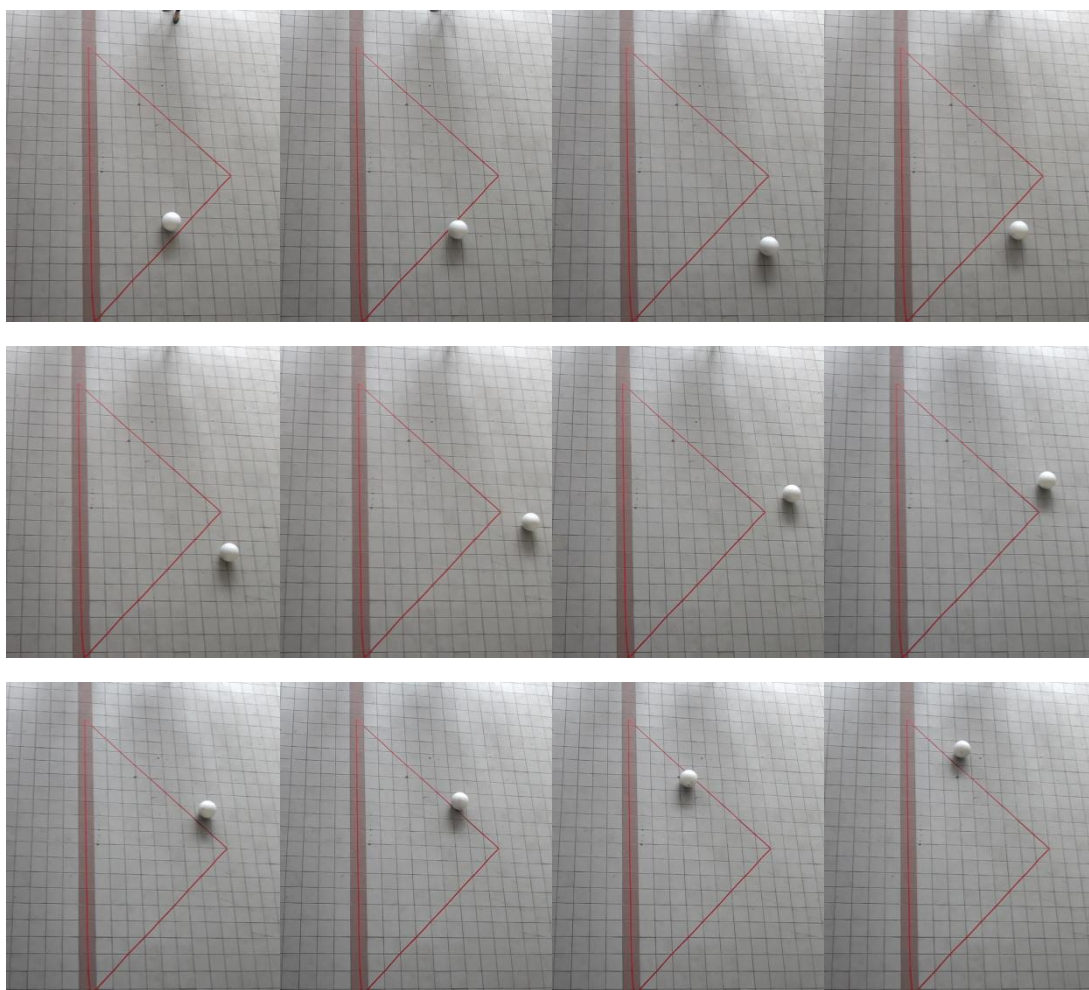


圖 5-14 下 手控路徑測試。圖陣由左到右、上至下，每張圖片間隔 3 秒鐘，總費時 1 分 12 秒。

5.3 改進與調整

第一次組裝測試之後，已能做出運動的功能。然而結果卻沒有預期中的好，特別是遙控機器時，馬達容易空轉。為此，將帶動中球的驅動軸以及其馬達重新設計成為帶有側向夾力的彈性機構，並且換了一組馬達。同時，也在居動軸的橡膠材質上刻上押花，藉此增加驅動球與中球的摩擦力，又換掉塑膠球接頭，改為較滑順的牛眼輪。第二次實驗證明，這樣的改良確實將打滑的問題降低了。

雖然不是封閉控制系統，但是測試路徑時發現球機器人時常做出晃動的行為；行進中忽然關閉馬達，球將也似乎因著慣性持續短時間小幅度前進，且也伴隨些微晃動。經由觀察之後，發現球機器人的主體之重心並未落在中心軸上，且位置也偏高。因此重新調配電池、控制器之位置，並且在壓克力上挖洞減輕重量，以調整整體重心。結果發現，慣性在整體機器之運動表現上扮演非常重要之角色，若非藉由回饋控制介入控制，實難改進。

單點摩擦力驅動確實可以做出無死角的「任意運動」運動，特別是從其機構設計的觀點來看。若從力學的角度看，卻能找到許多困難，最大的問題便是摩擦

力。球機器人中各接觸點的摩擦力卻不好測量，也不容易計算。摩擦力與表面性質、正向力、以及當時驅動軸的扭力（轉換成推進力）有相關，但除了表面性質之外，其餘的量值以及其方向一直都在改變，因而很難掌握。造成遙控馬達在漸變量大時容易使得驅動軸以及中球之間發生打滑之現象。

整體而言，球機器人已達成「簡單」及「無運動死角」這兩設計理念。若想更進一步發展，可以嘗試克服其「晃動和穩定性」並針對其「摩擦力」做出更深的研究。另外，「回饋控制」勢必也要放進考量中。

六、總結與心得

計畫永遠趕不上變化，又或者以一個工程人的角度應該這麼說——理想永遠不等於現實。預先設想了很多事、假設了很多種情況、也擬定了很多可能問題的解決方法，然而真正執行起來卻往往出乎意料之外。

在實際動手前，真的覺得此計畫是機器人領域裡全新的嘗試，因為前人做過的很多推導都不會適用在球機器人身上。單點摩擦力驅動，理論上將能使用同樣的單一接點 X 向驅動、隨之滾動，反之同理，比現有研究有更好的空間節省及機構改良。執行後卻發現，沒有相關文獻是有原因的，因為摩擦力掌握實屬一極重要，也極難掌握的課題。

想要馬達順利驅動球，需要摩擦力夠大以防止打滑，但同時若以荷重下壓方式增加摩擦係數，也容易使摩擦力過大而超過馬達負荷範圍，使其短路過熱甚至造成危險——其中微妙平衡需要耗時測試拿捏，方可達到一折衷值。而若機構內配重不均，也會使球機器人晃動，進而影響行進而的慣性，嚴重時甚至會無法控制，此為執行時另一挑戰。

總結來說，無論是在學術或應用上，單點摩擦驅動球型機器人有深入研究的價值，期盼將來能將更深研究此機器人。

七、致謝

單點動力傳動球型機器人是一個全新的概念，從無到有地創造出一台機器人困難度非常高；從機構分析、機械製圖，採買材料及製作，一直到電路焊接，遙控器學習等，都需花很多的時間摸索及學習。故本專題實質上是由一個團隊來集思廣益並分工製作的。

感謝 陳慶沛同學在電路連接、數學分析及機構改良上的幫忙；

感謝 蔡佳璇同學在機構設計以及電腦輔助製圖上的付出；

感謝 楊琇惠同學在材料搜尋以及工件製造的支援協助。

特別感謝 林沛群教授在本專題中對我們多方面指導，以及實驗室學長們的知識傳授；讓我們在這專題中學到很多電子元件及雷射切割等方面的應用知識，使得專題能順利進行。

八、附錄

8.1 Bill of Materials (BOM)

表 8-1 自製零件

件號	零件名稱	件數	材料
1	中央平板	1	壓克力
2	上板	1	壓克力
3	底板	1	壓克力
4	頂板	1	壓克力
5	下直立板一	4	壓克力
6	下直立板二	4	壓克力
7	下直立板三	2	壓克力
8	上直立板	3	壓克力
9	下牛眼輪連結板	1	壓克力
10	頂直立板一	1	壓克力
11	頂直立板二	2	壓克力
12	插槽板	4	壓克力
13	驅動軸	5	鋁

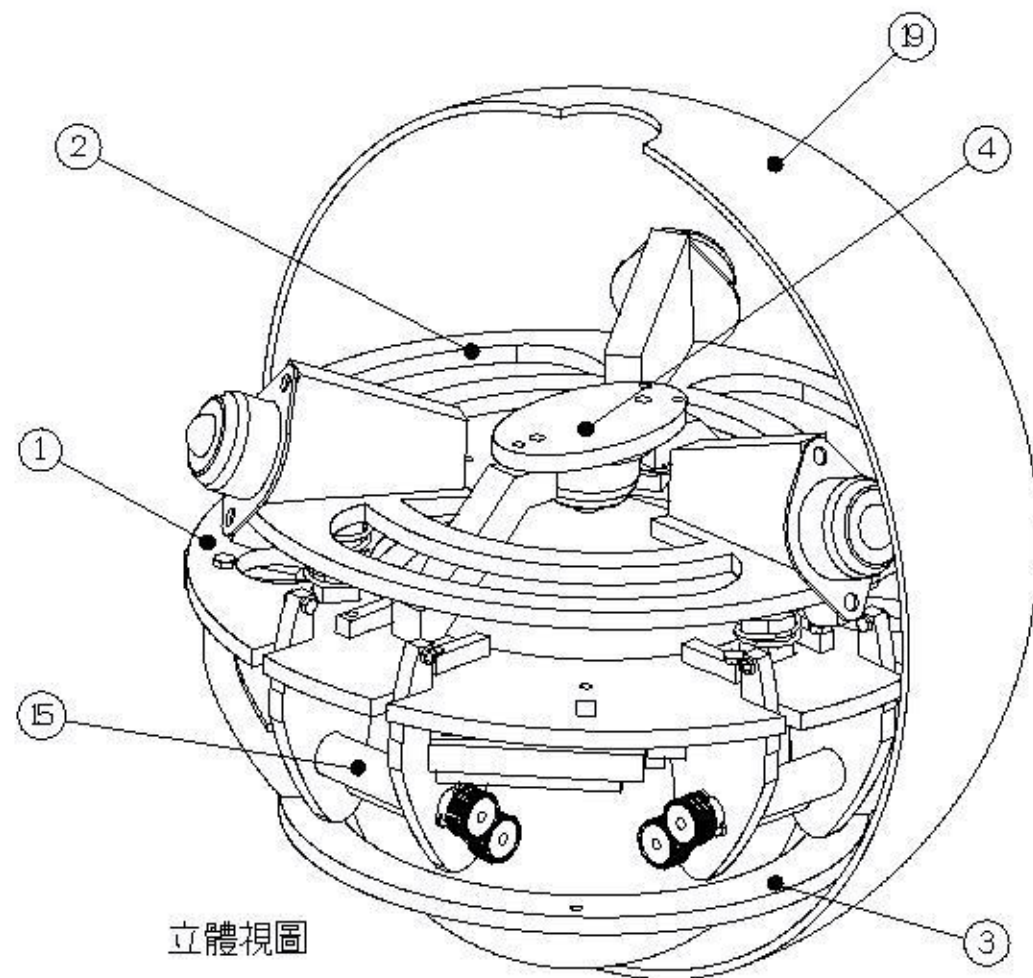
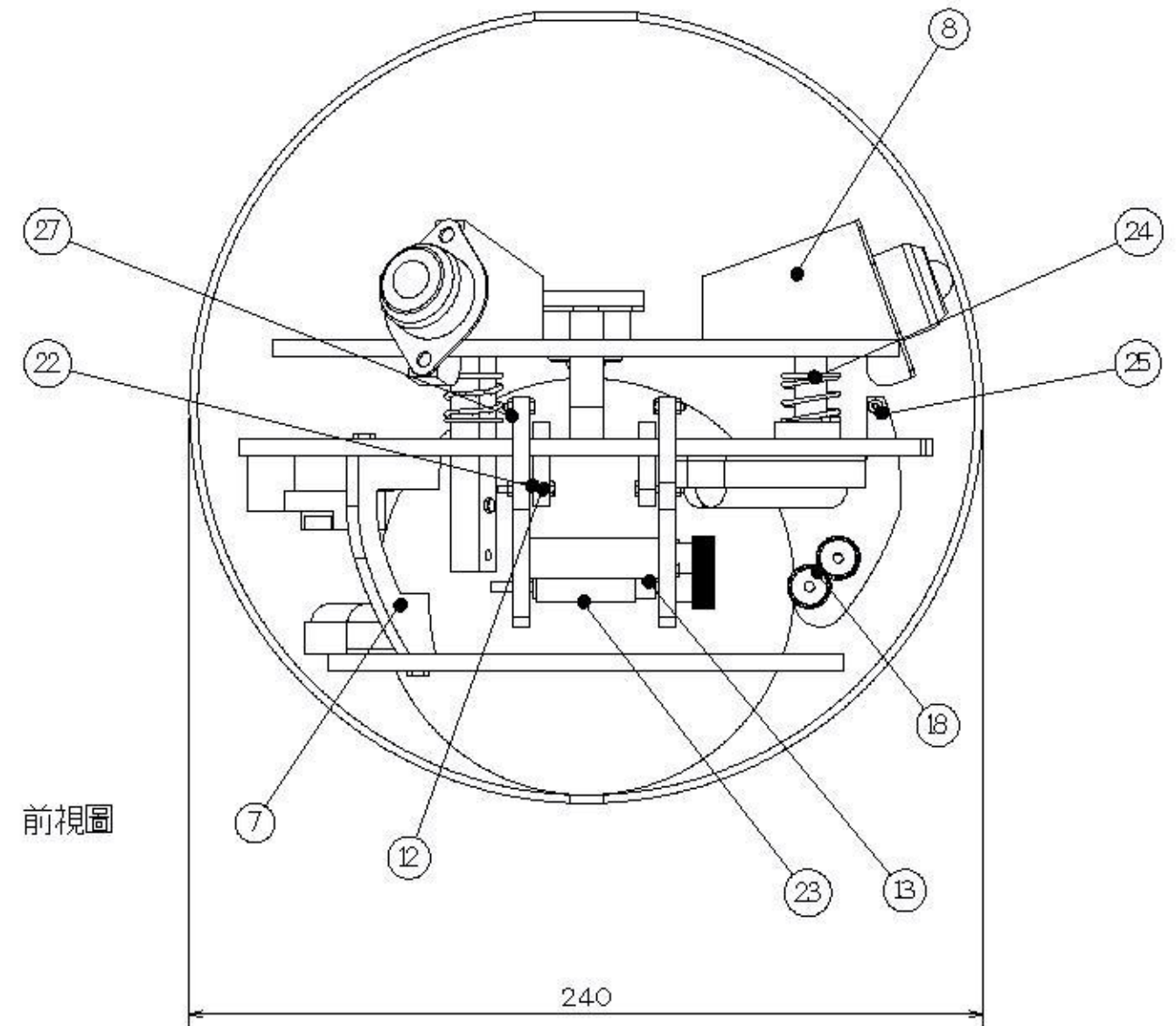
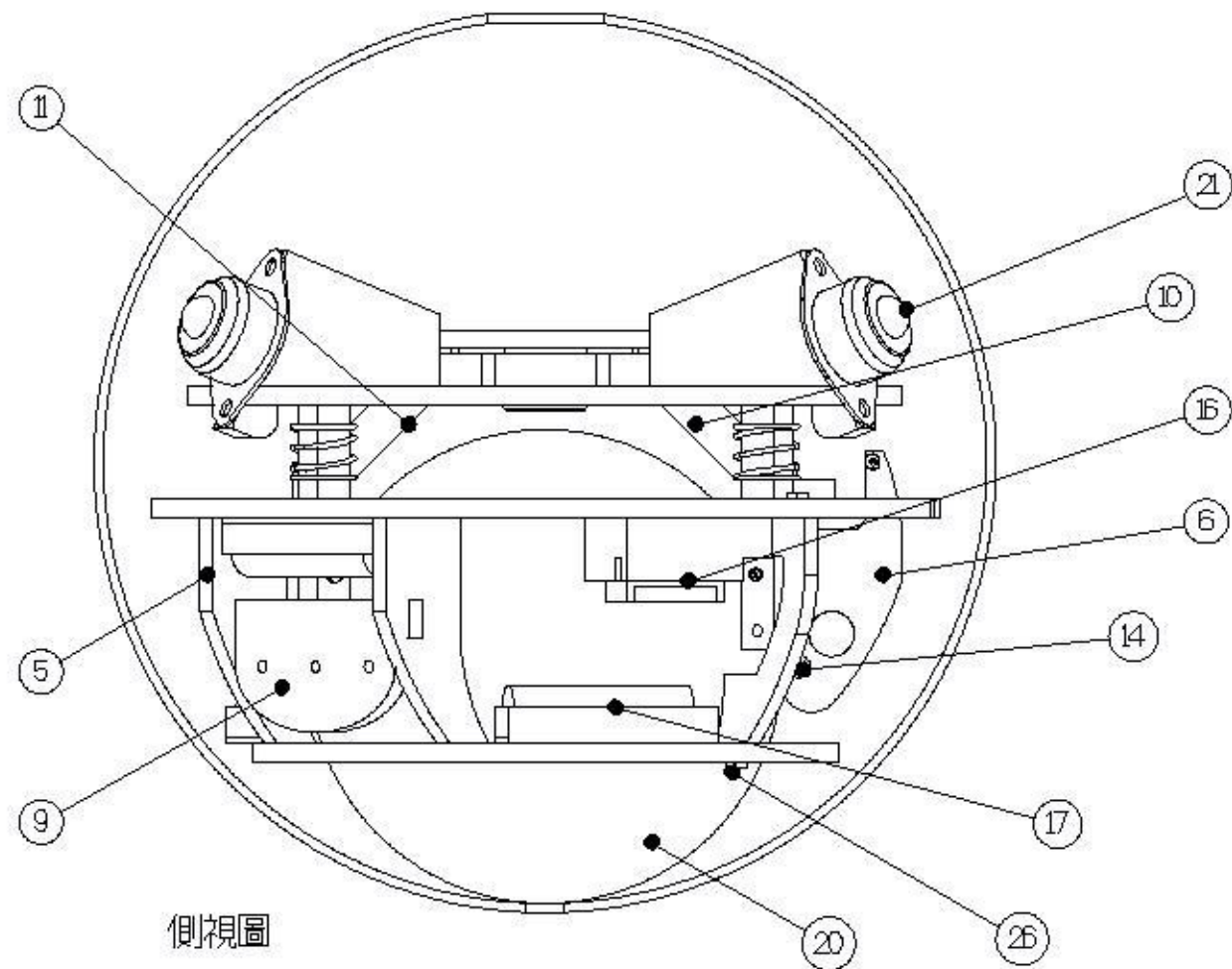
表 8-2 採購零件

件號	零件名稱	型號、規格	件數	單價	總價	來源廠商
14	軸承	內徑Ø3 外徑Ø6	9	35	315	添盛實業有限公司
15	馬達	IG-12GM 01Type 減速比 1/64	2		2100	祥儀企業股份有限公司
16	放大器	TAMIYA Electronic Speed Controller, TEU-101BK	2	600	1200	超速度遙控模型
17	三號電池座	-	6		50	川禾電氣五金行
18	齒輪	Kyosho Option House 17 Tooth Hard Pinion Gear W5087	4	160	640	萬年大樓

19	球殼	10 吋地球儀	1			富加順實業股份有限公司
20	驅動球	-	1			
21	牛眼輪		8	50	400	協興車輪行
22	小套筒	-	4			美工材料行
23	橡膠止滑布	-	2			
24	彈簧	內徑Ø15	3			雅銅五金彈簧行
25	M2 壓克力螺絲	M2	15			
26	M3 壓克力螺絲	M3	15			
27	M2 螺帽	M2	11			
28	遙控器	Futaba ,4-Channel Digital Proportional R/C System, 4EX-FM	1	2980	2980	超速度遙控模型
29	三號充電電池	三號	14		735	政豐企業有限公司
30	發泡劑	-	1	179	179	特力屋
31	萬向球	-	1	358	358	喬歐科計
32	軸承	Ø8			210	添盛實業有限公司
33	龍吐珠	-	1	92	92	瑞吉五金行
34	輕巧超輕土	-				光南大批發

8.2 總組合圖

Twaltz 球機器人的總組合圖極為複雜，各部份零組件詳如附圖，各編號都能對應到 BOM 上。



14	軸承	4	鋁軸	28		
13	驅動軸	2	壓克力	27	M2螺帽	11
12	插槽板	4	壓克力	26	M3壓克力螺絲	15
11	頂直立板二	2	壓克力	25	M2壓克力螺絲	15
10	頂直立板一	1	壓克力	24	彈簧	3
9	下牛眼輪連結板	1	壓克力	23	橡膠止滑布	2
8	上直立板	3	壓克力	22	小套筒	4
7	下直立板三	2	壓克力	21	牛眼輪	5
6	下直立板二	4	壓克力	20	驅動球	1
5	下直立板一	4	壓克力	19	球殼	1
4	頂板	1	壓克力	18	齒輪	4
3	底板	1	壓克力	17	電池與電池盒	6
2	上板	1	壓克力	16	放大器	2
1	中央平板	1	壓克力	15	馬達	2
件號	零件名稱	件數	備註	件號	零件名稱	件數

零件表

繪製者 蔡佳璇
校閱者 陳為熙

TWaltz總組合圖

比例 1:2
投影 第三角法
國立台灣大學
機械工程學系
日期 2011/03/26
圖號 001

九、參考文獻

1. **Spheroidz** by **MechRC**, *I4U News: Spheroidz is an RC Car in a Bubble*
<http://www.i4u.com/article30996.html>
2. **Gyrosphere robot** by **Greg Schroll**, *10 Most Brilliant Innovators of 2009: The Ball-Shaped Robot*
<http://www.popularmechanics.com/science/robotics/4332921.html?series=88>
3. **Orbs** by **The Swarm Team**, <http://wiki.orbswarm.com/> and <http://blog.orbswarm.com/>
4. **Spherical soft robot** by **Shinichi Hirai**, *Crawling and Jumping Soft Robots*
<http://www.ritsumeai.ac.jp/se/~hirai/research/softrobot-e.html>
5. **The 'wanna be' Miniball - BEAM robot** by **Solarbotics**,
http://www.youtube.com/watch?v=IwIRV_WmQ7A
6. **Rotundus**, <http://rotundus.se/specifications.html>
7. 地球儀公司富加順實業股份有限公司(茂意興企業有限公司)
http://tw.commerce.com.tw/modules.php?modules=company&action=company_in_side&ID=C0031953
8. 祥儀企業股份有限公司, <http://www.shayye.com.tw/>
9. **Futaba® Radio Control Systems and Accessories** <http://www.futaba-rc.com/>
10. **TAMIYA**, <http://www.tamiya.com/>
11. 飄機器人, <http://www.playrobot.com/cart/index.php>