

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生活與應用科學(一)科

032808

有教無累—擬真教練動作桌球餵球機設計與製作

學校名稱：嘉義市立蘭潭國民中學

作者： 國一 江育桓 國一 洪碩謙 國二 林育穎	指導老師： 張耀宗 陳文奇
---	-----------------------------

關鍵詞：餵球機、執拍擊球、擬真動作

有教無累—擬真桌球教練餵球機設計與製作

摘要

本研究主要是設計以球拍將球擊出的發球機。裝置分成二部分：先由滾輪發球機將球發出，再由擊球機揮拍打球。擊球機以往復式曲柄滑塊帶動球拍打球，並安裝 3 個伺服馬達分別控制揮拍角度、拍面觸球角度及擊球方向，模擬真人揮拍撞擊及摩擦桌球控制球速及旋轉。機身及滑塊曲柄等皆自行設計後以雷射切割木板膠合而成。擊球機啟動擊球時機則以微動開關控制，當滾輪發球機發球時滑塊觸動微動開關來啟動擊球機，當滑塊後退時則觸動停止開關完成一次發球；再以另一個伺服馬達週期性觸動滾輪發球機，如此即可持續發球讓練習者練習。另外我們利用 Arduino 程式控制，讓此裝置可以發出定點上旋球及二點交替變化上旋球。

壹、前言

一、研究動機：

我們在桌球隊訓練的發球機發出來的球，跟平時對打練習的球有很大不同，觀察發球機構造後發現是由滾輪發出的球，旋轉與球速都跟真人對打不同，於是我們想要研發以球拍擊打出球的發球機，讓發出的球與教練的球一樣，方便自主練習，也可以輔助教練教學時餵球，讓教練不會累，可以專心訓練學員動作。

二、研究目的：

- (一) 設計並製作滾輪式發球機。
- (二) 設計並製作仿生手執球拍擊球機。
- (三) 滾輪發球機與擊球機雙機機電整合及球速、落點、旋球測試。
- (四) Arduino 控制伺服馬達，並利用程式控制訓練球路。

三、文獻回顧：

作品名稱	全國科展屆數	相關內容
自動「自「發」、求新「球」變—自製桌	第55屆	發球機上方安裝減速齒輪，帶動挖洞的瓦楞板作為送球器，實現自動發球。利用兩端馬達的不同轉速，控

球發球機之成效探討		制發球速度和旋轉。
觸而及「發」- 自製不插電桌球發球 機自製之成效探討	第60屆	以2個3V馬達加上發射輪，在輪上套橡皮筋製作發球機，找出發射輪間距及橡皮筋的最佳條件，以可變電阻調整馬達轉速來發出不同旋轉球，另外製作送球轉盤，實驗出不會卡球的送球轉盤與底座之最佳距離。
智慧桌球練習機：以 Arduino 為核心之創 新設計	第63屆	以無刷馬達及玩具輪製作發球機，用Arduino控制馬達，並以手機App經藍牙遙控機器，控制左右旋球以及送球閘門。
小「兵」立大功-可 攜式乒乓發射器應用 於智慧 訓練之研製	第63屆	利用電磁線圈發球，與傳統發球機使用滾輪發球機構不同，使用手機 APP 與Arduino控制不同球路變化。在球桌安裝壓電片接收撞擊訊號，分析擊球落點位置、力道大小並計算成功率，並根據 AI 大數據矯正受試者錯誤姿勢。

上述作品皆是利用滾輪或電磁線圈將球發出，找不到以球拍擊打的發球機相關文獻，國內市售發球機也沒有球拍擊球的發球機，讓我們想要自行研發。

貳、研究設備及器材

- 一、研究使用設備：筆記型電腦、手機、雷射切割機。
- 二、主要器材



圖1 本研究使用之器材(由作者拍攝製作)

三、使用工具



圖2 本研究使用之工具(由作者拍攝製作)

四、使用軟體及網站

				
Arduino程式編輯	Excel	Inkscape製圖	LaserBox	疊圖軟體
				
Veed影片編輯	物聯網雲服務	線上流程圖製作	雷切盒子圖生成網站	chatgpt

參、研究過程與結果

一、實驗流程

透過資料參考腦力激盪，並與老師討論後，我們設計了以下的實驗流程：

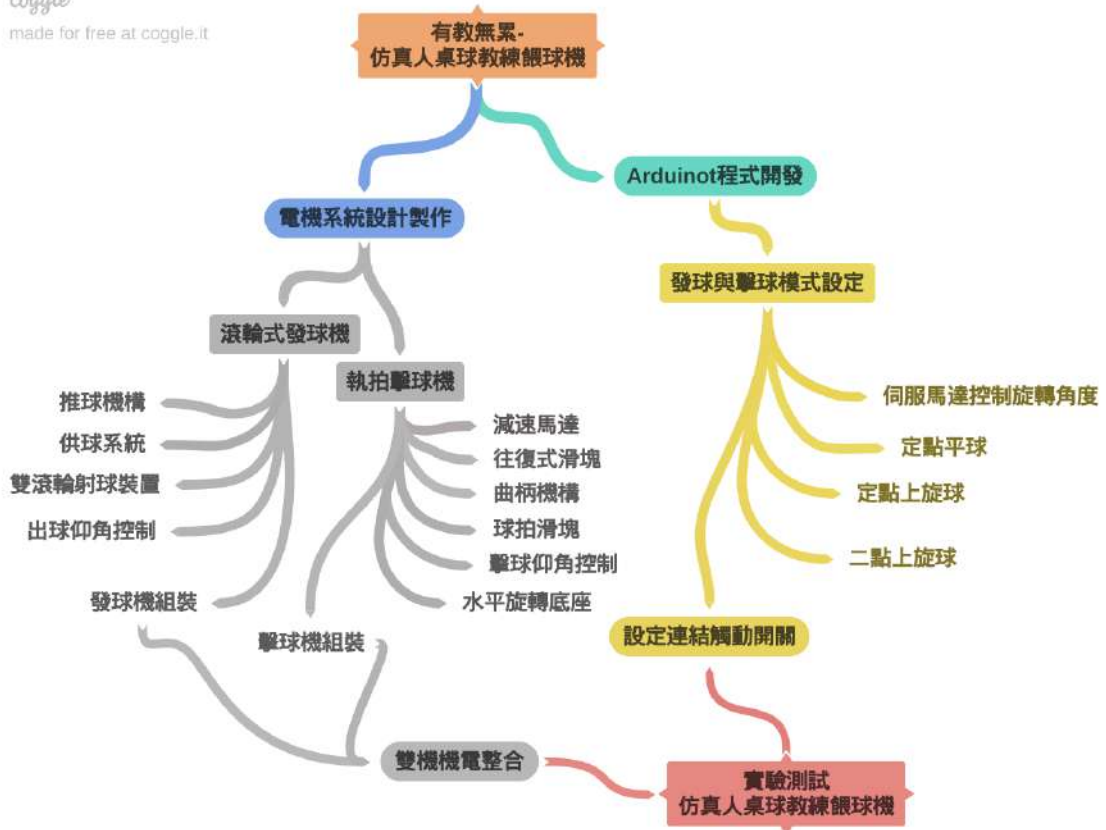


圖 3 仿真人桌球教練餵球機自造流程(本圖由作者自行製作)

二、實地觀察教練的餵球動作，會先以左手將球擲向右手握拍方向，再由右手執拍擊出，並以手腕旋轉球拍角度及手臂揮拍方向控制出球方向及旋轉。因此，我們依據分解動作設計，將餵球動作分解為二部分：1.模擬左手拋擲球的機器，需穩定但不需強力，參考歷屆全國科展作品製作的發球機作品後，設計輕量化且出球穩定度優化的滾輪發球機。2.右手握拍擊球的機器，原本是想以市售的六軸機械手臂來擊球，試用後發現扭力不足，無法瞬間發力擊球，若改用大扭力的伺服馬達價格很昂貴，所以嘗試自行設計製作。

三、滾輪發球機設計與製作

(一) 供球系統：將3mm椴木板切割成適度大小，以熱熔膠黏成四角錐台做為集球空間，底部挖出42mm的正方形出球孔，利用N20減速馬達及束帶製造擾動，避免球卡在洞口，如下頁表1圖4。

(二) 推球機構：我們一開始製作的發球機參考將科技課中提到的往復式滑塊連桿裝置應用在此，採用C130小馬達及減速齒輪盒，馬達轉動曲柄使連桿及滑塊

前推可將球推至滾輪處，此裝置可控制出球頻率並提供良好的出球穩定度。
詳見圖5。

表1 滾輪發球機設計與製作結構實體圖像(圖3~圖8由作者拍攝)

圖4 供球落球口擾動防卡球裝置	圖5 推球馬達減速齒輪滑塊連桿	圖6 射球馬達及滾輪	圖7 仰角控制腳架

(三) 雙滾輪射球裝置：使用兩顆C130小馬達及玩具車橡膠輪製作，當球被推進而接觸到滾輪時，藉由摩擦力將球噴出。如上表1圖6。

(四) 出球仰角控制機構：以木條做支架安裝伺服馬達，再安裝機身，以伺服馬達控制仰角。支架設計結構如上表1圖7。

(五) 機身組裝：合併供球、推球及雙滾輪射球系統，用Inkscape設計圖檔，以3mm椴木板雷切出適當的機身元件膠合完成滾輪發球機，如右圖8。

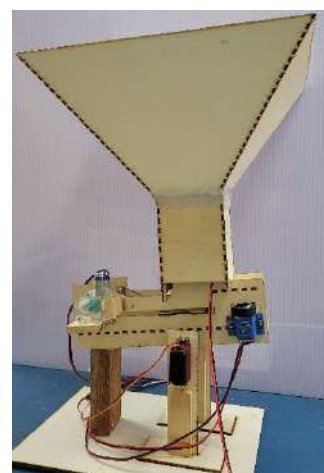


圖8 滾輪發球機組裝完成

四、執拍擊球機：

(一) 擊球推動系統：

1. 減速馬達：原以 C130 小馬達與減速齒輪盒作為驅動馬達，但塑膠齒輪磨損很快且扭力不足，第二次測試我們改用 N20 減速馬達，但扭力不足問題仍存在，所以嘗試使用 2 顆 N20 馬達並聯傳動，還沒裝上球拍時，整組元件推動正常，但裝上有重量的球拍後，只能維持水平方向的擊球，無法完成傾斜向上的揮拍動作，最後改用 12V 高扭力減速馬達幫助我們克服問題，如下頁表 2 圖 9。

2. 往復式滑塊曲柄機構作為揮拍擊球主要裝置，反覆調整實驗後，揮拍距離設定為 18cm，曲柄長則需 9cm，如表 2 圖 10。
3. 球拍滑塊：一開始原本想在機身挖一長縫，將球拍固定於長縫中，由於滑塊摩擦力太大，因此安裝軸承導輪在椴木板上下協助滑塊移動，而單片椴木板容易彎曲變形，於是將滑塊做成 10mm 厚的盒子，並在機身內部安裝導輪，將摩擦力減小，滑塊盒子構造概況請參照表 2 圖 11。

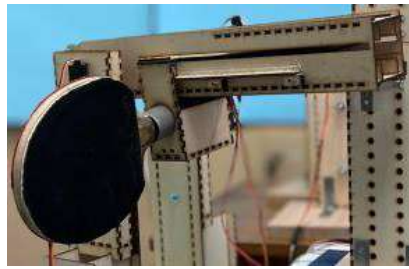
表 2 執拍擊球機設計與製作結構實體圖像(圖 9~圖 18 由作者拍攝)

圖9 減速馬達及機身側板	圖10 曲柄、滑塊及導輪	圖11 球拍架安裝於滑塊下方	圖12 球拍架安裝導輪及軌道減少摩擦力
圖13 擊球仰角控制腳架	圖14 上蓋板及下底板加裝導輪	圖15 上下底板加裝導輪，讓滑塊順利滑動	圖16 滑塊二側安裝導輪減少與機身側板間摩擦力

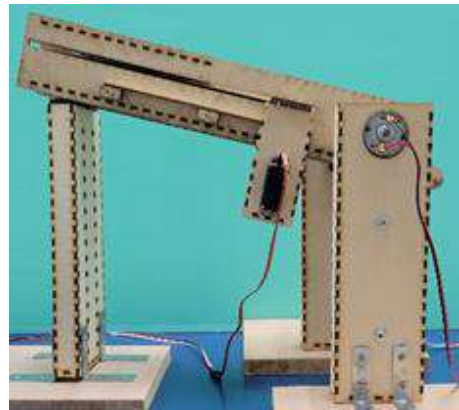
(二) 球拍架：滑塊上層凸出機身外側，連接盒子掛在機身下方，盒子一側安裝伺服馬達，球拍柄則由另一側置入盒內固定在伺服馬達上，利用伺服馬達來精確調整球拍觸球的角度，如上表 2 圖 11、12。

(三) 擊球仰角控制腳架：設計矩形椴木盒組裝成擊球機支架，安裝伺服馬達，再安裝機身，以伺服馬達控制整組擊球機的仰角。支架設計結構如上表2圖13。

(四) 機身組裝：合併上述元件，用Inkscape設計圖檔，以椴木板雷切成適當的機身形狀與大小，膠合並安裝所需的減速馬達、曲柄、連桿、滑塊、球拍架和擊球仰角控制支架組裝成執拍擊球機，機身完成圖如圖17~18。



↑圖17擊球機球拍裝於右側
→圖18由左側伺服馬達控制
球拍面觸球角度



五、滾輪發球機及執拍擊球機測試與修正

(一) 滾輪發球機

1. 球速測試：

如下圖 19，距發球機 1m 處垂直放置 pp 瓦楞板，將發球機對準瓦楞板發射，拍攝影片後，擷取影片中桌球飛行 1m 所需的時間。反覆偵測 100 顆球，紀錄所測得的球速，用 Excel 分析球速的平均值與標準差，評估滾輪發球機的穩定度，提供發球球速穩定性調整的參考依據。

2. 射點穩定測試：

設計如下圖 20 的標靶，同心圓半徑分別為 5、10、15cm，貼在垂直於桌面的 PP 板上於平板上，啟動滾輪發球機連續發射桌球 100 球，錄影分析桌球飛行 1m 後射擊標靶位置，並記錄 100 球次的射靶落點得分，評估滾輪發球機發射落點的穩定度。

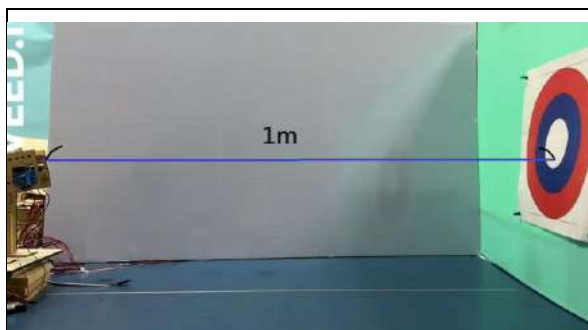


圖 19 球速測試裝置圖。(本圖由作者拍攝)

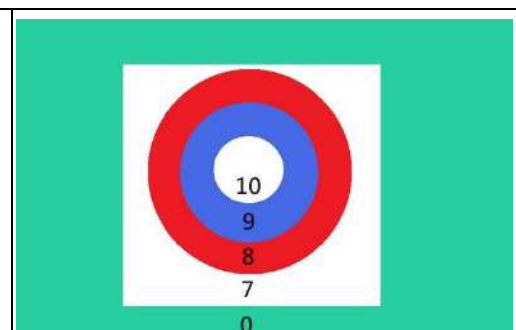


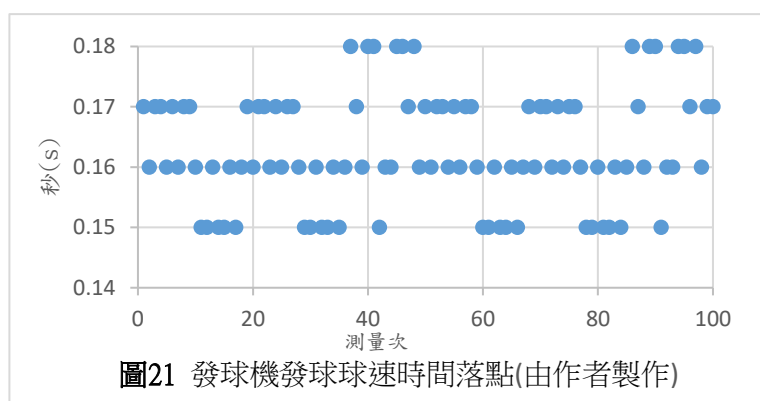
圖 20 射點穩定測試。(本圖由作者製作)

3. 如果球速及落點不穩定時或是會卡球，微調機身、滑塊、曲柄、連桿的尺寸，或

更換馬達及滾輪款式，將發球狀況調整至最穩定狀態。實驗調整後，最佳的發球測試整理如表 3。

表 3 滾輪發球機穩定性測試結果

滾輪發球機穩定性測試							
發球時間		發球球速				射點得分	
平均時間	標準差	平均秒速(m/s)	標準差	平均時速(km/hr)	標準差	平均得分	標準差
0.163	0.009	6.148	0.189	22.132	1.285	9.350	0.732



(二) 擊球機動作測試

1. 伺服馬達(4)控制球拍拍面轉動、伺服馬達(3)控制揮拍角度測試：Arduino 連接 ESP32 開發板控制伺服馬達，接線圖如右圖 22，連接手機的畫面如右圖 23，程式如附件一。測試是否

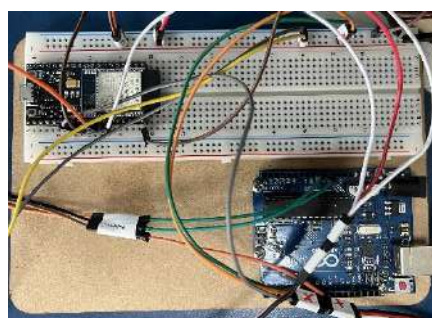


圖 22 ESP32 開發板控制伺服馬達接線圖(本圖由作者自行拍攝)

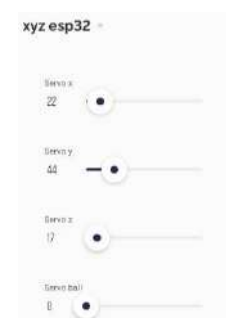


圖 23 手機連接 ESP32 控制伺服馬達，手機畫面(本圖由作者擷取)

控制旋轉順暢，有卡頓或抖動現象則檢查接線、外接電源、安裝結構等。

2. 減速馬達推動球拍測試：檢查電路電壓，調整曲柄、連桿及滑塊尺寸，導輪間距調整，使擊球機動作滑順。

六、發球機與擊球機雙機機電整合

(一) 電路圖

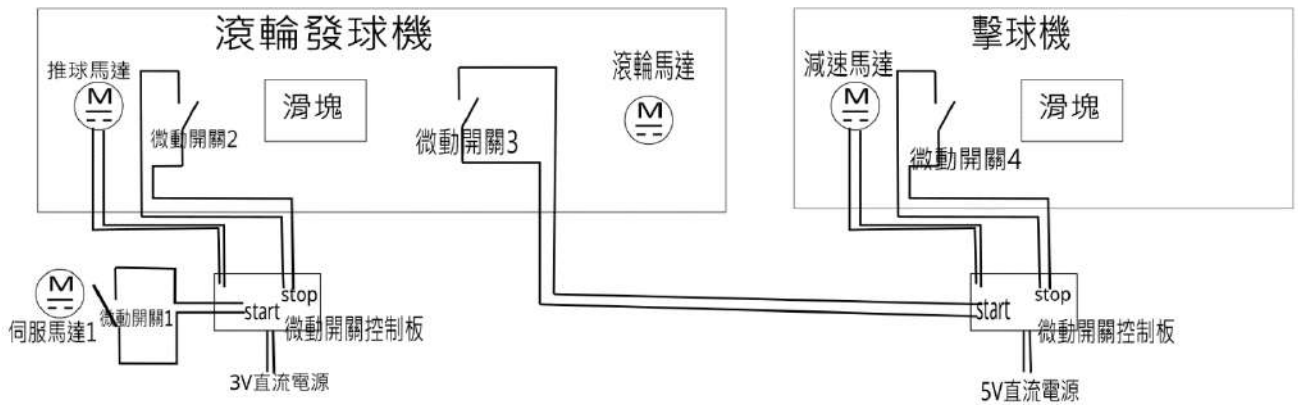


圖24 發球機與擊球機雙機整合電路圖(本圖由作者自行製作)

(二) 雙機動作流程

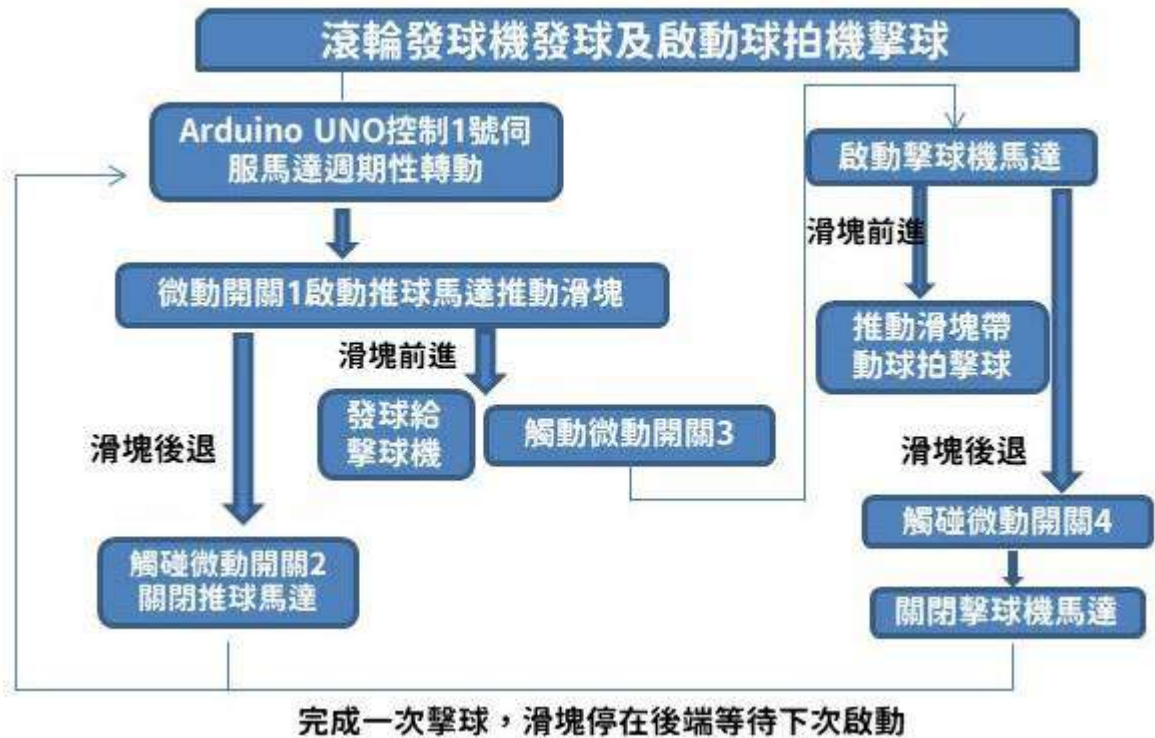


圖25 發球機與擊球機雙機整合動作流程圖(本圖由作者自行製作)

(三) 滾輪發球機動作

1. 如上圖 24 及圖 25，以 Arduino UNO 控制 1 號伺服馬達，每間隔數秒(時間可設定以調整出球頻率)轉動懸臂接觸 1 號微動開關啟動雙滾輪發球機的推球馬達，利用連桿驅動滑塊，滑塊將來自供球裝置進入軌道中的桌球推進雙滾輪區，雙滾輪將桌球射出。
2. 滾輪發球機滑塊推進到最前方時，觸動 3 號微動開關，啟動擊球機馬達，滑

塊退回後端時，觸碰後端的 2 號微動開關關閉雙滾輪發球機的推球馬達，此時完成一次發球，等 1 號伺服馬達再次觸動 1 號微動開關完成下次發球。

(四) 擊球機動作

1. 揮拍擊球的部分，擊球機馬達由滾輪發球機滑塊啟動，驅動往復式滑塊曲柄機構，利用連桿推動球拍滑塊，模擬執拍擊球，將滾輪發球機的發球擊出。
2. 待球拍滑塊退回中央位置，觸碰 4 號微動開關後，球拍滑塊因慣性作用退回停止在後端，等 Arduino 重新開啟伺服馬達轉動懸臂接觸 1 號微動開關時，重複上述動作，再發下一球，並擊球。

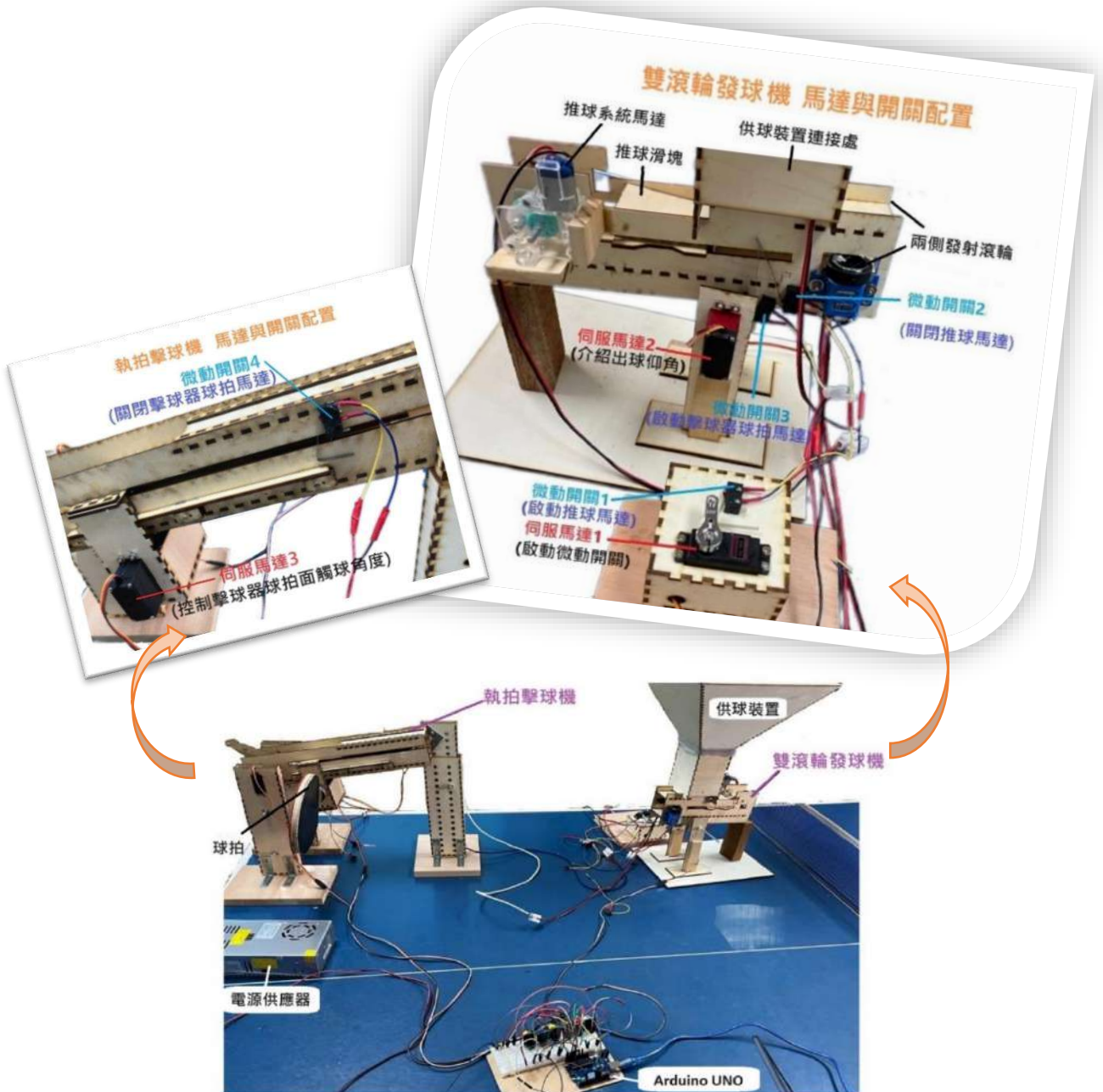


圖26 雙機整合馬達與開關配置及接線(本圖由作者拍攝)

3. 球速測試:

- (1) 控制滾輪馬達及減速馬達電壓，拍面與水平面夾角保持 90 度，揮拍方向保持水平，以純撞擊方式擊球。
- (2) 距擊球機球拍 1.6 公尺處垂直放置 pp 瓦楞板，拍攝擊球影片，擷取影片中桌球飛行 1.6 公尺所需的時間。反覆偵測 10 顆球，紀錄所測得的球速。

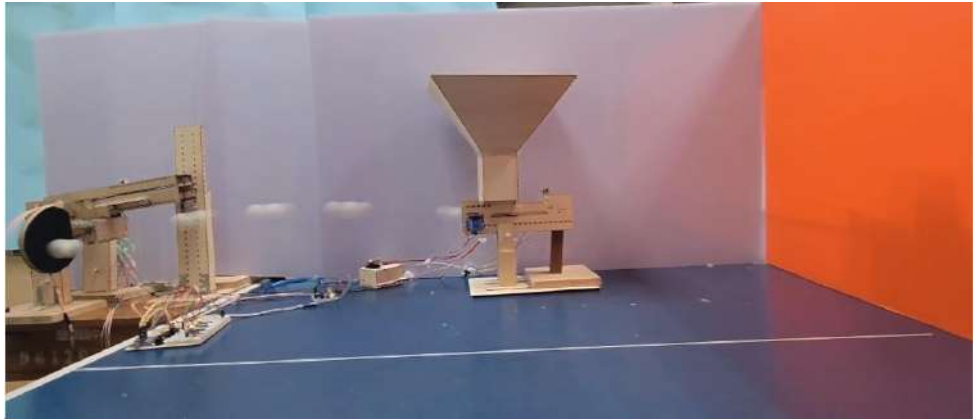


圖 27 雙機整合測試:發球軌跡與擊球軌跡(本圖由作者自行拍攝)

(3) 實驗結果

表 4 不同滾輪馬達及減速馬達電壓擊球球速

減速馬達電壓(V)	滾輪馬達電壓(V)		
	3V 球速(m/s)	4V 球速(m/s)	5V 球速(m/s)
4.5V	6.5	8.3	10.7
5V	7.1	9.9	12.8
5.5V	8.5	11.1	14.5
6V	9.7	12.8	16.3

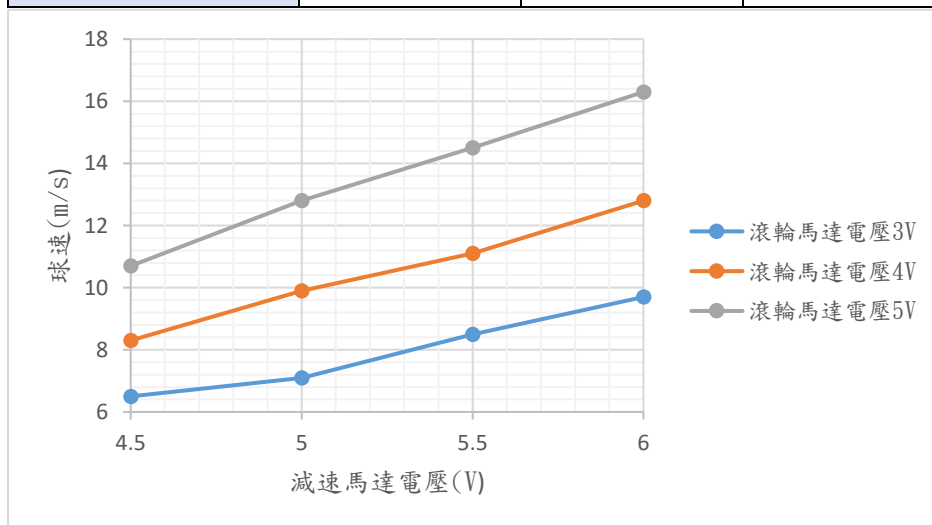


圖 28 不同滾輪馬達及減速馬達電壓擊球球速(本圖由作者自行製作)

4. 桌面落點測驗：

- (1) 分析擊球機的變因參數，包括滾輪馬達電壓(V_1)、擊球機減速馬達電壓(V_2)、揮拍仰角(y°)、球拍面與水平面夾角(z°)。
- (2) 依教練建議將落點區劃分為 18 區(圖 25)，將劃分圖佈置於標準桌球桌面上進行擊球落點測試，參考教練餵球時站位在左側，我們也將擊球機置於相同位置，球拍中心點距球桌左側 40 公分處，擊球揮拍方向對準中央位置。
- (3) 啟動滾輪發球機及擊球機擊球後觀察落點，調整 4 項變因使球可達左端線區，紀錄變因參數後以同參數發 30 顆球並錄影分析統計落點位置的次數百分率，以確認參數角度與擊球落點的位置關係，做為擊球機落點調整的參考依據。
- (4) 重複上述步驟找出中央 C 區、D 區及左網前區參數。

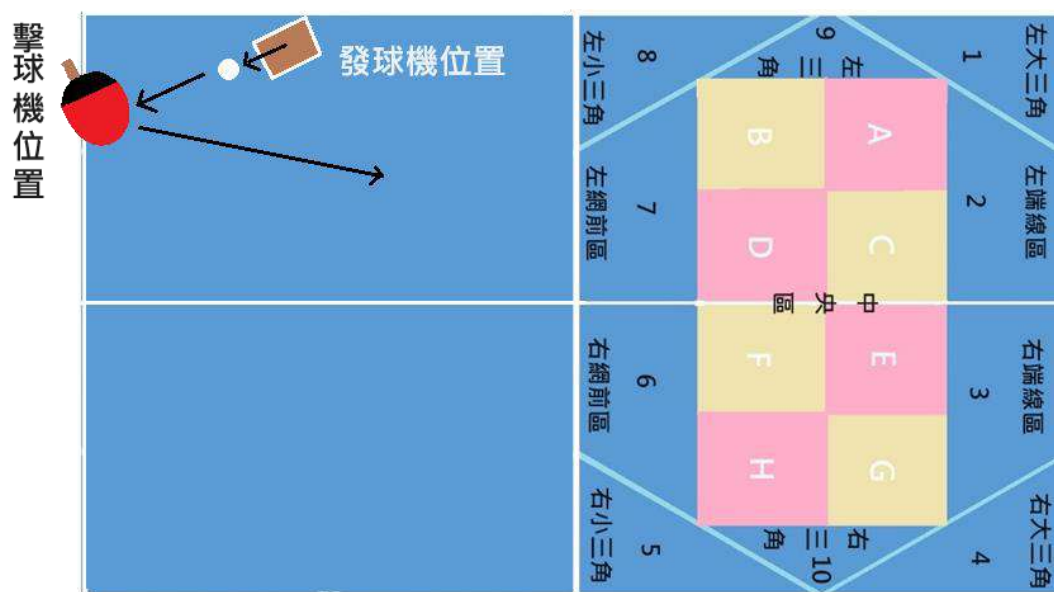


圖 29 球桌落點 18 區位置圖示(本圖由作者自行製作)

表 5 執拍擊球機桌面落點次數統計

落點	V_1	V_2	y°	z°	次數%	落點	V_1	V_2	y°	z°	次數%
端線區	4	5.5	30	85	90	中央 C 區	4	5	20	80	93
端線區	4	6	30	85	86	中央 C 區	4	5.5	20	80	97
端線區	5	4.5	30	85	93	中央 D 區	3	5	30	85	90
端線區	5	5	20	80	90	中央 D 區	3	4.5	45	90	93

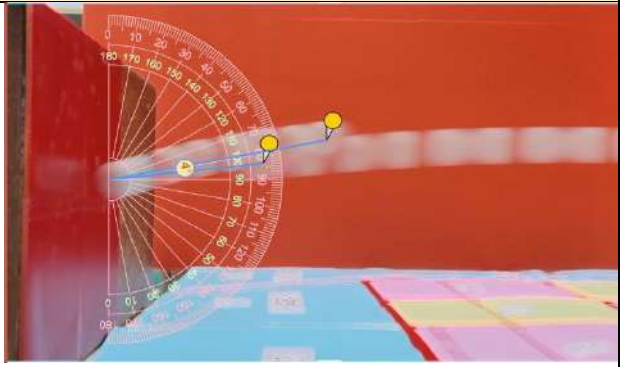
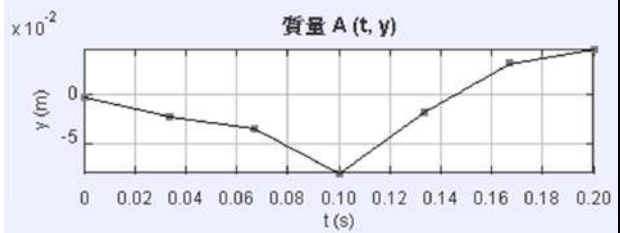
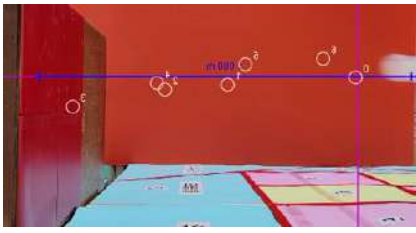
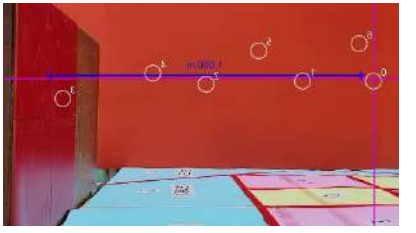
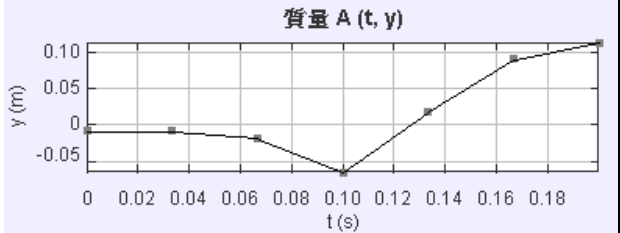
端線區	5	5.5	15	80	86	左網前區	3	4.5	50	110	86
端線區	5	6	10	80	90	左網前區	3	4.5	60	115	83
端線區	5	5.5	30	70	90						
端線區	5	6	40	60	83						

5. 發不轉球及上旋球測試：

將膠皮黏貼於木板上，並將木板垂直置放於擊球機距發球機 1.6 公尺處，開啟手機多重曝光模式，在測試膠皮處拍攝連續照片，再利用線上疊圖軟體

Startrails，合成桌球撞擊膠皮後的運動軌跡，並依據軌跡圖上的反彈角度進行量測與分析，此測試可以作為我們調整擊球機擊出不同球路的評估依據，結果整理比較如表 6 及表 7。

表 6 模擬真人教練餵球機發不轉球測試球體運動軌跡圖表(由作者拍攝製作)

平擊不轉球		擊出平球球體運動軌跡圖	
觸球角度	90°		
揮拍角度	0°		
馬達電壓	$V_1=5V$ 、 $V_2=5.5V$		
反彈方向與角度	<p>▶以線上量角器定位擊球點的球心位置為支點，量測入射球心與反射球心的夾角。</p> <p>擊球機反彈方向與角度:4°</p>		
Tracker 球軌追蹤	 <p>▲擊球機發球 Tracker 球軌追蹤</p>	<p>▲擊球機發球 Tracker 球軌 xy 散佈圖-平球</p>	
真人教練擊球軌跡	 <p>▲教練發球 Tracker 球軌追蹤</p>	 <p>▲真人教練發球球軌追蹤 xy 散佈圖-平球</p>	

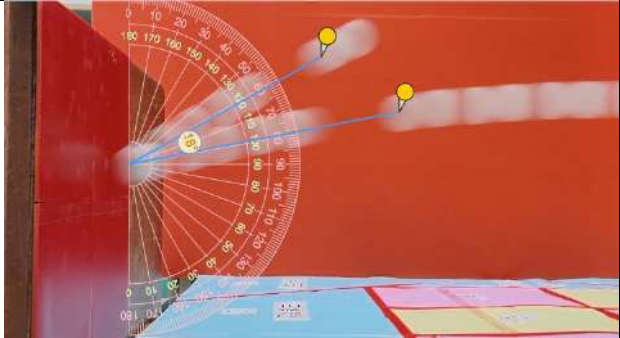
	<p>▶真人教練擊球軌跡以線上量角器定位擊球點的球心位置為支點，量測入射球心與反射球心的夾角。</p> <p>教練擊球反彈方向角度:8°</p>	
--	--	--

平球擬真球路評估:

比較直拍擊球機擊出的平球，用 Tracker 追蹤影片中桌球的運動軌跡，與真人教練擊出的平球軌跡所得到的運動位置座標，會發現兩曲線的運動軌跡，以真人教練擊球較平直，相較於擊球機的擊球，兩者撞擊紅色拍皮前的位置座標不太相同，但在撞擊紅色膠皮後，反射的軌跡就趨近雷同。

表 7 模擬真人教練餵球機發上旋球測試球體運動軌跡圖表(由作者拍攝製作)

上旋球		擊出上旋球球體運動軌跡圖
觸球角度	75°	
揮拍角度	70°	
馬達電壓	V ₁ =5V、V ₂ =5.5V	
反彈方向與角度	<p>▶以線上量角器定位擊球點的球心位置為支點，量測入射球心與反射球心的夾角。</p> <p>擊球機反彈方向與角度:22°</p>	
Tracker 球軌追蹤	<p>▲擊球機發球 Tracker 球軌追蹤</p>	<p>▲擊球機發球 Tracker 球軌 xy 散佈圖-上旋球</p>
真人教練擊球軌跡	<p>▲教練發球 Tracker 球軌追蹤</p>	<p>▲真人教練發球 Tracker 球軌 xy 散佈圖-上旋球</p>

<p>▶真人教練擊球軌跡疊圖完成後，以線上量角器定位擊球點的球心位置為支點，量測入射球心與反射球心的夾角。</p> <p>教練擊球反彈方向角度:18°</p>	
---	--

上旋球擬真球路評估：

比較直拍擊球機擊出的上旋球，用 Tracker 追蹤影片中桌球的運動軌跡，與真人教練擊出的上旋球軌跡所得到的運動位置座標，會發現不論是擊球機發球 Tracker 球軌 xy 散佈圖，或是真人教練發球 Tracker 球軌 xy 散佈圖，兩曲線的運動軌跡，在撞擊紅色膠皮前後，球體隨時間變化運行的高度曲線相似度極高。

七、擬真教練餵球模式

(一) 為了能餵出左右變化的球，我們製作了一個能繞垂直軸旋轉的平台，將執拍擊球機置於平台上旋轉，如下圖 30~33。(由作者拍攝)



圖 30 平台安裝大扭力伺服馬達



圖 31 平台上轉盤加裝滾珠轉盤

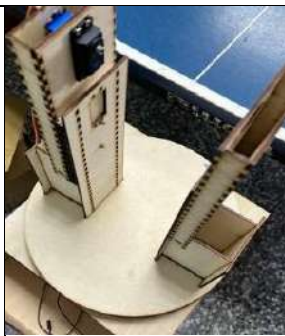


圖 32 伺服馬達上安裝轉盤腳架

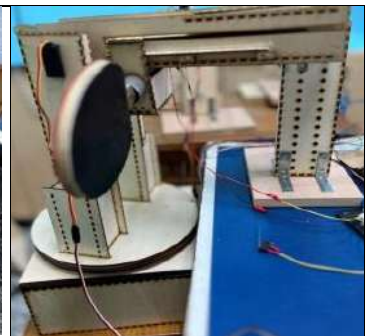


圖 33 將擊球機安裝於腳架上

(二) 將擊球機左右轉動，找出將球打到端線區落點位置的旋轉角度，紀錄角度 x° ，以同參數發 30 顆球並錄影分析統計落點位置的次數百分率，結果如表 8。

表 8 餵球模式落點位置次數百分率

落點	V_1	V_2	y°	z°	x°	次數 %	V_1	V_2	y°	z°	x°	次數 %

左大三角區	5	5.5	30°	85°	-7	90	5	6	20°	80°	-4	86
左端線區	5	5.5	30°	85°	5	86	5	6	20°	80°	8	83
右端線區	5	5.5	30°	85°	17	93	5	6	30°	85°	22	83
右大三角區	5	5.5	20°	80°	30	90	5	6	45°	90°	35	86

八、各種球路設計

(一) 訓練球路：目前設定 2 種功能，以實體按鍵控制，按鍵 1 按下發出定點上旋球，按鍵 2 按下發二點上旋球。接線圖如右圖 34：

1. 定點上旋長球(按鍵 1)

(1) 發球位置：左端線區，學員可練習正反手攻球、推擋、長顆粒磕球等。

(2) 按研究過程七之結果設定參數滾輪馬達電壓 $V_1=5V$ 、減速馬達電壓

$V_2=5.5V$ ，揮拍仰角 $y^\circ = 30^\circ$ 、球拍面與水平面夾角 $z^\circ = 85^\circ$ ，拍面指向角度 $x^\circ = 5^\circ$ 。

(3) 依各項參數控制對應直流馬達及伺服馬達。

(4) 依研究過程六之步驟啟動機器。

2. 二點上旋球(按鍵 2)

(1) 發球位置：左端線區及右端線區輪流交替，學員可練習正反手交替攻球、二點走位練習等。

(2) 按研究過程七結果設定參數滾輪馬達電壓 $V_1=5V$ 、減速馬達電壓

$V_2=5.5V$ ，揮拍仰角 $y^\circ = 30^\circ$ 、球拍面與水平面夾角 $z^\circ = 85^\circ$ ，拍面指向角度 $x^\circ = 5^\circ、17^\circ$ ，每 6 秒換一次。

A

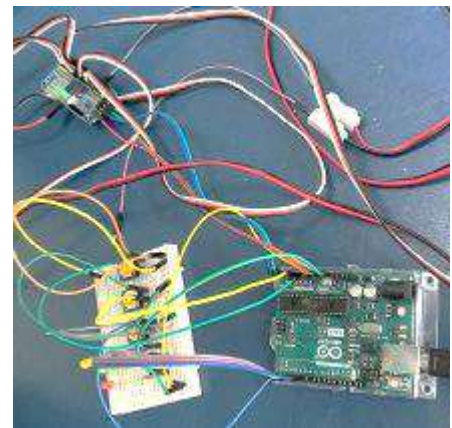


圖 34 實體按鍵控制接線圖(由作者拍攝)

(3) 依各項參數控制對應直流馬達及伺服馬達。

(4) 依研究過程六之步驟啟動機器。

(二) Arduino UNO 程式

1. 程式控制規劃流程圖

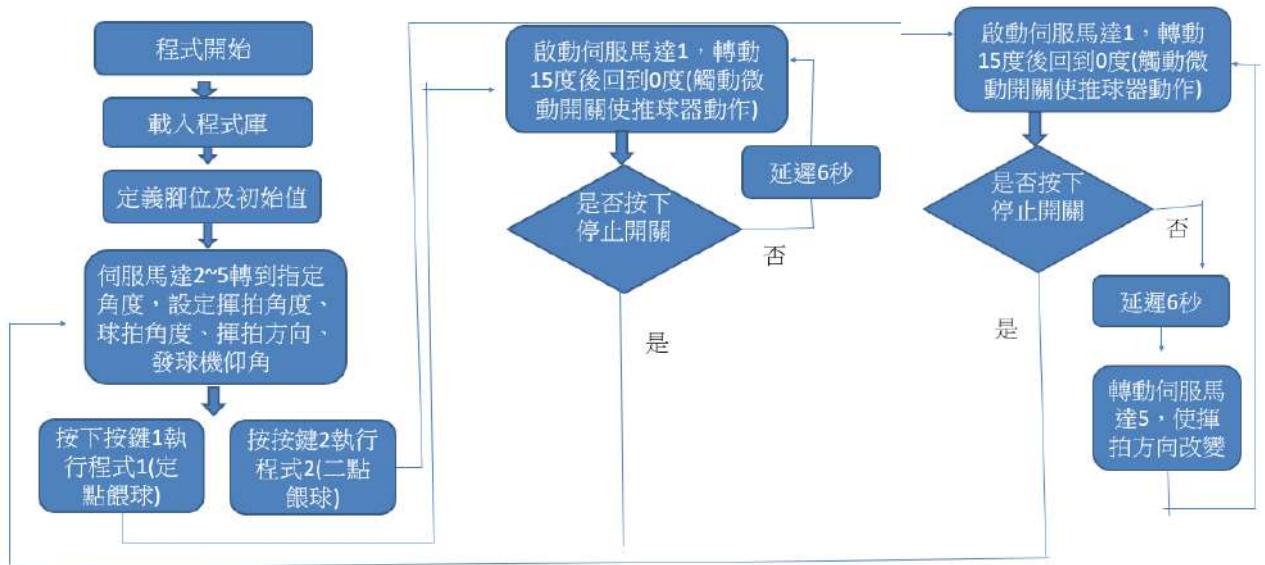


圖35 程式控制規劃流程圖(本圖由作者製作)

2. Arduino UNO 程式如附錄 2。

肆、討論

一、滾輪發球機

滾輪發球機在歷屆科展作品中已經多有著墨，雖然有歷屆作品以及網路影片可以參考，但我們在實際製作時仍舊遇到許多問題，說明如下：

(一) 推球機構卡球：我們參考的歷屆科展作品皆未設計推球機構，一開始我們也這樣做，讓球由高處沿球道滾到滾輪發射，發現 2 個缺點：

1. 當機體上仰，射球口高於進球口時，球無法滾到發射輪處發射。
2. 機體向下，射球口低於進球口時，球不斷滾到發射輪處發射，無法控制出球頻率，而且容易卡球。

於是我們設計了推球機構，而一開始也一直遇到往復式連桿的推球機構卡球，解決方式如下：

1. 多次調整連桿、曲柄長度與滑塊的大小，直到推球機構與馬達的組合運作順

暢。

2. 在滾輪前安裝橡皮筋擋住球，當滑塊推動球時，球受力才能通過橡皮筋到達滾輪。

(二) 供球系統容球數：原來的發球器只能裝五顆球，需要人工一直填補桌球，我們後來更改為：設計供球裝置提供大容量的桌球，且補球方便。

(三) 供球系統卡球：一開始採用 TT 馬達設計擾球器進行球體擾動，發現裝滿球後，擾動效果不佳。克服供球裝置卡球的進程如下：

→我們嘗試用轉速 50rpm 的 N20 馬達取代，仍然會出現卡球的現象。

→最後使用轉速 16rpm 的 N20 馬達，並在供球裝置底部設計擾球器破壞顆粒流的拱形多邊形造成的靜態平衡，避免卡球狀況(如圖 36)。

→擾球器上的撥桿，由冰棒棍改用有彈性的束帶，卡球現象更有改善。



圖 36 加大容積供球裝置與擾球器
(本圖由作者拍攝)

(四) 滾輪是用玩具車輪製作的，測試觀察發現在高速旋轉下，滾輪胎皮有時會因為離心力而脫離，即使膠合也無法改善。嘗試錯誤後，我們發現：

→改用較大的輪框搭配小一號的輪胎皮，在塗上熱融膠，增加密合度。



圖 37 滾輪旋轉時卡到馬達架，以銼刀打磨馬達架(本圖由作者拍攝)

二、執拍擊球機

執拍擊球機目前並沒有參考範例，我們從無到有，依據自己的想像一直修正結構與外型的尺寸，希望可以模擬教練持拍時旋轉手腕的效果，做到餵球動作，在設計與製作過程所發現的問題與應對策略說明如下：

- (一) 滑塊太重：因為要裝上球拍架、伺服馬達及桌球拍，所以滑塊的大小與形狀經過多次測試修改，並需要反覆調整球拍架的位置，此問題的修正策略是：

→考量整體重心的位置，最後將球拍架裝置在滑塊下方，不過測試時，摩擦力仍太大。

→在滑塊兩側加裝軌導輪，兩側加裝導輪與對應的軌道，果然大大降低滑塊推行的摩擦力。

(二)馬達扭力不足:球拍較重，改善滑塊的摩擦力後，發現推球馬達的扭力仍須調整。

→經過測試後，從 C130 小馬達改成 N20 馬達，再調整成 2 顆 N20 馬達並聯傳動(如右圖 38)，最後改用 12V 減速馬達才順利克服。

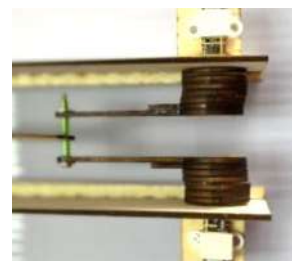


圖 38 2 顆 N20 馬達並聯傳動(本圖由作者拍攝)

(三)滑塊連桿斷裂：如下圖，椴木連桿在測試時出乎意料地突然斷裂，原本想用金屬片替代，但發現自己的金工器材使用的能力不足，無法順利完成，後來發現塑膠曲柄的形狀剛好吻合，因此使用曲柄強化連桿轉軸，堅固又方便，如下圖 39。

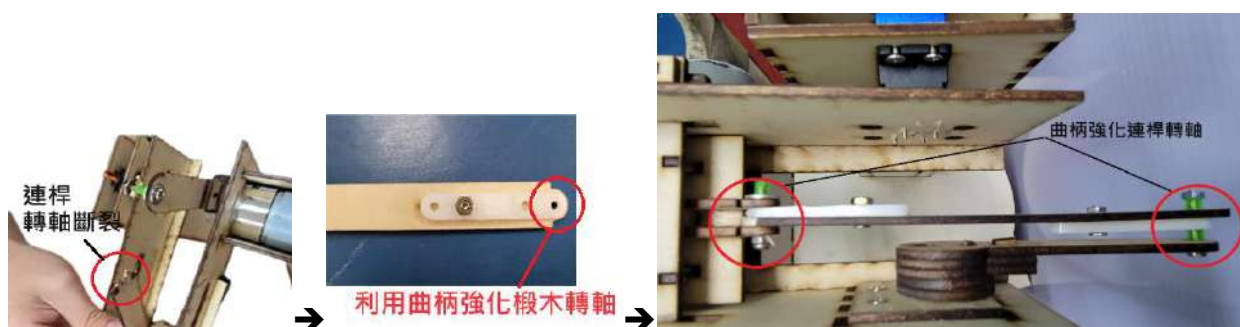


圖 39 滑塊連桿斷裂後以曲柄替代轉軸(本圖由作者拍攝製作)

三、雙機整合

(一)雙機整合遇到最大的難題就是：**擊球機球拍啟動的時間點**。當發球機發出球時，球拍太早或太晚揮動，都會錯失擊球的最佳時機。我們在國小時參加過台師大辦理的科技競賽機械獸接力項目，有利用微動開關啟動及停止不同機械獸的經驗，決定嘗試使用微動開關控制馬達的啟動與關閉，經反覆測試與調整微動開關的位置，找出啟動擊球機的最佳時機。

(二)停止馬達的微動開關在滑塊移動的後端點時，馬達雖然關閉但仍有轉動的慣性讓滑塊又向前移動一段距離才停止，造成滑塊未能停在最後端，因此微動開關位置要在前面一些的位置，但這樣滑塊向前或向後都會卡到微動開關，後來我們將微動開關的接觸鐵片減短，黏上容易形變的塑膠束帶(如右圖40)，如此一來，滑塊向前時不會被鐵片卡住，後退時會觸動開關又不會卡住。



圖 40 利用塑膠束帶避免滑塊來回撞擊微動開關(本圖由作者拍攝)

- 四、測試滾輪發球機及執拍擊球機時，我們發現不同的電源提供相同電壓卻有不同的轉速，查了相關資料才知道不同的電源供應器或電池，能提供的電流不同，電流也會影響轉速，因此我們每次實驗時都採用相同的電源供應器。
- 五、以 Arduino 接可變電阻控制伺服馬達，單顆測試沒有問題，當連接到 3 顆時常常不穩定，因為發球機及擊球機運轉時馬達震動，可能造成連接的杜邦線鬆脫，因此使用 PCA9685 擴展板，可以減少杜邦線連接。
- 六、原本水平左右轉動的旋轉盤未安裝鋼珠轉盤，直接裝在伺服馬達上，發現摩擦力太大轉動不順，也找不到適合的軸承，後來看到電腦椅的轉盤，於是安裝這種鋼珠轉盤，便宜又好用。
- 七、Arduino 程式控制部分，我們做了單點上旋球及二點上旋球，由於前段製作滾輪發球機與擊球機還有測試修正花太多時間，後段程式開發較倉促，目前只完成 2 種球路，但我們還是會持續繼續開發其他球路，讓整個研究更佳完整。
- 八、綜上討論，我們將真人教練與模擬教練餵球機列表比較如下：

表9 真人教練餵球與模擬教練餵球機性能比較

比較項目		真人教練餵球	模擬教練餵球機
不同	不轉球	反彈後角度: 8°	反彈後平飛角度: 4°
	上旋球	反彈後上旋角度:18°	反彈後上旋角度:22°

球路	其他球路	側旋球、下旋球等	尚未開發
餵球穩定度		實際定點餵球穩定度觀察約99%，長時間餵球體力負荷大	不同定點位置，穩定度約83%~97% 長時間餵球無體力問題
餵球球速		真人可以控制自如	調整馬達電壓控制球速
模擬比賽球路餵球訓練		可以呈現競賽對打實況	目前尚未開發下旋、側旋球，變化度仍無法提供模擬競賽的餵球
單次費用計算		聘請球館教練，每小時600元以上	材料費:估計約6500元左右
長期費用估算		每日午休練習1小時，每週5日。 每月需負擔約12000元。	無，後續可自行維修或修繕
學生排隊問題		教練只有1位，20位選手排隊練球，每人每小時只能分得3分鐘	自行製造模擬教練餵球機，每桌一臺，5臺球桌，每週分配4人，每人每小時可得15分鐘練習時間。
臨時應變		教練若請假，會停止練習	教練不在也可以自主練習，不會有停止練習的突發狀況。

從比較結果中發現：「模擬教練餵球機」，可以提供兩點餵球，修改程式後可以多點餵球，但如果要多種球路(上、下旋及側旋)混合訓練餵球，仍需要「真人教練」上場，但球隊**多人練習**時，若加入「模擬教練餵球機」**分擔**真人教練的餵球工作，一來可以減輕教練體力負擔，二來可以讓教練有更多時間觀察球員擊球動作，給予更多技術與策略的指導。另外在給球隊隊員試用後發現，隊員搭配影音平台上的桌球教學影片，利用我們的餵球機就可以自主訓練一些如拉球、推擋等基本動作。

伍、結論

- 一、本研究製作的**滾輪發球機**如下圖，經測試不卡球，可控制出球**頻率**、**球速**及**仰角**的球，**落點穩定度**佳。

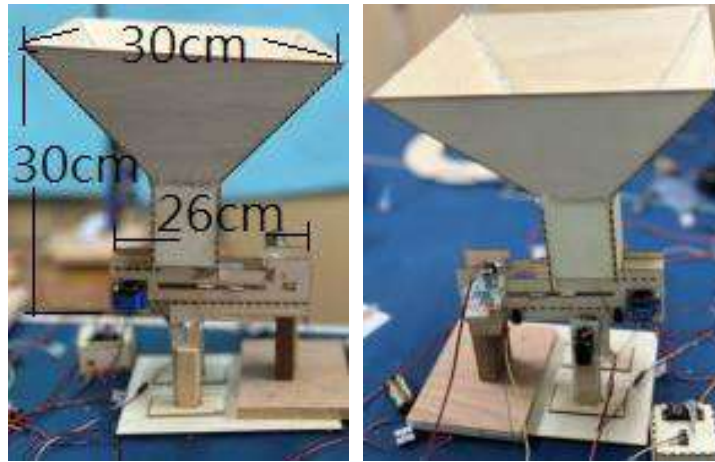


圖 41 本實驗滾輪發球機最佳化裝置(由作者拍攝)

二、本研究製作的**擊球機**如下圖，經測試可以擊出不同**速度**不同**仰角**的球，且**落點穩定**度佳。

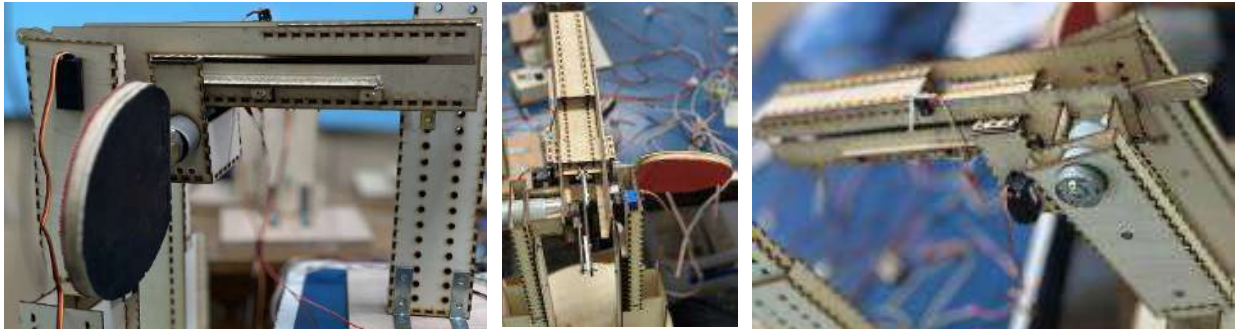


圖 42 本實驗執拍擊球機最佳化裝置(擊球機長 37cm，寬 6cm，高 6.5cm)(由作者拍攝)

三、發球機及擊球機雙機機電整合及擊球配合：以 Arduino 控制伺服馬達觸動微動開關，使發球機發球，滑塊移動觸動其他微動開關使擊球機啟動擊球，而滑塊移動至適當位置時會觸動關閉的微動開關使滑塊停止，完成發球及擊球。

四、餵球落點測試：經實際測試，本裝置可將球打到指定位置，每個位置測試30球，達到指定位置有 24~29球。

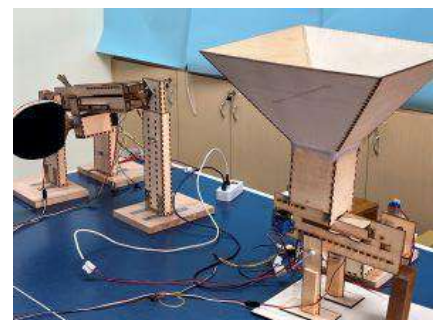


圖 43 雙機整合(由作者拍攝)

五、Arduino 程式控制本裝置後，可發單點上旋球及二點上旋球，讓球員可體驗擬真人教練自主練球。

陸、參考文獻資料

- 一、國中翰林版科技課本1下關卡4-結構與機構。
- 二、國中翰林版科技課本2下關卡5-製作電動液壓動力機械手臂。
- 三、連廷楷、孫芷柔、應冠穎，吳睿文(2015)。「自動」自「發」、求新「球」變。中華民國第55屆中小學科學展覽會。
- 四、廖沛蓉、鍾昀珊、林盈萱 (2020)。觸而及「發」-自製不插電桌球發球機治具之成效探討。中華民國第60屆中小學科學展覽會。
- 五、林佑謙(2023)。智慧桌球練習機：以Arduino 為核心之創新設計。中華民國第63屆中小學科學展覽會。
- 六、陳柏宏、吳翰泰。小「兵」立大功-可攜式乒乓發射器應用於智慧訓練之研製。中華民國第63屆中小學科學展覽會。

附錄一 ESP32開發板連接手機控制伺服馬達程式(以Arduino IDE 撰寫)

```
#define BLYNK_PRINT Serial
/* Fill in information from Blynk Device Info here */
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL6j6BRpPJ0"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "servo control"
#define BLYNK_AUTH_TOKEN "cImimp9seG1PCHA7xb8z3njQSzb2U50M"

#define servox_pin 16 //底盤
#define servoy_pin 17 //仰角
#define servoz_pin 18 //擊球角度

#define servo4_pin 25
#define servo5_pin 26 //發球仰角

int pos = 0;
const int potpin=34;
int val = 0;
int i;

#include <WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include <ESP32Servo.h>

// Your WiFi credentials.
// Set password to "" for open networks.
char ssid[] = "AndroidAPA687";
char pass[] = "rmuh3576";

Servo servox;
Servo servoy;
Servo servoz;

Servo servo4;
Servo servo5;

void setup() {
  // Debug console
  Serial.begin(115200);

  Blynk.begin(BLYNK_AUTH_TOKEN, ssid, pass);

  servox.attach(servox_pin);
  servoy.attach(servoy_pin);
  servoz.attach(servoz_pin);

  servo4.attach(servo4_pin);
  servo5.attach(servo5_pin);
}
```

```

BLYNK_WRITE(V0) {
  int value = param.asInt();

  servox.write(value);

  Serial.print("servo1_pos:");
  Serial.println(value);
  delay(1);
}

BLYNK_WRITE(V1) {
  int value = param.asInt();

  servoy.write(value);

  Serial.print("servo2_pos:");
  Serial.println(value);
  delay(1);
}

BLYNK_WRITE(V2) {
  int value = param.asInt();

  servoz.write(value);

  Serial.print("servo3_pos:");
  Serial.println(value);
  delay(1);
}

void loop() {
  Blynk.run();

  val=analogRead(potpin);
  i = map(val, 0, 4095, 0, 180);
  servo5.write(i);

  for (pos = 0; pos <= 15; pos += 1) {
    servo4.write(pos);
  }
  delay(3000);
  for (pos = 15; pos >= 0; pos -= 1) {
    servo4.write(pos);
  }
}

```

附錄二 定點發球及二點發球控制程式

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_PWMServoDriver.h>

#define BUTTON_PIN1 A0 // 按鈕1的腳位
#define BUTTON_PIN2 A1 // 按鈕2的腳位

#define MOTOR_PIN3 5 // L298N控制腳3
#define MOTOR_PIN4 4 // L298N控制腳4

Adafruit_PWMServoDriver pwm = Adafruit_PWMServoDriver();

const int servoMin = 150; // 伺服馬達最小脈衝寬度(0度)
const int servoMax = 600; // 伺服馬達最大脈衝寬度(180度)
const int servoRange = servoMax - servoMin;
const byte intPin=2; //interrupt pin uno的中斷腳位設定
const int ball_time =6000; //發球間隔時間

int play_mode=0; // 定義模式的變數

//pca9685對不同servo輸出腳位的定義
#define servo1_PIN 0 //仰角控制
#define servo2_PIN 3 //打球機球拍
#define servo3_PIN 7 //底盤
#define servo4_PIN 5 //發球角度
#define servo5_PIN 8 //發球頻率

//自訂函數"ServoAngle"讓伺服馬達更容易設定旋轉角度，servoid事連接pca9685的
//輸出腳，float angle代表Angle可以帶有小數點
void ServoAngle(int servoid, float angle)
{
  int kk;
  kk=servoMin+angle*servoRange/180; //pwm.setPWM0的角度轉換公式
  pwm.setPWM(servoid, 0, kk);
}
//中斷設定(模式0)參考:https://yhhuang1966.blogspot.com/2016/09/arduino-interrupt.html
void int00 { //interrupt handler
  play_mode=0;
  digitalWrite(13,HIGH);
  delay(100);
}
//模組化用伺服馬達觸控的開關(sweep取自範例中的sweep，可讓伺服馬達在一定
//範圍來回旋轉)
void sweep() {
```

```

//sweep執行的事(在0-15度之間來回)
  ServoAngle(8,15);
  delay(200);
  ServoAngle(8,0);
  delay(200);
  ServoAngle(8,15);
  delay(200);

}

void setup() {
  Serial.begin(9600); //與監控窗通訊速度

  pinMode(4,OUTPUT);digitalWrite(4,LOW); //led 引腳模式及輸出
  pinMode(5,OUTPUT);digitalWrite(5,LOW);
  pinMode(6,OUTPUT);digitalWrite(6,LOW);

  //按鈕中斷系統輸出定義
  pinMode(intPin, INPUT_PULLUP);
  attachInterrupt(0, int0, LOW);
  pinMode(A2,OUTPUT);

  //模式選擇按鈕輸出定義
  pinMode(BUTTON_PIN1, INPUT_PULLUP); //INPUT_PULLUP為上拉電阻
  pinMode(BUTTON_PIN2, INPUT_PULLUP);

  pwm.begin(); //初始化PCA9685
  pwm.setPWMPFreq(60); //PWM頻率設定(60Hz)

  //自訂函數ServoAngle(servoId,angle)
  ServoAngle(servo1_PIN,90); //仰角控制 servo1 0
  ServoAngle(servo2_PIN,30); //打球機球拍 servo2 3
  ServoAngle(servo3_PIN,130); //底盤 servo3 7
  ServoAngle(servo4_PIN,0); //發球角度 servo4 5
  ServoAngle(servo5_PIN,15); //發球頻率 servo5 8
}

void loop() {
  Serial.println(play_mode); //顯示偵測到的模式(0, 1, 2)
  if (play_mode==0) {
    digitalWrite(4,HIGH); //模式0的燈號
    digitalWrite(5,LOW);
    digitalWrite(6,LOW);
  }
}

```

```


if (digitalRead(BUTTON_PIN1)==LOW) { //偵測哪顆按鈕被按到
  play_mode=1;
  digitalWrite(4,LOW); //模式1的燈號
  digitalWrite(5,HIGH);
  digitalWrite(6,LOW);
}
if (digitalRead(BUTTON_PIN2)==LOW) { //偵測哪顆按鈕被按到
  play_mode=2;
  digitalWrite(4,LOW); //模式2的燈號
  digitalWrite(5,LOW);
  digitalWrite(6,HIGH);
}
if (play_mode == 1) {
  Serial.println(play_mode);
  ServoAngle(7,130); //定點發球(模式1)
  delay(500);
  Serial.println("play_mode"); //在監控窗顯示模式
  sweep();
  delay(ball_time); //等待6秒
}
else if (play_mode ==2){
  Serial.println("play_mode");
  ServoAngle(7,130); //兩點發球(模式2)
  sweep();
  delay(ball_time); //等待6秒
  ServoAngle(7,113);
  sweep();
  delay(ball_time); //等待6秒
}
}

```

【評語】 032808

1. 本作品研製一套桌球發球機，用於訓練運動員的球技。整體構想清晰，實施方法符合科學研究精神，實驗結果展現了實際效益。
2. 若能多著墨於本作品與市面上的桌球發球機或真人發球之比較，可使作品更加完整。
3. 在實驗數據方面，若能增添更多的發球機參數之分析，例如，桌球之速度、旋轉、落點等，將有助於提升作品的說服力。

作品簡報



有教無累-

擬真桌球教練餵球機設計與製作

摘要

本研究主要是設計以球拍將球擊出的發球機。裝置分成二部分：先由滾輪發球機將球發出，再由擊球機揮拍打球。擊球機以往復式曲柄滑塊帶動球拍打球，並安裝 3 個伺服馬達分別控制揮拍角度、拍面觸球角度及擊球方向，模擬真人揮拍撞擊及摩擦桌球控制球速及旋轉。機身及滑塊曲柄等皆自行設計後以雷射切割木板膠合而成。擊球機啟動擊球時機則以微動開關控制，當滾輪發球機發球時滑塊觸動微動開關來啟動擊球機，當滑塊後退時則觸動停止開關完成一次發球；再以另一個伺服馬達週期性觸動滾輪發球機，如此即可持續發球讓練習者練習。另外我們利用 Arduino 程式控制，讓此裝置可以發出定點上旋球及二點交替變化上旋球。

壹、前言

一、研究動機

我們在桌球隊訓練的發球機發出來的球，跟平時對打練習的球有很大不同，觀察發球機構造後發現是由滾輪發出的球，旋轉與球速都跟真人對打不同，於是我們想要研發以球拍擊打出球的發球機，讓發出的球與教練的球一樣，方便自主練習，也可以輔助教練教學時餵球，讓教練不會累，可以專心訓練學員動作。

二、研究目的

- (一)設計並製作滾輪式發球機。
- (二)設計並製作機械手執球拍擊球機。
- (三)滾輪發球機與擊球機雙機電整合及球速、落點、旋球測試。
- (四)Arduino 控制伺服馬達，並利用程式控制訓練球路。

貳、研究設備及器材

本研究使用器材、設備工具及線上平台與免付費軟體，均分類收集整理成表格，請參照作品說明書。

參、研究過程與結果

一、實驗流程

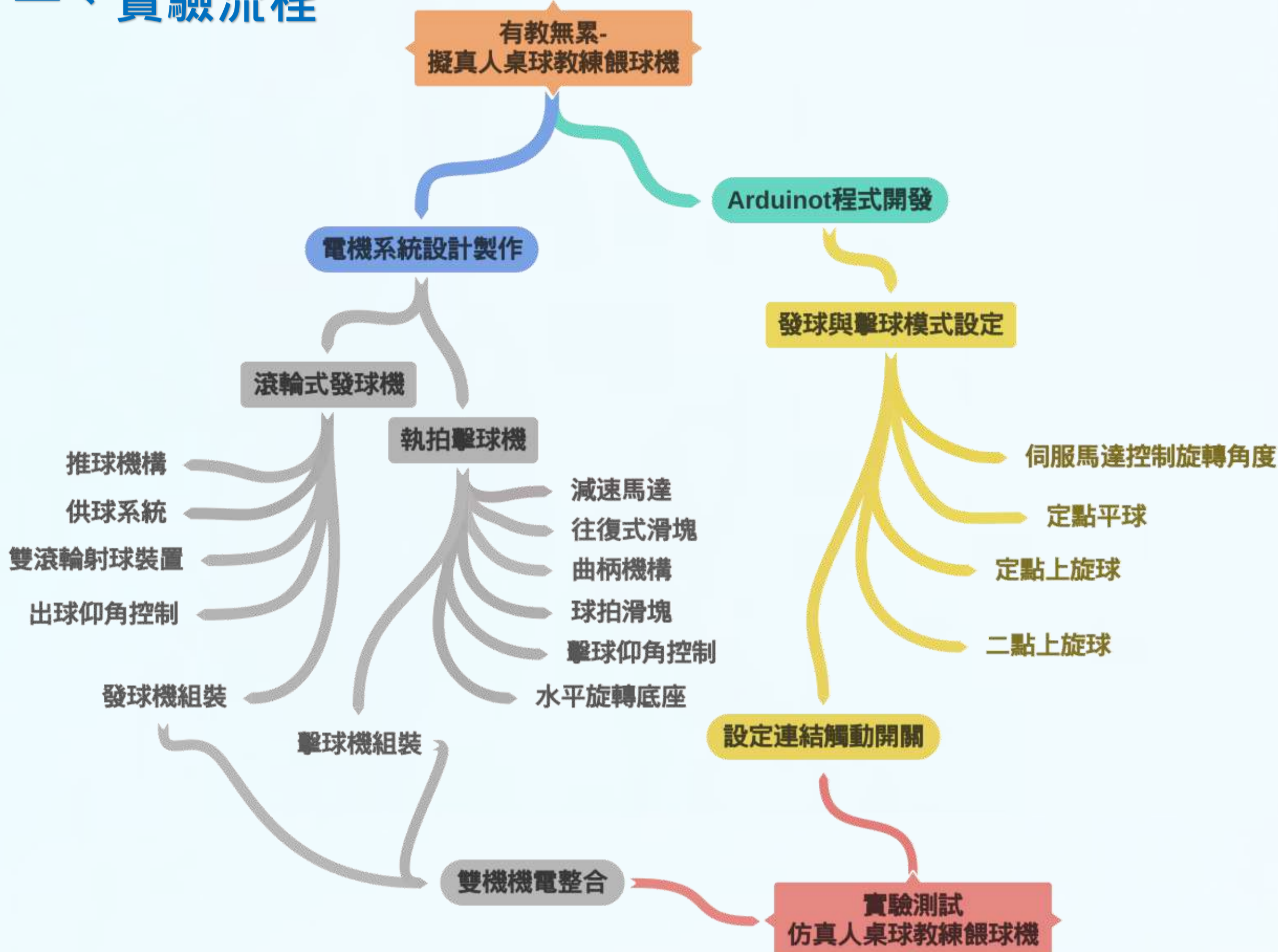


圖 1 擬真桌球教練餵球機自造流程

二、滾輪發球機與執拍擊球機雙機實作說明

(一)滾輪式發球機設計與製作

表 1 滾輪發球機設計與製作結構實體圖像

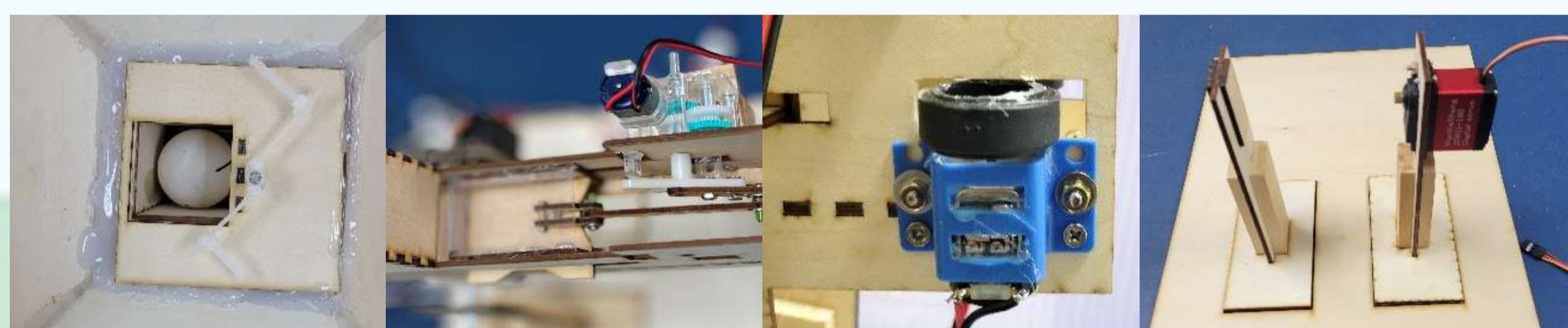


圖 2 供球落球口擾動防卡球裝置 圖 3 推球馬達減速齒輪滑塊連桿 圖 4 射球馬達及滾輪 圖 5 仰角控制腳架

(二)執拍擊球機設計與製作

表 2 執拍擊球機設計與製作結構實體圖像



圖 6 減速馬達及機身側板 圖 7 曲柄、滑塊及導輪 圖 8 球拍架安裝於滑塊下方 圖 9 球拍架安裝導輪及軌道減少摩擦力 圖 10 擊球仰角控制腳架 圖 11 上蓋板及下底板加裝導輪 圖 12 上下底板裝導輪讓滑順利滑動 圖 13 滑塊二側安裝導輪減少與機身側板間摩擦力

(三)滾輪發球機與執拍擊球機雙機完成圖

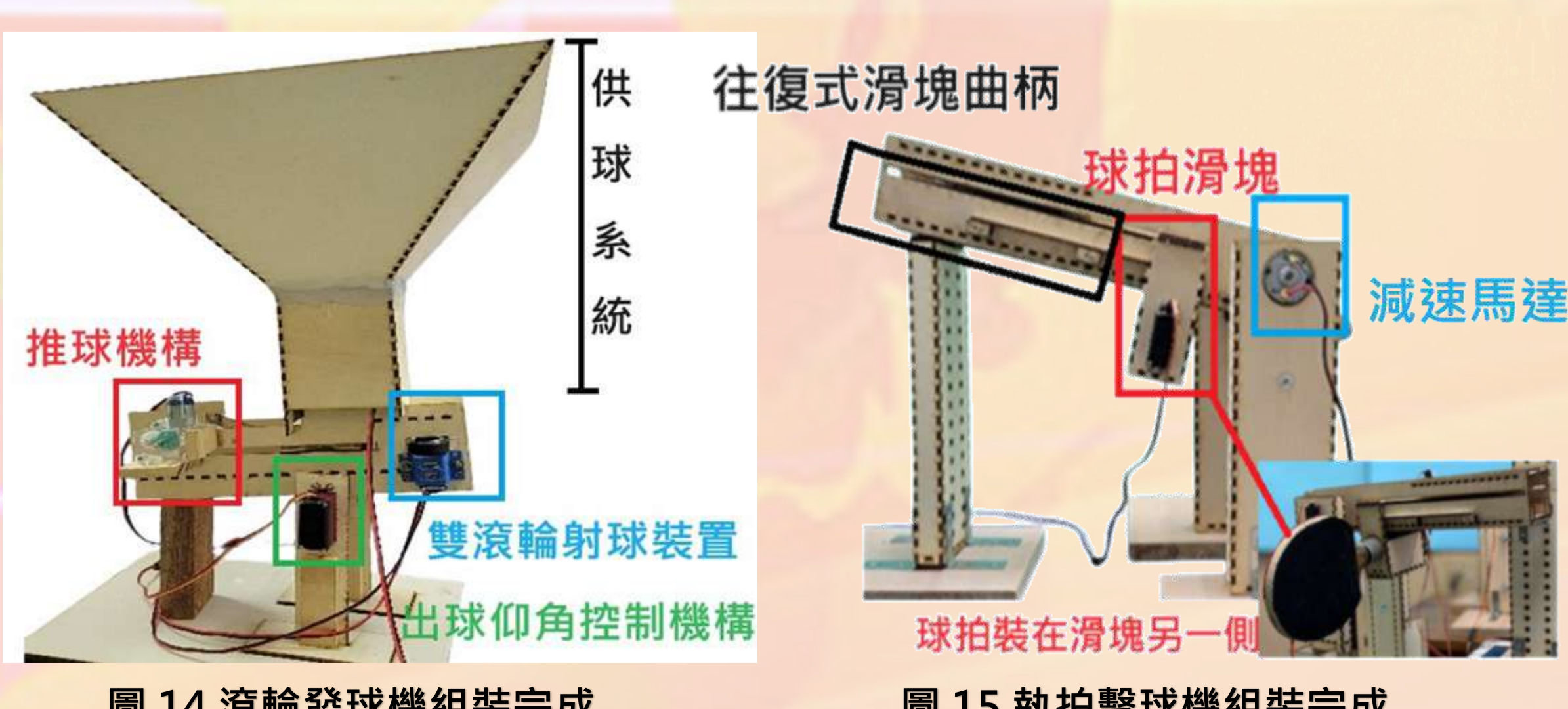


圖 14 滾輪發球機組裝完成

圖 15 執拍擊球機組裝完成

三、滾輪發球機與執拍擊球機測試與修正

(一)滾輪發球機穩定性測試

表 3 滾輪發球機穩定性測試實驗設計

球速測試				射點穩定測試			
▲ 實驗方法：取出球口到靶心相距 1m 的位置放置滾輪發球機，進行測試，擷取影片中桌球飛行 1m 所需的時間，反覆偵測 100 顆球，求球速平均值與標準差。				▲ 標靶落點計分：依據上圖桌球射擊落點進行得分紀錄，記錄 100 球次的射靶落點，分析射球落點得分的平均值與標準差。			

表 4 滾輪發球機穩定性測試實驗結果

滾輪發球機穩定性測試結果							
發球時間		發球球速				射點得分	
平均時間	標準差	平均秒速 (m/s)	標準差	平均時速 (km/hr)	標準差	平均得分	標準差
0.163	0.009	6.15	0.189	22.13	1.285	9.350	0.732

(二)執拍擊球機動作測試

- 1.以 ESP32 開發板連接手機 Blynk app 控制伺服馬達，以伺服馬達(4)控制球拍拍面轉動、伺服馬達(3)控制揮拍角度，測試擊球機旋轉控制是否順暢，若有卡頓或抖動現象則檢查接線、外接電源、安裝結構等。
- 2.減速馬達推動球拍測試：檢查電路電壓，調整曲柄、連桿及滑塊尺寸，導輪間距調整，使擊球機動作滑順。

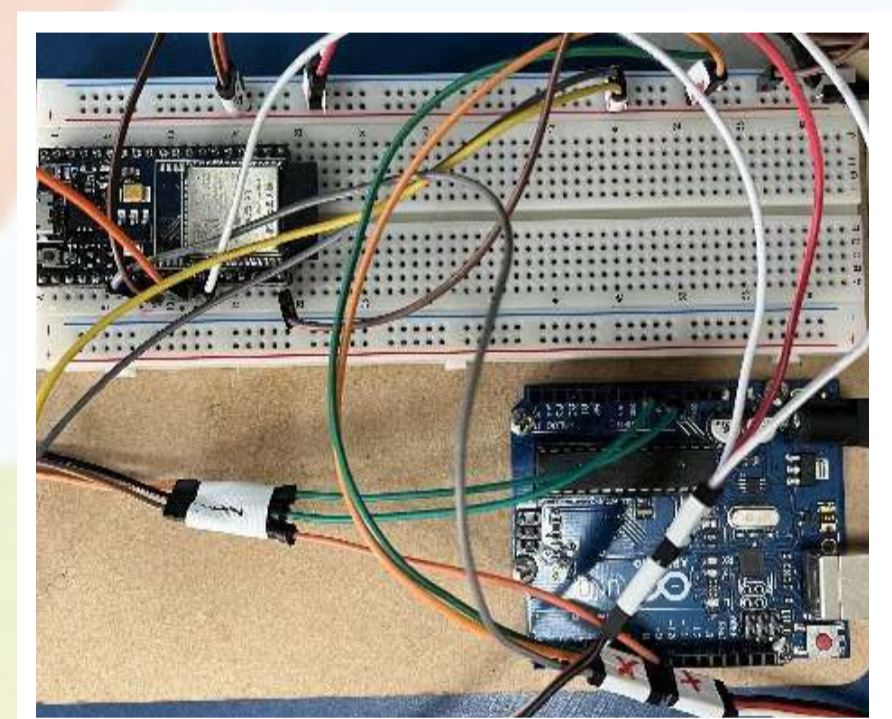


圖 16 ESP32 開發板控制伺服馬達接線圖

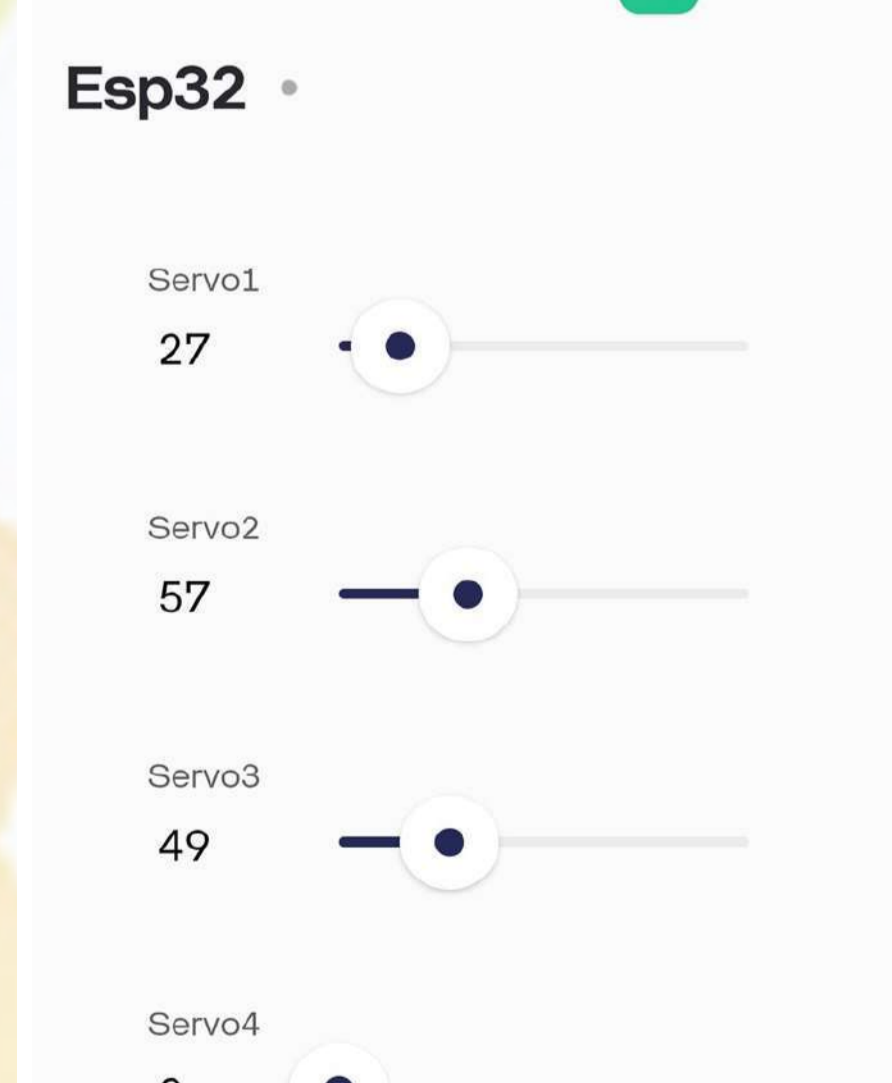


圖 17 手機連 ESP32 控制伺服馬達 (手機控制畫面)

四、滾輪發球機與執拍擊球機雙機機電整合

(一)雙機整合電路圖

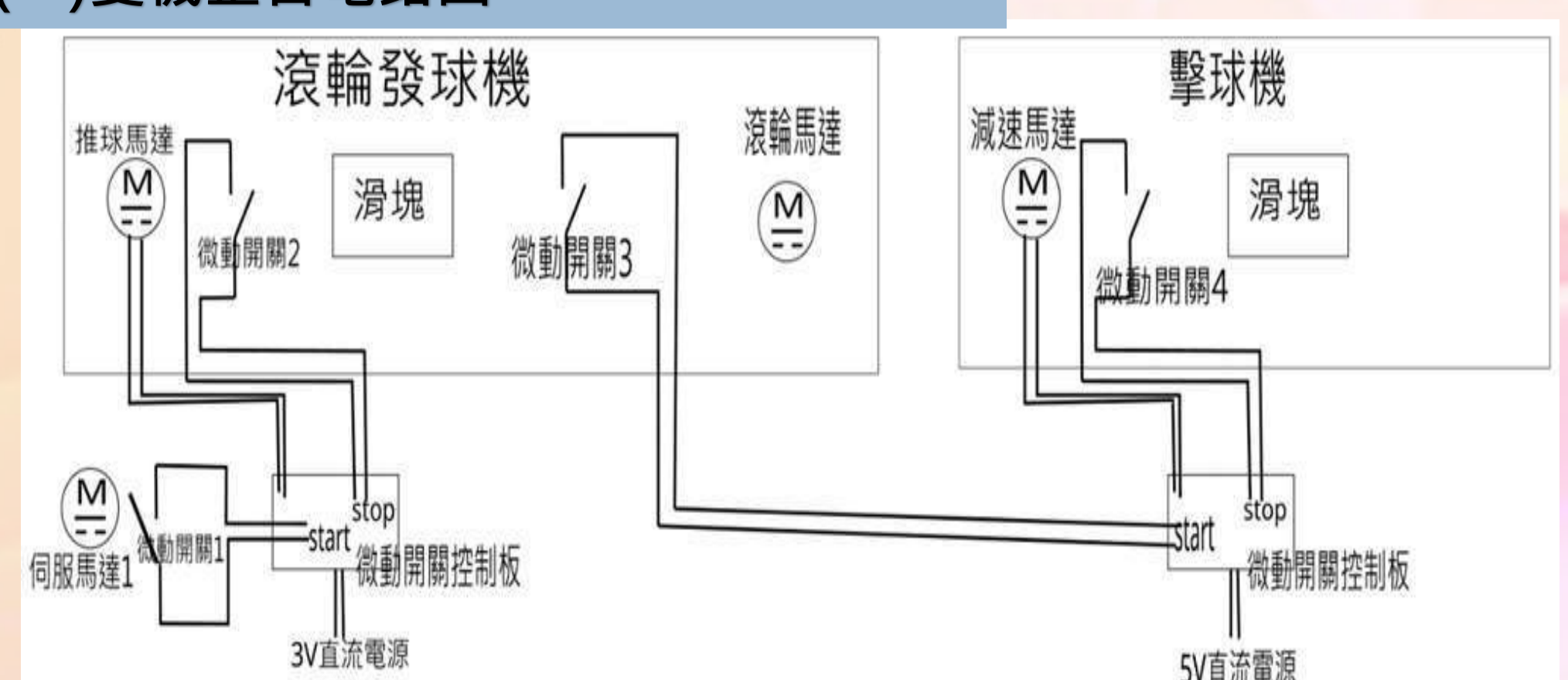
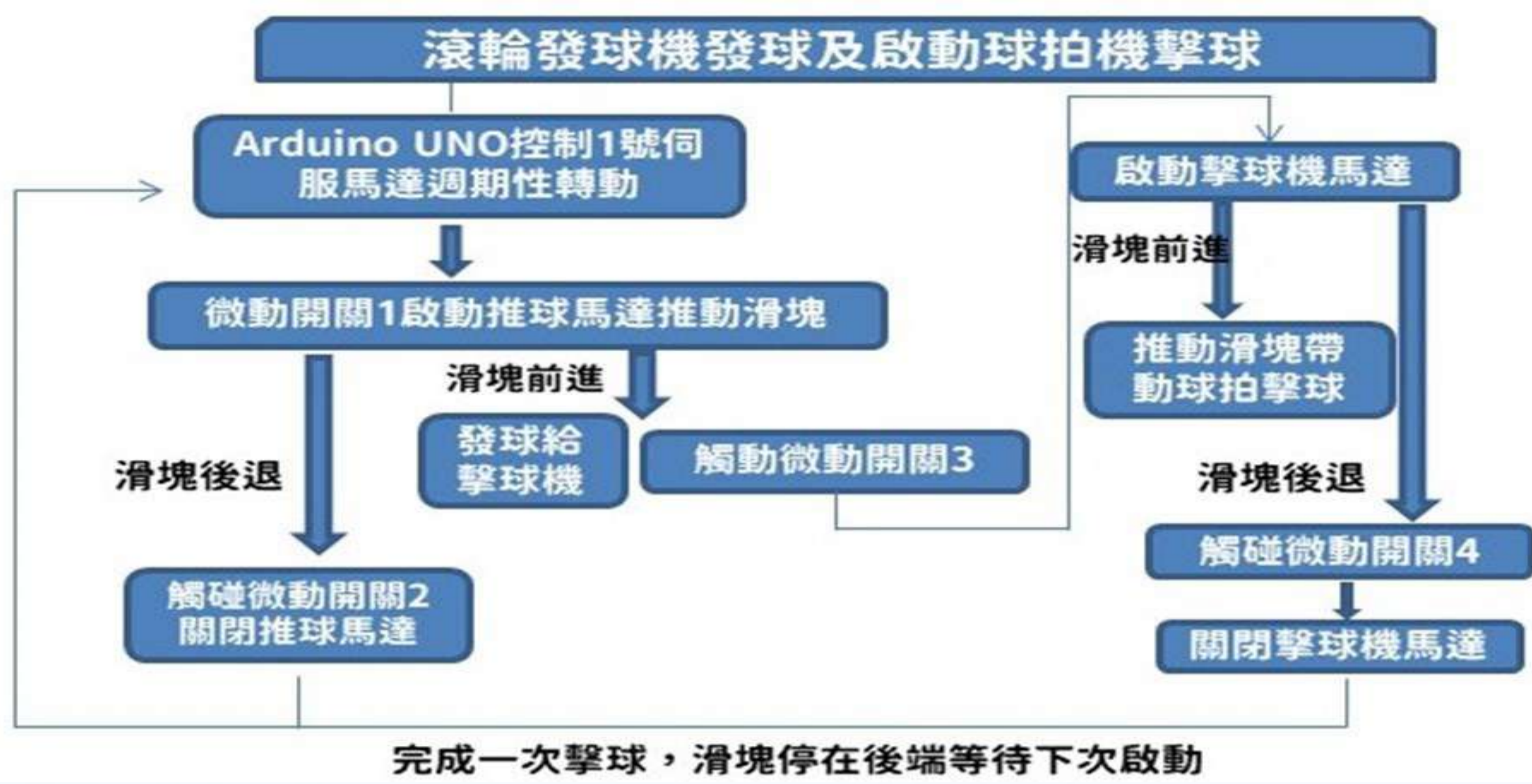


圖 18 雙機整合電路圖

五、Arduino 控制伺服馬達

(二)雙機整合動作流程圖



完成一次擊球，滑塊停在後端等待下次啟動
圖 19 雙機協同運作流程說明圖

(三)雙機的馬達與開關接線配置說明圖

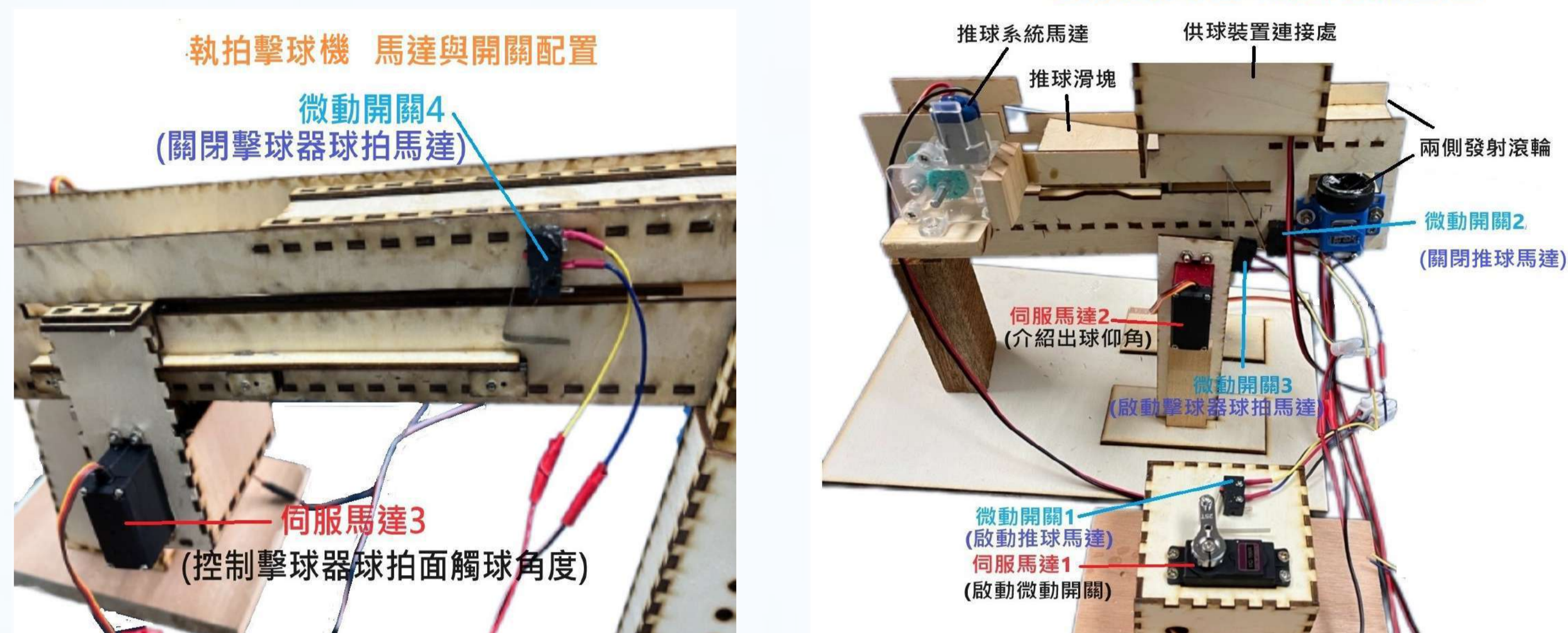


圖 20 雙機馬達與開關接線配置圖

(四)雙機整合馬達電壓與發球球速測試

1. 實驗方式:

- (1) 控制滾輪馬達、減速馬達電壓，拍面與水平夾角保持 90 度，水平揮拍。
- (2) 距擊球機球拍 1.6 公尺處直立 pp 瓦楞板，拍攝擊球影片，擷取影片中桌球飛行 1.6 公尺的時間。

2. 統計結果: 反覆偵測 10 顆球，紀錄所測得的球速整理如右表 5。

表 5 雙機馬達電壓與發球球速測試結果

減速馬達電壓 (V)	滾輪馬達電壓(V)		
	3V 球速 (m/s)	4V 球速 (m/s)	5V 球速 (m/s)
4.5V	6.5	8.3	10.7
5V	7.1	9.9	12.8
5.5V	8.5	11.1	14.5
6V	9.7	12.8	16.3

(五)雙機整合發球桌面落點測試

【擊球落點測試說明】

依教練建議將落點劃分為 18 區，分析雙機的控制參數，包括滾輪馬達電壓 (V_1)、擊球機減速馬達電壓 (V_2)、揮拍仰角 (γ°)、球拍面與水平面夾角 (z°)。啟動雙機觀察擊球落點，設定 4 項參數，各發 30 顆球，錄影分析，並統計落點位置的次數與相對次數，以確認參數角度與擊球落點的位置關係，做為擊球機落點調整的參考依據。

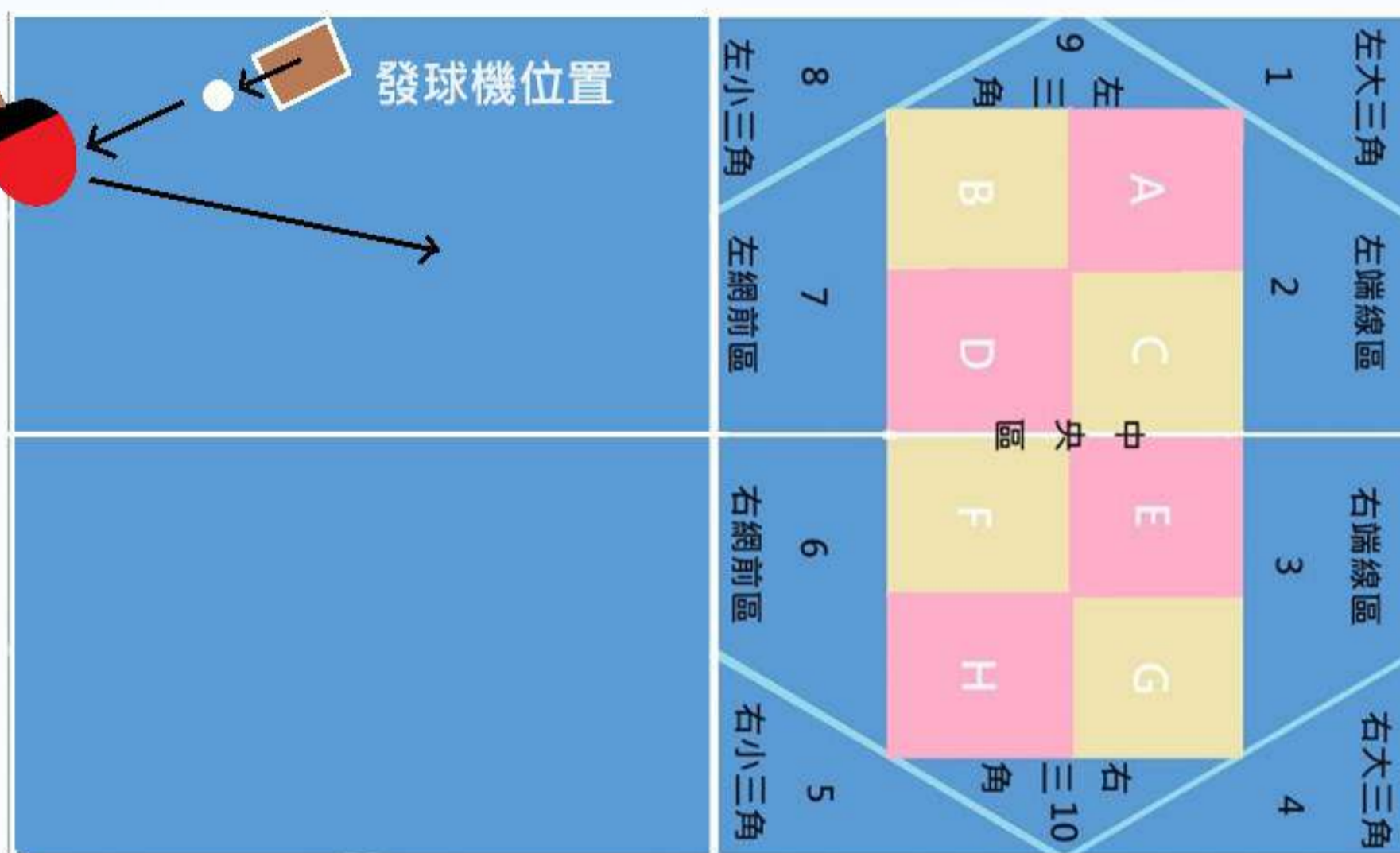


圖 21 雙機測試位置與球桌落點 18 區圖示

統計方式: 紀錄變因參數後，以同參數發 30 顆球並錄影分析統計落點位置的次數與相對次數，以確認參數角度與擊球落點的位置關係。

測試結果

表 6 雙機整合擊球落點穩定度測試統計表

落點	V_1	V_2	γ°	z°	落點%	落點	V_1	V_2	γ°	z°	落點%
端線區	4	5.5	30	85	90	中央 C 區	4	5	20	80	93
端線區	4	6	30	85	86	中央 C 區	4	5.5	20	80	97
端線區	5	4.5	30	85	93	中央 D 區	3	5	30	85	90
端線區	5	5	20	80	90	中央 D 區	3	4.5	45	90	93
端線區	5	5.5	15	80	86	左網前區	3	4.5	50	110	86
端線區	5	6	10	80	90	左網前區	3	4.5	60	115	83
端線區	5	5.5	30	70	90						
端線區	5	6	40	60	83						

六、擬真教練餵球模式

為了能餵出左右變化的球，我們製作了一個能水平旋轉的平台，用以旋轉執拍擊球機，如下圖 22~25。我們將擊球機左右轉動旋轉角度設定為角度 x° ，並再次進行擊球落點位置穩定性測試，落點統計結果如表 9。

表 9 餵球模式落點穩定度測試統計表

落點	V_1	V_2	γ°	z°	x°	落點%	V_1	V_2	γ°	z°	x°	落點%
左大三角區	5	5.5	30°	85°	-7	90	5	6	20°	80°	-4	86
左端線區	5	5.5	30°	85°	5	86	5	6	20°	80°	8	83
右端線區	5	5.5	30°	85°	17	93	5	6	30°	85°	22	83
右大三角區	5	5.5	20°	80°	30	90	5	6	45°	90°	35	86

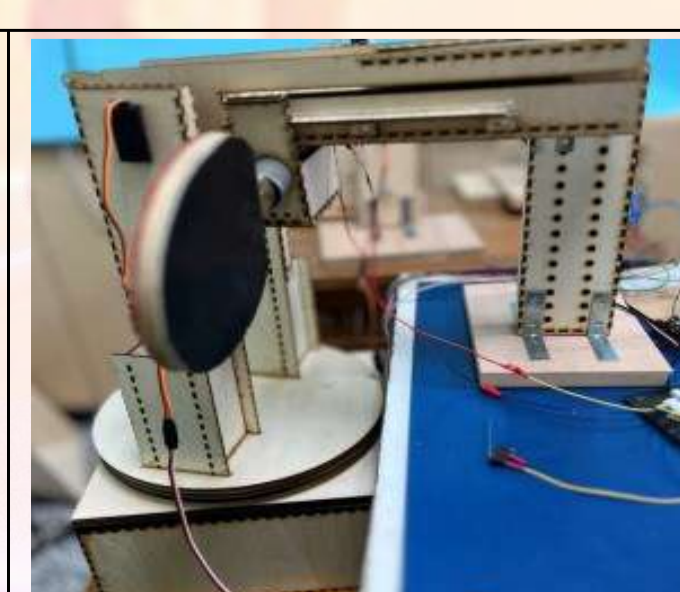
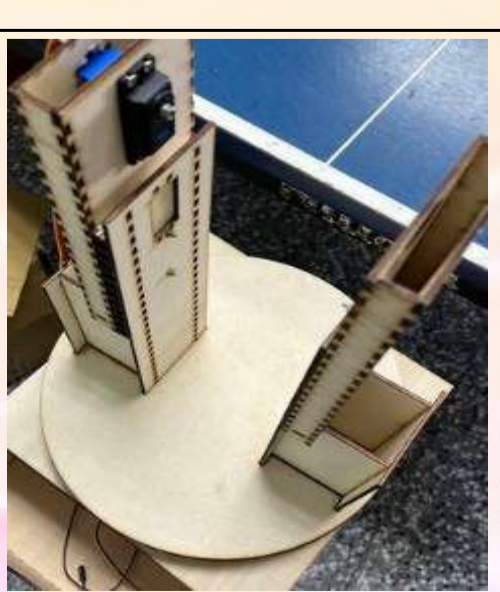


圖 22 平台安裝大扭力伺服馬達

圖 23 平台上轉盤加裝滾珠轉盤

圖 24 伺服馬達上安裝轉盤腳架

圖 25 將擊球器安裝於腳架上

(六)雙機整合發不轉球及上旋

將膠皮黏貼於木板上，並將木板垂直置放於擊球機距發球機 1.6 公尺處，開啟手機多重曝光模式，在測試膠皮處拍攝連續照片，再利用線上疊圖軟體 Startrails，合成桌球撞擊膠皮後的運動軌跡，並依據軌跡圖上的反彈角度進行量測與分析，此測試可以作為我們調整擊球機擊出不同球路的評估依據，結果整理比較如右側表 7 及表 8。

➤ 上旋球定義: 相同球速下，上旋越多，桌球反彈後向上角度越大。

表 7 模擬真人教練餵球機發不轉球測試球體運動軌跡圖表

球種	平擊不轉球	擊出平球球體運動軌跡圖	
觸球角度	90°	揮拍角度 0°	
馬達電壓	$V_1=5V$ 、 $V_2=5.5V$	均速 14.2m/s	
反彈方向與角度	以線上量角器定位擊球點球心位置為支點，量測入射球心與反射球心夾角。 擊球機反彈方向與角度: 4°		
Tracker 球軌追蹤			
真人教練擊球軌跡			
擬真球路評估	比較直拍擊球機擊出的平球，用 Tracker 追蹤影片中桌球的運動軌跡，與真人教練擊出的平球軌跡所得到的運動位置座標，會發現兩曲線的運動軌跡，以真人教練擊球較平直，相較於擊球機的擊球，兩者撞擊紅色拍皮前的位置座標不太相同，但在撞擊紅色拍皮後，反射的軌跡就趨近雷同。而二者球速也接近。		

表 8 模擬真人教練餵球機發上旋球測試球體運動軌跡圖表

球種	上旋球	擊出上旋球球體運動軌跡圖	
觸球角度	75°	揮拍角度 70°	
馬達電壓	$V_1=5V$ 、 $V_2=5.5V$	均速 13.3m/s	
反彈方向與角度	以線上量角器定位擊球點球心位置為支點，量測入射球心與反射球心夾角。 擊球機反彈方向與角度: 22°		
Tracker 球軌追蹤			
真人教練擊球軌跡			
擬真球路評估	比較直拍擊球機擊出的上旋球，用 Tracker 追蹤影片中桌球的運動軌跡，與真人教練擊出的上旋球軌跡所得到的運動位置座標，會發現不論是擊球機發球 Tracker 球軌 x-y 散佈圖，或是真人教練發球 Tracker 球軌 x-y 散佈圖，兩曲線的運動軌跡，在撞擊紅色拍皮前後，球體隨時間變化運行的高度曲線相似度極高。而二者球速也接近。		

七、各種球路設計

(一)Arduino UNO 程式控制流程圖

Arduino UNO 程式請參考作品說明書附錄 2。

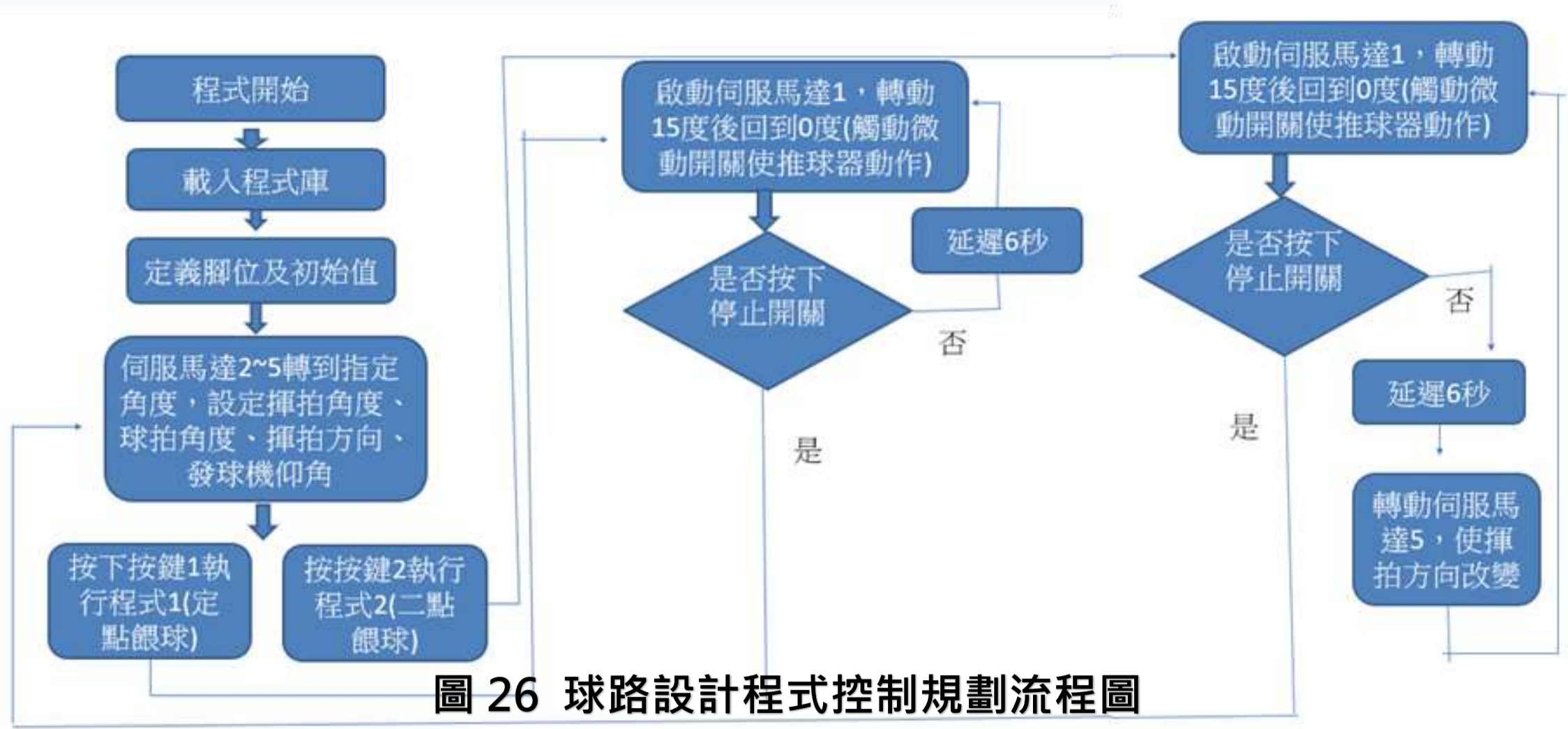


圖 26 球路設計程式控制規劃流程圖

訓練球路：目前設定 2 種功能，以實體按鍵控制，按鍵 1 按下發出定點上旋球，按鍵 2 按下發二點上旋球，依各項參數控制對應直流馬達及伺服馬達。

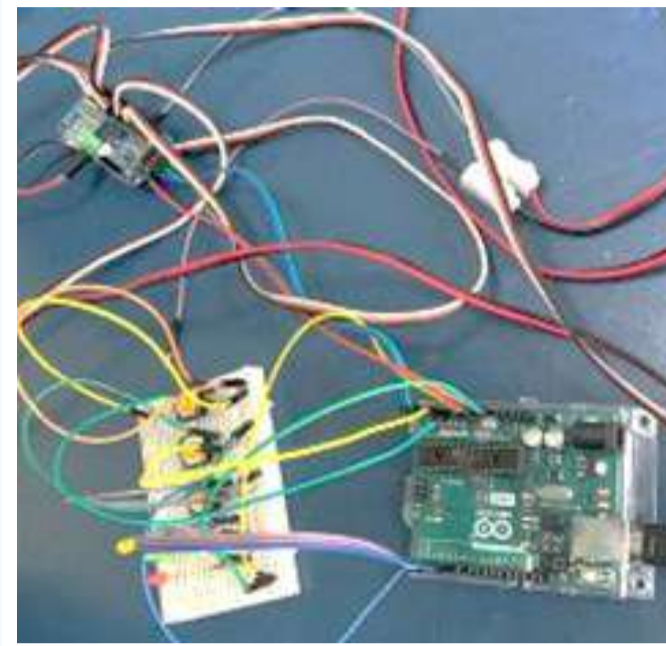


圖 27

原始實體按鍵控制裝置

表 10 訓練球路參數設定與應用

訓練球路	定點上旋長球	二點上旋球	
按鍵	按鍵 1	按鍵 2	
發球位置	左端線區	左端線及右端線區輪流交替	
適用球種	可練習正反手攻球、推擋、長顆粒磕球等	可練習正反手交替攻球、二點走位練習等	
參數設定	滾輪馬達電壓	$V_1=5V(L298N PWM=213)$	$V_1=5V(L298N PWM=213)$
	減速馬達電壓	$V_2=5.5V(L298N PWM=234)$	$V_2=5.5V(L298N PWM=234)$
	拍面指向角度(x°)	$x^\circ=5^\circ$	$x^\circ=5^\circ、17^\circ$ (每 6 秒換一次)
	揮拍仰角(y°)	$y^\circ=30^\circ$	$y^\circ=30^\circ$
	拍面與水平面夾角(z°)	$z^\circ=85^\circ$	$z^\circ=85^\circ$

肆、討論

一、滾輪發球機

滾輪發球機在歷屆科展作品中已經多有著墨，在實際製作時仍舊遇到許多問題，以下將自造過程遭遇的困難點以及所採取的解決策略進行說明：

- (一)推球機構卡球→多次調整連桿。
- (二)供球系統容球數→設計大容量供球裝置，且補球方便(圖 28)。
- (三)供球系統卡球→使用 16rpm 的 N20 馬達，設計擾球器破壞顆粒流造成的靜態平衡，避免卡球狀況。



圖 28 加大容量供球裝置與擾球器

二、執拍擊球機

執拍擊球機目前並沒有參考範例，從無到有，我們不斷修正結構與外型尺寸，希望可以模擬教練持拍時旋轉手腕的效果，做到餵球動作，以下將製作過程所發現的問題與對策進行說明如下：

- (一)滑塊太重→在滑塊兩側加裝軌導輪，兩側加裝導輪與對應的軌道，大大降低滑快推行的摩擦力(參考直排輪的設計)。
- (二)馬達扭力不足→經過測試，從 C130 小馬達→ N20 馬達→ 2 顆 N20 馬達並聯傳動→最後改用 12V 減速馬達才順利克服。
- (三)滑塊連桿斷裂→想用金屬片替代，但金工使用能力不足→發現塑膠曲柄形狀吻合→使用曲柄強化連桿轉軸，堅固又方便。



圖 29 利用曲柄強化木轉軸

三、雙機整合

(一)雙機整合遇到最大的難題就是：

擊球機球拍啟動的時間點。當發球機發出球時，球拍太早或太晚揮動，都會錯失擊球的最佳時機。

- 國小參加師大科技競賽機械獸接力，曾經使用微動開關。
 - 嘗試微動開關控制馬達的啟動與關閉，反覆測試與調整微動開關的位置，尋找啟動擊球機的最佳時機點(嘗試錯誤，累積經驗)。
- (二)測試時，我們發現用不同的電源提供相同的電壓，形成不同的轉速，查相關資料學到不同的電源供應器或電池，能提供的電流不同，電流也會影響轉速，→每次實驗都使用相同的電源供應器。
- (三)水平左右轉動的旋轉盤是參考旋轉座椅的轉盤，安裝類似的鋼珠轉盤可以輕鬆轉動餵球機，便宜又好用。
- (四)Arduino 程式控制部分，我們做了單點上旋球及二點上旋球，目前完成 2 種球路，成功透過手機控制擊球器的水平角度(x°)揮拍仰角(y°)與球拍面與水平面夾角(z°)。為了球隊練習，我們還會持續繼續開發其他球路，讓仿真教練餵球機更佳完整。

四、真人教練與仿真教練餵球機的比較

表 11 真人教練與仿真教練餵球機性能與 CP 值比較

比較項目	真人教練餵球	模擬教練餵球機	
不同球路	不轉球	反彈後角度: 8°	反彈後平飛角度: 4°
	上旋球	反彈後上旋角度: 18°	反彈後上旋角度: 22°
	其他球路	側旋球、下旋球等	尚未開發
餵球穩定度	實際定點餵球穩定度觀察約 99%。 長時間餵球體力負荷大	不同定點位置，穩定度約 83%~97% 長時間餵球無體力問題	
餵球球速	真人可以控制自如	調整馬達電壓控制球速	
模擬比賽球路餵球訓練	可以呈現競賽對打實況	目前尚未開發下旋、側旋球，變化度仍無法提供模擬競賽的餵球	
單次費用計算	聘請球館教練，每小時 600 元以上	材料費:估計約 6500 元左右	
長期費用估算	每日午休練習 1 小時，每週 5 日。 每月需負擔約 12000 元。	無，後續可自行維修或修繕	
學生排隊問題	教練只有 1 位，20 位選手排隊練球，每人每小時只能分得 3 分鐘	自行製造模擬教練餵球機，每桌一臺，5 臺球桌，每週分配 4 人，每人每小時可得 15 分鐘練習時間。	
臨時應變	教練若請假，會停止練習	教練不在也可以自主練習，不會有停止練習的突發狀況。	

伍、結論

一、本研究製作的滾輪發球機如下圖，經測試可以發出不同速度不同仰角的球，且落點穩定度佳。

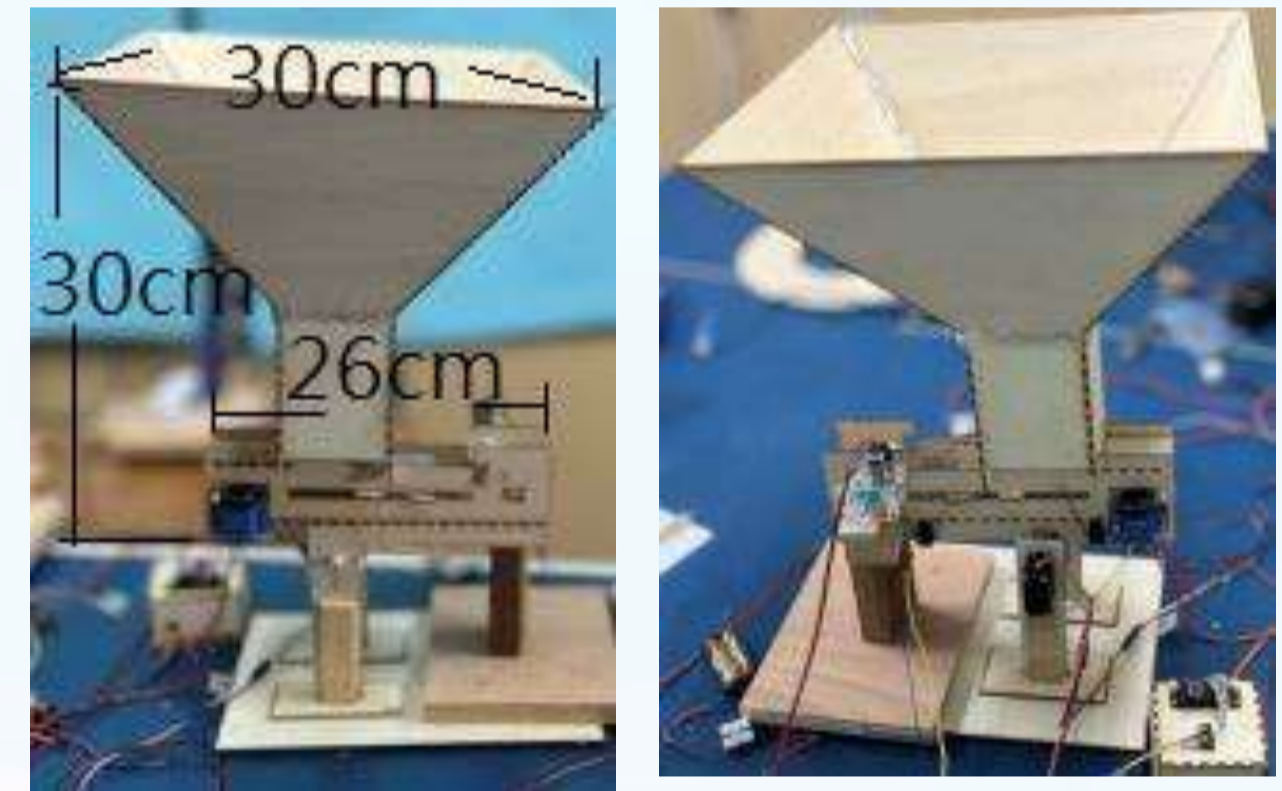


圖 30 本實驗滾輪發球機最佳化裝置

二、本研究本實驗執拍擊球機最佳化裝置經測試可以擊出不同速度不同仰角的球，且落點穩定度佳。

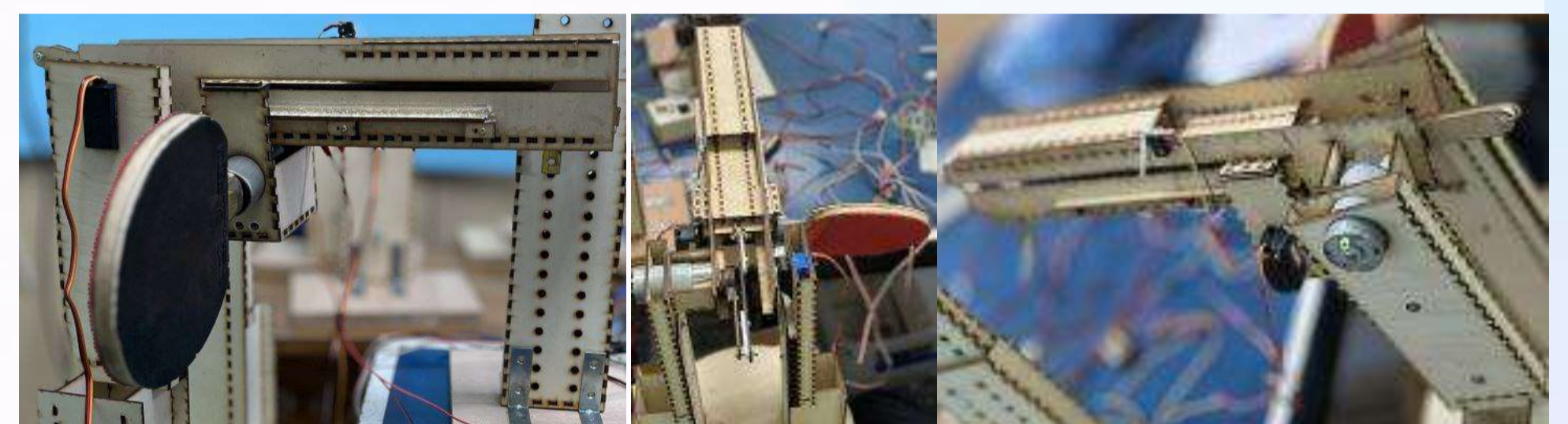


圖 31 本實驗執拍擊球機最佳化裝置

三、發球機及擊球機雙機機電整合及擊球配合：以 Arduino 控制伺服馬達觸動微動開關，使發球機發球，擊球機的滑塊移動觸動微動開關使擊球機啟動擊球，當滑塊移動至適當位置時會觸動另一微動開關使滑塊停止，完成發球及擊球。

四、餵球落點測試：經實際測試，本裝置可成功將球打到指定位置，每個位置測試 30 球，達到指定位置有 24~29 球。

五、Arduino 程式控制本裝置可發單點上旋球及二點上旋球。

六、「模擬教練餵球機」，可提供兩點餵球，球隊多人練習時，可加入「模擬教練餵球機」分擔真人教練的餵球工作。一來可以減輕教練體力負擔，二來可以讓教練有更多時間觀察球員擊球動作，給予更多技術與策略的指導。



▲桌球隊的隊友一起來試球
圖 32 擬真教練餵球機體驗實況

陸、參考文獻資料

- 一、國中翰林版科技課本 1 下-結構與機構。
- 二、國中翰林版科技課本 2 下-製作電動液壓動力機械手臂。
- 三、連廷楷；孫芷柔；應冠穎；吳睿文(2015)。自動自「發」、求新「球」變。中華民國第 55 屆中小學科學展覽會。
- 四、廖沛蓉；鍾昀珊；林盈萱(2020)。觸而及「發」-自製不插電桌球發球機治具之成效探討。中華民國第 60 屆科展。
- 五、林佑謙(2023)。智慧桌球練習機：以 Arduino 為核心之創新設計。中華民國第 63 屆中小學科學展覽會。
- 六、陳柏宏、吳翰泰。小「兵」立大功-可攜式乒乓發射器應用於智慧訓練之研製。中華民國第 63 屆中小學科學展覽會。