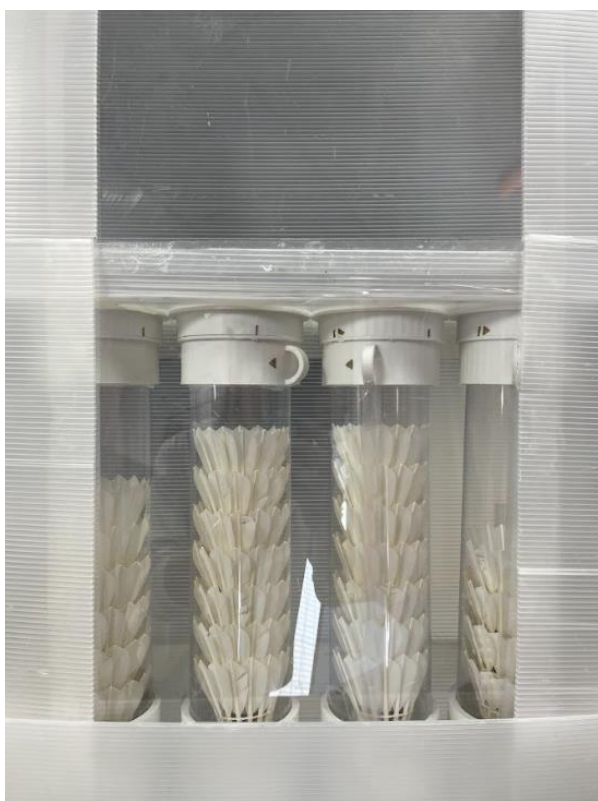


花蓮縣第 66 屆國民中小學科學展覽會 作品說明書

科別：生活與應用科學（一）

組別：國小 A 組

百發百中羽球收球排列器——羽球定向排列之研究



(指導教師拍攝)

關鍵詞：羽球排列、孔徑設計、重心引導

目 錄

摘要.....	1
壹、研究動機.....	1
貳、本次研究創新說明	2
參、研究目的	2
肆、文獻探討	3
一、羽球的物理特性與重心	3
二、力矩與翻轉機制.....	3
三、振動機制對粒狀物體定向排列的影響	3
四、現有羽球收集與整列裝置之研究回顧	4
伍、研究設備及器材.....	5
陸、研究過程.....	7
實驗一：孔徑大小對羽球定向排列正確率之影響.....	8
實驗二：新舊球混合測試與孔徑下限驗證	11
實驗三：孔洞數量對產能之影響.....	13
實驗四：最大容球數與負載穩定性測試.....	15
實驗五：7.2cm 孔徑四孔效能驗證.....	17
實驗六：7.2cm 孔徑最大容球數測試	19
柒、研究結果與討論.....	20
捌、結論	24
玖、研究限制.....	25
拾、未來展望	25
拾壹、參考資料及其他	25
附件：ESP32 紅外線感應系統接線圖	26

摘要

本研究以本隊完成之「智慧多功能羽球撿球器」為基礎，透過四組控制變因實驗，系統探討孔徑大小（6.8~8cm）、孔洞數量（1~4 孔）及容球數量（20~40 顆）對進球成功率與排序正確率的影響。利用「重心引導翻轉機制」——羽球球頭較重，在集球區搖晃時於孔洞上方完成翻轉，進入孔洞時已呈球頭朝下落入桶中。實驗確立 7.3cm 為最佳孔徑（ ≤ 10 顆時排序正確率 100%；建議作業負載 ≤ 20 顆時排序率 94%）；雙模動力（機器震動+手動搖晃）對新舊球各有適用；四孔並列產能達單孔 2.9 倍；建議每次投入 ≤ 20 顆，此條件下進球 87%、排序 94%最為穩定。

壹、研究動機

在羽球練習的時候，羽球常常會散落在地上，我們需要一直彎腰撿球，不但很花時間，也很容易覺得累。另外，在使用自動發球機之前，還要先把羽球一顆一顆排好方向，才能放進機器裡，讓練習變得很麻煩。

我們發現桌球有撿球器，可以減少撿球的辛苦，但羽球由於造型與其他球類大為不同，因此相關工具大多只能把球收集起來，還是需要再用手整理方向。此外，羽球隊訓練時，除了手動發球外，球隊也會搭配羽球發球機使用；然而在填充羽球時，仍需以人力逐一排序後再放入機器，填充過程相當耗費人力與時間。



圖 1-1 羽球隊訓練現場—大量羽球散落，持有裝置原型於球場進行實地測試(指導教師拍攝)

在資料搜尋的過程中，我們查閱了多項前人研究，包括第 53 屆全國科展（陳怡云等，2014）以斜面力學整列羽球的作品、第 57 屆全國科展（林嘉欣等，2018）以吸力式裝置成串收集羽球的設計，以及中國專利（CN103751996A，2013）的氣流式回收整列機等。這些研究驗證了「利用羽球重心可以實現定向排列」的可行性，但目前仍有三大進步空間：

1. 收集效率與模式：過往科展作品的「吸力式」裝置一次只能吸一顆球，面對大量羽球時速度太慢。
2. 電力與體積限制：大型裝置雖能大量收球，但體積龐大且需插電，在戶外使用不便。
3. 功能單一化：現有裝置通常只能收球，收完後還需倒進其他容器才能教學使用。

因此，本研究以本隊先前開發完成的「智慧多功能羽球撿球器」（2026 IEYI 世界青少年發明展臺灣選拔賽參賽作品）為基礎，該裝置已克服「多孔大量收球」、「模組化結構」及「雙模動力」等硬體設計挑戰。為追求完美的 100% 排序正確率並解決卡球問題，本研究針對集球托盤的「孔徑過濾效應」進行更進一步的科學實驗，希望找出能讓新舊球都順暢通過的最佳孔徑，並驗證四孔設計的加乘效果。



圖 1-2 左：裝置輕便好攜帶的設計特色(指導教師拍攝)；中、右：排列整齊球頭朝下的羽球，可直接填入發球機(指導教師拍攝)

貳、本次研究創新說明（延續前期作品之新增研究內容）

本科展作品延續本隊於 2026 IEYI 世界青少年發明展臺灣選拔賽之參賽作品「智慧多功能羽球撿球器」（作品編號 TWER25057）。依據科展規定，以下說明前期作品已完成的部分，以及本次科展的創新與新增研究內容：

【前期 IEYI 作品已完成項目】（一）**集球器硬體設計**：ESP32 晶片感應控制、紅外線感測器、馬達旋轉邊刷自動掃球功能。（二）**裝置整體架構**：模組化結構設計、伸縮拉桿、磁吸組合、快拆卡榫系統。（三）**雙模動力概念**：機器震動與手動搖晃的雙模設計概念。（四）**後揸式發球桶**：球桶可拆卸重組為後揸式手動發球桶的功能設計。

【本次科展新增創新研究項目】（一）**孔徑科學化實驗**：本次科展全新進行的系統性控制變因實驗——對 6.8cm、7.0cm、7.3cm、7.5cm、8.0cm 五種孔徑的進球成功率與排序正確率進行量化比較，找出最佳孔徑為 7.3cm，此為前期作品未進行之科學研究。（二）**新舊球差異實驗**：比較新球與舊球在相同孔徑條件下的進球表現差異，發現機器震動對新球完全失效（進球率 0%）的現象，並驗證手動搖晃可補救此問題，此為新發現。（三）**多孔數效能實驗**：透過 1 孔至 4 孔的對比實驗，量化多孔設計的產能加乘效果（2 孔＝2.7 倍），超線性增益現象為新發現。（四）**最大容球負載實驗**：系統性測試 20 至 40 顆不同容球數量下的效能表現，找出臨界負載量（20 顆）並分析失效機制，此為全新實驗設計。（五）**文獻回顧整合**：整合物理學文獻（Cohen et al., 2015）、力矩原理、振動機制等理論依據，為本裝置孔徑設計提供科學解釋。

本次科展的研究重點為「**最佳孔徑設計的科學實驗研究**」，與前期 IEYI 作品的重點「**多功能撿球裝置的硬體設計與發明**」屬不同面向，**本次研究完全聚焦於新的科學問題探討，前期作品僅提供裝置基礎**，所有實驗設計、數據收集與分析均為本次科展新增之研究內容。

參、研究目的

- 一、現有羽球收集裝置（包含市售產品及過往科展設計）能將球收集起來，但均無法同步完成「**球頭朝下**」的定向排列，使用者仍需手動逐一排序才能填入發球機，耗費大量時間。本研究的核心問題是：能否利用羽球球頭較重、重心偏前的物理特性，透過孔徑設計讓球在落入收納桶時自動完成定向排列，達成大量**收球與同步排列兼顧**的目標？
- 二、探討不同孔徑大小下，孔洞對羽毛的阻擋程度如何影響進球成功率與排序正確率，找出

兼顧「順暢進球」與「確保球頭朝下排列」的最佳孔徑尺寸。

三、以「進球成功率」（15 秒內成功落入管內之比率）與「排序正確率」（球頭朝下之比率）為量化指標，透過控制變因實驗，系統分析孔徑規格、多孔結構、容球數量對排列效能的影響，找出各變因之最佳設計規格。

四、驗證「雙模動力」設計（機器震動 vs. 手動搖晃）之必要性，分析不同動力模式對新球、舊球進球率的差異，確立適用不同使用情境之操作建議。

肆、文獻探討

一、羽球的物理特性與重心

依據世界羽球聯合會（Badminton World Federation, BWF）Laws of Badminton 規定，標準羽球重量為 4.74 至 5.50 克，羽毛端直徑為 58 至 68 毫米，軟木底座直徑為 25 至 28 毫米（BWF, 2025）。羽球由較重的軟木底座與較輕的羽毛骨架構成，兩部分的質量分布極不均勻，因為球頭（軟木底座）很重、羽毛很輕，整顆球的重心偏向球頭那一端，這就是本研究能讓球自動排列的核心依據。

Cohen 等人（2015）在《New Journal of Physics》發表的研究「The physics of badminton」中，以高速攝影機記錄羽球翻轉動作，證明羽球重心位於軟木端，與壓力中心相距約 3 公分。由於軟木比羽毛重很多，無論球一開始是什麼方向，重力都會讓球自動翻轉到「球頭朝下」的穩定姿態。本研究稱這個現象為「重心引導翻轉機制」：當球在集球區（孔洞上方的開放空間）中受到搖晃振動時，重力對偏向球頭的重心產生旋轉力（力矩），使球在集球區內完成翻轉，以球頭朝下的姿態對準孔洞落入，達成定向排列。孔徑設計的關鍵是控制翻轉完成後球能順暢通過的空間：孔洞太大（如 8cm）球未完成翻轉就反向通過；孔洞太小（如 6.8cm）阻力太大球難以落入。

二、力矩（Torque）與翻轉機制

「力矩」是讓物體旋轉的力量，就像用長一點的板手轉螺絲比較省力——力量乘以距離就是旋轉力（均一教育平台，力矩單元）。當力的作用點沒有正好通過物體的重心時，就會讓物體旋轉。在本研究中，羽球在集球區（孔洞上方的開放空間）受搖晃後，若羽毛端朝下，重力施力在偏向球頭的重心上，就形成了讓球頭往下轉的旋轉力。翻轉完成後，球頭已朝下的羽球對準孔洞落入桶中完成定向排列。

孔徑大小直接影響此力矩能否有效發揮：孔徑太大（如 8cm）時，球倒著就能滑進去，翻轉動作還沒完成球就已經落下，排序就會出錯；孔徑太小（如 6.8cm，幾乎等於球的最大寬度）時，孔壁卡住球的阻力太大，雖然排列方向是對的，但球幾乎進不去。7cm（實測 7.3cm）提供了約 0.3cm 的翻轉空間，剛好讓旋轉力（力矩）完成翻轉動作，又不會讓球倒著掉入，是「進球順暢」和「排列正確」之間的最佳平衡點。

三、振動機制對粒狀物體定向排列的影響

振動是使粒狀物質產生位移、分類與定向排列的常見工業手段。在工業上，振動常被用來讓物品自動分類和排列，例如零件工廠的振動送料盤。研究顯示，振動的快慢（頻率）和

幅度大小會決定物品排列的效率，最好的振動方式要配合物品的形狀、重量分布和容器的設計。

本研究的「機器震動」是快速小幅度的抖動，能穩定持續地讓球移向孔口；「手動搖晃」是大幅度慢搖，能克服新球羽毛較硬、卡在孔口的問題。這個雙模設計符合「針對不同材料特性選擇適當振動方式」的原則，有效解決新舊球進球難易度不同的問題。

四、現有羽球收集與整列裝置之研究回顧

在本研究之前，已有多項科展作品與學術研究探討過羽球收集與整列的問題，本節整理與本研究最相關的四項先行研究，說明現有技術的進展與尚待突破的課題。

（一）陳怡云等（2014）——斜面整列機制（第 53 屆全國科展）：本作品最早以科學方式驗證了「利用羽球重心偏向球頭」進行整列的可行性，設計出斜面導槽，讓球滑落時因重心偏置自動旋轉為球頭朝前的排列。這與本研究共享相同的物理原理——「重心引導翻轉機制」。然而此裝置採用手動操作與斜面導槽，未能實現大量快速的自動化收球，且沒有針對孔洞大小對整列效能的量化分析。本研究正是要在此基礎上，系統性地探討孔徑尺寸的影響。

（二）林嘉欣等（2018）——吸力式收集器（第 57 屆全國科展）：本作品設計出可讓羽球「成串收集」的吸力式裝置，解決了市面上無羽球收球器的問題。裝置以吸塵器的氣流吸引羽球進入收納管，由於球頭較重，在管道中自然排列為球頭朝前的方向。但此設計需持續電力與較大體積的吸力設備，且一次只能吸取少量球，面對大量訓練球時速度偏慢，也無法在野外無電源環境使用。本研究的「孔徑振動排列」設計，正是為克服吸力裝置「耗電、速度慢、體積大」三大限制而提出。

（三）杜春銘（2013）——羽毛球回收理球機（中國發明專利 CN103751996A）：此專利設計一種以「氣流（風力）」為動力的回收整列機。裝置筒體上方開口較大、下方開口較小，羽毛球由上方投入後，底部側面的進風裝置（電機驅動旋轉葉片）向筒體內斜向吹入氣流，使羽毛球在筒體內翻轉、定向排列為球頭朝下後落下。此設計與本研究的核心差異在於動力機制：專利採用「持續氣流」吹動羽球完成定向，本研究則採用「機械振動＋手動搖晃」的雙模動力讓羽球在孔洞處翻轉落下。兩者雖然目標相同（使球頭朝下排列），但原理與應用場景不同——氣流式裝置需要持續電力且體積較大，本研究的孔徑振動設計更輕便，適合無電源的戶外場地使用。

（四）陳柏翔（2024）、廖宏毅（2024）、正修科技大學（2025）——AI 自動化收集研究：近年已有多篇學術論文與競賽作品嘗試以 AI 影像辨識、自動導航機器人等技術進行羽球自動收集，並關注收集後的定向排列問題。這些研究代表羽球自動化的技術前沿，但均屬大型系統設計，尚未深入探討孔徑尺寸與排列機制的科學量化問題。

綜合以上先行研究可知：「利用羽球重心設計整列裝置」的概念已被科展與專利所驗證；「振動協助排列」的機制也已被工業設計所採用。然而，「孔徑大小對振動條件下羽球定向排列效能」的系統性量化實驗、以及「新舊球物性差異如何影響孔徑選擇」的深入探討，在可查詢的文獻中尚屬空白。本研究即針對此缺口，以控制變因實驗方法填補此一科學研究空白。

綜合上述文獻可知，本研究之設計具備明確的科學原理依據：（一）羽球球頭比羽毛

重，決定了在孔徑適當時一定會發生「球頭自動轉下」並經由孔洞通過的現象；（二）力矩（旋轉力）原理說明了孔徑大小如何控制翻轉空間，進而影響排列的正確率；（三）振動原理的研究支持了雙模動力設計的合理性，也解釋了「機器震動對新球無效、換成手動搖晃就可以補救」的實驗結果。綜合本節文獻回顧可知，雖然羽球整列的物理原理已被先行研究所確認（Cohen et al., 2015；陳怡云等，2014），氣流定向整列的裝置設計亦已有先例（杜春銘，2013），但尚無研究系統性地量化「孔徑大小」對「振動條件下羽球定向排列效能」的影響，也未深入探討新舊球物性差異如何影響孔徑選擇。本研究以第五節回顧的先行研究作為基礎，針對此空白進行科學實驗，兼具創新性與實用價值。根據文獻探討所確立的三大科學原理，本研究設計了四組控制變因實驗：（一）以「重心引導翻轉機制」為依據，設計實驗一**探討最佳孔徑**；（二）以「孔壁摩擦阻力」原理設計實驗二，**比較新舊球的進球差異**；（三）以「多通道分流效應」設計實驗三，**驗證多孔數的產能加乘**；（四）以「負載壓力影響翻轉空間」設計實驗四，**確立最佳容球量上限**。

伍、研究設備及器材

一、裝置結構說明

本裝置名稱為「智慧多功能羽球撿球器」，由三大模組組成，可依使用需求快速組裝與拆卸：

1. 集球器：具 ESP32 晶片、紅外線感測器及馬達旋轉邊刷，感應到羽球時自動啟動邊刷掃球，不需彎腰即可收球。伸縮拉桿：輕量化支撐結構，可伸縮調整高度，方便推動集球器在球場移動。
2. 集球托盤：具四孔可換式孔徑底盤，搭配機器震動（改裝律動機）或手動搖晃雙模動力，引導羽球自動翻轉排列。收納桶設有快拆卡榫，取出後可重新組裝為「後揸式發球桶」。

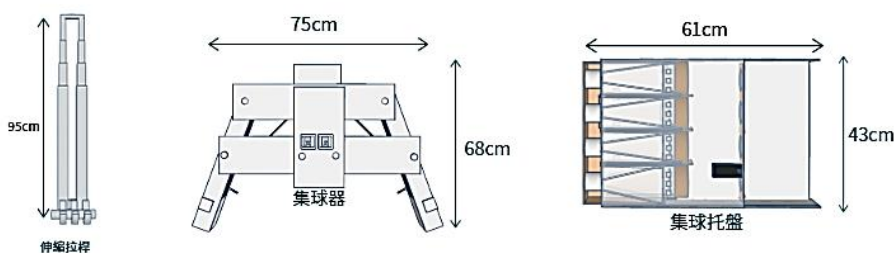


圖 5-1 零件組成及設計圖—含集球器（68x75cm）、集球托盤（61x43cm）與伸縮拉桿（95cm）規格(作者繪製)



圖 5-2 裝置主要零件標示—萬向輪及旋轉邊刷、集球排列彈匣、磁吸裝置、伸縮拉桿與 ESP32 控制板(指導教師拍攝、作者編輯)

二、主要器材清單(作者製表)

器材類別	器材名稱	說明與用途
裝置結構	PP 瓦楞板（集球器主體）	輕量環保材質，降低成本，方便攜帶
控制系統	ESP32 晶片	裝置控制核心，驅動感測與收球功能
感測系統	紅外線感測器	偵測羽球位置，觸發邊刷馬達啟動
收球機構	直流馬達＋旋轉邊刷	感應到球才作動，節省電力
動力系統（機器）	改裝律動機自製震動器	提供機器震動動力，速度 600～999 可調
動力系統（手動）	手動搖晃操作	人力手搖模式，作為補充動力
核心實驗組件	可更換孔徑 3D 列印底盤	測試 6.8/7/7.5/8cm 等規格孔徑
實驗樣本	同廠牌型號羽球（新舊混合）	確保控制變因一致性
量測工具	電子碼錶、游標卡尺、直尺	精確控制時間（15 秒）與孔徑尺寸

三、雙模動力說明

本裝置設計了「機器震動」與「手動搖晃」兩種動力模式，原因在於：

1. 機器震動（改裝律動機）：提供持續穩定的高頻小振幅震動，適合常規大量收球作業，使用者不需手持操作，省力自動化。
2. 手動搖晃：提供大振幅的位能，能有效突破新球羽毛與孔壁之間的阻力（卡球現象），是處理新球或高負載時的關鍵補充動力。



圖 5-3 雙模動力示意—左：改裝律動機提供機器震動；右：手動搖晃操作(指導教師拍攝)

四、裝置操作流程

完整收球至排列的作業流程共六步驟：



步驟 1：放置集球托盤，安裝拉桿並開啟 ESP32（左）→ 步驟 2：推動集球器收集羽球（中）→ 步驟 3：踩踏板固定，將拉桿後拉磁吸組合（右）(指導教師拍攝)



步驟 4：集球器含托盤一同立起（左）→ 步驟 5：拆卸取出集球托盤（中）→ 步驟 6：手動搖晃或機器震動，使球落入彈匣完成排列（右）（指導教師拍攝）

五、後揸式發球桶功能

集球排列完成後，收納桶可透過快拆卡榫拆卸，重新組裝為「後揸式發球桶」，讓教練能直接揸著球在場上靈活進行手動發球教學，無需依賴固定插電的自動發球機。

此設計的前提是「排序必須 100% 正確」——若羽球球頭方向排列錯誤，裝填入後揸式發球桶後，手動發球時球頭方向顛倒，球無法順利取出球筒，因此孔徑的精準設計對整套系統至關重要。



圖 5-4 左、中：球桶組裝成後揸式手動發球桶；右：機器震動與手動雙模式實際運作（指導教師拍攝）

陸、研究過程

各實驗採用「變因控制法」，固定測試時間（15 秒）、投入球數及裝置結構，僅改變各實驗之操縱變因。以進球成功率（%）及排序正確率（%）作為應變變因。

一、整體實驗設計：變因對照表（作者製表）

實驗	操縱變因	控制變因	應變變因
實驗一	孔徑大小 (6.8/7.0/7.5/8.0cm)	測試時間(15 秒)、投入球數(10 顆舊球)、球種（舊球）、動力模式（機器各速 + 手動）	進球成功率(%)、排序正確率(%)
實驗二	球種（新球 vs 舊球）；孔徑（7.5cm vs 7.3cm）	測試時間(15 秒)、投入球數(10 顆=5 新+5 舊)、動力模式（機器 999 速 + 手動）	新球/舊球分別進球率(%)、排序正確率(%)
實驗三	孔洞數量（1/2/3/4 孔）	孔徑固定 7.3cm、測試時間(15 秒)、投入球數(10 顆新舊混合)	15 秒進球總數、產能(顆/分)、完成 10 顆所需時間
實驗四	容球數量（20/24/30/40 顆）	孔徑固定 7.3cm（四孔）、測試時間(15 秒)、動力模式（機器 + 手動）	進球成功率(%)、排序正確率(%)、系統穩定性
實驗五	球種（全舊球/全新球/新舊混合）	孔徑固定 7.2cm（四孔）、投入 10 顆、測試時間(15 秒)、動力模式（機器 999 速 + 手動）	進球成功率(%)、排序正確率(%)、完成所需時間(秒)
實驗六	容球數量（20/24/30/40 顆）	孔徑固定 7.2cm（四孔）、機器震動(999 速)及手動搖晃雙模式	進球成功率(%)、排序正確率(%)

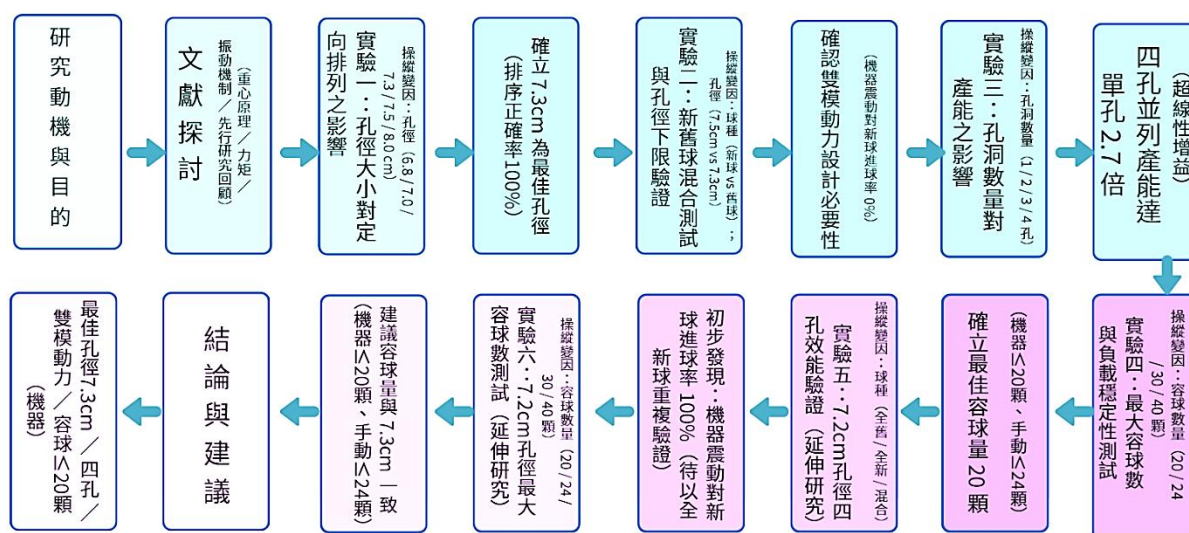


圖 6-0 本研究研究流程圖 (作者繪製)

實驗一：孔徑大小對羽球定向排列正確率之影響

(一) 研究目標

1. 探討不同底盤孔徑 (8cm、7.5cm、7cm、6.8cm) 對「球頭朝下」排序正確性的影響。
2. 找出能在標準測試條件下達成最高排序正確率 (目標 100%)，同時兼顧進球順暢度的最佳孔徑。

(二) 相關科學原理

羽球是由圓圓的軟木球頭 (底部) 和一圈羽毛 (上部) 組合而成的。軟木的密度比羽毛大很多，整顆球的「重心」 (也就是重量最集中的地方) 偏向球頭那一端。這就好像拿一根一端是鉛球、一端是棉花的棒子——不管你怎麼放，鉛球那端一定會往下沉。這個「重的那端往下」的現象，叫做「重心引導翻轉」。本實驗就是要利用這個原理，透過設計不同大小的孔洞，讓羽球在集球區 (孔洞上方的開放空間) 搖晃時翻成球頭朝下，再以正確方向落入孔洞中。孔洞太大，球翻轉前就反著掉進去，排列會出錯；孔洞太小，球根本擠不進去。我們要找的就是那個「剛剛好」的尺寸，讓球能在集球區完成翻轉、又能順暢落入。

(三) 研究想法

我們推測，羽球因軟木端較重，在集球區 (孔洞上方的開放空間) 內受搖晃時應能因重力力矩自動翻轉至球頭朝下，再落入孔洞。若孔徑過大，尚未完成翻轉的球反向通過，排序會出錯；若孔徑過小，雖翻轉正確但阻力太大使球無法落入。我們預期 7cm 附近存在一個「甜蜜點」，能同時達成 100% 排序正確率與合理的進球成功率。

(四) 研究工具及方法

1. 工具：可更換孔徑之集球桶 (實驗一共四種規格：6.8、7.0、7.5、8.0cm；實驗二增加 7.3cm 規格)、同廠牌型號羽球共 10 顆 (本研究實際量測所用羽球最大直徑為 6.8cm)、電子碼錶、游標尺、紀錄表。
2. 方法：**變因控制法**—固定測試時間 (15 秒)、投入球數 (10 顆)；分別測試機器震動 (速度 600~999，為晃動機的電子檔位設定值，數值愈大震動頻率愈高) 與手動搖

晃，各孔徑重複 3 次取平均。

（五）研究步驟

【孔徑選擇依據】本研究測量各知名品牌球筒（Mizuno、Kumpoo、YONEX、Victor、Volar、ADONEX、REDSON 等 7 款）的開口直徑，取平均值 6.8cm 作為實驗最小孔徑。實測中也確認羽球本身最大直徑約為 6.8cm，與球筒開口相近。由於測試發現 6.8cm 孔徑下羽球容易卡住、不易掉落，因此向上延伸測試 7cm、7.3cm、7.5cm、8cm 四個孔徑，以球筒直徑為下限、上限設為 8cm，觀察各孔徑的進球率與排序正確率表現。

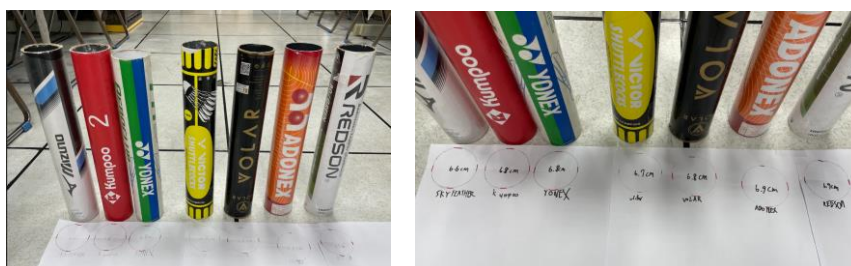


圖 6-1-1 各知名品牌球筒直徑測量（共 7 款，平均值 6.8cm 為實驗最小孔徑依據）（指導教師拍攝）



圖 6-1-2 3D 列印製作之各孔徑底盤（左至右：6.8cm、7.0cm、7.5cm、8.0cm），共 4 種規格；其中 7.3cm 孔徑於實驗二加入測試，實驗一使用 6.8/7.0/7.5/8.0cm 四種規格（作者製作並拍攝）

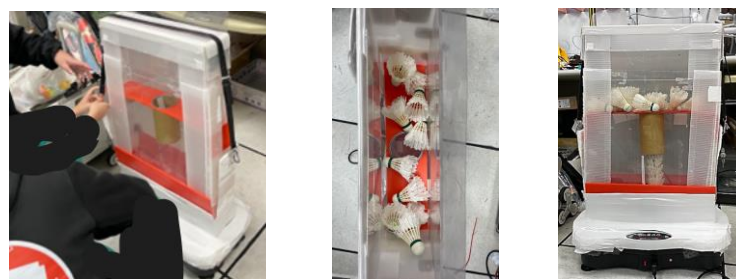


圖 6-1-3 集球托盤安裝於晃動機進行實驗測試（指導教師拍攝）



圖 6-1-4 7cm 孔徑排序 100% 正確 vs 8cm 孔徑排序失敗（有球羽毛朝下）對比（指導教師拍攝）

1. 安裝指定孔徑之集球桶底盤。
2. 投入 10 顆羽球，依序以機器震動（各速度檔位）及手動搖晃進行 15 秒測試。
3. 紀錄進入管內羽球總數（進球成功率）及球頭朝下之數量（排序正確率）。

4. 重複上述步驟測試所有孔徑規格，各重複 3 次取平均。

(六) 實驗數據彙整

【評選標準說明】本研究以「**排序正確率必須達 100%**」為前提條件——只要有任何一顆球倒著進入，該孔徑即不符合裝置設計需求（因倒立球頭無法填入發球機）。在符合此前提的孔徑中，再比較進球成功率的高低，以找出最佳孔徑。

表 1-1 各孔徑機器震動與手動搖晃平均效能比較(作者製表)

孔徑 (cm)	機器震動 平均進球率	手動搖晃 進球率	排序正確率 (機器)	排序正確率 (手動)	綜合評估
8cm	92.4%	90%	95.7%	85.2%	進球率最高，但排序有瑕疵
7.5cm	52.4%	73.3%	100%	100%	排序佳，手動效率明顯較好
7cm	42.0%	83.3%	100%	100%	本階段手動效率最佳：手動進球率最高且排序 100%
6.8cm	45.3%	46.7%	100%	100%	排序佳，但整體進球率偏低

表 1-2 各孔徑各速度進球成功率詳細原始數據（機器震動，三次重複；各孔徑排序正確率均為 100%，排序正確率詳見表 1-1）(作者製表)

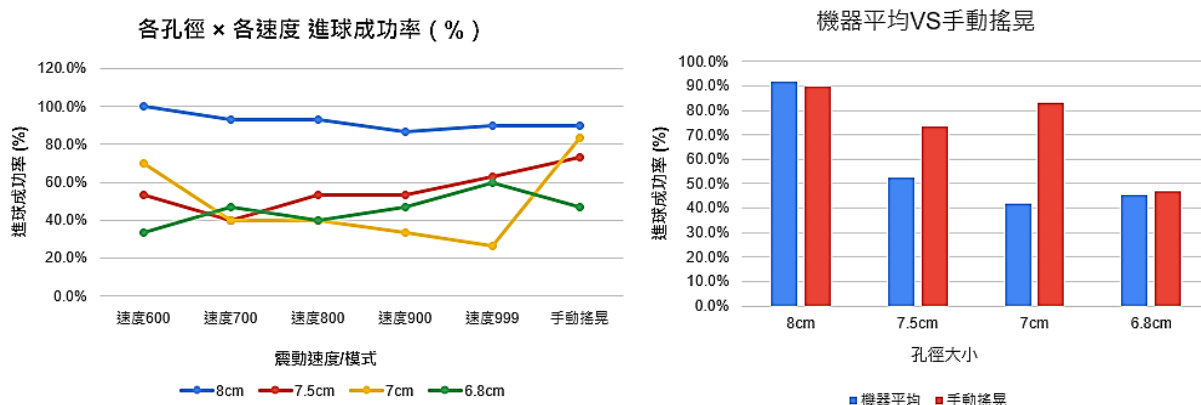
孔徑	次數	速度 600	速度 700	速度 800	速度 900	速度 999	手動
8cm	第 1 次	10 顆(100%)	9 顆(90%)	9 顆(90%)	7 顆(70%)	7 顆(70%)	8 顆(80%)
	第 2 次	9 顆(90%)	8 顆(80%)	9 顆(90%)	9 顆(90%)	8 顆(80%)	9 顆(90%)
	第 3 次	10 顆(100%)	10 顆(100%)	10 顆(100%)	10 顆(100%)	10 顆(100%)	6 顆(60%)
	平均	97%	90%	93%	87%	83%	77%
7.5cm	第 1 次	5 顆(50%)	6 顆(60%)	6 顆(60%)	2 顆(20%)	4 顆(40%)	7 顆(70%)
	第 2 次	8 顆(80%)	2 顆(20%)	9 顆(90%)	8 顆(80%)	6 顆(60%)	8 顆(80%)
	第 3 次	3 顆(30%)	4 顆(40%)	1 顆(10%)	6 顆(60%)	9 顆(90%)	7 顆(70%)
	平均	53%	40%	53%	53%	63%	73%
7cm	第 1 次	8 顆(80%)	8 顆(80%)	3 顆(30%)	3 顆(30%)	0 顆(0%)	8 顆(80%)
	第 2 次	7 顆(70%)	2 顆(20%)	4 顆(40%)	2 顆(20%)	4 顆(40%)	9 顆(90%)
	第 3 次	6 顆(60%)	2 顆(20%)	5 顆(50%)	5 顆(50%)	4 顆(40%)	8 顆(80%)
	平均	70%	40%	40%	33%	27%	83%
6.8cm	第 1 次	4 顆(40%)	6 顆(60%)	6 顆(60%)	3 顆(30%)	8 顆(80%)	4 顆(40%)
	第 2 次	5 顆(50%)	1 顆(10%)	2 顆(20%)	5 顆(50%)	5 顆(50%)	5 顆(50%)
	第 3 次	1 顆(10%)	7 顆(70%)	4 顆(40%)	6 顆(60%)	5 顆(50%)	5 顆(50%)
	平均	33%	47%	40%	47%	60%	47%

1. 進球成功率(%) 用來衡量機器的「工作效率」。

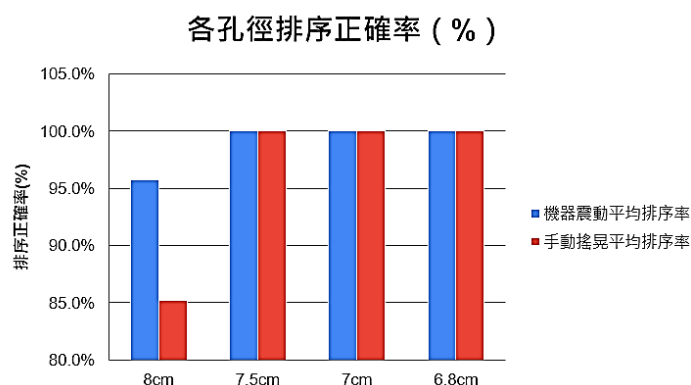
$$\text{進球成功率} = \frac{\text{進入管內的羽球總數（不論正反）}}{\text{總投入球數(10顆)}} \times 100\%$$

2. 排序正確率(%) 用來衡量機器的「精準度」(本研究最看重的指標)。

$$\text{排序正確率} = \frac{\text{進入管內且「球頭朝下」的數量}}{\text{進入管內的羽球總數}} \times 100\%$$



圖一 a：各孔徑進球成功率比較(左：各速度折線圖；右：機器震動平均 vs 手動搖晃長條圖)——手動搖晃在 7cm 孔徑(實驗一)達 83.3%，為所有孔徑手動模式最高值(作者製圖)



圖一 b：各孔徑排序正確率比較(實驗一)——8cm 孔徑兩種模式均低於 100% (機器 95.7%、手動 85.2%)，其餘孔徑(7.5、7.0、6.8cm) 全程達 100% (作者製圖)

實驗二：新舊球混合測試與孔徑下限驗證

(一) 研究目標

1. 實驗一以 7cm、7.5cm、6.8cm、8cm 四種孔徑進行測試，初步確認 7.5cm 有最好的機器震動進球率(52.4%)且排序正確。但在後續測試中，我們發現 7.5cm 孔徑偶有球以羽毛朝下的錯誤方向通過(排序率最低 75%)，無法達到 100%的排序保證。同時，7cm 孔徑的機器震動進球率偏低(42%)。因此，我們決定測試介於兩者之間的 7.3cm 孔徑，驗證能否找到兼顧「100%排序正確」與「較高進球率」的平衡點。本實驗同時在 7.5cm 與 7.3cm 兩種孔徑下，比較新球與舊球混合測試時的進球成功率。
2. 比較「機器震動(999 速)」與「手動搖晃」兩種動力模式的差異。

(二) 相關科學原理

本實驗的重點是「新球和舊球為什麼表現不一樣」。新球的羽毛比較硬挺、外形飽滿，就像新毛刷的刷毛一樣，和孔洞邊緣的摩擦力比較大，容易卡在洞口動彈不得——這就是「卡球現象」。舊球的羽毛因為使用過，變得比較軟，所以比較容易通過孔洞。機器震動提供的是規律的小幅度抖動，當力量不夠大，就無法把卡住的新球「抖」過孔洞。手動搖晃是

大幅度的不規則晃動，可以提供更大的衝擊力量，讓卡住的球有機會「跳過」孔壁的阻擋。本實驗要驗證的就是：不同動力方式對新球與舊球的效果有多大差異，以及 7.3cm 是否真的是兼顧排序正確與順暢進球的孔徑最小值。

（三）研究想法

實驗一發現 7cm 孔徑手動模式進球成功率為 83.3%、排序正確率 100%，是當時孔徑中表現最好的。但後來進一步測試發現 7cm 的機器震動進球率偏低（42%），而 7.5cm 雖然進球較順暢，卻偶有排序錯誤情形（排序率最低 75%，未達 100%）。為了找到一個介於兩者之間、兼顧「進球順暢」與「排序 100% 正確」的孔徑，我們取 7cm 和 7.5cm 的中間值 7.3cm 進行進一步測試。本實驗同時預測：7.3cm 對新球的卡球現象仍會存在，且手動搖晃應能有效克服此阻力。

（四）研究工具及方法

1. 工具：可更換孔徑集球桶（7.5cm、7.3cm）、新球 5 顆＋舊球 5 顆（共 10 顆）、紀錄表。
2. 方法：每次投入 5 顆新球＋5 顆舊球（共 10 顆），固定 15 秒，分別測試機器 999 速與手動搖晃，各重複 3 至 5 次。進球成功率以「進球數÷10 顆（總投入數）」計算；新球進球率與舊球進球率分別以「新球進球數÷5」及「舊球進球數÷5」計算，以便比較不同球種的表現。

（三）實驗數據彙整

表 2-1 7.5cm 孔徑新舊球混合測試 (作者製表)

測試次數	模式	新球進球	舊球進球	排序錯誤	總進球率	排序正確率
第 1 次	機器 999	2 顆(40%)	3 顆(60%)	0 顆	50%	100%
第 2 次	機器 999	2 顆(40%)	2 顆(40%)	1 顆(舊球)	40%	75%
第 3 次	機器 999	2 顆(40%)	2 顆(40%)	0 顆	40%	100%
第 4 次	手動搖晃	4 顆(80%)	5 顆(100%)	0 顆	90%	100%
第 5 次	手動搖晃	4 顆(80%)	1 顆(20%)	0 顆	50%	100%
平均	—	2.8 顆	2.6 顆	0.2 顆	54%	95%

表 2-2 7.3cm 孔徑新舊球混合測試（孔徑下限驗證） (作者製表)

測試次數	模式	新球進球	舊球進球	總進球率	排序正確率
第 1 次	機器 999	0 顆(0%)	2 顆(40%)	20%	100%
第 2 次	機器 999	0 顆(0%)	4 顆(80%)	40%	100%
第 3 次	機器 999	0 顆(0%)	2 顆(40%)	20%	100%
手動搖晃	手動	3 顆(60%)	3 顆(60%)	60%	100%
平均	—	0.75 顆	2.75 顆	35%	100%

表 2-3 7.5cm vs 7.3cm 孔徑綜合效能比較 (作者製表)

比較項目	7.5cm 孔徑	7.3cm 孔徑	說明
機器模式新球成功率	40%	0%	7.3cm 孔壁阻力大，新球卡住無法通過
機器模式舊球成功率	46%	55%	舊球羽毛較軟，兩者差異不大
手動模式總成功率	54% - 90%	60%	手動大振幅可突破卡球，效率提升
排序正確率（全程）	75 - 100%	100%	7.3cm 幾何攔截更嚴格，排序最穩定

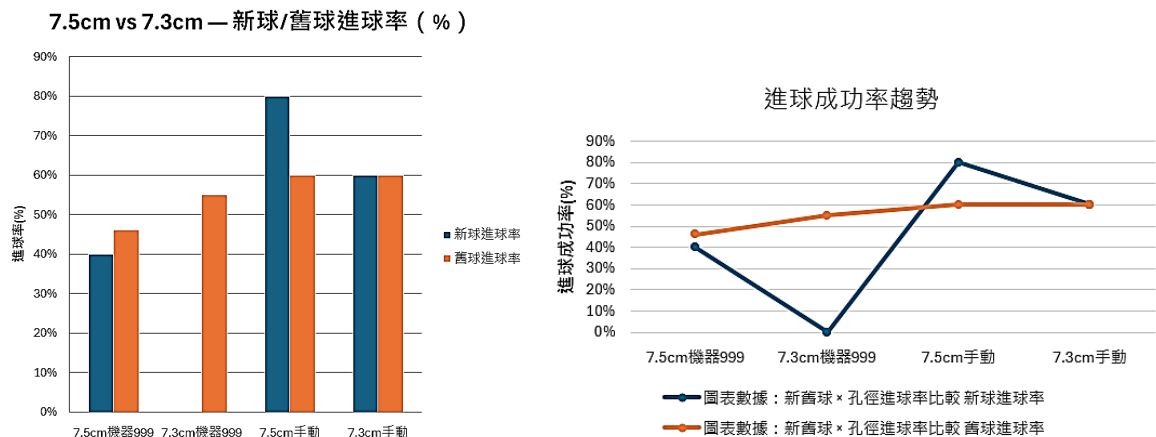


圖 6-2-1：新舊球在不同孔徑與動力模式下的進球數比較——7.3cm 孔徑搭配機器震動時新球進球數為 0，切換手動搖晃後新球成功率回升至 60% (作者製圖)



圖 6-2-2 新球卡在 7.3cm 孔口無法落入的卡球現象 (指導教師拍攝)

實驗三：孔洞數量對產能之影響（1 孔至 4 孔對比）

（一）研究目標

1. 驗證增加孔洞數量是否能有效提升單位時間收球產能（顆/分），補償 7.3cm 單孔效率不足的問題。
2. 比較 1 孔、2 孔、3 孔、4 孔在機器震動與手動搖晃下的產能差異，確認最佳孔數配置。



圖 6-3-1 各孔徑安裝實驗 (指導教師拍攝)

（二）相關科學原理

本實驗的核心概念是「多個出口同時分流，效率比單一出口更高」。可以用一個生活例子來說明：超市收銀台只開一條時，所有人排成一列，等待時間很長；開了四條時，每條隊伍都短很多，大家更快結帳。同樣的道理，球盤上只有一個孔洞時，所有球都要排隊等進那一個孔；增加到四個孔洞後，球可以從不同位置同時掉落，等待時間大幅縮短。不只如此，孔洞增加後，每個孔口附近的球數量也減少，球與球之間比較不會互相擠壓、卡死，翻轉空間更充足，整體效率甚至超過「孔數×單孔效率」的簡單計算——這就是我們觀察到的「2.7 倍加乘效果」。

（三）研究想法

若增加孔洞數量，每個孔口可同時接納羽球，產能理論上至少應為單孔的 2 倍。然而我們進一步推測，多孔設計還能減少羽球在單一孔口的堆積等待，降低球球之間的互相阻擋，實際產能提升幅度可能超過線性預測（即超過 2x）。本實驗即在驗證此「超線性增益」假設，並找出產能達到飽和的孔數上限。

（四）研究工具及方法

1. 工具：固定 7.3cm 孔徑，分別測試 1 孔、2 孔、3 孔、4 孔配置，新舊混合球 10 顆，固定 15 秒。
2. 方法：以單孔為對照組，逐步開放孔位，記錄 15 秒內總進球數換算每分鐘產能，同時記錄完成 10 顆球排列的實際所需時間。

（三）實驗數據彙整

表 3-1 各孔數產能對比表（固定孔徑 7.3cm，15 秒測試）（作者製表）

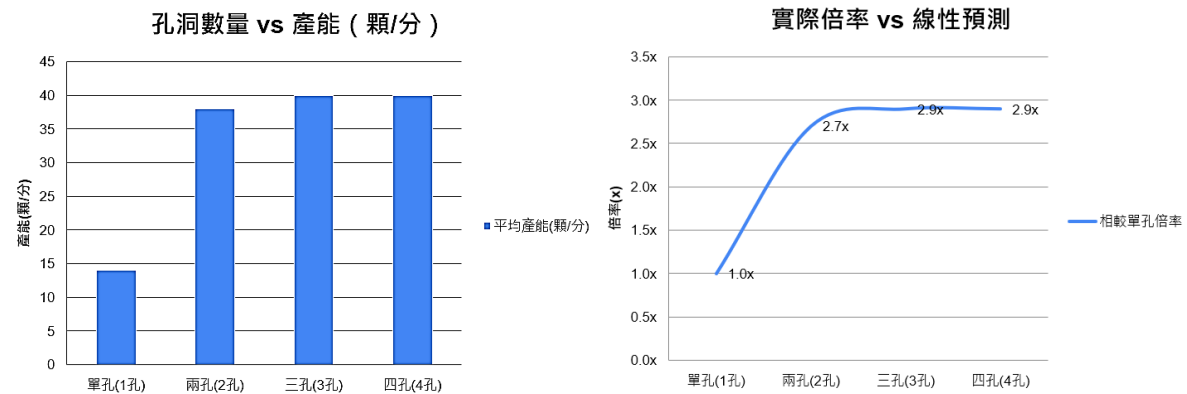
測試模式	第 1 次	第 2 次	第 3 次	手動	平均	產能(顆/分)	排序正確率
單孔(1 孔)	2 顆	4 顆	2 顆	6 顆	3.5 顆	14 顆/分	100%
兩孔(2 孔)	8 顆	10 顆	10 顆	10 顆	9.5 顆	38 顆/分	100%
三孔(3 孔)	10 顆	10 顆	10 顆	10 顆	10 顆	40 顆/分	100%
四孔(4 孔)	10 顆	10 顆	10 顆	10 顆	10 顆	40 顆/分	100%

表 3-2 完成 10 顆球排列所需實際時間（作者製表）

測試模式	第 1 次	第 2 次	第 3 次	手動	最快紀錄
三孔(3 孔)	12 秒	10 秒	10 秒	8 秒	8 秒
四孔(4 孔)	11 秒	14 秒	10 秒	2 秒	★2 秒（手動）

表 3-3 產能增長倍率分析（相較單孔基準）(作者製表)

測試模式	每分鐘產能	相較單孔倍率	說明
單孔（基準）	14 顆/分	1.0x	—
兩孔	38 顆/分	2.7x	超越線性 2x—多孔分流加速效應
三孔	40 顆/分	2.9x	15 秒測試下趨近飽和
四孔（手動）	最快 2 秒完成 10 顆	理論超 300 顆/分	展現最高效能上限



圖三：多孔設計效率分析（左：長條圖；右：實際倍率 vs 線性預測折線）——兩孔產能達單孔 2.7 倍（超越線性預測 2 倍），四孔手動模式最快 2 秒完成 10 顆排列 (作者製圖)

實驗四：最大容球數與負載穩定性測試

（一）研究目標

1. 測試裝置在不同容球數量（20 顆、24 顆、30 顆、40 顆）下的進球成功率與排序正確率。
2. 確立裝置的「最佳作業負載量」，並找出系統失效的臨界點。

（二）相關科學原理

本實驗探討「投入太多球，裝置會發生什麼事」。球的數量是關鍵因素：球裝太多時，底部的球被上面的球壓住，翻轉空間縮小；同時，震動的力量傳不到最底部，就像把力氣傳過一大堆枕頭——傳到底部已經不夠讓球移動。但如同本研究後來的觀察（圖 4-2），失效的關鍵其實是「筒口堵塞」——上層的球雖然已翻好，卻因底部幾顆球卡死而全部進不去。

（三）研究想法

隨著容球數量增加，底部孔口附近的球受到上層球堆的重量壓制，翻轉空間將逐漸縮小，進球成功率與排序正確率應隨之下降。我們預期存在一個「臨界負載量」——在此之前系統維持穩定效能，超過後效能急遽惡化。本實驗即在量化此臨界點，為裝置的「建議最大單次投球數」提供科學依據。

（四）研究工具及方法

1. 工具：7.3cm 孔徑裝置，依次投入 20 顆（新舊各半）、24 顆（新舊各半）、24 顆（全新球）、30 顆及 40 顆進行壓力測試。



圖 4-1 新舊球混合測試 (指導教師拍攝)

2. 方法：記錄每組 15 秒內新球與舊球分別進球數及排序正確率，各重複 3 至 5 次取平均。

(三) 實驗數據彙整

表 4-1 20 顆球（10 新/10 舊）—最佳作業負載測試 (作者製表)

次數	模式	進球(新)	進球(舊)	進球成功率	排序正確率
第 1 次	機器震動	6 顆	4 顆	50%	90%
第 2 次	機器震動	10 顆	10 顆	100%	90%
第 3 次	機器震動	10 顆	10 顆	100%	95%
第 4 次	手動搖晃	7 顆	10 顆	85%	100%
第 5 次	手動搖晃	10 顆	10 顆	100%	95%
平均	—	8.6 顆	8.8 顆	87%	94%

表 4-2 24 顆球（12 新/12 舊）與全新球對照 (作者製表)

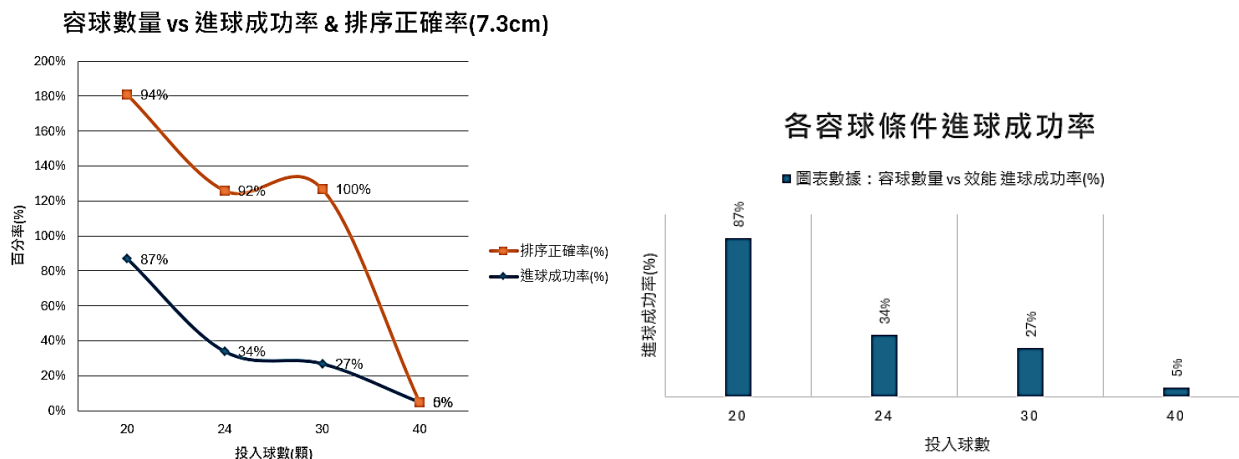
測試組別	模式	進球成功率	排序正確率	說明
24 顆（新舊各半）第 1 次	機器震動	29%	85%	翻轉空間開始受限
24 顆（新舊各半）第 2 次	機器震動	41%	100%	
24 顆（新舊各半）第 3 次	機器震動	29%	85%	
24 顆（新舊各半）手動	手動搖晃	37%	100%	
24 顆（新舊各半）平均	—	34%	92%	效能明顯下降
24 顆（全新球）平均	機器/手動	67%	94%	優於混合球（新球張力一致不易互卡）

表 4-3 30 顆及 40 顆球極限負載測試 (作者製表)

測試組	模式	球數	進球成功率	排序正確率	說明
30 顆平均	機器/手動	15 新/15 舊	27%	100%	進球效率低，翻轉仍正確
40 顆	機器震動	20 新/20 舊	5%	0%	底部筒口堵塞，系統完全失效

表 4-4 各容球數效能彙整比較 (作者製表)

投入球數	進球成功率	排序正確率	系統狀態
20 顆 (新舊各半)	87%	94%	★最佳作業負載
24 顆 (新舊各半)	34%	92%	效能明顯下降
24 顆 (全新球)	67%	94%	優於混合球
30 顆 (新舊各半)	27%	100%	進球困難，翻轉仍正確
40 顆 (新舊各半)	5%	0%	系統完全失效



圖四：容球數量 vs 進球成功率 / 排序正確率——20 顆為最佳負載（進球 87%、排序 94%），超過 24 顆效能明顯下降，40 顆時底部筒口堵塞，系統完全失效（進球 5%、排序 0%）(作者製圖)

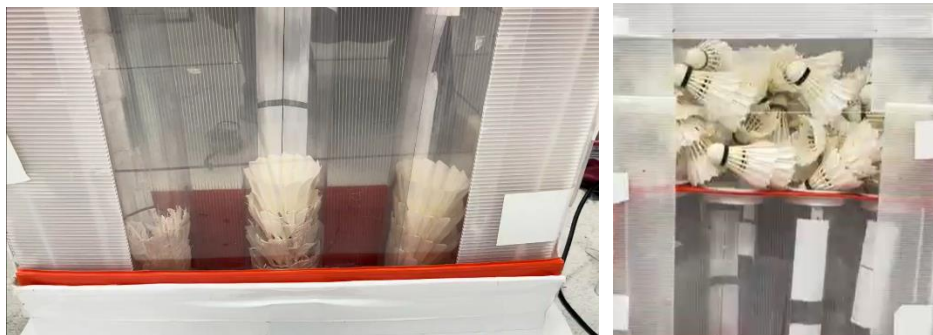


圖 4-3 左：20 顆球正常排列/ 右：40 顆球塞滿失效（指導教師拍攝）

實驗五：7.2cm 孔徑四孔效能驗證（延伸研究）

（一）研究目標

1. 驗證 7.2cm 孔徑在四孔配置下，全舊球、全新球、新舊混合球的進球成功率與排序正確率。
2. 比較 7.2cm 與 7.3cm 孔徑在機器震動模式下對新球進球率的差異，並記錄各球種完成時間。

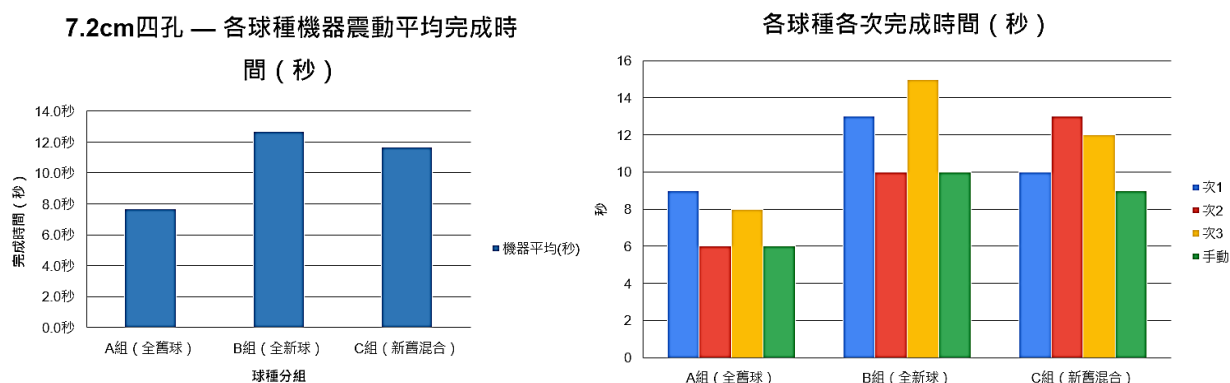
（二）相關科學原理

本實驗利用與實驗一至四相同的「重心引導翻轉機制」，但採用更嚴格的 7.2cm 孔徑（較 7.3cm 小 0.1cm），探討更小孔徑是否能在維持 100% 排序正確率的前提下，同樣讓球順暢進入收納桶。

(三) 實驗數據彙整

表 5-1 實驗五：7.2cm 四孔，各球種進球成功率與排序正確率（固定 10 顆，15 秒）（作者製表）

測試組別	動力模式	球種	進球成功率	排序正確率	完成時間（秒）
A-1	機器震動(999)	全舊球	100%	100%	9s
A-2	機器震動(999)	全舊球	100%	100%	6s
A-3	機器震動(999)	全舊球	100%	100%	8s
A-4（手動）	手動搖晃	全舊球	100%	100%	6s
B-1	機器震動(999)	全新球	100%	100%	13s
B-2	機器震動(999)	全新球	100%	100%	10s
B-3	機器震動(999)	全新球	100%	100%	15s
B-4（手動）	手動搖晃	全新球	100%	100%	10s
C-1	機器震動(999)	新舊混合	100%	100%	10s
C-2	機器震動(999)	新舊混合	100%	100%	13s
C-3	機器震動(999)	新舊混合	100%	100%	12s
C-4（手動）	手動搖晃	新舊混合	100%	100%	9s
機器各組平均	—	—	100%	100%	舊 7.7s / 新 12.7s / 混 11.7s



圖五：7.2 孔徑各球種延伸測試 (作者製圖)

(四) 結果與討論

12 次測試全部達成進球成功率 100%、排序正確率 100%，結果高度一致。舊球機器震動最快 6 秒完成 10 顆；新球最慢 15 秒，但三次重複均在 15 秒測試時間內完成。

【關鍵發現與矛盾說明】7.2cm 孔徑搭配機器震動時，新球進球率達 100%；但實驗二顯示 7.3cm 孔徑機器震動下新球進球率為 0%（完全卡球）。此結果與孔徑越小阻力越大的直覺預期相反。本研究推測：實驗五所用新球歷經實驗一至四多次測試，羽毛可能有不易察覺的微小磨損，影響進球阻力。由於無法排除球況因素，7.2cm 對標準全新球的表現仍有待後續驗證，詳見拾、未來展望。

實驗六：7.2cm 孔徑最大容球數測試（延伸研究）

（一）研究目標

1. 測試 7.2cm 孔徑（四孔）在不同容球數量（20、24、30、40 顆）下的進球率與排序正確率。
2. 確立 7.2cm 孔徑下的最佳作業容球量，並與主研究 7.3cm 孔徑（實驗四）進行橫向比較。

（二）實驗數據彙整

表 6-1 實驗六：7.2cm vs 7.3cm 最大容球量橫向比較 (作者製表)

比較項目	7.3cm（實驗四）	7.2cm（實驗六）	說明
機器震動建議容球量	≤20 顆	≤20 顆	兩者相同
手動搖晃建議容球量	≤24 顆	≤24 顆（混合手動 100%）	兩者相同
20 顆機器進球率（混合）	87%	56.3%	7.3cm 較高
20 顆手動排序正確率	100%	100%	兩者相同
10 顆新球機器進球率	0%（完全卡球）	100%（待驗證）	7.2cm 待確認

（機器震動 999 速+手動搖晃）(作者製表)

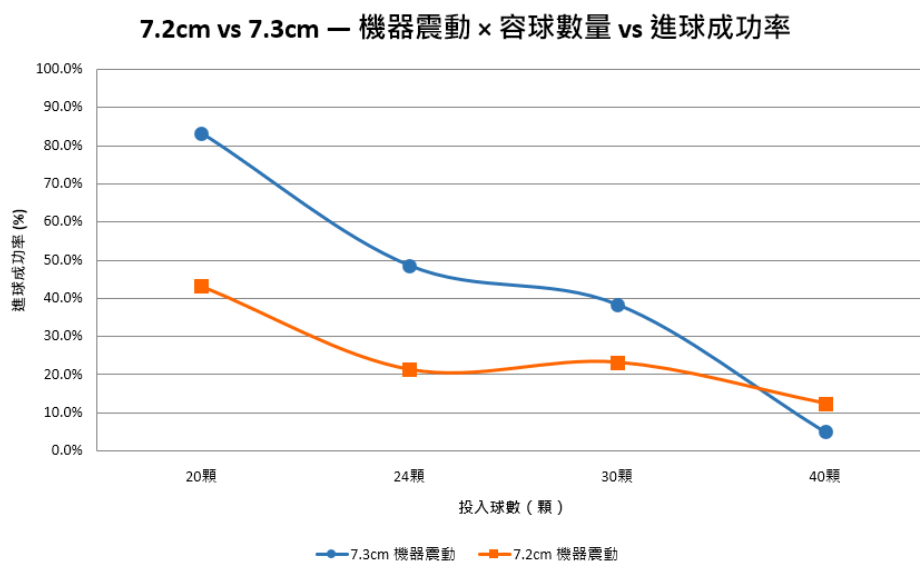
投入球數	模式	平均進球率	平均排序率	說明
40 顆(20 新/20 舊)	機器+手動	15.6%	82.5%	進球率低，排序不穩
30 顆(15 新/15 舊)	機器+手動	21.7%	61.7%	進球低且排序差
24 顆混合(機器)	機器震動	30.6%	100%	排序穩定，進球偏低
24 顆混合（手動）	手動搖晃	33.3%	100%	手動排序 100%
20 顆全舊（機器）	機器震動	56.3%	98%	機器最佳表現
20 顆混合（手動）	手動搖晃	100%	100%	★最佳作業條件

（三）結果與討論

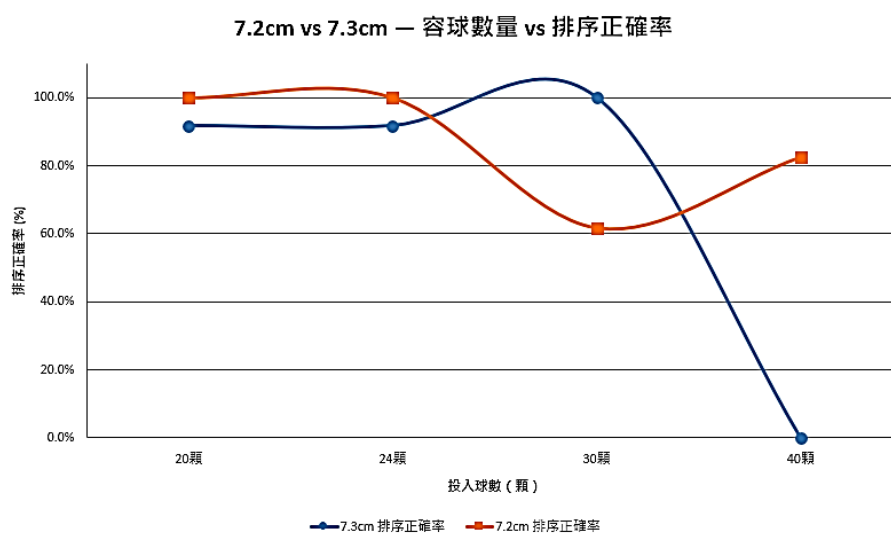
表 6-2 實驗六：7.2cm 孔徑各容球量效能彙整（機器震動 999 速+手動搖晃）(作者製表)

比較項目	7.3cm（實驗四）	7.2cm（實驗六）	說明
機器震動建議容球量	≤20 顆	≤20 顆	兩者相同
手動搖晃建議容球量	≤24 顆	≤24 顆（混合手動 100%）	兩者相同
20 顆機器進球率（混合）	87%	56.3%	7.3cm 較高
20 顆手動排序正確率	100%	100%	兩者相同
10 顆新球機器進球率	0%（完全卡球）	100%（待驗證）	7.2cm 待確認

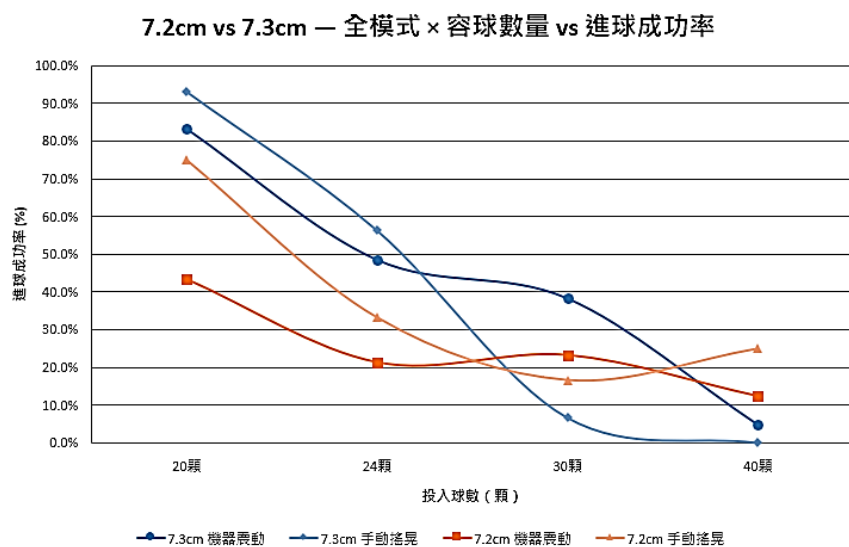
在最佳作業容球量（手動≤24 顆、機器≤20 顆）的條件下，7.2cm 與 7.3cm 孔徑表現相近，兩者差異主要在 10 顆新球機器震動的進球率（7.2cm=100% vs 7.3cm=0%），此點仍需以未使用過的標準新球重複驗證後方可作為確定性結論。



圖六：7.2cm vs 7.3cm — 機器震動 × 容球數量 vs 進球成功率 (作者製圖)



圖七：7.2cm vs 7.3cm — 機器震動 × 容球數量 vs 排序正確率 (作者製圖)



圖八：7.2cm vs 7.3cm 雙模式 × 容球數量 vs 進球成功率折線圖 (作者製圖)

柒、研究結果與討論

實驗一：孔徑大小對定向排列之影響

（一）研究結果

1. 8cm 孔徑：機器震動進球成功率最高（平均 92.4%），但排序正確率僅 95.7%（機器）、85.2%（手動），出現球羽朝下的錯誤排列。
2. 7.5cm 孔徑：排序正確率達 100%（實驗一 10 顆舊球條件），機器模式進球成功率 52.4%，手動模式提升至 73.3%（後續實驗二發現 7.5cm 排序率最低達 75%，詳見實驗二討論）。
3. 7cm 孔徑（實驗一）：排序正確率 100%，機器模式進球成功率 42%（機器震動下孔口略小，球體容易因摩擦在孔口彈跳，難以穩定落入），但手動模式高達 83.3%，為所有孔徑手動模式最佳。
4. 6.8cm 孔徑：排序正確率 100%，但整體進球成功率偏低（機器 45.3%，手動 46.7%）。

（二）討論

羽球最大直徑約 6.8cm，7cm 孔徑與球體間保留約 0.3cm 的間隙。在球量較少（10 顆）、空間充足的情況下，若羽毛端先碰到孔邊，球頭因較重產生力矩，自然翻轉至頭朝下通過孔洞，此即「重心引導翻轉機制」。

8cm 孔徑因間隙過大（約 1.2cm），翻轉尚未發生時球已反向通過，排序正確率下降；6.8cm 雖排序 100%，但與球徑幾乎相等，阻力極大，進球率因此偏低。7cm 孔徑在手動模式下進球成功率達 83.3%，手動模式狀態最佳。【與研究想法對照】實驗前我們預期「7cm 附近存在最佳孔徑」，結果符合預期——7cm 及 7.5cm 確實同時達成 100% 排序與合理進球率，但 7.5cm 機器及手動進球率總平均為 63%，7cm 機器及手動進球率總平均為 62.5%，7.5cm 孔徑整體而言進球效率略高於 7cm，因此選擇 7.5cm 作為本階段最佳孔徑進行後續驗證。

意外發現：速度 800 進球率特別低，推測是規律震動頻率恰好與球體擺動產生共振，使球卡在孔口；速度 999 反而因震動過快讓球「浮起」脫離摩擦，進球率回升。這個觀察值得未來研究進一步探討。

實驗二：新舊球混合測試與孔徑下限驗證

（一）研究結果

1. 7.5cm 孔徑：機器 999 速下新球 40%、舊球 46%，手動模式可達 90%，排序最低達 75%，整體排序正確率未能穩定維持 100%。
2. 7.3cm 孔徑：機器模式下新球進球數為 0（完全卡球），舊球 55%。手動搖晃後新球 60%、舊球 60%，排序全程 100%。

（二）討論

卡球現象：7.3cm 孔徑下，機器震動（高頻小振幅）的能量無法克服新球羽毛與孔壁之間的阻力，導致新球卡在洞口動彈不得。新球羽毛張力強、外型飽滿，與孔壁接觸面積大，阻力遠超機器震動能量。【速度差異的直接觀察】速度 800 時進球率特別低，我們觀察到

羽球像不倒翁一樣在孔口規律地左右滑行，卻因擺動太整齊反而抵銷了向下的力量，卡在洞口。這個現象很像物理上的「共振」——當機器震動的頻率剛好和羽球在孔口晃動的頻率接近時，球會停留在平衡位置而難以掉落。速度 999 時，高速擺動讓羽球彈跳、減少孔壁摩擦力，羽球被拋起後像是「浮」在洞口上方，此時球頭較重產生的重力力矩就能輕鬆帶動球頭轉向滑入。手動搖晃之所以效果好，是因為人工搖晃是不規則的，能依據每顆球當下的狀態調整晃動角度，讓每一顆球都有機會換個方向掉下去。【補充說明：「速度 800 共振」現象值得未來探討，若能量測機器各檔位的實際震動頻率，可進一步驗證此推論。】

手動搖晃的突破效果：切換至手動搖晃（低頻大振幅）後，新球成功率從 0% 提升至 60%，手動提供的大幅度位能「搖動」羽球脫離卡住的狀態。這驗證了「雙模動力」設計的必要性。

7.3cm vs 7.5cm 的取舍：7.5cm 舊球偶有反向通過（排序率最低 75%），無法達成 100% 排序保證。7.3cm 在本次 10 顆測試全程 100% 排序正確，代價是機器模式下新球完全卡球，必須搭配手動搖晃。

實驗三：孔洞數量對產能之影響

（一）研究結果

1. 單孔：平均產能 14 顆/分（15 秒平均進球 3.5 顆）。
2. 兩孔：產能大幅提升至 38 顆/分（9.5 顆），為單孔的 2.7 倍。
3. 三孔與四孔（機器模式）：15 秒均能完成 10 顆，產能 40 顆/分，效能趨近飽和。
4. 四孔手動模式：最快 2 秒即完成 10 顆球排列，展現最高效率潛力。

（二）討論

多孔分流加速效應：兩孔產能是單孔的 2.7 倍而非 2 倍，超越了線性預測。這是因為球分散到兩個洞口，就像高速公路從單線道增加到多線道——車輛不再全部擠在同一出口，各自分散前進，整體通行效率超出等比例預期。

四孔手動 2 秒完成 10 顆，顯示四孔結構在充足動力下具備更高的效率上限。實驗三成功驗證了「以孔數補償孔徑效率」的核心邏輯。【倍率計算說明】單孔平均進球 3.5 顆÷15 秒×60=14 顆/分；兩孔平均進球 9.5 顆÷15 秒×60=38 顆/分；兩孔÷單孔=38÷14≈2.7 倍。若為純線性預測（兩孔=兩倍），應為 28 顆/分，實際 38 顆超出預測，顯示多孔設計帶來了額外的流動加速效果。

實驗四：最大容球數與負載穩定性

（一）研究結果

1. 20 顆（最佳負載）：進球成功率 87%、排序正確率 94%，系統最穩定。
2. 24 顆新舊混合：進球成功率降至 34%；同等數量全新球反而達 67%。
3. 30 顆：進球成功率降至 27%，但排序正確率仍維持 100%。
4. 40 顆：進球成功率僅 5%，排序正確率 0%（兩顆進球均反向入桶）——系統完全失效。

（二）討論



圖 4-2 左：未搖晃前球況平均分布；右：經過搖晃後，球量過多底部筒口堵塞，上層球雖已翻轉完成卻無法落入集球筒中（指導教師拍攝）

我們原本以為球量太多時，底部的球沒有空間翻轉，所以才進不去。但實際拍攝後發現，上面的球其實已經翻好了（球頭朝下），問題出在底部的幾顆球卡在筒口，讓後面的球全部「塞車」了（見圖 4-2）。就像出去玩時，大家一起擠在門口，最前面的人卡住了，後面就算都準備好要出門也出不去。球也是一樣——筒口一堵，上面翻轉好的球全部只能在上面等，進不來。所以投入太多球時，不是球方向排錯，而是「出口塞車」了。

【值得注意的發現】本研究目標為「新舊球兼容」——在同一套裝置下讓新球和舊球都能順利排列。實驗四發現 24 顆全新球（67%進球率）優於同等數量的新舊混合球（34%），此結果看似意外，但其實有合理解釋：舊球的羽毛較軟、容易變形，在高負載時更容易和新球較硬挺的羽毛相互糾纏、造成連鎖卡球；而全新球的羽毛張力一致、形狀整齊，球與球之間的間隙比較規律，反而不易卡死。這個發現說明：當球的種類混合時，新舊球特性差異會造成額外的干擾，是未來裝置設計需要克服的問題。本研究建議的 20 顆最佳負載是針對「新舊球混合」情境設計的保守值，若使用球種一致（全新或全舊），此上限可能可以適度提高，此點值得未來進一步驗證。

實驗五：7.2cm 孔徑四孔效能驗證（延伸研究）

（一）研究結果

1. 12 次測試（全舊球、全新球、新舊混合各 4 次）全部達成進球成功率 100%、排序正確率 100%，為本研究所有實驗中唯一達成全組 100%的結果。
2. 機器震動下完成時間：全舊球平均 7.7 秒（最快）、混合球 11.7 秒、全新球 12.7 秒（最慢）。

（二）討論

7.2cm 孔徑在本實驗條件下展現優異表現，特別是機器震動模式對新球的進球率達 100%，與實驗二（7.3cm 新球機器進球率 0%）形成顯著對比。然而如實驗五討論所述，此結果可能受到球況影響，需以標準全新球重複驗證。

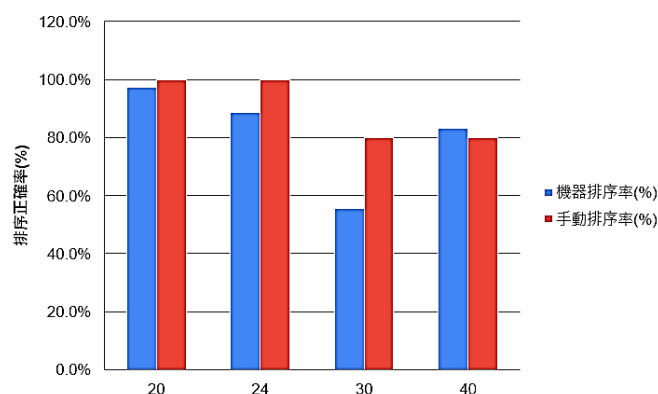
實驗六：7.2cm 孔徑最大容球數測試（延伸研究）

（1）研究結果

1. 20 顆手動模式（各球種）：進球率 56 - 100%，排序正確率 100%——最佳作業條件。
2. 24 顆手動模式（混合球）：進球率 33%，排序正確率 100%——可接受上限。

3. 30 顆及 40 顆：進球率低（21.7%及 15.6%），排序正確率不穩定，不建議使用。

7.2cm 孔徑 — 各容球量排序正確率（%）



圖九：7.2cm 孔徑各容球量排序正確率（作者製圖）

（二）討論

7.2cm 孔徑的建議容球量（機器 ≤ 20 顆、手動 ≤ 24 顆）與主研究 7.3cm 孔徑完全一致，顯示容球量限制主要由裝置物理空間決定，與孔徑差異關係不大。7.2cm 在 20 顆機器模式下進球率（56%）低於 7.3cm（87%），建議使用時以手動模式補充效率。

捌、結論

一、研究目的一：自動定向排列的可行性驗證

本研究成功驗證了「利用孔徑設計實現羽球自動定向排列」的可行性。在 7.3cm 孔徑條件下，羽球確實能透過「重心引導翻轉機制」（球頭較重，重力驅動球頭往下旋轉）自動完成球頭朝下的定向排列，不需人工介入。在 ≤ 10 顆的測試條件下排序正確率達 100%；在建議作業負載 ≤ 20 顆的條件下，排序正確率維持 94% 高水準，達成研究目的一所設定之目標。

二、研究目的二：最佳孔徑確立

四種初始孔徑（8cm、7.5cm、7cm、6.8cm）測試結果顯示：8cm 孔徑因翻轉空間過大，排序正確率未達 100%；6.8cm 孔徑雖排序正確但進球阻力過大；7.5cm 排序率最低 75% 未達 100% 穩定保證；7cm 孔徑手動模式進球成功率 83.3% 且排序 100%。進一步測試 7.3cm 後，確認其在新舊球混合條件下均能達到 100% 排序正確率，且整體進球效率優於 7cm。

結論：本研究確立 7.3cm 為本裝置的最佳孔徑，其「孔徑與球徑之間保留約 0.5cm 的間隙」是讓重心引導翻轉機制正常運作的關鍵。

三、研究目的三：各變因最佳設計規格確立

1. 孔徑規格：7.3cm（ ≤ 10 顆時排序 100%；建議負載 ≤ 20 顆時排序 94%，兼顧進球流暢度）
2. 多孔結構：四孔並列為最佳配置，兩孔產能即達單孔 2.7 倍（38 顆/分），四孔達 2.9 倍，展現「多孔分流加速效應」（超線性增益）
3. 容球數量：最佳作業負載量為 20 顆（進球 87%、排序 94%）。超過 24 顆後效能明顯下降，40 顆時底部筒口堵塞，系統完全失效，建議採「少量多次」策略

四、研究目的四：雙模動力設計必要性驗證

實驗二明確驗證了雙模動力設計的必要性。在 7.3cm 孔徑下，機器震動對新球的進球率為 0%（完全卡球），而切換手動搖晃後新球進球率回升至 60%。這說明單一機器震動模式無法應對新球羽毛阻力較大的問題，「機器震動（常規舊球收球）+手動搖晃（新球卡球時或 ≤ 24 顆中等負載時補充）」的雙模設計，是確保新舊球均能順暢排列的必要設計。

整體結語：本研究在有限條件下（中小學生進行、自製 3D 列印器材）系統性地完成了四組控制變因實驗，建立了羽球自動定向排列孔徑選擇的科學依據，並提出了具體的操作規範（7.3cm 孔徑、四孔配置、每次 ≤ 20 顆、依球種選擇動力模式），對實際羽球訓練場域具有直接的應用價值。速度 800 機器模式進球率偏低等現象亦顯示本研究仍有值得繼續探討的科學課題。

五、研究目的五：7.2cm 孔徑初步效能驗證（延伸研究）

實驗五（10 顆各球種）以 7.2cm 孔徑進行延伸測試，達成全組 100%進球率與排序正確率；實驗六在建議容球量（機器 ≤ 20 顆、手動 ≤ 24 顆）條件下，排序正確率維持 100%，並確認最佳容球量與 7.3cm 相同。7.2cm 對機器震動模式新球進球率的意外優異表現（100% vs 7.3cm 的 0%）值得進一步研究，但由於實驗新球可能已有微小磨損，此結論尚待以標準全新球重複驗證，故本研究仍維持 7.3cm 為現有實驗條件下最確定的最佳孔徑。

玖、研究限制

- 一、羽球樣本標準化：「舊球」的羽毛損壞程度難以完全標準化，不同磨損狀態可能對進球成功率造成干擾。
- 二、3D 列印器材精度：進球孔底盤由 3D 列印製作，表面較粗糙，可能增加阻力，影響孔徑下限測試的可靠性。未來應對內壁進行打磨（#800 砂紙以上）或使用低阻力塗層。
- 三、機器震動穩定性：自製震動器的震幅與頻率可能因連續運轉或載重不均產生微幅變異。
- 四、實驗球況標準化限制：實驗五及六使用之新球已歷經實驗一至四多次測試，羽毛狀態可能存在不易察覺的微小磨損，影響 7.2cm 對標準全新球進球率推論的可靠性，此為本研究延伸實驗結論之重要限制。

拾、未來展望

- 一、表面處理優化：對進球孔內壁進行打磨或低阻力塗層，降低阻力，進一步提升進球穩定性。
- 二、7.2cm 孔徑全新球驗證（優先項目）：以全新未使用球重複實驗五之 7.2cm 四孔機器震動測試，確認孔徑效能結論是否受球況影響，進而釐清 7.2cm 對標準新球的真實表現。本實驗因時間因素未能於本屆科展前完成，為後續研究最優先執行項目。
- 三、動力系統升級：將機器改為「不規則低頻大擺動」機構，模擬手動搖晃效果，提升對新球的收球率。
- 四、動態負載感測：加入重量感測器，球量接近 20 顆時自動提醒分批投放，防止超載導致排序失效。

五、場地移動功能：仿照掃地機器人設計，讓裝置能在球場自動巡航收球，達成全自動化目標。

拾壹、參考資料及其他

中華民國中小學科學展覽會（無日期）。歷屆優秀作品資料庫。取自 <https://www.shs.edu.tw/>
Espressif Systems（無日期）。ESP32 Technical Reference Manual。取自 <https://docs.espressif.com/>
本研究團隊（2026）。智慧多功能羽球撿球器作品說明書（TWER25057）。IEYI 世界青少年發明展臺灣選拔賽。

Badminton World Federation. (2025). Laws of Badminton. Retrieved from <https://worldbadminton.com/rules/>

Cohen, C., Darbois Texier, B., Quéré, D., & Clanet, C. (2015). The physics of badminton. *New Journal of Physics*, 17, 063001. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/17/6/063001>

均一教育平台（無日期）。力矩的概念。取自 <https://www.junyiacademy.org>

中華民國羽球協會（2024）。羽球規格標準說明（依據 BWF Laws of Badminton 中文版）。取自 <https://www.brs.org.tw>

教育部國民及學前教育署（2024）。探究實作課程設計指引——以科學展覽為例。國立教育研究院。

陳怡云、林威辰、吳君平（2014）。羽置今拾——應用羽球重心斜面力學整列與拋物線的省力收集器（第 53 屆中華民國中小學科學展覽會國中組生活與應用科學科第三名，作品編號 030818）。國立臺灣科學教育館。取自 <https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/53/pdf/030818.pdf>

林嘉欣、謝淳婷等（2018）。羽羽生風——羽球收集器（第 57 屆中華民國中小學科學展覽會國小組生活與應用科學科第二名，作品編號 080808）。國立臺灣科學教育館。取自 <https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/57/pdf/080808.pdf>

杜春銘（2013 年 12 月 17 日）。羽毛球回收理球機——以氣流（風力）定向排列之收納裝置（中國發明專利申請公布，申請號 CN201310692231.9，公布號 CN103751996A）。中華人民共和國國家知識產權局。取自 <https://patents.google.com/patent/CN103751996A/zh>

陳柏翔（2024）。羽毛球多球訓練之回收用具概念設計（碩士論文，正修科技大學資訊管理系）。臺灣博碩士論文知識加值系統。取自 <https://hdl.handle.net/11296/ap43mn>

廖宏毅（2024）。羽球自動收集與檢測之智慧機器人（碩士論文，正修科技大學資訊管理系）。臺灣博碩士論文知識加值系統。取自 <https://hdl.handle.net/11296/357asr>

正修科技大學資訊管理系（2025）。AI 自動撿羽毛球機獲 2025 第 30 屆大專校院資訊應用服務創新競賽資訊應用組第一名。正修科技大學。取自 <https://www.csu.edu.tw/p/406-1000-25535,r19.php?Lang=zh-tw>