

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

佳作

080112

有「力」可「球」，變化 more 測

學校名稱：臺北市內湖區東湖國民小學

作者： 小六 李孟濬 小六 蔡杰良 小六 陳泰任 小六 吳振羽	指導老師： 羅明昌 姜巧華
-------------------------------------------------	-------------------------

關鍵詞：頻率、柏努利定律、球體軌跡

摘要

本報告主要針對球體在不同作用力下，影響其行徑軌跡之研究，運用都普勒效應及柏努利定律等概念，設計實驗裝置。為了探討球體水平方向及自由落下垂直方向的運動獨立性，自製 3D 列印實驗球體(圓球和橢球體)與球體旋轉軌跡裝置，分別引入水平與垂直氣流進行球體軌跡實驗。透過相機錄製影像與物理實作 APP 擷取聲音頻譜資料，再運用 Tracker 軟體進行數據處理。此外，善用磁生電原理，驅動 LED 光來測得球體轉數。最終，實驗結果發現球體形狀、轉速跟空氣氣流產生不同作用力，都會使得球體產生偏轉，皆符合柏努利定律來進行解釋。

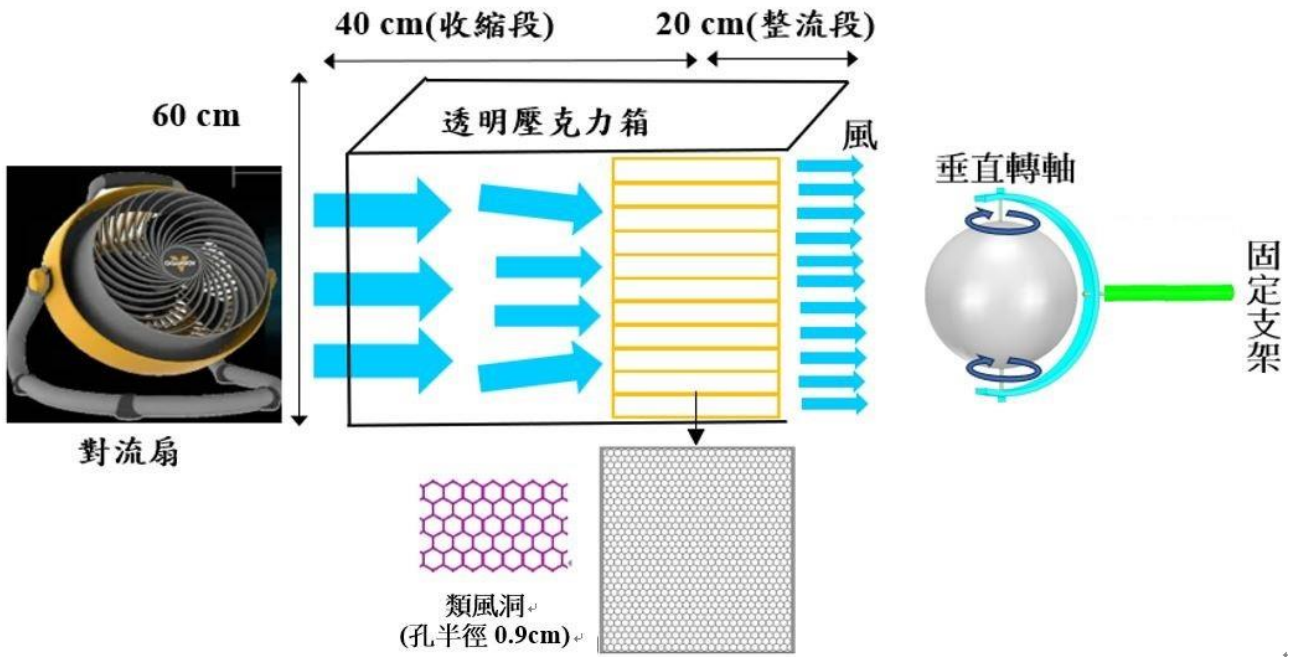
壹、前言

一、研究動機

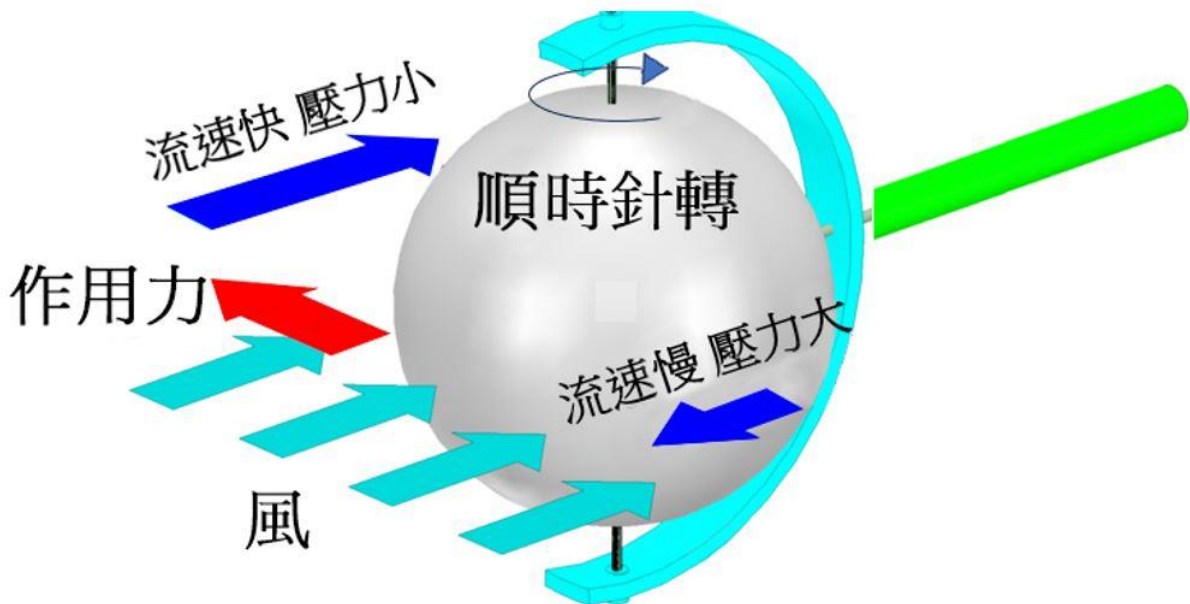
在網路上看到變化球的影片及《牛頓科學雜誌》介紹，投手靠著不同的握球姿勢就可以投出不同的變化球，這引起我們的好奇。更深入的搜尋後發現有一種塑膠軟球在球體上，有橢圓形狀的孔稱之為威浮球，可以很輕易地投出超級變化球，這大大的引發了我們的研究動機。五年級上學期，自然課的力與運動單元時，學習到所謂「力」就是推或拉的作用，能使物體移動，投球就是利用力使物體往前方移動。後來，我們從《棒球物理大聯盟：王建民也要會的物理學》得知，棒球飛行時，作用於球體的力：重力、阻力及柏努利定律，是造成球飛行軌跡變化的因素。我們也分別利用磁生電讓附在球體上 LED 亮的次數即球體轉數。另外，使用附在球體上的蜂鳴器，進行圓周運動，會因都普勒效應產生高低頻，測得高頻的次數即球體轉數。

我們架設了一個可以產生平穩對流的風力測試設備如圖一(a)所示，用來觀察風的流動與球體作用力之間的現象。球體採用圓球，風力由對流扇提供，藉由蜂巢形結構的類風洞設備提供整流後的穩定氣流。透過球體順時針（俯瞰）轉動，並依類風洞同側方向來說明，球體左側對應點流速快、壓力小，右側對應點流速慢、壓力大，其相對速度不一造成壓力差，進而產生推力。為了解釋這個現象，我們從《棒球物理大聯盟：王建民也要會的物理學》與維基百科的 Magnus Effect 得到如圖一(b)所示，當球體流速快（壓力小）、另一側空氣流速慢

(壓力大)，球體左右側的壓力差，因而產生偏轉作用力。但實際運動中的球體產生偏移變化的關鍵因素是什麼？此外，能不能以柏努利方程式中的流體速度、流體密度跟壓力之間的關係，對應到球體旋轉時，相對應點的壓力差，進而推算出推力並依運動公式求得偏移量的理論值。



(a) 自製風力穩定設備「類風洞」與球體轉動 (本圖為研究者自製)



(b) 氣流對轉動球體的偏轉現象 (本圖為研究者自製)

圖一 自製風力穩定設備「類風洞」球體轉動示意圖 (本圖為研究者自製)

二、研究目的

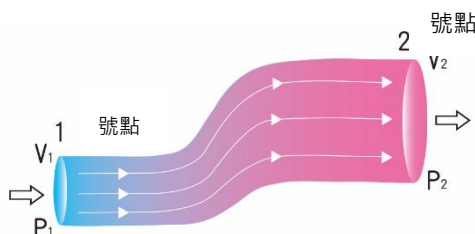
本研究實驗之目的，主要探討球體在不同作用力下，影響其飛行軌跡之研究。我們學習了流體力學中的柏努利公式，發現不同應用公式涉及很多假設，所以，針對我們的研究目的，設定實驗需求：如球體形狀、球體轉速、球體分別水平或垂直的轉速，因而，訂定研究目的如下：

- (一)探討由 LED 亮的次數測得球的旋轉次數。
- (二)探討由都普勒效應推算高頻出現的次數測得球的旋轉次數。
- (三)探討在類風洞環境等高點測得轉動球體的偏移量。
- (四)探討上下轉動的圓球與橢球體自由落下時的偏移量。

三、文獻回顧

(一)柏努利定律 (Bernoulli's equation) 在流體 (液體或氣體)

$$p_1 + 1/2\rho v_1^2 + \rho gh_1 = p_2 + 1/2\rho v_2^2 + \rho gh_2$$

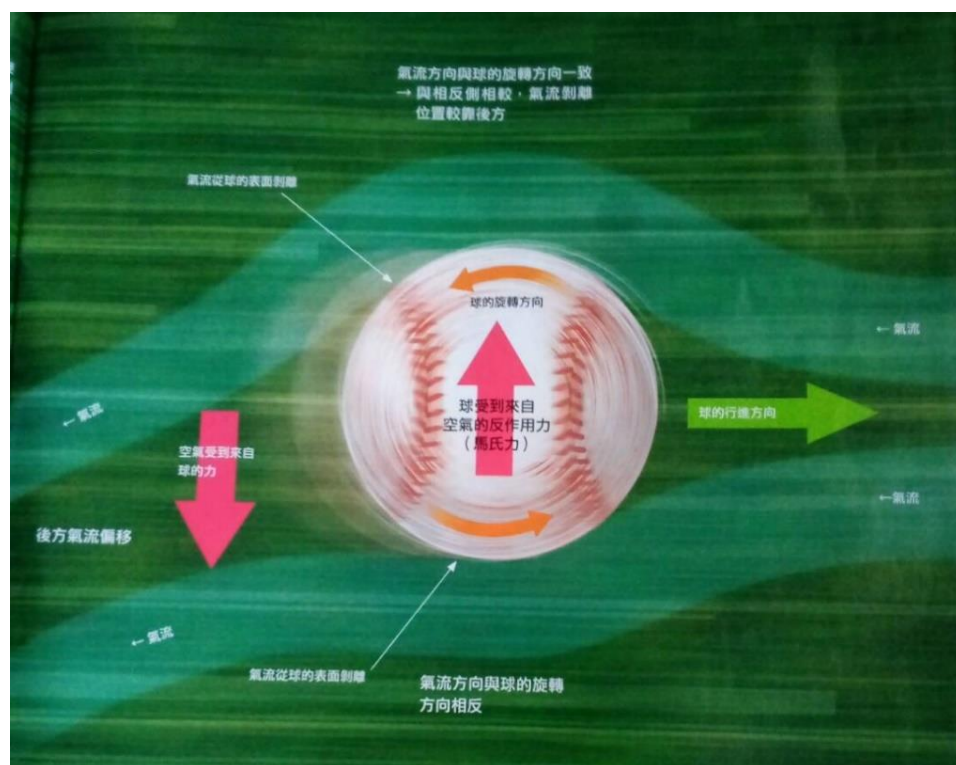


圖二 引自(Lea, 1997)柏努利定律示意圖 (本圖為研究者自製)

如圖二所示，1 號點的界面壓力、流體速度平方與流體密度之積之半、流體密度與重力加速度與流體高度積之總和等於 2 號點的界面壓力、流體速度平方與流體密度之積之半、流體密度與重力加速度與流體高度積之總和，稱為柏努利定律。

(二)以球的左側定為 1 號點，右側定為 2 號點，當球投出時，以 2 號點施力使球逆時針（俯瞰）水平旋轉，此時，1 號點與空氣氣流同方向，流速快、壓力小，球會偏向 1 號點的方向。例如橄欖球是以球的長軸為旋轉軸讓球旋轉，球可以更穩定的飛行，又稱為陀螺效應。如果從飛行中的球體來看，周圍的空氣往與行進方向相反的方向流動。換句話說，球一直都是「逆風」而行。空氣沿著表面流動，然後途中會從球體表面「剝離」。在球體

旋轉方向與氣流一致的這側，氣流會受到球體旋轉的「牽引」，不易從球體表面剝離，氣流從球面剝離的位置會偏移到後方，結果變成球後方的氣流往一邊偏移。這意味著「球體周圍的空氣受到來自球的力，流動方向被改變」。此時，球相反地受到來自空氣的「反作用力」。換句話說，球旋轉改變周圍的氣流，其反作用力即球體所承受的力，就是馬格努斯力。(溝田武人等, 2015) 根據柏努利定律可知，球體上方流速快(壓力小)、下方流速慢(壓力大)，有壓力差，產生往上的作用力如圖三所示。



圖三 “球體旋轉時的馬氏力“ (圖片來源：(溝田武人, 2015)收錄於《牛頓科學雜誌》)

圖三照片來源為《牛頓科學雜誌》

(三)在棒球運動中，經常可發現球的運動路徑會轉彎。這都是因為球往前運動之外，又快速的旋轉所造成，此現象被稱為馬格努斯效應。指當球體快速旋轉時，空氣流經球體時，上下的空氣流速會產生壓力差，因而產生作用力如圖三所示。臺中教育大學。“馬格努斯效應”。檢索於 2023 年 10 月 1 日。<https://scigame.ntcu.edu.tw/air/air-023.html>。

(四)“「威」力?「浮」力?「球」球，你告訴我!”，其研究透過自製乒乓威浮球來實驗，證明出威浮球偏轉的原因。但可惜的是仍然無法將市售的威浮球投出變化來。(來源:莊曜璋等, 2011 中華民國第 51 屆中小學科學展覽會)

貳、研究設備及器材

一、實驗用 3D 列印球

本研究參考日本小學生所使用的棒球尺寸約為半徑 3.33cm，我們以尼龍材質製作了 3D 列印球，如圖四(a, b)，採用尼龍材質的球偏硬較輕，適合進行球體軌跡測試，球體形狀有圓球(截面為圓形，半徑 3.3cm)及橢球體(截面為橢圓形，半長軸 3.65cm，半短軸 3.21cm)。



(a) 圓球 (b) 橢球體

圖四 3D 列印球體(尼龍材質)

(本圖為研究者自行拍攝)

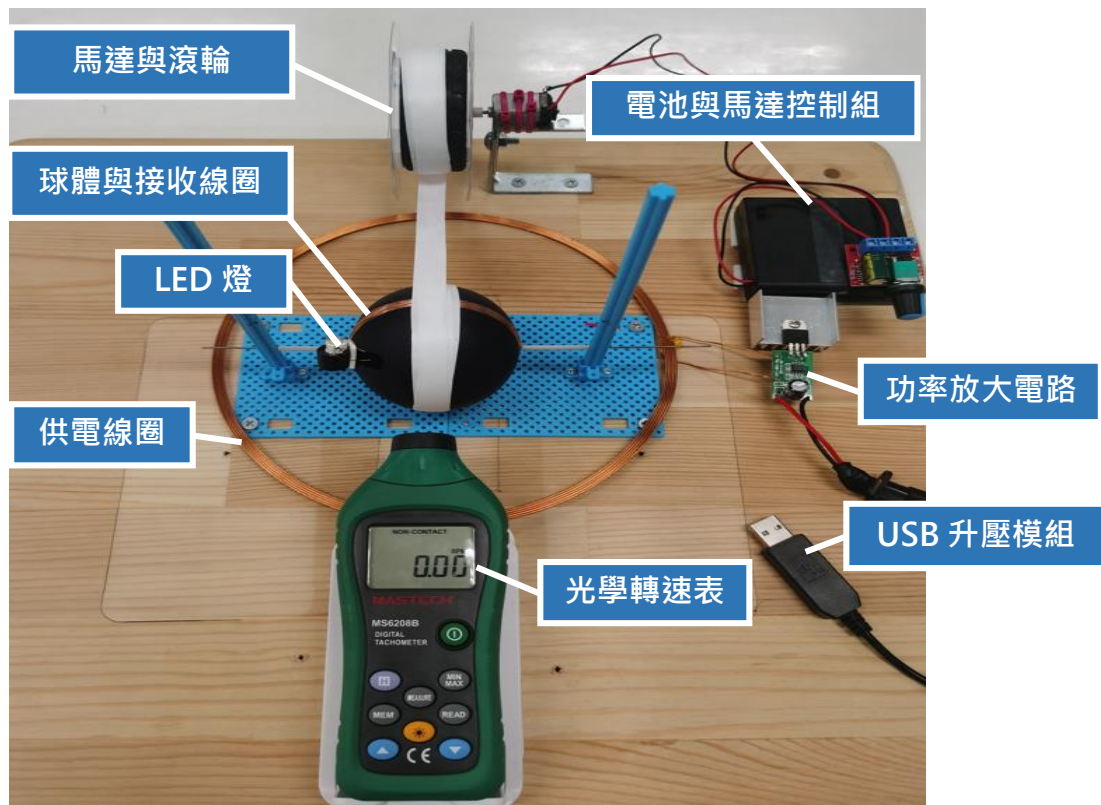
二、研究設備：

(一)由 LED 亮的次數測得球的旋轉次數

我們運用不同物理特性：如 LED 亮的次數來測得球體的旋轉次數(如圖五)。因此，引入一直流電壓 12V 無線供電線圈模組，可以將電流轉換成磁場。供電線圈由半徑 0.5 mm 漆包線纏繞 6 圈，線圈半徑為 10 cm。球體接收線圈由半徑 0.13 mm 漆包線纏繞 18 圈，線圈半徑為 3.33 cm，可以產生足夠感應電流。在接收線圈的兩端，焊接上 LED 的正負極。當球體接收線圈與供電線圈平行時，可以點亮 LED；球體再旋轉一圈時才能再點亮 LED。因此，可以透過 LED 亮的次數測得球體的旋轉次數。利用錄影方式擷取 LED 亮的次數，並透過 Tracker 軟體分析 LED 亮的次數即球的旋轉次數。自製磁電轉速器材與設備如表一與圖五所示。

表一 磁生電實驗器材與設備表

自製器材	數量	廠製器材	數量
3D 列印球加 LED	1	轉速表	1
球體線圈	1	USB 線	1
金屬支撐桿	1	馬達與馬達控制迴路	1
金屬配件	4	供磁線圈組	1



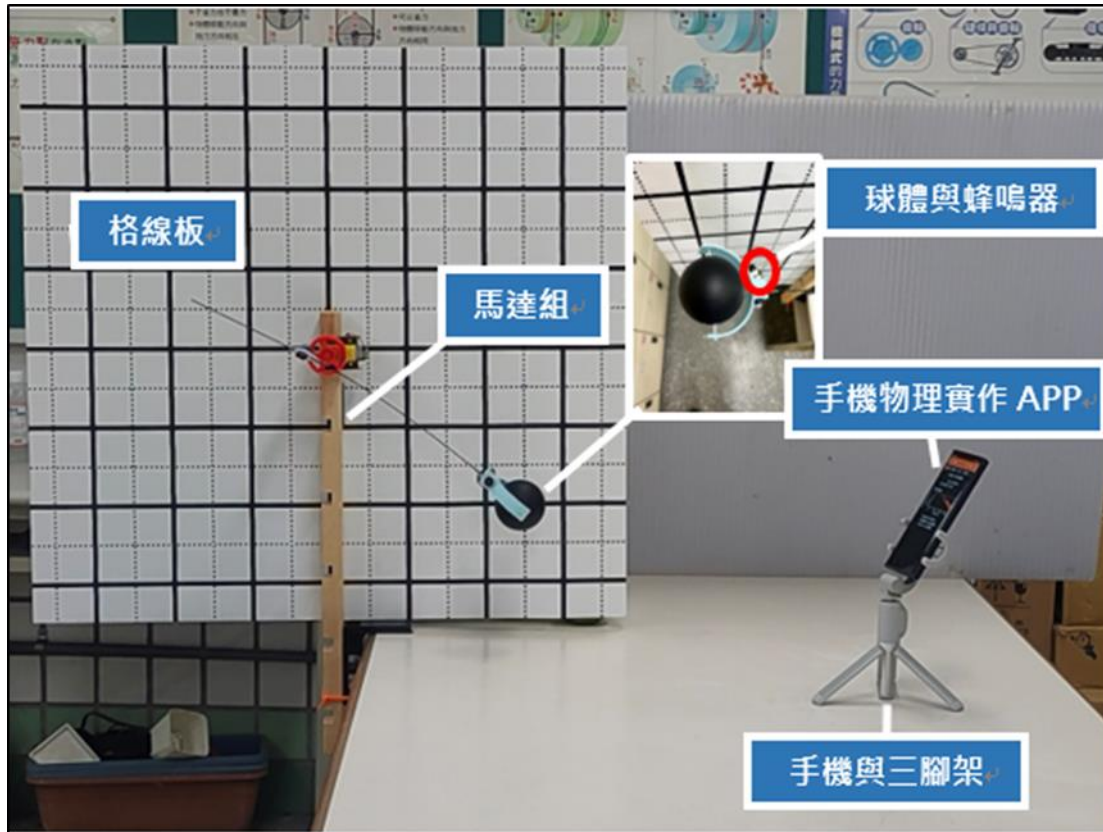
圖五 自製磁生電實驗器材與設備圖 (本圖為研究者自行拍攝)

(二)由都普勒效應推算高頻出現的次數測得球的旋轉次數

都普勒效應是指由於波源的運動，而使波頻率產生變化的效應。我們自製一圓周運動設備，將球放置於藍色夾具中並將蜂鳴器(2548 Hz)附在球上，固定一觀察點測得都普勒效應因圓周運動產生聲源頻率的變化，進而可以推算出運動周期與聲源速率。在支撐桿的末端放置一球體支架可以進行不同球體進行實驗，透過聲源頻率周期的換算即可得到圓周運動速率。如表二與圖六所示為自製圓周運動都普勒聲音測試設備與器材表。由一木質支架與格線板組成主要結構，引入直流馬達轉動中心紅色轉輪帶動一球體支撐桿進行圓周運動。利用 3V 供電的蜂鳴器可以發出固定頻率聲源(2548 Hz)，距離蜂鳴器 50cm 的位置放置一手機作為聲源觀察點，並利用手機物理實作 APP 的聲音頻譜錄製進行數據分析，透過附在球體的蜂鳴器圓周運動，測得高頻出現的次數即球的旋轉次數。

表二 都普勒聲音測試設備器材表

自製器材	數量	廠製器材	數量
格線板	1	手機物理實作 APP	1
木質支架	1	智慧型手機與三腳架	2
控制迴路	1	3V 蜂鳴器(2548 Hz)與鈕扣電池 3V	1
3D 列印球	2	直流馬達	1



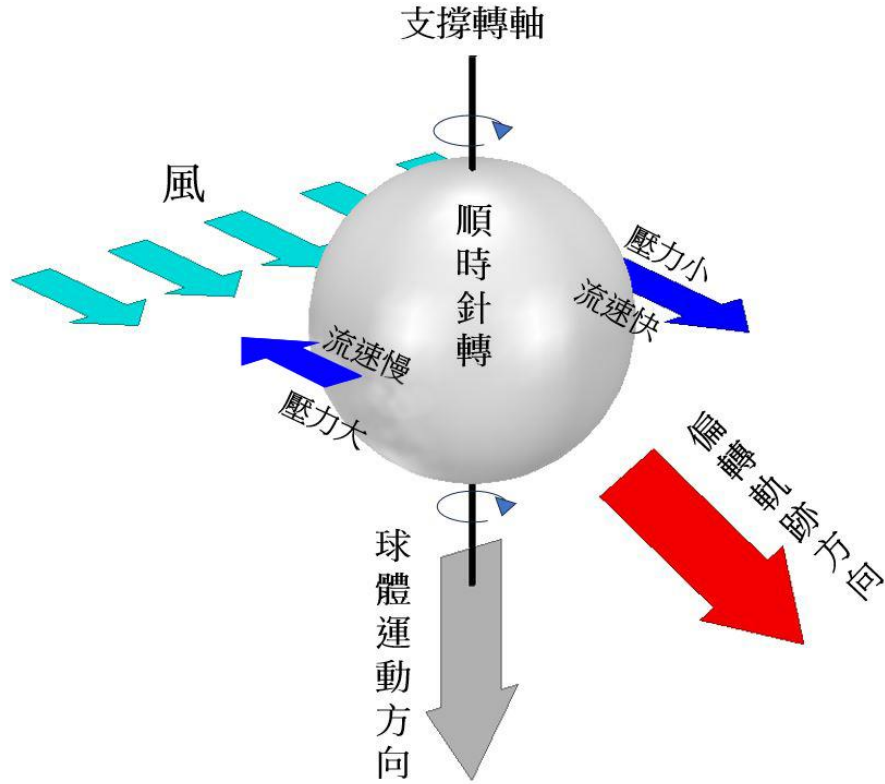
圖六 自製圓周運動都普勒聲音測試設備 (本圖為研究者自行拍攝)

(三)在類風洞環境等高點測得轉動球體的偏移量

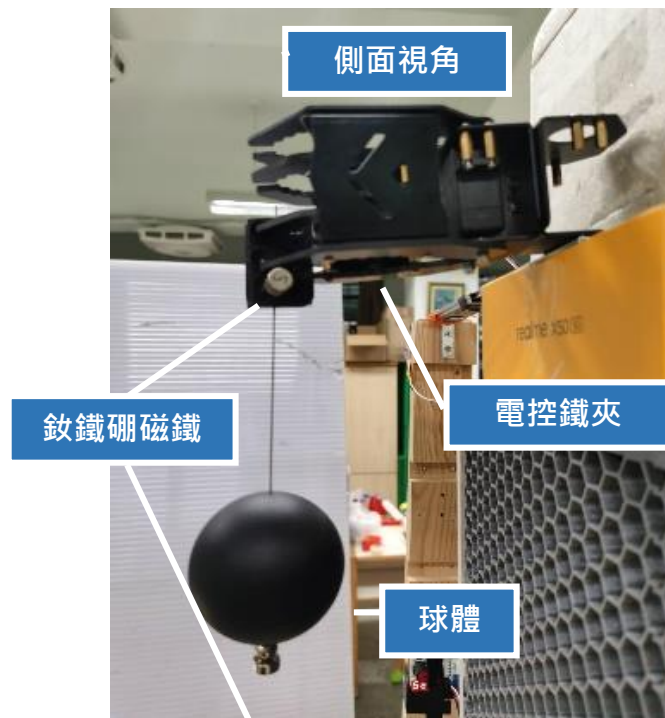
為了探討球體運動在水平方向與垂直方向具獨立性，圖七為類風洞的水平氣流與旋轉球體偏移關係示意圖，球體置放一支撐轉軸，使得球體可以在水平方向順時針或逆時針旋轉後自由落下。引入類風洞所產生的水平方向氣流，可以探討空氣流動影響下與球體旋轉後產生的切線速度，兩者之間的作用力，進而得到球體行進軌跡的變化。參考此概念自製球體軌跡測試設備與器材如表三及圖八。首先，運用類風洞與對流扇產生穩定氣流。接著，支撐轉軸上與下分別置入強力磁鐵，頂部利用電控鐵夾可以對於球體高度與角度進行微調。然後，引入馬達加滾輪可以控制球體旋轉轉速，當球體自由落下時，會推開底部的磁鐵自由落下。最終，利用手機與運動相機分別錄製正面與俯視影像並以 Tracker 軟體進行軌跡圖分析。

表三 球體旋轉軌跡測試設備器材表

自製器材	數量	廠製器材	數量	廠製器材	數量
類風洞	4	Insta360 運動相機	1	電源延長線	1
風洞框架	1	運動相機支架	1	Tracker 軟體	1
控制迴路	1	智慧型手機	1	相機三腳架	2
3D 列印球	2	攝影機	1	EVA 橡膠地墊	10
電控鐵夾支撐架	1	空氣循環機	1	鈦鐵硼磁鐵	14



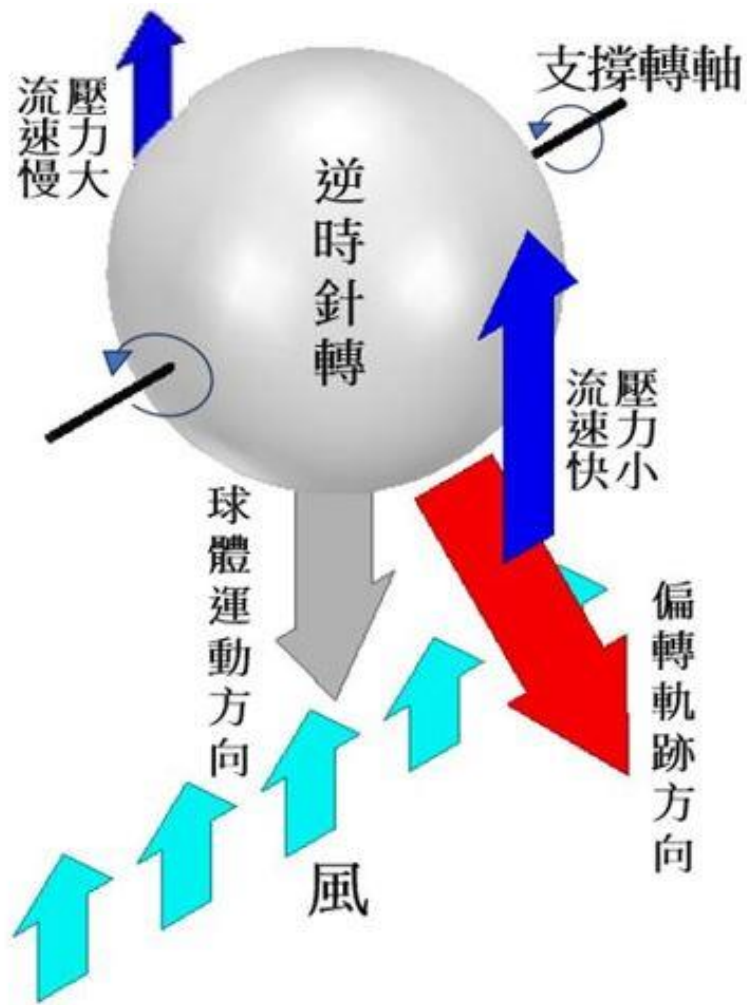
圖七 類風洞的水平氣流與旋轉球體偏移關係示意圖 (本圖為研究者自製)



圖八 球體旋轉軌跡測試設備(水平方向氣流) (本圖為研究者自行拍攝)

(四)依柏努利定律探討上下轉動的圓球與橢球體自由落下時的偏移量

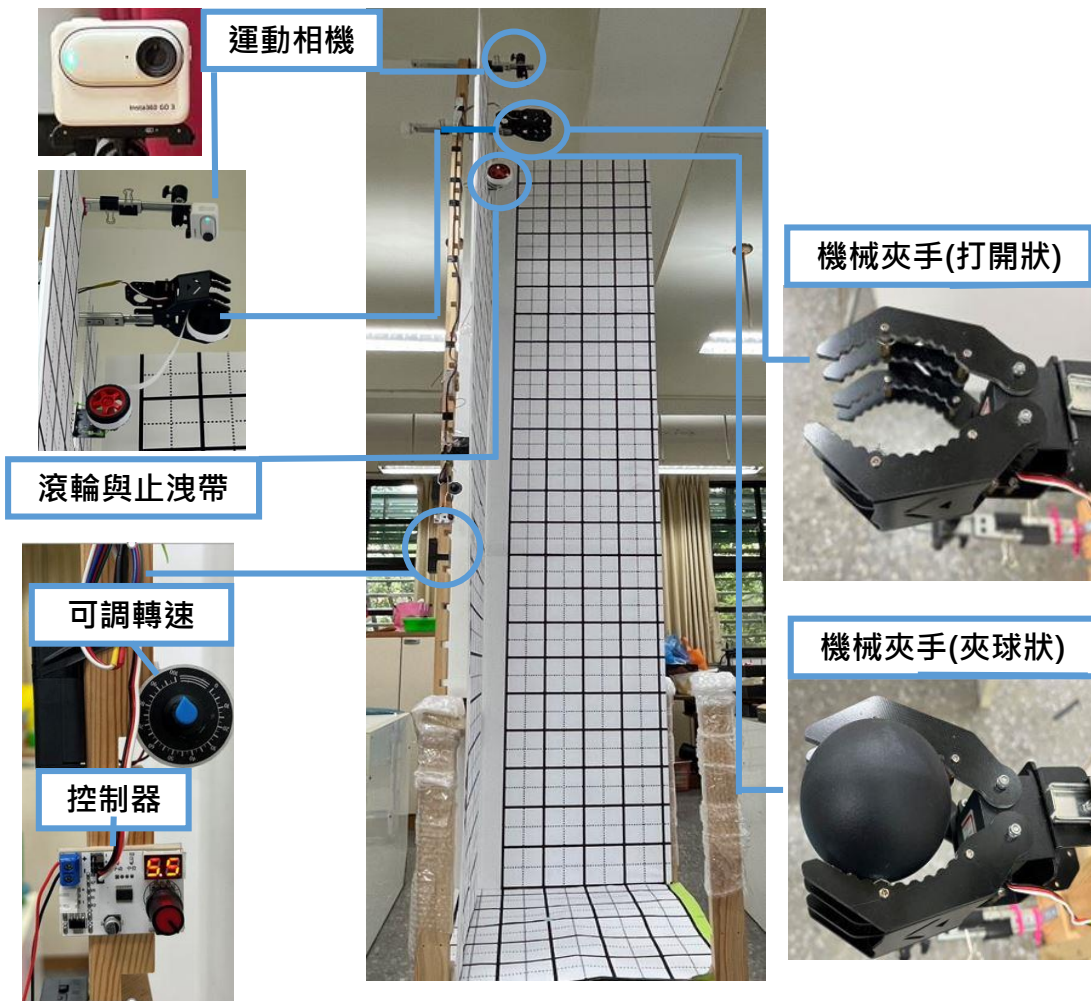
為了探討球體運動，圖九為旋轉球體自由落下其偏移關係示意圖，球體置放一支撐轉軸，使得球體可以在垂直方向順時針或逆時針旋轉後落下。透過球體自由落下形成的垂直反向氣流，其偏移方向即球體的運動軌跡。設備與器材如表四及圖十。由木質支架與格線板組成主要結構，球體可落下高度為 280 cm。先利用機械鐵夾與支撐轉軸將球體固定住。再引入馬達加滾輪透過止洩帶牽引，可以控制球體旋轉轉速 400 rpm (revolutions per minute) 跟 800 rpm。然後，放開機械夾手，球體就會自由落下。最終，利用手機與運動相機分別錄製正面與俯視影像並以 Tracker 軟體進行軌跡圖分析。



圖九 旋轉球體自由落下其偏移關係示意圖 (本圖為研究者自製)

表四 都普勒聲音測試設備器材表

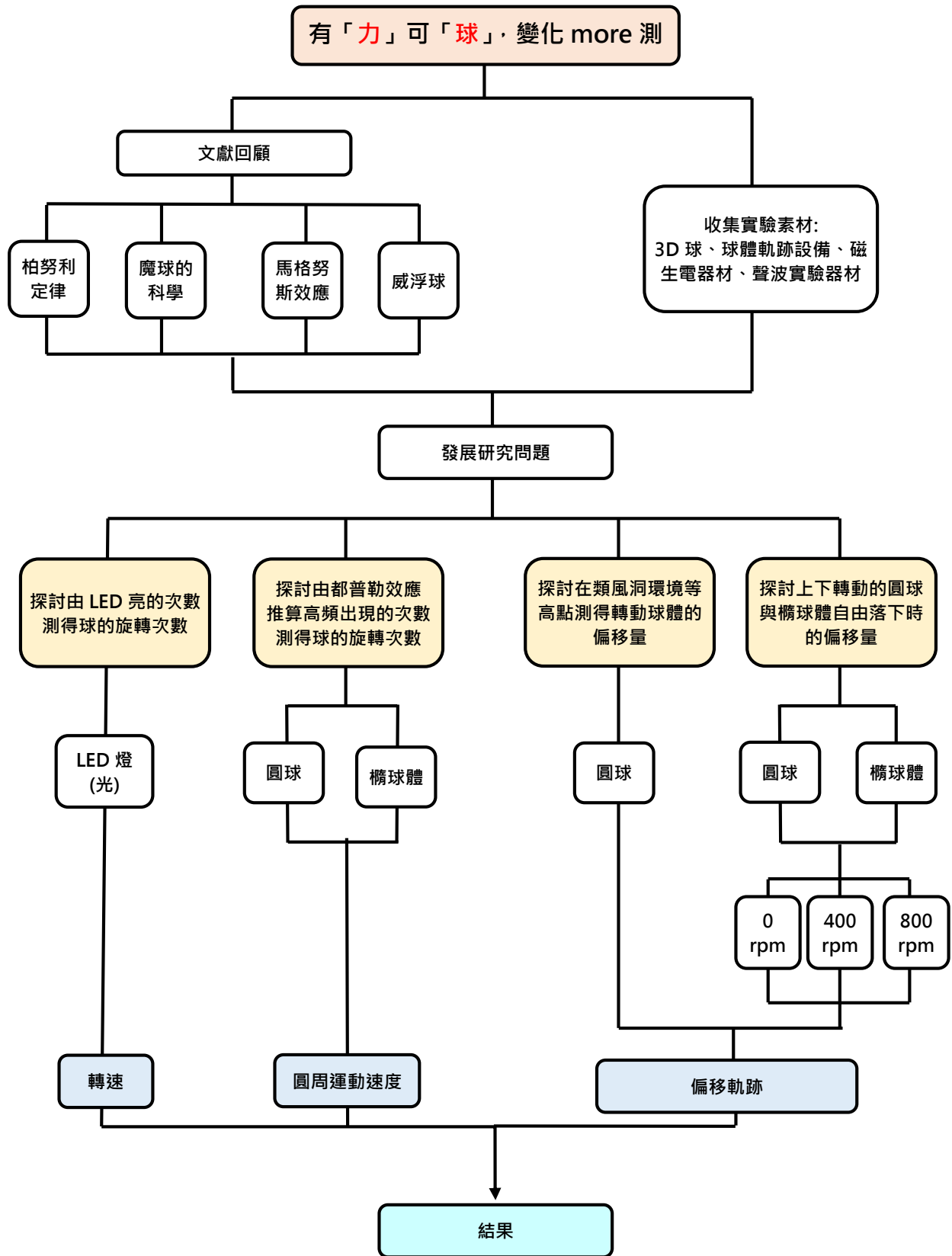
自製器材	數量	廠製器材	數量
木質支架	6	電腦平板	1
馬達控制迴路	1	Insta360 運動相機	1
3D 列印球	2	智慧型手機三腳架	2
格線板	2	水管止洩帶	20



圖十 測量旋轉球體自由落下軌跡設備 (本圖為研究者自行拍攝)

參、研究過程或方法

一、研究流程：



(本圖為研究者自製)

二、研究過程與方法：

(一)由 LED 亮的次數測得球的旋轉次數

1.運作原理與實驗步驟過程說明

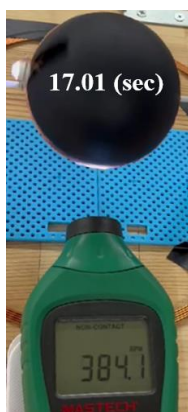
- (1)圓球，用半徑 0.13mm 漆包線纏繞 18 圈，線圈兩端焊接上 3V 電壓驅動 LED，再以金屬支撐桿穿過球體中心。
- (2)調整接收線圈與供電線圈感應間距，使球體線圈與供電線圈平行時，有最大電磁通過進而點亮 LED，反之線圈非平行狀態時，無法產生感應電流如圖十一所示。
- (3)將馬達滾輪透過止洩帶纏繞 20 圈牽引球體轉動，馬達轉速調整為 300rpm 帶動球體。
- (4)如圖十二所示，止洩帶牽引完成後，同時利用轉速表測讀數及手機錄製影像。
- (5)運用 Tracker 軟體進行轉速表讀數與光學 LED 亮的次數分析出轉數紀錄如圖十三。



圖十一 接收線圈感應到電流使 LED 發光



圖十二 球體旋轉 LED 呈現一亮一滅



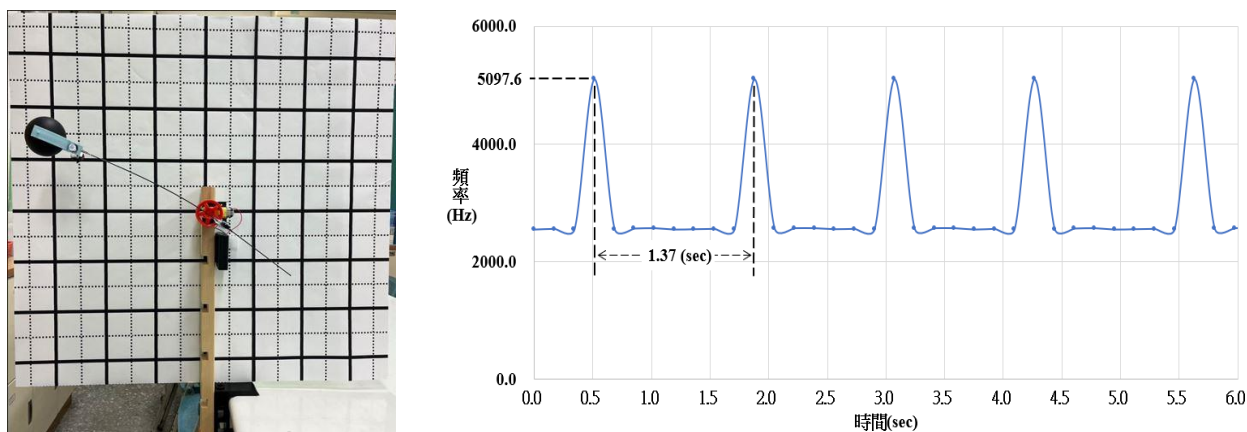
圖十三 Tracker 分析轉數表與 LED 亮滅週期

(本頁的圖為研究者自行拍攝)

(二)由都普勒效應推算高頻出現的次數測得球的旋轉次數

1.運作原理與實驗步驟過程說明

- (1)將球放置於藍色夾具中並於夾具上加裝蜂鳴器(2548 Hz)，開啟馬達，使球以順時鐘圓周運動轉動。
- (2)面對裝置的右邊，距離蜂鳴器 50cm 位置設置手機，以測量附有蜂鳴器的球體旋轉次數。
- (3)使用物理實作 APP 偵測聲音頻譜，如圖十四。
- (4)面對裝置的正面，架設錄影設備並錄製球體進行圓周運動的影片。
- (5)運用 Tracker 軟體分析其轉速及音頻變化。



圖十四 物理 APP 測得的聲譜紀錄表 (本圖為研究者自製)

(三)在類風洞環境等高點測得轉動球體的偏移量

1.設計概念

- (1)風通過類風洞後，會以大約等速進入實驗區。
- (2)球體起始高度為 172cm 左右，類風洞垂直高度為 42cm，如圖十五，其平均風速為 4(m/sec)，是以普通教室內各種可以搭配使用的器材組合，並且可以安全操作的高度為考量依據。
- (3)球體的固定方式使用釹鐵硼磁鐵與細鐵棒的組合，並加疊增加磁力，提高球體在固定時的穩定程度。

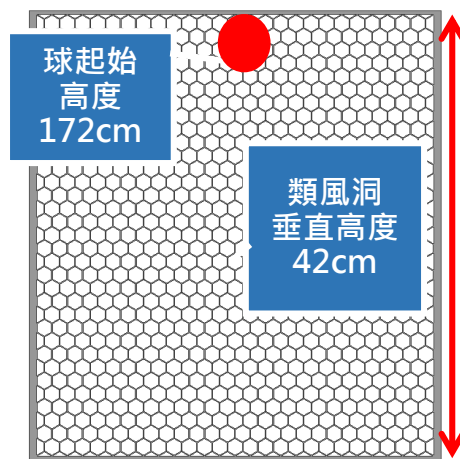
2.運作原理與實驗步驟過程說明

- (1)數片釹鐵硼磁鐵中間磁吸固定細鐵棒，並以電控的鐵夾夾住以固定實驗高度，

再將球體事先穿孔，細鐵棒穿過球體，並在細鐵棒下端以球形釹鐵硼磁鐵吸附住，用以固定球體。

(2)在馬達軸心安裝 1 個塑膠材質且有摩擦力的輪胎，接通電池盒，製作成馬達。

(3)面對類風洞方向的球體正面、側面與上方，架設錄影設備，錄製球體落下過程的影片，並以 Tracker 軟體分析其運動路徑。



圖十五 類風洞 (本圖為研究者自製)

(四)依柏努利定律探討上下轉動的圓球與橢球體自由落下時的偏移量

1.設計概念

為了探討球體運動，如圖九所示為旋轉球體自由落下其偏移關係示意圖，測量旋轉球體自由落下軌跡設備與器材如表四及圖十。由木質支架與格線板組成主要結構，球體可落下高度為 280 cm。利用機械鐵夾與支撐轉軸將球體固定。引入馬達加滾輪透過止洩帶牽引可以控制球體旋轉轉速(400rpm 跟 800rpm)，再放開機械夾手，球體就會自由落下。最終，利用手機與運動相機分別錄製正面與俯視影像，並以 Tracker 軟體進行軌跡圖分析。圖十六為圓球側面落下運動過程圖。

2.運作原理與實驗步驟過程說明

- (1)將兩段式支架向下凹折，將球放置在夾手中固定，支架高度 280cm。
- (2)開啟慢速錄影後，啟動滾輪將球體上的止洩帶拖引使球體旋轉。
- (3)當止洩帶脫離球體，按下夾具的啟動裝置，夾具鬆開，球即以旋轉狀態落下。
- (4)即時錄影紀錄球體落下軌跡並重複十次實驗。

(5)將錄影畫面加上 Tracker 軟體分析軌跡。



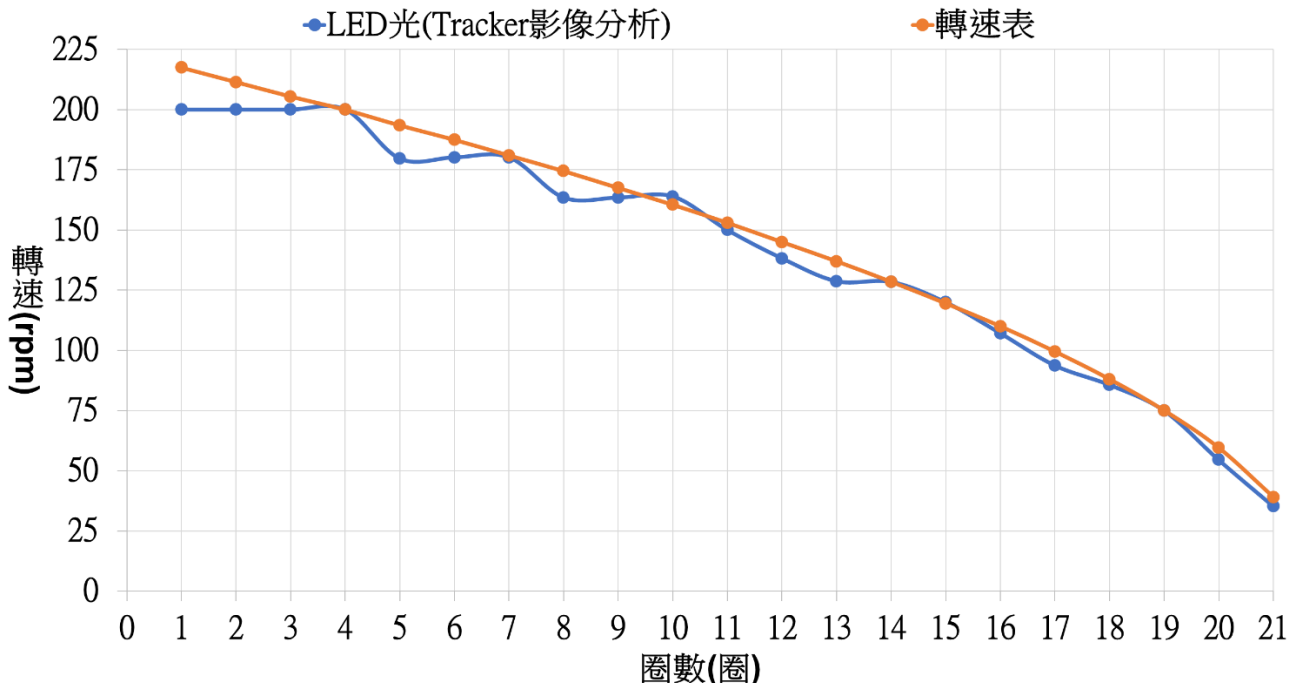
圖十六 圓球側面落下運動過程圖 (本圖為研究者自行拍攝)

肆、研究結果

一、實驗一：由 LED 亮的次數測得球的旋轉次數

測試球體為圖四(a)中圓球，參考第 13 頁實驗步驟說明(1)-(5)，首先，在馬達帶動測試球體轉動圈數 21 圈。然後，用手機錄影後，利用 Tracker 軟體分析得到轉速表轉速與 LED 轉數，從圖十七可以發現：

1. 透過馬達 300rpm 所牽引帶動的球體轉速會有一定的轉換損耗，球體第一圈的轉速為 217rpm。
2. 球體旋轉第 1 圈到結束的第 21 圈，轉速表判讀轉數的變化為 217rpm 到 39rpm。LED 光轉數的變化為 200rpm 到 30rpm。可以發現二種測量方式都呈現高轉速降到低轉速的趨勢。
3. 當球體轉到第 10 圈，發現球體轉數小於 160rpm 時，有 8rpm 誤差。
4. 當球體轉到第 14 圈，發現球體轉數小於 125rpm 時，LED 光轉數會比較接近轉速表數據，誤差小於 6rpm。



圖十七 轉速表與 LED 轉數對比圖 (本圖為研究者自製)

二、實驗二：由都普勒效應推算高頻出現的次數測得球的旋轉次數

測試球體為圖四的圓球與橢球體，固定發聲源利用圓周運動下，產生都普勒效應進行聲音頻率的實驗。參考第 14 頁實驗步驟說明(1)-(5)，距離蜂鳴器 50cm 位置設置手機，使用物理實作 APP 錄製聲音頻譜。面對裝置的正面，錄製圓周運動過程，最終，以 Tracker 軟體分析其轉速及音頻變化，從圖十八與圖十九可以發現：

1.蜂鳴器的固定發生源產生頻率為 2548.83 Hz。圓球與橢球體在圓周運動下，因為波源的移動而產生不同的聲音頻率且具有固定的週期性出現，符合都普勒效應的特性。此時發現圓球的最高頻率為 5097.66 Hz（第一泛音）；橢球體的最高頻率為 5103.52 Hz（第一泛音）。

2.聲音頻率與圓周運動速度的計算，觀察圓球與橢球體進行圓周運動，使用手機與物理實作 APP(Phephix) 偵測聲音頻率如表五，得到圖十八與圖十九：

裝圓球時的轉速： $60/(44.03-42.67)=44.11$ (rpm)

裝橢球體時的轉速： $60/(152.06-150.87)=50.42$ (rpm)

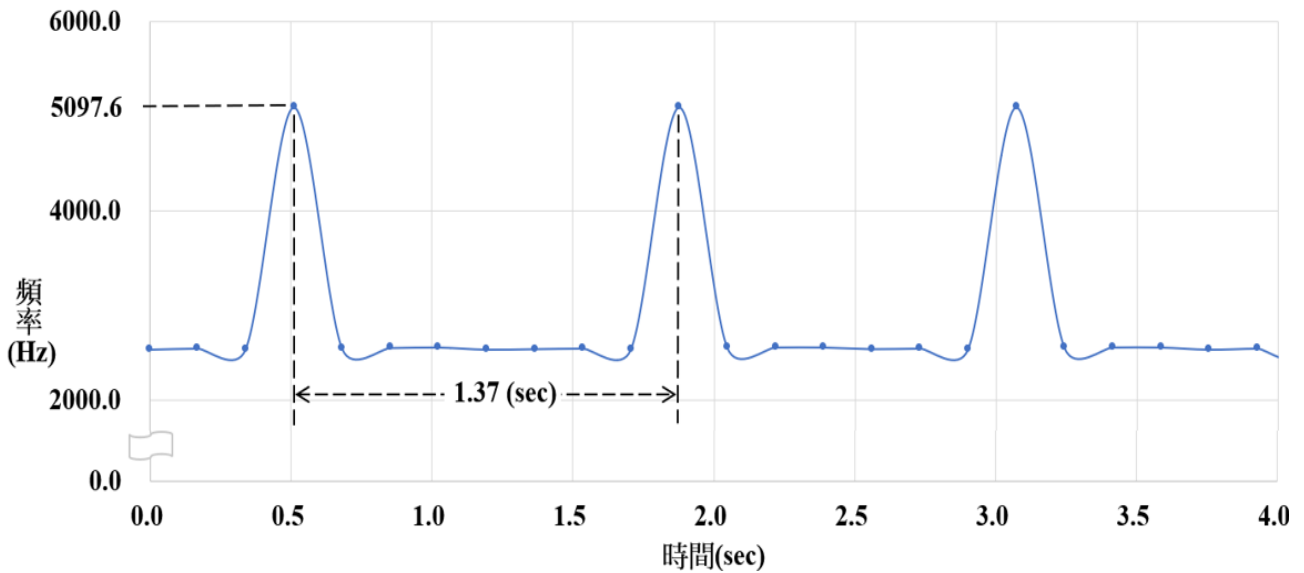
(1)圓周運動下，橢球體轉動一圈的週期(1.19sec)小於圓球的週期(1.37sec)。

(2)橢球體的最高頻率(5103.52 Hz)大於圓球的最高頻率(5097.66 Hz)。

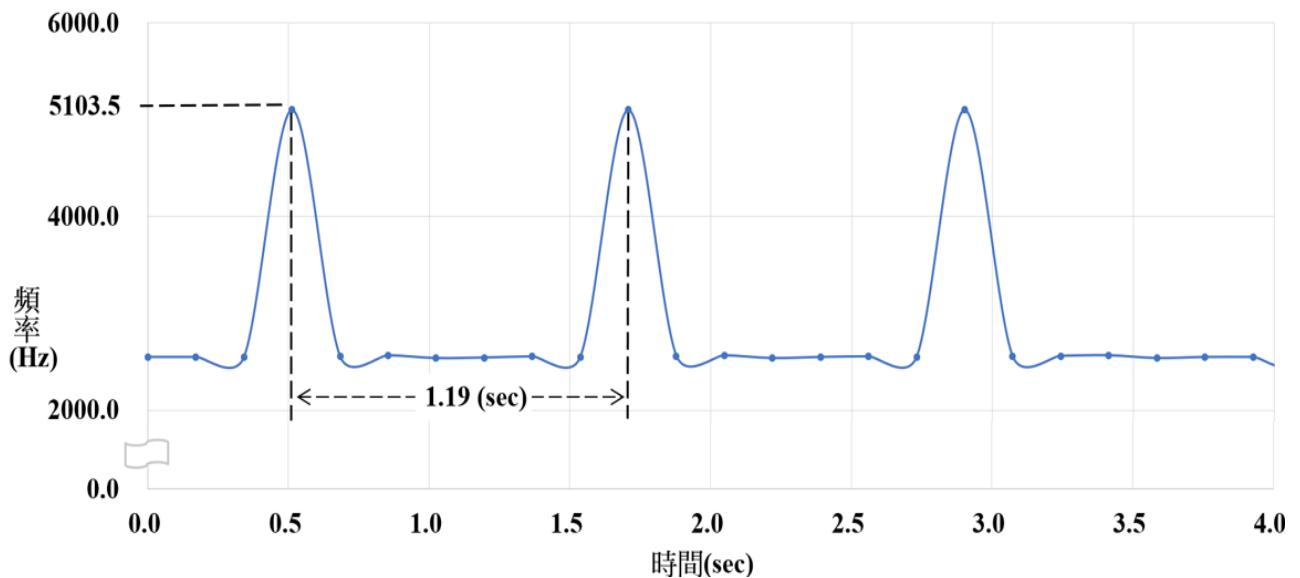
(3)圓周運動轉速為橢球體(50.42rpm)大於圓球(44.11rpm)。

表五 不同形狀球體週期、最高頻率及球體轉速統計表

球體形狀	週期(sec)	最高頻率(Hz)	球體轉速(rpm)
圓球	1.37	5097.66	44.11
橢球體	1.19	5103.52	50.42



圖十八 圓球在圓周運動產生聲源頻率的變化圖 (本圖為研究者自製)

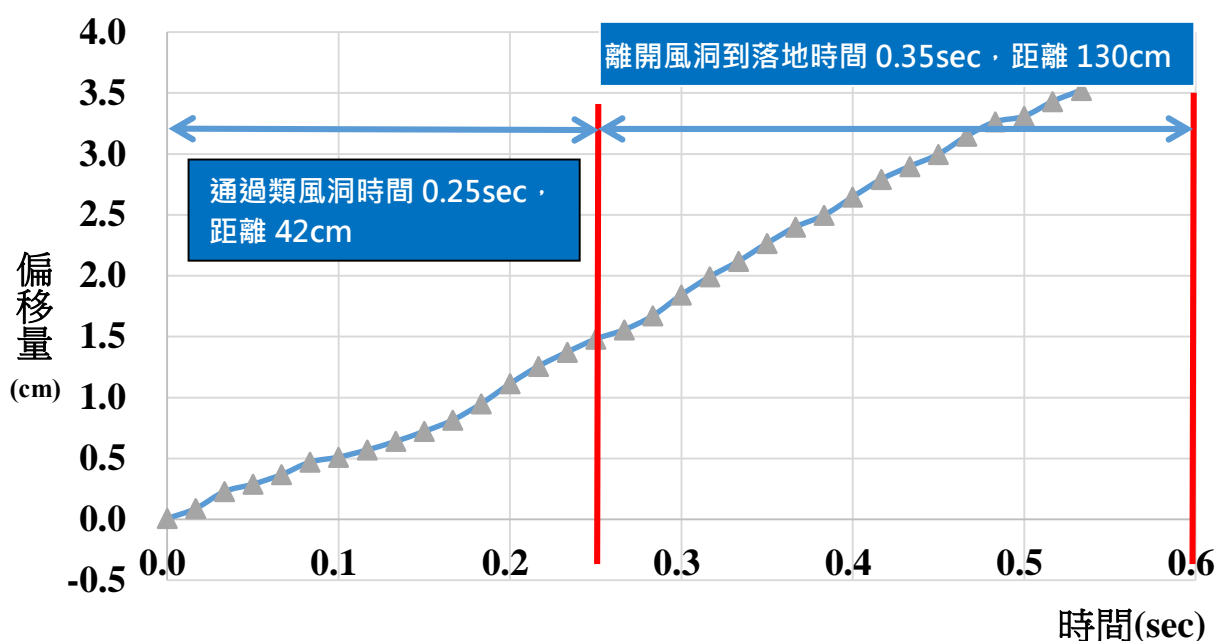


圖十九 橢球體在圓周運動產生聲源頻率的變化圖 (本圖為研究者自製)

三、實驗三：在類風洞環境等高點測得轉動球體的偏移量

1. 測試球體為圖四(a)的圓球，球體置放一支撐轉軸，使得球體可以在水平方向順時針(俯瞰)轉後自由落下。參考第 14 至第 15 頁實驗步驟說明(1)-(3)。最終，利用手機與運動相機分別錄製正面與俯視影像，然後，以 Tracker 軟體進行軌跡圖分析，從圖二十可以發現：

- (1)類風洞有風，球順時針轉時，球體平均偏移量為 $1.67 \pm 1.12(\text{cm})$ 。
- (2)因球體順時針旋轉，使得球體兩側的流速與出風方向分別相同和相反，形成壓力差，我們發現此現象符合柏努利定律，也符合圖七的實驗示意圖中作用力的偏移方向。



圖二十 類風洞有風圓球順時針轉之平均偏移量 (本圖為研究者自製)

圖二十與柏努利定律公式推算出的理論值相吻合。

四、實驗四：依柏努利定律探討上下轉動的圓球與橢球體自由落下時的偏移量

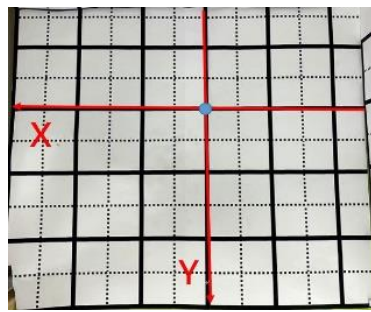
(一)實驗四之一：比較圓球不同轉速之落體行進軌跡實驗

1. 俯視角度

球體落點圖由長與寬各 5cm 之坐標單位，中心藍點定為圓心，坐標軸以(X,Y)表示 (如圖二十一)，參考第 15 頁實驗步驟說明(1)-(5)，每種轉速重複實驗 10 次。統計圓球在 0rpm、400rpm 及 800rpm 等三種不同轉速下，球體落下後其偏移量，從表六與圖二十三發現，圓球在 0rpm、400rpm 及 800rpm 轉速落下，800rpm 的偏移量 12.97cm 大於 400rpm 的偏移量 6.65cm 大於 0rpm 的偏移量 1.30cm(推測此偏移量為實驗誤差)。

2. 側視角度

統計圓球在 0rpm、400rpm 及 800rpm 等三種不同轉速下，球體落下後偏移量，從圖二十三與圖二十四發現，圓球在不同轉速落下，偏移量以轉速 800rpm 大於轉速 400rpm 大於轉速 0rpm。由於我們的只有施測 400rpm 及 800rpm 兩種轉速，數據量不夠，未來我們上國中後，會再以更多種轉速進行實驗，才能說明實驗的正確趨勢。



球體落點方格



方格板側視圖

方格板俯視圖

圖二十一 球體軌跡俯視與側視圖

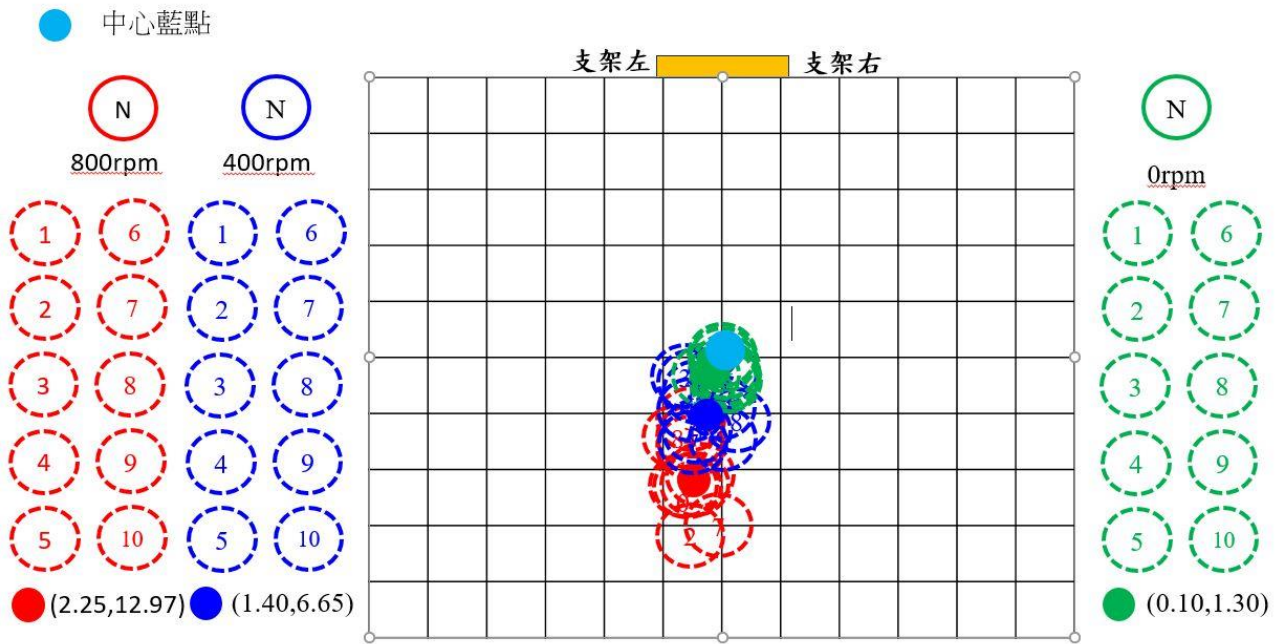


圖二十二 球體偏轉方向

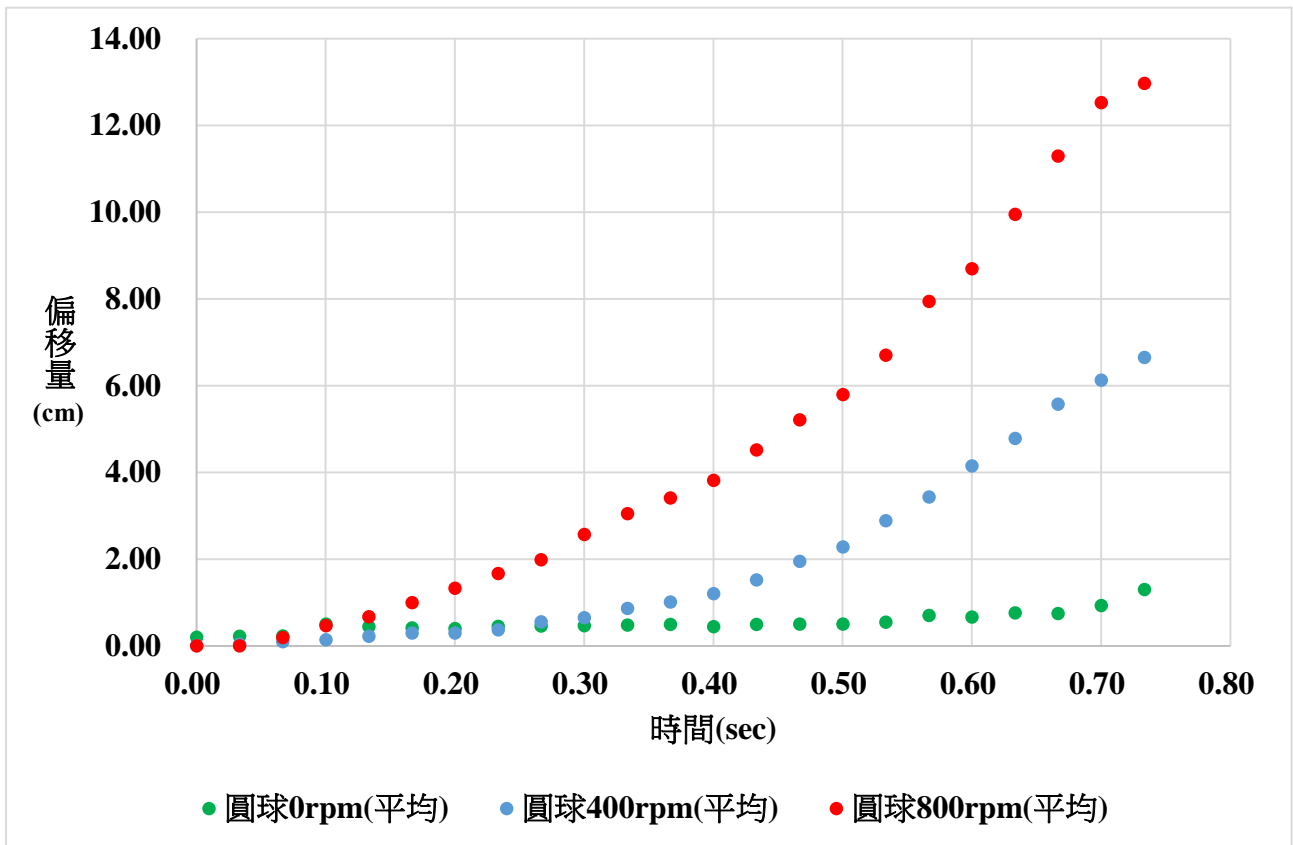
(圖二十一及圖二十二皆為研究者自行拍攝)

表六 圓球在 0rpm、400rpm 及 800rpm 偏移量統計表 單位:cm

轉速	圓球 0rpm	圓球 400rpm	圓球 800rpm
偏移量(cm)	1.30±0.79	6.65±2.36	12.97±4.32



圖二十三 圓球在 0rpm、400 rpm 及 800 rpm 下落體行進軌跡圖 (本圖為研究者自製)



圖二十四 圓球在 0rpm、400 rpm 及 800 rpm 平均偏移量(側視)

(本圖為研究者自製)

推估 0rpm 的偏移量為實驗誤差，誤差的原因包括空氣的擾動、空氣密度不均…等。

(二)實驗四之二：比較不同形狀球體之落體行進軌跡實驗

1.俯視角度

統計圓球及橢球體在 0rpm、400rpm 及 800 rpm 等三種不同轉速下，球體落下後偏移量，從表七可以發現：

橢球體的偏移量均大於圓球的偏移量，但不論是圓球或是橢球體，800rpm 的偏移量大於 400rpm 的偏移量大於 0rpm 的偏移量。

表七 圓球與橢球體在 0rpm、400rpm 及 800rpm 偏移量統計表(俯視) 單位:cm

偏移量(cm) 形狀 \ 轉速	0rpm	400rpm	800rpm
圓球	1.30±0.79	6.65±2.36	12.97±4.32
橢球體	3.10±1.33	10.32±2.88	16.62±4.85

推估 0rpm 的偏移量為實驗誤差，誤差的原因包括空氣的擾動、空氣密度不均…等。

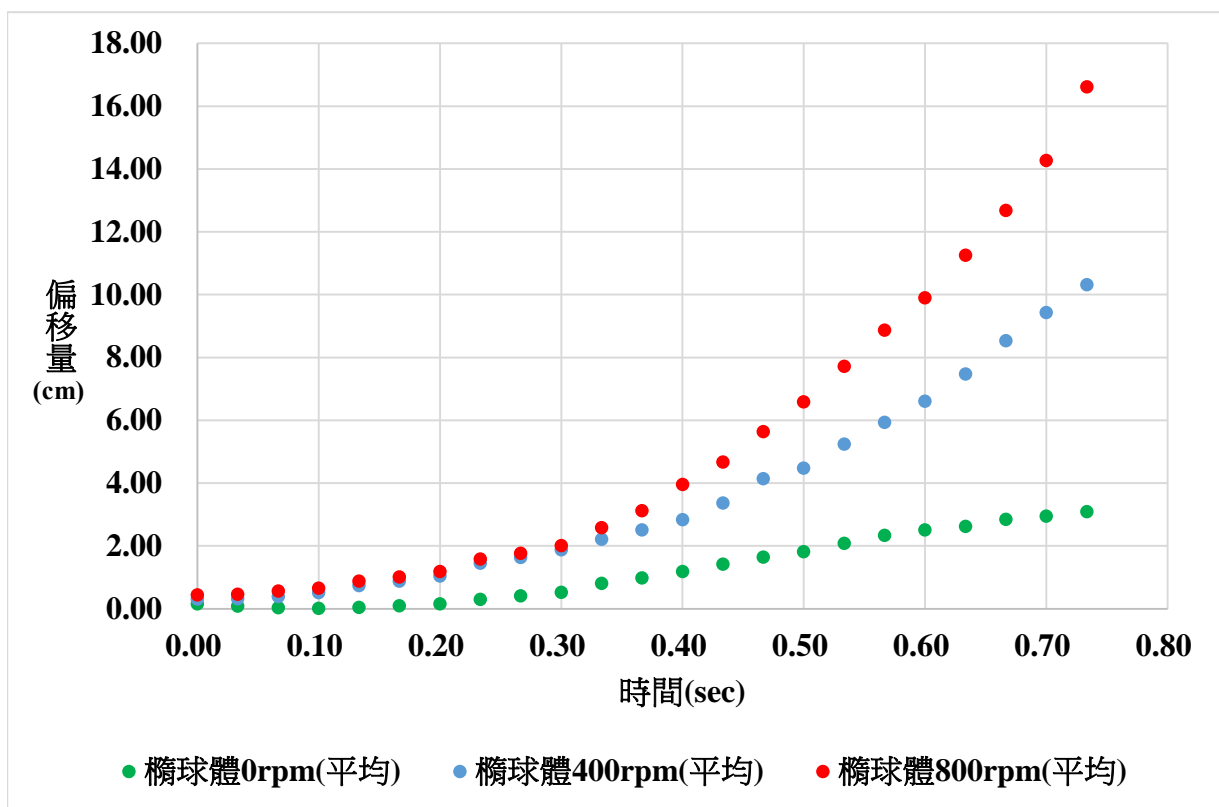
2.側視角度

表八為圓球及橢球體在 0rpm、400 rpm 及 800 rpm 三種轉速，球體落下每 0.03sec 的平均偏移量。從圖二十五可以發現，不論是圓球或是橢球體，800rpm 的偏移量大於 400rpm 的偏移量大於 0rpm 的偏移量，橢球體的偏移量均大於圓球的偏移量。從第十八頁的表五我們合理推測，橢球體的轉速較圓球快，其兩點的壓力差較圓球兩點的壓力差為大，所以產生的推力大於圓球，偏移量也大於圓球。但我們目前只是小學生，等未來較高年級時，我們會再進一步進行研究。此外，我們的實驗只有施測 400rpm 及 800rpm 兩種轉速，數據量太少，未來我們上國中後，會以更多種轉速進行實驗，才能說明實驗的正確趨勢。

表八 圓球及橢球體在 0rpm、400rpm 及 800rpm 三種轉速之平均偏移量

單位:cm

形狀 轉速 偏移量 (cm) 時間(sec)	圓球			橢球體		
	0rpm	400rpm	800rpm	0rpm	400rpm	800rpm
0.00	0.20±0.01	0.01±0.00	0.00±0.02	0.16±0.00	0.31±0.00	0.45±0.00
0.03	0.22±0.02	0.04±0.05	0.00±0.05	0.09±0.07	0.33±0.04	0.47±0.14
0.07	0.23±0.03	0.10±0.12	0.19±0.22	0.04±0.13	0.40±0.14	0.57±0.50
0.10	0.50±0.06	0.14±0.19	0.47±0.44	0.02±0.14	0.52±0.30	0.66±0.83
0.13	0.44±0.15	0.22±0.27	0.67±0.68	0.05±0.18	0.74±0.54	0.88±1.25
0.17	0.41±0.21	0.29±0.35	0.99±0.94	0.10±0.24	0.88±0.81	1.02±1.33
0.20	0.40±0.26	0.29±0.38	1.32±1.13	0.16±0.28	1.05±1.03	1.19±1.82
0.23	0.45±0.28	0.37±0.46	1.67±1.35	0.31±0.33	1.45±1.11	1.59±1.72
0.27	0.46±0.29	0.55±0.52	1.99±1.50	0.42±0.38	1.63±1.15	1.77±2.22
0.30	0.46±0.30	0.65±0.56	2.57±1.83	0.53±0.48	1.88±1.16	2.02±2.22
0.33	0.48±0.35	0.86±0.06	3.04±2.02	0.81±0.60	2.22±1.35	2.59±2.64
0.37	0.50±0.35	1.01±0.75	3.41±2.25	0.98±0.70	2.51±1.52	3.13±2.60
0.40	0.44±0.38	1.20±0.90	3.82±2.43	1.19±0.92	2.84±1.71	3.96±3.05
0.43	0.49±0.39	1.52±0.97	4.51±2.55	1.43±0.86	3.38±1.79	4.67±3.09
0.47	0.50±0.37	1.95±1.01	5.21±2.83	1.64±1.06	4.15±1.81	5.65±3.36
0.50	0.50±0.38	2.28±1.24	5.79±2.98	1.82±0.99	4.48±2.07	6.59±3.62
0.53	0.55±0.47	2.88±1.39	6.70±3.36	2.08±1.10	5.24±2.08	7.72±3.91
0.57	0.70±0.49	3.43±1.48	7.94±3.55	2.34±1.12	5.94±2.24	8.88±4.27
0.60	0.66±0.45	4.15±1.59	8.69±3.52	2.51±1.13	6.61±2.53	9.90±4.21
0.63	0.76±0.57	4.78±1.75	9.95±3.60	2.63±1.15	7.47±2.64	11.26±4.83
0.67	0.74±0.63	5.57±2.06	11.29±4.01	2.86±1.36	8.53±2.69	12.69±4.72
0.70	0.92±0.78	6.72±2.36	12.52±3.88	2.95±1.35	9.43±2.78	14.27±4.95
0.73	1.30±0.79	6.65±2.36	12.97±4.32	3.10±1.33	10.32±2.88	16.62±4.85



圖二十五 橢球體 0rpm、400rpm 及 800rpm 平均偏移量(側視)

(本圖為研究者自製)

推估 0rpm 的偏移量為實驗誤差，誤差的原因包括空氣的擾動、空氣密度不均…等。

伍、討論

一、由 LED 亮的次數測得球的旋轉次數

(一)無線供電線圈由半徑 0.5mm 漆包線纏繞 6 圈，線圈半徑為 10cm。球體接收線圈由半徑 0.13mm 漆包線纏繞 18 圈，線圈半徑為 3.33cm，能產生足夠感應電流，可以實現最佳匹配的磁感應效果同時使 3V 的 LED 發揮效果。

(二)因為磁生電的效應，球體線圈與供電線圈平行時，有最大電磁通過進而點亮 LED，球每轉 360 度 LED 會亮 1 次。

歸納：LED 亮的次數即為球的轉數。

二、由都普勒效應推算高頻出現的次數即球體的旋轉次數

(一)手機放在蜂鳴器發聲孔的同一側，並且要降低背景音，可以清晰接收聲波。

(二)接收聲波的工具與實驗裝置的距離越遠，效果越顯著。

(三)蜂鳴器高頻出現的次數即為球之旋轉次數，但球體本身的轉動速度不能太快。生活中，我們常聽到救護車的鳴笛聲，靠近時尖銳（高頻），離開時低沈（低頻），應用到圓周運動，由高頻出現的次數即為球的旋轉次數。

歸納：蜂鳴器高頻出現的次數即為球的旋轉次數。

實驗一、二測得球體的旋轉次數，可以推算出相對應點的切線速度差，因而產生壓力差，算出相對應點的推力，進一步提供實驗三、四，依運動公式求得偏移量的理論值。

三、在類風洞環境等高點測得轉動球體的偏移量

(一)球體起始高度為 172cm 左右，而有類風洞的位置，是在最上面的 42cm。

(二)因實驗操作場地的高度限制與安全，球體起始高度就設定為 172cm 左右，如果可以增加實驗起始的高度，再搭配全段類風洞，球體的偏移程度會更顯著。

(三)因為球體有重量，原本用了 2 顆釹鐵硼磁鐵夾住細鐵棒，讓磁力透過細鐵棒傳到下端，但這樣的磁力強度不夠，下端的球形磁鐵無法撐住球體的重量，我們又在磁鐵的兩側加磁鐵，以穩固球體。

(四)在固定球體的過程中，我們發現每次在把細鐵棒穿過球體的時候，因為，球是黑色又不透光，難度很大，經由加強磁力後，在細鐵棒穿進球體碰到另一端的內壁時，

把球型磁鐵貼近球體，再小範圍的移動球，使得較大的磁力比較順利地穿過球體。

歸納：依柏努利定律，球體會朝流速快的一側產生偏移。按柏努利定律的公式，去推算推力，再依運動公式求得偏移量的理論值。

四、依柏努利定律探討上下轉動的圓球與橢球體自由落下時的偏移量

(一)原先球體是設定不旋轉的，但為了要印證這個實驗與柏努利定律的相關程度，所以加裝了可調整轉速的馬達裝置，並用止洩帶拖引使球體旋轉。

(二)因為實驗場地的環境顏色深淺不同，而球體是黑色的，使得有些照片中球體比較不明顯，後來增加印有白色方格板的座標板，除了可以判讀球體軌跡變化的數值，球體的位置在照片中也更清楚。

(三)圓球與橢球體的體積差異不大，實驗高度只有 280cm，軌跡變化偏移量隨著轉速的增加，偏移量也相對增加。橢球體的偏移量大於圓球的偏移量。從第十八頁的表五，我們合理的推測橢球體的轉速快，橢球體的兩點壓力差較圓球兩點的壓力差為大，所以橢球體的推力大於圓球，偏移量也大於圓球。但我們目前只是小學生，待未來較高年級時，我們會再進一步進行研究。

歸納：依柏努利定律，球體會朝流速快的一側產生偏移。按柏努利定律的公式，去推算推力，再依運動公式求得偏移量的理論值。

陸、結論

實驗結果發現球體形狀、球體轉速跟空氣氣流產生不同作用力都會使得球體產生偏轉，皆符合柏努利定律並進行解釋。利用了磁生電原理，測得附在球體上 LED 亮的次數即球體的旋轉次數。附在球體上的蜂鳴器，可以利用都普勒效應，出現高頻次數即球體的旋轉次數。

一、由 LED 亮的次數測得球的旋轉次數

利用了磁生電原理，測得 LED 亮的次數即球體的旋轉次數。

二、由都普勒效應推算高頻出現的次數測得球的旋轉次數

附在球體上的蜂鳴器，可以利用都普勒效應，出現高頻次數即球體的旋轉次數。

三、在類風洞環境等高點測得轉動球體的偏移量

(一)有風的情況，球順時針（俯瞰）旋轉時，球體平均偏移量為 $1.67 \pm 1.12(\text{cm})$ 。

(二)因球體順時針（俯瞰）旋轉，使得球體兩側的相對應點，其流速與出風方向分別相同和相反，流速快（慢），壓力小（大），就會因有壓力差，且產生往壓力小一側的推力，這些現象與柏努利定律吻合，並依運動公式求得偏移量的理論值。

四、依柏努利定律探討上下轉動的圓球與橢球體自由落下時的偏移量

(一)圓球（俯視角度），轉速 800rpm 偏移量大於轉速 400rpm 偏移量大於 0rpm 偏移量。

球體以逆時針方向（以觀察者角度）旋轉，球的右側與氣流同向，左側則相反，球自由落下時，向流速快的一側偏移，轉速 800rpm 偏移量大於轉速 400rpm 偏移量且大於 0rpm 偏移量（推估 0rpm 的偏移量為實驗誤差）。

(二)橢球體的偏移量大於圓球的偏移量。我們合理的推測橢球體的轉速快，橢球體兩點的壓力差較圓球兩點的壓力差為大，所以推力大於圓球，偏移量也大於圓球。但我們目前只是小學生，待未來較高年級時，我們會再進一步進行研究。

(三)流速快（慢），壓力小（大），就會有壓力差，產生推力，這些現象與柏努利定律吻合，依運動公式求得偏移量的理論值。

未來展望

我們目前只是小學生，有些原理與理論，待未來國中及更高的學程，能再進一步研究，期待能更精進的探索。

柒、參考文獻資料

中文部份

李中傑 (2014)。棒球物理大聯盟：王建民也要會的物理學。五南。

莊曜璋、賴品翰、林芝羽、劉洵綸、徐仲毅、周暉珉、許森裕、王懋勳(2011, 10)。「威」力？「浮」力？「球」球，你告訴我！中華民國第 51 屆中小學科學展覽會作品說明書。

溝田武人,淺井武,山田幸雄,葛西順一,和田純夫 (2015, 8 月) 彎曲！下墜！搖搖晃晃！魔球的科學 牛頓科學雜誌

英文部份

https://m.facebook.com/video.php/?video_id=3346682928925672

Magnus Effect 維基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/Magnus_effect

Lea, S. M. & Burke, J. R. (1997). Physics: the nature of things. West Publishing Company, MN, U. S. A.

Rossmann, J., & Rau, A. (2007). An experimental study of Wiffle ball aerodynamics. American Journal of Physics. 75(12).DOI: 10.1111/1.2787013

牛頓第三定律。在維基百科。檢索自

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%89%9B%E9%A1%BF%E7%AC%AC%E4%B8%89%E8%BF%90%E5%8A%A8%E5%AE%9A%E5%BE%8B>

白努利定律。維基百科。檢索自 [https://zh.m.wikipedia.org/zh-](https://zh.m.wikipedia.org/zh-tw/%E4%BC%AF%E5%8A%AA%E5%88%A9%E5%AE%9A%E5%BE%8B)

[tw/%E4%BC%AF%E5%8A%AA%E5%88%A9%E5%AE%9A%E5%BE%8B](https://zh.m.wikipedia.org/zh-tw/%E4%BC%AF%E5%8A%AA%E5%88%A9%E5%AE%9A%E5%BE%8B)

威浮球。在維基百科。檢索自 [https://zh.wikipedia.org/zh-](https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%A8%81%E6%B5%AE%E7%90%83)

[tw/%E5%A8%81%E6%B5%AE%E7%90%83](https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%A8%81%E6%B5%AE%E7%90%83)

都普勒效應。維基百科。檢索自 [https://zh.wikipedia.org/zh-](https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%A4%9A%E6%99%AE%E5%8B%92%E6%95%88%E5%BA%94)

[tw/%E5%A4%9A%E6%99%AE%E5%8B%92%E6%95%88%E5%BA%94](https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%A4%9A%E6%99%AE%E5%8B%92%E6%95%88%E5%BA%94)

附錄一、都普勒效應公式 引自(Lea, 1997)

$$f' = f \frac{v \pm V_D}{v \pm V_S}$$

都普勒效應-----聲音的頻率會因發音體的靠近（相對）而頻率變高,相反的：發音體遠離（相對）而頻率降低

其中公式中

v-----聲音速度

V_D -----測者的速度

V_S -----聲源的速度

分子部分靠近”+”號,遠離採用”-”號

分母部份：聲源靠近採”-”號, 遠離採”+”號

附錄二、流體力學柏努利公式 引自(Lea, 1997)

$$P + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho gh = \text{定值}$$

P-----流線上任意點的壓力

ρ -----流體密度

h-----高度

V-----速度

$F = (\Delta P) A = ma$

F-----兩點間的推力

ΔP -----兩點間的壓力差

A-----球體的截面積

m-----球體的質量

a-----加速度

【評語】 080112

白努力定律的工作算是一個長期被研究的題目，不算新穎。就這個工作，有做了一些技術上的改進。譬如：利用手機中的 tracker 程式、類風洞、LED 測球的轉速.... 由都普勒效應及感應之 LED 發光測得球旋轉頻率，就實驗技術和設備上來說是相對上的改進。接著經由測量球的轉速，圓周運動速度及偏移軌跡來分析球運動軌跡。相較於先前的工作，本研究使變化球的偏移路徑可用實驗方法定量解析出來，可補定性分析不足。實驗設計適當及完整，有系統的分析。

作品簡報

有「力」可「球」，變化more測

摘要

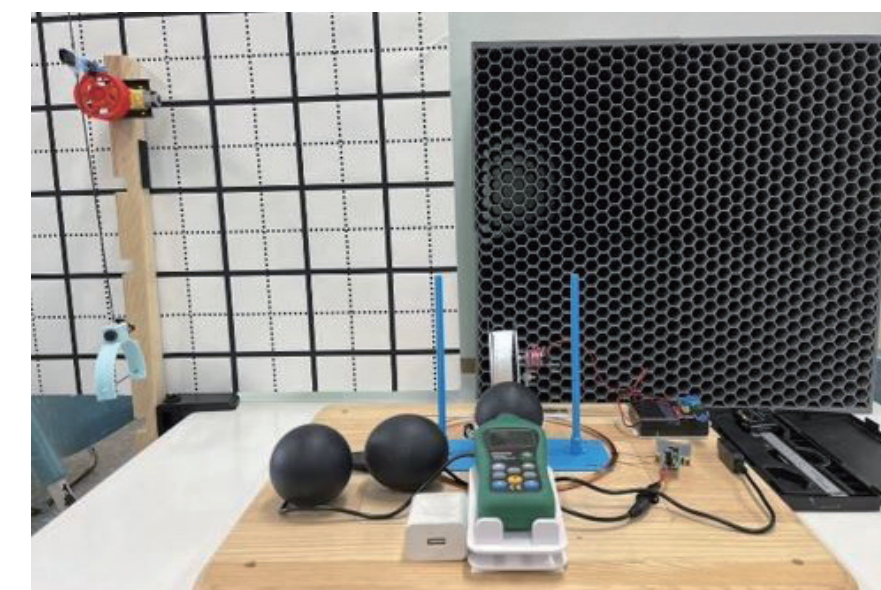
本報告主要針對球體在不同作用力下，影響其行徑軌跡之研究，運用都普勒效應及柏努利定律等概念，設計實驗裝置。為了探討球體水平方向及自由落下垂直方向的運動獨立性，自製 3D 列印實驗球體（圓球和橢球體）與球體旋轉軌跡裝置，分別引入水平與垂直氣流進行球體軌跡實驗。透過相機錄製影像與物理實作 APP 擷取聲音頻譜資料，再運用 Tracker 軟體進行數據處理。此外，善用磁生電原理，驅動 LED 光來測得球體轉速。最終，實驗結果發現球體形狀、轉速跟空氣氣流產生不同作用力，都會使得球體產生偏轉，皆符合柏努利定律來進行解釋。

壹、研究目的

- (一) 探討由 LED 亮的次數測得球的旋轉次數。
- (二) 探討由都普勒效應推算高頻出現的次數測得球的旋轉次數。
- (三) 探討在類風洞環境等高點測得轉動球體的偏移量。
- (四) 探討上下轉動的圓球與橢球體自由落下時的偏移量。

貳、研究設備及器材

研究設備及器材：3D 列印球、球體線圈、轉速表、馬達與馬達控制迴路、電腦平板、供磁線圈組、格線板、智慧型手機、3V 蜂鳴器 (2548 Hz) 與鈕扣電池 3V、直流馬達、類風洞、空氣循環機、Insta360 運動相機、電線、Tracker 軟體、鈦鐵硼磁鐵、水管止洩帶、機械夾手、空氣循環機、游標卡尺、電子秤、對流扇。



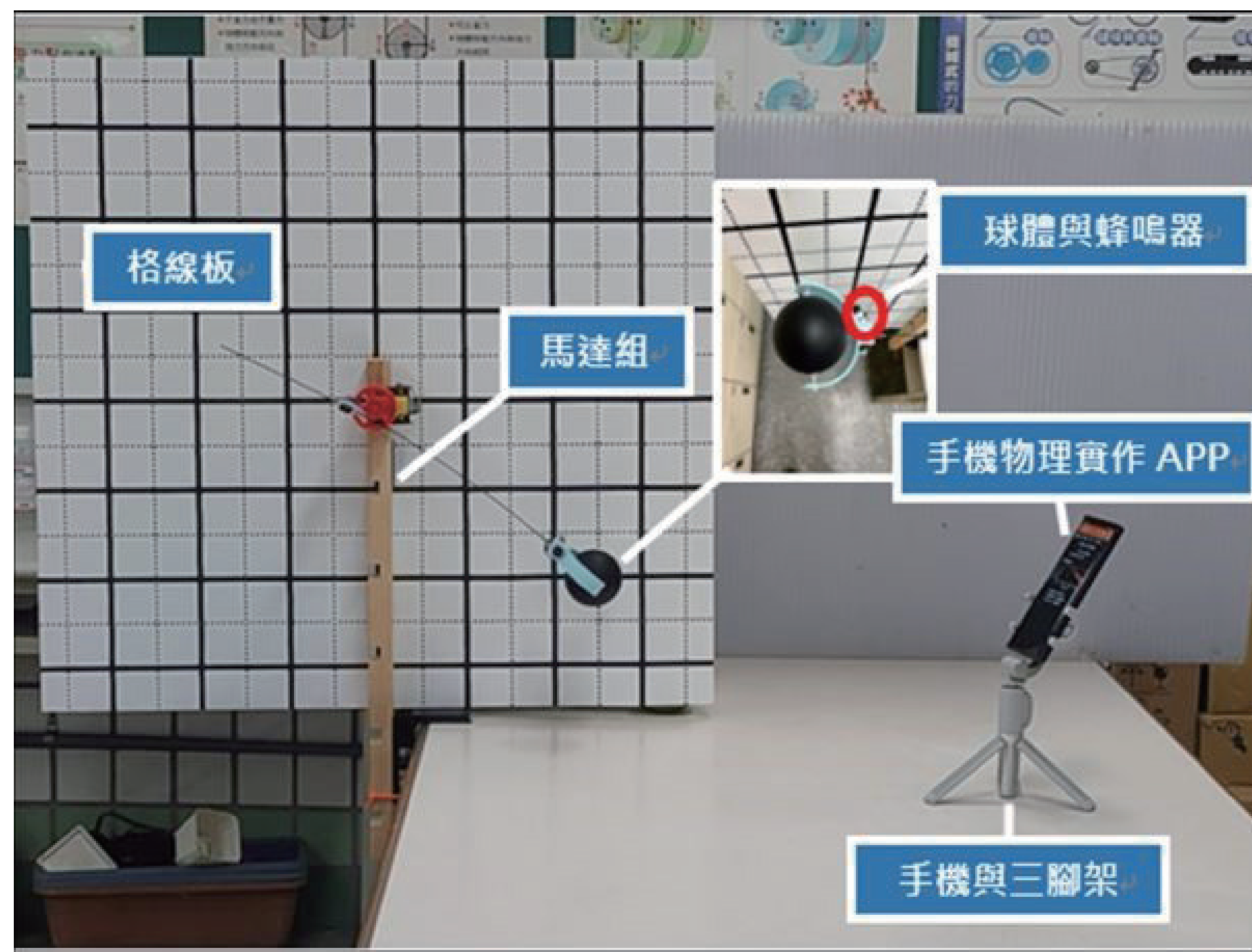
圖一 研究設備及器材

參、研究過程或方法

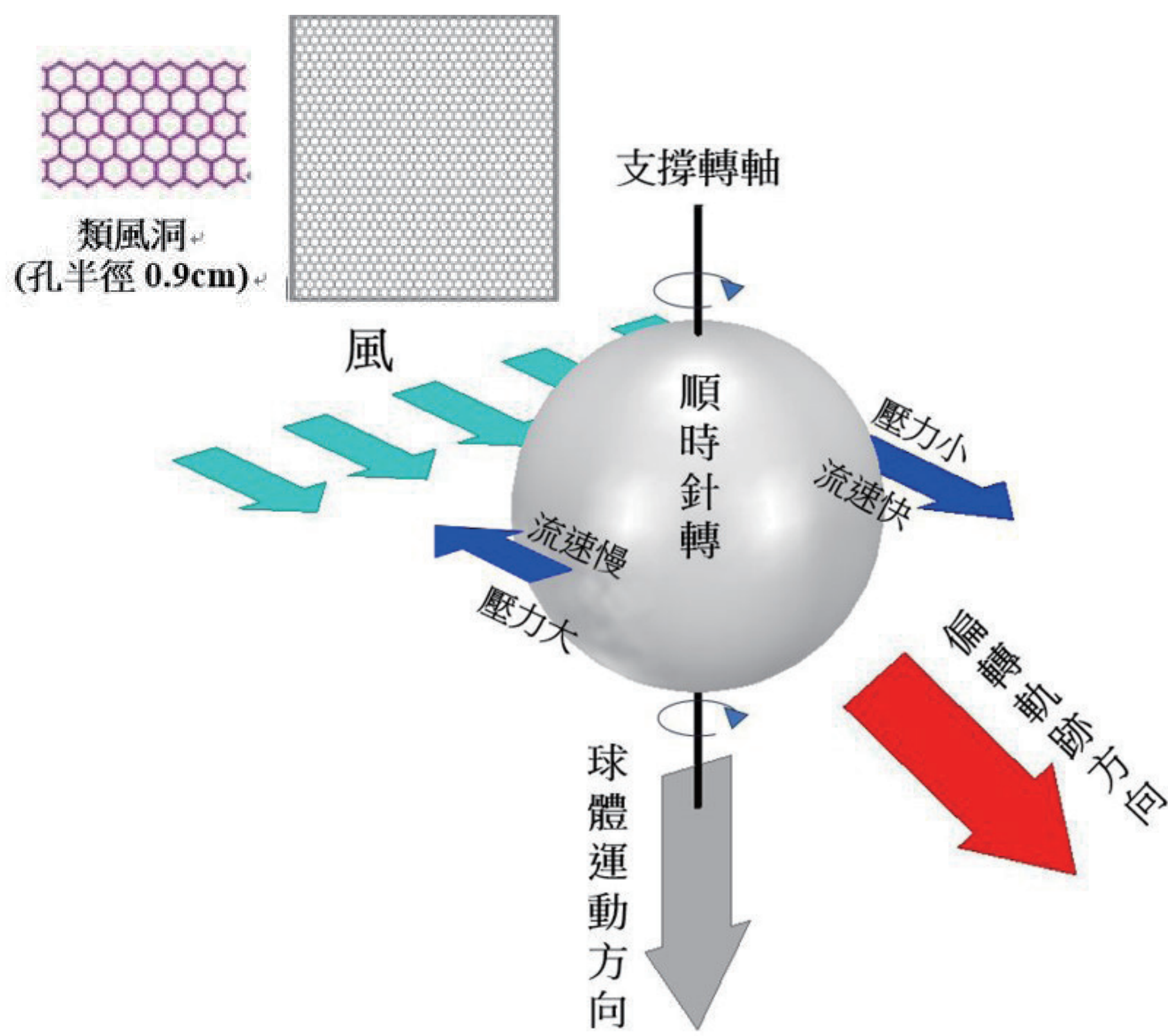
實驗裝置



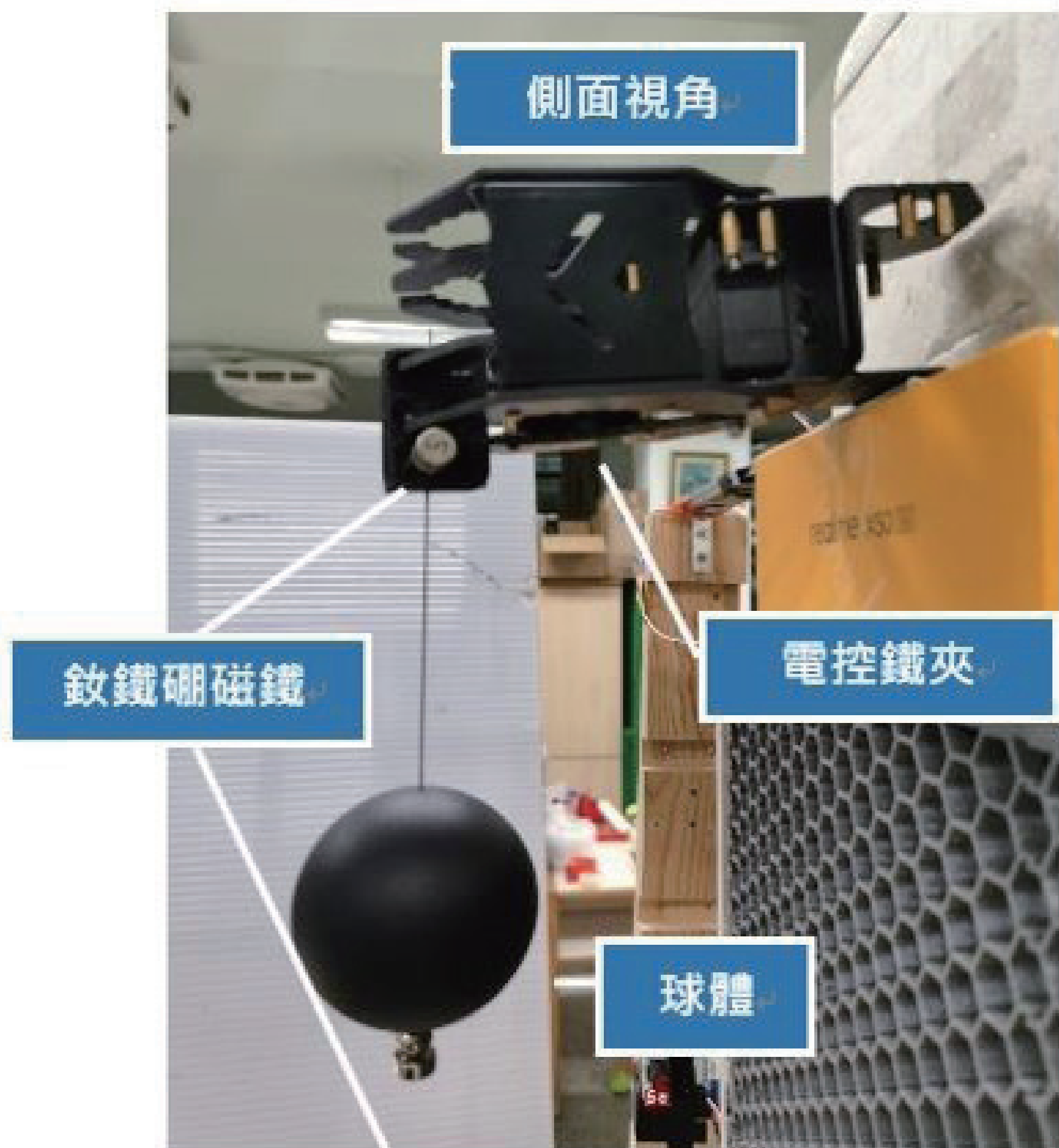
圖二 自製磁生電實驗器材與設備



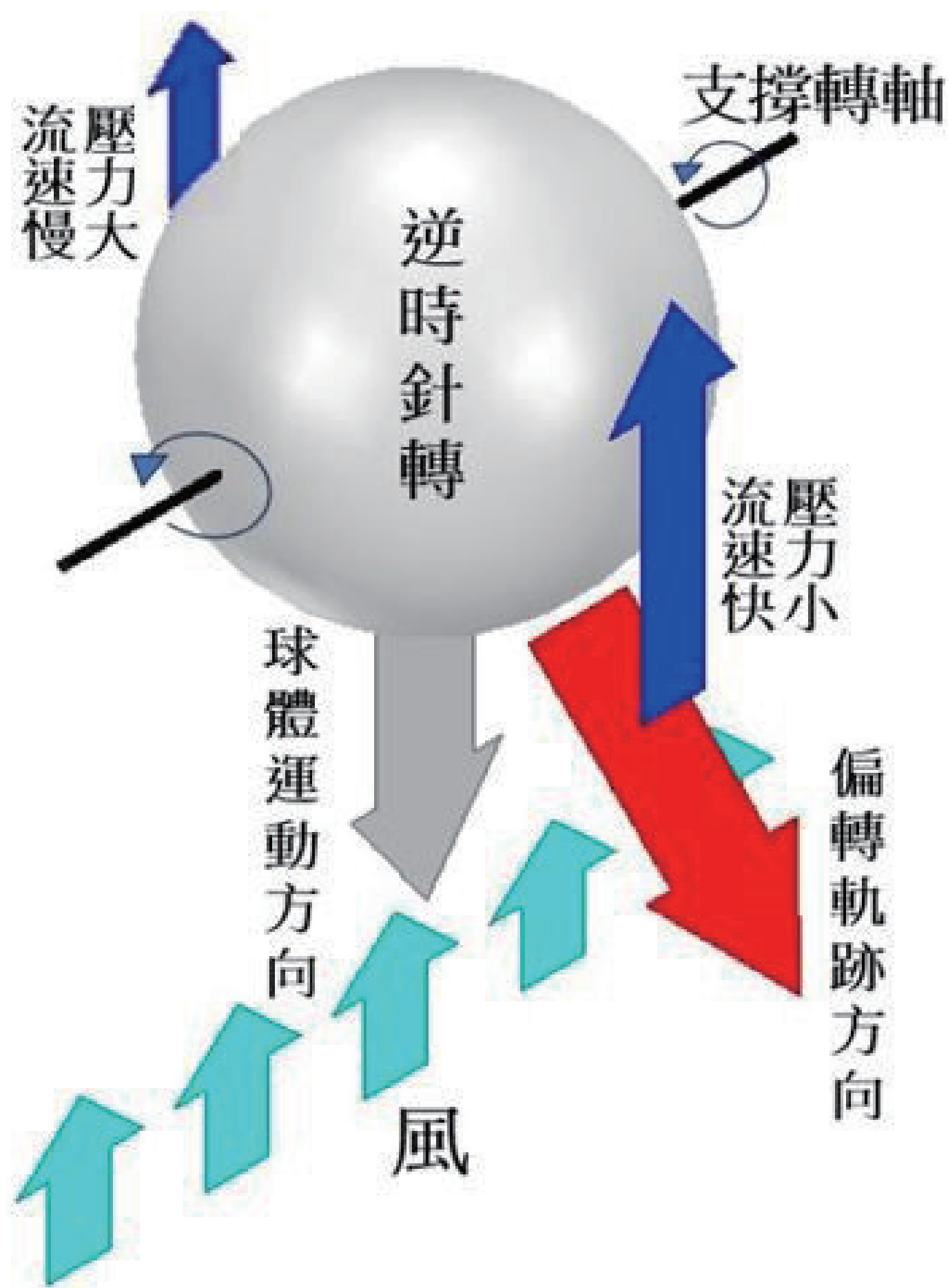
圖三 自製圓周運動都普勒聲音測試設備



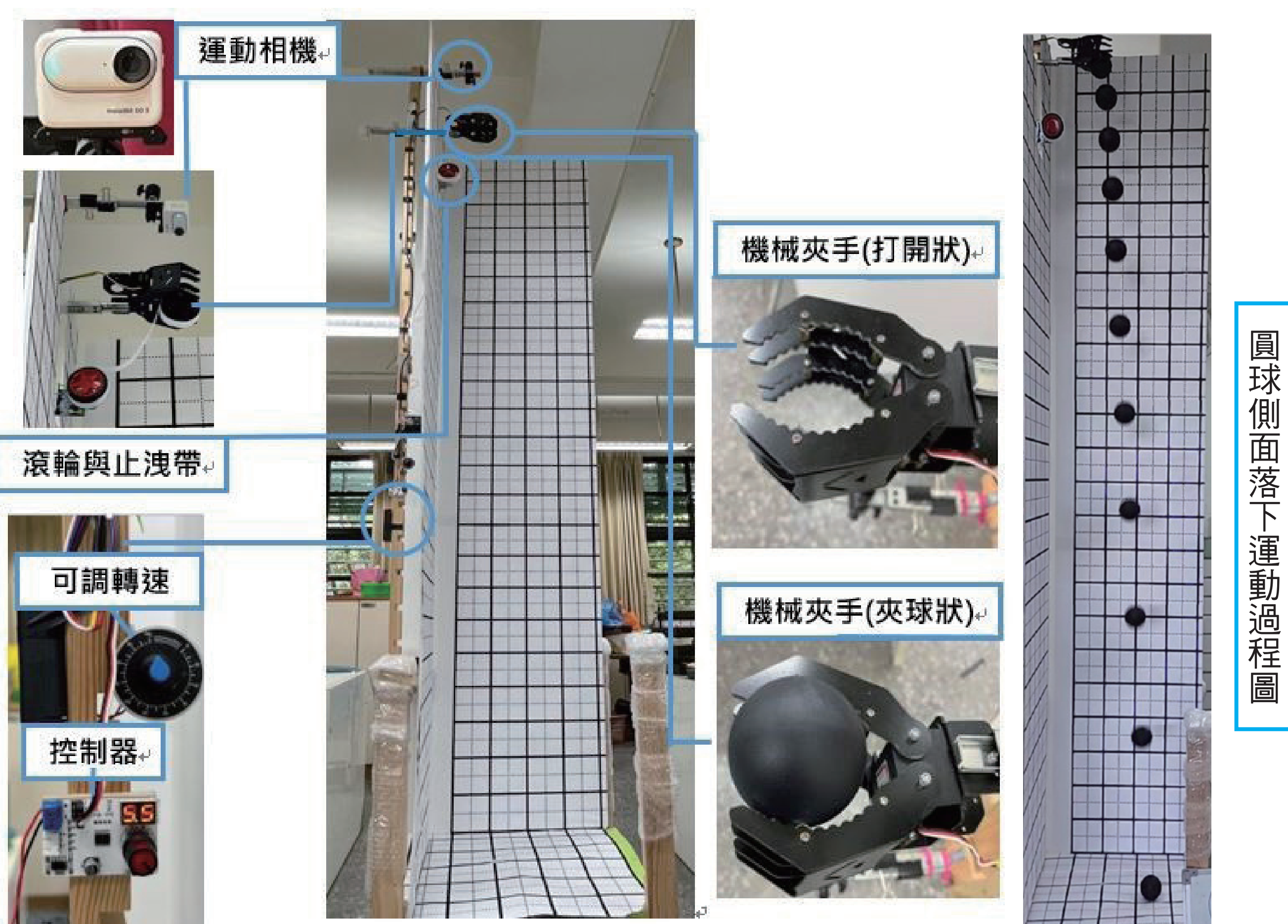
圖四 「類風洞」的水平氣流與旋轉球體偏移關係示意圖



圖五 球體旋轉軌跡測試設備



圖六 旋轉球體自由落下其偏移關係示意圖



圖七 測量旋轉球體自由落下軌跡設備

肆、研究結果

實驗一：由 LED 亮的次數測得球的旋轉次數

步驟：

1. 圓球用漆包線纏繞 18 圈，線圈兩端焊接上 3V 電壓驅動 LED，再以金屬支撐桿穿過球體中心。
2. 調整接收線圈與供電線圈感應間距，使球體線圈與供電線圈平行時，有最大電磁通過進而點亮 LED，反之線圈非平行狀態時，無法產生感應電流。
3. 將馬達滾輪透過止洩帶纏繞 20 圈牽引球體轉動，馬達轉速調整為 300rpm 帶動球體。
4. 止洩帶牽引完成後，同時利用轉速表，手機錄影，錄製影像。
5. 運用 Tracker 軟體進行轉速表讀數與光學 LED 亮的次數分析出轉數紀錄。

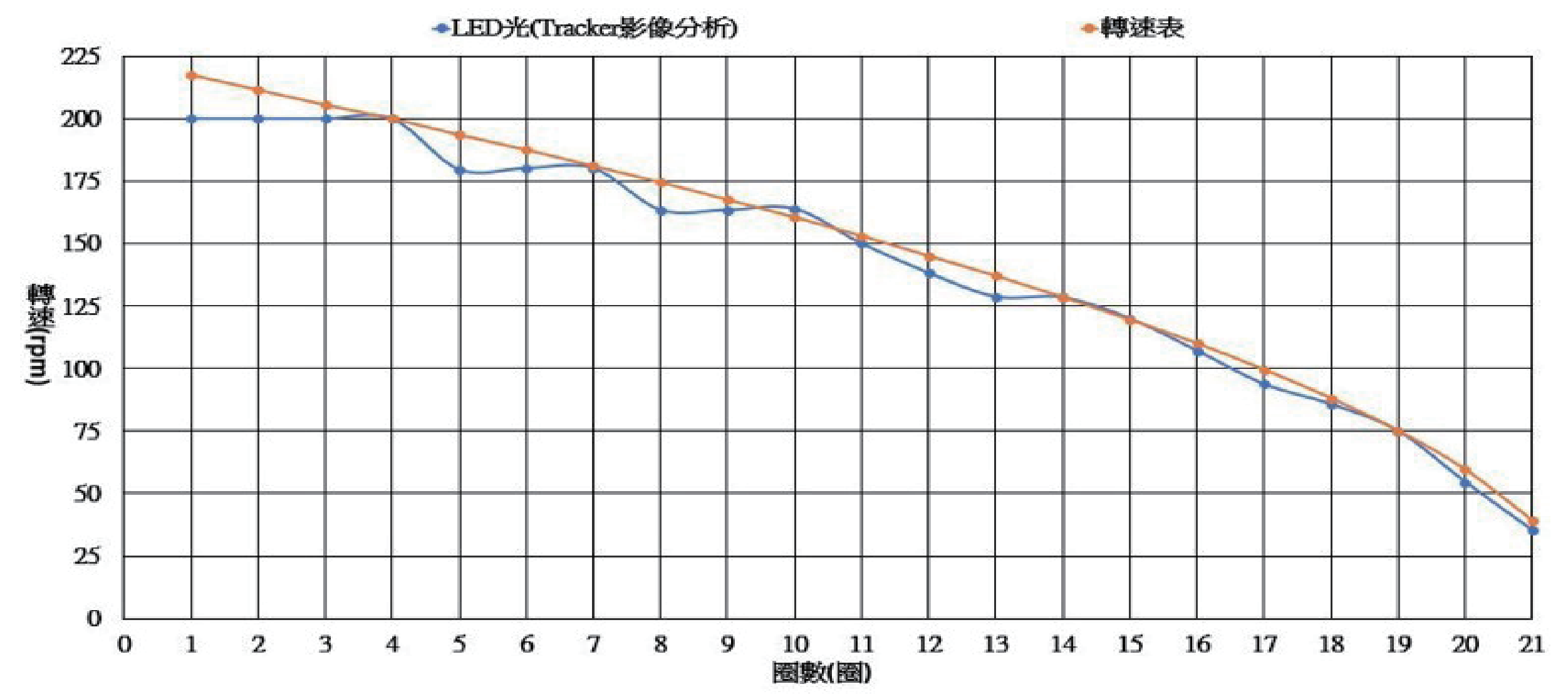


圖八 接收線圈感應到電流使 LED 發光



圖九 球體旋轉 LED 呈現一亮一滅

圖十 Tracker 分析轉速表與 LED 亮滅週期

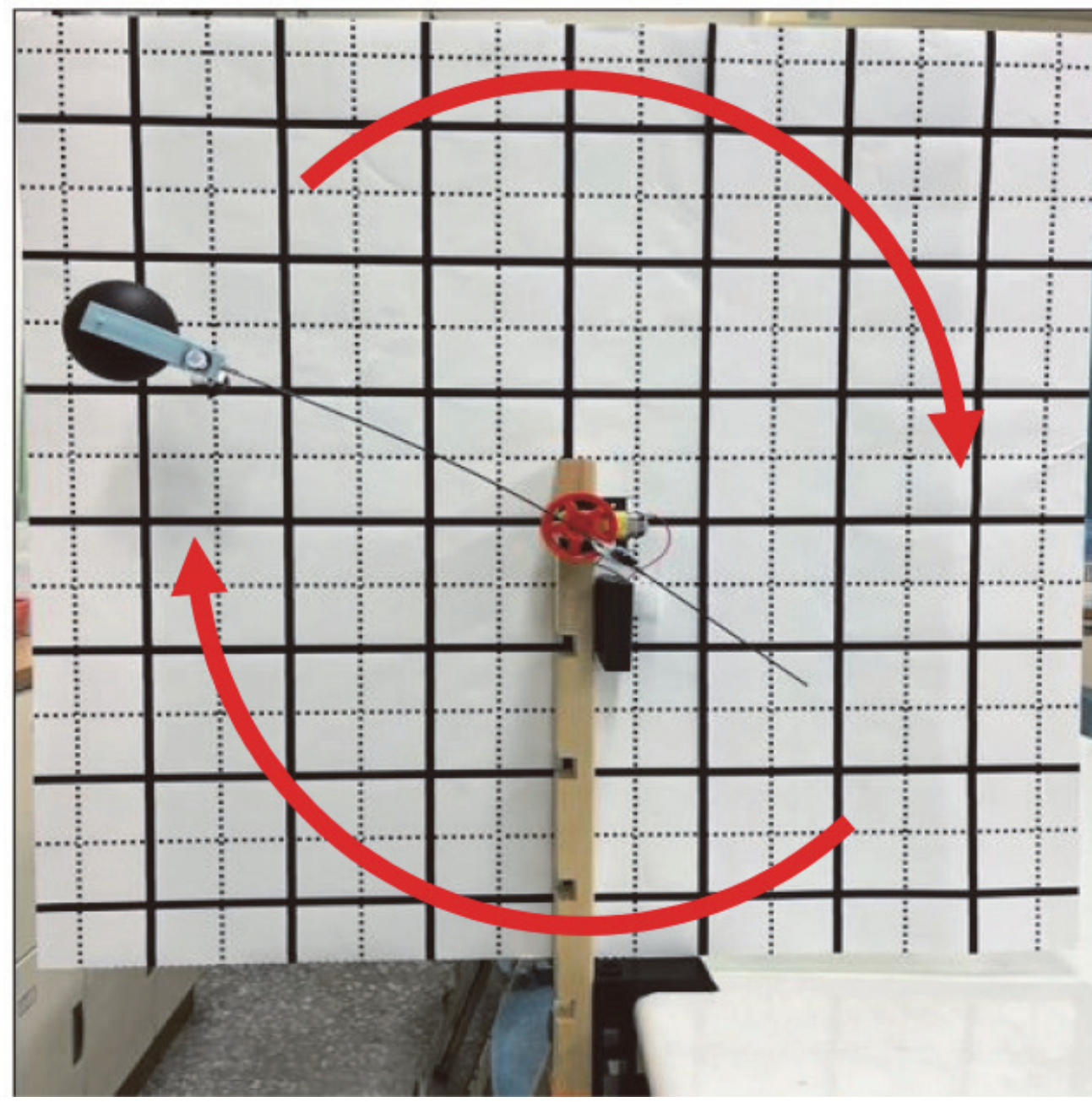


圖十一 轉速表與 LED 轉數對比圖

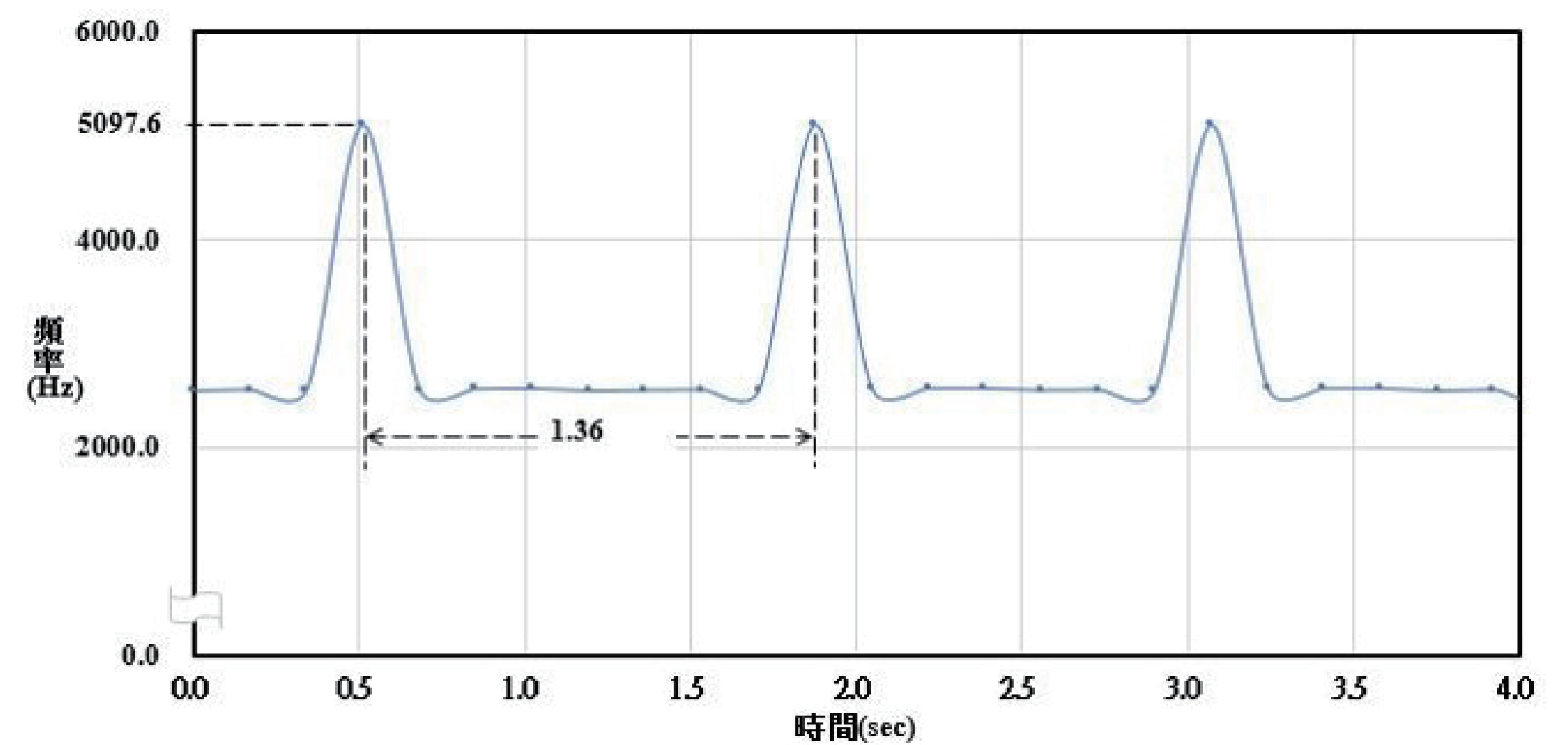
實驗二：由都普勒效應推算高頻出現的次數測得球的旋轉次數

步驟：

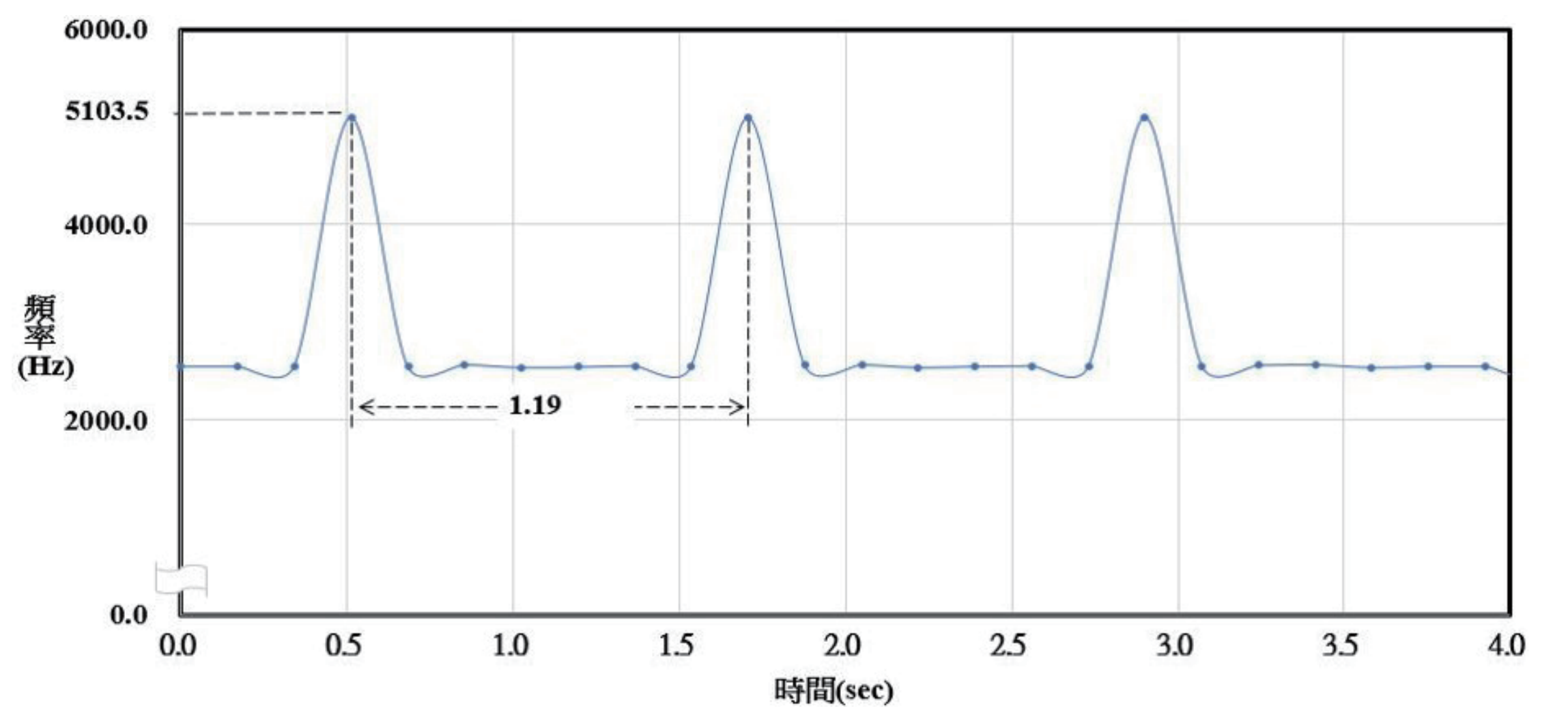
1. 將球放置於藍色夾具中並於夾具上加裝蜂鳴器 (2548 Hz)，開啟馬達，使球以順時鐘圓周運動轉動。
2. 面對裝置的右邊，距離蜂鳴器 50cm 位置設置手機，以測量附有蜂鳴器的球體旋轉次數。
3. 使用物理實作 APP 偵測聲音頻譜。
4. 面對裝置的正面，架設錄影設備並錄製球體進行圓周運動的影片。
5. 運用 Tracker 軟體分析其轉速及音頻變化。



圖十二 球體圓周運動示意圖



圖十三 圓球在圓周運動產生聲源頻率的變化圖



圖十四 橢球體在圓周運動產生聲源頻率的變化圖

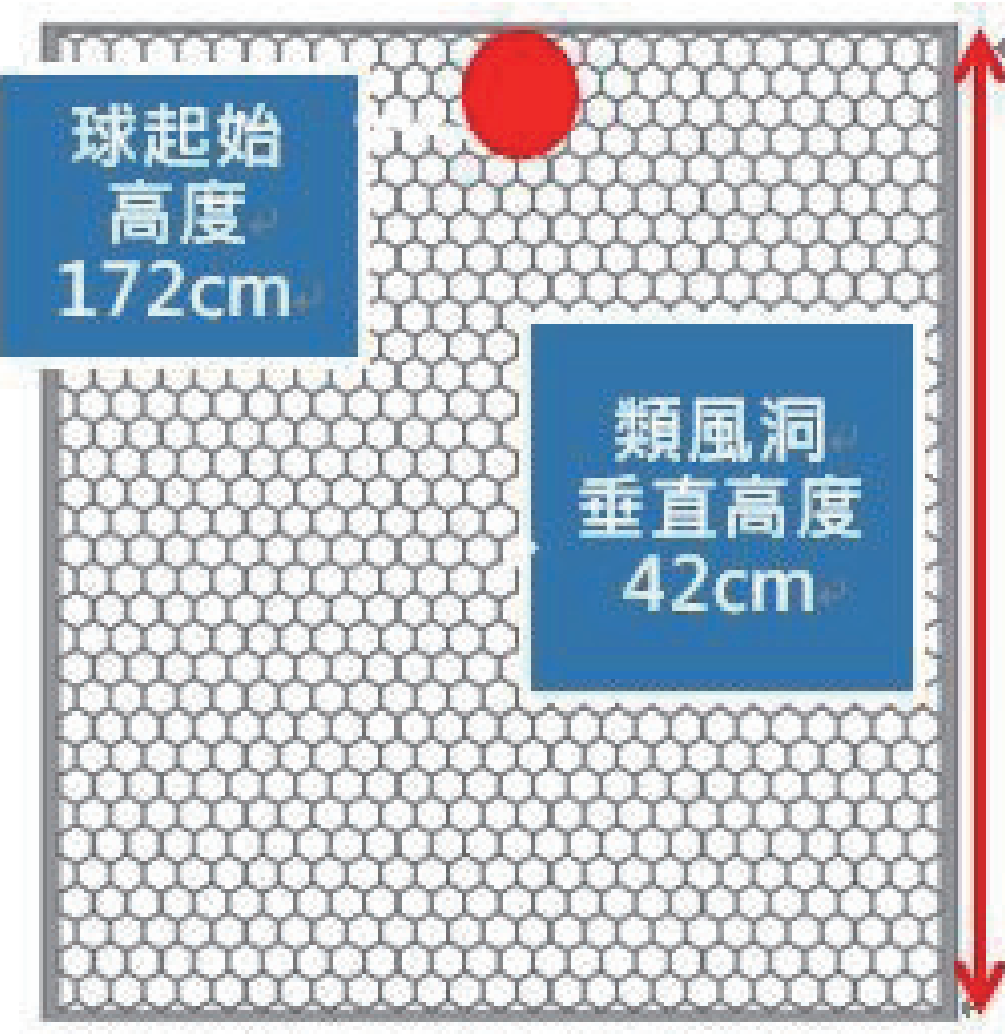
表一 不同形狀球體週期、最高頻率及球體轉速統計表

球體形狀	週期 (sec)	最高頻率 (Hz)	球體轉速 (rpm)
圓球	1.36	5097.66	44.12
橢球體	1.19	5103.52	50.42

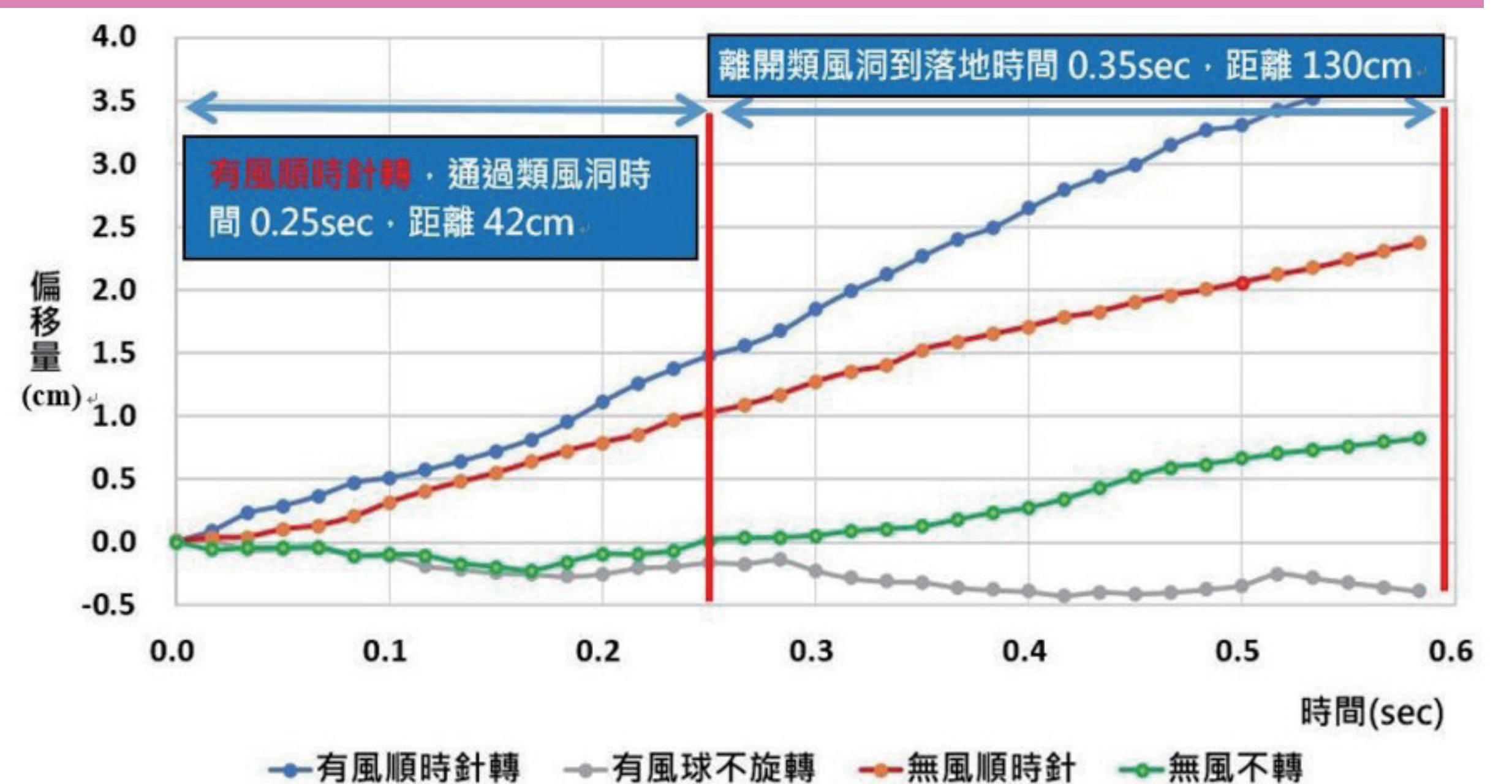
實驗三：在類風洞環境等高點測得轉動球體的偏移量

步驟：

1. 數片釹鐵硼磁鐵中間磁吸固定細鐵棒，並以電控的鐵夾夾住以固定實驗高度，再將球體事先穿孔，細鐵棒穿過球體，並在細鐵棒下端以球形釹鐵硼磁鐵吸附住，用以固定球體。
2. 在馬達軸心安裝 1 個塑膠材質且有摩擦力的輪胎，接通電池盒，製作成馬達。
3. 面對類風洞方向的球體正面、側面與上方，架設錄影設備，錄製球體落下過程的影片，並以 Tracker 軟體分析其運動路徑。



圖十五 類風洞示意圖



圖十六 有風順時針轉與不旋轉之平均偏移量

圖十六與柏努利定律公式推算出的理論值趨勢一致。

1. 有風的情況，球順時針（俯瞰）旋轉時，球體平均偏移量為 $1.67 \pm 1.12(\text{cm})$
2. 圓球落下速度為：無風順時針轉 > 有風不旋轉 > 無風不旋轉 > 有風順時針轉

實驗四：依柏努利定律探討上下轉動的圓球與橢球體自由落下時的偏移量

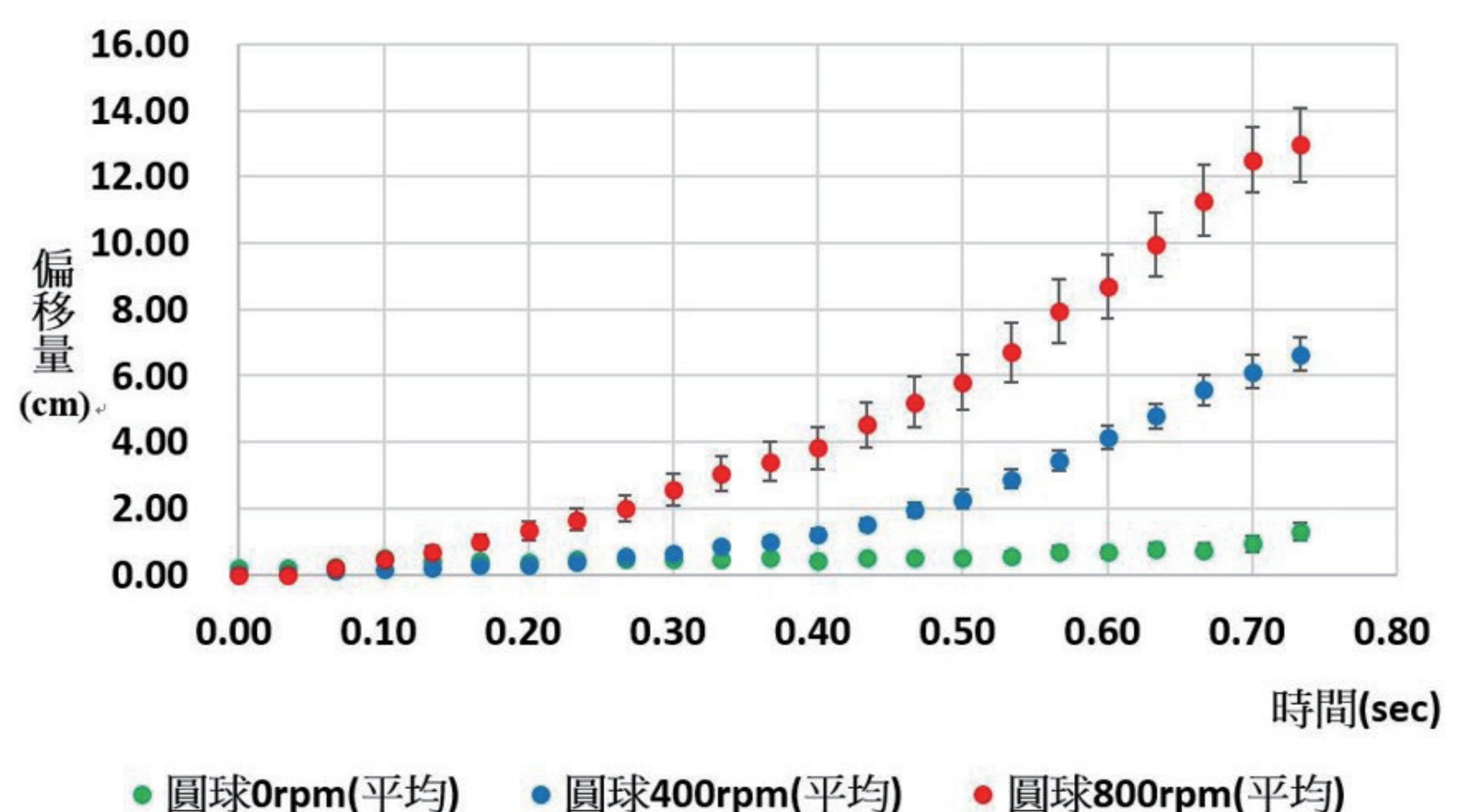
實驗四之一：比較圓球不同轉速之落體行進軌跡實驗

步驟：

1. 將兩段式支架向下凹折，將球放置在夾手中固定，支架高度 280cm。
2. 開啟慢速錄影後，啟動滾輪將球體上的止洩帶拖引使球體旋轉。
3. 當止洩帶脫離球體，按下夾具的啟動裝置，夾具鬆開，球即以旋轉狀態落下。
4. 即時錄影紀錄球體落下軌跡並重複十次實驗。
5. 將錄影畫面加上 Tracker 軟體分析軌跡。



圖十七 球體旋轉時的偏轉方向



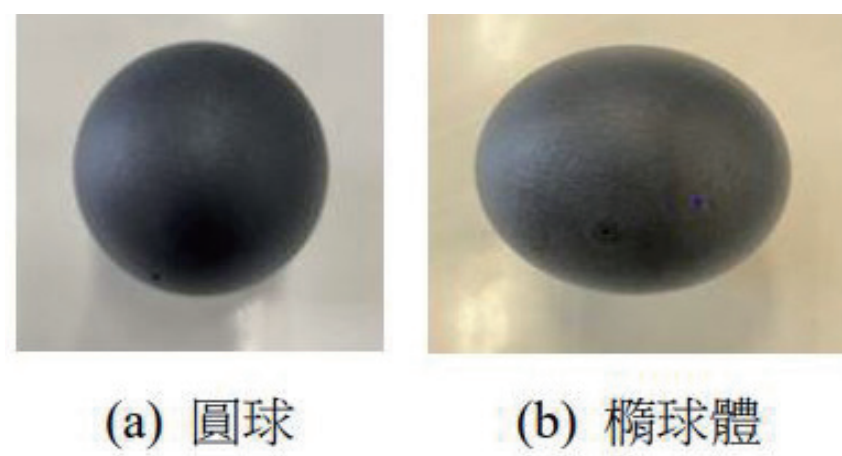
圖十八 圓球在 0rpm、400 rpm 及 800 rpm 平均偏移量

推估 0rpm 的偏移量為實驗誤差，誤差的原因包括空氣的擾動、空氣密度不均...等。

實驗四之二：比較不同形狀球體之落體行進軌跡實驗

步驟：

1. 將兩段式支架向下凹折，將球放置在夾手中固定，支架高度 280cm。
2. 開啟慢速錄影後，啟動滾輪將球體上的止洩帶拖引使球體旋轉。
3. 當止洩帶脫離球體，按下夾具的啟動裝置，夾具鬆開，球即以旋轉狀態落下。
4. 即時錄影紀錄球體落下軌跡並重複十次實驗。
5. 將錄影畫面加上 Tracker 軟體分析軌跡。



圖十九 3D 列印球體

表二 不同形狀球體週期、最高頻率及球體轉速統計表

形狀	偏移量 (cm)	0rpm	400rpm	800rpm
圓球		1.30±0.25	6.65±0.50	12.97±1.12
橢球體		3.10±0.46	10.32±0.49	16.62±1.14

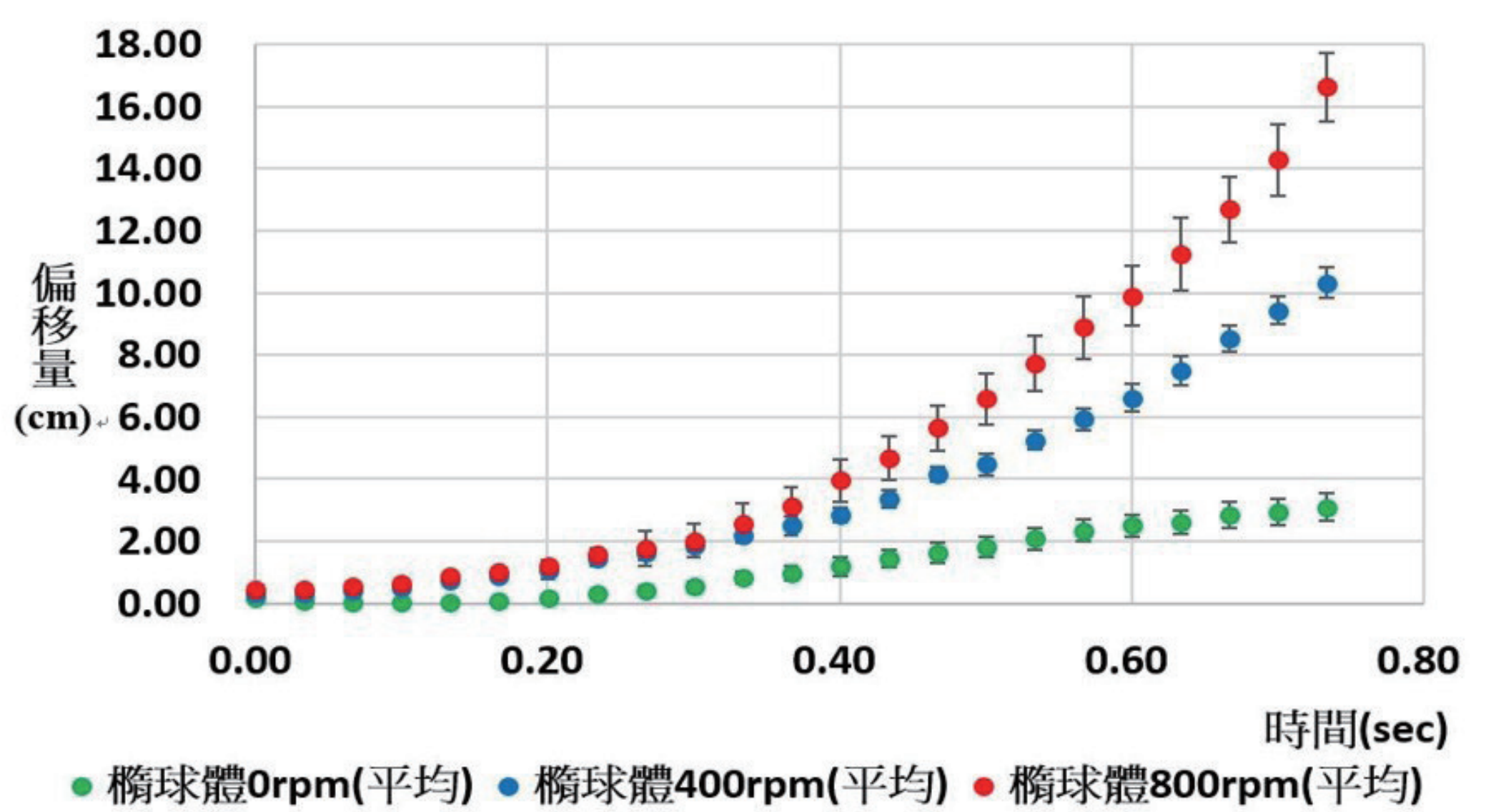
推估 0rpm 的偏移量為實驗誤差，誤差的原因包括空氣的擾動、空氣密度不均...等。

依據推力公式 $F=(\Delta P)A$ ，我們得到圓球與橢球體的推力如表三

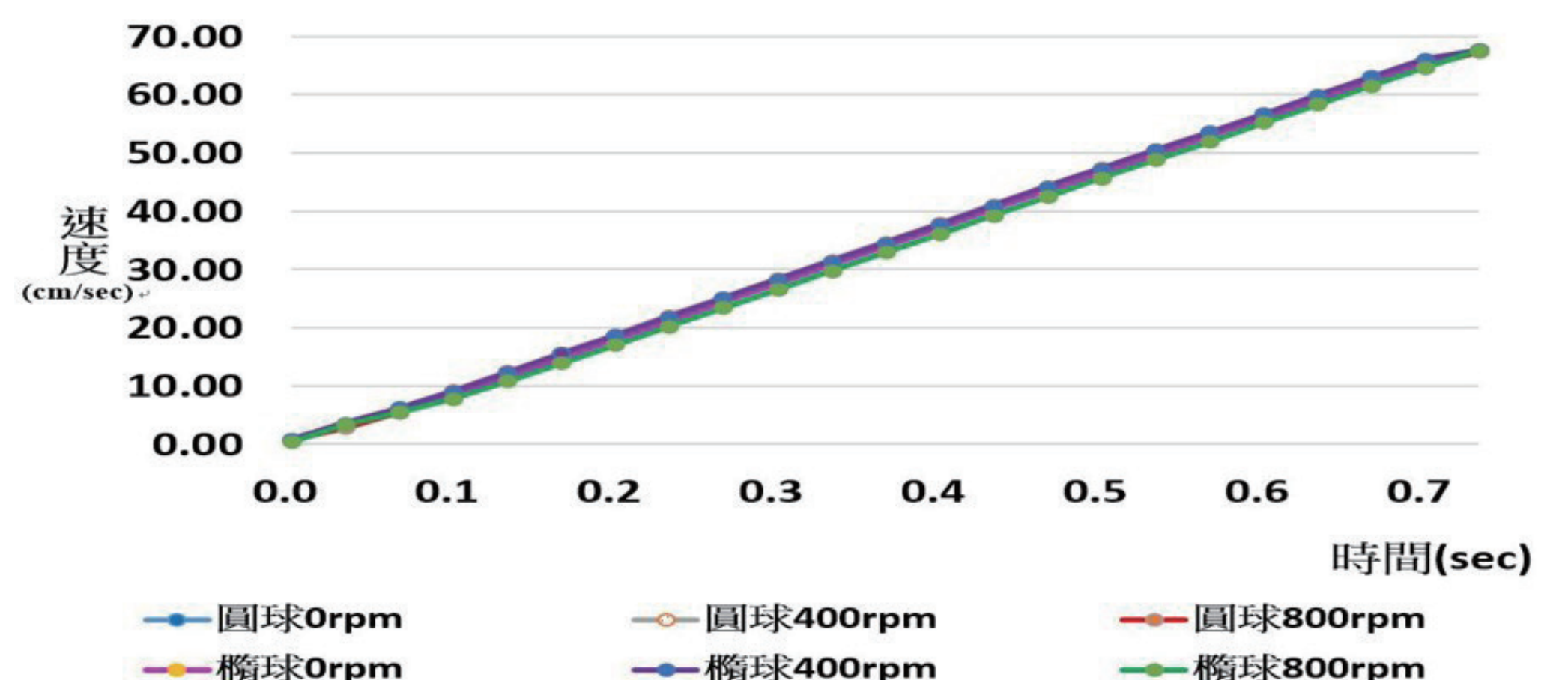
表三 圓球與橢球體的推力比較表

	ΔP (壓力差)	A (截面積 m^2)	F (推力)
圓球	45.24	0.0034	0.15
橢球體	50.00	0.0037	0.19

圖二十一顯示，圓球與橢球體落下速度差異不大，但依據表三，我們合理推測，橢球體的轉速較圓球快，其兩點的壓力差較圓球兩點的壓力差為大，所以產生的推力大於圓球 ($F_{橢球體} > F_{圓球}$)，偏移量也大於圓球。



圖二十 橢球體在 0rpm、400 rpm 及 800 rpm 平均偏移量



圖二十一 圓球與橢球體 0rpm、400 rpm 及 800 rpm 落下速度

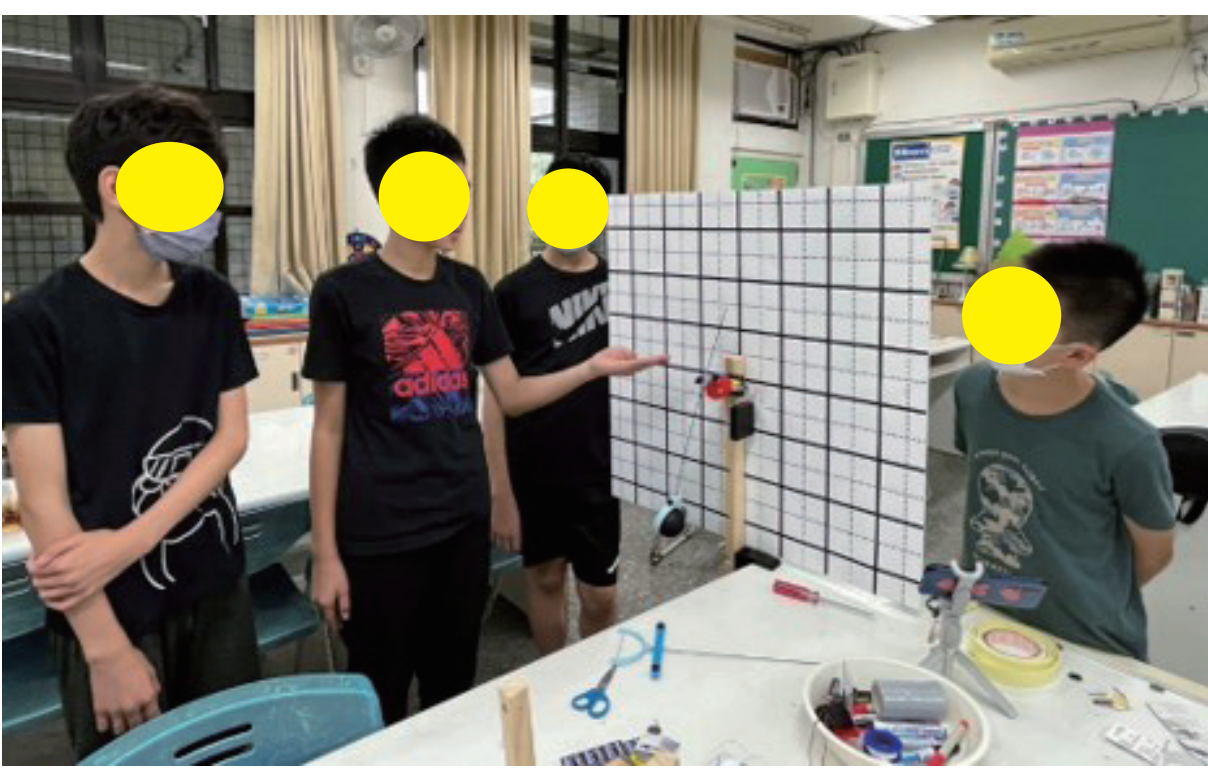
伍、討論

一、由 LED 亮的次數測得球的旋轉次數

- (一) 無線供電線圈由漆包線纏繞 6 圈，線圈半徑為 10cm。球體接收線圈由漆包線纏繞 18 圈，能產生足夠感應電流，可以實現最佳匹配的磁感應效果，同時使 3V 的 LED 發揮效果。
- (二) 因為磁生電的效應，球體線圈與供電線圈平行時，有最大電磁通過進而點亮 LED，球每轉 360 度 LED 會亮 1 次。歸納：LED 亮的次數即為球的旋轉次數。



二、由都普勒效應推算高頻出現的次數即球體的旋轉次數



- (一) 手機放在蜂鳴器發聲孔的同一側，並且要降低背景音，可以清晰接收聲波。
- (二) 接收聲波的工具與實驗裝置的距離越遠，效果越顯著。
- (三) 蜂鳴器高頻出現的次數即為球體之旋轉次數，但球體本身的轉動速度不能太快。

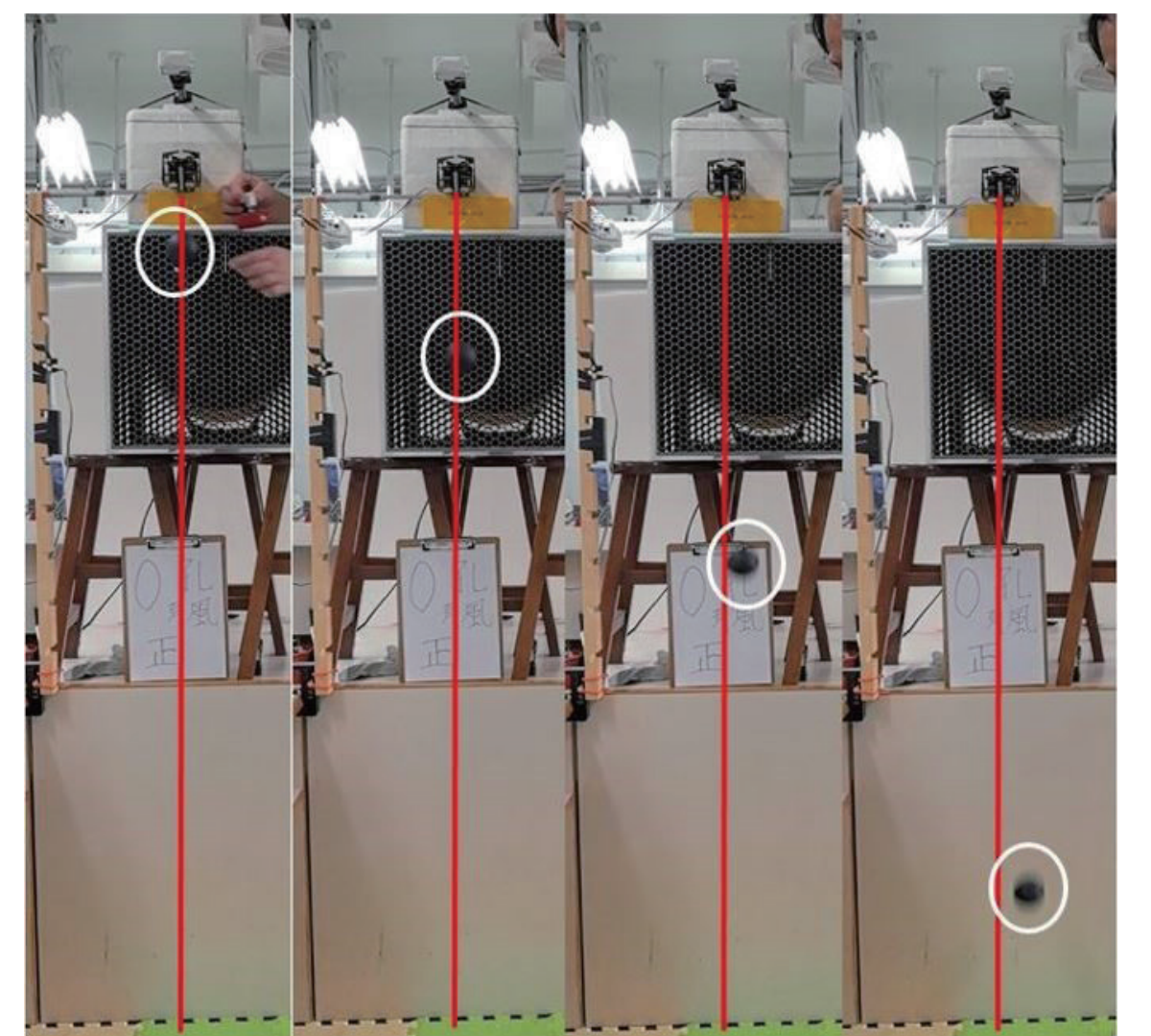
生活中，我們常聽到救護車的鳴笛聲，靠近時尖銳（高頻），離開時低沈（低頻），應用到圓周運動，由高頻出現的次數即為球的旋轉次數。

歸納：蜂鳴器高頻出現的次數即為球的旋轉次數。
實驗一、二測得球體的旋轉次數，可以推算出相對應點的切線速度差，因而產生壓力差，算出相對應點的推力，進一步提供實驗三、四，依運動公式求得偏移量的理論值。

三、在類風洞環境等高點測得轉動球體的偏移量

- (一) 球體起始高度為 172cm 左右，如果可以增加實驗起始的高度，再搭配全段類風洞，球體的偏移程度會更顯著。
- (二) 因為球體有重量，原本用了 2 顆釹鐵硼磁鐵夾住細鐵棒，讓磁力透過細鐵棒傳到末端，但這樣的磁力強度不夠，下端的球形磁鐵無法撐住球體的重力，我們又在磁鐵的兩側加磁鐵，以穩固球體。
- (三) 在固定球體的過程中，我們發現每次在把細鐵棒穿過球體的時候，因為，球是黑色又不透光，難度很大，經由加強磁力後，在細鐵棒穿進球體碰到另一端的內壁時，把球型磁鐵貼近球體，再小範圍的移動球，使得較大的磁力比較順利地穿過球體。

歸納：依柏努利定律，球體會朝流速快的一側產生偏移。按柏努利定律的公式，去推算推力，再依運動公式求得偏移量的理論值。

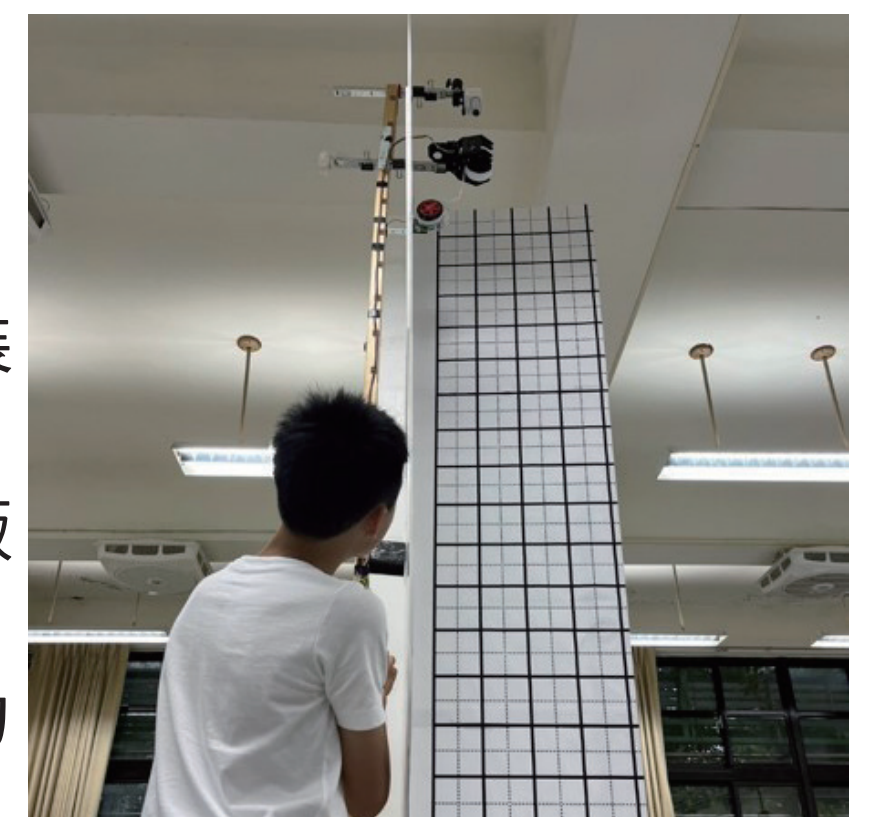


圖二十二 類風洞有風圓球順時針轉之連續偏移圖

四、依柏努利定律探討上下轉動的圓球與橢球體自由落下時的偏移量

- (一) 原先球體是設定不旋轉的，但為了要印證這個實驗與柏努利定律的相關程度，所以加裝了可調整轉速的馬達裝置，並用止洩帶拖引使球體旋轉。
- (二) 為了使 tracker 軟體更好判讀球體軌跡變化的數值，球體的位置在照片中也更清楚，我們增加印有白色方格板的座標板。
- (三) 從表一，我們合理的推測橢球體的轉速快，橢球體的兩點壓力差較圓球兩點的壓力差為大，所以橢球體的推力大於圓球，偏移量也大於圓球。待未來較高年級時，我們會再進一步進行研究。

歸納：依柏努利定律，球體會朝流速快的一側產生偏移。按柏努利定律的公式，去推算推力，再依運動公式求得偏移量的理論值。



圖二十三 印有白色方格板的座標板

陸、結論

實驗結果發現球體形狀、球體轉速跟空氣氣流產生不同作用力都會使得球體產生偏轉，皆符合柏努利定律並進行解釋。利用了磁生電原理，測得附在球體上 LED 亮的次數即球體的旋轉次數。附在球體上的蜂鳴器，可以利用都普勒效應，出現高頻次數即球體的旋轉次數。

- 一、由 LED 亮的次數測得球的旋轉次數，利用了磁生電原理，測得 LED 亮的次數即球體的旋轉次數。
 - 二、由都普勒效應推算高頻出現的次數測得球的旋轉次數，附在球體上的蜂鳴器，可以利用都普勒效應，出現高頻次數即球體的旋轉次數。
 - 三、在類風洞環境等高點測得轉動球體的偏移量
 - (一) 有風的情況，球順時針（俯瞰）旋轉時，球體平均偏移量為 $1.67 \pm 0.35(\text{cm})$ 。
 - (二) 因球體順時針（俯瞰）旋轉，使得球體兩側的相對應點，其流速與出風方向分別相同和相反，流速快（慢），壓力小（大），就會因有壓力差，且產生往壓力小一側的推力，這些現象與柏努利定律吻合，並依運動公式求得偏移量的理論值。
 - 四、依柏努利定律探討上下轉動的圓球與橢球體自由落下時的偏移量
 - (一) 圓球與橢球體均為，轉速 800rpm 偏移量大於轉速 400rpm 偏移量大於 0rpm 偏移量。球體以逆時針方向（以觀察者角度）旋轉，球的右側與氣流同向，左側則向反，球自由落下時，向流速快的一側偏移。（推估 0rpm 的偏移量為實驗誤差）。
 - (二) 圓球與橢球體在側視角度，橢球體的偏移量大於圓球的偏移量。
 - (三) 流速快（慢），壓力小（大），就會有壓力差，產生推力，這些現象與柏努利定律吻合，依運動公式求得偏移量的理論值。
- 未來展望：有些原理與理論，待未來國中及更高的學程，能再進一步研究，期待能更精進的探索。

柒、參考資料及其他

- 李中傑 (2014)。棒球物理大聯盟：王建民也要會的物理學。五南。
- 莊耀璋、賴品翰、林芝羽、劉清綸、徐仲毅、周暉、許森裕、王懋勳 (2011, 10)。「威」力？「浮」力？「球」球，你告訴我！中華民國第 51 屆中小學科學展覽會作品說明書。
- 溝田武人，淺井武，山田幸雄，葛西順一，和田純夫 (2015, 8 月) 彎曲！下墜！搖搖晃晃！魔球的科學 牛頓科學雜誌
- https://m.facebook.com/video.php/?video_id=3346682928925672
- Magnus Effect 維基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/Magnus_effect
- Lea, S. M. & Burke, J. R. (1997). Physics: the nature of things. West Publishing Company, MN, U. S. A .
- Rossmann, J., & Rau, A. (2007). An experimental study of Wiffle ball aerodynamics. American Journal of Physics. 75(12).DOI: 10.1111/1.2787013

備註：本報告內之照片及圖表均由研究者自行拍攝、製作