

新竹市第四十三屆中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：物理

組 別：國小組

作品名稱：見風轉「陀」，擇「扇」而行

關 鍵 詞：空中陀螺、空氣動力學、3D 列印

編 號：

目 錄

摘要.....	1
壹、前言.....	1
一、研究動機.....	1
二、研究目的.....	2
三、文獻回顧.....	2
貳、研究設備及器材.....	2
一、KINGSSEL K-1818 3D 列印機.....	2
二、Beambox Pro 雷射切割機.....	3
三、其他使用材料與工具.....	3
參、研究過程或方法.....	4
一、研究問題.....	4
二、研究過程.....	4
三、手作空中陀螺開發與研究.....	5
四、3D 列印空中陀螺扇葉開發與研究.....	9
肆、研究結果.....	13
一、各式手作空中陀螺變因之結果統整.....	13
二、各式 3D 列印扇葉變因之結果統整.....	16
三、採用 3D 列印製作最佳空中陀螺.....	24
伍、討論.....	26
一、測量時的困難與未來研究部分.....	26
二、各類型應用與發展.....	27
陸、結論.....	29
柒、參考文獻資料.....	30

摘要

本研究欲探討各式變因對於紙杯手作空中陀螺的影響，在改變扇葉數量、形狀、開口方向等變因後，何種情況下能夠使陀螺的飛行時間最長。再進一步透過 3D 列印改良空中陀螺，藉以減少人為手作誤差，發現運用 3D 列印等設備來製作空中陀螺是可行的，3D 列印本身具備良好的發展性與修改彈性，但由於各式 3D 列印扇葉的重量具有差異，因此我們採用高度補償的方式將扇葉重量考慮進去。最終我們發現，手作空中陀螺的扇葉數量越多，其飛行時間會越長，且逆時針開口皆優於順時針開口，「扇形」扇葉皆優於「長方形」扇葉；大多 3D 列印空中陀螺扇葉數量越多，飛行效率較佳，此結果與手作空中陀螺相同。且相較手作空中陀螺，在考量重量下，3D 列印空中陀螺的飛行效率大多較好。

壹、前言

一、研究動機

當開始決定做科展的時候，大家一起討論思考要以什麼主題為題材，有組員不經意在 Youtube 看到一段胡子頻道的影片【迴旋幽浮！紙杯和牙籤居然能成為科學競賽的題目？原來這裡頭滿滿的細節啊！】(取自：https://www.youtube.com/watch?v=5_hnKabIB5E&ab_channel=%E8%83%A1%E5%AD%90Huзи)，內容是在講使用紙杯製作旋轉幽浮陀螺，而影片中也介紹到這個科學玩具是遠哲科學趣味競賽的競賽項目之一，大家看完後都覺得很有趣，就一起討論，也有去搜尋遠哲科學網站的競賽簡章，後來發現我們有太多不懂的問題與疑惑，因此開始嘗試自己製作陀螺，看是否也能像影片中的陀螺一樣轉得這麼久，後來發現這其實不是一件簡單的事，真的開始研究的時候才發現小小的陀螺中竟富含著如此豐富的科學原理；再加上每個人的手作陀螺扇葉、重量等都有差距，因此在老師建議下，我們開始嘗試使用 3D 列印來提升製作陀螺的準確度，才發現原來科技的力量能提供我們這麼多的幫助。

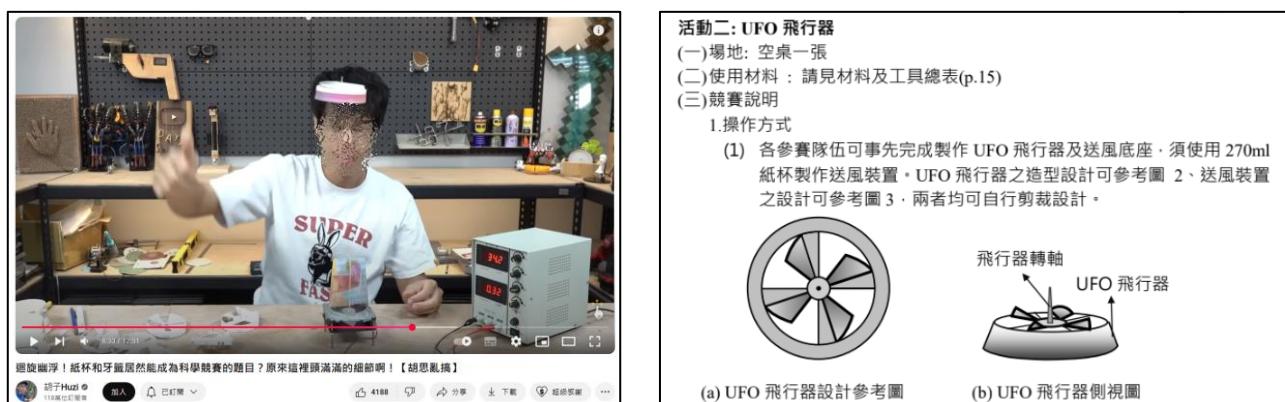


圖 1-1-1 YouTuber 胡子影片與遠哲科學競賽規則部分截圖(自行截圖)

二、研究目的

本研究的主要研究目的如下：

- (一) 以紙杯手作空中陀螺，探討其扇葉改變對陀螺飛行時間之影響。
- (二) 運用 3D 列印機印製扇葉，並探討最佳飛行之扇葉結構。
- (三) 以 3D 列印製作最佳空中陀螺，並統整分析影響空中陀螺飛行時間之各式變因。

三、文獻回顧

在研究製作前，我們針對扇葉或陀螺相關之歷年科展研究進行回顧：

表 1-3-1 相關研究文獻統整表

全國科展屆數	文獻名稱	全國科展屆數	文獻名稱
第 44 屆	挑戰爺爺的戰鬥陀螺	第 44 屆	Ready set go！轉，轉，轉
第 58 屆	風兒圓舞曲-風力環轉動之研究	第 63 屆	轉吧~風動陀螺

(一)葉片軸距相關(取自：挑戰爺爺的戰鬥陀螺 / Ready set go！轉，轉，轉)

1. 陀螺的本體重心越低時，在可以施力使其轉動下的旋轉時間最為持久，且穩定性最高，因此本研究的扇葉位置應偏牙籤下方，較能使空中陀螺穩定性提升。

(二)葉片型態相關(取自：挑戰爺爺的戰鬥陀螺 / 轉吧~風動陀螺 / 風兒圓舞曲-風力環轉動之研究)

1. 陀螺的整體質量需平均，否則在轉動時容易左右傾倒而影響旋轉時間。
2. 葉片轉動的時間會受到面積大小、形狀以及施力大小的影響，因此在進行葉片不同形狀的實驗中，每個葉片的面積、重量須盡量控制相同。
3. 葉片的長度、寬度與形狀對陀螺的穩定度及轉速有明顯的影響，扇葉長度越長、寬度越窄時，轉速越慢，半圓形扇葉的轉速最快且穩定性高。
4. 紙面翻摺的數量越多，旋轉速度越快，且紙面翻摺線與圓心的角度以 40° 最佳，為逆時針旋轉；夾角越接近 90° ，轉速越慢甚至無法轉動，盤面以圓形旋轉速度最佳。

貳、研究設備及器材

一、KINGSSEL K-1818 3D 列印機

耗材以 PLA 為主，其噴頭溫度介於 100°C 至 245°C 之間，列印的容積為 $210 \times 180 \times 180 \text{ mm}$ ，列印最小解析度為 0.05mm ，印製的品質相當良好，應用性相當廣泛，因此作為本研究的風扇印製使用，藉著新興科技的使用經驗，提升我們對於科技的掌握，也了解到 3D 列印對於科學研究的幫助。

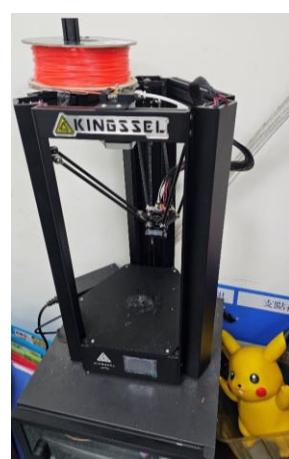


圖 2-1-1 KINGSSEL K-1818 3D 列印機(自行拍攝)

二、Beambox Pro 雷射切割機(圖 2-2-1 取自官網)

雷切機工作範圍長度為 60*37.5*8cm，可支援多項繪圖檔案，軟體操作相當簡易，且可以有效解決 3D 列印印製大範圍零件需要耗費過多時間的問題，



圖 2-2-1 Beambox Pro 雷射切割機

與 3D 列印機搭配使用，可以有效提升本研究製作的品質，作為創作的工具相當富有彈性。

三、其他使用材料與工具(自行拍攝)

風速儀	夾式測微器	270ml 紙杯	牙籤
風速儀	夾式測微器	270ml 紙杯	牙籤
塑膠 PP 板	雷射切割木板	3D 列印材料(PLA)	水平儀
塑膠 PP 板	雷射切割木板	3D 列印材料(PLA)	水平儀
雙面膠	美工刀	記號筆	碼表
雙面膠	美工刀	記號筆	碼表
斜口鉗	漆包線	電子秤	捲尺
斜口鉗	漆包線	電子秤	捲尺
iPad10	小白板+白板筆	平板支架	束線帶
iPad10	小白板+白板筆	平板支架	束線帶
循環扇	煙霧器	鐵架	紙碗
循環扇	煙霧器	鐵架	紙碗

參、研究過程或方法

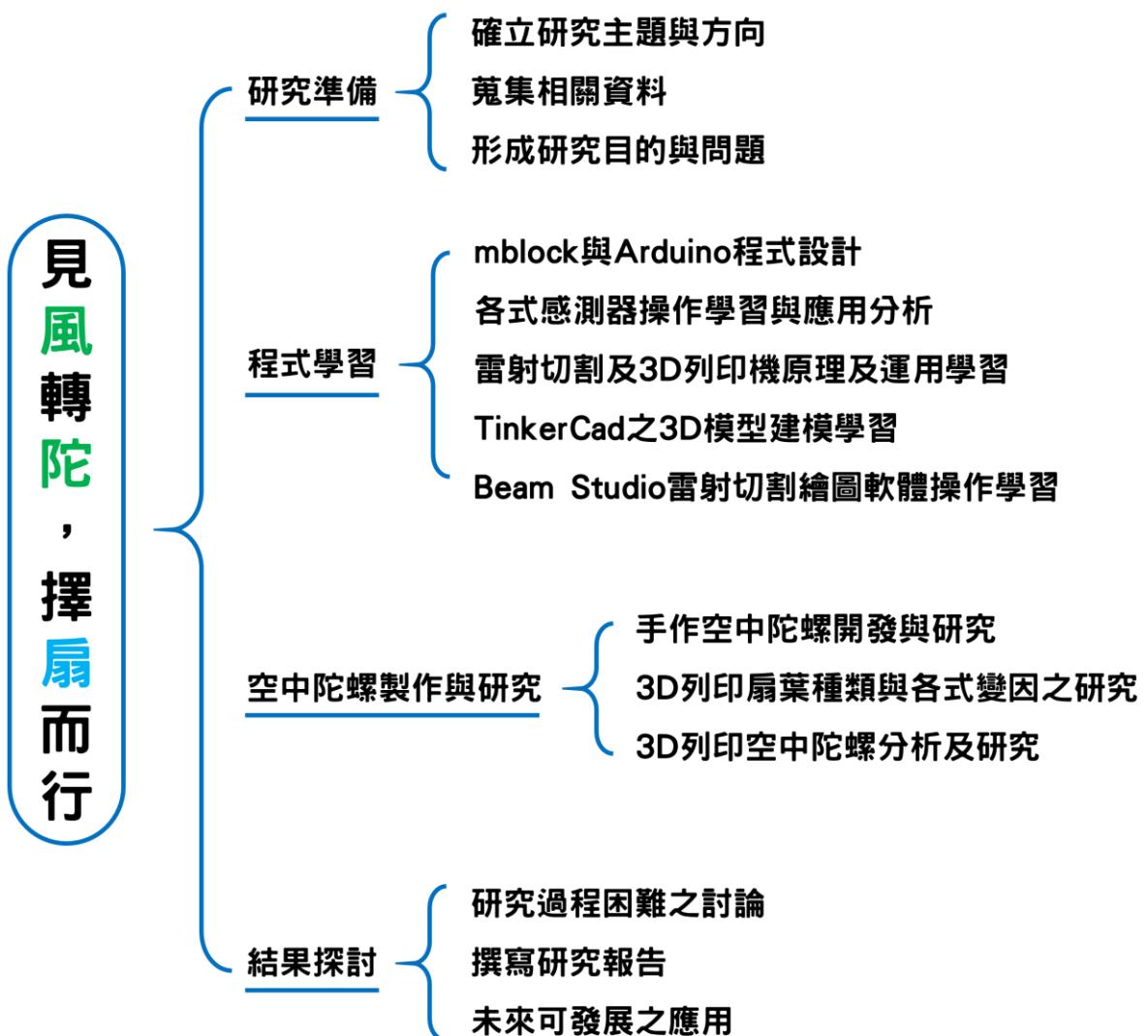
一、研究問題

依據本研究動機及研究目的，提出下列研究問題：

- (一) 是否能透過紙杯手作空中陀螺，找尋最佳飛行時間之空中陀螺？
- (二) 是否能運用 3D 列印機印製扇葉，並找尋最佳飛行之扇葉結構？
- (三) 是否能以 3D 列印製作最佳空中陀螺，探討影響其飛行時間之各式變因？

二、研究過程(圖 3-2-1)

研究過程分為四個階段進行，依序為「研究準備」、「程式學習」、「空中陀螺製作與研究」、「結果探討」。



三、手作空中陀螺開發與研究

(一)空中陀螺製作流程

採用與遠哲科學趣味競賽相同的材料，以 270ml 的紙杯進行本體製作，因手作容易產生各種人為誤差，因此我們採用雷射切割機製作輔助工具，繪製對稱線條時可以更為準確(6 等分與 8 等分)，在製作對稱圖形時更能減少手作時所產生的誤差，其製作流程如圖 3-3-1。



圖 3-3-1 空中陀螺製作過程圖(自行拍攝)

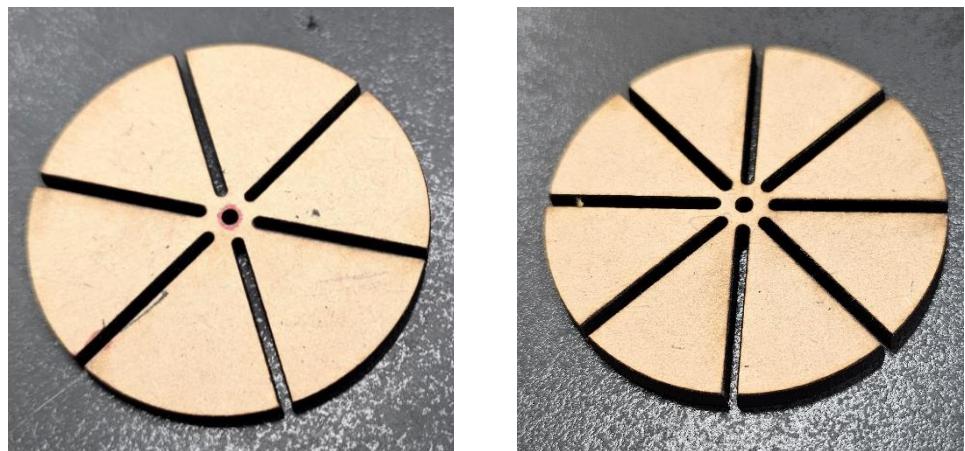


圖 3-3-2 空中陀螺製作雷切輔助工具實體圖(自行拍攝)

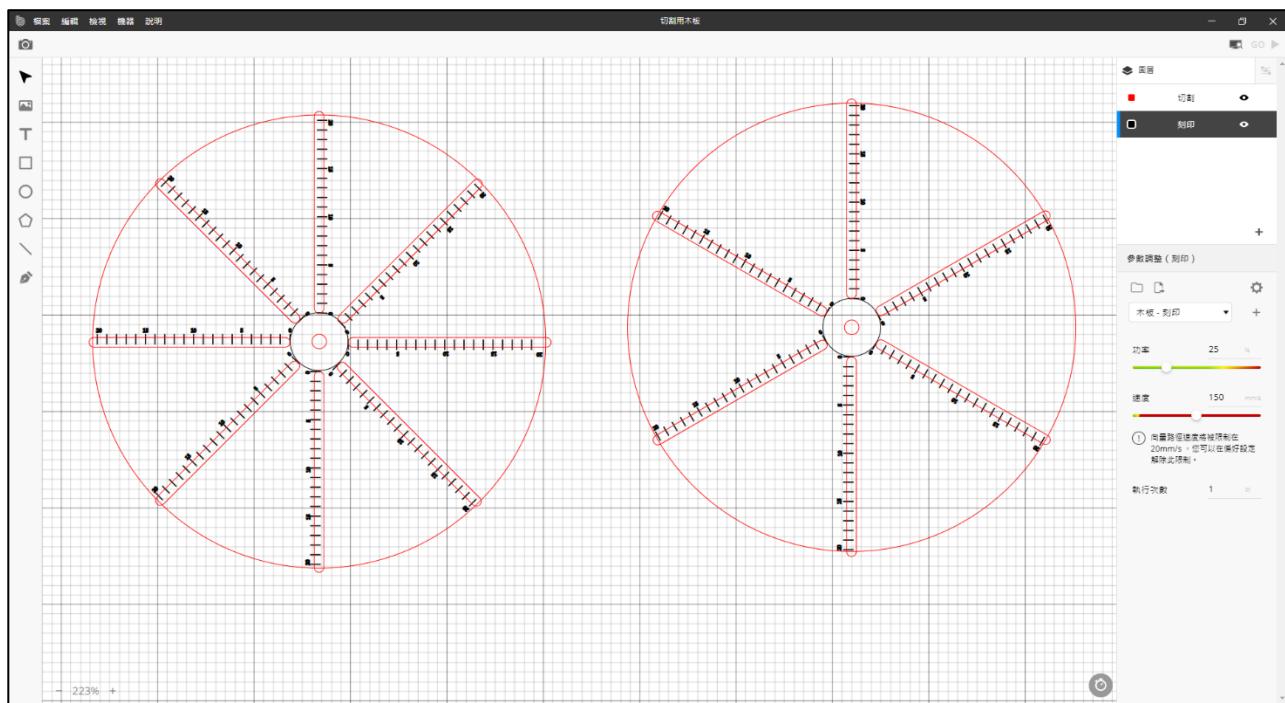


圖 3-3-3 空中陀螺製作雷切輔助工具圖檔(自行截圖)

(二)手作空中陀螺測試裝置及流程

由於風力大小與旋轉方向對於本研究會有很大的影響，因此在下列各階段的研究中，將風力相關等變因設為控制變因，以同一台循環扇作為研究設備使用，其風扇旋轉方向為順時針，風力大小共有三階段(強、次、弱)，其第一階段(弱風)的平均風速大小請參考表 3-3-1。

表 3-3-1 循環扇上方各式位置平均風速表

風速 高度 \ 位置	正中央	最內圈	第二圈	最外圈
0 公分	0.8 m/s	3.6 m/s	4.1 m/s	2.5 m/s
5 公分	2.4 m/s	3.1 m/s	4.6 m/s	2.4 m/s
10 公分	2.7 m/s	2.8 m/s	3.7 m/s	2.6 m/s
15 公分	2.9 m/s	3.1 m/s	3.4 m/s	2.2 m/s
20 公分	3.0 m/s	3.1 m/s	2.7 m/s	2.0 m/s
25 公分	2.7 m/s	3.0 m/s	2.5 m/s	1.8 m/s
30 公分	2.6 m/s	3.1 m/s	2.2 m/s	1.8 m/s
35 公分	3.1 m/s	3.1 m/s	1.7 m/s	1.6 m/s
40 公分	3.0 m/s	3.1 m/s	1.6 m/s	1.5 m/s

1. 測試裝置設置過程

將循環扇平放於桌面上，並將扇面平行於桌面，利用水平儀確認扇面保持水平，本研究以扇面為基準面，測量空中陀螺從空中釋放瞬間至掉落低於基準面的飛行時間，但由於扇面面積不大，不易觀察空中陀螺是否已低於基準面，因此我們利用塑膠 PP 板將扇面擴大，如此更容易測量空中陀螺的飛行時間，以提升精準度。



圖 3-3-4 空中陀螺測試裝置架設圖(自行拍攝)

2. 測量流程與釋放技巧

由於手作空中陀螺的測量方式為徒手於扇面上方旋轉空中陀螺，因缺少左右的固定裝置，因此風力過強會使空中陀螺容易被吹走而不易騰空旋轉，因此本研究手作空中陀螺的測量統一採用第一階段的風力大小(弱風)進行數據蒐集，且透過風速儀的測量發現到循環扇的風力大小多會隨著離扇面的距離增加而逐漸減弱，但由於貼近扇面不易釋放空中陀螺，因此我們將釋放高度設定在循環扇第二圈的上方 10 公分處，一方面此處的風速充足，另一方面空中陀螺具有足夠的掉落高度與釋放空間，以增加測量的準確性。

為避免不同學生釋放陀螺時所產生的誤差，因此在經過多次的嘗試與測量後，最終陀螺的釋放皆由同一位組員操作，飛行時間的測量也固定由另一位組員操作，每一顆空中陀螺一共進行十次的釋放，釋放前皆會對循環扇進行一次水平校正，以確保其風向的統一及穩定性，並在測量飛行時間前預先測量空中陀螺包含牙籤之總重量(將同一牙籤下方約 1/3 處插入中間孔洞中進行測量，圖 3-3-5)，若實驗數據過大或過小時，則視為異常值予以剔除。



圖 3-3-5 手作空中陀螺裝置圖(自行拍攝)

經過多次測量的經驗，若要穩定釋放陀螺必須注意幾個重點：

1. 手臂與手腕不要提高，避免施力不慎與風扇扇面的高度產生誤差。
2. 扇面保持水平，每次測量前都使用水平儀進行校正，避免每次的風向不同。
3. 釋放位置固定，可利用風扇格子確認，並把釋放高度固定為 10 公分，可用尺垂直於扇面，做為陀螺釋放位置的記號。
4. 旋轉力道盡可能相同，不要刻意加大或減小，以避免轉速過多或過低影響陀螺在空中飛行的時間。
5. 釋放時，手盡量不要有往上拉的力道，以避免增加上升力而產生實驗誤差。
6. 手臂和陀螺都要與扇面平行，竹籤則要與扇面保持垂直。
7. 當釋放組員準備釋放空中陀螺時，倒數「32 放」(釋放陀螺同學負責倒數)，負責計時同學在聽到「放」時，則開始計時秒數，當紙陀螺的竹籤尖端掉落至低於基準面時即結束計時，記錄測得的時間即為飛行時間。



圖 3-3-6 空中陀螺測試過程圖(自行拍攝)

四、3D 列印空中陀螺扇葉開發與研究

由於手作的空中陀螺容易產生手作誤差，且手作的扇葉種類及形狀也有一定的限制，為進一步進行不同扇葉的研究，因此我們決定採用 3D 列印來印製陀螺扇葉，透過科技的輔助盡可能減少手作所產生的誤差，且可以進行更多更複雜的扇葉種類嘗試。

(一) 3D 列印扇葉 3D 圖設計與印製(圖 3-4-1、圖 3-4-2)

採用 TinkerCad 繪製 3D 扇葉圖，繪製過程中將扇葉的厚度皆固定為 0.5 毫米，且盤面的直徑固定為 5 公分、厚度固定為 1.5 毫米，以降低不同 3D 列印扇葉所造成的誤差。

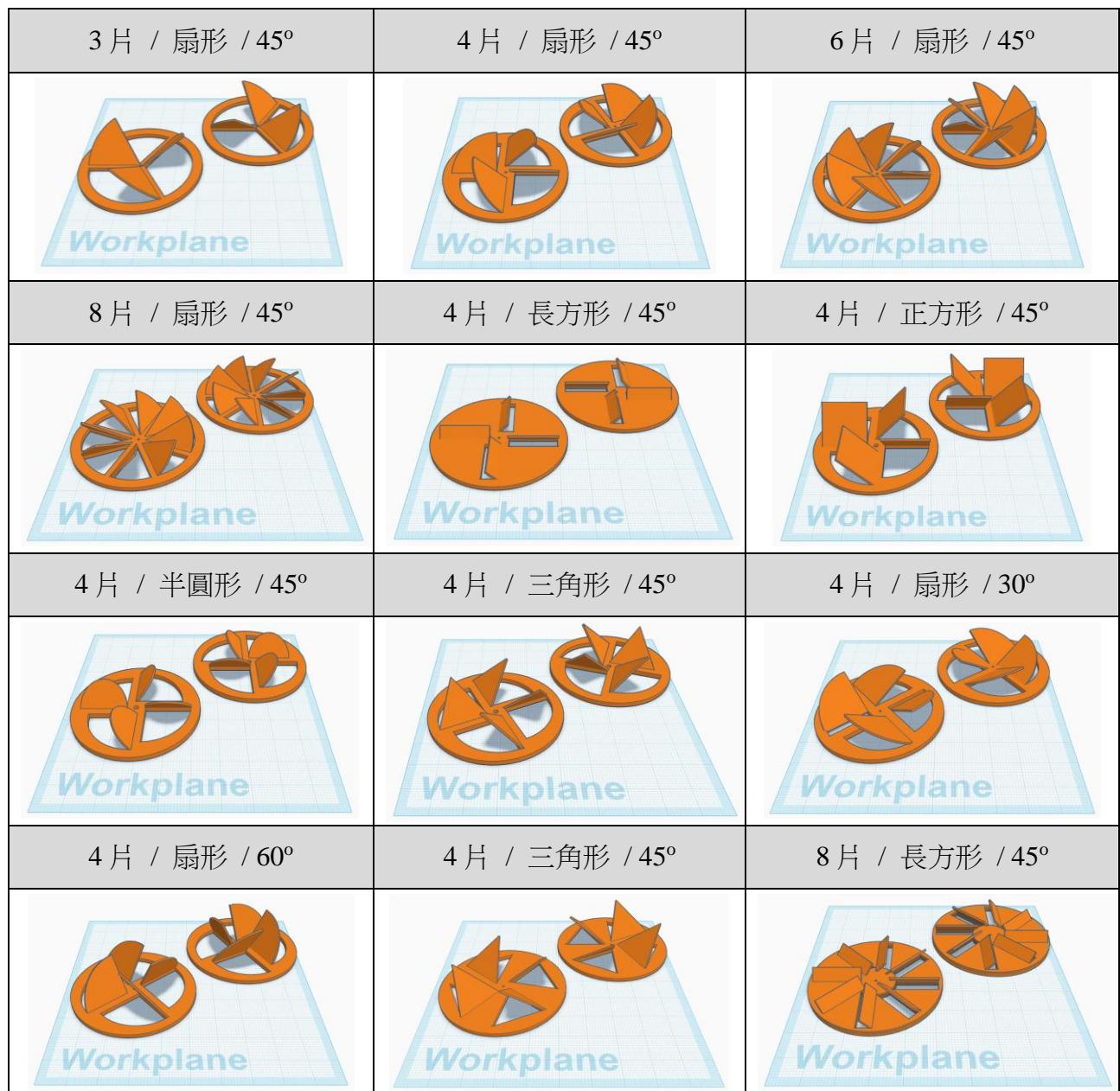


圖 3-4-1 3D 扇葉繪製統整圖(自行繪製並截圖)

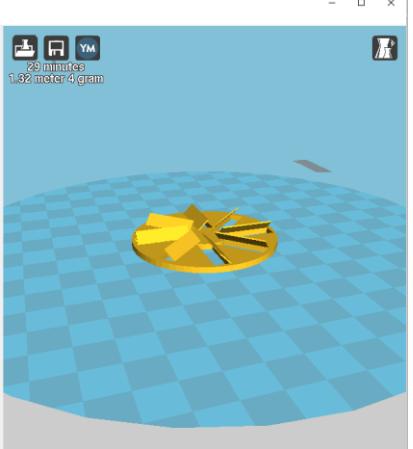
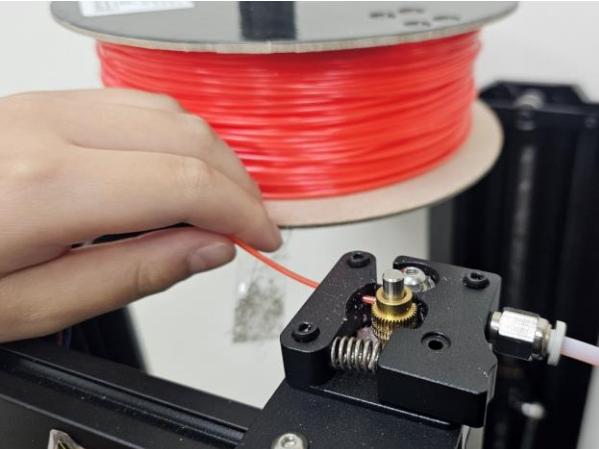
繪製 3D 扇葉設計圖	設定 3D 切片軟體
	
裝設 3D 列印線材與加熱	選擇印製檔案並印製
	
取出 3D 列印扇葉物件	修剪 3D 列印扇葉
	

圖 3-4-2 TinkerCad 繪製 3D 列印扇葉與印製過程圖(自行拍攝)

(二) 3D 列印扇葉測試裝置及流程

1. 測試裝置設置過程

運用鐵架與束線帶等固定材料，並利用大型塑膠袋套住鐵架邊緣，以固定出風口的範圍，目的是減少外在氣流對扇葉飛行的擾動，於循環扇旁架設煙霧器(圖 3-4-3、3-4-4)，同時開啟煙霧器及循環扇，透過煙霧的流動，我們可以判斷循環扇所吹出來的風與一般風扇不同，不會像一般風扇一樣有過多的周圍擾動，其風向更為集中且一致，因此採用循環扇作為本研究的控制變因，比起使用一般的風扇，能更減少風力不均勻所造成的實驗誤差。



圖 3-4-3 煙霧器與循環扇風向測試裝置圖



圖 3-4-4 實驗裝置架設圖

2. 測量流程(圖 3-4-5)

為了測量不同 3D 列印扇葉的旋轉速度與上升力之關聯性，因此運用漆包線穿過扇葉，以避免左右偏移等問題，但發現漆包線與扇葉間仍有摩擦力會抵消其上升力，因此若沿用第一階段的風力大小(弱風)，會發現 3D 扇葉的上浮高度皆過低，也因此將 3D 列印扇葉種類與各式變因之研究統一採用第二階段的風力大小(次風)進行數據蒐集。

將 3D 扇葉穿過漆包線	漆包線綁緊至相同位置	以水平儀確認循環扇角度
		
確認平板拍攝高度與位置	於小白板標註扇葉種類	風扇開啟後並同時錄製
		

圖 3-4-5 3D 扇葉測試流程圖(自行拍攝)

肆、研究結果

一、各式手作空中陀螺變因之結果統整

(一) 扇形扇葉數量與開口方向改變

表 4-1-1 為改變空中陀螺之扇形扇葉數量，並比較不同扇葉開口(順逆時針)之飛行時間，由於手作空中陀螺的重量相近(介於 $\pm 2\%$ 之間)，雖然重量影響因素不大，但為求實驗精確性，仍將重量因素列入比較，因此將飛行時間與重量的乘積定義為飛行效率來做進一步的探討，其結果比較圖可參考圖 4-1-1。可以發現，**不論扇葉數量多寡，逆時針開口的空中陀螺飛行效率皆優於順時針開口的空中陀螺**，並發現扇葉數量會影響空中陀螺的飛行效率，以 8 片逆時針開口扇葉的飛行效率為最佳，從圖 4-1-1 可看出不論開口方向，兩者扇葉數量越多時飛行效率會越佳，**表示手作空中陀螺扇葉數量越多且逆時針開口時的飛行效率最佳**。

※備註：扇葉開口順時針與逆時針的定義，以扇葉的傾斜方向來決定，且因下一階段 3D 列印扇葉轉動時，順時針開口的扇葉其轉動方向為順時針，逆時針開口的扇葉其轉動方向為逆時針，因此最終以此方式定義扇葉的開口方向。

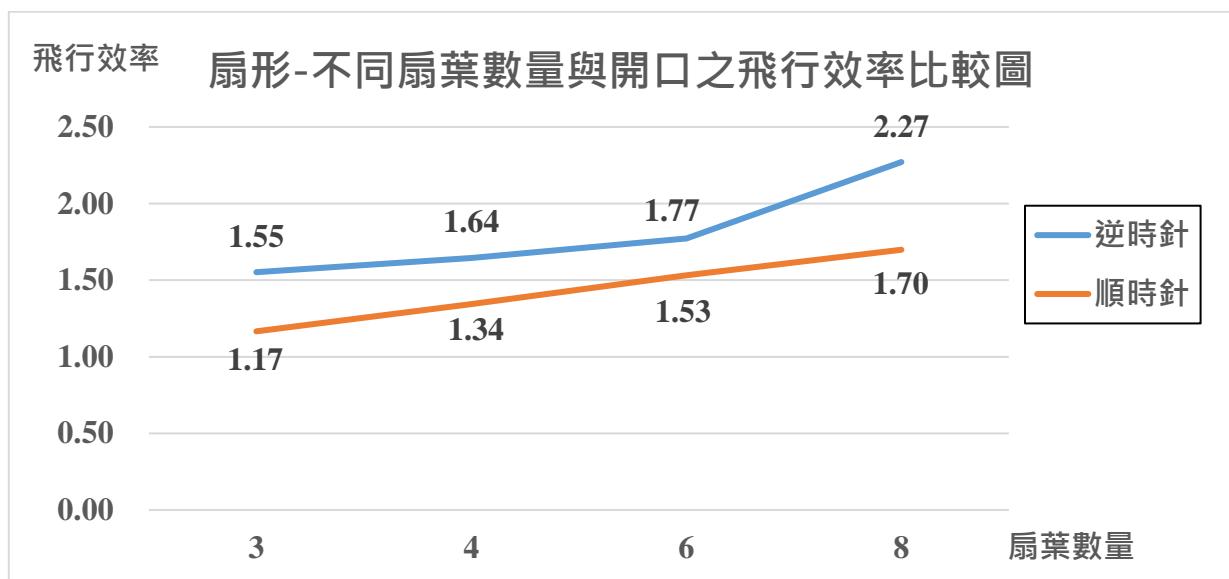
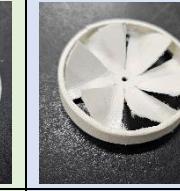
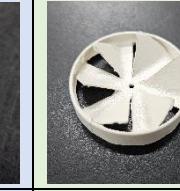
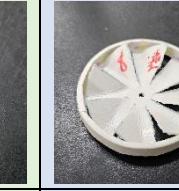


圖 4-1-1 扇形-不同扇葉數量與開口之飛行效率比較圖

表 4-1-1 手作空中陀螺扇形扇葉數量與飛行時間統計表

扇葉形狀	扇形							
扇葉角度	45°							
扇葉數量	3 片扇葉		4 片扇葉		6 片扇葉		8 片扇葉	
扇葉開口	逆時針	順時針	逆時針	順時針	逆時針	順時針	逆時針	順時針
陀螺重量 (gw)	1.62	1.64	1.68	1.64	1.64	1.67	1.66	1.68
陀螺照片 (自行拍攝)								
十次測量 飛行時間 (sec)	1.02	0.84	1.35	0.59	1.12	0.81	0.87	0.87
	1.00	0.47	1.02	1.37	0.93	0.65	2.09	0.81
	1.06	0.63	0.86	0.81	0.90	0.71	0.84	0.97
	0.89	0.69	0.67	0.63	1.03	0.87	1.35	0.93
	1.16	0.85	0.90	0.75	1.32	1.65	0.97	1.13
	0.97	0.47	1.00	0.50	1.28	1.17	1.22	1.06
	0.82	1.00	0.50	1.06	1.38	0.91	0.93	0.97
	0.88	0.93	0.81	0.56	0.72	0.69	1.47	0.84
	1.00	0.88	0.84	1.12	0.90	0.93	2.66	1.31
	0.78	0.78	1.41	0.81	1.22	0.78	1.28	1.22
平均時間 (sec)	0.96	0.71	0.98	0.82	1.08	0.92	1.37	1.01
飛行效率 (gw*s)	1.55	1.17	1.64	1.34	1.77	1.53	2.27	1.70

(二) 扇葉形狀(扇形與長方形)與扇葉數量改變

表 4-1-2 為改變空中陀螺之長方形扇葉數量，並比較逆時針開口時的扇形與長方形扇葉之飛行時間，其結果比較圖可參考圖 4-1-2。從結果我們可以發現，**不論扇葉數量多寡，扇形扇葉空中陀螺的飛行效率皆優於長方形扇葉的空中陀螺**，並發現與前一個結果相同，八片扇葉的飛行效率最佳，且從折線圖趨勢中可以發現**逆時針的空中陀螺，扇葉的形狀不論是扇形或長方形，其扇葉數量越多時，飛行效率越好**。

表 4-1-2 空中陀螺長方形扇葉數量與飛行時間統計表

扇葉開口	逆時針			
	3 片扇葉	4 片扇葉	6 片扇葉	8 片扇葉
陀螺重量 (gw)	1.62	1.61	1.65	1.64
陀螺照片 (自行拍攝)				
十次測量 飛行時間 (sec)	0.84/ 0.59/ 0.64/ 0.66/0.88/0.65/ 0.72/0.78/ 0.75/0.85	0.60/0.56/0.97/ 0.75/0.88/0.66/ 0.82/0.85/ 0.75/0.79	0.72/0.66/0.47/ 0.75/1.00/1.03/ 1.13/0.84/ 1.06/0.66	1.59/0.56/0.59/ 0.78/1.22/0.72/ 1.41/0.68/ 0.88/0.81
平均時間 (sec)	0.74	0.76	0.83	0.92
飛行效率 (gw*s)	1.19	1.23	1.37	1.52

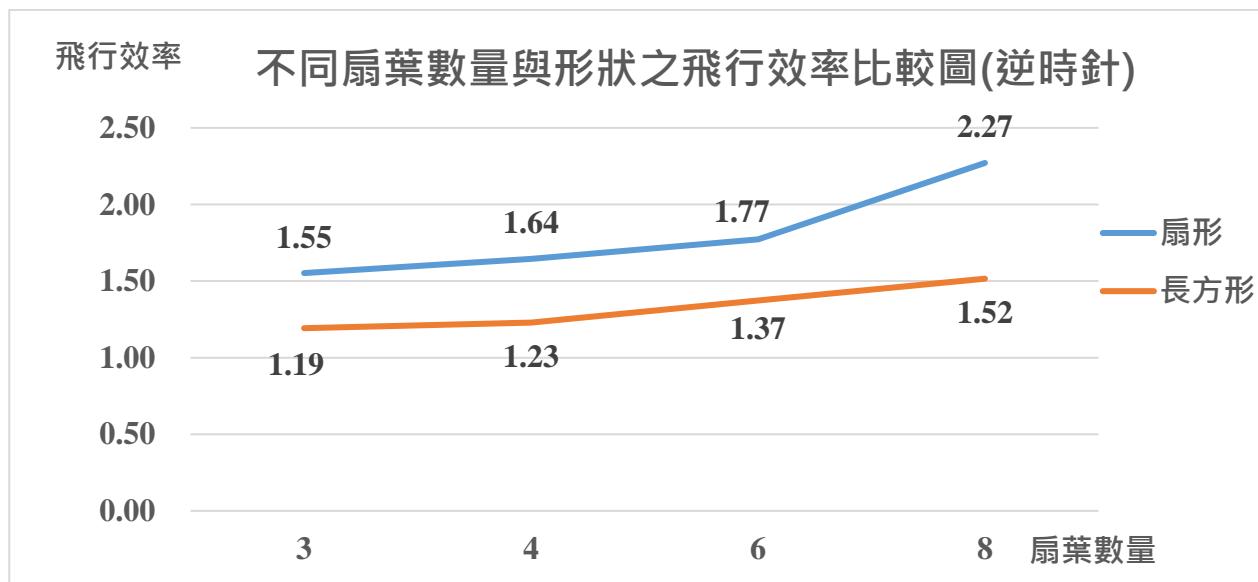


圖 4-1-2 不同扇葉數量與形狀之飛行效率比較圖(逆時針)

二、各式 3D 列印扇葉變因之結果統整

(一) 扇葉飛行高度與轉速測量及計算

1. 扇葉飛行高度

透過 iPad 側面錄影來監測扇葉的飛行高度，測量共進行五次，取每次的最高飛行高度再加以平均，即得到扇葉飛行高度。(因 3D 列印扇葉在穩定飛行後，不易統計其平均飛行高度，因此選取每次的最高飛行高度進行實驗結果分析，且後續研究所提及「平均高度」皆用以表示平均最高飛行高度。並於討論或未來研究中，選取部分扇葉進行逐格分析，探討「平均飛行高度」與轉速之間的關聯性是否優於「平均最高飛行高度」與轉速之間的關聯性)

2. 扇葉轉速(單位：每分鐘轉速 rpm)(圖 4-2-1)

透過 Samsung S23 Ultra 手機於 3D 列印扇葉上方進行慢動作攝影(30 帖)，擷取影片中段扇葉已趨於轉動穩定之影像(約 20 秒)；再匯入 Tracker 軟體進行分析；總影格數(frames)介於 598-600 帖，先透過質點工具(約 150 帖)定位扇葉的軌跡後，再針對質點的波形變化進行時間分析，取相同波谷(峰)間的時間差進行計算，共選取至少五段波

長計算轉速後平均，其計算公式如下： $\frac{1}{\text{時間差}} \times \frac{\text{總影格數}}{\text{總影片時長}} \times 60 \text{ 秒}$

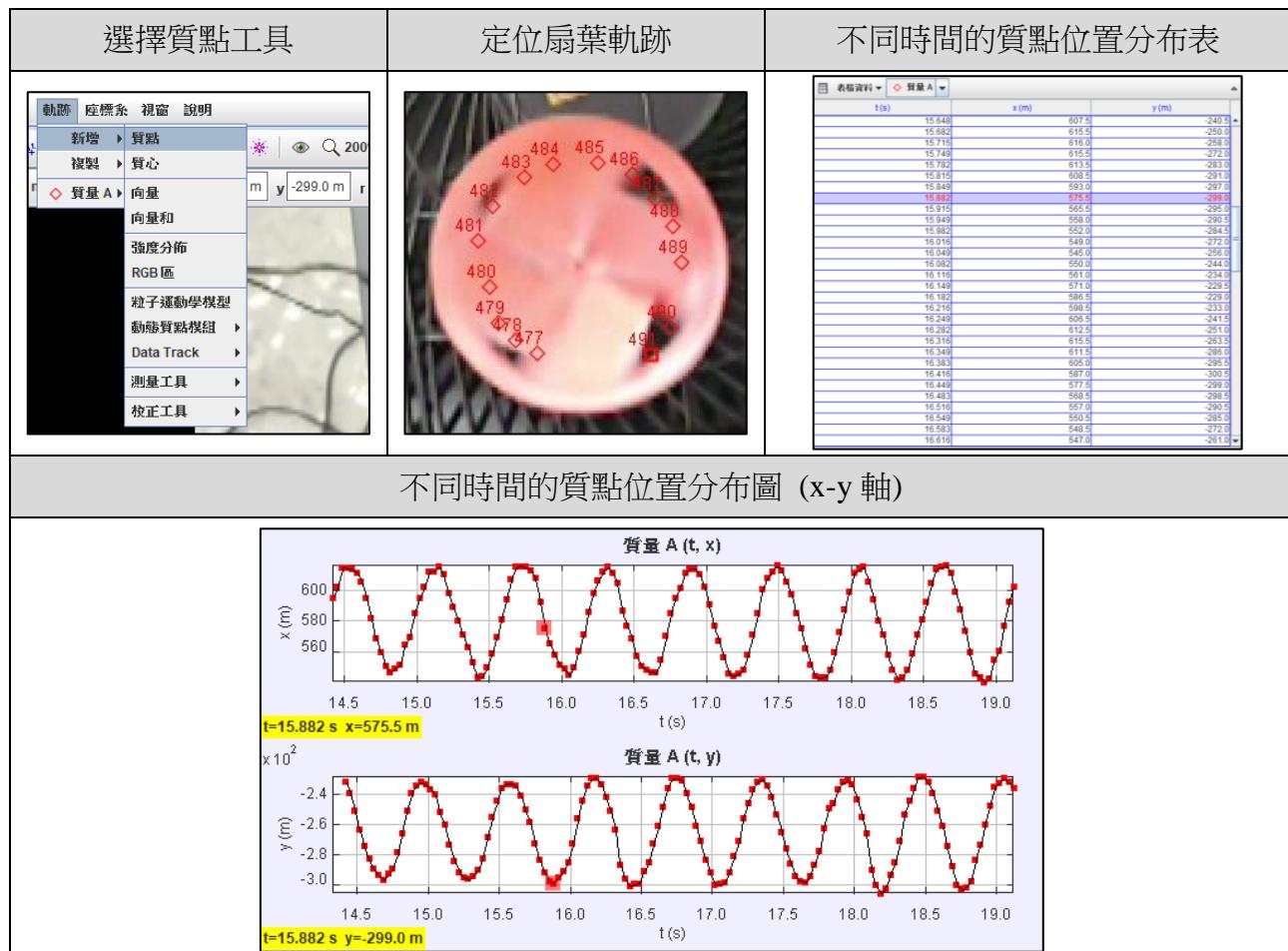


圖 4-2-1 3D 列印扇葉轉速計算圖(自行拍攝與截圖)

(二) 扇形扇葉開口方向與扇葉數量改變

表 4-2-1 為改變空中陀螺之扇形扇葉數量，並比較不同扇葉開口(順逆時針)之飛行時間，其結果比較圖可參考圖 4-2-2。從實驗結果我們可以發現，3D 列印扇葉的飛行高度會受到扇葉數量與開口方向的影響，**不論是順時針或逆時針開口，扇葉數量 3 片的飛行高度皆為最佳**，而扇葉數量 4 片次之，且順時針的飛行高度會優於逆時針。並且可以發現順時針開口的扇葉，飛行高度會隨著扇葉數量增加而遞減，以 3 片及 4 片為佳；但逆時針開口的扇葉，會隨著扇葉數量增加而逐漸遞減，但我們發現在數量 6 片後有上升的趨勢，反而在 8 片扇葉的飛行效率為逆時針最佳，我們推測 3D 列印扇葉的重量會影響飛行高度，因此決定考量重量因素。

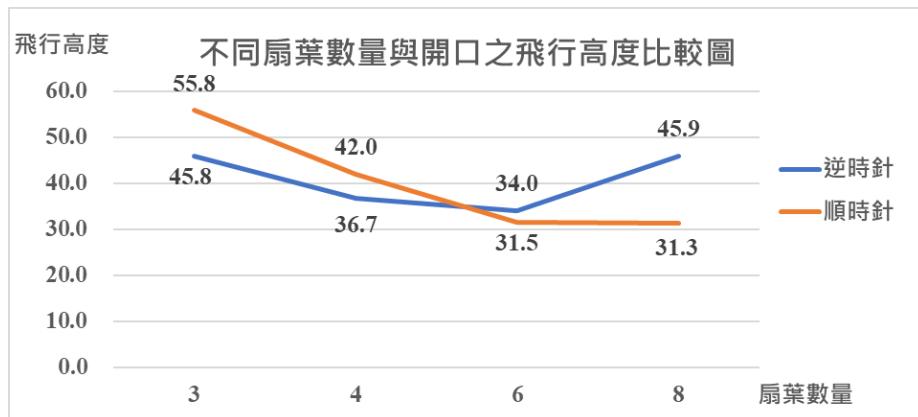


圖 4-2-2 扇形 3D -不同扇葉數量與開口之飛行高度比較圖

考量進一步探討，飛行效率(即為重量 \times 飛行高度)與扇葉開口、數量之間的關聯性。因重量相同時，飛行高度越高者的飛行效率越佳；飛行高度相同時，扇葉的重量越大者飛行效率越佳，其結果請參考圖 4-2-3，扇葉飛行效率仍以順時針 3 片及 4 片為佳、逆時針 8 片扇葉的飛行效率為最佳。歸納**若順時針開口時，扇葉數量應較少為佳；但若為逆時針開口時，則扇葉數量則應越多，對飛行效率幫助最大。**

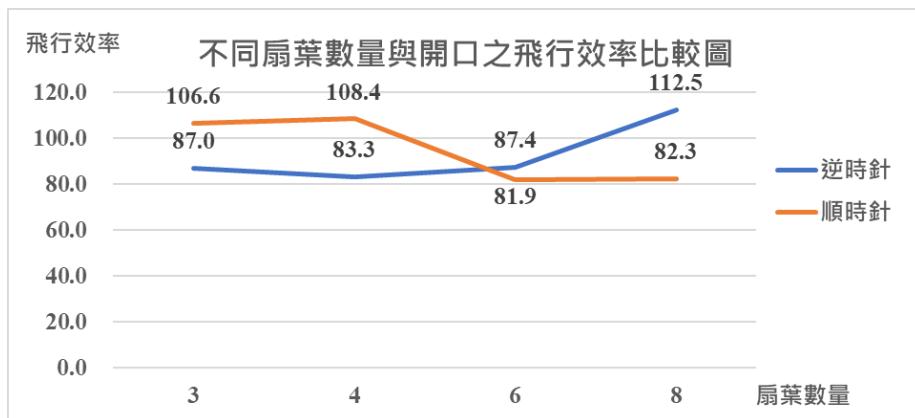


圖 4-2-3 扇形 3D -不同扇葉數量與開口之飛行效率比較圖(考量重量)

但我們後來我們討論時發現若使用重量與高度相乘的方式來將重量因素考慮時，其結果可能會過度受到重量大小的影響，使其分析結果不精確，也因此我們也討論使用兩者的比值進行結果分析，但不論是重量除以高度(每上升 1 公分時可以帶動的扇葉重量)，或是高度除以重量(每 1 公克可以使扇葉上升幾公分)，兩者數據比值的結果都難以解釋我們的研究目的：希望找到最佳的扇葉結構，因此我們改以「重量微調實驗設計」來進行探討。

因為 3 片扇形 45° 順時針開口扇葉的飛行高度最高，因此我們選用它來進行重量微調實驗設計，由於扇葉飛行至最高高度時會同時受到因扇葉重量而產生的下墜力，以及扇葉因風吹而產生的上浮力，其上浮力可以視為原上浮力(未加扇葉時的上浮力)與扇葉提升的上浮力。因此我們採用 3D 列印各式不同重量的加重環(圖 4-2-4)，以雙面膠將加重環黏貼至扇葉上，進行實驗分析(表 4-2-2)，透過實驗數據統整出隨著重量的增加，扇葉會因此降低多少高度的方程式 ($y = 14.794x - 27.742$)，即可運用此方程式將飛行高度進行校正，補償不同扇葉因額外的重量而損失的飛行高度，如此補償高度較能呈現真實的實驗結果。.

表 4-2-2 扇葉葉片重量改變與飛行高度變化表

扇葉種類	3 片、扇形、 45° 、順時針開口			
扇葉重量 (gw)	1.91	2.66	3.01	3.72
扇葉最高飛行高度 (cm)	57.0 / 49.0 / 53.0 / 62.0 / 58.0	46.0 / 45.5 / 46.0 / 44.5 / 46.0	35.5 / 35.0 / 36.5 / 36.0 / 35.0	30.5 / 29.0 / 30.0 / 31.0 / 29.5
平均高度 (cm)	55.8	45.6	35.6	30.0
降低高度 (cm)	0.0	10.2	20.2	25.8

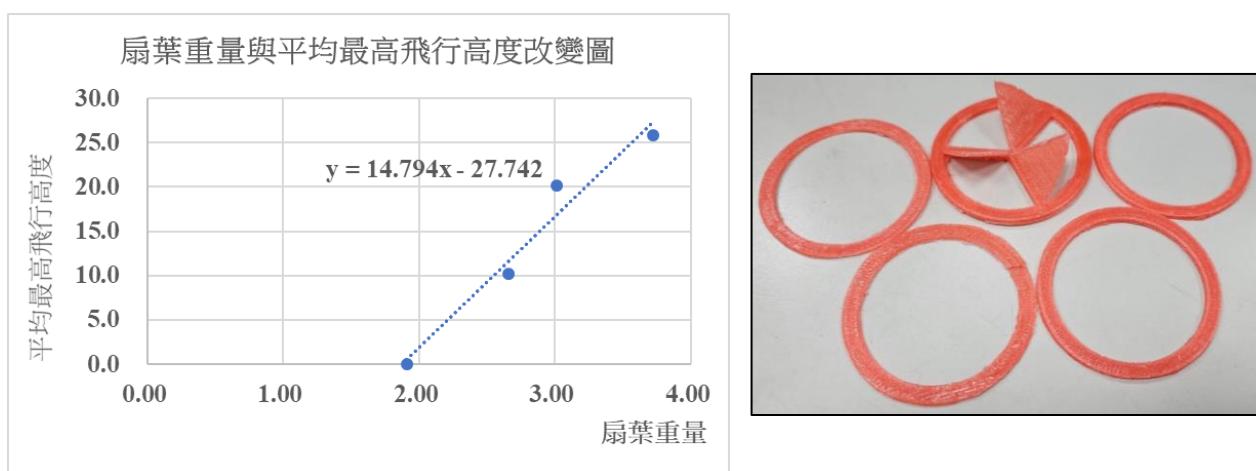


圖 4-2-4 扇葉重量與平均最高飛行高度改變圖 (含加重環圖，自行拍攝與製圖)

我們運用方程式計算出重量增加後所應降低的飛行高度後，將其降低的飛行高度補償至原平均高度中而得到補償高度，可參考圖 4-2-5。結果發現，順時針開口的扇葉，扇葉數量 3 片的補償高度為最佳，且有扇葉數量增加而補償高度遞減的趨勢，但逆時針扇葉則為相反，除 3 片扇葉外(可能是重量過輕仍對飛行有所助益)，皆具有扇葉數量增加而補償高度漸增的趨勢。

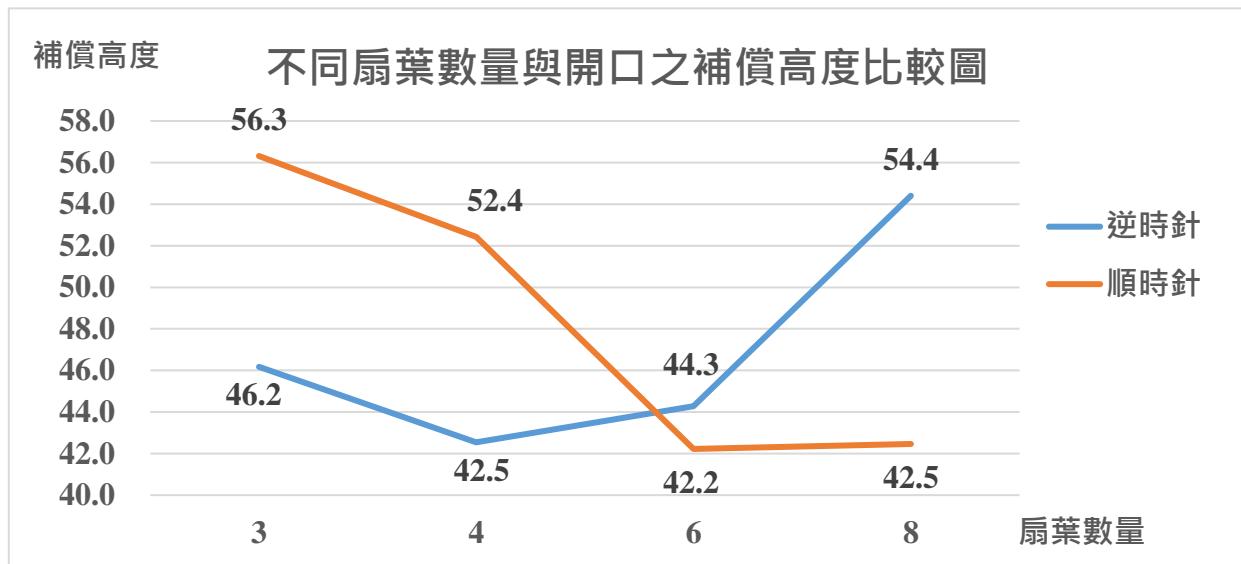


圖 4-2-5 不同扇葉數量與開口之補償高度比較圖(考量重量後補償高度)

表 4-2-1 扇形 3D -不同扇葉數量與開口比較表

扇葉形狀	扇形							
扇葉角度	45°							
扇葉數量	3 片扇葉		4 片扇葉		6 片扇葉		8 片扇葉	
扇葉開口	逆時針	順時針	逆時針	順時針	逆時針	順時針	逆時針	順時針
扇葉重量 (gw)	1.90	1.91	2.27	2.58	2.57	2.60	2.45	2.63
扇葉照片 (自行拍攝)								
扇葉最高 飛行高度 (cm)	41.0 49.0 44.0 46.0 49.0	57.0 49.0 53.0 62.0 58.0	36.5 36.0 37.0 36.5 37.5	45.0 43.0 41.0 40.0 41.0	35.0 33.0 37.0 31.0 34.0	32.0 31.0 32.0 31.5 31.0	44.5 45.0 45.5 47.5 47.0	32.0 31.0 31.5 32.0 30.0
平均高度 (cm)	45.8	55.8	36.7	42.0	34.0	31.5	45.9	31.3
平均轉速 (rpm)	5341	5990	2341	5224	3041	2353	2595	1896
飛行效率 (gw*cm)	87.0	106.6	83.3	108.4	87.4	81.9	112.5	82.3
補償高度 (cm)	46.2	56.3	42.5	52.4	44.3	42.2	54.4	42.5

3D 列印扇葉的平均最高飛行高度與轉速兩者間的斯皮爾曼(Spearman)相關係數為 0.762 (表 4-2-3)，且達到統計上的顯著性，表示兩者具有高度正相關性(補充：相關係數介於 0.7~1.0 之間為高度正相關，0.3~0.69 之間為中度正相關，0.3 以下為低度正相關)，代表扇葉的各項變因(數量、形狀、角度……等)會影響其旋轉的速度，而其轉速會再進一步影響其上浮的力量，而使得 3D 扇葉的上升高度有所差異。

表4-2-3 3D列印扇葉的平均最高飛行高度與轉速之斯皮爾曼相關係數表

		平均最高飛行高度	平均轉速
Spearman 的 rho	平均最高 飛行高度	相關係數 顯著性 (雙尾)	1.000 .028
	N		8 8
	平均轉速	相關係數 顯著性 (雙尾)	.762* .028
	N		8 8

*. 相關性在 0.05 層上顯著 (雙尾)

(三) 扇葉形狀與開口方向不同之比較 (底部開口皆為相同之扇形)

表 4-2-4 為改變空中陀螺之扇葉形狀，在扇形數量、扇葉角度與底部扇形面積皆相同的條件下，比較不同扇葉開口(順逆時針)之補償高度，其結果比較圖可參考圖 4-2-6。從實驗結果我們可以發現，正方形逆時針開口的扇葉補償高度最佳，次者為扇形順時針開口。

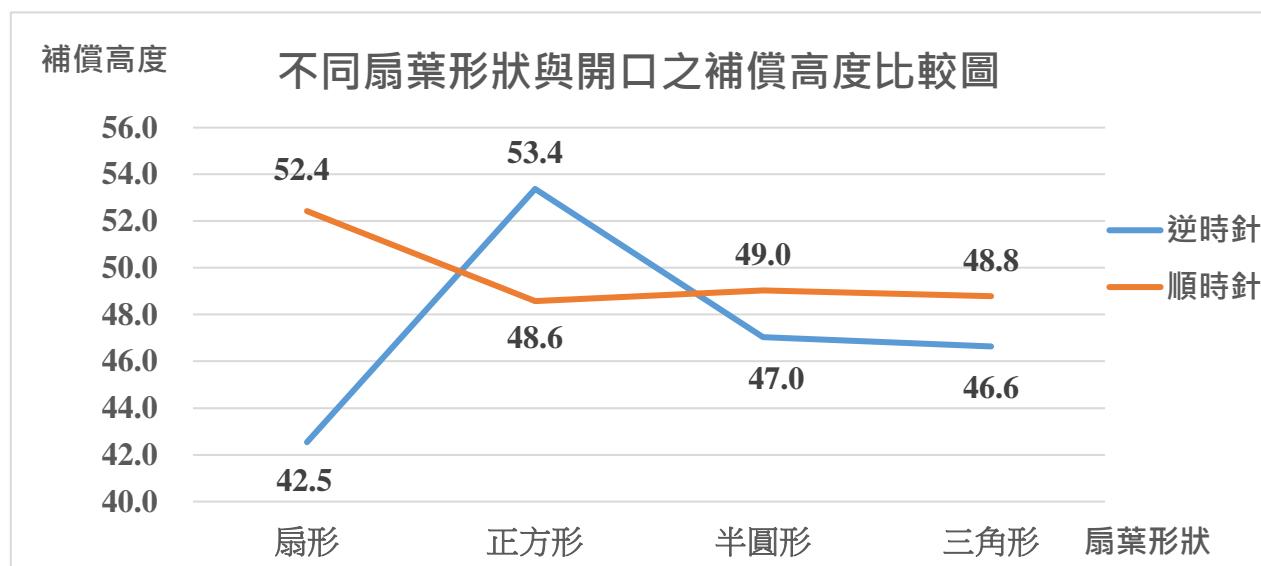


圖 4-2-6 不同扇葉形狀與開口之補償高度比較圖(底部相同，考量重量後補償高度)

表 4-2-4 4 片扇葉 3D-扇葉形狀與開口方向不同比較表(底部開口皆為相同之扇形)

扇葉數量	4 片扇葉							
扇葉角度	45°							
底部開口	扇形							
扇葉形狀	扇形		正方形		半圓形		三角形	
扇葉開口	逆時針	順時針	逆時針	順時針	逆時針	順時針	逆時針	順時針
扇葉重量 (gw)	2.27	2.58	2.82	2.82	2.27	2.27	2.27	2.28
扇葉照片 (自行拍攝)								
扇葉最高 飛行高度 (cm)	36.5 36.0 37.0 36.5 37.5	45.0 43.0 41.0 40.0 41.0	41.0 39.0 37.0 39.0 41.0	36.0 34.0 34.0 33.0 36.0	41.0 41.0 40.0 44.0 40.0	44.0 44.0 38.0 49.0 41.0	42.0 40.0 38.0 43.0 41.0	43.0 45.0 42.0 41.0 43.0
平均高度 (cm)	36.7	42.0	39.4	34.6	41.2	43.2	40.8	42.8
平均轉速 (rpm)	2341	5224	4796	3169	4789	4889	5289	3593
飛行效率 (gw*cm)	83.3	108.4	111.1	97.6	93.5	98.1	92.6	97.6
補償高度 (cm)	42.5	52.4	53.4	48.6	47.0	49.0	46.6	48.8

(四) 扇葉形狀與開口方向不同之比較 (底部開口形狀全等於扇葉形狀)

表 4-2-5 為改變空中陀螺之扇葉形狀，在底部開口形狀全等於扇葉形狀，且扇葉數量、角度相同的條件下(額外加入 8 片長方形扇葉)，比較不同扇葉開口(順、逆時針)之補償高度，其結果比較圖可參考圖 4-2-7。從實驗結果我們可以發現，**不論開口方向，長方形扇葉皆優於其他兩者扇葉形狀，且長方形扇葉不論開口方向，皆會因扇葉數量增加而補償高度下降，且若與前述各式扇葉實驗結果比較，4 片長方形扇葉的補償後高度皆優於其餘的扇葉，且以 4 片順時針開口最佳(為所有扇葉中最佳)**，其因素可能是長方形扇葉的底部開口面積較其他扇葉小，而導致所受到的上升力量較強，因此即使重量較重也能使其達到較高的飛行高度，因而提升其飛行效率。

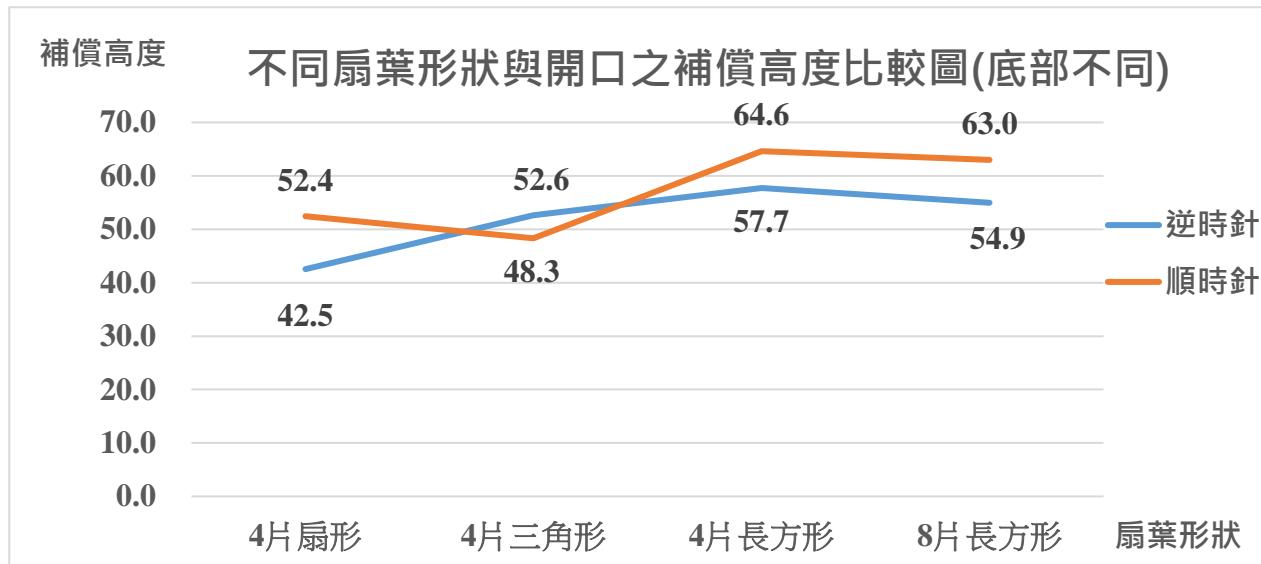


圖 4-2-7 不同扇葉形狀與開口之補償高度比較圖(底部不同，考量重量後補償高度)

表 4-2-5 3D-扇葉形狀與開口方向不同比較表(底部開口形狀全等於扇葉形狀)

扇葉數量	4 片扇葉				8 片扇葉			
扇葉形狀	扇形	三角形	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形
底部開口	扇形	三角形	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形
扇葉角度	45°							
扇葉開口	逆時針	順時針	逆時針	順時針	逆時針	順時針	逆時針	順時針
扇葉重量 (gw)	2.27	2.58	3.08	3.12	3.33	3.35	3.48	3.51
扇葉照片 (自行拍攝)								
扇葉最高 飛行高度 (cm)	36.5 36.0 37.0 36.5 37.5	45.0 43.0 41.0 40.0 41.0	33.0 35.5 36.0 35.5 34.0	31.0 30.0 29.0 29.5 30.0	38.0 33.0 35.0 39.0 36.0	37.0 44.0 44.0 45.0 44.0	31.0 28.0 30.0 34.0 33.0	39.5 39.5 37 37.5 40.5
平均高度 (cm)	36.7	42.0	34.8	29.9	36.2	42.8	31.2	38.8
平均轉速 (rpm)	2341	5224	2809	2993	3590	4489	4140	3292
開口面積 (cm ²)	40.72	40.72	6.89	6.89	3.6	3.6	7.2	7.2
飛行效率 (gw*cm)	83.3	108.4	107.2	93.3	120.5	143.4	108.6	136.2
補償高度 (cm)	42.5	52.4	52.6	48.3	57.7	64.6	54.9	63.0

(五) 扇葉開口方向與角度不同之比較

表 4-2-6 為改變空中陀螺之扇葉角度，在扇葉數量、底部扇形面積都相同的條件下，比較不同扇葉開口(順、逆時針)之補償高度，其結果比較圖可參考圖 4-2-8。從實驗結果我們可以發現，不論扇葉開口方向，扇葉角度越小，補償高度越高，以 30° 角的補償高度為佳，且又以 30° 角時逆時針為最優，推測可能是因為扇葉角度越小時，其受風面積較大，因此導致其飛行效率提升。扇葉開口方向比較：逆時針影響大於順時針，隨著扇葉角度的增加，逆時針開口扇葉的補償高度也隨之大幅度下降，而順時針開口扇葉雖然也會隨扇葉角度增加而補償高度下降，但下降幅度較為平緩。

表 4-2-6 扇葉開口與角度不同之比較表

扇葉數量	4 片扇葉					
扇葉形狀	扇形					
扇葉角度	30°		45°		60°	
扇葉開口	逆時針	順時針	逆時針	順時針	逆時針	順時針
扇葉重量 (gw)	2.64	2.52	2.27	2.58	2.47	2.78
扇葉照片 (自行拍攝)						
扇葉最高 飛行高度 (cm)	48.0 54.0 54.0 49.0 47.0	40.0 43.0 42.0 42.0 51.0	36.5 36.0 37.0 36.5 37.5	45.0 43.0 41.0 40.0 41.0	15.0 14.0 14.0 13.0 14.5	30.0 30.0 31.0 34.0 32.0
平均高度 (cm)	50.4	43.6	36.7	42.0	14.1	31.4
平均轉速 (rpm)	7697	4985	2341	5224	2609	2834
飛行效率 (gw*cm)	133.1	109.9	83.3	108.4	34.8	87.3
補償高度 (cm)	61.7	53.1	42.5	52.4	22.9	44.8

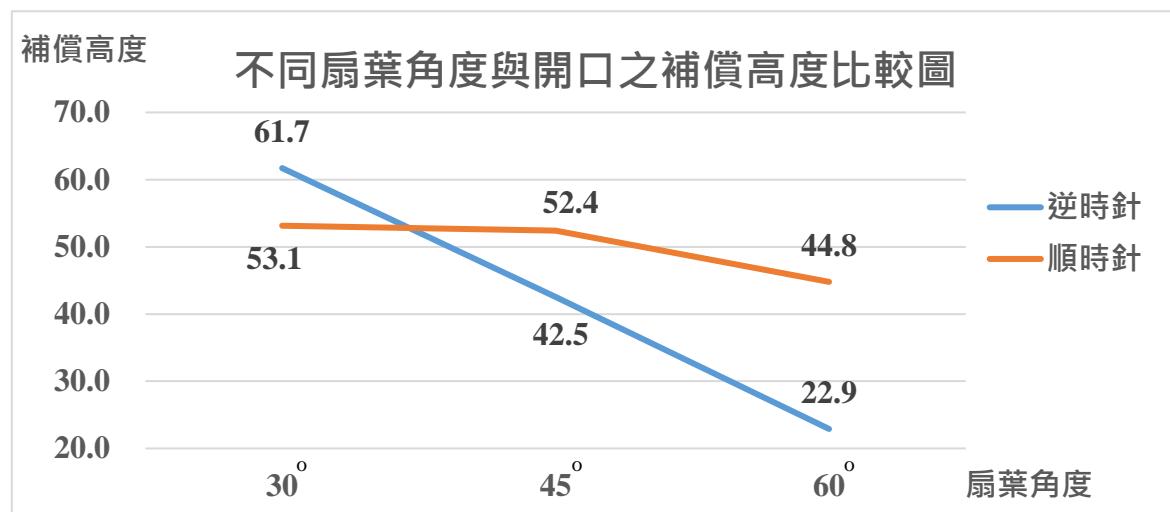


圖 4-2-8 不同扇葉角度與開口之補償高度比較圖(考量重量後補償高度)

三、採用 3D 列印製作最佳空中陀螺(圖 4-3-1、表 4-3-1)

統整研究二的結果，我們選取下列補償高度較佳的扇葉製作成空中陀螺(表 4-3-1)。同樣以手作空中陀螺的形式進行實驗，測量其 3D 列印空中陀螺的飛行效率，在加以分析。

表 4-3-1 最佳空中陀螺選用表

扇葉數量	3 片	4 片				8 片		
扇葉形狀	扇形	扇形	正方形	長方形	長方形	長方形	長方形	扇形
扇葉角度	45°	30°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
扇葉開口	順時針	逆時針	逆時針	逆時針	順時針	逆時針	順時針	逆時針

我們發現 3D 列印空中陀螺大多也具有扇葉數量越多，飛行效率較佳的特性，其實驗結果大致與手作空中陀螺相同，扇形扇葉的飛行時間雖優於長方形扇葉，但考量重量因素後其飛行效率不如長方形扇葉，未來研究可採用補償高度的方式考量重量因素。且相較於手作空中陀螺，3D 列印空中陀螺的重量較重，飛行時間會有所損失，但若考慮重量因素時，多數 3D 列印空中陀螺的飛行效率較佳(僅部分略低於 8 片扇形逆時針手作空中陀螺)，可能是 3D 列印所製作的扇葉飛行穩定度與旋轉較佳，人為誤差較小(圖 4-3-1、表 4-3-2)。

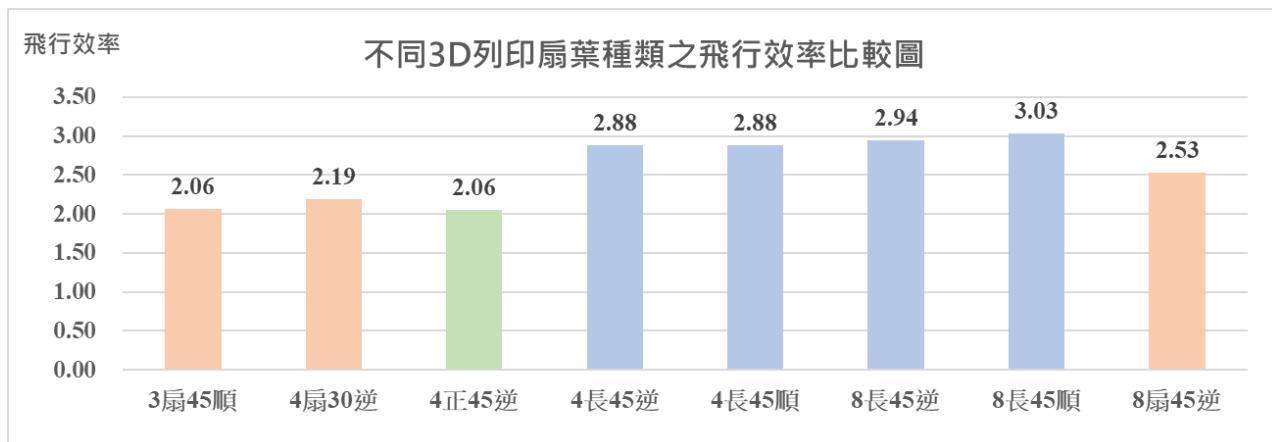
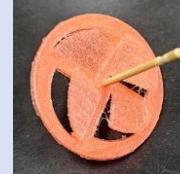
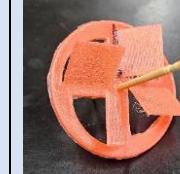
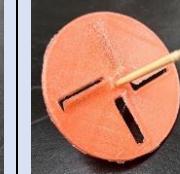
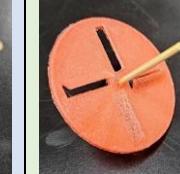
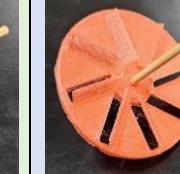
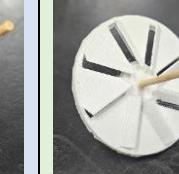
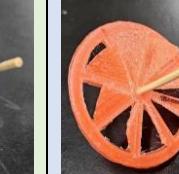


圖 4-3-1 不同 3D 列印扇葉種類之飛行效率比較圖

表 4-3-2 3D 列印扇葉空中陀螺扇葉數量與飛行時間統計表

扇葉數量	3 片扇葉	4 片扇葉				8 片扇葉		
扇葉形狀	扇形	扇形	正方形	長方形	長方形	長方形	長方形	扇形
扇葉角度	45°	30°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
扇葉開口	順時針	逆時針	逆時針	逆時針	順時針	逆時針	順時針	逆時針
陀螺重量 (gw)	2.08	2.85	3.03	3.58	3.56	3.70	3.74	2.67
陀螺照片 (自行拍攝)								
十次測量 飛行時間 (sec)	0.88	0.63	0.62	0.66	0.78	0.75	0.72	0.91
	1.07	0.75	0.57	0.94	0.81	0.81	0.69	0.75
	0.91	0.66	0.63	0.87	0.72	1.13	0.69	0.88
	0.85	0.78	0.93	0.69	0.63	0.62	1.00	0.81
	0.85	0.87	0.91	0.79	0.78	0.66	1.09	1.16
	0.97	0.78	0.75	0.85	0.75	0.87	0.69	0.84
	0.96	0.88	0.66	0.65	0.84	0.63	0.87	1.15
	1.12	0.78	0.59	0.90	0.69	0.88	0.78	1.37
	1.06	0.63	0.56	0.75	0.91	0.78	0.82	0.81
	1.25	0.94	0.57	0.94	1.19	0.82	0.75	0.78
平均時間 (sec)	0.99	0.77	0.68	0.80	0.81	0.80	0.81	0.95
飛行效率 (gw*s)	2.06	2.19	2.06	2.88	2.88	2.94	3.03	2.53

伍、討論

一、測量時的困難與未來研究部分

1. 本研究未來可以嘗試將側拍及上視影像進行逐格分析，並以大數據針對每一幀的飛行高度與轉速進行分析，除了平均最高高度及最高轉速外，也能夠計算出扇葉穩定飛行時間內的總平均高度及平均轉速，更進一步探討影響提升扇葉飛行效率的變因，以達到更為精確的實驗結果。
2. 可以結合 Arduino 等各式感測器進行數據的偵測，運用感測器測量循環扇轉動時各個位置的氣流擾動情況，並透過氣壓感測器監測其氣體壓力的變化，推測是否影響扇葉的轉速以及其各式因素，並作為調整影響空中陀螺各式變因的依據。
3. 嘗試運用高速攝影機從正上方與側面錄製空中陀螺的旋轉情況，並分析其逐格的質點位置，確認在不同時間點時，空中陀螺在空間中的質點分布情況，並藉此逐格質點分佈進行空間定位，可以更深入了解空中陀螺在飛行過程中的完整移動軌跡，並定義不同空中陀螺的旋轉穩定度以及其旋轉狀態，則更有依據調整空中陀螺的各式變因。
4. 由於徒手旋轉空中陀螺並進行計時的方式，即使同一位實驗者進行多次的操作，仍然可能產生一定程度的手動人為誤差，因此建議未來研究時可以設計一個自動發射器(圖 5-1-1)取代人力旋轉陀螺(可採用氣壓發射系統或者單純的彈簧進行設計)，並運用 Arduino 或是其他感測器來進行偵測，檢測陀螺發射的瞬間以及落地的瞬間，盡可能將人為所可能產生的誤差減少，期實驗結果會更為準確。

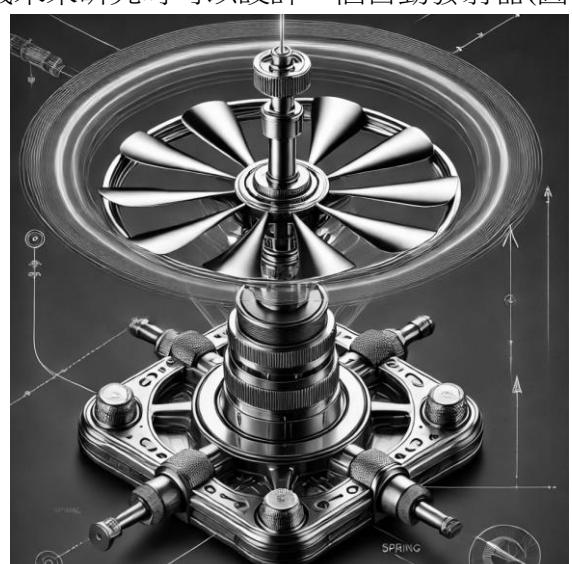


圖 5-1-1 自動空中陀螺發射器生成圖(生成自 ChatGPT)

5. 目前我們考慮重量影響的方式，是選取本研究飛行高度最高的 3D 扇葉重量作為基準，以加重環在此扇葉上進行加重，以得到重量增加與飛行高度減少之趨勢線公式，但我們在後續討論時，有組員提到說會不會有可能每一種類的扇葉都有屬於自己的趨勢線，而不能共用同一條，因此未來研究若需要排除重量影響之因素，可以採取兩種更為進階的方式進行排除：

- (1) 3D 列印扇葉時就將扇葉重量列入考量進行實際設計，可調整其印製密度或者扇葉厚薄度，使每一個扇葉的重量落差在誤差範圍內。
- (2) 每一種類扇葉都使用加重環測量其重量改變後所減少之飛行高度，並列出其趨勢線公式，透過數據分析將扇葉的重量調整至同一基準以進行後續研究。

二、各類型應用與發展

一開始我們認為找尋最佳空中陀螺應該不是件很困難的事情，但實際開始進行研究後才發現需要考量的變因非常多，且變因與變因之間的相互作用相當複雜，因此在研究過程中相當具有挑戰性，透過組員及老師共同集思廣益，盡可能思考所需要探討的變因，以及在實驗過程中可以透過哪些方法解決所遇到的問題，我們認為在這一連串的思考過程中，也更進一步的加深我們對於影響扇葉飛行的各式變因的認知，在討論的階段我們也嘗試思考，這次我們研究的裝置設計，除了用於提升空中陀螺的飛行效率外，在日常生活當中還可能有哪一些能夠應用的地方，以下為本研究針對日常生活應用方面所製作的統整：

1. 作為市售循環扇風向及穩定度的檢測工具：

- (1) 採用空中陀螺做為檢測市售風扇穩定的工具，可以採用雷射切割裝置切割方形外框，以類似三軸穩定器的方式將空中陀螺固定於方形外框正中間，且此陀螺可自由任意旋轉，六個面都可以受風吹拂，其想像生成圖請參考圖 5-2-1。

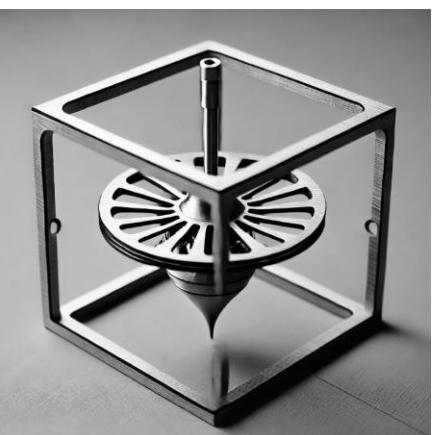


圖 5-2-1 循環扇檢測工具生成圖(生成自 ChatGPT)

(2) 使用方式：將檢測工具擺放至市售的風扇旁，可透過空中陀螺的轉動速度以及穩定性來判別此循環扇或者一般風扇的風力穩定度以及強度，是否有符合產品規範，並可在檢測工具上加裝各式感測器，透過振動以及轉速的測定來更進一步得到精確的風力數據，以做為購買風力系統產品的依據。

2. 無人空拍機內嵌式槳葉的設計：

空拍機在爬升、懸停模式時，槳葉的型式能降低因氣流擾動而產生機身的不平穩，若能將本研究的扇葉型式使用在空拍機內嵌式槳葉，加上相鄰的槳葉反向旋轉以抵消扭矩，便能讓機身更穩定，實現空拍機空中爬升、懸停功能。

3. 廚房排油煙機扇葉設計：

廚房排油煙機的排煙強勁結構，除了馬達、油煙罩、油煙吸入口位置、排煙出口距離之外，扇葉的設計也是影響排煙效果很重要的一環。本研究尋找出扇葉的受力面積與傾斜角度之最佳組合，可以應用在廚房排油煙機的扇葉裝置設計，能涵蓋油煙排出最大範圍之面積，藉以提升排煙量。

4. 循環扇扇葉設計：

循環扇的主要功能是經由過馬達驅動葉片旋轉，使室內空氣產生循環流動，進而達到快速降溫的效果。扇葉的設計能幫助吹出來的風是呈現「螺旋狀」集中，並且將風吹往較遠的距離、覆蓋較大範圍，提供更好的空氣循環和降低室內溫度。由本研究可以了解葉片數量較少、葉片面積較大，有助於產生較大風量，若再加上調節風向，將能產生更好的空氣對流。

陸、結論

透過這個研究，我們運用 3D 列印等設備來製作空中陀螺是可行的，因 3D 列印本身所具備良好的發展性與修改彈性，科學中自行動手作有其必要性，但若是從科學研究以及改良的方面進行切入，需要有足夠的嚴謹性以及可再現性，運用科技輔助設備能夠改善許多手作時可能遇到的問題與人為誤差，以下為本研究之結論以及對於空中陀螺未來發展的建議：

- 一、 手作空中陀螺不論扇形扇葉數量的多寡，逆時針開口皆優於順時針開口，且兩者於扇葉數量越多時，飛行時間都越長，效率越佳。
- 二、 手作空中陀螺不論扇葉數量的多寡，逆時針開口的扇形扇葉皆優於長方形扇葉，且兩者於扇葉數量越多時，飛行時間都越長，效率越佳。
- 三、 採用加重環調整扇葉重量，測量重量及最高飛行高度後，以散布圖方式計算出重量增加與高度減少之趨勢線，可利用此公式將不同重量之扇葉進行高度彌補，以考量重量變因。
- 四、 3D 列印扇葉順時針開口以扇葉數量 3 片為最佳，且扇葉數量越少時飛行效率越好，但逆時針開口除 3 片扇葉外，則是隨扇葉數量增加有飛行效率越好的趨勢。
- 五、 扇葉的平均最高飛行高度與平均轉速兩者具有高度正相關性(相關係數為 0.762)，表示扇葉的平均轉速增加時其最高飛行高度也會隨之增加。
- 六、 當底部開口皆為相同之扇形，正方形逆時針開口扇葉的補償高度最佳，其次為扇形順時針開口扇葉。
- 七、 當底部開口全等於扇葉形狀，長方形扇葉不論開口方向皆優於其他兩者(扇形與三角形)，且以 4 片順時針長方形的效率為佳(為所有扇葉中最佳)，且長方形開口扇葉不論開口方向為順時針或逆時針，皆會因扇葉數量的增加而補償高度下降。
- 八、 不論扇葉開口方向，扇葉角度越小，補償高度越高，以 30° 角的補償高度為佳，且又以 30° 角時逆時針為最優。
- 九、 大多 3D 列印空中陀螺扇葉數量越多，飛行效率較佳，此結果大致與手作空中陀螺相同。
- 十、 相較於手作空中陀螺，3D 列印空中陀螺的飛行效率大多較為良好(需考量重量)。
- 十一、 建議採用逐格分析方式計算扇葉穩定後的真實平均高度，並結合各式感測器與程式開發面板製作自動陀螺發射器與計時器，藉以提升測量數據的準確性。

柒、參考文獻資料

一、第 63 屆全國中小學科學展覽會：轉吧~風動陀螺

取自：國立臺灣科學教育館 科展資訊管理系統

二、第 58 屆全國中小學科學展覽會：風兒圓舞曲-風力環轉動之研究

取自：國立臺灣科學教育館 科展資訊管理系統

三、第 44 屆全國中小學科學展覽會：挑戰爺爺的戰鬥陀螺

取自：國立臺灣科學教育館 科展資訊管理系統

四、第 44 屆全國中小學科學展覽會：Ready set go！轉，轉，轉

取自：國立臺灣科學教育館 科展資訊管理系統

五、迴旋幽浮！紙杯和牙籤居然能成為科學競賽的題目？原來這裡頭滿滿的細節啊！

取自：https://www.youtube.com/watch?v=5_hnKabIB5E

六、第 27 屆遠哲科學趣味競賽實施手冊：御風飛行(p11~p15)

取自：https://drive.google.com/file/d/1IJtWcy2gbvt1V0lxYu-Dk4g7-h69R_g9/view

七、TinkerCad

取自：<https://www.tinkercad.com/dashboard>

八、ChatGPT

取自：<https://chatgpt.com/>

九、DJI 全能 Vlog 空拍機 DJI Flip：僅 249 克、AI 智慧跟拍

取自：<https://www.outsiders.com.tw/post/36879>

十、看懂黑科技 | 3 分鐘了解無人機構造及飛行原理。

取自：<https://kknews.cc/tech/p8qqvb8.html>

十一、如何選擇適合妳的抽油煙機？

取自：<https://ding-ju.com/knowledge-detail.php?id=127>

十二、循環扇、電風扇「擺對位置」涼感加倍更省電。

取自：<https://3c.ltn.com.tw/news/53950>

十三、循環扇、電風扇比較：差異在哪裡？怎麼用才正確？循環扇功能、使用方式介紹

取自：<https://www.cool3c.com/article/153609>

十四、空動超入門#1 什麼是空氣動力學？

取自：<https://reurl.cc/xpYYjZ>