

# 中華民國第 59 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國小組 物理科

第二名

080122

振翅飛翔·御風而行-探究鳥兒「振翅」動作造成的各種現象

學校名稱：國立東華大學附設實驗國民小學

作者： 小六 陳芃庭 小六 伍瑞希 小六 賴信宗	指導老師： 李偲華 游時銘
-----------------------------------	---------------------

關鍵詞：撲翅機、振翅、氣流

# 摘要

本研究經過數十次不斷改良終於研發出能模擬鳥類振翅以及符應實驗需求的「撲翅機」來進行探究，發現撲翅機翅膀下拍時，翅膀每個截面上所產生的空氣作用力會同時在前進方向產生推力及在重力反方向產生升力，也成功藉由量測及推算，量化撲翅機在不同振翅速度下的推進力及升力值。

我們還利用自創的「水平推力/垂直升力檢測儀」，以「重量」形式呈現其數值，透過計算「升阻比」可精確得知撲翅機『翼尖後方』是後面隨行同伴飛行的好位置！

最後藉由「煙霧製造機」親眼看見撲翅機兩翼之翼尖後方產生垂直、方向相反的渦流，再次驗證後方隨行的鳥兒不僅會避開前方同伴的下沉氣流區，還會乘著翼尖後方的上升氣流前進，以獲得額外的升力呢！

## 壹、研究動機

某天，我望向一望無際的天空，成群結隊振翅飛翔的鳥兒引起我的注意，再仔細一看，鳥兒的隊型中好像隱藏了「V」字密碼呢！這使我非常好奇：鳥兒振翅的動作是如何影響飛行？鳥兒和鳥兒間的距離和位置有什麼特殊意義嗎？……許多關於鳥兒飛行的問題不斷地從我腦海中浮現，於是我決定和同學一同進行研究，解開鳥兒飛行的終極密碼。

## 貳、研究目的

- 一、研發並製作能模擬鳥類振翅的撲翅機。
- 二、探究撲翅機振翅時可能造成的各種現象。
- 三、探究撲翅機振翅時後方的氣流變化。

## 參、研究設備及器材

- 一、器材：錄影機、超音波震盪器、計時器、電子秤、打洞器、熱熔膠槍、齒輪、滑輪、實驗小馬達、高速馬達、碳纖骨架、電子調速器、馬達電子調速器測試儀、電壓檢測器、木棍、窗簾桿、布尺、角鐵、鋁支架、滴管。
- 二、材料：冰棒棍、透明塑膠片、螺絲、螺帽、鐵釘、玻璃紙、電池、塑膠棍、塑膠布、鋰電池、棉繩、紙箱瓦楞板、塑膠瓦楞板、保麗龍球、寶特瓶、塑膠杯、吸管、熱熔膠條、尼龍繩、立可白、黑色噴漆、小鐵環。
- 三、軟體：Shotcut、image-j

## 肆、研究過程及結果

### 實驗一：文獻探討

#### 一、鳥的飛行方式

在大自然中，鳥類一直是生物圈中重要的一分子，而人類也經常夢想和鳥一樣能在空中翱翔。雖然鳥類的運動方式有許多種，但飛翔使鳥類在自然界中佔盡優勢。飛翔可以避開地上的捕食者，亦可以快速拓展分佈領域，增加食物來源和避免不佳的生活環境，而南北遷徙的候鳥就是自然界中最佳的例子。

鳥類飛行過程中，飛行方式主要可分為三種：

- (一)振翅：振翅飛行是鳥類最基本的一種飛行方式，需要依靠翅膀向上與向下的運動方式來完成。鳥類藉由不斷掄動翅膀規律性的振動，克服空氣阻力以及其自身重力，從而持續的飛行。
- (二)滑翔：滑翔是指當鳥類由高空往低處飛翔時，翅膀保持平行不動的狀態，是一種利用氣流往前飛翔的方法，許多鳥類在降落時，都是利用滑翔飛行的方式進行。
- (三)盤旋：鳥類為了省時省力，有時會利用上升氣流，邊畫圓圈邊飛高，在到達某一高點時，再利用滑翔的姿勢俯衝，進行長距離的移動，減少振動翅膀的機會。鳥類運用盤旋的飛行方式，通常可以持續飛行較長的時間。

**鳥類的飛行方式中，我們對鳥類的「振翅」動作特別感興趣，因為即使是最佳的滑翔者及盤旋高手，也常常需要靠拍打翅膀的方式起飛、調整高度、持續飛行。**

#### 二、關於「鳥類振翅」的相關科展研究：

在歷屆中小學科展中，有許多研究鳥類振翅情形的相關研究，依照其研究內容可分為兩大類型：

第一類型：「如鷹展翅上騰－重新得“力”」（全國科展第45屆）、「翹首振翼－再次得力」（全國科展第48屆）、「翼手龍的飛舞」（全國科展第49屆）等作品，皆以鳥類為參考範本，進行翅膀的模型設計，再將自行設計的模擬機翼以固定、靜止之姿放入風洞中，藉以模擬該模擬機翼在空中真實飛行時的狀態以觀察其變化。

第二類型：以「最佳振翅翼飛具--半活動翅骨翼之設計與測試」（國際科展2004年）之作品為例，則是將振翅機放入風洞中，觀察在相同風速、相同振翅頻率(每分鐘振翅翼拍動144下)下，測試其在不同振翅機設計條件下的升力變化情形。

上述研究皆須借助風洞中穩定的氣流，達到觀察待測物的升力或阻力之改變情形。風洞是用來產生風速穩定、可控制風量的「人造風」之管道。許多研究中常常藉助風洞來了解待測物其不同外觀特徵所承受的風阻多寡，或是將待測物模型置於風洞中進行試驗，來模擬待測物在空中真實飛行時的相對性原理。這兒的相對性原理是指待測物在流體中運動所受的力，與待測

物不動而流體以相同速度相對待測物運動時，待測物所受的力相同。

但是，這些研究方式都無法得知鳥類單純依靠本身自行拍動翅膀所造成的各種現象。因此本研究除了想要研發一架能模擬鳥兒拍動翅膀的撲翅機之外，還希望實驗全程能在一個幾近無風的環境中進行，以阻隔環境氣流所造成的可能影響，如此才能原汁原味、精準的呈現鳥兒在不同的振翅速度下如何產生升力和推力，以及鳥類振翅時其後方的氣流變化。

## 實驗二：撲翅機設計及實驗環境介紹

### 一、撲翅機設計

#### (一)設計理念：

基於上述文獻探討，我們想探究單隻鳥在不同振翅速度時的升力及推力表現，以及領頭鳥後方第一隻鳥所受到的升力及推力的影響為何。因此研究之初的首要之務是要設計出一隻能模擬鳥兒振翅的撲翅機，且此撲翅機須具有能調整振翅速度與堅固耐用等特色。我們花了數個月的時間不斷地進行構思設計、尋找零件、組裝測試，以下我們將敘述撲翅機的四代演進過程，並詳述其尺寸、重量、製作方式及優缺點分析。

#### (二)撲翅機代數演進：

### 第一代 馬達驅動單翼冰棒棍骨架撲翅機



■尺寸：長 14cm\*寬 30cm\*高 12cm

■重量：70.74g(含馬達、電池)

■製作方式：

以透明片、冰棒棍、鐵釘組成，依靠馬達(1.5V, 轉速 25000rpm)驅動進行單翼振翅的撲翅機。

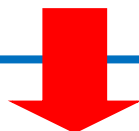
■優缺點分析：

◎優點-(1)材料容易取得。

◎缺點-(1)冰棒棍的紋理很明顯，裁剪或釘釘子時容易順著方向裂開。

(2)只能單翼振翅。

(3)無法調整振翅速度。



## 第二代 馬達驅動雙翼塑膠骨架撲翅機



■尺寸：長 15cm\*寬 42cm\*高 7cm

■重量：94.82g(含馬達、電池)

■製作方式：

以玻璃紙、塑膠片、鐵絲、竹籤、木片組成，依靠馬達(12V，轉速 25000rpm)驅動進行雙翼振翅的撲翅機。

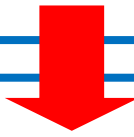
■優缺點分析：

◎優點-(1)利用簡單的塑膠骨架設計即可使雙翼進行對稱性振翅。

◎缺點-(1)無法調整振翅速度。

(2)塑膠片與鐵絲軸心摩擦力過大，需要效能更好的馬達才能使軸心流暢地轉動。

(3)材料不夠扎實，實驗次數頻繁時容易發生故障。



## 第三代 馬達驅動雙翼塑膠齒輪骨架撲翅機



■尺寸：長 10cm\*寬 27cm\*高 8cm

■重量：53.73 g(含馬達、電池)

■製作方式：

以玻璃紙、塑膠齒輪、塑膠棒組成，依靠高速小馬達(空心杯電機，3.7V，轉速 51200rpm)進行雙翼振翅的撲翅機。

■優缺點分析：

◎優點-(1)利用馬達帶動塑膠小齒輪的設計可以解決第二代塑膠片與鐵絲軸心摩擦力過大的問題。

(2)翅膀振動速度加快許多。

◎缺點-(1)無法調整振翅速度。

(2)翅膀骨架過於單薄，振翅力道過小，對於後續研究有困難。

(3)材料不夠扎實，實驗次數頻繁時容易發生故障。



## 第四代 馬達驅動雙翼碳纖骨架撲翅機



■尺寸：長 49.5cm\*寬 115cm\*高 17cm

■重量：400g(含電子零件、鋰電池)

■製作方式：

以碳纖骨架、碳纖維齒輪、塑膠棍、塑料布面組成，依靠高速馬達(12V，轉速 45960 rpm)、電子調速器、馬達電子調速器測試儀進行雙翼振翅的撲翅機。

■優缺點分析：

◎優點-(1)可使雙翼進行對稱性振翅。

(2)可調整振翅速度。

(3)翅膀骨架形狀更接近真實的鳥類。

(4)結構堅固，可支援長時間的實驗。

◎缺點-(1)零件尋覓費時。

(2)組裝程序繁複。

(3)重量較重。

(三)第四代「馬達驅動雙翼碳纖骨架撲翅機」各構造名稱及功能：

歷經一~三代撲翅機的設計與測試後，我們更了解可符應本研究所需的撲翅機之架構特色與性能為：使用齒輪組使雙翼能對稱性振翅、使用高速馬達提升振翅速度、翅膀須能縫製骨架使其更趨近真實鳥類翅膀、能調整振翅速度、鳥體堅固耐用。因此，我們到遙控飛機模型店請教專家黃先生，和黃先生討論我們的研究需求後，一同協助我們尋找零件。回學校後，我們便自行組裝完成「第四代撲翅機」(如圖 2-1)，其各構造名稱及功能如圖 2-2~2-9。



圖 2-1：自買零件組裝成實驗用撲翅機

## 塑料布面翅膀

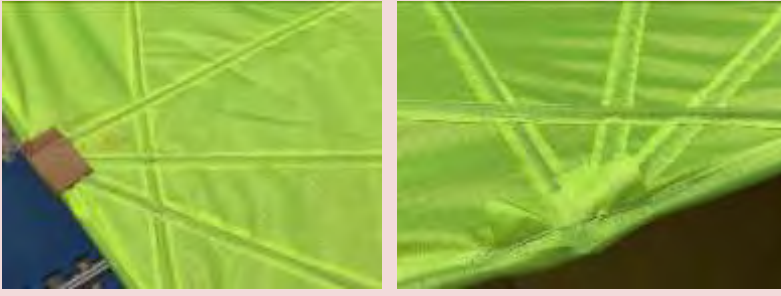


圖 2-3：以候鳥的翅膀為設計概念，在塑料布面上覆以塑膠細管當作翅膀骨架，模擬真實鳥類的翅膀骨骼。

## 齒輪組



圖 2-4：使用齒輪組合，帶動高速馬達，使撲翅機雙翼可對稱性振動。

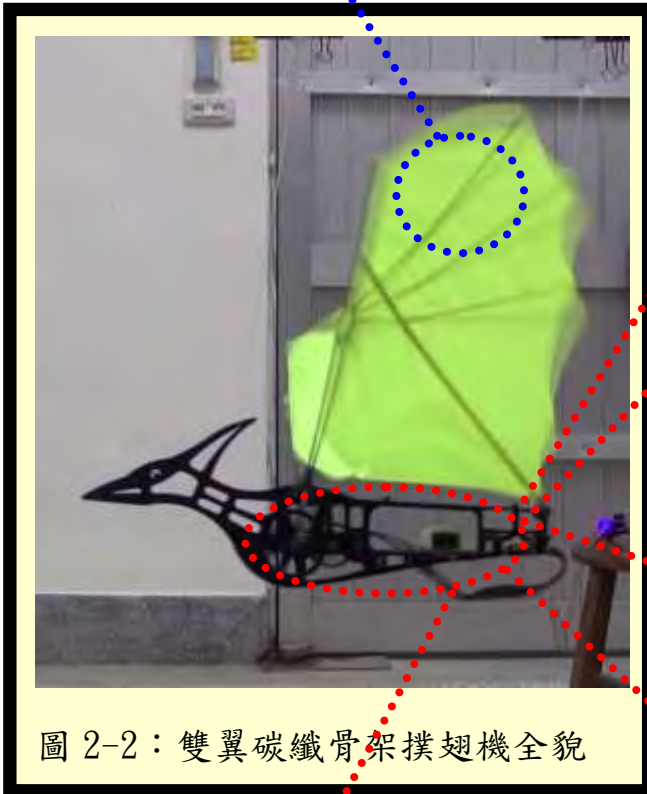


圖 2-2：雙翼碳纖骨架撲翅機全貌

## 高速馬達



圖 2-5：選用散熱佳、重量輕、馬力大的遙控直升機專用之 KV3800 型號高速馬達。

## 電子調速器



圖 2-6：一端連接高速馬達，另一端連接馬達電子調速器測試儀及鋰電池組，功能是接收馬達電子調速器測試儀的信號，根據此信號調節馬達的轉速，影響撲翅機的翅膀振動速度。

## 可充電 3S 鋰離子電池組



圖 2-9：和電子調速器連接，3S 電池組是代表這塊電池裡有三小個鋰電池，是可快速充電且循環壽命長，在高溫環境下穩定性高的遙控飛機專用之鋰電池組。

## 馬達電子調速器測試儀



圖 2-7：和電子調速器連接，可擺脫遙控設備進行手動調速。

## 鋰電池電壓檢測暨低電壓警報器(簡稱：電壓檢測器)



圖 2-8：和鋰電池連接，自動檢測鋰電池每個電芯的電壓和總電壓，當電壓低於設定值時，蜂鳴器會響起，紅色 LED 閃爍，可避免鋰電池因過度放電而造成損壞。

## 二、實驗環境介紹(如圖2-10)

1. 本研究想探討撲翅機振翅時所造成的各種影響，是故我們選擇在無風的天文台中進行。
2. 將窗簾桿釘在一粗木棍上(如圖2-11)，並將其架於鋁架上，形成一個高116cm，寬212cm的「冂」型支架。
3. 將第四代「雙翼碳纖骨架撲翅機」的頭尾分別以棉繩懸掛於「冂」型支架窗簾桿上的小滑輪。
4. 因應各實驗子題的需求再進行其他布置。
5. 在「冂」型支架前方約1.5m處以水平視角架設一攝影機，將所錄製的電子檔以Shotcut及image-j軟體判讀所需數據。

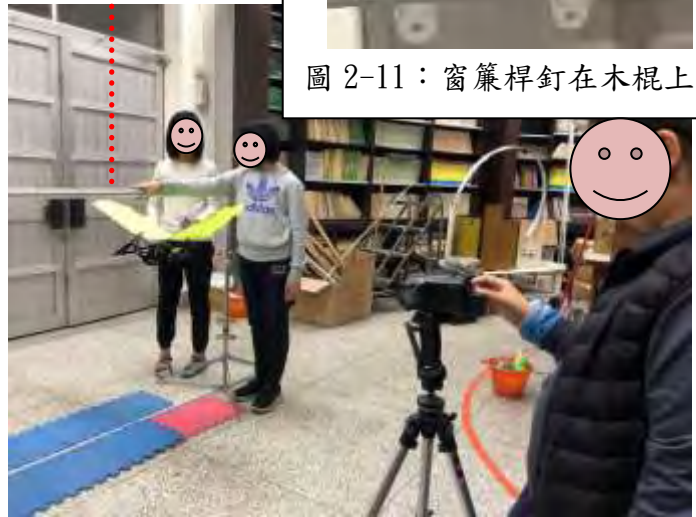


圖 2-11：窗簾桿釘在木棍上

圖 2-10：實驗環境布置。

## 實驗三：撲翅機的振翅速度如何影響其移動情形？

### (一)實驗步驟

1. 在「冂」型支架木棍上及鋁架側邊皆布置了一條布尺，以便進行撲翅機移動後的數據判讀(圖3-1)。
2. 用4個長尾夾固定懸掛撲翅機的小滑輪。
3. 將透明片裁剪成圓形後，打洞使其能套在「馬達電子調速器測試儀」的旋鈕上。為了每次實驗都能準確地調整振翅速度的變化，我們在洞孔邊緣等距離繪製六個記號，定義為速度刻度1~6，其中**速度1**為撲翅機能啟動振翅狀態的起始位置(圖3-2)。
4. 讓撲翅機在不同的6種速度刻度下運作，每種速度刻度各實驗5次，再將攝影機所錄製的電子檔以Shotcut軟體判讀振翅速度、移動情形，再以image-j軟體判讀撲翅機振翅時棉繩的角度變化。



圖 3-1：在「冂」型支架木棍上及鋁架側邊布置布尺，以便後續的數據判讀。



圖 3-2：在「馬達電子調速器測試儀」上套入有做6個等距的不同速度刻度記號的透明圓片。



(二)實驗結果

表 3-1：撲翅機在不同速度刻度下，其振翅速度及移動情形一覽表

測試儀 刻 度	實驗 次數	振翅 次數 (次)	振翅 時間 (秒)	振翅 速度 (次/秒)	垂直 上升 (公分)	水平 移動 (公分)	棉繩角度變化(度)		移動情形
							前盪	後擺	
刻度 1	1	12	9.63	1.25	0.09	2.57	3.80	0.00	撲翅機小幅度向 前盪→回到原點 →向前盪→回到 原點，反覆進行。
	2	16	12.40	1.29	0.17	3.58	5.31	0.00	
	3	13	10.05	1.29	0.11	2.84	4.20	0.00	
	4	15	12.01	1.25	0.13	3.11	4.60	0.00	
	5	16	12.37	1.29	0.10	2.80	4.14	0.00	
	平均	---	---	1.27	0.12	2.98	4.41	0.00	
刻度 2	1	11	7.27	1.51	5.02	18.99	29.60	-24.03	撲翅機大幅度地 向前擺→回到原 點→向後盪，反覆 進行。
	2	12	7.97	1.51	5.74	20.19	31.69	-24.50	
	3	11	6.93	1.59	4.60	18.22	28.30	-25.78	
	4	11	7.03	1.56	4.17	17.41	26.93	-24.47	
	5	15	9.70	1.55	4.73	18.47	28.72	-26.25	
	平均	---	---	1.54	4.85	18.66	29.05	-25.01	
刻度 3	1	7	3.77	1.86	0.15	3.42	5.07	4.92	撲翅機不穩定地 左右擺盪。
	2	12	6.60	1.82	0.09	2.64	3.90	3.07	
	3	7	3.80	1.84	0.13	3.18	4.71	2.98	
	4	9	5.00	1.80	0.15	3.39	5.02	3.92	
	5	5.5	2.97	1.85	0.14	3.26	4.83	2.17	
	平均	---	---	1.83	0.13	3.18	4.71	3.41	
刻度 4	1	16	6.3	2.54	0.91	8.32	12.48	8.74	撲翅機往前衝，機 身稍微向上抬 升，使得尾繩產生 抖動，後擺幅度極 小。
	2	15	6.07	2.47	1.33	10.03	15.11	9.89	
	3	10	4.03	2.48	2.03	12.33	18.70	16.52	
	4	12	4.75	2.53	1.92	12.00	18.17	17.31	
	5	17	6.58	2.58	1.09	9.08	13.64	12.79	
	平均	---	---	2.52	1.46	10.35	15.62	13.05	
刻度 5	1	12	3.42	3.51	3.28	15.53	23.82	22.40	撲翅機快速往前 衝，整個機身向上 抬升，使得尾繩明 顯抖動，後擺幅度 極小。
	2	16	4.51	3.55	3.65	16.34	25.15	23.32	
	3	12	3.4	3.53	3.50	16.02	24.62	21.26	
	4	12	3.38	3.55	4.32	17.70	27.41	22.89	
	5	13	3.67	3.54	3.99	17.05	26.32	21.54	
	平均	---	---	3.54	3.75	16.53	25.46	22.28	
刻度 6	1	12	2.78	4.32	9.20	24.94	40.47	34.73	撲翅機奮力往前 衝，整個機身向上 抬升，使得尾繩激 烈抖動，後擺幅度 極小。
	2	10	2.33	4.29	9.34	25.10	40.80	34.71	
	3	11	2.51	4.38	9.56	25.36	41.30	35.10	
	4	10	2.31	4.33	10.29	26.16	42.92	35.16	
	5	12	2.75	4.36	9.59	25.39	41.36	37.29	
	平均	---	---	4.34	9.60	25.39	41.37	35.40	

(三)實驗發現

將表 3-1 繪製成圖 3-3~3-5 發現：

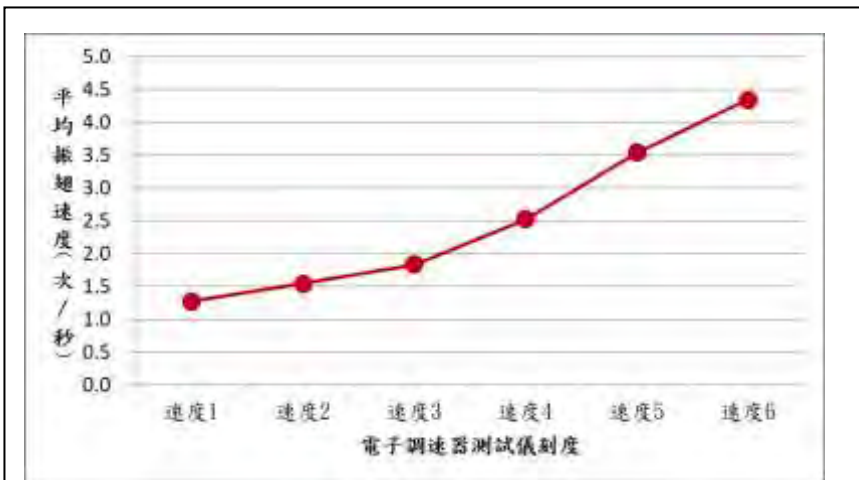


圖 3-3：撲翅機在不同速度刻度下與振翅速度關係圖。



圖 3-4：撲翅機在不同速度刻度下與其前盪後擺時棉繩角度之關係圖。

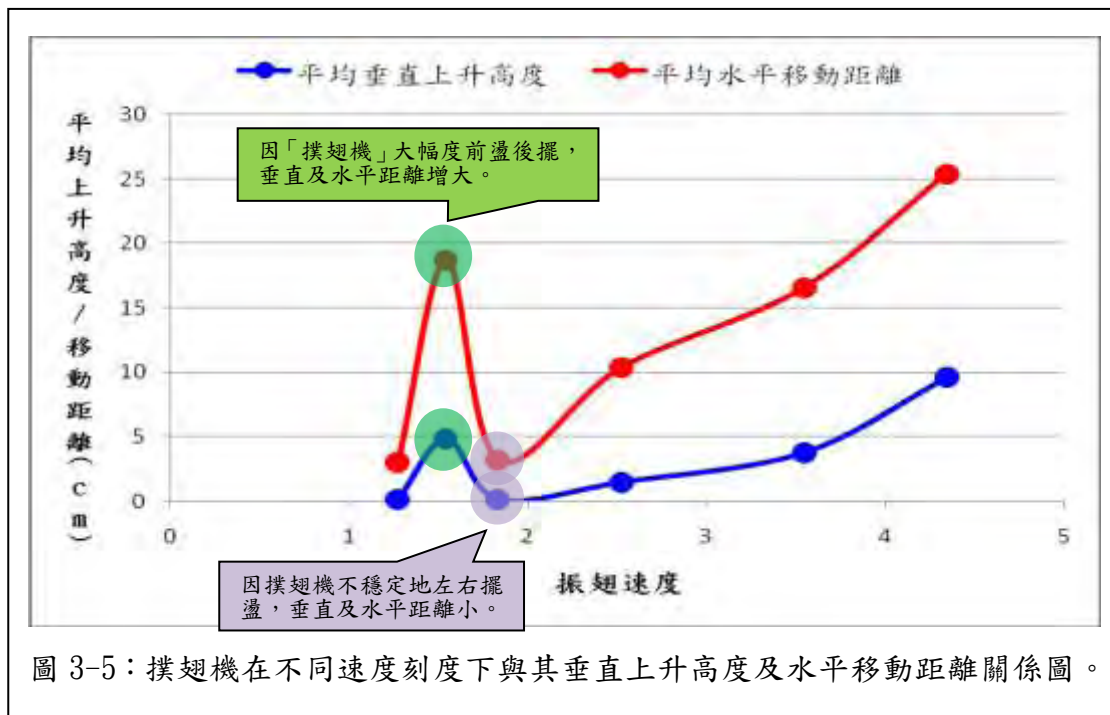


圖 3-5：撲翅機在不同速度刻度下與其垂直上升高度及水平移動距離關係圖。

1. 「馬達電子調速器測試儀」上的 6 個測試儀刻度的記號雖然等距，但從實驗影片分析中得知振翅速度並非等倍加速。

2. 撲翅機速度刻度 1 的平均振翅速度為 1.27 次/秒，只有反覆小幅度向前擺→盪回原位，垂直上升高度介於 0.09~0.17cm，水平位移介於 2.57~3.58cm。

3. 撲翅機速度刻度 2 的平均振翅速度為 1.54

次/秒，振翅過程中會往前盪→回到原位→往後盪→回到原位→往前盪……(如圖 3-6)，是故其後擺角度為負值。推測是因撲翅機振翅時會產生往前的推力及升力，但因往前推力及升力的力道不足，又被重力往下拉，使得撲翅機往後盪，但也因為一前一後像鞦韆來回擺盪的關係，使得垂直上升高度及水平移動距離大幅度地增加。

4. 撲翅機速度刻度 3 的平均振翅速度為 1.83 次/秒，振翅過程中撲翅機很不穩定地朝左朝右反覆擺盪(如圖 3-7)，導致其垂直上升高度值極小。

5. 撲翅機速度刻度 4~6 的平均振翅速度分別為 2.52 次/秒、3.54 次/秒、4.34 次/秒，振翅過程中，撲翅機會往前衝，機身也向上抬升，後盪幅度極小(如圖 3-8)。**振翅速度越快，尾部的棉繩抖動得越激烈，前盪的棉繩角度越大，垂直上升高度及水平移動距離的數值也隨之增加。**

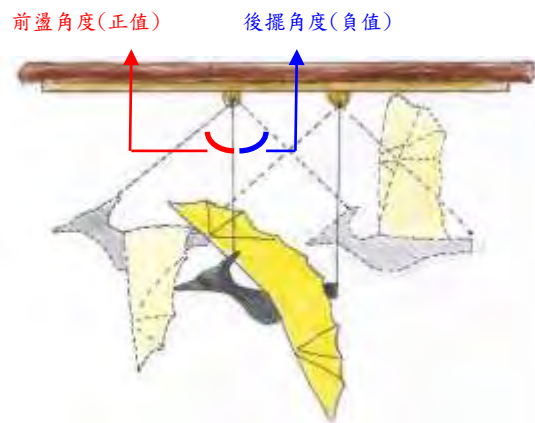


圖 3-6：「撲翅機」速度 2 時，因一前一後像鞦韆來回擺盪的關係，使得垂直上升高度及水平移動距離大幅度地增加。

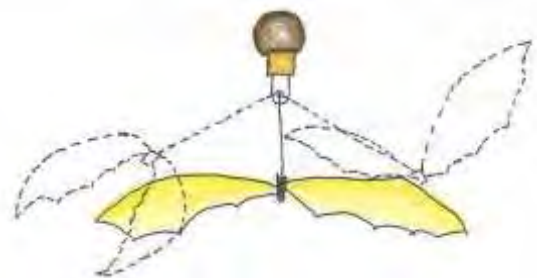


圖 3-7：「撲翅機」測試儀刻度 3 時，很不穩定地朝左朝右反覆擺盪，導致其垂直上升高度值極小。

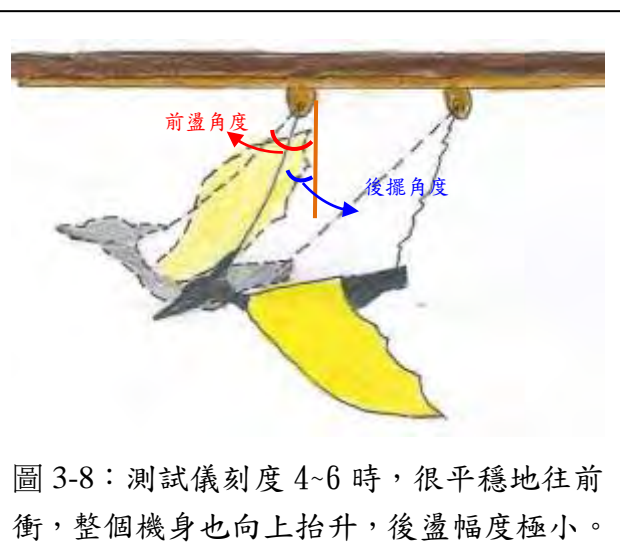


圖 3-8：測試儀刻度 4~6 時，很平穩地往前衝，整個機身也向上抬升，後盪幅度極小。

#### 實驗四：撲翅機的振翅速度如何影響其向前推力？

##### (一) 實驗步驟

1. 「 $\square$ 」型支架木棍上黏貼一條布尺，以便進行撲翅機移動同等距離所需時間的數據判讀。

2. 每次實驗都將撲翅機固定在同一起始位置，讓撲翅機在不同的 6 種速度刻度下振翅往前行進

1.2m，將攝影機所錄製的電子檔以 Shotcut 軟體精準地判讀撲翅機移動固定距離(1.2m)所需時間(如圖 4-1)。每種不同的速度實驗 5 次，取其平均移動時間值進行分析。



←圖 4-1：將「撲翅機」固定在同一起始位置，量測「撲翅機」在不同的 6 種速度刻度下振翅往前行進 1.2m 所需時間。

## (二)實驗結果

表 4-1: 撲翅機在不同的 6 種振翅速度下振翅往前行進 1.2m 所需時間一覽表

測試儀刻度		刻度 1	刻度 2	刻度 3	刻度 4	刻度 5	刻度 6
振翅速度		1.27 次/秒	1.54 次/秒	1.83 次/秒	2.52 次/秒	3.54 次/秒	4.34 次/秒
移動所需時間	實驗 1	87.20 秒	24.00 秒	2.45 秒	1.83 秒	1.42 秒	0.70 秒
	實驗 2	86.50 秒	23.58 秒	2.41 秒	1.81 秒	1.43 秒	0.70 秒
	實驗 3	86.23 秒	22.96 秒	2.45 秒	1.81 秒	1.40 秒	0.72 秒
	實驗 4	87.02 秒	23.70 秒	2.43 秒	1.79 秒	1.42 秒	0.70 秒
	實驗 5	86.84 秒	23.77 秒	2.43 秒	1.83 秒	1.42 秒	0.73 秒
	平均時間	86.76 秒	23.60 秒	2.43 秒	1.81 秒	1.42 秒	0.71 秒
移動情形描述		撲翅機像毛毛蟲一樣一步一步地向前行進。	撲翅機像毛毛蟲一樣一步一步地向前行進。	撲翅機流暢地向前滑行。	撲翅機快速、流暢地向前一面滑行，一面向上抬升。	撲翅機非常快速地往前衝，且滑行一段距離後機身開始向上抬升。	撲翅機一振翅，機身便開始向上抬升，並非常快速地往前衝。

## (三)實驗發現

1. 慢速振翅(振翅速度 1.27~1.54 次/秒)時，撲翅機像毛毛蟲一樣一步一步地向前行進，非常有趣！以 Shotcut 軟體極慢速播放影片，可以清楚觀察到撲翅機的翅膀從下往上揮動(上揚)時，撲翅機停在原位；但撲翅機的翅膀從上往下揮動(下拍)時，撲翅機會往前進，這可說明鳥的翅膀往下拍的動作，是一種「可創造力量、克服空氣阻力的動作」，這動作正是鳥類飛行推進力的主要來源。
2. 中、高速振翅(振翅速度 1.83~4.34 次/秒)時，撲翅機往前行進的速度越來越快，以 Shotcut 軟體極慢速播放影片，可以清楚觀察到不論撲翅機的翅膀是「下拍」或是「上揚」，都會使撲翅機往前進，但「翅膀下拍時所前進的距離」略大於「翅膀上揚時所前進的距離」(如表 4-2)，這說明鳥類在揚翅時不會產生推力，只能靠前一次掄動翅膀時所產生之水平方向的動量而向前衝。

表 4-2：撲翅機在不同速度刻度下，翅膀揮動情形與其前進距離一覽表

測試儀刻度	1	2	3	4	5	6
振翅速度(次/秒)	1.27	1.54	1.83	2.52	3.54	4.34
翅膀下拍時所前進的距離	0.7cm	1.6cm	6.5 cm	13.3 cm	16.7 cm	20.2 cm
翅膀上揚時所前進的距離	0cm	0cm	5.7 cm	11.9 cm	15.1 cm	17.1 cm

3. 將表 4-1 繪製成圖 4-2 發現，移動同樣 1.2m 距離時，測試儀速度刻度 1~2 所需時間遠大於其他速度刻度值，測試儀速度刻度 3~6 所需時間則相當接近。這說明鳥振翅需高於某速度，才會明顯產生飛行所需的推進力。

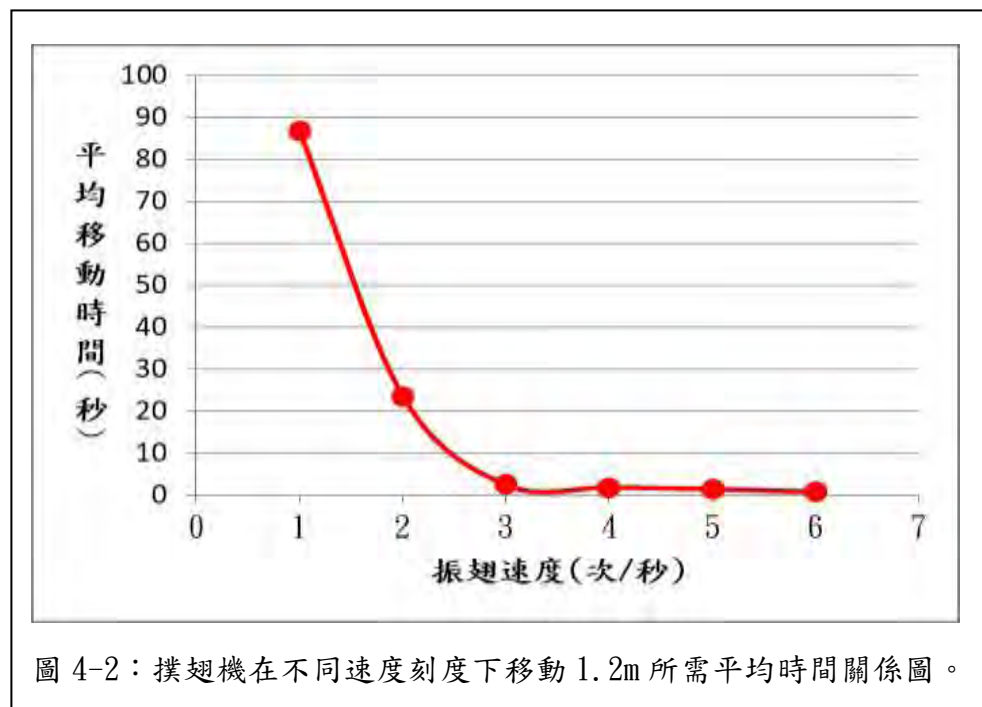


圖 4-2：撲翅機在不同速度刻度下移動 1.2m 所需平均時間關係圖。

4. 承上述發現我們知道撲翅機揮動翅膀的動作確實會產生鳥類飛行時所需的「推進力」，但這「推進力」到底有多大呢？我們決定以「牛頓第二運動定律」來一探究竟！

首先利用撲翅機在不同振翅速度下行進同等距離(S)所需的時間(t)下計算出其平均加速度(a)：

$$\text{因為 } S = \frac{1}{2} \times a \times t^2 \quad \text{所以 } a = \frac{2S}{t^2}$$

再利用牛頓第二運動定律中，當物體受力作用時，會在力的方向產生加速度(a)，其大小與力(F)成正比，與質量(m)成反比。

$$F(\text{推力}) = m \times a$$

計算後結果如表 4-3。

F(推力)的單位為「Kg · m/s<sup>2</sup>」，也是「N(牛頓)」，進行單位換算 1N =  $\frac{1}{9.8}$  Kg，將推力以公克重表示，換算後結果如表 4-3。

表 4-3：撲翅機在 6 種不同振翅速度往前行進 1.2m 下，所求得的加速度及推進力一覽表

(受限於頁數，僅在此呈現五次實驗的平均數值)

測試儀刻度 / 振翅速度	移動距離 (公尺)	移動時間 (秒)	經計算得之		經換算得之
			平均加速度(m/s <sup>2</sup> )	推力(Kg · m/s <sup>2</sup> )	推力(g)
刻度 1 / 1.27 次/秒	1.2	86.76	0.00032	0.00013	0.01
刻度 2 / 1.54 次/秒	1.2	2.43	0.40515	0.16206	16.54
刻度 3 / 1.83 次/秒	1.2	1.81	0.72950	0.29180	29.78
刻度 4 / 2.52 次/秒	1.2	1.42	1.19268	0.47707	48.68
刻度 5 / 3.54 次/秒	1.2	1.01	2.33739	0.93495	95.40
刻度 6 / 4.34 次/秒	1.2	0.71	4.76543	1.90617	194.51

5. 將表 4-3 繪製成圖 4-3，可發現：

(1) 測試儀刻度 1，振翅速度 1.27 次/秒，平均推力幾乎為 0，因此只能依靠「撲翅機」翅膀下拍 1 次才能稍稍往前移動 1 小步，但翅膀上揚則無法產生任何位移。

(2) 測試儀刻度 2~4，振翅速度 1.54~2.52 次/秒，平均推力介於 16.54~48.68 公克，「撲翅機」可以流暢、無停頓地向前行進。

(3) 測試儀刻度 5~6，振翅速度

3.54~4.34 次/秒，平均推力介於 95.40~194.51 公克，可看出撲翅機不僅非常快速向前衝刺，且機身也有非常明顯的抬升情形，這說明**鳥類飛行時能靠著雙翼快速、有力掄擊而產生動量，且沿著水平路線振翅飛行時，翅膀向下方揮動不僅可產生推進力，還能產生可克服本身重量的升力呢！我們將在下個子題探究撲翅機振翅時的升力表現。**

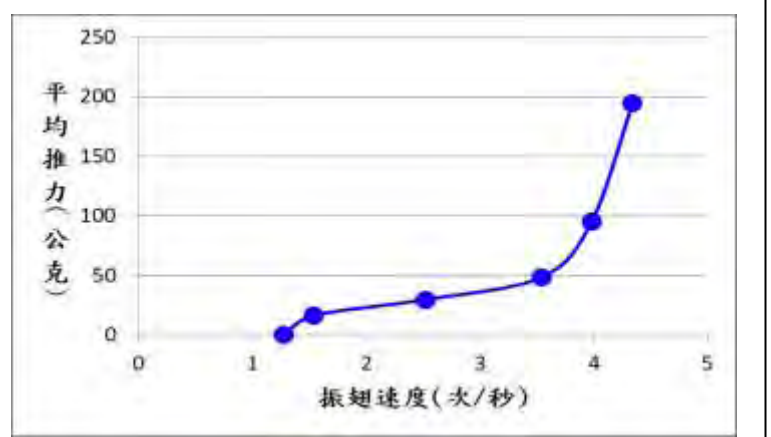


圖 4-3：撲翅機振翅速度與平均推力關係圖。

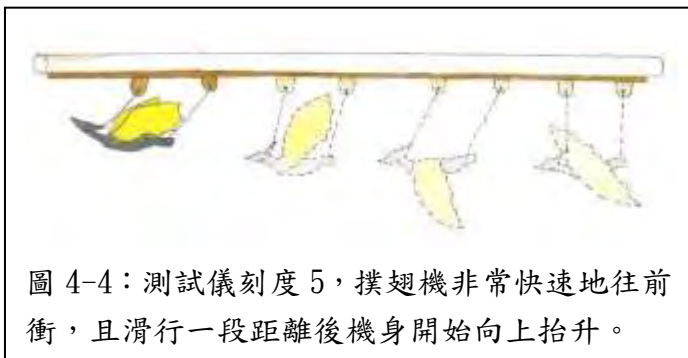
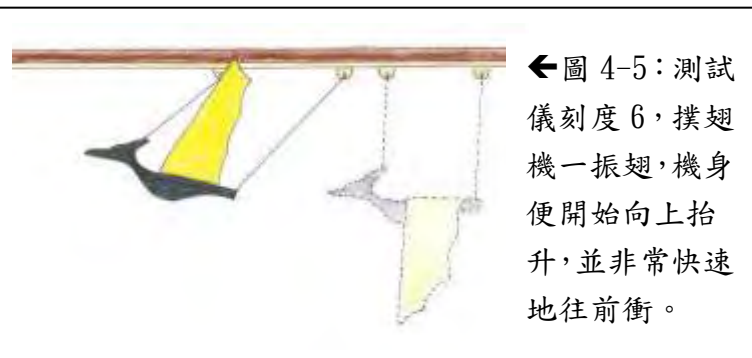


圖 4-4：測試儀刻度 5，撲翅機非常快速地往前衝，且滑行一段距離後機身開始向上抬升。



←圖 4-5：測試儀刻度 6，撲翅機一振翅，機身便開始向上抬升，並非常快速地往前衝。

## 實驗五：撲翅機的振翅速度如何影響其向上升力？

### (一) 實驗步驟

1. 將 400 公克撲翅機以木條、螺絲固定於角鐵，再將其立於電子秤上，此時電子秤會顯現撲翅機與木條、角鐵及所有五金零件的整體重量為 2067.1 公克。
2. 器材左前方約 1m 處架設一台攝影機，錄製撲翅機振翅時電子秤上的數值變化。
3. 讓撲翅機在不同的 6 種速度刻度下各運作 5 秒鐘，每種速度各實驗 5 次，再將攝影機所錄製的電子檔以 Shotcut 軟體判讀電子秤上的數值變化。

### (二) 實驗結果



圖 5-1：將撲翅機以木條、螺絲固定於角鐵，再將其立於電子秤上。



圖 5-2：在器材左前方約 1m 處架設一台攝影機，錄製撲翅機振翅過程中電子秤上數值。

表 5-1：撲翅機在不同的 6 種振翅速度下，電子秤所測得重量最高值與最低值一覽表

測試儀刻度 振翅速度	實驗 次數	撲翅機振翅時 電子秤所測得數值		升力值	情形描述
		重量最高值	重量最低值		
刻度 1 1.27 次/秒	1	2079.1	2014.7	64.4	「撲翅機」能在電子秤上平穩地振翅，底部角鐵基座無任何移位情形。
	2	2083.8	2017.2	66.6	
	3	2077.7	2012.8	64.9	
	4	2081.5	2019.5	62.0	
	5	2086.3	2023.2	63.1	
	平均	<b>2081.7</b>	<b>2017.5</b>	<b>64.2</b>	
刻度 2 1.54 次/秒	1	2084.6	1999.3	85.3	
	2	2089.1	2005.2	83.9	
	3	2092.8	2009.2	83.6	
	4	2085.7	2001.5	84.2	
	5	2091.1	2007.7	83.4	
	平均	<b>2088.7</b>	<b>2004.6</b>	<b>84.1</b>	
刻度 3 1.83 次/秒	1	2081.4	1978.7	102.7	
	2	2085.3	1983.2	102.1	
	3	2079.8	1973.5	106.3	
	4	2084.4	1977.6	106.8	
	5	2077.6	1970.2	107.4	
	平均	<b>2081.7</b>	<b>1976.6</b>	<b>105.1</b>	
刻度 4 2.52 次/秒	1	2089.2	1961.3	127.9	「撲翅機」振翅時，底部角鐵基座會在電子秤上跳動。
	2	2093.8	1969.2	124.6	
	3	2105.8	1972.2	133.6	
	4	2091.2	1963.6	127.6	
	5	2110.3	1973.4	136.9	
	平均	<b>2098.1</b>	<b>1967.9</b>	<b>130.1</b>	
刻度 5 3.54 次/秒	1	2080.4	1928.1	152.3	
	2	2081.8	1925.6	156.2	
	3	2077.6	1921.9	155.7	
	4	2081.6	1927.3	154.3	
	5	2078.5	1925.1	153.4	
	平均	<b>2079.9</b>	<b>1925.0</b>	<b>154.9</b>	
刻度 6 4.34 次/秒	1	2077.2	1897.7	179.5	「撲翅機」振翅時，底部角鐵基座會在電子秤上劇烈跳動。
	2	2078.6	1899.2	179.4	
	3	2077.6	1901.3	176.3	
	4	2078.1	1892.2	185.9	
	5	2078.2	1899.8	178.4	
	平均	<b>2077.9</b>	<b>1898.0</b>	<b>179.9</b>	

### (三)實驗發現

1. 透過Shotcut軟體將所錄製的影片檔以極慢速播放，發現**撲翅機翅膀下拍時，電子秤上的數值會減少**；**撲翅機翅膀上揚時，電子秤上的數值會增加**。這說明當翅膀下拍時在翅膀的每一個截面上所產生的空氣作用力，不僅會在前進方向產生推力，也會在重力的反方向產生升力。
2. 撲翅機在振翅速度5~6時，其振翅所產的升力居然能讓重達2067.1公克的器材在電子秤上跳動，整個器材反覆被抬起又被放下，對於這現象我們都驚訝連連！
3. 撲翅機振翅速度越快，電子秤所測得的重量最高值稍小，最低值也較小。
4. 將表 5-1 繪製成圖 5-3 發現**振翅速度越快，撲翅機所獲得的升力值越大**。

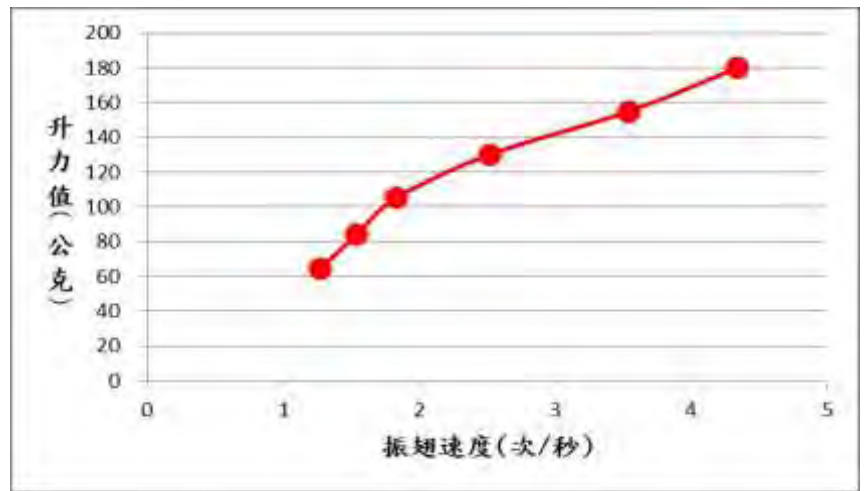


圖 5-3：「撲翅機」在不同的 6 種振翅速度下與其所測得之升力關係圖

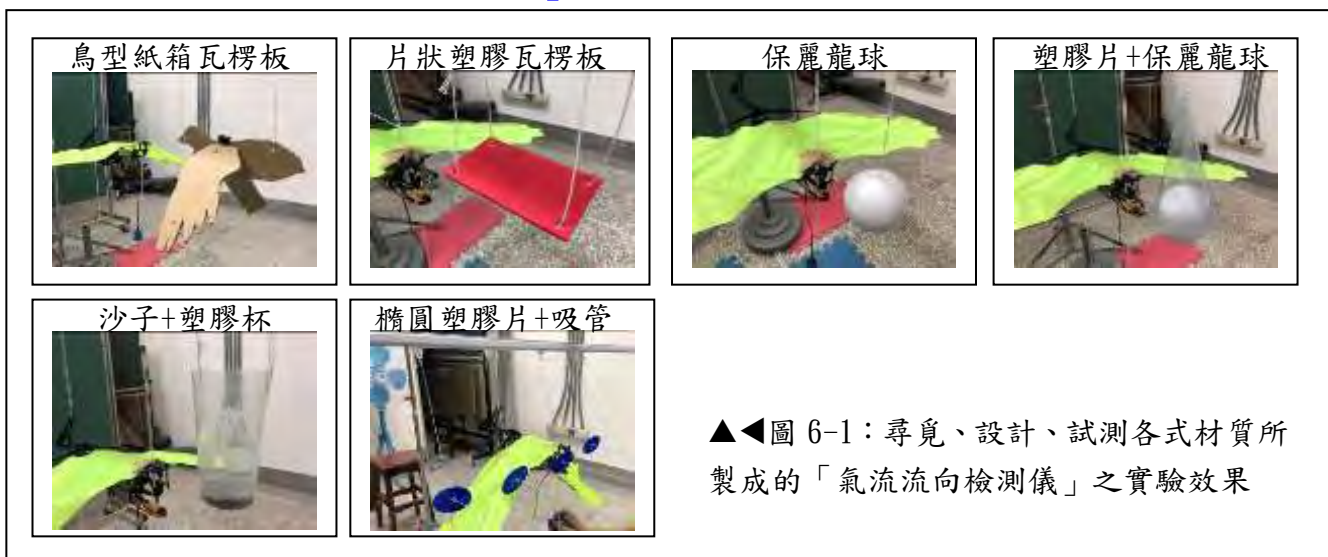
## 領頭鳥後面隨行的同伴飛行位置應該位在那兒最有助於飛行呢？

在子題二~五中，我們透過撲翅機的設計及各式實驗完成探究單一隻鳥在不同振翅速度下如何影響其本身的升力及向前推力。然而，我們更好奇的是，如果我們將設計的這架撲翅機當成鳥類群體飛行的領頭鳥，那麼領頭鳥後面同伴的位置應該位在那兒最有助於飛行呢？因此子題六、七實驗設計的焦點將關注領頭鳥後方不同位置的氣流變化情形。

### 實驗六：撲翅機的振翅速度如何影響其後方不同區域之水平及垂直氣流？

#### (一)設計並製作「氣流流向檢測儀」本體：

1. 我們花了許多時間尋覓各式材質(紙箱瓦楞板、塑膠杯、保麗龍球、塑膠片……，如圖 6-1)來試著測量領頭鳥後方氣流的大小，**最終決定以重量輕、佔位空間小、受風面大、形狀對稱而取勝的「橢圓形狀塑膠片」為主要素材來進行實驗**。



▲◀圖 6-1：尋覓、設計、試測各式材質所製成的「氣流流向檢測儀」之實驗效果





圖 6-2：裁剪長軸 8cm、短軸 4.5cm 橢圓塑膠片，上色。



圖 6-3：在塑膠橢圓片正中央打一個圓洞。



圖 6-4：在圓洞中嵌入管徑 0.5cm、長 1cm 的吸管。



圖 6-5：檢查吸管與透明塑膠片是否相互垂直。

## (二) 測量撲翅機的振翅速度如何影響其後方不同區域之水平氣流？

1. 將「氣流流向檢測儀」主體套在畫有尺規刻度(如圖 6-6)的棉繩上，移至起始值處(如圖 6-7)。
2. 利用支架使 5 個「氣流流向檢測儀」以與地面呈水平方向分別置於撲翅機左翼側面及平均分布於翅膀後方，分別命名這 5 個「氣流流向檢測儀」擺放位置為區域 A、B、C、D、E(如圖 6-8)。



圖 6-6：每隔 1cm 用黑色油性筆畫上記號，逢 5 或 10cm 則用紅色簽字筆做記號。



圖 6-7：將「氣流流向檢測儀」主體套在畫有尺規刻度的棉繩上。

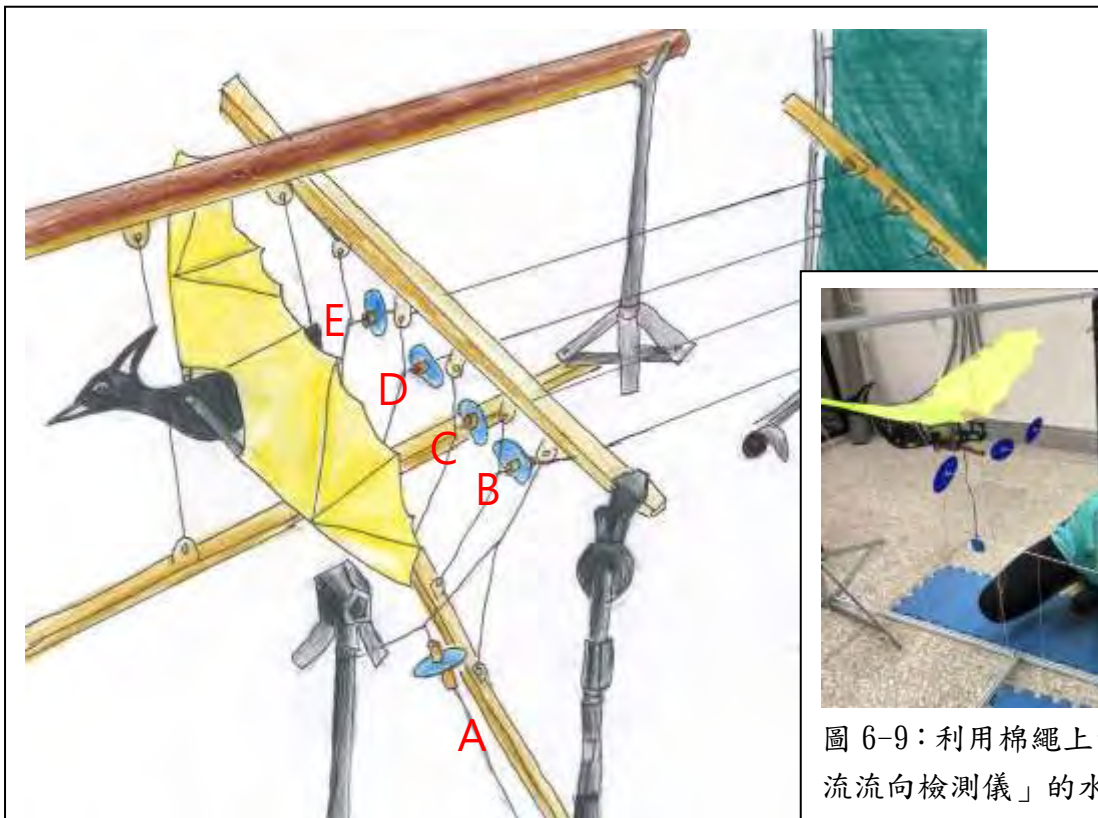


圖 6-8：將 5 個「氣流流向檢測儀」分別置於撲翅機的側面及平均分布於翅膀後方，並依區域命名為 A、B、C、D、E。

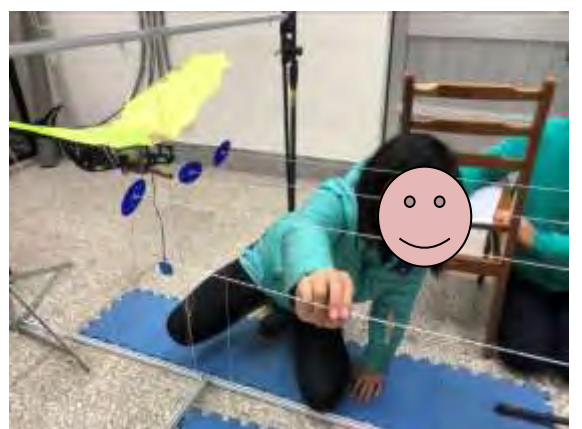


圖 6-9：利用棉繩上的尺規記號計數「氣流流向檢測儀」的水平移動距離。

3. 讓撲翅機在不同的 6 種速度刻度下各運作 5 秒鐘後，利用繩上的尺規記號計數「氣流流向檢測儀」的水平向後移動距離(如圖 6-9)。每種速度刻度各實驗 5 次，取其平均值。

1. 利用窗簾桿支架使 5 個「氣流流向檢測儀」稍加改良以垂直於地面的方向分別置於撲翅機左翼的側面及平均分布於翅膀正後方，分別命名這 5 個「氣流流向檢測儀」區域為 A、B、C、D、E(如圖 6-10~6-11)。

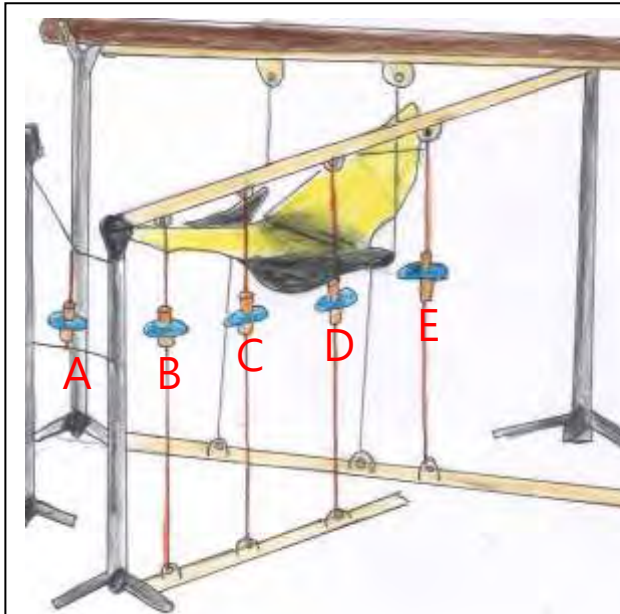


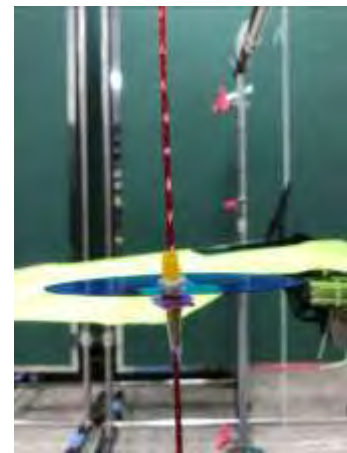
圖 6-10：將 5 個「氣流流向檢測儀」分別置於「撲翅機」側面及平均分布於翅膀後方，並依區域命名為 A、B、C、D、



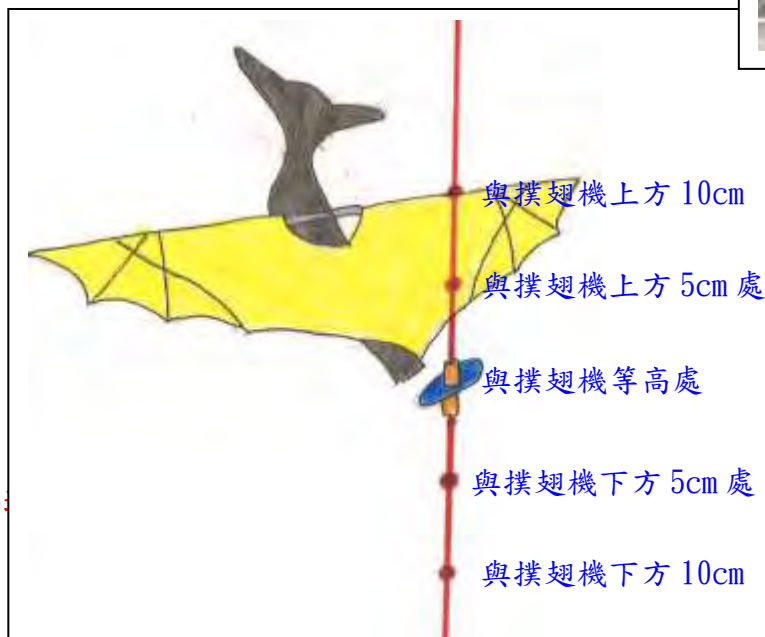
圖 6-11：實驗環境實景照

2. 利用立可白在尼龍繩上做尺規記號以方便使用電腦軟體計數「氣流流向檢測儀」的上升距離(如圖 6-12)
3. 改變不同變因的三個小實驗：

- (1) 撲翅機在 6 種不同振翅速度下，將「氣流流向檢測儀」架設於撲翅機翅膀側面及正後方 5 個不同區域。
- (2) 選擇(1)結果中最佳振翅速度，將 5 個「氣流流向檢測儀」架設於 A~E 區與撲翅機等高處、上方 5cm、上方 10cm、下方 5cm、下方 10cm 處(圖 6-13)。



◀圖 6-12：尼龍繩上的立可白尺規記號可便於使用軟體計數「氣流流向檢測儀」的上升距離。

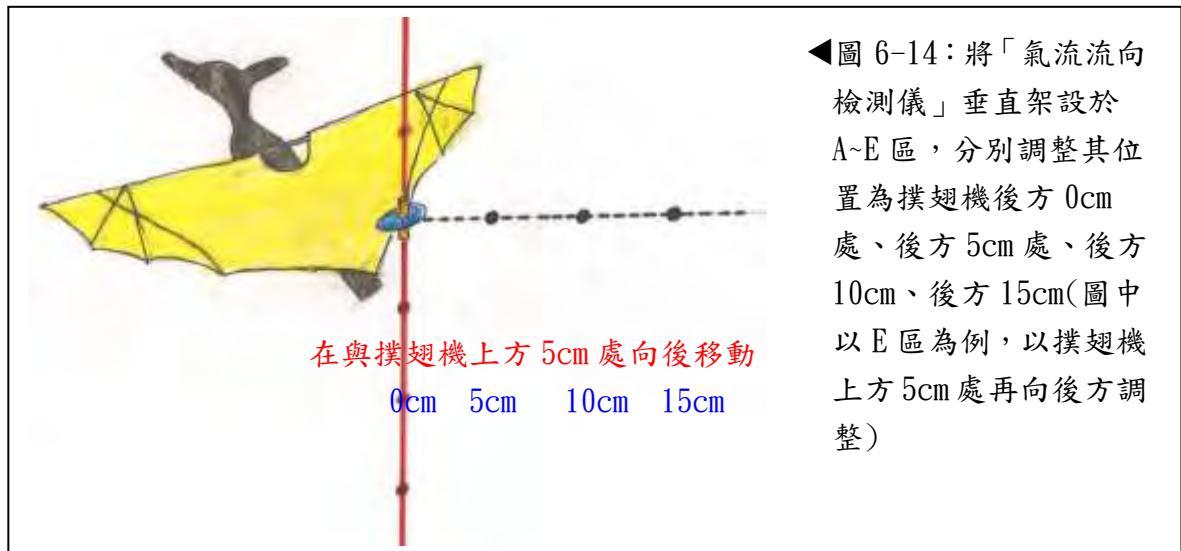


(3):

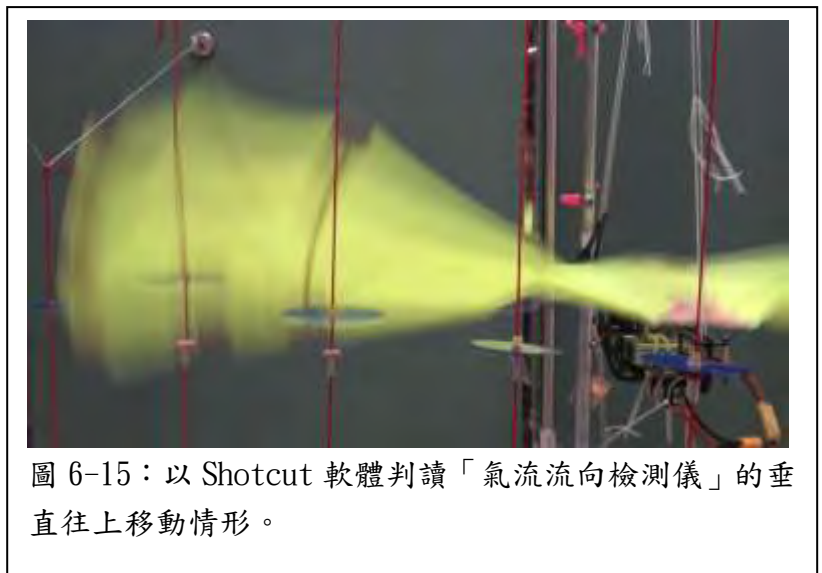
◀圖 6-13：將「氣流流向檢測儀」垂直架設於 A~E 區，分別調整其高度為與撲翅機等高處、上方 5cm、上方 10cm、下方 5cm、下方 10cm 處(圖中以 E 區為例)

檢測

儀」分別架設於 A~E 區撲翅機後方 0cm、5cm、10cm、15cm 處(如圖 6-14，假設(2)實驗結果中的最佳高度為上方 5cm)。



4. 將攝影機所錄製的電子檔以 Shotcut 軟體判讀「氣流流向檢測儀」的垂直往上移動情形(圖 6-15)。每種速度刻度各實驗 5 次，取其平均值。



## (二)實驗結果

表 6-1：撲翅機在不同的 6 種振翅速度下，各區域「氣流流向檢測儀」的後移水平距離一覽表(受限於頁數，僅在此呈現五次實驗的平均數值)

測試儀刻度 / 振翅速度	「氣流流向檢測儀」移動距離(cm)				
	A	B	C	D	E
刻度 1 / 1.27 次/秒	0.00	16.59	2.37	0.00	0.00
刻度 2 / 1.54 次/秒	0.00	28.47	11.72	0.00	0.00
刻度 3 / 1.83 次/秒	0.00	37.20	56.19	7.56	0.00
刻度 4 / 2.52 次/秒	0.00	37.47	68.20	29.24	1.34
刻度 5 / 3.54 次/秒	0.00	41.14	93.19	55.88	13.11
刻度 6 / 4.34 次/秒	0.00	41.10	121.65	108.57	13.43

表 6-2：「撲翅機」在不同的 6 種振翅速度下，各區域「氣流流向檢測儀」的上升距離一覽表

(受限於頁數，僅在此呈現五次實驗的平均數值)

測試儀刻度 / 振翅速度	「氣流流向檢測儀」移動距離(cm)				
	A	B	C	D	E
刻度 1 / 1.27 次/秒	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
刻度 2 / 1.54 次/秒	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
刻度 3 / 1.83 次/秒	0.00	1.04	0.58	0.00	0.00
刻度 4 / 2.52 次/秒	0.00	2.42	1.94	2.40	0.00
刻度 5 / 3.54 次/秒	0.00	3.49	1.91	3.14	0.00
刻度 6 / 4.34 次/秒	0.00	5.82	4.44	4.78	0.00

測試儀刻度 6，振翅速度 4.34 次/秒時，所測得的上升氣流最大，故以此振翅速度進行下一個變因的研究。

表 6-3：「撲翅機」振翅速度 4.34 次/秒，各區域「氣流流向檢測儀」高度與其上升距離一覽表 (受限於頁數，僅在此呈現五次實驗的平均數值)

氣流流向檢測儀位置	「氣流流向檢測儀」移動距離(cm)				
	A	B	C	D	E
「撲翅機」等高	0.00	5.82	4.44	4.78	0.00
「撲翅機」上方 5cm	0.00	11.02	13.08	8.87	0.35
「撲翅機」上方 10cm	0.00	4.58	4.54	4.53	0.00
「撲翅機」下方 5cm	0.00	2.36	3.43	2.67	0.00
「撲翅機」下方 10cm	0.00	2.22	3.23	2.10	0.00

將振翅速度設定於 4.34 次/秒，「氣流流向檢測儀」在撲翅機上方 5cm 處所測得的上升氣流最大，故以此高度進行下一個變因的研究。

表 6-4：「撲翅機」振翅速度 4.34 次/秒，各區域「氣流流向檢測儀」位置與其上升距離一覽表 (受限於頁數，僅在此呈現五次實驗的平均數值)

氣流流向檢測儀位置	「氣流流向檢測儀」移動距離(cm)				
	A	B	C	D	E
「撲翅機」正後方	0.00	11.02	13.08	8.87	0.35
「撲翅機」後方 5cm	0.00	5.36	5.79	5.14	0.62
「撲翅機」後方 10cm	0.00	5.15	5.55	4.43	0.52
「撲翅機」後方 15cm	0.00	4.62	5.44	3.45	0.36

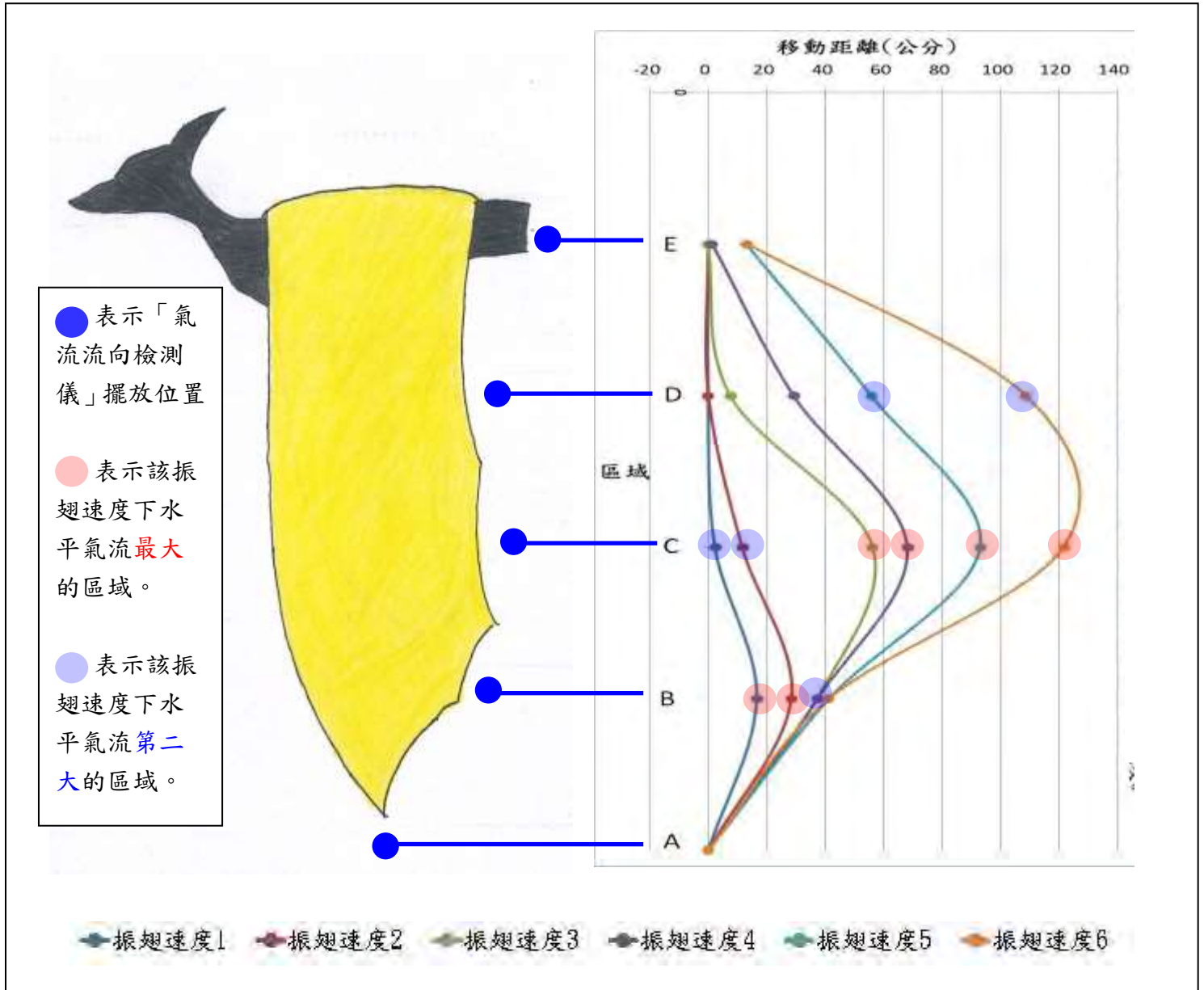
振翅速度設定為 4.34 次/秒，「氣流流向檢測儀」位於翅膀正後面的上方 5cm 處所測得的上升氣流最強。

### (三) 實驗發現

#### 1. 撲翅機的振翅速度如何影響其後方不同區域之水平氣流的實驗發現

(1) 我們想藉由「氣流流向檢測儀」來了解撲翅機振翅時，其翅膀側面及後方的水平氣流大小，如果該區的「氣流流向檢測儀」移動距離越遠，表示該區向後方流動的水平氣流越強，氣流越強越不利於後方隨行鳥兒的飛行。

(2) 將表 6-1 繪製成圖 6-16 發現：



- ② 測試儀刻度 1~2，振翅速度為 1.27~1.54 次/秒時，撲翅機後方水平氣流最大、第二大區域落在 B、C 區。
- ③ 測試儀刻度 3~4，振翅速度為 1.83~2.52 次/秒時，撲翅機後方水平氣流最大、第二大區域落在 C、B 區。
- ④ 測試儀刻度 5~6，振翅速度為 3.54~4.34 次/秒時，撲翅機後方水平氣流最大、第二大區域落在 C、D 區。
- ④ 撲翅機振翅速度越快，越靠近撲翅機身體後方的水平氣流越強，對於後方隨行鳥兒的飛行所造成的阻力越大；越靠近撲翅機翅膀尖端後方的水平氣流越弱，對於後方隨行鳥兒的飛行所造成的阻力越小。

## 2. 撲翅機的振翅速度如何影響其後方不同區域之垂直氣流的實驗發現

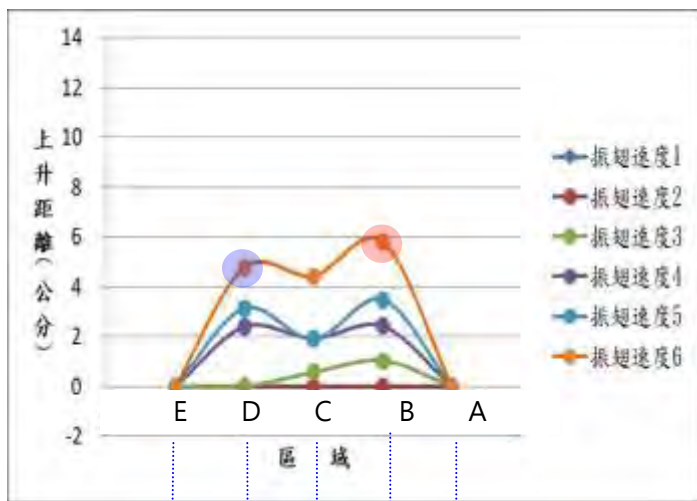


圖 6-17：6 種不同振翅速度與其各區域「氣流流向檢測儀」上升距離之關係圖

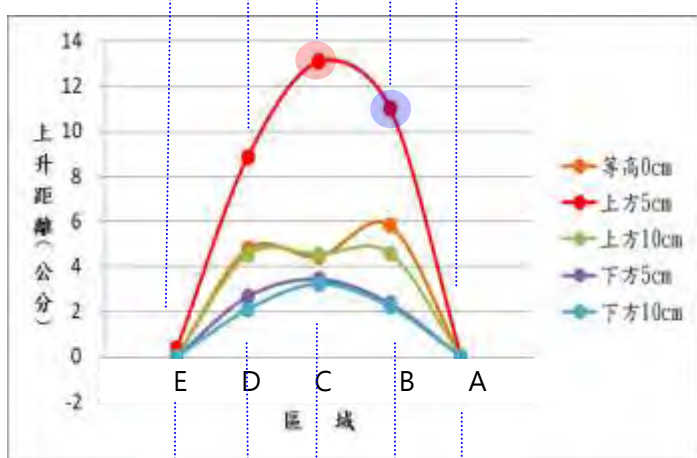


圖 6-18：「撲翅機」振翅速度 4.34 次/秒下，各區域「氣流流向檢測儀」高度與其上升距離關係圖。

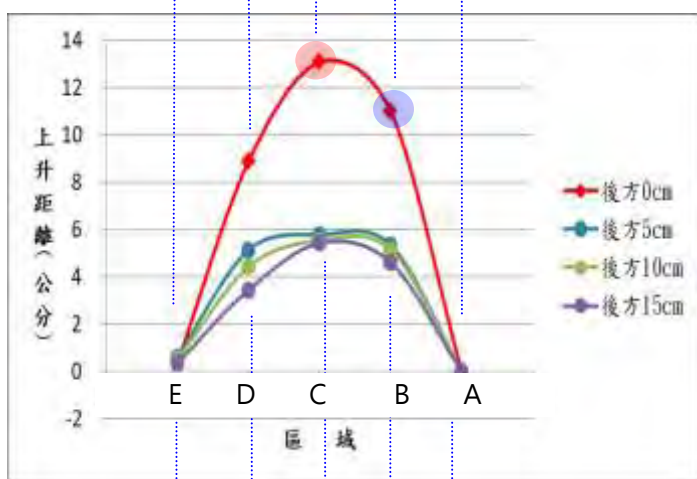
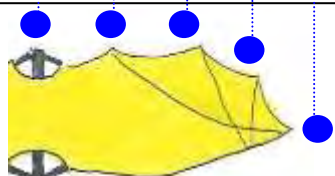


圖 6-19：振翅速度 4.34 次/秒，上方 5cm，各區「氣流流向檢測儀」距機身遠近與其上升距離關係圖。



備註：● 表示該實驗中垂直氣流最大的區域。  
● 表示該實驗中垂直氣流第二大的區域。

(1) 我們想藉由改良後的「氣流流向檢測儀」來了解撲翅機振翅時，其翅膀側面及後方的垂直向上氣流大小，如果該區「氣流流向檢測儀」上升距離越高，表示該區向上流動的垂直氣流越強，氣流越強越有助於後方隨行鳥兒的飛行。

(2) 將表 6-2 繪製成圖 6-17 發現：

- ① 振翅速度 1~2 (1.27~1.54 次/秒) 時，所有區域的「氣流流向檢測儀」完全沒有上升，這表示振翅速度過慢時，翅膀側面及後方無顯著上升氣流產生。
- ② 振翅速度 4~6 (2.52~4.34 次/秒) 時，各區的「氣流流向檢測儀」有顯著上升情形，其中區域 B、D 的上升幅度較大，表示該區的上升氣流較強。這說明當鳥兒振翅飛行時，牠同時也製造向上流動的氣流幫助同伴飛行。
- ③ 振翅速度越大，B~D 區「氣流流向檢測儀」的上升距離也隨之增大，本實驗中振翅速度 6 時，區域 B 的上升氣流最強。

(3) 將表 6-3 繪製成圖 6-18 發現：

- ① 將「氣流流向檢測儀」置於機身下方 5cm 或 10cm 處，同區域的上升數值極為接近，其中區域 C 的上升氣流較強。
- ② 將「氣流流向檢測儀」置於撲翅機身等高處、上方 10cm 處時，各區域的上升數值極為接近，且區域 B、D 的上升氣流較強。
- ③ 將「氣流流向檢測儀」置於撲翅機身上方 5cm 處，其區域 B、C、D 的上升氣流大大高於其他距離，
- ④ 整體而言，不論翅膀的哪個區域，機身上方的上升氣流優於機身下方的上升氣流。其中機身上方 5cm 處的區域 C、B 上升氣流最強。

(4) 將表 6-4 繪製成圖 6-19 發現：

- ① 將「氣流流向檢測儀」置於機身正後方 0~15cm 處，各區域的上升幅度表現極為接近，皆為「∩」型，各區域上升氣流強度為 C>B>D>A=E。
- ② 將「氣流流向檢測儀」置於機身正後方 0cm 處，各區域的上升氣流皆優於其他距離，其中 C、B 的上升氣流最強。

(5) 綜合以上發現，可得知振翅速度越快，位於機身正後方，上方 5cm 處，產生的垂直氣流可讓「氣流流向檢測儀」上升距離最高，其中又以 C 區最高為 13.08cm，B 區次之為 11.02cm。

## 設法以更精準的方式找出隨行同伴的最佳飛行位置！

在子題六中得知，量測「氣流流向檢測儀」的水平後退距離及垂直上升距離，可分別檢視撲翅機振翅時，翅膀後方不同區域水平向後(不利於後方隨行鳥兒的飛行)及垂直向上(有助於後方隨行鳥兒的飛行)氣流的強弱。

實驗中得知撲翅機振翅速度最快為 4.34 次/秒時，水平向後的氣流由強至弱為：區域 C>D>B>E>A，其中區域 A 全無水平向後的氣流；而垂直向上的氣流最強之處則位於機身正後上方 5cm，其中又以 C 區最強為 13.08cm，B 區次強為 11.02cm。

但若想將兩者加以綜合比較找出對後面隨行同伴飛行的最佳位置，還是有困難，因此我們計畫將在子題七中設法改良「氣流流向檢測儀」的設計，以精確找出後面隨行同伴飛行的最佳位置！

### 實驗七：改良「氣流流向檢測儀」，嘗試以「重量」的形式呈現撲翅機後方水平及垂直氣流的大小？

#### (一)實驗設計理念

1. 在子題六發現垂直向上的氣流最強之處位於機身正後上方 5cm，我們將以此處為實驗點，改良「氣流流向檢測儀」的設計，使其所量測出區域 A~E 的水平推力及垂直升力能以「重量」的形式呈現。因為衡量撲翅機後方的空氣動力性能，不能只單從升力，或單從阻力一個面向來看，必須把兩者結合起來，分析升力和阻力之間的對比關係，即為「升阻比」，因此計算出撲翅機正後上方 5cm 區域 A~E 的「升阻比」，以求能精確找出後面隨行同伴飛行的最佳位置！

#### 2. 測量撲翅機正後上方 5cm 處區域 A~E 之水平向後推力

(1)輔以小鐵環、釣線、量杯等材料改良原本量測「水平氣流之氣流流向檢測儀」設計，成為「水平推力檢測儀」，將其設置於撲翅機翅膀後方區域 A，在量杯中裝水 10gw，使其立於電子秤上(如圖 7-1~7-2)。

(2)撲翅機振翅時，設置於翅膀後方該區的「水平推力檢測儀」將因水平向後氣流的影響而往後退，就會帶動釣魚線，使得原本電子秤上所測得的 10gw 量杯的重量減少，那麼減少的重量即為該區所產生的水平推力，單位為 gw。

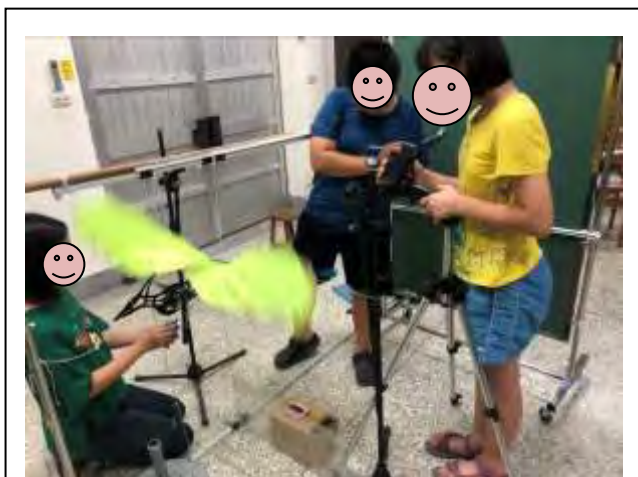


圖 7-1：實驗環境實景照

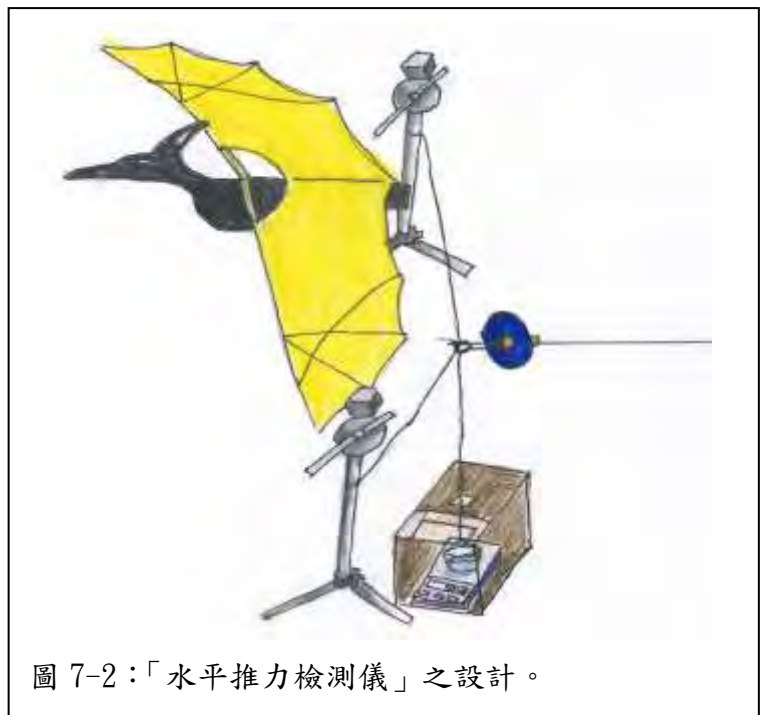


圖 7-2：「水平推力檢測儀」之設計。

(3) 啟動撲翅機的振翅速度為刻度 6(4.34 次/秒)，每次振翅 6 秒鐘，以攝影機錄製電子秤上的數值變化，再以 Shotcut 軟體精準判讀數值。

(4) 將此設置依序移至區域 B、C、D、E 進行實驗，每個區域各實驗 5 次，取其平均值。

### 3. 測量撲翅機正後上方 5cm 處區域 A~E 之垂直向上升力

(1) 輔以釣線、量杯等材料改良原本「量測垂直氣流之氣流流向檢測儀」設計，成為「垂直升力檢測儀」(如圖 7-3~7-4)，將其設置於撲翅機翅膀後方區域 A，在量杯中裝水 10gw，使其量杯立於電子秤上。

(2) 撲翅機振翅時，設置於翅膀後方該區的「垂直升力檢測儀」將因垂直向上氣流的影響而往上升，就會帶動釣魚線，使得原本電子秤上所測得的 10g 量杯的重量減少，那麼減少的重量即為該區所產生的垂直向上升力，單位為 gw。

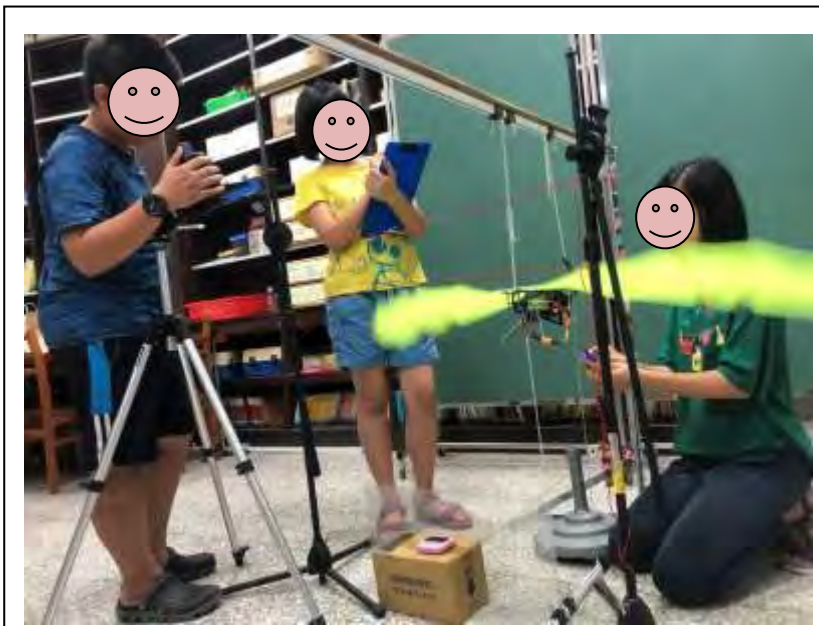


圖 7-3：實驗環境實景照

(3) 啟動撲翅機的振翅速度為刻度 6(4.34 次/秒)，每次振翅 6 秒鐘，以攝影機錄製電子秤上的數值變化，再以 Shotcut 軟體精準判讀數值。

(4) 將此設置依序移至區域 B、C、D、E 進行實驗，每個區域各實驗 5 次，取其平均值。

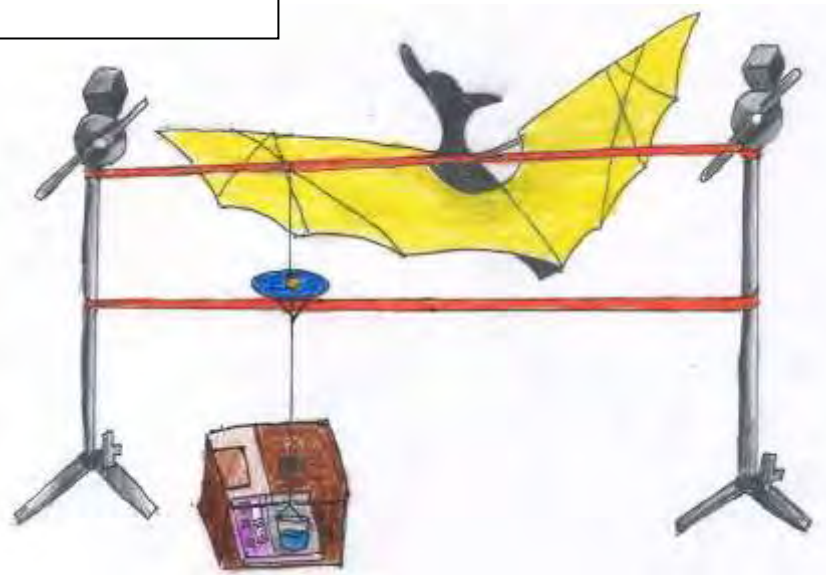


圖 7-4：「垂直升力檢測儀」之設計。



(二)實驗結果(受限於頁數，僅在此呈現五次實驗的平均數值)

表 7-1：撲翅機振翅速度為刻度 6(4.34 次/秒)時，其正後上方 5cm 處區域 A~E 之水平向後推力  
(受限於頁數，僅在此呈現五次實驗的平均數值)

區域	電子秤顯示重量		水平向後推力(gw)
	撲翅機無振翅時(gw)	撲翅機振翅時(gw)	
A	10	10.00	0.00
B	10	8.58	1.42
C	10	5.98	4.02
D	10	7.60	2.40
E	10	9.67	0.33

註：水平向後推力(gw)=撲翅機無振翅時電子秤所測得量杯中水重(gw)-撲翅機振翅時電子秤所測得量杯中水重(gw)

表 7-2：撲翅機振翅速度為刻度 6(4.34 次/秒)時，其正後上方 5cm 處區域 A~E 之垂直向上升力  
(受限於頁數，僅在此呈現五次實驗的平均數值)

區域	電子秤顯示重量		垂直向上升力(gw)
	撲翅機無振翅時(gw)	撲翅機振翅時(gw)	
A	10	10.00	0.00
B	10	8.47	1.53
C	10	8.21	1.79
D	10	8.92	1.08
E	10	9.86	0.14

註：垂直向上升力(gw)=撲翅機無振翅時電子秤所測得量杯中水重(gw)-撲翅機振翅時電子秤所測得量杯中水重(gw)

(三)實驗發現

- 藉由「水平推力檢測儀」/「垂直升力檢測儀」可精確得知撲翅機振翅時，其翅膀側面及後方的推力/升力之大小，**如果該區的「水平推力檢測儀」減少的重量越多，表示該區水平向後的力量越強，越不利於後方隨行鳥兒的飛行；如果該區的「垂直升力檢測儀」減少的重量越多，表示該區垂直向上的力量越強，越有利於後方隨行鳥兒的飛行。**
- 不論是測量水平向後推力或垂直向上升力實驗中，可以發現：
  - (1)區域 A 的「水平推力檢測儀」/「垂直升力檢測儀」重量永遠沒有變化。
  - (2)**區域 B~E 的「水平推力檢測儀」/「垂直升力檢測儀」在撲翅機起動後其電子秤上數值的變化由快至慢**：區域 B 的檢測儀在 1 秒鐘內，其數值即迅速變化至最大差值；而區域 E 的檢測儀則是在撲翅機啟動的前幾秒數值完全沒有變化，至最後 1 秒時數值才緩緩產生變化。

3. 以實驗所得的「**水平推力**」÷「**垂直升力**」計算撲翅機正後上方 5cm 處各區的「**升阻比**」(如表 7-3)，可得知區域 B 的升阻比最大，比值為 1.08，說明撲翅機『翼尖後方』是後面隨行同伴飛行的好位置！

表 7-3：撲翅機正後上方 5cm 處各區「升阻比」之一覽表

區 域	A	B	C	D	E
垂直平均升力(g)	0.00	1.53	1.79	1.08	0.14
水平平均推力(g)	0.00	1.42	4.02	2.40	0.33
升 阻 比	0.00	1.08	0.45	0.45	0.43
隨行同伴最佳位置		✓			

4. 承 3 之發現當鳥群振翅飛行時，前面領頭鳥的翅膀在空中揮動，翼尖後的上方會產生一股微弱的垂直上升氣流，後方鳥兒爲了利用這股上升氣流，以節省自己的體力，就緊跟在前一隻鳥兒翼尖後方飛行，一隻接著一隻排列著，一群鳥兒的飛行隊伍就成了「V」字形排列了！

### 實驗八：利用水煙霧觀察撲翅機兩翼的翼尖後方氣流之流動情形。

#### (一)實驗步驟

1. 自製「**煙霧製造機**」：將超音波震盪器置於自製黑色箱子內，箱上方孔洞能使煙霧更集中(如圖 8-1)。

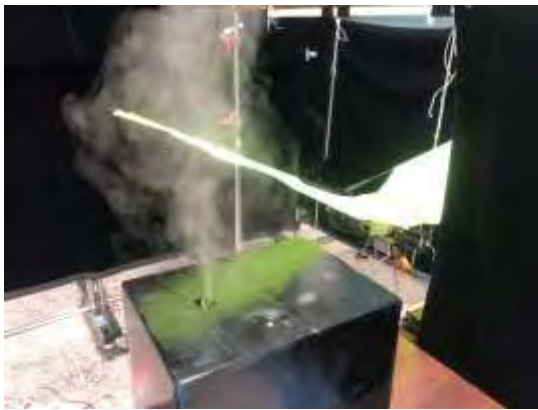


圖 8-1：將自製「煙霧製造機」置於撲翅機「翼尖後方」。




圖 8-2：器材後 1.5m 處以水平視角架設攝影機以進行後續分析。

2. 器材周圍圍上黑絨布，以讓白色水煙霧更加明顯。
3. 設定撲翅機振動速度為 2.52 次/秒，將自製「**煙霧製造機**」置於撲翅機左翼及右翼「**翼尖後方**」(子題六、七所得之**隨行同伴最佳位置**)，以觀察此區立體氣流流動情形。
4. 器材後方 1.5m 處以水平視角架設攝影機，錄製的電子檔以 Shotcut 軟體分析氣流流動情形(如圖 8-2)。

## (二)實驗結果

表 8-1：撲翅機振翅速度 2.52 次/秒時，兩翼之翼尖後方水煙霧氣流的流動情形一覽表

翅膀方向	左 翼	右 翼
氣流照片		
說 明	左翼翼尖後方煙霧順時針方向流動	右翼翼尖後方煙霧逆時針方向流動

## (三)實驗發現

1. 選擇振翅速度 2.52 次/秒進行氣流觀察實驗的原因，是因為振翅速度過快時，翅膀後方的水平氣流過強，會將水煙霧往後吹散，不易觀察。
2. 當撲翅機每向下拍動一次翅膀，就會在翼尖後方產生一個垂直方向的渦流，這兩個渦流旋轉方向相反，左翼後方煙霧順時針方向流動，右翼後方煙霧逆時針方向流動。
3. 從撲翅機後方進行拍攝時，可清楚觀察到兩個渦流內側是下沉氣流，外側則是上升氣流，這表示領頭鳥後面隨行同伴飛行時，可以藉由將翅膀定位在上升氣流的部位，來獲得額外的升力以達到省力的目的呢！

## 伍、結論

### 一、成功組裝出「撲翅機」，不僅能模擬鳥類振翅，還能依實驗需求調整振翅速度。

1. 子題一文獻探討中得知以往諸多研究鳥類飛行作品中，都是將一固定形狀待測物體置於風洞中，藉以模擬該物體在空中真實飛行時的狀態，並設計實驗量測出其在空中飛行時所獲得的推進力及升力。但本研究則是致力研發能真真實實模擬鳥兒振翅的撲翅機，**實驗全程在無風的環境中，探究其在不同振翅速度下的各種現象。**
2. 子題二中得知，歷經數十次設計、測試、改良，我們終於自行組裝出能符應本研究所需的撲翅機（如圖 8-3），其特色為：**使用齒輪組使雙翼能對稱性振翅、使用高速馬達以提升振翅速度、增加翅膀骨架以更趨近真實鳥類翅膀、加裝電子調速器以便能調整振翅速度、碳纖製成重量輕的鳥體結構堅固耐用可支援長時間實驗。**



圖 8-3：「撲翅機」全貌。

3. 子題三中得知，使用透明片在撲翅機「馬達電子調速器測試儀」上做了6個等距的記號以進行後續實驗，但很有趣的是從所錄製的影片中分析可得其**振翅速度並非等倍加速**(詳細數值如圖 8-4 所示)，且撲翅機振翅速度越快，其**垂直上升高度及水平移動距離的數值也隨之增加**(如圖 8-5)，表示振翅動作確實能產生**推進力及升力**。

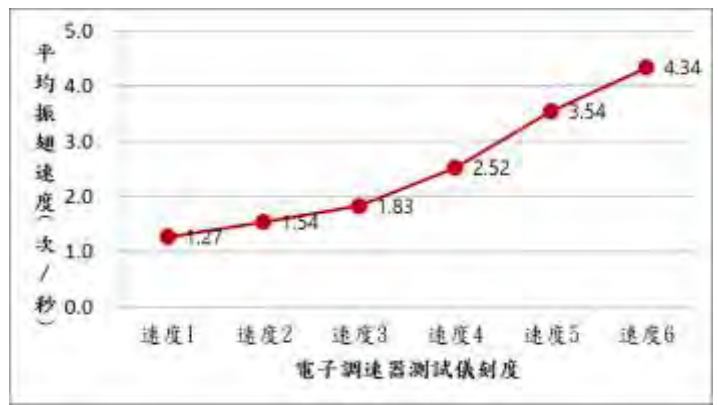


圖 8-4：撲翅機刻度與振翅速度關係圖

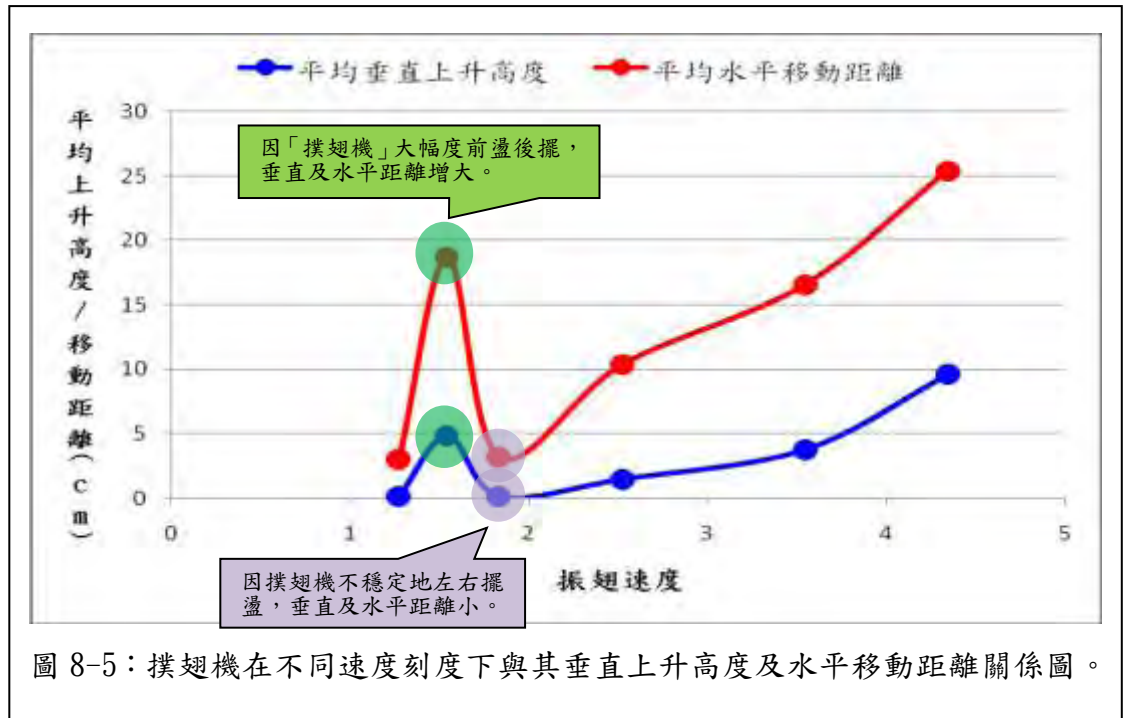


圖 8-5：撲翅機在不同速度刻度下與其垂直上升高度及水平移動距離關係圖。

## 二、透過實驗成功探究撲翅機振翅時對「自身」造成的各種現象。

(一) 實驗發現撲翅機翅膀下拍時，在翅膀的每一個截面上所產生的空氣作用力會同時在前進方向產生推力及在重力的反方向產生升力。

- 子題四，撲翅機在慢速振翅(1.27~1.54 次/秒)下像毛毛蟲一樣一步一步地向前行進，不僅充滿趣味，藉由 Shotcut 軟體極慢速播放實驗影片還可以清楚觀察到撲翅機翅膀上揚時，撲翅機停在原位，翅膀下拍時，撲翅機會往前進，這可說明**鳥的翅膀下拍的動作，是一種「確實可創造力量、克服空氣阻力的動作」**，這動作正是鳥類飛行推進力的主要來源。
- 撲翅機在中、高速振翅下(振翅速度 1.83~4.34 次/秒)，往前行進速度越來越快，以 Shotcut 軟體極慢速播放影片，可以清楚觀察到不論撲翅機的翅膀是「下拍」或是「上揚」，都會使撲翅機往前進，但「翅膀下拍時所前進的距離」大於「翅膀上揚時所前進的距離」，**這說明鳥類在揚翅時雖不會產生推力，但能靠前一次煽動翅膀時所產生之水平方向的動量而向前衝。**

3. 子題五，將撲翅機固定於角鐵，再將其立於電子秤上進行振翅動作，透過 Shotcut 軟體將所錄製的影片檔以極慢速播放，發現撲翅機翅膀下拍時，電子秤上的數值會減少；撲翅機翅膀上揚時，電子秤上的數值會增加。這說明當翅膀下拍時在翅膀的每一個截面上所產生的空氣作用力，不僅會在前進方向產生推力，也會在重力的反方向產生升力。

## (二)成功藉由實驗量測及推算，量化撲翅機在不同振翅速度下的推進力及升力值。

1. 子題四中藉由撲翅機在不同振翅速度下，量測移動 1.2m 所需花費的平均時間，再以「牛頓第二運動定律」成功計算出撲翅機在不同振翅速度時推力值。以撲翅機振翅速度 4.34 次/秒，移動 1.2m 需花費 0.71 秒為例，可計算出平均推力值為 194.51 公克。

2. 在子題五中，記錄撲翅機在電子秤上進行振翅動作時，電子秤上的數值變化情形，求出所測得的最高值與最低值之差值，即為最大升力值。

3. 將子題四、五所得之平均推力值及最大升力值繪製成圖 8-6，發現：

(1) 振翅速度越快，撲翅機所獲得的平均推力值及最大升力值越大。

(2) 撲翅機振翅速度需高於 1.83 次/秒，才會明顯產生飛行所需的推進力及升力，此時撲翅機會快速、流暢地向前滑行，機身也有顯著的向上抬升現象(如圖 8-7~8-8)。

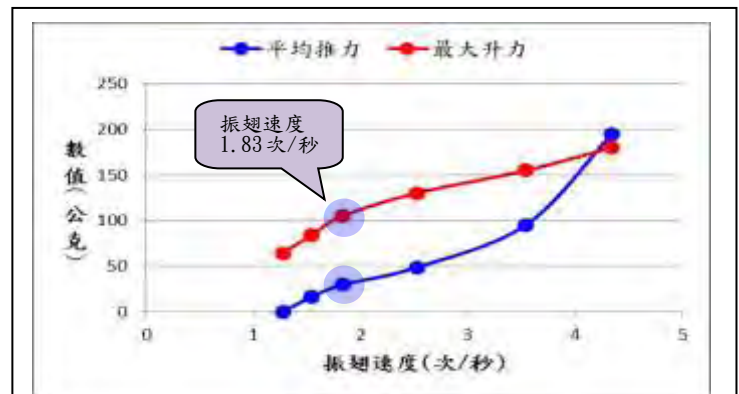
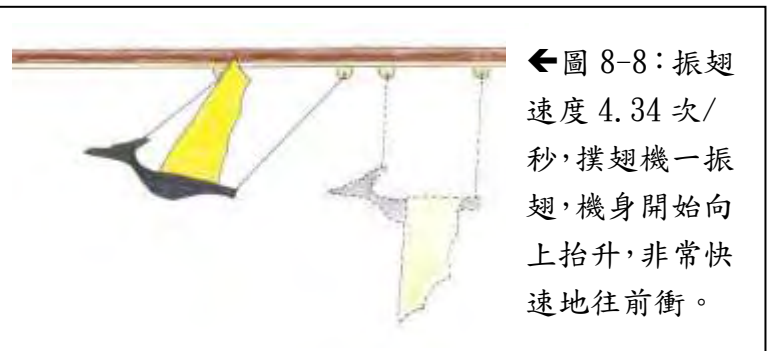


圖 8-6：撲翅機不同振翅速度下，其平均推力及最大升力關係圖。



圖 8-7：振翅速度 3.54 次/秒，撲翅機非常快速往前衝，滑行一段距離後機身開始向上抬升。



←圖 8-8：振翅速度 4.34 次/秒，撲翅機一振翅，機身開始向上抬升，非常快速地往前衝。

## 三、透過實驗成功探究撲翅機振翅時「後方」的氣流變化。

(一)利用研發的「氣流流向檢測儀」可具體呈現撲翅機振翅時其後方各區域水平及垂直氣流的強弱。

子題六中自創以重量輕、佔位空間小、受風面大、形狀對稱而取勝的橢圓形狀塑膠片製成的「氣流流向檢測儀」主體(如圖 8-9)，將其水平/垂直架設於置於撲翅機側面及後方的 5 個區域來

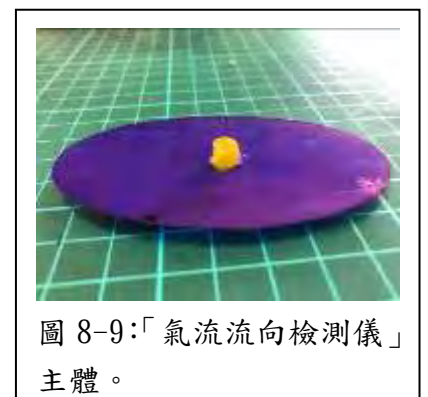


圖 8-9：「氣流流向檢測儀」主體。

進行實驗(如圖 8-10~8-11)，透過「氣流流向檢測儀」水平後退/垂直上升的距離，可具體呈現撲翅機後方各區的水平/垂直氣流的強弱，令我們大為驚豔！

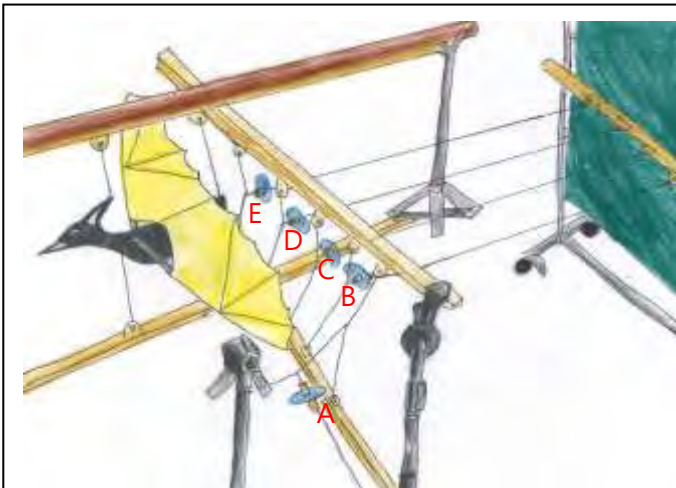


圖 8-10：將「氣流流向檢測儀」水平架設則可量測水平氣流。

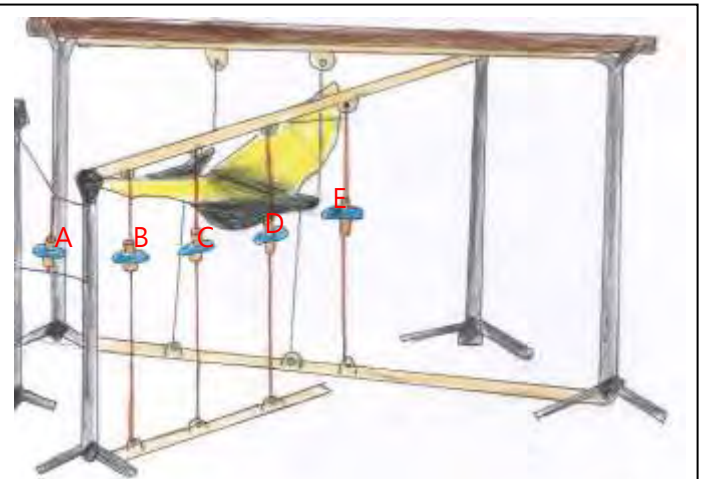


圖 8-11：若將「氣流流向檢測儀」垂直架設，則可量測垂直氣流。

**(二)利用改良後的「水平推力/垂直升力檢測儀」可成功以「重量」的形式呈現撲翅機後方各區的水平推力/垂直升力，透過計算其「升阻比」可精確得知撲翅機『翼尖後方』是後面隨行同伴飛行的好位置！**

1. 在子題六發現垂直向上的氣流最強之處位於機身正後上方 5cm，我們則以此處為實驗點，改良「氣流流向檢測儀」的設計(如圖 8-12~8-13)，使其所量測出區域 A~E 的水平推力及垂直升力能以「重量」的形式呈現。

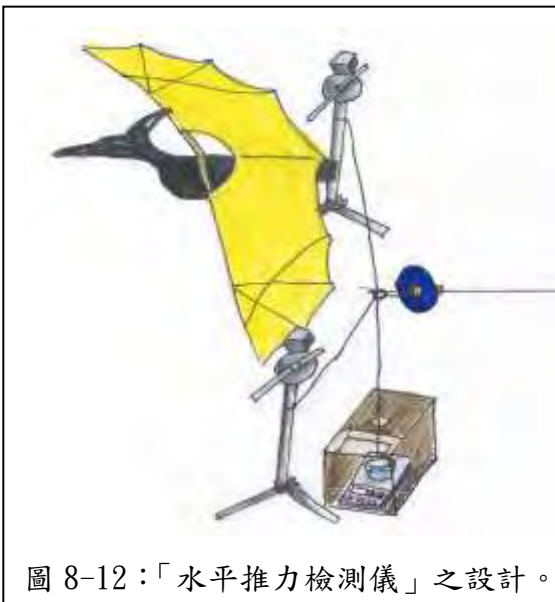


圖 8-12：「水平推力檢測儀」之設計。

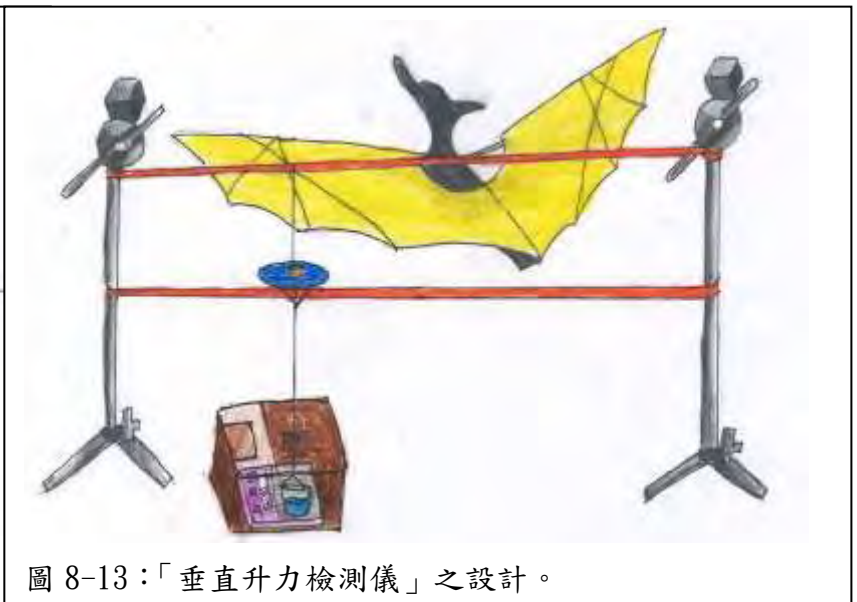


圖 8-13：「垂直升力檢測儀」之設計。

2. 以實驗所得的「水平推力」÷「垂直升力」計算撲翅機正後上方 5cm 處各區的「升阻比」(如表 8-2)，可得知區域 B 的升阻比最大，比值為 1.08，說明撲翅機「翼尖後方」是後面隨行同伴飛行的好位置！

表 8-2：撲翅機正後上方 5cm 處各區「升阻比」之一覽表

區 域	A	B	C	D	E
垂直平均升力(g)	0.00	1.53	1.79	1.08	0.14
水平平均推力(g)	0.00	1.42	4.02	2.40	0.33
升 阻 比	0.00	1.08	0.45	0.45	0.43
隨行同伴最佳位置		✓			

3. 由此發現，當鳥群振翅飛行時，前面領頭鳥的翅膀在空中揮動，翼尖後的上方會產生一股微弱的垂直上升氣流，後方鳥兒為了利用這股上升氣流，以節省自己的體力，就緊跟在前一隻鳥兒翼尖後方飛行，一隻接著一隻排列著，一群鳥兒的飛行隊伍就成了「V」字形排列了！

### (三)藉由「煙霧製造機」可親眼看見撲翅機兩翼之翼尖後方上升/下沉渦流的流動情形，再次讓我們的研究所得獲得有力的驗證！

子題八藉由水煙霧可觀察到撲翅機振翅時，每向下拍動一次翅膀，就會在翼尖後方產生一個垂直方向、方向相反的渦流，左/右翼後方渦流分別以順時針/逆時針方向流動(如圖 8-14~8-15)，流動方向顯示出兩個渦流內側是不利於飛行的下沉氣流，外側則是空氣阻力小的上升氣流，整群鳥兒不僅會避免位在同伴的下沉氣流區，還會搭著前方鳥兒捎來的上升氣流輕鬆地飛行著呢！



圖 8-14：左翼翼尖後方煙霧順時針方向流動。



圖 8-15：右翼翼尖後方煙霧逆時針方向流動。

## 陸、參考資料

- 一、時代生活叢書編輯組 (1990)。動物的行為。台北：泛亞。
- 二、2004 年國際科展作品~最佳振翅翼飛具--半活動翅骨翼之設計與測試。
- 三、全國第 45 屆科展國中組物理科作品~如鷹展翅上騰—重新得“力”。
- 四、全國第 48 屆科展國中組物理科作品~翹首振翼—再次得力。
- 五、全國第 49 屆科展國小組物理科作品~翼手龍的飛舞

## 【評語】 080122

1. 缺少自製撲翅機運動方式與鳥類翅膀比較。
2. 實驗精心設計製作、數據分析完整。
3. 實驗測量構想具創新性。



# 壹、研究動機

某天，我望向一望無際的天空，成群結隊振翅飛翔的鳥兒引起我的注意，仔細一看，鳥兒隊型中好像隱藏了「V」字密碼呢！這使我非常好奇：鳥兒振翅的動作是如何影響飛行？鳥兒和鳥兒間的距離和位置有什麼特殊意義嗎？.....許多關於鳥兒飛行的問題不斷地從我腦海中浮現，於是我決定和同學一同進行研究，解開鳥兒飛行的終極密碼。

# 貳、研究目的

- 一、研發並製作能模擬鳥類振翅的撲翅機。
- 二、探究撲翅機振翅時可能造成的各種現象。
- 三、探究撲翅機振翅時後方的氣流變化。

# 參、研究方法、結果與發現

## 實驗一：文獻探討

- 一、**鳥的飛行方式**：鳥類飛行過程中的飛行方式主要可分為三種~振翅、滑翔、盤旋，其中我們對鳥類的「振翅」動作特別感興趣，因為即使是最佳的滑翔者及盤旋高手，也常常需要靠拍打翅膀的方式起飛、調整高度、持續飛行。
- 二、**關於「鳥類振翅」的相關科展研究**：歷屆全國中小學科展中有關於鳥類振翅情形的研究，依其研究內容可分為兩大類型~  
第一類型：第45屆「如鷹展翅上騰-重新得“力”」、第48屆「翹首振翼-再次得力」、第49屆「翼手龍的飛舞」等作品，將所設計的鳥兒翅膀模型以固定、靜止之姿放入風洞，藉以模擬翅膀在空中真實飛行時的狀態以觀察其變化。  
第二類型：以國際科展2004年「最佳振翅翼飛具--半活動翅骨翼之設計與測試」為例，將振翅機放入風洞中，觀察在相同風速、相同振翅頻率(144次/分)下，測試其在不同振翅機設計條件下的升力變化情形。  
上述研究皆須借助風洞中穩定的氣流，達到觀察待測物的升力或阻力之改變情形。但這些研究方式都無法單純得知鳥類依靠本身自行拍動翅膀所造成的各種現象。因此本研究除了想要研發一架能模擬鳥兒拍動翅膀的撲翅機之外，還希望實驗全程能在一個幾近無風的環境中進行，以阻隔環境氣流所造成的可能影響，如此才能原汁原味、精準的呈現鳥兒在不同的振翅速度下如何產生升力和推力，以及鳥類振翅時其後方的氣流變化。

## 實驗二：撲翅機設計及實驗環境介紹

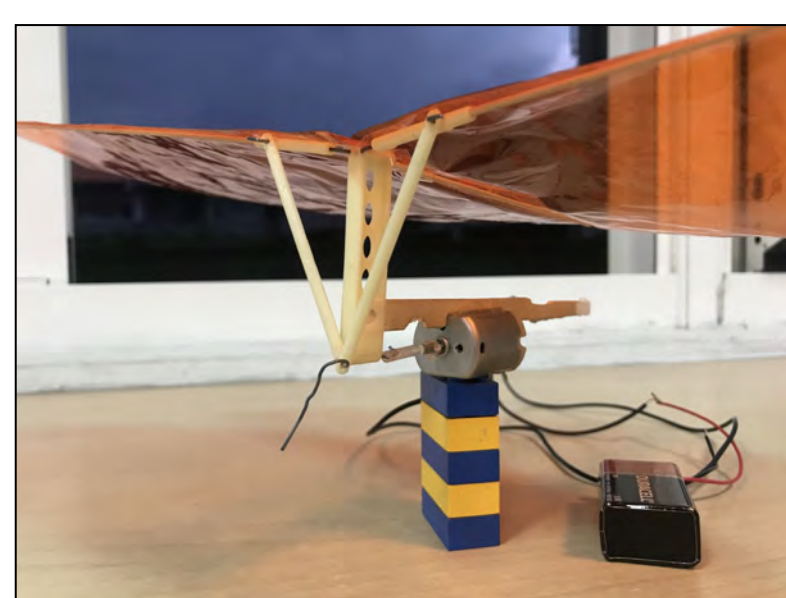
一、**撲翅機設計**：設計能模擬鳥兒振翅的撲翅機，且須具有能調整振翅速度與堅固耐用等特色，代數演進及優缺點分析如下：

### ●第一代 單翼冰棍棍骨架撲翅機



- 優點-材料容易取得。
- 缺點-只能單翼振翅，無法調整振翅速度。

### ●第二代 雙翼塑膠骨架撲翅機



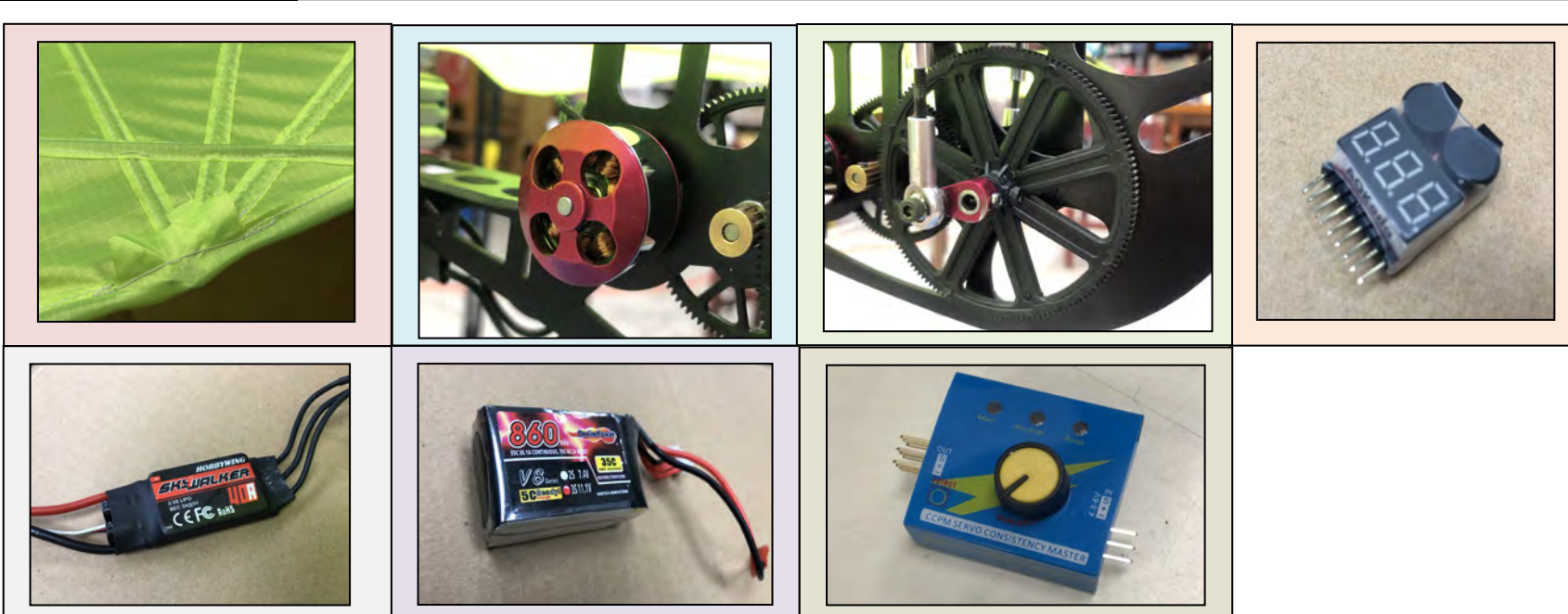
- 優點-雙翼進行對稱性振翅
- 缺點-無法調整振翅速度，塑膠片與鐵絲軸心摩擦力過大。

### ●第三代 雙翼塑膠齒輪骨架撲翅機



- 優點-塑膠齒輪可減少摩擦力，振動速度加快。
- 缺點-無法調整振翅速度，振翅力道過小。

### ●第四代 雙翼碳纖骨架撲翅機



- 優點-可使雙翼進行對稱性振翅，可調整振翅速度，翅膀骨架形狀更接近真實的鳥類，結構堅固，可支援長時間的實驗。
- 缺點-零件尋覓費時，組裝程序繁複。

## 二、實驗環境介紹：

本研究想探討撲翅機振翅時所造成的各種影響，故選擇在無風的天文台進行，基礎實驗環境如圖2-1，以水平視角架一攝影機，因應各實驗子題需求再進行其他布置，以Shotcut、image-j軟體判讀分析所需數據。



圖2-1：實驗環境布置。

## 實驗三：撲翅機的振翅速度如何影響其移動情形？

(一)實驗步驟：實驗環境如圖3-1，裁一圓形透明片，使其套在「馬達電子調速器測試儀」旋鈕上。為了每次實驗都能準確調整振翅速度變化，在洞孔邊緣等距繪製六個記號，定義為速度刻度1~6(圖3-2)，讓撲翅機在不同6種速度刻度下運作，量測並分析振翅時棉繩的角度變化。

(二)實驗發現：(如圖3-3~3-5)

- 1.「馬達電子調速器測試儀」上的6個測試儀刻度的記號雖然等距，但從實驗影片分析中得知振翅速度並非等倍加速。
- 2.振翅速度越快，尾部棉繩抖動得越激烈，棉繩前盪角度越大，垂直上升高度及水平移動距離的數值也隨之增加。



圖3-2：在「馬達電子調速器測試儀」上套入有做6個等距的不同速度刻度記號的透明圓片。

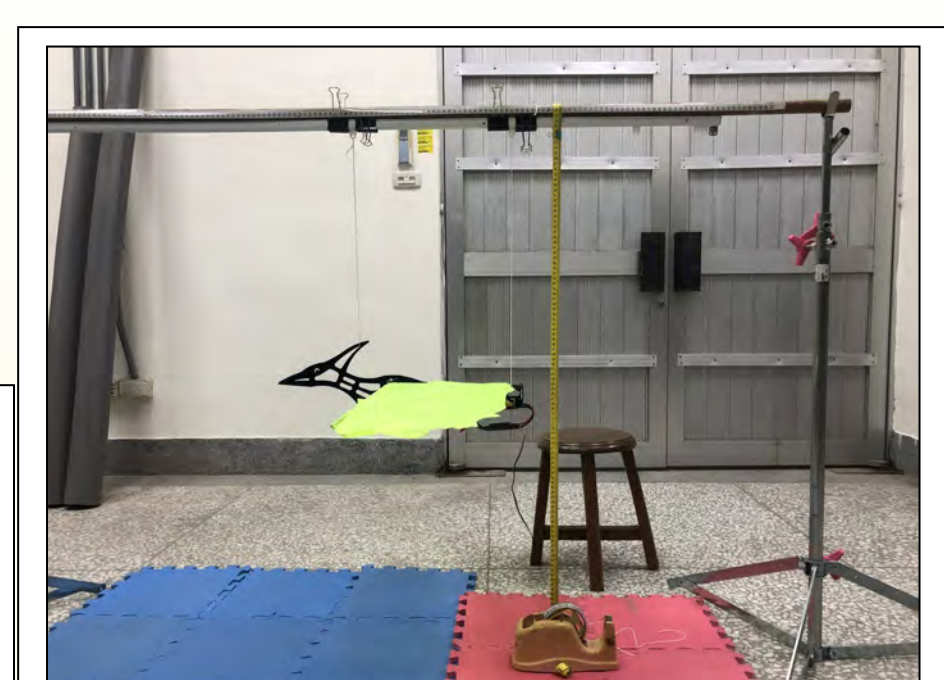


圖3-1：在「口」型支架木棍上及鉛架側邊布置布尺，以便後續的數據判讀。



圖3-3：撲翅機刻度與振翅速度關係圖



圖3-4：撲翅機在不同速度刻度下與其前盪後擺時棉繩角度之關係圖

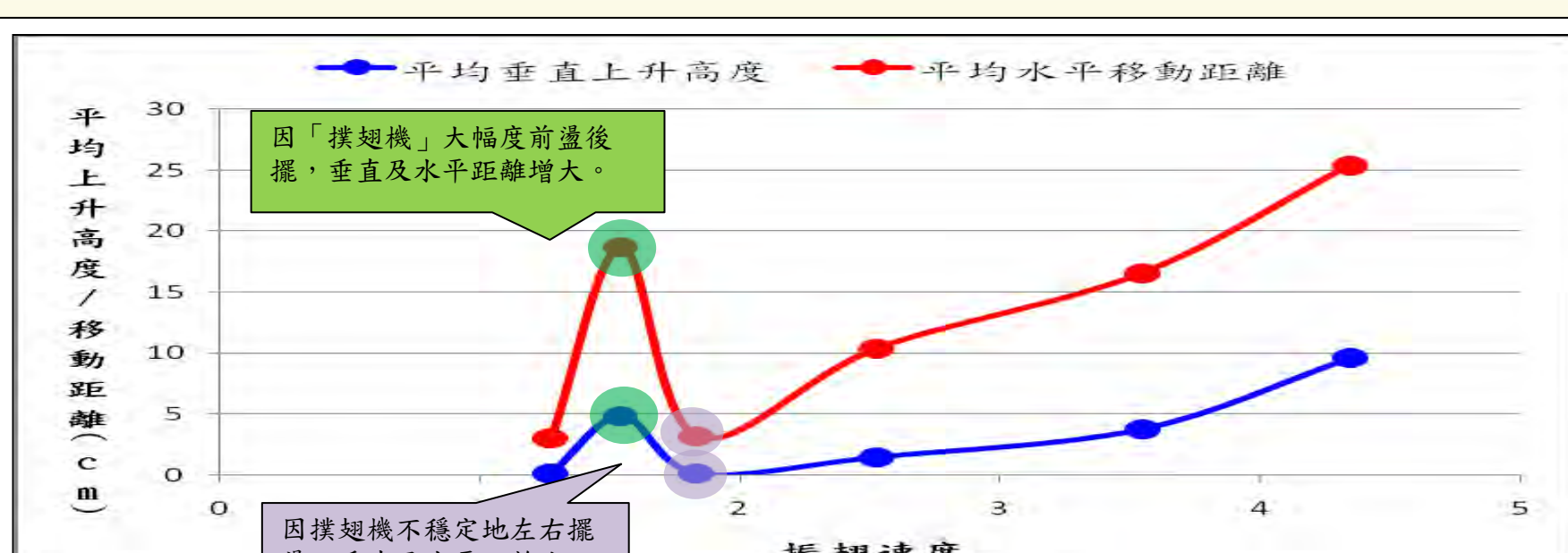


圖3-5：撲翅機在不同速度刻度下與其垂直上升高度及水平移動距離關係圖

## 實驗四：撲翅機的振翅速度如何影響其向前推力？

(一)實驗步驟：讓撲翅機在不同的6種速度刻度下振翅往前行進1.2公尺，量測其所需時間，再利用「牛頓第二運動定律」得出不同振翅速度的推進力大小。

(二)實驗發現：

- 1.慢速振翅時，撲翅機像毛毛蟲一樣一步一步地向前行進，翅膀上揚時，撲翅機停在原位，但翅膀下拍時，撲翅機會往前進。表示鳥的翅膀往下拍的動作，是一種「可創造力量、克服空氣阻力的動作」，這動作正是鳥類飛行推進力的主要來源。
- 2.中、高速振翅(振翅速度1.83~4.34次/秒)時，撲翅機往前行進速度越來越快，以軟體極慢速播放影片，可清楚觀察到不論撲翅機的翅膀是「下拍」或是「上揚」，都會使撲翅機往前進，但「翅膀下拍時所前進的距離」略大於「翅膀上揚時所前進的距離」，說明鳥類揚翅時不會產生推力，只能靠前一次搥動翅膀時所產生之水平方向動量而向前衝。
- 3.從圖4-1得知

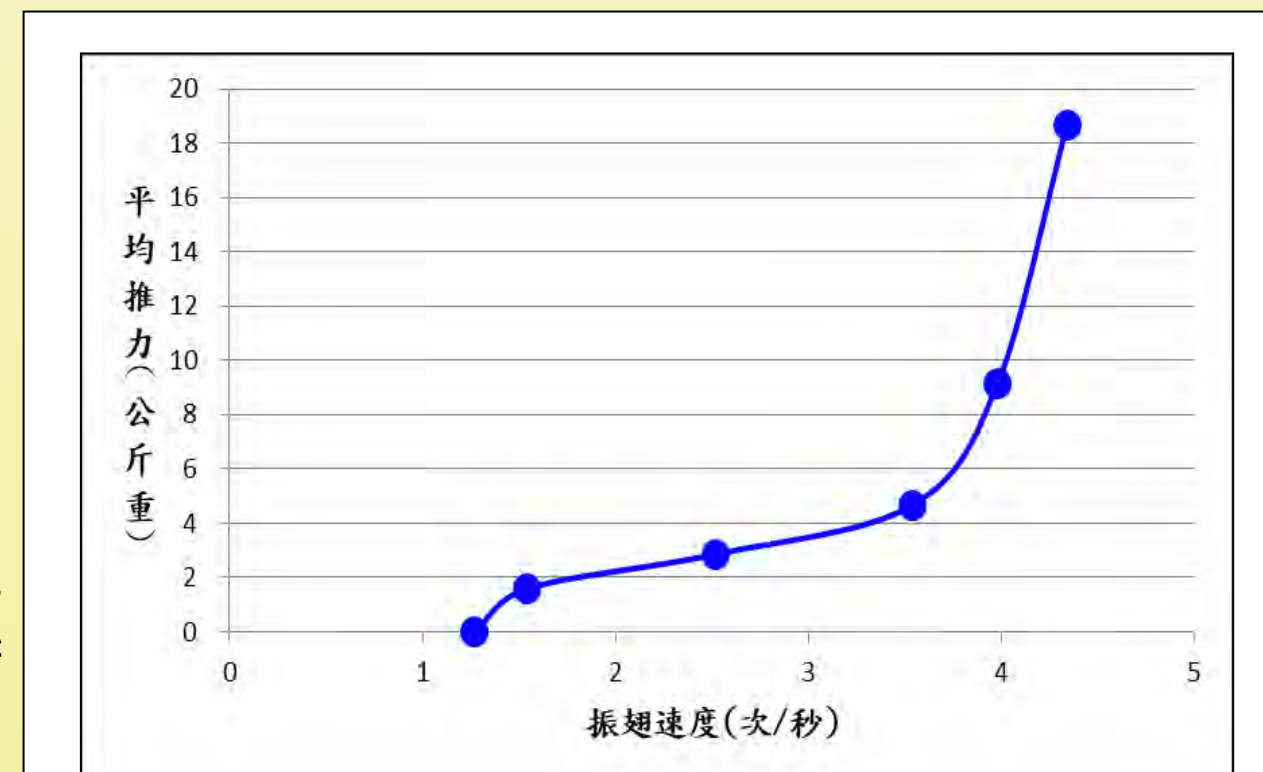


圖4-1：撲翅機振翅速度與平均推力關係圖。

- (1)測試儀刻度1，振翅速度1.27次/秒，平均推進力幾乎為0，只能依靠撲翅機翅膀下拍1次才能稍稍往前移動1小步，但翅膀上揚則無法產生任何位移。
- (2)測試儀刻度2~5，振翅速度1.54~3.54次/秒，平均推進力介於1.59~9.22公斤，撲翅機可流暢地向前行進。
- (3)測試儀刻度6，振翅速度4.34次/秒，竟然高達18.66公斤，可看出撲翅機不僅非常快速向前衝刺，且機身也有非常明顯抬升情形，這說明鳥類飛行時能靠著雙翼快速、有力搥擊而產生動量，且沿著水平路線振翅飛行時，翅膀向下方揮動不僅可產生推進力，還能產生可克服本身重量的升力呢！我們將在下個子題探究撲翅機振翅時的升力表現。

# 實驗五：撲翅機的振翅速度如何影響其向上升力？

- (一)實驗步驟：將 400 公克撲翅機以木條、螺絲固定於角鐵，將其立於電子秤上，以攝影機錄製振翅時電子秤數值變化。
- (二)實驗發現：(圖 5-1)
- 撲翅機翅膀下拍時，電子秤上的數值會減少；撲翅機翅膀上揚時，電子秤上的數值會增加。這說明當翅膀下拍時在翅膀的每一個截面上所產生的空氣作用力，不僅會在前進方向產生推力，也會在重力的反方向產生升力。
  - 撲翅機在振翅速度 5~6 時，振翅所產的升力居然能讓重達 2067.1 公克器材在電子秤上跳動，整個器材反覆被抬起又被放下，對於這現象我們都驚訝連連！
  - 振翅速度越快，撲翅機所獲得的升力值越大。

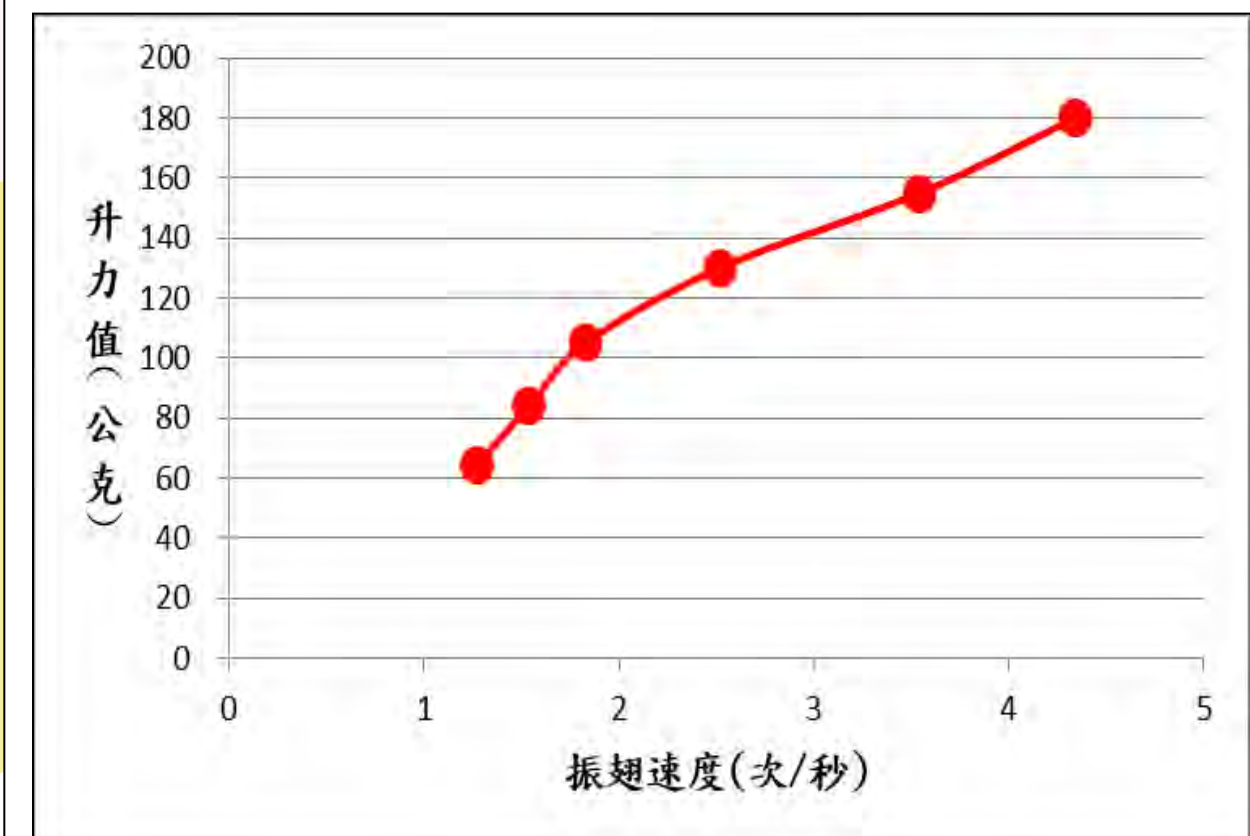


圖 5-1：「撲翅機」在不同的 6 種振翅速度下與其所測得之升力關係圖

## 領頭鳥後面隨行的同伴飛行位置應該位在那兒最有助於飛行呢？

在子題二~五中，我們透過撲翅機的設計及各式實驗完成探究單一隻鳥在不同振翅速度下如何影響其本身的升力及向前推力。然而，我們更好奇的是，如果我們將設計的這架撲翅機當成鳥類群體飛行的領頭鳥，那麼領頭鳥後面同伴的位置應該位在那兒最有助於飛行呢？因此子題六實驗設計的焦點將關注領頭鳥後方不同位置的氣流變化情形。

# 實驗六：撲翅機的振翅速度如何影響其後方不同區域之水平氣流？

- (一)自創重量輕、佔位空間小、受風面大、形狀對稱「氣流流向檢測儀」本體。
- (二)測量撲翅機的振翅速度如何影響其後方不同區域之水平氣流：將「氣流流向檢測儀」(圖 6-1)以與地面呈水平方向分別置於翅膀後方 A~E 區(圖 6-2)。讓撲翅機在 6 種速度下各運作 5 秒鐘，利用棉繩上尺規記號計數其移動距離(圖 6-3)。
- (三)測量撲翅機的振翅速度如何影響其後方不同區域之垂直氣流：
- 將「氣流流向檢測儀」以垂直於地面分別置於翅膀後方 A~E 區，改用立可白在尼龍繩上做尺規記號，以方便計數「氣流流向檢測儀」的上升距離。(圖 6-4~6-5)
  - 改變不同變因的三個小實驗：
    - 撲翅機在 6 種不同的振翅速度下，將「氣流流向檢測儀」架設於撲翅機翅膀側面及正後方共 5 個不同區域。
    - 選擇(1)結果上升距離最大的最佳振翅速度，將「氣流流向檢測儀」架設於 A~E 區與撲翅機等高、上方 5cm、上方 10cm、下方 5cm、下方 10cm(圖 6-6)。
    - 選擇(1)實驗結果中最佳振翅速度，及(2)實驗結果中的最佳高度，將 5 個「氣流流向檢測儀」分別架設於 A~E 區撲翅機後方 0cm、5cm、10cm、15cm 處(如圖 6-7，假設(2)實驗結果中的最佳高度為上方 5cm)。

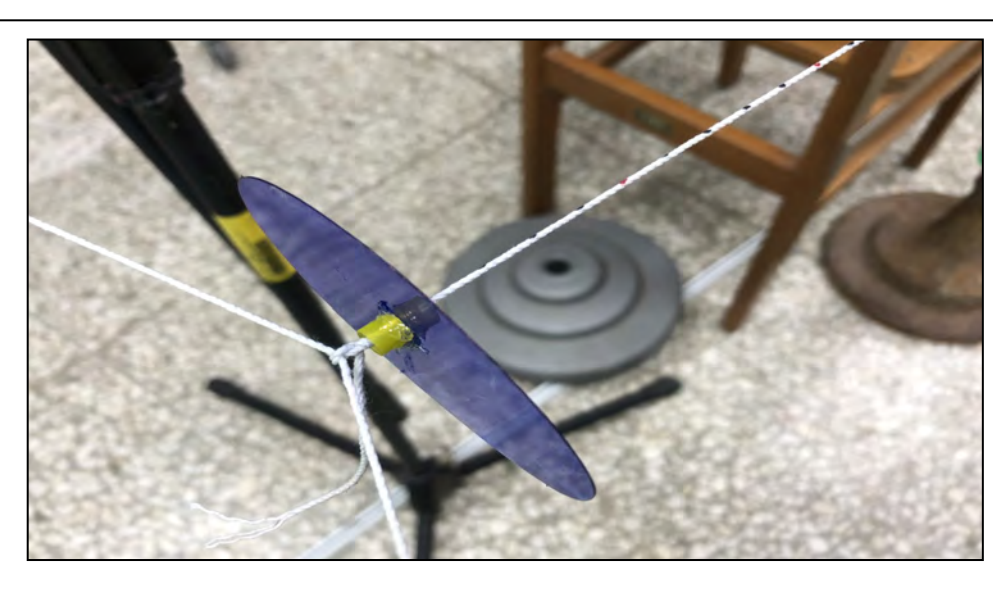


圖 6-1：將「氣流流向檢測儀」主體套在畫有尺規刻度的棉繩上。

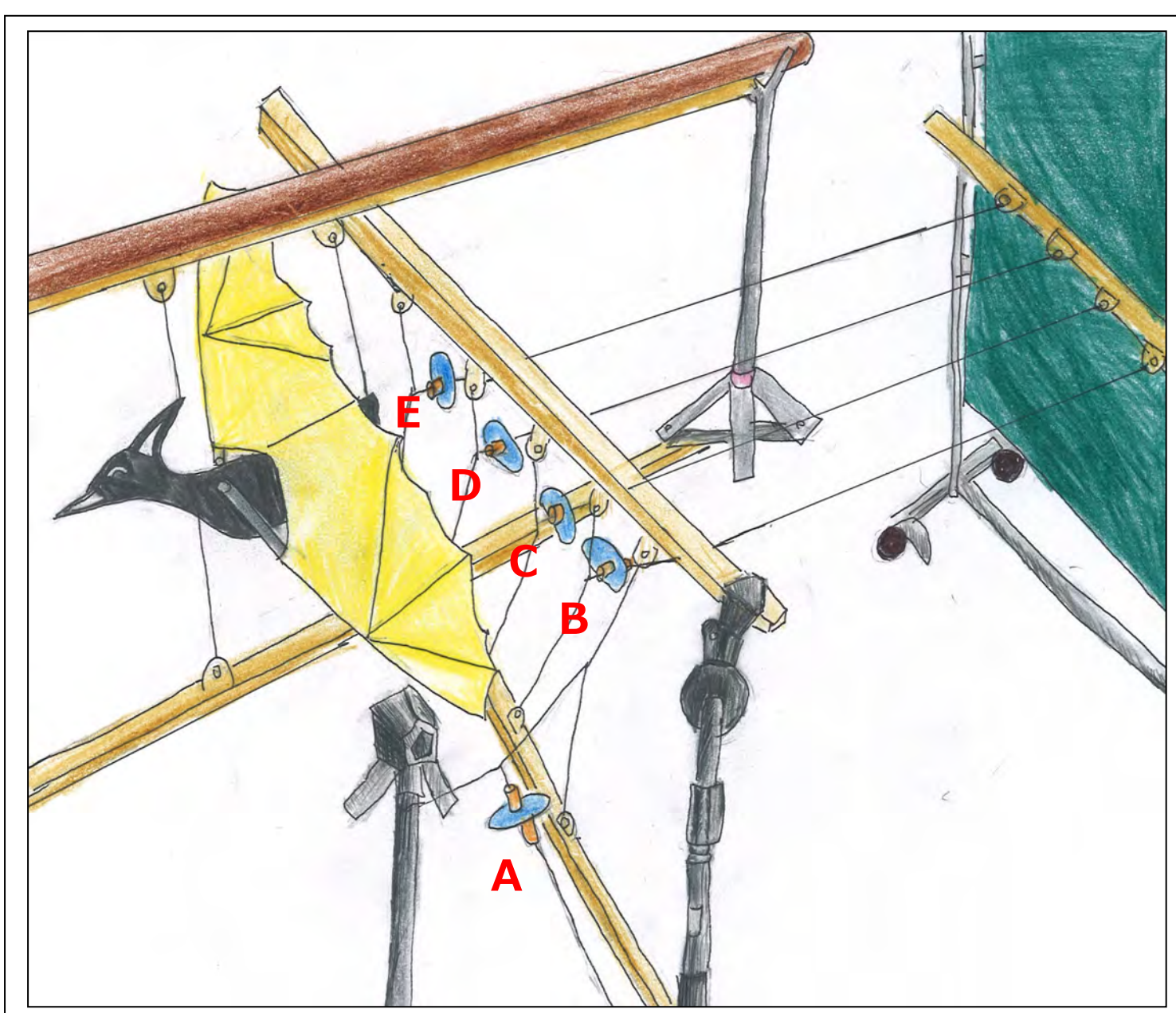


圖 6-2：將 5 個「氣流流速測試儀」分別置於撲翅機的側面及平均分布於翅膀後方，並依區域命名為 A、B、C、D、E。

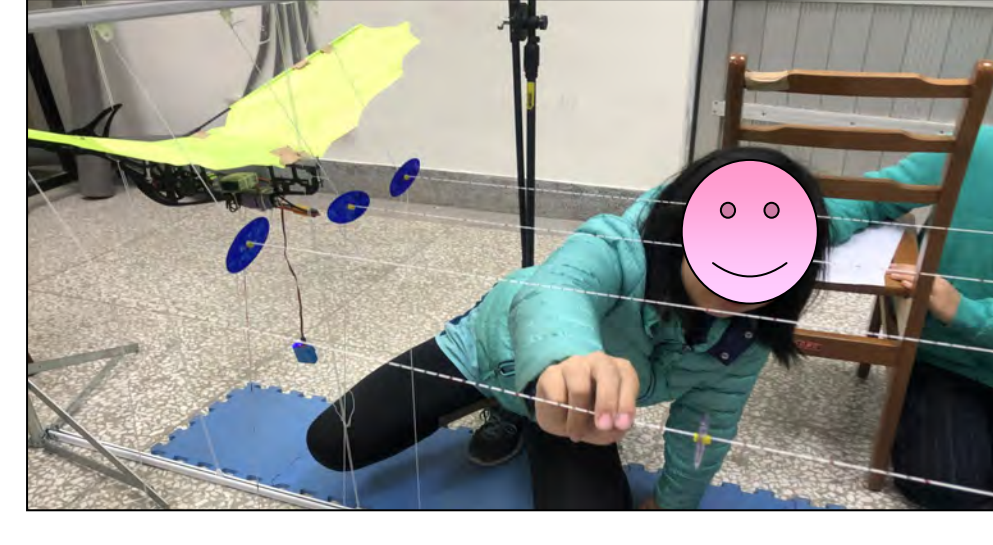


圖 6-3：利用棉繩上的尺規記號計數「氣流流向檢測儀」的移動距離。

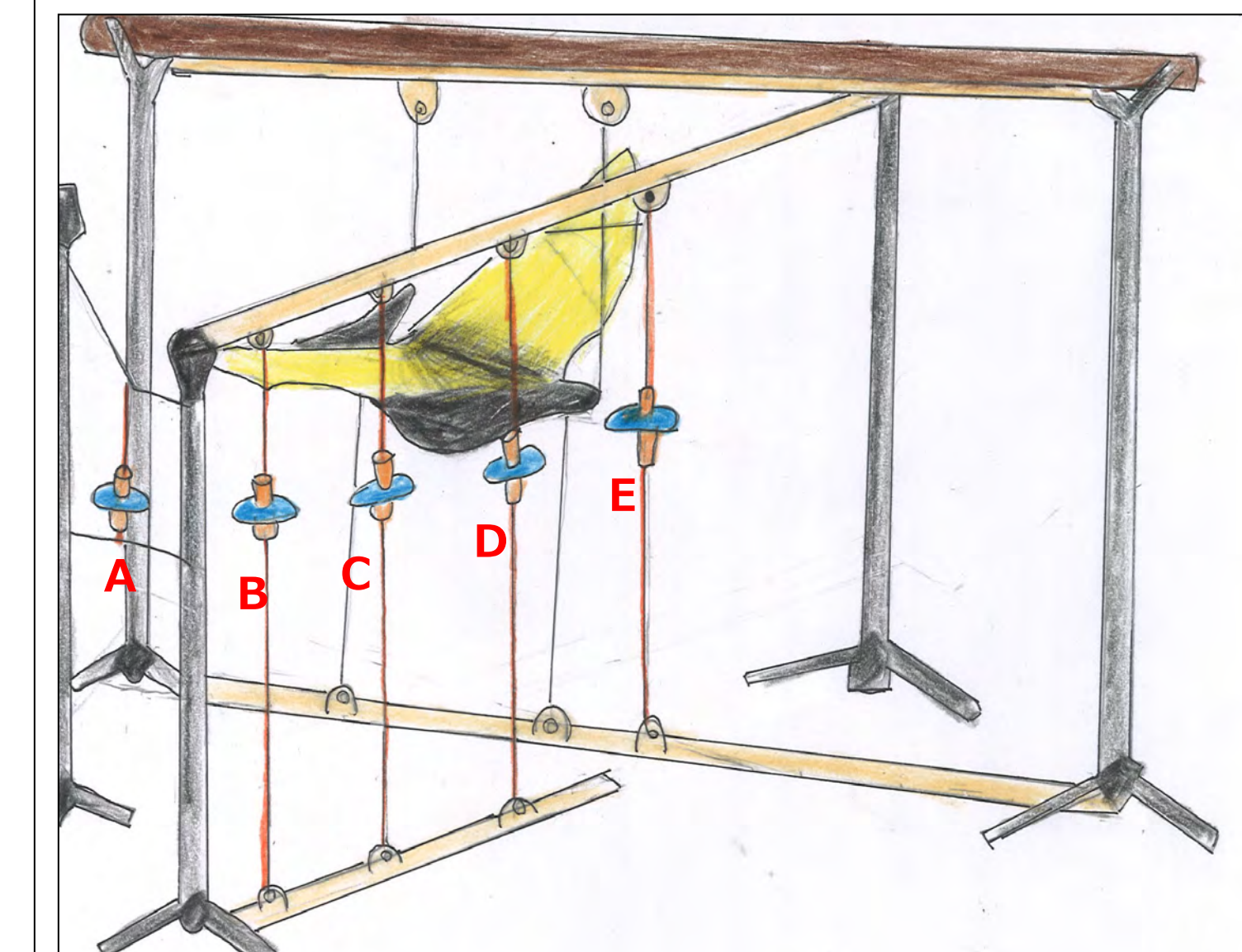


圖 6-4：將 5 個「氣流流向檢測儀」分別置於「撲翅機」側面及平均分布於翅膀後方，並依區域命名為 A、B、C、D、E。

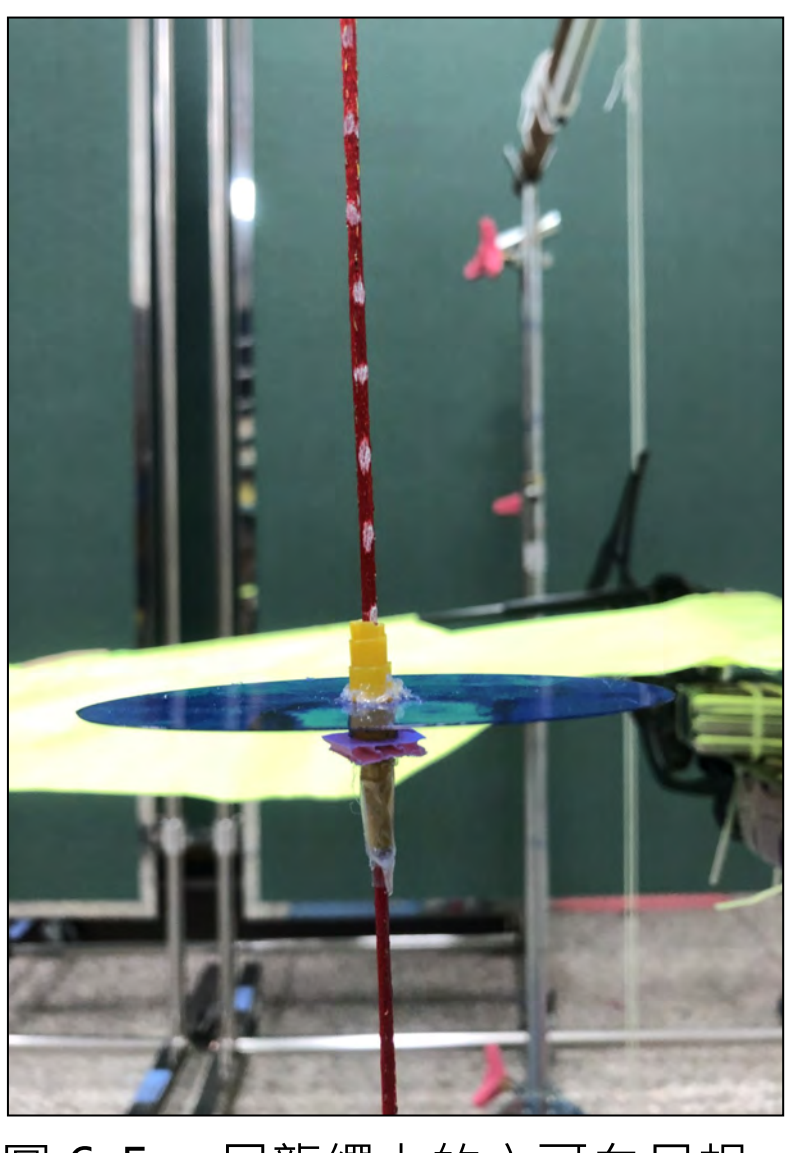


圖 6-5：尼龍繩上的立可白尺規記號便於使用軟體計數「氣流流向檢測儀」的上升距離。

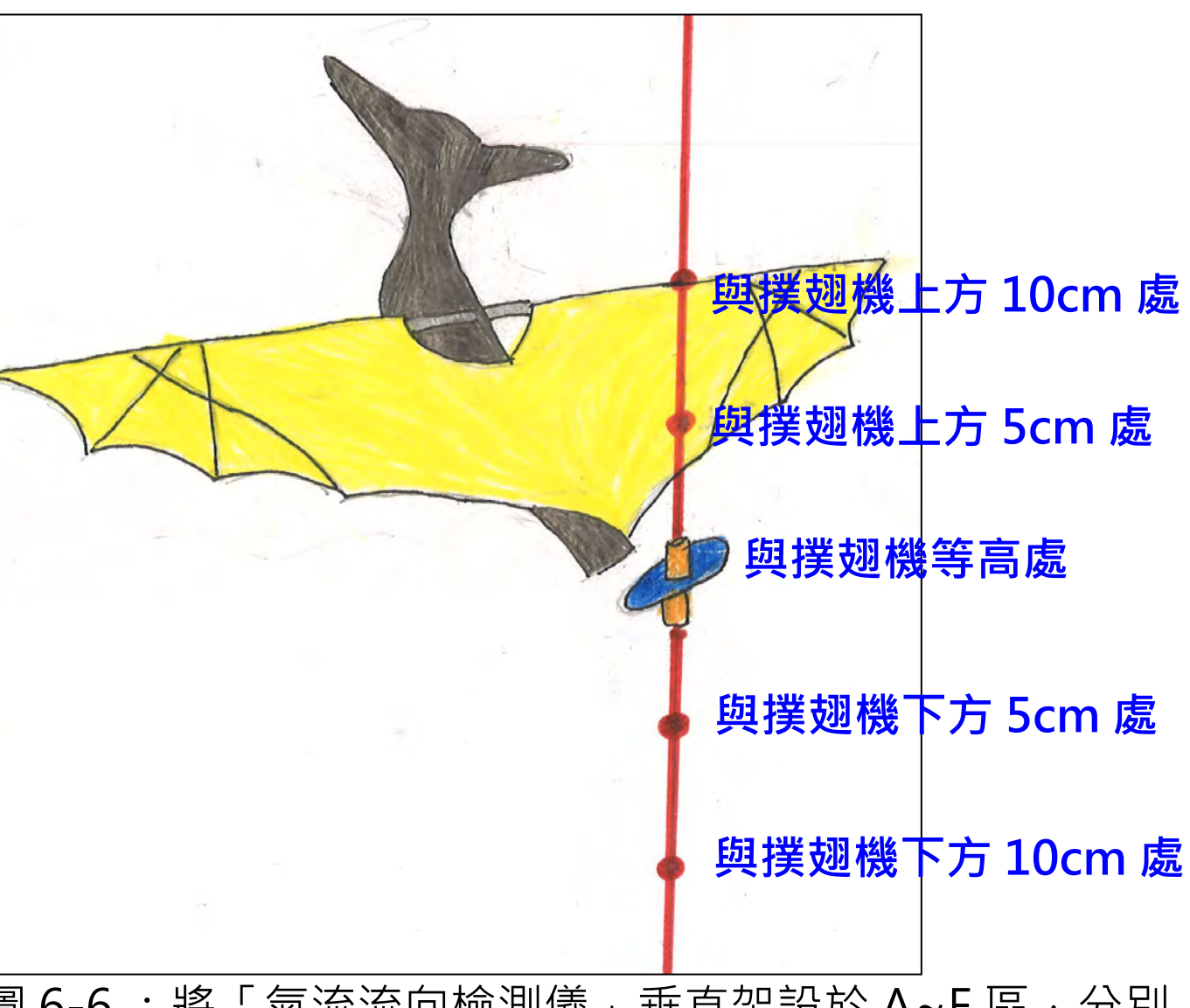


圖 6-6：將「氣流流向檢測儀」垂直架設於 A~E 區，分別調整其高度為與撲翅機等高處、上方 5cm、上方 10cm、下方 5cm、下方 10cm 處(圖中以 E 區為例)



圖 6-7：將「氣流流向檢測儀」垂直架設於 A~E 區，分別調整其位置為撲翅機後方 0cm 處、後方 5cm 處、後方 10cm、後方 15cm 處(圖中以 E 區為例，以撲翅機上方 5cm 處再向後方調整)

- 將所錄製電子檔以 Shotcut 軟體判讀「氣流流向檢測儀」垂直往上移動情形(圖 6-8)。每種速度刻度各實驗 5 次，取其平均值。

- (二)實驗發現：
- 撲翅機振翅速度如何影響後方區域之水平氣流的實驗發現(圖 6-9)
    - 如果該區的「氣流流向檢測儀」移動距離越遠，表示該區向後方流動的水平氣流越強，氣流越強越不利於後方隨行鳥兒的飛行。
    - 發現撲翅機振翅速度越快，越靠近撲翅機身體後方的水平氣流越強，對於後方隨行鳥兒的飛行所造成的阻力越大，其中振翅速度每秒 4.34 次時，撲翅機後方 C、D 區的水平氣流最大，「氣流流向檢測儀」分別後退了 121.65 及 108.57 公分。

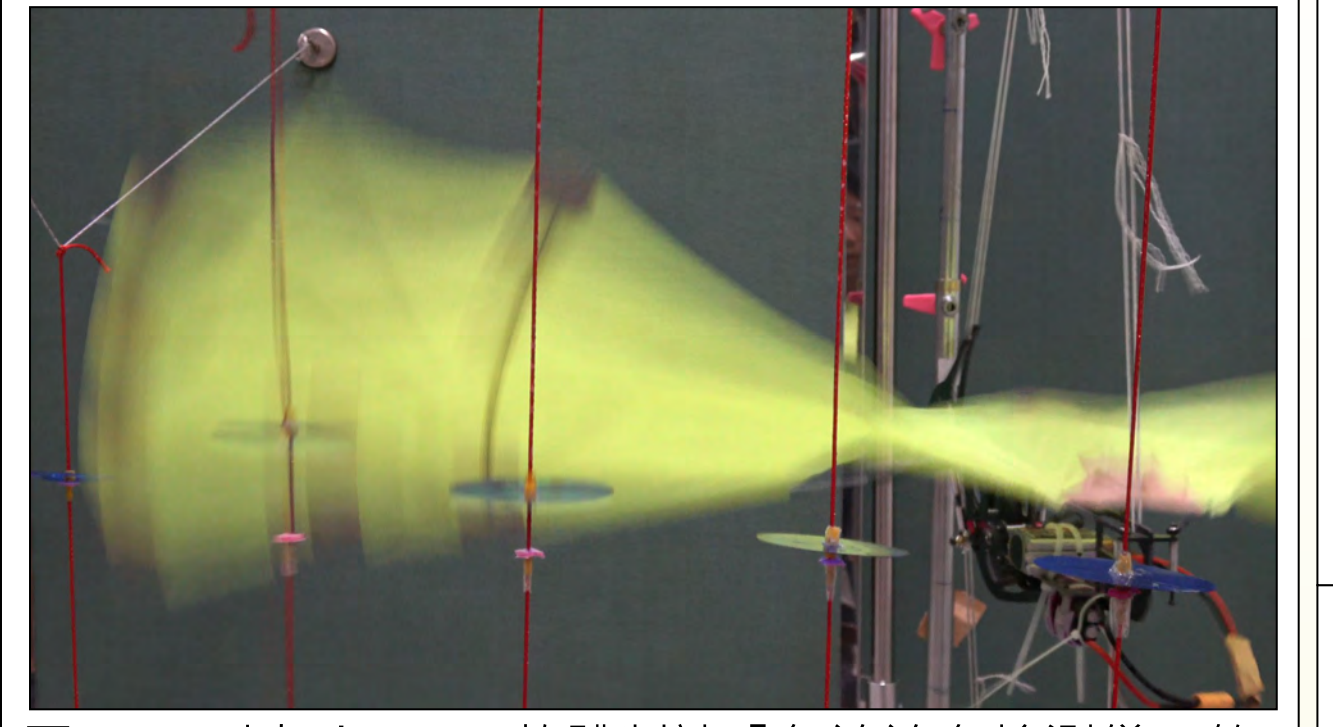


圖 6-8：以 Shotcut 軟體判讀「氣流流向檢測儀」的垂直往上移動情形。

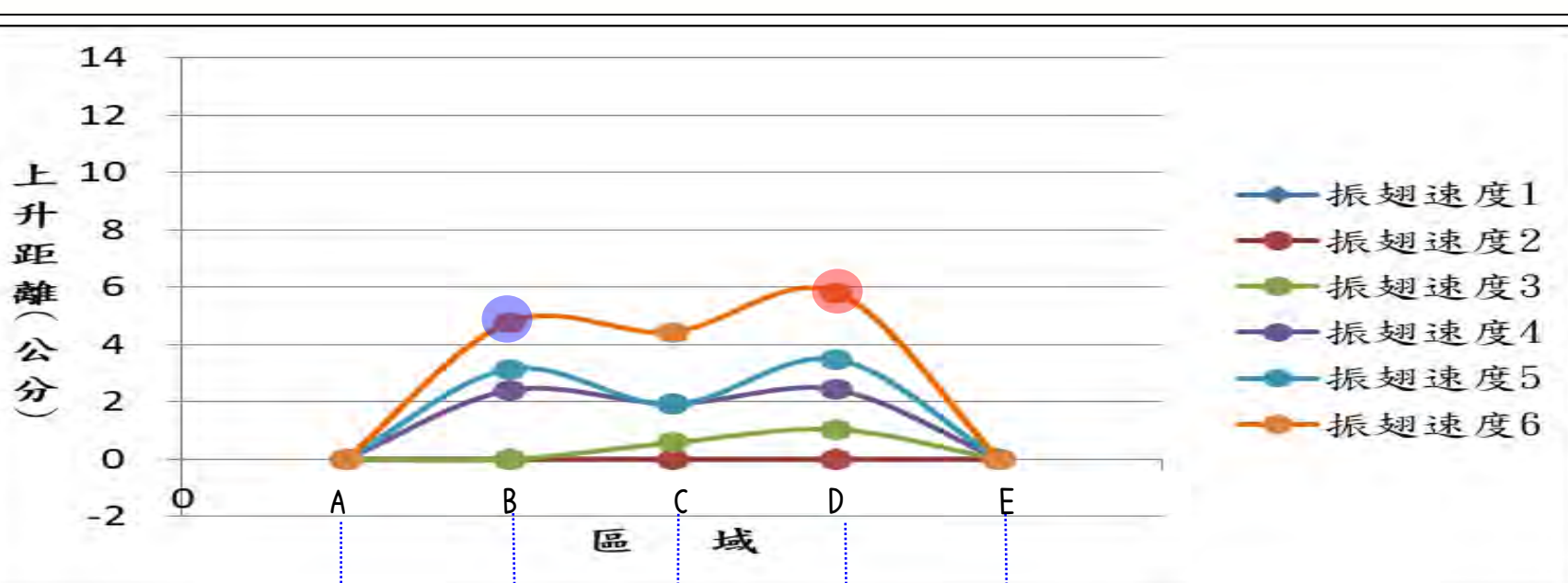


圖 6-10：6 種振翅速度與各區域「氣流流向檢測儀」上升距離之關係圖

- 撲翅機振翅速度如何影響後方區域之垂直氣流的實驗發現(圖 6-10-6-12)
  - 如果該區的「氣流流向檢測儀」上升距離越高，表示該區向上方流動的垂直氣流越強，氣流越強越有助於後方隨行鳥兒的飛行。
  - 從圖 6-10 發現：①振翅速度過慢時，翅膀側面及後方無顯著上升氣流產生。②振翅速度 2.52~4.34 次/秒時，各區「氣流流向檢測儀」有顯著上升情形，說明鳥兒振翅飛翔時，同時也製造向上流動的氣流幫助同伴飛行。③振翅速度越大，B~D 區「氣流流向檢測儀」的上升距離也隨之增大。
  - 從圖 6-11 發現不論哪個區域，機身上方上升氣流優於機身下方。其中機身上方 5cm 處的區域 C、B 的上升氣流最強。
  - 從圖 6-12 發現機身正後方 0cm 處，各區域上升氣流皆優於其他距離，其中 B、C 上升氣流最強。
  - 綜合以上發現可得知振翅速度越快，機身正後方，上方 5cm 處，產生的垂直氣流可讓「氣流流向檢測儀」上升距離最高，C 區最高為 13.08cm，B 區次之為 11.02cm。

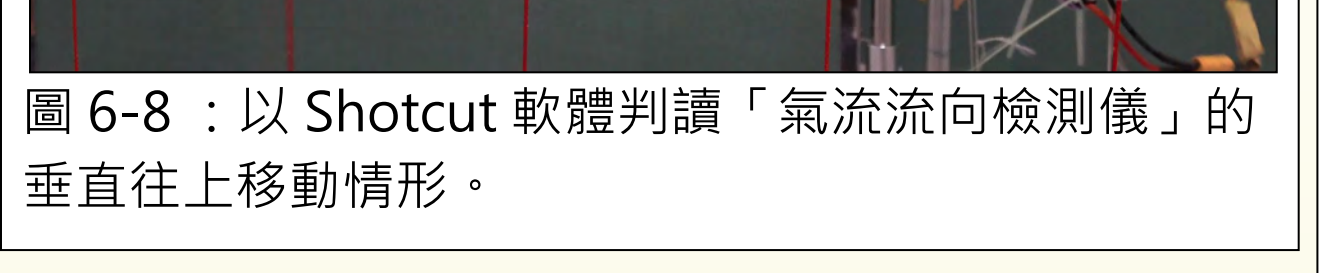


圖 6-9：撲翅機在不同 6 種振翅速度下，各區域位置與「氣流流向檢測儀」後移距離關係圖

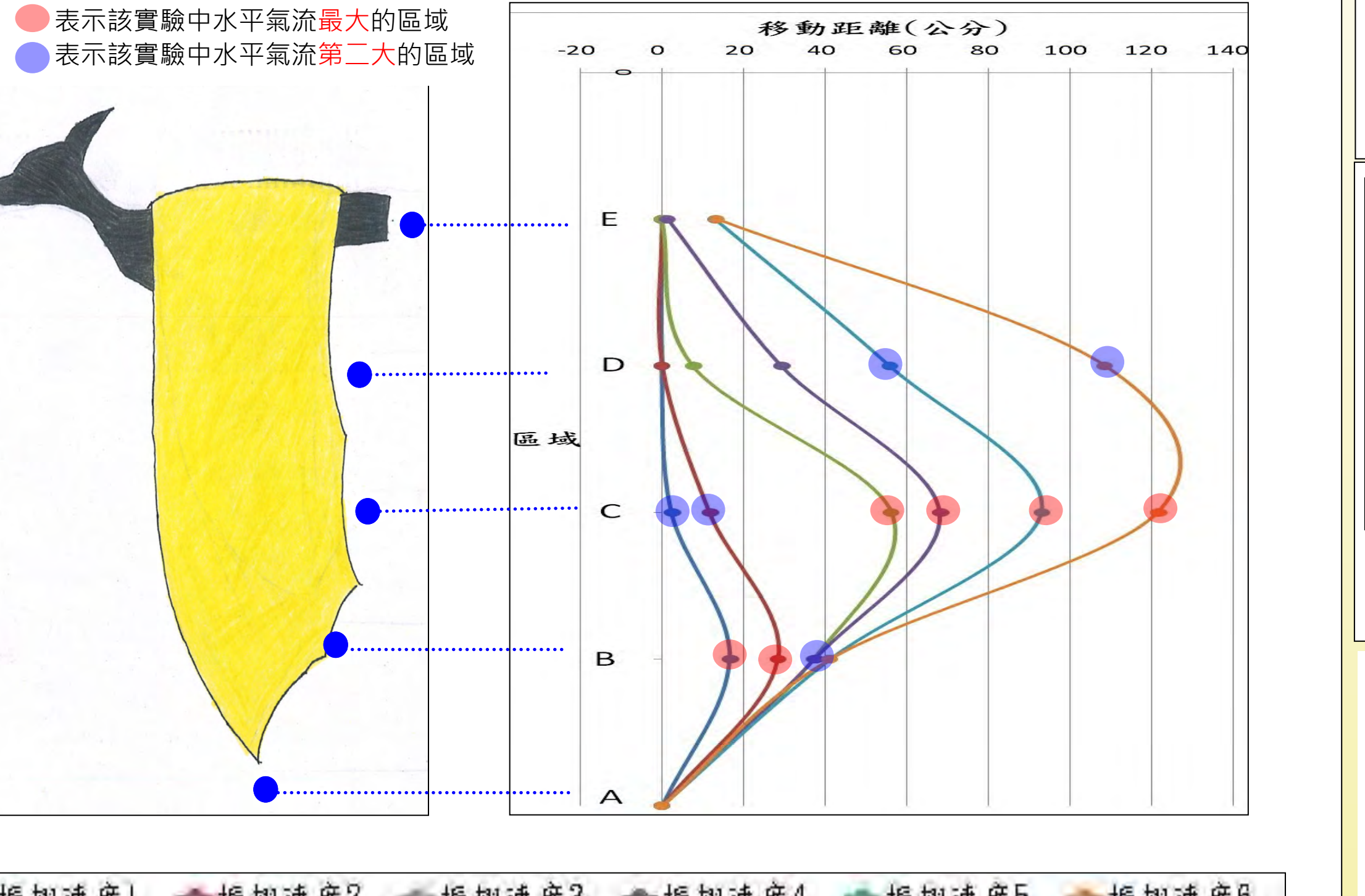


圖 6-9：撲翅機在不同 6 種振翅速度下，各區域位置與「氣流流向檢測儀」後移距離關係圖

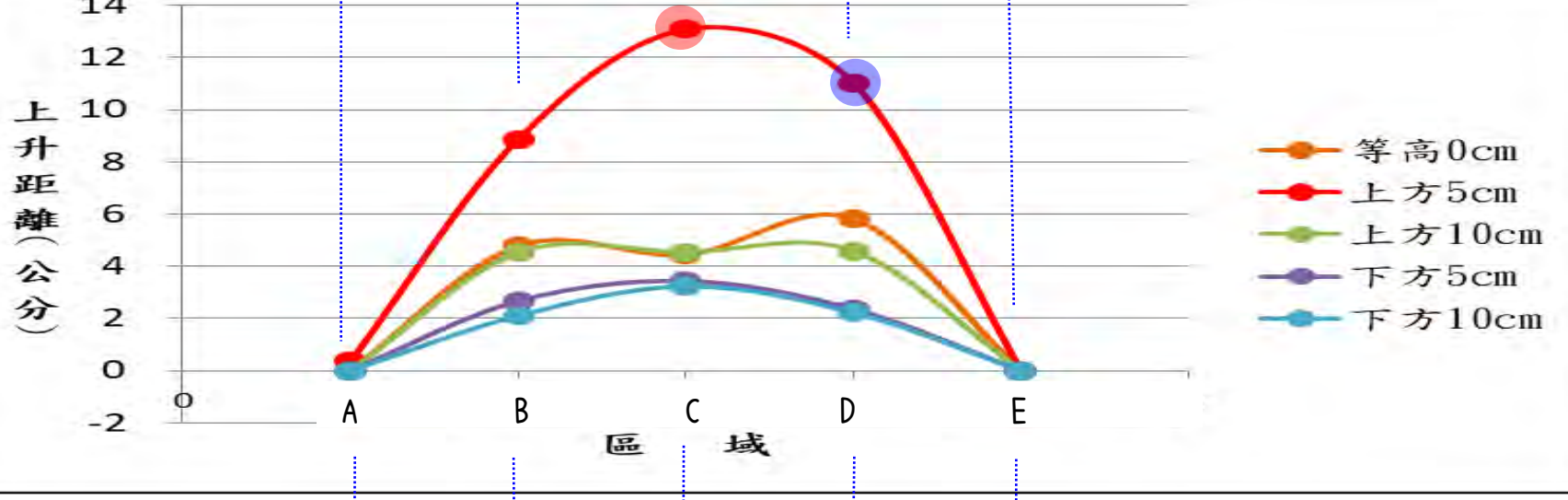


圖 6-11：振翅速度 4.34 次/秒，各區「氣流流向檢測儀」高度與上升距離之關係圖

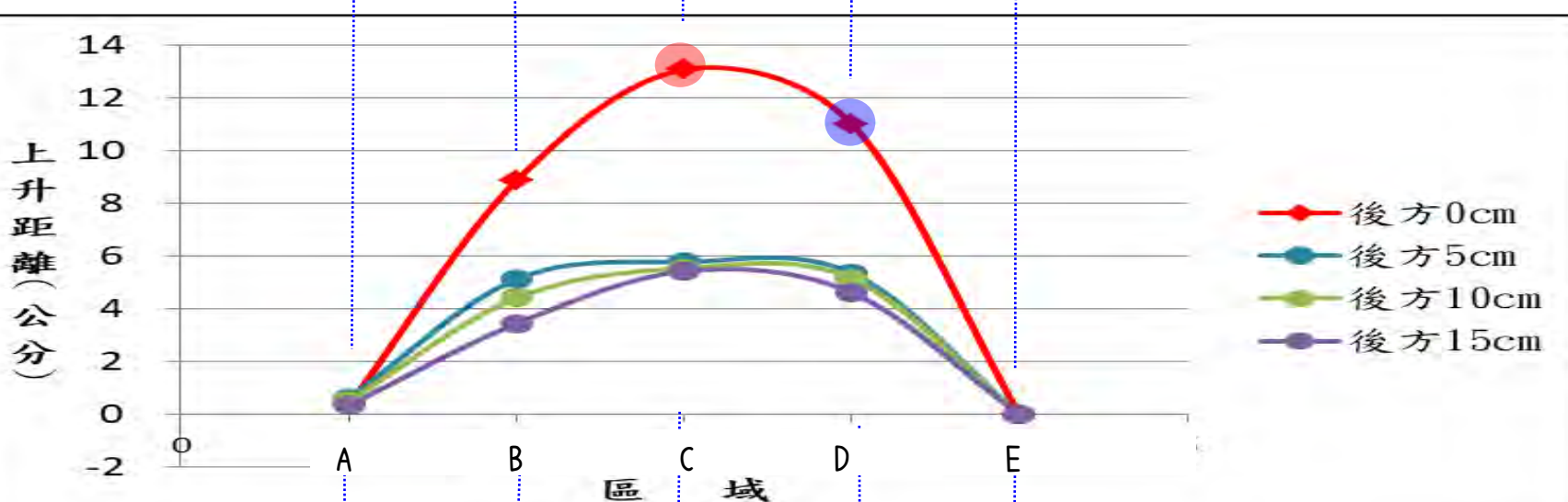
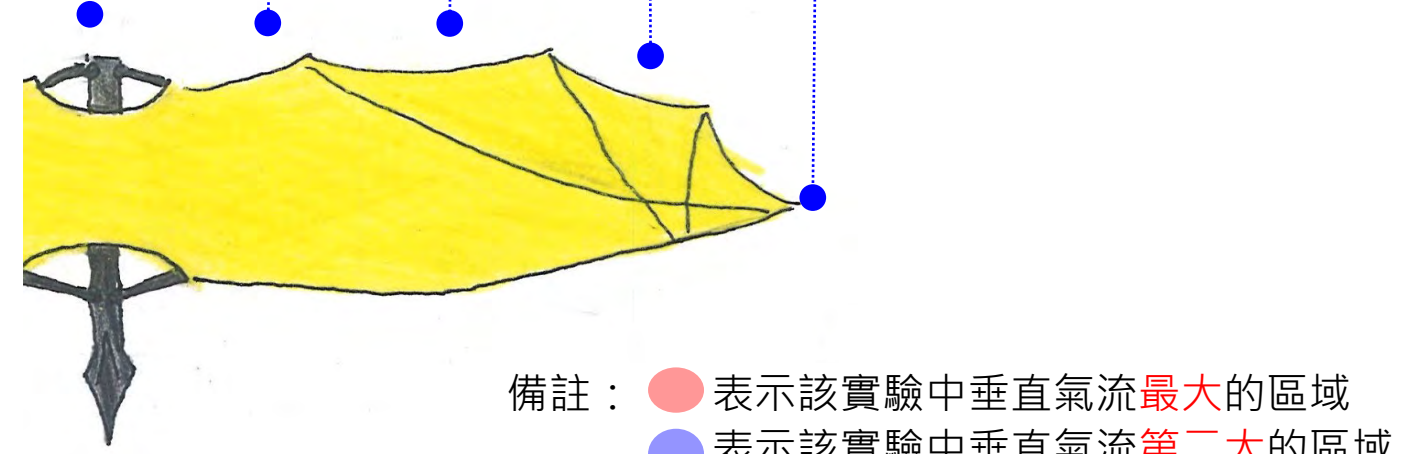


圖 6-12：振翅速度 4.34 次/秒，上方 5cm，各區域「氣流流向檢測儀」距機身遠近與其上升距離關係圖



備註：●表示該實驗中垂直氣流最大的區域 ●表示該實驗中垂直氣流第二大的區域

## 設法以更精準的方式找出隨行同伴的最佳飛行位置！

在子題六中得知，量測「氣流流向檢測儀」的水平後退距離及垂直上升距離，可分別檢視撲翅機振翅時，翅膀後方不同區域水平向後(不利於後方隨行鳥兒的飛行)及垂直向上(有助於後方隨行鳥兒的飛行)氣流的強弱。

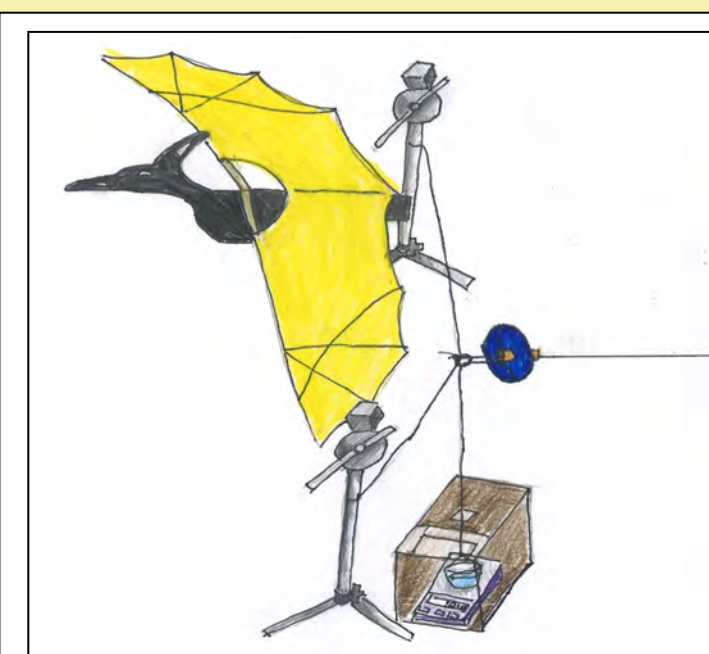
實驗中得知撲翅機振翅速度最快為 4.34 次/秒時，水平向後的氣流由強至弱為：區域 C > D > B > E > A，其中區域 A 全無水平向後的氣流；而垂直向上的氣流最強之處則位於機身正後上方 5cm，其中又以 C 區最強為 13.08cm，B 區次強為 11.02cm。

但若想將兩者加以綜合比較找出對後面隨行同伴飛行的最佳位置，還是有困難，因此我們計畫將在子題七中設法改良「氣流流向檢測儀」的設計，以精確找出後面隨行同伴飛行的最佳位置！

# 實驗七：改良「氣流流向檢測儀」，嘗試以「重量」的形式呈現撲翅機後方水平及垂直氣流的大小？

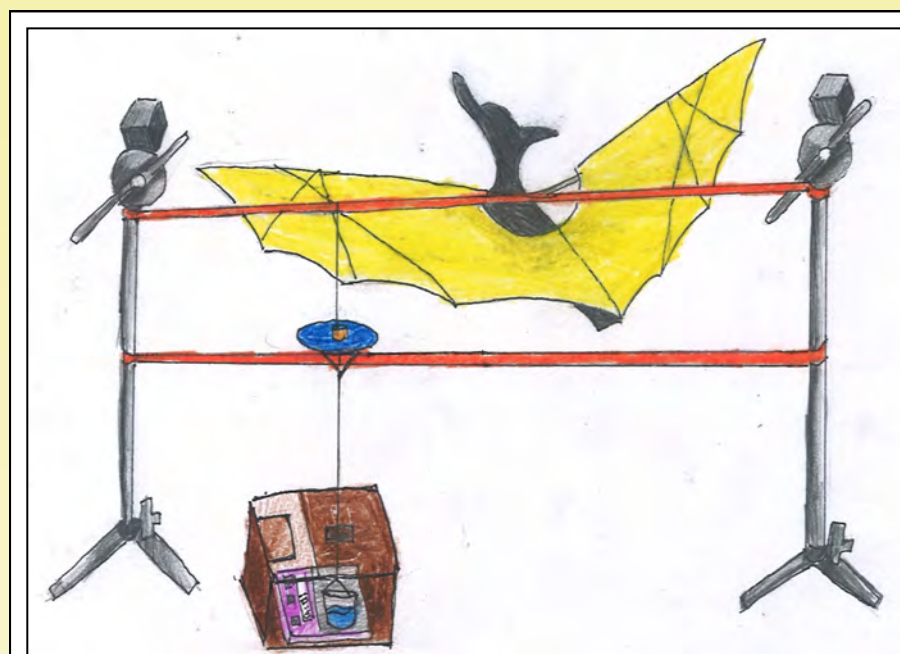
## (一)實驗設計理念及步驟：

- 1.在子題六發現垂直向上的氣流最強之處位於機身正後上方 5cm，我們將以此處為實驗點，改良「氣流流向檢測儀」的設計，使其所量測出區域 A~E 的水平推力及垂直升力能以「重量」的形式呈現。因為衡量撲翅機後方的空氣動力性能，不能只單從升力，或單從阻力一個面向來看，必須把兩者結合起來，分析升力和阻力之間的對比關係，即為「升阻比」，因此計算出撲翅機正後上方 5cm 區域 A~E 的「升阻比」，以求能精確找出後面隨行同伴飛行的最佳位置！
- 2.測量撲翅機正後上方 5cm 處區域 A~E 之水平向後推力：
- 3.測量撲翅機正後上方 5cm 處區域 A~E 之垂直向上升力：



撲翅機振翅時，設置於翅膀後方該區的「水平推力檢測儀」將因水平向後氣流的影響而往後退，就會帶動釣魚線，使得原本電子秤上所測得的 10gw 量杯的重量減少，那麼減少的重量即為該區所產生的水平推力，單位為 gw。

圖 7-1：「水平推力檢測儀」之設計。



撲翅機振翅時，設置於翅膀後方該區的「垂直升力檢測儀」將因垂直向上氣流的影響而往上升，就會帶動釣魚線，使得原本電子秤上所測得的 10gw 量杯的重量減少，那麼減少的重量即為該區所產生的垂直向上升力，單位為 gw。

圖 7-2：「垂直升力檢測儀」之設計。

## (二)實驗發現：

- 1.如果該區的「水平推力檢測儀」減少的重量越多，表示該區水平向後的力量越強，越不利於後方隨行鳥兒的飛行；如果該區的「垂直升力檢測儀」減少的重量越多，表示該區垂直向上的力量越強，越有利於後方隨行鳥兒的飛行。
- 2.計算撲翅機正後上方 5cm 處各區「升阻比」(表 7-1)，可得區域 B 升阻比最大為 1.08，說明『翼尖後方』是後面隨行同伴飛行的好位置！
- 3.承 2 之發現當鳥群振翅飛行時，領頭鳥翅膀在空中揮動，翼尖後上方會產生一股微弱的垂直上升氣流，後方鳥兒爲了利用這股上升氣流，以節省自己的體力，就緊跟在前一隻鳥兒翼尖後方飛行，一隻接著一隻排列著，一群鳥兒的飛行隊伍就成了「V」字形排列了！

表 7-1：撲翅機正後上方 5cm 處各區「升阻比」之一覽表

區域	A	B	C	D	E
垂直平均升力(gw)	0.00	1.53	1.79	1.08	0.14
水平平均推力(gw)	0.00	1.42	4.02	2.40	0.33
升阻比	0.00	1.08	0.45	0.45	0.43
隨行同伴最佳位置		✓			

# 實驗八：利用水煙霧觀察撲翅機兩翼的翼尖後方氣流之流動情形。

- (一)實驗步驟：設定撲翅機振動速度為 2.52 次/秒，將自製「煙霧製造機」置於撲翅機左翼及右翼「翼尖後方」(前子題所得隨行同伴最佳位置)，以觀察此區立體氣流流動情形(圖 8-1~8-2)。

## (二)實驗發現：

- 1.選擇振翅速度 2.52 次/秒進行氣流觀察實驗的原因，是因為振翅速度過快時，翅膀後方的水平氣流過強，會將水煙霧往後吹散，不易觀察。
- 2.當撲翅機每向下拍動一次翅膀，就會在翼尖後方產生一個垂直方向的渦流，這兩個渦流旋轉方向相反，左翼後方煙霧順時針方向流動，右翼後方煙霧逆時針方向流動。
- 3.從撲翅機後方進行拍攝時，可清楚觀察到兩個渦流內側是下沉氣流，外側則是上升氣流，這表示領頭鳥後面隨行同伴飛行時，可以藉由將翅膀定位在上升氣流的部位，來獲得額外的升力以達到省力的目的呢！



圖 8-1：將自製「煙霧製造機」置於撲翅機左翼及右翼「翼尖後方」。

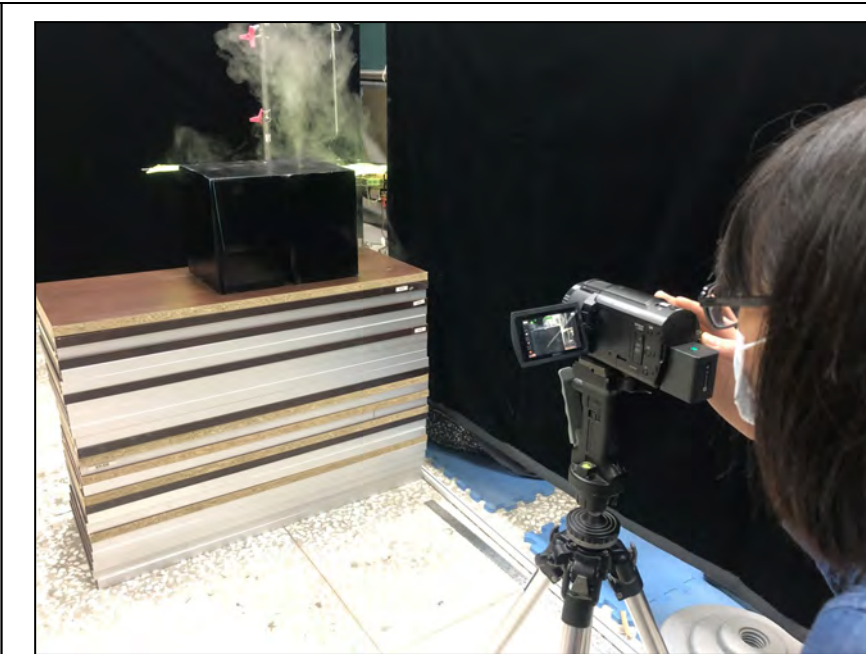


圖 8-2：器材後 1.5m 處以水平視角架設攝影機以進行後續分析。

表 8-1：兩翼之翼尖後方水煙霧氣流的流動情形一覽表

翅膀方向	左翼	右翼
氣流照片		
說明	左翼翼尖後方煙霧順時針方向流動	右翼翼尖後方煙霧逆時針方向流動

# 肆、結論

## 一、成功組裝能模擬鳥類振翅及能依實驗需求調整振翅速度的「撲翅機」

- 1.子題一文獻探討中得知以往研究鳥類飛行作品中，都是將一固定形狀待測物體置於風洞中，藉以模擬該物體在空中真實飛行時的狀態，並設計實驗量測出其在空中飛行時所獲得的推進力及升力。但本研究則是致力研發能真真實實模擬鳥兒振翅的撲翅機，實驗全程在無風的環境中，探究其在不同振翅速度下的各種現象。
- 2.子題二經數十次測試改良，終於製作出符應研究需求的撲翅機，特色為使用齒輪組使雙翼能對稱性振翅、使用高速馬達提升振翅速度、增加翅膀骨架以更趨近真實鳥類翅膀、加裝電子調速器以便能調整振翅速度、量輕耐用可支援長時間實驗。
- 3.子題三中得知「馬達電子調速器測試儀」上的 6 個記號雖等距，但從所錄製的影片分析卻得其振翅速度並非等倍加速(如圖 3-3)，且撲翅機振翅速度越快，垂直上升高度及水平移動距離數值隨之增加(圖 3-5)，表示振翅動作確實能產生推進力及升力。

## 二、透過實驗成功探究撲翅機振翅時對「自身」造成的各種現象。

### (一)實驗發現撲翅機翅膀下拍時，翅膀每個截面上所產生的空氣作用力會同時在前進方向產生推力及在重力反方向產生升力。

- 1.子題四，撲翅機慢速振翅(1.27~1.54 次/秒)下像毛毛蟲般一步一步向前行進，不僅充滿趣味，極慢速播放實驗影片還可清楚觀察到撲翅機翅膀上揚時停在原位，翅膀下拍時會往前進，這可說明鳥的翅膀下拍的動作，是鳥類飛行推進力的主要來源。
- 2.撲翅機在中、高速振翅下(振翅速度 1.83~4.34 次/秒)，往前行進速度越來越快，極慢速播放影片可清楚觀察到不論撲翅機的翅膀是「下拍」或是「上揚」，都會使撲翅機往前進，但「翅膀下拍時所前進的距離」大於「翅膀上揚時所前進的距離」，這說明鳥類在揚翅時雖不會產生推力，但能靠前一次扇動翅膀時所產生之水平方向的動量而向前衝。
- 3.子題五，將撲翅機固定於角鐵，立於電子秤上進行振翅動作，發現翅膀下拍時，電子秤數值減少；翅膀上揚時，電子秤數值增加。說明翅膀下拍時在翅膀每個截面上所產生的空氣作用力，不僅會在前進方向產生推力，也會在重力反方向產生升力。

### (二)成功藉由實驗量測及推算，量化撲翅機在不同振翅速度下的推進力及升力值。

- 1.子題四藉由撲翅機不同振翅速度下，量測移動 1.2m 所需花費的平均時間，再以「牛頓第二運動定律」計算出撲翅機在不同振翅速度時推進力值。以撲翅機振翅速度 4.34 次/秒，移動 1.2m 需花費 0.71 秒為例，其平均推進力值竟高達為 18.66 公斤重！
- 2.子題五記錄撲翅機在電子秤上進行振翅動作時，其數值變化情形，求出所測得最高值與最低值之差值，即為最大升力值。
- 3.將子題四、五所得平均推力值及最大升力值繪製成圖 8-3，發現振翅速度越快，撲翅機所獲得平均推力值及最大升力值越大

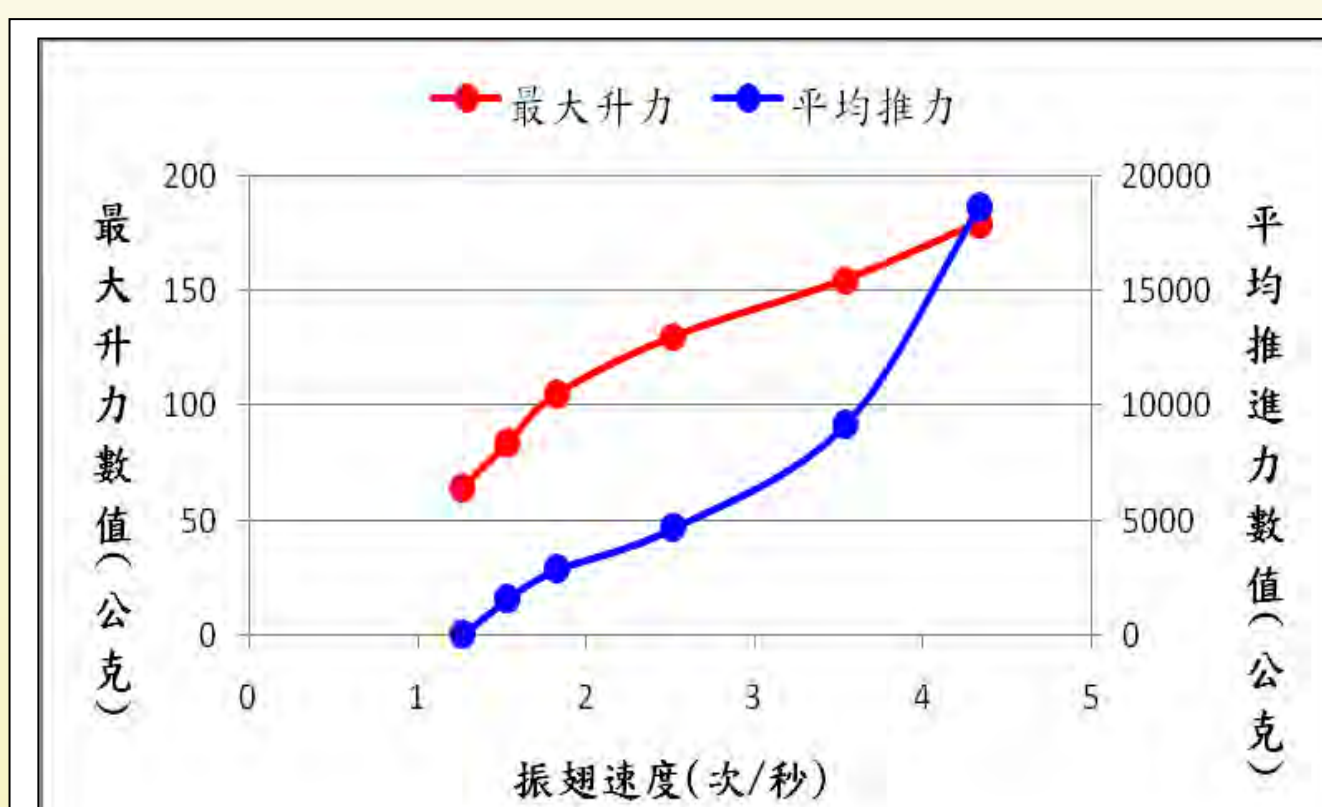


圖 8-3：撲翅機不同振翅速度下，其平均推力及最大升力關係圖。

## 三、透過實驗成功探究撲翅機振翅時「後方」的氣流變化。

### (一)利用研發的「氣流流向檢測儀」可具體呈現撲翅機振翅時其後方各區域水平及垂直氣流的強弱。

本研究自創以重量輕、佔位空間小、受風面大、形狀對稱而取勝的橢圓形狀塑膠片製成的「氣流流向檢測儀」，將其置於撲翅機側面及後方的 5 個區域來進行實驗，精準得知撲翅機後方各區的水平及垂直氣流的強弱。

### (二)利用改良後的「水平推力/垂直升力檢測儀」可成功以「重量」的形式呈現撲翅機後方各區的水平推力/垂直升力，透過計算其「升阻比」可精確得知撲翅機『翼尖後方』是後面隨行同伴飛行的好位置！

鳥群振翅飛行時，前面領頭鳥翅膀在空中揮動，翼尖後上方會產生一股微弱垂直上升氣流，後方鳥兒爲了利用這股上升氣流以節省自己的體力，就緊跟在前一隻鳥兒翼尖後方飛行，一隻接著一隻排列著，一群鳥兒飛行隊伍就成了「V」字形排列了！

### (三)藉由「煙霧製造機」可看見撲翅機兩翼之翼尖後方上升/下沉渦流的流動情形，再次讓我們的研究所得獲得有力的驗證！

子題八藉由水煙霧可觀察到撲翅機振翅時，每向下拍動一次翅膀，就會在翼尖後方產生一個垂直方向、方向相反的渦流，左/右翼後方渦流分別以順時針/逆時針方向流動，流動方向顯示出兩個渦流內側是不利於飛行的下沉氣流，外側則是空氣阻力小的上升氣流，整群鳥兒不僅會避免位在同伴的下沉氣流區，還會搭著前方鳥兒捎來的上升氣流輕鬆地飛行著呢！