

# 屏東縣第 62 屆國中小學科學展覽會 作品說明書

科 別：物理科

組 別：國中組

作品名稱：忍者的手裏劍—影響紙飛鏢飛行距離因素的討論

關 鍵 詞：飛行距離、紙飛鏢、旋轉

編號：B2004

## 摘要

在本實驗中，我們討論影響紙飛鏢飛行距離的因素。紙飛鏢如何丟的遠？其中有哪些因素會影響紙飛鏢飛行的距離？我們製做 25 種大小、重量不同的紙飛鏢，並且自己製做一個能旋轉的發射器，利用 Arduino 和霍爾傳感器來測量轉速。討論紙飛鏢尺寸、重量、轉速、外力等因素對飛行距離的影響。結果發現外力越大，飛行距離也會較遠；當輕的飛鏢轉速夠，有足夠的角動量保持飛鏢滑翔時，能在空中停留較長時間，就能飛得比較遠。實驗中得到的數據為：外力大 (2.0kgw)，轉速快 (rpm=1680)，尺寸大 (19.0cm)，重量輕 (11.30gw) 的飛鏢，在本實驗中得到最遠的飛行距離 314cm。我們希望這個實驗能對於旋轉飛行的器具及飛盤、鐵餅等相關運動有所幫助。

## 壹、研究動機

紙飛鏢是很多人小時候喜歡玩的小玩具，但是要像忍者一樣丟的又準又遠恐怕不是容易的事。我們常在想要如何做，才能把紙飛鏢丟的遠？其中有哪些因素會影響紙飛鏢飛行的距離？

我們上網找相關資料<sup>[1]</sup>，其實這和丟飛盤應該有相似的變因，影響的因素可能有丟的力道大小、旋轉速率、飛行物本身的大小和重量……等。其中丟的力道越大，飛鏢飛得越遠，在我們的討論中應該是沒有問題的，但是旋轉速率是越快越好？還是只要有轉，轉得快慢影響不大？飛鏢本身是否也是越大、越重，就能飛得越遠？這些問題都是非常有趣也值得討論的。

網路上討論資料很多，但是也沒有找到相關的數據和答案，我們決定自己試著來做實驗，自己來找如何將紙飛鏢丟得更遠的方法。

在這些變因中，最困擾我們的是如何讓紙飛鏢旋轉，然後還要能控制旋轉的快慢，以及測量到旋轉速率的數據，我們想了很多方法，畫了很多設計圖，總算製做出能完成實驗的裝置。

在實驗中，我們參考了自然與生活科技課本第五冊中有關速度、慣性、簡單機械的相關原理<sup>[2]</sup>，來進行實驗。

希望我們實驗的結果，能運用到一些體育運動，例如：飛盤、鐵餅。也希望在未來能設計出旋轉的飛行器，像飛碟一樣，更節省飛行的能源。



圖 1-1 自己摺紙飛鏢<sup>[3]</sup>



圖 1-2 擲鐵餅<sup>[4]</sup>

## 貳、研究目的

### 實驗一：

#### (一)實驗目的：

探討**拉力大小**對飛鏢飛行距離的影響。

#### (二)控制變因：

飛鏢重量、飛鏢大小、飛鏢轉速。

#### (三)操縱變因：

利用橡皮筋形成 0.8kgw 及 2.0kgw 兩種不同的拉力，並利用感測器測量飛鏢飛出前的速度。

#### (四)應變變因：

測量飛鏢飛行距離，再分析數據。

### 實驗二：

#### (一)實驗目的：

探討**飛鏢大小**對飛鏢飛行距離的影響。

#### (二)控制變因：

飛鏢重量、飛鏢轉速、拉力大小。

#### (三)操縱變因：

從飛鏢兩對角測量長度，共有 10.50cm、12.00cm、14.50cm、16.50cm、19.00cm 五種不同大小。

#### (四)應變變因：

測量飛鏢飛行距離，再分析數據。

### 實驗三：

#### (一)實驗目的：

探討**飛鏢重量**對飛鏢飛行距離的影響。

#### (二)控制變因：

飛鏢轉速、飛鏢大小、拉力大小。

#### (三)操縱變因：

在原有的飛鏢上加重，共有 2.80gw、9.70gw、16.60gw、23.50gw、30.40gw 五種不同加重。

#### (四)應變變因：

測量飛鏢飛行距離，再分析數據。

### 實驗四：

#### (一)實驗目的：

探討**飛鏢轉速**對飛鏢飛行距離的影響。

#### (二)控制變因：

飛鏢重量、飛鏢大小、拉力大小。

(三)操縱變因：

利用感測器測量飛鏢轉速，共有 0rpm、120rpm、960rpm、1680rpm 四種不同轉速。

(四)應變變因：

測量飛鏢飛行距離，再分析數據。

## 參、研究設備及器材

### 一、常用工具

老虎鉗（圖 3-1）、尖嘴鉗、螺絲起子及三用電表（圖 3-2）。



圖 3-1 實驗中常用工具

### 二、旋轉器本體

在實驗中需要飛鏢能旋轉再發射出去，我們討論了很多次，也畫了很多張實驗裝置設計圖，最後使用模型車來改裝，利用模型車的馬達帶動輪子，輪子上放置飛鏢，飛鏢就會跟著轉動，如圖 3-2。

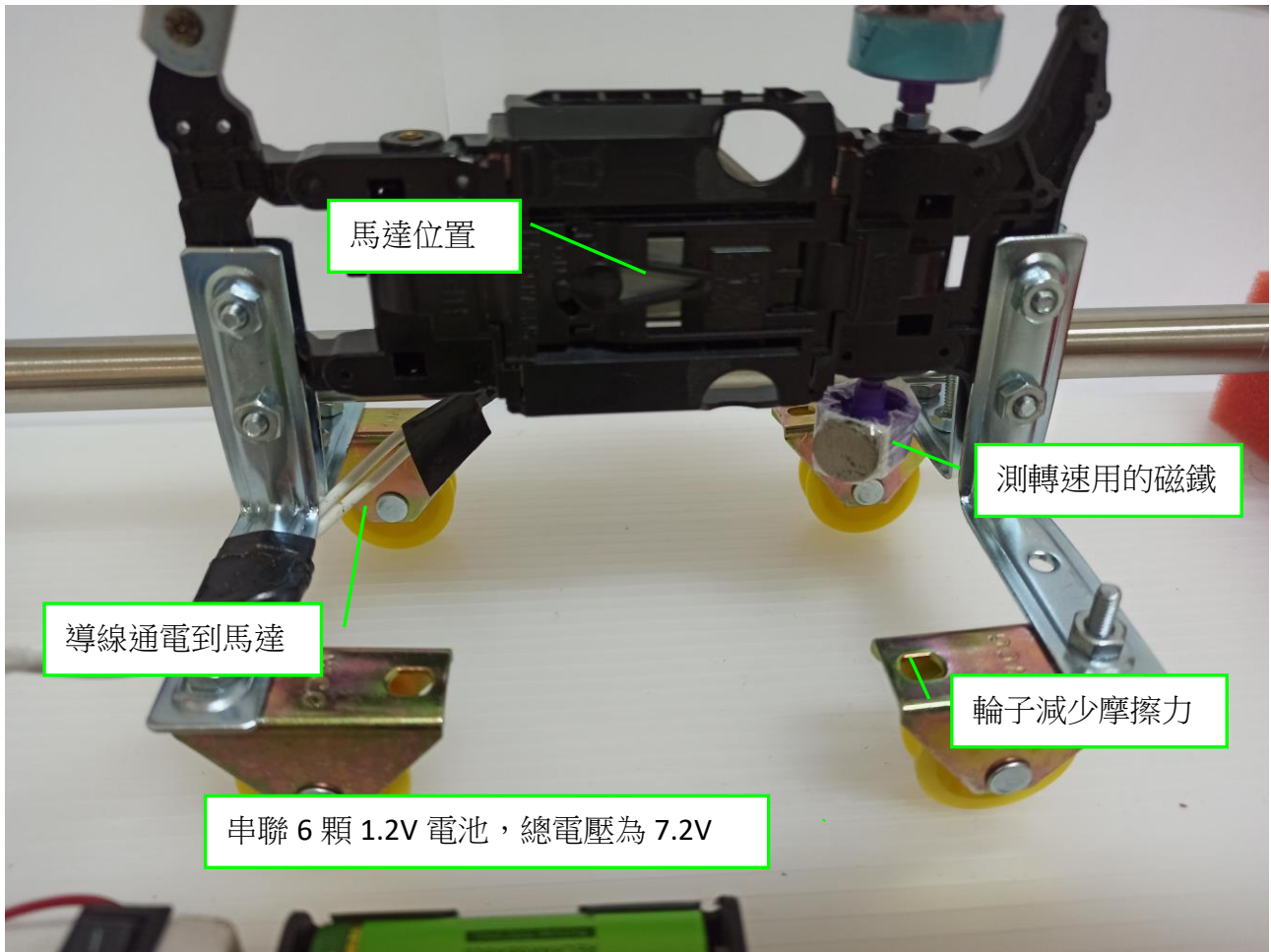


圖 3-2 旋轉器本體說明

然後我們要有一個能調整飛鏢旋轉速率的裝置，所以加裝一個調速器，就可以調整飛鏢旋轉速率。我們使用 pwm 直流馬達調速器(圖 3-3)，此調速器常被用作直流迴路中燈具調光或直流馬達調速，它主要是通過改變輸出，使得負載上的平均接通時間從 0~100%變化，以達到調整負載亮度或馬達旋轉速率的目的。

依照調速器上接口的標示，將導線依正、負極，輸出、輸入接好，以壓線帽連接導線，並固定在滑道邊(圖 3-4)，使用調整鈕方便實驗時可調整速度。經過反覆測試，可改變馬達轉速沒有問題。

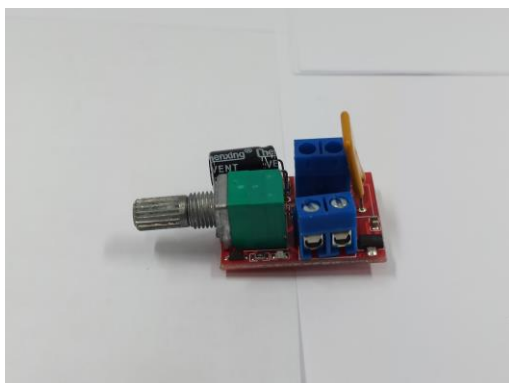


圖 3-3 pwm 直流馬達調速器



圖 3-4 安裝在滑道上



為了提高馬達的最大轉速，我們上網找資料後發現可以增加馬達電壓，來增加馬達轉速，我們的馬達可以承受的電壓為 6V~9V，所以我們串聯 6 顆 1.2 伏特的充電電池，使得總電壓達到 7.2 伏特（圖 3-5）。在馬達調速器上加裝刻度指標（圖 3-6），以利在實驗操做時能快速旋轉調節鈕，調整馬達轉速。

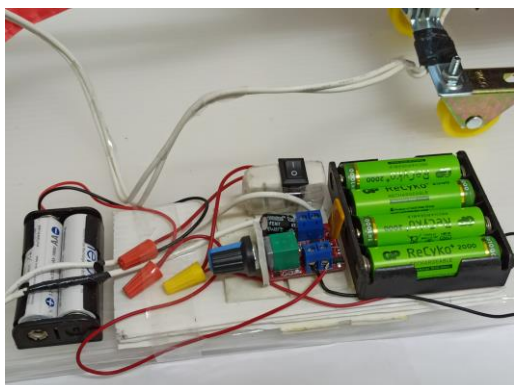


圖 3-5 使用電壓為 7.2 伏特



圖 3-6 加裝刻度指標

然後串聯一個開關（圖 3-7），方便實驗進行。在滑道兩側裝上橫桿以確保滑輪能直線前進，並在滑道最後放置防撞海綿（圖 3-8），減緩滑車的衝擊力。



圖 3-7 安裝開關

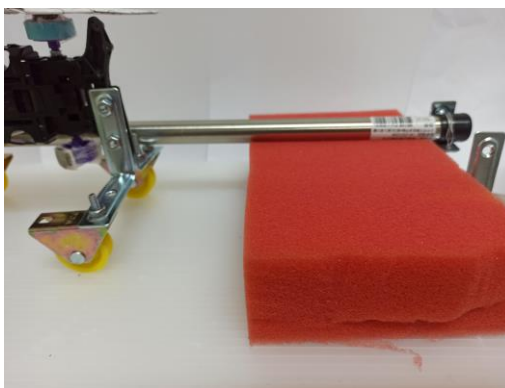


圖 3-8 放置防撞海綿

在旋轉器本體上裝上支架，支架前方用磁鐵吸住飛鏢（圖 3-9），使飛鏢跟著旋轉（圖 3-10），然後旋轉器受橡皮筋拉力前進時，飛鏢跟著前進，在滑道終點時利用繩子拉開支架，飛鏢就會慣性飛出。

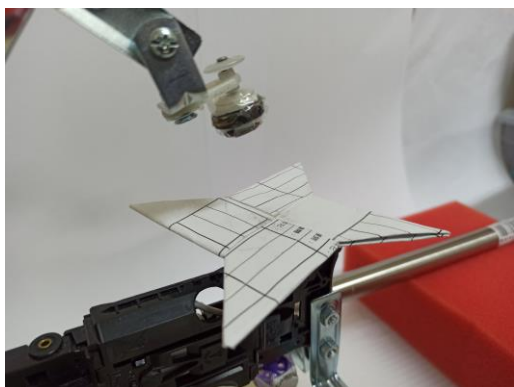


圖 3-9 利用磁鐵吸住飛鏢

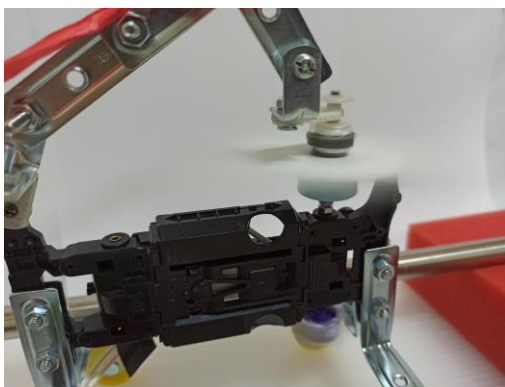


圖 3-10 馬達帶動飛鏢旋轉

### 三、Arduino 和霍爾傳感器

Arduino 是整合微控制晶片及燒錄功能在一塊開發板上，現在很多機器人營隊中都有使用，運用非常廣泛，在學校中也有相關社團。Arduino 必須得搭配感測器或周邊設備，來達到邏輯判斷或是自動控制的目的。

我們使用霍爾傳感器來測量馬達轉速和飛鏢發射前的速度（圖 3-11）。霍爾傳感器，是一個換能器，將變化的磁場轉化為輸出電壓的變化。霍爾傳感器首先是實用於測量磁場，此外還可測量產生和影響磁場的物理量，例如被用於接近開關、位置測量、轉速測量和電流測量設備<sup>[5]</sup>。

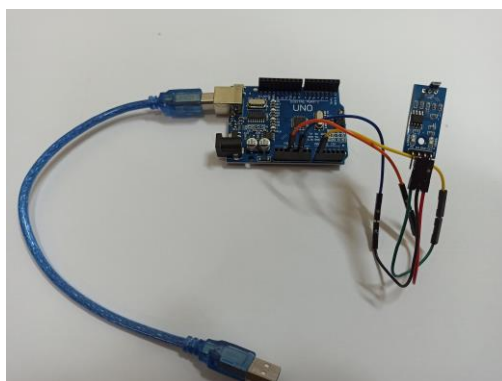


圖 3-11 Arduino 和霍爾傳感器

#### （一）測馬達轉速

首先，在旋轉器底部轉軸上黏上磁鐵（圖 3-12），為保持轉動時的平衡，另一邊黏上約等重的小螺絲。將 Arduino 和霍爾傳感器以杜邦線連接好，然後燒入程式<sup>[6]</sup>（表 3-1），讓數據回傳到電腦上。

霍爾傳感器前端感受到磁力時，會計下次數（圖 3-13），再算出轉動的速率，單位為每分鐘轉動次數（rpm）。我們開啟電腦即可看到回傳的數據（圖 3-14），我們可以調整 pwm 馬達調速器來達到我們要的轉速。

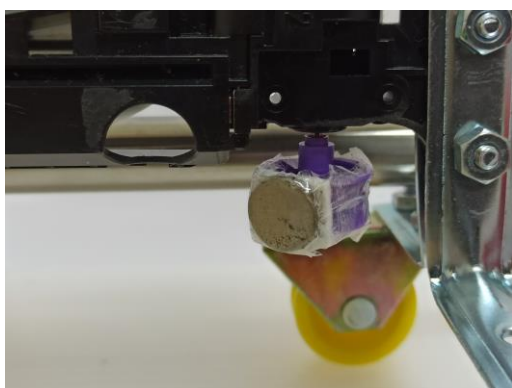


圖 3-12 讓磁鐵也跟著旋轉

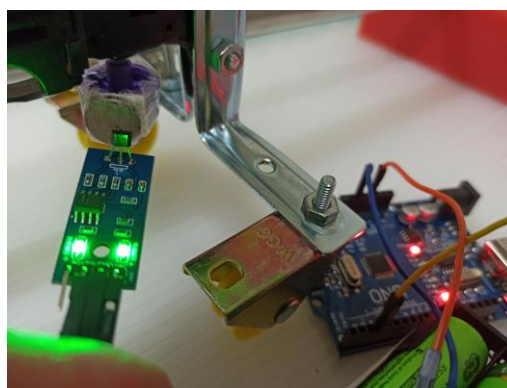


圖 3-13 感測器可偵測到旋轉次數

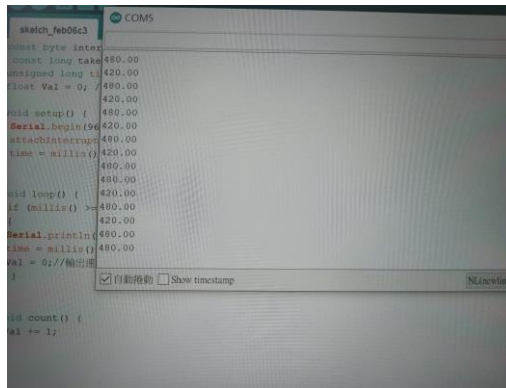


圖 3-14 數據回傳到電腦

```

const byte interruptPin = 3;
  const long taketime = 1000; // 每次測量的時間
  unsigned long time; //設定變數 time，計時
  float Val = 0; //設定變數 Val，計數

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(interruptPin), count, FALLING); //觸發訊號必須是變化的，上升或下降皆可
  time = millis(); //開始計時，time 獲得當前系統時間
}

void loop() {
  if (millis() >= time)
  {
    Serial.println(Val*60); //轉換成 rpm，單磁鐵觸發解析度為 60rpm，2 個磁鐵為 30rpm
    time = millis() + taketime; //標記未來的時間點，1000ms 後執行 if 判斷，輸出結果。另，降低重新整理頻率，可以提高解析度
    Val = 0; //輸出速度結果後清零，記錄下一秒的觸發次數
  }
}

void count() {
  Val += 1;
}

```

表 3-1 Arduino 程式碼<sup>[6]</sup>



## (二) 測飛鏢發射速度

接下來我們測飛鏢發射速度，我們同樣使用霍爾傳感器。在旋轉器本體的前後輪子邊各黏上一個強力磁鐵（圖 3-15），量得兩磁鐵間的距離為 0.1120 公尺，將霍爾傳感器放置於可偵測到磁力的位置，然後拉動旋轉器本體，藉由橡皮筋拉力使旋轉器本體加速前進，兩個輪子先後經過霍爾傳感器旁（圖 3-16），霍爾傳感器即會回傳電腦兩個訊息，然後由兩個訊息的時間差 0.142 及 0.053 秒，即可換算出在外力為 0.8kgw 時飛鏢的發射速度約為 0.79m/s，在外力為 2.0kgw 時飛鏢發射速度約為 2.11m/s。（式 3-1）

公式：

$$\text{平均速度 } v = \frac{\text{位移 } x}{\text{時間 } t} \quad \text{單位} = \frac{\text{公尺}}{\text{秒}} \quad \boxed{\text{式 3-1}}$$

此變項在實驗中定為控制變因，我們儘量讓相同外力時，每組實驗中飛鏢發射前的速度保持一致。旋轉發射器重量約為 340gw，而最重的飛鏢為 38.90gw，重量約只有旋轉發射器的 1/10，所以加上飛鏢後，飛鏢的重量對發射器的速度影響很小。

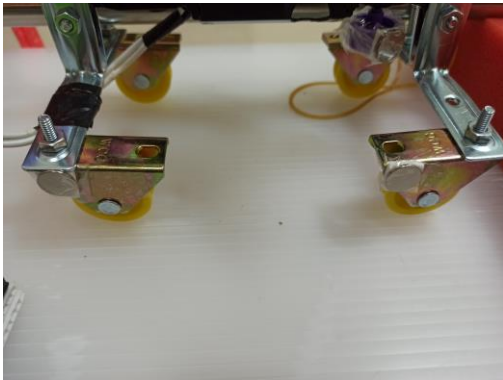


圖 3-15 兩個輪子旁各黏上磁鐵

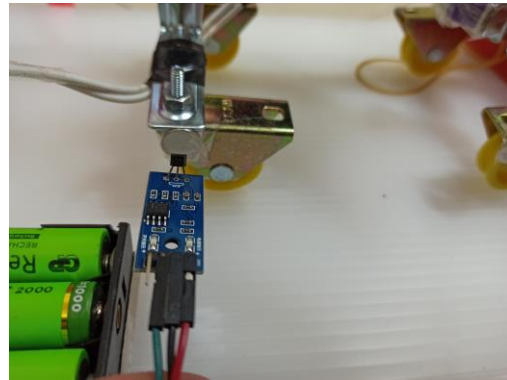


圖 3-16 感測器偵測經過的時間

## 四、製做不同大小、重量的飛鏢

我們使用相同材質的紙張，折出小時候常玩的紙飛鏢。製做五種大小不同的紙飛鏢，從飛鏢兩對角量得數據為 10.50cm、12.00cm、14.50cm、16.50cm、19.00cm。每種飛鏢，分別再貼上 0 個、2 個、4 個、6 個及 8 個 3.8g 重的一元，分成五種不同的重量，合計共有 25 種紙飛鏢（圖 3-17）。

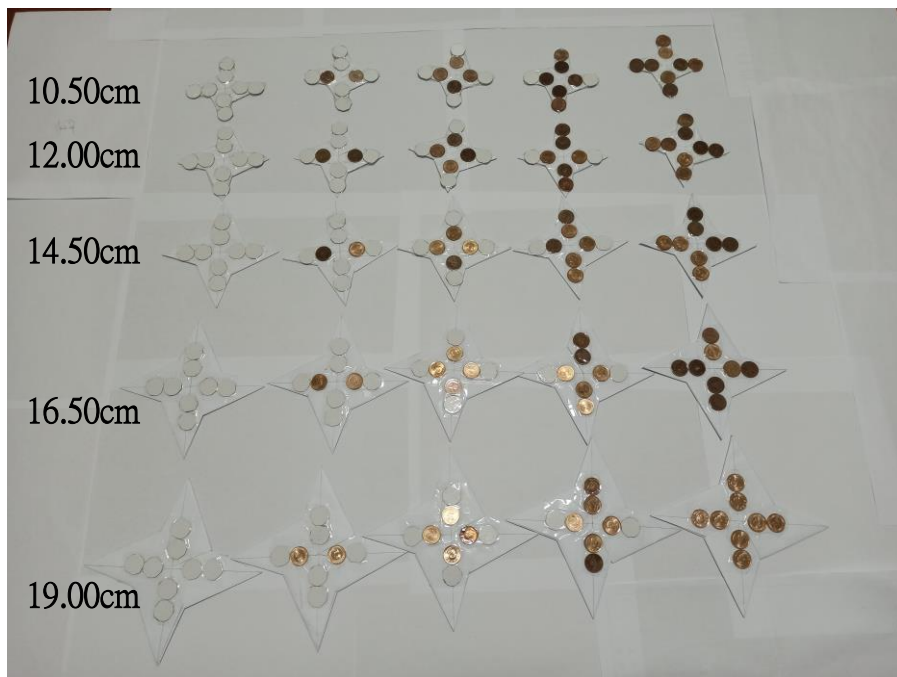


圖 3-17 共有 25 種大小重量不同的紙飛鏢進行實驗

在飛鏢的配重上，我們想到貼上的 1 元會有凸起，可能對空氣流動造成影響，所以我們在沒有貼 1 元的飛鏢上也貼厚度相同，每個重為 0.35gw 的圓形厚紙片，儘量減少其它變因對實驗結果造成影響（圖 3-18）。每個紙飛鏢因大小不同，所以一開始的重量也不同，加上配重的結果如表 3-2。



圖 3-18 減少因配重造成的厚度差異

紙飛鏢大小	紙飛鏢重量				
	10.5cm	5.30 gw	12.20 gw	19.10 gw	26.00 gw
12.0cm	6.10 gw	13.00 gw	19.90 gw	26.80 gw	33.70 gw
14.5cm	7.58 gw	14.48 gw	21.38 gw	28.28 gw	35.18 gw
16.5cm	9.17 gw	16.07 gw	22.97 gw	29.87 gw	36.77 gw
19.0cm	11.30 gw	18.20 gw	25.10 gw	32.00 gw	38.90 gw

表 3-2 每個紙飛鏢的重量

## 五、滑道

最後我們將滑道製做完成，滑道兩側裝上金屬桿，可使旋轉器本體在前進時保持直線前進及平穩（圖 3-19），再串聯接上四條厚為 2.0mm 的橡皮筋，繞過旋轉器本體固定在前方，可形成拉力拉動旋轉器前進（圖 3-20）。在本實驗中，使用 0.8kgw、2.0kgw 兩種拉力來帶動旋轉器，使飛鏢前進（0.8kgw、2.0kgw 兩種拉力代表的是當橡皮筋拉到跑道最末端時測量到的彈力，當橡皮筋縮短時，拉力也會逐漸減少）。

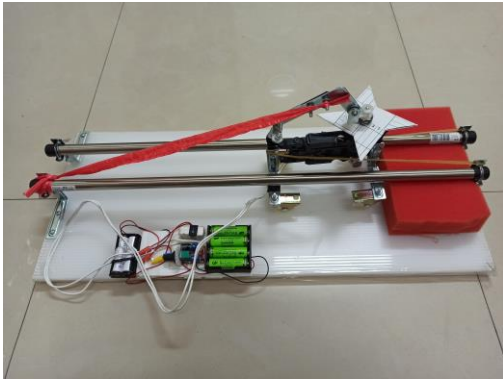


圖 3-19 滑道兩側裝上金屬桿

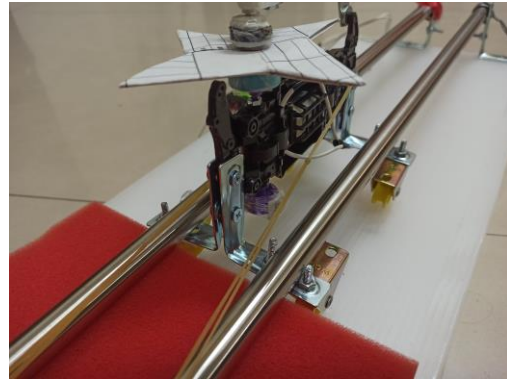
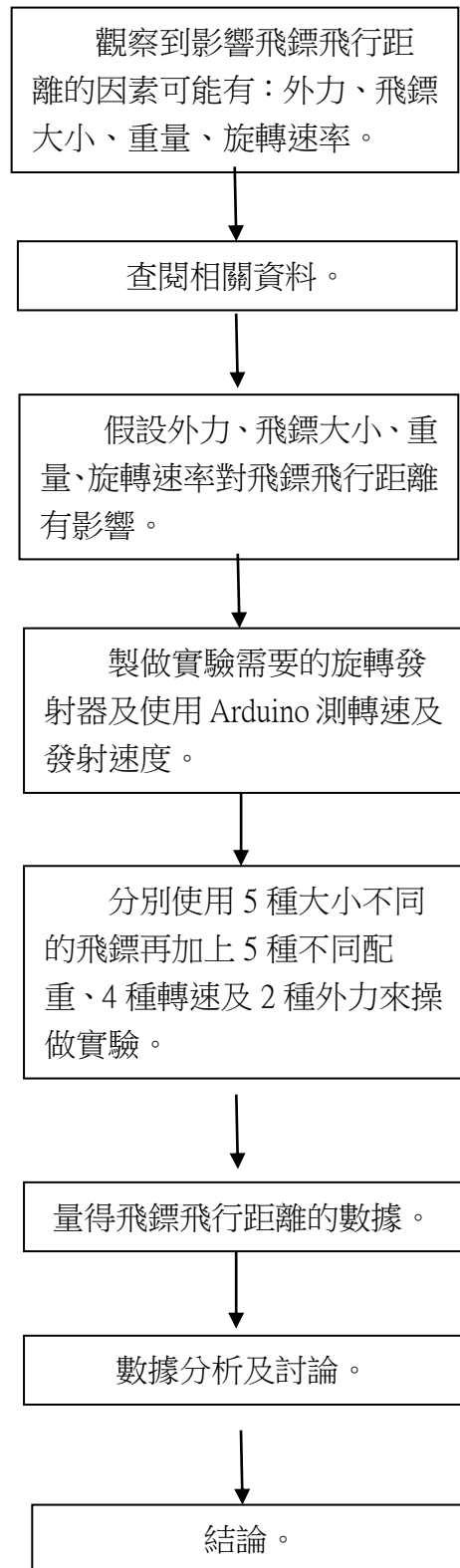


圖 3-20 以橡皮筋來形成拉力

## 肆、研究方法

### 一、實驗流程圖



## 二、實驗方法

開始進行實驗，將實驗裝置放於 74.50cm 的桌子上，Arduino 和霍爾傳感器用 usb 連接電腦，開啟程式 Arduino IDE，將紙飛鏢安裝好，打開電源，開始轉動，即可在電腦上看到旋轉速率（圖 4-1）。然後，將旋轉器本體向後拉，放開後紙飛鏢即會因為慣性旋轉飛出。

每個實驗操做三次，再使用捲尺量得飛行距離（圖 4-2），取最遠的一次數據記錄下來後，再分析數據。

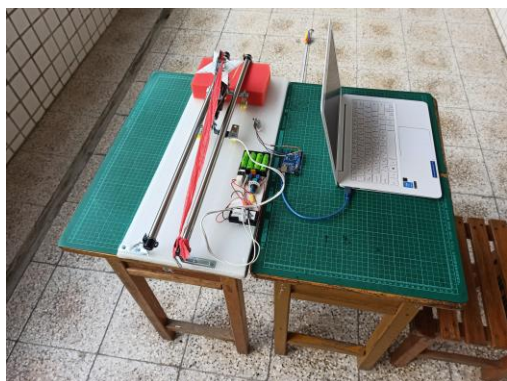


圖 4-1 實驗裝置圖



圖 4-2 用捲尺量紙飛鏢飛行距離

## 伍、研究結果

每組實驗操做 3 次，將飛行距離最佳的結果記錄如下表：

紙飛鏢大小 10.5cm

		紙飛鏢重量				
		5.30 gw	12.20 gw	19.10 gw	26.00 gw	32.90 gw
轉速		飛行距離				
拉力 0.8kgw	0 rpm	93 cm	95 cm	96 cm	96 cm	98 cm
	120 rpm	100 cm	98 cm	100 cm	102 cm	102 cm
	960 rpm	135 cm	130 cm	127 cm	125 cm	117 cm
	1680 rpm	145 cm	143 cm	143 cm	132 cm	120 cm

拉力 2.0kgw	0 rpm	123 cm	134 cm	146 cm	166 cm	174 cm
	120 rpm	168 cm	166 cm	165 cm	167 cm	167 cm
	960 rpm	234 cm	230 cm	210 cm	190 cm	177 cm
	1680 rpm	240 cm	240 cm	225 cm	210 cm	178 cm

表 5-1 10.5cm 紙飛鏢數據



紙飛鏢大小 12.0cm

		紙飛鏢重量					
		6.10 gw	13.00 gw	19.90 gw	26.80 gw	33.70 gw	
		轉速	飛行距離				
拉力 0.8kgw	0 rpm	95 cm	94 cm	95 cm	98 cm	102 cm	
	120 rpm	95 cm	93 cm	95 cm	97 cm	107 cm	
	960 rpm	131 cm	133 cm	129 cm	122 cm	120 cm	
	1680 rpm	140 cm	139 cm	133 cm	128 cm	124 cm	

拉力 2.0kgw	0 rpm	121 cm	131 cm	147 cm	155 cm	169 cm
	120 rpm	147 cm	141 cm	144 cm	159 cm	177 cm
	960 rpm	210 cm	211 cm	210 cm	205 cm	187 cm
	1680 rpm	264 cm	255 cm	231 cm	211 cm	187 cm

表 5-2 12.0cm 紙飛鏢數據

紙飛鏢大小 14.5cm

		紙飛鏢重量					
		7.58 gw	14.48 gw	21.38 gw	28.28 gw	35.18 gw	
		轉速	飛行距離				
拉力 0.8kgw	0 rpm	96 cm	97 cm	100 cm	105 cm	117 cm	
	120 rpm	120 cm	121 cm	122 cm	125 cm	126 cm	
	960 rpm	150 cm	149 cm	150 cm	140 cm	138 cm	
	1680 rpm	153 cm	151 cm	151 cm	145 cm	140 cm	

拉力 2.0kgw	0 rpm	123 cm	140 cm	145 cm	164 cm	168 cm
	120 rpm	168 cm	169 cm	170 cm	169 cm	172 cm
	960 rpm	228 cm	220 cm	210 cm	190 cm	182 cm
	1680 rpm	270 cm	260 cm	221 cm	203 cm	190 cm

表 5-3 14.5cm 紙飛鏢數據

紙飛鏢大小 16.5cm

		紙飛鏢重量					
		9.17 gw	16.07 gw	22.97 gw	29.87 gw	36.77 gw	
		轉速	飛行距離				
拉力 0.8kgw	0 rpm	86 cm	88 cm	91 cm	105 cm	111 cm	
	120 rpm	86 cm	87 cm	95 cm	107 cm	110 cm	
	960 rpm	145 cm	141 cm	133 cm	134 cm	129 cm	
	1680 rpm	155 cm	149 cm	144 cm	145 cm	143 cm	

拉力 2.0kgw	0 rpm	110 cm	131 cm	127 cm	151 cm	161 cm
	120 rpm	133 cm	135 cm	137 cm	153 cm	169 cm
	960 rpm	251 cm	221 cm	218 cm	197 cm	185 cm
	1680 rpm	293 cm	277 cm	231 cm	229 cm	212 cm

表 5-4 16.5cm 紙飛鏢數據

紙飛鏢大小 19.0cm

		紙飛鏢重量					
		11.30 gw	18.20 gw	25.10 gw	32.00 gw	38.90 gw	
		轉速	飛行距離				
拉力 0.8kgw	0 rpm	78 cm	80 cm	82 cm	88 cm	96 cm	
	120 rpm	108 cm	108 cm	107 cm	108 cm	110 cm	
	960 rpm	150 cm	145 cm	144 cm	135 cm	129 cm	
	1680 rpm	158 cm	155 cm	152 cm	149 cm	142 cm	

拉力 2.0kgw	0 rpm	105 cm	118 cm	125 cm	145 cm	153 cm
	120 rpm	186 cm	180 cm	177 cm	177 cm	171 cm
	960 rpm	252 cm	246 cm	222 cm	213 cm	204 cm
	1680 rpm	314 cm	272 cm	239 cm	221 cm	210 cm

表 5-5 19.0cm 紙飛鏢數據

將表 5-1~5-5 的數據輸入電腦，利用 excel 程式繪出條狀圖（圖 5-1~圖 5-5），從圖中來分析我們實驗的結果。

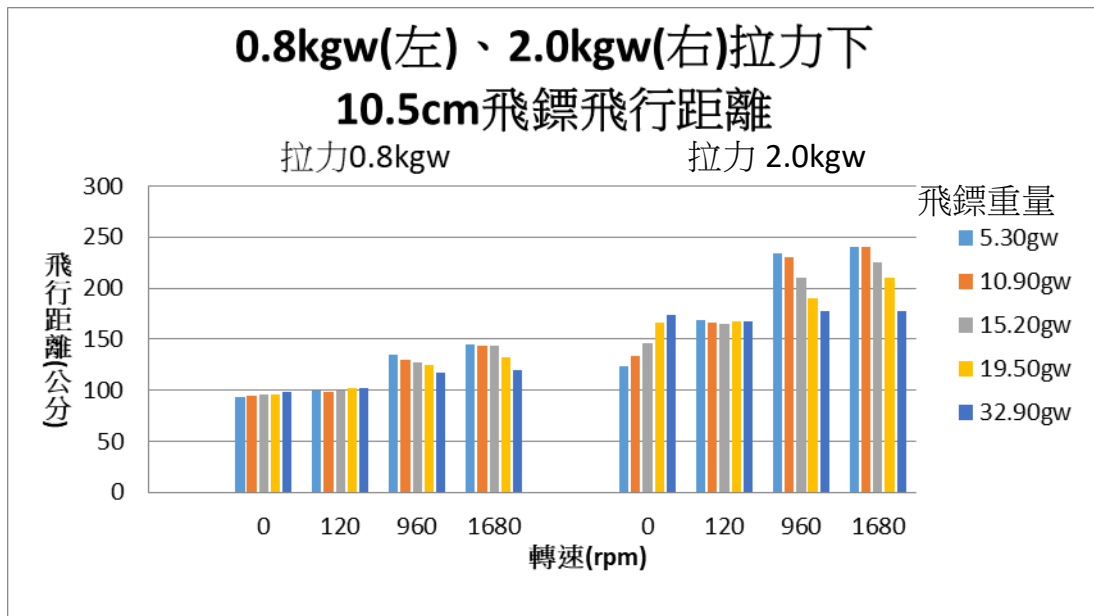


圖 5-1 10.5cm 紙飛鏢數據柱狀圖

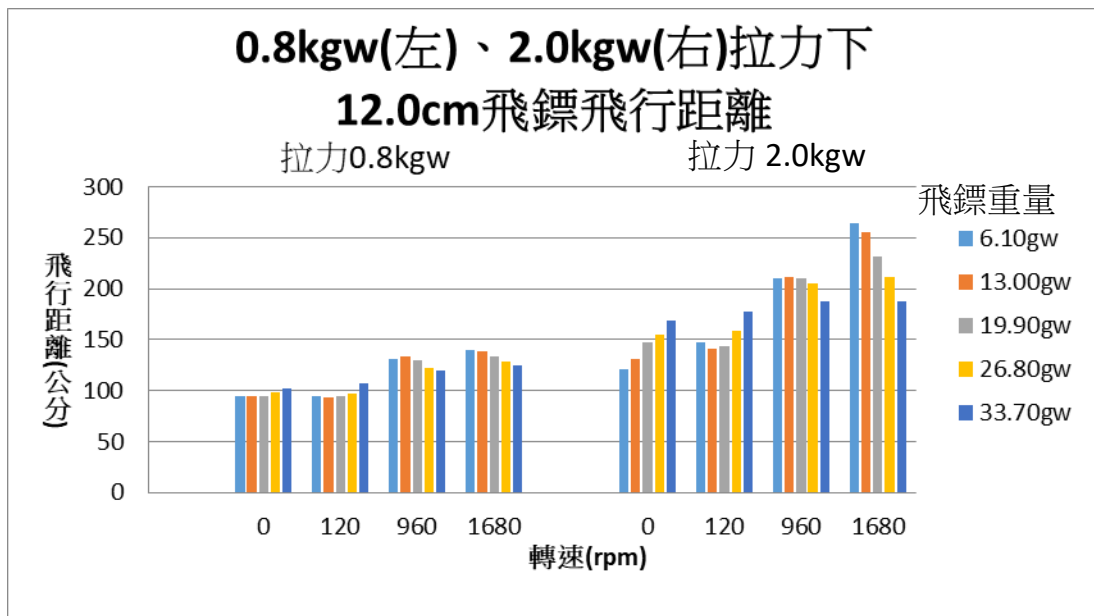


圖 5-2 12.0cm 紙飛鏢數據柱狀圖

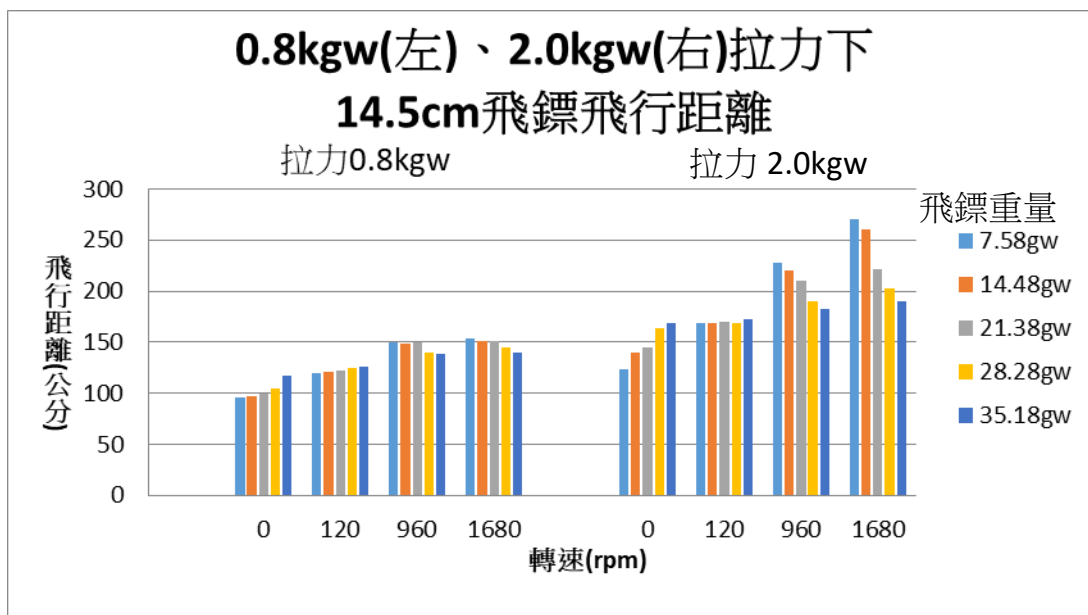


圖 5-3 14.5cm 紙飛鏢數據柱狀圖

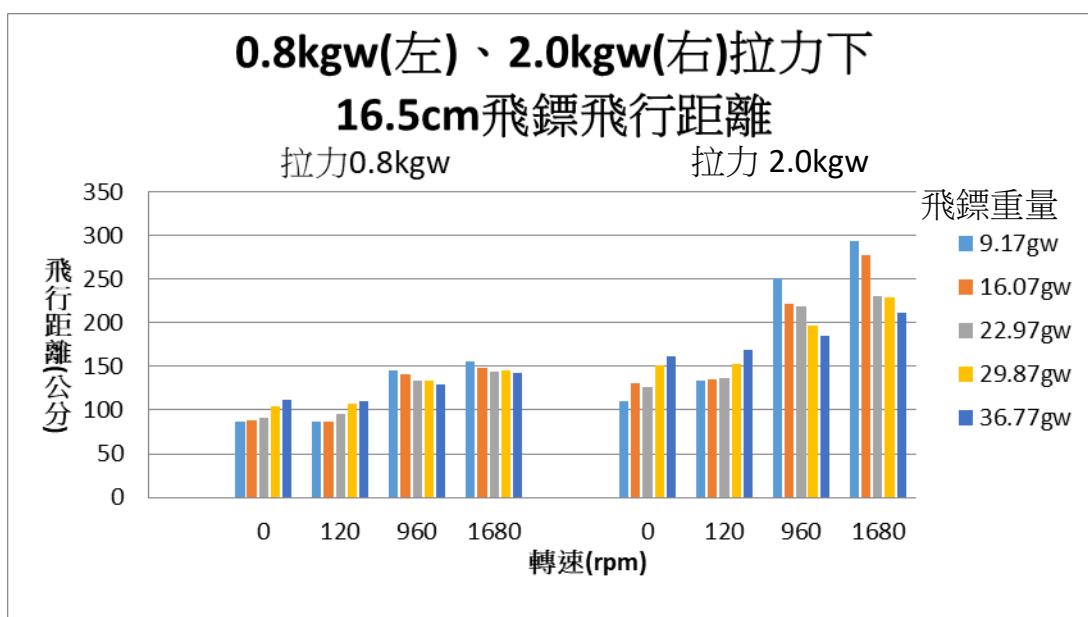


圖 5-4 16.5cm 紙飛鏢數據柱狀圖

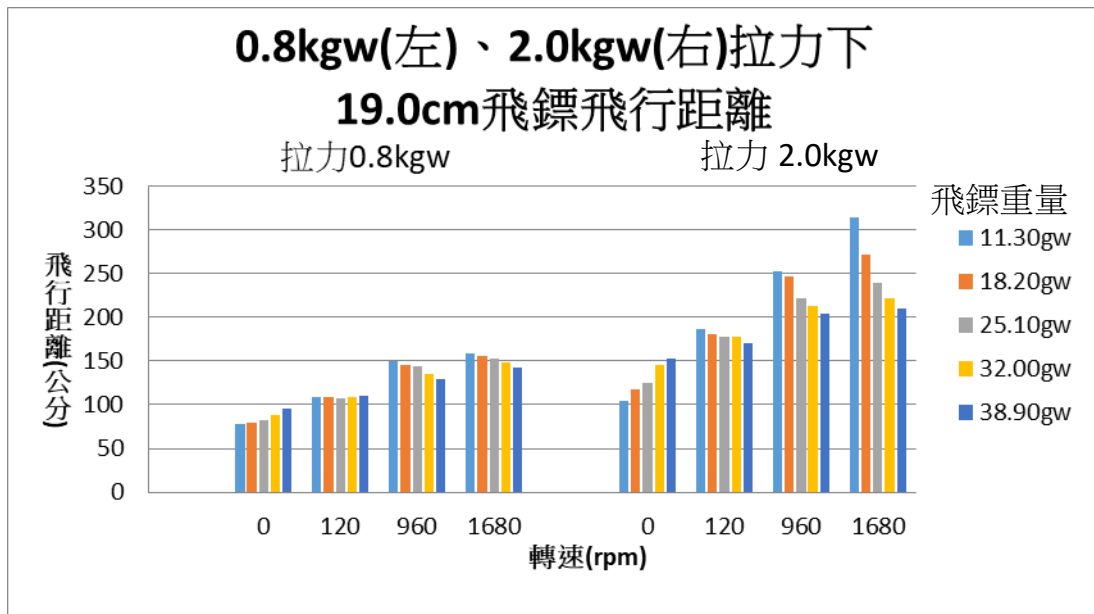


圖 5-5 19.0cm 紙飛鏢數據柱狀圖



## 陸、討論

我們先從飛鏢尺寸為 19.0cm 的柱狀圖來討論，如圖 6-1 中，我們可以看出柱狀圖的關係，這些關係在其它飛鏢尺寸的圖形中也可以看到相似的结果。

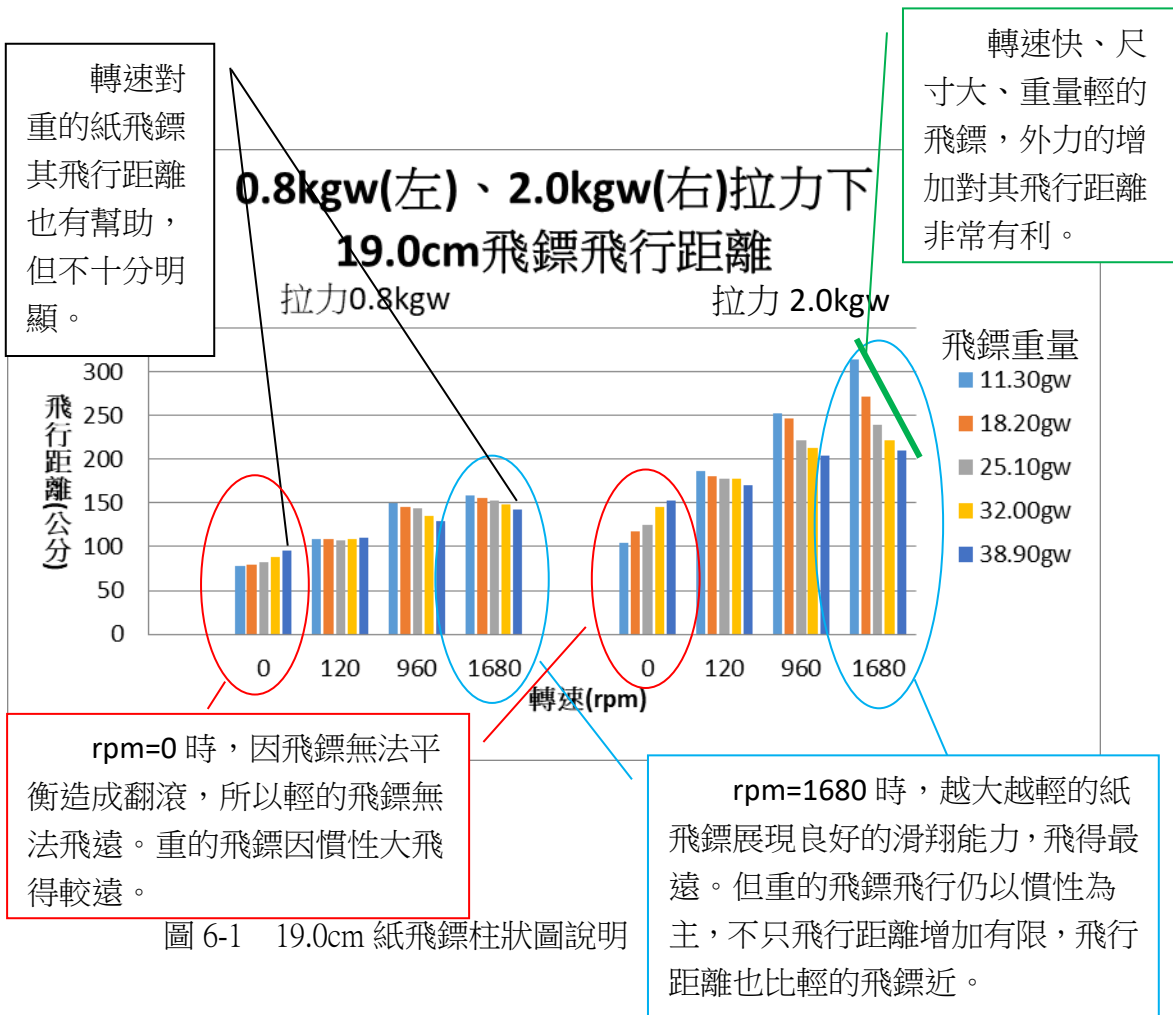


圖 6-1 19.0cm 紙飛鏢柱狀圖說明

從圖 6-1 中可以看到很多資訊，紙飛鏢的飛行距離似乎不是受單一變因的變化所影響，除了外力的大小越大越好，其他的變因彼此會互相影響實驗結果，我們試分析如下。

### 討論一：外力對飛行距離的影響

外力的影響在圖中是最容易被判斷出來的，外力越大，飛行距離也會較遠，在圖 6-1 中，左側拉力 0.8kgw 和右側拉力 2.0kgw 的變化中可以明顯看出，受 2.0kgw 的外力時，紙飛鏢都有較好的飛行結果。從圖 5-1~圖 5-5 中，也都能看到相似的结果。

紙飛鏢大小 10.5cm							
紙飛鏢重量 5.3gw				紙飛鏢重量 32.9gw			
轉速	外力		飛行距離增加 百分比	轉速	外力		飛行距離增加 百分比
	0.8kgw	2.0kgw			0.8kgw	2.0kgw	
0rpm	93cm	123 cm	32%	0	98 cm	174 cm	78%
120rpm	100 cm	168 cm	68%	120	102 cm	167 cm	64%
960rpm	135 cm	234 cm	73%	960	117 cm	177 cm	51%
1680rpm	137 cm	240 cm	75%	1680	120 cm	178 cm	48%

紙飛鏢大小 19.0cm							
紙飛鏢重量 11.3gw				紙飛鏢重量 38.9gw			
轉速	外力		飛行距離增加 百分比	轉速	外力		飛行距離增加 百分比
	0.8kgw	2.0kgw			0.8kgw	2.0kgw	
0rpm	78 cm	105 cm	35%	0	96 cm	153 cm	59%
120rpm	108 cm	186 cm	72%	120	110 cm	171 cm	55%
960rpm	150 cm	252 cm	68%	960	129 cm	204 cm	58%
1680rpm	158 cm	314 cm	99%	1680	142 cm	210 cm	48%

表 6-1 10.5cm 和 19.0cm 紙飛鏢受不同外力時數據分析

由表 6-1 中可以看到，在紙飛鏢大小由 10.5cm 增加為 19.0cm 時，轉速也增加的情形下，增加外力有非常好的效果，最大、最輕的紙飛鏢在外力增加約 1.1 倍時，飛行距離可增加 99%，而相同情形下若紙飛鏢重量較重時，外力增加約 1.1 倍，飛行距離只增加 48%。代表轉速快、尺寸大、重量輕的飛鏢，外力的增加對其飛行距離非常有利。

#### 討論二：飛鏢大小對飛行距離的影響

在沒有轉速 rpm=0 時，可以看到圖 6-1 中，無論拉力為 0.8kgw 或 2.0kgw，輕的飛鏢表現均較差。這是因為在實驗中可以觀察到輕的飛鏢在沒有轉速時會有翻滾的情形。如圖 6-2 中，前進時的空氣阻力會造成前後翻滾的力矩，一但產生翻滾現象，空氣阻力會增加使飛鏢很快落地。這種情形在轉速 rpm=120 中也會看到，但翻滾情形就會比較慢出現，轉動在空氣阻力下漸漸變慢，翻滾現象會在飛鏢快落地前才發生。在轉速 rpm=960 及 1680 中就不會看到，此時飛鏢飛行距離有明顯增加。

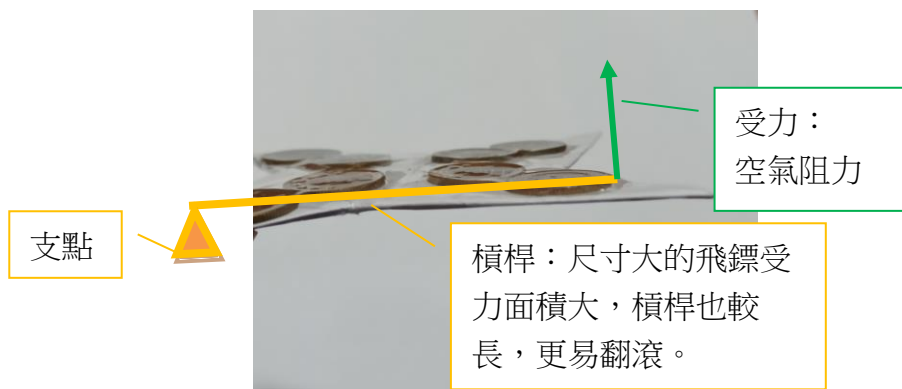


圖 6-2 紙飛鏢受空氣阻力作用翻滾

在表 6-2 中，我們選擇最大和最小尺寸的飛鏢中重量最相近的兩組數據來做比較，可以排除重量的影響。在轉速 rpm=0 時，較大的飛鏢表面積大，翻滾後受到的空氣阻力更大，此時小的飛鏢反而比大的飛鏢飛的遠。但在轉速上升後，尺寸大的飛鏢若不翻轉，即可以有比尺寸小的飛鏢有更好的飛行距離。由表 6-2 的數據可以看出飛鏢尺寸從 10.5cm 上升到 19.5cm、重量大約都為 32gw、皆受到 2.0kgw 的外力、轉速皆為 1680rpm 時，可增加約 24% 的飛行距離。

	轉速	紙飛鏢 10.5cm 32.90gw	紙飛鏢 19.50cm 32.00gw	飛行距離增加 百分比
拉力 0.8kgw	0rpm	98 cm	88 cm	-10%
	120rpm	102 cm	108 cm	6%
	960rpm	117 cm	135 cm	15%
	1680rpm	120 cm	149 cm	24%
拉力 2.0kgw	0rpm	174 cm	145 cm	-17%
	120rpm	167 cm	177 cm	6%
	960rpm	177 cm	213 cm	20%
	1680rpm	178 cm	221 cm	24%

表 6-2 相同尺寸不同重量紙飛鏢數據分析

### 討論三：飛鏢重量對飛行距離的影響

比薩斜塔實驗的結果是在不計空氣阻力，重的物體和輕的物體從相同高度落下時，會同時落地。我們實驗環境是有空氣阻力的，當飛鏢尺寸相同，重量不同，從相同高度落下，重的飛鏢受重力大，受到相同空氣阻力時，對重的飛鏢影響小，重的飛鏢會先落地。

所以當輕的飛鏢轉速夠，有足夠的角動量保持飛鏢滑翔時，即能在空中停留較長時間，自然就能飛得比較遠。

但是，當飛鏢尺寸相同，在同樣沒有轉速 rpm=0，只有外力時，重的飛鏢因慣性

較大，反而飛的比輕的飛鏢遠，此時重的飛鏢飛的遠，如圖 6-1。

#### 討論四：飛鏢轉速對飛行距離的影響

當飛鏢在空中飛行時，可以被看作是一個翼，通過白努利原理（Bernoulli's Principle）<sup>[7]</sup>來控制提升力的大小，使飛鏢懸浮在空中（圖6-3）。

我們的實驗中，因為有貼上配重的 1 元或圓紙片，所以飛鏢上部略有弧形，在飛鏢前進時，能形成上升的力量，能讓飛鏢飛得更遠。此因素為控制變因，所有製做出的紙飛鏢有相同的條件。

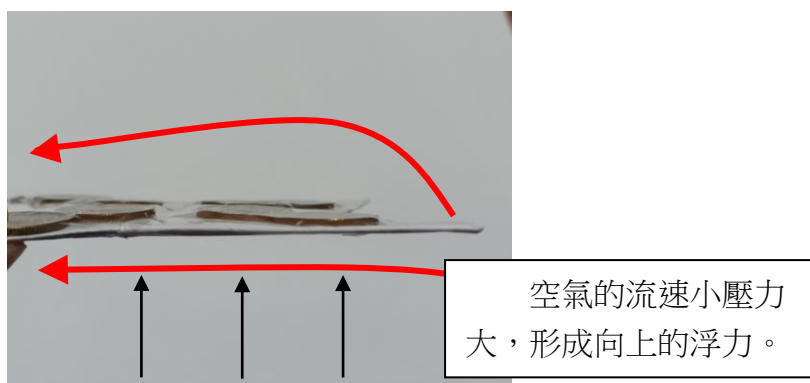


圖 6-3 白努利原理使飛鏢上浮

空氣阻力也會造成飛鏢翻轉，要防止翻轉，就要使飛鏢旋轉。飛鏢轉動時，能維持盤面方向，是因為轉動的物體具有角動量，受外力矩的影響較小<sup>[1]</sup>。

從表 6-3 中可以看到轉速對輕的飛鏢十分重要，在表 6-3 中，飛鏢為 19.0cm、重量 11.30gw、外力同為 2.0kgw，rpm=0 時飛行距離為 105 cm，而 rpm=1680 時飛行距離為 314cm，代表轉速能讓相同的飛鏢增加約 2 倍的飛行距離，尤其當轉速足以讓飛鏢保持平衡不翻轉時，即增加了 77%的飛行距離。

而相同尺寸、相同外力、重量的飛鏢，轉速對其飛行距離的增加就比較少，主要是因為重的飛鏢向前飛時，較大的重量使其較快落地。

轉速對輕的飛鏢能有效提升飛行距離，但對於重的飛鏢，提升比例較不明顯。

紙飛鏢 19.0cm 11.30gw	轉速	飛行距離	飛行距離增加百分比	紙飛鏢 19.0cm 38.90gw	轉速	飛行距離	飛行距離增加百分比
拉力 2.0kgw	0rpm	105 cm		拉力 2.0kgw	0rpm	153 cm	
	120rpm	186 cm	77%		120rpm	171 cm	12%
	960rpm	252 cm	35%		960rpm	204 cm	19%
	1680rpm	314 cm	25%		1680rpm	210 cm	3%

表 6-3 轉速對不同重量紙飛鏢數據分析

所以，飛鏢要飛得遠，可以分為兩個部份來思考：

1. 飛鏢向前飛時受慣性影響：初速度大、飛鏢重量大有利

施力大，飛鏢初速度大。飛鏢盤面大，有利空氣阻力形成向上的升力。轉速有利於前進時盤面穩定不翻轉，可以減少前進時的阻力。重量大有利於向前的慣性，但不利於在空中停留的時間。

2. 飛鏢落地的時間：飛鏢尺寸大、重量輕較有利

飛鏢旋轉時形成類似飛盤的圓，此圓面積越大，落下時所受空氣阻力也會越大，再加上輕的飛鏢所受重力小，因此能在空中滑行較長時間。

## 柒、結論

在實驗中，我們發現，外力、飛鏢尺寸、重量、轉速四者相互影響：

1. 外力對飛行距離的影響：

外力越大，飛行距離也會較遠，最大、最輕的紙飛鏢在外力增加約 1.1 倍時，飛行距離可增加 99%，代表轉速快、尺寸大、重量輕的飛鏢，外力的增加對其飛行距離非常有利。

2. 飛鏢大小對飛行距離的影響：

在轉速  $\text{rpm}=0$  時，較大的飛鏢因為翻轉，所受到的空氣阻力更大，此時小的飛鏢反而比大的飛鏢飛的遠。但在轉速上升後，尺寸大的飛鏢若不翻轉，即可以有比尺寸小的飛鏢有更好的飛行距離。飛鏢尺寸從 10.5cm 上升到 19.5cm、重量大約都為 32gw、皆受到 2kgw 的外力、轉速皆為 1680rpm 時，可增加約 24% 的飛行距離。

3. 飛鏢重量對飛行距離的影響：

當輕的飛鏢轉速夠，有足夠的角動量保持飛鏢滑翔時，即能在空中停留較長時間，所以能飛得比較遠。

但是，當飛鏢尺寸相同，在沒有轉速  $\text{rpm}=0$ ，只有外力時，重的飛鏢因慣性較大，此時重的飛鏢飛的遠，

4. 飛鏢轉速對飛行距離的影響：

轉速對輕的飛鏢十分重要，在實驗中，飛鏢為 19.0cm、重量 11.3gw、外力同為 2kgw， $\text{rpm}=0$  時飛行距離為 105 cm，而  $\text{rpm}=1680$  時飛行距離為 314cm，代表轉速能讓相同的飛鏢增加約 2 倍的飛行距離，尤其當轉速足以讓飛鏢保持平衡不翻轉時，即增加了 77% 的飛行距離。

轉速到  $\text{rpm}=1680$  時，對較重的飛鏢已沒有顯著的影響。

5. 外力大 (2.0kgw)，轉速快 ( $\text{rpm}=1680$ )，尺寸大 (19.0cm)，重量輕 (11.30gw) 的飛鏢，在本實驗中得到最遠的飛行距離 314cm。

6. 在本實驗所使用的數據範圍內，我們可以推論：

在沒有轉速  $\text{rpm}=0$ ，飛鏢飛行距離和外力、飛鏢重量呈正相關，和飛鏢大小呈負相關。當轉速上升到可使飛鏢飛行時不翻轉  $\text{rpm}>120$ ，此時飛鏢飛行距離和外力、飛鏢大小呈正相關，和飛鏢重量呈負相關。



## 捌、參考資料

1. 飛盤運動模型的物理學 Chuan-Yen
2. 自然與生活科技課本第五冊 速度、慣性、簡單機械
3. 手工 DIY：簡易的紙飛鏢  
[https://k.sina.com.cn/article\\_7021941855\\_p1a28a545f00100hxn1.html](https://k.sina.com.cn/article_7021941855_p1a28a545f00100hxn1.html)
4. 男子鐵餅  
<https://www.easyatm.com.tw/wiki/%E7%94%B7%E5%AD%90%E9%90%B5%E9%A4%85>
5. 維基百科  
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9C%8D%E5%B0%94%E6%95%88%E5%BA%94%E4%BC%A0%E6%84%9F%E5%99%A8>
6. 基礎教程 12 霍爾感測器與 Arduino 外部中斷 <https://itw01.com/QUDJPED.html>
7. 白努利原理 (Bernoulli's Principle) <https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=1524>