

中華民國第 58 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

(鄉土)教材獎

051805

如何飛向他的心 - 撲克牌之飛行軌跡研究

學校名稱：國立竹北高級中學

作者： 高二 張以侑 高二 張袞德 高二 吳依庭	指導老師： 洪佩琪 楊雅棻
---	-----------------------------

關鍵詞：撲克牌、飛行軌跡、康達效應

摘要：

本研究旨在觀察撲克牌於空中飛行軌跡的變化。為了能夠精準控制每次實驗發射時的條件，我們製作了一台撲克牌發射器。在本次科展中我們研究了多種原因對撲克牌飛行軌跡之影響(例如：初始偏轉角、牌型凹凸程度)，並依據實驗數據觀察現象，分析距離對於落點偏轉角之影響。此外，驗證實驗場地氣流對落點的影響。最後透過定性描述驗證撲克牌的飛行軌跡影響因素，進而提出一定程度的見解及討論。

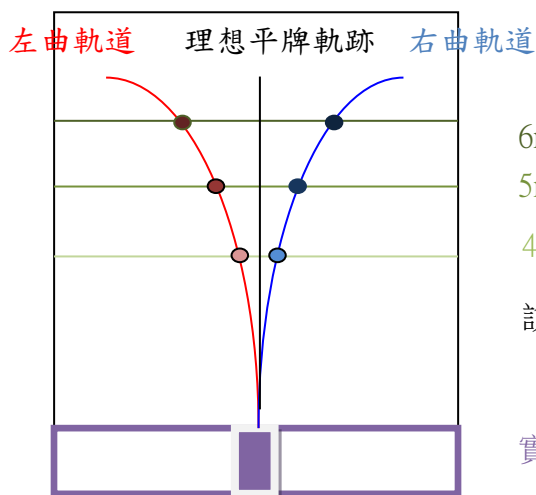
壹、研究動機：

台上的魔術師帥氣的丟出紙牌，刷！準確的命中目標並引來觀眾一陣驚呼。身為觀眾的我們在驚呼之際，不禁也想著，紙牌在空中是否會受到高二下學期所學的角動量和舊課綱的流體力學中的升力和拖曳力，我們決定一探紙牌在空中的變化，因而展開此次科展的研究。

貳、研究目的：

在經過簡單的試射之後，我們發現撲克牌在空中飛行時，軌跡似乎有些特殊的規律。但是，微小的變因都會影響到撲克牌的軌跡。因此，在實驗設計上遇到了很大的問題。為了解決這些問題，我們自己設計了一台可以穩定發射條件的撲克牌發射器。解決我們遭遇的問題後，我們針對以下幾項變因做了軌跡的分析並得到以下不同的軌跡，希望在實驗結束後能對此變化提出解釋：

- 一、撲克牌發射的傾斜程度對軌跡的影響。
- 二、撲克牌的凹凸程度對軌跡的影響。



6m 珍珠板
5m 珍珠板
4m 珍珠板

說明：推測牌的軌跡

(由 Z 軸上方看下來，可參見圖 27)

實紫線:櫃子 實紫塊:發射器

參、研究設備及器材：

一、器材表：

項目	數量	備註
自製撲克牌發射器	一台	發射器為木製，使用線鋸機裁切。
橡皮筋	數條	
撲克牌	數盒	單張撲克牌的平均質量為：1.5g
保麗龍板	數張	
珍珠板	數張	

表一 實驗器材

二、自製撲克牌發射器：

在試驗的過程中，我們發現必須使用一些工具來固定撲克牌發射的條件，因此我們開始著手設計發射器。首先，我們想到的是利用馬達製造旋轉、模仿手臂丟出撲克牌的方式射出撲克牌，但這項設計無法提供足夠的初速度，讓撲克牌無法在空中成功的飛行。

(一)第二代發射器：

接著，我們想到的是童年的玩具，彈弓。我們發現彈弓可以提供足夠的速度，讓撲克牌飛行很長的距離。於是，我們將彈弓固定在板凳上完成了在第二代的發射器(請見圖 1、圖 2)，並用釘子固定，穩定結構。可是看似良好的架構，卻發現發射起來問題可大了。

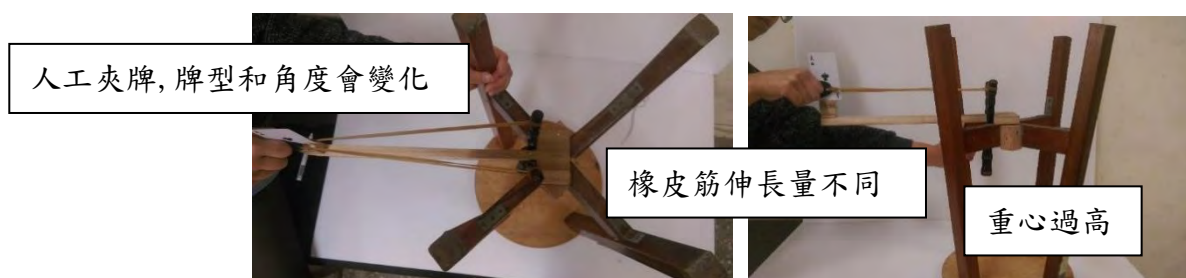


圖 1 俯視圖

圖 2 側視圖

因此整理出我們在使用的過程中發現了一些問題：

- 1.板凳不夠平整使得發射時基座不能穩定發射方向。
- 2.彈弓的發射必須靠人力。若靠人手發射，發射角度及牌面無法被完全固定。
- 3.彈弓的伸長量無法被有效的固定，因此每次發射的初速度皆不相同。即使小心的固定每次發射條件，但是微小的發射變因差異，都會對撲克牌在空中的軌跡有很大的影響。因此我們決定再次設計一台發射器來解決不穩定、參數無法固定的問題，發展了第三代發射器(請見圖 3、4、5)，此發射器也是我們實驗的主要發射器。

(二)第三代發射器：

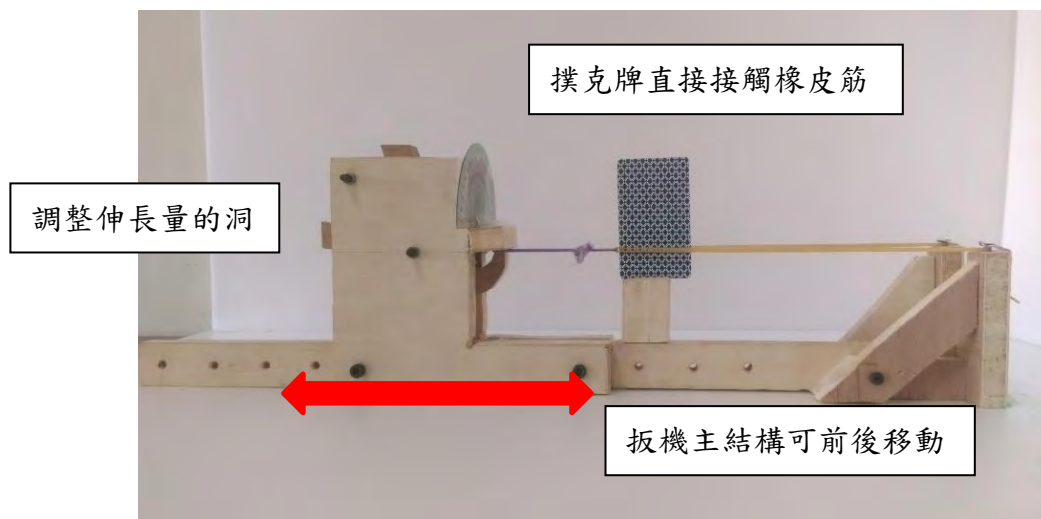


圖 3 側視圖

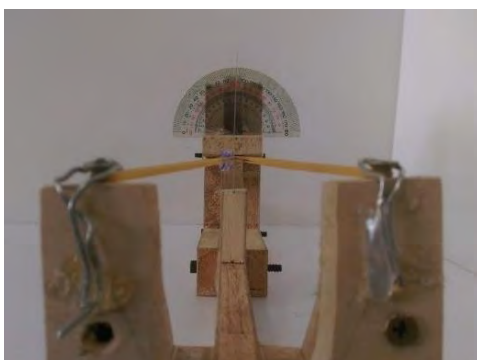


圖 4 前視圖

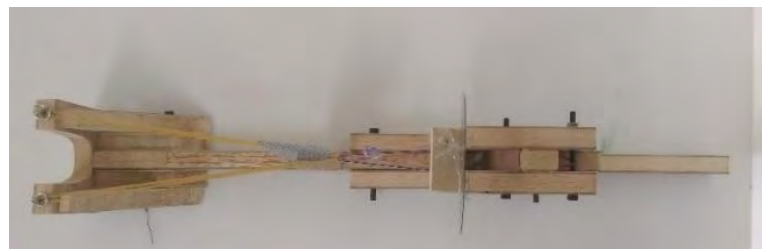


圖 5 俯視圖

此發射器的特點是：

1. 模仿彈弓的設計，利用橡皮筋發射撲克牌。
2. 設計板機，利用板機發射，來解決人工發射的不穩定。(如圖 6)。
3. 不用皮革接觸撲克牌，而用橡皮筋直接接觸撲克牌，減少撲克牌的滑動。(見圖 3)
4. 我們在發射器下方設計了等間距(間距 4cm)的孔洞，可利用移動板機到 U 行板的距離，改變橡皮筋的伸長量、調整力的大小。

製作過程中遇到許多困難，像是如何用專業器材切割和加工技術指導，還有板機內部構造如何製作(如圖 6、圖 7)，種種原因使得第 3 代發射器從設計到完工花費了許多時間，也特別感謝木工廠的指導和提供器材，讓我們得以實現自己的設計，並開始進行我們的實驗。

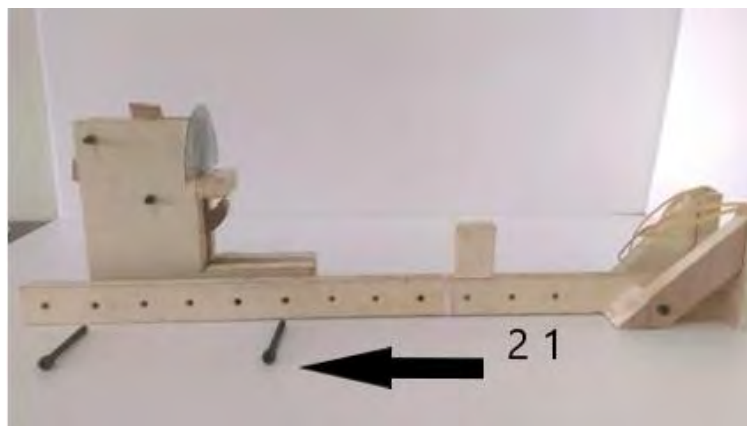


圖 6 拆下板機主結構與固定的螺絲和洞數的描述

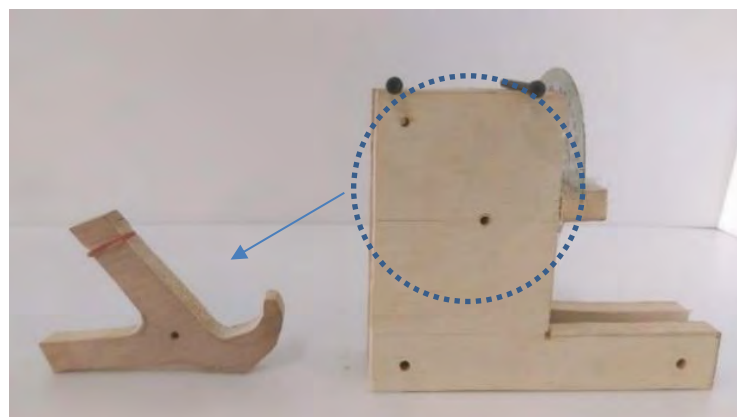


圖 7 拆下板機與它兩旁的夾板

肆、研究過程或方法：

一、實驗原理

(一)進動現象：

進動現象是指一物體在自轉時，他的自轉軸也受到其他力的影響而向著另一中心軸旋轉。陀螺就是最明顯的例子，當陀螺垂直於地面自轉時，可能因為受到外力，使本身的重力產生力矩產生傾斜，讓自轉的陀螺又產生另一轉動軌跡（如圖 10）。要了解進動現象，首先要從角動量開始認識：

1.角動量：

角動量 \vec{L} 為一種描述轉動的向量，具有方向性，其定義解釋如下：

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} (\vec{L}=\text{角動量 } \vec{r}=\text{旋轉半徑 } \vec{p}=\text{動量})$$

$$\vec{P} = m\vec{v} (m=\text{質量 } \vec{v}=\text{速度})$$

從圖 8 圖例表示，當一個質量為 m 的物體做等速率圓周運動時，速度為 \vec{v} ，半徑為 \vec{r} ，故得 $\vec{L} = m(\vec{r} \times \vec{v})$

2.力矩：

力矩 $\vec{\tau}$ 是能使物體繞支點產生的轉動的物理量(如圖 9)。

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} (\vec{\tau}=\text{力矩 } \vec{F}=\text{受力})$$

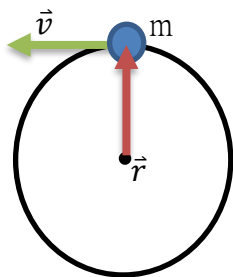
當物體的運動狀態（動量 \vec{p} ）發生變化，表示物體受力作用，而作用力大小就等於動量 \vec{p} 在單位時間內的變化：

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} (\Delta t=\text{變化時間})$$

當物體的轉動狀態發生改變時，表示物體受到力矩作用，而力矩就等於角動量 L 在單位時間內的變化：

$$\vec{\tau} = \frac{\Delta \vec{L}}{\Delta t}$$

角動量和力矩關係以陀螺為例(如圖 10)。



圖*8 角動量示意圖

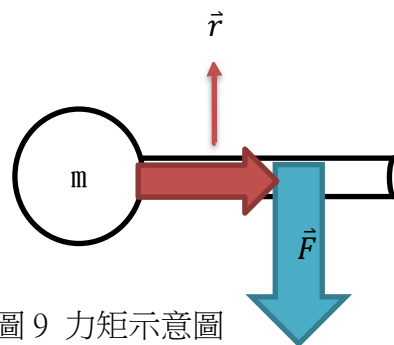


圖 9 力矩示意圖

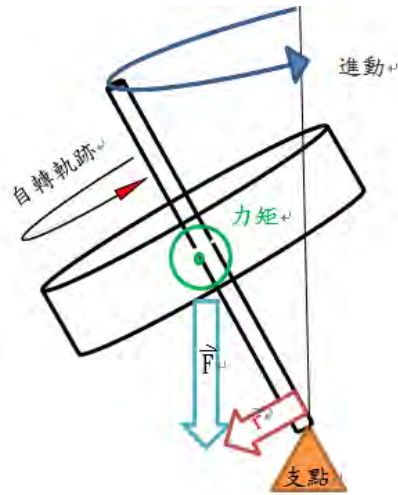


圖 10 進動現象示意圖

討論進動現象的目的，是因為在撲克牌的飛行過程中，自轉的同時因為重力而產生朝向另一個中心軸的轉動軌跡，故使用進動現象推論撲克牌的飛行軌跡。

(二)康達效應

康達(康德)效應 (Coanda Effect)，亦稱附壁作用或柯恩達效應。此效應主要在表示流體遇到障礙物時(如撲克牌)，氣流會沿著撲克牌上的曲面流動的情況。以下圖為例，下層氣流快速流動時會使靠近撲克牌凸面附近產生較低壓區域，使下層氣流改變原本方向，造成上下層氣壓不均，上層氣壓(向下)會大於下層氣壓(向上)，因此合力向下。除提供下層氣流彎取所需的向心力，合力即是升力，使物體受到「提拉」(entrainment,或稱「挾持」或「拽引」)的影響。(如圖 11)

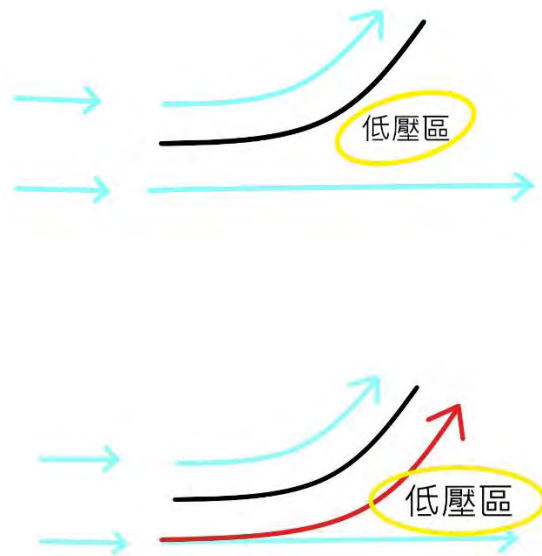


圖 11

(三)拖曳力：

物理意義：由空氣摩擦力產生，拖曳力與流體平行，但方向相同。此力會使物體愈來愈慢，因摩擦力始終存在，導致拖曳力永遠不等於零。

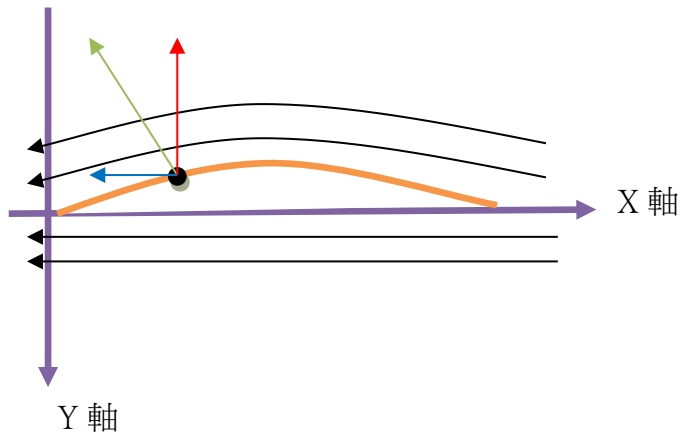


圖 12

圖 12 說明：此圖為俯視圖，即向-Z 軸方向看下來。並假設在運動時空氣分子平均分散且無運動，所以對牌的速度方向來說相對是風平行流過牌面。

綠色箭頭:壓力差給的力向量

黑色箭頭:流體流過牌的軌跡

紅色箭頭:康達效應所提供的升力

藍色箭頭:拖曳力

二、研究過程或方法

(一)實驗一「初始偏轉角(下文將初始偏轉角定義為 θ)對於撲克牌軌跡影響」:

- 1.實驗說明：實驗的過程中我們發現撲克牌在發射前，垂直水平面上有傾斜的問題，如圖 13 和圖 14 所示，因此透過這個實驗，我們想要探討初始偏轉角是否對撲克牌的落點有影響，並確認實驗的精度。



圖 13 傾斜情況



圖 14 初始偏轉角示意圖

2.實驗步驟：

- (1)將橡皮筋拉至發射器板機上扣住。
- (2)調整撲克牌傾角至特定區間，再用相機確認角度，並利用保麗龍板在距離發射器 4 m 處記錄撲克牌落點位置(如圖 15 和圖 17)。
- (3)撲克牌射向保麗龍板後，用粉筆及原子筆在保麗龍板做紀錄(如圖 16)。
- (4)運用捲尺測量在保麗龍板上設置座標，並運用試算表畫出數據落點精確圖形(如圖 18)。



圖 15

圖 16



圖 17

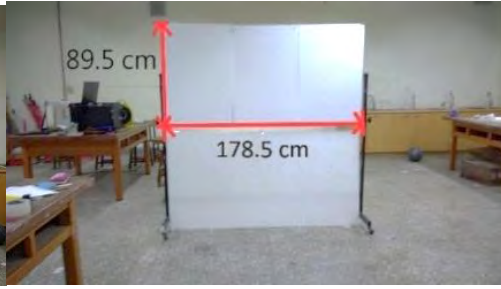


圖 18

3.實驗條件：

(1)控制變因：

發射點高度距地	保麗龍板距發射點	底邊距地高度 (請參照圖 15)	板機至釘子連線 垂直距離
104 cm	4 m	98 cm	第七洞：46(cm)

表二 實驗控制變因

(2)操作變因-偏轉角：

面向量角器，分成五個角度區間每個區間取 30 個數據點：

以圖 14 為例，定量角器 90 度為基準($\theta = 0^\circ$ 度)，以面向保麗龍板為主，向右為正，向左為負，分為下列五區間:

$-5 \leq \theta < -3$	$-3 \leq \theta < -1$	$-1 \leq \theta \leq 1$	$1 < \theta \leq 3$	$3 < \theta \leq 5$
-----------------------	-----------------------	-------------------------	---------------------	---------------------

表三 角度區間

(二)實驗二「曲面對於軌跡影響」：

- 1.實驗說明：做完偏角實驗後，我們發現偏角雖然對軌跡有些微影響，但似乎不是主因，並在實驗過程中發現，撲克牌有曲面(如圖 19)，而曲面似乎對撲克牌的軌跡有很大的影響，因此我們對撲克牌的曲面進行實驗和討論。



圖 19 撲克牌之曲面

2.實驗步驟：

- (1)首先將牌做成曲面和平面。
- (2)平面的牌只需將它壓在重物(我們使用的是書本)下方，等待一天後取出。
- (3)曲面的牌先將中心軸對準量角器中心，用手拗出曲面，使它曲成 0 度至 175 度。
- (4)上下兩面重複檢查角度是否一致。
- (5)接下來只需將曲平牌放在發射器上發射即可。

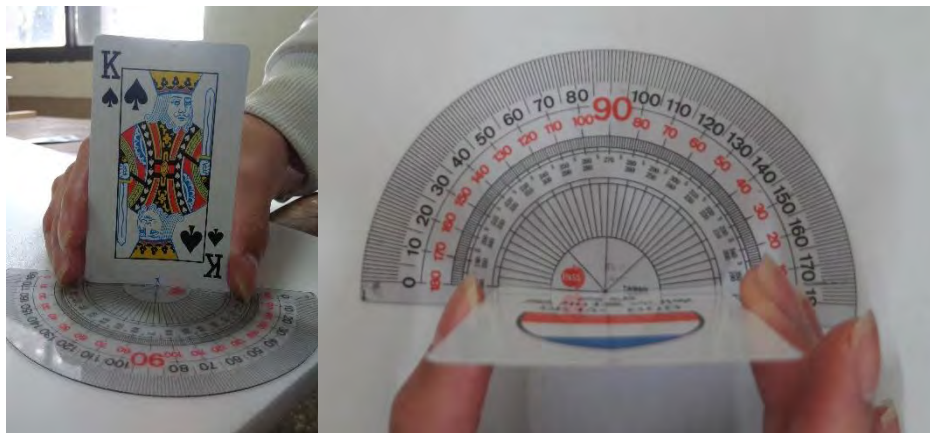


圖 20 曲面角度確認示意圖

3.實驗條件：

(1)控制變因：

發射點高度	保麗龍板距發射點	板機至釘子連線 垂直距離
104(cm)	4(m)	第四洞：34 (cm)

表四 實驗控制變因

(2)操作變因：撲克牌的曲面向左、向右以及沒有曲面

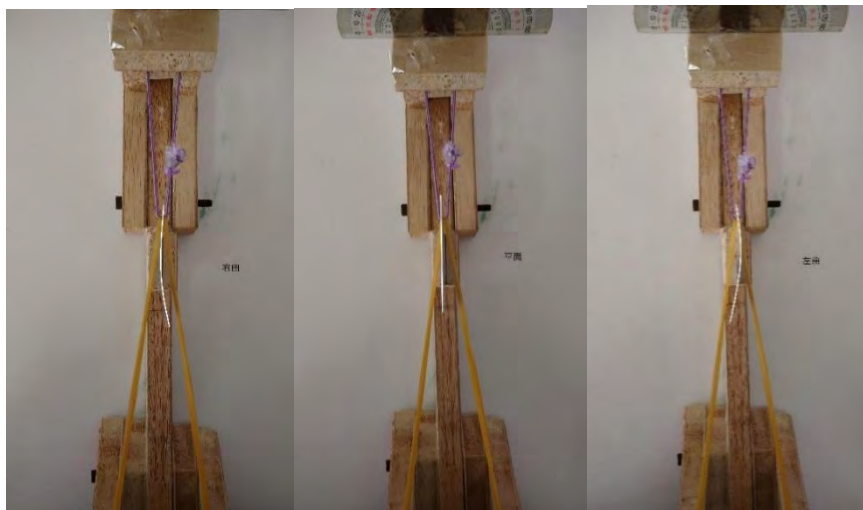


圖 21 曲面實驗操作變因(由左至右為：左曲 平面 右曲)

(三)實驗三「測量不同曲面下，落點位置隨距離的變化」：

- 1.實驗說明：在上一個實驗中我們發現，影響軌跡的主要原因應為撲克牌的曲面方向，因此我們更進一步的做了落點位置隨發射距離的變化。
- 2.實驗步驟：同實驗二之實驗步驟。
- 3.實驗條件：

(1)控制變因：

發射點高度	板機至釘子連線 垂直距離
104(cm)	第四洞：34(cm)

表五 實驗控制變因

(2)操作變因：

珍珠板與發射器的距離		
4(m)	5(m)	6(m)

表六 實驗操作變因

(四)實驗四「氣流對落點的影響」：

1.實驗說明：從實驗一和實驗二我們發現，落點紀錄都偏右。所以我們用曲牌的正向跟反向各發射 20 發，並觀察落點，確認落點偏右的原因。

2.實驗步驟：

- (1)將橡皮筋拉至發射器板機上扣住。
- (2)使用線香確認氣流穩定。
- (3)撲克牌射向珍珠板後，用粉筆及原子筆在珍珠板做紀錄。
- (4)運用捲尺測量在珍珠板上設置座標，並運用試算表看出數據落點圖形。
- (5)曲牌的正反面各 20 發。

3.實驗條件:

(1)控制變因：

發射點高度	珍珠板與發射器距離	板機至釘子連線垂直距離
104(cm)	4(m)	第四洞:34(cm)

表七 實驗控制變因

(2)操作變因：發射器發射方向相反。

(五)實驗五「落點偏轉角測量」：

1.實驗條件：在我們做完不同曲面下，落點位置隨距離的變化這項實驗之後。我們在珍珠板上發現隨著距離的變化和牌型變化，落點偏轉角度有所不同，於是我們對曲面實驗中的落點取角度。

2.角度測量步驟：

- (1)準備一重物綁在一條線上，置放水平儀確認測量平面平整(如圖 22)
- (2)在珍珠板上對落點進行垂吊，並畫上鉛直線(如圖 23 及圖 24)
- (3)對撲克牌的落點留下軌跡做直線標示，用量角器做測量(如圖 25 及圖 26)



圖 22 水平儀放置 圖 23 吊掛鉛垂線 圖 24 畫上鉛垂線 圖 25 標示落點 圖 26 測量偏轉角(ϕ)

伍、實驗結果：

一、數據坐標軸原點

- (一)實驗一、二原點為 a
- (二)實驗三原點為 b
- (三)實驗四原點為 c

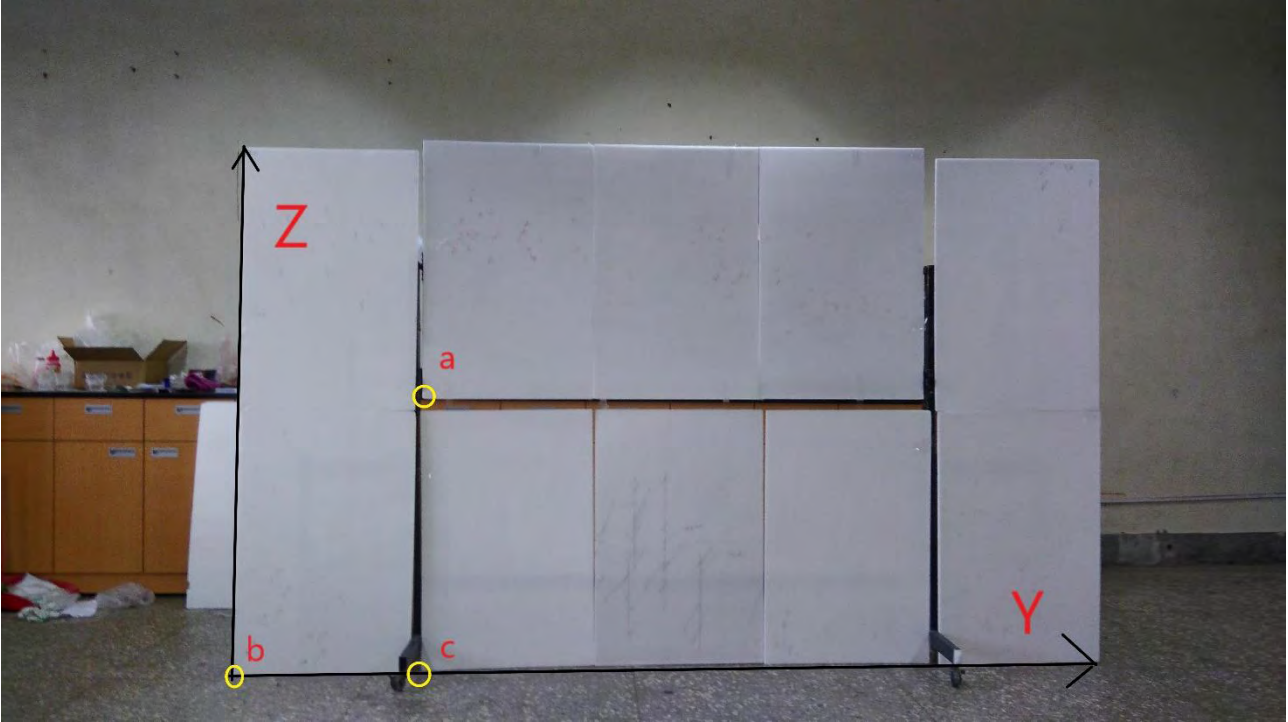
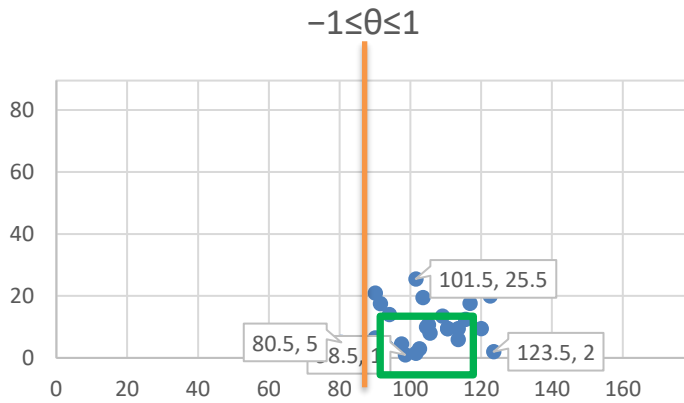


圖 27 數據座標及原點示意圖

二、實驗一「初始偏轉角對於撲克牌軌跡影響」：

(一)偏角區間為 $-1 \leq \theta \leq 1$ ：



	Y	Z
平均值	105.5cm	10.8cm
標準差	11.3	6.8

表八 該區間之平均值及標準差

圖 28 偏角實驗結果—偏角區間 $-1 \leq \theta \leq 1$ (Y、Z 軸單位:cm)

1.圖 28 為偏角區間 $-1 \leq \theta \leq 1$ 之 30 個數據點，圖中的橘線為保麗板在 Y 方向的正中央、且發射器對齊此點。

此 30 個落點的位置平均值為 $(y, z) = (105.5, 10.8) (cm)$ 。

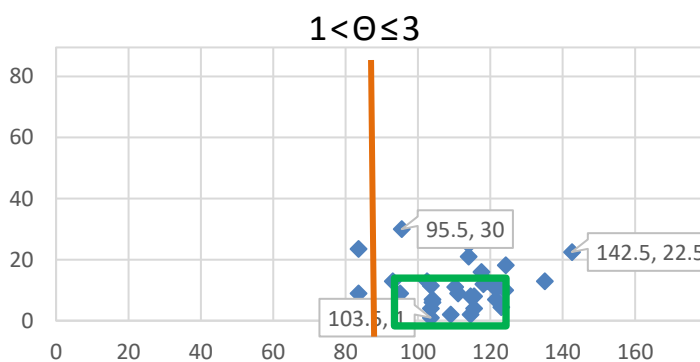
2.此位置為圖中綠色方框的正中心，且實際距地高度為 108.8 cm。

3.此 30 個落點的標準差為 $(y, z) = (11.3, 6.8)$ ，綠色方框長和寬度分別 y、z 方向上兩個標準差的寬度。

4.為探討偏角對落點的影響，我們接下來將 $-1 \leq \theta \leq 1$ 的平均值作為理論值分析其他偏角的誤差。

其餘四個區間敘述相同，以表格表示。

(二)偏角區間為 $1 < \theta \leq 3$ 之 30 個數據點：

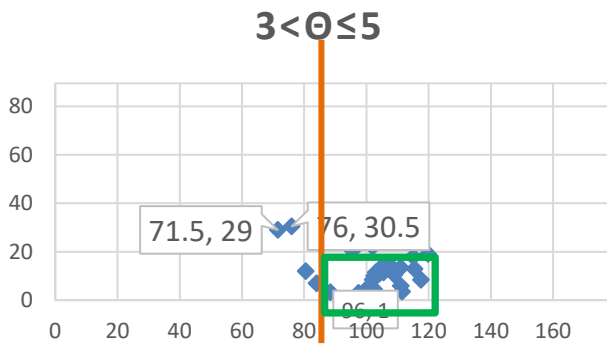


	Y	Z
平均值	110.2cm	11.0cm
標準差	14.0	7.2
誤差	0.07	0.04

表九 該區間之平均值及標準差

圖 29 偏角實驗結果—偏角區間 $1 < \theta \leq 3$ (Y、Z 軸單位:cm)

(三)偏角區間為 $3 < \theta \leq 5$ 之 30 個數點：

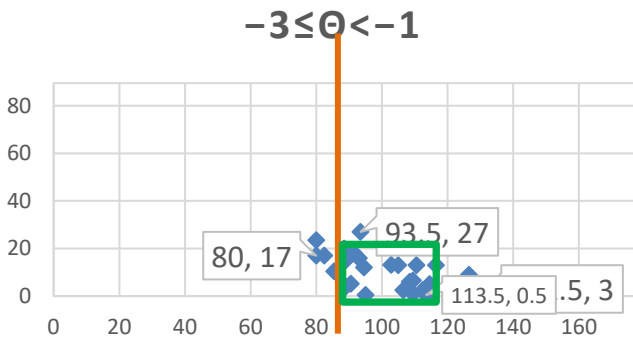


	Y	Z
平均值	102.8cm	13.1cm
標準差	12.3	7.9
誤差	0.07	0.11

表十 該區間之平均值及標準差

圖 30 偏角實驗結果—偏角區間 $3 < \theta \leq 5$ (Y、Z 軸單位:cm)

(四)偏角區間為 $-3 \leq \theta < -1$ 之 30 個數據點：

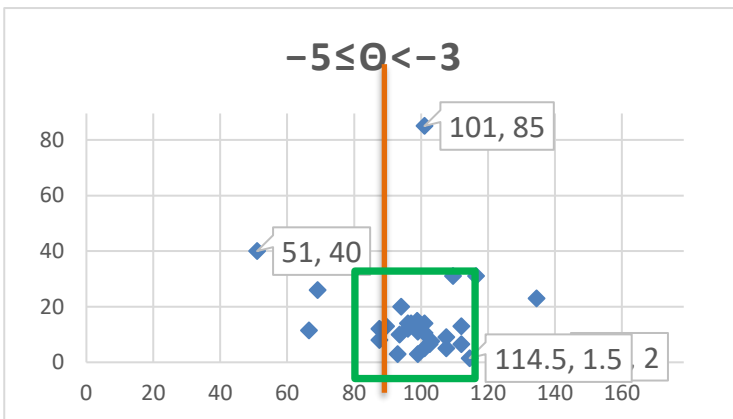


	Y	Z
平均值	114.1cm	11.2cm
標準差	15.7	7.9
誤差	0.01	0.27

表十一 該區間之平均值及標準差

圖 31 偏角實驗結果—偏角區間 $-3 \leq \theta < -1$ (Y、Z 軸單位:cm)

(五)偏角區間為 $-5 \leq \theta < -3$ 之 30 個數據點：



	Y	Z
平均值	98.7cm	14.8cm
標準差	17.7	16.3
誤差	0.06	0.27

表十二 該區間之平均值及標準差

圖 32 偏角實驗結果—偏角區間 $-5 \leq \theta < -3$ (Y、Z 軸單位:cm)

三、實驗二「曲面對於軌跡影響」：

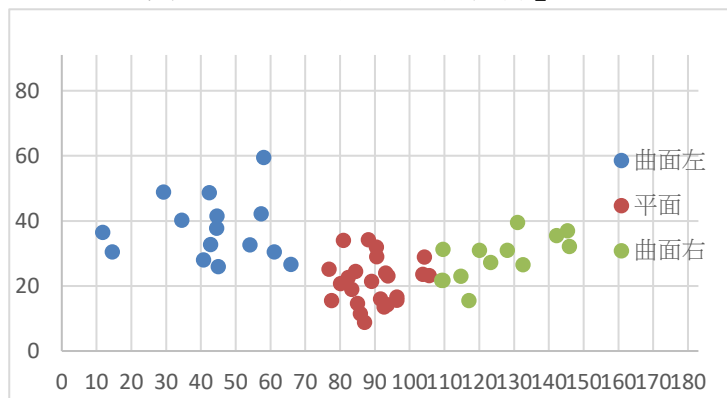


圖 33 左右曲面對軌跡的影響(Y、Z 軸單位:cm)

	左曲	平面	右曲
平均值	(109.3, 134.1)	(153.1, 118.8)	(185.9, 125.5)
標準差	(18.6, 9.6)	(7.8, 6.8)	(15.7, 6.8)

表十三 左右曲面落點之平均值及標準差

四、實驗三「測量不同曲面下，落點位置隨距離的變化」：

(一) 4 m

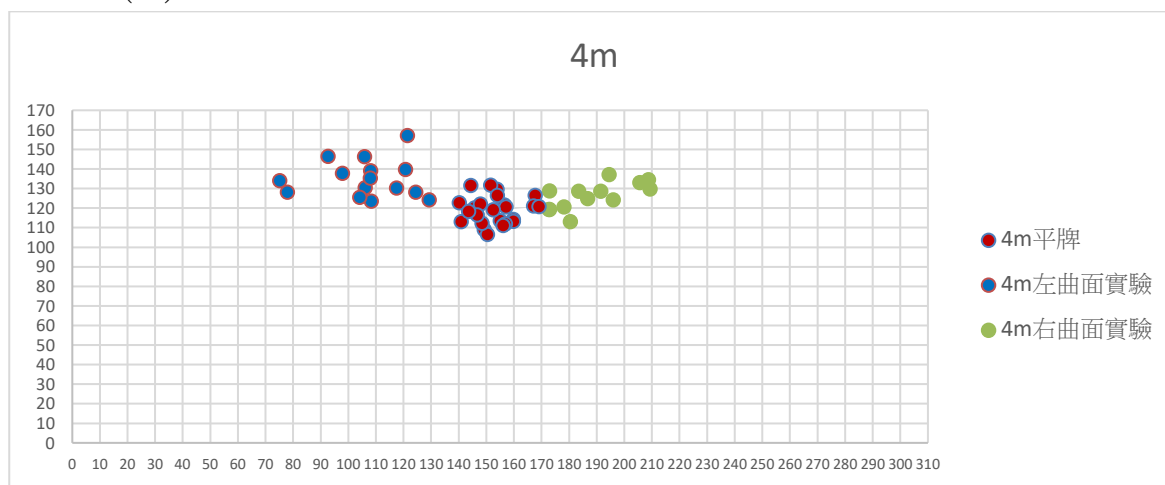


圖 34 曲面距離實驗結果(4m)(Y、Z 軸單位:cm)

	左曲	平面	右曲
平均數 (小數點後一位)	(103.4, 135)	(153.1, 118.8)	(188.6, 126.2)
標準差 (小數點後一位)	(15.7, 9.5)	(7.8, 6.8)	(13.5, 6.9)

表十四 曲面距離(4m)落點之平均值及標準差

(二)5 m

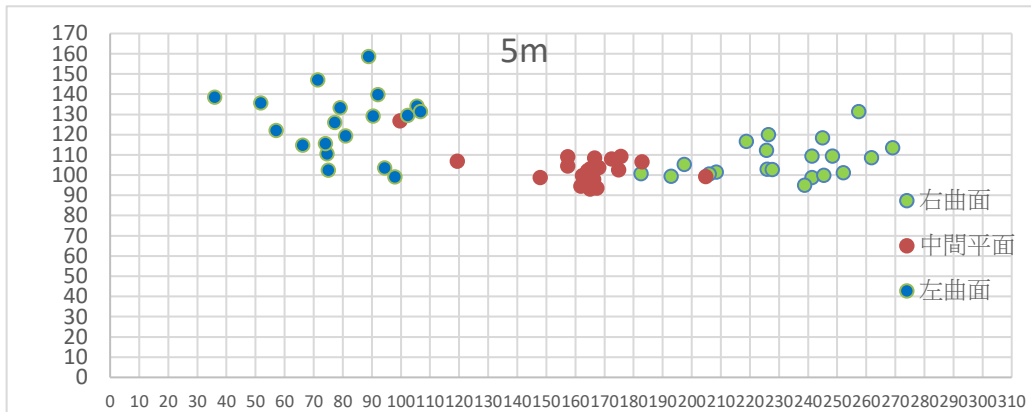


圖 35 曲面距離實驗結果(5m) (Y、Z 軸單位:cm)

	左曲	平面	右曲
平均數 (小數點後一位)	(80.1,125.7)	(162.1,103.1)	(230.6,107.3)
標準差 (小數點後一位)	(18.2,15.2)	(20.9,7.4)	(23.2,8.8)

表十五曲面距離(5m)落點之平均值及標準差

(三)6 m

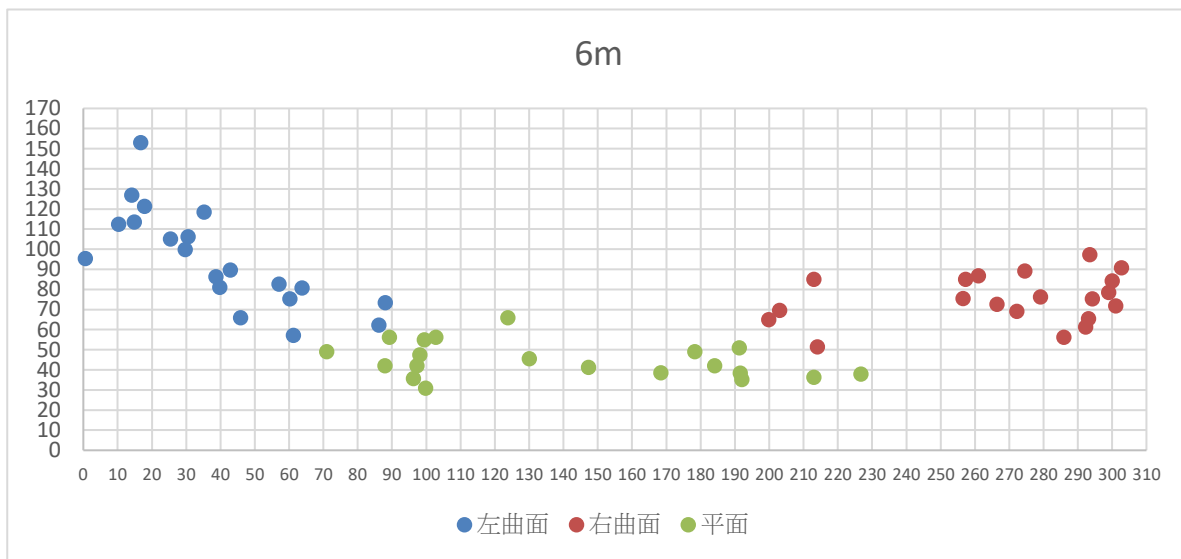


圖 36 曲面距離實驗結果(6m) (Y、Z 軸單位:cm)

	左曲	平面	右曲
平均數 (小數點後一位)	(38.9,95.3)	(139.3,44.8)	(267.9,75.3)
標準差 (小數點後一位)	(23.8,23.8)	(47.7,8.6)	(33.4,11.7)

表十六 曲面距離(6m)落點之平均值及標準差

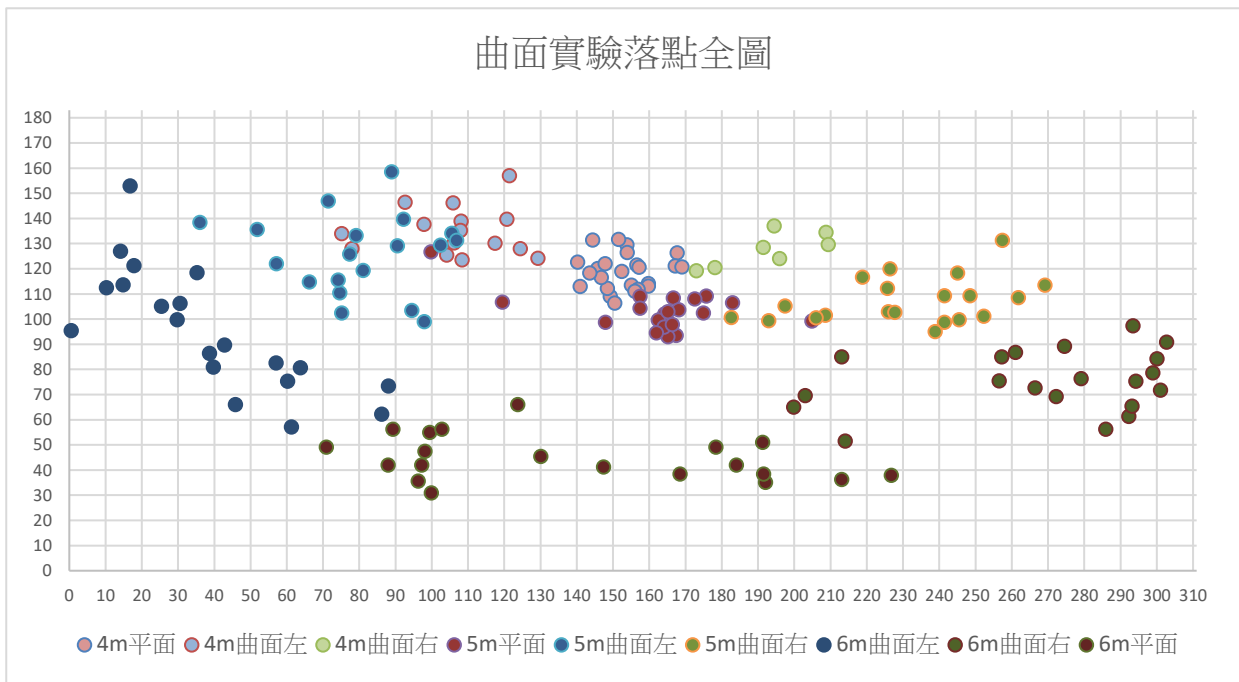


圖 37 曲面距離實驗結果全圖(Y、Z 軸單位:cm)

五、實驗四「發射器系統和氣流對落點的影響」：

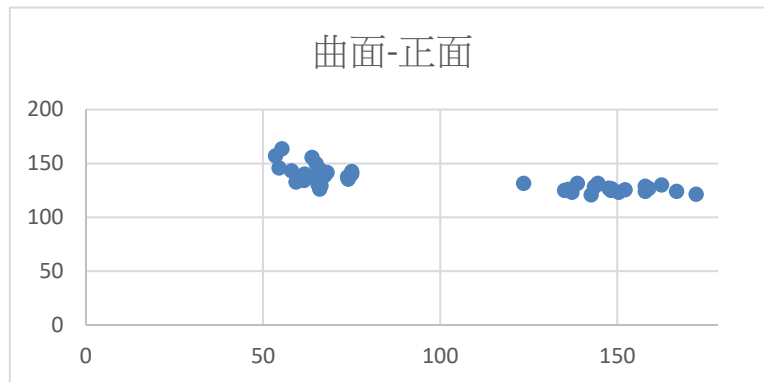


圖 38 曲面正面落點結果(Y、Z 軸單位:cm)

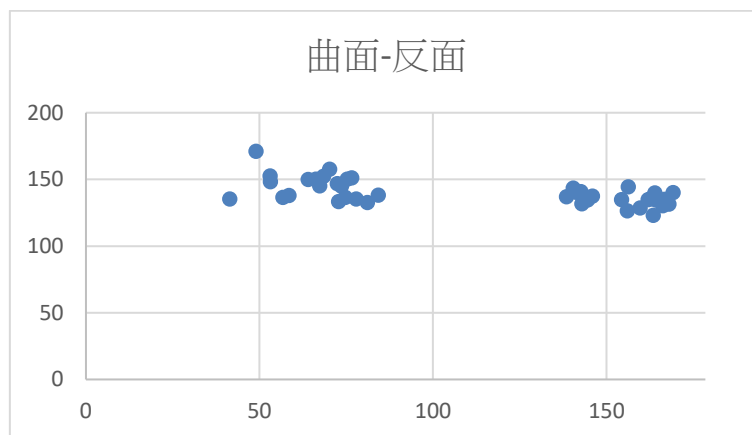


圖 39 曲面反面落點結果(Y、Z 軸單位:cm)

六、實驗五「落點偏轉角測量」

(一)4 m

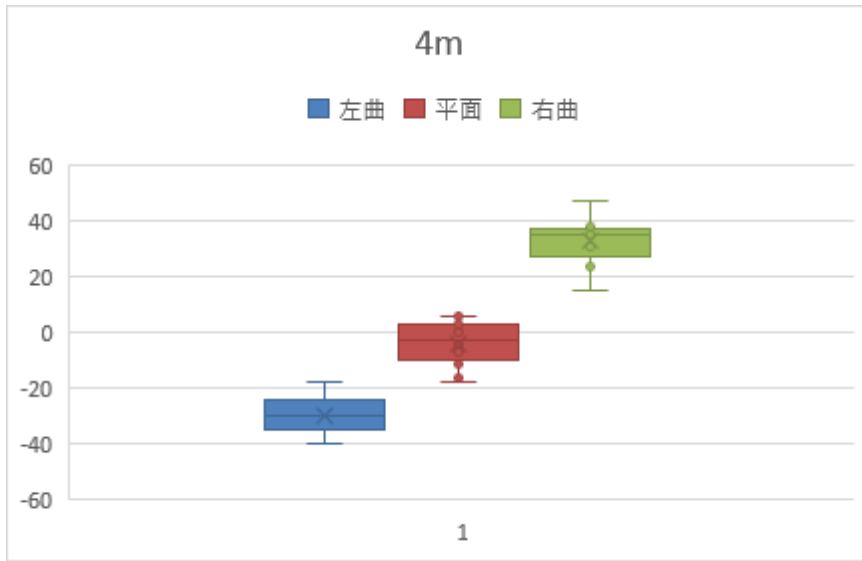


圖 40 4m 盒鬚圖(Y 軸單位:度)

	左曲	平面	右曲
平均值	-29.5	-3.8	32.9
標準差	7.3	7.4	8.0

表十七 4 m 各牌型偏轉角之平均值及標準差

(二)5 m

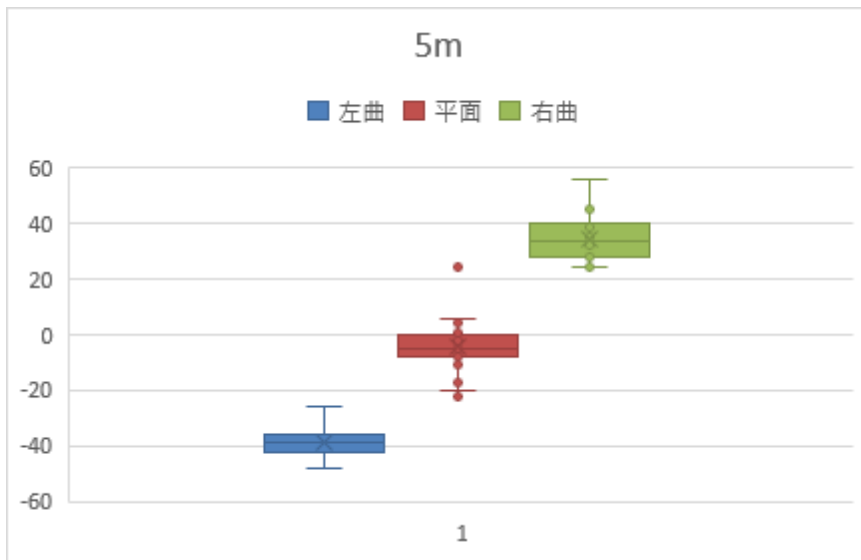


圖 41 5m 盒鬚圖(Y 軸單位:度)

	左曲	平面	右曲
平均值	-38.8	-4.2	34.3
標準差	5.6	10.1	8.7

表十八 5 m 各牌型偏轉角之平均值及標準差

(三)6 m

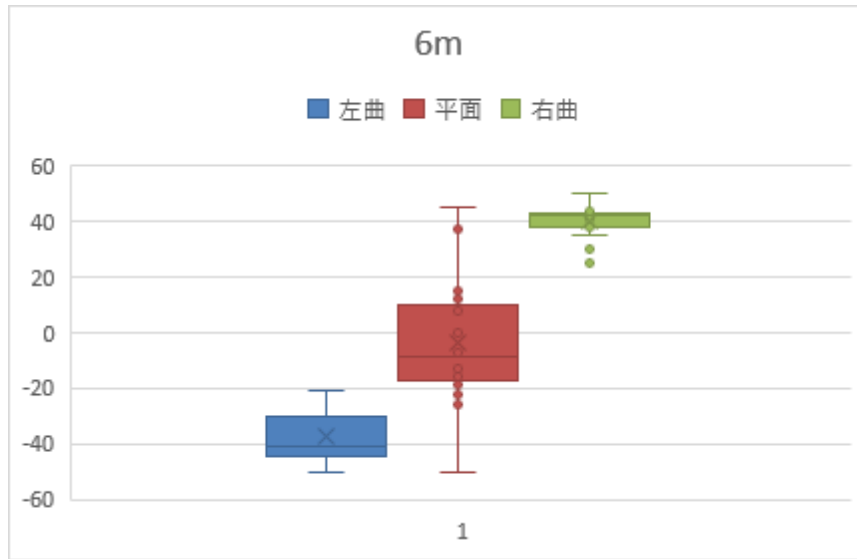


圖 42 6m 盒鬚圖(Y 軸單位:度)

	左曲	平面	右曲
平均值	-37.5	-3.7	40.4
標準差	9.2	21.6	5.7

表十九 m 各牌型偏轉角之平均值及標準差

陸、討論：

一、實驗結果討論

(一)實驗一「初始偏轉角對於撲克牌軌跡影響」：

1.目的：在使用發射器時，我們發現撲克牌在基座上會有傾倒的狀況，而造成牌面在發射前有一個「初始偏轉角」。因此，我們想透過實驗來檢視此偏轉角是否會對撲克牌的軌跡造成影響。為了要排除其他變因，包含牌要對齊基座哪裡、初始偏轉角間距要多少、力的大小等等。我們做了一些基本測試後，設計了實驗一的實驗步驟並得到以下結果。

2.實驗結果分析：

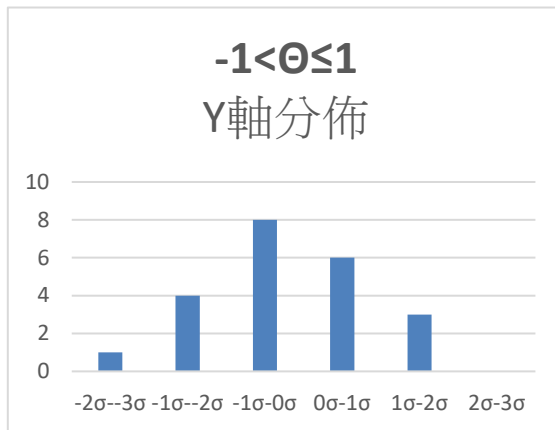


圖 43 $-1 < \theta \leq 1$ 標準差峰值圖

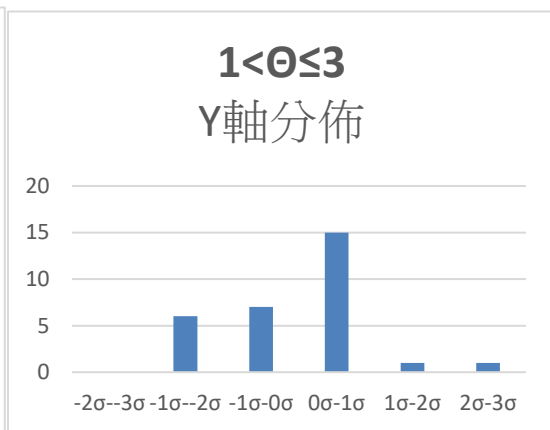


圖 44 $1 < \theta \leq 3$ 標準差峰值圖

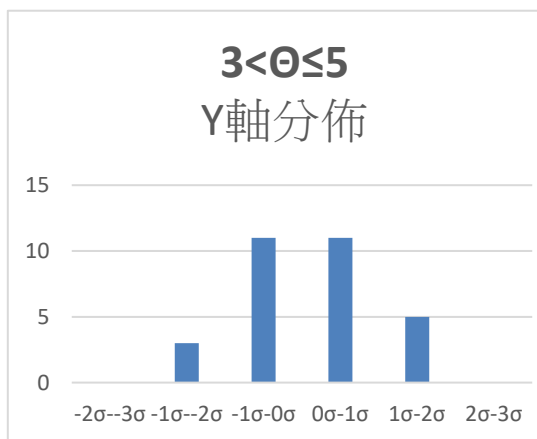


圖 45 $3 < \theta \leq 5$ 標準差峰值圖

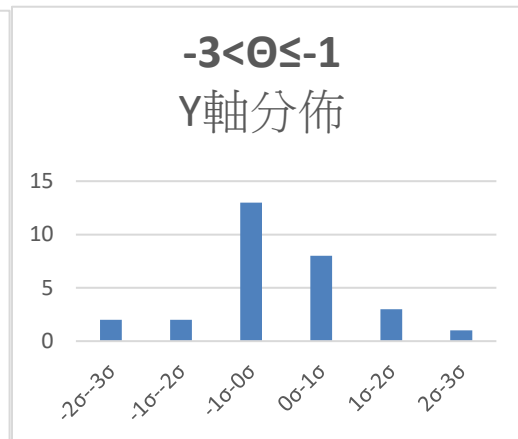


圖 46 $-3 < \theta \leq -1$ 標準差峰值圖

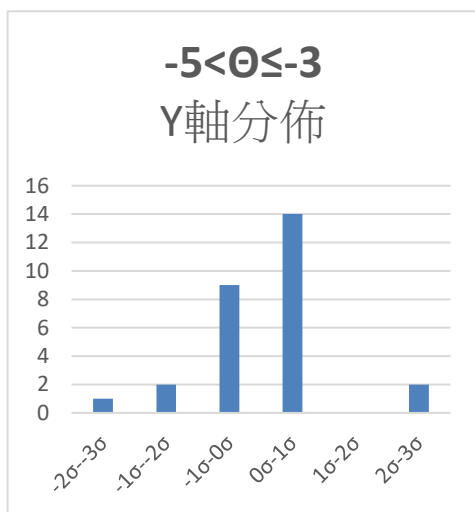


圖 47 -5 $\le \theta \le -3$ 標準差峰值圖

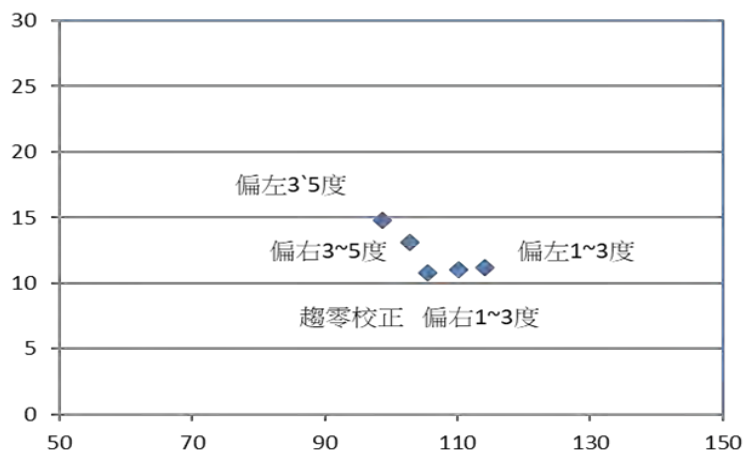


圖 48 五區間平均值落點(Y、Z 軸單位:cm)

3. 結果討論：

(1) 雖然無法皆落在同一位置，但由每一個角度區間的標準差峰值可以看出，撲克牌的落點大致上皆集中在一個標準差內，說明落點是有集中的趨勢，且實驗結果具有重複性。

(2) 初始偏轉角在正負 5 度以內對軌跡的影響並不顯著。

由圖 48 可看出，其實五個區間的差異並不大，而圖上僅是座標間距較大，才看出差異。所以我們認為左右偏轉角控制在正負 5 度內不太會影響實驗結果，因此，往後的實驗我們將牌面的初始偏轉角控制在五度之內。

(3) 撲克牌的落點皆有偏右的現象，可能為系統誤差。

實驗結果的圖 28-32 中，我們利用橘線標示出發射器的相對位置。我們發現無論偏轉角度的正負，撲克牌的落點皆有偏右的趨勢。我們猜想此結果應為發射器的系統誤差，與發射器的結構有關。因此我們之後設計了實驗四，來討論偏右的原因。

(二)實驗二「曲面對於軌跡影響」：

1. 目的：由實驗一的結果，我們排除了偏轉角對軌跡的影響。並在實驗的過程中發現了另一個對撲克牌軌跡有重要影響的變因－「撲克牌的曲面」。我們觀察到撲克牌在開封時就擁有一個自然的曲面，此曲面應與撲克牌的製造過程有關。而這似乎是決定撲克牌飛行軌跡的關鍵，因此我們設計了實驗二來探討曲面對軌跡的影響。

2. 實驗討論：

(1)在還沒有發現曲面的影響時，我們無法得到合理的軌跡變化圖：1)

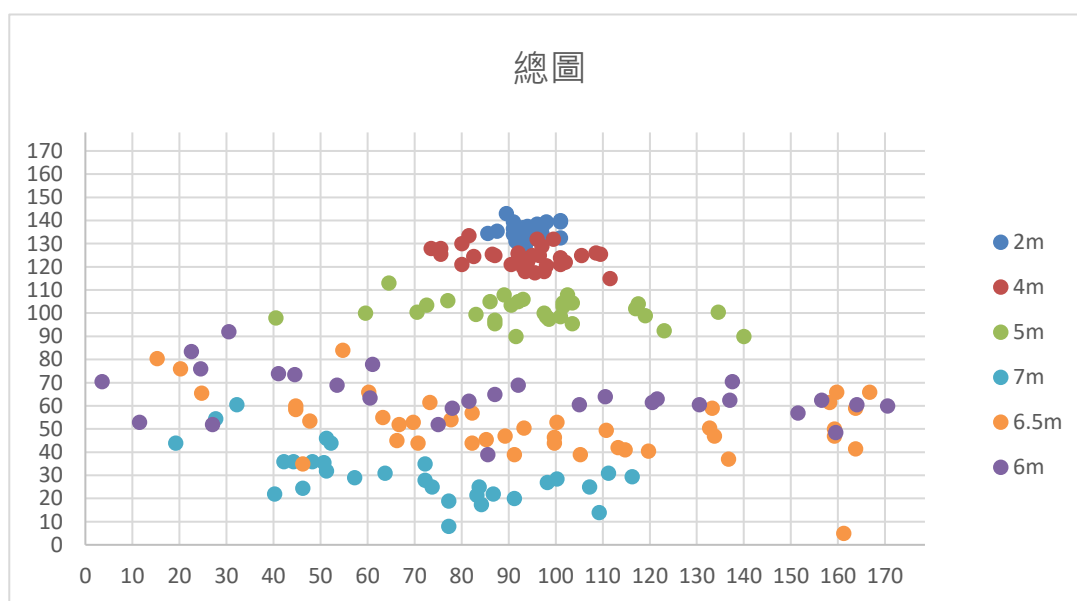


圖 49 距離實驗落點總圖(Y、Z 軸單位:cm)

圖 49 為還沒有發現撲克牌有自然曲面時完成的軌跡數據。我們將撲克牌發射至不同距離的保麗龍板上，希望能看出軌跡的變化。我們在發射每一張牌都用相同變因，但是 7M 落點集中在左方，不像 2.4.5.6M 平均分布，也就是說有個因素控制軌跡向左向右，只是我們不知道。經過觀察，我們發現曲面可能影響牌軌跡的關鍵，因此我們接著設計了實驗二來印證我們的想法。

(2)曲面的方向決定撲克牌的飛行方向：

從圖 33 的結果中，我們可以清楚的得到當牌的曲面控制在 0 度到 175 度時(圖 20)，凸面面向方向及牌的軌跡飛行方向。

造成此結果的原因我們推論是因為撲克牌的曲面，使空氣流過撲克牌時，受到康達效應的影響，而使撲克牌受到升力(合力)提拉的作用，讓撲克牌凸面所面向的方向即為撲克牌的偏移方向。

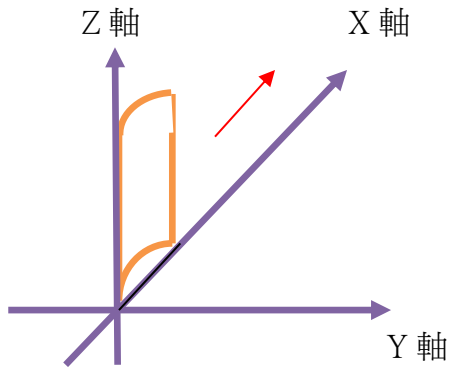


圖 50

圖 50 說明：
圖中牌的凸面向左(負 Y 軸方向)，
向正 X 軸發射。

註:圖 50、51、52 皆以圖 50 XYZ 軸來說明

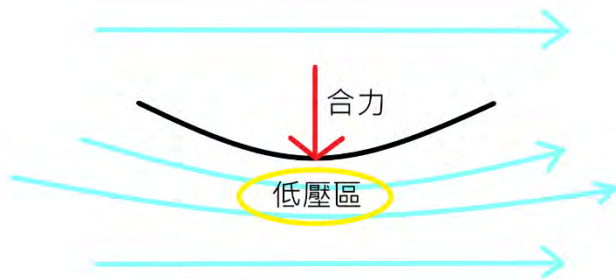


圖 51

說明：此圖為圖 50 俯視圖，即向-Z 軸方向看下來。

藍色箭頭:流體流過牌的軌跡

(三)實驗三「測量不同曲面下，落點位置隨距離的變化」：

1.目的：為了驗證實驗二的論述，我們調整發射器到珍珠板的距離，以觀察實驗距離拉長後撲克牌的飛行狀況。

2.實驗結果討論：

(1)當距離拉長，撲克牌確實按照我們的推論，往凸面面向方向運動。

(2)從圖 34、35、36 得知曲牌高於平牌落點，推論是進動造成偏轉，使牌產生升力對 Z 軸的正射影量增加。(詳細進動描述在實驗五討論)

(3)平牌存在著肉眼觀察不到的微小曲面，當距離拉長，兩力作用的時間也被拉

長，造成左右分散的現象愈明顯。

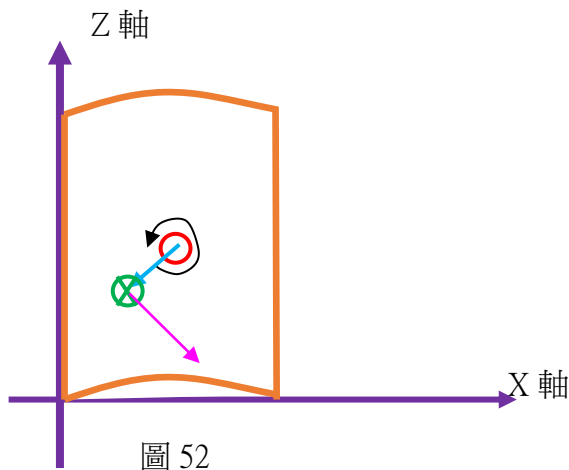
不管距離是多少，左邊的平均高度都較右邊平均高度高。我們推論是發射器的系統誤差而非教室內的微小氣流影響，因此我們轉換發射器方向並得到實驗四的結果。

(四)實驗四「氣流對落點的影響」：

- 1.目的：在實驗一和實驗三中我們皆觀察到撲克牌落點集中右邊，甚至有左高右低的情形，造成此結果的原因可能有二。一為發射器上兩條橡皮筋彈力係數不同，導致在發射時有系統上的誤差。二是我們曾在教室內利用燒線香觀察煙的流向，觀察到儘管關起門窗，教室內仍有微小的氣流流動。此結果可能導致高速飛行的撲克牌受到額外的作用力。
- 2.結果討論：為了說明我們的實驗是否受到氣流影響，我們將發射器跟珍珠板的位置交換，這個動作將使得風向相對於撲克牌的飛行軌跡發生改變。從圖 38 和 39 的實驗結果中，我們可以看到落點跟原方向發射沒有太大的差別，故說明氣流不是落點偏右的主因。

(五)實驗五「落點偏轉角測量」：

- 1.目的：每次我們實驗完都發現牌打在珍珠板上留下撲克牌的軌跡有偏轉過的痕跡，而偏轉的角度我們稱作落點偏轉角來區別初始偏轉角。為了解釋這現象我們把它所偏轉的角度量下來，並思索是甚麼力造成的。
- 2.結果：我們認為之所以發生這現象是有關於牌的 COM(center of mass)質量中心和 COP(center of pressure)平均壓力中心所造成的，而升力和拖曳力施力點為 COP。當牌在飛行會造成 COP 在牌的位置有所改變(圖 52)進而造成力矩，同時牌以 COM 轉動產生角動量，使牌有進動現象。



說明:

紅色射出紙面點為 COM

紅色射出牌面向量:角動量

綠色射入紙面點為 COP

綠色射入牌面向量:升力與拖曳力的合力

藍色向量:力臂

粉紅色向量:力矩

圖 52

從實驗結果(圖 40、41、42)盒鬚圖觀察出 4m 到 6m 中間會愈來愈大表示角度愈來愈不相同。呼應前面康達產生的升力和拖曳力作用久了把每張牌微小曲面表現出來，側轉愈來愈明顯。而左右的角度具有對稱性，代表同曲面相同所造成的偏轉角相同。

柒、結論：

一、實驗一「初始偏轉角對於撲克牌軌跡影響」：

在發射實驗中小角度的初始偏轉角對軌跡影響不大。

二、實驗二「曲面對於軌跡影響」：

曲面是影響撲克牌飛行軌跡的主要因素。

三、實驗三「測量不同曲面下，落點位置隨距離的變化」：

牌型曲面方向會影響撲克牌的飛行軌跡。左曲的牌會落在屏幕左邊，右曲的牌會落在屏幕右邊，平牌則落在兩者之間且微偏右。

四、實驗四「發射器系統和氣流對落點的影響」：

此實驗證實落點偏右非氣流影響。

五、實驗五「落點偏轉角測量」：

在實驗五中得知，牌落點的偏轉會隨距離漸遠而增大。

捌、未來展望：

未來我們希望可以實驗找出橡皮筋是否會因拉扯的次數增加，而造成施在牌上的力產生變化。另外驗證我們的進動理論是否正確。並利用高速攝影機去觀察撲克牌在空中發生人類肉眼無法觀察到的現象。最後嘗試把定性轉換到定量描述牌飛行軌跡。

玖、參考資料及其他：

- 一、David HallidayResnick,Jearl WalkerRobert. (2011.11). Principles of Physic Extended, 9/E. 新北市: 全華出版社。
- 二、HummelA.Sarah. (2003). Frisbee Flight Simulation and Throw Biomechanics. Rolla University of Missouri。
- 三、MorrisonR.V. (2005年3月6日). The Physics of Frisbees. Electronic Journal of Classical Mechanics and Relativity,Mount allison University。
- 四、Yunus A. CengelM. CmbalaJohn. (2010). Fluid Mechanics Fundamentals and Applications second edition in si units. New York: McGrawHill。

【評語】 051805

想要瞭解撲克牌飛行的變化，而自製發牌機，雖簡易，但已可得到不少有用的數據，並可看出曲面的重要性。有相當原創性，如果能有更多定量的分析及對自製儀器本身及操作時的可能造成的誤差有所分析會更好。

摘要：

本研究旨在觀察撲克牌在空中飛行軌跡的變化。為了能夠精準控制每次實驗發射上的條件，因此我們製作了一台撲克牌發射器。在本次科展中我們研究了多種原因對撲克牌飛行軌跡之影響(例如：初始偏轉角、牌型凹凸程度)。並依據實驗數據觀察現象，分析距離對於落點偏轉角之影響。驗證發射器本身是否造成系統誤差。最後透過定性描述驗證撲克牌的飛行軌跡影響因素提出一定程度的見解及討論。

壹、研究動機&目的：

曾看過魔術師帥氣丟出紙牌且命中目標的我們，不禁想著紙牌在空中是否會受到高二下學期所學的角動量和舊課綱的流體力學中的升力和拖曳力影響。我們決定一探紙牌在空中的變化，我們決定展開此次科展的研究。為了固定實驗變因和穩定發射，我們自己設計了一台撲克牌發射器。

我們針對以下兩項變因做了軌跡的分析，並希望在實驗結束後能對此變化提出解釋：

- (1)撲克牌發射的傾斜程度對軌跡的影響。
- (2)撲克牌的凹凸程度對軌跡的影響。
- (3)橡皮筋對撲克牌飛行軌跡的影響。

貳、研究設備及器材：

項目	數量	備註	項目	數量	備註
自製撲克牌發射器	一台	發射器為木製 使用線鋸機裁切	保麗龍板	數張	
橡皮筋	數條		珍珠板	數張	
撲克牌	數盒	單張撲克牌 平均質量：1.5g	彈簧秤	一個	測量範圍：0~3000gw 精準值：50gw/刻度

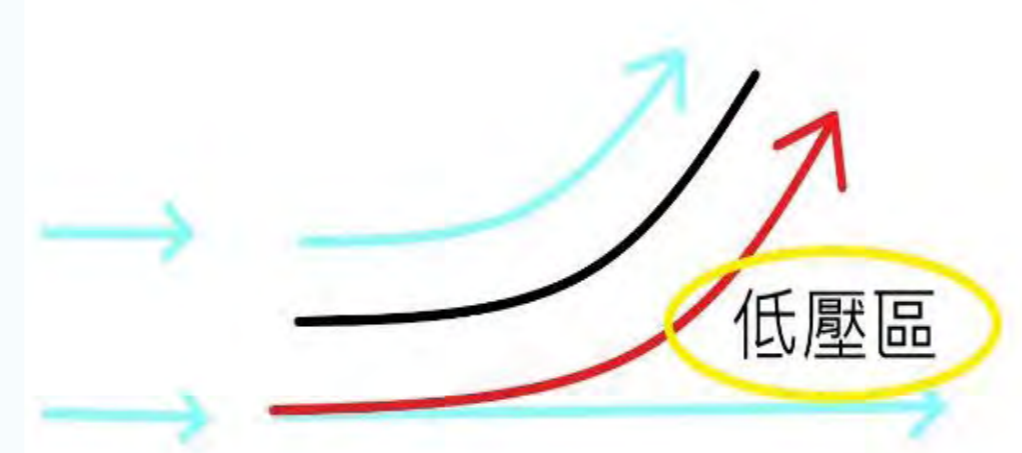
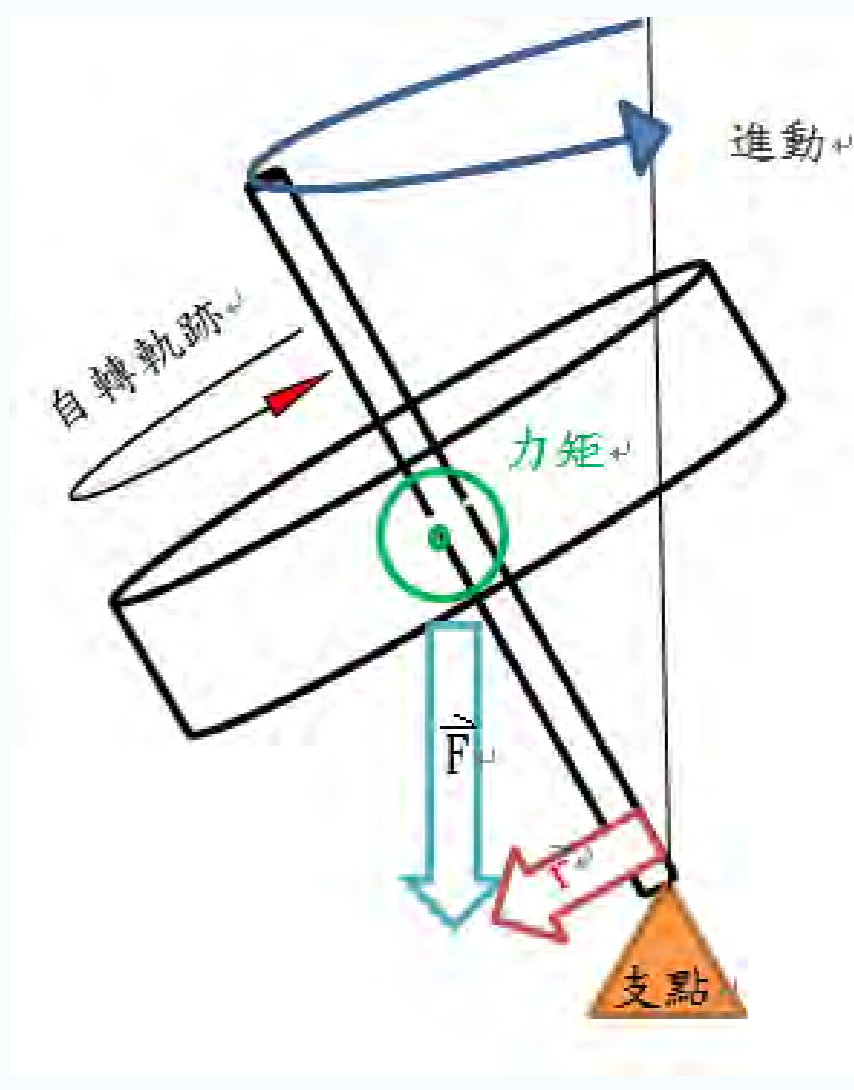
參、發射器、輔助圖：

第一代發射器	第二代發射器	第三代發射器
缺點： (1)初速不足 (2)無法控制發射時機和方向	缺點： (1)無法固定力的大小 (2)重心太高 (3)易滑動	優點： (1)機械發射 (2)橡皮筋直接接觸撲克牌，減少能量損失。 (3)改變橡皮筋的伸長量、調整力的大小。

場地和記錄版的原點圖		實驗1、4的步驟輔助圖	實驗2、3的步驟輔助圖
圖一	圖二	圖三	圖四
說明： (一)實驗一、二數據原點為a (二)實驗三數據原點為b (三)實驗四數據原點為c	說明： 實驗場地的配置	說明： 發射器前方相機所拍攝到的初始偏轉角	說明： 從上空俯視手拗牌的曲度的

實驗5的步驟輔助圖		實驗六場地架設圖
圖五	圖六	圖七
說明： 重物垂掛，再用原子筆畫垂線	說明： 將垂線和牌的痕跡線所夾夾角用量角器量出	說明： 實驗六場地的配置

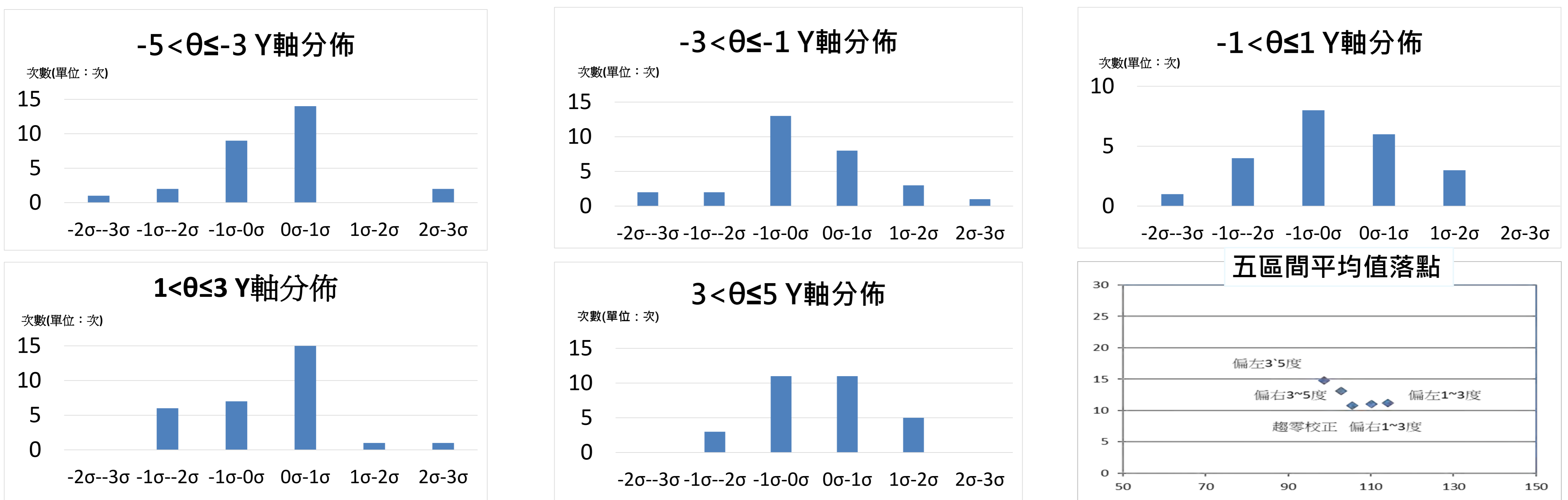
肆、實驗原理、實驗步驟、實驗結果、結果討論

原理1：康達(德)效應(柯恩達效應、附壁作用)	原理2：進動現象
<p>此效應主要在表示流體遇到障礙物時，氣流會沿著物體表面流動的情況。以右圖為例，下層氣流快速流動時會使靠近物體凸面附近產生較低壓區域，使下層氣流改變原本方向，造成上下層氣壓不均，上層氣壓(向下)會大於下層氣壓(向上)，因此合力向下。除提供下層氣流彎取所需的向心力，合力即是升力，使物體受到「提拉」的影響。</p> 	<p>進動現象是指一物體在自轉時自轉軸也受到其他力的影響而向著另一中心軸旋轉。以陀螺為例，當陀螺垂直於地面自轉時，可能因為受到重力產生力矩產生傾斜，讓自轉的陀螺又產生另一轉動軌跡。</p> 

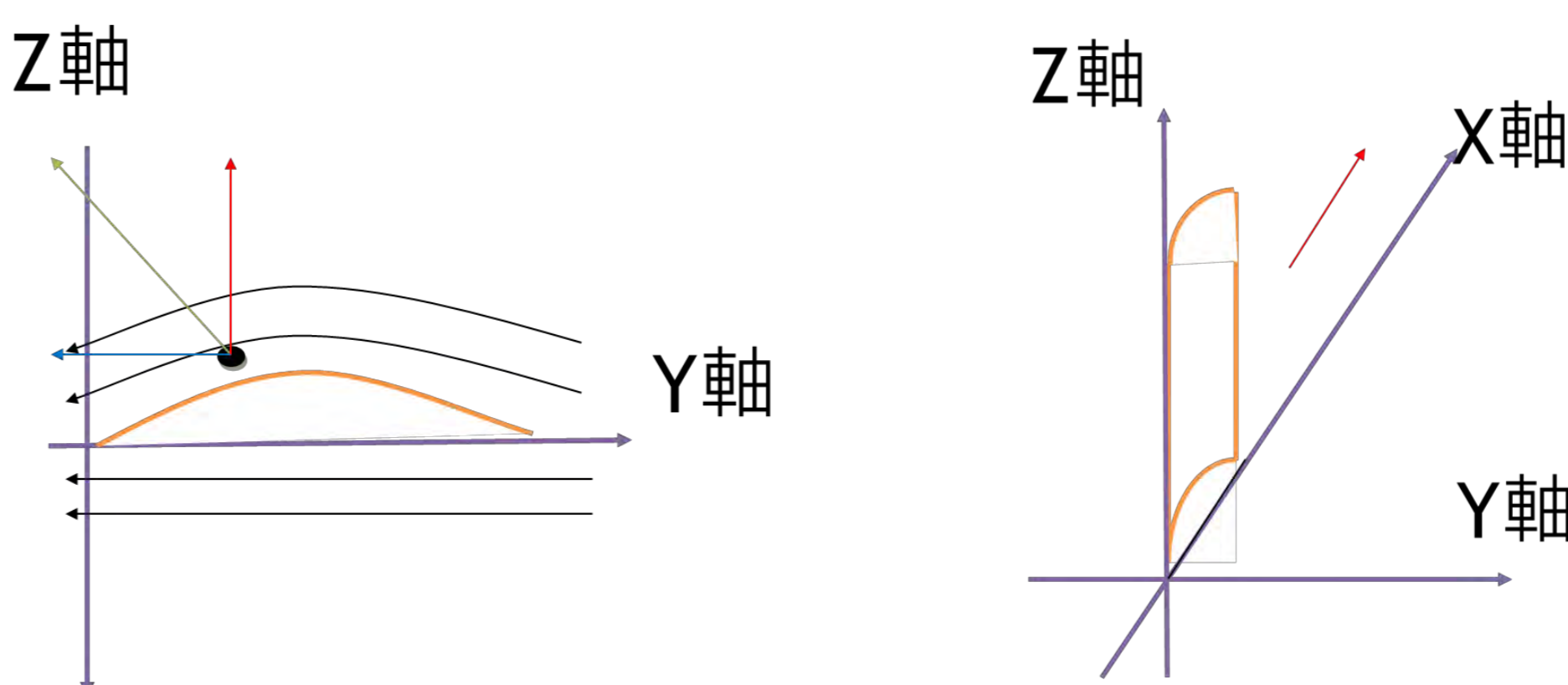
實驗一「初始偏轉角對於撲克牌軌跡影響」

<p>實驗步驟：</p> <ol style="list-style-type: none"> (1)將橡皮筋拉至發射器，並扣住板機。 (2)調整撲克牌傾角至特定區間，再用相機確認角度(圖3)，並利用保麗龍板在距離發射器4 m處記錄撲克牌落點位置。 (3)撲克牌射向保麗龍板後，用粉筆及原子筆在保麗龍板做紀錄。 (4)運用捲尺測量，並在保麗龍板上設置座標，最後運用表格畫出數據落點的示意圖。 	<p>結果討論：</p> <ol style="list-style-type: none"> (1)落點有集中的趨勢。 (2)實驗結果具有重複性。 (3)初始偏轉角在正負5度以內對軌跡的影響並不顯著。 (4)撲克牌的落點皆有偏右的現象，可能為系統誤差，因此我們設計了實驗四，來討論偏右的原因。
--	--

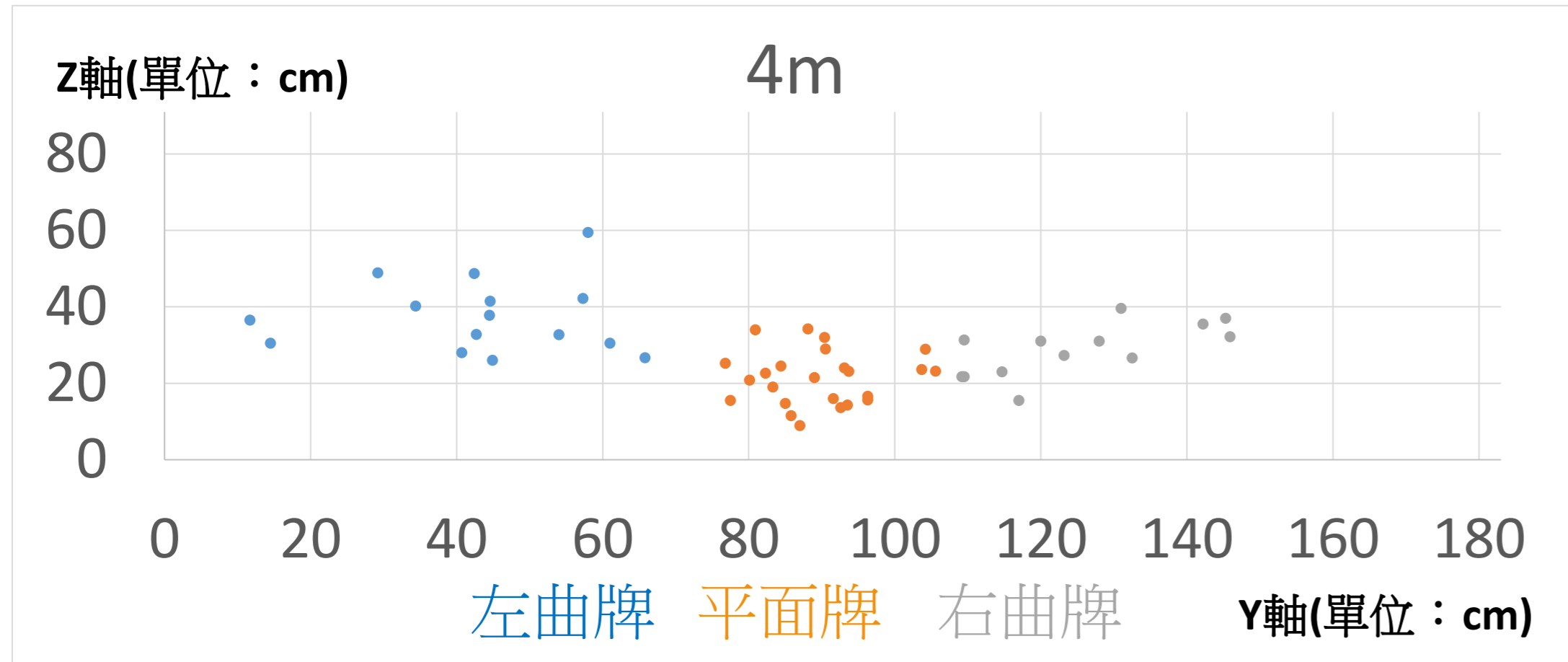
實驗結果:



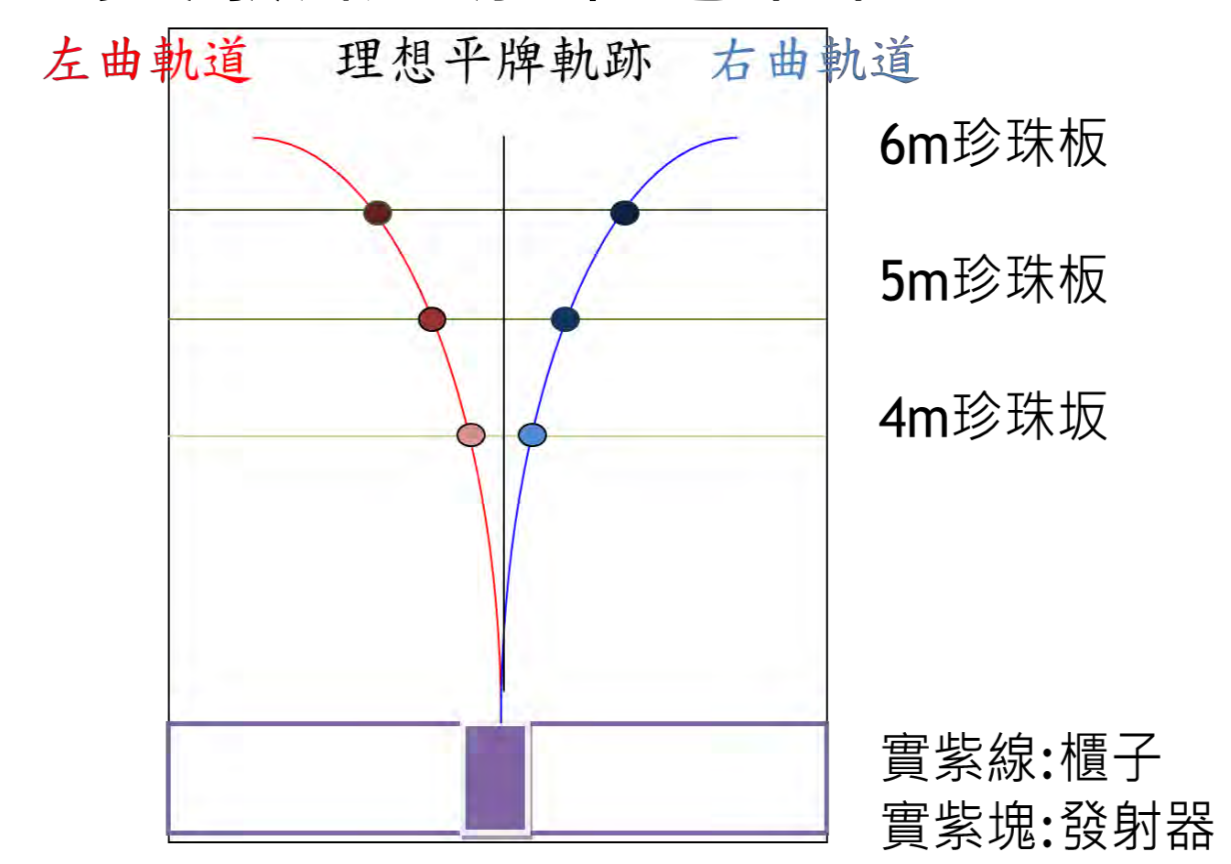
實驗二「曲面對於軌跡影響」

<p>實驗步驟：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 首先將牌做成曲面和平面的： <ol style="list-style-type: none"> (1)平面的牌只需將它壓在重物(我們使用的是書本)下方，等待一天後取出。 (2)曲面的牌先將中心軸對準量角器中心，用手拗出曲面，使它曲成0度至175度。(圖4) (3)上下兩面重複檢查角度是否一致。 2. 將曲平牌放在發射器上發射，並記錄數據 	<p>結果討論：曲面的方向決定撲克牌的飛行方向。</p> 
--	---

實驗結果:



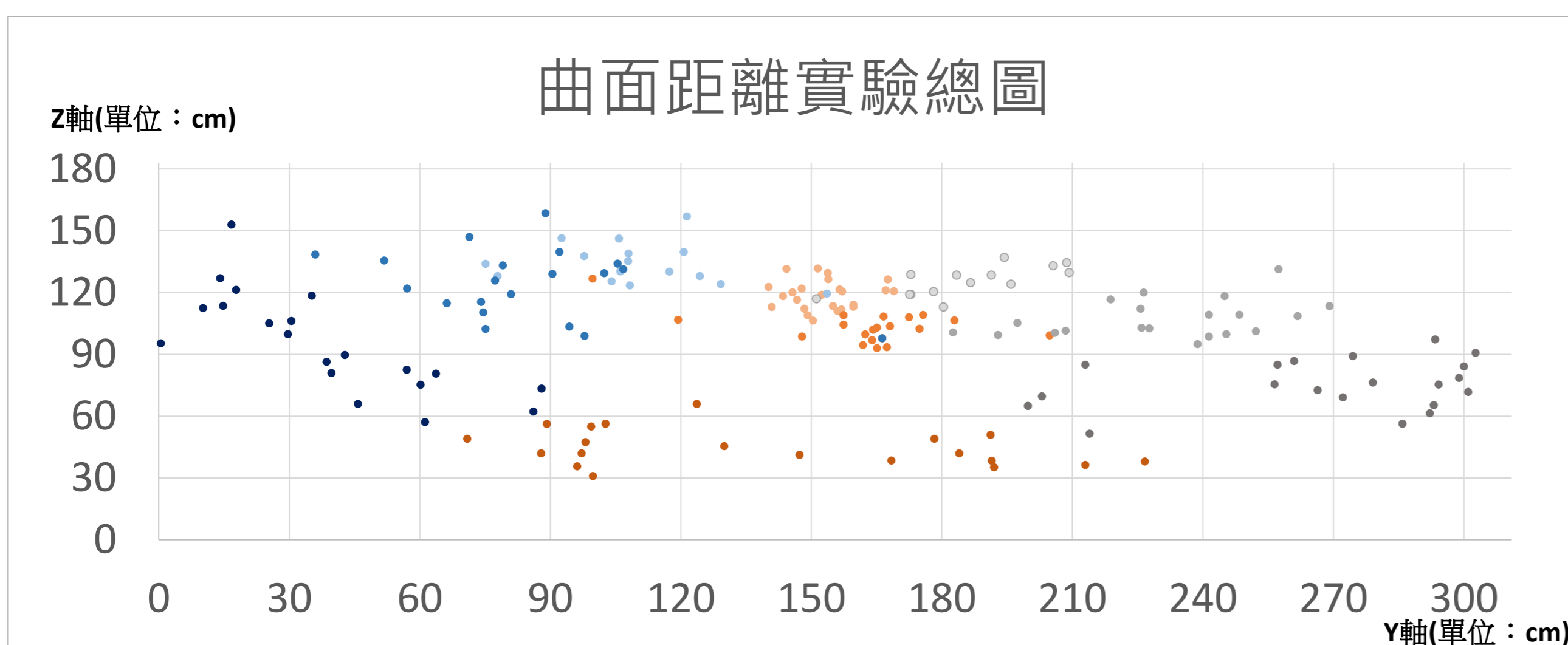
實驗軌跡示意圖



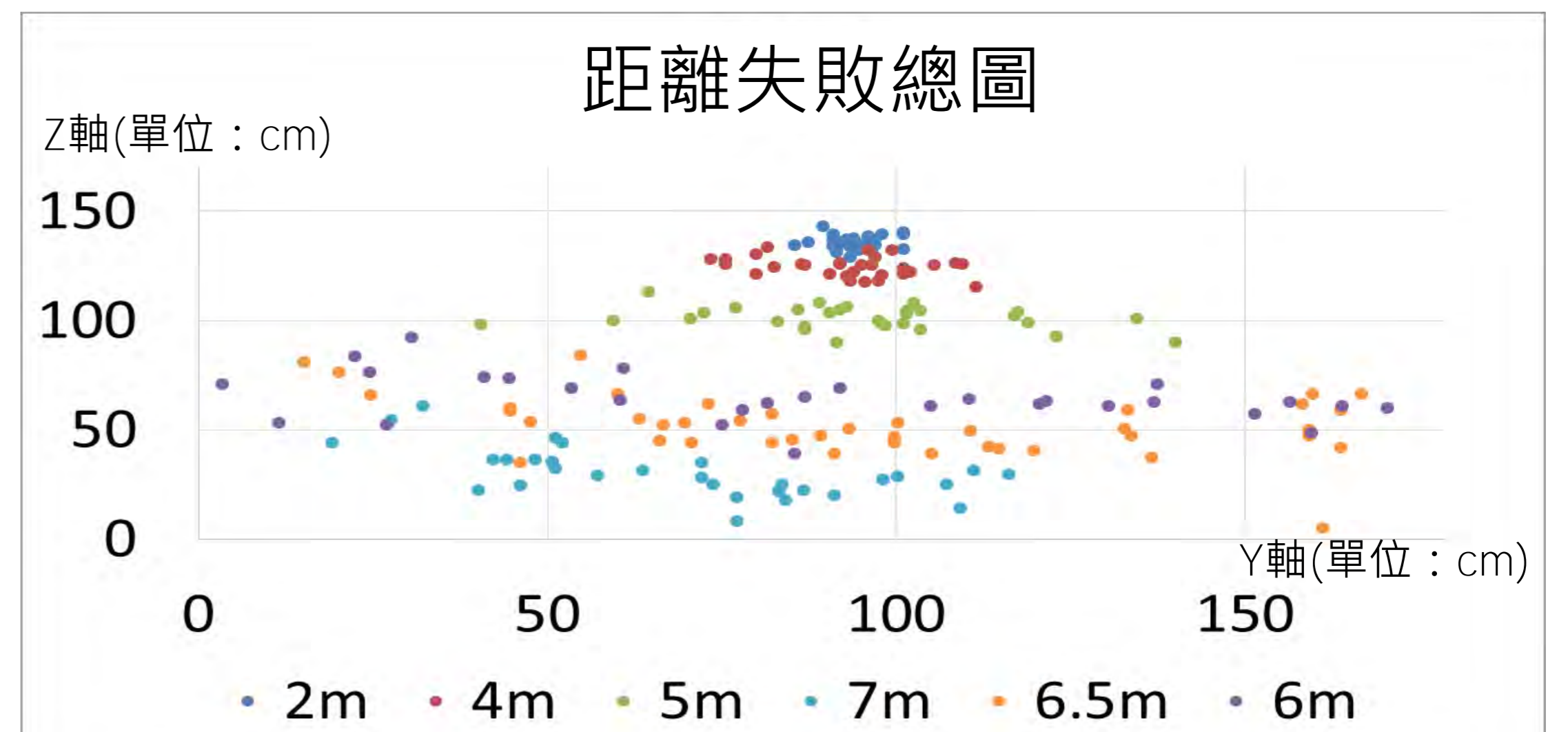
實驗三「測量不同曲面下，落點位置隨距離的變化」

<p>實驗步驟：</p> <p>同實驗二，僅改變落點屏幕的距離。</p>	<p>結果討論：</p> <ol style="list-style-type: none"> (1)曲牌高於平牌落點。 (2)距離越遠，曲牌的落點位置愈偏離中線。
---	---

實驗結果:



顏色由淺到深：4m到6m



實驗四「橡皮筋和氣流對落點的影響」

實驗步驟：

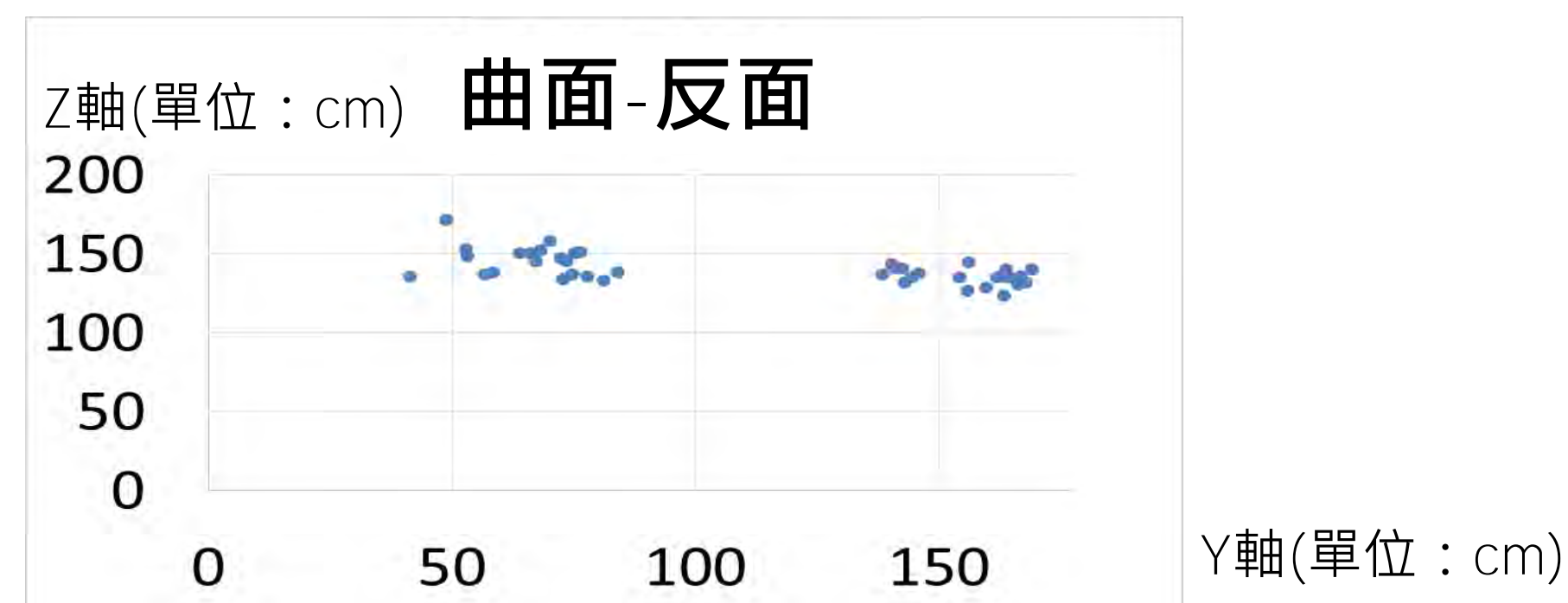
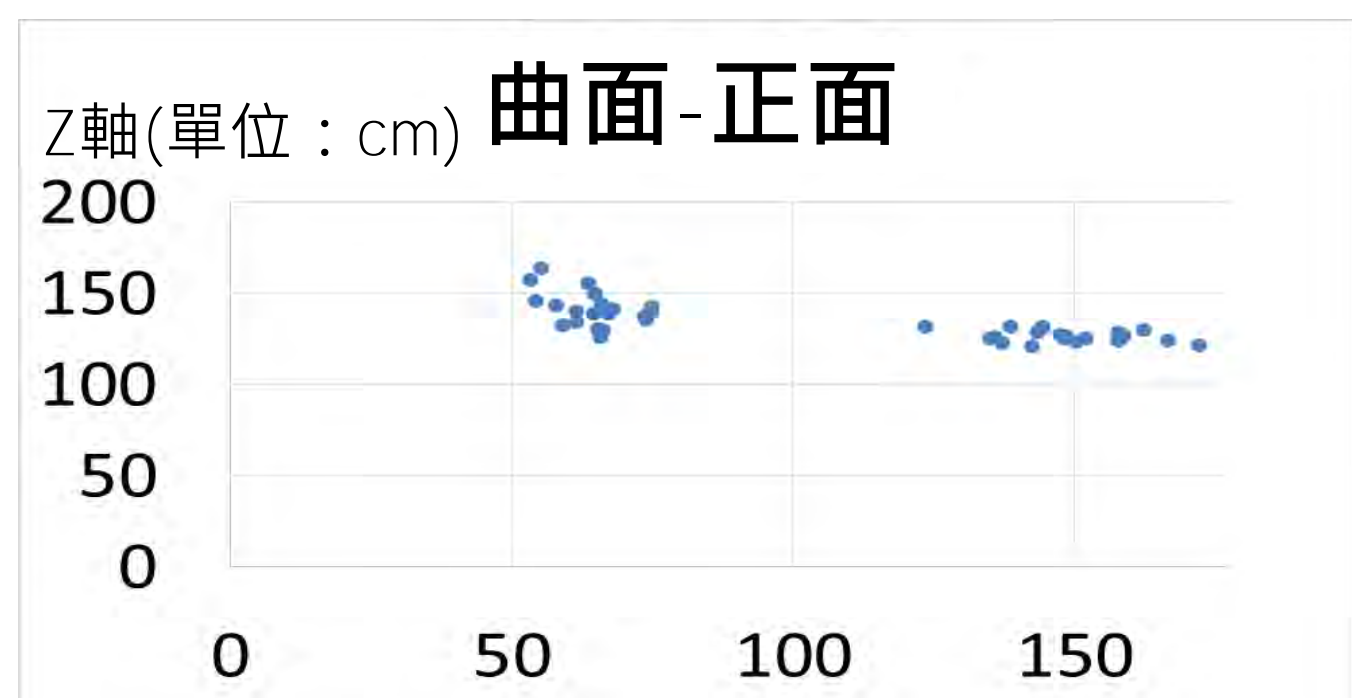
同實驗一

- (1)使用線香確認氣流方向。
- (2)曲牌的正反面各20發。

結果討論：

- (1)落點跟原方向發射沒有太大的差別，因此說明氣流不是落點偏右的主因。
- (2)落點偏右的主因來自發射器在設計上造成的系統誤差。

實驗結果：



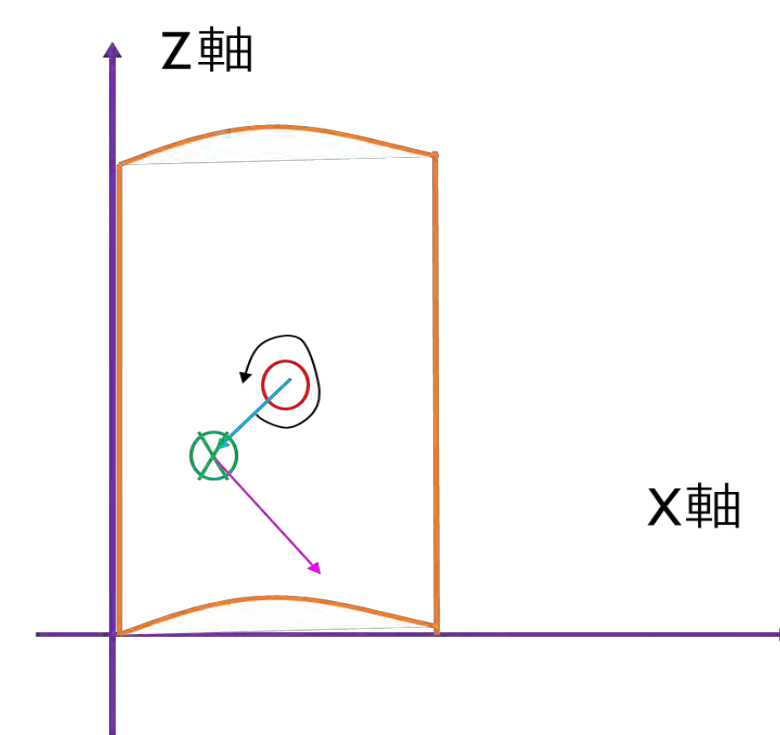
實驗五「落點偏轉角測量」

實驗步驟：

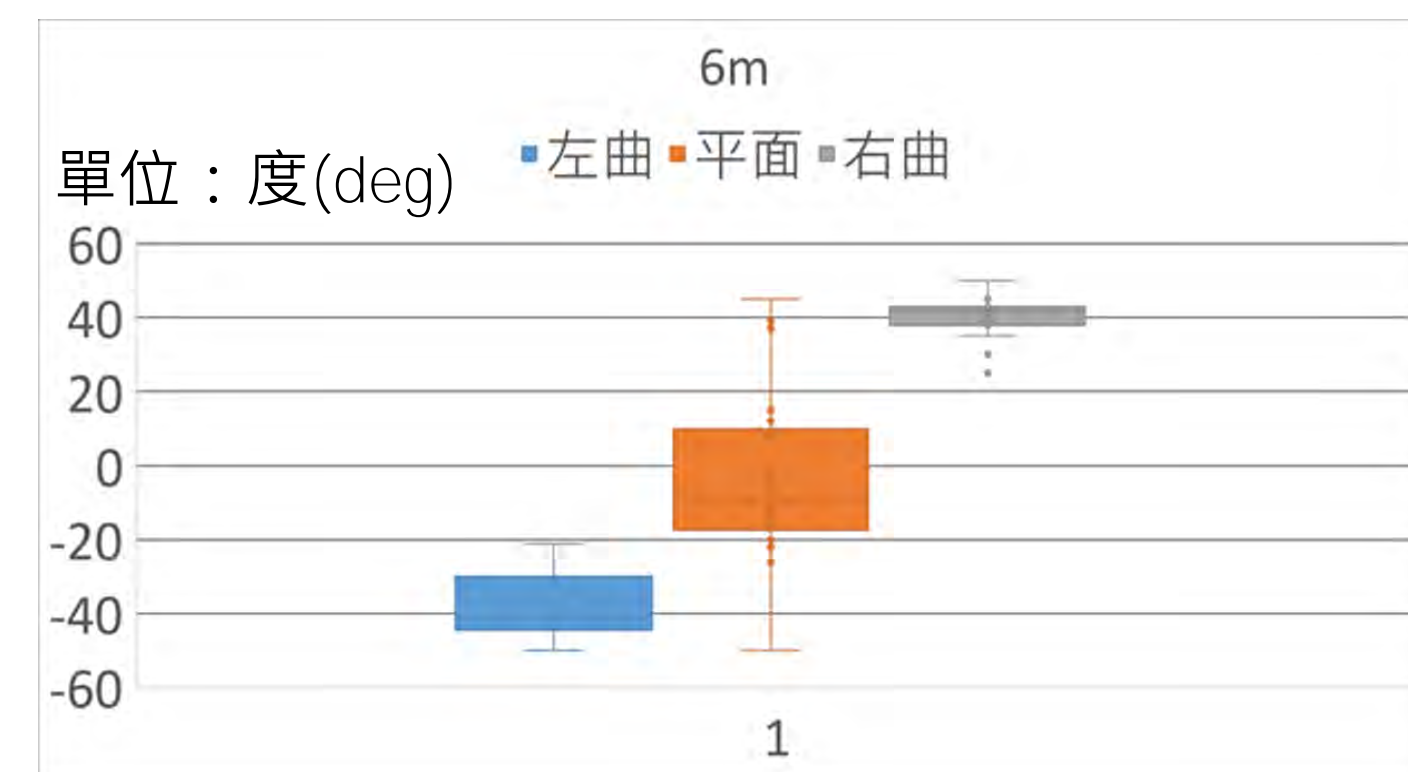
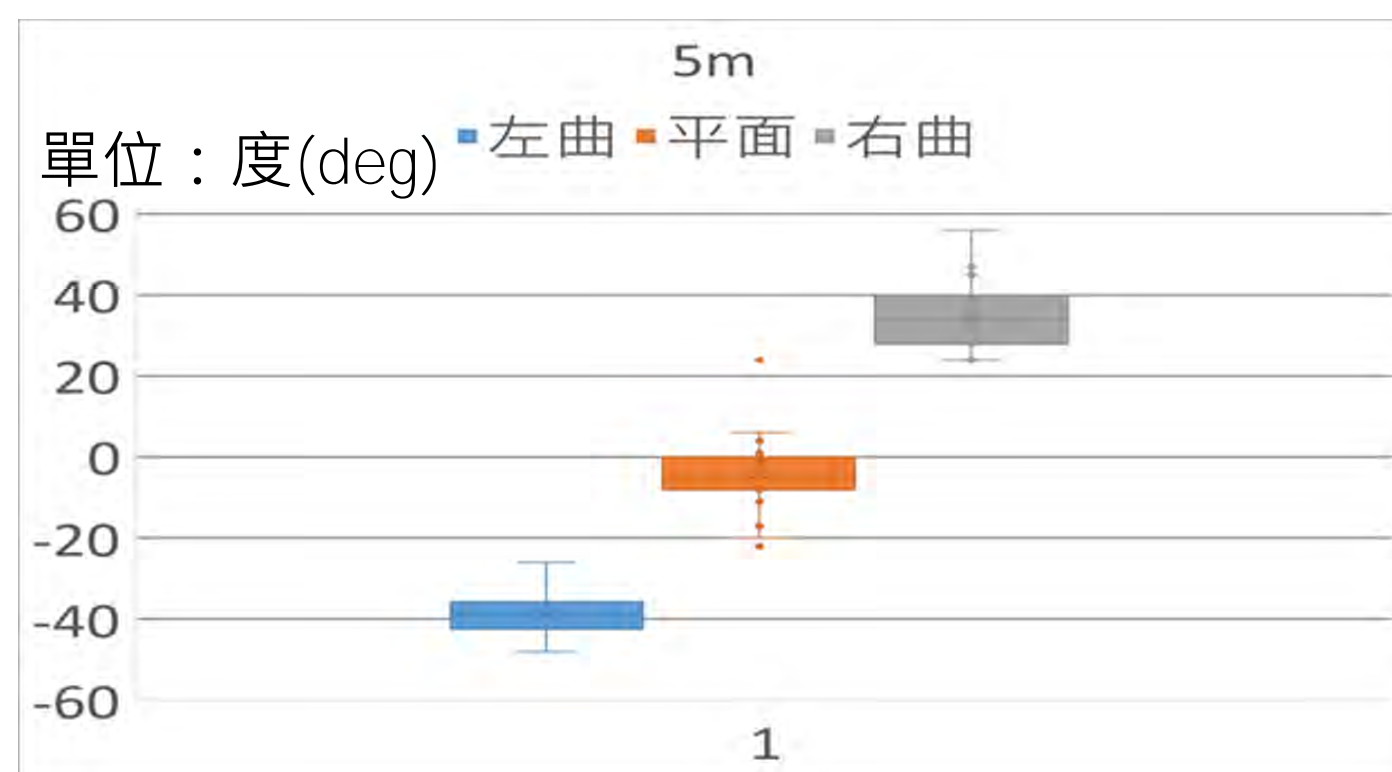
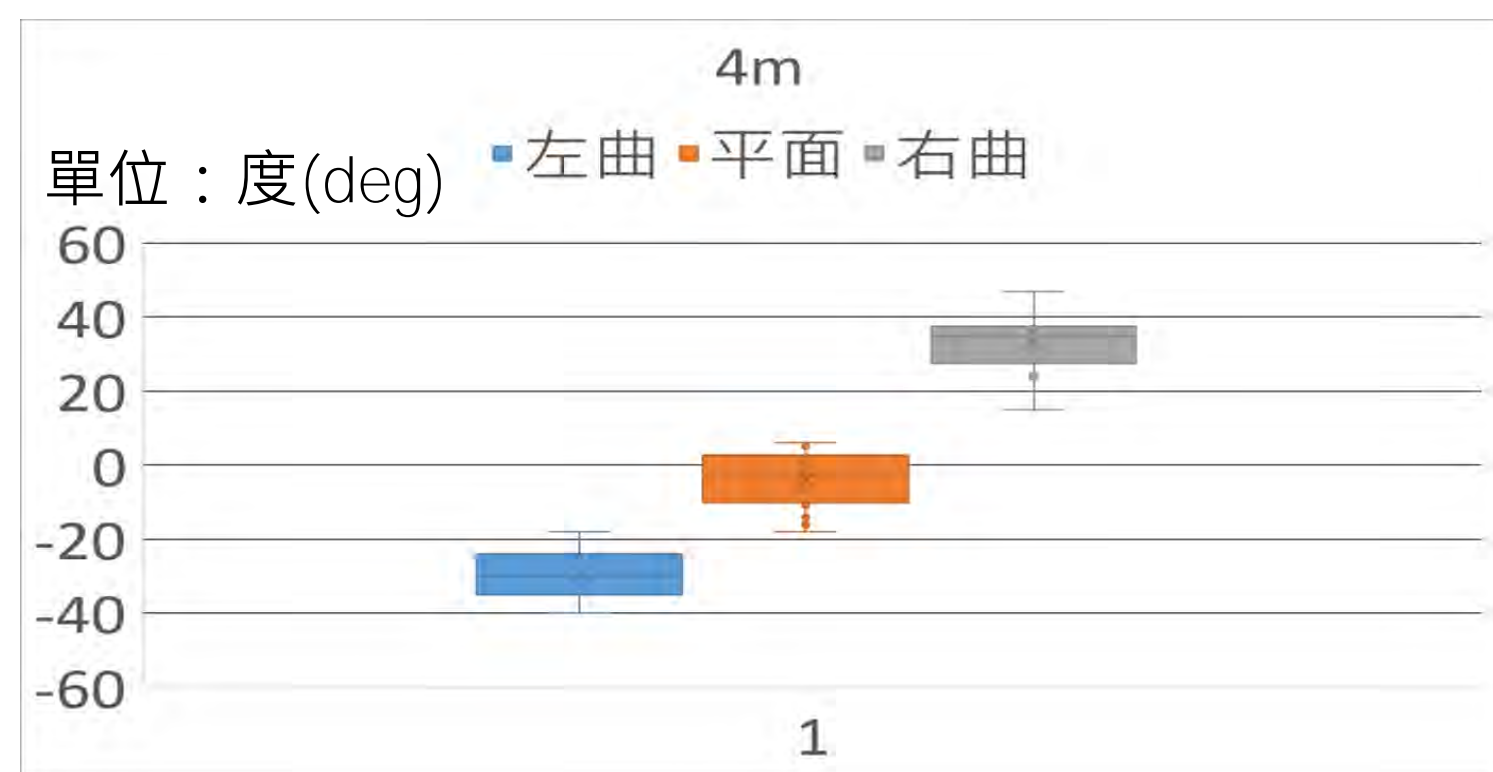
- (1)準備一重物綁在一條線上，置放水平儀確認水平。
- (2)在珍珠板上對落點進行垂吊(圖5)，並畫上鉛直線。
- (3)對撲克牌落點留下的痕跡做直線標示，並用量角器測量(圖6)。

結果討論：

- (1)4m到6m中間會愈來愈大表示角度愈來愈不相同。
- (2)左右的角具有對稱性，代表同曲面相同所造成的偏轉角相同



實驗結果：



實驗六「橡皮筋疲乏程度測定」

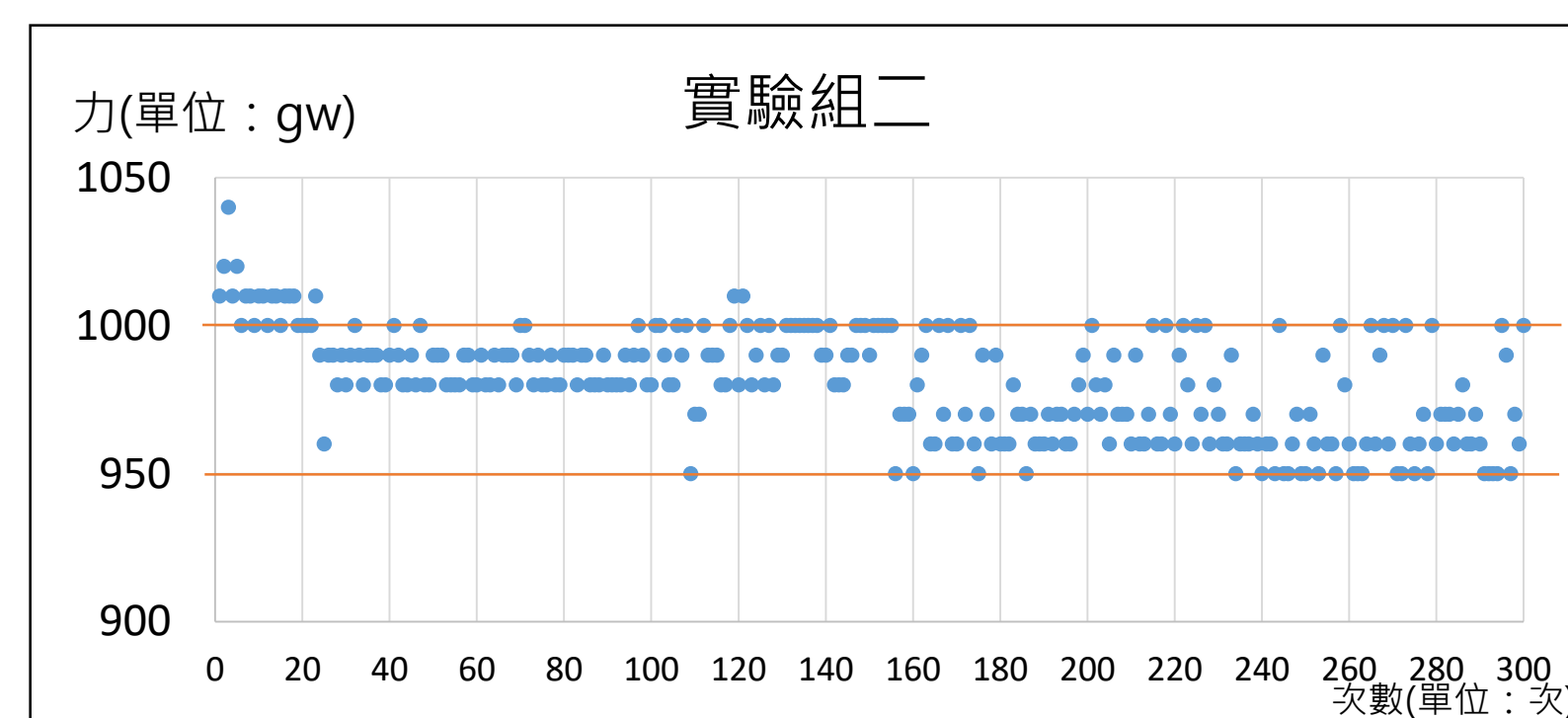
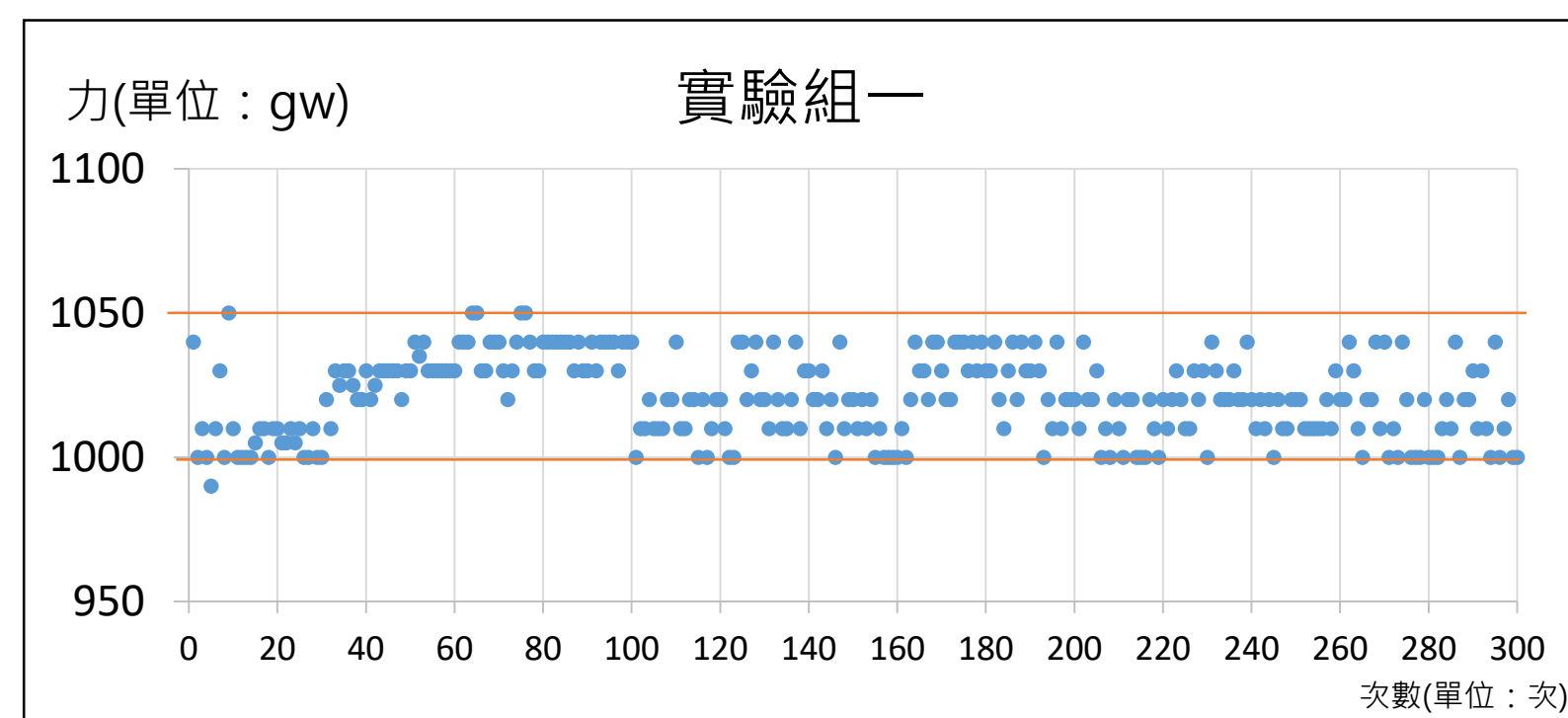
實驗步驟：

- 1.架設實驗裝置(如圖七)
- 2.把兩橡皮筋套在釘子
- 3.將橡皮筋與線段接點伸長至23.9cm紀錄彈簧秤讀數
- 4.每次測試間隔30秒，重覆動作直至做完300次

結果討論：

兩實驗組的拉力變化大部分都在彈簧秤的刻度範圍內浮動(單位：50gw)，並沒有太明顯的變化。

實驗結果：



實驗七「橡皮筋拉力對牌飛行軌跡之影響」

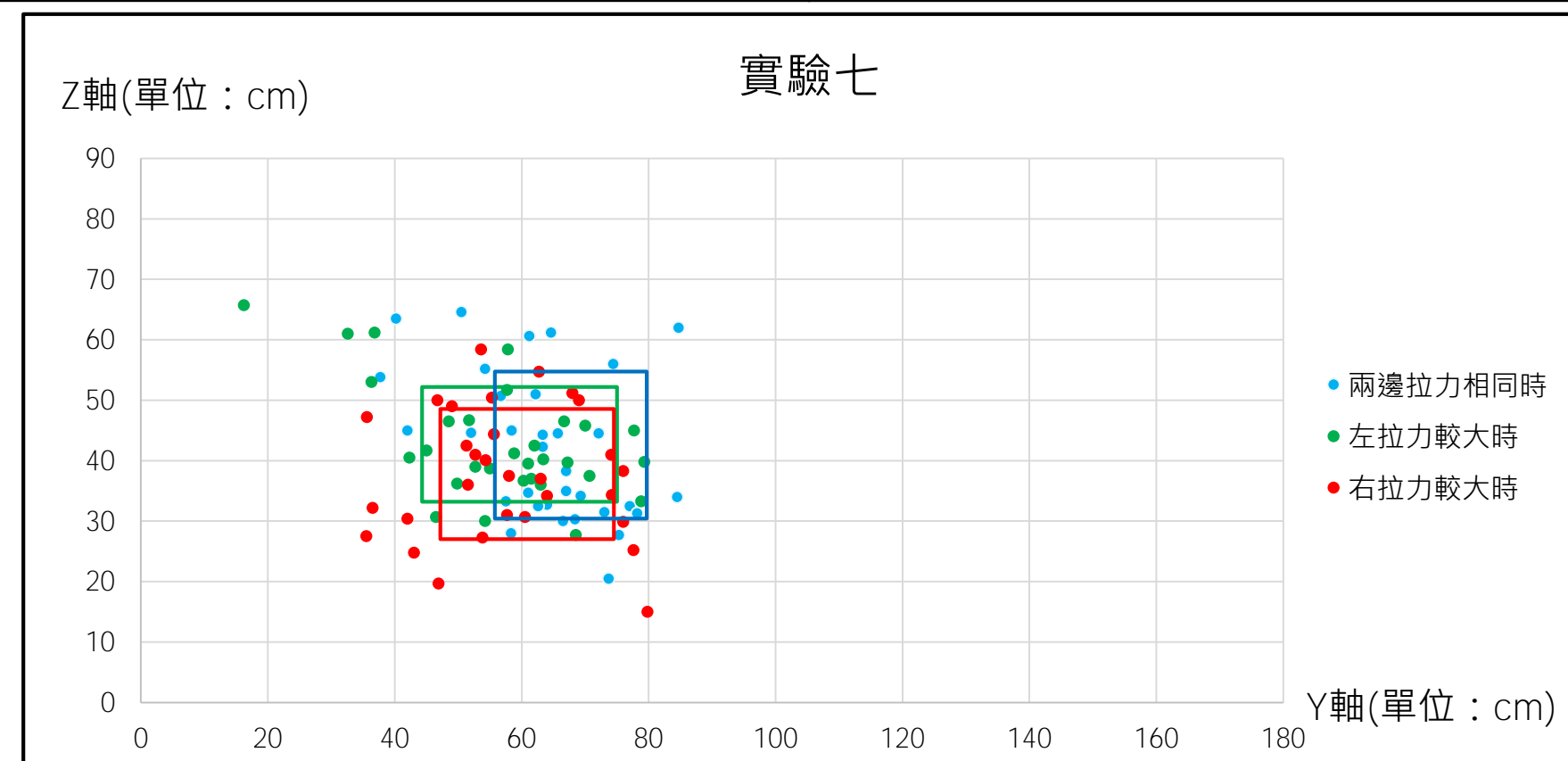
實驗步驟：

- 1.製作左曲牌，詳細部分參見實驗2。
- 2.用拉力兩邊相同的實驗組發射左曲撲克牌30發。
- 3.用兩邊拉力不同的實驗組發射，因為兩邊拉力不同，所以交換位置進行實驗各30發。

結果討論：

和兩邊橡皮筋拉力相同時比較，拉力不同時，Y軸的落點平均值偏左、標準差變大。

實驗結果：



伍、未來展望

未來我們希望這項實驗可以進到風洞做實驗，找出撲克牌飛行時的升力係數以及拖曳力係數，還有用其他精密實驗儀器測出撲克牌在飛行時的其他物理量，並利用高速攝影機去觀察撲克牌在空中發生人類肉眼無法觀察到的現象，嘗試把定性轉換到定量描述牌飛行軌跡。

陸、參考資料及其他

- 一、David Halliday Resnick, Jearl Walker Robert. (2011.11). Principles of Physics Extended, 9/E. 新北市: 全華出版社。
- 二、Hummel A. Sarah. (2003). Frisbee Flight Simulation and Throw Biomechanics. Rolla University of Missouri。
- 三、Morrison R.V. (2005年3月6日). The Physics of Frisbees. Electronic Journal of Classical Mechanics and Relativity, Mount Allison University。
- 四、Yunus A. Cengel M. Cimbala John. (2010). Fluid Mechanics Fundamentals and Applications second edition in SI units. New York: McGrawHill。
- 五、張慧貞. (2016年5月5日). 「觀念物理」: 白努力定理的誤解與錯誤應用. 物理雙月刊。
- 六、林世偉等. (2011). 筋疲力盡. 宜蘭縣立國華國民中學。