

中華民國第 56 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國中組 物理科

最佳(鄉土)教材獎

030110

粒“力”皆辛苦~探討顆粒長短對擊球的影響

學校名稱：高雄市立明華國民中學

作者：  國二 胡睿庭  國二 詹允倫  國二 黃銘智	指導老師：  吳德儀  楊俊宏
---	-----------------------------

關鍵詞：球路軌跡、回復係數、桌球拍皮顆粒

## 摘要

因為在桌球課堂中，發現同學們準備的不同桌球拍影響了球的彈跳軌跡，因而引起我們想要一探究竟的好奇心。在考量經費有限及架設的需求，動手自行設計發球機，運用實驗室器材設計固定板及自由釋放裝置以利穩定發射。並藉由改變兩側輪胎轉速差來製造穩定直球及旋球。透過噴覆石墨噴漆使乒乓球及拍顆粒面具有導電性，進行錄音取得接觸時間，同時搭配慢動作錄影分析速度來分析不同長短拍面對球的彈跳影響。發現，高速球之下各拍面與球的接觸時間有明顯差異，且其下方的海綿厚度影響頗大。斜向入射時，反彈後角度較入射前減少，且長顆粒拍面的反射軌跡改變最大。更在右旋球垂直向下時，展現出馬格努斯效應。讓我們對於各種拍面有了基本認知。

## 壹、研究動機

在上桌球課時我們發現有些同學的桌球拍面有所異同，打出來的球軌跡都會產生不同的變化，因此渾身好奇心的我們想知道不同長短的顆粒拍面是否會造成飛行軌跡的變化?或造成特殊的效果?這樣應該就能更早知悉對手的回擊球路。再來我們詢問了校內的體育老師和上網查了資料也沒有相關的資訊，只知道顆粒面會對軌跡產生變化，但我們想更加知悉什麼擊打角度時會打出特定的變化球。所以我們自行製作一台發球機，採用不同的入射方式來探討拍皮對於彈跳的影響。

## 貳、研究目的

### 一、 分析不同拍皮物理性質的差異

- (一) 顆粒型態差異
- (二) 摩擦力差異
- (三) 接觸時間與回復係數

### 二、 探討不同拍皮對直球彈跳的差異

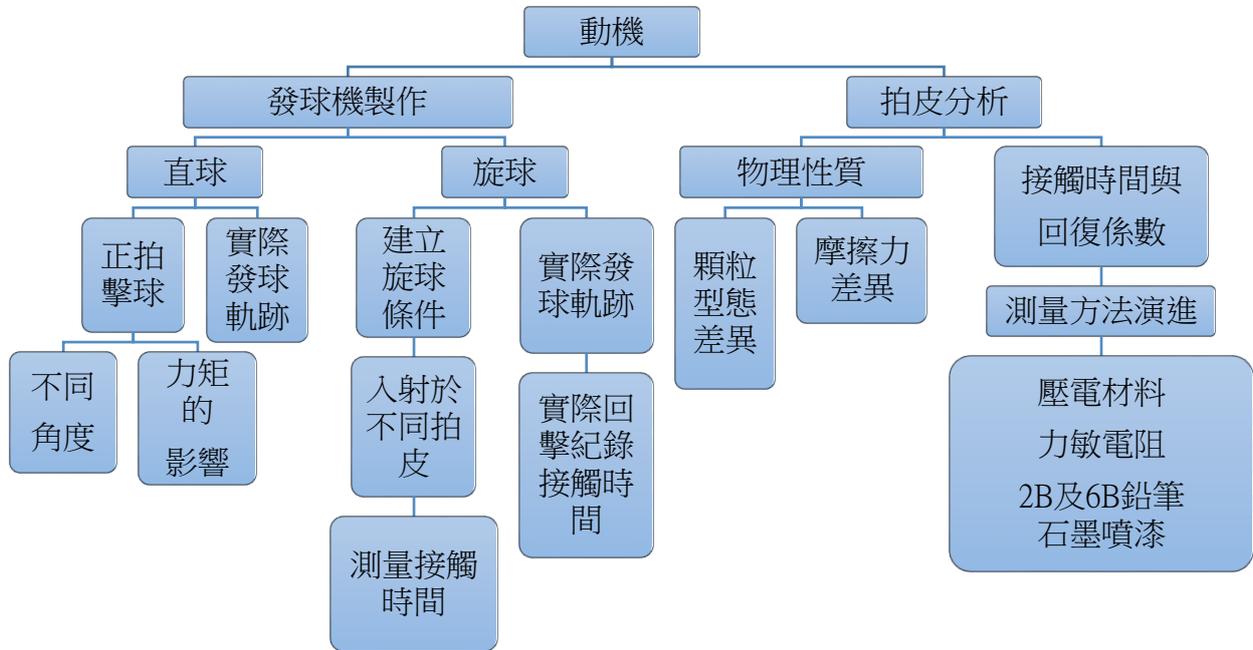
- (一) 球速的影響
- (二) 力矩的影響
- (三) 20/40/60 度斜向入射對反射的影響

### 三、 探討不同拍皮對垂直旋球彈跳的差異

(一) 旋球的條件

(二) 軌跡的差異

### 參、流程圖

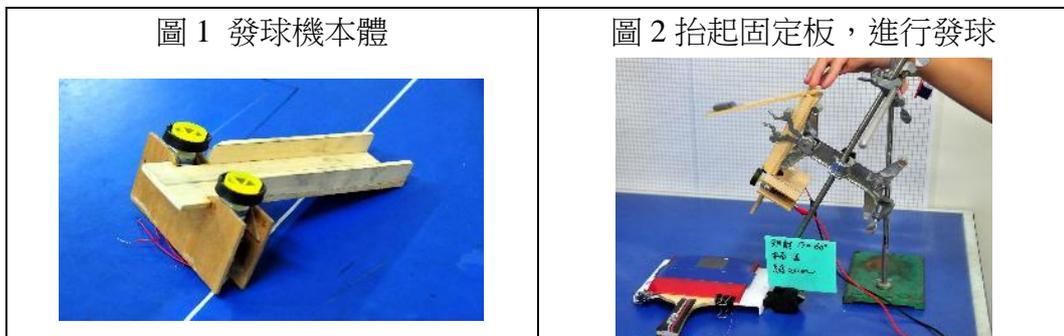


### 肆、儀器設計與軟體設備

#### 一、發球機裝置

##### (一) 發球機及固定器製作

1. 將兩個四驅車高速馬達固定在薄木板兩側，並間隔適當寬度以利桌球發射。
2. 利用木條組成口字型作為進球軌道。
3. 另取一細長木條，在一端黏上鐵塊，另一端黏上竹籤，作為固定板，利用鐵塊重量夾住乒乓球，穩定發球前狀態。



##### (二) 架設方式(改變發球方位與角度)

1. 使用滴定管夾固定發球機的進球軌道。

2. 再利用鐵架及萬用夾將發球機調整至實驗角度，並透過手機的水平儀模式校正。

圖 3 調整為入射角度=60 度



圖 4 利用手機的水平儀進行校正



### (三) 發球測試

#### 1. 直球發球

- (1)兩側馬達並聯後接上 3 伏特電壓，讓車輪產生左側順時針、右側逆時針的旋轉方式，對球產生同方向的作用力，以利直球的發射。
- (2)利用 iphone 6plus 俯拍進行慢動作錄影(規格為 240fps)
- (3)透過 tracker 分析，得知速率約為 520cm/s~560cm/s。
- (4)進行落點測試，確認裝置穩定性。每次發射 10 球，均可得到 6 成以上的準確度，最好情況下有 9 成的準確度。

圖 5 俯拍進行慢動作錄影

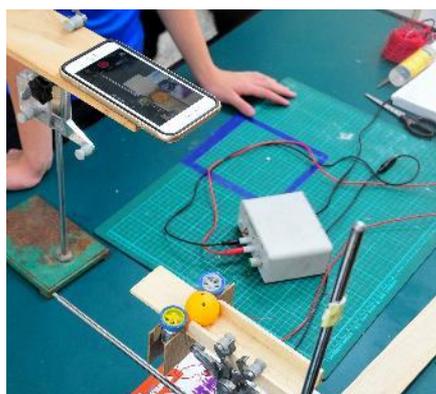
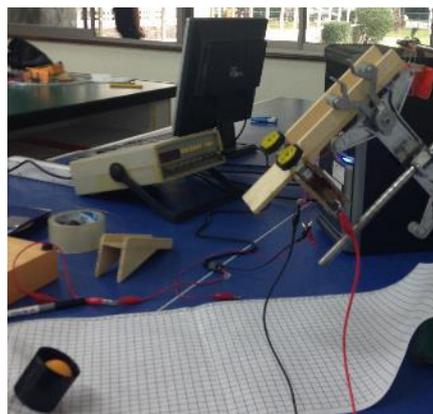


圖 6 進行落點測試，能發射直球進入黑色瓶蓋中



#### 2. 旋球發球

- (1)右馬達為靜止狀態，左馬達接上 3 伏特電壓產生逆時針旋轉，可發出右旋球。
- (2)進行落點測試，確認裝置穩定性，每次發射 10 球，均可得到 6 成以上的準確度，最好情況下有 8 成的準確度。

## 二、 摩擦力測量裝置

- (一) 利用實驗室現有的摩擦力測量裝置相疊至適當高度，並將測試拍皮置於上方。
- (二) 將 4 顆乒乓球黏合並在在一端綁上棉線並掛上 100 公克砝碼。
- (三) 利用文件夾綁上棉線拖曳測試拍皮，並將棉線繞在顯微鏡的粗調節輪上達到穩定施力
- (四) 將乒乓置於測試拍皮上，確認棉線水水平後再透過定滑輪使 100 公克砝碼靜置於電子天平上。
- (五) 轉動粗調節輪使測試拍皮和乒乓球組間產生持續的相對運動，過程中記錄電子天平讀數的減少量，即為測試拍皮與乒乓球間的動摩擦力。
- (六) 再施力將靜止的乒乓球組移動至拍皮前方另一處，待其靜止時，記錄下電子天平讀數的減少量。多次測量後，取最大值作為測試拍皮與乒乓球間的最大靜摩擦力。



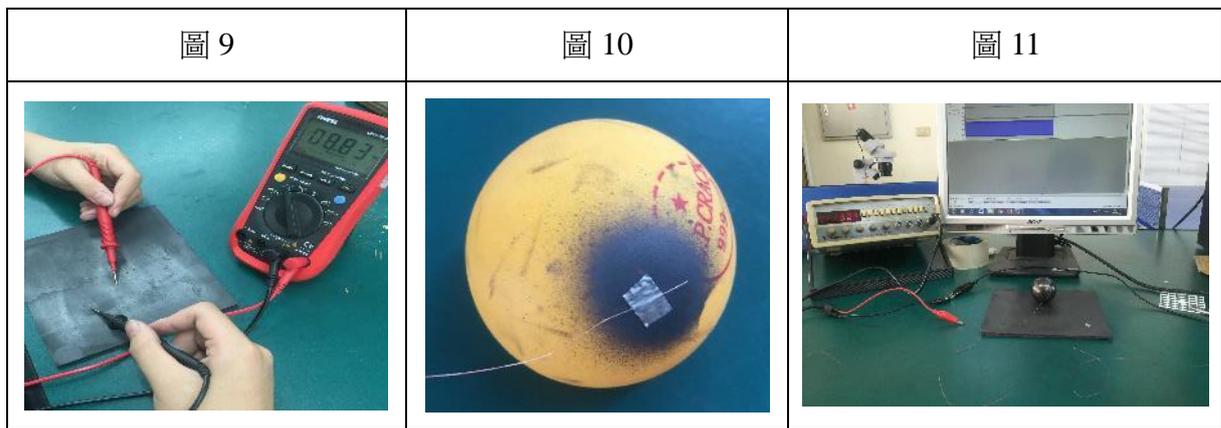
## 三、 導電層處理

### (一) 拍面導電層製作步驟

1. 先用膠帶重覆黏貼拍皮表面去除灰塵顆粒。
2. 依序噴覆石墨噴漆第一層/乾燥/第二層/乾燥/第三層/乾燥，再利用拭鏡紙輕輕擦拭表面後，可得到 10K 歐姆以下的電阻值。

### (二) 乒乓球導電層製作步驟

1. 乒乓球頂上噴覆上小區域石墨噴漆後利用鋁箔膠帶黏上細漆包線。
2. 乒乓球以懸吊方式噴覆上石墨噴漆，利用拭淨紙擦拭表面後可得小於 10K 的電阻值。



#### 四、錄音設備

- (一) 將訊號產生器、乒乓球、測試拍面、3.5mm 音源線連接成通路。
- (二) 調整訊號產生器產生 60K 赫茲，當乒乓球碰觸拍面時，錄音軟體 audacity 即可接收電訊完成錄音。

#### 伍、研究過程與方法

##### 一、分析不同拍皮物理性質的差異

##### (一) 顆粒型態差異

1. 利用解剖顯微鏡觀察四種拍面(平面、短顆、中顆、長顆)表面的樣貌。
2. 搭配電子目鏡軟體拍攝照片，並量測拍面厚度及顆粒長度及寬度。

##### (二) 摩擦力差異

1. 使用自行設計的摩擦力裝置。轉動顯微鏡旋鈕穩定施力拉動測試拍皮，紀錄下拍皮和桌球間產生相對運動時電子天平的數據。
2. 更換測試拍皮，重複步驟(1)~(2)。

##### (三) 測量方法演進

1. 壓電片測試
2. 力敏電阻測試
3. 2B 鉛筆及 6B 畫筆測試
4. 石墨噴漆測試

## 二、 探討不同拍皮對直球彈跳的差異

### (一) 球速的影響:

1. 分別進行高度 10cm 的石墨球自由落下於四種石墨拍面中央，透過 audacity 紀錄接觸時間並同時進行錄影。
2. 架設發球機於拍面上方 10cm 處，垂直入射直球於四種石墨拍面中央，透過 audacity 紀錄接觸時間並同時進行錄影。

### (二) 力矩的影響:

將石墨拍皮黏貼於一端固定的木板上，重複上述步驟入射於拍皮的最遠端(定義為 1 區)。

### (三) 20/40/60 度斜向入射對於反彈的影響

1. 固定發射機至測試拍皮上方 5cm 處。再分別調整發射機の入射方向為 20、40 及 60 度斜向入射於拍面 1 區間，透過 audacity 紀錄接觸時間並同時進行錄影。

## 三、 探討不同拍皮對垂直旋球彈跳的差異

### (一) 建立旋球條件

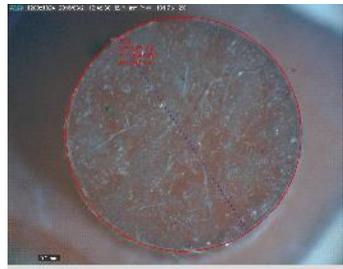
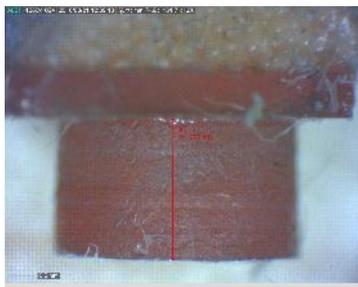
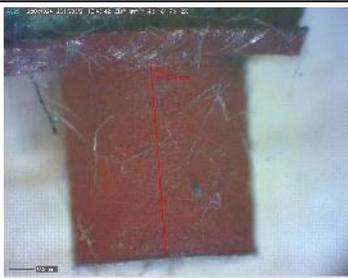
- ### (二) 軌跡的差異:垂直向下入射右旋球於四種拍皮上，透過 audacity 紀錄接觸時間並同時進行錄影。

## 陸、 研究結果

### 一、 分析不同拍皮物理性質的差異

#### (一) 顆粒型態差異

## 1. 解剖顯微鏡下測量結果

	顆粒直徑	顆粒高度	尺寸
平面	/		總厚度=3.9mm
短顆			總厚度=3.8mm 顆粒直徑=2.031mm 顆粒高度=0.894mm
中顆			總厚度=3.8mm 顆粒直徑=2.018mm 顆粒高度=1.124mm
長顆			總厚度=3.5mm 顆粒直徑=1.548mm 顆粒高度=1.621mm

<表 1>顆粒拍面相關數值

## (二) 摩擦力差異

### 1. 數據分析

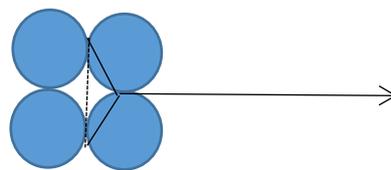
	平面	短顆	中顆	長顆
乒乓球組總重量=10.7gw				
最大靜摩擦力	16.8gw	7.1gw	7.5gw	9.4gw
靜摩擦係數	1.57	0.66	0.70	0.88
動摩擦力	10.4gw	3.6gw	5.4gw	7.0gw
動摩擦係數	0.97	0.34	0.50	0.65

得知拍面最大靜摩擦力大小依序為平面>長顆>中顆>短顆，其中平面拍的靜摩擦係數高達 1.57，動摩擦係數也有 0.97

2. 過程中，我們發現繩子纏繞的方式會造成數據的差異，分析原因為

(1)有捆繞：減少數值 = 繩子兩側張力的合力

≠ 靜摩擦力



(2)沒有捆繞：減少數值 = 繩子張力

= 靜摩擦力(取最大數據近似於最大靜摩擦力)

- 我們在實驗剛開始時，想要比較各拍面表面的摩擦程度。首先，採用國中理化課本方式，利用彈簧秤拉動乒乓球組，但無法肉眼辨識出瞬間移動時的彈簧刻度。故自行設計出此裝置，也透過此裝置得到各拍面的摩擦係數。
- 而之後的實驗多為探討拍面對球的彈跳差異，沒有在使用此裝置。但仍可作為理化課中測量摩擦力的另一種方法選擇。

### (三) 測量方法演進

#### 1. 壓電片測試

- (1)在一次的理化課中，老師介紹了科學玩具，讓我們認識到蜂鳴器是封裝上外殼的壓電片，也對壓電片的工作原理有了基本認識。因此挑選了市面上常見的尺寸 27mm 進行試驗。
- (2)以手指施加壓力在壓電片上發現電壓值會有正、負值的變化，便加入橋式整流器進行整流，發現整流後的電壓值變小。
- (3)乒乓球自由落下撞擊壓電片，因力道太小且反應時間過短，無法測量到電壓值，故不採用。

#### 2. 力敏電阻測試

- (1)透過網路查詢到力敏電阻(FSR)，其工作原理與應用介紹自參考網站摘要如下：

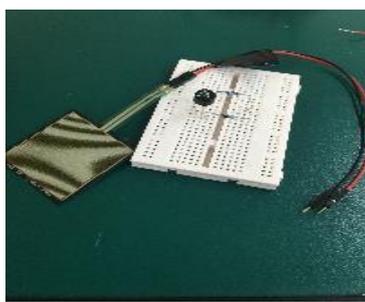
Force Sensing Resistor 是著名 Interlink Electronics 公司生產的一款重量輕，體積小，感測精度高，超薄型電阻式壓力感測器。這是一塊 1.75x1.5" (約 45x38mm) 的方形壓力感測器，隨著施加在感應區域的力量大小變化，其所輸出的電阻值將會有相應的變化。力量越大，電阻值越小。若沒有施加任何力，電阻值將會大於 1MΩ。此感測器能夠檢測 100g-10kg 的壓力。而在 FSR 感測器背面有粘膠，只需撕下就可以粘貼在被探測部位，非常容易使用。

- (2)參考 arduino 相關書籍連接線路，並在力敏電阻上黏貼一塊略小的壓克力片，期望能達到平均施力的效果
- (3)利用 100g 砝碼置於力敏電阻的邊緣與中央，得到的數據多有變動且差異太大。
- (4)最後，透過乒乓球實際撞擊，仍因反應時間過短而無法顯示數值，亦無法採用。

圖 12 壓電片接上橋式整流器整流



圖 13 利用麵包板及 arduino 板測試力敏電阻



### 3. 2B 鉛筆及 6B 畫筆測試

- (1)參考 2014 科展作品，利用 2B 鉛筆重複塗在乒乓球表面及 6B 畫筆的石墨粉刮下塗抹在平面拍皮上，均可得到小於 10K 的電阻值。
- (2)但顆粒拍皮上則無法均勻塗抹，也難克服顆粒間空隙問題，仍無法採用。

### 4. 石墨噴漆測試

- (1)嘗試將石墨粉與膠水混合以便塗覆於顆粒拍面上，過程中在網路上查詢到石墨噴漆便具備了可噴覆在絕緣體表面上達到導電的效果。
- (2)測試拍面噴覆製作步驟：利用膠帶黏貼拍皮清除灰塵，進行石墨漆噴覆步驟後於邊緣黏上極細漆包線。
- (3)將函數產生器、乒乓球、測試拍面、3.5mm 音源線連接成通路，透過電腦以 audacity 錄音，偵測乒乓球與拍面的接觸時間。

圖 14 黏貼漆包線於拍面角落

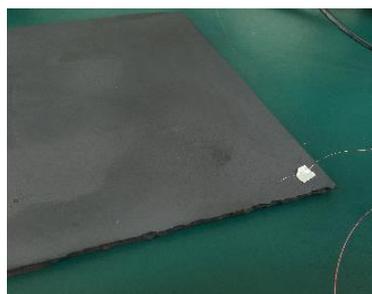


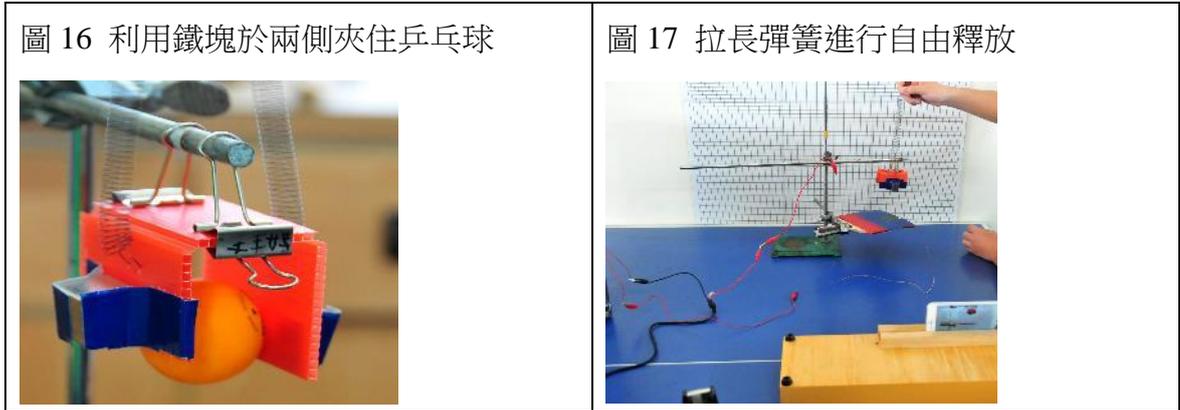
圖 15 連接線路，測試錄音效果



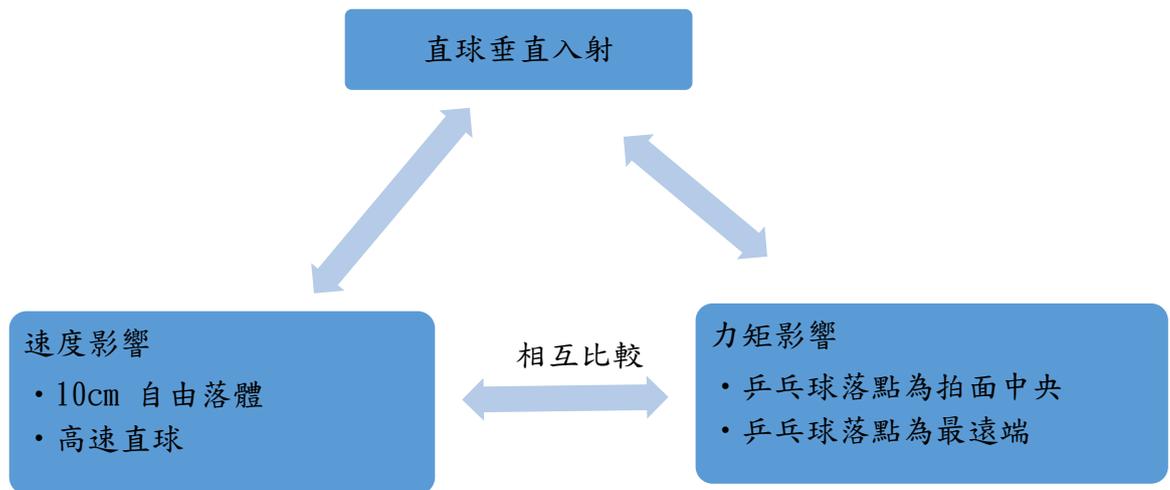
二、 探討不同拍皮對直球彈跳的差

(一) 自由釋放裝置:

將兩個鐵塊分別黏在珍珠板兩側，利用側向力產生摩擦力使乒乓球靜止。再於珍珠板兩側掛上彈簧，藉由拉動彈簧進而拉開兩側珍珠板達到靜止釋放乒乓球，避免用手釋放時產生的不穩定性。



(二) 本項實驗流程圖



(三) 10cm 自由落體於拍面中央數據

平面拍面；10cm 自由落體；無力矩										
彈跳次數	接觸時間	滯空時間	入射速度	反射速度	速度變化量	平均作用力	轉換為公克重	入射高度	反彈高度	回復係數
次	秒	秒	cm/s	cm/s	cm/s	dyne	gw	cm	cm	
0			140							
1	0.0016	0.2205	140.00	108.07	248.07	416744.30	416.74	10.000	5.958	0.60
2	0.0016	0.1844	108.07	90.38	198.44	324697.14	324.70	5.958	4.167	0.70
3	0.0017	0.1529	90.38	74.90	165.28	263613.05	263.61	4.167	2.862	0.69
4	0.0018	0.1298	74.90	63.59	138.49	207464.14	207.46	2.862	2.063	0.72
5	0.0019	0.1107	63.59	54.27	117.86	168539.04	168.54	2.063	1.502	0.73

平面拍面；10cm 自由落體；無力矩										
彈跳次數	接觸時間	滯空時間	入射速度	反射速度	速度變化量	平均作用力	轉換為公克重	入射高度	反彈高度	回復係數
次	秒	秒	cm/s	cm/s	cm/s	dyne	gw	cm	cm	
6	0.0020	0.0941	54.27	46.09	100.36	135870.32	135.87	1.502	1.084	0.72
7	0.0020	0.0812	46.09	39.77	85.86	114080.44	114.08	1.084	0.807	0.74
8	0.0022	0.0703	39.77	34.44	74.21	92937.43	92.94	0.807	0.605	0.75
9	0.0022	0.0611	34.44	29.96	64.40	78618.27	78.62	0.605	0.458	0.76
10	0.0023	0.0531	29.96	26.02	55.98	68015.43	68.02	0.458	0.345	0.75
11	0.0022	0.0461	26.02	22.59	48.61	62396.34	62.40	0.345	0.260	0.75
12	0.0022	0.0398	22.59	19.50	42.09	52281.02	52.28	0.260	0.194	0.75
13	0.0026	0.0344	19.50	16.87	36.37	40207.54	40.21	0.194	0.145	0.75
14	0.0028	0.0302	16.87	14.79	31.66	32920.17	32.92	0.145	0.112	0.77
15	0.0028	0.0257	14.79	12.58	27.37	28598.67	28.60	0.112	0.081	0.72
16	0.0029	0.0220	12.58	10.79	23.37	24098.93	24.10	0.081	0.059	0.74
17	0.0029	0.0188	10.79	9.23	20.02	20596.21	20.60	0.059	0.043	0.73
18	0.0031	0.0161	9.23	7.91	17.14	17329.25	17.33	0.043	0.032	0.73
19	0.0032	0.0137	7.91	6.71	14.62	14716.33	14.72	0.032	0.023	0.72
20	0.0035	0.0114	6.71	5.60	12.31	12000.52	12.00	0.023	0.016	0.70
21	0.0036	0.0096	5.60	4.69	10.29	10207.20	10.21	0.016	0.011	0.70
22	0.0037	0.0078	4.69	3.82	8.51	8774.96	8.77	0.011	0.007	0.66
23	0.0039	0.0063	3.82	3.08	6.90	7231.30	7.23	0.007	0.005	0.65
24	0.0042	0.0048	3.08	2.37	5.44	5999.49	6.00	0.005	0.003	0.59
25	0.0046	0.0035	2.37	1.71	4.08	4944.53	4.94	0.003	0.001	0.52
26	0.0052	0.0020	1.71	1.00	2.71	3986.62	3.99	0.001	0.001	0.34

短顆拍面；10cm 自由落體；無力矩										
彈跳次數	接觸時間	滯空時間	入射速度	反射速度	速度變化量	平均作用力	轉換為公克重	入射高度	反彈高度	回復係數
次	秒	秒	cm/s	cm/s	cm/s	dyne	gw	cm	cm	
0			140							
1	0.00150	0.20961	140.00	102.71	242.71	432361.15	432.36	10.000	5.382	0.54
2	0.00150	0.17515	102.71	85.82	188.53	336429.55	336.43	5.382	3.758	0.70
3	0.00156	0.14755	85.82	72.30	158.12	270407.92	270.41	3.758	2.667	0.71
4	0.00156	0.12372	72.30	60.62	132.92	227726.79	227.73	2.667	1.875	0.70
5	0.00175	0.10404	60.62	50.98	111.60	171975.36	171.98	1.875	1.326	0.71
6	0.00179	0.08649	50.98	42.38	93.36	140698.23	140.70	1.326	0.916	0.69
7	0.00202	0.07211	42.38	35.33	77.71	104638.67	104.64	0.916	0.637	0.70
8	0.00209	0.05982	35.33	29.31	64.64	84713.01	84.71	0.637	0.438	0.69
9	0.00193	0.04964	29.31	24.32	53.63	76336.52	76.34	0.438	0.302	0.69

短顆拍面；10cm 自由落體；無力矩										
彈跳次數	接觸時間	滯空時間	入射速度	反射速度	速度變化量	平均作用力	轉換為公克重	入射高度	反彈高度	回復係數
次	秒	秒	cm/s	cm/s	cm/s	dyne	gw	cm	cm	
10	0.00202	0.04143	24.32	20.30	44.62	61189.99	61.19	0.302	0.210	0.70
11	0.00227	0.03474	20.30	17.02	37.32	46213.62	46.21	0.210	0.148	0.70
12	0.00238	0.02914	17.02	14.28	31.30	37433.90	37.43	0.148	0.104	0.70
13	0.00249	0.02444	14.28	11.98	26.26	30491.14	30.49	0.104	0.073	0.70
14	0.00256	0.02057	11.98	10.08	22.06	25406.93	25.41	0.073	0.052	0.71
15	0.00252	0.01698	10.08	8.32	18.40	21969.22	21.97	0.052	0.035	0.68
16	0.00283	0.01358	8.32	6.66	14.98	16600.02	16.60	0.035	0.023	0.64
17	0.00313	0.01057	6.66	5.18	11.83	12618.03	12.62	0.023	0.014	0.61
18	0.00347	0.00773	5.18	3.79	8.97	9445.95	9.45	0.014	0.007	0.54
19	0.00415	0.00524	3.79	2.57	6.36	6655.70	6.66	0.007	0.003	0.46
20	0.00517	0.00193	2.57	0.94	3.51	4396.68	4.40	0.003	0.001	0.14

中顆拍面；10cm 自由落體；無力矩										
彈跳次數	接觸時間	滯空時間	入射速度	反射速度	速度變化量	平均作用力	轉換為公克重	入射高度	反彈高度	回復係數
次	秒	秒	cm/s	cm/s	cm/s	dyne	gw	cm	cm	
0			140							
1	0.0015	0.2159	140.00	105.81	245.81	431353.95	431.35	10.000	5.712	0.57
2	0.0016	0.1778	105.81	87.13	192.94	329386.17	329.39	5.712	3.874	0.68
3	0.0017	0.1482	87.13	72.63	159.77	248269.78	248.27	3.874	2.692	0.69
4	0.0018	0.1240	72.63	60.76	133.39	195047.52	195.05	2.692	1.883	0.70
5	0.0020	0.1033	60.76	50.62	111.38	153947.74	153.95	1.883	1.307	0.69
6	0.0022	0.0841	50.62	41.23	91.86	115593.84	115.59	1.307	0.867	0.66
7	0.0024	0.0673	41.23	32.96	74.19	84390.25	84.39	0.867	0.554	0.64
8	0.0026	0.0534	32.96	26.16	59.11	63729.92	63.73	0.554	0.349	0.63
9	0.0026	0.0410	26.16	20.07	46.22	49980.86	49.98	0.349	0.205	0.59
10	0.0030	0.0310	20.07	15.19	35.26	33810.19	33.81	0.205	0.118	0.57
11	0.0035	0.0240	15.19	11.74	26.93	22773.69	22.77	0.118	0.070	0.60
12	0.0039	0.0188	11.74	9.20	20.94	16745.40	16.75	0.070	0.043	0.61
13	0.0039	0.0147	9.20	7.21	16.41	13812.70	13.81	0.043	0.027	0.61
14	0.0041	0.0112	7.21	5.50	12.71	10714.40	10.71	0.027	0.015	0.58
15	0.0045	0.0082	5.50	4.02	9.52	8161.07	8.16	0.015	0.008	0.53
16	0.0051	0.0054	4.02	2.62	6.64	6079.08	6.08	0.008	0.004	0.43
17	0.0060	0.0023	2.62	1.14	3.77	4251.86	4.25	0.004	0.001	0.19

長顆拍面；10cm 自由落體；無力矩										
彈跳次數	接觸時間	滯空時間	入射速度	反射速度	速度變化量	平均作用力	轉換為公克重	入射高度	反彈高度	回復係數
次	秒	秒	cm/s	cm/s	cm/s	dyne	gw	cm	cm	
0			140							
1	0.00150	0.19349	140.00	94.81	234.81	418372.77	418.37	10.000	4.5863	0.46
2	0.00159	0.14696	94.81	72.01	166.82	281106.70	281.11	4.586	2.6457	0.58
3	0.00184	0.11492	72.01	56.31	128.32	187737.45	187.74	2.646	1.6178	0.61
4	0.00177	0.09020	56.31	44.20	100.51	153189.71	153.19	1.618	0.9968	0.62
5	0.00188	0.07000	44.20	34.30	78.50	113125.95	113.13	0.997	0.6003	0.60
6	0.00245	0.05481	34.30	26.86	61.16	68772.41	68.77	0.600	0.3680	0.61
7	0.00236	0.04098	26.86	20.08	46.93	55336.08	55.34	0.368	0.2057	0.56
8	0.00297	0.03050	20.08	14.94	35.02	33840.30	33.84	0.206	0.1139	0.55
9	0.00345	0.02308	14.94	11.31	26.26	22783.55	22.78	0.114	0.0653	0.57
10	0.00361	0.01748	11.31	8.57	19.88	17207.17	17.21	0.065	0.0374	0.57
11	0.00381	0.01302	8.57	6.38	14.94	12992.73	12.99	0.037	0.0208	0.55
12	0.00424	0.00914	6.38	4.48	10.86	9381.14	9.38	0.021	0.0102	0.49
13	0.00478	0.00569	4.48	2.79	7.27	6621.73	6.62	0.010	0.0040	0.39
14	0.00608	0.00197	2.79	0.97	3.76	4234.66	4.23	0.004	0.0005	0.12

1. 設定 audacity 的採樣頻率為 44100 赫茲，故每一個樣本(sample)時間為 1/44100 秒，如此便可測量到極短的接觸時間。
2. 石墨噴漆確實解決了顆粒拍面上的空隙問題，透過 2~3 次的噴覆，便可於乒乓球碰撞測試拍面時形成通路，再藉由錄音軟體記錄下接觸訊號，進而得知接觸時間。
3. 各拍面的接觸時間都介於 0.0015~0.006 秒之間。
4. 定義此次碰撞後至下一次碰撞的間隔時間為滯空時間，並套用鉛直上拋模式，計算出:

$$(1) \text{入射速度} = \text{重力加速度} \times \frac{\text{第}n\text{次滯空時間}}{2}$$

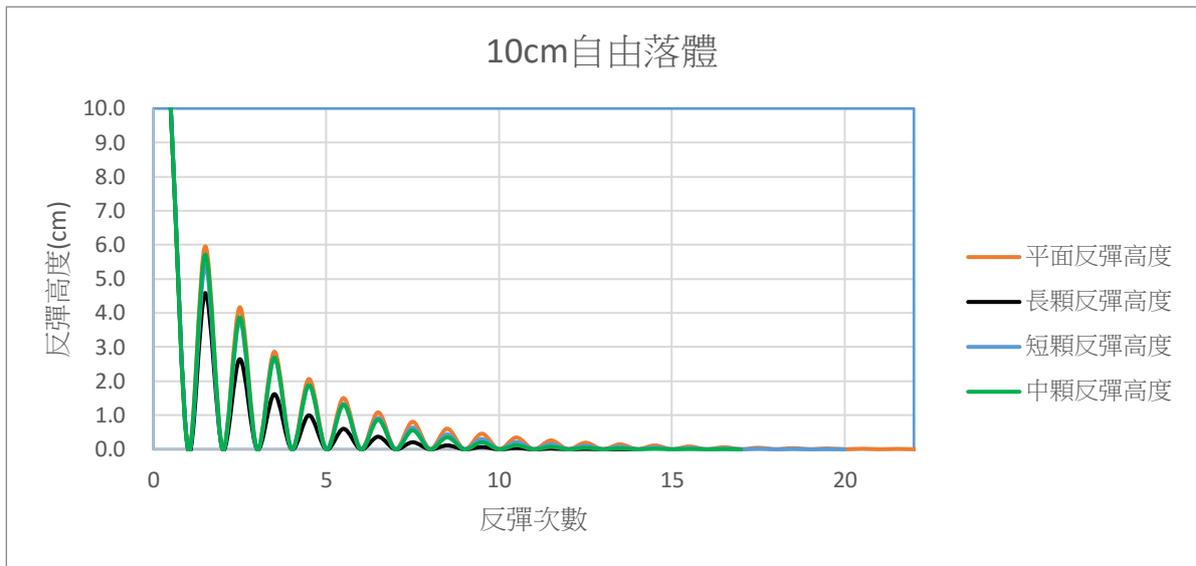
$$(2) \text{反射速度} = \text{重力加速度} \times \frac{\text{第}(n+1)\text{次滯空時間}}{2}$$

$$(3) \text{拍面給予乒乓球的正向力} - \text{乒乓球重力} = \text{乒乓球質量} \times$$

$$\text{加速度拍面給予乒乓球的正向力} = \text{乒乓球質量} \times \left( \text{重力加速度} + \frac{\text{速度變化}}{\text{接觸時間}} \right)$$

$$(4) \text{故, } F = m \times \left( 980 + \frac{\text{反射速度} + \text{入射速度}}{\text{接觸時間}} \right) [\text{達因}], \text{ 其中 } m \text{ 為乒乓球質量。}$$

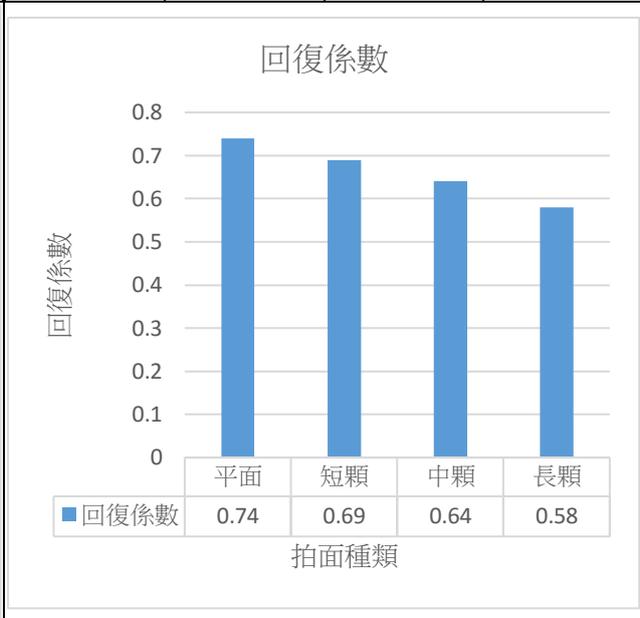
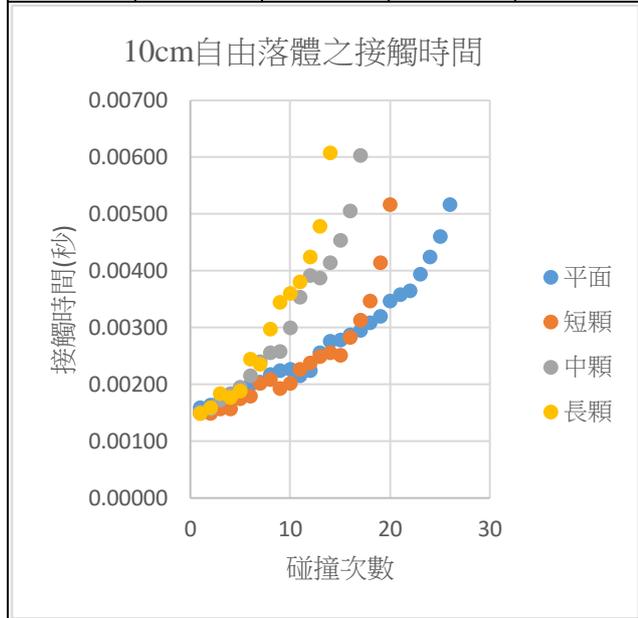
5. 10cm 自由落下碰撞拍面之彈跳軌跡比較



### 6. 接觸時間與回復係數比較

無力矩之 10cm 自由落體								
彈跳次數	平面	短顆	中顆	長顆	平面	短顆	中顆	長顆
接觸時間比較				回復係數比較				
1	0.00159	0.00150	0.00152	0.00150	0.595837	0.538243	0.571224	0.45863
2	0.00163	0.00150	0.00156	0.00159	0.699423	0.698176	0.678119	0.576873
3	0.00168	0.00156	0.00172	0.00184	0.686816	0.709704	0.69487	0.61149
4	0.00179	0.00156	0.00184	0.00177	0.720774	0.703051	0.699681	0.616107
5	0.00188	0.00175	0.00195	0.00188	0.728289	0.707128	0.694241	0.602204
6	0.00200	0.00179	0.00215	0.00245	0.721317	0.691058	0.66346	0.613028
7	0.00204	0.00202	0.00240	0.00236	0.744468	0.695173	0.638793	0.558937
8	0.00218	0.00209	0.00256	0.00297	0.75024	0.688169	0.629899	0.554024
9	0.00224	0.00193	0.00259	0.00345	0.756339	0.68856	0.588603	0.572863
10	0.00227	0.00202	0.00299	0.00361	0.75463	0.696603	0.57293	0.573605
11	0.00215	0.00227	0.00354	0.00381	0.753531	0.703138	0.597879	0.554262
12	0.00224	0.00238	0.00392	0.00424	0.745211	0.70354	0.613636	0.492931
13	0.00256	0.00249	0.00388	0.00478	0.748151	0.703771	0.614368	0.387916
14	0.00277	0.00256	0.00415	0.00608	0.768799	0.707908	0.581729	0.120141
15	0.00279	0.00252	0.00454	球已彈跳 出去	0.72333	0.681945	0.534819	球已彈跳 出去
16	0.00288	0.00283	0.00506		0.735776	0.639573	0.425018	
17	0.00295	0.00313	0.00603		0.732426	0.605227	0.19048	
18	0.00308	0.00347	球已彈跳 出去		0.734105	0.535472	球已彈跳 出去	
19	0.00320	0.00415			0.719638	0.458897		
20	0.00347	0.00517			0.696285	0.135399		
21	0.00358	球已彈跳 出去			0.701074	球已彈跳 出去		
22	0.00365	出去	0.664495	出去				

無力矩之 10cm 自由落體								
彈跳次數	平面	短顆	中顆	長顆	平面	短顆	中顆	長顆
接觸時間比較					回復係數比較			
23	0.00395				0.648399			
24	0.00424				0.591289			
25	0.00460				0.522736			
26	0.00517				0.341542			

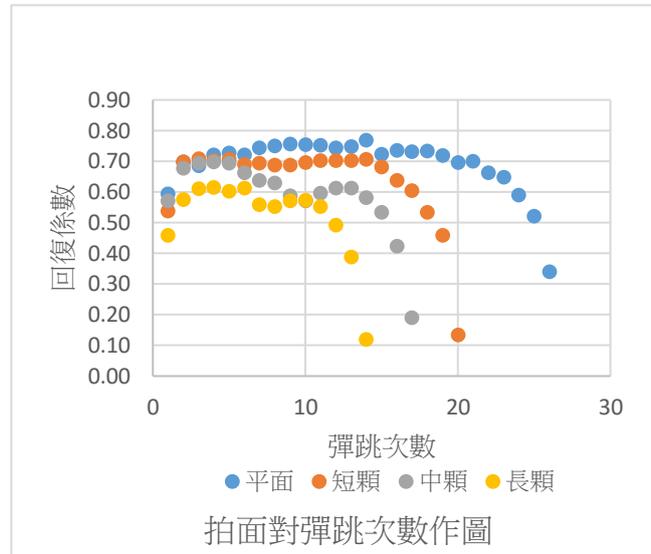


1. 各拍面的首次接觸時間均極為短暫，約為 0.0015 秒且和拍面種類關係不大。
2. 自第二次起的接觸時間便有明顯不同，以長顆影響最大，最快達到末次接觸的時間落在 0.006 秒。
3. 各拍面的接觸時間都介於 0.0015~0.006 秒之間。

1. 慢速彈跳過程中的回復係數，以平面>短顆>中顆>長顆，和預期相符。
2. 取彈跳中間過程計算各拍面的回復係數:  
平面=0.74 ，短顆=0.69  
中顆=0.64 ，長顆=0.58
3. 顆粒愈長，有助於吸收來球能量，而具有最小的回復係數。
4. 相對而言，平面在彈跳高度的表現最佳。

## 7. 彈跳次數比較

(1) 平面拍面彈跳次數約 20~26 次，短顆粒拍面彈跳次數約 17~20 次，中顆粒拍面彈跳次數約 16~17 次，長顆粒拍面彈跳次數約 9~14 次。此結果跟預測相符，考量為平面拍面較能提供穩定且較能控制的彈跳，確實得到較多次的彈跳次數。

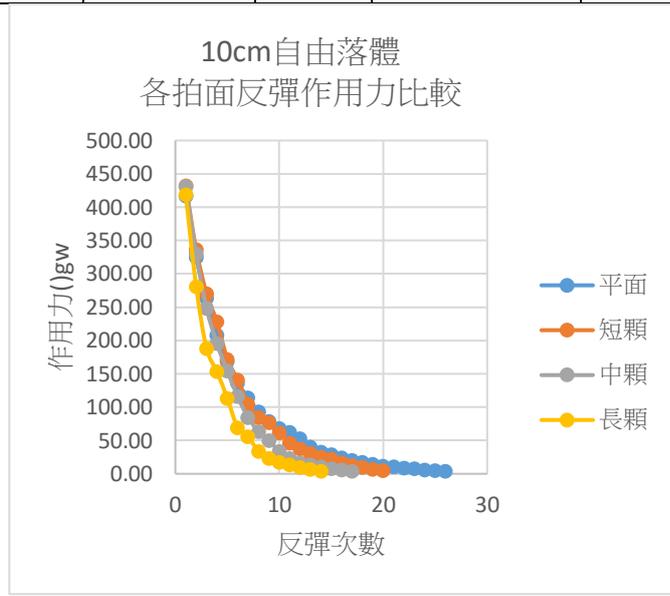


(2) 若為顆粒拍面，則乒乓球的落點是落在顆粒上或是顆粒之間也會對彈跳路徑造成影響，無法形成理想的鉛直向上彈跳。且顆粒愈長，影響愈大，得到最少的彈跳次數。

## 8. 10cm 自由落體反彈作用力分析

反彈作用力分析								
彈跳次數	平面		短顆		中顆		長顆	
	反彈作用力 (gw)	保留比率	反彈作用力 (gw)	保留比率	反彈作用力 (gw)	保留比率	反彈作用力 (gw)	保留比率
1	416.74		432.36		431.35		418.37	
2	324.70	0.78	336.43	0.78	329.39	0.76	281.11	0.67
3	263.61	0.81	270.41	0.80	248.27	0.75	187.74	0.67
4	207.46	0.79	227.73	0.84	195.05	0.79	153.19	0.82
5	168.54	0.81	171.98	0.76	153.95	0.79	113.13	0.74
6	135.87	0.81	140.70	0.82	115.59	0.75	68.77	0.61
7	114.08	0.84	104.64	0.74	84.39	0.73	55.34	0.80
8	92.94	0.81	84.71	0.81	63.73	0.76	33.84	0.61
9	78.62	0.85	76.34	0.90	49.98	0.78	22.78	0.67
10	68.02	0.87	61.19	0.80	33.81	0.68	17.21	0.76
11	62.40	0.92	46.21	0.76	22.77	0.67	12.99	0.76
12	52.28	0.84	37.43	0.81	16.75	0.74	9.38	0.72
13	40.21	0.77	30.49	0.81	13.81	0.82	6.62	0.71
14	32.92	0.82	25.41	0.83	10.71	0.78	4.23	0.64
15	28.60	0.87	21.97	0.86	8.16	0.76	球已彈跳出去	球已彈跳出去
16	24.10	0.84	16.60	0.76	6.08	0.74		
17	20.60	0.85	12.62	0.76	4.25	0.70		
18	17.33	0.84	9.45	0.75	球已彈跳出去	球已彈跳出去		
19	14.72	0.85	6.66	0.70				
20	12.00	0.82	4.40	0.66				

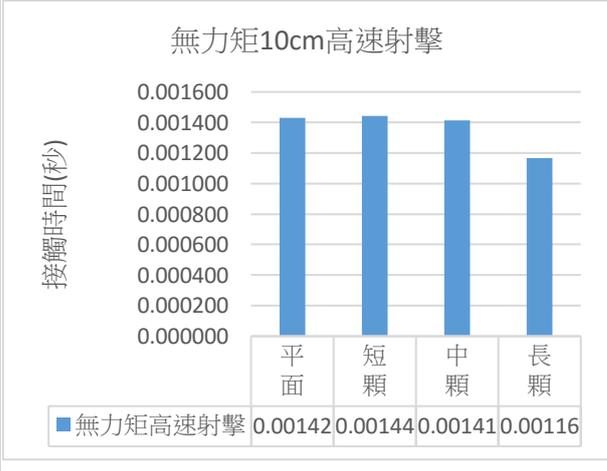
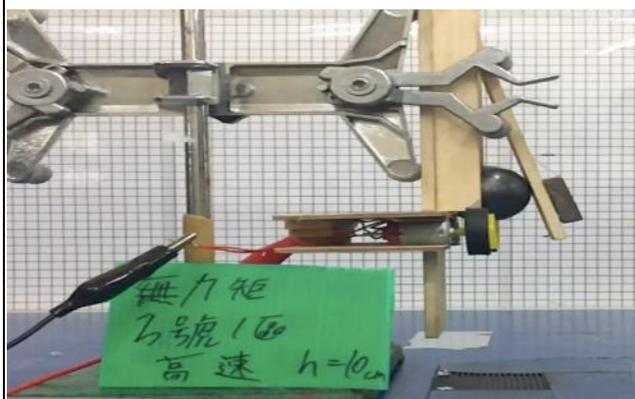
反彈作用力分析								
	平面		短顆		中顆		長顆	
彈跳次數	反彈作用力 (gw)	保留比率	反彈作用力 (gw)	保留比率	反彈作用力 (gw)	保留比率	反彈作用力 (gw)	保留比率
21	10.21	0.85	球已彈出拍面	球已彈跳出去				
22	8.77	0.86						
23	7.23	0.82						
24	6.00	0.83						
25	4.94	0.82						
26	3.99	0.81						



1. 各拍面給乒乓球的首次作用力都在 430gw 左右。
2. 就顆粒拍面探討，短顆與中顆的首次反彈作用力相近，但仍以短顆衰減較少，以保留 8 成的比例衰減，中顆則為 7~8 成的保留比例。而長顆的反彈作用力為 6~7 成的比例衰減。
3. 各種拍面的最後反彈作用力均為 4gw 左右，約為乒乓球重量 2.65gw 的 1.5 倍。

(四) 垂直高速射擊各種拍面的接觸時間比較

圖 18 高度 10cm 垂直高速入射於長顆拍面



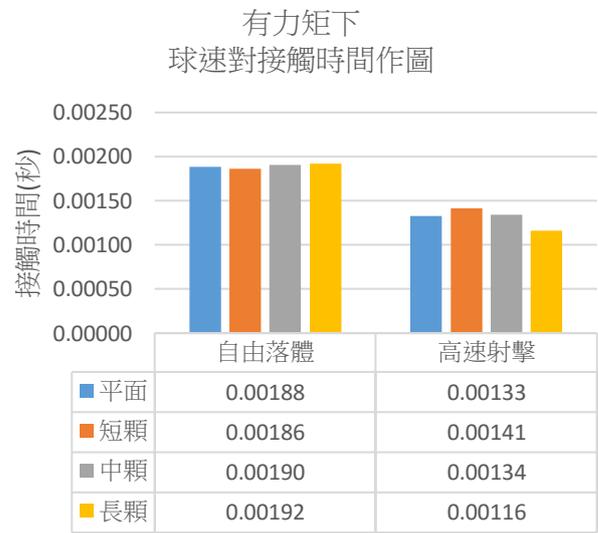
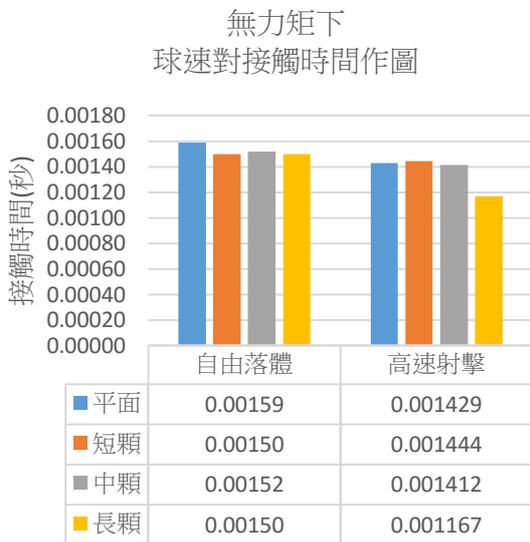
1. 高速射擊時，顆粒拍面呈現結果為顆粒愈長接觸時間愈短。
2. 我們試著推測原因為在總厚度(接近 4mm)相同下，短顆粒膠皮搭配最厚的海綿，能展現出最強的彈性，延長接觸時間。因此，我們推論海綿的彈性影響會在高速球時更為顯著。

(五) 力矩與速度對接觸時間的影響

圖 19 測試拍面平鋪於球桌上，進行實驗



圖 20 測試拍面貼於一端固定木板上，高速球入射最遠端



1. 無力矩下，高速射擊的接觸時間都短於自由落下的首次接觸時間。原因為高速射擊時的反彈作用力很大，反彈速度快，故接觸時間減短。而在力矩作用下，高速球的接觸時間減少更為明顯。
2. 自由落下慢速入射的情形下，力矩的因素明顯增加了接觸時間。其中，長顆粒拍面在力矩影響下的接觸時間拉長為 0.00192 秒。推測為入射時的作用力引起木板上下晃動，使得木板和乒乓球間的相對運動延長了接觸時間。
3. 無力矩作用，慢速球與拍面的接觸時間都在 0.0015 秒左右，與拍面種類無關。而在力矩作用下，慢速球與拍面的接觸時間都延長在 0.00188 秒左右，也與拍面種類無關。
4. 但在高速射擊時，兩種情形中的長顆粒接觸時間都較短。

(六) 力矩對最遠端位置彈跳次數的影響

一區比較，7.5 公分自由落體								
bounce	平面的回復係數		短顆的回復係數		中顆的回復係數		長顆的回復係數	
	無力矩	有力矩	無力矩	有力矩	無力矩	有力矩	無力矩	有力矩
1	0.32	0.48	0.44	0.35	0.40	0.29	0.36	0.35
2	0.32	0.51	0.53	0.35	0.44	0.34	0.40	0.41
3	0.05	0.53	0.50	0.36	0.35	0.26	0.30	0.38
4	因為球已經	0.48	0.36	0.37	0.26	0.29	0.09	0.33
5	跳出 1 區的	0.49	0.08	0.35	0.25	0.23	因為球已經	0.32
6	拍面，終止	0.70	因為球已經	0.37	0.19	0.19	跳出 1 區的	0.27
7	錄音。	0.65	跳出 1 區的	0.35	因為球已經	因為球已經	拍面，終止	0.05
8		0.66	拍面，終止	0.24	跳出 1 區的	跳出 1 區的	錄音。	因為球已經
9		0.60	錄音。	0.30	拍面，終止	拍面，終止		跳出 1 區的
10		0.60		因為球已經	錄音。	錄音。		拍面，終止錄
11		0.80		跳出 1 區的				音。
12		0.60		拍面，終止				
13		0.60		錄音。				
14		0.57						
15		0.51						
16		0.32						

1. 一區為拍面離拍子握柄處最遠的區塊，固定球拍的拍柄時會有最大的力矩影響。
2. 各拍面實驗結果皆呈現有力矩的彈跳次數多於無力矩時的彈跳次數，尤以平面拍面為甚，無力矩時平均為 3~5 次，而有力矩時則可達 15~18 次。
3. 慢速球在力矩的作用之下，同時延長接觸時間也應加了彈跳次數。
4. 思考原因應為測試拍面下木板受碰撞產生的晃動增加乒乓球的彈跳次數，其中對平面拍的效果最大。

(七) 力矩對慢速球反彈作用力的影響

一區比較，7.5 公分自由落體								
反彈作用力(gw)								
bounce	平面		短顆		中顆		長顆	
	無力矩	有力矩	無力矩	有力矩	無力矩	有力矩	無力矩	有力矩
1	290.67	136.95	348.97	81.23	302.48	70.80	322.22	92.22
2	134.48	87.31	232.28	28.29	154.38	52.08	161.71	38.68
3	35.92	58.06	157.07	23.84	81.05	45.47	75.55	27.06

一區比較，7.5 公分自由落體								
反彈作用力(gw)								
	平面		短顆		中顆		長顆	
bounce	無力矩	有力矩	無力矩	有力矩	無力矩	有力矩	無力矩	有力矩
4	因為球已經跳出1區的拍面，終止錄音。	39.80	82.79	14.20	28.13	8.22	因為球已經跳出1區的拍面，終止錄音。	19.48
5		26.14	30.87	10.51	13.15	5.84		11.62
6		19.88	因為球已經跳出1區的拍面，終止錄音。	7.63	8.55	4.46		7.68
7		16.04		5.98	因為球已經跳出1區的拍面，終止錄音。	5.01		
8		12.98		4.87				
9		10.82		4.23				
10		8.94		因為球已經跳出1區的拍面，終止錄音。				
11		7.75						
12		6.76						
13		5.88						
14		5.28						
15		4.80						
16		4.32						

平面拍面

彈跳次數	無力矩 (Ggw)	有力矩 (Ggw)
1	290	140
2	140	100
3	100	70
4	70	50
5	50	40
6	40	35
7	35	30
8	30	25
9	25	20
10	20	15
11	15	10
12	10	8
13	8	6
14	6	5
15	5	4
16	4	3

短顆粒拍面

彈跳次數	無力矩 (gw)	有力矩 (gw)
1	350	100
2	230	50
3	150	30
4	100	20
5	50	15
6	30	10
7	20	8
8	15	6
9	10	5
10	8	4

中顆粒拍面

彈跳次數	無力矩 (gw)	有力矩 (gw)
1	300	70
2	150	50
3	80	45
4	40	30
5	20	15
6	10	10

長顆粒拍面

彈跳次數	無力矩 (gw)	有力矩 (gw)
1	320	100
2	160	40
3	80	25
4	40	15
5	20	10
6	10	8
7	8	6

1. 四種拍面在力矩的影響下，雖延長了彈跳時間、增加彈跳次數，但是對於反彈的作用力也大幅減緩了，大多減弱為無力矩狀況時的4成以下，而且顆粒拍面則減弱到只有原來

的 2~3 成。

(八) 60/40/20 度斜向入射

1. 實驗照片

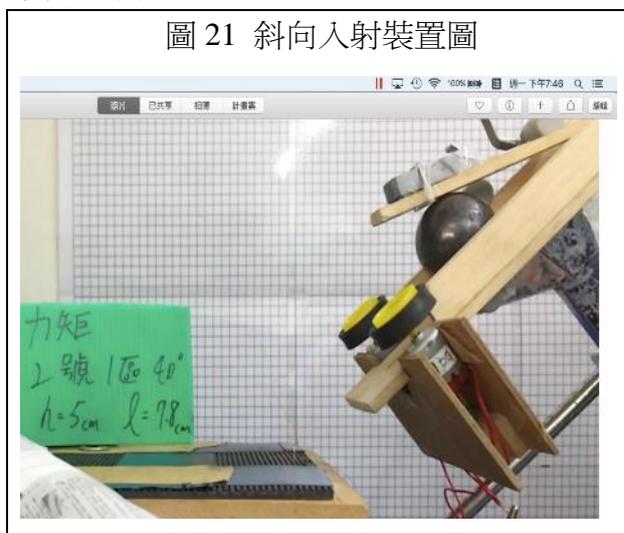


圖 21 斜向入射裝置圖

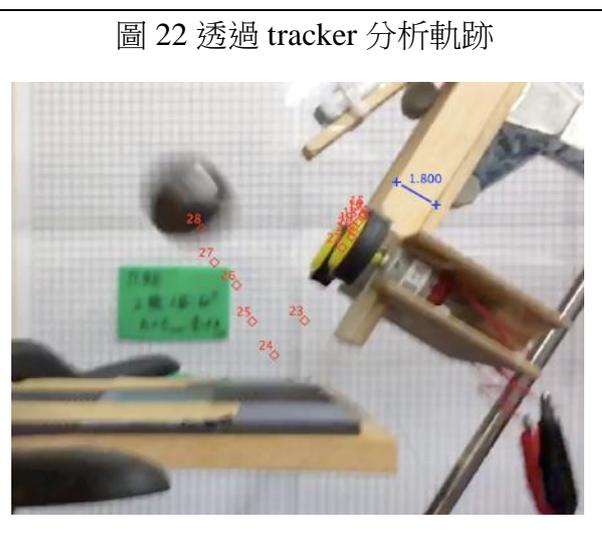
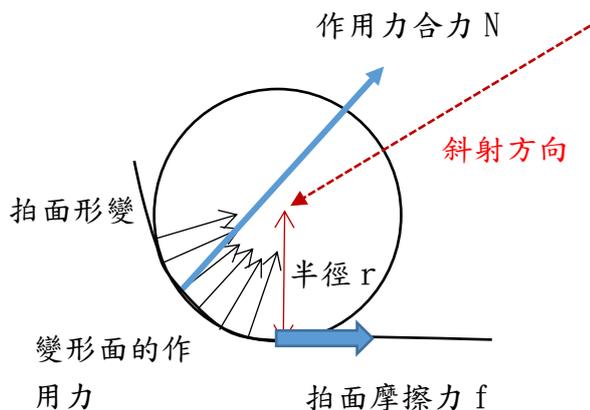
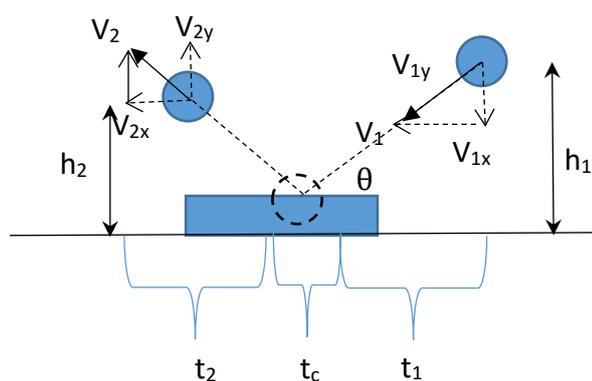


圖 22 透過 tracker 分析軌跡

2. 理論分析



$\theta$  為球的人射方向和拍面間的夾角  
 $h_1$  為碰撞前一個影格的乒乓球高度  
 $h_2$  為碰撞後一個入射方和向影格的乒乓球高度  
 $V_1$  為碰撞前一影格的乒乓球速度  
 $V_{1x}$  為碰撞前一影格的乒乓球水平速度分量  
 $V_{1y}$  為碰撞前一影格的乒乓球垂直速度分量  
 $V_2$  為碰撞後一影格的乒乓球速度  
 $V_{2x}$  為碰撞後一影格的乒乓球水平速度分量  
 $V_{2y}$  為碰撞後一影格的乒乓球垂直速度分量  
 $t_1$  為碰撞後自拍面到前一個影格位置的時間  
 $t_2$  為碰撞後自拍面到後一個影格位置的時間  
 $t_c$  為乒乓球與拍面的接觸時間

- (1) 利用慢動作錄影取得 3 個影像，分別是碰撞前、碰撞中以及碰撞後這 3 個影格。
- (2) 乒乓球自發射後到碰到拍面之間以及碰撞後的運動皆為等加速度運動，在水平方向

上無外力作用， $V_{1x}$  會維持慣性保持等速直到接觸拍面產生交互作用而減速，離開拍面後便維持在  $V_{1x}$ 。故可透過水平合力  $= N_x = m \times a = m \times \frac{v_{2x}-v_{1x}}{t_c}$ ，得到拍面提供的正向力水平分量，即為摩擦力的大小。

(3) 在垂直方向上，因為進行等加速度運動， $V_{2y} - V_{1y} = \text{定值}$ ，故可代入  $N_y = m(g + \frac{v_{2y}-v_{1y}}{t_c})$  求出拍面提供的正向力垂直分量  $N_y$ 。

(4) 最後，求出摩擦係數  $= \frac{N_x}{N_y}$

(5) 實驗過程中，我們曾經嘗試在石墨球上貼上鋁箔膠帶幫助導電及定位分析，但會增加太多額外重量和影響原來質心分布，故不採用。數據表格。

### 3. 20/40/60 度角斜向入射數據

拍面種類	斜射角度	接觸時間	$V_{1x}$	$V_{1y}$	$V_1$	$V_{2x}$	$V_{2y}$	$V_2$	$N_x$	$N_y$	$\frac{N_x}{N_y}$
	度	s	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s	gw	gw	
平面	60	0.00136	-270.6	-398.3	481.5	-206.7	338.2	396.3	47.0	2061.6	0.023
	40	0.00132	-486.2	-436.3	653.3	-249.8	209.8	326.2	179.8	1870.7	0.096
	20	0.00186	-530.4	-204.3	568.4	-383.5	96.8	395.5	79.0	618.9	0.128
短顆	60	0.00152	-279.48	-460.1	538.3	-194.3	330.6	383.5	56.1	1980.5	0.028
	40	0.001497	-487.62	-364.5	608.8	-294.5	311.4	428.6	129.0	1719.5	0.075
	20	0.002404	-473.0	-193.9	511.2	-337.9	173.3	379.8	56.2	584.3	0.096
中顆	60	0.00145	-343.9	-594.2	686.6	-210.3	417.3	467.3	92.0	2652.9	0.035
	40	0.0015	-498.7	-380.2	627.1	-256.2	264.5	368.3	161.6	1637.1	0.099
	20	0.00211	-575.2	-211.9	613.0	-388.5	201.8	437.8	88.5	748.8	0.118
長顆	60	0.00118	-294.2	-452.9	540.0	-281.0	221.5	357.8	11.2	2175.3	0.005
	40	0.001338	-484.3	-404.5	631.0	-343.2	252.8	426.3	105.4	1870.4	0.056
	20	0.00172	-654.6	-229.7	693.7	-455.5	91.9	464.7	115.7	714.1	0.162

#### (九) 滑動或滾動之探討

1. 若斜向入射的乒乓球與拍面的接觸屬於純滾動，則接觸面作用力的水平分量形成的力矩會造成乒乓球的旋轉。考量接觸面形變角度很小，水平分量近似平行拍面，類似拍面提供的摩擦阻力，我們便試著將  $N_x$  和  $N_y$  相除，就得到的  $\frac{N_x}{N_y}$  和查到的拍面摩擦係數相比較。
2. 我們定義  $\frac{N_x}{N_y} = \text{摩擦係數}$ ，發現和查到資料中的數據接近。

3. 乒乓球由右至左向下斜射碰撞拍面前後，質心速度變化示意圖如下：



(1) 碰撞前，乒乓球的質心速度  $v_c = v \sin \theta = v_1$

(2) 碰撞時的  $N_x$  和球運動方向相反，提供乒乓球逆時針轉動的力矩提供角加速度  $\alpha$ ，造成角速度變化量  $\Delta\omega = \alpha t$

(3) 碰撞後，質心速度加速至  $v_c + \Delta\omega r$

4. 但明顯的，碰撞後水平速度減少並未增加，因此推論在我們的實驗條件下，乒乓球高速斜向入射與拍面接觸時能應該仍有滑動發生，導致水平速度明顯減少。

5. 此時的  $\frac{N_x}{N_y} = \text{摩擦係數}$ ，與參考資料的摩擦係數相近。

6. 此項數據一直困擾著我們，查閱相關資料多有提到拍面與球之間有相對作用時傾向以純滾動來分析處理。然而，在真實乒乓球的運動分析中，也無切確的定論出乒乓球和拍面接觸時的情形為純滾動、滑動抑或是又滾又滑的條件。因此我們僅就我們的實驗數據嘗試推論，提供想法以供參考。

#### (十) 摩擦係數的比較

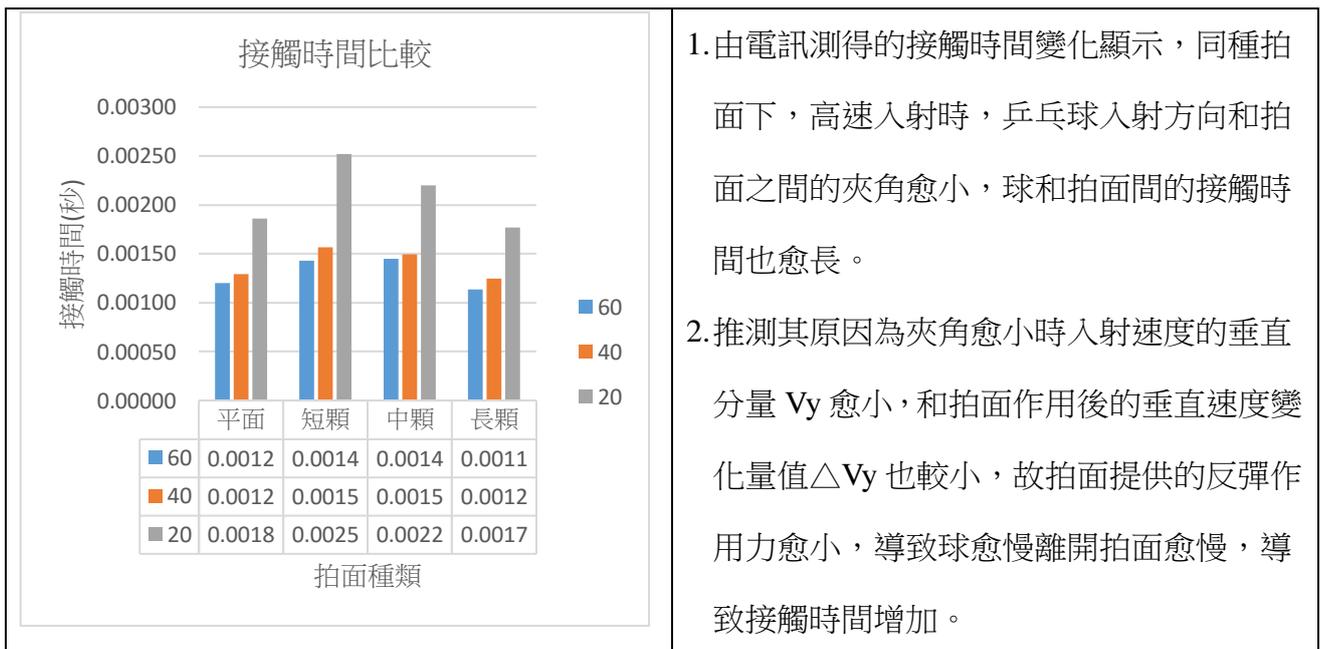


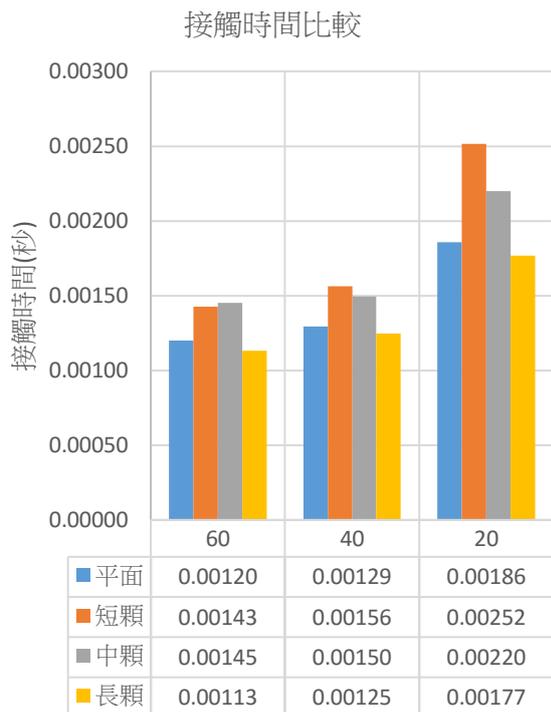
1. 我們結合了噴覆石墨噴漆測量接觸時間以及慢動作錄影分析影格中的乒乓球速度及高度，求出拍面的摩擦係數。
2. 透過錄音可偵測到 1/1000 秒的極短暫接觸時間，但用於斜向入射時，對於偵測第二

次彈跳有其困難度，故搭配 tracker 軟體分析接觸拍面的前、後一影格速度和高度，代入理論也可求出碰撞拍面的入射速度和反射速度，進而求出水平阻力、反彈作用力以及摩擦係數。

3. 本次實驗受限於無法取得價格昂貴的高速攝影機(1000fps 以上)，採用 I phone6s 的慢動作錄影，影格數僅為 240fps，都有影像重疊的缺點，且不容易確認分析的質點位置。所以，能提高攝影規格，相信能有更好的準確度。
4. 對同一拍面而言，拍面的摩擦係數均顯示出隨著入射角度減小而增加的趨勢，尤以長顆粒拍面為甚，從 60 度的 0.005 遽增到 20 度的 0.162。試著推論原因為，小角度入射時，具有很大的水平速度分量，容易造成長顆粒側邊受力變形，阻力增加。
5. 我們也推論若以運用長顆粒拍面進行小角度切球或抽球，能有較好效果。

#### (十一) 接觸時間比較

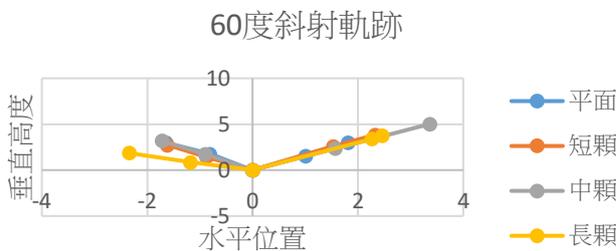




入射方向和拍面之間的夾角  
 ■ 平面 ■ 短顆 ■ 中顆 ■ 長顆

1. 固定入射角度，不同拍面間的接觸時間變化趨勢相近，以平面拍和長顆拍面的接觸時間較短，此現象在小角度入射時更為明顯。
2. 雖然影響的變因實在太多，我們仍試著推論背後原因:在經費有限下無法購買很多種拍皮，我們採用的總厚度相同的四種拍面，即拍皮加上海綿的總厚度均接近4mm。所以短顆粒會搭配最後的海綿，平面和長顆粒搭配最薄的海綿。
3. 快速球時，海綿的影響愈大，即愈厚的海綿愈能延長球與拍面的接觸時間，因此短顆拍面在各種角度下的接觸時間最長。

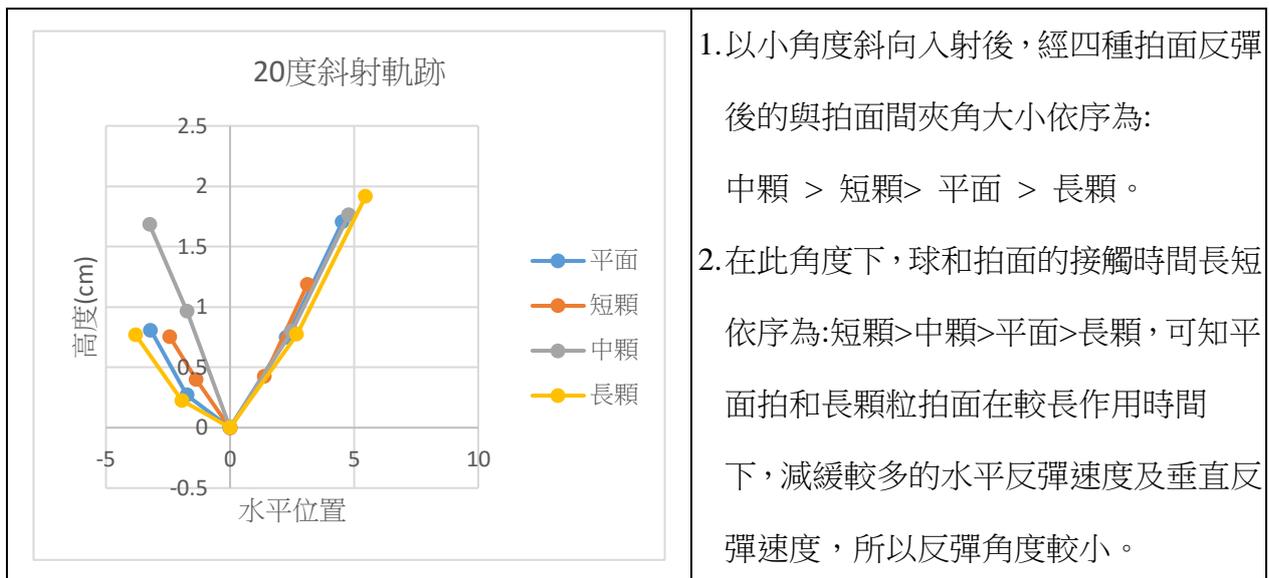
(十二) 軌跡比較



1. 60度角入射，長顆拍面明顯改變了反射角度，具有最小的人射角
2. 數據顯示在此角度下，平面拍、短顆拍面及中顆拍面差異不大。

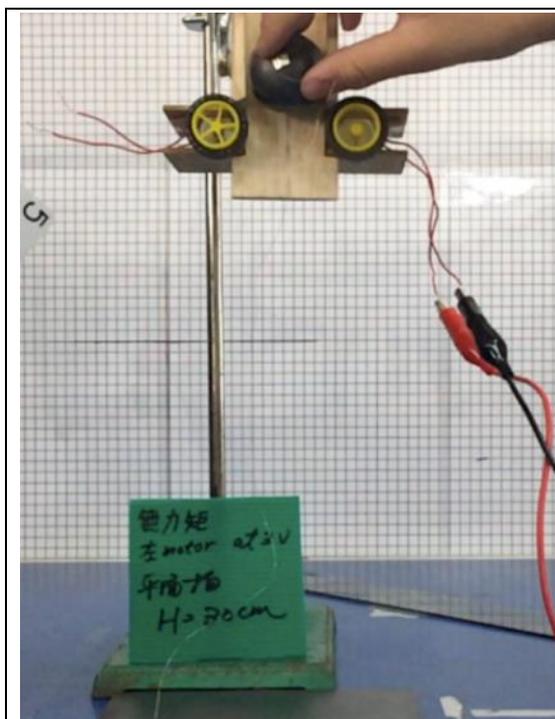


1. 此角度下，平面拍面於碰撞後的0.008秒使乒乓球具有最大反彈高度。
2. 乒乓球於長顆拍面反彈後的反射角仍為最小。



### 三、 探討不同拍皮下回擊旋球的軌跡

#### (一) 建立旋球條件



1. 我們採將發球機發球方向的左側馬達接上 3 伏特電壓，右側馬達靜止之方式來製造旋球。
2. 當左側馬達以逆時針旋轉方式啟動時，可製造出右旋球。

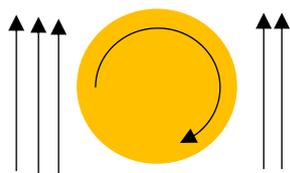


3. 以高於拍面 30cm 之高度垂直向下發射右旋球於四種拍面上，探討接觸時間擊反彈軌跡。

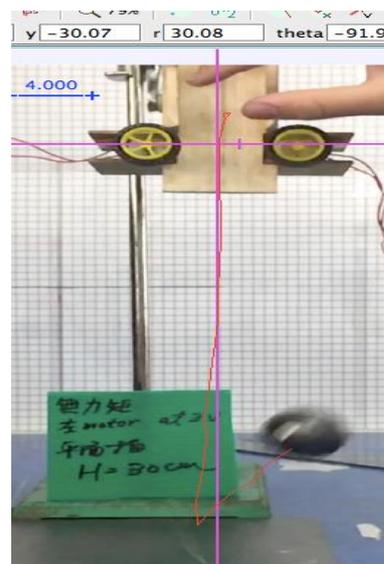
#### (二) 入射軌跡

1. 入射的右旋球碰撞拍測試拍皮前的軌跡呈現明顯的偏移現象。
2. 我們查閱資料發現這便是在球類運動中常被提到的馬格努斯效應 (Magnus Effect)，用於解釋轉動的物體在流體中運動時受到的力學效應。

3. 以我們的條件而言，



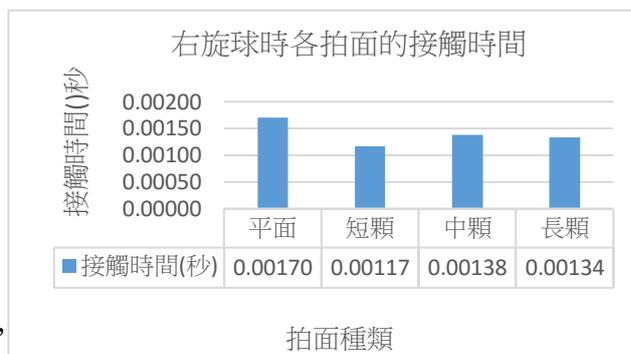
所見的乒乓球以順時針自旋同時也向下運動，周圍的空氣相對而言會向上流動，而在球體左側因為球的自旋切線方向與氣流方向相同造成氣流加速；反之球體右側則因方向相反而減速。根據伯努利定律，左側流體速度快，氣壓小，右側流體速度慢氣壓大，這樣就導致旋轉物體在橫向的壓力差。



4. 因此，此時的乒乓球下墜的軌跡呈現左偏的現象，且平均的偏移量為 0.8cm~1.0cm。

### (三) 接觸時間比較

1. 平面拍因為具有穩定的接觸面而具有最長的接觸時間，和預期相同。
2. 顆粒拍面接觸時間相近。
3. 和自由落下、高速落下的接觸時間相比，



各拍面接觸時間長短大致上為自由落下 > 高速擊球 > 右旋向下。

	自由落下	高速擊球	右旋向下
平面拍面	0.00159s	0.00143s	0.00170s
短顆拍面	0.00150s	0.00144s	0.00117s
中顆拍面	0.00152s	0.00141s	0.00138s
長顆拍面	0.00150s	0.00117s	0.00134s

### (四) 反彈速度比較圖

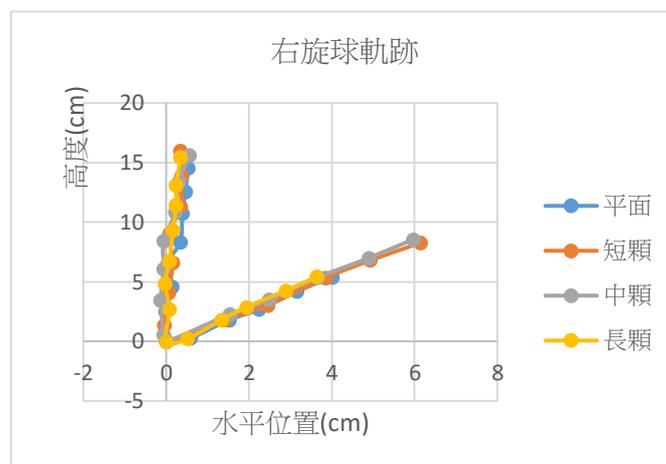


1. 在此情形下，短顆粒拍面具有最短的接觸時間以及最佳的回復係數。
2. 平面拍面因為接觸時間長，使得回復係數約為 0.6。
3. 因為在石墨球上標示追蹤點有相當

困難，未能分析反彈後的旋轉能力改變。期待未來能針對此部分有所突破。

#### (五) 軌跡比較

四種拍面的軌跡相近。



## 柒、結論

1. 我們自行設計發球裝置，運用了生活科技課程中所學習到的木工技巧，過程中也利重錘設計固定板及自由釋放裝置以穩定發球狀況。實驗角度則是取用實驗室中常見的器材及手機的水平儀完成的，收穫豐盛。
2. 可透過兩側馬達所接電壓控制轉速差，當兩側馬達等電壓反向運轉時，可得到約 520cm/s~560cm/s 的直球，且落點可達六成以上穩定度。只有單側馬達運轉則可發出旋球，更可調整發球角度發射上、下、左及又旋球。我們實驗中便是採左馬達接 3 伏特製造右旋球垂直向下碰撞四種拍面。
3. 桌球的拍面種類極多，考量經費之下，選擇了總厚度接近 4mm 的桌球拍皮，進行平面、短顆粒、中顆粒及長顆粒拍面的探討。
4. 透過自行設計的摩擦力測量裝置，藉由電子天平讀數的變化量取得各種拍面的靜摩擦係數與動摩擦係數。我們發現桌球拍面的靜摩擦係數很大，為 0.66~1.57，而動摩擦係數則 0.34~0.97。此方式也較國中理化課程中使用的彈簧秤更有準確度。
5. 我們最後選用石墨噴漆噴覆在拍皮及球面上，可成功克服顆粒拍面間的空隙問題，成功測得接觸時間。
6. 接觸時間比較:
  - (1) 接觸時間均在 1/1000 秒的等級，極為短暫。

- (2) 四種拍面在 10cm 自由落下的慢速球碰撞，接觸時間都相近，都在 0.0015 秒左右
  - (3) 高速球時，僅長顆粒拍面接觸時間明顯減短，因為此膠皮下的海綿厚度最薄，因此高速球作用時，海綿對於彈跳的影響增加。
  - (4) 垂直向下的右旋球中，則是平面拍因為和球之間接觸面最完整而具有最久的接觸時間。
  - (5) 若考量乒乓球落下造成的力矩，力矩造成慢速球的接觸時間拉長，但快速球的接觸時間則大多減少。
7. 我們結合導電錄音及慢動作錄影取得斜向入射的數據，但其分析多有難度，即使查閱相關資料及請教老師後，仍無法很全面的理解這複雜的運動。僅能就我們實驗條件下的數據試著推論，並提供想法。
  8. 斜向入射不遵守反射定律，反射後的水平速度均明顯下降，且反射角<入射角，尤以長顆粒拍面具有最小的反射角度。
  9. 我們就斜向入射數據分析 $\frac{N_x}{N_y}$ ，介於 0.005~0.158 之間，再加上反射的水平速度明顯下降推論球與拍面之間的交互作用應該是又滾又滑，無法以單一形式表示
  10. 右旋球向下時的軌跡展現的馬格努斯效應。

## 捌、未來展望

- 1.藉由噴覆石墨噴漆可以改變絕緣體表面的導電性這個性質十分有趣，未來可實際用於桌球及桌球拍上，測量各種不同揮拍方式下的接觸時間，強化桌球技巧，也可用來測量其他有趣的動作時間，例如:用手指彈耳朵的時間...等等。
- 2.可以改變海綿厚度探討海棉對於彈跳的影響。
- 3.改變發球機的輪胎方向，探討其他種類旋球的影響。

## 玖、參考資料

- 1.導電漆種類 取自網頁 <http://shop.cpu.com.tw/cPath/542>
- 2.2014 年臺灣國際科學展覽會 乒乓球彈跳運動研究
- 3.第 46 屆中小學科學展覽會高中物理科 翻滾吧,輪子!——滾動摩擦之探討
- 4.第 43 屆中小學科學展覽作品 高中組物理 數位攝影與碰撞一瞬間

5. 網頁：力敏電阻 FSR (Force Sensing Resistor)

<http://thats-worth.blogspot.tw/2014/07/fsr-force-sensing-resistor.html>

6. 維基百科 <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/壓電效應>

7. 維基百科 <https://zh.wikipedia.org/wiki/馬格努斯效應>

8. 步步來電-永續發展的新式能源, 高雄市第 48 屆中小學科學展覽會

9. 音源線接頭 3.5mm 取自網頁 <http://fireball-catcher.blogspot.tw/2011/03/35mm-34.html>

## 【評語】 030110

1. 相當完整的工作。方法也相當有創意。尤其以電流長短量測接觸時間是個好方法。
2. 唯數據的一致性應多留意。