

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 物理科

佳作

080110

凱爾特石的反轉密碼

學校名稱：新北市私立及人國民小學

作者： 小六 謝稚鎧 小六 丁睿哲 小六 張皓然	指導老師： 張政義 吳俊良
-----------------------------------	---------------------

關鍵詞：凱爾特石、反轉

摘要

我們發現可以改變方向旋轉的迴旋棒（rattleback），感到很驚奇。我們想探討它產生迴轉的變化與原理。我們以（1）文獻探討法（2）調查法（3）數位成型法（4）灌模法（5）實驗法（控制材質、大小、形狀、底面粗細、旋轉力量、施力點、施力方法、施力方向等變因）（6）TRACKER 軟體分析法進行研究，探討迴旋棒產生反轉的現象、原理及變化。我們發現：迴旋棒的反轉現象會受形狀、材質、重心位置、受力位置、受力大小的影響，我們應用迴旋棒 X、Y、Z 軸的關係及重心結構原理，對於這種發現我們十分興奮，希望繼續探討實作新型迴旋棒，擴展研究成果。

壹、研究動機

我們發現有一種可以改變原先旋轉方向的迴旋棒（rattleback），玩起來很神奇；我們對這種現象感到很驚奇，經過調查發現迴旋棒稱為「凱爾特石」（Celtic stone），他是古老而神奇的玩具，它好像有自己的「意志」，可以不聽你的指揮往另外一個方向旋轉；如果把它放在具有摩擦力的平面上，並且讓它在水平面上按照某個方向旋轉的話，那麼它在轉了一會兒後就會往相反的方向旋轉，它似乎很不喜歡原來的方向。我們把它按照它喜歡的方向旋轉，就不會出現往相反的方向旋轉的情況。除此之外，我們如果按一下或點一下迴旋棒的一端，讓它左右晃動，那麼過一會兒它就會開始在水平面上旋轉，實在神奇。我們想探討這有趣的現象，就計劃製作不同材質、大小、形狀的迴旋棒，用不同的方法來觀察它的變化，以揭開凱爾特石的反轉秘密，並且把這個神秘、有趣、好玩的特性運用在其他物品或玩具上，使玩具有另一種改變，多增加一點樂趣，讓科學研究有趣又實用。

貳、研究目的

- 一、了解迴旋棒旋轉的特性。
- 二、進行迴旋棒及發動模型旋轉儀器的製作。
- 三、探討迴旋棒旋轉之變化及原理。

研究目的	研究問題
一、了解迴旋棒旋轉的特性。	1.迴旋棒的外觀與反轉現象的描述 2.迴旋棒受力的大小會影響反轉的現象嗎？ 3.迴旋棒受力的位置會影響反轉的現象嗎？
二、進行迴旋棒及發動模型旋轉儀器的製作。	4.迴旋棒的材質會影響反轉的現象嗎？ 5.迴旋棒的重量會影響反轉的現象嗎？ 6.迴旋棒受力的方法會影響反轉的現象嗎？ 7.迴旋棒 XYZ 軸的長短會影響反轉的現象嗎？
三、探討迴旋棒旋轉之變化及原理。	8.利用 TRACKER 軟體分析迴旋棒的旋轉分析

參、文獻探討

一、凱爾特石頭

凱爾特石頭 (Celtic stone) ，又稱迴旋棒 (rattleback) 是一個半橢圓形的陀螺。它會往特定的方向旋轉，但是當它被往反方向轉時，會變得不穩定而搖晃然後停止，再往回轉。因此又被稱做迴旋陀螺。這種運動現象，看似違反了物理學上的角動量守恆定律。

二、凱爾特石頭的歷史

在 19 世紀時，考古學家們在凱爾特古遺址中，發現了迴旋陀螺。因為是在凱爾特遺址發現的，並且覺得和這個民族有關，所以就稱這石頭為凱爾特石頭。這種陀螺在 1890 年就有人研究了。而在 20 世紀時，人們更是深入研究，發表了更多關於它的論文。

三、凱爾特石頭的原理


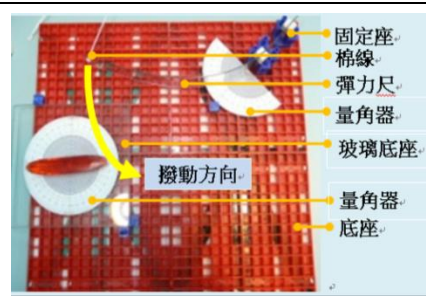
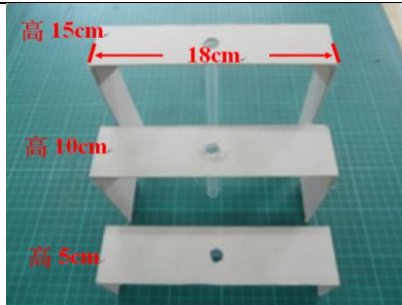
這種不穩定的現象，是因為物理學中滾動運動與俯仰運動的同時進行而造成的。當陀螺質量的分佈，造成俯仰軸和滾動軸所構成的平面為不對稱時，滾動運動和俯仰運動就開始了不穩定狀態，漸漸的使陀螺從俯仰運動變為滾動運動。然而這種現象會因為旋轉方向的不同而有所差異，當俯仰運動不穩定時會因為摩擦力而減速或中止轉動。

肆、研究設備及器材

一、研究設備：1.實驗觀察-LUMIX 照相機。2. FLUX Delta+ 數位成型機。3.研究紀錄-電腦、隨身碟、列印機。

二、實驗器材：1.旋轉角度觀察板。2.彈力點擊器。3.自製撥動器。4.重力點擊器。

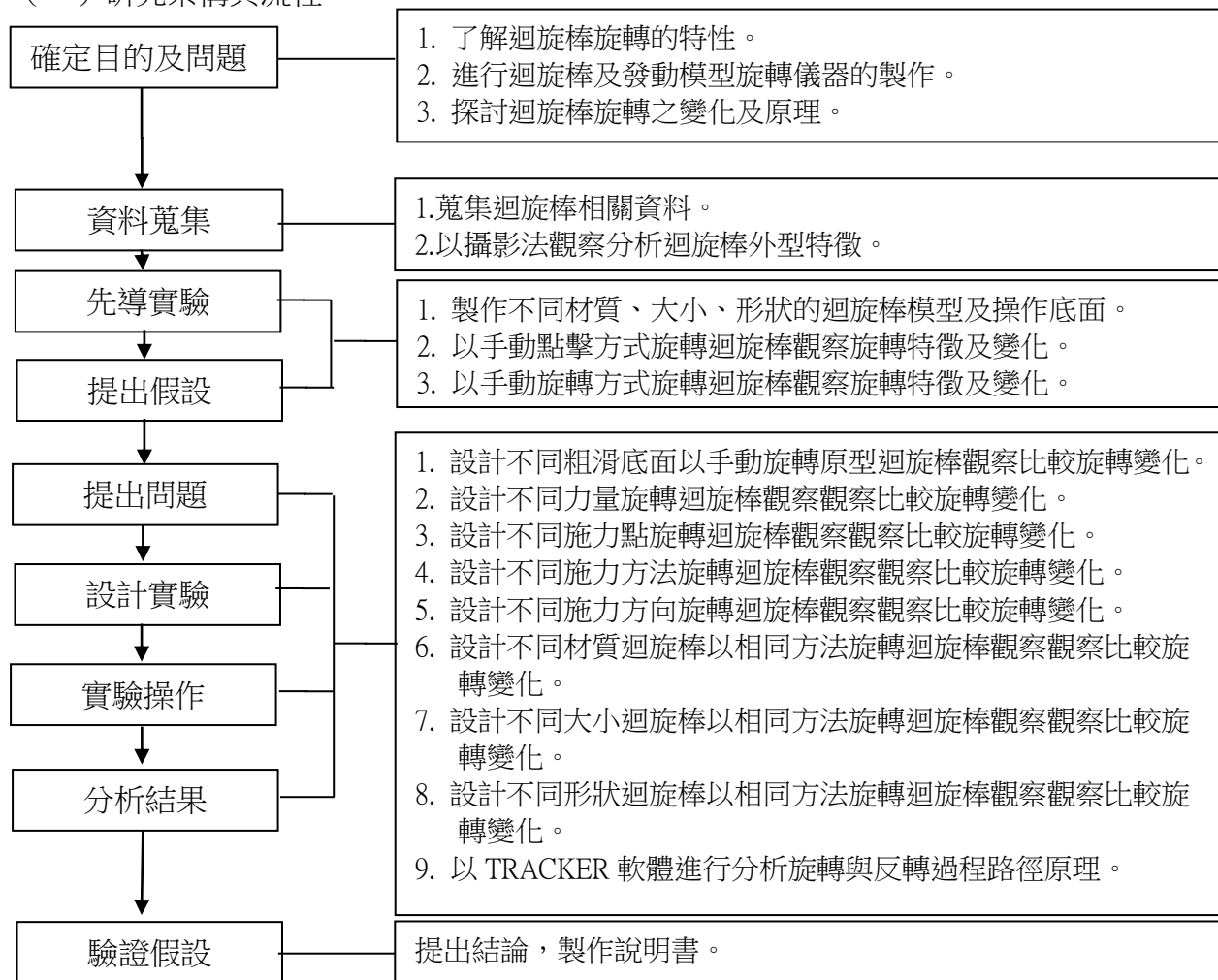
三、製作模型：石膏粉、保力劑、塑膠盒、水、水杯、凡士林、水彩筆、刀片、迴旋棒、三秒膠、攪拌棒、厚紙板、粗吸管、鑽子、榔頭、剪刀、奇異筆、30cm 尺、鉛筆、筆記本。

旋轉角度觀察板	撥動器	重力點擊器
		
將分度計黏貼在光碟片上，做成可以測量旋轉角度的觀察台。觀察台旋轉角度以 1° 為單位。	以方格板為底座、直尺做彈力尺、玻璃板為旋轉板，組成撥動台。改變直尺撥動角度為撥動力大小。	以硬紙板製作 Γ 形三型點擊架，在架子中心挖直徑 1.2cm 孔洞，黏上同徑吸管，做為鐵珠落下方位置管道。

伍、研究方法與過程


一、研究方法

(一) 研究架構與流程



(二) 實驗與操作方法

我們初步計畫以 (1) 文獻探討法 (2) 調查法 (3) 數位成型法 (4) 灌模法 (5) 實驗法 (控制材質、大小、形狀、底面粗細、旋轉力量、施力點、施力方法、施力方向等變因) (6) TRACKER 軟體分析法進行實驗研究，各種研究方法說明如下：

研究方法	說明
文獻探討法  迴旋棒 (Rattleback)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 利用午休、課餘時間收集迴旋棒與相關資料。 2. 利用網路探討迴旋棒的旋轉原理。 3. 固定每周一、二、四、五的午休時間，共同討論。

調查法



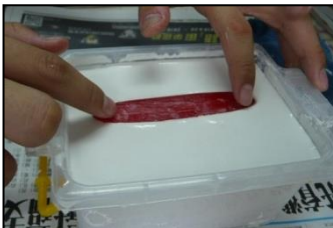
1. 調查收集市售迴旋棒與相關資料。
2. 比較自製與市售迴旋棒不同做為設計實驗依據。

數位成型法



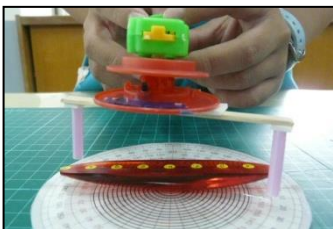
1. 以具有 3D 掃描、列印功能的 FLUX Delta+ 數位成型機對迴旋棒進行 3D 掃描。
2. 雷射掃描後提供數據做為 3D 列印模型依據。
3. 3D 列印迴旋棒各式模型，進行研究。

灌模法



1. 以迴旋棒為模型灌模自製石膏迴旋棒。
2. 以灌模法灌製各種材質迴旋棒，進行實驗研究。。

實驗法



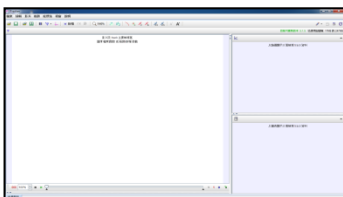
1. 以各式迴旋棒依實驗設計進行實驗研究。
2. 控制以下變因進行各種實驗，包含：不同材質、不同大小、不同形狀、不同粗細底面、不同旋轉力量、不同施力點、不同施力方法、不同施力方向。

暗箱法



自製暗箱，將迴旋棒原型鑽孔固定，利用光照觀察迴旋棒外型特徵，做為分析特色參考。

TRACKER 軟體分析法



1. 利用軟體分析迴旋棒動態過程路徑。
2. 透過速度與加速度的方向及大小來分析解釋反轉現象。

問題一、迴旋棒的外觀與反轉現象的描述

〔研究 1〕迴旋棒的外觀紀錄

方法：1.我們以畫圖法、方格法將迴旋棒置於 0.1cm×0.1cm 的方格紙上，底面朝下描繪出外型，計算迴旋棒傾斜面之面積。

2.方格攝影法、暗箱攝影法觀察分析迴旋棒外型、結構特徵。

3.我們在壓克力桌面以（1）順、逆時針方向旋轉迴旋棒（2）手動點擊迴旋棒，觀察旋轉變化。

表 1-1 方格、暗箱攝影觀察比較

暗箱攝影法側視 1	暗箱攝影法側視 2	暗箱攝影法上視
方格攝影法側視 1	方格攝影法側視 2	方格攝影法上視

表 1-2 迴旋棒不對稱結構分析圖及照片

側面圖	鳥瞰照片（底面朝下）	側視底面照片
 1 的格子 271 個，1/2 的格子 27 個，1/4 的格子 10 個 $27 \times 1/2 = 13.5$ $10 \times 1/4 = 4.5$ $271 + 13.5 + 4.5 = 287$ 格 287×0.01 (一小格面積) = 2.87 cm^2	 左右不對稱	 左右不對稱
	側視照片	
	 上下不對稱	 上下不對稱

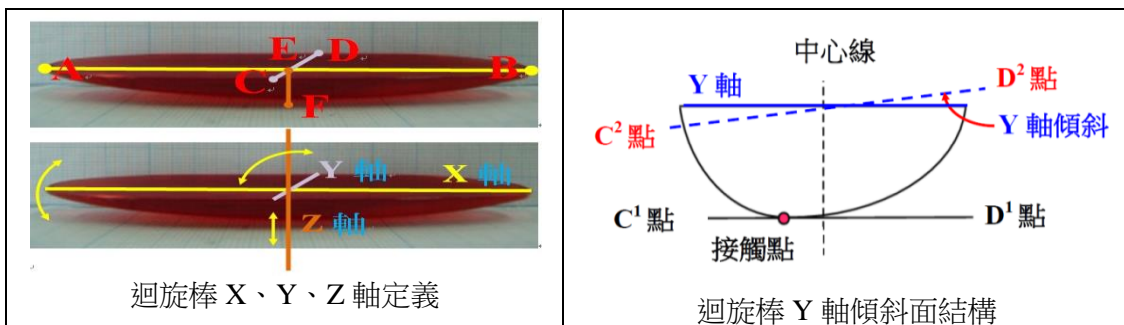
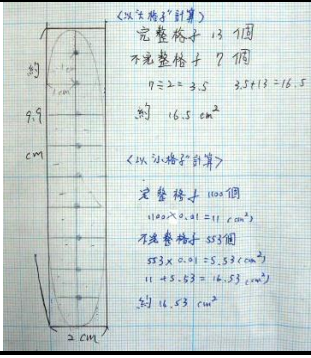


圖 1 迴旋棒 X、Y、Z 軸定義及傾斜結構說明

表 1-3 迴旋棒平面底面積計算

迴旋棒平面底面圖	迴旋棒平面底面積計算
 <p> <2X 3 格子計算> 完整格子 13 個 不完整格子 7 個 $9 \div 2 = 3.5$ $3.5 \times 13 = 16.5$ 約 16.5 cm^2 <2X 30 格子計算> 完整格子 1200 個 $1100 \times 0.01 = 11 \text{ (cm}^2\text{)}$ 不完整格子 632 個 $632 \times 0.01 = 6.32 \text{ (cm}^2\text{)}$ $11 + 6.32 = 17.32 \text{ (cm}^2\text{)}$ 約 17.32 cm^2 </p>	以方格紙法計算迴旋棒平面底面積 計算過程如下： 1. 每小格面積為 $0.1\text{cm} \times 0.1\text{cm} = 0.01 \text{ cm}^2$ 2. 完整的格子有：1200 個 則 $0.01 \times 1200 = 12 \text{ cm}^2$ 3. 不完整的格子有：632 個 則 $0.01 \times 632 = 6.32 \text{ cm}^2$ 4. $6.32 \text{ cm}^2 + 12 \text{ cm}^2 = 18.32 \text{ cm}^2$ 5. 因此迴旋棒平面底面積約為 18.32 cm^2

結果：1. 我們依迴旋棒外型、結構特徵對迴旋棒加以定義：

- (1) X 軸：A-B 點，軸長 99.97mm，容易上下擺動，我們稱為俯仰軸，
- (2) Y 軸：C-D 點，軸長 20.01mm，容易左右擺動，我們稱為滾動軸。
- (3) Z 軸：E-F 點，軸長 10.00mm，維持軸心穩定，我們稱為穩定軸。

2. 點擊 X 軸 A 或 B 點，迴旋棒會逆時針旋轉；順時針旋轉 X 軸，迴旋棒會先順時針旋轉再逆時針反轉。

3. 迴旋棒外型上下、左右皆不對稱（如表 1-1、1-2、1-3），由於重心不在接觸點，如以 Z 軸為中心線，影響迴旋棒在 Y 軸形成傾斜結構，造成迴旋棒容易依 X 軸上下俯仰擺動、依 Y 軸左右滾動或擺動。

4. 迴旋棒 Y 軸的面傾斜，面積約為 18.32 cm^2 ；側面面積約為 2.87 cm^2 。

〔研究 2〕自製迴旋棒

方法：

- 1. 自製迴旋棒石膏模型與迴旋棒原型加以比較。
- 2. 我們取 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 15\text{cm}$ 的塑膠盒加入快乾石膏，壓入迴旋棒製作模型，步驟過程如表 2。



表 2 灌模自製迴旋棒石膏模型方法

灌模器材	加入石膏調勻	迴旋棒壓出模型
		

結果：

- 1. 我們成功複製迴旋棒石膏模型。
- 2. 自製迴旋棒順時針旋轉也會產生逆時針反轉現象。

〔研究3〕不同接觸面材質

方法：

- 1.我們將蒐集到的紅、綠色迴旋棒與自製石膏材質迴旋棒在 7 種不同質料的底板測試。
- 2.我們分別在磨石子、耐磨板、薄紙板、硬紙板、玻璃板、切割版、壓克力板上，以（1）順、逆時針方向旋轉迴旋棒（2）手動點擊迴旋棒，觀察旋轉變化。

表 3-1 迴旋棒不同質料底板操作

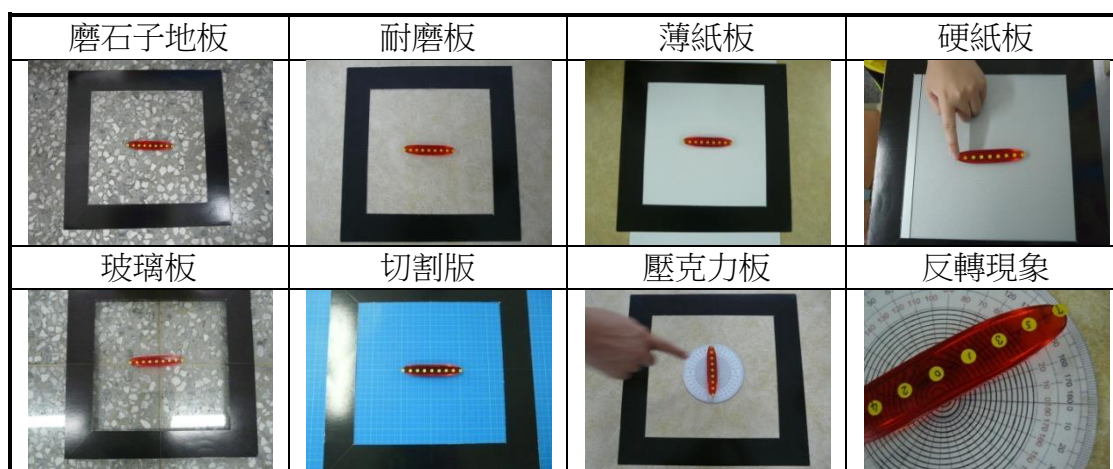


表 3-2 迴旋棒不同質料底板逆時針反轉觀察

材質	磨石子	耐磨板	薄紙板	硬紙板	玻璃板	切割版	壓克力板
紅迴旋棒	○	○	○	○	●	○	●
綠迴旋棒	○	○	○	○	●	○	●
石膏迴旋棒	○	○	○	○	●	○	●

○表示會反轉 ●表示反轉角度較大

- 結果：
- 1.點擊及手動順時針旋轉迴旋棒在 7 種不同質料的底板都出現逆時針反轉現象。
 - 2.外觀上以玻璃、壓克力材質逆時針反轉角度較大。
 - 3.因此，我們認為迴旋棒逆時針反轉現象，會受底板粗滑影響。底板越滑，逆時針反轉角度大；底板越粗糙，逆時針反轉角度小。

〔研究4〕各項物品旋轉型態

方法：1.觀察大小、形狀、材質不同的物體旋轉特徵與迴旋棒比較。

- 2.取 10 種大小、形狀、重量不同的物品，有：蠟燭、膠捲帶、指北針、漆包線捲、口紅膠、筆蓋、護唇膏、橡皮擦、3 號電池、桌球，以（1）單手旋轉（2）雙手旋轉的方法旋轉測試比較。
- 3.測試、觀察、比較（1）旋轉時間（2）旋轉時間與物體重量的關係（3）旋轉時間與物體形狀的關係。

表 4-1 不同的物體旋轉時間分析

旋轉項目	蠟燭	膠捲帶	指北針	漆包線捲	口紅膠	筆蓋	護唇膏	橡皮擦	3 號電池	桌球
重量 (克)	12.900	4.000	5.900	10.500	13.200	4.000	10.600	13.700	18.300	2.700
單手旋轉時間 (秒)	1.320	4.530	2.780	5.530	5.070	5.390	7.690	1.010	16.230	23.280
雙手旋轉時間 (秒)	5.410	6.620	12.250	3.670	1.630	1.380	2.470	1.420	2.030	36.850

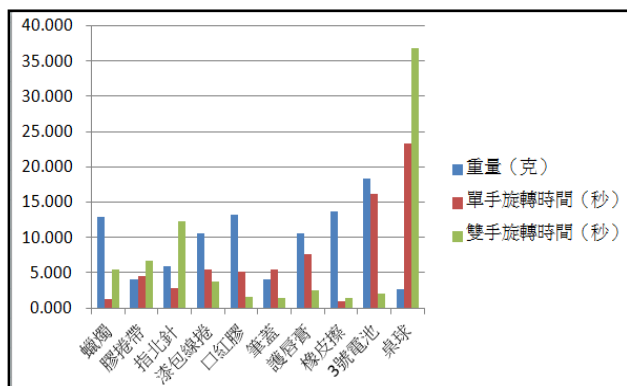


圖 4-1 不同的物體旋轉時間比較長條圖

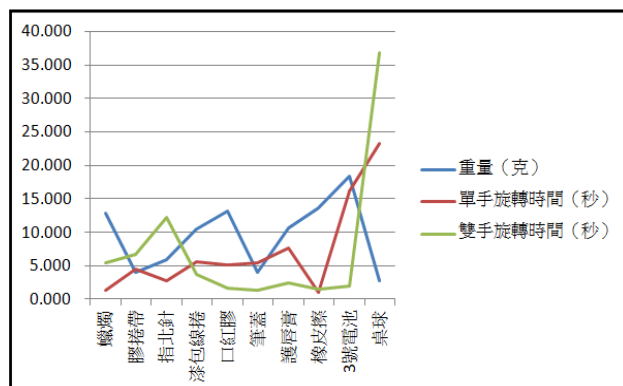


圖 4-2 不同的物體旋轉時間比較折線圖

結果：我們發現

- 1.圓球形的桌球在（1）單手旋轉（2）雙手旋轉時間最久；其他物品旋轉時間因手動的影響，並不穩定。
- 2.旋轉時間與物體重量的關係不大，和形狀的規則或不規則比較有關係。
- 3.不同的物體以順、逆時針旋轉，都不會出現反轉現象。

問題二、迴旋棒受力的大小會影響反轉的現象嗎？

〔研究 5〕鐵珠不同高度點擊迴旋棒的反轉效果

方法：1.製作旋轉角度觀察板、點擊器、旋轉器、重力測試器，觀察力的大小對迴旋棒的旋轉變化的影響。

2.我們做出三型∩形重力點擊器：

- (1) 第一型：高 5cm、寬 5cm、長 15cm。
- (2) 第二型：高 10cm、寬 5cm、長 15cm。
- (3) 第三型：高 15cm、寬 5cm、長 15cm。

3.點擊器的架子中心挖直徑 1.2cm 孔洞，黏上同徑吸管，做為鐵珠（重 2.12g）落下方位置管道。

4.我們每次實驗將鐵珠放在吸管口同一位置，自由落下，利用三型∩形重力點擊器不同的高度，製造不同的力量點擊迴旋棒，測試、觀察、比較迴旋棒旋轉變化及角度。

5.測試時，由①②③④⑤⑥⑦⑧分點、分次進行，每一點做 3 次，觀察紀錄比較。

表 5-1 不同點擊高度迴旋棒逆時針旋轉角度比較

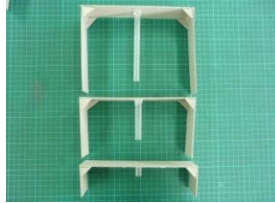

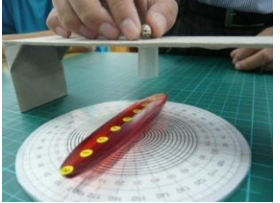
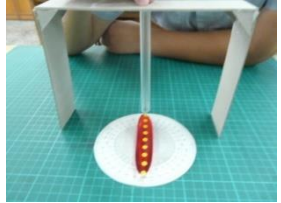
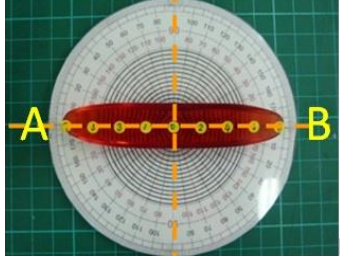
<p>點擊器模型</p> 	<p>點擊鋼珠秤重</p> 	<p>點擊器操作 1</p> 	<p>點擊器操作 2</p> 
<p>迴旋棒點擊點編碼照片</p>		<p>點擊點編碼方式</p>	
		<p>編碼方式：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.中心點編號0 2.迴旋棒底面朝上，左邊為 A 端，右邊為 B 端。 3.中心點至 A 端編號為0 1 3 5 7。 4.中心點至 B 端編號為0 2 4 6 8。 5.點與點間距 1.2cm。 	

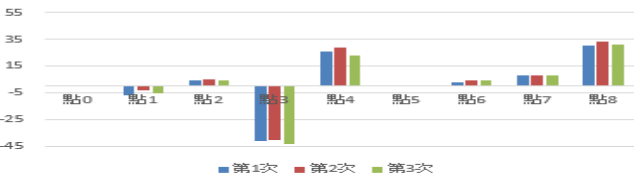
表 5-2 不同點擊高度迴旋棒逆時針旋轉角度比較

不同模型高度重力實驗-5CM			
	第1次	第2次	第3次
點0	0	0	0
點1	-7	-3	-5
點2	4	5	4
點3	-41	-40	-43
點4	26	29	23
點5	0	0	0
點6	3	4	4
點7	8	8	8
點8	30	33	31

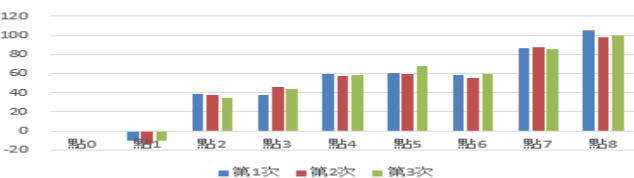
不同模型高度重力實驗-10CM			
	第1次	第2次	第3次
點0	0	0	0
點1	-10	-13	-10
點2	39	38	35
點3	38	46	44
點4	60	57	58
點5	61	59	68
點6	58	55	60
點7	87	88	85
點8	105	98	100

不同模型高度重力實驗-15CM			
	第1次	第2次	第3次
點0	5	4	4
點1	-15	-14	-13
點2	43	43	48
點3	100	101	104
點4	72	74	75
點5	32	33	33
點6	200	202	204
點7	26	30	28
點8	230	224	226

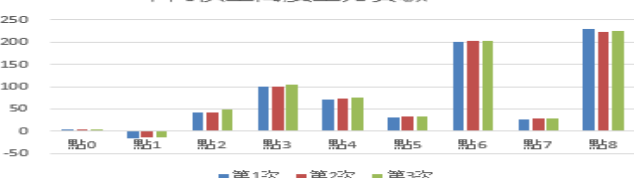
不同模型高度重力實驗-5CM



不同模型高度重力實驗-10CM



不同模型高度重力實驗-15CM



結果：

- 1.我們發現越敲擊的位置若在迴旋棒右側，也就是 2、4、6、8 點時，迴旋棒旋轉時不會出現負數之記錄(負數就是會往順時針方向旋轉，但是因為迴旋棒反轉現象是逆時針旋轉，所以我們統稱有順時針旋轉現象的記錄為負數)；而呈現負數之記錄只出現在 1 或 3 點。
- 2.我們也從每一個敲擊點去觀察，發現重力點擊器若高度越高，旋轉角度就越大。

問題三、迴旋棒受力的位置會影響反轉的現象嗎？

〔研究 6〕不同傾斜面點擊測試

方法：

- 1.將標有 0~8 記號的迴旋棒置於旋轉角度觀察板上，分 (1) A 面在左 (凹面朝上) (2) A 面在右 (凹面朝下) 兩種方向加以測試。
- 2.以鋼珠 (重 2.12g) 做為重力，在第二型點擊器 (高度 10cm) 上進行點擊測試。
- 3.點擊測不同傾斜面點擊測試時，X、Y、Z 軸保持相互垂直：
 - (1) X 軸：迴旋棒 A 端置於 0° 、B 端置於 180° 位置，以中心線為 X 軸。
 - (2) Y 軸：以第二型點擊器上端橫板為 Y 軸。
 - (3) Z 軸：鋼珠自點擊器垂直落下路徑為 Z 軸。
- 4.點擊測試由 0 ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ 分點、分次進行，每一點做 3 次，觀察紀錄比較。

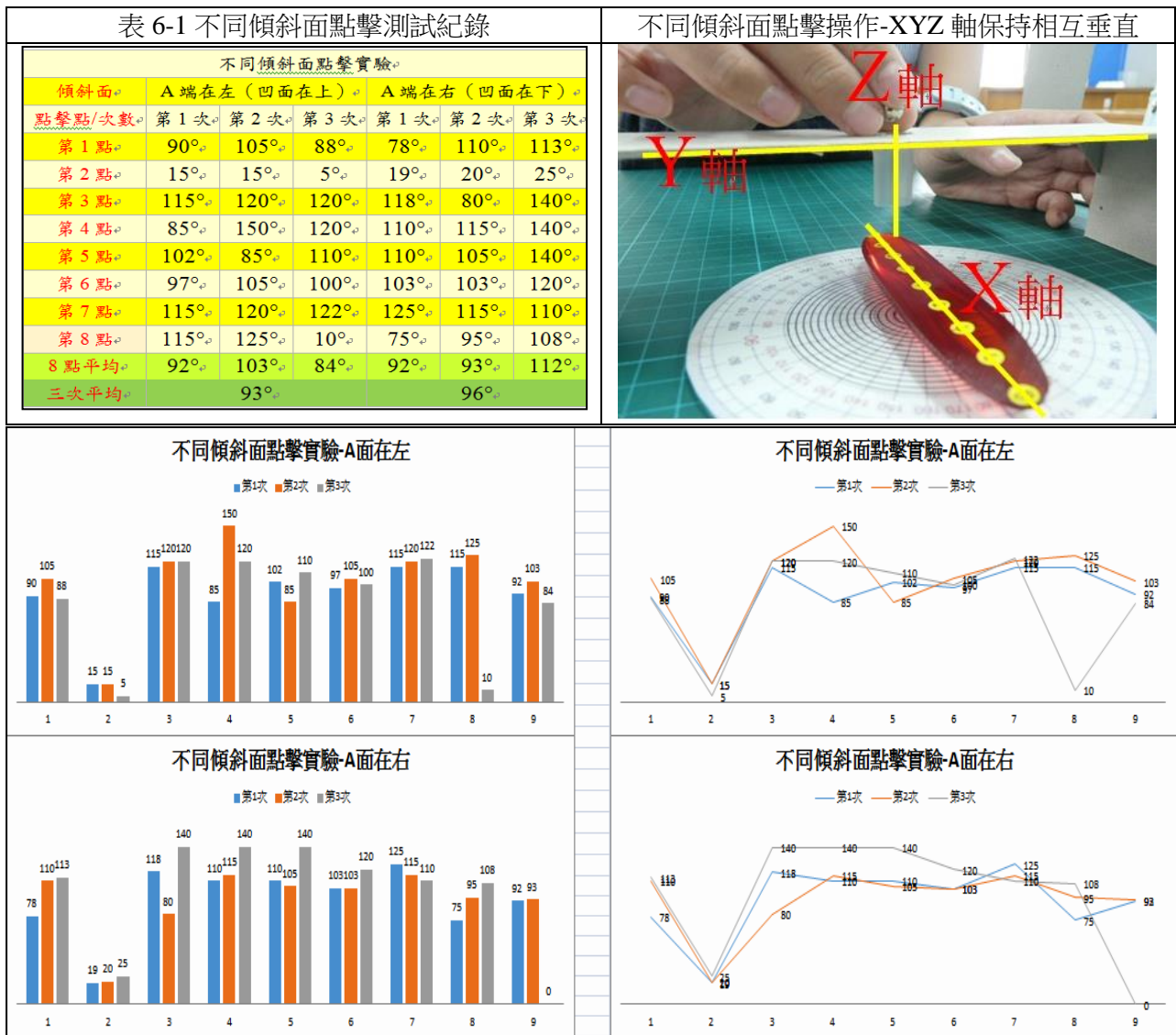


圖 6-1 不同傾斜面點擊測試比較圖

- 結果：1.迴旋棒由**0 1 2 3 4 5 6 7 8**分點、分次進行點擊，都會產生逆時針旋轉現象。
- 2.無論是（1）A面在左（凹面朝上）（2）A面在右（凹面朝下），都會產生逆時針旋轉現象；最多達 150°。
3. A面在右（凹面朝下），產生逆時針旋轉平均角度較大。

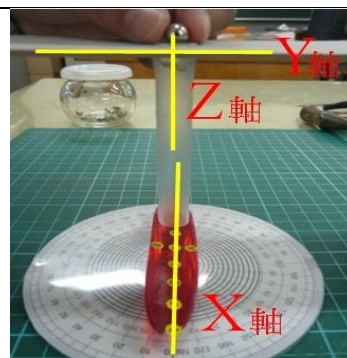
〔研究 7〕不同鋼珠重力點擊

方法：

- 1.將標有 0~8 記號的迴旋棒置於旋轉角度觀察板上，以第二型點擊器(高度 10cm)與 0.45g、0.85g、1.05g、2.12g 的 4 種鋼珠進行點擊測試。
2. X、Y、Z 軸保持相互垂直，迴旋棒 A 面在左（凹面朝上），由**0 1 2 3 4 5 6 7 8**分點、分次進行，測試三次觀察比較。

表 7-1 不同鋼珠重力點擊實驗記錄（單位：度）

鋼珠重量	次數	點 1	點 2	點 3	點 4	點 5	點 6	點 7	點 8
0.45g	第 1 次	2	3	5	8	12	10	20	8
	第 2 次	5	5	15	15	10	13	15	15
	第 3 次	0	2	8	12	15	18	15	15
	平均	2.33	3.33	9.33	11.67	12.33	13.67	16.67	12.67
0.85g	第 1 次	7.00	5.00	18.00	35.00	30.00	30.00	45.00	45.00
	第 2 次	8.00	8.00	30.00	30.00	35.00	50.00	40.00	50.00
	第 3 次	10.00	13.00	45.00	40.00	56.00	20.00	40.00	60.00
	平均	8.33	8.67	31.00	35.00	40.33	33.33	41.67	51.67
1.05g	第 1 次	17.00	10.00	30.00	38.00	63.00	65.00	66.00	66.00
	第 2 次	10.00	30.00	35.00	50.00	75.00	75.00	75.00	80.00
	第 3 次	30.00	22.00	30.00	60.00	75.00	70.00	70.00	80.00
	平均	19.00	20.67	31.67	49.33	71.00	70.00	70.33	75.33
2.12g	第 1 次	55.00	55.00	60.00	90.00	88.00	97.00	120.00	110.00
	第 2 次	78.00	45.00	55.00	75.00	75.00	105.00	108.00	113.00
	第 3 次	75.00	48.00	65.00	90.00	85.00	98.00	105.00	115.00
	平均	69.33	49.33	60.00	85.00	82.67	100.00	111.00	112.67



不同鋼珠重力點擊實驗操作-XYZ 軸互相保持垂直

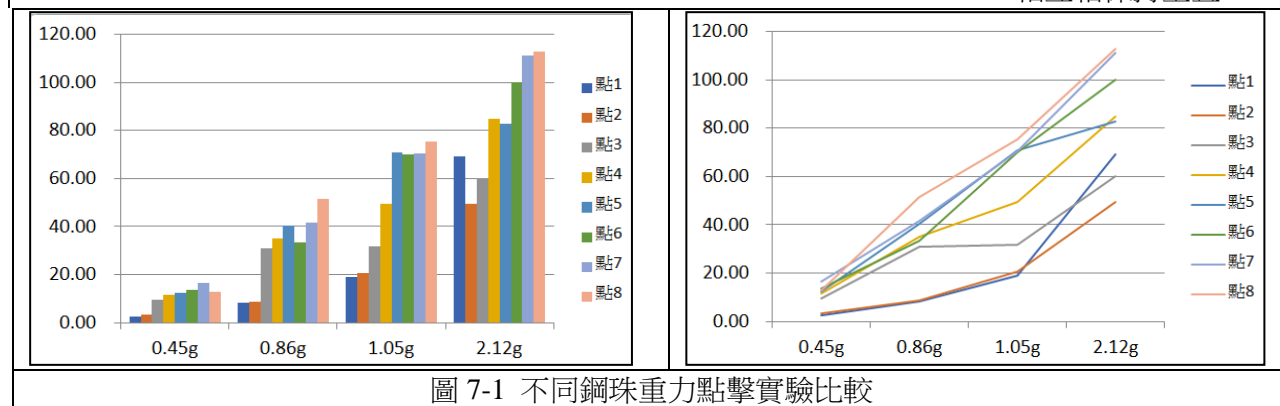


圖 7-1 不同鋼珠重力點擊實驗比較

- 結果：1.迴旋棒由**0 1 2 3 4 5 6 7 8**分點、分次進行點擊，都會產生逆時針旋轉現象。
2. 0.45g、0.85g、1.05g、2.12g 的 4 種鋼珠進行點擊測試，都會產生逆時針旋轉現象。
- 3.鋼珠重量越重，重力越大，點擊迴旋棒產生逆時針旋轉角度越大；2.12g 的鋼珠使迴旋棒產生逆時針旋轉角度平均達 112.67°。
- 4.點擊 A、B 端（**7 8**點）迴旋棒產生逆時針旋轉角度較大；因此，我們發現點擊迴旋棒產生逆時針旋轉角度越靠近末端，逆時針旋轉角度越越大。

〔研究 8〕不同重力油土重力點擊

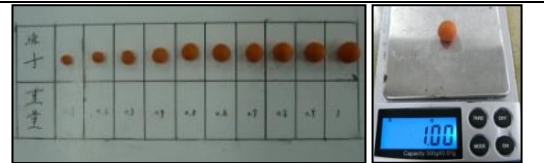
方法：1.將標有 0~8 記號的迴旋棒置於旋轉角度觀察板上，以第二型點擊器（高度 10cm）與 0.1g~1.0g 的 10 種油土球進行點擊測試。

2. X、Y、Z 軸保持相互垂直。

3.每種油土球先加以冰凍保持硬度，以 A 面在左（凹面朝上），皆點擊第 8 點，測試三次觀察比較。

表 8-1 不同重力點擊實驗

重量	0.1 g	0.2 g	0.3 g	0.4 g	0.5 g	0.6 g	0.7 g	0.8 g	0.9 g	1.0 g
測試 1	0°	0°	振動	3°	15°	11°	20°	38°	40°	35°
測試 2	0°	0°	振動	3°	15°	21°	25°	35°	26°	40°
測試 3	0°	0°	3°	7°	12°	16°	22°	40°	35°	50°
平均	0°	0°	1°	4.33°	14°	16°	22.33°	37.67°	33.67°	41.67°



不同重力油土模型與秤重

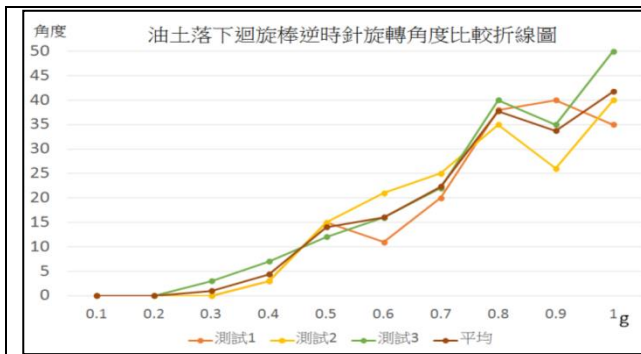
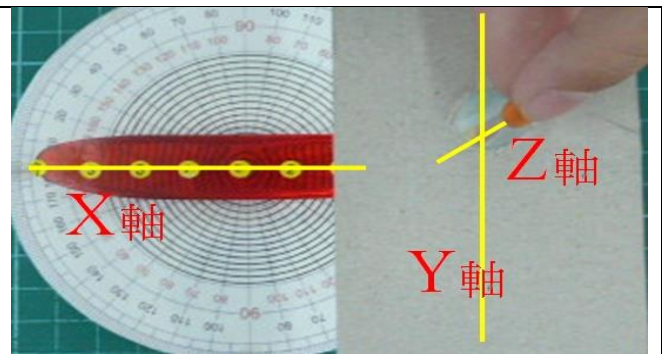


圖 8-1 油土測試逆時針旋轉角度比較圖



油土測試操作- X、Y、Z 軸保持相互垂直

結果：

- 0.1g~1.0g 的 10 種油土球對第 8 點點擊，都會產生逆時針旋轉現象。
- 0.1g、0.2 g 油土球點擊，無法使迴旋棒產生逆時針旋轉；1g 的油土球使迴旋棒產生逆時針旋轉角度平均達 41.67°。
- 我們發現油土球重量越重，重力越大，點擊迴旋棒產生逆時針旋轉角度越大。

問題四、迴旋棒的材質會影響反轉的現象嗎？

〔研究 9〕不同材質迴旋棒反轉現象

方法：





- 我們以矽膠製作模具，自製作迴旋棒模型，方法如下：
 - 以壓克力製作模具外盒（5cm×5cm×12cm）。
 - 壓克力製作模具外盒底部固定迴旋棒，倒入 140 毫升矽膠及 1.4 毫升硬化劑混合劑。
 - 以小針、抖動等方式消除氣泡，靜置 2 小時，再用美工刀劃開模型邊緣取出模型。
- 分別製作二組不同材質迴旋棒模型：





(1) 以 FLUX Delta+數位成型機對迴旋棒進行 3D 掃描，並以 3D 列印製作迴旋棒逆向型、順向型。





(2) 取油土、蠟、陶土、紅土、熱熔膠、保利膠、報紙紙漿、冰塊為材料，以矽膠模具製作迴旋棒模型。

3.以 A 面在左（凹面朝上），在第二型點擊器上用 2.12g 的鋼珠進行點擊測試。

4.點擊第 7、8 點，各測試三次，觀察比較迴旋棒是否逆時針旋轉。

固定迴旋棒	灌入矽膠	去除氣泡	水平靜置
			

調整列印機	初始列印模型外圍	列印外圍第一層	增厚外圍第一層
			

製作保利混和劑	混和劑倒入模具	蠟倒入模具	水平靜置
			





不同材質迴旋棒	鋼珠材質迴旋棒	陶土迴旋棒測試	油土迴旋棒測試
			

表 9-5 不同材質迴旋棒點擊實驗記錄

種類	3D 模型-逆向		3D 模型-順向		油土		蠟	
	7	8	7	8	7	8	7	8
第一次	103°	(翻)	56°	179°	15°	15°	105°	80°
第二次	165°	(翻)	78°	130°	10°	17°	107°	90°
第三次	157°	(翻)	(翻)	199°	13°	17°	103°	107°
種類	陶土		紅土		白熱熔膠		黃熱熔膠	
點擊點	7	8	7	8	7	8	7	8
第一次	29°	15°	80°	97°	115°	41°	30°	28°
第二次	35°	25°	73°	111°	98°	75°	40°	29°
第三次	29°	20°	70°	112°	92°	(-16°)	40°	18°
種類	保利膠		報紙		冰塊			
點擊點	7	8	7	8	7	8		
第一次	55°	75°	27°	(翻)	15°	345°		
第二次	55°	115°	(翻)	(翻)	(-5°)	245°		
第三次	62°	125°	(翻)	(翻)	25°	180°		

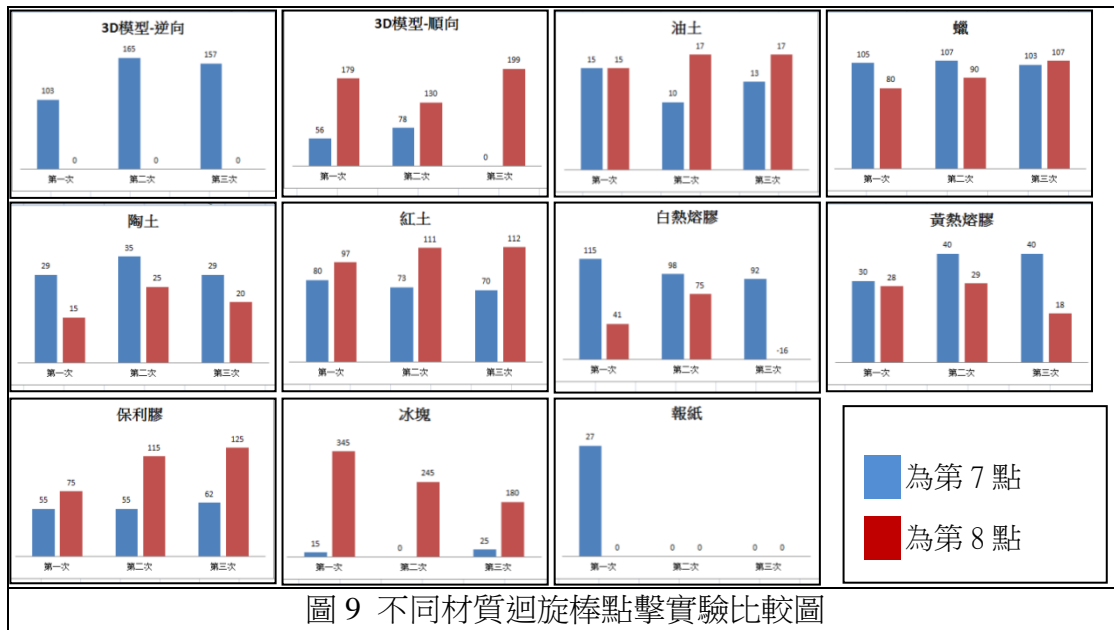


圖 9 不同材質迴旋棒點擊實驗比較圖

結果：

- 迴旋棒 3D 順向型、逆向型，都會產生反向旋轉現象：
 - 順向型順時針旋轉時會產生逆時針反轉現象；逆時針旋轉時不會產生反轉現象。
 - 逆向型逆時針旋轉時會產生順時針反轉現象；順時針旋轉時不會產生反轉現象。
- 其他不同材質的迴旋棒，順時針旋轉時都會產生逆時針反轉現象。
- 不同材質的迴旋棒中，以 3D 順向型逆時針旋轉角度最大，平均達 199°；報紙材質的迴旋棒因為較輕，只有一次逆時針反轉，角度為 27°。

問題五、迴旋棒的重量會影響反轉的現象嗎？

〔研究 10〕不同鋼珠數之迴旋棒反轉現象

- 方法：1.調製保利膠混和劑加入 0.85g 鋼珠增加重量，利用矽膠模具製作不同重量迴旋棒。
- 鋼珠每次增加 1 個，共做出 14 個模型。
 - 以 A 面在左（凹面朝上），在第二型點擊器上用 2.12g 的鋼珠進行點擊測試。
 - 點擊第 7、8 點，各測試三次，觀察比較迴旋棒是否逆時針旋轉。

表 10-1 不同鋼珠數保利膠迴旋棒點擊實驗

鋼珠數	1	2	3	4
點擊點	7	8	7	8
第一次	97°	105°	39°	93°
第二次	125°	107°	43°	107°
第三次	135°	109°	64°	89°
鋼珠數	5	6	7	8
點擊點	7	8	7	8
第一次	103°	213°	15°	18°
第二次	124°	221°	27°	25°
第三次	110°	209°	30°	17°
鋼珠數	9	10	11	12
點擊點	7	8	7	8
第一次	69°	89°	44°	70°
第二次	80°	88°	34°	104°
第三次	68°	113°	44°	96°
鋼珠數	13	14		
點擊點	7	8		
第一次	52°	148°	51°	165°
第二次	91°	116°	47°	188°
第三次	73°	167°	50°	182°

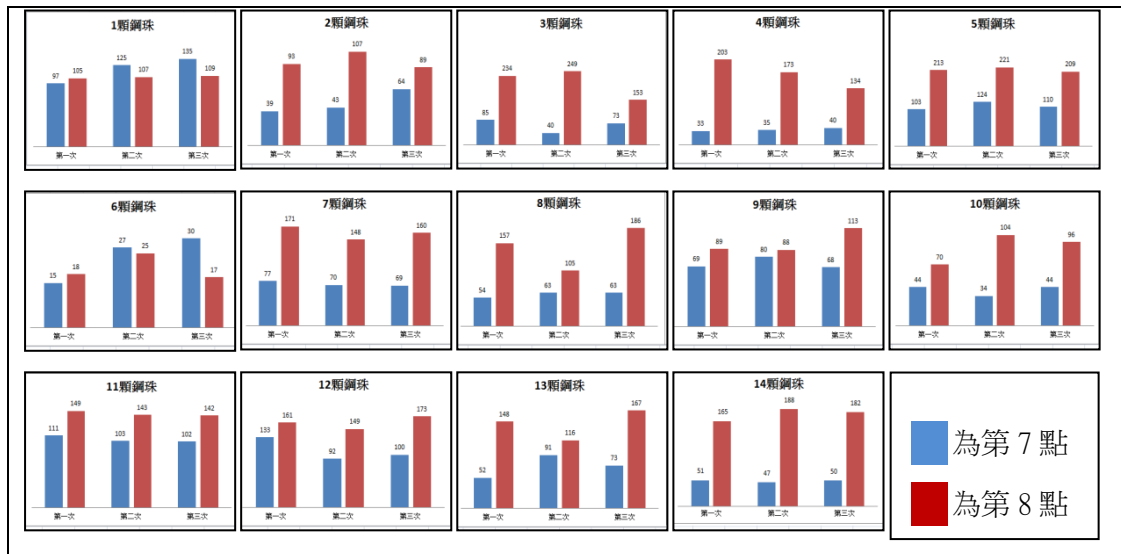


圖 10 不同鋼珠數保利膠迴旋棒點擊實驗比較

結果：1. 點擊第 8 點迴旋棒逆時針轉動角度較點擊第 7 點為大。

2. 重量會影響迴旋棒重心，影響反轉角度。

〔研究 11〕自製模擬迴旋棒

方法：1. 以 30cm 鐵尺 4 支十字垂直，固定在半球型透明塑膠球（直徑 25cm），下方置 360° 量角器，做成迴旋棒模擬器，試行找出迴旋棒反向旋轉之變化。

2. 迴旋棒模擬器操作方式：

- (1) A、B、C、D 四點，各放 30g 重的相同磁鐵；每次移動 5cm，觀察是否旋轉。
- (2) 以順時針、逆時針加以旋轉，觀察是否反轉。
- (3) 以點擊方式旋轉，觀察是否旋轉、反轉。

3. 移動磁鐵觀察迴旋棒模擬器是否旋轉的方法：

- (1) BCD 不動，移動 A。
- (2) ACD 不動，移動 B。
- (3) ABD 不動，移動 C。
- (4) ABC 不動，移動 D。
- (5) CD 不動，移動 AB。
- (6) AB 不動，移動 CD。
- (7) 同時移動 ABCD。

4. 各測試三次，觀察比較迴旋棒是否逆時針旋轉。



表 11 迴旋棒模擬器旋轉觀察紀錄

編號	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
順時針轉	×	×	×	×	×	×	×
逆時針轉	×	×	×	×	×	×	×
點擊	×	×	×	×	×	×	×

「×」表示不會反轉

結果：

1. (1) ~ (8) 的型態，迴旋棒模擬器以順時針、逆時針加以旋轉或點擊，都不會反轉。
2. 我們認為迴旋棒模擬器點擊、順逆旋轉不會反轉原因是模擬器過大，迴旋棒反轉變化非常細微，我們會針對這部分再加以探討。

問題六、迴旋棒受力的方法會影響反轉的現象嗎？

〔研究 12〕迴旋棒不同受力方法反轉現象

方法：

1. 自製迴旋棒反轉測試撥動台，製作與操作說明如下：
 - (1) 以八塊方格板做成底座、直尺（30 cm）做彈力尺、玻璃板為旋轉板，組成撥動台。
 - (2) 撥動台彈動直尺做為撥動力，分別為 5 g、10 g、15 g、20g。
 - (3) 改變直尺撥動角度為撥動力大小，分別為 10°、15°、20°。
 - (4) 直尺撥動後回到原位。
2. 將各種自製迴旋棒置於玻璃旋轉板上，順時針撥動旋轉，觀察是否反轉。
3. 各測試三次，觀察比較迴旋棒是否逆時針旋轉。

表 12-1 迴旋棒撥動反轉測試說明

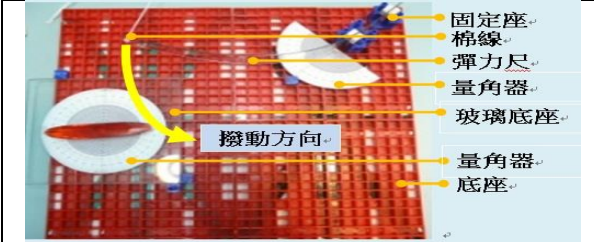



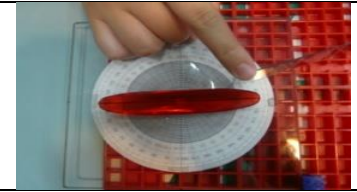
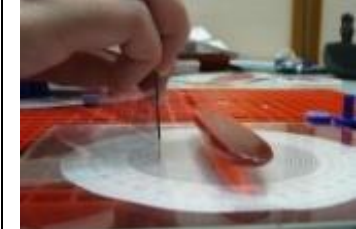


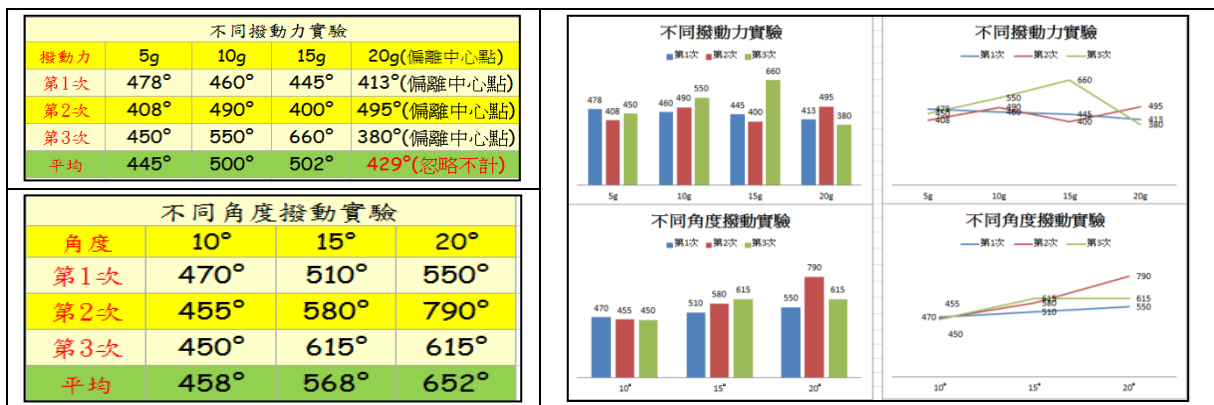
迴旋棒反轉測試撥動台		以彈簧秤量測彈力尺撥動力	
			
固定彈力尺	測試彈力尺	撥動彈力尺反轉測試	
			
原型迴旋棒反轉測試	3D 逆向型反轉測試	保利膠迴旋棒反轉測試	
			

表 12 迴旋棒撥動反轉測試結果



結果：

- 1.15 g 撥動力撥動迴旋棒時，反轉角度較大，平均達 502°；5 g 撥動力使迴旋棒反轉角度較小，但是平均也達 445°；20 g 撥動力過大會讓迴旋棒偏離中心點，雖然反轉角度平均也達 429°，仍忽略不計。
- 2.撥動角度為 20°時，迴旋棒反轉角度較大，平均達 652°；10°時，迴旋棒反轉角度較小，平均達 458°。
- 3.撥動角度越大，撥動力也越大，因此撥動力越大，迴旋棒反轉角度會越大，反之越小。

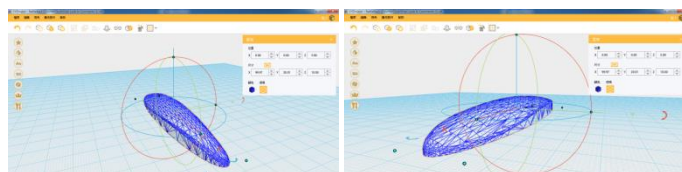
問題七、迴旋棒 XYZ 軸的長短會影響反轉的現象嗎？

〔研究 13〕改變迴旋棒 XYZ 軸長短比較

方法：

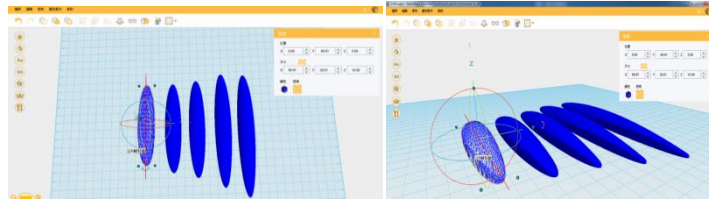
- 1.我們利用 XYZmaker 軟體設計三軸等距、等比變化模型，利用原型 X 軸 99.97mm、Y 軸 20.01mm、Z 軸 10.00mm 的長度為基礎，下列二種方式以 3D 模型探討反轉現象：
 - (1) 等距方式改變 X、Y、Z 軸。
 - (2) 等比方式改變 X、Y、Z 軸。
- 2.依據學校 3D 列印機所能列印最大範圍(140mmX140mmX140mm)，我們的設計如下：

(1) 原型迴旋棒型態

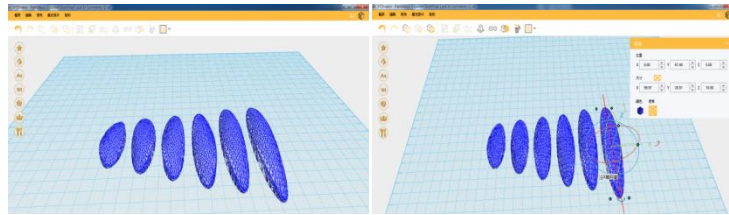


(2) X 軸的改變

- a.在 Y 與 Z 軸長度不變下，以 X 軸等差加 10mm(1 公分)方式來改變軸距，如下圖由左而右分別是 99.97mm(原型)、109.97mm、119.97mm、129.97mm、139.97mm。

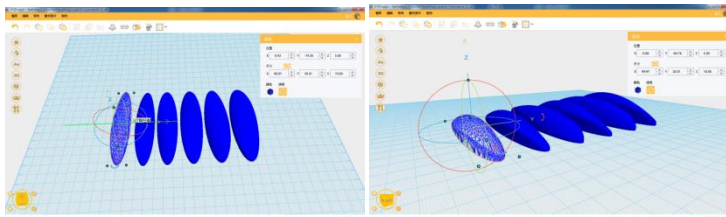


b.在 Y 與 Z 軸長度不變下，以 X 軸等差減 10mm(1 公分)方式來改變軸距，如下圖由左而右分別是 29.97mm、39.97mm、49.97mm、59.97mm、69.97mm、79.97mm、89.97mm、99.97mm(原型)。

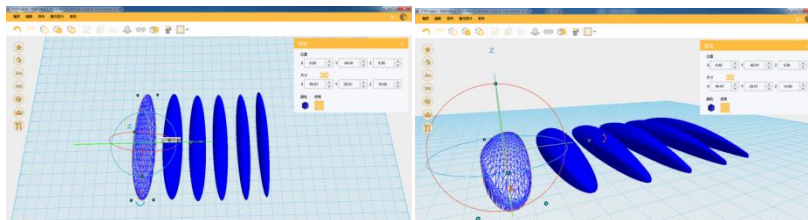


(3) Y 軸的改變

a.在 X 與 Z 軸長度不變下，以 Y 軸等差加 2mm(0.2 公分)方式來改變軸距，如下圖由左而右分別是 20.01mm(原型)、22.01mm、24.01mm、26.01mm、28.01mm、30.01mm。

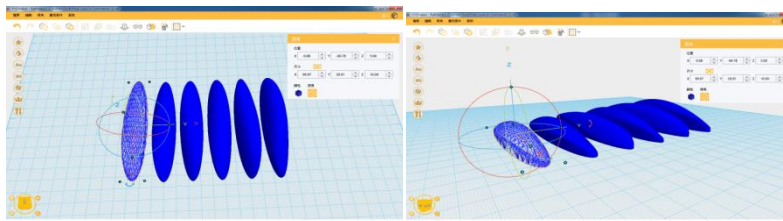


b.在 X 與 Z 軸長度不變下，以 Y 軸等差減 2mm(0.2 公分)方式來改變軸距，如下圖由左而右分別是 20.01mm(原型)、18.01mm、16.01mm、14.01mm、12.01mm、10.01mm。

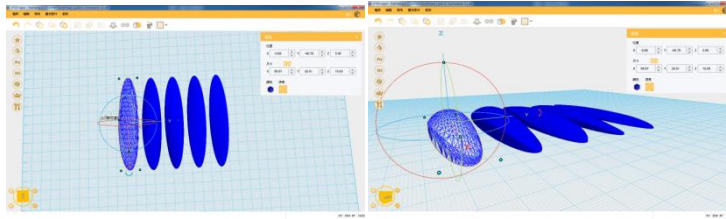


(4) Z 軸的改變

a.在 X 與 Y 軸長度不變下，以 Z 軸等差加 2mm(0.2 公分)方式來改變軸距，如下圖由左而右分別是 10.00mm(原型)、12.00mm、14.00mm、16.00mm、18.00mm、20.00mm。



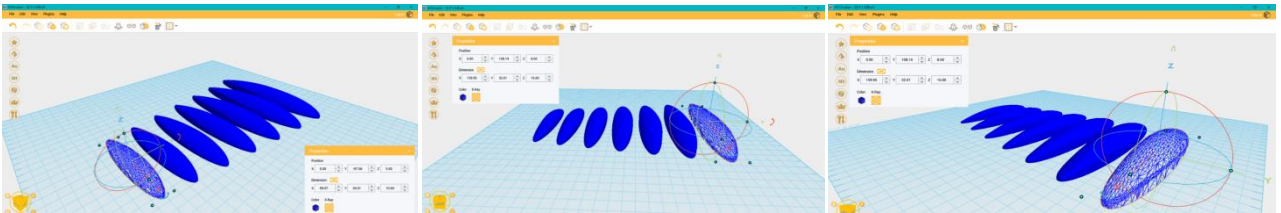
b.在 X 與 Y 軸長度不變下，以 Z 軸等差減 2mm(0.2 公分)方式來改變軸距，如下圖由左而右分別是 10.00mm(原型)、8.00mm、6.00mm、4.00mm、2.00mm。



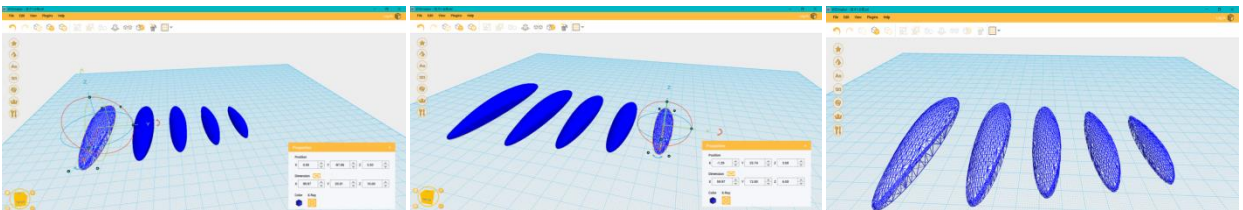
(5) 等比方式改變 X、Y、Z 軸

a. 原型迴旋棒的三軸長短參數分別：X 軸 99.97mm、Y 軸 20.01mm、Z 軸 10.00mm。

b. 等倍率放大：以原型迴旋棒以 X、Y 和 Z 軸均以同時等倍率放大，如下圖由左而右分別 1 倍(原型)、1.1 倍(109.96mm×22.01mm×11mm)、1.2 倍(119.96 mm×24.01 mm×12mm)、1.3 倍(129.96 mm×26.01 mm×13mm)、1.4 倍(139.96 mm×27.01 mm×14mm)、1.5 倍(149.96 mm×28.01 mm×15mm)和 1.6 倍(149.96 mm×29.01 mm×16mm)。



c. 等倍率縮小：以原型迴旋棒以 X、Y 和 Z 軸均以同時等倍率縮小，如下圖由左而右分別 1 倍(原型)、0.9 倍(89.97 mm×18 mm×9mm)、0.8 倍(79.97 mm×16 mm×8mm)、0.7 倍(69.97 mm×14 mm×7mm)、0.6 倍(59.97 mm×12 mm×6 mm)。



3. 我們以研究五的點擊法對：(1) 等距方式改變 X、Y、Z 軸 (2) 等比方式改變 X、Y、Z 軸的 3D 列印模型探討反轉現象。

表 13-1 3D 列印模型及操作

說明	點擊法	原型點擊	不同 Y 軸點擊	不同 Z 軸點擊
操作照片				
說明	X 軸不同的 3D 列印模型		Y 軸不同的 3D 列印模型	
照片				
說明	Z 軸不同的 3D 列印模型		等比縮放的 3D 列印模型	
照片				

表 13-4 改變 Z 軸長角度比較

改變 Z 軸長										
軸長/mm	20.00		18.00		16.00		14.00		12.00	
點擊點	7	8	7	8	7	8	7	8	7	8
第1次	0	0	0	0	30	35	50	80	205	240
第2次	0	0	0	0	27	38	32	55	175	220
第3次	0	0	0	0	82	22	84	190	170	180
平均	0	0	0	0	46	32	55	108	183	213
軸長/mm	10.00		8.00		6.00		4.00		2.00	
點擊點	7	8	7	8	7	8	7	8	7	8
第1次	51	28	51	28	0	0	0	0	0	0
第2次	56	30	56	30	0	0	0	0	0	0
第3次	84	36	84	36	0	0	0	0	0	0
平均	123	138	64	31	0	0	0	0	(-9)	0

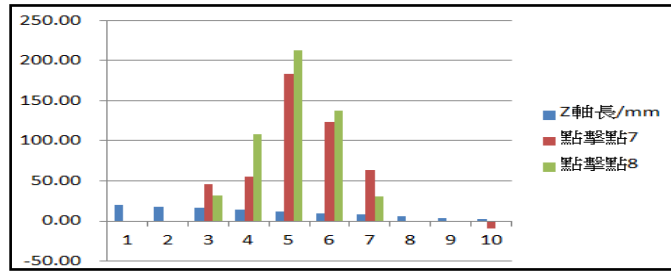


圖 13-3 改變 Z 軸長角度比較圖

表 13-5 不同重力 (10cm) 角度比較

重力0.45g 點擊高度10cm												
等比改變	0.6X		0.7X		0.8X		0.9X		1X		1.1X	
點擊點	7	8	7	8	7	8	7	8	7	8	7	8
第1次	0	0	0	0	35	93	9	152	45	185	66	207
第2次	0	0	0	0	18	91	58	98	30	175	67	174
第3次	0	0	0	0	12	88	21	125	35	135	56	131
平均	0	0	0	0	22	91	29	125	37	165	63	171
改變項目	1.2X		1.3X		1.4X		1.5X		1.6X			
點擊點	7	8	7	8	7	8	7	8	7	8	7	8
第1次	124	212	163	223	125	159	135	163	145	180		
第2次	113	121	127	271	130	165	140	158	135	181		
第3次	121	143	104	150	150	172	160	159	165	179		
平均	119	159	131	215	135	165	145	160	148	180		

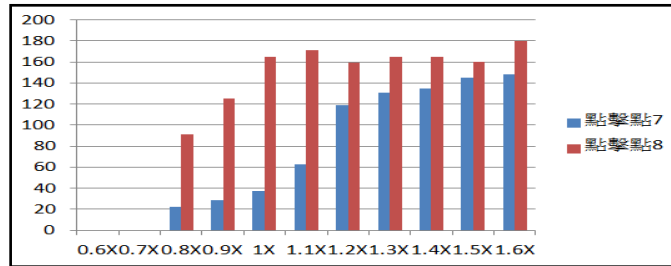


圖 13-4 不同重力 (10cm) 角度比較圖

表 13-6 不同重力 (5cm) 角度比較

重力0.45g 點擊高度5cm												
等比	0.6X		0.7X		0.8X		0.9X		1X		1.1X	
點擊點	7	8	7	8	7	8	7	8	7	8	7	8
第1次	166	119	139	143	49	68	23	59	18	7	4	12
第2次	149	104	148	139	29	40	13	72	18	8	3	8
第3次	137	105	137	143	33	65	14	62	10	7	6	8
平均	151	108	141	142	37	58	17	64	15	7	4	9
改變項目	1.2X		1.3X		1.4X		1.5X		1.6X			
點擊點	7	8	7	8	7	8	7	8	7	8	7	8
第1次	3	7	2	8	1	1	0	0	0	0	0	0
第2次	4	5	3	8	0	1	0	0	0	0	0	0
第3次	4	6	4	4	1	0	0	0	0	0	0	0
平均	4	6	3	7	1	1	0	0	0	0	0	0

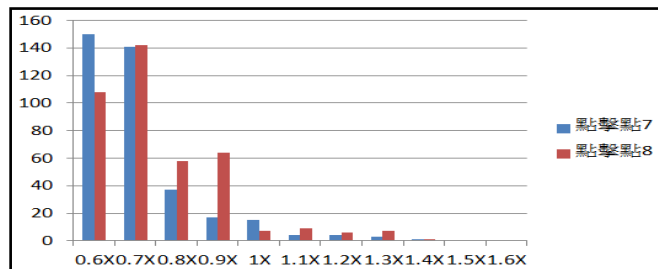


圖 13-5 不同重力 (5cm) 角度比較圖

結果：我們發現

1. 等距方式改變 X、Y、Z 軸下，點擊第 7、8 點迴旋棒都會反轉，點擊 8 點比第 7 點平均反轉較度較大，其他情形如下：
 - (1) 改變 X 軸長時，X 軸長越長迴旋棒平均反轉較度越大；軸長越短迴旋棒平均反轉較度越小。
 - (2) 改變 Y 軸長時，Y 軸長越短迴旋棒平均反轉較度越小；軸長小於 1cm 時不會反轉。
 - (3) 改變 Z 軸長時，Z 軸長高於 1.6cm、低於 0.6cm 時，迴旋棒不會反轉；以原型 Z 軸長反轉角度最大。
2. 等比方式改變 X、Y、Z 軸下，點擊第 7、8 點迴旋棒都會反轉，點擊 8 點亦比第 7 點平均反轉較度較大，其他情形如下：
 - (1) 以 0.45g 鋼珠在 10cm 高度點擊，點擊第 7、8 點迴旋棒都會反轉，點擊 8 點比第 7 點平均反轉較度較大，倍數 0.7 以下迴旋棒過輕，會偏離中心點無法反轉。
 - (2) 以 0.45g 鋼珠在 5cm 高度點擊，點擊第 7、8 點迴旋棒都會反轉，點擊 8 點比第 7 點

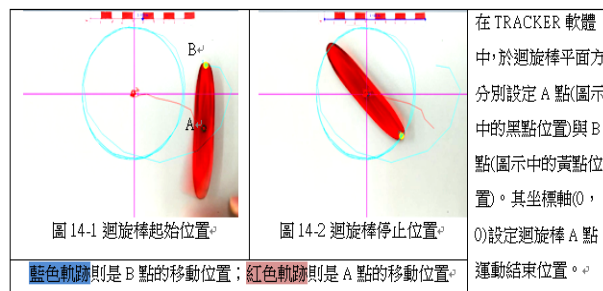
平均反轉較大，由於高度 5cm 產生重力過小，無法讓倍數 1.5、1.6 以上迴旋棒反轉。

問題八、利用 TRACKER 軟體分析迴旋棒的旋轉變化

〔研究 14〕迴旋棒旋轉與反轉現象

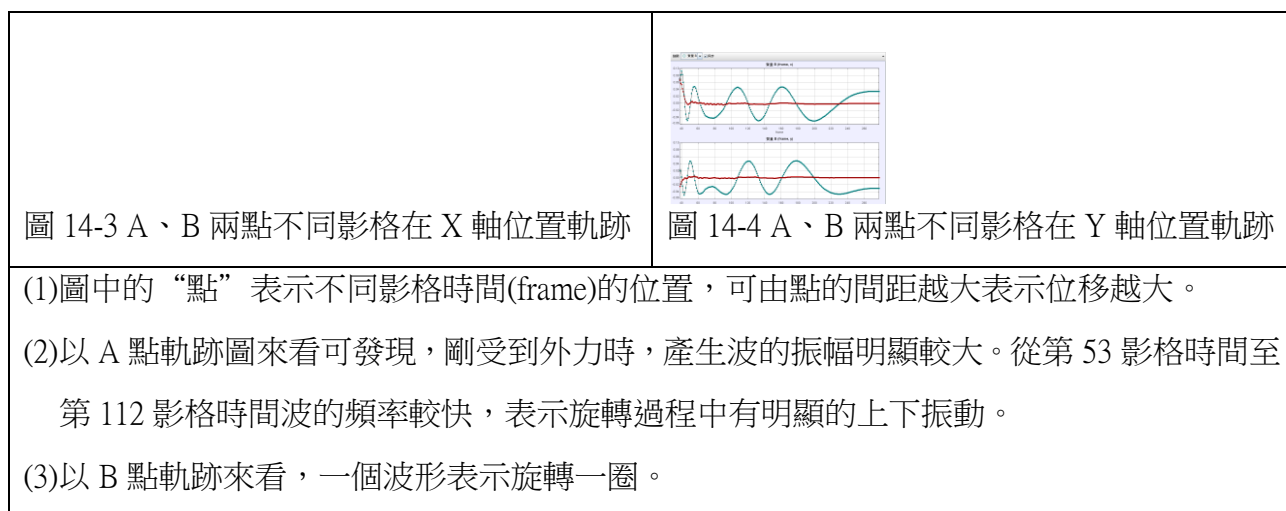
方法：

- 1.在迴旋棒分別定位 A(黑點)和 B(黃點)兩點並透過相機錄影方式記錄其旋轉過程。
- 2.使用 TRACKER 軟體來分析迴旋棒旋轉過程及路徑。



- 3.旋轉軌跡設定與說明如右。

結果：1.點與影格分析結果



2.分階段觀察旋轉結果

(1)1,2,3,4 為旋轉分析階段；a,b,c 為旋轉特殊變化分析點，說明如下：

階段說明	線段說明
階段 1：迴旋棒受到外力時的位移軌跡階段。	線段 a：迴旋棒因旋轉有開始上下震動時。
階段 2：迴旋棒順時針旋轉階段。	線段 b：迴旋棒順時針旋轉停止時。
階段 3：迴旋棒逆時針旋轉階段。	線段 c：迴旋棒停止逆時針旋轉時。
階段 4：迴旋棒停止旋轉階段。	

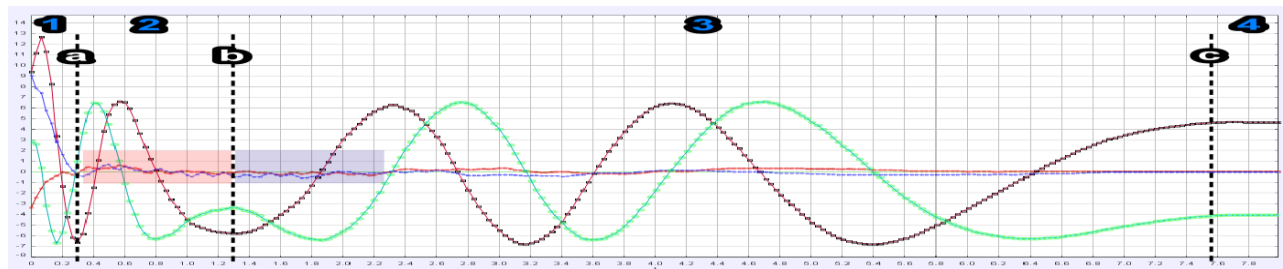


圖 14-5 A 點和 B 點的在 X、Y 軸上的軌跡分布圖

(2)受外力時(階段 1)→順時針旋轉(階段 1、2)→上下振動(線段 a、階段 2)→停止旋轉(線段 b)→上下振動(階段 3)→逆時針旋轉(階段 3)→停止旋轉(線段 c、階段 4)

a.以 A 點的軌跡來看，在階段 2 粉紅色塊時，軌跡點連線是明顯上下折線方式呈現。在停止旋轉的瞬間(線段 b)，則階段 3 紫色塊的軌跡點連線也是上下折線方式呈現。顯示迴旋棒在停止旋轉瞬間的前後均有上下震動的現象產生。

b.以 B 點的軌跡來看，在階段 1 時，迴旋棒受到外力的作用而造成明顯的位移現象；在階段 2 時，軌跡點の間距明顯從大漸小，表示順時針的旋轉速度逐漸地變小，轉到線段 b 則瞬間停止；在階段 3 時，從線段 b 至線段 c 範圍，反轉了兩圈多(兩個波型態)；在最後階段 4 則停止反轉現象。

3.不同階段的瞬時速度與向心加速度之比較(紅點軌跡表示 A 點；藍點軌跡表示 B 點)

由上兩圖示，橫軸表示影格(從第 38 影格至第 278 影格)，縱軸分別表示 X 軸及 Y 軸的位置。並透過 TRACKER 軟體分析不同影格時間的速度向量與加速度向量變化(附件一)。是迴旋棒反轉關鍵，以圖表說明如下：

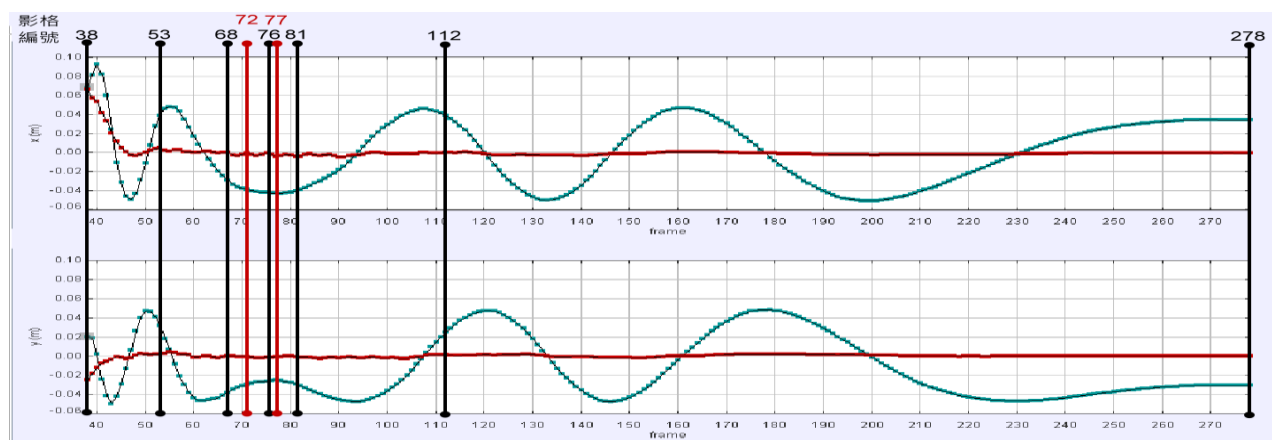
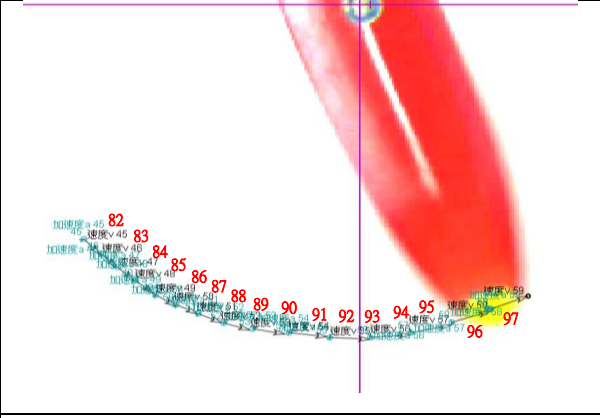
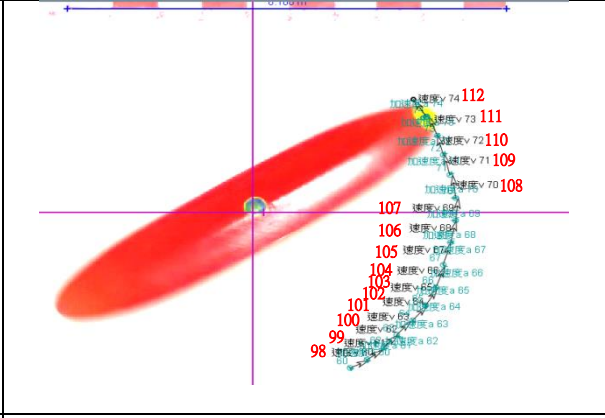


圖 14-6 不同影格紀錄軌跡位置圖

影格	38	39—53
圖像		
說明	黑色標籤 A 點為迴旋棒的中心位置；黃色標籤 B 點為迴旋棒的一端位置。從第 38 影格開始記錄，此時迴旋棒尚未受到任何外力。並無任何瞬時速度及向心加速度的產生。	當迴旋棒一端受到外力旋轉的產生。從圖中可發現加速度與速度並不是同一方向，以 B 點來看，方向會不斷地改變。而形成以 A 點為中心旋轉現象產生。

影格	54-68	65-68
圖像		
說明	當迴旋棒順時針旋轉一段時間後，發現圖中的加速度長度與速度長度呈現愈來愈短。表示順時針旋轉的速度逐漸減少。此過程中會發現迴旋棒的兩端會有明顯的上下振動。推測迴旋棒在順時針旋轉時，其桌面接觸點與重心位置未在同一垂直線上形成上下振動情形產生。	從圖示影格時間可發現在第 68 影格呈現的速度與加速度的方向相反，而使得迴旋棒的順時針旋轉速度逐漸變小。推測此時加速度應是迴旋棒與接觸面所產生摩擦力造成的。
影格	69-72	73-76
圖像		
說明	可明顯看出影格 69 至 72 因迴旋棒上下振動摩擦力造成順時針旋轉的速度愈來愈小的現象。	從影格 73 至 76 可看見迴旋棒的順時針旋轉速度逐漸變小及以非常小的距離移動。
影格	77	78-81
圖像		
說明	在第 77 影格中，可發現此時的順時針旋轉的速度為 0，而加速度方向則以逆時針方向產生。從 A 點軌跡位置在圖五和六中發現此時 xy 軸還是上下振動狀態。	迴旋棒在此影格 78 時開始反轉產生，可發現速度與加速度為同一方向。推測重心與接觸點並不在同一鉛直線上，上下振動現象明顯持續，造成迴旋棒因重心偏移兩端形成反轉現象。

影格	82-97	98-112
圖像		
說明	反轉速度逐漸變快，且此時的加速度逐漸變成向心加速度，使迴旋棒以逆時針旋轉。	從反轉的過程中，可發現迴旋棒則以圓周運動方式轉動。直到反轉兩圈多後停止。

4.我們認為迴旋棒因重心與底部接觸點在順時針旋轉時無法穩定同一旋轉軸上而因重心偏移產生的摩擦力進而造成迴旋棒有明顯的上下振動現象。

陸、討論

一、我們發現：

(一) 迴旋棒運動軌跡呈現特定圖形

Rattleback(又名 Celt Stone)為一橢圓形底面之物體，當往某個特定的方向旋轉後，它會開始上下震盪，然後再朝相反的方向旋轉。逆轉原因來自動摩擦力之分力所造成的力矩，此分力與接觸面摩擦係數有關，在某些條件下會產生最佳逆轉效果(高至辰、郭先予，2006)。我們以自製模型來分析各種變因與逆轉效果的關係，觀測到迴轉棒運動過程中，其對稱中心在 X、Y 兩方向的震盪振幅會隨時間呈現收斂的狀態，軌跡呈現特定圖形。

(二) 迴旋棒逆時針反轉現象與重心有關

我們發現迴旋棒的不對稱結構：左右不對稱、上下不對稱，讓迴旋棒上下振動時會造成與接觸面的滑動現象，這種現象與細微的變化，會讓迴旋棒旋轉時逐漸累積反轉能量；如果接觸面較粗糙時，逆時針反轉現象就不明顯，因此我們分析認為迴旋棒逆時針反轉現象與重心有關。

(三) 迴旋棒逆時針反轉力量來自於不穩地擺動所形成的力量大於轉動動能

迴旋棒順時針旋轉一陣子之後，會出現不穩定的晃動現象，我們分析迴旋棒旋轉已無法繼續繞中心軸、中心點旋轉，因此形成不穩定的晃動現象，而這種晃動就是一種擺

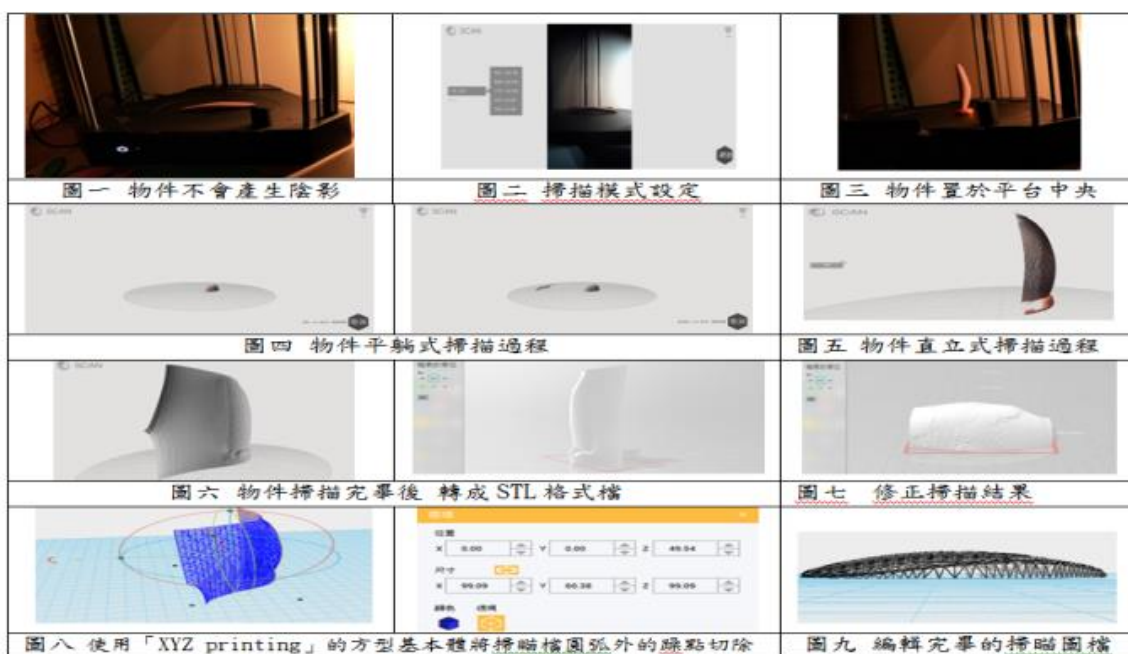
動的力量，這種現象在「點擊」迴旋棒的一端時特別明顯，因此我們分析迴旋棒逆時針反轉力量來自於不穩地擺動所形成的力量，當擺動力量大於順時針轉動動能時就形成逆時針反轉現象。

二、迴旋棒 3D 掃描設計探討

(一)目的：透過市售迴旋棒的 3D 掃描平躺 式及直立式，分析迴轉棒的曲面分布情形。

(二)步驟：

- 1.啟動「FIUX+」3D 列印機並與電腦主機連線，掃描物件放置旋轉平台中央(如圖三)。
- 2.確認光源配置適合掃描，最適合的環境為背光環境。紅線越清楚，則掃描點雲的效果越好。當環境光源過度明亮或太暗時，紅線可能會不清楚，或是太模糊(如圖一)。
- 3.掃描模式相關設定(如圖二)。
- 4.待掃描完畢，將檔案轉成 STL 檔(如圖六)
- 5.使用「XYZ printing」的方型基本體將掃描檔圓弧外的噪點切除(如圖八)。

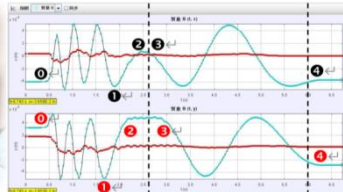


三、TRACKER 軟體分析迴旋棒在不同材質接觸點比較

(一)切割墊

①-①是代表迴旋棒在旋轉時，會劇烈晃動，所以在追蹤軌跡時，間格會比較大；②-③是代表迴旋棒從旋轉正要轉成反轉時，側面會與接觸面摩擦，所以晃動角度較小。③-④是代表迴旋棒從反轉到結束，晃動幅度比較小，所以後續的追蹤較為密集。反轉時間：2.6 秒到 4.5 秒，約 1.9 秒

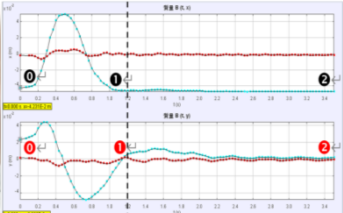
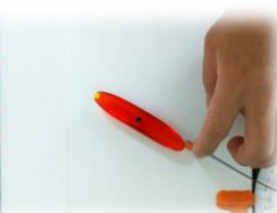
(二)光滑木桌



①-①是代表迴旋棒在旋轉時，會劇烈晃動，所以在追蹤軌跡時，間格會比較大；②-③是代表迴旋棒從旋轉正要轉成反轉時，側面會與接觸面摩擦，

所以晃動角度較小。③-④是代表迴旋棒從反轉到結束，晃動幅度比較小，所以後續的追蹤較為密集。反轉時間：2.6 秒到 6 秒，約 3.4 秒

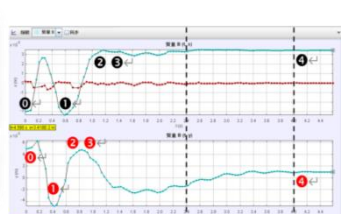
(三)珍珠板



迴旋棒在珍珠板上不會有反轉現象，從圖中①-①可知道迴旋棒旋轉一圈後，就一直呈現平穩的停止狀態，我們推測是因為迴旋棒側面與珍珠板底面摩擦力太強，造成抵銷。

成抵銷。

(四)桌面塑膠板

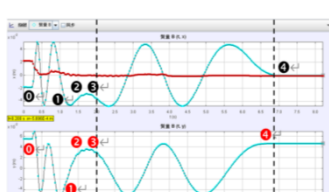


①-①是代表迴旋棒在旋轉時，會劇烈晃動，所以在追蹤軌跡時，間格會比較大；我們發現迴旋棒只轉了一圈就開始反轉，表示塑膠板底面可以使迴旋棒在更快的時間內反轉。

②-③是代表迴旋棒從旋轉正要轉成反轉時，側面會與接觸面摩擦，所以晃動角度較小。

③-④是代表迴旋棒從反轉到結束，晃動幅度比較小，所以後續的追蹤較為密集。反轉時間：2.4 秒到 4 秒，約 1.6 秒

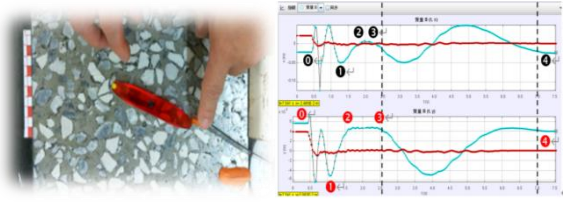
(五)電腦桌面



①-①是代表迴旋棒在旋轉時，會劇烈晃動，所以在追蹤軌跡時，間格會比較大；②-③是代表迴旋棒從旋轉正要轉成反轉時，側面會與接觸面摩擦，所以晃動角度較小；②-③時間很短，表示電腦桌底面可以產生大量摩擦力，使其不需要太多摩擦底面的時間就可以反轉。

③-④是代表迴旋棒從反轉到結束，晃動幅度比較小，所以後續的追蹤較為密集。反轉時間：2 秒到 6.9 秒，約 4.9 秒，共反轉了兩圈

(六)磨石子地板



①-①是代表迴旋棒在旋轉時，會劇烈晃動，所以在追蹤軌跡時，間格會比較大；②-③是代表迴旋棒從旋轉正要轉成反轉時，側面會與接觸面摩擦，所以晃動角度較小；②-③時間很短，表示磨石子地板底面可以產生大量摩擦力，使其不需要太多摩擦底面的時間就可以反轉。③-④是代表迴旋棒從反轉到結束，晃動幅度比較小，所以後續的追蹤較為密集。反轉時間：2.5 到 7 秒，約 4.5 秒

分析：

1. 反轉時間比較：電腦桌面 4.9 秒>磨石子地板 4.5 秒>光滑木桌 3.4 秒>切割墊 1.9 秒>塑面塑膠板 1.6 秒
2. 從不同的軌跡圖來看，迴旋棒在順時轉停止前與開始反轉時，迴旋棒都會有明顯地上下振動現象產生。
3. 可發現接觸面愈光滑，反轉現象愈明顯。可知迴旋棒在開始反轉時，當接觸面的摩擦阻力太大反而使迴旋棒重心偏移受到阻礙而無法反轉現象產生。

柒、結論

- 一、迴旋棒的重心會影響反轉的現象，重心過高或過低會影響迴旋棒反轉的反轉角度。
- 二、迴旋棒的形狀會影響反轉的現象，形狀不規則會影響迴旋棒反轉的反轉角度，甚至不會反轉。
- 三、迴旋棒受力的大小會影響反轉的現象，迴旋棒受力越大，反轉角度越大；迴旋棒受力越小，反轉角度越小；如施加迴旋棒的力量過大，迴旋棒會偏離旋轉位置，但是迴旋棒仍會反轉。
- 四、迴旋棒受力的位置影響受力的大小，因此影響反轉角度。
- 五、迴旋棒的材質會影響反轉的現象，材質越輕，迴旋棒越不容易旋轉或反轉；迴旋棒底面粗糙，反轉角度較小。
- 六、等距方式改變 X、Y、Z 軸下，點擊第 7、8 點迴旋棒都會反轉，點擊 8 點比第 7 點平均反轉較度較大，其他情形如下：
 - (一) 改變 X 軸長時，X 軸長越長迴旋棒平均反轉較度越大；軸長越短，迴旋棒平均反轉角度越小。
 - (二) 改變 Y 軸長時，Y 軸長越短迴旋棒平均反轉較度越小；軸長小於 1cm 時不會反轉。

(三) 改變 Z 軸長時，Z 軸長高於 1.6cm、低於 0.6cm 時，迴旋棒不會反轉；以原型 Z 軸長反轉角度最大。

(四) 等距方式改變 X、Y、Z 軸，必須維持相當的比例關係，以 Y、Z 軸最為關鍵：

1.X 軸不變時 (100mm) Y 軸不能小於 10mm。

2.X 軸不變時 (100mm) Z 軸不能大於 18mm、小於 10mm。

七、等比方式改變 X、Y、Z 軸下，點擊第 7、8 點迴旋棒都會反轉，點擊 8 點亦比第 7 點平均反轉較度較大，因此等比放大或縮小的迴旋棒模型都會有反轉現象，其他情形如下：

(一) 以 0.45g 鋼珠在 10cm 高度點擊，點擊第 7、8 點迴旋棒都會反轉，點擊 8 點比第 7 點平均反轉較度較大，倍數 0.7 以下迴旋棒過輕，會偏離中心點無法反轉。

(二) 以 0.45g 鋼珠在 5cm 高度點擊，點擊第 7、8 點迴旋棒都會反轉，點擊 8 點比第 7 點平均反轉較度較大，由於高度 5cm 產生重力過小，無法讓放大 1.5、1.6 倍以上迴旋棒反轉。

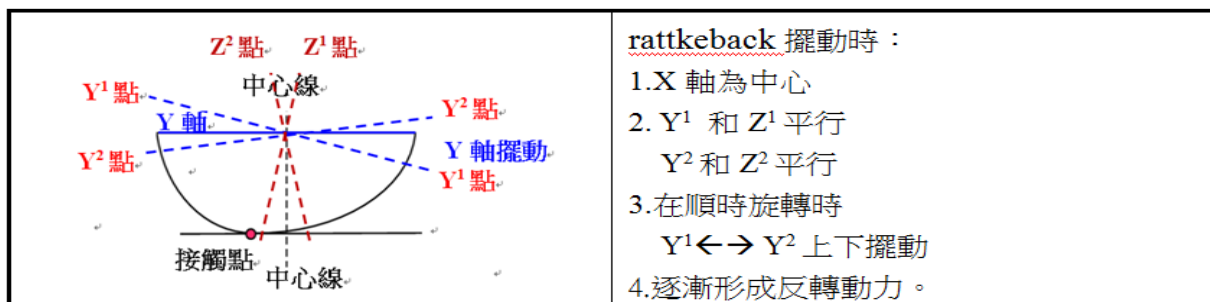
八、應用迴旋棒 X 軸、Y 軸、Z 軸的關係及重心結構的原理應用設計，結果：

(一) 我們推測迴旋棒是靠著結構重心的轉移，再藉由本身的底面弧度而產生不穩定的晃動，且產生反轉，我們認為 rattkeback 有兩種反轉模式：

1.第一種反轉模式：迴旋棒在受力轉動後能在第一時間，在重量較大的位置受重力影響會產生向下的力量，以晃動模式，抵消轉動力量，形成反轉。

2.第二種反轉模式：轉動時無法在第一時間抵消轉動力量，轉動時會以重量最重點(如新型迴旋棒熱熔膠的位置)為中心轉動，等到轉動力量漸漸消去後，再向著重心偏向傾動，形成反轉。

(二) rattkeback 反轉原理圖示如下：



(三) 表面材質的接觸面不能選擇摩擦力太強或摩擦力太弱的表面材質。摩擦力太強會在 rattkeback 正要反轉時讓 rattkeback 順勢停止；而摩擦力太弱會讓 rattkeback 根本無法製造出反轉的機會(無法利用接觸面而讓轉動力量削減，而產生晃動進而反

轉)。因此 rattkeback 必須在平穩而不平滑的表面即可進行反轉。

(四) 我們利用 X 軸、Y 軸、Z 軸的關係及重心結構，做出新型迴旋棒。

九、透過 TRACKER 軟體進行迴旋棒運動分析，可了解到迴旋棒受到外力時以順時針方向，其旋轉過程造成接觸點與其重心無法穩定在同一旋轉軸上。使得迴旋棒產生上下振動形成摩擦阻力抵抗順時針轉的力量，最後停止旋轉；此時也因迴旋棒接觸點與重心也無法在同一垂直線上也產生上下振動，而造成開始反轉現象產生。

十、rattkeback 反轉其實是旋轉力量的延伸，只是反轉方向與旋轉方向相反。

捌、參考文獻

1. 林亭妤、邱品嘉 (2001)。頭暈目眩——順轉！逆轉！轉轉轉！！。彰化：彰化女中。
2. 高至辰、郭先予 (2006)。會逆轉的石頭—Rattleback 逆旋現象 (中華民國第四十六屆中小學科學展覽會作品未出版)。台北：國立台灣科學教育館

【評語】 080110

1. 凱爾特石是一項通俗的科學玩具，作者能進一步探究此現象。
2. 作者能善用新興科技，使用 3D 印表機及製模的方式，製作各種不同凱爾特石，進行探究。
3. 作者能使用不同點擊啟動方式，配合數位錄影與分析軟體，清楚呈現轉動的軌跡圖，並進一步分析實驗結果。

摘要

我們發現可以改變旋轉方向的迴旋棒 (rattleback)，感到很驚奇。我們以 (1) 文獻探討法 (2) 調查法 (3) 數位成型法 (4) 灌模法 (5) 實驗法 (控制材質、大小、形狀、底面粗細、旋轉力量、施力點、施力方法、施力方向等變因) (6) TRACKER 軟體分析法進行研究，探討迴旋棒產生反轉的現象、原理及變化。我們發現：迴旋棒的反轉現象會受形狀、材質、重心位置、受力位置、受力大小的影響，我們應用迴旋棒 X、Y、Z 軸的關係及重心結構原理，希望繼續探討實作新型迴旋棒，擴展研究成果。

研究目的

- 一、了解迴旋棒旋轉的特性。
- 二、進行迴旋棒及發動模型旋轉儀器的製作。
- 三、探討迴旋棒旋轉之變化及原理。

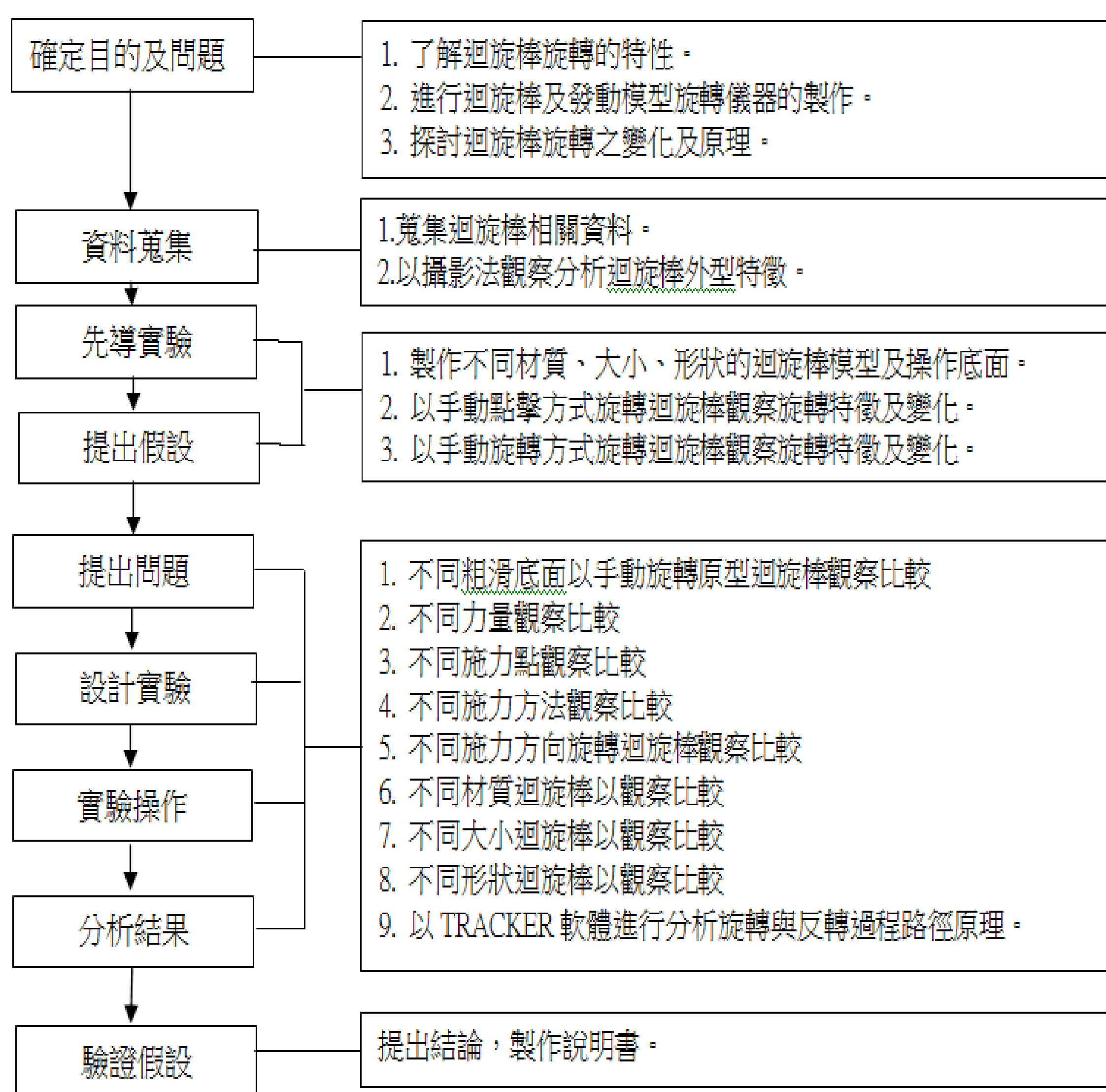
文獻探討

凱爾特石又稱迴旋棒，是一個半橢圓形的陀螺。它會往特定的方向旋轉，但是當它往反方向轉時，會變得不穩定而搖晃停止，再往回轉。因此又被稱做迴旋陀螺。這種運動現象，看似違反了物理學的角動量守恆定律。

19世紀時，考古學家在凱爾特遺址中，發現了迴旋棒。這種陀螺在1890年就有人研究了。而在20世紀時，人們更是深入研究，發表了更多的論文。

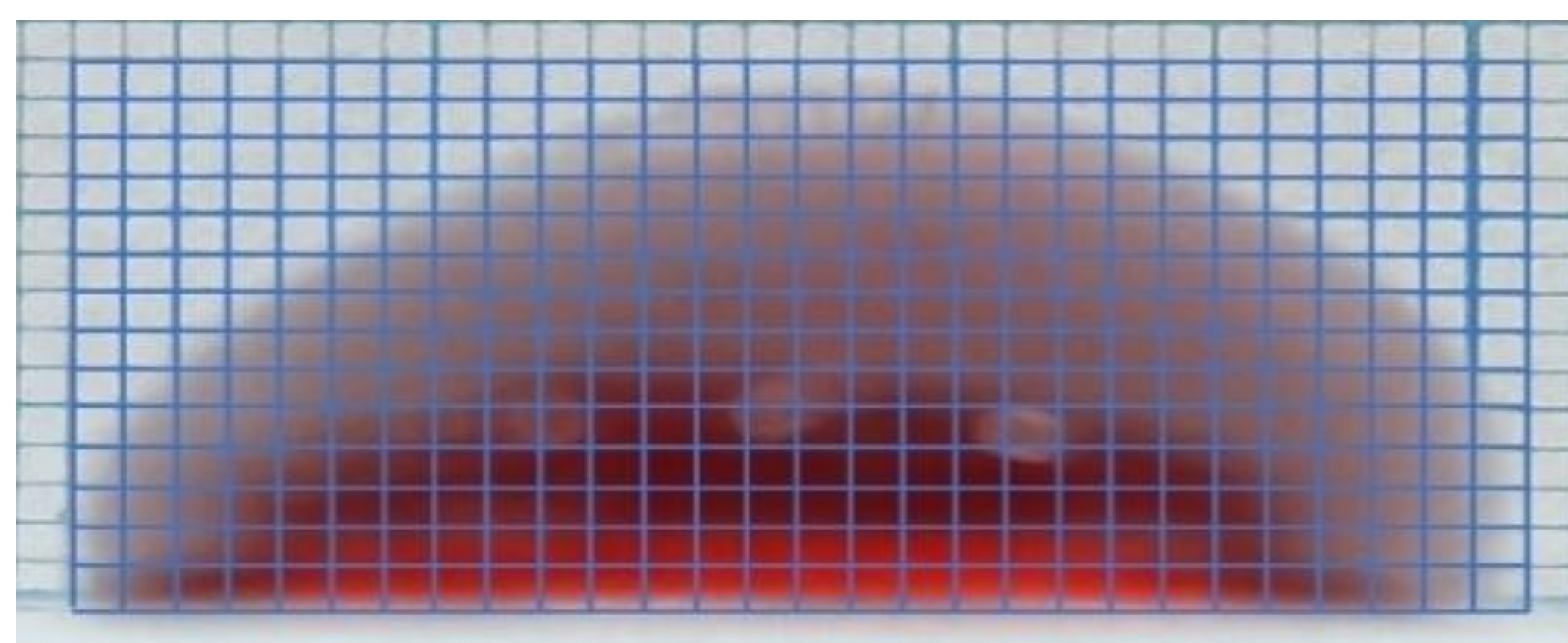
這種不穩定的現象，是因為物理學中滾動運動與俯仰運動同時進行而造成的。當陀螺質量分佈造成俯仰軸和滾動軸所構成的平面為不對稱時，滾動運動和俯仰運動就成為不穩定狀態，漸漸的使陀螺從俯仰運動變為滾動運動。

研究架構

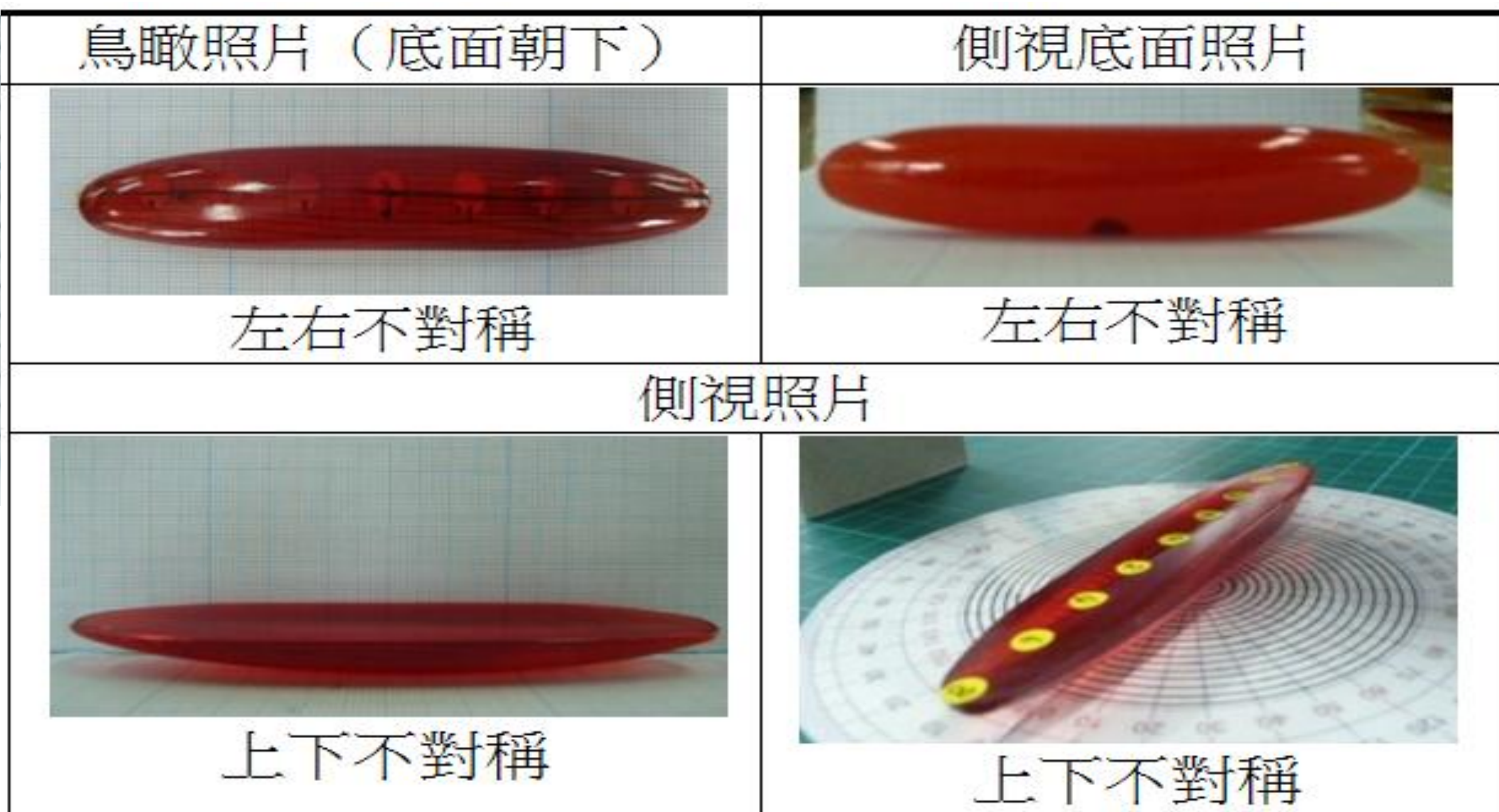


研究結果

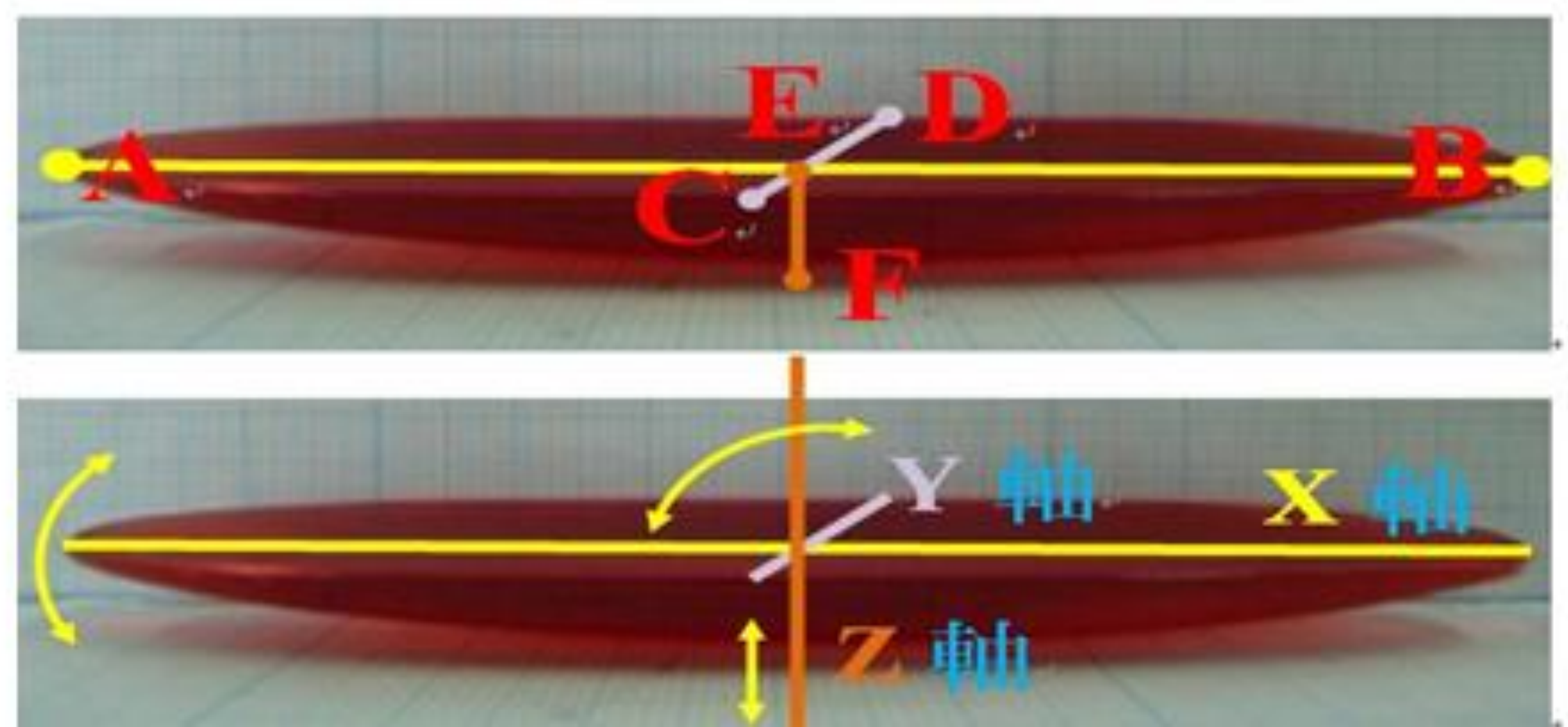
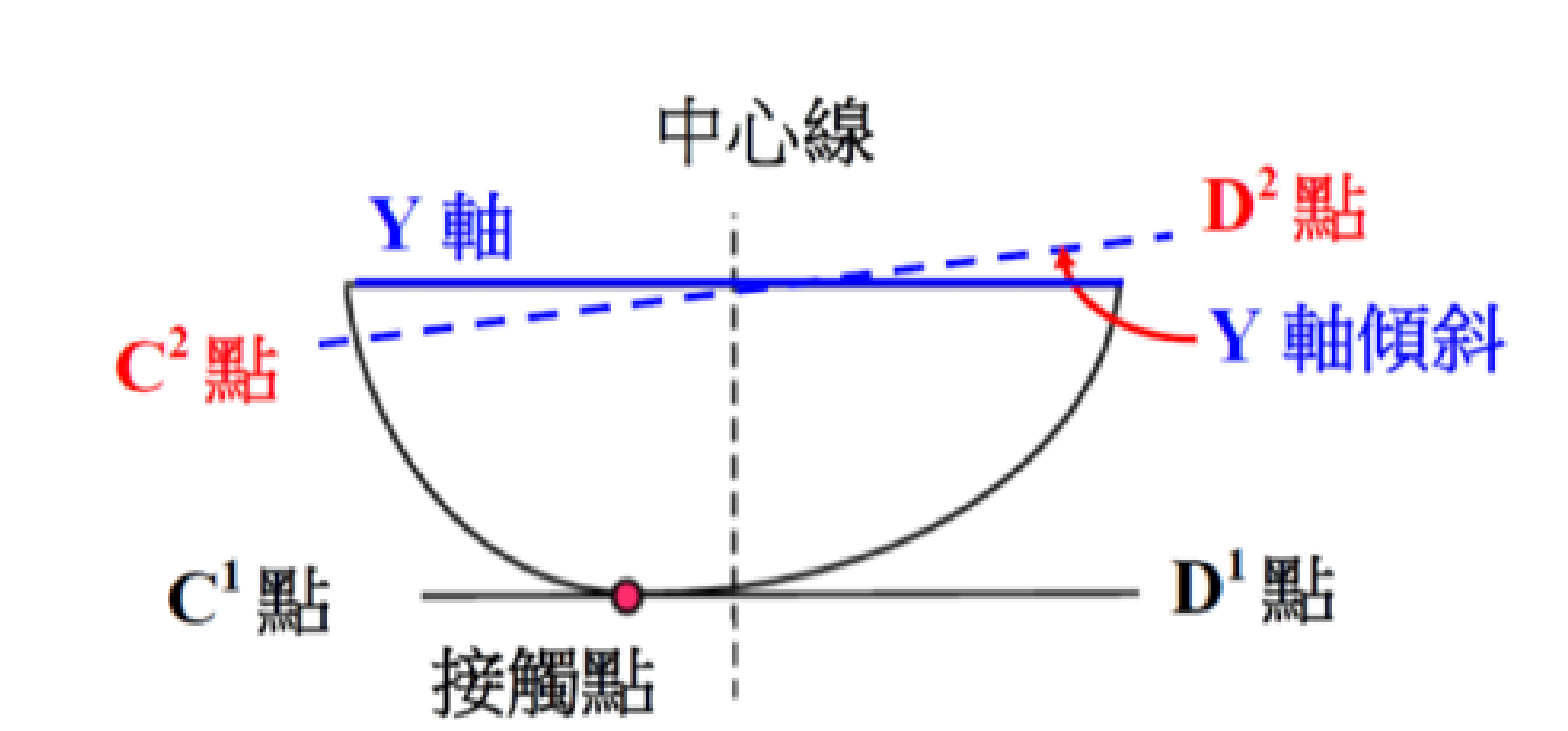
迴旋棒的外觀與反轉現象的描述



1的格子271個，1/2的格子27個，1/4的格子10個
 $27 \times 1/2 = 13.5$ $10 \times 1/4 = 2.5$
 $271 + 13.5 + 2.5 = 287$ 格
 287×0.01 (一小格面積) = 2.87 cm^2

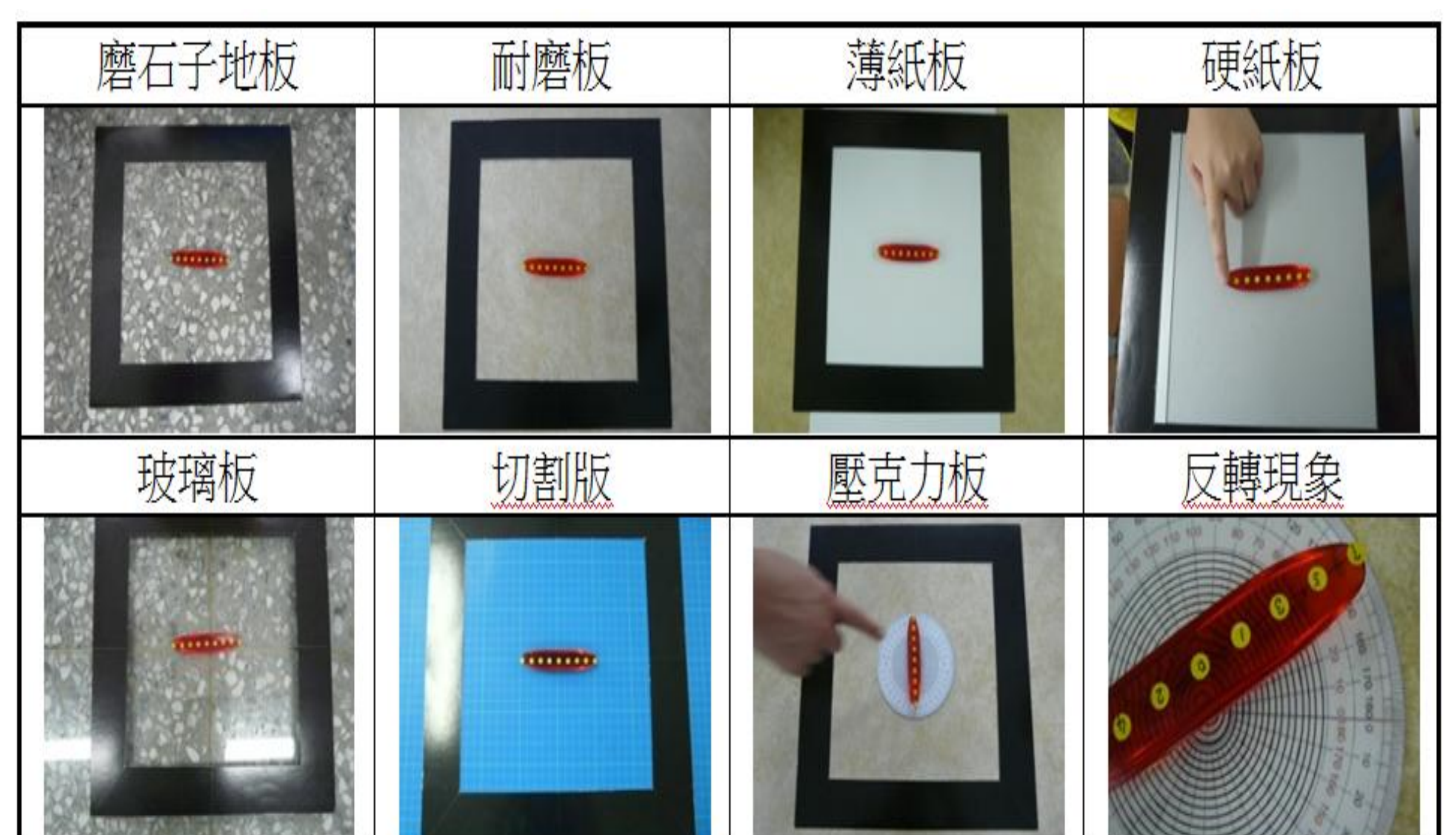


以方格紙法計算迴旋棒平面底面積
 計算過程如下：
 1. 每小格面積為 $0.1\text{cm} \times 0.1\text{cm} = 0.01 \text{ cm}^2$
 2. 完整的格子有：1200 個 則 $0.01 \times 1200 = 12 \text{ cm}^2$
 3. 不完整的格子有：632 個 則 $0.01 \times 632 = 6.32 \text{ cm}^2$
 4. $6.32 \text{ cm}^2 + 12 \text{ cm}^2 = 18.32 \text{ cm}^2$
 5. 因此迴旋棒平面底面積約為 18.32 cm^2



我們依迴旋棒外型、結構特徵對迴旋棒加以定

- (1) X軸：A-B點，軸長99.97mm，容易上下擺動，我們稱為俯仰軸，
- (2) Y軸：C-D點，軸長20.01mm，容易左右擺動，我們稱為滾動軸。
- (3) Z軸：E-F點，軸長10.00mm，維持軸心穩定，我們稱為穩定軸。



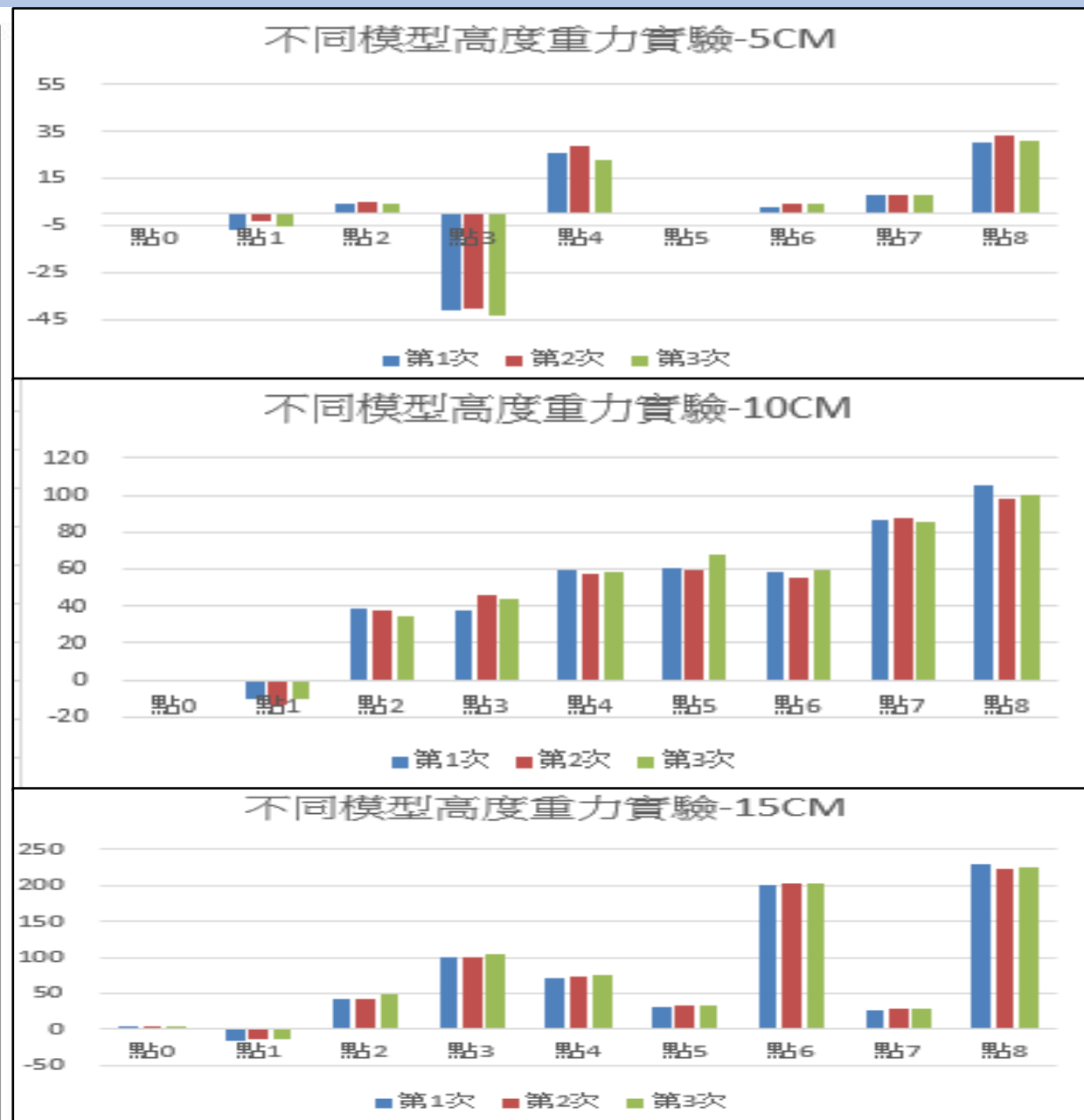
材質	磨石子	耐磨板	薄紙板	硬紙板	玻璃板	切割版	壓克力板
紅迴旋棒	○	○	○	○	●	○	●
綠迴旋棒	○	○	○	○	●	○	●
石膏迴旋棒	○	○	○	○	●	○	●

○表示會反轉 ●表示反轉角度較大

1. 點擊及手動順時針旋轉迴旋棒在7種不同質料的底板都出現逆時針反轉現象。
2. 外觀上以玻璃、壓克力材質逆時針反轉角度較大。
3. 因此，我們認為迴旋棒逆時針反轉現象，會受底板粗滑影響。底板越滑，逆時針反轉角度大；底板越粗糙，逆時針反轉角度小。

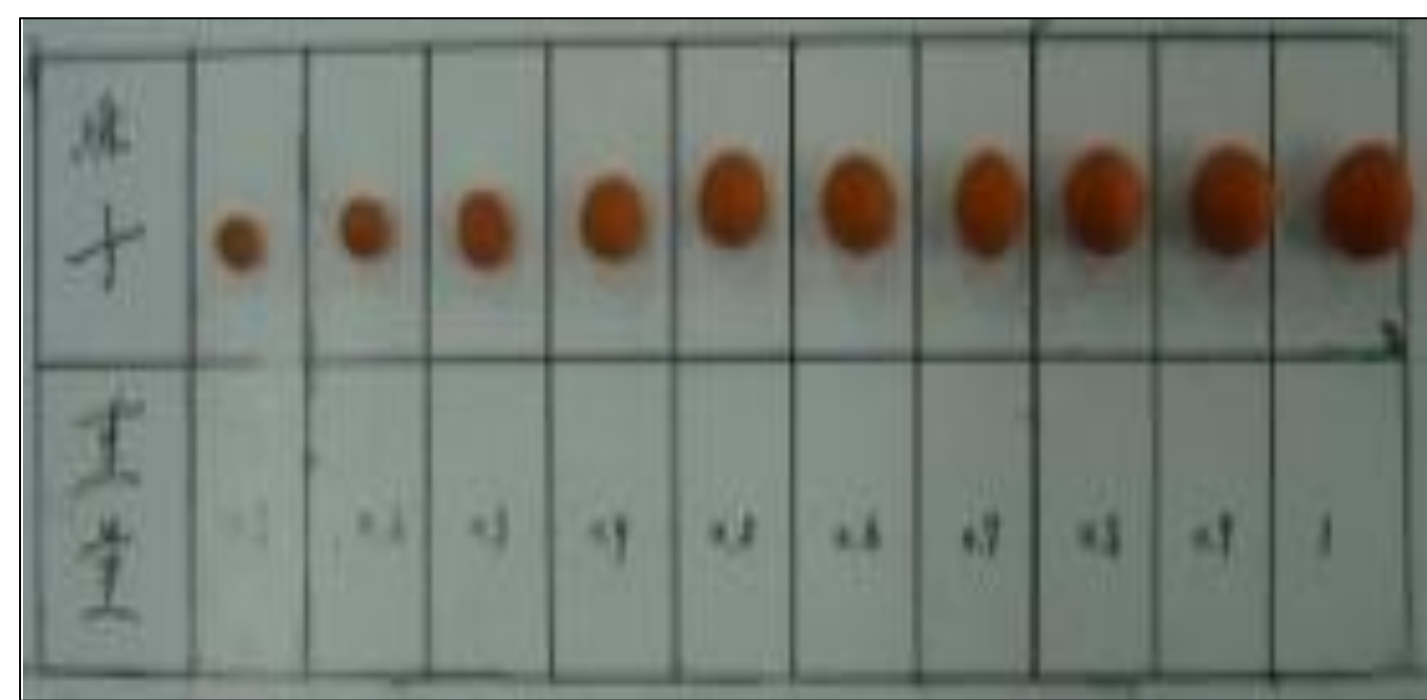
探討迴旋棒受力位置及大小影響反轉的差異

點擊器模型	點擊鋼珠秤重	點擊器操作 1	點擊器操作 2
迴旋棒點擊點編碼照片	點擊點編碼方式		
	編碼方式： 1.中心點編號 0 2.迴旋棒底面朝上，左邊為A端，右邊為B端。 3.中心點至A端編號為 01367 。 4.中心點至B端編號為 02468 。 5.點與點間距1.2cm。		



1. 我們發現越敲擊的位置若在迴旋棒右側，也就是2、4、6、8點時，迴旋棒旋轉時不會出現負數之記錄(負數就是會往順時針方向旋轉，但是因為迴旋棒反轉現象是逆時針旋轉，所以我們統稱有順時針旋轉現象的記錄為負數)；而呈現負數之記錄只出現在1或3點。

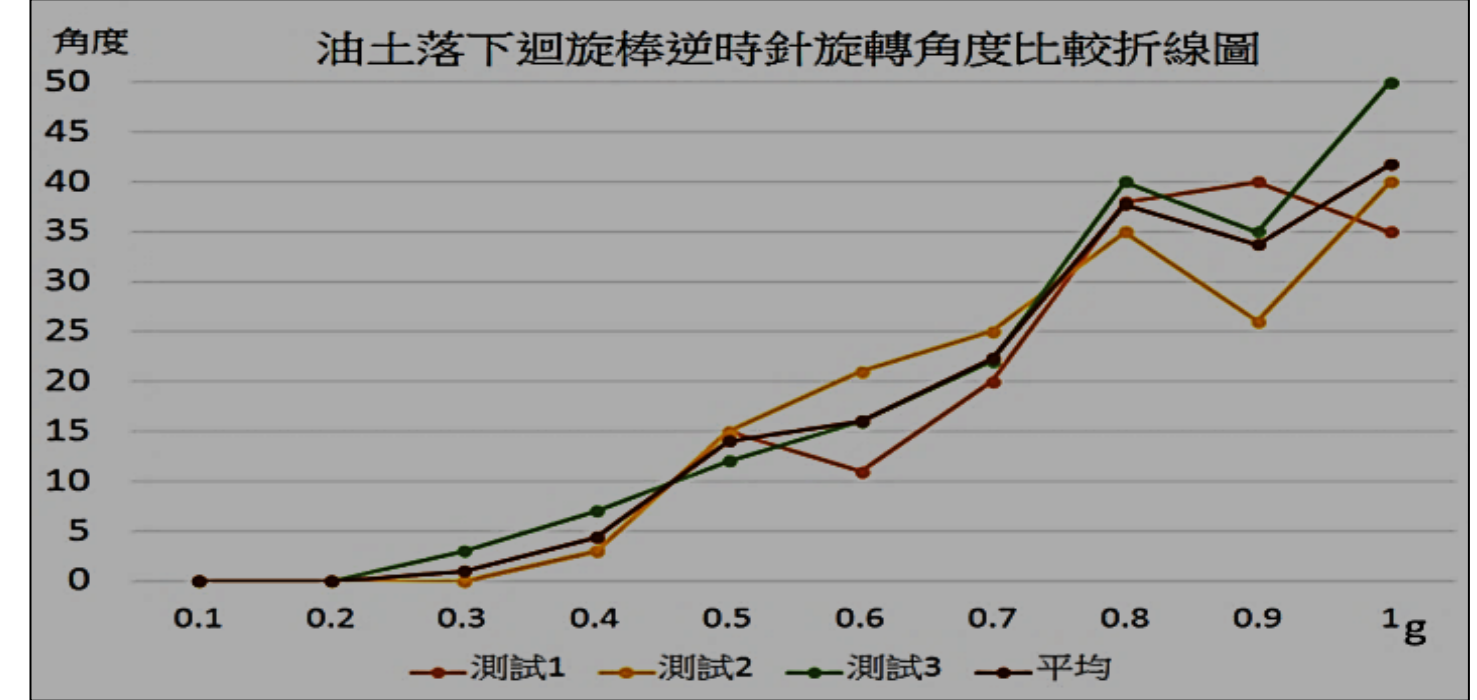
2. 我們也從每一個敲擊點去觀察，發現重力點擊器若高度越高，旋轉角度就越大。



1. 0.1g~1.0g的10種油土球對第8點點擊，都會產生逆時針旋轉現象。

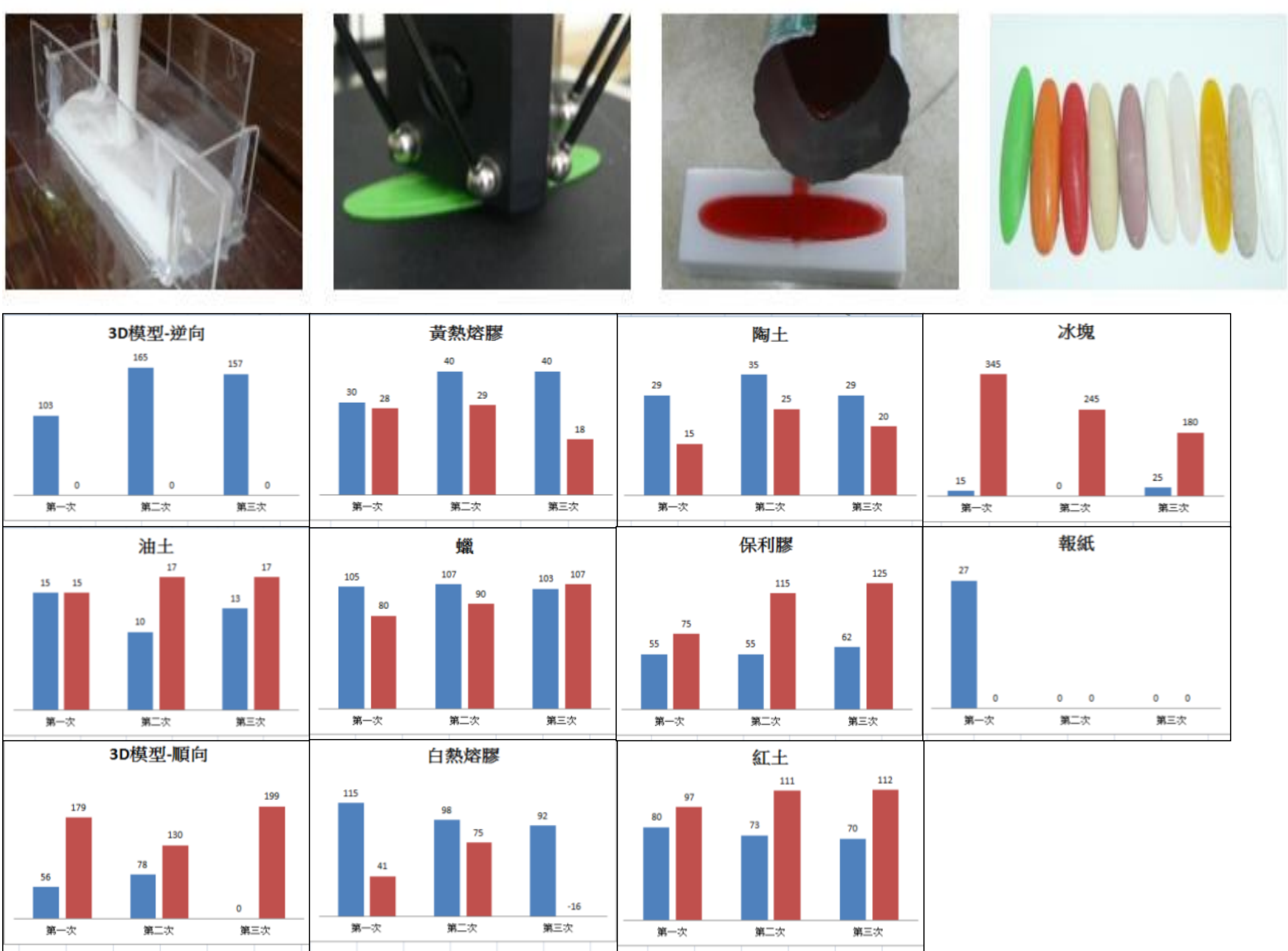
2. 0.1g、0.2g油土球點擊，無法使迴旋棒產生逆時針旋轉；1g的油土球使迴旋棒產生逆時針旋轉角度平均達41.67°。

3. 我們發現油土球重量越重，重力越大，點擊迴旋棒產生逆時針旋轉角度越大。

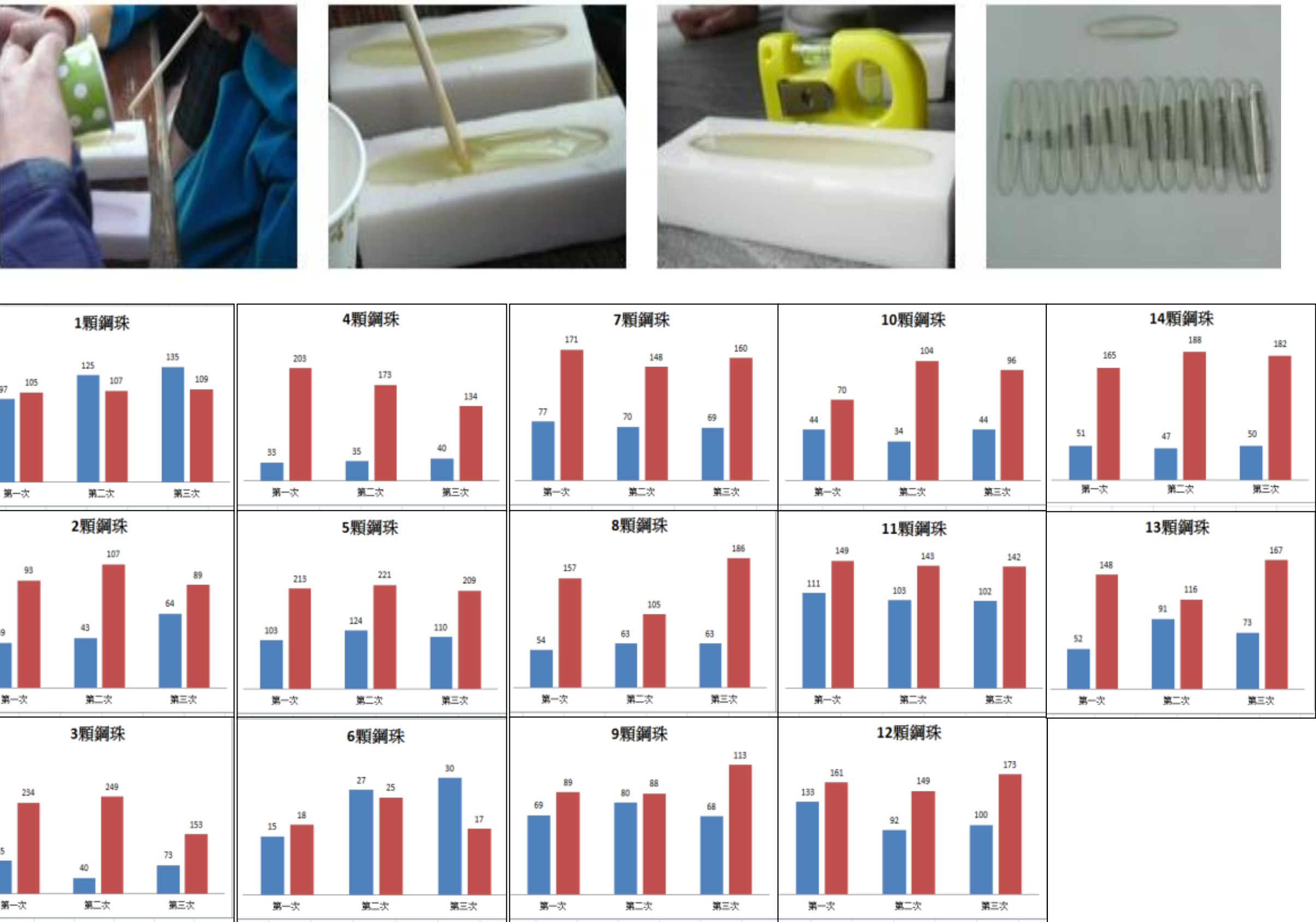


比較不同材質及重量對迴旋棒旋轉的影響

比較不同材質對迴旋棒旋轉的影響



比較不同重量對迴旋棒旋轉的影響



不同材質的迴旋棒中，以3D順向型逆時針旋轉角度最大，平均達199°；報紙材質的迴旋棒因為較輕，只有一次逆時針反轉，角度為27°。

1. 點擊第8點迴旋棒逆時針轉動角度較點擊第7點為大。

2. 不同重量會影響迴旋棒重心，影響反轉角度。

比較XYZ軸長短對迴旋棒旋轉的影響

點擊法	原型點擊	不同Y軸點擊	不同Z軸點擊
X軸不同的3D列印模型		Y軸不同的3D列印模型	
Z軸不同的3D列印模型		等比縮放的3D列印模型	

1. 等距方式改變X、Y、Z軸下，點擊第7、8點迴旋棒都會反轉，點擊8點比第7點平均反轉較度較大，其他情形如下：

(1) 改變X軸長時，X軸長越長迴旋棒平均反轉較度越大；軸長越短迴旋棒平均反轉較度越小。

(2) 改變Y軸長時，Y軸長越短迴旋棒平均反轉較度越小；軸長小於1cm時不會反轉。

(3) 改變Z軸長時，Z軸長高於1.6cm、低於0.6cm時，迴旋棒不會反轉；以原型Z軸長反轉角度最大。

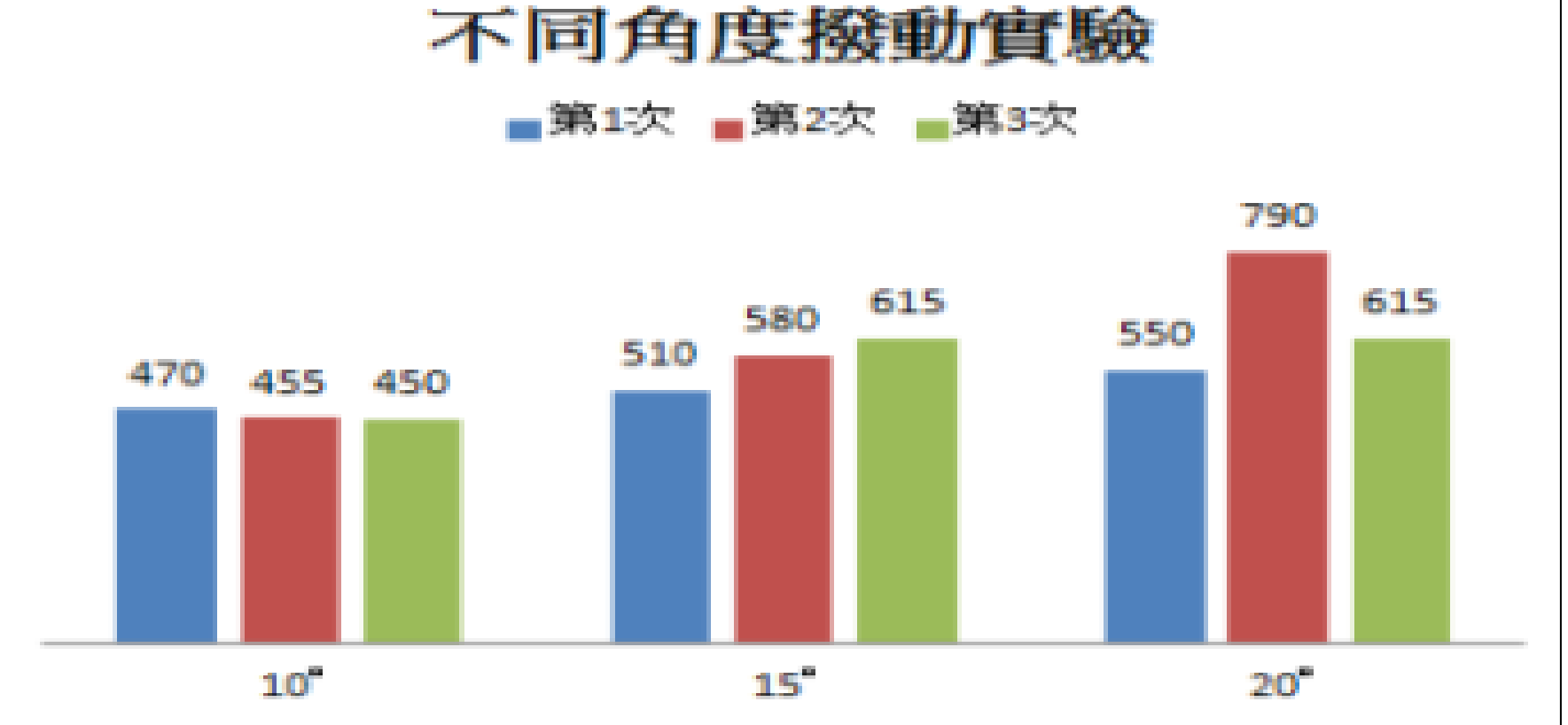
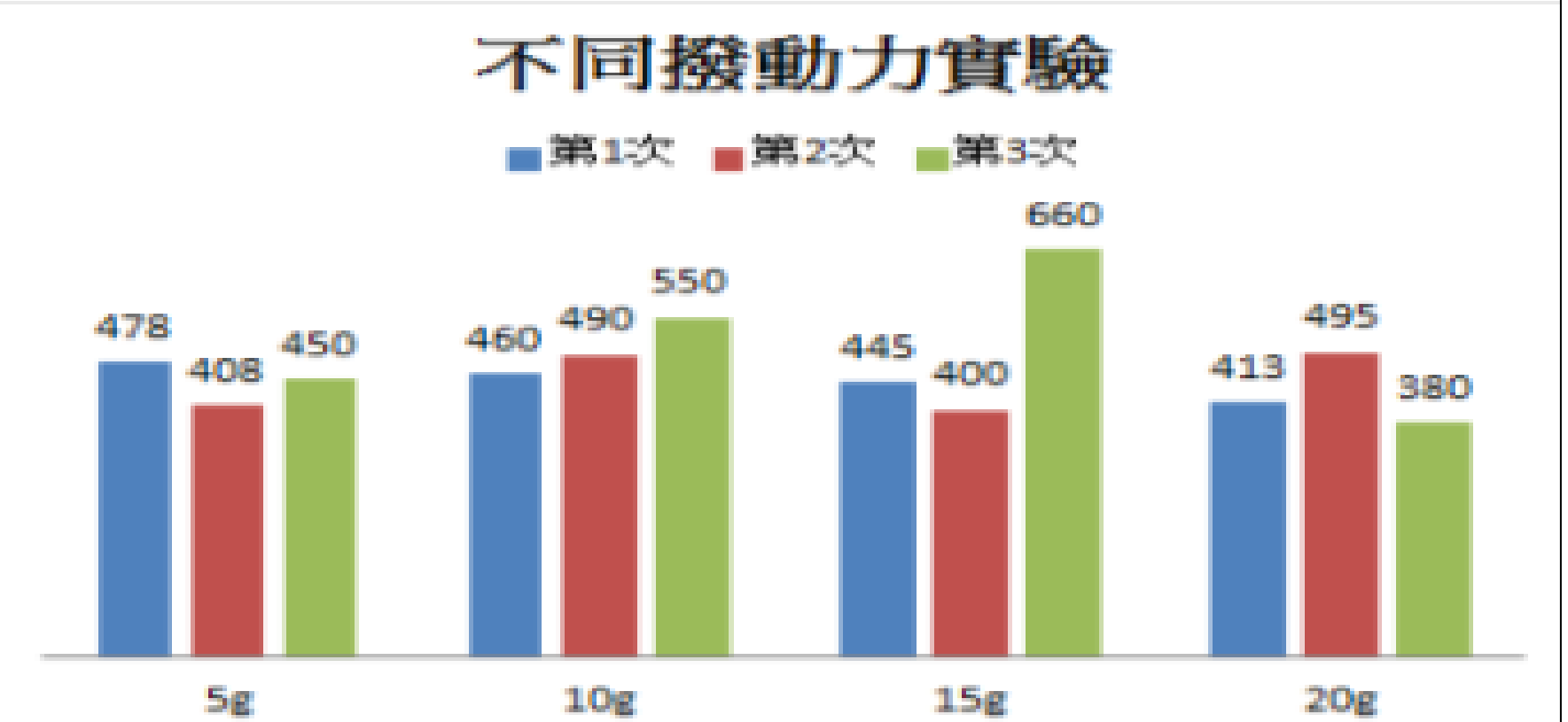
2. 等比方式改變X、Y、Z軸下，點擊第7、8點迴旋棒都會反轉，點擊8點亦比第7點平均反轉較度較大，其他情形如下：

(1) 以0.45g鋼珠在10cm高度點擊，點擊第7、8點迴旋棒都會反轉，點擊8點比第7點平均反轉較度較大，倍數0.7以下迴旋棒過輕，會偏離中心點無法反轉。

(2) 以0.45g鋼珠在5cm高度點擊，點擊第7、8點迴旋棒都會反轉，點擊8點比第7點平均反轉較大，由於高度5cm產生重力過小，無法讓倍數1.5、1.6以上迴旋棒反轉。

比較不同受力方法對迴旋棒旋轉的影響

迴旋棒反轉測試撥動台	固定彈力尺	測試彈力尺	撥動彈力尺反轉測試
以彈簧秤測彈力尺撥動力	原型迴旋棒反轉測試	3D模型反轉測試	保利膠迴旋棒反轉測試

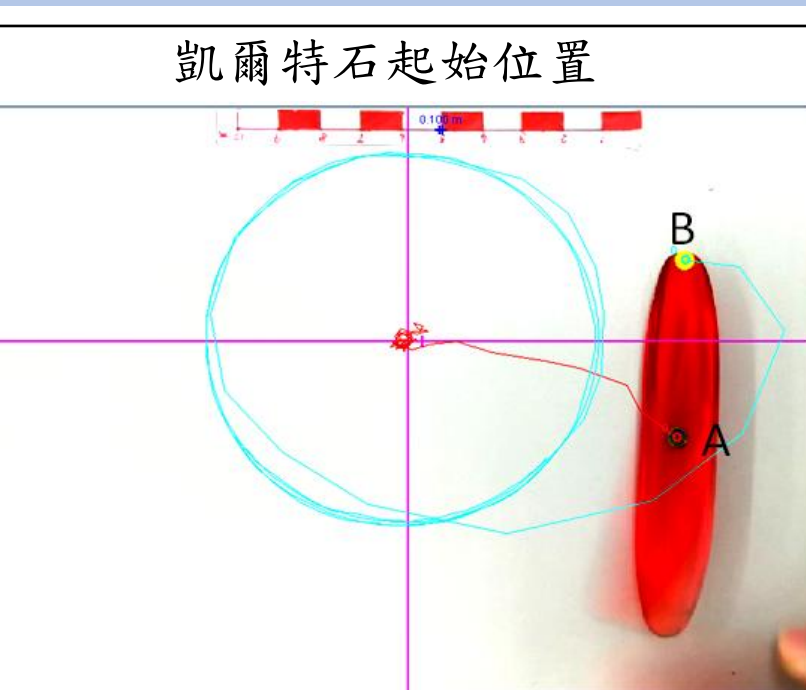


1. 15g撥動力撥動迴旋棒時，反轉角度較大，平均達502°；5g撥動力使迴旋棒反轉角度較小，但是平均也達445°；20g撥動力過大會讓迴旋棒偏離中心點，雖然反轉角度平均也達429°，仍忽略不計。

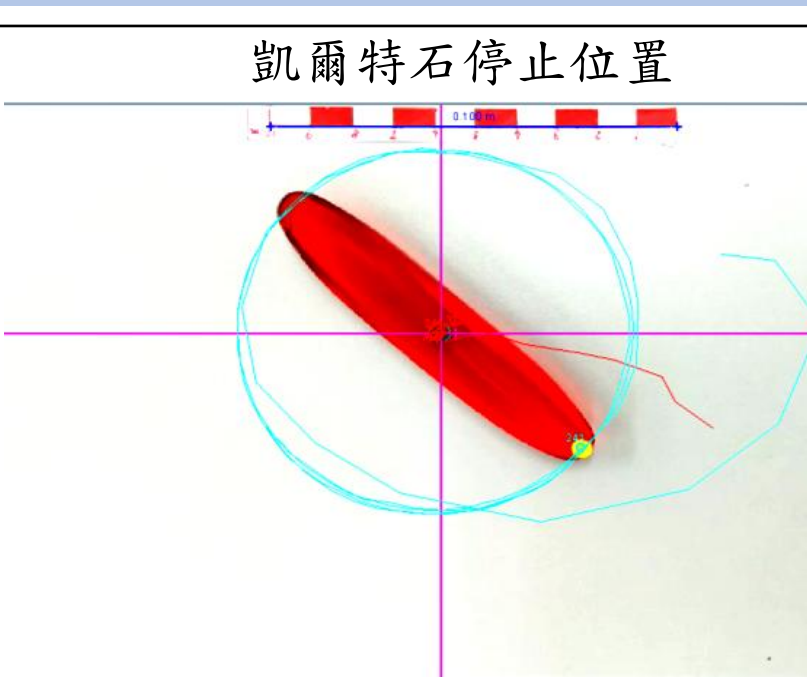
2. 撥動角度為20°時，迴旋棒反轉角度較大，平均達652°；10°時，迴旋棒反轉角度較小，平均達458°。

3. 撥動角度越大，撥動力也越大，因此撥動力越大，迴旋棒反轉角度會越大，反之越小。

利用TRACKER軟體分析迴旋棒的反轉現象



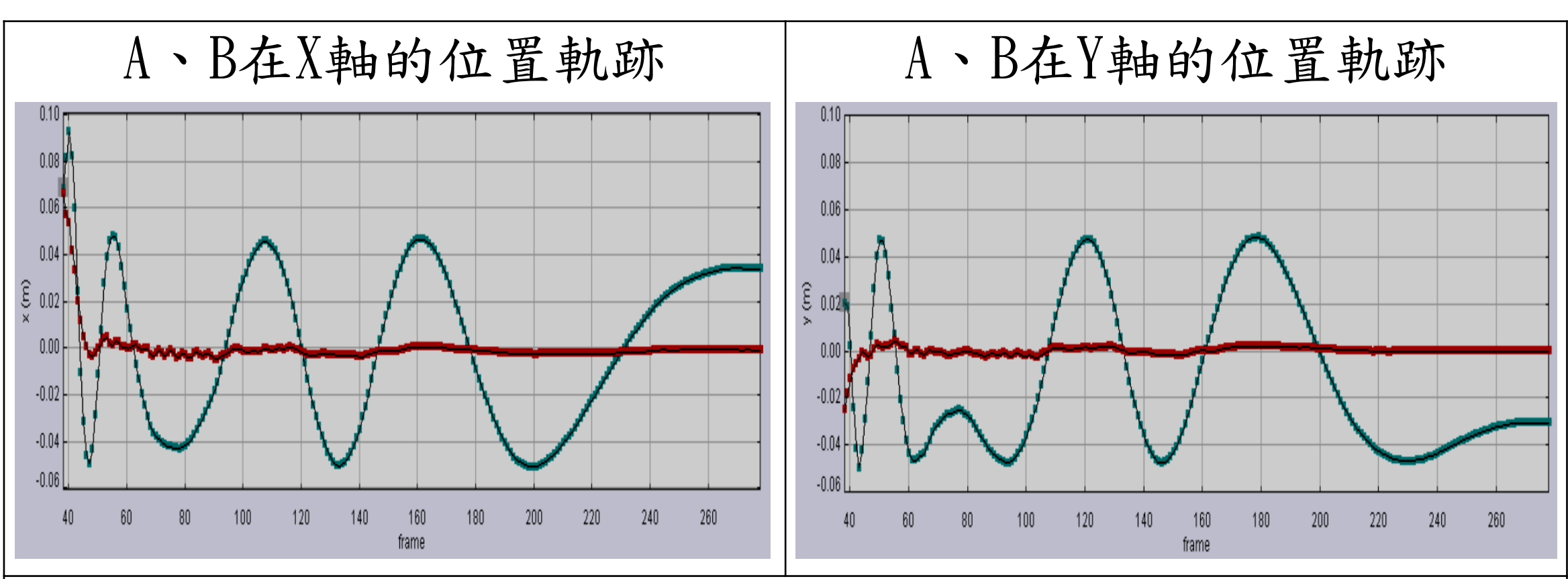
凱爾特石起始位置



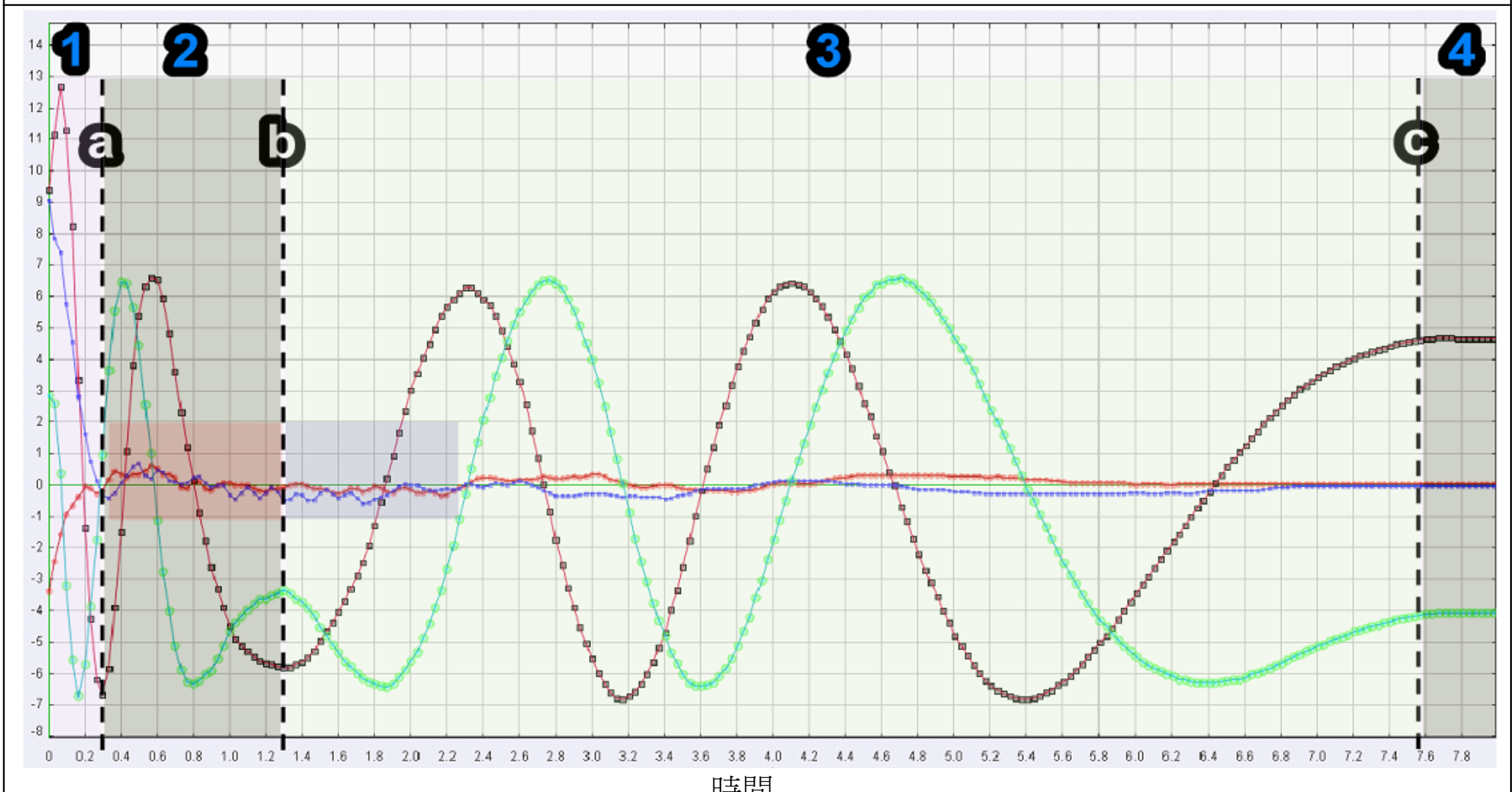
凱爾特石停止位置

在TRACKER軟體中，在凱爾特石上方分別設定A點與B點。其坐標軸(0, 0)設定凱爾特石A點運動結束位置。

藍色軌跡則是B點的移動位置；紅色軌跡則是A點的移動位置



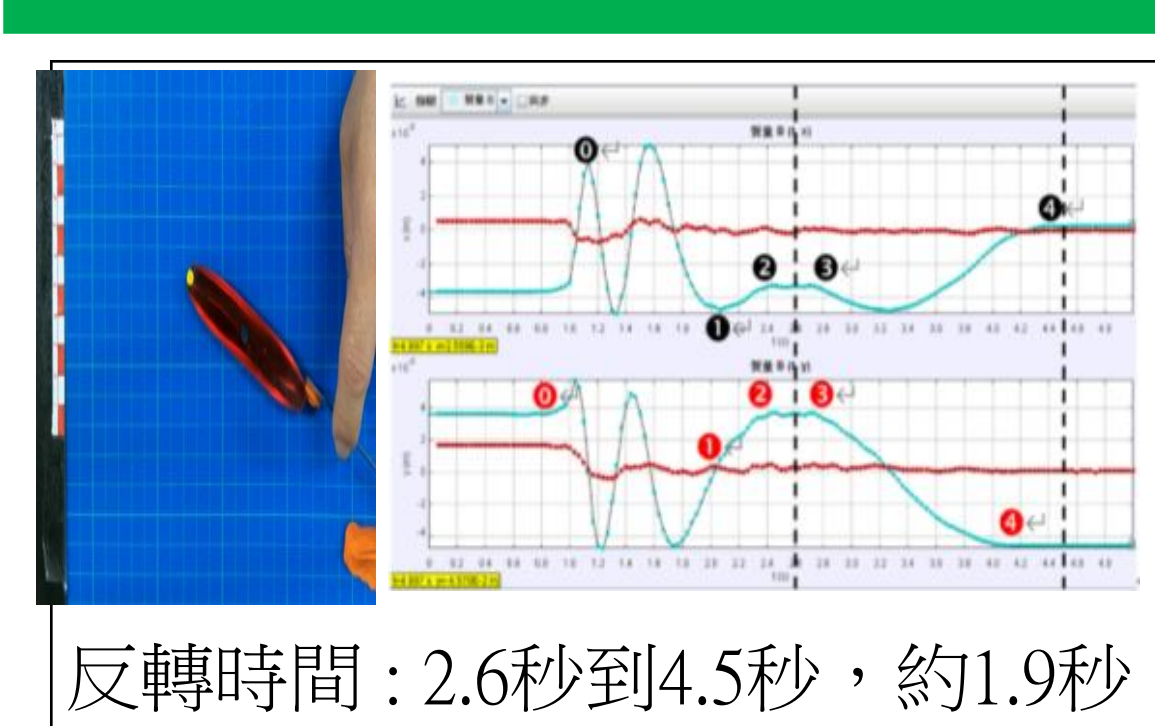
1. 圖中的“點”表示不同影格時間(frame)的位置，可由點的間距越大表示位移越大。
2. 以A點軌跡圖來看可發現，剛受到外力時，產生波的振幅明顯較大。從第53影格時間至第112影格時間波的頻率較快，表示旋轉過程中有明顯的上下振動。
3. 以B點軌跡來看，一個波形表示旋轉一圈。



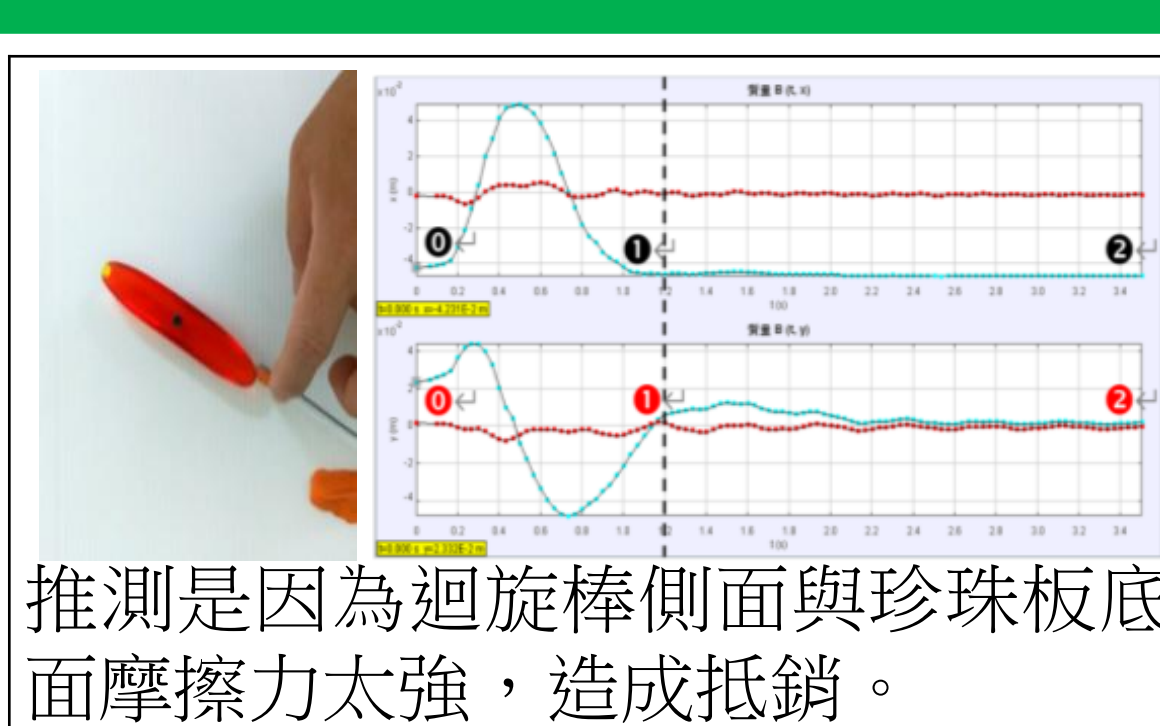
階段1：凱爾特石受到外力時的位移軌跡階段。
 階段2：凱爾特石順時針旋轉階段。
 階段3：凱爾特石逆時針旋轉階段。
 階段4：凱爾特石停止旋轉階段。
 線段a：凱爾特石因旋轉有開始上下震動時。
 線段b：凱爾特石順時針旋轉停止時。
 線段c：凱爾特石停止逆時針旋轉時。
 受外力時(階段1)→順時針旋轉(階段1、2)→上下振動(線段a、階段2)→停止旋轉(線段b)→上下振動(階段3)→逆時針旋轉(階段3)→停止旋轉(線段c、階段4)

1. 以A點的軌跡來看，在階段2粉紅色塊時，軌跡點連線是明顯上下折線方式呈現。在停止旋轉的瞬間(線段b)，則階段3紫色塊的軌跡點連線也是上下折線方式呈現。顯示凱爾特石在停止旋轉瞬間的前後均有上下震動的現象產生。
2. 以B點軌跡來看，在階段1時，凱爾特石受到外力的作用而造成明顯的位移現象；在階段2時，軌跡點的間距明顯從大漸小，表示順時針的旋轉速度逐漸地變小，轉到線段b則瞬間停止；在階段3時，從線段b至線段c範圍，反轉了兩圈多(兩個波型態)；在最後階段4則停止反轉現象。

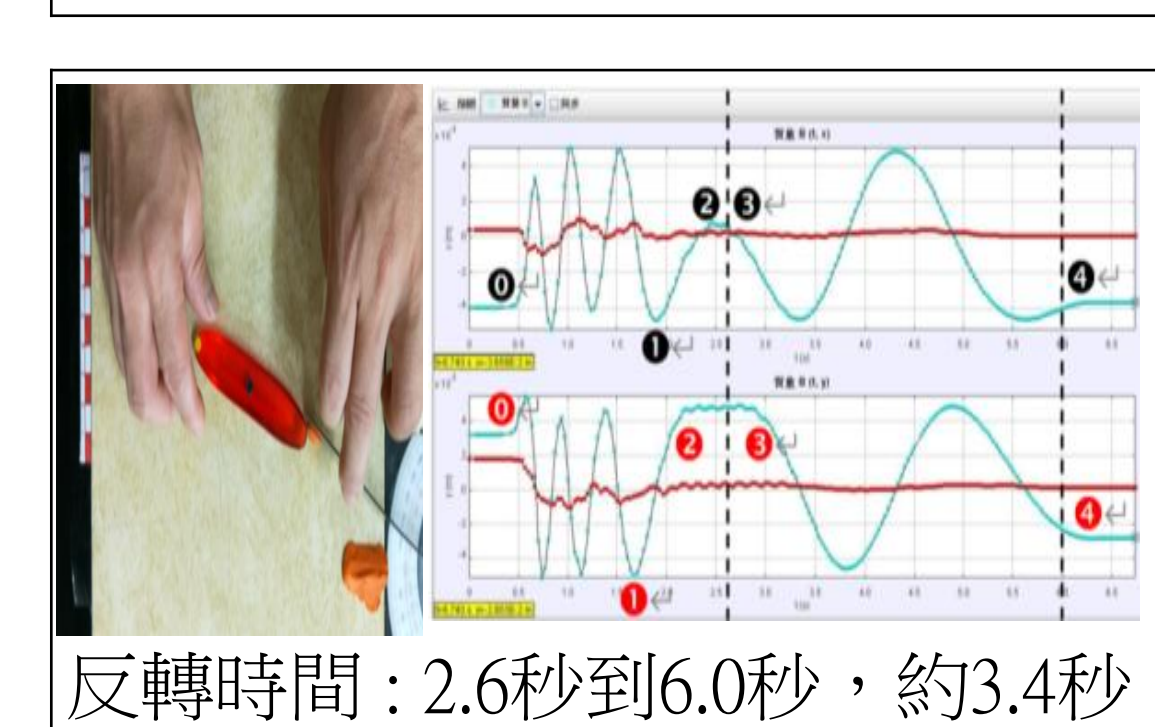
討 論



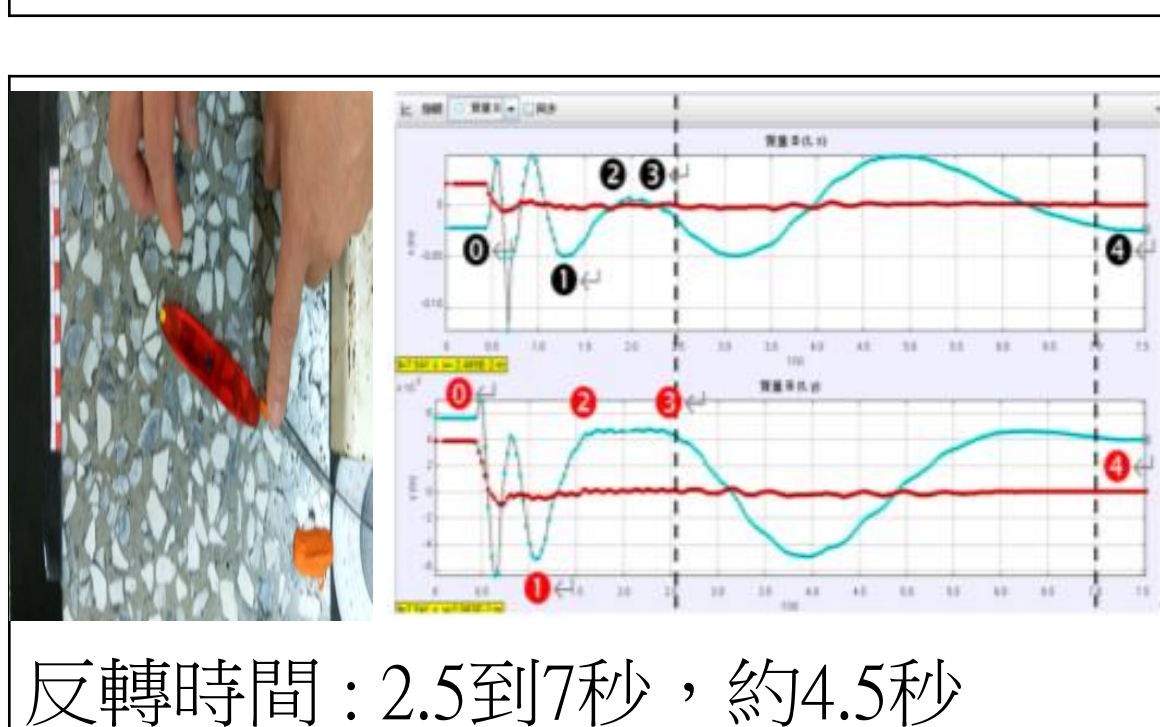
反轉時間：2.6秒到4.5秒，約1.9秒



推測是因為迴旋棒側面與珍珠板底面摩擦力太強，造成抵銷。



反轉時間：2.6秒到6.0秒，約3.4秒



反轉時間：2.5到7秒，約4.5秒

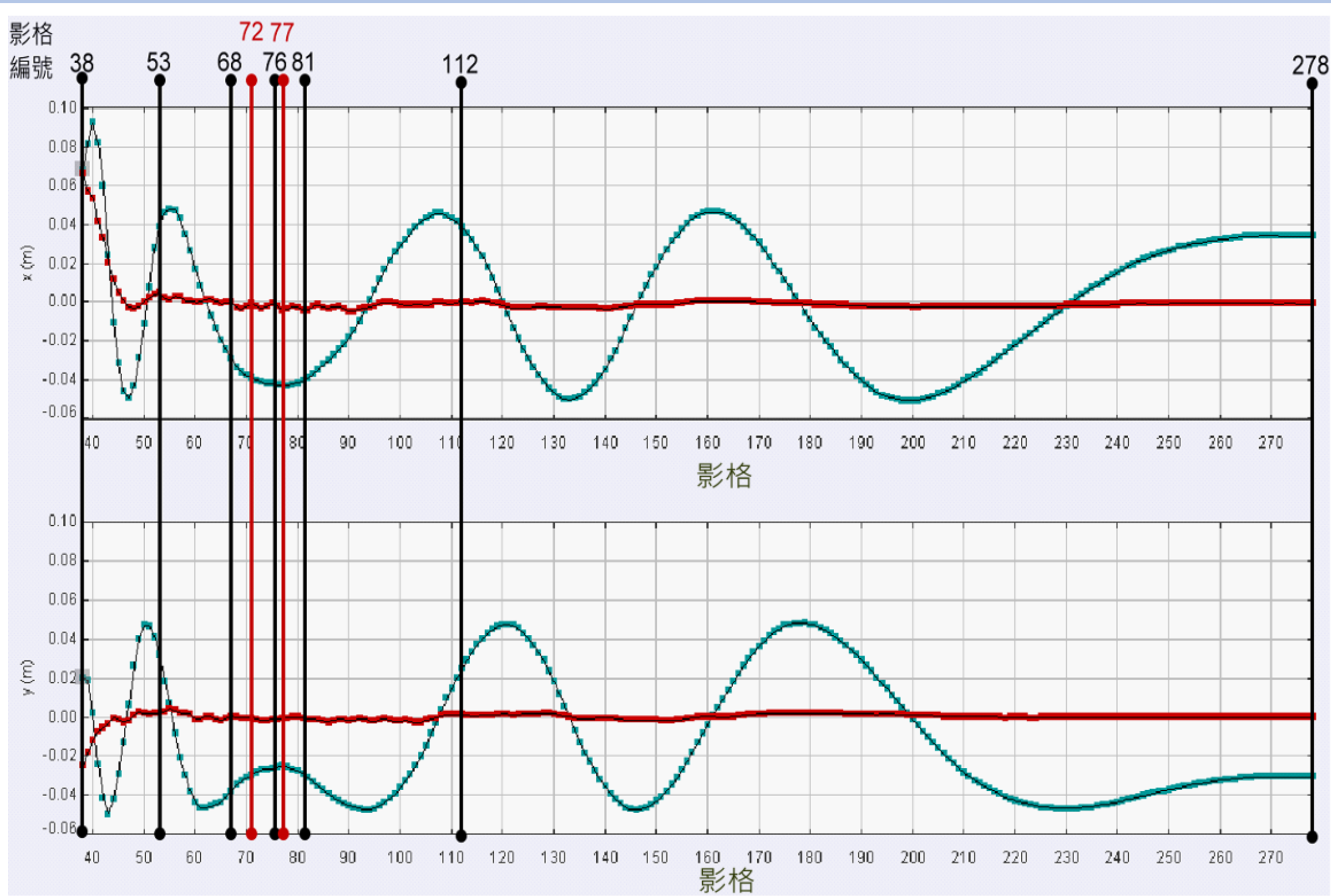


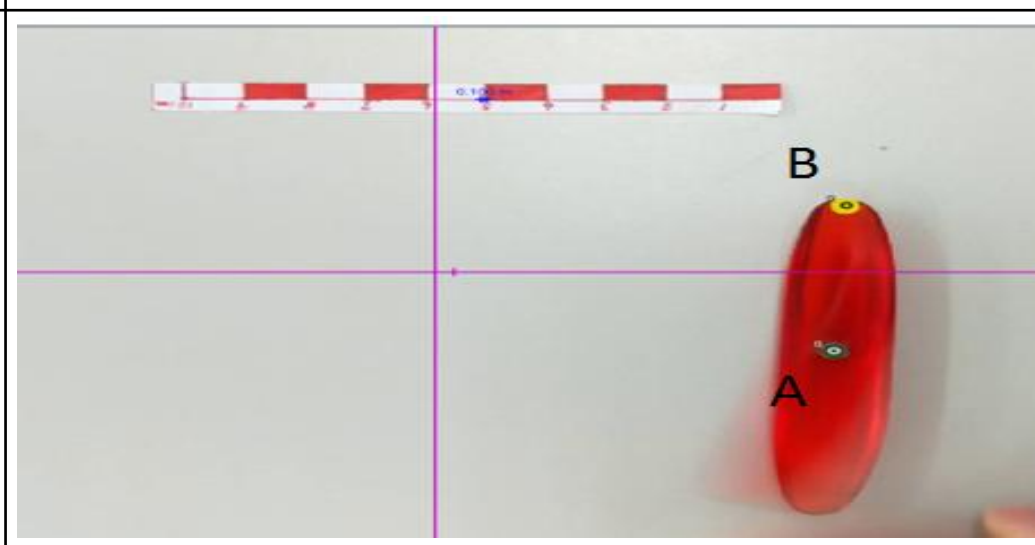
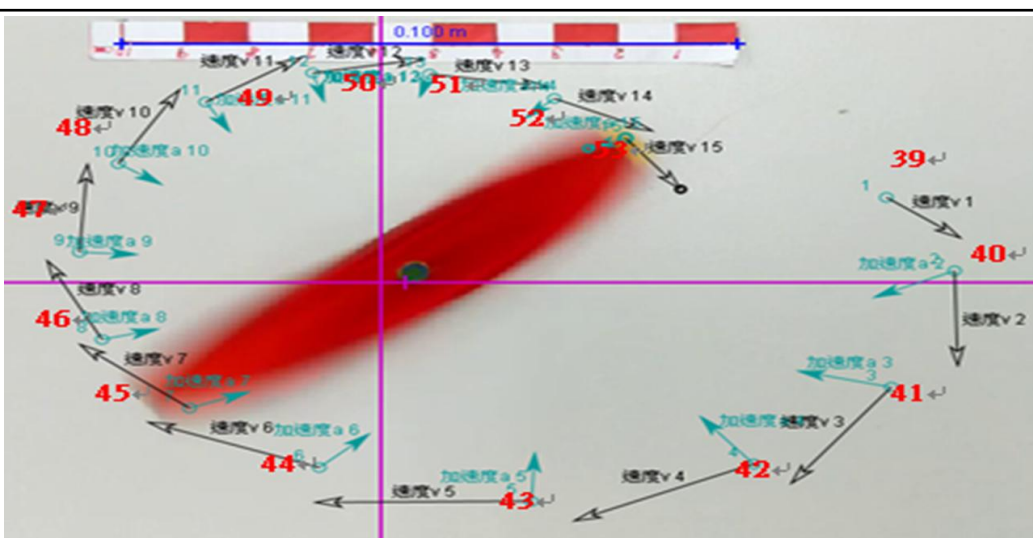
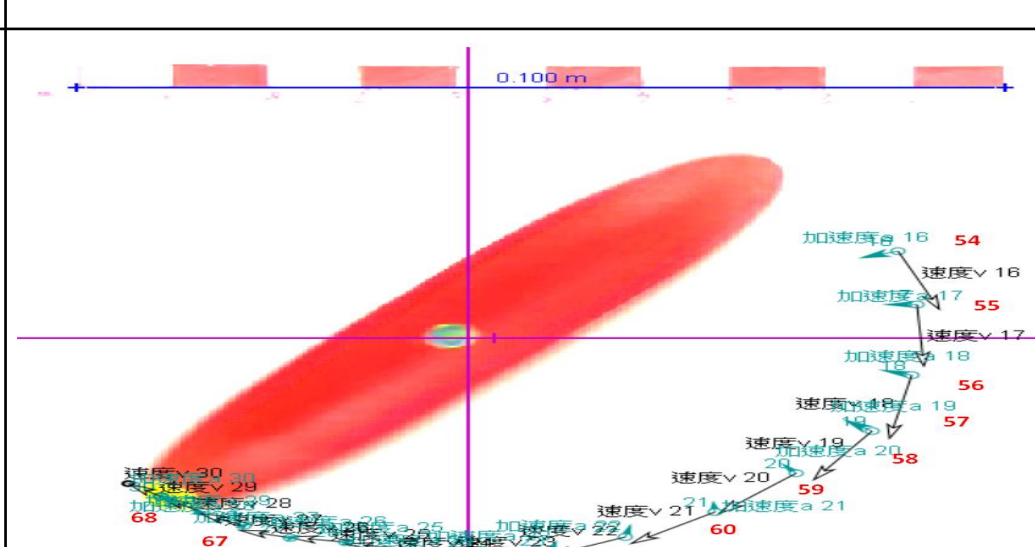
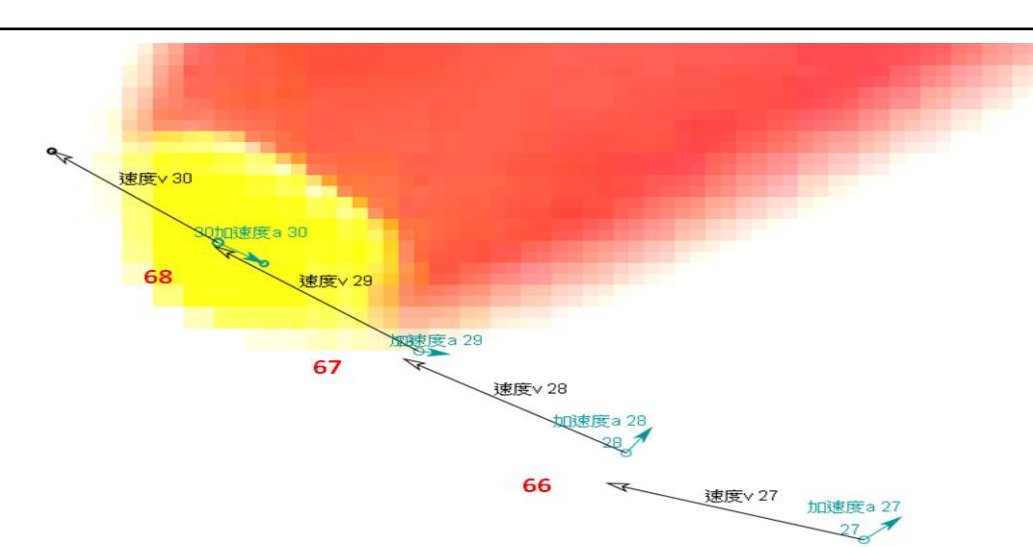
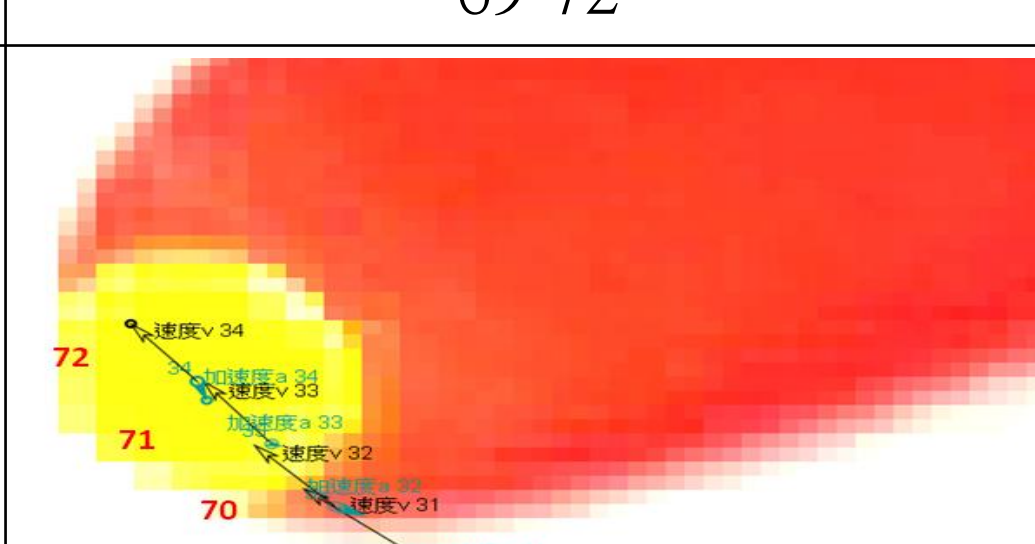
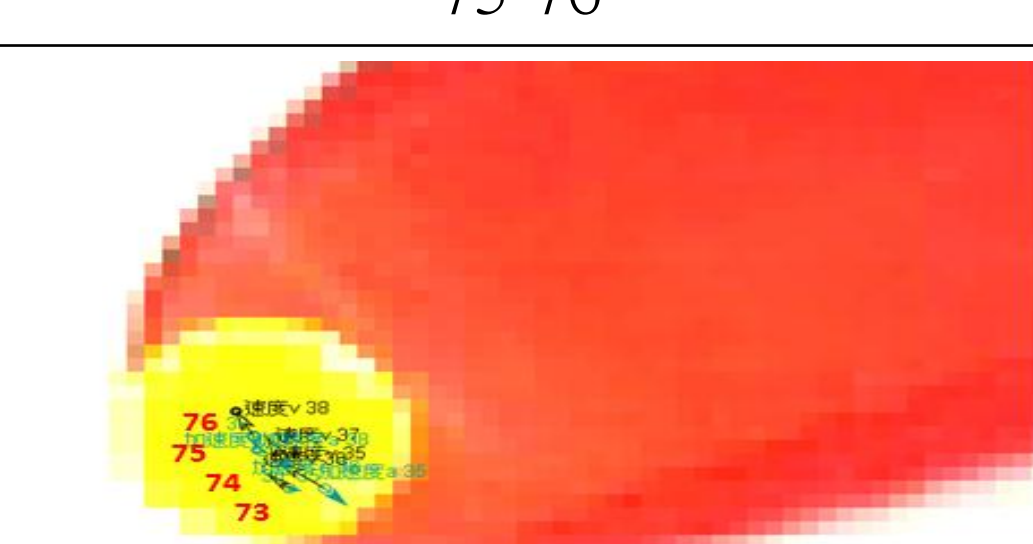
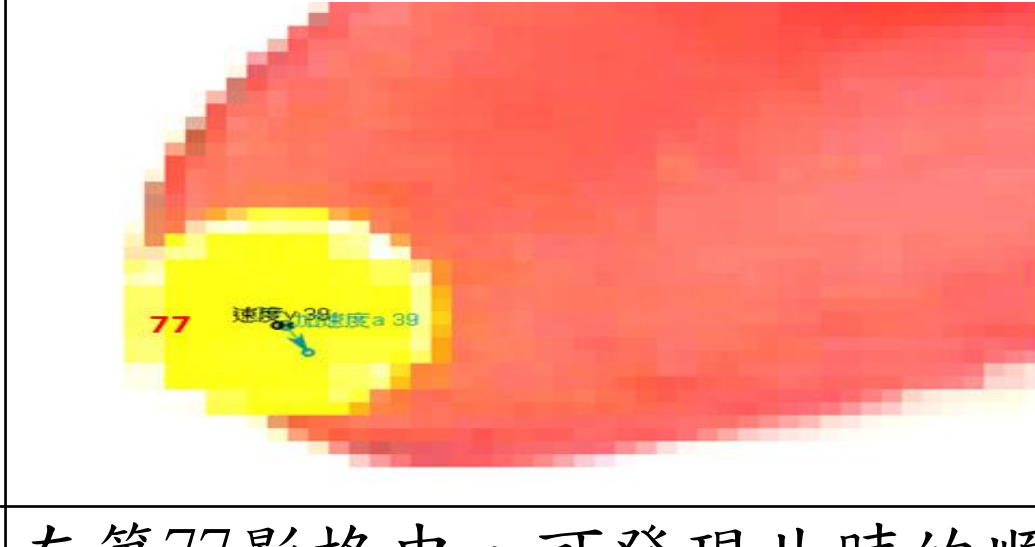
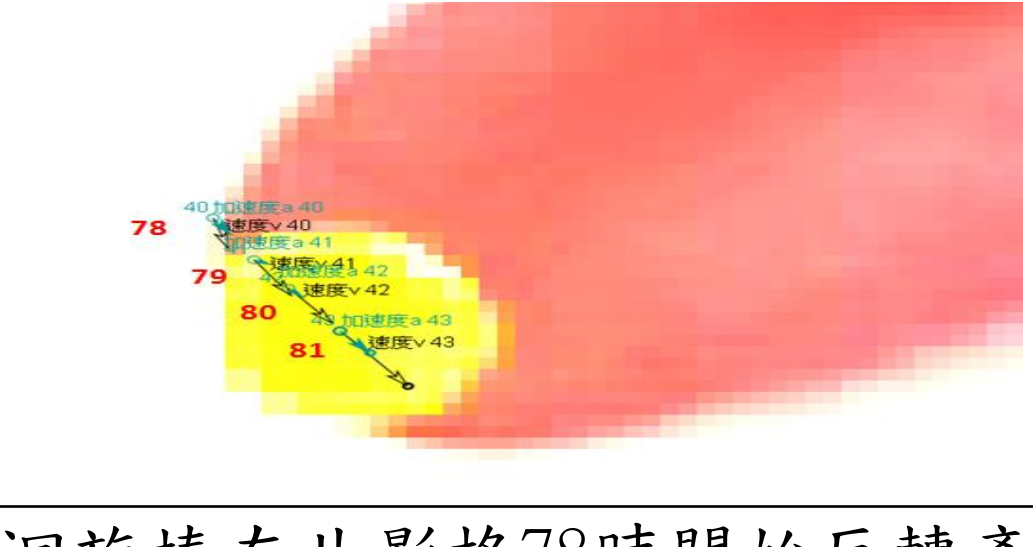
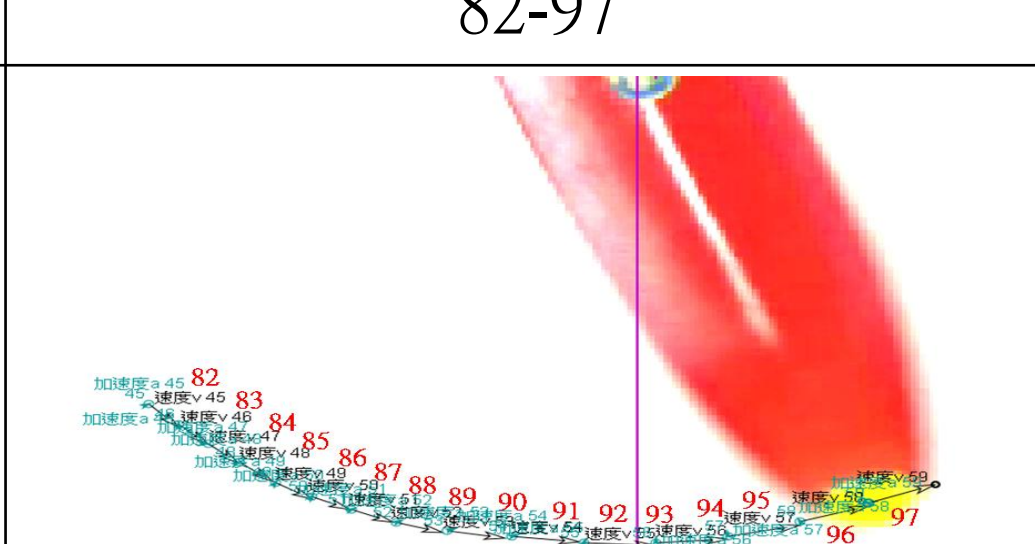
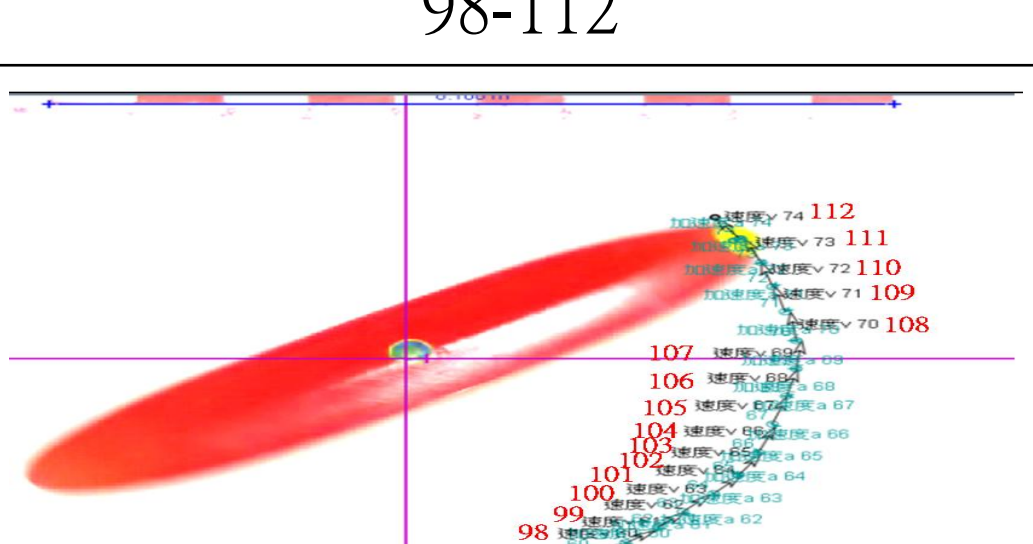
反轉時間：2.4秒到4秒，約1.6秒



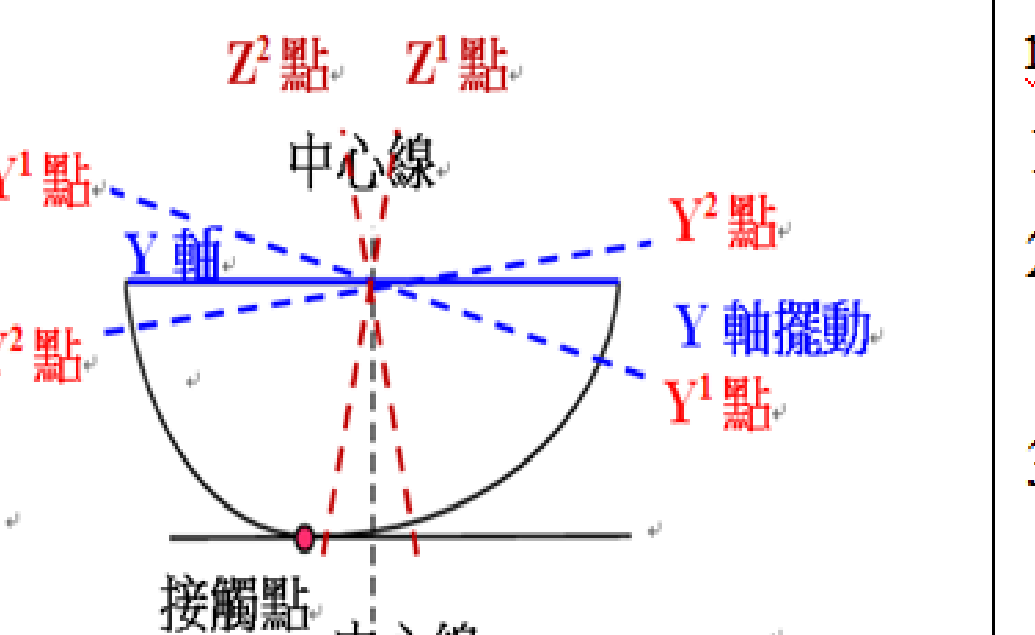
反轉時間：2秒到6.9秒，約4.9秒

- 反轉時間比較：電腦桌面4.9秒>摩石子地板4.5秒>光滑木桌3.4秒>切割墊1.9秒>塑面塑膠板1.6秒
- 從不同的軌跡圖來看，迴旋棒在順時轉停止前與開始反轉時，迴旋棒都會有明顯地上下振動現象產生。
- 可發現接觸面愈光滑，反轉現象愈明顯。可知迴旋棒在開始反轉時，當接觸面的摩擦阻力太大反而使迴旋棒重心偏移受到阻礙而無法反轉現象產生。



影格	38	39-53
圖像		
說明	從第38影格開始記錄，此時迴旋棒尚未受到任何外力。並無任何瞬時速度及向心加速度的產生。	從圖中可發現加速度與速度並不是同一方向，以B點來看，方向會不斷地改變。而形成以A點為中心旋轉現象產生。
影格	54-68	65-68
圖像		
說明	當迴旋棒順時針旋轉一段時間後發現圖中的加速度長度與速度長度呈現愈來愈短。表示順時針旋轉的速度逐漸減少。此過程中會發現迴旋棒的两端會有明顯的上下振動。	從圖示影格時間可發現在第68影格呈現的速度與加速度的方向相反，而使得迴旋棒的順時針旋轉速度逐漸變小。推測此時加速度應是迴旋棒與接觸面所產生摩擦力造成的。
影格	69-72	73-76
圖像		
說明	可明顯看出影格69至72因迴旋棒上下振動摩擦力造成順時針旋轉的速度愈來愈小的現象。	從影格73至76可看見迴旋棒的順時針旋轉速度逐漸變小及以非常小的距離移動。
影格	77	78-81
圖像		
說明	在第77影格中，可發現此時的順時針旋轉的速度為0，而加速度方向則以逆時針方向產生。	迴旋棒在此影格78時開始反轉產生，可發現速度與加速度為同一方向。
影格	82-97	98-112
圖像		
說明	反轉速度逐漸變快，且此時的加速度逐漸變成向心加速度，使迴旋棒以逆時針旋轉。	從反轉的過程中，可發現迴旋棒則以圓周運動方式轉動。直到反轉兩圈多後停止。

結 論



Z¹點、Z²點
中心線
Y¹點、Y²點
Y軸
Y軸擺動
接觸點
中心線

rattkeback 擺動時：

1. X 軸為中心
2. Y¹ 和 Z¹ 平行
Y² 和 Z² 平行
3. 在順時旋轉時
Y¹ ↔ Y² 上下擺動
4. 逐漸形成反轉動力。

可了解到迴旋棒受到外力時以順時針方向，其旋轉過程造成接觸點與其重心無法穩定在同一旋轉軸上。使得迴旋棒產生上下振動形成摩擦阻力抵抗順時針轉的力量，最後停止旋轉；此時也因迴旋棒接觸點與重心也無法在同一垂直線上也產生上下振動，而造成開始反轉現象產生。