

中華民國第 58 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 物理科

080120

有趣的指尖陀螺

學校名稱：新北市私立及人國民小學

作者： 小五 許沁琄 小五 趙宇翔	指導老師： 張政義 吳俊良
-------------------------	---------------------

關鍵詞：指尖陀螺

摘要

指尖陀螺旋轉時感覺有定向、牽引、穩定、改變重量的力量；我們以文獻探討、調查、定位觀測、吊掛觀測、滾輪觀測、三軸定位法來探究這些有趣的現象。我們發現指尖陀螺：

- (1) 外型對稱，會穩定平衡的水平、垂直定向轉動，這和重量、翼數、精密有關
- (2) 旋轉方式不影響旋轉時間，但重量有減輕現象（介於 0.1~0.2 克間）
- (3) 水平吊掛順、逆時針轉動，會水平穩定旋轉，不受擺動影響；但旋轉路徑不同
- (4) 吊掛垂直擺動時，軸距長旋轉時間久，這與垂直定位旋轉變水平定位旋轉有關
- (5) 軸水平、垂直方向旋轉，會產生偏移的力
- (6) 垂直、水平旋轉，有穩定滾動的作用
- (7) 三軸定位器有穩定平衡的避震功能。

我們希望擴展指尖陀螺有趣的研究成果，讓更多人喜歡研究科學。

壹、研究動機

最近風行指尖陀螺，玩法很多，玩起來很有趣。我們蒐集不同種類指尖陀螺來研究，發現把指尖陀螺水平快速旋轉，陀螺會向左、右、上、下偏移的現象，感覺會產生定向、牽引、穩定、改變重量的力量，和四年級「有趣的力」的單元一樣很有趣。我們想探討指尖陀螺有趣的現象及變化，就設計實驗用不同材質、結構的指尖陀螺來觀察旋轉變化，希望發現指尖陀螺旋轉特性及其應用可能性，讓研究科學研究有趣又實用。

貳、研究目的與問題

- 一、認識指尖陀螺平衡轉動的原理與影響因素。
- 二、探討指尖陀螺定向、牽引、穩定、改變重量的現象與變化。
- 三、研究指尖陀螺旋轉特性應用可能性。

參、研究問題

- 一、什麼是指尖陀螺？它有什麼特別的地方？
- 二、指尖陀螺的形狀、大小會影響旋轉嗎？
- 三、指尖陀螺的旋轉方法、方向會影響旋轉嗎？
- 四、指尖陀螺旋轉會受擺動的影響嗎？
- 五、指尖陀螺旋轉時穩定性如何？
- 六、指尖陀螺旋轉時會產生其他的力嗎？能加以應用嗎？

肆、研究器材與設備

- 一、研究設備：照相機、印表機、電腦、隨身碟、HTC RE 錄影機。

二、器材：各種指尖陀螺、培林、量角器、水平儀、指北針、螺絲、螺帽、木棒、塑膠環、塑膠珠、塑膠盤、金屬扣環、起子、鉛筆、橡皮擦、尺、原子筆、立可帶、筆記本、A4 白紙、訂書機、透明膠帶、棉線。

伍、研究方法與過程

一、研究方法

我們初步以（1）文獻探討法（2）調查法（3）定位觀測法（4）吊掛觀測法（5）滾輪觀測法（7）三軸定位觀測法研究指尖陀螺的平衡、定向、牽引及旋轉變化，各種研究方法說明如下：

研究方法	說 明
<p>文獻探討法</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1.利用午休、課餘時間收集指尖陀螺相關資料。 2.利用網路探討指尖陀螺相關研究。 3.固定每周一、二、四午休時間，共同討論。
<p>調查法</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1.利用假日進行指尖陀螺種類調查分析。 2.在校時間利用午休時間分析指尖陀螺特徵。 3.準備器材：相機、電腦。
<p>定位觀測法</p>      <p>擺動水平定位 擺動垂直定位 軸心定位 旋轉軸定位</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1.以食指在指尖陀螺中心點定位，包含：擺動水平定位、擺動垂直定位、軸心定位、旋轉軸定位。 2.定位後用力旋轉指尖陀螺，觀察變化。
<p>吊掛觀測法</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1.取出指尖陀螺中心蓋子，再以 5cm 鉛筆（直徑 0.7cm）做為軸心。 2.以 30cm（直徑 0.1cm）的棉線將指尖陀螺固定。 3.將固定的指尖陀螺用力旋轉，觀察變化。

滾輪觀測法



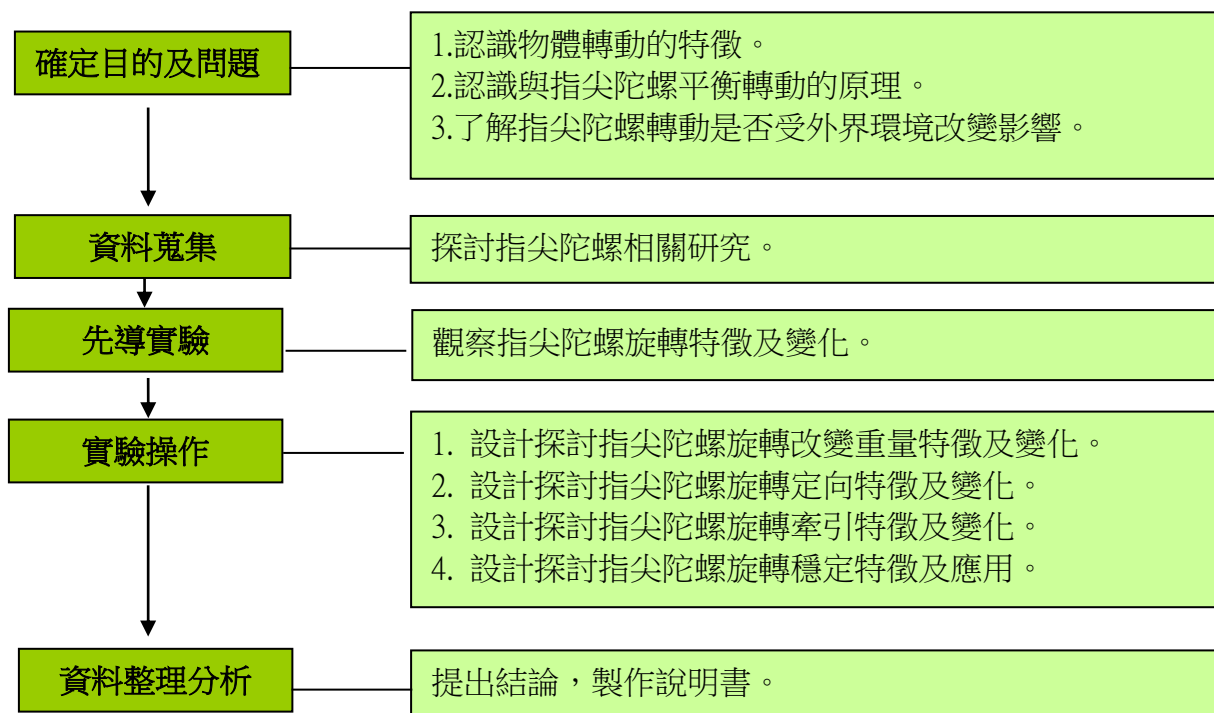
- 1.將指尖陀螺固定在 20cm 鉛筆（直徑 0.7cm）中心點，兩端各固定一片 CD 片，做成輪狀模型。
- 2.將尺標相距 20cm 黏置觀察台上，做成模型滾動軌道。
- 3.先以水平儀將觀察台調整至水平狀態，再將固定的指尖陀螺以（1）垂直（2）水平方向固定，用固定的力旋轉，測試觀察變化。

三軸定位觀測法



- 1.我們做成三軸定位器（模型如研究 6-4 說明），旋轉指尖陀螺，改變外軸角度，觀察三軸角度變化及定位器穩定性。
- 2.我們將 HTC RE 型錄影機裝在三軸定位器加上，觀察定位器穩定效果。

二、研究流程



陸、研究過程

一、什麼是指尖陀螺？它有什麼特別的地方？

【研究 1】

方法：

- 1.我們蒐集不同的指尖陀螺，編號加以比較。
- 2.我們比較指尖陀螺間的結構、翼長、翼數、重量。
- 3.我們比較指尖陀螺和一般陀螺外觀及旋轉方面的不同。

表 1-1 指尖陀螺結構

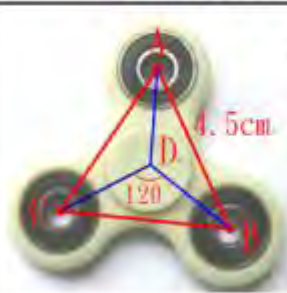

指尖陀螺基本型外觀	指尖陀螺基本型結構
 <ul style="list-style-type: none"> • $DA = DB = DC$ • $\angle ADB = \angle BDC = \angle ADC = 120^\circ$ 	 <ul style="list-style-type: none"> 翼 培林蓋 培林 (直徑2.1cm) 翼長 (4.1cm)

表 1-2 指尖陀螺和一般陀螺旋轉比較



指尖陀螺基本型與一般陀螺外觀比較		一般陀螺有明顯的軸，並以軸為中心轉動；指尖陀螺利用培林為中心轉動。此外旋轉方法、結構也不同。
		

表 1-3 指尖陀螺種類分析















編號	2	3-1	3-2	3-3	編號	3-4	3-5	3-6	3-7
照片					照片				
翼數	2	3	3	3	翼數	3	3	3	3
翼長	3.3cm	4.1 cm	3.8 cm	4.2 cm	翼長	3.3 cm	4.1 cm	3.3 cm	4.1 cm
重量	62.09 g	54.48 g	50.32 g	41.09 g	重量	73.24 g	41.23 g	64.73 g	43.08 g
編號	3-8	4	6-1	6-2	編號	7			
照片					照片				
翼數	3	4	6	6 cm	翼數	7 cm			
翼長	2.7cm	3.2 cm	2.6 cm	3g	翼長	3 g			
重量	31.11 g	35.12 g	106.5 g	58.1	重量	45.22			

表 1-4 指尖陀螺特徵

編號	2	3-1	3-2	3-3	
特徵	它有 2 個葉片，純合金重，是 10 分鐘不壞。	它有 3 個葉片，價格不貴，又很順手。	它有 3 個葉片，他把住，轉得很特別。	它有 3 個葉片，附燈來，美，十分漂亮。	
編號	3-4	3-5	3-6	3-7	
特徵	它有 3 個葉片，是比一般還重。	它有 3 個葉片，顏色好，不黑。	它有 3 個葉片，轉出，非常快。	它有 3 個葉片，每個葉片上都有鋼珠，轉動。	
編號	3-8	4	6-1	6-2	7
特徵	它有 3 個葉片，轉動時會發出聲音。	它有 4 個葉片，轉起，順手。	它有 6 個葉片，像彩虹。	它有 6 個葉片，轉起，手大。	它有 7 個葉片，轉起，手大。

結果：

1.我們稱「指尖陀螺側邊部位」為「翼」、編號 3-1 的指尖陀螺為「基本型」（表 1-1），重 54.48g。

2.指尖陀螺基本型有三個翼，翼中有培林，翼長 4.1cm，共四個培林，培林直徑為 2.1cm；設中央培林中心點為 D，其他分別為 A、B、C，則四個培林關係如下：

(1) $DA = DB = DC = 4.5\text{cm}$

(2) $\angle ADB = \angle BDC = \angle ADC = 120^\circ$

3.指尖陀螺和一般陀螺比較：一般陀螺外觀有明顯的軸，並以軸為中心轉動；指尖陀螺利用培林為中心轉動。此外旋轉方法、結構也不同。

4.我們蒐集不同的指尖陀螺共 13 種；特徵比較如表 1-3，表 1-4。

二、指尖陀螺的形狀、大小會影響旋轉嗎？

【研究 2-1】

方法：

- 1.我們將各種指尖陀螺以定位觀測法在電子秤中心點上旋轉比較。
- 2.我們不斷練習相同的力，用定位觀測法在桌面上，以相同的力比較旋轉時間。
- 3.做三次定位旋轉比較，過程中去除變異的數值，求出平均數加以觀察。

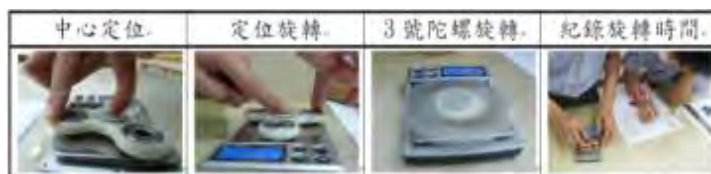


圖 2-1-1 指尖陀螺定位旋轉操作

表 2-1-1 指尖陀螺定位旋轉時間比較表

編號	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均 (秒)
2	33.49	32.78	46.15	37.47333
3-1	155.2	121.19	132.77	136.3867
3-2	103.82	94.92	114.12	104.2867
3-3	54.06	55.65	63.62	57.77667
3-4	96.01	117.83	124.75	112.8633
3-5	60.2	75.22	93	76.14
3-6	125.87	121.81	116.33	121.3367
3-7	106.46	75.5	37.47	73.14333
3-8	257.21	129.64	203.61	196.82
4	93.22	97.06	73.88	88.05333
6-1	121.82	142.04	97.88	120.58
6-2	156.49	162.75	160.44	159.8933
7	258.85	251.38	249.78	253.3367

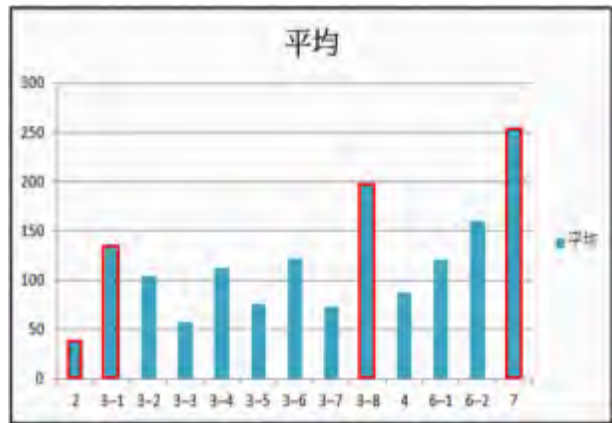


圖 2-1-2 指尖陀螺定位旋轉時間比較圖

結果：

- 1.各種指尖陀螺都能快速旋轉，其中 7 號平均旋轉時間最長約 253.3 秒；2 號平均旋轉時間最短約 37.5 秒。
- 2.我們認為指尖陀螺旋轉時間和陀螺本身重量、翼數、精密有關；一般來說指尖陀螺較精密、較重、翼數較多旋轉時間較長；反之，旋轉時間較短。
- 3.基本型旋轉時間約達 136.4 秒，旋轉時間也較長。

【研究 2-2】

方法：

- 1.我們用定位觀測法將各種指尖陀螺在電子秤中心點上旋轉比較。
- 2.我們觀察、紀錄、比較指尖陀螺的（1）原始重量（2）旋轉初始重量（3）旋轉改變重量（4）旋轉終止重量變化。
- 3.我們不斷練習相同的力，以便能用相同的力旋轉比較。
- 4.做三次定位旋轉比較，過程中去除變異的數值，求出平均數加以觀察。

表 2-2-1 陀螺旋轉重量改變觀察結果（平均/重量單位：克）

編號	2-1	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	4-1	6-1	6-2	7
C-原始重量	62.09	54.51	50.32	41.09	73.24	41.23	64.73	43.05	31.12	35.14	106.53	58.10	58.10
旋轉初始重量	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察
旋轉終止重量	62.09	54.56	50.31	41.07	73.23	41.21	54.71	43.05	31.10	35.17	106.58	58.15	58.15
A-最大重量	62.10	54.57	50.36	41.09	73.37	41.41	64.74	43.05	31.15	35.17	106.58	58.17	58.17
B-最小重量	62.03	54.45	50.21	40.88	73.13	41.14	64.62	43.00	31.10	35.05	106.49	58.04	58.04
A-B	0.07	0.12	0.15	0.21	0.23	0.25	0.14	0.05	0.05	0.12	0.09	0.13	0.13
C-B	0.06	0.06	0.11	0.21	0.11	0.09	0.11	0.05	0.02	0.09	0.04	0.06	0.06

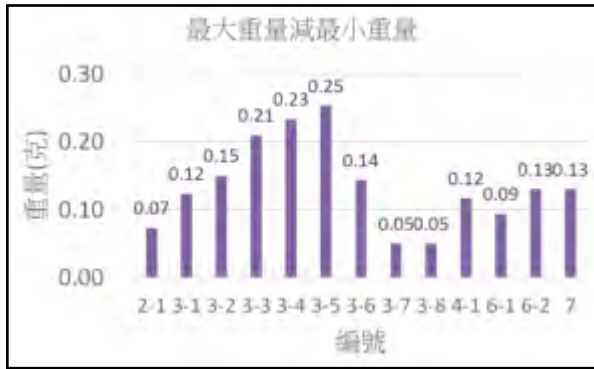


圖 2-2-1 最大重量減最小重量比較



圖 2-2-2 原始重量減最小重量比較

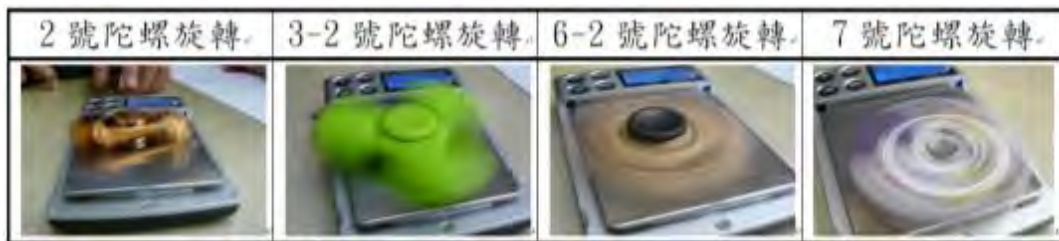


圖 2-2-3 指尖陀螺定位旋轉比較

結果：

1. 指尖陀螺旋轉時重量會改變。
2. 旋轉時間愈久，重量改變越頻繁，如基本型（3 號各型）、6 號、7 號。
3. 旋轉初始重量因為指壓的關係無法觀察。
4. 旋轉時重量會改變，我們比較重量改變情形：
 - (1) 「最大重量－最小重量」時：3-7、3-8 減輕最少（0.05 克）。
 - (2) 「原始重量－最小重量」時：3-8 減輕最少（0.02 克），3-3 減輕最多（0.21 克）。
 - (3) 「原始重量」和「最大重量」比較，除 3-3、3-7 減少以外，其他都會變重。
 - (4) 有些指尖陀螺一開始旋轉就變重，有些一開始旋轉就變輕，情形不一樣。
 - (5) 旋轉時重量改變和指尖陀螺原始重量有關；越重變化越小，如 6-1；越輕變化也越小，如 3-8。

【研究 2-3】

方法：

1. 我們用 6-1 號指尖陀螺在電子秤上以定位觀測法旋轉比較。
2. 每次取下一翼，分別取下一翼、二翼、三翼、四翼、五翼、六翼旋轉觀察。
3. 做三次定位旋轉比較，過程中去除變異的數值，求出平均數加以觀察。



定位旋轉觀測

觀測與紀錄

表 2-3 6-1 號指尖陀螺旋轉重量與時間變化比較

編號	0	1-1	2-1	2-1	2-3	3-1	
照片							
原始重量	106.51	96.21	85.97	86.17	86.19	75.86	
旋轉終止重量	106.59	96.22	85.97	86.17	86.16	75.86	
旋轉時間	99.74	18.11	15.35	10.08	12.54	7.63	
編號	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3	5-1	6-1
照片							
原始重量	75.86	75.89	65.67	65.69	65.69	55.42	45.36
旋轉終止重量	75.85	75.88	65.67	65.69	65.66	55.42	45.35
旋轉時間	98.1	8.387	1.593	2.97	11.19	1.68	79.74

重量單位：克 時間單位：秒

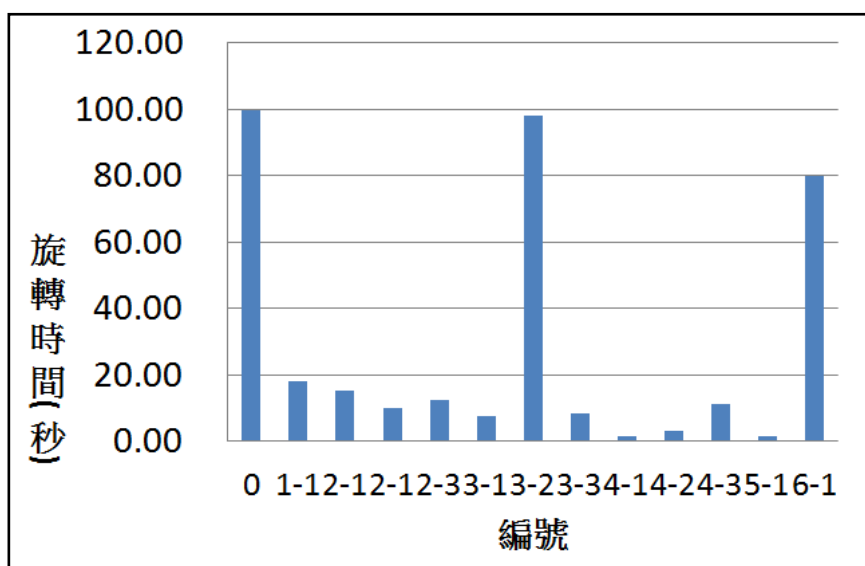


圖 2-3 6-1 號旋轉重量與時間變化比較 (時間單位：秒)

結果：

1. 旋轉時重量幾乎不會改變。
2. 4-1 (2 翼)、4-2 (2 翼)、5-1 號 (1 翼) 「翼」不對稱，無法旋轉，旋轉不穩定，
3. 0 (6 翼)、3-2 (3 翼)、6-1 號 (0 翼) 「翼」相互對稱，旋轉時間較久，旋轉很穩定，如比較圖 2-3。
4. 「翼」的對稱性會影響旋轉時間長短和穩定性。

三、指尖陀螺的旋轉方法、旋轉方向會影響旋轉嗎？

【研究 3-1】

方法：

1. 我們用 2、3、4、6 組指尖陀螺以「研究 2-2」方法操作觀察。
2. 我們以 (1) 手動-定位觀測法 (2) 氣動-定位觀測法旋轉觀測比較各種重量變化。
2. 氣動旋轉時，噴槍與指尖陀螺成 45°，計時打氣 5 秒鐘做觀察比較。
3. 我們再由 2~20 秒，每次增加 2 秒，打氣觀察指尖陀螺氣動旋轉時間長短。
4. 各做三次定位旋轉比較，過程中去除變異的數值，求出平均數加以觀察。

表 3-1-1 旋轉方法不同重量改變操作觀察



表 3-1-2 旋轉方法不同的重量改變比較

編號	2-1		3-1		3-2		3-3		3-4		編號	3-5		3-6		4-1		6-1		6-2	
	手動	氣動	手動	氣動	手動	氣動	手動	氣動	手動	氣動		手動	氣動	手動	氣動	手動	氣動	手動	氣動	手動	氣動
原始重量	62.1	62.2	54.5	50.8	50.3	50.5	41.1	40.5	73.2	73.2	原始重量	41.2	41.3	64.7	65.3	35.1	35.0	106.5	106.8	58.1	58.1
旋轉終止	62.1	62.2	54.6	50.8	50.3	50.5	41.1	40.5	73.2	73.2	旋轉終止	41.2	41.4	64.7	65.1	35.2	34.9	106.6	106.7	58.1	58.1
A-散失重量	62.1	62.2	54.6	51.1	50.3	50.7	41.1	40.8	73.4	73.2	A-散失重量	41.4	41.4	64.7	65.3	35.2	35.1	106.6	107.1	58.2	58.3
B-散失重量	62.0	62.1	54.4	50.7	50.3	50.5	40.9	40.3	73.1	73.0	B-散失重量	41.2	41.3	64.6	64.9	35.1	34.9	106.3	106.6	58.0	57.9
A-B	0.1	0.1	0.2	0.4	0	0.2	0.2	0.6	0.3	0.2	A-B	0.2	0.1	0.1	0.4	0.1	0.2	0.1	0.5	0.2	0.4
C-B	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0.2	0.2	0.1	0.2	C-B	0	0	0.1	0.4	0	0.1	0	0.2	0.1	0.2

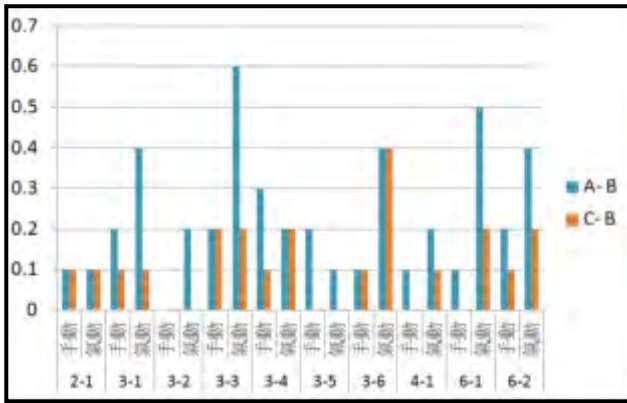


圖 3-1-1 旋轉方法不同的 A-B 與 C-B 比較

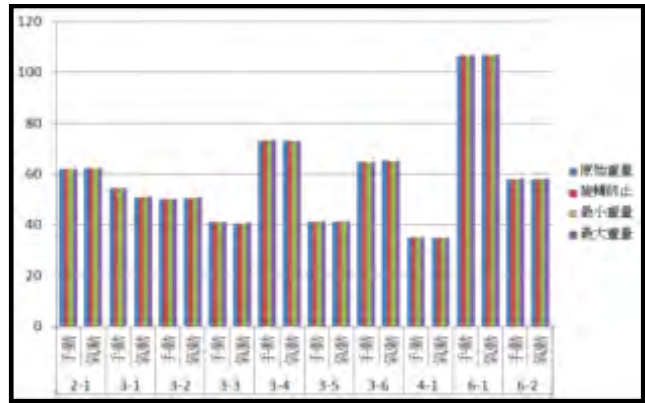


圖 3-1-2 旋轉方法不同各種重量改變比較

結果：

1. 手動與氣動旋轉的重量都會改變；旋轉時間愈久，重量改變越頻繁。

2. 我們比較手動與氣動重量改變情形：

(1) 「最大重量－最小重量」時：3-1、3-3、6-1、6-2 改變較大，3-3 氣動旋轉達 0.6 克。

(2) 「原始重量－最小重量」時：無論手動與氣動旋轉大都有重量減輕的現象（0.1~0.2 克之間）。

3. 氣動旋轉的重量改變較大（如 3-3、6-1），因此我們認為氣動旋轉的方法較不穩定。

【研究 3-2】

方法：

1. 我們由 2~20 秒，每次增加 2 秒，打氣觀察基本型指尖陀螺氣動旋轉時間長短。

2. 以「研究 3-1」方法操作觀察。

3. 各做三次定位旋轉比較，過程中去除變異的數值，求出平均數加以觀察。

表 3-2-1 手動與氣動旋轉時間比較

驅動秒數	手動	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	氣動平均
旋轉時間	59.3	48.8	52.9	60.1	65.3	77.3	65	58.2	57	52.6	57.9	59.5

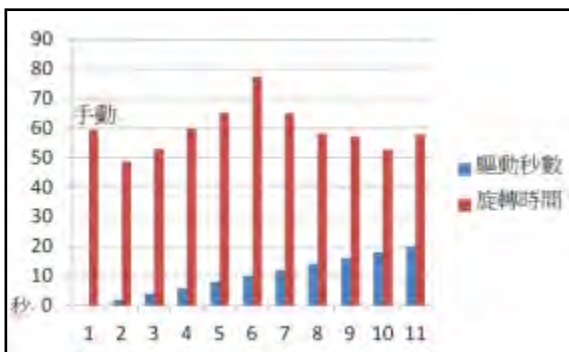


圖 3-2-1 手動與氣動旋轉時間比較

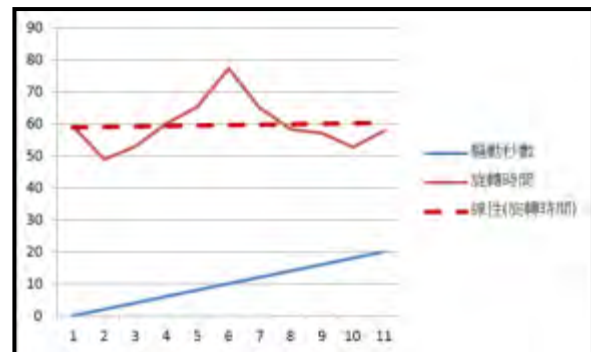


圖 3-2-2 手動與氣動旋轉時間比較趨勢

結果：

1.手動旋轉時間平均為 59.3 秒，氣動旋轉 2~20 秒時間平均為 59.5 秒，相差 0.2 秒，旋轉時間大致相同。

2.氣動旋轉 2~10 秒時，旋轉時間逐漸增加；10~20 秒，旋轉時間有逐漸減少趨勢；以氣動 10 秒旋轉時，指尖陀螺旋轉時間最久。

3.由旋轉時間趨勢線觀察（圖 3-2-2），手動與氣動旋轉在旋轉時間長短無多大差異。

【研究 3-3】

方法：

1.我們用基本型指尖陀螺在電子秤上以定位觀測法旋轉比較。

2.以研究 2-1、2-2 的方法，將二個基本型指尖陀螺以順、逆方向旋轉比較。

3.分別有以：上順下順、上逆下逆、上順下逆、上逆下順四種旋轉方向比較。

4.我們以指尖陀螺的（1）原始重量（2）旋轉初始重量（3）旋轉改變重量（4）旋轉終止重量，觀察、紀錄、比較重量變化。

5.做三次定位旋轉比較，過程中去除變異的數值，求出平均數加以觀察。

表 3-3-1 旋轉方向不同重量改變觀察

編號	上順下順	上逆下逆	上順下逆	上逆下順
原始重量	103.02	102.96	102.93	102.94
旋轉終止重量	103.01	102.90	102.86	102.91
A-最大重量	103.10	103.07	103.00	103.01
B-最小重量	102.99	102.81	102.74	102.88
A-B	0.11	0.26	0.26	0.13

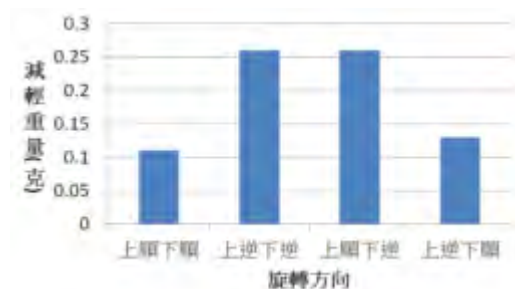


圖 3-3-1 旋轉方向不同重量改變比較

結果：

1.二個指尖陀螺旋轉方向不同時，不會影響旋轉。

2.二個指尖陀螺旋轉方向不同時，重量會改變，情形如下：

（1）上順下順：減輕 0.11 克。

（2）上逆下逆：減輕 0.26 克。

（3）上順下逆：減輕 0.26 克。

（4）上逆下順：減輕 0.13 克。

四、指尖陀螺旋轉會受擺動的影響嗎？

【研究 4-1】

方法：

1.設計「擺動觀察台」（如圖 4-1-1），將指尖陀螺中心點穿孔繫上棉繩吊掛，以水平定位擺動觀察。

2.指尖陀螺與量角器保持平行，由右至左以（1）順時針（2）逆時針方向轉動指尖陀螺，移動至 10° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° ，放下擺動觀察（如圖 4-1-1）。

3.指尖陀螺與量角器保持平行，由左至以：

（1）順時針轉動指尖陀螺，移動至 10° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° ，放下擺動觀察。

（2）逆時針轉動指尖陀螺，移動至 10° ，放下擺動觀察。

4.每種角度做三次，以相機的錄影模式觀察記錄指尖陀螺旋轉路徑變化，並模擬畫出來。



圖 4-1-1 擺動觀察台及操作方法

表 4-1-1 不同角度擺動觀察

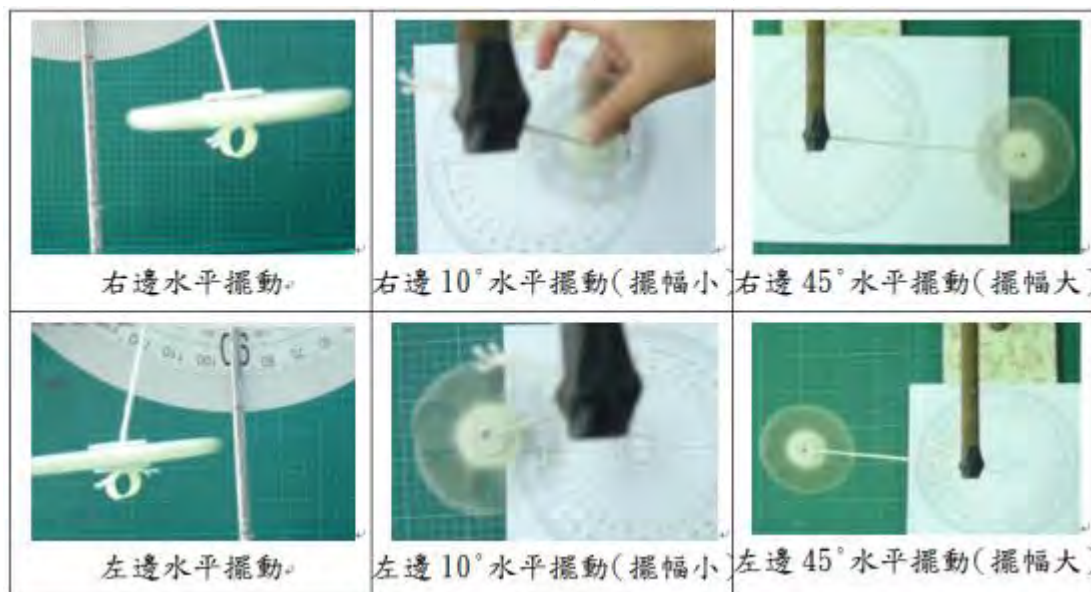


表 4-1-2 由右至左不同角度擺動路徑觀察（「●」代表起點，「→」代表終點）

路徑 角度 旋轉方法	10°	30°	45°	60°	90°
由右至左 順時針					
由右至左 逆時針					

表 4-1-3 由左至右不同角度擺動路徑觀察（「●」代表起點，「→」代表終點）

路徑 角度 旋轉方法	10°	30°	45°	60°	90°
由左至右 順時針					

表 4-1-4 由左至右不同角度擺動路徑觀察（「●」代表起點，「→」代表終點）

路徑 角度 旋轉方法	10°	10°	10°
由左至右 順時針			

結果：

1. 指尖陀螺順時針、逆時針方向轉動，都保持水平穩定旋轉，不受擺動影響。
2. 指尖陀螺順時針方向轉動時，由 0° 迴轉擺動至 90°，共擺動 15 次；因此每迴轉擺動 1 次，則每 6° 順時針擺動 1 次，計算方式為： $90 \div 15 = 6$ 。
3. 指尖陀螺順時針方向轉動時，會以順時針路徑，平均每 6° 移動擺動一次；移動擺動至 135° 時會反轉擺動，這時指尖陀螺轉動也會出現反轉的錯覺。
4. 指尖陀螺逆時針方向轉動時，會以逆時針路徑，平均每 6° 移動擺動一次；移動擺動至 135° 時會反轉擺動，這時指尖陀螺轉動也會出現反轉的錯覺。
5. 擺動路徑會越來越趨近圓形，最後靜止在中心點(表 4-1-2、表 4-1-3、表 4-1-4、圖 4-1-3)。



圖 4-1-2 指尖陀螺旋轉擺動路徑



圖 4-1-3 指尖陀螺旋轉擺動路徑分析

【研究 4-2】




方法：




- 1.將指尖陀螺固定在長 20cm、直徑 0.6 cm 的轉軸（竹筷）上，每隔 1cm 做一個劃記。
- 2.將指尖陀螺固定在研究 4-1 的觀察台中心點（以觀察台三軸為基準，圖 4-1-1），保持在 0° ，每隔 1cm 吊掛觀察 1 次。
- 3.指尖陀螺和旋轉軸維持垂直，以垂直定位旋轉法順時針旋轉觀察。
- 4.做三次，以相機的錄影模式觀察記錄指尖陀螺旋轉路徑變化，並模擬畫出來。



圖 4-2-1 垂直定位擺動觀察操作

表 4-2-1 不同軸距吊掛旋轉穩定觀察 (「●」代表起點, 「→」代表終點)

軸距	1cm	2cm	3cm
旋轉時間(秒)	60.75	67.79	93.10
旋轉路徑			
其他變化	開始時旋轉軸水平逆時針旋轉, 20 秒後旋轉軸傾斜順時針迴轉, 40 秒後垂直加速旋轉。	開始時旋轉軸水平逆時針旋轉, 20 秒後旋轉軸傾斜順時針迴轉, 40 秒後垂直加速旋轉。	開始時旋轉軸水平逆時針旋轉, 20 秒後旋轉軸傾斜順時針迴轉, 40 秒後垂直加速旋轉。

軸距	4cm	5cm	6cm
旋轉時間(秒)	88.55	87.93	90.37
旋轉路徑			
其他變化	旋轉軸傾斜逆時針迴轉逐漸垂直快速旋轉。	旋轉軸傾斜逆時針迴轉逐漸垂直快速旋轉。	旋轉軸傾斜逆時針迴轉逐漸垂直快速旋轉。

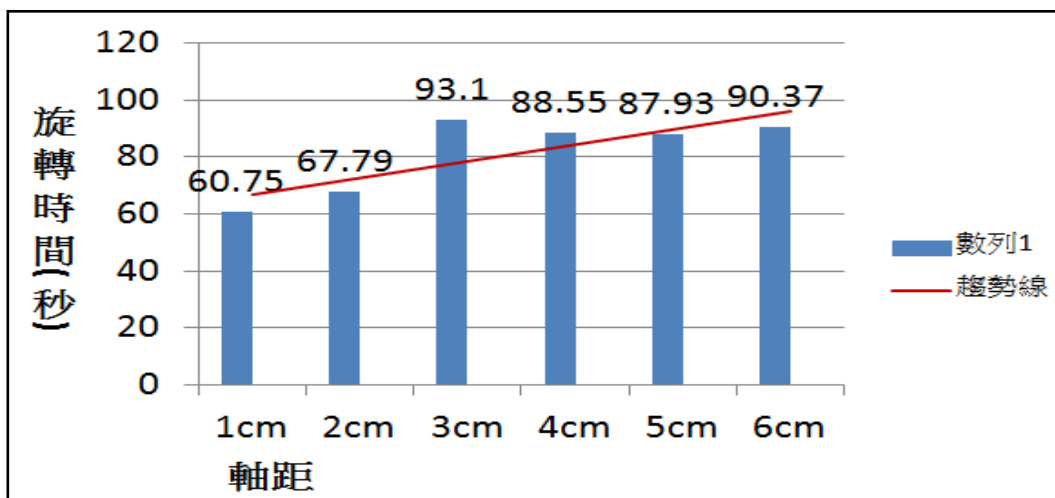











圖 4-2-2 不同軸距吊掛旋轉穩定比較

表 4-2-2 不同軸距吊掛旋轉穩定觀察說明

照片			
說明	軸距：1cm 垂直定位旋轉操作	軸距：1cm 旋轉軸維持水平旋轉	軸距：1cm 旋轉軸逆時針 45° 水平旋轉
照片			
說明	軸距：1cm 旋轉軸逆時針 90° 水平旋轉	軸距：1cm 旋轉軸逆時針 135° 水平旋轉	軸距：1cm 旋轉軸逆時針 200° 傾斜旋轉
照片			
說明	軸距：1cm 旋轉軸停留逐漸垂直旋轉	軸距：1cm 旋轉軸順時針逐漸垂直旋轉	軸距：3cm 旋轉軸順時針逐漸垂直旋轉

結果：

1. 指尖陀螺在軸距 1-3cm 時，旋轉軸先水平逆時針旋轉，但是會左右、上下擺動；20 秒後旋轉軸傾斜順時針迴轉，40 秒後垂直加速旋轉。

2. 指尖陀螺在軸距 4-6cm 時，旋轉軸不容易保持水平旋轉，旋轉軸會快速傾斜、變垂直快速旋轉。

3. 軸距越長旋轉時間較久，我們認為和指尖陀螺由垂直定位旋轉變水平定位旋轉有關。

五、指尖陀螺旋轉時穩定性如何？

【研究 5】

方法：

1. 將指尖陀螺固定在長 20cm、直徑 0.6 cm 的轉軸（竹筷）上，每隔 0.5cm 做一個劃記。
2. 將指尖陀螺固定在「角度觀察台」中心點（表 4-3-1 照片），保持在 0°，每隔 1cm 定位旋轉觀察 1 次。

3. 指尖陀螺和旋轉軸維持垂直，旋轉軸垂直保持 0°，以水平定位旋轉法順時針旋轉觀察。

4. 做三次，以相機的錄影模式觀察記錄指尖陀螺旋轉路徑變化。

表 5-1 不同軸距軸柱旋轉穩定觀察說明

照片			
說明	軸距：0.5cm 旋轉軸停留逐漸垂直旋轉	軸距：2cm 旋轉軸順時針逐漸垂直旋轉	軸距：3.5cm 旋轉軸順時針逐漸垂直旋轉
照片			
說明	軸距：5cm 旋轉軸停留逐漸垂直旋轉	軸距：5cm 旋轉軸逐漸偏離中心點 逆時針旋轉	軸距：5.5cm 旋轉軸偏離中心點逆時 針旋轉

表 5-2 不同軸距軸柱旋轉穩定觀察

軸距	0.5cm	1cm	1.5cm
旋轉時間 (秒)	69.99	70.17	76.32
其他變化	12.75 秒偏右 2° 21.95 秒偏右 3° 34.59 秒回復 0°	20.10 秒偏右 2° 37.68 秒偏右 4° 43.28 秒回復 0°	21.57 秒偏右 2° 25.83 秒偏右 3° 39.70 秒回復 0°
軸距	2cm	2.5cm	3cm
旋轉時間 (秒)	71.67	69.78	68.94
其他變化	24.46 秒偏左右偏 2° 36.12 秒偏左右偏 3° 43.01 秒回復 0°	16.82 秒偏左右偏 2° 25.64 秒偏左右偏 1° 25.65 秒回復 0°	14.078 秒偏左右偏 2° 32.82 秒偏左右偏 0°
軸距	3.5cm	4cm	4.5cm
旋轉時間 (秒)	64.15	63.17	50.40
其他變化	28.67 秒偏左右偏 2° 38.17 秒偏左右偏 1° 49.96 秒回復 0°	21.41 秒偏左右偏 4° 29.18 秒偏左右偏 1° 29.19 秒回復 0°	21.17 秒偏左右偏 1° 32.67 秒偏左右偏 2° 46.04 秒回復 0°
軸距	5cm	5.5cm	6cm
旋轉時間 (秒)	53.43	57.48	0
其他變化	40.51 秒偏左右偏 1° 41.01 秒回復 0°	26.60 秒偏左右偏 1° 36.44 秒回復 0°	傾倒

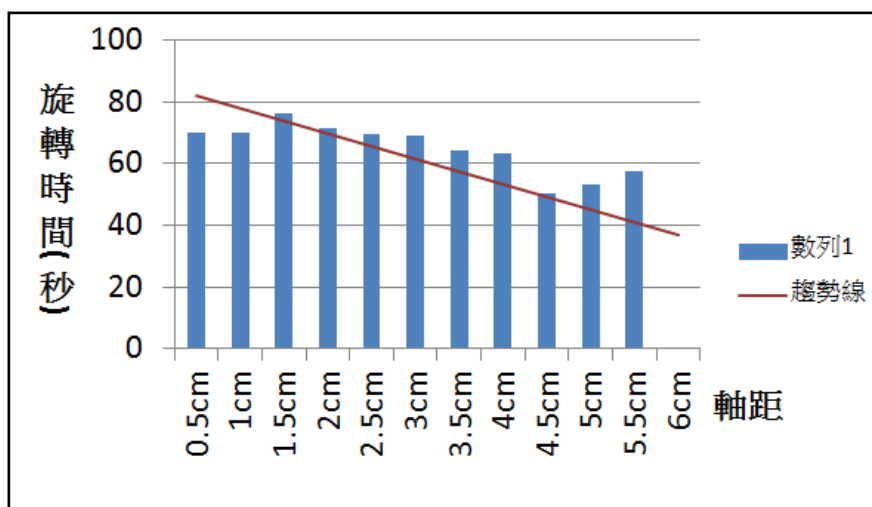


圖 5-1 不同軸距軸柱旋轉穩定比較

結果：

1. 指尖陀螺在軸距 0.5-5.5cm 時都能順利穩定旋轉，6cm 以上無法直立轉動。
2. 旋轉時間由趨勢線觀察，軸距越短旋轉時間越久。
3. 指尖陀螺旋轉變化如下：穩定旋轉（旋轉軸保持 0° ）→ 左右擺動旋轉（旋轉軸左右擺幅 $1-4^\circ$ ）→ 穩定旋轉 → 傾倒。
4. 快傾倒時，旋轉軸會偏離中心點。

六、指尖陀螺旋轉時會產生其他的力嗎？能加以應用嗎？

【研究 6-1】

方法：

1. 將指尖陀螺固定在長 10cm（8.5cm）、直徑 0.6 cm 的轉軸（竹筷）上，做出有軸的指尖陀螺。
2. 將指尖陀螺固定在直徑 8.5cm、寬 1 cm 的環狀塑膠管上，做出 A、B 兩型環型有軸的指尖陀螺，加以比較。
 - (1) A 型：轉軸長 8.5cm、直徑 0.6 cm（略呈圓形）。
 - (2) B 型：轉軸長 9.5cm、直徑 0.6 cm（略呈橢圓形）。
3. 在環狀塑膠管內 $0^\circ-90^\circ-180^\circ$ 位置，設定三個基準點；第一基準點與第二基準點成 180° ，第一基準點與第三基準點、第二基準點與第三基準點成 90° （表 6-1），以便操作觀察。
4. 再將環型有軸的指尖陀螺，固定在「圓形量角器」中心點（表 6-2），分 (1) 軸水平 (2) 軸垂直固定位置觀察；兩種方式都以旋轉軸定位法順時針旋轉觀察。
5. 做三次，以相機的錄影模式觀察記錄指尖陀螺旋轉變化。

表 6-1-1 A、B 型環型有軸的指尖陀螺製作說明

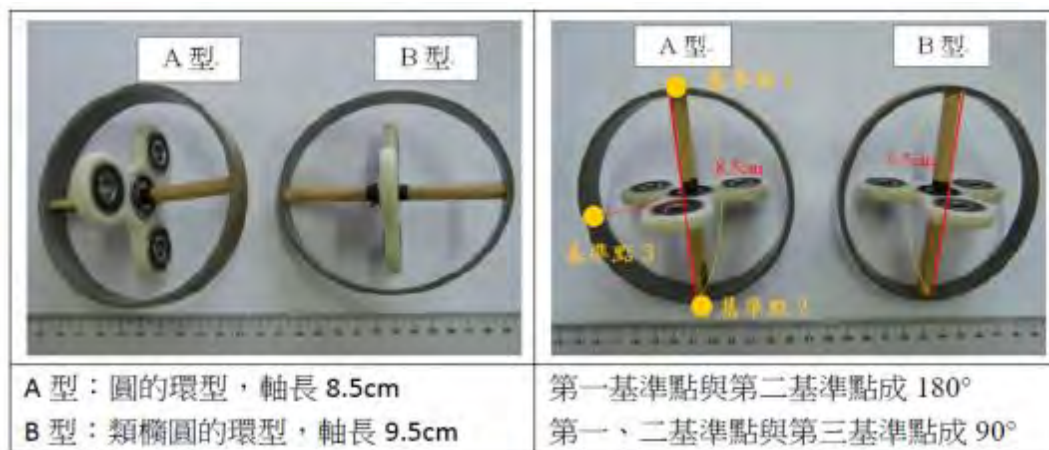


表 6-1-2 環型指尖陀螺操作說明

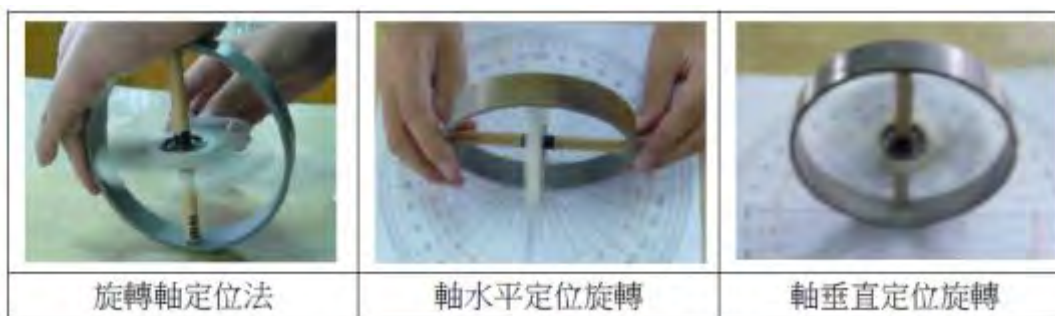


表 6-1-3 環型指尖陀螺定位與偏轉變換

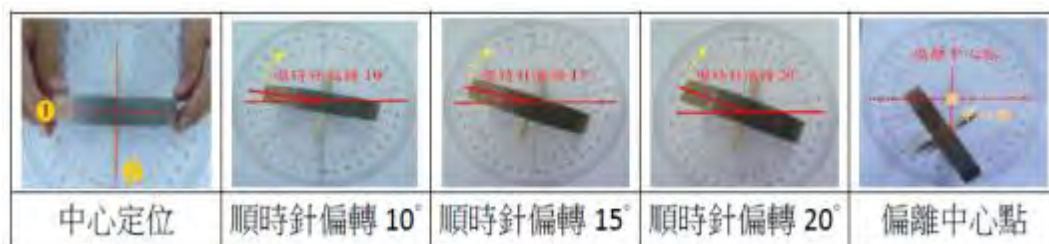


表 6-1-4 A、B 環型指尖陀螺旋轉偏離角度比較

操作	結果觀察	A						B							
		順			逆			順			逆				
		1次	2次	3次	1次	2次	3次	1次	2次	3次	1次	2次	3次		
●水平	偏移中心點	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	
	垂直偏離角度	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	
	水平偏離角度	∪	∪	∪	∪	∪	∪	∪	∪	∪	∪	∪	∪	∪	
	∪-順時針方向 ∪-逆時針方向	10°	10°	20°	5°	1°	3°	10°	10°	11°	20°	1°	10°		
●垂直	偏移中心點	會	會	會	會	會	會	無法直立			會	會	會		
	垂直偏離角度	90°	90°	90°	90°	90°	90°				90°	90°	90°	1°	90°
	水平偏離角度	∪	∪	∪	∪	∪	∪				∪	∪	∪	∪	∪
	∪-順時針方向 ∪-逆時針方向	43°	40°	53°	35°	35°	78°				25°	47°	55°		

結果：

1. A 型、B 型環型指尖陀螺都能在「軸水平、軸垂直」方向旋轉。
2. B 型轉軸較長，形成類橢圓形環型指尖陀螺，旋轉效果較差。
3. 「軸水平」時 A 型、B 型旋轉時都不會偏離中心點；但是會產生順、逆時針偏移的力，最多偏移 20°，情形如下：

- (1) A 型順時針定位旋轉，會產生順時針偏移的力，最多偏移 20°。
- (2) A 型逆時針定位旋轉，會產生逆時針偏移的力，最多偏移 1°。
- (3) B 型順時針定位旋轉，會產生順時針偏移的力，最多偏移 11°。
- (4) B 型逆時針定位旋轉，偏移的力不穩定，最多偏移 20°。

4. 「軸垂直」時 A 型、B 型旋轉時都會偏離中心點，回復「軸水平」的位置，變化較大，情形如下：

- (1) A 型順時針定位旋轉，會產生順時針偏移的力，回復「軸水平」，最多偏移 53°。
- (2) A 型逆時針定位旋轉，會產生逆時針偏移的力，回復「軸水平」，最多偏移 78°。
- (3) B 型順時針定位旋轉，無法順利旋轉。
- (4) B 型逆時針定位旋轉，偏移的力不穩定，回復「軸水平」，最多偏移 55°。

【研究 6-2】

方法：

1. 將指尖陀螺固定在 20cm 鉛筆（直徑 0.7cm）中心點，兩端各固定一片 CD 片，做成輪狀模型；再將尺標相距 20cm 黏置觀察台上，做成模型滾動軌道。
2. 以水平儀將觀察台調整至水平狀態，再將垂直固定的指尖陀螺用力旋轉，觀察變化。
3. 指尖陀螺以（1）順時針（2）逆時針方向旋轉，用相同的力加以旋轉測試，觀察輪狀模型是否偏離定位點，以及順、逆時針旋轉的影響。

表 6-2-1 輪狀模型滾動測試位置及操作

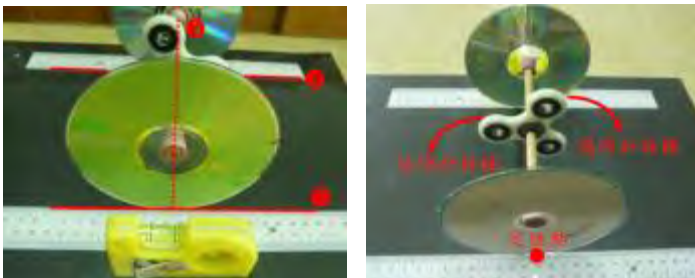
輪狀模型滾動測試位置	操作方法
	<ol style="list-style-type: none">1. 以水平儀讓測試台保持水平。2. 模型在定位點上定位。3. 讓①與②保持平行；①、②與③垂直。4. 旋轉紙尖陀螺測試觀察。

表 6-2-2 輪狀模型滾動測試比較

操作	結果觀察	輪狀							
		順				逆			
		1次	2次	3次	平均	1次	2次	3次	平均
水平	順向偏移中心點	不會	不會	不會	-	不會	不會	不會	-
	反向偏移中心點	會	會	會	-	會	會	會	-
	順向偏移距離	0 cm	0 cm	0 cm	0 cm	0 cm	0 cm	0 cm	0 cm
	反向偏移距離	0.2cm	2.6 cm	1.2 cm	1.33 cm	0.6 cm	2.4 cm	1.1 cm	1.36 cm

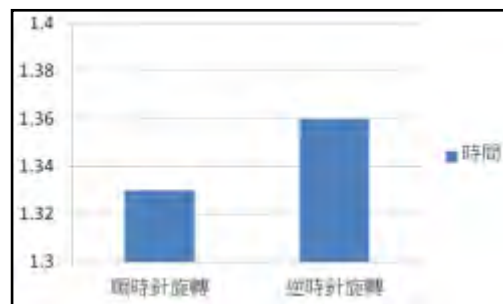


圖 6-2-1 輪狀模型滾動距離比較

結果：

- 1.指尖陀螺在輪狀模型以（1）順時針（2）逆時針方向旋轉，都會往相反方向些微移動；輪狀模型的指尖陀螺順時針旋轉平均移動 1.33cm，逆時針旋轉平均移動 1.36cm。
- 2.指尖陀螺在旋轉時會產生與旋轉方向相反的力。

【研究 6-3】

方法：

- 1.我們以輪狀模型、滑輪、棉線、紙盒做成拉力測量裝置，以小迴紋針（0.32 克）、大迴紋針（1.22 克）放入紙盒中，以產生拉力。
- 2.將輪狀模型以（1）垂直（2）水平固定指尖陀螺，在研究 6-2 的觀測台上用力旋轉，測試觀察移動變化。
- 3.指尖陀螺垂直旋轉以小迴紋針（0.32 克）測拉力；水平旋轉以大迴紋針（1.22 克）測拉力。

表 6-3-1 輪狀模型旋轉測試操作


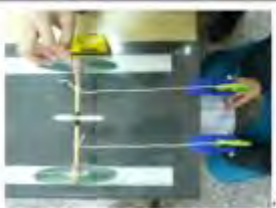




照片與說明			
	垂直旋轉測試	垂直旋轉測試裝置	移動距離測量
照片與說明			
	水平旋轉測試	水平旋轉測試裝置	水平旋轉產生翻轉

表 6-3-2 輪狀模型垂直旋轉測試操作

載重	空盒	1 個	2 個	3 個
重量 (g)	3.21 g	3.53g	3.85g	4.81g
移動距離	4cm	9.5cm	14cm	掉落 (無法測量)

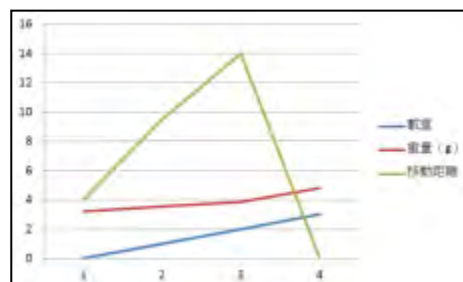


圖 6-3-1 垂直旋轉拉力關係

表 6-3-3 輪狀模型水平旋轉測試操作

載重	1 個	2 個	3 個	4 個	5 個
重量 (g)	4.43g	5.65 g	6.87 g	8.09 g	9.31 g
移動距離	0.2cm	0.4 cm	0.6 cm	0.8 cm	1 cm
載重	6 個	7 個	8 個	9 個	10 個
重量 (g)	10.53 g	11.75 g	12.97 g	14.19 g	15.41 g
移動距離	1.2 cm	1.4 cm	1.6 cm	1.8 cm	2 cm

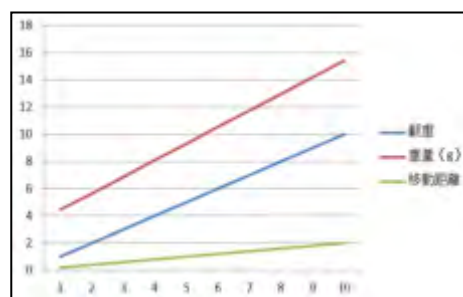


圖 6-3-2 水平旋轉拉力關係

結果：

- 1.指尖陀螺垂直、水平旋轉時，載重越大，移動距離越大；拉力的關係如圖 6-3-1、圖 6-3-2。
- 2.指尖陀螺垂直旋轉時，只能承受 3.85g 的力，穩定滾動的作用較小；指尖陀螺水平旋轉時，每增加 1.22 克移動 0.2cm，能承受 15.41g 以上的力（最大能達 30.85g），穩定滾動的作用較大。

【研究 6-4】

方法：

- 1.我們參考研究 4-1、4-2、5、6-1、6-2、6-3 所發現指尖陀螺穩定旋轉、定位旋轉的現象，以指尖陀螺、培林（直徑 2.1cm）、塑膠環（三個，直徑分別為 3、4、4.5cm）、螺絲（長 16 cm）螺絲帽、木棒（長 19 cm，直徑 1cm）、量角器做成指尖陀螺三軸定位器（如圖 6-4-1）。

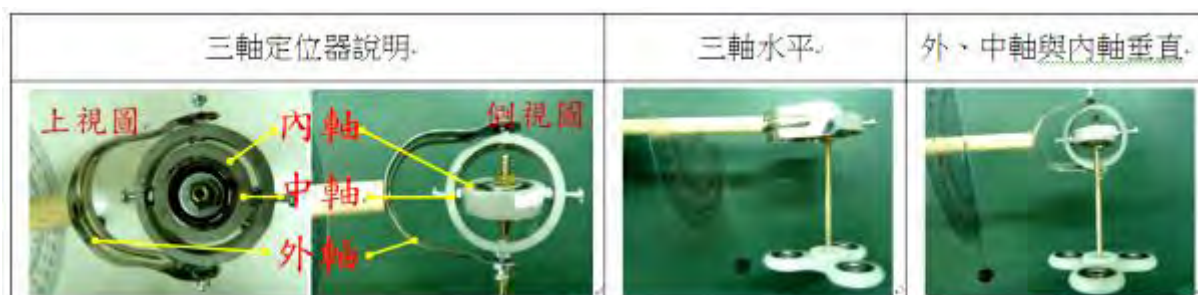


圖 6-4-1 三軸定位器說明

2.我們製作 (1) 水平觀察台-中心放置水平儀 (2) 角度觀察台-中心吊置指北針 (如圖 6-4-2)，旋轉指尖陀螺，每隔 10° 改變三軸定位器的角度，觀察穩定的變化。

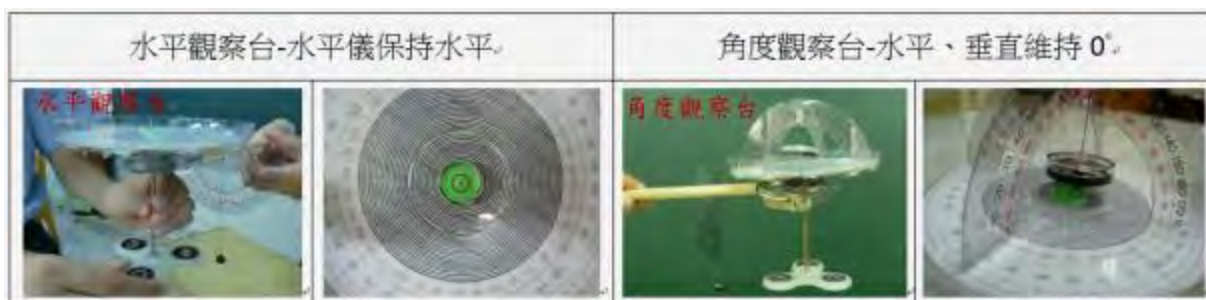


圖 6-4-2 三軸定位器操作

3.我們製作穩定觀察台 (如圖 6-4-3)，將 HTC RE 錄影機裝在指尖陀螺三軸定位器上，分 (1) 不轉動指尖陀螺-靜止 (2) 轉動指尖陀螺的方式，以左右兩側每隔 10° 操作觀察一次，做三次，求出平均數比較，操作圖示如下。

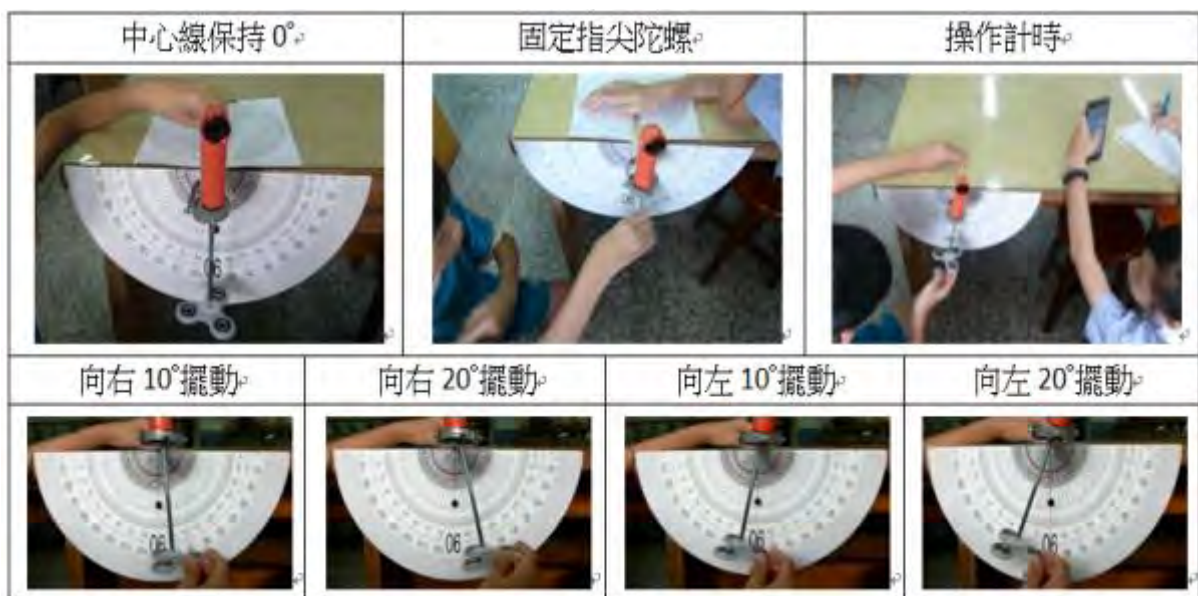


圖 6-4-3 三軸定位器穩定觀察

4.我們利用 HTC RE 錄影機及指尖陀螺三軸定位器，製作攝影平臺 (圖 6-4-4)，以 (1) 靜止時，指尖陀螺轉動、不轉動 (2) 移動時，設定移動速度為 0.25 公尺/秒，指尖陀螺分轉動、不轉動的方式，錄影觀察指尖陀螺三軸定位器穩定的功能。

表 6-4-1 三軸定位器水平觀察比較

向左偏轉角度	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
觀察結果	保持水平	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察
向右偏轉角度	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
觀察結果	保持水平	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察

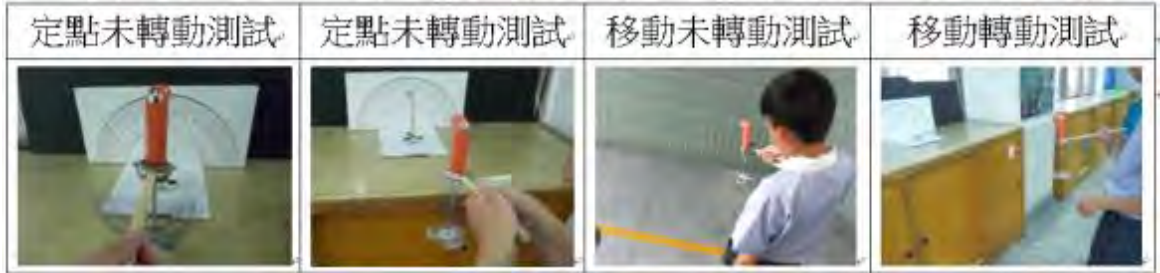


圖 6-4-4 HTC RE 攝影平臺操作

結果：

1.我們把指尖陀螺三維定位器的三軸分為為內軸、中軸、外軸（如圖 6-4-1），功能如下：

- (1) 內軸：與指尖陀螺維持水平，穩定指尖陀螺位置。
- (2) 中軸：與內軸維持垂直關係，可以協助維持前後穩定。
- (3) 外軸：與內軸維持水平關係，可以協助維持左右穩定。
- (4) 三軸定位器左右約可轉動 140°；前後約可轉動 270°。

2.水平觀察台上的水平儀可以保持水平，顯示指尖陀螺三軸定位器在震動時有維持水平的功能；三軸定位器受觀察台影響適用振幅約 40°。

3.角度觀察台上的指北針可以在水平與垂直方向保持 0°，顯示指尖陀螺三軸定位器在震動狀態下，有維持水平、垂直的穩定功能；適用振幅約 40°。

4.我們觀察指尖陀螺三軸定位器穩定性，發現：

(1) 指尖陀螺不轉動時（靜止），向右擺動 10°需時 4.62 秒，向右擺動 20°需時 7.84 秒；向左擺動 10°需時 3.6 秒，向左擺動 20°需時 7.41 秒。

(2) 轉動指尖陀螺時，向右擺動 10°需時 5.86 秒，向右擺動 20°需時 7.04 秒；向左擺動 10°需時 3.85 秒，向左擺動 20°需時 6.06 秒。

(3) 三軸定位器穩定性和左右擺無關，和角度有關；角度小指尖陀螺不轉動時較穩定，角度大指尖陀螺轉動時較穩定，我們認為：三軸定位器在擺動較大時，越能發揮穩定作用。

表 6-4.2 三軸定位器穩定觀察比較

方向/角度	右 10°				右 20°				左 10°				左 20°			
次數	1	2	3	平均	1	2	3	平均	1	2	3	平均	1	2	3	平均
靜止 (秒)	5.13	4.37	4.36	4.62	7.9	7.8	7.83	7.843	4.37	3.07	3.36	3.6	7.31	7.06	7.86	7.41
旋轉 (秒)	5.61	6.78	5.19	5.86	6.78	6.6	7.73	7.037	4.89	3.24	3.42	3.85	6.55	7.2	6.63	6.058

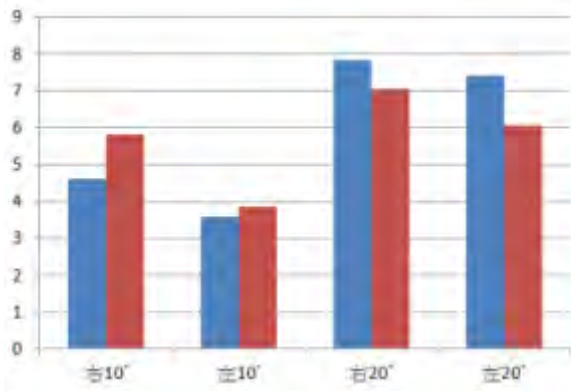


圖 6-4-5 三軸定位器穩定觀察比較

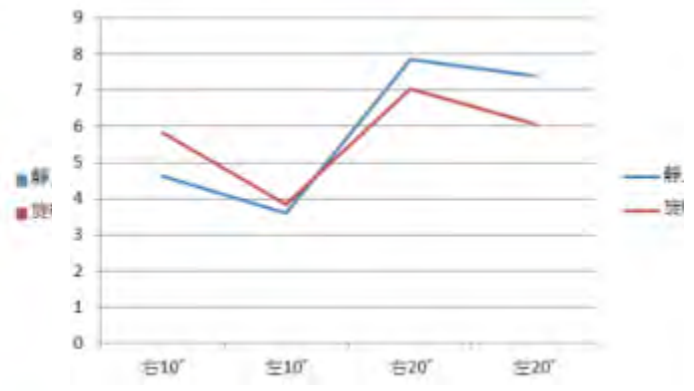


圖 6-4-6 三軸定位器穩定趨勢觀察比較

5.我們比較 HTC RE 錄影影片在 (1) 靜止 (2) 移動時指尖陀螺三軸定位器功能，發現：

- (1) 靜止時指尖陀螺不轉動較轉動畫面穩定。
- (2) 移動時指尖陀螺轉動較不轉動畫面穩定。

柒、討論

一、指尖陀螺的發明者是 62 歲的凱瑟琳·海婷格（黃樂怡，2017），出生地是美國華盛頓特區，是位女演員，曾經演過命中註定多個你、盛大婚禮等戲劇。

二、指尖陀螺有趣好玩，也可以拿來研究，玩法多元化，但是玩時要小心，不要受傷了。

三、指尖陀螺有許多葉片，只要是對稱的，就可以轉得很穩；它的外觀大有不同，但是不管外型再如何奇怪，都還是會對稱的。

四、指尖陀螺的軸承有分等級，如果是陶瓷的，會轉得比較久。

五、指尖陀螺很貴，所以我們持續探討如何自製指尖陀螺。

六、我們曾利用網路調查指尖陀螺的種類，共蒐集了 12 種，整理如下：

名稱	夜光三片指間陀螺	雙色七片指間陀螺	鋁合金三片指間陀螺-1	銅金二片指間陀螺-1	名稱	鋁合金三片指間陀螺-2	楓葉二片指間陀螺	銅金二片指間陀螺-2	手裏劍四片指間陀螺
照片					照片				
特徵	採用異製配重軸承，高密度塑料框架控制成本，同時保持可玩度和速度，重量 55 克，在黑暗的地方會發光，價格約 60 元。	材質藍銅合金，轉速中等，價格約 300 元。	三角平衡板可輔助三分鐘，材質合金精鋼，價格約 600 元。	可轉動 3 到 4 分鐘，速度快，精鋼材質。	特徵	尺寸 78x5.5 進口滾珠軸承旋轉速度快持久力越久約 4 分鐘材質鋁合金。	價超騎士版金屬軸承主體 ABS 塑膠旋轉快，持久力還好！約 50 秒。	金屬軸承可替換，至少轉 3 分鐘以上體積小價格約 300 到 500 元。	擁有少見四片的指間陀螺，持久力約 3 分鐘，價格約 300 到 500 元。
名稱	EDU 三片指間陀螺	啞牌二片指間陀螺	俄羅斯三片指間陀螺	夜光輪盤二片指間陀螺	名稱	金屬六片指間陀螺	LED 七片指間陀螺	方向盤圓指間陀螺	三葉草三片指間陀螺
照片					照片				
特徵	塑膠材質進口不鏽鋼滾珠軸承(軸承可以轉動)，旋轉速度中等，持久力約 2 分鐘，價格約 100-150 元。	360 度旋轉，可旋轉 2-3 分鐘，旋轉速度快，持久力強，下鏢鋼材質，十字型造型增加分，價格 300 到 600 元之間。	整體為不鏽鋼，較重，鏢形部分是鋁合金，鋼圈硬鋼帶基料厚度十足當即機械人一樣！彭不鏽鋼較重所以如果全部材質鋼或鈦合金，轉動會更輕。	重量輕，體積小，材質為 ABS，身體顏色帶灰綠色，夜間發光，獨特的輪盤形狀，光澤的表面保持手指免受劃傷，價格約 100-150 元，旋轉快，持久力為 40 秒。	特徵	金屬鋼與 188 軸承可替換，轉速快，穩定，轉動時間高達 8 分鐘，價格約 300 到 500 元。	LED 七彩燈轉速快，炫酷，適合夜間，價格約 300 到 500 元。	60mm 風車輪，重量 43 克，材質合金加塑膠，高速轉動，在手上隨處晃動，材料有輕微震動。	304 不鏽鋼旋轉 5 分鐘以上超強，價格極高的 1400-1500 元。

資料來源：作者自行蒐集，網址如實驗紀錄。

七、調查的指尖陀螺與一般陀螺比較不同如下：

(一) 發射方式：指尖陀螺是用手撥轉動；一般陀螺是用繩子拉動它。

(二) 形狀：指尖陀螺大多是扁平形的；一般陀螺上面是圓柱的，下面是尖的。

(三) 構造：指尖陀螺的裡面有軸承，外面再用塑膠或合金包覆著；一般陀螺是在木頭的外面畫圖，下面用一根類似針的物體讓它旋轉維持平衡。

(四) 材質：指尖陀螺有塑膠、合金、黃銅、不鏽鋼、鈦或銅製；一般陀螺則是用木頭。

(五) 玩法：指尖陀螺可以在手上轉，一般陀螺要在平面地方玩；指尖陀螺發動的方式多元，像是：用手、橡皮筋等等，一般的陀螺則是手捻、棉繩打動。

(六) 一般陀螺的樣式很多，如下：

名稱	貼餅陀螺	王爺陀螺	儀物陀螺	火龍陀螺	名稱	轉舌陀螺	豈木陀螺	陀螺儀	瓜體陀螺
照片					照片				
名稱	無奈陀螺	皮卡陀螺	王牌高手陀螺	雷神陀螺	名稱	紅鳳陀螺	雙龍陀螺	蜂工陀螺	電報陀螺
照片					照片				
名稱	菊輝陀螺	風暴陀螺	火焰陀螺	風周陀螺	名稱	雙向衝擊陀螺	雙時陀螺	巨大陀螺	心起陀螺
照片					照片				
名稱	家學陀螺	暴力陀螺	風丁陀螺	地城陀螺	名稱	三代陀螺	拉麵陀螺	水果陀螺	太極八卦陀螺
照片					照片				

資料來源：作者自行蒐集，網址如實驗紀錄。

八、研究中我們發現用手動方式讓指尖陀螺轉動，有力量不一致的缺點，我們有考慮用（1）吹氣或打氣產生動力的方法（2）拉線產生動力的方法（3）彈簧產生動力的方法讓指尖陀螺轉動，但是在實際操作時只有手動方式才能有效操作，為了讓實驗有趣，我們將尋求更好的方法來轉動指尖陀螺做實驗。

九、研究中我們也發現（1）電子秤本身（2）指尖陀螺秤的位置會影響秤重而產生誤差的問題，如編號 6-1 相同的「翼」，秤出的重量不同（如下），在指尖陀螺轉動時重量減輕的實驗影響很大，我們將針對「指尖陀螺轉動時重量減輕」的問題再繼續探討。

照片			
數值	10.30 克	10.25 克	10.23 克
照片			
數值	10.24 克	10.13 克	10.05 克

捌、結論

1.我們稱「指尖陀螺側邊部位」為「翼」，指尖陀螺基本型有三個翼，翼中有培林，翼長 4.1cm，共四個培林，培林直徑為 2.1cm；設中央培林中心點為 D，其他分別為 A、B、C，則四個培林關係如下：

(1) $DA = DB = DC = 4.5\text{cm}$

(2) $\angle ADB = \angle BDC = \angle ADC = 120^\circ$

2.我們蒐集的指尖陀螺共 13 種，都能快速旋轉，我們認為指尖陀螺旋轉時間長短和陀螺本身重量、翼數、精密有關；一般來說指尖陀螺較精密、較重、翼數較多旋轉時間較長；反之，旋轉時間較短。

3.指尖陀螺旋轉時重量會改變；二個指間陀螺旋轉方向不同時，不會影響旋轉，但是重量也會改變。

4.指尖陀螺雖然外觀大有不同，但是不管它外型再奇怪，它都還是會對稱；「翼」的對稱性會影響旋轉時間長短和穩定性；只要是對稱的，就可以轉得很穩。

5.指尖陀螺旋轉方法不同（手動與氣動）時，變化如下：

（1）都有重量減輕的現象（0.1~0.2 克之間），我們認為旋轉時會產生些微上升的力。

（2）二者由旋轉時間趨勢線觀察（圖 3-2-2），在旋轉時間長短上無多大差異。

（3）氣動旋轉的方法較不穩定，影響實驗穩定性。

6.指尖陀螺順時針、逆時針方向水平擺動轉動，都保持水平穩定擺動旋轉，不受擺動影響；但是旋轉路徑不同如下：

（1）指尖陀螺順時針方向轉動時，由 0° 迴轉擺動至 90° ，共擺動 15 次；因此每迴轉擺動 1 次，則每 6° 順時針擺動 1 次，計算方式為： $90 \div 15 = 6$ 。

（2）指尖陀螺順時針方向轉動時，會以順時針路徑，平均每 6° 移動擺動一次；移動擺動至 135° 時會反轉擺動，這時指尖陀螺轉動也會出現反轉的錯覺。

（3）指尖陀螺逆時針方向轉動時，會以逆時針路徑，平均每 6° 移動擺動一次；移動擺動至 135° 時會反轉擺動，這時指尖陀螺轉動也會出現反轉的錯覺。

（4）擺動路徑會越來越趨近圓形，最後靜止在中心點。

7.指尖陀螺在不同軸距垂直吊掛擺動實驗時，軸距越長旋轉時間較久，和指尖陀螺由垂直定位旋轉變水平定位旋轉有關，變化如下：

（1）軸距 1-3cm 時，旋轉軸先水平逆時針旋轉，但是會左右、上下擺動；20 秒後旋轉軸傾斜順時針迴轉，40 秒後垂直加速旋轉。

（2）指尖陀螺在軸距 4-6cm 時，旋轉軸不容易保持水平旋轉，旋轉軸會快速傾斜、變垂直快速旋轉。

8.指尖陀螺在不同軸距軸柱旋轉穩定實驗時，變化如下：

（1）在軸距 0.5-5.5cm 時都能順利穩定旋轉，6cm 以上無法直立轉動。

（2）軸距越短旋轉時間較久。

（3）不同軸距軸柱旋轉變化如下：穩定旋轉（旋轉軸保持 0° ）→左右擺動旋轉（旋轉軸

擺幅 1-4°) → 穩定旋轉 → 傾倒。

(4) 快傾倒時，旋轉軸會偏離中心點。

9. A 型、B 型環型指尖陀螺都能在「軸水平、軸垂直」方向旋轉，並產生偏移的力，變化如下：

(1) 「軸水平」時 A 型、B 型旋轉時都不會偏離中心點；但是會產生順、逆時針偏移的力，最多偏移 20°，情形如下：

- a. A 型順時針定位旋轉，會產生順時針偏移的力，最多偏移 20°。
- b. A 型逆時針定位旋轉，會產生逆時針偏移的力，最多偏移 1°。
- c. B 型順時針定位旋轉，會產生順時針偏移的力，最多偏移 11°。
- d. B 型逆時針定位旋轉，偏移的力不穩定，最多偏移 0°。

(2) 「軸垂直」時 A 型、B 型旋轉時都會偏離中心點，回復「軸水平」的位置，變化較大，情形如下：

- a. A 型順時針定位旋轉，會產生順時針偏移的力，回復「軸水平」，最多偏移 53°。
- b. A 型逆時針定位旋轉，會產生逆時針偏移的力，回復「軸水平」，最多偏移 78°。
- c. B 型順時針定位旋轉，無法順利旋轉。
- d. B 型逆時針定位旋轉，偏移的力不穩定，回復「軸水平」，最多偏移 55°。

10. 我們發現指尖陀螺在輪狀模型實驗中以 (1) 垂直 (2) 水平旋轉，都有穩定滾動的作用。

11. 指尖陀螺三軸定位器在震動時有維持水平、垂直的穩定功能；適用振幅約 40°。

12. 三軸定位器穩定性擺動角度有關；指尖陀螺不轉動時角度小較穩定，指尖陀螺轉動時角度大較穩定，因此我們認為：三軸定位器在擺動較大時，越能發揮穩定作用。

玖、參考文獻

1. 林玟君等 (2005)。轉不轉不一樣。第四十四屆全國中小學科學展覽會作品說明書。
2. 維基百科 (2017)。陀螺。【on line】<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%99%80%E8%9E%BA>.
3. 黃樂怡 (2017)。發明家悲歌。【on line】<https://www.hk01.com/熱話/88686>.

【評語】 080120

指尖陀螺是一個用來研究角動量與力學平衡相當理想的教具。
本作品將許多影響陀螺轉動的因素一一的剖析，並且為其設計與自製了不同的實驗裝置來研究陀螺的性質，做了定性上的說明和描述。
唯若能對實驗結果做進一步的探討，更能彰顯參加科展的精神。

壹、研究動機

最近風行指尖陀螺，玩法很多，玩起來很有趣。我們蒐集不同種類指尖陀螺來研究，發現把指尖陀螺水平快速旋轉，陀螺會向左、右、上、下偏移的現象，感覺會產生定向、牽引、穩定、改變重量的力量，和四年級「有趣的力」的單元一樣很有趣。我們想探討指尖陀螺有趣的現象及變化，就設計實驗用不同材質、結構的指尖陀螺來觀察旋轉變化，希望發現指尖陀螺旋轉特性及其應用可能性，讓研究科學研究有趣又實用。

貳、研究目的

- 一、認識指尖陀螺平衡轉動的原理與影響因素。
- 二、探討指尖陀螺定向、牽引、穩定、改變重量的現象與變化。
- 三、研究指尖陀螺旋轉特性應用可能性。

參、研究問題

- 一、什麼是指尖陀螺？它有什麼特別的地方？
- 二、指尖陀螺的形狀、大小會影響旋轉嗎？
- 三、指尖陀螺的旋轉方法、方向會影響旋轉嗎？
- 四、指尖陀螺旋轉會受振動的影響嗎？
- 五、指尖陀螺旋轉時穩定性如何？
- 六、指尖陀螺旋轉時會產生其他的力嗎？能加以應用嗎？



我們的指尖三軸定位器

肆、研究器材設備

- 一、研究設備：照相機、印表機、電腦、隨身碟、HTC RE錄影機。
- 二、器材：各種指尖陀螺、培林、量角器、水平儀、指北針、螺絲、螺帽、木棒、塑膠環、塑膠珠、塑膠盤、金屬扣環、起子、鉛筆、橡皮擦、尺、原子筆、立可帶、筆記本、A4白紙、訂書機、透明膠帶、棉線。

伍、研究方法與流程

一、研究方法

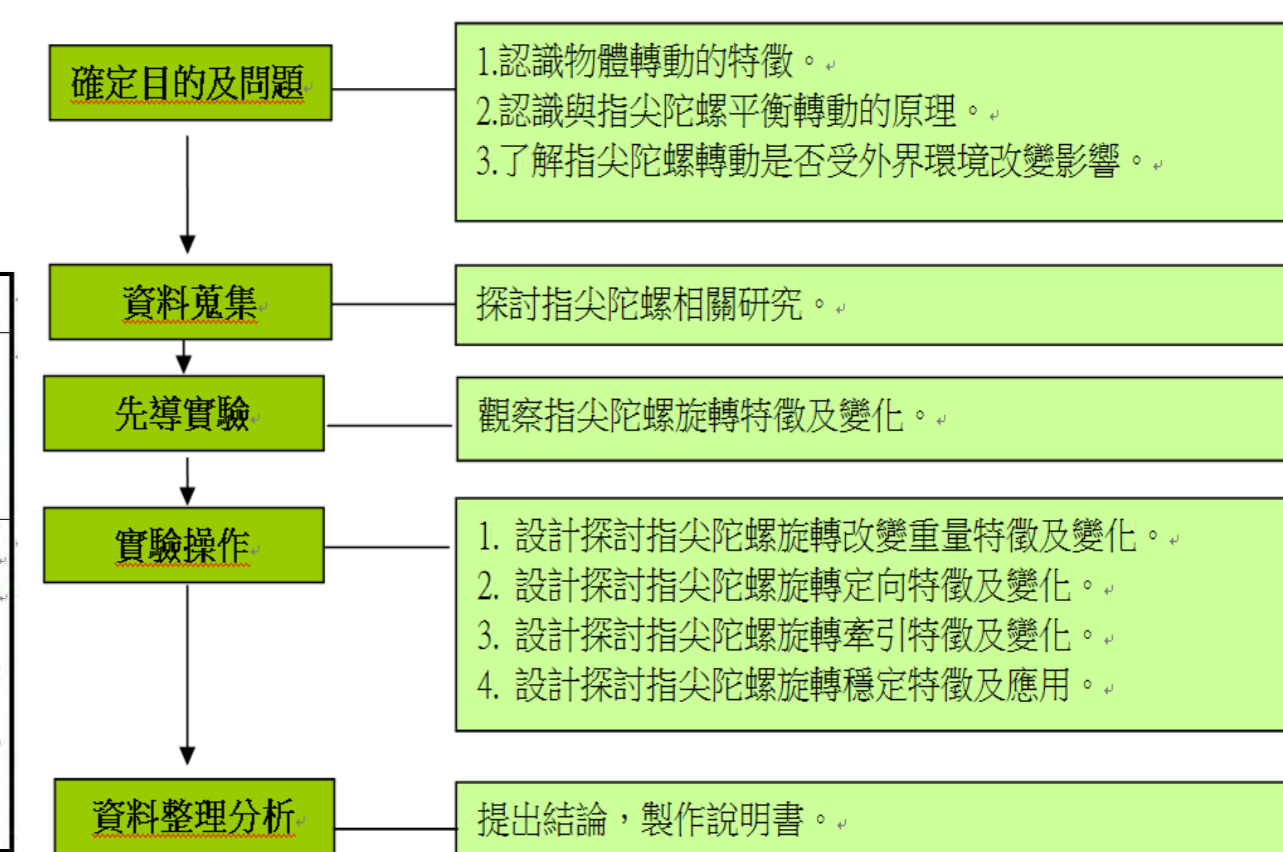
我們初步以(1)文獻探討法(2)調查法(3)定位觀測法(4)吊掛觀測法(5)滾輪觀測法研究指尖陀螺的平衡、定向、牽引及旋轉變化，各種研究方法說明如下：

研究方法	文獻探討法	調查法	吊掛觀測法
照片			
說明	1.利用午休、課餘時間蒐集指尖陀螺相關資料。 2.利用網路探討指尖陀螺相關研究。 3.固定每週一、二、四午休時間，共同討論。	1.利用假日進行指尖陀螺種類調查分析。 2.在校時間利用午休時間分析特徵。 3.器材：相機、電腦。	1.取出指尖陀螺中心蓋子，再以5cm鉛筆(直徑0.7cm)做為軸心。 2.以30cm(直徑0.1cm)的線將指尖陀螺固定。 3.將固定的指尖陀螺用力旋轉，觀察變化。

研究方法	定位觀測法	擺動水平定位	擺動垂直定位
照片			
說明	1.以食指在指尖陀螺點中心定位，包含：擺動水平定位、擺動垂直定位、軸心定位、旋轉軸定位。 2.定位後用力旋轉指尖陀螺，觀察變化。	軸心定位	旋轉軸定位

研究方法	滾輪觀測法	三軸定位觀測法
照片		
說明	1.將指尖陀螺固定在20cm鉛筆(直徑0.7cm)中心點，兩端各固定一片CD片，做成輪狀模型。 2.將尺橫相距20cm黏置觀察台上，做成模型運動軌道。 3.先以水平儀將觀察台調整至水平狀態，再將固定的指尖陀螺以(1)垂直(2)水平方向固定，用固定的力旋轉，測試觀察變化。	1.我們做成三軸定位器(模型如研究6-4說明)，旋轉指尖陀螺，改變外軸角度，觀察三軸角度變化及定位器穩定性。 2.我們將HTC RE型錄影機裝在三軸定位器上，觀察定位器穩定效果。

二、研究流程



陸、研究過程

一、什麼是指尖陀螺？它有什麼特別的地方？

【研究1】

- 方法：
- 1.我們蒐集不同的指尖陀螺，編號加以比較。
 - 2.我們比較指尖陀螺間的結構、翼長、翼數、重量。
 - 3.我們比較指尖陀螺和一般陀螺外觀及旋轉方面的不同。

表1-1 指尖陀螺結構

指尖陀螺基本型外觀	指尖陀螺基本型結構	一般陀螺有明顯的軸，並以軸為中心轉動；指尖陀螺利用培林為中心轉動，此外旋轉方法、結構也不同。

表1-3 指尖陀螺種類分析

編號	2	3-1	3-2	3-3	編號	3-8	4	6-1	6-2
照片					照片				
翼數	2	3	3	3	翼數	3	4	6	6
翼長	3.3cm	4.1cm	3.8cm	4.2cm	翼長	2.7cm	3.2cm	2.6cm	3g
重量	62.09g	54.48g	50.32g	41.09g	重量	31.11g	35.12g	106.5g	58.1

表1-4 指尖陀螺特徵

編號	2	3-1	3-2	3-3	編號	3-4	3-5	3-6	3-7	編號	3-8	4	6-1	6-2	7
特徵	它有2個葉片，葉片合金，所以轉動時間不長。	它有3個葉片，葉片合金，轉動時間又長。	它有3個葉片，葉片合金，轉動時間又長。	它有3個葉片，葉片合金，轉動時間又長。	特徵	它有3個葉片，葉片合金，轉動時間不長。	它有3個葉片，葉片合金，轉動時間不長。	它有3個葉片，葉片合金，轉動時間不長。	它有3個葉片，葉片合金，轉動時間不長。	特徵	它有3個葉片，葉片合金，轉動時間不長。	它有4個葉片，葉片合金，轉動時間不長。	它有6個葉片，葉片合金，轉動時間不長。	它有6個葉片，葉片合金，轉動時間不長。	它有7個葉片，葉片合金，轉動時間不長。

結果：

- 1.我們稱「指尖陀螺側邊部位」為「翼」、編號3-1的指尖陀螺為「基本型」(表1-1)，重54.48g。
- 2.指尖陀螺基本型有三個翼，翼中有培林，翼長4.1cm，共四個培林，培林直徑為2.1cm；設中央培林中心點為D，其他分別為A、B、C，則四個培林關係如下：
 - (1) $DA = DB = DC = 4.5\text{cm}$
 - (2) $\angle ADB = \angle BDC = \angle ADC = 120^\circ$
- 3.指尖陀螺和一般陀螺比較：一般陀螺外觀有明顯的軸，並以軸為中心轉動；指尖陀螺利用培林為中心轉動。此外旋轉方法、結構也不同。
- 4.我們蒐集不同的指尖陀螺共13種；特徵比較如表1-3，表1-4。

二、指尖陀螺的形狀、大小會影響旋轉嗎？

【研究2-1】

- 方法：
- 1.我們將各種指尖陀螺以定位觀測法在電子秤中心點上旋轉比較。
 - 2.我們不斷練習相同的力，用定位觀測法在桌面上，以相同的力比較旋轉時間。
 - 3.做三次定位旋轉比較，過程中去除變異的數值，求出平均數加以觀察。

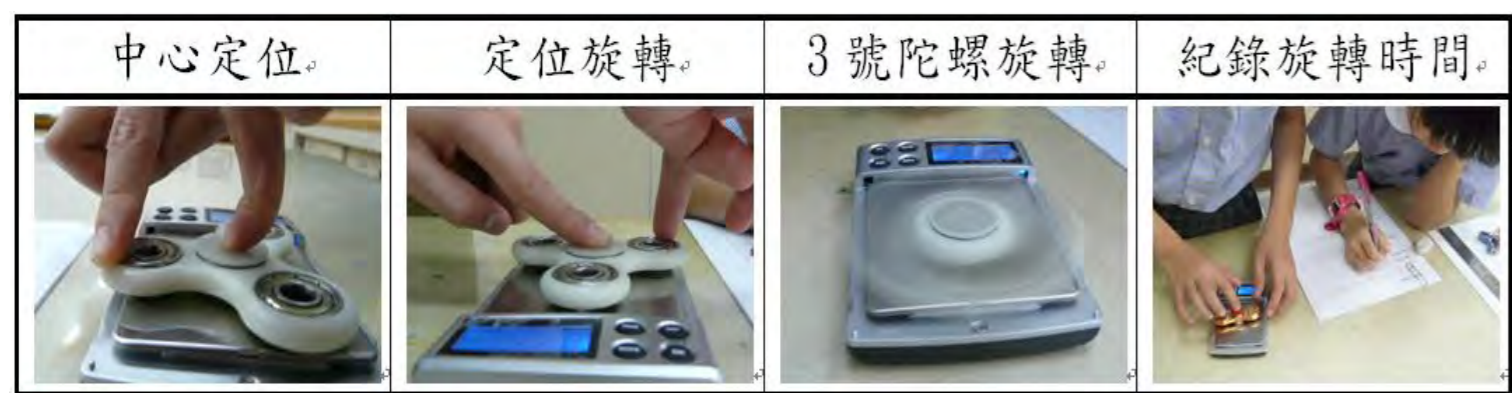


圖2-1-1 指尖陀螺定位旋轉操作

表2-1-1 指尖陀螺定位旋轉時間比較表

結果次數	第1次	第2次	第3次	平均(秒)
編號				
2	33.49	32.78	46.15	37.47333
3-1	155.2	121.19	132.77	136.3867
3-2	103.82	94.92	114.12	104.2867
3-3	54.06	55.65	63.62	57.77667
3-4	96.01	117.83	124.75	112.8633
3-5	60.2	75.22	93	76.14
3-6	125.87	121.81	116.33	121.3367
3-7	106.46	75.5	37.47	73.14333
3-8	257.21	129.64	203.61	196.82
4	93.22	97.06	73.88	88.05333
6-1	121.82	142.04	97.88	120.58
6-2	156.49	162.75	160.44	159.8933
7	258.85	251.38	249.78	253.3367

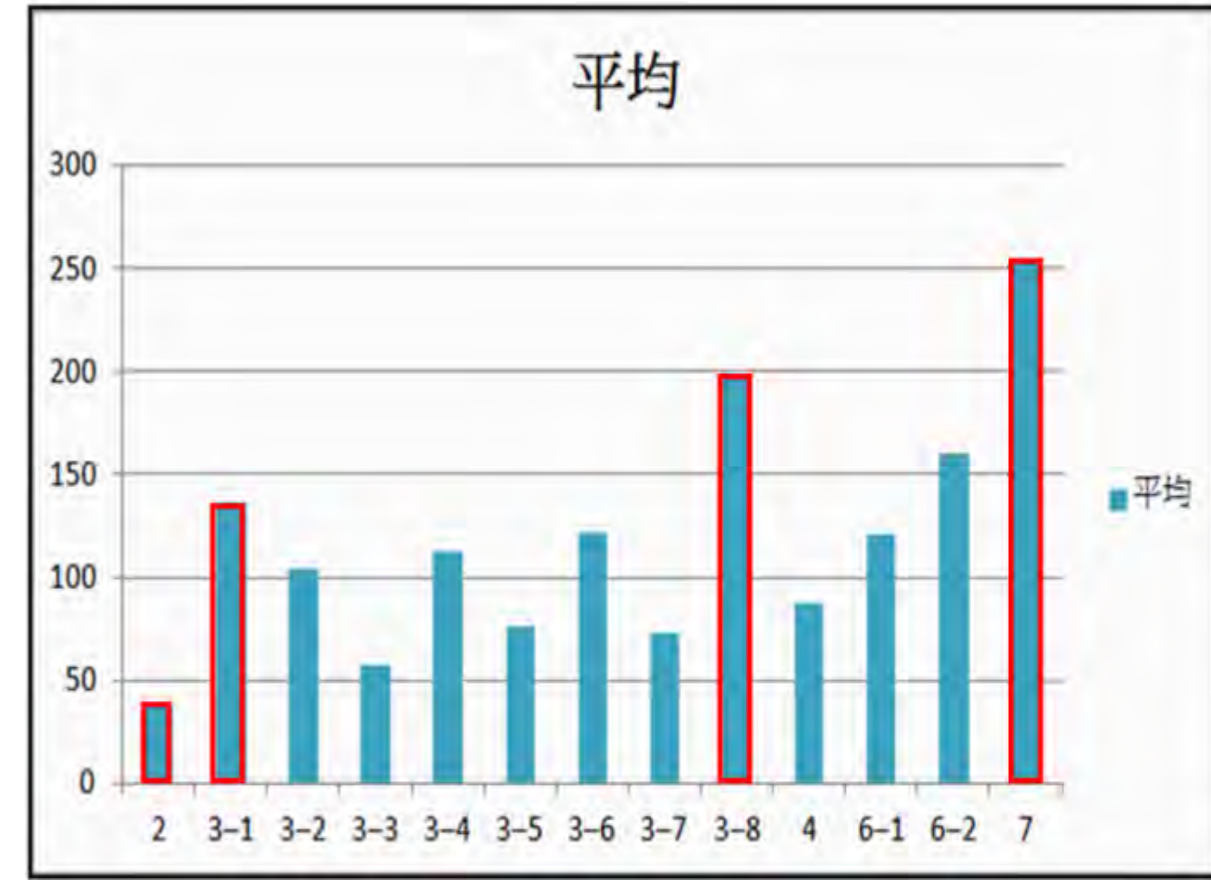


圖2-1-2 指尖陀螺定位旋轉時間比較圖

- 結果：
- 1.各種指尖陀螺都能快速旋轉，其中7號平均旋轉時間最長約253.3秒；2號平均旋轉時間最短約37.5秒。
 - 2.我們認為指尖陀螺旋轉時間和陀螺本身重量、翼數、精密有關；一般來說指尖陀螺較精密、較重、翼數較多旋轉時間較長；反之，旋轉時間較短。
 - 3.基本型旋轉時間約達136.4秒，旋轉時間也較長。

【研究2-2】

- 方法：
- 1.我們用定位觀測法將各種指尖陀螺在電子秤中心點上旋轉比較。
 - 2.我們觀察、紀錄、比較指尖陀螺的(1)原始重量(2)旋轉初始重量(3)旋轉改變重量(4)旋轉終止重量變化。
 - 3.我們不斷練習相同的力，以備能用相同的力旋轉比較。
 - 4.做三次定位旋轉比較，過程中去除變異的數值，求出平均數加以觀察。

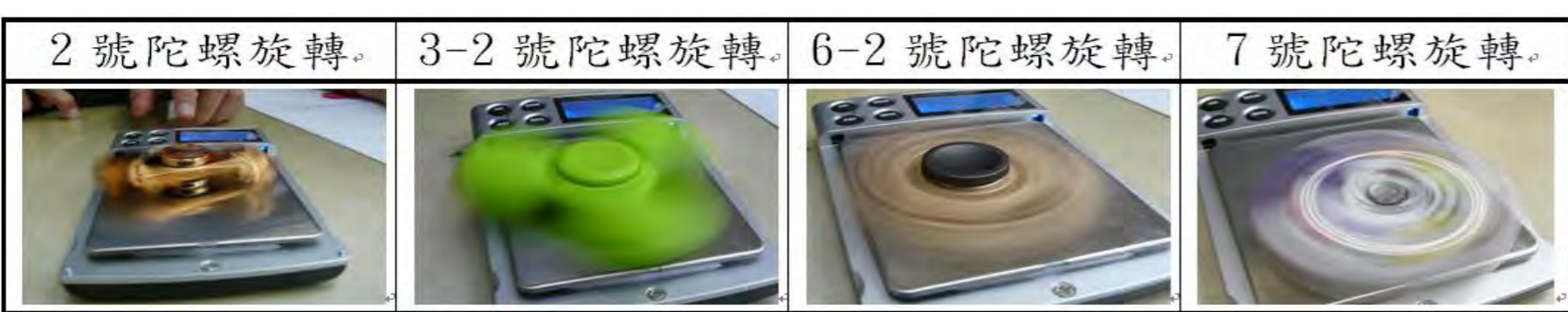


圖2-2-3 指尖陀螺定位旋轉比較

表2-2-1 陀螺旋轉重量改變觀察結果(平均/重量單位:克)

編號	2-1	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	4-1	6-1	6-2	7
C-原始重量	62.09	54.51	50.32	41.09	73.24	41.23	64.73	43.05	31.12	35.14	106.53	58.10	58.10
旋轉初始重量	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察
旋轉終止重量	62.09	54.56	50.31	41.07	73.23	41.21	64.71	43.05	31.10	35.17	106.58	58.15	58.15
A-最大重量	62.10	54.57	50.36	41.09	73.37	41.41	64.74	43.05	31.15	35.17	106.58	58.17	58.17
B-最小重量	62.03	54.45	50.21	40.88	73.13	41.14	64.62	43.00	31.10	35.05	106.49	58.04	58.04
A-B	0.07	0.12	0.15	0.21	0.23	0.25	0.14	0.05	0.05	0.12	0.09	0.13	0.13
C-B	0.06	0.06	0.11	0.21	0.11	0.09	0.11	0.05	0.02	0.09	0.04	0.06	0.06

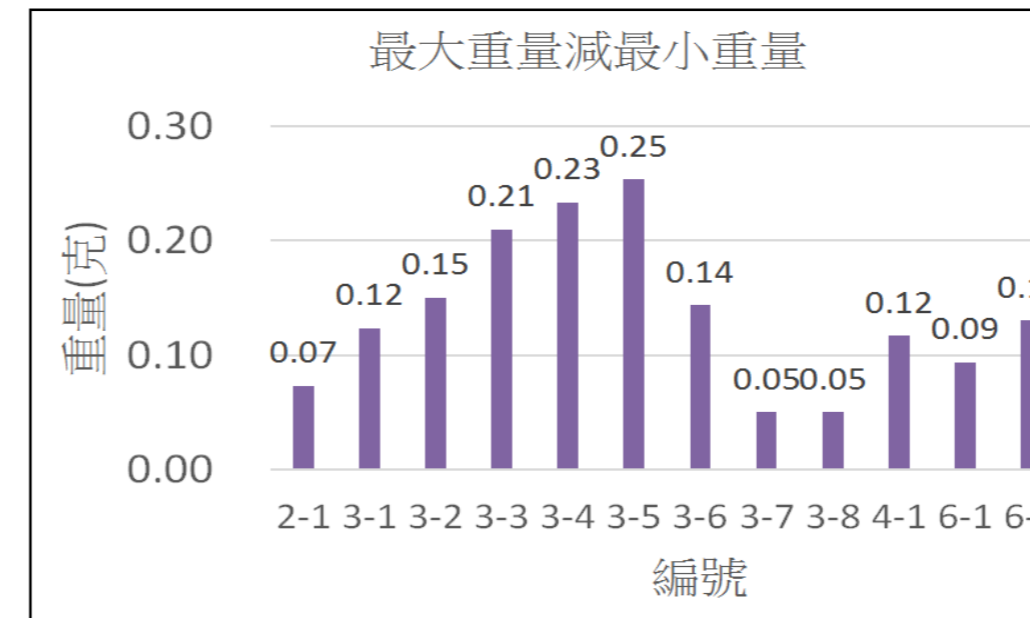


圖2-2-1 最大重量減最小重量比較

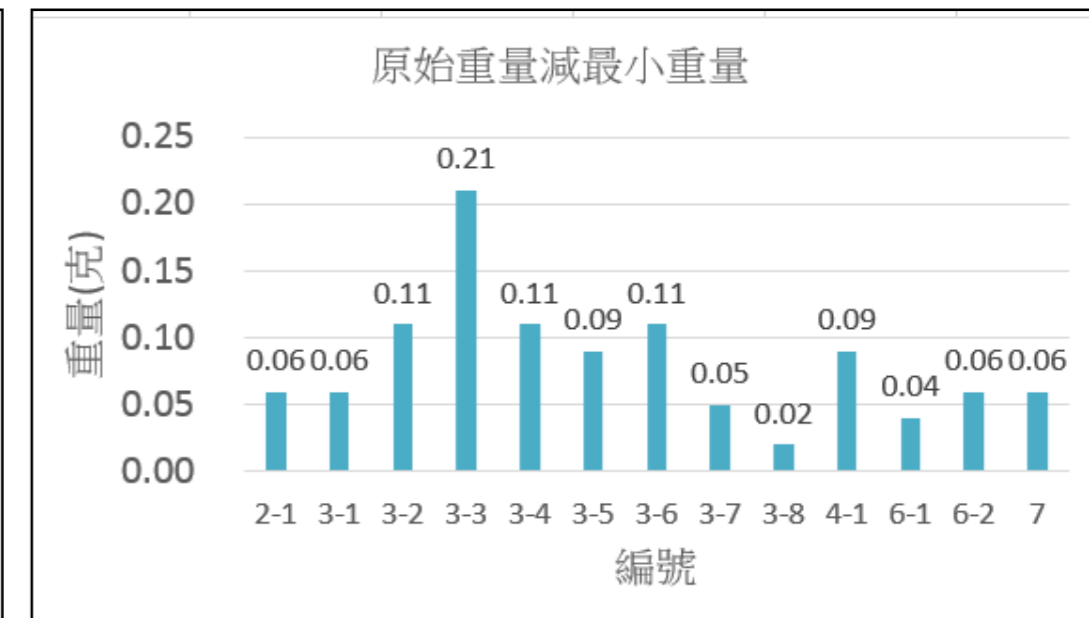


圖2-2-2 原始重量減最小重量比較

結果：

- 1.指尖陀螺旋轉時重量會改變。
- 2.旋轉時間愈久，重量改變越頻繁，如基本型(3號各型)、6號、7號。
- 3.旋轉初始重量因為指壓的關係無法觀察。
- 4.旋轉時重量會改變，我們比較重量改變情形：
 - (1)「最大重量-最小重量」時：3-7、3-8減輕最少(0.05克)。
 - (2)「原始重量-最小重量」時：3-8減輕最少(0.02克)，3-3減輕最多(0.21克)。
 - (3)「原始重量」和「最大重量」比較，除3-3、3-7減少以外，其他都會變重。
 - (4)有些指尖陀螺一開始旋轉就變重，有些一開始旋轉就變輕，情形不一樣。
 - (5)旋轉時重量改變和指尖陀螺原始重量有關；越重變化越小，如6-1；越輕變化也越小，如3-8。

【研究2-3】

- 方法：
- 1.我們用6-1號指尖陀螺在電子秤上以定位觀測法旋轉比較。
 - 2.每次取下一翼，分別取下一翼、二翼、三翼、四翼、五翼、六翼旋轉觀察。
 - 3.做三次定位旋轉比較，過程中去除變異的數值，求出平均數加以觀察。

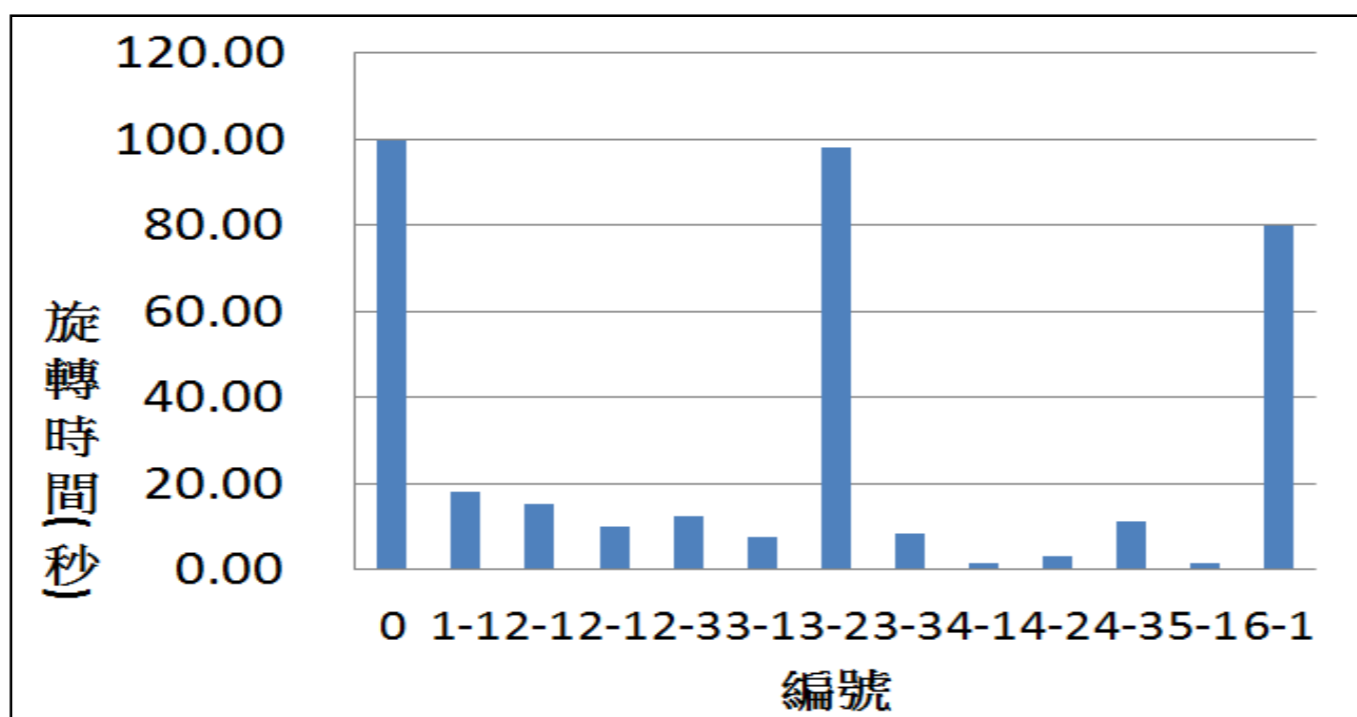


圖2-3 6-1號旋轉重量與時間變化比較(時間單位:秒)

- 結果：
- 1.旋轉時重量幾乎不會改變。
 - 2.4-1(2翼)、4-2(2翼)、5-1號(1翼)「翼」不對稱，無法旋轉，旋轉不穩定。
 - 3.0(6翼)、3-2(3翼)、6-1號(0翼)「翼」相互對稱，旋轉時間較久，旋轉很穩定，如比較圖2-3。
 - 4.«翼»的對稱性會影響旋轉時間長短和穩定性。

表2-3 6-1號指尖陀螺旋轉重量與時間變化比較

編號	0	1-1	2-1	2-1	2-3	3-1
照片						
原始重量	106.51	96.21	85.97	86.17	86.19	75.86
旋轉終止重量	106.59	96.22	85.97	86.17	86.16	75.86
旋轉時間	99.74	18.11	15.35	10.08	12.54	7.63

編號	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3	5-1	6-1
照片							
原始重量	75.86	75.89	65.67	65.69	65.69	55.42	45.36
旋轉終止重量	75.85	75.88	65.67	65.69	65.66	55.42	45.35
旋轉時間	98.1	8.387	1.593	2.97	11.19	1.68	79.74

摘 要

指尖陀螺旋轉時感覺有定向、牽引、穩定、改變重量的力量；我們以文獻探討、調查、定位觀測、吊掛觀測、滾輪觀測、三軸定位法來探究這些有趣的現象。我們發現指尖陀螺：(1)外型對稱，會穩定平衡的水平、垂直定向轉動，這和重量、翼數、精密有關(2)旋轉方式不影響旋轉時間，但重量有減輕現象(介於0.1~0.2克間)(3)水平吊掛順、逆時針轉動，會水平穩定旋轉，不受擺動影響；但旋轉路徑不同(4)吊掛垂直擺動時，軸距長旋轉時間久，這與垂直定位旋轉變水平定位旋轉有關(5)軸水平、垂直方向旋轉，會產生偏移的力(6)垂直、水平旋轉，有穩定滾動的作用(7)三軸定位器有穩定平衡的避震功能。我們希望擴展指尖陀螺有趣的研究成果，讓更多人喜歡研究科學。

三、指尖陀螺的旋轉方法、旋轉方向會影響旋轉嗎？

【研究3-1】
方法：
1. 我們用2、3、4、6組指尖陀螺以「研究2-2」方法操作觀察。
2. 我們以(1)手動-定位觀測法(2)氣動-定位觀測法旋轉觀測比較各種重量變化。
3. 氣動旋轉時，噴槍與指尖陀螺成45°，計時打氣5秒鐘做觀察比較。
4. 我們再由2-20秒，每次增加2秒，打氣觀察指尖陀螺氣動旋轉時間長短。
5. 各做三次定位旋轉比較，過程中去除變異的數值，求出平均數加以觀察。

表3-1-1 旋轉方法不同重量改變操作觀察



表3-1-2 旋轉方法不同的重量改變比較

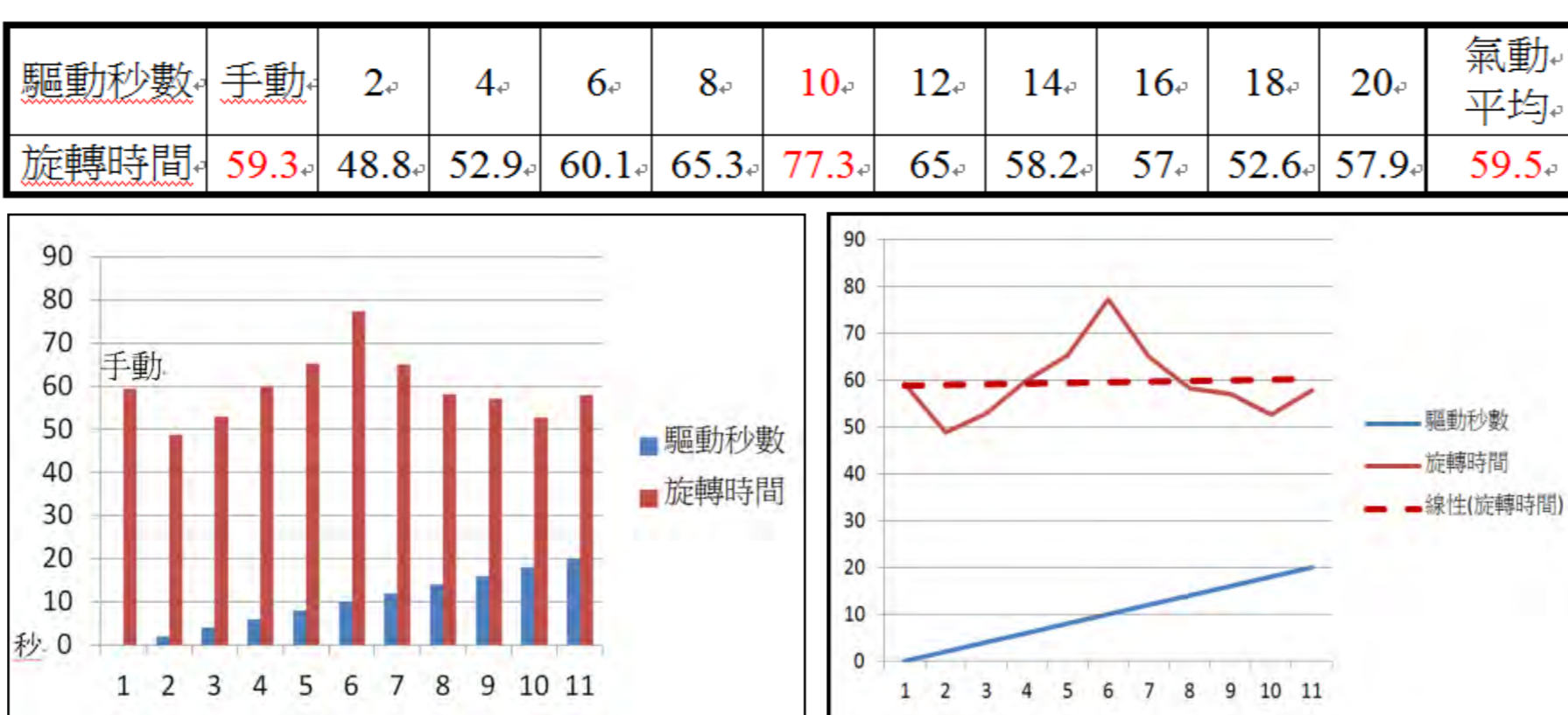
編號	2-1		3-1		3-2		3-3		3-4	
	手動	氣動	手動	氣動	手動	氣動	手動	氣動	手動	氣動
C-	62.1	62.2	54.5	50.8	50.3	50.5	41.1	40.5	73.2	73.2
原始重量	62.1	62.2	54.6	50.8	50.3	50.5	41.1	40.5	73.2	73.2
旋轉終止	62.1	62.2	54.6	50.8	50.3	50.5	41.1	40.9	73.4	73.2
A-	62.0	62.1	54.4	50.7	50.3	50.5	40.9	40.3	73.1	73.0
最大重量	62.0	62.1	54.4	50.7	50.3	50.5	40.9	40.3	73.1	73.0
B-	0.1	0.1	0.2	0.4	0	0.2	0.2	0.6	0.3	0.2
最小重量	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0.2	0.2	0.1	0.2
A-B	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0.2	0.2	0.1	0.2
C-B	0	0	0.1	0.4	0	0.1	0	0.2	0.1	0.2

結果：
1. 90度角反射鏡距離物體1cm時，影像為5cm；距離物體20cm時，影像為2.5cm。
2. 我們認為90度角反射鏡距離物體越近，形成影像越大；距離物體越遠，形成影像越小，物體位移與鏡像大小關係如圖4-1-2、圖4-1-3。

【研究3-2】

方法：
1. 我們由2-20秒，每次增加2秒，打氣觀察基本型指尖陀螺氣動旋轉時間長短。
2. 以「研究3-1」方法操作觀察。
3. 各做三次定位旋轉比較，過程中去除變異的數值，求出平均數加以觀察。

表3-2-1 手動與氣動旋轉時間比較



結果：
1. 手動旋轉時間平均為59.3秒，氣動旋轉2-20秒時間平均為59.5秒，相差0.2秒，旋轉時間大致相同。
2. 氣動旋轉2-10秒時，旋轉時間逐漸增加；10-20秒，旋轉時間有逐漸減少趨勢；以氣動10秒旋轉時，指尖陀螺旋轉時間最久。
3. 由旋轉時間趨勢線觀察(圖3-2-2)，手動與氣動旋轉在旋轉時間長短無多大差異。

圖3-2-1 手動與氣動旋轉時間比較

圖3-2-2 手動與氣動旋轉時間比較趨勢

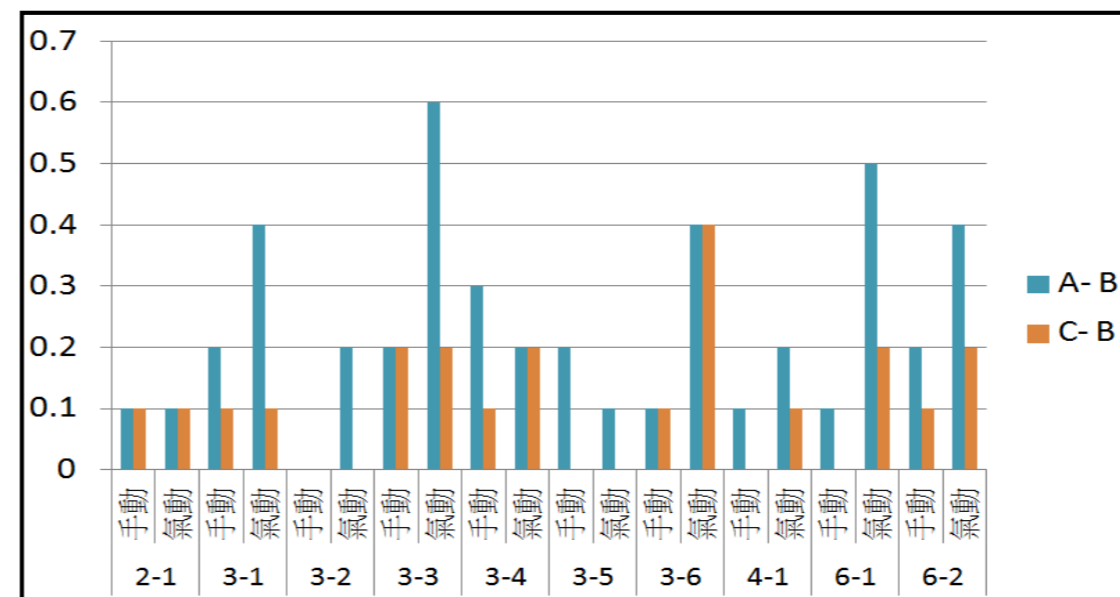


圖3-1-1 旋轉方法不同的A-B與C-B比較

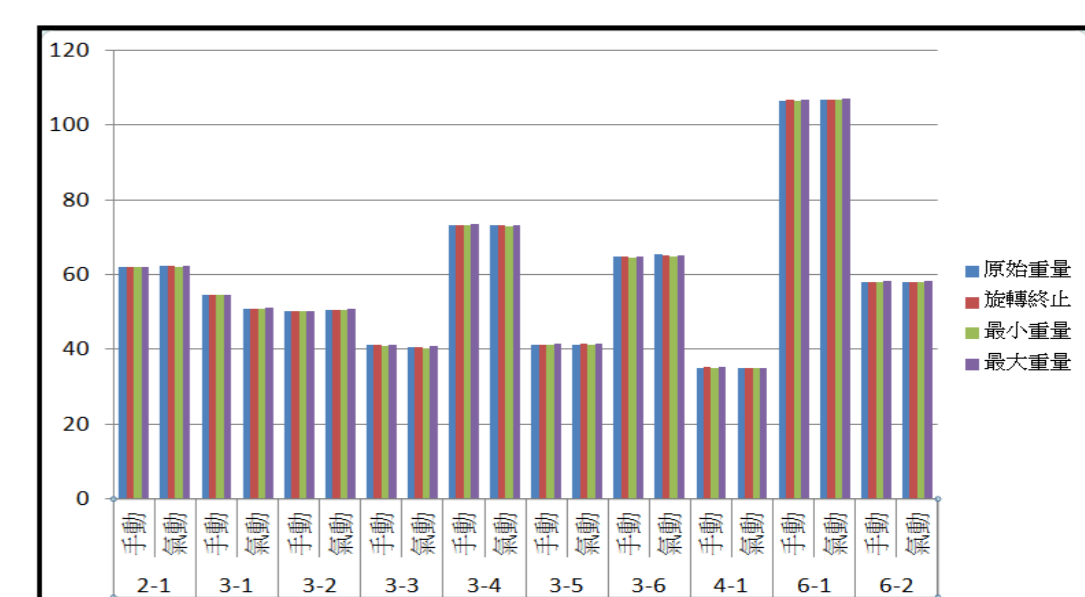


圖3-1-2 旋轉方法不同各種重量改變比較

【研究3-3】

方法：
1. 我們用基本型指尖陀螺在電子秤上以定位觀測法旋轉比較。
2. 以研究2-1、2-2的方法，將二個基本型指尖陀螺以順、逆方向旋轉比較。
3. 分別有以：上順下順、上逆下逆、上順下逆、上逆下順四種旋轉方向比較。
4. 我們以指尖陀螺的(1)原始重量(2)旋轉初始重量(3)旋轉改變重量(4)旋轉終止重量，觀察、紀錄、比較重量變化。
5. 做三次定位旋轉比較，過程中去除變異的數值，求出平均數加以觀察。

表3-3-1 旋轉方向不同重量改變觀察

編號	上順下順	上逆下逆	上順下逆	上逆下順
原始重量	103.02	102.96	102.93	102.94
旋轉終止重量	103.01	102.90	102.86	102.91
A-最大重量	103.10	103.07	103.00	103.01
B-最小重量	102.99	102.81	102.74	102.88
A-B	0.11	0.26	0.26	0.13

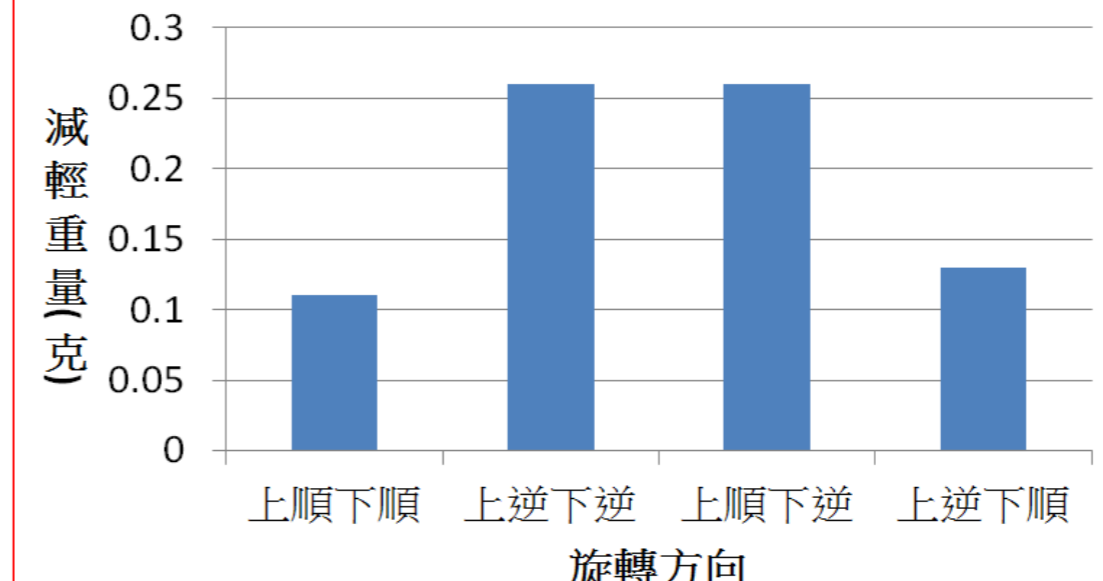


圖3-3-1 旋轉方向不同重量改變比較

結果：
1. 二個指尖陀螺旋轉方向不同時，不會影響旋轉。
2. 二個指尖陀螺旋轉方向不同時，重量會改變，情形如下：
(1) 上順下順：減輕0.11克。
(2) 上逆下逆：減輕0.26克。
(3) 上順下逆：減輕0.26克。
(4) 上逆下順：減輕0.13克。

四、指尖陀螺旋轉會受擺動的影響嗎？

【研究4-1】
方法：
1. 設計「擺動觀察台」(如圖4-1-1)，將指尖陀螺中心點穿孔繫上繩繩吊掛，以水平定位擺動觀察。
2. 指尖陀螺與量角器保持平行，由右至左以(1)順時針(2)逆時針方向轉動指尖陀螺，移動至10°、30°、45°、60°、90°，放下擺動觀察(如圖4-1-1)。
3. 指尖陀螺與量角器保持平行，由左至右以：
(1) 順時針轉動指尖陀螺，移動至10°、30°、45°、60°、90°，放下擺動觀察。
(2) 逆時針轉動指尖陀螺，移動至10°，放下擺動觀察。
4. 每種角度做三次，以相機的錄影模式觀察記錄指尖陀螺旋轉路徑變化。

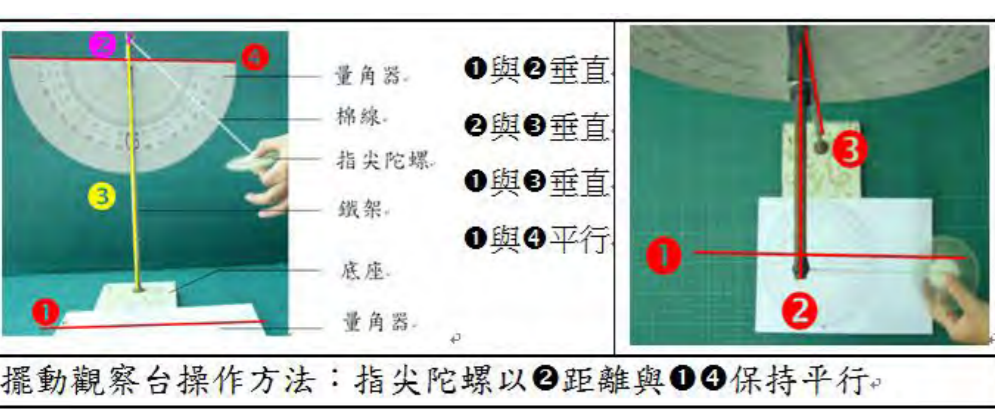


圖4-1-1 擺動觀察台及操作方法

結果：
1. 指尖陀螺順時針、逆時針方向轉動，都保持水平穩定旋轉，不受擺動影響。
2. 指尖陀螺順時針方向轉動時，由0°迴轉擺動至90°，共擺動15次；因此每迴轉擺動1次，則每6°順時針擺動1次，計算方式為：90÷6=15。
3. 指尖陀螺逆時針方向轉動時，會以順時針路徑，平均每6°移動擺動一次；移動擺動至135°時會反轉擺動，這時指尖陀螺轉動也會出現反轉的錯覺。
4. 指尖陀螺逆時針方向轉動時，會以逆時針路徑，平均每6°移動擺動一次；移動擺動至135°時會反轉擺動，這時指尖陀螺轉動也會出現反轉的錯覺。
5. 擺動路徑會越來越趨近圓形，最後靜止在中心點(表4-1-2、表4-1-3、表4-1-4)。



圖4-1-2 指尖陀螺旋轉擺動路徑

表4-1-1 不同角度擺動觀察

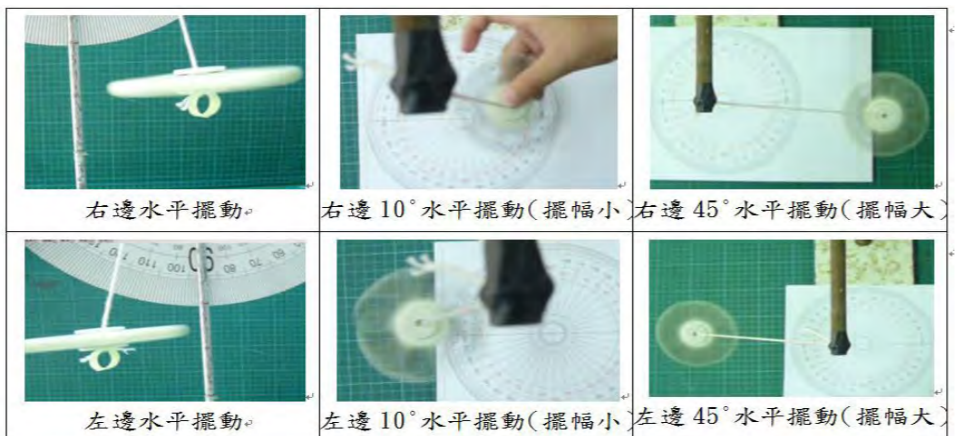


圖4-1-3 指尖陀螺旋轉擺動路徑分析

表4-1-2 由右至左不同角度擺動路徑觀察(「●」代表起點，「」代表終點)

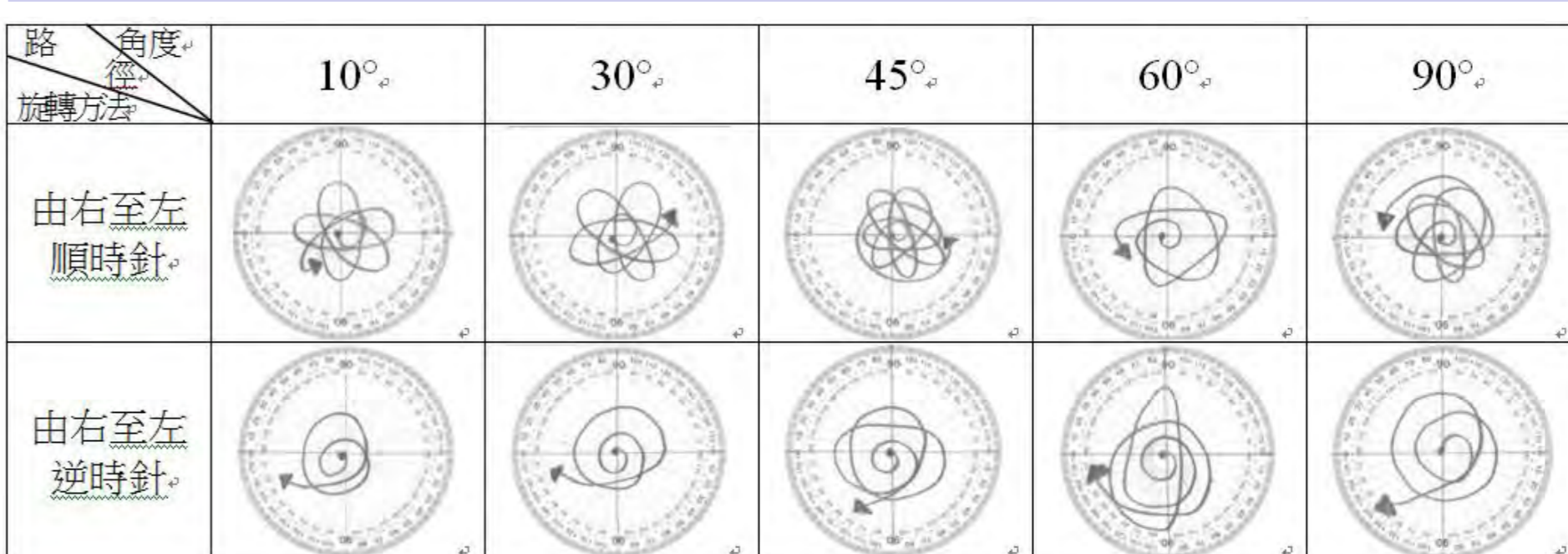


表4-1-3 由左至右不同角度擺動路徑觀察(「●」代表起點，「」代表終點)

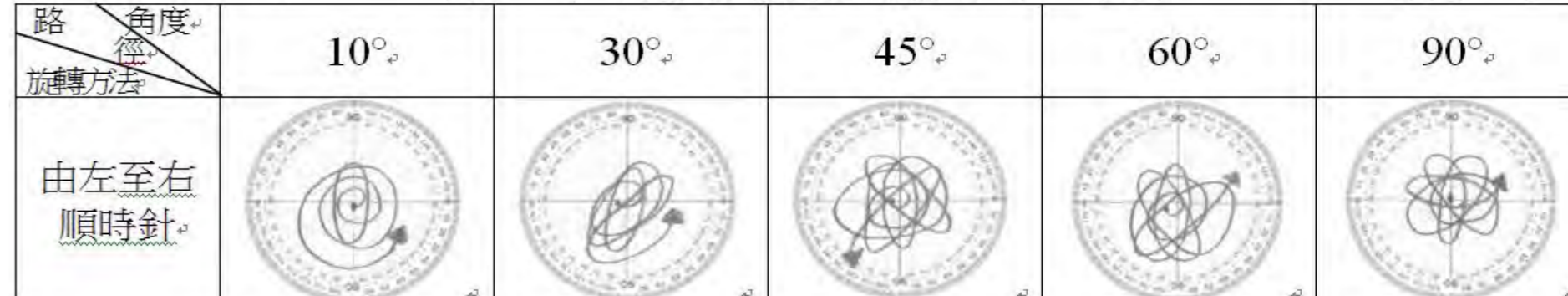
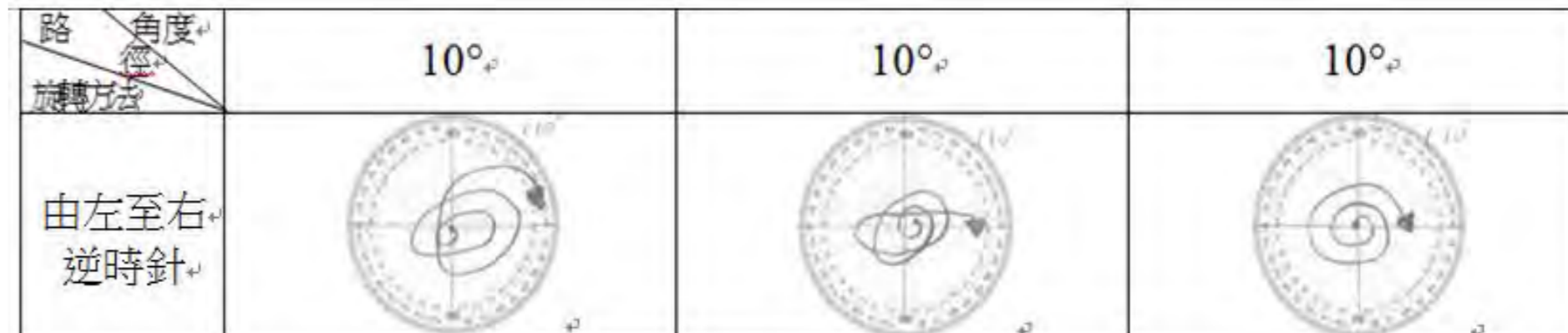


表4-1-4 由左至右不同角度擺動路徑觀察(「●」代表起點，「」代表終點)



【研究4-2】
方法：
1. 將指尖陀螺固定在長20cm、直徑0.6 cm的轉軸(竹筷)上，每隔1cm做一個記號。
2. 將指尖陀螺固定在研究4-1的觀察台中心點(以觀察台三軸為基準，圖4-1-1)，保持在0°，每隔1cm吊掛觀察1次。
3. 指尖陀螺和旋轉軸維持垂直，以垂直定位旋轉法順時針旋轉觀察。
4. 做三次，以相機的錄影模式觀察記錄指尖陀螺旋轉路徑變化。



圖4-2-1 垂直定位擺動觀察操作

表4-2-1 不同軸距吊掛旋轉穩定觀察(「●」代表起點，「」代表終點)

軸距	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm	6cm
旋轉時間(秒)	60.75	67.79	93.10	88.55	87.93	90.37

結果：
1. 指尖陀螺在軸距1-3cm時，旋轉軸水平逆時針旋轉，但是會左右、上下擺動；20秒後旋轉軸傾斜順時針迴轉，40秒後垂直加速旋轉。
2. 指尖陀螺在軸距4-6cm時，旋轉軸不容易保持水平旋轉，旋轉軸會快速傾斜、變垂直快速旋轉。
3. 軸距越長旋轉時間較久，我們認為和指尖陀螺由垂直定位旋轉變水平定位旋轉有關。

圖4-2-2 不同軸距吊掛旋轉穩定比較

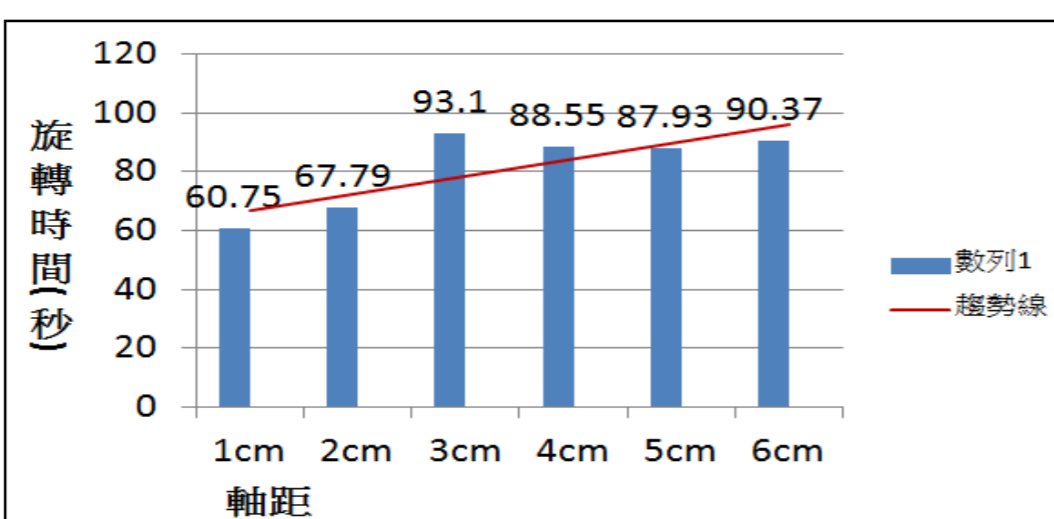
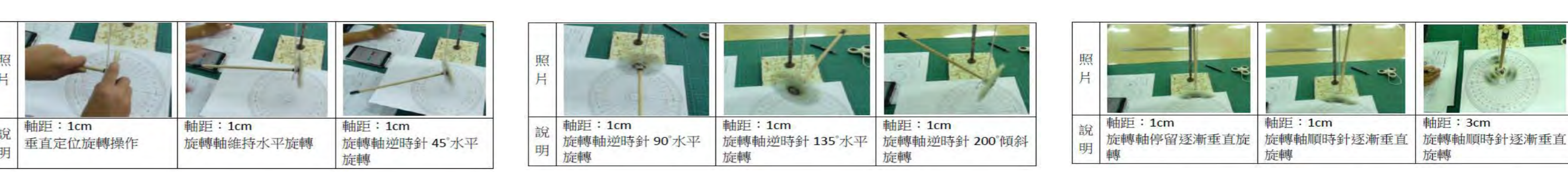


表4-2-2 不同軸距吊掛旋轉穩定觀察說明



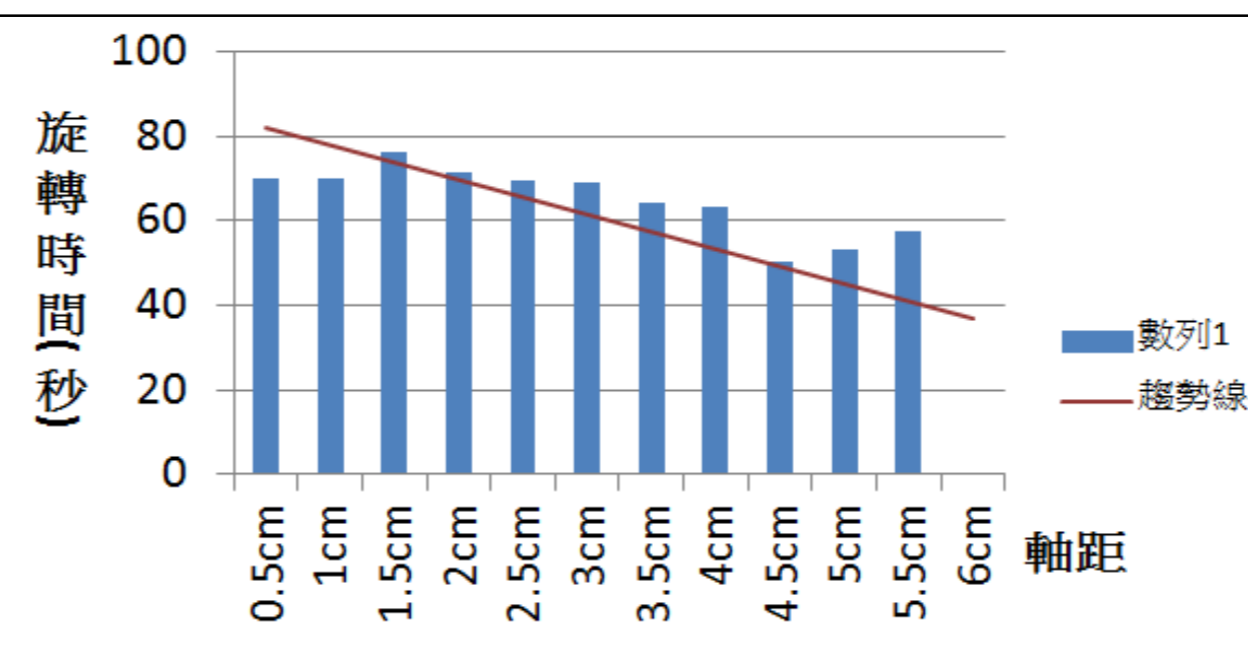
五、指尖陀螺旋轉時穩定性如何？

【研究5】
方法：
1. 將指尖陀螺固定在長20cm、直徑0.6 cm的轉軸(竹筷)上，每隔0.5cm做一個記號。
2. 將指尖陀螺固定在「角度觀察台」中心點(表4-3-1照片)，保持在0°，每隔1cm定位旋轉觀察1次。
3. 指尖陀螺和旋轉軸維持垂直，旋轉軸垂直保持0°，以水平定位旋轉法順時針旋轉觀察。
4. 做三次，以相機的錄影模式觀察記錄指尖陀螺旋轉路徑變化。

表5-1 不同軸距軸柱旋轉穩定觀察說明



圖5-1 不同軸距軸柱旋轉穩定比較



結果：
1. 指尖陀螺在軸距0.5-5.5cm時都能順利穩定旋轉，6cm以上無法直立旋轉。
2. 旋轉時間由趨勢線觀察，軸距越短旋轉時間越久。
3. 指尖陀螺旋轉變化如下：穩定旋轉(旋轉軸保持0°)→左右擺動旋轉(旋轉軸左右擺幅1-4°)→穩定旋轉→傾倒。
4. 快傾倒時，旋轉軸會離離中心點。

表5-2 不同軸距軸柱旋轉穩定觀察

軸距	0.5cm	1cm	1.5cm
旋轉時間(秒)	69.99	70.17	76.32
其他變化	12.75秒偏右2° 21.95秒偏右3° 34.91秒回復0°	20.10秒偏右2° 37.68秒偏右4° 43.28秒回復0°	21.57秒偏右2° 25.83秒偏右3° 39.70秒回復0°
軸距 <th>2cm</th> <th>2.5cm</th> <th>3cm</th>	2cm	2.5cm	3cm
旋轉時間(秒)	71.67	69.78	68.94
其他變化	24.46秒偏左右偏2° 36.12秒左偏3° 43.01秒回復0°	16.82秒左偏2° 25.64秒左偏1° 25.65秒回復0°	1407.8秒左偏2° 32.67秒左偏0°
軸距 <th>3.5cm</th> <th>4cm</th> <th>4.5cm</th>	3.5cm	4cm	4.5cm
旋轉時間(秒)	64.15	63.17	50.40
其他變化	28.67秒左偏2° 38.17秒左偏1° 49.96秒回復0°	21.41秒左偏4° 29.18秒左偏1° 29.19秒回復0°	21.17秒左偏1° 32.67秒左偏2° 46.04秒回復0°
軸距 <th>5cm</th> <th>5.5cm</th> <th>6cm</th>	5cm	5.5cm	6cm
旋轉時間(秒)	53.43	57.48	0
其他變化	40.51秒左偏1° 41.01秒回復0°	26.60秒左偏1° 36.44秒回復0°	傾倒

六、指尖陀螺旋轉時會產生其他的力嗎？

【研究6-1】

- 方法：
- 將指尖陀螺固定在長10cm (8.5cm)、直徑0.6 cm的轉軸(竹筷)上，做出有軸的指尖陀螺。
 - 將指尖陀螺固定在直徑8.5cm、寬1 cm的環狀塑膠管上，做出A、B兩型環型有軸的指尖陀螺，加以比較。
 - (1) A型：轉軸長8.5cm、直徑0.6 cm (略呈橢圓形)。
 - (2) B型：轉軸長9.5cm、直徑0.6 cm (略呈橢圓形)。
 - 在環狀塑膠管內0°-90°-180°位置，設定三個基準點；第一基準點與第二基準點成180°，第一基準點與第三基準點、第二基準點與第三基準點成90°(表6-1)，以便操作觀察。
 - 將環型有軸的指尖陀螺，固定在「圓形量角器」中心點(表6-2)，分(1)軸水平(2)軸垂直直位位置觀察。
 - 兩種方式都以旋轉軸定位法順時針旋轉觀察。
 - 做三次，以相機的錄影模式記錄指尖陀螺旋轉變化。

表6-1-1 A、B型環型有軸的指尖陀螺製作說明



表6-1-2 環型指尖陀螺操作說明

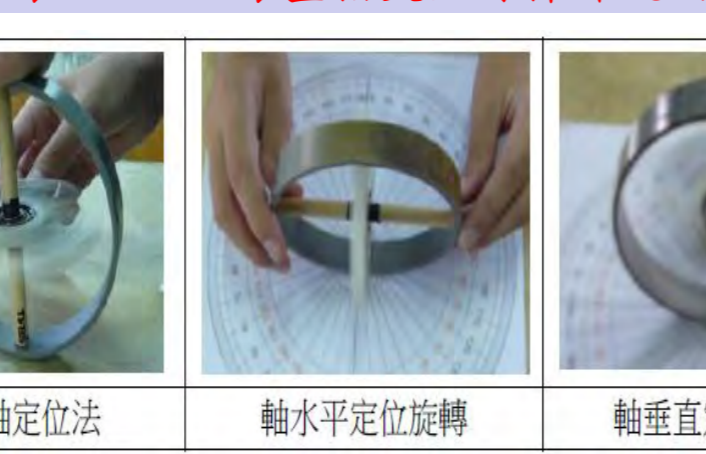


表6-1-3 環型指尖陀螺定位與偏轉變化

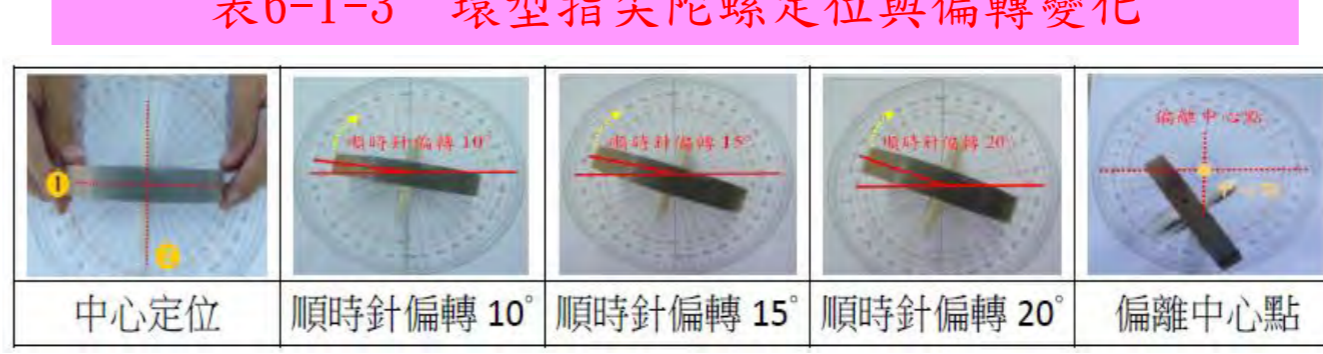


表6-1-4 A、B環型指尖陀螺旋轉偏離角度比較

觀察法	結果	A						B					
		1次	2次	3次	1次	2次	3次	1次	2次	3次	1次	2次	3次
●水平	偏移中心點	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
	垂直偏離角度	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	水平偏離角度	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
●垂直	偏移中心點	會	會	會	會	會	會	會	會	會	會	會	會
	垂直偏離角度	90°	90°	90°	90°	90°	90°	無法直立	無法直立	無法直立	無法直立	無法直立	無法直立
	水平偏離角度	43°	40°	35°	35°	35°	35°	90°	1°	90°	90°	1°	90°

- 結果：
- A型、B型環型指尖陀螺都能在「軸水平、軸垂直」方向旋轉。
 - B型轉軸較長，形成橢圓環型指尖陀螺，旋轉效果較差。
 - 「軸水平」時A型、B型旋轉時都不會偏離中心點；但是會產生順、逆時針偏移的力，最多偏移20°。情形如下：
 - A型順時針定位旋轉，會產生順時針偏移的力，最多偏移20°。
 - A型逆時針定位旋轉，會產生逆時針偏移的力，最多偏移1°。
 - B型順時針定位旋轉，會產生順時針偏移的力，最多偏移11°。
 - B型逆時針定位旋轉，偏移的力不穩定，最多偏移11°。
 - 「軸垂直」時A型、B型旋轉時都會偏離中心點，回復「軸水平」的位置，變化較大，情形如下：
 - A型順時針定位旋轉，會產生順時針偏移的力，回復「軸水平」，最多偏移53°。
 - A型逆時針定位旋轉，會產生逆時針偏移的力，回復「軸水平」，最多偏移78°。
 - B型順時針定位旋轉，無法順利旋轉。
 - B型逆時針定位旋轉，偏移的力不穩定，回復「軸水平」，最多偏移55°。

【研究6-2】

- 方法：
- 將指尖陀螺固定在20cm鉛筆(直徑0.7cm)中心點，兩端各固定一片CD片，做成輪狀模型。
 - 將尺標相距20cm黏置觀察台上，做成模型滾動軌道。
 - 先以水平儀將觀察台調整至水平狀態，再將垂直直立的指尖陀螺用力旋轉，測試觀察變化。
 - 指尖陀螺以(1)順時針(2)逆時針方向旋轉，用相同的力加以旋轉測試，觀察輪狀模型是否偏離定位點，以及順、逆時針旋轉的影響。

- 結果：
- 指尖陀螺在輪狀模型以(1)順時針(2)逆時針方向旋轉，都會往相反方向些微移動；輪狀模型的指尖陀螺順時針旋轉平均移動1.33cm，逆時針旋轉平均移動1.36cm。
 - 指尖陀螺在旋轉時會產生與旋轉方向相反的力。

表6-2-1 輪狀模型滾動測試位置及操作

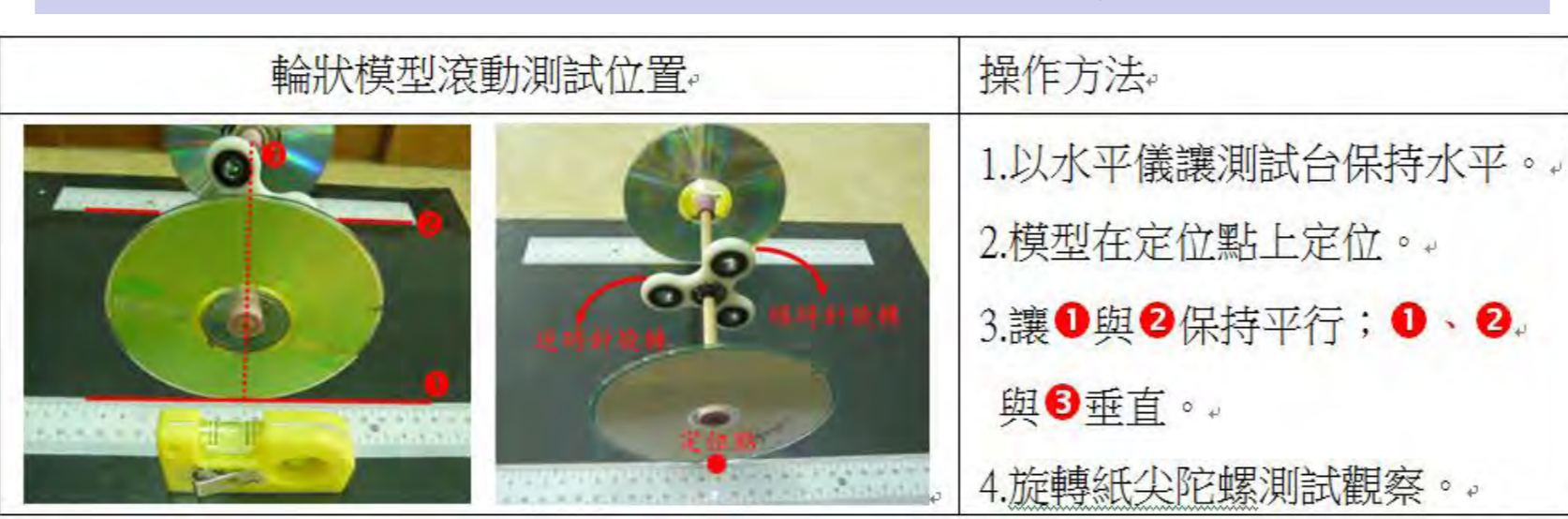
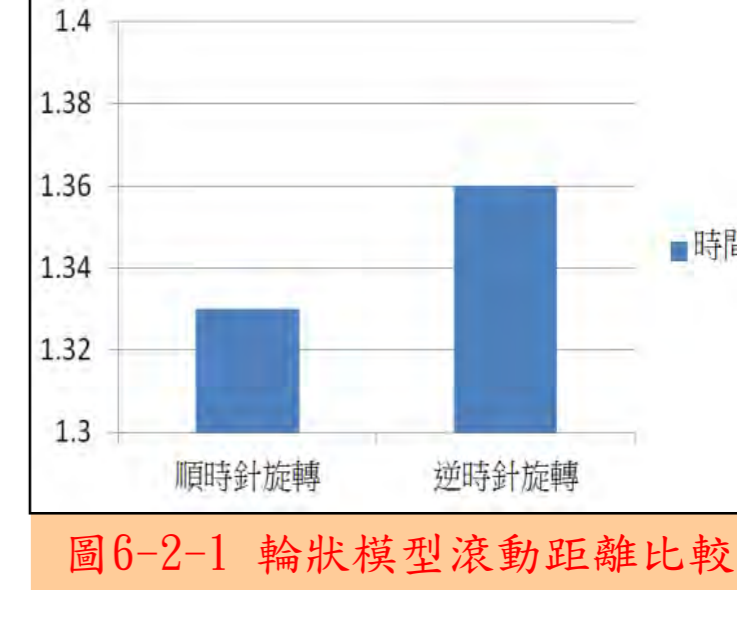


表6-2-2 輪狀模型滾動測試比較

觀察法	結果	順			逆		
		1次	2次	3次	1次	2次	3次
●水平	偏向偏移中心點	不會	不會	不會	不會	不會	不會
	垂直偏離角度	0cm	0cm	0cm	0cm	0cm	0cm
	水平偏離角度	0.2cm	2.6cm	1.2cm	1.33cm	0.6cm	2.4cm



【研究6-3】

- 方法：
- 我們以輪狀模型、滑輪、棉線、紙盒做成拉力測量裝置，以小迴紋針(0.32克)、大迴紋針(1.22克)放入紙盒中，以產生拉力。
 - 將輪狀模型以(1)垂直(2)水平固定指尖陀螺，在研究6-2的觀察台上用力旋轉，測試觀察移動變化。
 - 指尖陀螺垂直旋轉以小迴紋針(0.32克)測拉力；水平旋轉以大迴紋針(1.22克)測拉力。

- 結果：
- 指尖陀螺垂直、水平旋轉時，載重越大，移動距離越大；拉力的關係如圖6-3-1、圖6-3-2。
 - 指尖陀螺垂直旋轉時，只能承受3.85g的力，穩定滾動的作用較小；指尖陀螺水平旋轉時，每增加1.22克移動0.2cm，能承受15.41g以上的力(最大能達30.85g)，穩定滾動的作用較大。

表6-3-1 輪狀模型旋轉測試操作



表6-3-2 輪狀模型垂直旋轉測試操作

載重	空盒	1個	2個	3個
重量(g)	3.21g	3.53g	3.85g	4.81g
移動距離	4cm	9.5cm	14cm	掉落(無法測量)

表6-3-3 輪狀模型水平旋轉測試操作

載重	1個	2個	3個	4個	5個
重量(g)	4.43g	5.65g	6.87g	8.09g	9.31g
移動距離	0.2cm	0.4cm	0.6cm	0.8cm	1cm

【研究6-4】

- 方法：
- 我們參考研究4-1、4-2、5、6-1、6-2、6-3所發現指尖陀螺穩定旋轉、定位旋轉的現象，以指尖陀螺、培林(直徑2.1cm)、塑膠環(三個，直徑分別為3、4、4.5cm)、螺絲(長16cm)螺絲帽、木棒(長19cm，直徑1cm)、量角器做成指尖陀螺三軸定位器(如圖6-4-1)。
 - 我們製作(1)水平觀察台-中心放置水平儀(2)角度觀察台-中心吊置指北針(如圖6-4-2)，旋轉指尖陀螺，每隔10°改變三軸定位器的角度，觀察穩定的變化。
 - 我們製作穩定觀察台(如圖6-4-3)，將HTC RE錄影機裝在指尖陀螺三軸定位器上，分(1)不轉動指尖陀螺-靜止(2)轉動指尖陀螺的方式，以左右兩側每隔10°操作觀察一次，做三次，求出平均數比較，操作圖示如下。
 - 我們利用HTC RE錄影機及指尖陀螺三軸定位器，製作攝影平臺(圖6-4-4)，以(1)靜止時，指尖陀螺轉動、不轉動(2)移動時，設定移動速度為0.25公尺/秒，指尖陀螺轉動、不轉動的方式，錄影觀察指尖陀螺三軸定位器穩定的功能。

表6-4-1 三軸定位器水平觀察比較

方向/角度	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
向左轉動	保持水平	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察
向右轉動	保持水平	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察	無法觀察

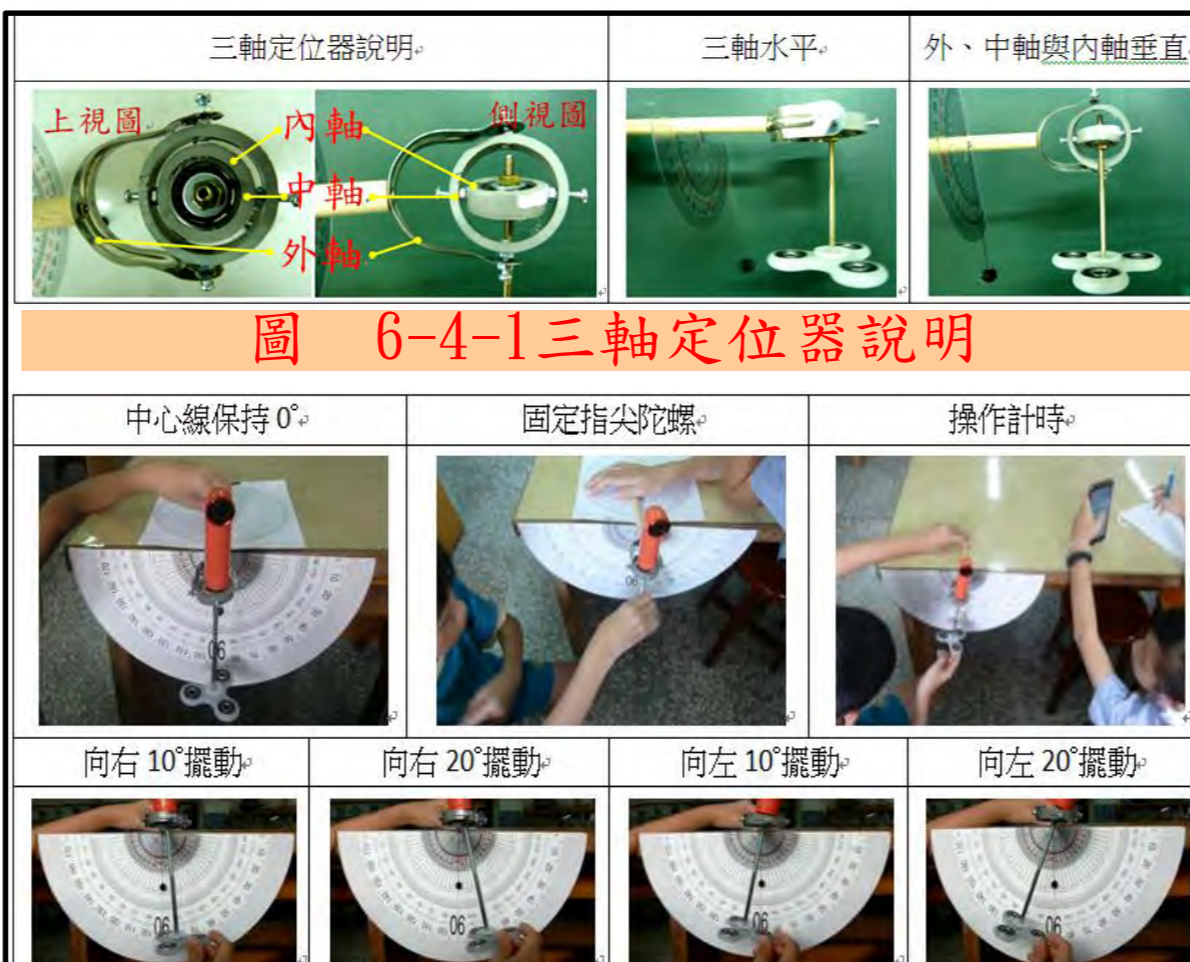
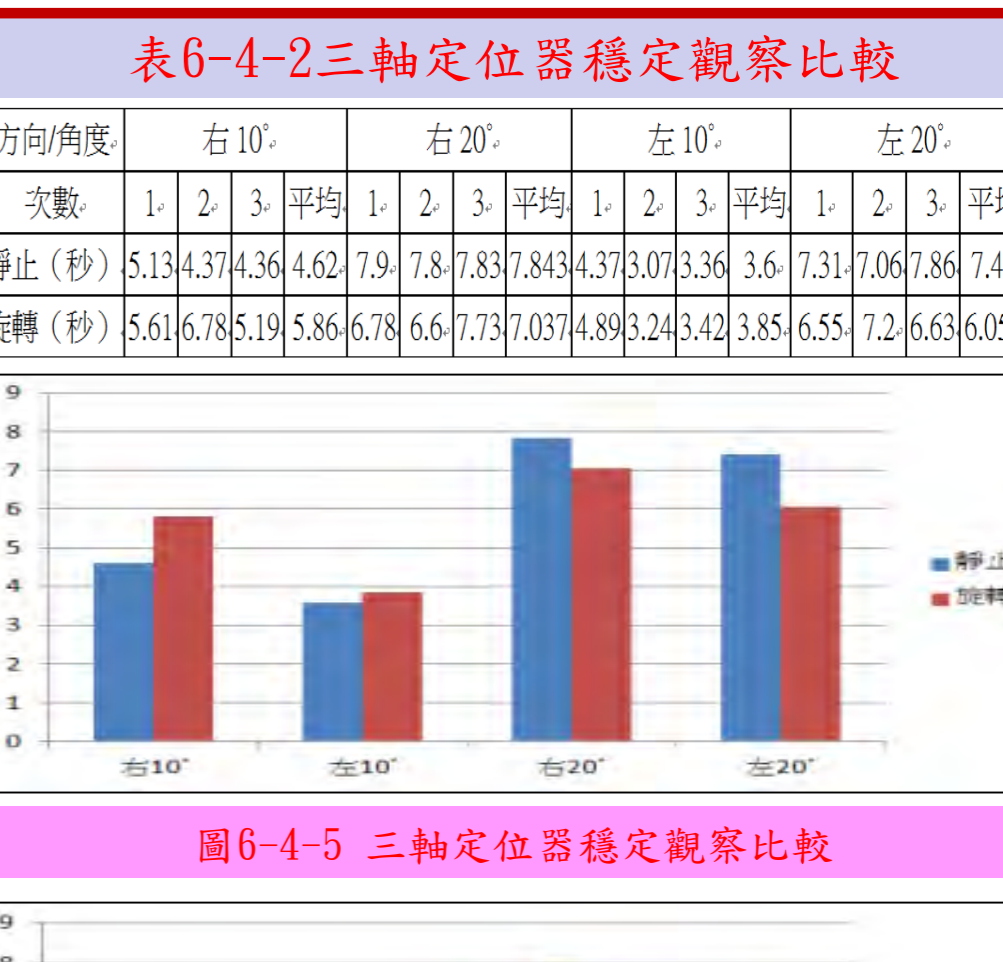


表6-4-2 三軸定位器穩定觀察比較

方向/角度	右10°	右20°	左10°	左20°
次數	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3
平均	5.13, 4.37, 4.36	4.62, 7.9, 7.83	7.84, 4.37, 5.07	3.36, 3.6, 7.31
靜止(秒)	5.61, 6.78, 5.19	5.86, 6.78, 6.6	7.73, 7.03, 4.88	5.24, 3.42, 3.85
旋轉(秒)	6.6, 6.78, 5.19	5.86, 6.78, 6.6	7.73, 7.03, 4.88	5.24, 3.42, 3.85



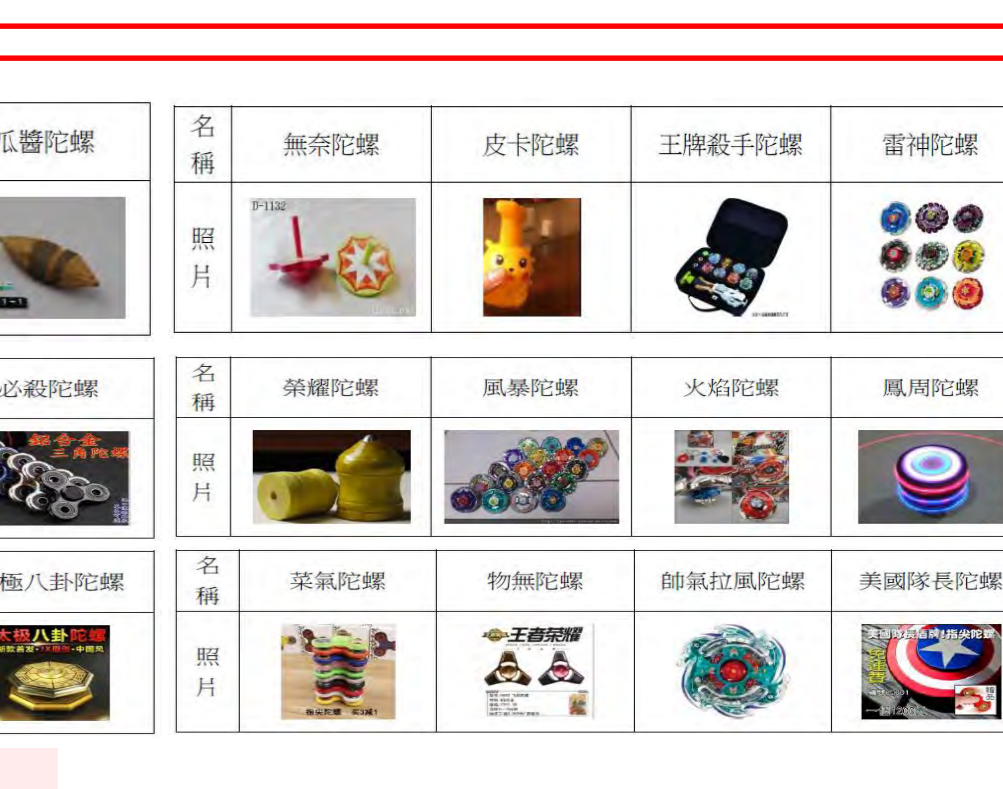
柒、討論

- 指尖陀螺的發明者是62歲的凱瑟琳·海特格(黃樂怡, 2017)，出生地是美國華盛頓特區，是位女演員，曾經演過命中註定多個你、盛大婚禮等戲劇。
- 指尖陀螺有趣好玩，也可以拿來研究，玩法多元化，但是玩時要小心，不要受傷了。
- 指尖陀螺有許多葉片，只要是對稱的，就可以轉得很穩；它的外觀大有不同，但是不管外型再如何奇怪，都還是會對稱的。
- 指尖陀螺的軸承有分等級，如果是陶瓷的，會轉得比較久。
- 指尖陀螺很貴，所以我們持續探討如何自製指尖陀螺。
- 我們曾利用網路調查指尖陀螺的種類，共蒐集了12種，整理如上：
- 調查的指尖陀螺與一般陀螺比較不同如右：
 - 發射方式不同：指尖陀螺是用手撥轉動；一般陀螺是用繩子拉動它。
 - 形狀不同：指尖陀螺大多是扁平形的；一般陀螺上面是圓柱的，下面是尖的。
 - 構造不同：指尖陀螺的裡面有軸承，外面再用塑膠或合金包覆蓋；一般陀螺是在木頭的外面畫圖，下面用一根類似針的物體讓它旋轉維持平衡。
 - 材質不同：指尖陀螺常用塑膠、合金、黃銅、不鏽鋼、鈦或銅；一般陀螺則是用木頭。
 - 玩法不同：指尖陀螺可以在手上轉，一般陀螺要在平地方玩；指尖陀螺發動的方式多元，像是：用手、橡皮筋等等，一般的陀螺則是手捻、棉繩打動。
 - 一般陀螺的樣式很多，如右：
- 研究中我們發現用手動方式讓指尖陀螺轉動，有力量不一致的缺點，我們有考慮用(1)吹氣或打氣產生動力的方法(2)拉線產生動力的方法(3)彈簧產生動力的方法讓指尖陀螺轉動，但是在實際操作時只有手動方式才能有效操作，為了讓實驗有趣，我們將尋求更好的方法來轉動指尖陀螺做實驗。
- 研究中我們也發現(1)電子秤本身(2)指尖陀螺秤的位置會影響秤重而產生誤差的問題，如編號6-1相同的「翼」，秤出的重量不同(如下)，在指尖陀螺轉動時重量減輕的實驗影響很大，我們將針對「指尖陀螺轉動時重量減輕」的問題再繼續探討。



指尖陀螺轉動時重量變化比較

重量	10.30克	10.25克	10.23克
重量	10.30克	10.25克	10.23克
重量	10.24克	10.13克	10.05克



捌、結論

- 我們稱「指尖陀螺側邊部位」為「翼」，指尖陀螺基本型有三個翼，翼中有培林，翼長4.1cm，共四個培林，培林直徑為2.1cm；設中央培林中心點為D，其他分別為A、B、C，則四個培林關係如下：
 - DB=DC=4.5cm
 - ∠ADB=∠BDC=∠ADC=120°
- 我們蒐集的指尖陀螺共13種，都能快速旋轉，我們認為指尖陀螺旋轉時間長短和陀螺本身重量、翼數、精密有關；一般來說指尖陀螺較精密、較重、翼數較多旋轉時間較長；反之，旋轉時間較短。
- 指尖陀螺旋轉時重量會改變；二個指間陀螺旋轉方向不同時，不會影響旋轉，但是重量也會改變。
- 指尖陀螺雖然外觀大有不同，但是不管它外型再奇怪，它都還是會對稱；「翼」的對稱性會影響旋轉時間長短和穩定性；只要是對稱的，就可以轉得很穩。
- 指尖陀螺旋轉方法不同(手動與氣動)時，變化如下：
 - 都有重量減輕的現象(0.1-0.2克之間)，我們認為旋轉時會產生些微上升的力。
 - 二者由旋轉時趨勢線觀察(圖3-2-2)，在旋轉時間長短上無多大差異。
 - 氣動旋轉的方法較不穩定，影響實驗穩定性。
- 指尖陀螺順時針、逆時針方向水平擺動轉動，都保持水平穩定擺動旋轉，不受擺動影響；但是旋轉路徑不同如下：
 - 指尖陀螺順時針方向轉動時，由0°迴轉擺動至90°，共擺動15次；因此每迴轉擺動1次，則每6°順時針擺動1次，計算方式為：90÷15=6°。
 - 0°指尖陀螺順時針方向轉動時，會以順時針路徑，平均每6°移動擺動一次；移動擺動至135°時會反轉擺動，這時指尖陀螺轉動也會出現反轉的錯覺。
 - 指尖陀螺逆時針方向轉動時，會以逆時針路徑，平均每6°移動擺動一次；移動擺動至135°時會反轉擺動，這時指尖陀螺轉動也會出現反轉的錯覺。
 - 擺動路徑會越來越趨近圓形，最後靜止在中心點。
- 指尖陀螺在不同軸距垂直吊掛旋轉實驗時，軸距越長旋轉時間較久，和指尖陀螺由垂直定位旋轉變水平定位旋轉有關，變化如下：

- 軸距1-3cm時，旋轉軸先水平逆時針旋轉，但是會左右、上下擺動；20秒後旋轉軸傾斜順時針迴轉，40秒後垂直加速旋轉。
- 指尖陀螺在軸距4-6cm時，旋轉軸不容易保持水平旋轉，旋轉軸會快速傾斜、變垂直快速旋轉。
- 指尖陀螺在不同軸距軸柱旋轉穩定實驗時，變化如下：
 - 在軸距0.5-5.5cm時都能順利穩定旋轉，6cm以上無法直立轉動。
 - 軸距越短旋轉時間較久。
 - 不同軸距軸柱旋轉變化如下：穩定旋轉(旋轉軸保持0°)→左右擺動旋轉(旋轉軸擺幅1-4°)→穩定旋轉→傾倒；快傾倒時，旋轉軸會偏離中心點。
- A、B型環型指尖陀螺都能在「軸水平、軸垂直」方向旋轉，並產生偏移的力，變化如下：
 - 「軸水平」時A型、B型旋轉時都不會偏離中心點；但是會產生順、逆時針偏移的力，最多偏移20°，情形如下：
 - A型順時針定位旋轉，會產生順時針偏移的力，最多偏移20°。
 - A型逆時針定位旋轉，會產生逆時針偏移的力，最多偏移1°。
 - B型順時針定位旋轉，會產生順時針偏移的力，最多偏移0°。
 - B型逆時針定位旋轉，偏移的力不穩定，最多偏移0°。
 - 「軸垂直」時A型、B型旋轉時都會偏離中心點，回復「軸水平」的位置，變化較大，情形如下：
 - A型順時針定位旋轉，會產生順時針偏移的力，回復「軸水平」，最多偏移53°。
 - A型逆時針定位旋轉，會產生逆時針偏移的力，回復「軸水平」，最多偏移78°。
 - B型順時針定位旋轉，無法順利旋轉。
 - B型逆時針定位旋轉，偏移的力不穩定，回復「軸水平」，最多偏移55°。
- 我們發現指尖陀螺在輪狀模型實驗中以(1)垂直(2)水平旋轉，都有穩定滾動的作用；以水平方向穩定滾動的作用較大。
- 指尖陀螺三軸定位器在震動時有維持水平、垂直的穩定功能；適用振幅約40°。
- 三軸定位器穩定性與擺動角度有關；指尖陀螺不轉動時角度小較穩定，指尖陀螺轉動時角度大較穩定，因此我們認為：三軸定位器在擺動較大時，越能發揮穩定作用。

玖、參考文獻

- 林政君等(2005)。轉不轉不一樣。第四十四屆全國中小學科學展覽會作品說明書。
- 維基百科(2017)。陀螺。【on line】<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%99%80%E8%9E%BA>。
- 黃樂怡(2017)。發明家悲歌。【on line】<https://www.hk01.com/熱話/88686>。