中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組　物理科

佳作

080102

回心轉「易」！橡皮筋逆向滾動機制之探討

學校名稱： 臺中市私立明道普霖斯頓國民小學

作者：	指導老師：
小六 林潔兒 小五 邱杰 小四 張樂萱 小四 劉芝瑜	戴郁奇 劉原旭

關鍵詞： 逆向滾動、優化旋轉、斜拋角度

摘　要

射出去的橡皮筋竟然會自己滾回來，使用**自製**「逆向滾動發射器」，橡皮筋以一定的斜拋角度發射，它會在空中高速旋轉，跟地面接觸後，旋轉動能與地面摩擦力相互作用，產生逆向滾動效果。橡皮筋是不太均勻的彈性體，所以電子磅秤進行重量篩選，搭配圓形校對模型和自製靜態拉伸測量器，嚴格控制橡皮筋的物理參數，降低其他變因的影響，找出最佳滾回條件組合是：

1.直徑 4.8cm 近似圓形橡皮筋，重量 0.60g，寬度 3mm，彈性係數最好的 k72。

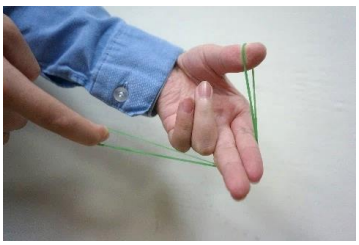
2.橡皮筋不均勻拉伸比例 1：1.5，中段轉折支架設定在正中間位置 B。

3.發射點距離地面 75cm，最佳斜拋發射角度 20°。

綜合上述發射條件，橡皮筋發射後不但能成功滾回，而且多次測試常常超過原始發射點，展現良好滾回效果和動量維持性！

壹、研究動機

哇！橡皮筋為什麼會自己滾回來？舅舅跟我說他可以讓橡皮筋乖乖回來，接著手裡拿著一條橡皮筋，左手配合著右手，勾一勾、拉一拉、轉一轉，把橡皮筋擺成類似 V 字的形狀，發射出去的橡皮筋竟然真的自己滾回來。橡皮筋不是往前飛出去了？為什麼落地後卻會自己滾回來？橡皮筋運動模式明明是往前啊！任何種類的橡皮筋都可以嗎？一定要 V 字形的手勢嗎？要成功滾回來又需要哪些條件？對於橡皮筋可以自己滾回來的神奇現象，引發了我們的研究興趣，在跟隊員們討論以後，如何讓橡皮筋可以自己滾回來就成為了這次研究的主題。



（本照片由作者拍攝）

圖 1-1：逆向滾動手勢

※與課程相關單元：力與運動、簡單機械、資訊課程

貳、研究目的

我們設計的「逆向滾動發射器」可以讓橡皮筋自動滾回來，但是想讓它有最長的滾回距離，那麼就要針對所有的發射條件來做組合試驗。研究方向包括斜拋發射角度、中段轉折支架位置，不同重量、彈性係數、拉伸比例的橡皮筋等種種變因，一項一項來實驗測試，調整並找出發射器和橡皮筋逆向滾動距離的最佳條件組合。

【研究一】比較橡皮筋在均勻和不均勻拉伸的優化旋轉效果

【研究二】發射器斜拋角度、中段轉折構造和橡皮筋條件逆滾測試

【研究三】不同摩擦係數接觸面對橡皮筋逆向滾動的影響

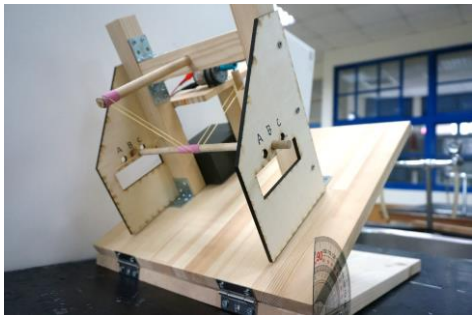
【研究四】比較寬度不同橡皮筋的逆向滾動情形

【研究五】比較不同尺寸橡皮筋的逆向滾動情形

參、實驗流程架構

一、橡皮筋逆向滾動的理論基礎

1.當橡皮筋被不均勻拉伸 30 公分時產生了形狀變化，同時間也儲存著彈力位能。發射出去後，因為轉折處在正中間位置，橡皮筋後段帶動前段往前飛出去，形成逆向旋轉動作。橡皮筋在斜拋發射角度 20°的發射過程中，因為被拉長的橡皮筋前段和後段形成轉折，導致它要恢復原本圓形狀態時產生了旋轉現象，進而帶動橡皮筋整體進行旋轉運動。此時旋轉運動會造成空氣阻力減少，並在落地後和地面產生摩擦作用力，使橡皮筋可以逆向滾動，最後自己滾回原始發射點。



（本照片由作者拍攝）

圖 3-1：逆向滾動最佳發射模式

2.橡皮筋逆向滾動的整個運動過程，可以分成以下三個階段來進行分析。

(1)彈性變形儲能階段：橡皮筋被拉伸並扭轉至特定形變狀態，此時正儲存著彈力位能。當橡皮筋要恢復原本的彈性時，就會轉化為發射所需的動能，這些動能包括了平移和旋轉兩種形式。

(2)空中逆向旋轉階段：橡皮筋發射後，在空中產生了兩種運動模式。

※平移運動：水平方向的直線運動

公式：$E_{trans} = \frac{1}{2}mv^2$ ，其中 m：橡皮筋質量，v：速度。

※旋轉運動：橡皮筋繞自身軸線逆時針旋轉

公式：$E_{rot} = \frac{1}{2}I\omega^2$ ，其中 I = 轉動慣量，ω = 角速度。

(3)落地逆向滾回階段：橡皮筋落地後和地面產生摩擦阻力，使平移動能逐漸耗損，但因為橡皮筋仍然保有旋轉動能，讓摩擦力轉化為逆向滾動的推進力，所以橡皮筋才可以滾回原始發射位置。

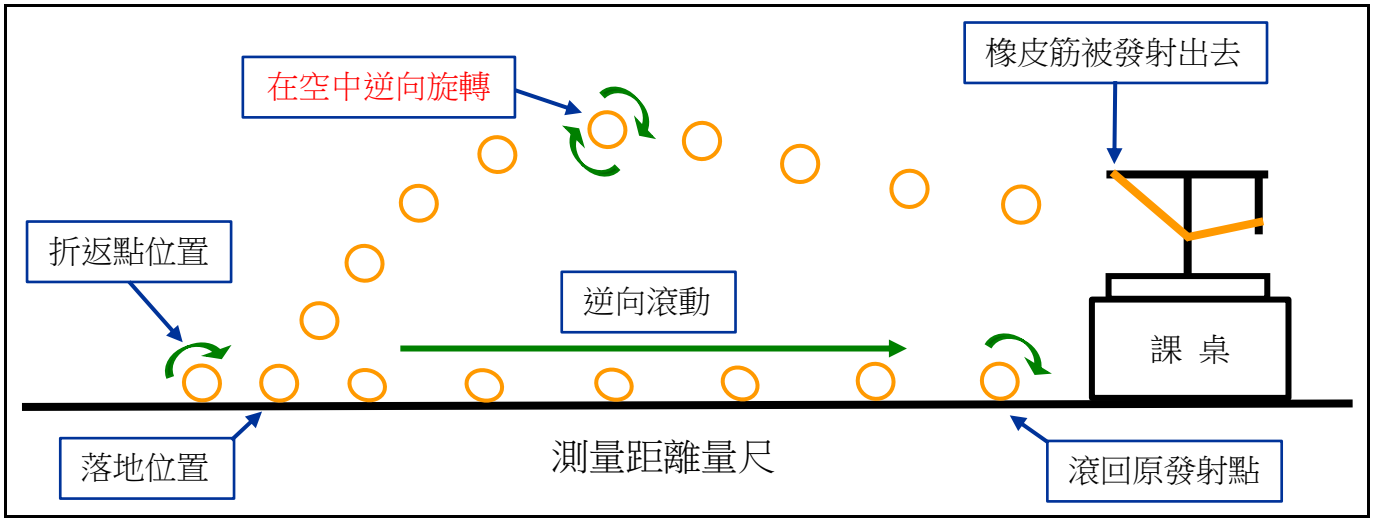
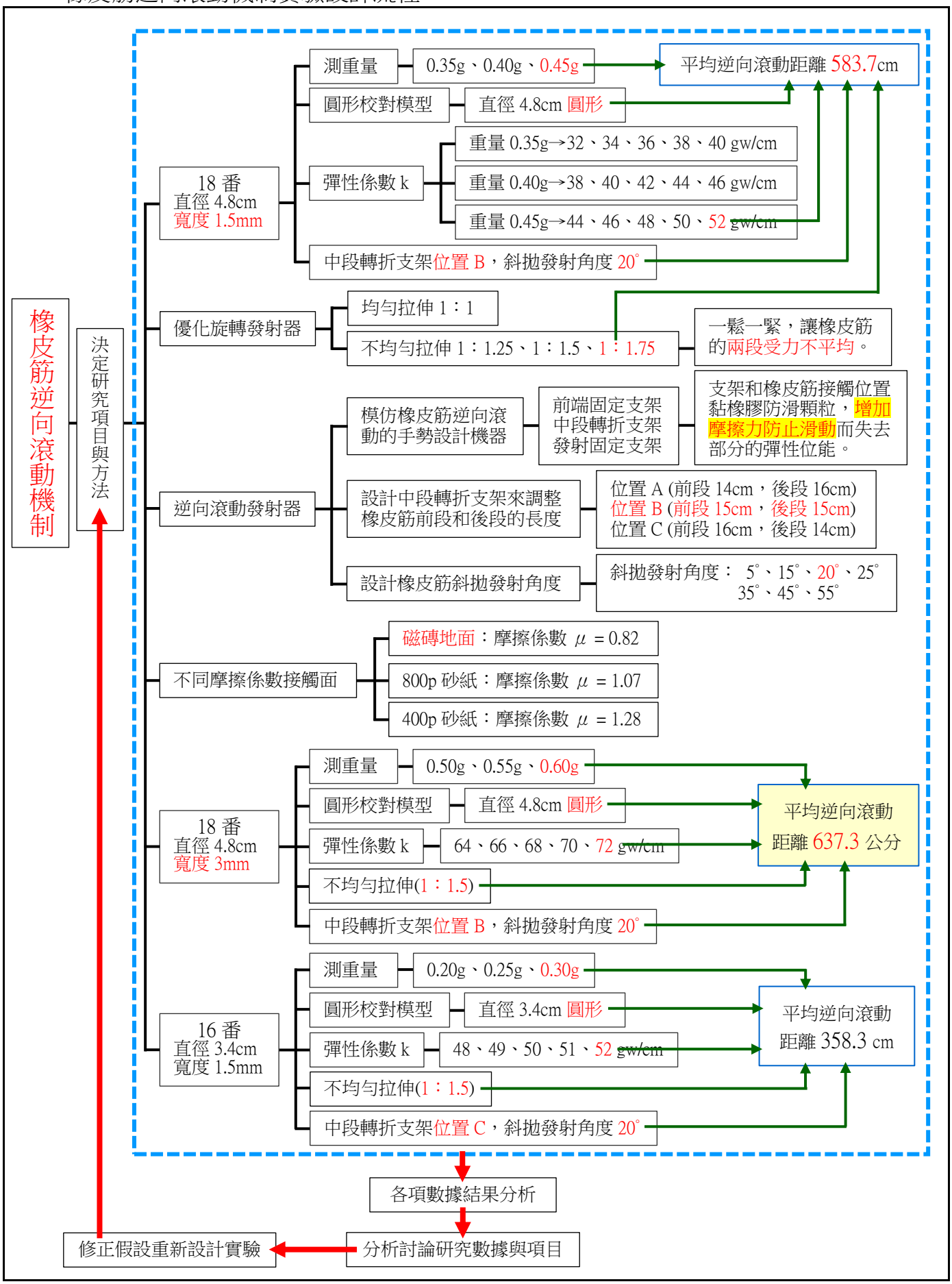


圖 3-2：橡皮筋逆向滾動運動過程分析

（本圖由作者設計繪製）

二、橡皮筋逆向滾動機制實驗設計流程



（本圖由作者設計繪製）

三、橡皮筋逆向滾動初速度計算(比較彈性係數 k33 和 k39，重量 0.40g)

1.用 FDR-AX700 高畫質數位攝影機的高速攝影功能，影片錄影 1 秒鐘有 960 張照片，可以將影片速度放慢 40 倍，把橡皮筋在被發射出去後的第 0.1 秒內和第 0.2 秒內，逆向滾動的運動過程錄影起來。

2.高速攝影影片用威力導演軟體來換算橡皮筋移動時間，角鐵原來長度換算影片裡的比例，計算出橡皮筋在影片裡的移動長度和實際長度，再利用已知的時間和距離，代入等加速度運動公式， $s = Vot + \frac{1}{2}at^2$ ，便可算出彈性係數 k33 和 k39 初速度。

3.比較彈性係數 k33 和 k39 初速度，可以知道不同彈性係數是否會有不同的初速度，進而證明彈性係數比較大的橡皮筋，會有比較好的逆向滾動距離。

4.條件限制：(1)測試時，要在沒有空氣氣流影響的環境下操作。

(2)高速攝影需在晴朗陽光下，拍攝橡皮筋的運動情形才會比較清楚。

(3)橡皮筋測試時，要不均勻拉伸 1：1.75，斜拋發射角度 20°，中段轉折設定在位置 B，發射速度控制在 6V。

5.利用高速攝影和威力導演軟體計算【彈性係數 k33】的初速度

開始發射	第 0.1 秒	第 0.2 秒
47 秒 18 	47 秒 21 	47 秒 24 

1.威力導演 47 秒 18 到 47 秒 21，換算實際時間 0.1 秒。47 秒 18 到 47 秒 24，換算實際時間 0.2 秒。
2.用角鐵長度比例對照，在 0.1 秒裡移動 0.189 公尺，在 0.2 秒裡移動 0.364 公尺。
3.等加速度公式： $s = Vot + \frac{1}{2}at^2$ ，算出 Vo33(初速度) = 1.96 m/s，a(加速度) = -1.4m/s^2。

圖 3-3：彈性係數 k33 高速攝影分析　　（本表格由作者和第一指導教師拍攝繪製）

6.利用高速攝影和威力導演軟體計算【彈性係數 k39】的初速度

發射開始	第 0.1 秒內	第 0.2 秒內
25 秒 23 	25 秒 26 	25 秒 29 

1.威力導演 25 秒 23 到 25 秒 26，換算實際時間 0.1 秒。25 秒 23 到 25 秒 29，換算實際時間 0.2 秒。
2.用角鐵長度比例對照，在 0.1 秒裡移動 0.2034 公尺，在 0.2 秒裡移動 0.3959 公尺。
3.等加速度公式： $s = Vot + \frac{1}{2}at^2$ ，算出 Vo39 (初速度)= 2.0885 m/s，a(加速度) = -1.09m/s^2。

圖 3-4：彈性係數 k39 高速攝影分析　　（本表格由作者和第一指導教師拍攝繪製）

7. Vo33 和 Vo39 的初速度比較

※代入等加速度公式 $s = Vot + \frac{1}{2}at^2$，再用二元二次聯立方程式解出初速度。

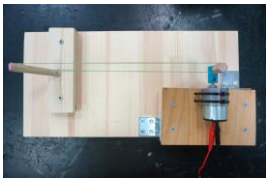
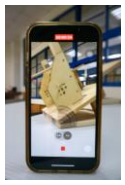
※初速度計算結果：Vo33 = 1.96 m/s，Vo39 = 2.0885 m/s。

※實驗結論：Vo39 > Vo33 彈性係數 k39 初速度會比 k33 初速度大

因為發射器提供的動能都是一樣，所以證明拉伸彈力大的，初速度就會比較大。

肆、研究設備、工具及器材

一、設備器材

			
靜態拉伸測量器	優化旋轉發射器	逆向滾動發射器	強扭力直流減速馬達
			
電子磅秤	橡膠顆粒防滑手套	慢動作錄影手機	自製距離量尺
			
雷射切割機	斜拋角度量角器	電源供應器	FDR-AX700 高速攝影機

（本項次照片由作者拍攝）

二、輔助軟體：Excel 文書處理、Word 文書處理、Beam Studio 繪圖軟體、威力導演

三、橡皮筋運動相關文獻探討(經過比對校正後，這件作品沒人做過，具有我們的獨創性。)

屆數	作品名稱	內容摘要	與本研究結果的差異
56 屆 國中物理	圈上的波妞 -有趣的滾圈圈	利用轉盤讓橡皮筋因為摩擦力而滾動起來，轉盤速度產生改變時，會因摩擦力和重力的影響，產生滾動後退或滾動前進的現象。	我們是利用橡皮筋本身的彈力位能轉換成動能來造成滾動。
57 屆 國小物理	奔跑吧！橡皮筋～	發射器在中間的支架，可以讓射出的橡皮筋落地後在地上往前滾動。	運動方向相反，我們的橡皮筋運動模式是往前飛出後會自動滾回來。
我們的 作品	回心轉「易」 -橡皮筋逆向滾動機制之探討	本作品展現我們的獨特性和創意性，並研究出為什麼往前飛出的橡皮筋，落地後會自己滾回原來的發射點。而且對於橡皮筋要成功滾動回來的各種條件和變因，我們都有做深入的研究分析和修正討論，最後也找到橡皮筋最佳逆向滾動條件。	

（本表格由作者設計）

四、靜態拉伸測量器、優化旋轉發射器和逆向滾動發射器的結構介紹解說

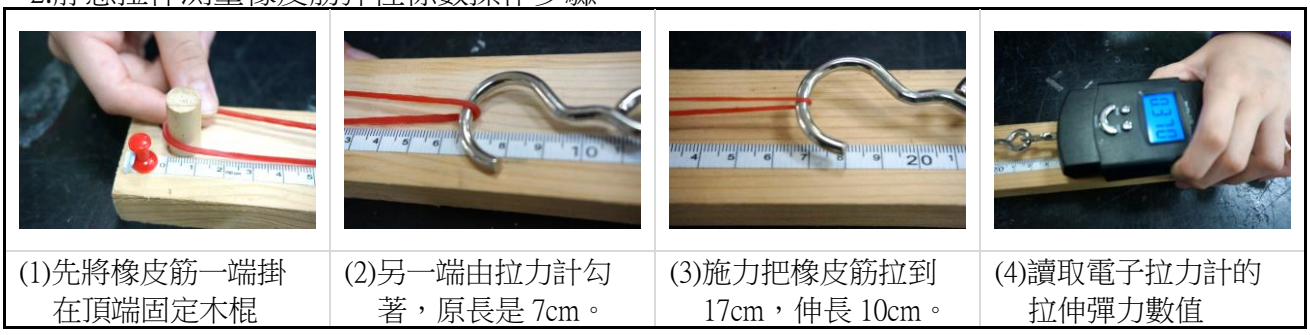
(一)「靜態拉伸測量器」設計和操作方式

1.靜態拉伸測量器的各部位設計功能介紹



圖 4-1：靜態拉伸測量器各部位構造解說　（本項次照片由作者拍攝）

2.靜態拉伸測量橡皮筋彈性係數操作步驟



(1)先將橡皮筋一端掛在頂端固定木棍	(2)另一端由拉力計勾著，原長是 7cm。	(3)施力把橡皮筋拉到 17cm，伸長 10cm。	(4)讀取電子拉力計的拉伸彈力數值

圖 4-2：靜態拉伸測量器操作步驟　（本項次照片由作者拍攝）

(二)「優化旋轉發射器」設計和操作方式

1.優化旋轉發射器的各部位設計功能介紹

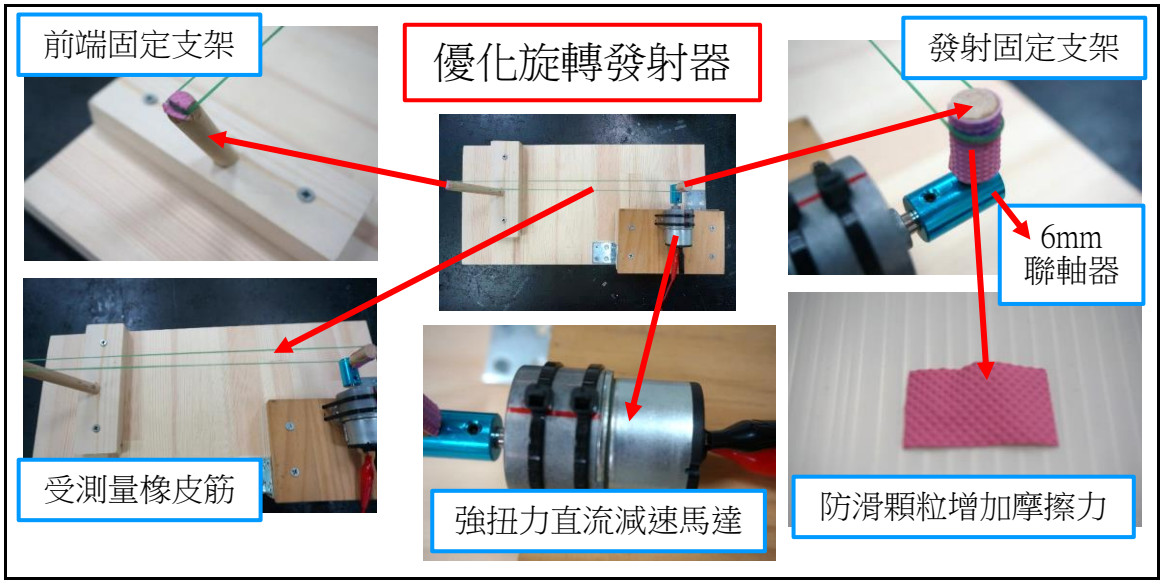


圖 4-3：優化旋轉發射器各部位構造解說　（本項次照片由作者拍攝）

2.直徑 4.8cm 橡皮筋均勻和不均勻拉伸優化旋轉操作步驟

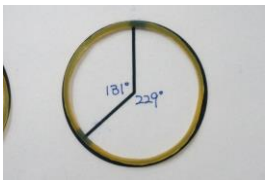
<table>
<tr><td>
</td><td>
</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>1：1</td><td>1：1.25</td><td>1：1.5</td><td>1：1.75</td></tr>
<tr><td>(1)均勻拉伸比例</td><td colspan="3">(2)不均勻拉伸比例</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="2">(3)均勻和不均勻拉伸掛在發射器上</td><td colspan="2">(4)紀錄均勻拉伸和不均勻拉伸飛行的距離</td></tr>
</table>

圖 4-4：優化旋轉發射器操作步驟　　（本項次照片由作者和第一指導教師拍攝）

(三)「逆向滾動發射器」設計和操作方式

1.逆向滾動發射器的各部位設計功能介紹

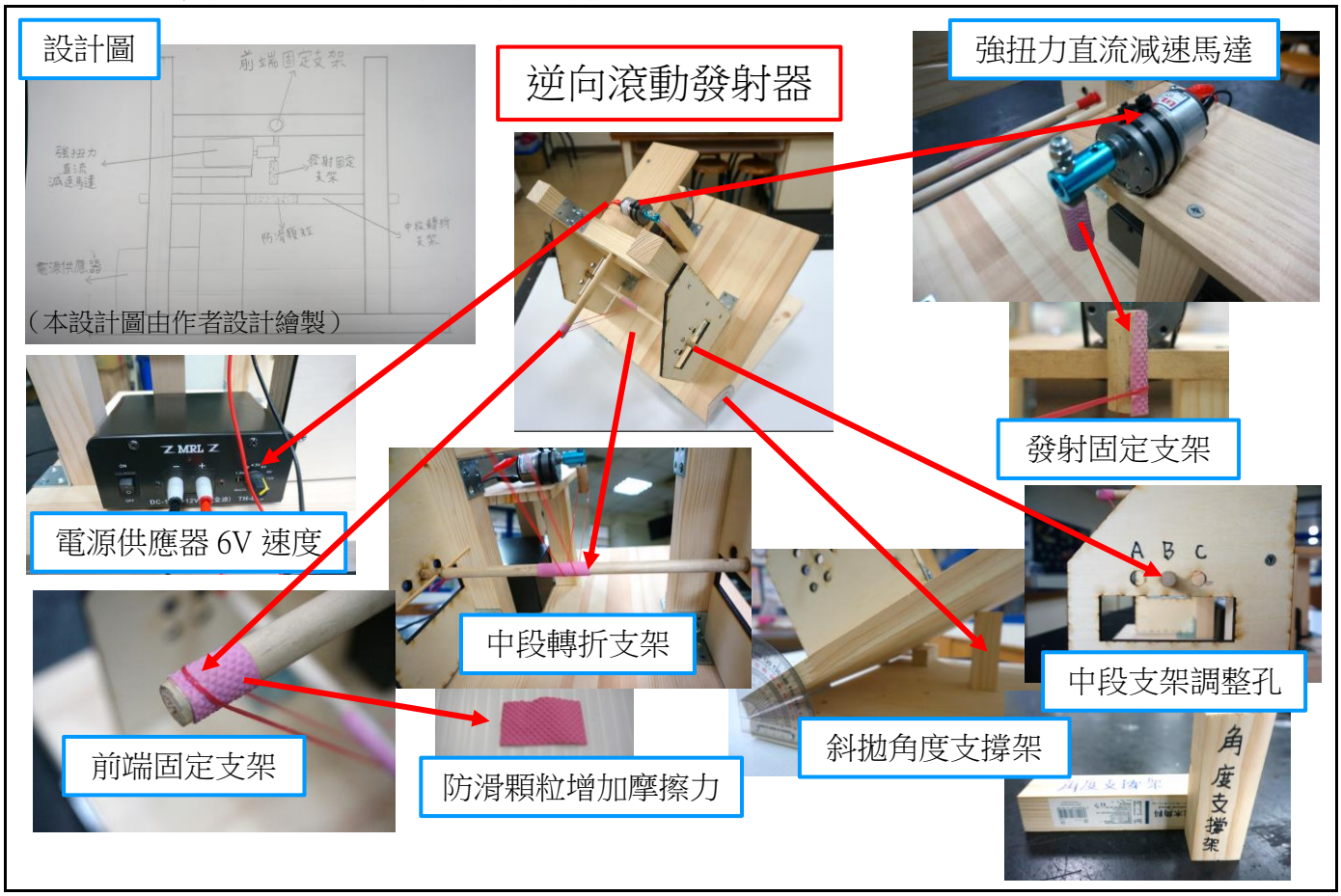
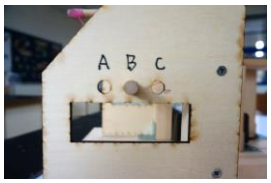


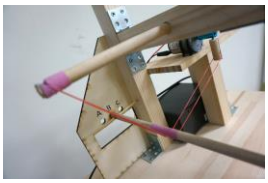
圖 4-5：逆向滾動發射器各部位構造解說　　（本項次照片由作者拍攝）

2.橡皮筋逆向滾動發射操作步驟



(1)布置逆向滾動場地





(2)調整中段轉折支架，改變橡皮筋前後段長度。



(3)調整斜拋角度



(4)不均勻拉伸掛上橡皮筋



(5)紀錄折返點和滾回停止點

圖 4-6：逆向滾動發射器操作步驟　（本項次照片由作者和第一指導教師拍攝）

3.逆向滾動發射器打造完成後，發射出去的橡皮筋有時候會滾回來，有時候卻直接落地不滾動，不能順利滾回來這個問題困擾我們很久，最後發現原來是橡皮筋在三個支點的摩擦力不夠，讓橡皮筋被發射出去前，**因為滑動而失去部分彈性位能**，所以在三個接觸點黏上防滑顆粒增加摩擦力，大大提高橡皮筋滾回來成功率。

4.斜拋發射角度設計概念解說

斜拋角度是指橡皮筋前段和水平線之間的夾角，把上層木板抬高，讓橡皮筋前段和水平線保持平行，看量角器的度數，就可以知道一開始的斜拋角度是 55°。

※角度計算公式：斜拋發射角度 ＝ 55°－上層木板抬高角度

舉例來說，上層木板抬高 35°，那麼斜拋發射角度就是 20°（55°－35°）。



圖 4-7：斜拋發射角度定義分析　（本項次照片由作者拍攝）

5.中段轉折支架設計概念解說

(1)中段轉折支架是逆向滾動要成功的必要條件，如果沒有這個轉折設計，發射出去的橡皮筋就不會產生逆向旋轉飛行，當然也就不會自己滾回來。

(2)使用 Beam Studio 軟體設計「中段轉折支架」圖形，雷射切割機精準定位裁切木片，中段轉折支架可以維持水平，並調整橡皮筋前段和後段的長度。

(3)中段轉折支架調整孔分別設計在位置 A、位置 B、位置 C。

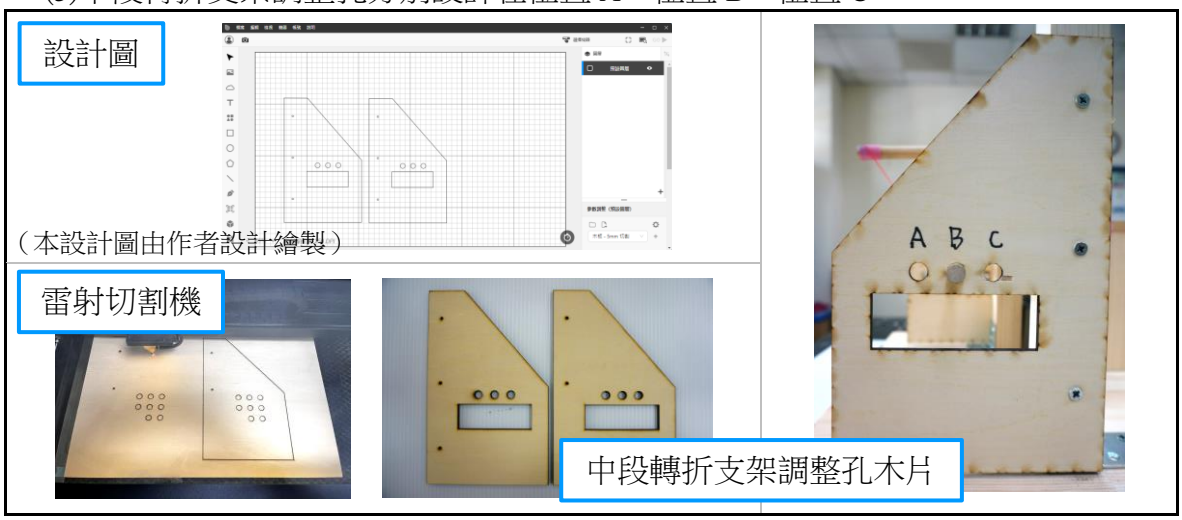


圖 4-8：Beam Studio 設計和雷射切割機裁切中段轉折支架木片　（本項次照片由作者拍攝）

伍、研究過程與方法

一、使用「橡皮筋逆向滾動發射器」的實驗相關控制條件限制

(一)固定測試場地環境控制變因，我們選擇在學校地下二樓做橡皮筋逆向滾動實驗測試，因為這裡是全校最不受空氣氣流影響的地方，每次做橡皮筋逆向滾動的實驗前，我們會先把測試場地的灰塵和垃圾掃乾淨，再用拖把把地板拖過，等到地面乾燥後，確保沒有任何東西在跑道上面。關掉走廊空調冷氣，不讓空氣氣流影響到橡皮筋逆向滾動的測試情形。

(二)在橡皮筋製造過程中，各家廠牌的橡膠和黏劑比例不太一樣，造成橡皮筋整體並不是很均勻，所以我們利用重量、圓形校對模型，來挑選相同實驗條件的橡皮筋，希望把橡皮筋是不均勻物體的變因降到最低。

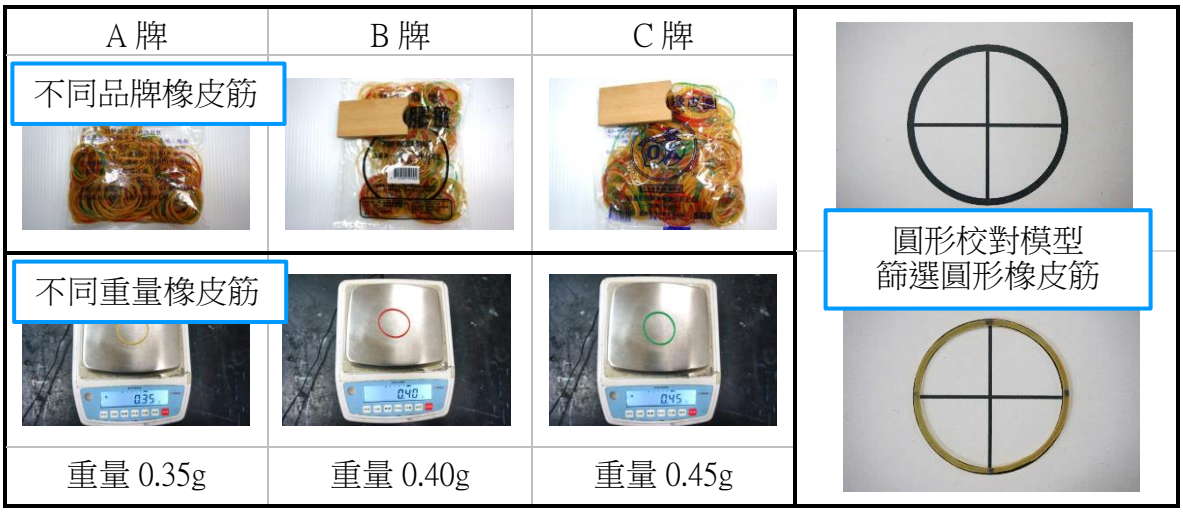


圖 5-1-1：利用重量和圓形校對模型篩選橡皮筋　（本項次照片由作者拍攝）

(三)自製「靜態拉伸測量器」來測量橡皮筋的彈性係數並分類

1.橡皮筋在不施力的狀況下，原來長度是 7cm，用電子拉力計拉伸到 17cm 的位置，測量每一條橡皮筋被拉長 10cm 時，呈現出的拉伸彈力數據並把它們分類。

2.靜態拉伸測量橡皮筋的規則，每一條橡皮筋都拉伸 3 次，而且每拉伸 1 次便需要暫停休息 3 分鐘。3 次拉伸彈力數據，至少要有 2 次是一樣的數值，這樣就符合我們的分類條件，之後才能拿來做橡皮筋逆向滾動的實驗測試。

3.橡皮筋彈性係數 k ＝ $\frac{\text{拉伸彈力}}{\text{伸長長度}}$ （單位：gw/cm）

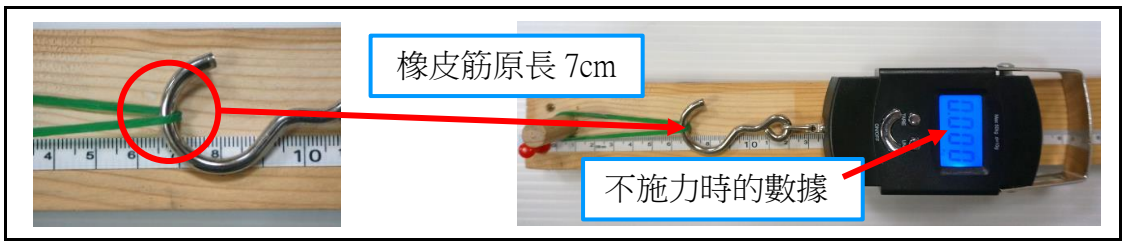


圖 5-1-2：利用電子拉力計來計算橡皮筋的彈性係數　（本項次照片由作者拍攝）

(四)做逆向滾動和靜態拉伸實驗測試時，因為橡皮筋都會被我們拉伸到 30 公分，遠超過橡皮筋所能承受的彈性限度，造成橡皮筋測試 1 次就容易因為彈性疲乏而鬆掉。所以我們每測試 1 次，便會換另一條相同篩選條件的橡皮筋，保持我們實驗測試的公平性。

二、研究一：比較均勻拉伸和不均勻拉伸橡皮筋的優化旋轉效果

(一)測試橡皮筋飛行的距離，有均勻拉伸和不均勻拉伸兩種方式，均勻拉伸是左右兩邊長度都一樣(1：1)，不均勻拉伸長度比例是(1：1.25)、(1：1.5)、(1：1.75)三種。

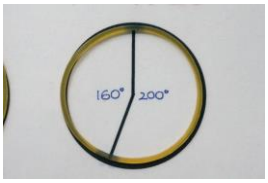
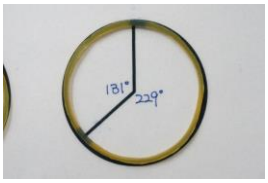
不均勻拉伸、比例 1：1.25	不均勻拉伸、比例 1：1.5	不均勻拉伸、比例 1：1.75
		

圖 5-2-1：橡皮筋不均勻拉伸的三種比例　（本項次照片由作者拍攝）

(二)利用「優化旋轉發射器」來測試不同拉伸比例對橡皮筋飛行距離的影響

1.測試均勻拉伸 1：1 和不均勻拉伸 1：1.25、1：1.5、1：1.75 橡皮筋，比較它們飛行距離的遠近。測試條件是直徑 4.8cm，寬度 1.5mm，彈性係數 k42 的橡皮筋。

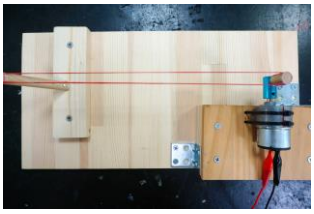
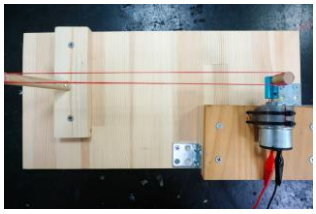
均勻拉伸、比例 1：1	不均勻拉伸、比例 1：1.75
	

圖 5-2-2：均勻和不均勻拉伸橡皮筋　（本項次照片由作者拍攝）

2.進行實驗測試把自然教室門窗緊閉，不開空調風扇。橡皮筋發射點距地面 75 公分，測試每一條橡皮筋飛行 3 次的平均數值，距離最小單位取到公分，操作優化旋轉發射器、錄影設備和手提尺測量橡皮筋飛行距離，慢動作錄影確認橡皮筋落地位置。

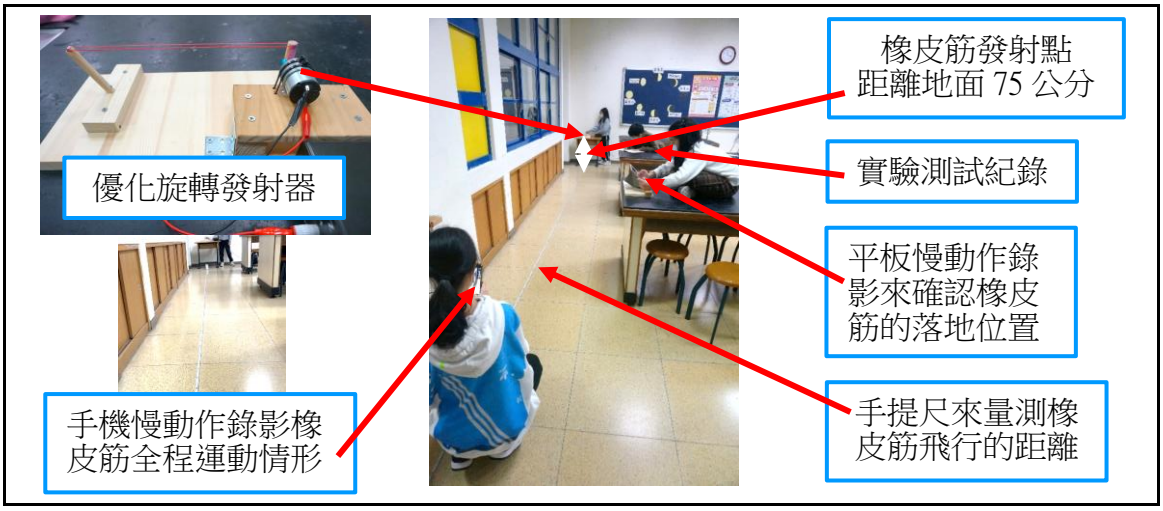


圖 5-2-3：橡皮筋優化旋轉實驗場地布置　（本項次照片由作者和第一指導教師拍攝）

三、研究二：發射器斜拋角度、中段轉折構造和橡皮筋條件的逆向滾動測試

(一)設計並組建一台「逆向滾動發射器」

1.模仿用手讓橡皮筋逆向滾動的姿勢，設計打造一台逆向滾動發射器，橡皮筋被發射出去後，可以讓它在空中不停旋轉，落地後和地面產生摩擦作用力，到達折返點後，再順利自動滾回來。

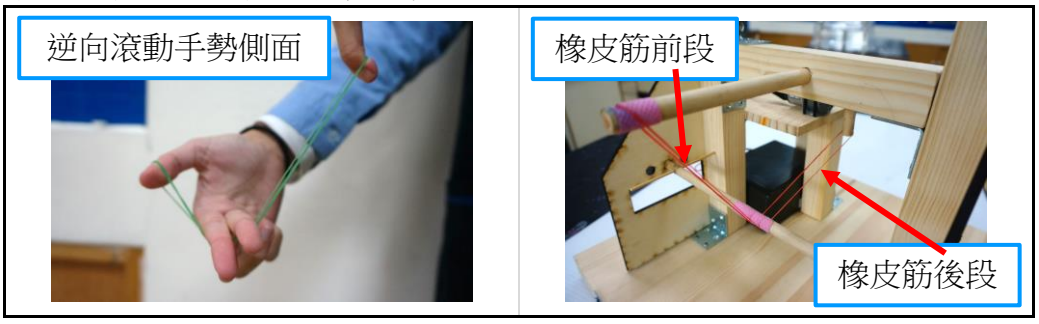


圖 5-3-1：逆向滾動手勢和發射器對照　（本項次照片由作者拍攝）

(二)用角度支撐架來調整不同斜拋發射角度

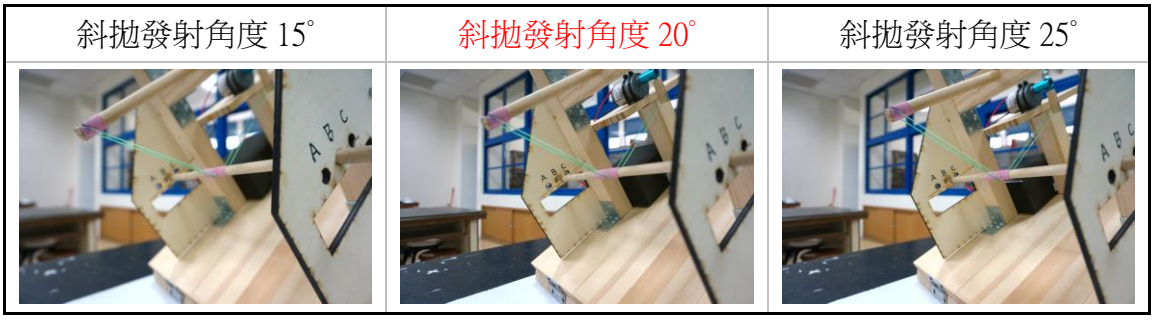


圖 5-3-2：不同斜拋發射角度　（本項次照片由作者拍攝）

(三)使用 Beam Studio 軟體設計「中段轉折支架」圖，雷射切割機精準定位裁切木片，中段轉折支架可以調整橡皮筋前後段的長度。

1.中段轉折支架調整孔分別設計在位置 A、位置 B、位置 C。

2.中段轉折支架位置可以調整橡皮筋前段和後段的長度。

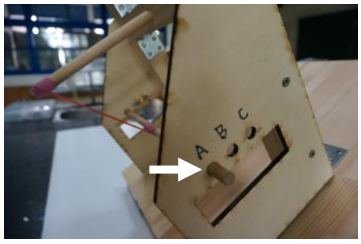
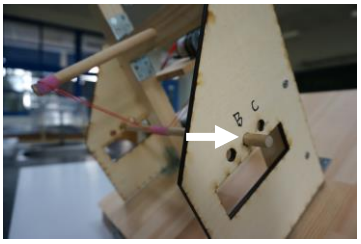
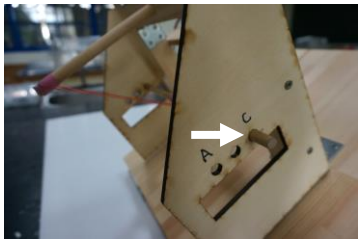
中段轉折位置 A	中段轉折位置 B	中段轉折位置 C
		
前段 14cm、後段 16cm	前段 15cm、後段 15cm	前段 16cm、後段 14cm

圖 5-3-4：中段轉折支架調整橡皮筋前段和後段的長度　（本項次照片由作者拍攝）

(四)進行實驗測試，把地下二樓空調風扇關掉，再利用逆向滾動發射器、錄影設備和自製量尺，把電源供應器設定 6V 速度，把不均勻拉伸的橡皮筋掛上，測量橡皮筋折返點和滾回停止點的時間與距離。

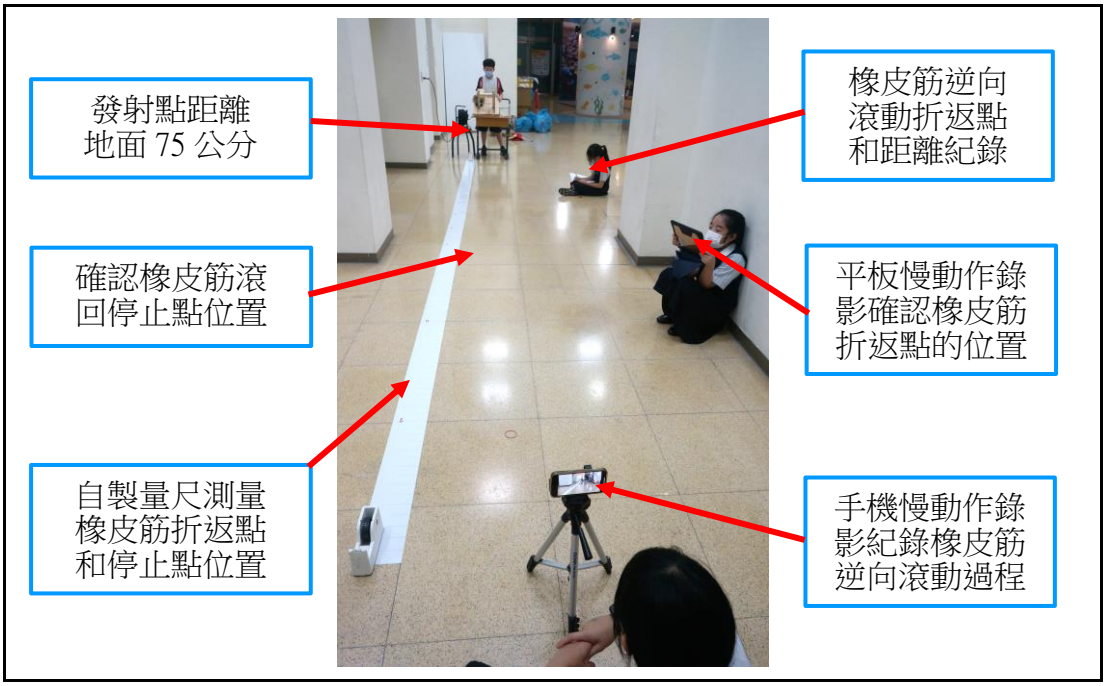
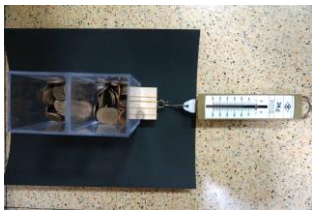
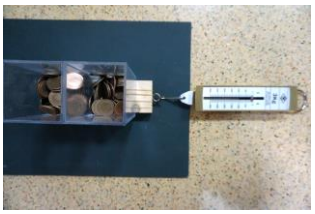


圖 5-3-5：橡皮筋逆向滾動實驗場地　（本照片由第一指導教師拍攝）

四、研究三：不同摩擦係數接觸面對橡皮筋逆向滾動的影響

(一)我們先把 4 條橡皮筋套在載重物木條上，讓橡皮筋可以和受測接觸面直接碰觸。整組重物用容器裝壹圓硬幣，總重量 1000 公克，彈簧秤拉動 1000 公克重物，測量在三種不同接觸面的動摩擦係數 μ 。

磁磚地面	400 磅砂紙	800 磅砂紙
		
摩擦係數 μ ：0.82	摩擦係數 μ ：1.07	摩擦係數 μ ：1.28

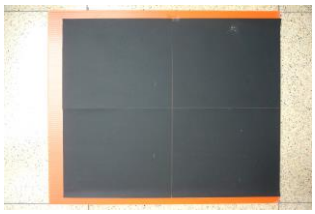
載重物木條套橡皮筋	受測接觸面 400p 砂紙	受測接觸面 800p 砂紙
		

圖 5-4-1：不同接觸面摩擦係數 μ （本項次照片由作者拍攝）

(二)用角度支撐架來調整不同角度，斜拋發射角度分別是 15˚、20˚和 25˚，如研究二的角度調整方式(p.11)。

(三)進行實驗測試時，把地下二樓空調風扇關掉，再利用逆向滾動發射器、錄影設備和自製量尺，把電源供應器設定在 6V 速度，掛好要不均勻拉伸的橡皮筋，測量橡皮筋折返點和滾回停止點的時間與距離。

五、研究四：比較寬度不同橡皮筋的逆向滾動情形

(一)兩種橡皮筋雖然都是規格 18 番，直徑 4.8cm，但寬度有 1.5mm 和 3mm 的差別，重量也就不一樣。

篩選比較符合圓形模型的橡皮筋	逆向滾動發射器發射橡皮筋
	
橡皮筋要盡量能重疊圓形模型	斜拋發射角度 20˚

圖 5-5-1：寬度 3mm 逆向滾動發射條件 （本項次照片由作者拍攝）

(二)重量 0.60g、直徑 4.8cm、寬度 3mm 橡皮筋，測量靜態拉伸長度 10cm 彈力。



圖 5-5-2：寬度 3mm 拉伸 10cm 的彈性係數分類　（本項次照片由作者拍攝）

(三)中段轉折位置 B 可以調整橡皮筋前段和後段各 15cm 長度。

(四)角度支撐架調整不同發射角度，斜拋發射角度分別是 15˚、20˚和 25˚。

(五)進行規格 18 番，但寬度 3mm，重量 0.60g，直徑 4.8cm，不同彈性係數橡皮筋逆向滾動實驗測試時，把關閉地下二樓空調風扇，操作逆向滾動發射器、錄影設備和自製量尺，確認並測量橡皮筋折返點和滾回停止點的距離。

六、研究五：比較尺寸不同橡皮筋的逆向滾動情形

塑膠材料行買到規格 16 番，直徑 3.4cm，寬度 1.5mm 橡皮筋，用電子磅秤測量重量、圓形校對模型和靜態拉伸橡皮筋彈性係數，篩選實驗條件一致的橡皮筋。

(一)電子磅秤測量每一條橡皮筋的重量，測量到的最小單位是小數點後兩位，先把所有的橡皮筋做重量的分類，有 0.20g、0.25g 和 0.30g 三種重量。

(二)圓形校對模型：用 word 設計印出直徑 3.4cm 圓形圖案，把橡皮筋和圓形校對模型重疊，如果能盡量密合，這樣就符合我們所要測試實驗的橡皮筋。

圓形形狀校對模型	篩選符合圓形校對模型的橡皮筋
	
直徑 3.4cm 圓形	橡皮筋能重疊圓形校對模型

圖 5-6-1：直徑 3.4cm 圓形校對模型　（本項次照片由作者拍攝）

(三)靜態拉伸測量不同彈力長度 10cm 橡皮筋拉伸

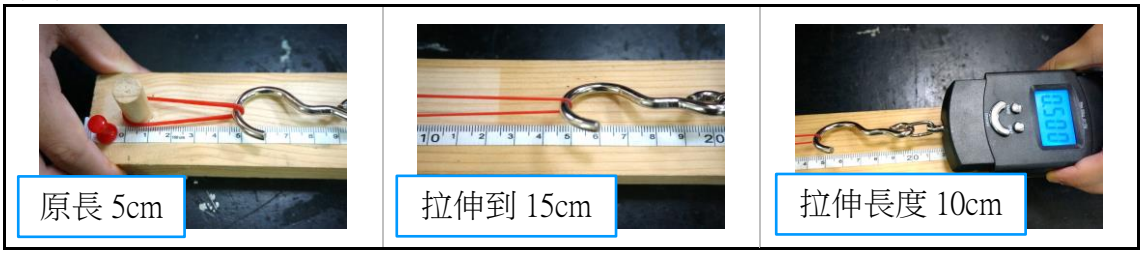


圖 5-6-2：直徑 3.4cm 橡皮筋拉伸 10cm　（本項次照片由作者拍攝）

(四)中段轉折 C 位置可以調整橡皮筋前段和後段各 13cm 長度。

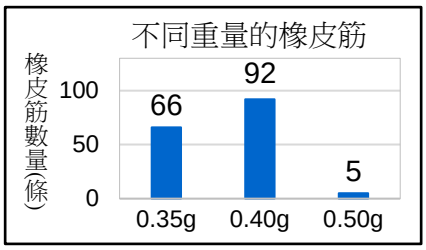
(五)角度支撐架調整不同發射角度，斜拋發射角度分別是 15˚、20˚和 25˚。

(六)進行規格 16 番，但寬度 1.5mm，重量 0.30g，直徑 3.4cm，不同彈性係數橡皮筋逆向滾動實驗測試，把測試場地不開空調風扇，操作逆向滾動發射器、錄影設備和自製量尺，來確認並測量橡皮筋折返點和滾回停止點的距離。

陸、研究結果與討論

一、實驗前置作業：利用重量、圓形校對模型和靜態拉伸彈力篩選相同實驗條件的橡皮筋

(一)用電子磅秤測量每一條橡皮筋重量，把不同重量的橡皮筋分類出來，電子磅秤最小單位是小數點後第 2 位。因為 B 牌和 C 牌大多數的橡皮筋比較不符合圓形校對模型條件，就是形狀比較不圓。所以之後逆向滾動實驗都選擇 A 牌來測試。1 包 A 牌橡皮筋有 3 種不同重量，0.35g 有 66 條，0.40g 有 92 條，0.45g 只有 5 條，但每一包數量不太一樣，大致上也是上述的數量常態分布。



（本圖由作者製作）

圖 6-1-1：不同重量橡皮筋數量

(二)不圓的橡皮筋滾動時比較不順利，用 word 設計直徑 4.8cm 圓形校對模型，把 3 種重量 0.35、0.40 和 0.45g 橡皮筋和圓形校對模型比對，篩選符合圓形形狀。因為測試會大量耗損橡皮筋，再買 10 包 A 牌來篩選，來完成之後橡皮筋逆向滾動實驗。

(三)自製靜態拉伸測量器測量拉伸彈力，3 種不同重量橡皮筋都取 5 種不同拉伸彈力做實驗。發現同重量橡皮筋彈力竟然相差到 140g，證明橡皮筋並不是一種均勻的彈性體。測試發射時，橡皮筋被拉伸到 30cm，遠超過它的彈性限度，同條橡皮筋拉到第 2、3 次，就會產生永久形變，簡單說就是變鬆了。所以每超限拉伸 1 次，便換一條橡皮筋來測試。


（本照片由作者拍攝）

圖 6-1-2：橡皮筋變鬆

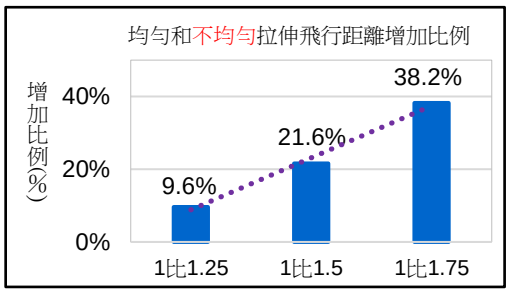
二、實驗一：比較均勻和不均勻拉伸橡皮筋的優化旋轉效果

逆向滾動發射需要不均勻拉伸橡皮筋，它才會順利滾回來，所以我們想比較橡皮筋在均勻拉伸和不均勻拉伸優化旋轉情形。拉伸方式分為均勻拉伸比例(1：1) 和不均勻拉伸比例(1：1.25)、(1：1.5)、(1：1.75)，自然教室門窗關好並關掉風扇空調，讓橡皮筋在飛行時，不受到空調或外來空氣氣流的影響。

我們設計製造的優化旋轉發射器，橡皮筋發射點距離地面是 75cm，利用手提尺的距離標示，測試每一條橡皮筋飛行 3 次，並且取 3 次的平均數值，而距離最小單位取到公分，並用慢動作錄影記錄飛行的情形，平板慢動作錄影確認橡皮筋飛行落地位置。

實驗一討論：

觀察橡皮筋逆向滾動情形，發現橡皮筋要用不均勻拉伸方式才會順利滾回來。但如果是均勻拉伸橡皮筋，雖然也會飛出去，但落地後不太滾動就停下來，所以橡皮筋拉伸方式是會影響逆向滾動的運動模式。



（本圖由作者製作）

圖 6-2-1：均勻和不均勻拉伸橡皮筋飛行距離的增加比例

以均勻拉伸 1：1 當基準，比較不均勻拉伸飛行距離增加比例，不均勻拉伸 1：1.25 增加 9.6%，1：1.5 增加 21.6%，1：1.75 增加 38.2%。

測試後證明了不均勻拉伸差距越大，越可以讓橡皮筋旋轉起來，並維持著旋轉的角動量，而且這樣的方式受空氣阻力的影響比較小，那麼橡皮筋就會飛得比較遠。

三、實驗二：發射器斜拋角度、中段轉折構造和橡皮筋條件的逆向滾動測試

自製的「逆向滾動發射器」可以把橡皮筋發射出去，落地後藉由跟地面的摩擦力，讓它自動滾回來，手機、平板慢動作錄影配合自製量尺，測量橡皮筋從折返點滾回原來發射點的距離。這台測試機器設計有四個方向的操縱變因要討論，分別是斜拋角度、中段轉折位置、不同重量橡皮筋、不同彈性係數橡皮筋。

(一)橡皮筋在不同彈性係數和不同斜拋角度的逆向滾動距離。(單位：cm)

1.四種橡皮筋彈性係數：k33、k35、k37、k39。

2.發射器斜拋角度：15°、20°、25°、35°、45°。

3.橡皮筋重量 0.40g，不均勻拉伸 1：1.75，中段轉折位置 A。

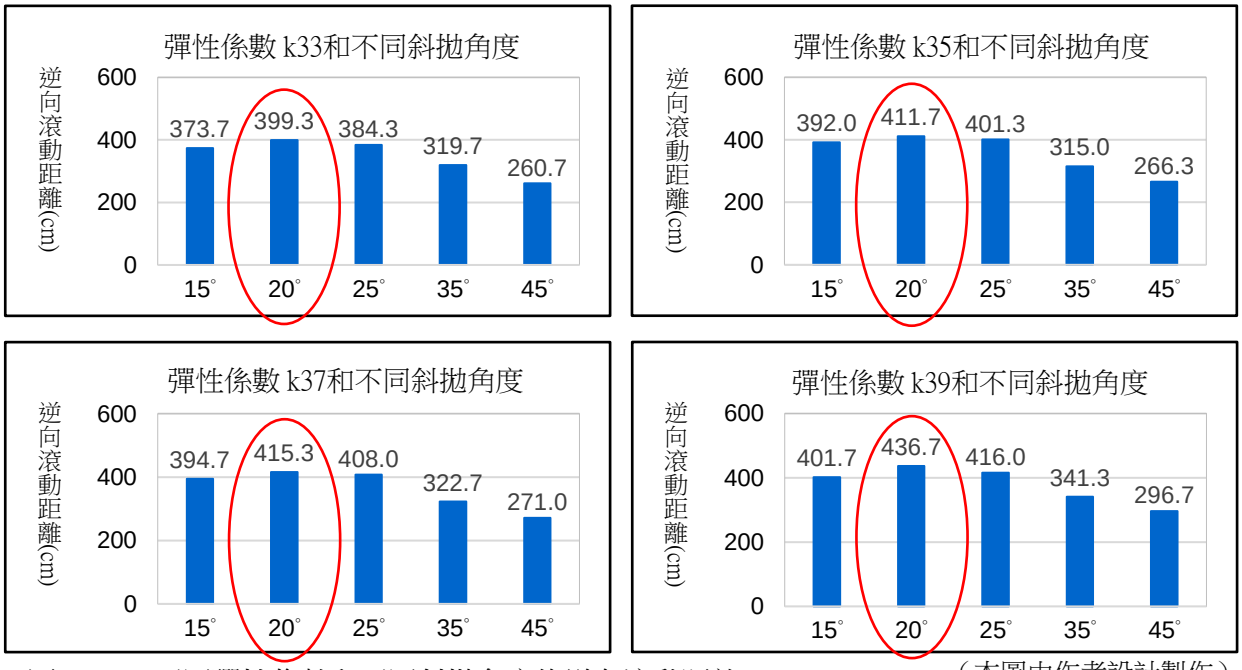


圖 6-3-1：不同彈性係數和不同斜拋角度的逆向滾動距離

（本圖由作者設計製作）

(二)橡皮筋在中段轉折位置和不同彈性係數的逆向滾動距離。(單位：cm)

1.中段轉折支架調整孔，分別設定在位置 A、位置 B 和位置 C。

2.四種橡皮筋彈性係數：k33、k35、k37、k39。

3.橡皮筋重量 0.40g，不均勻拉伸 1：1.75，斜拋發射角度 20°。

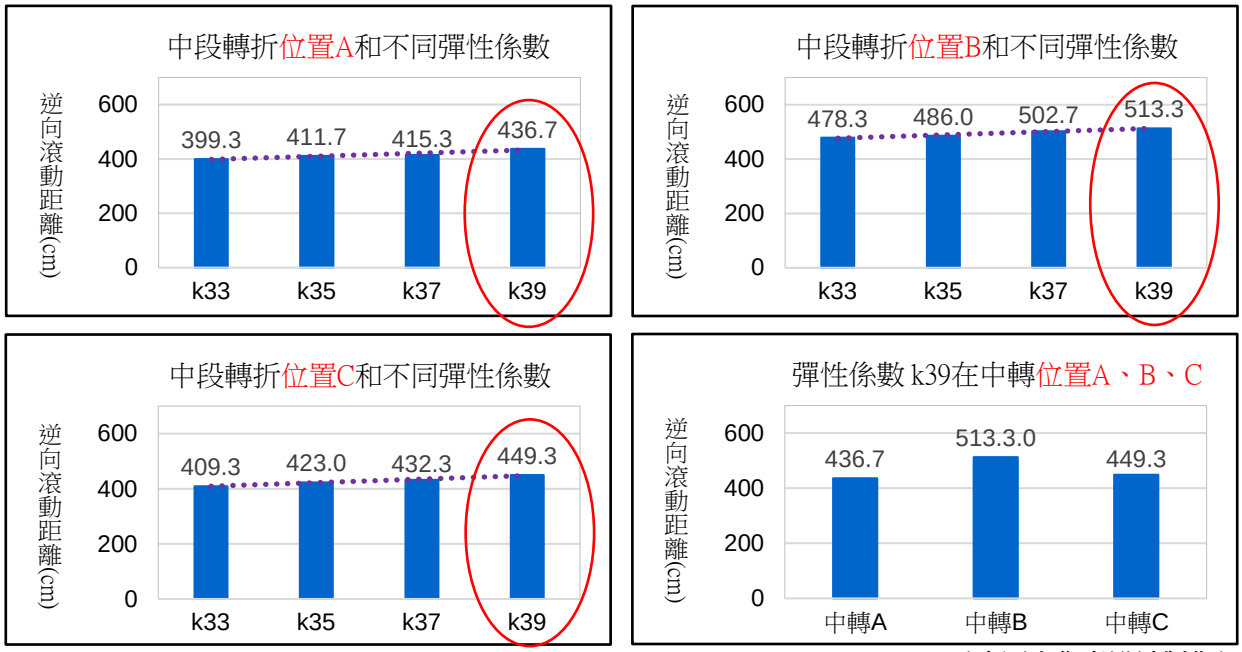


圖 6-3-2：中段轉折位置和不同彈性係數逆向滾動距離

（本圖由作者設計製作）

(三)橡皮筋不同重量和不同彈性係數在中段轉折位置 B 的逆向滾動距離。(單位：cm)

1.電子磅秤測橡皮筋重量：0.35g、0.40g、0.45g。

2.重量 0.35g 橡皮筋彈性係數：k32、k34、k36、k38、k40。

重量 0.40g 橡皮筋彈性係數：k38、k40、k42、k44、k46。

重量 0.45g 橡皮筋彈性係數：k44、k46、k48、k50、k52。

3.中段轉折位置 B，不均勻拉伸 1：1.75，斜拋發射角度 20°。

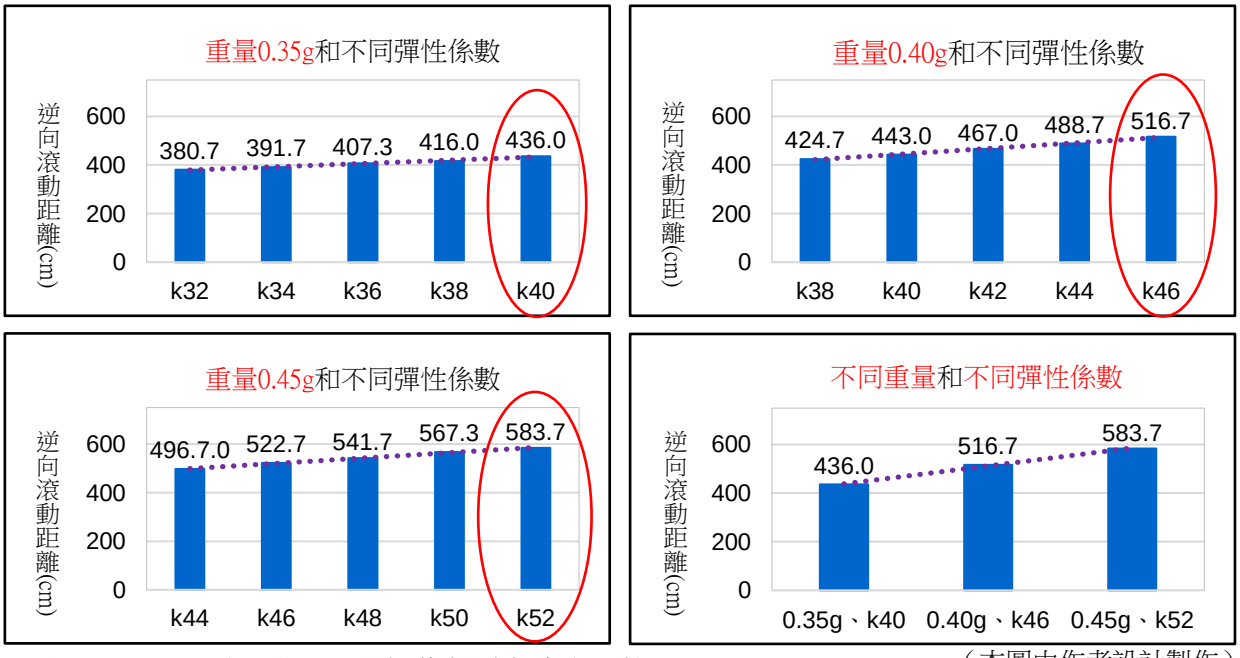
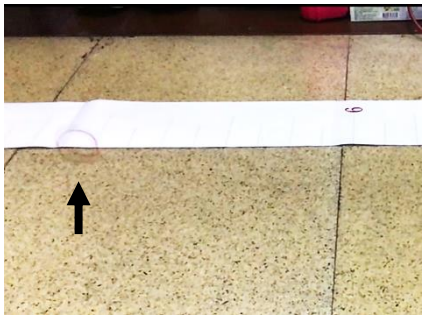


圖 6-3-3：不同重量和不同彈性係數逆向滾動距離

（本圖由作者設計製作）

實驗二討論：

1.橡皮筋逆向滾動發射出去是由後段帶動前段往前飛出，被拉長時儲存的彈力位能轉換成旋轉動能，在空中不停高速旋轉，落地後跟地面產生摩擦阻力，這時再藉由逆向旋轉動能，讓橡皮筋可以自己滾回原來的發射點。

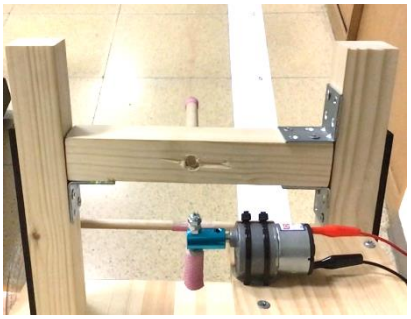


（本照片由作者拍攝）

圖 6-3-4：逆向滾動折返點

2.角度支撐架可以調整不同斜拋發射角度，測試結果在斜拋角度 15˚、20˚、25˚、35˚、45˚，橡皮筋才會有逆向滾動的現象，但不同斜拋角度滾動回來的距離還是會有差別。

3.在此次實驗裡，使用重量 0.40g，彈性係數 k33、k35、k37、k39 橡皮筋在不同斜拋角度發射出去，最好的彈性係數 k39 搭配斜拋角度 20˚，會有最長的逆向滾動距離。



（本照片由作者拍攝）

圖 6-3-5：逆向滾動正後方

(1)彈性係數 k33，平均滾回距離 399.3cm。

(2)彈性係數 k35，平均滾回距離 411.7cm。

(3)彈性係數 k37，平均滾回距離 415.3cm。

(4)彈性係數 k39，平均滾回距離 436.7cm。

4.使用逆向滾動發射器來測試，斜拋發射角度在 20˚，測試中段轉折位置 A、B、C 和不同彈性係數橡皮筋滾回距離，分析實驗測試數據，如果在中段轉折位置 B，逆向滾動的距離也就會越長。

(1)在中段位置 A，彈性係數 k39，平均滾回距離 436.7cm。

(2)在中段位置 B，彈性係數 k39，平均滾回距離 513.3cm。

(3)在中段位置 C，彈性係數 k39，平均滾回距離 449.3cm。

5.不同重量橡皮筋會有不同彈性係數，中段轉折設在位置 B。重量越重橡皮筋，彈性係數越好，逆向滾動的距離就越長。

(1)重量 0.35g，彈性係數 k40 橡皮筋平均滾回距離 436.0cm。

(2)重量 0.40g，彈性係數 k46 橡皮筋平均滾回距離 516.7cm。

(3)重量 0.45g，彈性係數 k52 橡皮筋平均滾回距離 583.7cm。

6.斜拋角度在 55˚時，橡皮筋被逆向發射後，雖然會有最遠的飛行距離 728.7cm，但大多是直接落地幾乎不滾動，有一些情形是滾回一點點就停下來。而斜拋角度在 5˚，橡皮筋會直接撞擊地面，旋轉動能被消耗掉，只往前滾動一小段距離。

7.橡皮筋逆向滾動正上方運動連續圖

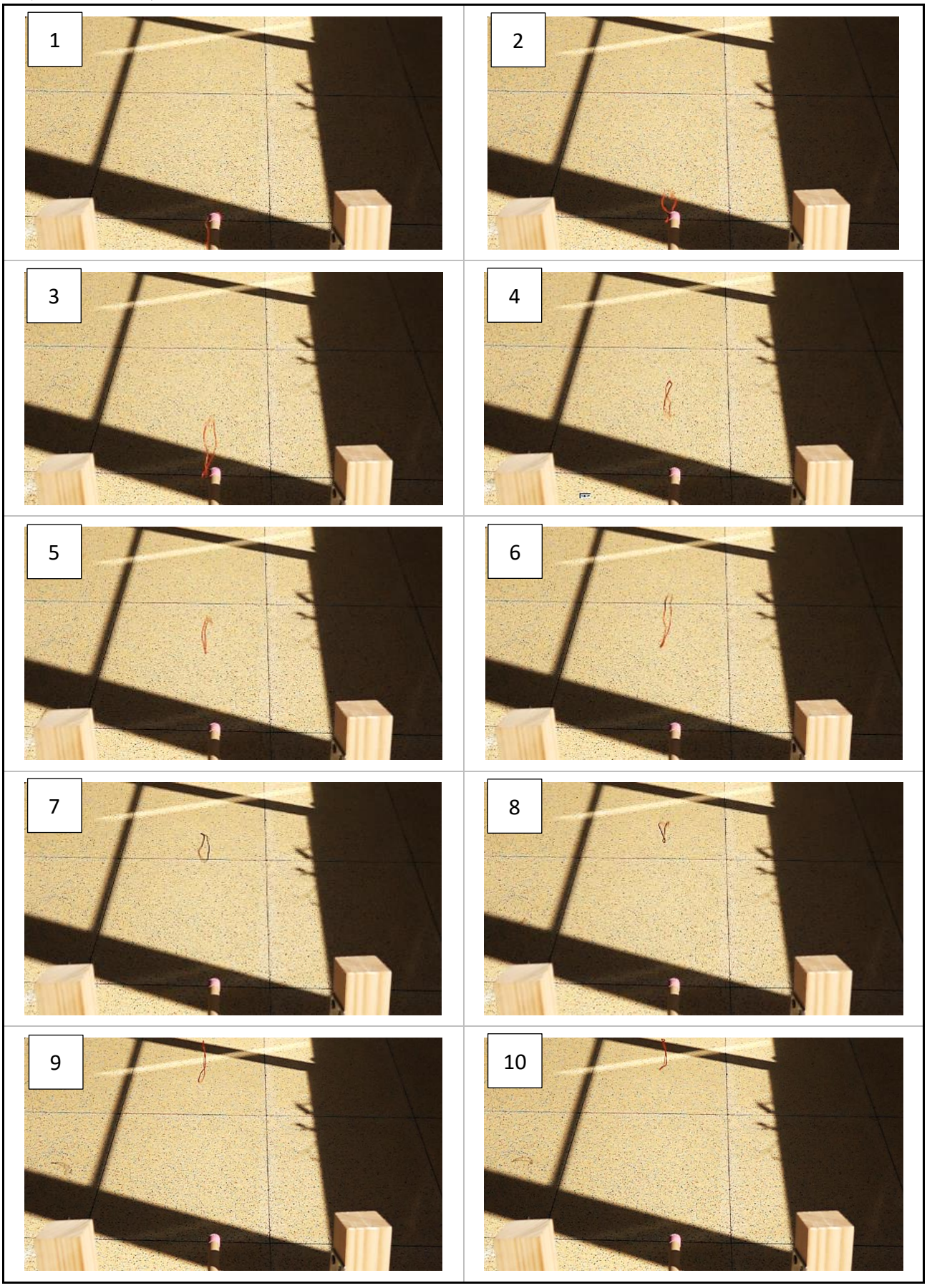


圖 6-3-6：橡皮筋逆向滾動正上方連續圖　（本項次影片由作者和第一指導教師拍攝）

8.橡皮筋逆向滾動側面運動圖

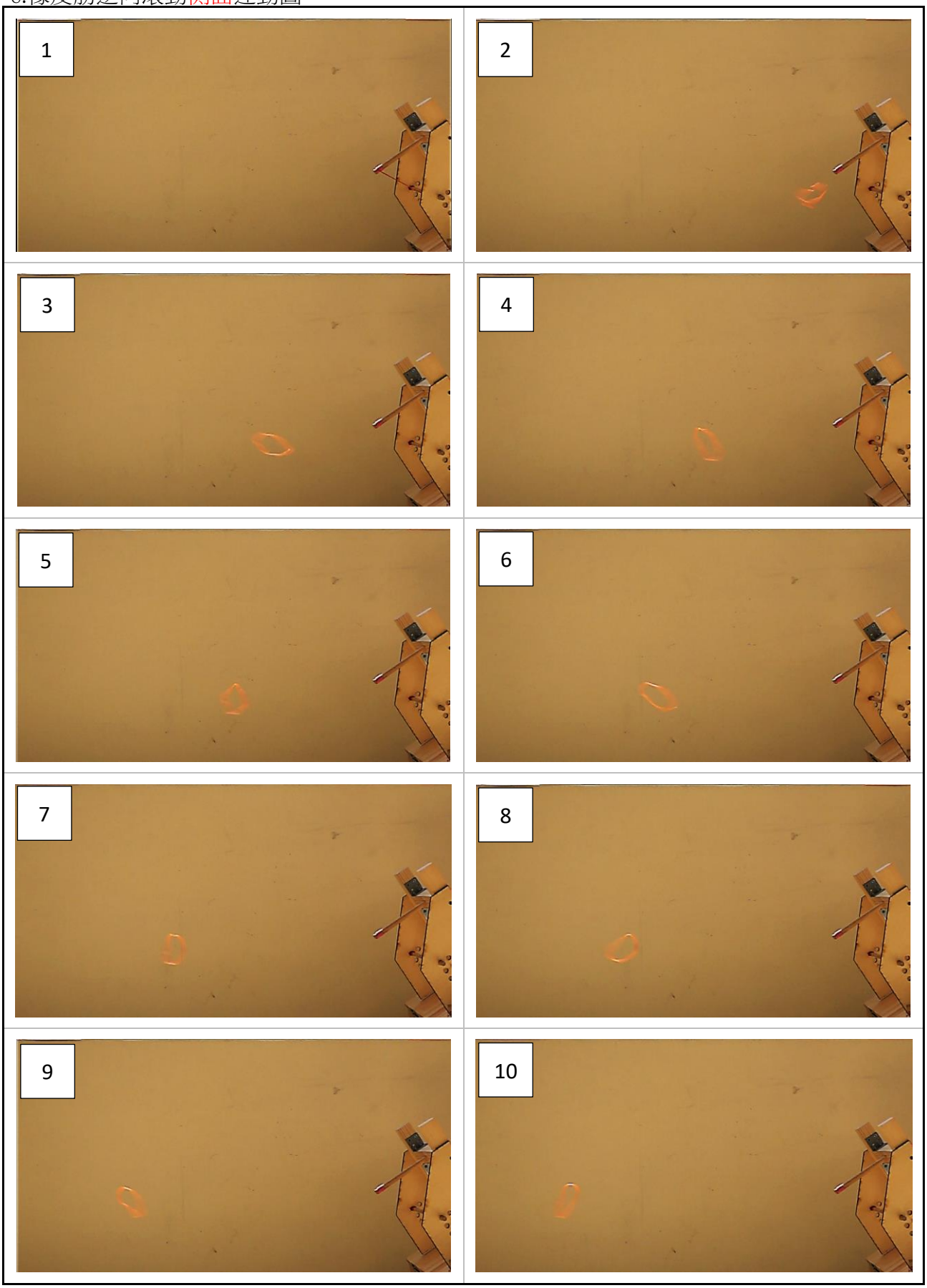


圖 6-3-7：橡皮筋逆向滾動側面連續圖　（本項次影片由作者和第一指導教師拍攝）

四、實驗三：不同材質接觸面對橡皮筋逆向滾動的影響

橡皮筋逆向滾動的整個運動過程裡，在落地的那一瞬間，帶著逆向旋轉動能和接觸面產生摩擦阻力，逆向旋轉動能讓它可以順利滾回，所以落地時接觸面給予的摩擦阻力，所以我們想知道不同的摩擦力，對橡皮筋滾回距離會有什麼影響。使用重量 0.45g，彈性係數 k42 的橡皮筋來測試。

(一)利用套著 4 條橡皮筋的載物木條，用彈簧秤拉動整組重物(壹圓硬幣)1000 公克，測量出三次動摩擦力數值並平均。

※摩擦力係數 $\mu = \frac{f(\text{動摩擦力})}{N(\text{正向力})}$ ，正向力(N) = 1000 公克 = 9.8 牛頓。

1.磁磚地面摩擦係數 μ = 0.82

2.砂紙 800p 摩擦係數 μ =1.07

3.砂紙 400p 摩擦係數 μ =1.28

(二)不同接觸地面摩擦係數和不同斜拋發射角度的逆向滾動測試(單位：cm)

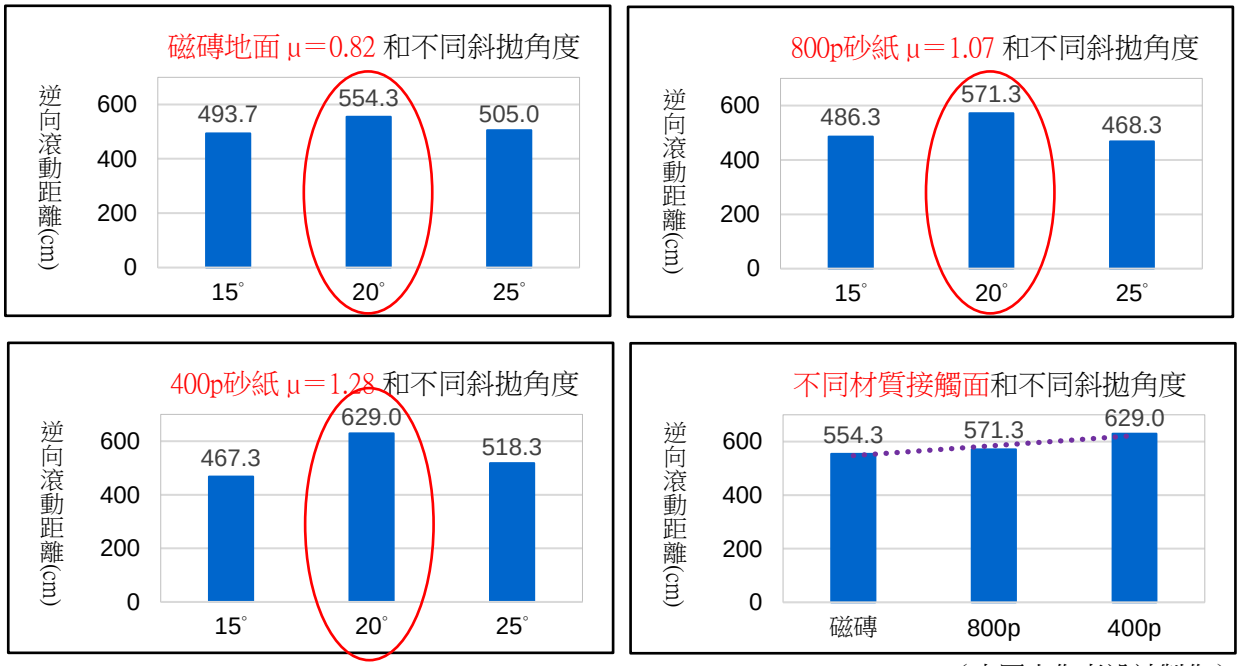


圖 6-4-1：不同接觸面和不同斜拋角度逆向滾動距離　　（本圖由作者設計製作）

實驗三討論：

1.橡皮筋在「落地逆向滾回階段」時，空中不停高速旋轉橡皮筋，在落地後跟地面產生摩擦阻力，這時再藉由逆向旋轉動能，讓它自動滾回來。

2.磁磚地面摩擦係數 μ = 0.82，橡皮筋逆向滾回距離 554.3cm。

砂紙 800p 摩擦係數 μ =1.07，橡皮筋逆向滾回距離 571.3cm。

砂紙 400p 摩擦係數 μ =1.28，橡皮筋逆向滾回距離 629.0cm。

3.落地接觸面的摩擦力越大，和橡皮筋逆向旋轉動能相互作用的推進力也就更大，橡皮筋逆向滾動回來的距離也就比較長。

五、實驗四：比較寬度不同橡皮筋的逆向滾動情形

五金行常見的橡皮筋尺寸是 18 番，直徑 4.8cm，寬度 1.5mm。我們找到一樣是 18 番，直徑 4.8cm，但寬度卻是 3mm，比較寬也比較重的橡皮筋。利用靜態拉伸測量器和逆向滾動發射器來做實驗數據測試，不均勻(1：1.5)拉伸到 30cm 的長度，同一條橡皮筋測試 3 次，並取平均值到小數點第 1 位

(一)靜態拉伸測量寬度 3mm 橡皮筋的不同彈性係數(k62～k72)。用圓形校對模型來篩選比較圓的橡皮筋，但要完全符合圓形的橡皮筋卻很少。

1.不同彈性係數和不同斜拋角度，測量折返點和滾回停止點距離。(單位：cm)

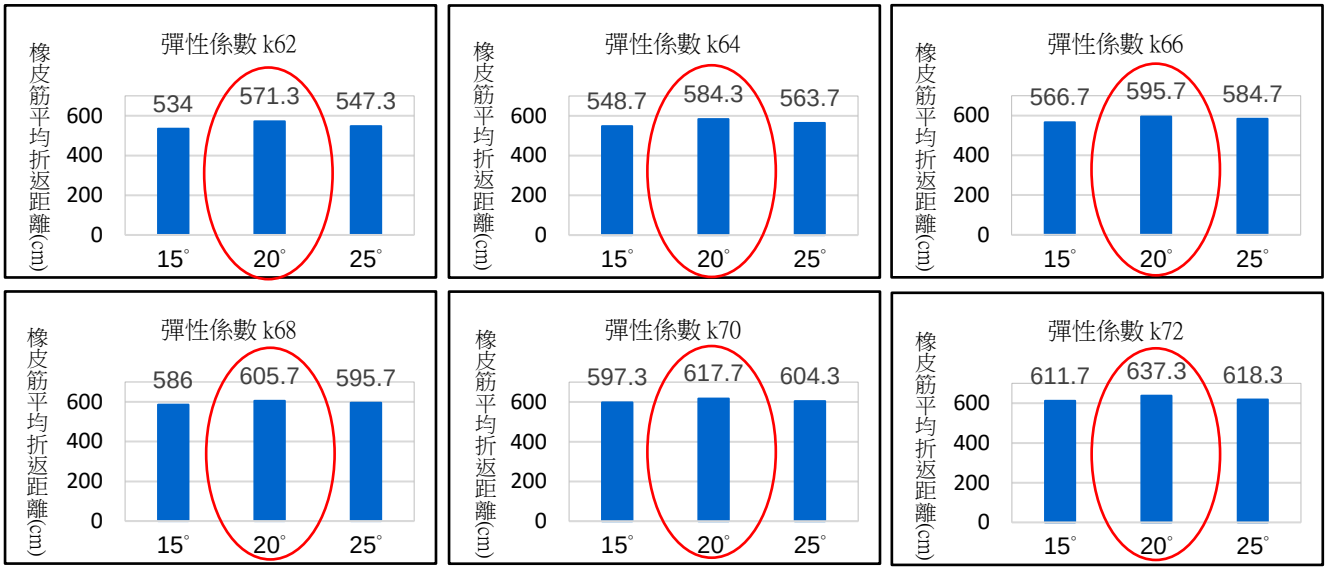
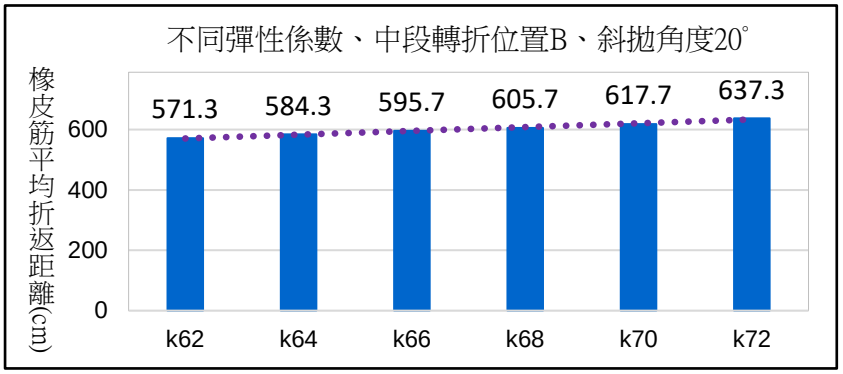


圖 6-5-1：不同彈性係數和不同斜拋角度逆向滾動距離　　（本圖由作者設計製作）

2.不同彈性係數在斜拋角度 20°的逆向滾回距離比較(單位：cm)



（本圖由作者設計製作）

圖 6-5-2：不同彈性係數和不同斜拋角度逆向滾動距離

實驗四討論：

1.橡皮筋尺寸 18 番，直徑 4.8cm，厚度 3mm，重量 0.60g，這種尺寸有很多的橡皮筋，都不太符合直徑 4.8cm 圓形校對模型，形狀都沒有很圓，但是因為拉伸彈力夠大，所以大部分都還是能夠順利往回滾動，而且都還蠻接近原來發射點，甚至超過原來發射點。



（本照片由作者拍攝）

圖 6-5-3：接近圓形但不圓

2.寬度 3mm 橡皮筋被不均勻拉伸 1：1.5，中段轉折在位置 B，斜拋發射角度 20˚，

(1)彈性係數 k62 平均滾回距離是 571.3cm

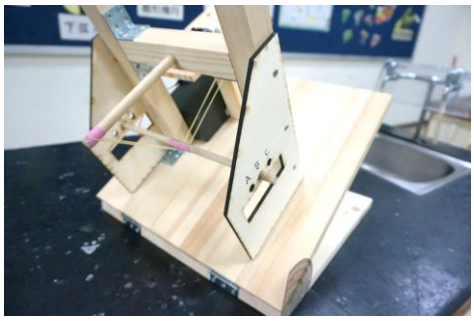
(2)彈性係數 k64 平均滾回距離是 584.3cm

(3)彈性係數 k66 平均滾回距離是 595.7cm

(4)彈性係數 k68 平均滾回距離是 605.7cm

(5)彈性係數 k70 平均滾回距離是 617.7cm

(6)彈性係數 k72 平均滾回距離是 637.3cm



（本照片由作者拍攝）

圖 6-5-4：k72 逆向滾動發射模式

3.測試後的數據可以讓我們知道寬度 3mm、彈性係數 k72 因為彈力以較好，所以橡皮筋逆向滾動效果也會比較好。

六、實驗五：比較不同尺寸橡皮筋的逆向滾動情形

橡皮筋尺寸是 16 番，直徑 3.4cm，寬度 1.5mm。利用靜態拉伸測量器和逆向滾動發射器來做實驗數據測試，不均勻(2：3)拉伸到 26cm 的長度，同一條橡皮筋我們一樣只測試 3 次，並取平均值到小數點第 1 位。

(一)直徑 3.4cm，規格 16 番，利用圓形校對模型來篩選比較圓的橡皮筋，而重量 0.30g 有 49 條，靜態拉伸測量橡皮筋的不同彈性係數(k47～k52)。

(二) 三種斜拋角度 15˚、20˚和 25˚，中段轉折 C 位置調整橡皮筋前段 13cm 和後段 13cm 的長度。

1.不同彈性係數和不同斜拋角度，中段轉折 C 測量折返點和滾回停止點距離。(單位：cm)

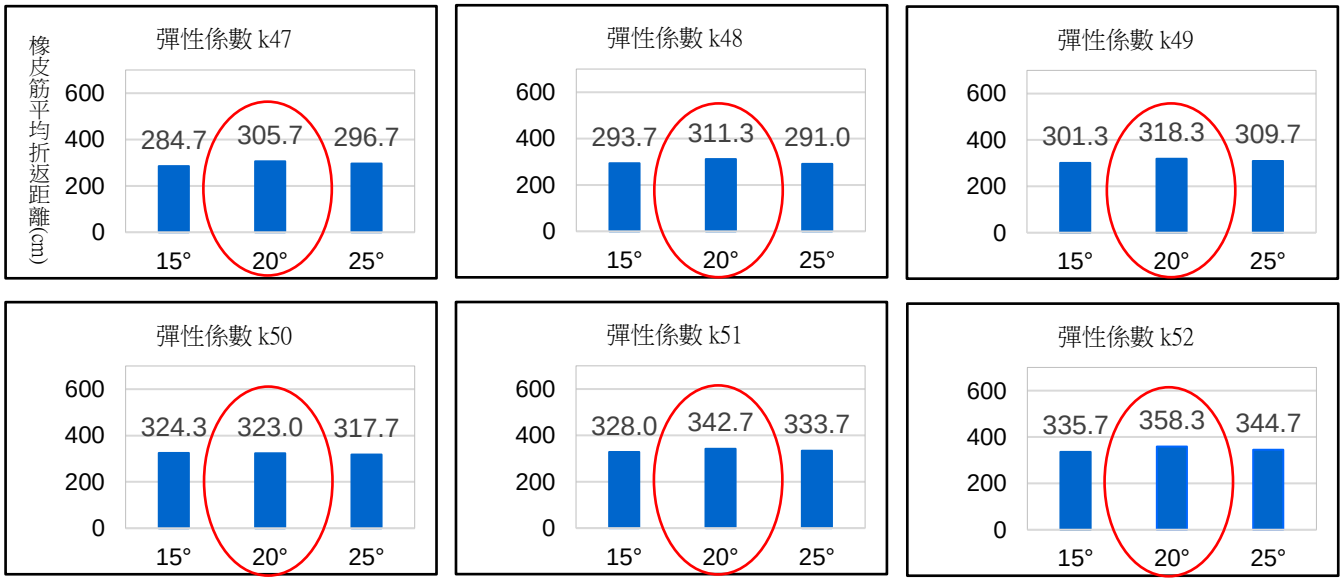


圖 6-6-1：不同彈性係數和不同斜拋角度逆向滾動距離

（本圖由作者設計製作）

2.不同彈性係數和斜拋角度 20°的滾回距離比較

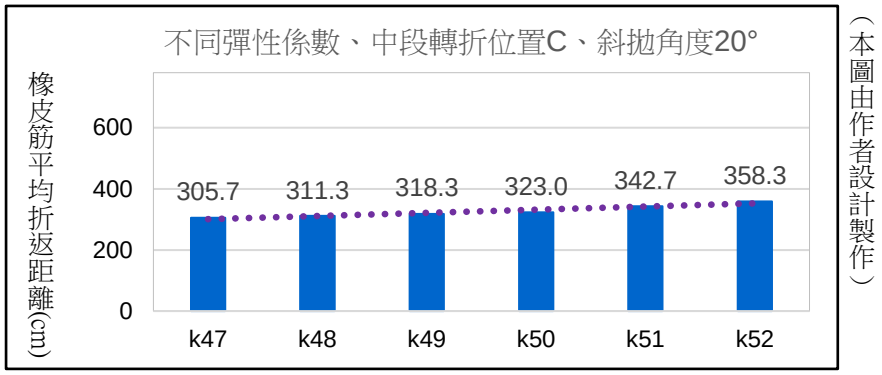


圖 6-6-2：不同彈性係數和不同斜拋角度逆向滾動距離

實驗五討論：

1.規格 16 番，直徑 3.4cm，重量 0.30g 橡皮筋，橡皮筋的尺寸小很多，所以我們調整了逆向滾動發射器的前端固定支架，而且中段轉折支架也調整到位置 C，這樣才有可能讓直徑 3.4cm 橡皮筋拉伸到 26cm，前段和後段受力平均各 13 公分。

2.不同彈性係數和不同斜拋發射角度的逆向滾動距離

(1)彈性係數 k47 平均滾回距離是 305.7cm

(2)彈性係數 k48 平均滾回距離是 311.3cm

(3)彈性係數 k49 平均滾回距離是 318.3cm

(4)彈性係數 k50 平均滾回距離是 323.0cm

(5)彈性係數 k51 平均滾回距離是 342.7cm

(6)彈性係數 k52 平均滾回距離是 358.3cm

3.滾動回來的距離不太理想，沒有 1 次數據是有滾動回到原發射點，可能是拉伸長度不適合這種尺寸的橡皮筋。

柒、研究結論

一、使用自製「逆向滾動發射器」讓橡皮筋順利滾回來的最佳條件組合：

1.直徑 4.8cm 接近圓形，重量 0.60g、寬度 3mm、彈性係數最好 k72 的橡皮筋。

2.橡皮筋要不均勻拉伸 1：1.5，讓它一鬆一緊，造成優化旋轉，減少空氣阻力。

3.中段轉折支架設定在位置 B，讓橡皮筋的前段和後段都是一樣長的 15cm。

4.用角度支撐架來調整斜拋發射角度 20°。

5.逆向滾動發射器的發射點設定距離地面 75 公分，這是依據全國四五年級男女生平均身高來制定。

6.紀錄到橡皮筋滾回距離最長的一次，折返點落在自製量尺位置 613cm ，滾回超過原來發射點 71cm，竟然滾動了 684cm，還滾到發射器後面呢！

二、橡皮筋逆向滾動的整個運動過程，可以分成以下三個階段來進行分析。

1.彈性變形儲能階段：橡皮筋被拉伸並扭轉至特定形變狀態，此時正儲存著彈力位能。當橡皮筋要恢復原本的彈性時，就會轉化為發射所需的動能，這些動能包括了平移和旋轉兩種形式。

2.空中逆向旋轉階段：橡皮筋發射後，在空中產生了兩種運動模式。

※平移運動：水平方向的直線運動

公式：Etrans $= \frac{1}{2} mv^2$ ，其中 m：橡皮筋質量，v：速度。

※旋轉運動：橡皮筋繞自身軸線逆時針旋轉

公式：Erot $= \frac{1}{2} I\omega^2$ ，其中 I = 轉動慣量，ω = 角速度。

3.落地逆向滾回階段：橡皮筋落地後和地面產生摩擦阻力，使平移動能逐漸耗損，但因為橡皮筋仍然保有旋轉動能，讓摩擦力轉化為逆向滾動的推進力，所以橡皮筋才可以滾回原始發射位置。

三、本研究需要大量橡皮筋做測試，所以為了實驗的公平性，我們設定三種方式來挑選實驗條件一致橡皮筋，盡量降低橡皮筋是不均勻物體的特性。

1.用電子磅秤分類 18 番，寬度 1.5mm 橡皮筋共 10 包，重量有 0.35g、0.40g 和 0.45g。

2.直徑 4.8cm 圓形校對模型，比對三種重量並篩選符合圓形的橡皮筋，因為比較接近圓形橡皮筋在地面上滾動會比較順利。

3.自製靜態拉伸測量器做橡皮筋彈性係數分類，發現橡皮筋彈性係數都不太一樣。以同重量的 0.45g 來說，最小彈性係數是 k38，最大卻有 k52，數據大小差別其實蠻大的，竟然相差到 140g，證明橡皮筋是一種不均勻的彈性體，透過 我們設定的篩選條件，盡量降低橡皮筋會影響測試結果變因。

4.因為之後要用優化旋轉發射器和逆向滾動發射器發射橡皮筋，橡皮筋會被不均勻拉伸到 30cm，這樣會超過它的彈性限度，拉伸到第 2 或第 3 次時，就會產生永久形變，簡單地說就是彈性疲乏變鬆了，相對的彈性係數也會變小，所以我們設定實驗規則，每一條橡皮筋被不均勻超限拉伸只能 1 次。之後都買相同品牌橡皮筋來支援實驗，依之前篩選方式選擇實驗條件一致橡皮筋，完成接續下來對橡皮筋運動實驗測試。

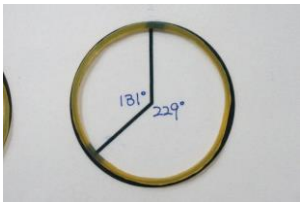
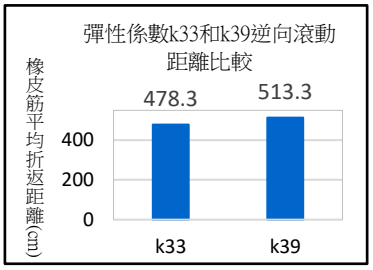
		
電子磅秤測重量	圓形校對模型	靜態拉伸彈性係數

圖 7-1：篩選橡皮筋的條件限制　（本項次照片由作者拍攝）

五、比較不同彈性係數橡皮筋逆向滾動發射出去的初速度，利用高速攝影紀錄兩種不同彈性係數橡皮筋 k33 和 k39 飛出的過程：計算一開始被發射出去時，在第 0.1 秒內和第 0.2 秒內的移動距離。再利用等加速度運動公式計算出兩種不同彈性係數橡皮筋的初速度，雖然兩種彈力都是相同尺寸和相同重量，但彈性係數卻不一樣，較大的 k39，初速度比較大，所以橡皮筋逆向滾回來的距離也會比較長。

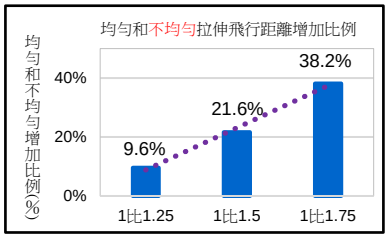


（本圖由作者設計製作）

參考 p.17，圖 6-3-2

※初速度比較：k39Vo＝2.0885 m/s，k33Vo＝1.96 m/s
，所以 k39 初速度 ＞ k33 初速度。

六、在觀察橡皮筋逆向滾動運動情形，我們發現橡皮筋要不均勻拉伸 1：1.75，它順利滾回的效果最好。可是如果是均勻拉伸 1：1 橡皮筋，在逆向飛出去後會直接落地，沒有什麼滾動就停止，所以橡皮筋拉伸方式會影響可不可以順利滾回。不均勻拉伸飛行有優化旋轉效果，橡皮筋會快速旋轉來維持它的角動量，以減少空氣阻力，所以飛得比較遠。但均勻拉伸的橡皮筋飛出後不會旋轉，相對空氣阻力就比較大，飛得就會比較近。因為橡皮筋有超限拉伸情形，造成彈性疲乏，所以每一條我們只測試 1 次，就要更換實驗條件一致的橡皮筋做下一個測試。



（本圖由作者設計製作）

參考 p.11，圖 6-2-1

七、觀察橡皮筋逆向滾動手勢，打造一台「逆向滾動發射器」，首先要設計三個位置的支點：前端固定支架、中段轉折支架和發射固定支架，完成發射器後測試橡皮筋逆向滾動情形，有時候會滾回來但距離不長，有時候還會直接落地不滾動，手勢和機器設計原理都一樣，但是逆向滾回就是失敗率超高，這問題困擾我們一個多禮拜，最後經過仔細觀察、研究和嘗試，終於發現原來是三根支架和橡皮筋接觸點的摩擦力不夠，導致在發射時，橡皮筋在三個接觸點上會跟著滑動，從不均勻拉伸趨向於均勻拉伸，橡皮筋彈性位能持續消退減弱，原本彈性位能只有部分轉換成動能。為了解決這個會滑動的問題，在三根支架黏橡膠防滑顆粒，增加橡皮筋和支架之間的摩擦力，橡皮筋在被發射出去前就不會滑動，就是這樣的重大發現，大大提高橡皮筋逆向滾回來的成功率。

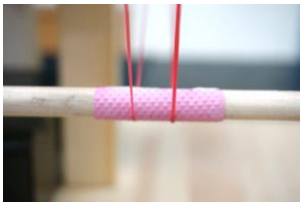
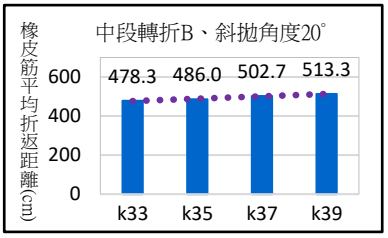
		
前端固定支架	中段轉折支架	發射固定支架

圖 7-2：三根支架黏防滑橡膠顆粒　　（本項次照片由作者拍攝）

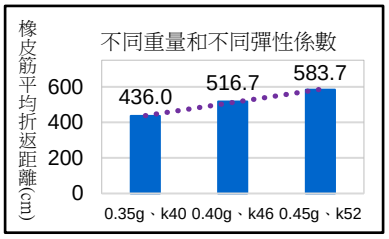
八、為了找到讓橡皮筋逆向滾回來的最佳組合，斜拋發射角度設計 5°、15°、20°、25°、35°、45°、55°。中段轉折支架位置有 A、B、C 三處，可以調整橡皮筋前後段長度。測試後結果，中段轉折在位置 B，斜拋發射角度 20°和彈性係數最好 k39 橡皮筋，會有最佳平均滾動距離 513.3cm，單次最長距離紀錄是 577cm。



（本圖由作者設計製作）

參考 p.17，圖 6-3-2

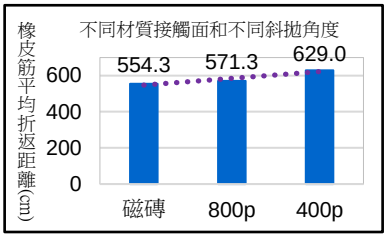
九、不同重量橡皮筋有不同彈性係數，歸類篩選測試結果，重量越重橡皮筋通常有比較好彈性係數，0.35g 彈性係數最好到 k40，0.40g 彈性係數最好到 k46，0.45g 彈性係數最好到 k52。所以橡皮筋越重越紮實，彈性係數也越好，橡皮筋逆向滾回距離紀錄是 583.7cm。



（本圖由作者設計製作）

參考 p.17，圖 6-3-3

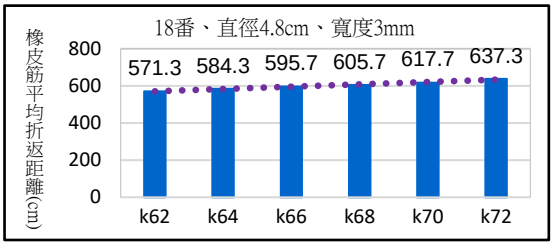
十、落地在不同摩擦係數的接觸面，接觸面摩擦力越大，和橡皮筋逆向旋轉動能相互作用的推進力也就越大，砂紙 400p 摩擦係數 μ 是 1.28，橡皮筋逆向平均滾回的距離是 629.0cm。



（本圖由作者設計製作）

參考 p.21，圖 6-4-1

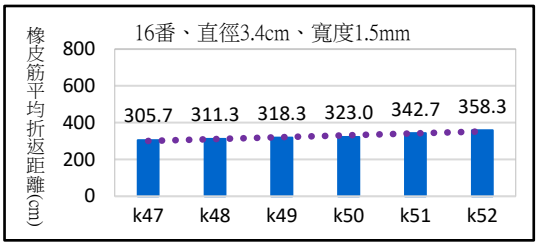
十一、逆向滾動發射器測試規格 18 番，寬度 3mm 橡皮筋，重量 0.60g，彈性係數最好的 k72，中段轉折支架設定位置 B，斜拋發射角度 20°，平均逆向滾動距離是 637.3cm。測試數據紀錄最好的一次，折返點在位置 613cm，滾回超過原來發射點 71cm，總共滾動了 684cm，不但讓橡皮筋順利滾回來，竟然還滾到原始發射點的後面呢！



（本圖由作者設計製作）

參考 p.22，圖 6-5-2

十二、發射器測試規格 16 番，直徑 3.4cm，比對圓形校對模型，寬度 1.5mm 橡皮筋，中段轉折在位置 C，斜拋發射角度 20°，最好的彈性係數是 k52，平均滾回距離只有 358.3cm，滾回來距離不太理想，沒有 1 次的測試是有滾回到原來發射點。



（本圖由作者設計製作）

參考 p.24，圖 6-6-2

捌、未來展望

本研究成功研發逆向滾動發射器，讓橡皮筋可以順利飛出去然後滾回來。但我們發現規格 18 番，寬度 3mm 會比寬度 1.5mm 橡皮筋滾動回來的距離多很多。除了本身的拉伸彈力差距很大之外，兩種橡皮筋在被壓揉變形後，回復原來圓形形狀能力也有差別，而寬度 3mm 回復成圓形會比較快且容易，但寬度 1.5mm 卻比較不容易回復成圓形，在高速攝影影片裡，看得出來寬度 1.5mm 橡皮筋的形狀扭曲變形，那麼會不會是因為在空中已經損耗太多能量去恢復它的圓形形狀，這些發現是我們可以再去研究探討的部分。

回復原來圓形有時不太容易	正上方：扭曲變形
	

圖 8-1：橡皮筋扭曲變形正上方示意　　（本項次影片由作者和第一指導教師拍攝）

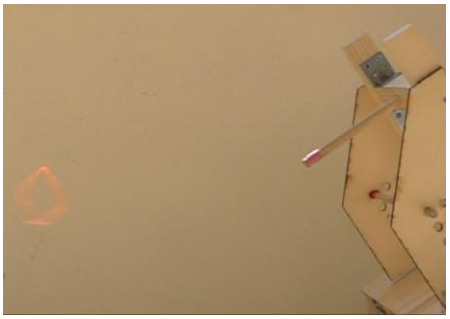
側面：扭曲變形	側面：扭曲變形
	

圖 8-2：橡皮筋扭曲變形側面示意　　（本項次影片由作者和第一指導教師拍攝）

玖、參考資料

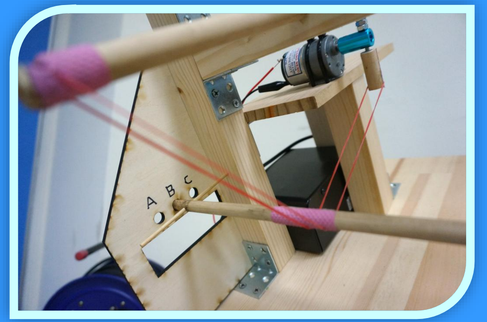
1. https://www.tumblr.com/szwaymi/60343786640
   吃完飯後的橡皮筋會倒退回來找主人
2. https://www.ps-taiwan.org/tw/modules/news/article.php?storyid=286
   2024 全國大專暨高中青年自然科學辯論競賽—競賽題目 4：射擊橡皮筋

【評語】080102

主題從日常生活中一個有趣的物理現象出發,進行了系統化和嚴謹的探討。研究中對於橡皮筋的物理參數和發射條件能夠精確的掌握，並且自製了能穩定模擬人手操作的「逆向滾動發射器」,這是一大亮點。不但顯示了其研究和製作能力，而且成功的讓橡皮筋有超乎預期的滾回效果,實屬不易。實驗涵蓋了多個變因,並致力於減少人為誤差。射出去的橡皮筋竟然會自己滾回來，使用「逆向滾動發射器」,橡皮筋以一定的斜拋角度發射，在空中高速旋轉,跟地面接觸後,旋轉動能與地面摩擦力相互作用，產生逆向滾動效果。橡皮筋是不太均勻的彈性體,所以電子磅秤進行重量篩選,搭配圓形校對模型和自製靜態拉伸測量器，嚴格控制橡皮筋的物理參數,降低其他變因的影響,找出最佳滾回條件組合。綜合上述發射條件，橡皮筋發射後不但能成功滾回,而且多次測試常常超過原始發射點,展現良好滾回效果和動量維持性！

作品海報

回心轉『易』





橡皮筋逆向滾動機制之探討

摘 要

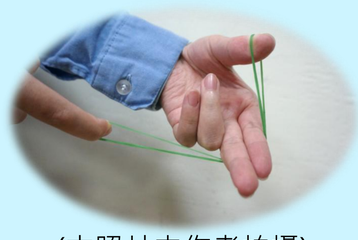
射出橡皮筋竟然會自己滾回來，使用**自製**「逆向滾動發射器」，橡皮筋以一定的斜拋角度發射，它會在空中高速旋轉，跟地面接觸後，旋轉動能與地面摩擦力相互作用，產生逆向滾動效果。橡皮筋是不太均勻的彈性體，所以電子磅秤進行重量篩選，搭配圓形校對模型和自製靜態拉伸測量器，嚴格控制橡皮筋的物理參數降低其他變因的影響，找出最佳滾回條件組合是：

1.直徑4.8cm近似圓形橡皮筋，重量0.60g，寬度3mm，用彈性係數最好的k72。
2.橡皮筋不均勻拉伸比例1：1.5，中段轉折支架設在正中間位置B。
3.發射點距離地面75cm，最佳斜拋發射角度20°。

綜合上述發射的條件，橡皮筋發射後不但能成功滾回，而且多次測試常常超過原始發射點，展現良好滾回效果和動量維持性！

壹、研究動機

咦！橡皮筋為什麼會自己滾回來？舅舅跟我說他可以讓橡皮筋乖乖回到他手上，接著手裡拿著一條橡皮筋，左手配合著右手，勾一勾、拉一拉、轉一轉，把橡皮筋擺成類似V字形狀，發射出去的橡皮筋竟然真的會自己滾回來。橡皮筋不是往前飛出去？為什麼落到地面後，卻會自動滾回來？橡皮筋的運動模式明明是往前呀！任何種類的橡皮筋都可以嗎？一定要用V字形的手勢嗎？要成功滾回來又需要哪些條件？對於橡皮筋可以自己滾回來的神奇現象，引發我們的研究興趣，在跟隊員們討論以後，如何讓橡皮筋可以自己滾回來就成為了這次研究的主題。



(本照片由作者拍攝)

貳、研究目的

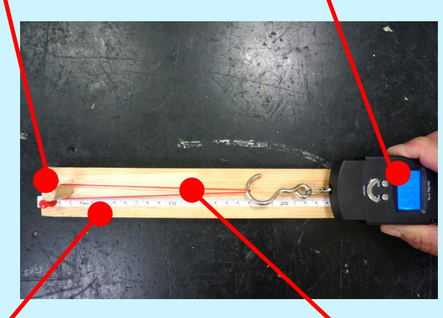
我們設計的「逆向滾動發射器」可以讓橡皮筋自動滾回來，但是如果想讓它有最長的滾回距離，那麼就要針對所有發射條件來做組合試驗。研究方向包括斜拋發射角度、中段轉折支架位置，不同重量、彈性係數、拉伸比例的橡皮筋等種種變因，一項一項來實驗測試，調整並找出發射器和橡皮筋逆向滾動距離的最佳條件組合。

【研究一】比較橡皮筋在均勻和不均勻拉伸的優化旋轉效果
【研究二】發射器斜拋角度、中段轉折構造和橡皮筋條件逆滾測試
【研究三】不同摩擦係數接觸面對橡皮筋逆向滾動的影響
【研究四】比較寬度不同橡皮筋的逆向滾動情形
【研究五】比較不同尺寸橡皮筋的逆向滾動情形

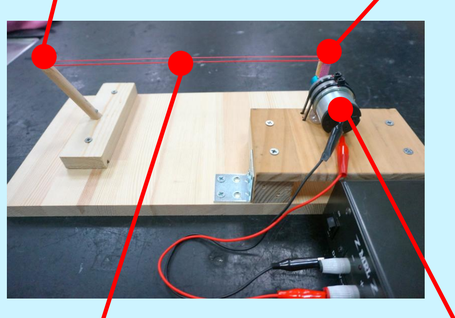
參、研究設備與工具

逆向滾動發射器	木條、木棍、木板、鱷魚夾電線、電源供應器 橡膠防滑顆粒、聯軸器、量角器、螺絲、丁雙 束帶、角鐵、強扭力直流減速馬達
優化旋轉發射器	木條、木棍、木板、角鐵、螺絲、聯軸器、橡膠防滑顆粒 電源供應器、鱷魚夾電線、束帶、強扭力直流減速馬達
靜態拉伸測量器	木條、木棍、量尺、圖釘、電子拉力計
其他工具與材料	電鋸、電鑽、熱熔槍、美工刀、瞬間膠、直尺
資訊相關軟體	Beam Studio(雷切圖形設計)、Excel、Word、威力導演

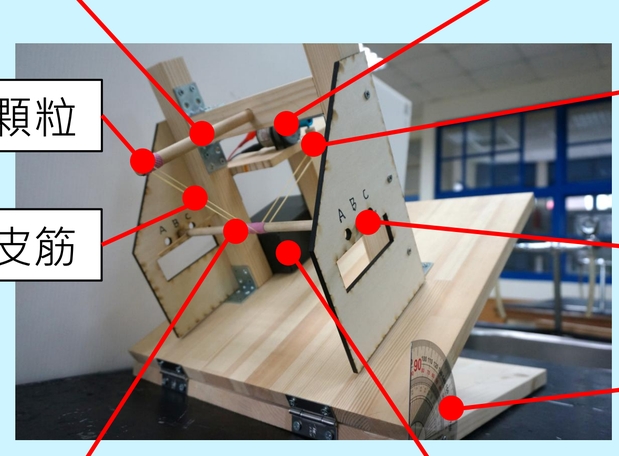
靜態拉伸測量器



優化旋轉發射器



逆向滾動發射器



(本項次照片由作者拍攝)

肆、研究流程架構圖

- 橡皮筋逆向滾動機制
  - 決定研究項目與方法
    - 逆向滾動發射器
      - 18番 直徑4.8cm 寬度1.5mm
        - 電子磅秤測重：0.35g、0.40g、0.45g
        - 圓形校對模型：直徑4.8cm、接近圓形
        - 彈性係數k：重量0.45g→k44、k46、k48、k50、k52
        - 中段轉折位置B，斜拋發射角度20°
        - → 平均逆向滾動距離 583.7公分
      - 優化旋轉發射器
        - 均勻拉伸1：1
        - 不均勻拉伸1：1.25、1：1.5、1：1.75
          - 一鬆一緊，讓橡皮筋兩段受力不平均
          - → 平均逆向滾動距離 583.7公分
      - 模仿逆向滾動手勢設計機器
        - 前端固定支架 中段轉折支架 發射固定支架
          - 支架和橡皮筋接觸位置黏橡膠防滑顆粒，增加摩擦力防止滑動而失去部分的彈性位能。
      - 設計斜拋發射角度
        - 斜拋發射角度： 5°、15°、20°、25° 35°、45°、55°
      - 設計中段轉折支架調整前段後段長度
        - 位置A：前段14cm，後段16cm
        - 位置B：前段15cm，後段15cm
        - 位置C：前段16cm，後段14cm
    - 不同摩擦係數接觸面
      - 磁磚地面 ：摩擦係數 μ=0.82
      - 800p砂紙：摩擦係數 μ=1.07
      - 400p砂紙：摩擦係數 μ=1.28
      - 接觸面摩擦係數越大，橡皮筋落地瞬間轉換成旋轉動能就越大。
    - 18番 直徑4.8cm 寬度3mm
      - 電子磅秤測重：0.50g、0.55g、0.60g
      - 圓形校對模型：直徑4.8cm、接近圓形
      - 彈性係數k：重量0.60g→k64、k66、k68、k70、k72
      - 拉伸比例：不均勻拉伸1：1.5
      - 中段轉折位置B，斜拋發射角度20°
      - → 平均逆向滾動距離 637.3公分
    - 16番 直徑3.4cm 寬度1.5mm
      - 電子磅秤測重：0.20g、0.25g、0.30g
      - 圓形校對模型：直徑3.4cm、接近圓形
      - 彈性係數k：重量0.30g→k48、k49、k50、k51、k52
      - 拉伸比例：不均勻拉伸1：1.5
      - 中段轉折位置C，斜拋發射角度20°
      - → 平均逆向滾動距離 358.3公分
  - 各項數據結果分析
  - 討論分析研究項目和數據
  - 修正假設重新設計實驗
- 最遠一次 684 公分 落地位置613，超過原發射點位置71。

(本圖由作者設計繪製)

※橡皮筋逆向滾動理論基礎

橡皮筋逆向滾動的整個運動過程，可以分成以下三個階段來進行分析。

1.彈性變形儲能階段：橡皮筋被拉伸並扭轉至特定形變狀態，此時正儲存著彈力位能。當橡皮筋要恢復原本的彈性時，就會轉化為發射所需的動能，而這些動能包含了平移和旋轉兩種形式。

2.空中逆向旋轉階段：橡皮筋發射後，在空中產生了兩種運動模式。

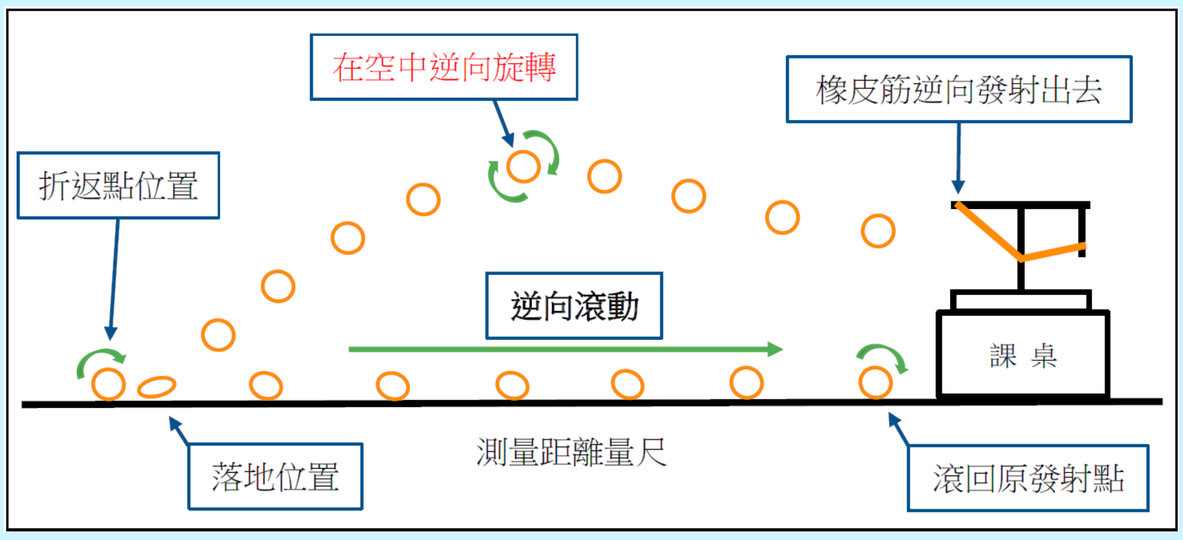
※平移運動：水平方向的直線運動

公式：E trans $=\frac{1}{2}mv^2$，其中 m：橡皮筋質量，v：速度。

※旋轉運動：橡皮筋繞自身軸線逆時針旋轉

公式：E rot $=\frac{1}{2}I\omega^2$，其中 I = 轉動慣量，ω = 角速度。

3.落地逆向滾回階段：橡皮筋落地後和地面產生摩擦阻力，使平移動能逐漸耗損，但橡皮筋仍然保有旋轉動能，讓摩擦力轉化為逆向滾動的推進力，所以橡皮筋滾回原始發射位置。



(本圖由作者設計繪製)

橡皮筋運動相關文獻探討			
屆數	作品名稱	內容摘要	與本研究相關性
56屆 國中物理	圈上的波妞 -有趣的滾圈圈	利用轉盤讓橡皮筋因摩擦力滾動起來，轉盤速度產生改變，會因摩擦力和重力影響，產生滾動後退或滾動前進的現象。	我們是利用拉長橡皮筋，使得彈力位能轉換成動能，中間有轉折，進而造成橡皮筋逆向滾動情形。
57屆 國小物理	奔跑吧！橡皮筋～	發射器在中間的支架，可以讓射出的橡皮筋落地後在地上往前滾動。	運動方向相反，我們的橡皮筋運動模式是往前飛出後會自動滾回來。
我們的作品	回心轉「易」 -橡皮筋逆向滾動機制之探討	本作品展現我們的獨特性和創意性，並研究出為什麼往前飛出的橡皮筋，落地後會自己滾回原來的發射點。而且對於橡皮筋要成功滾動回來的各種條件和變因，我們都有做深入的研究分析和修正討論，最後找到橡皮筋最佳逆向滾動條件。	

(本表格由作者設計)

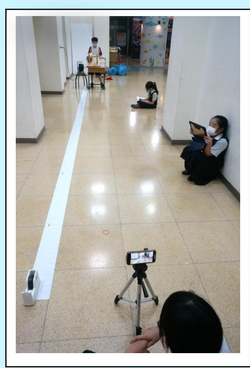
※橡皮筋逆向滾動初速度計算

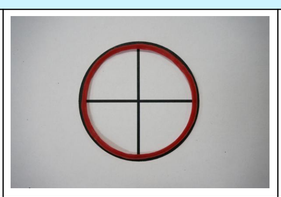
彈性係數	發射開始	第0.1秒內	第0.2秒內
k33 初速度 1.96 m/s			
k39 初速度 2.0885 m/s			

(本表格由作者和第一指導教師拍攝設計)

伍、研究過程、方法與討論

※逆向滾動發射器實驗相關控制條件限制






1.固定測試場地環境控制變因，在學校地下二樓關掉掉冷氣空調，跑道清掃乾淨拖把拖過，等待乾燥。

2.橡皮筋不是均勻彈性體，所以利用重量、圓形校對模型、彈性係數，來挑選相同實驗條件的橡皮筋。

(本項次照片由作者拍攝)

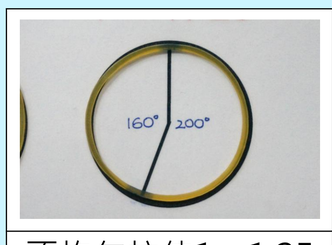
研究一：比較均勻拉伸和不均勻拉伸優化旋轉效果

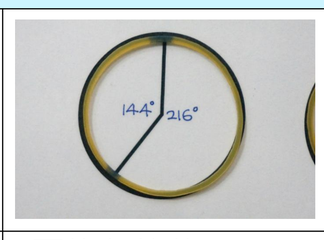
一、實驗方法

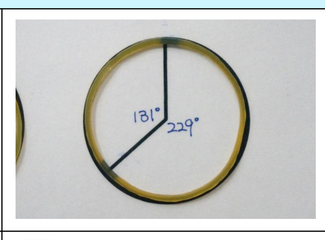
1.橡皮筋拉伸方式分為均勻拉伸1：1和不均勻拉伸1：1.25、1：1.5、1：1.75，我們想比較在均勻和不均勻拉伸時的飛行距離。

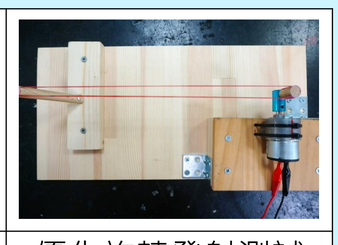
2.自然教室門窗緊閉並關掉風扇空調，讓橡皮筋在飛行時，不受到空氣氣流的影響。

3.自製優化旋轉發射器，測試相同實驗條件橡皮筋飛行距離3次，並取3次平均數值。









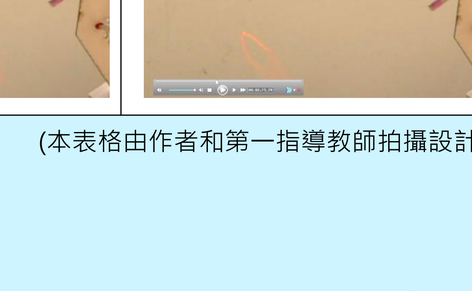
不均勻拉伸1：1.25	不均勻拉伸1：1.5	不均勻拉伸1：1.75	優化旋轉發射測試

(本項次照片由作者拍攝)

二、實驗分析與討論

觀察橡皮筋逆向滾動，發現橡皮筋要用不均勻拉伸才會順利滾回。但如果是均勻拉伸，雖然也會飛出，但落地後不太滾動就停下，所以橡皮筋拉伸方式是會影響逆向滾動的運動模式。

以均勻拉伸1：1當基準，比較不均勻拉伸飛行距離增加比例，不均勻拉伸1：1.25距離增加9.6%，1：1.5距離增加21.6%，1：1.75距離增加38.2%，測試後證明了不均勻拉伸差距越大，越可以讓橡皮筋旋轉起來，並維持著旋轉角動量，而且這樣的方式受空氣阻力影響比較小，那麼橡皮筋就會飛得比較遠。



（本圖表由作者製作）

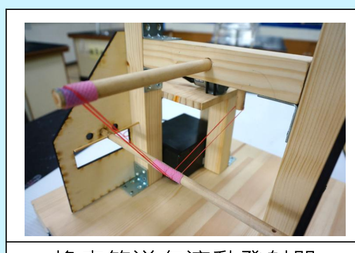
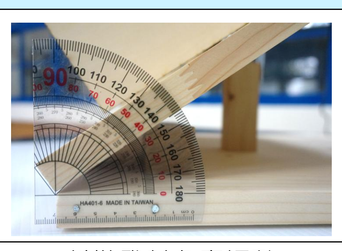
研究二：發射器斜拋角度、中段轉折構造和橡皮筋條件的逆向滾動測試

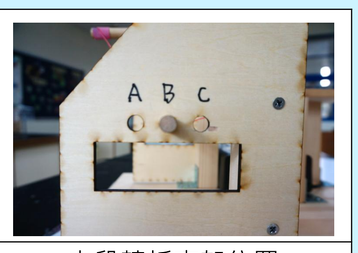
一、實驗方法

1.模仿用手讓橡皮筋逆向滾動的姿勢，設計打造一台逆向滾動發射器。

2.用角度支撐架來調整不同斜拋發射角度。

3.使用Beam Studio軟體設計中段轉折支架圖，雷射切割機精準定位裁切木片，中段轉折支架可以調整橡皮筋前後段的長度。



橡皮筋逆向滾動發射器	斜拋發射角度調整	中段轉折支架位置

(本項次照片由作者拍攝)

二、實驗分析與討論

1.橡皮筋逆向滾動發射是由後段帶動前段往前飛出，被拉長儲存彈力位能轉換成旋轉動能，在空中不停高速旋轉，落地後跟地面產生摩擦阻力，再藉逆向旋轉動能，讓橡皮筋可以自己滾回原來發射點。

2.角度支撐架調整不同斜拋發射角度，測試斜拋角度15°、20°、25°、35°、45°，橡皮筋才會逆向滾動，但不同斜拋角度滾動回來的距離還是會有差別。

3.在此次實驗使用重量0.40g，彈性係數k33、k35、k37、k39橡皮筋在不同斜拋角度發射，最好的彈性係數k39搭配斜拋角度20°，會有最長逆向滾動距離。彈性係數k33、k35、k37、k39，平均滾回距離399.3cm、411.7cm、415.3cm、436.7cm、。

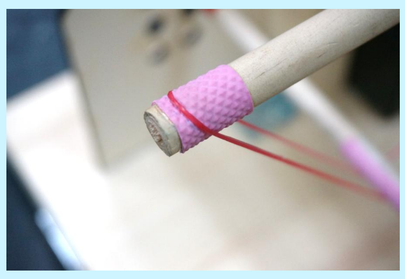
4.用逆向滾動發射器測試，斜拋角度20°，彈性係數k39，中段位置A、位置B、位置C，滾回距離436.7cm、513.3cm、449.3cm。如果在中段轉折位置B，逆向滾動的距離也就會越長。

5.不同重量橡皮筋會有不同彈性係數，中段轉折設在位置B。重量0.35g彈性係數k40橡皮筋平均滾回距離436.0cm。重量0.40g，彈性係數k46橡皮筋平均滾回距離516.7cm。重量0.45g，彈性係數k52橡皮筋平均滾回距離583.7cm。重量越重橡皮筋，彈性係數越好，逆向滾動的距離就越長。

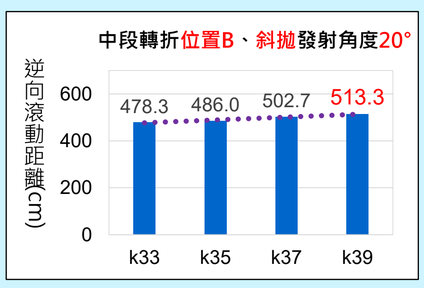
6.斜拋角度55°，橡皮筋逆向發射，雖然會有最遠飛行距離728.7cm，但大多直接落地不滾動，有一些情形滾回一點點就停下。斜拋角度在5°，橡皮筋直接撞擊地面，旋轉動能消耗，只往前滾動一小段距離。

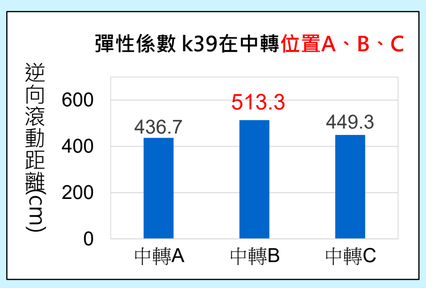
為什麼橡皮筋不會順利滾回來？

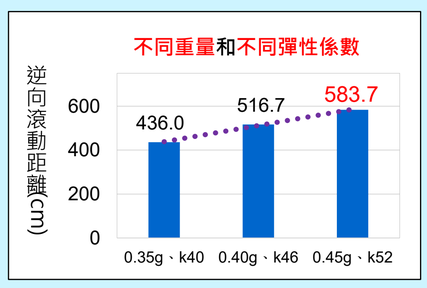
逆向滾動發射器完成後，橡皮筋有時會滾回來，有時卻直接落地不滾動，不能順利滾回的問題困擾我們很久，最後發現原來是橡皮筋在三個接觸點的摩擦力不夠，所以橡皮筋被發射出去前，會因滑動而失去部分彈性位能，所以在三個接觸點上黏防滑顆粒來增加摩擦力，因為這樣的發現與調整，大大提高了橡皮筋滾回來成功率。



(本照片由作者拍攝)







（本項次圖表由作者製作）

研究三：摩擦係數接觸面對逆向滾動影響

一、實驗方法

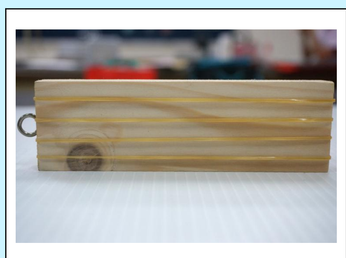
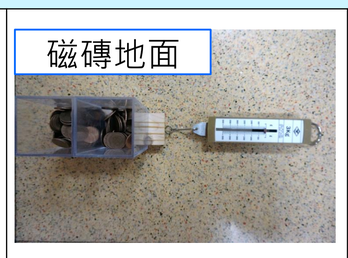
1.把橡皮筋套在載重物木條，讓橡皮筋可以和受測接觸面直接碰觸。

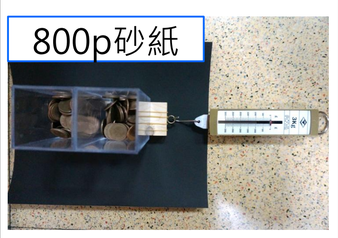
2.整組重物用容器裝壹圓硬幣，總重1000公克。

3.彈簧秤拉動1000公克重物，測量在三種不同接觸面的動摩擦係數μ。

4. 動摩擦力係數μ = $\frac{f(\text{動摩擦力})}{N(\text{正向力})}$，正向力(N) = 1000公克 = 9.8牛頓。

磁磚地面μ = 0.82、800p砂紙μ =1.07、400p砂紙μ =1.28





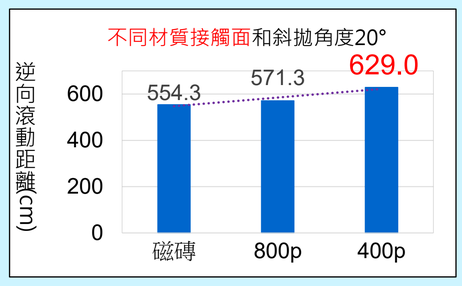
載重物木條套橡皮筋	摩擦係數μ：0.82	摩擦係數μ：1.07	摩擦係數μ：1.28

(本項次照片由作者拍攝)

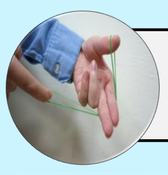
二、實驗分析與討論

1.磁磚地面摩擦係數μ = 0.82，橡皮筋逆向滾回距離554.3cm。砂紙800p摩擦係數μ =1.07，橡皮筋逆向滾回距離571.3cm。砂紙400p摩擦係數μ =1.28，橡皮筋逆向滾回距離629.0cm。

2.落地接觸面的摩擦力越大，和橡皮筋逆向旋轉動能相互作用的推進力也就更大，橡皮筋逆向滾動回來的距離也就比較長。



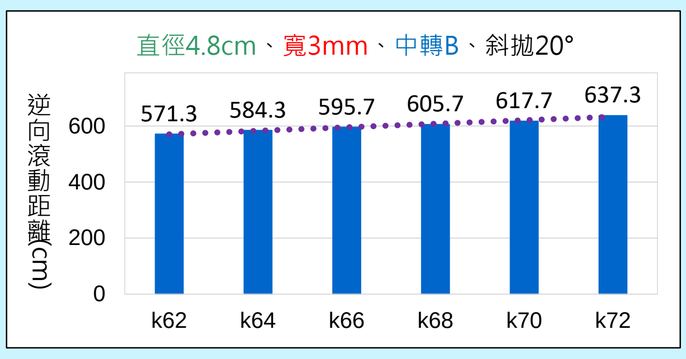
（本圖表由作者製作）



研究四：比較寬度不同橡皮筋逆向滾動

一、實驗方法

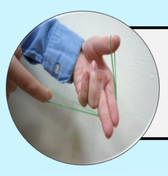
1.直徑4.8cm，但寬度卻是3mm，比較寬也比較重的橡皮筋。
2.利用靜態拉伸測量器和逆向滾動發射器來做實驗數據測試，不均勻拉伸1：1.5到30公分長度。
3.自然教室門窗緊閉並關掉風扇空調，讓橡皮筋在飛行時，不受到空氣氣流的影響。
4.測試相同實驗條件橡皮筋飛行距離3次，並取3次平均數值。



二、實驗分析與討論

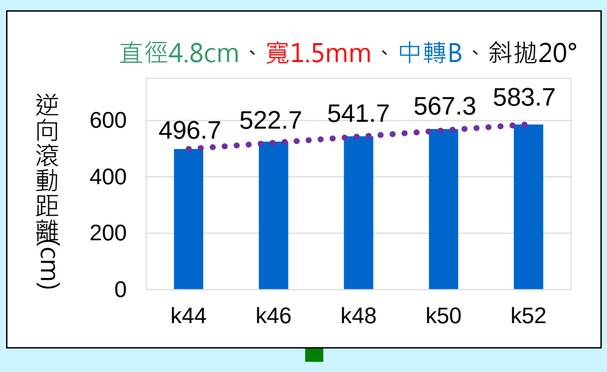
1.直徑4.8cm，寬度3mm，重量0.60g，這種尺寸有很多的橡皮筋，都不太符合圓形校對模型，形狀沒有很圓，但是因為拉伸彈力夠大，所以大部分還是能夠順利往回滾動，而且還蠻接近原來發射點，甚至超過原來發射點。
2.寬度3mm橡皮筋被不均勻拉伸1：1.5，中段轉折位置B，斜拋發射角度20°。
3.彈性係數k62、k64、k66、k68、k70、 k72 ，平均滾回距離是571.3、584.3、595.7、605.7、617.7、637.3cm。
4.測試後數據知道寬度3mm、彈性係數k72因為彈力比較好，所以橡皮筋會有最好的逆向滾動效果。

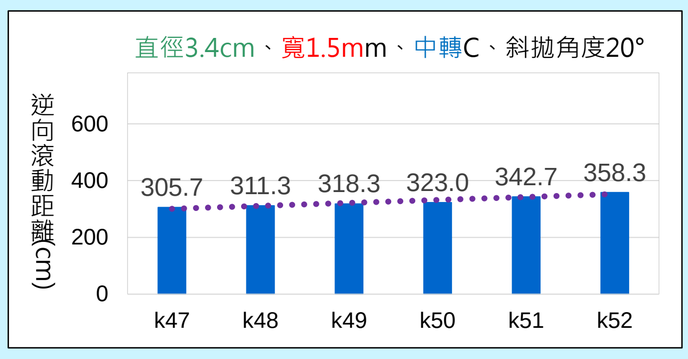
研究五：比較不同尺寸橡皮筋逆向滾動



一、實驗方法

1.直徑3.4cm，寬度是1.4mm，比較小也比較輕的橡皮筋。
2.利用靜態拉伸測量器和逆向滾動發射器來做實驗數據測試，不均勻拉伸1：1.5到26公分長度。
3.自然教室門窗緊閉並關掉風扇空調，讓橡皮筋在飛行時，不受到空氣氣流的影響。
4.測試相同實驗條件橡皮筋飛行距離3次，並取3次平均數值。

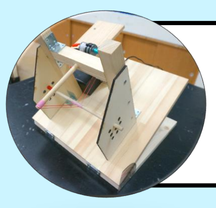




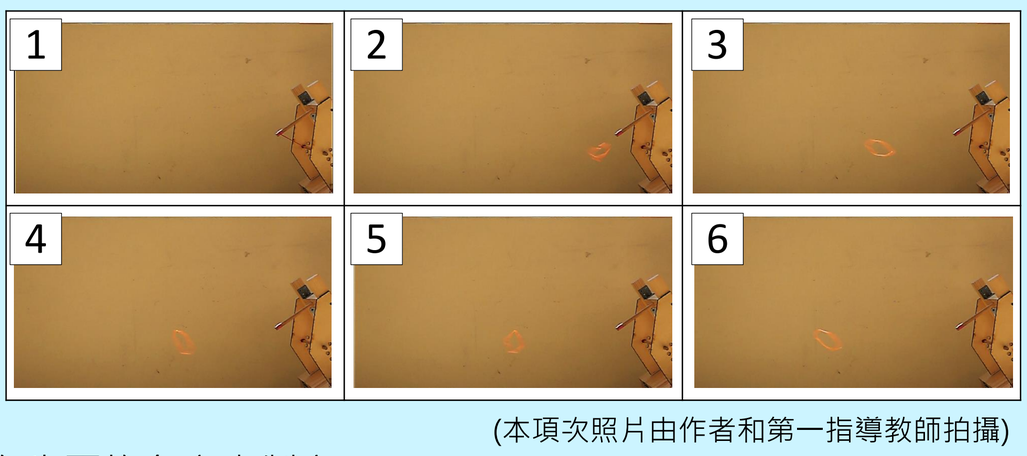
（本項次圖表由作者製作）

二、實驗分析與討論

1.直徑3.4cm，寬度1.5mm，重量0.30g橡皮筋，橡皮筋尺寸小很多，所以我們調整逆向滾動發射器的前端固定支架，而且中段轉折支架也調整到位置C，這樣才有可能讓直徑3.4cm橡皮筋拉伸到26cm，讓前段和後段受力平均各13公分。
2.彈性係數k47、k48、k49、k50、k51、 k52 ，平均滾回距離是305.7、311.3、318.3、323.0、342.7、358.3cm。
3.滾動回來距離不太理想，沒有1次數據是有滾動回到原發射點，可能是拉伸長度不適合這種尺寸的橡皮筋。



陸、研究結論與分析



(本項次照片由作者和第一指導教師拍攝)

一、使用自製「逆向滾動發射器」讓橡皮筋順利滾回來的最佳條件組合：
1.直徑4.8cm接近圓形，重量0.60g、寬度3mm、彈性係數最好k72橡皮筋。
2.橡皮筋不均勻拉伸1：1.5，一鬆一緊，造成優化旋轉，減少空氣阻力。
3.中段轉折支架設定在位置B，讓橡皮筋的前段和後段都是一樣長的15cm。
4.用角度支撐架來調整斜拋發射角度20°。
5.逆向滾動發射器的發射點設定距離地面75公分，這是依據全國四五年級男女生平均身高來制定。
6.紀錄到滾回距離最長一次，折返點落在自製量尺位置613cm ，滾回超過原來發射點71cm，竟然滾動了684cm，還滾到發射器後面！

二、橡皮筋逆向滾動的整個運動過程，可以分成以下三個階段來進行分析。
1.彈性變形儲能階段：橡皮筋被拉伸並扭轉至特定形變狀態，此時正儲存著彈力位能。當橡皮筋要恢復原本的彈性時，就會轉化為發射所需的動能，這些動能包括了平移和旋轉兩種形式。
2.空中逆向旋轉階段：橡皮筋發射後，在空中產生了兩種運動模式。
※平移運動：水平方向的直線運動
公式：$E_{trans} = \frac{1}{2}mv^2$ ，其中 m：橡皮筋質量，v：速度。
※旋轉運動：橡皮筋繞自身軸線逆時針旋轉
公式：$E_{rot} = \frac{1}{2}I\omega^2$ ，其中 I = 轉動慣量，ω = 角速度。
3.落地逆向滾回階段：橡皮筋落地後和地面產生摩擦阻力，使平移動能逐漸耗損，但因為橡皮筋仍然保有旋轉動能，讓摩擦力轉化為逆向滾動的推進力，所以橡皮筋才可以滾回原始發射位置。

三、本研究需要大量橡皮筋做測試，為了實驗公平性，我們設定三種方式來挑選實驗條件一致橡皮筋，盡量降低橡皮筋是不均勻物體特性。
1.用電子磅秤測重量分類18番，寬度1.5mm橡皮筋共10包，重量有0.35g、0.40g和0.45g。
2.直徑4.8cm圓形校對模型，比對三種重量並篩選符合圓形的橡皮筋，因為比較接近圓形橡皮筋在地面上滾動會比較順利。
3.自製靜態拉伸測量器做橡皮筋彈性係數分類，發現彈性係數都不太一樣。以同重量0.45g來說，最小彈性係數是k38，最大卻有k52，數據大小差別其實蠻大，竟然相差到140g，證明橡皮筋不是均勻彈性體，透過設定篩選條件，盡量降低橡皮筋影響測試結果變因。
4.之後用優化旋轉發射器和逆向滾動發射器發射，橡皮筋會被不均勻拉伸到30cm，超過它的彈性限度，產生永久形變，簡單地說就是彈性疲乏變鬆，相對彈性係數也會變小，所以設定實驗規則，每一條橡皮筋只能測試1次。多買相同品牌橡皮筋來支援實驗，依之前篩選方式選擇實驗條件一致橡皮筋，完成接續下來對橡皮筋運動實驗測試。

四、比較不同彈性係數橡皮筋逆向滾動發射出去初速度，利用高速攝影紀錄兩種不同彈性係數橡皮筋k33和k39飛出過程：計算一開始被發射出去時，在第0.1秒內和第0.2秒內移動距離。再利用等加速度運動公式計算出兩種不同彈性係數橡皮筋的初速度，雖然兩種彈力都是相同尺寸和相同重量，但彈性係數卻不一樣，較大的k39，初速度比較大，所以橡皮筋逆向滾回來的距離也會比較長。
※初速度比較：k39Vo = 2.0885 m/s，k33Vo = 1.96 m/s，所以k39初速度 > k33初速度。

五、觀察橡皮筋逆向滾動運動情形，發現橡皮筋要不均勻拉伸1：1.75，它順利滾回效果最好。如果是均勻拉伸1：1橡皮筋，在逆向飛出後會直接落地，沒有什麼滾動就停止，所以橡皮筋拉伸方式會影響可不可以順利滾回。不均勻拉伸飛行有優化旋轉效果，橡皮筋會快速旋轉來維持它的角動量，減少空氣阻力，所以飛得比較遠。但均勻拉伸橡皮筋飛出後不會旋轉，相對空氣阻力就比較大，飛得就會比較近。因為橡皮筋有超限拉伸情形，造成彈性疲乏，所以每一條我們只測試1次，就要更換實驗條件一致的橡皮筋做下一個測試。

六、觀察橡皮筋逆向滾動手勢，打造一台逆向滾動發射器，首先要設計三個位置支點：前端固定支架、中段轉折支架和發射固定支架，完成發射器後測試橡皮筋逆向滾動，有時會滾回但距離不長，有時會直接落地不滾動，手勢和機器設計原理都一樣，但是逆向滾回就是失敗率超高，這問題困擾我們一個多禮拜，經過仔細觀察、研究和嘗試，終於發現原來是三根支架和橡皮筋接觸點摩擦力不夠，導致發射時，橡皮筋在三個接觸點上會跟著滑動，從不均勻拉伸趨近於均勻拉伸，彈性位能持續消退減弱，原本彈性位能只有部分轉換成旋轉動能。找到解決這個會滑動問題，在三根支架黏橡膠防滑顆粒，增加兩者之間的摩擦力，橡皮筋在被發射出去前就不會滑動，因為這樣的重大發現，大大提高橡皮筋逆向滾回來的成功率。

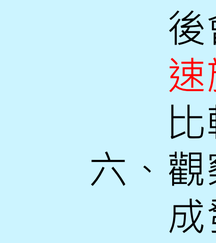
七、為了找到讓橡皮筋逆向滾回最佳組合，斜拋角度設計5°、15°、20°、25°、35°、45°、55°。中段轉折支架位置A、B、C三處，調整橡皮筋前後段長度。測試結果中段轉折位置B，斜拋角度20°和彈性係數最好k39橡皮筋，有最佳平均滾動距離513.3cm。

八、不同重量橡皮筋有不同彈性係數，歸類測試結果，重量越重橡皮筋通常有比較好彈性係數，0.35g彈性係數最好到k40，0.40g彈性係數最好到k46，0.45g彈性係數最好到k52。所以橡皮筋越重越紮實，彈性係數也越好，橡皮筋逆向滾回距離紀錄是583.7cm。

九、落地在不同摩擦係數的接觸面，接觸面摩擦力越大，和橡皮筋逆向旋轉動能相互作用的推進力也就越大，砂紙400p摩擦係數μ是1.28，橡皮筋逆向平均滾回的距離是629.0cm。

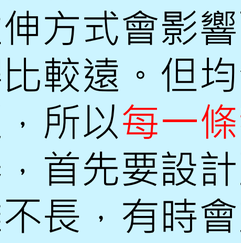
十、逆向滾動發射器測試規格18番，寬度3mm橡皮筋，重量0.60g，彈性係數最好k72，中段轉折支架設定位置B，斜拋發射角度20°，平均逆向滾動距離是637.3cm。測試數據紀錄最好一次，折返點在位置613cm，滾回超過原來發射點71cm，總共滾動684cm，不但讓橡皮筋順利滾回來，竟然還滾到原始發射點的後面呢！

十一、發射器測試規格16番，直徑3.4cm，比對圓形校對模型，寬度1.5mm橡皮筋，中段轉折在位置C，斜拋發射角度20°，最好的彈性係數是k52，平均滾回距離只有358.3cm，滾回來距離不太理想，沒有1次的測試是有滾回到原來發射點。



柒、未來展望

本研究成功研發逆向滾動發射器，讓橡皮筋可以順利飛出去然後滾回來。但我們發現規格18番，寬度3mm會比寬度1.5mm橡皮筋滾動回來的距離多很多。除了本身的拉伸彈力差距很大之外，兩種橡皮筋在被壓揉變形後，回復原來圓形形狀能力也有差別，而寬度3mm回復成圓形會比較快且容易，但寬度1.5mm卻比較不容易回復成圓形，在高速攝影影片裡，看得出寬度1.5mm橡皮筋形狀扭曲變形，那麼會不會是因為在空中已經損耗太多能量，去恢復它的圓形形狀，這些發現是我們可以再去研究探討的部分。



捌、參考資料

1. 吃完飯後的橡皮筋會倒退回來找主人
2. 2024全國大專暨高中青年自然科學辯論競賽¯競賽題目4：射擊橡皮筋
3. Chatgpt軟體：聊天生成預訓練轉換器，是OpenAI是開發的人工智慧聊天機機器人程式。