

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 生活與應用科學科(一)

第三名

032817

「捲」動未來-摺紙仿小卷機器人之探究

學校名稱： 基隆市立武崙國民中學

作者：	指導老師：
國二 林承緯	林柏宗
國二 游芷毓	葉玉君

關鍵詞： 仿小卷機器人、摺紙、機器人

摘要

我們觀察到小卷在水中移動時，若受到驚嚇或刺激，會以噴射方式迅速前進。基於此特性，我們設計並製作了仿小卷動力機器人，模擬其水中移動行為。寶特瓶小卷模型皆採用水力作為動力來源，並以近似小卷的材質與比例製作，使其運動方式更貼近真實生物。完成初步實驗後，我們嘗試讓模型能像真實小卷般自行移動，因此運用校內的 3D 列印機設計零件。並且模仿小卷的動力，做出外殼，使用棘輪裝置收縮彈出產生速度，使仿生小卷能達到推進的效果。

壹、前言

一、研究動機

住在擁有豐富海洋資源的基隆，我們從小便與海洋相伴，但平常不論在家中或在學校，能接觸到海洋生物的知識卻是少之又少。而當我們得知需要選擇科展的題材時，就決定了有關於海洋生物的題目。在此之中，我們發現關於小卷的運動方式、外觀等的研究實在是少之又少，我們的好奇心就此開始萌芽。聽聞歷屆學長姐也曾對此展開一系列的研究，卻因時間的限制，而沒辦法得出一個完美的結論，於是我們便繼承了他們的研究精神，全力以赴的面對這次的研究。我們先是使用學長姐的研究過程嘗試以寶特瓶製作出小卷模型，再針對小卷實際運動方式、材質及穩定性作改良。接著，我們便開始挑戰製作全自動的小卷模型機器人，參考摺紙軟體上的資料，再配合校園裡的 3D 列印機，設計出屬於我們獨特的小卷。

二、研究目的

- (一)、透過網路上影像了解小卷的運動方式
- (二)、詳讀歷屆科展報告並參考其研究
- (三)、自製仿小卷動力模型
- (四)、使用自製彈簧搭配馬達再使用至小卷模型上

三、文獻回顧

- (一)、「卷」來「卷」去—小卷的運動：探討小卷構造在水中的影響，包括其中鰭的比例、腕的比例、鰭的形狀以及發射裝置。最終實驗後得知鰭在與體長比 1:4 時，從各項數值得知為能行徑最遠且頭部軌跡最高的；形狀的部分，最高的為半圓形及正三角形，而形狀對距離並無太大影響；觸腕長在此只提及並不穩定，並沒有明確提到他的比例；發射方式的部分，最終的發射方式決定為彈力發射。
- (二)、神鰭魔力渦最行：自製仿生機械魚後，利用自製的推力檢測儀器去測量魚在水中移動時的推力，並且也考量到在受渦流阻力時的變數。由這些實驗去證明魚的尾鰭擺動速度能使整體加速的真相。在實驗中，我們參考了報告中製作仿生魚的尾鰭構思，並設計出可持續移動的小卷臂腕。

(三)、受摺紙啟發的機器人透過噴射推進游泳：利用馬達搭配摺紙外殼，並製作能夠手動釋放水力噴射的可折式外殼鯊魚仿生機器人，且觀察其移動軌跡。在實驗中，我們受到此研究的啟發，將外殼使用摺紙的部分納入實驗，研究適合的摺紙比例與方法。

(四)、摺紙是一種三維結構，由二維源通過遵循一定模式的一系列折疊而構建。剪紙相當於切割折疊紙以產生所需結構的過程。模組化摺紙基於模組的組裝，可以是摺紙或剪紙，透過黏合或簡單連接每個模組來產生。摺紙是基於由摺痕、頂點面定義的折疊圖案構建的。展示了一個簡單的折疊圖案，顯示了折疊處的摺痕；確定摺痕限制的頂點；以及由一組摺痕定義的面板或刻面。從科學和技術角度來看，棋盤格摺紙結構通常具有令人感興趣的機械特性，摺紙鑲嵌可以創造出由稱為單3位單元的週期性圖案所建構的複雜設計。每個相應的單位單元都被突出顯示，並且代表能夠定義重複以創建整個結構的週期性模式的最小元素。單位單元不僅基於在整個摺紙鑲嵌中重複的可識別形式，而且還包含有關折疊過程的可識別週期性行為的表示。

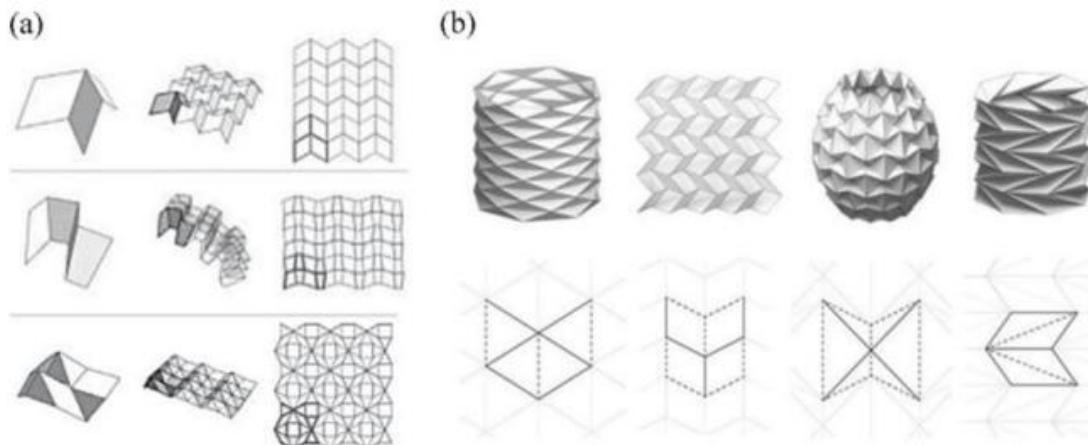


圖 1-1 摺紙的不同型態圖(出自 An overview of the mechanical description of origami-inspired systems and structures)

一、研究架構圖

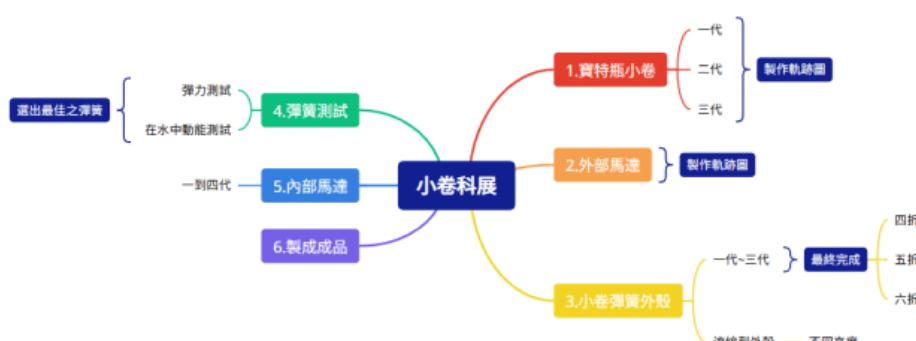


圖 1-2 實驗架構圖

二、小卷身體構造和移動方式

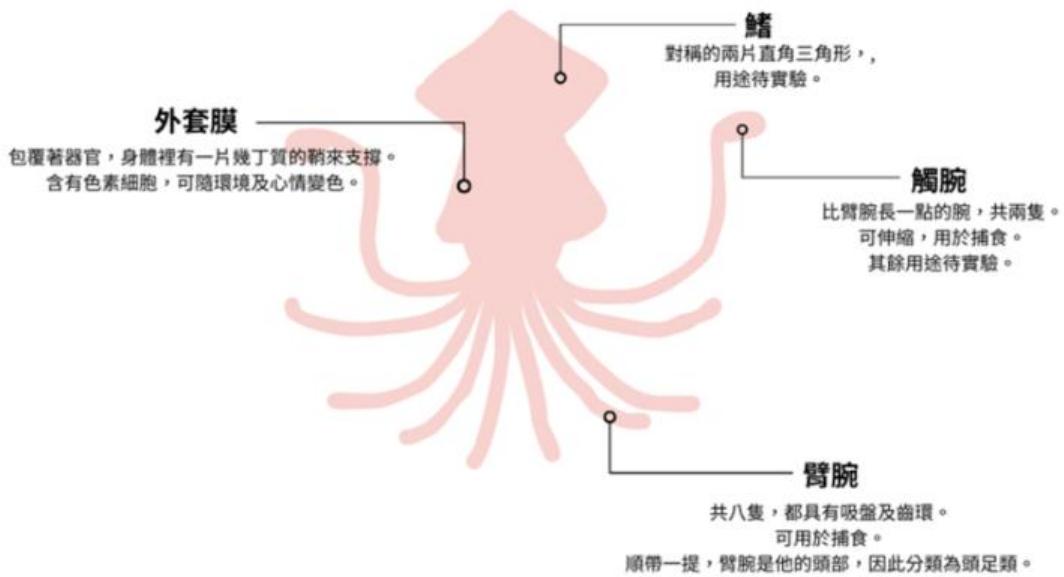


圖 1-3 小卷身體部位及用途圖

從中華民國農訓協會 385 期-【封面故事】基隆小卷夏日謳歌，整理過後可了解小卷的三種移動方式：

1. 吸水：小捲會通過外套膜中的肌肉收縮，將水吸入外套腔內。
2. 噴射：當外套膜的肌肉再次快速收縮時，小捲會將外套腔中的水高速噴出，從而產生反作用力，推動自己向前移動。這種噴射推進能讓它們迅速逃離掠食者或追逐獵物。
3. 使用鰭進行調整：除了噴射推進外，小捲的側面還有鰭，可以用來協助在水中進行平衡和改變方向。

貳、研究設備及器材

一、實驗器材:3D 列印機、保鮮膜、壓克力黏著膠、瓦楞板、水箱、寶特瓶、矽膠手套、塑膠水管、壓克力管、壓克力板、防水膠帶、塑膠片、馬達、電池、電池盒、氣球、塑膠袋、壓克力切片專用刀、切割機、固化燈、木板、積木。

二、實驗數據分析程式:Tracker、Tinkercad、Chi tubox

參、研究過程或方法

一、小卷模型製作

參考了「卷」來「卷」去一小卷的運動這篇科展，我們參考其的寶特瓶小卷模型並加以改良並實作。

(一)發射台製作

由於參考之寶特瓶小卷模型，需要以水力發射的方式前進，故須製作發射台為了穩定小卷的發射方向及移動軌跡，而我們先以瓦

楞板製作了第一代發射台來固定模型的發射位置，但由於瓦楞板過於脆弱，容易彎折及斷裂，因此第二代就以第一代的結構為原型，再使用了較堅固的壓克力材質重新黏貼，且固定水管的位置使得操作更加方便，就有了現在所使用的發射台。

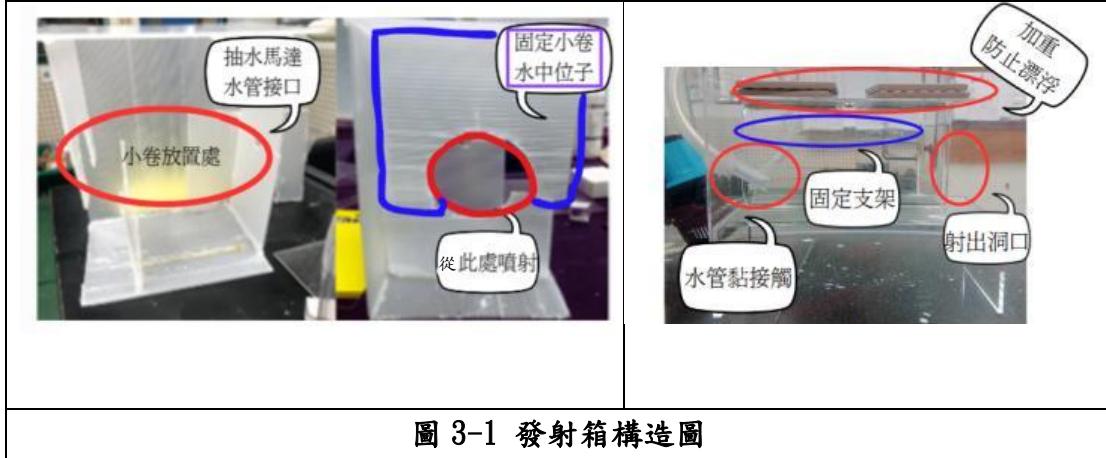


圖 3-1 發射箱構造圖

(二) 寶特瓶小卷一代模型製作

第一代小卷(如圖 3-2)是用寶特瓶當作小卷身體，並且用塑膠袋當作鰭和氣球當作臂膀，放在發射台發射，並製作 X 軸和 Y 軸之移動軌跡圖。但此模型放進水裡時會直接下沉至水箱底部，再加上寶特瓶前端呈彎曲狀，造成小卷的腕會向內聚集，與小卷本身有過大差異。此外，一代模型還有一個缺點，黏貼小卷臂膀的地方並非模型的最末端，可能導致測量數據及實驗的不精準，因此決定不採用第一代的小卷。



圖 3-2 寶特瓶小卷一代
模型圖

(三) 寶特瓶小卷二代模型製作

為了解決一代模型會沉沒的問題，於是在二代模型(如圖 3-3)內裝了一顆乒乓球以維持模型在水中的浮力，在兩者中間加上一層氣球隔開，使發射前的等待時間較一代模型較短，並製作 X 軸和 Y 軸之移動軌跡圖。但接著又遇到了新的瓶頸，二代模型的浮力過強，導致模型無法在水底下移動，因此決定製作第三代模型改良已知的缺點。

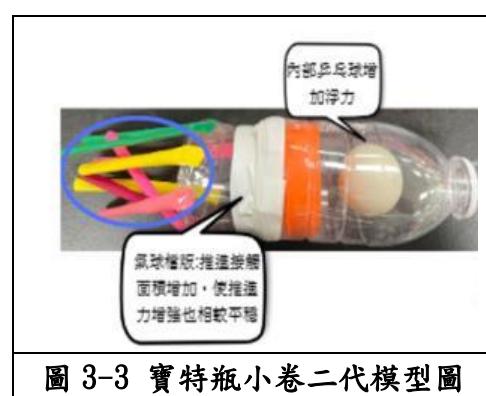


圖 3-3 寶特瓶小卷二代模型圖

(四) 三代模型製作

第三代小卷(如圖 3-4)改善了浮力的問題，使寶特瓶總長度縮短，正好能讓三代模型在水中保持有些微的浮力，卻也不會完全下沉；在小卷的尾端更是加上了一層氣球阻隔，使得發射等待時間較二代小卷更短，並製作 X 軸和 Y 軸之移動軌跡圖。

總結：雖然三代模型有很好的發射效果，但需要發射台且只能移動一次，所以我們決定嘗試不同移動方式，並尋找有使用機械相關技術之科展。

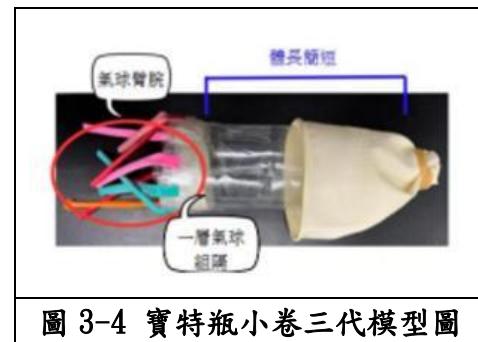


圖 3-4 寶特瓶小卷三代模型圖



圖 3-5 寶特瓶小卷追蹤位置圖

二、自製外部馬達

(一) 構思

在經過港西國小的啟發後，上網查詢了有關於此魚尾鰭結構的文獻，並發現其原理為：在維持同一片矩形的長度下，再設定後方槳子可移動幅度，就能使兩片板子左右移動。示意圖如右：

1. 設計

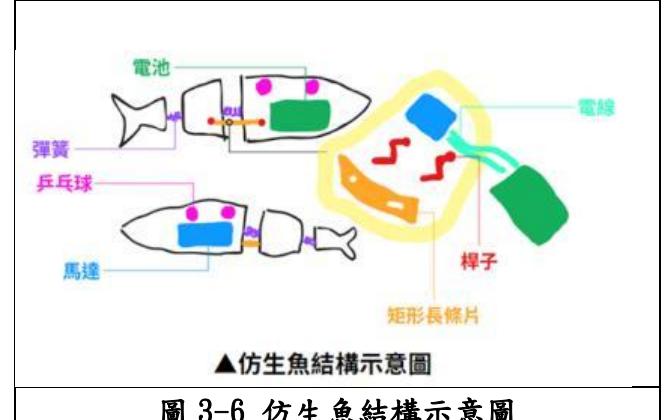


圖 3-6 仿生魚結構示意圖

而在理解它的構造後，倏地靈光乍現：我們是否可以讓小卷臂腕轉動帶動外部馬達前進呢？於是便利用 tinkerCAD 設計零件離形(如圖 3-7)。

2. 添加支架

在設計完畢後，曾為了零件材質苦惱許久，而在這時便想起校園內還有兩台 3D 列印機，於是便開始學習如何列印。步驟如下圖：

3. 列印

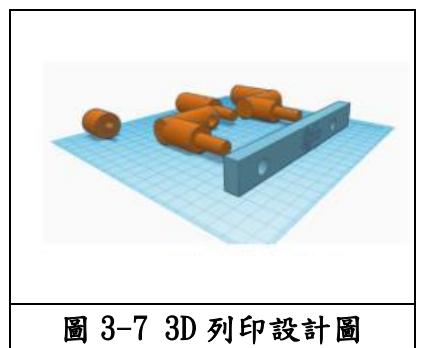


圖 3-7 3D 列印設計圖

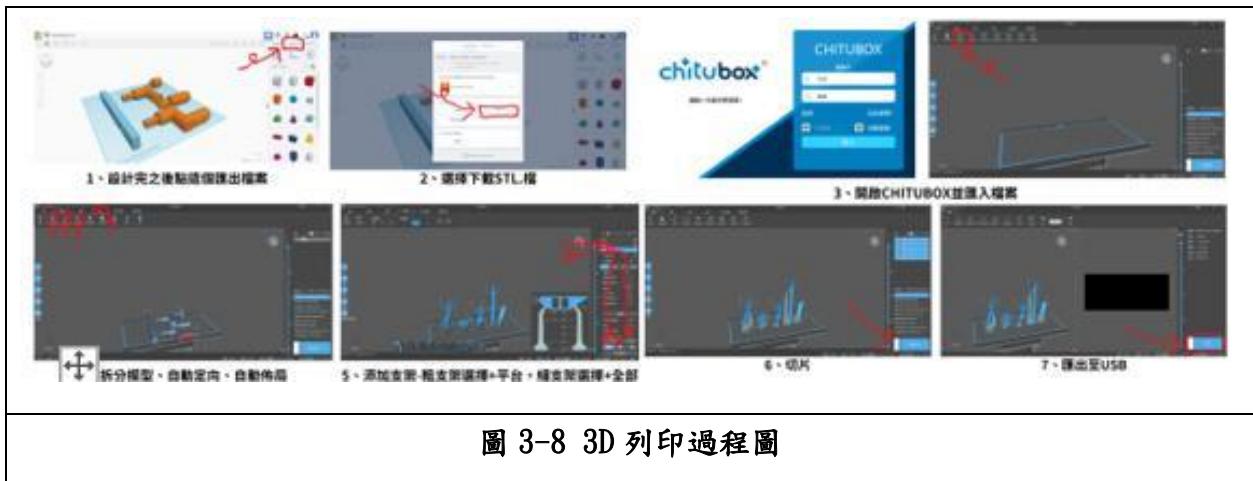


圖 3-8 3D 列印過程圖

在電腦操作完後，便移動到了 3D 列印機上操作。操作步驟如下圖：

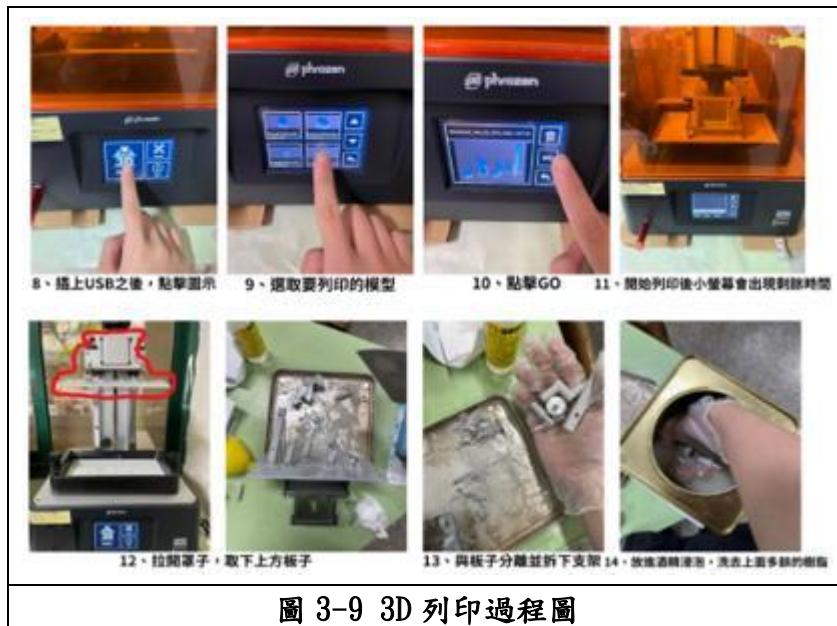


圖 3-9 3D 列印過程圖

4. 固化

我們的自製固化機是將 250 瓦的紫外線燈安裝在木盒上的裝置(如圖 3-10)，這項裝置是為了因應在氣候不穩定的基隆，也能隨時照射紫外線燈，是個在實驗中非常省時又方便的好工具。

5. 組裝

固化完成之後，將印完的零件組合成外部馬達。

6. 實際應用

此部分是為了模仿小卷鰐的運動模式，所以我們測試外部馬



圖 3-10 固化燈

達移動狀況，並製作X軸和Y軸之移動軌跡圖，分為左馬達和右馬達(如圖 3-12)。

但外部馬達裝在寶特瓶上極難推動前進，而本身運動軌跡也較無規律，所以我們只好放棄外部馬達的想法。

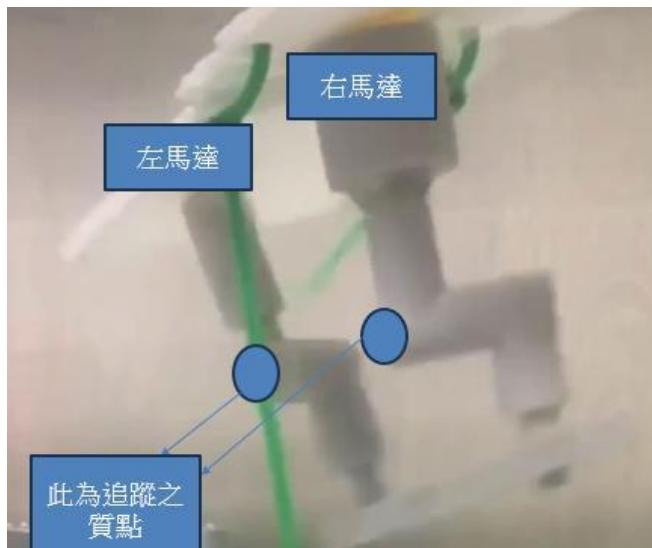


圖 3-12 外部馬達追蹤質點圖

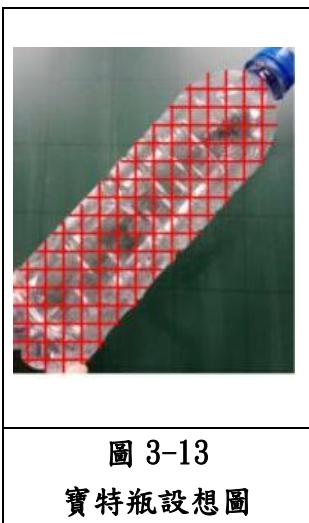


圖 3-13
寶特瓶設想圖

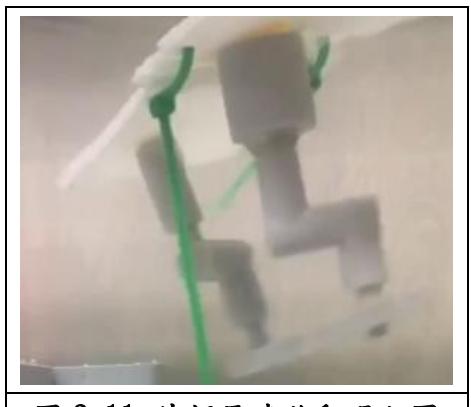


圖 3-11 外部馬達移動過程圖

三、自製彈簧外殼

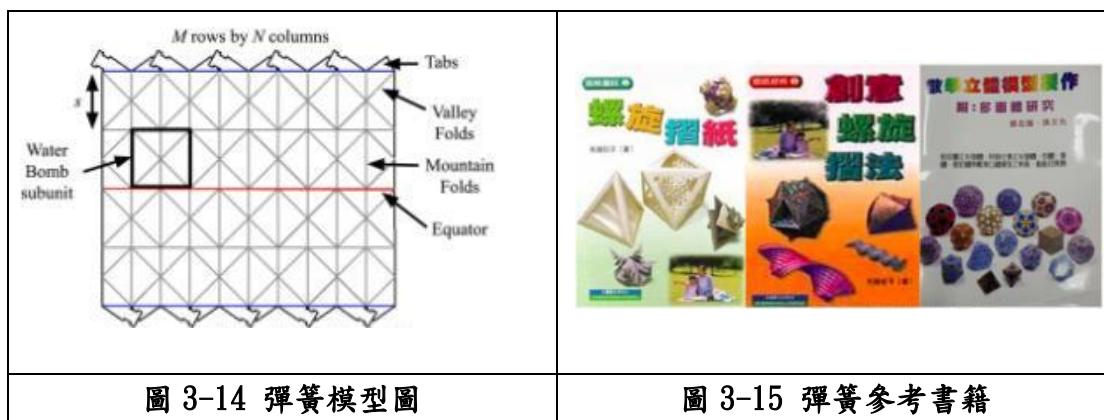
(一)材質與構想-寶特瓶切割

小卷的噴射情形有一種為與真實小卷更為相似，將水從內部噴出，而構思能夠伸縮的殼進一步了解後，初步決定以寶特瓶做切割，依著的紅色線條以美工刀切割(如圖 3-13)，而經過實作過後發現寶特瓶瓶身太硬造成無法壓縮，所以決定不採納此想法。

(二)摺紙

透過文獻<摺紙啟發的機器人透過噴射推進游泳>獲得摺紙的靈感

為了尋找適合的摺紙方法查閱了幾本相關書籍(如圖 3-15)。



從〈數學立體模型製作〉選取了幾組較符合需求的摺法進一步探討，而經過統整與討論後決定以「燈籠」「螺旋」相關詞彙作為查詢方向，並選擇使用較易折和易成型的 PVC 塑膠板當作下方實驗之材料。

(三)一版彈簧

在查詢許多相關資料後，開始進行第一版彈簧的製作
照著的線條由左右兩側向內摺(如圖 3-17-1)

1. 翻到背面輕輕刻出斜摺痕(如圖 3-17-2)
2. 以對角線為基準由兩側向內摺(如圖 3-17-3)
3. 將右上角向後摺後，將三角形 1、2 面積重和相疊以此類推(如圖 3-17-4)
4. 接著照著摺痕向下摺即可完成



圖 3-16 一版彈簧成品

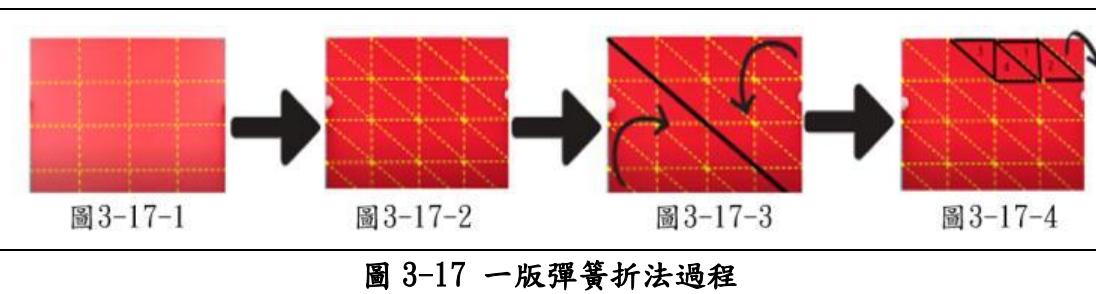


圖 3-17 一版彈簧折法過程

(四)二版彈簧(花瓶)

1. 4 公分的正方形沿著對角線對摺(如圖 3-19-1、-2)
2. 將兩角分別向中線摺(如圖 3-19-3、-4)
3. 摺出摺線後，將兩角攤開，留下摺痕(如圖 3-19-8)
4. 再將中間的正方形向下摺(圖 3-19-7、-6)
5. 將前面一片鬆開，再將其中一角向內摺(圖 3-19-5)
6. 將以上動作重複 16 次
7. 製作花瓶底座，沿著虛線對折
8. 將前面 16 個以四個一組為一層
9. 完成組合



圖 3-18 一版彈簧成品圖

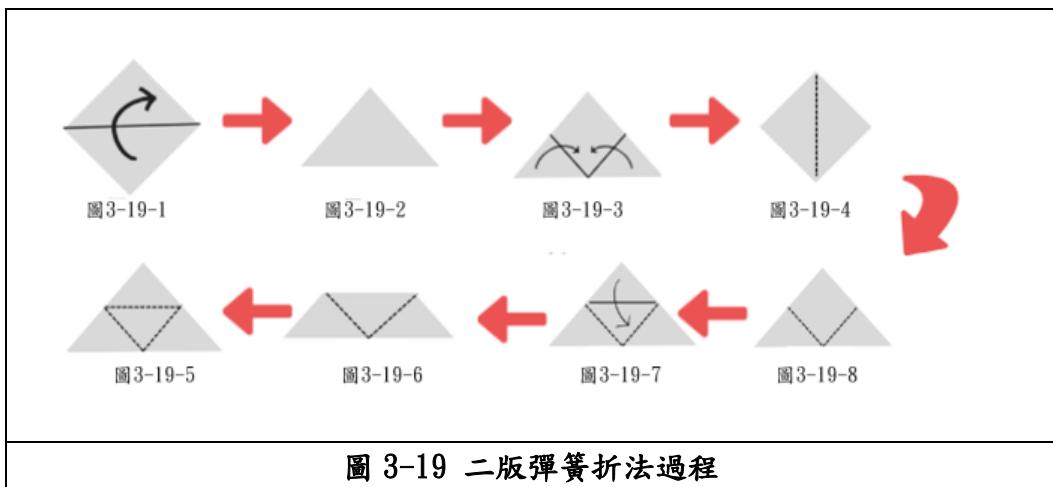


圖 3-19 二版彈簧折法過程

(五)三版彈簧

我們在摺紙軟體中找到了可以摺出彈簧的平面圖，並且用此平面圖可摺出我們想要的彈簧，而我們可以利用其平面圖為等差數列的排列，改變項數，選出最適合我們的彈簧模型。

做法如下：

如圖 3-20(藍色部分為谷折線，紅色部分為山折線)(一格為一摺)

1. 將山折線向外折
2. 將谷折線向內折
3. 將彈簧一端用熱溶膠黏至另一端(一邊會預留約 0.5cm)
4. 待熱溶膠凝固即完成

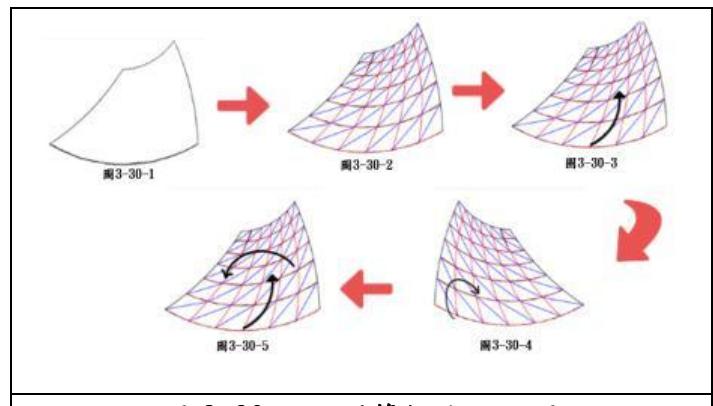
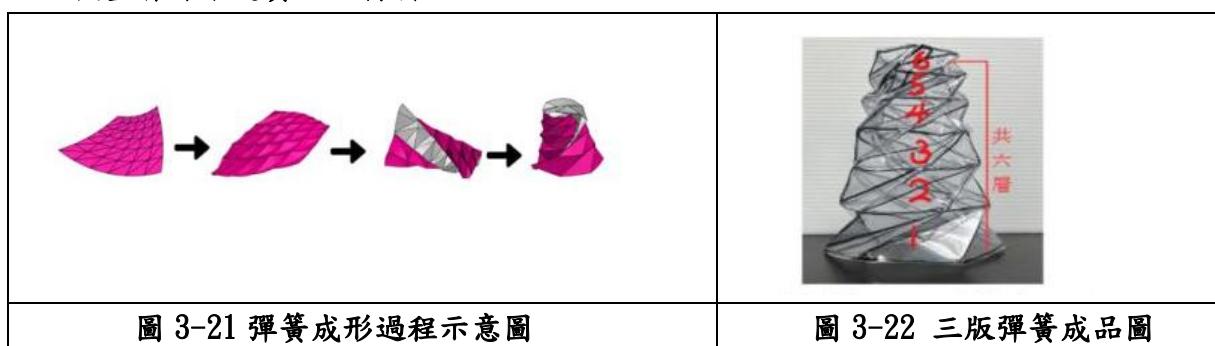


圖 3-20 三版彈簧折法過程圖

最後發現三版彈簧其可改變折數，

選出最佳比例之模型，還可較輕易壓縮和彈開，故決定使用三版
模型當作下述實驗之材料。



四、摺數與比例

為了比較不同摺數彈簧的彈力，推算並研究原圖的比例關係
由左圖可發現影響摺數的變因是因垂直方向的層次改變，進一步發現垂直方向
每層的高度不同，且成等差數列，第一層為 4，第二層為 3.5，第三層為

3 ……以此類推。

由此可得知以 4 為首項，公差為 0.5，項數為 6，級數總合為 19。

而能夠輕易得知改變項數和使用影印機等比例放大縮小(大:放大 2.5 倍，中:放大 1.5 倍，小:原稿)即能改變彈簧的摺數和大小，我們尋找資料後，使用 Adobe Illustuator 這項軟體來畫出不同摺數的平面圖。

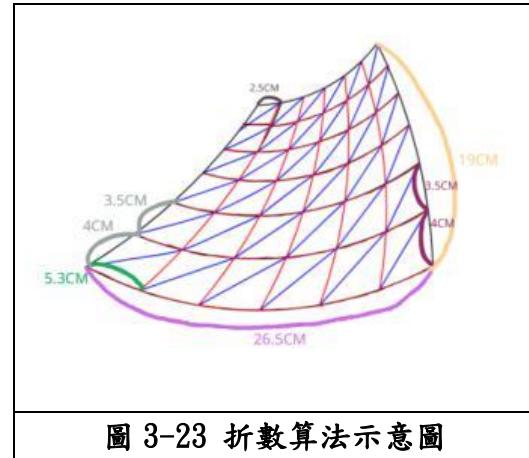


圖 3-23 折數算法示意圖

(一)四摺

1. 製作四摺比例圖(如圖 3-24)
2. 以 2 為首項，項數為 4，等差級數為 19 推算公差
3. 經過計算公差大約為 1.8 依比例繪製出此圖
4. 水平方向的間距保持不變
5. 依照步驟 4. 並利用此比例圖製作彈簧

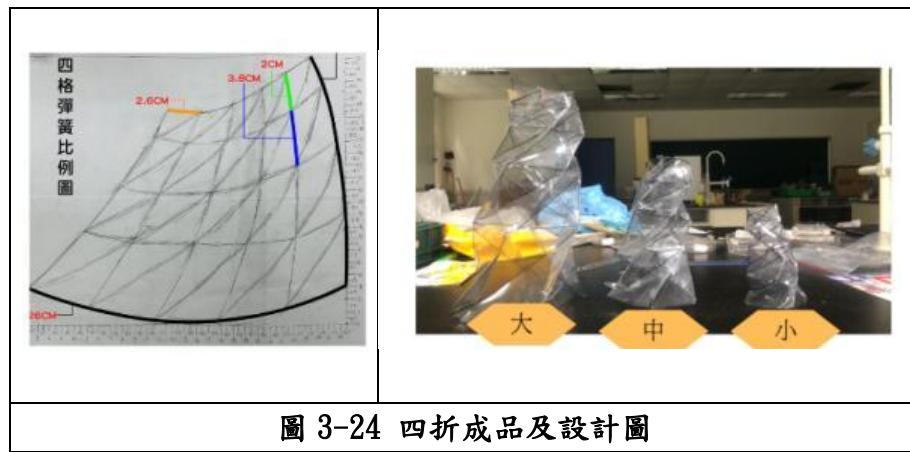


圖 3-24 四折成品及設計圖

(二)五摺

1. 製作五摺比例圖(如圖 3-25)
2. 以為 1 首項，項數為 5，等差級數為 19 推算公差
3. 經過計算公差大約為 1.4 依比例繪製出此圖
4. 水平方向的間距保持不變
5. 依照步驟 4. 並利用此比例圖製作彈簧

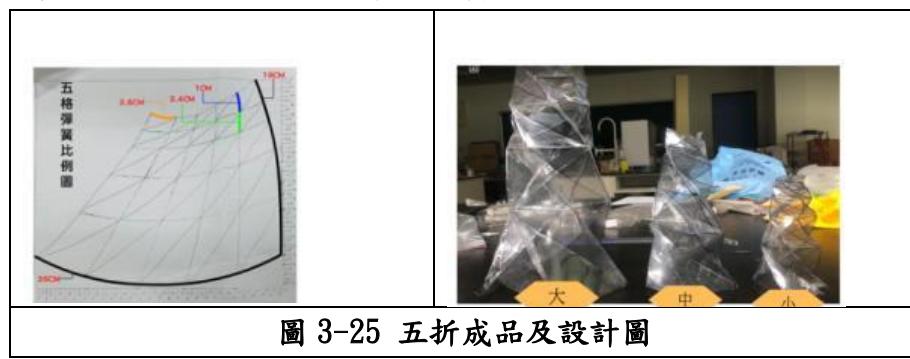


圖 3-25 五折成品及設計圖

(三)六折 六折為原稿

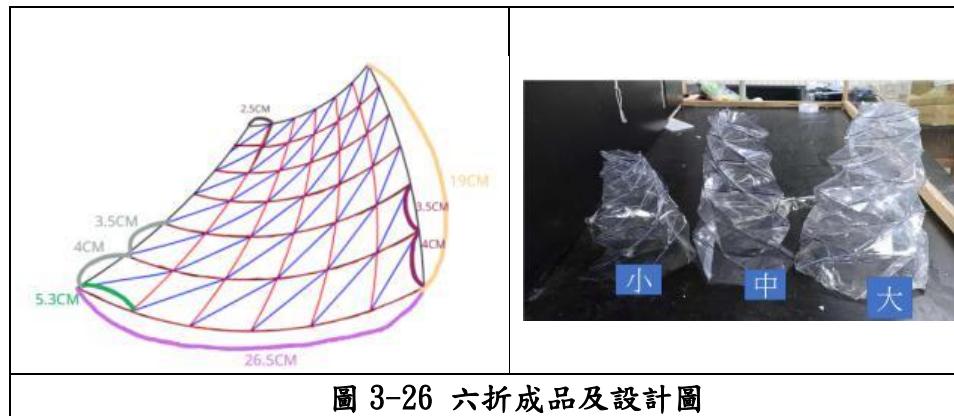


圖 3-26 六折成品及設計圖

註:三摺或七摺等彈簧會有無法壓縮和彈力過差的情況，故不加入實驗

(四)彈簧之彈力測試

為了想知道不同折數和大小的彈簧的彈力如何，所以我們設計了以下這個實驗

1. 為了達到測量的準確性用積木製作了彈簧發射器
2. 將兩端積木扣住，使得彈簧壓力一致放開扣環彈簧即彈起

彈跳力平均值數據公式:

1. $(\text{彈跳高度} + \text{彈簧壓縮後長度}) / \text{彈簧高度}$ (三重複加標準差)
(大型約 24cm，中型約 16cm)
2. 避免因彈簧原本大小不一而造成彈力計算的誤差，按照與彈簧本身高度的比例來算

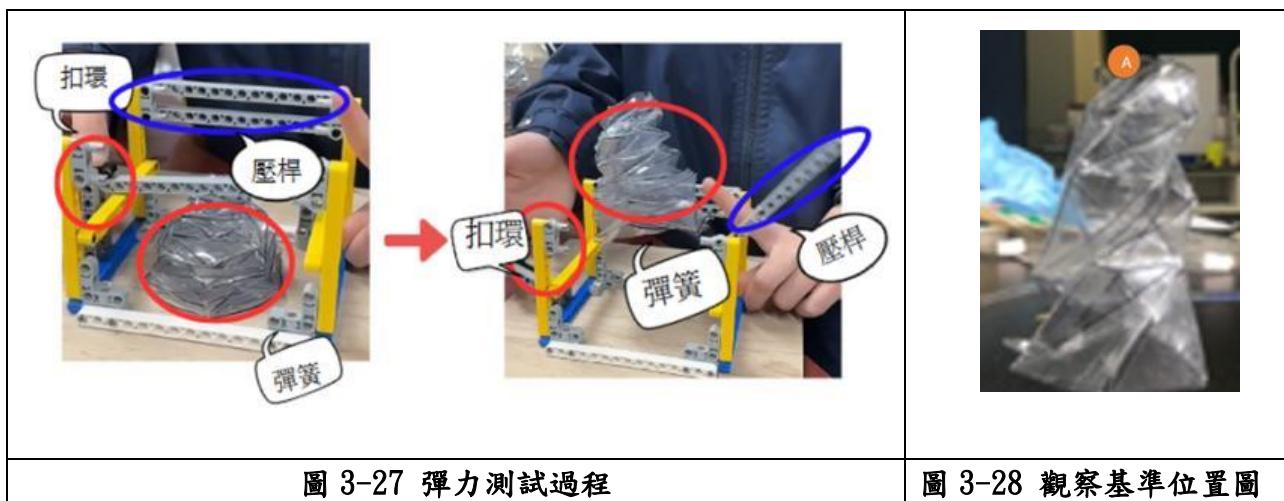


圖 3-27 彈力測試過程

圖 3-28 觀察基準位置圖

五、自製內部馬達

(一)簡單機械參考來源

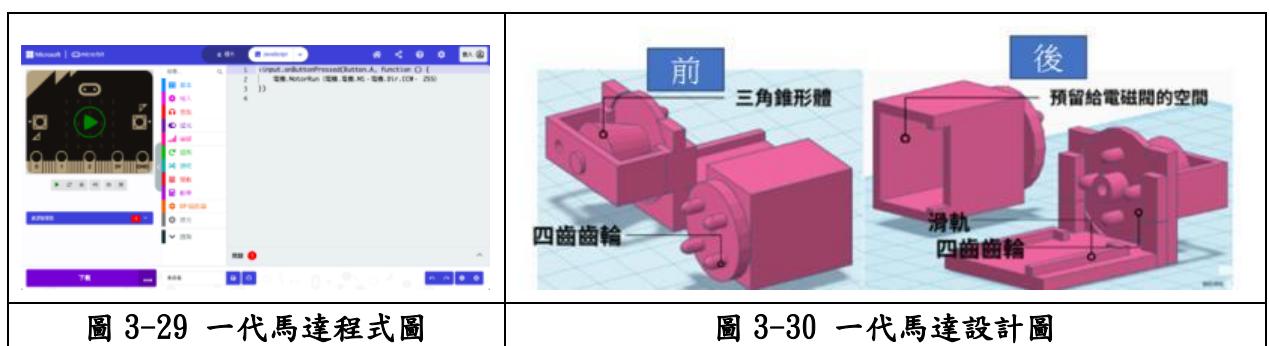
1. 櫄取 Thingiverse (3D 模型平台)上的部分範本做為參考，並放進自製內部馬達的設計裡。
2. 設計要點

- (1). 需配合自製彈簧拉伸
- (2). 使用強韌的釣魚線連接自製彈簧前後端，自製彈簧中央需有可收放線的機械。
- (3). 觀察過後，得知可使用三角錐形及齒輪當作拉力，以此為基礎設計收放線機械。
- (4). 備註: rpm 值可表示馬達轉速的大小，數值越大代表轉速越快]

(二)一代馬達

1. 設計構思

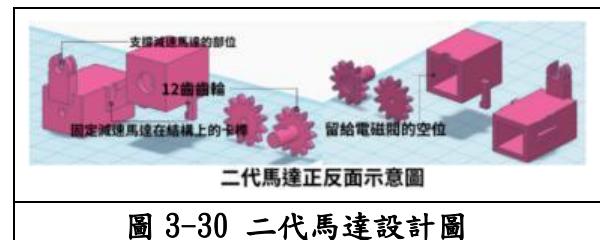
- (1) 使用三角錐形當作捲線的主軸，並使用推動電磁閥的方式，使得上方的四齒齒輪能夠放鬆，達到瞬間放線的效果。
- (2) 使用材料: 減速馬達(rpm300、100)、電磁閥、micro bit(如圖 3-29)、自印 3D 模型零件。
- (3) 不採取理由: 滑軌過緊，無法推動電磁閥；馬達扭力過小，需重新評估扭力。



(三)二代馬達

1. 設計構思

因一代馬達的扭力不足，於是第二代我們改為採用 12 齒齒輪，增加齒輪之間的接觸面積（為增加摩擦力），帶動的效果會更加。接著為了改良滑軌卡住的問題，也試著用另一種類型的卡榫，以減少接觸面積。示意圖如下：



2. 使用材料

減速馬達(rpm100)、電磁閥、micro bit(程式碼如圖 3-31)、自印 3D 模型零件。

3. 不採取理由

使用 12 齒齒輪過於緊繃，導致收線情況雖好，放線情況卻不佳。

(四) 三代馬達

1. 設計構思

因一、二代模型製作的卡榫不斷失敗，所以第三代製作時便直接將卡榫的部分剷除了，只留下空格。改取用 24 齒齒輪與 rpm300 的馬達相互配合

試試是否會減少些微為摩擦力，緩解放線時的卡頓。

2. 使用材料

減速馬達(rpm300)、電磁閥、micro bit(程式碼同二代馬達)、自印 3D 模型零件

3. 不採取理由

在收線時容易斷，但為最強拉力之配法，所以將其改良

(五) 四代馬達

1. 設計構思

本次改良使用 arduino(如圖 3-35)，讓其可以遠端操控，搖桿按上為收線，收線至最緊後，按下彈出，並且使用棘輪裝置，齒輪配法和三代一樣，但使用此方式，就可保持力度，而且還不會斷，所以選這一代馬達當作最終的版本。

材料：

減速馬達(rpm300)、arduino、自印 3D 模型零件



圖 3-31 二代馬達程式圖

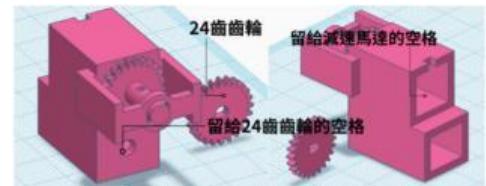


圖 3-32 三代馬達設計圖

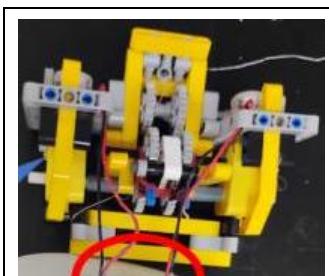


圖 3-33 四代馬達成品圖



圖 3-34 搖桿使用方式

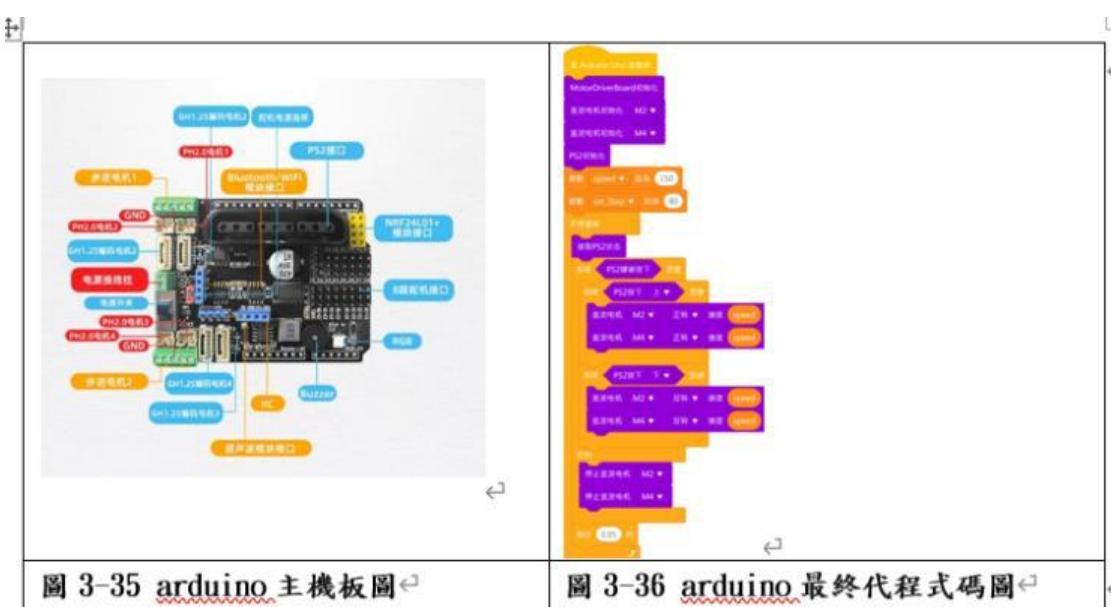


圖 3-35 arduino 主機板圖

圖 3-36 arduino 最終代程式碼圖

2. 3D 模型傳動軸

由於馬達和棘輪裝置為不同之模組，所以用 3D 列印印出如圖 3-34 之傳動軸，將馬達的速度轉換至棘輪裝置(齒輪)上。

六、彈簧在水下之速度測試

我們的內部馬達模型運用 arduino 旁邊裝電池盒，在給電至馬達將機械模型製作出來，再將馬達的釣魚線綁在彈簧上方的竹筷，將馬達放在另一彈簧下方第一折處並用束帶固定(如圖 3-38)，而我們為了想

知道彈簧在水下實際速度為何，於是將彈簧和棘輪裝置放入水中，拍攝其彈開瞬間，並找出各種彈簧三個質點之速度與加速度(v_x & a_x)



圖 3-37 3D 模型傳動軸正反面圖

最大值(三重複加標準差)，並製成長條圖，並將 X 軸軌跡用長條圖呈現，得出最佳之彈簧模型。



圖 3-38 束帶位置圖

分析之三個質點位置：



圖 3-39 水下質點分析位置圖

七、彈簧流線型頭部

我們發現，小卷的頭部是較像流線型，可減緩水的阻力，但上述實驗設計之彈簧外型卻不符合此造型，故我們想到：可使用之前實驗剩餘之 PVC 塑膠板，折成流線型的前端。所以故設計此實驗，了解何種比例之流線型前端移動速度最佳。

我們使用 GeoGebra 設計底部和五折中彈簧大小直徑一樣的圓錐體，並設計高度分別為 10cm 20cm 30cm(如圖 3-40)，並黏在上方放入水中測試，並測試其從水中一個位置(同一位置)，直到觸碰到水缸另一端玻璃(約 45cm)，看其所需時間。

※由於 10cm 之流線型頭部過小，馬達會造成其凹折，造成實驗不精準，故不加入至實驗。

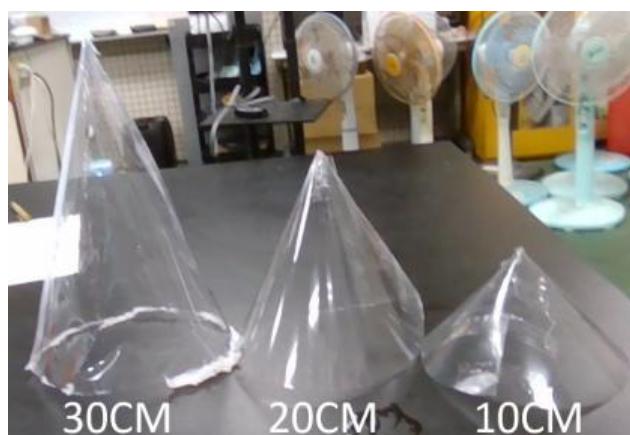


圖 3-40 流線型頭部模型成品圖

八、tracker 程式使用與設定

1. 開啟 tracker 程式頁面後，導入影片後，新增校正桿放在已知長度的物體上，作為目標移動距離的根據
2. 新增質點以追蹤目標物
3. 每幀可點一個質點來追蹤目標，完成後即可得到右方圖表及數據做分析

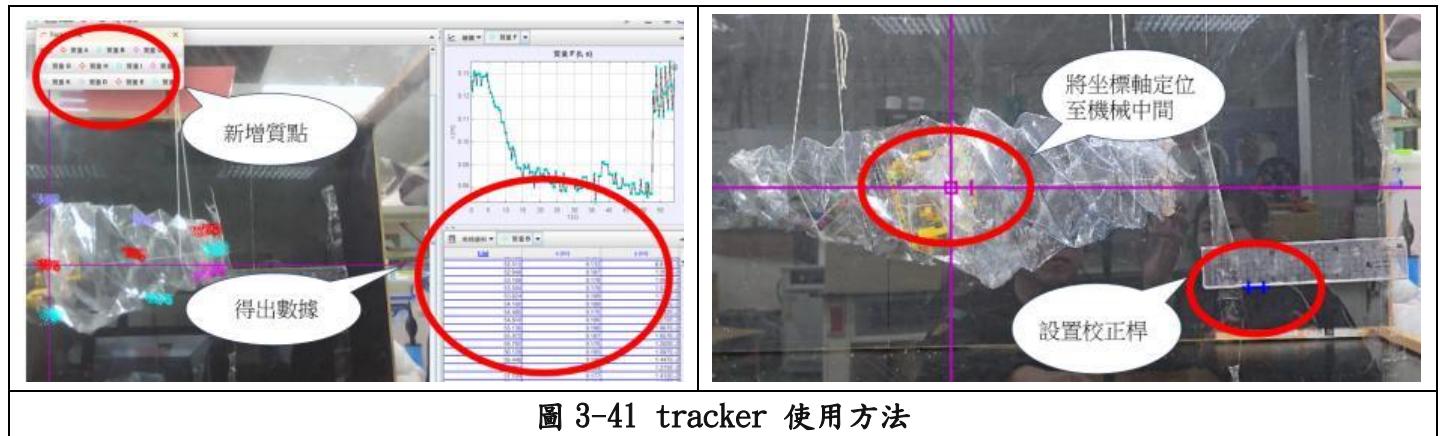


圖 3-41 tracker 使用方法

九、內部馬達結合彈簧空氣行徑軌跡

而我們想要看看機械的彈射移動方向為何，剛好教室內有以前學長姊製作的生物觀察箱(如圖 3-43)，經過我們的改良後，以兩條棉線分別讓機械的兩端懸空，觀察其的軌跡。

我們一開始一直讓機械持續壓縮，直到 5 秒鐘機械都無法在往下轉一個齒輪，即彈開，而彈開後則在拍攝五秒鐘其的移動軌跡。

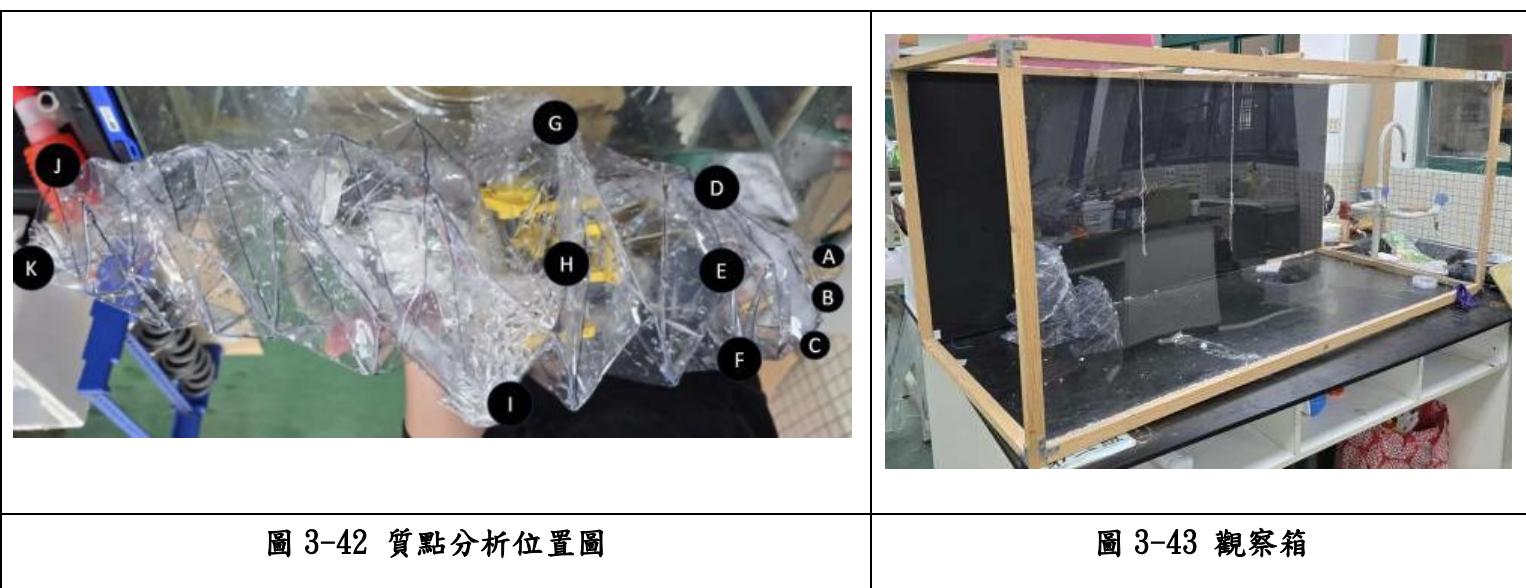


圖 3-42 質點分析位置圖

圖 3-43 觀察箱

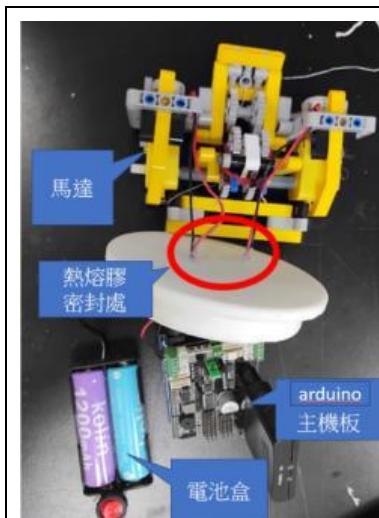


圖 3-44 馬達圖



圖 3-45 氣球和 arduino 位置



圖 3-46 機械位置圖

十、自製馬達成品實測軌跡

我們的成品運用 arduino 旁邊裝電池盒，在給電至馬達，馬達結構為防水，但 arduino 和電池盒為不防水，且水會阻隔信號，所以經過多方思考和評估可行性，決定將 arduino 主機板和電池盒放置在水面上(如圖 3-45)並組裝五折中彈簧+20cm 流線型頭部；並製作質點軌跡圖；而我們還用了氣球懸掛機械，讓其可以穩定在水中保持一定高度。

而我們的機器在水中 1 分鐘左右可以完成多次收縮彈射，並可以移動約 45 公分，顯示其可在水中進行移動。

肆、研究結果

一、第一代寶特瓶小卷移動軌跡

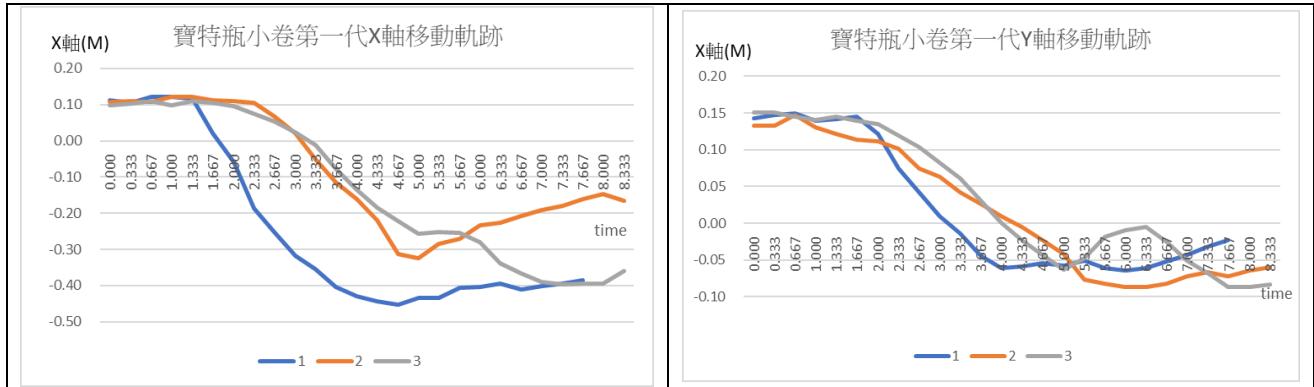


圖 4-1 第一代寶特瓶小卷 X 軸和 Y 軸移動軌跡

在寶特瓶小卷第一代 X 軸移動軌跡中，我們發現小卷寶特瓶發射出去後，一開始會往前行進，但到後面之後有可能會偏左或偏右，有軌跡不穩定的情況發生。

而在寶特瓶小卷第一代 Y 軸軌跡中，我們發現小卷寶特瓶模型一開始發射出去之後會直直的往下沉，但是之後有可能頭部會稍微的往上，但又會沉下去。但在整體看來，寶特瓶小卷第一代的移動軌跡不僅會沉沒，而且會有方向不穩定的情況發生，所以我們不使用這個模型。

二、第二代寶特瓶小卷移動軌跡

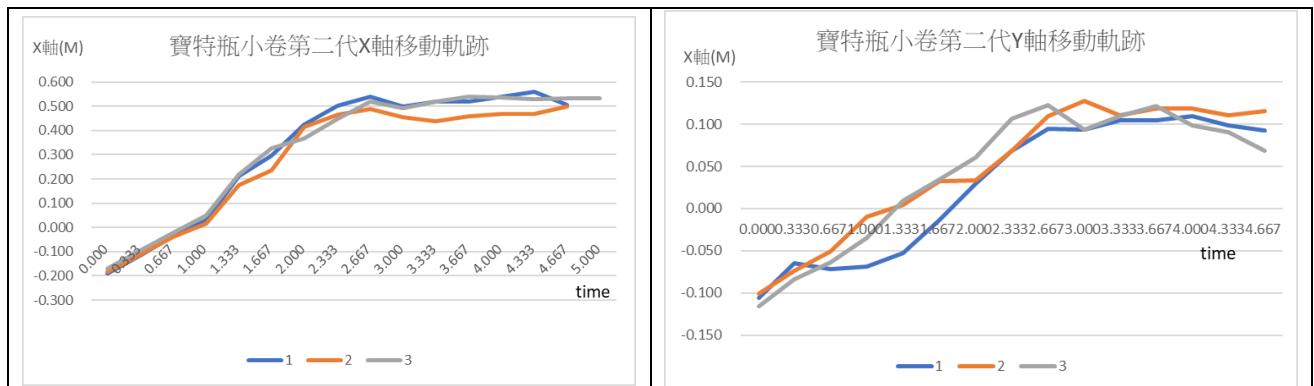


圖 4-2 第二代寶特瓶小卷 X 軸和 Y 軸移動軌跡

在寶特瓶小卷第二代中，我們在裡面增加了一顆乒乓球。所以在寶特瓶小卷第二代 X 軸移動軌跡中，我們發現小卷模型發射出去後會往右快速移動，浮到水面上後就較少往右移動，而且在移動過程中會出現移動軌跡不穩定的情況發

生。而在寶特瓶小卷第二代Y軸移動軌跡中，我們發現寶特瓶小卷模型發射出去後會直直往上浮起，而且會有方向不穩定的情況發生，故決定不使用此代模型。

三、第三代寶特瓶小卷移動軌跡

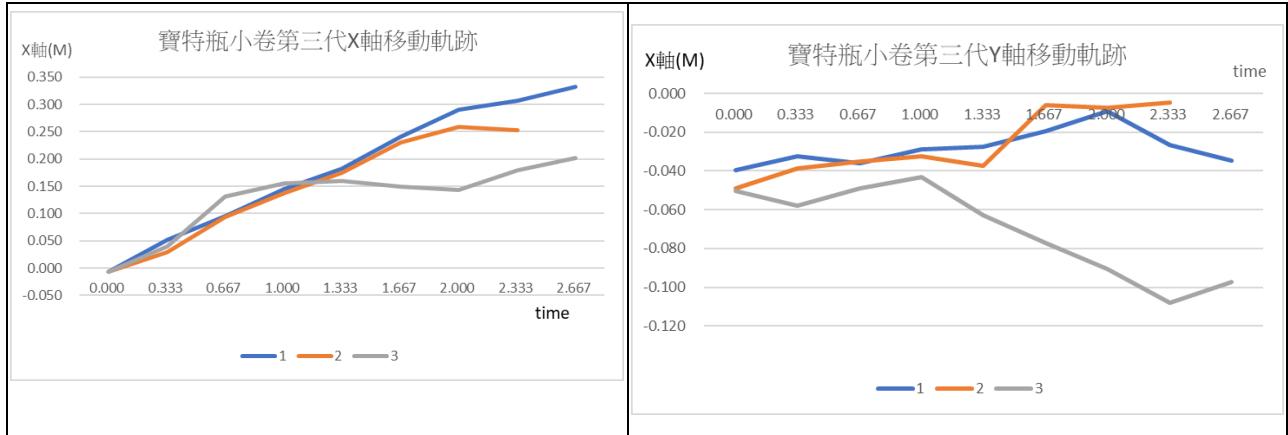


圖 4-3 第三代寶特瓶小卷 X 軸和 Y 軸移動軌跡

在小卷第三代模型中，我們發現它發射出去之後會在位於水缸的中間，並且一開始時會穩定地緩慢向前前進，但是發射出去後一陣子它就會偏左或偏右。像第三部影片就是在發射過程中旋轉了約 90 度，所以我們發現寶特瓶小卷不論是第幾代都會有軌跡不穩定的問題，所以我們參考別的資料製作新的模型和移動方式。

一、外部馬達移動軌跡

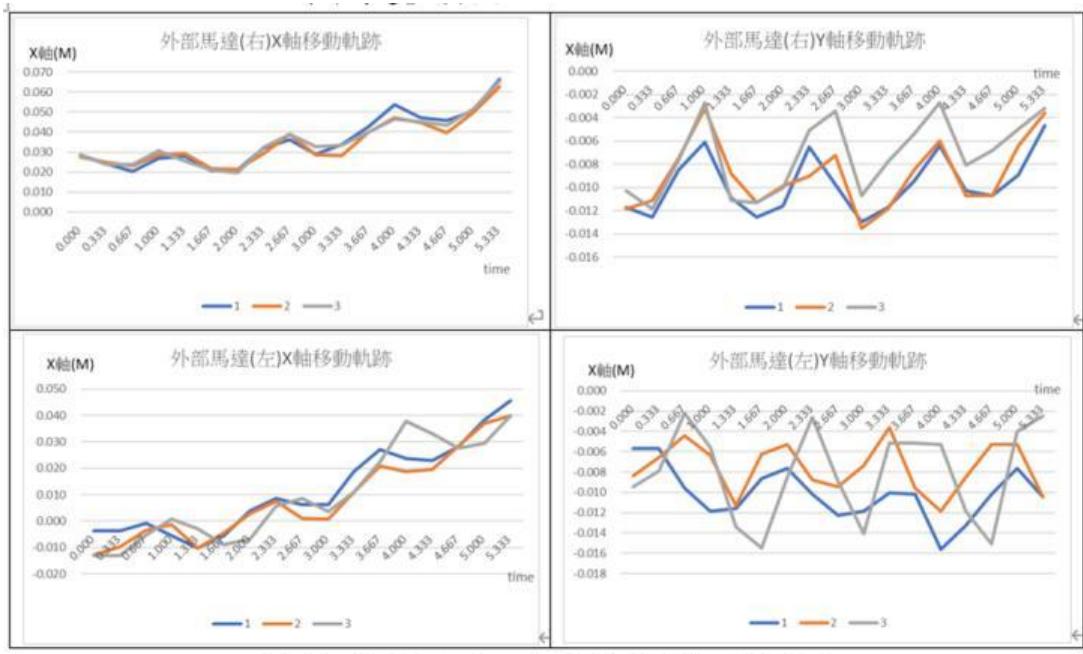


圖4-4 外部馬達 左、右馬達 X、Y軸移動軌跡

在 X 軸和 Y 軸左馬達和右馬達的移動軌跡圖中，我們在圖表中看來它都有很明顯的趨勢，但在移動時我們發現它有時也會像之前的寶特瓶小卷模型一樣會有偏左偏右的問題，所以我們又放棄了這個想法繼續尋找新的資料。

五、彈簧之彈力測試

彈簧種類	第一次	第二次	第三次	彈跳力 比值
四摺-中				1.6356 ±0.083
四摺-大				1.7581 ±0.0952
五摺-中				1.685± 0.1025

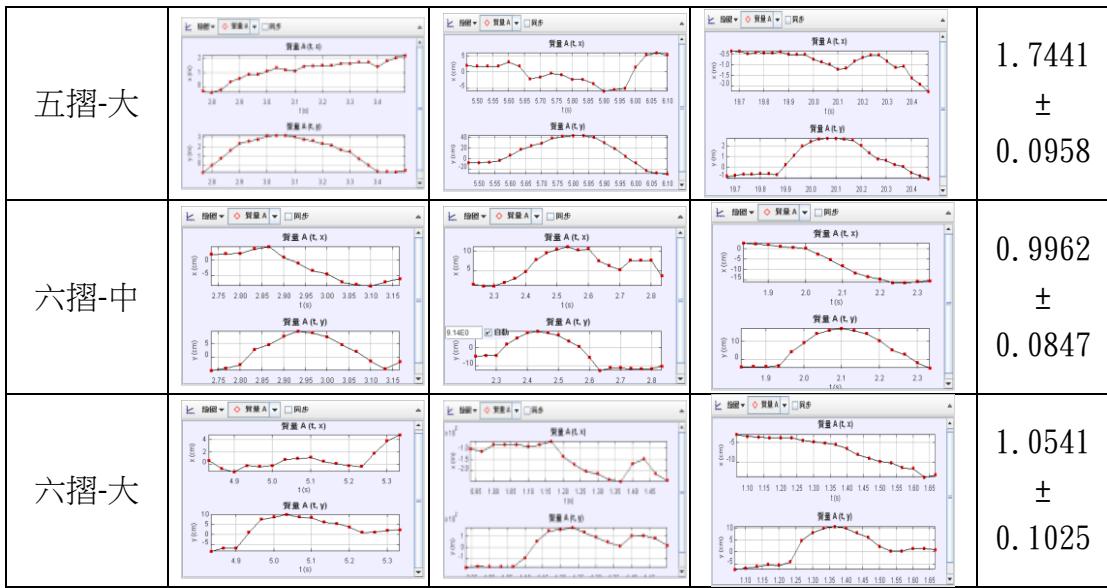
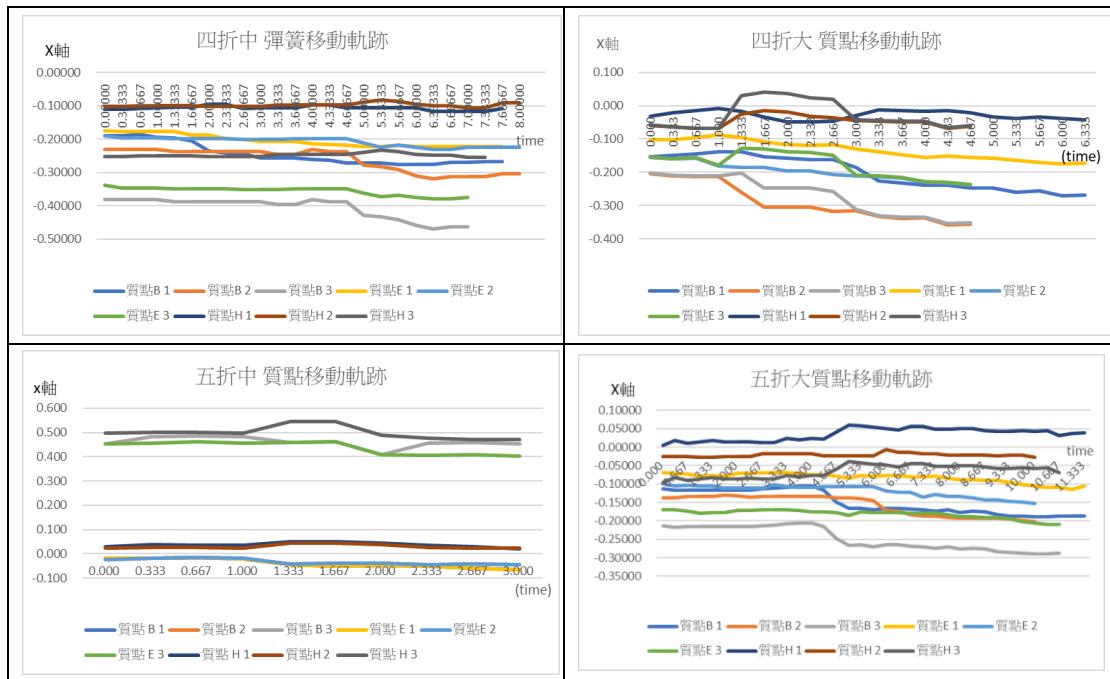


圖 4-5 彈簧之彈力測試圖

小彈簧未能分析數據是因彈跳高度都未超過標準桿，且小彈簧的空間也不足以包覆電池，』而由上表可知，彈跳力為 4 折>5 折>6 折，但由於先前有馬達扭力不足導致無法轉動的情況，我們不打算採用大型彈簧。

二、彈簧在水下之速度測試

(一) X 軸移動軌跡



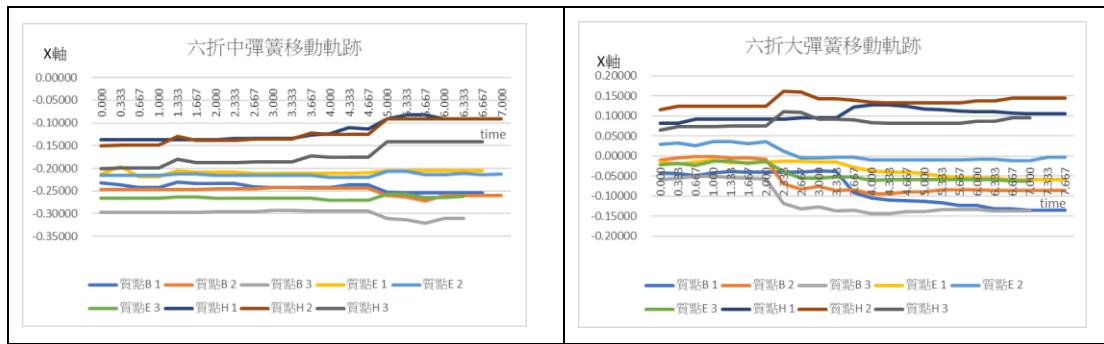


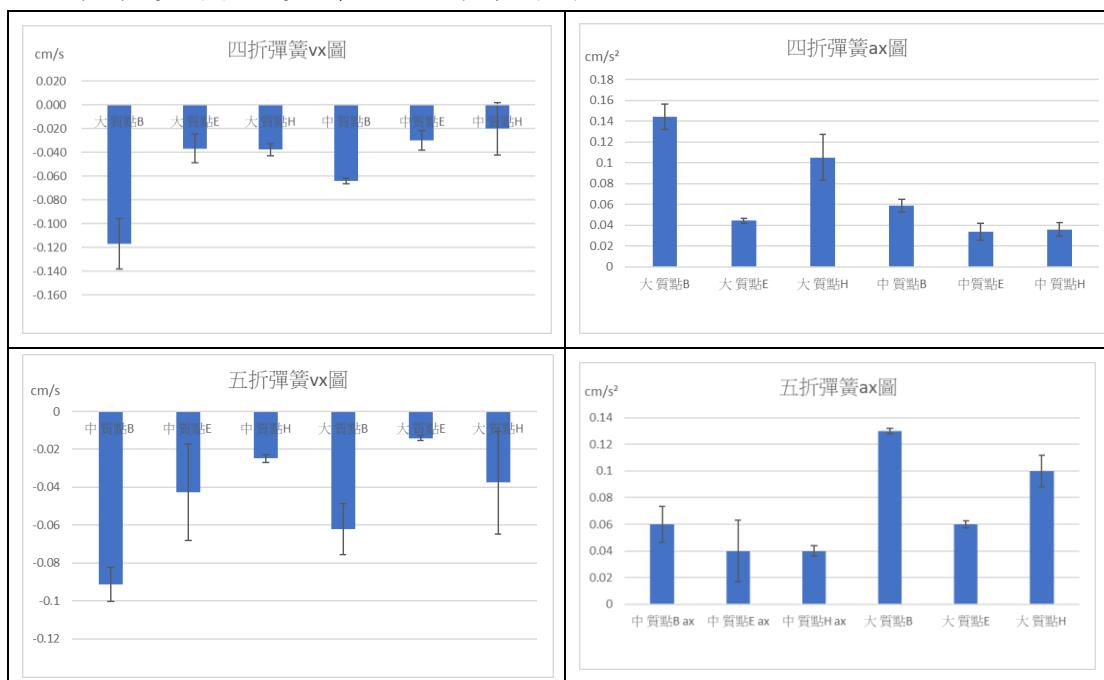
圖 4-6 彈簧在水下測試之 X 軸移動軌跡圖

註 1: 圖表下方圖例標示之質點 B 1、質點 B 2 之 1 2 為第一次拍攝和第二次拍攝

註 2: 此圖表 X 軸單位為公尺(M)

從上方彈簧移動軌跡的圖表中(X 軸移動軌跡)，每種彈簧質點的移動方式大略相同。我們發現質點 B 和質點 E 在彈射瞬間會往左邊明顯的移動，但質點 B 變化量會較質點 E 多(由於質點 B 位於彈簧前端，而彈出後會朝向右上移動；而質點 H 則是沒有向左移動的趨勢，但質點 H 在彈射出後因為彈簧產生動力，所以有往右移動的軌跡。

(二)速度與加速度最大值比較長條圖



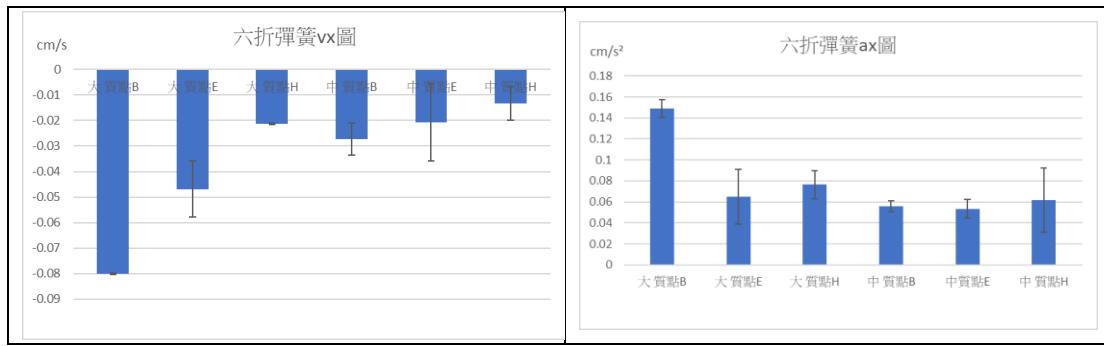
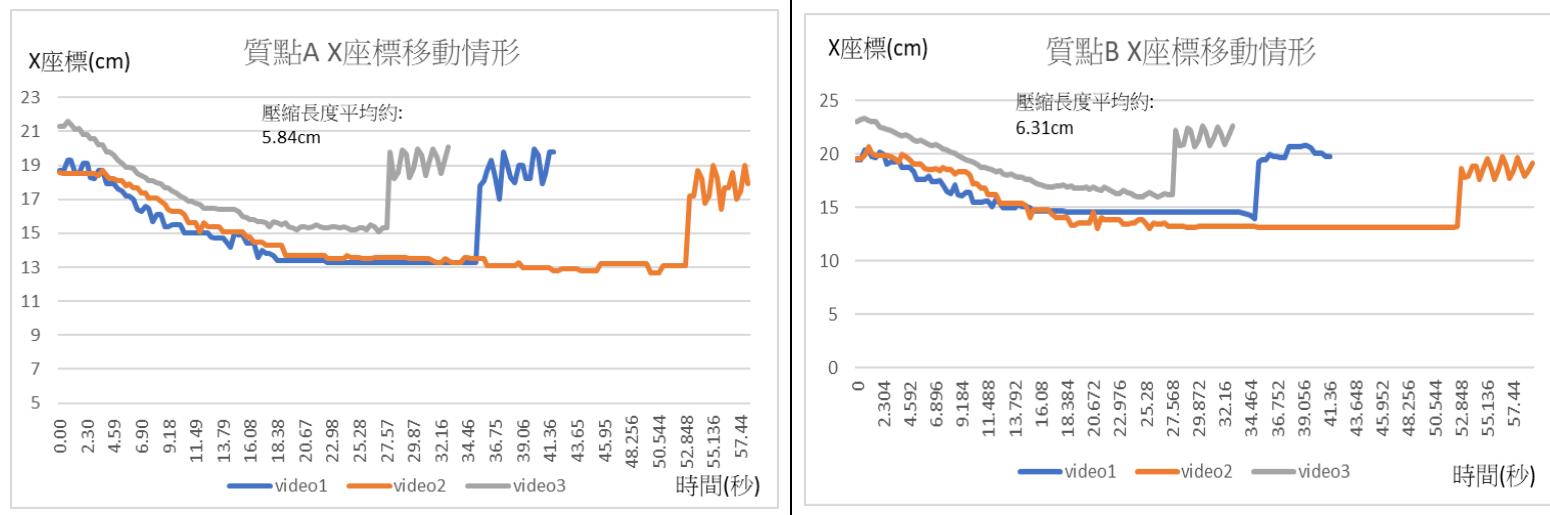
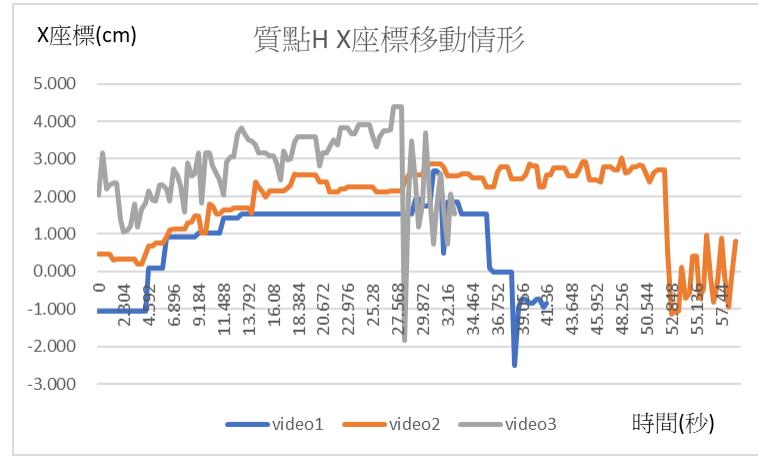
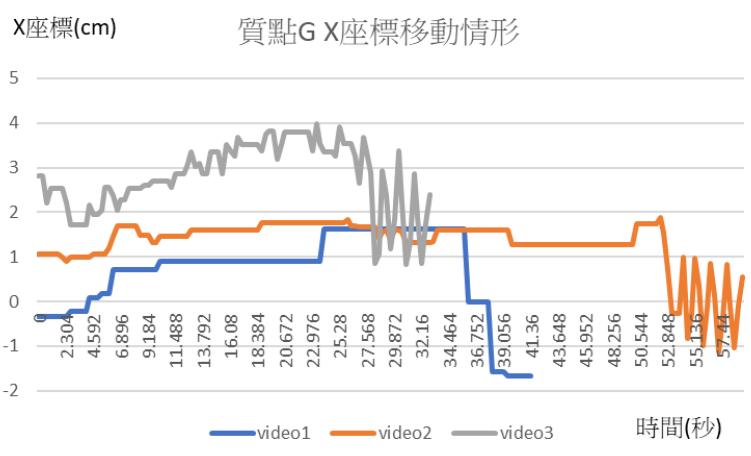
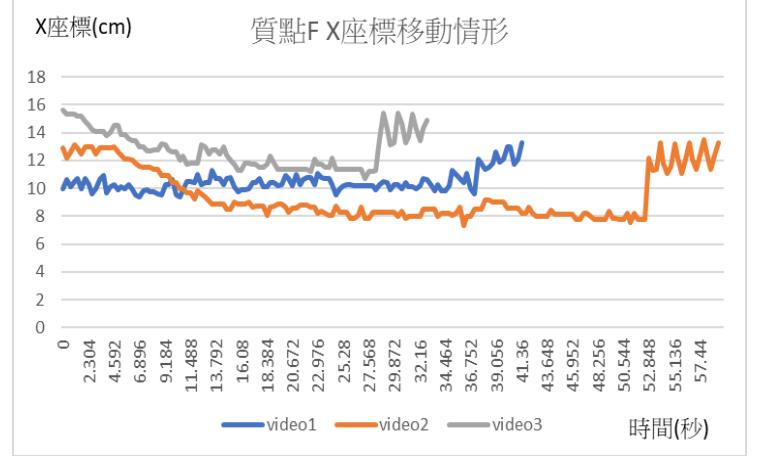
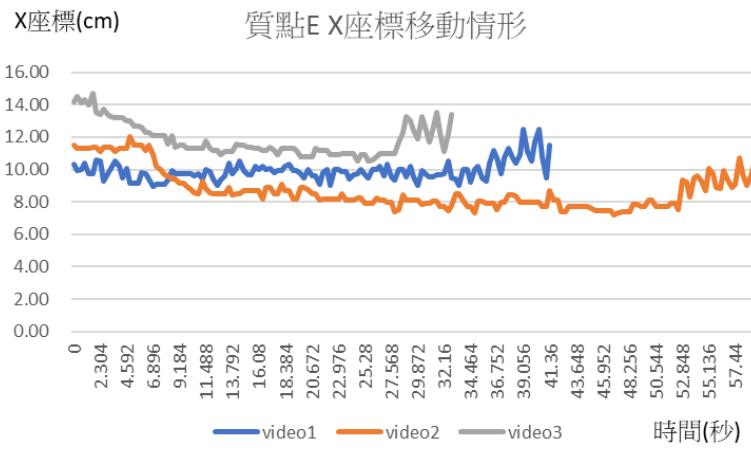
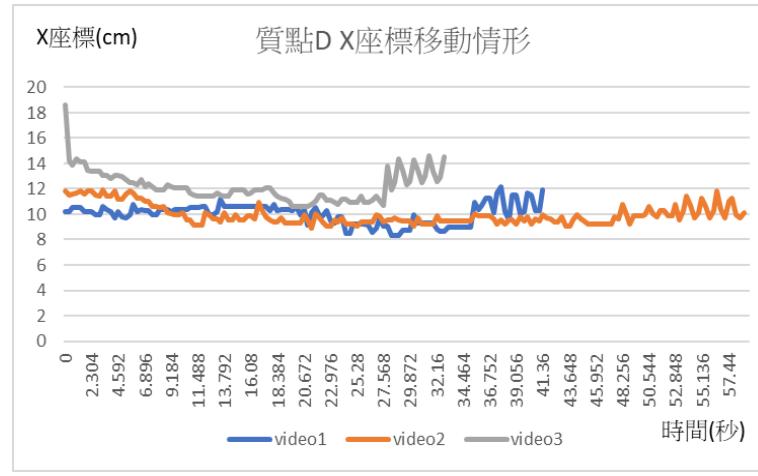
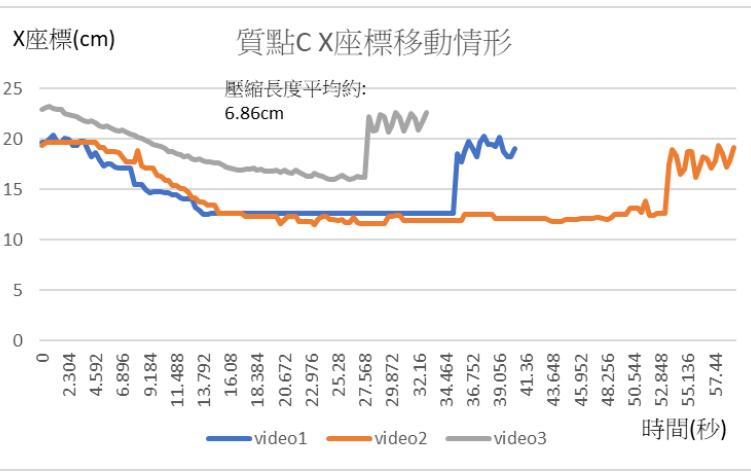


圖 4-7 彈簧水下速度與加速度最大值比較長條圖

上方 AX 跟 VX 的圖表中，我們發現通常質點 B > 質點 E > 質點 H 速度為大 > 中，但是因為我們此長條圖是求最大值的部分，所以質點 H 會取到彈簧彈開後的最大值，所以有時圖表中質點 H 會大於質點 E，而我們最後選擇的為五折中的彈簧，因為它的大小剛剛好可以放進棘輪裝置馬達，而且在整個彈跳力與速度上都有一定的強度，所以我們之後會使用五折中馬達來進行後續的實驗。

八、內部馬達結合彈簧空氣行徑軌跡





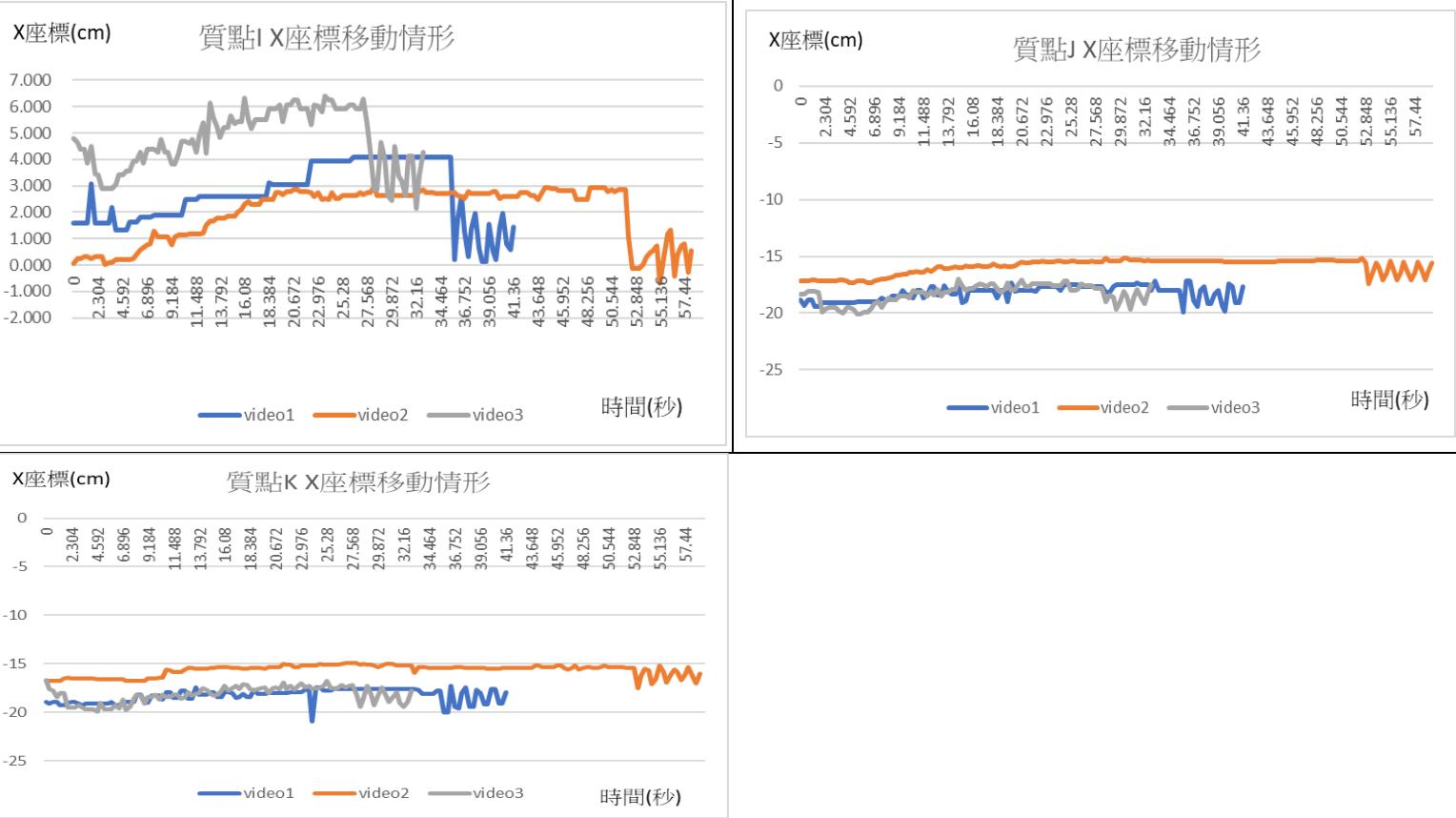


圖 4-8 內部馬達結合彈簧空氣行徑軌跡圖

註：質點 ABC 圖表之壓縮長度為最初質點減壓縮至極限之質點長度，然後將 video1~3 做平均

從上方 X 座標移動情形圖中，可看到位於前方質點 A B C，三個影片都是慢慢被壓縮，到最緊程度後彈開，會瞬間往反方向彈開，並且會左右晃動（晃動時間只取 5 秒）。

而位於右方彈簧中間的質點 D E F，趨勢相似質點 A B C，但因為不是最先被壓縮的部分，所以一開始壓縮時 X 軸座標數值的減少較不明顯，但彈開還是會瞬間往反方向移動，並且也有左右晃動的軌跡。

位於整組機械正中間的質點 G H I，一開始數據較無明顯變化，但彈開後還是有左右晃動的趨勢。

位於尾部質點 J K，趨勢和質點 G H I 相似，都無明顯變化，都僅有在彈開後有左右晃動的趨勢。

九、彈簧流線型頭部

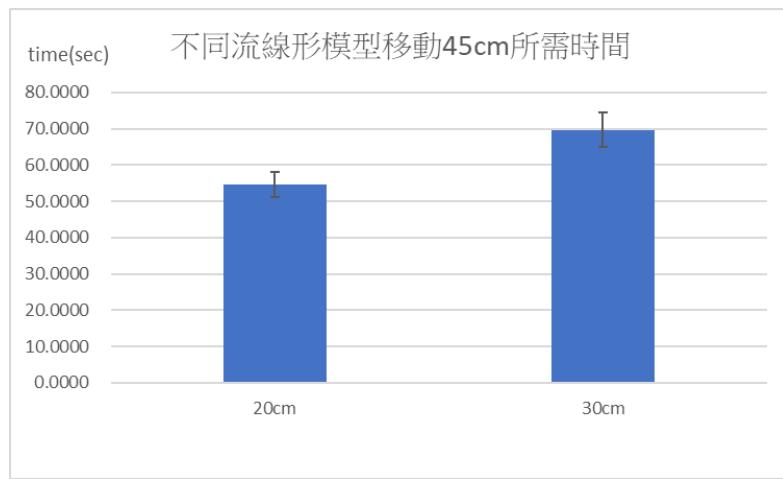
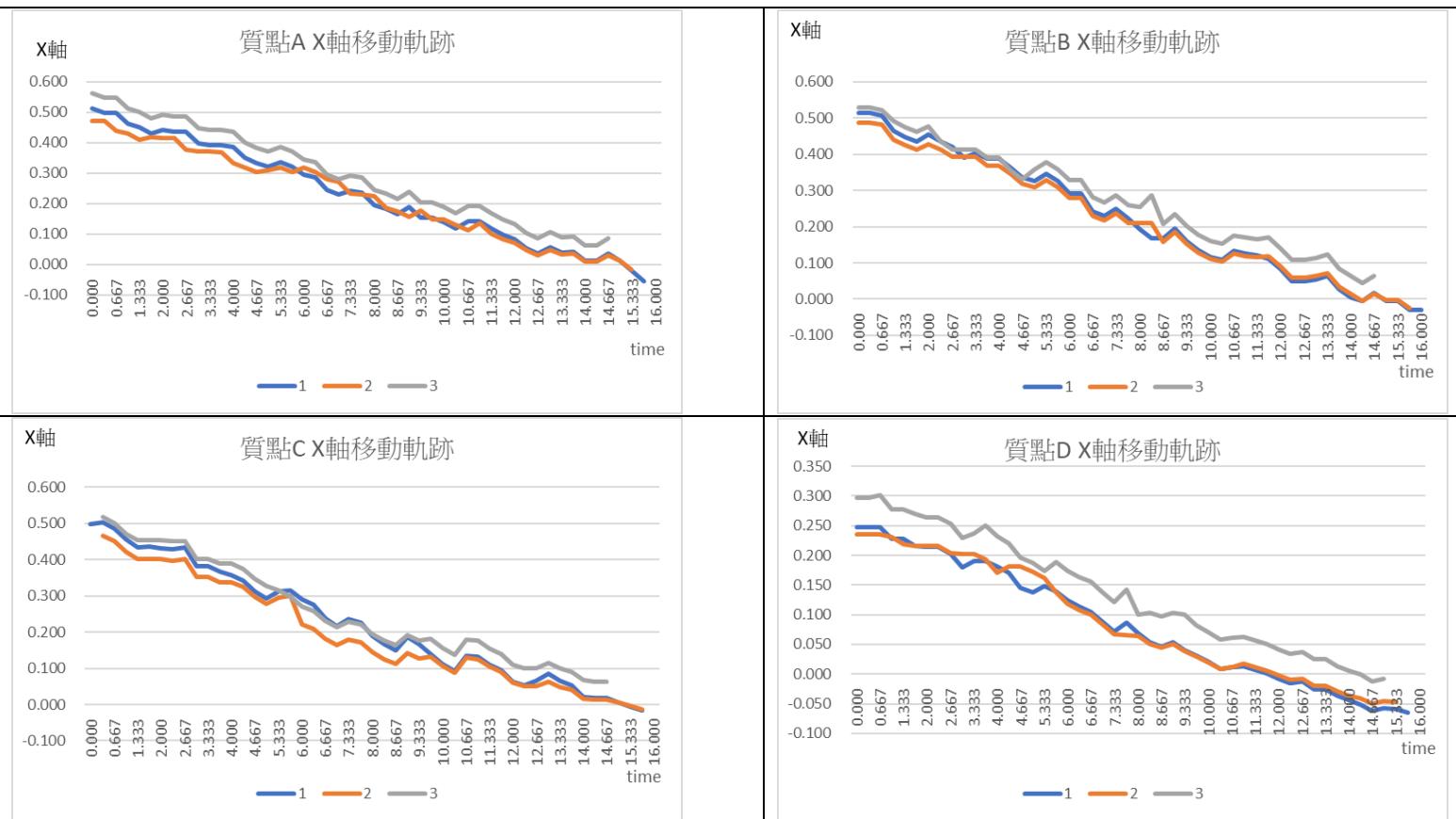
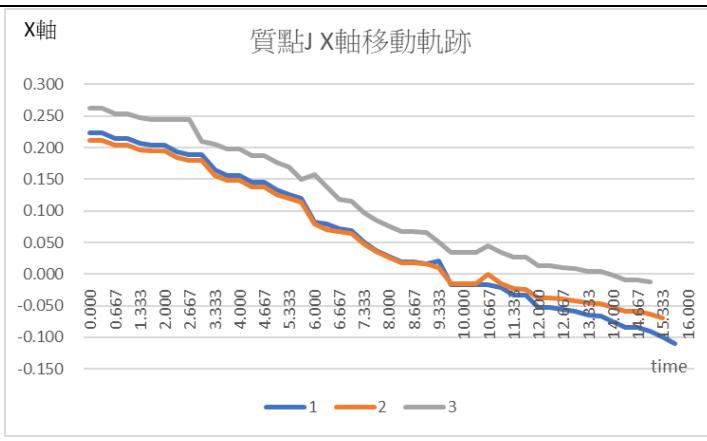
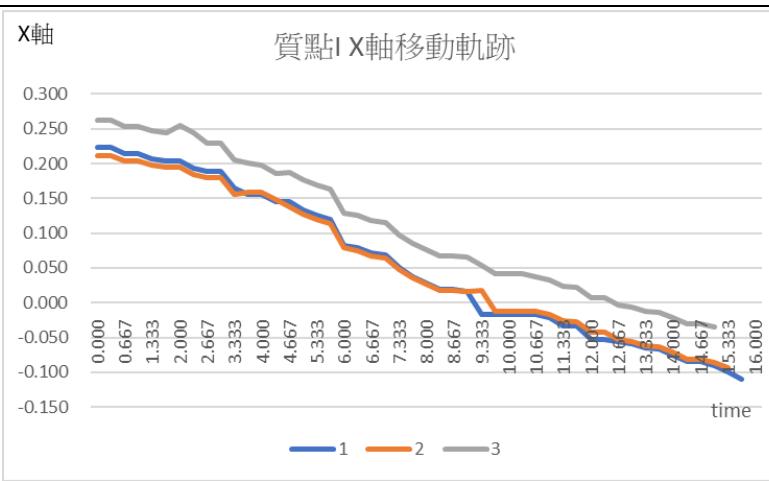
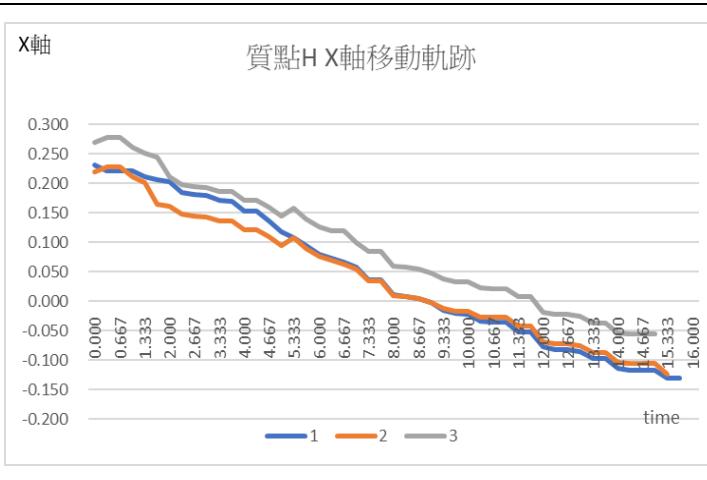
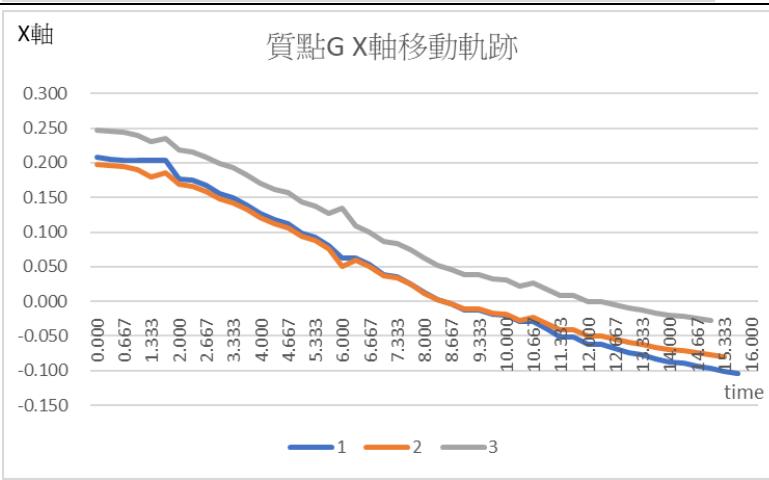
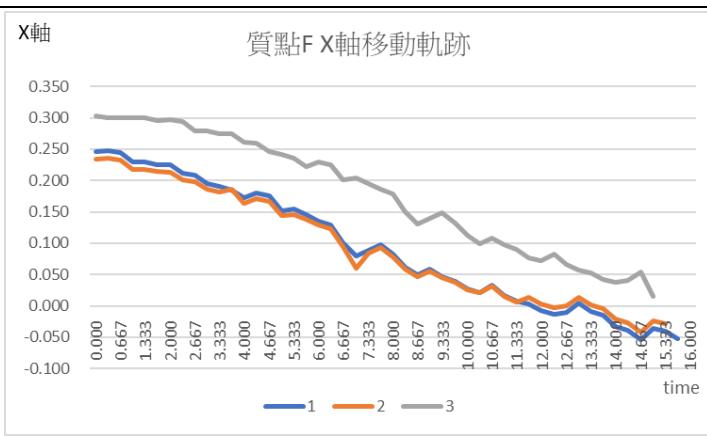
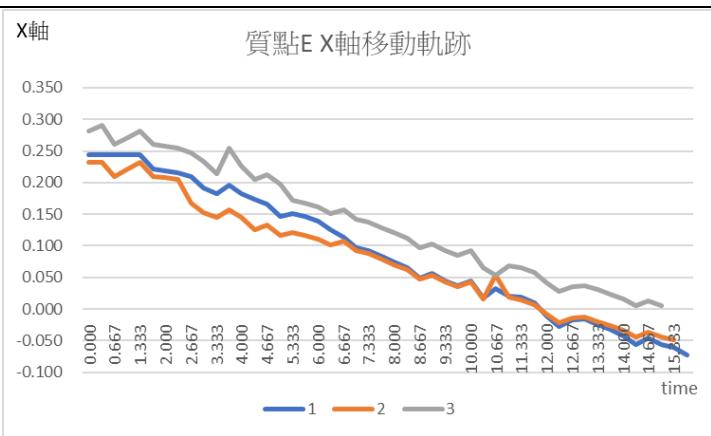


圖 4-9 流線型頭部移動所需時間比較圖

在上方的圖表中可以發現 20 公分的流線型頭部會較 30 公分的流線型頭部快
所以最後我們選擇裝置 20 公分的流線型頭部模型到我們的最終成品上。

十、自製馬達成品實測軌跡





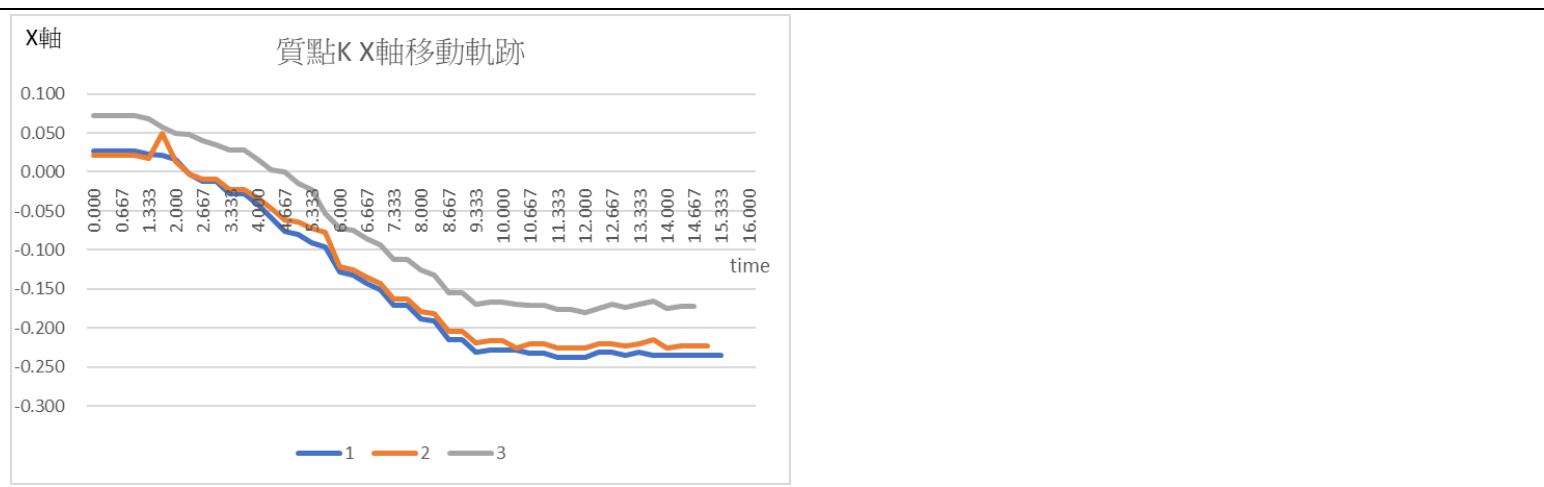


圖 4-10 水中實測 X 軸軌跡圖

註：為了將彈簧之伸縮彈開較凸顯，所以此圖表為加速五倍之影片製成，而 X 軸單位為公尺，而下方圖例之 1、2、3 為影片第一部第二部的意思。

在水中實測的圖表中，整組機械一分鐘約可移動 45cm。發現質點 A、B、C 的軌跡會較明顯地會伸縮、彈開、伸縮、彈開。而質點 D、E、F，它雖然也會有伸縮、彈開、伸縮、彈開的軌跡，但由於它位於彈簧中間，所以趨勢較沒有質點 A、B、C 明顯。而質點 G、H、I 則是不會伸縮部分，但整組機械在伸縮時，X 軸還是會有比較明顯的停頓或者是改變的情況。

而質點 J 和 K 則是位於彈簧尾端，和質點 G、H、I 相似，X 軸在伸縮、彈開時會有些許的改變，但不會有像指點 A、B、C、D、E、F 一樣有伸縮、彈開的明顯趨勢。

伍、討論與結論

一、寶特瓶小卷；在參考學長姐的寶特瓶小卷模型後，發現第一代的模型容易下沉，所以在其中放置一顆乒乓球製作出第二代，但第二代浮力又太強，所以拿出乒乓球在中間以一層氣球阻隔，製作出可穩定在水中間的第三代，但不論是第一代、第二代還是第三代都會有移動軌跡不穩定的情況發生，所以決定放棄寶特瓶小卷這個想法。

二、外部馬達：外部馬達參考了仿生魚這篇科展的構思，所以我們使用仿小卷臂腕的方式，用 3D 列印列印出零件，並且使用自製固化燈讓其成形，但外部馬達實際放到水中後，發現會有移動軌跡不穩定的情況發生，所以決定再繼續尋找資料。

三、自製彈簧外殼：我們一開始想用寶特瓶切割的方式製作出彈簧，但由於寶特瓶瓶身太硬，所以決定放棄此想法，後來又去參考關於摺紙彈簧等的書籍，製作出了三版的彈簧。

而第三版彈簧它可以透過改變摺數的方式來製作出許多不同的模型，而且還可以輕易地壓縮與彈開，故我們最後決定使用三版的彈簧當作後續實驗的材料。

四、摺數與比例：發現彈簧之平面圖是由等差數列構成的一張圖，而可以透過改變等差數列的項數，以及使用影印機進行等比例的放大或縮小，來改變彈簧的折數與整體大小。

製作出不同比例之彈簧後，使用積木製作出彈力測試之機具，使用彈跳力平均公式算出比值再三重複加標準差算出每個彈簧之彈力。

在彈力測試的結果中發現，折數越多，彈力表現越差；而當彈簧整體結構中比例越大時，彈力也同樣會下降。

五、水中彈簧速度測試：在本次實驗中，我們將棘輪裝置與彈簧放入水中，觀察彈簧彈開瞬間的速度與加速度變化。結果發現，彈簧前端的質點具有最大的速度與加速度，而越靠近後端，其值則逐漸減小。此外，質點 H 有時因為彈簧釋放後的前進位移，其速度與加速度會有時高於質點 E。

綜合彈力測試與速度、加速度測試的結果，我們最終選用五折中彈簧作為後續實驗的主體。此彈簧在彈力表現上為第二佳，且尺寸剛好能安裝於內部馬達結構中。此外，其在速度與加速度測試中具備良好的彈開表現，符合實驗需求，因此被選為最終使用的彈簧。

六、自製內部馬達：在前幾代馬達的設計中，我們持續改良了拉力與放線過程中所出現的問題，最終成功開發出第四代馬達，該版本結合了可遠端操控的 Arduino 控制板與棘輪裝置。因此，後續實驗皆採用此第四代馬達進行操作。

七、小卷流線型頭部：在此實驗中，我們發現 20 公分的模型，速度會較 30 公分來的快，故我們最後使用 20 公分的模型。

八、小卷機械行進：在小卷機械的最終成品中，我們觀察到其在水中一分鐘約可前進 45 公分。此外，透過氣球可協助其維持在特定水深，並可利用遠端控制系統進行移動。

陸、參考資料

- 一、Chitobox 赤兔教學。超級阿達工作室(2022)。
- 二、影像追蹤分析軟體 Tracker 使用簡介。國立臺灣師範大學中等教育階段自然領域教學研究中心(2017)。
- 三、黏合 3D 列印的五種方法【第一次 3D 列印就上手】希特 3D 列印(2023)。
- 四、蘇堯、賴岳群(2014)紙捲壓縮形成摺痕之探討。第 53 屆中小學科學展覽會。
- 五、中華民國農訓協會 385 期-【封面故事】基隆小卷夏日謳歌(2022)。
- 六、DIY Paper Folding Lamp Conical Structure Hexagonal Base NeoSpica Paper Structures(2020).
- 七、Fonseca, L. M., Rodrigues, G. V., & Savi, M. A. (2022). An overview of the mechanical description of origami-inspired systems and structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 223, 107316.

※除圖一以外，其他圖片皆由自己拍攝繪製。

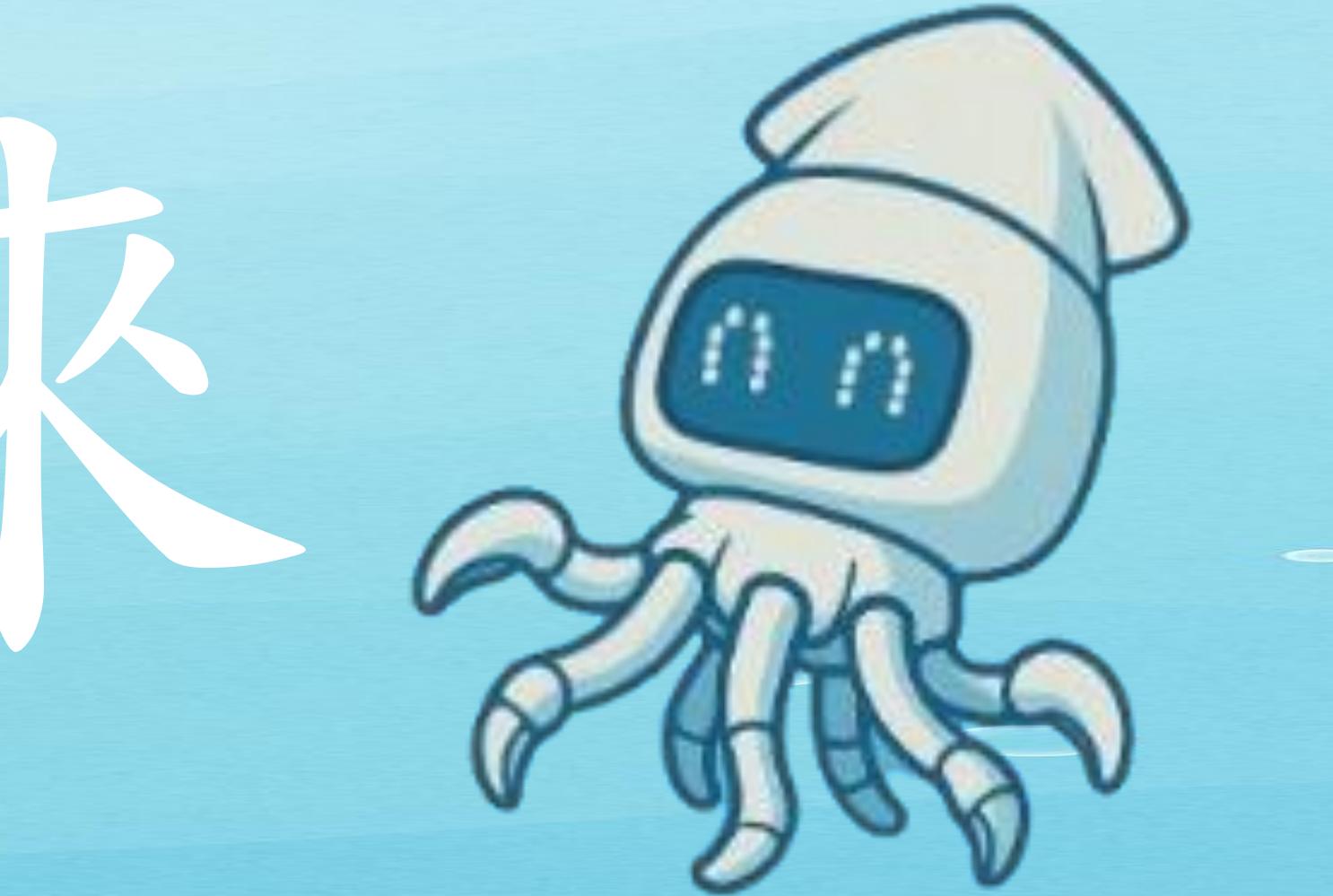
【評語】032817

結合在地特色與仿生設計，巧妙運用摺紙工藝、利用彈性塑膠摺紙模擬小卷的水中動力行為，構想具有創意並加以實作。建議未來研究可以強化原理說明，找出移動的機制，加強物理原理說明（如流體阻力、動能轉換），並探討實際應用領域如環境監測或水中機器人的可能性。

作品海報

捲動未來

「捲」動未來-摺紙仿生小卷機器人之探究



摘要

我們觀察到小卷在水中移動時，若受到驚嚇或刺激，會以噴射方式迅速前進。基於此特性，我們設計並製作了仿小卷動力機器人，模擬其水中移動行為。寶特瓶小卷模型皆採用水力作為動力來源，並以近似小卷的材質與比例製作，使其運動方式更貼近真實生物。完成初步實驗後，我們嘗試讓模型能像真實小卷般自行移動，因此運用校內的3D列印機設計零件。並且模仿小卷的動力，做出外殼，使用棘輪裝置收縮彈出產生速度，使仿生小卷能達到推進的效果。

壹、前言

一、研究動機

住在擁有豐富海洋資源的基隆，我們從小便與海洋相伴，但平常不論在家中或在學校，能接觸到海洋生物的知識卻是少之又少。而當我們得知需要選擇科展的題材時，就決定了有關於海洋生物的題目。在此之中，我們發現關於小卷的運動方式、外觀等的研究實在是少之又少，我們的好奇心就此開始萌芽。聽聞歷屆學長姐也曾對此展開一系列的研究，卻因時間的限制，而沒辦法得出一個完美的結論，於是我們便繼承了他們的研究精神，全力以赴的面對這次的研究。我們先是使用學長姐的研究過程嘗試以寶特瓶製作出小卷模型，再針對小卷實際運動方式、材質及穩定性作改良。接著，我們便開始挑戰製作全自動的小卷模型機器人，參考摺紙軟體上的資料，再配合校園裡的3D列印機，設計出屬於我們獨特的小卷。

二、研究目的

- (一)透過網路上影像了解小卷的運動方式
- (二)詳讀歷屆科展報告並參考其研究
- (三)自製仿小卷動力模型
- (四)使用自製彈簧搭配馬達再使用至小卷模型上

三、文獻回顧

(一)「卷」來「卷」去一小卷的運動:探討小卷構造在水中的影響，包括其中鰭的比例、腕的比例、鰭的形狀以及發射裝置。最終實驗後得知鰭在與體長比1:4時，從各項數值得知為能行徑最遠且頭部軌跡最高的；形狀的部分，最高的為半圓形及正三角形，而形狀對距離並無太大影響；觸腕長在此只提及並不穩定，並沒有明確提到他的比例；發射方式的部分，最終的發射方式決定為彈力發射。

(二)摺紙是一種三維結構，由二維源通過遵循一定模式的一系列折疊而構建。剪紙相當於切割折疊紙以產生所需結構的過程。模組化摺紙基於模組的組裝，可以是摺紙或剪紙，透過黏合或簡單連接每個模組來產生。摺紙是基於由摺痕、頂點面定義的折疊圖案構建的。



圖1-1 摺紙的不同型態圖

(Fold Mapping: Parametric Design of Origami Surfaces with Periodic Tessellations 2018)

四、研究架構圖



圖1-2 實驗架構圖

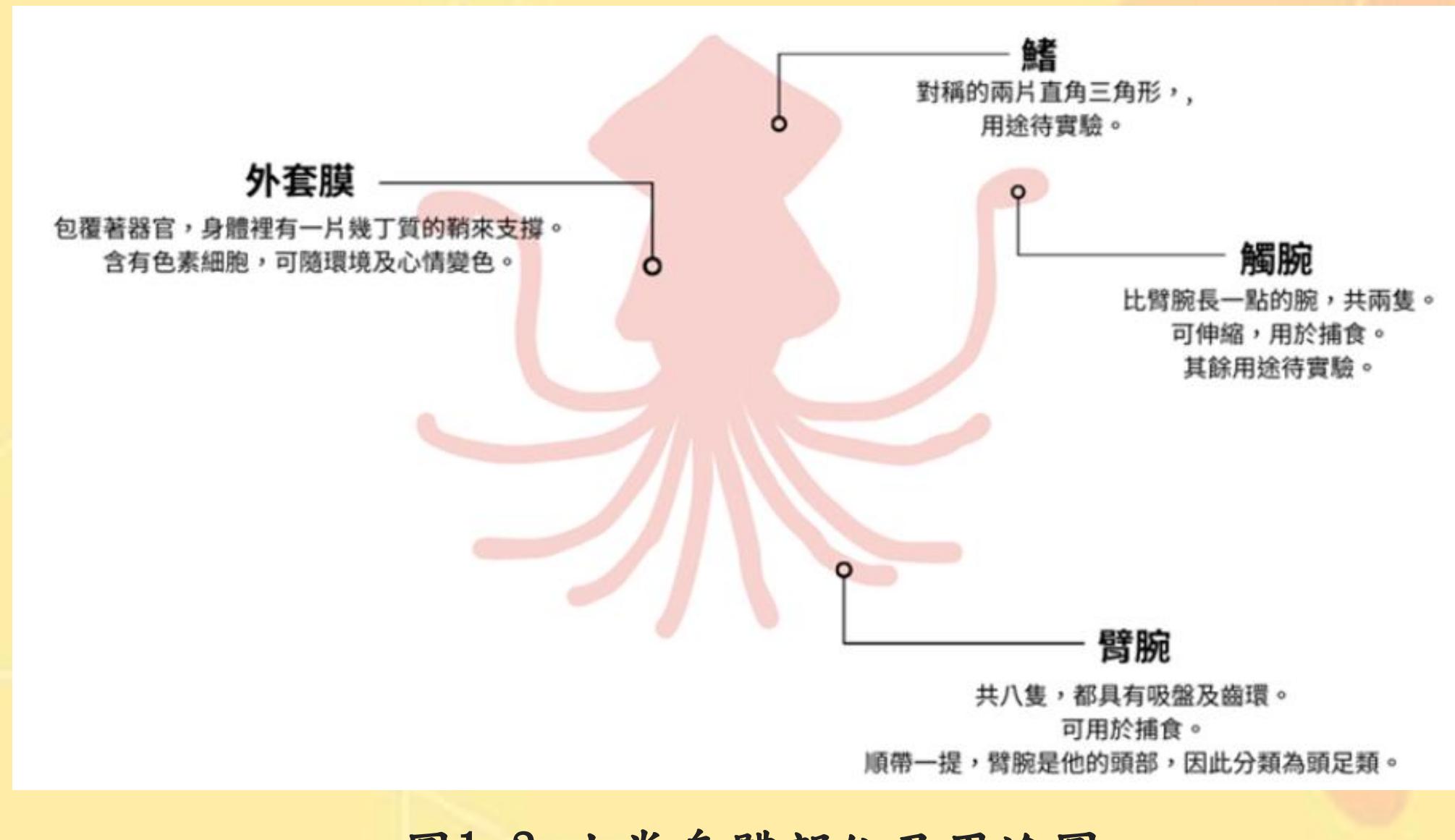


圖1-3 小卷身體部位及用途圖
(風馳電「卷」-摺紙仿生小卷機器人之探究 2024)

從中華民國農訓協會385期-【封面故事】基隆小卷夏日謳歌，整理過後可了解小卷的三種移動方式：

1. 吸水：小捲會通過外套膜中的肌肉收縮，將水吸入外套腔內。
2. 噴射：當外套膜的肌肉再次快速收縮時，小捲會將外套腔中的水高速噴出，從而產生反作用力，推動自己向前移動。這種噴射推進能讓它們迅速逃離掠食者或追逐獵物。
3. 使用鰭進行調整：除了噴射推進外，小捲的側面還有鰭，可以用來協助在水中進行平衡和改變方向。

貳、研究過程或方法

一、小卷模型製作

參考了「卷」來「卷」去一小卷的運動這篇科展，我們參考其的寶特瓶小卷模型並加以改良並實作。

(一)發射台製作

由於參考之寶特瓶小卷模型，需要以水力發射的方式前進，故須製作發射台為了穩定小卷的發射方向及移動軌跡，而我們先以瓦楞板製作了一代發射台來固定模型的發射位置，但由於瓦楞板過於脆弱，容易彎折及斷裂，因此第二代就以第一代的結構為原型，再使用了較堅固的壓克力材質重新黏貼，且固定水管的位置使得操作更加方便，就有了現在所使用的發射台。

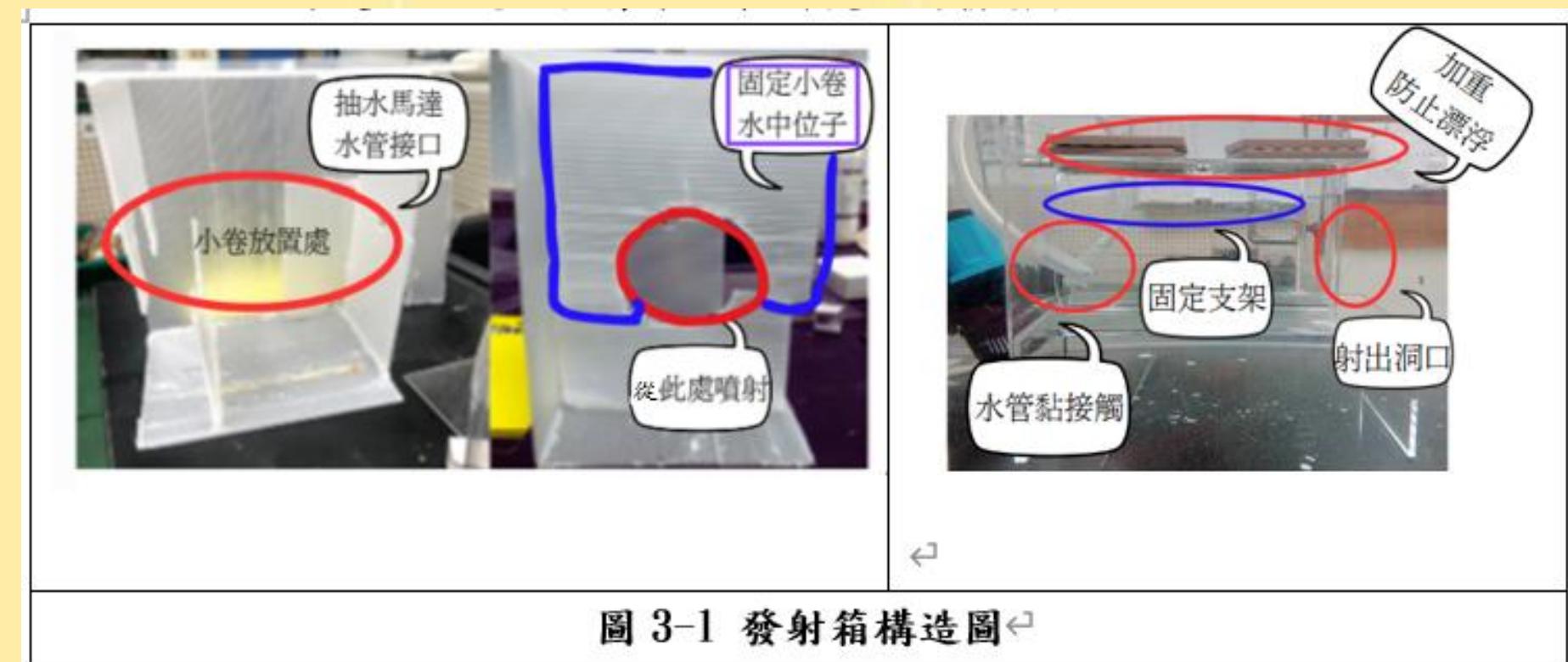


圖 3-1 發射箱構造圖

(二)寶特瓶小卷一代模型製作

第一代小卷(如圖3-2)是用寶特瓶當作小卷身體，並且用塑膠袋當作鰭和氣球當作臂膀，放在發射台發射，並製作X軸和Y軸之移動軌跡圖。但此模型放進水裡時會直接下沉至水箱底部，再加上寶特瓶前端呈彎曲狀，造成小卷的腕會向內聚集，與小卷本身有過大差異。此外，一代模型還有一個缺點，黏貼小卷臂膀的地方並非模型的最末端，可能導致測量數據及實驗的不精準，因此決定不採用第一代的小卷。



圖 3-2 寶特瓶小卷一代
模型圖

(三)寶特瓶小卷二代模型製作

為了解決一代模型會沉沒的問題，於是在二代模型(如圖3-3)內裝了一顆乒乓球以維持模型在水中的浮力，在兩者中間加上一層氣球隔開，使發射前的等待時間較一代模型較短，並製作X軸和Y軸之移動軌跡圖。但接著又遇到了新的瓶頸，二代模型的浮力過強，導致模型無法在水底下移動，因此決定製作第三代模型改良已知的缺點。

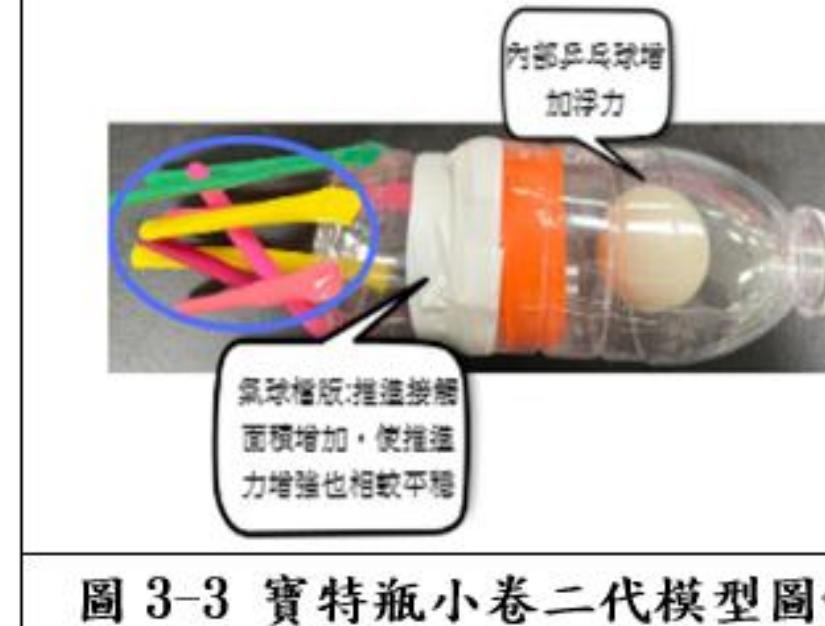


圖 3-3 寶特瓶小卷二代模型圖

(四)寶特瓶小卷三代模型製作

第三代小卷(如圖3-4)改善了浮力的問題，使寶特瓶總長度縮短，正好能讓三代模型在水中保持有些微的浮力，卻也不會完全下沉；在小卷的尾端更是加上了一層氣球阻隔，使得發射等待時間較二代小卷更短，並製作X軸和Y軸之移動軌跡圖。

總結：雖然三代模型有很好的發射效果，但需要發射台且只能移動一次，所以我們決定嘗試不同移動方式，並尋找有使用機械相關技術之科展。



圖 3-4 寶特瓶小卷三代模型圖

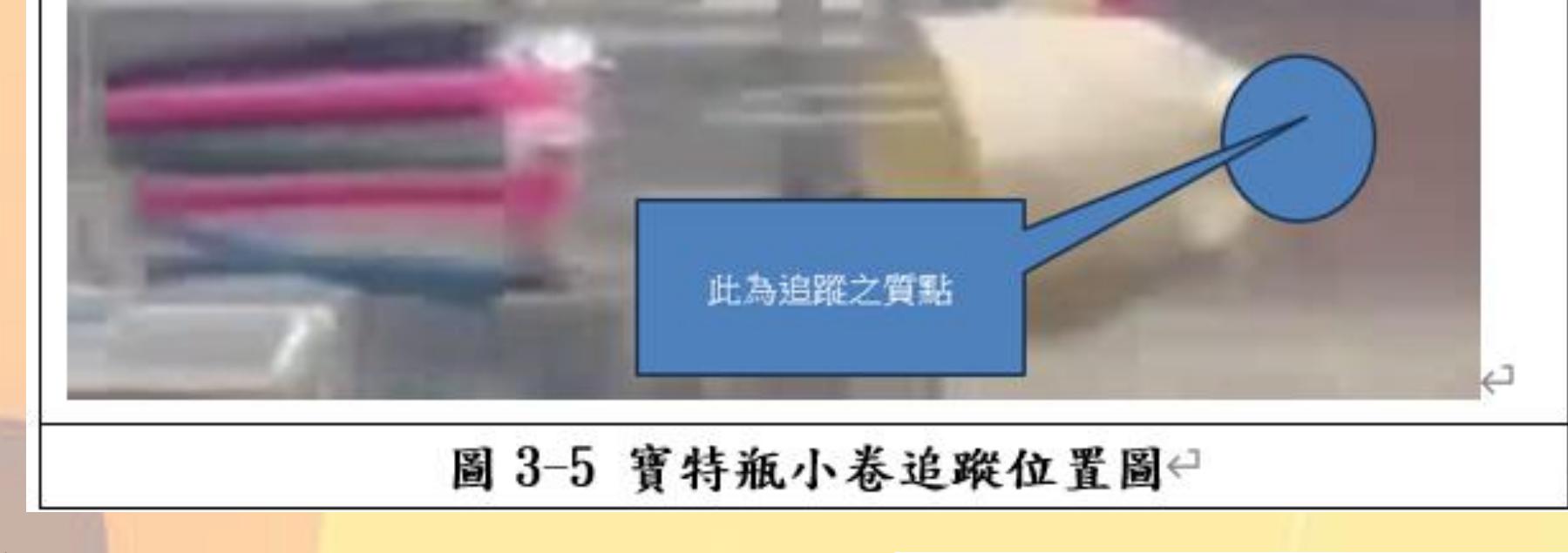


圖 3-5 寶特瓶小卷追蹤位置圖

二、自製外部馬達

(一)構思

在經過港西國小的啟發後，上網查詢了有關於此魚尾鰭結構的文獻，並發現其原理為：在維持同一片矩形的長度下，再設定後方桿子可移動幅度，就能使兩片板子左右移動。示意圖如右：

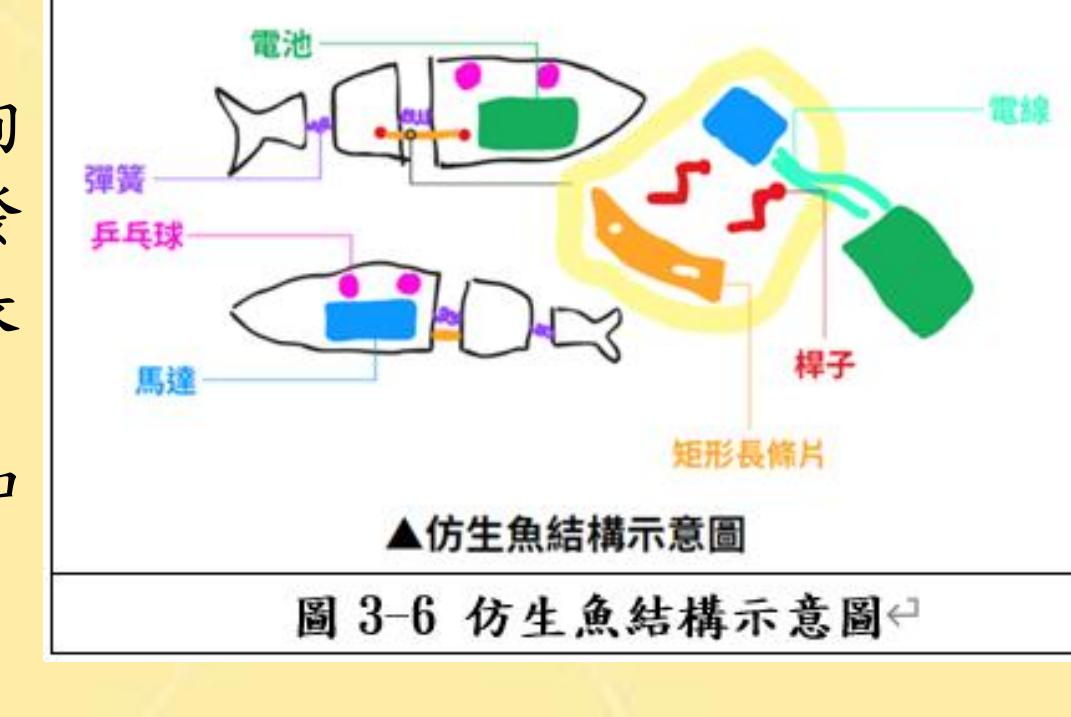


圖 3-6 仿生魚結構示意圖

1. 設計

而在理解它的構造後，倏地靈光乍現：我們是否可以讓小卷臂膀轉動帶動外部馬達前進呢？於是便利用tinkercad設計零件雛形。

2. 添加支架

在設計完畢後，曾為了零件材質苦惱許久，而在這時便想起校園內還有兩台3D列印機，於是便開始學習如何列印。

3. 列印

4. 固化

我們的自製固化機是將250瓦的紫外線燈安裝在木盒上的裝置(如圖3-8，這項裝置是為了因應在氣候不穩定的基隆，也能隨時照射紫外線燈，是個在實驗中非常省時又方便的好工具。

5. 組裝

固化完成之後，將印完的零件組合成外部馬達。

6. 實際應用

此部分是為了模擬小卷鰭的運動模式，所以我們測試外部馬達移動狀況，並製作X軸和Y軸之移動軌跡圖，分為左馬達和右馬達(如圖3-9)。



圖 3-7 3D 列印過程圖



圖 3-8 固化燈

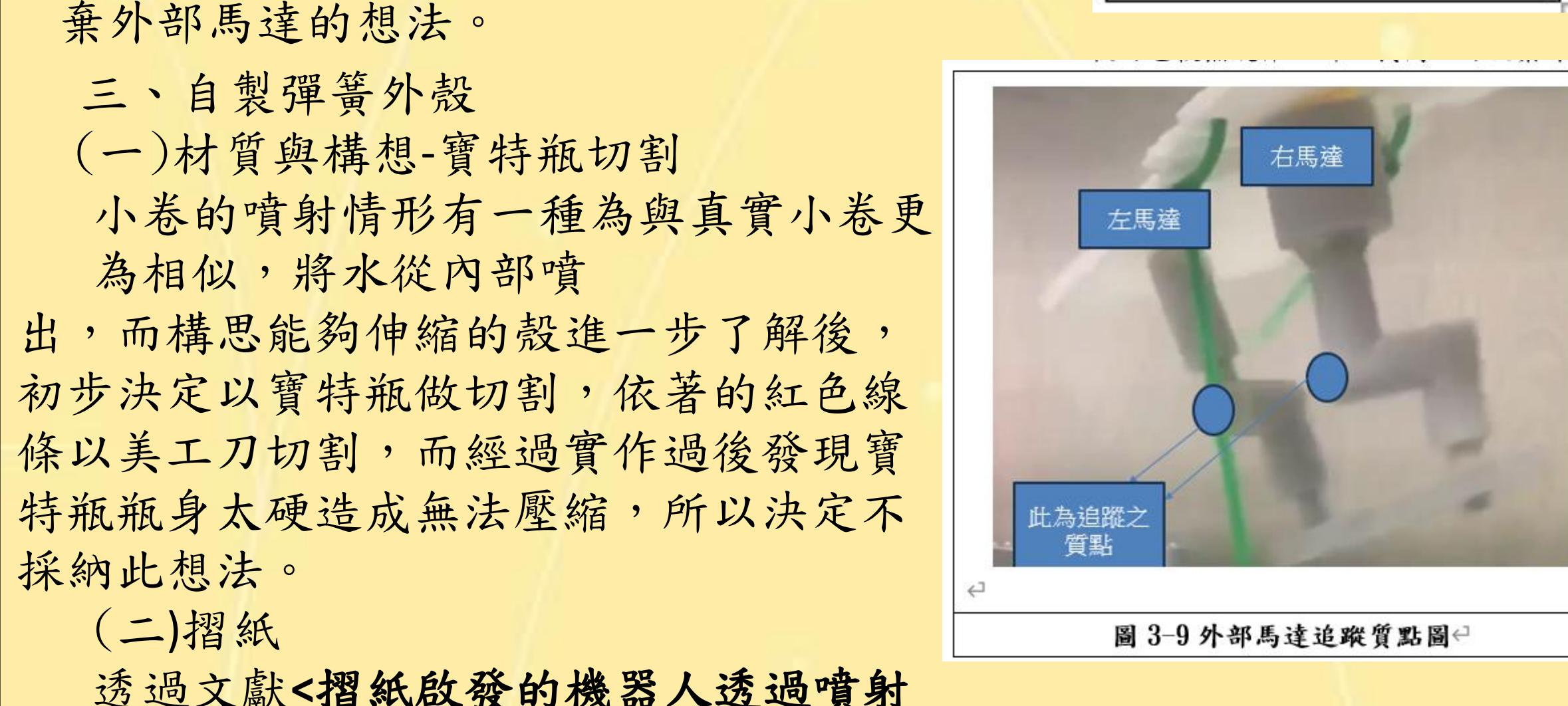


圖 3-9 外部馬達追蹤質點圖

從<數學立體模型製作>選取了幾組較符合需求的摺法進一步探討，而經過統整與討論後決定以「燈籠」「螺旋」相關詞彙作為查詢方向，並選擇使用較易折和易成型的PVC塑膠板當作下方實驗之材料。

(三)最終版彈簧

我們在摺紙軟體中找到了可以摺出彈簧的平面圖，並且用此平面圖可摺出我們想要的彈簧，而我們可以利用其平面圖為等差數列的排列，改變項數，選出最適合我們的彈簧模型。

做法如下:(如圖3-10)

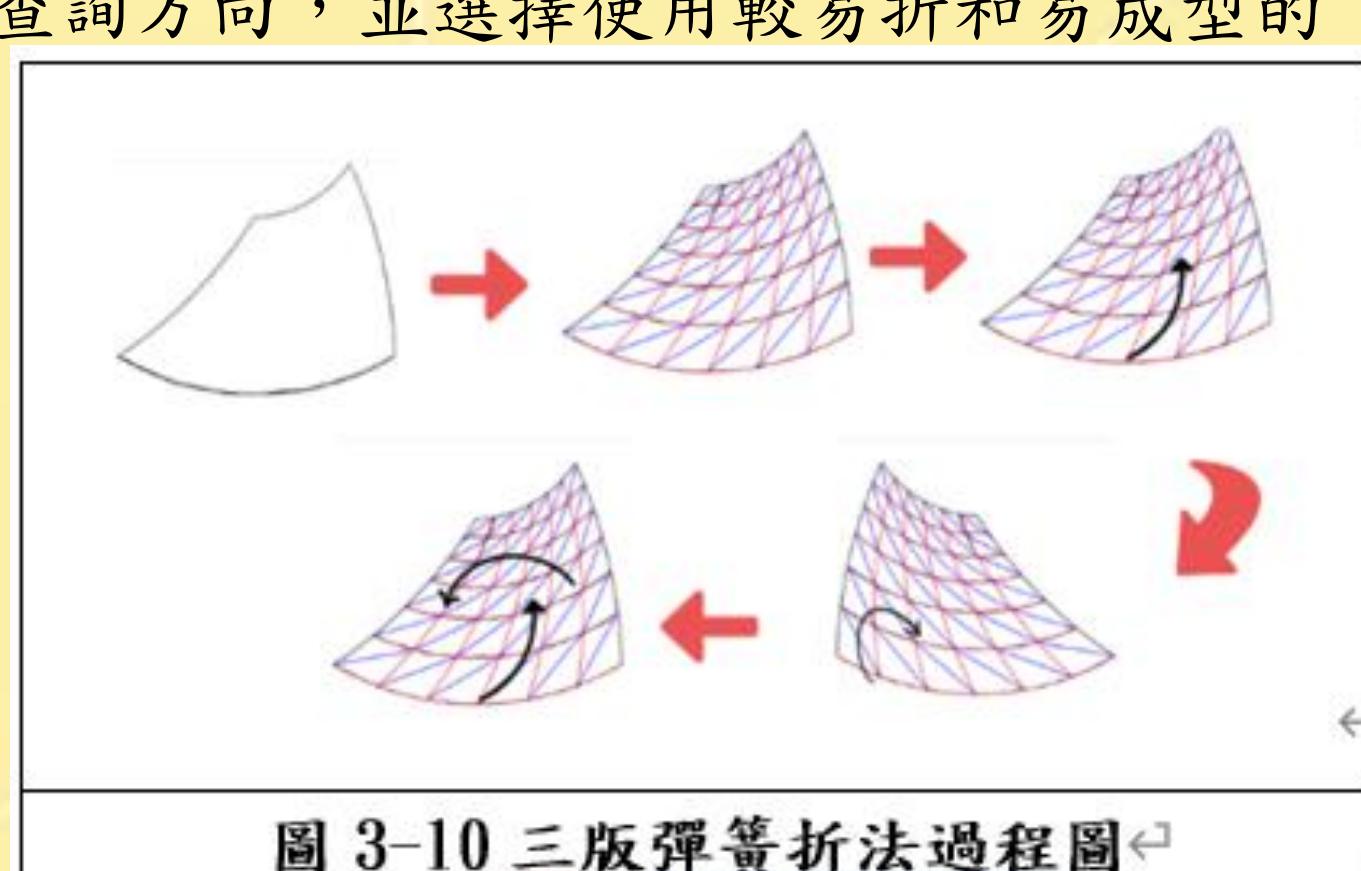


圖 3-10 三版彈簧折法過程圖

(藍色部分為谷折線，紅色部分為山折線)(一格為一摺)

1. 將山折線向外折
2. 將谷折線向內折
3. 將彈簧一端用熱溶膠黏至另一端(一邊會預留約0.5cm)
4. 待熱溶膠凝固即完成

最後發現三版彈簧其可改變折數，選出最佳比例之模型，還可較輕易壓縮和彈開，故決定使用三版模型當作下述實驗之材料。

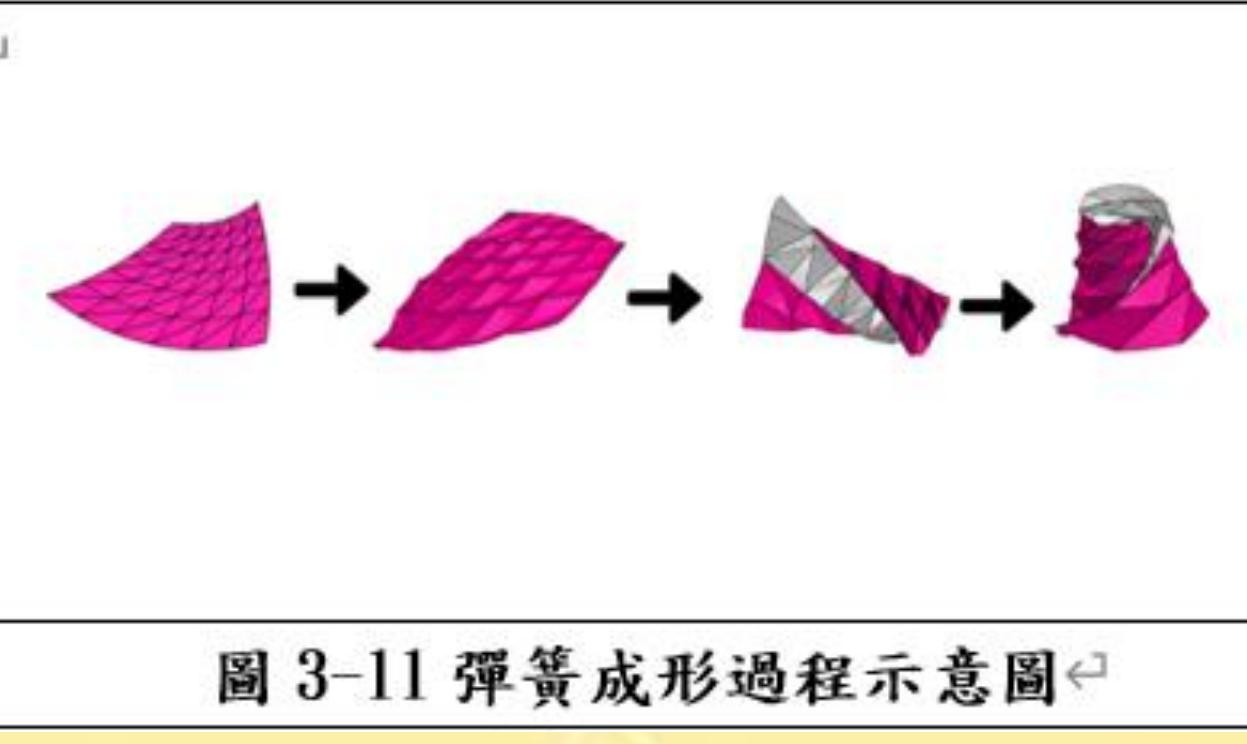


圖 3-11 彈簧成形過程示意圖

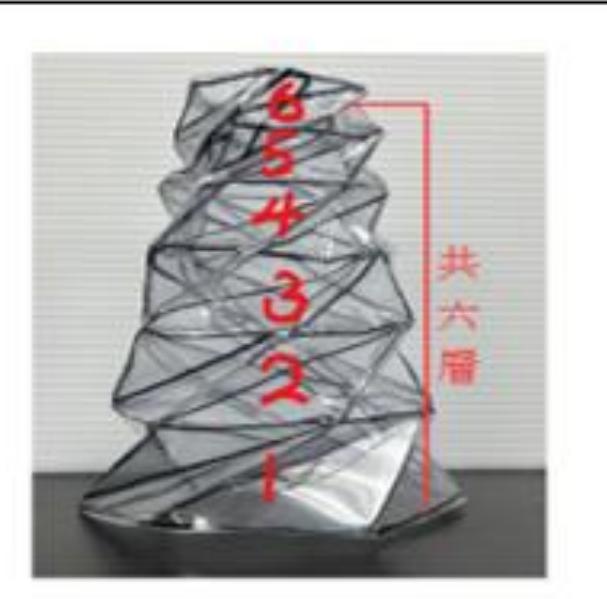


圖 3-12 三版彈簧成品圖

四、摺數與比例

為了比較不同摺數彈簧的彈力，推算並研究原圖的比例關係由左圖可發現影響摺數的變因是因垂直方向的層次改變，進一步發現垂直方向每層的高度不同，且成等差數列，第一層為4，第二層為3.5，第三層為3……以此類推。

由此可得知以4為首項，公差為0.5，項數為6，級數總合為19。而能夠輕易得知改變項數和使用影印機等比例放大縮小(大:放大2.5倍，中:放大1.5倍，小:原稿)即能改變彈簧的摺數和大小，我們尋找資料後，使用Adobe Illustuator這項軟體來畫出不同摺數的平面圖。

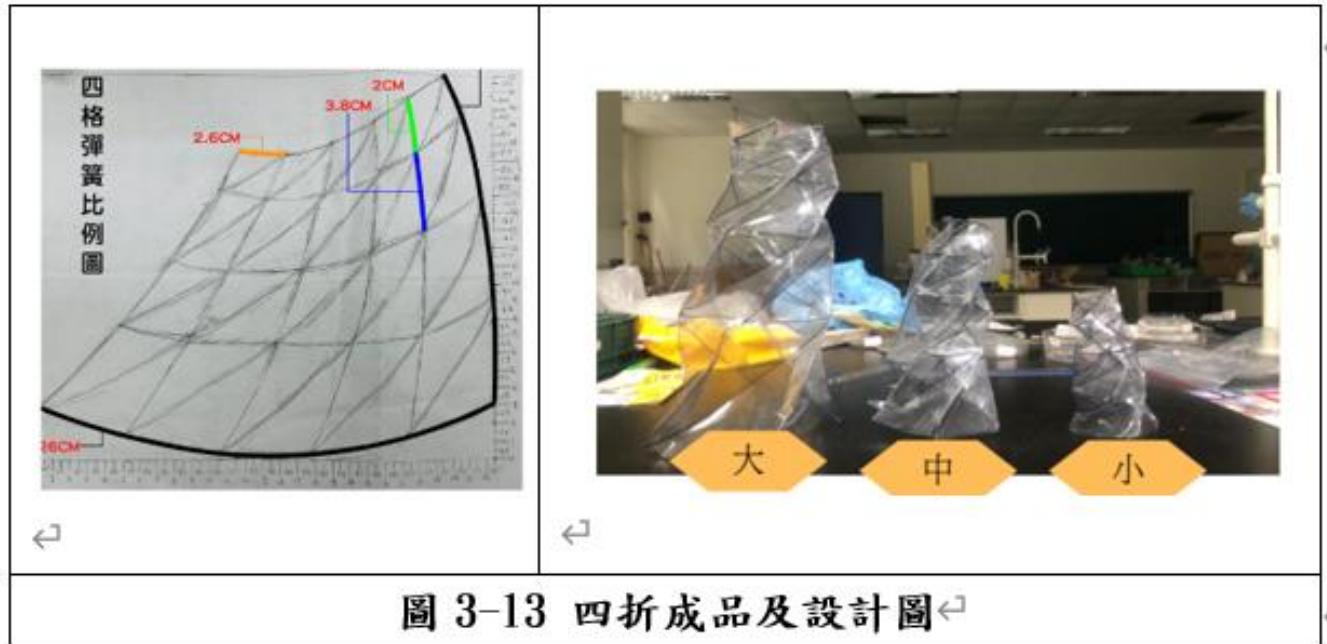


圖 3-13 四折成品及設計圖

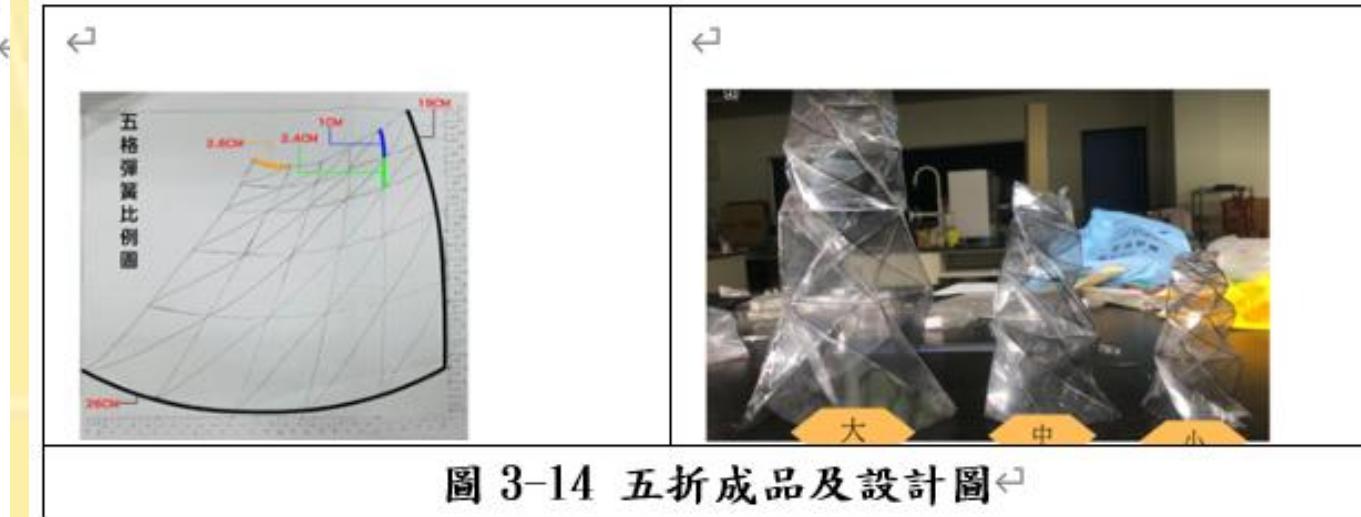


圖 3-14 五折成品及設計圖

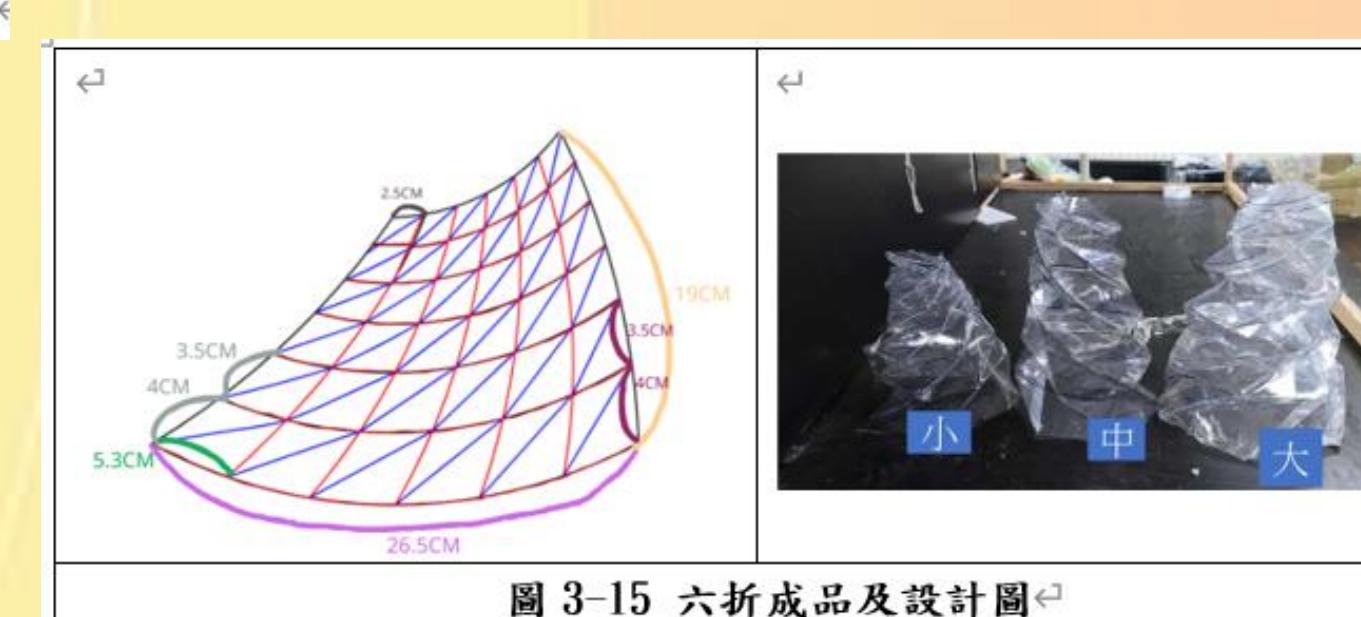


圖 3-15 六折成品及設計圖

1. 為了達到測量的準確性用積木製作了彈簧發射器

2. 將兩端積木扣住，使得彈簧壓力一致放開扣環彈簧即彈起

彈跳力平均值數據公式：

1. 彈跳高度+彈簧壓縮後長度)/彈簧高度(三重複加標準差)
(大型約24cm，中型約16cm)
2. 避免因彈簧原本大小不一而造成彈力計算的誤差，按照與彈簧本身高度的比例來算

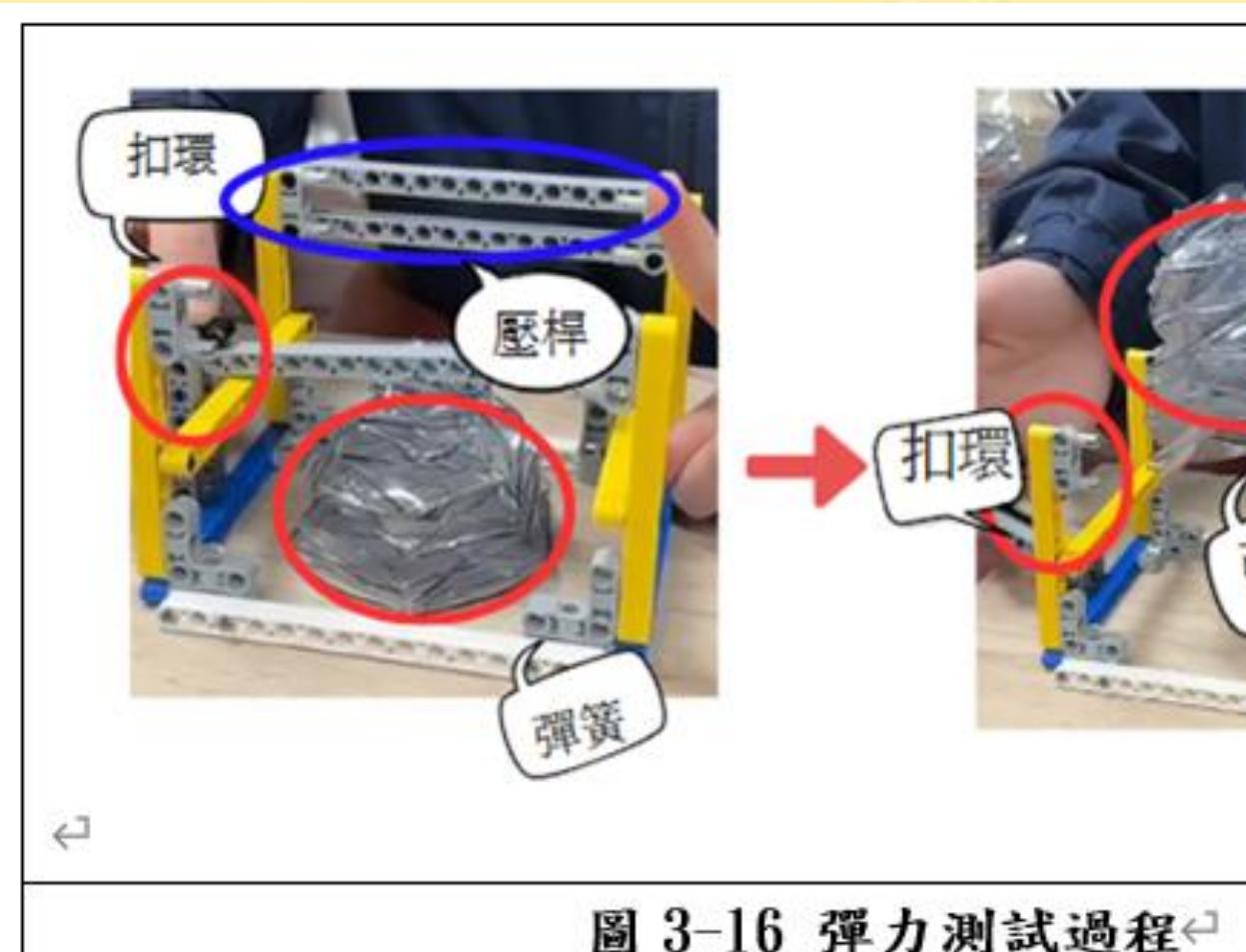


圖 3-16 彈力測試過程



圖 3-17 觀察基準位置圖

五、自製內部馬達

(一)簡單機械參考來源

1. 擷取 Thingiverse (3D 模型平台)上的部分範本做為參考，並放進自製內部馬達的設計裡。
2. 設計要點
(1). 需配合自製彈簧拉伸
(2). 使用強韌的釣魚線連接自製彈簧前後端，自製彈簧中央需有可收放線的機械。
(3). 觀察過後，得知可使用三角錐形及齒輪當作拉力，以此為基礎設計收放線機械。
(4). 備註:rpm 值可表示馬達轉速的大小，數值越大代表轉速越快]

(二)四代馬達

1. 設計構思

本次改良使用arduino(如圖3-35)，讓其可以遠端操控，搖桿按上為收線，收線至最緊後，按下彈出，並且使用棘輪裝置，齒輪配法和三代一樣，但使用此方式，就可保持力度，而且還不會斷，所以選這一代馬達當作最終的版本。

材料：

減速馬達(rpm300)、arduino、自印3D模型零件

2. 3D模型傳動軸

由於馬達和棘輪裝置為不同之模組，所以用3D列印印出傳動軸，將馬達的速度轉換至棘輪裝置(齒輪)上。



圖 3-18 馬達圖

六、彈簧在水下之速度測試

我們的內部馬達模型運用arduino旁邊裝電池盒，在給電至馬達，將機械模型製作出來，再將馬達的釣魚線綁在彈簧上方的竹筷，將馬達放在另一彈簧下方第一折處並用束帶固定，而我們為了想知道彈簧在水下實際速度為何，於是將彈簧和棘輪裝置放入水中，拍攝其彈開瞬間，並找出各種彈簧三個質點之速度與加速度($v_x & a_x$)最大值(三重複加標準差)，並製成長條圖，並將X軸軌跡用長條圖呈現，得出最佳之彈簧模型。

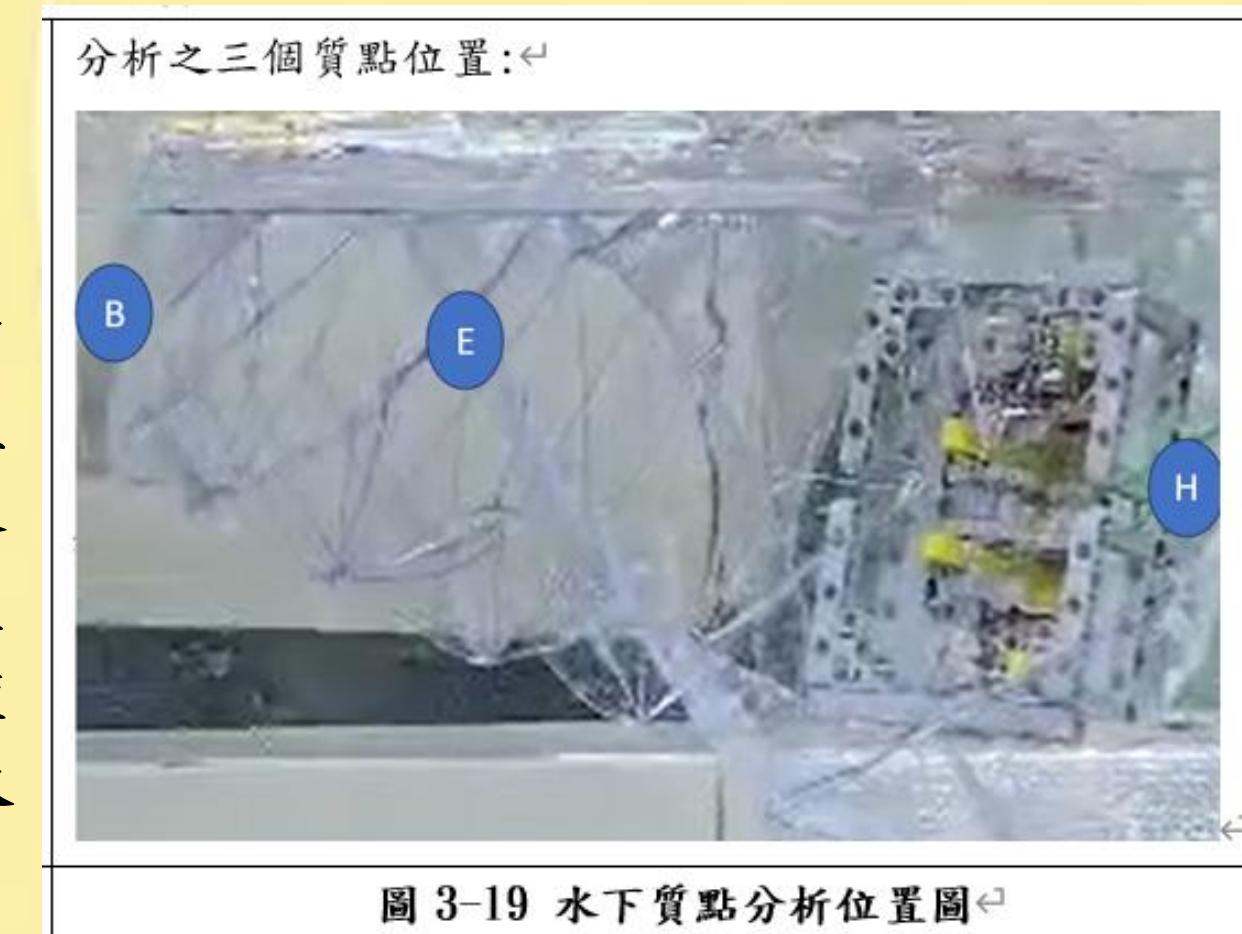


圖 3-19 水下質點分析位置圖

七、彈簧流線型頭部

我們發現，小卷的頭部是較像流線型，可減緩水的阻力，但上述實驗設計之彈簧外型卻不符合此造型，故我們想到：可使用之前實驗剩餘之PVC塑膠板，折成流線型的前端。所以故設計此實驗，了解何種比例之流線型前端移動速度最佳。

我們使用GeoGebra 設計底部和五折中彈簧大小直徑一樣的圓錐體，並設計高度分別為10cm 20cm 30cm(如圖3-40)，並黏在上方放入水中測試，並測試其從水中一個位置(同一位置)，直到觸碰到水缸另一端玻璃(約45cm)，看其所需時間。

※由於10cm之流線型頭部過小，馬達會造成其凹折，造成實驗不精準，故不加入至實驗。

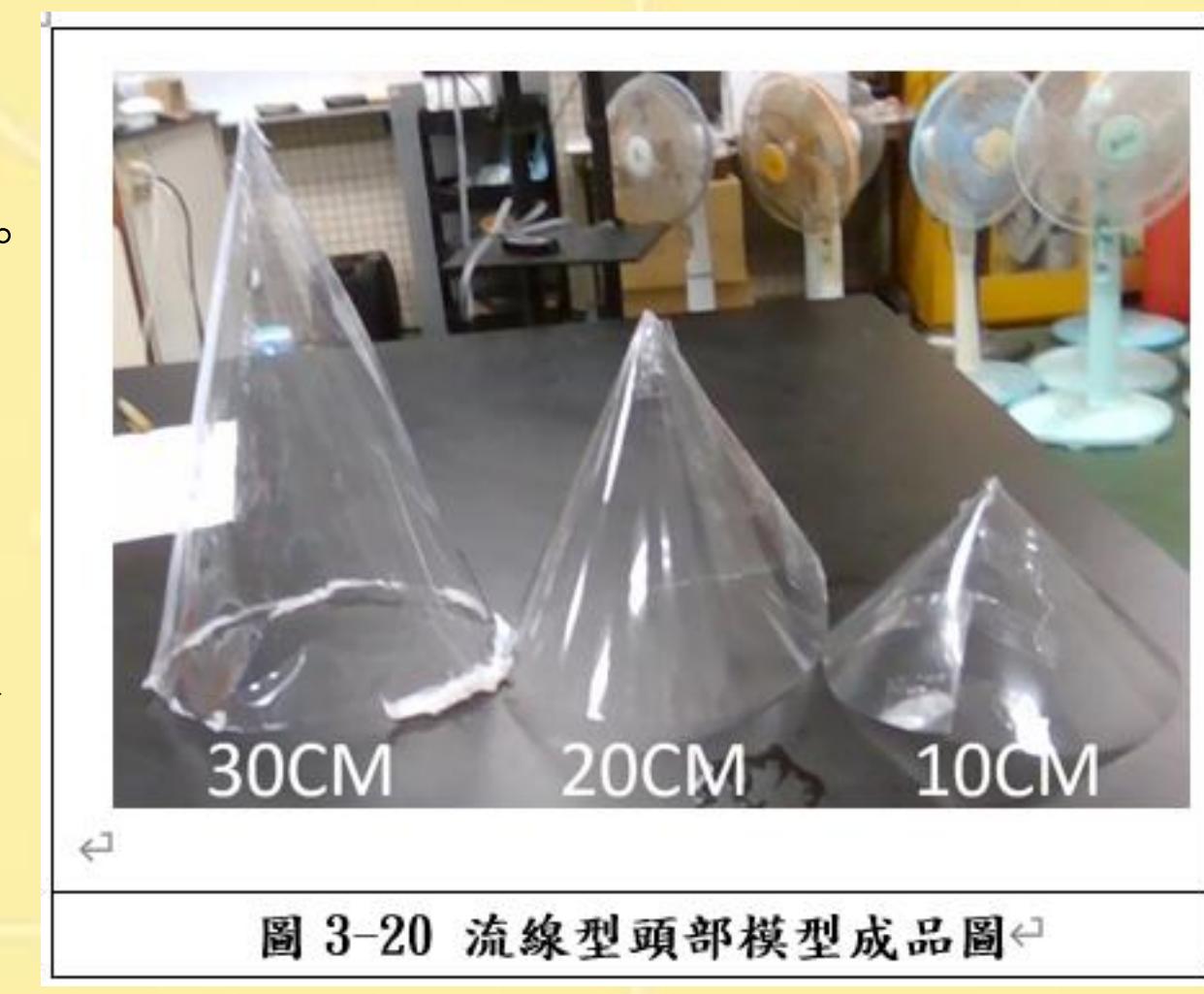


圖 3-20 流線型頭部模型成品圖

八、內部馬達結合彈簧空氣行徑軌跡

而我們想要看看機械的彈射移動方向為何，剛好教室內有以前學長姊製作的生物觀察箱(如圖3-22)，經過我們的改良後，以兩條棉線分別讓機械的兩端懸空，觀察其的軌跡。

我們一開始一直讓機械持續壓縮，直到5秒鐘機械都無法在往下轉一個齒輪，即彈開，而彈開後則在拍攝五秒鐘其的移動軌跡。



圖 3-21 質點分析位置圖



圖 3-22 觀察箱

九、自製馬達成品實測軌跡

我們的成品運用arduino旁邊裝電池盒，在給電至馬達，馬達結構為防水，但arduino和電池盒為不防水，且水會阻隔信號，所以經過多方思考和評估可行性，決定將arduino主機板和電池盒放置在水面上(如圖3-23)並組裝五折中彈簧+20cm流線型頭部；並製作質點軌跡圖；而我們還用了氣球懸掛機械，讓其可以穩定在水中保持一定高度。

而我們的機器在水中1分鐘左右可以完成多次收縮彈射，並可以移動約45公分，顯示其可在水中進行移動。



圖 3-23 氣球和arduino位置

參、研究結果

一、第一代寶特瓶小卷移動軌跡

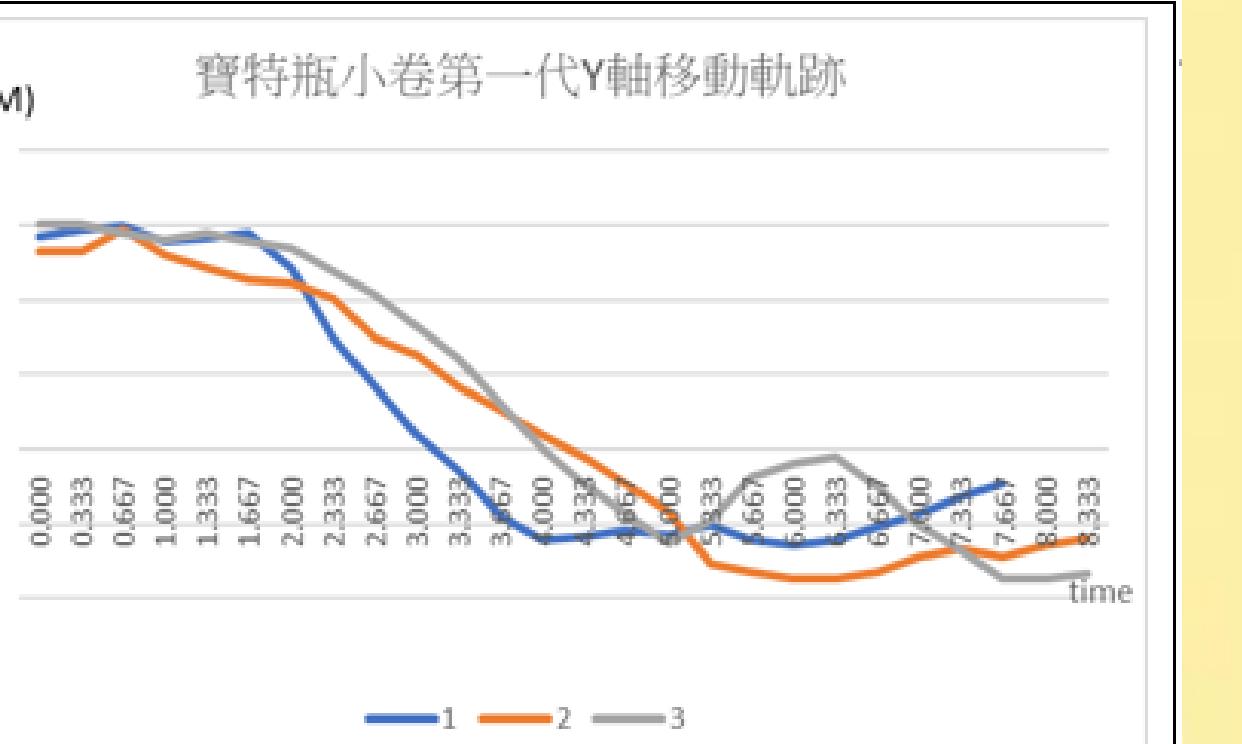
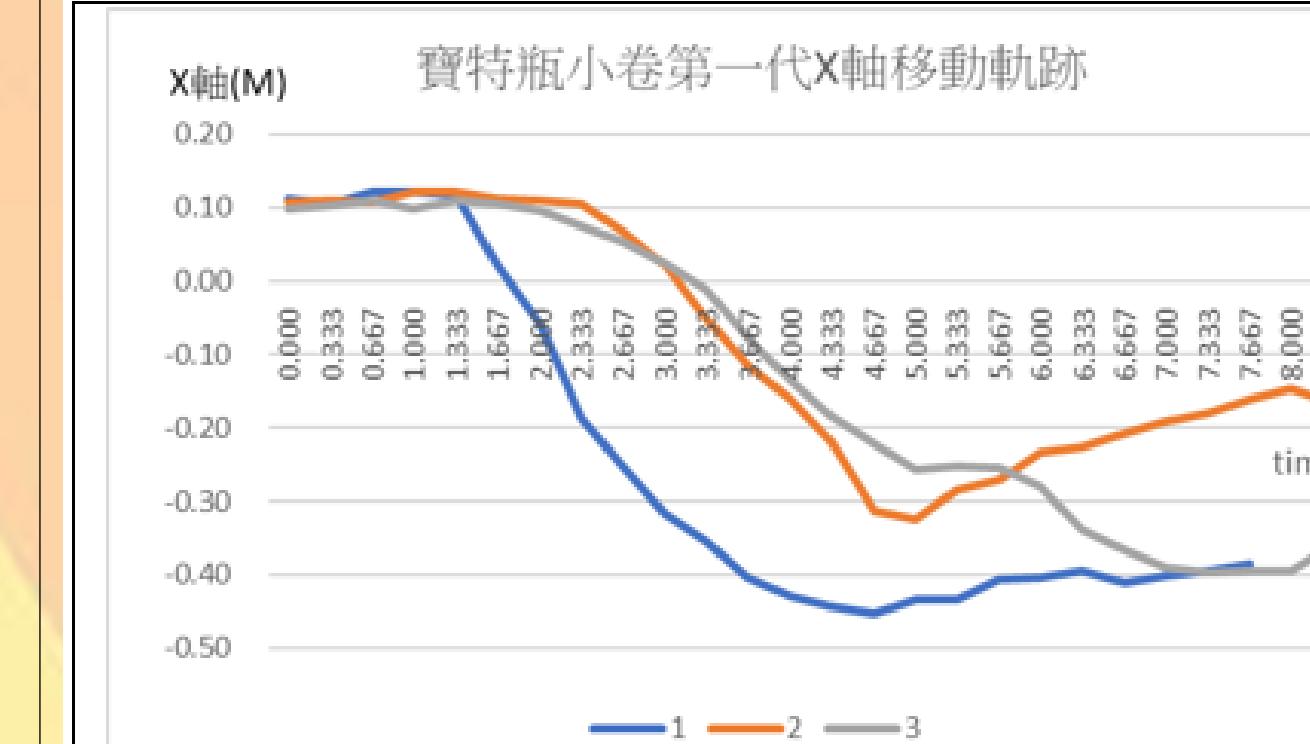


圖 4-1 第一代寶特瓶小卷 X 軸和 Y 軸移動軌跡

在寶特瓶小卷第一代X軸移動軌跡中，我們發現小卷寶特瓶發射出去後，一開始會往前行進，但到後面之後有可能會偏左或偏右，有軌跡不穩定的情況發生。而在寶特瓶小卷第一代Y軸軌跡中，我們發現小卷寶特瓶模型一開始發射出去之後會直直的往下沉，但是之後有可能頭部會稍微的往上，但又會沉下去。但在整體看來，寶特瓶小卷第一代的移動軌跡不僅會沉沒，而且會有方向不穩定的情況發生，所以我們不使用這個模型。

二、第二代寶特瓶小卷移動軌跡

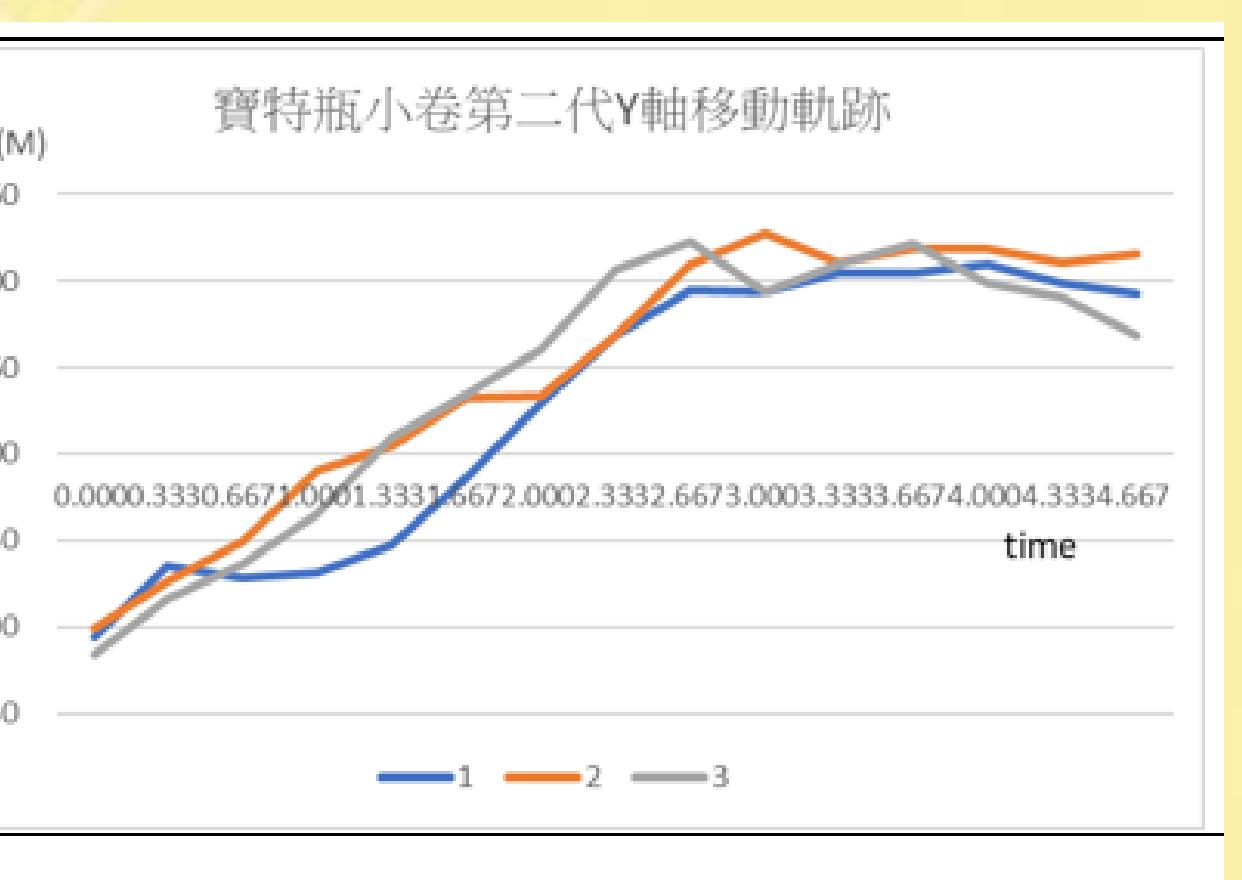
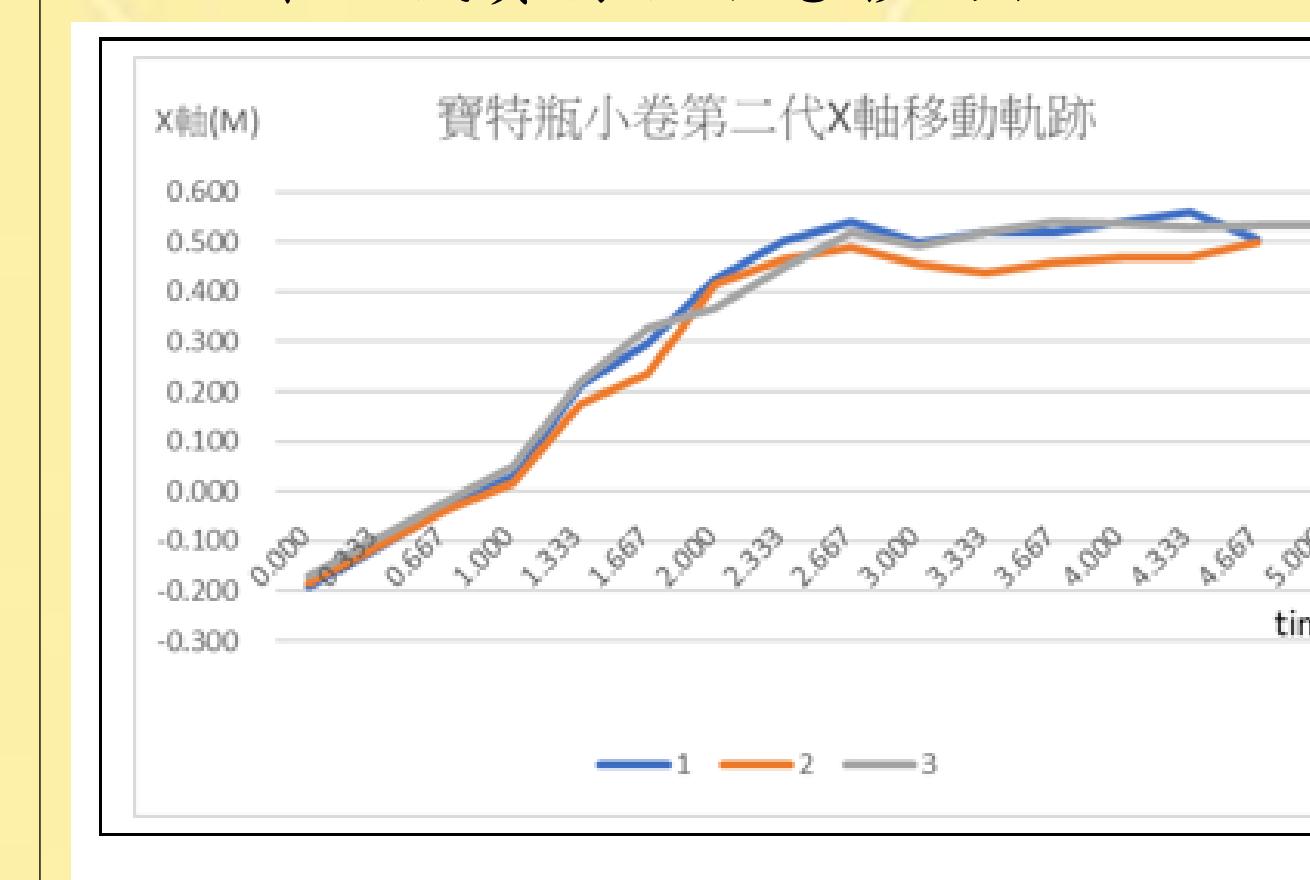


圖 4-2 第二代寶特瓶小卷 X 軸和 Y 軸移動軌跡

在寶特瓶小卷第二代中，我們在裡面增加了一顆乒乓球。所以在寶特瓶小卷第二代X軸移動軌跡中，我們發現小卷模型發射出去後會往右快速移動，浮到水面上後就很少往右移動，而且在移動過程中會出現移動軌跡不穩定的情況發生。而在寶特瓶小卷第二代Y軸移動軌跡中，我們發現寶特瓶小卷模型發射出去後會直直往上浮起，而且會有方向不穩定的情況發生，故決定不使用此代模型。

三、第三代寶特瓶小卷移動軌跡

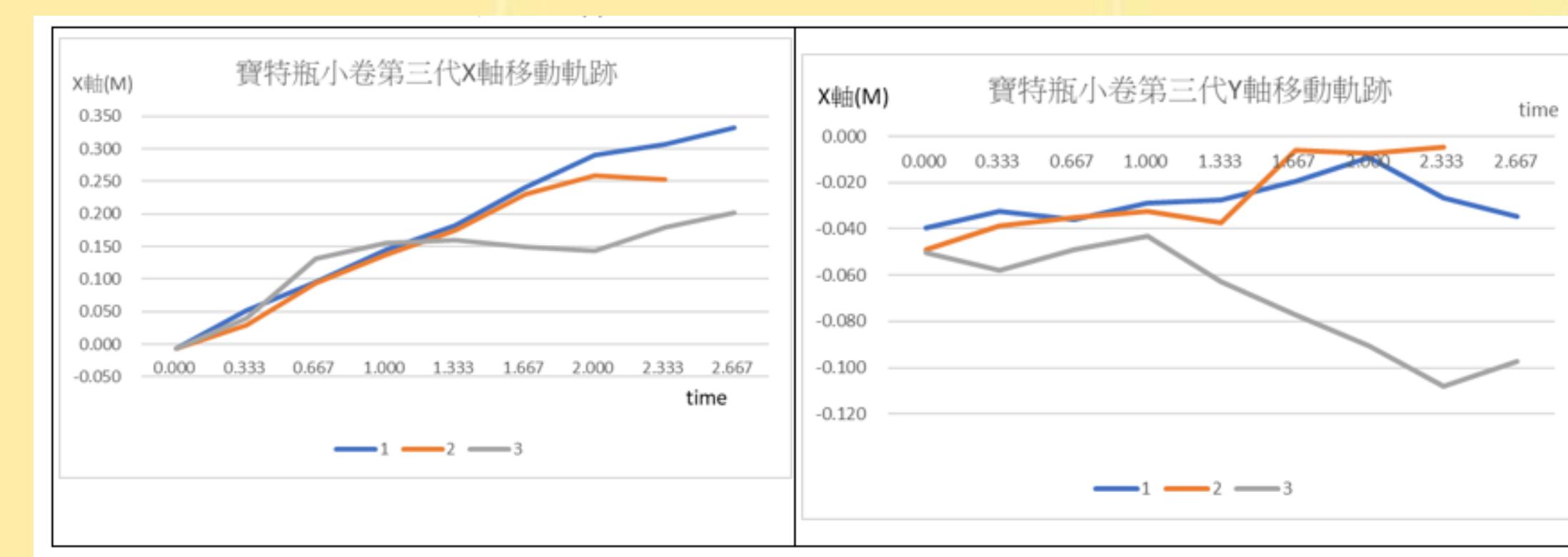


圖 4-3 第三代寶特瓶小卷 X 軸和 Y 軸移動軌跡

在小卷第三代模型中，我們發現它發射出去之後會在位於水缸的中間，並且一開始時會穩定地緩慢向前前進，但是發射出去後一陣子它就會偏左或偏右。像第三部影片就是在發射過程中旋轉了約 90 度，所以我們發現寶特瓶小卷不論是第幾代都會有軌跡不穩定的問題，所以我們參考別的資料製作新的模型和移動方式。

四、外部馬達移動軌跡

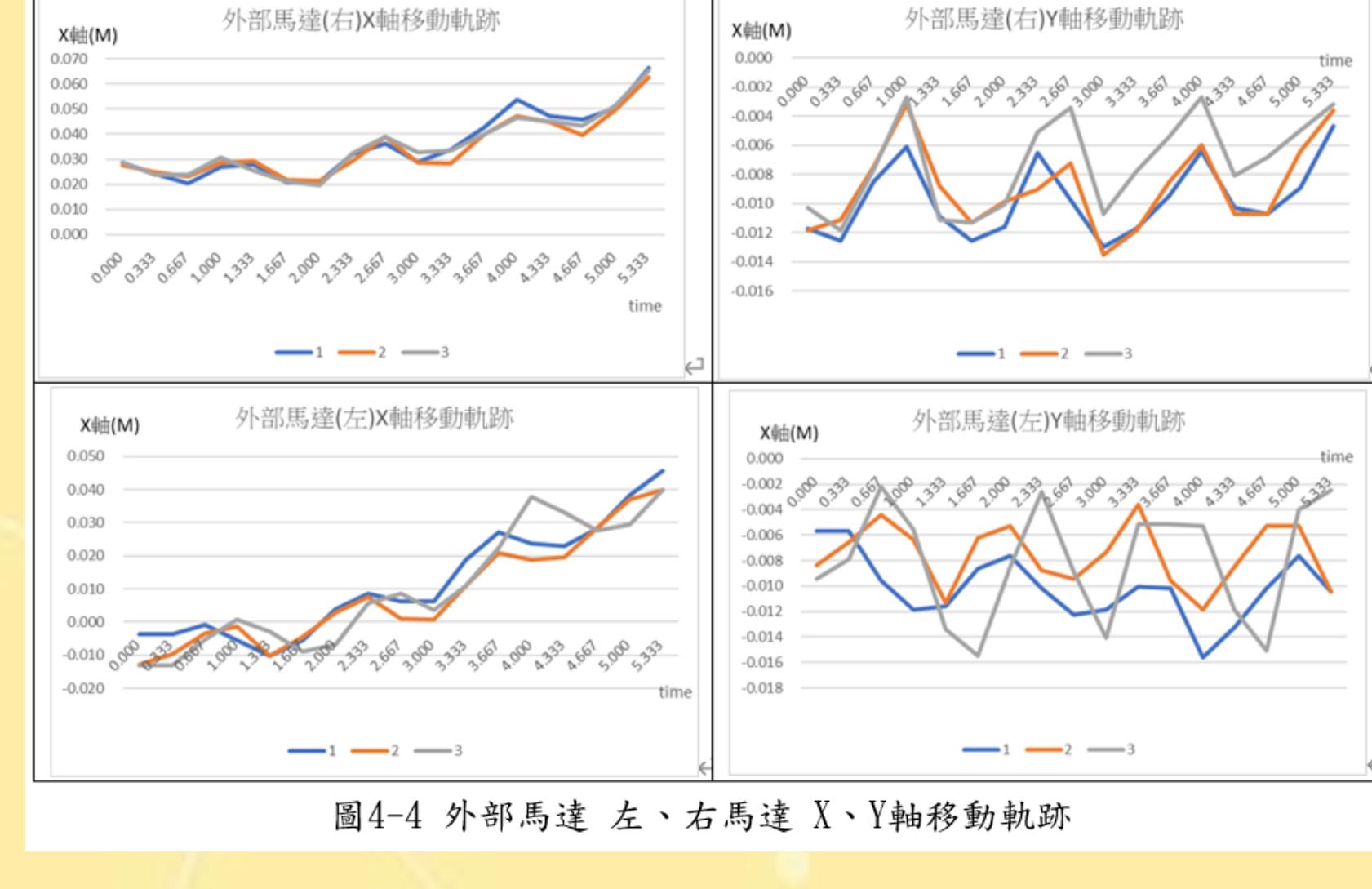


圖 4-4 外部馬達 左、右馬達 X、Y 軸移動軌跡

在 X 軸和 Y 軸左馬達和右馬達的移動軌跡圖中，我們在圖表中看來它都有很明顯的趨勢，但在移動時我們發現它有時也會像之前的寶特瓶小卷模型一樣會有偏左偏右的問題，所以我們又放棄了這個想法繼續尋找新的資料。

五、彈簧之彈力測試

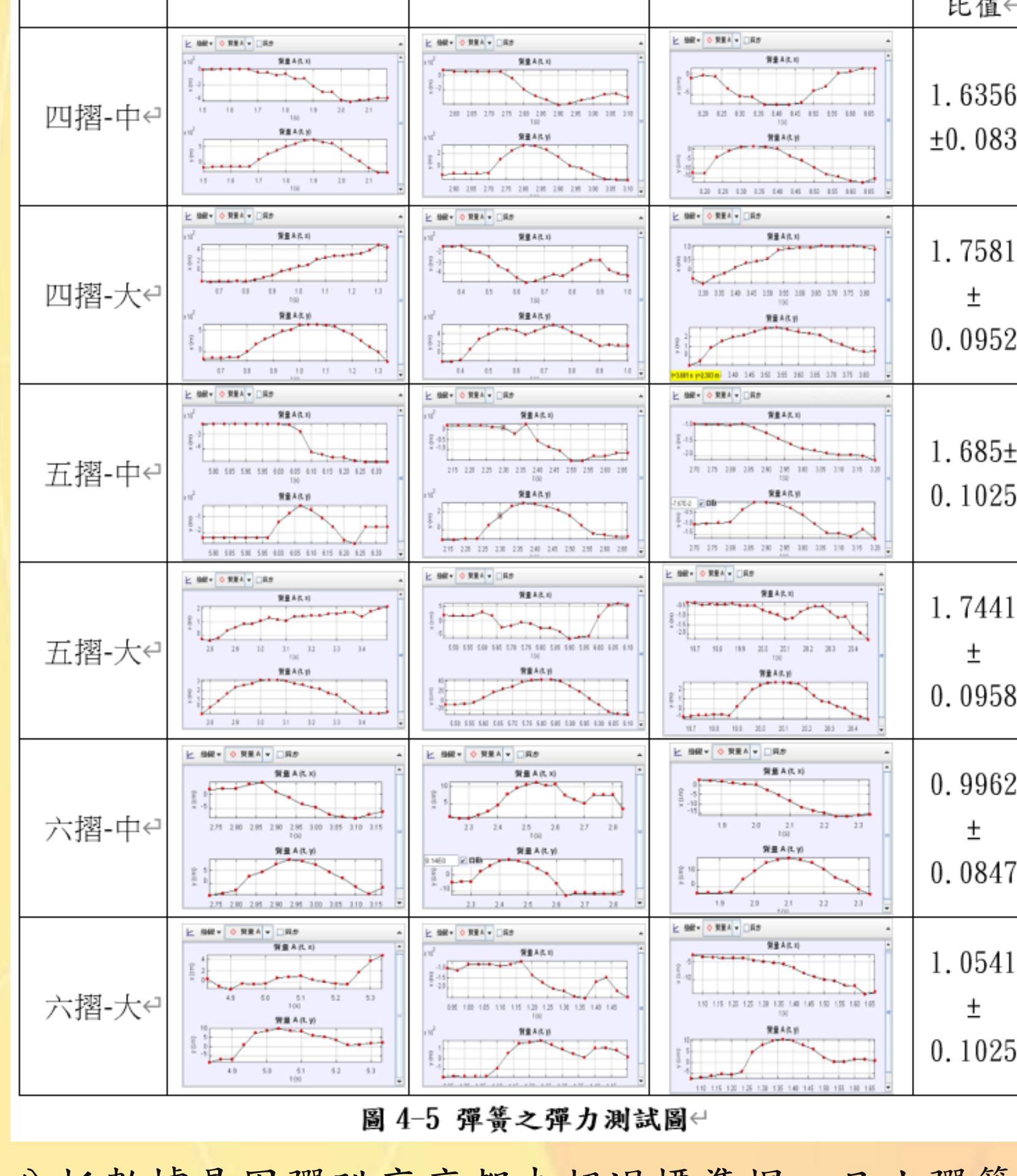
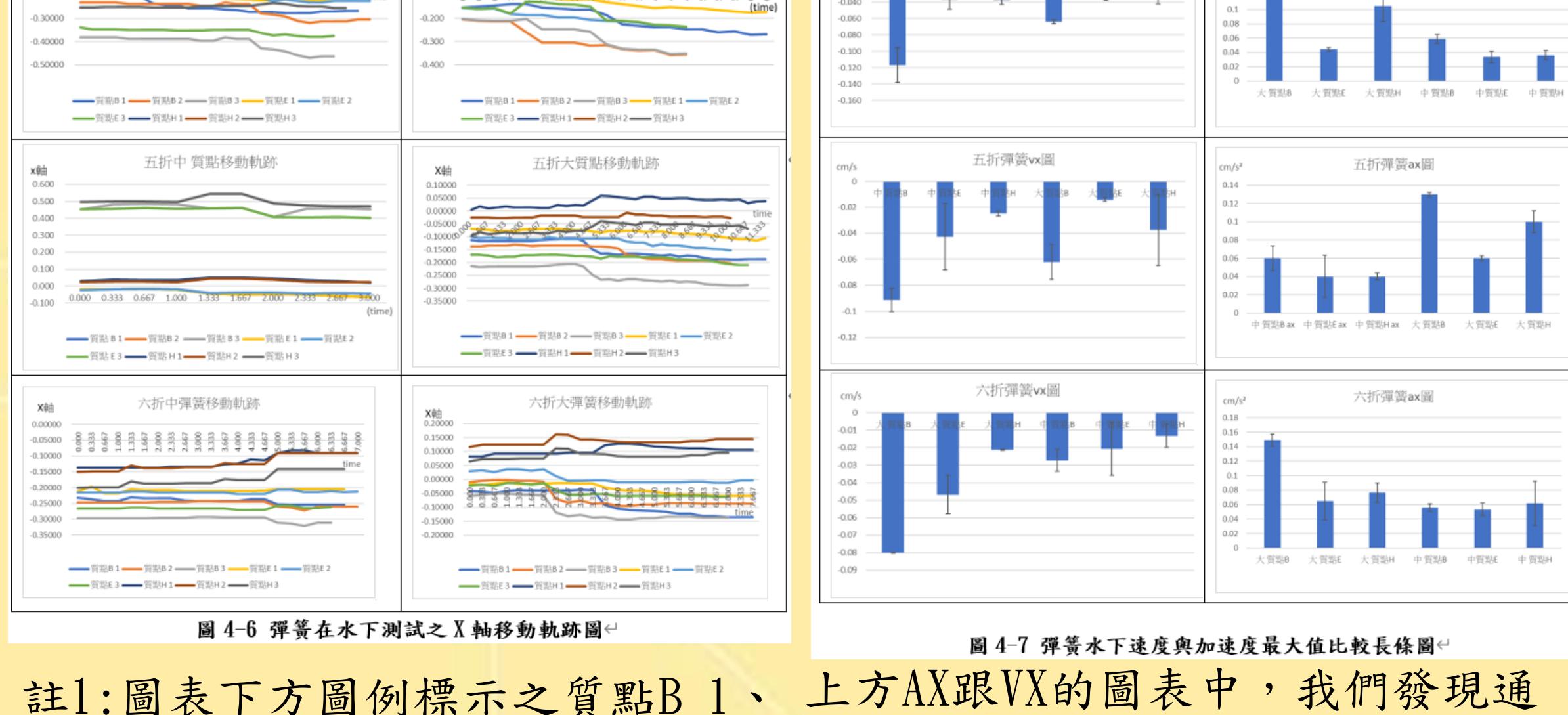


圖 4-5 彈簧之彈力測試圖

小彈簧未能分析數據是因彈跳高度都未超過標準桿，且小彈簧的空間也不足以包覆電池，而由上表可知，彈跳力為 4 折 > 5 折 > 6 折，但由於先前有馬達扭力不足導致無法轉動的情況，我們不打算採用大型彈簧。

六、彈簧在水下之速度測試

(一) X 軸移動軌跡及速度與加速度最大值比較長條圖



註 1: 圖表下方圖例標示之質點 B 1、質點 B 2 之 1 2 為第一次拍攝和第二次拍攝

註 2: 此圖表 X 軸單位為公尺 (M)

從上方彈簧移動軌跡的圖表中 (X 軸移動軌跡)，每種彈簧質點的移動方式大略相同。我們發現質點 B 和質點 E 在彈射瞬間會往左邊明顯的移動，但質點 B 變化量會較質點 E 多 (由於質點 B 位於彈簧前端，而彈出後會朝向右上移動；而質點 H 則是沒有向左移動的趨勢，但質點 H 在彈射出後因為彈簧產生動力，所以有往右移動的軌跡)。

上方 AX 跟 VX 的圖表中，我們發現通常質點 B > 質點 E > 質點 H 速度為大 > 中，但是因為我們此長條圖是求最大值的部分，所以質點 H 會取到彈簧彈開後的最大值，所以有時圖表中質點 H 會大於質點 E，而我們最後選擇的為五折中的彈簧，因為它的大小剛剛好可以放進棘輪裝置馬達，而且在整個彈跳力與速度上都有一定的強度，所以我們之後會使用五折中馬達來進行後續的實驗。

七、彈簧流線型頭部

在上方的圖表中可以發現 20 公分的流線型頭部會較 30 公分的流線型頭部快，所以最後我們選擇裝置 20 公分的流線型頭部模型到我們的最終成品上。

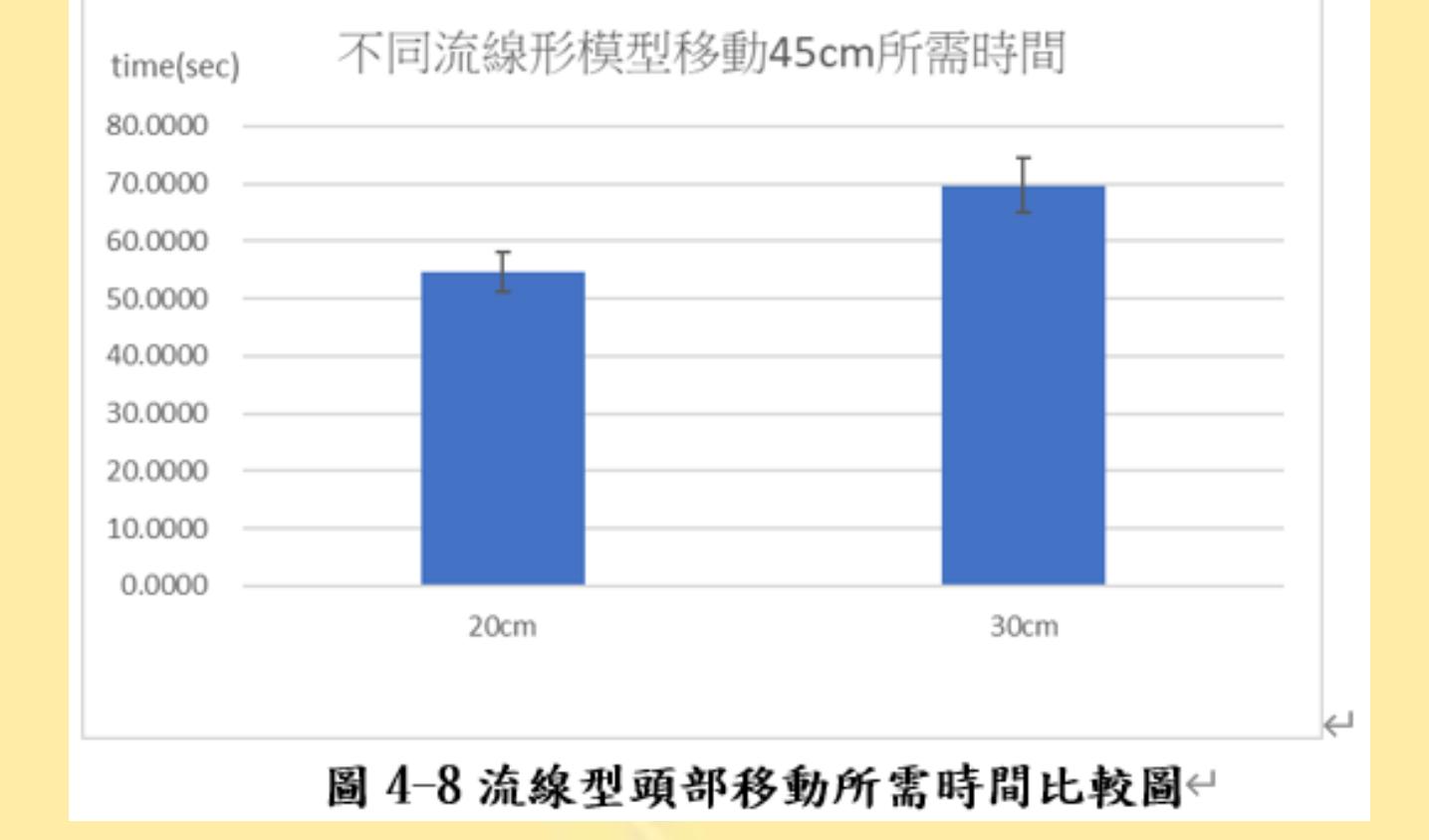


圖 4-8 流線型頭部移動所需時間比較圖

八、自製馬達成品實測軌跡

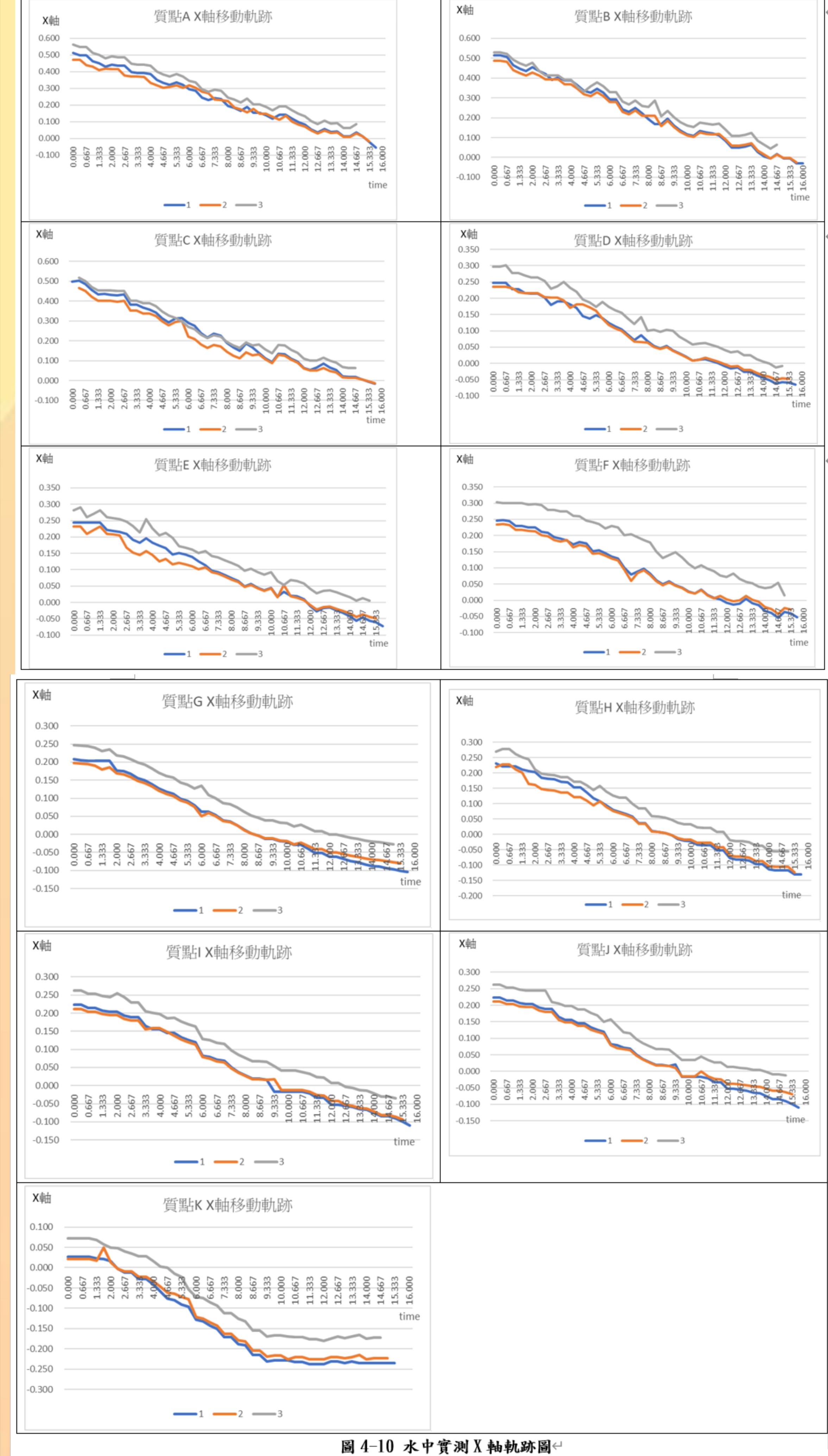


圖 4-10 水中實測 X 軸軌跡圖

註：為了將彈簧之伸縮彈開較凸顯，所以此圖表為加速五倍之影片製成，而 X 軸單位為公尺，而下方圖例之 1、2、3 為影片第一部第二部的意思。在水中實測的圖表中，整組機械一分鐘約可移動 45cm。

肆、結論兼討論

一、寶特瓶小卷：在參考學長姐的寶特瓶小卷模型後，發現第一代的模型容易下沉，所以在其中放置一顆乒乓球製作出第二代，但第二代浮力又太強，所以拿出乒乓球在中間以一層氣球阻隔，製作出可穩定在水中間的第三代，但不論是第一代、第二代還是第三代都會有移動軌跡不穩定的情況發生，所以決定放棄寶特瓶小卷這個想法。

二、外部馬達：外部馬達參考了仿生魚這篇科展的構思，所以我們使用仿小卷臂腕的方式，用 3D 列印列印出零件，並且使用自製固化燈讓其成形，但外部馬達實際放到水中後，發現會有移動軌跡不穩定的情況發生，所以決定再繼續尋找資料。

三、自製彈簧外殼：我們一開始想用寶特瓶切割的方式製作出彈簧，但由於寶特瓶瓶身太硬，所以決定放棄此想法，後來又去參考關於摺紙彈簧等的書籍，製作出了三版的彈簧。

而第三版彈簧它可以透過改變摺數的方式來製作出許多不同的模型，而且還可以輕易地壓縮與彈開，故我們最後決定使用三版的彈簧當作後續實驗的材料。

四、摺數與比例：製作出不同比例之彈簧後，使用積木製作出彈力測試之機具，使用彈跳力平均公式算出比值再三重複加標準差算出每個彈簧之彈力。

在彈力測試的結果中發現，摺數越多，彈力表現越差；而當彈簧整體結構中比例越大時，彈力也同樣會下降。

五、水中彈簧速度測試：在本次實驗中發現，彈簧前端的質點具有最大的速度與加速度，而越靠近後端，其值則逐漸減小。此外，質點 H 有時因為彈簧釋放後的前進位移，其速度與加速度會有時高於質點 E。

綜合彈力測試與速度、加速度測試的結果，我們最終選用五折中彈簧作為後續實驗的主體。此彈簧在彈力表現上為第二佳，且尺寸剛好能安裝於內部馬達結構中。此外，其在速度與加速度測試中具備良好的彈開表現，符合實驗需求，因此被選為最終使用的彈簧。

六、自製內部馬達：在前幾代馬達的設計中，我們持續改良了拉力與放線過程，中所出現的問題，最終成功開發出第四代馬達，該版本結合了可遠端操控的 Arduino 控制板與棘輪裝置。因此，後續實驗皆採用此第四代馬達進行操作。

七、小卷流線型頭部：在此實驗中，我們發現 20 公分的模型，速度會較 30 公分來的快，故我們最後使用 20 公分的模型。

八、小卷機械行進：在小卷機械的最終成品中，我們觀察到其在水中一分鐘約可前進 45 公分。此外，透過氣球可協助其維持在特定水深，並可利用遠端控制系統進行移動。

除標出其餘照片或圖片皆為作者自行拍攝製作