

# 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

第三名

080108

以「蹼」力進—探究蹼足結構對划水推進效能之影響

學校名稱： 國立東華大學附設實驗國民小學

作者：	指導老師：
小六 張灑心	李偲華
小六 洪崇皓	游時銘
小六 魏梓丞	

關鍵詞： 蹼足、最大推進力、波動感應儀

## 摘要

我們歷經觀察、設計、測試與改良，終於研發出能模擬鴨子雙腳蹼足交替划動、可穩定前行的「第三代機械鴨」。

我們還研發【推進力測量儀】，成功量測鴨蹼划水所產生的最大推進力，並運用 Tracker 軟體分析實驗影片，比對結果高度吻合，證明此測量儀為一個非常可信的實驗工具！

研究中發現蹼足的材質、面積、厚度、划水速度皆會顯著影響推進力表現！而鴨脛長度與兩蹼夾角亦會影響機械鴨划行的穩定性與效率。在實驗中模擬小鴨列隊划行行為，驗證列隊划行有助於省力推進。

最後利用自行研發「波動感應儀」裝置讓我們以視覺化方式清楚理解鴨蹼划水在不同深度造成的水流動態特徵，是本研究的一大創意與突破。

## 壹、研究動機

去年暑假，我在阿嬤家附近的湖邊觀察到一個有趣的現象：一群鴨子游過湖面時，小鴨總是整齊地排成一列，緊跟在母鴨後方。這樣的隊形看起來既有秩序又十分協調，讓我產生了濃厚的好奇心——為什麼鴨子游泳時會選擇這種排列方式？這樣的隊形對牠們有什麼特別的作用嗎？

為了揭開這個謎團，我和對科學探究同樣充滿興趣的朋友，一起深入研究這個現象。我們希望透過科學方法，找出鴨子排成一列游泳背後的科學原理！

## 貳、研究目的

- 一、研發能在水中依靠雙腳划水平穩前進的機械鴨。
- 二、研發能測量機械鴨划水前進所產生推進力大小的儀器。
- 三、探究影響機械鴨划水前進所產生推進力大小的因素。
- 四、探究小鴨跟隨鴨媽媽前進時所產生的推進力變化。

## 參、研究設備及器材

- 一、材料：迷你直流電機 PWM 調速器、鋁線、壓克力版、鏡子、杜邦線、6V 變壓器、棉繩、各種厚度塑膠片、氣球皮、吸管、線軸、海綿、強力磁鐵、魔術黏土、熱熔膠條、塑膠瓦楞板。
- 二、工具：45.5cm\*43cm\*90cm 玻璃水缸、電子秤、砝碼、馬達、雷射切割機、3D 列印機、Ipad、腳架、熱熔膠槍、鑽孔器、焊槍。
- 三、軟體：Image-J、Inkscape、Tracker、Tinkercad。

## 肆、研究架構及流程

# 以「蹼」力進

研讀

## 文獻探討

研發

機械鴨

透過

推進力測量儀

進行

有

第一代 兩蹼足前後擺動機械鴨

第二代 兩蹼足可划動機械鴨

第三代 兩蹼足可划動機械鴨 Plus

鴨蹼材質

鴨蹼面積

鴨脛長度

划水速度

鴨蹼厚度

兩鴨蹼夾角

有否海綿

雨傘布  
氣球皮  
塑膠片

1.06cm<sup>2</sup>  
2.55cm<sup>2</sup>  
4.64cm<sup>2</sup>  
5.60cm<sup>2</sup>  
6.88cm<sup>2</sup>  
8.53cm<sup>2</sup>  
10.34cm<sup>2</sup>  
11.75cm<sup>2</sup>  
13.56cm<sup>2</sup>  
15.62cm<sup>2</sup>

1cm  
2cm  
3cm  
4cm  
5cm

1/4 轉速  
2/4 轉速  
3/4 轉速  
4/4 轉速

0.10mm  
0.20mm  
0.25mm  
0.30mm

180 度  
160 度  
140 度  
120 度  
100 度  
80 度

有  
沒有

研發

## 文獻探討

進行

小鴨跟隨母鴨

母鴨位在小鴨前方相對水平距離

0cm  
2cm  
4cm  
6cm  
8cm  
10cm  
12cm  
14cm  
16cm

小鴨在母鴨正後方的距離

4cm

6cm  
8cm  
10cm  
12cm  
14cm  
16cm

量測

推進力

量測

推進力

量測

推進力

進行測試

◎研發能在水中依靠雙腳划水平穩前進的機械鴨。

◎探究影響機械鴨划水前進所產生推進力大小的因素。

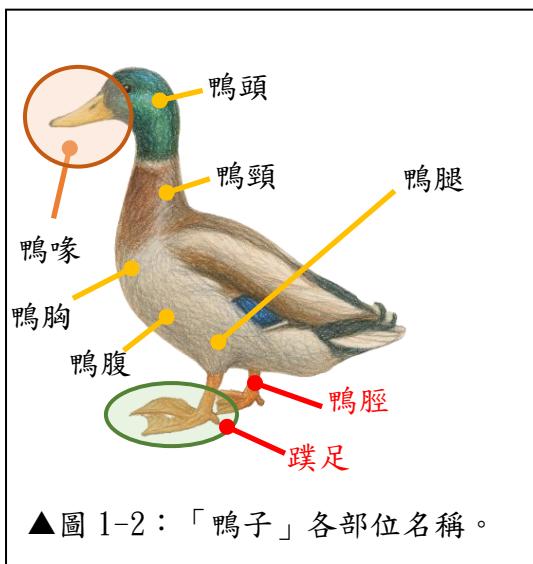
◎探究小鴨跟隨鴨媽媽前進時所產生的推進力變化。

備註：『★』表示在該子題中有最佳表現者。

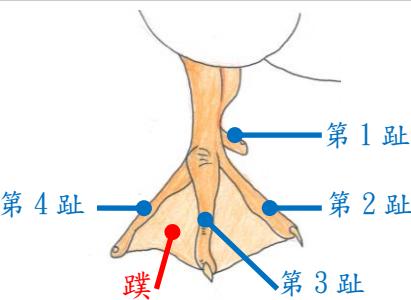
### 【文獻探討】

#### 一、認識「鴨子」身體結構與其運動方式

##### (一) 鴨子身體各部位名稱(如圖 1-2、1-3)



▲圖 1-2：「鴨子」各部位名稱。



▲圖 1-3：「蹠足」各部位名稱。



▲圖 1-4：鴨腿的位置相對於其他鳥類更靠近身體後方。

##### (二) 體型

鴨子頭大且圓，喙長且扁，脖子沒有同屬的天鵝和雁長，身體寬長，呈流線型。身體形狀與船相似，胸腹部猶如船底，能浮在水面上以減少阻力。

##### (三) 鴨腳

鴨子的腿雖短，但相當強壯，第 2、3、4 趾之間有一層寬扁且平展的蹠（如圖 1-3）。「蹠」是由腳趾間的皮膚延伸演化的薄膜組織結構，能有效增加腳趾的截面積，使鴨子在水中划動時產生更大的推力，進而提升游泳速度與效率。這種「蹠足結構」正是為了適應水中生活而進化的結果。

相較於其他鳥類，鴨子的腿部位置更靠近身體後方（如圖 1-4）。這樣的構造雖讓牠們在陸地上行走時步伐緩慢、搖搖晃晃，但在水中卻能展現出極佳的靈活度與推進力。

鴨子在陸地上行走時會將整個腳掌完全貼地（如圖 1-5），這種走法與人類相似，因而將其稱為「鴨掌」。

##### (四) 「鴨掌」與「扁平足」(如圖 1-5)

鴨掌「腳掌貼地、無明顯足弓」的特徵，成為「扁平足」俗稱來源。因扁平足患者足弓塌陷，足底幾乎全部接觸地面，看起來像鴨子腳掌，因此被比喻稱為「鴨母蹄」。



▲圖 1-5：「鴨掌」和「扁平足」。

## (五)「蹼足」與「鴨掌」的詞語辨析

1. 鴨的蹼足：是指鴨腳上具有「蹼膜」的結構，屬於生物學上對腳型的描述，強調功能性和形態特徵。
2. 鴨掌：是指鴨子的腳，是比較口語化或生活化的稱呼，多用於日常對話、飲食名稱，或比喻外型像鴨腳的東西。

本實驗是為探究「鴨腳的構造與功能」，所以將使用「蹼足」來稱呼。

## 二、「鴨子」能在水中快速划動的奧秘

從水面上看，鴨子總是悠然自得地划行，像一艘優雅的船隻；但其實在水面上，牠們的雙腳正不斷用力交替划動，精準地協調節奏和角度。

鴨子的雙腿長在身體的後側，這讓牠們在陸地上走路時，看起來步伐笨拙、搖搖晃晃，但正是這樣的腿部位置與角度設計，讓牠們能在水中划動時保持平衡與方向穩定，像一艘穩定的小船在水面划行。

鴨子腳上的「蹼」是一種連接腳趾之間的皮膜結構，這種構造在游泳時能大幅增加划水面積，就像人類使用的蛙鞋一樣。我們也觀察到每當鴨子往後踢腳時，蹼會張開，推動大量的水，使自己往前大幅推進；而當牠收回腳時，蹼則會自動摺疊，以減少阻力，節省體力。

## 三、小鴨為什麼要排隊跟著鴨媽媽划水？

在自然界中，我們常看到小鴨排成一列緊跟著鴨媽媽在水面上划行。為什麼牠們不分開游？這樣排隊真的比較好嗎？會不會比較省力？為了找出答案，科學家們進行了電腦模擬，模擬鴨媽媽在水中游泳時產生的水波，觀察小鴨位於不同相對位置時的划水效率。根據 Yuan 等人 (2021) 的模擬結果發現如下：

### (一) 小鴨「搭媽媽的浪」，就像滑水一樣省力。

若小鴨恰好游在媽媽後方某個「甜蜜點」 (sweet point)，可因波浪干涉而產生推進力，幾乎無需自行划水，便能被水波推著前進，類似滑水板現象。

### (二) 一起排隊划水比較輕鬆。

科學家發現，排在媽媽後方的第一隻小鴨省力效果最佳，從第二隻開始至後方的每隻小鴨，都能維持接近的推進效率，原因是每隻小鴨會像「水波中繼器」般將波浪能量傳遞給後方個體。

### (三) 為什麼要排成一列？因為最省力！

單列縱隊可使每隻小鴨都位於最佳波場位置，避免彼此干擾，使整體隊伍省下最多體力。研究證實，這種隊形的能量節省主要來自兩種機制：「乘浪」 (wave-riding) 與「傳波」 (wave-passing)。

雖然科學家已透過電腦模擬分析，證實小鴨排隊跟隨鴨媽媽划水時能有效節省體力，但這些結果主要來自數值計算與理論模型的推估。為了進一步驗證此現象在實際情境下是否成立，我們希望在本研究中，運用自行研發的「機械鴨」、「推進力測量儀」進行實體量測，藉由觀察小鴨跟隨鴨媽媽前進時所產生的推進力變化，來佐證模擬結果。

#### 四、關於「鴨子划水」的相關科展研究：

自科教館網站查詢全國第1~64屆高國中小科展參展作品中和「鴨子划水」相關研究只有1件，閱讀後整理摘要如表1-1：

表1-1：全國科展第1~64屆高國中組與「鴨子划水」相關研究作品一覽表

屆數	組別	科別	作品名稱	作品摘要
第63屆	高中組	物理與天文學科	鴨行無阻	本研究透過水池、橡皮鴨與伺服馬達，模擬鴨子在水面上游動的情況，藉由馬達回傳的電功率值，計算鴨子在游動時的阻力，希望找到鴨子在何種情況下最省力。透過改變鴨子的排列方式、大小、速度等變因，嘗試找出這些變因與其游動時阻力的關聯。

基於上述文獻探討，發現目前尚無科展作品探究「蹠足對其划水之運動行為的影響」，因此我們想探究「單隻鴨子蹠足在不同變因下向前划行時推進力及划行效能的表現」，及「小鴨跟隨於母鴨後方時，在水中向前划行時推進力的表現」。

為克服在水中測量數據的困境，期望能自創量測推進力的裝置，找出影響蹠足向前划動的真相！

#### 【實驗一】實驗環境介紹

##### 一、「機械鴨」的設計

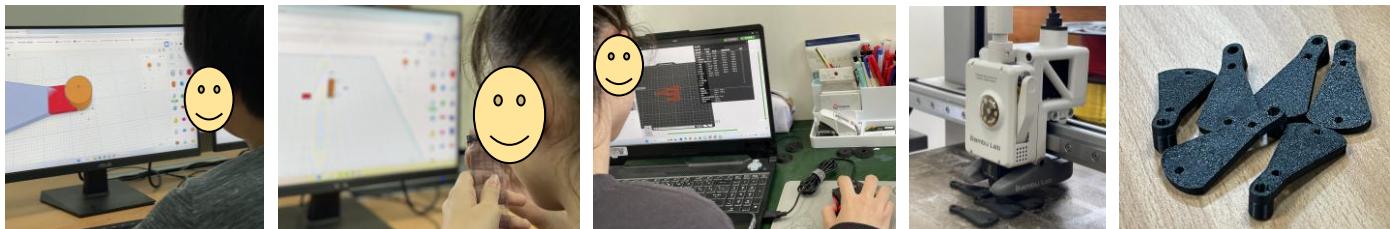
###### (一)設計理念：

研究之初要設計一隻單純以蹠足的划動就能在水中平穩地往前划行的「機械鴨」，且還須具有能調整蹠足前後划動速度、更換蹠足不同樣態、更換鴨脛長度，且兼具防水與堅固耐用等特色。

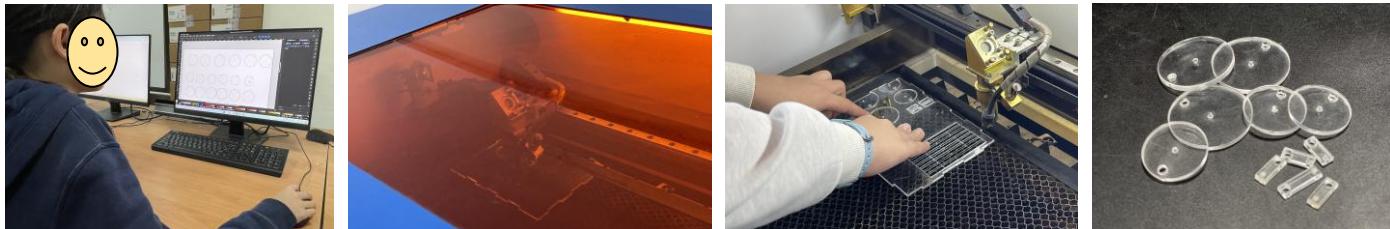
我們花了數個月時間思考並動手設計「使用各種裝置帶動蹠足的划動」，並將完成品置入水中測試，將依據「帶動蹠足划動之不同裝置」來敘述三代「機械鴨」的演進過程，並詳述製作方式及優缺點分析。

設計及製作中面臨最大困難之一是難以在市面上覓得合適、輕巧的軸心、連動桿和鴨腳等零件，我們便運用學校所學的3D列印及雷切技術來製作符應所需的零件尺寸及形狀！(如圖1-6)

使用3D列印



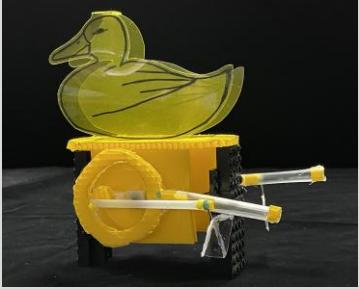
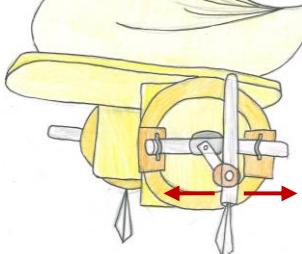
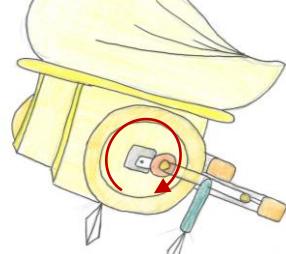
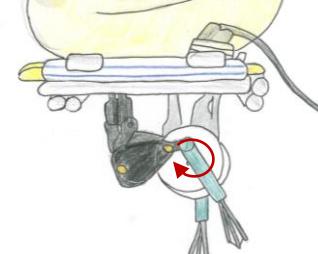
使用雷切



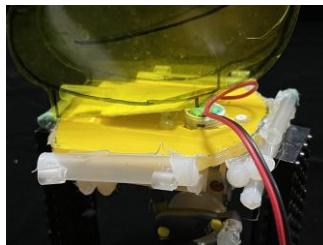
▲圖1-6：運用學校所學3D列印及雷切技術來製作符應我們所需連動圓盤/桿和鴨腳等零件尺寸及形狀。

## (二)「機械鴨」代數的演進

表 1-2: 不同代數「機械鴨」的名稱、樣貌、優缺點分析一覽表

代數	第一代	第二代	第三代
名稱	兩蹼足前後擺動機械鴨	兩蹼足可划動機械鴨	兩蹼足可划動機械鴨 Plus
照片			
足部設計 手繪圖			
優缺點 分析	<p>◎優點-</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1)可以在水中前進。</li> <li>(2)材料容易獲得。</li> </ul> <p>◎缺點-</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1)馬達直接暴露於水中，容易生鏽。</li> <li>(2)雙蹼無划動的模樣。</li> <li>(3)塑膠瓦楞板構造容易進水。</li> <li>(4)環形塑膠瓦楞板不易切割、易形變。</li> <li>(5)兩蹼足無法流暢地前後擺動。</li> </ul>	<p>◎優點-</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1)雙蹼有划動的模樣。</li> <li>(2)可以在水中前進。</li> <li>(3)材料容易獲得。</li> </ul> <p>◎缺點-</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1)馬達直接暴露於水中，容易生鏽。</li> <li>(2)塑膠瓦楞板構造容易進水。</li> <li>(3)環形塑膠瓦楞板不易切割、易形變。</li> <li>(4)兩蹼足無法流暢地划動。</li> </ul>	<p>◎優點-</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1)雙蹼有划動的模樣。</li> <li>(2)可以在水中流暢地向前划動。</li> <li>(3)馬達及所有零件都具有防水功能。</li> <li>(4)可更換鴨脣及蹼足的樣式，形成不同的操縱變因。</li> </ul> <p>◎缺點-</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>製作費時。</li> </ul>

### (三)「第三代機械鴨」各部位的介紹(圖 1-7~圖 1-14)



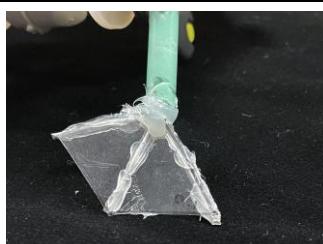
**浮板**

▲圖 1-9：用塑膠瓦楞板及熱熔膠封口的吸管，增加機械鴨浮力。



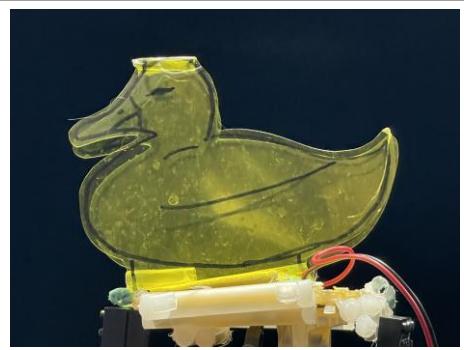
**鴨脣(湖水綠)**

▲圖 1-10：(綠)吸管塞滿魔術黏土，再用空(透明)吸管做鰾關節，以熱熔膠組合而成。



**蹼足**

▲圖 1-11：用鋁絲及塑膠片組合而成的蹼足。

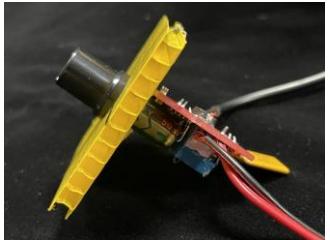


**黃色機械鴨**

▲圖 1-8：在黃色塑膠片繪製小鴨

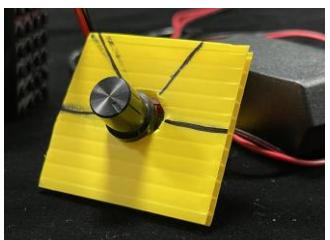


▲圖 1-7：「第三代機械鴨」



**電子調速器**

▲圖 1-13：可調整鴨蹼足前後划動速度



**調速器刻度盤**

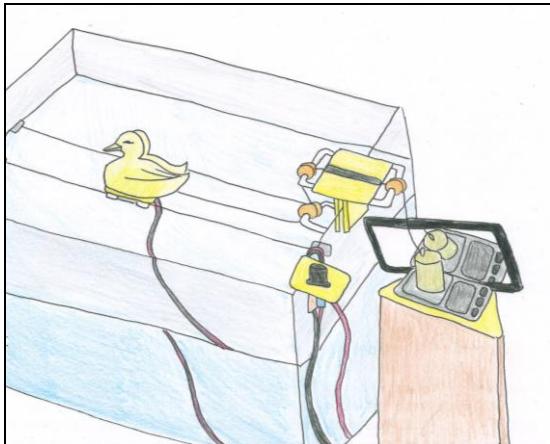
▲圖 1-14：為能精準調整機械鴨划動蹼足速度，依據反覆量測蹼足划動的頻率，將方形塑膠瓦楞板畫上 4 記號後，打洞使其能套在「電子調速器」旋鈕上。



**鴨腳**

◀圖 1-12：使用小馬達以及雷切技術、3D 列印技術、鋁絲、蒐集到的各式模型零件，組合成可前後擺動的鴨腳(含鴨脣、蹼足)。

## 二、自行研發【推進力測量儀】來量測機械鴨在水中往前划水時所產生的「推進力」。



▲圖 1-15：【推進力測量儀】設計圖



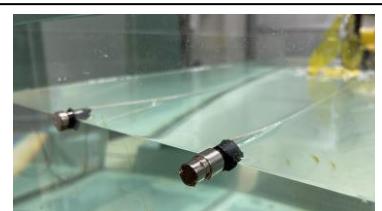
▲圖 1-16：【推進力測量儀】實際樣貌

1. 為測量不同變因下的鴨腳向前划行時推進力的數值，主要利用線軸、吸管、塑膠瓦楞板、線材、強力磁鐵、電子秤、鏡子來組裝「推進力測量儀」裝置(如圖 1-15~圖 1-16)。

2. 為使實驗精準，得讓機械鴨在每次實驗中能在固定軌道中划行，我們的做法：

### (1)以雙棉繩作為導軌：

將棉繩黏貼於一顆強力磁鐵上，並將其固定在水槽內側牆面；再將另一顆強力磁鐵從外側對準位置貼合，藉由磁力吸附將棉繩牢牢夾緊。棉繩的另一端亦採相同方式固定，完成一條穩固的直線繩索。接著，再以相同方法設置第二條平行棉繩，形成雙軌設計，作為機械鴨的划行導引軌道 (如圖 1-17)。



▲圖 1-17：以雙棉繩作為導軌。

### (2)導引機械鴨穩定前進：

為了讓機械鴨能順利沿著棉繩軌道前進，我們在機械鴨的兩側各裝設一支橫向切口的吸管，讓棉繩可卡入吸管的切口中 (如圖 1-18)。這樣的設計不僅可有效限制鴨子的行進路線，以確保每次實驗過程中路徑相同，提升量測準確性，而且也便於取放機械鴨。

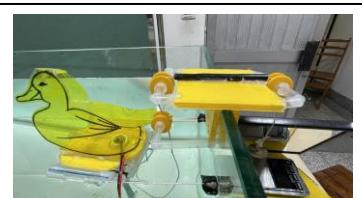


▲圖 1-18：機械鴨兩側各裝設一支橫向切口吸管，讓棉繩可卡入吸管的切口中。

3. 【最大推進力】量測方法：測量「機械鴨」雙腳划動所產生的「最大推進力」。

### (1)安裝棉繩與砝碼：

取一條棉繩，一端穿過「機械鴨」浮板中央的吸管，棉繩另一端依序繞過三個線軸，最後繫上一顆 200 公克的砝碼，並調整繩長，使砝碼剛好置放在電子秤的秤盤上。(如圖 1-19 所示) 該繩長設計可讓「機械鴨」划行 32 公分的距離。



▲圖 1-19：安裝棉繩與砝碼。

## (2) 設置鏡面反射便於觀測數值：

為了在錄影時能清楚觀察電子秤讀數，放置鏡子以將秤面數字反射至鏡中(如圖 1-20)，方便後續影片分析與數據記錄。

## (3) 記錄起始重量 (A 值)：

未啟動馬達前，機械鴨尚未產生推進動作，記錄此時電子秤顯示的重量，作為 **初始值 A**。

## (4) 啟動馬達進行推進量測：

啟動馬達後，「機械鴨」開始沿著雙棉繩軌道雙腳交替向前划行。當其行進至棉繩所允許的最遠距離時，雖然無法再前進，但雙腳仍繼續划動，進而拉動繫著砝碼的棉線。此時電子秤上的數字會因拉力而減少，記錄這時的重量值為 **B 值**。

## (5) 計算【最大推進力】：

【數值 A】-【數值 B】=「機械鴨」雙腳划動前進時產生的**最大推進力**。



◀圖 1-20：  
設置鏡面反  
射便於觀測  
數值。

### 三、實驗環境介紹

1. 本研究於長 90 公分、寬 45.5 公分、深 43 公分的玻璃水箱中進行，利用自行研發的「**第三代機械鴨**」，模擬鴨掌前後擺動以產生往前划行之推進動作，並搭配自行研發的「**推進力測量儀**」，進行推進力之量測與分析。
2. 為便於使用電腦軟體讀取精準的數值，在水箱前方以水平視角架設錄影機錄製實驗影片，以進行後續的分析。

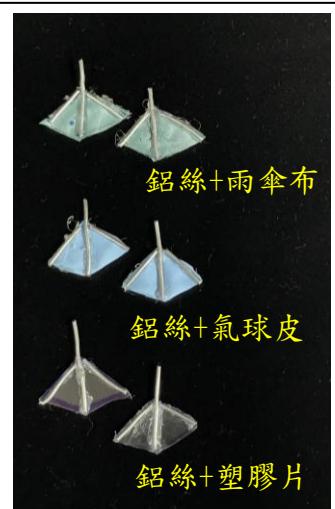
### 【實驗二】蹠足的材質如何影響機械鴨的最大推進力？

#### (一) 研究方法：

##### 1. 設定機械鴨參數並更換不同蹠足材質：

(1) 固定機械鴨的蹠足面積為  $4.64\text{ cm}^2$ 、鴨脛長度為 1 公分，並設定雙腳以 3/4 的馬達轉速交替划動。

(2) 實驗中依序更換三種不同材質製作鴨的蹠足，為「**鋁絲+雨傘布**」、「**鋁絲+氣球皮**」、「**鋁絲+塑膠片**(塑膠片厚度 0.3mm)」(如圖 2-1)。



▲圖 2-1：三種不同材  
質製作的蹠足。

## 2. 使用推進力測量儀進行量測：

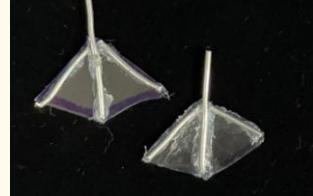
利用本團隊自行研發的【推進力測量儀】，針對機械鴨雙腳向前划動時所產生的推進力進行量測與紀錄。

## 3. 重複實驗並進行數據分析：

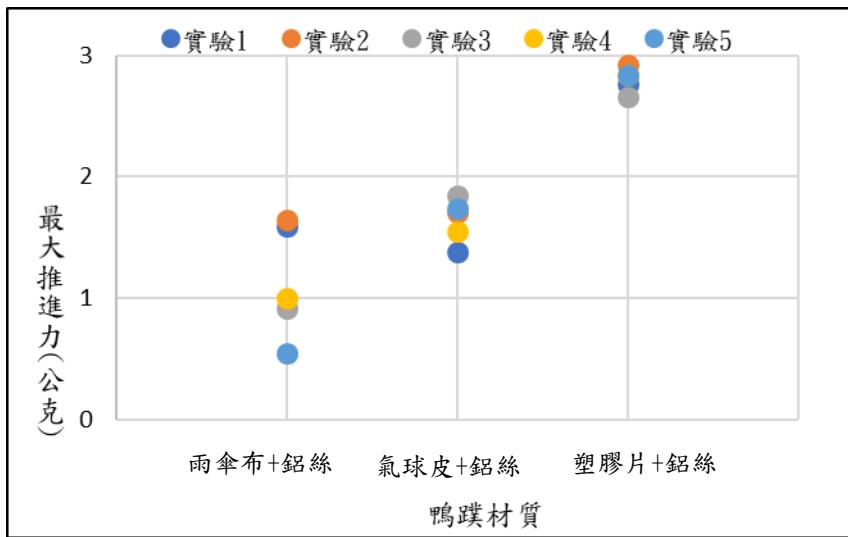
每種鴨的蹼足材質各進行 5 次實驗，並以攝影機全程錄影紀錄電子秤顯示的數據。實驗結束後，使用 Tracker 軟體將影片進行慢速播放分析，逐格判讀電子秤數值，進而計算出每次試驗中所產生的推進力。

### (二) 研究結果：

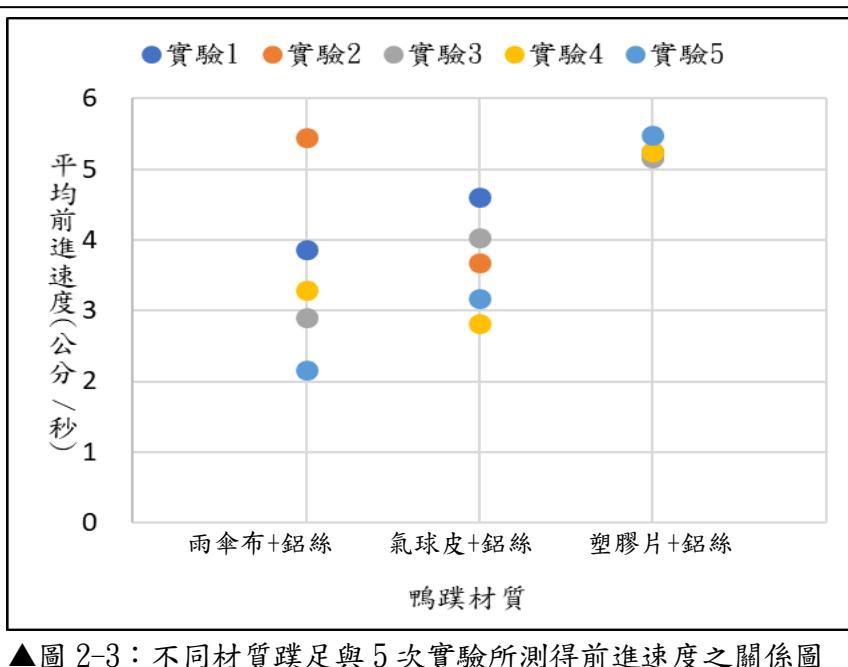
表 2-1：不同材質的蹼與其推進力、前進速度之一覽表

腳掌 材質	鋁絲+雨傘布				鋁絲+氣球皮				鋁絲+塑膠片				
圖片													
實驗 數值	電子秤數值(g)		最大 推進力 (g)	前進 速度 (cm/s)	電子秤數值(g)		最大 推進力 (g)	前進 速度 (cm/s)	電子秤數值(g)		最大 推進力 (g)	前進 速度 (cm/s)	
	起始	最終			起始	最終			起始	最終			
實驗 次數	1	199.68	198.09	1.59	3.87	199.56	198.18	1.38	4.62	199.17	196.41	2.76	5.25
	2	199.27	197.63	1.64	5.45	199.12	197.41	1.71	3.68	199.05	196.13	2.92	5.19
	3	199.34	198.43	0.91	2.90	199.09	197.25	1.84	4.03	199.22	196.56	2.66	5.16
	4	199.40	198.40	1.00	3.29	199.13	197.58	1.55	2.82	199.28	196.44	2.84	5.25
	5	199.51	198.96	0.55	2.17	199.63	197.89	1.74	3.17	199.27	196.43	2.84	5.49
平均值	---	---	1.14	3.54	---	---	1.73	3.66	---	---	2.80	5.27	
實驗情形 描述	<p> <b>缺點：</b></p> <p>①因雨傘布有一層防水層，容易與鋁絲分離。</p> <p>②雨傘布的材質為滌綸布（聚酯纖維），不易剪裁。</p> <p>③推進力數值不穩定，差異大。</p>				<p> <b>優點：</b></p> <p>①防水效果比雨傘布佳。</p> <p>②機械鴨划水前進速度比【鋁絲+雨傘布】快。</p>				<p> <b>優點：</b></p> <p>①塑膠片與鋁絲能緊密黏合，不易在水中脫落。</p> <p>②塑膠片容易剪裁。</p> <p>③機械鴨划水前進速度快。</p>				
	<p> <b>缺點：</b></p> <p>①氣球皮為弧面設計又具有延展性，不易剪裁。</p> <p>②在水中，氣球皮偶爾會發生與鋁絲分離的情形。</p>				<p> <b>缺點：</b></p> <p>透明塑膠片錄影時不易辨識。</p>								

### (三) 研究發現：



▲圖 2-2：不同材質蹼足 5 次實驗測得最大推進力之關係圖



▲圖 2-3：不同材質蹼足與 5 次實驗所測得前進速度之關係圖

### 1. 「最大推進力」數據穩定性分析：

- 【鋁絲+雨傘布】材質數據落差最大(0.55~1.64g)，顯示出不穩定性，與材質易脫落、滌綸布材質不易固定有關。
- 【鋁絲+氣球皮】材質數據範圍1.38~1.84g，氣球皮延展性可能影響個別實驗結果，但數據呈現還算穩定。
- 【鋁絲+塑膠片】材質數據最穩定(2.66~2.92g)，是因塑膠片無延展性，與鋁絲緊密結合、形狀保持佳，有助於穩定推進表現。

### 2. 最大推進力及前進速度方面：

- 最大推進力由高至低為鋁絲+塑膠片>鋁絲+氣球皮>鋁絲+雨傘布，其中【鋁絲+塑膠片】最大推進力最大，為 2.8 公克。
- 平均速度由快至慢為：鋁絲+塑膠片>鋁絲+氣球皮>鋁絲+雨傘布，其中【鋁絲+塑膠片】平均速度最快，為 5.27 cm/s。
- 承(1)(2)可獲知，最大推進力越大，前進速度也越快！
- 【鋁絲+塑膠片】材質的蹼足對機械鴨的最大推進力和前進速度表現最佳，適合用於後續研究中的機械鴨設計。



將 Tracker 軟體所得結果與實驗影片進行比對後，驗證推進力測量儀是可信的工具！

將「實驗錄影所得的影片」匯入 Tracker 中，選擇影片中「機械鴨剛要開始拉動砝碼時」為起始點，逐一標示影片中機械鴨的位置，讓 Tracker 計算出「機械鴨在每個時間點的加速度」，並帶入  $F=Ma$  的公式，得出「機械鴨當時最大推進力數值」，與「推進力測量儀所得的數值」進行比對。

表 2-2：將「鋁絲+塑膠片」的三次實驗影片匯入 Tracker 中所得數值一覽表

編號	機械鴨 重量(kg)	最大加速度 ( $m \cdot s^{-2}$ )	推估最大推進力 重量數值(g)	平均值 (g)	與研發的 「推進力測 量儀」所測 得的最大推 進力 2.8g 相吻合！
1898	0.0965	0.281	$0.0965 \times 0.281 / 9.8 \times 1000 = 2.77$	2.76	與研發的 「推進力測 量儀」所測 得的最大推 進力 2.8g 相吻合！
1901	0.0965	0.272	$0.0965 \times 0.272 / 9.8 \times 1000 = 2.68$		
1904	0.0965	0.265	$0.0965 \times 0.265 / 9.8 \times 1000 = 2.82$		

結果發現經由 trakcer 計算所得的數值與推進力測量儀所測得的結果，不謀而合，誤差極小，因此可驗證推進力測量儀是可信的工具。



▲圖 2-4：將實驗影  
片匯入 Tracker 中  
計算所得數值。

### 【實驗三】不同面積的蹼足如何影響機械鴨的最大推進力？

#### (一) 研究方法：

##### 1. 設定機械鴨參數並更換不同蹼足面積：

(1) 固定蹼足材質為鋁絲+塑膠片（塑膠片厚度 0.3mm）、鴨脛長度為 1 公分，並設定雙腳以 3/4 的馬達轉速交替划動。

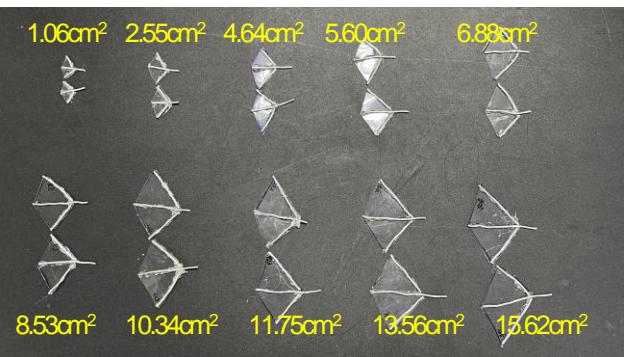
(2) 實驗中依比例更換五種不同面積的蹼足，為「 $1.06\text{cm}^2$ 、 $2.55\text{cm}^2$ 、 $4.64\text{cm}^2$ 、 $5.60\text{cm}^2$ 、 $6.88\text{cm}^2$ 、 $8.53\text{cm}^2$ 、 $10.34\text{cm}^2$ 、 $11.75\text{cm}^2$ 、 $13.56\text{cm}^2$ 、 $15.62\text{cm}^2$ 」（如圖 3-1）。

##### 2. 同【實驗二】研究方法，用推進力測量儀進行量測，重複實驗並進行數據分析

#### (二) 研究結果：

表 3-1：不同面積的蹼足與其推進力、前進速度之一覽表（受限於頁數，因此表格中僅呈現 5 次實驗所計得的推進力及速度之數值。）

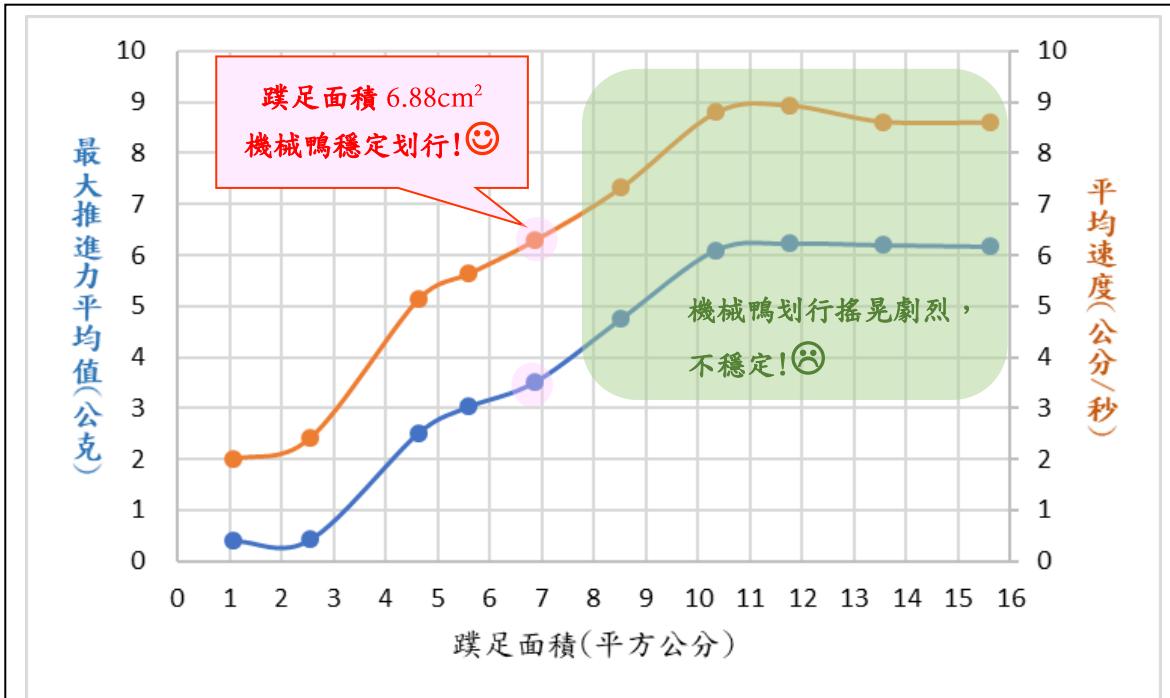
蹼足面積	$1.06\text{cm}^2$		$2.55\text{cm}^2$		$4.64\text{cm}^2$		$5.60\text{cm}^2$		$6.88\text{cm}^2$		
實驗數值	最大推進力 (g)	前進速度 (cm/s)	最大推進力 (g)	前進速度 (cm/s)	推進力 (g)	前進速度 (cm/s)	最大推進力 (g)	前進速度 (cm/s)	最大推進力 (g)	前進速度 (cm/s)	
實驗次數	1	0.34	2.00	0.42	2.50	2.43	5.25	2.94	5.58	3.75	6.36
	2	0.21	1.98	0.40	2.51	2.76	5.16	2.92	5.64	3.67	6.24
	3	0.49	1.95	0.46	2.25	2.54	5.25	3.11	5.71	3.75	6.40
	4	0.52	1.94	0.35	2.41	2.23	4.90	3.16	5.75	3.34	6.07
	5	0.43	2.11	0.49	2.44	2.62	5.19	3.03	5.52	3.11	6.44
平均值	0.40	2.00	0.42	2.42	2.52	5.15	3.03	5.64	3.52	6.30	
實驗情形描述	1. 機械鴨的蹼足極小，前進速度極慢 2. 縱使蹼足持續划水，常無法將棉繩拉直帶動砝碼上提，使推進力數值極度不穩定		1. 機械鴨前進速度慢。 2. 機械鴨在水中前進時能將棉繩拉直帶動砝碼上提，測得的最大推進力數值很穩定。		1. 機械鴨的前進速度大幅提升。 2. 機械鴨在水中划水所產生的最大推進力大幅提升。		1. 機械鴨的前進速度快。 2. 機械鴨在水中划水所產生的最大推進力有所提升。		1. 機械鴨的前進速度快。 2. 機械鴨在水中划水所產生的最大推進力有所提升。		



▲圖 3-1：製作五種不同面積的蹼足。

蹼足面積	8.53 cm <sup>2</sup>	10.34 cm <sup>2</sup>	11.75 cm <sup>2</sup>	13.56 cm <sup>2</sup>	15.62 cm <sup>2</sup>				
實驗數值	最大推進力(g)	前進速度(cm/s)	最大推進力(g)	前進速度(cm/s)	最大推進力(g)	前進速度(cm/s)	最大推進力(g)	前進速度(cm/s)	
實驗次數	1	4.78	7.06	5.95	8.42	6.08	8.89	6.10	8.36
	2	4.56	7.39	6.26	8.58	6.12	9.07	6.23	8.27
	3	4.58	7.44	5.94	9.14	6.43	9.22	6.11	8.65
	4	4.88	7.16	6.40	9.14	6.22	8.82	6.28	8.89
	5	4.99	7.62	5.97	8.72	6.29	8.72	6.26	8.96
平均值	4.76	7.33	6.10	8.80	6.23	8.94	6.20	8.62	
實驗情形描述	1. 機械鴨在水中划水所產生的最大推進力有所提升。 2. 機械鴨前進速度增快，但划行非常不穩定，顯著左右晃動。	1. 機械鴨在水中划水所產生最大推進力顯著提升 2. 機械鴨前進速度非常快，搖晃劇烈快到有時浮板會脫離浮板邊吸管而翻覆。	1. 機械鴨前進速度非常快，搖晃劇烈快到有時浮板會脫離浮板邊吸管而翻覆。	1. 機械鴨前進速度非常快，搖晃劇烈快到有時浮板會脫離浮板邊吸管而翻覆。	1. 機械鴨前進速度非常快，搖晃劇烈快到有時浮板會脫離浮板邊吸管而翻覆。				

(二) 研究發現：



▲圖 3-2：蹼足面積不同時，其與最大推進力平均值及平均速度之關係圖。

## 1. 跛足面積越大，推進力整體呈現上升趨勢。

(1)隨著蹠足面積由  $1.06\text{ cm}^2$  增加至  $10.34\text{ cm}^2$ ，機械鴨的平均推進力從  $0.40\text{ g}$  穩定上升至  $6.10\text{ g}$ ，顯示面積越大的蹠足在划水時能推動更多水量，產生更大的反作用力。

(2)然而，當面積增至  $6.88\text{ cm}^2$  時，划行非常不穩定，顯著左右晃動。當面積增至  $10.34\text{ cm}^2$  時，搖晃劇烈快到有時浮板會脫離浮板邊吸管而翻覆。顯示再繼續增大蹠足面積可能反而影響機械結構與運動效率。

## 2. 跛足面積越大，前進速度亦隨之提升。

平均速度與最大推進力變化趨勢一致，最小蹠足 ( $1.06\text{ cm}^2$ ) 前進速度僅約  $2.00\text{ cm/s}$ ，而最大蹠足 ( $15.62\text{ cm}^2$ ) 可達  $8.82\text{ cm/s}$ 。這顯示最大推進力提升對整體划行效能具有明顯正向影響。

## 3. 推進效益存在「遞減現象」：

雖然整體趨勢為「面積越大、最大推進越強」，但由  $6.88\text{ cm}^2$  增加至  $10.34\text{ cm}^2$  時，最大推進力與速度雖仍然上升，但增幅已不若前期顯著；由  $10.34\text{ cm}^2$  增加至  $15.62\text{ cm}^2$  時，最大推進力值接近，並伴隨機械鴨在水中搖晃加劇、穩定性下降，甚至有浮板翻覆現象，顯示過大的蹠足面積對穩定性造成負面影響。

## 4. 最佳面積建議值：

綜合推進力、前進速度與穩定性三項考量，我們認為面積為  $6.88\text{ cm}^2$  的蹠足組在表現上達到良好平衡，為後續研究採用的最佳面積。

## 【實驗四】不同長度的鴨脛如何影響機械鴨的最大推進力？

### (一) 研究方法：

#### 1. 設定機械鴨參數並更換不同長度鴨脛：

(1)固定機械鴨的蹠足面積為  $6.88\text{ cm}^2$ 、蹠足材質為鋁絲+塑膠片(塑膠片厚度  $0.3\text{ mm}$ )，並設定雙腳以  $3/4$  的馬達轉速交替划動。

(2)實驗中更換五種不同長度的鴨脛，為「 $1\text{ cm}$ 、 $2\text{ cm}$ 、 $3\text{ cm}$ 、 $4\text{ cm}$ 、 $5\text{ cm}$ 」(如圖 4-1)。

2. 同【實驗二】之研究方法，使用推進力測量儀進行量測，重複實驗並進行數據分析。



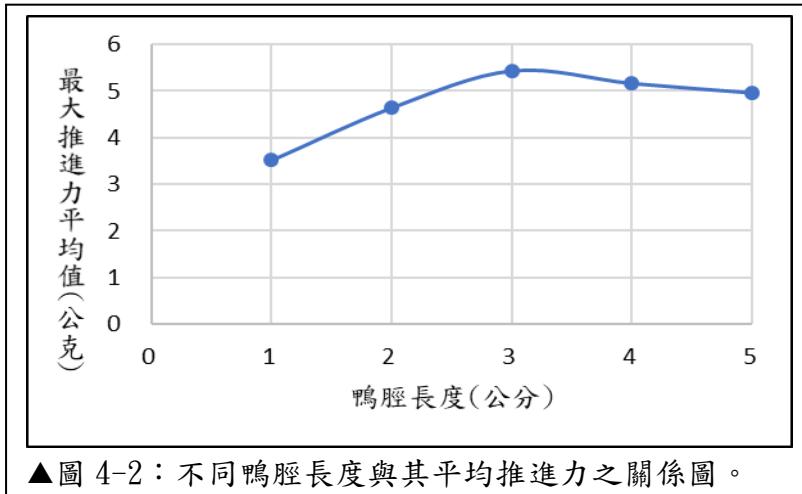
◆圖 4-1：  
五種不同  
長度的鴨  
脛。

## (二) 研究結果：

表 4-1：不同長度的鴨脛與其推進力一覽表

鴨脛長度	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
最大推進力 (g)	實驗 1	3.75	5.03	5.49	5.12
	實驗 2	3.67	4.72	5.31	5.34
	實驗 3	3.75	4.42	5.65	4.96
	實驗 4	3.34	4.56	5.46	5.31
	實驗 5	3.11	4.50	5.29	5.12
	平均值	3.52	4.65	5.44	5.17
實驗情形 描述	機械鴨非常緩慢、非常平穩地往前游。	機械鴨緩慢、平穩地往前游。	1. 機械鴨平穩地往前游。 2. 機械鴨稍往前傾斜。	1. 機械鴨明顯左右晃動地往前划行。 2. 機械鴨稍往前傾斜。 3. 電子秤數值一直跳動，較難判讀穩定數值。	1. 機械鴨大幅度左右晃動地往前划行。 2. 機械鴨往前傾斜角度增大。 3. 機械鴨後方水劇烈波動。 4. 電子秤數值跳動幅度大，難以判讀穩定數值。

## (三) 研究發現：



▲圖 4-2：不同鴨脛長度與其平均推進力之關係圖。

1. 鴨脛長度 1~3 公分間，鴨脛越長，機械鴨的最大推進力呈現上升趨勢。

(1) 鴨脛 1cm 時的最大推進力平均值最低，當鴨脛長度逐漸增加至 3cm 時的最大推進力平均值明顯提升。

(2) 根據自然課所學，我們認為是鴨脛加長後，鴨掌在水中划動的幅度與作用槓桿變長，使單次划水能推動更多水量，進而產生更大的反作用力。

2. 鴨脛長度 3~5 公分間，最大推進力及划行穩定性趨於下降。

(1) 鴨脛 3cm 時的最大推進力平均值最高，當鴨脛長度增加至 5cm 時的最大推進力平均值些微下降。

(2) 鴨脛長度大於 3cm，向前划行時會大幅度左右晃動、前傾角度增大，後方水劇烈波動。推測過長的肢體可能會影響穩定性與操控性。

3. 本實驗鴨脛長度為 3cm 時，有較強的最大推進力且能穩定的划動，因此後續研究將使用 3cm 鴨脛長度。

## 【實驗五】機械鴨雙腳划水速度不同如何影響其最大推進力？

### (一) 研究方法：

#### 1. 設定機械鴨參數並更換機械鴨兩蹼足不同的划水速度：

(1) 固定機械鴨的蹼足面積為  $6.88\text{ cm}^2$ 、蹼足材質為鋁絲+塑膠片(塑膠片厚度  $0.3\text{ mm}$ )、鴨脛長  $3\text{ cm}$ 。

(2) 實驗中調整馬達轉速，以讓機械鴨雙腳以不同的速度划水前進，馬達轉速分別調整為「 $1/4$  轉速、 $2/4$  轉速、 $3/4$  轉速、 $4/4$  轉速」。

#### 2. 同【實驗二】研究方法，用推進力測量儀進行量測，重複實驗並進行數據分析

### (二) 研究結果：

表 5-1：蹼足不同划水速度與其推進力一覽表



馬達調速 (划水速度)	1/4	2/4	3/4	4/4	
最 大 推 進 力 (g)	實驗 1	0.42	2.97	5.49	6.24
	實驗 2	0.24	3.45	5.31	6.81
	實驗 3	0.55	3.35	5.65	6.67
	實驗 4	0.35	3.01	5.46	5.78
	實驗 5	0.39	3.34	5.29	5.73
平均值	0.39	3.22	5.44	6.25	
實驗情形 描述	1. 機械鴨很緩慢、很平穩地往前划行。 2. 電子秤數值只有極微小變動	1. 機械鴨緩慢、平穩往前划行。 2. 機械鴨往前划行時能將後方的棉繩拉得筆直。	機械鴨明顯加快速度，且平穩地往前滑行。	1. 機械鴨非常快速向前划行。 2. 機械鴨往前划行時會明顯地左右晃動。	

### (三) 研究發現：

#### 1. 划水速度越快，最大推進力越強。

從圖 5-1 可明顯看出隨著馬達轉速提升，機械鴨雙腳划動速度增快，所產生的最大推進力呈現穩定上升趨勢。

#### 2. 速度越快，划行動態也會改變。

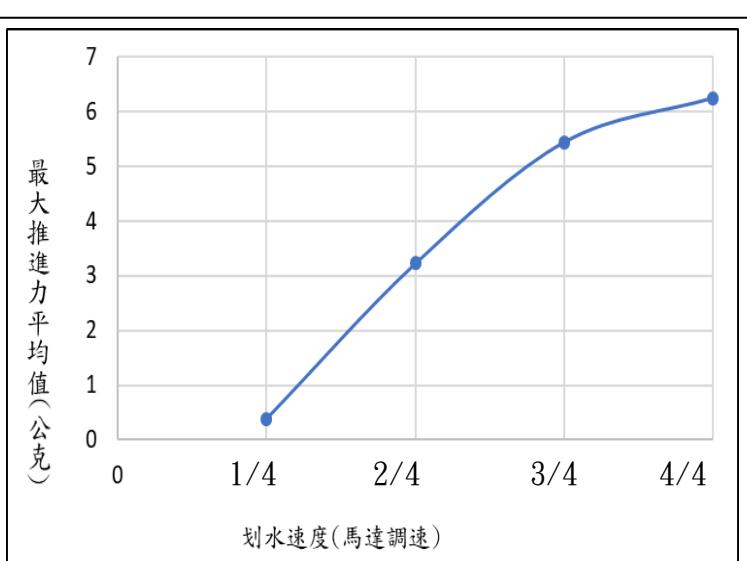
(1)  $1/4$  和  $2/4$  轉速時，機械鴨划行緩慢且平穩，棉繩可見輕微拉動或筆直延展

(2) 在  $3/4$  轉速時，機械鴨速度明顯加快，

划行順暢，推進效果顯著。

(3) 在  $4/4$  轉速時，雖然最大推進力最強，但機械鴨會出現明顯的左右晃動，穩定性下降，可能導致能量的分散。

3. 本實驗顯示，提高機械鴨的划水速度可以有效增加推進力，但當速度達到最高時，雖有最強推進力，卻可能出現晃動影響穩定性。說明划水速度與推進效率需取得平衡，過快未必最佳。



▲圖 5-1：不同划水速度與其最大推進力平均值之關係圖。

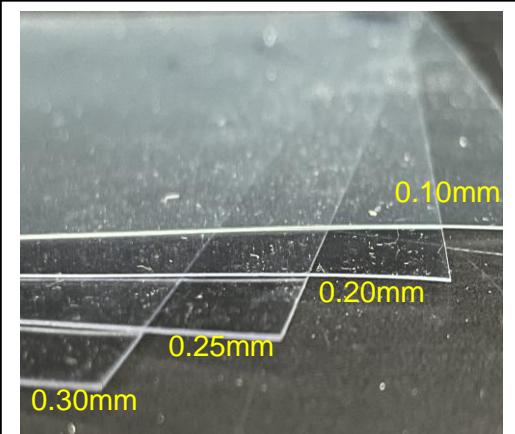
## 【實驗六】：不同厚度的蹼如何影響機械鴨的最大推進力？

### (一) 研究方法：

#### 1. 設定機械鴨參數並更換不同鴨蹼厚度：

- (1) 固定機械鴨的蹼足面積為  $6.88\text{ cm}^2$ 、蹼足材質為鋁絲+塑膠片、鴨脛長3cm，並設定雙腳以3/4的馬達轉速交替划動。
- (2) 實驗中依序更換四種不同厚度的塑膠片(鴨蹼材質)，為「0.10mm、0.20mm、0.25mm、0.30mm」(如圖6-1)。

2. 同【實驗二】之研究方法，使用推進力測量儀進行量測，重複實驗並進行數據分析。



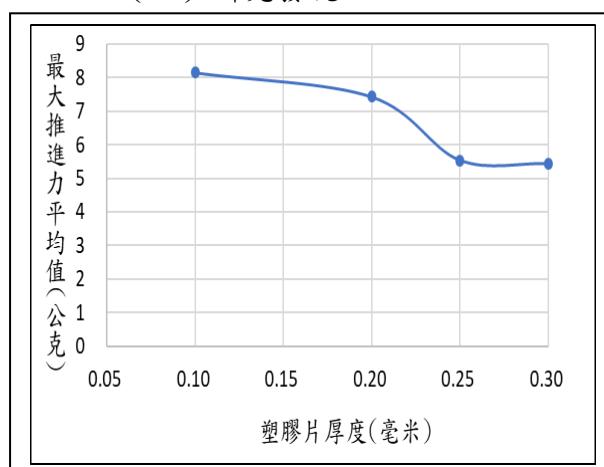
▲圖 6-1：四種不同厚度的塑膠片

### (二) 研究結果：

表 6-1：不同厚度鴨掌與其推進力一覽表

鴨掌厚度	0.10 mm	0.20 mm	0.25 mm	0.30 mm
最大推進力(g)	實驗 1	7.76	7.01	5.09
	實驗 2	8.04	7.64	5.35
	實驗 3	8.17	7.67	6.21
	實驗 4	8.72	7.21	5.58
	實驗 5	8.07	7.63	5.48
	平均值	8.15	7.43	5.54
實驗情形 描述	1. 機械鴨在划行時，塑膠片(鴨蹼)會顯著彎曲。 2. 划行速度極快。	1. 機械鴨划行時，塑膠片(鴨蹼)會些微彎曲。 2. 划行速度很快。	1. 機械鴨划行時，塑膠片(鴨蹼)不太會彎曲。 2. 划行速度快。	1. 機械鴨划行時，塑膠片(鴨蹼)沒有出現肉眼可見的彎曲情形。 2. 划行速度快。

### (三) 研究發現：



▲圖 6-2：不同厚度塑膠片與其最大推進力平均值之關係圖。

#### 1. 薄的蹼足能產生較大的推進力。

- (1) 圖 6-2 可知，當鴨蹼厚度愈薄，最大推進力愈強，但在厚度超過 0.25mm 後，最大推進力趨於平緩。
- (2) 雖然較厚的塑膠片 (0.30mm) 更穩固，但實驗結果顯示其與 0.25mm 厚度的最大推進力平均值接近，無明顯推進優勢。說明厚度過高反而降低靈活性，限制了水流的有效推動。

#### 2. 蠕足(塑膠片)「彈性與彎曲程度」可能是影響推進力大小的關鍵因素。

- (1) 鴨蹼 0.10mm 厚度時，鴨蹼會在划行中明顯彎曲、極具彈性，並產生最高速度與最大推進力；鴨蹼厚度越厚，彎曲程度越小，鴨蹼(塑膠片)0.30mm 時幾乎無明顯彎曲，最大推進力與速度也相對下降。

(2) 承(1)，我們推測鴨蹼適當的彈性與彎曲能增強划水時的水流包覆與推力效率，而過厚的材質則因僵硬、水阻增大，以致最大推進力下降。

3. 跛足厚度對最大推進力有顯著影響。越薄且彈性的材質，划水過程中更能產生彎曲與動態變形，進而提升水流包覆與推進效率。實驗證明 0.10mm 厚度的蹠足(塑膠片)為實驗中最大推進力表現最佳的材質厚度，後續研究將以此厚度蹠足進行。

### 【實驗七】：不同夾角的兩蹠足如何影響機械鴨的最大推進力？

#### (一) 研究方法：

##### 1. 設定機械鴨參數並更換兩蹠足的不同夾角：

(1) 固定機械鴨的蹠足面積為  $6.88 \text{ cm}^2$ 、蹠足材質為鋁絲+塑膠片(塑膠片厚度 0.1mm)、鴨脛長 3cm，並設定雙腳以 3/4 的馬達轉速交替划動。

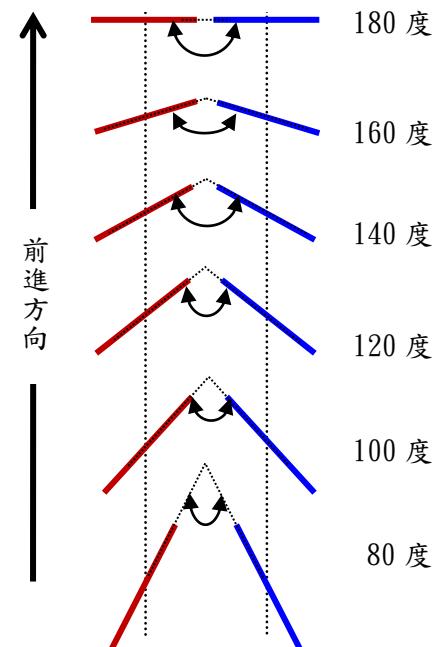
(2) 實驗中依序調整兩蹠足呈現六種不同角度的夾角，分別為「180 度、160 度、140 度、120 度、100 度、80 度」(如圖 7-1 示意)。

2. 同【實驗二】研究方法，使用推進力測量儀進行量測，重複實驗並進行數據分析。

#### (二) 研究結果：

表 7-1：不同夾角的兩蹠足與其推進力一覽表

左蹠足 右蹠足



▲圖 7-1：機械鴨兩蹠足夾角示意圖，

兩蹠足夾角	180 度	160 度	140 度	120 度	100 度	80 度
最大推進力 (g)	實驗 1	7.76	5.85	4.02	2.55	0.00
	實驗 2	8.04	5.64	3.87	2.89	0.00
	實驗 3	8.17	5.99	4.04	2.01	0.00
	實驗 4	8.72	5.12	4.00	2.42	0.00
	實驗 5	8.07	5.80	3.94	2.18	0.00
	平均值	8.15	5.68	3.97	2.41	0.00
實驗情形 描述	快速、平穩地向前划行。 	划行時會稍微左右晃動。	1. 划行時會稍微左右晃動。 2. 蹠足划水時引發的水波幅度較小。	1. 很緩慢地前進。 2. 蹠足划水時引發的水波幅度最小。	無法向前划行。	無法向前划行。

### (三) 研究發現：

#### 1. 兩蹼足夾角越大，最大推進力越強。

(1) 180° 夾角時最大推進力平均值最強，為 8.15 g，是所有夾角中表現最佳。

(2) 夾角從 160° (5.68g) 、140° (3.97g) 、120° (2.41g) 逐步遞減，當夾角縮小至 100° 或 80° 時，最大推進力為 0g，機械鴨無法前進。

#### 2. 兩蹼足夾角影響水波幅度與行進穩定性

(1) 180° 夾角時，蹼足運動時產生的水流方向與前進方向相反（即向後推），有效推動水層，推進效率高，使機械鴨划行快速且平穩。

(2) 隨著夾角變小，蹼足撥水讓水流推力偏向側面，造成動能分散、穩定性變差，行進晃動加劇，推進力也明顯下降。

(3) 當夾角小於 100° 時，蹼足幾乎無法對水產生有效推力，以致無法產生前進動能。

#### 3. 本實驗證明，機械鴨兩蹼足的夾角對推進力有決定性影響。兩蹼足最佳夾角為 180°，能產生最強的最大推進力並保持前進穩定性，將以此作為後續實驗的設計。

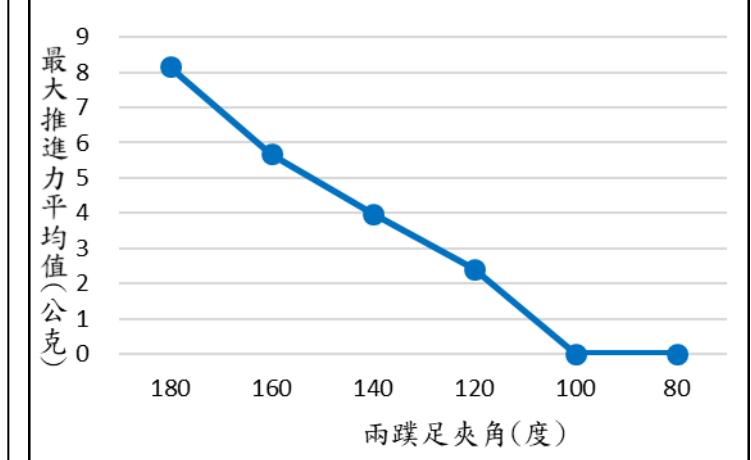
## 【實驗八】：水缸壁有無置放海綿如何影響機械鴨的最大推進力？



#### 研究緣起：

我們的研究原本聚焦於「單隻機械鴨的蹼足對划水運動行為的影響」，實驗場域選在一個長方形玻璃水缸 (45.5cm × 43cm × 90cm) 中進行。在觀察機械鴨雙腳划動的過程中，我們注意到牠在水中產生的水波紋會不斷擴散，並於接觸水缸壁後反彈回來，可能干擾機械鴨的運動軌跡與推進力表現。

這引發我們一個想法：若能在狹長水缸的兩側壁面放置大型海綿，吸收部分擴散水波，模擬一個較接近自然湖面的環境，是否會對機械鴨蹼足划水所產生的推進力產生影響？因此，我們進一步設計本子題，探討水缸壁有無放置海綿對推進效果的可能影響。



▲圖 7-2：不同夾角的兩蹼足與其平均推進力之關係圖

## (一) 研究方法：

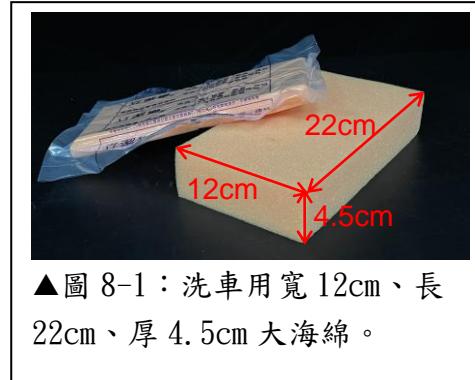
### 1. 設定機械鴨參數並放置海綿在玻璃水缸的不同位置：

(1) 固定機械鴨的蹼足面積為  $6.88\text{ cm}^2$ 、蹼足材質為鋁絲+塑膠片、鴨脛長3cm、鴨蹼厚0.1mm、兩蹼足夾角180度，並設定雙腳以3/4的馬達轉速交替划動。

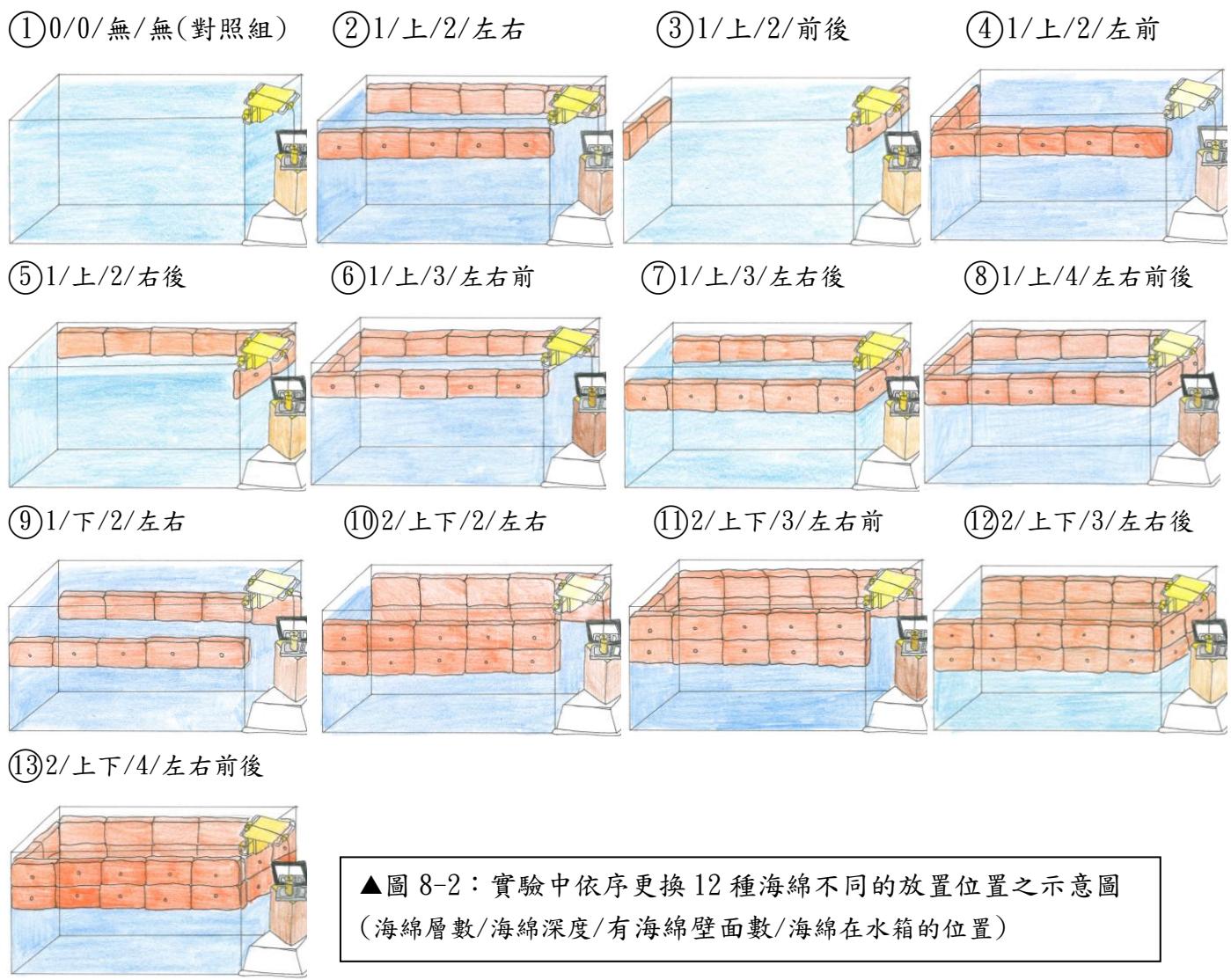
(2) 購置洗車用寬12cm、長22cm、厚4.5cm大海綿。

(3) 實驗中依序更換12種海綿不同的放置位置，如圖8-2。

2. 同【實驗二】之研究方法，使用推進力測量儀進行量測，重複實驗並進行數據分析。



▲圖 8-1：洗車用寬12cm、長22cm、厚4.5cm大海綿。

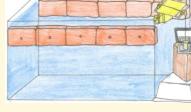
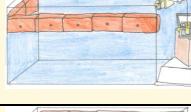
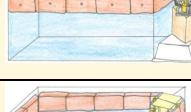
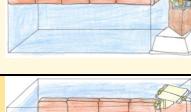
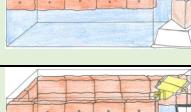
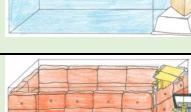


▲圖 8-2：實驗中依序更換12種海綿不同的放置位置之示意圖  
(海綿層數/海綿深度/有海綿壁面數/海綿在水箱的位置)

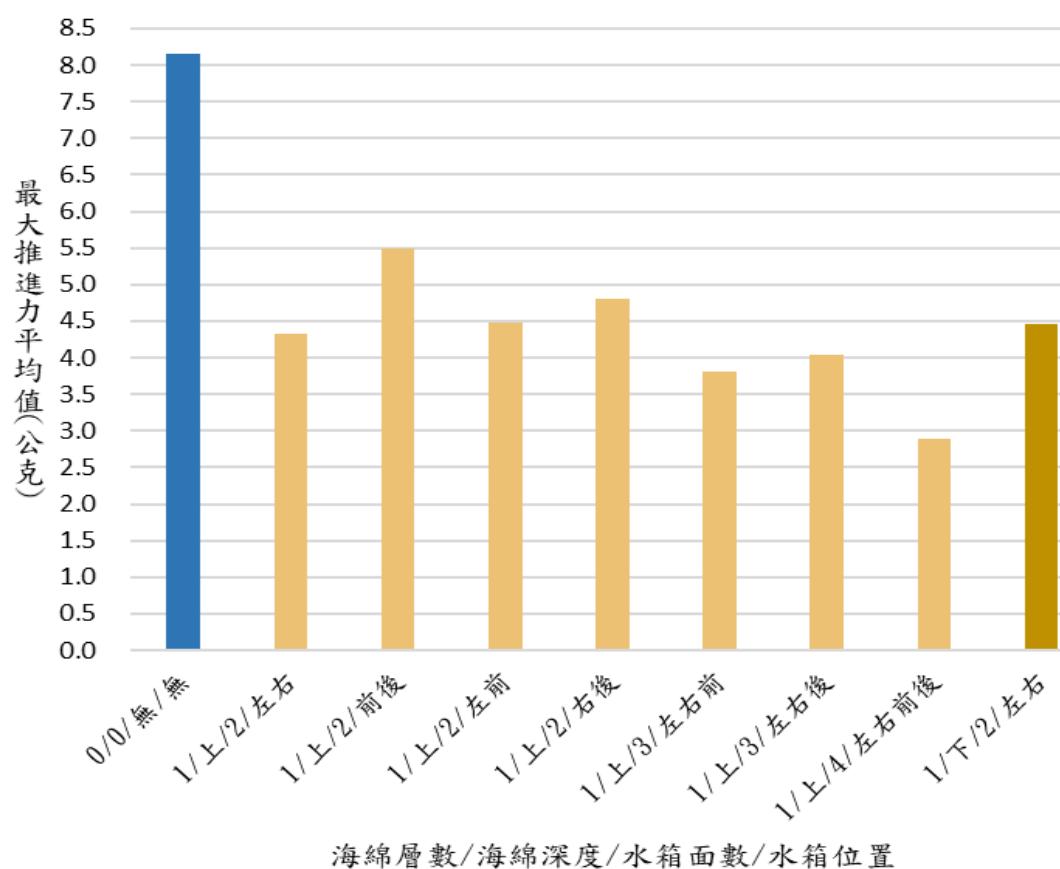
## (二) 研究結果：

表 8-1：水缸壁有無置放海綿及海綿放置不同，其最大推進力平均值一覽表

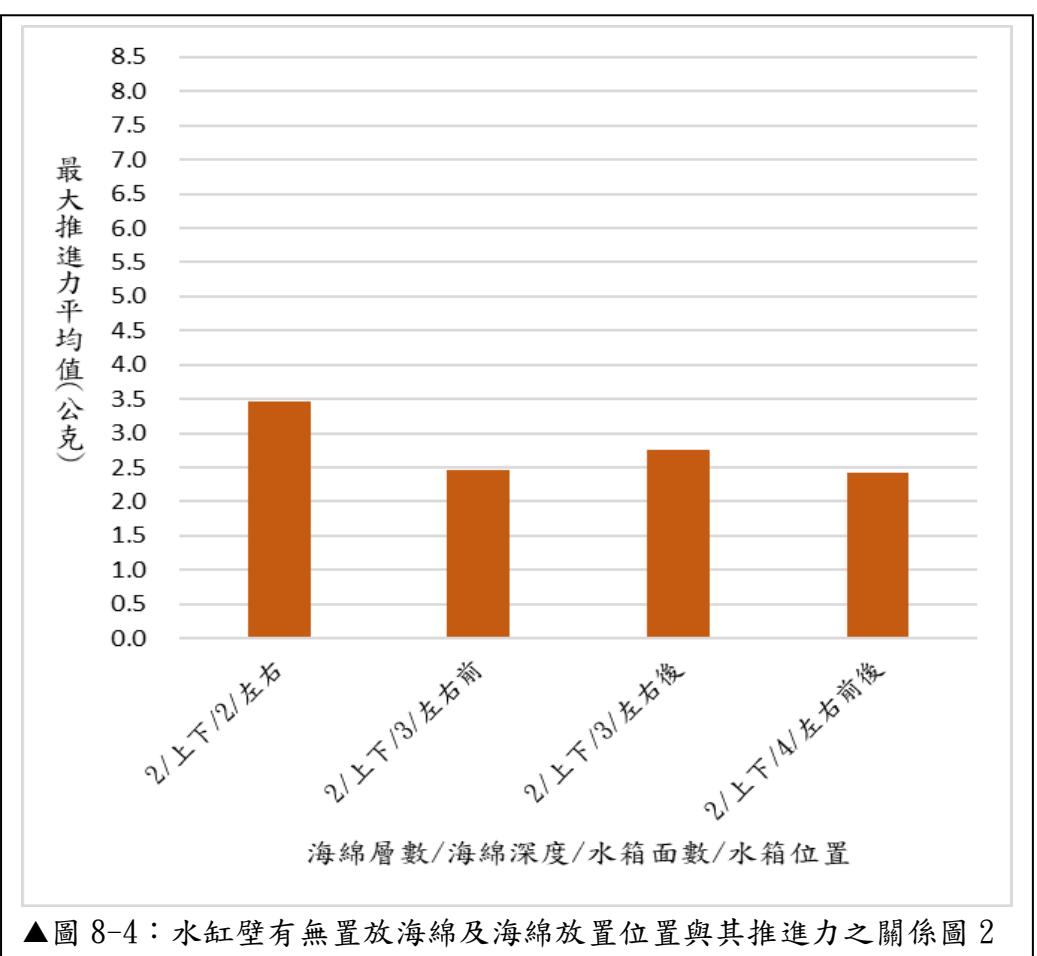
(受限於頁數，因此表格中僅呈現最大推進力之平均值。)

海綿層數	海綿深度	有海綿壁面數	水箱位置	圖片	最大推進力平均值(g)
0 (對照組)	-	0	-		8.15
					數值最大!
1	上	2	左右		4.32
1	上	2	前後		5.50
1	上	2	左前		4.47
1	上	2	右後		4.80
1	上	3	左右前		3.82
1	上	3	左右後		4.04
1	上	4	左右前後		2.89
1	下	2	左右		4.47
2	上下	2	左右		3.47
2	上下	3	左右前		2.46
2	上下	3	左右後		2.77
2	上下	4	左右前後		2.42
					數值最小!

(三)研究發現：



▲圖 8-3：水缸壁有無置放海綿及海綿放置位置與其推進力之關係圖 1



▲圖 8-4：水缸壁有無置放海綿及海綿放置位置與其推進力之關係圖 2

### 1. 有無海綿會顯著影響推進力表現

(1) 在無海綿（對照組）情況下，機械鴨的最大推進力平均值為 8.15 g。

(2) 說明水波反彈，雖可能產生干擾，但水的反作用力可強化推進效果。

### 2. 海綿放置愈多、吸波效果愈強，最大推進力越低！

(1) 當水缸內放置越多海綿（如水面上下層、四個壁面都放置），最大推進力會顯著降低，最低為 2.42 g。

(2) 說明海綿能吸收水波與減緩反彈干擾，但也因此減少了推進時的反作用能量來源。

### 3. 以自然模擬角度觀察，海綿吸波效應有助穩定但降低推進力！

(1) 本實驗結果顯示水缸壁若未放置海綿，反彈水波可增強推進效果；反之，若放置大量海綿吸收波浪，會減少推進力。

(2) 雖然放置海綿會降低推進力表現，但也使實驗環境更接近自然湖泊條件，因此接下來將裝置「2層海綿/置於水面上下/四個水箱壁面/左右前後」以模擬自然環境來探究「鴨子列隊划行」的相關實驗。



### 為什麼小鴨總是緊跟在母鴨後方排隊游泳？

#### 研究緣起：

在前一階段的研究中，我們發現在狹長型水缸兩側壁面放置大型海綿，能有效吸收水波、減緩反彈干擾，有助於建立一個更穩定、接近自然湖面條件的實驗環境。這樣的設計讓實驗更穩定，也讓我們能接著進行更深入的探究。

接下來，我們將探究源自戶外觀察的現象：【為什麼小鴨總是緊跟在母鴨後方排隊游泳？】文獻顯示這種「列隊划行」可能與省力原理有關，但這些研究大多是用電腦模擬出來的，我們想要用真正的實驗來看看，小鴨跟在不同的位置，划起水來是不是真的比較省力。

因此，我們希望透過實際量測，探究當小鴨緊跟於母鴨後方划行時，其最大推進力表現如何受到距離與位置的影響。

## 【實驗九】：小鴨在母鴨正後方的距離如何影響小鴨的最大推進力？

### (一)研究方法：

1. 在玻璃水缸 4 個壁面的水面下各設置 24cm 寬的海綿。
2. 為驗證「列隊划行」是否真能幫助小鴨節省力氣，本實驗設計固定母鴨不動，讓小鴨在母鴨正後方不同距離 (4cm、6cm、8cm、10cm、12cm、14cm、16cm) 進行推進測試，觀察最大推進力的變化。
2. 設定機械鴨參數並調整小鴨與母鴨的距離：

(1) 固定機械鴨的蹼足面積為  $6.88\text{ cm}^2$ 、蹼足材質為鋁絲+塑膠片、鴨脛長 3cm、兩蹼足夾角 180 度，並設定雙腳以 3/4 的馬達轉速交替划動。

(2) 實驗中依序調整小鴨與母鴨的距離為「4cm、6cm、8cm、10cm、12cm、14cm、16cm」(如圖 9-1)。

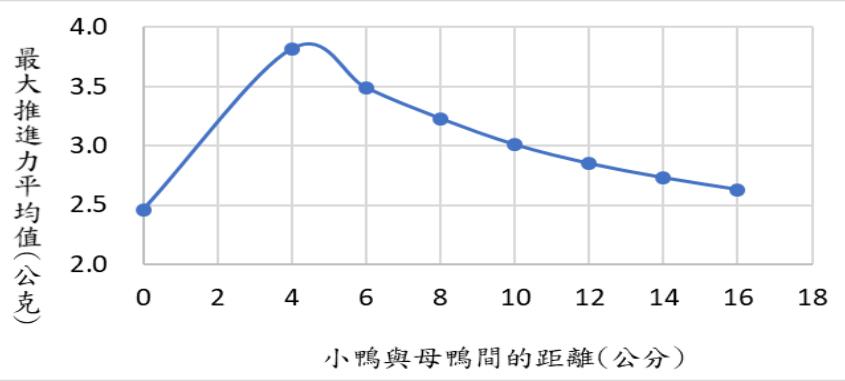
3. 同【實驗二】研究方法，使用推進力測量儀進行量測，重複實驗並進行數據分析

### (二)研究結果：

表 9-1：小鴨與母鴨間的距離及小鴨所展現的推進力一覽表

小鴨距母鴨的距離	無母鴨 (對照組)	距母鴨 4cm	距母鴨 6cm	距母鴨 8cm	距母鴨 10cm	距母鴨 12cm	距母鴨 14cm	距母鴨 16cm	
最大推進力 (g)	實驗 1	2.43	3.84	3.41	3.31	3.15	2.9	2.65	2.71
	實驗 2	2.31	3.83	3.56	3.23	3.1	2.69	2.71	2.51
	實驗 3	2.56	3.83	3.46	3.12	2.82	2.94	2.76	2.75
	實驗 4	2.50	3.69	3.37	3.32	2.99	2.89	2.77	2.52
	實驗 5	2.52	3.91	3.63	3.16	2.97	2.84	2.75	2.64
	平均值	2.46	3.82	3.49	3.23	3.01	2.85	2.73	2.63

### (三)研究發現：



▲圖 9-2：小鴨與母鴨間距離與其最大推進力平均值關係圖

## 1. 小鴨與母鴨距離 4 公分時，最大推進力表現最佳！

- (1) 距離母鴨最近 (4cm) 的小鴨最大推進力平均值最大，為 3.82g。
- (2) 顯示此距離小鴨可能正好位於母鴨產生的水波推力範圍內，能「搭著水波划行」，有效減少划水阻力。

## 2. 距離越遠，推進力逐漸下降。

- (1) 當距離增加至 6cm、8cm、10cm……至 16cm，小鴨的最大推進力逐步下降，由 3.49g 降至 2.63g。
- (2) 說明隨著與母鴨的距離增加，小鴨能夠受惠的水波推力逐漸減弱，推進效率也隨之降低。

## 3. 對照組「無母鴨」情況下，推進力最低。

- (1) 作為對照組的「無母鴨」情況下，小鴨平均推進力只有 2.46g。
- (2) 表示即使與母鴨距離達至 16cm，仍略略優於沒有跟隨母鴨的情境。
- (3) 證實小鴨單獨前進時較耗力，無法藉由前方水波獲得推進幫助。

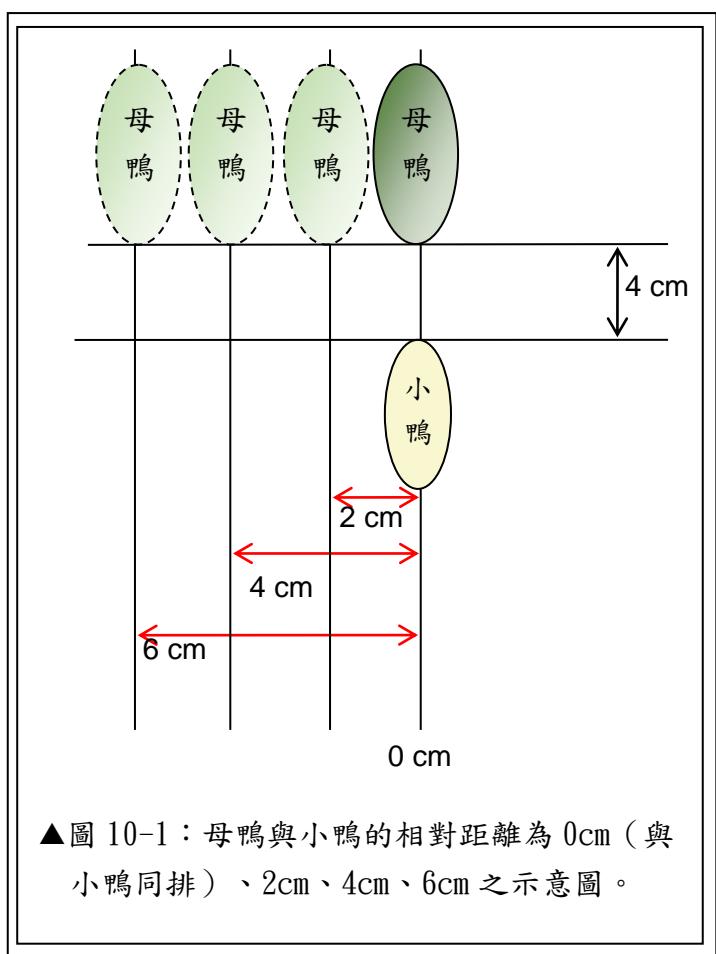
## 4. 列隊跟隨有助於提升推進力，符合自然界「省力划行」原理。

- (1) 實驗結果整體顯示，小鴨若能在合適距離緊跟母鴨後方划水，即可提升推進力、減少耗能。
- (2) 此發現與科學家以電腦模擬所推論的「列隊省力」現象相符，並以實體實驗方式加以實證。

### 【實驗十】：母鴨位在小鴨前方不同位置將如何影響小鴨的最大推進力？

#### (一) 研究方法：

1. 玻璃水缸 4 個壁面的水面下各設置 24cm 寬的海綿，將小鴨固定位置。
2. 設定機械鴨參數並調整母鴨在小鴨前方的位置：
  - (1) 固定機械鴨的蹠足面積為 6.88 cm<sup>2</sup>、蹠足材質為鋁絲+塑膠片、鴨脛長 3cm、兩蹠足夾角 180 度，並設定雙腳以 3/4 的馬達轉速交替划動，母鴨在小鴨前方 4cm 遠的距離。
  - (2) 實驗中以母鴨在小鴨前方的位置為操縱變因，依序調整母鴨與小鴨的相對距離如下，以觀察母鴨位置變化對小鴨推進力表現之影響。(如圖 10-1)



▲圖 10-1：母鴨與小鴨的相對距離為 0cm (與小鴨同排) 、2cm 、4cm 、6cm 之示意圖。

①同排 0cm：小鴨位於母鴨正後方 5cm 處，兩者左右對齊。

②相對距離為 2cm、4cm、6cm、8cm、10cm、12cm、14cm：母鴨向左平移，小鴨位於母鴨右斜後方。

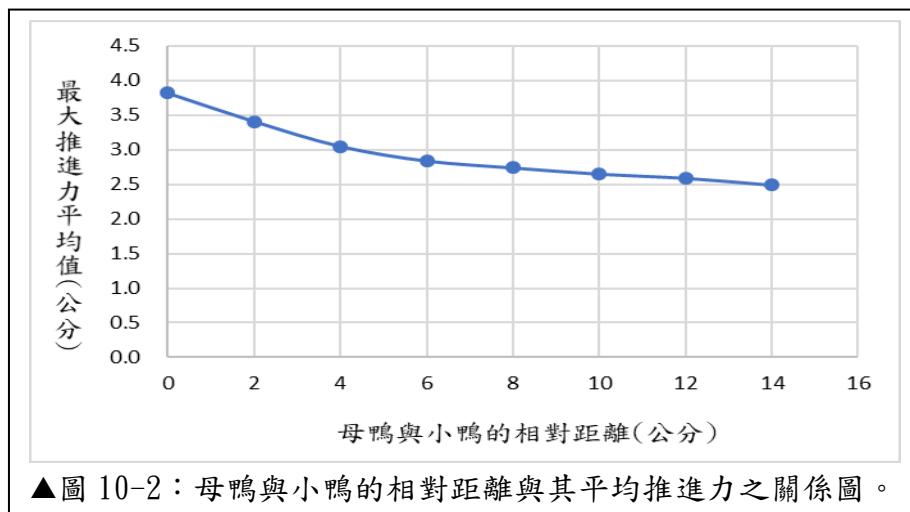
3. 同【實驗二】研究方法，用推進力測量儀進行量測，重複實驗並進行數據分析。

(二)研究結果：

表 10-1：小鴨距母鴨的距離及小鴨所展現的推進力一覽表

母鴨與小鴨的相對距離		0 cm (與小鴨同排)	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	10 cm	12 cm	14 cm
最大推進力 (g)	實驗 1	3.84	3.26	3.04	2.75	2.68	2.63	2.61	2.47
	實驗 2	3.83	3.54	3.06	2.76	2.67	2.63	2.59	2.53
	實驗 3	3.83	3.51	2.95	2.95	2.82	2.69	2.52	2.47
	實驗 4	3.69	3.38	3.08	2.86	2.77	2.72	2.67	2.47
	實驗 5	3.91	3.38	3.14	2.86	2.77	2.60	2.54	2.52
	平均值	3.82	3.41	3.05	2.84	2.74	2.65	2.59	2.49

(三)研究發現：



▲圖 10-2：母鴨與小鴨的相對距離與其平均推進力之關係圖。

1. 小鴨在母鴨正後方（同排，0cm）時，推進力最佳！

(1) 最大推進力平均值為 3.82g，明顯高於其他七種更偏左位置的最大推進力。

(2) 當小鴨位於母鴨正後方的「搭浪主通道」時，最能接收到母鴨產生的水波推力划行前進，最大推進力最強且穩定。

2. 小鴨位於母鴨左後方斜角 (2cm~14cm) 時，小鴨的最大推進力逐漸下降。

(1) 最大推進力由大至小：左後方斜角 2cm > 4cm > 6cm > 8cm > 10cm > 12cm > 14cm。

(2) 說明當小鴨偏離母鴨正後方，離開最佳水波路徑後，受到的推力效果明顯減弱。

3. 母鴨產生的水波具有方向性，最佳推力集中在母鴨的正後方。

依據圖 10-2 可得知，小鴨若偏離母鴨正後方，即使仍在其後方區域，也可能錯過主要推進波帶，以致推進力減小。

4. 本實驗證實，小鴨若位於母鴨正後方位置，能獲得最佳推進力！而當小鴨位於斜後方、與母鴨不在同一水波路徑上時，平移距離越遠，推進力顯著下降。此結果說明小鴨列隊划行，是具有節省體力與提升推進力的科學依據。

### 【實驗十一】：使用「波動感應儀」裝置觀察水流變化。



#### 研究緣起：

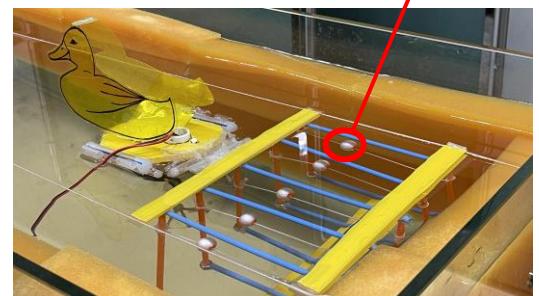
本實驗想要透過自製的「波動感應儀」，於機械鴨正後方不同水層設置 5 顆保麗龍球，觀察其因水流變化而移動的情形，以了解鴨蹼划水時在不同深度造成的波動特徵。



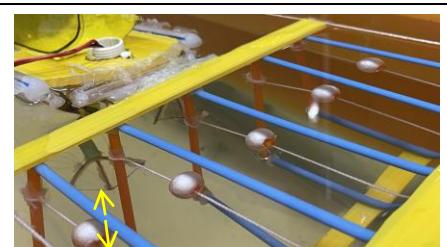
▲圖 11-2：在保麗龍球中嵌入吸管，使保麗龍球能在棉繩上自由滑動。

#### (一)研究方法：

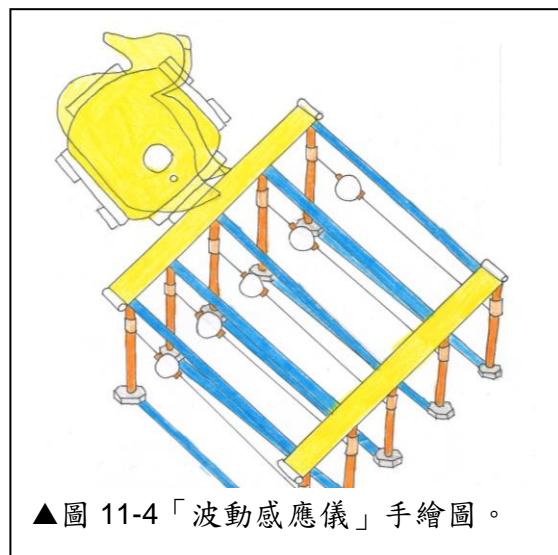
1. 使用保麗龍球、各式吸管、棉繩、塑膠瓦楞板組合成「波動感應儀」。將「波動感應儀」固定於機械鴨黃色浮板正後方(如圖 11-1)。
2. 「波動感應儀」有五根相距 4.5cm 的藍色桿子管，正中間的藍色桿子在機械鴨正後方。
3. 藍色吸管下方各有一條穿過保麗龍球的棉繩，在保麗龍球中嵌入吸管，使保麗龍球能在棉繩上自由滑動(如圖 11-1)。
4. 一開始調整保麗龍球在前方橘色桿子 3cm 處。
5. 承 3，該棉繩繫於橘色桿子，可調整上下層位置(如圖 11-3)。
6. 觀察機械鴨開始划行前及划行後，「波動感應儀」上保麗龍球的移動情形。



▲圖 11-1：將「波動感應儀」固定於機械鴨黃色浮板正後方。

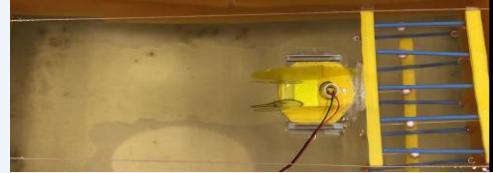


▲圖 11-3：棉繩繫於橘色吸管，可調整上下層位置。



## (二)研究結果：

表 11-1：機械鴨划行前後，「波動感應儀」保麗龍球移動情形一覽表

保麗龍球在 橘桿上位置	對應 位置	保麗龍球位置	
		划行前	划行後
上層	水面		
中層	鴨脰 中段		
下層	蹼足 底端		

## (三)研究發現：

### 1. 水面上層：

- (1)保麗龍球排列呈「<字形」。
- (2)中央球向前推移幅度最大、兩側較小，顯示水面層的水波受到蹼足推動後，沿著機械鴨正後方中心線呈現前方擴散趨勢。此現象與自然界中小鴨「搭浪省力」的行為相呼應，中央水波最強的位置正是最省力的划行路徑。

### 2. 水面中層（中段）：

- (1)保麗龍球呈「>字形」排列。
- (2)中央球向後微推移，而兩側球幾乎沒有移動。推測在中層位置(鴨脰中段)的機械鴨正後方，水流有一小段向後回流，可能為上下層水波交界干涉造成的水流轉向區。

### 3. 水面下層（下段）：

- (1)保麗龍球呈「>字形」排列。
- (2)中央球顯著向後移動、兩側球微微向後移動，推測蹼足的主要推水動作集中於正下方中央區域，當機械鴨以雙腳划水時，其蹼足在水下產生直接而強烈的後推力，使正後方水流向後快速排出，因此中央球受到明顯水流衝擊而大幅向後滑動。

## 陸、結論

一、我們成功研發出能模擬鴨蹼前後划動並穩定前行的機械鴨，並設計出可量測「最大推進力」的「推進力測量儀」，克服水中數據不易取得的困境。

我們使用 Tracker 軟體分析機械鴨划行影片，加速度與力量計算結果與推進力測量儀所得數值高度吻合，顯示二者驗證彼此，進一步證明我們所研發的「推進力測量儀」是非常可信的工具！

二、蹼足的「材質」、「面積」、「厚度」、「划水速度」皆會顯著影響推進力表現！

1. 在實驗二中得知，材質以【鋁絲+塑膠片】製作之蹼足推進力最大且最穩定。
2. 在實驗三中得知，蹼足面積越大，推進力與前進速度越高，但在面積達到一定程度( $6.88\text{cm}^2$ )後，推進力雖仍有增長，但成長幅度較小，顯示蹼足面積過大時推進力的提升有限。
3. 在實驗五中得知，提高機械鴨的划水速度可以有效增加推進力，但當速度達到最高時，雖有最大推進力，卻可能出現晃動影響穩定性。
4. 在實驗六中得知，蹼足厚度對推進力有顯著影響。越薄且彈性的材質，划水過程中更能產生彎曲與動態變形，進而提升水流包覆與推進效率。

三、「鴨脛長度」與「兩蹼夾角」影響機械鴨划行的穩定性與效率。

1. 在實驗四中得知，鴨脛長  $3\text{cm}$  時，有最大的推進力且能穩定的划動。
  - (1)鴨脛長度  $1\sim 3$  公分間，鴨脛越長，機械鴨的推進力呈上升趨勢，且平穩地划行；鴨脛長度  $3\sim 5$  公分間，推進力及划行穩定性趨於下降。
  - (2)鴨脛越長不僅顯著左右晃動，且機械鴨後方水劇烈波動。
2. 實驗七中得知，兩蹼足夾角為  $180^\circ$  時能產生最大推進力，夾角越小則動能越分散，甚至無法前進。
  - (1)實驗發現與自然環境中「鴨子在往後踢腳時蹼會張開、收腳時蹼會自動摺疊」的動作相呼應！
  - (2)兩蹼足  $180^\circ$  夾角 = 完全展開的蹼足推水狀態

真實鴨子往後踢腳時，蹼會張開，形成最大面積，就像在實驗中  $180^\circ$  夾角的蹼足一蹼足向左右展開呈一直線，能最大限度推動水產生反作用力，而這也正是產生最大推進力的黃金姿勢。

(3)自動摺疊 = 減少收腳時的阻力：

鴨子收回腳時蹼自動摺疊，減少迎面阻力。雖然實驗中機械鴨蹼足是固定角度，但從實驗中看出，當夾角縮小（如  $160^\circ$  以下）時，蹼足無法充分展開推水，效率顯著降低，甚至無法前進，這也驗證了真實鴨子動作設計的精妙性。

#### 四、環境會影響推進力，水波的反射或吸收扮演重要角色。

實驗八得知，無海綿環境，水波反彈產生反作用力能強化機械鴨推進效果；裝置海綿，吸收水波雖會降低整體推進力表現，但有助於模擬自然環境與穩定實驗條件。

#### 五、模擬小鴨列隊划行行為，驗證列隊划行有助於省力推進。

- (1) 實驗九、十中得知，當小鴨緊跟在母鴨正後方或與母鴨距離接近（如 4cm）時，能有效利用母鴨所激起的水波產生「搭浪效應」，小鴨的推進力顯著提升。
- (2) 實驗九、十中得知，與母鴨距離過遠或偏離直線排列，推進力即顯著下降。證實列隊划行有助於省力推進。

#### 六、自行研發「波動感應儀」裝置讓我們以視覺化方式清楚理解鴨蹼划水在不同深度造成的水流動態特徵，是本研究的一大創意與突破。

在【實驗十一】中，我們自行設計「波動感應儀」，觀察到機械鴨蹼足推水在三層水深產生不同的波動樣態：

1. 上層中央水波最強，呈「<字形」，對應最佳搭浪位置。
2. 中層呈「」字形，中央有微弱回流，可能為水波轉向干涉區。
3. 下層呈「>字形」，中央球向後移動最顯著，反映蹼足推水主力向後傳導。

### 捌、參考資料

1. Yuan, Zhi-Ming., Chen, Minglu., Jia, Laibing., Ji, Chunyan., & Incecik, Atilla. (2021)。 *Wave-riding and wave-passing by ducklings in formation swimming*. 《Journal of Fluid Mechanics》，928，R2。doi:10.1017/jfm.2021.820。
2. 全國第 63 屆科展高中組物理與天文學科作品~鴨行無阻—鴨子行進陣列與其省力情形之探究。

《本研究所有照片、圖片、統計圖表皆為作者自行拍攝、繪製、編製》

## 【評語】080108

作品模擬鴨子蹼足的交替划動，成功研發了可穩定前行的第三代機械鴨。研究過程中的數據豐富，而且考慮得很周延完整。推進力測量儀也能精準測量鴨蹼划水所產生的最大推進力，可信度極高！最後實驗還證明了小鴨列隊划行能有助於省力前進，實屬不易。雖然波動感應儀是此作品中的一大創意，但仍有可深入探討的空間。整體而言，是件有創意、具有學術價值的作品。

作品海報



一探究竟蹼足結構對划水推進效能之影響

蹼

夾

進

# 壹、研究動機

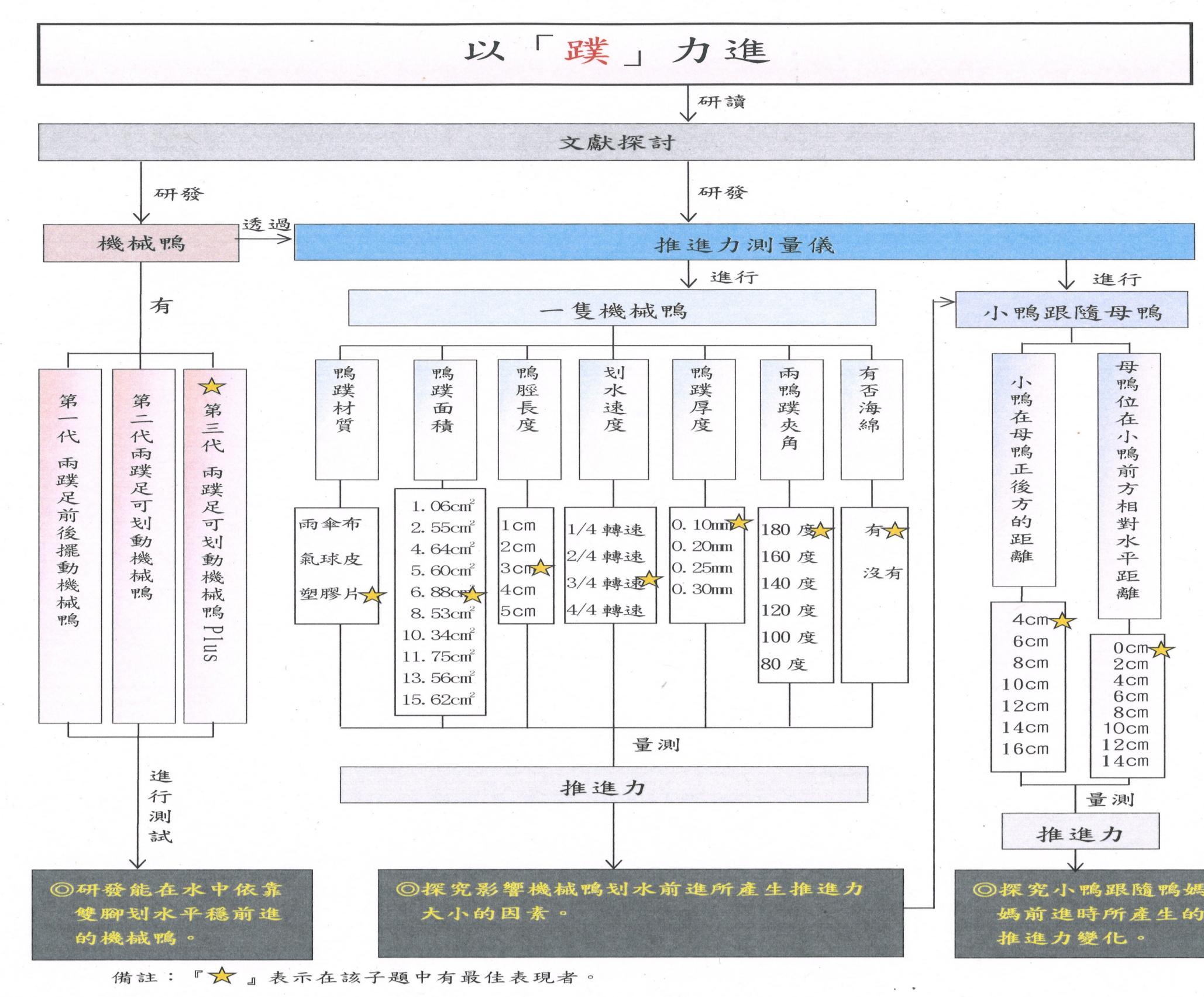
去年暑假，我在阿嬤家附近的湖邊觀察到一個有趣的現象：一群鴨子游過湖面時，小鴨總是整齊地排成一列，緊跟在母鴨後方。這樣的隊形看起來既有秩序又十分協調，讓我產生了濃厚的好奇心——為什麼鴨子游泳時會選擇這種排列方式？這樣的隊形對牠們有什麼特別的作用嗎？

為了揭開這個謎團，我和對科學探究同樣充滿興趣的朋友，一起深入研究這個現象。我們希望透過科學方法，找出鴨子排成一列游泳背後的科學原理！

# 貳、研究目的

- 一、研發能在水中依靠雙腳划水平穩前進的機械鴨。
- 二、研發能測量機械鴨划水前進所產生推進力大小的儀器。
- 三、探究影響機械鴨划水前進所產生推進力大小的因素。
- 四、探究小鴨跟隨鴨媽媽前進時所產生的推進力變化。

# 參、研究架構及流程

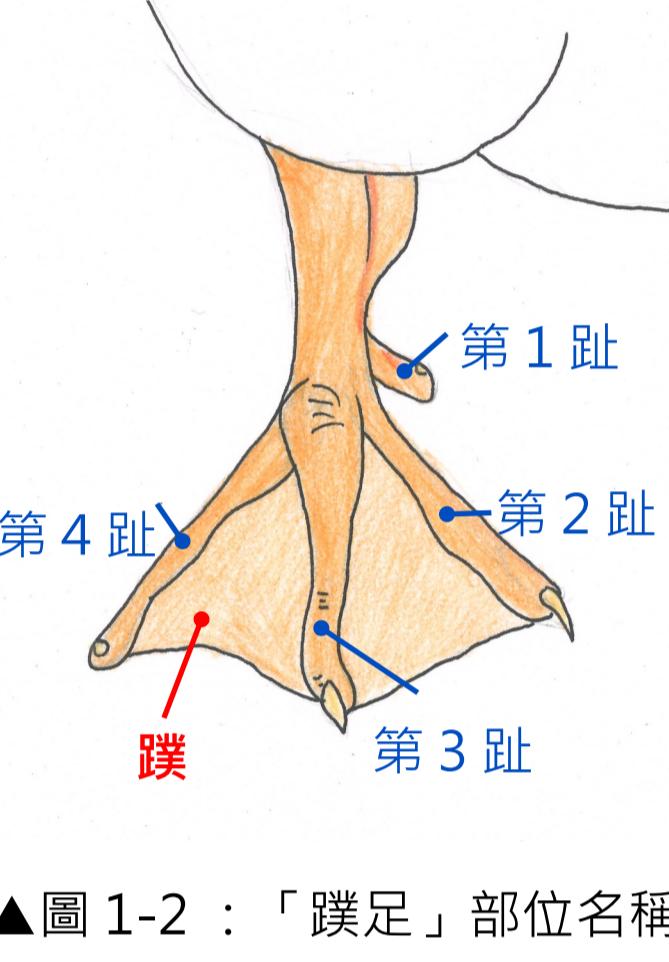
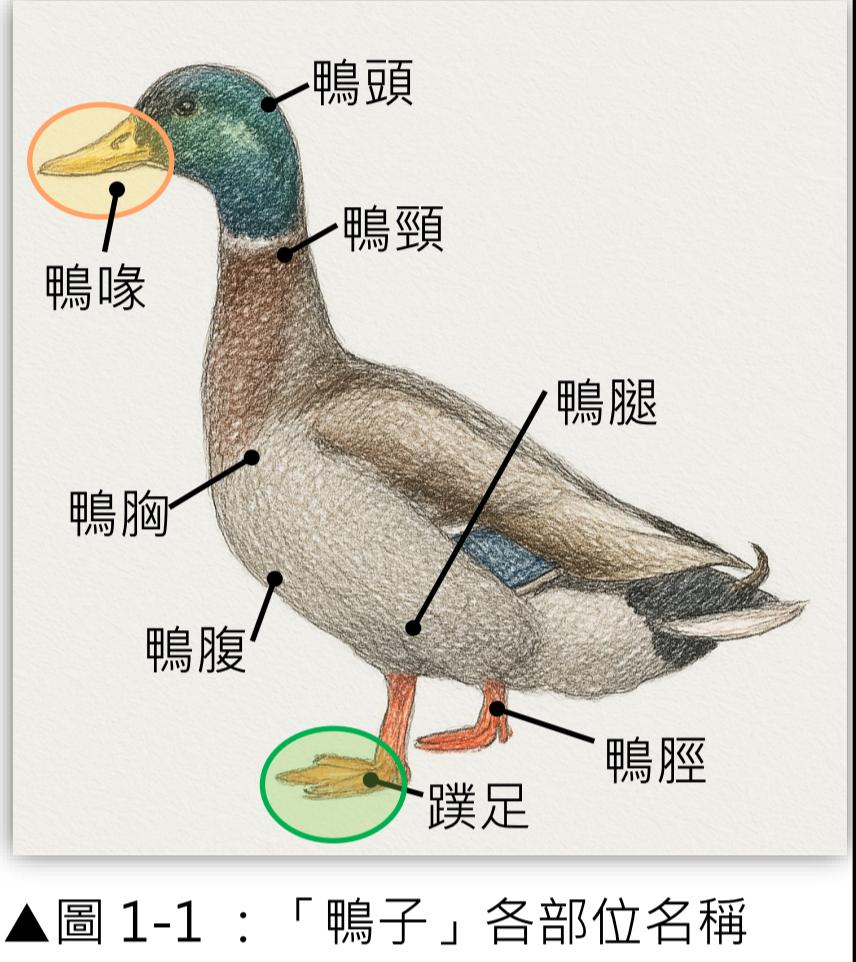


# 肆、研究方法、結果與發現

## 【文獻探討】

### 一、認識「鴨子」身體結構與其運動方式

#### (一)鴨子身體各部位名稱



▲圖 1-1：「鴨子」各部位名稱

▲圖 1-2：「蹼足」部位名稱

#### (二)體型:身體形狀與船相似，胸腹部猶如船底，能浮在水面上以減少阻力。

(三)鴨腳:第2、3、4趾之間有一層寬扁且平展的蹼，是由腳趾間的皮膚延伸演化而成的薄膜組織結構，能夠有效增加腳趾的截面積，使鴨子在水中划動時產生更大的推力，進而提升游泳速度與效率。這種「蹼足結構」正是為了適應水中生活而進化的結果。

(四)「鴨掌」與「扁平足」:扁平足患者的足弓塌陷，足底幾乎全部接觸地面，看起來像鴨子的腳掌，因此被形象化的比喻稱為「鴨母蹄」。

#### (五)「蹼足」與「鴨掌」的詞語辨析

1.鴨的蹼足：是指鴨腳上具有「蹼膜」的結構，屬於生物學上對腳型的描述，強調功能性和形態特徵。

2.鴨掌：多用於日常對話、飲食名稱，或比喻外型像鴨腳的東西。

本實驗是為探究「鴨腳的構造與功能」，所以將使用「蹼足」來稱呼。

### 二、小鴨為什麼要排隊跟著鴨媽媽划水？

科學家用電腦模擬出鴨媽媽在水中游泳時，產生的水波浪，再觀察小鴨站在哪些位置游泳會比較省力？根據 Yuan 等人 (2021) 的模擬結果發現小鴨「搭媽媽的浪」，就像滑水一樣省力-如果小鴨剛好游在媽媽後面的某個位置，牠就可以「搭著水波前進」，幾乎不用自己用力划水，還能被水波往前推，就像在坐水上的滑板車一樣！

雖然科學家已透過電腦模擬分析，證實小鴨排隊跟隨鴨媽媽划水時能有效節省體力，但這些結果主要來自數值計算與理論模型的推估。為了進一步驗證此現象在實際情境下是否成立，我們希望在本研究中，運用自行研發的「機械鴨」、「推進力測量儀」進行實體量測，藉由觀察小鴨跟隨鴨媽媽前進時所產生的推進力變化，來佐證模擬結果。

### 三、關於「鴨子划水」的相關科展研究

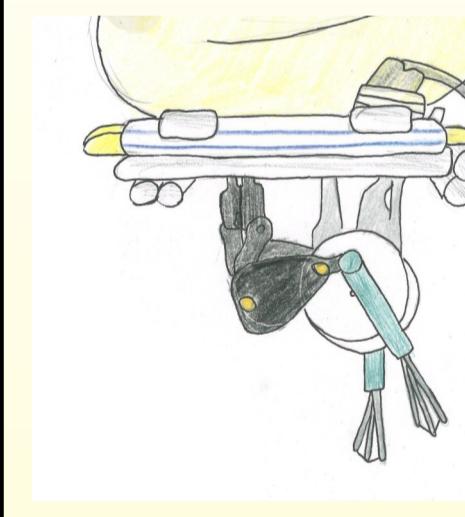
發現目前尚無國中小科展作品探究「蹼足對其划水之運動行為的影響」，因此我們想探究「單隻鴨子蹼足在不同變因下向前划行時推進力及划行效能的表現」，及「小鴨跟隨著母鴨後方時，在水中向前划行時推進力的表現」。為克服在水中測量數據的困境，期望能自創量測推進力的裝置，找出影響蹼足向前划動的真相。

## 實驗一：實驗環境介紹

### 一、「第三代兩蹼足可划動的機械鴨 Plus」的設計



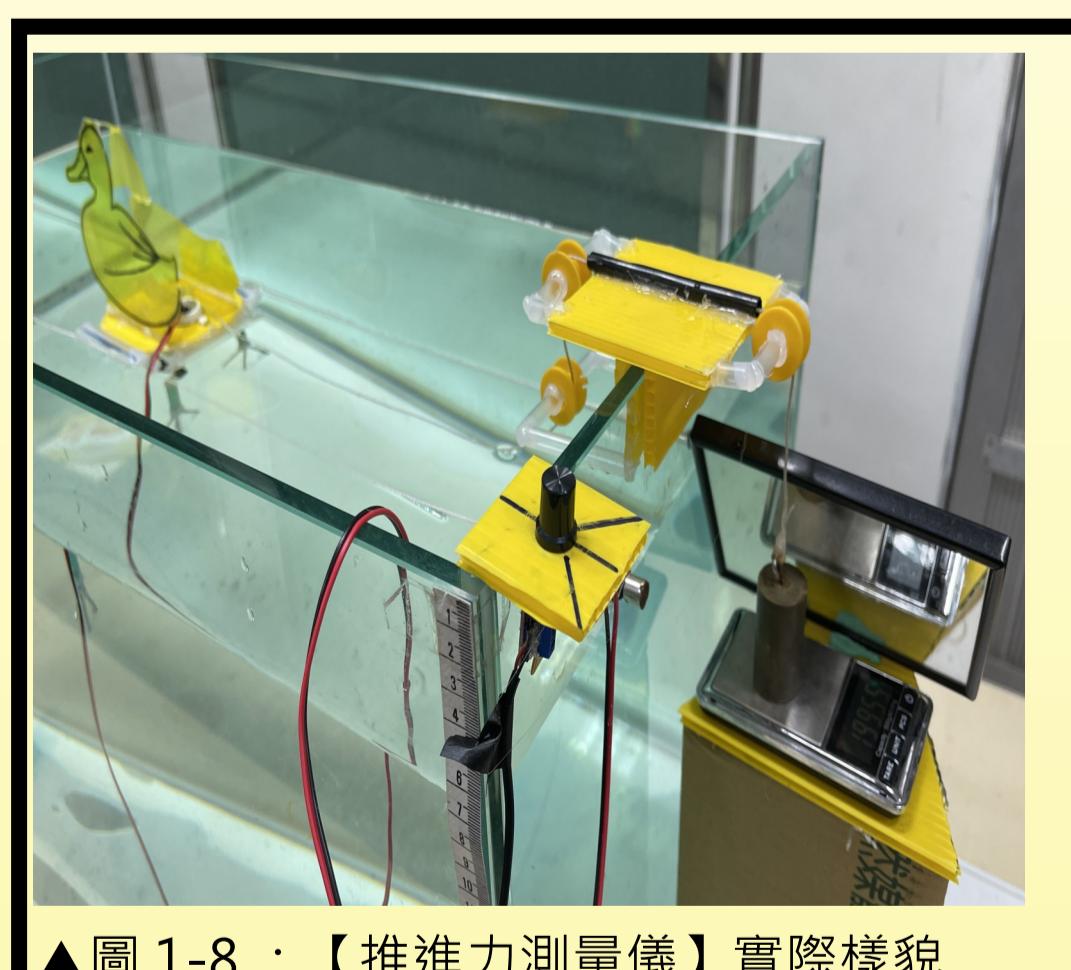
▲圖 1-3：第三代兩蹼足可划動的機械鴨 Plus



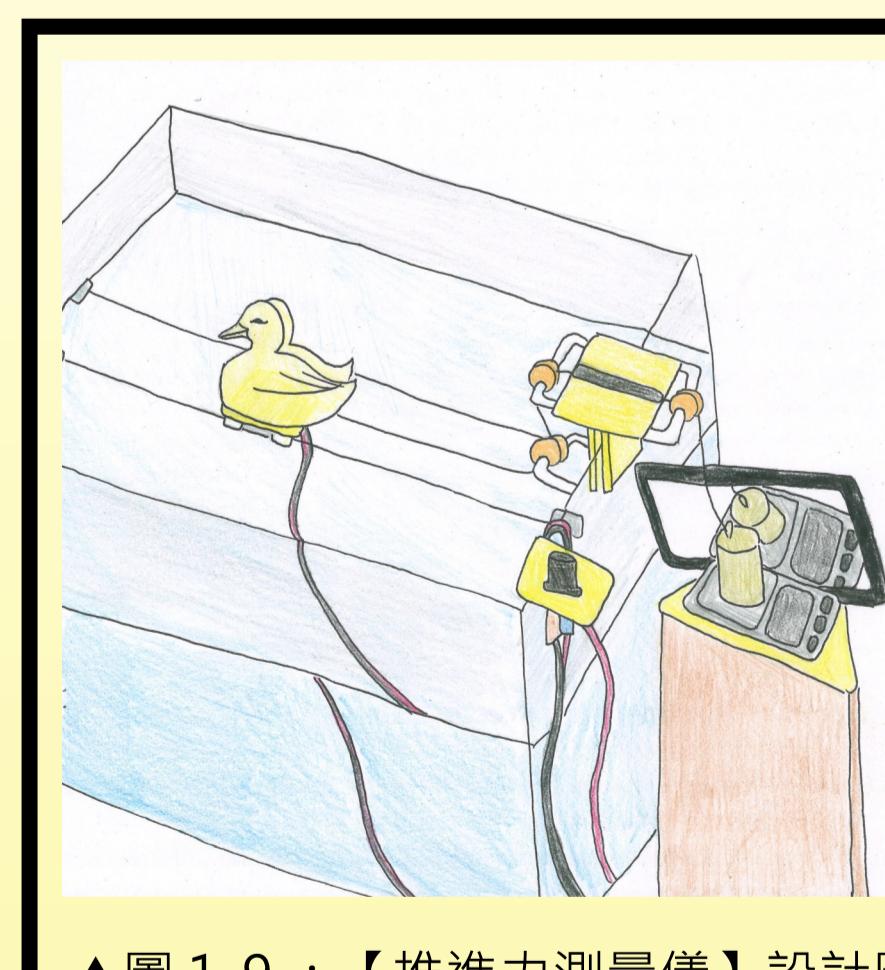
- 雙蹼有划動模樣，可在流暢地向前划動
- 馬達及零件都具有防水功能
- 可更換鴨脛及蹼足，形成不同操縱變因

▲圖 1-4：第三代兩蹼足可划動的機械鴨 Plus 之設計圖

### 二、自行研發【推進力測量儀】來量測機械鴨在水中往前划水時所產生的「推進力」。



▲圖 1-8：【推進力測量儀】實際樣貌



▲圖 1-9：【推進力測量儀】設計圖

### 《如何計算最大推進力》

Step1: 未啟動馬達前，記錄電子秤起始重量 (A 值)

Step2: 啟動馬達進行推進量測

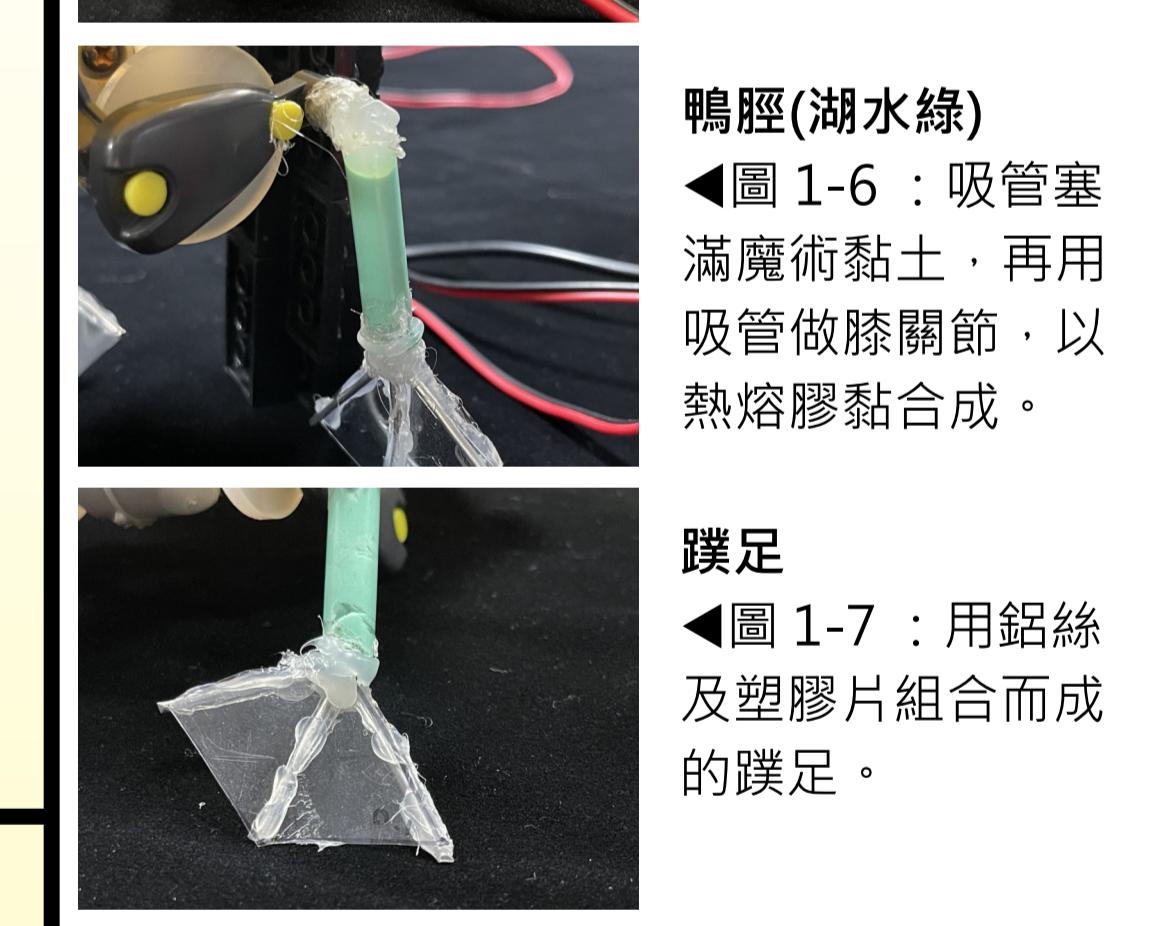
機械鴨沿雙棉繩軌道划行至棉繩所允許最遠距離，進而拉動繫著砝碼的棉線。電子秤上數字因拉力而減少，記錄這時重量值為 B。

Step3: 計算推進力

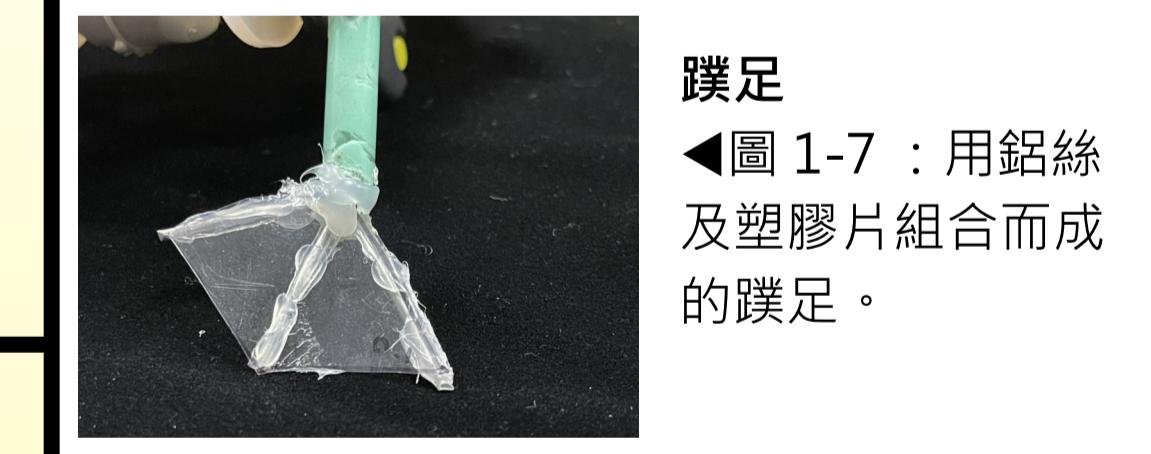
$$[數值 A] - [數值 B] = 「機械鴨」雙腳划動前進時產生的最大推進力$$



電子調速器  
◀圖 1-5：可調整鴨蹼足前後划動速度



鴨脛(湖水綠)  
◀圖 1-6：吸管塞滿魔術黏土，再用吸管做膝關節，以熱熔膠黏合成。



蹼足  
◀圖 1-7：用鋁絲及塑膠片組合而成的蹼足。

## 實驗二：蹼足的材質如何影響機械鴨的最大推進力？

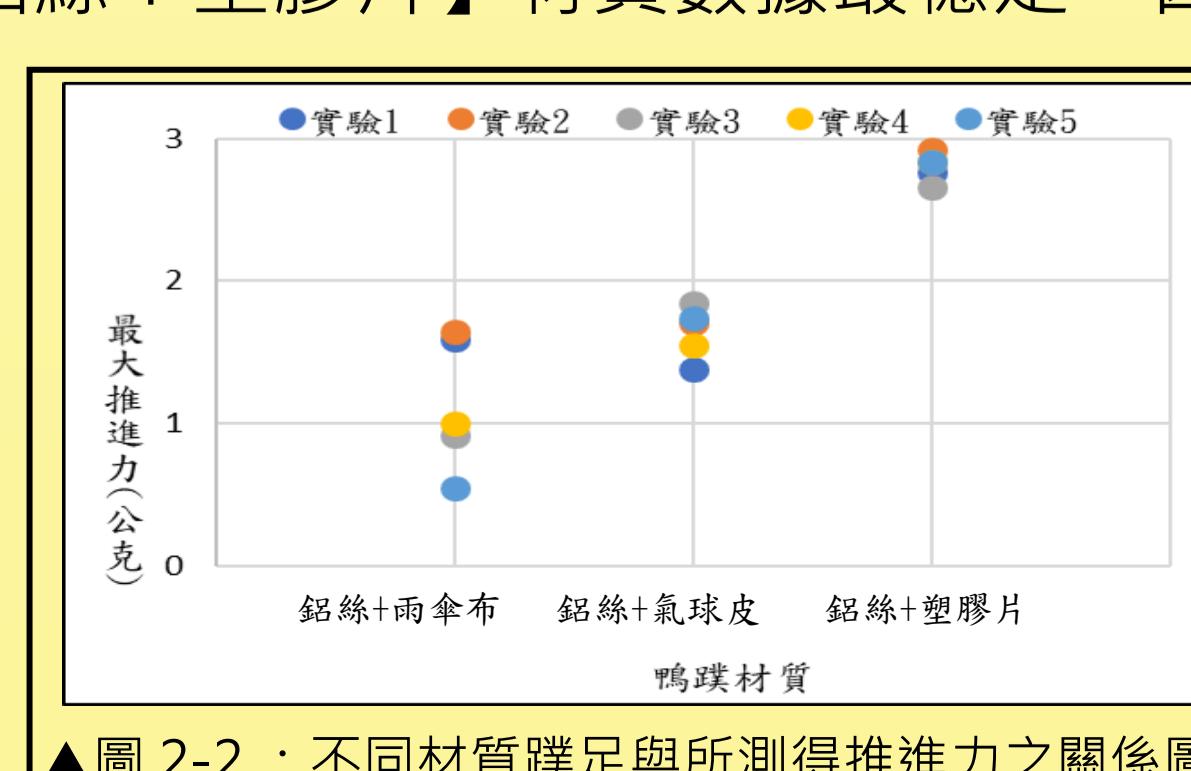
(一)研究方法：設定機械鴨參數並更換不同蹼足材質為「鋁絲+雨傘布」、「鋁絲+氣球皮」、「鋁絲+塑膠片」。使用推進力測量儀進行量測，重複實驗並進行數據分析。

(二)研究發現：

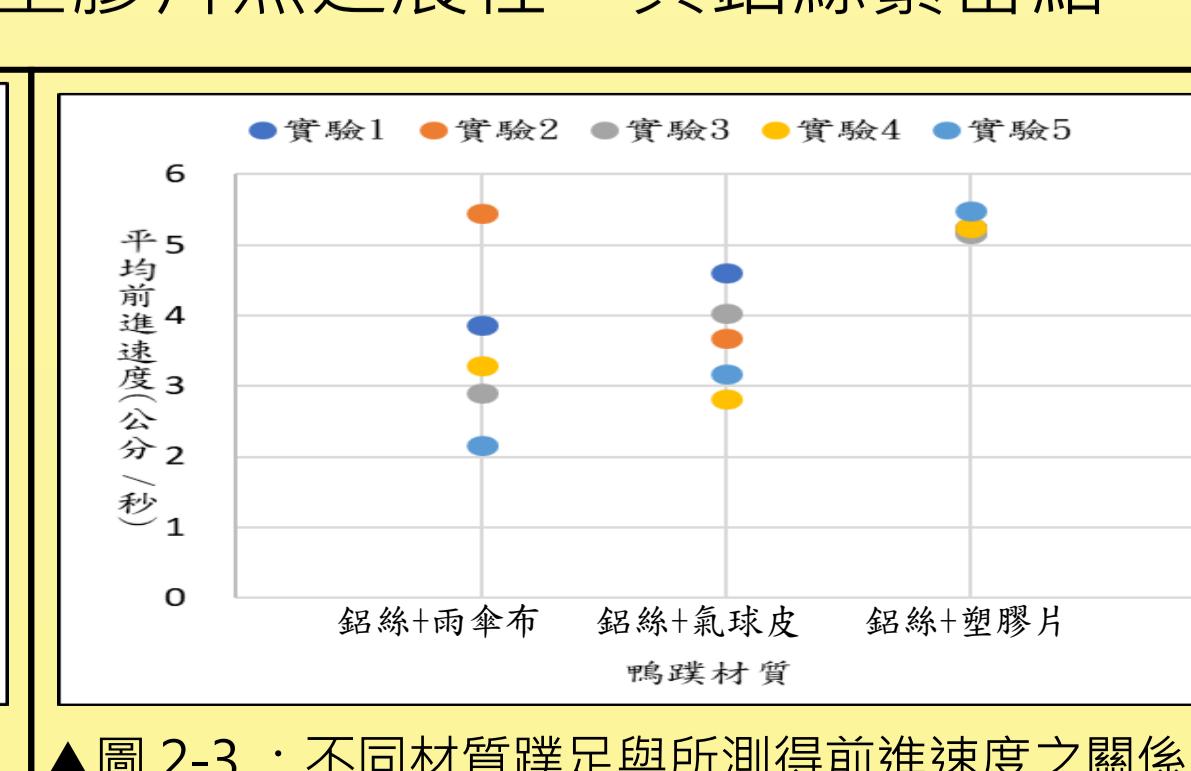
1.「推進力」數據穩定性：【鋁絲+塑膠片】材質數據最穩定，因塑膠片無延展性，與鋁絲緊密結合，有助於穩定推進表現。

2.推進力越大，前進速度越快！

3.【鋁絲+塑膠片】材質的蹼足對機械鴨的推進力和前進速度表現最佳，適合用於後續研究中的機械鴨設計。



▲圖 2-2：不同材質蹼足與所測得推進力之關係圖



▲圖 2-3：不同材質蹼足與所測得前進速度之關係圖



▲圖 2-1：三種不同材質的蹼足。

表 2-1：將「鋁絲+塑膠片」的三次實驗影片匯入 Tracker 中所得數值一覽表

編號	機械鴨重量(kg)	最大加速度(m·s <sup>-2</sup> )	推估最大推進力重量數值(g)	平均值(g)
1898	0.0965	0.281	0.0965*0.281/9.8*1000=2.77	2.76
1901	0.0965	0.272	0.0965*0.272/9.8*1000=2.68	
1904	0.0965	0.265	0.0965*0.286/9.8*1000=2.82	

與研發的「推進力測量儀」所測得的最大推進力 2.8g 相吻合！

將「實驗錄影所得的影片」匯入 Tracker 中，選擇影片中「機械鴨要開始拉動砝碼時」為起始點，逐一標示影片中機械鴨的位置，讓 Tracker 計算出「機械鴨在每個時間點的加速度」，並帶入  $F=Ma$  的公式，得出「機械鴨當時最大推進力數值」，與「推進力測量儀所得的數值」進行比對。

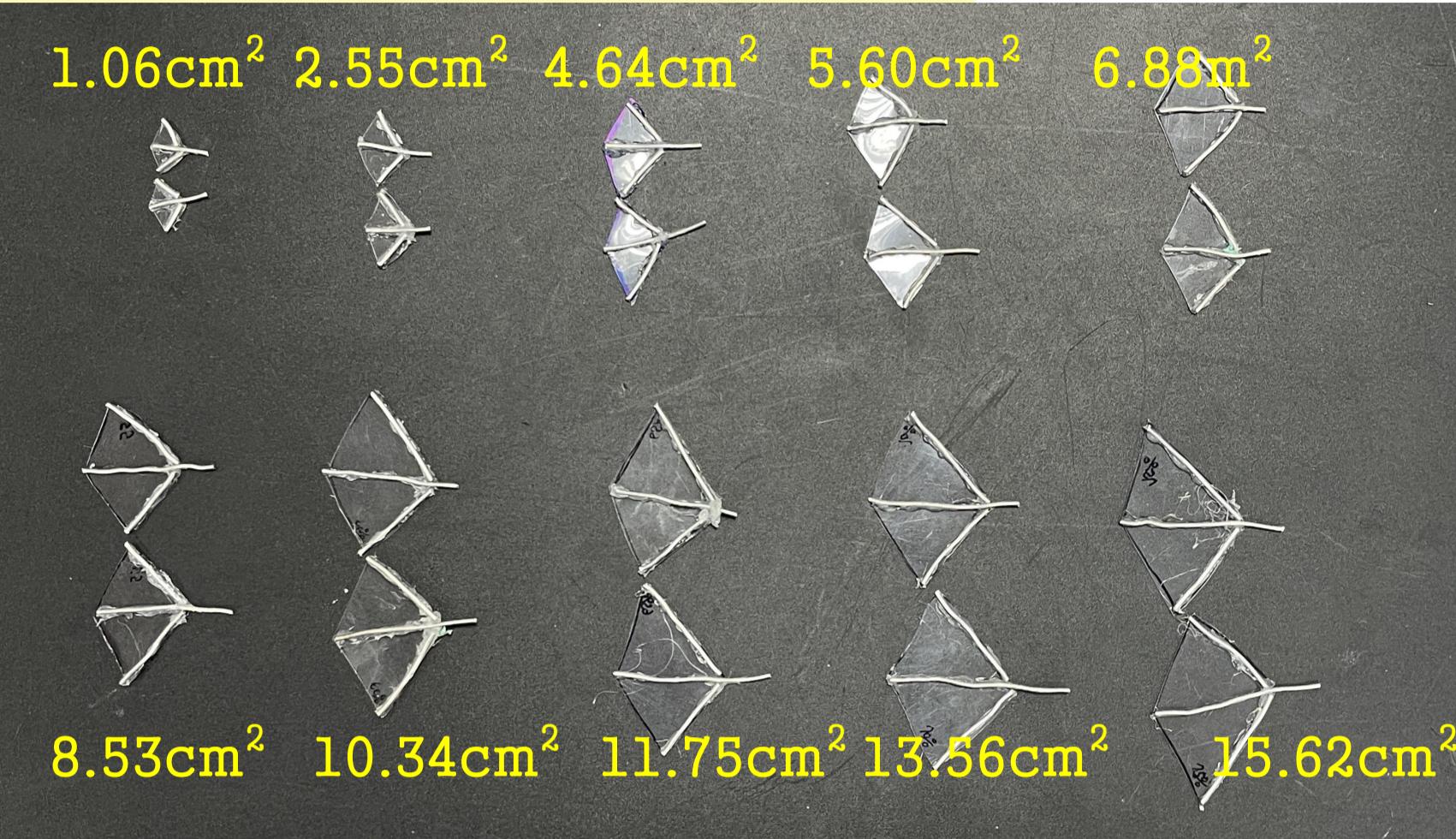
結果發現經由 tracker 計算所得的數值與推進力測量儀所測得的結果，不謀而合，誤差極小，因此可驗證推進力測量儀是可信的工具。

## 實驗三：不同面積的蹼足如何影響機械鴨的最大推進力？

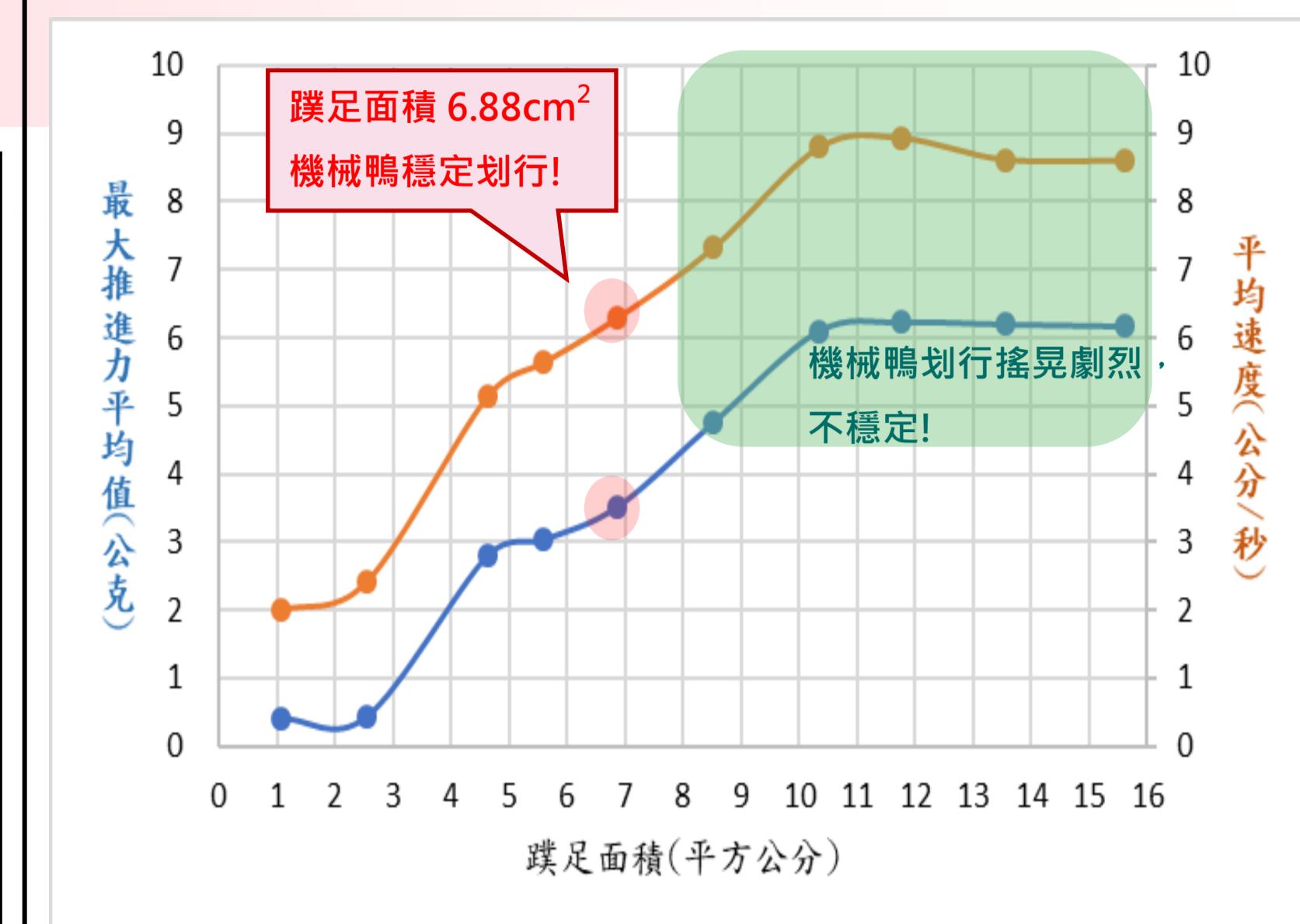
(一)研究方法：設定機械鴨參數(固定蹼足材質為鋁絲+塑膠片、鴨脛長度為 1 公分，並設定雙腳以 3/4 的馬達轉速交替划動)並更換不同蹼足尺寸如圖 3-1。

(二)研究發現：

1. 趼足面積越大，推進力整體呈現上升趨勢，前進速度亦隨之提升！
2. 趼足面積越大，推進力與前進速度越高，但在面積達到一定程度後，增加的效益趨於遞減。本實驗踶足面積最大( $10.34\text{cm}^2$ )時，機械鴨雖前進速度非常快，但會快速到機械鴨脫離雙棉繩軌道而翻覆。因此後續研究將使用  $6.88\text{cm}^2$  趼足面積。



▲圖 3-1：製作五種不同尺寸的蹼足。



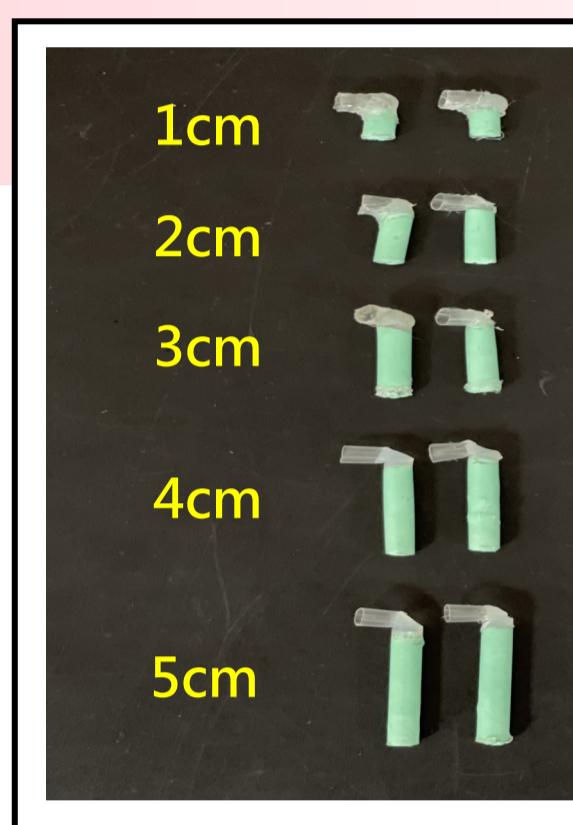
▲圖 3-2：踶足面積不同時，其與平均推進力與平均速度之關係圖。

## 實驗四：不同長度的鴨脛如何影響機械鴨的最大推進力？

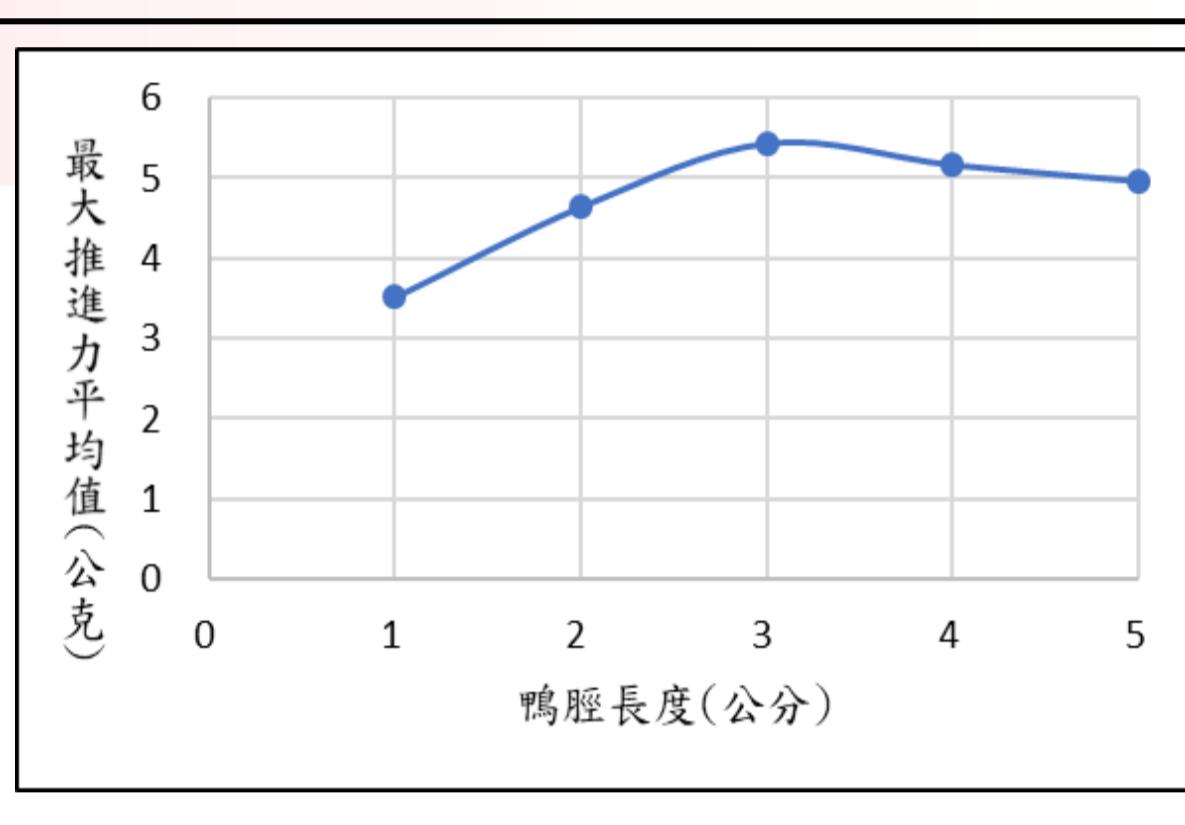
(一)研究方法：設定機械鴨參數(固定機械鴨的踶足面積為  $6.88\text{cm}^2$ 、踶足材質為鋁絲+塑膠片，並設定雙腳以 3/4 的馬達轉速交替划動。)並更換不同長度鴨脛為 1cm、2cm、3cm、4cm、5cm。

(二)研究發現：

1. 鴨脛長度 1~3 公分，鴨脛越長，機械鴨推進力呈現上升趨勢。我們認為是鴨脛加長後，鴨掌在水中划動的幅度與作用槓桿變長，使單次划水能推動更多水量，進而產生更大的反作用力。
2. 鴨脛長度 3~5 公分，推進力及划行穩定性趨於下降，推測過長肢體會影響穩定性與操控性。
3. 本實驗鴨脛長度 3cm 時，有最大推進力且能穩定划動，因此後續研究將使用 3cm 鴨脛長度。



▲圖 4-1：不同長度鴨脛



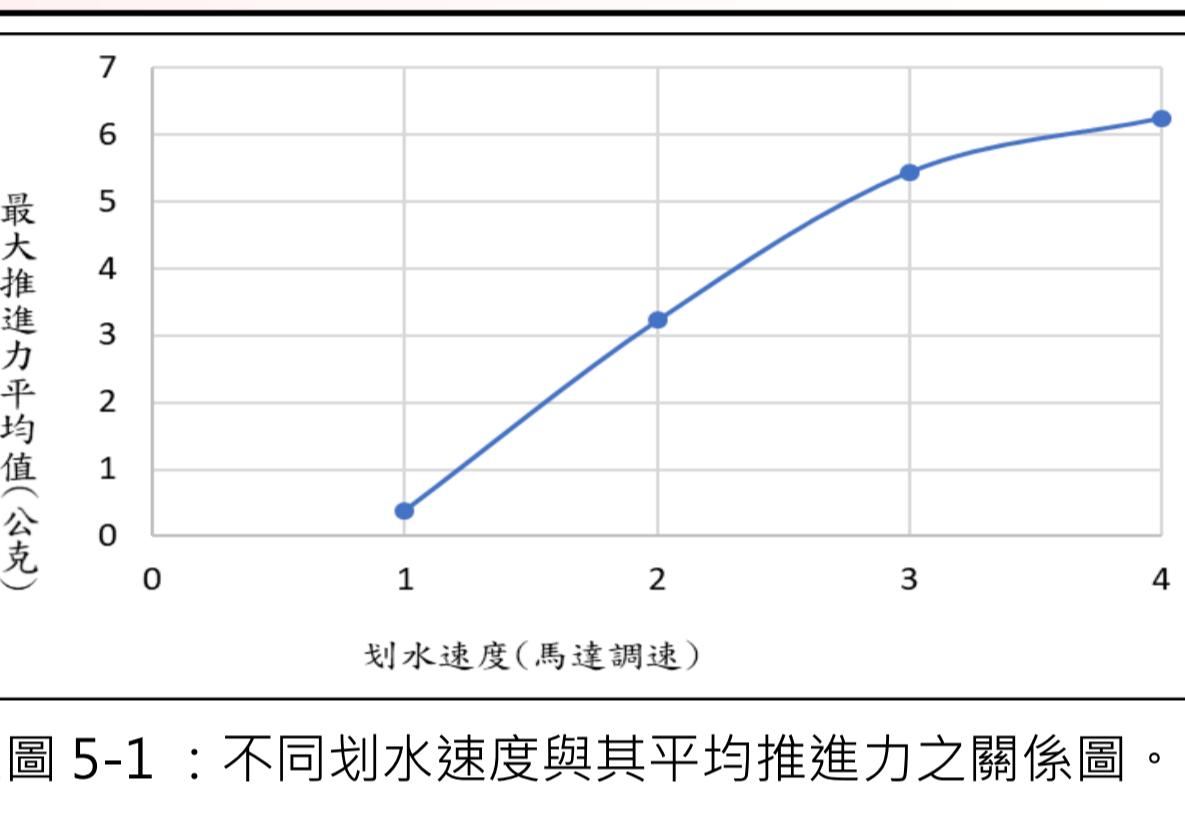
▲圖 4-2：不同鴨脛長度與其平均推進力之關係圖

## 實驗五：機械鴨雙腳划水速度不同如何影響其最大推進力？

(一)研究方法：設定機械鴨參數(固定機械鴨踶足面積為  $6.88\text{cm}^2$ 、踶足材質為鋁絲+塑膠片、鴨脛長 3cm。)並更換機械鴨兩踶足不同的划水速度為 1/4 轉速、2/4 轉速、3/4 轉速、4/4 轉速。

(二)研究發現：

1. 划水速度越快，推進力越大，划行動態也會改變。
2. 本實驗顯示，提高機械鴨的划水速度可以有效增加推進力，但當速度達到最高時，雖有最大推進力，卻可能出現晃動影響穩定性。說明划水速度與推進效率需取得平衡，過快未必最佳。



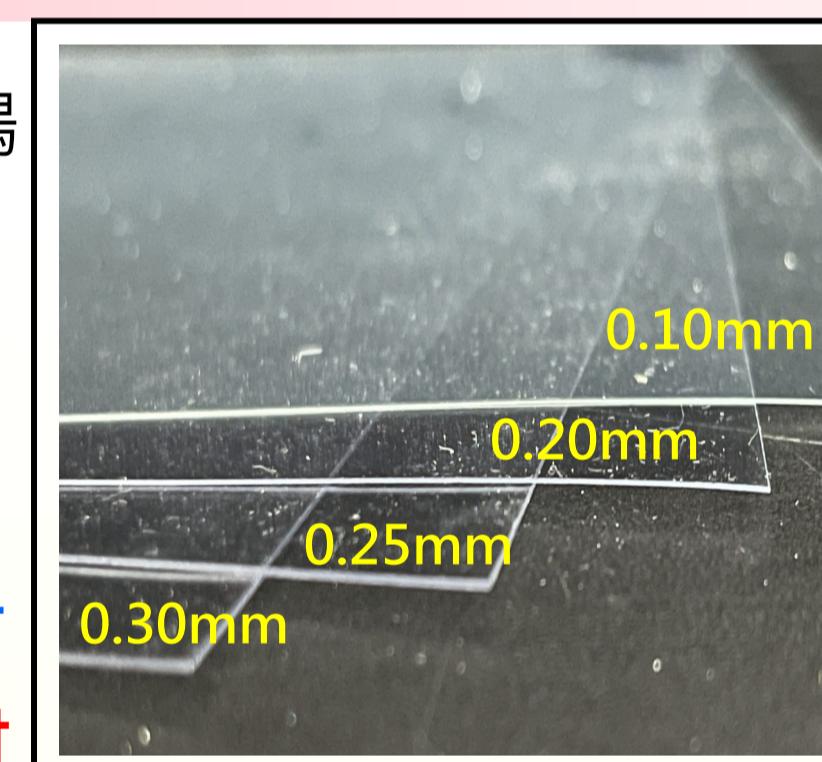
▲圖 5-1：不同划水速度與其平均推進力之關係圖。

## 實驗六：不同厚度的蹼如何影響機械鴨的最大推進力？

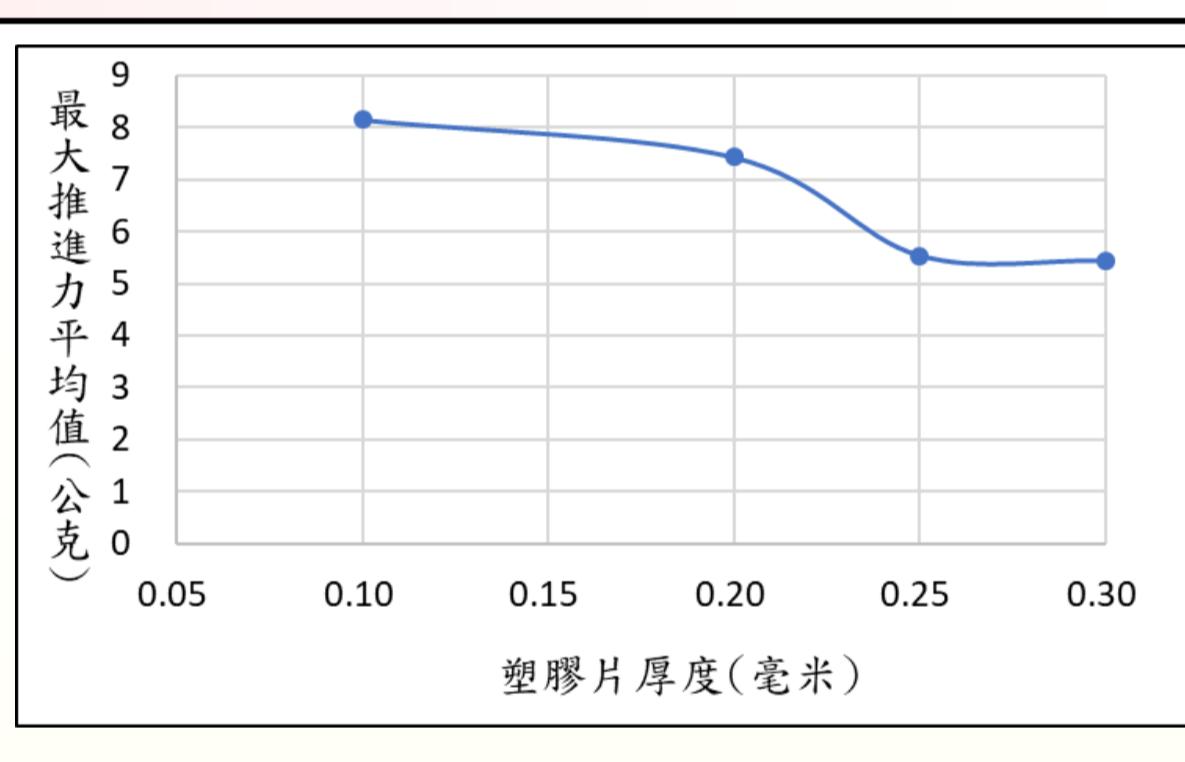
(一)研究方法：設定機械鴨參數(固定機械鴨的踶足面積為  $6.88\text{cm}^2$ 、踶足材質為鋁絲+塑膠片、鴨脛長 3cm，並設定雙腳以 3/4 的馬達轉速交替划動。)並更換不同鴨蹼厚度為 0.10mm、0.20mm、0.25mm、0.30mm。

(二)研究發現：

1. 薄的蹼足能產生較大的推進力，顯示厚度過高反而降低靈活性，限制了水流的有效推動。
2. 蹼足厚度對推進力有顯著影響。越薄且彈性的材質，划水過程中更能產生彎曲與動態變形，進而提升水流包覆與推進效率。實驗證明 0.10mm 厚度的蹼足(塑膠片)為實驗中推進力表現最佳的材質厚度，後續研究將以此厚度蹼足進行。



▲圖 6-1：四種不同厚度的塑膠片



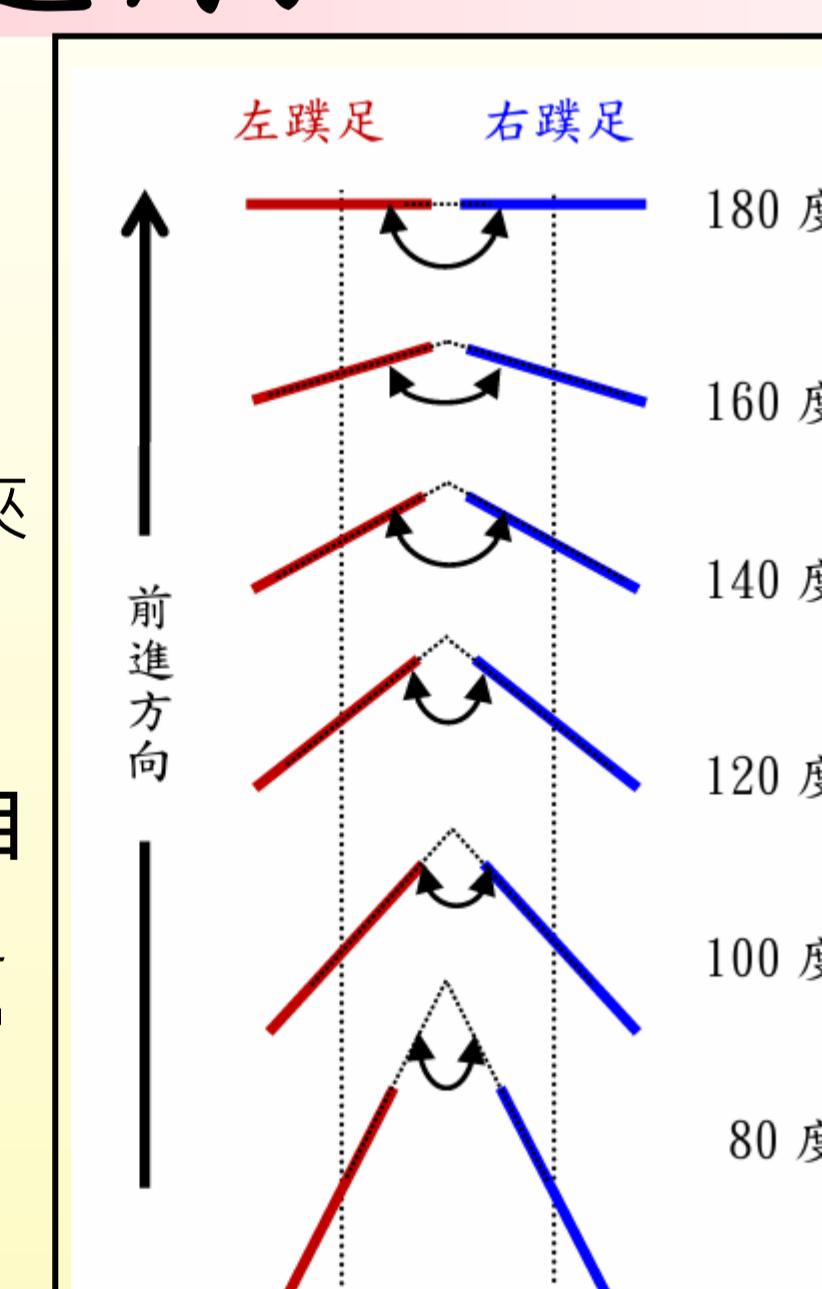
▲圖 6-2：不同厚度塑膠片與其平均推進力之關係圖

## 實驗七：不同夾角的兩蹼足如何影響機械鴨的最大推進力？

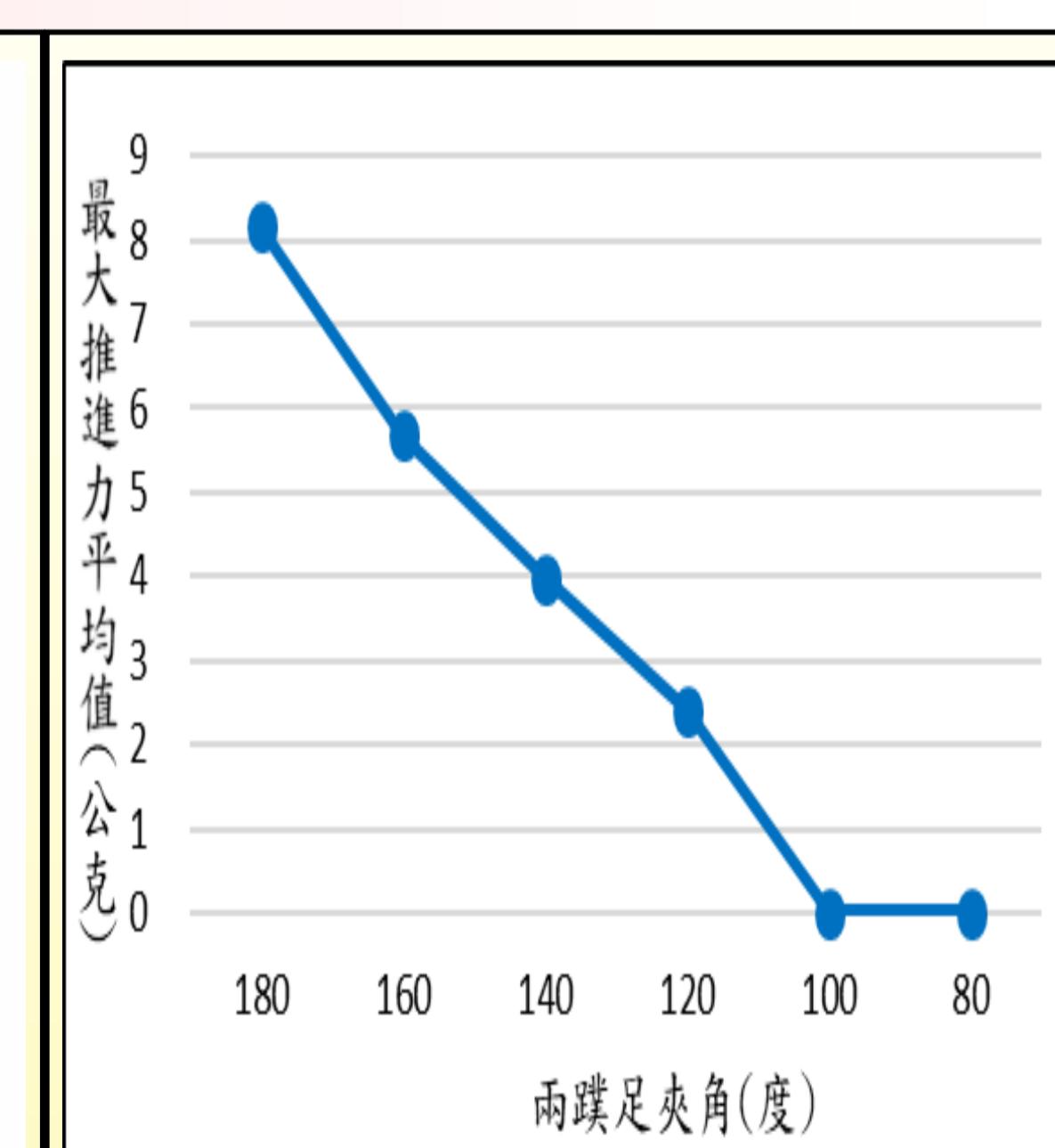
(一)研究方法：設定機械鴨參數(固定機械鴨的踶足面積為  $6.88\text{cm}^2$ 、踶足材質為鋁絲+塑膠片(塑膠片厚度 0.1mm)、鴨脛長 3cm，並設定雙腳以 3/4 的馬達轉速交替划動。)並更換兩蹼足的不同夾角為 180 度、160 度、140 度、120 度、100 度、80 度。

(二)研究發現：

1. 兩蹼足夾角越大，推進力越強。180°夾角時推進力最大，為 8.15 g，是所有夾角中表現最佳；夾角從 160°(5.68g)、140°(3.97g)、120°(2.41g)逐步遞減；當夾角縮小至 100°或 80°時，推進力為 0g，機械鴨無法前進。
2. 兩蹼足夾角影響水波幅度與行進穩定性。180°夾角時，蹼足運動時產生的水流方向與前進方向相反(即向後推)，有效推動水層，推進效率高，使機械鴨划行快速且平穩。隨著夾角變小，蹼足撥水讓水流推力偏向側面，造成動能分散、穩定性變差，行進晃動加劇，推進力也明顯下降。當夾角小於 100°時，蹼足幾乎無法對水產生有效推力，以致無法產生前進動能。
3. 本實驗證明，機械鴨兩蹼足的夾角對推進力有決定性影響。兩蹼足最佳夾角為 180°，能產生最強的推進力並保持前進穩定性，將以此作為後續實驗的設計。



▲圖 7-1：機械鴨兩蹼足夾角示意圖



▲圖 7-2：不同夾角兩蹼足與平均推進力之關係圖

## 實驗八：水缸壁有無置放海綿如何影響機械鴨的最大推進力？

研究緣起：

我們的研究原本聚焦於「單隻機械鴨的蹼足對划水運動行為的影響」，實驗場域選在一個長方形玻璃水缸 ( $45.5\text{cm} \times 43\text{cm} \times 90\text{cm}$ ) 中進行。在觀察機械鴨雙腳划動的過程中，我們注意到牠在水中產生的水波紋會不斷擴散，並於接觸水缸壁後反彈回來，可能干擾機械鴨的運動軌跡與推進力表現。這引發我們一個想法：若能在狹長水缸的兩側壁面放置大型海綿，吸收部分擴散水波，模擬一個較接近自然湖面的環境，是否會對機械鴨蹼足划水所產生的推進力產生影響？因此，我們進一步設計本子題，探討水缸壁有無放置海綿對推進效果的可能影響。

(一)研究方法：設定機械鴨參數並放置海綿在玻璃水缸的不同位置，如圖 8-2。

◎0/0/無(無對照組) ◎1/上/2/左右 ◎1/上/2/前後 ◎1/上/2/左前 ◎1/上/2/右後 ◎1/上/3/左右前 ◎1/上/3/左右後 ◎1/上/4/左右前後

◎1/下/2/左右 ◎2/上下/2/左右 ◎2/上下/3/左右前 ◎2/上下/3/左右後 ◎2/上下/4/左右前後

◎3/上/2/左右 ◎4/上/3/左右前 ◎4/上/3/左右後 ◎4/上/4/左右前後

◎5/上/2/左右 ◎6/上/3/左右前 ◎6/上/3/左右後 ◎6/上/4/左右前後

◎7/上/2/左右 ◎8/上/3/左右前 ◎8/上/3/左右後 ◎8/上/4/左右前後

◎9/上/2/左右 ◎10/上/3/左右前 ◎10/上/3/左右後 ◎10/上/4/左右前後

◎11/上/2/左右 ◎12/上/3/左右前 ◎12/上/3/左右後 ◎12/上/4/左右前後

◎13/上/2/左右 ◎14/上/3/左右前 ◎14/上/3/左右後 ◎14/上/4/左右前後

◎15/上/2/左右 ◎16/上/3/左右前 ◎16/上/3/左右後 ◎16/上/4/左右前後

◎17/上/2/左右 ◎18/上/3/左右前 ◎18/上/3/左右後 ◎18/上/4/左右前後

◎19/上/2/左右 ◎20/上/3/左右前 ◎20/上/3/左右後 ◎20/上/4/左右前後

◎21/上/2/左右 ◎22/上/3/左右前 ◎22/上/3/左右後 ◎22/上/4/左右前後

◎23/上/2/左右 ◎24/上/3/左右前 ◎24/上/3/左右後 ◎24/上/4/左右前後

◎25/上/2/左右 ◎26/上/3/左右前 ◎26/上/3/左右後 ◎26/上/4/左右前後

◎27/上/2/左右 ◎28/上/3/左右前 ◎28/上/3/左右後 ◎28/上/4/左右前後

◎29/上/2/左右 ◎30/上/3/左右前 ◎30/上/3/左右後 ◎30/上/4/左右前後

◎31/上/2/左右 ◎32/上/3/左右前 ◎32/上/3/左右後 ◎32/上/4/左右前後

◎33/上/2/左右 ◎34/上/3/左右前 ◎34/上/3/左右後 ◎34/上/4/左右前後

◎35/上/2/左右 ◎36/上/3/左右前 ◎36/上/3/左右後 ◎36/上/4/左右前後

◎37/上/2/左右 ◎38/上/3/左右前 ◎38/上/3/左右後 ◎38/上/4/左右前後

◎39/上/2/左右 ◎40/上/3/左右前 ◎40/上/3/左右後 ◎40/上/4/左右前後

◎41/上/2/左右 ◎42/上/3/左右前 ◎42/上/3/左右後 ◎42/上/4/左右前後

◎43/上/2/左右 ◎44/上/3/左右前 ◎44/上/3/左右後 ◎44/上/4/左右前後

◎45/上/2/左右 ◎46/上/3/左右前 ◎46/上/3/左右後 ◎46/上/4/左右前後

◎47/上/2/左右 ◎48/上/3/左右前 ◎48/上/3/左右後 ◎48/上/4/左右前後

◎49/上/2/左右 ◎50/上/3/左右前 ◎50/上/3/左右後 ◎50/上/4/左右前後

◎51/上/2/左右 ◎52/上/3/左右前 ◎52/上/3/左右後 ◎52/上/4/左右前後

◎53/上/2/左右 ◎54/上/3/左右前 ◎54/上/3/左右後 ◎54/上/4/左右前後

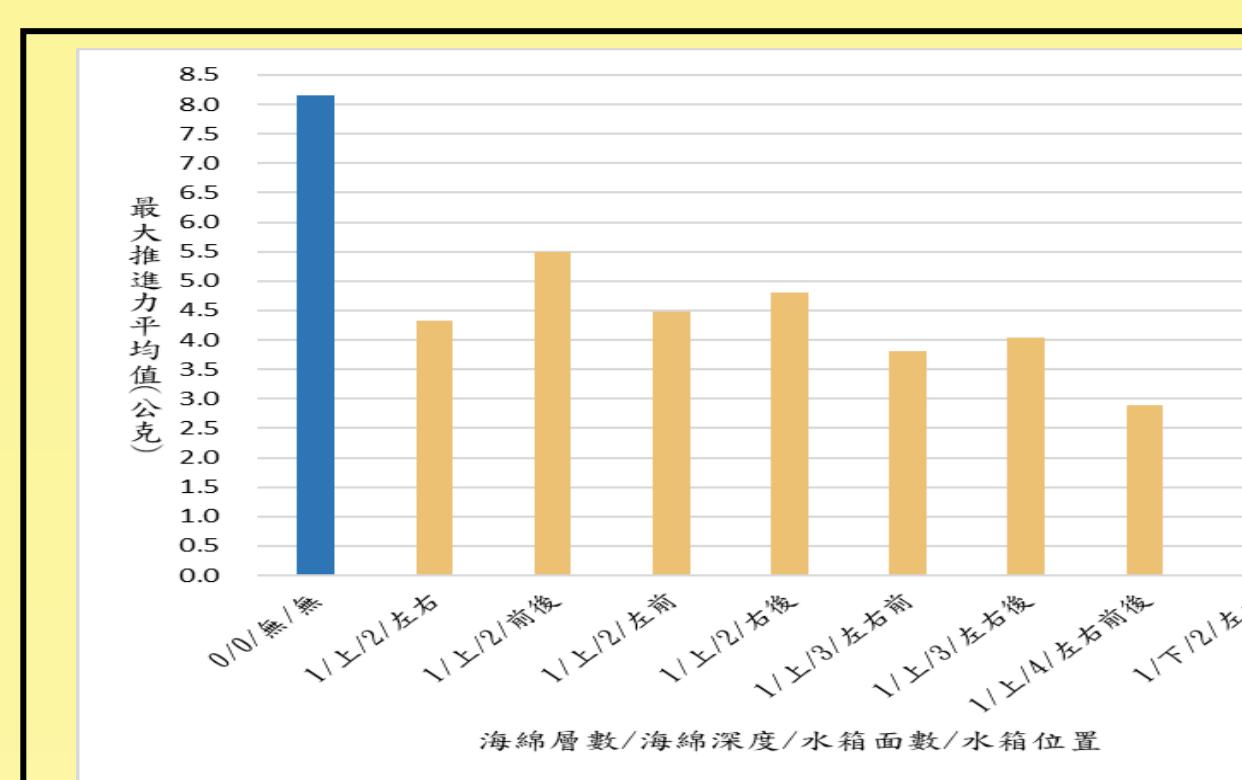
◎55/上/2/左右 ◎56/上/3/左右前 ◎56/上/3/左右後 ◎56/上/4/左右前後

◎57/上/2/左右 ◎58/上/3/左右前 ◎58/上/3/左右後 ◎58/上/4/左右前後

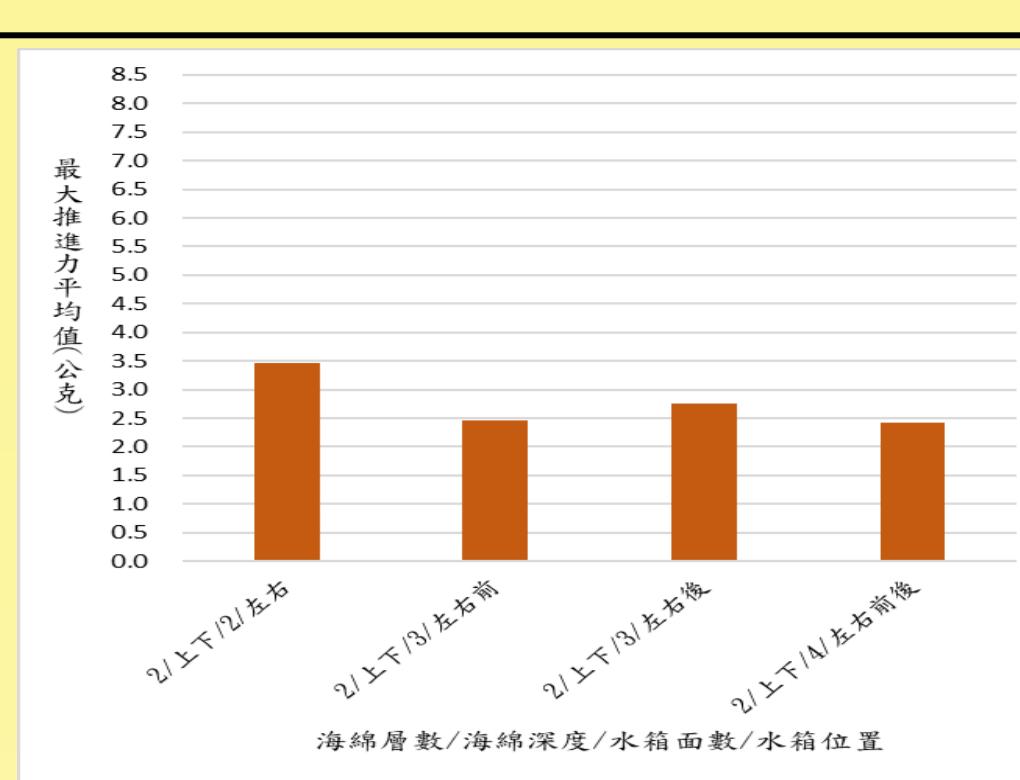
◎59/上/2/左右 ◎60/上/3/左右前 ◎60/上/3/左右後 ◎60/上/4/左右前後

(二)研究發現：

- 1.無海綿(對照組)時，推進力最大。說明水波反彈，雖可能產生干擾，但水的反作用力可強化推進效果。
- 2.海綿放置越多、覆蓋範圍越廣，推進力越低！海綿能吸收水波與減緩反彈干擾，減少推進時反作用能量來源。
- 3.以自然模擬角度觀察，海綿吸波效應有助穩定但降低推進力。接下來裝置「2層海綿/置於水面上下/四個水箱壁面/左右前後」探究「鴨子列隊划行」實驗。



▲圖 8-3：有無置放海綿及海綿位置與推進力之關係圖 1



▲圖 8-4：有無置放海綿及海綿位置與推進力之關係圖 2

## 為什麼小鴨總是緊跟在母鴨後方排隊游泳？

研究緣起：

前段研究中發現在狹長型水缸兩側壁面放置大型海綿，能有效吸收水波、減緩反彈干擾，有助於建立一個更穩定、接近自然湖面條件的實驗環境。接下來，我們將探究源自戶外觀察的現象：【為什麼小鴨總是緊跟在母鴨後方排隊游泳？】文獻顯示這種「列隊划行」可能與省力原理有關，但這些研究大多是用電腦模擬出來的，我們想要用真正的實驗來看看，小鴨跟在不同的位置，划起水來是不是真的比較省力。

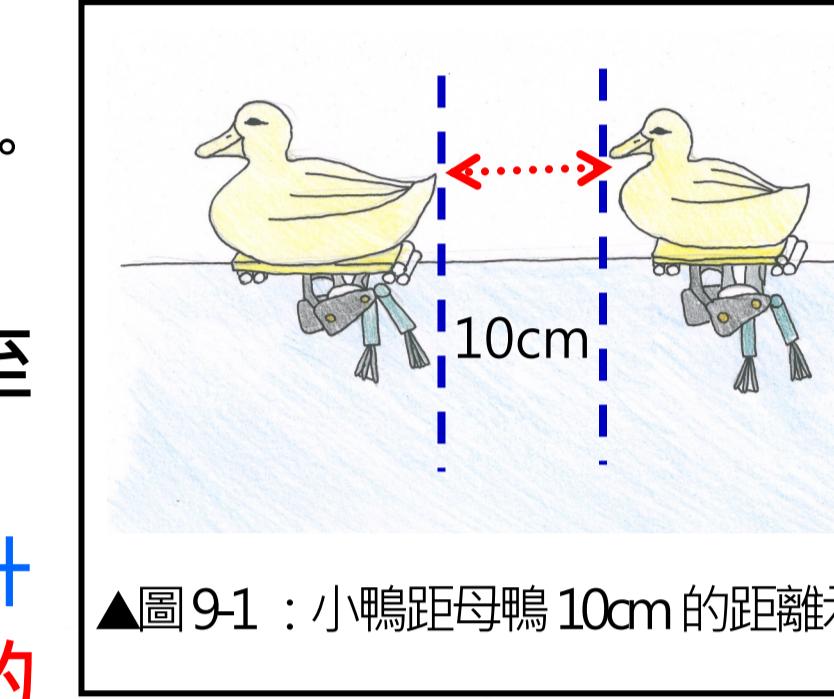
因此，我們希望透過實際量測，探究當小鴨緊跟於母鴨後方划行時，其推進力表現如何受到距離與位置的影響。

## 實驗九：小鴨在母鴨正後方的距離如何影響小鴨的最大推進力？

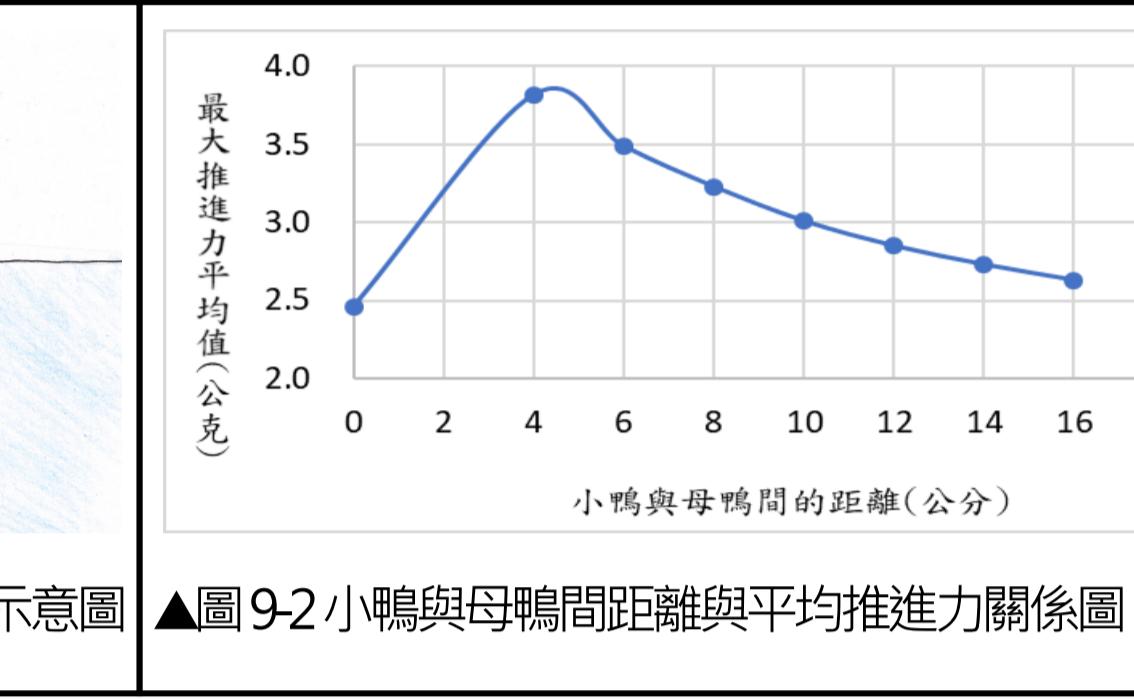
(一)研究方法：設定機械鴨參數並調整小鴨與母鴨的距離「4cm、6cm、8cm、10cm、12cm、14cm、16cm」。

(二)研究發現：

- 1.小鴨與母鴨距離 4 公分時，推進力表現最佳！小鴨可能正好位於母鴨產生水波推力範圍內，能「搭著水波划行」，有效減少划水阻力。
- 2.距離越遠，推進力逐漸下降。
- 3.對照組「無母鴨」情況下，推進力最低。表示即使與母鴨距離達至 16cm，仍略優於沒有跟隨母鴨的情境。
- 4.本實驗顯示小鴨若能在適當距離緊跟在母鴨後方划水，能有效提升推進力、減少耗能。這發現與科學家認為自然界中小鴨列隊划行的省力原理相符合。



▲圖 9-1：小鴨距母鴨 10cm 的距離示意圖



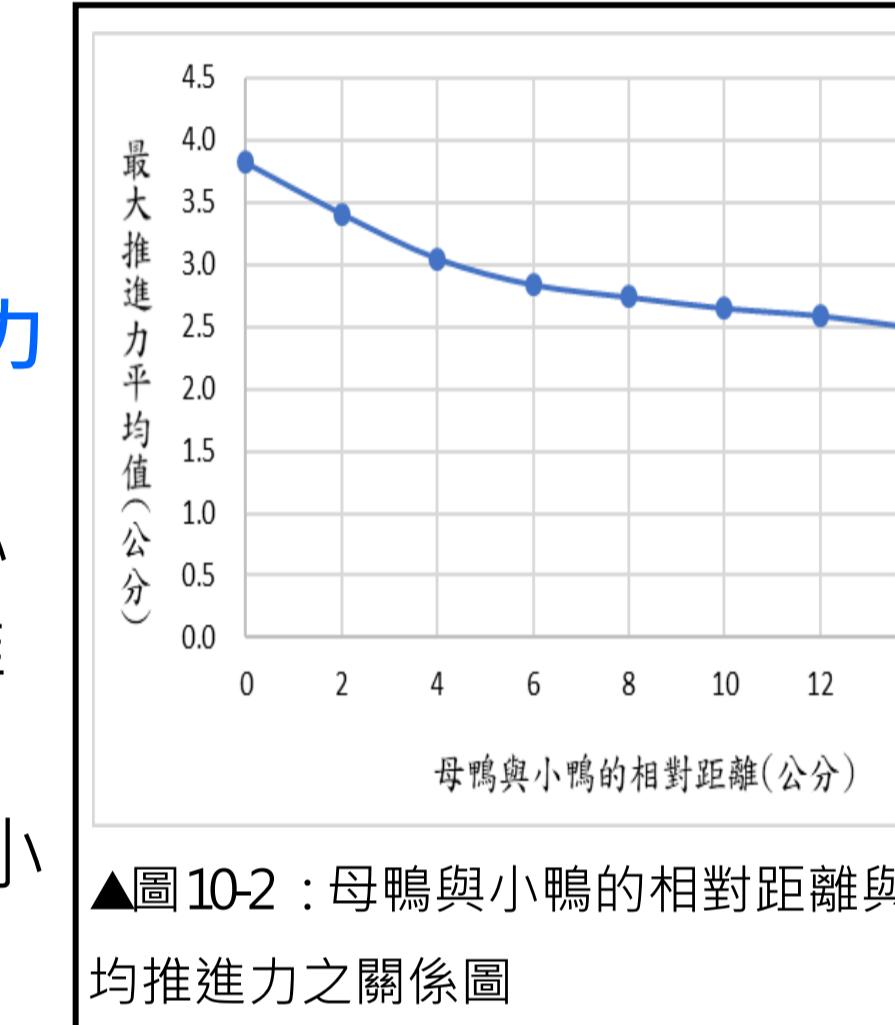
▲圖 9-2 小鴨與母鴨間距離與平均推進力關係圖

## 實驗十：母鴨位在小鴨前方不同位置將如何影響小鴨的最大推進力？

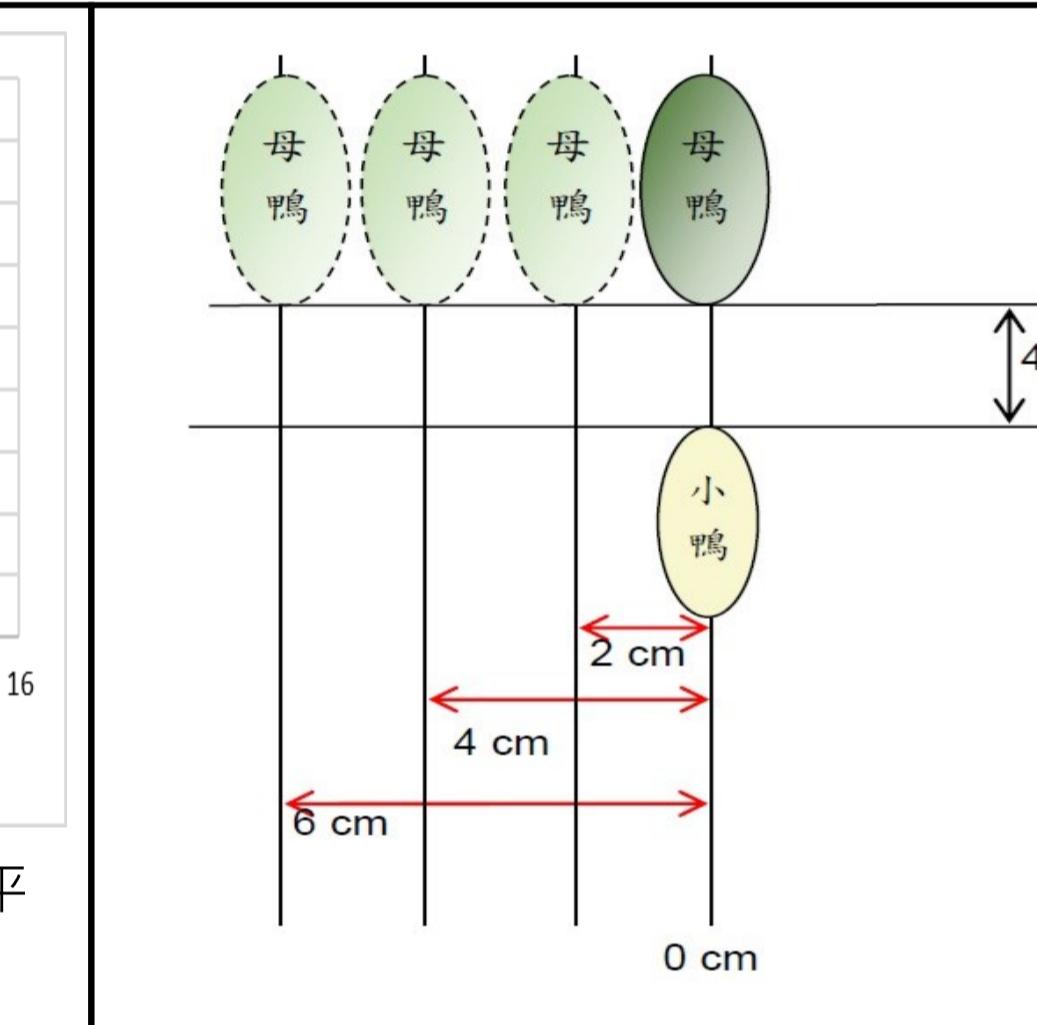
(一)研究方法：以母鴨在小鴨前方的位置為操縱變因，依序調整母鴨與小鴨的相對距離如下，以觀察母鴨位置變化對小鴨推進力表現之影響。同排 0cm：小鴨位於母鴨正後方 4cm 處。

(二)研究發現：

- 1.小鴨在母鴨正後方(同排，0cm)時，推進力最佳！
- 2.小鴨位於母鴨右後方斜角(2cm~14cm)時，小鴨的最大推進力逐漸下降。
- 3.母鴨產生的水波具有方向性，最佳推力集中在母鴨的正後方。小鴨若偏離母鴨正後方，即使仍在其後方區域，也可能錯過主要推進波帶，以致推進力減小。
- 4.本實驗證實，小鴨位於母鴨正後方位置，能獲得最佳推進力！當小鴨位於斜後方、與母鴨不在同一水波路徑上時，平移距離越遠，推進力顯著下降。此結果說明小鴨列隊划行，是具有節省體力與提升推進力的科學依據。



▲圖 10-2：母鴨與小鴨的相對距離與其平均推進力之關係圖



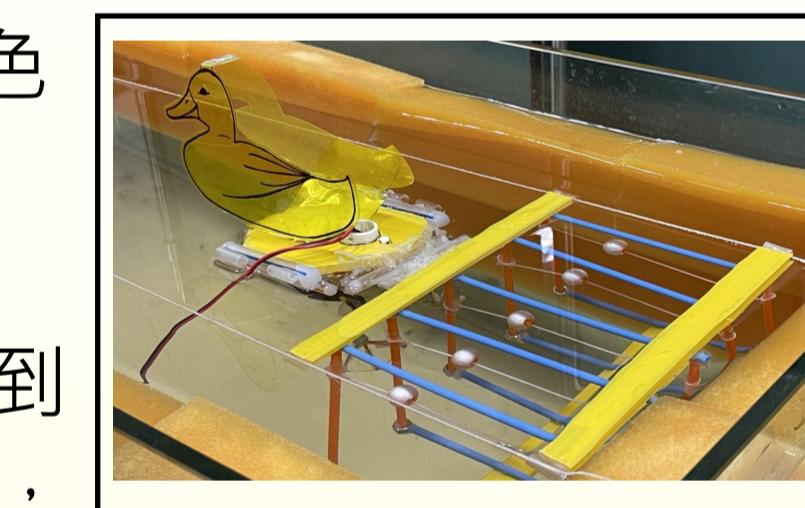
▲圖 10-1：母鴨與小鴨相對距離為 0cm (與小鴨同排)、2cm、4cm、6cm 之示意圖。

## 實驗十一：使用「波動感應儀」裝置觀察水流變化。

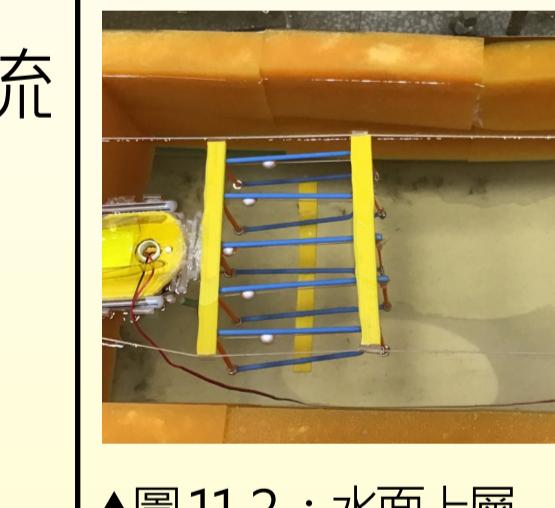
(一)研究方法：用保麗龍球、吸管、棉繩、塑膠瓦楞板組合成「波動感應儀」。將其固定於機械鴨黃色浮板正後方。觀察機械鴨開始划行前及划行後，「波動感應儀」上保麗龍球的移動情形。

(二)研究發現：

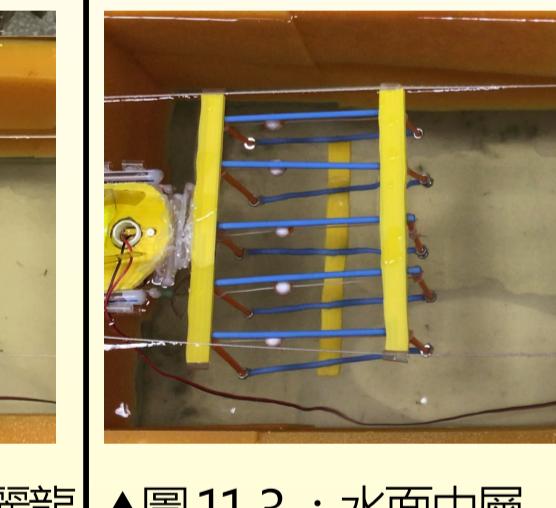
- 1.水面上層：保麗龍球排列呈「<字形」。中央球向前推移幅度最大、兩側較小，顯示水面層水波受到蹼足推動後，沿著機械鴨正後方中心線呈前方擴散趨勢。與自然界中小鴨「搭浪省力」行為相呼應，中央水波最強的位置正是最省力的划行路徑。
- 2.水面中層(中段)：保麗龍球呈「( )字形」排列。中央球向後微推，兩側球幾乎無移動。推測在中層位置(鴨脛中段)的機械鴨正後方，水流有一小段向後回流，可能為上下層水波交界干涉造成的水流轉向區。
- 3.水面下層(下段)：保麗龍球呈「>字形」排列。中央球顯著向後移動、兩側球微微向後移動，推測蹼足主要推水動作集中於正下方中央區域，以雙腳划水時，蹼足在水下產生直接而強烈後推力，使正後方水流向後快速排出，因此中央球受到明顯水流衝擊而大幅向後滑動。



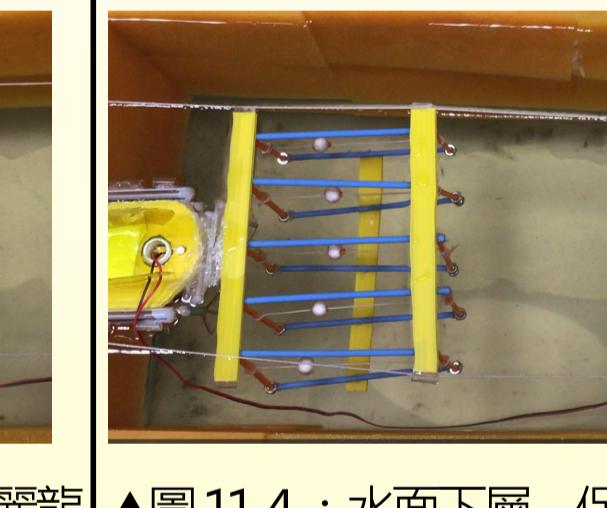
▲圖 11-1：將「波動感應儀」固定於機械鴨黃色浮板正後方。



▲圖 11-2：水面上層，保麗龍球排列呈「<字形」。



▲圖 11-3：水面中層，保麗龍球呈「( )字形」排列。



▲圖 11-4：水面下層，保麗龍球呈「>字形」排列。

## 伍、結論

### 一、本作品是目前第一件探究「蹼足對其划水之運動行為的影響」的科展作品。

目前沒有其他國中小作品探究蹼足結構的運動行為，因此本研究將聚焦改變蹼足結構的各種變因，找出影響其游動的真相！

### 二、蹼足的「材質」、「面積」、「厚度」、「划水速度」皆會顯著影響推進力表現！

(一)材質以【鋁絲 + 塑膠片】製作之蹼足推進力最大且最穩定。蹼足面積越大，推進力與前進速度越高，但在面積達到一定程度( $6.88\text{cm}^2$ )後，推進力雖仍有增長，但成長幅度較小，顯示蹼足面積過大時推進力的提升有限。

(二)提高機械鴨的划水速度可以有效增加推進力，但當速度達到最高時，雖有最大推進力，卻可能出現晃動影響穩定性。越薄且彈性的材質，划水過程中更能產生彎曲與動態變形，進而提升水流包覆與推進效率。

### 三、「鴨脛長度」與「兩蹼夾角」影響機械鴨划行的穩定性與效率。

鴨脛 3cm 時，有最大的推進力且能穩定的划動。兩蹼足夾角  $180^\circ$ 能產生最大推進力，夾角越小動能越分散，甚至無法前進。

### 四、環境會影響推進力，水波的反射或吸收扮演重要角色。

無海綿，水波反彈產生反作用力能強化推進效果；有海綿，吸收水波雖降低整體推進力，但助於模擬自然環境與穩定實驗條件。

### 五、模擬小鴨列隊划行行為，驗證列隊划行有助於省力推進。

小鴨緊跟在母鴨正後方或與母鴨距離接近，推進力顯著提升，證實列隊划行有助於省力推進。

### 六、自行研發「波動感應儀」裝置讓我們以視覺化方式清楚理解鴨蹼划水在不同深度造成的水流動態特徵，

是本研究的一大創意與突破。

《本研究所有照片、圖片、統計圖表皆為作者自行拍攝、繪製、編製》