

花蓮縣第 65 屆國民中小學科學展覽會

作品說明書

科別：物理科

組別：國小組

作品名稱：

以「蹣」力進

——探究蹣足結構對划水推進效能之影響

關鍵詞：蹣足、推進力、列隊划行

編號：

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

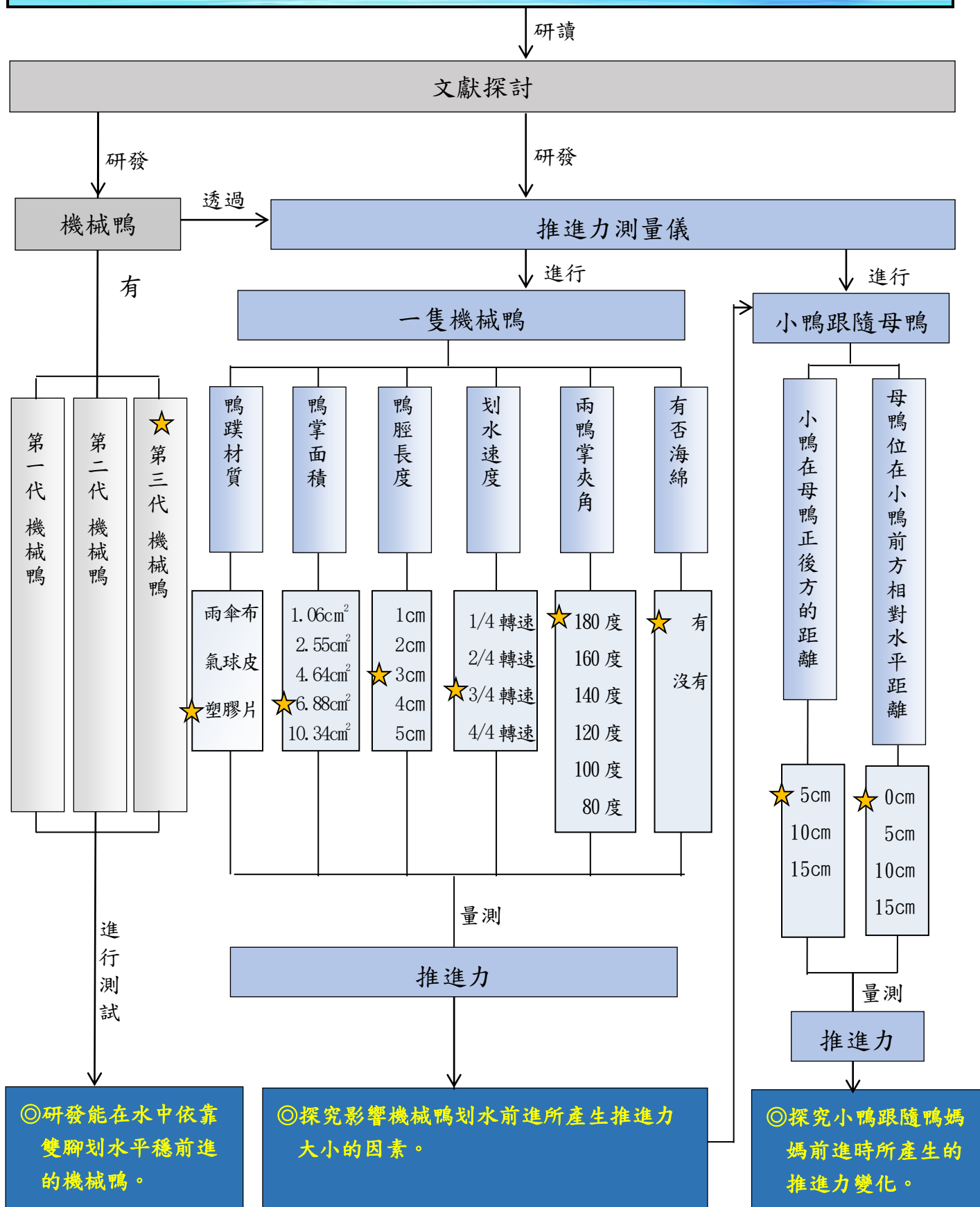
- 一、研發能在水中依靠雙腳划水平穩前進的機械鴨。
- 二、研發能測量機械鴨划水前進所產生推進力大小的儀器。
- 三、探究影響機械鴨划水前進所產生推進力大小的因素。
- 四、探究小鴨跟隨鴨媽媽前進時所產生的推進力變化。

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



備註：『★』表示在該子題中有最佳表現者。

▲圖 1-1：研究架構及流程圖

【文獻探討】

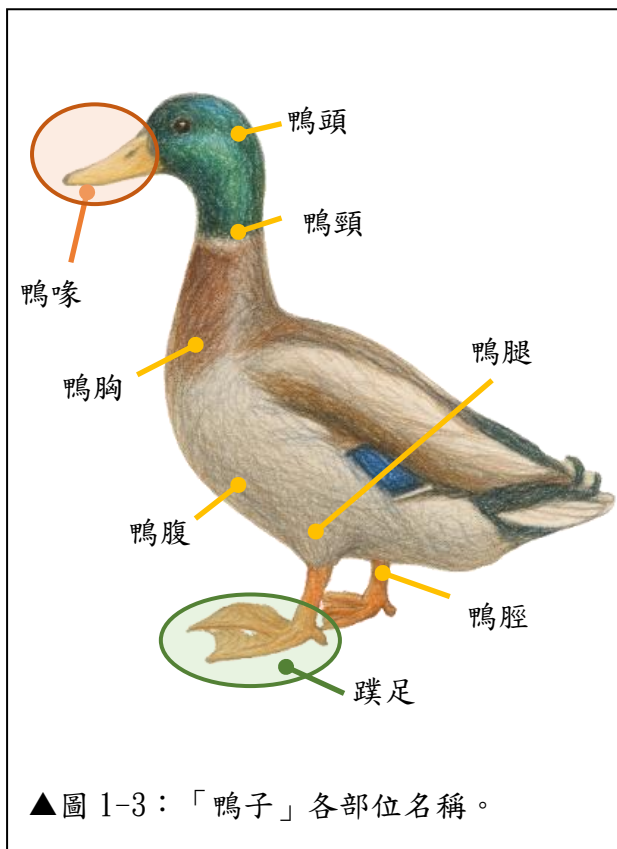
一、認識「鴨子」科學分類

「鴨子」在分類上，屬於【動物界】-【脊索動物門】-【鳥綱】-【雁形目】-【雁鴨亞目】-【鴨科】-【鴨屬】，是鳥類的一種，有趣的是：有同屬鴨科但不稱作鴨的有天鵝、鵝、雁、鴛鴦等！（圖 1-2 以綠頭鴨為例）

鳥類中再根據生活型態及棲息地類型又可劃分出二分類：「陸禽」和「游禽」。鴨子屬「游禽」，在淡水和鹹水都可以看見牠們的身影。

二、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 1-3、1-4）

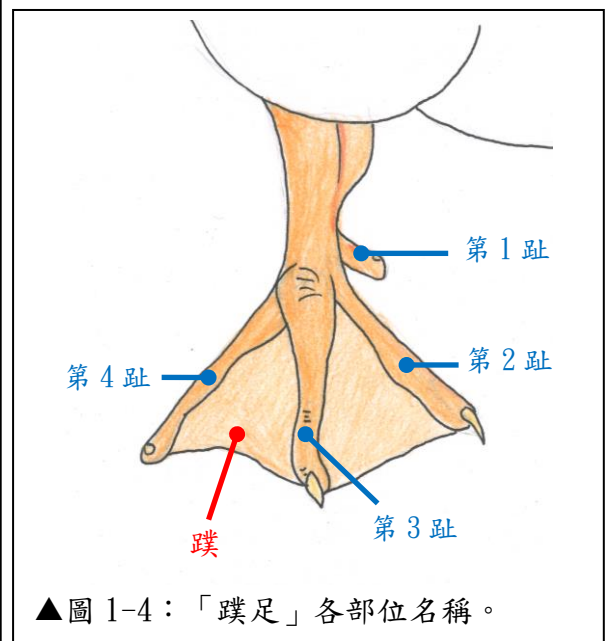


綠頭鴨 科學分類



【界】動物界
【門】脊索動物門
【綱】鳥綱
【目】雁形目
【科】鴨科
【屬】鴨屬

▲圖 1-2：「綠頭鴨」科學分類



(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。



▲圖 1-5：鴨腿的位置相對於其他鳥類更靠近身體後方。

(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蹼（如圖 1-4）。這層

「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。

相較於其他鳥類，鴨子的腿部位置更靠近身體後方（如圖 1-5）。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。

當鴨子在陸地上行走時，牠們會將整個腳掌完全貼地（如圖 1-6），這種走法與人類相似，因而人們將其稱為「鴨掌」。

(四)「鴨掌」與「扁平足」（如圖 1-6）

鴨掌這種「腳掌貼地、無明顯足弓」的特徵，成為台灣民間對「扁平足」俗稱的來源。由於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」。



▲圖 1-6：「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；但其實在水面下，牠們的雙腳正不斷用力交替划動，精準地協調節奏和角度。這種「上靜下動」的現象，也常被人們用來形容表面冷靜、實則努力奮鬥的人生哲學。

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，科學家用電腦模擬了鴨媽媽和小鴨游泳時的情況，發現裡面藏著一個「划水的祕密」！

科學家用電腦模擬出鴨媽媽在水中游泳時，產生的水波浪（像一層層小水牆），再觀察小鴨站在哪些位置游泳會比較省力，哪些地方會更累？研究發現：

（一）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！

（二）一起排隊划水比較輕鬆

科學家發現，在鴨媽媽後面的第一隻小鴨最省力，列隊的第二隻(含)小鴨開始的每隻小鴨所節省的力氣差不多大，因為每隻小鴨都會「幫忙傳遞水波」給後面的同伴，就像接力一樣。

（三）為什麼要排成一列？因為最省力！

這樣一隻接一隻排成直直的隊伍，可以讓每一隻小鴨都剛好站在水波最好的位置，不會互相擋住。這種隊形可以讓整組鴨子省下最多的體力。

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「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 44~64 屆高國中組與「鴨子划水」相關研究作品一覽表

國展屆數	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「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，找出影響蹼足向前划動的真相！

【實驗一】實驗環境介紹

一、「機械鴨」的設計

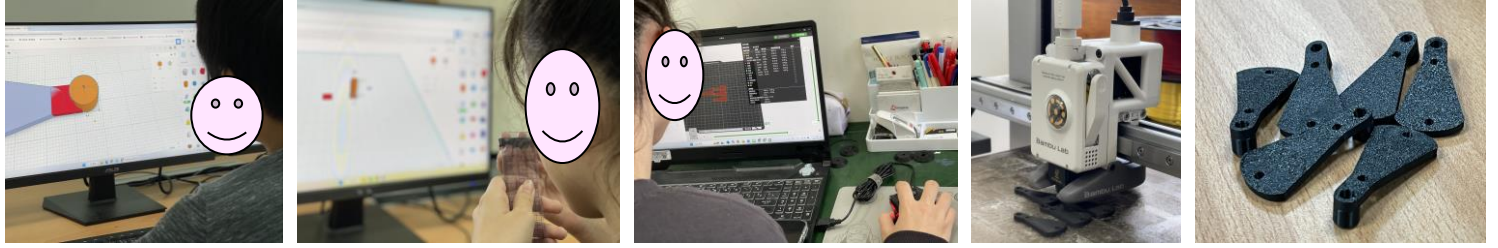
(一)設計理念：

研究之初要設計一隻單純以蹼足的划動就能在水中平穩地往前划行的「機械鴨」，且還須具有能調整蹼足前後划動速度、更換蹼足不同樣態、更換鴨脰的長度，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「使用各種裝置來帶動蹼足的划動」，並將完成品置入水中測試，以下我們將依據「帶動蹼足划動之不同裝置」敘述三代「機械鴨」的演進過程，並詳述其尺寸、製作方式及優缺點分析。

在設計及製作機械鴨中，面臨最大的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，因此我們便運用學校所學的 3D 列印及雷射技術來製作符應我們所需的零件尺寸及形狀！

使用 3D 列印



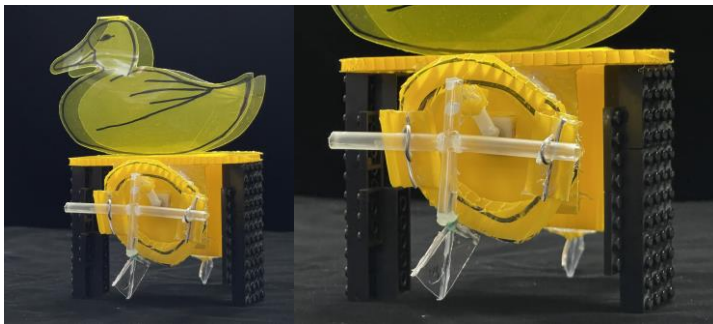
使用雷切



▲圖 1-7：運用學校所學 3D 列印及雷切技術來製作符應我們所需軸心、連動桿和鴨腳等零件尺寸及形狀。

(二)「機械鴨」代數的演進

第一代 兩蹼足前後擺動的機械鴨

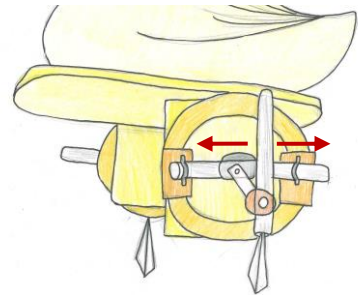


■製作方式：

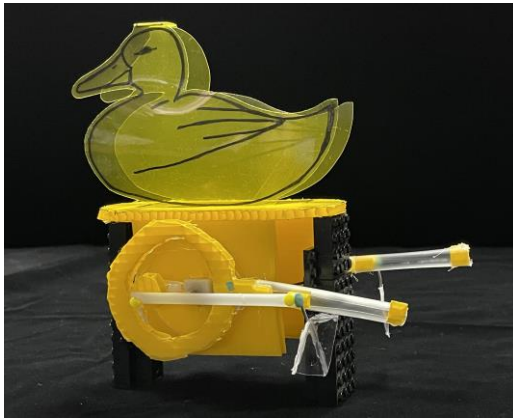
切割環形、方型塑膠瓦楞板，加上吸管、鋁絲、小馬達加以組裝，讓吸管轉動時帶動鴨脰使雙腳前後擺動。

■優缺點分析：

- ◎優點-(1)可以在水中前進。
- (2)材料容易獲得。
- ◎缺點-(1)馬達直接暴露於水中，容易生鏽。
- (2)雙蹼無划動的模樣。
- (3)塑膠瓦楞板構造容易進水。
- (4)環形塑膠瓦楞板不易切割、易形變。
- (5)兩蹼足無法流暢地前後擺動。

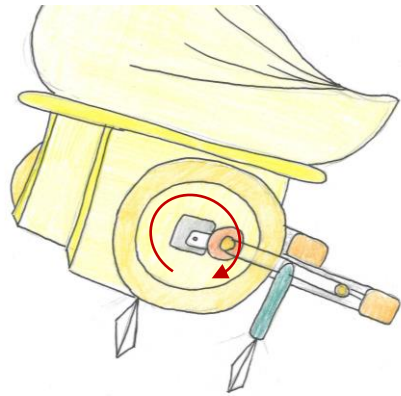


第二代 兩蹼足可划動的機械鴨



■製作方式：

切割環形、方型塑膠瓦楞板，加上吸管、小馬達加以組裝，讓吸管帶動另一吸管，轉動時使雙腳產生划動的姿勢。



■優缺點分析：

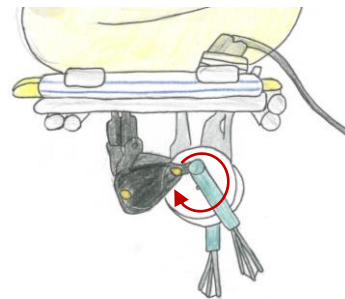
- ◎優點-(1)雙蹼有划動的模樣。
- (2)可以在水中前進。
- (3)材料容易獲得。
- ◎缺點-(1)馬達直接暴露於水中，容易生鏽。
- (2)塑膠瓦楞板構造容易進水。
- (3)環形塑膠瓦楞板不易切割、易形變。
- (4)兩蹼足無法流暢地划動。

第三代 兩蹼足可划動的機械鴨 Plus



■製作方式：

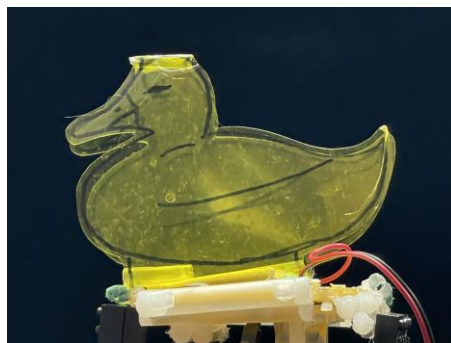
1. 使用雷射切割、3D 列印製作機械鴨腿部構造所需的連動桿、連動圓盤，以及小馬達防水殼。
2. 將連動桿及連動圓盤、齒輪、小馬達、各式零件組裝。
3. 讓小馬達帶動齒輪，再帶動圓盤及連動桿，使雙腳產生划動的姿勢。



■優缺點分析：

- ◎優點-(1)雙蹼有划動的模樣。
- (2)可以在水中流暢地向前划動。
- (3)馬達及所有零件都具有防水功能。
- (4)可更換鴨脰及蹼足的樣式，形成不同的操縱變因。
- ◎缺點-(1)製作費時。

(三)「第三代機械鴨」各部位的介紹(圖 1-8~圖 1-15)



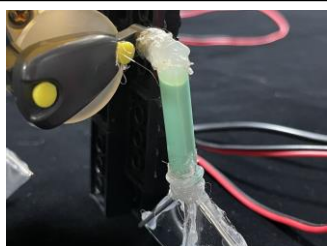
黃色機械鴨

▲圖 1-9：在黃色塑膠片繪製小鴨



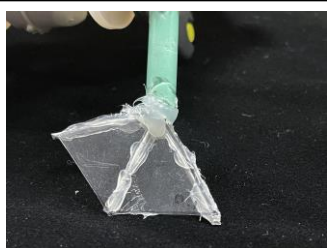
浮板

▲圖 1-10：用塑膠瓦楞板及熱熔膠封口的吸管，增加機械鴨浮力。



鴨脛(湖水綠)

▲圖 1-11：(綠)吸管塞滿魔術黏土，再用空(透明)吸管做腕關節，以熱熔膠組合而成。



蹼足

▲圖 1-12：用鋁線及塑膠片組合而成的蹼足。

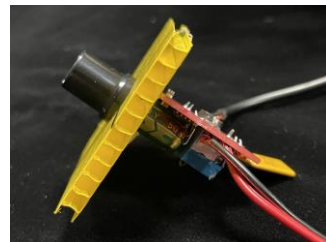


▲圖 1-8：「**第三代機械鴨**」



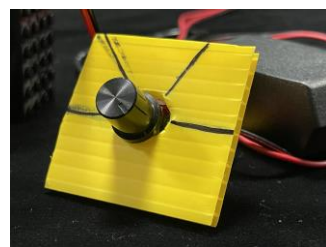
鴨腳

◀圖 1-13：使用小馬達以及雷切技術、3D 列印技術、鋁線、蒐集到的各式模型零件，組合成可前後擺動的鴨腳(含脛、蹼足)。



電子調速器

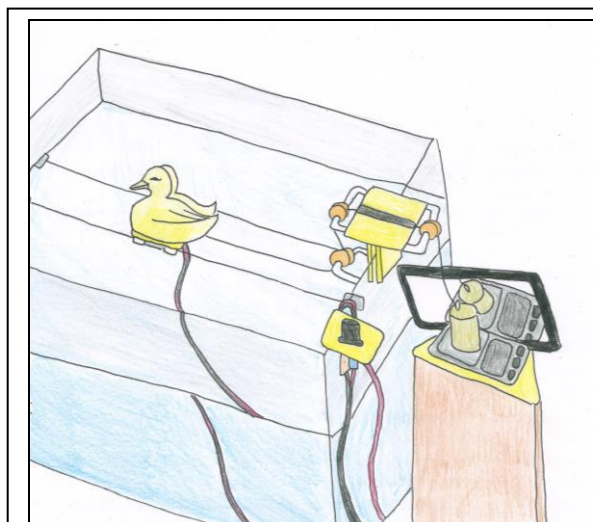
▲圖 1-14：可調整鴨蹼足前後划動速度



調速器刻度盤

▲圖 1-15：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「馬達電子調速器」旋鈕上。

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 1-16：【推進力測量儀】設計圖

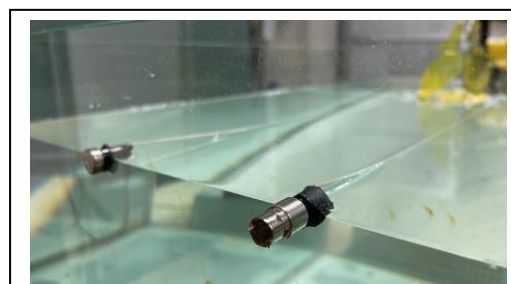


▲圖 1-17：【推進力測量儀】實際樣貌

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 1-16~圖 1-17)。
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：

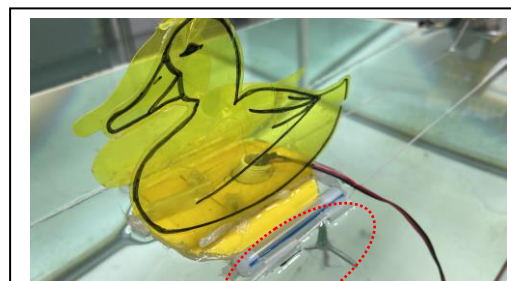
將棉繩黏貼於一顆強力磁鐵上，並將其固定在水槽內側牆面；再將另一顆強力磁鐵從外側對準位置貼合，藉由磁力吸附將棉繩牢牢夾緊。棉繩的另一端亦採相同方式固定，完成一條穩固的直線繩索。接著，再以相同方法設置第二條平行棉繩，形成雙軌設計，作為機械鴨的划行導引軌道（如圖 1-18）。



▲圖 1-18：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，我們在水槽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 1-19）。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。

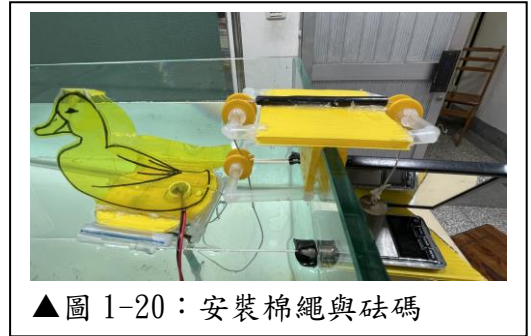


▲圖 1-19：機械鴨的兩側各裝設一支橫向切口的吸管，讓棉繩可卡入吸管的切口中。

3. 推進力量測方法：測量「機械鴨」雙腳划動所產生的推進力

(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 1-20 所示）該繩長設計可讓「機械鴨」划行 32 公分的距離。



(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 1-21)，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) 計算推進力：

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

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】蹼足的材質如何影響機械鴨的推進力？

（一）研究方法：

1. 設定機械鴨參數並更換不同蹼足材質：

(1) 固定機械鴨的蹼足面積為 4.64 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。

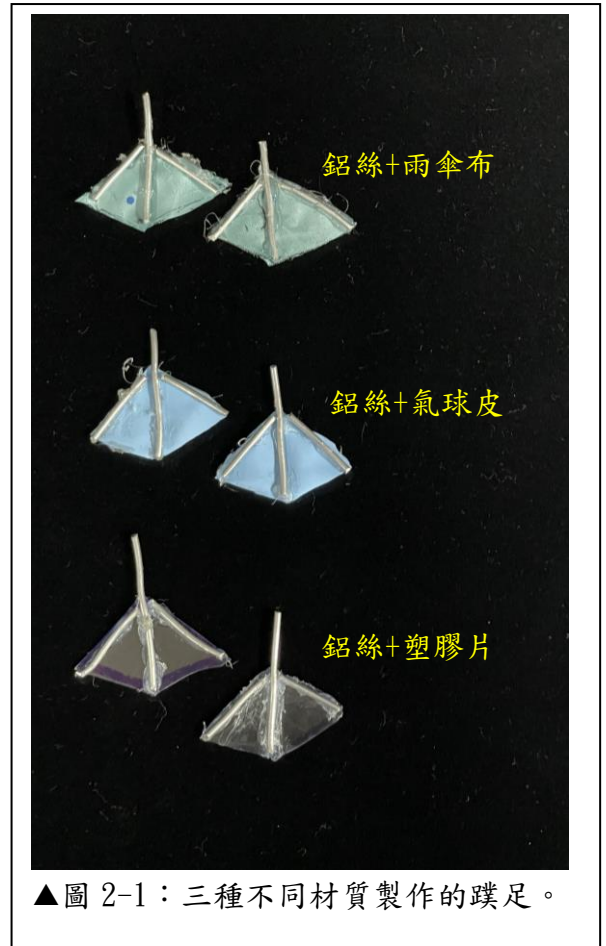
(2) 實驗中依序更換三種不同材質製作鴨的蹼足，為「鋁絲+雨傘布」、「鋁絲+氣球皮」、「鋁絲+塑膠片」（塑膠片厚度 0.3mm ）」（如圖 2-1）。

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：

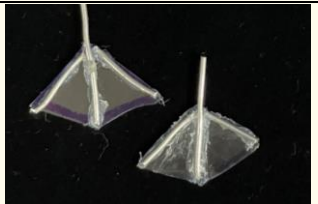
每種鴨的蹼足材質各進行 5 次實驗，並以攝影機全程錄影紀錄電子秤顯示的數據。實驗結束後，使用威力導演軟體將影片進行慢速播放分析，逐格判讀電子秤數值，進而計算出每次試驗中所產生的推進力。



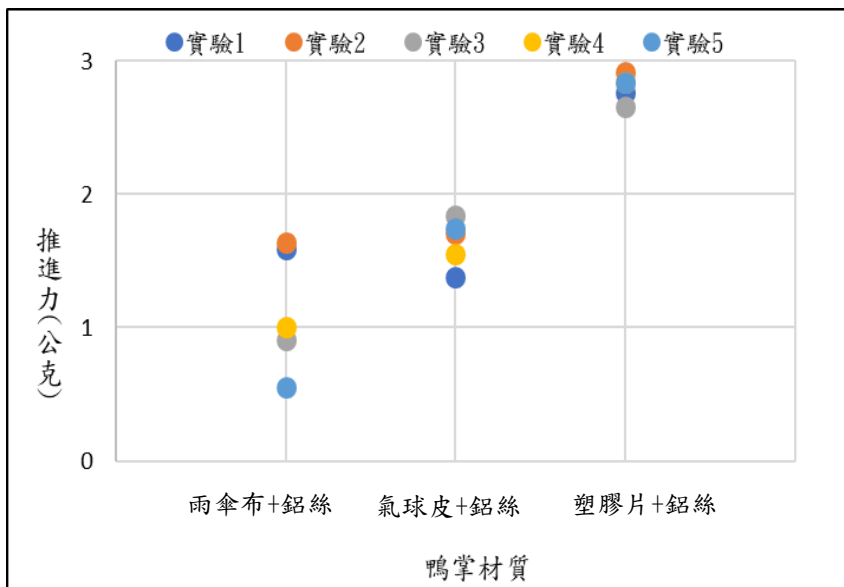
▲圖 2-1：三種不同材質製作的蹼足。

(二) 研究結果：

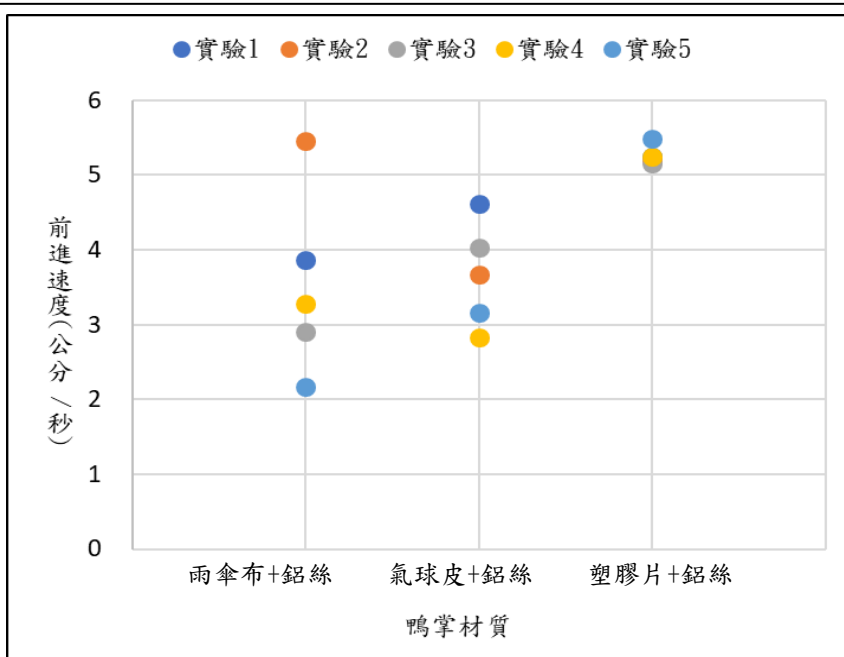
表 2-1：不同材質的蹼與其推進力、前進速度之一覽表

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)		推進力 (g)	前進 速度 (cm/s)	電子秤數值(g)		推進力 (g)	前進 速度 (cm/s)	電子秤數值(g)		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		🙄缺點： ①因雨傘布有一防水層，容易與鋁絲分離。 ②雨傘布的材質為滌綸布（聚酯纖維），不易剪裁。 ③推進力數值不穩定，差異大。				😊優點： ①防水效果比雨傘布佳。 ②實驗鴨打水前進速度比【鋁絲+雨傘布】快。 🙄缺點： ①氣球皮為弧面設計又具有延展性，不易剪裁。 ②在水中，氣球皮偶爾會發生與鋁絲分離的情形。				😊優點： ①塑膠片與鋁絲能緊密黏合，不易在水中脫落。 ②塑膠片容易剪裁。 ③實驗鴨打水前進速度快。 🙄缺點： 透明塑膠片錄影時不易辨識。			

(三) 研究發現：



▲圖 2-2：不同材質蹣足與 5 次實驗所測得推進力之關係圖



▲圖 2-3：不同材質蹣足與 5 次實驗所測得前進速度之關係圖

1. 「推進力」數據穩定性分析：

- (1)【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。
- (2)【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，但數據呈現尚稱穩定。
- (3)【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，有助於穩定的推進表現。

2. 推進力及前進速度方面：

- (1)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】平均推進力最大，為 2.8 公克。
- (2)推進速度由快至慢為：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。
- (3)承(1)(2)可獲知，推進力越大，前進速度也越快！

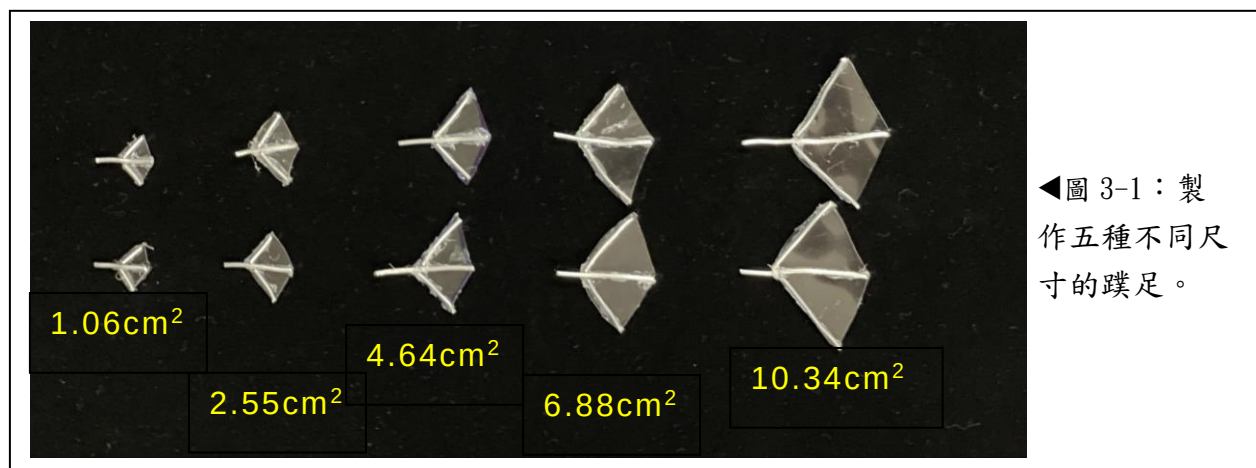
3. 【**鋁絲+塑膠片**】材質的蹣足對機械鴨的推進力和前進速度表現最佳，適合用於後續研究中的機械鴨設計。

【實驗三】不同面積的蹣足如何影響機械鴨的推進力？

(一) 研究方法：

1. 設定機械鴨參數並更換不同蹣足尺寸：

- (1)固定蹣足材質為鋁絲+塑膠片(塑膠片厚度 0.3mm)、鴨脰長度為 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尺寸面積的蹣足，為「**1.06cm²**、**2.55cm²**、**4.64cm²**、**6.88cm²**、**10.34cm²**」(如圖 3-1)。



◀圖 3-1：製作五種不同尺寸的蹼足。

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。

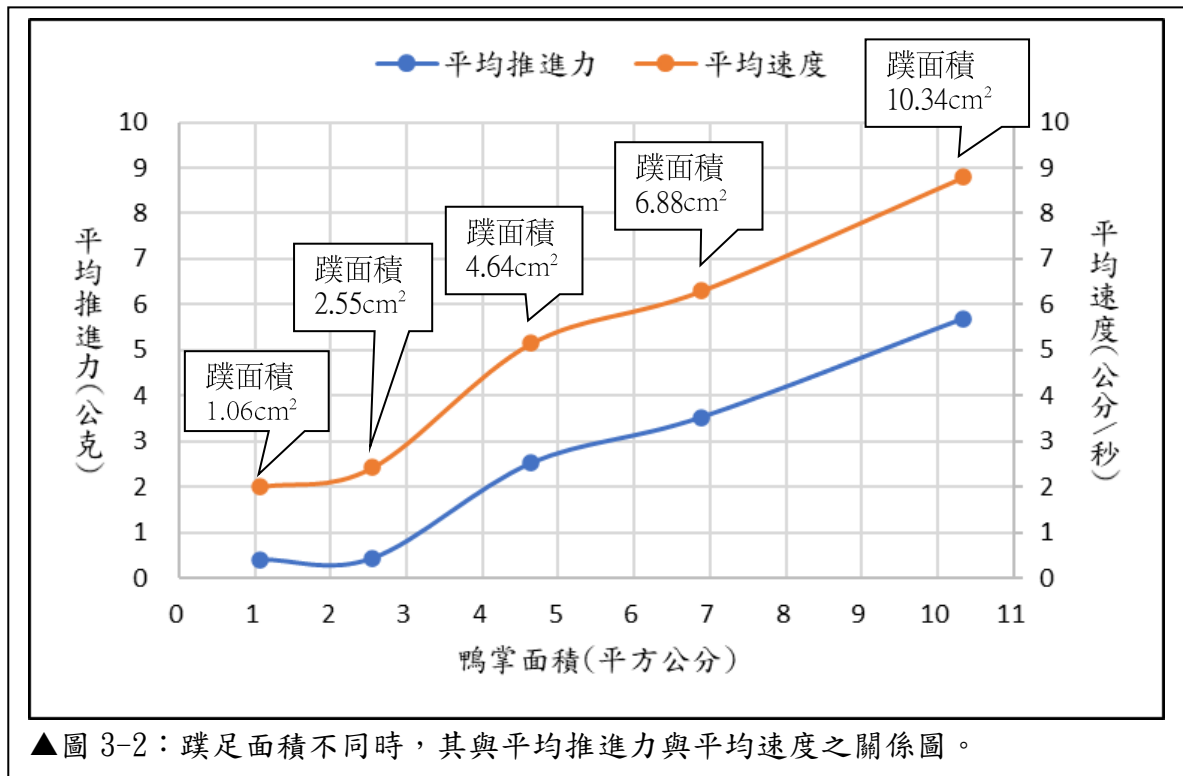
(二) 研究結果：

表 3-1：不同尺寸的蹼足與其推進力、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。)

蹼足尺寸		1.06 cm ²		2.55 cm ²		4.64 cm ²		6.88 cm ²		10.34 cm ²	
實驗數值		推進力 (g)	前進速度 (cm/s)	推進力 (g)	前進速度 (cm/s)	推進力 (g)	前進速度 (cm/s)	推進力 (g)	前進速度 (cm/s)	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	3.75	6.36	5.55	8.42
	2	0.21	1.98	0.40	2.51	2.76	5.16	3.67	6.24	5.86	8.58
	3	0.49	1.95	0.46	2.25	2.54	5.25	3.75	6.40	5.54	9.14
	4	0.52	1.94	0.35	2.41	2.23	4.90	3.34	6.07	6.00	9.14
	5	0.43	2.11	0.49	2.44	2.62	5.19	3.11	6.44	5.57	8.72
平均值		0.40	2.00	0.42	2.42	2.52	5.15	3.52	6.30	5.70	8.80
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. 機械鴨的前進的速度慢。 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推進力有所提升。		1. 機械鴨前進速度非常快，快到有時浮板會脫離浮板邊吸管而翻覆。 2. 機械鴨在水中划水所產生的推進力更大。	

(二) 研究發現：



▲圖 3-2：蹼足面積不同時，其與平均推進力與平均速度之關係圖。

1. 蹼足面積越大，推進力整體呈現上升趨勢。

- (1)從圖 4-2 可知推進力隨蹼足面積增加而提升，說明較大的蹼足面積能在每次划水時推動更多水量，產生更大的反作用力。
- (2)承(1)，最小蹼足面積 1.06cm^2 的平均推進力為 0.40g ，最大蹼足面積 10.34cm^2 的平均推進力為 6.10g ，呈現穩定上升。
- (3)蹼足面積由 6.88cm^2 增加至 10.34cm^2 時，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。
- (4)蹼足面積增加至 10.34cm^2 時，兩蹼組交互划動時會互相碰撞。

2. 蹼足面積越大，前進速度亦隨之提升

- (1)與推進力表現一致，平均前進速度也隨面積增加而上升。
- (2)過小的蹼足(1.06cm^2 、 2.55cm^2)無法提供足夠推進力，以致前進速度小於 2.5cm/s 。
- (2)最大蹼足面積的平均前進速度是最快的，顯示蹼足面積大小對整體移動效能有明顯影響。

3. 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後，增加的效益趨於遞減。本實驗蹼足面積最大(10.34cm^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 6.88cm^2 蹼足面積。

【實驗四】不同長度的鴨脰如何影響機械鴨的推進力？

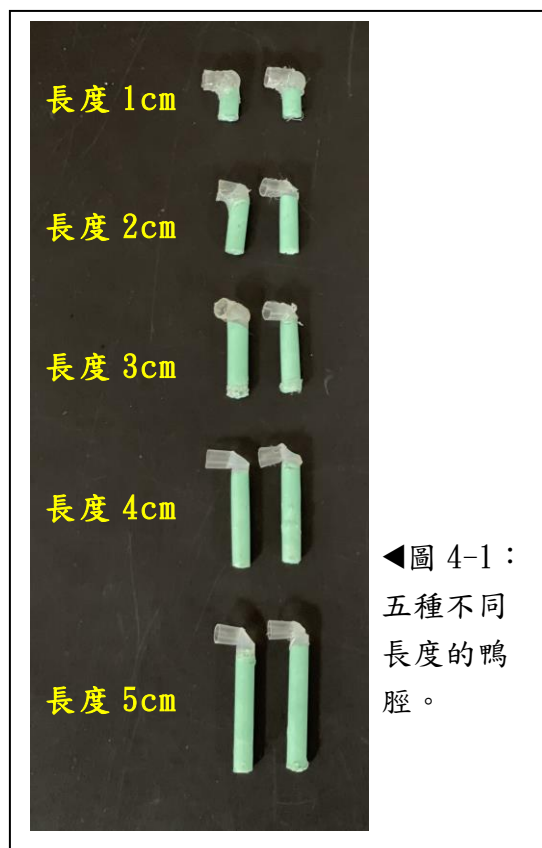
(一) 研究方法：

1. 設定機械鴨參數並更換不同長度鴨脰：

(1) 固定機械鴨的蹼足面積為 6.88 cm^2 、蹼足材質為鋁絲+塑膠片(塑膠片厚度 0.3mm)，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尺寸的鴨脰，為「1cm、2cm、3cm、4cm、5cm」(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。

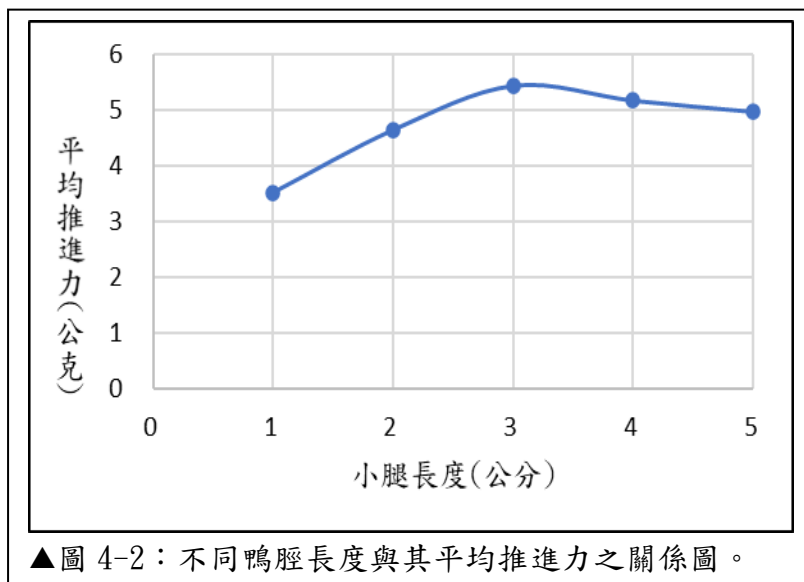


◀圖 4-1：
五種不同
長度的鴨
脰。

(二) 研究結果：

表 4-1：不同長度的鴨脰與其推進力一覽表

鴨脰長度		1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
推進力 (g)	實驗 1	3.75	5.03	5.49	5.12	5.29
	實驗 2	3.67	4.72	5.31	5.34	5.17
	實驗 3	3.75	4.42	5.65	4.96	5.05
	實驗 4	3.34	4.56	5.46	5.31	4.78
	實驗 5	3.11	4.50	5.29	5.12	4.55
	平均值	3.52	4.65	5.44	5.17	4.97
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。



1. 鴨脛長度 1~3 公分間，鴨脛越長，機械鴨的推進力呈現上升趨勢。

- (1) 鴨脛 1cm 時的平均推進力最低，當鴨脛長度逐漸增加至 3cm 時的推進力明顯提升。
- (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 1~3 公分間，推進力及划行穩地性趨於下降。

- (1) 鴨脛 3cm 時的平均推進力最高，當鴨脛長度增加至 5cm 時的推進力些微下降。
- (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，有最大的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 cm^2 、蹼足材質為鋁絲+塑膠片(塑膠片厚度 0.3mm)、鴨脛長 3cm。
- (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】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。

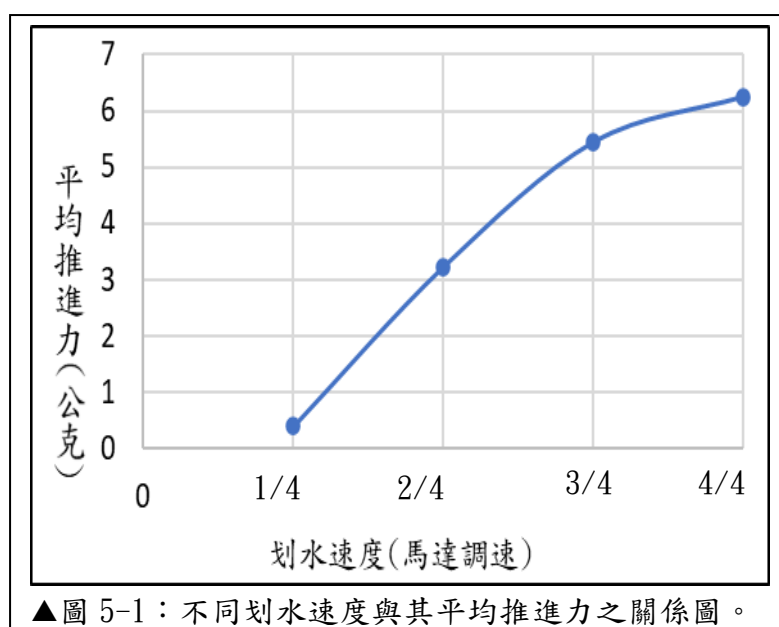
(二) 研究結果：

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
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，推進力越大。

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，雖然推進力最大，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。**

【實驗六】：不同厚度的蹼如何影響機械鴨的推進力？

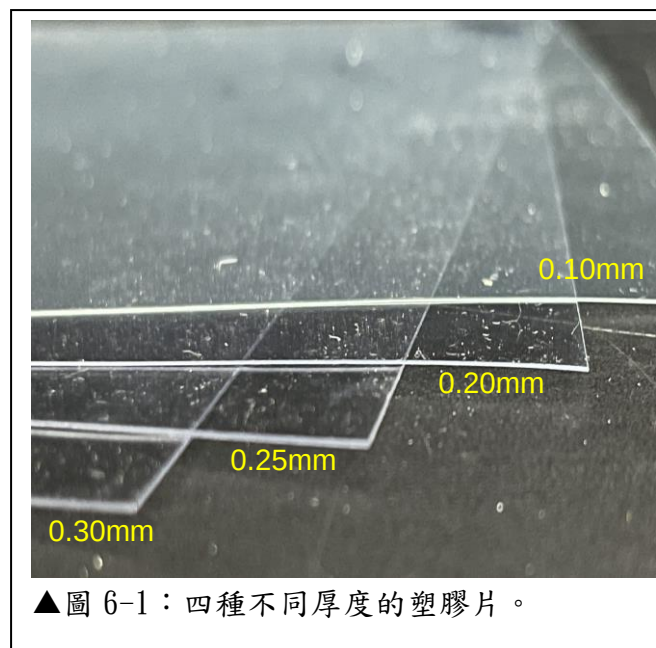
（一）研究方法：

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 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。



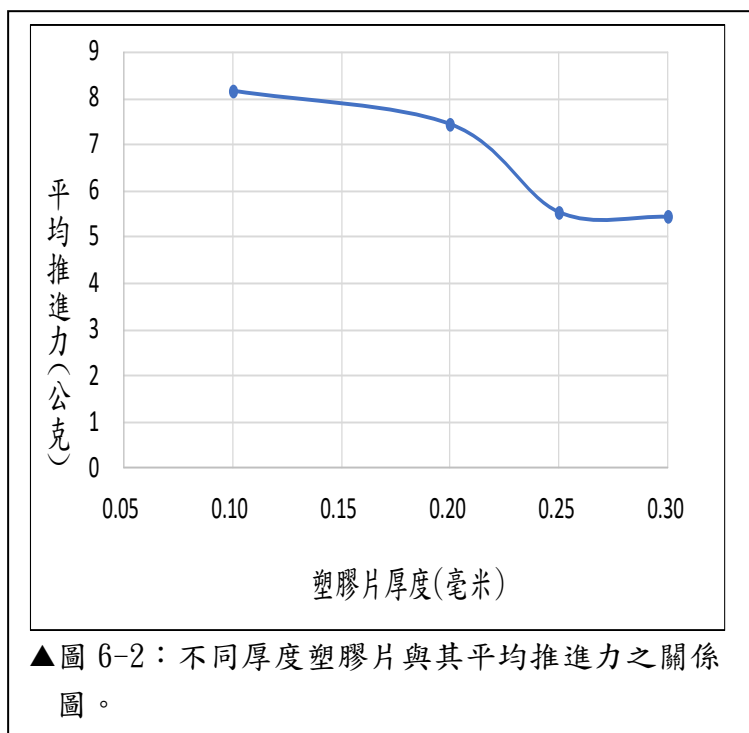
▲圖 6-1：四種不同厚度的塑膠片。

（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
推進力 (g)	實驗 1	7.76	7.01	5.09	5.49
	實驗 2	8.04	7.64	5.35	5.31
	實驗 3	8.17	7.67	6.21	5.65
	實驗 4	8.72	7.21	5.58	5.46
	實驗 5	8.07	7.63	5.48	5.29
	平均值	8.15	7.43	5.54	5.44
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. 機械鴨在划行時，塑膠片(鴨蹼)會些微彎曲。 2. 划行速度很快。	1. 機械鴨在划行時，塑膠片(鴨蹼)不會彎曲。 2. 划行速度快。	1. 機械鴨在划行時，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：



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，推進力愈大，但在厚度超過 0.25mm 後，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 組平均推進力皆為 5.04g，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. 蹼足(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)在鴨蹼 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，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，以致推進力下降。

3. 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。

【實驗七】：不同夾角的兩蹼足如何影響機械鴨的推進力？

(一) 研究方法：

1. 設定機械鴨參數並更換兩蹼足的不同夾角：

(1)固定機械鴨的蹼足面積為 6.88 cm^2 、蹼足材質為鋁絲+塑膠片(塑膠片厚度 0.1mm)、鴨脰長 3cm，並設定雙腳以 3/4 的馬達轉速交替划動。

(2)實驗中依序調整兩蹼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：

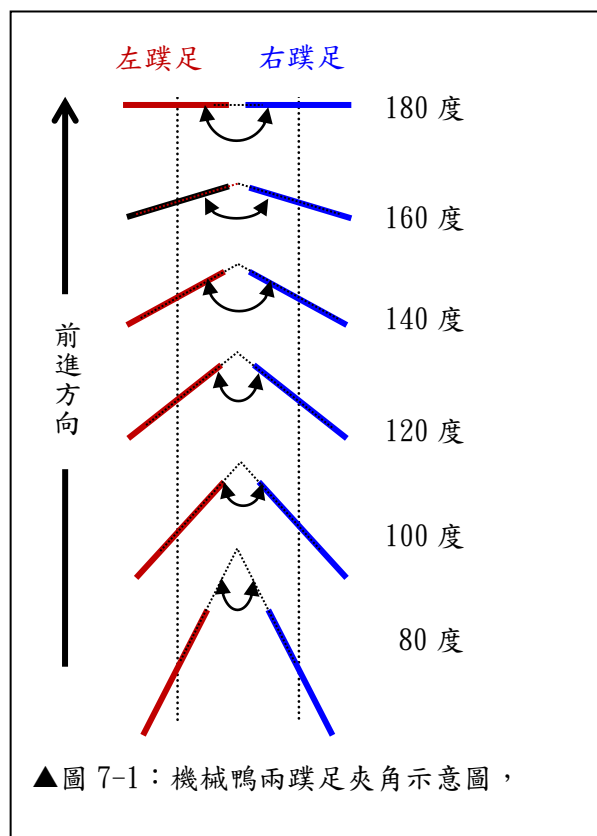


表 7-1：不同夾角的兩蹼足與其推進力一覽表

兩蹼足夾角		180 度	160 度	140 度	120 度	100 度	80 度
推進力 (g)	實驗 1	7.76	5.85	4.02	2.55	0.00	0.00
	實驗 2	8.04	5.64	3.87	2.89	0.00	0.00
	實驗 3	8.17	5.99	4.04	2.01	0.00	0.00
	實驗 4	8.72	5.12	4.00	2.42	0.00	0.00
	實驗 5	8.07	5.80	3.94	2.18	0.00	0.00
	平均值	8.15	5.68	3.97	2.41	0.00	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. 鴨掌划水時引發的水波幅度較小。	1. 很緩慢地前進。 2. 鴨掌划水時引發的水波幅度最小。	無法向前划行。	無法向前划行。

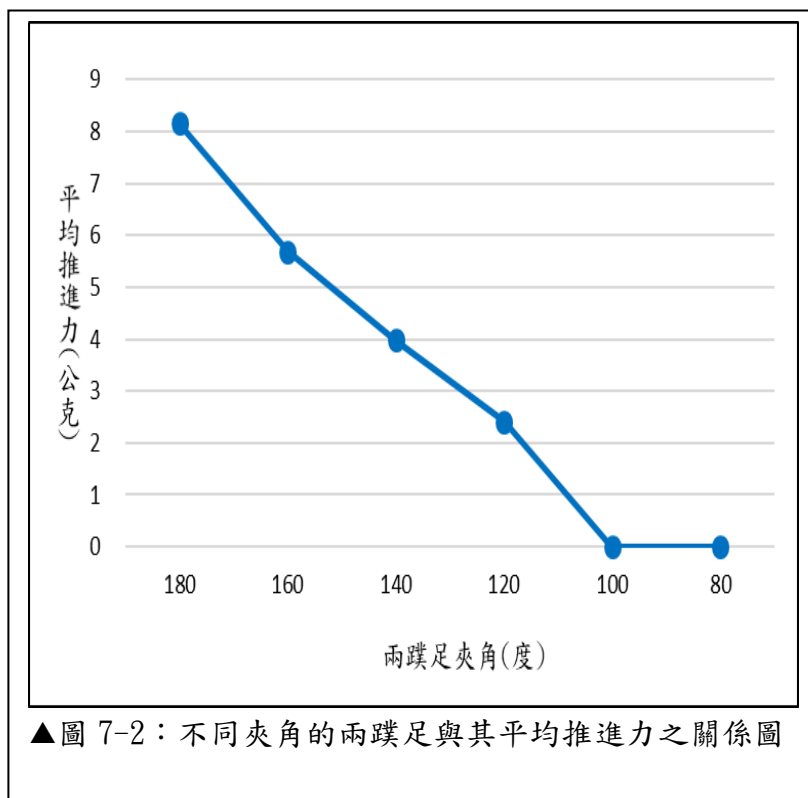
(三) 研究發現：

1. 兩蹼足夾角越大，推進力越強。

- (1) 180° 夾角時推進力最大，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，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：

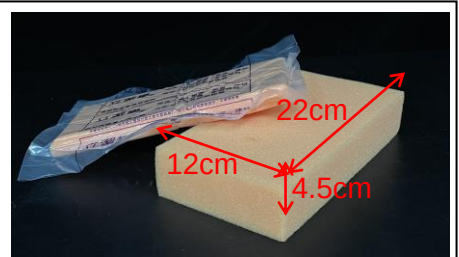
我們的研究原本聚焦於「單隻機械鴨的蹼足對划水運動行為的影響」，實驗場域選在一個長方形玻璃水缸（45.5cm × 43cm × 90cm）中進行。在觀察機械鴨雙腳划動的過程中，我們注意到牠在水中產生的水波紋會不斷擴散，並於接觸水缸壁後反彈回來，可能干擾機械鴨的運動軌跡與推進力表現。

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。

（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：

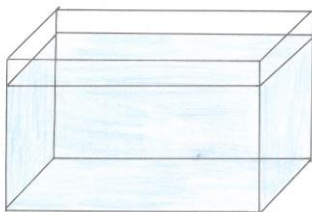
- (1) 固定機械鴨的蹼足面積為 6.88 cm^2 、蹼足材質為鋁絲+塑膠片、鴨脰長 3cm、鴨蹼厚 0.1mm，並設定雙腳以 $3/4$ 的馬達轉速交替划動。
- (2) 購置洗車用寬 12cm、長 22cm、厚 4.5cm 大海綿。
- (3) 實驗中依序更換五種海綿不同的放置位置，為「無海綿(對照組)、水面下兩側各放 12cm 寬海綿、水中兩側各放 12cm 寬海綿、水面下+水中兩側各放 24cm 寬海綿、水面下三側各放 24cm 寬海綿」。(如圖 8-1)。



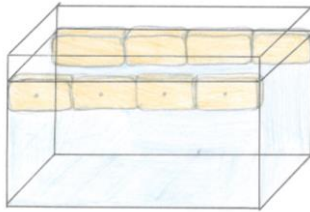
▲圖 8-1：洗車用寬 12cm、長 22cm、厚 4.5cm 大海綿

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。

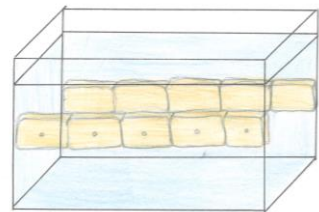
① 無海綿(對照組)



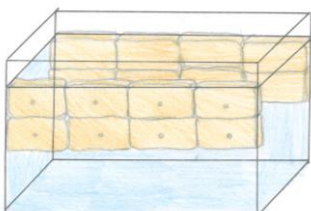
② 水面下兩側各放 12cm 寬海綿



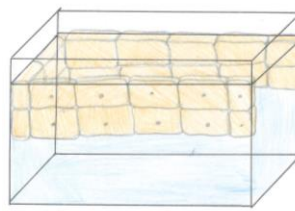
③ 水中兩側各放 12cm 寬海綿



④ 水面下+水中兩側各放 24cm 寬海綿



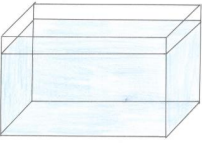
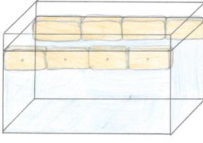
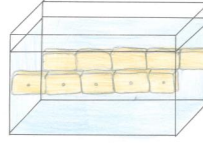
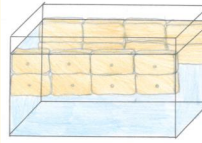
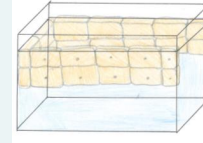
⑤ 水面下三側各放 24cm 寬海綿



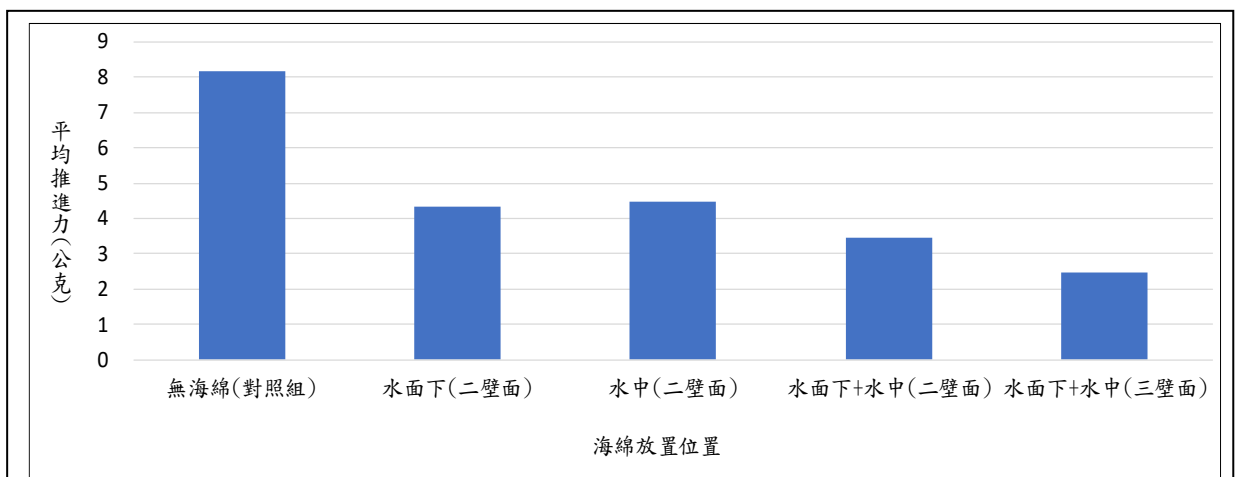
▲圖 8-2：實驗中依序更換五種海綿不同的放置位置之示意圖

(二) 研究結果：

表 8-1：水缸壁有無置放海綿及海綿放置位置其推進力一覽表

海綿放置位置		無海綿 (對照組)	水面下	水中	水面下+水中	水面下+水中
有放置海綿壁面數		0	2	2	2	3
圖片						
推進力 (g)	實驗 1	7.76	4.31	4.61	3.43	2.43
	實驗 2	8.04	4.28	4.41	3.45	2.31
	實驗 3	8.17	4.39	4.36	3.48	2.56
	實驗 4	8.72	4.31	4.42	3.32	2.5
	實驗 5	8.07	4.32	4.54	3.66	2.52
	平均值	8.15	4.32	4.47	3.47	2.46
實驗情形描述		1. 機械鴨划動雙腳時，會激起水波，這些水波傳至水缸壁後反射回來，與原本的波紋交錯疊加，導致水面波動變得紊亂不規則。 2. 機械鴨游得比較快。	1. 當機械鴨划動雙腳激起水波後，這些水波傳到水缸壁時被海綿有效吸收，反射回來的波動顯著變小。 2. 機械鴨的划動速率明顯變慢。	1. 機械鴨划動雙腳激起水波後，這些水波傳至水缸壁仍會產生顯著反射，但相較於未設置海綿時，反射回來的波動明顯減弱。 2. 機械鴨的划動速率明顯變慢。	1. 機械鴨划動雙腳激起水波後，這些水波傳至水缸壁被海綿有效吸收，反射回來的波動微乎其微。 2. 機械鴨的划動速率明顯變得更慢。	1. 機械鴨划動雙腳激起水波後，這些水波傳至水缸壁被海綿有效吸收，幾乎沒有反射現象。 2. 機械鴨的划動速率非常慢。

(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. 沒有放置海綿(對照組)時，推進力最大

(1)無海綿(對照組)平均推進力是所有裝置中推進力最大的。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. 海綿放置越多、覆蓋範圍越廣，推進力越低!

(1)推進力由大至小為：【水中兩側各放 12cm 寬海綿】>【水面下兩側各放 12cm 寬海綿】>【水面下+水中兩側各放 24cm 寬海綿】>【水面下三側各放 24cm 寬海綿】。

(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。

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。

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「水面下三側各放 24cm 寬海綿」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推進力？

(一)研究方法

1. 在玻璃水缸 3 個壁面的水面下各設置 24cm 寬的海綿，將母鴨固定位置。

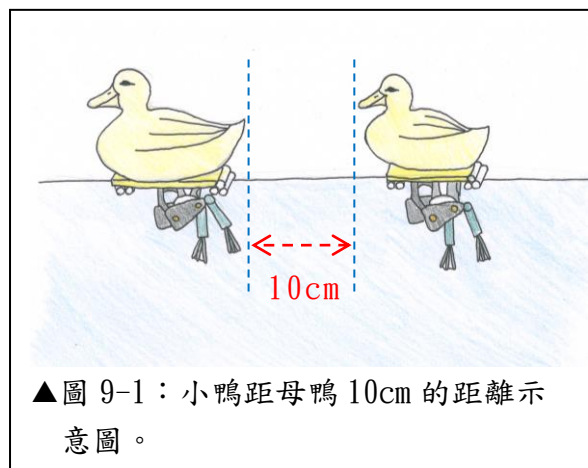
2. 設定機械鴨參數並調整小鴨與母鴨的距離：

(1) 固定機械鴨的蹼足面積為 6.88 cm^2 、蹼足材質為鋁絲+塑膠片、鴨脰長 3cm，並設定雙腳以 $3/4$ 的馬達轉速交替划動。

(2) 實驗中依序調整小鴨與母鴨的距離為

「5cm、10cm、15cm」(如圖 7-1)。

3. 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。

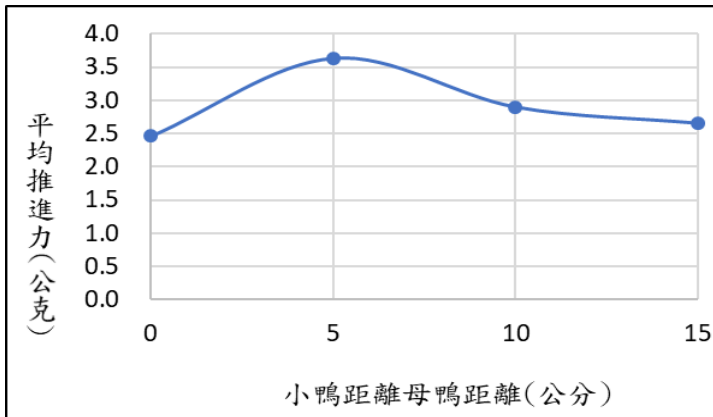


(二)研究結果

表 9-1：小鴨距母鴨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	距母鴨 5cm	距母鴨 10cm	距母鴨 15cm
推進力 (g)	實驗 1	2.43	3.77	3.01	2.68
	實驗 2	2.31	3.62	2.81	2.73
	實驗 3	2.56	3.86	2.92	2.51
	實驗 4	2.50	3.47	2.89	2.73
	實驗 5	2.52	3.46	2.88	2.64
	平均值	2.46	3.64	2.90	2.66
實驗情形描述		機械鴨前進速度變慢。	1. 機械鴨前進速度增快。 2. 水缸內的水波最為紊亂。 	1. 機械鴨前進速度變慢。 2. 母鴨與小鴨所各激起的水波在擴散過程中相遇時，會有部分重疊的現象。 3. 機械鴨前進速度變慢。	1. 由於母鴨與小鴨之間距離較遠，牠們分別划動雙蹼所激起的水波在擴散過程中相遇時，會在兩者之間逐漸抵銷、減弱，使波動在中間區域被弭平。 2. 機械鴨前進速度變慢。

(三)研究發現



▲圖 9-2：小鴨與母鴨間距離與其平均推進力關係圖

1. 小鴨與母鴨距離 5 公分時，推進力表現最佳！

- (1)距離母鴨最近 (5cm) 的小鴨平均推進力最大，為 3.64g。
- (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)距離母鴨 10cm 時所測得的平均推進力為 2.90g，距離母鴨 15 公分時推進力則降至 2.66g。
- (2)說明隨著距離增加，小鴨受到母鴨產生水波的助力減弱，推進力也跟著減少。

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 15cm，仍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. 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應。

【實驗十】：母鴨位在小鴨前方不同位置將如何影響小鴨的推進力？

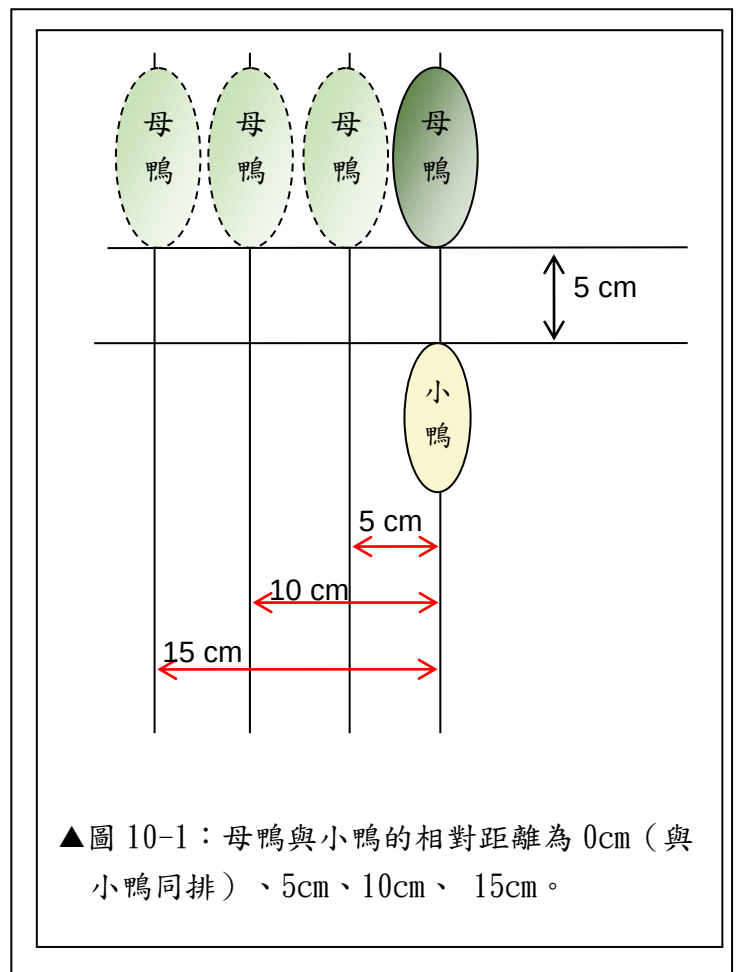
(一)研究方法

1. 玻璃水缸 3 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)固定機械鴨的蹼足面積為 6.88 cm^2 、蹼足材質為鋁絲+塑膠片、鴨脰長 3cm，並設定雙腳以 3/4 的馬達轉速交替划動，母鴨在小鴨前方 5cm 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)

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 5cm、10cm、15cm：

母鴨向左平移，小鴨位於母鴨右斜後方。



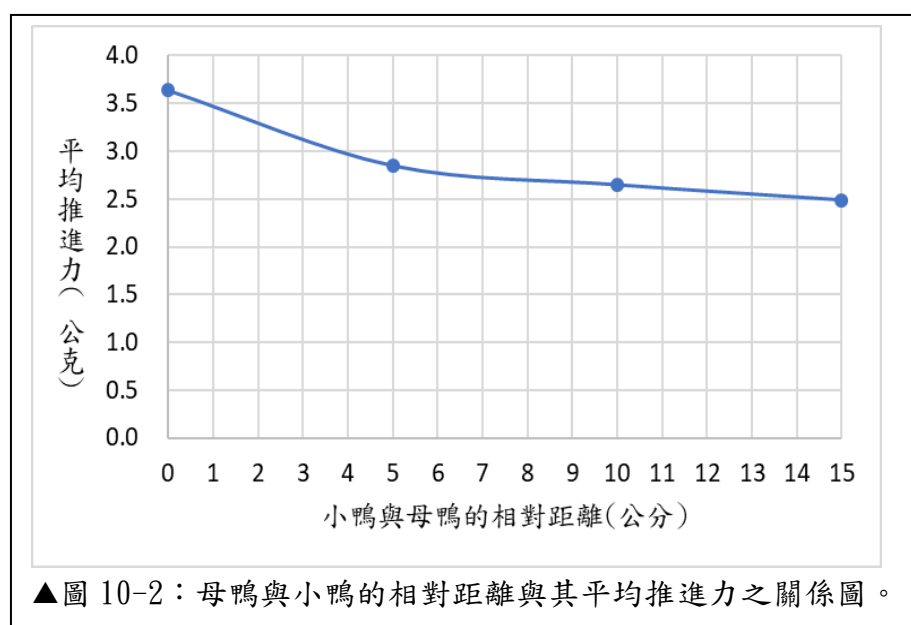
3. 同【實驗二】研究方法，用推進力測量儀進行量測，重複實驗並進行數據分析。

(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)	5 cm	10 cm	15 cm
推進力 (g)	實驗 1	3.77	2.83	2.63	2.44
	實驗 2	3.62	2.79	2.63	2.47
	實驗 3	3.86	2.91	2.69	2.53
	實驗 4	3.47	2.80	2.72	2.47
	實驗 5	3.46	2.90	2.60	2.56
	平均值	3.64	2.85	2.65	2.49
實驗情形描述		母鴨所激起的水波在小鴨正前方迅速傳遞，與小鴨自身激起的水波有最大部分的重疊。	母鴨划動雙蹼所激起的水波，會向四周擴散並延伸至小鴨的左前側水域，有小部分的水波會重疊。	母鴨划動雙蹼所激起的水波，會向四周擴散並延伸至小鴨的左前側水域，因此有極小部分的水波會重疊。	母鴨划動雙蹼所激起的水波，會向四周擴散並延伸至小鴨的左前側水域，因此只有極小部分的水波會重疊。

(三)研究發現



1. 小鴨在母鴨正後方（同排，0cm）時，推進力最佳！

- (1) 平均推進力數值為 3.64g，明顯高於其他三種更偏右位置的推進力。
- (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，推進力最強且穩定。

2. 小鴨位於母鴨右後方斜角（5cm、10cm、15cm）時，小鴨推進力逐漸下降。

- (1) 推進力由大至小：右後方斜角 5cm > 右後方斜角 10cm > 右後方斜角 15cm。

(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。

陸、結論

本研究從觀察鴨群列隊划行的自然現象出發，成功研發出具備穩定划行能力的「第三代機械鴨」，並自行設計並製作「推進力測量儀」，讓我們得以順利在水中進行推進力的量測與數據蒐集。透過一系列實驗與分析，我們獲得以下幾項主要結論：

一、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(6.88cm^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。

二、「鴨脰長度」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，鴨脰長 3cm 時，有最大的推進力且能穩定的划動。
 - (1)鴨脰長度 1~3 公分間，鴨脰越長，機械鴨的推進力呈上升趨勢，且平穩地划行；脰長度 3~5 公分間，推進力及划行穩地性趨於下降。
 - (2)鴨脰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° 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° 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° 夾角的蹼足—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 140° 、 120° 、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。

三、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。

四、模擬小鴨列隊划行行為，驗證列隊划行有助於省力推進。

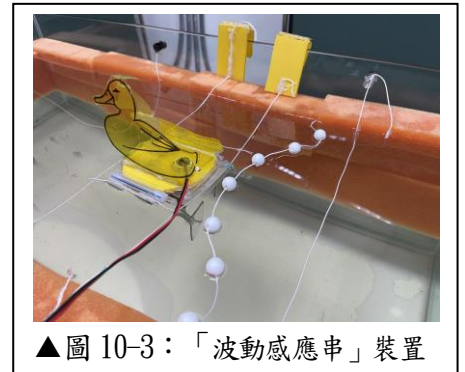
(1)實驗九、十中得知，當小鴨緊跟在母鴨正後方或與母鴨距離接近（如 5cm）時，能有效利用母鴨所激起的水波產生「搭浪效應」，小鴨的推進力顯著提升。

(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。

柒、未來展望

本研究最後，我們嘗試以創新方式探索機械鴨推進時對周遭水域的影響。

我們將棉線穿過多顆小保麗龍球，製作成一條「保麗龍球串珠」，並固定於玻璃水缸內部兩側，位於機械鴨的後方，即為「**波動感應串**」裝置。



▲圖 10-3：「波動感應串」裝置

實驗中觀察到：每當機械鴨划動雙蹼前進時，這條保麗龍球串會明顯地被吸向前方(如圖 10-3)。此現象顯示，機械鴨在推進過程中產生了向後的水流與壓力變化，造成後方流場形成低壓區域，進而吸引輕質物體靠近。

未來希望進一步設計更精細的保麗龍標記裝置，結合高畫質錄影與逐格分析，以視覺化記錄流場的運動方向與強度變化。同時，我們也將思考是否能透過不同形狀或排列的「浮球裝置」，探討流體分佈在不同機械鴨設計與隊形變化下的差異。

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。