

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 物理科

佳作

080106

無「鰭」不「泳」—探究水平尾鰭對其運動行為的影響

學校名稱：國立東華大學附設實驗國民小學

作者： 小六 林勇助 小六 曹希婕 小六 林言臻	指導老師： 李偲華 游時銘
---	-----------------------------

關鍵詞：水平尾鰭、推升比值、水流檢測儀

摘要

這是截至 62 屆科展為止，第一件研究水平尾鰭在水中運動行為的科展作品。歷經長時間努力終於研發出能模擬海豚利用水平尾鰭的擺動在水中向前游動的「機械海豚」，更進而研發【水中推進力/升力測量儀】，成功以「重量」形式呈現水平尾鰭在不同變因下所產生的推進力及升力，透過「推升比值」精準檢視其前進能力。

研究發現水平尾鰭的擺動速度、面積、形狀都會影響其在水中的前進能力，有趣的是尾鰭擺動得越快，不見得會越游越快喔！

最後研發的【水流檢測儀】可環景無死角地看出水平尾鰭擺動時的水流變化，小檢測球的設計更是讓水平尾鰭後端的 4 個漩渦完美地呈現在眼前！證明水平尾鰭的擺動會製造渦流降低前進的阻力以提高前進的效能。

壹、研究動機

住在東部的我們，每天都可以看到一望無際的大海，學校也經常安排和海洋教育相關的課程。

還記得五年級時，學校安排全校同學到影城欣賞關於兩個父親和海洋、鯨豚互動的記錄片-《男人與他的海》(圖 1-1)，並邀請台灣首位鯨豚攝影師-金磊先生到校演講，拍攝鯨豚經驗豐富的金磊在講座中提到「因為海豚游泳速度飛快，因此很難捕捉到海豚的水中英姿」。我非常好奇到底是什麼因素使海豚的游泳速度如此出眾呢？於是決定和同學進行深入的探究，一起揭開海豚在水中游動的奧秘！



▲圖 1-1：《男人與他的海》電影文宣。

貳、研究目的

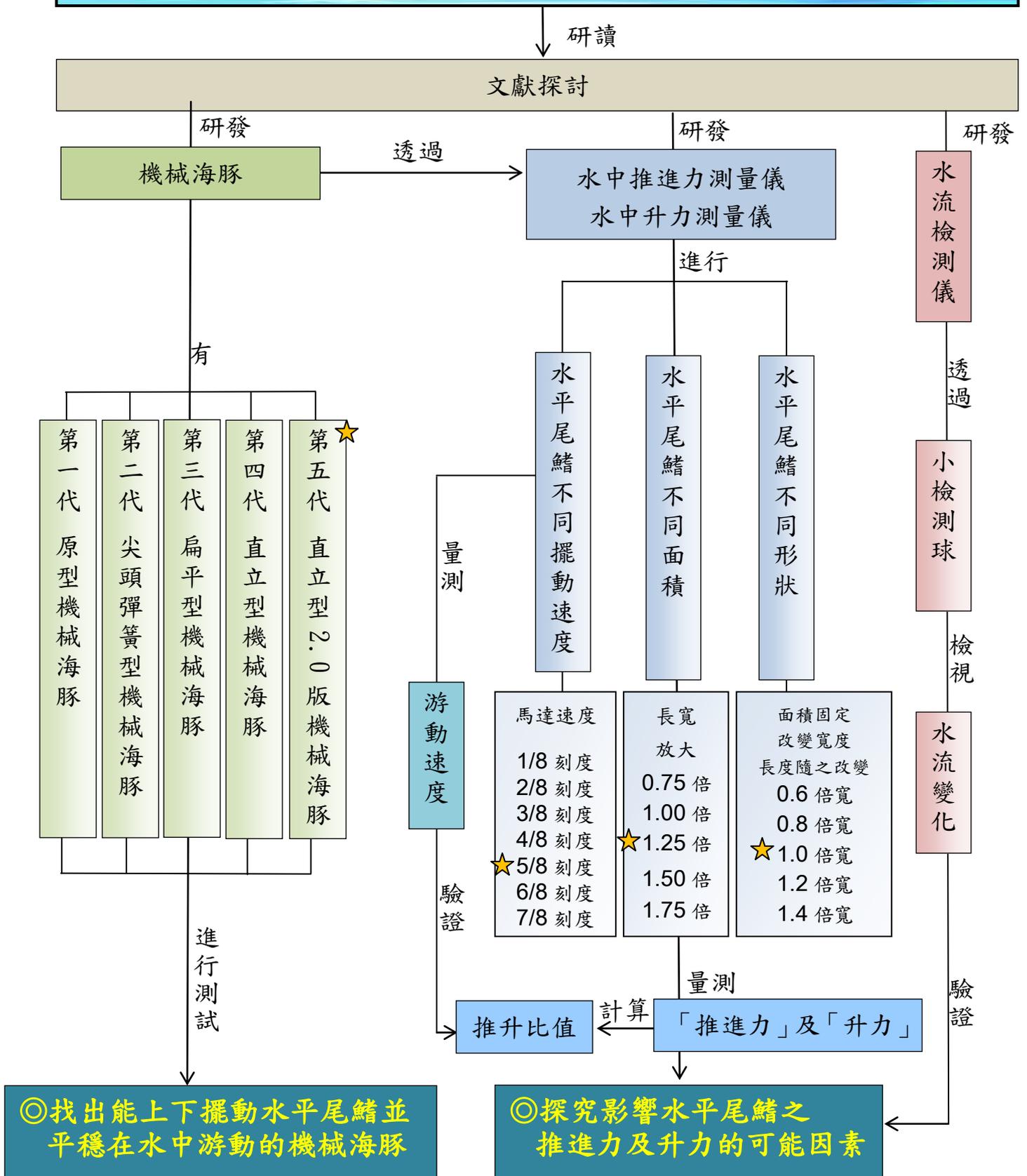
- 一、研發並製作尾鰭能上下擺動並能平穩地在水中向前游動的機械海豚。
- 二、研發並製作能在水裡量測游動中機械海豚之推進力及升力的儀器。
- 三、探究影響機械海豚尾鰭之推進力及升力的可能因素。

參、研究設備及器材

- 一、器材：錄影機、IPad、雷射切割機、3D 列印機、腳架、電子秤、熱熔膠槍、滑輪、窗簾桿、焊槍、45.5cm*43cm*90cm 水缸、20cm*30cm*32cm 水箱、鐵架、變壓器、鏡子、電子調速器。
- 二、材料：塑膠瓦楞板、熱熔膠條、塑鋼土、雷切用壓克力板、木條、矽利康、氣球、透明塑膠片、瓶蓋、螺絲、螺帽、墊片、保麗龍球、棉繩、針線、焊錫、彈簧、寶特瓶。
- 三、軟體：Inkscape 軟體、image-j 軟體、Tracker 軟體、台灣三軸雷射切割雕刻軟體。

肆、研究架構及流程

無「**鰭**」不「**泳**」



備註：『**★**』表示在該子題中有最佳表現者。

肆、研究過程及結果

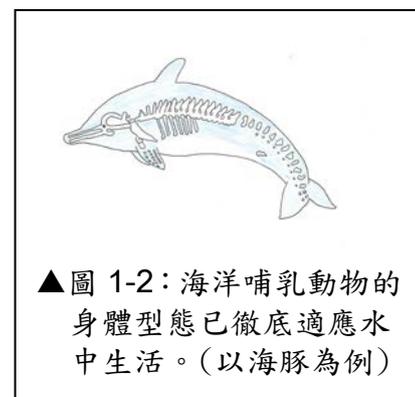
實驗一：文獻探討

一、「海豚」和「魚」身體結構與運動方式的差異

(一) 「海豚」和「魚」不同的尾鰭型態是外觀上最顯著的差異！

「海豚」和「魚」都在水中生活，不僅都具有流線體型，也看似皆具有胸鰭、背鰭、尾鰭，但「尾鰭型態」則有顯著不同：
「海豚」的尾鰭是水平生長的，「魚」的尾鰭是豎著生長的！

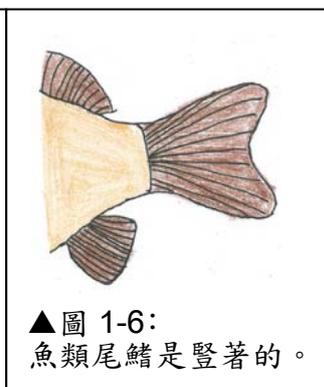
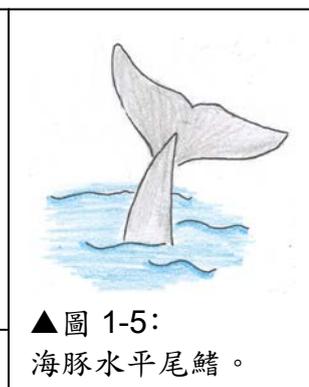
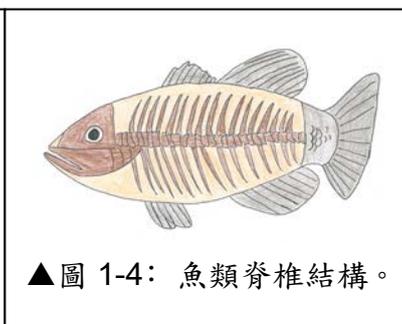
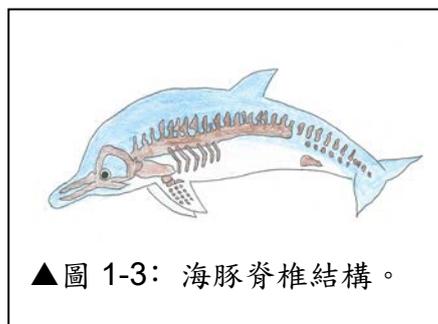
(二) 「海豚」和「魚」因脊椎結構的差異使其產生不同的運動方式，不同的尾鰭型態順勢而生。



海豚是海洋哺乳動物，由陸生哺乳動物演化而成，為了適應水中生活，演化出近似魚類的外形(圖1-2)。但我們可別忘了牠們的祖先是曾在陸地上行走的哺乳動物呢！

哺乳動物脊椎結構與魚類截然不同：哺乳動物用來支撐體腔的肋骨，連接於脊椎的左、右兩側(圖1-3);而魚類支撐身體的棘突(就是我們說的魚刺)是從脊椎向上、下生長的(圖1-4);為了達到移動時的協調性，脊椎的擺動方向就得避開/符應其脊椎的生長結構，因而**造就了哺乳動物的脊椎是上下擺動，魚類的脊椎是左右擺動!**

而尾鰭裡的骨頭(尾椎)是脊椎的一部分，運動方向當然要和整條脊椎一致，所以海豚的尾鰭要上下擺尾，因而水平生長(圖1-5);魚類的尾鰭要左右擺尾，因而要豎著生長!(圖1-6)



(三) 「海豚」能在水中快速游動的奧秘

海豚善於跳躍和潛泳，並號稱是在水中行動最迅速的哺乳動物。我們透過不斷不斷慢速播放海豚的影片，分析海豚的運動方式，發現可將海豚的運動行為大致分為「躍出水面」、「空中的飛行或旋轉等展示行為」、「潛入水中」、「水中游動」四種。

在海豚的運動行為中，我們對於「海豚能在水中快速游動」的行為特別感興趣!研讀文獻時，知道海豚是靠胸鰭幫助牠們保持平衡及改變控制方向，靠背鰭幫助牠們穩定身體，流線型身體可減低牠們在水中的阻力，但**使牠們可維持每小時 30 公里的游泳速度，最主要是「利用尾鰭上下拍動水面而產生向前游動的推進力」!**

人類甚至因為對海豚能在水中快速游動的嚮往而發明了「蝶泳」，蝶泳的打水動作-蝶腳，也就是俗稱的「海豚腳」(圖 1-7)。「**海豚腳**」產生動力的方式與自由式打水一樣，不同的是，**模擬海豚的水平尾鰭需要雙腿同時動作，利用腳背打直所產生的面積，由上往下壓水產生直接的反作用力進而製造動力**。「海豚腳」不僅是蝶泳的一部分，也是目前自由泳、仰泳、蝶泳出發動作中最快速的潛泳動作。



▲圖 1-7: 「海豚腳」需雙腿同時動作，產生動力的方式與自由式打水一樣。

三、關於「鯨豚」、「鰭」相關的科展研究

自科教館網站查詢全國第 1~62 屆高國中小科展參展作品中「鯨豚」、「鰭」相關的研究有 3 件，所得之資訊整理如下。

(一) 關於「鯨豚」的相關科展研究僅有 1 件：

「纏蝕鯨豚—露脊鼠海豚在馬祖的擱淺研究」(第 62 屆國中組地球科學科)，該研究主要利用資料分析以了解影響露脊鼠海豚擱淺的原因及分布情形。其研究方向和鯨豚的運動方式毫無關聯。

(二) 關於「鰭」的相關科展研究有 2 件：

1. 「神鰭魔力“渦”最行?!」(第 60 屆國小組物理科)，本研究探討一般魚類左右擺動尾鰭，其所產生的渦流與前進推力的關係。
2. 「魚你翼鰭飛—探討飛魚腹鰭對飛行穩定度的作用」(第 62 屆高中組物理與天文學科)，該作品探究飛魚腹鰭面積、腹鰭形狀、腹鰭與魚身之間的夾角與飛行狀態之關係。

基於上述文獻探討，發現**目前尚無科展作品探究海豚水平尾鰭對其運動行為的影響**，因此我們**想探究水平尾鰭在不同狀態時推進力及升力的表現，及尾鰭擺動時附近水流的變化情形**。為克服在水中測量數據的困境，期望能自創量測裝置，找出影響水平尾鰭能快速游動的真相!

本研究自製「機械海豚」將以體型較小的「齒鯨亞目」下「海豚科」【白鯨】的尾鰭型態作為製作實驗模型的參考。

實驗二：「機械海豚」設計及實驗環境介紹

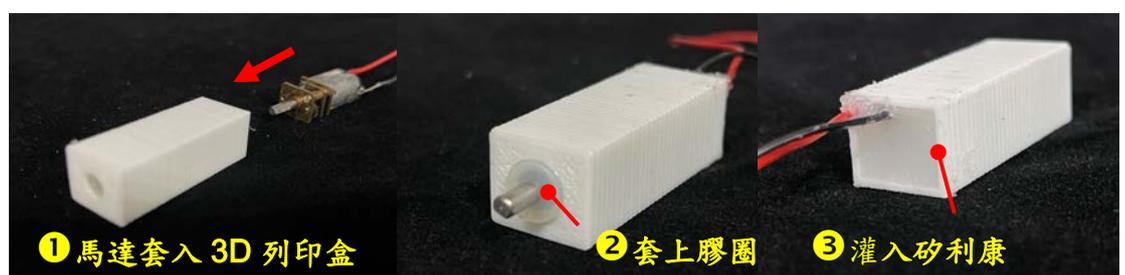
一、「機械海豚」的設計

(一) 設計理念：

研究之初要設計一隻單純以水平尾鰭上下擺動就能在水中平穩地往前游動的流線型「機械海豚」，且還須具有能調整水平尾鰭擺動速度、更換水平尾鰭不同樣態、防水與堅固耐用等特色。



▲圖 2-1: 以 3D 列印製成的馬達防水盒。



▲圖 2-2: 將馬達套入 3D 列印的防水盒，套上膠圈，灌入矽利康，達到完全地防水。

我們花了數個月時間不斷地進行構思設計、尋找零件、配重、組裝後，將其置入水中測試，以下我們將敘述五代「機械海豚」的演進過程，並詳述其尺寸、重量、製作方式及優缺點分析。

在設計及製作機械海豚中，面臨最大的困難之一是難以在市面上覓得合適、輕巧的連動桿或馬達防水盒尺寸，因此我們便運用學校所學的 3D 列印來製作機械海豚裡頭的馬達防水盒(圖 2-1~2-2)，運用雷射切割技術來製作不同尺寸的連動桿! (圖 2-3)



▲圖 2-3: 用「台灣三軸雷射切割雕刻軟體」繪製所需部件圖，驅動雷射切割機切割出所需的連動桿。

(二)「機械海豚」代數的演進

第一代 原型機械海豚



■尺寸: 23.1cm*9.0cm*10.7cm

■重量: 34.45gw(含馬達)

■製作方式:

身體及尾鰭以塑膠 PP 透明片黏製而成，使用自製連桿、輔以螺絲、螺帽進行固定及配重，再依靠變壓器、減速馬達(12V，900 轉)驅動尾鰭的擺動，可使機械海豚向前游動。頂部安裝氣球增加浮力。

■優缺點分析:

◎優點-(1)外觀與真實海豚極為接近。

(2)身體與尾鰭是 3D 立體的。

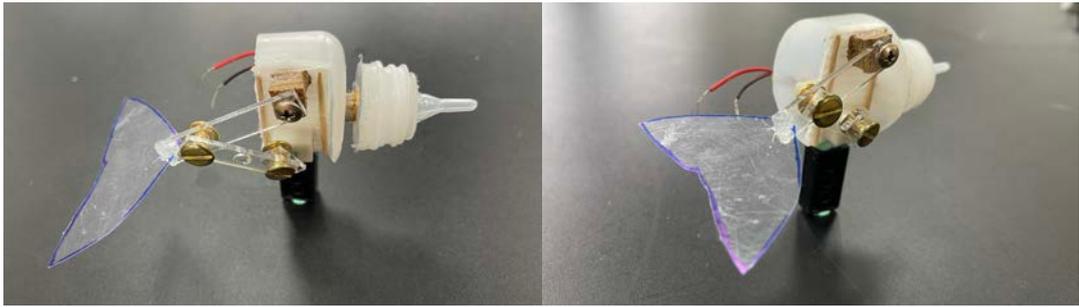
◎缺點-(1)機械海豚沒安裝氣球時，會沉至水底；安裝氣球時，又會浮至水面，無法讓機械海豚維持在水中。

(2)身體會進水，不易控制重量。

(3)身體長，不易保持平衡，游動時會轉彎

(4)製作費時。

第二代 尖頭彈簧型機械海豚



■尺寸：14.6cm*8.2cm*4.8cm

■重量：33.99gw(含馬達)

■製作方式：

頭部及身體以 PVC 塑膠瓶裁切製成，頭部與身體間以彈簧銜接，尾鰭以塑膠透明片剪裁而成。使用自製連桿、輔以螺絲、螺帽進行固定及配重，再依靠變壓器、減速馬達(12V, 900 轉)驅動尾鰭的擺動，可使機械海豚向前游動。

■優缺點分析：

- ⊙優點-(1)外觀與真實海豚較為接近。
- (2)可成功維持「在水中」游動。
- (3)以彈簧銜接頭部與身體，游動時頭部、身體、尾鰭會有律動感的呈現自然弧度。
- ⊙缺點-(1)製作費時。
- (2)因游動時會呈現有律動感的自然弧度，使得游動時會轉彎或繞圈，無法直線游動。
- (3)因游動時會呈現有律動感的自然弧度，導致尾鰭的擺動不明顯。

第三代 扁平型機械海豚



■尺寸：12.1cm*8.7cm*3.5cm

■重量：41.41gw(含馬達)

■製作方式：

扁平狀身體及尾鰭以塑膠瓦楞板裁切製成，使用自製連桿、輔以螺絲、螺帽進行固定及配重，還以瓶蓋、小保麗龍球增加浮力，再依靠變壓器、減速馬達(12V, 900 轉)驅動尾鰭的擺動，可使機械海豚向前游動。

■優缺點分析：

- ⊙優點-(1)可成功維持「在水中」游動。
- (2)若扁平狀身體左右兩邊配重達平衡，可在水中平穩地向前游動。
- ⊙缺點-(1)扁平狀身體較難尋覓能安裝連桿及馬達的位置。
- (2)扁平狀身體左右兩邊的配重不易在水中達成平衡。
- (3)當馬達轉速變快，游動時會轉彎。

第四代 直立型機械海豚



■尺寸：17.2cm*7.3cm*7.7cm

■重量：67.73gw(含馬達)

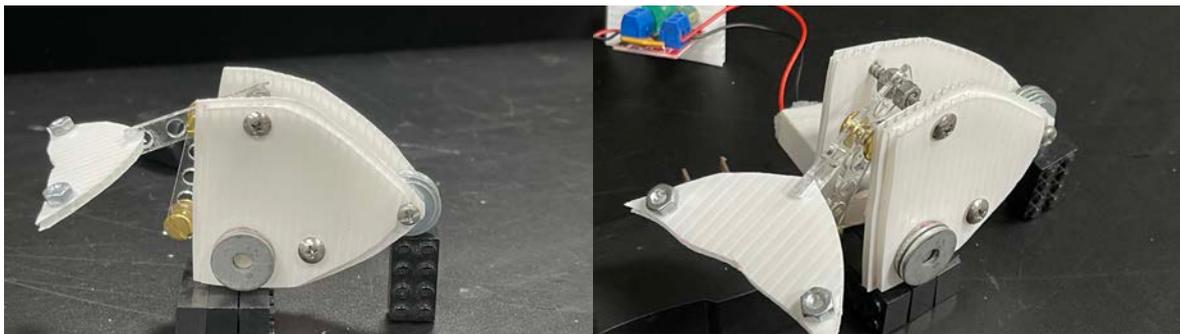
■製作方式：

直立型身體及尾鰭以塑膠瓦楞板裁切製成，使用自製連桿、輔以螺絲、螺帽、墊片進行固定及配重，再依靠變壓器、減速馬達(12V，900轉)驅動尾鰭的擺動，可使機械海豚向前游動。

■優缺點分析：

- ◎優點-(1)可「在水中」較為「平穩」地向前游動。
(2)可將馬達嵌入直立型身軀，可增添墊片達到配重上的平衡。
- ◎缺點-(1)尾鰭沒有在整個身體的正後方，直立型身軀的左右平衡需多費心。
(2)在水中游動一小段時間後，容易出現轉彎或身體側翻等情形。

第五代 直立型 2.0 版 機械海豚



■尺寸：14.1cm*7.3cm*6.5cm

■重量：74.05gw(含馬達)

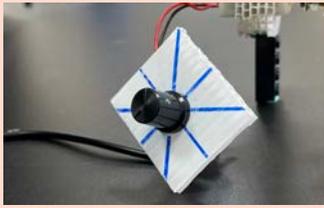
■製作方式：

以塑膠瓦楞板裁切成直立型身體一式兩份，使用自製連桿、螺絲、螺帽將尾鰭安裝至身體正後方，再依靠變壓器、減速馬達(12V，900轉)驅動尾鰭的擺動，可使機械海豚向前游動。

■優缺點分析：

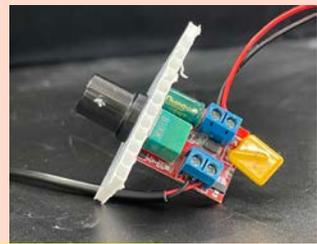
- ◎優點-(1)流線型外觀與真實海豚極為相似。
(2)尾鰭在整個身體正後方，能非常穩定地「在水中」呈「直線型」游動。
- ◎缺點-製作時間較為費時。

(三)「第五代機械海豚」各部位的介紹(圖 2-4~2-9)



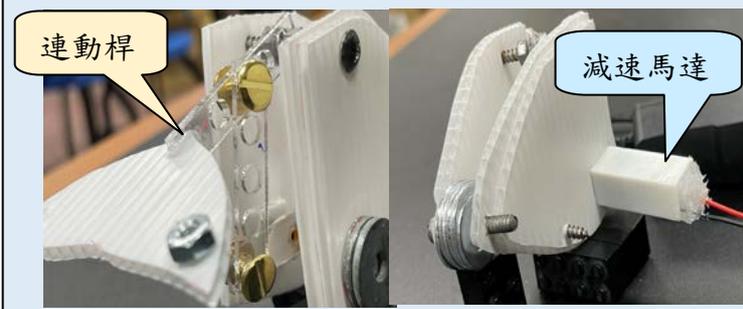
調速器刻度盤

▲圖 2-7: 為能精準調整尾鰭擺動速度, 將方形塑膠瓦楞板畫上 8 等分刻度後, 打洞使其能套在「馬達電子調速器」旋鈕上。



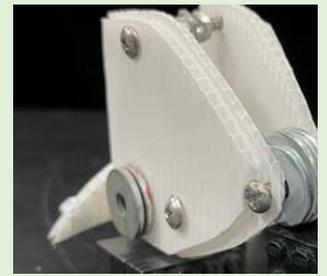
電子調速器

▲圖 2-6: 連接馬達與「電子調速器」, 調整尾鰭擺動速度。



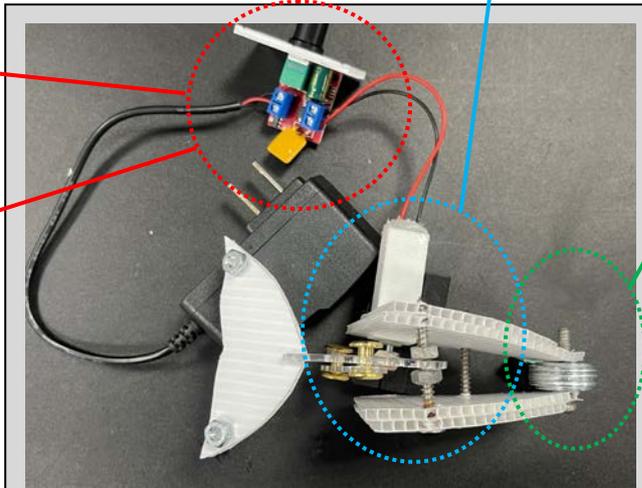
「連動桿」、「減速馬達」

▲圖 2-8: 用連動、桿減速馬達驅動尾鰭上下擺動。

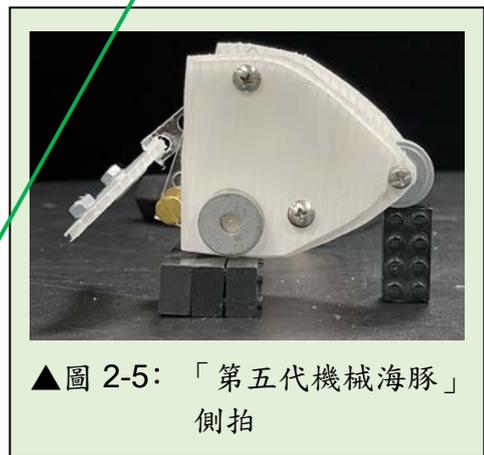


頭部配重

▲圖 2-9: 以墊片配重



▲圖 2-4: 俯拍「第五代機械海豚」

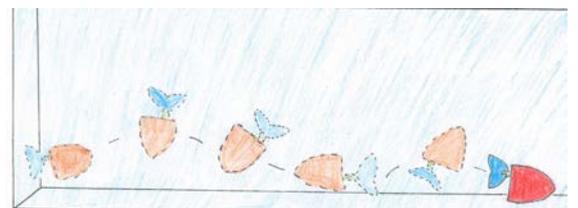


▲圖 2-5: 「第五代機械海豚」側拍

機械海豚在水中的運動行為由你來掌控!

調整【第五代機械海豚】水平尾鰭的擺動速度, 其在水箱中的游動行為各異其趣!當馬達調速在 $1/8 \sim 2/8$ 時, 機械海豚水平尾鰭的擺動頻率超緩慢, 只能停留在原處擺動尾鰭; 當馬達調速在 $3/8$ 時, 機械海豚水平尾鰭的擺動頻率較為緩慢, 會在靠近水箱底部向前游動, 但頭部會不時地碰撞箱底; 當馬達調速在 $4/8 \sim 5/8$ 時, 機械海豚水平尾鰭的擺動頻率較快速, 會在水箱中上層處平穩地向前游動; 當馬達調速在 $6/8$ 時, 機械海豚水平尾鰭的擺動頻率極快速, 會在水箱中邊向前游動, 邊翻跟斗, 超級有趣!

但接下來的實驗需精準地量測在不同水平尾鰭的變因下其推升比值、游動速度、附近水流變化, 是故必須將機械海豚固定於某處進行實驗!



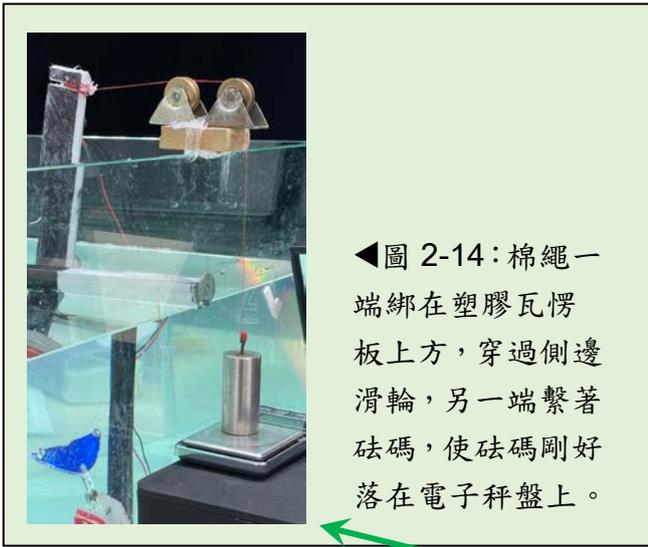
▲圖 2-10: 調速 $6/8$, 水平尾鰭擺動頻率極快速, 邊向前游動, 邊翻跟斗!

二、自行研發【水中推進力測量儀】、【水中升力測量儀】來量測機械海豚在水中游動時所產生的「推進力」、「升力」

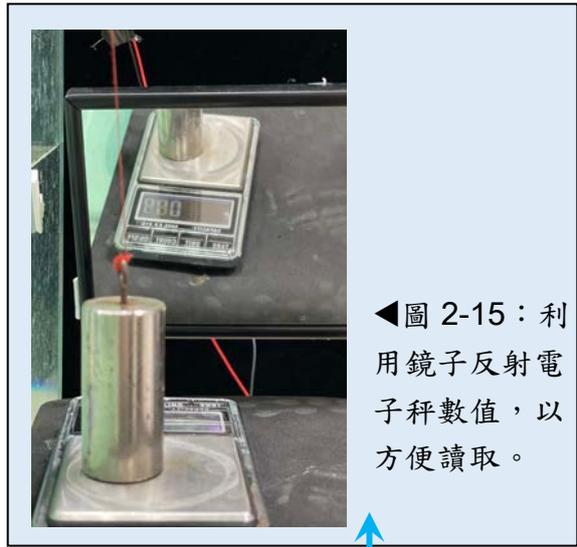
(一)設計理念

1. 本研究想了解, 在不同的操縱變因下「推進力」及「升力」的變化, 然而目前並沒有現成的儀器可直接用來進行測量, 因此必須自行研發!
2. 無法讓「機械海豚」邊向前游動, 邊測量推進力/升力, 因此我們讓「機械海豚」在定點擺動尾鰭, 設計適合的測量裝置來具體呈現水平尾鰭擺動時產生的「推進力」及「升力」。

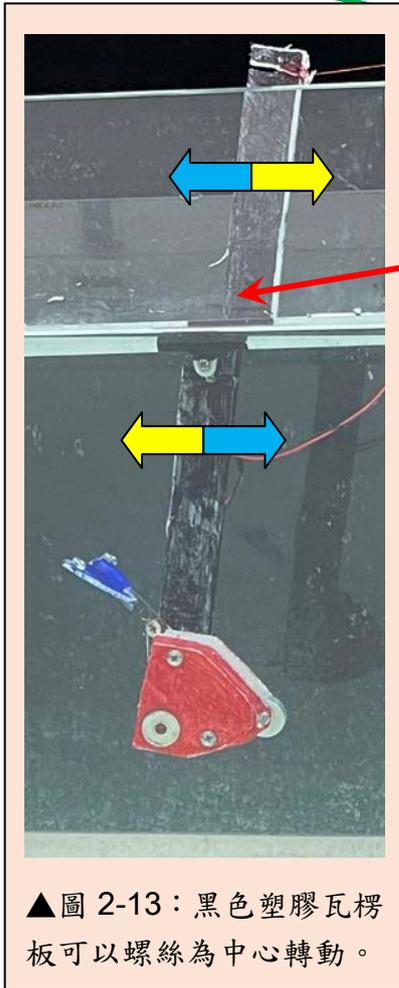
(二)【水中推進力測量儀】的設計(圖 2-11)、製作及操作方式(圖 2-12~2-15)



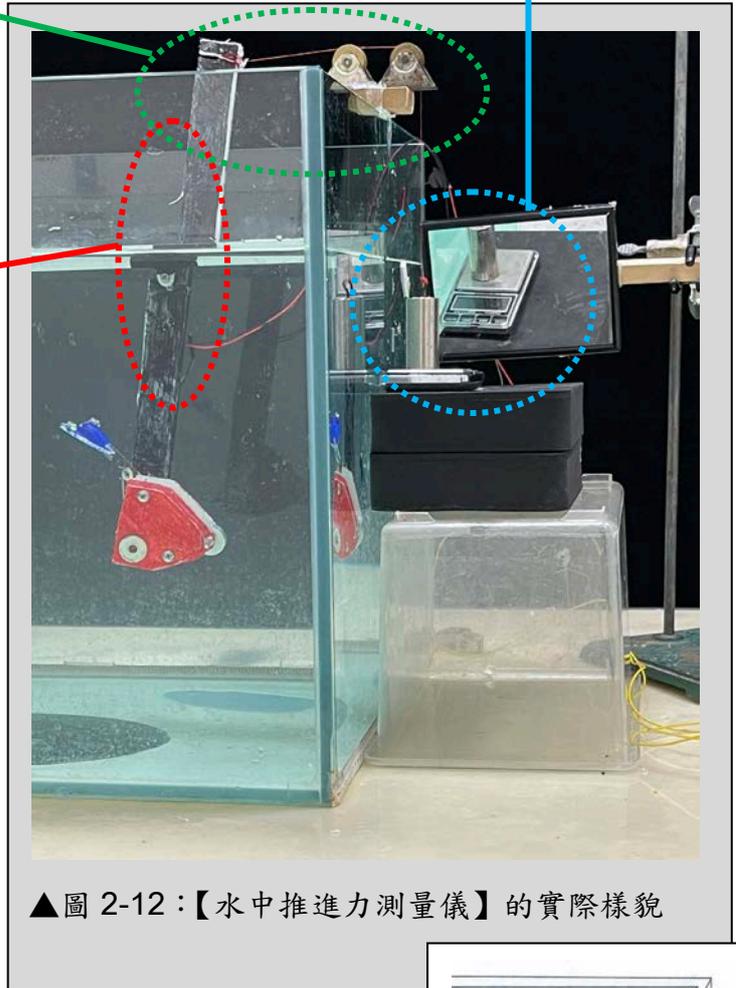
◀圖 2-14：棉繩一端綁在塑膠瓦楞板上方，穿過側邊滑輪，另一端繫著砝碼，使砝碼剛好落在電子秤盤上。



◀圖 2-15：利用鏡子反射電子秤數值，以方便讀取。

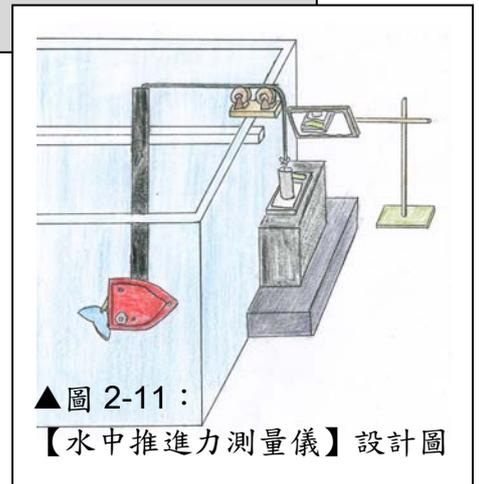


▲圖 2-13：黑色塑膠瓦楞板可以螺絲為中心轉動。



▲圖 2-12：【水中推進力測量儀】的實際樣貌

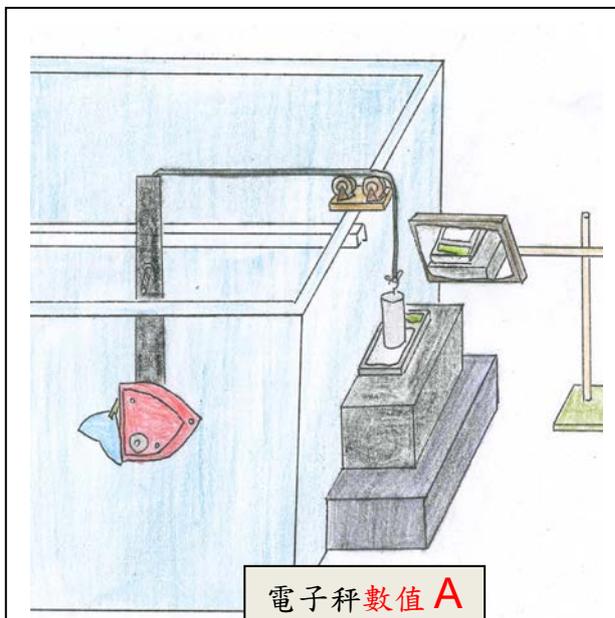
1. 為測量不同變因下尾鰭擺動時，「機械海豚」的推進力，利用窗簾桿、大小滑輪、電子秤、塑膠瓦楞板、線材來組裝裝置(圖 2-11~2-12)。
2. 小滑輪用膠布固定於窗簾軌道，使其無法移動，將窗簾軌道橫架於水面下 5cm 處。
3. 裁剪一段寬 3cm、長 36cm 的塑膠瓦楞板，在正中間 18cm 處鑽一個洞。用螺絲穿過窗簾軌道小滑輪的孔、塑膠瓦楞板上的洞，並用螺帽將其鬆鬆地鎖上，使長條狀塑膠瓦楞板可以螺絲為中心自由地轉動(圖 2-13)。



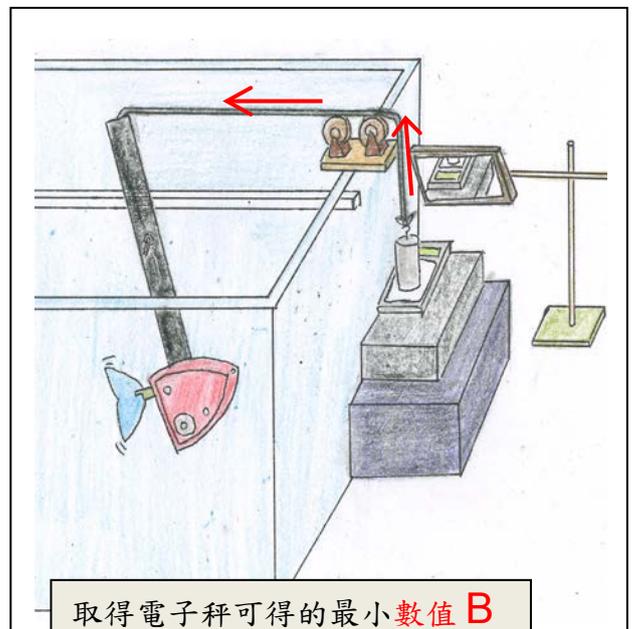
▲圖 2-11：【水中推進力測量儀】設計圖

4. 將「機械海豚」上色，並用泡棉膠將「機械海豚」固定於此長條狀塑膠瓦楞版的最末端。
5. 在木塊上黏上兩個滑輪，把黏有滑輪的木塊黏在水族缸側邊。
6. 取一條棉繩，一端綁在長條狀塑膠瓦楞板的上方，棉繩穿過水箱側邊滑輪，棉繩另一端繫著 200gw 砝碼，調整棉繩長度，使砝碼剛好落在電子秤盤上(圖 2-14)。
7. 架設鏡子，使能反射電子秤畫面於鏡中，以便錄影時能從鏡中讀取電子秤數值(圖 2-15)。
8. 機械海豚尾鰭還沒開始擺動時，取得電子秤上初始數值 A(圖 2-16)。
9. 開啟馬達，「機械海豚」便開始擺動尾鰭往前游時，塑膠瓦楞板下端跟「機械海豚」往同方向前進，因此中心點上方的塑膠瓦楞板會往「機械海豚」前進方向的另一邊傾斜，繫著砝碼的棉線被拉動，使電子秤上呈現的數字減少，將錄製的實驗影片透過 Tracker 軟體讀取電子秤所測得的最小數值 B(圖 2-17)。
10. 【數值 A】減去【數值 B】即是「機械海豚」尾鰭擺動時的推進力。

【數值 A】 - 【數值 B】 = 「機械海豚」尾鰭擺動時產生的推進力。

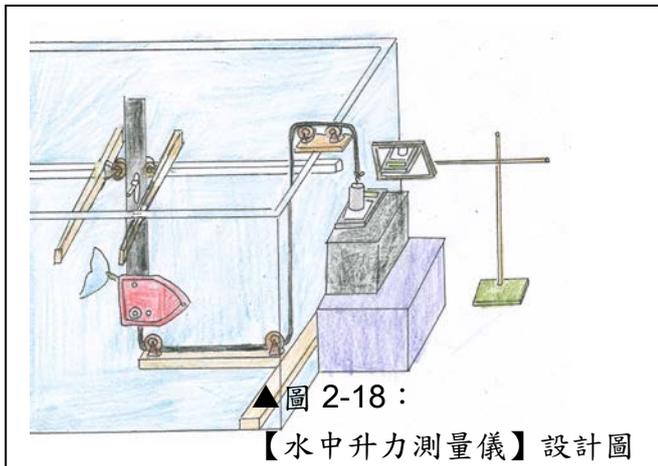


▲圖 2-16：機械海豚尾鰭還沒開始擺動時，取得電子秤上初始數值 A



▲圖 2-17：啟動馬達，機械海豚開始擺動尾鰭往前游，塑膠瓦楞板會往另一邊傾斜，因棉線被拉動(如紅色箭頭 → 方向)，使得電子秤上數值減少，取得電子秤可得的最小數值 B。

(二)【水中升力測量儀】的設計、製作及操作方式(圖 2-18~圖 2-21)



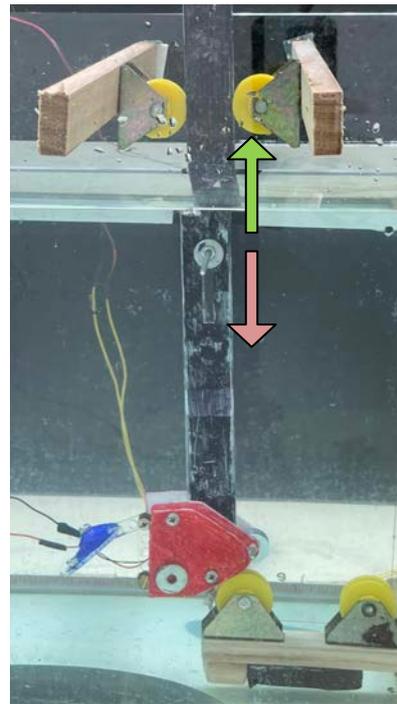
▲圖 2-18：
【水中升力測量儀】設計圖



◀圖 2-21：棉繩一端綁在機械海豚上，另一端穿過兩組木條上的滑輪，繫著砝碼，使砝碼剛好落在電子秤盤上。



▲圖 2-19：【水中升力測量儀】實際樣貌

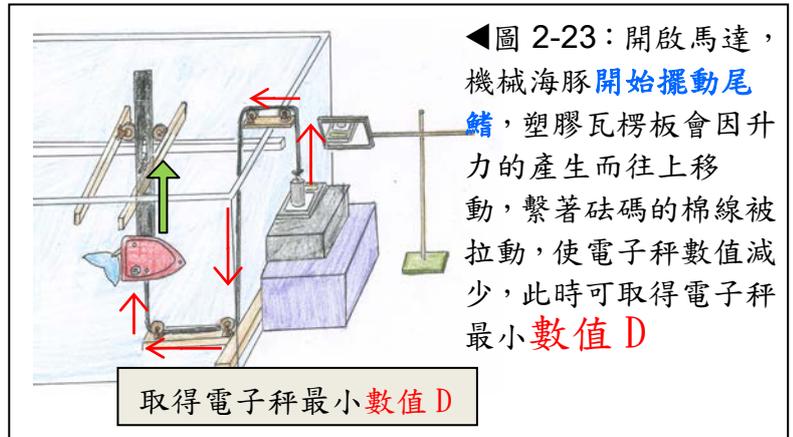
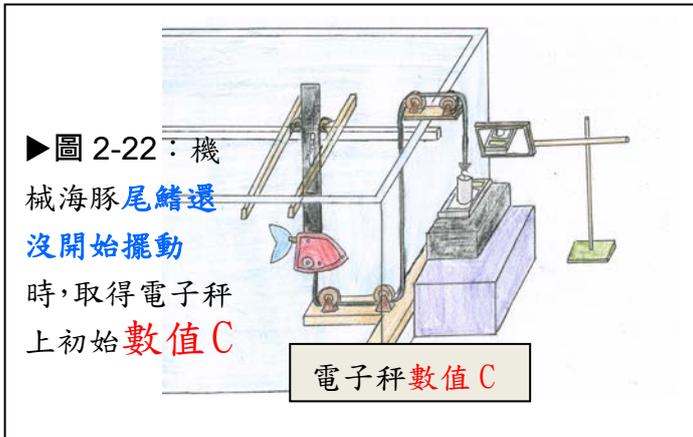


◀圖 2-20：塑膠瓦楞板上長條形的洞，可讓塑膠瓦楞板上下移動。

1. 為測量不同變因下的尾鰭擺動時「機械海豚」升力的數據，主要利用窗簾桿、大小滑輪、電子秤、塑膠瓦楞板、線材、木條來組裝裝置(圖 2-18~2-19)。
2. 用膠帶固定窗簾軌道上的小滑輪，使其無法移動，並將窗簾軌道橫架於水面下 5cm 處。
3. 裁剪一段寬 3cm、長 36cm 的塑膠瓦楞板，在中間處切割一長條形的洞。用螺絲穿過窗簾軌道小滑輪的孔、塑膠瓦楞板上長條形的洞，用墊片與螺帽鎖上，在塑膠瓦楞板兩側加裝 2 個滑輪，使其可以流暢地上下移動(圖 2-20)。
4. 在塑膠瓦楞板的兩側各卡上一根木條，讓「機械海豚」不能前後移動。
5. 使用泡棉膠將「機械海豚」固定於長條狀塑膠瓦楞板最末端。將「機械海豚」上色，以便利利用軟體判讀數據。
6. 在兩根木條上各黏兩個相距 12.9cm 滑輪，分別固定在水缸上方及下方。
7. 取一條棉繩，一端固定於機械海豚，另一端穿過兩組木條上的滑輪後繫著 200gw 砝碼，調整棉繩長度，使砝碼剛好落在電子秤的秤盤上(圖 2-21)。
8. 使用鐵架架設鏡子，反射電子秤畫面於鏡中，以便於錄影時能從鏡中讀取電子秤數值。
9. 機械海豚尾鰭還沒開始擺動時，取得電子秤上初始數值 C(圖 2-22)。

10. 開啟馬達，「機械海豚」便開始擺動尾鰭，連接「機械海豚」的塑膠瓦楞板會因產生升力而往上移動，繫著砝碼的棉線被拉動，使電子秤上呈現的數字減少，此時電子秤可得數值 D(圖 2-23)，【數值 C】減去【數值 D】即是「機械海豚」擺動尾鰭時的升力。

【數值 C】 - 【數值 D】 = 「機械海豚」尾鰭擺動時產生的升力。



三、實驗環境介紹

1. 本研究是採用自行研發之「第五代機械海豚」在長 90cm×寬 45cm×水深 34cm 玻璃水箱內進行推進力、升力... 的量測實驗。
2. 為便於使用電腦軟體讀取精準的數值，水箱側邊及下方黏貼布尺，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。

實驗三：「機械海豚」尾鰭的擺動速度如何影響其推進力？

(一) 實驗方法

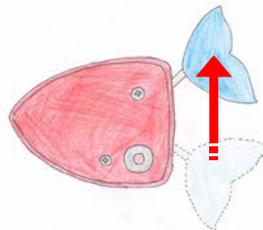
1. 使用減速馬達及電子調速器讓「機械海豚」在不同的 5 種速度刻度下運作，以此控制「機械海豚」尾鰭的擺動速度。
2. 利用自行研發【水中推進力測量儀】測量「機械海豚」在水中游動時所產生的「推進力」。
3. 每種馬達速度各實驗 5 次，再將攝影機所錄製的電子檔用 Tracker 軟體慢速播放影片，計數尾鰭擺動頻率(圖 3-1)，及判讀電子秤數值以計算出推進力。

◎【尾鰭擺動頻率】的計算方式

Step 1：透過影片判讀尾鰭的上擺及下擺時間後，
「上擺時間」+「下擺時間」=尾鰭的擺動週期。

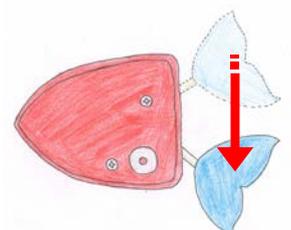
▼上擺時間：

尾鰭由「最下端」上擺至「最上端」的所需時間



▼下擺時間：

尾鰭由「最上端」下擺至「最下端」的所需時間



Step 2：

尾鰭擺動頻率： $\frac{1}{\text{擺動週期}}$

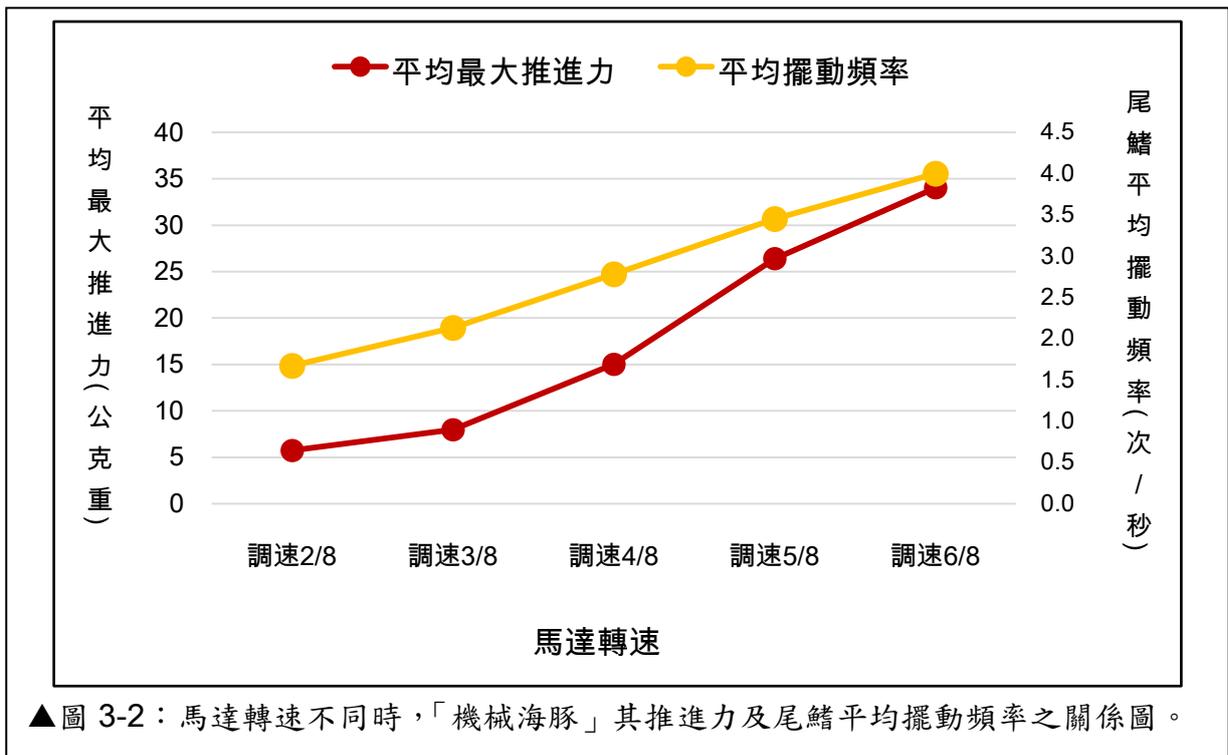
▲圖 3-1：尾鰭擺動頻率的計算方式

(二)實驗結果

表 3-1：馬達轉速不同時，「機械海豚」其最大推進力及尾鰭擺動平均週期一覽表

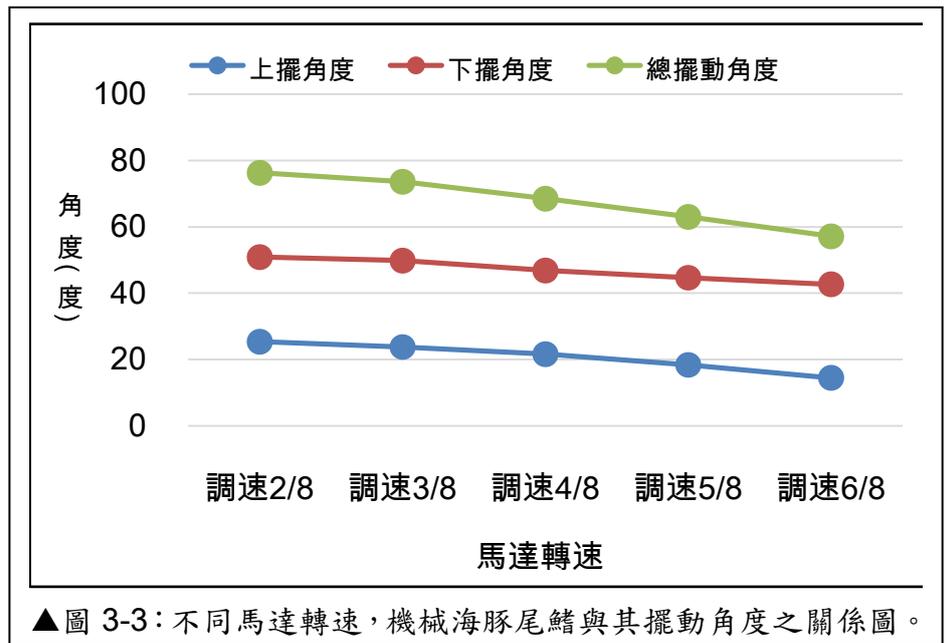
馬達轉速	實驗次數	電子秤數值(gw)		最大推進力(gw) (A-B)	尾鰭			
		起始值 (A)	最小值 (B)		上擺時間(s) (T ₁)	下擺時間(s) (T ₂)	擺動週期(s) (T ₁ +T ₂)	擺動頻率 (次/秒)
1/8	尾鰭有擺動，但數值無變化。							
2/8	1	199.43	193.40	6.03	0.30	0.30	0.60	1.67
	2	197.91	192.14	5.77	0.30	0.30	0.60	1.67
	3	196.73	191.49	5.24	0.30	0.30	0.60	1.67
	4	197.01	191.60	5.41	0.30	0.30	0.60	1.67
	5	198.75	192.57	6.18	0.30	0.30	0.60	1.67
	平均	197.97	192.24	5.73	0.30	0.30	0.60	1.67
3/8	1	199.34	192.05	7.29	0.23	0.23	0.47	2.13
	2	198.35	190.52	7.83	0.23	0.23	0.47	2.13
	3	198.76	190.40	8.36	0.23	0.23	0.47	2.13
	4	198.93	191.32	7.61	0.23	0.23	0.47	2.13
	5	198.48	189.75	8.73	0.23	0.23	0.47	2.13
	平均	198.77	190.81	7.96	0.23	0.23	0.47	2.13
4/8	1	197.43	181.83	15.60	0.17	0.17	0.33	3.03
	2	199.06	184.02	15.04	0.20	0.17	0.37	2.70
	3	196.59	181.85	14.74	0.20	0.17	0.37	2.70
	4	198.96	183.48	15.48	0.20	0.17	0.37	2.70
	5	198.26	184.10	14.16	0.20	0.17	0.37	2.70
	平均	198.06	183.06	15.00	0.19	0.17	0.36	2.78
5/8	1	197.83	171.89	25.95	0.17	0.13	0.30	3.33
	2	199.23	173.62	25.61	0.17	0.13	0.30	3.33
	3	198.14	170.69	27.45	0.13	0.13	0.27	3.70
	4	197.69	170.93	26.76	0.13	0.13	0.27	3.70
	5	196.51	170.34	26.17	0.17	0.13	0.30	3.33
	平均	197.88	171.49	26.39	0.15	0.13	0.29	3.45
6/8	1	196.76	162.77	33.99	0.13	0.10	0.23	4.35
	2	198.76	164.42	34.34	0.13	0.10	0.23	4.35
	3	198.30	163.65	34.65	0.13	0.10	0.23	4.35
	4	197.29	163.97	33.32	0.13	0.13	0.27	3.70
	5	199.33	165.54	33.79	0.13	0.13	0.27	3.70
	平均	198.09	164.07	34.02	0.13	0.11	0.25	4.00
7/8	尾鰭快速擺動 1、2 次後，馬達就壞掉了！							

(三)實驗發現



1. 將表 3-1 繪成圖 3-2，發現：

- (1) 當減速馬達轉速在 1/8 刻度時，「機械海豚」尾鰭有緩慢擺動，但電子秤上的數值沒有變化。
- (2) 當馬達轉速在 7/8 刻度時，「機械海豚」尾鰭極快速擺動 1、2 次後，馬達就停止轉動，壞掉了！
- (3) 承(1)、(2)之發現，本實驗及之後實驗，為減少馬達的耗損，馬達調速範圍介於 2/8~6/8 刻度。



- (4) 當「機械海豚」的尾鰭往下擺的時候，與機械海豚相黏的塑膠瓦楞板，使用螺絲固定住的下半部會往後傾斜，使得電子秤數值稍微增加，這說明當「機械海豚」尾鰭由上往下擺動時，幾乎沒有推進力的產生。
- (5) 當「機械海豚」的尾鰭往上擺的時候，與機械海豚相黏的塑膠瓦楞板，使用螺絲固定住的塑膠瓦楞板下半部會向前，使得電子秤數值減少，這說明當「機械海豚」尾鰭由下往上擺動時，會產生推進力。
- (6) 「機械海豚」尾鰭擺動頻率越大，其在水中的推進力顯著變大。當馬達調整至 2/8~6/8 刻度間時，其推進力介於 5.73~34.02gw。

2. 「機械海豚」尾鰭擺動頻率越大，其擺動角度越小。當馬達調整至 2/8~6/8 刻度間時，其尾鰭擺動角度從 76.3 度降至 57.1 度(圖 3-3)。

實驗四：「機械海豚」尾鰭的擺動速度如何影響其升力？

(一) 實驗方法

1. 使用減速馬達及電子調速器讓「機械海豚」在 2/8~6/8 刻度速度刻度下運作，以此控制「機械海豚」尾鰭的擺動速度。
2. 利用自行研發的【水中升力測量儀】測量「機械海豚」在水中游動時所產生的「升力」。
3. 每種速度刻度各實驗 5 次，再將攝影機所錄製的電子檔用 Tracker 軟體慢速播放影片判讀電子秤數值以計算出其「升力值」。
4. 取實驗三所測得之「推進力值」除以「升力值」，求得「推升比值」，

(二) 實驗結果

表 4-1：馬達轉速不同時，「機械海豚」其最大升力值一覽表

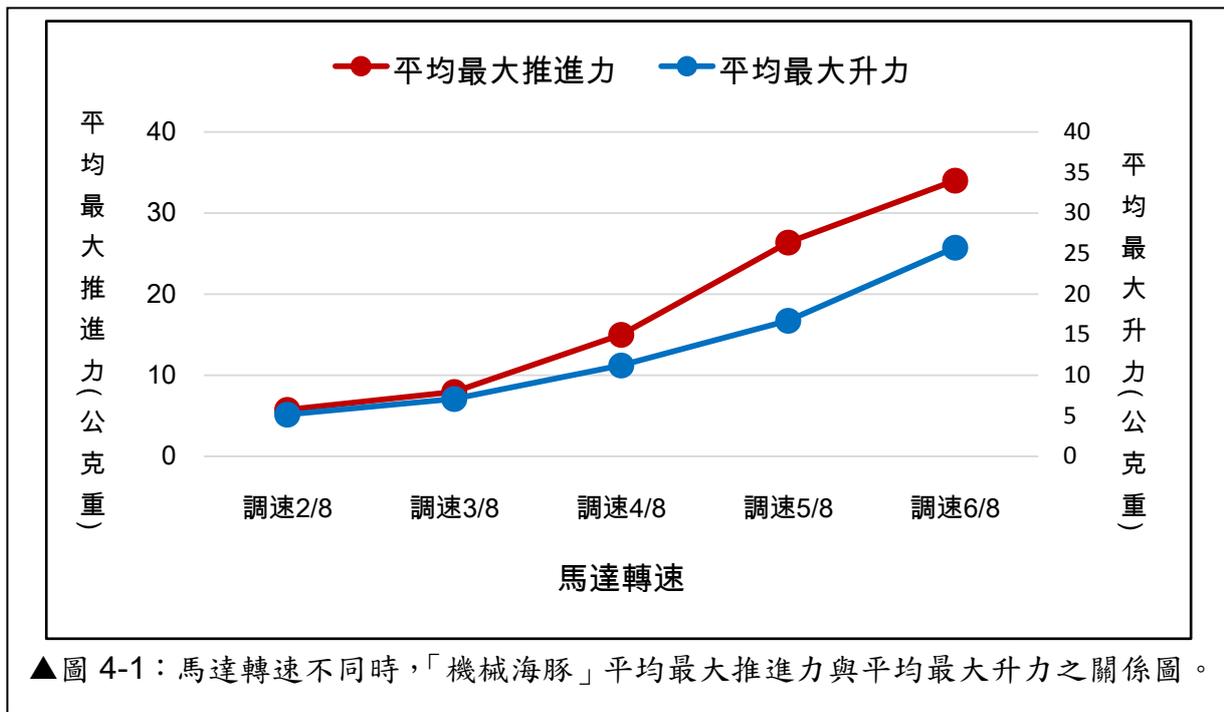
馬達轉速	實驗次數	電子秤數值(gw)		最大升力(gw) (C-D)	馬達轉速	實驗次數	電子秤數值(gw)		最大升力(gw) (C-D)
		起始值 (C)	最小值 (D)				起始值 (C)	最小值 (D)	
1/8	尾鰭有擺動，但數值無變化。				4/8	1	198.27	187.01	11.26
	2	199.54	188.07	11.47					
	3	199.10	188.33	10.77					
	4	196.76	185.55	11.21					
	5	198.29	186.95	11.34					
	平均	198.39	187.18	11.21					
2/8	1	197.86	192.33	5.53	5/8	1	197.29	180.79	16.50
	2	196.90	192.32	4.58		2	198.30	182.34	15.96
	3	198.73	193.75	4.98		3	198.92	182.83	16.09
	4	197.78	192.86	4.92		4	196.16	178.41	17.75
	5	198.74	193.06	5.68		5	199.65	182.31	17.34
	平均	198.00	192.86	5.14		平均	198.06	181.34	16.73
3/8	1	198.14	190.35	7.79	6/8	1	196.75	171.67	25.08
	2	196.31	189.25	7.06		2	197.78	171.44	26.34
	3	199.22	192.10	7.12		3	198.08	171.87	26.21
	4	196.24	189.33	6.91		4	199.50	174.09	25.41
	5	197.42	190.90	6.52		5	198.20	172.47	25.73
	平均	197.47	190.39	7.08		平均	198.06	172.31	25.75

表 4-2：馬達轉速不同時，「機械海豚」最大推進力與最大升力之比值一覽表

馬達調速	最大推進力(gw)	平均最大升力(gw)	推升比值
2/8	5.73	5.14	1.11
3/8	7.96	7.08	1.12
4/8	15.00	11.21	1.34
5/8	26.39	16.73	1.58
6/8	34.02	25.75	1.32

(三) 實驗發現

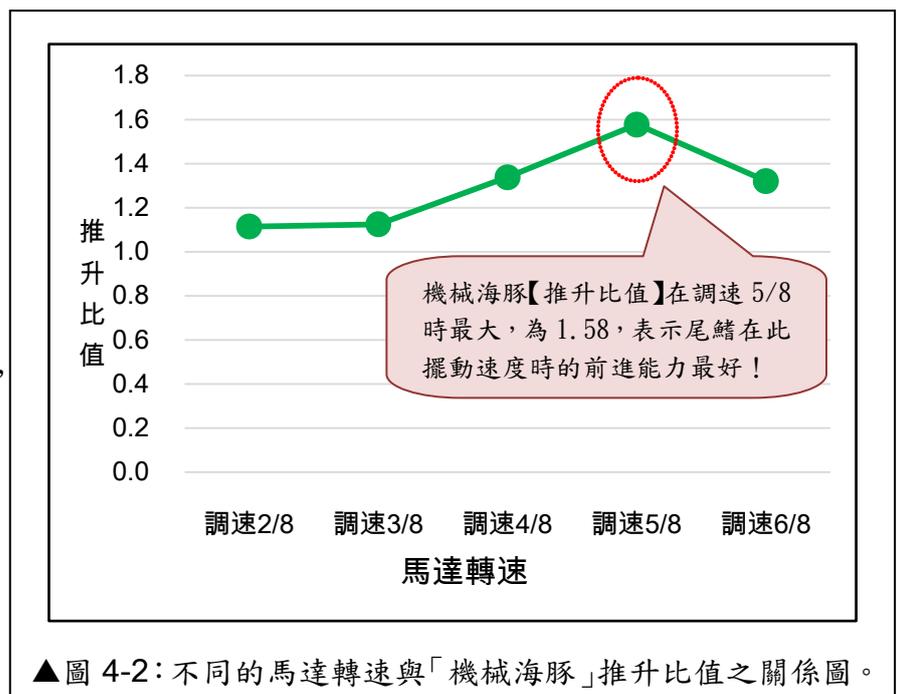
1. 將表 3-1、表 4-1 繪製成圖 4-1 後，發現：



- (1) 「機械海豚」尾鰭擺動頻率越大，其在水中的升力也隨之越大。當馬達調整至 2/8~6/8 刻度間時，其升力介於 5.14~25.75gw。
- (2) 馬達轉速介於 2/8、3/8、4/8、5/8、6/8 刻度時，每增加一個轉速刻度其升力分別增加 1.94gw、4.13gw、5.52gw、9.02gw，說明「機械海豚」尾鰭擺動越快，其升力會大幅度的增長。
- (3) 使用軟體反覆觀看慢速播放的實驗影片，可觀察到當「機械海豚」尾鰭往下擺動時，長條形塑膠瓦楞板會被抬升，電子秤的數值會減少；尾鰭往上擺動時，長條形塑膠瓦楞板無明顯抬升，電子秤的數值幾乎沒有改變。這說明當「機械海豚」尾鰭往下擺動時，會產生升力；當「機械海豚」尾鰭往上擺動時，幾乎無升力產生。

2. 將表 4-2 繪製成圖 4-2 後，發現：

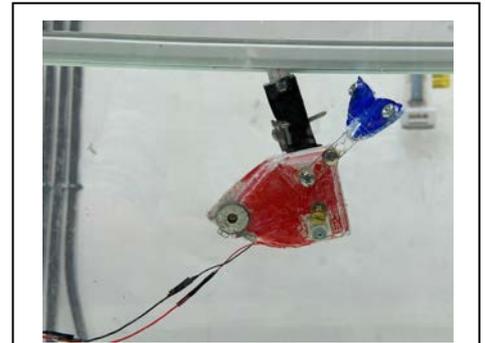
- (1) 機械海豚的【推升比值】計算公式是「推進力」除以「升力」。機械海豚的【推升比值】越大，就代表著其每一單位升力，所產生的推進力越多，表示機械海豚的前進能力越佳！
- (2) 本實驗馬達轉速介於 2/8~5/8 時，其中當馬達轉速為 5/8 時，機械海豚的【推升比值】最大，表示機械海豚尾鰭在此擺動速度時的前進能力最好！
- (3) 當馬達轉速介於 2/8~5/8 時，馬達轉速越快，其「推升比值」越大。但當馬達轉速介於 5/8~6/8 時，其「推升比值」卻變小。這說明海豚尾鰭擺動得越快，其前進能力不見得會越好喔！



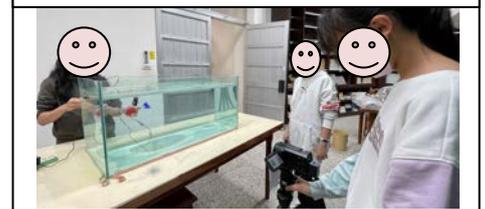
實驗五：「機械海豚」尾鰭的擺動如何影響其向前的游動速度？

(一)實驗方法

1. 為使機械海豚在水中以直線游動，以期能得知「機械海豚」尾鰭擺動速度與其游動速度的關係，於是將「機械海豚」固定於長條塑膠瓦楞板（厚 0.9cm）下端，使用螺絲及螺帽將此長條塑膠瓦楞板上端和窗簾軌道小滑輪鎖在一起(圖 5-1)，並將窗簾軌道架設在水面下 5cm 處。
2. 在窗簾軌道上的「起點」及「終點」做記號，「起點」和「終點」相距 75cm。
3. 使用減速馬達及電子調速器讓機械海豚的尾鰭依序在 2/8~6/8 刻度下擺動，使機械海豚「從「起點」游動至「終點」(圖 5-2)。
4. 每種馬達刻度各實驗 5 次，將攝影機所錄製的電子檔用 Tracker 軟體慢速播放判讀機械海豚從「起點」及「終點」所需時間。以【距離/時間=速度】公式，求得機械海豚的游動速度。



▲圖 5-1：將「機械海豚」與窗簾軌道上的小滑輪形成一體。



▲圖 5-2：實驗布置

(二)實驗結果

表 5-1：當距離固定為 75cm 時，「機械海豚」不同馬達轉速與其所需時間、移動速度一覽表

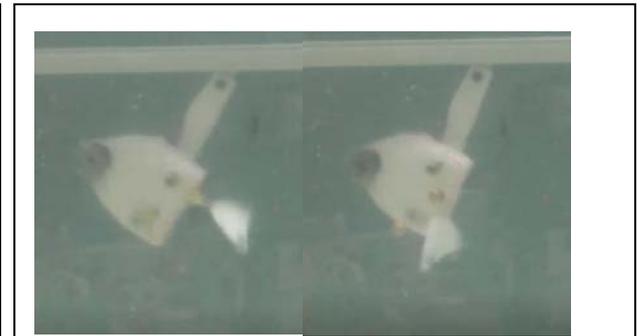
馬達轉速	實驗次數	所需時間 (s)	平均移動速度 (cm/s)	馬達轉速	實驗次數	所需時間 (s)	平均移動速度 (cm/s)
2/8	1	18.07	4.15	5/8	1	5.37	13.97
	2	19.57	3.83		2	4.90	15.31
	3	18.33	4.09		3	5.07	14.79
	4	18.73	4.00		4	5.37	13.97
	5	18.43	4.07		5	5.03	14.91
	平均	18.63	4.03		平均	5.15	14.59
3/8	1	11.87	6.32	6/8	1	5.47	13.71
	2	11.17	6.71		2	6.57	11.42
	3	12.33	6.08		3	6.23	12.04
	4	11.33	6.62		4	5.70	13.16
	5	11.30	6.64		5	5.80	12.93
	平均	11.60	6.47		平均	5.95	12.65
4/8	1	7.70	9.74	7/8	1	5.15	14.57
	2	7.33	10.23		2	5.25	14.29
	3	7.57	9.91		3	5.35	14.02
	4	7.06	10.62		4	5.45	13.76
	5	7.57	9.91		5	5.55	13.51
	平均	7.45	10.08		平均	5.35	13.91

(三)實驗發現

1. 反覆慢速播放實驗影片讀取數值時，觀察到：當馬達轉速在 2/8~5/8 時，機械海豚上下擺動尾鰭，頭部會跟著上下擺動(圖 5-3);而馬達轉速 6/8 刻度時，機械海豚不僅上下快速地擺動尾鰭，頭部都維持朝上角度(圖 5-4)，似乎是在水中受到很大的升力影響所致。



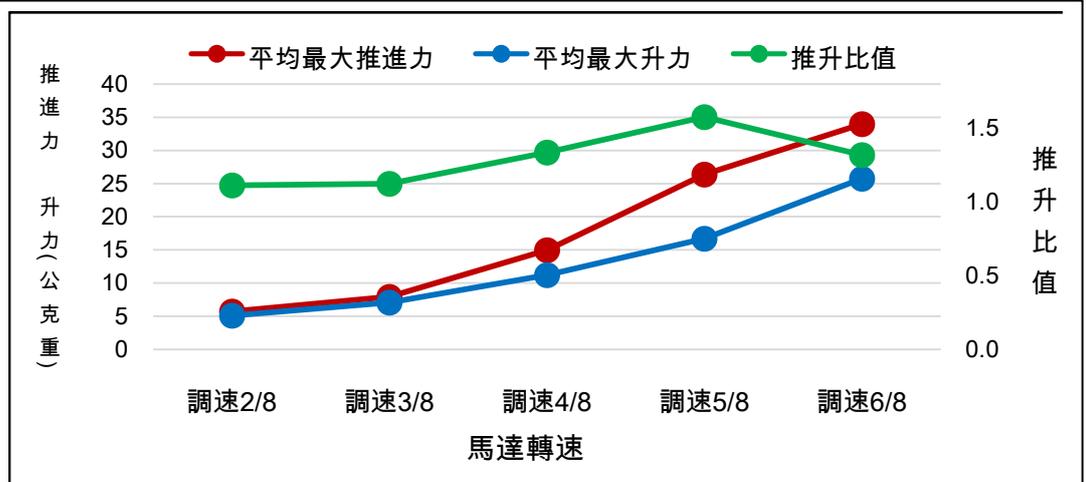
▲圖 5-3: 馬達轉速 2/8~5/8 刻度時，機械海豚上下擺動尾鰭，頭部會跟著上下擺動。



▲圖 5-4: 馬達轉速 6/8 刻度時，機械海豚上下擺動尾鰭，頭部都維持朝上角度。

2. 承 1，此游動現象可與實驗三、四「調整馬達轉速為 2/8~6/8 刻度，量測機械海豚在水中擺動尾鰭時所產生的推進力、升力、推升比值」實驗結果(圖 5-5)相呼應：當

馬達轉速在 6/8 刻度時，尾鰭極快速地擺動下，其「升力的上升幅度」比「推進力的上升幅度」來得大，導致「推升比值」變小。使得在實驗中所看見的現象即機械海豚在前進過程中，頭部一直維持上揚狀態！



▲圖 5-5: 馬達轉速與機械海豚所受到的推進力、升力、推升比值之關係圖。

3. 將表 5-1 繪製成圖 5-6 發現：

(1) 當馬達轉速為 5/8 刻度時，機械海豚平均游動速度最快！



▲圖 5-6: 「機械海豚」不同馬達轉速與其移動速度之關係圖。

- (2) 當馬達轉速介於 2/8~5/8，馬達

轉速越快，機械海豚平均游動速度越大。但當馬達轉速介於 5/8~6/8，其平均游動速度卻變小。這說明海豚尾鰭擺動得越快，不見得會游得快喔！

- (3) 此結果與實驗三、四利用自行研發「水中推進力測量儀」及「水中升力測量儀」所得的【當馬達轉速為 5/8 時的「推升比值」最大，表示此時機械海豚前進能力最佳】之發現不謀而合！

3. 在實驗三~五中，得知當馬達轉速為 5/8 刻度時，機械海豚在水中前進時的「推升比值」最大，游動速度最快，因此之後的實驗六、七都將馬達轉速定於 5/8 刻度進行實驗。

實驗六：「機械海豚」的尾鰭面積如何影響其推進力及升力？

(一)實驗方法

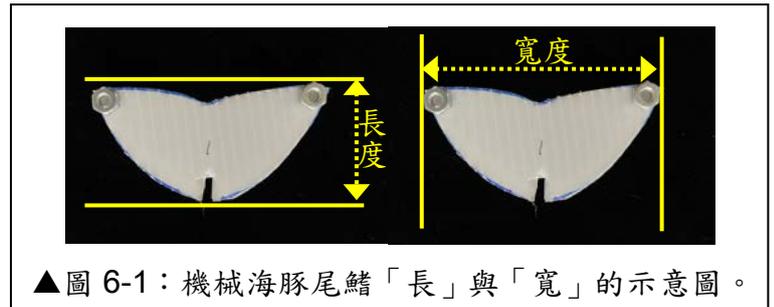
1. 用 Inkscape 軟體，將「機械海豚」尾鰭長與寬(圖 6-1)依序放大成 0.75 倍、1 倍、1.25 倍、1.5 倍、1.75 倍，輸出上述 5 種比例的尾鰭紙樣板(圖 6-2)，再依板模進行塑膠瓦楞板的裁剪(圖 6-3)。

2. 使用 Image-J 軟體計算 5 種比例的尾鰭面積。

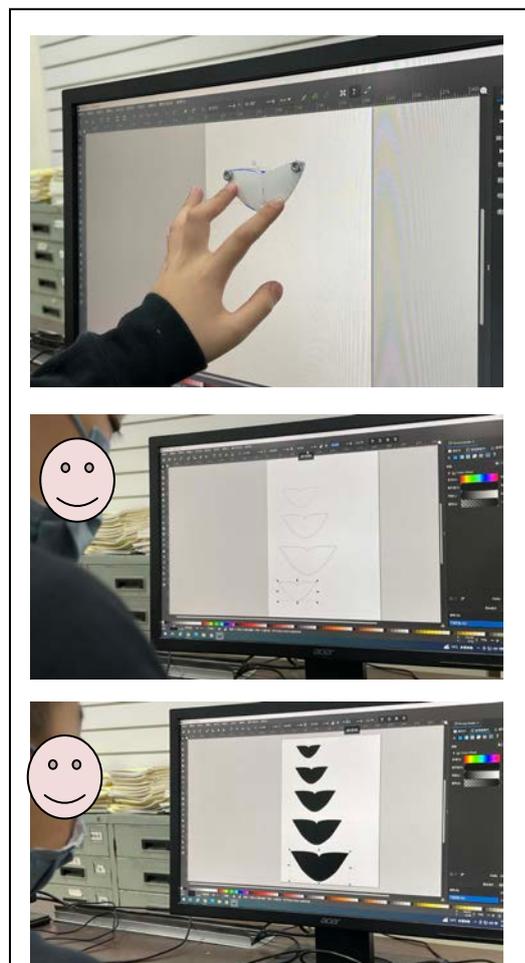
3. 將馬達轉速調整至 5/8 刻度，使用自行研發的「水中推進力測量儀」及「水中升力測量儀」分別量測這 5 種比例的尾鰭在水中前進時之推進力及升力。

4. 每種比例的尾鰭各在水中實驗 5 次，再將

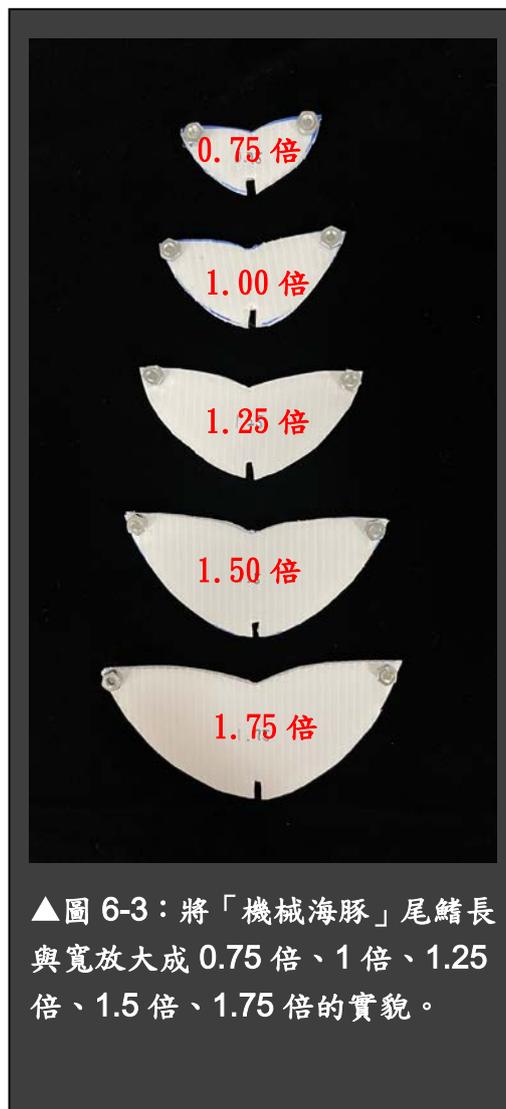
攝影機所錄製的電子檔用 Tracker 軟體慢速播放影片判讀其擺動頻率、推進力及升力數值。以取得的推進力及升力平均值計算出「推升比值」。



▲圖 6-1：機械海豚尾鰭「長」與「寬」的示意圖。



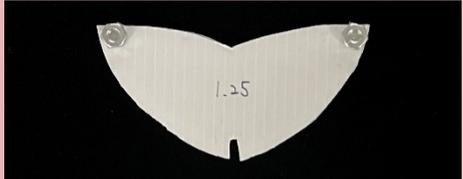
▲圖 6-2：使用 Inkscape 軟體，將「機械海豚」尾鰭的長與寬依序放大後輸出紙樣模板。



▲圖 6-3：將「機械海豚」尾鰭長與寬放大成 0.75 倍、1 倍、1.25 倍、1.5 倍、1.75 倍的實貌。

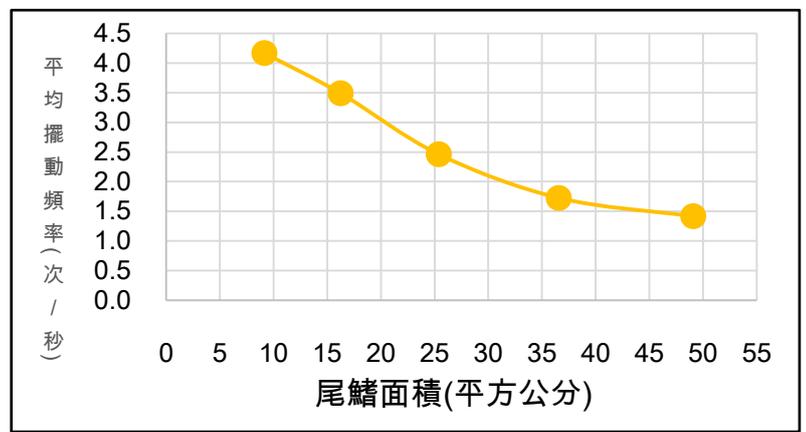
(二)實驗結果

表 6-1: 不同尾鰭面積，其擺動週期、推進力、升力、推升比一覽表

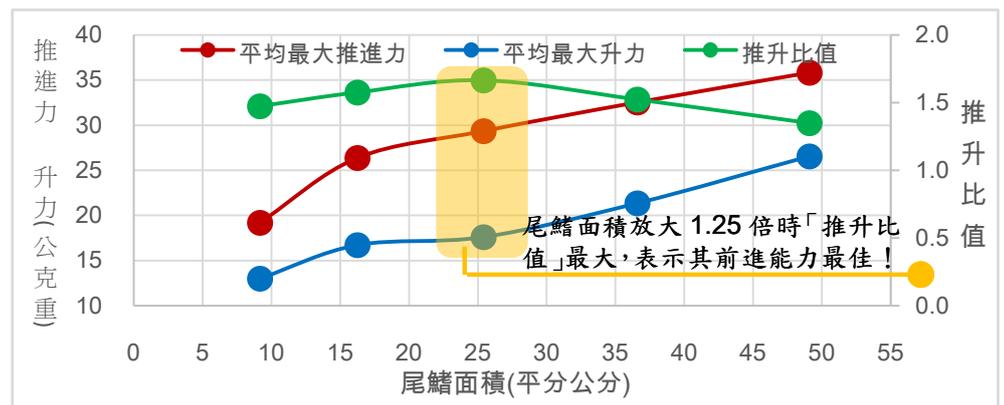
長與寬 放大 比例	照片	尾鰭 面積 (cm ²)	實驗 次數	擺動 週期 (s)	擺動 頻率 (次/秒)	推進力 (gw)	升力 (gw)	推 升 比
0.75		9.15	1	0.23	4.35	20.11	12.77	1.48
			2	0.23	4.35	18.86	13.28	
			3	0.27	3.70	19.28	12.71	
			4	0.23	4.35	18.54	13.40	
			5	0.23	4.35	19.31	12.99	
			平均	0.24	4.17	19.22	13.03	
1		16.26	1	0.30	3.33	25.95	16.50	1.58
			2	0.30	3.33	25.61	15.96	
			3	0.27	3.70	27.45	16.09	
			4	0.27	3.70	26.76	17.75	
			5	0.30	3.33	26.17	17.34	
			平均	0.29	3.45	26.39	16.73	
1.25		25.40	1	0.40	2.50	28.33	17.06	1.67
			2	0.40	2.50	29.42	18.07	
			3	0.40	2.50	30.43	17.97	
			4	0.40	2.50	29.04	17.50	
			5	0.43	2.33	29.61	17.54	
			平均	0.41	2.44	29.37	17.63	
1.5		36.58	1	0.57	1.75	32.06	21.83	1.52
			2	0.60	1.67	33.04	21.61	
			3	0.57	1.75	31.71	21.25	
			4	0.60	1.67	33.32	20.66	
			5	0.57	1.75	32.64	21.44	
			平均	0.58	1.72	32.55	21.36	
1.75		49.09	1	0.70	1.43	35.37	25.76	1.35
			2	0.73	1.37	36.05	26.15	
			3	0.70	1.43	36.24	27.33	
			4	0.70	1.43	34.99	26.66	
			5	0.70	1.43	36.58	26.97	
			平均	0.71	1.41	35.85	26.57	

(三)實驗發現

1. 將表 6-1 繪製成圖 6-4，發現**當尾鰭面積越大時，其在水中的擺動頻率越慢**。當尾鰭面積介於 9.15~40.09cm²，擺動頻率介於 4.17~1.41 次/秒。
2. 將表 6-1 繪成圖 6-5，發現：**尾鰭面積越大，機械海豚在水中擺動尾鰭所產生的推進力及升力也隨之變大**。
3. 尾鰭面積放大 1.25 倍 (25.40cm²) 時的「推升比值」最大，為 1.67，因此之後實驗都以該面積的尾鰭進行。



▲圖 6-4: 不同尾鰭面積與其擺動頻率之關係圖



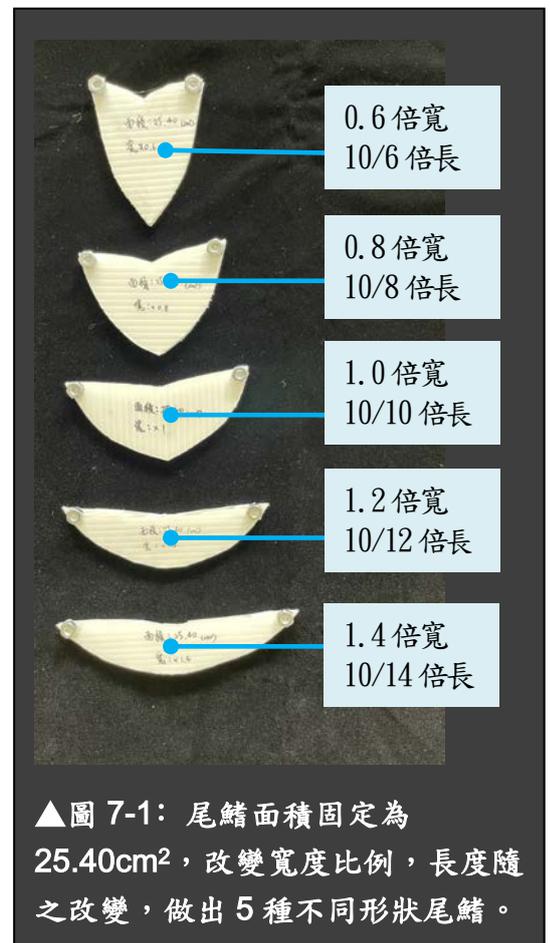
▲圖 6-5: 不同尾鰭面積與其推進力、升力、推升比之關係圖

實驗七：「機械海豚」尾鰭面積固定下，形狀如何影響其推進力及升力？

(一)實驗方法

1. 用 Inkscape 軟體，在「機械海豚」尾鰭面積固定為 25.40cm² 下，分別改變寬度比例為 0.6 倍、0.8 倍、1.0 倍、1.2 倍、1.4 倍，而長度隨之變為 10/6 倍、10/8 倍、10/10 倍、10/12 倍、10/14 倍，製作出 5 種不同形狀的尾鰭(圖 7-1)。
2. 將馬達轉速調整至 5/8 刻度，使用自行研發的「水中推進力測量儀」及「水中升力測量儀」分別量測這 5 種不同形狀的尾鰭在水中前進時之推進力及升力。
4. 每種形狀的尾鰭各在水中實驗 5 次，再將攝影機所錄製的電子檔用 Tracker 軟體慢速播放影片判讀其擺動頻率、推進力及升力數值。以取得的推進力及升力平均值計算出「推升比值」。

(二)實驗結果



▲圖 7-1: 尾鰭面積固定為 25.40cm²，改變寬度比例，長度隨之改變，做出 5 種不同形狀尾鰭。

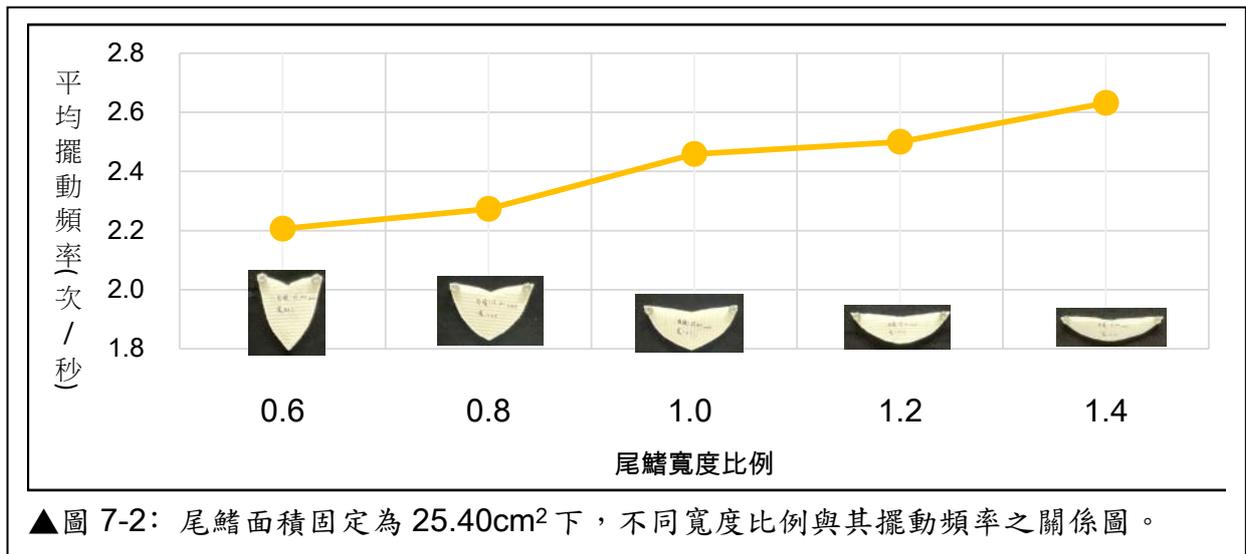
表 7-1: 尾鰭面積固定 25.40cm²，長寬比例不同，其擺動週期、推進力、升力、推升比一覽表

尾鰭比例		圖片	實驗次數	擺動週期 (s)	擺動頻率 (次/秒)	推進力 (gw)	升力 (gw)	推升比
寬	長							
6/10	10/6		1	0.47	2.13	43.31	26.13	1.66
			2	0.43	2.33	45.83	25.79	
			3	0.43	2.33	44.45	26.76	
			4	0.47	2.13	44.26	27.54	
			5	0.47	2.13	43.83	27.08	
			平均	0.45	2.22	44.34	26.66	
8/10	10/8		1	0.43	2.33	36.47	22.79	1.67
			2	0.43	2.33	36.12	21.37	
			3	0.43	2.33	35.64	22.07	
			4	0.43	2.33	37.16	21.16	
			5	0.47	2.13	36.88	21.96	
			平均	0.44	2.27	36.45	21.87	
1	1		1	0.40	2.50	28.33	17.06	1.67
			2	0.40	2.50	29.42	18.07	
			3	0.40	2.50	30.43	17.97	
			4	0.40	2.50	29.04	17.50	
			5	0.43	2.33	29.61	17.54	
			平均	0.41	2.44	29.37	17.63	
12/10	10/12		1	0.40	2.50	29.34	17.89	1.66
			2	0.40	2.50	28.71	16.96	
			3	0.40	2.50	27.53	17.43	
			4	0.40	2.50	28.06	16.90	
			5	0.40	2.50	27.99	16.12	
			平均	0.40	2.50	28.33	17.06	
14/10	10/14		1	0.37	2.70	26.47	16.40	1.66
			2	0.37	2.70	27.64	15.56	
			3	0.37	2.70	25.88	16.25	
			4	0.40	2.50	26.79	16.69	
			5	0.40	2.50	27.03	15.54	
			平均	0.38	2.63	26.76	16.09	

(三) 實驗發現

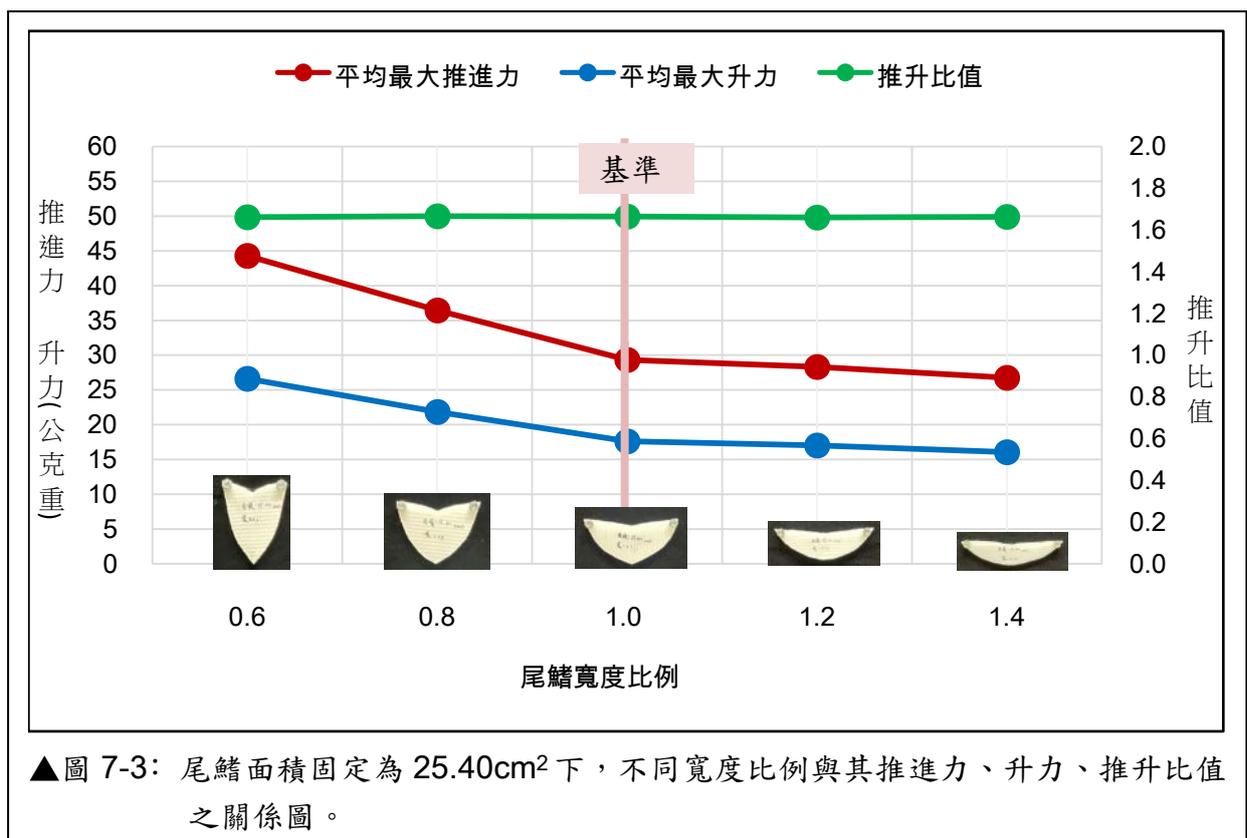
1. 尾鰭面積固定，依序改變尾鰭的寬度為 0.6 倍、0.8 倍、1.0 倍、1.2 倍、1.4 倍時，其尾鰭形狀會由「銳角三角形」的型態變為「鈍角三角形」的型態，再變為趨近「新月形」的型態。

2. 將表 7-1 繪製成圖 7-2，發現：



- (1) 尾鰭面積固定，改變尾鰭寬與長度的比例，擺動頻率略微增加。尾鰭面積固定為 25.40cm²，改變尾鰭的長度為 0.6~1.4 倍，但其擺動頻率分別為介於 2.22~2.63 次/秒。
- (2) 承(1)，水平尾鰭形狀越接近「銳角三角形」，擺動頻率越小；水平尾鰭形狀越接近「新月形」，擺動頻率越大。

3. 將表 7-1 繪製成圖 7-3，發現：



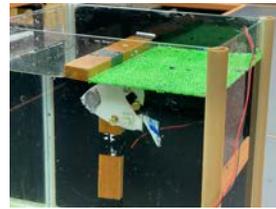
- (1) 尾鰭面積固定為 25.40cm²，以 1.0 倍為基準，尾鰭寬度減為 0.6 倍、0.8 倍時，在水中擺動尾鰭時所測得的推進力及升力都顯著增加；尾鰭寬度增為 1.2 倍、1.4 倍時，水中擺動尾鰭時所測得的推進力及升力略減。
- (2) 承(1)，不論尾鰭寬度如何改變，以所測得的推進力及升力計算「推升比值」，發現其「推升比值」介於 1.66~1.67 之間。換句話說，當水平尾鰭面積一樣時，其「推升比值」幾乎相同！



機械海豚的尾鰭在水中擺動時， 會如何影響水的流動呢？

在實驗三~七中，我們透過自行研發的【水中推進力測量儀】、【水中升力測量儀】成功量測機械海豚在不同的擺動速度、尾鰭面積、尾鰭形狀下，在水中游動時所產生的「推進力」及「升力」，以具體數據了解機械海豚向前游的動力來源。

但我們還是好奇，機械海豚在水中擺動尾鰭時，尾鰭附近的水流是如何變化的？我們發想了許多實驗方法，例如在水中放滿了小保麗龍球(結果小保麗龍球全浮在水面上，尾鰭擺動時會有數顆保麗龍球被帶入水中)、在水中加了紅墨水(結果尾鰭一擺動，整缸水都變紅了)，每次的失敗，都是邁向成功的一階，最後我們真的成功研發了可顯著看出水流的變化、可重複進行觀測的【水流檢測儀】！



▲圖 7-4：保麗龍球放入水箱中。



▲圖 7-5：將紅墨水滴入水箱中。

實驗八：當「機械海豚」尾鰭擺動速度不同時，如何影響其附近的水流變化？

(一)實驗方法

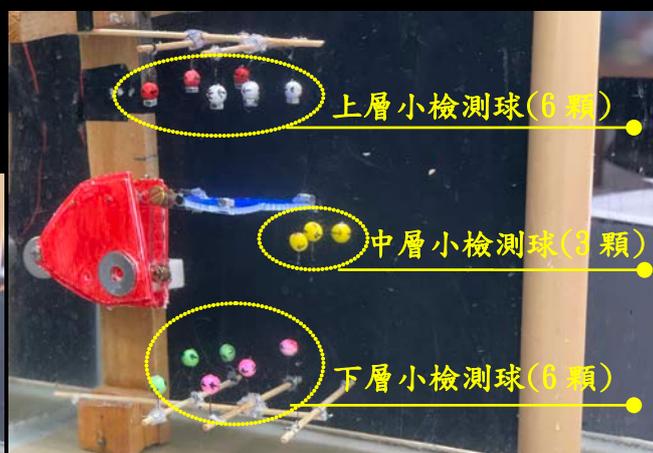
1. 研發【水流檢測儀】：用木條、竹筷、竹籤、針線、小保麗龍球、螺帽材料組裝成【水流檢測儀】(圖 8-1)，檢測儀含有 15 顆「小檢測球」分佈於機械海豚尾鰭的上、中、下層(圖 8-2~8-3)。
2. 將機械海豚固定於木條後，置入 20cm*30cm*32cm 水箱，依序調整馬達轉速為 2/8~6/8 刻度，每刻度各實驗 3 分鐘，且每刻度都錄下 3 個面向(水箱正面、水箱右側、水箱正上方)的影片。將攝影機所錄製的電子檔用 Tracker 軟體慢速播放判讀每一顆小檢測球的移動情形(圖 8-4)。

【水流檢測儀】

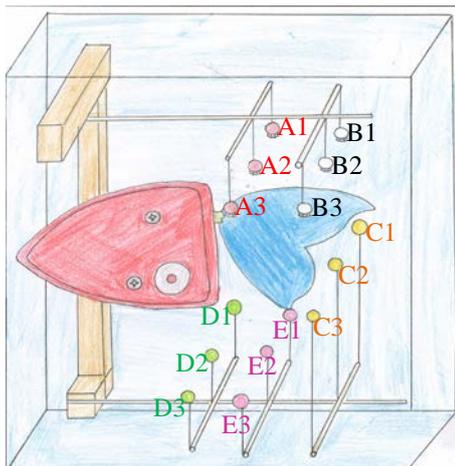
~細部介紹



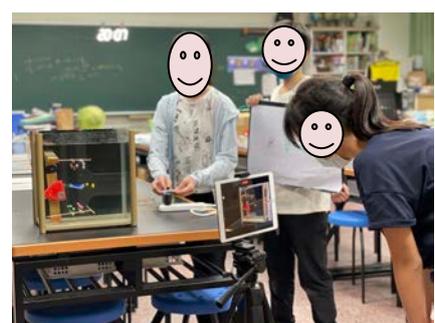
▲圖 8-1：水流檢測儀全貌



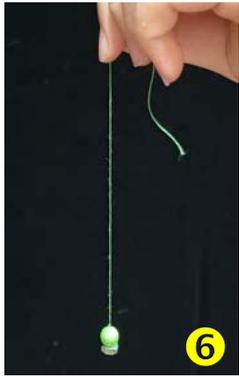
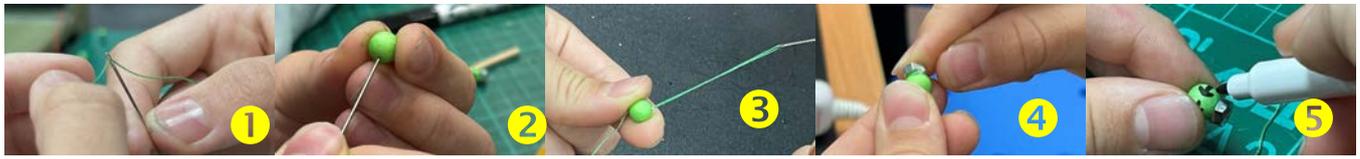
▲圖 8-2：三層【小檢測球】位置



◀圖 8-3：【水流檢測儀】15 顆小檢測球位置標示



▲圖 8-4：實驗環境照



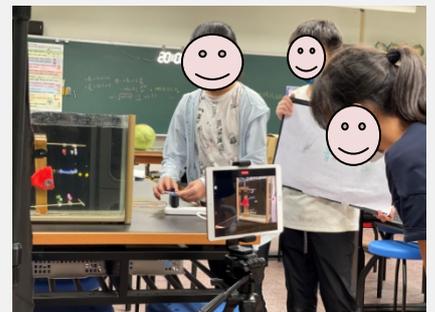
【水流檢測儀】上層「小檢測球」的製作方式

- ①②③ 使用針線穿過 7mm 的小保麗龍球正中心。
- ④ 在小保麗龍球正底部黏一個小螺帽以增加重量(中下層「小檢測球」毋需此步驟)
- ⑤ 用油性簽字筆在小保麗龍球側面畫一圈「→」記號，以便於實驗影片中辨別移動方向。
- ⑥ 一個「小檢測球」就完成嘍!

(二)實驗結果

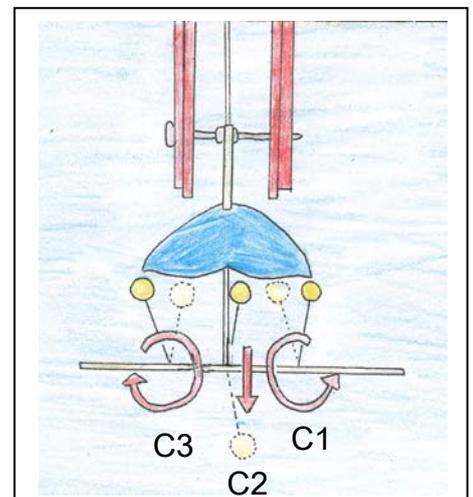
表 8-1：馬達調速不同時，水流檢測儀中各區域小檢測球移動與否一覽表

馬達轉速	位置	區域			馬達轉速	位置	區域			馬達轉速	位置	區域					
		小檢測球是否移動					小檢測球是否移動					小檢測球是否移動					
2/8	上層	A1	A2	A3	4/8	上層	A1	A2	A3	6/8	上層	A1	A2	A3			
		B1	B2	B3			B1	B2	B3			B1	B2	B3			
			✓														
	中層	C1	C2	C3		中層	C1	C2	C3		中層	C1	C2	C3			
		✓	✓	✓			✓	✓	✓			✓	✓	✓			
	下層	D1	D2	D3		下層	D1	D2	D3		下層	D1	D2	D3			
			✓					✓									
		E1	E2	E3			E1	E2	E3			E1	E2	E3			
			✓					✓				✓					
	3/8	上層	A1	A2		A3	5/8	上層	A1		A2	A3	6/8	上層	A1	A2	A3
			B1	B2		B3			B1		B2	B3			B1	B2	B3
			✓														
中層		C1	C2	C3	中層	C1		C2	C3	中層	C1	C2		C3			
		✓	✓	✓		✓		✓	✓		✓	✓		✓			
下層		D1	D2	D3	下層	D1		D2	D3	下層	D1	D2		D3			
			✓					✓									
		E1	E2	E3		E1		E2	E3		E1	E2		E3			
			✓					✓			✓						

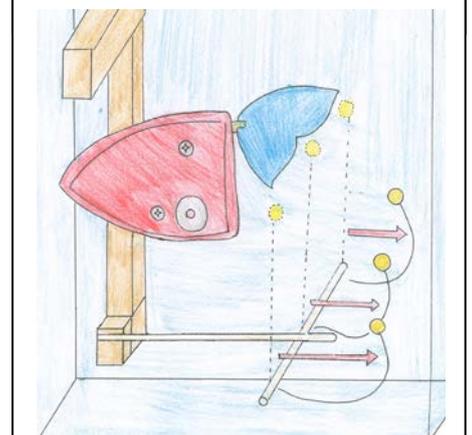


(三)實驗發現

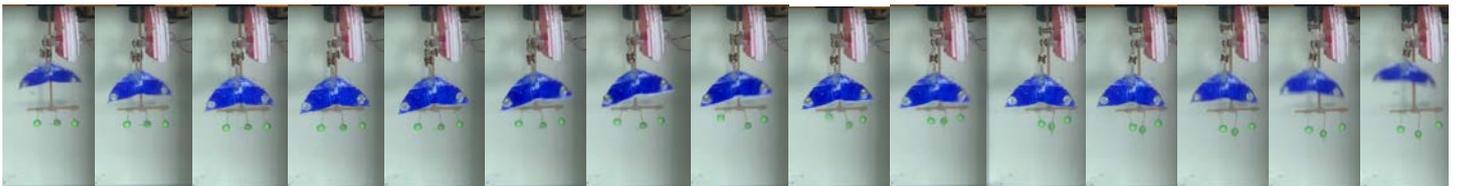
1. 不論馬達轉速為何，【中層 C1、C2、C3 區域】及【下層 E2 區域】小檢測球都有大幅度轉動或移動現象；當馬達轉速為 4/8、5/8 時，除上述區域外，還增加了【下層 D2 區域】；當馬達轉速為 2/8、3/8 時，除了上述區域外，還增加了【上層 B2 區域】。
2. 承 1，尾鰭擺動得越快，小檢測球會顯著移動或旋轉的總區域越少。推測是因當尾鰭擺動速度越快，受其擺動角度越小之影響所致。
3. 不論馬達轉速為何，【上層 A1、A2、A3】、【上層 B1、B3】、【下層 D1、D3】、【下層 E1、E3】區域小檢測球僅有微小幅度的移動或轉動，表示當尾鰭擺動時，以上這些區域的水流變化微弱。
4. 由慢速播放水箱正上方所錄影片，可明顯看出尾鰭正後方【中層 C1 區域】的小檢測球呈大幅度的水平面向的逆時針旋轉，【中層 C3 區域】的小檢測球時常呈大幅度的水平面向的順時針旋轉，尾鰭正後方的 2 個水漩渦顯而易見(圖 8-5-1~8-5-2)!
5. 由慢速播放水箱正上方所錄影片，可明顯看出尾鰭正後方【中層 C2 區域】的小檢測球大幅度的往後移動，顯然是受到【中層 C1、C3 區域】2 個水漩渦推擠所致(圖 8-5-1~圖 8-5-2)!
6. 由慢速播放水箱正前方所錄影片，可明顯看出尾鰭由下往上擺動時，正後方【中層 C1、C2、C3 區域】小檢測球時而呈現出大幅度的垂直面向的逆時針漩渦(圖 8-6-1~圖 8-6-2)!
6. 特別製作 3 顆小檢測球放在上層 B 區之後，慢速播放水箱正前方所錄影片，可明顯看出尾鰭由下往上擺動時，尾鰭上方會出現大幅度的垂直面向的順時針漩渦(圖 8-7)!



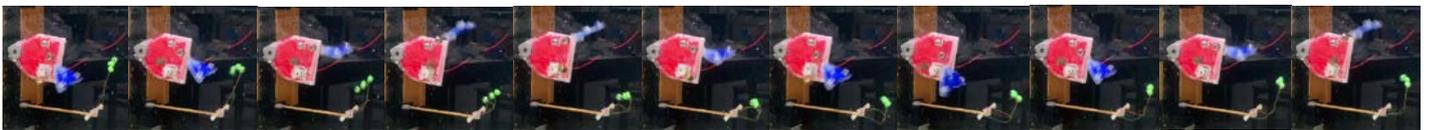
▲圖 8-5-1: 從水箱正上方可以看出 C1、C3 小檢測球分別呈逆、順時針轉動。C2 小檢測球



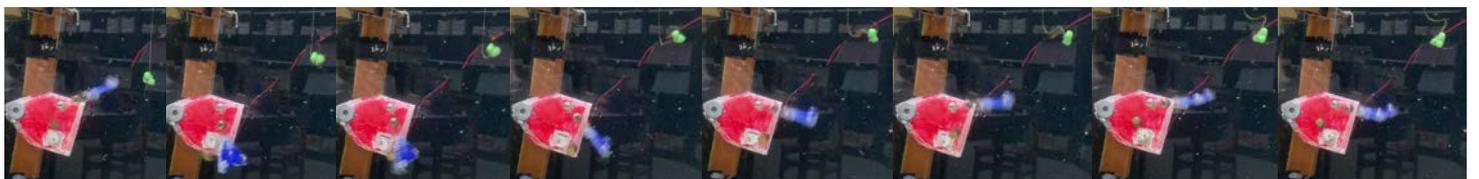
▲圖 8-6-1: 從水箱正前方可以看出 C1、C2、C3 小檢測球時而呈現出大幅度的垂直面向的逆時針旋轉。



▲圖 8-5-2: 從水箱正上方可以看出 C1、C3 小檢測球分別呈逆、順時針轉動。C2 小檢測球被推向後方。



▲圖 8-6-2: 從水箱正前方可以看出 C1、C2、C3 小檢測球時而呈現出大幅度的垂直面向的逆時針旋轉。



▲圖 8-7: 水箱正前方影片，可看出尾鰭由下往上擺動時，尾鰭上方會出現大幅度垂直面向順時針漩渦。

伍、結論

一、本作品是目前第一件「研究水平尾鰭在水中運動行為」的科展作品。

子題一文獻探討得知「海豚」能在水中快速游動的奧秘，主要是「利用水平尾鰭上下拍動水面而產生向前游動的推進力」！然而，截至 62 屆科展為止，沒有其他作品探究海豚水平尾鰭的運動行為，因此本研究擬將聚焦改變水平尾鰭的各種變因，找出影響水平尾鰭能快速游動的真相！

二、成功研發動態實驗用擬真模型及多項能在水中進行量測的儀器，克服在水中取得數據的困境！

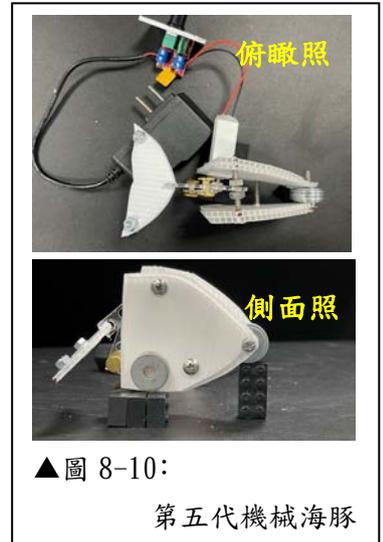
(一)研發擬真「機械海豚」進行實驗，藉由調整水平尾鰭的擺動速度，可掌控機械海豚有趣的游動姿態！

1. 子題二研發擬真「第五代直立型 2.0 版機械海豚」，利用可調速馬達驅動水平尾鰭的擺動，使其在水中平穩向前游動，還能符合實驗需求，改變水平尾鰭擺動速度及型態進行各項實驗，並具備防水、結構堅固耐用、可支援長時間實驗等特色。
2. 調整【第五代機械海豚】水平尾鰭的擺動速度，其在水箱中的游動行為各異其趣！當馬達調速在 1/8~2/8 時，機械海豚水平尾鰭的擺動頻率超緩慢，只能停留在原處擺動尾鰭；當馬達調速在 3/8 時，機械海豚水平尾鰭的擺動頻率較為緩慢，會在靠近水箱底部向前游動，但頭部會不時地碰撞箱底；當馬達調速在 4/8~5/8 時，機械海豚水平尾鰭的擺動頻率較快速，會在水箱中上層處平穩地向前游動；當馬達調速在 6/8 時，機械海豚水平尾鰭的擺動頻率極快速，會在水箱中邊向前游動，邊翻跟斗，超級有趣！

(二)自行研發【水中推進力/升力測量儀】，成功以「重量」形式呈現機械海豚在不同變因下游動時所產生的推進力/升力，並藉由計算「推升比值」檢視其前進能力！

1. 子題二中所研發出的「水中推進力測量儀」(圖 8-11~8-12)是運用槓桿力矩的概念，將長條狀塑膠瓦楞板一端鎖在窗簾桿的滑輪孔，使長條狀塑膠瓦楞板可以螺絲為中心自由地轉動，另一端則黏住機械海豚。在機械海豚尾鰭還沒開始擺動時取得電子秤上初始數值 A，機械海豚開始擺動尾鰭往前游，將使電子秤上數值減少，取得電子秤可得的最小數值 B。

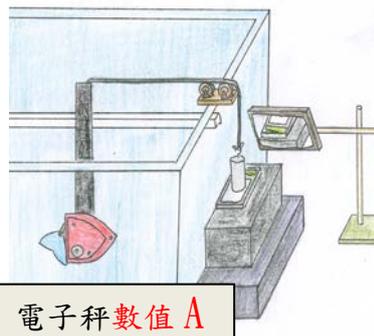
$$\text{【數值 A】} - \text{【數值 B】} = \text{尾鰭擺動時產生的推進力}$$



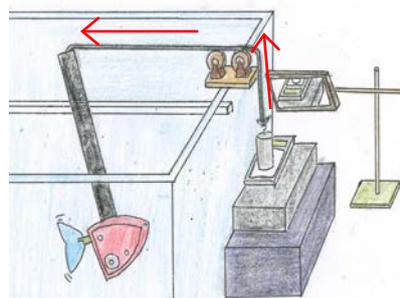
▲圖 8-10:

第五代機械海豚

►圖 8-11：
機械海豚尾鰭還沒開始擺動時，取得電子秤上初始數值 A



電子秤數值 A

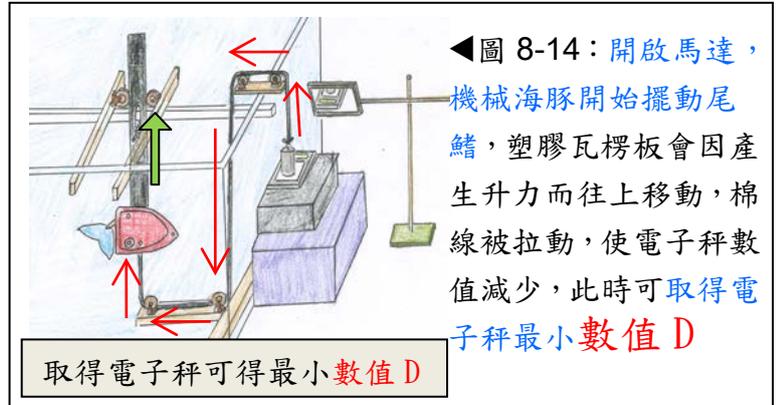
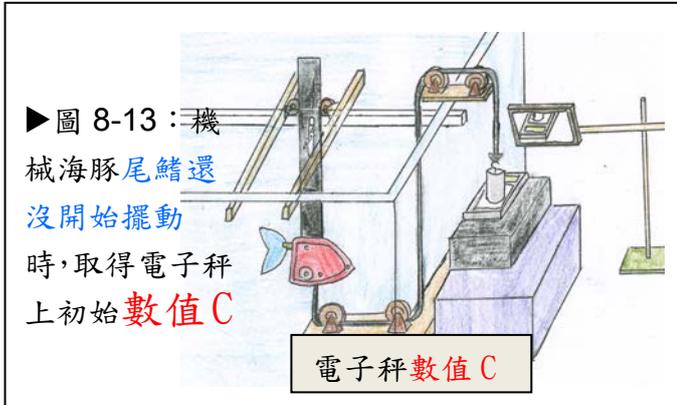


取得電子秤可得的最小數值 B

◀圖 8-12：啟動馬達，機械海豚開始擺動尾鰭往前游，使得棉線被拉動(紅色箭頭→)，導致電子秤上數值減少，取得電子秤可得的最小數值 B。

2. 子題二中所研發出「水中升力測量儀」(圖 8-13~8-14)是將機械海豚固定於長條瓦楞板末端，透過固定與裁剪，瓦楞板上長方形的孔可使其垂直地上下移動。機械海豚尾鰭還沒開始擺動時，取得電子秤上初始數值 C；開啟馬達，開始擺動尾鰭，塑膠瓦楞板將因升力的產生而往上移動，使得電子秤數值減少，取得電子秤最小數值 D。

【數值 C】 - 【數值 D】 = 「機械海豚」尾鰭擺動時產生的升力。

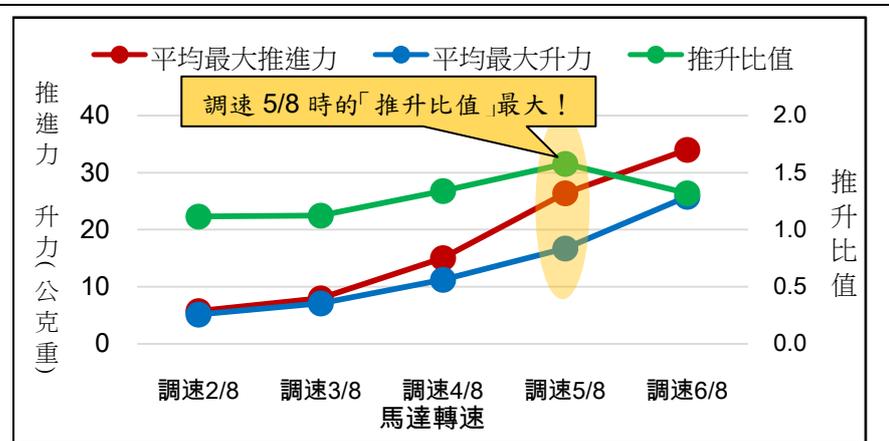


3. 透過「水中推進力測量儀」、「水中升力測量儀」測得機械海豚尾鰭在不同擺動狀態時的推力及升力後，可計算出【推升比值】。子題五「水平尾鰭的擺動如何影響其向前的游動速度？」實驗中已驗證【推升比值】越大，機械海豚的前進速度越快，前進能力越佳！
4. 子題三、四透過「水中推進力/升力測量儀」可確實得知尾鰭由下往上擺動時，會產生推進力；尾鰭由上往下擺動時，會產生升力。

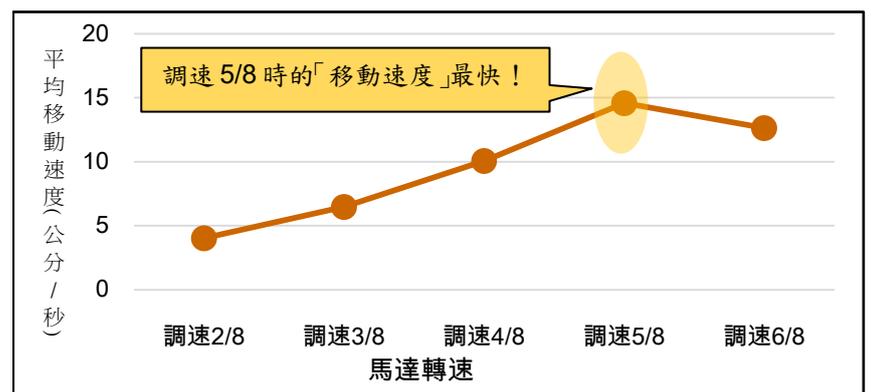
三、機械海豚尾鰭擺動速度、面積、形狀都會影響其在水中的前進能力。

(一) 海豚尾鰭擺動得越快，不見得會越游越快喔！

- 子題三、四中得知當馬達轉速介於 2/8~5/8 時，馬達轉速越快，其「推升比值」越大。但當馬達轉速介於 5/8~6/8 時，其「推升比值」卻變小(圖 8-15)。表示機械海豚尾鰭在馬達轉速 5/8 擺動速度時的前進能力最好！
- 子題五中「不同馬達轉速與其移動速度之關係圖」(圖 8-16)與「尾鰭擺動速度與推升比值之關係圖」(圖 8-15)的趨勢相符合，再次驗證「推升比值」越大，游動速度越快，前進能力越好！



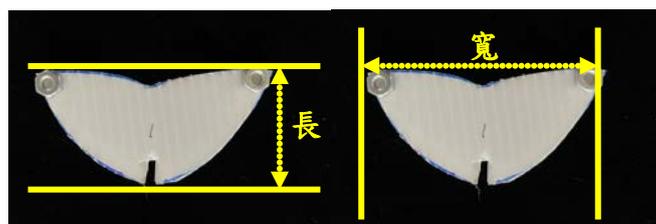
▲圖 8-15: 尾鰭擺動速度與推進力、升力、推升比值之關係圖。



▲圖 8-16: 「機械海豚」不同馬達轉速與其移動速度之關係圖。

(二)機械海豚尾鰭面積等比例放大時，所產生的推進力及升力也隨之變大！

1. 子題六將機械海豚尾鰭長與寬(圖 8-17)依序放大成 0.75 倍、1 倍、1.25 倍、1.5 倍、1.75 倍後(圖 8-18)進行實驗，發現尾鰭面積越大時，機械海豚在水中擺動尾鰭所產生的推進力及升力也隨之變大。但尾鰭面積放大 1.25 倍(25.40cm²)時的「推升比值」最大，為 1.67! (圖 8-19)

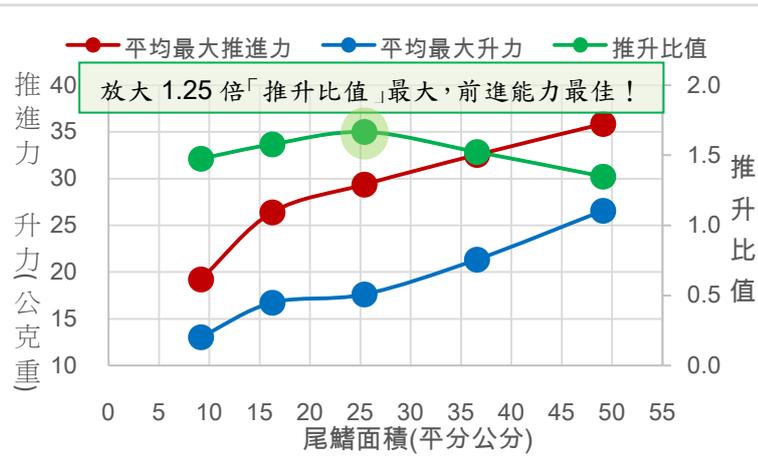


▲圖 8-17：機械海豚尾鰭「長」與「寬」示意

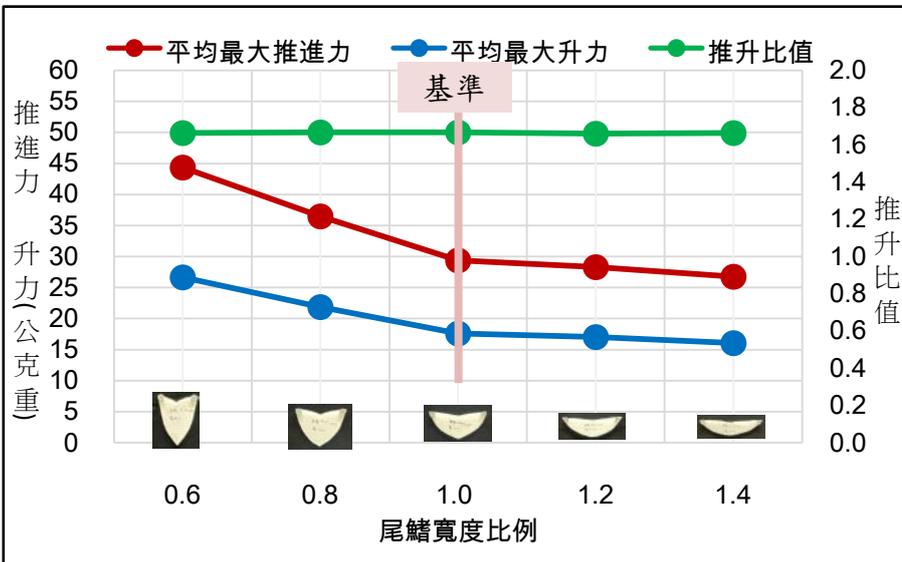
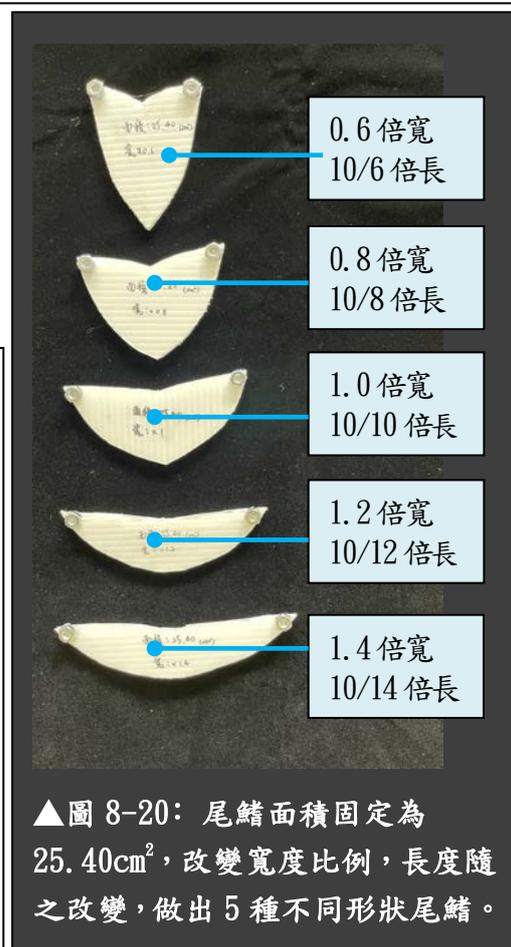
(三)固定水平尾鰭面積，不論其形態如何變化，其「推升比值」幾乎相同!

1. 子題七中得知，機械海豚尾鰭面積為定值時，改變尾鰭長與寬的比例(圖 8-20)，發現以 1.0 倍為基準，尾鰭寬度減為 0.6 倍、0.8 倍時，在水中擺動尾鰭時所測得的推進力及升力都顯著增加;尾鰭寬度增為 1.2 倍、1.4 倍時，水中擺動尾鰭時所測得的推進力及升力略減。

2. 子題七以所測得的推進力及升力計算「推升比值」，發現其「推升比值」介於 1.66~1.67 間。換句話說，當水平尾鰭面積一樣時，其「推升比值」幾乎相同!



▲圖 8-19：不同尾鰭面積與推進力、升力、推升比值之

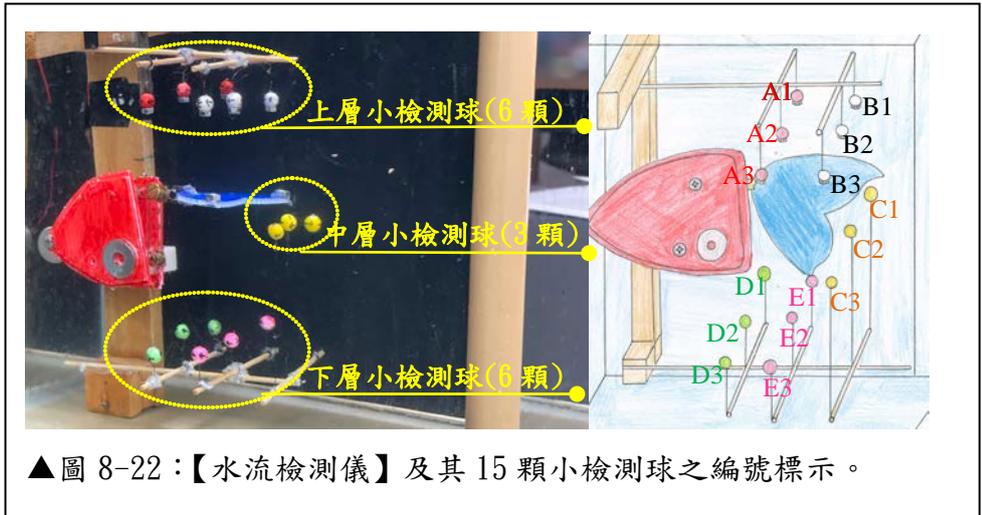


▲圖 8-21：尾鰭面積固定為 25.40cm²，不同寬度比例與其推進力、升力、推升比值之關係圖。

四、研發【水流檢測儀】，使機械海豚擺動尾鰭時的水流變化一覽無遺！

(一)所研發的【水流檢測儀】不僅可以環景無死角地看出尾鰭擺動時的水流變化，還能立即無限制地重複進行觀測。

1. 子題八曾發想許多檢測水流方法，最後成功用針線、保麗龍球、螺帽等材料做成小檢測球，組裝成可顯著看出水流變化、可重複觀測的【水流檢測儀】(圖 8-22)!



▲圖 8-22：【水流檢測儀】及其 15 顆小檢測球之編號標示。

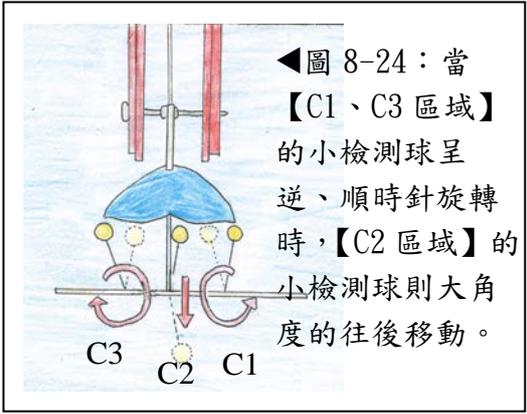
2. 子題八得知尾鰭擺動得越快，浮在水中的小檢測球會顯著移動或旋轉的總區域越少，推測這與子題三發現的結果-「尾鰭擺動速度越快，其擺動角度越小」有關。
3. 子題八得知不論馬達轉速，【中層 C1、C2、C3 區域】及【下層 E2 區域】的小檢測球都有大幅度轉動或移動現象，表示該區域水流變化極劇烈，值得我們進一步進行細膩的探究！

(二)藉由多角度的錄影，小檢測球讓尾鰭後端的 4 個漩渦完美地呈現在眼前！

1. 子題八透過慢速播放水箱正上方所拍攝的實驗影片，可明顯看出 2 個漩渦：尾鰭正後方【中層 C1、C3 區域】的小檢測球分別呈大幅度水平面向的逆、順時針旋轉。
2. 子題八透過水箱正前方實驗影片，尾鰭由下往上擺動時，可明顯看出 2 個漩渦：第一個漩渦出現在尾鰭後下方，【中層 C1、C2、C3 區域】小檢測球時而呈現大幅度垂直面向的逆時針旋轉；另一個漩渦出現在尾鰭後上方，小檢測球時而呈現垂直面向的順時針旋轉。



▲圖 8-23：藉由多角度的錄影，小檢測球讓尾鰭後端的 4 個漩渦完美地呈現在眼前！



◀圖 8-24：當【C1、C3 區域】的小檢測球呈逆、順時針旋轉時，【C2 區域】的小檢測球則大角度的往後移動。

(三)機械海豚利用水平尾鰭的擺動製造渦流來降低前進阻力，進而提高前進效能。

子題八中可由小檢測球的轉動及移動看出：由下往上擺動的尾鰭在尾鰭後方形成兩個方向相反的漩渦，接著由上往下擺動的尾鰭使得兩個漩渦相遇，相併的兩個漩渦形成一束強有力地向後的噴流(如圖 8-24 的 C2 小檢測球)，以作為推進力量的提供。

陸、參考資料

- 一、斷尾海豚重生記(2013)。科學人 2013 年第 134 期 4 月號
- 二、<https://www.youtube.com/watch?v=cglnjRjiv5M> 鯨魚不是魚！
- 三、全國第 60 屆科展國小組物理科作品~神鰭魔力“渦”最行？！。
- 四、全國第 62 屆高中組物理與天文學科~魚你翼鰭飛—探討飛魚腹鰭對飛行穩定度的作用。 -30-

【評語】 080106

經由觀察到海豚高速游動的上下擺動尾鰭，異於其他魚類的左右擺動，而激發起探究其間關連的問題意識。這樣的求知好奇心是科學研究的動力。在技術上而言，以上下擺動尾鰭能達到穩定前進泳動的機械裝置是非常不容易的。必須經過考量整體配重與擺動角度。他們克服了精巧的連桿機構，以及馬達防水等技術難題，成功製造出水平尾鰭的機械魚。進一步以簡易的自製推力計，以最佳化他們的裝置。雖然不是屬於令人驚艷的創意，但是設計的巧思處處可見。

作品海報

無「鰭」不「泳」



—探究水平尾鰭對其運動行為的影響

壹、研究動機

參、研究架構及流程

住在東部的我們，學校常安排和海洋教育相關的課程。五年級時學校安排全校同學到影城欣賞關於兩個父親和海洋、鯨豚互動的記錄片-《男人與他的海》(圖 1-1)，並邀請台灣首位鯨豚攝影師-金磊到校演講中提到「因為海豚游泳速度飛快，很難捕捉到海豚的水中英姿」。我非常好奇是什麼因素使海豚的游泳速度如此出眾？於是決定和同學進行探究，一起揭開海豚在水中游動的奧秘！



▲圖 1-1：
《男人與他的海》電影文章。

貳、研究目的

- 一、研發並製作尾鰭能上下擺動並能平穩地在水中向前游動的機械海豚。
- 二、研發並製作能在水裡量測游動中機械海豚之推進力及升力的儀器。
- 三、探究影響機械海豚尾鰭之推進力及升力的可能因素。

肆、研究方法、結果與發現

實驗一：文獻探討

一、「海豚」和「魚」身體結構與運動方式的差異

- (一)「海豚」和「魚」不同的尾鰭型態是外觀上最顯著的差異！「海豚」的尾鰭是水平生長的，「魚」的尾鰭是豎著生長的！
- (二)「海豚」和「魚」因身體結構不同，造就哺乳動物脊椎上下擺動，魚類脊椎左右擺動！尾鰭裡的骨頭是脊椎一部分，運動方向須和整條脊椎一致，所以海豚尾鰭上下擺尾，因而水平生長；魚類尾鰭左右擺尾，因而豎著生長！(圖 1-2~1-5)
- (三)對「海豚能在水中快速游動」行為特別感興趣！文獻提到「海豚主要是利用尾鰭上下拍動水面而產生向前游動的推進力」

二、關於「鯨豚」、「鰭」相關的科展研究

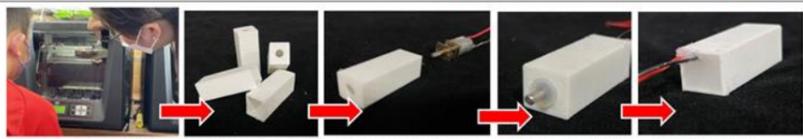
- (一)關於「鯨豚」科展研究僅有 1 件-「纏蝕鯨豚—露脊鼠海豚在馬祖的擱淺研究」(第 62 屆國中組地球科學科)，該研究主要利用資料分析以了解影響露脊鼠海豚擱淺的原因及分布情形。其研究方向和鯨豚的運動行為毫無關聯。
- (二)關於「鰭」科展研究有 2 件-「神鰭魔力“渦”最行?!」(第 60 屆國小組物理科)，本研究探討一般魚類左右擺動尾鰭所產生的渦流與前進推力的關係；「魚你翼鰭飛—探討飛魚腹鰭對飛行穩定度的作用」(第 62 屆高中組物理與天文學科)，該作品探究飛魚腹鰭面積、腹鰭形狀、腹鰭與魚身之間的夾角與飛行狀態之關係。

目前尚無科展作品探究海豚水平尾鰭對其運動行為的影響，因此我們想探究水平尾鰭在不同狀態時推進力及升力的表現，及尾鰭擺動時附近水流的變化。為克服在水中測量數據的困境，期望能自創量測裝置，找出影響水平尾鰭能快速游動的真相！

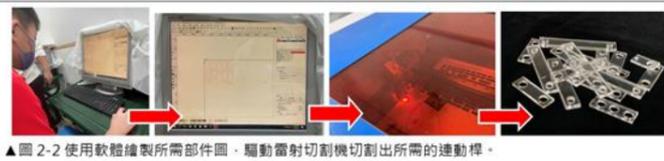
實驗二：「機械海豚」設計及實驗環境介紹

一、「機械海豚」的設計

- (一)設計理念：設計單純以水平尾鰭上下擺動就能在水中平穩往前游動的流線型「機械海豚」，且須具有能調整水平尾鰭擺動速度、更換水平尾鰭不同樣態、防水與堅固耐用等特色。製作過程中，面臨最大困難之一是難以在市面上覓得合適、輕巧連動桿及馬達防水盒尺寸，我們運用學校所學 3D 列印製作馬達防水盒(圖 2-1)，雷切技術製作不同尺寸連動桿(圖 2-2)!



▲圖 2-1：以 3D 列印製成的馬達防水盒，將馬達套入 3D 列印的防水盒，套上膠圈，灌入矽利康，達到完全地防水。



▲圖 2-2 使用軟體繪製所需零件圖，驅動雷射切割機切割出所需的連動桿。

- (二)「第五代直立型 2.0 版 機械海豚」各部位介紹(圖 2-3~圖 2-8)：



▲圖 2-3：俯拍「第五代直立型 2.0 版機械海豚」

▲圖 2-4：側拍「第五代機械海豚」

電子調速器

▲圖 2-5：將馬達與「電子調速器」連接，以用來調整尾鰭的擺動速度。

調速器刻度盤

▲圖 2-6：為精準調整尾鰭擺動速度，將方形板分成 8 等分，套在調速器旋鈕上。

「減速馬達」及「連動桿」

▲圖 2-7：利用減速馬達及連動桿驅動尾鰭上下擺動。

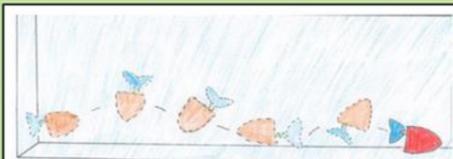
頭部配重

▲圖 2-8：以墊片及螺帽配重

機械海豚在水中的運動行為由你來掌控!

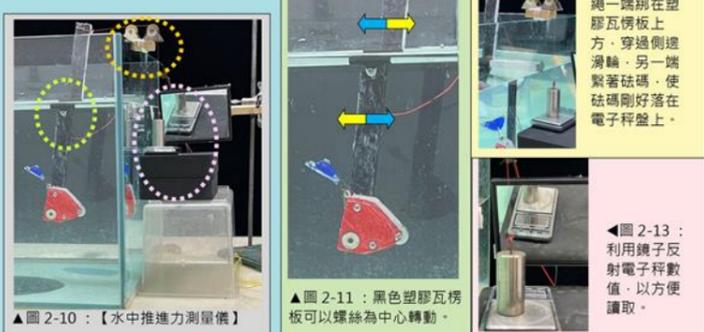
調整【第五代機械海豚】水平尾鰭擺動速度，其在水中的游動行為各異其趣! 當馬達調速 1/8~2/8 時，水平尾鰭的擺動頻率超緩慢，只能停留在原處擺動尾鰭；當馬達調速 3/8 時，水平尾鰭的擺動頻率較為緩慢，會在靠近水箱底部向前游動，但頭部會不時地碰撞箱底；當馬達調速 4/8~5/8 時，水平尾鰭的擺動頻率較快速，會在水箱中上層處平穩地向前游動；當馬達調速在 6/8 時，機械海豚水平尾鰭的擺動頻率極快速，會在水箱中上層處向前游動，邊翻跟斗，超級有趣!

但接下來的實驗需精準地量測在不同水平尾鰭的變因下其推升比值、游動速度、附近水流變化，是故必須將機械海豚固定於某處進行實驗!



▲圖 2-9：調速 6/8，水平尾鰭擺動頻率極快速，邊向前游動，邊翻跟斗!

二、自行研發【水中推進力測量儀】來量測機械海豚在水中游動時所產生的「推進力」



▲圖 2-10：【水中推進力測量儀】

▲圖 2-11：黑色塑膠瓦楞板可以螺絲為中心轉動。

▲圖 2-12：棉繩一端綁在塑膠瓦楞板上，穿過側邊滑輪，另一端繫著砝碼，使砝碼剛好落在電子秤盤上。

▲圖 2-13：利用鏡子反射電子秤數值，以方便讀取。

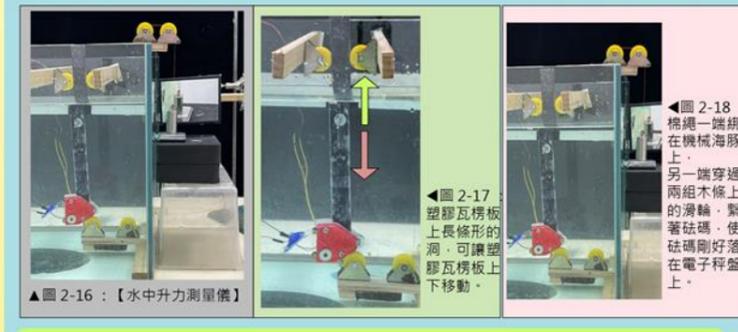
【數值 A】-【數值 B】=尾鰭擺動時產生的推進力。



▲圖 2-14：機械海豚尾鰭還沒開始擺動時，取得電子秤上初始數值 A

▲圖 2-15：啟動馬達，機械海豚開始擺動尾鰭往前游，瓦楞板會往另一邊傾斜，因棉線被拉動(如紅色箭頭→方向)，使得電子秤上數值減少，取得電子秤可得的數值 B

三、自行研發【水中升力測量儀】來量測機械海豚在水中游動時所產生的「升力」

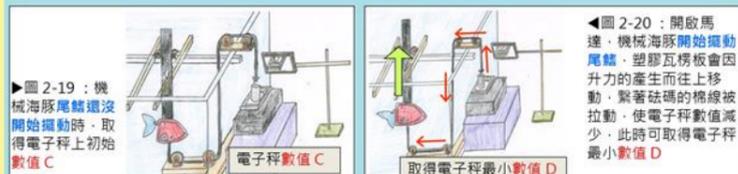


▲圖 2-16：【水中升力測量儀】

▲圖 2-17：塑膠瓦楞板上長條形的洞，可讓塑膠瓦楞板上下移動。

▲圖 2-18：棉繩一端綁在機械海豚上，另一端穿過兩組木條上的滑輪，繫著砝碼，使砝碼剛好落在電子秤盤上。

【數值 C】-【數值 D】=尾鰭擺動時產生的升力。



▲圖 2-19：機械海豚尾鰭還沒開始擺動時，取得電子秤上初始數值 C

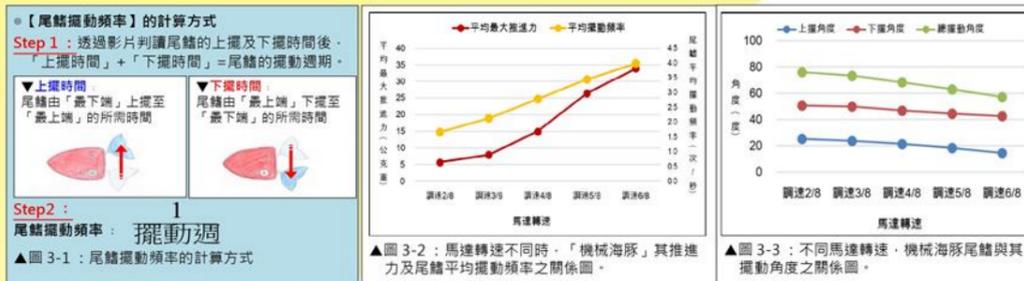
▲圖 2-20：開啟馬達，機械海豚開始擺動尾鰭，塑膠瓦楞板會因升力的產生而往上移動，繫著砝碼的棉線被拉動，使電子秤數值減少，此時可取得電子秤最小數值 D

實驗三：「機械海豚」尾鰭的擺動速度如何影響其推進力？

(一)實驗方法：讓「機械海豚」在5種不同速度下運作，以此控制水平尾鰭的擺動速度，利用【水中推進力測量儀】測量其在水中游動時所產生的「推進力」。每種速度各實驗5次，再將攝影機所錄製的電子檔用Tracker軟體慢速播放影片，計數尾鰭擺動頻率(圖3-1)，及判讀電子秤數值以計算出推進力。

(二)實驗發現

- 將實驗結果繪製成圖3-2後，發現：
 - 馬達轉速1/8刻度，尾鰭緩慢擺動，但電子秤數值無變化；馬達轉速7/8刻度，尾鰭極快速擺動1、2次後，馬達就壞掉了！因此之後實驗為減少馬達耗損，調整範圍介於2/8~6/8刻度。
 - 當尾鰭往下擺時，瓦楞板下半部會往後傾斜，使得電子秤數值微增，說明尾鰭由上往下擺動時，幾乎沒有推進力產生；當尾鰭往上擺時，瓦楞板下半部會向前，使得電子秤數值減少，說明尾鰭由下往上擺動時，會產生推進力。
 - 尾鰭擺動越快，其在水中推進力顯著變大。當馬達調整至2/8~6/8刻度間時，其推進力介於5.73~34.02gw。
- 「機械海豚」尾鰭擺動越快速，尾鰭擺動角度越小。當馬達調整至2/8~6/8刻度間時，其尾鰭擺動角度從76.3度降至57.1度(圖3-3)。

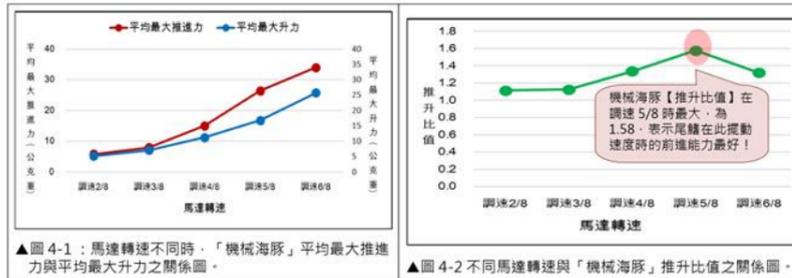


實驗四：「機械海豚」尾鰭的擺動速度如何影響其升力？

(一)實驗方法：讓「機械海豚」在馬達2/8~6/8速度刻度下運作，以此控制水平尾鰭擺動速度，利用【水中升力測量儀】測量其在水中游動時所產生的「升力」。取實驗三所測得之「推進力值」除以「升力值」，求得「推升比值」。

(二)實驗發現

- 從圖4-1發現：
 - 馬達轉速介於2/8~6/8刻度時，每增加一個轉速刻度升力分別增加1.94gw、4.13gw、5.52gw、9.02gw，說明尾鰭擺動越快，其升力會大幅度的增長。
 - 反覆慢速播放實驗影片，觀察到當水平尾鰭往下擺動時，長條形瓦楞板會被抬升，電子秤數值會減少；尾鰭往上擺動時，長條形瓦楞板無明顯抬升，電子秤數值幾乎沒有改變。說明當尾鰭往下擺動時，會產生升力；當尾鰭往上擺動時，幾乎無升力產生。
- 從圖4-2發現：
 - 機械海豚的【推升比值】越大，就代表著其每一單位升力，所能受到的推進力越多，表示機械海豚的前進能力越佳！
 - 本實驗馬達轉速介於2/8~6/8時，其中當馬達轉速為5/8時，機械海豚的【推升比值】最大，表示機械海豚尾鰭在此擺動速度時的前進能力最好！
 - 馬達轉速2/8~5/8時，轉速越快，「推升比值」越大。馬達轉速5/8~6/8時，「推升比值」卻變小。說明尾鰭擺動得越快，不見得會越游越快喔！

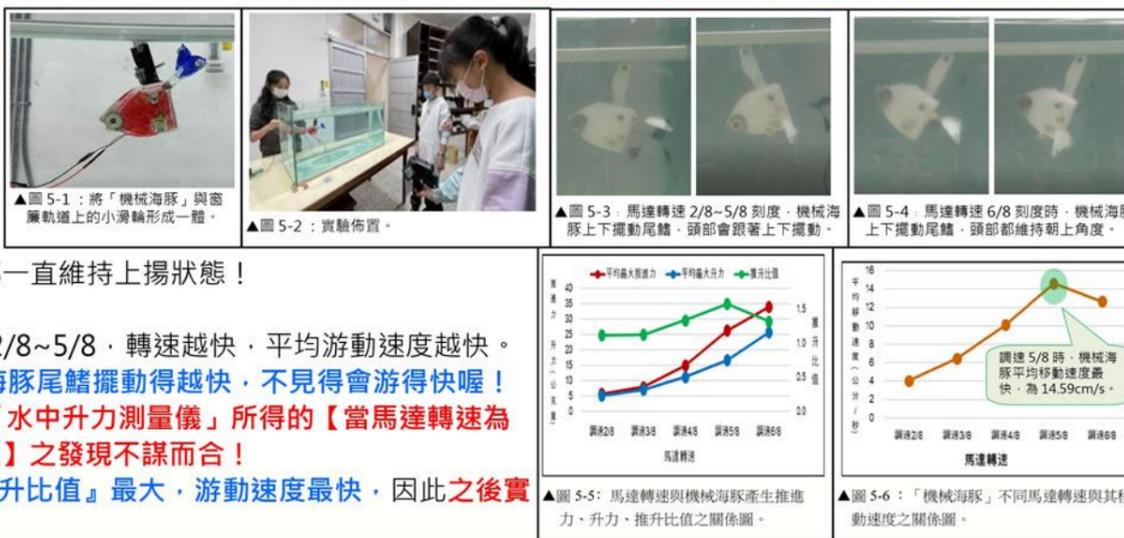


實驗五：「機械海豚」尾鰭的擺動如何影響其向前的游動速度？

(一)實驗方法：為使機械海豚在水中以直線游動，以期能得知水平尾鰭擺動速度與其游動速度的關係，於是將機械海豚固定於長條瓦楞板下端，並與窗簾軌道小滑輪鎖在一起(圖5-1)，在馬達2/8~6/8刻度下擺動，從「起點」游至「終點」(相距75cm)(圖5-2)。以【距離/時間=速度】公式，求得其游動速度。

(二)實驗發現

- 馬達轉速2/8~5/8時，機械海豚上下擺動尾鰭，頭部會跟著上下擺動(圖5-3)；馬達轉速6/8刻度時，機械海豚不僅上下快速擺動尾鰭，且頭部都維持朝上角度(圖5-4)，明顯產生很大升力。
- 承1，此游動現象可與實驗三、四實驗結果(圖5-5)相呼應：當馬達轉速在6/8刻度時，尾鰭極快速地擺動，其「升力的上升幅度」比「推進力的上升幅度」來得大，導致「推升比值」變小。使得在實驗中所看見的現象即機械海豚在前進過程中，頭部一直維持上揚狀態！
- 實驗結果繪製成圖5-6發現：
 - 當馬達轉速為5/8時，平均游動速度最快！當馬達轉速介於2/8~5/8，轉速越快，平均游動速度越快。但馬達轉速介於5/8~6/8，其平均游動速度卻變慢。這說明海豚尾鰭擺動得越快，不見得會游得快喔！
 - 此結果與實驗三、四利用自行研發「水中推進力測量儀」及「水中升力測量儀」所得的【當馬達轉速為5/8時的『推升比值』最大，表示此時機械海豚前進能力最佳】之發現不謀而合！
- 實驗三~五得知馬達轉速5/8刻度時，機械海豚水中前進的『推升比值』最大，游動速度最快，因此之後實驗六、七都將馬達轉速定於5/8刻度進行實驗。



實驗六：「機械海豚」的尾鰭面積如何影響其推進力及升力？

(一)實驗方法

- 用Inkscape軟體，將「機械海豚」水平尾鰭長與寬(圖6-1)依序放大成0.75倍、1倍、1.25倍、1.5倍、1.75倍，輸出上述5種比例的尾鰭紙樣板(圖6-2)，再依模版進行塑膠瓦楞板的裁剪(圖6-3)。
- 使用Image-J軟體計算5種比例的尾鰭面積。
- 將馬達轉速調整至5/8刻度，使用自行研發的「水中推進力測量儀」及「水中升力測量儀」分別量測這5種比例的尾鰭在水中前進時之推進力及升力。
- 每種比例的尾鰭各在水中實驗5次，再將攝影機所錄製的電子檔用Tracker軟體慢速播放影片判讀其擺動頻率、推進力及升力數值。以取得的推進力及升力平均值計算出「推升比值」。

(二)實驗發現

- 圖6-4發現水平尾鰭面積越大時，其在水中的擺動頻率越小。當尾鰭面積介於9.15~40.09cm²，擺動頻率介於4.17~1.41次/秒。
- 圖6-5發現：水平尾鰭面積越大，機械海豚在水中擺動尾鰭所產生的推進力及升力也隨之變大。
- 尾鰭面積放大1.25倍(25.40cm²)時的「推升比值」最大，為1.67，因此之後實驗都以該面積的尾鰭進行。



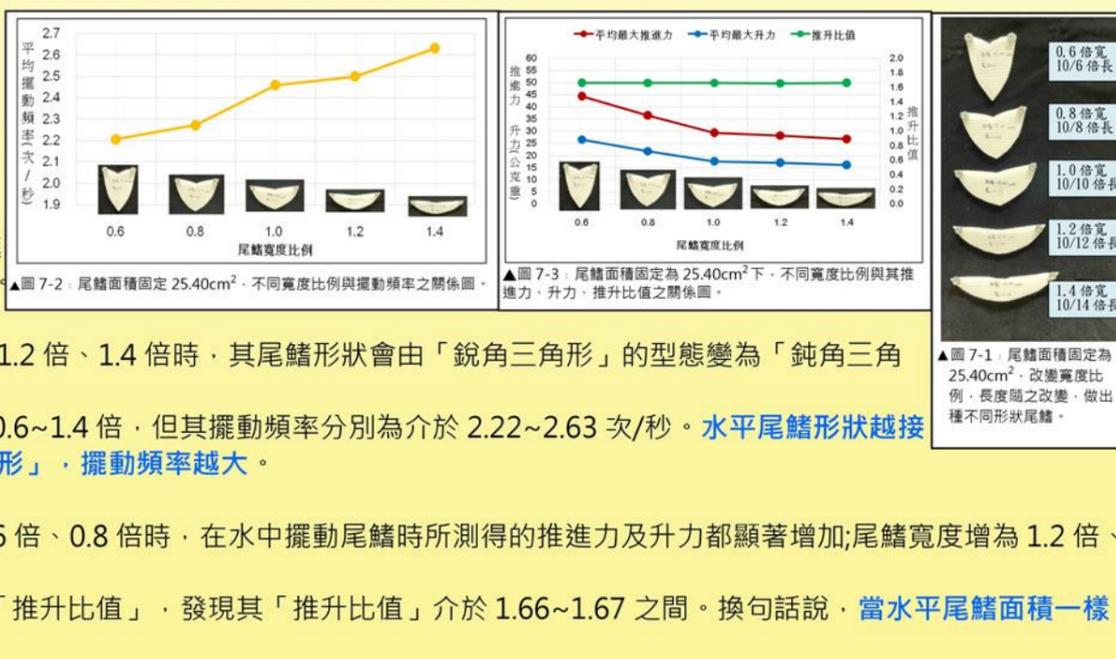
實驗七：「機械海豚」尾鰭面積固定下，形狀如何影響其推進力及升力？

(一)實驗方法

- 固定機械海豚水平尾鰭面積25.40cm²，依序改變寬度比例為0.6倍、0.8倍、1.0倍、1.2倍、1.4倍，長度隨之改變，製作出5種不同形狀的尾鰭(圖7-1)。
- 馬達轉速5/8刻度，用「水中推進力/升力測量儀」分別量測5種不同形狀尾鰭在水中前進時之推進力及升力。
- 每種形狀的尾鰭各在水中實驗5次，透過影片判讀擺動頻率、推進力及升力數值。以取得的推進力及升力平均值計算出「推升比值」。

(二)實驗發現

- 尾鰭面積固定，依序改變尾鰭的寬度為0.6倍、0.8倍、1.0倍、1.2倍、1.4倍時，其尾鰭形狀會由「銳角三角形」的型態變為「鈍角三角形」的型態，再變為趨近「新月形」的型態。
- 圖7-2發現水平尾鰭面積固定為25.40cm²，改變尾鰭的長度為0.6~1.4倍，但其擺動頻率分別為介於2.22~2.63次/秒。水平尾鰭形狀越接近「銳角三角形」，擺動頻率越小；水平尾鰭形狀越接近「新月形」，擺動頻率越大。
- 圖7-3發現：
 - 尾鰭面積固定為25.40cm²，以1.0倍為基準，尾鰭寬度減為0.6倍、0.8倍時，在水中擺動尾鰭時所測得的推進力及升力都顯著增加；尾鰭寬度增為1.2倍、1.4倍時，水中擺動尾鰭時所測得的推進力及升力略減。
 - 承(1)，不論尾鰭寬度如何改變，以所測得的推進力及升力計算「推升比值」，發現其「推升比值」介於1.66~1.67之間。換句話說，當水平尾鰭面積一樣時，其「推升比值」幾乎相同！

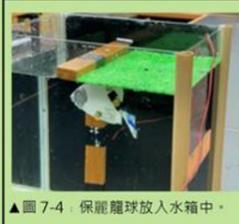


機械海豚的尾鰭在水中擺動時，會如何影響水的流動呢？



實驗三~七中，我們透過自行研發的【水中推進力測量儀】、【水中升力測量儀】成功量測機械海豚在不同擺動速度、尾鰭面積、尾鰭形狀下，在水中游動時所產生的「推進力」及「升力」，以具體數據了解機械海豚向前游的動力來源。

但我們還是好奇，**機械海豚在水中擺動尾鰭時，尾鰭附近的水流是如何變化的？**我們發想了許多實驗方法，例如在水中放滿了**小保麗龍球**(結果小保麗龍球全浮在水面上，尾鰭擺動時會有數顆保麗龍球被帶入水中)、在水中加了**紅墨水**(結果尾鰭一擺動，整缸水都變紅了)，每次的失敗，都是邁向成功的一階，**最後我們真的成功研發了可顯著看出水流的變化、可重複進行觀測的【水流檢測儀】!**



▲圖 7-4：保麗龍球放入水箱中。

▲圖 7-5：將紅墨水滴入水箱中。

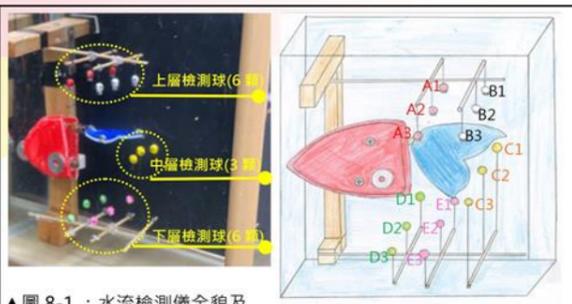
實驗八：當「機械海豚」尾鰭擺動速度不同時，如何影響其附近的水流變化？

(一)實驗方法

- 1.研發【水流檢測儀】：用簡易材料裝置【水流檢測儀】，檢測儀含有 15 顆「小檢測球」分佈於機械海豚尾鰭的上、中、下層(圖 8-1~8-2)。
- 2.將機械海豚固定於木條後，置入 20cm*30cm*32cm 水箱中，依序調整馬達轉速為 2/8~6/8 刻度，每刻度各實驗 3 分鐘，且錄下 3 個角度(水箱正面、水箱右側、水箱正上方)影片，並使用軟體判讀每顆小檢測球移動情形。

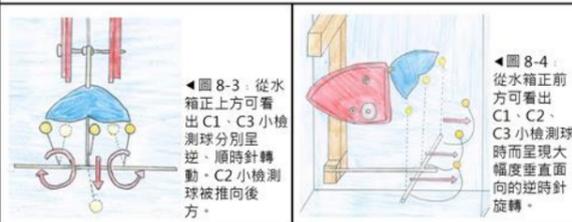
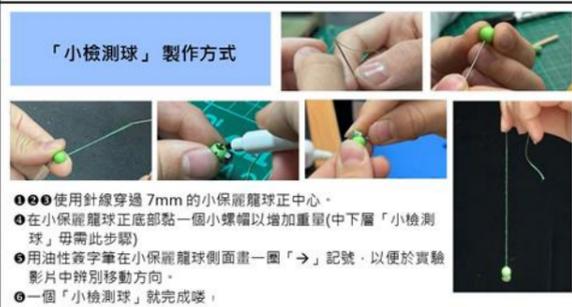
(二)實驗發現

- 1.不論馬達轉速為何，【中層 C1、C2、C3 區域】及【下層 E2 區域】小檢測球都有大幅度轉動/移動;馬達轉速 4/8、5/8 時，除了上述區域外，還增加【下層 D2 區域】;馬達轉速 2/8、3/8 時，除上述區域，還增加【上層 B2 區域】
- 2.承 1，**尾鰭擺動得越快，小檢測球會顯著移動或旋轉的總區域越少。推測是因當尾鰭擺動速度越快，受其擺動角度越小之影響所致。**
- 3.不論馬達轉速為何，【上層 A1、A2、A3】、【上層 B1、B3】、【下層 D1、D3】、【下層 E1、E3】區域小檢測球僅有微小幅度的移動或轉動，表示當尾鰭擺動時，以上這些區域的水流變化微弱。
- 4.慢速播放水箱正上方影片，**可明顯看出尾鰭正後方【中層 C1 區域】小檢測球呈大幅度水平面向逆時針旋轉，【中層 C3 區域】小檢測球時常呈大幅度水平順時針旋轉，尾鰭正後方 2 個水流渦顯而易見(圖 8-3)!**
- 5.慢速播放水箱正前方影片，**可明顯看出尾鰭正後方【中層 C2 區域】小檢測球大幅度往後移動，顯然受【中層 C1、C3 區域】2 個漩渦推擠(圖 8-3)!**
- 6.慢速播放水箱正前方影片，**可明顯看出尾鰭由下往上擺動時，正後方【中層 C1、C2、C3 區域】小檢測球時而呈現大幅度垂直的逆時針漩渦(圖 8-4)!**
- 7.特別製作 3 顆小檢測球放在上層 B 區後，慢速播放水箱正前方所錄影片，**可明顯看出尾鰭由上往下擺動，尾鰭上方出現大幅度垂直順時針漩渦!**



▲圖 8-1：水流檢測儀全貌及【小檢測球】位置

▲圖 8-2：【水流檢測儀】15 顆小檢測球位置標示



▲圖 8-3：從水箱正上方可看出 C1、C3 小檢測球分別呈逆、順時針轉動，C2 小檢測球被推向後方。

▲圖 8-4：從水箱正前方可看出 C1、C2、C3 小檢測球時而呈現大幅度垂直面向的逆時針旋轉。

伍、結論

一、本作品是目前第一件「研究水平尾鰭在水中運動行為」的科展作品。

子題一文獻探討得知「**海豚**」能在水中快速游動的奧秘，主要是「**利用水平尾鰭上下拍動水面而產生向前游動的推進力**」!目前沒有其他作品探究海豚水平尾鰭的運動行為，因此本研究將聚焦改變水平尾鰭的各種變因，找出影響其游動的真相!

二、成功研發動態實驗用擬真模型及多項能在水中進行量測的儀器，克服在水中取得數據的困境!

(一)研發擬真「機械海豚」進行實驗，藉由調整水平尾鰭的擺動速度，可掌控機械海豚有趣的游動姿態!

調整【第五代機械海豚】水平尾鰭擺動速度 1/8~2/8 時，只能停留在原處擺動尾鰭;擺動速度 3/8 時，會在靠近水箱底部向前游動，但頭部會不時地碰撞箱底;擺動速度 4/8~5/8 時，會在水箱中上層處平穩地向前游動;擺動速度 6/8 時，會在水箱中邊向前游動，邊翻跟斗，超級有趣!

(二)自行研發【水中推進力/升力測量儀】，成功以「重量」形式呈現機械海豚在不同變因下游動時所產生的推進力/升力，並藉由計算「推升比值」檢視其前進能力!

子題三、四透過「水中推進力/升力測量儀」可確實得知尾鰭由下往上擺動時，會產生推進力;尾鰭由上往下擺動時，會產生升力。子題五「水平尾鰭的擺動如何影響其向前的游動速度?」實驗中已驗證【推升比值】越大，機械海豚的前進速度越快，前進能力越佳!

三、機械海豚尾鰭擺動速度、面積、形狀都會影響其在水中的前進能力。

(一)海豚尾鰭擺動得越快，不見得會越游越快喔!

子題三、四中得知當馬達轉速介於 2/8~5/8 時，馬達轉速越快，其「推升比值」越大。但當馬達轉速介於 5/8~6/8 時，其「推升比值」卻變小(圖 4-2)。表示機械海豚尾鰭在馬達轉速 5/8 擺動速度時的前進能力最好!

(二)機械海豚尾鰭面積等比例放大時，所產生的推進力及升力也隨之變大!

子題六將機械海豚尾鰭長與寬(圖 6-1)依序放大成 0.75 倍、1 倍、1.25 倍、1.5 倍、1.75 倍後(圖 6-3)進行實驗，發現尾鰭面積越大時，機械海豚在水中擺動尾鰭所產生的推進力及升力也隨之變大。但尾鰭面積放大 1.25 倍(25.40cm²)時的「推升比值」最大，為 1.67!

(三)固定水平尾鰭面積，不論其形態如何變化，其「推升比值」幾乎相同!

子題七中得知，機械海豚尾鰭面積為定值時，改變尾鰭長與寬的比例(圖 7-1)，發現以 1.0 倍為基準，尾鰭寬度減為 0.6 倍、0.8 倍時，在水中擺動尾鰭時所測得的推進力及升力都顯著增加;尾鰭寬度增為 1.2 倍、1.4 倍時，水中擺動尾鰭時所測得的推進力及升力略減。「推升比值」介於 1.66~1.67 間。

四、研發【水流檢測儀】，使機械海豚擺動尾鰭時的水流變化一覽無遺!

(一)所研發的【水流檢測儀】不僅可以環景無死角地看出尾鰭擺動時的水流變化，還能立即無限制地重複進行觀測。

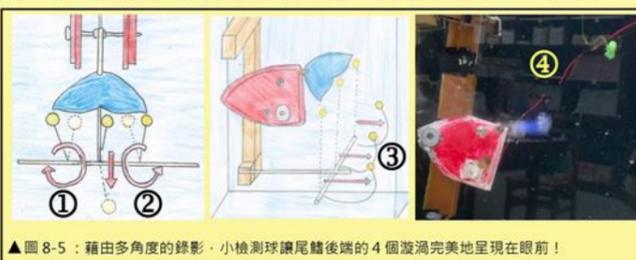
子題八得知尾鰭擺動越快，小檢測球移動/旋轉總區域越少，推測與子題三結果-尾鰭擺動速度越快，擺動角度越小有關。

(二)小檢測球的設計讓尾鰭後端 4 個漩渦完美呈現眼前!(圖 8-5)

- 1.子題八從水箱正上方拍攝的影片明顯看出 2 個漩渦：尾鰭正後方【中層 C1、C3 區域】小檢測球分別呈大幅度水平面向逆、順時針旋轉。
- 2.子題八從水箱正前方拍攝的影片看出尾鰭由下往上擺動時明顯出現第 3 個漩渦在尾鰭後下方，【中層 C1、C2、C3 區域】小檢測球時而呈現出大幅度的垂直面向的逆時針旋轉;當尾鰭由上往下擺動時出現第 4 個漩渦在尾鰭後上方，小檢測球時而呈現垂直面向的順時針旋轉。

(三)機械海豚利用水平尾鰭的擺動製造渦流來降低前進的阻力，進而提高前進的效能。

子題八中可由小檢測球轉動/移動看出：由下往上擺動的尾鰭在尾鰭後方形形成兩個方向相反的漩渦，接著由上往下擺動的尾鰭使得兩個漩渦相遇，相併的兩個漩渦形成一束強力地向後的噴流(如圖 8-3 的 C2 小檢測球)，以作為推進力量的提供。



▲圖 8-5：藉由多角度的錄影，小檢測球讓尾鰭後端的 4 個漩渦完美地呈現在眼前!