

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 生活與應用科學(二)科

第三名

032922

鰭門遁水—仿生魚鰭於船隻航行上的應用與探究

學校名稱：新北市立安溪國民中學

作者： 國二 蔡立群 國二 謝靚樺 國二 李彥均	指導老師： 劉明元 解宗翰
---	-----------------------------

關鍵詞：仿生魚鰭、渦流、雙擺

摘要

以仿生魚尾鰭做為船隻推進裝置，探究對船隻運動的影響。用自製船體拍攝其運動影片加以分析，依各實驗探究目的比較其平均速度、波峰加速度平均值、平均或最大推力。仿金槍魚與仿石斑魚尾鰭各在適當的軟硬材質、擺動幅度及頻率下可得最大推力。考慮船舶使用情境的多元性，故選用形狀介於兩者間的中間型尾鰭，配合渦流觀察，進行後續探究，結果發現：以 1/2 前翼展 2.5 公分、中軸長 4 公分的尾鰭，加裝 12 公分木籤作為連桿，可有效提升船隻的平均速度及最大推力。比對渦流運動得知尾鰭推力與渦流完整度，噴流效果相關。加裝適當破阻裝置能有效降低阻力，使前進合力顯著提升。由雙尾鰭實驗得知兩尾鰭相反位相擺動可同時提升船隻平穩度及推力。

壹、研究動機

一般船隻需要有螺旋槳和方向舵兩個裝置，分別控制前進動力與方向轉動，才能夠在海中航行；不過魚類卻只需要一個有力的尾鰭，配合適當的擺盪模式，便能達到同樣效果。因此我們想嘗試模擬魚的尾鰭構造，並將其裝置於船上，讓船只靠尾鰭獲得推進進力，觀察其推進的狀態，是否可應用在不同航行狀態下(例如變速航行、轉彎閃避)，並且產生優化效果。

貳、研究目的

1. 探討三種形狀的魚尾鰭在改變材質、擺動幅度與擺動頻率時，對船隻運動的加速度與平均速度影響。
2. 探討中間型魚鰭，前翼展和中軸長比值變化對船推進的影響。
3. 探討不同材質、不同長度的尾鰭連桿對船推進的影響。
4. 探討改變魚鰭表面性質對船推進力的影響。
5. 探討魚尾鰭擺動，來與回頻率不同所造成的推力變化。
6. 探討船隻運動時，尾鰭擺動與渦流變化的相關性。
7. 探討船體加上仿生臀鰭(破阻裝置)對船隻運動的影響。
8. 探討雙尾鰭擺動對船推進的效能影響。

參、研究設備及器材

器材		耗材	儀器
延長線	塑膠墊板	熱熔膠條	筆電
Arduino 電路板	鋁片	鐵絲	手機
9v 充電電池	透明橡膠墊版	竹籤	相機
伺服馬達	冰棒棍	氣球棍	電子秤
麵包板	銅管(接竹籤)	釘套	三用電表
熱熔膠槍	油黏土		
水缸	塑膠瓦楞板		
			使用軟體： Arduino traker imageJ Excel
圖 1 自製船體	圖 2 自製魚鰭卡榫	圖 3 拍攝平台	



圖 4 自製壓克力水波槽

肆、文獻探討及研究步驟

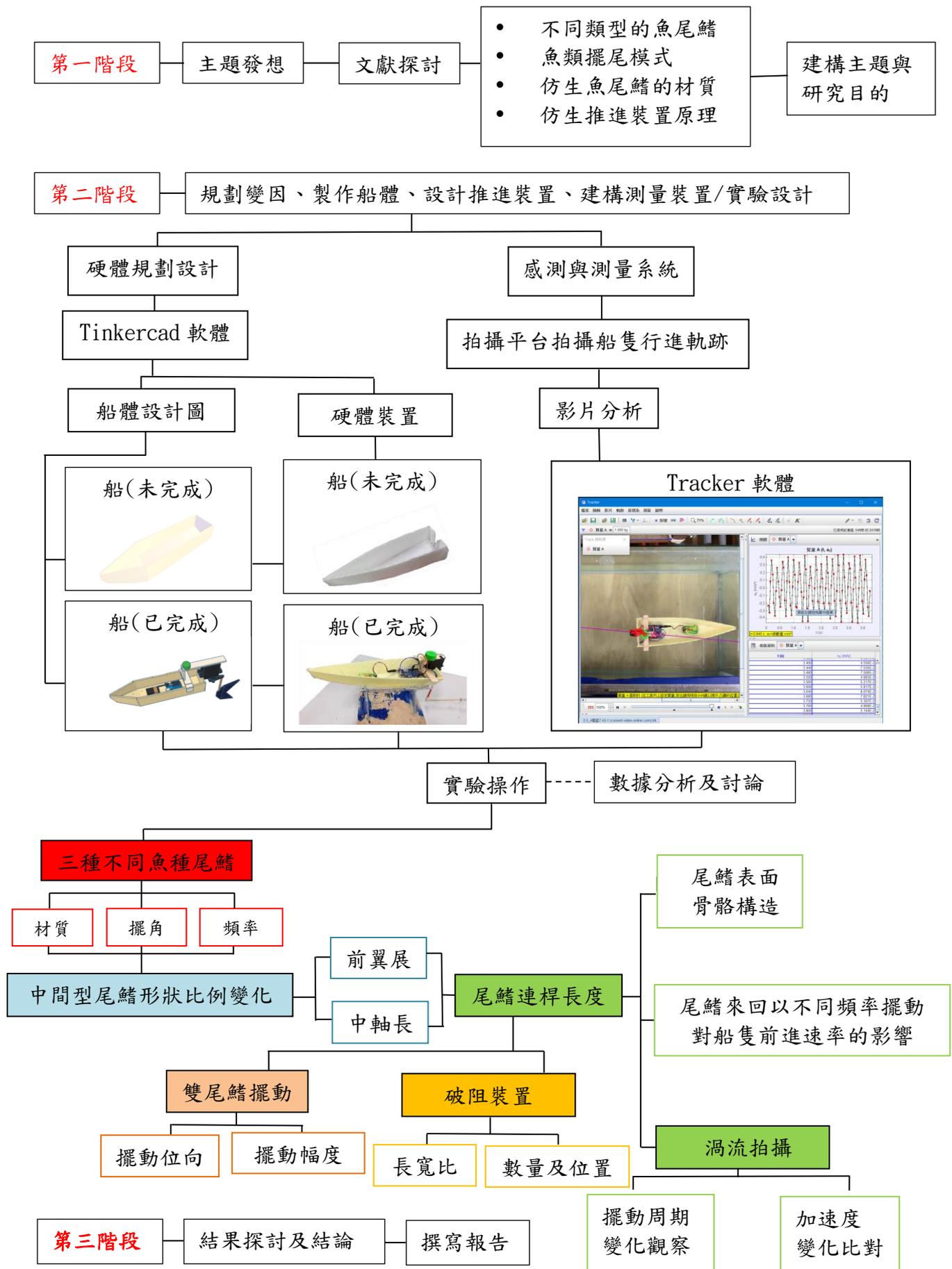


圖 5 實驗流程圖

一、文獻探討初論

(一) 一般常見魚類的游泳模式，一種是類似旗魚、**金槍魚**。這一類的魚，身體形狀類似魚雷的流線型，頭尾相對尖細；尾部肌肉結實發達，尾鰭基部較窄，末梢展開距離較寬；尾鰭



▲北方黑鮪(North Bluefin tuna) 圖片來源: <http://www.mermaid.com.tw/zh-tw/>

上下對稱，單邊觀察較為尖細，尾鰭前緣較厚較硬，後緣較薄較軟，組成的骨骼在鰭上半部為上傾由基部向末梢發散，下半部為下傾發散，上下有對稱。背鰭臀鰭構造與尾鰭相似，分布一上一下，游泳時具備破阻效果。

這類的魚游泳時，身體中前段擺動甚少，末段可以高頻率擺動帶動尾鰭，**直線泳速較快，若擺動幅度大，可以瞬間產生高速**。此種魚類肌肉粒線體含量甚高，顯示其收縮時能量消耗甚大。

另一類，主要是類似**石斑魚**、吳郭魚；相對於前一類，身體雖亦呈現流線型，但左右側明顯較扁，頭尾相對於軀幹較不尖細，尾部肌肉相對於金槍魚較不結實，但分布較寬、扁。



尾鰭基部較寬，展幅寬度較窄，整體而言近似梯形。尾鰭較薄、軟，細骨骼沿上下兩邊平行分布，略呈扇形散開。

這一類的魚，游泳時，整個身體左右擺盪呈波浪狀，擺動頻率相對較慢越靠近身體後中後段及尾鰭擺盪越顯著；**衝刺速度不如前一類，但瞬間急彎的靈活度明顯較佳**。

(二) 由前述的探討，仿生魚鰭在材料與結構上的考量，應以**軟硬度與彈性**的角度來思考；由文獻得知，魚尾鰭擺盪，在後方會產生渦流，**渦流的組合或亂流的產生**皆會影響推力的大小及方向。而魚本身的游泳模式，主要和身體、尾鰭的擺動配合相關，而尾鰭的彈性與軟硬度就是其中關鍵。就像人學游泳一樣，動作對才會游的快，游的好。所以，選擇尾鰭材料，我們考慮**軟質透明墊板，金屬鋁片**；前者較軟，有彈性，後者剛性較強，彈性較弱。另外**塑膠墊板**，剛性介於前兩者之間，且彈性較佳，故作為第三種選擇。



(三) 金槍魚與石斑魚為兩種不同典型游泳模式，其尾鰭

形式是兩種極端；若尾鰭形式介於兩者之間，是否在應用上更多元，後來由文獻中，找到所謂**中間型魚尾鰭**(因未找到相對應的魚種，故稱之)，亦將之列為探究的類型。

二、研究步驟

(一) 船體設計

為了測試推進力，製作船體時考慮到水阻力及浮力影響，我們決定用較輕的塑膠瓦楞板製作，並採斜底，讓船推進時能減少阻力並避免吃水過深。

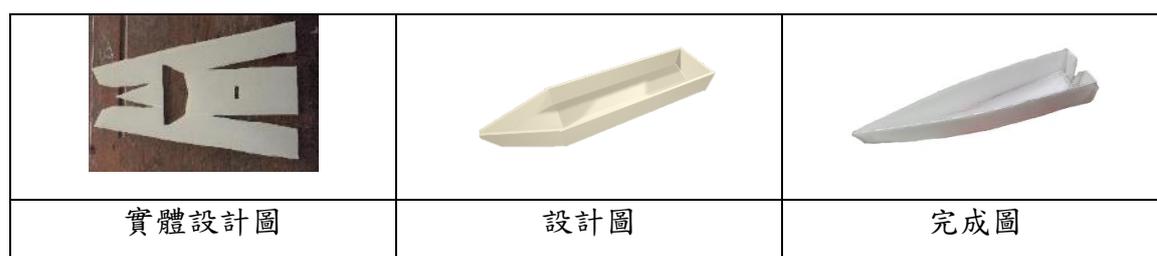


圖 6 船體設計圖

(二) 推進尾鰭設計

透過文獻探討，得知在不同環境下，魚鰭會因魚體形狀、柔軟度與游泳模式而演化出不同的彈性、軟硬程度及形狀，得以帶來不同程度的推進效果，因此我們挑選了三種魚種的尾鰭作為推進裝置的參考。

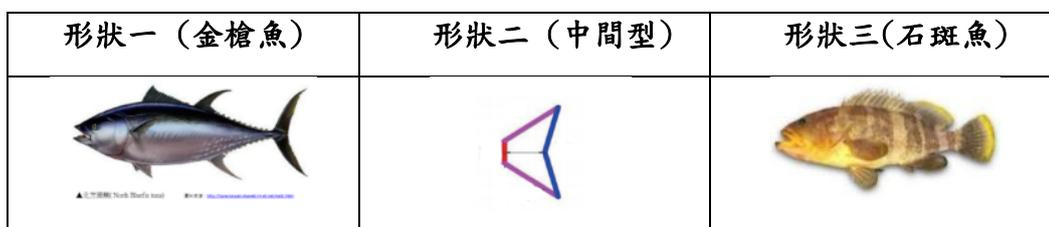
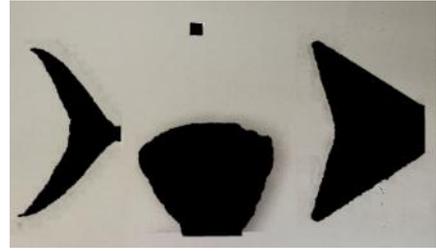


圖 7 推進裝置參考

表一、推進裝置簡介

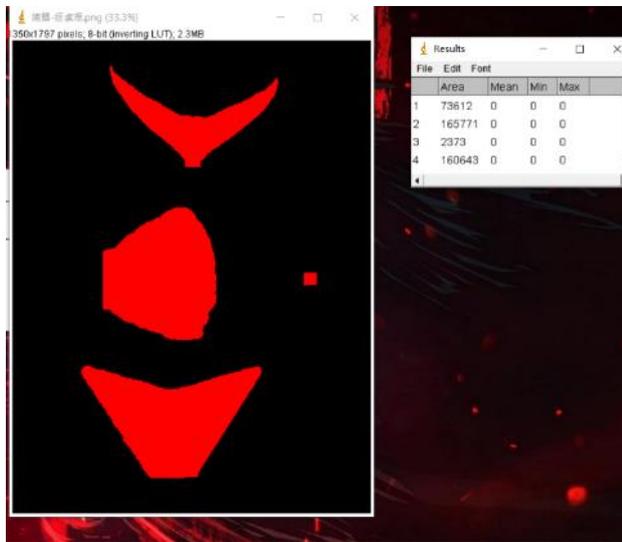
形狀一（金槍魚）	形狀二（中間型）	形狀三（石斑魚）
尾鰭展幅大，硬質，以尾鰭急速擺動獲得推力。	形狀介於金槍魚和石斑魚之間 參考文獻「仿生機制與運用介紹-向海洋生物學習」中的魚鰭形狀示意圖	尾鰭展幅小，近梯形，質軟；尾部尾鰭配合擺動

本實驗為探討尾鰭形狀的影響，因面積大小影響尾鰭受力大小，以等化消除此一變因干擾。



面積等化

1. 將參考魚種的尾鰭截下並填色，置於同張紙上印出，於紙上畫一個 1cm^2 的方塊，拍下存於電腦後再次將其填色成色塊。
2. 利用 imageJ 計算色塊面積(平方像素)



(上：仿北方藍鰭金槍魚
中：仿石斑魚
下：中間型
右： 1cm^2 方塊)

圖 8 imageJ 軟體

3. 計算邊長比用於放大至同樣面積(69.86cm^2)

$$\left(\sqrt{\frac{A1}{A2}}-1\right)*100\%$$

A1-作為基準的魚鰭面積

A2-欲換算的魚鰭面積

$\frac{A1}{A2}$ 面積比(像素比=公分比)； $\sqrt{\frac{A1}{A2}}$ -邊長比

$$\left(\sqrt{\frac{A1}{A2}}-1\right)*100\%-用影印機進行放大所需放大之倍率$$

4. 以此放大倍率將鰭印出作為推進裝置(尾鰭)設計圖

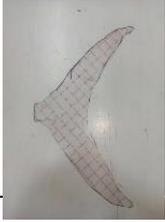
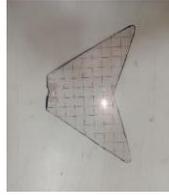
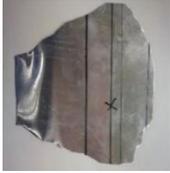
材質:透明軟質墊板		
形狀:仿北方藍鰭金槍魚	形狀:仿石斑魚	形狀: 中間型
		
材質:鋁片		
形狀:仿北方藍鰭金槍魚	形狀:仿石斑魚	形狀: 中間型
		
材質:塑膠墊板		
形狀:仿北方藍鰭金槍魚	形狀:仿石斑魚	形狀: 中間型
		

圖 9 推進尾鰭實品

(三) 總體架設與實作檢測流程

船體及推進裝置完成後，將兩者與驅動裝置組合。

1. 將伺服馬達利用冰棒棍定位於船身後側，並在上方黏貼瓶蓋用於 tracker 程式追蹤船隻行進軌跡。
2. 將驅動程式碼灌入 Arduino 主機板，並使用電池提供輸出所需電壓(控制於 8V， $\pm 0.3V$ 範圍)。
3. 拍攝平台即堆疊講桌及課桌椅架高手機以拍攝船隻完整行進軌跡。

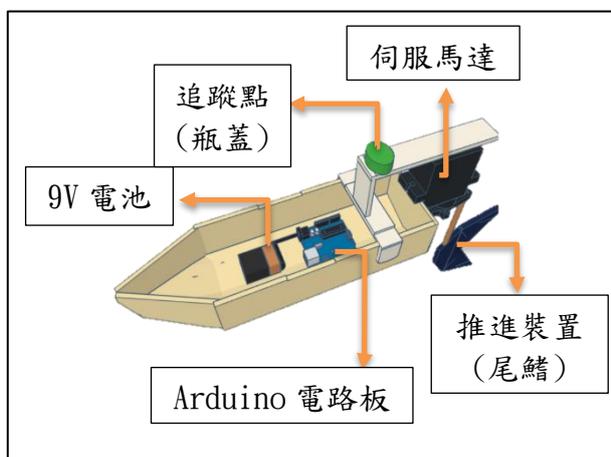


圖 10 船隻設計示意圖

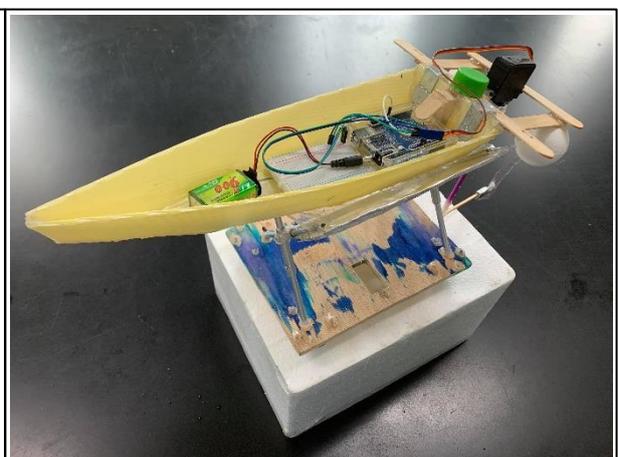


圖 11 船隻實作完成圖

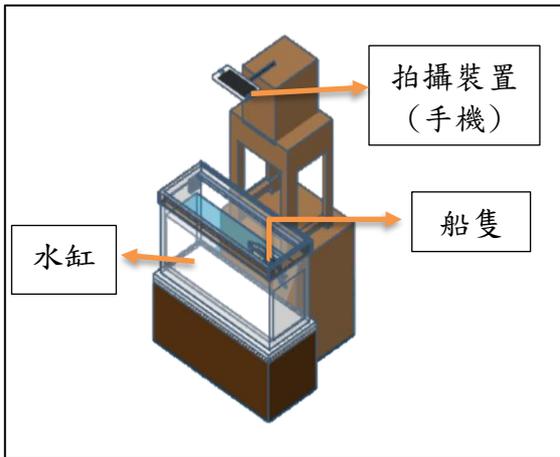


圖 12 拍攝平台裝置示意圖



圖 13 拍攝平台實作完成圖

檢測步驟:

- (1) 將程式寫入 Arduino 電路板，控制伺服馬達擺動條件
- (2) 將船隻放入水缸之起始點，並調整前進方向後，使船隻前進
- (3) 以拍攝裝置錄下船隻運動軌跡之影片
- (4) 將影片匯入 Tracker 分析
- (5) 分析後數據匯入 Excel 後製成圖表(V-t, a-t 圖) tracker 圖，後續實驗均以相同方式進行分析觀察。

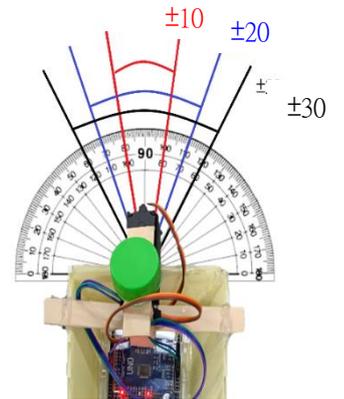
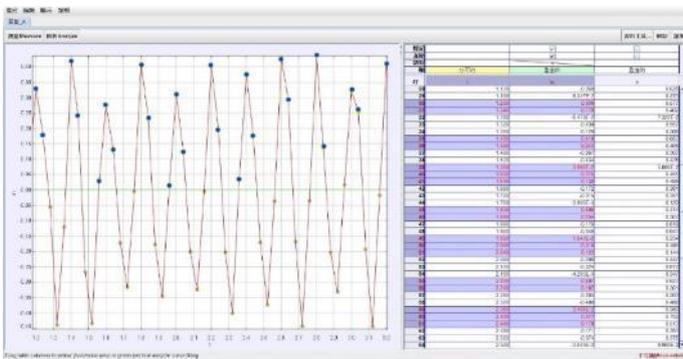


圖 14 尾鰭擺角示意

分析 1. 平均速度(觀察及評估船隻航行時整體的動能)

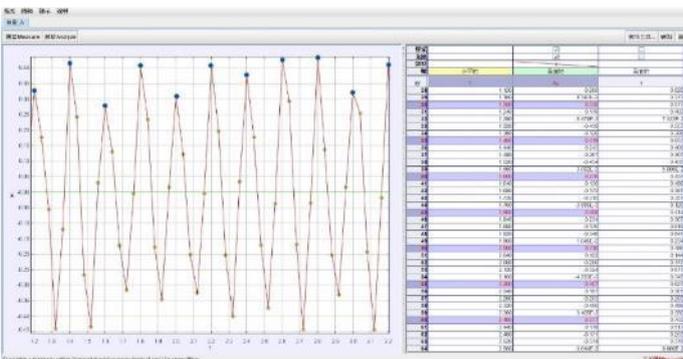
Tracker 追蹤質點 (影片所取部分速度平均)



2. 平均推力

1. 取影片中較有規律週期的兩秒
2. 將數值為正的數據取出取平均值
3. (平均後數據×船隻總質量)÷尾鰭面積

(觀察及評估船隻航行時整體輸出的推力)



3. 最大推力

(觀察尾鰭擺盪週期，推力達到最大值)(波峰)

1. 取影片中較有規律的兩秒
2. 將波峰的加速度數據取平均值
3. (平均後數據×船隻總質量)÷尾鰭面積

平均推力: (正向加速度值×船隻總質量)÷尾鰭面積
 最大推力: (波峰加速度值×船隻總質量)÷尾鰭面積

(四) 各項操作變因實作驗證

實驗一：探討三種魚鰭在不同材質、(擺角幅度，擺動頻率)組合，船隻**平均速度**的變化

此實驗的發想，主要是考慮不同的尾鰭，形狀、材質、擺動模式都會影響船隻的推進效能，且組合模式可能不只一種。根據實驗結果，找出適用的組合條件。

實驗條件

1. 以金槍魚、石斑魚與中間型魚鰭，搭配軟墊板、鋁片、塑膠墊板三種材質，建構**九種尾鰭**，並進行擺動測試。
 2. 馬達在相同電源(8V)飽和輸出功率下，設定三種(擺幅角度，擺動頻率)規格，(10度、3.3Hz)，(20度、2.5Hz)，(30度、2.0Hz)；組合九種尾鰭，共計二十七種擺動組合條件。
 3. 拍攝船隻運動過程影片，以 Tracker 軟體分析，觀察船隻平均速度的變化。
- 註：因馬達輸出總功率相同，擺角大小會影響擺動頻率；特定擺角會有相對應的頻率

實驗二：改變中間型魚鰭**前翼展與中軸**的比值，觀察船隻最大推力與平均推力。

實驗一的結果經過討論，選定以參考文獻的

中間型尾鰭形狀為依據，改變其比例；

並以**軟墊板**為材質

設定改變的參數為：

1/2 前翼展及中軸長。

10cm

參考尾鰭的規格：

1/2 前翼展 2.5cm、中軸長 6cm。

實驗條件

1. **1/2 前翼展**分別為 2.5cm、5cm 及 7.5cm；

中軸長分別為 4cm、6cm、8cm 及 10cm。

交互組合，共計有 12 種規格的同型尾鰭。

2. 以 8V 電壓輸入，擺幅± 30 度，擺動頻率 2Hz 進行測試；

因為尾鰭面積大小不同，故採用單位面積受力大小(上表以壓力表示)做綜合比較。

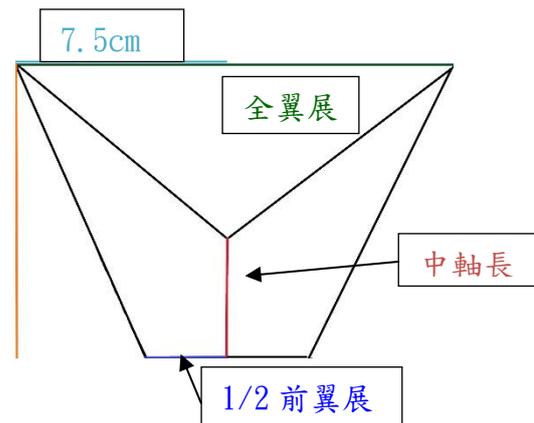


圖 15 中間型魚鰭比例變化示意圖

測試結果以尾鰭規格

1/2 前翼展 2.5cm、中軸長 4cm、面積 55 平方公分；得最大輸出壓力與最大平均壓力。

因此以這組尾鰭的條件進行後續優化試驗

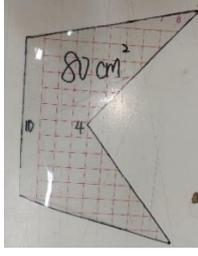
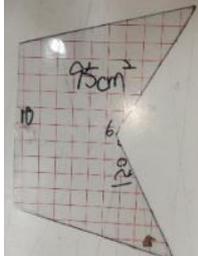
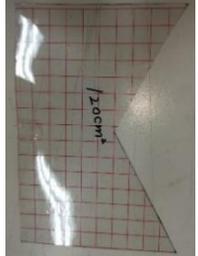
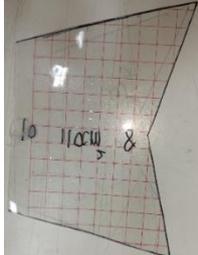
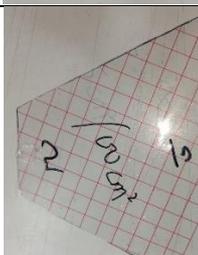
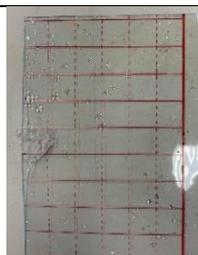
2/1 前翼展→ ↓ 中軸長	2.5cm	5cm	7.5cm
4cm			
6cm			
8cm			
10cm			

圖 16 中間型魚鰭各種比例實體

實驗三:尾鰭連桿(仿生尾部脊椎骨)

以實驗二的最佳展軸比，(1/2 前翼展 2.5cm、中軸長 4cm、面積 55 平方公分)，更改不同材質與長度的尾鰭連桿。

此一試驗設計主要是考量到魚類游泳時，身體尾部會有擺動，帶動尾鰭，形成不同的擺動模式；因此在尾鰭前端加裝傳動連桿，模擬尾部脊椎骨；連桿的彈性、軟硬度會影響擺動模式與力量的傳遞。

實驗條件 :1. 材料與長短影響連桿的彈性、硬度與振動頻率；材料選擇鐵絲與竹籤進行測試，長度是以尾鰭中軸長為基準，以 4cm(1 倍)、8cm(2 倍)、12cm(3 倍)，交互組合共建立六種連桿進行測試。

2. 以 8V 電壓輸入，擺幅± 30 度，擺動頻率 2Hz 進行測試；

以 Tracker 軟體分析，觀察平均速度與最大輸出推力的變化。

實驗四：魚尾鰭表面性質：

以細鐵絲模仿魚鰭表面骨骼排列，探究不同排列模式，對尾鰭擺動推力所造成的影響。

此實驗設計是考量魚尾鰭需要有適當**剛性**傳遞連桿作用力，也需要適當的**柔軟度**避免擺動的水渦流被破壞形成亂流(推力效果差)。

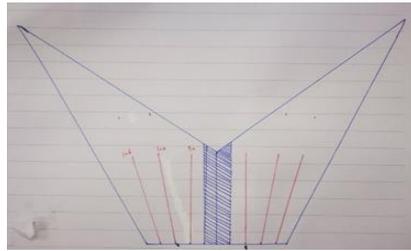


圖 17-1 尾鰭仿生骨骼設計

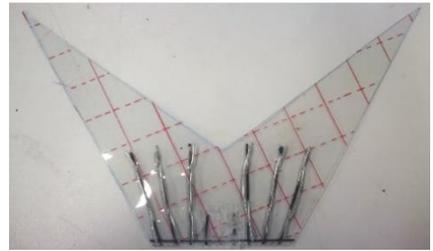


圖 17-2 尾鰭仿生骨骼實體完成

實驗條件： 1. 以 12cm 竹籤連桿傳動，1/2 前翼展 2.5cm、中軸長 4cm、面積 55 平方公分軟墊板尾鰭進行測試。

2. 以 8V 電壓輸入，擺幅 ± 30 度，擺動頻率 2Hz 進行測試

3. 分別以 2cm, 4cm 的細鐵絲，以鑲嵌方式配合透明膠帶固定於尾鰭基部，鐵絲在基部間隔 0.5cm，以放射狀分布。左右兩組鐵絲規格皆相同，兩組鐵絲中央間隔 2cm(左右各 3 支)。

實驗五：變頻擺動：

以不同配對組合**來與回**時間，以觀察平均速度與最大輸出推力的變化。

此實驗的設計考量是由先前科展作品得到啟發，原先作品中描述來回擺盪時間落差變大，可提升推力大小。考量到尾鰭來回擺盪有快慢變化，除了魚本身**省力**以外，造成**水渦流**何種變化，使推力提升?若直接運用在船舶推動，效果如何?

實驗條件： 1. 以 12cm 竹籤連桿傳動，1/2 前翼展 2.5cm、中軸長 4cm、面積 55 平方公分軟墊板尾鰭進行測試。

2. 以 8V 電壓，飽和功率輸出，進行測試

3. 擺角以中軸為基準， ± 30 度擺動，
時間組合設定 0.75s+0.75s、1.0s+0.5s、1.25s+0.25s

4. 擺角以中軸為基準， ± 10 度擺動，
時間組合設定 0.35s+0.35s、0.45s+0.25s、0.55s+0.15s

實驗六：渦流變化觀察：

觀察船舶在動力尾鰭擺動時產生的渦流，比較平均推力最佳與較弱的尾鰭擺動，觀察**推力的變化**與**渦流變化**的相關性。

此實驗設計的發想，是觀察到船隻運動過程中，推進的加速度有週期性變化，且在平均推力大小不同的情境下，渦流、亂流的形成組合均不同；因此想進一步找出其定性甚至定量關係。

實驗方法(一) 觀察漂浮保麗龍球的擾動:(此方法是由文獻參考而來)

1. 將保麗龍球鋪滿水缸

2. 將目前平均推力**最佳尾鰭(木質 12cm 連桿-2.5cm:4cm)**

與相對推力較弱的尾鰭**(木質 12cm 連桿-7.5cm:10cm)**

依序固定在同一船隻的傳動連桿上，分別進行擺動測試。

(測試條件:8V 電壓輸入，擺幅 ± 30 度，擺動頻率 2Hz)

3. 以支架固定船隻，尾鰭伸入水中 1/2(約在中軸線為至)，再以架高的相機拍攝保麗龍球擾動，透過影片觀察尾鰭擺動與渦流變化的相關性

實驗方法(二) 利用水波槽進行投影拍攝

查閱相關文獻及詢問專家，除方法(一)以外，另外有查到利用染劑流動、閃頻儀、高速攝影及紋影法。

方法(一)**保麗龍漂浮法**，肉眼可見渦流，但渦流的形成、組合、擾動變化、大小位置定量均無法觀察分析，且拍攝效果不佳，探究深度頗為受限。

以**滴墨水**方式可在短時間看到影像，但墨水易擴散沉底，無法觀察紀錄。

閃頻儀與**高速攝影**拍攝影像效果佳，但渦流為水面擾動，景深效果不佳；

紋影法多用於氣流擾動，藉由密度差造成亮暗區別形成擾動影像；但渦流並無密度差異，無法形成影像。

藉由紋影法的啟發，聯想到水波觀察，凸透鏡聚光，凹透鏡散光，而渦流似凹透鏡，浪高起形成水流似凸透鏡，再以強光投射，可看到亮暗影像。因此我們訂製一個長6尺寬4尺深20公分的壓克力**水波槽**進行測試。初步測試效果甚佳，渦流形成、消失、自旋、強度、相互偏移擾動、噴流形成均可觀察拍攝紀錄。

可惜在完成初步觀察紀錄後，因新冠肺炎疫情嚴重，學校停課，無法進一步進行船舶推力與渦流變化的量化分析。只能等待疫情結束再繼續進行實驗探究了！

目前已有的渦流觀察紀錄：

以**手動擺盪操作**1/2前翼展2.5cm、中軸長4cm、面積55平方公分軟墊板尾鰭；操作變因：單尾鰭渦流形成，擺角大小，作用力大小，擺動頻率大小，雙尾鰭擺盪渦流變化，另外以同規格鋁片尾鰭，觀察渦流變化。

實驗七：破阻裝置，模擬魚的背鰭、臀鰭製造破阻裝置

此試驗的發想是由仿生背鰭、臀鰭開始，由前面的試驗判斷，船前進時會受到水阻力與尾鰭推力共同作用，且二作用力的效果互為拮抗。若能像自行車團隊賽一樣，有一個破風手在前抗風阻，後方選手可因阻力小，省力加速。而**背鰭臀鰭**的角色就相當於尾鰭的”破風手”。

實驗條件：

1. 以**鋁片**模擬魚類臀鰭製作破阻裝置；**破阻裝置**，連結船體的部分為長，另一邊則為深，規格統一以**長 * 深**做表示。

表二、破阻裝置的組合

背鰭長度 \ 背鰭深度	5cm	7cm
5cm	5*5	7*5
7cm	5*7	7*7

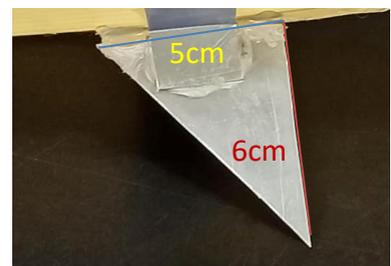


圖 18-1 船身底部破阻裝置示意圖

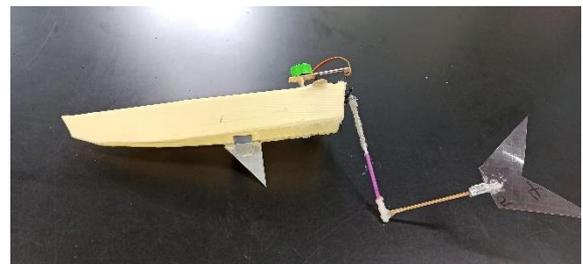


圖 18-2 破阻裝置實品組裝圖

2. **擺放位置**：有兩種選擇，第一種是裝在**船身一半**也是距離尾鰭15公分，第二種裝在船身**最尾部**的位置。
3. **組合形式**：單片破阻，4種形式*2種位置，共計8種組合。
雙片破阻，4種形式排列組合，共計16種組合。
4. 以8V電壓輸入，擺幅±30度，擺動頻率2Hz進行測試，拍攝船隻運動軌跡匯入Tracker分析速度與加速度變化。

實驗八:雙尾鰭擺動裝置

改變雙尾鰭擺動位相，觀察相同與相反位相的推進效能變化。

此試驗的發想，著重於尾鰭擺動時，垂直前進方向側向力會造成船舶**顯著搖晃**，並且降低了向前的推進力。且根據先前探究的結果，擺動產生的渦流聚合造成向後噴流，成為船前進的推力。**噴流聚合效果**的好壞直接影響到**推力**的大小與方向。若雙尾鰭同步擺盪或反相擺盪，是否可提升噴流效果或船的穩定度。

實驗方法:

1. 改造船隻，在船身後方利用架設支架，鎖上兩顆伺服馬達，並個別接上傳動連桿與尾鰭。
2. 以 12cm 竹籤連桿傳動，1/2 前翼展 2.5cm、中軸長 4cm、面積 55 平方公分軟墊板尾鰭進行測試。
3. 並黏上保麗龍球改善船因重量增加所造成的平衡問題。
4. 以 Arduino 程式控制擺動位相及擺動角度。

以 8V 電壓輸入，擺幅 ± 30 度，擺動頻率 2Hz 進行測試(位相變因)

5. 變因 (1)雙尾鰭擺動位相:同相，相位差 180 度(反相)
(2)擺角: 反相擺盪，改變擺盪角度。

由中軸向外側 30 度(擺幅向外 30 度); 由中軸向內向外皆 30 度(擺幅 60 度)

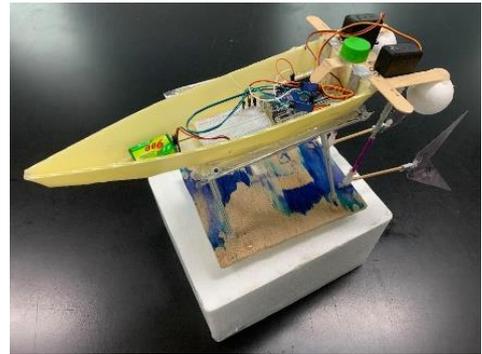


圖 19 雙尾鰭擺動裝置(實物)

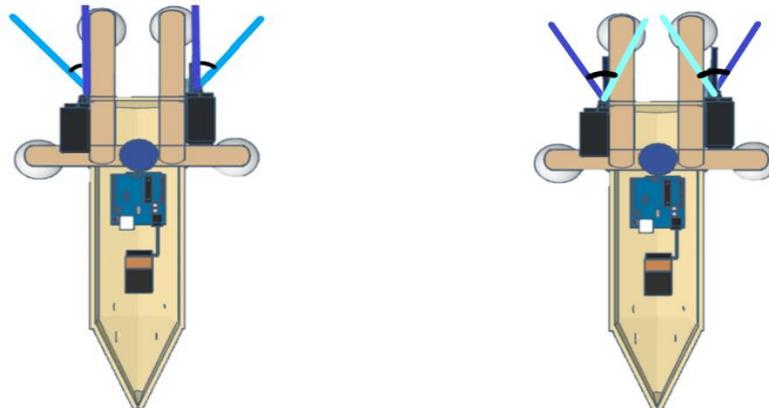


圖 20 雙尾鰭擺動擺角模式示意圖

6. 拍攝船隻運動軌跡匯入 Tracker 分析

伍、研究結果

實驗一、探討三種形狀的魚尾鰭在改變材質、(擺動幅度與擺動頻率)時，對船隻運動平均速度的影響

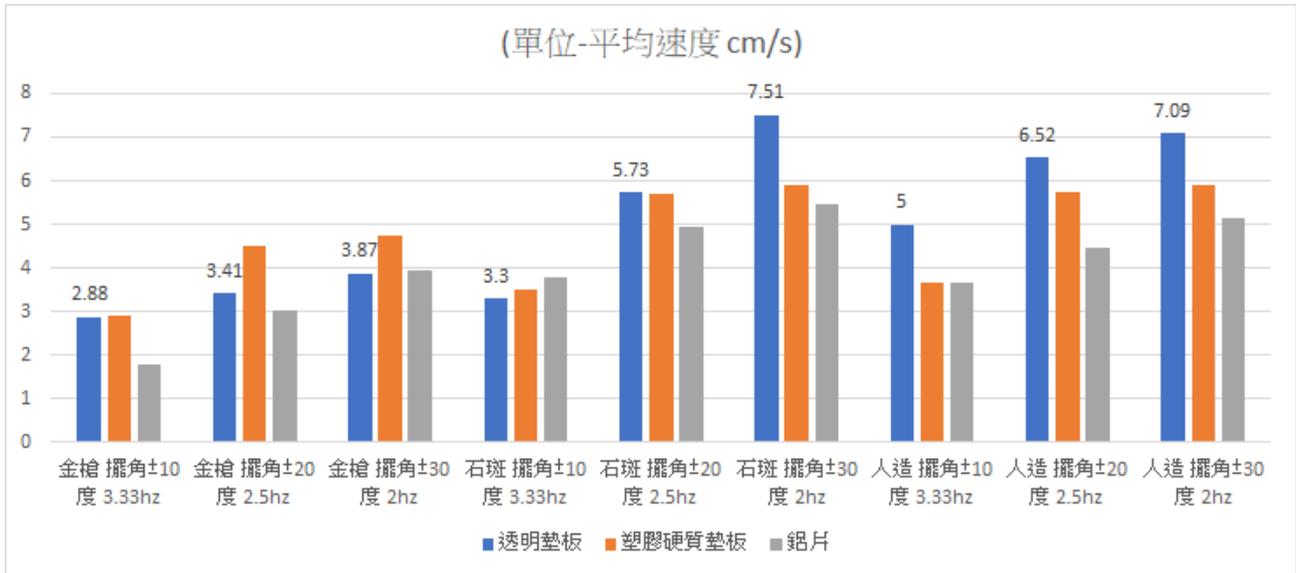


圖 21 改變魚鰭形式、材質、擺動幅度，船隻平均速度變化

數據說明

1. 考慮推進效率，以船前進的直線平均速度做為比較的應變變因。
2. 馬達以 8V 電壓(充電電池)，固定最大功率輸出；當擺角改變，會產生對應擺動頻率，擺角越大擺動的頻率越小。
3. 以尾鰭形式觀察，在所測的擺角頻率範圍內，訪金槍魚鰭平均速度較其他兩種魚鰭低；以材質種類觀察，塑膠硬質墊板在仿金槍魚鰭的速度效能高於其他兩種材料；而在仿石斑魚鰭與人造魚鰭(即中間形魚鰭)，則以透明軟質墊板的速度效能較佳；以擺動幅度來觀察，相同條件下，擺幅越大，所造成的速度效能最佳

數據討論

進行九組實驗分析過後，以平均速度為依據，將三種魚鰭形狀的最優組進行比較，得出九組實驗條件中，船隻航行平均速度的最大值出現在仿石斑魚尾鰭形搭配材質透明軟質墊板、擺角±30 頻率 2hz，其次為中間型尾鰭材質透明軟質墊板、擺角±30 頻率 2hz，兩者平均速度相差 0.42cm/s。

但是在相同電源輸出功率的情況下，若擺角變小，頻率提高；軟質墊板中間型尾鰭平均速度與最大加速度略有下降；相對石斑魚尾鰭，在擺角小頻率高的條件下，平均速度與最大加速度(未列於報告內)均顯著下降；可能是因為擺動的擺角、頻率符合石斑魚的擺動模式，所以效能明顯高於其他兩種擺動模式。考慮到尾鰭出力的穩定性，後續的變因實驗皆以中間型尾鰭材質透明軟質墊板、擺角±30 頻率 2hz，作為試驗的基本條件。

實驗二、探討中間型尾鰭，前翼展和中軸長比值變化對船隻運動推力的影響

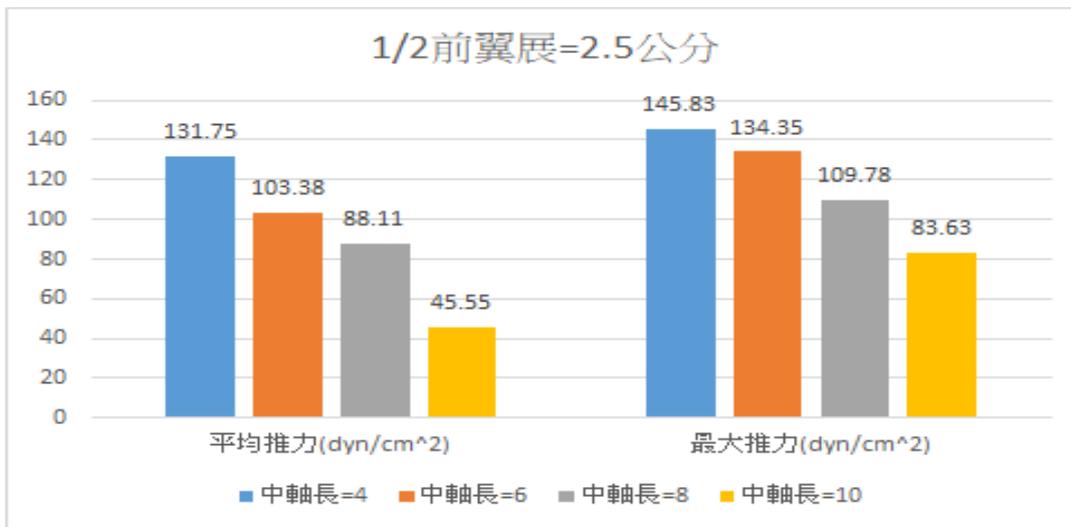


圖 22-1 1/2 前翼展=2.5cm，中軸長改變

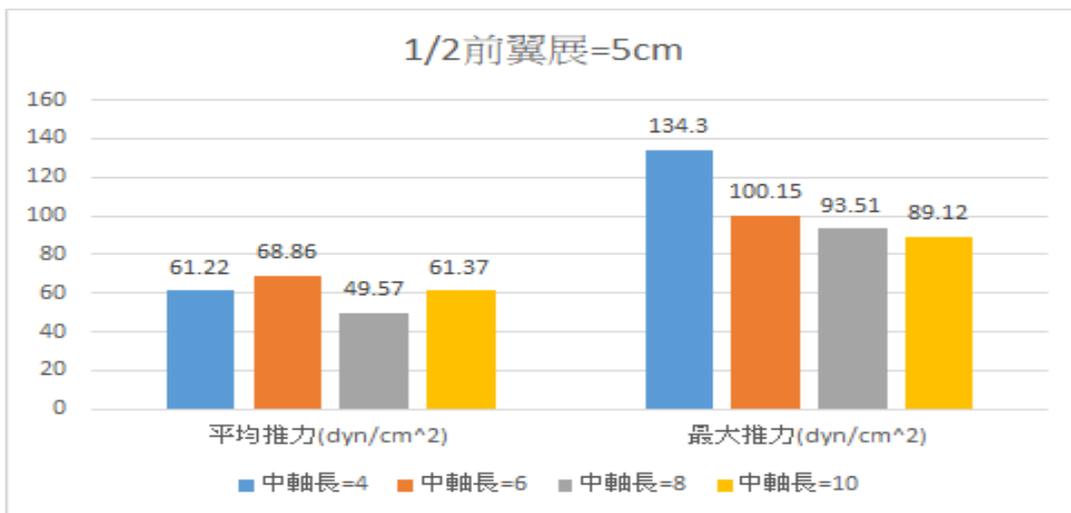


圖 22-2 中間型尾鰭 1/2 前翼展=5cm，中軸長改變

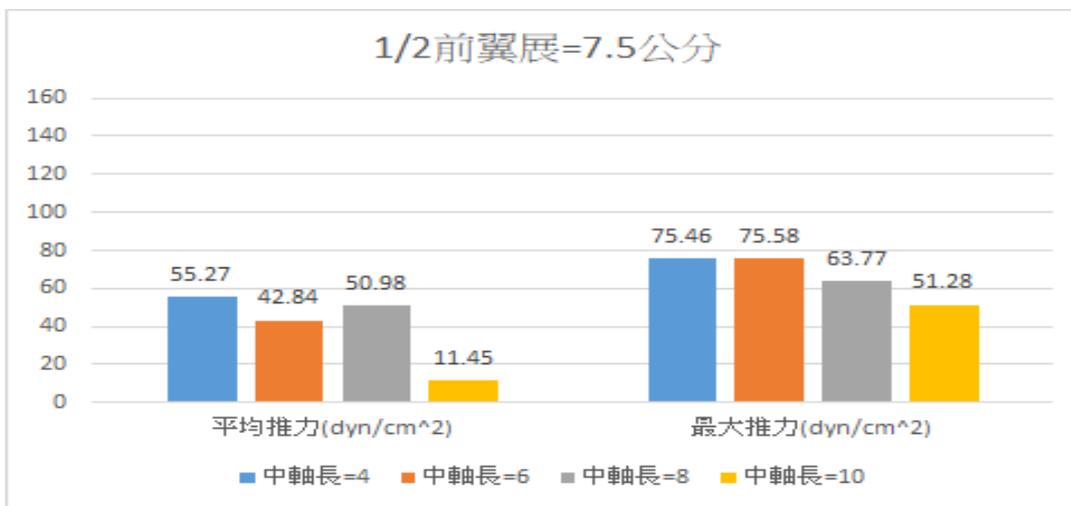


圖 22-3 中間型尾鰭 1/2 前翼展=7.5cm，中軸長改變

數據說明

1. 在測試分析的過程中發現，不論是加速度或速度均可以發現有週期性的變化，推測應與尾鰭擺盪的週期性有相關，過程中甚至加速度有出現負值(即阻力，造成減速)；若過程中是由尾鰭加速的推力與水阻力造成船前進的作用力，當推力有週期性變化，合力必然也有相對變化，那船的前進速度可能就是忽快忽慢(與實驗結果相符)。
2. 比較平均推力及最大推力，主要考慮到最大推力為單一擺動週期中瞬間最大推力，並不能完全代表實際推力效能；有可能出現最大推力較大，但是平均推力反而較小(確實有觀察到)。因為所代表的物理意義不同，因此都予以考慮。
3. 由實驗結果得知，在全翼展、尾鰭垂直長固定的情況下，
由 1/2 前翼展的角度觀察，條件相同情況下，前翼展較窄，得到的最大推力、平均推力均有較大的趨勢；可能與力量傳遞損耗有關。
由中軸的角度觀察，可以看出，相同條件下，中軸較短，得到的最大推力、平均推力也有較大的趨勢；推斷可能與擺盪過程中，中軸較短的尾鰭慣性彎曲甩尾顯著有關。
由最大推力的判斷，中軸及前翼展越長，受力面積雖然增加，但可能擺盪過程中阻力的效果也增強，推力的效果均減弱。
4. 1/2 前翼展 2.5cm 時，中軸長 4cm 所得推力效果最佳，但是平均速度(數據未列入報告)卻沒有相對性最高，推測可能與船身擺盪，造成側向分力產生，出現側向速度，使直線方向的速度減弱。

數據討論 綜合前面論述的結果，透明薄墊板，規格 1/2 前翼展 2.5cm 時，中軸長 4cm 中間形尾鰭，推力效果較佳，後續優化試驗均以此為基本形尾鰭。

實驗三、探討不同材質、不同長度的尾鰭連桿對船推進的影響

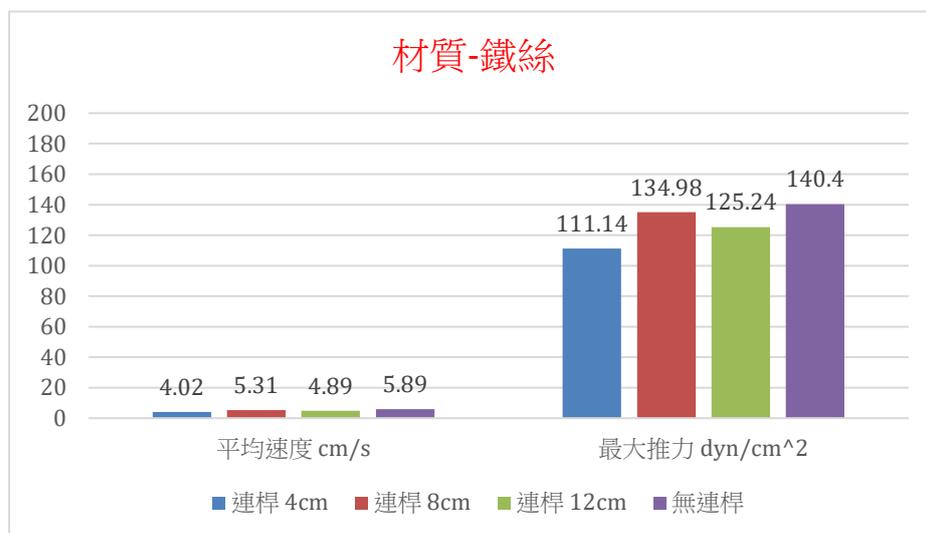


圖 23-1 鐵絲作為連桿平均速度與推力的變化

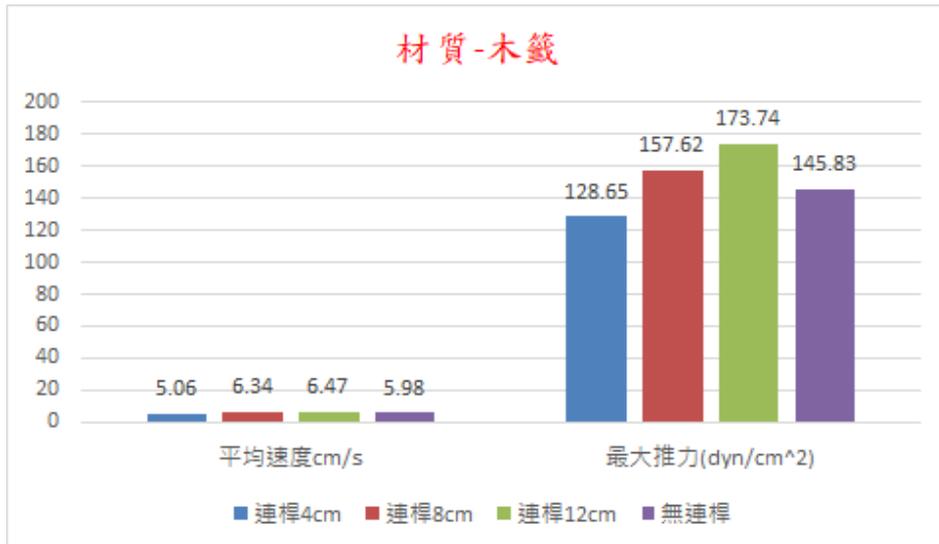


圖 23-2 木籤作為連桿平均速度與最大推力的變化

數據說明

尾鰭連桿的材質與長短決定了它的彈性、硬度與自然振動頻率，而這些條件都有可能影響到尾鰭的擺動模式，影響到能量的傳遞與水渦流的組成。由實驗結果看到，

1. 以鐵絲做的連桿，三種長度都造成平均速度與最大推力均下降，效能比無連桿狀態還低。顯然在傳遞過程中，能量損耗更多。且看不出長度改變所造成的變化趨勢。
2. 以木籤作連桿，8cm 與 12cm 所測到的平均速度與最大推力都有所提升，效能高於無連桿狀態；顯然在擺盪過程中，能量傳遞的損失較少。且效能表現，12cm>8cm>4cm。
3. 在相同長度下，三種長度的連桿，木籤的效能都比鐵絲高。

數據討論

1. 鐵絲連桿可能因為材質較軟，彈性較弱，遇到較大的水阻力容易形變。降低擺動力的輸出。減低船隻的推進力。
2. 木籤硬度較大，彈性也較佳；在傳遞能量上較少損耗。且 12cm 的木籤效果最好可能是長度較長，彈性更好，剛好配合魚鰭的擺動頻率，亂流的阻力較小。
3. 後續檢測試驗，尾鰭皆有接 12cm 木籤連桿。

實驗四、探討改變魚鰭表面性質對船推進力的影響

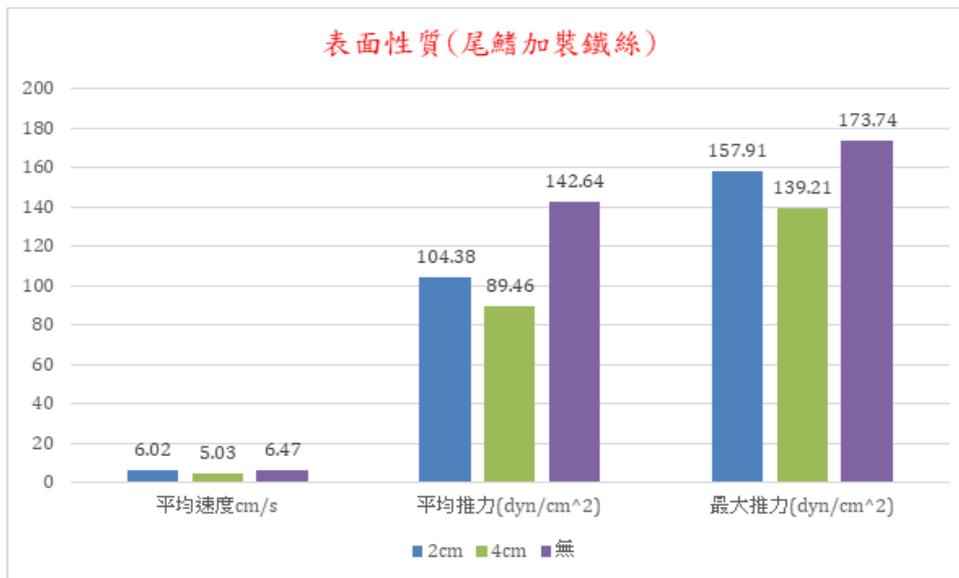


圖 24 表面性質(尾鰭加裝鐵絲)對平均速度、推力的影響

數據說明

經過數據分析，我們發現當尾鰭裝上 2 公分的仿生魚骨頭(細鐵絲)，平均速度與推力效能較 4cm 好；但都比對照組無加裝鐵絲的效能弱。我們懷疑是因為加裝細鐵絲增加了尾鰭的剛性，使尾鰭失去了正確的擺動姿勢，破壞了渦流的結構與噴流效果，讓船的推進效能降低。

數據討論

藉由觀察真實的魚尾鰭，我們發現它並不是像我們先前的實驗裡所用的透明軟質墊板一樣，呈現整片皆是一樣的性質並且表面平滑。我們觀察到，真正的魚尾鰭上會有細小、較尾鰭本身堅硬的魚骨及關節，造成尾鰭的不均質，且表面會呈現微凸。

我們猜想魚骨可以增加剛性，關節可以增加柔軟度；剛性可以加作用力與反作用力的效果，柔軟度可以形成正確擺盪，使渦流效果更好；理論上都是可以提升推力效果。但實驗結果卻都是效果變差，最大的可能是鐵絲的數量、長短、擺放位置不佳，只增加了剛性，卻破壞了柔軟度，沒有做出正確擺盪(慣性甩尾)，使形成的渦流被破壞。降低了推力。剛性越強，破壞越顯著。(由對照、2cm、4cm 鐵絲的數據比較即可看出)

實驗五、探討魚尾鰭擺動，來與回時間不同所造成的推力變化

表三、尾鰭擺動時間變化組合

擺角	時間組合					
	往外	往內	往外	往內	往外	往內
以90度為基準						
±30度	2.5S	1.25s	3.75s	1.25s	5s	1.25s

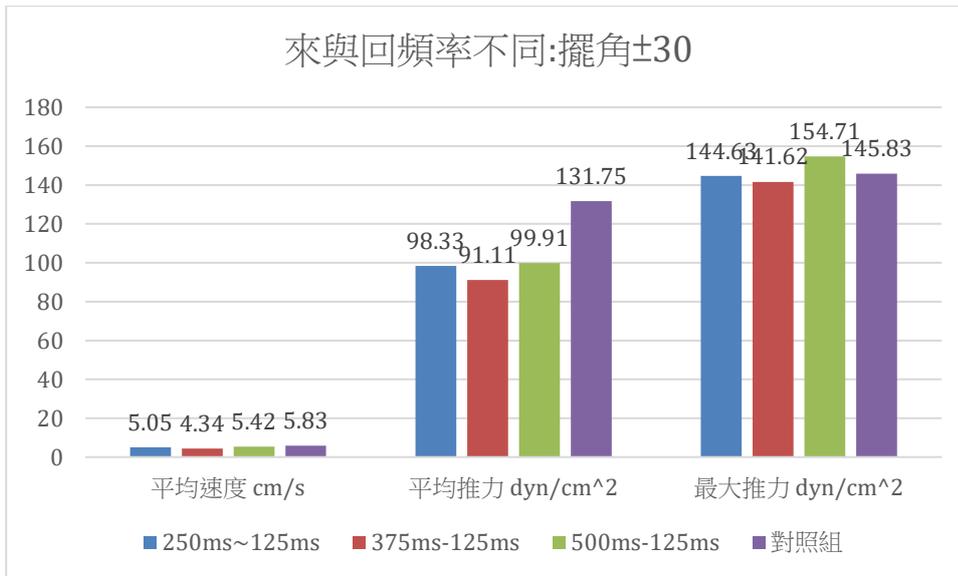


圖 25 尾鰭來回擺時間不同對平均速度、推力影響

數據說明

1. 在先前的文獻探討中讀到，用感應儀器測量尾鰭擺動推力大小(未裝置在船隻上)時，以九十度為基準，尾鰭向外和往回時間(1/2 週期)差越大時，推進效能越好，因此我們想嘗試實際應用於船上是否也有優化效果。
2. 由實驗結果得知，不與對照組相比，單以三組操作組比較，時間落差最大，船隻平均速度，平均推力，最大推力似有稍好的趨勢，但是落差並不顯著。但若與對照組(來回擺盪時間相同)，會發現三組直線前進的效能均顯著降低；且操作時，來回擺盪時間落差越大，船體左右搖晃就越劇烈。

數據討論

當來與回擺動時間差距大時，船體直線前進的效能未有顯著提升，甚至下降；且船身會有越劇烈的擺動，有很明顯的側向力。根據實驗結果，推測可能原因：

1. 測量方式不同，文獻是以魚模型接感應儀器測量作用力大小，而我們是直接用於船隻運動，由運動狀態測量向前推力。由文獻中試驗看不出側向力的影響
2. 由渦流變換情況來看，時間短，作用力大，渦流明顯；回擺時間長，作用力小，渦流產生小或無。渦流完整，互動也更單純，比較不會形成亂流擾動。尾鰭推力提升是可能的。

3. 單邊渦流較強盛，側向力作用明顯。以能量守恆的角度看，影響直線運動的表現。

實驗六、探討船隻運動時，尾鰭擺動與渦流變化的相關性

(一)由文獻探討中，得知渦流的擾動影響尾鰭對船隻造成的推力，我們想探討關於尾鰭擺動時是否能利用渦流在它後方產生噴流，而渦流的組合與推力的相關性又如何？因此我們將水面鋪滿保麗龍球，利用保麗龍球的擾動，觀察單位面積受力最大和最小的推進尾鰭，擺動時的渦流狀態做觀察。

木脊椎 12cm 搭配 1/2 前翼展 2.5cm；中軸長 4cm 軟墊板尾鰭（尾鰭單位推力最大組合）

尾鰭擺到最右時



尾鰭擺到最左時



圖 26-1 尾鰭擺到最右時渦流情形(推力佳) 圖 26-2 尾鰭擺到最左時渦流情形(推力佳)

(註：圖片來自一整段影片中的截圖，因非連貫無動態感的關係渦流情形在圖片裡並不明顯，但肉眼觀察及影片內是有可看出顯著渦流在黑線標記位置的)

無脊椎骨搭配 1/2 前翼展 7.5cm；中軸長 10cm 軟墊板尾鰭（尾鰭推力最小組合）

尾鰭擺到最右時



尾鰭擺到最左時



圖 27-1 尾鰭擺到最右時渦流情形(推力弱) 圖 27-2 尾鰭擺到最左時渦流情形(推力弱)

(二) 以水波槽投影拍攝

強光投射水槽，**渦流凹陷**成凹透鏡**發散光線**效果，呈現**暗區**，越清晰，越黑，代表渦流完整作用力強；邊緣**浪凸起**，呈現**凸透鏡**效果，呈現，最亮觸即浪頭，可判斷水流動方向。時間所限，想到以此方法操作，**恰逢因新冠肺炎而停課，未能來的及以船隻馬達控制尾鰭擺動進行測量，僅能以手動方式以最佳化尾鰭進行擺動觀察**，另有一部分以鋁片尾鰭進行擺動觀察作為對照。照片底部方格為 1cm^2 ，尾鰭中軸長 4cm ，中軸以下 $1/2$ 尾鰭在水中，尾鰭基部到末梢垂直距離 10cm ，末梢離水面 7.5cm ，水深 15cm 。

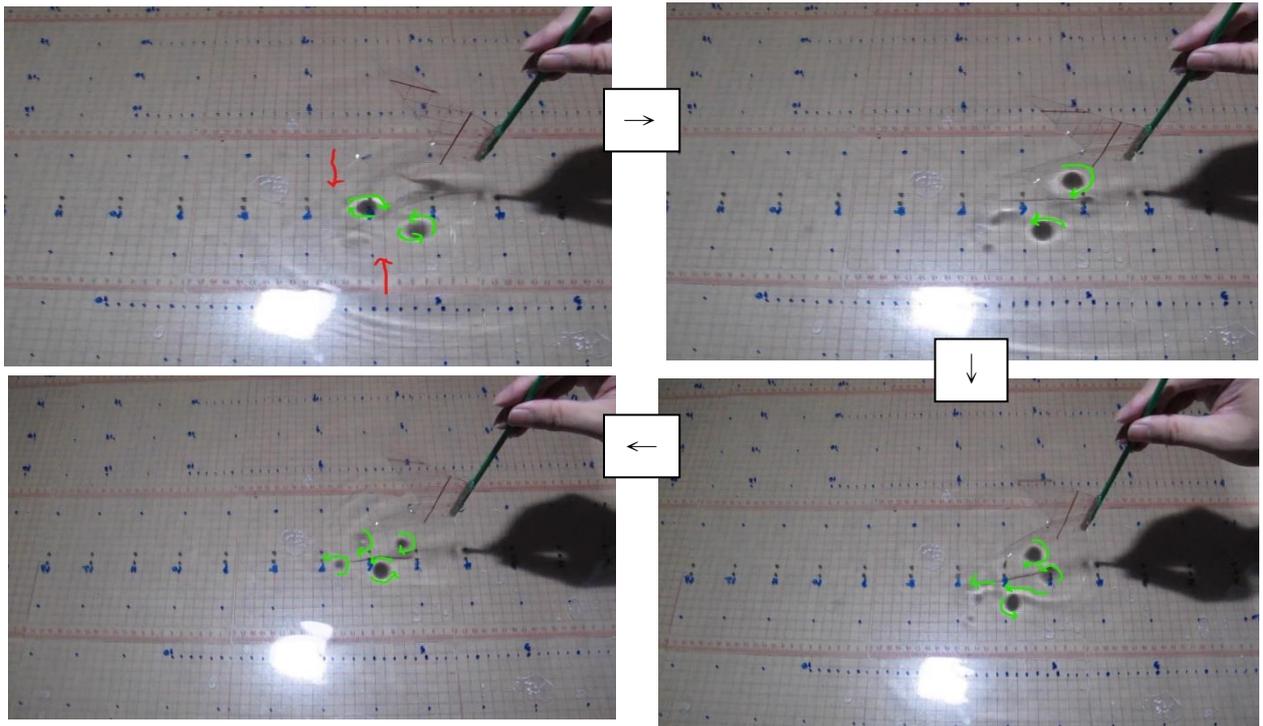


圖 28 單尾鰭渦流擺動四步驟

1. 尾鰭先向下擺，形成左端順時針渦流(第一)；開始回擺形成右端逆時針渦流(第二)
2. 尾鰭向下擺形成第三個渦流，第一第二渦流間形成噴流，第一渦流逐漸消失，第二渦流開始模糊，上下兩渦流之間渦流切線方向皆向左。
3. 第一渦流消失，向後噴流可見(亮點為浪頭)；第三渦流向第二渦流靠近，第四渦流開始形成(此時尾鰭剛開始向上回擺)。
4. 尾鰭向下輕擺，第一渦流已消失，第二、第三渦流變小模糊，第四渦流較大，完整；第五渦流剛形成，可能因力量較小，渦流較小也較模糊。
5. 尾鰭回擺會形成逆方向自漩渦流。力量大，作用時間短，渦流顏色深、半徑大、邊緣亮線也較亮(水波較強，波峰)。

6. 渦流會沿尾鰭向末梢飄移，若擺動太快，或擺動曲度錯誤，會造成渦流破壞，形成亂流。
7. 單尾鰭擺盪，渦流為左右間格錯開，一般而言尾鰭擺盪到接近中線時新窩流產生，根據觀察，此時渦流完整、距離適當、對稱良好，噴流亮線都會很清楚。推測此時噴流效果應該最佳。對照尾鰭擺角位置，剛好是在家速度變化波峰位置(推力最大)。

註：以上觀察記錄皆有相關影片可供證實。

8. 擺角大小會影響渦流偏移出去的角度，角度大向外偏移多，兩邊渦流互動較弱，對稱性較差，對照船舶試驗，此時船體左右搖晃較劇烈。一般而言相同作用力，擺角越大尾鰭作用力

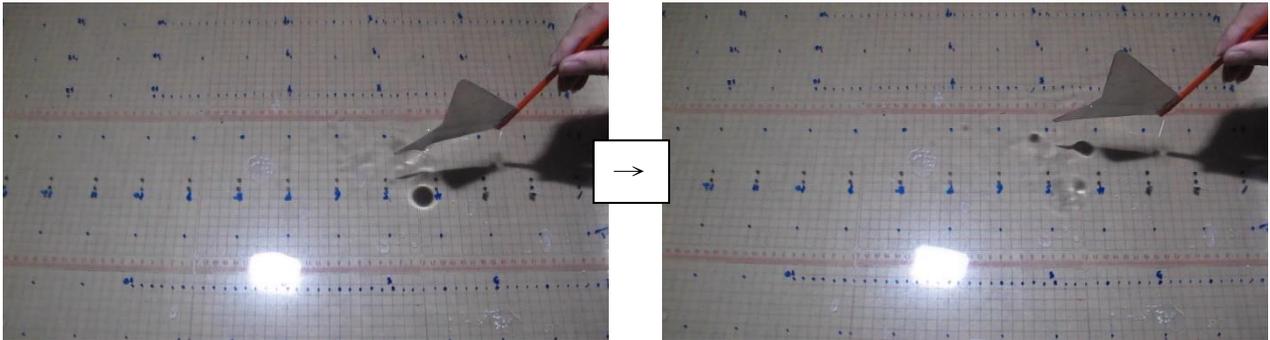


圖 29：鋁片擺盪渦流

9. 鋁片剛性較強，擺盪作用力甚大，容易形成強大渦流，但若擺動稍快，容易造成擾流，直接破壞渦流構造形成亂流。

實驗七、探討船體加上破阻裝置對船隻運動的影響

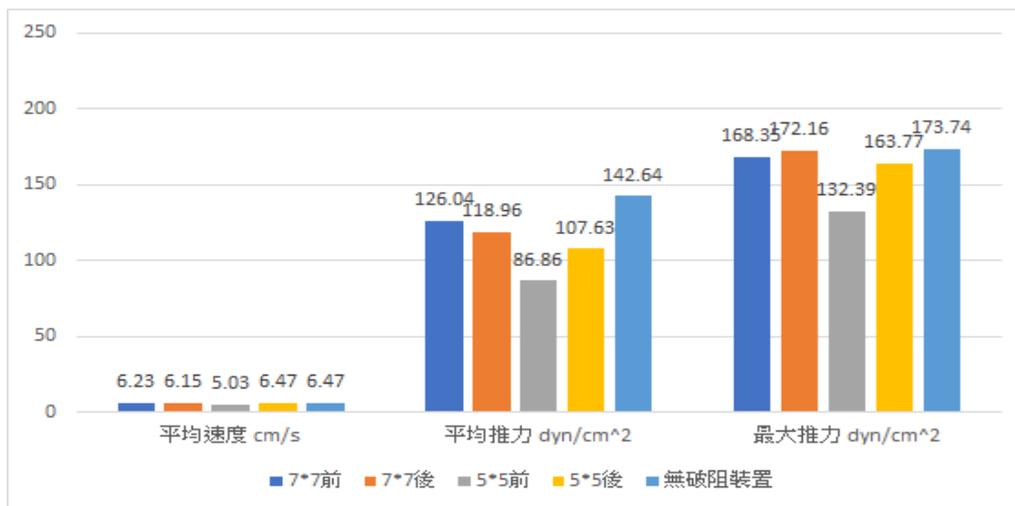


圖 30 單破阻裝置(5cm*5cm、7cm*7cm)

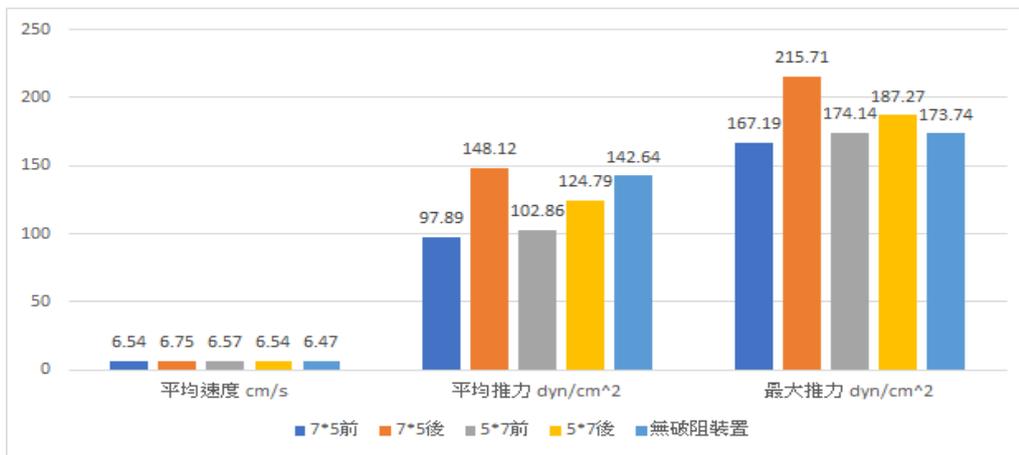


圖 31 單破阻裝置(5cm*7cm、7cm*5cm)

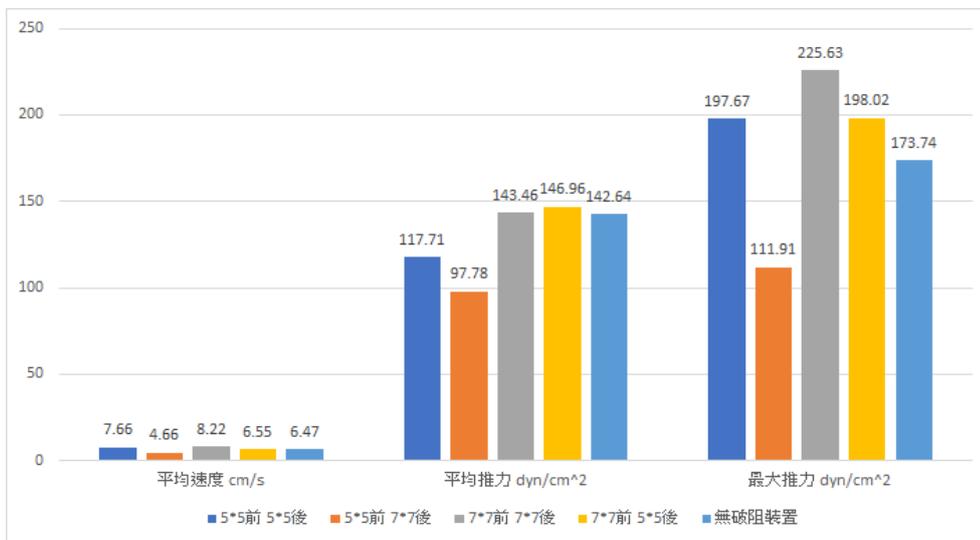


圖 32 雙破阻裝置(5cm*5cm、7cm*7cm 組合)

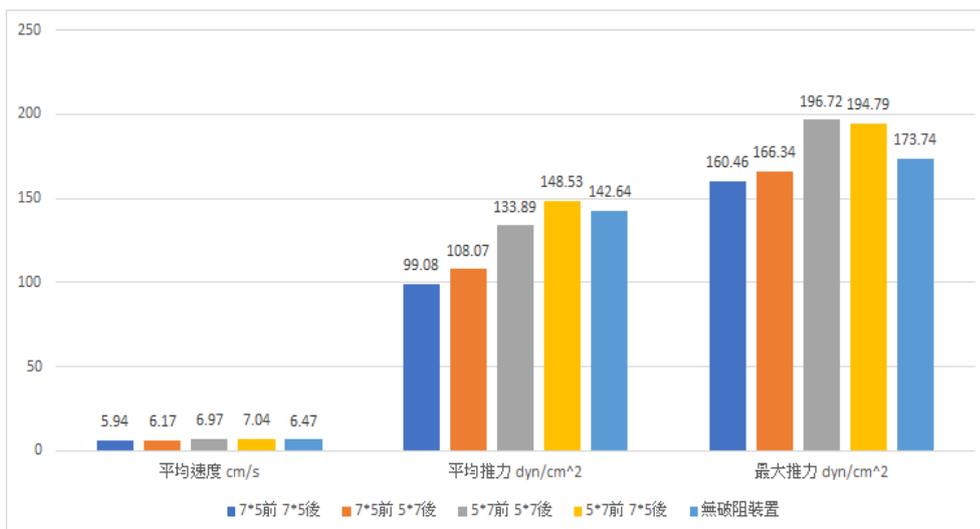


圖 33 雙破阻裝置(5cm*7cm、7cm*5cm 組合)

數據說明

1. 在單破阻裝置時 7*5 在後的效能最佳；而當在雙破阻裝置時，加裝前後都是 7x7 破阻裝置的效果最佳，我們推測破阻裝置得以減少船所受水阻力，也同時加強了尾鰭的噴流效果，使

船的推進效能上升。

2. 推測破組裝置可有效降低水阻力，使向前推進的合力提升，關鍵所在是尾鰭是否能接收到此一效果；由實驗結果觀察，若水流效果夠強夠深(水流效果會隨著距離拉長，摩擦削弱；水流也會往水面接近，消失)，可搭配尾鰭噴流效果，提升推力。搭配不當，摩擦反而使推力下降。實驗結果剛好可以佐證

實驗八、 探討雙尾鰭擺動位相對與擺動幅度船推進的效能改變

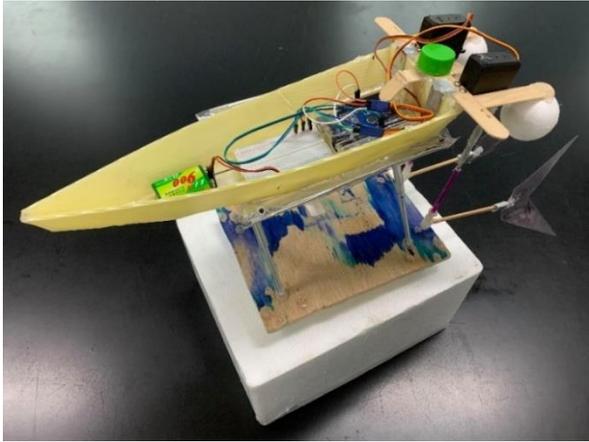


圖 34 雙擺船隻實品圖

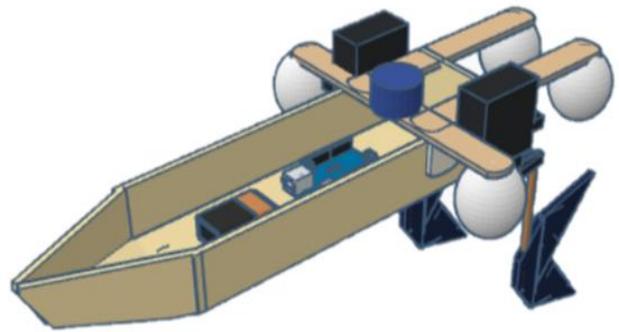


圖 35 雙擺船體示意圖

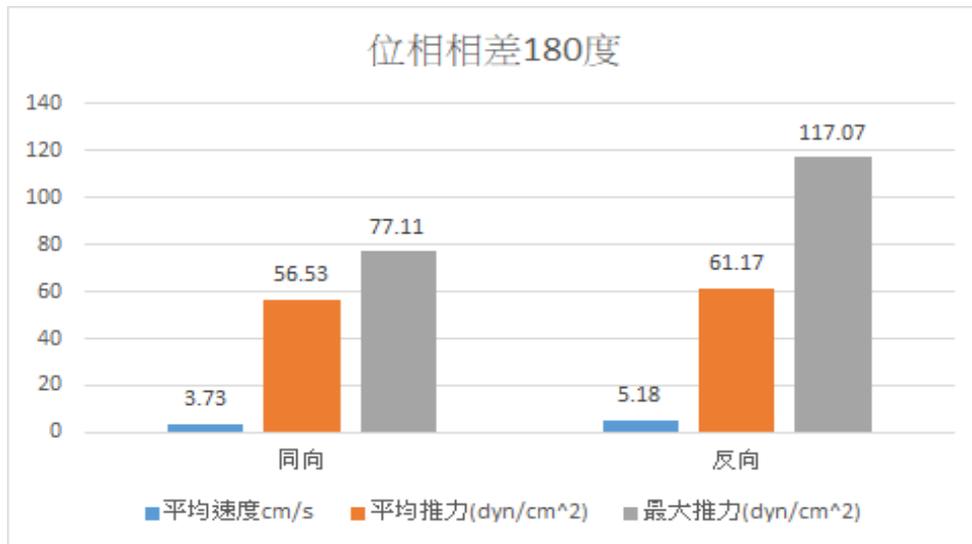
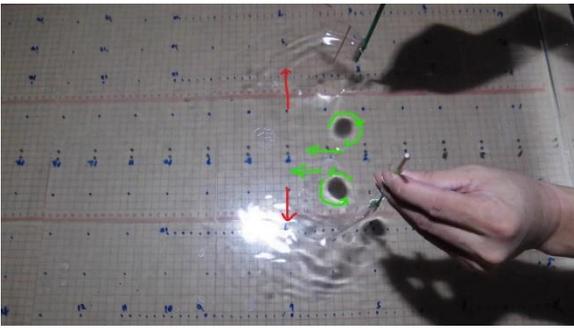


圖 36 雙擺位相變化對平均速度與推力的影響

數據說明

1. 由實驗結果得知，雙擺裝置向前推力並未提升，反而顯著下降，可能與船體加重，又加上支撐的保麗龍球，水阻力的提升大於推力的提升。

2. 同相擺盪推力效果明顯低於反向擺盪，而且過程中左右搖擺甚為嚴重，側向力的產生削弱向前推力。 反相擺盪的推力效果較佳，最大的不同是船身幾乎沒有搖擺。



3. 圖 37 的擺盪模式，一樣產生自旋方向相反的渦流，兩窩流位置是相對而未錯開，靠中央一側渦流切線方向皆是相左，可能因白努力效應，兩者逐步靠近，中央噴流甚為明顯，而兩窩流幾乎同時減弱消失，只剩噴流往後(亮度甚高，強度大)，沒有擾流。

圖 37: 模擬反降擺盪。

在相反位相情況下更改尾鰭的擺動角度。



圖 38 雙擺船隻反相擺盪角度變化示

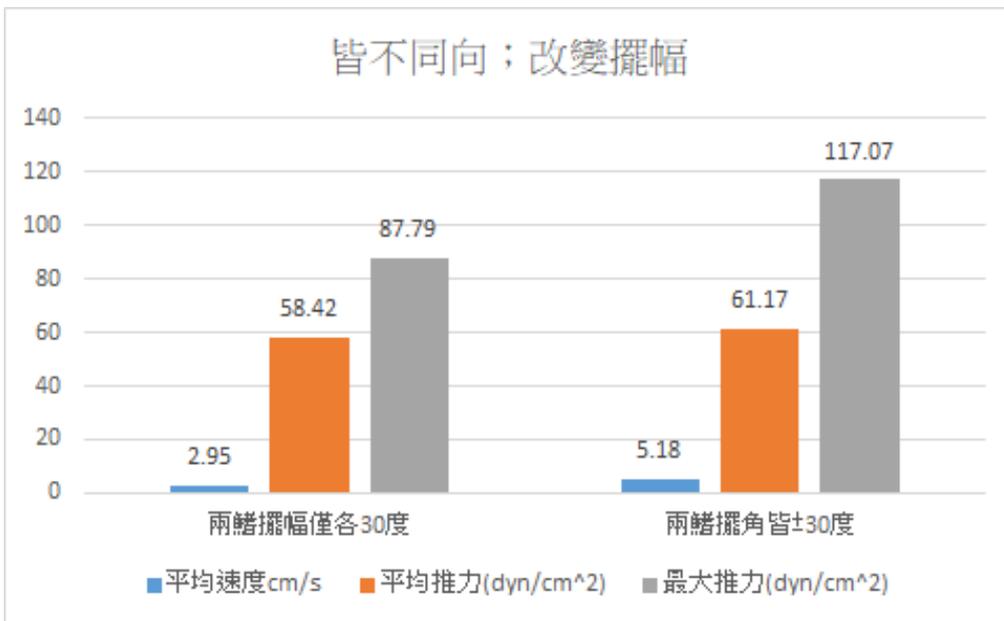


圖 39 雙擺角度變化(反相)平均速度與推力的改變

我們在相反位相情況下更改尾鰭的擺動角度，我們發現改變擺角後，穩定性沒有顯著差異，但平均速度下降明顯。我們推測是因為擺角較小的擺動產生的作用力也較小，因此大半與水中阻力抵消，造成平均速度顯著下降。

陸、綜合討論

1. 根據文獻探討，常見魚的游泳模式主要有三大類，一種是類似鰻魚以身體扭動為主，第二種是類似鱒魚、鱸魚，以身體靠尾部三分之一的部分配合尾鰭進行擺動；第三類如金槍魚、鯖魚，僅以尾鰭快速擺動。

鰻魚鰭演化特殊，暫不討論；本篇報告討論的主要是以第二類、第三類游泳模式的尾鰭為主。尾鰭擺動造成向前推力，主要是在擺動時造成立體的水渦流(低水壓區塊)，渦流之間的交互作用，造成向後噴射水流；魚的本體便藉由反作用力的效果往前推進。

試想：尾鰭的形狀、結構、材質、擺動模式改變，皆有可能造成渦流的結構、大小、相對位置的變化，進而影響噴流作用力的強弱及方向。魚尾鰭在身體後方，推力直接作用於前端的身體，甚至身體可配合尾鰭擺動；若改裝於船的後端下方，相對位置不同，魚鰭擺動所造成的推進效果是否有所不同？

2. 尾鰭從構造型態來看，與船舶的方向舵相似，會造成推進力是因為擺動造成噴流的效果，因此我們先從尾鰭形狀、材質、擺角頻率變化進行探究。三種材質當中，鋁片剛性最佳但彈性較差，原本設定與金槍魚尾鰭性質相近，推測在擺角小、頻率高的條件下，應該有較好的推力，但實驗結果卻與預期相反，反而是效能較低的一組，可能是擺動頻率不夠高，推力低；也可能是在擺角大的情況下剛性太大的材質其渦流結構鬆散噴流效果較差有關。

而軟墊板彈性，在擺動的過程中表現出慣性甩尾的現象(類似眾多小關節連結，越末梢的關節擺幅越大)，在擺角大頻率低的條件下，尤為顯著；剛好此實所測得的正向推力也較大；觀察此時渦流也較顯著，推測此一甩尾現象有利於渦流漩渦的形成，提升噴流推力。

3. 在每個實驗中，我們重點比較的數據結果會依實驗性質有所不同，分別有平均速度、波峰加速度平均值、最大推力或平均推力。

平均速度代表船隻(追蹤點)一秒移動的距離，我們以這項結果推測即表示其推力及阻力皆有發揮功效的合力結果。波峰加速度平均值是在每次航行的影片中，找到最具週期性的一段(約兩秒)，將其中加速度達到波峰時的數值取出並平均，在實驗一每種推進裝置皆為同面積時，我們有以這一項作比較；最大推力則是將取出的波峰加速度平均值成以質量除以面積，用於表示以該實驗條件的推進裝置讓船運動時，推進裝置在那段單位面積最大可出的力。平均推力也是一樣取具週期性的兩秒(若平均推力和最大推力皆有表示出來比較則兩者數值出於同一段影片)，選取兩秒內所有正向加速度做平均，並將其換算成推力，用於比較船隻運動時推進裝置持續的推進力。

柒、結論

綜合文獻探討和實驗結果：

1. 魚尾鰭擺動會在後方形成渦流；渦流週期性變化，檢測到推力亦有相對的週期變化。以白努力定律判斷渦流之間形成向後噴流，造成前進推力。
2. 魚尾鰭的材質、形狀、表面性質、連桿長短，性質影響整體構造彈性，配合適當擺動頻率、擺角，可影響渦流形成結構與組合，造成較佳推力效果。
3. 文獻探討中得知若尾鰭來與回擺動頻率不同，能以儀器測量出推力有所提升；但以模型船實際測試，直線前進的平均速度及推力並無提升，但船體左右擺盪顯著；推測可能有側向分力的作用。此一特性或許可應用於船隻短時間加速轉向。
4. 原先預設破阻裝置可減少船體所受水阻力，同時加強向後噴流效果，提升向前作用力。實驗結果卻是提升與削弱互見；推測可能是摩擦阻力拮抗的影響；單破阻裝置以 5cm*7cm 置於船尾，雙破阻裝置以前後皆裝置 7cm*7cm，所測得平均速度及推力提升較佳。
5. 雙擺裝置，同相擺盪推力小，且船身左右搖擺更為顯著；在相反向擺盪時推力較，且幾乎沒有搖擺現象。推測左右渦流的組合，噴流效果更顯著，側向力的平衡使船更穩定。

捌、參考資料及其他

- 一、黃子鴻(2008)·仿生魚鰭的幾何形狀對擺動推進系統之影響·國立成功大學系統及船舶機電工程學系碩士論文
- 二、鐘胤展、鐘可恩、鐘若欣(2020)·鰭魔力“渦”最行?!·中華民國第 60 屆中小學科學展覽會
- 三、徐伯銘(2018)·多關節機器魚之游動仿生分析與深度控制·國立臺北科技大學電機工程系碩士學位論文
- 四、葉禮源(2018)·多關節機器魚之仿生游動分析及運動控制·國立臺北科技大學自動化科技研究所碩士學位論文
- 五、賴渝翔、林有駿、林佑叡、楊鏡堂(2020)·仿生機制與運用介紹向海洋生物學習·生物科技產業研究中心季刊第 61 期
- 六、陳政宏(2000)·淺談流體中生物的推進方法與仿生推進·國立成功大學造船及船舶機械工程學系論文

【評語】 032922

本作品以生物觀察發想，仿金槍魚與仿石斑魚尾鰭做為船隻推進裝置，作了很仔細的文獻探討後，探究並折衷出對船隻運動的最佳化形狀。研究規劃整體完整，按著科學步驟調整變因，並依各實驗探究目的比較其平均速度、波峰加速度平均值、平均或最大推力。最後在適當的形狀、軟硬材質、擺動幅度及頻率下可得最大推力。比對渦流運動得知尾鰭推力與渦流完整度，噴流效果相關。加裝適當破阻裝置能有效降低阻力，使前進合力顯著提升。由雙尾鰭實驗更得知兩尾鰭相反位相擺動可同時提升船隻平穩度及推力。實驗設計妥當且合理，實驗記錄詳實，是一個用心又有趣的作品。

作品簡報

鰭門遁水

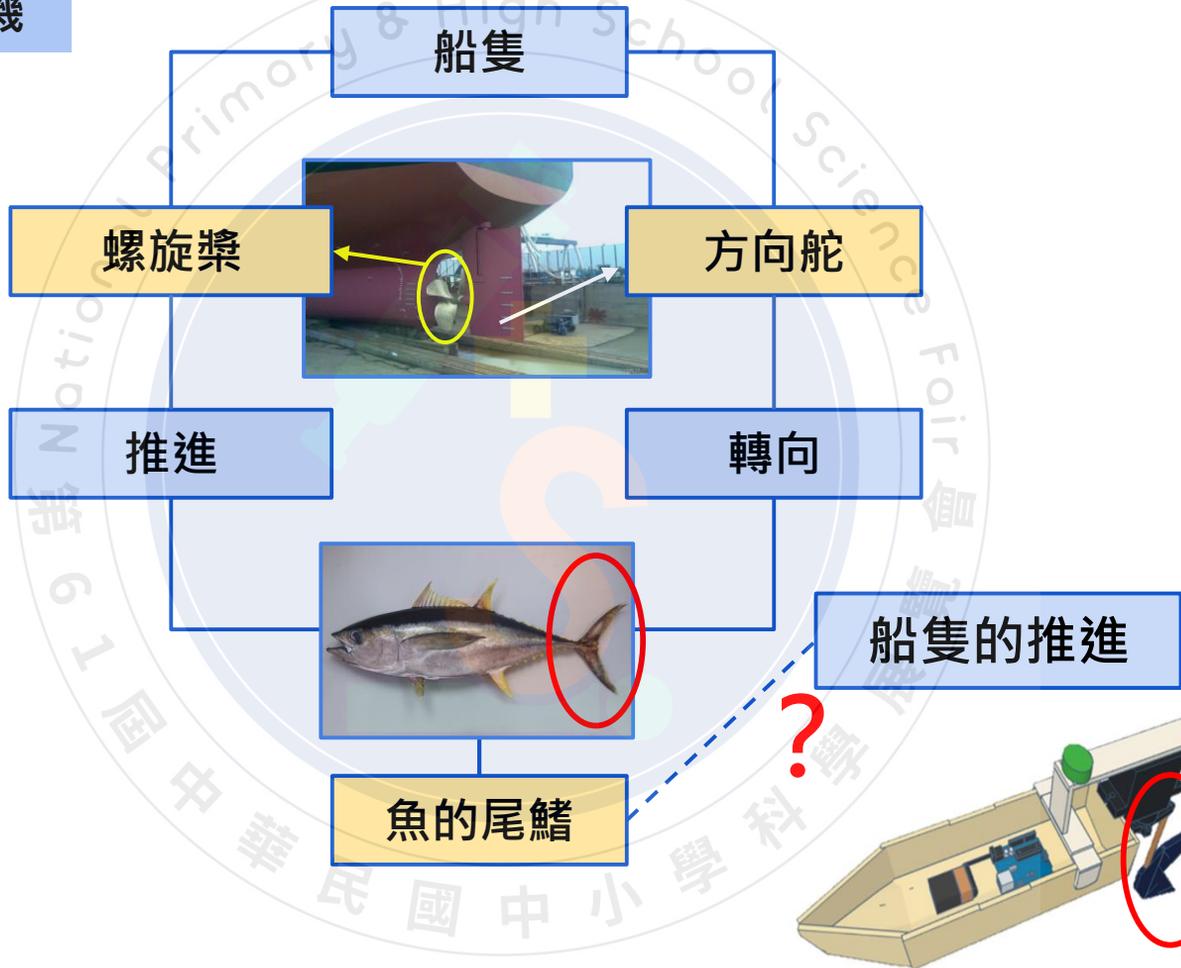
仿生魚鰭於船隻航行上的應用與探究

組別：國中組

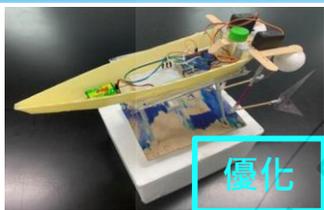
科別：生活與應用科學(二)

編號：032922

研究動機



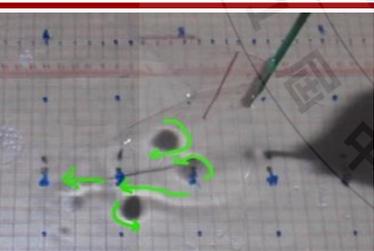
研究目的與流程



8. 雙尾鰭



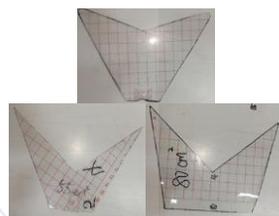
7. 加裝破阻裝置
(仿臀鰭、背鰭)



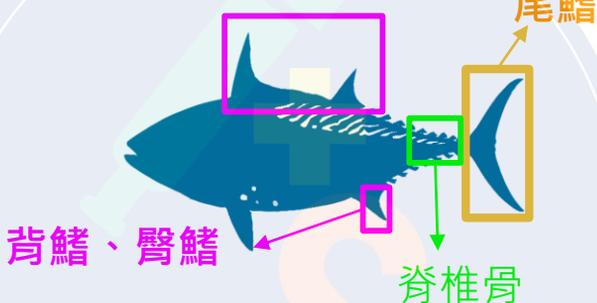
6. 尾鰭擺動時渦流變化



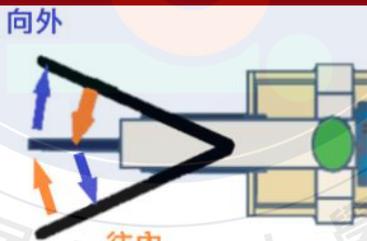
1. 尾鰭形狀、材質、擺幅



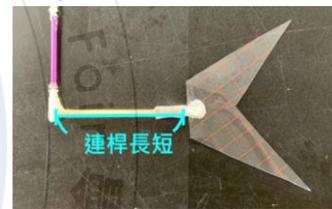
2. 中間型尾鰭
前翼展和中軸長比例



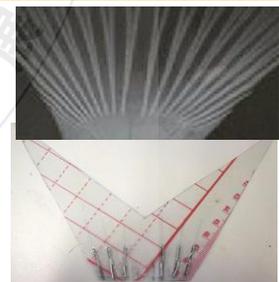
擺動模式



5. 尾鰭擺動
來與回頻率不同



3. 加裝連桿



4. 表面性質

研究方法

追蹤點(瓶蓋)

伺服馬達

充電電池

Arduino電路板

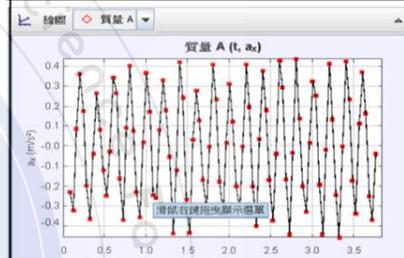
推進裝置
(尾鰭)

拍攝裝置
(手機)

水缸

船隻

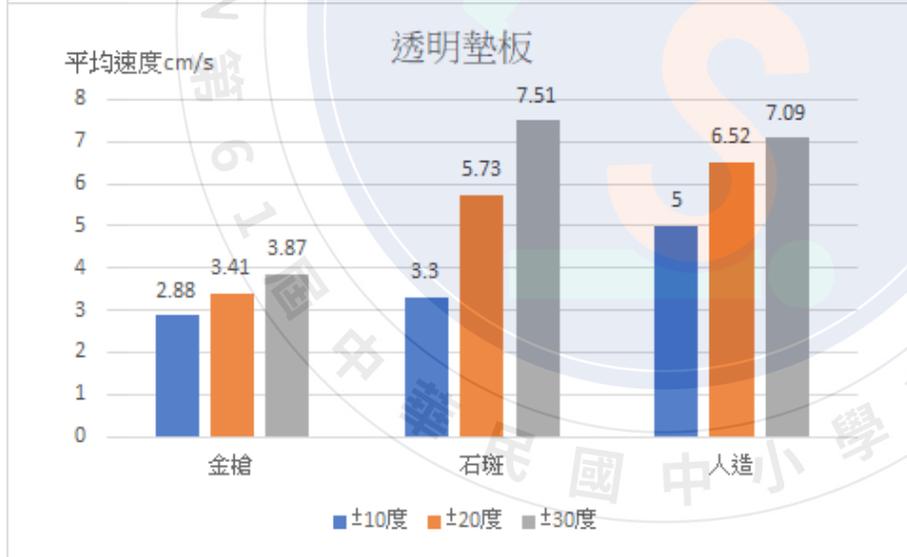
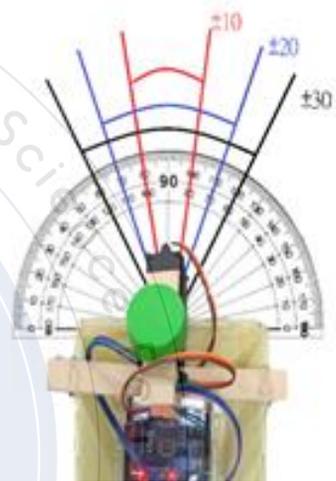
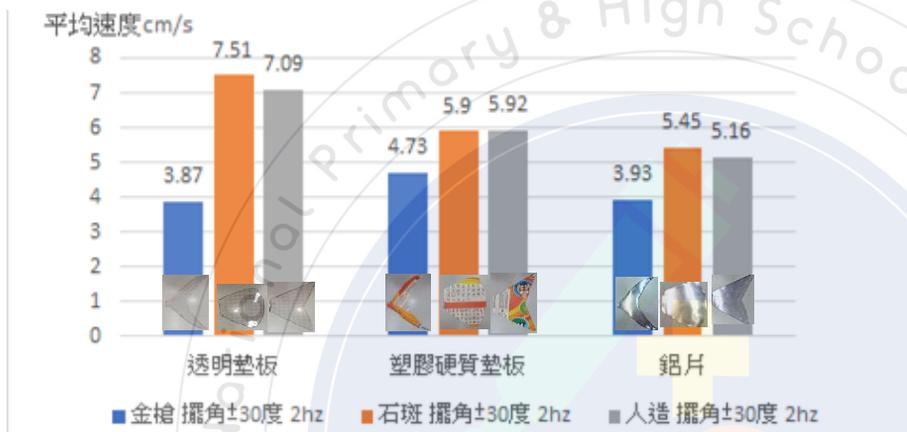
分析方法



Tracker 追蹤質點
分析

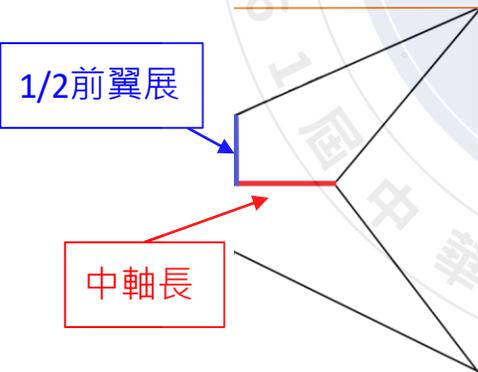
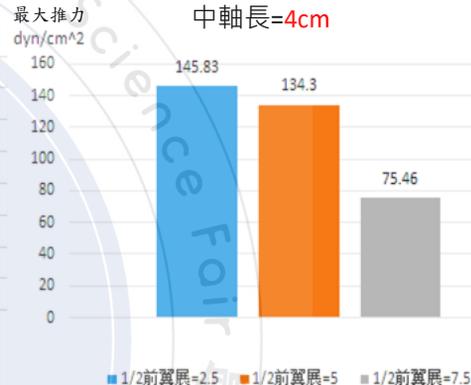
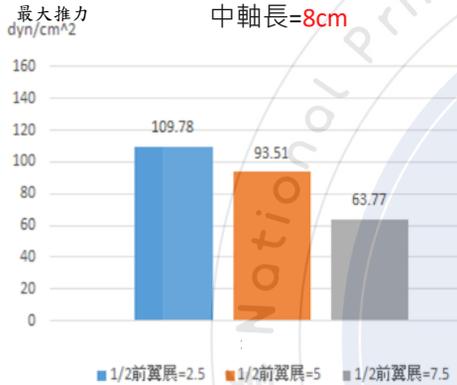
1. 平均速度
2. 平均推力
3. 最大推力

實驗結果一、材質以**透明墊板**最佳，尾鰭出力的穩定性以**人造尾鰭**較優



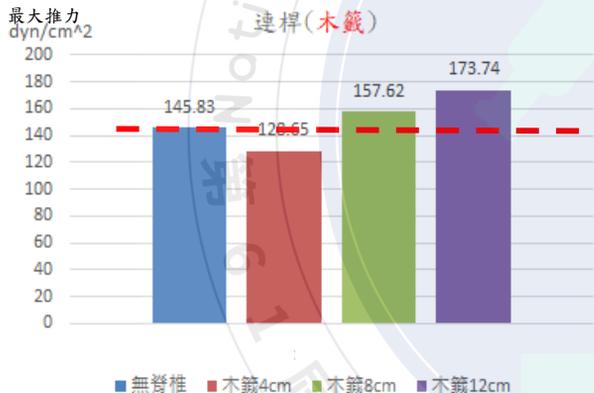
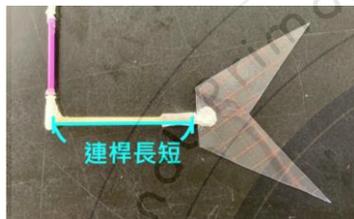
後續皆以**人造尾鰭**
 材質**透明軟質墊板**、
 擺角**±30度**頻率**2hz**、
 作優化基本

實驗結果二、中間形尾鰭1/2前翼展2.5cm、中軸長4cm，推力較佳



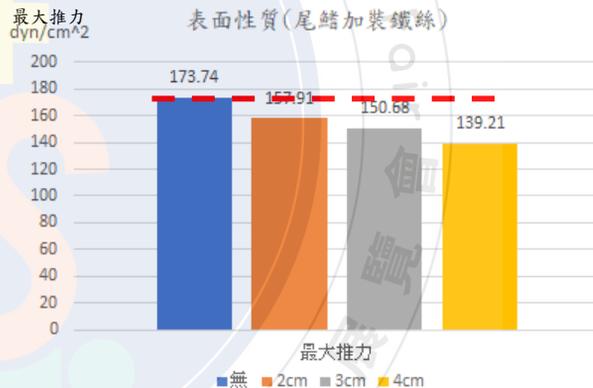
推測中軸長和前翼展比例將影響尾鰭柔軟及擺動的完整性

實驗結果三、以木籤作連桿， 8cm與12cm所測到的推力提升



推測適當的連桿長短，
能使船體有較佳的游泳姿態，
提升推力效果

實驗結果四、改變表面性質推進效能無 提升且4cm魚骨效能下降較多



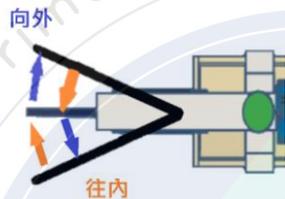
推測尾鰭剛性和柔軟度兼顧才
能有效提升向前的推力

實驗結果五、

尾鰭擺動來與回頻率不同

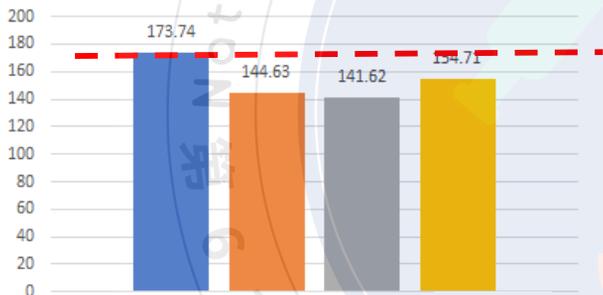
則頻率越接近時

直線前進效能越好



最大推力
dyn/cm²

來與回頻率不同



0.125s-0.125s

■ 對照組

■ 0.25s-0.125s

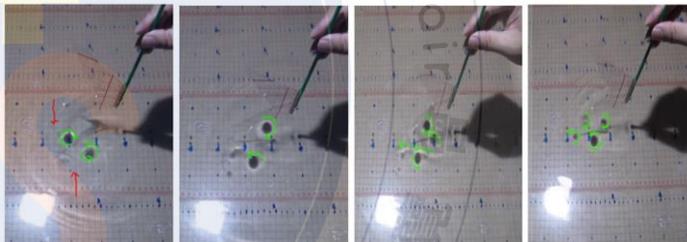
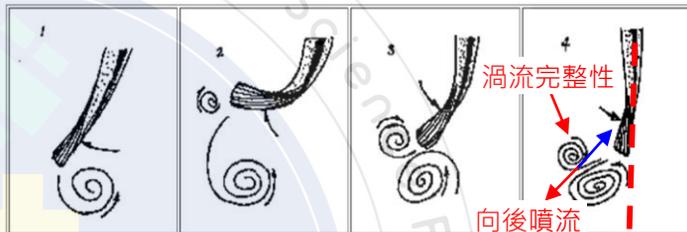
■ 0.375s-0.125s

■ 0.5s-0.125s

不同頻率擺動造成的船身擺動，或許後續能應用於船隻轉向

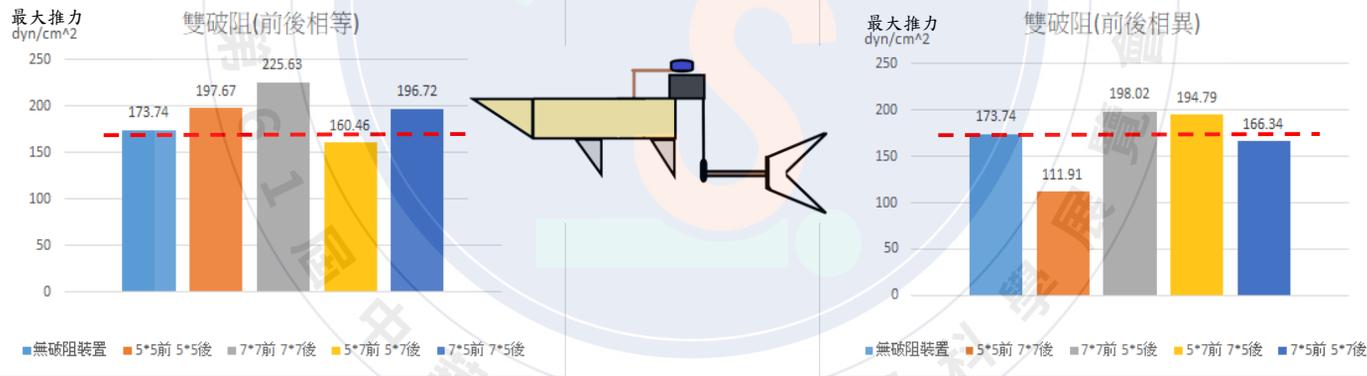
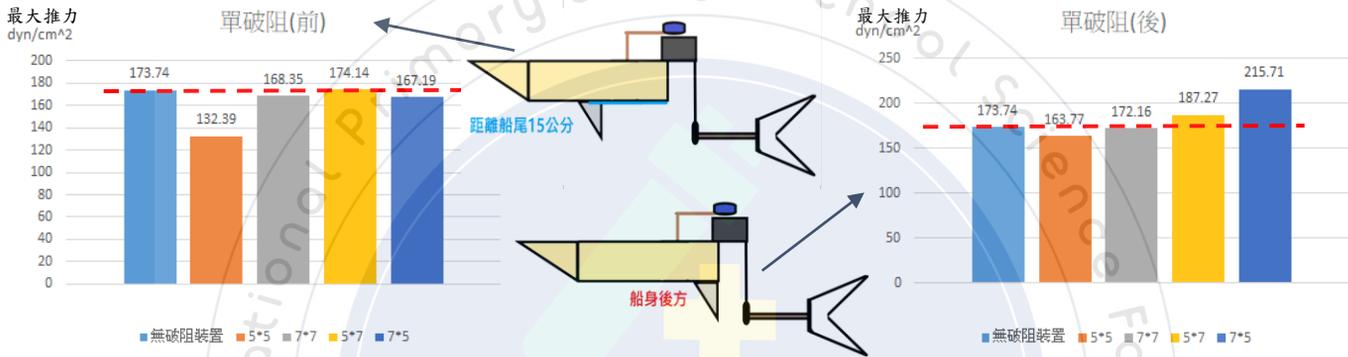
實驗結果六、船隻運動時

尾鰭擺動與渦流變化相關性



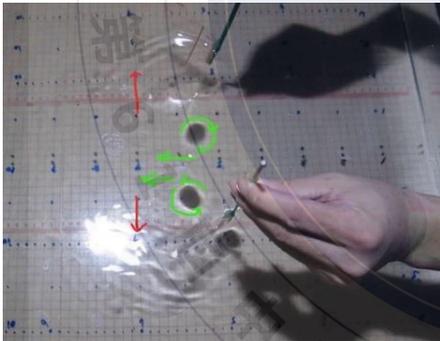
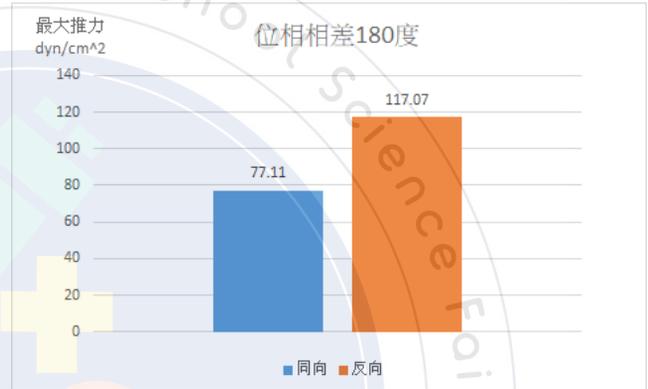
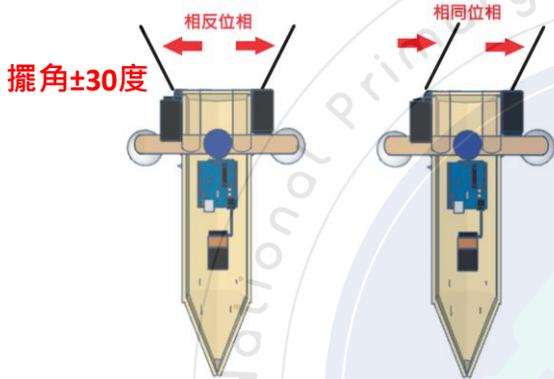
適當形狀、材質，擺角能使渦流較完整，造成噴流效果較好

實驗七、單破阻裝置-7*5在後的效能最佳；雙破阻裝置-前後皆7*7的效果最佳

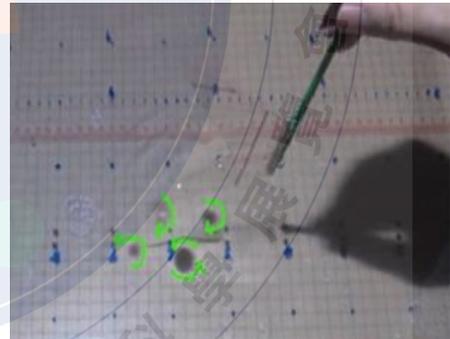


破阻裝置可降低水阻力的作用，提升船隻向前推進的合力

實驗結果八、雙擺時，兩個尾鰭位相相反，推進效能及穩定性好於相同位相者



雙尾鰭因側向力的平衡，向後噴流筆直



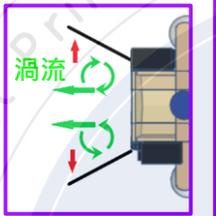
單尾鰭因有側向分力，向後噴流歪斜有夾角

相反位相時，船身因左右兩尾鰭側向分力抵消，合力向前，穩定性提高

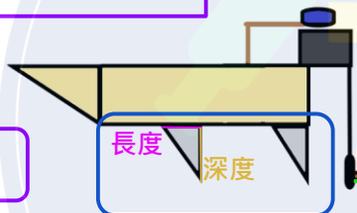
結論

5.

雙擺裝置:
雙擺裝置**相反向擺盪**時
推力提升顯著且穩定性
提高。



其他發想



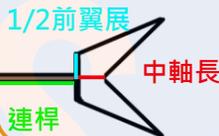
1.

魚尾鰭的性質:

- 透明軟質墊板
 - 擺角 $\pm 30^\circ$ 頻率2hz
 - 1/2前翼展2.5cm
 - 中軸長4cm
 - 連桿長度12公分
- 推力效果最佳

2.

渦流:
渦流形成的向後噴流
位置及方向
與完整性影響噴流與
推力效果。



3.

尾鰭擺動來與回頻率不同:

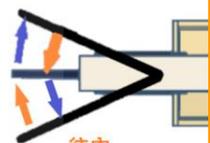
文獻

若尾鰭來與回擺動頻率不同，
能以儀器測量出推力有所提升

模型船
實際測試

推測因側向分力顯著，沒有測
得相同現象

向外



往內

4.

破阻裝置:

- 單破阻裝置5cm*7cm置於船尾
- 雙破阻裝置前後皆裝置7cm*7cm

原預測破阻裝置可提升向前作用力。結果卻是提升與削弱互見

註:推測破阻裝置的好壞取決於是否可影響後方渦流與是否與阻力抵消

過程中發現船體擺盪明顯，或許能應用於短時間加速轉向

參考文獻:

- 一、黃子鴻(2008)·仿生魚鰭的幾何形狀對擺動推進系統之影響·國立成功大學系統及船舶機電工程學系碩士論文
- 二、鐘胤展、鐘可恩、鐘若欣(2020)·神鰭魔力“渦”最行?!·中華民國第60屆中小學科學展覽會
- 三、徐伯銘(2018)·多關節機器魚之游動仿生分析與深度控制·國立臺北科技大學電機工程系碩士學位論文
- 四、葉禮源(2018)·多關節機器魚之仿生游動分析及運動控制·國立臺北科技大學自動化科技研究所碩士學位論文
- 五、賴渝翔、林有駿、林佑叡、楊鏡堂(2020)·仿生機制與運用介紹向海洋生物學習·生物科技產業研究中心季刊第61期
- 六、陳政宏(2000)·淺談流體中生物的推進方法與仿生推進·國立成功大學造船及船舶機械工程學系論文