

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生活與應用科學(一)科

佳作

032811

神機鬼械，機不可濕？--最佳化BCF游動式機械魚的運動表現

學校名稱：苗栗縣私立君毅高級中學(附設國中)

作者： 國一 丁宥菁 國一 黃卉伶	指導老師： 宋威德 張博翔
-------------------------	---------------------

關鍵詞：仿生機構、尾鰭推進、浮力

摘要

本研究旨在探討影響尾鰭推進游動式(BCF)機械魚游速的因素。本研究是將市售仿生機械魚進行改良，從材質特性、形狀、面積、夾角、浮力、穩定度及浮心位置等因素著手，改變材質、尾鰭、浮球後，將機械魚放入自製環狀水道，測量機械魚在水道上繞一圈所需的時間，找出機械魚的最佳化配置。本研究總整了35隻機械魚、420筆實驗紀錄，結果顯示：薄PP板(3mm)材質、叉型夾角90°尾鰭、前面浮球向後1cm(浮心極靠近質心)且浮球材質為乒乓球的機械魚，游速最快，成功使機械魚繞環狀水道一圈所需的時間減少27.2%，大幅提升了機械魚的游速。本研究結果，也能在大體積的水道中重現，展示改進市售仿生機械魚運動表現的可能性，有助於提升人們對魚類游泳之仿生機構的認識。

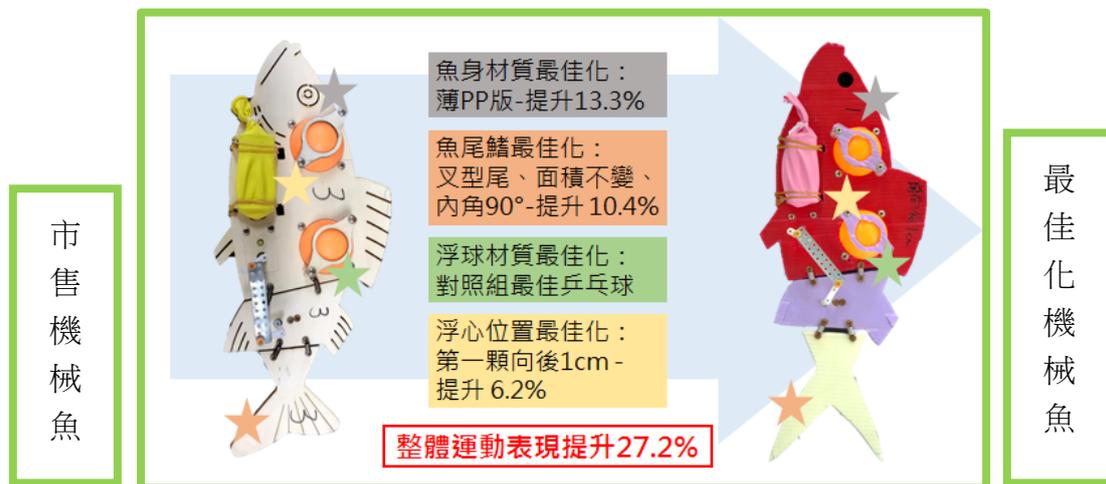


圖1、最佳化BCF游動式機械魚的運動表現 研究摘要圖

壹、研究動機

仿生學近年來受很大的歡迎。仿生機械魚不但能進入海中協助研究，2019年更有高中生利用機械魚探討降低發電機成本的可能性。但機械魚在水中游動，還是會受到種種因素的限制，「速度」和「穩定度」可以說是重要關鍵，我們希望能找出讓機械魚游得又快又穩定的模組，因此進行了許多實驗，企圖提供游速影響因子，使仿生機械魚能更有利協助科學發展。

自然課本第4冊有介紹「浮力」，BCF游動式機械魚就是靠浮力和尾鰭擺動產生的推進力前進，我們想透過實驗，設計出一隻兼具速度和穩定度的仿生機械魚。

貳、研究目的

本研究指的運動表現，以游速為代表。BCF 游動式機械魚，是指以尾鰭為主要推進動力的機械魚，因此，我們確認最佳**魚身材質**後，便先改變**尾鰭形狀、面積與夾角**，最後確認最佳的**浮球材質及浮心位置**。為了確保各種最佳化因子能具有**再現性**，我們也將最佳化機械魚與市售機械魚放到更大的水道中，比較游速差異，**期待游速影響因子能遷移到更大的水域**。

研究一、探討市售機械魚的基本性質

研究二、探討不同材質魚身對機械魚游速的影響（對照組：市售木片材質）

1. 探討**薄 PP 板(3mm)**材質魚身的機械魚游速
2. 探討**厚 PP 板(5mm)**材質魚身的機械魚游速
3. 探討**切割墊**材質魚身的機械魚游速
4. 探討**透明軟墊板**材質魚身的機械魚游速

研究三、探討不同尾鰭設計對機械魚游速的影響

(一) 探討不同**尾鰭形狀**對機械魚游速的影響（對照組：市售機械魚尾鰭形狀）

1. 探討**圓形**尾鰭的機械魚游速
2. 探討**截形**尾鰭的機械魚游速
3. 探討**叉型**尾鰭的機械魚游速
4. 探討**新月形**尾鰭的機械魚游速
5. 探討**普通歪形**尾鰭的機械魚游速

(二) 探討不同**尾鰭面積**對機械魚游速的影響（對照組：100%尾鰭面積）

1. 探討尾鰭面積變為原來 **50%(約 17.94cm²)** 的機械魚游速
2. 探討尾鰭面積變為原來 **75%(約 26.91cm²)** 的機械魚游速
3. 探討尾鰭面積變為原來 **125%(約 44.85cm²)** 的機械魚游速
4. 探討尾鰭面積變為原來 **150%(約 53.82cm²)** 的機械魚游速
5. 探討尾鰭面積變為原來 **175%(約 62.79cm²)** 的機械魚游速
6. 探討尾鰭面積變為原來 **200%(約 71.76cm²)** 的機械魚游速

(三) 探討不同**尾鰭夾角**對機械魚游速的影響（對照組：尾鰭夾角 105°）

1. 探討尾鰭夾角變為 **45°**的機械魚游速
2. 探討尾鰭夾角變為 **90°**的機械魚游速
3. 探討尾鰭夾角變為 **135°**的機械魚游速
4. 探討尾鰭夾角變為 **180°**的機械魚游速

研究四、探討不同浮球材質對機械魚游速的影響

1. 比較**乒乓球**浮球與**保麗龍球**浮球機械魚的游速

研究五、探討不同浮心位置對機械魚游速的影響

(一) 探討不同**浮球顆數**對機械魚游速的影響（對照組：兩顆浮球機械魚）

1. 探討**只留前面**浮球機械魚的游速
2. 探討**只留後面**浮球機械魚的游速
3. 探討**只在原兩顆浮球的中點**之上留浮球機械魚的游速

(二) 探討不同**浮球位置**對機械魚游速的影響（對照組：浮球位置同市售機械魚）

1. 探討**前面浮球向後 1cm** 機械魚的游速
2. 探討**前面浮球向後 2cm** 機械魚的游速
3. 探討**後面浮球向前 1cm** 機械魚的游速
4. 探討**後面浮球向前 2cm** 機械魚的游速
5. 探討**兩顆浮球一起向中 1cm** 機械魚的游速

綜合研究、探討最佳化機械魚與市售機械魚游速差異在**大型圓形水道**的**重現性**

操縱因素	材質特性	形狀	面積	夾角	浮力	穩定度	浮心位置
改變標的	不同材質	不同尾鰭			浮球材質	浮球位置	
實驗設計	<ul style="list-style-type: none"> 木板 厚PP板 薄PP板 切割墊 軟墊板 	<ul style="list-style-type: none"> 市售尾鰭 圓型 截型 叉型 新月型 普通歪型 	<ul style="list-style-type: none"> 50% 75% 100% 125% 150% 175% 200% 	<ul style="list-style-type: none"> 45° 90° 105° 135° 180° 	<ul style="list-style-type: none"> 乒乓球 保麗龍球 	<ul style="list-style-type: none"> 兩顆皆留 只留前 只留中 只留後 	<ul style="list-style-type: none"> 原位置 前向後1cm 前向後2cm 後向前1cm 後向前2cm 一起向中1cm
重現檢測	使用大型圓形跑道檢測本研究的重現性						

圖 5、研究架構圖 — 最佳化 BCF 游動式機械魚的運動表現

二、文獻探討：

(一)機械魚是真實魚的仿生結果，簡單版的機械魚能幫助我們更深入研究各項變因

仿生學是藉由觀察大自然中的生物獲得靈感，做出成本低、效能高，又不會產生太多廢棄物的科技。仿生機械魚與真實的魚有許多相同的地方，像是兩者皆使用尾鰭擺動產生推力使魚前進。然而，本實驗使用的機械魚屬簡易版本，所以它們還是有一些不同的地方，例如真實的魚可以自由控制上下前後左右移動，但簡單版機械魚卻不能；游動速度上顯然難與真實的魚完整相互比擬。文獻中，有些唯妙唯肖模仿真實魚的仿生機械魚，將魚類的避障、游速、外型等放入作品，但卻難以再做出更多改變。因此，本研究選擇使用結構簡單的機械魚做探討、改造，以使我們能更清楚知道各項變因對機械魚運動表現的影響，並企圖將這隻結構簡單的機械魚進一步地改造成更靈敏的機械魚。

(二)魚類運動可分為 BCF 與 MPF 兩種模式；我們選用 BCF 游動式機械魚進行改良

魚類的運動模式可分為藉由身體和尾鰭(body and/or caudal fin, BCF)(以圖6黃色區塊顯示)運動推進；以及藉由背鰭、臀鰭、胸鰭和腹鰭等魚鰭(median and/or paired fin, MPF)(以圖7黃色區塊顯示)運動推進。BCF游動擁有更大的推力以及加速度(圖6、圖8)，而MPF常在低速的環境下使用，提供更大的靈活度與續航力(Michael Sfakiotakis *et al.*, 1999)。我們的研究，目的是改良出游速最快的機械魚，因此採用速度較快的BCF游動式機械魚，希望能達到最好的效果。

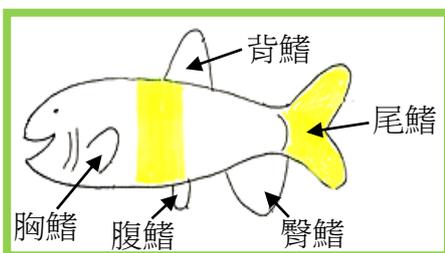


圖 6、BCF 運動使用的身體部位

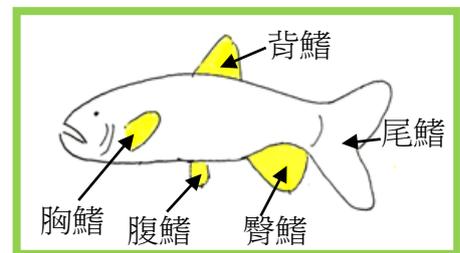


圖 7、MPF 運動使用的身體部位

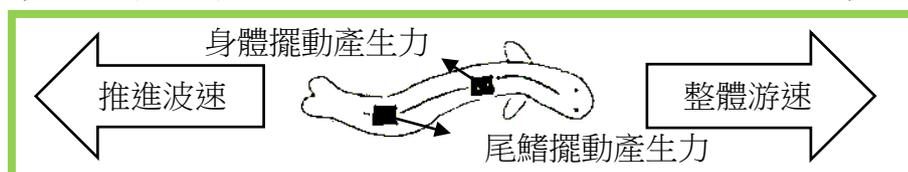
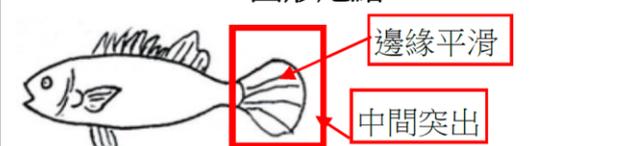
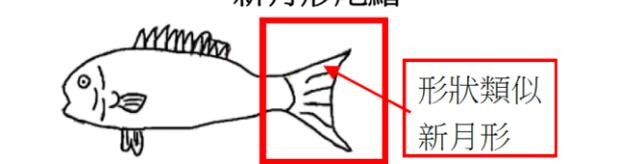
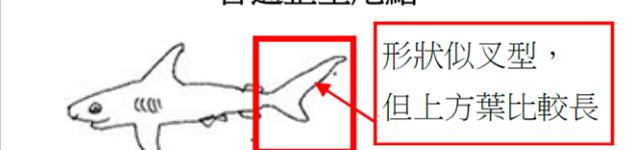


圖 8、BCF 運動模式側視圖(Michael Sfakiotakis,1999)

(三)魚類的尾鰭，可概括分成五類；市售的仿生機械魚尾鰭，則介於其中兩者之間

如表 1 之圖示，圓形尾鰭表示尾鰭是圓形的，截形尾鰭表示是三角形的，叉型尾鰭表示尾鰭分成相等兩葉，新月形尾鰭表示是新月型的，而普通歪型尾鰭像叉型一樣，但上半部比較長。**市售機械魚尾鰭的兩邊筆直，後方有向內彎的弧度，我們判斷介於叉型與新月形之間。**

表 1、魚類常見尾鰭與市售機械魚尾鰭形狀表

<p>圓形尾鰭</p>  <p>邊緣平滑 中間突出</p>	<p>截形尾鰭</p>  <p>角 垂直邊</p>
<p>叉型尾鰭</p>  <p>兩個葉 邊緣平滑</p>	<p>新月形尾鰭</p>  <p>形狀類似 新月形</p>
<p>普通歪型尾鰭</p>  <p>形狀似叉型， 但上方葉比較長</p>	<p>市售機械魚的尾鰭形狀(類似叉型與新月形)</p> 

(四)魚鰾可協助降低魚在水裡的密度，本研究使用乒乓球或保麗龍球模擬魚鰾

魚鰾是控制魚在水中上升下潛的器官，而魚能控制魚鰾的大小，讓魚身在水中浮起或下降。但也有研究指出，魚其實不能控制魚鰾的大小，因為魚鰾裡面的氣體大多無法控制增加或減少。而真正控制魚身上升和下潛的是胸鰭和腹鰭，當牠們的擺動方式不同，魚便可以自在地在其中游上游下。魚鰾真正的功能是降低魚在水裡的密度，如果一隻魚沒有魚鰾，便會下沉，需費很大的力才能再浮到水面，當牠好不容易游到水面時，也容易因筋疲力竭而再度下沉，久而久之，沒有魚鰾的魚就慢慢被選汰(中國上海市向明中學研究成果)。

本研究選用乒乓球或保麗龍球這種不能控制體積大小的浮力裝置，便是為了模擬魚無法自由控制的魚鰾，讓機械魚能更逼近真實魚構造，擁有一個體積不會太大變動的魚鰾。

(五)乒乓球與保麗龍球是兩樣模擬魚鰾的器具，但性質略有不同(如表 2 所列)：

表 2、乒乓球、保麗龍球的差異比較表

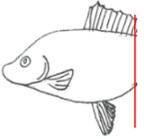
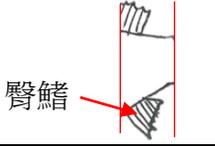
	乒乓球 	保麗龍 
原料	賽璐珞	發泡聚苯乙烯(EPS)
結構	球體，球中空心	球體，實心有許多氣孔
重量(gw) (本研究自測)	2.81	0.59
浮力 (gw)	視同浮體時，所受浮力恰為整隻機械魚重量	
特色	有彈力、結構較穩固	容易變形

三、機械魚的製作及準備環狀水道

(一)製作機械魚

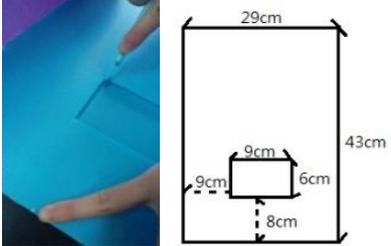
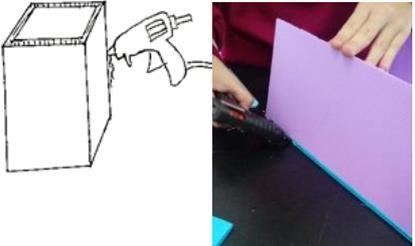
1. 取出零件，並把魚身木片編號 (1、2、3)，分別對照真實魚的身體構造(表 3)。
2. 將電池盒電線穿入馬達接線孔；在圓形零件上使用 M2.6 螺絲固定透明柱，形成支架。
3. 使用 M2.6 與 M3 螺絲分別將乒乓球、支架與馬達固定到木片 1 上。
4. 在木片 2 上用 7mm 螺絲安裝白色連桿，然後用彈簧和 7mm 螺絲連接木片 1、2、3。
5. 馬達軸上面使用 15mm 鐵軸連接連桿，木片 2 使用 20mm 鐵軸連接雙排鐵片和連桿。
6. 在電池盒內安裝電池，並用氣球套住電池盒，再用束帶將開口綁緊，避免電池盒進水。
7. 用橡皮筋鉤住 10mm 螺絲，穿到另外一邊後將電池盒固定。

表 3、機械魚與真實魚的身體構造對照表

	機械魚	真實魚
木片 1 (模仿真實魚的口到臀鰭)	12cm 	
木片 2 (模仿真實魚的臀鰭到尾鰭)	3cm 	臀鰭 
木片 3 (模仿真實魚的尾鰭)	5cm 	

(二)為了測量機械魚的游速，並進行攝影，以方便事後統計與使用 tracker 軟體進行路徑追蹤，我們使用整理箱與 PP 板，架設環狀水道，並自製攝影架(如表 4 所示)。

表 4、架設環狀水道與自製攝影架的流程表

1. 準備 1 個整理箱、2 片薄 PP 板、2 片厚 PP 板 	2. 厚 PP 板中挖洞(讓水流動) 	3. 用熱熔膠黏 PP 板成長方筒 
4. 整理箱內用膠帶黏出標示 	5. 把長方筒用膠帶黏上整理箱 	6. 調整攝影架位置，攝影紀錄 

四、 規劃研究二至研究五的實驗基本步驟

(一)隔板外貼金色膠帶部分呈現水道動線與起點、終點。環狀水道俯瞰圖與編制如圖 9：

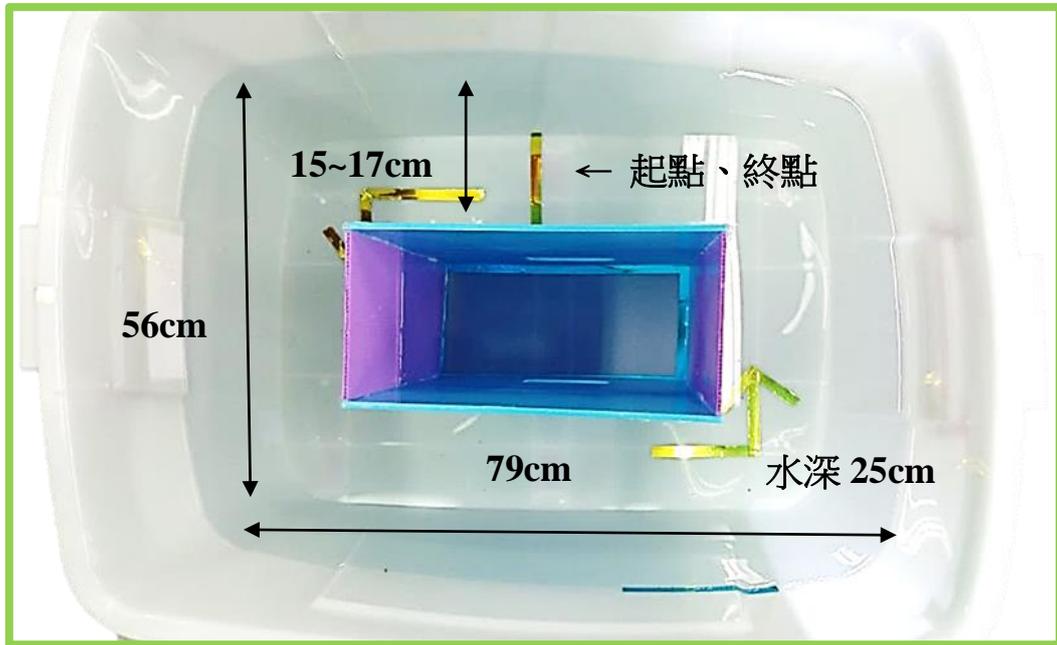


圖 9、環狀水道俯瞰圖

(二)本研究將長方形整理箱內部以 PP 板隔製成環狀水道，並以此測試機械魚的游速，依序比較機械魚在不同魚身材質、尾鰭設計及浮心結構下，游速的差異，進而找出最佳化配置。**研究二至研究五制定共同操作流程，接下來的說明書篇幅中，將簡稱為「基本步驟」**(表 5)：

表 5、本研究在研究二至研究五，共同的「基本步驟」表

<p>1、架設水道</p> 	<p>2、加水到 25cm 處</p> 	<p>3、放下擋板</p> 
<p>4、打開開關，放入機械魚，使其自由游動</p> 	<p>5. 等待魚游動穩定後，拉開擋板，開始計時</p> 	<p>6、魚到達終點時，停止計時，並將魚拿起來</p> 

伍、研究設計與研究步驟

研究一、探討市售機械魚的基本性質

(一)實驗設計：測量市售機械魚的重量(含魚身、浮球及所有組裝零件)、尾鰭擺動及面積，以方便我們進行後續研究二至研究五的設計。

(二)實驗步驟：

1.測量市售機械魚的重量

(1)電子秤歸零後，將組好的市售機械魚放置電子秤，並記錄。

2.測量市售機械魚的尾鰭擺動

(1)將組好的市售機械魚魚身固定，從正上方錄影，記錄 1 分鐘的尾鰭擺動次數。

3.測量市售機械魚的尾鰭面積

(1)將市售機械魚的尾鰭放置於桌上，並拍下來(一旁要有長度校正用的物體)。

(2)使用 ImageJ 軟體 (version: 64-bit Java 1.8.0_112) 計算尾鰭面積。

研究二、探討不同材質魚身對機械魚游速的影響

(一)觀察及背景知識：除木片外，也有其他不易沉入水底的材質，但各種材質的重量與特性(質地、密度與表面摩擦係數等)皆有所不同，我們希望找出材質重量、特性與游速之間的關聯。

(二)提出問題：若使用不同材質製作機械魚魚身，游速會不會被影響？

(三)研究假設：我們評估硬、輕及表面光滑的魚身，能產生較大推進力，使游速較快。**薄 PP 板為光滑塑膠材質、輕且具有硬度**。因此我們推測**薄 PP 板**材質機械魚速度最快。

(四)實驗設計：預計比較對照組(木片)、厚 PP 板(5mm)、薄 PP 板(3mm)、切割墊、透明軟墊板及透明壓克力板(3mm)製成的機械魚游速，以驗證研究假設。

(五)實驗步驟

1.用木片當模板，將薄 PP 板、厚 PP 板、切割墊、透明軟墊板各材質，分別切出機械魚的頭部、軀幹、尾鰭。

2.將不同材質的機械魚組裝起來如圖 10 所示，並將攝影腳架放置於固定位置。

3.每種魚身材質重複基本步驟 12 次(P.7，表 5)，並攝影實驗過程。

4.含對照組共更換 5 種材質，每次同時更換新電池及新彈簧，並重複步驟 3。



圖 10、研究二 不同材質魚身的機械魚

研究三-(一)、探討不同尾鰭形狀對機械魚游速的影響

(一)觀察及背景知識：魚類的尾鰭，可分為圓型、截型、叉型、新月型和普通歪型，形狀大小都不同，我們想了解尾鰭形狀對水流推動的影響，找出與游速間的關聯。

(二)提出問題：若製作不同形狀的機械魚尾鰭，游速會不會被影響？

(三)研究假設：鮪魚、旗魚等游速較快的魚種擁有的尾鰭都屬叉型尾。因此我們推測**叉型尾鰭**機械魚游得最快。

(四)實驗設計：

仿生機械魚是 BCF 運動型態，尾鰭會影響游速，因此尾鰭變動，很可能對機械魚游速造成巨大影響。本研究將機械魚尾鰭換成 5 種不同形狀（圓型、截型、叉型、新月型和普通歪形），對照組則使用市售機械魚的尾鰭形狀。除尾鰭形狀可能影響游速外，**魚鰭大小影響每次拍動的推進力**，也可能影響運動表現。因此，**我們控制尾鰭的寬度與市售機械魚一致，同時使用研究二的最佳魚身材質製作魚身和尾鰭**，力求本研究六項子實驗具有一致的控制變因。

(五)實驗步驟：

1. 繪下五種形狀的尾鰭，將五種尾鰭等比例放大至寬度與對照組尾鰭相同，並製作出來。
2. **使用研究二的最佳魚身材質與尾鰭零件組起不同的機械魚如圖 11 所示**，並將攝影腳架放置於固定位置。
3. 每種尾鰭形狀重複基本步驟 12 次(P.7，表 5)，並攝影實驗過程。
4. 含對照組共更換 6 種尾鰭，每次同時更換新電池及新彈簧，並重複步驟 3。

研究三-(二)、探討不同尾鰭面積對機械魚游速的影響

(一)觀察及背景知識：我們認為尾鰭面積會影響它推動水流時，產生的動力多寡，進而影響游速。希望找出尾鰭面積與游速的關聯。

(二)提出問題：若改變機械魚尾鰭面積，游速會不會被影響？

(三)研究假設：尾鰭面積大，可能導致尾鰭每次拍動會推動更多水流，產生更大的前進動力。因此我們推測**將原本尾鰭放大為 200%**的機械魚會游得最快。

(四)實驗設計：

本研究將**使用研究二的最佳魚身材質製作機械魚含尾鰭，且使用研究三-(一)的最佳尾鰭形狀，作為控制變因**。將最佳尾鰭形狀(叉型)分別調整為 6 種不同的面積大小(由對照組 x50%、x75%、x125%、x150%、x175%、x200%)，對照組則使用實驗三-(一)的叉型尾鰭(面積 = 35.88cm²)視為 100%。仿生機械魚屬於 BCF 的運動型態，尾鰭擺動是機械魚前進的關鍵動力，因此尾鰭面積可能對機械魚游速產生很大的影響。為了避免改變尾鰭面積的過程中，尾鰭形狀失真，因此我們製作尾鰭，是使用影印機的**等比例縮放**功能，讓 6 種尾鰭能**等比例改變面積大小**。

(五)實驗步驟：

1. 將對照組尾鰭放置至影印機中，等比例縮放成 6 種面積大小(50%、75%、125%、150%、175%、200%)，並製作出 6 種不同面積的尾鰭。
2. 將魚身用圖 12 所示之尾鰭零件組起，並將攝影腳架放置於固定位置。
3. 每種尾鰭面積重複基本步驟 12 次(P.7，表 5)，並攝影實驗過程。
4. 含對照組共更換 7 種尾鰭，每次同時更換新電池及新彈簧，並重複步驟 3。

研究三-(三)、探討不同尾鰭夾角對機械魚游速的影響

(一)觀察及背景知識：機械魚的尾鰭是推進魚的主要動力來源。尾鰭的夾角可能影響動力的水流，及魚所受到的阻力大小，進而使機械魚的游速有所差別。

(二)提出問題：若改變機械魚尾鰭的夾角，游速會不會被影響？

(三)研究假設：若尾鰭角度小，拍動時所產生的前進力與阻力，易產生抵銷，使機械魚無法快速前進；但若尾鰭角度愈大，拍動時所產生的前進力，無法集中加成疊合，導致機械魚游速較慢。因此我們假設尾鰭 90°夾角機械魚能游最快。

(四)實驗設計：

本研究設計四種不同尾鰭的夾角（45°、90°、135°、180°），對照組則使用市售機械魚尾鰭 105°夾角。對照組、實驗組皆使用先前研究得到的最佳魚身材質、最佳尾鰭形狀與面積比例製作機械魚，作為控制變因。為了避免在設計不同尾鰭夾角時，造成大小不一，因此我們製作尾鰭時，會控制五種尾鰭的面積大小。

(五)實驗步驟：

1. 使用叉型尾鰭作為模板，製作出 4 種不同夾角的尾鰭(45°、90°、135°、180°)，如圖 13。
2. 將魚身用零件組起，並將攝影腳架放置於固定位置。
3. 每種尾鰭夾角重複基本步驟 12 次(P.7，表 5)，並攝影實驗過程。
4. 含對照組共更換 5 種尾鰭，每次同時更換新電池及新彈簧，並重複步驟 3。



圖 11、研究三-(一) 不同尾鰭形狀的機械魚



圖 12、研究三-(二)不同尾鰭面積的機械魚



(方格紙單位方格皆為 1cm²)

圖 13、研究三-(三)不同尾鰭夾角的機械魚

研究四、探討不同浮球材質對機械魚游速的影響

(一)觀察及背景知識：浮力單元中，提到浮體浮力大小等於其重量，而保麗龍球比乒乓球輕，所以，以保麗龍球作為浮球的機械魚，其所受浮力應該略小。因此我們改變浮球材質，測試浮球浮力對機械魚游速的影響。

(二)提出問題：如果更換機械魚的浮球材質，游速會不會被影響？

(三)研究假設：保麗龍球的重量較輕，浮力較小，浸在水裡的部分也較少，所以尾鰭在擺動時，所能推動的水比乒乓球浮球機械魚少，因此推測**乒乓球做為浮球的機械魚**能游得比較快。

(四)實驗設計：

本研究將浮球從乒乓球替換為直徑相同(40mm)但重量較輕的保麗龍球，藉由比較游速快慢，找出最適合機械魚的浮球材質，對照組與實驗組**皆使用先前研究得到的最佳魚身材質與最佳尾鰭製作機械魚，作為控制變因。**

(五)實驗步驟：

1. 將魚身用不同浮球零件組起如圖 14，並將攝影腳架放置於固定位置。
2. 每種浮球材質重複基本步驟 12 次(P.7，表 5)，並攝影實驗過程。
3. 含對照組共更換 2 種浮球材質，每次同時更換新電池及新彈簧，並重複步驟 2。

研究五-(一)、探討不同浮球顆數對機械魚游速的影響

(一)觀察與背景知識：自然界中，魚大多只有一個魚鰾，但機械魚卻有兩顆浮球模擬魚鰾，我們推測是為了讓機械魚浮力來源位置更穩定而加上第二顆浮球。

(二)提出問題：更改機械魚的浮球顆數，游速會不會被影響？

(三)研究假設：我們企圖透過**減少浮球顆數來降低浮力來源位置的穩定度**。推測**兩顆浮球**，能使機械魚的浮力來源位置穩定，也能游得比較快。

(四)實驗設計：

本研究將模擬魚鰾的浮球更改為一顆，降低魚身的穩定度，分別放在 3 個不同的位置(留前、留中、留後)，對照組則在原位置，**皆使用先前研究得到的最佳魚身材質、最佳尾鰭、最佳浮球材質製作實驗魚，作為控制變因。**

(五)實驗步驟：

1. 製作不同浮球顆數與位置的魚身，用零件組起如圖 15，並將攝影腳架放置於固定位置。
2. 每種浮球顆數與位置的魚身，重複基本步驟 12 次(P.7，表 5)，並攝影實驗過程。
3. 含對照組共更換 4 種魚身，每次同時更換新電池及新彈簧，並重複步驟 2。



圖 14、研究四 不同浮球材質的機械魚



圖 15、研究五-(一) 不同浮球數量的機械魚

研究五-(二)、探討不同浮球位置對機械魚游速的影響

(一)觀察與背景知識：目前為止的觀察，機械魚會略往前傾斜。由上個實驗得知，單顆浮球使機械魚的平衡容易被改變，而浮球位置會影響整隻魚的浮力中心(浮心)

(二)提出問題：若更改機械魚浮球間的相對距離，游速會不會被影響？

(三)研究假設：改變浮球相對位置能改變浮力中心。由於原本機械魚略往前傾斜，因此我們推測**前面的浮球往後 2cm**，將能使機械魚達到平衡，而游得更快。

(四)實驗設計：

本研究調整兩顆浮球位置的相對關係。我們以對照組的浮球位置作為基準，做出浮球位置前向後 1cm、前向後 2cm、後向前 1cm、後向前 2cm 與一起向中間 1cm。

(五)實驗步驟：

1. 製作不同浮球位置的魚身，用零件組起如圖 16，並將攝影腳架放置於固定位置。
2. 每種浮球位置的魚身，重複基本步驟 12 次(P.7，表 5)，並攝影實驗過程。
3. 含對照組共更換 6 種魚身，每次同時更換新電池及新彈簧，並重複步驟 2。

綜合研究、探討最佳機械魚與原本機械魚游速差異在大型圓形水道的重現性

(一)觀察及背景知識：機械魚在進行研究二至研究五時，常會受到亂流影響而導致游動不順暢。而水體變大，亂流的影響會顯得比較輕微，不過，可能又會產生其他干擾因子。

(二)提出問題：機械魚游動水道的水體大小不同，游速影響因子的效果是否一致？

(三)研究假設：機械魚除了本體的設計外，水道也是可能影響游速的一大關鍵。但前面研究中的最佳化機械魚，水道完成平均時間標準差小，表現穩定，因此我們推測，研究二至研究五找出的**流速影響因子，在大水道中能有相同的影響效果**。

(四)實驗設計：預計比較大水道中，最佳化機械魚與市售機械魚的完成平均時間，以驗證機械魚游速影響因子是否具有重現性。為了避免兩種機械魚因路徑不同而導致實驗誤差，我們用 PP 板及透明墊板**圍了一圈放大版的圓型水道來確保每隻魚游的路徑長相仿**(外隔板為直徑 90cm 的圓，內隔板為直徑 50cm 的圓，機械魚的游動水道在外隔板與內隔板間如圖 16)。

(五)實驗步驟

1. 組裝大型圓形跑道如圖 17，組裝方式如表 6。
2. 將最佳化機械魚與市售機械魚用零件組起，並將攝影腳架放置於固定位置。
3. 最佳化機械魚與市售機械魚，分別重複基本步驟 12 次(P.7，表 5)，並攝影實驗過程。



圖 16、研究五-(二) 兩顆浮球間隔不同距離的機械魚

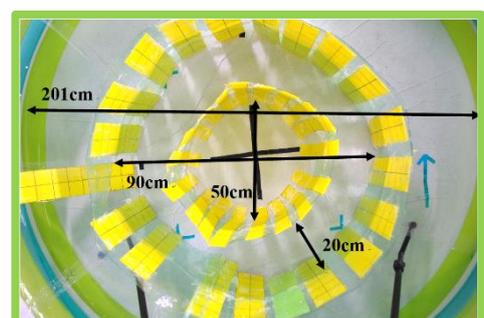


圖 17、綜合研究的圓形跑道設計

表 6、圓形跑道組裝步驟表

<p>1. 將透明軟墊板裁成 165x33.5cm 及 290x 33.5cm 的兩片隔板。</p> 	<p>2. 把 PP 板裁成 10x33.5cm 以及 5x33.5cm 作為支架，將其黏到隔板上。</p> 	<p>3. 把做好的擋板黏到 203 x 51cm 游泳池內，形成直徑 50cm 及 90cm 的圓。</p> 
--	--	---

統計分析方法

本研究中，各實驗資料收齊後，將資料運用 Excel 2016 繪製盒鬚圖，用以表示資料的分布。接著比較對照組與各實驗組間的差異，先運用 *F.test* 檢驗兩組資料的變異數同質性，在 excel 中，使用公式(1)。當檢定值 >0.05 表示兩組資料的變異數相同， <0.05 則不同。

$$= F.TEST(\text{資料範圍一}, \text{資料範圍二}) \quad \text{公式(1)}$$

F.test 的結果會協助我們判斷 *T.test* 的檢定種類。在公式(2)中，*T.test* 檢定分為三種，分別是成對雙樣本 *T.test*、獨立雙樣本 *T.test* (變異數相同) 與獨立雙樣本 *T.test* (變異數不同)。而前述公式(1)的 *F.test* 檢驗結果，若 >0.05 ，則檢定種類填 2； <0.05 則檢定種類填 3。

$$= T.TEST(\text{資料範圍一}, \text{資料範圍二}, \text{單/雙尾}, \text{檢定種類}) \quad \text{公式(2)}$$

由於 *T.test* 比較的對象為兩個樣本，因此我們把對照組與實驗組所有的組別兩兩比較，找出兩兩間的關係。利用檢定的顯著性，將檢定判讀後，差異未達顯著(P 值 ≥ 0.01)的資料分在同一組，以同一個斜體英文字母(*a*、*b*、*c*……)作為標示，分類標記在最初繪製的盒鬚圖上，差異達顯著(P 值 < 0.01)，則以相異的斜體英文字母作區隔標示，藉此完整展示各實驗兩兩結果間是否達顯著差異。

伍、研究結果

研究一：探討市售機械魚的基本性質

本研究先對三隻一樣的市售機械魚進行基本了解，測量市售機械魚的重量、尾鰭擺動及尾鰭面積，方便我們以後做各項機械魚的改變時，有基本的依據(表 7)。

表 7、市售機械魚基本數據表

基本資料 \ 魚編號	魚 1	魚 2	魚 3	平均數	標準差
重量(gw)	112.5	112.3	112.2	112.33	0.15
尾鰭擺速(次/秒)	1.5	1.5	1.5	1.5	0
尾鰭面積(cm^2)	40.75	40.75	40.75	40.75	0

由表 7 可知，市售機械魚的重量測量值位於 112.2 至 112.5gw 間，平均數為 112.33gw，標準差為 0.15；尾鰭擺速為 1.5 次/秒；尾鰭面積為 40.75cm^2 。我們可從表 7 數據得知市售機械魚的樣板是固定的，其重量、面積都相當穩定，就連馬達輸出功率也穩定，因此擺速都一樣。由於不同隻市售機械魚的基本性質穩定，**我們統一使用魚 1 進行後續實驗**，加強控制變因。

研究二、探討不同材質魚身對機械魚游速的影響

本研究使用**厚 PP 板(5mm)**、**薄 PP 板(3mm)**、**切割墊**、**透明軟墊板**共 4 種材質作為研究的變因，並以市售機械魚木片材質作為對照組。每種材質會切割 1 隻機械魚，並且進行 12 次基本步驟後，求其水道完成一圈的時間平均值(圖 18)。

我們以盒鬚圖來表示水道完成平均時間，並以 *F.test*、*T.test* 來檢定各組之間是否達顯著差異，如果兩兩之間沒有顯著差異(P 值<0.01)，便會用同一個斜體英文字母分在同一組，兩兩之間有顯著差異時，則會用相異的斜體英文字母作區隔標示(*a*、*b*、*c*...)。

圖 18 中，**綠色系為對照組**，**紅色系為水道完成平均時間低於對照組的組別**，**藍色系則為水道完成平均時間高於對照組的組別**。我們發現，**薄 PP 板機械魚的水道完成平均時間為 29.28 秒**，**標準差為 1.30**，**顯著低於對照組的 33.77 秒**，**標準差 2.89**，具有最佳的運動表現。

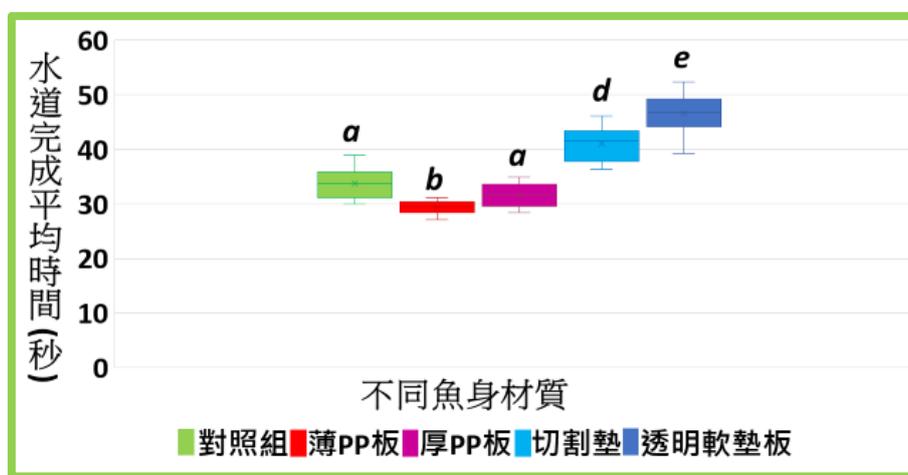


圖 18、不同材質魚身機械魚的水道完成時間圖

我們將材質特性中的「**重量**」加以量化，並**考量作者間可能的人為誤差**，將各材質的魚身重複製作三隻，再測量魚身平均重量，結果如表 8：

表 8、不同材質魚身機械魚的重量表

魚身材質	魚編號	魚 1	魚 2	魚 3	平均數	標準差
	重量(g)					
對照組		112.5	112.3	112.2	112.33	0.15
厚 PP 板(5mm)		98.4	99.1	98.4	98.63	0.40
薄 PP 板(3mm)		89.7	89.4	90.5	89.86	0.56
切割墊		176.4	176.3	176.6	176.43	0.15
透明軟墊板		96.5	96.8	96.7	96.66	0.15

表 8 結果顯示，切割墊材質是最重的，平均重量為 176.43g，但其水道完成平均時間，卻非與對照組相差最大；最輕的薄 PP 板材質，重量為 89.86g，其水道完成時間則最少；透明軟墊板重量偏輕，但卻是運動表現最差的，預估與材質其他特性相關。經由以上結果，我們知道**不同材質會有不同重量**，但**材質的其餘特性(如：表面光滑、質地等)也會影響其游速**。

綜合圖 18 及表 8，**薄 PP 板(3mm)材質魚身的機械魚**，**水道完成平均時間較對照組減少約 13.3%**，通過統計檢驗且游速穩定，因此，我們決定以薄 PP 板作為後續研究的魚身材料。

研究三-(一)、探討不同尾鰭形狀對機械魚游速的影響

本研究使用圓型、截型、叉型、新月型及普通歪型共 5 種尾鰭形狀作為研究的變因，並以市售機械魚尾鰭形狀作為對照組。

透過圖 19，我們發現，叉型尾鰭機械魚的水道完成平均時間為 27.75 秒，標準差為 0.71 顯著較對照組的 29.28 秒，標準差 1.30 低，具有最佳的運動表現。

雖然我們控制尾鰭的寬度與市售機械魚一致，但為了確保機械魚的游速不被尾鰭面積干擾，我們也測量了各種尾鰭形狀機械魚的尾鰭面積，結果如表 9。再將不同尾鰭機械魚的水道完成平均時間，與尾鰭面積製成 $x-y$ 散佈圖(圖 20)。我們發現尾鰭面積與水道完成時間，決定係數(相關係數的平方)趨近於 0。因此，在此實驗中，面積非游速影響因子。

表 9、不同尾鰭形狀機械魚的尾鰭面積表

尾鰭形狀	對照組	叉型	截型	新月型	圓型	普通歪型
尾鰭面積 (cm ²)	40.75	35.88	40.75	27.75	41.25	34.63

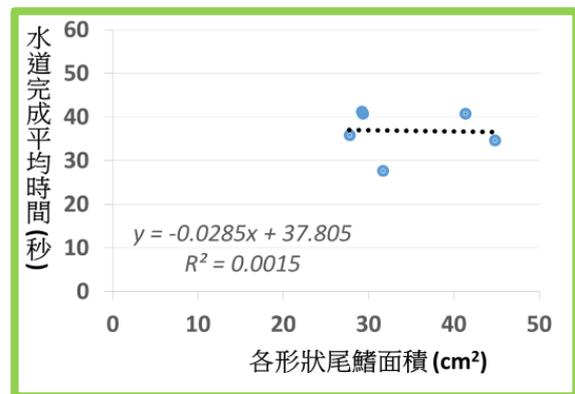
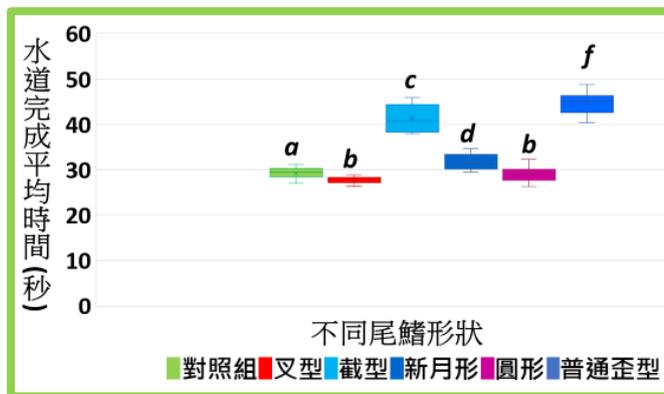


圖 19、不同尾鰭形狀機械魚的水道完成時間圖 圖 20、尾鰭面積與水道完成時間圖

綜合表 9 及圖 19，叉型尾鰭的機械魚，水道完成平均時間較對照組減少約 5.2%，通過統計檢驗，且游速穩定，因此，我們決定以叉型作為後續研究的尾鰭形狀。

研究三-(二)、探討不同尾鰭面積對機械魚游速的影響

本研究共使用對照組 x 50%、x75%、x125%、x150%、x175%及 x200%等 6 種尾鰭面積作為研究的變因，並以市售機械魚尾鰭面積(面積 = 35.88cm²)作為對照組。

透過圖 21，我們發現，對照組的水道完成平均時間為 27.75 秒，標準差為 0.71，顯著低於大部分實驗組，具有最佳的運動表現。

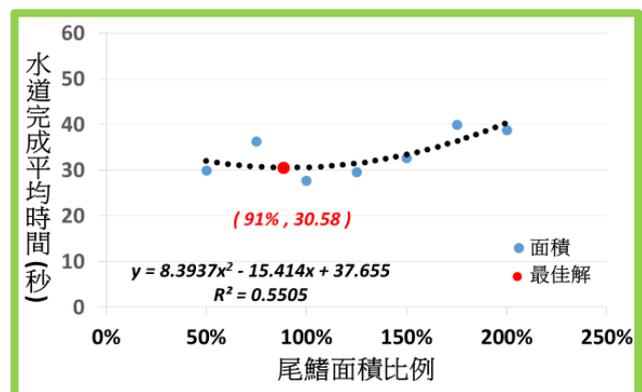
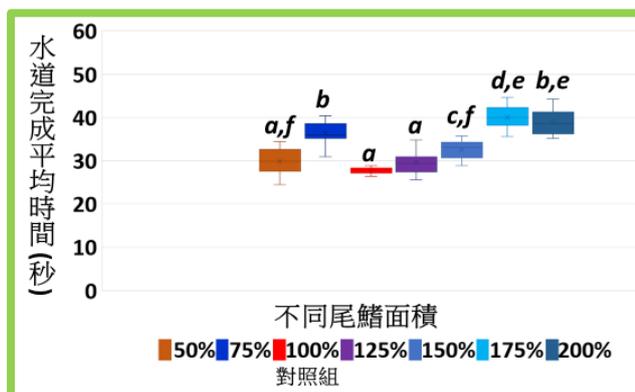


圖 21、不同尾鰭面積機械魚的水道完成時間圖 圖 22、最佳尾鰭面積二次函數分析圖

得出實驗結果後，我們使用二次函數迴歸分析來推估最佳的尾鰭面積。從圖 22，我們得知此迴歸分析為高度相關，可用以推算尾鰭的最佳面積比例：最佳的尾鰭面積為 91%。此迴歸分析圖形在 90%~110%間，幾乎平行，因此，此區間內都可能具有最佳的運動表現。我們實際得出的實驗結果，**最佳面積比例 100%不但位於此區間內，更比分析預測的時間減少 9.2%**，具有最佳的運動表現，因此，我們決定以對照組的尾鰭面積作為後續研究的尾鰭面積。

研究三-(三)、探討不同尾鰭夾角對機械魚游速的影響

本研究共使用 45°、90°、135°及 180°等 4 種尾鰭夾角作為研究的變因，並以市售機械魚尾鰭夾角(夾角=105°)作為對照組。

透過圖 23，我們發現，**尾鰭夾角 90°機械魚的水道完成平均時間為 26.23 秒，標準差為 1.13，顯著低於對照組的 27.75 秒，標準差 0.71**，具有最佳的運動表現。

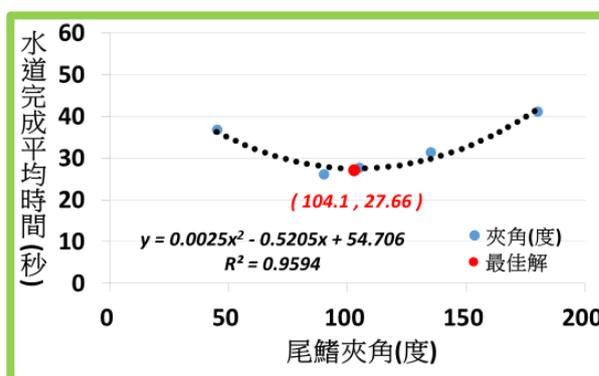
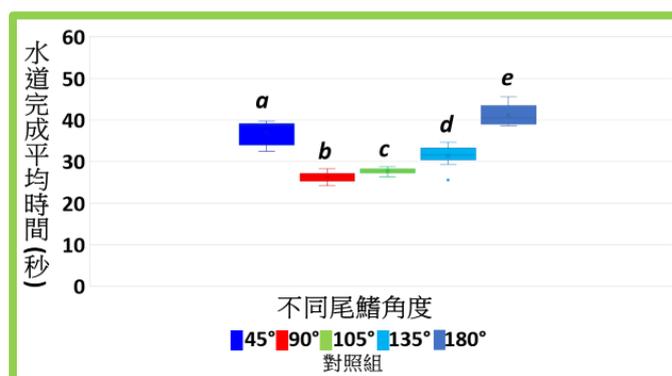


圖 23、不同尾鰭夾角機械魚的水道完成時間圖

圖 24、最佳尾鰭夾角二次函數分析圖

得出實驗結果後，我們使用二次函數迴歸分析來推估最佳的尾鰭夾角。從圖 24，我們得知此迴歸分析為高度相關，可用以推算尾鰭的最佳夾角：最佳的尾鰭夾角為 104.1°。此迴歸分析圖形在 90°~110°間，幾乎平行，實驗結果得出的**最佳夾角 90°不但位於此區間內，更比分析預測的時間減少 5.1%**，具有最佳的運動表現，因此，我們決定以 90°作為後續研究的尾鰭夾角。

研究四、探討不同浮球材質對機械魚游速的影響

本研究探討**保麗龍球替代乒乓球作為機械魚浮球材質**的可能性。

透過圖 25，我們發現，**對照組的水道完成平均時間為 25.95 秒，標準差為 0.99，顯著低於保麗龍球作為浮球材質的 31.73 秒，標準差 1.94**，具有最佳的運動表現。因此，我們決定以對照組的浮球材質作為後續研究的浮球材質。

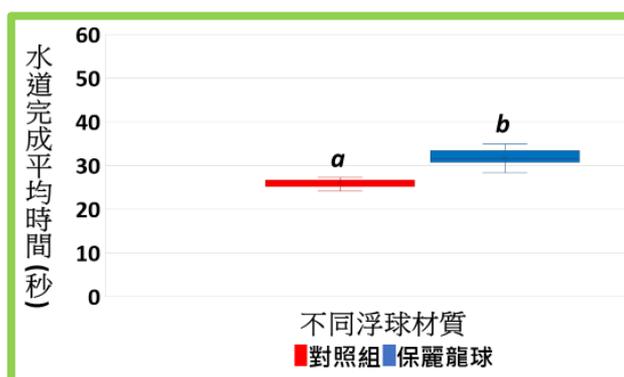


圖 25、不同浮球位置機械魚的水道完成時間圖

研究五-(一)、探討不同浮球顆數對機械魚游速的影響

本研究共使用**單顆乒乓球留前、留後、留中**等 3 種將乒乓球放在不同的位置作為研究的變因，並以市售機械魚的兩顆乒乓球為浮球作為對照組。

透過圖 26，我們發現，**對照組的水道完成平均時間為 26.22 秒，標準差為 1.12，顯著低於全部實驗組**，具有最佳的運動表現。顯見，只留一顆乒乓球的游速都較對照組差，因此把浮球改成一顆，無法提升機械魚的游速。

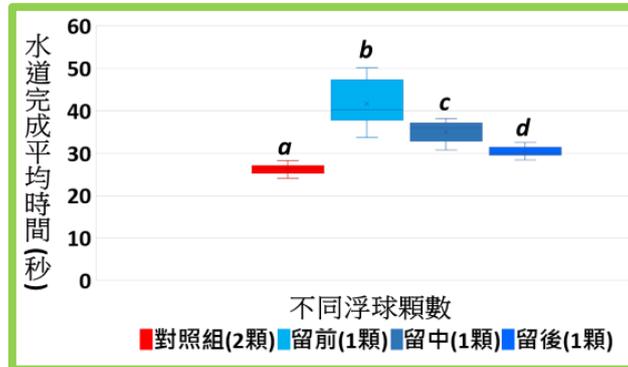


圖 26、不同浮球材質機械魚的水道完成平均時間圖

本研究中，有些魚身，僅搭配 1 顆浮球；有些則搭配 2 顆。為了確保，機械魚的游速是被浮球位置影響，而非重量，我們也測量了各種浮球位置機械魚的重量，結果如表 10。

表 10、不同浮球位置機械魚的重量表

浮球位置(數量)	對照組 (2 顆)	留前 (1 顆)	留中 (1 顆)	留後 (1 顆)
重量 (g)	90.03	87.47	87.70	87.30

綜觀圖 26 與表 10，發現，乒乓球僅留一顆的情況(留前、留中、留後)，重量皆差不多，但水道完成平均時間卻差異極大，30.27 秒至 41.71 秒都有。經由以上結果，我們知道，**浮球有兩顆時，魚身較易達到平衡，因此游得較快及較穩定**。所以，**對照組機械魚的水道完成平均時間較只留一顆浮球的佳**，且游速穩定，我們決定以此作為後續研究的浮球顆數。

研究五-(二)、探討不同浮球位置對機械魚游速的影響

本研究共使用**前向後 1cm、前向後 2cm、後向前 1cm、後向前 2cm、一起向中 1cm**等 5 種將乒乓球放在不同的位置作為研究的變因，並以市售機械魚的浮球位置作對照組。

透過圖 27，我們發現，**前面浮球位置往後 1cm 的機械魚，因魚身最能達到平衡，水道完成平均時間為 24.59 秒，標準差為 1.36，顯著低於對照組的 26.22 秒，標準差 1.12，減少了約 6.2%的時間**，具有最佳的運動表現。

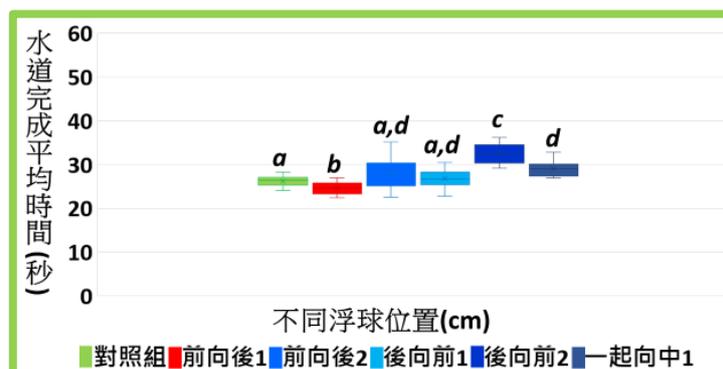


圖 27、不同浮球位置機械魚的水道完成時間圖

綜合研究、探討最佳化機械魚與市售機械魚游速差異在大型圓形水道的重現性

經過研究二至研究五，我們配置出游速最佳化的機械魚，有幾項特徵：

1. 薄 PP 板魚身材質
2. 尾鰭為夾角 90° 的叉形尾鰭
3. 浮球為兩顆乒乓球，且前面一顆較市售機械魚向後 1cm

最佳化機械魚水道完成平均時間為 24.59 秒，市售機械魚(研究二的對照組) 水道完成平均時間則為 33.77 秒，**整體而言，我們減少了約 27.2% 的時間。**

為了確保游速影響因子，在研究二至研究五所使用之水道以外，仍具有效果，我們最後進行一項綜合研究，將**市售機械魚及最佳化機械魚分別放入大型圓形水道中**，各進行 12 次基本步驟後，求其水道完成的平均時間值(圖 28)。使用大型圓形游泳池，是因為水體體積較大，更能推估本研究之研究結果，在開放水域中是否具有重現性。

綜合圖 28 與圖 29，發現**最佳化機械魚的水道完成平均時間為 36.14 秒，標準差 2.08，顯著低於市售機械魚的 66.14 秒，標準差 4.90，減少了約 45.4% 的時間**；而方形水道與大型圓形水道的研究結果相仿，則展現了**我們研究的重現性。**

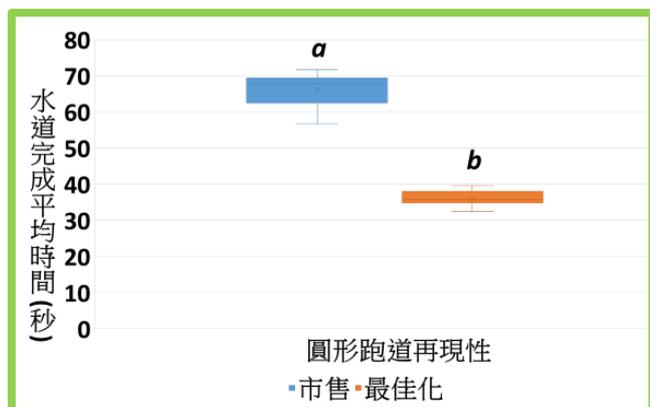


圖 28 大型圓形水道的水道完成時間圖

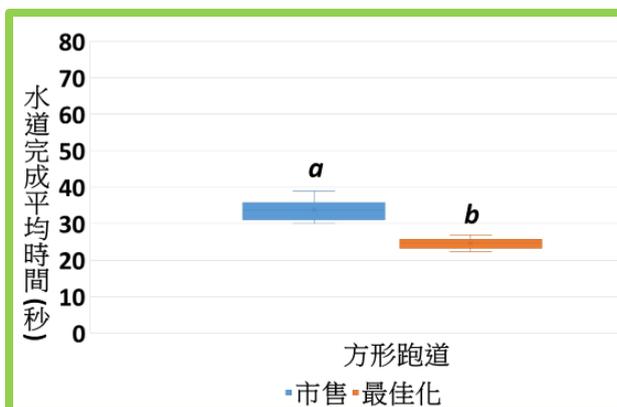


圖 29 方形水道的水道完成時間圖

陸、討論

一、本研究使用的仿生機械魚，是模擬 BCF 擺尾方式的鱒行式

魚類的擺尾法大致分為三種方式，分別是鰻行式、鱒行式、鮪行式(表 11)。使用鰻行式的魚，在游動中會使用到整個身體進行擺動，像鰻魚就是一個典型的例子，鱒行式則是大部分魚類的游動方式，身體前段的波動幅度較少，只有魚身最後的 1/3 進行波動行為，主要利用尾鰭擺動產生前進的推力，而鮪行式則只使用尾鰭擺動產生前進的力量，也是在快速運動中最有效率的游動方式 (Michael Sfakiotakis, etal,1999)。**本研究使用的仿生機械魚是利用軀幹末端擺動帶動尾鰭，進而產生前進的動力，因此我們判斷其游行方式為模擬鱒行式。**

表 11、鰻行式、鱒行式與鮪行式的比較表

	鰻行式	鱒行式	鮪行式
運動部位	全身	身體的最後 1/3	尾鰭
速度	最慢	較快	最快
特色	每單位行進距離的成本較少	在速度、加速度和操控性有最好的平衡	長距離遷徙中移動速度快

二、機械魚製作過程，從多個面向掌管控制變因，企圖減少系統性誤差

(一)研究三-(一)中，我們控制尾鰭的比例與大小，減少尾鰭面積造成的推進力差異

不同尾鰭形狀的實驗，可能因為尾鰭面積大小，造成向前推進力有所不同，進而導致速度快慢不均，因此**我們控制尾鰭連接魚身處的長度是一樣的，力求面積一致。**

(二)在研究三-(二)中，我們控制尾鰭的形狀，減少尾鰭形狀不同造成的推進力差異

不同尾鰭面積的實驗，為了避免機械魚尾鰭無法裝在魚身上，我們固定尾鰭連接魚身的三角形區塊面積，只改變後方兩片尾鰭的大小，並使用影印機**將標準尾鰭等比例放大縮小**，使不同面積的**尾鰭能維持原本形狀比例。**

(三)在研究三-(三)中，我們控制尾鰭的面積及大小，減少尾鰭面積不同造成的推進力差異

不同尾鰭夾角的實驗，為了控制尾鰭的面積及大小，我們固定尾鰭連接魚身的三角形區塊面積及位置，全部使用對照組的尾鰭形狀作為模板，只改變兩片尾鰭間的夾角。

三、環狀水道實驗執行過程，從多個面向掌管控制變因，企圖減少隨機性誤差

(一)我們以 1 組電池進行 1 組實驗，並將實驗完的電池拿給總務處，發揮其效用

電池一經使用，便會不如新電池的電力。為了降低實驗誤差，我們預計在每次機械魚游完一圈後，就更換電池，但我們也擔心使用過多電池，損害環境，因此我們先試行使用一組電池，讓機械魚先游 20 圈，發現第 1 圈與第 20 圈的耗時，沒有太大差別，於是我們**使用 1 組電池進行 1 組實驗(共 12 圈)**，以兼顧實驗準確性與環保。並且，實驗完的電池，我們也拿給總務處，讓這些電力還很足夠的電池發揮最大功用。

(二)我們讓機械魚的出發角度隨機，減少魚頭角度不同導致的路徑差異

我們發現放下機械魚時，魚頭角度不同，會讓機械魚游的路徑也產生差異。為了減少因為路徑不同導致的誤差數據，便先讓機械魚在預備區(起點前)先等 5 秒，並用隔板擋住，讓機械魚的出發角度是隨機的，減少人為造成的機械魚路徑偏差。

四、研究二、探討不同材質魚身對機械魚游速的影響

(一)我們選用各種材質，找出機械魚魚身應有的特質

我們使用各種不同特質的材料，木板(對照組)、硬切割墊、厚 PP 板(5mm)、薄 PP 板(3mm)、透明軟墊板。從實驗結果發現，薄 PP 板(3mm)是最佳的魚身材質。而薄 PP 板與其他材質相比，其質地較硬、密度較小(輕)、表面摩擦係數也小(滑)，因此得知，機械魚魚身的最佳化材質必須具備硬、輕、滑、薄等條件。我們也利用機械魚重量與水道完成時間做線性迴歸分析(圖 30)，發現去除透明軟墊板的資料點後，重量與水道完成時間有非常高的相關。透明軟墊板魚身機械魚在游動時，因為質地太軟，尾鰭擺動會受到明顯水的阻力，因而降低擺尾速度，使得尾鰭推進力較小。也因此，當透明軟墊板機械魚受到亂流影響時，無法快速地游回水道中央，會卡在某一位置，增加水道完成時間。

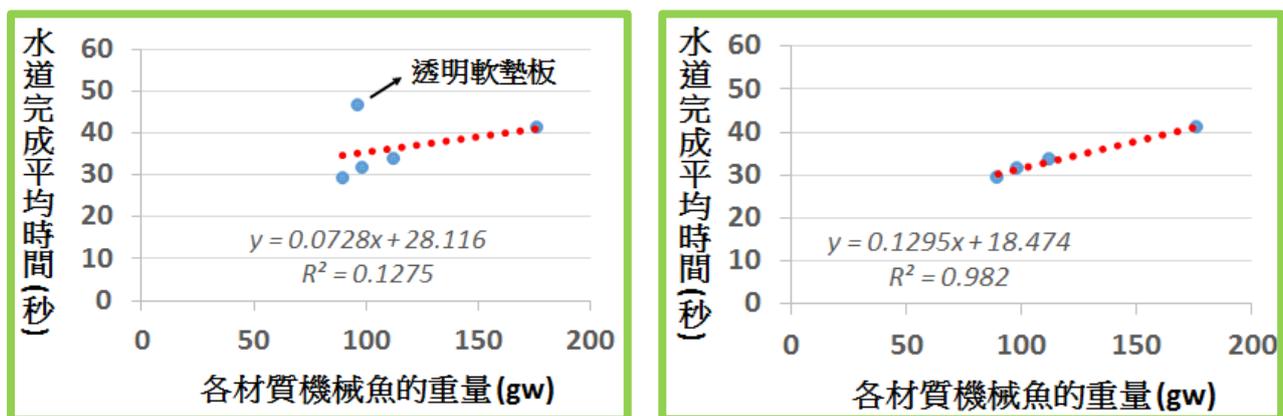


圖 30、機械魚重量與水道完成時間關係圖 (左圖為五種材質；右圖為去掉透明軟墊板材質)

(二)我們控制，切割魚身時，PP 板的方向

在製作厚 PP/薄 PP 板材質機械魚的過程中，我們發現，若將有洞的面朝前後，機械魚魚身將會進水，導致機械魚無法順利地向前游，但若將有洞的地方朝上下，機械魚就可如其他材質的機械魚一樣，順利在水中游動，因此我們在製作厚 PP/薄 PP 板材質機械魚時，會使用將有洞的面朝上下的方法。

(三)研究二符合研究假設：機械魚魚身材質為薄 PP 版時，速度最快

使用 *T.test* 檢定，分析機械魚繞行水道一圈所需的時間，可發現對照組與厚 PP 板(5mm)沒有顯著差異，而對照組與薄 PP 板(3mm)、切割墊、透明軟墊板則具有顯著差異，其中，薄 PP 板(3mm)材質魚身的機械魚在水道內繞一圈所需的時間之平均值最小，符合研究假設。

五、研究三-(一)、探討不同尾鰭形狀對機械魚游速的影響

(一)深海魚尾鰭，可能使魚游得更快；但，本研究無法驗證普通歪型尾鰭提高游速

魚類尾鰭多變，圓型、截型、叉型、新月型和普通歪型，是大致的尾鰭分類。圓形尾鰭(例：松雕)，牠們的生活環境在礁區、河口、近海沿岸等水深較淺的地方；截型尾鰭(例：吳郭魚)，生活環境在河口、近海沿岸、淡水水域；叉型尾鰭(例：劍旗魚)生活環境在大洋、深海、近海沿岸；新月型尾鰭(例：雄新月絲鰭鸚鯛)生活環境在礁區、近海沿岸；普通歪型尾鰭(例：鏟狀真鯊)生活環境在大洋、深海、礁區、砂泥底、近海沿岸。由上述可知，**生活在海洋及深海的魚擁有的尾鰭，可能使魚游得更快。但本研究並無法驗證普通歪型尾鰭游得很快**，我們推測可能是因為魚身設計，導致普通歪型尾鰭推進的效果不明顯。

(二)鯊魚的尾鰭形狀(普通歪型尾鰭)，可能不適合 BCF 游動模式與我們的機械魚魚身設計

鯊魚是海中游速很快的生物，但本研究實驗過程中，當我們使用鯊魚的尾鰭形狀(普通歪型尾鰭)進行實驗時，卻發現它居然是所有尾鰭形狀中游速最慢的。在自然第二冊有介紹到，鯊魚是軟骨魚，且鯊魚的游動模式也非 BCF 游動；很可能，**普通歪型尾鰭並不適合使 BCF 游動模式具有加速的效果**。我們推論，若更改魚身設計，很可能就能使普通歪型尾鰭的游速威力顯現。

(三)研究三-(一)符合研究假設：機械魚尾鰭形狀為叉型時，速度最快

使用 *T.test* 檢定，分析機械魚繞行水道一圈所需的時間，發現對照組與實驗組(叉型、截型、新月形、圓形、普通歪型)都達顯著差異。其中，**叉型尾鰭機械魚在水道繞一圈所需的時間之平均值最小，符合研究假設**。

六、研究三-(二)、探討不同尾鰭面積對機械魚游速的影響

(一)我們將市售機械魚尾鰭等比例縮放，尋找尾鰭面積對機械魚游速的影響

為了在放大縮小尾鰭時，不改變原本尾鰭的形狀，因此將對照組的叉型尾鰭，**運用影印機等比例放大縮小，再依此為模板製作出不同面積的尾鰭**，這樣做不僅能使機械魚尾鰭形狀保持一致，面積大小的改變準確度也大幅提升。

(二)原本的機械魚尾鰭游的最快，符合身體比例

一開始，我們認為面積愈大的尾鰭在擺動時能產生愈大的推進力，因此假設面積 200%的機械魚游速最快，但在實驗結束後，我們卻發現原本機械魚尾鰭游速最快。經過討論後，我們認為是因為**200%的尾鰭在水中的阻力大**，因此無法快速前進。

(三)研究三-(二)不符合研究假設：使用對照組尾鰭，機械魚游得更快

做完不同尾鰭面積的實驗，發現實驗結果與我們的研究假設(200%的尾鰭游的最快)不同：我們推測是因為機械魚的尾鰭和魚身有完美的比例，我們將**尾鰭放大，魚的水中阻力也變大，擺速變慢；而把尾鰭縮小，魚在水裡的阻力雖然也小，但是擺動的力量不足以快速的將機械魚往前推**，所以不管把尾鰭放大或縮小，都無法提升機械魚的游速。

七、研究三-(三)、探討不同尾鰭夾角對機械魚游速的影響

(一)我們以 45° 為一個單位，設計不同夾角的尾鰭，找出尾鰭夾角對游速的影響

設計尾鰭夾角時，為了使夾角造成的差異能顯而易見被觀察，我們以 45° 為一個單位，設計出 45° 、 90° 、 135° 、 180° 等四種夾角尾鰭，用以檢測尾鰭夾角對機械魚游速的影響。

(二)夾角為 90° 尾鰭的機械魚游速最快，因為夾角角度適中。

我們預估尾鰭夾角 90° 的機械魚游速最快。因為，若尾鰭夾角小，拍動時所產生的前進力與阻力，易產生抵銷，使機械魚無法快速前進；但若尾鰭夾角大，則上下兩半尾鰭，拍動時所產生的前進力，無法集中加成疊合，導致機械魚游速慢。

(三)研究三-(三)符合研究假設：尾鰭夾角為 90° ，機械魚游得快。

本研究中，發現結果與研究假設相同：尾鰭夾角 90° 機械魚游較快。因為尾鰭擺動時，上下兩半不會太近而阻力相互干擾，也不會太遠而導致推進的力量分散，水流可以順利通過，又能降低尾鰭擺動時產生的阻力對推進力的干擾，因此尾鰭夾角 90° 機械魚游最快。

八、我們綜觀研究三的二次函數迴歸分析，剖析模型並預測未來可能的發展應用

研究三共發展了 2 個二次函數迴歸分析(圖 22、圖 24)，預測機械魚各游速影響因子的最佳化理論數值。加上研究五的二次函數迴歸分析(圖 31)，透過這三個分析模型，發現：

1. 二次函數迴歸分析的 U 字圖形，說明參數太大與太小的設計，對機械魚的運動表現都會有不利的影响。

2. 二次函數迴歸分析的 U 字圖形，曲線在端點附近趨近平行，我們的確也對照出，實驗的最佳秒數落在這段趨近平行的範圍內。

3. 實驗設計沒有剛好設計到最佳理論值，因此無法得知各實驗在該點的真实運動表現

4. 實驗所得的最佳秒數，皆優於模型預測，說明機械魚運動表現不只包含單一因素。

未來，我們打算使用模型預測結果進行深入研究，在逼進最佳解的範圍，再次設計實驗，修正最佳解的預測。以最佳尾鰭夾角的實驗為例(圖 24)，模型預測的最佳夾角為 104.1° ，且迴歸分析圖形在 $90^\circ \sim 110^\circ$ 間，幾乎平行，因此將進一步設計夾角為 90° 、 91° 、 \dots 、 103° 、 104° 、 105° 、 \dots 、 109° 、 110° 等，但在實際操作的過程中，過於精細的夾角設計，可能會有許多因素影響實驗結果，這些是未來進行深入研究前，需仔細考量的。

九、研究四、探討不同浮球材質對機械魚游速的影響

(一)機械魚是屬於浮體，因此，機械魚重量大小便是其所受的浮力大小

機械魚的浮球是模擬魚鰾，它能使機械魚在水中順利控制升降與前進。我們在國中自然第 4 冊，學到浮力，物體在水中的狀態可分為：沉在水底的沉體、位在水中的懸浮體、以及部分露出水面的浮體，市售機械魚屬浮體，因此機械魚的重量大小，便決定其所受浮力大小。

(二)研究四符合研究假設：乒乓球為浮球材質的機械魚游得較快

保麗龍球與乒乓球為浮球材質的機械魚，在進行 *T-test* 檢定後，達到顯著差異，且乒乓球機械魚游得較快。在視為浮體時，浮力大小為其重量大小，乒乓球的質量較大，浮力也較大，會排開較多水，在水裡時，吃水較深，魚鰾擺動能產生較大推進力使機械魚往前，因而使乒乓球機械魚的水道完成平均時間低於保麗龍球機械魚。

十、研究五、探討不同浮球位置對機械魚游速的影響

(一)我們透過改變浮球位置，找出浮心位置對機械魚游速的影響

我們發現，**浮心(浮力中心)位置會影響機械魚在水中的傾斜狀況**，是游速的一大影響因子，因此我們藉由改變機械魚的浮球位置改變浮心，找出不同浮心位置對機械魚的影響。

(二)我們運用公式，計算機械魚的質心與浮心

乒乓球所受向上浮力決定浮心位置，而向下重力則決定重心位置；我們可視同整隻機械魚所受浮力集中在浮心，而所受重力集中在重心。**為了找出浮心與重心靜力平衡與力矩平衡後的狀態，我們將機械魚假想為一維空間，並計算其浮心與重心位置** (圖 31、圖 32)。

質心位置與重心位置是相同的，於是，我們計算質心位置。首先，我們以機械魚的魚頭吻端當作基準點，並將不包含浮力模組(浮力模組為 4 個透明柱+2 個圓型零件+8 個螺絲)的機械魚質量(m)乘以基準點到不包含浮力模組的機械魚質心位置的距離(x_1)加上第一個浮力模組的重量(m)乘以基準點到第一個浮力模組的距離(x_2)以及第二個浮力模組的重量(m)乘以基準點到第二個浮力模組的距離(x_3)(如沒有第二個浮力模組，則等於 0)，接著再除以整隻魚(含浮力模組)的重量，就可以找出整隻魚(含浮力模組)的質心位置了。

$$\text{質心} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3}{(m_1 + m_2 + m_3)} \quad \text{公式(3)}$$

找出整隻魚的質心位置後，我們計算浮心位置。乒乓球是浮體，所受浮力等於重量大小，又兩顆球的浮力恰與機械魚重力互相平衡，因此，一顆乒乓球貢獻的浮力恰為機械魚重量一半。將第一顆乒乓球的浮力(B_1)乘以從基準點到第一顆乒乓球的距離(x_2)加上第二顆乒乓球的浮力(B_2)乘以從基準點到第二顆乒乓球的距離(x_3)，除以全部浮力大小的總和(第一顆乒乓球的浮力大小加第二顆乒乓球的大小浮力)，就可以算出整隻魚在水中的浮心位置。

$$\text{浮心 (浮力中心)} = \frac{B_1x_2 + B_2x_3}{B_1 + B_2} \quad \text{公式(4)}$$

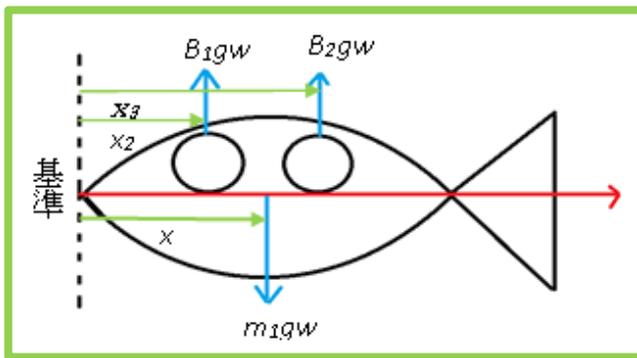


圖 31、機械魚在水中會受重力與浮力影響

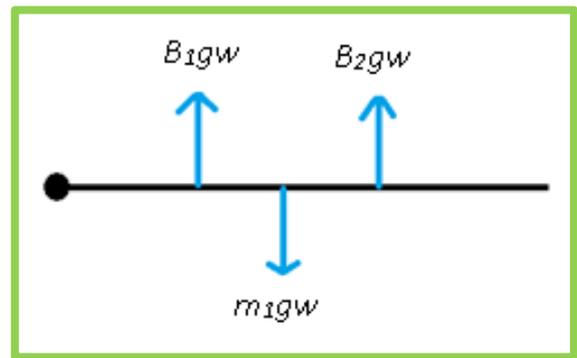


圖 32、將機械魚假想為一維空間示意圖

(三)利用質心位置，找出浮心與機械魚游速的關聯

機械魚在水中，會慢慢達到縱軸方向的靜力平衡(向上及向下的力平衡，不會上下移動)與力矩平衡(兩邊力矩達到平衡，不再更加傾斜)。經過計算，發現**機械魚在達到平衡的過程中，魚身會前傾，使浮心漸漸向前調整，直到與重心在同一條垂直線上，而達到力矩平衡為止**。浮心越能接近重心，則機械魚越不容易傾斜，也與機械魚游速有所關聯。

(四)找到浮心位置後，預測最佳化的浮心位置

經測量、計算後，得到質心與浮心相較基準點的位置，如表 12。

表 12、不同浮球數量與位置機械魚的質心、浮心與完成水道的平均秒數

位置 參數	對照組	留前	留中	留後	前向後 1cm	前向後 2cm	後向前 1cm	後向前 2cm	一起向中 1cm
質心	12.70	10.84	12.59	12.74	12.56	12.60	12.46	12.42	12.51
浮心	13.65	4.85	6.15	7.80	12.15	12.65	11.15	10.65	11.65
秒數	26.22	41.41	35.06	30.27	24.60	28.10	26.90	32.54	29.01

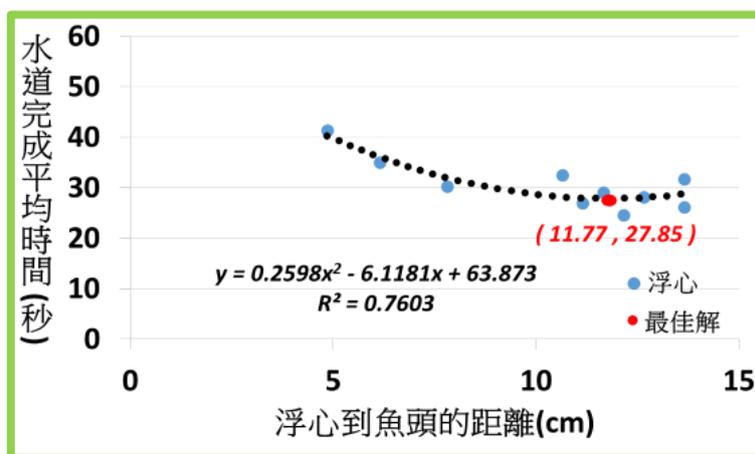


圖 33、最佳浮心位置之二次函數分析圖

從圖 33，我們發現此迴歸分析為高度相關，可用以推算最佳的浮心位置。經計算後，最佳浮心位置距魚頭約 11.77cm，又，此迴歸分析圖形在 11~13cm 間，幾乎平行，因此，此區間內都可能具有最佳的運動表現。我們實際得出的實驗結果，**前面浮球向後 1cm 的機械魚，質心位置在 12.15cm 處，不但位於此區間內，更比分析預測的時間減少 11.7%**，具有最佳的運動表現。然而，兩顆浮球一起向中 1cm 的浮心位置 11.65cm，更接近模型預測的最佳位置，但水道平均完成時間卻較長，意味著有其他可能的因素對游速有更明顯的影響。

十一、綜合研究使我們更有把握，本研究所得之結果，在開放水域中也具重現性

最佳化機械魚在大型圓形水道的水道完成時間比市售機械魚減少了 45.3%，效果更甚研究二至研究五使用的小型方形水道。我們發現，市售機械魚轉彎的曲率半徑大，容易與水道外側擋板發生碰撞，產生亂流；但，最佳化機械魚則相反，它的曲率半徑相對較小，可以完美地在圓形跑道前進，也因為水域面積變大，水道外的水體吸收了產生的少數亂流，使機械於更順利前進。我們也發現，**最佳化機械魚在圓形水道游動時，幾乎沒有肉眼可見的亂流，也沒有被卡門窩街效應影響太多**，因此在水道內前進的動線十分順暢。

十二、綜合討論，卡門窩街現象

(一)卡門窩街是流體與阻流體互動時，產生漩渦互相干擾的現象

卡門窩街(Kármán vortex street)是白努力定理的延伸，指在流體中放置阻流體時，特定條件下，會出現邊界層分離(緊貼物品的流體脫離物體表面)，並**產生兩排非對稱漩渦(一條順時針旋轉，一條逆時針旋轉)**，這兩排漩渦相互交錯排列，且各個漩渦和對面產生漩渦的中間點對齊，由空氣動力學家西奧多·馮·卡門最先提出。

(二)當機械魚碰壁後，便可能受嚴重的卡門窩街影響，導致離群值

由圖 34 可知，當機械魚游到點 A 時，因為撞到環狀水道外圍，使原本順利的 BCF 擺尾前進，嚴重受到卡門窩街產生的亂流影響，而偏離軌道、速度改變。受卡門窩街影響較嚴重的機械魚，便會成為統計上的離群值。然而，我們實驗的阻流體之一就是機械魚本身，阻流體與流體都是動態改變的，使我們無法清楚分析卡門窩街造成的非對稱漩渦導致的效應。



圖 34、使用 Tracker 軟體進行機械魚運動軌跡追蹤

十三、我們自實驗影片發現，機械魚在轉彎的過程中，時常碰壁

我們發現機械魚的一些路徑問題：一部份機械魚在進入彎道時會卡到中間檔板的直角，導致機械魚繞水道一圈所需平均時間增加。我們認為，**若將水道內障礙物改為圓形，便能有效減少機械魚卡住的情況**。因此，我們在綜合研究中，將水道中間障礙物改為圓形，並拓寬水道，企圖解決問題。事後分析機械魚的游泳速率，發現最佳化機械魚在大型圓形水道的游泳速率，更甚於在方形水道時，所以中央擋板與水體大小的改善，確實提升機械魚游速。

十四、綜合討論，分析游泳軌跡與計算更真實的游速

(一)增加游泳軌跡的分析，可能可以得到更多量化的游泳資訊，最佳化的評估將更完整

目前的實驗組與對照組，都用秒速來表示游速的快、慢，無法完整了解這段游泳過程的經過。我們已經開始**學習並使用 *Tracker* 軟體，在空間座標與時間的系統下，可以協助我們自動追蹤並記錄機械魚的游泳軌跡**。*Tracker* 可以得到完整的軌跡圖，也可以知道機械魚在座標系統位置與時間的變化關係，從圖 34 可以明顯看出前半圈機械魚有明顯且完整的 BCF 運動，但在撞壁後，後半圈則開始受到嚴重的卡門窩街效應影響，加劇亂流。

(二)計算真實路徑長與時間得到的游速，可能更明確比較出不同實驗組間的差異

目前游速測量，僅用機械魚游泳一圈的耗時表示，*Tracker* 軟體能提供清楚的移動距離，再加上累計的運動時間，我們計算出更真實的游速。但是，使用 *Tracker* 時，發現一些問題：

1. 當時錄影，並非自正上方，**計算所得之路徑長仍非正確數值**
2. **軌跡追蹤時，乒乓球的投影面積較大，追蹤效果較魚吻端佳**
3. 我們以膠帶固定中間的擋板，卻使**膠帶的光影在自動追蹤時產生影像誤判**

我們期待未來能克服這些的問題，以更準確地討論機械魚的最佳運動表現。

柒、結論

如何配置機械魚能使魚游得更快呢？完成最佳化 BCF 游動式機械魚的運動表現研究後，我們發現：機械魚**以薄 PP 板為材質**，相較對照組，減少了 13.3%的水道完成時間；以市售機械魚 100%面積大小的**90°夾角叉型尾鰭**機械魚，又減少了 10.4%的水道完成時間；兩顆乒乓球浮球，且**相較市售機械魚將前方浮球向後 1 公分**，又可再減少 6.2%的水道完成時間。綜合以上結果，我們證實了**魚身材質、尾鰭形狀、面積與夾角、浮球材質、顆數與位置都會對機械魚的運動表現產生影響；因此，材質特性、形狀、面積、夾角、浮力、穩定度與浮心位置都會是游速影響因子**。最佳化的機械魚，水道完成平均時間為 24.59 秒，大幅領先市售機械魚的 33.77 秒，減少了 27.2%的時間。本研究從機械魚的游速影響因子出發，改良機械魚，更加瞭解了機械魚的特性，並**成功將研究結果，在大體積的水道中重現**，展示改進市售仿生機械魚運動表現的可能性，希望能增加人們對魚類游泳之仿生機構的認識。

捌、參考資料及其他

- 一、陳政宏、李志揚(2000.12.4)·淺談流體中生物的推進方法與仿生推進。
- 二、陳懷璞·魚能發電之開發及應用·黃育熙、劉育祈指導·2019 臺灣國際科展作品。三、郭振華(民 98)·智慧型水下仿生機械魚展示品技術導入研究 (P.3 尾鰭擺動方式分為鰻形式、鱒形式、鮪形式)。
- 四、Michael Sfakiotakis, David Lane, John Bruce Davies (1999). Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 24(2):237 - 252 (P.241 BCF 游行方式、P.242、243 卡門窩街、P.246、247 MPF 游動方式)。
- 五、喻俊志、陈尔奎、王硕、谭民(2003)·仿生機器魚研究的進展與分析。《控制理论与应用》20(4):485 - 491
- 六、崔亦晨、汪浩 (2009)·对鱼鳔功能的质疑与研究·黄曾新指導·第 24 届英特尔上海市青少年科技创新大赛。取自 <http://blog.udn.com/q87947/18507352>
- 七、邵廣昭·臺灣魚類資料庫。取自 <https://fishdb.sinica.edu.tw/chi/home.php>
- 八、Top 10: What are the fastest fish in the world?, Science Focus-BBC (世界上游的最快的十種魚是什麼?)(游得快的魚尾鰭都類似叉型)。取自 <https://www.sciencefocus.com/>
- 九、Qualitative and Quantitative Characteristics of Fish A. Qualitative Characters。取自 http://site.iugaza.edu.ps/elnabris/files/2014/12/1_Qualitative-Characters.pdf (P.3 魚尾鰭形狀)

【評語】 032811

該作品研究市售仿生機械魚之特性，探討各種設計變因（浮力、材質、尾鰭形狀、面積等）對其游速之影響，並嘗試改進其效能，具實驗精神。實驗水道為環形、初始魚體指向等因素對於游速之測定或有影響，此外，理論解釋與探討較為不足。建議作者再接再勵，在上述方面持續改進，讓作品更完整。

壹、摘要

本研究旨在探討影響BCF游動式機械魚游速的因素。是將市售仿生機械魚進行改良後，將機械魚放入自製環狀水道，測量機械魚在水道上繞一圈所需的時間，找出機械魚的最佳化配置。本研究總整了35隻機械魚、420筆實驗紀錄，最佳化配置，成功使機械魚繞環狀水道一圈所需的時間減少27.2%，大幅提升了機械魚的游速。本研究結果，也能在大體積的水道中重現，展示改進市售仿生機械魚運動表現的可能性，有助於提升人們對魚類游泳之仿生機構的認識。

貳、研究動機

仿生學近年來受很大的歡迎，尤其是能夠協助科學家的仿生機械魚，它不但能進入海中協助研究，也能讓我們更了解魚類。機械魚在水中游，「速度」和「穩定度」是影響它的關鍵，因此我們進行了許多實驗，希望能讓機械魚游得快又穩定。自然課本第4冊有介紹到「浮力」，機械魚就是靠浮力和尾鰭擺動產生的推進力前進，我們想透過實驗找出浮力和尾鰭推進的關係，並設計出一隻兼具速度和穩定度的仿生機械魚。

參、研究目的

操縱因素	材質特性	形狀	面積	夾角	浮力	穩定度	浮心位置
改變標的	不同材質	不同尾鰭			浮球材質	浮球位置	
實驗設計	<ul style="list-style-type: none"> 木板 厚PP板 薄PP板 切割墊 軟墊板 	<ul style="list-style-type: none"> 市售尾鰭 圓型 截型 叉型 新月型 普通歪型 	<ul style="list-style-type: none"> 50% 75% 100% 125% 150% 175% 200% 	<ul style="list-style-type: none"> 45° 90° 105° 135° 180° 	<ul style="list-style-type: none"> 乒乓球 保麗龍球 	<ul style="list-style-type: none"> 兩顆皆留 只留前 只留中 只留後 	<ul style="list-style-type: none"> 原位置 前向後1cm 前向後2cm 後向前1cm 後向前2cm 一起向中1cm
重現檢測	使用大型圓形跑道檢測本研究的重現性						

肆、研究設備及器材



伍、研究過程或方法

一、文獻探討

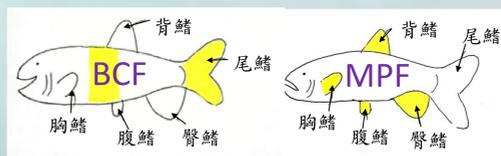
(一) 機械魚與真實魚的異同

- 1、皆是由尾鰭推進的運動模式
- 2、皆有控制浮力的器官
- 3、機械魚僅有尾鰭可動與單一的運動方向
- 4、機械魚無法自由在水中升降

(二) 乒乓球、保麗龍球的差異比較

(三) 魚類的運動 (Michael Sfakiotakis et al., 1999)

- 1、BCF：使用身體和尾鰭運動推進 (body and/or caudal fin)
- 2、MPF：使用背鰭、臀鰭、胸鰭和腹鰭運動推進 (median and/or paired fin)



BCF/MPF運動使用的身體部位



BCF運動模式俯視圖

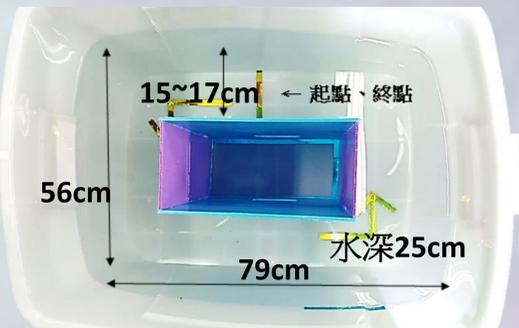
二、製作典型機械魚

- 1、焊接馬達與電源線以防水
- 2、固定乒乓球、減速馬達
- 3、連接木片
- 4、連接雙排鐵片和搖桿
- 5、用束帶綁住氣球開口以防水
- 6、固定電池盒

	木片1 (口到臀鰭)	木片2 (臀鰭到尾鰭)	木片3 (尾鰭)
機械魚			
真實魚			

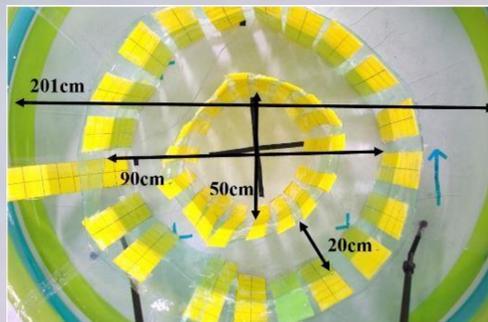
三、小型環狀水道

1. 準備大整理箱、PP板
2. 厚PP板中挖洞(讓水流動)
3. 用熱熔膠黏PP板成長方筒
4. 整理箱內用膠帶黏出標示
5. 把長方筒用膠帶黏上整理箱
6. 調整攝影架位置，攝影紀錄



四、大型圓形水道

1. 準備泳池、PP板、透明墊板
2. 透明墊板作成隔板
3. PP板作成隔板的支架
4. 將隔板用支架黏於泳池上
5. 調整攝影架位置，攝影紀錄



五、測量機械魚水道完成時間的基本步驟

- 1、架設水道
 - 2、加水到25cm處
 - 3、放下擋板與機械魚並開啟馬達
 - 4、等待魚游動穩定
 - 5、拉開擋板，開始計時
 - 6、魚到達終點時，停止計時
- (每個對照組與實驗組皆重複12次)



六、實驗結果的分析與作圖

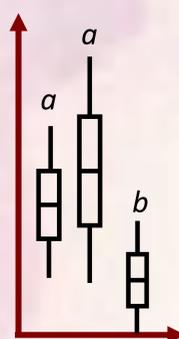
(一) 以盒鬚圖描繪資料分布

本研究以盒鬚圖表示水道完成平均時間的分布，盒鬚圖除了盒子本身的上下界代表第1與第3四分位數，盒中間的線代表中位數(第2四分位數)，也有向上下延伸至最大最小值的線條，數據中的離群值常以額外的點表示。能顯示出本研究一組12筆數據的資料分布範圍等資訊。



(二) 以 T. test 展示組別間的關係

利用 T. test 檢定對照組與實驗組所有組別之間的兩兩組合比較，沒有顯著差異時(P值≥0.01)，將資料分在同一組，以同一個斜體英文字母(如右圖a)標記在盒鬚圖上；有顯著差異時(P值<0.01)，則用不同的英文小寫字母標記(如右圖b)，藉此完整展示各實驗兩兩結果間是否達到統計上的顯著差異。



陸、實驗結果與討論

一、掌管控制變因，減少系統性誤差

(一)本研究各實驗中，皆考慮各實驗組間的操作變因能有固定條件，例如使用影印機將標準尾鰭等比例放大縮小，使尾鰭夾角控制住外，外型與面積同時放大。

(二)所有的實驗皆使用同一組市售材料包

二、掌管控制變因，減少隨機性誤差

(一)我們先使用一組電池，讓機械魚游20圈，發現第1圈與第20圈的耗時，沒有太大差別，於是我們以1組電池進行1組實驗，並將實驗完的電池拿給總務處，發揮其剩餘效用。

(二)我們先讓機械魚在預備區(起點前)先等5秒，並用隔板擋住，使機械魚的出發角度隨機，減少路徑差異

(三)彈簧是機械魚的關節，前測實驗發現彈簧生鏽會大幅影響機械魚的運動表現，因此所有實驗結束後接更換全部彈簧。

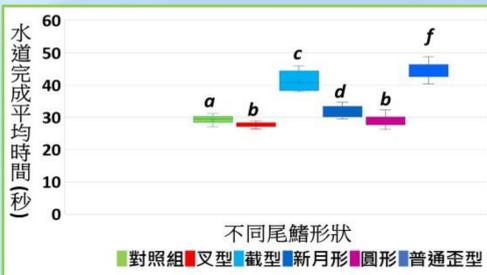
三、探討市售機械魚的基本性質

本研究先對市售機械魚進行基本了解，測量市售機械魚的重量、尾鰭擺速及尾鰭面積，方便我們以後做各項機械魚的改變時，有基本的依據。三個材料包得到的機械魚之基本數據差異不大，因此本研究皆僅以魚1材料做全部的實驗。

魚編號	魚1	魚2	魚3	平均數	標準差
基本資料					
重量(g)	112.5	112.3	112.2	112.33	0.15
尾鰭擺速(次/秒)	1.5	1.5	1.5	1.5	0
尾鰭面積(cm ²)	40.75	40.75	40.75	40.75	0

五、叉型尾鰭形狀最佳

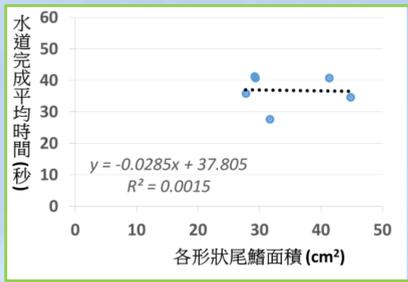
本實驗以市售機械魚尾鰭形狀作為對照組，控制魚身總長度設計操作變因，同時避免系統性誤差，共比較六種不同魚尾。



叉型尾鰭機械魚的水道完成平均時間為27.75秒，顯著較對照組的29.28秒低，具有最佳的運動表現，在後續實驗中，將以叉型作為機械魚的尾鰭形狀。

討論：控制魚尾長度，面積不影響游速

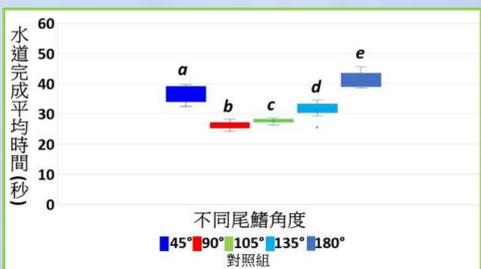
利用機械魚尾鰭面積與水道完成時間做線性迴歸分析：



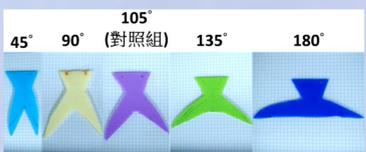
低相關的線性分析顯示，魚尾面積不影響水道完成時間。因此，在此實驗中，雖然我們控制的是魚尾長度，但魚尾面積的差異在此實驗中並不影響機械魚的運動表現。

七、尾鰭夾角90°最佳

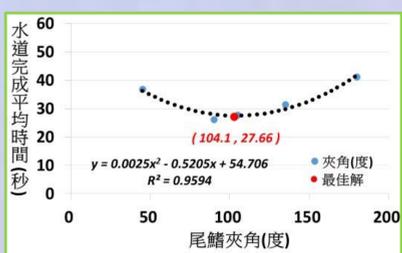
本實驗以市售機械魚尾鰭夾角(夾角=105°)作為對照組，使用4種尾鰭夾角作為研究的變因，並控制了機械魚的尾鰭面積。



尾鰭夾角90°機械魚的水道完成平均時間為26.23秒，顯著低於對照組的27.75秒，具有最佳的運動表現。在後續實驗中，我們將以90°作為機械魚的尾鰭夾角。

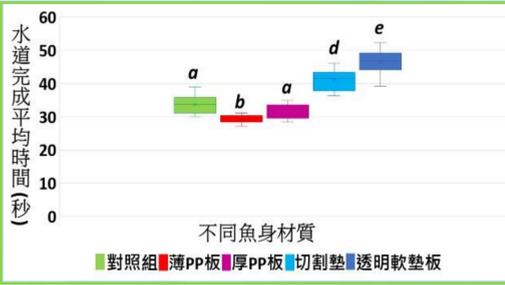


使用高相關的二次函數迴歸分析圖推算出最佳的尾鰭夾角為104.1°。



四、薄PP板材質魚身最佳

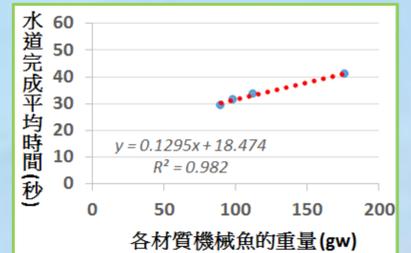
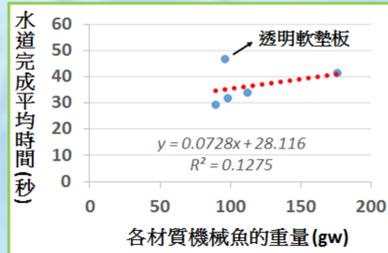
本實驗以市售機械魚木片材質作為對照組，使用4種不同的材質作為研究的變因，並利用影印描繪的方式控制魚身面積，避免系統性的誤差。在製作厚PP/薄PP板材質機械魚時，使用將有洞的面垂直水平面，避免機械魚身進水，導致下沉。



薄PP板機械魚的水道完成平均時間為29.28秒，顯著低於對照組的33.77秒，具有最佳的運動表現。在後續實驗中，將以薄PP板作為機械魚的魚身材質。

討論：各種不同材質間，游速與重量呈高度正相關

利用機械魚重量與水道完成時間做線性迴歸分析：



發現去除透明軟墊板的資料點後，重量與水道完成時間有非常高的相關。高相關代表愈輕的魚身重量游的愈快，在厚PP版與薄PP版的數據點也可以發現；去除透明軟墊板才有高相關則代表軟性材質不適合。因此，機械魚魚身的最佳化材質必須具備硬、輕、薄等條件。

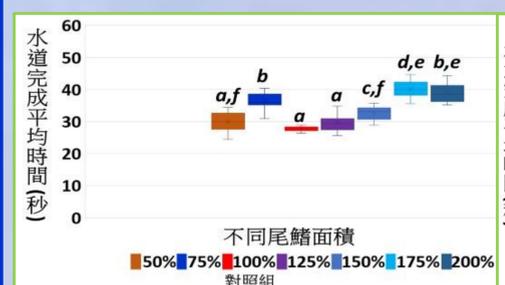
討論：作者間製作的魚身差異極小

考量手工制作在不同作者間可能產生的人為誤差，所以在本研究第一個時實驗中，將各材質的魚身重複製作三隻，再測量魚身重量，計算平均值與標準差。由下表可知，利用市售魚身做為影印機模板，繪製在不同材質的操作方法，由重量作為量化的資訊，不同作者間幾乎沒有差異。

魚編號	魚1	魚2	魚3	平均數	標準差
魚身材質					
對照組	112.5	112.3	112.2	112.33	0.15
厚PP板(5mm)	98.4	99.1	98.4	98.63	0.40
薄PP板(3mm)	89.7	89.4	90.5	89.86	0.56
切割墊	176.4	176.3	176.6	176.43	0.15
透明軟墊板	96.5	96.8	96.7	96.66	0.15

六、市售尾鰭面積最佳

本實驗以市售機械魚尾鰭面積(面積=35.88cm²)作為對照組，將對照組的叉型尾鰭運用影印機等比例放大縮小，再依此為模板製作出不同面積的尾鰭。使用6種不同的尾鰭面積作為研究的變因，同時控制尾鰭形狀避免系統性誤差。



對照組的水道完成平均時間為27.75秒，顯著低於大部分實驗組，具有最佳的運動表現。在後續實驗中，我們將以原本尾鰭面積作為機械魚的尾鰭面積。

高相關的二次函數迴歸分析推算出最佳的尾鰭面積為91%。



八、保麗龍浮球材質最佳

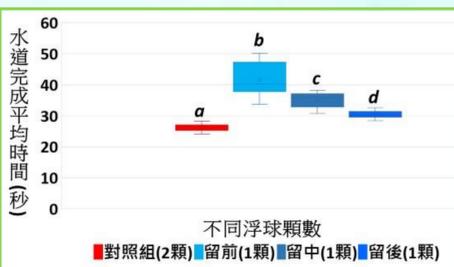
本實驗探討保麗龍球替代乒乓球作為機械魚浮球材質的可能性。



對照組具有最佳的運動表現。以對照組的浮球材質作為後續研究的浮球材質。

九、兩顆的浮球數量最佳

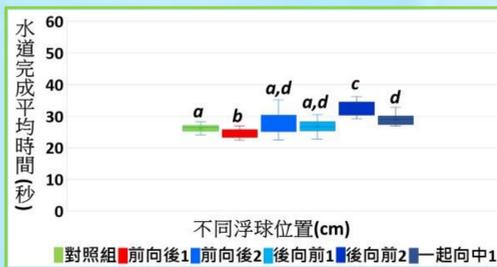
本實驗共使用單顆乒乓球留前、留後、留中等3種將乒乓球放在不同的位置作為研究的變因，並以市售機械魚的兩顆乒乓球為浮球作為對照組。



對照組的水道完成平均時間為26.22秒，有最佳的運動表現，因此以對照組(兩顆浮球)作為機械魚的浮球顆數。

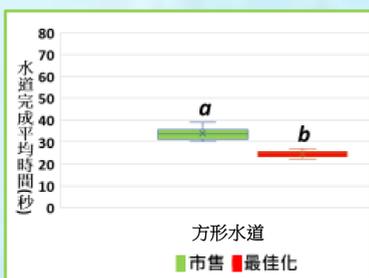
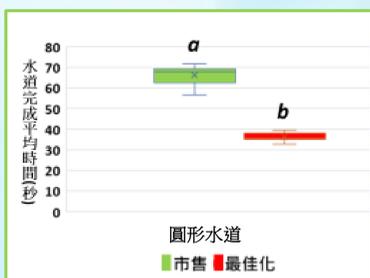
十、前浮球向後1公分的浮球最佳

本實驗使用市售機械魚的兩顆浮球位置作對照組，設計五種不同距離的實驗組，控制變因即為前項所有實驗的最佳設計與市售魚本身的機構組合。



前面浮球位置往後1cm的機械魚，水道完成平均時間為24.59秒有最佳的運動表現。以後以前面浮球位置往後1cm的機械魚作為浮球位置。

十一、大型水道中再現一致



最佳化機械魚的水道完成平均時間為36.14秒，最佳化平均減少45%的秒數(方形跑道為27%)。可能是整體游速的增加，使圈速最佳化表現比例更高。

十二、綜合討論

(一)分析游泳軌跡與計算更真實的游速

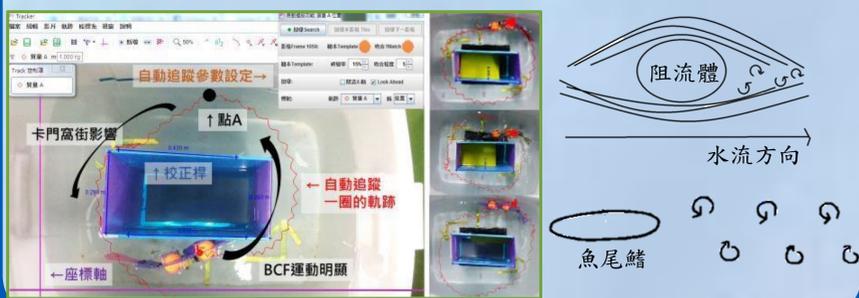
我們已經開始學習並使用Tracker軟體，在空間座標與時間的系統下，協助我們自動追蹤並記錄機械魚的游泳軌跡。從軌跡就可以明顯發現BCF運動，由尾鰭推進產生的波浪式前進線條。

使用Tracker的同時，也發現一些限制：

- 1、軌跡追蹤時，乒乓球的影像面積較大，追蹤效果較魚吻端佳，但實驗計時皆以吻端為主。
- 2、我們以膠帶固定中間的擋板，卻使膠帶反射的日光燈在自動追蹤時產生影像誤判。

(二)卡門窩街現象

- 1、卡門窩街是在流體中放置阻流體時，特定條件下，會出現邊界層分離，並產生兩排非對稱漩渦。
- 2、從運動軌跡的後半段可以發現，機械魚因為撞到環狀水道外圍，使原本順利的BCF擺尾前進，嚴重受到卡門窩街產生的亂流影響，而偏離軌道、速度改變。

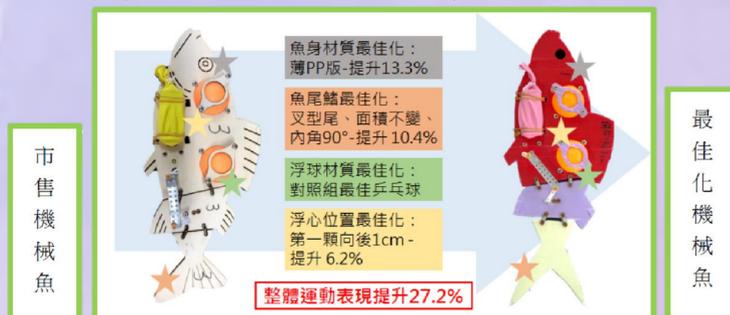


捌、結論

本研究依機械魚各個可操作變因，由大至小依序實驗，自魚身材質、尾鰭、浮球等因素，發現：

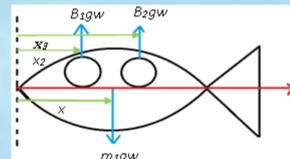
- 1、機械魚以薄PP板為材質、市售機械魚原來面積的90°夾角叉型尾鰭機械魚、兩顆乒乓球浮球，且將前方浮球向後1公分，是最佳化的機械魚。
- 2、證實了材質特性、形狀、面積、夾角、浮力、穩定度與浮心位置都是游速影響因子。
- 3、最佳化機械魚的水道完成平均時間為24.59秒，較市售機械魚的33.77秒，減少了27.2%的時間。

本研究從機械魚的游速影響因子出發，改良機械魚，並成功將研究結果在大體積的水道中重現，希望能增加人們對魚類游泳之仿生機構的認識。



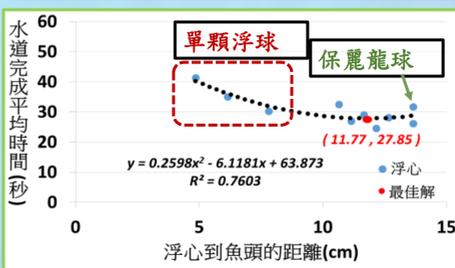
討論：機械魚運動穩定度與浮力中心

實驗八、九、十皆與浮力有關，浮球所受向上浮力決定浮力中心(浮心)位置，而向下重力則決定重心位置。



浮球的材質、數量、位置皆會影響機械魚的質心與浮心，我們經測量和計算後得到質心與浮心的位置。

	對照組	保麗龍球	留前	留中	留後	前向後1cm	前向後2cm	後向前1cm	後向前2cm	一起向中1cm
顆數	2顆	2顆	1顆	1顆	1顆	2顆	2顆	2顆	2顆	2顆
質心	12.70	12.65	10.84	12.59	12.74	12.56	12.60	12.46	12.42	12.51
浮心	13.65	13.65	4.85	6.15	7.80	12.15	12.65	11.15	10.65	11.65
秒數	26.22	31.73	41.41	35.06	30.27	24.60	28.10	26.90	32.54	29.01



$$\text{質心} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3}{m_1 + m_2 + m_3}$$

$$\text{浮心(浮力中心)} = \frac{B_1x_2 + B_2x_3}{B_1 + B_2}$$

藉高度相關的二項式迴歸分析推算出最佳的浮心位置距魚頭約11.77cm。

討論：二次函數模型預測的解釋與應用

本研究共發展三個二次函數的模型，分別用以分析各實驗中最佳的連續性資料，包含尾鰭角度、尾鰭面積和浮心位置。

- (一)二次函數的U字圖形，說明參數太大與太小的設計，對機械魚的運動表現都會有不利的影響。
- (二)U字曲線在端點附近趨近平行，我們也對照出實驗的最佳秒數落在這段趨近平行的範圍內。
- (三)實驗設計沒有剛好設計到最佳理論值，因此無法得知各實驗在該點的真实運動表現。
- (四)實驗所得的最佳秒數，皆優於模型預測，說明機械魚運動表現不只包含單一因素。

未來，我們打算使用模型預測結果進行深入研究，在逼近最佳解的範圍，再次設計實驗，修正最佳解的模型預測。但在實際操作的過程中，過於精細的夾角設計，可能會有許多因素影響實驗結果，這些是未來進行深入研究前，需仔細考量的。

玖、參考資料

- 一、陳政宏、李志揚(2000.12.4)·淺談流體中生物的推進方法與仿生推進
- 二、陳懷璞·魚能發電之開發及應用·2019 臺灣國際科展作品
- 三、郭振華(民 98)·智慧型水下仿生機械魚展示品技術導入研究
- 四、Michael Sfakiotakis et al, (1999). Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion
- 五、喻俊志等(2003)·仿生機器魚研究的進展與分析
- 六、黃曾新等(2008)·魚鰾的功能
- 七、邵廣昭·臺灣魚類資料庫
- 八、世界上游的最快的十種魚是什麼?