

# 中華民國第 54 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

國中組 生物科

第一名

最佳創意獎

030319

生物的群聚行為與生存優勢

—大肚魚的群體決策行為研究及電腦模擬

學校名稱：新竹市立培英國民中學

作者：  國一 郭東穎	指導老師：  劉思廷
-------------------	------------------

關鍵詞：大肚魚、決策行為、電腦模擬

## 得獎感言

### 以大自然為師—無止境的樂趣

大自然中處處是學問，隱藏耐人尋味的道理和智慧。這次研究的主角——大肚魚，透過牠們簡單的生存法則，再一次帶領我窺見生物行為之妙，每一次新發現，都成為我再接再厲的動力。

這個研究兩年前就開始了，不過，去年參加市科展時，評審覺得沒有足夠的實驗驗證我的理論及電腦模擬，他們一針見血的建議讓我下定決心設計更完整的實驗，成為本次研究最大的推手。這是一個非常寶貴的經驗，我發現接受意見並重新審視缺點在科學中的重要性。這次全國科展雖然得到了好成績，評審教授及院士們依然提供了非常多面的珍貴意見，原以為已經畫下休止符的研究，在他們的指引下，竟生出一條又一條新的方向，讓我興奮不已，原來科學研究在熱切追求的人眼中是無止境的啊！能夠聽到他們對我的研究的看法及提出的新方向，是本次參展最大的收穫。

我要感謝父母不僅支持我發展寫程式的興趣，並容忍我佔用許多生活空間，以維持上百隻的大肚魚，在兩年間和魚兒們生活在高溼度的環境中。指導老師、校長、還有學校的老師們，有的提供專業的意見，有的提供各樣的協助，讓參展得以順利。特別要感謝我的外公，雖屆耄耋之年，仍與我促膝談論研究內容，很高興我身上流著和他一樣喜愛探索的血液。

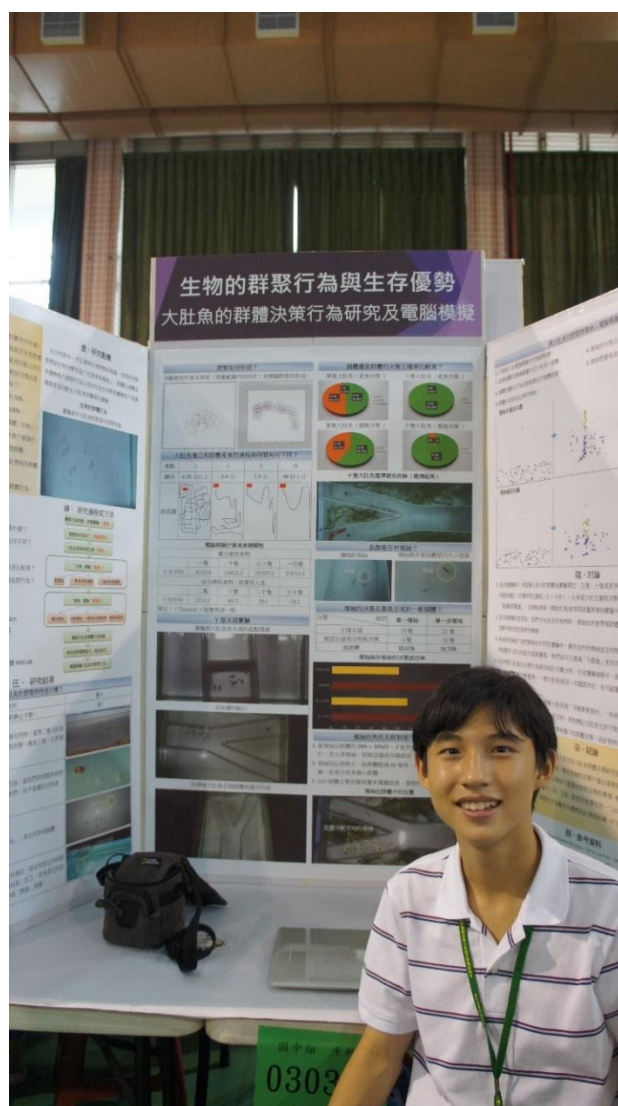
另外，在博通基金會舉辦的「博通國際科學大師」選拔活動中，我也學到甚多。他們提供一系列問題，讓我從許多不同角度去思考自己的研究，例如：在這研究當中我用了哪些科學方法、科技、工程設計和數學原理呢？有沒有可能運用在生活中呢？讓我對自己的研究有宏觀的定位，而不只著眼微觀的研究結果而已。



充滿活力的大肚魚



科展之夜



全國科展會場

作品名稱

# 生物的群聚行為與生存優勢

## 大肚魚的群體決策行為研究及電腦模擬

### 摘要

本研究想了解大肚魚為何成群？跟著群體覓食及避免危險上有何好處？本研究利用 Y 型水道實驗來檢驗群體決策是否有相對優勢。研究發現大肚魚傾向成群，群體在覓食行動上所花時間比個體短，因為群體中的領袖提供較佳決策品質，使群體決策正確率高於個體。

主要發現如下：

1. 單一個體在覓食與避險的決策正確率約 50%。
2. 群體在覓食與避險的決策正確率接近 100%。
3. 領袖決策正確率（82.61%）優於一般個體（57%）。
4. 領袖決策如果沒有得到其它個體的跟從，決策不被執行。
5. 領袖與群體大小要有合適比例（20~30%），才能有效帶領群體。
6. 個體行動原則是「跟著身旁同伴」，因此領袖在群體中的位置分配會影響群體決策。
7. 根據這些群體特性，用 MATLAB 電腦語言模擬大肚魚群體行為。

### 壹、研究動機

在自然界中，可以看到生物群聚的現象：為何野雁排隊前進？麻雀成群飛翔？魚群成群游動？螞蟻排隊前進？（林俊宏譯，2010）包括最常見的大肚魚也是，如圖（一）。我第一個想到的問題是群聚帶給生物什麼生存上的利益？在生存的三大要件「找食物及避開危險」上，群聚為生物帶來好處嗎？

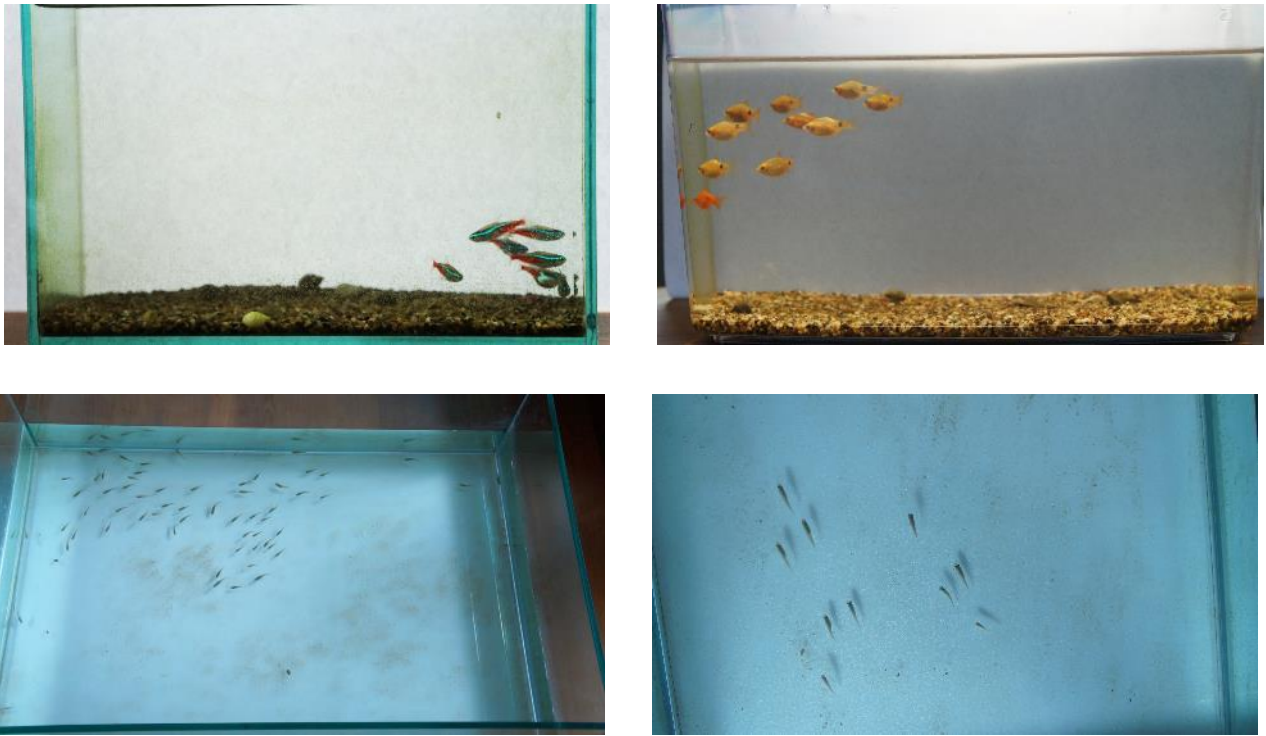
一開始，我們做了一個簡單的電腦模擬計算，比較「獨自找食物」和「一起找食物」的「總腳步」。結果發現：魚群覓食時，若「跟著別人走」，則整個族群的覓食「總腳程」是遠低於所有個體獨自覓食的（電腦模擬計算資料請見附錄附表一）。這個結果引起我們對於「跟著別人走」如何為魚群帶來生存上的優勢進一步探究。我們選擇最常見的野生大肚魚來開始觀察及實驗。

### 貳、研究目的

本研究主要目的是針對魚群覓食及避險決策設計實驗，了解大肚魚的群體決策是否優於個體，並且了解「領袖」在群體決策過程中的角色。本研究除了驗證大肚魚的群體決策效率外，並把觀察到的魚群特徵及實驗結果納入電腦模擬中，可用以預測魚群行為，提供更多對生物群聚的觀察角度。

具體主要想回答下列五個問題：

- 一、 群聚是如何形成？大肚魚的群聚特性觀察。
- 二、 大肚魚獨立覓食和群體一起覓食的過程與所花費時間的比較。
- 三、 獨立個體與群體的決策效率比較。
- 四、 魚群是否有領袖？領袖的決策特性為何？領袖在群體中的角色及限制。
- 五、 如何將以上的研究所得的魚群特性，用 **MATLAB** 電腦程式模擬魚群的行為？



圖（一）生物的群體行為  
實驗室中各類魚的群游及群聚現象

## 參、研究設備及器材

研究設備及器材如下：

- 一、 玻璃大魚缸一個： 長 100cm x 寬 60cm x 高 30cm
- 二、 大肚魚（*Gambusia affinis*）共 100 隻（其中 60 隻實驗，儲備 40 隻輪替），來源為台中小溪流。
- 三、 塑膠瓦楞紙（製作 Y 型水道）
- 四、 照相機及偏光鏡
- 五、 錄影機
- 六、 計時器
- 七、 電腦及應用軟體 MATLAB





大肚魚 100 隻



圖（二）主要實驗設備：玻璃大魚缸及 Y 型水道的設計

## 肆、研究過程或方法

下頁圖（三）是本研究的流程。我們設計以下**四個實驗**來回答提出的問題。

**實驗一：大肚魚群聚特性：**前置觀察及群聚行為特徵。

**實驗二：覓食所花費的時間：**在大魚缸內分別置入 1, 3, 5, 10 隻大肚魚，測量覓食所需時間，並畫出覓食的路徑圖。實驗重複 4 次，計算平均費時。

**實驗三：決策實驗—Y 型水道決策實驗。**又分為**覓食及避險**二種。

**實驗四：領袖實驗—**將大肚魚分為領袖及非領袖，並重複 Y 型水道覓食決策實驗，比較二者決策正確率是否有不同。

**電腦模擬大肚魚行為：**將以上的發現的特徵用 MATLAB 程式語言模擬大肚魚行為。

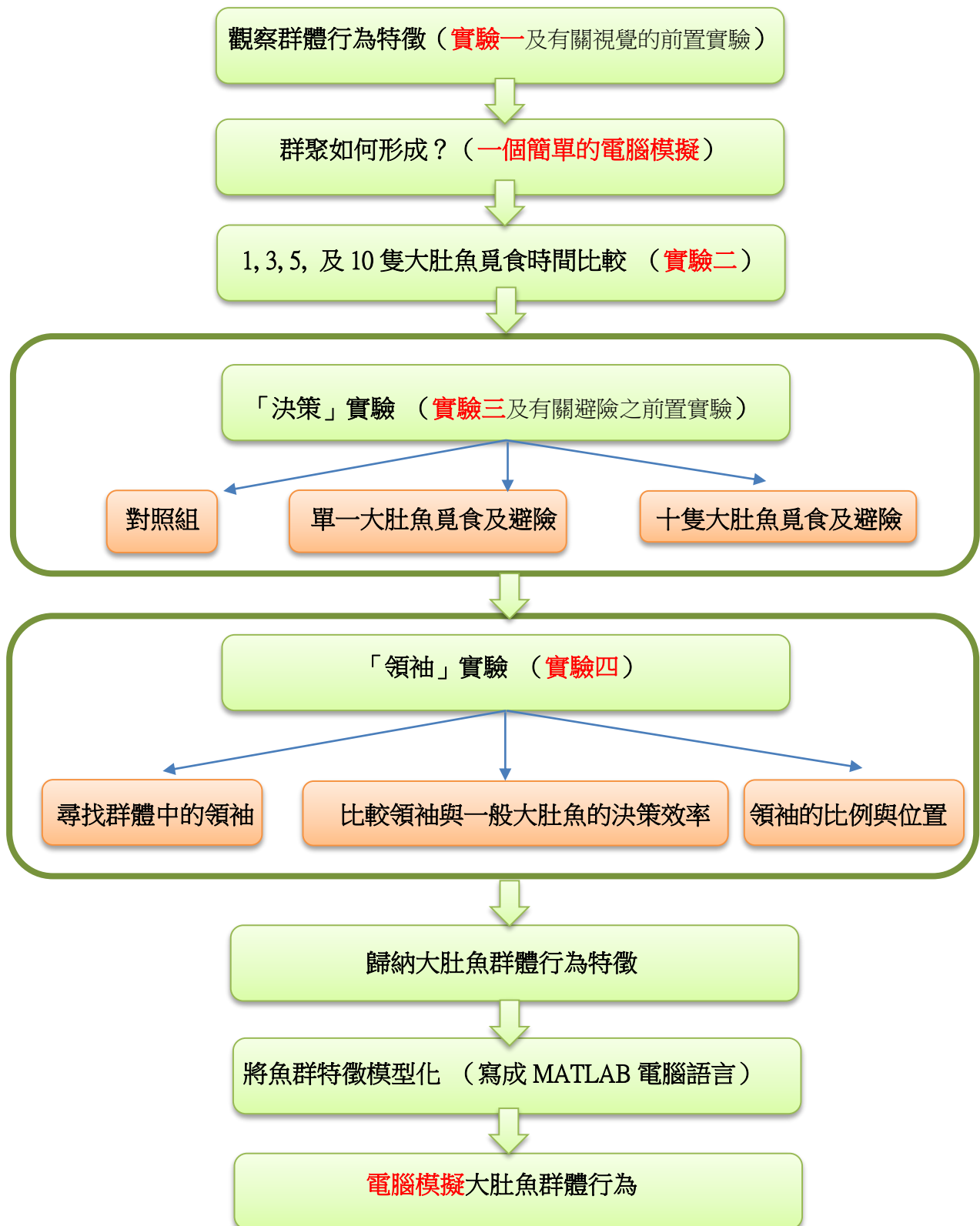


圖 (三) 實驗流程

## 伍、研究結果

- 研究結果分為五個部份：
- 一、大肚魚的群聚特性
  - 二、為什麼要群聚？（個體與群體的覓食時間效率）
  - 三、個體與群體的決策
  - 四、群體的領袖
  - 五、電腦模擬結果

### 一、大肚魚的群聚特性

#### （一）實驗一：觀察大肚魚的群體行為特徵

在魚缸中分別放入一隻、二隻、三隻等，錄影記錄其行為及路徑。歸納所觀察到的群體行為特徵如以下五要點：

群體行為特徵五要點			
特徵	特點	說明	圖示
1	單獨則不行	單隻魚，若沒有同伴在視覺範圍出現，則靜止不活動。	（無）
2	找同伴	<p>獨立的個體若發現有同伴的出現，則游向同伴。</p> <p>圖（四）：當第二、三隻大肚魚放入魚缸後，便往下游，找到第一隻魚之後，它們便「如影隨行」。</p> <p>圖（五）：依序放入更多的大肚魚，當它們到新環境後，馬上找到同伴，聚集在一起。</p>	 <p>圖（四）</p>  <p>圖（五）</p>
3	優先找同伴	跟隨同伴為大肚魚的「優先」行為。當我們同時提供食物時，獨立的個體傾向游向同伴們，而不是獨自去找食物。	 <p>圖（六）先找同伴不覓食</p>



4	領袖先行	同伴中若有個體「向外游出」，其它同伴則跟隨。	 <p>圖（七）「領袖」向外游出，同伴選擇跟隨</p>
5	共同決策、集體行動	一群魚若有「先行者」向外游出，卻沒有其它同伴跟隨，則這隻先行者不會再向前；反之，若有其它同伴跟隨，則繼續向前游，形成「群游」現象。	 <p>沒同伴跟隨則不再前進</p> <p>圖（八）共同決策：同伴不跟則不行</p>  <p>圖（九）一群魚集體行動—群游</p>

表（一） 群體行為特徵五要點

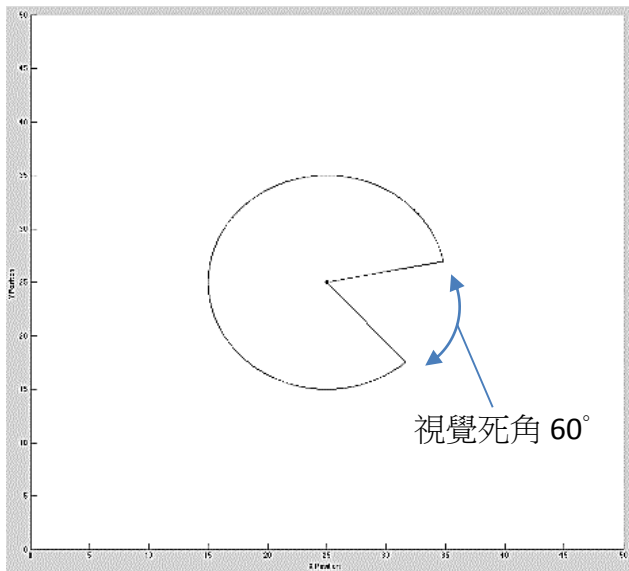
## （二） 「群聚」如何形成？電腦模擬群聚的形成：用一個簡單基本原則

為了了解群聚的形成，我們先對大肚魚的視覺範圍及溝通方式做了前置實驗及觀察。由於大肚魚這些基本特性會直接影響實驗設計，但不是本研究的主軸，我們把前置觀察與實驗結果摘要於**附錄二**中。前置實驗結果告訴我們大肚魚的群聚與視覺息息相關。

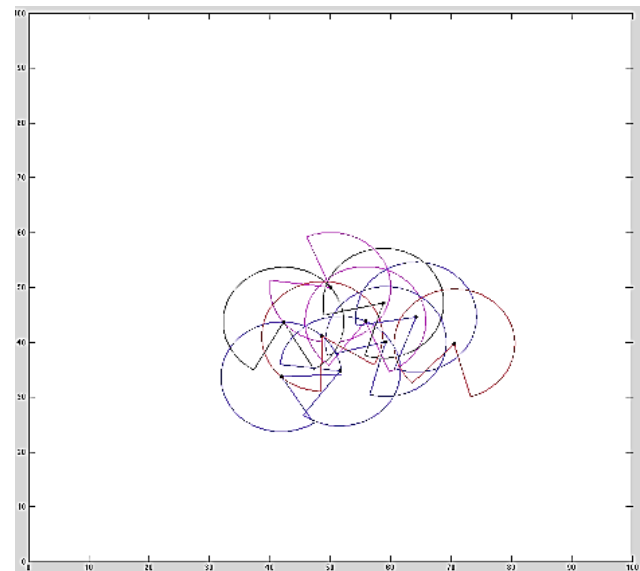
依照群聚特徵及前置實驗中的發現，個體會傾向移向另一個體，並維持一個「可溝通」的距離，形成「群聚」現象。大肚魚大多數時候維持在一個「可看見同伴」的距離，而且唯有在這個距離之內，它們會對同伴的行動有所「反應」。若把這個原則視為大肚魚形成群聚的一個「簡單基本原則」，一群個體就會形成「聚集」，如圖（十、十一）所示。例如，我們用電腦模擬 50 個排列的個體，依照一個簡單原則排列 — 「每個個體的視覺範圍內一定有至少另一個

個體」，就可以排成一個「有意義」的群體，如圖（十二）。又例如：另一個可能的簡單原則若為「個體之間保持一個固定的距離，而且向中間靠攏」，就形成了「圓形的群聚」（李千毅譯，2010），圖（十三）。

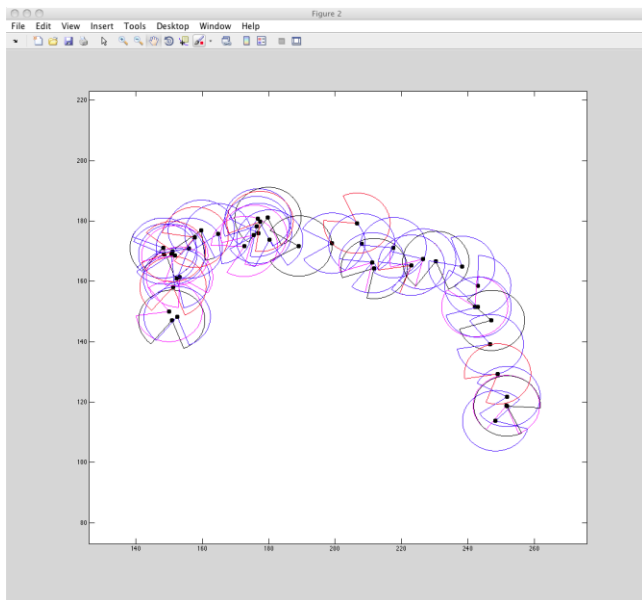
在以下的決策實驗中，我們將看到，這樣一個「簡單行為」並非「無機行為」，藉由這樣一個簡單動作——跟著身旁的同伴，群體的生存效率就可能遠大於獨立個體的。



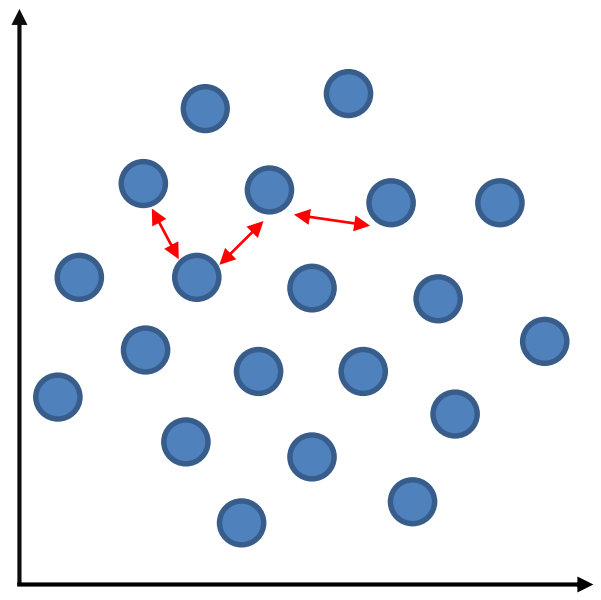
圖（十）魚的視覺範圍



圖（十一）每隻魚的視覺範圍內都有其它體：形成一個群聚型式



圖（十二）一個群聚型式



圖（十三）個體之間形成等距並向中心靠攏

## 二、為什麼要群聚？

### (一) 實驗二：個體與群體的覓食所花費的時間

本實驗測量：一群魚的覓食時間是否顯著少於單一的大肚魚

#### 1. 方法：

在大魚缸的一角放置食物，在其對角放入一、三、五及十隻大肚魚如圖（十五），分別計時從大肚魚「開始」往外尋找食物起到「吃」到食物為止所花費的時間。重複實驗四次，記錄魚或魚群覓食的軌跡。

使用的食物是半徑 0.8 公分的圓形，可固定、不擴散的貼錠飼料，有香味（大肚魚覓食時所仰賴的知覺，見附錄二：視覺之外）。

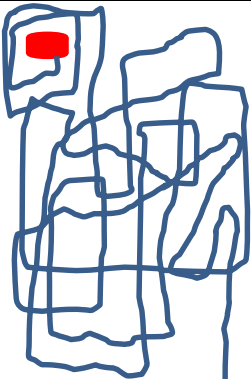
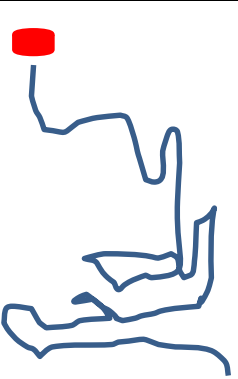
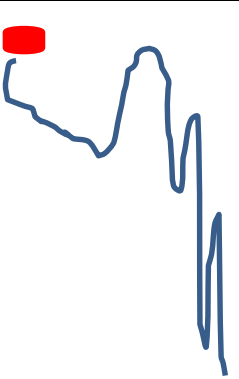
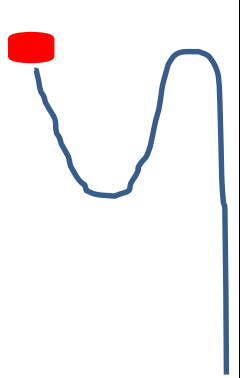
#### 2. 實驗結果：

單一的大肚魚覓食時間可能長達 30 分鐘以上（甚至有些則放棄而停留在原處），短則在 6~8 分鐘以上。而以十隻為一組的大肚魚則只需最少 36 秒到最長 1 分 20 秒。表（二）

從路徑圖來看，10 隻為一組的大肚魚在路徑的選擇上很直接快速。單一的大肚魚有時靜止、有時沒有目的的游走，一個可能是單一的大肚魚在沒有同伴之下，一直想四處尋找同伴，覓食並非牠的第一要務。圖（十四）在覓食的效率上，單一的大肚魚，很明顯不及群體的效率。

大肚魚隻數	1隻	3 隻	5 隻	10 隻
第 1 次	6 分 39 秒	4分 15 秒	3分 34 秒	36 秒
第 2 次	35 分 (放棄找)	1分 14 秒	5分 18 秒	44 秒
第 3 次	6 分 29 秒	2 分 28 秒	1分 48 秒	46 秒
第 4 次	8 分 30 秒	3 分 16秒	2分 13 秒	1分 20秒
費時	6~35 分以上	1~4 分	1~5 分	36秒~1分20秒

表（二）覓食隻數與所花費時間

大肚魚隻數	1	3	5	10
代表路徑圖 ■：食物				

圖（十四）覓食隻數與路徑



一隻大肚魚獨自覓食——沒有目標



三隻大肚魚一起覓食



五隻大肚魚一起覓食

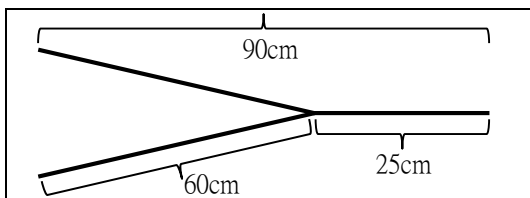


十隻大肚魚一起覓食——行動快速而一致

圖（十五）

### 三、個體與群體的決策

本研究要進一步問：行動快速而一致的十隻大肚魚，覓食效率從何而來？是因為決策正確率較高嗎？諸多文獻指出生物和人類皆有「群體智慧」(Krause et al. 2010; Dyer et al. 2009)，甚至有「群體共同決策」的可能 (Wolf et al. 2013; Ward et al. 2012)。生物生存的基本有二件事：覓食及避免危險，因此我們利用自製的 Y 型水道，針對群體大肚魚在覓食與避險上是否有決策優勢進行實驗。Y 型水道有以下設計考量：



- 一、二選一的Y型水道讓大肚魚的決策結果可計量。
- 二、25公分的起使水道讓魚能夠有思考、決策的空間，不會一下就衝向任一水道。
- 三、從起點到終點食物之處是「可看見」的距離。

#### （一）實驗三：個體與群體的決策實驗

本實驗驗證：群體的決策品質優於個體

實驗進行方式：見圖（十八）		
1. 對照組	(1) 單隻 (2) 十隻	Y型水道上沒有放置食物或危險狀況。因此，無論單一或一群大肚魚對任一水道的選擇機率應是一樣的。
2. 實驗組 （覓食）	(1) 單隻 (2) 十隻	在Y型水道的其中一水道放置食物，比較單一及十隻大肚魚的決策。
3. 實驗組 （避險）	(1) 單隻 (2) 十隻	在Y型水道的其中一水道模擬危險情境，比較單一及十隻大肚魚的覓食決策是否能避險。

## 1. 對照組

在沒有食物及敵人的行情之下，單隻魚或一群魚選擇任一水道的機率應是接近於 50%。

(1) 單隻魚對照組：我們讓 30 隻魚分別實驗。

- 1) 方法：一隻一隻魚放到魚缸裡，觀察魚走到左邊還是右邊。
- 2) 目的：為了與「一隻覓食」和「一隻避險」實驗比較，證實魚不會因其他因素被干擾而對任何一個水道有「偏好」。
- 3) 結果：觀察 30 隻大肚魚獨自選擇水道，對於左或右水道的選擇機率接近 50%。如下圖（十六）所示。

(2) 十隻魚對照組：

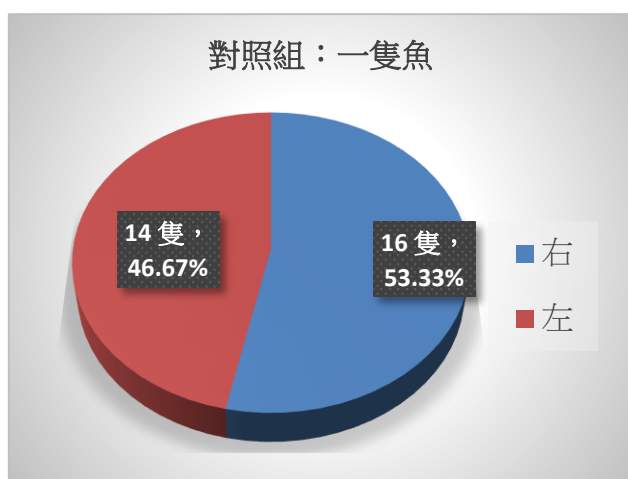
- 1) 方法：每次十隻魚放到魚缸裡，觀察幾隻魚走到左邊還是右邊。若十隻魚裡面超過半數游到左邊，便統計這組選擇左邊；反之，若十隻魚裡面大部分游到右邊，便統計這組走右邊；若一樣或大部分無抉擇，則不採計。重複實驗 30 次。
- 2) 目的：同單隻對照組。
- 3) 結果：如下圖（十七）所示，十隻大肚魚對照組顯示大肚魚在沒有任何食物及危險情況下，對任一水道的選擇沒有偏好。

	左	右	沒有選擇
隻數	14	16	0
比例	46.67%	53.33%	0.00%

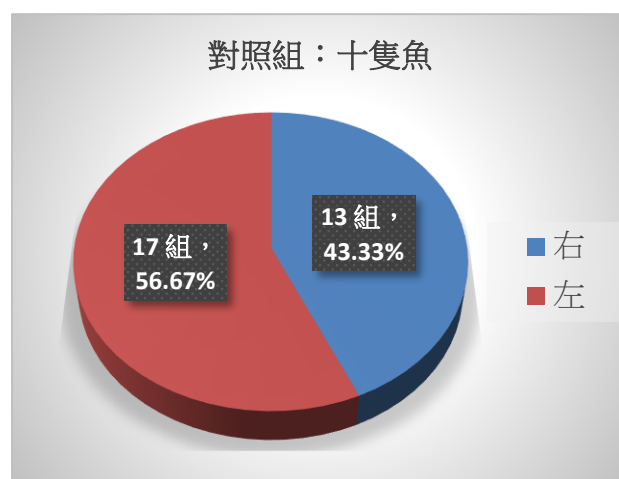
表（三）對照組：單一大肚魚與 Y 型水道

	左	右	沒有選擇
組數	17	13	0
比例	56.67%	43.33%	0.00%

表（四）對照組：10 隻大肚魚與 Y 型水道



圖（十六）對照組：單一大肚魚



圖（十七）對照組：10 隻大肚魚





Y型水道實驗過程：實驗前大肚魚在水道的起點預備



在抉擇的路口



抉擇後大肚魚互相跟隨到達目的地

圖（十八）

## 2. 實驗組

(1) **單一大肚魚覓食決策**：測試在覓食時，單一的大肚魚與十隻為一群大肚魚在決策上是否有不同。

1) **實驗方法**：在 Y 型水道其中一個盡頭放食物，將大肚魚分別一隻一隻放到魚缸裡，觀察它的決策是否正確。實驗進行前，大肚魚已有三日沒有進食，水持續過濾，以去除食物雜質與氣味。重複實驗 30 次。(實驗方式見圖 (十八))

2) **實驗結果**：(表五，圖十九)

- (a) 單隻大肚魚找食物錯誤與正確率約各 50%，和隨機一樣。
- (b) 單隻大肚魚非常猶豫，因為沒有其他魚支持牠的抉擇。
- (c) 大肚魚會以跟著別人走為優先選擇。因此四處尋找同伴，沒有積極找食物。

(2) **十隻大肚魚覓食決策**

1) **實驗方法**：方式同上。若十隻魚裡面超過半數游到食物處，便統計這組成功；反之，便統計這組失敗。重複做十組（一組為十隻魚）

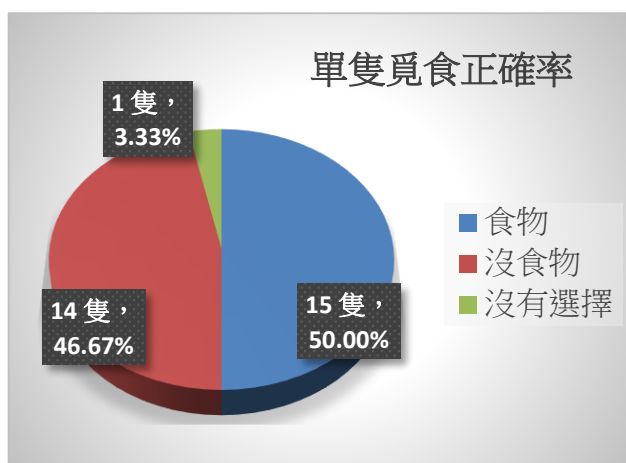
2) **實驗結果**：如表 (六) 與圖 (二十) 所示，十隻魚一起找食物的正確率很明顯的大於單一的大肚魚，而且正確率是 100%。

	正確選擇	錯誤選擇	沒有選擇
隻數	15	14	1 (沒有移動)
比例	50.00%	46.67%	3.33%

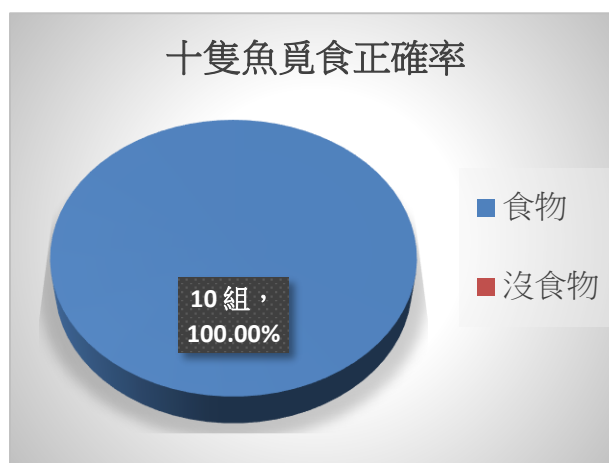
表 (五) 單一大肚魚獨自覓食的結果

組別	食物	沒食物	沒動靜	註解
1	7	0	0	
2	9	1	0	原有一隻走錯，又回到叉路折回
3	8	2	0	
4	8	0	2	
5	8	1	1	沒動靜的那隻魚生病
6	7	2	1	
7	8	2	0	
8	10	0	0	
9	9 (10)	1 (0)	0	有一隻走錯的被兩隻對的帶到正確的地方
10	10	0	0	
成功率	100%			若過半數選擇正確水道，記「成功」一次。

表 (六) 十隻大肚魚一起找食物的正確率



圖（十九）單一大肚魚獨自覓食的正確率



圖（二十）十隻大肚魚一起找食物的正確率

### （3）單一大肚魚：避免危險

首先，我們做了「大肚魚對危險的認知」前置實驗，以了解對大肚魚而言「危險」環境是什麼，而後根據前置實驗的結果來設計大肚魚的避險 Y 型水道實驗(詳見附錄三:避險實驗的前置實驗:大肚魚對危險環境的認知)。我們對單一大肚魚及十隻為一組的大肚魚進行避敵實驗。觀察群體是否在避免危險上也是比單一大肚魚有效率的。

#### 1) 危險環境的設計

前置實驗中發現，對大肚魚而言，一個可能存在危險為：紅色、閃爍並會動的物體。根據這個結果設計一隻「會動的、閃光的紅色銀魚」。圖（二十一）

2) 實驗方法：我們在 Y 型水道的一端放置「紅色銀魚」並利用細鐵絲操作它的動態（輕微的振動），以模擬危險情境。並在紅色銀魚前面放食物（圖（二十四））。另一水道也放食物。觀察大肚魚是否能避開危險環境而到另一水道覓食。魚一隻一隻分別放到魚缸裡，危險在左邊和在右邊各做 30 次實驗。

3) 實驗結果：從以下的表（七）及圖（二十二）可以發現，單一大肚魚成功避開危險的機率為 58.33%。危險環境對單一大肚魚具有一定的影響，避開危險比覓食的動機要大。（可比較表五：單一大肚魚覓食實驗。）

### （4）十隻大肚魚：避險

1) 實驗方法：模擬危險情況同上。魚十隻為一組分別放到魚缸裡，敵人在左邊和在右邊各做 10 次實驗。

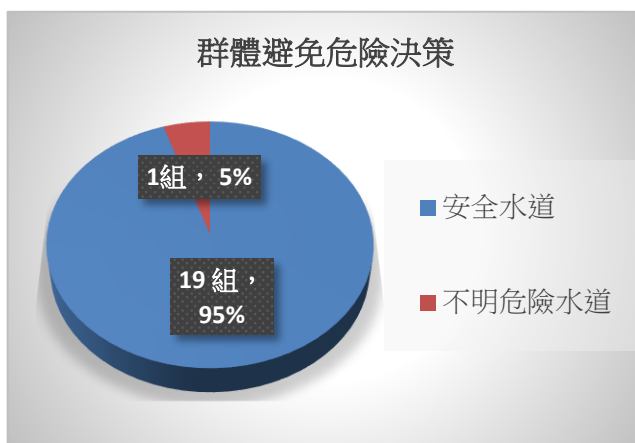
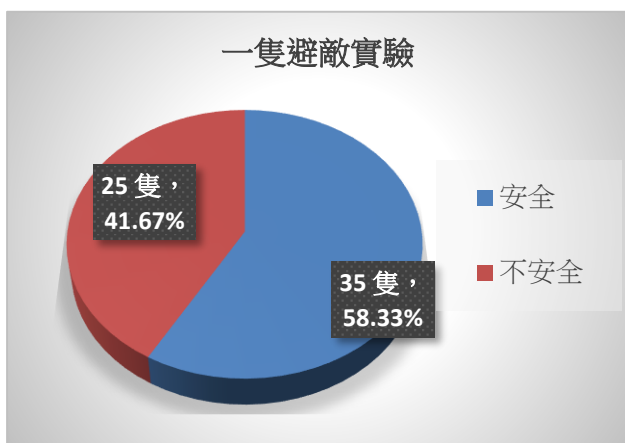
2) 實驗結果：以十隻為一組的大肚魚能有效選擇避開危險(成功率 95%)。那些沒有緊跟大多數魚而落單的個體，若在現實環境中，顯然進入了危險之境。表（八），圖（二十四）。

	成功避免危險	失敗或沒有行動
次數	35	25
比例	58.33%	41.67%

表（七）單一大肚魚是否能成功避免進入危險之境？



圖（二十一）水道一頭的不明危險



圖（二十二）單一大肚魚是否能夠成功避免危險水道

圖（二十三）十隻為一組的大肚魚能夠成功避開危險



十隻大肚魚選擇避免敵人（抉擇路口）



十隻大肚魚選擇避免敵人（選擇結果）

圖（二十四）

組別	安全	不安全	沒動靜
1	8	2	0
2	10	0	0
3	9	1	0
4	2	8	0
5	8	2	0
6	9	1	0
7	7	1	2
8	8	1	1
9	8	2	0
10	10	0	0
11	10	0	0
12	6	4	0
13	8	1	1
14	9	0	1
15	10	0	0
16	8	1	1
17	8	2	0
18	10	0	0
19	10	0	0
20	7	3	0
次數	19	1	0
比例	95%	5%	0

表（八）實驗結果（十隻一組）數據（1~10：危險在左，11~20：危險在右）

#### 四、群體中的領袖：領袖的決策品質

從以上的實驗結果，我們要問：為何群體的決策會優於個體呢？一個可能是，一群魚中，有所謂的「菁英份子」或「領袖」，而一群大肚魚的「菁英份子」（領袖）的決策正確率是遠高於平均值，憑著領袖的決策，其它個體只要「跟著走」就可以保證整群魚達到最佳選擇。本實驗便是要檢驗這個假說。

假說：領袖的決策品質是比較高的，因此其它個體只要跟著走就可以保證整群魚有最佳選擇。



因此，下一步便是要在一群大肚魚中找出領袖，而且證明這些領袖的決策品質確實優於一般個體。此外，我們也必須進一步觀察，領袖確實可以帶領一群個體做出最佳選擇。在這個單元中，針對這三個方向我們設計以下實驗。

#### （一）實驗四：領袖的決策品質

##### 本實驗驗證：領袖的決策品質優於一般個體

實驗程序：

1. 找出群體中的領袖
2. 驗證領袖的決策品質與一般個體不同
3. 驗證領袖可以帶領一般個體做正確有效的決策

##### 1. 步驟一：尋找領袖

方法：每次隨機選取三隻大肚魚到大魚缸中，觀察三隻中最先決定往外游的一隻，把它分別出來放置於「領袖堆」中，其餘則置於「一般」中。採用這種「選才」方式是根據文獻上有關魚群「領袖」研究的概念，認為首先採取行動的魚（圖二十五），比較積極，為一群魚中的領袖（Shinnosuke Nakayama, 2013）。以同樣方式，我們再從領袖堆去除「相對被動」的魚隻放入非領袖群，並從非領袖群取出「相對積極」的放入領袖堆。

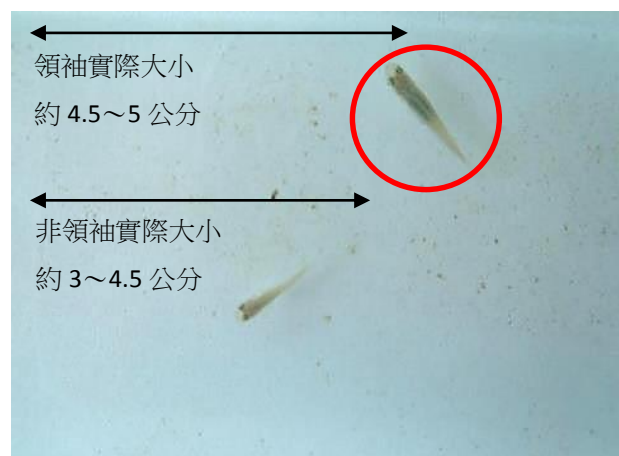
20 組共 60 隻挑選領袖的結果如下表(九)。選取結果意外的發現，領袖相較之下體型是比較大的（圖二十六）。而且，我們也發現，領袖甚至可以把走錯的同伴帶回到正確的選擇上(圖二十七)。

特質	主動積極向外	被動跟隨
隻數（共60隻）	23	37

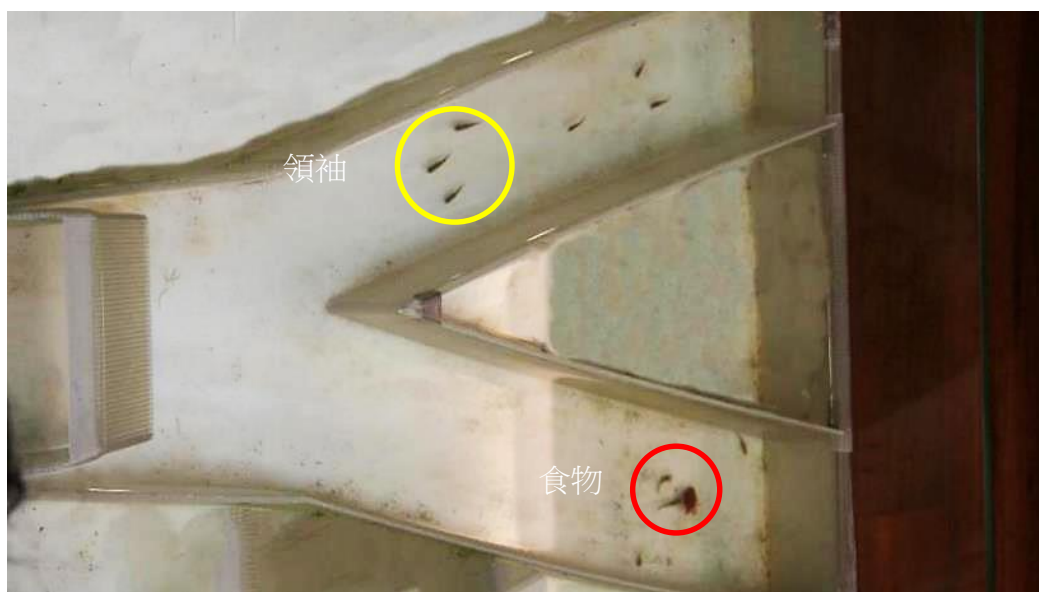
表（九）群體中的領袖



圖（二十五）積極的領袖



圖（二十六）領袖與非領袖在體型上有差異



圖（二十七）領袖甚至能帶領走錯的魚回到食物之處

## 2. 步驟二：領袖的決策能力是否優於非領袖？

方法：領袖群與非領袖群進行 Y 型水道的覓食實驗。分別以獨立的領袖及獨立的非領袖進行實驗，再以群體領袖與群體非領袖進行覓食實驗。

領袖組（獨自覓食）（共 23 隻）

領袖組（7~8 隻一起覓食）：隨機選取每次 7~8 隻，做三次，隔二天後再做三次。

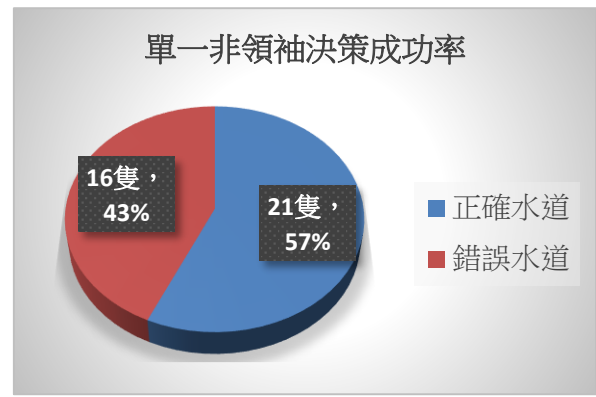
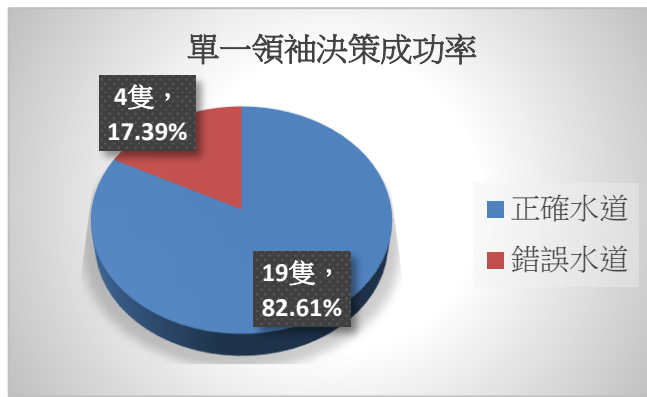
非領袖組（獨自覓食）（共 37 隻）：單隻覓食，觀察非領袖決策品質。

非領袖組（10 隻覓食）：隨機取每次 10 隻，做三次，二天後再重複做三次。

結果可自表（十）及圖（二十八）看出，領袖的決策品質明顯高於非領袖（82.61%>56.76%），而群體領袖成功率高達 100%（表十一，表十二，圖二十九）。我們進一步探究，如果把領袖與非領袖以固比例放在一起，領袖是否可以成功帶領大家做正確的選擇？

組別 決策	單一領袖（23隻）	單一非領袖（37隻）
正確水道	19	21
錯誤水道或沒有做決策	4	16
成功率	82.61%	56.76%

表（十）單一領袖與單一非領袖決策品質比較



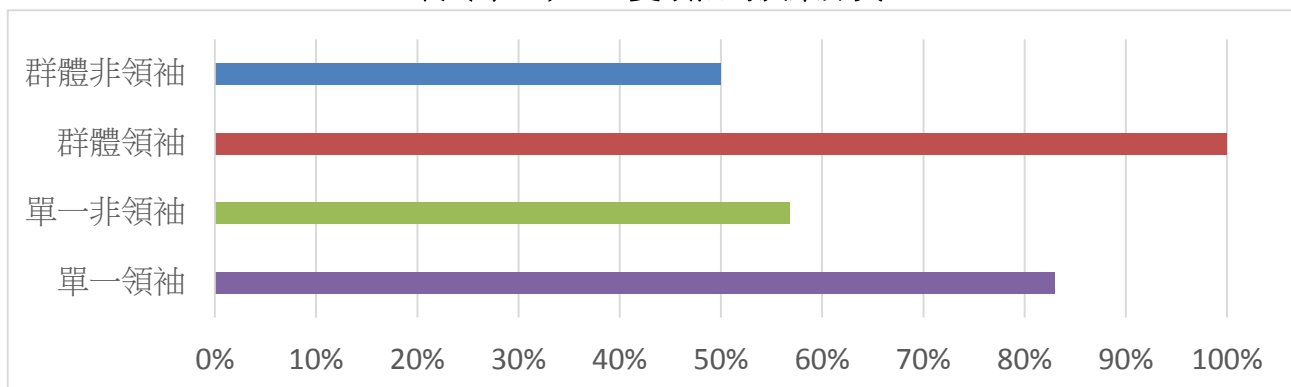
圖（二十八）領袖與非領袖的決策品質（個體決策）

實驗	正確水道	錯誤水道	其它
1	9	0	1（沒有跟過去）
2	4	5	1（沒有跟過去）
3	3	7	0
4	2	6	2（沒有跟過去）
5	10	0	0
6	4	3	3（沒有跟過去）
比率	50%	50%	-

表（十一）10 隻非領袖的決策品質比較

實驗	正確（找到食物）	錯誤	其它
1	8	0	0
2	5	0	2（停留在原點）
3	8	0	0
4	6	1	0
5	7	1	0
6	7	1	0
比率	100%	0%	0%

表（十二）7~8 隻領袖的決策品質



圖（二十九）領袖與非領袖的決策正確率

### 3. 步驟三：領袖是否能夠成功帶領一般魚做正確的選擇？

在這個實驗中，我們讓領袖去帶領一般的大肚魚，以檢驗我們的假設：

**驗證：領袖可以提高群體的決策品質**

**方法：**我們把不同比例的領袖，混合在一般的大肚魚中，之後，讓他們在 Y 型水道上覓食，並記錄成功率。以不同比例的領袖實驗 13 次，表（十三）是實驗數據。結果分析如下：

實驗	分析
實驗1, 2	當領袖為全體的10%時，決策品質沒有顯著提高，決策失敗。
實驗3, 4, 5, 6, 7, 8	當領袖量為全體的20%~30%時，決策成功。
實驗9-1, 9-2	雖然領袖有效帶領，但決策錯誤有一次。
實驗10, 11, 12	雖然領袖比例在20%~30%之間，但整個群體卻分裂成二組。
實驗13	增加領袖，並無解決分裂的問題。

實驗	領袖	非領袖	領袖/ 全部	正確選擇	錯誤選擇	其它	觀察
1	1	9	10%	5 (1)	5	0	領袖數目不足
2	1	9	10%	3 (1)	7	0	領袖數目不足
3	2	8	20%	7 (2)	3	0	有效的帶領
4	2	8	20%	9 (2)	1	0	有效的帶領
5	3	7	30%	10 (3)	0	0	有效的帶領
6	3	7	30%	9 (3)	1	0	有效的帶領
7	3	10	23.02%	12 (3)	1	0	有效的帶領
8	3	13	18.75%	14 (3)	2	0	有效的帶領
9-1	3	16	15.79%	1	18 (3)	0	有效帶領，但領袖錯誤
9-2	3	16	15.79%	19 (3)	0	0	重複實驗後領袖修正決策
10	4	16	20%	9 (2)	11 (2)	0	領袖無法有共識
11	5	16	23.81%	14 (3)	7 (2)	0	領袖無法有共識
12	5	16	23.81%	16 (3)	5 (2)	0	領袖無法有共識
13	6	16	27.27%	14 (4)	8 (2)	0	增加領袖無法解決族群太大的問題
總次數				10	3	0	

表（十三） 領袖是否能夠成功帶領一般魚做正確的選擇？（ ）中的數字代表領袖個數

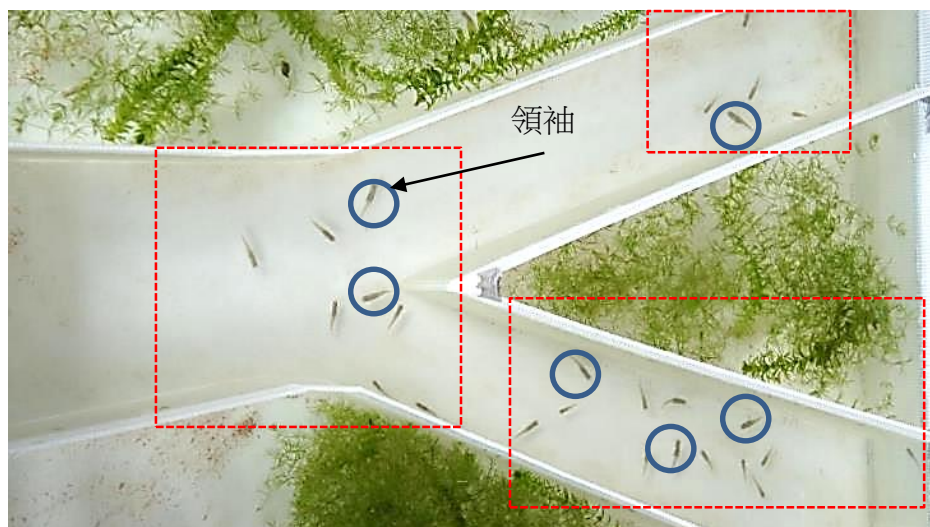
## （二）觀察領袖在群體中的位置及決策結果

從以上的實驗，當族群太大時，即使有足夠的領袖比例，並不一定能有效的帶領。這個現象有以下幾個可能：

1. 領袖的位置太集中，使得有些大肚魚因為離開領袖太遠而無法「跟上正確的決策」。（因為大肚魚只根據一個「跟著身旁的同伴走」的簡單法則行動。）適當的領袖分配才能有效帶領。圖（三十）
2. 領袖們若彼此距離太遠則無法有共識，若領袖們的決策不同，族群便一分為多。針對這個可能，進一步做了「質性的」觀察。讓 26 隻大肚魚（其中有 6 隻領袖）自由在魚缸中決定前進的方向。圖（三十一）中表示其中一個現象，領袖分成三組，分別帶領一群魚，形成三群。



圖（三十） 3 隻領袖帶領 13 隻大肚魚



圖（三十一） 領袖的分配位置：領袖能夠有效帶領整個群體嗎？



### （三）實驗四結論摘要

領袖確實可以讓整個群體的決策品質提高，在一個群體中，若個體能「跟著領袖走」，則可以提高整個群體的生存機會。這個實驗的重要觀察總結於下：

1. 領袖雖然可以讓群體決策的成功率增加，但並非沒有限制。
2. 如果群體太大的話，單一領袖比較無法有效帶領。
3. 領袖的數量如果在群體的20%以上，能有效的做出正確決策並執行。
4. 領袖間對於決策的互相認可，可以更加確認決策的品質。
5. 太多的領袖卻無法有效達成共識，做成一致的決定。
6. 領袖的比例夠多，但是群體超過20隻以上時，領袖無法產生共識，而群體容易分成二個小群體。領袖在群體中的位置分配是關鍵。

## 五、電腦模擬

本節根據以上的研究結果，把魚群行為幾個主要特徵納入電腦模擬中，來模擬大肚魚群的動態。以下是納入於電腦模擬中的魚群特徵：

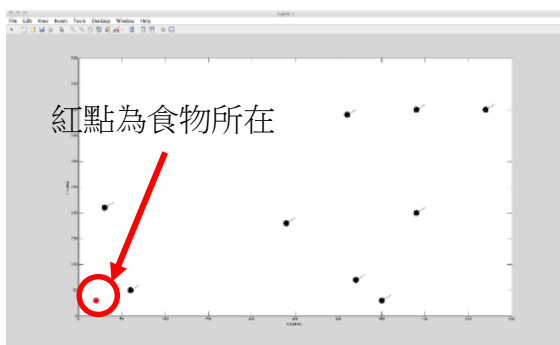
- 一、 每個個體在至少一個個體的視覺（溝通）範圍內。
- 二、 個體的優先行為是「跟」最近的個體前進。
- 三、 群體間有領袖。
- 四、 群體中有固定比例的領袖。
- 五、 領袖的決策品質比較高。
- 六、 領袖有共識，方向才會確認。

我們將幾個動態結果摘要如下圖，可以看到雖然族群非常大，但只要領袖有達成共識且分配平均，就能有效率地帶領整個團體。

圖（三十二）跟著別人走：電腦模擬動態圖與實際的大肚魚群比較

圖（三十三）領袖有共識下的群體覓食行為

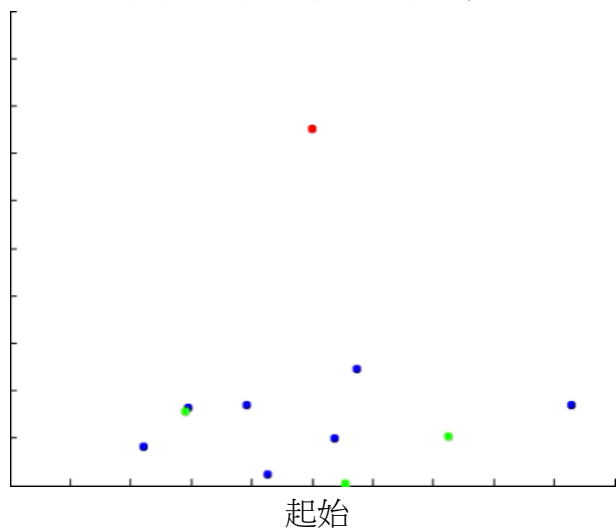
圖（三十四）領袖沒有共識下的群體覓食行為



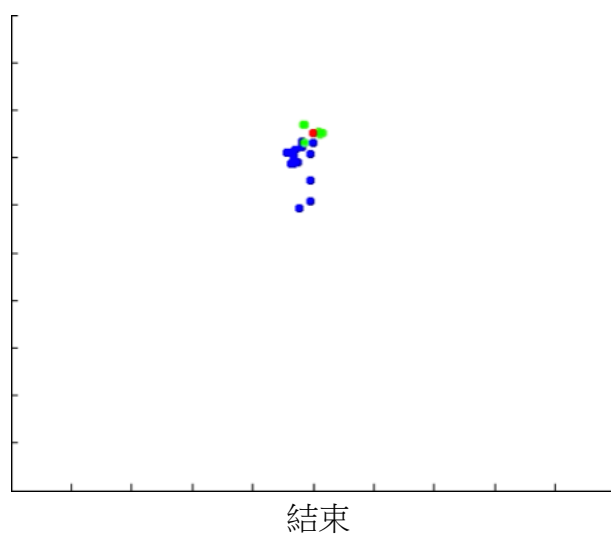
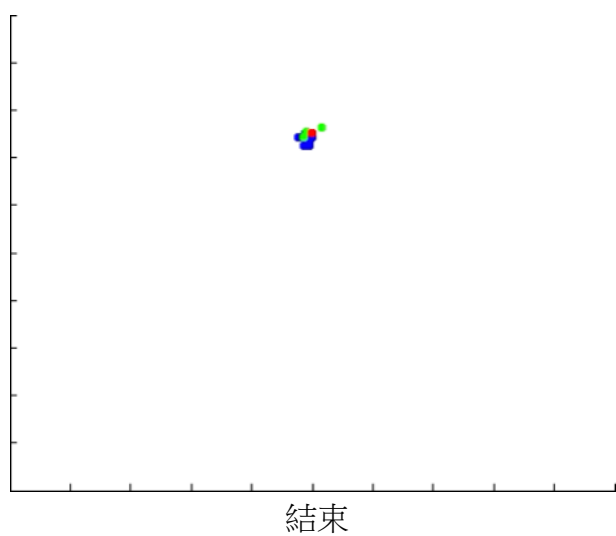
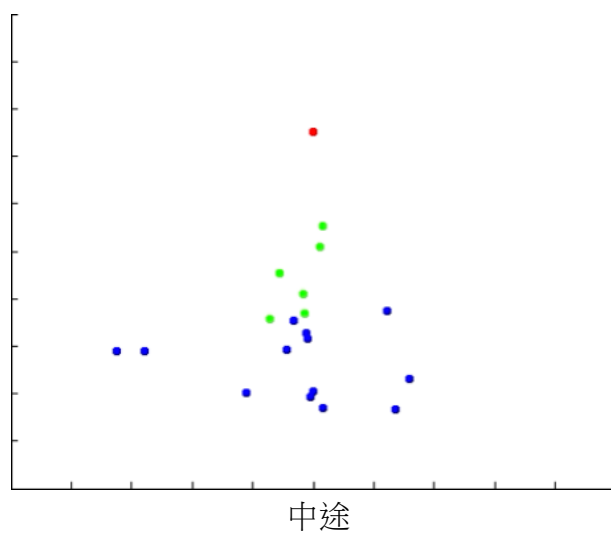
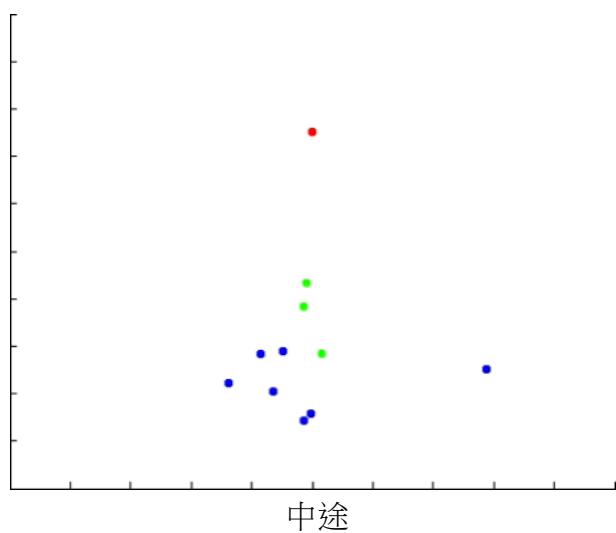
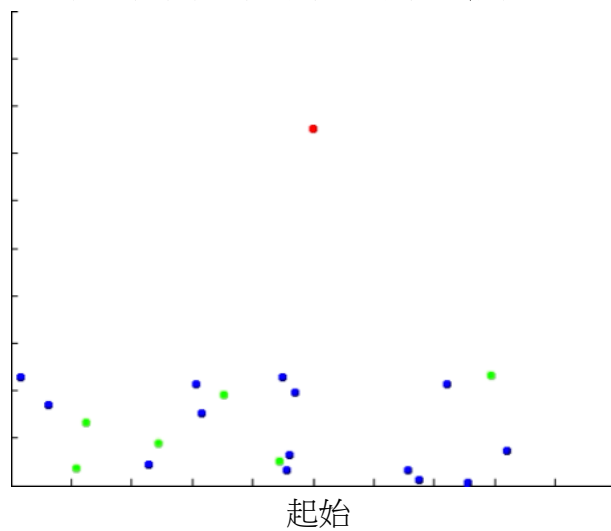
圖（三十二）電腦模擬動態示意圖：跟著別人走

電腦模擬示意圖與實際的大肚魚群比較

共10隻魚，3隻領袖，領袖達成共識

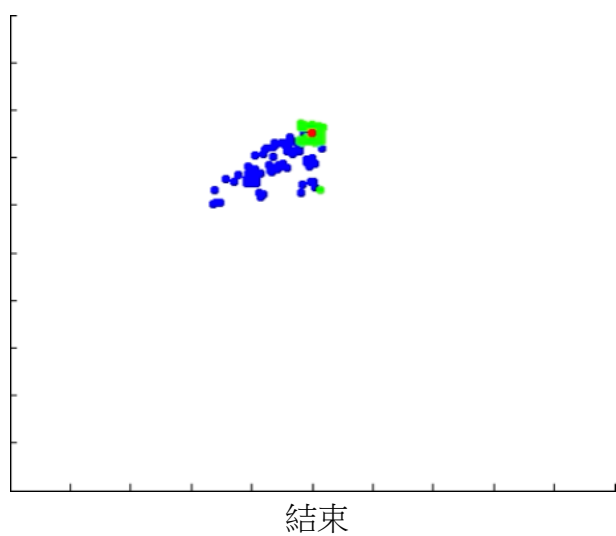
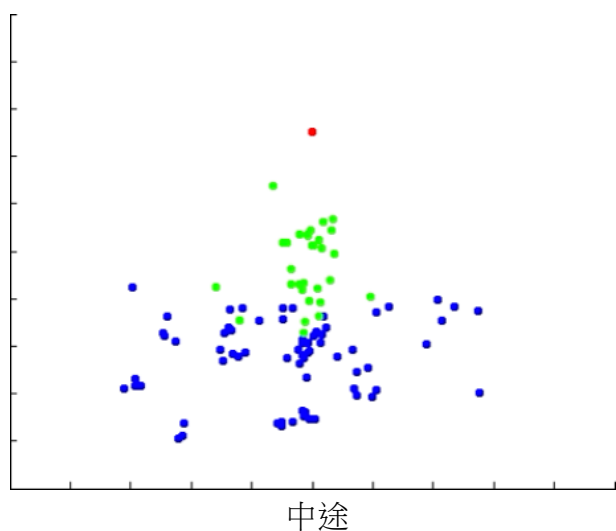
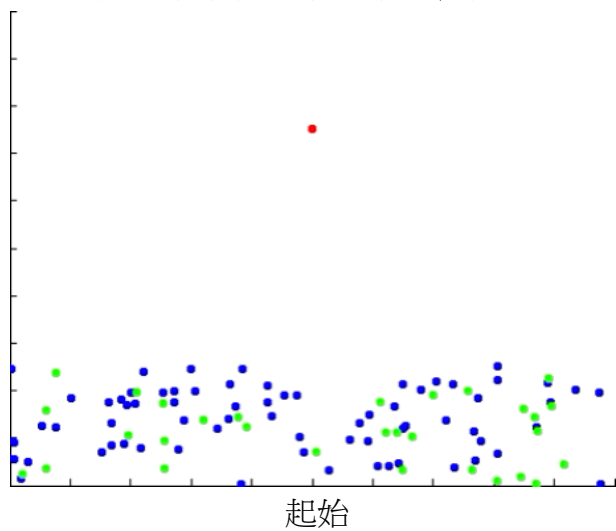


共20隻魚，6隻領袖，領袖達成共識



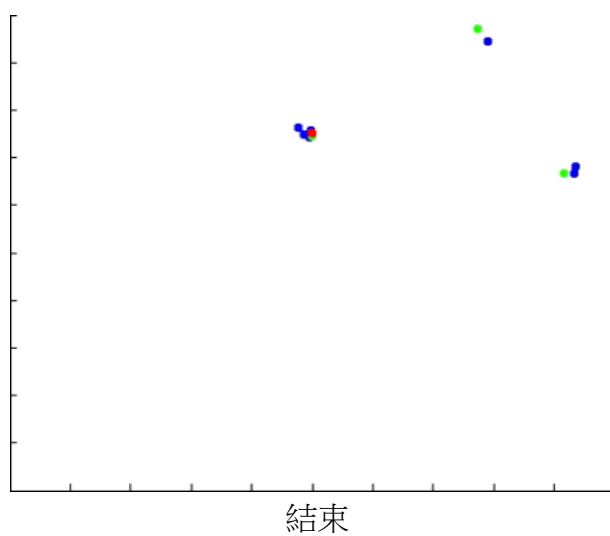
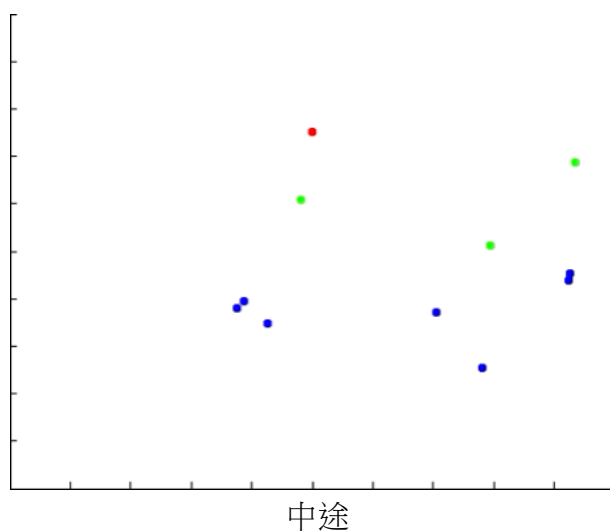
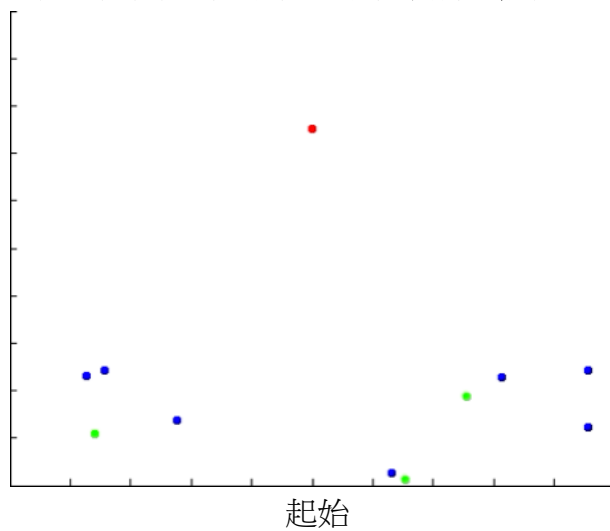
圖（三十三）電腦模擬領袖達成共識時的群體覓食行為

共100隻魚，30 隻領袖達成共識



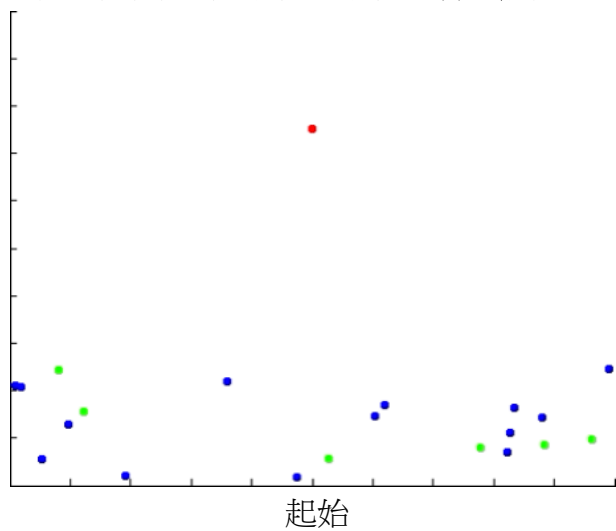
圖（三十三）電腦模擬  
領袖達成共識時的群體覓食行為

共10隻魚，3隻領袖，領袖沒有達成共識

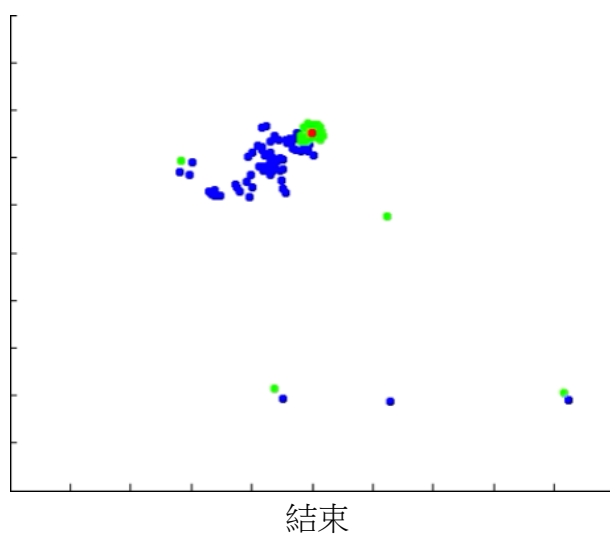
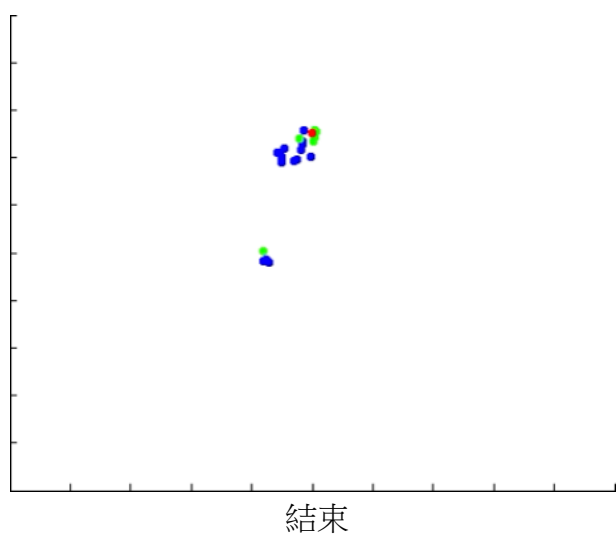
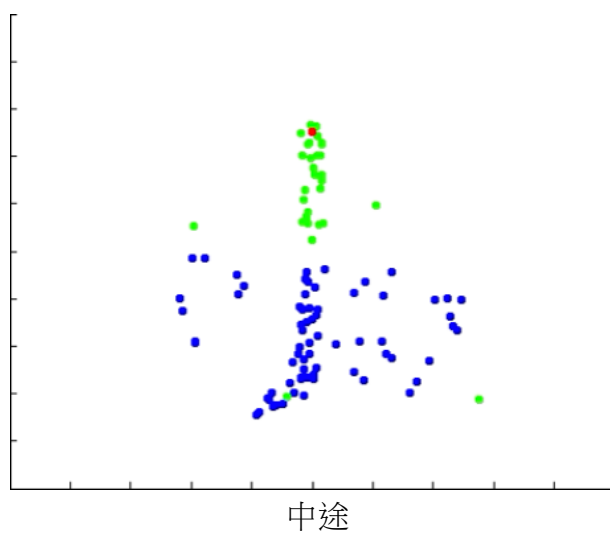
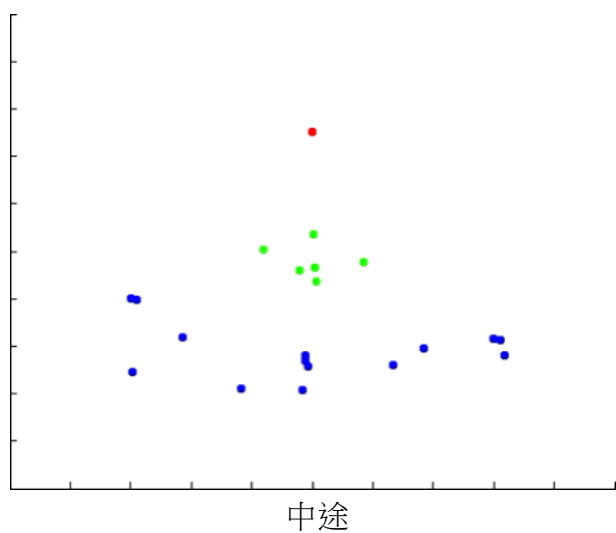
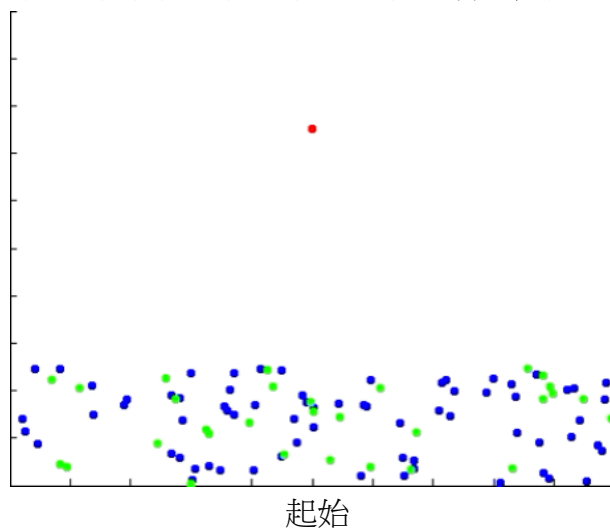


圖（三十四）電腦模擬  
領袖未達成共識時的群體覓食行為

共20隻魚，6隻領袖，領袖不會達成共識



共100隻魚，30隻領袖，領袖不會達成共識



圖（三十四）電腦模擬：領袖未達成共識時的群體覓食行為

## 陸、討論

- 一、在決策實驗時，到底要以多大的群體為實驗單位，五隻、十隻或更多呢？實驗前測試發現，十隻左右的決策效率最為穩定，決策時間也最短（2~3 秒）。太多或少於五隻時決策結果並不穩定，表示共同決策過程中有「最適族群數量」，這個結果與一開始的覓食時間測量與領袖實驗中的結果可相呼應。
- 二、從決策實驗的對照組，我們可知在沒有食物時，領袖依然會帶領群體向外游出。大肚魚的領袖傾向往外探險，這樣可增加找到食物的機會。
- 三、領袖是否會更換呢？我們發現在不同的實驗中，最先往外的領袖並沒有特定某一隻，但都屬「積極的領袖群」。雖跟隨者大部分時候仍是跟隨者，但牠們卻可以透過「不跟進」來否決領袖的決定，扮演共同決策的重要角色。
- 四、本研究對大肚魚的決策行為使用統計次數分析，但是在實驗過程中，我們發現大肚魚的決策受到許多環境變因影響，質性的觀察同等重要。一群大肚魚做出一次錯誤決定，有可能隱藏沒有控制完善的變因，例如人所無法感覺到的光影或振動。
- 五、為了「計次」分析，有時我們只好忽略大肚魚是「可簡單學習的」，有時牠們知道自己走錯了方向而折回正確的路。
- 六、有許多因素不是本研究時間及經費許可的。利如透過對大肚魚的「標記」也許可以對群體中的領袖有更好的掌握及長期研究。
- 七、電腦模擬上可以再進一步模擬不同族群特徵下的群體決策或對特定行為模擬。

## 柒、結論

到底菁英領袖聰明或者群眾才更有智慧呢？在完成大肚魚群體決策研究後，我對這個古老的爭論有更深的體會。菁英領袖的決策品質也許比較優良，然而單一菁英領袖的決策不僅必須得到其它領袖的共識，也必須有群眾的認可，其決策才能獲得執行。而單一菁英領袖不能提供族群足夠的帶領，唯有相當數量及適當分散於群眾中的菁英領袖，才能對群眾產生有效的影響力。另一方面，群眾的智慧在於，「以逸待勞」，只要跟著眾人走，就可以保證決策品質和菁英領袖是一樣的，族群的大多數生存優勢因此得到保障。平凡不起眼的大肚魚無疑的告訴我們群體智慧的意義。

## 捌、參考資料及附錄

### 附錄一、電腦模擬自己找食物與跟著別人走的總「腳程」

獨立尋找食物（單位：1 Timestep＝每隻魚游一格）				
	一隻	十隻	五十隻	一百隻
十次平均	36163.6	136421.6	183997.4	204799.3
合力尋找食物：跟著別人走（單位：1 Timestep＝每隻魚游一格）				
	二隻	十隻	二十隻	五十隻
十次平均	2714.2	465.2	55.1	106.1
註記：模擬魚可活動範圍為500單位x 500單位之正方形，速度為一步5單位。				

附表（一）獨立與合力找食物所須「腳程」比較



## 附錄二、有關大肚魚視覺與群聚的前置觀察及實驗

大肚魚的視覺範圍與溝通方式	
直線距離	在我們的群體決策實驗中，大肚魚必須能夠「看到」或「感覺到」食物或環境中的危險，因此實驗前必須先確定大肚魚是否能看到 Y 型水道末端的食物或物品。我們對魚缸中的 30 隻大肚魚進行簡單測試，發現魚缸中的魚對直線距離在 200 公分外的移動物體，部分的大肚魚開始產生反應。大部分的大肚魚在 150 公分內的移動物體開始反應。若移動物體再接近 50 公分，則所有的大肚魚都有反應。大肚魚的直線視覺距離雖有個體上的差異，但對在魚缸外 100 公分內的移動物體，不經過水波的傳遞，也可以利用視覺看的到。
視覺半徑	我們從與大肚魚魚身呈 90 度直角方向讓移動物體慢慢接近，發現與直線距離測試時相同，牠們可以對垂直 90 度且 100 公分內的移動物體有反應。大肚魚眼球是可以往後轉的，理論上，視覺範圍應可超過半圓。根據文獻上對其它魚類的研究指出，魚類的視覺死角約是 60 度，因此，牠們可以對圓角 300 度內的訊息有反應(Hall, etc., 1986)，見圖（十）。
視覺之外：嗅覺、觸覺與化學覺	<p>大肚魚覓食時所仰賴的知覺為何？我們的一個小測試是將食物放在魚無法見到的之處（與大肚魚隔著不透明板），而水流是相通的，則大肚魚在「嗅到」味道之後，變得非常活躍，但是卻像一群無頭蒼蠅一樣，沒有目標，也沒有集體行為。反之，若將食物密封在玻璃水罐中，大肚魚可看到食物卻聞不到，魚群卻可以有方向的往食物移動。我們認為「視覺」在方向的決定上扮演重要的角色。因此我們認為大肚魚的視覺是牠們決策的重要工具。</p> <p>我們並不認為「視覺」是大肚魚唯一的溝通工具，文獻上有關生物溝通的研究指出：生物會用不同的方式與環境互動，而在不同的需要時會利用不同的工具，各種感覺的使用會因不同目的而有比重上的不同。例如，在水波流動多變的情況下，觸覺及皮膚覺在決策上變得不重要，因為資訊不明確。而看不到的時候，化學覺就會變得重要了。</p>

## 附錄三、避險實驗的前置實驗：大肚魚對危險環境的認知

由於大肚魚並非保育類動物，文獻上對於大肚魚的天敵並沒有具體的研究，僅知大型淡水魚及鳥類會以大肚魚為食物，但大肚魚並非他們「唯一」食物。因此在設計大肚魚避險行為實驗並不是針對大肚魚的「敵人」做設計，而是針對大肚魚會選擇避免的環境做設計。以下是我們在實驗前的測試結果：

(一) 對三原色及錫箔紙的反應：

我們在大型魚缸中兩兩放入色板浮於水面，並先觀察 50 隻大肚魚的反應。我們重複三次觀察（將色板移動位置三次），下表是牠們選擇躲避於下的色板顏色。一個可能的原因是，綠色接近水草色，由於平時大肚魚喜歡躲在水草下方找遮蔽，而紅色並非在溪流中長見的顏色，閃亮的銀色則好比大魚的反光，見附圖（一）。

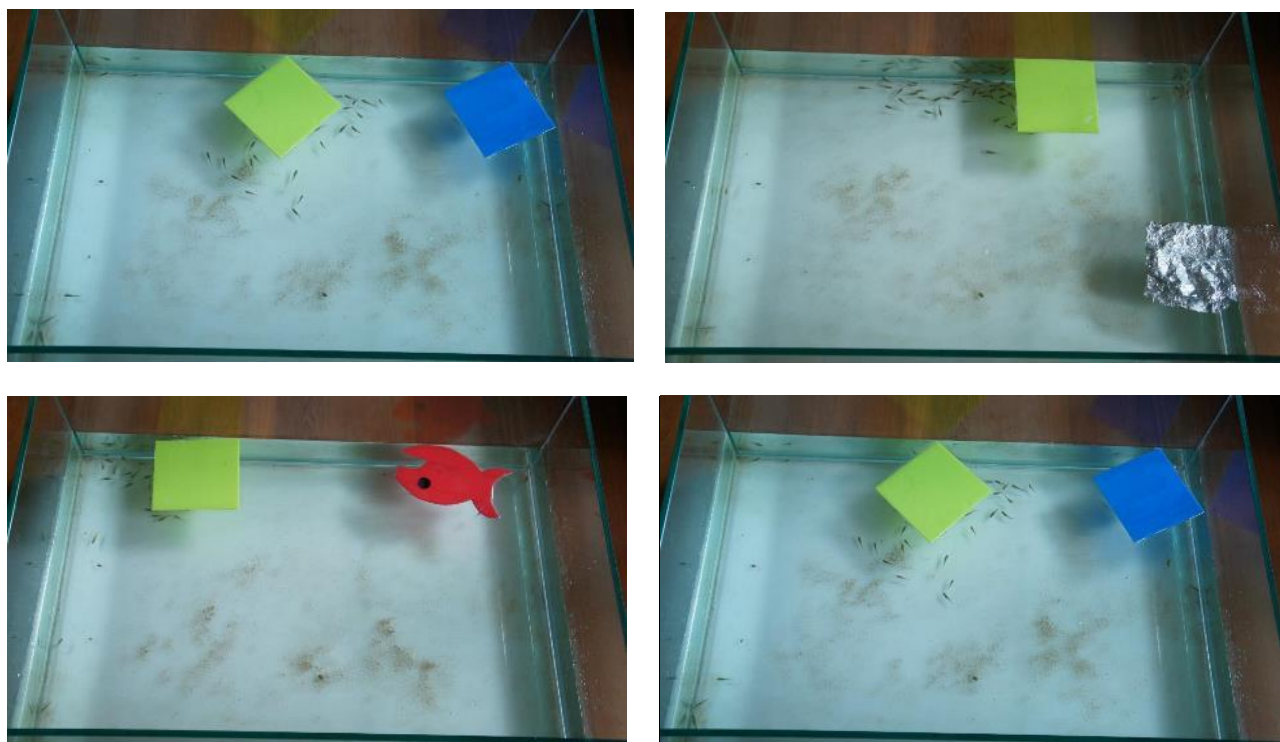
	藍＋綠	綠＋紅	藍＋紅	綠＋銀	藍＋銀	紅＋銀
偏好	綠	綠	藍	綠	藍	紅
可推出：對牠們最沒有威脅的是綠色，而紅色在三原色中最不喜歡，但是對反光的錫箔紙（銀色）則更不喜歡。						

附表（二） 對三原色及錫箔紙的反應

此外，我們也將色板放置於 Y 型水道的一端做測試，結果呼應以上的發現：大肚魚選擇走向有綠色色板的水道，最不喜歡的水道是紅色及銀色。

- (二) 對突然移動的物體反應較為激烈，對於靜止的不明物體不太有警覺。
- (三) 對於由上而來的物體感覺威脅最大，大肚魚會快速反方向逃避。而對水平接近的物體，反應較不激烈，會慢慢移開。
- (四) 對於水中放入的不明物體，大肚魚一開始躲開，隨著時間過去若此物體沒有威脅，牠們便會游回，甚至「察看一番」。

因此，大肚魚認為的危險可能是：不熟悉的，紅色或閃亮的，會持續動作的，從上而來的。



附圖（一） 大肚魚對環境中三原色及錫箔紙的反應

#### 附錄四、MATLAB 電腦模擬程式之一：代表一隻非領袖大肚魚的行為模式

```

classdef Follower < Fish
    %Follower A class that represents a follower.
    % A class that represents a follower.

    properties (Constant = true)
        % Is this fish a leader?
        isLeader = false;
        % Is this fish a follower?
        isFollower = true;
    end

    methods
        function followerObj = Follower(frames, radius, distBetweenFish, speed)
            if nargin == 4
                followerObj.x = zeros(1, frames+1);
                followerObj.y = zeros(1, frames+1);
                followerObj.radius = radius;
                followerObj.distBetweenFish = distBetweenFish;
                followerObj.speed = speed;
            end
        end

        function nextCoordinate(followerObj, leaderFish, followerFish, thisFrame)
            % Calculate distance to every other fish
            otherFishDistance = zeros(numel(leaderFish)+numel(followerFish), 1);

            % Calculate distance to leaders
            for i=1:numel(leaderFish)
                otherFishDistance(i) =
followerObj.distToCoordinates([leaderFish(i).xForFrame(thisFrame)
leaderFish(i).yForFrame(thisFrame)], thisFrame);
            end
            % Calculate distance to followers
            i=[numel(followerFish) 1];
            while true
                if i(1) > numel(otherFishDistance) || i(2) > numel(followerFish)
                    break;
                end
                otherFishDistance(i(1)) =
followerObj.distToCoordinates([followerFish(i(2)).xForFrame(thisFrame)
followerFish(i(2)).yForFrame(thisFrame)], thisFrame);
                i = i+1;
            end

            if numel(followerObj.followingFish) ~= 0
                % If there is a fish to follow, follow the fish only when its distance
to other fish is more then property "distBetweenFish"
                otherFishDistance(otherFishDistance == 0) = [];

                if any(otherFishDistance < followerObj.distBetweenFish)
                    % If the distance between fish are too small
                    % Go to the opposite direction with randomness
                    if followerObj.followingFishIsLeader
                        A = followerObj.getCloserToCoordinates(randn(1, 2) .*
(2*[followerObj.xForFrame(thisFrame) followerObj.yForFrame(thisFrame)] -
[leaderFish(followerObj.followingFish).xForFrame(thisFrame),
leaderFish(followerObj.followingFish).yForFrame(thisFrame)]), thisFrame);
                    else
                        A = followerObj.getCloserToCoordinates(randn(1, 2) .*
(2*[followerObj.xForFrame(thisFrame) followerObj.yForFrame(thisFrame)] -
[followerFish(followerObj.followingFish).xForFrame(thisFrame),
followerFish(followerObj.followingFish).yForFrame(thisFrame)]), thisFrame);
                    end
                    followerObj.x(1, thisFrame+1) = A(1);
                    followerObj.y(1, thisFrame+1) = A(2);
                else
                    % Else get closer to the fish that it is following
                    if followerObj.followingFishIsLeader
                        A =

```

```

followerObj.getCloserToCoordinates([leaderFish(followerObj.followingFish).xForFrame(thisFrame), leaderFish(followerObj.followingFish).yForFrame(thisFrame)], thisFrame);
    else
        A =
followerObj.getCloserToCoordinates([followerFish(followerObj.followingFish).xForFrame(thisFrame), followerFish(followerObj.followingFish).yForFrame(thisFrame)], thisFrame);
    end
    followerObj.x(1, thisFrame+1) = A(1);
    followerObj.y(1, thisFrame+1) = A(2);
end
else
    % Else follow the nearby fish
    % Calculate the fish with the minimal distance from this fish
    minDist = Inf;

    % Calculate distance to leaders
    for i=1:numel(leaderFish)
        if isempty(leaderFish(i).followingFish) && otherFishDistance(i) ~=
0 && otherFishDistance(i) < minDist
            minDist = otherFishDistance(i);
        end
    end
    % Calculate distance to followers
    i=[numel(followerFish) 1];
    while true
        if i(1) > numel(otherFishDistance) || i(2) > numel(followerFish)
            break;
        end
        if isempty(followerFish(i(2)).followingFish) &&
otherFishDistance(i(1)) ~= 0 && otherFishDistance(i(1)) < minDist
            minDist = otherFishDistance(i(1));
        end
        i = i+1;
    end

    % Set it as the fish to follow
    if isempty(find(otherFishDistance(1:numel(leaderFish)) == minDist, 1))
        followerObj.followingFish =
find(otherFishDistance(numel(leaderFish)+1:numel(leaderFish)+numel(followerFish)) ==
minDist);
        followerObj.followingFishIsLeader = false;
        followerObj.followingFishIsFollower = true;
    else
        followerObj.followingFish =
find(otherFishDistance(1:numel(leaderFish)) == minDist);
        followerObj.followingFishIsLeader = true;
        followerObj.followingFishIsFollower = false;
    end

    % Get closer to the fish to follow
    if followerObj.followingFishIsLeader
        A =
followerObj.getCloserToCoordinates([leaderFish(followerObj.followingFish).xForFrame(thisFrame), leaderFish(followerObj.followingFish).yForFrame(thisFrame)], thisFrame);
    else
        A =
followerObj.getCloserToCoordinates([followerFish(followerObj.followingFish).xForFrame(thisFrame), followerFish(followerObj.followingFish).yForFrame(thisFrame)], thisFrame);
    end
    followerObj.x(1, thisFrame+1) = A(1);
    followerObj.y(1, thisFrame+1) = A(2);
end
end
end
end

```

## 參考資料

- 李千毅譯，觀念生物學 1~4，第一版，天下文化，2010  
( Mahlon Hoagland & Bert Dodson , The Way Life Works , 1998 )
- 林俊宏譯，群的智慧，第一版，天下文化，2010  
( Peter Miller , The Smart Swarm , McCormick & Williams , 2008 )
- 自然與生活科技課本（七上），5-4 行為與感應，第三版，翰林出版，2012
- Dyer J.R.G., Johansson A., Helbing D., Couzin I.D. & Krause J. 2009, “Leadership, consensus decision making and collective behaviour in human crowds” , Biological Sciences , Vol. 364 , P.781-P.789
- Krause J., Ruxton G.D. & Krause S., 2010, “Swarm intelligence in animals and humans” , Trends in Ecology and Evolution, Vol. 25, P.28-P.34
- Hall, S.J., Wardle, C. S. & MacLennan, D.N., “Predator evasion in a fish school: Test of a model for the fountain effect” , Marine biology, 1986, P.143-P.148.
- Shinnosuke Nakayama , 2013 , “Following fish teach us that leaders are born, not made” , The Conversation, University of Cambridge.
- Sumpter, D., “Collective Animal Behavior” , Princeton University Press, 2010
- Wolf, M., Kurvers, R., Ward, A., Krause, S., Krause, J., 2013, “Accurate decisions in an uncertain world: Collective cognition increases true positives while decreasing false positives” , Proceedings of the Royal Society of London, Biological Sciences, 280(1756), 1-9.



## 【評語】 030319

使用常見的大肚魚與簡單實驗設計，加上電腦模擬，探討出有趣的群聚行為。創意十足，得到的結果也極具參考性。除了群聚行為外，其實本研究對於大肚魚領導者的產生、視覺重於嗅覺等項目也有著力，可以將這幾項數據多一些說明，再加以擴大，讓結果更加豐富。