

彰化縣 113 學年度國民中小學學生獨立研究作品甄選

作品說明書

作品編號：

☐國小組

☐數學類

組別：

☒自然與科學類

☒國中組

☐人文社會類

作品名稱：初探射水魚的數感能力

第一階段 研究訓練階段

一、近二年學校獨立研究課程之規劃

- (一) 開設每週一堂獨立研究的課程。
- (二) 請畢業學長、姐回校經驗分享。
- (三) 學校於寒、暑假舉辦相關營隊。
- (四) 定期舉辦校外教學：高雄科工館、台北科教館。

二、學校如何提供該生獨立研究訓練

- (一) 科學性文章選讀。
- (二) 歷屆獨立研究作品、科展作品賞析。
- (三) 從近幾年的科學新聞找尋有趣的題材。
- (四) 在實驗過程中，即時解讀實驗數據、討論如何改進實驗過程、解決遇到的問題。
- (五) 軟體使用教學：微軟 Word、Excel、PowerPoint，訓練學生使用相關功能，自己整理報告。

第二階段 獨立研究階段

一、 研究動機

在一次的獨立研究課程，老師讓我們看了一部關於台灣師範大學對斑龜數感的研究影片，讓我們對動物的數感產生了興趣。

我們想，除了斑龜以外，其他的動物會不會也有數感呢？影片中提到，蜥蜴、孔雀魚也都有數感，於是我們查了相關資料，發現蜥蜴最多能分辨 2vs. 3(比值 0.67)、孔雀魚最多能分辨 4vs. 5(比值 0.8)，讓我們對魚類的數感感到好奇。

如果孔雀魚能夠分辨 4vs. 5，那麼其他的魚類或許能分辨比值更接近 1 的數。孔雀魚、蓋斑鬥魚等可能會因為食物的氣味而影響攝食的選擇，而射水魚則是僅用視覺來判斷，因此我們決定用射水魚來做數感的研究。

二、 擬定正式計畫、研究問題及工作進度表

[研究射水魚對不同數量的判斷能力]

[第一次實驗]

[實驗組]

1vs. 2、2vs. 3、3vs. 4、4vs. 5、5vs. 6(差 1)

1vs. 3、2vs. 4、3vs. 5、4vs. 6(差 2)

1vs. 4、2vs. 5、3vs. 6(差 3)

1vs. 5、2vs. 6(差 4)

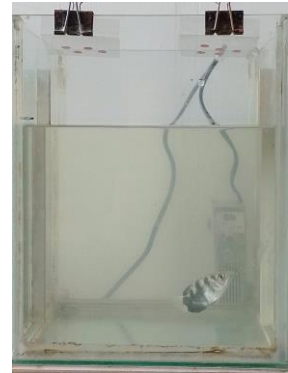
1vs. 6(差 5)

[實驗步驟]

1. 將投影片剪成相同的大小。
2. 在投影片上貼上不同數量的粉紅色圓形標籤貼紙(右圖)。



3. 擲骰子決定實驗組投影片上的圓點數量。
4. 將兩片投影片夾在魚缸前緣(右圖)。
5. 等待射水魚噴水。
6. 射水魚如果噴到較大的數，則給予飼料；如果噴到較小的數，則不給予飼料，拆除投影片，回到步驟3繼續實驗，直到所有實驗組做完。



[重設實驗]

因為射水魚較常噴牠右方的投影片，於是我們將實驗做了以下調整：

1. 將魚缸的兩側用白紙貼起來，以及關上窗簾：

射水魚一直噴向右方可能與光線的強弱有關，所以我們讓兩邊光的強度盡量相同。

2. 把投影片移到魚缸兩側：

一直噴向右邊也可能與牠習慣的方向有關，我們將投影片移到中間後，牠必須面向牠所想要噴的那片投影片，才有辦法噴水，所以沒有左右方的分別。

3. 在實驗過程中將濾水器關閉：

水流可能會影響射水魚的選擇。

4. 將投影片上多加一層紙：

因為投影片是透明的，為了避免光線的影響，於是在上面加一層紙，讓牠的視線中兩邊的亮度盡量相同。

[第二次實驗]

[實驗組]

1vs. 2、2vs. 3、3vs. 4、4vs. 5、5vs. 6(差 1)

1vs. 3、2vs. 4、3vs. 5、4vs. 6(差 2)

1vs. 4、2vs. 5、3vs. 6(差 3)

1vs. 5、2vs. 6(差 4)

1vs. 6(差 5)

[實驗步驟]

1. 關濾水器、窗簾。
2. 在投影片的背面貼一層紙。
3. 在投影片貼上不同數量的粉紅色圓點貼紙。
4. 將投影片夾在魚缸兩邊(右圖)。
5. 等待射水魚噴水。
6. 如果噴到較大的數，則給予飼料，反之則不給予飼料，回到步驟 4，繼續實驗。



[第二次重設實驗]

1. 因為射水魚常常連續噴向同一邊的投影片，於是我們在實驗開始前，先讓射水魚分辨 1vs. 1、2vs. 2、3vs. 3、4vs. 4、5vs. 5，如果射水魚左右兩邊都有噴水至少一次，則開始實驗，反之則調整光線再做一次 1vs. 1、2vs. 2、3vs. 3、4vs. 4、5vs. 5，直到兩邊都有噴水，才開始實驗。
2. 因為魚在 5vs. 6 的情況下幾乎無法分辨，所以我們在第三次實驗將投影片 6 拿掉。

[第三次實驗]

[實驗組]

1vs. 2、2vs. 3、3vs. 4、4vs. 5(差 1)

1vs. 3、2vs. 4、3vs. 5(差 2)

1vs. 4、2vs. 5(差 3)

1vs. 5(差 4)

[實驗步驟]

1. 關濾水器、窗簾。
2. 將 1vs. 1、2vs. 2、3vs. 3、4vs. 4、5vs. 5 的投影片依序夾在魚缸兩側。

3. 如果射水魚左右兩邊都有噴水至少一次就繼續實驗，反之則調整光線，再做一次，直到兩邊都有噴水，才繼續實驗。
4. 將實驗組的投影片夾在魚缸兩側。
5. 等待射水魚噴水。
6. 射水魚如果噴向較大的數，則給予飼料，反之則不給予飼料，回到步驟 4，繼續實驗。

〔第三次重設實驗〕

因為射水魚還是一直噴向同一邊，所以我們改成把投影片隨機放在透明玻璃上。

〔第四次實驗〕

〔實驗組〕

1vs. 2、2vs. 3、3vs. 4、4vs. 5(差 1)

1vs. 3、2vs. 4、3vs. 5(差 2)

1vs. 4、2vs. 5(差 3)

1vs. 5(差 4)

〔實驗步驟〕

1. 關濾水器、窗簾。
2. 將實驗組依序放在玻璃上(右圖)。
3. 等待射水魚噴水
4. 射水魚如果噴向較大的數，則給予飼料；反之則不給予飼料，回到步驟 2，繼續實驗。



三、彙整相關文獻

〔動物的數感〕

哺乳類、鳥類、兩棲類、魚類、無脊椎動物等都和人類一樣有數感。蠐螬能分辨到 2vs. 3，食蚊魚和經過訓練的海豚最多能分辨到 3vs. 4，而斑龜最多能分辨到 9vs. 10。研究也發現斑龜的數感認知符合韋伯率，即兩數間的比值越接近 1，則代表難度越難，因此表現變

差。(林鳳君，2021)

不同的動物擁有數感能力的原因可能都不盡相同。費氏弧菌 (*Vibrio fischeri*) 當菌體密度達到一定程度時，會通過化學語言，所有細菌都同時發光，這種行為叫做群聚感應(QS)。日本切葉蟻 (*Myrmecina nipponica*)，牠們感覺到出現群聚，就會集體遷移到新的地方，因為牠們認為在這種情況下遷移蟻巢才是最安全的。蜜蜂能估計在通向食物源的飛行通道裡有幾個地標，牠們依靠地標數量來測量蜂巢到食物源之間的距離。動物覓食的時候大部分會選擇多數，但田鼠每次覓食都會選擇數量較少的蟻群，田鼠喜歡吃螞蟻，但是牠們受到威脅時會咬攻擊者，田鼠們似乎是為了覓食過程更舒適，才做出如此選擇。生殖在生物學中非常重要，不論是昆蟲或脊椎動物，雄性估算競爭強度的能力決定了精液的多少和成分。擬蠍目中的長臂天牛 (*Cordylocheres scorioides*)，多個雄性與一雌性交尾是常態。第一個交配的雄性精子完成受精的機率最高，而之後成功受精的機會就會愈來愈小，但是精子的產生耗費很大的過程，所以精子的分配會根據受精機率決定精液中的精子數量。雄蠍子透過嗅覺判斷雌蠍子和多少雄性交配過，隨著交配過的雄性越多，精子的分配會相應遞減。(Andreas Nieder，2020)。

動物會利用數感去分辨獵物數量的多寡而做出決策，最佳的攝食行為就是用最低的成本換取最高的報酬，動物需要進行風險評估的攝食決策時，他們會根據自身的飢餓與飽食程度來進行選擇。就像人類在飽食的狀態下賭博，願意承擔的風險較低，所下的賭注較少；在飢餓的狀態下賭博，願意承擔的風險較高，所下的賭注較多(楊燦伊，2016、2017)。

〔算數能力與感數能力〕

數感分為兩種系統，感數能力：在數量不多時，可以立即分辨數量；算術能力：在數量較大時，需要一個個地計算總數。動物的計數能力通常不超過4，在分辨更大的數時，只能依比例感受哪一邊比較

多，而在兩數間的比值愈接近 1 時，分辨的準確度也會下降，即韋伯率。(2017，焦傳金、楊璨伊)

〔魚類的數感〕

眼斑雙鋸魚(*Amphiprion ocellaris*)生活在珊瑚礁和潟湖，常與海葵共生。牠的皮膚對海葵的毒液有免疫能力，可以得到良好的保護。研究者們發現眼斑雙鋸魚能計算白條紋的數量，決定是否驅趕缸內的魚，避免他們搶奪自己的地盤。(hayashi，2024)。

〔動物的靈活性〕

入侵物種的數感能力可能是他們具有入侵潛能的原因。斑龜和紅耳龜在 8：9、9：10 等難度高的正確率差不多，但如果把實驗分成前後兩階段來觀察，會發現斑龜在前半段固定數字題型的答對率隨著題目難度上升而遞減；而紅耳龜下降的趨勢不明顯。在後半段較複雜的亂數题型中，斑龜的答對率在前期為陡降的斜線，後來才漸漸追上。兩種烏龜只要都經過充分的訓練後，可以達到一樣的成就，但紅耳龜行為的靈活性較斑龜高。(林鳳君，2021)。

〔射水魚〕

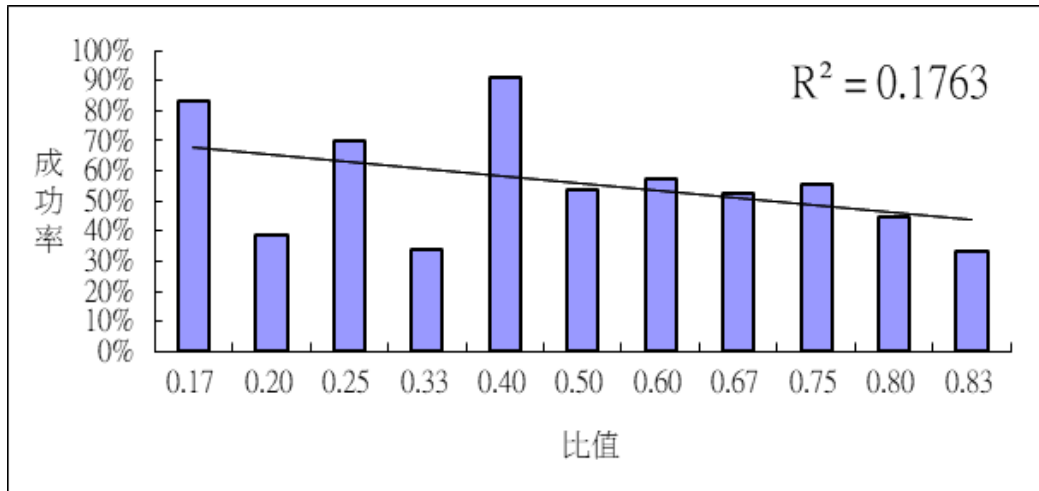
射水魚(*Toxotes jaculatrix*)標準體長為 25~30cm，頭吻長 3.3~4.1cm、尾長 2.7~3.7cm，背棘總數 4(右圖)。牠是一種鹹淡水魚，既能生活在海水也能生活在淡水。射水魚的捕食方法是用舌頭抵住口腔頂部的一



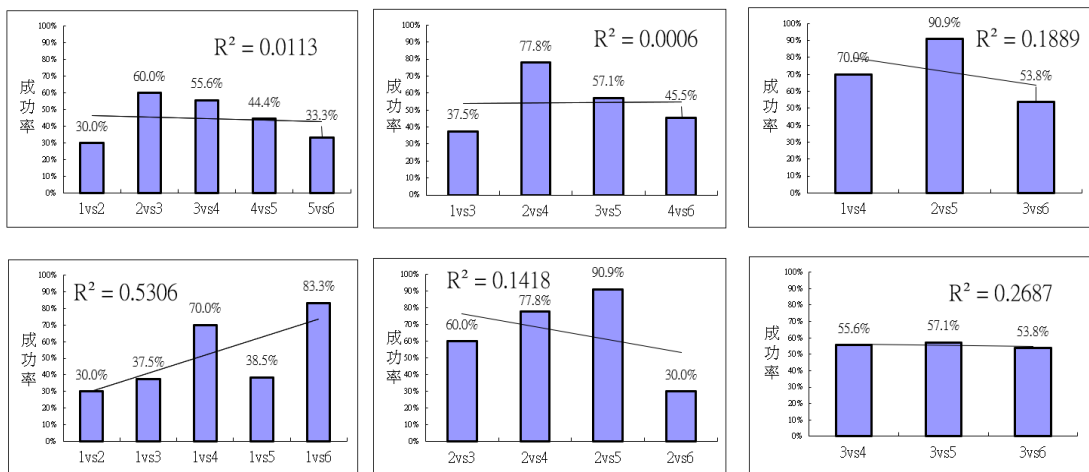
個特殊凹槽形成管道，當鰓蓋突然闔上時，一道水柱就會沿著管道被推向前方。射水魚能夠修正水和空氣之間的光線折射角度以及重力導致的水柱拋物線扭曲，這種能力是經過後天練習得到的。(中文百科全書)。

四、資料分析

[第一次實驗]

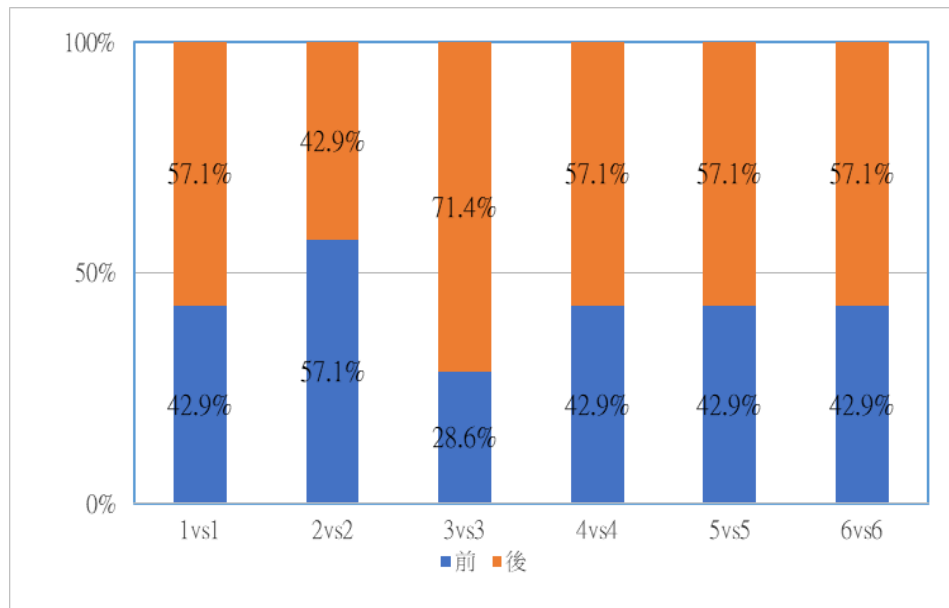


圖一：成功率和比值的關係不符合韋伯定律。



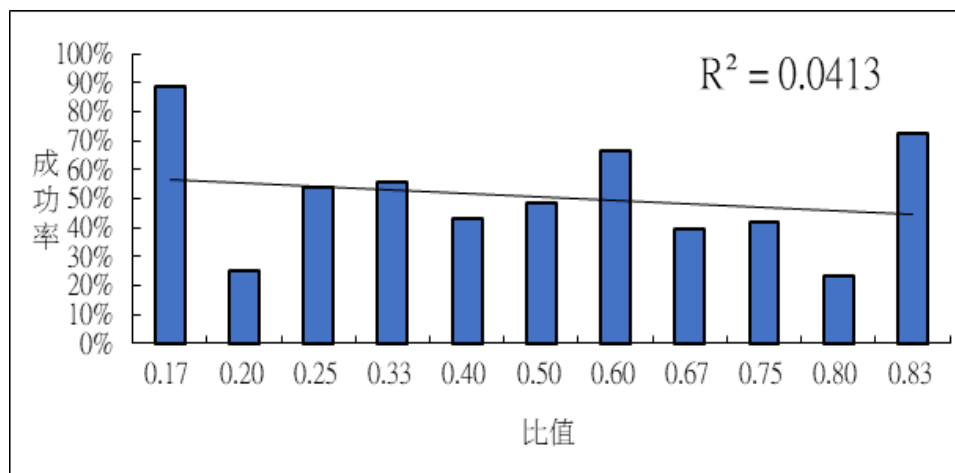
圖二：上排：向右比值上升，與成功率下降沒什麼關係。下排：向右比值下降，僅最左邊的圖有高度正相關，但只有 1vs. 4、1vs. 6 的成功率有超過 70%，其餘都低於 40%。

[重設實驗]

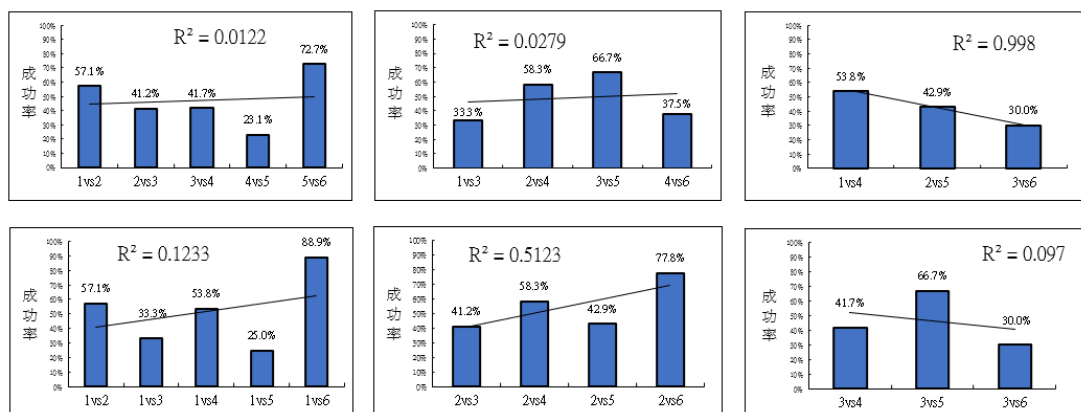


圖三：更換投影片的位置後，稍微偏向後方的投影片。

[第二次實驗]

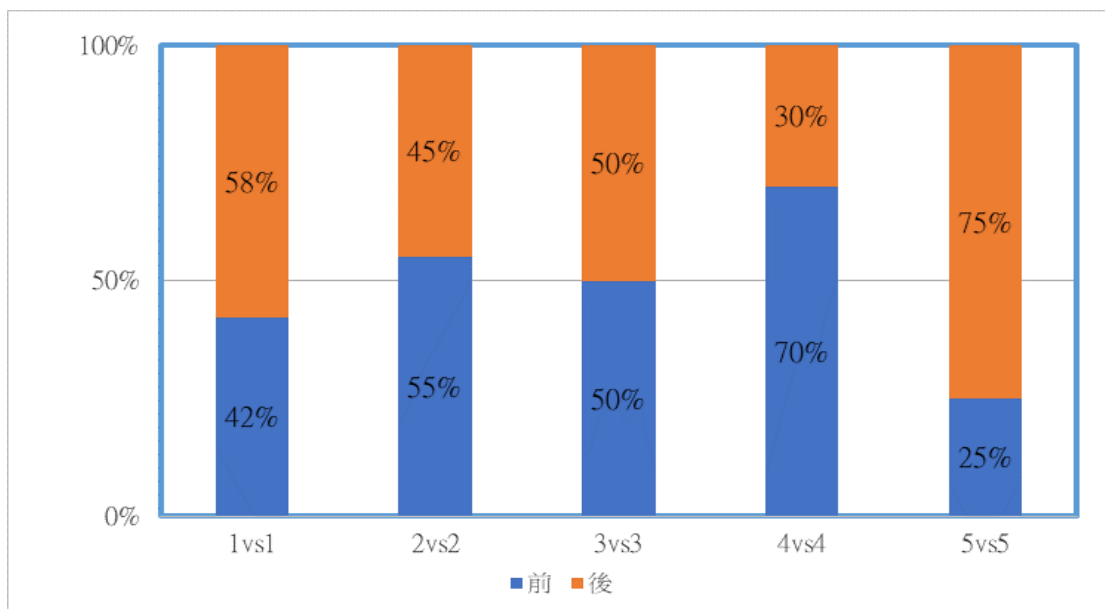


圖四：成功率和比值的關係不符合韋伯定律。



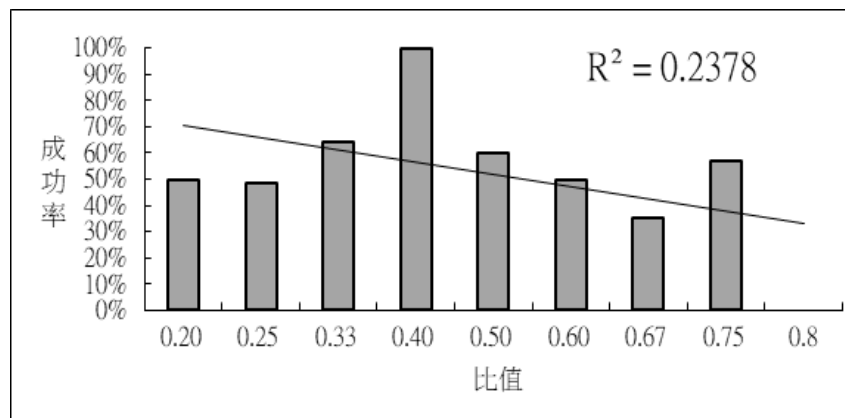
圖五：上排：向右比值上升，僅最右邊的圖呈現高度負相關，但實驗次數都低於 15 次，且成功率皆低於 60%，傾向數字小的投影片。下排：向右比值下降，僅最中間的圖有高度正相關，但只有 2vs. 6 的成功率超過 70%。

[第二次重設實驗]

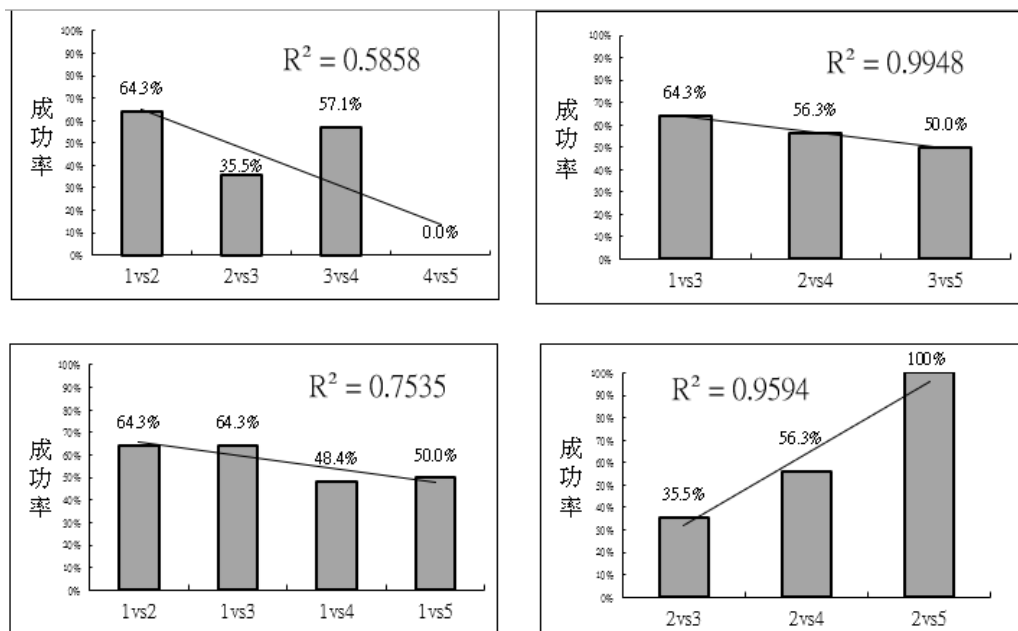


圖六：更動環境的光照後，比較沒有傾向哪一邊的投影片。5vs. 5 的測試次數只有 4 次。

[第三次實驗]

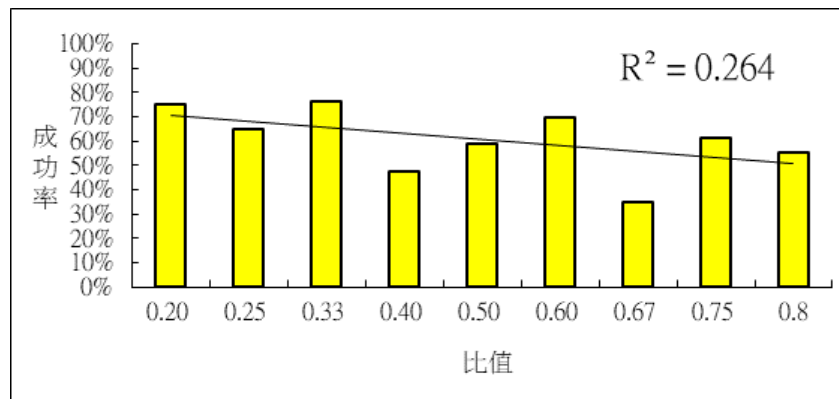


圖七：成功率和比值的關係不符合韋伯定律。比值 0.8 的組別是 4vs. 5，測試次數只有 2 次。

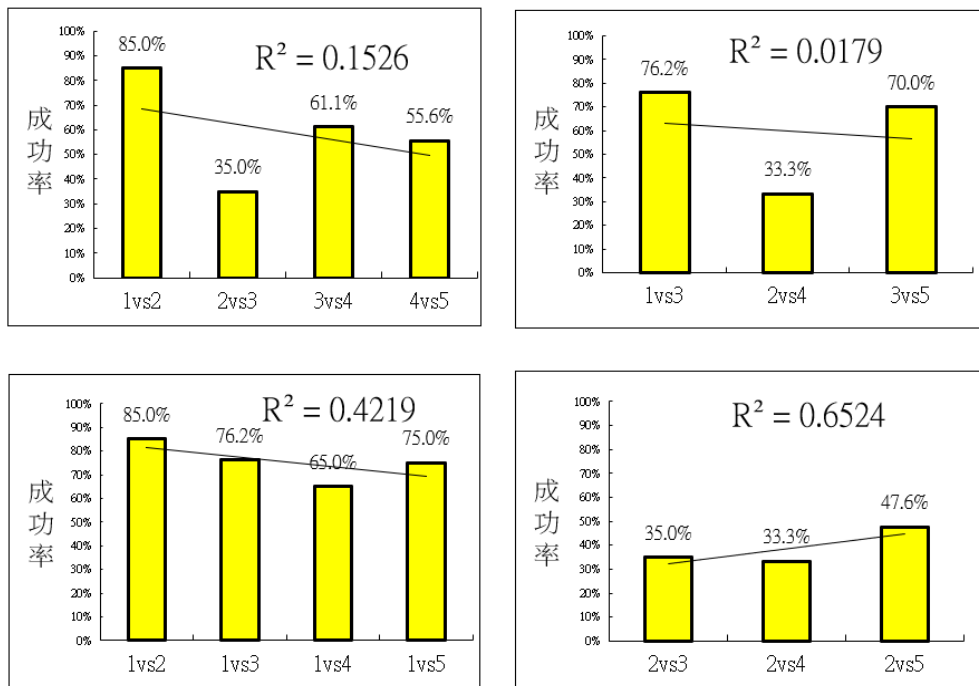


圖八：上排：向右比值上升，成功率下降，以右圖相差 2 的狀況較明顯。下排：向右比值下降，左圖成功率卻下降，右圖與成功率呈高度正相關。但 1vs. 5、2vs. 5、3vs. 5、4vs. 5 都只測試了兩次，樣本數太少。

[第四次實驗]

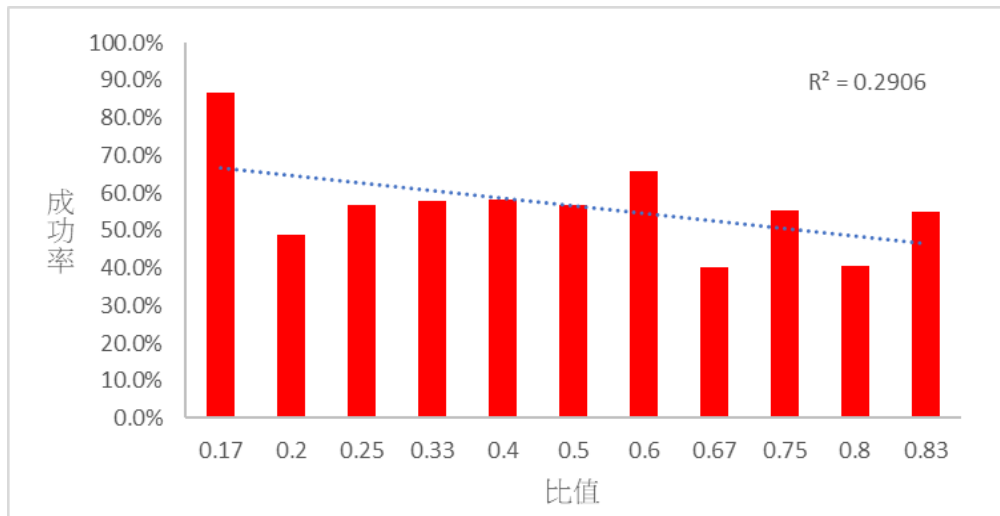


圖九：成功率和比值的關係不符合韋伯定律。

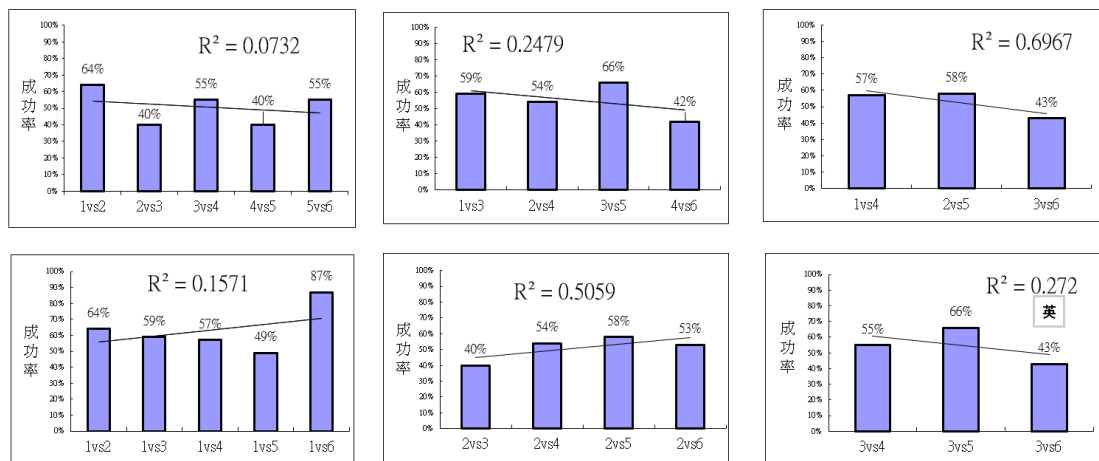


圖十：上排：向右比值上升，與成功率下降沒什麼關係。下排：向右比值下降，左圖雖然是中度負相關，但是成功率皆高於 65%，傾向數字大的投影片，右圖的成功率皆低於 50%，傾向數字 2 的投影片。

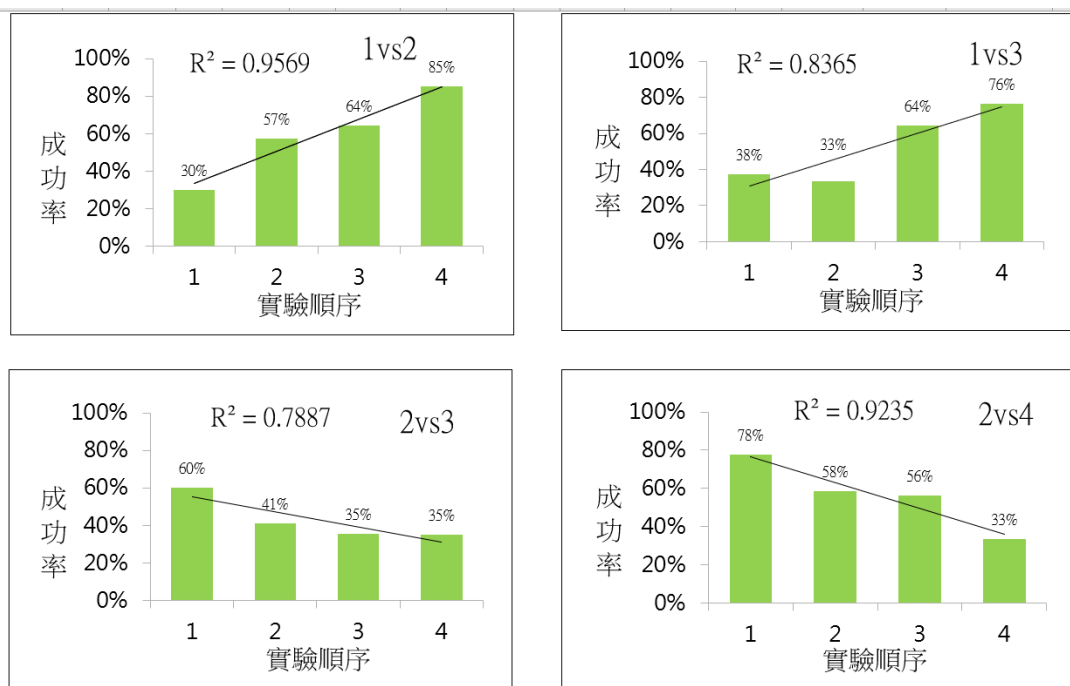
[一~四次實驗彙集]



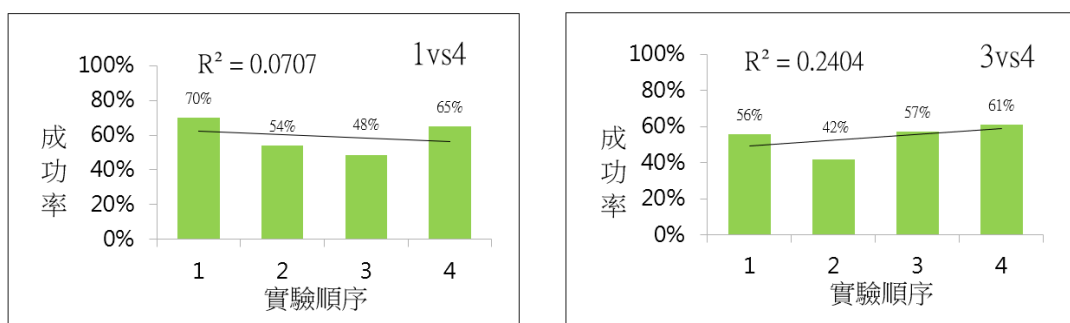
圖十一：成功率和比值的關係不符合韋伯定律。



圖十二：上排：向右比值上升，只有最右邊的圖成功率高度負相關，但成功率都低於 60%。下排：向右比值下降，成功率上升不明顯，只有中間的圖是高度正相關，但是成功率都在 60% 以下。



圖十三：上排：越到實驗後期，成功率越高，傾向數字大的投影片。
下排：越到實驗後期，成功率越低，傾向數字 2 的投影片。



圖十四：隨著實驗進行，和成功率沒什麼相關，大都在 60% 以下。

表一：四次實驗的數據。

比值	0.50	0.33	0.25	0.20	0.17	0.67	0.50	0.40	0.33	0.75	0.60	0.50	0.80	0.67	0.83
組別	1vs2	1vs3	1vs4	1vs5	1vs6	2vs3	2vs4	2vs5	2vs6	3vs4	3vs5	3vs6	4vs5	4vs6	5vs6
實驗順序	對	錯	對	錯	對	錯	對	錯	對	錯	對	錯	對	錯	對
1	次數	3	7	3	5	8	5	1	6	4	7	2	10	1	3
	成功率	30%	38%	70%	38%	83%	60%	78%	91%	30%	56%	57%	54%	44%	45%
2	次數	8	6	4	8	7	6	4	12	8	1	7	10	3	5
	成功率	57%	33%	54%	25%	89%	41%	58%	43%	78%	42%	67%	30%	23%	38%
3	次數	18	10	18	10	15	16	1	1			11	20	18	14
	成功率	64%	64%	48%	50%		35%	56%	100%		57%	50%		0%	
4	次數	17	3	16	5	13	7	15	5			7	13	6	12
	成功率	85%	76%	65%	75%		35%	33%	48%		61%	70%		56%	
加總次數		46	26	41	28	42	32	25	26	13	2	31	47	38	33
成功率		64%	59%	57%	49%	87%	40%	54%	58%	53%	55%	66%	43%	40%	42%

五、研究結果與討論

在第一次到第四次的實驗(圖一、四、七、九)，含有數字 4、5、6 投影片的實驗結果都不符合韋伯定律；(圖二、五、八、十)不管是上排固定數字差距，還是下排同一數字不同比值的組合，成功率都不符預期，沒有一致的結果，有些還出現相反的趨勢。回想在四次實驗中，我們改變了投影片的位置、魚缸周圍的光照、抽籤決定數字組合時，有些數字組合的次數太少，這些可能都會影響實驗結果。所以，我們最後把四次的數據全部加起來分析，除了有投影片 6 的組合之外，每種數字組合的樣本數最少都在 41 以上。(圖十一)成功率和比值雖然達到中度負相關($R^2=0.2906$)，但是大部分的成功率不到 60%，不符合韋伯定律；(圖十二)只有數字組合相差 3 時，成功率和比值是高度負相關($R^2=0.6967$)、投影片有數字 2 不同比值組合，成功率和比值是高度正相關($R^2=0.5059$)，但是成功率都不到 60%。(圖十四)1vs. 4、3vs. 4 隨著實驗進行，和成功率沒什麼相關，而且成功率大都在 60%以下。顯示射水魚僅具感數能力，缺乏計數能力，或是對 4 以上的數量完全沒有概念，推測射水魚的數感只有到 3。

將四次實驗的相同數字組合放在一起，可以看出(圖十三)1vs. 2 與 1vs. 3 的實驗，成功率隨著時間呈現高度正相關($R^2=0.9569$ 、 0.8365)，顯示射水魚具有學習行為，而且都偏向數字大的一方；但在 2vs. 3、2vs. 4 的成功率卻是隨著時間呈現高度負相關($R^2=0.7887$ 、 0.9235)，都偏好 2，可以推論經過四次的實驗，魚對於數量的喜好為 $2>3>1$ 。這可能是像田鼠覓食螞蟻一樣，為了覓食過程更舒適，而不選擇最多的獵物。

(圖十三)1vs. 2 與 2vs. 4 的比值都是 0.5，但是成功率趨勢卻相反，代表射水魚可能沒有辦法依比例判斷數量之大小，而是在選擇時，利用感數能力以及權衡獵物數量與覓食舒適程度，選擇噴向的數量。

六、 評鑑與檢討

我們參考蓋斑鬥魚的實驗設計，不同數字組合採用隨機的方式測試，但是後來得知斑龜的數感實驗中，同一個處理訓練五天後才換下一個數字組合，隨機的數字組合是放在最後才實驗。我們的射水魚等於一開始就採用困難模式，若有機會，可以試試斑龜的實驗設計。

射水魚的行為很有趣，但是在水族館卻很少見到。所以，我們的實驗數據全都是同一條魚貢獻的。在 4 月大地震時，牠晚上跳缸死亡，之後一直都沒有再看到有在賣射水魚了，我們也無從得知射水魚的數感是不是有個體的差異。

七、參考資料

2016，楊璨伊、焦傳金。烏賊會算數—烏賊的數感與風險評估。科學月刊，564。

2017，焦傳金、楊璨伊。烏賊也知 1、2、3。科學人雜誌，183，72~76。

2020, Andreas Nieder. 動物與數字 vs. 動物的數能力是天賦還是演化。

2020，陳芷儀，范芷甯，朱子鈞。算數「蓋」厲害-蓋斑鬥魚的數感與攝食偏好。

2021，林鳳君，入侵與原生淡水龜的數感認知比較。

2024, Hayashi et al. Counting Nemo: anemonefish *Amphiprion ocellaris* identify species by number of white bars. *Journal of Experimental Biology* (2024) 227, jeb246357. doi: 10.1242/jeb.246357

<https://www.newton.com.tw/wiki/%E5%B0%84%E6%B0%B4%E9%AD%A/19657384> 中文百科全書