

中華民國第 56 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

高級中等學校組 動物與醫學學科

最佳創意獎

052007

水中魅影 - 蝦子後抽運動機制之研究

學校名稱：國立岡山高級中學

作者：  高二 李采娟  高二 侯光哲  高二 謝依均	指導老師：  林逸賢  張瓊丹
---	-----------------------------

關鍵詞：蝦子、後抽運動、位移速度

## 摘 要

我們想要探討蝦子後抽運動的表現，以及與體型變化的關聯性。我們利用攝影機高速攝影的功能，拍攝蝦子後抽運動的畫面，並利用軟體轉換成動作分解圖，以獲得運動時的形態變化量值。結果顯示蝦子的體重與體長，分別於彈跳角度、位移距離無關聯性，但是體長與最大速度有正相關；體節寬度對速度的關聯性，以頭節寬度的影響最為明顯；體節擺動以第三體節與尾節的彎曲變化，與最大速度有明顯的相關性，我們推測蝦子的運動應該是藉由增加對水的推力與減少對水的阻力，來提升水中游泳的速度。蝦子若有進行連續第二次的後抽運動，則主要是擺動尾節為運動推力，而速度較第一次低，不過能量消耗可能也比較少。

## 壹、 研究動機

我們在學習生命現象的單元時，老師提及生物感應與運動的例子，有部分是說明掠食者與獵物之間的互動，兩者間的關係演化至此，真的是很神奇又有趣。有次我們一群人去逛夜市，經過釣蝦攤位的時候，突然有人要伸手進去抓蝦，看到許多蝦子開始跳動，甚至有些個體還跳到地上，而在水中也只能看到一些移動的身影。後來我們開始思考，蝦子像湯匙般的體型，又加上牠們又只能往內收縮，會讓牠們往後抽動，但要是掠食者在後方的時候，那不就剛好被吃掉？還是他們往後移動的時候有特別的機制呢？這引起了我們想去研究蝦子後抽運動的動機。

## 貳、 研究目的

我們想去探討蝦子體型與後抽運動之關聯性，並試著從中歸納出後抽運動的機制與策略。因此，我們提出幾個想要探討的問題：

- 一、蝦子對不同部位刺激的反應
- 二、蝦子後抽運動的表現
- 三、蝦子體型與後抽運動的關係
- 四、蝦子體節彎曲與後抽運動的關係
- 五、蝦子連續後抽運動的初探

## 參、 研究設備與器材

一、研究物種：多齒新米蝦(*Neocaridina denticulate*)(圖一)，是俗稱黑殼蝦類的一種，體色變化多，有黑褐色、紅棕色、藍綠色等，有些個體會呈現半透明狀，分佈在乾淨的溪流中，但現在已被人工養殖，廣泛地供給水族飼養使用，可做為魚類的餌料(註一)。因為取得方便，而且此蝦種可定位為被掠食的角色，剛好可做為我們探討蝦子在受刺激影響時，在水中運動的物種。



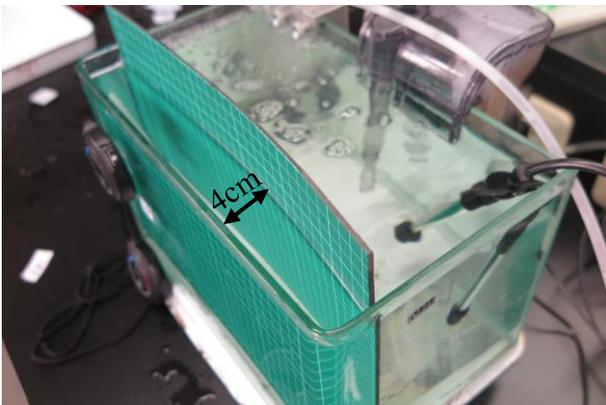
圖一 多齒新米蝦(*Neocaridina denticulate*)

二、圈養環境：我們將蝦子個別飼養在容量約為 300 cc 的塑膠盒中，再置於水溫固定為 26°C 並且持續打氣的水槽中(圖二)；供應水族館專用的蝦料來餵食，為避免蝦子因飢餓導致動物行為的誤差，所以我們均供應足夠且可見殘留的食物量給蝦子食用，平均約 1 到 2 天便進行更換與補充。



圖二 飼養蝦子的水槽

三、拍攝裝置與器材：我們設置一個大小約 10 公升的水族箱來做為拍攝蝦子運動的環境，其中水溫也是保持在 26°C，並且持續打氣以維持水中的含氧量。為了讓蝦子可以在同一平面運動，以方便拍攝時的紀錄，我們在水族箱的前面(拍攝面)，用繪有 1cm<sup>2</sup> 為單位的切割板，隔出寬度約 4cm 的空間(圖三)，來做為蝦子運動的場所。為了拍攝蝦子的快速運動，我們租借了型號為 SONY FS700r 的攝影機(圖四)，此機具有超慢動作(Super Slow Motion, SSM)的拍攝功能，最高能拍攝至 960fps (frame per second, 即每秒可拍攝的畫面數)，以呈現蝦子運動時的分解動作。最後把錄製完成的影片，利用播放軟體 GOM Media Player 進行靜態的畫面截取，並利用影像編輯軟體 PHOTOSHOP，將蝦子於不同時期的運動姿態，轉換成點線圖，以便測量相關量值。



圖三 拍攝蝦子運動之環境



圖四 SONY FS700r 與拍攝的場景

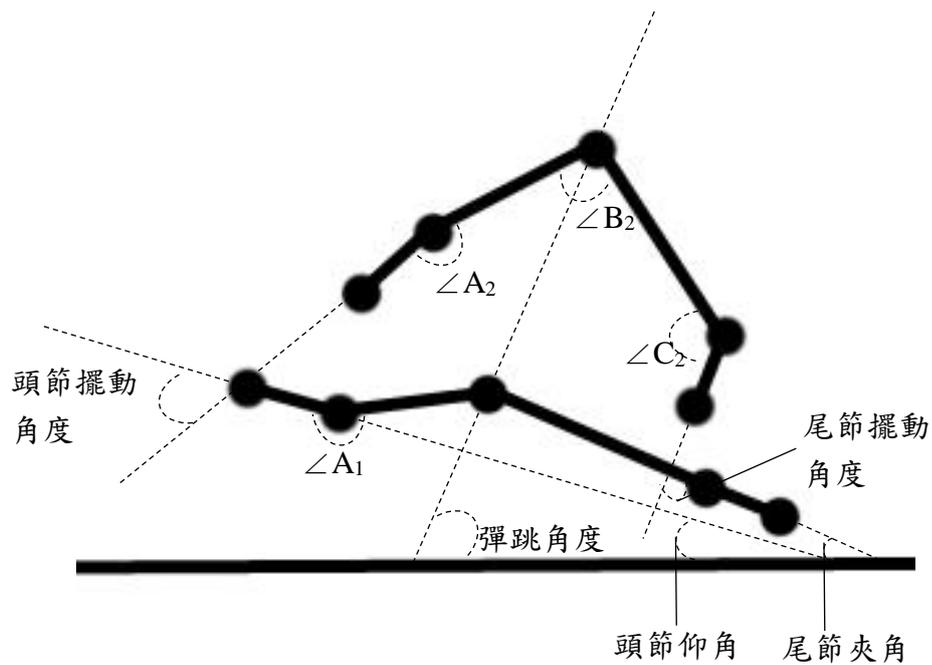
## 肆、 研究方法

一、蝦子形態的測量與標記：我們測量每一個體的重量，以及外部形態，如體長、體寬(包括頭節前、後端、第二、三、L 節及尾扇的寬度；L 節為體節最窄處)，以及觸鬚長度(為 6 根觸鬚的總長度)。為了讓運動的分析更加清楚，我們在蝦子的外殼上，用立可白點上了五處記號，分別為頭節前、後端，第三體節，L 節以及尾扇(圖五)，以便觀察身體運動的趨勢。



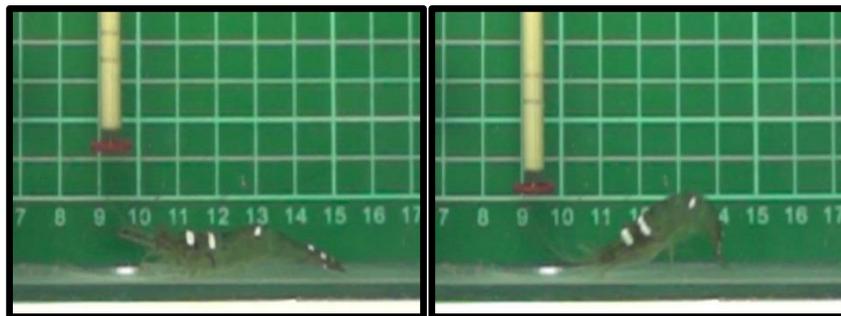
圖五 蝦子外部形態測量部位說明圖

二、測量的量值：我們分別測量運動變化時的形態量值，例如彈跳角度、體節擺動角度、彎曲角度、以及頭尾節與地面的夾角等，如圖六所示，其中  $\angle A_1$  與  $\angle A_2$  分別代表最初兩個時段頭節彎曲角度的例子。我們測量第三體節( $\angle B$ )於單位時間內移動長度，做為蝦子的位移距離。因為從我們實驗過程中的觀察，發現蝦子運動的動力主要是來自身體於靜置時，瞬間收縮產生的推力以造成迅速後抽，而大部分的個體於運動之後便呈現自然落下的現象，所以我們用以分析數據的時段，主要是取開始後抽移動後的前 7 個畫面(每個畫面間隔 0.012 秒)。



圖六 蝦子體型測量位置示意圖。

三、拍攝的步驟：將蝦子置於拍攝池中，待蝦子底部靜止不動時，才開始進行刺激與拍攝。我們製作了一個類似原子筆筆芯伸縮的機械彈跳裝置，讓每一次的刺激力度均能控制一定的大小。開始進行測試時，再將此裝置的刺激端，分別置於蝦子的頭部或尾部上方約 2 公分處，以避免裝置彈出時撞擊到蝦子，而干擾到蝦子的反應與運動模式(圖七)，最後再進行行為的紀錄與影像的轉檔。



圖七 刺激物的彈跳與蝦子的相對位置

四、數據分析：為探討兩類因子之間的關係，我們進行簡單迴歸分析；若是探討多因子與特定因子的關係，則是進行多元迴歸分析。

## 伍、 研究結果

### 一、蝦子對不同部位的刺激之反應

我們總共測試了 19 隻蝦子，共刺激了 73 次，包括前方頭部 29 次與後方尾部 44 次，結果蝦子運動的反應為往前移動共 9 次，往後移動共 27 次，其中往後移動還可分成緩慢移動 4 次，以及迅速後抽 23 次，統整如表一所示。

表一 蝦子對前後刺激的反應

刺激		反應		
位置	次數	前移	後移	
			緩慢移動	迅速後抽
頭部	29	0	3	19
尾部	44	9	1	4
總計	73	9	4	23

若將蝦子行為模式分成前移與後移兩種類型來比較，則這兩類蝦子的形態結果如表二，結果顯示這兩類型的蝦子於體長、體重與觸鬚長度並無明顯的差異。

表二 受刺激產生不同反應蝦子之形態比較

	反應		T	顯著性
	前移(n=9)	後移(n=27)		
體長	5.52±0.78	5.62±0.83	-0.303	0.764
體重	1.79±0.82	1.93±0.80	-0.449	0.657
觸鬚長度	12.23±3.06	12.52±3.02	-0.243	0.809

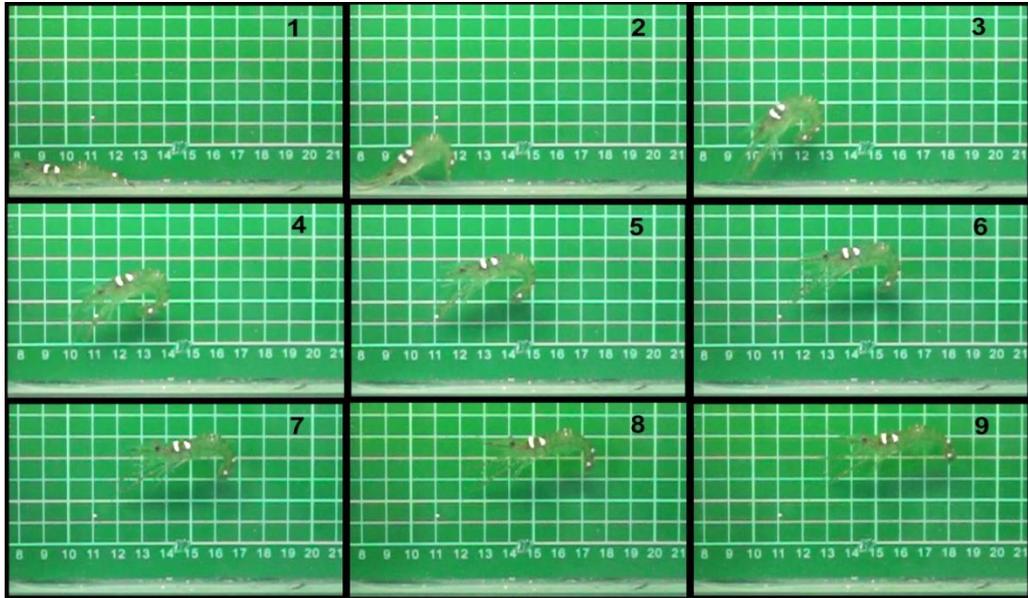
我們再針對刺激前方頭部的個體所表現出的後移反應，分成緩慢移動與迅速後抽運動兩類，並進行形態的比較(如表三)，結果顯示兩類運動模式的個體，在體長、體重與觸鬚長度的比較，僅在體長有顯著的差異性。

表三 不同類型後移反應的蝦子之形態比較

	後移反應		T	顯著性
	緩慢移動(n=3)	迅速後抽(n=19)		
體長	6.10±0.14	5.59±0.83	2.490	0.022
體重	2.38±0.30	1.91±0.82	0.952	0.353
觸鬚長度	12.03±1.04	12.87±3.52	-0.403	0.691

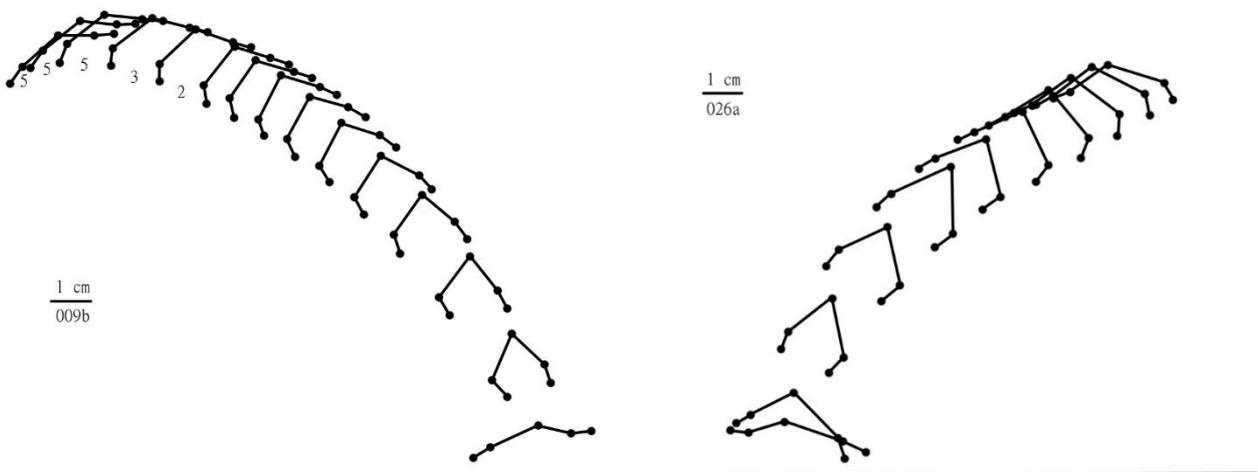
## 二、蝦子後抽運動之拍攝與呈現

我們利用 SONY FS700r 高速攝影機拍攝蝦子的後抽運動，再將影片利用播放軟體 GOM Media Player 進行畫面截取，每畫面的間隔時間約為 0.012 秒，舉例如圖八。



圖八 蝦子後抽運動連續截取畫面

我們將影片中截取出來的畫面，利用軟體重新標記於圖片上，並將不同時期的畫面所繪製的圖片疊合於一張圖片之中，我們稱之為動作分解圖，範例如圖九。大部分個體的運動軌跡類似斜拋物線，但因運動過程中身體體節的擺動不同，導致軌跡也有所差異。我們藉由個體的動作分解圖去測量相關的角度與距離的量值。

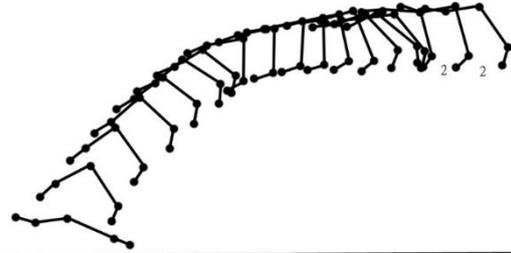
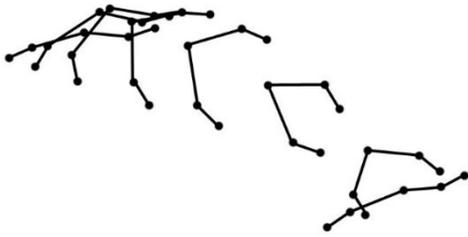


A. 斜拋物線軌跡

B. 斜拋物線軌跡

$\frac{1 \text{ cm}}{064a}$

$\frac{1 \text{ cm}}{059e}$

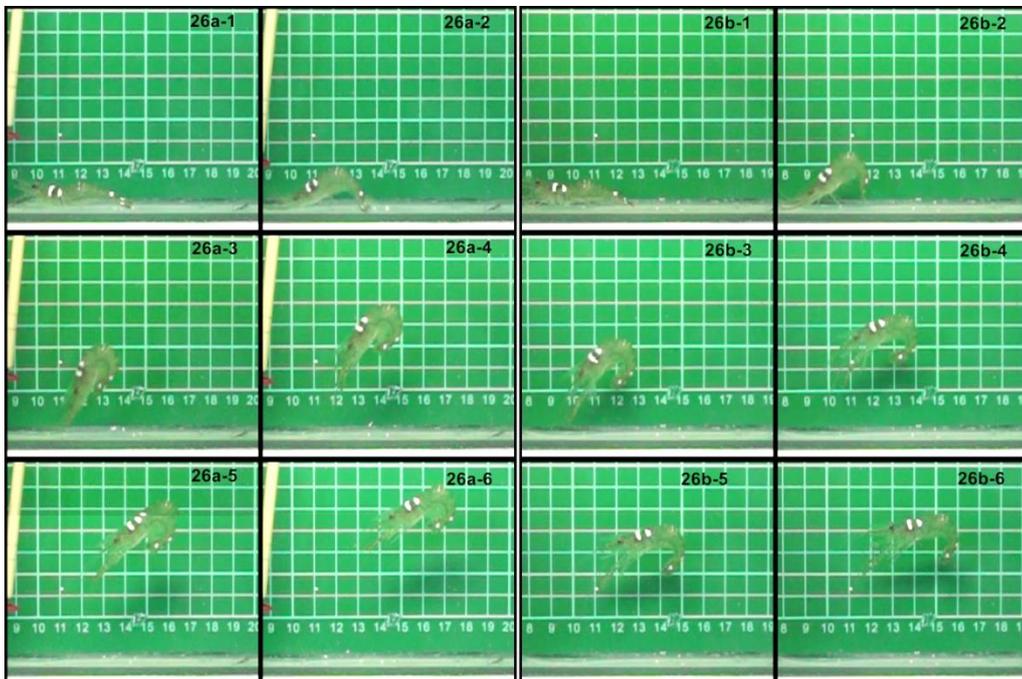


C. 快速打開體節降速

D. 多次彈跳

圖九 後抽運動動作分解圖

我們也發現到同一個體於不同的測試中，像是個體彈跳的角度、身體體節彎曲的程度、水平與垂直位移的距離等運動特徵的表現，也不盡相同(圖十)。



圖十 同一個體於不同測量之比較。

### 三、蝦子後抽運動機制之探討

關於蝦子後抽運動的實驗，我們總共紀錄了 16 隻個體，共 24 次的運動行為。這些蝦子的體長為  $5.12 \pm 0.73$  公分，變異係數為 14.19%；體重為  $1.89 \pm 1.04$  公克，變異係數為 54.93%。

#### (一) 後抽運動的量值呈現

我們分析了 24 次的後抽運動，表現結果如表四所示。

表四 蝦子後抽運動之表現數據

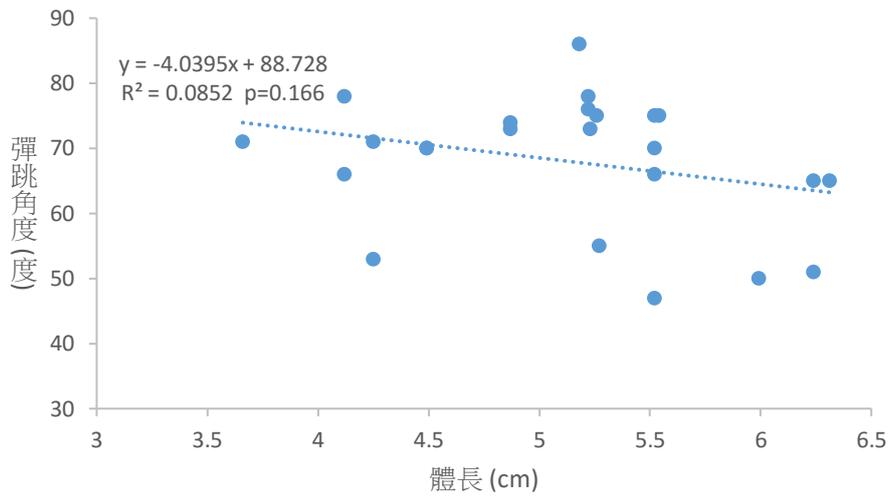
	平均±標準差	最大值	最小值	變異係數
彈跳角度(度)	$68.04 \pm 10.05$	86	47	14.78%
水平位移長度(cm)	$7.05 \pm 1.78$	10.80	3.80	25.30%
垂直最高高度(cm)	$6.87 \pm 2.12$	11.80	4.40	30.87%
最大移動速度(cm/s)	$211.11 \pm 46.93$	308.33	116.67	22.23%
最大加速度( $\text{cm/s}^2$ )	$8391.20 \pm 5806.23$	19444.44	-1388.89	69.19%

註：水平位移長度為蝦子往後抽離到最高點時，與靜止時的水平位移距離

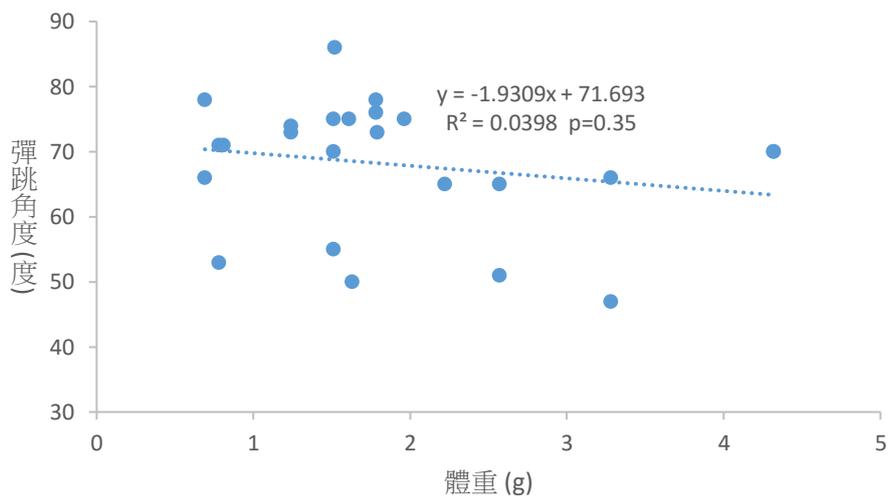
#### (二) 蝦子體型與後抽運動的關聯性

##### 1. 體型與彈跳角度的關係

我們將個體的體長和體重，分別與彈跳角度進行迴歸分析，結果顯示兩者與彈跳角度的無明顯關聯性(圖十一、圖十二)。我們猜測蝦子停棲於底部時，身體與地面的距離，以及頭節、尾節在抽動時擺動的角度，都有可能影響彈跳角度的改變，所以我們測量蝦子停棲時身體上 5 處標記點與地面的距離，頭、尾兩體節靜置時與地面的夾角，以及運動瞬間時擺動的角度。身體 5 標記點的離地距離整理如表五；頭節仰角為  $13.56 \pm 7.80$  度，擺動的角度為  $49.88 \pm 21.47$  度；尾節夾角為  $30.81 \pm 9.23$ ，擺動的角度為  $65.96 \pm 23.32$  度。我們將這三類因子分別與彈跳角度進行多元迴歸分析。結果顯示身體離地距離以及頭、尾節擺動的角度，與彈跳角度均沒有明顯相關性(表六、表七)，頭、尾體節與地面的夾角有一些負相關性(表八)。



圖十一 蝦子體長與彈跳角度之關係圖。



圖十二 蝦子體重與彈跳角度之關係圖。

表五 蝦子靜置時身體離地距離。

	頭節前端	頭節後端	第三體節	L 節	尾扇
離地距離	1.38±0.35	1.25±0.23	1.43±0.25	0.95±0.32	0.66±0.33
變異係數	25.10%	18.48%	17.34%	33.99%	50.86%

表六 身體離地高度與彈跳角度之多元迴歸分析。

模型	標準化係數 $\beta$	T 值	顯著性
頭節前端離地高度	.667	.801	.434
頭節後端離地高度	-1.032	-1.288	.214
第三體節離地高度	.477	.797	.436
L 節離地高度	-.910	-1.497	.152
尾扇離地高度	.825	1.522	.145

註： $\beta$  係數的絕對值愈大，表示該自變項對依變項的影響力愈大。

表七 頭、尾節擺動角度與彈跳角度之多元迴歸分析。

模型	標準化係數 $\beta$	T 值	顯著性
頭節擺動角度	-.284	-1.280	.215
尾節擺動角度	-.356	-1.602	.124

註： $\beta$  係數的絕對值愈大，表示該自變項對依變項的影響力愈大。

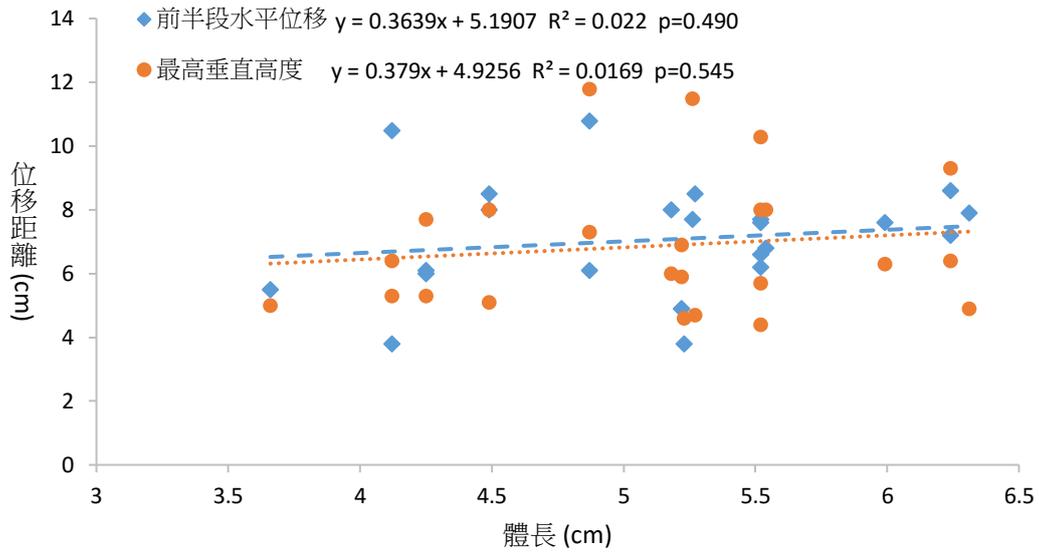
表八 頭節仰角、尾節夾角與彈跳角度之多元迴歸分析。

模型	標準化係數 $\beta$	T 值	顯著性
頭節仰角	-.335	-1.777	.090
尾節夾角	-.378	-2.009	.058

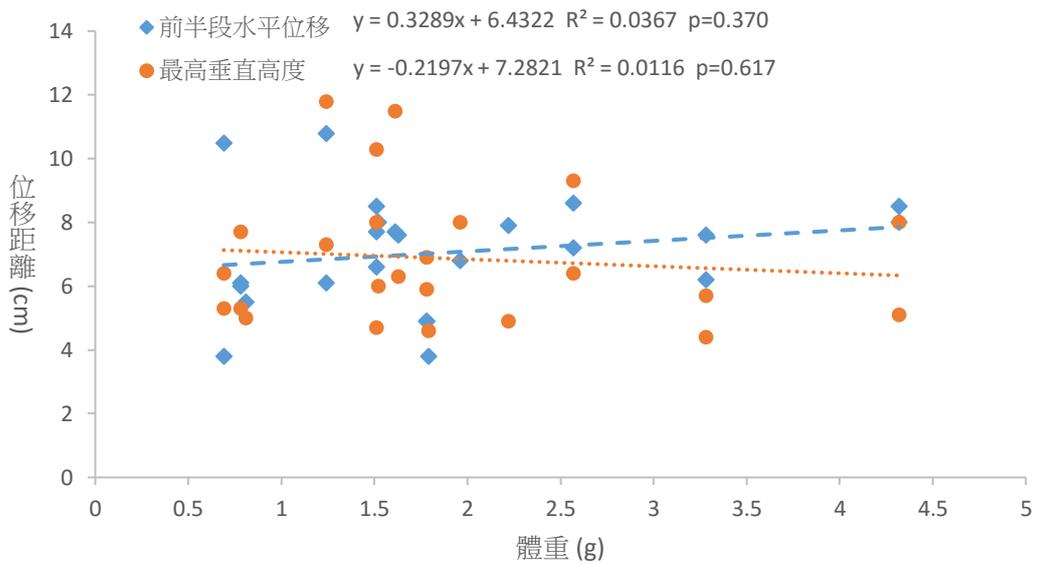
註： $\beta$  係數的絕對值愈大，表示該自變項對依變項的影響力愈大。

## 2. 體型與位移距離的關係

我們很好奇蝦子體型大小是否與牠們進行後抽運動後的移動距離有關，所以進行體型(包括體長、體重)與位移(水平、垂直)距離的迴歸分析。結果顯示體長和體重，分別與水平和垂直位移，並沒有明顯的相關性(圖十三、圖十四)。



圖十三 蝦子體長與位移距離之關係。

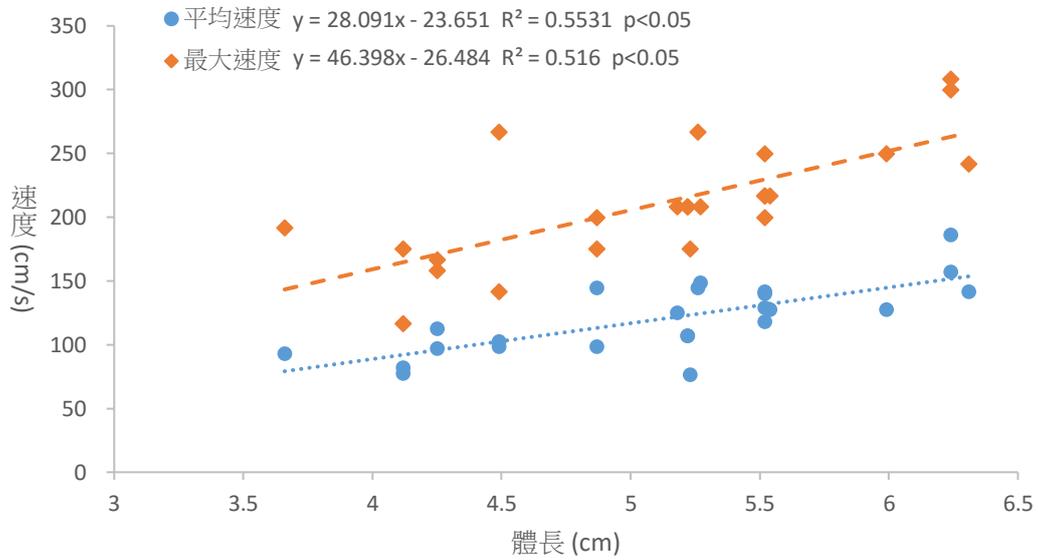


圖十四 蝦子體重與位移距離之關係。

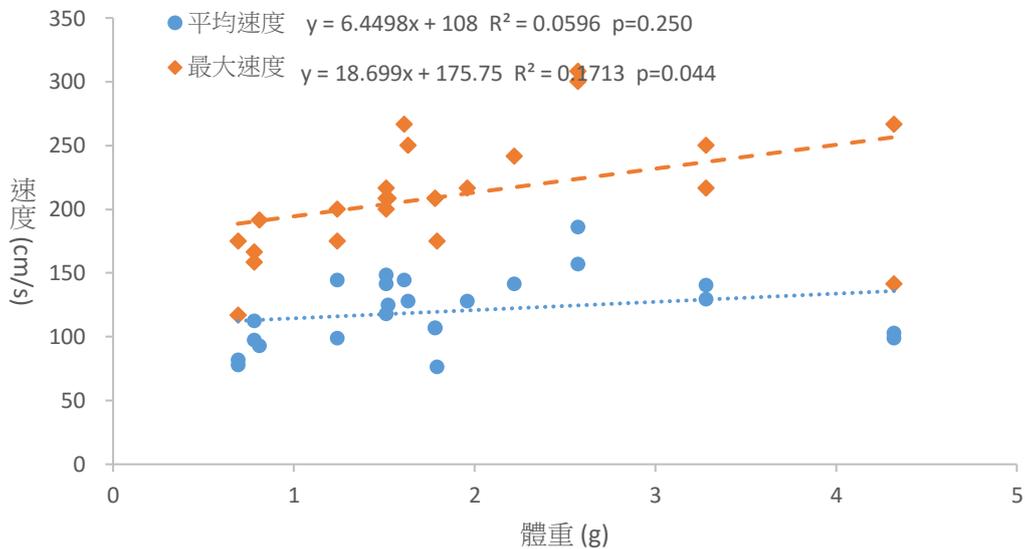
### 3. 體型與位移速度的關係

蝦子因為後抽運動帶來移動的表現，最主要受一開始身體收縮的影響，之後是讓身體順著慣性往後移動，所以在這段時間內的移動速度是不同的。因此，我們個別分析了體型與位移時的最大和平均速度之關係。結果顯示

體長分別與最大與平均速度有明顯的關聯性(圖十五)，體重只與最大速度有明顯的關聯性(圖十六)。



圖十五 體長與平均、最大速度的關係。

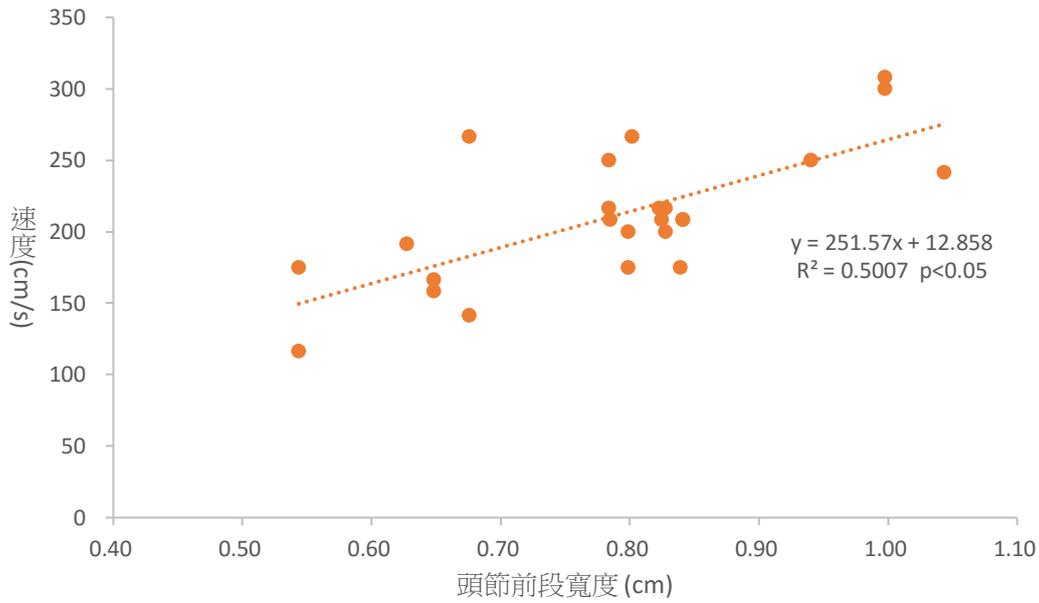


圖十六 體重與平均、最大速度的關係

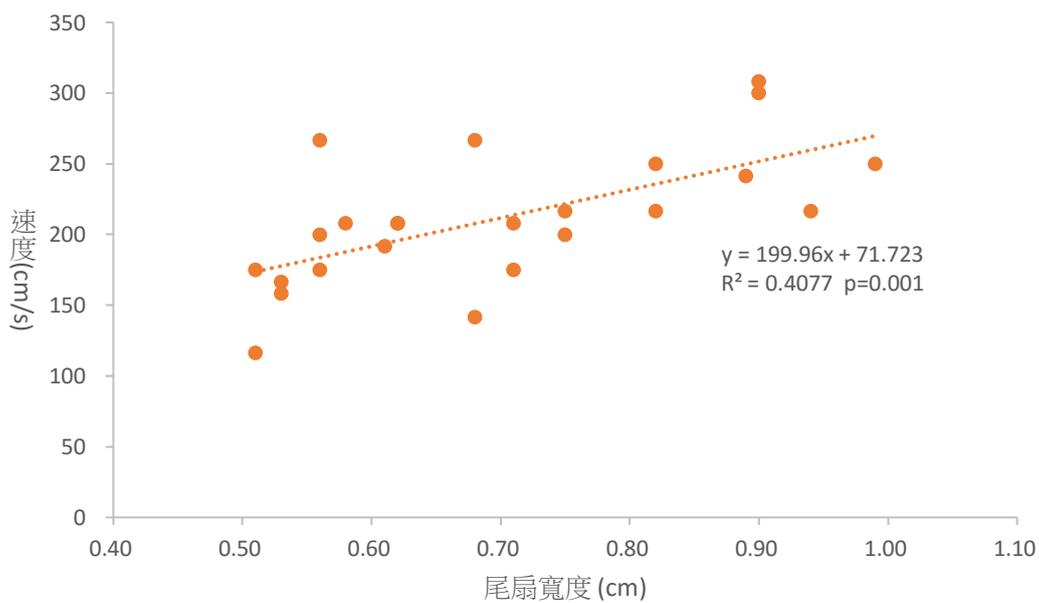
#### 4. 體節寬度與位移速度的關係

我們個別分析各體節的寬度與最大速度的相關性。結果顯示只有頭節

前端與尾扇的寬度與最大速度呈現明顯的相關性(圖十七、圖十八)，與其他體節(頭節後段、第二、第三與L節)的無關聯性(結果未呈現)。若我們再將這些體節寬度一併與最大速度進行多元迴歸分析，結果顯示影響最大的因子是頭節前段寬度，其次是第三體節寬度，其他體節寬度均無明顯關聯性(表九)。



圖十七 頭節前端寬度與最大速度的關係。



圖十八 尾扇寬度與最大速度的關係。

表九 蝦子體節寬度與最大速度之多元迴歸分析。

模型	標準化係數 $\beta$	T 值	顯著性
頭前節寬	.690	2.328	.033
頭後節寬	-.221	-.580	.570
第二節寬	-.036	-.117	.908
第三節寬	-.343	-1.957	.067
L 節寬	.175	.753	.462
尾扇寬度	.350	1.394	.181

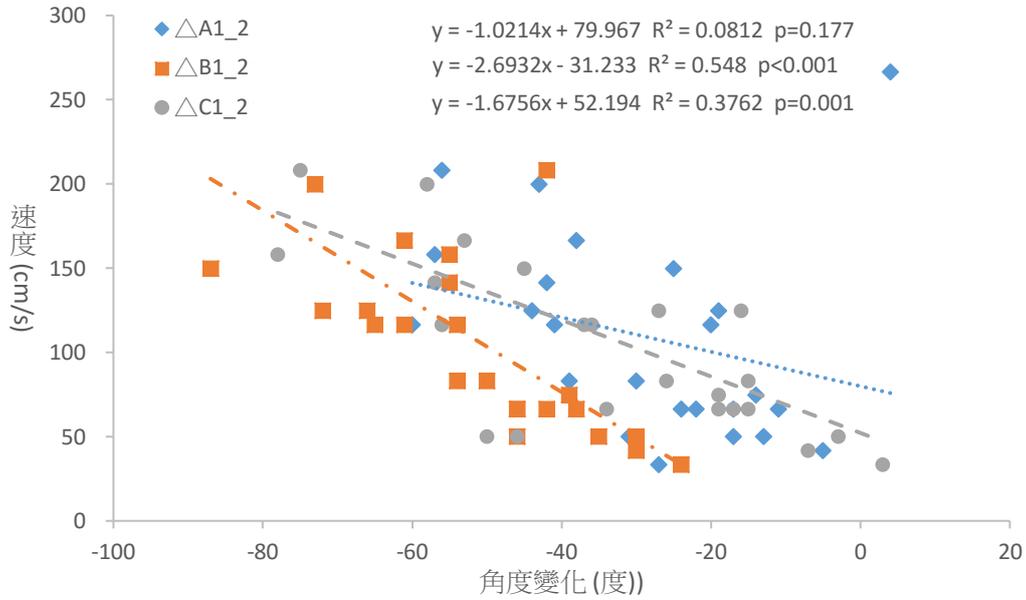
註： $\beta$  係數的絕對值愈大，表示該自變項對依變項的影響力愈大。

### 5. 體節擺動與位移速度的關係

我們從後抽運動動作分解圖中，分析蝦子在不同時間體節擺動所形成的夾角角度(表十)，與速度的關聯性。因為蝦子於剛開始後抽的姿勢改變對速度的影響最為明顯，所以我們是用最初的角度變化( $\Delta\angle A1\_2$ ， $\Delta\angle B1\_2$  以及  $\Delta\angle C1\_2$ )來做為探討因子。結果顯示  $\angle B$  與  $\angle C$  的變化量與速度具有明顯的負相關， $\angle A$  則無如此的關係(圖十九)。我們再將三個角度變化與速度進行多元迴歸分析，結果顯示影響最明顯的是  $\angle B$ ，其次是  $\angle C$ ， $\angle A$  則沒關聯性(表十一)。

表十 不同時間體節彎曲的角度

	時間 1	時間 2	時間 3	時間 4	時間 5	時間 6	時間 7
$\angle A$	197.7±13.7	168.9±16.1	157.0±15.6	164.2±14.3	170.7±14.8	178.7±12.9	183.9±12.8
$\angle B$	150.0±7.4	97.8±17.1	86.1±16.1	99.8±15.4	107.5±15.9	114.0±16.7	120.9±16.1
$\angle C$	171.1±13.3	137.0±15.3	119.1±14.4	126.7±16.2	125.4±10.9	126.8±9.7	135.0±12.6



圖十九 體節彎曲的角度變化與速度之關係。

表十一 蝦子體節彎曲角度與速度之多元迴歸分析。

模型	標準化係數 $\beta$	T 值	顯著性
$\triangle \angle A1\_2$	.048	.347	.733
$\triangle \angle B1\_2$	-.614	-4.989	.000
$\triangle \angle C1\_2$	-.460	-3.228	.004

註： $\beta$  係數的絕對值愈大，表示該自變項對依變項的影響力愈大。

### (三) 連續二次後抽運動的比較

在實驗的過程中，有紀錄到幾次蝦子在離開地面後，會在水中再進行第二次的後抽運動，我們列舉兩隻個體的紀錄(表十二)。結果顯示第一次後抽運動時身體彎曲的變化程度比第二次來得明顯，而且有較大的位移(移動速度)。

表十二 蝦子連續兩次彈跳的比較

個體 編號	彈跳 次數	$\angle A$			$\angle B$			$\angle C$			位移
		$\angle A1$	$\angle A2$	變化量	$\angle B1$	$\angle B2$	變化量	$\angle C1$	$\angle C2$	$\triangle \angle C$	
059e	1	206	165	-41	151	97	-54	180	124	-56	1.4
	2	188	168	-20	114	80	-34	115	118	3	1.1
77b	1	196	140	-56	144	102	-42	180	105	-75	2.5
	2	169	166	-3	122	61	-61	132	116	-16	2

## 陸、 討論

### 一、蝦子對刺激之反應

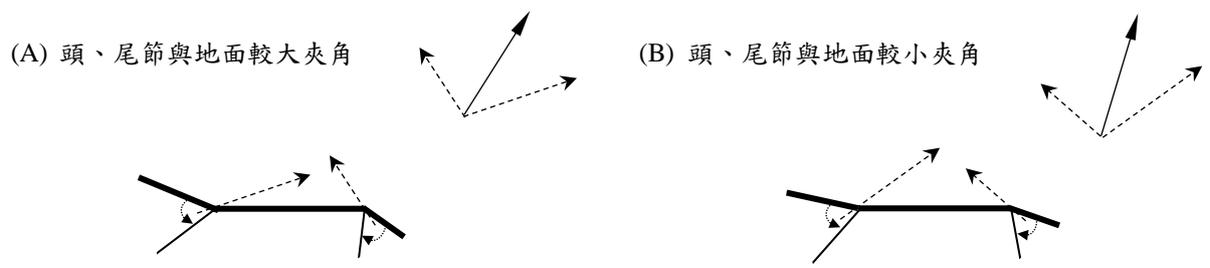
從我們的結果可以發現，蝦子對於前方的刺激是比較敏感的。在我們進行測試的過程中，發現在刺激物靠近蝦子的時候，蝦子頭部的觸鬚會開始異常的擺動，甚至會接觸到刺激物。所以我們推測可能是因為刺激物彈跳的觸擊，或是引帶的水流(水壓的改變)，刺激到蝦子的觸鬚，就會造成蝦子往後移動的反應。這個觸鬚擺動的現象，在我們進行尾部的刺激時，大部分的個體並沒有表現出來，或許也是因此才沒有明顯的運動反應出現，但是仍有部分個體的觸鬚較長，偵測到刺激時亦會做出反應。另外我們發現，體型較大的個體，靜置於底部時，可用其步足將身體撐起，當有刺激干擾時，大部分都是以步足進行緩慢移動(表三)，另外，我們也猜測體型較大的個體若進行後抽運動，則會耗損較多的能量，所以若刺激影響不明顯的狀況下，蝦子可能選擇步行的方式來移動；相對的，體型較小的個體則多是用彈跳進行移動。

### 二、蝦子體型大小與後抽運動的關係

蝦子於底部停棲的時候，身體與地面的距離，提供了蝦子體節擺動的空間，造成推力的差異，進而改變運動時的彈跳角度。我們推測當蝦子的頭節仰角越大時，因向下擺動而造成往後方的力；尾節與地面夾角越大時，能擺動的角度以往前為主，所以造成推力方向朝向斜後方，兩力合力會造成蝦子的運動角度偏向水平(示意圖如圖二十\_A)。若頭節仰角越小，會因向下擺動而造成往上移動的力量；尾節的夾角越小，擺動時所造成的反作用力為朝上，這兩體節所形成的合力，會帶動蝦子呈現垂直方向的移動，所以才會有較大的彈跳角度(示意圖如圖二十\_B)。或許是因為這個關係，頭、尾節與地面的夾角才會與彈跳角度呈現負相關性。其他關於研究(註七)也說明，當蝦子停棲於底部時，因為身體的伸屈狀態/角度的差異，會影響到運動軌跡的方向，像是蝦子若是在底部平躺時進行抽動，則會造成個體垂直抬升的運動，這與我們分析的結果是相符的。

從斜拋物線的公式推算，想要有最大的水平移動距離，彈跳角度應該是 45 度。我們實驗的結果顯示彈跳平均角度約為  $68.04 \pm 10.05$  度，最大角度甚至達到 86 度，表示蝦子

的移動方向是有點往上彈跳，若以此狀態自然落下的話，其實不會獲得遠離刺激物的最大距離。所以我們推測蝦子在受到刺激的時候，並沒有一定的模式進行彈跳，應該只求迅速逃離而已，這種行為模式在其他動物亦可見(註二)。不過，我們發現到蝦子垂直與水平的移動距離比約是 1:1(表四)，這又跟斜拋 45 度的軌跡相似，這其中似乎存在許多因子，像是身體形態、運動阻力等，如何影響運動的表現，都值得我們未來持續探討。



圖二十 蝦子頭、尾節擺動造成移動合力之示意圖。粗黑實線為蝦子停棲時的姿態示意圖。右上方的小圖為合力的模擬圖。→ 表體節擺動的方向；- - -> 表體節擺動造成的各別分力；➤ 表頭、尾兩體節擺動所形成的合力。

從我們的分析中，可以發現體長與移動速度的關係，比體重來得明顯。我們推測可能是因為體節長的個體，在水中擺動時帶來體節對水的擾動較為明顯，所以造成的推力也較大，因此會有比較大的速度。Arnott et al. (1998)指出褐蝦 *Crangon crangon* 的移動速度並非與體長為完全的正相關，而是有一個峰值(peak)，亦即在特定(非最大)體長時會有最大的移動速度，因為體型太大會承載較重的甲殼重量。這個體長與速度的關聯性在我們的實驗中並沒有發現，但是在體重與速度的分析中，好像有類似的關係(圖十六，體重在 2~3 克之間的個體，有較大的移動速度)。

我們原本預期體型較大的蝦子在受到刺激後，應該會有較大的移動距離，但結果並非如此，只發現可能會有較大的移動速度而已(位移距離與速度的相關性極低，未呈現)。我們推測蝦子的後抽運動，主要目的應該是在於離開刺激物的「速度」，而非「距離」，也因蝦子身體呈現不對稱的形態，所以導致如此的後抽逃離方式充滿不確定性(註七)，路線不易被掠食者預測，可增加生存機會；此外，蝦子可能也會採取躲藏、保護色等避敵的策略，但是實驗過程中並沒有針對這些方面進行測試。

### 三、蝦子體節寬度與後抽運動速度的關係

我們一直以為尾扇對於蝦子的移動速度有明顯的影響，但是在分析後卻發現尾扇寬度與速度的關聯性消失了(表九)，顯示尾扇對蝦子的運動無關嗎？這個結果令人我們感到意外。Arnott et al. (1998)呈現 *C. crangon* 後抽運動的影像，顯示頭部的觸鬚與尾部的甲殼均會打開成扇形，以促進運動的進行，而且尾扇的影響較為明顯，但我們的實驗結果顯示並非如此。推測原因可能是我們測量尾扇的寬度，是將個體靜置於培養皿的淺水拍照，無法呈現在水中運動推動水流時的張開狀態，所以才會導致這個分析與我們預期不同，而拍攝過程中無法紀錄到尾扇的運動情形，是我們一直覺得很可惜的部分。

頭節寬度與速度的關聯性，比起其他的體寬來得高。我們推測頭節影響蝦子運動的關係跟我們使用船槳的原理類似，因為面積較大，所以對水的推力較大，會獲得較大的速度(註三)；另外一方面，頭節寬度所產生的阻力，可讓尾節擺動時不會造成個體的旋轉，這原理有點像我們使用夾子時，要同時施力於兩側才可平衡，所以我們並不會看到蝦子在瞬間後抽的時候，會在原地打轉的現象。然而，頭節的寬度是所有體節中最大的，但卻與速度有正相關，那其所帶來的阻力怎麼不會對速度產生負面的影響呢？推測可能是因為蝦子移動方向的迎水面為第三節，而非頭節，所以阻力效應才沒那麼明顯。第三體節寬度與速度大小為負相關(趨近顯著,  $p=0.067$ )，可能就是因為是阻力帶來的影響；不過，體節的寬度以及體重或許可以反映出肌肉的多寡，所以我們猜測體節較寬以及體重較大者會有較大的肌力，以造成有效的擺動效應，因此體重較大者與最大移動速度有明顯的正相關(圖十六)。可能就是因為體節寬度帶來阻力與肌力的相互影響，才會造成第三體節寬度對於速度的影響不明顯。

### 四、蝦子體節擺動角度與後抽運動速度之關係

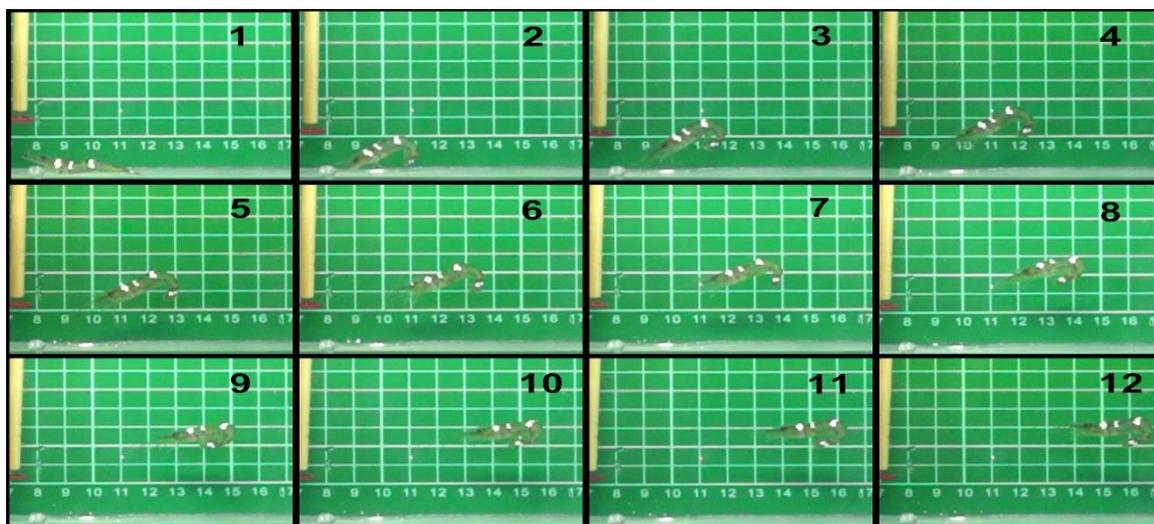
從 $\angle A$ 、 $\angle B$ 與 $\angle C$ 的角度變化與速度的關係中，呈現 $\angle B$ 與 $\angle C$ 具有明顯的關聯性，可以說明當第三體節與尾節因彎曲而造成變化角度越大時，可能會提供最大的移動速度。我們推測應該是當蝦子第三體節收縮彎曲成拳狀時，連帶牽動頭、尾節的擺動，造成對水的反作用力，並且將迎水面面積降到最低以減少阻力的產生(註五)，對蝦子的移動速

度均會有明顯提升的功能。先前討論頭節寬度對速度有明顯的影響，但頭節擺動的影響並非如預期般的明顯，可能是因為身體結構的關係導致頭節擺動的角度有限，另一可能是頭節寬度較大，擺動時阻力影響，均導致擺動角度不明顯，才會與移動速度的關聯性不高，但我們推測頭節的擺動應該還是可以造成一定的推力。

## 五、蝦子連續後抽運動之探討

我們觀察並分析進行第二次後抽的運動模式。當蝦子完成第一次的收縮運動後，體節開始放鬆打開，其身體的變化主要是以第三節附近做為轉軸，不過頭、尾兩節並非一起攤開，主要是尾節往後擺動，後來再藉由後半段體節的往前擺動的反作用力，來帶動身體的後移，頭節擺動並不明顯(圖二十一，畫面 7-9)。我們推測如此的姿勢變化，可以避免頭節擺動時所造成的阻力，而尾扇往後擺動時亦會呈現閉合的狀態，再加上後方體節寬度(面積)越來越小，均有減少阻力的效果(註三)，以增加位移的距離。

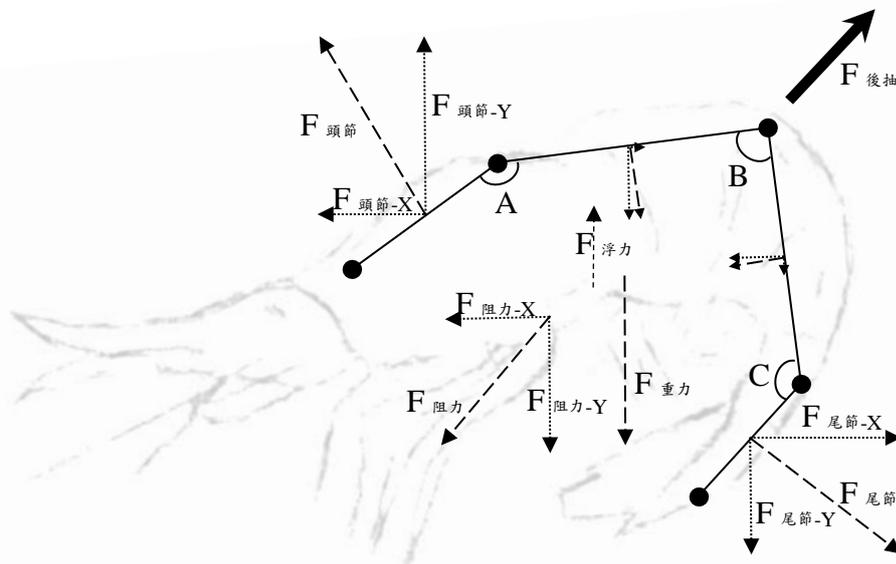
我們有思考一個問題：為什麼蝦子不一直連續進行後抽運動呢？過程中的好處與壞處是否有平衡呢？我們推測連續後抽運動的確可以讓蝦子迅速並遠離刺激源，但是也會讓蝦子消耗大量的能量(蝦子的白肌無法提供長時間的收縮，註二)。所以若是刺激程度太小或是沒有持續刺激的話，可能只會進行一次後抽運動，便可逃避刺激的影響，或許就是這個原因，我們所紀錄到連續兩次後抽運動的行為並不多。刺激的大小、類型與後抽運動體姿縮放的頻率、速度以及位移變化之間的關係，都是未來可以繼續探討的問題。



圖二十一 蝦子連續兩次後抽運動之截取畫面

## 六、蝦子後抽運動合力之探討

因為蝦子是無脊椎動物，所以在運動時因肌肉收縮導致的身體變形，並不像其他脊椎動物有骨骼支持，並可進行槓桿般的運動機制，但因蝦子身體形態的獨特，以及有特定模式的擺動行為，讓牠們具備有效的移動能力。我們藉由實驗中獲得一些結論，以及配合物理力學所學的知識，將蝦子在水中運動時可能受的力，綜合繪製於圖二十二。當蝦子身體彎曲的角度不同時，可能會導致不同體節的反作用力，在水平與垂直分量的改變；阻力的大小受到迎水面積以及速度的影響( $F_D = \frac{1}{2}\rho v^2 C_d A$ ，其中  $F_D$  為阻力， $v$  為速度， $A$  為接觸面積。註四)；重力與浮力的影響是其中維持固定不變的量值。故藉由以上的不同因子的作用，造成後抽運動淨力( $F_{後抽}$ )的變化，進而影響蝦子的移動狀態。



圖二十二 蝦子運動受力之示意圖。(箭頭長度並非代表力的大小)

## 柒、 結論

我們的實驗說明蝦子前端對刺激較為敏感，並會做出後抽運動來做逃離刺激源，而個體的體型大小，與後抽運動的角度與位移距離並沒有明顯相關，但體長與頭節的寬度為主要影響移動速度大小的因子。後抽運動時，蝦子身體彎曲導致迎水面積變小以及體

節擺動的效應，均能有效地提升移動的速度，以迅速離開刺激源。相較於離開地面時的第一次後抽運動，第二次後抽運動的收縮程度比較低，而且主要是以擺動尾扇為主，所以移動速度較慢，但其中所耗損的能量應該也較低。以下為我們歸納出來蝦子可能的運動模式：藉由觸角來感應刺激→身體背側收縮，分別帶動前、後段體節，形成反作用力(推力)，身體開始後移→頭、尾節分別向擺動，增加推力，其中頭節提供向上的力，尾節提供向後的力，合力決定蝦子移動的方向與速度→若有第二次後抽運動，則主要藉由後半段體節的擺動來帶動身體持續後移→最後身體體節逐漸攤開/平，恢復至於先前靜置於地面的狀態，使其落下時能讓步足先行著地。

## 捌、參考資料

註一、維基百科·多齒新米蝦·取自

<https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%A4%9A%E9%BD%92%E6%96%B0%E7%B1%B3%E8%9D%A6&redirect=no>

註二、胡妙芬 (2006)·動物的防衛·台中市：暢談國際文化。

註三、欽俊德 (2001)·動物的運動·台北市：牛頓。

註四、維基百科·阻力·取自 <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E9%98%BB%E5%8A%9B>

註五、游泳的生物力學·流線·取自 <http://www.lifesaving.org.tw/swim/dy/fishlike.htm>

註六、Henry, C. A. and Thomas, J. R. (2014). The mechanics of elastic loading and recoil in anuran jumping. *The Journal of Experimental Biology* 217: 4372-4378.

註七、Arnott, S. A., D. M. Neil, and A. D. Ansell (1998). Tail-flip mechanism and size-dependent kinematics of escape swimming in the brown shrimp *Crangon crangon*. *The Journal of Experimental Biology* 201: 1771-1784.

## 【評語】 052007

目的：探討蝦子受刺激時，會有往後抽動之行為之意義。

蝦子之大小、種類、健康狀況都會影響往後彈跳之角度及長度，宜再加強突顯本研究和已知前人之差異性及新穎性，及代表之意義。