

第十二屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA12-246

作品名稱：『蜻蜻』欲動

—小仰蜻運動模式之探討

姓名：劉正文

關鍵字：刷狀毛、跗節、水阻係數

摘要

小仰蝨(*Anisops*)是一種特別的水棲昆蟲，以擺動後足之方式在水中前進。我們針對他的外觀細微構造進行觀察，並分析其擺動流程。從中，我們確定了後足腿節擺幅與其運動方向、運動路徑長之關係；後足脛節與跗節對於調整與水接觸面積、平衡與穩定之功能；最後，我們求出小仰蝨運動時的加速度，再利用水阻公式推算出水阻，並做了小仰蝨能量的損益分析，並期盼能將結果推廣至更多水棲昆蟲運動方式的解釋及其模型之建構上。

壹、研究動機

在一次的校園訪察中，我們意外地從池塘中捕捉一種奇特的水中昆蟲—小仰蝨，牠在水中划出一道道優美的弧線，讚歎之餘，心中也起了好奇的漣漪，到底是怎麼樣的構造，給予牠在水中推進的能力呢？到底是怎麼樣的動作，決定它或向前猛進、或迴身轉彎呢？牠的泳足就好像是一把船槳，但一節節可彎曲的附節，卻又似乎比起船槳來得更有效率；腳節上的細毛，使牠的動作更為精細。

這些相異點是否透露著什麼祕密呢？漣漪起波瀾，好奇，促使我們尋找答案。

貳、研究目的

由於小仰蝨以單一泳足(後足、具四個關節)進行游泳的特點，比其他的水中昆蟲更具代表性(不若其他水棲昆蟲以 2-3 對泳足進行游泳複雜。且方便進行觀察，易於量化數據)，因此我們決定以小仰蝨作為研究的對象。

其中，我們主要探討：

1. 觀察小仰蝨的身體結構，以了解其如何適應水中生活。
2. 研究為何小仰蝨後足的腿節為何不像脛節及跗節般具有刷狀毛。
3. 探討小仰蝨後足的分節現象是否對游泳有所助益。
4. 分析小仰蝨的直線、轉彎運動的差異。
5. 探討小仰蝨運動過程中的能量損益。

參、實驗器材與設備

一、研究器材與設備：

實驗裝置器材

編號	器材	型號/規格	附註
1	單眼相機	Canon 500D	鏡頭：18-55mm、60mm macro
2	高速攝影機		
3	大型培養皿	內直徑 15 cm，高 2 cm	
4	直尺		
5	溫度計		
6	瞬間膠	聯合文具有限公司	
7	針筒		
8	水族箱		
9	乙醚		



高速攝影機(國立中央大學協助提供)



水族箱

二、使用軟體：

- (一)、Microsoft Office
- (二)、Tracker
- (三)、Mb-ruler
- (四)、Anime Studio Pro

三、實驗物種：

小仰蝽(Anisops)

(一)、科學分類：

Arthropoda 節肢動物門
Insecta 昆蟲綱
Hemiptera 半翅目
Notonectidae 仰蝽科
Anisops 小仰蝽屬



Fig.1 小仰蝽外觀圖(繪者：Poco Alarcon)

(二)、特徵：

頭部：複眼發達，占頭部的三分之二。為肉食性昆蟲，具有刺吸式口器，喜食孑孓、紅蟲。
胸部：前、中足的構造用來固定以及捕捉獵物，而後足則演化成類似「槳」的構造，適合用來游泳。
腹部：具一對翅，翅下有氣室，可提供在水中所需之氧氣以及浮力。換氣時，利用尾部密生的毛破壞水的表面張力以填充氣室，體內尚有血紅蛋白協助長時間的潛泳。

(三)、身體構造：

O(ommateum)：複眼

B(Beak)：刺吸式口器

F₁(Femur)：前足腿節 / **T₁(Tibia)：**前足脛節 /

t₁(Tarsus)：前足跗節

F₂：中足腿節 / **T₂：**中足脛節 / **t₂：**中足跗節

F₃：後足腿節 / **T₃：**後足脛節 / **t₃：**後足跗節

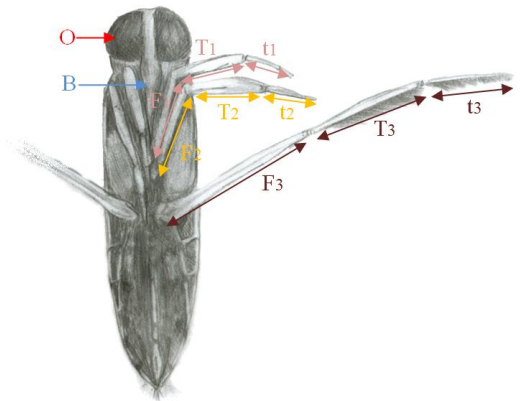
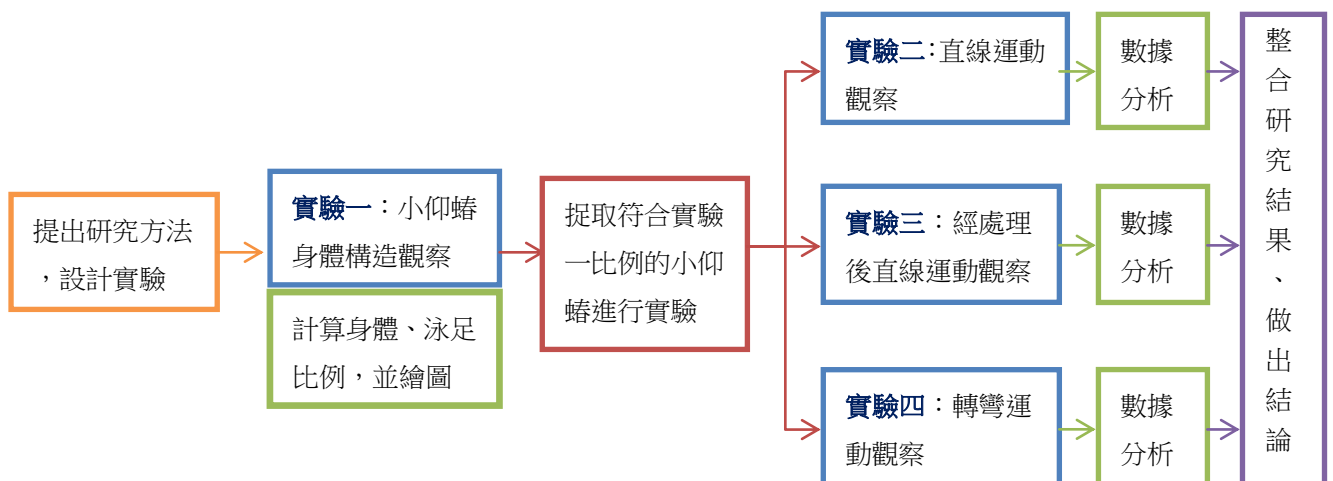


Fig.2 小仰蝽身體構造手繪圖

肆、研究過程或方法



一、實驗一：觀察小仰蝽體型、足部型態及構造

(一).實驗目的：藉由觀察小仰蝽體型與足部型態及構造，找出其能在水中快速運動的可能因素，並求出一定的身長與泳足長之比例以作為接續實驗的標準。

(二).實驗方法：

- 1、自校園池塘中取 12 隻野生小仰蝽，分別置入編號為(A)~(L)的玻璃瓶中。
- 2、分別取出小仰蝽，以肉眼觀察三對附肢及每個腳節，相機拍攝後進行全身繪圖。
- 3、進行小仰蝽麻醉手術。在抽風櫃中，將棉花浸泡乙醚後放入小盒子，接著於盒外放置培養皿及小仰蝽。將之迷昏後，用複式顯微鏡觀察，繪出前足、中足、後足腿部細微構造。
- 4、以顯微測量量測出各腿節長度，並求出腿節和身長之比。
- 5、將數據製成表格並觀察其相關性，並找出身長、後足長比例之平均值以利其餘實驗的分析並縮小野生小仰蝽間之差異性。
- 6、實驗後將小仰蝽全部放生。



Fig.3 乙醚麻醉設備

二、實驗二：分析小仰蝽的標準直線運動模式

(一).實驗目的：分析直線行進時後足腳節擺動角度與行進距離之相關性。

(二).實驗方法：

- 1、準備一大型培養皿(長 150mm，高 20mm)，並置入去除雜質後之原生池水直到水高 8mm 為止，以縮小實驗因小仰蝽之垂直潛泳而造成之誤差。
- 2、由實驗一之研究結果，自野外捕捉的小仰蝽中找尋五組身長及後足長比例相等或約略相等於 0.93 之小仰蝽，並將其分別命名為(甲)、(乙)、(丙)、(丁)、(戊)。
- 3、分別放入大型培養皿中，以 120 fps 的高速攝影機拍攝小仰蝽在水中的運動情形。
- 4、從每隻小仰蝽運動過程中擷取六段直線前進但移動距離不同的運動數據。
- 5、量測照片中的數據，量測數據包含下列兩項：
 - (1)、總路徑長 d ：以蟲身中點作為運動質點，以運動分析軟體 Tracker 分別量出每 1/120 秒小仰蝽移動距離，將其加總後即為此段運動之總路徑長 d 。
 - (2)、角度 θ 與 φ ：利用 Mb-ruler 量出左右腳身體與腿節(θ_1 、 φ_1)、腿節與脛節(θ_2 、 φ_2)、脛節與跗節(θ_3 、 φ_3)所夾之角度。
- 6、利用 Microsoft Office 軟體分析角度、速度、移動距離及總路徑長之相關性，並繪製成折線圖。

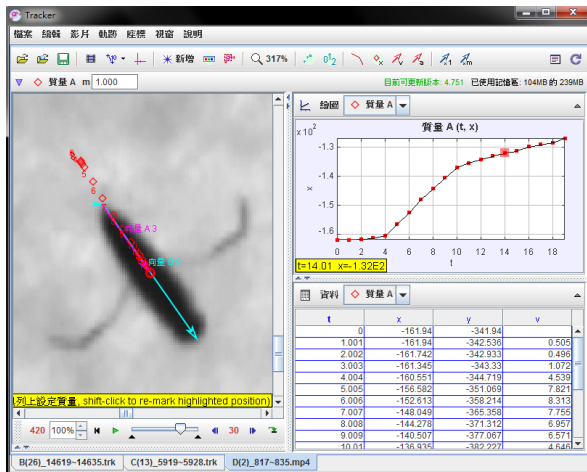


Fig.4 利用物理追蹤軟體 Tracker 進行移動距離之分析

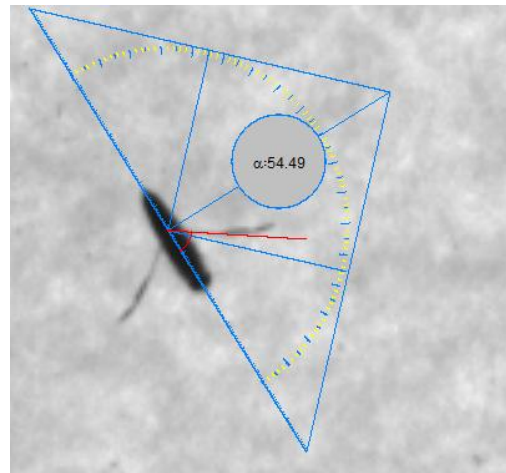


Fig.5 利用 Mb-ruler 量測角度

※定義：因小仰蝽游動方式為腹部向上，故其左右後足恰與觀看方向相反，所以給定下列定義：

- θ_1 ：右足腿節與蟲身夾角。
- θ_2 ：右足脛節與腿節夾角。
- θ_3 ：右足跗節與脛節夾角。
- φ_1 ：左足腿節與蟲身夾角。
- φ_2 ：左足脛節與腿節夾角。
- φ_3 ：左足跗節與脛節夾角。

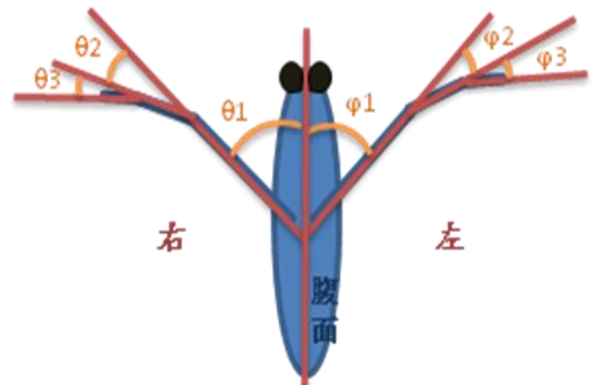


Fig.6 角度定義說明圖示

三、實驗三：分析小仰蝨在後足腳節無法彎曲時之直線運動模式

(一).實驗目的：藉由不傷害小仰蝨的方式，固定其腳節，以推論後足腿節、脛節、跗節在小仰蝨運動過程中扮演之角色，並與**實驗二**之結果合併討論。

(二).實驗方法：

- 1、保留**實驗二**中的五隻小仰蝨(甲)、(乙)、(丙)、(丁)、(戊)。
- 2、進行小仰蝨的乙醚麻醉手術，手術步驟與**實驗一**相同，麻醉時間約在 2 min。
- 3、以針筒吸入少量三秒膠，並將已麻醉之小仰蝨置於載玻片上。確保脛節與跗節呈一直線後，以針頭前端碰觸左右後足脛節與跗節之關節處，讓少量的三秒膠因表面張力的作用流出恰能黏住關節，使其無法彎曲。此步驟皆在解剖顯微鏡下進行。
- 4、待手術後 3~5min，小仰蝨甦醒時將其放入大型培養皿中，且水面高度控制在 8mm。
- 5、以 120 fps 的高速攝影機再次拍攝小仰蝨(甲)、(乙)、(丙)、(丁)、(戊)等五組在水中的運動情形。
- 6、從每隻小仰蝨運動過程中擷取六段直線前進但移動距離不同的運動數據，並進行數據量測，包含：總路徑長 d 、角度 θ 與 ϕ 。
- 7、待小仰蝨休息 3 小時後，再次重複步驟 2~6，惟改變黏接腳節為腿節以及脛節之關節。
- 8、將所測得小仰蝨(甲)、(乙)、(丙)、(丁)、(戊)僅固定後足脛節與跗節之數據和兩個腳節皆被固定的數據利用 Microsoft Office 軟體繪出折線圖，並與**實驗二**之結果相比較。
- 9、實驗後，將小仰蝨全數放生。



Fig.7 腳節固定手術

四、實驗四：小仰蝨運動過程的力學分析

(一).實驗目的：分析小仰蝨運動過程中所受到的外力，並計算出水阻以求出小仰蝨在水中運動的能量損益。

(二).實驗方法：

- 1、整合**實驗一**、**實驗二**、**實驗三**、**實驗四**的結果，討論運動中所受到的外力。
- 2、藉由水阻公式以及雷諾數計算出小仰蝨在水中所受到的阻力。
- 3、將計算出的數據利用 Microsoft Office 軟體繪出折線圖，並討論結果。

五、實驗五：分析小仰蝨的轉彎運動模式

(一).實驗目的：將轉彎運動過程製成分解圖，從中觀察小仰蝨之脛節、跗節如何達到最小之阻力並在運動結束時穩定水流與停止。

(二).實驗方法：

- 1、從**實驗二**所拍攝之照片中擷取左右轉各三段轉彎運動。
- 2、利用測得之數據，製成分解圖，觀察其結果，並做出討論。

伍、研究結果

一、實驗一：觀察小仰蝽體型、足部型態及構造

(一)、小仰蝽之體型：

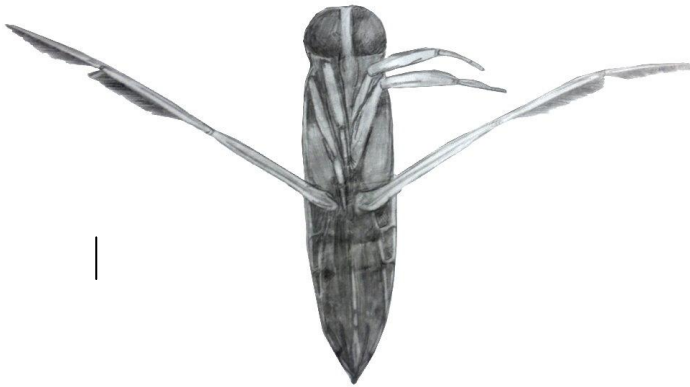


Fig.8(a) 小仰蝽正面手繪圖



Fig.8(b) 小仰蝽背面手繪圖



Fig.8(c) 小仰蝽側面手繪圖

(二)、小仰蝽之各腿部構造：

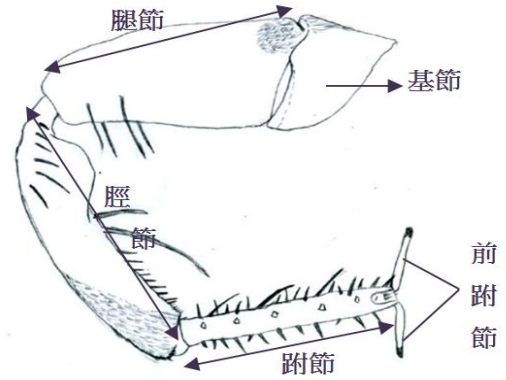


Fig.9(a) 前足手繪圖

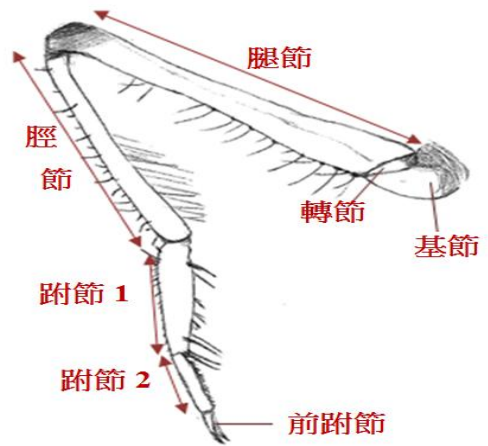


Fig.9(b) 中足手繪圖

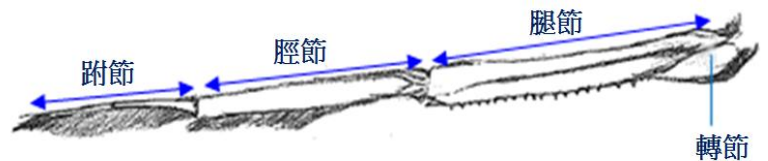


Fig.9(c) 後足(泳足)手繪圖

(三)、將 12 組小仰蝽(A~L)進行身長測量，求得平均(A~L)的數據附於附錄)如下：

	頭至轉節長 (mm)	轉節至尾端長 (mm)	腿節長 (mm)	脛節長 (mm)	跗節長 (mm)	腿/身
平均	<u>5.61</u>	<u>4.71</u>	<u>3.96</u>	<u>3.14</u>	<u>2.48</u>	<u>0.93</u>

表.1 小仰蝽身長、泳足長測量結果

二、實驗二：分析小仰蝽的標準直線運動模式

(一)、未進行固定的 θ_1 與 ϕ_1

1. 以小仰蝽(甲)之運動為例，所取的六段不同位移運動編號分別為 a、b、c、d、e、f，對應 Tracker 軟體中求得各段運動之總路徑長。
2. 將小仰蝽(甲)各段運動其右後足腿節與蟲身夾角(θ_1)與左後足腿節與蟲身夾角(ϕ_1)兩兩一組求其算術平均值 μ_1 (例： $\mu_1 = \frac{\theta_1 + \phi_1}{2}$)。再將 μ_1 對時間(單位:1/120s)的關係繪製成折線圖(Fig.10(a))。
3. 尋找整段運動過程 μ_1 最大值發生處，定義為 Max；向前回推五個資料點內 μ_1 最小值發生處，定義為 Min。將 Max-Min 值與總路徑長製成表格(表.2)，並繪製出擺幅對距離之散布圖(Fig.10(b))。

小仰蝽(甲)之直線運動分析_a~f 組之 μ_1 擺幅						
編號	a	b	c	d	e	f
總移動距離(cm)	0.27	0.4	0.52	0.57	0.71	0.89
Max-Min (度)	44.5	46.1	59.9	62.9	76.7	82.2

表.2 直線運動 μ_1 擺幅

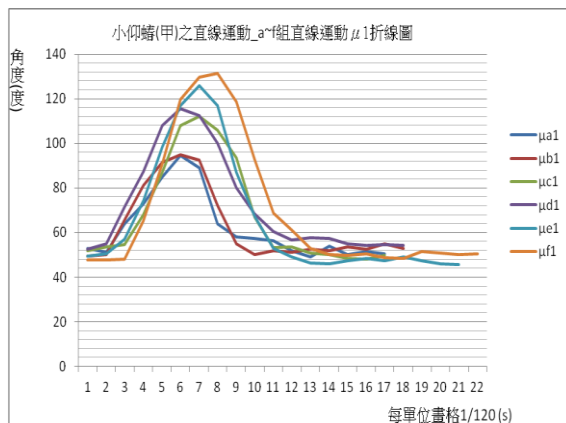


Fig.10(a) 直線運動 μ_1 折線圖

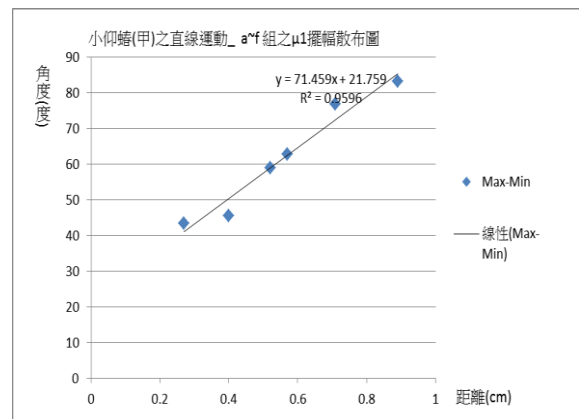


Fig.10(b) 直線運動 μ_1 擺幅散布圖

4. 繪製小仰蝽(甲)直線運動過程中，速度對時間之作圖(v-t 圖)。

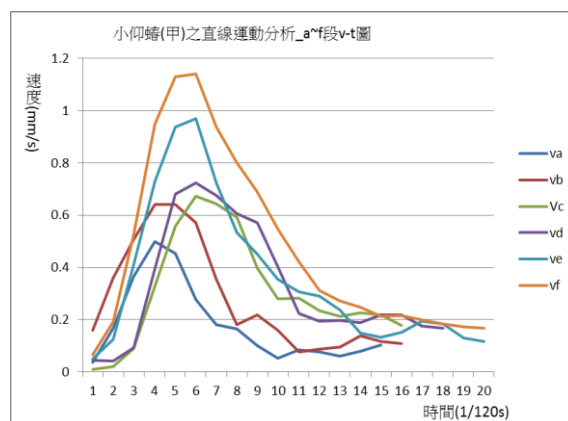


Fig.10(c) 直線運動 v-t 圖

- 重複上述步驟 1~4，繪製出小仰蝨(乙)、(丙)、(丁)、(戊)的 μ_1 折線圖、擺幅對移動距離之散布圖、v-t 圖，並將結果記錄後統整。
- 以相同流程分析其他腳節之運動。

(二)、未進行固定的 θ_2 與 ϕ_2

小仰蝨(甲)之直線運動_a~f 組 μ_2 之擺幅						
編號	a	b	c	d	e	f
移動距離 (cm)	0.27	0.4	0.52	0.57	0.71	0.89
Max-Min (度)	45.7	62.5	68.4	76.7	81.4	80.4

表.2 直線運動 μ_2 擺幅

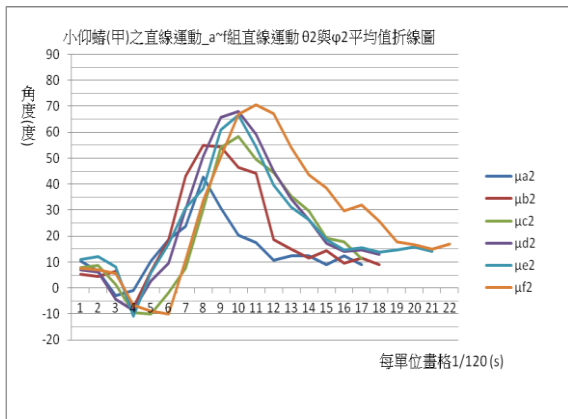


Fig.11(a) 直線運動 μ_2 折線圖

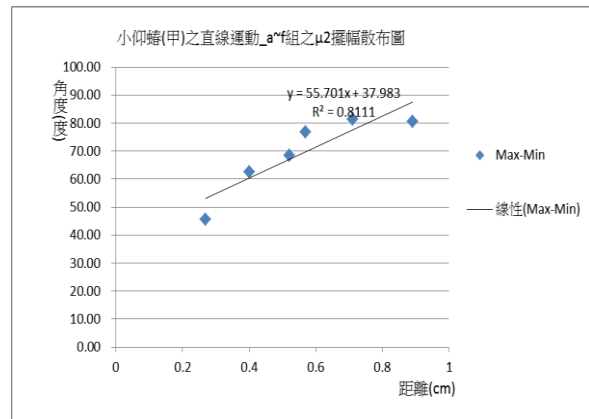


Fig.11(b) 直線運動 μ_2 擺幅散布圖

(三)、未進行固定的 θ_3 與 ϕ_3

小仰蝨(甲)之直線運動_a~f 組 μ_3 之擺幅						
編號	a	b	c	d	e	f
總路徑長(cm)	0.27	0.40	0.52	0.57	0.71	0.89
Max-Min (度)	63.6	51.3	60.2	71.3	61.7	67.5

表.3 直線運動 μ_3 擺幅

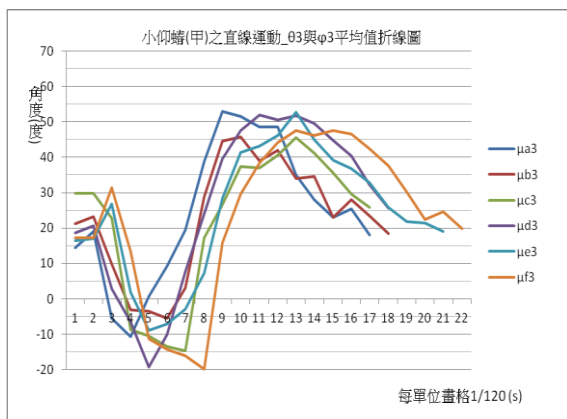


Fig.12(a) 直線運動 μ_3 折線圖

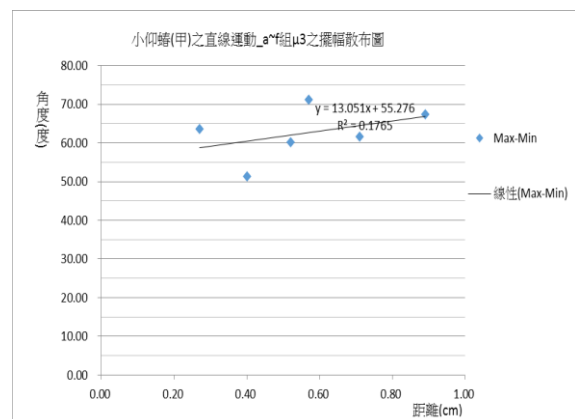


Fig.12(b) 直線運動 μ_3 擺幅散布圖

三、實驗三：分析小仰蝽在後足腳節無法彎曲時之直線運動模式

(一)、固定後足“跗節”後的 θ_1 與 ϕ_1

1. 以小仰蝽(甲)之運動為例，分析移動不同距離下之右後足腿節與蟲身夾角(θ_1)與左後足腿節與蟲身夾角(ϕ_1)。其中，所取的六段不同位移運動編號分別為 a'、b'、c'、d'、e'、f'，對應 Tracker 軟體中求得各段運動之總路徑長，並以相同方式繪製出 μ_1 折線圖、 μ_1 擺幅散布圖、v-t 圖。

小仰蝽(甲)固定跗節後的直線運動_a'~f'組之 μ_1 擺幅						
編號	a'	b'	c'	d'	e'	f'
移動距離(cm)	0.21	0.25	0.28	0.31	0.39	0.47
Max-Min	52.0	60.0	64.0	65.0	88.1	94.0

表.4 固定跗節之直線運動 μ_1 擺幅

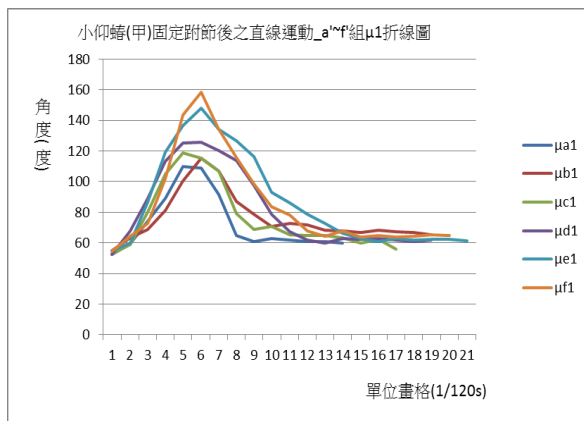


Fig.13(a) 固定脛節之直線運動 μ_1 折線圖

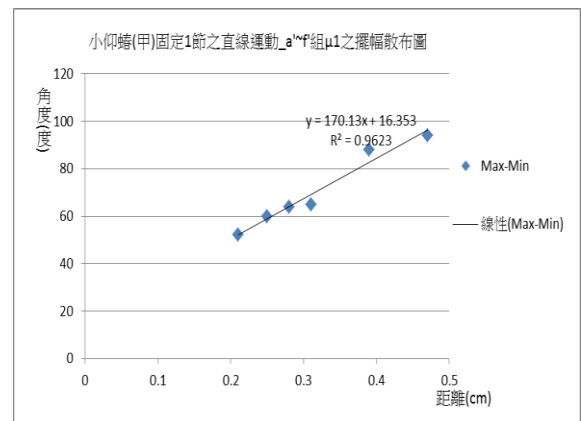


Fig.13(b) 固定脛節之直線運動 μ_1 擺幅散布圖

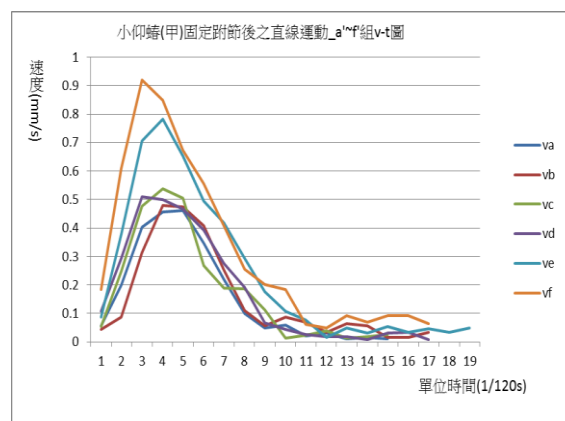


Fig.13(c) 固定脛節之直線運動 v-t 圖

2. 重複上述步驟，繪製出小仰蝽(乙)、(丙)、(丁)、(戊) 的 μ_1 折線圖、擺幅對移動距離之散布圖、v-t 圖，並將結果記錄後統整。
3. 以相同流程分析其他腳節之運動。

(二)、固定後足跗節後的 θ_2 與 φ_2

小仰蜻(甲)固定跗節後的直線運動_a'~f'組之 μ_2 擺幅						
編號	a'	b'	c'	d'	e'	f'
移動距離(cm)	0.17	0.21	0.25	0.28	0.39	0.47
Max-Min(度)	75.5	74.0	74.5	75.5	77.5	83.5

表.5 固定跗節之直線運動 μ_2 擺幅

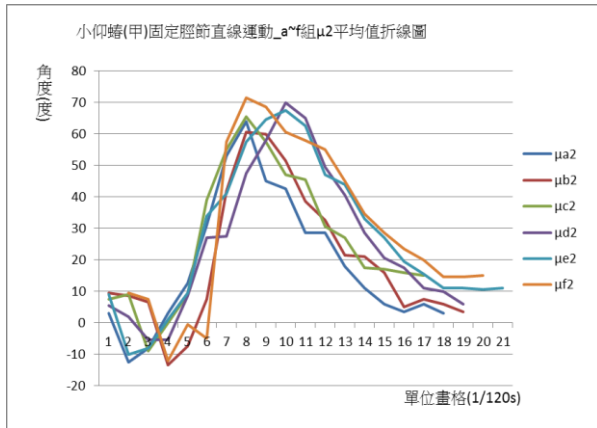


Fig.14(a) 固定跗節之直線運動 μ_2 折線圖

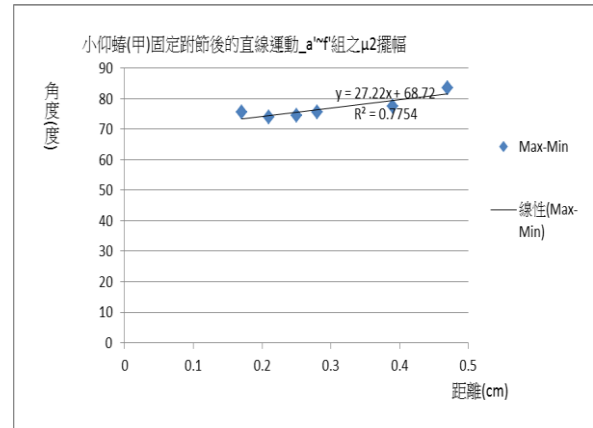


Fig.14(b) 固定跗節之直線運動 μ_2 擺幅散布圖

(三)、固定後足脛節與跗節後的 θ_1 與 φ_1

- 以固定脛節與跗節後小仰蜻(甲)之運動為例，分析移動不同距離下之右後足腿節與蟲身夾角(θ_1)與左後足腿節與蟲身夾角(φ_1)。其中，所取的六段不同位移運動編號分別為 a''、b''、c''、d''、e''、f''，對應 Tracker 軟體中求得各段運動之總路徑長，並以相同方式繪製出 μ_1 折線圖、 μ_1 擺幅散布圖、v-t 圖。

小仰蜻(甲)固定脛節及跗節後的直線運動_a''~f''組之 μ_1 擺幅						
編號	a''	b''	c''	d''	e''	f''
移動距離(cm)	0.1	0.11	0.12	0.13	0.16	0.17
Max-Min(度)	70.0	67.0	72.6	80.0	88.5	87.4

表.6 固定跗節之直線運動 μ_1 擺幅

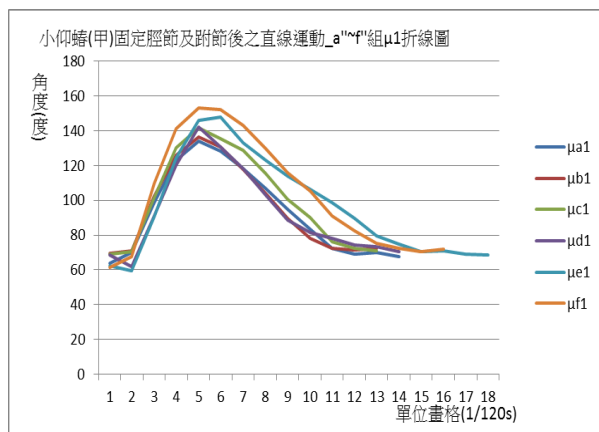


Fig.15(a) 固定脛節與跗節之直線運動 μ_2 折線圖

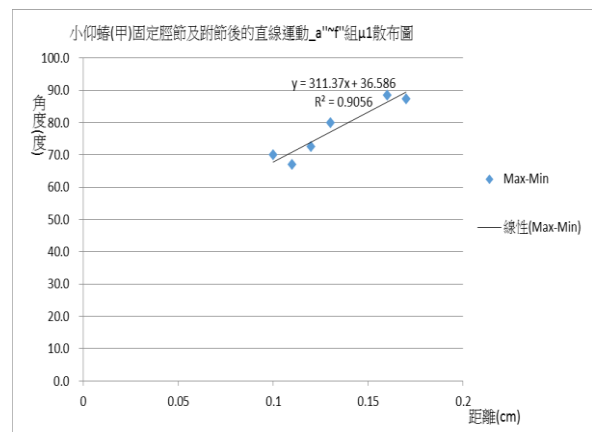


Fig.15(b) 固定脛節與跗節之直線運動 μ_2 擺幅散布圖

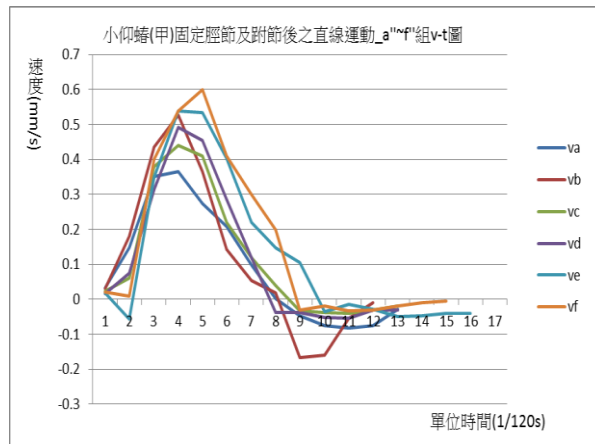


Fig.15(c) 固定脛節與跗節之直線運動 v-t 圖

四、實驗四：分析小仰蟻的轉彎運動模式

1. 以小仰蟻(甲)之轉彎運動為例，取轉彎相同角度之小仰蟻並分析其右後足跗節與脛節夾角(θ_1)與左後足跗節與脛節夾角(ϕ_1)。

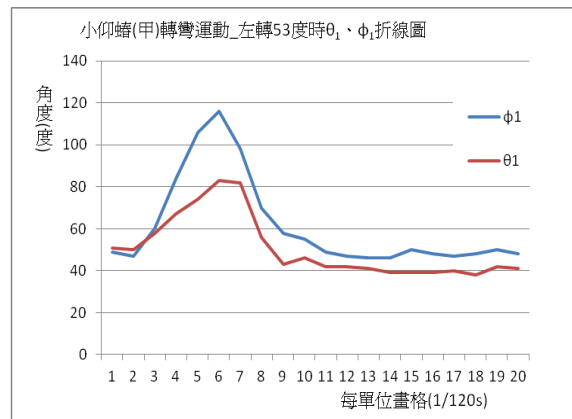
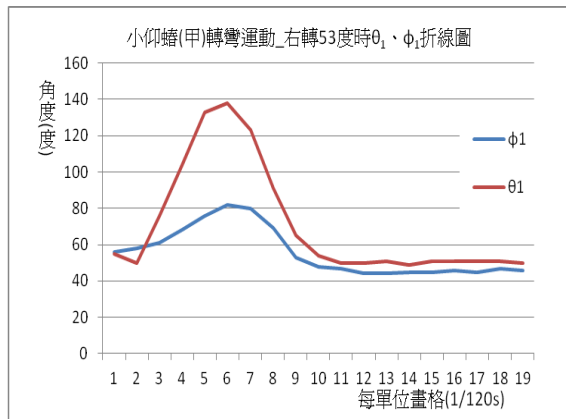


Fig.16(a) 右轉 53 度 θ_1 與 ϕ_1 折線圖(7.1mm) Fig.16(b) 左轉 53 度 θ_1 與 ϕ_1 折線圖(5.2mm)

2. 由 Fig.16(a)與 Fig.16(b)中，發現 θ_1 與 ϕ_1 最大角度的差異會造成蟲身轉彎。當我們取左右轉相同角度但移動不同距離的兩段數據來觀察，可以發現 Fig.6(a)中最大角度的差異大約為 56 度，但 Fig.6(b)僅有約 33 度。由於 θ_1 與 ϕ_1 之值同時受移動距離與轉彎角度兩個變因控制，無法繪出散布圖以觀察相關性，故我們以繪出折線圖之方式，觀察脛節與跗節在轉彎時扮演之角色。

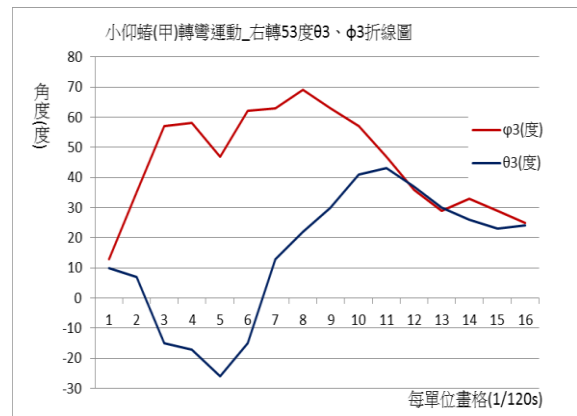
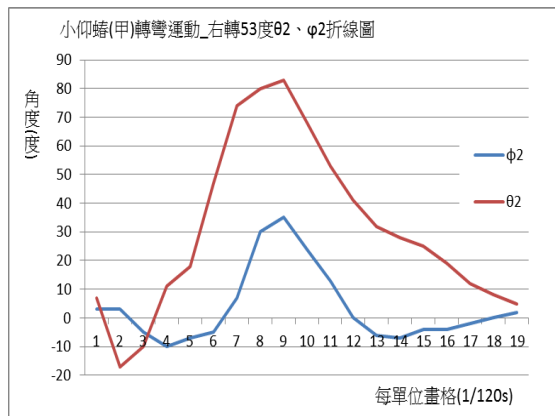


Fig.16(c) 右轉 53 度 θ_2 與 ϕ_2 折線圖(7.1mm)

Fig.16(d) 右轉 53 度 θ_3 與 ϕ_3 折線圖(7.1mm)

陸、討論

一、小仰蝽體型、足部型態及構造討論

(一)、體型：身形長，複眼大，身體前部鈍狀，而身軀尾部尖細且具細毛，整體成流線型。其腹部呈黑色朝上，翅成略透明的白色，其後翅面上可能存在大量乳突，其微奈米形之結構造成其翅面之超疏水性(王永生, 2012)。其尖銳的嘴部分節且向腹面縮起，前足與中足在身體前方收起。

(二)、足部構造：

- 1、前足(**Fig.9(a)**)：基節及腿節相當粗，附生棕色細短毛；腿節與脛節上有稀疏的黑色長毛；脛節末端與跗節上具有短刺；前跗節上有短爪，推測其形態構造利於捕食。
- 2、中足(**Fig.9(b)**)：腿節也稍粗但較長，脛節上之刺較前足更長且密集，前跗節上之爪端相當銳利，推測其為小仰蝽的捕食與抱握足。
- 3、後足(**Fig.9(c)**)：為其游泳足，型態構造與前足、中足有相當大之差異。腿節最長且細，末端可看到轉節，其基節則埋於身體中；脛節與跗節皆叢生著流蘇狀之刷狀毛，但其上之刺則相當短小不明顯；前跗節不明顯或退化，無爪狀構造，相較於半翅目中其他水生昆蟲後足明顯的前跗節，推測其可能原因乃是為了將特化的游泳足之阻力減至最小而致。

(三)、小仰蝽之身長比例：

將所得數據整理後，取平均值如下(n=12)：

- 1、腿節：3.96mm($\sigma=0.37$)
- 2、脛節：3.14mm($\sigma=0.13$)
- 3、跗節：2.48mm($\sigma=0.11$)
- 4、小仰蝽身長：10.32mm($\sigma=0.3$)

泳足:腿節:脛節:跗節：約 8:6:5

泳足長/身長(腿身比)：約 0.93

由數據可發現不同小仰蝽間泳足與身長之比例有些微差異，但其比例約為 0.93。為縮小腿節與蟲身比例之差異造成之誤差，在進行型態觀察並分析後便將小仰蝽放生，再從另外捕獲的野生小仰蝽中篩選出泳足長與身長之比例接近 0.93 之小仰蝽(甲)~(戊)。

二、泳足擺動之角度與運動方向、運動距離之討論

(一)、 θ_1 、 φ_1 與運動方向之關係

取實驗二小仰蝨(甲)直線運動的一段運動為例，並將此段運動之 θ_1 與 φ_1 值對時間繪出折線圖(Fig.17(a))；取實驗二小仰蝨(甲)轉彎運動移動相同距離的一段運動作為對照，並以同樣方式繪製出折線圖(Fig.17(b))。

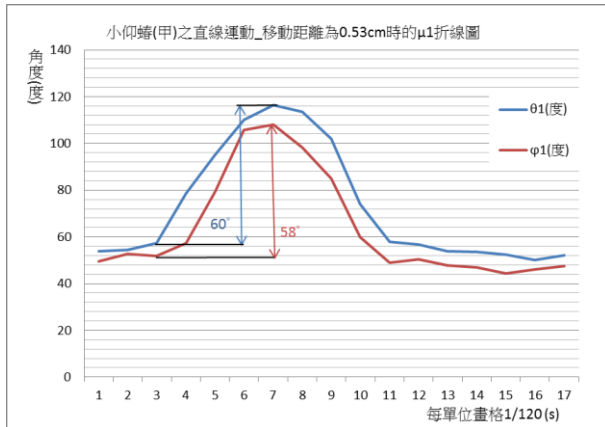


Fig.17 (a) 移動距離 0.53cm 直線運動

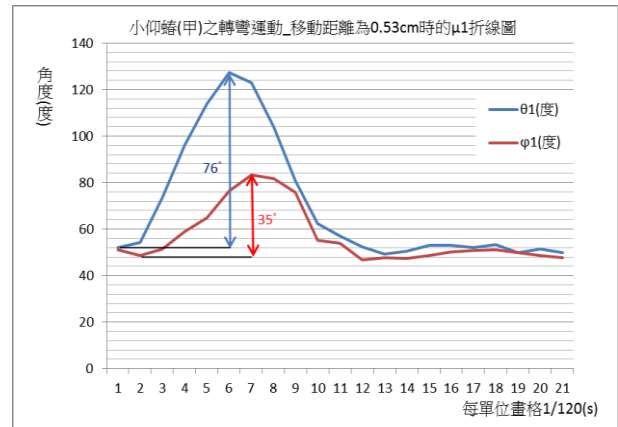


Fig.17 (b) 移動距離 0.53cm 轉彎運動

由 Fig.16(a)觀察出 θ_1 自運動開始至結束皆比 φ_1 多了 5~10 度，但此角度之差異並不因此造成蟲身之偏轉，顯見決定其前進或後退之因素並非兩者在同一時刻的差角。

然而，若取 θ_1 與 φ_1 有最大值之畫格，以及此畫格前五畫格內 θ_1 與 φ_1 有最小值之畫格(經觀察後可發現，小仰蝨腿節加速之運動，無論距離長短，皆會在 4~5 畫格內結束。)，並將其角度差值標示出來後，可以發現到無論是 θ_1 或是 φ_1 此角度差值皆相當接近。故我們定義此角度差異值即為小仰蝨運動之「擺幅」。

比較 Fig.17(a)直線運動中左右足之小差異擺幅(58°、60°)，以及 Fig.17(b)轉彎運動中左右足之大差異擺幅(35°、76°)，可得下列結論： θ_1 與 φ_1 之擺幅值可相當接近的還原小仰蝨之運動過程，且將 θ_1 與 φ_1 之擺幅兩相比較後，能推得小仰蝨之運動方向。

(二)、 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 擺幅與運動距離之關係

取實驗二中，小仰蝨(甲) μ_1 、 μ_2 、 μ_3 擺幅對距離之散布圖(Fig.10(b)、Fig.11(b)、Fig.12(b))，並將小仰蝨(乙)、(丙)、(丁)、(戊) μ_1 、 μ_2 、 μ_3 擺幅值(Max-Min)對距離之散布圖合併，如 Fig.18

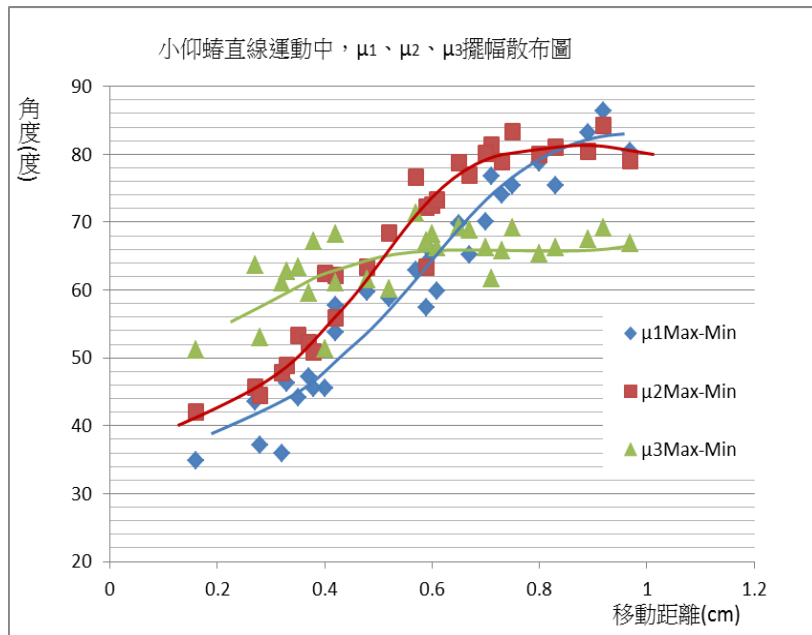


Fig.18 小仰蟻(甲)~(戊)直線運動之 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 擺幅散布圖

Fig.18 中可看出小仰蟻(甲)~(戊)在直線運動過程中， μ_1 擺幅值隨著距離增大，大致呈線性上升。移動距離短時，其值趨近 35° ，而當移動距離長時，其值趨近 90° ，而在所收集之數據中少有移動距離大於 100° 的情況發生。

μ_2 擺幅與 μ_1 擺幅趨勢線類似，隨移動距離增大而上升，但在約 80° 時則不再增加。由實驗二之研究結果可知，當 μ_1 擺動縮回時， μ_2 擺幅方才大幅度上升，此時脛節與跗節盡可能的降低阻力。故當移動距離較大時，有調整運動中之跗節平行蟲身之功能。

μ_3 擺幅值與移動距離之相關性較小，雖然跗節其上之細毛擺動時能造成推進力以增加移動距離，但可觀察出 μ_3 擺幅在任何距離皆保持相當接近的值。

綜上所述，可發現 μ_1 與 μ_2 擺幅皆明顯影響移動距離，又因其中脛節與跗節之擺動又多是由腿節帶動的，可知 μ_1 擺幅為移動距離長短之決定性因素。

三、未進行固定手術與進行固定手術後的小仰蝽之直線運動分解圖

取實驗二中小仰蝽(甲)之 c 段運動，以及實驗三中固定脛節、固定脛節與跗節的小仰蝽(甲)各取一段移動距離與之相近之運動，將此三段運動利用動畫製作軟體 Anime Studio Pro 進行繪製如下：

(1)、未進行固定之小仰蝽(加速段、減速段)

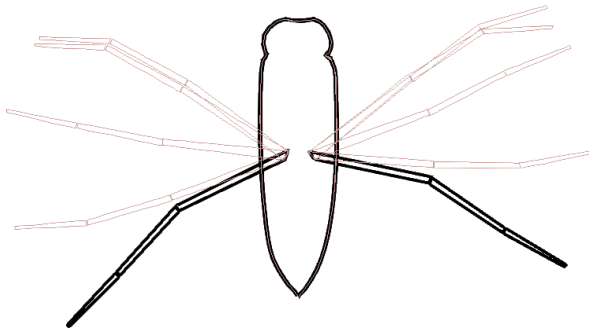


Fig.19(a)

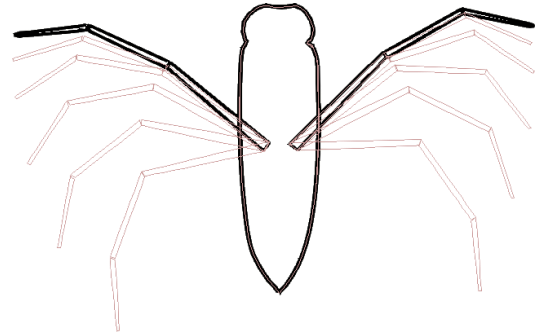


Fig.19(b)

(2)、固定跗節後之小仰蝽(加速段、減速段)

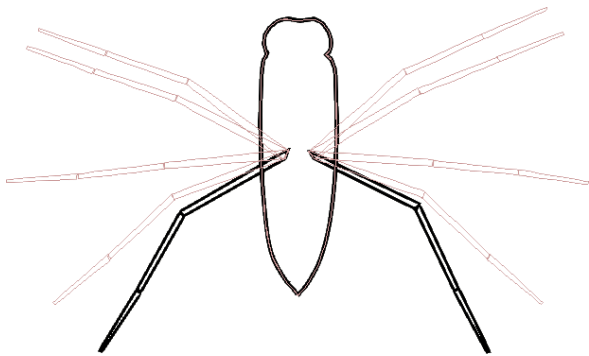


Fig.19(c)

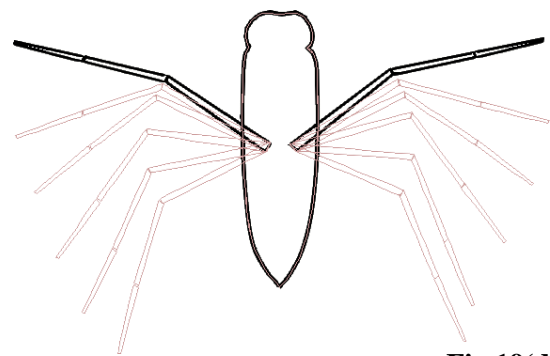


Fig.19(d)

(3)、固定脛節與跗節後之小仰蝽(加速段、減速段)

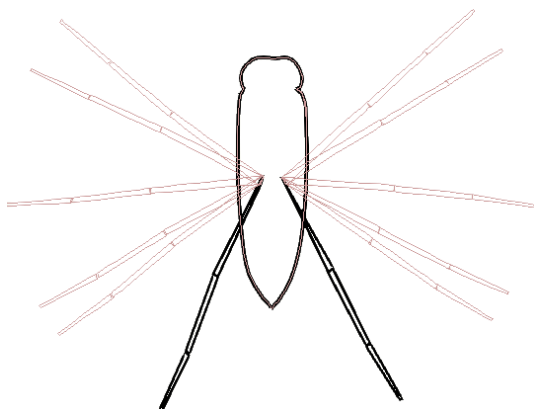


Fig.19(e)

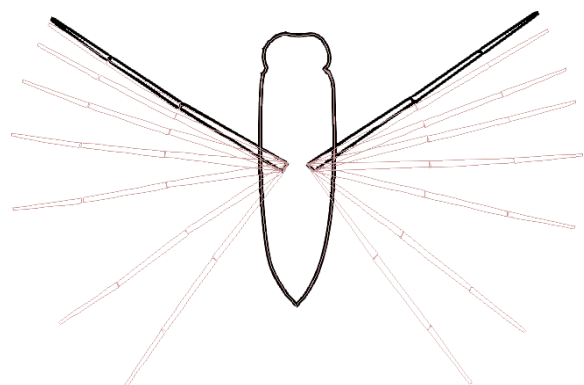


Fig.19(f)

※其中，開啟洋葱皮工具後，每幀間隔時間為 0.014s

由圖中可發現，下揮時脛節與跗節像是被牽引著般順著腿節揮動，在此三段運動中可看出同樣是移動相同距離， μ_1 擺幅彼此之間差異性大：未進行固定的小仰蝨(甲)腿節只揮動了約 45 度，但固定脛節與腿節的小仰蝨(甲)需要揮動約 110 度才能移行相同距離。

觀察脛節與跗節，發現未固定組下揮時能調整其角度，使其盡可能的垂直身體延展。此動作能使小仰蝨在直線行進時與水有最大的接觸面積，且微調角度能使泳足上的細毛盡可能的垂直水流方向。而在動作復原時，小仰蝨則盡可能地將跗節與脛節彎曲以順著水流減少阻力。

將未固定與與固定脛節及跗節的小仰蝨比較，可發現當下揮時兩者差異較不明顯，皆是盡可能地伸長打直泳足(但未固定的能較為靈活的調控角度)以達到前進的動能；但在回復動作時，未固定者乾淨俐落的順水恢復，但固定脛節與跗節後則是再度大面積將水推回，也耗費了更多時間。

四、未進行固定手術與進行固定手術後的小仰蝨之直線運動移動距離

由討論二中，我們推論出 μ_1 擺幅為移動距離之決定性因素，且在討論三中觀察發現三組移動距離相同之運動擺幅有明顯差異。故將實驗二與實驗三中未進行固定、僅固定跗節、固定跗節及脛節的小仰蝨(甲)~(戊)之 μ_1 之擺幅對距離之散布圖繪製如下：

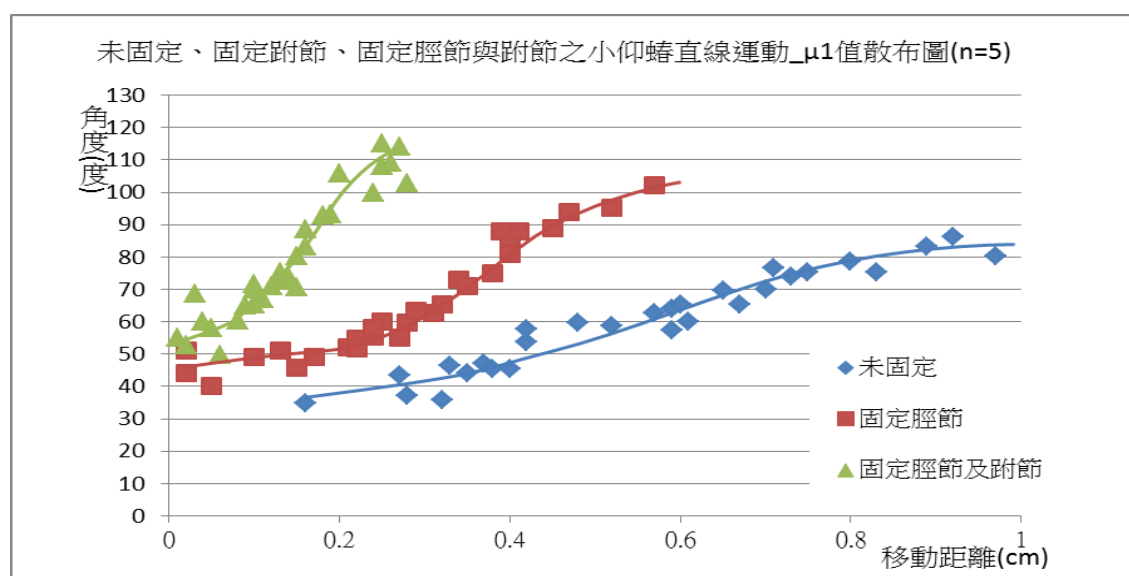


Fig.20 未固定、固定脛節、固定脛節及跗節之 μ_1 擺幅散布圖

以移動 0.2cm 之距離為例，正常之小仰蝨僅需 35 度之擺幅便可達到；相較之下，固定跗節後之小仰蝨則需揮動 50 度；而此段距離，腳節皆固定後之小仰蝨需要揮動達 103 度才能達到。

考慮運動初始時，蟲身與腿節即有至少 40~45 之角度差，而 θ_1 與 φ_1 之最大值約為 175 度時擺至身體最末端，故 Max-Min 之最大角度約被限制在 135 度以內(175-40=135)。據此推論，一次最充分的 135 度之擺幅能驅使正常之小仰蝨向前行進約 1.6cm，甚至繼續漂行一段距離。相對地；固定跗節後的小仰蝨僅能行進約 0.6cm，而固定脛節及跗節後的小仰蝨更只能前進約 0.3cm。

然而，未固定組的擺幅多在 100 度以下；而固定手術後的小仰蝨卻有較高頻率大擺幅運動，推測其原因為在小仰蝨加速時，固定組的阻力較未固定組的小而導致。

五、未進行固定手術與進行固定手術後的小仰蝨之直線運動移動速率

以實驗二中小仰蝨(甲)之 c 段運動為例，討論未進行固定手術與進行固定手術後之 v-t 圖與其移動距離。

小仰蝨(甲)之 c 段運動最大擺幅為 58.8 度，依照此角度在小仰蝨(甲)固定跗節、固定跗節及脛節的運動中尋找接近 58.8 度的運動以控制變因，並列表格(表.7)及 v-t 圖如下。

編號	v	v'	v''
處理方式	未固定	固定跗節	固定跗節及脛節
擺幅 Max-Min(度)	58.8	58.0	60.1
至動作歸位後總移動距離(cm)	0.52	0.28	0.10

表.7

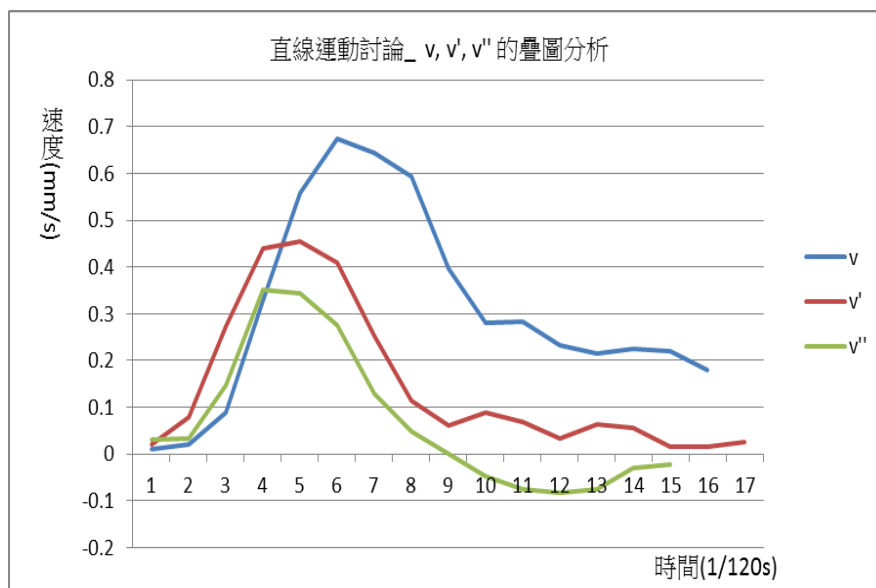


Fig.21 未固定、固定脛節、固定脛節及跗節之 v-t 圖

以下將分成加速段、減速段、漂行段來進行討論。

◎定義：加速段：自運動開始時至蟲身有最大運動速率時為加速段。

減速段：自蟲身有最大運動速率至速率漸趨平緩時為減速段，其分界點約在腿節回到初始位置時，此段之前蟲身皆呈現大幅度的減速。

漂行段：自減速段至運動結束，此時蟲身速率緩緩下降。

加速段：由疊圖中可發現，三組數據初始蟲身之加速度皆相當接近，但 v 組運動能加速到更高的速度，且會維持一段時間後才下降。

減速段：未固定及僅固定跗節兩組(v、v'組)速度因阻力而下降，其中 v'組甚至速度接近 0。更令人震驚的是固定脛節與跗節後的運動 v''組在運動後段呈現負值，即每段運動後還會倒退一小段才停下。

漂行段：由於小仰蝨蟲身與泳足皆極為流線，減速段結束時的速度將決定其接下來的漂行距離。在 v 段中其能繼續漂行一長段距離直至速度為 0，而固定脛節與跗節後的 v''段則將緩緩倒退直至停下。

六、小仰蝽運動力學分析

【靜止情況】：小仰蝽在水中靜止時，主要會遇到的力有二：

1. 浮力 B ：

在小仰蝽的翅下具有**氣室**，為其主要浮力來源。常溫下小仰蝽潛水時間平均約3~5分鐘不等，換氣時利用腹部流蘇狀細毛破壞水面表面張力以導入空氣至翅下，而超疏水性的翅面可有效留住空氣，提供小仰蝽的浮力與潛泳時氧氣來源。

2. 重力 W ：

小仰蝽成蟲平均重量為 $12.43 \pm 0.18 \text{ mg}$ ，其中雌蟲比雄蟲略重。

小仰蝽在水中靜止時， **B 約略等於 W** 以維持身體平衡。進行捕食或換氣前後會藉由改變氣室內之空氣量來達到上升下降或前傾等較為複雜的動作。

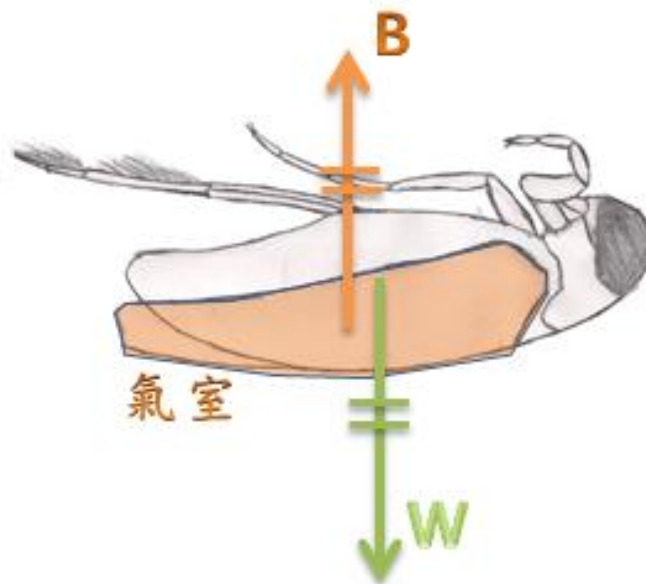


Fig.22(a) 靜止時的小仰蝽力學分析

【加速段情況】：小仰蝨進行加速段運動時，主要會遇到的力有四：

1. 浮力 B
2. 重力 W
3. 後足推進力 F' ：（包含 F'_{Tarsus} 、 F'_{Tibia} 、 F'_{Femur} ）

當小仰蝨揮下後足時，腿節、脛節、跗節與水產生之阻力 F 會轉換為反作用力（在此以 F' 表示）。

其中因為脛節與跗節上具有刷狀細毛且其揮動面積相當大，因此造成的反作用力（ F'_{Tarsus} 、 F'_{Tibia} ）亦較大。而腿節造成之反作用力（ F'_{Femur} ）則較小。

4. 身體阻力 F_{Body} ：

加速段時小仰蝨身體阻力無法轉換為反作用力前進，故小仰蝨盡可能地將前足與中足收起，此時身體形狀略呈子彈型，降低水阻。

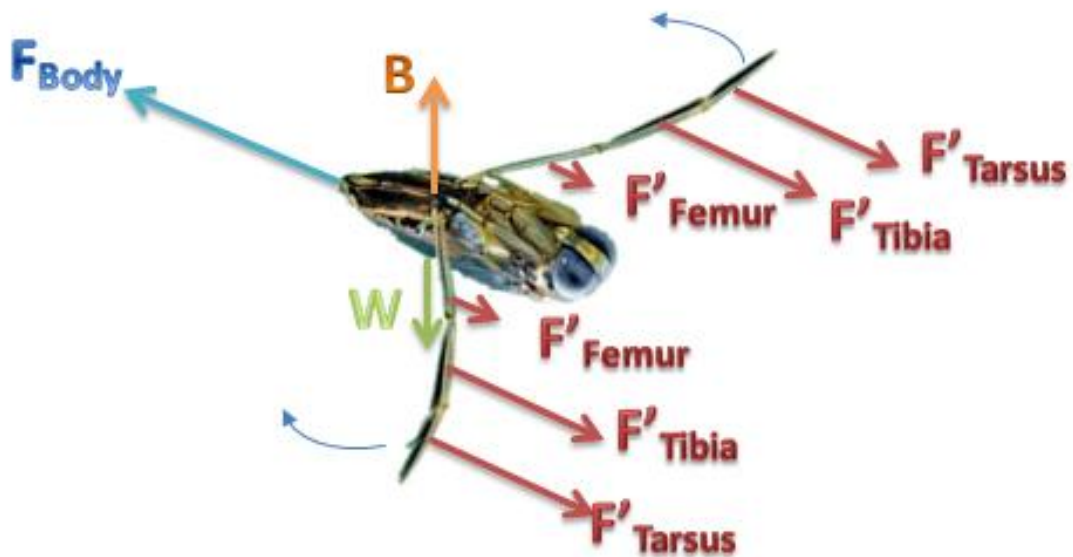


Fig.22(b) 加速段的小仰蝨力學分析

【減速段運動情況】：小仰蝽進行減速段運動時，主要會遇到的力有三：

1. 浮力 B
2. 重力 W
3. 阻力 F ：

- (1) 身體阻力 F_{Body} ：與加速段時相同，仍為蟲身最主要的阻力來源。
- (2) 腿節阻力 F_{Femur} ：在減速揮回時與正面接觸水流，水阻大。
- (3) 脛節阻力 F_{Tibia} ：與水流保持一定夾角降低水阻，阻力相較於腿節少了許多。
- (4) 跗節阻力 F_{Tarsus} ：與脛節相同，在揮回過程前半段幾乎平行水流。

減速段時遭遇水阻，細分為以上四項，其中 $F_{\text{Body}} > F_{\text{Femur}} > F_{\text{Tibia}} > F_{\text{Tarsus}}$ (下圖僅依照水阻相對大小來繪製)，而我們將其水阻值總和計為 F_D (Drag Force)。可以發現腿節造成之水阻值 F_{Femur} 相較另外兩個腳節為大，故其特化後更加細長且不具刷狀毛以降低水阻。

為了求得其 F_D 之估計值，我們將進一步進行其雷諾數 Re 值之估計。

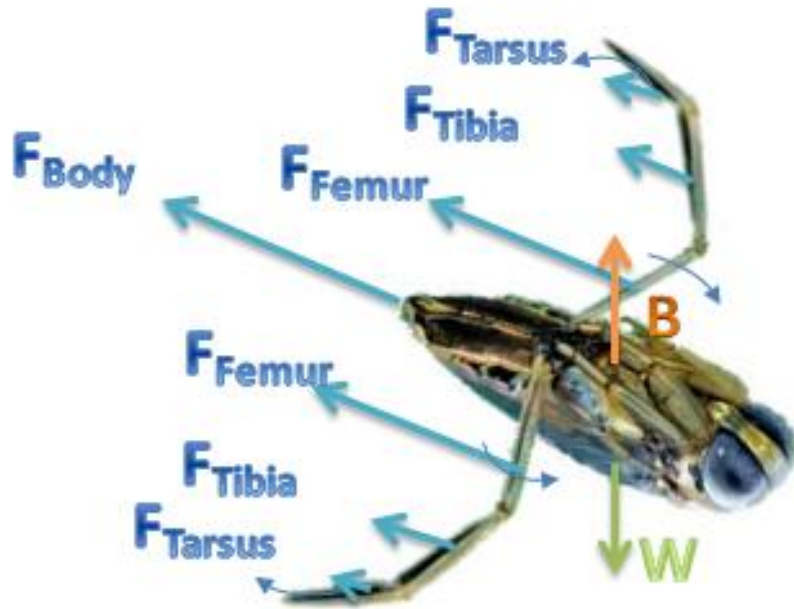


Fig.22(c) 減速段的小仰蝽力學分析

【力學分析】：

考慮小仰蝨運動過程所受總計的阻力 F_D ：

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho v \quad \text{式(1)}$$

其中：

C_D = 阻力係數(drag coefficient)

A = 參考面積(m^2)，在此考慮泳足運動時取泳足垂直運動方向(正面)上的表面積。

ρ = 流體密度(kg/m^3)

v = 平均流速(m/s)，在此為水體與小仰蝨之相對流速。

利用上述公式，以**實驗二**中小仰蝨(甲)之 c 段運動為例，進行整段運動之詳細分析。在討論過程中，主要影響小仰蝨之阻力的因子有二：泳足表面積 A 、水和蟲身相對流速 V 。

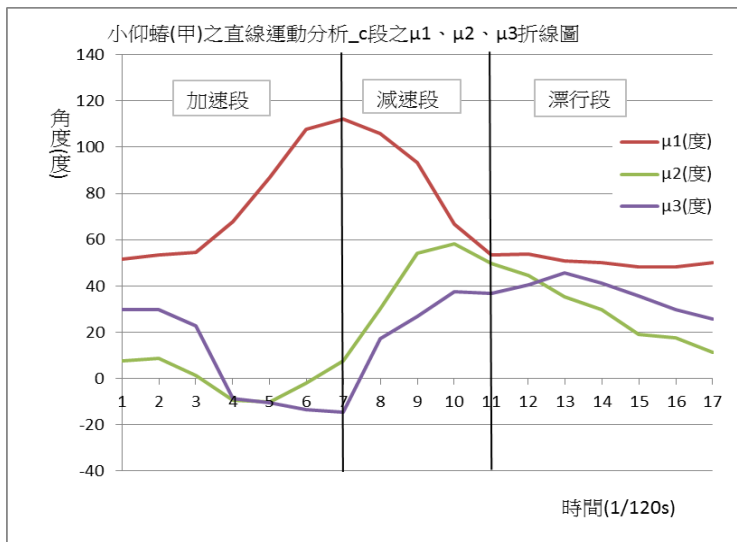


Fig.23(a) 小仰蝨直線運動 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 折線圖

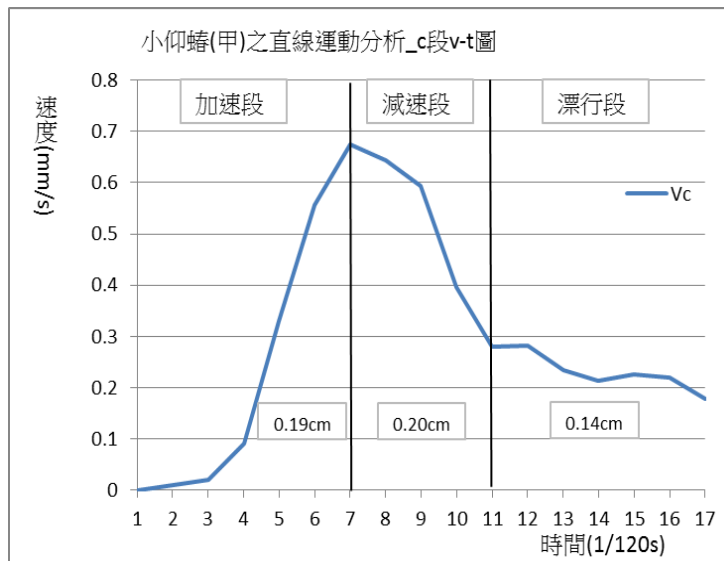


Fig.23(b) 仰蝨直線運動 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 v-t 圖

1.加速段：

- (1)、腿節：大幅度揮動，其擺幅約在 50~130 度區間內，帶動脛節與跗節向後擺動。當 μ_1 有最大值時，蟲身恰有最大前進速率。
- (2)、脛節、跗節：其上有細毛，不多加施力，使其順著水流揮動以掃過最大靜水面積 A ，其角度甚至能達到負值，此時泳足如揮動的槳下揮。此時與水之阻力 F_D 會變成反作用力，帶動蟲身前行。
- (3)、蟲身：將前足、中足收起貼近身體(如飛機起飛後將機輪收起減少阻力)，使身體呈現流線型以降低壓力阻力的作用。

加速段策略：增大泳足與水體之摩擦力，造成反作用力推動蟲身；而蟲身須盡可能地減少摩擦力維持流線型使重心向前移動。

2.減速段：

- (1)、腿節：在**實驗一**中發現其上沒有細毛的構造且較細。推測原因是減速段時腿節不可避免的需要以相同方式揮回，但此時減速時有極大速度，此時的 F_D 會因為 V^2 值變大而大幅增加，造成向後之阻力；加速時腿節造成的反作用力將快速被消耗掉。故縮減其表面積，使其較細以降低減速時的阻力。
- (2)、脛節、跗節：在減速段一開始時，其與腿節的角度快速增大，順著水流而行。其原理乃因足上的細毛有極大的與水接觸表面積，且蟲身平均速率相當快。為了減少式(1)中的 A 值(泳足正面的總表面積)，故將脛節與跗節盡可能地收回(降低 A 值)並靠近身體(降低蟲身的壓力阻力)。此時若脛節與跗節被固定住，由於 V^2 值甚至比剛開始時大，其造成的阻力是有可能使蟲身後退的！此亦解釋了討論六中的減速段倒退現象。
- (3)、蟲身：雖然腿節、脛節及跗節盡所能的降低阻力造成之影響，但最末速度還是約只有最高速度的 1/3，然而當動作皆定位後，繼續緩緩漂行增加移動距離。

減速段策略：脛節與跗節以最低阻力回到初始位置，故迅速揮動到大角度以避免刷狀毛與水流正面相會；腿節則不可避免會造成大阻力，故特化為細長狀且無刷狀毛。

3.漂行段：

- (1)、腿節、脛節、跗節：定位並恢復成初始動作，脛節與跗節雖皆大面積與水接觸，但其流線型構造並不會快速消耗在水中之動能，使其尚能乘著水流緩緩漂行。
- (2)、蟲身：漂行距離深受減速段結束時之速度影響，但還能有效帶動蟲體移行一段距離。

漂行段策略：蟲身維持流線型漂行以換取距離，而突出的泳足及其上的毛也呈現機翼般平板狀的流線型構造。

七、小仰蝽之轉彎運動分解圖與討論

一、轉彎運動中折線圖(Fig.16(a)~(d))之討論

加速段：

左足腿節揮動的角度大於右足，產生較大的推力。而左右足的脛節角度一開始時呈現較小(甚至是負值)的角度，在加速段末，左足跗節會呈現出負值，是為了划過大量的水體，相對之下，右足跗節並沒有大幅度的擺動。

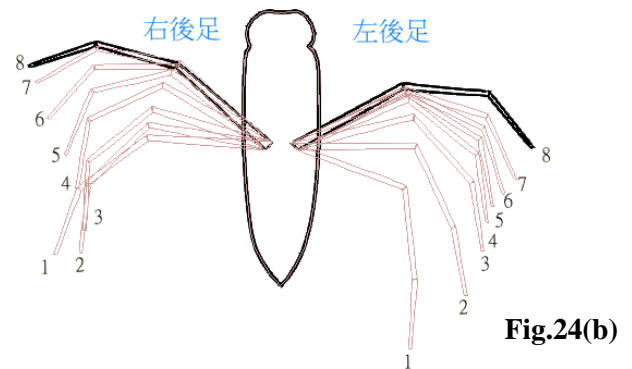
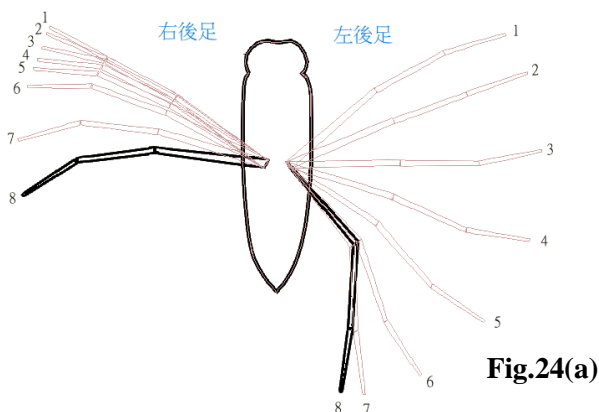
減速段：

左足腿節迅速地回復至初始狀態，最後角度與右足持平，以待下次擺動，左右脛節則迅速地回復至初始狀態。跗節在這段時期角度並沒有大幅度的變化，主要是為了穩定水流及保持平衡。

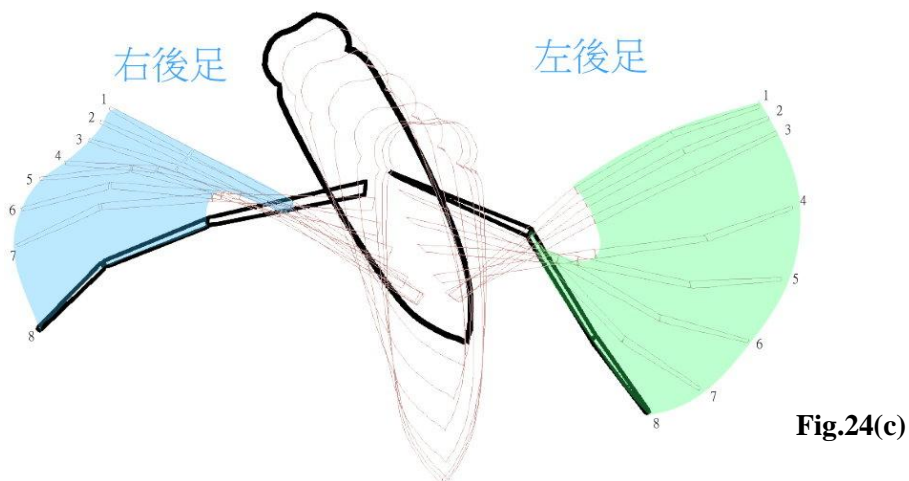
二、轉彎運動中分解圖(Fig.23(a)~(c))之討論

取實驗四中小仰蝽(甲)之轉彎運動，將此段運動利用動畫製作軟體 Anime Studio Pro 進行繪製如下：

(1)、小仰蝽之轉彎運動且蟲身固定於一點(加速段、減速段)



(2)、小仰蝽之轉彎運動且但不固定蟲身(加速段)



※其中，開啟洋葱皮工具後，每幀間隔時間為 0.007s

將小仰蝽運動過程繪製成分解圖且不固定蟲身(**Fig.23(c)**)，可看出小仰蝽在水池中進行一小段轉彎運動的過程。因小仰蝽在運動過程中所推動的總靜水水量近似為分解圖中脛節與跗節上的刷狀毛所揮過之面積。

圖中可發現左足揮動過的面積大於右足。由於在運動過程中，因揮動時蟲身也在前進，故真正能揮過的面積並不如固定蟲身(**Fig.23(a)**)大。但左足在運動過程中以身外一點為轉動中心，當前進時，恰能以此點為中心揮動左足，以達到轉彎時能掃過的最大面積，直線運動時也是利用此法行進。右足則以小角度揮動腿節的方式來縮小其揮動面積，值得注意的是此時跗節與脛節會近似與身體垂直，推測其具有穩定水流與維持平衡的作用，確保小仰蝽能順利轉彎。

柒、結論

- 一、小仰蝨在不同運動中，使能量耗損最少並達到最佳推進效果的運動策略如下：
 - (1)、直線運動—腿節之擺幅為決定其移動距離之關鍵，而脛節、跗節之分節構造能使其在加速時微調角度，以與水體有最大接觸面積；減速時則擺動脛節與跗節，使刷狀毛與水流方向平行。
 - (2)、轉彎運動—腿節擺幅之差角為決定其移動方向與距離之關鍵，此時脛節與跗節角度之調整，一側扮演穩定水流的功能，而另一側則大幅度揮動而使身體旋轉。
- 二、小仰蝨游泳足各腳節之型態與功能整理如下：
 - (1)、腿節：細長而不具刷狀毛的原因是為了盡可能的減少腿節之阻力，而不讓減速段的速度大幅下降，並且使脛節與跗節作最有效的延伸。
 - (2)、脛節：具刷狀細毛，加速時協助推進，但在減速段時會收回靠近身側，以減少阻力。
 - (3)、跗節：功能與脛節相似，但在直線運動與轉彎運動中，跗節的角度會微調，使其更能精準調控其前進方向，並與水體作最大面積之接觸，以協助推進。

捌、未來展望

- 一、了解小仰蝨所具有的超疏水性表面及細毛與水阻之相關性。
- 二、分析小仰蝨之後足刷狀毛在運動過程中之角度與表面積。
- 三、研究小仰蝨在三維空間中的運動。
- 四、測試小仰蝨在不同水流環境中的游泳情形。
- 五、建構小仰蝨能量損益之分析圖，以**前進每單位身長所需校耗能量與體重**化成比值之後可與人類水中交通工具(例如:獨木舟、潛水艇等)，或其他水中昆蟲(例如:負子蟲、龍蝨等)進行對照，以找出在水中運動時，最有效率之運動模型。

玖、參考資料

1. Creation Wiki <http://creationwiki.org/Backswimmer>
2. 昆蟲的足 <http://www.imdap.entomol.ntu.edu.tw/Learning/Learning/outer/legbasic.swf>
3. Philip G.D. Matthews and Roger S. Seymour, 2008 , Haemoglobin as a buoyancy regulator and oxygen supply in the backswimmer (Notonectidae, Anisops) , *The Journal of Experimental Biology* 211, 3790-3799
4. William E. Garrett, JR. and Donald T. Kirkendall, Exercise and Sport Science, *Lippincott Williams & Wilkins*
5. P.J.Gullan and P.S.Cranston, 2004, 昆蟲學概論, 合記圖書出版社
6. Çengel Cimbala, 流體力學, *Mc Graw Hill*
7. 欽俊德, 動物的運動, 暨南大學、清華大學出版

拾、附錄

	頭至轉節 長 (mm)	轉節至尾 端長 (mm)	腿節長 (mm)	脛節長 (mm)	跗節長 (mm)	腿/身
<i>A</i>	5.73	4.81	3.64	2.87	2.45	0.85
<i>B</i>	4.85	4.10	3.43	3.03	2.47	1.00
<i>C</i>	5.15	4.39	3.56	3.01	2.38	0.94
<i>D</i>	5.44	4.85	3.60	3.05	2.51	0.89
<i>E</i>	5.61	4.73	4.10	3.26	2.55	0.96
<i>F</i>	5.73	4.77	3.93	3.14	2.64	0.92
<i>G</i>	5.56	4.56	4.06	3.10	2.47	0.95
<i>H</i>	6.19	5.06	4.60	3.35	2.64	0.94
<i>I</i>	5.52	4.73	3.85	3.26	2.26	0.91
<i>J</i>	5.98	5.23	4.02	3.22	2.59	0.88
<i>K</i>	5.69	4.64	4.73	3.26	2.34	1.00
<i>L</i>	5.82	4.69	4.06	3.14	2.43	0.92
平均	<u>5.61</u>	<u>4.71</u>	<u>3.96</u>	<u>3.14</u>	<u>2.48</u>	<u>0.93</u>
標準差	0.33	0.27	0.37	0.13	0.11	0.04

表.1 小仰蝽身長、泳足長測量結果