

臺灣二〇〇八年國際科學展覽會

科 別：動物學

作品名稱：環境因子影響美洲蜚蠊觸角擺動模式之研究

得獎獎項：第三名

匈牙利正選代表：匈牙利 2008 國際科學博覽會

學校 / 作者：臺北市立中山女子高級中學 柯庭晴

作者簡介



柯庭晴就是我！今年17 歲，平常喜歡在睡前玩玩數獨，每天上學最期待的莫過於專題研究時間和放學與老師研究專題的時光。我會喜歡生物主要是受到我父親、國中的生物老師以及現在的生物老師影響。當然，生物本身的內容也是它深深吸引我的地方，許多的”例外”加上它與日常生活是那麼的息息相關，正是它令我感到有趣的地方。每當想出一個實驗、開始進行、直到完成它，都令我樂此不疲！

作品名稱：環境因子影響美洲蜚蠊觸角擺動模式之研究

英文標題：**The effects of environmental conditions on the antenna reactions of American cockroach**

英文摘要(Abstract)

The aim of this study is to investigate the different swing motion modes of antennae of American cockroach (*Periplaneta americana*) by computer-aided Imaging Analysis. The parameters of each swing movement were calculated in order to analyze how light (including light stimulation or light adaptation), vibration, food and drinking water may affect the antennae behavior of American cockroach. It was found that the antennae swing motion modes were significantly different under different types of stimulus. If two different types of stimulus occurred at the same time, the reactions of antennae motion may become conformable. Under different environmental conditions (such as food or water), same stimulus may result in different reactions. The antennae behavior has shown to be significantly affected by environmental conditions and individual physiological status.

Through the observation with scanning electron microscope (SEM), it was found that the antennae has many types of sensilla; and the distribution and quantity of these sensilla are significant different between sexes.

In conclusion, not only the antennae are considered as the sensitive receptors, but also they are the important effectors to reflect physiological status and environmental conditions. The current model is suitable for the development of specific detectors in the applications of Bionics to detect the physical and chemical factors in certain environments.

中文摘要：

本研究以攝影紀錄的方式，透過電腦進行影像分析，記錄不同刺激下美洲蜚蠊(*Periplaneta americana*)的觸角擺動模式，計算出各項觸角運動的參數，以瞭解光線(光刺激或光適應)、震動刺激、喝水與進食對其觸角行為的影響。我們發現不同因子的刺激下，觸角擺動的模式具有差異，若兩種不同的刺激同時發生，蜚蠊觸角的行為亦具整合性的反應。蜚蠊於不同狀態下(如喝水或進食)，對相同的刺激有不同的反應，證明蜚蠊觸角的行為模式，受環境因子與個體狀態調節。透過掃描式電子顯微鏡的觀察，也發現觸角具多種感覺毛，且雌雄的感覺毛的分佈與數量具有差異。綜合以上發現，證明觸角除了為敏感的感受器，亦為能反映出生理與環境狀態的動器，同時也適合進行發展檢測器的仿生學應用，用來檢測環境中物理及化學因子。

壹、前言

一、研究動機

「動物的行為分析」是一個非常有趣的研究領域，從國中到高中的生物課堂上，我們已學習許多動物行為的相關例子(例如高二生命科學第六章第四節-動物行為)。而我們身旁的許多生物，身體構造雖較為簡單，但行為表現卻是複雜多樣的，因此我們很好奇，是否無脊椎動物(如：昆蟲)，也可作為研究動物行為的實驗動物。

我們以蜚蠊(蟑螂)作為我們的實驗動物，是因為它具備了許多模式生物的條件，如：數量多、易取得、成本低、易安置、生命力強...等。而在眾多的蜚蠊品種中，我們選擇以美洲蜚蠊(*Periplaneta americana*)作為我們的實驗材料，因為牠的體型大且觸角長，易於觀察，也是日常生活中常見的昆蟲，非常親近人類的的生活環境。

依據日常生活中的觀察以及我們查閱的文獻資料，皆發現昆蟲的觸角擺動行為與其本身活動表徵有很大的關聯。對昆蟲而言，立即、準確地偵測四周環境極為重要，故其觸角的擺動模式可反映出蟲體對環境探索的程度，與其生理的狀態。因此我們以震動和照光等刺激，並在黑暗與明亮的環境下分別觀察與記錄蜚蠊的觸角擺動行為，並探討蜚蠊在喝水與進食的情形下，觸角運動模式的差異，期望能觀察到蜚蠊在不同因子的刺激下，觸角擺動模式的特性與差異，並且作為未來發展為生物型環境探測器之仿生學應用的基礎。

二、研究目的

本研究欲解決以下問題：

- (一)、建立昆蟲觸角擺動的動物模式。
- (二)、黑暗與有光的環境下，震動刺激對蜚蠊觸角的擺動模式有何影響？
- (三)、照光刺激對蜚蠊觸角的擺動模式有何影響？
- (四)、震動與照光同時刺激，對蜚蠊觸角的擺動模式有何影響？
- (五)、在進食與喝水的情況下，震動刺激對蜚蠊觸角的擺動模式有何影響與差異？
- (六)、利用掃描式電子顯微鏡，觀察、比較雌雄蟲體觸角上，各種不同感覺毛的種類、數量及分布。

貳、材料與方法

一、研究器材與設備(表一)：

表一 實驗裝置器材

編號	名稱	規格 × 數量	備註
1	鐵架	中型 × 2	
2	廣用夾	3	
3	電扇	1	
4	寶特瓶	2L × 1	
5	黑布	約 1x1m × 1	
6	軟木塞	3	
7	玻棒	約 30cm × 1	
8	長尾夾	7	
9	保麗龍球	直徑約 10cm × 1	
10	手電筒	1	14 顆白色 LED 燈泡
11	攝影機	1	
12	鏡子	1	
13	載玻片	2	
14	投影用塑膠片	約 1 x 3cm × 1	
15	鐵釘	1	
16	膠帶	1 段	
17	長尾夾	1	
18	白紙	數張	
19	紅色玻璃紙	約 5x10cm × 1	
20	支架	10	
21	馬達	1	
22	LED 燈泡	紅色 × 1；白色 × 3	
23	厚紙板	2~3 張	
24	軟塑膠墊	1	
25	水	約 15mL	
26	飼料(雞飼料)	約 15mL	成分：大麥、玉米

二、實驗動物：

美洲蜚蠊(*Periplaneta americana*)飼養於室內昆蟲箱，為本校自行飼養繁殖。飼養之環境溫度約 25~28°C，定期換水、提供充足飼料。進行第二部分實驗所使用之蜚蠊，於實驗前一星期停止提供飼料或水。實驗的進行皆以色澤明亮、身體外表無破損之雄性成蟲作為實驗動物，以避免母蟲生殖週期或攜夾卵鞘的干擾。實驗過的動物不再進行實驗。

三、研究步驟與方法：

(一)、光線與震動影響美洲蜚蠊觸角擺動模式之研究

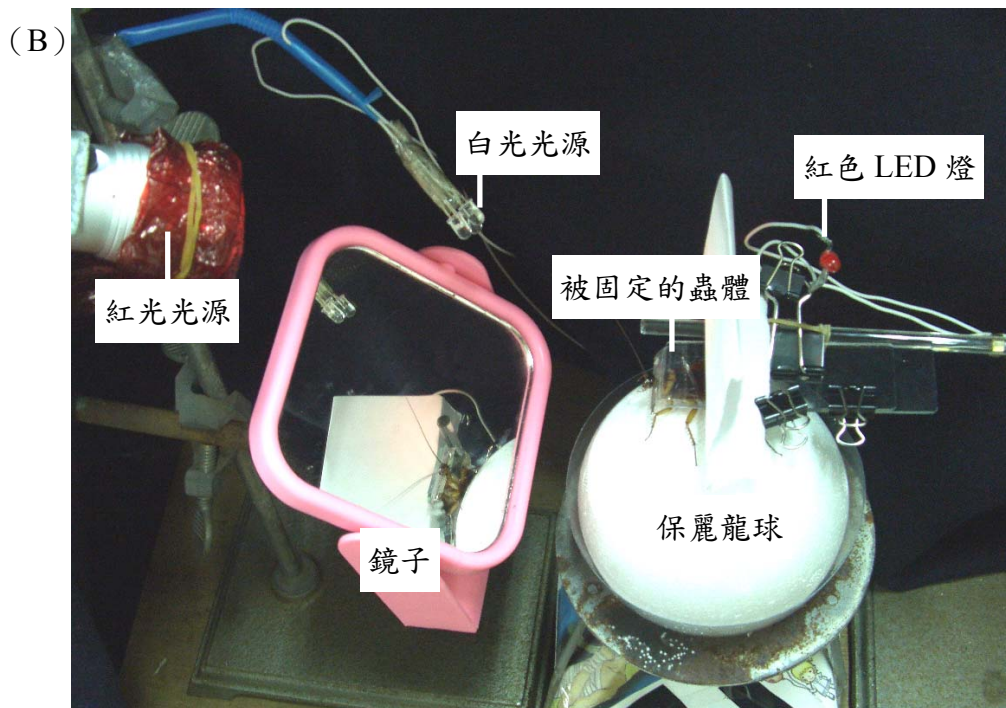
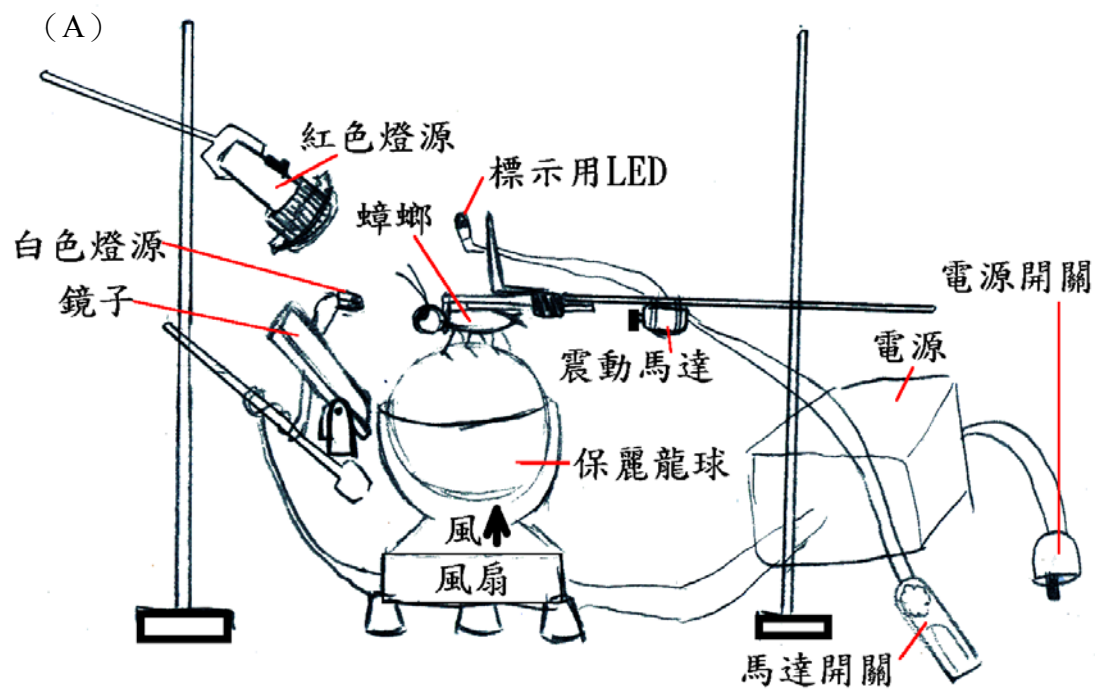
我們架設了一個固定蜚蠊的設備(圖一)：蜚蠊由兩片載玻片與塑膠片固定於支架上，而蜚蠊置於一保麗龍球上，保麗龍球下方由一風扇透過漏斗向上吹風，使保麗龍球漂浮於空中，如此蜚蠊可於保麗龍球上自由行走、運動。數位攝影機(DV)置於蟲體正上方，向下拍攝蜚蠊的觸角運動過程。利用此裝置，可用於探討蜚蠊於光適應(以白燈模擬日間)及暗適應(以紅燈模擬黑間)期間，或受震動刺激(以馬達的振動模擬外在環境干擾)以及光照刺激等環境因子，對蜚蠊觸角運動模式的調節作用。

將 LED 手電筒罩上紅色玻璃紙，作為紅色光的燈源(照度為 3.8 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$)。由於蜚蠊眼睛不具接收紅光波長的色素細胞，故可將紅色光源作為暗適應期間攝影的照明。另外以白色 LED 燈作為光適應或照光刺激的光源(照度為 12.46 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$)。

在固定蟲體的支架上以膠帶綁上一個馬達，通電後可產生震動(原理為馬達旋轉銅柱之圓心並非其重心，震動頻率約為 81.2 次/秒)，並以與馬達並聯的方式，與支架上安置一棵紅色 LED 燈，使馬達通電震動的同時該燈亮起，以判斷震動刺激的時間。

我們將實驗分為以下六個組別：

1. 暗適應：將蟲體置於暗適應的狀態中 15 分鐘，使蜚蠊適應馴化。以數位攝影機紀錄蟲體觸角的擺動行為，每次紀錄 1.5 分鐘。
2. 光適應：光適應 15 分鐘後，紀錄蟲體觸角的擺動行為。
3. 暗適應期間震動刺激：暗適應 15 分鐘後，使馬達通電產生震動刺激。紀錄 10 秒鐘後停止震動刺激，共攝影記錄 20 秒。
4. 暗適應期間照光刺激：暗適應 15 分鐘後，以白色 LED 燈照光刺激。紀錄 10 秒鐘後關掉燈源，共攝影記錄 20 秒。
5. 暗適應期間同時震動與照光刺激：暗適應 15 分鐘後，同時給予震動刺激與照光刺激。紀錄 10 秒鐘後關掉燈源與震動馬達，共攝影記錄 20 秒。
6. 光適應期間震動刺激：光適應 15 分鐘後，使馬達通電產生震動刺激。紀錄 10 秒鐘後停止震動刺激，共攝影記錄 20 秒。



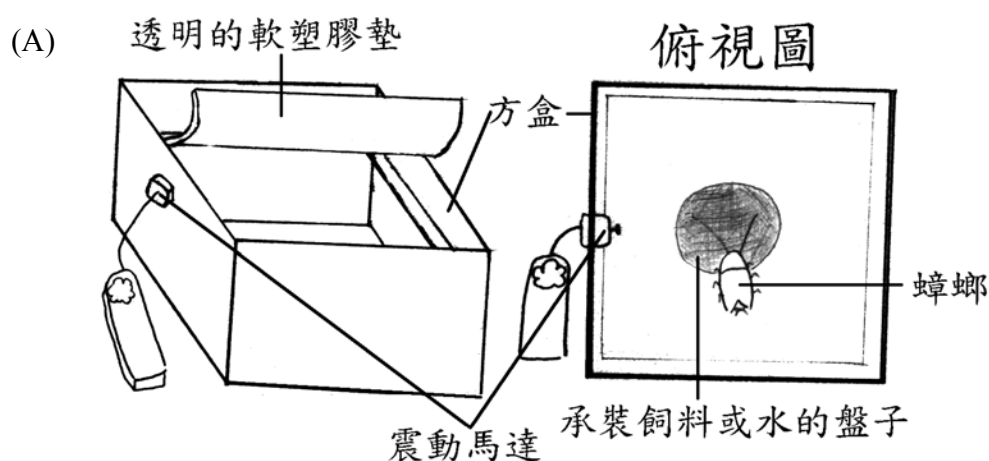
圖一 研究蜚蠊觸角運動模式的實驗設備。(A)示意圖。(B)實際照片。

(二)、喝水與進食影響美洲蜚蠊觸角擺動模式之研究

將厚紙板裁成適當的大小後組裝成無蓋的方盒(約 15 cm×15cm×10cm)，並在上方蓋上透明的軟塑膠墊，如此蜚蠊可於方盒內自由行走、運動，同時可以觀察其觸角的擺動行為(圖二)。於方盒上方割一個洞將馬達卡入，通電後可產生震動。數位攝影機(DV)置於蟲體正上方，向下拍攝蜚蠊的觸角運動過程。以淺盤承裝飼料(雞飼料)或水。飼料先以研鉢將飼料搗成粉末防止蜚蠊攜帶出攝影範圍。利用此裝置，可用於探討蜚蠊於進食與喝水期間，震動刺激對蜚蠊觸角運動模式的影響。

我們將實驗分為以下二個組別：

1. 進食期間震動刺激：蜚蠊進食時開始攝影記錄，30 秒後震動刺激 10 秒，每次紀錄 60 秒鐘。
2. 喝水期間震動刺激：同上。

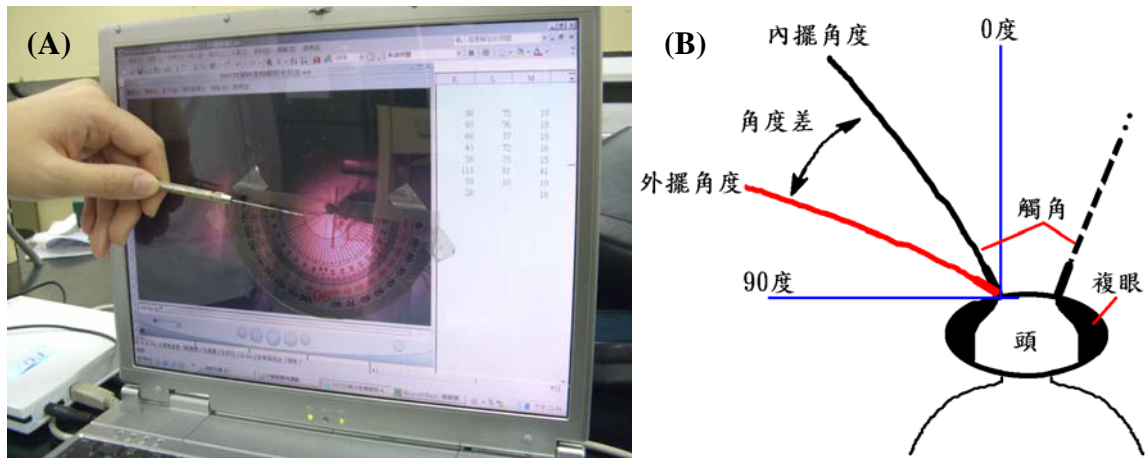


圖二 研究蜚蠊進食與喝水期間觸角運動模式的實驗設備。

(A)示意圖。(B)實際照片。

三、測量的參數：

將所記錄的影片於個人電腦上逐張播放(每秒 30 格畫面)，直接於螢幕上測量蟲體觸角之角度(圖三)並直接記錄，本研究皆測量蜚蠊的左觸角。



圖三 於電腦螢幕上進行蟲體觸角角度的測量。

(A) 測量過程照片。

(B) 蟑螂觸角內擺角度、外擺角度與角度差之示意圖。

本研究對觸角擺動行為所測量的參數如下：

(一)、擺動頻率：在一完整擺動行為之紀錄中，擺動次數總和除以所經歷的時間，單位為「次/秒」。

(二)、擺動角度

1. 內擺角度：觸角擺至最內側(即角度最小)時的角度，單位為「度」。
2. 外擺角度：觸角擺至最外側(即角度最大)時的角度，單位為「度」。

(三)、擺動角度差

1. 內擺角度差：觸角自最大角度擺至最小角度之角度差，單位為「度」。
2. 外擺角度差：觸角自最小角度擺至最大角度之角度差，單位為「度」。

(四)、擺動時間差

1. 內擺時間差：每一次內擺(最大角度擺至最小角度)所經歷之時間，單位為「秒」。
2. 外擺時間差：每一次外擺(最小角度擺至最大角度)所經歷之時間，單位為「秒」。

(五)、擺動角速度

1. 內擺角速度：內擺角度差除以內擺時間差，單位為「度/秒」。
2. 外擺角速度：外擺角度差除以外擺時間差，單位為「度/秒」。

參、研究結果

一、光線與震動影響美洲蜚蠊觸角擺動模式之研究

(一)、各處理組蜚蠊觸角擺動模式

若記錄蜚蠊觸角隨時間的角度變化(圖四)，可發現各處理組觸角擺動的模式明顯不同，顯示美洲蜚蠊對環境因子的刺激非常敏感，並可由觸角的行為反映出其生理狀態。

(二)、不同刺激對觸角擺動頻率的影響

暗適應情形下，照光刺激可增加擺動頻率(圖五)，但若同時照光並給予震動刺激，卻會減小單獨照光刺激的效應(但仍較對照組高)。暗適應時單獨給予震動刺激不會影響擺動頻率。若於光適應情形下，震動刺激可增加擺動頻率。

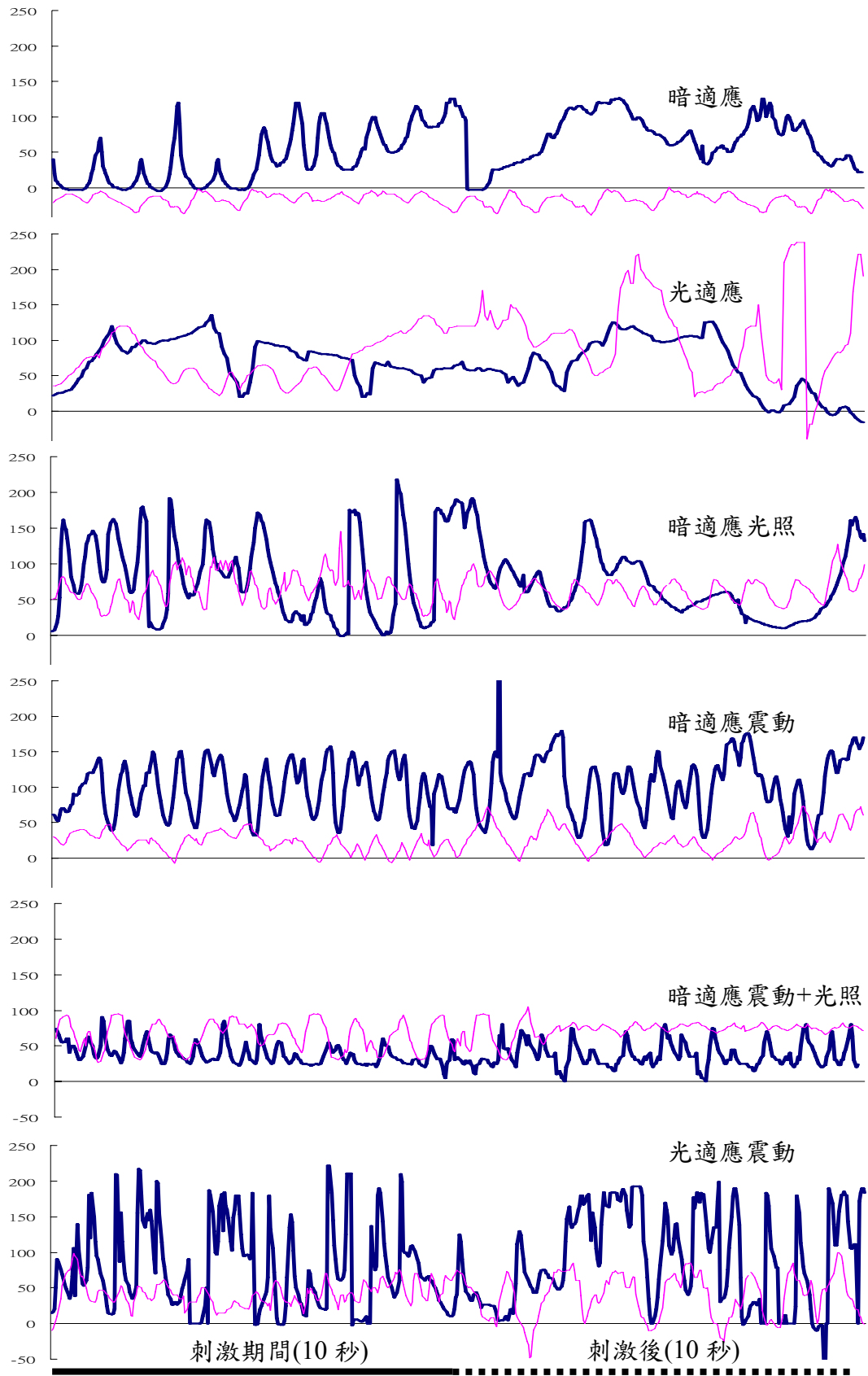
(三)、不同刺激對內、外擺角度差之影響

將各處理組所測量的參數，經統計整理於表二與表三，分別代表刺激期間與刺激結束後的參數變化，所測量的參數亦製成柱狀圖進行比較與判讀(請見附錄一：光線與震動影響美洲蜚蠊觸角擺動模式—實驗數據柱狀圖)。表四為測量各項參數的取樣數。光適應下之觸角擺動角度差較暗適應下為大(表二)。暗適應後給予照光刺激，擺動角度差會因外擺角度增加而增加，且照光結束後，擺動角度差因內擺角度減小而增大(表三)。

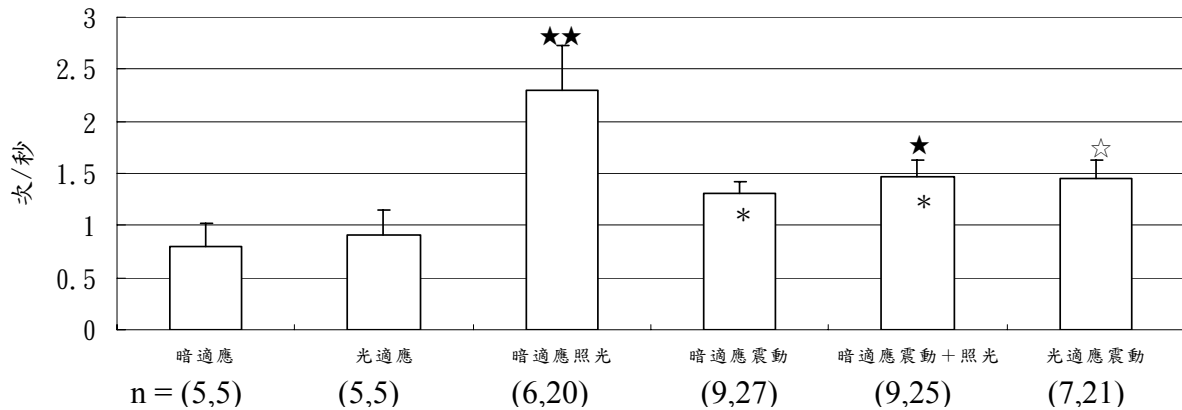
暗適應後給予震動刺激，擺動角度差增加，且增加程度大於照光刺激，且刺激結束後不回立即恢復(表三)，顯示震動刺激後之觸角擺動行為持續較久，且震動刺激對擺動角度差的調節作用大於照光刺激。暗適應下同時給予照光與震動兩項刺激，觸角擺動角度差增加，但因內擺角度較大角度差仍較單獨震動刺激小，且刺激結束後擺動角度差增加。此結果顯示照光刺激減弱了震動刺激對內擺角度的影響。

光適應後給予震動刺激，觸角擺動角度差因外擺角度增加而大於光適應處理組(表二)。與暗適應震動刺激一樣，刺激結束後不會立即恢復(表三)。若與暗適應震動刺激組比較，可發現光適應下震動刺激造成擺動角度差增加的效應，不及暗適應下震動刺激，以上數據顯示光適應或照光刺激皆會減少震動刺激增加擺動角度差的效應。

比較各處理組外擺角度差與內擺角度差(表二)，可發現兩者在各處理組皆不具統計上的差異。代表各因子對外擺角度差與內擺角度差具有相同的調節作用。



圖四 各處理組蟑螂於刺激期間與刺激後，俯視(藍粗線)與鏡內(紅細線)左觸角的擺動模式之比較。



圖五 各因子對蟑螂觸角擺動頻率的影響(mean±SE)。n = (個體數,測量次數)。

與暗適應組相較：單尾 t 檢定；★： $p < 0.05$ ；★★★： $p < 0.005$ 。

與光適應組相較：單尾 t 檢定；☆： $p < 0.05$ 。

與暗適應照光組相較：單尾 t 檢定；*： $p < 0.05$ 。

(四)、不同刺激對擺動時間差之影響

光適應不會影響觸角的擺動時間差(表二)。暗適應後給予照光刺激，擺動時間差減小，且刺激結束後立即恢復。

暗適應後給予震動刺激，觸角擺動時間差減小，但不及照光刺激的影響。暗適應後同時給予震動與照光兩項刺激，可減小擺動時間差，其程度小於單獨照光刺激，大於單獨震動刺激，顯示兩種刺激同時出現的調節作用，介於兩種刺激的單獨作用之間。

光適應後給予震動刺激，擺動時間差與暗適應下震動刺激一致。但刺激結束後，擺動時間差會減小。

比較各處理組觸角外擺與內擺的時間差(表二)，發現大部分的因子處理下，觸角的外擺與內擺時間差一致，其中暗適應下的震動刺激組與同時震動、照光刺激組觸角內擺時間大於外擺時間。

(五)、不同刺激對擺動角速度之影響

光適應下之擺動角速度大於暗適應(表二)。暗適應後給予照光刺激，可增加擺動角速度，且刺激結束後內擺角速度不會立即恢復，而外擺角速度可再增加。

暗適應後給予震動刺激，可增加內擺角速度，其效應大於照光刺激，且刺激結束後不會立即恢復(表三)。暗適應後同時給予照光與震動兩項刺激，可增加內擺角速度，且其效應大於單獨照光刺激，小於單獨震動刺激，而於刺激結束後擺動角速度可再增加。

光適應後給予震動刺激，擺動角速度大於光適應，但不及暗適應下震動刺激，且刺激結束後不會立即恢復。以上數據顯示，無論是光適應或照光刺激，皆會降低震動刺激增加擺動角速度的效應。

暗適應、暗適應震動組、震動與照光刺激組與光適應震動組，此四個處理組

的觸角外擺角速度大於內擺角速度(表二)。

表二 各處理組於刺激期間，各項參數與對照組(暗適應)之比較。

刺激期間	暗適應 ^a	光適應 ^b	暗適應照光 ^c	暗適應震動	暗適應 照光+震動	光適應震動	
內擺角度(度)	41.8±1.4	47.0±2.5 ^{>a}	43.1±1.5	17.8±8.3 ^{<a, <c}	30.8±3.6 ^{<a, <c}	43.0±1.5	
外擺角度(度)	74.6±1.6	88.6±2.5 ^{>a}	84.0±4.6 ^{>a}	100.4±2.5 ^{>a, >c}	95.8±2.3 ^{>a, >c}	107.1±2.3 ^{>b}	
擺動角度差 (度)	內擺 外擺	32.8±1.2 41.3±2.3 ^{>a}	40.9±4.6 ^{>a} 40.8±4.6 ^{>a}	84.8±9.5 ^{>a, >c} 84.0±8.7 ^{>a, >c}	65.6±4.5 ^{>a, >c} 65.0±4.2 ^{>a, >c}	65.0±2.2 ^{>b} 64.1±2.2 ^{>b}	
擺動時間差 (秒)	內擺 外擺	0.633±0.056 0.553±0.044	0.514±0.071 0.525±0.050	0.327±0.045 ^{<a} 0.291±0.035 ^{<a}	0.505±0.038 ^{<a, >c} 0.388±0.044 ^{<a, >c}	0.447±0.029 ^{<a, >c} 0.311±0.018 ^{<a}	0.414±0.022 0.372±0.041 ^{<b}
擺動角速度 (度/秒)	內擺 外擺	73.2±2.5 80.1±2.8	127.6±10.5 ^{>a} 127.1±6.1 ^{>a}	160.8±13.7 ^{>a} 163.4±6.5	237.9±17.1 ^{>a, >c} 458.7±45.8 ^{>a, >c}	192.5±8.7 ^{>a, >c} 287.9±19.0 ^{>a, >c}	228.0±12.1 ^{>b} 311.1±17.7 ^{>b}

註：與暗適應組相較：單尾 t 檢定；>a 或 <a 代表具顯著差異($\alpha=0.05$)。

與光適應組相較：單尾 t 檢定；>b 或 <b 代表具顯著差異($\alpha=0.05$)。

與暗適應照光組相較：單尾 t 檢定；>c 或 <c 代表具顯著差異($\alpha=0.05$)。

表三 各處理組於刺激後，各項參數與對照組(暗適應)之比較。

刺激後	暗適應照光	暗適應震動	暗適應 照光+震動	光適應震動	
內擺角度(度)	33.4±2.2 [*]	17.4±2.2	25.1±3.6	35.5±1.8 [*]	
外擺角度(度)	87.3±2.4	101.2±2.4	105.1±3.1 [*]	106.7±3.6	
擺動角度差 (度)	內擺 外擺	53.9±3.3 [*] 53.3±3.4 [*]	84.1±3.3 82.5±2.9	77.6±3.8 [*] 80.0±4.3 [*]	70.4±3.7 70.6±3.7
擺動時間差 (秒)	內擺 外擺	0.565±0.120 [*] 0.369±0.064	0.587±0.124 0.346±0.022	0.454±0.035 0.383±0.040	0.396±0.017 0.389±0.043
擺動角速度 (度/秒)	內擺 外擺	176.7±9.5 262.1±15.8 [*]	236.0±27.6 406.0±33.1	231.9±13.4 [*] 375.7±35.8 [*]	243.7±20.2 283.4±21.5

註：與刺激期間相較：單尾 t 檢定；*代表具顯著差異($\alpha=0.05$)。

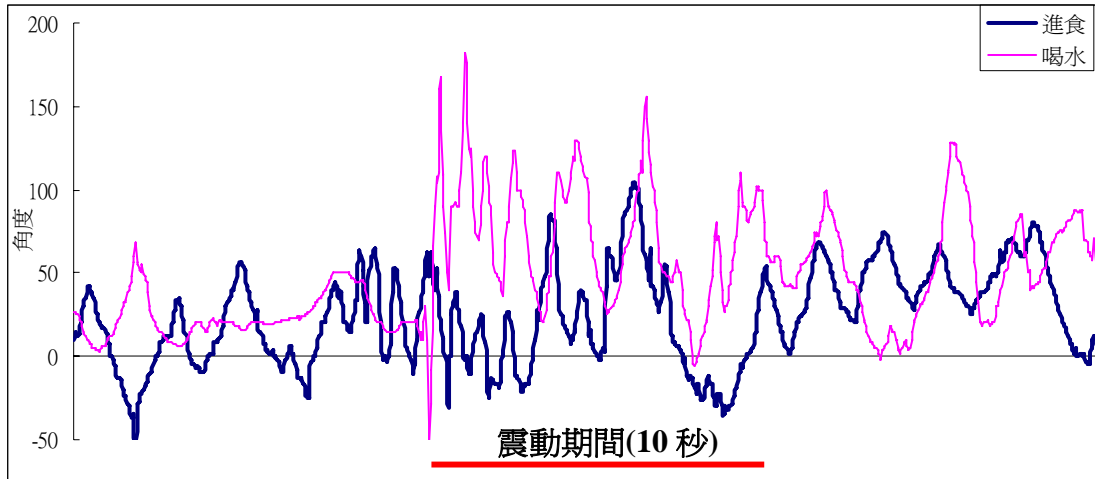
表四 測量各項參數的取樣數。

刺激期間	暗適應	光適應	暗適應照光	暗適應震動	暗適應 照光+震動	光適應震動
蟲體	5 隻	5 隻	6 隻	9 隻	9 隻	7 隻
觸角內擺 (刺激期間/刺激後)	327 次	267 次	353/316 次	292/408 次	319/333 次	252/363 次
觸角外擺 (刺激期間/刺激後)	324 次	266 次	354/314 次	300/412 次	328/336 次	254/362 次

二、喝水與進食影響美洲蜚蠊觸角擺動模式之研究

(一)、各處理組蜚蠊觸角擺動模式

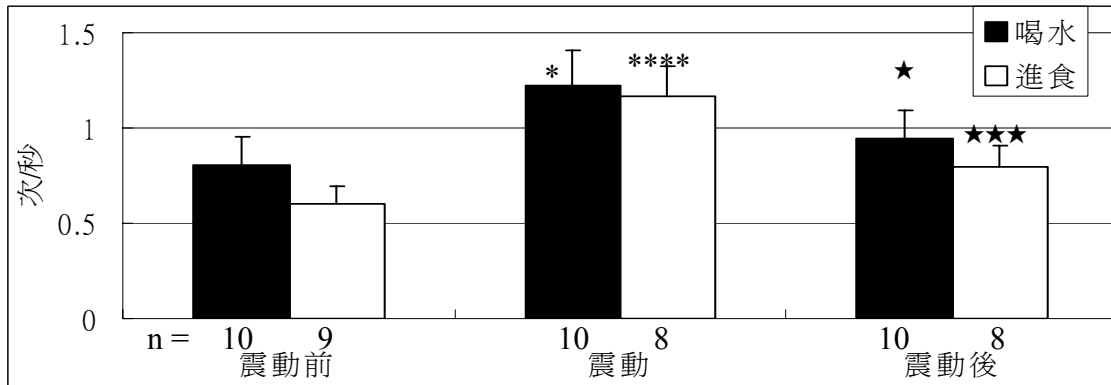
若記錄蜚蠊觸角隨時間的角度變化(圖六)，可發現蜚蠊於進食與喝水期間，觸角擺動的模式明顯不同。



圖六 蜚蠊於進食與喝水期間，受震動刺激的擺動模式。

(二)、不同刺激對觸角擺動頻率的影響

蜚蠊於喝水與進食期間，觸角擺動頻率不具差異(圖七)。在喝水和進食之情形下，震動刺激皆可增加擺動頻率，但喝水情形下震動前與震動期間之差異小於進食情形下之差異。在喝水與進食情形下，震動後之頻率皆小於震動期間，但喝水情形下之頻率差異小於進食情形下。



圖七 蜚蠊於喝水或進食期間，震動刺激前、中、後觸角擺動的頻率(mean±SE，n = 個體數)。

喝水與進食比較，於震動前、中、後皆不具差異(單尾 t 檢定， $p > 0.05$)

與震動前比較：配對單尾 t 檢定；*： $p < 0.05$ ；****： $p < 0.001$ 。

與震動比較：配對單尾 t 檢定；★： $p < 0.05$ ；★★★： $p < 0.005$ 。

(三)、不同刺激對內擺角度與外擺角度之影響

將各處理組所測量的參數，經統計整理於表五，所測量的參數亦製成柱狀圖進行比較與判讀(請見附錄二：喝水與進食影響美洲蜚蠊觸角擺動模式—實驗數據柱狀圖)。震動前之內擺角度和震動期間之內擺與外擺角度，於進食與喝水間具差異(表五)。蜚蠊在喝水情形下，震動前、中、後之內擺與外擺角度皆不具差異，震動期間之外擺角度大於震動前之外擺角度，震動後之外擺角度亦大於震動期間之外擺角度。在進食情形下，震動前、中、後之內擺與外擺角度皆不具差異。

(四)、不同刺激對內擺角度差與外擺角度差之影響

震動前之內擺與外擺角度差和震動後之內擺與外擺角度差，於進食與喝水間具差異(表五)。蜚蠊在喝水情形下，震動前、中、後之內擺與外擺角度差皆不具差異，震動期間之內擺角度差大於震動前之內擺角度差，震動期間之外擺角度差大於震動前之外擺角度差，震動後之內擺與外擺角度差小於震動期間之內擺與外擺角度差。在進食情形下，震動前、中、後之內擺與外擺角度差皆不具差異。

(五)、不同刺激對內擺時間差與外擺時間差之影響

震動前之外擺時間差、震動期間之外擺時間差、震動後之外擺時間差，於進食與喝水間具差異(表五)。蜚蠊在喝水情形下，震動前、中、後之內擺與外擺時間差皆不具差異，震動期間之內擺時間差小於震動前之內擺時間差，震動期間之外擺時間差小於震動前之外擺時間差，震動後之內擺與外擺時間差大於震動期間之內擺與外擺時間差，震動後之外擺時間差小於震動前之外擺時間差。在進食情形下，震動前、中、後之內擺與外擺角度差皆不具差異，震動期間之內擺與外擺時間差皆小於震動前之內擺與外擺時間差，震動後之內擺與外擺時間差皆大於震動期間之內擺與外擺時間差。

(六)、不同刺激對內擺角速度與外擺角速度之影響

震動前之內擺與外擺角速度和震動期間之外擺角速度，於進食與喝水間具差異(表五)。蜚蠊在喝水情形下，震動前、中、後之內擺與外擺角速度皆不具差異，震動期間之內擺角速度大於震動前之內擺角速度，震動期間之外擺角速度大於震動前之外擺角速度，震動後之內擺與外擺角速度小於震動期間之內擺與外擺角速度，且震動後之內擺與外擺角速度大於震動前之內擺與外擺角速度。在進食情形下，震動前、中、後之內擺與外擺角度差皆不具差異，震動期間之內擺角速度大於震動前之內擺角速度，震動後之內擺角速度小於震動期間之內擺角速度。

表五 喝水與進食期間，震動刺激前、中、後，各項參數之比較。

震動刺激：	震動前 ^a		震動期間 ^b		震動後	
蟲體狀態：	喝水	進食	喝水	進食	喝水	進食
內擺角度(度)	30.0±3.3	19.1±4.3*	29.5±2.9	18.6±2.8*	28.2±3.5	22.6±3.7
外擺角度(度)	63.6±3.4	68.8±3.9	75.7±2.9 ^{>a}	65.7±3.4*	64.6±3.7 ^{<b}	69.9±4.0
擺動角度差 內擺	33.1±2.7	52.1±4.2*	45.9±2.9 ^{>a}	46.6±3.0	36.1±3.4 ^{<b}	45.5±3.4*
(度) 外擺	33.0±3.5	49.9±3.8*	44.8±2.9 ^{>a}	48.1±2.9	36.1±3.0 ^{<b}	47.6±3.3*
擺動時間差 內擺	0.951±0.257	0.849±0.084	0.357±0.024 ^{<a}	0.407±0.029 ^{<a}	0.549±0.066 ^{>b}	0.680±0.070 ^{>b}
(秒) 外擺	0.668±0.070	0.884±0.079*	0.340±0.023 ^{<a}	0.460±0.041 ^{*,<a}	0.458±0.045 ^{>b,<a}	0.750±0.076 ^{*,>b}
擺動角速度 內擺	64.2±5.7	99.1±15.1*	160.9±12.4 ^{>a}	153.4±18.1 ^{>a}	84.0±10.1 ^{<b,>a}	102.6±13.3 ^{<b}
(度/秒) 外擺	56.5±4.9	96.1±22.9*	162.8±11.0 ^{>a}	136.9±10.2*	94.1±7.1 ^{<b,>a}	111.9±17.5

註：與震動前組相較：單尾 t 檢定；>a 或 <a 代表具顯著差異($\alpha=0.05$)。

與震動期間組相較：單尾 t 檢定；>b 或 <b 代表具顯著差異($\alpha=0.05$)。

喝水與進食組相較：單尾 t 檢定；*代表具顯著差異($\alpha=0.05$)。

表六 測量各項參數的取樣數。

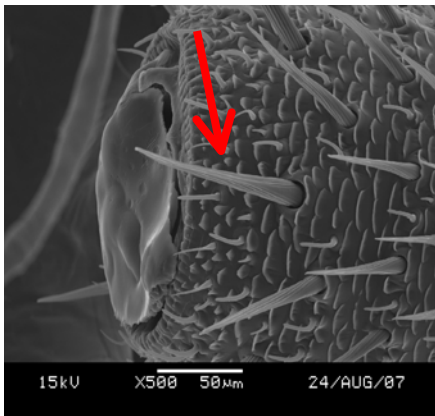
震動刺激：	震動前		震動期間		震動後		蟲體	
蟲體狀態：	喝水	進食	喝水	進食	喝水	進食	喝水	進食
觸角內擺	68 次	46 次	119 次	84 次	84 次	56 次	10 隻	8 隻
觸角外擺	60 次	47 次	118 次	82 次	88 次	53 次		

三、美洲蜚蠊觸角感覺毛之種類與分布

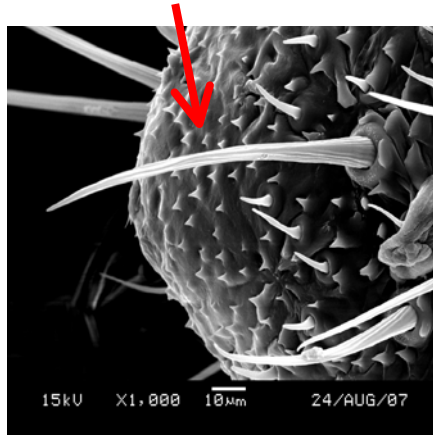
為了更進一步了解蜚蠊的觸角為何對於環境有如此反應，我們將他的觸角置於電子顯微鏡下觀測。我們將觸角分為兩組，分別是雄性以及雌性。選取觸角完整的雄性以及雌性蜚蠊成蟲，直接將觸角剪下。利用超音波震盪進行洗淨的動作。放進培養皿中，使其自然變乾。以雙面膠或黏鼠板的膠將觸角黏於觀測用的金屬架上。在觸角表面度上一層金膜。利用掃描式電子顯微鏡觀察分布於觸角表面各區域內的感覺毛。

(一)、感覺毛的種類

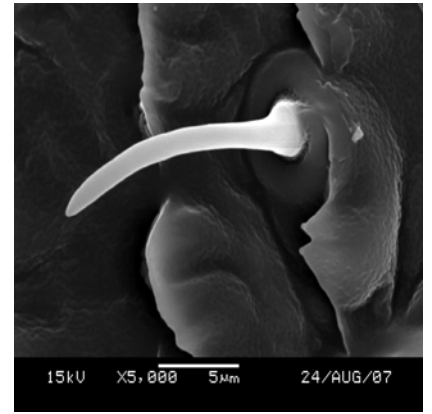
我們於蜚蠊觸角表面發現三種不同總類的感覺毛，並且加以分類為剛毛型(圖八)、硬棘型(圖九)以及短毛型(圖十)三組。



圖八 剛毛型感覺毛。



圖九 硬棘型感覺毛。

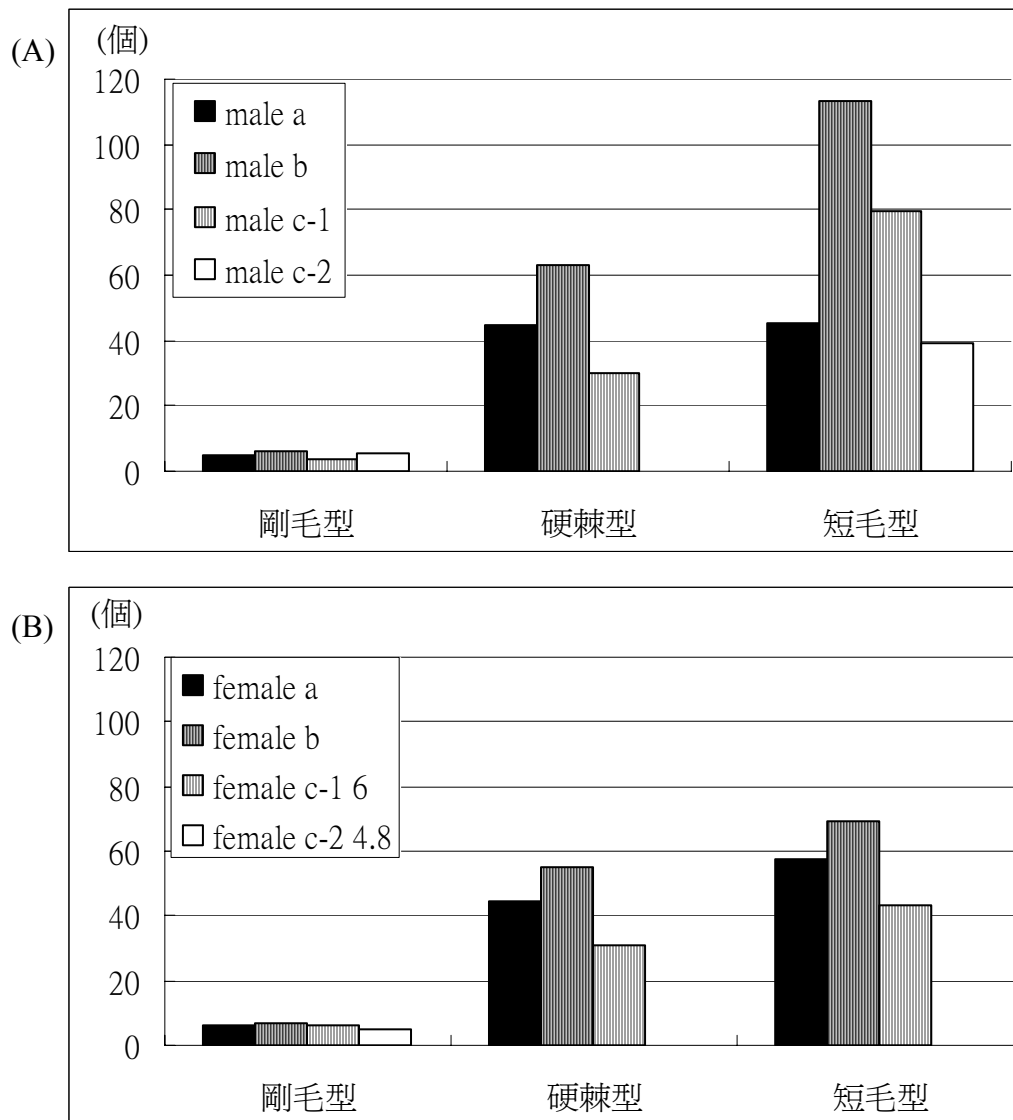


圖十 短毛型感覺毛。

(二)、不同性別與位置的感覺毛比較

分析蜚蠊觸角表面的感覺毛，我們發現除了觸角末段、中段、近中段的感覺毛以短毛型偏多(圖十一)，而中段的感覺毛總數量多於末段，末段又多於前段。最接近基部的觸角幾乎沒有感覺毛，只有少許的剛毛型感覺毛。

雄性蜚蠊成蟲的觸角末端與雌性的有明顯的不同，雌性蜚蠊成蟲的觸角末端會有突起的鱗片，而雄性的末端會有一些較長的短毛型感覺毛。此外，剛毛型感覺毛會以環狀分布於一節觸角接近末端處，而較那環剛毛型感覺毛較基部遠的地方只會有短毛型感覺毛分布。



圖十一 雄性(A)與雌蟲(B)成蟲蜚蠊觸角表面的感覺毛分布數量。

觸角大略分為四段：

a 為前段，也就是離蜚蠊觸角基部最遠的一段。

b 為中段，也就是離蜚蠊觸角基部最次遠的一段。

c-1 為末段，也就是離蜚蠊觸角基部最遠的一段，但較 c-2 遠。

c-2 為末段，也就是離蜚蠊觸角基部最遠的一段，但較 c-1 近。

肆、討論

本研究發現，不同因子的刺激，對蜚蠊觸角擺動模式的調節作用具有差異，不僅代表觸角為敏感的感受器之外，更是能反映環境因子與表現生理狀態的動器。我們已成功建立研究美洲蜚蠊觸角行為的動物模式，對於研究環境與生物體互動關係，為一適合且有效的工具。

本研究發現各項因子中，光適應可增加觸角內擺角度、外擺角度、擺動角度差與擺動角速度。照光刺激可增加觸角擺動頻率、外擺角度、擺動角度差與擺動角速度，減少擺動時間差。震動刺激可增加觸角外擺角度、擺動角度差與擺動角速度，減少內擺角度、擺動時間差。照光與震動刺激對各參數並無相反的作用，但若同時刺激，在擺動頻率、內擺角度、擺動角度差、擺動時間差、擺動角速度有整合而非加成的效果，也就是兩種刺激同時出現的觸角反應，介於兩種刺激單獨出現時的反應程度之間。在擺動頻率、內擺角度、擺動角度差、內擺時間差與擺動角速度，光適應與照光刺激對震動刺激具有相同的調節作用，而於外擺角度、外擺時間差則否。於刺激結束後，除了暗適應照光與暗適應震動組的內擺時間差，其餘參數不會立即恢復。

蜚蠊在需要探索周遭環境時，會增加觸角的探索範圍，而光適應、照光刺激與震動刺激時，觸角擺動的角度差增加，代表此時蟲體處於探索環境的狀態，但在本研究中亦可發現，當兩種不同刺激因子同時發生時，對於觸角的探索行為並不具有加成的效應，反而會降低其探索的效率(仍比對照組高)，我們認為可能是因為蜚蠊的觸角比其體長還長，觸角的運動可能會因擺動幅度增加而容易被略食者發現，故在多項環境因子同時刺激時，代表環境的變動與不確定性較大，故除了要偵測環境之外，亦要降低被捕食者發現的風險。而在刺激結束後，才需增加探索環境的效率，如同表二、表三的參數結果所顯示，在照光與震動同時刺激的情形下，蜚蠊觸角的擺動角度差與擺動角速度在刺激結束後都有增加的情形，支持了「探索行為在多項因子同時刺激時被抑制」的假設，但此假設仍須更多的證據方能確立，前人曾研究蜚蠊翻正反射時，去除尾毛的訊息接收，可增加其翻正反射的行為，顯示蟑螂感官的刺激，確實可抑制某些行為反應的程度。

本研究也發現，震動刺激對觸角擺動模式的改變，較照光刺激明顯，這可能是因為在有光的情形下，其觸角行為受到抑制，以避免觸角的行為增加被略食者發現的機會。或震動刺激對於蜚蠊的生存而言，為較重要的環境因子(如略食者接近所產生的震動)，故需更加掌握環境的狀態。

將各處理組的內擺角度與外擺角度進行比較(表二)，可發現震動刺激或照光與震動同時刺激，可同時減小內擺角度，與增加外擺角度，但照光刺激只增加外擺角度，甚至光適應處理組內擺角度增加。綜合而論，蜚蠊接受刺激時，觸角的擺動皆會向外偏移，但內擺角度卻不一定向內延伸，特別是光適應與照光刺激，我們認為這反映出蜚蠊偵測環境時，是以側面的偵測為主，而非蟲體前方，特別是在有光線的情形(光適應或照光刺激)，為了降低觸角擺動的幅度，以避免被略

食者發現，故在有光的情況下，觸角擺動只向外擴大，以增加探索、偵測的效率，但不向內(向前)擴大。

各處理組之觸角擺動角速度相較於暗適應皆有增加(表二)，因為擺動角度差增加與擺動時間差減少所致。若仔細比較角度差與時間差對角速度的影響，發現照光刺激時，擺動角速度的增加主要是透過擺動時間差的減小，而震動刺激時，擺動角速度的增加主要是透過擺動角度差的增加。光適應或照光與震動同時刺激處理，擺動時間差與擺動角度差對角速度的貢獻差不多。顯示不同性質的刺激，可引發蜚蠊觸角不同性質的行為反應，證明蜚蠊觸角行為的敏感性與複雜性。

我們發現喝水狀態時，震動刺激較能改變原先的觸角擺動模式，而進食狀態時震動刺激的調節作用較弱。例如喝水與進食的內擺角度與進食的外擺角度於震動前、中、後皆不具差異，但喝水的外擺角度皆具顯著差異(表五)。喝水時的內擺角度差與外擺角度差於震動前、中、後皆具差異，而進食時的內擺角度差與外擺角度差於震動前、中、後皆不具差異。喝水與進食時的擺動時間差於震動前、中、後皆具差異，但進食的差異較喝水時差異大。喝水與進食時的擺動角速度於震動前中後皆具差異，但喝水時的差異較進食時差異大。

經由電子顯微鏡的觀測，我們發現雄性蜚蠊觸角上感覺毛的總數明顯的大於雌性蜚蠊，可能雄性蜚蠊必須利用觸角上的感覺毛偵測雌性蜚蠊分泌的賀爾蒙，以利於繁衍後代。而感覺毛的種類與分布亦非均勻，觸角中段的感覺毛數量較多於前、末段，可能原因為末段的觸角受到傷害的機率大於中段，而前段觸角能偵測到的範圍又少於中段，因此中段為感覺毛分布最多的區域。

剛毛型感覺毛的功用主要為感測前一段觸角的擺動方向，以了解週遭環境與觸角的空間位置，以幫助尋找牆角、狹縫等區域，因此剛毛型感覺毛會以環狀分布於一節觸角接近末端處。又剛毛型感覺毛於各段的功用相似，故其分布於各段的數量皆無顯著差異。

我們雖然發現一些有趣的現象，但還有許多問題等待證明，期望本研究是個重要的起點，使我們能解開昆蟲與環境互動的微妙關係，瞭解集受器與動器於一身的神奇器官——觸角。藉由實驗的過程，我們也更加熟悉一種親近我們，卻背負許多臭名的重要清除者——蜚蠊。

伍、未來發展

本研究奠定蜚蠊觸角擺動模式的基礎，已先將基本的視覺以及觸覺的觸角擺動模式做歸納整理，發現了許多有趣的結果。舉其中一個非常實用的結果來說，日常生活中，最常見也是最令人不寒而慄的昆蟲就屬蜚蠊了，但大多數的人並無法快速且準確的打死自己眼前的蜚蠊，因此本實驗便為“捕捉蜚蠊”這項動作的技巧上修正。當你看見蜚蠊時，首先你要先找出周遭其中一個可以捕捉或是殺死牠的工具。接著觀察牠的觸角擺動模式，如果牠的觸角以很緩慢的頻率在頭的前面(較小的角度)擺動，很有可能代表他還沒發現你。但是，若蜚蠊的觸角於較靠

身體的地方(較大的角度)以較高的頻率擺動，你最好不要輕舉妄動，不然牠馬上就會逃跑了，因為此刻的蜚蠊已經感覺到接近時的震動了。等到蜚蠊恢復到頻率小且角度小的狀態時，你就可以放心的下手了！此方法在日常生活中常常使用，而且還很有效，因此我們希望能夠讓那些怕蜚蠊的人都能免於尖叫之苦。另一方面，本實驗觀察三維空間的觸角擺動模式，目的就是為了預防在較弱因子的刺激下，二維的觸角擺動模式會與其他因子混淆，因此以三維空間的定義減低不同因子有可能被混淆的弊端。

蟑螂的觸角擺動模式易觀察，亦容易受環境因子的影響，適合用於發展偵測環境因子的偵測器材，期望未來能利用蜚蠊感覺毛的高敏感性，與觸角運動模式的複雜性，使蜚蠊的觸角能應用於環境因子偵測技術的仿生學上。

伍、結論

一、光線與震動影響美洲蜚蠊觸角擺動模式之研究

- (一)、我們已建立一個研究各環境因子調節蜚蠊觸角行為的動物模式，並以光適應、照光刺激與震動刺激等因子，探討不同性質的刺激因子對觸角行為的調節作用。
- (二)、光適應、照光刺激與震動刺激皆會增加蜚蠊觸角的探索行為。
- (三)、若於暗適應後給予蜚蠊照光刺激，觸角擺動頻率、角度差、角速度增加，擺動時間差減少，而在照光刺激結束後十秒內，受調節的觸角行為表現不會立即恢復。
- (四)、若給予蜚蠊震動刺激，觸角擺動角度差、角速度增加，擺動時間差減少，而擺動頻率不變，而在震動刺激結束後十秒內，受調節的觸角行為表現不會立即恢復。
- (五)、若照光刺激與震動刺激同時發生，蜚蠊觸角擺動頻率、擺動角度差、角速度增加，擺動時間差減少，而在震動刺激結束後十秒內，受調節的觸角行為表現不會立即恢復。
- (六)、蜚蠊於有光的環境(光適應)，觸角擺動角度差、角速度增加，但擺動頻率、時間差不變。
- (七)、光適應與照光刺激在擺動頻率、內擺角度、擺動角度差、內擺時間差與擺動角速度等參數上，對震動刺激具有相同的調節作用，而於外擺角度、外擺時間差則否。
- (八)、照光刺激與震動刺激若同時對觸角行為進行調節，其調節程度介於單獨照光刺激與單獨震動刺激之間，顯示不同刺激之間具有交互作用，對觸角行為的調節具整合性。
- (九)、不同性質的刺激因子對觸角的行為表現，具不同的調節作用，顯示蜚蠊觸角除了是對環境因子敏感的感受器外，亦是能反映環境情形與生理狀態的動器。

二、喝水與進食影響美洲蜚蠊觸角擺動模式之研究

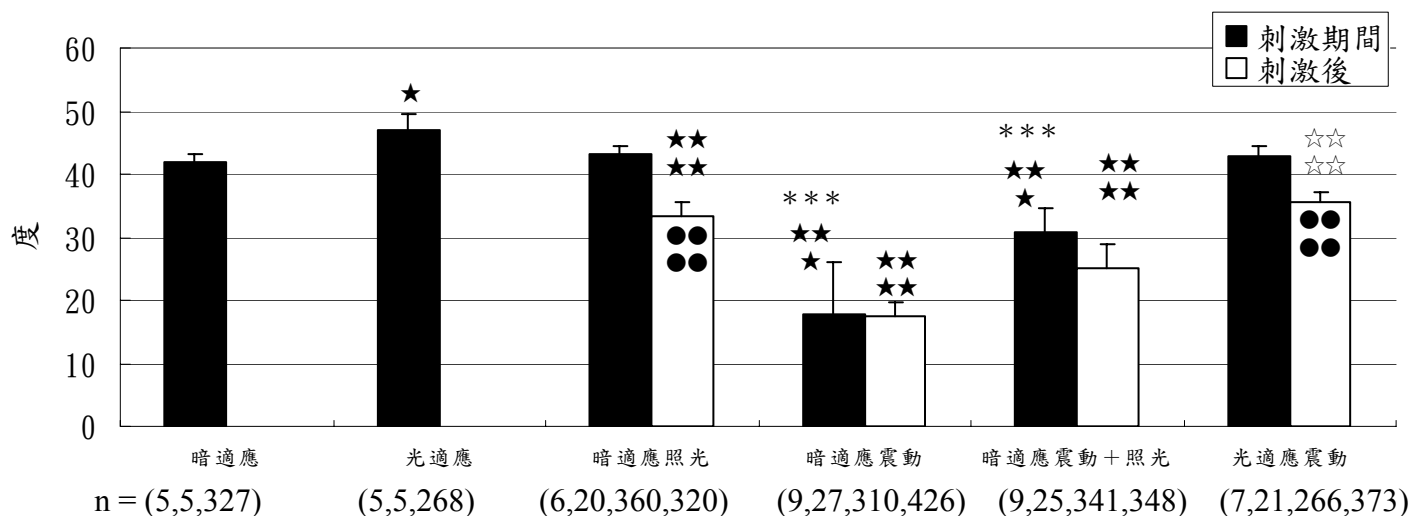
- (一)、進食(吃飼料)對觸角擺動頻率之影響大於喝水。
- (二)、進食期間之內擺與外擺角度在不同情形下(震動前、中、後)沒有差異，顯示在進食時蜚蠊之觸角擺動較不受震動影響。
- (三)、進食對觸角擺動時間差之影響大於喝水。
- (四)、喝水期間的擺動角度差於不同的情形下(震動前、中、後)皆有所不同，而進食期間的擺動角度差於不同的情形下(震動前、中、後)相同，因此進食期間蜚蠊觸角擺動差較不易受影響。
- (五)、不論喝水與進食時，觸角內擺與外擺擺動時間差皆沒有差異。
- (六)、不論喝水與進食期間，觸角內擺與外擺擺動角度差皆沒有差異。

三、蜚蠊的觸角生理能應用於環境因子偵測技術的仿生學發展。

陸、參考文獻

- Amdam, G. V., Norberg, K., Page, R. E., Erber, J. and Scheiner R. 2006. Operant conditioning of antennal movements in the honey bee. *Behav. Brain Res.* 169: 201-205.
- Flores, G. B. and Lazzari, C. R. 1996. The role of the Antennae in *Triatoma infestans*: Orientation towards thermal sources. *J. Insect Physiol.* 42: 433-440.
- Lent, D. D. and Kwon, H-W. 2004. Antennal movements reveal associative learning in the American cockroach. *J Exp Biol.* 207:369-75.
- Okada, J. and Toh, Y. 2000. The role of antennal hair plates in object-guided tactile orientation of the cockroach (*Periplaneta americana*). *J. Comp. Physiol.* 186: 849-857.
- 李星黎。民91。美洲蟑螂運動中觸角的擺動模式之研究。師大生物所碩士論文。
- 房瓚、蘇嘉弘、蔡偉博。2005。法天地之造化—仿生科技。科學發展, 396: 62-67。
- 林筱姍、徐慧雯、黃立果、郭友倫。民77。蟑螂的調查與研究。第二十八屆中小學科學展覽會。
- 孫婉玲。1998。蟑螂。親親自然出版。
- 莊河源。2002。動物嘉年華。國語日報出版社。
- 許惠紋、童麗珠、林金盾。民92。單眼在美洲蟑螂避光行為的角色。師大生物學報, 38(2): 68-69。
- 蔡任圃、黃壁祈、童麗珠、林金盾。2001。影像分析探討餵食葡萄糖液對蟑螂心輸出量的效應台灣昆蟲。台灣昆蟲, 21:133-145。
- 蔡任圃。民90。單眼與複眼在蟑螂運動行為上的調控功能。師大生物所碩士論文。
- 鄭琬蓉、梁勻慈、鄭佳怡、蔡任圃。民96。:認識身旁的小傢伙(三)—蟑螂翻正反射的觀察與探討頭、尾訊息輸入的調節作用。科學教育月刊, 297: 22-33。

附錄一：光線與震動影響美洲蜚蠊觸角擺動模式—實驗數據柱狀圖



圖一 各因子對蟑螂觸角內擺角度的影響(mean±SE)。

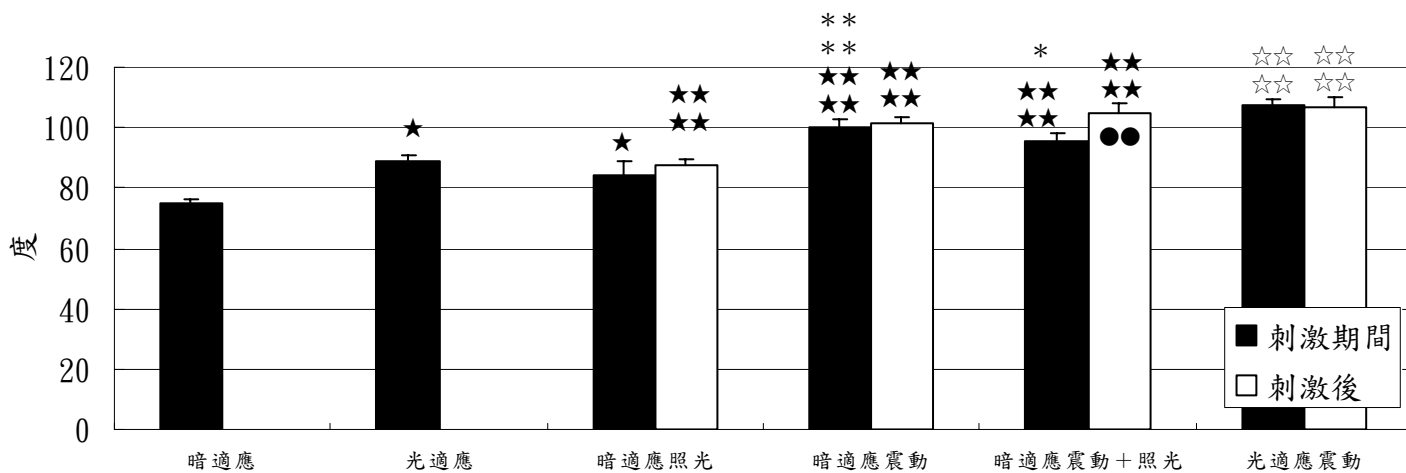
n = (個體數, 測量次數, 刺激期間觸角擺動次數, 刺激後觸角擺動次數)。

與暗適應組相較：單尾 t 檢定；★： $p < 0.05$ ；★★★： $p < 0.005$ ；★★★★： $p < 0.001$ 。

與光適應組相較：單尾 t 檢定；☆： $p < 0.05$ 。

與暗適應照光組相較：單尾 t 檢定；***： $p < 0.005$ 。

與刺激期間相較：單尾 t 檢定；●●●●： $p < 0.001$ 。



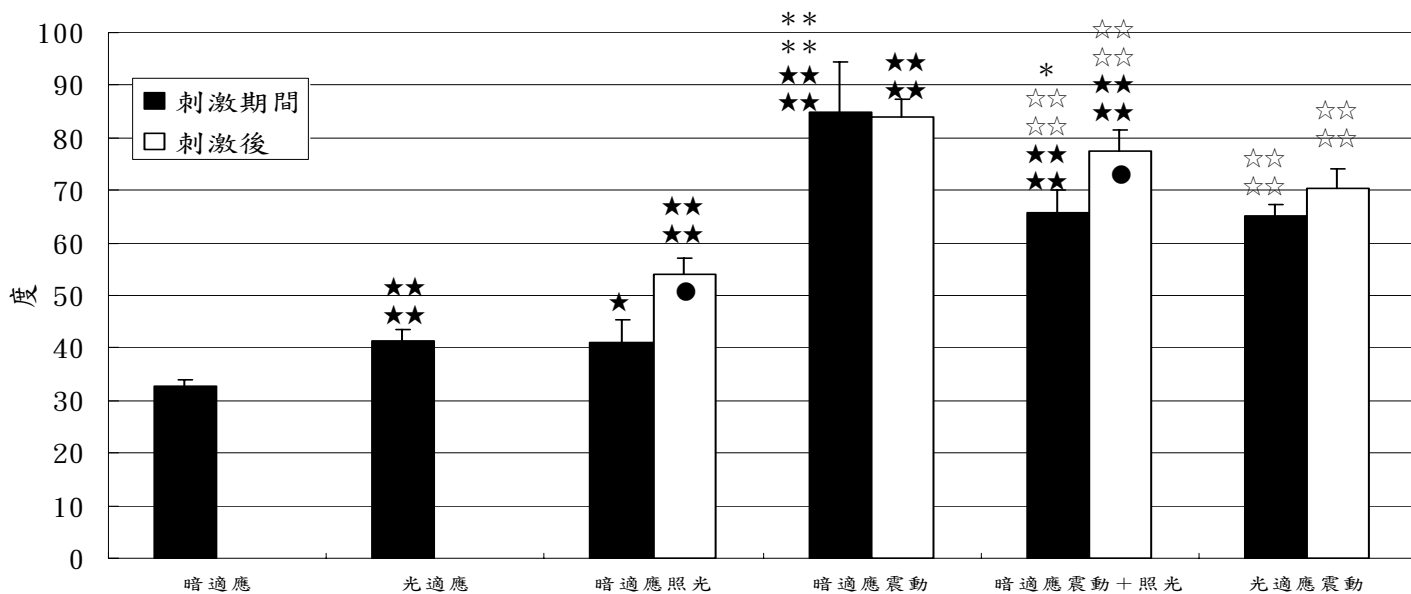
圖二 各因子對蟑螂觸角外擺角度的影響(mean±SE)。取樣數如圖一。

與暗適應組相較：單尾 t 檢定；★： $p < 0.05$ ；★★★★： $p < 0.001$ 。

與光適應組相較：單尾 t 檢定；☆☆☆☆： $p < 0.001$ 。

與暗適應照光組相較：單尾 t 檢定；*： $p < 0.05$ ；****： $p < 0.001$ 。

與刺激期間相較：單尾 t 檢定；●●●●： $p < 0.001$ 。



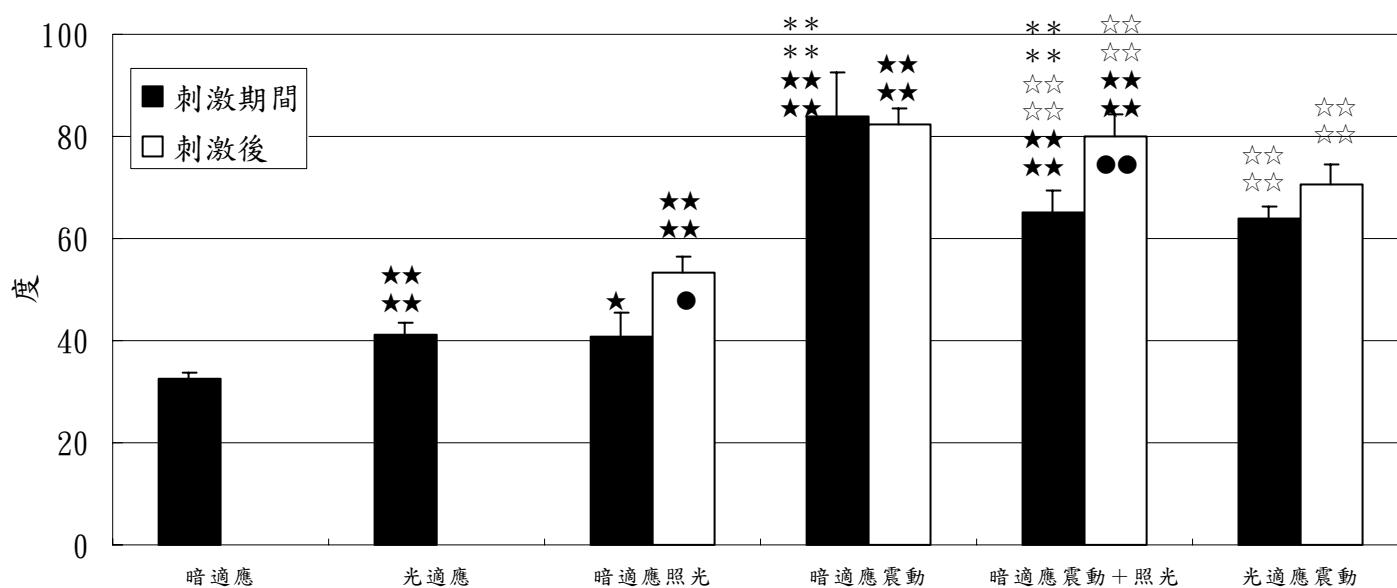
圖三 各因子對蟑螂觸角內擺角度差的影響(mean±SE)。取樣數如圖一。

與暗適應組相較：單尾 t 檢定；★： $p < 0.05$ ；★★★★： $p < 0.001$ 。

與光適應組相較：單尾 t 檢定；☆☆☆☆： $p < 0.001$ 。

與暗適應照光組相較：單尾 t 檢定；*： $p < 0.05$ ；****： $p < 0.001$ 。

與刺激期間相較：單尾 t 檢定；●： $p < 0.05$ 。



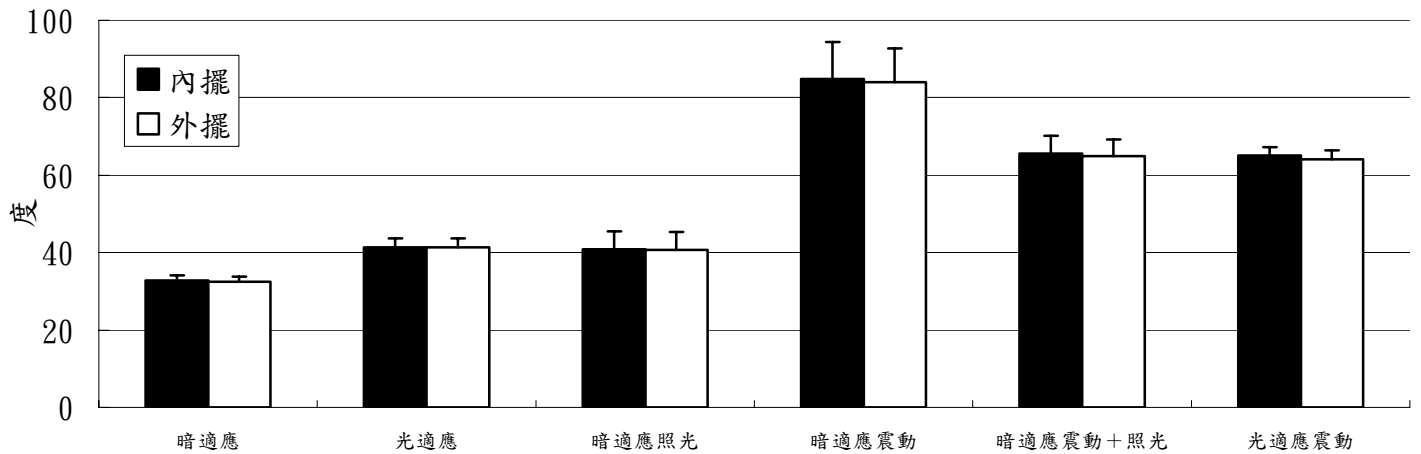
圖四 各因子對蟑螂觸角外擺角度差的影響(mean±SE)。取樣數如圖一。

與暗適應組相較：單尾 t 檢定；★： $p < 0.05$ ；★★★★： $p < 0.001$ 。

與光適應組相較：單尾 t 檢定；☆☆☆☆： $p < 0.001$ 。

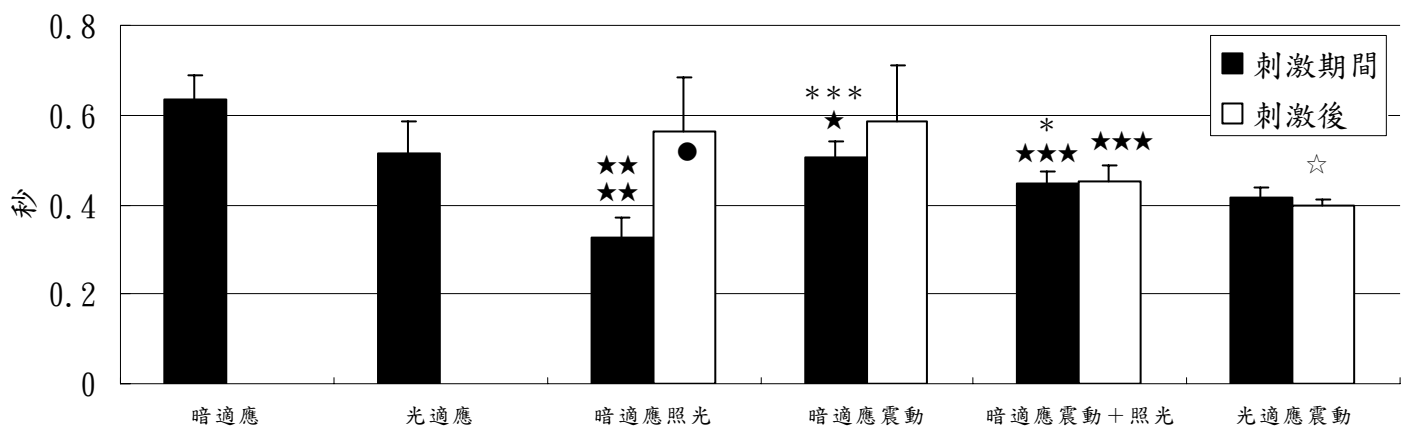
與暗適應照光組相較：單尾 t 檢定；****： $p < 0.001$ 。

與刺激期間相較：單尾 t 檢定；●： $p < 0.05$ ；●●： $p < 0.01$ 。



圖五 各處理組蟑螂觸角內擺角度差與外擺角度差的比較(mean±SE)。取樣數如圖一。

單尾 t 檢定；無統計差異。



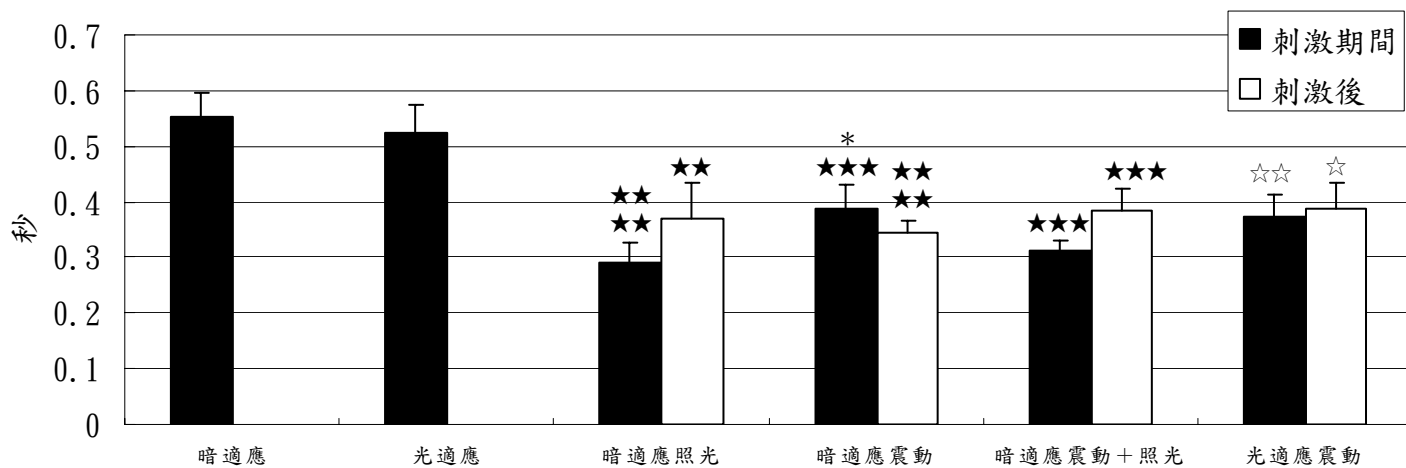
圖六 各因子對蟑螂觸角內擺時間差的影響(mean±SE)。取樣數如圖一。

與暗適應組相較：單尾 t 檢定；★： $p < 0.05$ ；★★★： $p < 0.005$ 。

與光適應組相較：單尾 t 檢定；☆： $p < 0.05$ 。

與暗適應照光組相較：單尾 t 檢定；*： $p < 0.05$ ；***： $p < 0.005$ 。

與刺激期間相較：單尾 t 檢定；●： $p < 0.05$ 。



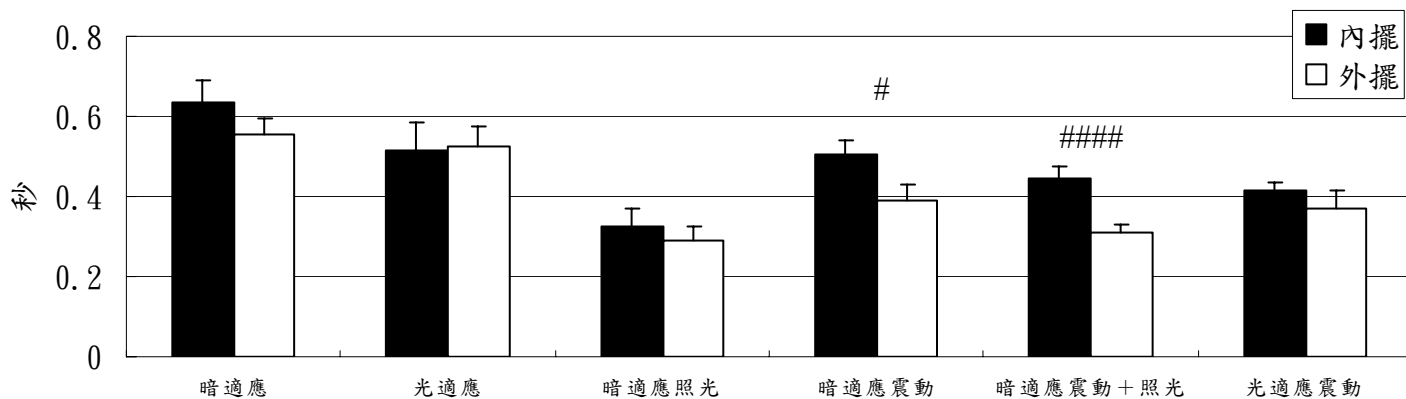
圖七 各處理組對蟑螂觸角外擺時間差的影響(mean±SE)。取樣數如圖一。

與暗適應組相較：單尾 t 檢定；★★： $p < 0.01$ ；★★★： $p < 0.005$ ；★★★★： $p < 0.001$ 。

與光適應組相較：單尾 t 檢定；☆： $p < 0.05$ ；☆☆： $p < 0.01$ 。

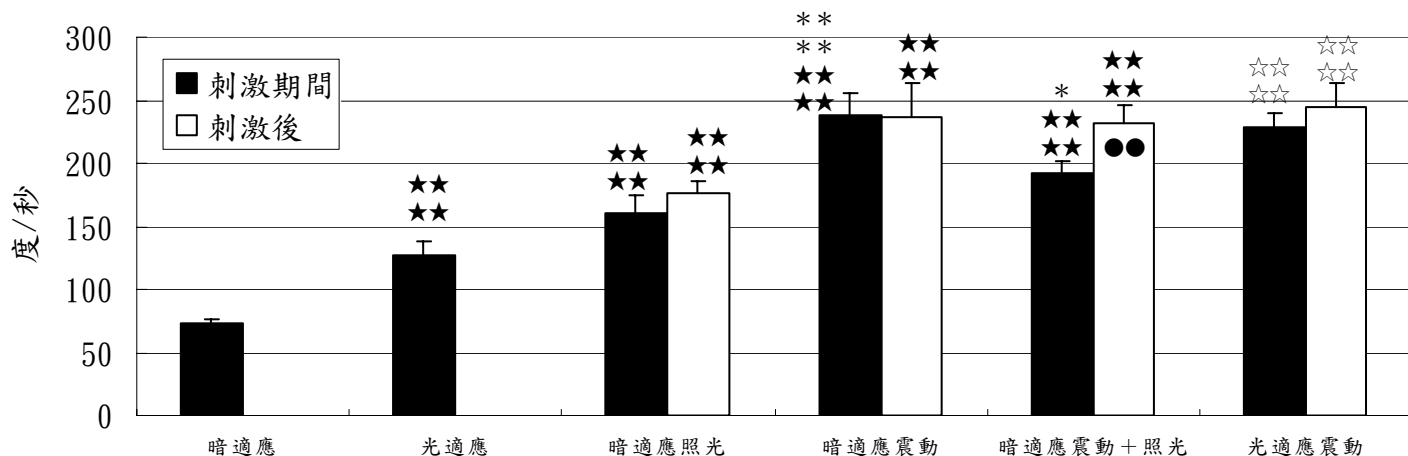
與暗適應照光組相較：單尾 t 檢定；*： $p < 0.05$ 。

與刺激期間相較：單尾 t 檢定；無統計差異。



圖八 各處理組蟑螂觸角內擺時間差與外擺時間差的比較(mean±SE)。取樣數如圖一。

單尾 t 檢定；#： $p < 0.05$ ；#####： $p < 0.001$ 。



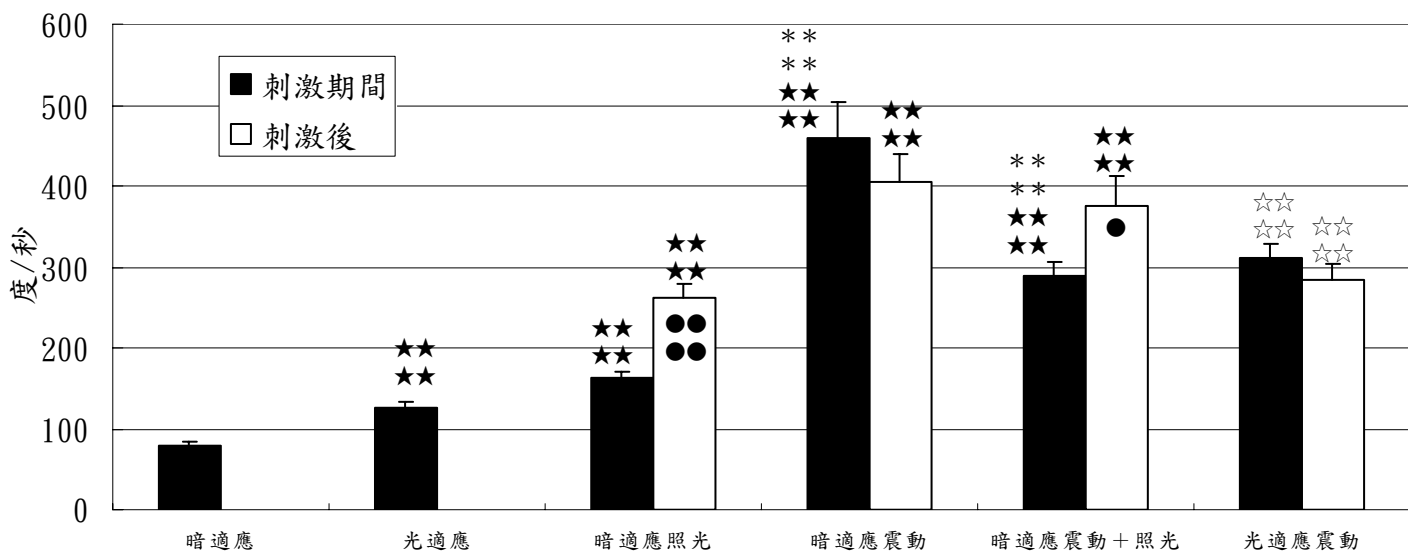
圖九 各因子對蟑螂觸角內擺角速度的影響(mean±SE)。取樣數如圖一。

與暗適應組相較：單尾 t 檢定；★★★★：p<0.001。

與光適應組相較：單尾 t 檢定；☆☆☆☆：p<0.005。

與暗適應照光組相較：單尾 t 檢定；*：p<0.05；****：p<0.001。

與刺激期間相較：單尾 t 檢定；●●：p<0.01。



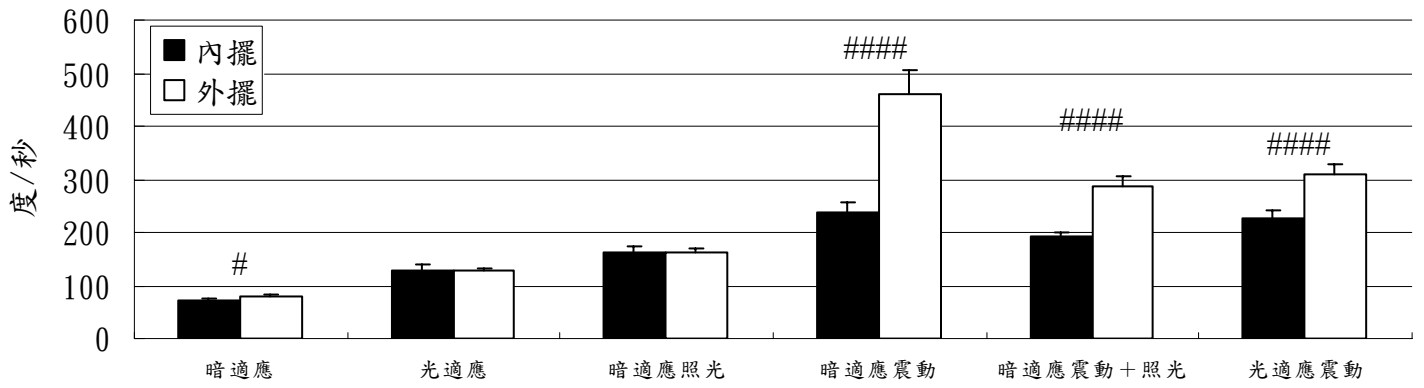
圖十 各因子對蟑螂觸角外擺角速度的影響(mean±SE)。取樣數如圖一。

與暗適應組相較：單尾 t 檢定；★★★★：p<0.001。

與光適應組相較：單尾 t 檢定；☆☆☆☆：p<0.005。

與暗適應照光組相較：單尾 t 檢定；****：p<0.001。

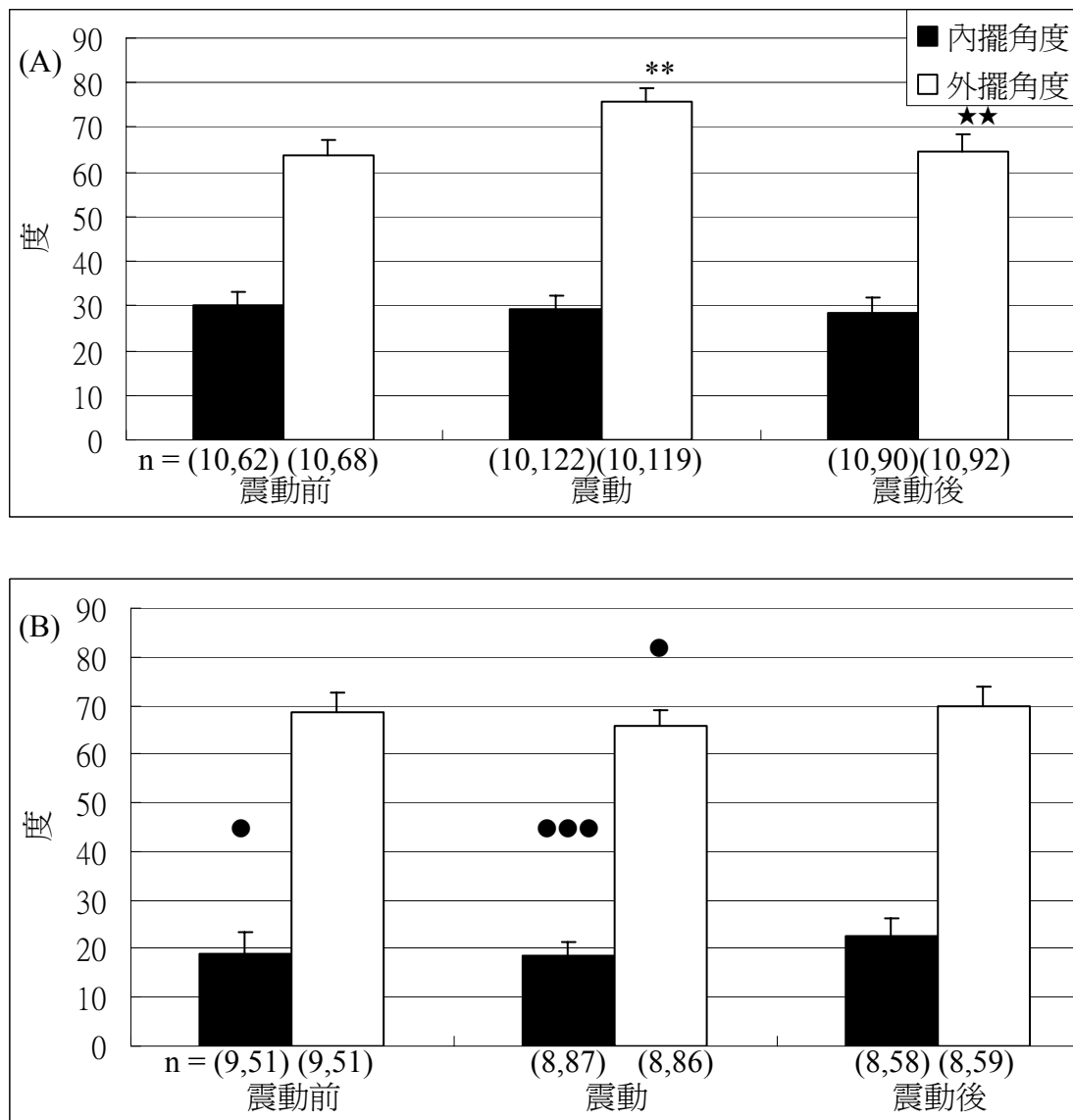
與刺激期間相較：單尾 t 檢定；●：p<0.05；●●：p<0.01。



圖十一 各處理組蟑螂觸角內擺角速度與外擺角速度的比較(mean±SE)。取樣數如圖一。

單尾 t 檢定；#： $p < 0.05$ ；#####： $p < 0.001$ 。

附錄二：喝水與進食影響美洲蜚蠊觸角擺動模式—實驗數據柱狀圖

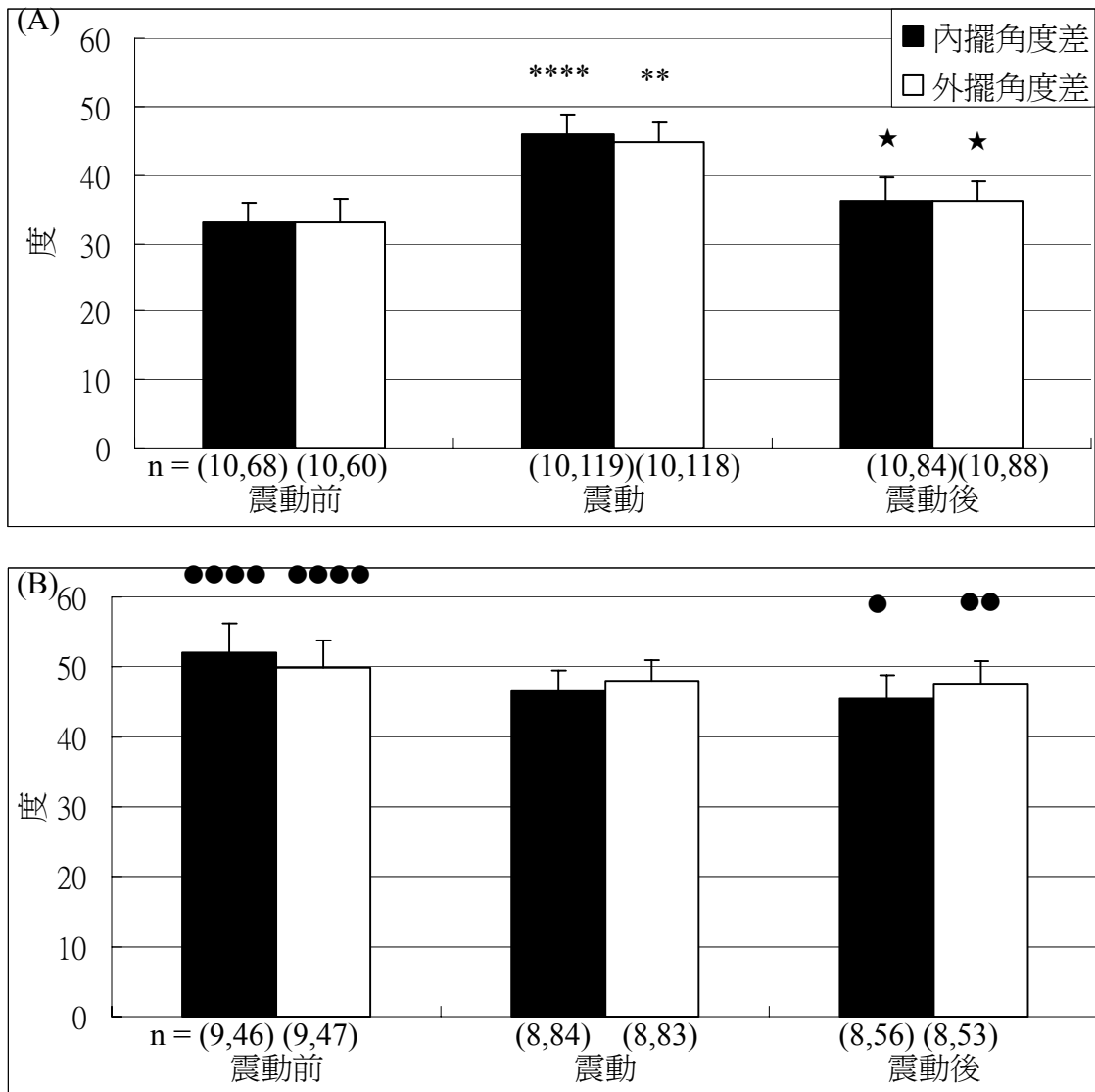


圖一 蟑螂於喝水(A)或進食(B)期間，震動刺激前、中、後觸角內擺與外擺的角度 (mean±SE, n = 個體數, 觸角擺動次數)。

與震動前比較：單尾 t 檢定；**：p<0.01。

與震動比較：單尾 t 檢定；★★：p<0.01。

喝水與進食比較：單尾 t 檢定；•：p<0.05；•••：p<0.005。



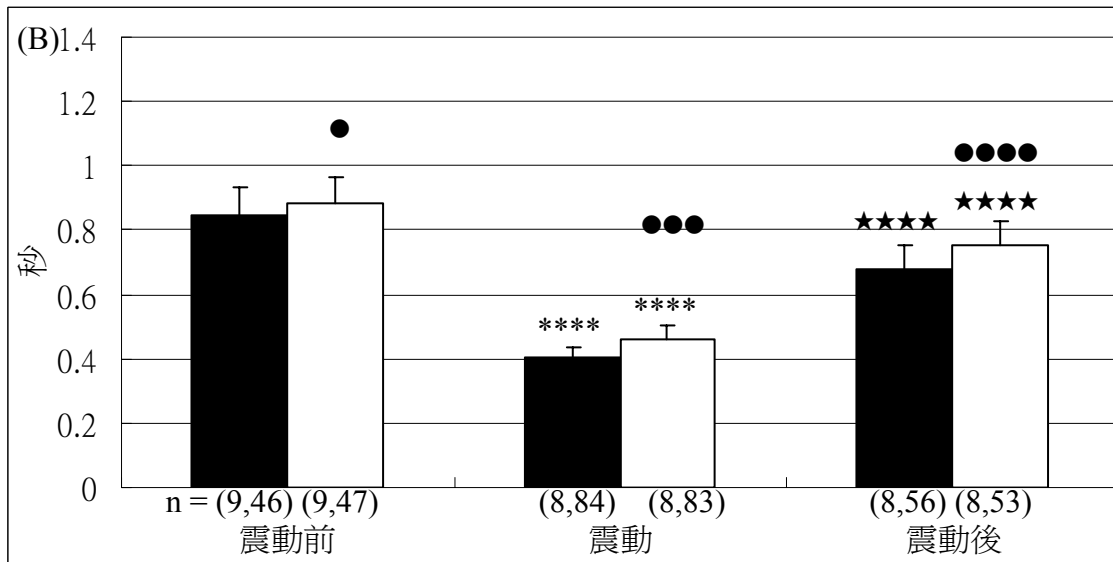
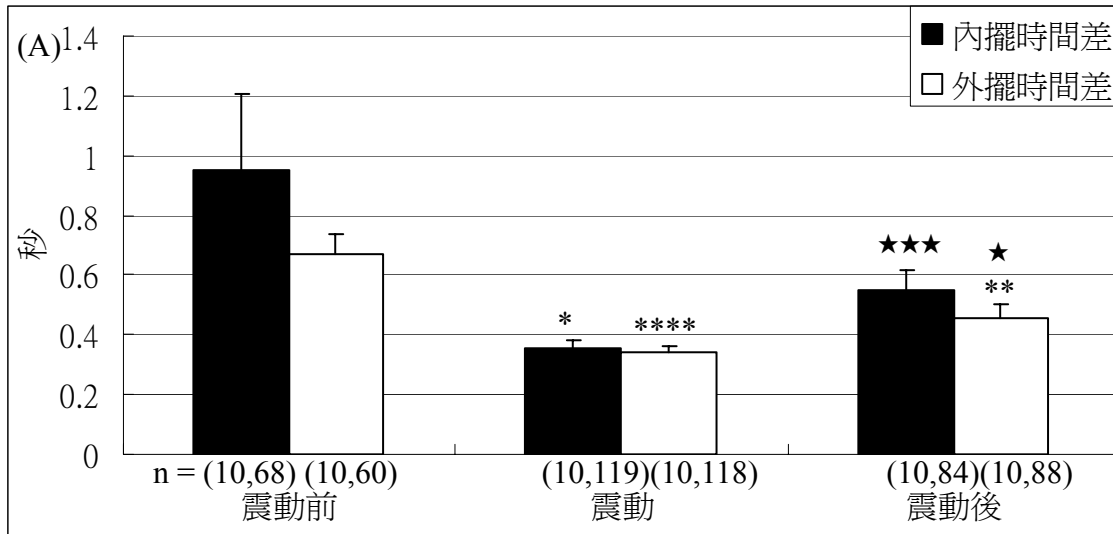
圖二 蟑螂於喝水(A)或進食(B)期間，震動刺激前、中、後觸角內擺與外擺的角度差 (mean±SE，n = 個體數,觸角擺動次數)。

與震動前比較：單尾 t 檢定； **： $p < 0.01$ ；****： $p < 0.001$ 。

與震動比較：單尾 t 檢定；★： $p < 0.05$ 。

外擺與內擺比較：單尾 t 檢定；不具統計差異($p > 0.05$)。

喝水與進食比較：單尾 t 檢定；●： $p < 0.05$ ；●●： $p < 0.01$ ；●●●： $p < 0.005$ 。



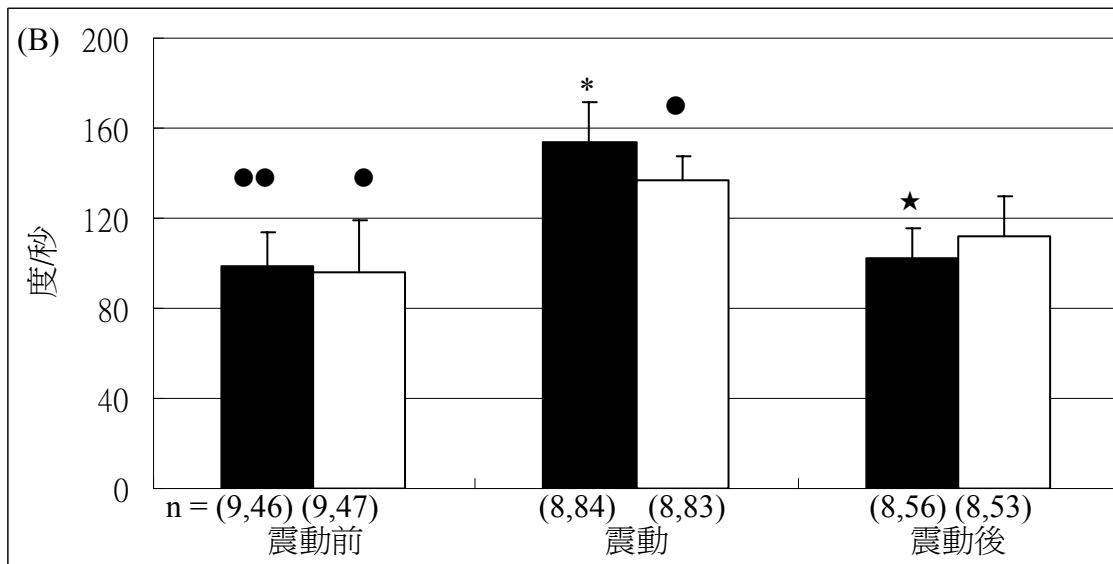
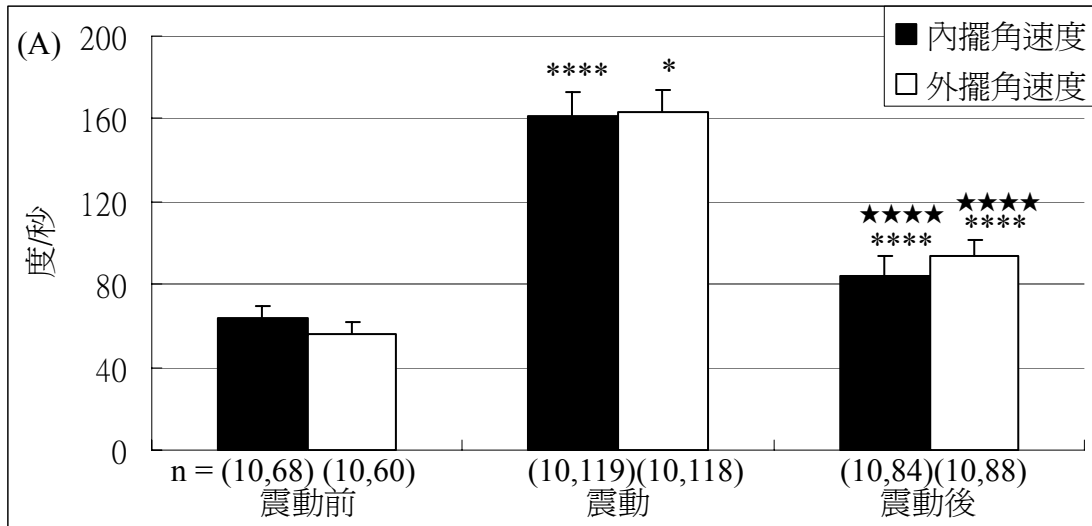
圖三 蟑螂於喝水(A)或進食(B)期間，震動刺激前、中、後觸角內擺與外擺的時間差 (mean±SE, n = 個體數, 觸角擺動次數)。

與震動前比較：單尾 t 檢定； *： $p < 0.05$ ； **： $p < 0.01$ ； ****： $p < 0.001$ 。

與震動比較：單尾 t 檢定； ★： $p < 0.05$ ； ★★★： $p < 0.005$ ； ★★★★★： $p < 0.001$ 。

外擺與內擺比較：單尾 t 檢定； 不具統計差異 ($p > 0.05$)。

喝水與進食比較：單尾 t 檢定； ●： $p < 0.05$ ； ●●： $p < 0.005$ ； ●●●： $p < 0.001$ 。



圖四 蟑螂於喝水(A)或進食(B)期間，震動刺激前、中、後觸角內擺與外擺的角速度 (mean±SE, n = 個體數, 觸角擺動次數)。

與震動前比較：單尾 t 檢定； *： $p < 0.05$ ；****： $p < 0.001$ 。

與震動比較：單尾 t 檢定；★： $p < 0.05$ ；★★★★★： $p < 0.001$ 。

外擺與內擺比較：單尾 t 檢定；不具統計差異($p > 0.05$)。

喝水與進食比較：單尾 t 檢定；●： $p < 0.05$ ；●●： $p < 0.01$ 。

評語

此作品非常有創意，但觸角擺動的分析利用影像分析可以再加強。若能將影像數據化，會使此作品的展現上更具吸引力。若能再加強數學模型的建立，則更增加其競爭力。