

# 臺灣二〇〇七年國際科學展覽會

科 別：動物學

作品名稱：擺動知覺曉，觸角知多少!--光線與震動影響  
美洲蜚蠊觸角擺動模式之研究

學校 / 作者：臺北市立中山女子高級中學 柯庭晴  
臺北市立中山女子高級中學 陳映綺

## 自我介紹



柯庭晴就是我啦(照片中右方)!今年16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夥伴研究專題的時光。這是我第二次參加科學研究計劃,第一次是與父親一同研究。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!



我是陳映綺，一個平凡的高中女生，成績不是頂尖，長相不是頂漂亮，身材不是頂好，但，好奇心跟運動細胞倒是有一點。我的專長是幻想，筆下有很多天馬行空的產物，閒暇時喜歡打籃球、上網、聽音樂。社團、空英、專題是我生活的三大主角，我住在混水，整天靠摸魚度日，卻摸出了頗多心得。自然科中最有興趣的是生物，尤其是動物，因為我本身也是動物。中山女高數理資優班是我的家，學校實驗室是我的房間，一年三百六十五天都是我的專題課，而小強是我的寵物。

進入中山、考上資優班、做專題，這一切對我來說都是意外，以前從沒想過的，不過，我很感謝這些美麗的意外，它給我很多很多的啟發，同時也是很多很多的良性重擔，也才發現自己其實很喜歡做實驗。

我要感謝的人有很多，我們的老闆”Captain”蔡老師，與我同甘共苦的研究夥伴柯庭晴，支持我的家人、朋友，還有小強，牠們一直都很配合，當然，還有耐心的把這篇自介看完的你。

作品名稱：擺動知覺曉，觸角知多少

— 光線與震動影響美洲蜚蠊觸角擺動模式之研究

英文標題：The effects of light and vibration on the antennae reactions of American cockroach.

### 英文摘要(Abstract)

During the biology classes from junior to senior high, we have learned many interesting instance of different animal behavior. Most people paid more attention on the Vertebrates as their experimental subjects. The other species around us, although with simple body structures, may behave rather complicated and versatile reactions. In particular, one of the most common insects with simple body structure in our neighborhood is the American cockroach (*Periplaneta americana*).

The aim of this study is to investigate the different swing motion modes of antennae of American cockroach by computer-aided Imaging Analysis. The parameters of each swing motion mode were calculated in order to analyze how light (including light stimulation and light adaptation) and vibration 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 types of stimulus occurred at the same time, the reactions of antennae motion may become conformable. In conclusion, antennae behavior has shown to significantly affect the survivability and environmental adaptation of American cockroach. Not only the antennae are considered as the sensitive receivers; but also they are the important transmitters to reflect physiological status and environmental condition.

### 中文摘要

從國中到高中的生物課堂上，我們學到許多有趣的動物行為例子，但前人多以脊椎動物作為研究對象，而我們身旁的許多生物，身體構造雖較為簡單，但行為表現卻豐富多樣，尤其是常見的美洲蟑螂(*Periplaneta americana*)，可說是最親近我們的昆蟲之一。本研究以攝影紀錄的方式，透過電腦進行影像分析，記錄不同刺激下蟑螂的觸角擺動模式，並計算出各項觸角運動的參數，以瞭解光線(照光刺激或照光適應)與震動刺激對其觸角行為的影響。我們發現在不同因子的刺激下，觸角擺動的模式具有差異，若兩種刺激同時發生，蟑螂觸角的行為亦具有整合性的反應，證明蟑螂觸角的行為模式，對其生存與適應具有重要意義。這也代表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重要動器。

# 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，但許多前人的研究皆以較高等的脊椎動物作為研究對象。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。但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。而在眾多的蟑螂品種中，我們選擇以美洲蟑螂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，皆證實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蟑螂的觸角擺動行為，期望能觀察到蟑螂在不同因子的刺激下，觸角擺動模式的特性與差異。此外，觸角的此項特性，也可利用在生物探測器上，現行的探測器或偵測器，多為高科技產品，體型較大且製作成本也較高，若使用蟑螂等昆蟲作為探測器，則成本將大幅縮小，且其體積小，又符合動物的生理反應，未來的發展性非常高。

## 二、研究目的

本研究欲解決以下問題：

1. 建立昆蟲觸角擺動的動物模式。
2. 在黑暗的環境(暗適應)下，光適應或照光刺激對蟑螂觸角的擺動模式有何影響？
3. 在黑暗的環境下(暗適應)，震動刺激對蟑螂觸角的擺動模式有何影響？
4. 在黑暗的環境下(暗適應)，震動與照光同時刺激，對蟑螂觸角的擺動模式有何影響？
5. 在有光的環境下(光適應)，震動刺激對蟑螂觸角的擺動模式有何影響？
6. 比較以上因子的差異及關係，探討照光刺激、照光適應與震動等三種不同性質的刺激，對蟑螂觸角的擺動模式有何影響？

## 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	1	
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	

### 二、實驗動物：

美洲蟑螂(*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。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：

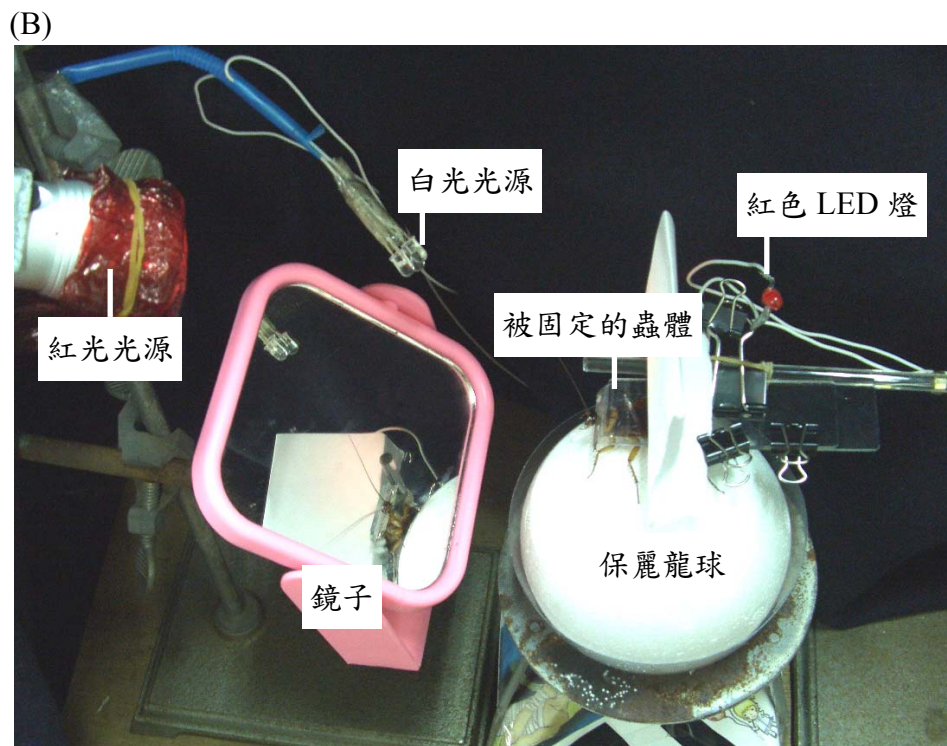
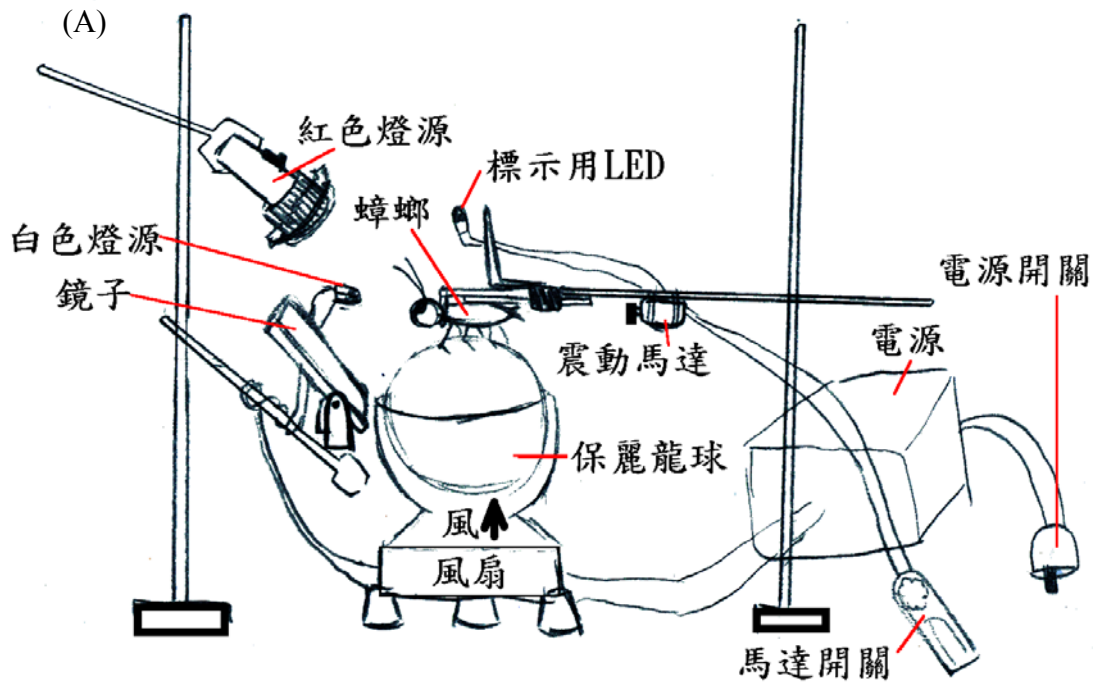
為了研究蟑螂觸角擺動模式，我們架設了一個固定蟑螂的設備(圖一)。蟑螂由兩片載玻片與塑膠片固定於支架上，而蟑螂置於一保麗龍球上，保麗龍球下方由一風扇透過漏斗向上吹風，使保麗龍球漂浮於空中，如此蟑螂可於保麗龍球上自由行走、運動。數位攝影機(DV)置於蟲體正上方，向下拍攝蟑螂的觸角運動過程。

將含有 14 顆白色發光二極體(Light Emitting Diodes, LED)的手電筒，罩上紅色玻璃紙，作為紅色光的燈源(照度為  $3.8 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$ )。由於蟑螂不具紅色光受器細胞，故可將紅色光源作為暗適應期間攝影的照明。另外以三顆白色 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)，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，紅色 LED 燈亮起。如此可於影像分析時能精確判斷震動刺激的時間。

上述之裝置以黑布圍蓋，使整個裝置與蟲體皆處於黑暗環境。利用此裝置，可用於探討蟑螂於光適應(以白燈模擬白天)及暗適應(以紅燈模擬夜晚)期間，受震動刺激(以馬達的震動模擬外在環境干擾)以及光照刺激等環境因子，對蟑螂觸角運動模式的調節作用。





圖一 研究蟑螂觸角運動模式的實驗設備。(A)示意圖。(B)實際照片。



我們將實驗分為六個組別：暗適應、光適應、暗適應期間照光刺激、暗適應期間震動刺激、暗適應期間同時震動與照光刺激、光適應期間震動刺激。說明如下：

(一)、暗適應(圖二)：將蟲體置於暗適應的狀態中 15 分鐘，使蟑螂適應馴化。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。

項目	15 分鐘適應	1.5 分鐘紀錄
攝影		
震動(開啟馬達)		
照光(開啟白色 LED 燈)		

圖二 暗適應之實驗設計。

(二)、光適應(圖三)：將蟲體置於光適應的狀態中 15 分鐘，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。

項目	15 分鐘適應	1.5 分鐘紀錄
攝影		
震動(開啟馬達)		
照光(開啟白色 LED 燈)		

圖三 光適應之實驗設計。

(三)、暗適應期間照光刺激(圖四)：將蟲體置於暗適應的狀態中 15 分鐘，再以數位攝影機紀錄蟲體觸角的擺動行為，攝影記錄開始時，同時以白色 LED 燈照光刺激。紀錄 10 秒鐘後關掉燈源，共攝影記錄 20 秒，包含照光刺激期間 10 秒與刺激結束後 10 秒。

項目	15 分鐘適應	0-10 秒	10-20 秒
攝影			
震動(開啟馬達)			
照光(開啟白色 LED 燈)			

圖四 暗適應期間照光刺激之實驗設計。

(四)、暗適應期間震動刺激(圖五)：將蟲體置於暗適應的狀態中 15 分鐘，再以數位攝影機紀錄蟲體觸角的擺動行為，攝影記錄開始時，同時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，包含震動刺激期間 10 秒與刺激結束後 10 秒。

項目	15 分鐘適應	0-10 秒	10-20 秒
攝影			
震動(開啟馬達)			
照光(開啟白色 LED 燈)			

圖五 暗適應期間震動刺激之實驗設計。

(五)、暗適應期間同時震動與照光刺激(圖六)：將蟲體置於暗適應的狀態中 15 分鐘，再以數位攝影機紀錄蟲體觸角的擺動行為，攝影記錄開始時，同時給予震動刺激與照光刺激。紀錄 10 秒鐘後關掉燈源與馬達，共攝影記錄 20 秒，包含刺激期間 10 秒與刺激結束後 10 秒。

項目	15 分鐘適應	0-10 秒	10-20 秒
攝影			
震動(開啟馬達)			
照光(開啟白色 LED 燈)			

圖六 暗適應期間同時震動與照光刺激之實驗設計。

(六)、光適應期間震動刺激(圖七)：將蟲體置於光適應的狀態中 15 分鐘，再以數位攝影機紀錄蟲體觸角的擺動行為，攝影記錄開始時，同時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，包含震動刺激期間 10 秒與震動刺激結束後 10 秒。

項目	15 分鐘適應	0-10 秒	10-20 秒
攝影			
震動(開啟馬達)			
照光(開啟白色 LED 燈)			

圖七 光適應期間震動刺激之實驗設計。

#### 四、測量的參數：

本研究所記錄之影片格式為每秒 30 格畫面，將所記錄的影片於個人電腦上逐張播放，直接於螢幕上測量蟲體觸角之角度(圖八)並直接記錄，本研究皆測量蟑螂的左觸角。

本研究所測量觸角擺動行為的參數包含擺動頻率、擺動角度、擺動角度差、擺動時間差、擺動角速度等，說明如下：

(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」。

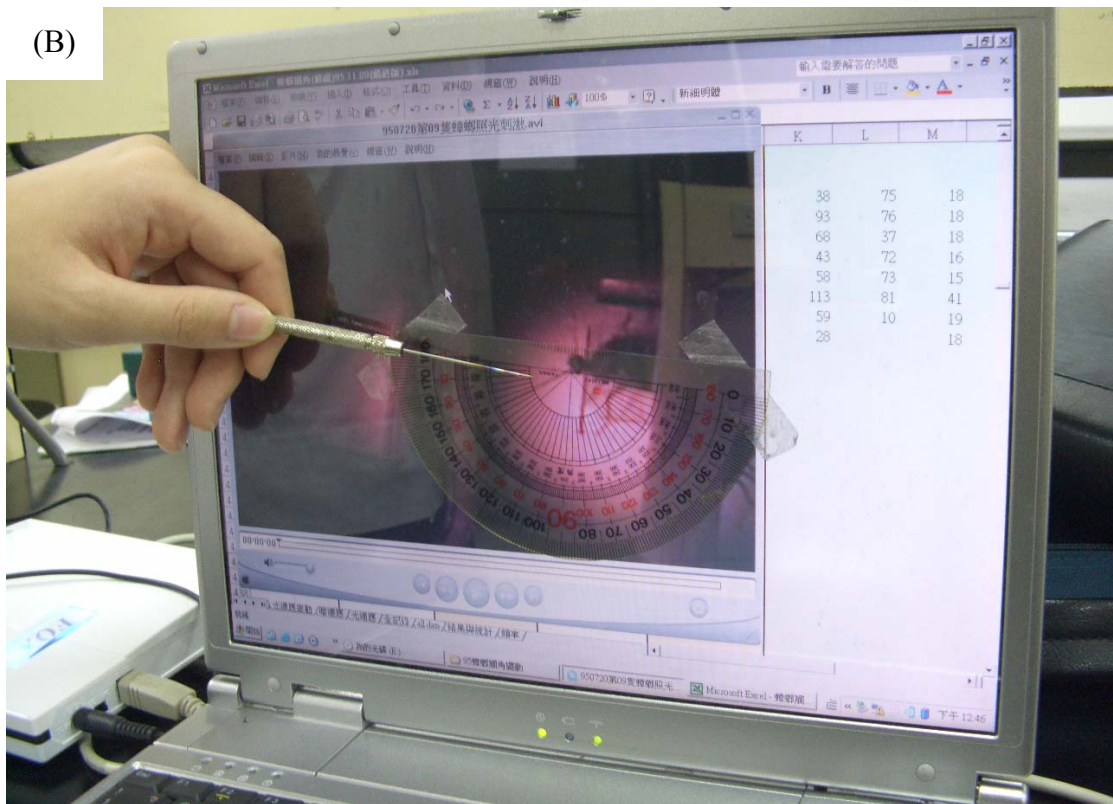
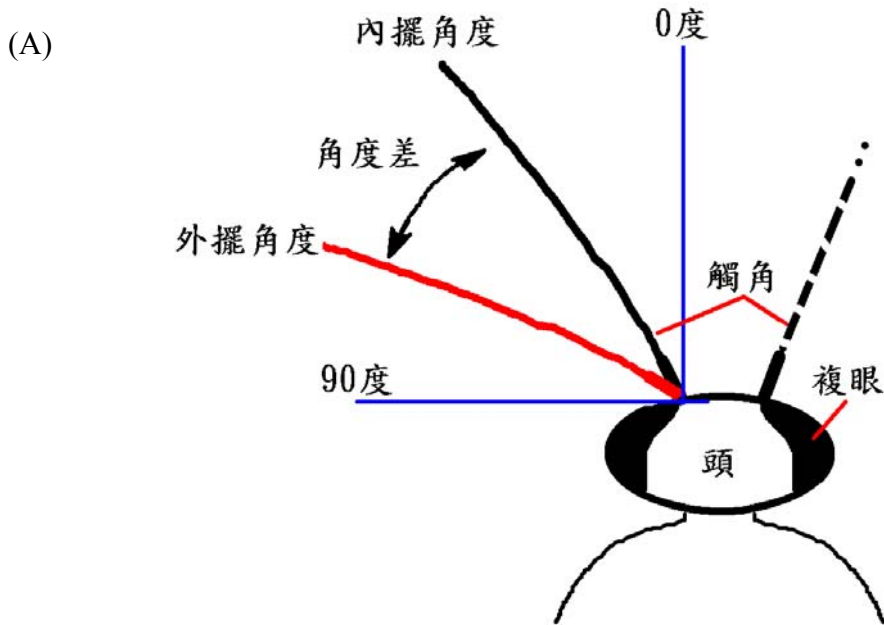
(四)、擺動時間差

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」。



圖八 蟑螂觸角各參數的測量。

(A) 蟑螂觸角內擺角度、外擺角度與角度差之示意圖。

(B) 於電腦螢幕上進行蟲體觸角角度的測量。

## 參、研究結果

### 一、各處理組蟑螂觸角擺動模式

若記錄蟑螂觸角隨時間的角度變化(圖九)，可發現各處理組觸角擺動的模式明顯不同，顯示美洲蟑螂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。但觸角行為的狀態與特性，還需進一步量化，才可瞭解環境因子的刺激，對觸角運動具有何種調節作用。

### 二、不同刺激對觸角擺動頻率的影響

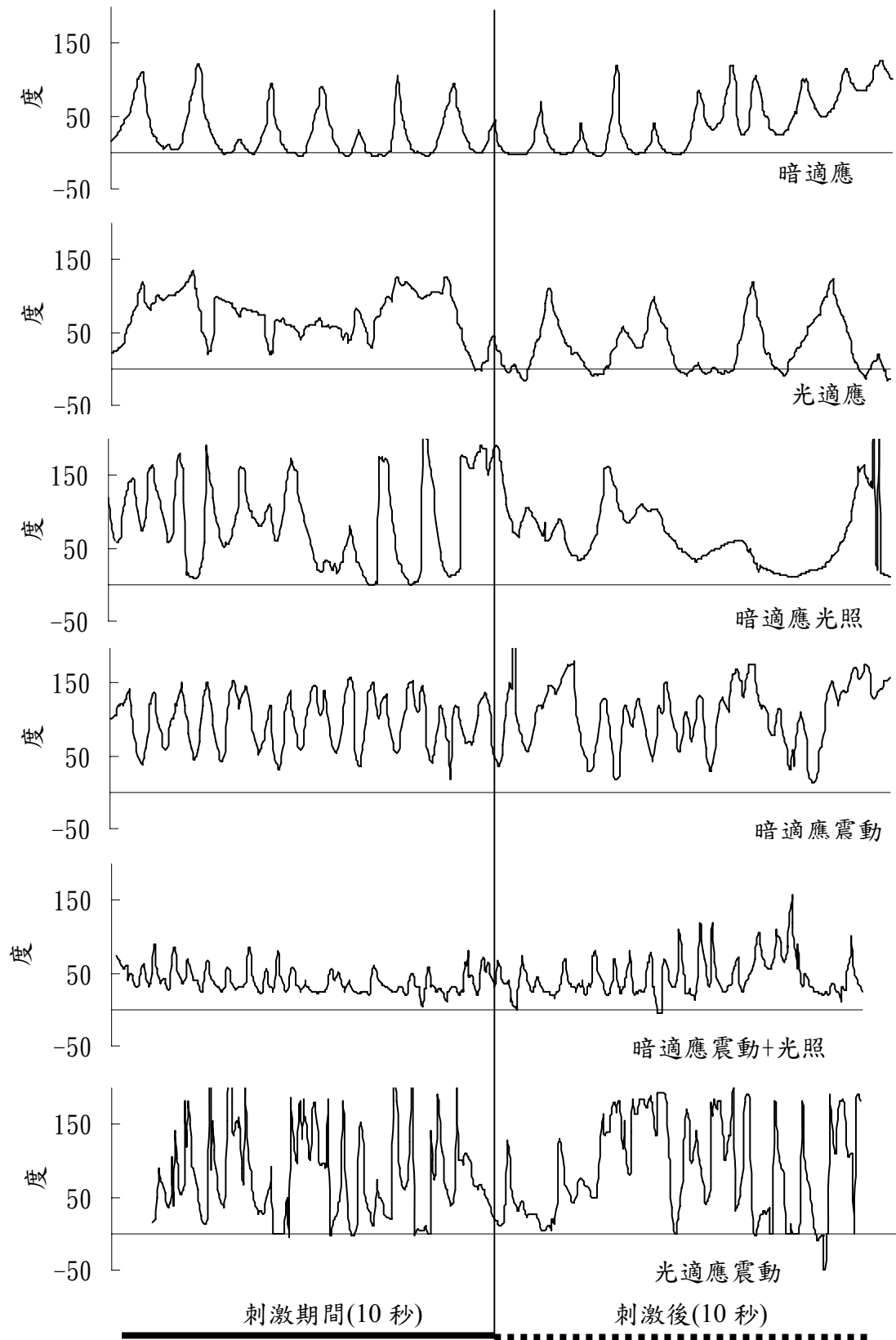
測量各處理組蟑螂於刺激期間的觸角擺動頻率(圖十)，可發現於暗適應情形下，照光刺激可增加擺動頻率( $p < 0.005$ )，但若同時照光並給予震動刺激，卻會減小單獨照光刺激的效應(但仍較對照組高， $p < 0.05$ )。暗適應時單獨給予震動刺激不會影響擺動頻率( $p > 0.05$ )。若於光適應情形下，震動刺激可增加擺動頻率( $p < 0.05$ )。

### 三、不同刺激對內擺角度(最內角度)之影響

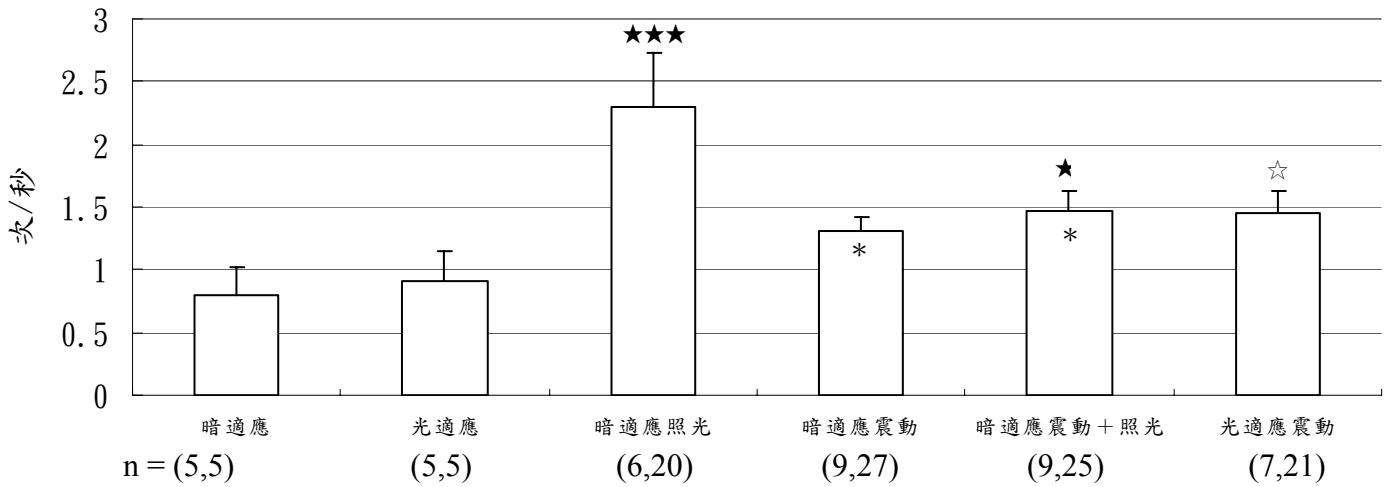
光適應下之觸角內擺角度較暗適應下為大(圖十一)，兩者間具統計上的差異( $p < 0.05$ )。暗適應後給予照光刺激，不會改變觸角的內擺角度( $p > 0.05$ )，顯示出照光刺激對觸角內擺角度不具影響。但於照光刺激結束後，內擺角度卻變小( $p < 0.001$ )。

暗適應後給予震動刺激，內擺角度亦減少( $p < 0.005$ )。震動刺激後之觸角內擺角度較暗適應小且差距大，兩者間亦具統計上的差異( $p < 0.001$ )，且刺激期間與刺激後之內擺角度無顯著差異( $p > 0.05$ )。顯示震動刺激後之觸角內擺角度的變化持續較久。暗適應後同時給予照光與震動刺激，可使觸角內擺角度減小( $p < 0.05$ )，但仍大於單獨震動刺激，此結果顯示照光刺激可減弱了震動刺激對內擺角度的影響，且刺激期間與刺激後之內擺角度無顯著差異( $p > 0.05$ )，顯示震動與照光同時刺激，觸角內擺角度的變化持續較久。

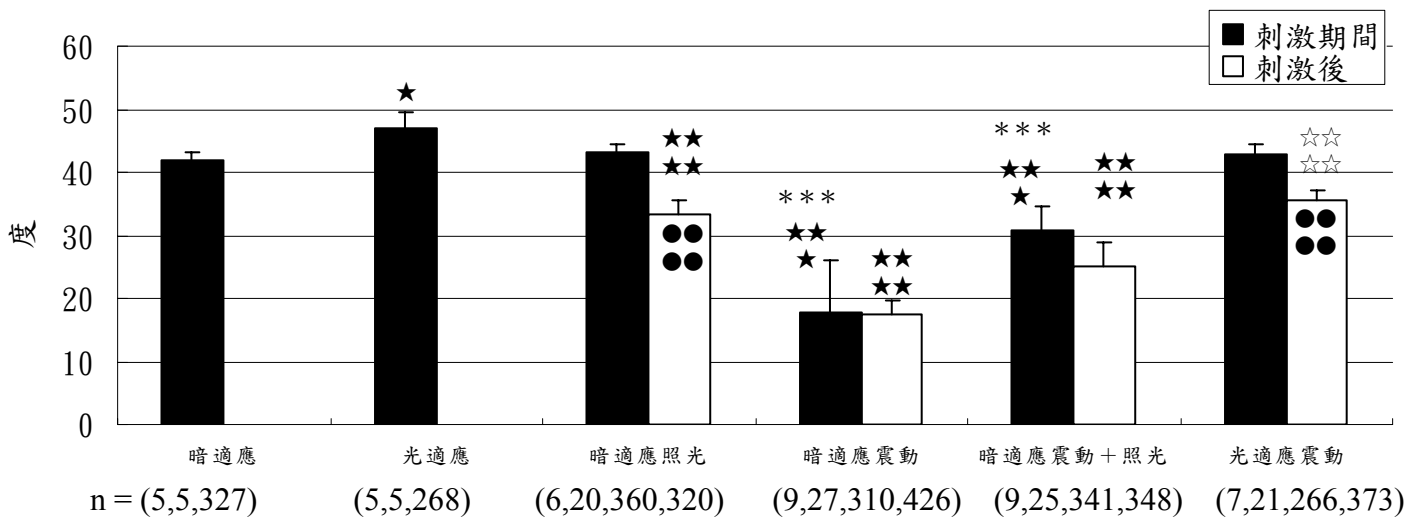
光適應後給予震動刺激之內擺角度與光適應下相同( $p > 0.05$ )，但於刺激結束後減小( $p < 0.001$ )。暗適應下震動與光適應下震動，雖皆有震動刺激，但在光適應情形下可抑制震動減小內擺角度的效應( $p < 0.005$ )。顯示無論光適應或照光刺激皆抑制震動刺激減小內擺角度的效應。



圖九 各處理組蟑螂於刺激期間與刺激後，左觸角的擺動模式。



圖十 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；\*： $p < 0.05$ 。



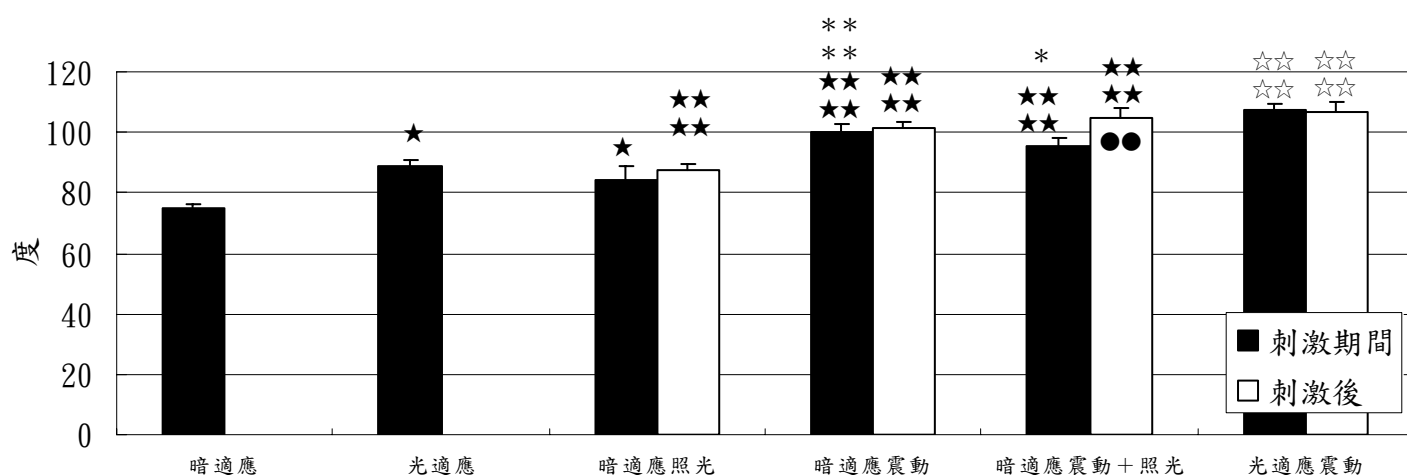
圖十一 各因子對蟑螂觸角內擺角度的影響(mean±SE)。  
 n = (個體數, 測量次數, 刺激期間觸角擺動次數, 刺激後觸角擺動次數)。  
 與暗適應組相較：單尾 t 檢定；★： $p < 0.05$ ；★★★： $p < 0.005$ ；★★★★： $p < 0.001$ 。  
 與光適應組相較：單尾 t 檢定；☆： $p < 0.05$ 。  
 與暗適應照光組相較：單尾 t 檢定；\*\*\*： $p < 0.005$ 。  
 與刺激期間相較：單尾 t 檢定；●●●●： $p < 0.001$ 。

#### 四、不同刺激對外擺角度(最外角度)之影響

光適應下之觸角外擺角度較暗適應下為大( $p < 0.001$ ，圖十二)。暗適應後給予照光刺激，觸角外擺角度增加( $p < 0.05$ )。且刺激後與刺激期間一致( $p > 0.05$ )。

暗適應後給予震動刺激，可使外擺角度增加( $p < 0.001$ )，且增加的程度大於照光刺激( $p < 0.001$ )。震動刺激後之觸角外擺與刺激期間無顯著差異( $p > 0.05$ )，顯示震動刺激後之觸角外擺行為持續較久。與內擺角度比較(圖十一)，可發現震動刺激會增加外擺角度且減少內擺角度，可增加觸角擺動的幅度(角度差)。暗適應後同時給予照光與震動兩項刺激，可增加觸角外擺角度( $p < 0.001$ )，且增加的程度與單獨震動刺激一樣( $p > 0.05$ )。在照光與震動刺激結束後，外擺角度會增加( $p < 0.01$ )。

光適應後給予震動刺激，蟑螂觸角外擺角度大於光適應的處理組( $p < 0.001$ )。且刺激結束後並不會立即恢復( $p > 0.05$ )。



圖十二 各因子對蟑螂觸角外擺角度的影響(mean±SE)。取樣數如圖十。

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；●●●●： $p < 0.001$ 。

#### 五、不同刺激對內擺角度差之影響

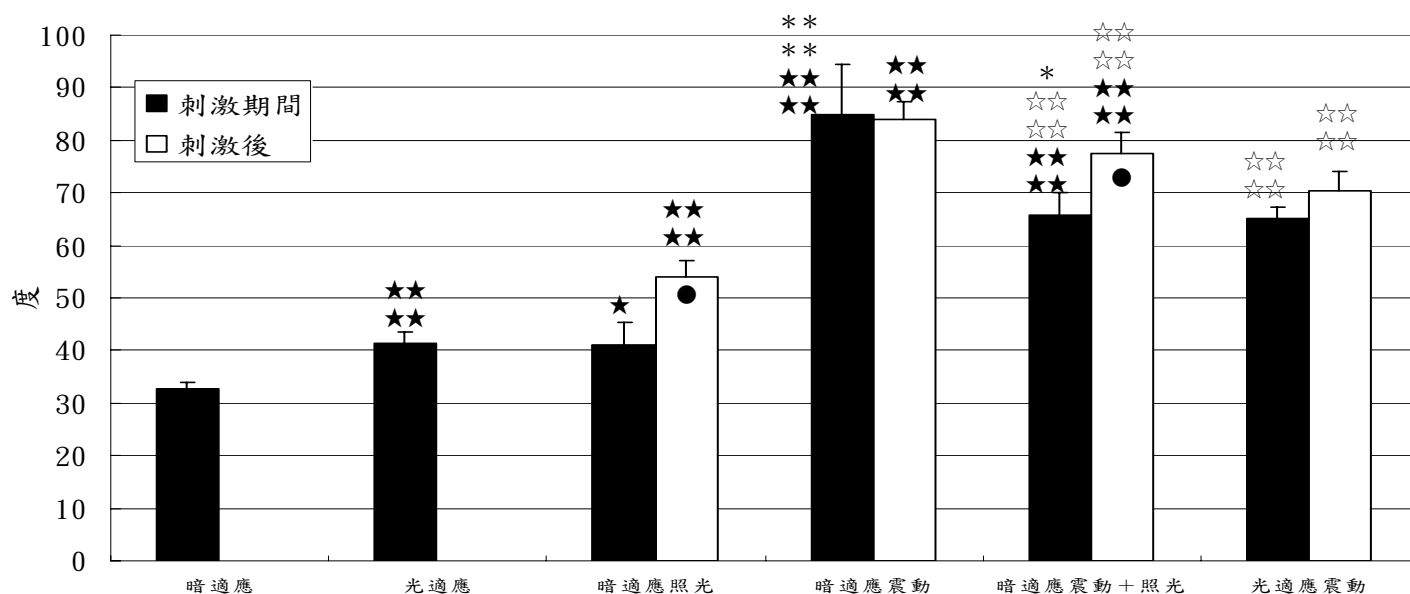
光適應下之觸角內擺角度差較暗適應下為大( $p < 0.001$ ，圖十三)。暗適應後給予照光刺激，內擺角度差亦增加( $p < 0.05$ )，且照光結束後，內擺角度差會增大( $p < 0.05$ )。

暗適應後給予震動刺激，內擺角度差增加( $p < 0.001$ )，且增加程度大於照光刺激( $p < 0.001$ )，且刺激結束後不回立即恢復( $p > 0.05$ )。顯示震動刺激對內擺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，觸角內擺角



度差增加( $p<0.001$ )，但仍較單獨震動刺激小( $p<0.05$ )，且刺激結束後內擺角度差增加( $p<0.05$ )。此結果顯示照光刺激減弱了震動刺激對內擺角度差的影響。

光適應後給予震動刺激，觸角內擺角度差大於光適應處理組( $p<0.001$ )。與暗適應震動刺激一樣，刺激結束後不會立即恢復( $p>0.05$ )。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內擺角度差增加的效應，不及暗適應下震動刺激( $p<0.05$ )，以上數據顯示光適應或照光刺激皆會減少震動刺激增加內擺角度差的效應。



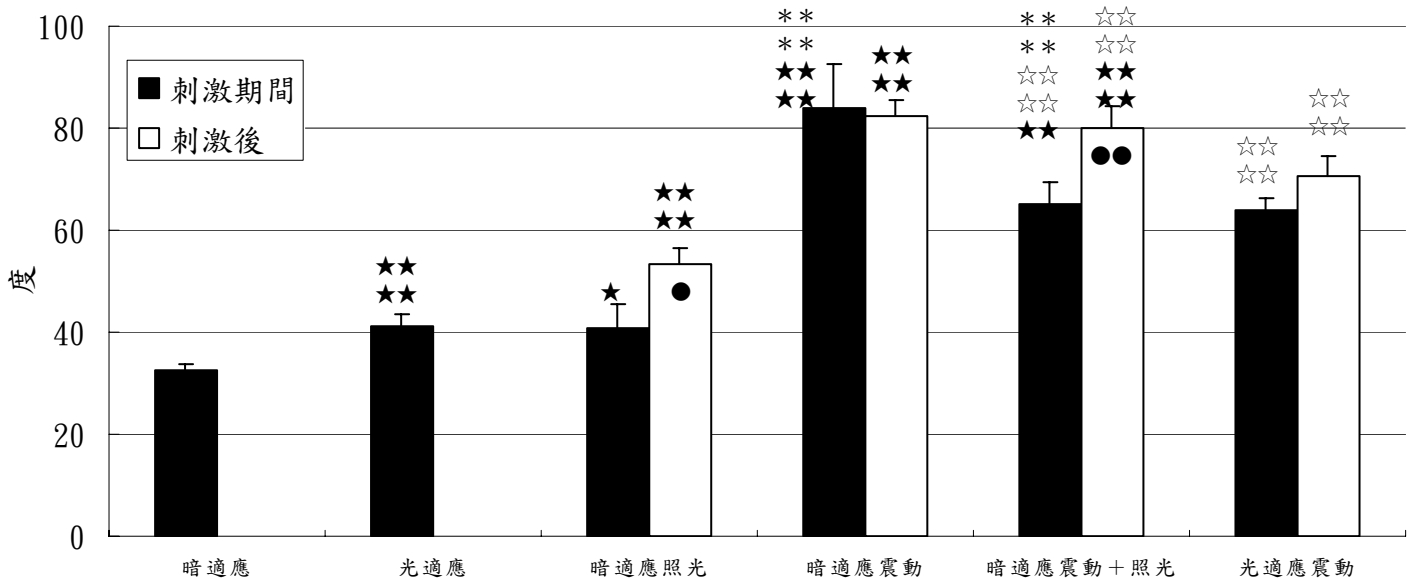
圖十三 各因子對蟑螂觸角內擺角度差的影響(mean±SE)。取樣數如圖十。  
 與暗適應組相較：單尾 t 檢定；★： $p<0.05$ ；★★★★： $p<0.001$ 。  
 與光適應組相較：單尾 t 檢定；☆☆☆☆： $p<0.001$ 。  
 與暗適應照光組相較：單尾 t 檢定；\*： $p<0.05$ ；\*\*\*\*\*： $p<0.001$ 。  
 與刺激期間相較：單尾 t 檢定；●： $p<0.05$ 。

#### 六、不同刺激對外擺角度差之影響

光適應下之觸角外擺角度差較暗適應下為大( $p<0.001$ ，圖十四)。暗適應後給予照光刺激，外擺角度差亦增加( $p<0.05$ )，且照光結束後，外擺角度差會增大( $p<0.05$ )。

暗適應後給予震動刺激，外擺角度差增加( $p<0.001$ )，增加程度大於照光刺激( $p<0.001$ )，且刺激結束後不回立即恢復( $p>0.05$ )。顯示震動刺激對外擺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，觸角外擺角度差增加( $p<0.001$ )，但仍較單獨震動刺激小( $p<0.05$ )，且刺激結束後內擺角度差增加( $p<0.05$ )。此結果顯示照光刺激減弱了震動刺激對外擺角度差的影響。

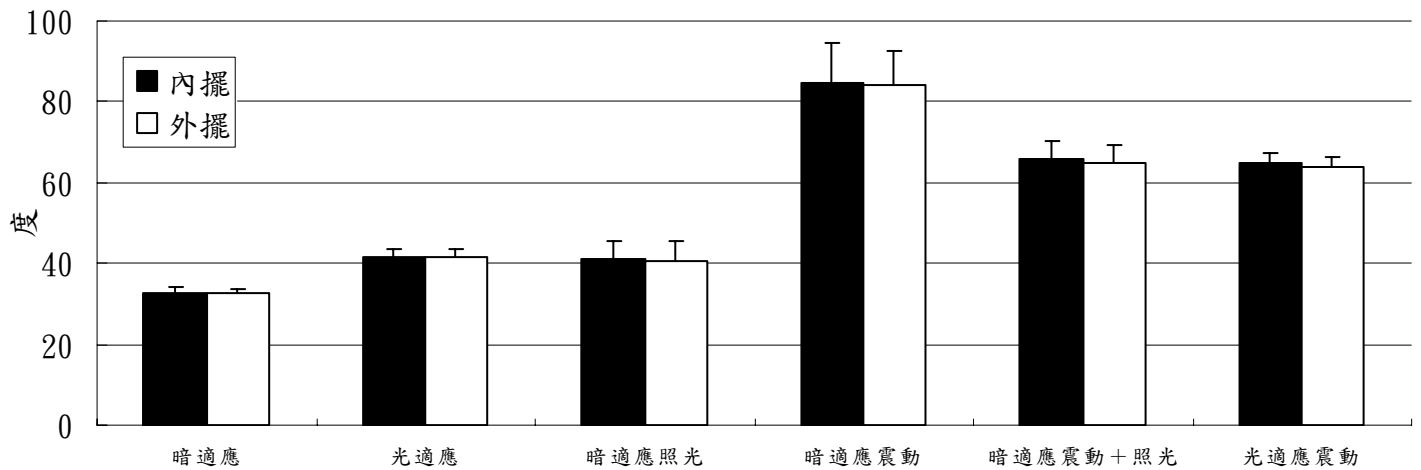
光適應後給予震動刺激，觸角外擺角度差大於光適應處理組( $p<0.001$ )。與暗適應震動刺激一樣，刺激結束後不會立即恢復( $p>0.05$ )。若與暗適應震動刺激組比較，可發現光適應下震動刺激造成外擺角度差增加的效應，不及暗適應下震動刺激( $p<0.05$ )，以上數據顯示光適應或照光刺激皆會減少震動刺激增加外擺角度差的效應。



圖十四 各因子對蟑螂觸角外擺角度差的影響(mean±SE)。取樣數如圖十。  
 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；●： $p<0.05$ ；●●： $p<0.01$ 。

### 七、外擺角度差與內擺角度差之比較

比較各處理組外擺角度差與內擺角度差(圖十三、圖十四、圖十五)，可發現兩者在各處理組皆不具統計上的差異( $p>0.05$ )。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。



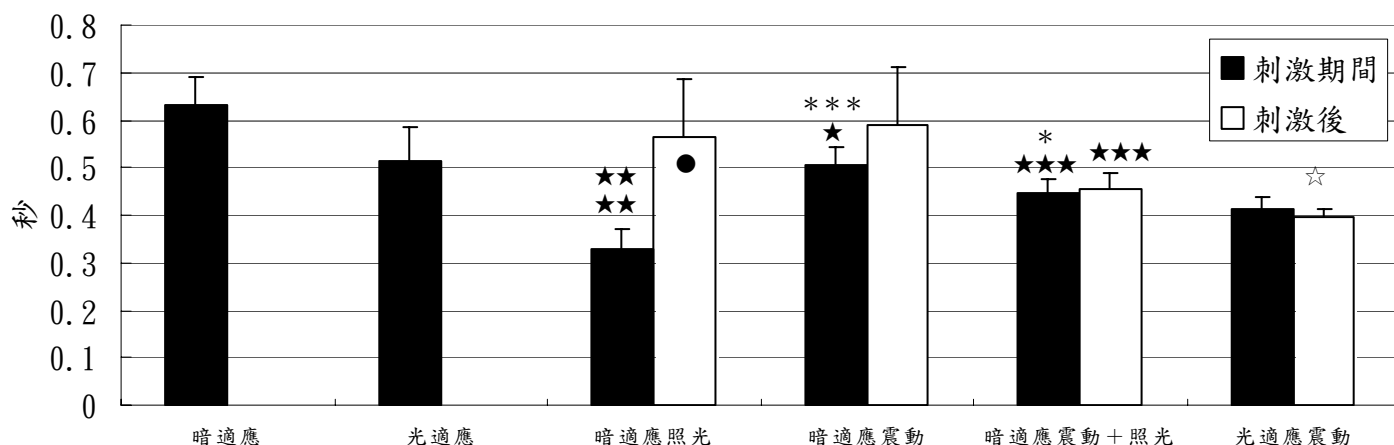
圖十五 各處理組蟑螂觸角內擺角度差與外擺角度差的比較(mean±SE)。取樣數如圖十。  
單尾 t 檢定；無統計差異。

#### 八、不同刺激對內擺時間差之影響

光適應不會影響觸角的內擺時間差( $p > 0.05$ ，圖十六)。暗適應後給予照光刺激，內擺時間差減小( $p < 0.001$ )，且刺激結束後立即恢復( $p < 0.05$ )。

暗適應後給予震動刺激，觸角內擺時間差減小( $p < 0.05$ )，但不及照光刺激的影響( $p < 0.005$ )。暗適應後同時給予震動與照光兩項刺激，可減小內擺時間差( $p < 0.005$ )，其程度小於單獨照光刺激( $p < 0.05$ )，大於單獨震動刺激( $p < 0.05$ )，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，內擺時間差與暗適應下震動刺激一致( $p > 0.05$ )。但刺激結束後，內擺時間差會減小( $p < 0.05$ )。



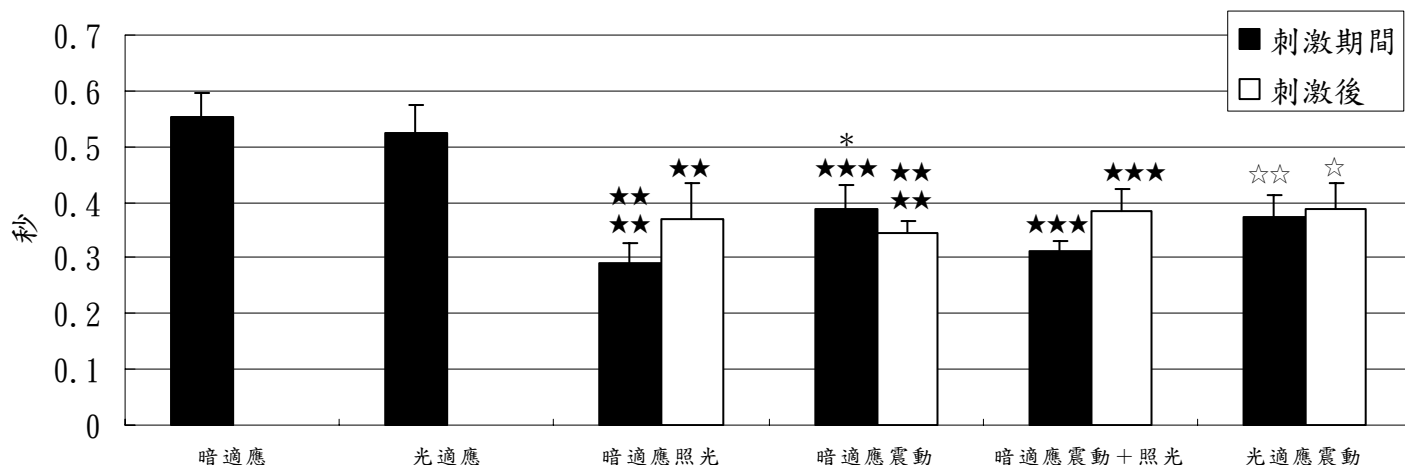
圖十六 各因子對蟑螂觸角內擺時間差的影響(mean±SE)。取樣數如圖十。  
 與暗適應組相較：單尾 t 檢定；★： $p < 0.05$ ；★★★： $p < 0.005$ 。  
 與光適應組相較：單尾 t 檢定；☆： $p < 0.05$ 。  
 與暗適應照光組相較：單尾 t 檢定；\*： $p < 0.05$ ；\*\*\*： $p < 0.005$ 。  
 與刺激期間相較：單尾 t 檢定；●： $p < 0.05$ 。

#### 九、不同刺激對外擺時間差之影響

光適應不會影響觸角的內擺時間差( $p > 0.05$ ，圖十七)。暗適應後給予照光刺激，內擺時間差減小( $p < 0.001$ )，但刺激結束不會立即恢復( $p < 0.05$ )。

暗適應後給予震動刺激，外擺時間差小於暗適應處理組( $p < 0.005$ )，且刺激結束後不會立即恢復( $p > 0.05$ )。暗適應後同時給予震動與照光兩項刺激，可減小外擺時間差( $p < 0.001$ )，其效應與單獨震動刺激或單獨照光刺激一致( $p > 0.05$ )，且刺激結束後不會立即恢復( $p > 0.05$ )。

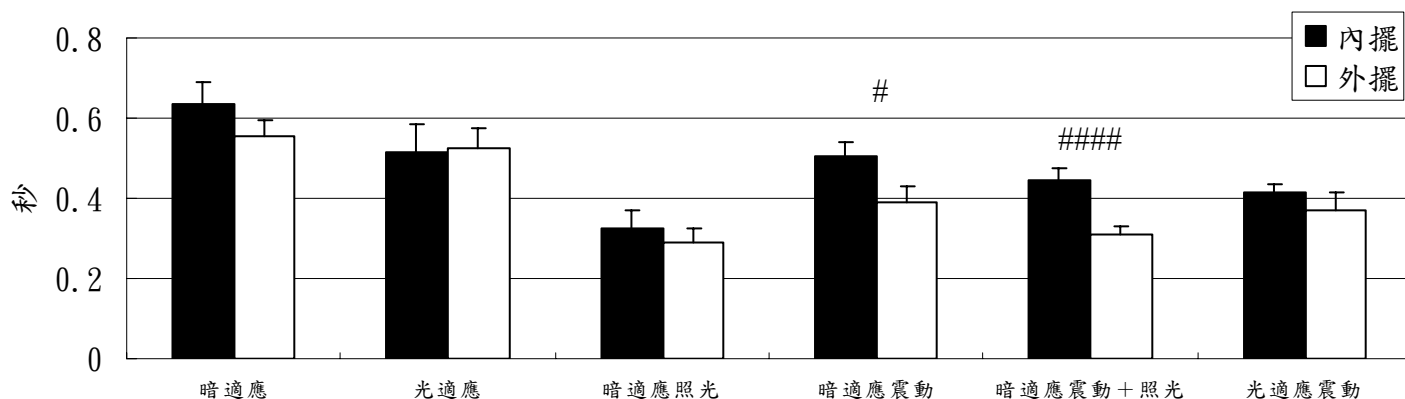
光適應後給予震動刺激，外擺時間差較光適應組小( $p < 0.01$ )，但與暗適應震動組一致( $p > 0.05$ )。顯示震動刺激的效應不受光適應或照光刺激的影響。



圖十七 各處理組對蟑螂觸角外擺時間差的影響(mean±SE)。取樣數如圖十。  
 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。

#### 十、外擺時間差與內擺時間差之比較

比較各處理組觸角外擺與內擺的時間差(圖十八)，發現大部分的因子處理下，觸角的外擺與內擺時間差一致( $p>0.05$ )，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( $p<0.05$ ； $p<0.001$ )。



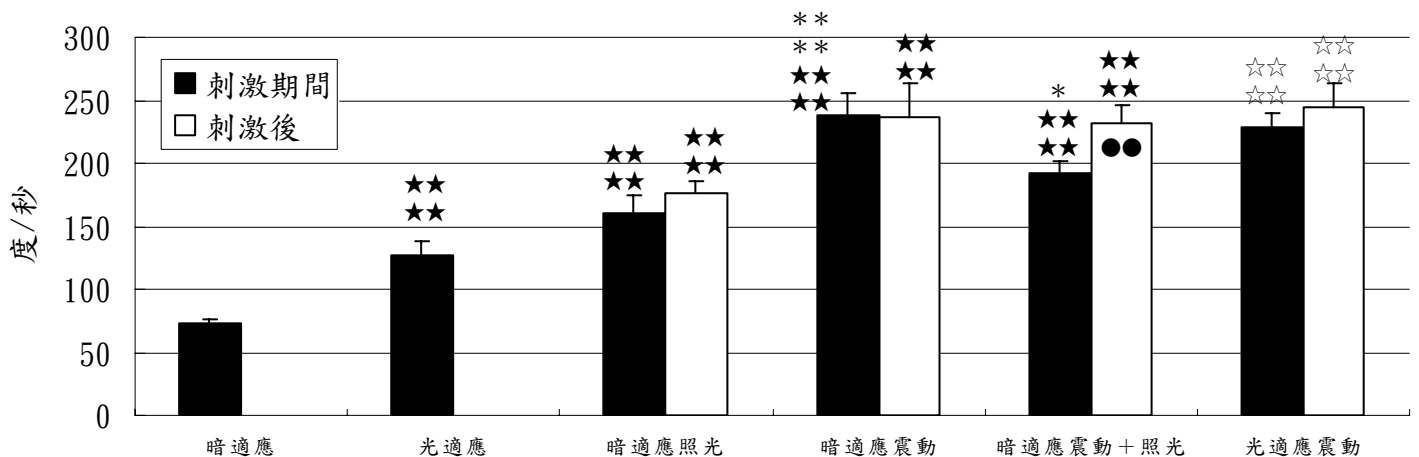
圖十八 各處理組蟑螂觸角內擺時間差與外擺時間差的比較(mean±SE)。取樣數如圖十。  
 單尾 t 檢定；#： $p<0.05$ ；#####： $p<0.001$ 。

## 十一、不同刺激對內擺角速度之影響

光適應下之內擺角速度大於暗適應( $p<0.001$ ，圖十九)。暗適應後給予照光刺激，可增加內擺角速度( $p<0.001$ )，且刺激結束後不會立即恢復( $p>0.05$ )。

暗適應後給予震動刺激，可增加內擺角速度( $p<0.001$ )，其效應大於照光刺激( $p<0.001$ )，且刺激結束後不會立即恢復( $p>0.05$ )。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( $p<0.001$ )，且其效應大於單獨照光刺激( $p>0.05$ )，小於單獨震動刺激( $p<0.01$ )，而於刺激結束後，觸角內擺角速度增加( $p<0.01$ )。

光適應後給予震動刺激，內擺角速度大於光適應組( $p<0.001$ )，但不及暗適應下震動刺激( $p<0.01$ )，且刺激結束後不會立即恢復( $p>0.05$ )。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內擺角速度的效應。



圖十九 各因子對蟑螂觸角內擺角速度的影響(mean±SE)。取樣數如圖十。

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；●●： $p<0.01$ 。

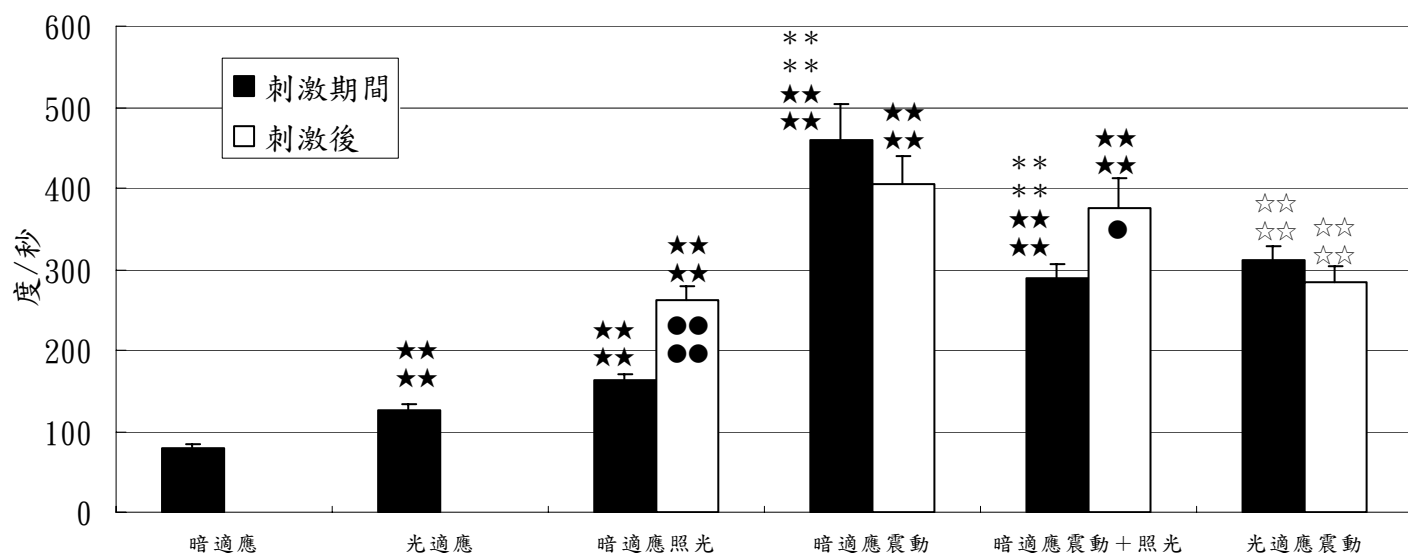
## 十二、不同刺激對外擺角速度之影響

光適應下之外擺角速度大於暗適應( $p<0.001$ ，圖二十)。暗適應後給予照光刺激，可增加外擺角速度( $p<0.001$ )，且刺激結束後，外擺角速度可再增加( $p<0.001$ )。

暗適應後給予震動刺激，增加外擺角速度( $p<0.001$ )，其效應大於照光刺激( $p<0.001$ )，且刺激結束後不會立即恢復( $p>0.05$ )。暗適應後同時給予照光與震動兩項刺激，可增加外擺角速度( $p<0.001$ )，其效應大於單獨照光刺激( $p<0.001$ )，小

於單獨震動刺激( $p < 0.005$ )，且刺激結束後外擺角速度可再增加( $p < 0.05$ )。

光適應後給予震動刺激，外擺角速度大於光適應處理組( $p < 0.001$ )，但不及暗適應下震動刺激( $p < 0.01$ )，且刺激結束後不會立即恢復( $p > 0.05$ )。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內擺角速度的效應。



圖二十 各因子對蟑螂觸角外擺角速度的影響(mean±SE)。取樣數如圖十。

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；☆☆☆☆： $p < 0.005$ 。

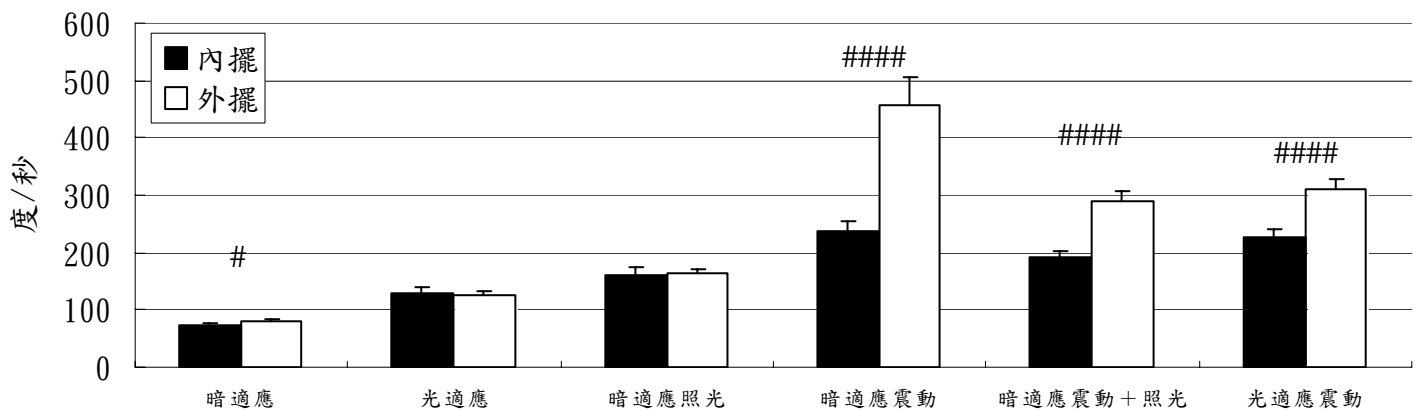
與暗適應照光組相較：單尾 t 檢定；\*\*\*\*： $p < 0.001$ 。

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

### 十三、外擺角速度與內擺角速度之比較

比較各處理組觸角外擺角速度與內擺角速度(圖二十一)，發現暗適應、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(皆  $p < 0.001$ )。





圖二十一 各處理組蟑螂觸角內擺角速度與外擺角速度的比較(mean±SE)。取樣數如圖十。

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

#### 十四、實驗結果摘要

將以上各處理組所測量的參數，整理統整於表二與表三，分別代表刺激期間與刺激結束後的參數變化。實驗數據之結果整理如下：

- (一)、觸角內擺與外擺在擺動時間、擺動角速度的表現不一致。
- (二)、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。
- (三)、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。
- (四)、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。
- (五)、照光與震動刺激對各參數並無相反的作用，但若同時刺激，對擺動頻率、內擺角度、擺動角度差、擺動時間差、擺動角速度有整合的效應，而非加成的作用。
- (六)、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。
- (七)、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。

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		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
擺動頻率		—	↑↑	—	↑	↑
內擺角度		↑	—	↓↓	↓	—
外擺角度		↑	↑	↑↑	↑↑	↑↑↑
擺動角度差		↑	↑	↑↑↑	↑↑	↑↑
擺動時間差	內擺	—	↓↓↓	↓	↓↓	↓↓
	外擺		↓↓	↓	↓	↓
擺動角速度		↑	↑↑	↑↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑

註：1. ↑代表較暗適應組增加，且增加程度↑↑↑>↑↑>↑↑>↑，之間具有統計上之差異。

2. ↓代表較暗適應組減少，且減少程度↓↓↓>↓↓>↓，之間具有統計上之差異。

3. —代表與暗適應組一致，不具統計上之差異。

4. 若無註明內擺/外擺，代表內擺與外擺一致。

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		↓	↓↓↓	↓↓	↓	▽
外擺角度		↑	↑↑	↑↑	↑↑	△
擺動角度差		↑	↑↑↑	↑↑	↑↑	△
擺動時間差	內擺	—	—	↓	↓	▽
	外擺	↓	↓	↓	↓	
擺動角速度	內擺	↑	↑↑↑	↑↑	↑↑	△
	外擺	↑	↑↑	↑↑	↑	

註：1. 表示方法如表二。

2. △：較光適應組增加；▽：較光適應組減小。

## 肆、討論

本研究以攝影紀錄的方式，記錄了不同因子對蟑螂觸角擺動模式的調節作用，並且以影像分析的方式，計算並比較各種參數，最後歸納出差異。本研究發現，不同因子的刺激，對蟑螂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受器之外，更是能反映環境因子與表現生理狀態的動器，故觸角的行為表現為最佳的實驗模式。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。

本研究發現在大部分測量的參數中(除擺動時間)，觸角內擺與外擺行為的表現一致。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。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。

蟑螂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蟑螂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，如同圖十三、十四與圖十九、二十所顯示，在照光與震動同時刺激的情形下，蟑螂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。

本研究中光適應與照光刺激的實驗結果，與前人的部分實驗結果不符(蔡，民 90)，但我們所測量的樣本數較多，數據較為可信，另該研究所使用的光線強度與本實驗不同，更加證明蟑螂為對環境敏感的昆蟲，刺激因子的質與量皆會對蟑螂觸角行為造成不同的效果。

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，或是震動刺激對於蟑螂的生存而言，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(圖十一、圖十二，表三)，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，蟑螂接受刺激時，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，我們認為這反映出蟑螂偵測環境時，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。

各處理組之角速度相較於暗適應皆有增加(圖十九、圖二十、表三)，皆是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，可引發蟑螂觸角不同性質的行為反應，再度證明蟑螂觸角行為的敏感性與複雜性。

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，同時，也希望能為生物探測器在未來的應用與發展鋪路。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—蟑螂。

## 伍、結論

- 一、我們已建立一個研究各環境因子調節蟑螂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蟑螂觸角的探索行為。
- 三、若於暗適應後給予蟑螂照光刺激，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、若給予蟑螂震動刺激，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，蟑螂觸角擺動頻率、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、蟑螂於有光的環境(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，顯示蟑螂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。

## 伍、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。
- 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、黃璧祈、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。

## 評語

- 一、 題材良好有創意。
- 二、 數據宜客觀整合，不宜以自己的意思選取。
- 三、 對樣品的基本行爲及生理背景應做更深入的瞭解。