

認識身旁的小傢伙(七)-- 美洲蟑螂振翅行為的觀察與量化方法

周心慈 劉奕伶 蔡任圃*

臺北市立中山女子高級中學

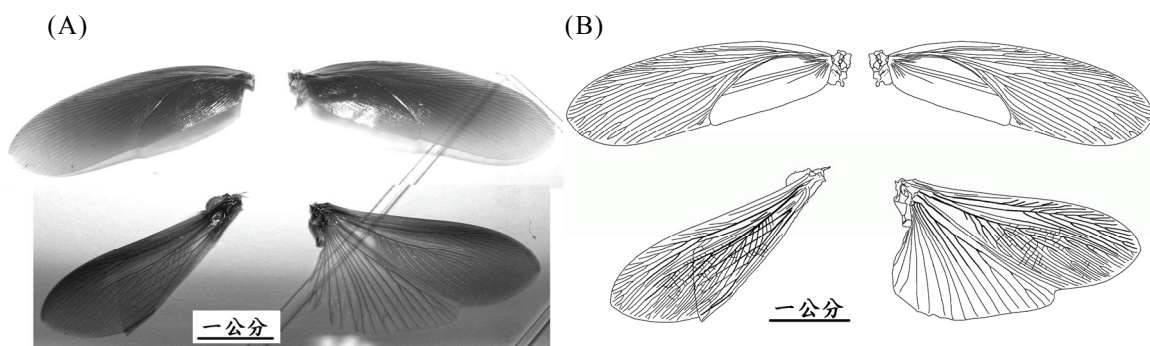
壹、前言

在自然界中，除了鳥類與蝙蝠之外，昆蟲也是空中的霸主之一，與前兩者不同，昆蟲的翅並不是前肢特化而來，而是胸部背側的骨板向外延伸特化而成，或是由水生昆蟲的氣管鰓起源而成，形成各式各樣的翅膀型態。想要研究生物遨翔的奧秘，尤其在中學實驗室中進行觀察與實驗，昆蟲是一群適合的實驗物種。許多昆蟲亦是科學家用來研究昆蟲飛行生理機制與調節作用的實驗對象，例如：麗蠅、蝗蟲、天蛾等，但這些昆蟲較難以取得與飼養，或是其翅膀運動過於快速，難以記錄分析，在中學實驗室中缺乏高速攝影機或電生理記錄儀器的條件下，美洲蟑螂

(*Periplaneta americana*)易捕捉、易飼養、蟲體大、翅膀運動頻率較慢，且易受環境因子調節，適合作為中學生觀察、研究昆蟲振翅行為的實驗動物。

貳、蟑螂的前、後翅型態

除了少數種類的昆蟲缺乏翅或一對翅退化，一般昆蟲成體具有兩對翅，前翅位於中胸，後翅位於後胸背側，蟑螂的前翅較為革質化，無法折疊，可保護後翅與軀體，稱為翅覆(Tegmina)。蟑螂後翅平時可經一次折疊，收於前翅(翅覆)之下，於飛行或滑翔時，前、後翅張開拍振增加滑翔時的空氣阻力與抬昇力。



圖一、美洲蟑螂的前、後翅型態。(A).實際照片。(B).手繪圖。

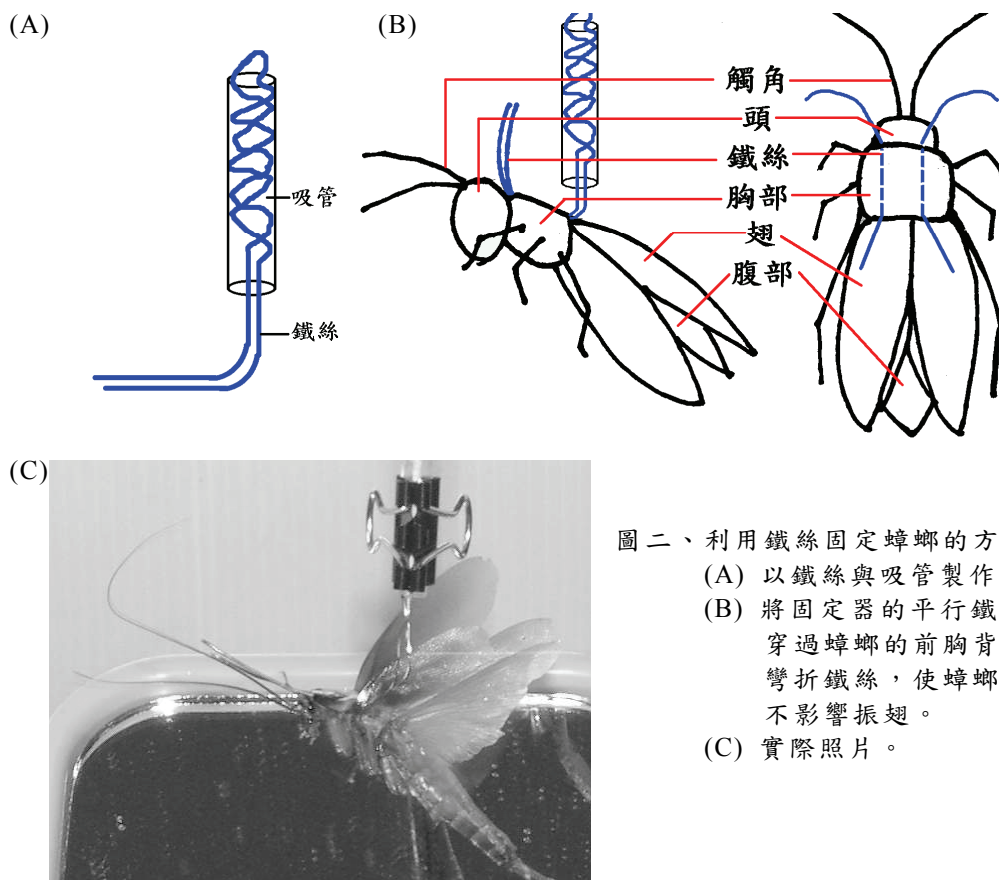
*為本文通訊作者

參、美洲蟑螂的固定方法

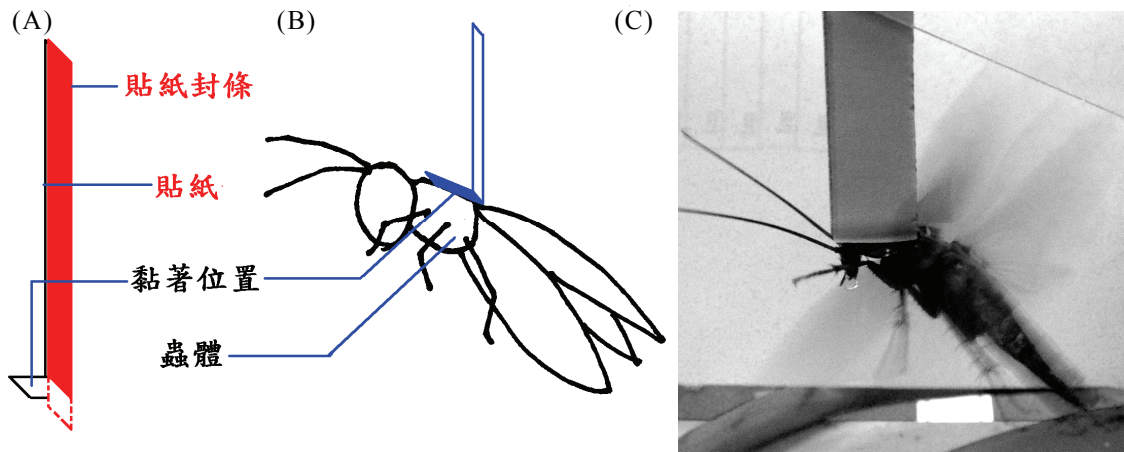
以蟲體固定式的方法，可用來觀察蟑螂的振翅行為與探討各種因子對其振翅行為的調控作用。本文介紹兩種固定蟲體的方式。以鐵絲折成兩端同一方向且互相平行(相隔約 0.5 公分)，將另一側的鐵絲部分固定於吸管内(如圖二 A)，再將平行的鐵絲末端穿過蟑螂前胸背板(如圖二 B)，最後調整鐵絲的位置與彎曲程度，使蟑螂無法逃脫，且不影響其振翅與步足的運動，最後將吸管部分以長尾夾固定於架子上，並撕一小球衛生紙或棉花給蟑螂的步足抓握，減少其掙扎行為與消除振翅反射。此

方法可確保蟑螂於實驗期間無法脫逃，但以穿刺方法固定會傷害蟲體，減低蟑螂活性，較適合用於剛接觸蟑螂操作的實驗者。

若操作蟑螂較具經驗，累積足夠技巧與膽量，可改用另一種固定蟲體的方法：利用市售的蟑螂屋(由一顆引誘劑吸引蟑螂靠近，另有一張捕黏紙，當蟑螂被吸引爬到該黏紙上，會被黏住而無法動彈)，將黏紙剪成長條狀(寬度約 0.8 公分)，將一端折起成 90°(長度約 0.5 公分)，將折起部位的貼紙封條撕去，黏著面朝下，黏貼於蟑螂的前胸背板上(如圖三)，以長尾夾將剩下的貼紙部位固定於架子上。



圖二、利用鐵絲固定蟑螂的方法示意圖。
 (A) 以鐵絲與吸管製作固定器。
 (B) 將固定器的平行鐵絲由後向前穿過蟑螂的前胸背板，並適當彎折鐵絲，使蟑螂無法逃脫亦不影響振翅。
 (C) 實際照片。



圖三、利用貼紙固定蟑螂的方法示意圖。

- (A). 將貼紙一端彎折 90° 並撕去封條。
 (B). 將貼紙黏著面朝下，黏貼於蟑螂的前胸背板。
 (C). 實際照片。

肆、振翅行為的紀錄與量化

若蟑螂的足部失去抓附之物，則會引發振翅反射，同時六個步足於振翅反射期間維持固定的姿勢(圖二 C、圖三 C)，故觀察蟑螂的振翅行為，只需將步足抓握的衛生紙或棉花摘去。若以風扇由蟲體正面給予氣流刺激，效果更佳。將數位攝影機置於蟲體一側並與蟲體同高，且在後方加立一塊白色塑膠版，避免後方雜物與蟑螂顏色過近，造成觀察紀錄上的困擾。由側面進行錄影記錄蟑螂的振翅行為過程，將影片於個人電腦中以 QuickTime 播放器逐步播放每格畫面，利用繪圖軟體的座標系統進行蟑螂翅端、步足座標路徑的測量(方法可參閱鄭等人，民 96)。由於每隻記錄的蟑螂，其身體角度不盡相同，故測得之座標需經校正方可相互比較。透過座標校正，可將不同個體的行爲標準化，再分別計算振翅頻率、幅度、時間、速度等參數。

校正方式為假設蟑螂的前胸背板的前坐標位於座標系統中的原點(0,0)，與前胸背板的後座標連線重疊於 X 軸，所記錄的附肢(翅或足)座標經下列方式校正成新座標點(圖四)：

蟑螂前胸背板的前坐標

$$= (X_1, Y_1) \rightarrow \text{校正成} \rightarrow (0, 0)$$

蟑螂前胸背板的後坐標

$$= (X_2, Y_2) \rightarrow \text{校正成}$$

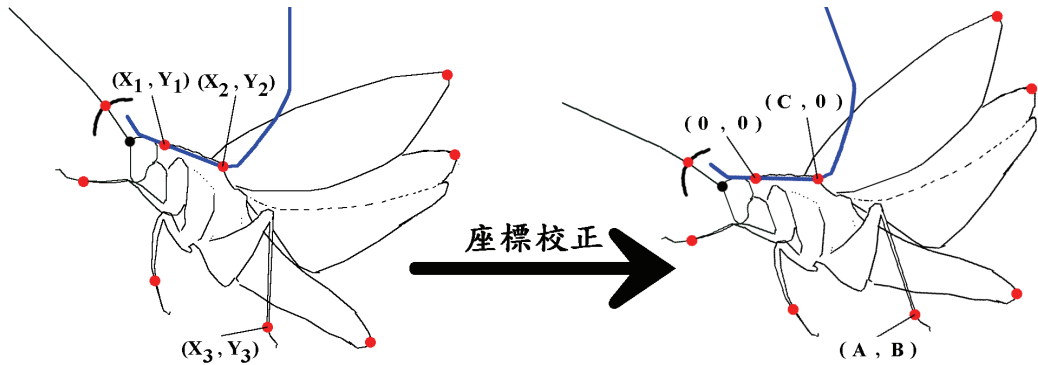
$$\rightarrow (\sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}, 0)$$

蟑螂附肢座標 = (X_3, Y_3) → 校正成

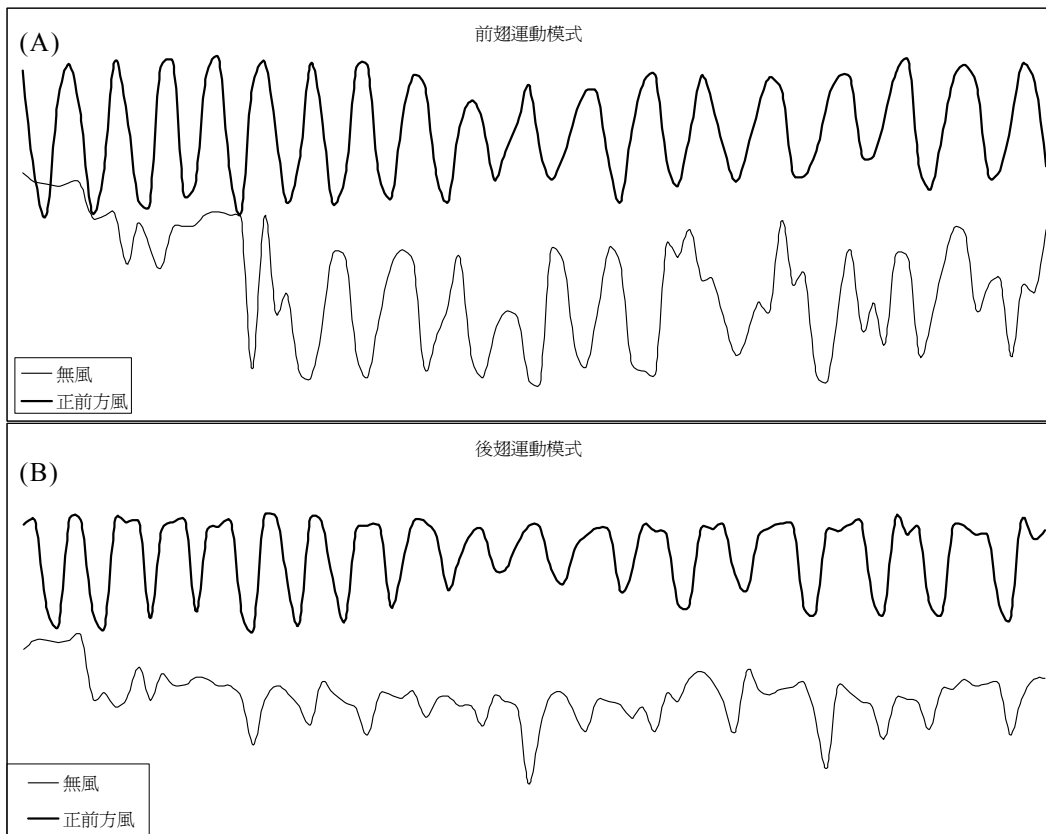
$$\rightarrow \left(\frac{(X_3 - X_1) + \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} (Y_3 - Y_1)}{\sqrt{1 + \left(\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}\right)^2}}, \frac{X_3(Y_2 - Y_1) - Y_3(X_2 - X_1) + (X_2 Y_1 - X_1 Y_2)}{\sqrt{(Y_2 - Y_1)^2 + (X_2 - X_1)^2}} \right)$$

利用上述方法，可畫製出蟑螂振翅期間，前後翅、步足等附肢的運動路徑，可比較在無氣流狀態與蟲體前方給於氣流刺激時，振翅反射的行為差異(圖五，見封底)。結果發現，在有氣流刺激(風速約 50

公分/秒)的情形下，前、後翅端的運動路徑較為平滑規律，步足、觸角與尾端的擺動亦較小(圖五 C、圖六)，而在無氣流刺激時，各附肢的運動路徑範圍較廣，較不具規律(圖五 B、圖六)。



圖四、將不同個體測量的座標經校正成新座標點，以方便進行比較。

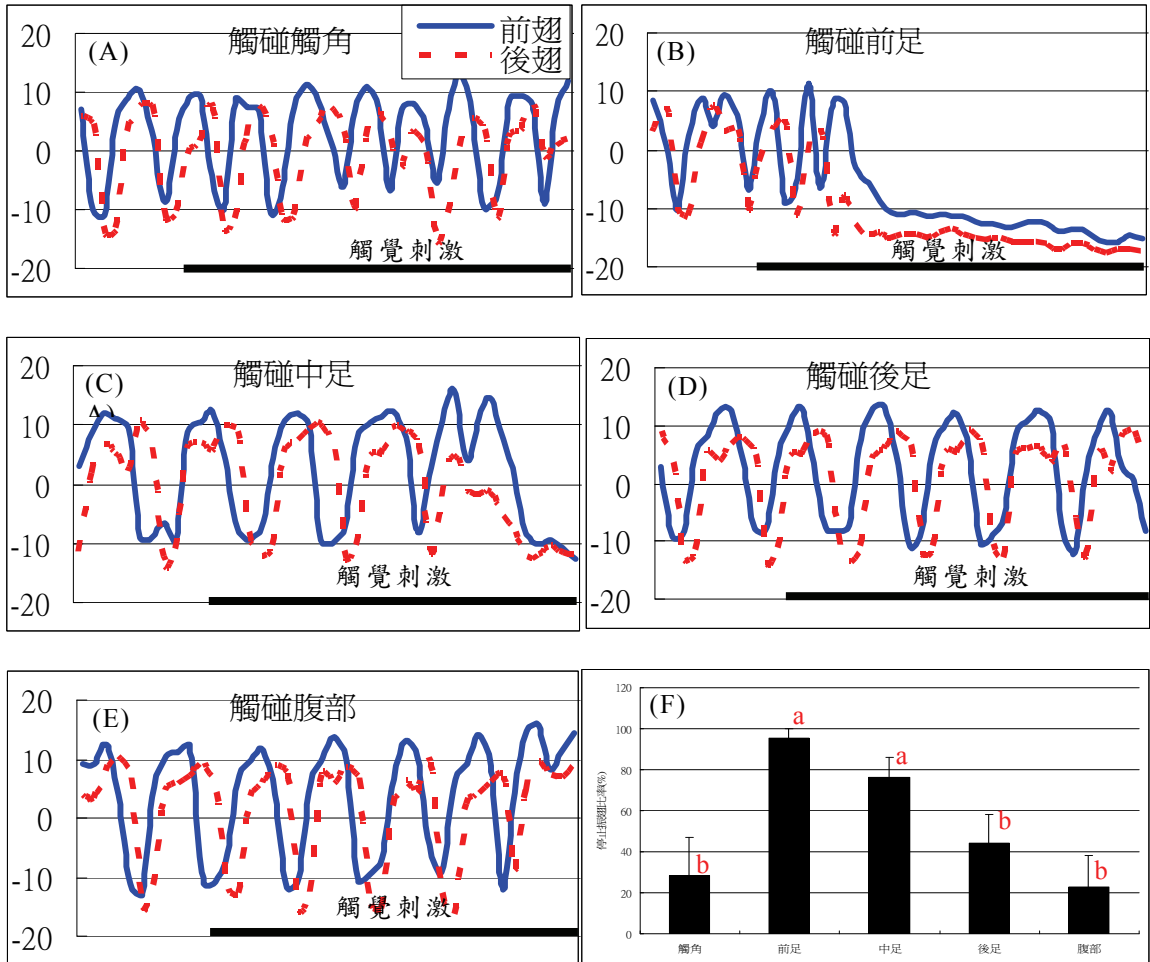


圖六、前翅(A)與後翅(B)在無氣流與有氣流刺激下的運動模式比較。

伍、觸覺刺激對於振翅的影響

若給予蟑螂氣流刺激引發振翅反射的同時，給予觸角、前足、中足、後足及尾端等部位觸覺刺激，可發現刺激前足常常使蟑螂停止振翅(圖七 B)，而其他部位的觸覺刺激較無反應(圖七 A, C, D, E)。若

以統計方法分析對不同附肢的觸覺刺激，比較抑制振翅反射的比率(圖七 F)，可發現觸覺刺激前足與中足最具抑制振翅的效果，而觸覺刺激後足、觸角、腹部的抑制效果皆較弱。



圖七、觸覺刺激觸角(A)、前足(B)、中足(C)、後足(D)及腹部(E)時，前後翅的振翅情形(橫軸為時間，縱軸為振翅幅度)。

(F)：利用統計方法比較不同部位的觸覺刺激，對振翅反射抑制效果的比較 ($a > b$ ；單尾 t 檢定， $p < 0.05$ ； $n = 5$)。

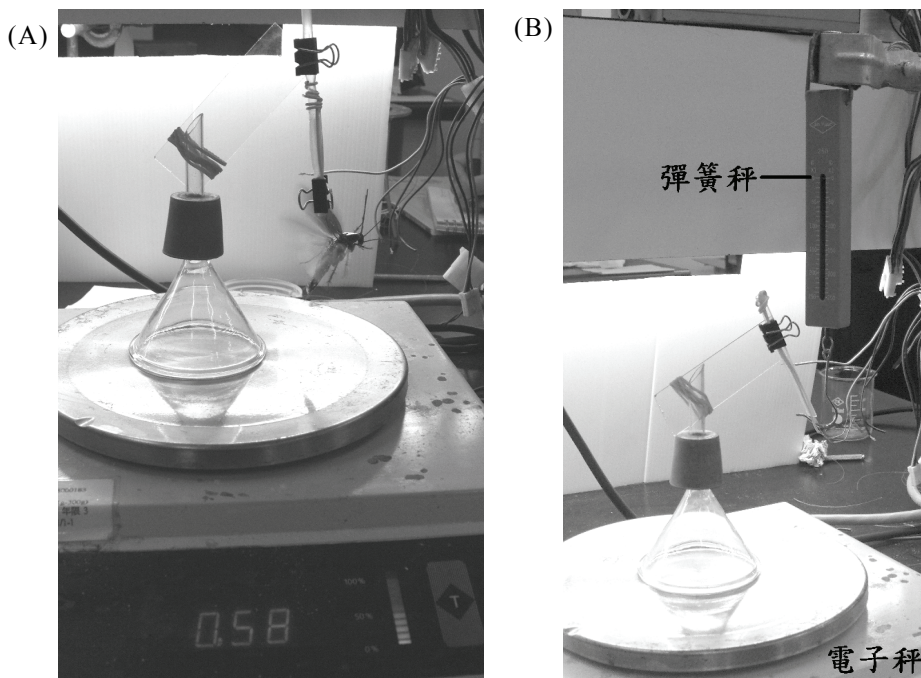
陸、振翅期間產生抬升力的測量

將固定蟲體的裝置放置到電子秤上，將數據歸零。摘去步足抓握之物(置於秤上)，或輔以氣流刺激，則可引發蟑螂的振翅行為，同時記錄電子秤的數值，以推算振翅行為所產生的抬昇力量(圖八 A)。若欲取得較精準的數據，可利用彈簧秤產生已知的向上抬昇力，再以電子秤記錄測量所得的數值(圖八 B)，最後將已知與所測量的抬升力數值得到迴歸方程式，利用此迴歸方程式進行蟑螂振翅向上抬升力之校正。以本文的數據測量過程為例，其迴歸公式為：

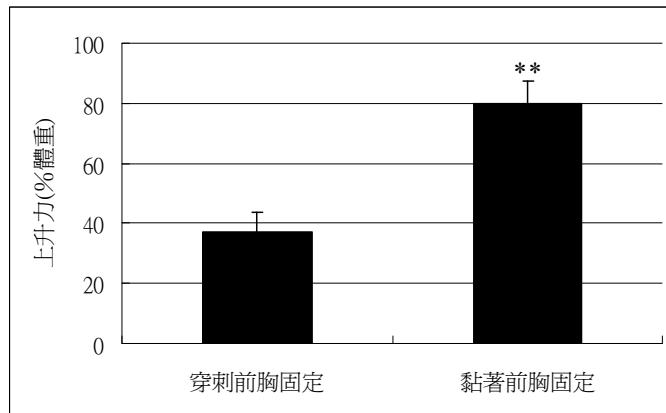
實際抬昇力

$$= \text{測量的抬昇力} \times 1.0463 \quad (R^2 = 0.9755)$$

經過以上步驟的測量、校正，可得以鐵絲與貼紙固定的蟑螂，在振翅期間的抬昇力(圖九)，結果可知以鐵絲穿刺方法固定蟲體，確實對蟲體有顯著的傷害，大約只能產生 37% 體重的抬昇力，而以黏著方式固定的蟑螂，則可產生約 80% 體重的抬昇力，這顯示蟑螂所產生的抬昇力量並不足以支撐其體重，其振翅行為應多用於滑翔而非飛行，或是固定蟲體的方式仍會限制其振翅行為的表現與效率。



圖八、(A) 測量振翅期間產生抬升力的測量裝置照片(本圖以鐵絲穿刺固定蟲體為例)。(B) 進行抬昇力校正時，利用彈簧秤產生已知抬昇力的實驗照片。



圖九、不同的蟲體固定方法，蟑螂振翅期間產生最大抬昇力之比較。
**: $p < 0.01$ (單尾 t 檢定); $n = 4$ 。

柒、結語：

人類對於飛行一直懷有夢想，而真正化為實際行動的萊特兄弟即是著名的例子，他們透過對鳥類飛行的觀察，製造出史上第一架飛機，自此開啓了人類對飛行的各種期盼。

會飛行的動物不僅止於鳥類，與我們日常生活密切的昆蟲也有高超的飛行能力，許多昆蟲飛行的研究對中學生而言非常有趣且容易進行，以本文所介紹的蟑螂為例，牠已擁有翅膀約三億五千萬年了，在歷經各種惡劣的浩劫與環境下仍能存活，生命力如此的頑強，其生存法寶實為我們想取經的目標，其振翅行為是否演化出特別的模式，尚需深入探討。但因蟑螂容易取得、飼養容易、成本低、在中學實驗室中容易操作，且易套用於其他系統的應用，是良好的模式生物，更值得介紹給中學生作為研究的材料。

捌、致謝

本文部分實驗由臺北市 96 年度中等學校學生科學研究獎助計畫(應用科學科編號 A06)支持經費，謹此致謝。

參考文獻

- 張書忱(1979)：昆蟲形態學。臺北縣：黎明文化事業股份有限公司。
- 欽俊德(2000)：院士科普書系—動物的運動。牛頓出版公司。
- 任淑仙(1995)：無脊椎動物學。台北市：淑馨。
- 鄭琬蓉、梁勻慈、鄭佳怡、蔡任圍(2007)：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。
- Richards, O. W. and Davies, R. G. (1977). *Imm's General Textbook of Entomology (10th ed.). Volume I: Structure, Physiology and Development*. London: Chapman and Hall.
- Wortmann, M. and Zarnack, W. (1993). Wing movements and lift regulation in the flight of desert locusts. *J. Exp. Biol.* 182: 57-69.