

---

# 認識身旁的小傢伙(六)－美洲蟑螂滑翔路徑的定位方法與降落行為的觀察

周心慈 蔡任圃\*

臺北市立中山女子高級中學

## 壹、前言

許多昆蟲具有高超的飛行能力，例如：能在飛行過程中追捕獵物的空中霸主－蜻蜓；既可於空中定點停留，也可 90 度急速轉彎的蒼蠅；或是婀娜多姿、翩翩起舞的蝴蝶。這些具有一身好本領的小生物們吸引了昆蟲學家研究昆蟲飛行的秘密，尤其對蝗蟲、蠅類、蝴蝶、蜻蜓等飛行技巧高超的昆蟲。蟑螂自三至四億年前古生代的石炭紀(Carboniferous Period)就已出現，且其外型與現代的蟑螂非常相似。蟑螂在歷經各種惡劣的環境與浩劫下依然存活，其生命力是如此的頑強，其生存法寶實為我們取經的目標。蟑螂擁有悠久歷史的翅膀，歷經數億年的演化歷史洗禮，但形態幾乎沒有改變，代表著不可抹滅的重要性與功能，但昆蟲學家對其翅膀功能的研究卻很少，值得深入探討。

研究昆蟲的飛行需要偵測昆蟲在三度空間位置的技術，但該技術常需昂貴的儀器設備，在中學的設備限制下難以實現。本文介紹一種利用簡單的器材與原理，建立偵測昆蟲三維空間座標的方法，可成為研究昆蟲飛行的利器，並可於中學實驗室中進行操作。

---

\*為本文通訊作者

## 貳、蟑螂善飛嗎？

若將蜻蜓、蒼蠅、蝴蝶、蝗蟲、金龜子、蟑螂等昆蟲關在一個小盒子，放在操場中央並打開蓋子，可觀察到蜻蜓、蒼蠅、蝴蝶、金龜子等昆蟲立刻振翅飛行；蝗蟲會先跳躍至空中後張開翅膀滑翔離去；而蟑螂通常是一溜煙地鑽到附近的石頭縫中或其他掩蔽物之下。若附近無掩蔽物，蟑螂會以快速的步伐逃離現場，直到陰暗處或牆角。同樣具有翅膀，但蟑螂在逃命時依然只使用其發達有力的步足，可見蟑螂是不善飛行的。若將成蟲的雄性蟑螂在空曠處向上拋，可迫使其張開翅膀振翅飛行，但持續時間短，且身體依然向下墜落，幾乎沒有抬升的現象，因此，蟑螂的翅膀通常不用來飛行，而用來滑翔、減緩身體墜落的速度，避免摔落受傷，或使蟑螂可由一高處滑翔至另一低處以進行移動。蟑螂究竟有沒有飛行的能力？透過本實驗方法，可以初步解決這個問題。

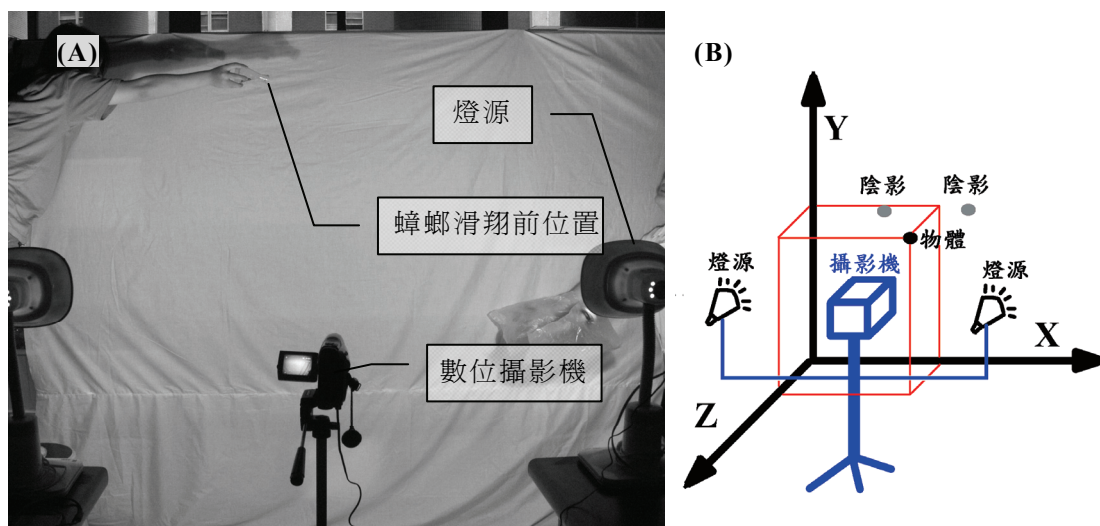
## 參、美洲蟑螂滑翔路徑的定位方法

尋找一適合的空間(如實驗室的一角或準備室)，以白色布幕搭起一個壁面，盡量使其平整，若該房間有一面白色的牆壁更佳。架設兩個檯燈照射白色布幕，使兩

檯燈光源相距 125 公分，燈泡距白布 120 公分，燈泡距地板 117 公分。以腳架架設數位攝影機，面向白色布幕，使其鏡頭距離白布 150 公分，距離地面 112.5 公分(圖一)。

於白色布幕前(攝影機視野中的高處)將蟑螂輕輕往上拋(為方便拋出蟑螂，可將蟑螂置於錐形瓶中，待其爬至開口時，輕輕將口端向上甩，使蟑螂甩離錐形瓶而騰空)。蟑螂落下時通常會張開翅膀產生振翅行為，此時白布上會顯現蟑螂的兩個陰影(因為有兩個燈源)(圖二)。蟑螂振翅滑翔期間若路經有所偏移，其在白色布幕上的

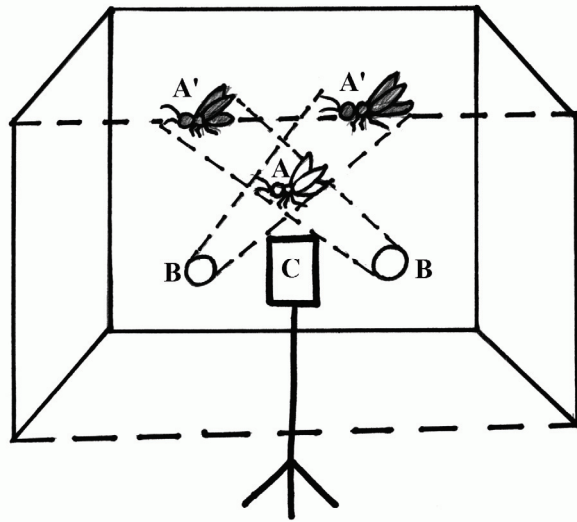
兩個陰影也會隨其變動位置。將蟑螂振翅滑翔的過程拍攝記錄，將 DV 的影片轉入電腦時，以 AVI 格式進行轉錄，以 Quickplayer 播放器進行播放，將所記錄的影片於電腦上逐張播放，將欲分析座標的畫面，以繪圖軟體的座標系統進行蟑螂位置、陰影位置座標的測量(方法可參閱鄭等人，2007)，最後將這些數據經過換算(詳見下文)，可得蟑螂在落下滑翔期間，於三維空間中的路徑座標。此三維座標測定方法因有兩個燈源而產生兩個陰影，稱為雙影定位系統(Double Shadow Position System, DSPS)。



圖一、三維空間座標定位裝備設置圖。

(A). 三維空間座標定位裝備實際照片

(B). 座標定位裝備燈源、布幕與數位攝影機的相對位置



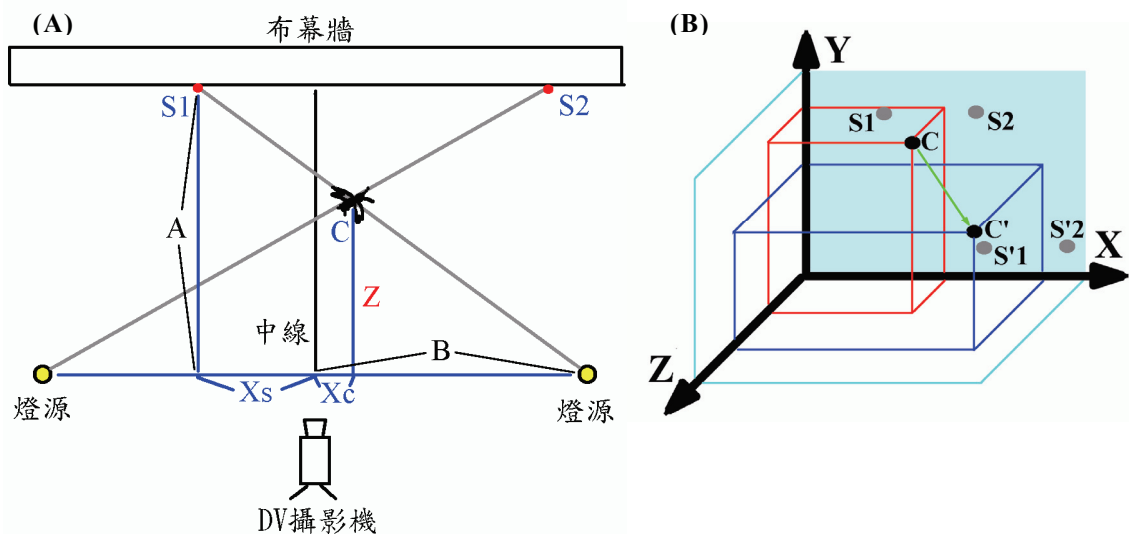
圖二、三維空間座標定位裝備設置圖。A：蟑螂位置；  
A'：蟑螂陰影位置；B 燈源；C 數位攝影機

由畫面中蟑螂與其陰影的座標，經校正、換算得知蟑螂的三維座標。圖三(A)中，S1、S2 為蟑螂在布幕上的兩個影子，C 為蟑螂的位置，Xs 為攝影機視野中蟑螂影子(S1)離中線的距離，Xc 為攝影機視野中蟑螂(C)離中線的距離。其中 A(布幕與燈的距離)與 B(中線與燈的距離)為已知數

$$\frac{Z}{A} = \frac{(B - Xc)}{(B + Xs)}$$
 值，欲求 Z 之值。利用  $\frac{Z}{A} = \frac{(B - Xc)}{(B + Xs)}$  的關係式，可由影片中所得之 Xc 與 Xs 求得 Z 值，而畫面中蟑螂的座標位置，可得其在三維空間中的 X 與 Y 座標。我們所定義的 X、Y、Z 軸如圖三(B)所示，當物體移動位置，白幕上的陰影亦隨之改變。物體由 C 移至 C'，其陰影(圖三 B 中 S1、S2)移到新的位置(圖三 B 中 S'1、S'2)，由陰影的

座標變化，可推算物體在空間中三維座標的路徑變化。

為了使數據更為精準，可建立 Xc 與 Xs 的距離校正方式。利用一條綿繩及兩顆保麗龍球，將綿繩穿過兩顆保麗龍球，使兩顆球相距 50 公分。將兩顆保麗龍球置於距離布面 15 或 30 公分處，在攝影機視野中不同的位置，測量兩球在布幕上的陰影。利用已知兩球距離，測量兩球的座標，求得影片中座標距離與實際距離的關係(設係數為 k)。在本系統中，距離布幕牆約 15 公分時，k = 0.15 公分/座標；距離布幕牆約 30 公分時，k = 0.13 公分/座標。建立這些校正的係數，有助於數據測量過程的精準度。



圖三、(A) 利用白幕上的陰影推算蟑螂實際上的空間座標。S1、S2 為蟑螂在白幕上的兩個影子，C 為蟑螂的位置， $X_s$  為攝影機視野中蟑螂影子(S1)離中線的距離， $X_c$  為攝影機視野中蟑螂(C)離中線的距離。  
 (B) 當物體移動位置，其在白幕上的陰影亦隨之改變。物體由 C 移至 C'，其陰影(S1、S2)移到新的位置(S'1、S'2)

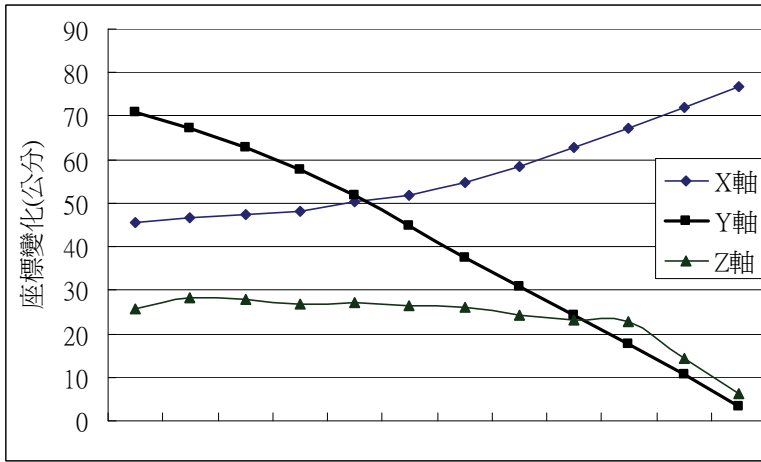
#### 肆、美洲蟑螂的滑翔特性

假設拍攝影片的視野中，橫軸為 X 軸，縱軸為 Y 軸，測量蟑螂及影子的座標點，將其換算成實際距離後，再推算出 Z 軸的距離(Z 軸即為實體距白色布幕的垂直距離)，可得蟑螂振翅滑翔時的 X、Y、Z 三維座標的變化(圖四)。將 X、Y、Z 三維上的距離相減後除以時間，換算成空間中的速度變化(圖五)。若 Y 軸上的速度變化再除以時間，可得到蟑螂在高度上的加速度變化(圖六)。

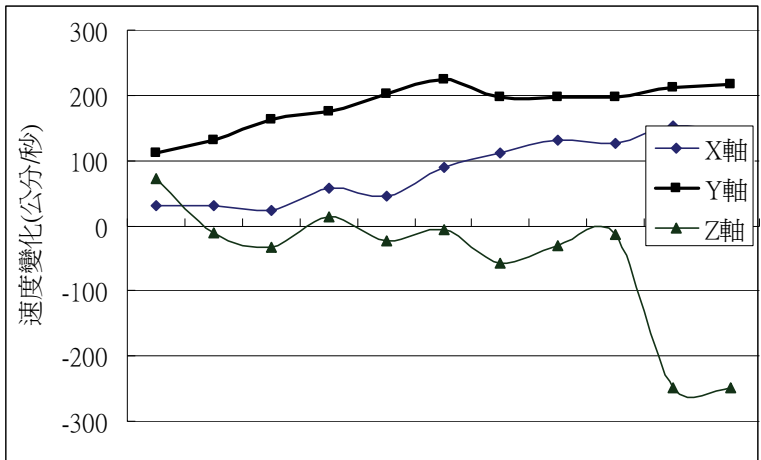
由蟑螂振翅滑翔時於 Y 軸上的加速度變化可知，當蟑螂落下時主要受重力( $g = 980 \text{ 公分/秒}^2$ )影響，但當蟑螂用力振翅的

瞬間，可產生抵抗重力( $a = -810 \text{ 公分/秒}^2$ )的抬升力，但仍無法產生向上的速度(速度仍向下)，代表蟑螂在落下振翅的過程中並無法起飛，只在接近地面時產生克服重力的抬升力，減緩降落速度。利用蟑螂自由振翅滑翔的實驗設計，所測量的抬昇力量，確實可以支持其體重，用於減緩墜落速度。

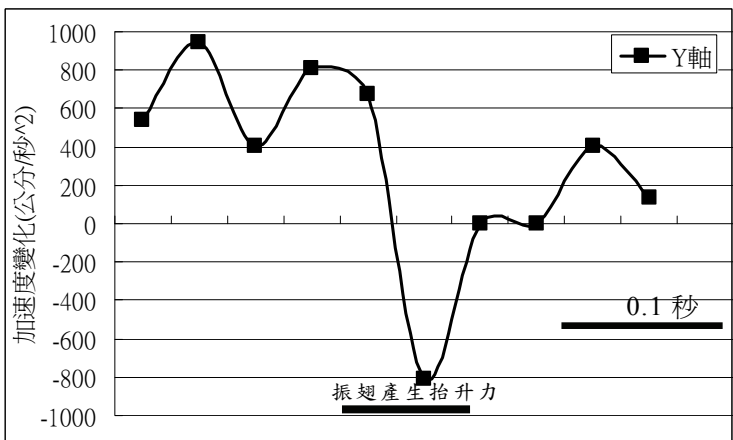
本文的測量方法結果發現蟑螂振翅的行為，雖可產生支持身體的力量，但在滑翔的過程中，這些抬昇力量主要用於減緩墜落速度，而非用於向上飛行。可見蟑螂確實是不善飛的昆蟲。



圖四、雙影定位系統測定蟑螂落下振翅時的座標變化。



圖五、雙影定位系統測定蟑螂落下振翅時的速度變化。



圖六、雙影定位系統測定蟑螂落下振翅時，Y 軸的加速度變化。



## 伍、美洲蟑螂降落行為的觀察方法

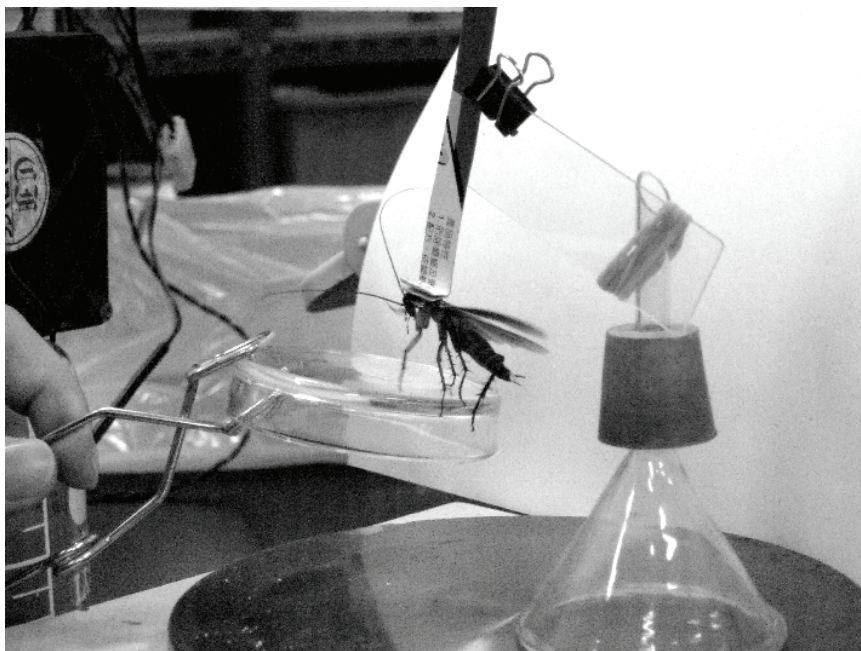
在日常經驗中，常有蟑螂展翅滑翔的印象。每次騰空滑翔都必須降落，而降落的過程必須有精密的減速與吸震系統，以免因撞擊而受傷。蟑螂既然是不善飛的昆蟲，顯示牠著陸的過程必有獨門的訣竅，因此我們可以透過觀察蟑螂的降落過程一窺究竟。

將蟑螂黏板(市售蟑螂屋中的黏蟑螂貼紙)剪成條狀，在末端折一小節(約與蟑螂前胸背板的大小相等)，撕掉那一小節的封條，將這節貼紙與蟑螂的前胸背板相黏固定(如圖七)。將此實驗標本以夾子固定在支架上。以氣流刺激引發蟑螂振翅行為，使培養皿靠近以觀察蟑螂著陸

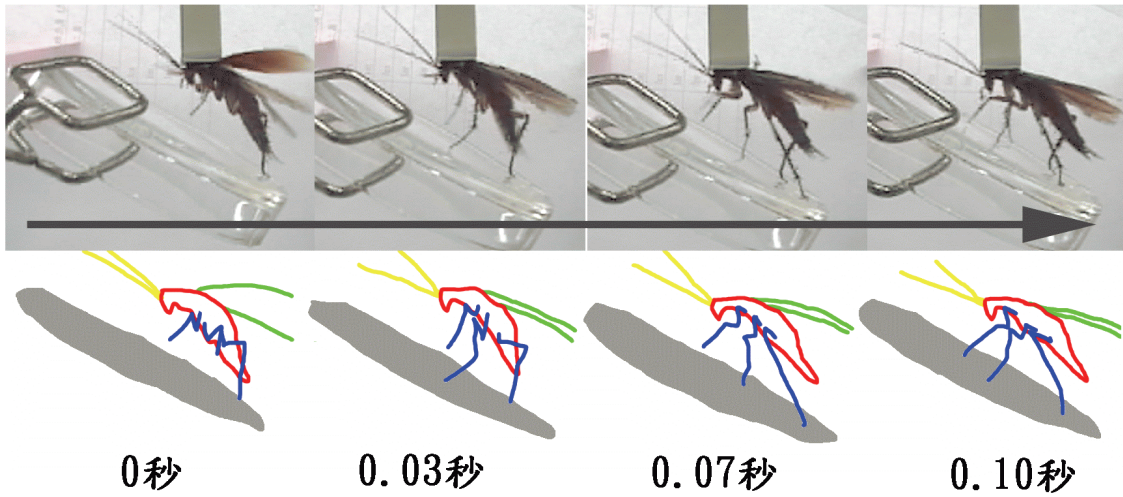
過程(圖七、八)，並以數位攝影機紀錄、分析。

## 陸、美洲蟑螂的著陸模式

於蟑螂振翅其間，培養皿以 $45^\circ$ 傾斜靠近蟑螂，可發現著陸過程中步足接觸地面的順序依序為後足→前、中足同時，或後足→中足→前足(圖八)。由觀察蟑螂的著陸過程，則歸納出後足與前、中足被分為兩個獨立的系統，不論在功能或長度(後足較長)上。我們在另一系列的實驗中(周等，印製中)也發現觸覺刺激前足與中足，能抑制蟑螂的振翅。蟑螂降落時，前足或中足先著地會使翅膀收起，若是後足先著地則無此效果(依然振翅)。



圖七、觀察蟑螂降落的實驗架設。



圖八、蟑螂著陸過程的連續照片(每張間隔 1/30 秒)。

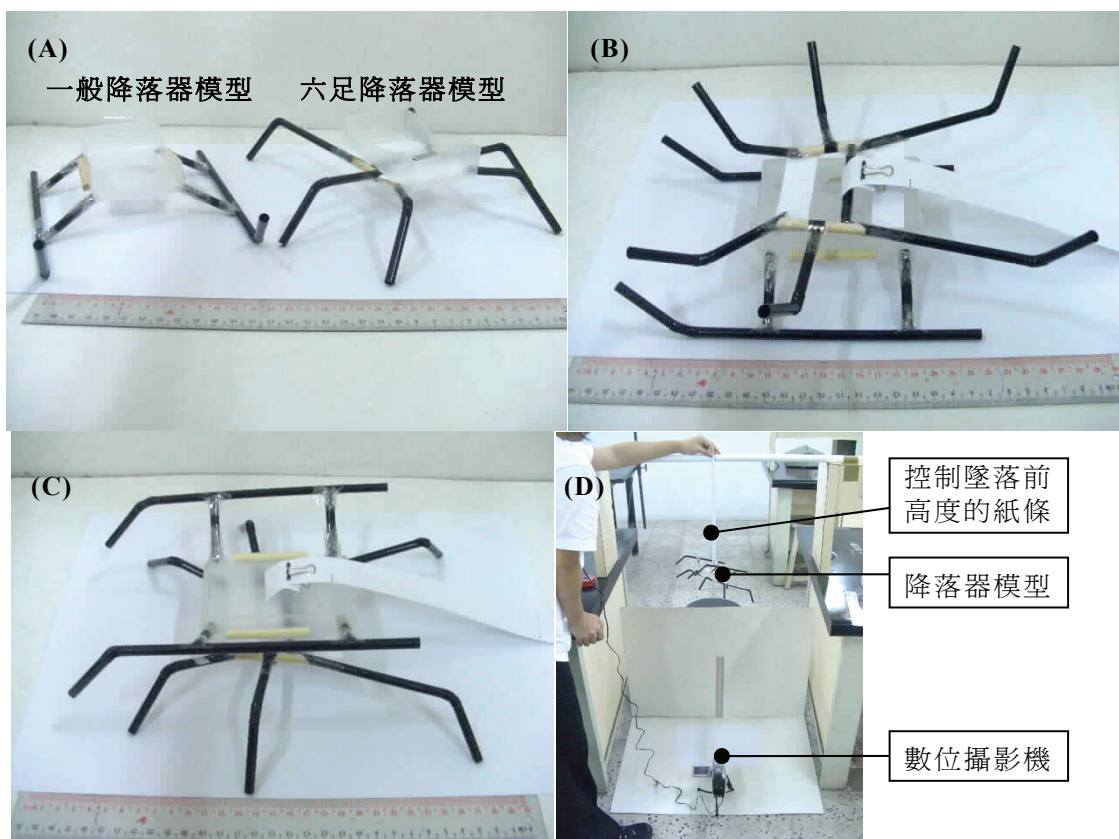
### 柒、探討模擬蟑螂降落過程的應用

取吸管、名片盒蓋、竹筷、小長尾夾及紙條製作成圖九(A)的降落器模型。將製作完成的兩種模型拼裝(圖九 B、C)，一面為一般降落器，反面為六足降落器。將實驗器材架設如圖九(D)，在紙條上標出三個刻度，標記降落器在不同測量的高度。將一般降落器朝下，在三個不同高度降落，每個高度降落三次。再以六足降落器朝下，在三個不同高度降落，每個高度降落三次。過程皆以數位攝影機記錄，最後利用影像分析換算出實際距離，將兩種降落器模型的降落參數進行比較分析。

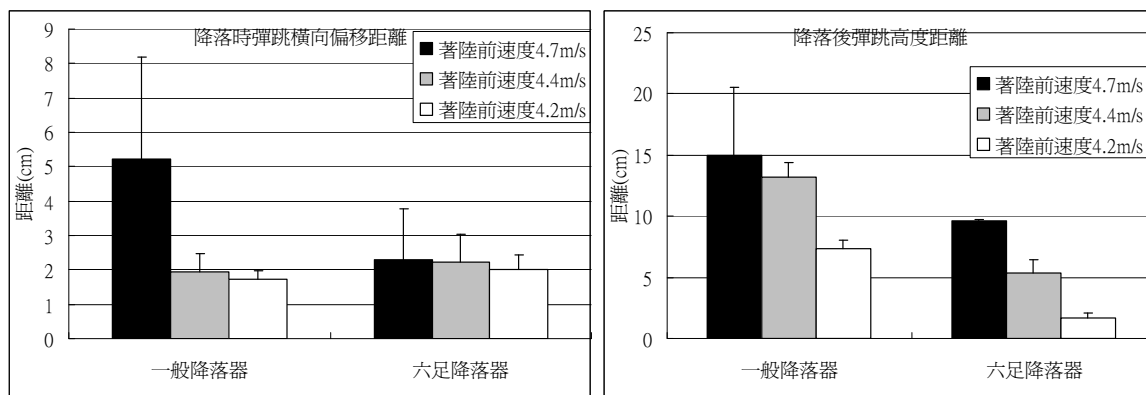
利用此兩種模型進行降落試驗，發現物體降落第一次接觸地面後發生彈跳，使其彈升至某一高度再落地，若比較彈升的高度與第二次落地與第一次落地的距離(彈跳橫向偏移距離)，發現六足降落器模型的彈升高

度皆小於一般降落器，顯示六足降落器較具穩定度。在落地速度較大(4.7 m/s)時，一般降落器模型的彈跳橫向偏移距離亦較六足降落器遠，而落地速度較慢時(4.4 m/s 以下)，兩種降落器在彈跳橫向偏移距離上不具差異(圖十)。

一般直昇機的起落架只能停駛於平坦地形，在峭壁懸崖或顛簸地形無法降落，且起落架亦沒有足夠的避震功能。從本文的實驗中，發現昆蟲的六足具有許多降落的優勢。因此未來的飛行器可以設計具關節的降落器(圖十一)，各節的連接處有避震、吸震功能，即各節於降落時的角度變化具緩衝效果而達到避震功能。降落前將後足伸長，測量離地距離以計算緩衝時間，並調節前、中足的相對位置，依地形建立降落模式。透過關節的調整，再利用末端的勾狀構造，可使飛行器適應各種崎嶇地形。

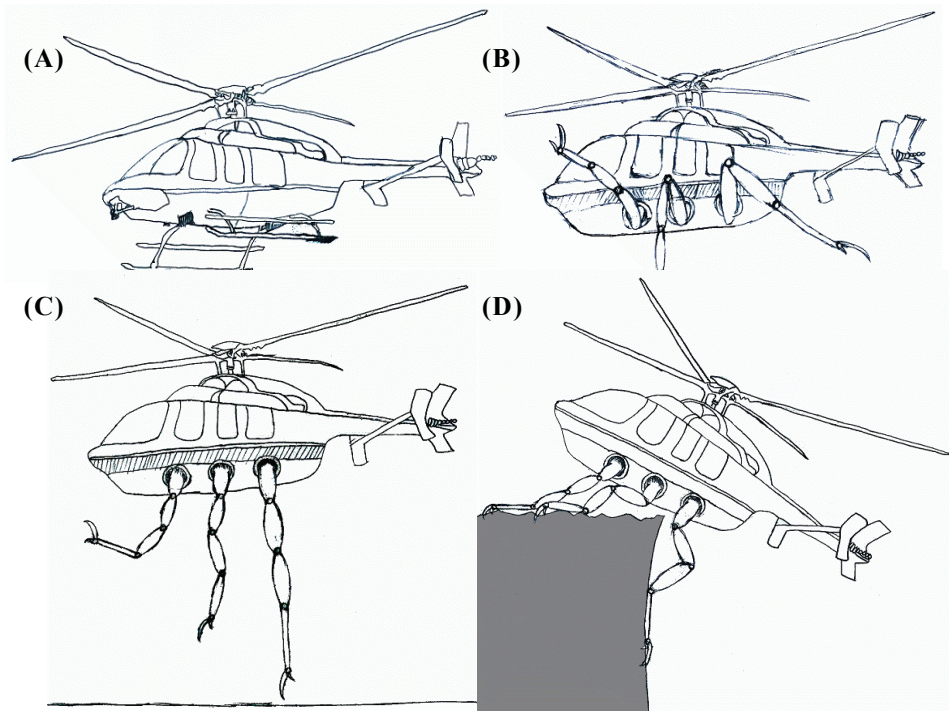


圖九、兩種降落器模型的照片(A、B、C)與模擬降落的實驗器材照片(D)。



圖十、一般降落器與六足降落器模型於不同降落速度下，彈跳橫向偏移距離(A)與彈升高度(B)的比較。





圖十一、比較一般直升機起落架與未來六足降落器示意圖。

- (A). 一般直升機。
- (B). 未來飛行器的降落器飛行時各足部所呈現的角度與位置(模擬蟑螂振翅時的附肢姿勢)。
- (C). 未來飛行器降落前，後足向下伸長測量距地的高度，以準確的控制降落過程。
- (D). 未來飛行器足部末端的鉤子增加磨擦力及抓地力，可降落於崎嶇地形。

## 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。

## 玖、參考文獻

周心慈、劉奕伶、蔡任圃(印製中)：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。《科學教育月刊》。

房瓊、蘇嘉弘、蔡偉博(2005)：法天地之造化—仿生科技。《科學發展》，396，62-67。

鄭琬蓉、梁勻慈、鄭佳怡、蔡任圃(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。

Bell, W. J. and Adiyodi, K. G. (1981). *The American Cockroach*. New York: Chapman and Hall.

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.