

花蓮縣第58屆中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：物理科

組 別：國小組

作品名稱：凌波微步—紫艷大白星天牛行進重心與步態探究

關鍵詞：紫艷大白星天牛 重心 行進速率

編 號：



凌波微步—紫艷大白星天牛行進重心與步態探究

研究摘要

本研究目的在探討紫艷大白星天牛面對各種環境時，如何運用六足維持身體重心，並計算步行速率與策略。研究進行 13 個月，發現紫艷天牛透過調整腿、脛節之間夾角控制重心高低；夾角越大，身體重心越往頭胸方向前移，夾角越小，身體重心越往腹部方向移。

紫艷大白星天牛會依環境特性，決定採用三角、五角或六角步態爬行。平緩環境採三角步態，平均行進速率 4.06 公分/秒。爬在樹葉或樹枝等崎嶇環境，採五角或六角步態，透過腹部尾端及足部提供的支點確保穩定，再以平均 0.39 公分/秒~1.12 公分/秒的速度緩慢爬行在樹葉、枝上。

跗節構造特殊，上面佈滿細毛，是紫艷大白星天牛能垂直爬行在光滑玻璃上的關鍵構造；其構造的物理特性及潛藏的研究價值，值得深入探討。

壹、研究動機與目的

一、研究動機

2016 年暑假，我們在一片烏心石樹林間發現數量超過 30 隻的紫艷大白星天牛(*Callophora albopicta*)成蟲，細細的觀察牠們，發現牠們的背板會發出閃亮的紫光，相當特殊漂亮。

在進行觀察的過程中發現，紫艷大白星天牛不僅能夠攀爬在樹枝、樹幹，也能在樹葉上及下方倒鉤爬行，甚至能使用六足在光滑的玻璃面上行走，這讓我們想到五下康軒版自然「生物的運動」單元提到，生物身體構造，會影響牠們的行進策略，瞧!牠那在葉面上行走的功力，讓我們聯想到金庸小說中的凌波微步，輕盈而靈巧的神功!真是讓我們感到驚訝!



紫艷大白星天牛究竟如何運用六足保持身體的重心，讓牠們能夠平衡且穩定爬行在各種不同條件的環境？到底在此生物的结构與其運動功能的關係如何？

這有趣的問題引發我們想一探究竟，期望透過我們的追蹤觀察與分析探究，解開紫艷大白星天牛步行背後所潛藏的生物力學的秘密，以提供仿生科技參考。



二、研究目的

目的一：了解紫艷大白星天牛的身體形態與其適應環境的移動策略。

目的二：分析紫艷大白星天牛如何運用六足維持身體重心，使其能適應各種步行條件。

貳、相關文獻

一、紫艷大白星天牛的生命史

紫艷大白星天牛(*Callophora albopicta*, Matsushita, 1933)，又叫麗艷大星斑天牛。生物分類地位為動物界、節肢動物門、昆蟲綱、鞘翅目、天牛科，是臺灣特有種昆蟲，與霧社血斑天牛、黃紋天牛同被稱呼為臺灣天牛三寶。

屬於完全變態昆蟲，一生經歷卵、幼蟲、蛹和成蟲四個階段。幼蟲階段以木蘭科植物為寄主植物。從卵孵化後，隨即鑽入樹幹啃食韌皮部和木質部。成蟲出現在 4-9 月間，食物來源為木蘭科植物的花、枝條及葉片。

形態部分，紫艷大白星天牛成蟲體長介於 48-70mm，體型碩壯，頭部黑色，觸角細長，且具有一節一節黑、白相間的斑紋。前胸背板為黑色，長方形，左右各有一枚尖銳的刺突，小盾板呈黑色，翅鞘則為鮮艷的紫至黑紫色，具有強烈的金屬光澤。

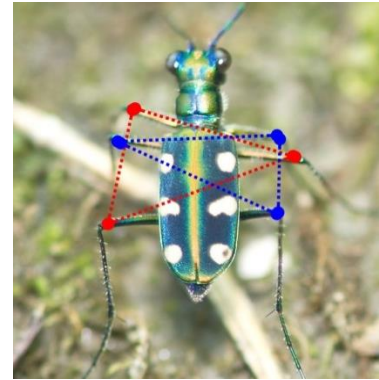


二、紫艷大白星天牛步行重心與平衡策略

我們找尋了國內文獻，發現未有紫艷大白星天牛運動相關的研究。於是放大資料搜尋範圍，擴大檢視有關昆蟲步行策略的相關資料，歸納重點如下：

(一)昆蟲以「三角步態」行進

所謂的「三角步態」(如右圖，以虎甲蟲為例)，是指六足昆蟲在行進時，會將牠們的腳分成兩組。其中一側的前後腳加上另一側的中腳為一組；另一側的前後腳加上另一邊的中腳為第二組。讓昆蟲在行進過程，皆能夠讓身體有三個點與地面接觸，使身體重心能維持在三角形的框架中，增加步行運動的穩定性。



我們認為，三角形的確是一個非常穩定的結構，昆蟲在爬行時，如真的能夠一組抬腳前進，另一組維持穩定的支點結構支撐身體，昆蟲肯定能夠維持穩定的重心而不翻身。

(二)昆蟲行進時的重心測量方法

閱讀文獻發現，昆蟲是六足動物，每次行進是以三腳步態的方式進行，同一側的前後腳搭配另一側的中腳，形成一組穩定的三角形支點，身體的重心位置，則會落在三角形的區塊之中。由於行進運動是三角步態的連續運動過程，因此昆蟲行進重心，就會在兩組移動的三角形區塊之間。

我們未曾在文獻中發現有相關研究探討如何測量天牛行進時的重心；因昆蟲運動是以脛節尾端接觸地面，相當於昆蟲步行時的支點，因此本研究即以天牛的「右前-左中-右後」脛節中段連成的三角形作為量測天牛行進時的重心的依據，透過測量三角形物體重心的方法，進行天牛身體重心的測量。



測量步驟如下：

步驟一：找到右前腳、左中腳及右後腳脛節中段，將三個點相連形成一個三角形。

步驟二：在三角形標出 A1、A2 及 A3 三個頂點。

步驟三：分別找出邊 A1A2、A2A3 及 A3A1 的中點，並標記。

步驟四：依序劃出「頂點 A1 與對邊 A2A3 中點連線」、「頂點 A2 與對邊 A3A1 中點連線」及「頂點 A3 與對邊 A1A2 中點連線」

步驟五：標出三線交會處，就是天牛三角步態所構成的重心。

小結

上述的資料提供本研究探討紫艷大白星天牛行進重心與平衡策略的基礎性論點，如文獻中所提到的，三角形的確是一個非常穩定的結構，昆蟲在爬行時，如真的能夠以三隻腳的三角形步行策略，同時一組抬腳前進，另一組維持穩定的支點來支撐身體，肯定能夠維持穩定的重心而不翻身。

但在野外實際觀察紫艷大白星天牛行走時，發現其所面對的行進路線真是千奇百怪，有時需要爬在垂直的樹幹上，有時則踩踏在輕軟超彈的枝葉末端，比較對照文獻的內容後，我們發現真實情境較文獻所探究的情境來得複雜些。這使得我們更加好奇，面對不同的情境時，牠們要如何調整控制腳的運動機能，以利跨越不同的行進障礙？

在面對不同條件的環境時，都採用三角步態行進嗎？另外，牠們的六足關節構造如何？不同的關節在行進時，分別扮演什麼功能角色？才能讓牠們面對不同狀況的環境時，能妥善維持身體的重心及平衡呢？

這是一系列複雜的生物力學問題，也是目前仿生機械獸所研究焦點，我們想要努力去解開其中所隱藏的物理秘密，發掘其中的奧妙。



參、研究問題

研究問題一：紫艷大白星天牛的身體構造及六足物理特性觀測。

研究問題二：野外的紫艷大白星天牛在哪裡活動？會使用哪些不同的方式行進呢？

研究問題三：紫艷大白星天牛在樹幹上垂直向上爬行的身體重心與角度分析。

研究問題四、紫艷大白星天牛在垂直樹幹爬行的步態與速率分析。

研究問題五：紫艷大白星天牛在樹葉上爬行時的身體重心與角度分析。

研究問題六、紫艷大白星天牛在樹葉上爬行的步態與速率分析。

研究問題七：紫艷大白星天牛在面對不規則的樹枝爬行，身體重心與角度分析。

研究問題八、紫艷大白星天牛在樹枝上爬行的步態與速率分析。

研究問題九、紫艷大白星天牛及獨角仙斜坡的爬升力比較。

肆、研究設備與器材

一、研究樣本來源說明

由於我們的研究重點在於紫艷大白星天牛成蟲步行的重心與策略，因此，觀察的重點為成蟲，觀察的季節與時間，以春、夏兩季為主。依照時序，從四月中下旬開始，到八月止，都有成蟲樣本可供觀察。此外，為了測量天牛步行時的六足運作的方位與角度，我們採集了棲地裡的死亡標本及五隻成蟲活體進行飼育觀察，並在成蟲死亡之後，隨即將其置入冷凍庫，以保存其身體形態完整，讓我們在非成蟲時序(前年 9 月-隔年 4 月)，仍有成蟲標本做為模擬天牛步態的操作樣本，讓我們能夠觀察牠們在不同情境時的足部關節所展現的物理特性。

二、研究設備與材料



生物顯微鏡



單眼相機



攝影機



電腦



紫艷天牛標本



解剖工具組



繪圖光板



影像剪輯分析軟體

伍、研究過程、發現與結果

研究問題一、紫艷大白星天牛的身體構造及六足物理特性觀測。

一、研究步驟：

步驟一：拆解棲地檢回的紫艷大白星天牛標本。

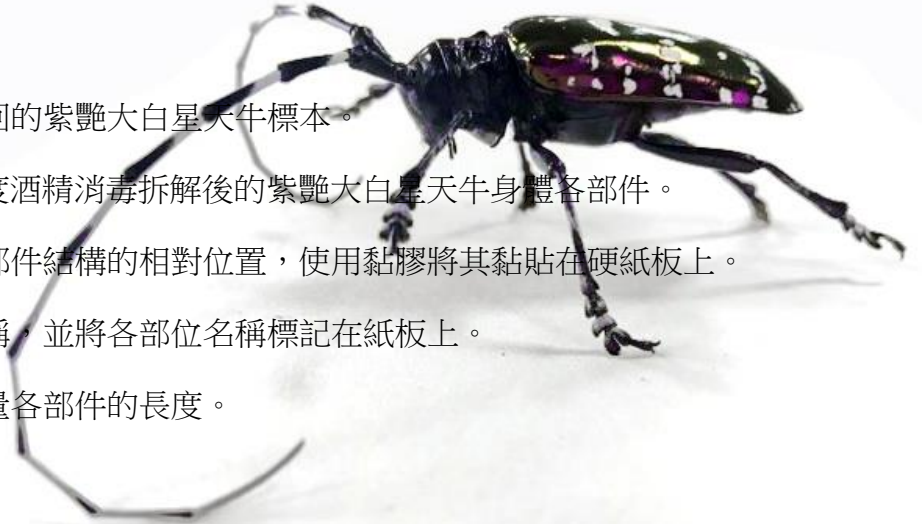
步驟二：使用 75% 濃度酒精消毒拆解後的紫艷大白星天牛身體各部件。

步驟三：依照身體各部件結構的相對位置，使用黏膠將其黏貼在硬紙板上。

步驟四：查詢部位名稱，並將各部位名稱標記在紙板上。

步驟五：使用工具測量各部件的長度。

二、研究過程：



野外測量個體大小



學習拆解標本(1)



學習拆解標本(2)



學習拆解標本(3)



依照天牛構造貼上天牛各部位結構



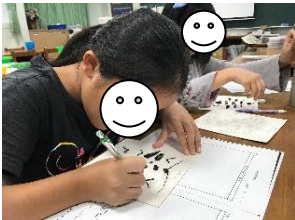
測量天牛腳旋轉角度



測量天牛腳旋轉角度



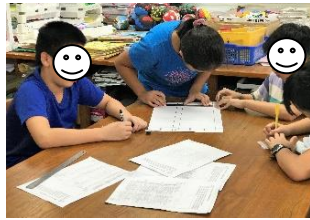
測量天牛腳閉合角度



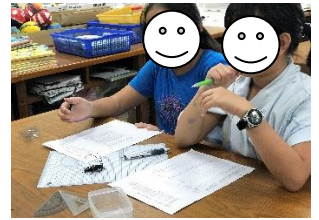
標記部位名稱



標記部位名稱



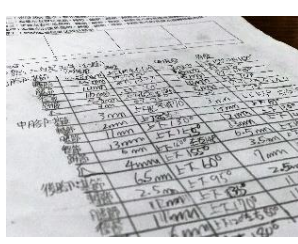
歸納分析測量結果



歸納分析測量結果



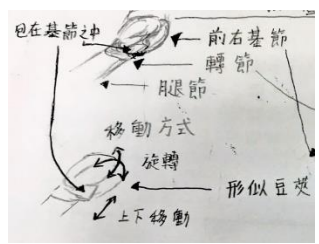
紀錄測量結果(1)



紀錄測量結果(2)



觀察腳部關節細部構造



學習關節的素描

三、研究發現：

天牛腳部可區分成基節、轉節、腿節、脛節、跗節及爪六段關節。我們逐一測量各關節的長度以及旋轉角度，並以天牛的右側足部為例整理測量結果。

(一)紫艷大白星天牛體區構造觀察

紫艷大白星天牛的身體構造，可分成頭、胸、腹三個體區。由於我們將探討天牛的行進策略，因此將天牛的行進中心-胸部的體區細部拆解，合計拆解成以下十九個骨片。

- 1.頭部體區(1 塊)：仔細觀察其細部構造，是由觸鬚(11 節)、一對複眼、口器、小顎鬚等器官所構成。
- 2.胸部體區(17 塊)：胸部器官除了前胸、中後胸為單一體區外，其餘構造是由左右對稱的前、中、後足及堅硬的鞘翅以及柔軟的內翅構成。胸部可以拆解成前胸及中後胸兩段，左右分別由前側板以及側板兩組骨片構成。由於用於飛行與行進運動的六足都生長在胸部，可以了解胸部體區為天牛的運動中樞。為了更詳細觀察天牛步行時六足運作的物理策略，我們決定再將胸部的構造拆解成前胸、中後胸背板、中後胸腹板、前足(*2)、中足(*2)、後足(*2)、前側板(*2)、後側板(*2)、翅鞘(*2)、內翅(*2)，合計 17 塊骨片。
- 3.腹部體區(1 塊)：由六段體節構成，腹部尾端為生殖器。

(二)紫艷大白星天牛六足各關節的長度統計分析

- 1.後腳最長(44.25mm)，其次為前腳(39.25mm)及中腳(35.5mm)。
- 2.足部的六段關節中，以脛節最長、其次依序為腿節、跗節、基節、爪，轉節最短。

(三)紫艷大白星天牛六足關節的旋轉與抬升角度分析

- 1.六足構造中，僅基節與轉節能夠左右旋轉。基節左右旋轉角度介於 100° - 120° 之間。轉節左右旋轉角度介於 160° - 180° 之間。
- 2.六足構造中，基節、腿節、脛節、跗節及爪能夠上下調整，基節上下調整角度介於 75° - 85° ；腿節上下調整角度介於 100° - 120° ；脛節上下調整角度介於 120° - 135° 、跗節上下調整角度介於 40° - 55° ；爪的調整角度介於 25° - 40° 。

以上的測量，讓我們知道，原來紫艷大白星天牛的行進運動，是透過基節與轉節合作，才能夠旋轉角度，而基節、腿節、脛節、跗節及爪，則能夠讓紫艷大白星天牛依照地形特性，選擇抬高或者壓低其身體，藉此保持身體重心平衡。

表 1

紫艷大白星天牛六足各關節的長度統計與旋轉與抬升角度歸納表

	右前腳				右中腳				右後腳				排 序
	1 號蟲		2 號蟲		1 號蟲		2 號蟲		1 號蟲		2 號蟲		
	長 度	旋轉 角度	長 度	旋轉 角度	長 度	旋轉 角度	長 度	旋轉 角度	長 度	旋轉 角度	長 度	旋轉 角度	
基 節	3.5 mm	左右 120° 上下 75°	3 mm	左右 120° 上下 75°	3 mm	左右 120° 上下 75°	2 mm	左右 110° 上下 80°	6 mm	左右 120° 上下 75°	5.5 mm	左右 100° 上下 85°	4
轉 節	1 mm	左右 180°	1 mm	左右 180°	1 mm	左右 180°	1 mm	左右 160°	2 mm	左右 180°	2 mm	左右 180°	6
腿 節	12 mm	上下 120°	11 mm	上下 120°	11 mm	上下 120°	10 mm	上下 120°	14 mm	上下 120°	12 mm	上下 100°	2
脛 節	14 mm	上下 120°	11 mm	上下 120°	11 mm	上下 120°	10 mm	上下 135°	13 mm	上下 120°	12 mm	上下 120°	1
跗 節	7 mm	上下 40°	6 mm	上下 40°	7 mm	上下 40°	6 mm	上下 55°	7 mm	上下 40°	6 mm	上下 55°	3
爪	4 mm	上下 30°	5 mm	上下 30°	4 mm	上下 30°	5 mm	上下 25°	4 mm	上下 30°	5 mm	上下 40°	5
總 長	41.5 mm	/	37 mm	/	37 mm	/	34 mm	/	46 mm	/	42.5 mm	/	
平 均	39.25mm				35.5mm				44.25mm				

研究問題二、野外的紫艷大白星天牛在哪裡活動？會使用哪些不同的方式行進呢？

一、研究方法：調查法

二、研究步驟：

步驟一：到棲地找尋紫艷大白星天牛(106年7月2、3、4日，上午9:00-12:00)。

步驟二：記錄紫艷大白星天牛的活動位置，並觀察分析牠的行進運動屬於哪種類型。

步驟三：統計分析紫艷大白星天牛的步行運動類別。

三、研究過程：



錄影記錄天牛爬樹



錄影拍攝天牛爬樹



錄影記錄天牛爬樹枝



錄影記錄天牛爬樹葉



記錄天牛爬枯枝



野外觀察紀錄



野外觀察紀錄



在棲地的行為調查

四、研究發現：

本研究調查期間棲地平均每次可觀測到 21.5 隻天牛。調查期間發現，紫艷大白星天牛停在樹幹上的次數最多，達 49%的機率，其次依序為樹枝上、樹葉上及地表及樹洞裡。無論在樹幹上、樹枝或者樹葉上，都發現天牛會朝上以及向下爬行。

表 2

紫艷大白星天牛行進類別統計表(單位：隻)

行進類別	樹幹上		樹枝上		樹葉上		其它
	朝上爬	向下爬	朝上爬	向下爬	朝上爬	向下爬	
7月2日	12	2	3	1	3	0	1
7月3日	7	0	4	2	2	2	1
7月4日	9	2	4	2	4	2	2
次數	28	4	11	5	9	4	4
分項總次數	32		16		13		4
平均	10.6		5.3		4.3		1.3
百分比	49%		25%		20%		6%
說明	1.7/2-7/3 日，每次到棲地發現的平均天牛數量為 21.5 隻。 2.2 次在其它發現的地點，1 次是在地表爬行，另一次躲在樹洞中。						

從上面的分析，我們發現紫艷大白星天牛在野外常出現在「樹幹上」、「樹枝上」及「樹葉上」爬行，且會朝上以及向下爬行。由於時間有限，後續的觀察與測量，我們將聚焦觀察天牛如何運用牠的六足關節進行伸縮調控，讓他正面往上的爬行條件中，能維持身體重心與穩定，順利的行走在各種環境中。



研究問題三、紫豔大白星天牛在樹幹上垂直向上爬行的身體重心與角度分析。

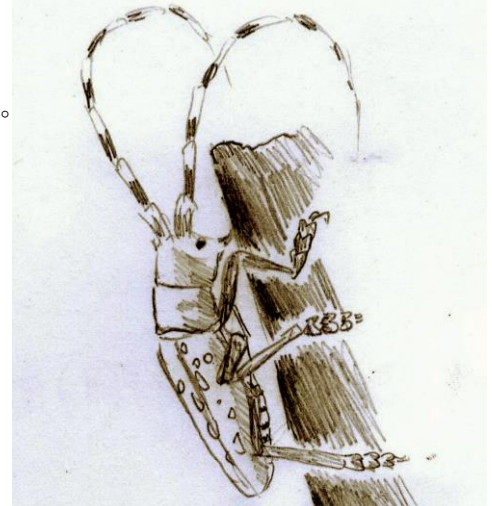
一、研究步驟：

步驟一：在棲地裡，找到在樹幹上爬行的紫豔大白星天牛。

步驟二：用攝影機與照相機記錄天牛爬行的影像。

步驟三：分析影像，尋找天牛爬行時的身體重心，
並觀察分析六足各關節扮演的角色。

步驟四：整理觀測的發現，並撰寫結果。



觀察天牛爬行(1)



觀察天牛爬行(2)



觀察天牛爬行(3)



觀察天牛爬行(4)



觀察天牛爬行(5)



觀察天牛爬行(6)



觀察天牛爬行(7)



觀察天牛爬行(8)



記錄到野外爬行在樹幹上的成蟲(1)



記錄到野外爬行在樹幹上的成蟲(2)



記錄到野外爬行在樹幹上的成蟲(3)



記錄到野外爬行在樹幹上的成蟲(4)



記錄到野外爬行在樹幹上的成蟲(5)



交配中的對蟲，也是以腹尾頂住樹表



校園內模擬重心天牛爬行時的重心(1)



校園內模擬重心天牛爬行時的重心(2)

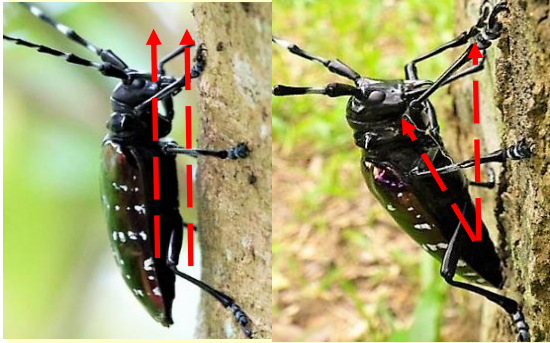

三、研究發現：

研究發現紫艷大白星天牛爬行在樹幹身體呈現「平行」及「傾斜 30°」兩種不同的角度與重心。蟲體與樹幹平行時，腹部與樹表距離 1 公分。腿部構造中，爪子鉤抓住樹表皮裂縫，跗節平貼在樹皮上，腿節與脛節夾角大於 90°，身體重心位於前、中後胸連結處。

蟲體傾斜 30°時，腹部尾端接觸樹皮，頭部抬高距樹皮 3 公分。腿部構造中，前端爪子鉤抓住樹皮，跗節平貼於樹皮，腿節與脛節夾角大於 90°。身體重心位於中後胸。

表 3

紫艷大白星天牛垂直爬樹時的身體重心與角度觀測結果分析表：

變因	身體的角度與離樹距離		身體的重心模擬測量	
	角度 1(平行)	角度 2(傾斜 30°)	角度 1(平行)	角度 2(傾斜 30°)
圖像				
差異比較	<p>共同點：前足爪鉤樹皮，中後足跗節平貼樹皮。</p> <p>差異點：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 平行時身體與樹表平行，距離樹表 1 公分。傾斜 30°時，身體與樹表呈 30°，腹尾與樹表接觸，頭部抬高距樹表 3 公分。 ● 六足與樹表接觸的支點部分。平行時蟲體以 6 個支點接觸樹幹；蟲體傾斜 30°時，有 7 個支點(腹尾)。 ● 平行時天牛腿節與脛節夾角大於 90°，傾斜 30°時腿節與脛節夾角大於 90°。 		<p>共同點：重心皆位於胸部。</p> <p>差異點：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 平行時天牛重心位於前、中後胸連結處。 ● 傾斜 30°時，天牛重心位於中後胸。 	

這些差異讓我們產生疑惑：「不同的角度，是否會有不同的行進速率與步態？」為解開這個疑問，我們進行了下列問題的測量與分析。

研究問題四、紫艷大白星天牛在垂直樹幹爬行的步態與速率分析。

一、紫艷大白星天牛使用哪種步態在樹幹上爬行？

(一)研究步驟

步驟一：找出紫艷大白星天牛在樹幹上爬行的影片。

步驟二：使用 Powerdirector 軟體格放影片，分析天牛行進時的足部運動方式。

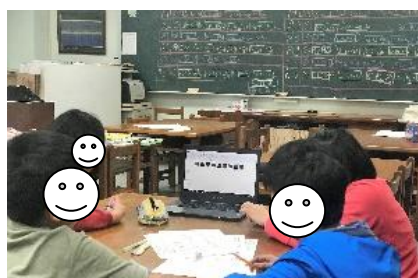
步驟三：將觀察結果記錄在海報紙與黑板上。

步驟四：提出觀察分析結果。

(二)資料分析過程：



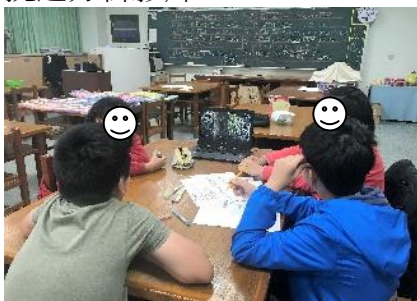
挑選分析影片



分析影片資料



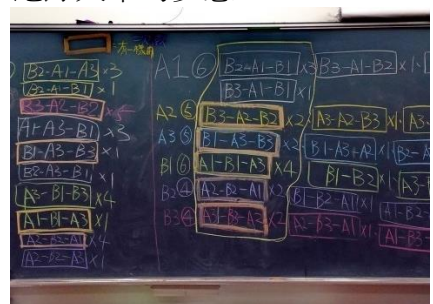
紀錄天牛的步態-1



紀錄天牛的步態-2



分析天牛的步態-3



分析天牛的步態-4

(三)研究發現：分析野外所拍攝的紫艷大白星天牛行進影片發現，紫艷大白星天牛在樹幹爬行的行進步態，可分成以下兩種不同的步態模式：

1. 三角步態模式：每次行進，「左前-右中-左後」為一組，「右前-左中-右後」為另一組，每一步伐都一起啟動三隻腳同時往前行進，符合三角步態的行進模式。
2. 六角步態模式：腳部位移的順序依照左前-右前-左後-右後-左中-右中的順序循環前進。每次移動，都只移動一隻腳，其餘五隻腳用以支撐身體不動。另外，由於牠們的腹部尾端與樹幹表皮接觸，跟五隻腳共同支撐身體，因此行進的過程形成六個角的支點方式，我們把它命名為六角步態。

表 4

紫豔大白星天牛在垂直樹幹爬行的步態分析表



三角步態：每次移動三隻腳，另三隻腳不動。

六角步態：每次只移動一隻腳，其餘不動。

	第一步	第二步	第三步	第四步	第五步	第六步
三角步態	左前-右中 -左後					
		右前-左中 -右後				
			左前-右中 -左後			
				右前-左中 -右後		
					左前-右中 -左後	
						右前-左中 -右後

	第一步	第二步	第三步	第四步	第五步	第六步
六角步態	左前					
		右前				
			左後			
				右後		
					左中	
						右中

二、紫艷大白星天牛在樹幹上爬行速率為何？

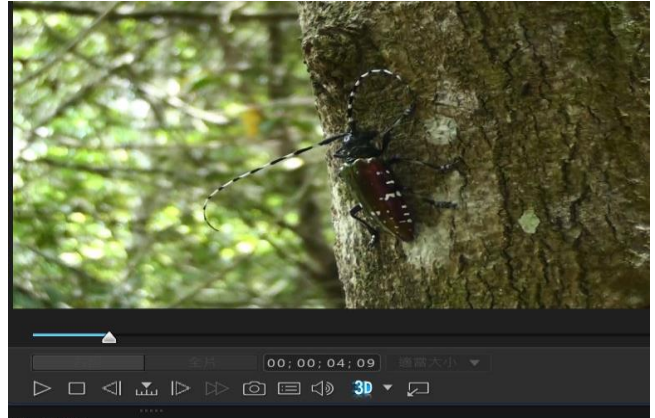
(一)研究步驟

步驟一：尋找天牛在樹幹上爬行的影片。

步驟二：使用 Powerdirector 軟體格放影片，分析五段天牛爬行的影片。

步驟三：以速率=距離÷時間公式，分別計算三角步態以及六角步態之速率。

步驟四：歸納分析結果。



(二)研究發現：

三角步態在樹幹上爬行的平均速率為 4.06 公分/秒(max5.2 公分/秒；min3 公分/秒)。

六角步態在樹幹上的平均爬行速率為 1.66 公分/秒(max2.66 公分/秒；min0.75 公分/秒)。三角步態在樹幹上的爬行速率比六角步態快 2.45 倍。

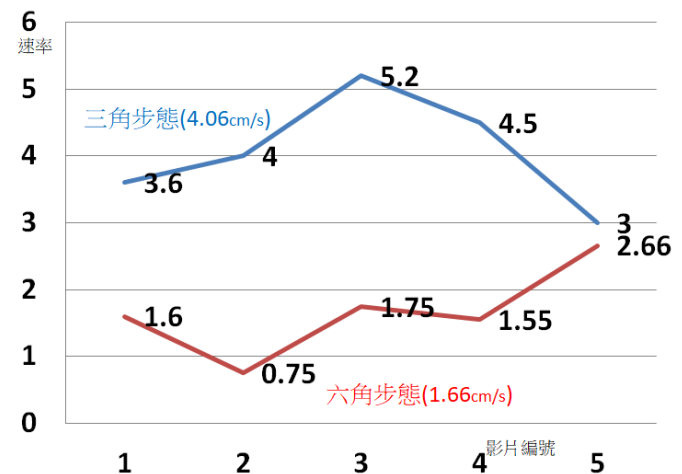


表 5

紫艷大白星天牛在樹幹上爬行速率統計表

影片	1	2	3	4	5	平均速率		
編號	距離	時間	距離	時間	距離		時間	
三角	14	3	8	2	26	5	4.06 cm/s	
步態	速率 3.6cm/s		速率 4 cm/s		速率 5.2 cm/s			
	速率 4.5 cm/s		速率 3 cm/s					
六角	8	5	6	8	7	4		1.66 cm/s
步態	速率 1.6 cm/s		速率 0.75cm/s		速率 1.75cm/s			
	速率 1.55cm/s		速率 2.66cm/s					

說明

1. 距離基本單位為公分，時間為秒。
2. 速率的計算，以速率=距離÷時間公式，各統計五段天牛步行距離及時間而得。
3. 三腳步態的步行速率，比六角步態速率快 2.45 倍。

研究問題五：紫艷大白星天牛在樹葉上爬行時的身體重心與角度分析。

一、研究步驟

步驟一：在棲地裡，找到在樹葉上爬行的天牛。

步驟二：用攝影機與照相機記錄天牛爬行的影像。

步驟三：分析影像，尋找天牛爬行時的身體重心，並觀察其身體角度。

步驟四：整理歸納觀測的發現與結果。

二、研究過程：



紀錄天牛行進



在葉面上行進 1



在葉面上行進 2



在葉面上行進 3

三、研究發現

研究發現紫艷大白星天牛爬行在樹葉上時，身體呈「平行」及「傾斜 30°」兩種不同的角度與重心。蟲體與樹葉平行時，腹部與葉面表距離約 1 公分。腿部構造中，爪子會鉤抓在葉子表面，跗節完全平貼葉面，腿節與脛節夾角大於 90°，身體重心位於前胸與中後胸交接處。

蟲體傾斜 30°時，腹部尾端接觸葉面(或樹枝)，頭部抬高距葉面 2 公分。腿部構造中，前端爪子鉤抓住樹皮，跗節平貼於樹皮，腿節與脛節夾角大於 135°。身體重心位於中後胸。

表 6

紫艷大白星天牛爬在樹葉上行進時身體重心與角度觀測紀錄表

變因	身體的角度與離樹距離		身體的重心模擬測量	
	角度 1(平行)	角度 2(傾斜 30°)	角度 1(平行)	角度 2(傾斜 30°)
				
差異比較	共同點：重心都位於胸部 都使用鉤爪抓住葉面 跗節都緊緊平貼於葉子表面		共同點： 身體的重心皆位於胸部構造中。	

差異點：

- 平行時，身體與葉面平行，距離葉面 1 公分。
- 身體傾斜 30°時，腹部尾端與葉面(或樹枝)接觸，形成另一個支點。頭部抬高距葉面 2 公分。
- 平行時，天牛以六個支點接觸葉面；傾斜 30°時，天牛以七個支點接觸葉面。
- 平行時，天牛的腿節與脛節夾角大於 90°。傾斜身體 30°時，腿節與脛節夾角大於 135°。

差異點：

- 蟲體與樹葉平行時，身體重心位於前胸與中後胸交接處。
- 蟲體傾斜 30°時，身體重心位於中後胸。

研究問題六、紫艷大白星天牛在樹葉上爬行的步態與速率分析。

一、紫艷大白星天牛使用哪種步態在樹葉上爬行？

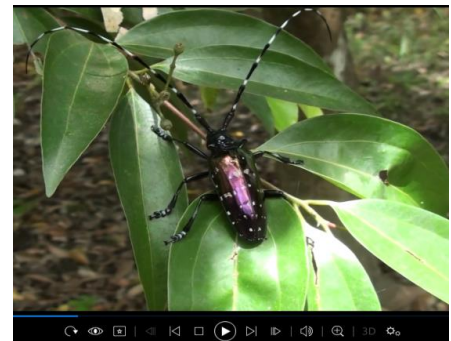
(一)研究步驟

步驟一：找出天牛在樹葉上爬行的影片。

步驟二：使用 powerdirector 軟體播放紀錄影片，分析天牛行進時的足部運動方式。

步驟三：將觀察結果記錄在海報紙與黑板上。

步驟四：提出觀察分析結果。



(二)研究發現：

分析紫艷大白星天牛在樹葉上爬行的行進步態，可以分成「五角步態」及「六角步態」兩種不同模式。說明如下：

五角步態模式：每次移動，都只移動一隻腳，其餘五隻腳支撐身體。腳部運動的位移順序，依左前-右後-左後-右中-左中-右前循環移動。

六角步態模式：每次移動，都只移動一隻腳，其餘五隻腳支撐身體不動。腹部尾端在行進過程頂住葉面，協助支撐身體，因此身體多了一個支點，成為六角步態。腳部運動的位移順序，依照右前-左前-右後-左後-右中-左中的順序移動。



表 7

紫艷大白星天牛在樹葉上爬行的步態分析表

前進步數	第一步	第二步	第三步	第四步	第五步	第六步
五角步態	左前	右後	左後	右中	左中	右前
六角步態	右前	左前	右後	左後	右中	左中

二、紫艷大白星天牛在樹葉上爬行速率如何？

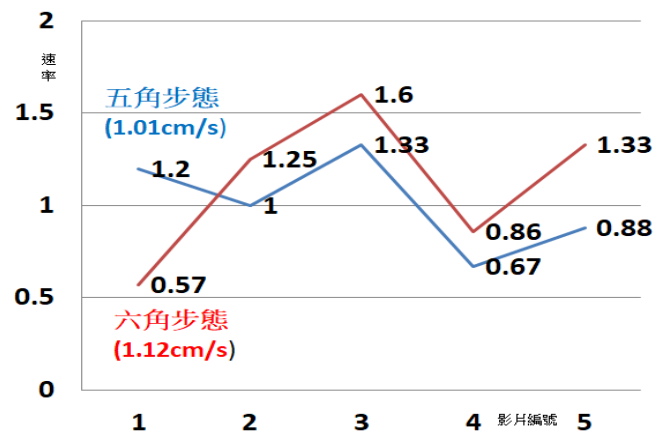
(一)研究步驟

步驟一：尋找天牛在樹幹上爬行的影片。

步驟二：使用 powerdirector 軟體播放紀錄影片，分析五段天牛爬行的影片。

步驟三：以速率=距離÷時間公式，分別計算三角步態以及六角步態之速率。

步驟四：提出分析結果。



(二)研究發現：

1.五角步態在樹葉上爬行的平均速率為 1.01 公分/秒(max1.33 公分/秒；min0.67 公分，秒)。

2.六角步態在樹葉上的平均爬行速率為 1.12 公分/秒(max1.60 公分/秒；min0.57 公分/秒)。

表 8

紫艷大白星天牛在樹葉上爬行速率統計表

影片編號	1		2		3		4		5		平均速率
	距離	時間	距離	時間	距離	時間	距離	時間	距離	時間	
五角步態	6	5	7	7	8	6	4	6	8	9	1.01cm/s
六角步態	4	7	5	4	8	5	7	8	8	6	1.12cm/s

說明 1.距離基本單位為公分，時間為秒。

2.速率的計算，以速率=距離÷時間公式，各統計五段天牛步行距離及時間而得。

研究問題七：紫艷大白星天牛在面對不規則的樹枝爬行時，身體重心與角度分析。

一、研究步驟

步驟一：在棲地裡，找到在樹枝爬行的天牛。

步驟二：用攝影機與照相機記錄天牛爬行的影像。

步驟三：分析影像，尋找天牛爬行時的身體重心，並觀察分析六足各關節扮演的角色。

步驟四：整理觀測發現，並撰寫結果。

二、研究發現：

研究發現紫艷大白星天牛爬行在樹枝上，會出現「身體傾斜 60 度」及「身體傾斜 70 度」兩種不同的重心策略。傾斜 60 度時，天牛會以六足鉤爪鉤抓樹枝(葉)，跗節平貼在樹枝或者樹葉上，腿節與脛節夾角會依照環境條件調整成大於或小於 90 度，身體重心位於腹部與後胸的交接處。傾斜 70 度時，天牛仍以鉤爪抓住樹枝或者樹葉，跗節平貼在枝葉上。腿節與脛節夾角內縮，小於 90 度。身體重心位於腹部上緣。

表 9

紫艷大白星天牛爬在不規則樹枝上行進時身體重心與角度觀測紀錄表

變因	身體的角度與離樹距離		身體的重心模擬測量	
	角度 1(傾斜 60°)	角度 2(傾斜 70°)	角度 1(傾斜 60°)	角度 2(傾斜 70°)
				
差異比較	共同點： 都使用鉤爪抓住樹枝或樹葉 跗節平貼葉面		共同點：身體重心偏低。	
	差異點： 以腹尾為主要支點時，身體與樹枝的角度呈現 85°。腿節與脛節夾角會依照環境調整成大或小於 90°。 以六足為主要支點時，身體與樹枝角度約成 80°，腹委會內縮。		差異點： 腹尾支點：身體重心位於腹部與後胸的交接處。 六足支點：身體重心位於腹部上緣。	

研究問題八、紫豔大白星天牛在樹枝上爬行的步態與速率分析。

一、紫豔大白星天牛使用哪種步態在樹枝上爬行?

(一)研究步驟

步驟一：找出天牛在樹枝上爬行的影片。

步驟二：使用 powerdirector 軟體播放紀錄影片，分析天牛行進時的足部運動方式。

步驟三：彙整歸納觀察資料。

(二)研究發現：

分析野外拍攝紫豔在樹枝上爬行的影片發現，紫豔大白星天牛在樹枝上爬行的行進步態，可以分成「五角步態」及「六角步態」兩種不同的運動模式。說明如下：

五角步態模式：每次移動，都只移動一隻腳，其餘五隻腳支撐身體。腳部運動的位移順序，依右前-左前-右中-左中-右後-左後循環移動。

六角步態模式：每次移動，都只移動一隻腳，其餘五隻腳支撐身體不動。腹部尾端在行進過程頂住樹枝，協助支撐身體，身體多了一個支點，因此稱為六角步態。腳部運動的位移順序，依照右前-左前-右後-左後-右中-左中的順序移動。

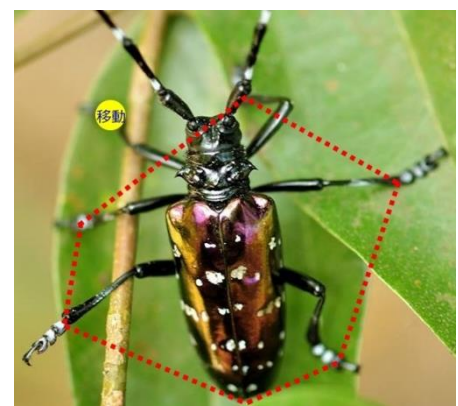


表 10

紫豔大白星天牛在樹枝上爬行的步態分析表

前進步數	第一步	第二步	第三步	第四步	第五步	第六步
五角步態	右前	左前	右中	左中	右後	左後

前進步數	第一步	第二步	第三步	第四步	第五步	第六步
六角步態	右前	左前	右後	左後	右中	左中

說明：五角步態：每次移動一隻腳，另五隻腳不動。六角步態：每次只移動一隻腳，其餘五隻腳不動，腹部尾端不動，形成六個支點。

二、紫艷大白星天牛在樹枝上爬行速率如何？

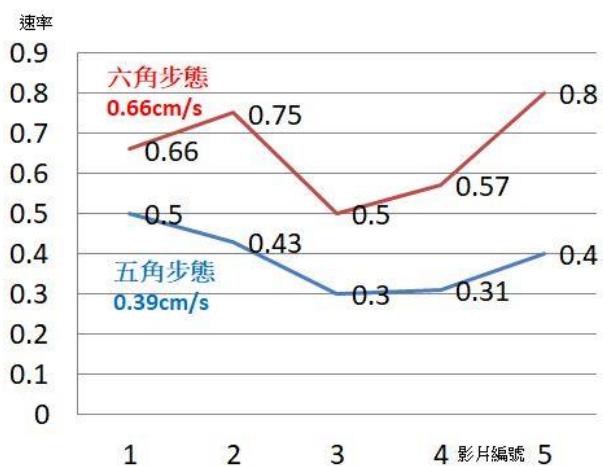
(一)研究步驟

步驟一：尋找天牛在樹枝上爬行的影片。

步驟二：使用 powerdirector 軟體播放紀錄影片，分析五段天牛爬行的影片。

步驟三：以速率=距離÷時間公式，分別計算三角步態以及六角步態之速率。

步驟四：提出分析結果。



(二)研究發現：

- 1.天牛使用五角步態在樹枝上爬行的平均速率為 0.39 公分/秒(max0.5 公分/秒;min0.3 公分/秒)。
- 2.天牛使用六角步態在樹枝上爬行的平均速率為 0.66 公分/秒(max0.8 公分/秒;min0.5 公分/秒)。

表 11

紫艷大白星天牛在樹枝上爬行速率統計表

影片編號	1		2		3		4		5		平均速率
	距離	時間	距離	時間	距離	時間	距離	時間	距離	時間	
五角步態	2	4	3	7	3	10	4	13	4	10	0.39cm/s
六角步態	2	3	3	4	2	4	4	7	4	5	0.66cm/s

說明

- 1.距離基本單位為公分，時間為秒。
- 2.速率的計算，以速率=距離÷時間公式，各統計五段天牛步行距離及時間而得。

研究問題九：紫艷大白星天牛及獨角仙斜坡的爬升力比較。

(一)研究步驟

步驟一：採集天牛、獨角仙活體。

步驟二：讓天牛、獨角仙依序爬行傾斜角度呈 15°、30°、45°、60°、75°及 90°的面板，觀察牠們是否可以成功爬升。

步驟三：記錄並且提出分析結果。



研究過程照片：



天牛可以在紙板上爬升 90°



天牛可以在塑膠板上爬升 90°



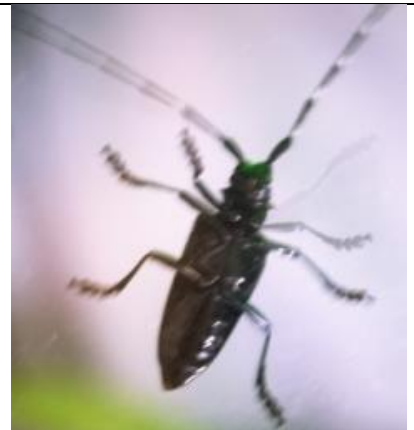
天牛可以在玻璃上爬升 90°



獨角仙無法爬升角度大於 15° 的斜坡。



天牛可以在木板上爬升 90°



爬行實驗照片



天牛在玻璃上爬行



在玻璃上爬行



在玻璃上爬行

(二)研究發現：

實驗過程，我們觀察發現，紫艷大白星天牛可以成功爬上 90°的傾斜面板，獨角仙只能爬行到 15°角的傾斜面板，超過這個角度，獨角仙就開始下滑。天牛可以攀爬紙板、木板、塑膠板、甚至玻璃板。

表 12

紫艷大白星天牛與獨角仙爬升傾斜面板的爬升力比較

面板傾斜角度	15 度角	30 度角	45 度角	60 度角	75 度角	90 度角
紫艷大白星天牛	✓	✓	✓	✓	✓	✓
獨角仙	✓					

為了進一步探究紫艷大白星天牛能夠爬行光滑面板的原因，進一步觀察紫艷大白星天牛與獨角仙爬行時，與光滑面板接觸的足部構造為何？並進行了構造上的比較。

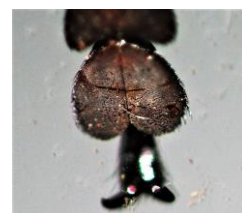
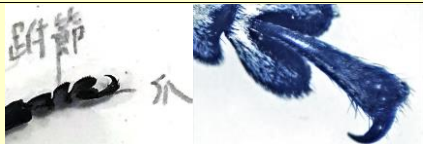


表 13

在光滑面板爬升時紫艷大白星天牛與獨角仙的足部接觸點觀察分析表

	紫艷大白星天牛	獨角仙
與光滑面板接觸的足部構造	爪 跗節 	爪 跗節
爬行光滑面板的施力構造	六足跗節平貼在面板上 跗節提供了天牛貼在面板往上爬的力量來源。	使用爪鉤抓面板，但因面板過於光滑，獨角仙的爪無法鉤住面板表面，因此下滑。

以上比較，我們確認了紫艷大白星天牛能夠爬行在光滑面板的主因，在於跗節構造。因此我們使用顯微鏡觀察了紫艷大白星天牛的跗節，發現跗節表面布滿了條狀的細毛。究竟這些細毛在紫艷大白星天牛爬行光滑的面板時扮演了哪些施力的功能，值得進一步追蹤探索。



陸、研究討論

討論一：紫艷大白星天牛行進時，六足構造與身體重心之間的關係探討

為了瞭解紫艷大白星天牛行進時，六足構造與身體重心的關係，我們將研究問題三至六所探討的相關變因歸納整理如下表。：

表 14

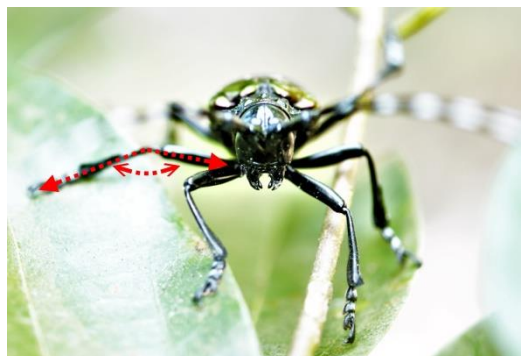
紫艷大白星天牛在不同行進狀況下之身體重心與腿脛節夾角關係歸納表

不同的	爬樹幹時的重心位置		爬樹葉時的重心		爬樹枝時的重心	
行進狀況	身體與樹幹 平行(朝上)	身體與樹幹 傾斜 30 度	身體與樹葉 平行	身體與樹葉 傾斜 30 度	身體與樹支 傾斜 60 度	身體與樹枝 傾斜 70 度
重心位置	前中後胸 交接處 (重心最高)	中後胸 (重心次高)	前中後胸 交接處 (重心最高)	中後胸 (重心次高)	後胸與腹部 交接處 (重心次低)	腹部 (重心最低)
腿節與脛 節夾角	大於 90 度	大於 90 度	大於 90 度	大於 135 度	小於 90 度	小於 90 度
跗節	平貼樹幹	平貼樹幹	平貼樹葉	平貼樹葉	平貼樹枝	平貼樹枝
爪	鉤住樹幹	鉤住樹幹	鉤住樹葉	鉤住樹葉	鉤住樹枝	鉤住樹枝

從上表中我們發現，紫艷大白星天牛不論面對哪種環境，牠們的跗節與爪所扮演的角色，都一樣是在鉤住物體(爪)與平貼物體(跗節)，由於牠們所展現出共同的功能，因此不會是形成重心不同的原因，於是我們首先將爪與跗節對重心位置影響排除。



天牛在面對不同的步行條件時，會調控腿節與脛節的夾角，讓自己身體的傾斜角度隨著環境的條件而調整。例如，在平行的樹幹與樹葉表皮中行走，天牛就會擴大自己的腿節與脛節夾角，讓腳可以往外延展，身體重心抬高到「前、中後胸交接處」。



當天牛爬行在不規則的樹枝上，身體傾斜高達 70 度，牠就會將自己腿節與脛節夾角縮小到 90 度以內，讓自己的身體重心降低到腹部的位置，才能讓自己穩穩的站在樹枝上。

由以上討論發現，紫艷大白星天牛身體的重心位置，與身體的傾斜角度成反比；身體越傾斜，重心越低。



討論二：紫艷大白星天牛行進時，六足形成的支點數量與行進速率之間的關係探討

下表歸納整理了本研究問題三至八所探討紫艷大白星天牛行進步態與行進速率的相關變因，我們將以此簡化的表格為依據，探討紫艷大白星天牛在不同行進步態下之支點數量與平均速率關係。

表 15

紫艷大白星天牛在不同行進步態下之支點數量與平均速率關係歸納表

不同的行進狀況	爬樹幹時的行進步態		爬樹葉時的行進步態		爬樹枝時的行進步態	
	三角步態	六角步態	五角步態	六角步態	五角步態	六角步態
支點數量	三個	六個	五個	六個	五個	六個
平均速率	4.06cm/s	1.66cm/s	1.01cm/s	1.12cm/s	0.39cm/s	0.66cm/s

從表 12 發現，天牛行進時，會面臨爬樹幹、爬樹葉及爬樹枝等多種不同的行進狀況，所採用的步態，除了我們所認知的三角步態之外，亦會因應條件的不同，採用五角、六角等不同且多元的策略進行。



三角步態，主要在面對平緩且需要快速步行的行進條件。由於地形平坦，紫艷大白星天牛可以順利且穩定的同時啟動三隻腳前進，行進速率自然比較快。在紫艷大白星天牛必須

面對攀爬樹葉或者樹枝的環境條件時，牠必須先穩定自己，讓自己不至於會掉落到地上，因此會採用較多支點的五角或者六角步態，先求穩定，再慢慢啟動可活動的腳往前爬行。

柒、研究結論與建議

本研究主要在探討紫艷大白星天牛究竟如何運用六足保持身體的重心，讓牠們能夠平衡且穩定爬行在各種不同條件的環境，以下是我們的研究結論與建議。

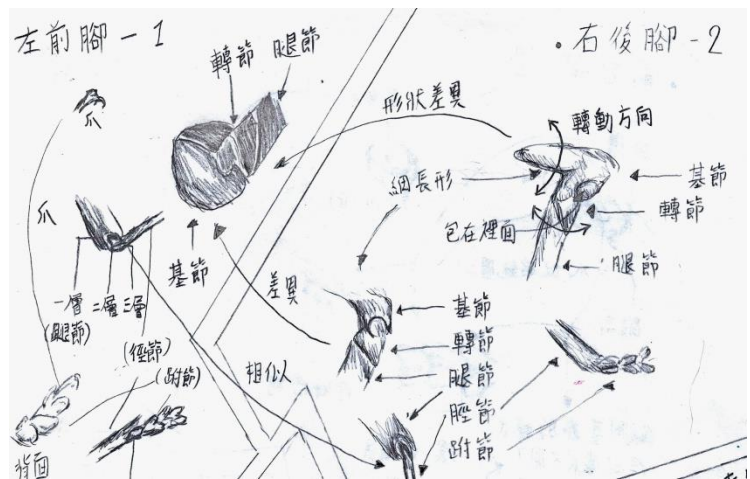


一、研究結論

研究結論(一) 紫艷大白星天牛身體可區分成頭、胸、腹三個體區。

1. 頭部由觸鬚(11 節)、複眼、口器、小顎鬚構成。
2. 胸部(17 塊)由前胸、中後胸背板、中後胸腹板、前足(*2)、中足(*2)、後足(*2)、前側板(*2)、後側板(*2)、翅鞘(*2)、內翅(*2)構成。腹部由六段體節構成，尾端為生殖器。
3. 六足各關節的長度比較，後腳最長(44.25mm)，其次前腳(39.25mm)、中腳(35.5mm)。

基節能左右旋轉 100° - 120° ，轉節能左右旋轉 160° - 180° 。基節、腿節、脛節、跗節及爪能夠上下調整。紫艷大白星天牛運動時基節與轉節提供左右旋轉功能，基節、腿節、脛節、跗節及爪，提供紫艷大白星天牛抬高或壓低身體，保持身體重心。



研究結論(二)

紫艷大白星天牛身體與樹幹平行時，腿節與脛節夾角大於 90° 度，身體重心位於前、中後胸連結處。身體傾斜 30° 時，腿節與脛節夾角大於 90° 度。身體重心位於中後胸。爬行時，可分成三角步態模式，爬行平均速率為 4.06 公分/秒。以及六角步態，平均速率為 1.66 公分/秒。

研究結論(三)

紫艷大白星天牛爬行在樹葉上時，當牠的身體與樹葉平行時，腿節與脛節夾角大於 90° 度，身體重心位於前胸與中後胸交接處。身體傾斜 30° 時，腿節與脛節夾角大於 135° 度，身體重心位

於中後胸。爬行步態可以分成「五角步態」，足部運動順序，依左前-右後-左後-右中-左中-右前循環，平均爬行速率為 1.01 公分/秒。「六角步態」足部位移依照右前-左前-右後-左後-右中-左中的順序，在樹葉上的平均爬行速率為 1.12 公分/秒。

研究結論(四)

紫艷大白星天牛爬行在樹枝上時，會出現「身體傾斜 60 度」及「身體傾斜 70 度」兩種不同的重心策略。不論傾斜 60 或者 70 度，腿節與脛節夾角均會小於 90 度，身體重心則位於腹部。步行策略可分成「五角步態」及「六角步態」兩種不同方式。平均速率介於 0.39 公分/秒~0.66 公分/秒之間。

研究結論(五)

紫艷大白星天牛可以成功爬上垂直的塑膠以及玻璃板，獨角仙無法做到，其中原因，在於跗節構造的不同。紫艷大白星天牛跗節表層佈滿了纖維狀的細毛。究竟這些細毛在紫艷大白星天牛爬行光滑的玻璃表面時扮演了哪些功能，我們預計透過實驗設計，進行追蹤解答。

二、研究建議

(一) 紫艷大白星天牛跗節深化研究的建議

本研究發現，紫艷大白星天牛能夠利用跗節爬行光滑的塑膠板與玻璃，受限於時間以及設備，我們目前仍舊無法在短期內獲得有效的解答。我們將持續進行研究，尋求與大學物理相關科系共同合作的機會，透過電子掃描顯微鏡的顯微觀測，探討天牛跗節的細微構造，以找尋天牛跗節之所以能夠貼緊玻璃的答案。

(二) 仿生科技的建議

本研究發現，紫艷大白星天牛會以伸縮腿節及脛節夾角的方式，抬高自己身體角度，以控制自己身體重心高低的策略，藉此因應不同的步行環境需求。此發現能提供仿生科技領域聚焦在設計調控腿節與脛節夾角功能，建議六足機器人設計實可參考應用。

捌、參考文獻

周文一(2008)。台灣天牛圖鑑。臺北市：貓頭鷹出版社。

張永仁(1998)。昆蟲圖鑑：台灣七百多種常見昆蟲生態圖鑑。台北市：遠流出版社。

教育部(2001)。自然與生活科技教學指引-生物的運動單元。台北：教育部。

盧耽(2008)。圖解昆蟲學。臺北：城邦出版社。

附錄

