

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 生物科

探究精神獎

030303

台灣矛巨山蟻職蟻的跳躍及滑翔能力之行為研究

學校名稱：新北市立青山國民中小學

作者： 國一 鄒仁宇	指導老師： 鍾兆晉 黃家成
---------------	---------------------

關鍵詞：矛巨山蟻、滑翔、跳躍

摘要

「跳躍」是生物界很重要的運動方式，跳躍行為在螞蟻物種中很罕見，300 屬螞蟻中只有 4 個屬能用腿部跳躍，台灣過去並沒有螞蟻跳躍記載的文獻。本研究記錄台灣特有亞種「矛巨山蟻」職蟻之跳躍的與滑翔動作行為，像是跳前觀察以及跳躍形式，並且觀察其空中動作，包括肢體動作，身體是否具有校正的能力，並利用風洞觀察其空中滑翔姿態，證明其具有「定向空中降落」的滑翔能力。探討引發矛巨山蟻跳躍之原因，像是逃離困境等，並對矛巨山蟻腿部構造進行分析，與其他螞蟻作比對，找出更多本土的跳躍蟻種。最後用高速攝影拍攝起跳的動作，估算其跳躍力學，與國外的碩眼山蟻跳躍文獻做比較，找出螞蟻跳躍的出力與速度，並且使用電腦分析軟體分析其跳躍能力。

壹、研究動機

在小學六年級做螞蟻的獨立研究時，有一項實驗是探討螞蟻的爬坡能力，發現有隻螞蟻竟然會跳躍，完全顛覆我的想法，一直認為螞蟻只會行走，當時我觀察過螞蟻高達五十多種，並沒有瞧見會跳躍的螞蟻，這一項觀察也讓我請教過螞蟻專家，也查遍台灣研究螞蟻的相關資料，「螞蟻跳躍」這項議題在台灣並沒有人做此相關研究，更是激起我濃厚的研究動機。

在研究一個問題的過程出乎意料又發現另一個問題，於是開啟了我另一個研究的動機，就是想進一步了解螞蟻的跳躍相關訊息，包括：螞蟻在什麼情形之下會跳？是不是所有的螞蟻都會跳？它們如何跳躍？跳躍過程是呈現怎麼樣的動作……，這些問題都值得進一步探討。

貳、研究目的

- 一、探究矛巨山蟻之跳躍與滑翔能力，觀察描述其跳躍與滑翔之過程與行為。
- 二、研究矛巨山蟻可能發生跳躍之原因。
- 三、探討會跳躍之蟻種與不會跳躍之蟻種，身體型態上之差異。
- 四、計算矛巨山蟻之跳躍力學，並且以電腦分析軟體分析其跳躍性能。

參、研究設備及器材

本研究所需的器材，除了不同種的螞蟻之外，也需要高速攝影手機來進行拍攝，所需的設備與器材如表一所示。

表一、研究矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)跳躍所需的設備與器材。

蟻種	困台設計的材料	解剖螞蟻的材料	風洞設計的材料	其他相關器材
矛巨山蟻 (<i>Camponotus carin tipunus</i>)	滑石粉 透明麥拉片 木棒	方格紙(1mm) 鑷子 刀片	LED 燈源 吸管整流板 強力抽風扇	相機 試管 螞蟻專用飼料
臭巨山蟻 (<i>Camponotus habereri</i>)	木片 軟木塞墊片 白膠	精密尺 (0.1mm) 精密電子秤	圓筒形壓克力 高速攝影手機 (HUAWEI Mate 30 Pro)	寵物箱 碼表 二氧化碳 錄影機
希氏巨山蟻 (<i>Camponotus siemsseni</i>)	水彩筆	(1mg)	測速器 紗網	計算機 高速攝影手機
麥氏棘山蟻 (<i>Polyrhachis illaudata</i>)			濾網 垃圾桶底座 洗臉盆*2	(HUAWEI Mate 30 Pro) 昆蟲夾子

肆、研究過程與方法

一、文獻探討

(一)矛巨山蟻之簡介

1、描述：矛巨山蟻(*Camponotus carin tipunus*)，蟻科，山蟻亞科/巨山蟻屬，台灣特有亞種，體型瘦長，頭、與腹部黑褐色，胸部及各腳黃褐色，頭部寬大，大顎發達，具齒突排列，胸背板細窄瘦長，各腳細長，如圖一。在台灣屬於廣泛分布之蟻種，經常出沒於山間、林間小路或溪流旁邊，出現時通常以 2-3 隻的小群落出現，喜愛吃花蜜。

2、型態：從外觀來看，矛巨山蟻大約可分為 4 種型態。蟻后體長約 15mm，胸部寬大，全身黑褐色，有翅，繁殖後會脫落。雄蟻體長約 7mm，橘褐色，有翅，六肢細長。此兩種型

態稱為繁殖蟻。一般工蟻長約 8mm 頭小，呈三角形，腿部細長，行動敏捷。大工蟻體長約 12mm，頭大，大顎強而有力，能抵禦敵人，也會外出覓食，所以有人不稱它們兵蟻，而稱為特化大工蟻。後兩種型態隻蟻可稱為「職蟻」。



圖一、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)工蟻在立面探索時的外觀。

(二)跳躍

「跳躍」是生物體解除地面約束轉變為騰空狀態的過程。跳躍是一種重要的運動方式，使動物或昆蟲能夠在複雜的環境中克服障礙、逃避捕食或迅速捕捉獵物。在台灣查矛巨山蟻並沒有記載與跳躍相關的資料，文獻中提到了全世界三百多屬種的螞蟻中，只有 6 屬能夠跳躍，這 6 屬以跳躍方式的不同區分為兩類型，第一類型是用大顎向後跳，包括：鋸針蟻屬 (*Odontomachus*)、顎針蟻屬 (*Anochetus*) 和瘤顎家蟻屬 (*Strumigenys*)，第二類型螞蟻用腿向前跳躍，包括：碩眼山蟻 (*Gigantiops*)、掠針蟻屬 (*Harpegnathos*)、牙針蟻屬 (*Myrmecia*)，以及同時能用大顎以及腿部跳躍的鋸針蟻屬 (*Odontomachus*)，沒有任何關於巨山蟻跳躍的文獻紀錄。

(三)滑翔

1、描述：生物之空中行動可分為 4 種：拍翅飛行，典型滑翔，定向空中降落以及掉落，無翅生物只能定向空中降落或者掉落。「滑翔」又叫做「定向空中降落」，是指無翅生物從高處掉落後能快速進行空中校正，並控制降落方向，例如：飛鼠，滑翔蟻、蜘蛛等，滑翔能力能增加生物掉落時的生存率。

2、過程：定向空中降落分為三階段：掉落、重新定位及穩定滑翔。「掉落」是指從樹上掉落後，由於重力大於阻力，因此會垂直掉落一段距離。「重新定位」是指利用附肢受風產生之阻力，將身體校正為腹面朝下，並修改移動方向。「穩定滑翔」是指重新定位校正後，維持平衡姿勢朝目標方位穩定滑翔。

二、研究方法

研究方向大致分成四大架構，如圖二，包括:研究矛巨山蟻跳躍與滑翔行為、誘發跳躍可能原因、與不會跳之蟻種身體型態之比較、跳躍力學計算與電腦分析。



圖二、矛巨山蟻跳躍(*C. carin tipunus*)之研究架構圖。

研究(一)、研究矛巨山蟻跳躍與滑翔之行為

實驗目的： 確認矛巨山蟻具有跳躍的行為，行為是否具有普遍性，並且觀察跳躍過程。

1、跳躍之行為觀察：

實驗說明: 確認矛巨山蟻是否有跳躍的能力，跳躍能力是否具有普遍性?

矛巨山蟻是一種常見的蟻種，但是要在戶外看見它們跳躍是非常罕見的，即便在過去一年採集(110年10月~111年10月)矛巨山蟻的過程中，也僅看過一次從姑婆芋葉上跳開，其餘的跳躍都是在室內做實驗過程中所觀測到。我們必須先證實跳躍這種能力是普遍存在這個族群之中，首要任務就是要研究出能使矛巨山蟻跳躍的方法，再收集各處的矛巨山蟻確認是否具有跳躍能力。從111年1月到10月之間有影片記錄矛巨山蟻跳躍共有四次，如表二，都

是在不同地點發現的矛巨山蟻，看似跳躍能力是普遍存在矛巨山蟻的族群之中。

表二、2022 年矛巨山蟻(*C. carin tipunus*)跳躍觀察記錄表。

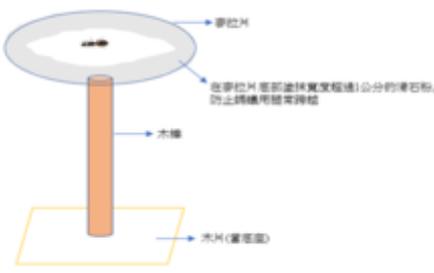
日期	螞蟻取得地點	跳躍紀錄	分工角色
1/1	南港舊庄天然茶莊	做螞蟻爬坡能力時，矛巨山蟻在 攀爬雙面膠的隔離紙，疑似攀爬 困難而往旁邊跳開，也是開啟我 的研究動機。	工蟻
6/6	汐止大尖山天道清修院	疑似兩隻前腳腳掌有受傷，跳躍 到另一個手掌上面。	兵蟻
9/2	汐止翠湖	第三次觀察是用一支水彩筆讓螞 蟻往返走不出去，大約走了三十 趟後，螞蟻就開始選擇向旁邊跳	工蟻
9/15	汐止大尖山鹿窟事件紀念碑	第四次觀察與第三次做法類似， 這次有使用手機放慢動作拍攝到 矛巨山蟻在跳躍的模樣。	工蟻

2、困台設計概念：

實驗說明: 矛巨山蟻是常見的蟻種，但是卻沒有人提出有關跳躍的資料，根據第三次的觀察，推論把矛巨山蟻困在某些地形上，可能誘使矛巨山蟻跳躍，於是提出一個疑問「矛巨山蟻是因受困才有跳躍的行為」。因此首要工作是開發出螞蟻困台，看看能否使螞蟻跳躍。

透明麥拉片用白膠與木棒一端相連，木棒另一端再與木片黏合，成為穩定的基座，並在麥拉片底下塗抹一層滑石粉，避免螞蟻攀爬，將螞蟻置入做好的困台上，觀察其跳躍，如圖三。

	
(A) 準備實驗器材:螞蟻、麥拉片、滑石粉、酒精、木棒、木片、水彩筆、白膠。	(B) 建造螞蟻困台

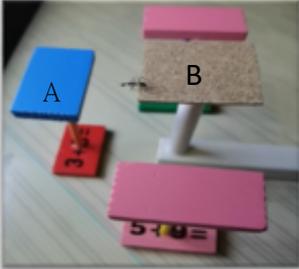
	
<p>(C) 將不同區域來源的矛巨山蟻與其他非矛巨山蟻依序放置於平台上(T:滑石粉)</p>	<p>(D) 螞蟻困台之示意圖</p>

圖三、螞蟻困台設計流程圖。

3、困台設計改良：

實驗說明：在證明矛巨山蟻跳躍能力的過程中發現跳躍前有許多動作，並且似乎對靠近的物體有興趣，因此設計有接引平台的實驗，並記錄矛巨山蟻跳躍前後的行為與動作。

因困台底面都是滑石粉，螞蟻翻下困台後足部都會沾上滑石粉末，跳躍時腳部容易打滑，影響跳躍表現，因此設計出二代螞蟻困台，在麥拉片表面上方再黏合一片軟木塞墊片，使螞蟻腳部不會打滑，軟木塞墊片的粗糙表面更貼切吻合自然界中螞蟻在樹枝上跳躍與攀爬的行為，同時也發現螞蟻跳躍之前，若能觀察到附近有其他物體的存在，會試圖攀附以及改變跳躍模式等行為，因此在二代的螞蟻困台前，放置一組跳躍接引區，離困台 1.5 公分處，長約 4.5cm、寬度約 2.5cm 的接引平台，並觀測其跳躍之行為與動作，如圖四。

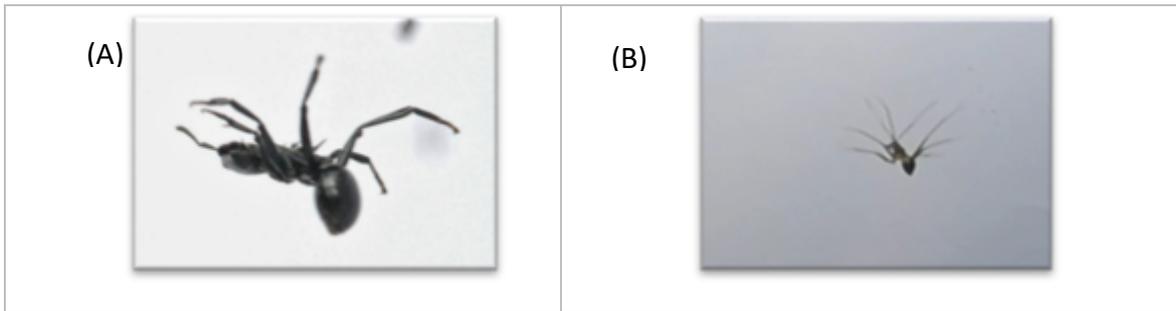
第一代螞蟻困台	第二代改良式螞蟻困台
	
<p>容易使螞蟻足部沾滑石粉末，造成打滑</p>	<p>在麥拉片表面上方再黏合一片軟木塞墊片，並在困台旁邊置放接引平台 (A:接引區; B:軟木塞墊片)。</p>

圖四、一代與二代的螞蟻困台。

4、滑翔行為觀察：

實驗說明：實驗過程觀察到螞蟻跳躍時，其空中姿勢與具有滑翔能力的黑頭刺家蟻 (*Cephalotes atratus*) 的姿勢相似，皆是六肢朝上，而且都能棲息於樹上，因此推測矛巨山蟻也可能具有滑翔能力，如圖五，因此設計高空落下之實驗，來觀察其滑翔行為。

高空落下的實驗第一次是由 200cm 落下，如表三，感覺效果不好於是再提高落下的高度，進行從 360cm 的高度落下，360cm 落下的實驗有分作實驗組與對照組，分別都從 360cm 空中落下，觀察是否有滑翔過程，如表四，並且拍攝俯瞰視角之滑翔動態。



圖五、黑頭刺家蟻(*Cephalotes atratus*，圖 A)與矛巨山蟻(*C. carin tipunus*，圖 B)的空中姿態。

表三、200cm 落下實驗的設計。

<p>實驗器材： 矛巨山蟻、表面沾滿滑石粉之平台。</p> 	<p>實驗過程： 取 3 隻矛巨山蟻，置於沾滿滑石粉的平台 上，然後翻轉平台呈 90 度使矛巨山蟻掉 落，觀察是否有空中平移的滑翔行為，每 隻螞蟻都落下 3 次，總共 9 次的落下實驗</p>
---	--

表四、360cm 落下實驗的設計。

<p>實驗器材： 矛巨山蟻職蟻、高解析度攝影手機、 改良型螞蟻困台、CO₂ 麻醉之矛巨山 蟻。</p>	<p>實驗過程： 1、取 3 隻正常的矛巨山蟻，置於沾滿滑石粉 的平台上，然後使矛巨山蟻在 360cm 高處掉 落，觀察是否有空中平移的滑翔行為，每隻螞 蟻都落下 3 次，總共 9 次的落下實驗。 2、取一隻用 CO₂ 麻醉之矛巨山蟻，從 360cm 高處掉落，觀察其空中落下之軌跡。</p>
--	---

	
<p>(A) 準備三隻正常的矛巨山蟻職蟻 (8mm)</p>	<p>(B) 放在 3.6 公尺高空上，引誘它跳躍並觀察其跳躍過程是否有發生滑翔，並且畫出軌跡圖</p>
	
<p>(C) 準備 1 隻被 CO₂ 處理過的矛巨山蟻 (8mm)</p>	<p>(D) 放在 3.6 公尺高空上，從高處往下丟並觀察其過程是否有發生滑翔，並且畫出軌跡圖</p>

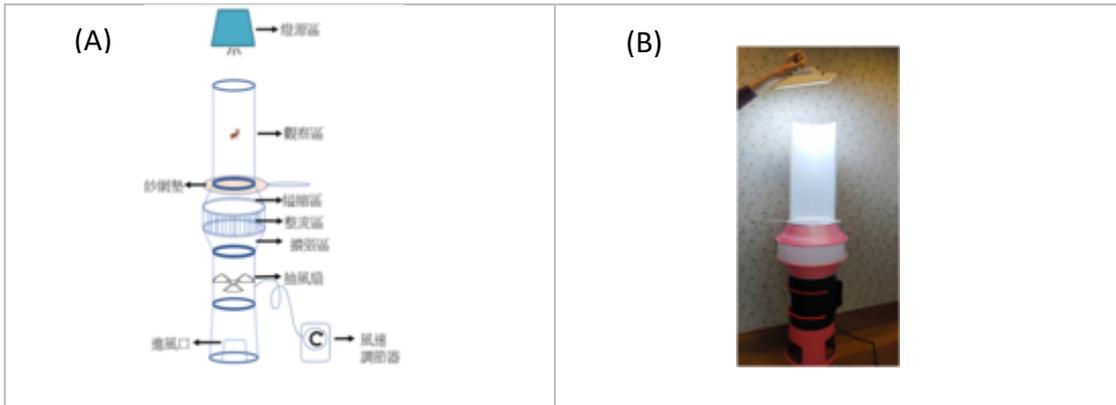
5、圓形風洞實驗設計：

實驗說明：360cm 落下的實驗雖然能看到滑翔的位置，但是無法看到空中滑翔的姿態，於是參考了國立彰化師範大學「廖佩茹」於 2018 年著作的論文「探討螞蟻職蟻的空中機動性」，發現其利用風洞實驗讓螞蟻在空中有更長時間的停留，於是參考其論文與歷年來科展的風洞研究，設計出我們自己的圓形風洞。

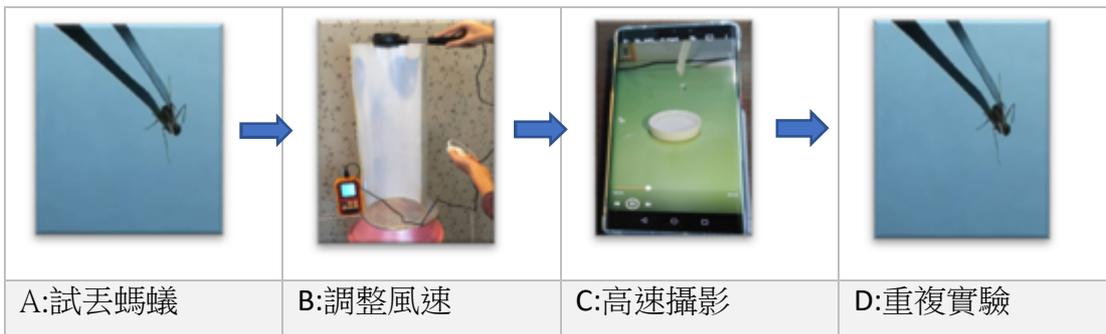
圓形風洞實驗的設計，最底下為進風口然後是風扇及調速器用來調整風扇風速。上面是擴張區，擴張區由一個底部挖空的塑膠臉盆構成用來減緩風速上面是整流區，由高約 10cm 的吸管直立排列而成，利用紗網墊在底部避免掉落，溢縮區用一個與擴張區相同的臉盆顛倒覆蓋，與整流區用熱融膠連接。風洞測試區由一個 60cm 高，直徑 20cm 的透明壓克力管構成，不鏽鋼濾網，以避免螞蟻掉落，並且方便拆卸以及移除螞蟻，如圖六。

設在每一次的試驗過程，用專門的昆蟲夾來夾住螞蟻，從風洞的觀察區上方將螞蟻丟下，試丟二至三次來測試螞蟻落下的速度，使螞蟻可以在觀察區中緩慢的降落，以風速計測量風速，接著開始正式的實驗。利用高速攝影機拍攝實驗畫面，同一隻螞蟻會重複地進行風洞掉

落實驗，對照組為大頭家蟻，如圖七。



圖六、圓形風洞組件圖(A)與成品(B)。

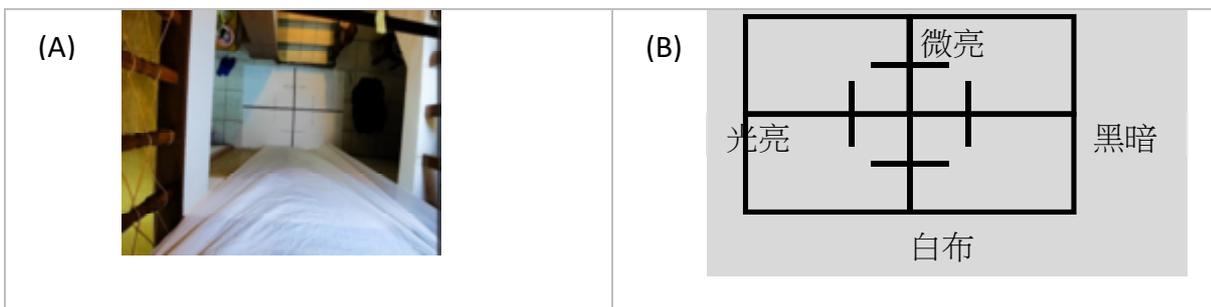


圖七、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)滑翔試驗流程圖。

6、矛巨山蟻空中降落之落點實驗：

實驗說明：彰化師範大學「廖佩茹」於 2018 年著作的論文「探討螞蟻職蟻的空中機動性」，發現滑翔蟻以視覺定位選擇降落位置，推測矛巨山蟻降落過程會選擇適當方向降落。

在白紙上畫四個等分，從中心點算起 30 公分處標上劃記，作為橫移距離的基準，以光線明亮度分作 3 個區塊，用 26 隻矛巨山蟻從 3.6 公尺落下，看螞蟻往哪個角落來降落，如圖八。

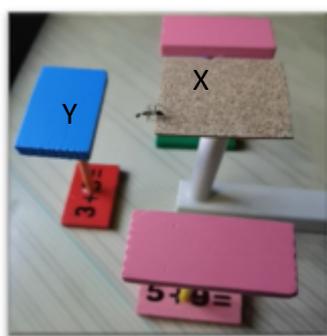


圖八、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)之落點實驗現場照片(A)與紙板示意圖(B)。

研究(二)、探究矛巨山蟻職蟻誘發跳躍的可能原因

實驗目的：從文獻蒐集可以歸納陸地生物發展出跳躍行為之目的有：**1. 逃避敵人** **2. 穿越障礙** **3. 突襲獵物**，因此設計三種實驗測試是否也能引發矛巨山蟻的跳躍，如表五。

表五、誘發矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)跳躍的相關實驗。

1、驚嚇跳躍實驗	2、受困跳躍與驚嚇之關聯	3、取食與群體取食的跳躍實驗
<p>實驗說明: 推測矛巨山蟻會因為逃避敵人而跳躍, 所以以快速敲打模仿敵人的出現。</p>	<p>實驗說明: 先前實驗證實矛巨山蟻會因為受困而跳躍, 若在更大壓力之下, 發生跳躍的時間是否有不同?</p>	<p>實驗說明: 推測矛巨山蟻會因為取食而跳躍, 此行為在單獨取食與群體覓食時, 是否有不同的策略?</p>
<p>將螞蟻放置於寵物箱內, 箱壁塗滿滑石粉避免螞蟻逃出, 用鑷子敲打箱體內外 10 分鐘, 觀察螞蟻是否有跳躍的行為, 使用 3 隻不同的矛巨山蟻, 重複進行此實驗並記錄結果, 如下圖。</p>  <p>(T: 鑷子敲擊寵物箱)</p>	<p>此實驗分為兩部分, 第一部分為單純受困, 第二部分為受困過程中用鑷子敲打困台並記錄跳躍的時間, 使用 3 隻不同的矛巨山蟻進行此實驗, 間隔一小時, 重複進行此實驗兩次並記錄結果, 如下圖。</p>  <p>(X: 塗滿滑石粉的困台; Y: 接引平台鑷子)</p>	<p>Z 處上方放置螞蟻喜愛的食物 (W), 旁邊設立一高台(Y)並確認螞蟻無法用前肢勾到困台, 高台的另一端也設立一個螞蟻困台 (X), 上面不放食物, 作為對照組。此實驗平台架設於寵物箱內, 箱外架設錄影機, 用來觀察螞蟻的取食, 單獨取食的部分有 3 隻再輪流做, 一周後再重複步驟, 群體取食部分有兩次, 一次是兩隻工蟻組成, 一次是兩隻工蟻與一隻兵蟻組成, 如下圖。</p>  <p>(X: 沒食物接引困台; Y: 高台; W: 螞蟻飼料; Z: 有食物接引困台)</p>

研究三、矛巨山蟻與跳躍螞蟻相關的身體型態的觀察比較

實驗目的：矛巨山蟻與其他跳蟻之比較, 許多文獻都記載具有跳躍能力的生物, 都有強而有力的腿, 從國外收集的文獻有提到會用腳跳的螞蟻有四屬, 如表六, 於是針對四屬的螞蟻的圖片進行腿部構造之量測。

文獻搜尋到這四屬螞蟻具有跳躍能力，上網調查發現有記載的跳蟻為碩眼山蟻屬的破壞碩眼山蟻(*G. destructor*)，牠擁有螞蟻物種最大比例的眼睛，然後是同為掠針蟻屬(*Harpegnathos*)屬底下的跳躍掠針蟻(*H. saltator*)與獵掠針蟻(*H. venator*)，主要分布在南亞洲，眼睛也相當大。牙針蟻屬(*Myrmecia*)的 *M. pilosula* 明顯具有跳躍能力，俗稱傑克跳蟻，分布於澳洲。鋸針蟻屬(*Odontomachus*)的爭吵鋸針蟻(*O. rixosus*)則是被證實能用腿及大顎跳躍。

表六、用足部跳躍的螞蟻。

屬名	碩眼山蟻屬 (<i>Gigantiops</i>)	掠針蟻屬 (<i>Harpegnathos</i>)	牙針蟻屬 (<i>Myrmecia</i>)	鋸針蟻屬 (<i>Odontomachus</i>)
分布	南美洲	南亞洲	澳洲	各大洲
生態 圖片				
體長	9~14mm	14~17 mm	12~14mm	12~15mm

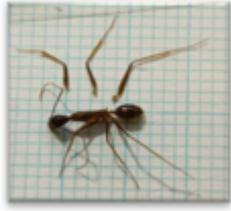
1、三種巨山蟻的腿部構造比較：

實驗說明：研究矛巨山蟻具有跳躍的能力，是否與腿部構造相關，比對矛巨山蟻與希氏巨山蟻以及臭巨山蟻腿部構造之比較。

文獻紀載會用足部跳躍的螞蟻，如表六，都具有眼睛大、體型大與腿長的特點，由於這些螞蟻台灣都沒有，只能由本土螞蟻中找出與矛巨山蟻體型相近的螞蟻來比較，如表七，由於矛巨山蟻眼睛不是很大，台灣也沒有其他大眼睛的螞蟻，因此不列入評估，腿長的特點才列入評估。螞蟻腿部構造，有6個節，依序是：基節、轉節、腿節、脛節、跗節與前跗節六處，如圖九，這些腿部的長度是否與跳躍有關係？

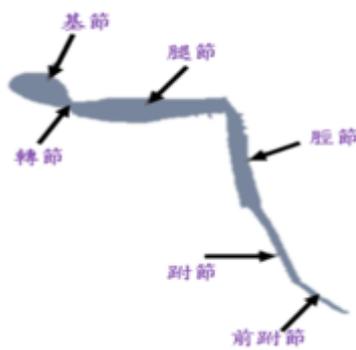
先量測螞蟻體長與重量，再以小刀分解螞蟻的腿部構造，並且以手機放大拍攝，以0.1mm刻度之透明尺量測，並記錄其各支節長度，如表八。

表七、與矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)做腿部構造比較的螞蟻種。

屬名	希氏巨山蟻 (<i>Camponotus siemsseni</i>)	臭巨山蟻 (<i>Camponotus habereri</i>)	矛巨山蟻 (<i>Camponotus carintipunus</i>)
圖片			
描述	巨山蟻屬，體型較胖，腿部看起來較短	巨山蟻屬，體型較胖，腿部看起來較長	巨山蟻屬，體型較瘦，腿部看起來較長

表八、螞蟻分解實驗過程。

		
1.先測量矛巨山蟻體長	2.測量矛巨山蟻體重	3.以小刀分解螞蟻的腿部構造，並且量測各部位的長度



圖九、螞蟻腿部之構造。

2、臭巨山蟻跳躍實驗：

實驗說明：臭巨山蟻腿部構造相似於矛巨山蟻，是否也具有跳躍能力。

矛巨山蟻的體長大約只有 8mm，與體型 10mm 的臭巨山蟻比較，腿長則是差不多，換算成相同比例的體型來看，矛巨山蟻腿長仍然比臭巨長 20%，由於差距不大，所以也抓臭巨山蟻來做困台跳躍實驗，測試臭巨山蟻是否也能跳躍。取兩隻臭巨山蟻，長度分別為 10mm、11mm 的臭巨山蟻，使用螞蟻困台加上驚嚇的方式，測試其是否跳躍，如圖十。



圖十、臭巨山蟻(*Camponotus habereri*)之跳躍

研究四、研究矛巨山蟻職蟻跳躍力學能力分析

實驗一、先前閱讀碩眼山蟻跳躍的文獻，得知可使用高速攝影機拍攝螞蟻跳躍影片，然後計算其跳躍能力，我們也使用一台具有高速攝影能力之手機(HUAWAI Mate 30 Pro)對矛巨山蟻進行拍攝，量測矛巨山蟻跳躍所需之加速時間、飛行速度、飛行距離等資料，然後用珠寶秤量測螞蟻之體重，用來計算螞蟻跳躍之力學，並與文獻蒐集到碩眼山蟻跳躍之相關資料作比對，此實驗必須使用具有自動動態捕捉與慢動作錄影之攝影機，並且需有每秒 960 畫面之錄影能力，如圖十一。



圖十一、高速攝影手機與矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)跳躍。

實驗二、我們計算矛巨山蟻的跳躍能力時，發現眷養在試管的矛巨山蟻跳躍能力似乎有變弱，因此我們進行一組野採與眷養矛巨山蟻跳躍能力之比較。

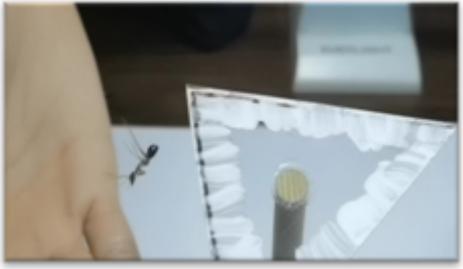
實驗三、實驗後期，我們看到有人用 Tracker 電腦影像分析軟體來做力學分析，於是將這軟體利用在矛巨山蟻的跳躍上，對螞蟻進行跳躍速度、加速度、跳躍高度與距離等分析。

伍、研究結果

研究一、研究矛巨山蟻職蟻跳躍與滑翔之行為

(一)、捕獲不同區域之矛巨山蟻，並確認其跳躍行為：

此次實驗共計取得了天然茶莊、天道清修院、汐止翠湖步道、大崙頭自然步道、汐萬路山區、白石湖與大尖山鹿窟事件紀念碑等 7 個地點共 15 隻的野生矛巨山蟻，放置於螞蟻困台上，觀察發現無論是從哪個地點抓取的矛巨山蟻，被放在螞蟻困台之後，都會開始尋找離開平台的方法，幾經嘗試後，通常會在 5~10 分鐘之間發生跳躍之行為，如圖十二。

	
不同地點抓取的矛巨山蟻放在螞蟻困台後，都會尋找離開平台的方法，通常在 5~10 分鐘間發生跳躍之行為。	對照組蟻的麥氏棘山蟻等八種螞蟻則是困在平台上超過 30 分鐘以上，也不會有跳下的動作。(X: 麥氏棘山蟻)

圖十二、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)與八種對照組螞蟻的跳躍比對。

此次實驗除了做矛巨山蟻之外，也做了其他蟻種，包括:白疏巨山蟻、高雄巨山蟻、懸巢舉尾蟻、泰勒巨山蟻、台北巨山蟻、長腳家蟻、麥氏棘山蟻與希氏巨山蟻等八種螞蟻，大部分螞蟻放上困台後，時間夠久(30 分)都想離開困台，會以跌落或墜落方式離開，只有矛巨山蟻會以跳躍方式離開困台。

(二)、觀察矛巨山蟻跳躍前後的動作與行為：

觀察矛巨山蟻整個跳躍過程的行為，分別以跳躍前、起跳動作、空中動作與落地準備的行為描述於表九~十一，在跳躍過程時，也發現矛巨山蟻若空中飛行的姿勢不正確，則具有「空中轉身」的校正能力，讓自己能順利安全六足平穩落地。

表九、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)跳躍前準備之描述。

 <p>螞蟻跳躍之前會先嘗試用攀爬方式離開平台。</p>	 <p>攀爬失敗後，一直不斷尋找出口，開始以觸角掃描附近有無物體。</p>	 <p>發現有物體距離較近，以前肢嘗試抓觸物體，嘗試失敗後，開始猶豫是否能跳躍。</p>
---	--	---

表十、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)起跳動作之描述。

 <p>螞蟻起跳時，先將自己的後四足擺置定位，此姿勢與平時站立姿勢略有不同。</p>	 <p>跳躍時使用後兩對足，前足常呈現抬起狀態，跳躍時會將兩後腿間距縮小，約剩下 3mm，呈現 M 型。</p>	 <p>跳躍時四腳同時出力，尾部會稍微抬高，加速度非常快，跳到四足全部伸直時離開地面。</p>
--	--	---

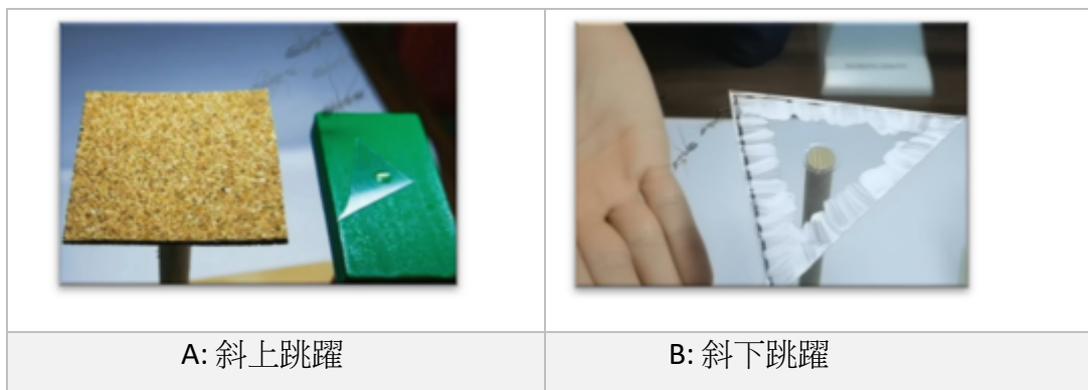
表十一、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)空中動作與落地準備之描述。

空中動作	落地準備
 <p>螞蟻跳起時，空中六足向上伸展，前肢是向前向上擺動的，後四足離開地面後也會向上擺動，後足會從正後方向上揮舞，直到與身體垂直，中足則是由側面向上擺動，最高會移動到 75 度左右的位置，此時若前足還在上方，尚未往下揮落，則會看到六足向上伸展的畫面。</p>	 <p>矛巨山蟻跳躍高度通常不會很高，大約都只有一公分左右，跳到頂點之後就會開始做出落地前的準備，六腳向下歸位，準備著陸，有時空中飛行的姿勢不正確或背部朝下，矛巨山蟻能空中轉身，六腳落地，如表十二。</p>

表十二、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)空中校正動作。



實驗過程中發現矛巨山蟻若有物體靠近，矛巨山蟻跳躍的方式也會改變有接引平台時，有時會用斜上跳躍的方式跳過平台，沒有接引平台時會直接斜下跳躍，如圖十三。



圖十三、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)跳躍的方式。

(三)、觀察矛巨山蟻從高空落下時，是否也具有滑翔行為:

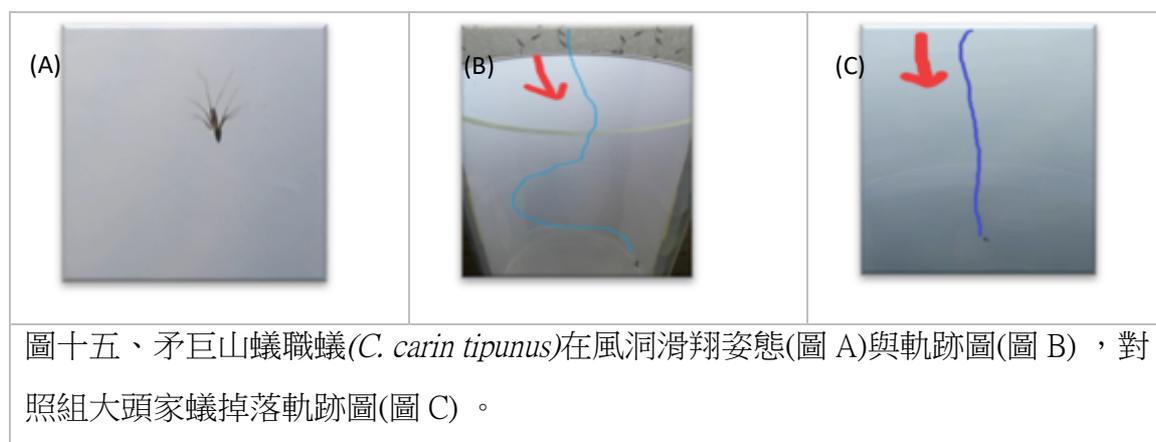
三隻矛巨山蟻在跳落的過程中都有比之前兩公尺落下的實驗有更大的平移距離，大約 30 公分左右，但其中有一隻矛巨山蟻平移距離特別長，有超過 50 公分如圖十四(A)，並且似乎有轉彎的現象。對照組的螞蟻，CO₂ 麻醉的螞蟻則呈現直線旋轉掉落，平移距離不到 10cm，此隻螞蟻無法正面朝地落地，落地時會彈起。如圖十四 (B)。



圖十四、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)滑翔軌跡圖。

(四)、觀察矛巨山蟻從風洞掉落時，滑翔的姿態:

在風洞的實驗中，用鑷子夾住矛巨山蟻，移到風洞的中央丟下，矛巨山蟻能夠迅速的將身體翻正，腹部朝下，後肢向後伸展至腹部後方，前肢維持在腹部前方，中肢則張開於腹部兩側，形成以腹部為重心、六肢伸張的下墜姿勢，並且能在落下過程中改變肢節姿態以影響風阻，藉此改變落下速度，造成在風洞實驗中有時會上下飄動的現象。對照組大頭家蟻也以相同方式落下，僅見背部朝下落地，無法翻正，也不會忽高忽低的改變風阻現象，如圖十五。

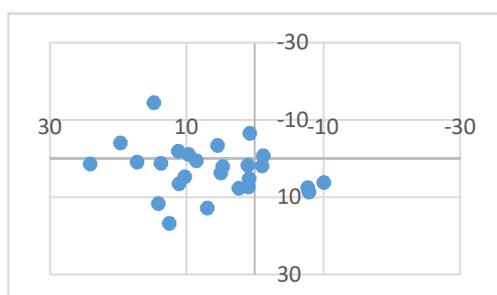


圖十五、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)在風洞滑翔姿態(圖 A)與軌跡圖(圖 B)，對照組大頭家蟻掉落軌跡圖(圖 C)。

(五)、矛巨山蟻空中降落之落點實驗:

經由此圖可以明顯看到矛巨山蟻在高空落下時會明顯靠光亮側偏移，如圖十六。

圖十六、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)3.6 公尺落點分布圖



研究二、探究矛巨山蟻職蟻誘發跳躍的可能原因

(一)、常見生物跳躍的原因探討:

文獻搜尋到一般生物會利用足部來移動、突襲獵物、逃離捕食者或是穿越障礙等，如表十三。

表十三、一般生物跳躍的原因與構造列表。

生物類別	跳躍原因	跳躍構造
跳蚤	穿越障礙	後雙足
蟋蟀	逃離捕食者	
蚱蜢	逃離捕食者	
袋鼠	移動方式	
青蛙	移動方式	
鳥類	飛行開始	
跳蛛	突襲獵物	後四足
傑克跳蟻	突襲獵物	

(二)、驚嚇跳躍的實驗:

三隻矛巨山蟻在驚嚇敲打的過程中，只見快速逃跑，沒有看到跳躍。此實驗進行了三次，每次進行三分鐘，矛巨山蟻雖然到處逃竄，就是沒有跳起來。

(三)、受困與受困驚嚇的實驗:

在單獨受困的實驗中，三隻受困的矛巨山蟻，會在受困 5~10 分鐘之間發生跳躍，平均需要花費 8 分鐘才決定跳躍，而受困又受到驚嚇的實驗，矛巨山蟻會在 32 秒左右就決定要跳躍，如圖十七。在受困與受困驚嚇實驗中，由於變因只改變一項，於是使用 excel 裡的 T. test 來作顯著水準分析，發現同一隻螞蟻在驚嚇前後的表現，其跳躍時間有顯著的改變 ($p < 0.05$)，然後把三隻螞蟻 9 次跳躍資料進行比對，也可以得到相同結果。

(四)、取食與群體取食的跳躍實驗:

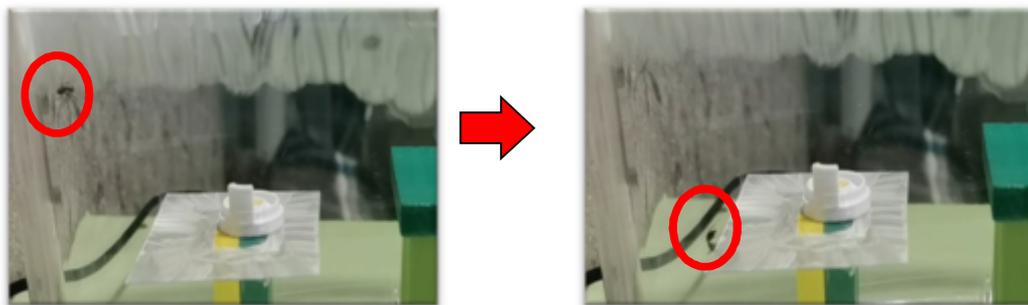
1、錄影觀察發現兩組螞蟻都有跳上平台取食，大約花費 2.2 小時才跳躍，如圖十七。



圖十七、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)取食、受困與受困驚嚇實驗所花費時間。

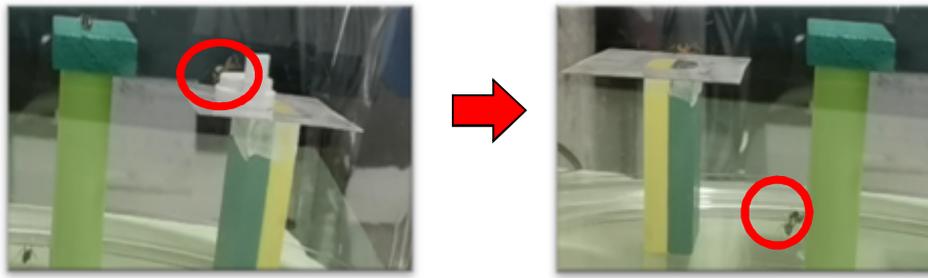
由圖十七可知，矛巨山蟻在困台上受到驚嚇時，會迅速離開。僅受困不驚嚇時，矛巨山蟻會猶豫一下子，才下定決心跳離。取食時，由於蟻蟻沒受困，因此花費更長時間探索路徑，大約 1 小時以上才會使用跳躍上平台。

2、取食需求所花的時間較久，所以有架設攝影機，發現矛巨山蟻的第三種跳躍動作，從垂直壁面上轉身跳落抓住平台邊緣，再爬上平台的畫面，如圖十八。



圖十八、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)從垂直壁面上轉身的跳躍。

3、雖然矛巨山蟻會因為取食目的而跳躍，但是群體覓食並不需要每隻矛巨山蟻都跳過平台，兩次群體覓食的實驗，一次兩隻另一次三隻，發現群體取食時，有些大工蟻都沒上過平台，也會被同伴餵哺的行為而飽食，群體取食不見得每隻矛巨山蟻都需要跳躍，如圖十九。



圖十九、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)交哺。

研究三、矛巨山蟻與跳躍螞蟻相關的身體型態的觀察比較

(一)、探討會跳躍與不會跳躍之蟻種之文獻調查:

首先我們收集網路上所有會跳的螞蟻資料，根據文獻(Dajia Ye et al. 2020)搜尋到碩眼山蟻屬(*Gigantiops*)、掠針蟻屬(*Harpegnathos*)與牙針蟻屬(*Myrmecia*)這三屬螞蟻以及文獻(Sorger 2015)找到鋸針蟻屬(*Odontomachus*)用腳跳躍的螞蟻，總共找出 4 屬 12 種有文獻記載能跳躍的螞蟻，如表十四，從 AntWiki 尋找具有比例尺的圖片上量測各種跳蟻之腿長。

表十四、文獻有記載能跳躍的螞蟻。

碩眼山蟻屬(<i>Gigantiops</i>) 1 種	破壞碩眼山蟻(<i>G. destructor</i>)
掠針蟻屬(<i>Harpegnathos</i>) 2 種	跳躍掠針蟻(<i>H. saltator</i>)以及獵掠針蟻(<i>H. venator</i>)
鋸針蟻屬(<i>Odontomachus</i>) 1 種	爭吵鋸針蟻(<i>O. rixosus</i>)
牙針蟻屬(<i>Myrmecia</i>) 8 種	黑帶牙針蟻(<i>M. nigrocincta</i>)、毛斑牙針蟻(<i>M. pilosula</i>)、班克斯牙針蟻(<i>M. banksi</i>)、黃腳牙針蟻(<i>M. fulvipes</i>)、克羅斯蘭牙針蟻(<i>M. croslandi</i>)、克哈金斯牙針蟻(<i>M. haskinsorum</i>)、今井牙針蟻(<i>M. imaii</i>)、孤雌牙針蟻(<i>M. impaternata</i>)

另外我們也在非正式文獻中(百度百科)找到兩種巨山蟻(*Camponotus*)有跳躍的行為，包括: 和平巨山蟻(*C. mitis*)與擬光腹巨山蟻(*C. pseudoirritans*)，如果再加上我們發現的台灣特有亞種矛巨山蟻(*C. carin tipunus*)與台灣特有種臭巨山蟻(*C. habereri*)，目前總共發現有 16 種會跳蟻種，我們利用 AntWiki 上的螞蟻圖片的比例尺對螞蟻的體型進行量測結果如表十五，其中部分螞蟻沒有拍到腳或沒有比例尺無法量測。

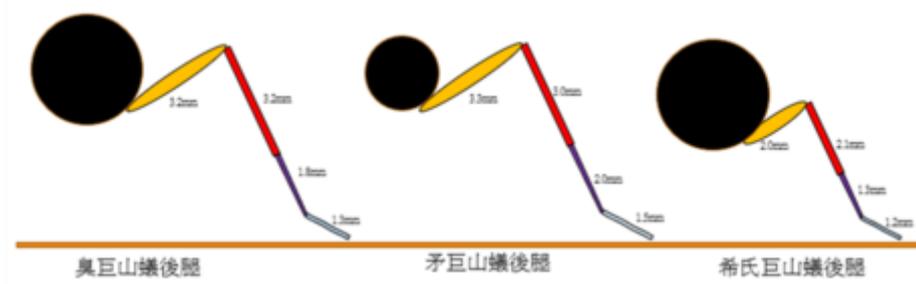
表十五、AntWiki 尋找具有比例尺的圖片上量測各種跳蟻之腿長。

螞蟻名稱	個體長度(mm)	前腿長度(mm)	中腿長度(mm)	後腿長度(mm)
破壞碩眼山蟻 <i>Gigantiops destructor</i>	9	9	10	14
毛斑牙針蟻 <i>Myrmecia pilosula</i>	9.5	7.8	7.6	10.3
跳躍掠針蟻 <i>Harpegnathos saltator</i>	12.5	8.6	8.5	12
獵掠針蟻 <i>Harpegnathos venator</i>	13	9.4	8.4	12.2
高山鋸針蟻 <i>Odontomachus rixosus</i>	10.9	8	9	11

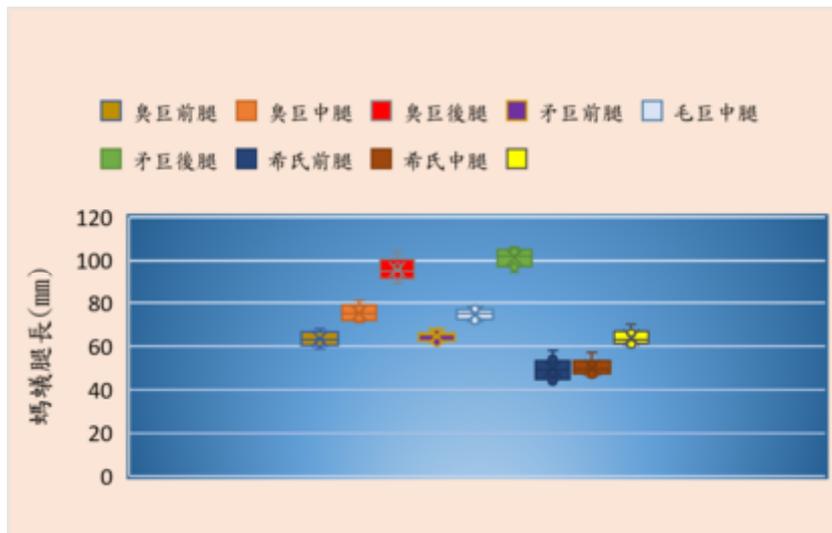
比對這些螞蟻，我們發現有兩個共同特徵就是(一)體型大：所有會跳的蟻種體型都有 9mm 以上，屬大型蟻。(二)後腿長：後腿的比例都很長，網路上跳躍螞蟻的資料非常少，我們找到了一篇 2023 年 3 月份發表的最新文獻(Lazzat Aibekova et.al,2023)，此篇文獻專門研究會跳與不會跳的螞蟻之間的身體型態差異，此文獻除了指出跳躍蟻種後腿都比身體長之外，更使用電腦斷層掃描發現會跳的螞蟻其腹部的肌肉特別發達。

(二)、矛巨山蟻、希氏巨山蟻與臭巨山蟻的腿部構造之比對：

矛巨山蟻的前腿、中腿與後腿都明顯長於其他蟻種，如圖二十與二十一，矛巨山蟻體長大約只有 8mm，但是與體長同為 8mm 的希氏巨山蟻比較，腿長幾乎是希氏巨山蟻的 1.5 倍，然而與體型 10mm 的臭巨山蟻比較，腿長則是差不多，換算成相同比例的體型來看，矛巨山蟻腿長仍然比臭巨長 20%。矛巨山蟻前中後腿長的比例約為 1:1.15:1.56，體長比後腿為 1:1.26，而不會跳的希氏巨山蟻前中後腿比例為 1:1.02:1.29，體長比後腿長只有 1:0.8，而臭巨的前中後腿比例為 1:1.19:1.5，與矛巨相當，但體長比後腿長則是 1:0.96，介於矛巨與希氏之間。



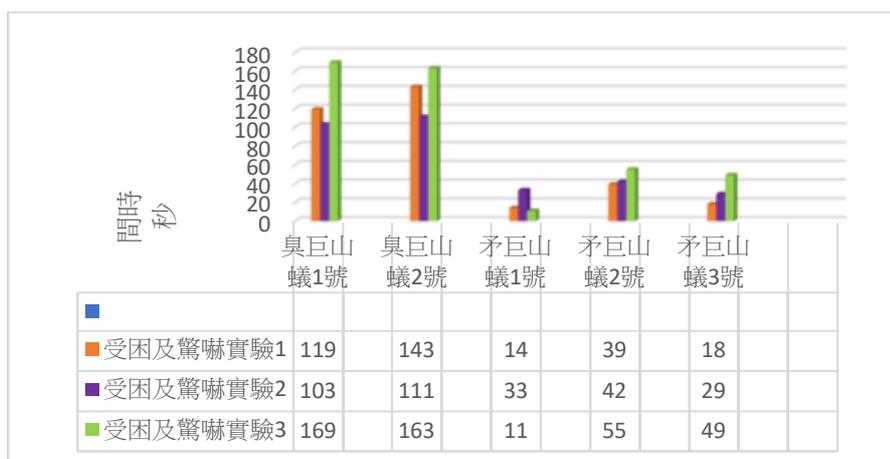
圖二十、臭巨山蟻(*C. habereri*)、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)與希氏巨山蟻(*C. siemsseni*)之後腿長度示意圖。



圖二十一、臭巨山蟻(*C. habereri*)、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)與希氏巨山蟻(*C. siemsseni*)之後腿長度盒鬚圖。

實驗三、測試臭巨山蟻是否也具有跳躍能力：

8mm 矛巨山蟻與體型 10mm 的臭巨山蟻比較，腿長則是差不多，換算成相同比例的體型來看，矛巨山蟻腿長仍然比臭巨長 20%，由於差距不大，所以我們也取兩隻臭巨山蟻來做困台加上驚嚇的實驗，每隻跳三次，共進行 6 次，臭巨山蟻均有跳躍，平均跳躍時間大約是 125 秒，由於變因只有矛巨山蟻和臭巨山蟻這一項，於是使用 excel 裡的 T. test 來作顯著水準分析，發現臭巨山蟻和矛巨山蟻在驚嚇前後的表現，其跳躍時間有顯著的差異($p < 0.05$)，如圖二十二，受困與驚嚇實驗的時間花費比矛巨山蟻久，經過此次實驗，意外的發現到，原來台灣不只是矛巨山蟻，連臭巨山蟻也會跳，所以目前台灣共有 2 種可以用足部跳躍的巨山蟻。

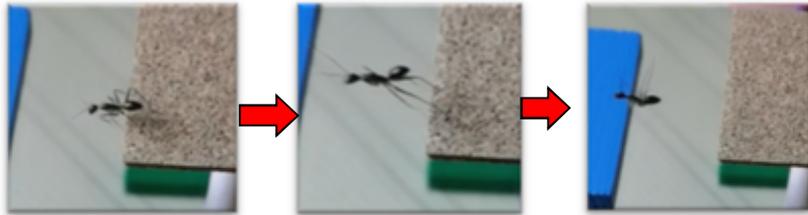


圖二十二、臭巨山蟻(*C. habereri*)與矛巨山蟻(*C. carin tipunus*)受困驚嚇實驗所花費的時間。

研究四、研究矛巨山蟻跳躍力學之分析

實驗一、計算力學並與文獻中碩眼山蟻之力學做比較。

使用 HUAWEI Mate 30 Pro 以慢動作 32 倍速 960FPS 高速攝影，擷取跳躍動作，包括：起跳前、起跳動作、飛行 8mm，如圖二十三。



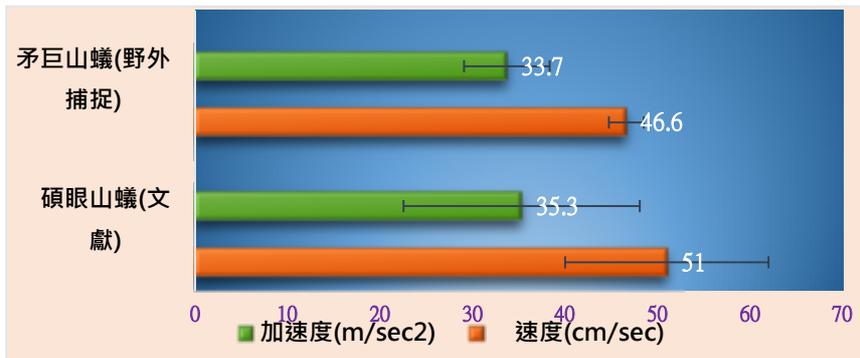
圖二十三、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)跳躍位置圖。

- (一)、觀察斜上跳躍的矛巨山蟻職蟻起跳之瞬間動作，從屁股開始移動到中腳離地，總共經歷 12 畫面，換算成 $12/960=12.5\text{ms}$ 。
- (二)、飛行一個身長的時間約 16 幅畫面，換算成 $16/960=16.67\text{ms}$ ，體長約 0.8cm
- (三)、計算其飛行速度，公式為 $V=S/T$ ， $V=0.8/0.0167$ ， $V(\text{飛行速度})=48\text{cm/s}$ 。
- (四)、計算其平均加速度，公式為 $A=V/T$ ， $A=48/0.0125$ ， $A(\text{加速度})=3840\text{cm/S}^2$
- (五)、使用珠寶秤可以測得此矛巨山蟻之重量大約 0.009g。
- (六)、計算其出力，公式為 $F=M*A$ ，推估其出力應為 $0.009*3840=34.56$ 達因。
- (七)、換算成公克， $1\text{g}=980$ 達因，計算出產生這種推力約需 0.035gw 的力道，大約是此矛巨山蟻體重的 4 倍。

查閱碩眼山蟻跳躍的文獻，如表十六，碩眼山蟻體型約 11mm，取收腹組處理前的數據做比較，其飛行速度 $0.51\pm 0.11 \text{ m/S}$ ，加速度 $35.3\pm 12.8 \text{ m/S}^2$ ，矛巨山蟻的起飛速度大約 0.48m/S，加速度為 38.4m/S^2 可以發現矛巨山蟻數據與碩眼山蟻的數據相差不遠，如圖二十四。

表十六、碩眼山蟻(*Gigantiops destructor*)力學

多變的	操縱	處理前平均值±SD (N, n)	處理後平均值±SD (N, n)	線性混合效應模型			
				均值差±SD	t-值	卡方值	P值
腹部旋轉 (°)	收腹	27.7±15.2 (8, 54)	2.4±6.5 (8, 53)	-23.6±2.2	-10.9	80.8	<0.0001*
	腳控	32.8±12.1 (7, 41)	26.9±14.7 (7, 37)	-6.2±2.8	-2.2	4.8	0.03
	訓練控制	27.0±14.3 (6, 38)	37.0±12.1 (6, 34)	10.3±2.9	3.6	11.6	0.0006*
起飛速度 (米/秒)	收腹	0.51±0.11 (8, 54)	0.46±0.12 (8, 53)	-0.05±0.02	-3.1	9.4	0.002*
	腳控	0.42±0.06 (7, 41)	0.41±0.05 (7, 37)	-0.005±0.01	-0.4	0.15	0.7
	訓練控制	0.43±0.06 (6, 38)	0.44±0.07 (6, 34)	0.01±0.01	0.7	0.54	0.46
加速度 (米/秒 ²)	收腹	35.3±12.8 (8, 54)	35.6±21.0 (8, 53)	0.29±3.4	0.09	0.008	0.93
	腳控	28.1±8.9 (7, 41)	24.2±6.6 (7, 37)	-3.9±1.8	-2.2	4.8	0.03
	訓練控制	28.0±8.5 (6, 38)	28.8±20.7 (6, 34)	0.9±3.6	0.3	0.06	0.81



圖二十四、矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)與碩眼山蟻(*Gigantiops destructor*)力學比較

實驗二、人工飼養與野採矛巨山蟻的力學比較。

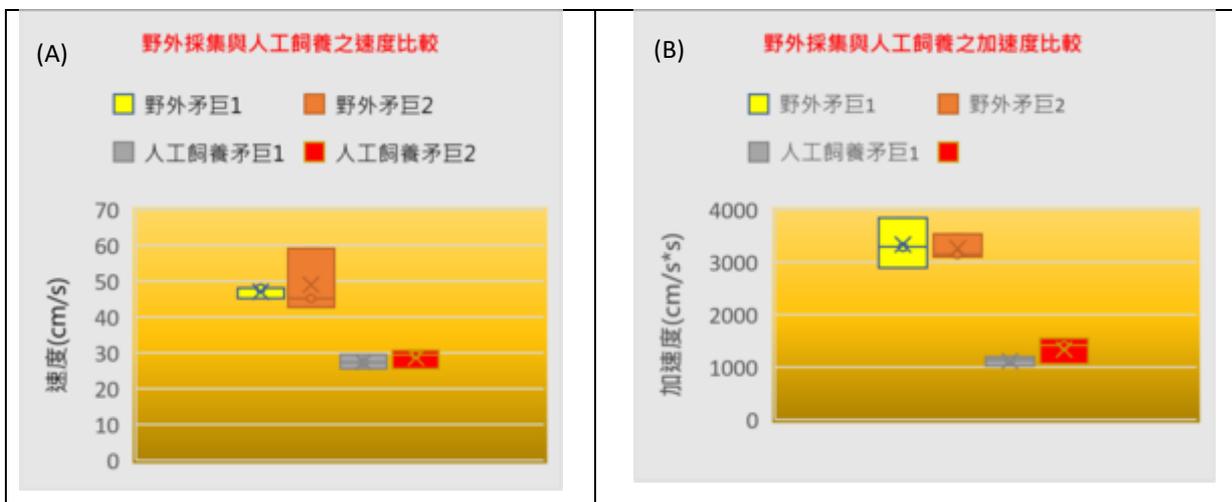
人工飼養 2 個月之矛巨山蟻，與野採矛巨山蟻的影片，利用 Excel 取得平均值，如表十七。

表十七、野外採集與人工飼養矛巨山蟻職蟻之跳躍力學分析(表 A: 野外; 表 B: 人工)。

野外標本					
	量測一	量測二	量測三	平均	平均標示誤差
體重(g)	0.009	0.009	0.009		
加速畫距(pages)	12	14	15		
飛行畫距(pages)	16	16	17		
加速時間(s)	0.0125	0.0146	0.0156	0.0142	0.0142±0.0014
飛行時間(s)	0.0167	0.0167	0.0177	0.0170	0.0170±0.0007
速度(cm/s)	48.00	48.00	45.18	47.06	47.06±1.88
加速度(cm/s ²)	3840	3291	2991	3341	3341±450
出力計算(g)	0.0353	0.0302	0.0266	0.0307	0.0307±0.0041
野外標本2					
	量測一	量測二	量測三	平均	平均標示誤差
體重(g)	0.008	0.008	0.008		
加速畫距(pages)	13	14	16		
飛行畫距(pages)	18	17	13		
加速時間(s)	0.0135	0.0146	0.0167	0.0149	0.0149±0.0017
飛行時間(s)	0.0188	0.0177	0.0135	0.0167	0.0167±0.0031
速度(cm/s)	42.67	45.18	59.08	48.97	48.97±10.1
加速度(cm/s ²)	3151	3098	3545	3264	3264±280
出力計算(g)	0.0257	0.0253	0.0289	0.0266	0.0266±0.0023

人工標本1					
	量測一	量測二	量測三	平均	平均標示誤差
體重(g)	0.008	0.008	0.008		
加速畫距(pages)	22	24	25		
飛行畫距(pages)	28	30	26		
加速時間(s)	0.0229	0.0250	0.0260	0.0247	0.0247±0.0017
飛行時間(s)	0.0292	0.0313	0.0271	0.0292	0.0292±0.0021
速度(cm/s)	27.43	25.60	29.54	27.52	27.52±1.92
加速度(cm/s ²)	1197	1024	1134	1118	1118±94
出力計算(g)	0.0098	0.0084	0.0093	0.0091	0.009±0.0008
人工標本2					
	量測一	量測二	量測三	平均	平均標示誤差
體重(g)	0.008	0.008	0.008		
加速畫距(pages)	20	19	23		
飛行畫距(pages)	26	25	30		
加速時間(s)	0.0208	0.0198	0.0240	0.0215	0.0215±0.0017
飛行時間(s)	0.0271	0.0260	0.0313	0.0281	0.0281±0.0021
速度(cm/s)	29.54	30.72	25.60	28.62	28.62±2.1
加速度(cm/s ²)	1418	1552	1069	1346	1346±206
出力計算(g)	0.0116	0.0127	0.0087	0.0110	0.011±0.0017

對野外採集與人工飼養的矛巨山蟻做速度與加速度計算的比較，並做出盒鬚圖，發現野外採集的力量優於人工飼養的，如圖二十五。



圖二十五、矛巨山蟻野外採集與人工飼養之盒鬚圖(圖 A: 速度; 圖 B: 加速度)。

實驗三、Tracker 分析矛巨山蟻之力學。

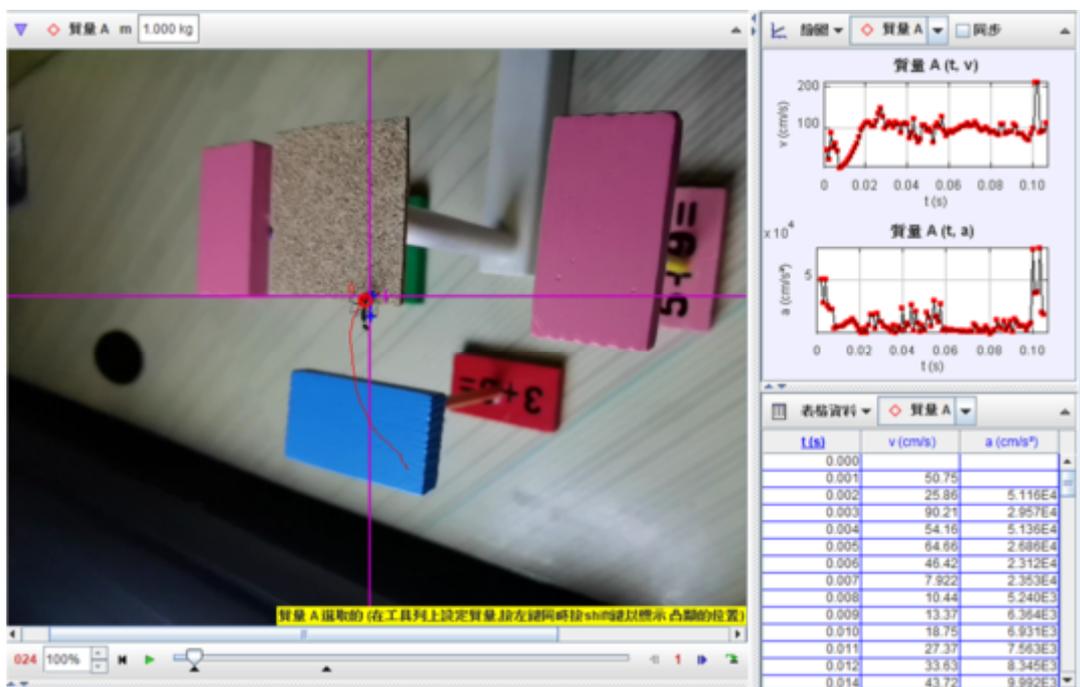
1、以 Tracker 分析矛巨山蟻工蟻平跳的影片：

由於 Tracker 不支援垂直方向的影片，因此影片被翻倒過來，不過 X-Y 軸雖然對調，並不會影響速度與加速度計算的結果，我們追蹤其腹部跳躍初期的加速度取 0.002 秒到 0.012 秒的加速區間做平均，得到平均加速度約為 3931cm/S^2 ，離地時速度約為 47.4cm/S ，此兩數據與我們人工計算接近，如圖二十六。

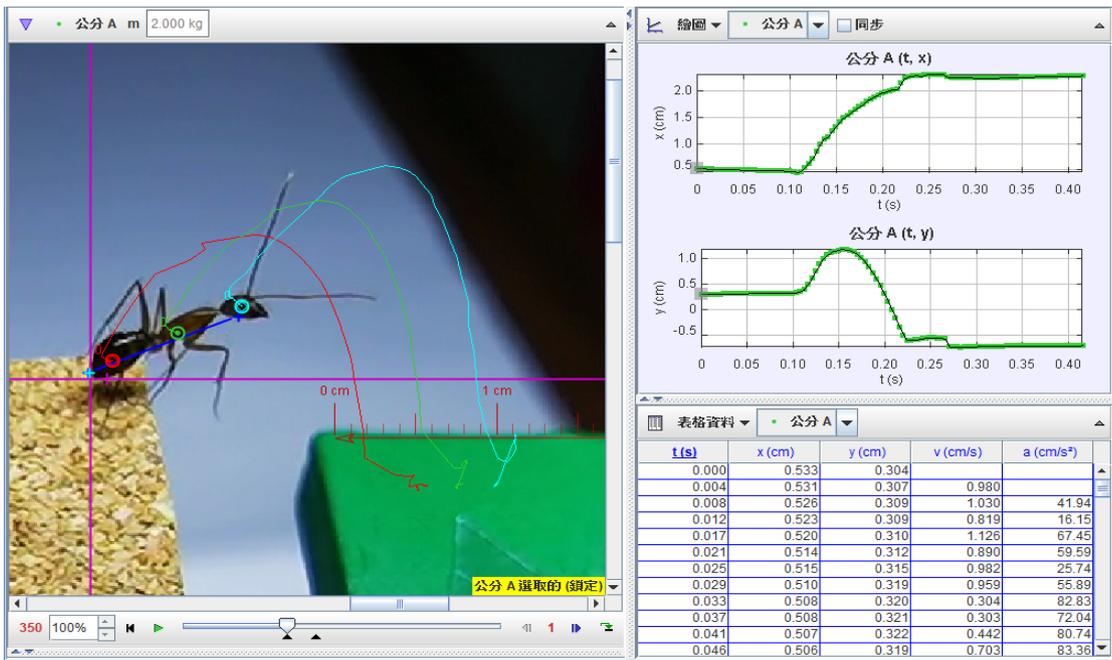
2、以 Tracker 分析矛巨山蟻大工拋物線跳躍的影片：

我們使用 Tracker 追蹤矛巨山蟻頭部以及腹部的兩質點，然後設立用兩質點建立質心，用來代表矛巨山蟻運動的質心(綠色線條表示)，可以清楚量測出其跳躍高度為 10mm，水平運動距離約 20mm，起跳到落下只花費了 0.11 秒，如圖二十七。

我們掌握了 Tracker 的技術後，發現計算矛巨山蟻的運動力學變得簡單許多，可以先把影片拍攝完成後，在從影片中找出可參考尺寸的物體，以校正影片中的物體大小，然後作力學計算，因此就算是以前已經拍攝完成的影片也能拿出來做力學分析。



圖二十六、以 Tracker 分析矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)跳躍速度與加速度。



圖二十七、Tracker 分析矛巨山蟻職蟻(*C. carin tipunus*)跳躍高度、跳躍時間與水平移動距離。

陸、問題與討論

一、矛巨山蟻跳躍與滑翔之行為

(一) 矛巨山的跳躍行為，在工蟻和兵蟻身上有沒有差別

根據我們的觀察，在受困的情況下是沒有差別，到一定的時間都會跳躍。同伴覓食的情況下，兵蟻比較不喜歡跳躍，牠會在下面等待覓食的工蟻，儲存工蟻的食物。

(二) 矛巨山會不會選擇跳躍的方式與使用時機

矛巨山蟻會依當時自身所處的地形，與想要跳過去的目的地來決定自己跳躍方式，觀察到跳躍方式有拋物線式、斜下向前跳躍與從牆壁上跳下的方式。

(1) 斜下跳躍：當矛巨山蟻想要逃離受困的地點時就會使用這種跳法，矛巨山蟻即使沒有看到目標地，還是會往下跳，應該是因為其本身具備有"空中定向落下"的滑翔能力。矛巨山蟻在落下的過程中，如果持續落下，則前肢會移動到朝下的位置，保護頭部。我們在做 200cm 的落下實驗時，矛巨山蟻總是前肢先著地，落速度更快時，矛巨山蟻會再調整身體平行度，使身體進行平移滑翔，大大增加了身體的平移距離，我們在 360cm 的落下實驗時，總是在

接近地面時看到快速平移的滑翔行為。

(2)斜上跳躍：矛巨山蟻只有當跳躍之目標距離較短，看得見目標物，且有把握跳的過去時，才會使用這種拋物線式的跳躍。我們發現，困台與接引平台之間間距小於 2 公分時，矛巨山蟻才會有意願用此跳法，如果平台間隙小於 1.5 公分，矛巨山蟻可能直接攀爬過去。

(3)垂直壁面轉身跳躍：矛巨山蟻爬在樹幹上，或垂直的壁面上時，若想要跳到附近的樹葉或平台上時，會採取該跳躍方式，從壁面直接躍起，然後設法攀附下方目標物。

(三)跳躍與滑翔行為對螞蟻棲地生存的可能優勢

會跳躍的螞蟻如果在樹上跳躍很容易從高空掉落，若牠們有滑翔的技能就能減少許多傷害。查到的論文指出，樹棲型與半樹棲型的螞蟻大多都具有滑翔力，但土棲型的螞蟻則沒有這種能力，我們所發現 2 種跳蟻，臭巨山蟻為樹棲型，矛巨山蟻為半樹棲型，都具有滑翔能力。

(四)矛巨山蟻跳躍過程的描述

矛巨山蟻完成一次性地跳躍，過程可以分成幾個階段來描述，包括：跳躍前準備、起跳動作、空中動作與落地準備。

1、跳躍前準備：

矛巨山蟻會做許多確認的動作，包括四周繞一繞，確認有無出路，用觸角掃描，或是嘗試用前肢勾碰等。直到確定非跳不可時，大約會花費五到十分鐘的才決定跳躍。

2、起跳動作：矛巨山蟻會先將自己的後四足調整到最適合跳躍的位置。相較於平時站立的姿勢，後兩腿之間間距會更短，呈現英文字母 M 型的狀態，這樣才能在跳躍時將腿推伸到最大長度，以獲取最大的加速時間。

3、空中動作：若四足都在平面上，會以斜上跳躍方式跳起，離地後，後腳迅速由正後方向上擺動到與身體垂直，而中腳朝外向上擺動，若此時前腳沒有揮舞結束，仍然朝上，就會看到螞蟻「六肢朝上」的畫面。「六肢朝上」的動作很相似於空中定向落下，滑翔蟻的空中姿態，但矛巨山蟻此時會開始準備滑翔與落地的姿勢，讓自己可以安全的六腳落地。

4、落地準備：矛巨山蟻跳躍高度通常不會很高，大約都只有一公分左右，跳到頂點之後就

會開始做出落地前的準備，六腳向下歸位，準備著陸。在跳躍的過程之中，如果沒有正面朝下，矛巨山蟻也都能像貓一樣，迅速的翻轉身軀，使六肢朝下，完成安全落地之動作，其動作非常迅速，大部分的跳躍都在 0.2 秒之內完成。

二、探究矛巨山蟻誘發跳躍的可能原因之討論

(一) 矛巨山蟻受驚嚇時為何不跳躍

我們實驗的結果發現矛巨山蟻都是經過思考才跳躍的，受驚嚇的過程中可能根本無法思考，所以以逃跑或亂竄為優先。有可能矛巨山蟻經過思考後認為跳躍這個動作反而更容易受到傷害，或者是讓自己掉落於危險地形之中，故不採取跳躍的行動。

(二) 矛巨山蟻跳躍前需要花多少時間思考

我們把螞蟻思考跳躍的時間分成四個等級：1-3 秒鐘、10-40 秒、5-10 分鐘以及 1 個小時以上，我們推測矛巨山蟻跳躍的思考時間與當時的壓力有關，壓力越大就越快決定是否要跳躍。

1、「1-3 秒鐘」的不思考跳躍：目前只出現在受到大量驚嚇，受傷，或者不明原因失去攀爬能力時，螞蟻進入緊張狀態時，可以看到矛巨山蟻只要一到邊緣，就毫不考慮，直接跳了。

2、「10-40 秒」的緊急跳躍：發生於受困在平台上，然後又受到驚嚇時，牠會在兩三次嘗試攀爬失敗時，就緊急跳離平台。

3、「5-10 分鐘」思考的跳躍狀況：就是螞蟻困在平台上時仍會不斷尋找出路，直到知道自己受困了，大約會花費 5-10 分鐘尋找出路後才會決定跳躍。

4、「1 個小時以上」的思考跳躍狀況：矛巨山蟻在覓食時，屬於較沒壓力的狀態，當它們發現食物卻取不到時，不會立刻跳躍，大約經過 1 個小時的探索，才會做出跳躍的動作。

(三)、矛巨山蟻的兵蟻較工蟻更不易出現跳躍行為

體重越重越容易摔傷，而且矛巨山蟻的兵蟻在覓食的過程中經常扮演儲存食物的角色，牠們不需要冒著生命危險去穿越各種障礙物。當工蟻攜帶食物時，也會找兵蟻幫忙攜帶。

三、不同因素與螞蟻跳躍能力關聯性

(一)腿長與跳躍的關聯性

腿長度越長，跳躍時可以獲得更多的加速距離，加速距離越長，越能把身體加到更高速脫離地面。腿的長度太長，也會造成力矩變長，不易施力，所以腿的長度也不是越長越好。

(二)視力對跳躍能力的關聯性

雖然視力不會直接影響跳躍能力，但是對於判斷需不需要跳躍有決定性的影響，如果螞蟻看不到目標物，應該不會去跳。矛巨山蟻跳躍前也會評估距離的遠近，如果矛巨山視力非常好，應該更有意願跳躍。

四、矛巨山蟻跳躍力學分析之討論

矛巨山蟻跳躍能力與碩眼山蟻之比較

從螞蟻的尺度來看，碩眼山蟻雖然比矛巨山蟻大 30%，體重也應該會大上 1 倍，我們目前拍到可以做為速度計算的影片不多，日後有更的資料後應該能做比對。我們抓取矛巨山蟻的過程中，有時會看到矛巨山蟻跳到 5 公分高度，雖然沒有拍攝到，但也代表矛巨山蟻跳躍能力還是有可能更好。

柒、結論

研究一、探究矛巨山蟻之跳躍與滑翔能力：

- (一)、矛巨山蟻確實會跳躍，這種跳躍行為普遍存在於矛巨山蟻的族群中。
- (二)、觀察到矛巨山蟻有各種不同的跳躍方式，會依狀況自行選擇。
- (三)、矛巨山蟻在跳躍的過程之中，如果沒有正面朝下，也能迅速的翻轉身軀，使六肢朝下，完成安全落地之動作。
- (四)、矛巨山蟻也具有滑翔的能力，使牠們從高空掉落時，減少許多傷害。
- (五)、矛巨山蟻在落下的過程中，應該也能控制掉落的方向。

研究二、探究矛巨山蟻誘發跳躍的可能原因之結論：

- (一)、矛巨山蟻可能不會因為突襲獵物，逃避敵人而跳躍，從我們的實驗得知矛巨山蟻的跳

躍行為多數與穿越障礙有關。

(二)、矛巨山蟻的跳躍與當時理的壓力可能有相關性，壓力越大就越快決定是否要跳躍。

研究三、探討會跳躍之蟻種與不會跳躍之蟻種，身體型態上之差異

(一)、世界上大部分的跳蟻，除了腿長之外，眼睛也都很大，可能跟狩獵的行為有關。

(二)、巨山蟻屬的跳躍行為，應該也是螞蟻跳躍能力進化上的獨立分支，直到 2023 年的螞蟻跳躍相關文獻，都沒有發現巨山蟻屬的跳躍文獻。

(二)、目前台灣所發現到會跳的螞蟻有兩種，分別為矛巨山蟻及臭巨山蟻。

(二)、這幾隻螞蟻的共同特徵是體型大，腿長，尤其後腿。

(三)、日後可以研究巨山蟻屬裡面是否有更多能跳的蟻種，與矛巨山蟻做比較。

研究四、關於矛巨山蟻跳躍力學分析之結論:

(一)、矛巨山蟻跳躍的初速度大約是 48.2cm，加速度為 38.56m/S²，出力約 0.035gw，大約是體重的 4 倍。其跳躍的能力數據與碩眼山蟻差不多。

(二)、將螞蟻困在狹小的空間中眷養，也的確會弱化螞蟻的跳躍能力。

(三)、以電腦分析螞蟻跳躍的影片，能快速精確的看到螞蟻跳躍的相關狀態，位置速度等，對於昆蟲運動的研究有很大的幫助。

捌、參考資料及其他

- 1、廖佩茹(2018)。探討螞蟻職蟻的空中機動性(膜翅目：蟻科)。國立彰化師範大學
- 2、Mostafa R.A.Nabawy et al.(2018)。Energy and time optimal trajectories in exploratory jumps of the spider *Phidippus regius*。 *Scientific Reports* , May 8(1):7142。
- 3、S. N. Patek. et al. (2006)。 Multifunctionality and mechanical origins: Ballistic jaw propulsion in trap-jaw ants。 *Proc Natl Acad Sci U S A* , Aug 103(34): 12787 – 12792。
- 4、DajiaYe et al.(2020)。 Effects of Abdominal Rotation on Jump Performance in the Ant *Gigantiops destructor*。 *Integrative Organismal Biology* , 2(1):1-10。
- 5、Lazzat Aibekova et al.(2023)。 Parallel and divergent morphological adaptations underlying the evolution of jumping ability in ants。 bioRxiv March 12。
- 6、https://antwiki.org/wiki/Welcome_to_AntWiki。
- 7、<https://ant-keeper.com/how-many-legs-do-ants-have>。
- 8、<https://entomologytoday.org/2015/12/01/trap-jaw-ant-jumps-with-its-legs-or-its-mandibles>。
- 9、<http://gaga.biodiv.tw/9708bx/933.htm>。

【評語】 030303

優點：

探究螞蟻的跳躍能力是一個非常有趣的主题，此研究提供對台灣特有亞種「矛巨山蟻」跳躍和滑翔行為的詳細觀察和資料收集。此作品展現研究者對螞蟻的高度熱情，作者以長時間觀察並透過影像分析將矛巨山蟻職蟻的跳躍過程加以描述定義，並進一步透過實驗設計證實螞蟻的跳躍表現常發生在受困驚嚇時。此外將矛巨山蟻與國外其他具跳躍能力的螞蟻進行腿部構造比較，試圖找出台灣其他可能具跳躍能力的探究精神十分值得肯定，最後再分別將野外與人工飼養的矛巨山蟻與文獻中的碩眼山蟻進行跳躍力學的比對，研究架構完整，期待此作品能夠開啟台灣後續研究螞蟻跳躍之精采研究。

建議及檢討：

1. 對於進行特殊處理或使用特定方法的螞蟻，建議在方法部分中解釋其使用的原因和目的。這樣的說明可以讓讀者更好地理解為何需要進行特殊處理或使用特定方法，以及這些處理和方法對研究結果的影響。

2. 跳躍實驗設計部分，以 3 隻 3 次方式進行，此部分的樣本數目宜再增加隻數，同時因台離開時間應紀錄。
3. 建構人工條件以觀察矛巨山蟻的罕見、非自然行為，建議應說明此條件之優勢及劣勢。
4. 討論部分” 我們實驗的結果發現矛巨山蟻都是經過思考才跳躍的” 屬於未足夠支持資料之臆測推論，應加以實驗驗證。

作品海報

台灣矛巨山蟻職蟻跳躍
及滑翔能力之行為研究



摘要

「跳躍」行為在螞蟻物種中很罕見，300 屬螞蟻只有 4 個屬能用腿部跳躍，台灣過去並沒有螞蟻跳躍記載的文獻。本研究記錄台灣特有亞種「矛巨山蟻」(*Camponotus carin tipunus*) 職蟻之跳躍與滑翔動作行為，像是跳前觀察與跳躍形式、空中動作、是否具有空中校正的能力，並利用風洞觀察其空中滑翔姿態，證明其具有「定向空中降落」的滑翔能力。也探討引發矛巨山蟻跳躍之原因，並對矛巨山蟻腿部構造進行分析，與其他螞蟻作比對，找出更多本土的跳躍蟻種。最後用高速攝影拍攝起跳的動作，估算其跳躍力學，與國外的碩眼山蟻跳躍文獻做比較，找出螞蟻跳躍的出力與速度，並且使用分析其跳躍能力。

壹、研究動機

在小學六年級做螞蟻獨立研究時，其中有項實驗是探討螞蟻的爬坡能力，忽然發現有隻螞蟻竟然會跳躍，完全顛覆我的想法，一直認為螞蟻只會行走。當時我觀察過的螞蟻已達五十多種，並沒有瞧見過會跳躍的螞蟻，這一項觀察也讓我查遍台灣研究螞蟻的相關資料，「螞蟻跳躍」這項議題在台灣並沒有人做過相關研究，在研究一個問題的過程出乎意料又發現另一個問題，於是開啓了我另一個研究的動機。

貳、研究架構圖



參、研究設備與器材

蟻種	困台設計的材料	解剖螞蟻的材料	風洞設計的材料	其他相關器材
矛巨山蟻 (<i>Camponotus carin tipunus</i>)	滑石粉 透明麥拉片 木棒	方格紙(1mm) 鑷子 刀片	LED 燈源 吸管整流板 強力抽風扇	相機 試管 螞蟻專用飼料
臭巨山蟻 (<i>Camponotus habereri</i>)	木片 軟木塞墊片 白膠	精密尺 (0.1mm) 精密電子秤 (1mg)	圓筒形壓克力 高速攝影手機 (HUAWEI Mate 30 Pro)	寵物箱 碼表 二氧化碳 錄影機
希氏巨山蟻 (<i>Camponotus siemsseni</i>)	水彩筆		測速器 紗網 濾網	計算機 高速攝影手機 (HUAWEI Mate 30 Pro)
麥氏棘山蟻 (<i>Polyrhachis illaoudata</i>)			垃圾桶底座 洗臉盆*2	昆蟲夾子



第一與第二代困台設計



容易造成螞蟻足部沾滑石粉末，造成打滑



在麥拉片表面上方再黏合一片軟木塞墊片，使螞蟻腳部不會打滑，並在困台旁邊置放接引平台

肆、研究結果

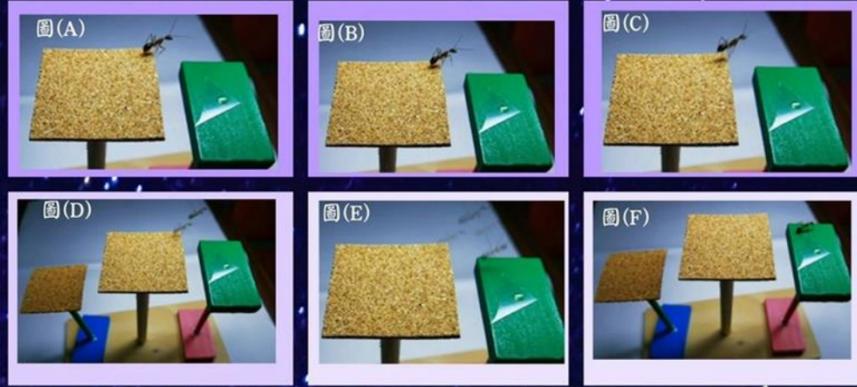
研究一、矛巨山蟻職蟻跳躍與滑翔之行為

(一)、確認不同區域之矛巨山蟻跳躍行為：

地點	矛巨山蟻數(隻)	跳躍時間(分)	跳躍比率(%)
1. 天然茶莊	2	15分以下	100
2. 天道清修院	4	15分以下	100
3. 汐止翠湖步道	3	15分以下	100
4. 大崙頭自然步道	1	15分以下	100
5. 汐萬路山區	1	15分以下	100
6. 內湖白石湖	1	15分以下	100
7. 大尖山鹿窟事件紀念碑	2	15分以下	100

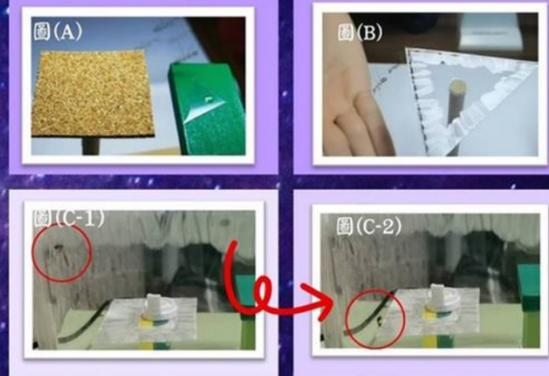
兵蟻平均體長11mm,工蟻平均體長8mm。

(二)、觀察矛巨山蟻跳躍的行為：



矛巨山蟻跳躍的軌跡圖像與描述。圖(A)矛巨山蟻預備跳躍，圖(B)矛巨山蟻前腳抬高，圖(C)矛巨山蟻利用中腳與後腳來出力跳躍，圖(D)矛巨山蟻跳躍過程會六腳朝上伸展，圖(E)利用殘影效果看出矛巨山蟻跳躍高度(約1公分)，而且明顯向上跳躍，圖(F)矛巨山蟻完成一次性跳躍

(三)、矛巨山蟻不同的跳躍形式：



矛巨山蟻跳躍的形式形式。圖(A)斜上跳躍，圖(B)斜下跳躍，圖(C-1, C-2)從垂直壁面上轉身的跳躍

(四)、矛巨山蟻具有空中轉身的能力：



矛巨山蟻空中轉身描述。圖(A)矛巨山蟻跳躍失敗，背部朝下，圖(B)持續掉落，圖(C)開始轉身修正，圖(D)轉正朝下

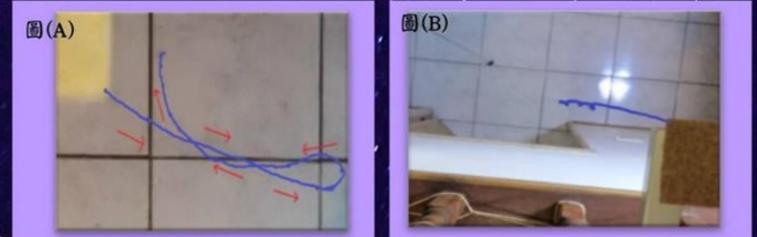
(五)、矛巨山蟻空中跳躍的姿態：



矛巨山蟻六足向上伸展的空中姿態。圖(A)矛巨山蟻，與圖(B)對照組黑頭刺家蟻 (*Cephalotes atratus*) 的空中姿態。

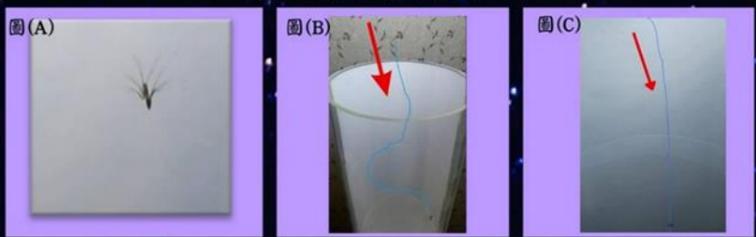
(六)、矛巨山蟻從高空落下，具有滑翔行為：

360cm高度落下的滑翔軌跡



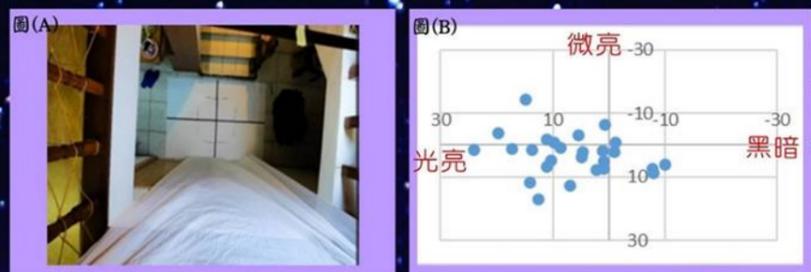
圖(A) 正常的矛巨山蟻職蟻滑翔軌跡圖。圖(B) CO₂ 麻醉處理過的矛巨山蟻掉落軌跡圖。

在風洞的滑翔行為



矛巨山蟻職蟻在風洞滑翔姿態(圖A)與軌跡圖(圖B)，對照組大頭家蟻頭部朝地掉落軌跡圖(圖C)。

(七)、矛巨山蟻3.6公尺之落點實驗：



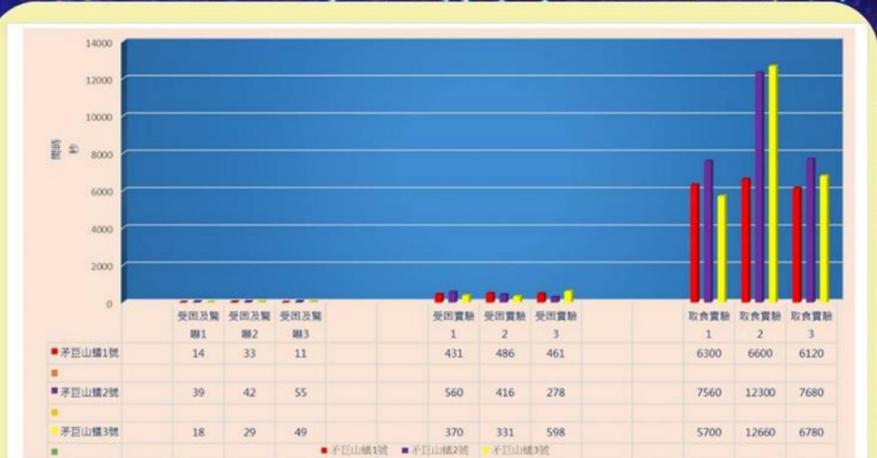
圖(A) 矛巨山蟻職蟻之落點實驗現場照片。圖(B) 26隻矛巨山蟻職蟻3.6公尺落點分布圖。明顯偏往光亮方向。

研究二、探究矛巨山蟻誘發跳躍的可能原因

(一)、一般生物跳躍的原因：

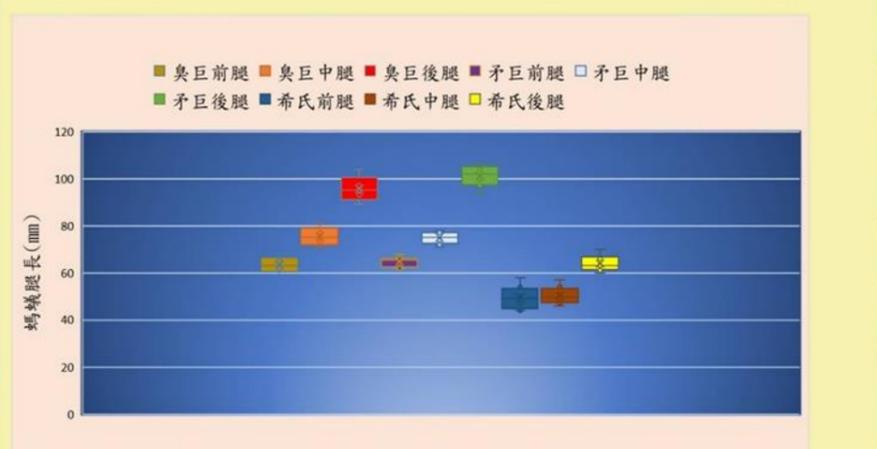
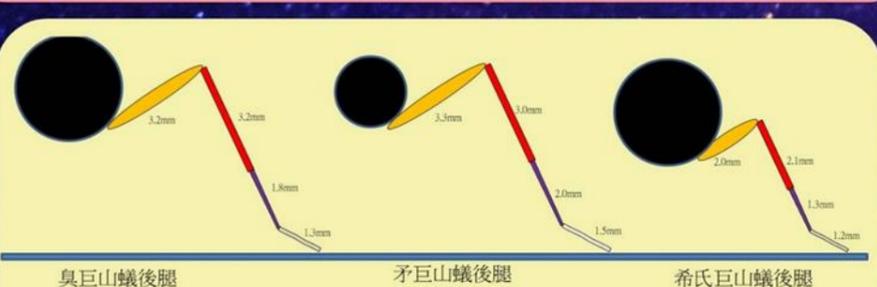
生物類別	跳躍原因	跳躍構造
跳蚤	穿越障礙	後雙足
蟋蟀	逃離捕食者	後雙足
蚱蜢	逃離捕食者	後雙足
跳蛛	突襲獵物	後四足
傑克跳蟻	突襲獵物	後四足
袋鼠	移動方式	後雙足
青蛙	移動方式	後雙足
鳥類	飛行開始	後雙足

(二)、矛巨山蟻取食、受困與受困驚嚇實驗所花費時間：



在單獨受困的實驗中，矛巨山蟻會在受困5~10分鐘之間發生跳躍，而受困又受到驚嚇的實驗，矛巨山蟻會在32秒左右就決定要跳躍，取食大約要花費2.2小時才跳躍。在受困與受困驚嚇實驗中，變因只改變一項，於是使用excel裡的T-test來作顯著水準分析，發現同一隻蟻在驚嚇前後的表現，其跳躍時間有顯著改變(p<0.05)，然後把三隻蟻9次跳躍資料進行比對，也得到相同結果。

研究三、會跳與不會跳的螞蟻身體型態的差異



矛巨山蟻、臭巨山蟻與希氏巨山蟻之後腿長度示意圖與盒鬚圖。矛巨山蟻前中後腿長的比例約為1:1.15:1.56，體長比後腿為1:1.26，而不會跳的希氏巨山蟻前中後腿比例為1:1.02:1.29，體長比後腿長只有1:0.8，而臭巨的前中後腿比例為1:1.19:1.5，與矛巨相當，但體長比後腿長則是1:0.96，介於矛巨與希氏之間，後續證明臭巨山蟻也具有跳躍能力。

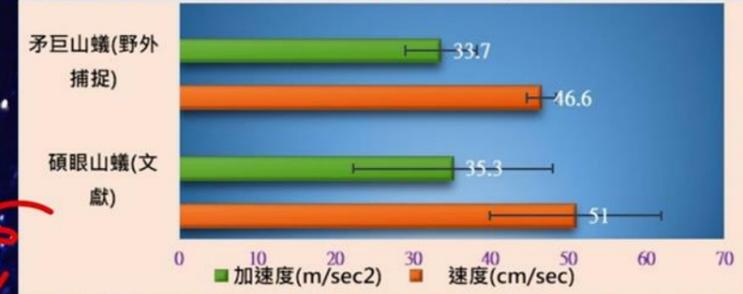
研究四、矛巨山蟻跳躍力學與電腦分析

(一)、野外採集與人工飼養矛巨山蟻之力學比較：



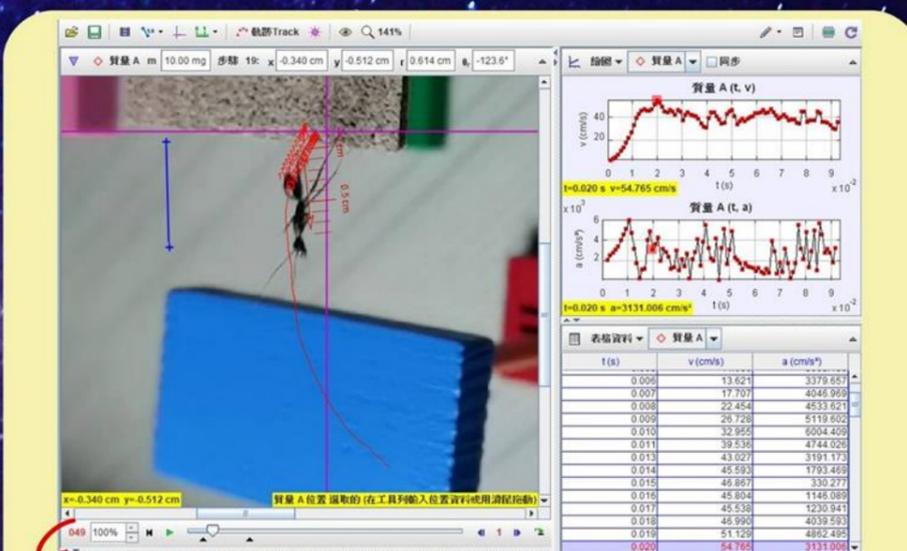
野外的矛巨山蟻力學都優於人工飼養。

(二)、野外的矛巨山蟻與文獻碩眼山蟻力學比較：

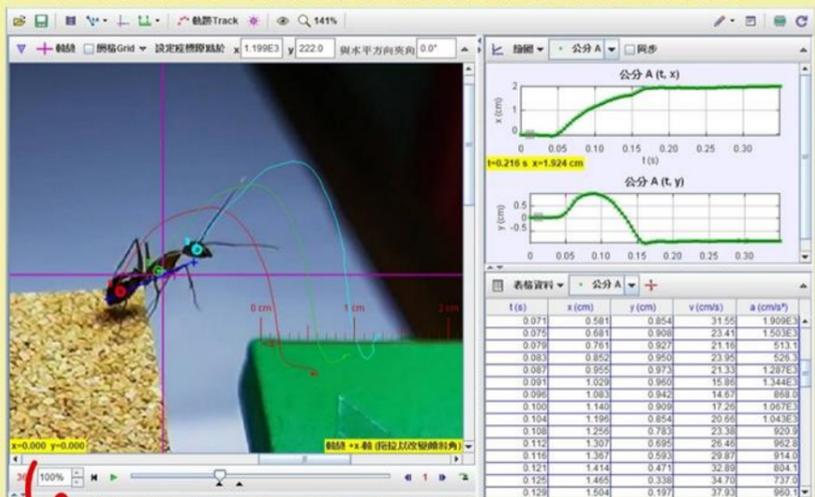


經查閱碩眼山蟻跳躍的相關文獻，碩眼山蟻體型約11mm，飛行速度 0.51 ± 0.11 m/s，加速度 35.3 ± 12.8 m/s²，可以發現野外的矛巨山蟻數據與碩眼山蟻的數據相差不遠。

(三)、Tracker分析矛巨山蟻之力學：

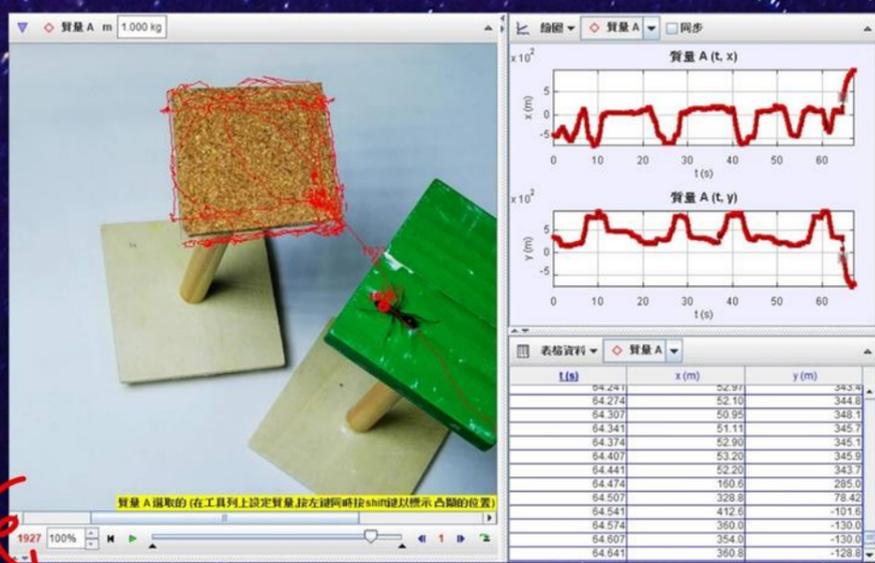


Tracker分析矛巨山蟻跳躍速度與加速度曲線起飛期間平均加速度與離地速度皆與手算相近



Tracker分析矛巨山蟻跳躍跳躍高度0.97cm 跳躍時間0.1秒 水平移動距離1.5cm

(四)、Tracker分析矛巨山蟻分析跳前行動軌跡：



Tracker可以看出矛巨山蟻會多次向平台探索然後跳躍

伍、問題與討論

一、探究矛巨山蟻職蟻跳躍的方式與使用時機

矛巨山蟻會依當時自身所處的地形，與想要跳過去的目的地來決定自己跳躍方式，觀察到跳躍方式有三種。

斜下跳躍	當矛巨山蟻想要跳到比較遠的目標就會使用這種跳法，斜下式的跳躍可以跳出較遠的距離。
斜上跳躍	矛巨山蟻只有當跳躍之目標距離較短，且能清楚看到目標時會選擇斜上跳躍。通常會在間距2公分以下時跳躍，若間距太短，前肢能勾附時，會直接攀爬去
垂直壁面轉身跳躍	矛巨山蟻爬在垂直的樹幹上，想要跳到附近的物體時，會採取此種跳躍方式

二、跳躍與滑翔行為對螞蟻棲地生存的可能優勢

螞蟻如果在樹上跳躍很容易從高空掉落，如果牠們有滑翔的技能就能減少許多傷害。查到的論文指出，樹棲型與半樹棲型的螞蟻大多都具有滑翔力，但土棲型的螞蟻則沒有這種能力，我們所發現2種跳蟻，臭巨山蟻為樹棲型，矛巨山蟻為半樹棲型，都具有滑翔能力

三、矛巨山蟻跳躍所需的時間的整理

矛巨山蟻判斷跳躍的時間分級	「1-3秒」	目前多出現在矛巨山蟻的大工蟻身上，因前肢受傷，或者不明原因失去攀爬能力時，當螞蟻進入緊張狀態時，就毫不考慮，直接跳了
	「10-40秒」	發生於受困在平台上，然後又受到驚嚇時，牠會在兩三次嘗試攀爬失敗時，就緊急跳離平台
	「5-10分」	螞蟻困在平台上時仍會不斷尋找出路，直到知道自己受困了，大約會花費5-10分鐘尋找出路後才會決定跳躍
	「1小時以上」	矛巨山蟻在覓食時，屬於較沒壓力的狀態，當它們發現食物卻取不到時，大約會經過1個小時以上的探索，才會做出跳躍的動作。

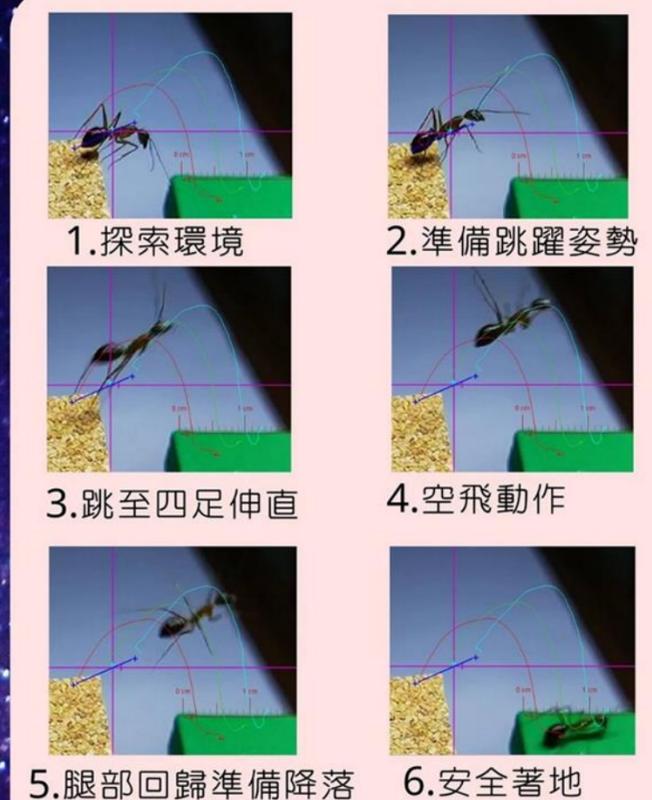
四、為何矛巨山蟻受驚嚇時不跳

我們實驗的結果發現矛巨山蟻都是經過判斷才跳躍的，受驚嚇的過程中可能根本無法判斷，所以以逃跑或亂竄為優先。

五、腿長對矛巨山蟻的跳躍有何幫助

腿的長度越長，跳躍時可以獲得更多的加速距離，加速距離越長，越能把身體加到更高速脫離地面。腿的長度太長，也會造成力矩變長，不易施力，所以腿的長度也不是越長越好。螞蟻會跳的因素很多，包括腿長、腿粗、視力、體重與身長等因素，日後可以做更深入的研究

六、以Tracker分析矛巨山蟻跳躍過程



使用Tracker分解矛巨山蟻跳躍的過程，從伸展後腿朝上到腿部回歸準備著陸，過程只花了0.016秒。

七、矛巨山蟻跳躍可能的動力來源

根據2023年Lazzat等人發表的文獻，大多數螞蟻的腿部肌肉特性，符合直接肌肉收縮驅動的跳躍特性，只有牙針蟻屬螞蟻肌肉量略顯不足，所以牙針蟻屬可能用彈性反衝力來輔助跳躍，其他都有足夠肌肉，能用肌肉收縮來做為跳躍動力，由於矛巨山蟻過去都沒有文獻發表證實它會跳躍，所以Lazzat等人發表的這篇也沒提到矛巨山蟻跳躍的動力來源，這個部份未來可以繼續來探討。

陸、結論

我的實驗結果不只是證明出矛巨山蟻會跳躍，而且我還設計了一些實驗的方法，可以很快的鑑別一些螞蟻是否具有跳躍與滑翔的能力，也讓我發現到巨山蟻屬是一種非常具有跳躍的條件與潛力的蟻屬。矛巨山蟻並不是利用跳躍能力來捕食獵物的螞蟻，因此它們跳躍演化的原因應該與其它跳蟻不同。我可以想像，矛巨山蟻在自然界的生活中，跳躍能力一定帶給牠許多生活上的幫助，也希望我的研究能帶給大家螞蟻行為研究上的幫助。

柒、參考文獻

- 1、廖佩茹 (2018)。探討螞蟻職蟻的空中機動性 (膜翅目：蟻科)。國立彰化師範大學
- 2、Dàjia Ye, Joshua C. Gibson, and Andrew V. Suarez. (2020). Effects of Abdominal Rotation on Jump Performance in the Ant *Gigantiops destructor*. *Integrative Organismal Biology*, 2(1):1-10.
- 3、Lazzat Aibekova, Roberto A. Keller, Julian Katzke, Daniel M. Allman, Francisco Hita Garcia, David Labonte, Ajay Narendra, and Evan P. Econmo (2023). Parallel and divergent morphological adaptations underlying the evolution of jumping ability in ants. *bioRxiv* March 12.
- 4、G. P. Sutton, M. Doroshenko, D. A. Cullen, and M. Burrows (2016). Take-off speed in jumping mantises depends on body size and a power-limited mechanism. *Journal of Experimental Biology*, 219 (14): 2127-2136.