

第十五屆旺宏科學獎

創意說明書

參賽編號：SA15-324

作品名稱：自製縮時攝影儀器-

探討葉下珠羽葉上舉運動特性

姓名：謝瑾安

關鍵字：縮時攝影、上舉運動、協調作用

壹、摘要

本研究利用自製光學儀器及資訊科技的整合，用於葉下珠植物的上舉運動。並在白天用強光照射羽葉，蒐集上舉高度變化與時間的數據來探討上舉運動與睡眠運動的差異。

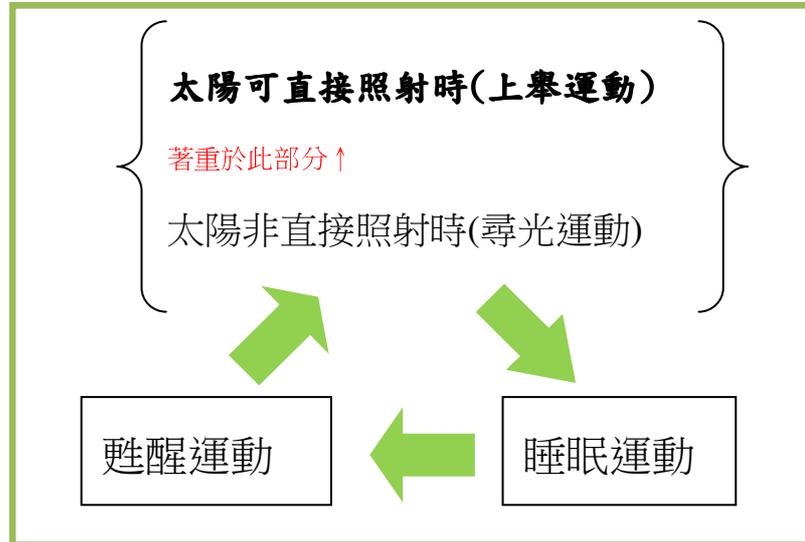
其特性有：

- (1)上舉運動僅在白天非睡眠運動期間進行。
- (2)由光能引發且在某一定強度下才會產生的運動型態。
- (3)不同品種比較時，疣果葉下珠會發生遲滯上舉的現象。
- (4)當不同強度、每天不同時段時 所上舉運動的高度皆不同。
- (5)上、下葉面皆有光的受器存在。
- (6)藍光與 UV-A 光譜區段的才能促發上舉運動。

冀望所發展的儀器與實驗方法有助於探討更多植物運動的特性。

貳、研究動機

之前研究(國二)的報告中，所提及葉下珠羽葉運動模式相當初步(圖一)。僅知道當羽葉被照射強光時會行上舉運動，對於所看到的葉片上舉運動仍保持著極大的興趣，因此藉由改良觀測方法及資料處理，對葉下珠羽葉的上舉運動作更進一步的探究。



圖一 之前報告所提及的葉下珠羽葉運動模式

參、研究目的

- (一)自製可觀察、記錄葉下珠上舉運動的儀器與分析方法。
- (二)瞭解此葉下珠上舉運動的特性、環境和品種的關係。
- (三)比較與分析上舉運動和睡眠運動。

肆、研究設備器材

- (一)自製數位顯微鏡：WebCam、凸透鏡、水管、角鋼、膠帶、鋸子、戳刀。
- (二)自製數位光照度計：光敏電阻、Arduino Nano 組、Arduino UNO 組、麵包板、電阻。(RGB 燈模組、紫外燈模組)
- (三)電腦：TakeSnapshot 軟體(定時拍照)、Comm_port 軟體(接收 Arduino 的訊號)、Movie Maker 軟體(轉成影片)、Tracker 軟體(分析運動影片)、ACD see 軟體(看圖用)、Database4 軟體(處理資料庫)、3D Printer。

伍、研究過程與方法

一、 文獻探討：

(一) 小返魂與疣果葉下珠二種植物在生物學的分類地位與特性如下：

名稱	中文名:疣果葉下珠 學名: <i>Phyllanthus hookeri</i> Muemll. –Arg.	中文名:小返魂 學名: <i>Phyllanthus amarus</i> Schum & Thonn.
分類地位	植物界木蘭植物門木蘭綱大戟目大戟科 <i>Euphorbiaceae</i> 油柑屬 <i>Phyllanth</i>	植物界木蘭植物門木蘭綱大戟目大戟科 <i>Euphorbiaceae</i> 油柑屬 <i>Phyllanth</i>
別名	珠子草、葉下珠	葉下珠、苦味葉下珠、珠子草、
外貌特徵	全株有毛，植株長 10cm~30cm。葉長橢圓形或鵝卵形，頂端有尖頭，葉背灰綠色。花簇生於葉腋，雌雄花異株各 6 片，蒴果，無梗，表面有小疣突。	一年生草本，莖光滑。葉全緣，互生，二列整齊排列，橢圓形、卵形或倒卵形，葉尖圓形，葉基略歪形。花瓣明顯 5 片。果實幾無梗，外表光滑。
圖片比較	 <p>圖二 疣果葉下珠果實與花近照</p>	 <p>圖三 小返魂果實與花近照</p>

照片取自 102 年度國中學生獨立研究成果發表競賽

註：因為在兩者的別名中皆有葉下珠，故以“葉下珠”統稱這兩種植物

(二) 概日韻律(circadian rhythm)：

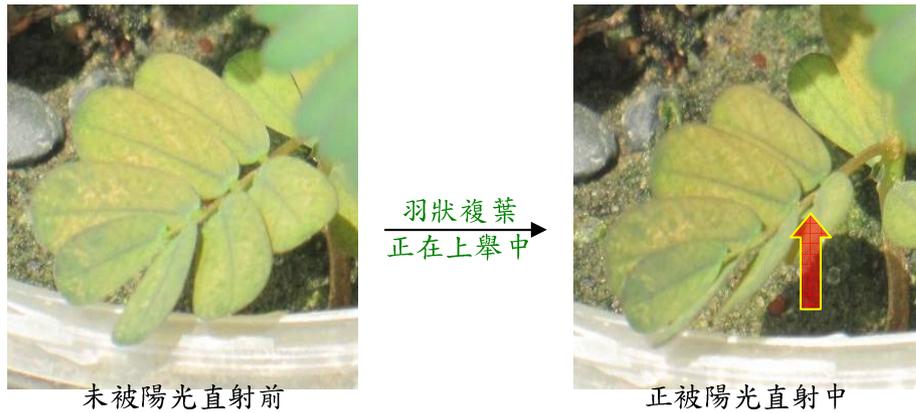
生物時鐘(biological clock)是指當生物在某些環境因素的規律變化調整後，會產生規律性的機制，用以控制生物在行為上、生理上或生物化學上的表現，且此表現在環境維持不變的情況下，仍可以維持一段時間的週期性變化。生物時鐘控制生物體對環境的適應情形。隨著生物種類的不同，生物時鐘的週期也會不同，大多數生物時鐘的週期與日夜變化一致。該週期長短約為 24 小時，故稱為概日韻律。

(三) 減熱作用：(推測階段)

日照時，有些植物為降低葉面的溫度，會利用葉表氣孔來調節水分蒸散或改變葉面對太陽的角度變化(例如：葉面捲起或羽軸偏向光源...等等)，使達成降溫的目的。這些植物達成此目的方式就稱為減熱作用

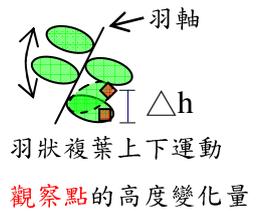
(四)上舉運動：(推測階段)

1. 受日光照射時，有些植物因為降低葉面的溫度，改變葉面角度(使葉軸偏向光源)。從觀察者的角度，葉子從平行地面，運動成似乎向上舉的狀態(圖四)。



圖四 葉下珠羽葉的上舉運動

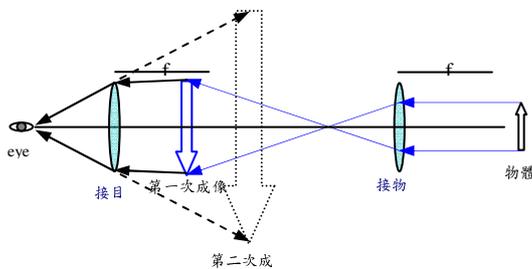
2. 在本實驗中，此最大角度不超過 90 度，故以高度說明。因此，在本實驗中稱為葉子的「上舉運動」。定義上舉運動的效果為：在相同的時間觀察點的高度變化量(Δh)。(圖五)



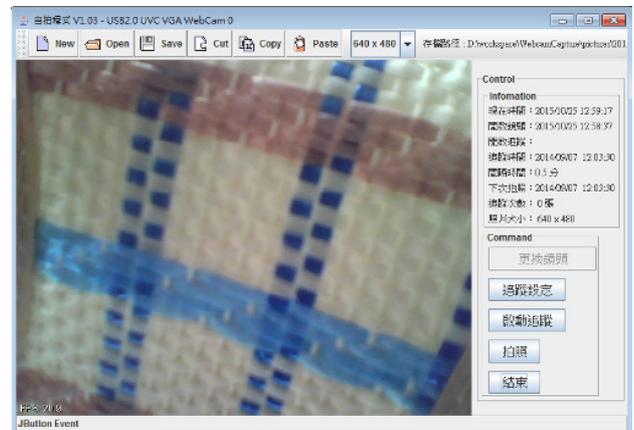
圖五 上舉運動的高度變化量(Δh)

二、 實驗方法：

- (一) 自製光學儀器是由兩片凸透鏡組成。物體在其一倍至兩倍焦距內時，物體會成放大倒立的實像(第一次成像)。當物體在一倍焦距內時，物體會成放大正立的虛像(第二次成像)。故整體的放大倍率是兩片凸透鏡放大的相乘且為放大倒立的像。(圖六)



圖六 自製顯微鏡原體設計圖



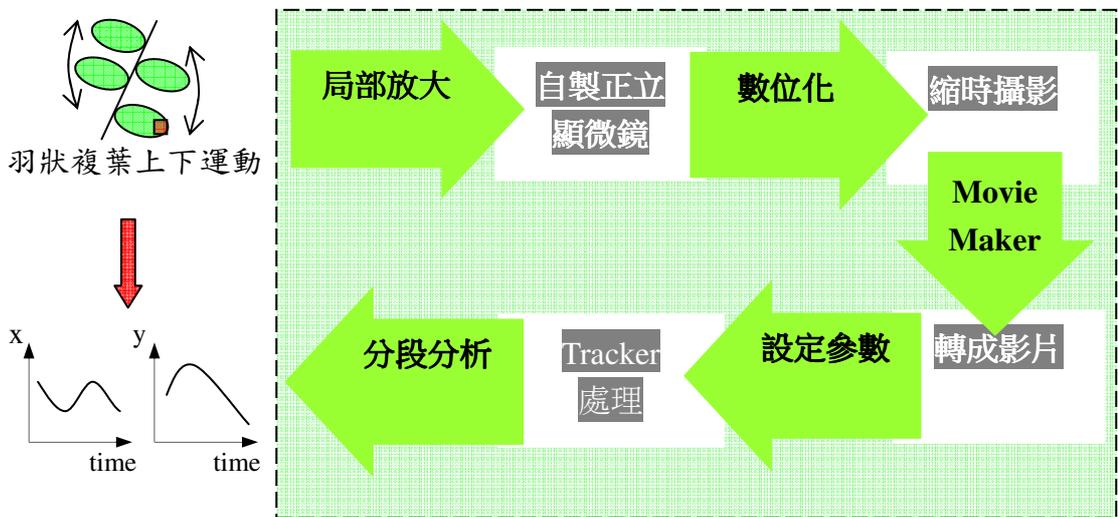
圖七 軟體實際介面

(二) 資料取得方式：

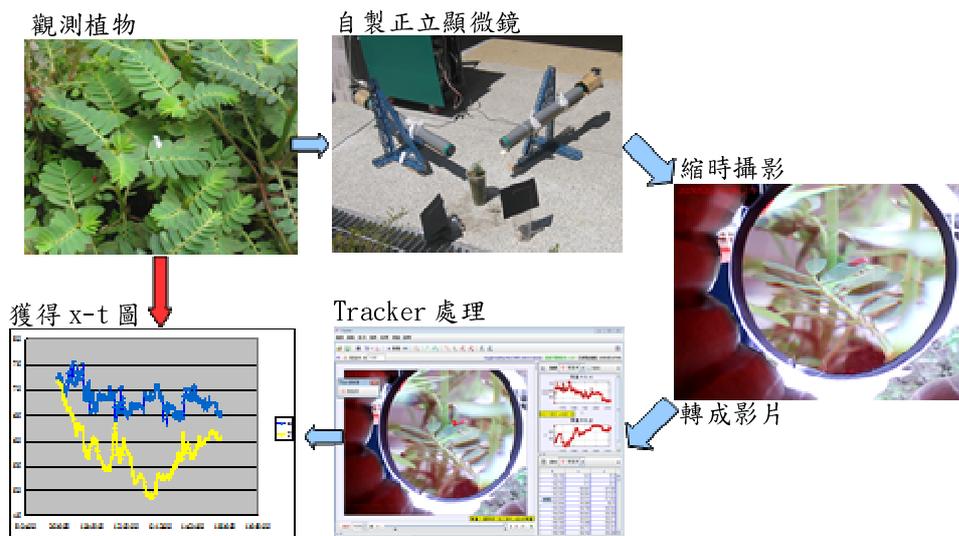
1. 軟體操作過程(圖七)：

- (a) 自製儀器的 USB 接電腦並啟動自拍軟體，設定每 15 秒拍攝一次照片。
- (b) 置觀察物距自製儀器接物鏡約 $1f \sim 2f$ 之間並調整鏡筒角度，使清楚地對準觀察物。
- (c) 設定照片的儲存位置，按下拍照鈕並查看儲存位置的檔案。
- (d) 檢視拍照環境有無反光或背光情形。按下自拍鈕，啟動自拍功能並檢視自拍系統的運作情況。

2. 自製光學儀器及資訊科技的整合：

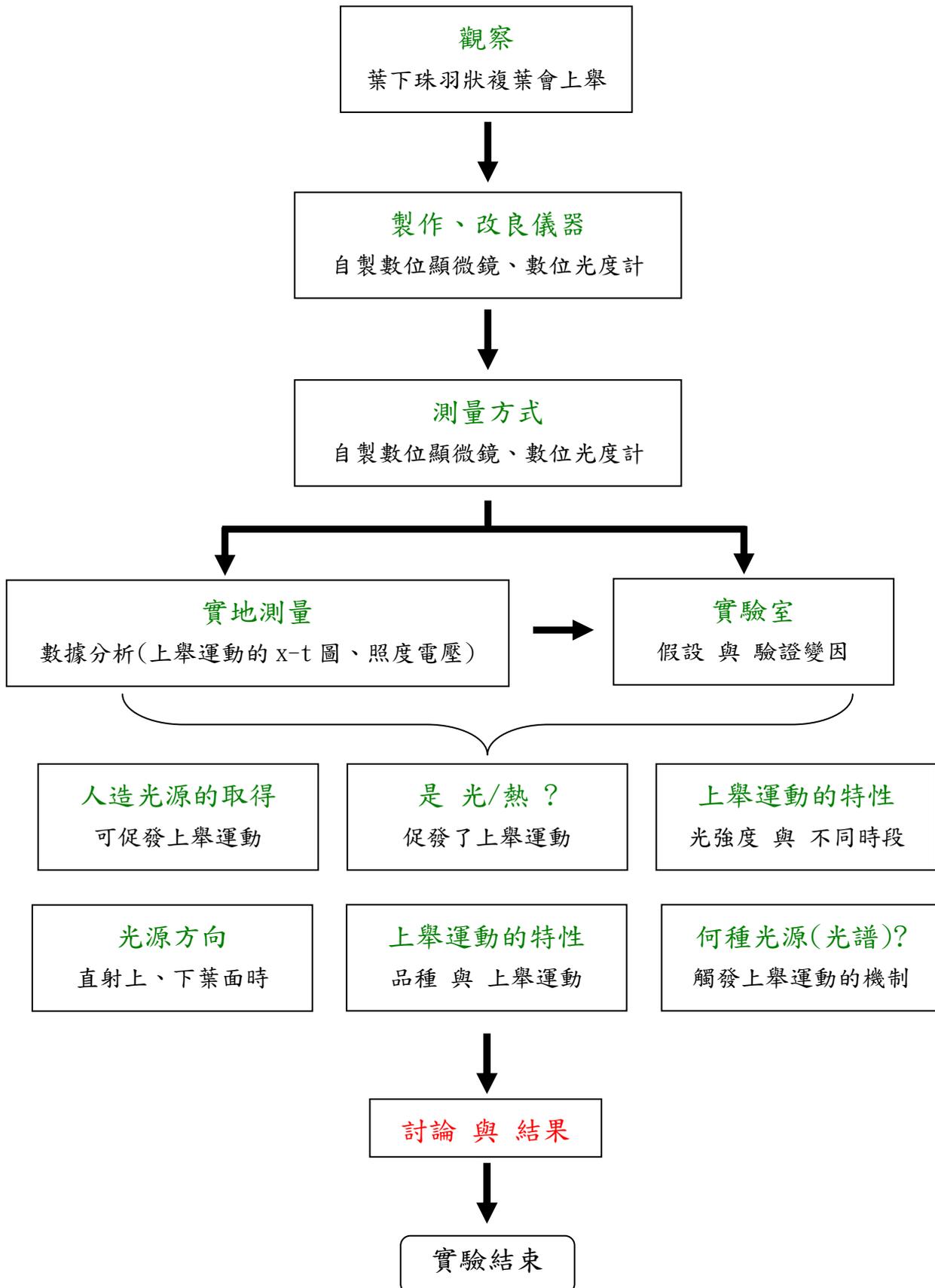


圖八 整合實驗與軟體操作流程示意圖



圖九 整合實驗與軟體操作流程實際圖

三、實驗概念流程



圖十一 實驗流程圖

陸、研究過程與方法

實驗一、自製數位顯微鏡的製作與改良

一、說明：

1. 根據實驗的需要製作出適合的儀器。
2. 比較目前各項工具的利弊，解釋為何選用自製數位複式顯微鏡。

	優點	缺點
制式數位相機	清楚拍攝	價格貴，且需人工定時拍攝，電力無法長時間供應。
數位錄影機	清楚拍攝，可長時間錄影	價格貴，錄影檔案大，須花多時進行人工擷圖
網路攝影機 (Webcam)	清楚拍攝，長時間，定時拍攝，價格較低	無放大效果，羽葉運動不明顯。日正當中時，易過度曝光，畫質差
自製數位複式顯微鏡	清楚，長時間，定時拍攝，價格低並有放大功能	須開發及改良的時間，操作時須較長時間來架設及調整

表 1-1 各工具之比較

3. 因此，根據中學課本中複式顯微鏡成像原理的示意圖，從日常生活中的材料裡，組成複式顯微鏡的雛形加以改良。

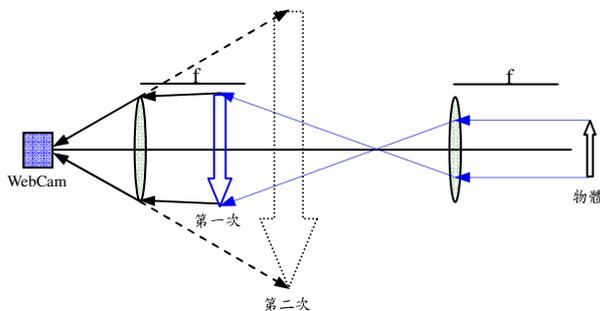


圖 1-1 自製光學儀器原理圖

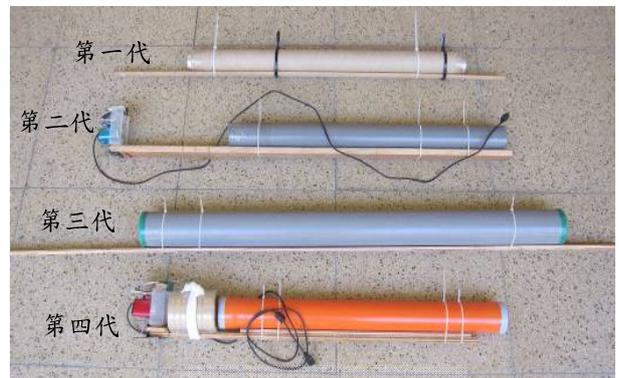


圖 1-2 改進各代儀器

二、步驟與說明：

- (一) 第一代，以海報機的紙筒，及兩個一般放大鏡片所構成。因紙筒長度固定，故放大倍率是固定的，已可拍到放大倒立的像。
- (二) 第二代，以水管為鏡筒，將 Webcam 上下顛倒左右相反。鏡筒長度可變更，故倍率可調整，並在螢幕上獲得正常的影像。
- (三) 第三代，以四吋水管為鏡筒，及四吋的凸透鏡為材料製作方便。整體太長又重（超過一米），不便攜帶與操作觀察，太陽直射時易過度曝光。且鏡片太大，一段時間後易脫落，建議再縮小整個儀器。
- (四) 第四代，以 50mm 水管及二吋半的凸透鏡所成，並加裝遮光環。改良第三代缺點。唯過度曝光仍無法有效改善。

實驗二、如何將照片轉換成可分析的數據(繪製上舉運動的位置-時間關係圖)

一、說明：

- (一)將照片連續快速播放時。即可看見上舉運動過程。但未能用位置與時間的關係圖(簡稱 x-t 圖)來表達上舉運動的情況。
- (二) 如何將照片轉換變成 x-t 圖，是量化此運動的重要關鍵點。
- (三) 提出可能的步驟(圖八)，並在每一過程中逐步調整參數，期待能獲得 x-t 圖。就可將影響上舉運動的因素做一比較與分析。

二、步驟：

- (一) 運用自製數位複式顯微鏡，可將羽葉局部放大，並獲得數位化的照片檔案。
- (二) 參考 Tracker 軟體的使用方法。並尋找適當的影片製作軟體。
- (三) 調整影片製作軟體、Tracker 軟體及實驗時觀察物的參數。
- (四) 取得羽狀複葉運動的座標資料，並用 Excel 繪製 x-t 圖。

三、結果：依步驟完成(圖九)，獲得 x-t 圖。

四、討論：

- (一) Tracker 是 Open Source Physics (OSP)架構下的免費影像分析。
- (二) Tracker 需以影片方式分析故用 Movie Maker(免費)轉照片成影片。
- (三) 本實驗提出，將 Movie Maker 中的持續時間設為 0.3 秒，並將 Tracker 軟體中的每一個步驟的影格數設為 9。故影片播放時是每一秒為 30 影格數。故 $0.3 \times 30 / 9 = 1$ 。即 Tracker 軟體是按一張張照片來分析。故縮時攝影設定時間間隔就是 Tracker 分析的時間間隔。
- (四) 過度曝光一直是分析失敗的主因，於是在羽狀複葉上貼貼紙的方式，就可有不錯的效果。
- (五) 所謂的分析點(參考點)，是指操作 Tracker 軟體時，須指定一點為運動分析的觀測點。指定後才能獲得此分析點的座標出來，常以貼紙的某一點。

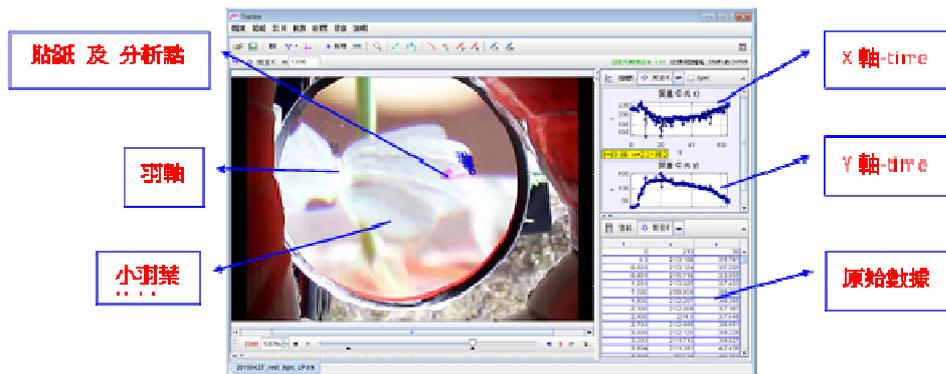


圖 2-1 實際介面各處代表含意

- (六) 將原始數據取出，以 Excel 繪出 x-t 圖(如下圖)。左圖是 X 軸-time 的關係圖，右圖是 Y 軸-time 的關係圖。
- (七) 貼紙是越小越好，避免影響原來的上舉運動。
- (八) 風吹動會使羽狀複葉搖動，當獲得的數據夠多時，搖動是不會影響上舉運動的觀察。

(九) 本實驗中最大角度不超過 90 度，故以 y 軸(高度)說明。

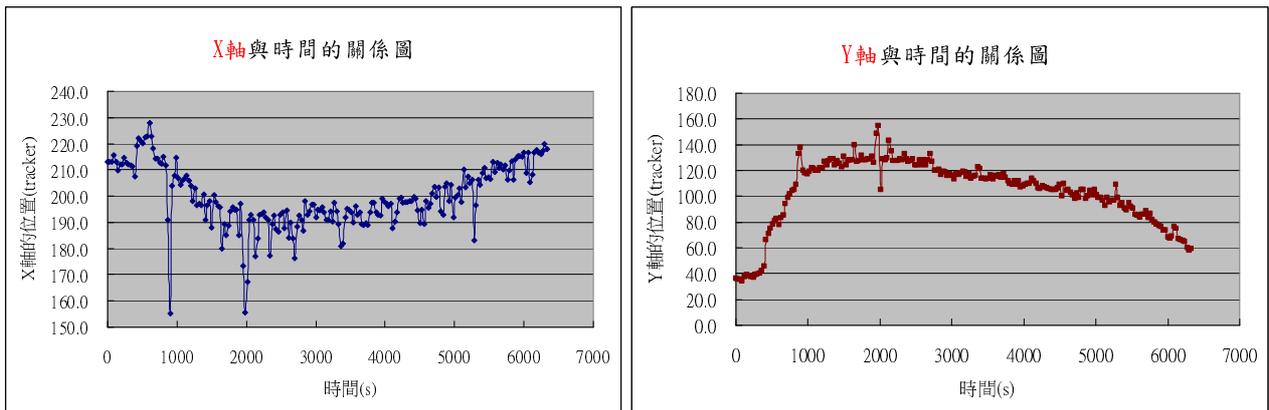


圖 2-2 上舉運動與 X、Y 軸關係圖

實驗三、尋找替代太陽光的人造光源

一、說明

- (一) 陽光變化無法控制，需找尋人工光源取代，故尋找不同光源。
- (二) 光源的特性中可能有照度、波長或熱能等因素會促使葉下株發生上舉運動。

二、步驟

- (一) 在沒有太陽直射的地方，選擇疣果葉下株的羽狀複葉為觀察植物，自製數位光度計的光敏電阻置於待觀察羽狀複葉相近約等高處。
- (二) 觀測儀器的觀測方向約與光源垂直。(如示意圖)
- (三) 準備不同光源，並填入表中。
- (四) 利用光源架調整光源的高度，記錄照度電壓。
- (五) 觀察 10 分鐘。將羽狀複葉是否發生上舉運動的結果，填入下表之中。
- (六) 更換不同種類的光源，10 分鐘後，再重複步驟 4, 5, 6。

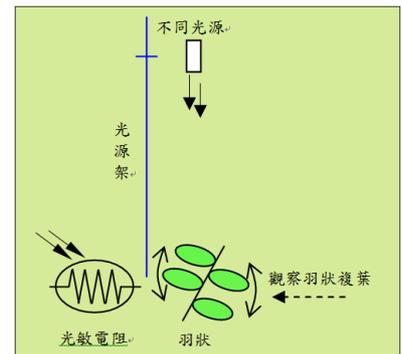


圖 3-1 實驗示意圖

三、結果

- (一) 不同光源的代號與種類。

代號	光源種類	光源說明
A	黃光，LED 燈	10W，太星電工
B	黃光，省電燈泡	20W，螺旋型
C	白光，LED 燈	3W，高亮度 LED
D	白光，LED 燈	10W，太星電工
E	黃光，LED 燈	9W
F	白光，LED 燈	7W，Link All
G	鎢絲燈泡	40W



圖 3-2 不同光源

- (二) 不同光源的所產生的照度電壓及分析是否有上舉運動。

(三)找到可以使用“**光源 C**”，來促發植物行上舉運動。

光源代號	A	B	C	D	E	F	G
照度電壓(V)	2.75~3.00	2.75~2.95	3.50~3.85	3.14~3.40	2.93~3.17	2.85~3.05	2.65~2.80
是否有上舉運動	否	否	是	略	否	否	否

四、討論

(一)以光源代號 C(稱光源 C)所產生的照度電壓最高，上舉的高度差最大，也最明顯。光源 D，所產生的照度電壓次之，記為“略上舉”。

(二) 光源 C 所產生功率最少(3W)，表示：“**光能是主要的刺激物，而非熱量**”。

實驗四、自製數位光照度計的製作與改良

一、說明：

(一)上舉運動與光的強度有關，如何量化光的強度與分析為本實驗的重點。利用 Arduino 的便利就成了此自製儀器的元素。

(二) 設計原理(光度計設計原理)：

- 1.利用光敏電阻與固定值電阻串連形成一個簡單電路。
- 2.強光照射光敏電阻，光敏電阻電壓變小會使 $V_{測}$ 變高；反之則變低。
- 3.利用光的強弱與 $V_{測}$ 電壓的高低變化，將光的強度數量化。
4. Arduino 價格低、易取得、作業系統易支援 等諸多優點，故以 Arduino 將訊號轉換數位訊號加以處理光強弱的數值。

二、結果：

(一) 裝出實際儀器如照片所示。

(二) 使用與待測羽葉 大約等高的寶特瓶來固定光敏電阻。

(三) 為讓儀器攜帶方便，將 Arduino UNO 板子改成 Nano 板子。

(四) 使用透明的塑膠膜包護光敏電阻，因為露水容易使光敏電阻損壞。

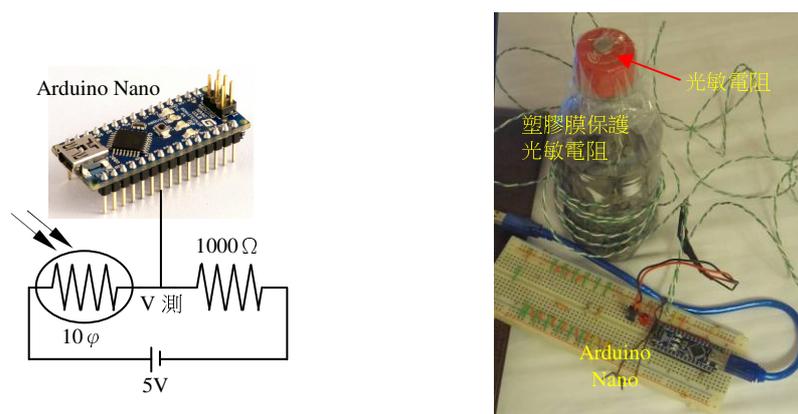


圖 4-1 自製數位光照度計電路圖與實際儀器

三、討論

(一) 因設計電路關係，光敏電阻兩端的電壓變化僅能在 0~5V 之間，故自製數位光照度計的照度就用 0~5V 之間來表示。在本實驗中，稱此電壓為**照度電壓** (0~5V)。

(二) 當陽光直射羽狀複葉，觀察到羽狀複葉發生上舉運動時，所測到的電壓是略小於 4V。因此，本實驗就以 4V 定義是“羽狀複葉發生上舉運動”的照度電壓值。意指測量到照度電壓為 4V 時，羽狀複葉就即會上舉運動。

實驗五、繪製羽狀複葉行上舉運動的照度電壓-時間關係圖

一、說明

(一) 在校園裡小返魂、疣果葉下珠是各聚集生長在同一處不會交錯。但相距不遠。(國中及高中校園都是相同的調查結果)。

(二) 本高中已有六十年之久，而兩植物的生長期是約一年生。因此，在校園的生長分佈已是適應諸多因素(光照、土壤、人工除草等等)的結果。然而此植物的上舉運動是跟陽光直射有關。故測量校園內聚集生長的小返魂及疣果葉下珠被日照時間長短有何差異。欲瞭解此植物與環境中日照多寡的進一步關係。



圖 5-1 小返魂、疣果葉下珠聚集生長環境

二、步驟

(一) 尋找校園內，小返魂與疣果葉下珠生長群聚的地點並安裝電源，將實驗儀器安置在兩處地點，在同一天中分別記錄照度電壓及時間並繪製關係圖。

(二) 將兩處地點的照度電壓-時間關係圖，做一比較分析與討論。

三、結果

小返魂群聚生長在機車棚下而疣果葉下珠群聚生長在集合館旁。

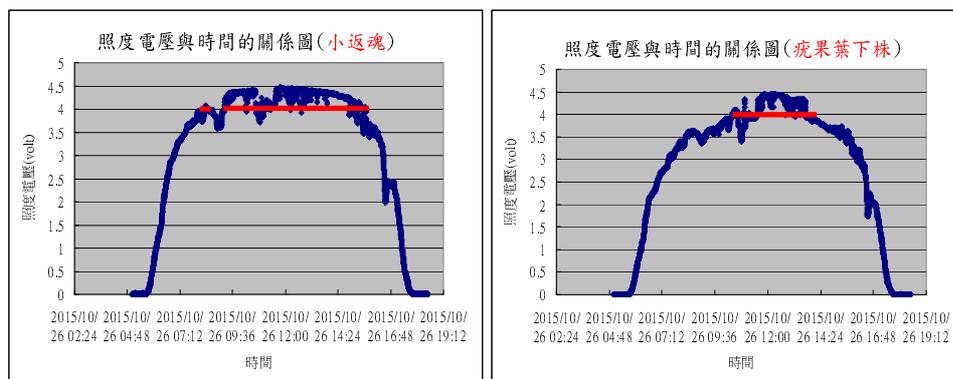


圖 5-2 小返魂、疣果葉下珠的照度電壓時間關係圖

四、討論

(一) 從實地觀察，發現小返魂性喜歡在石縫中生長。而疣果葉下珠性喜歡在泥土堆中生長，這是也是生長環境的差異處。

(二) 在兩圖中的 4V 處，劃紅線，小返魂的紅線約為 2.65cm，而疣果葉下珠的紅線約為 1.40cm。以陽光照時間而言，小返魂是疣果葉下珠約快兩倍(兩時間距是相同的)。結論：「校園內的小返魂為例，需要比較多的日照」。

(三) 因為是同一天來收集兩處的日照資料，可以排除天氣的干擾因素。

實驗六、用運動作圖說明上舉運動與睡眠運動的差異

一、說明

1. 利用運動的座標圖來說明上舉運動與睡眠運動的差異。
2. 雖然用貼紙當作標籤可以讓肉眼清楚觀察到植物運動；但運動時的不同角度使拍攝的標籤變型，進而讓 tracker 軟體不易分析出運動的座標圖數據出來。
3. 球狀從任何角度拍照都是圓形。如何製作微型球狀標示物並貼於羽葉上且不改變羽葉原本的運動下，讓此標示物為實驗的分析點。

二、步驟

1. 約 0.5cm 的釣魚線用火燒成球狀。剪斷後並用貼紙固定在羽葉上。
2. 依儀器操作程序，拍攝紀錄同一羽葉上舉運動(am 9:00-12:00)與睡眠運動(15:30-17:30)。
3. 用 tracker 軟體分析出運動時的數據資料，並製圖後討論。
(Y 軸就是羽葉上舉的高度 h)

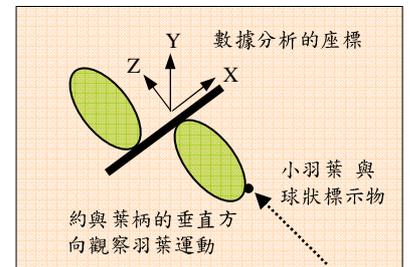
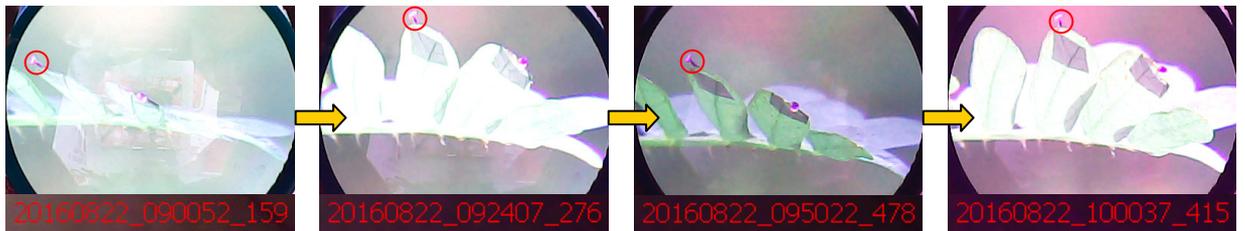


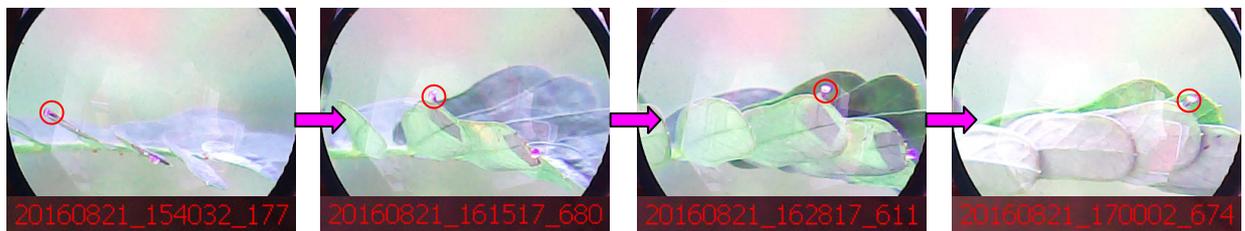
圖 6-1 實驗示意圖

三、結果

(一). 上舉運動的局部照片： 圖 6-2 上舉運動的羽葉變化



(二). 睡眠運動的局部照片： 圖 6-3 睡眠運動的羽葉變化



(三). 作圖出上舉運動及進行睡眠運動羽葉變化的高度與時間的關係圖。

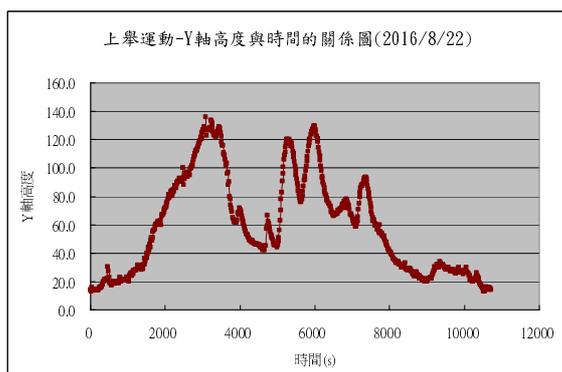


圖 6-4 疣果葉下珠進行上舉運動 h-t 圖

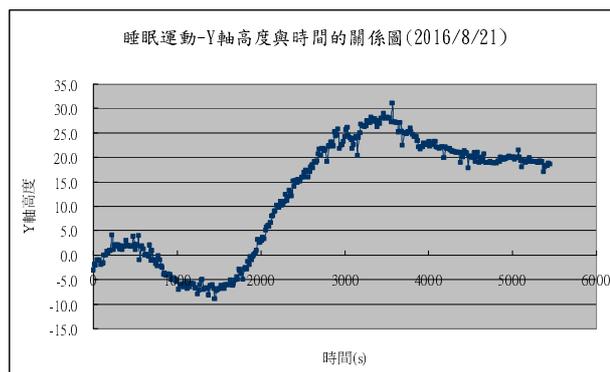


圖 6-5 疣果葉下珠進行睡眠運動 h-t 圖

四、討論

1. 將上舉與睡眠運動的比較與分析結果填入下表中：

運動種類 比較、分析	上舉運動	睡眠運動
時間	白天太陽日照時	每日的下午至隔日的清晨
作用原因	因強光而引起的膨壓	因生理周期而引起的膨壓
作用時間點	受日照的時間點	因季節不同開始時間不同(夏晚冬早)，
進行作用時間的長短	受日照時間的長短(約 11000 秒)	羽葉運動幾乎相同(約 55000 秒)，之後閉合方式睡眠作用
運動路徑	受日照強弱，羽葉會上舉、下降好幾回	從開始進行至結束，一直持續下去
葉面轉動	不轉動	會轉動

2. 球狀標示物靈感來自葉子上的小水滴。這也說明了羽葉可以負重的且羽葉的高度不會變化很大。(2016/08)



圖 6-6 球狀標示物靈感圖

實驗七、小返魂與疣果葉下珠在相同的照光條件下，誰上舉的快？

一、說明：

從實驗五中得知小返魂需要較多的日照時間。那在相同的日照下，何者對於產生上舉運動較快速呢？

二、步驟

- (一)由實驗五結果，取一段兩地(機車棚下、集合館旁)共同的日照時段(約 10 時~14 時)。
- (二)選擇兩株羽狀複葉大小約相同並貼上標籤且拍攝羽狀複葉的角度約相同。
- (三)開啟兩台自製數位顯微鏡並觀測的羽狀複葉。
- (四)當到共同日照時段時，將日照遮蔽物置於觀測的植物上方長 30 分(圖 7-1，

圖 7-2)。因兩種植物生長在不同地方，故以手機聯絡，同時將日照遮蔽物掀開。

(五) 記錄兩植物上舉運動的過程，並分析與討論上舉運動的情形。

三、結果

(一)實地操作如圖所示。



圖 7-1、7-2 不同地方兩種植物與日照遮蔽物

(二)小返魂與疣果葉下珠的上舉高度與時間的關係圖如圖所示。

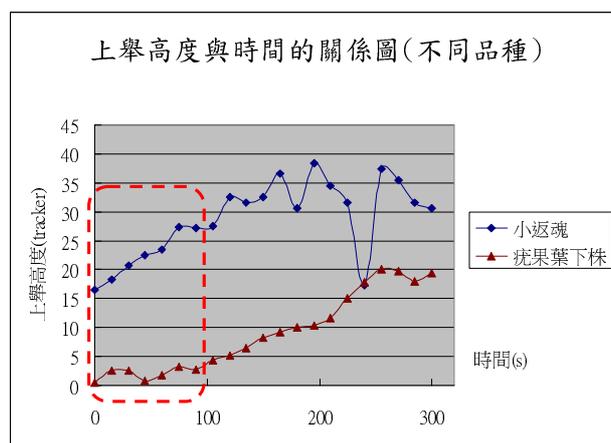


圖 7-3 兩葉下珠的上舉高度與時間的關係圖

四、討論

(一)當陽光照射在葉面時，疣果葉下珠約 90 秒後開始有上舉運動發生；而小返魂在 15 秒內就已經有上舉運動產生；所以小返魂比疣果葉下珠受光照射時上舉運動的發生的較快。

(二) 有關上舉的實際高度因受到不同的小羽狀複葉大小、放大倍率、標籤位置等因素的影響，所以不加討論。

(三) 因為是兩地實驗，那會不會有局部雲朵或土壤性質等不同所造成的結果。若是品種問題，同一地點實驗時，就可以知道此特性是否存在？所以再尋找一處，小返魂與疣果葉下珠同時生長的再測實驗地點。

(四) 同一地點實驗點如下(圖 7-4、7-5)，測得小返魂與疣果葉下珠的上舉高度與時間的關係圖(圖 7-6)如下所示。架設儀器如下。



圖 7-4、7-5 (1)小返魂 (2)疣果葉下珠 同一地 架設儀器

(五) 由上可知，疣果葉下珠受光照射時還是經過一段時間後(約 120 秒)後，才開始有上舉運動的反應。所以，小返魂受光後上舉運動較快發生且疣果葉下珠有遲滯上舉的現象，故對受光照射後產生上舉運動快慢是與品種有關。

實驗八之一、促發羽狀複葉上舉運動，需要多大的 LED 燈的光照強度？

一、說明

- (一) 從實驗三得知當太陽光照射羽狀複葉時，照度電壓大約 4V 時，葉下珠的羽狀複葉就進行上舉運動。若使用 LED 燈來取代太陽光時，照度電壓也要大約 4V 時，葉下珠的羽狀複葉就能進行上舉運動嗎？
- (二) 設計光源高低架使 LED 光源有六個不同的高低位置。a 處高度最低，代表照光強度大，照度電壓會較大。反之，f 處高度最高，照光強度弱，照度電壓會較小。
- (三) 自製數位光度計的光敏電阻放置在與待觀察的羽狀複葉相近且約同高度，觀測儀器的觀測方向約與光源垂直。(圖 8-1)

二、步驟

- (一) 選擇一處不會被太陽直射處，開啟自製數位光度計記錄照度電壓(每 10 秒一次)，及自製數位顯微鏡記錄羽狀複葉運動(每 15 秒一次)。
- (二) LED 光源從高度依序 a、b、c、d、e、f，再降至 f、e、d、c、b、a，共 12 處高度，LED 光源先由 a 處亮 10 分鐘，閉 10 分鐘。依序完成上敘 12 處高度。
- (三) 繪製照度電壓與時間的關係圖(圖 8-2、8-3)，分析在不同照度時，是否進行上舉運動，填入表格中。

三、結果

- (一) 繪出照度電壓與時間的關係圖如右圖所示。標示 a'，就是早上時在 a 高度測得的電壓值，下午時標示 a''。其他依序標示。

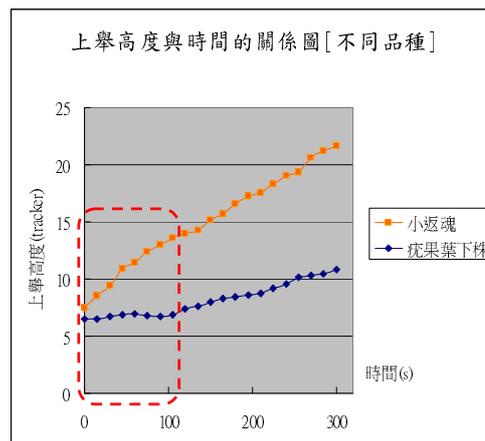


圖 7-6 上舉高度與時間的關係圖(不同品種)

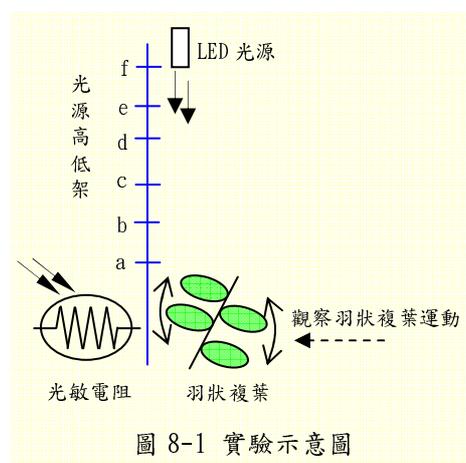
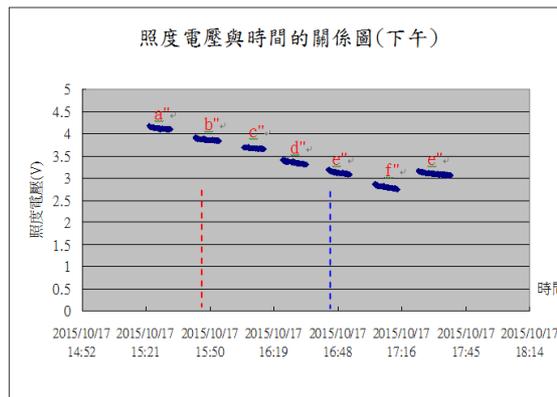


圖 8-1 實驗示意圖



(二)LED 燈在 a 高度(圖 8-2、8-3 照度電壓與時間的關係圖(早上以及下午) 度(圖 8-4) 時，甲圖是 LED 燈未開時，乙圖是 LED 燈打開，丙圖是 LED 燈已開 10 分鐘後。

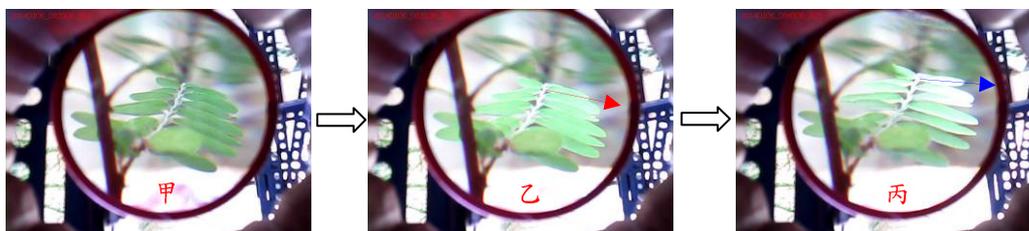


圖 8-4 LED 燈照射羽葉且上舉情形

在乙圖中繪製開始的羽狀複葉軸線(以紅色箭頭表示)，在丙圖中繪製 10 分鐘後的羽狀複葉軸線(以藍色箭頭表示)。將兩箭頭平移，箭頭一端接合如圖()。從圖中，得知 10 分鐘後的羽狀複葉軸線比原來的軸線高，就可以判定在羽狀複葉“是”有進行上舉運動。

(三)將 12 處高度的有無進行上舉運動填入下表中。並求出時間內自製數位光度計的電壓平均值。

高度	a	b	c	d	e	f	f	e	d	c	b	a
是否上舉	是	是	是	否	否	否	否	否	否	是	是	是
平均照度電壓 v	4.22	4.05	3.78	3.70	3.61	3.50	3.50	3.63	3.68	3.97	4.12	4.11

表 8-1 12 處高度之自製數位光度計的電壓平均值(早上)

四、討論

- (一)照度電壓大於某一限度時(約 3.78V)即促使上舉運動產生。
- (二)羽狀複葉所受的光源是四周環境所反射的太陽光再加上人工所給予的 LED 光源。
- (三)下午重新進行一次時，將是否進行上舉運動填入下表(表 8-2)中。(因為天暗，已無法進行剩下的高度點)。

高度	a	b	c	d	e	f	e
是否上舉	是	否	否	否	否	否	否
平均照度電壓 v	4.12	3.87	3.67	3.35	3.12	2.80	3.10

表 8-2 7 處高度之自製數位光度計的電壓平均值(下午)

(四)依上述(二)的結果，b 處應是有進行上舉運動(超過 3.78V)。但是結果為否。將 15:40 與 16:20 的照片做一比對，可以發現整個羽狀複葉的寬度已經改變(如箭頭之間)，羽狀複葉間的缺口也改變，也就是說：羽狀複葉開始向前閉合。意指，下午量測 b 處時，小返魂植物已開始進入睡眠狀態。

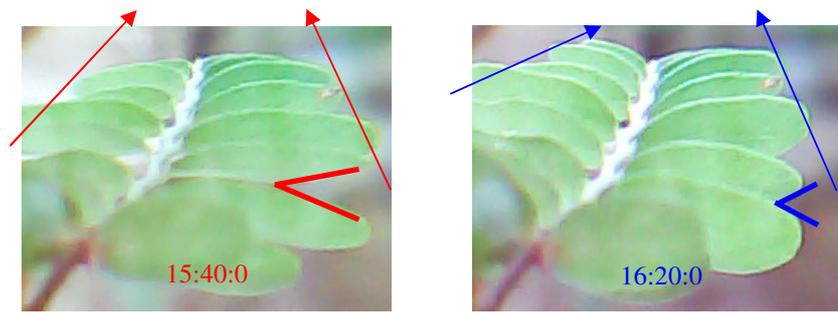


圖 8-5 羽狀複葉的寬度之對比

(五)綜上，葉下珠在約一日的運動週期中，只有“在非睡眠運動時，受到某一強度以上的光線照射，才會促發上舉運動”。

實驗八之二、測量照光強度與羽狀複葉上舉運動的高度變化程度

一、說明

- (一)從實驗八之一中得知，要促使上舉運動，需要光強度超過某一限度。
- (二)欲從不同光強度與高度變化的資料，藉分析資料可知兩者的關係。

二、步驟

- (一)將實驗八中發生上舉運動的 a、b、c 高度所得的數據加以處理。
- (二)繪製出不同光強度中與上舉運動的 x-t 圖。加以分析與討論。

三、結果

處理結果如下圖，光源 C 在 a 高度所產生的照度，稱為 a 照度。依此類推。

四、討論

- (一)羽狀複葉的上舉高度會隨著時間增加而上升。

(二)上舉變化量如下表(表 8-3)：

$$\begin{aligned} \Delta h_{a \text{ 照度}} &= 8.41 - 0.50 = 7.91 \\ \Delta h_{b \text{ 照度}} &= 24.42 - 15.50 = 8.92 \\ \Delta h_{c \text{ 照度}} &= 42.47 - 34.50 = 7.97 \end{aligned}$$

高度	照度電壓(V)	上舉變化量(Δh)
a	4.22	7.91
b	4.05	8.92
c	3.78	7.97

表 8-3 羽狀複葉的上舉變化量

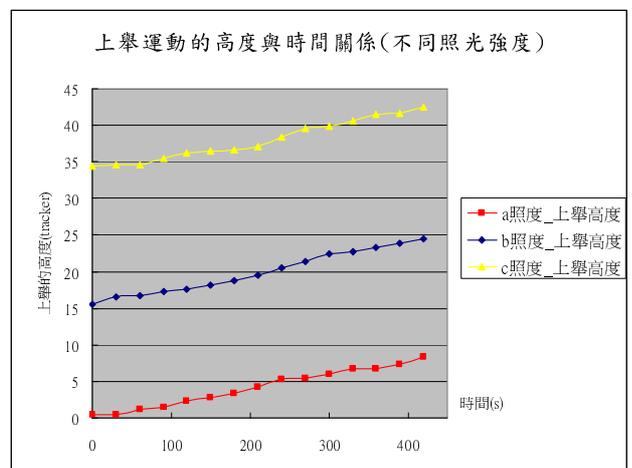


圖 8-6 上舉運動的高度與時間關係(不同照光強度)

從數據分析中得知，照度電壓逐漸減少，而上舉效果沒有呈現規則的表現，影響上舉變化量的變因有光強度、照射時間、是否睡眠運動等因素外。**可能還有其他因素存在。**

(三)開始著手找出此變因，提出假設並於是設計以下的實驗。

在相同照度及照射時間之下，
不同時段(早上、中午、下午)照射時，上舉變化量也會不同。

實驗九、相同照光強度下，一天內不同時段中 羽葉上舉運動的高度變化

一、說明

(一)由上述實驗可知，照光強度不是影響上舉運動高度變化量的唯一因素。一天內不同時段以相同的照光強度照射也會有不同程度的影響嗎？

(二)那還有多少因素會影響上舉運動的高度變化量呢？

二、步驟

(一)選擇一株小返魂為觀測的對象，且沒有被日照直射的地方。

(二)實驗裝置如實驗八，開啟自製數位顯微鏡及自製數位光照計觀察並記錄。

(三)調整光源 C 的高度使照度電壓為 4.0~4.1V 之間。

(四)打開光源 C 十分鐘，關閉 1 小時 50 分，重覆四次(9、11、13、15 點)。

(五)分析並討論羽狀複葉是上舉運動的情形。

三、結果

9、11 點開始拍照的相片如下，三個分析結果如下。

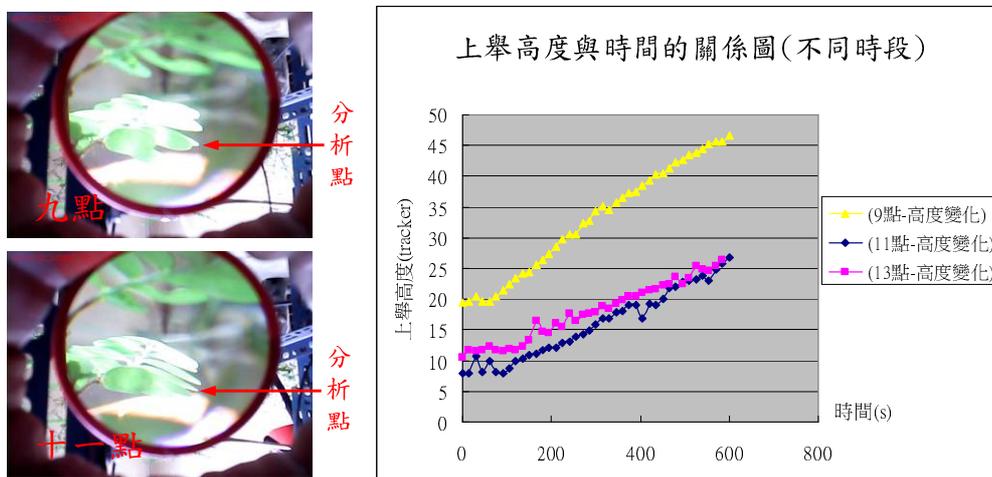


圖 9-1、9-2 分析點 與 上舉高度與時間的關係圖

四、討論

(一)9、11、13 點的上舉變化量為：

$$\Delta h_{9 \text{ 點}} = 46.57 - 19.50 = 27.07$$

$$\Delta h_{11 \text{ 點}} = 26.85 - 8.00 = 18.85$$

$$\Delta h_{13 \text{ 點}} = 26.42 - 10.59 = 15.83$$

從數據得知，早上的上舉速率最快，隨著時間而減小。所以在相同的照光強度下，相同時間距內，一天內不同時段(早上、中午、下午)中，羽狀複葉上舉運動的會有不同的高度變化量。

- (二)一開始羽狀複葉的測量時的初始位置也不同。9 點時初始位置最高。
- (三)15 點已進入開始睡眠狀態，所以此時段數據不處理及呈現。
- (四)早上何時上舉速率為最快，仍研究探討中。

實驗十、在強弱不同的光源下，照射在同一羽葉時，上舉運動會如何進行？

一、說明

- (一)使用光源 C 照射整片葉子可以促發上舉運動，利用燈罩使光源 C 僅“光束”的形式照射“局部”的葉子時，仍可以促發上舉運動嗎？
- (二)各小羽狀複葉間會有如何反應此狀態呢？

二、步驟

- (一)設計一個燈罩使光源 C 僅“光束”的形式照射。
- (二)選擇葉下珠的羽狀複葉為觀察植物，開啟自製數位顯微鏡觀察並記錄。
- (三)僅照射“局部”的葉子，觀察記錄上舉運動的情形。
- (四)分析與討論各處(A、B、C、D)的上舉運動情形。

三、結果

- (一)將燈罩完成，並瞭解“光束”的形狀(圓形)。(圖 10-1、10-2、10-3)
- (二)將光束照射在已標定的 A 處上(圖 10-4)，所獲得的照片如下。繪製的高度與時間關係圖如下(圖 10-5)。



圖 10-1、10-2、10-3 燈罩、光束中心、四個觀察點

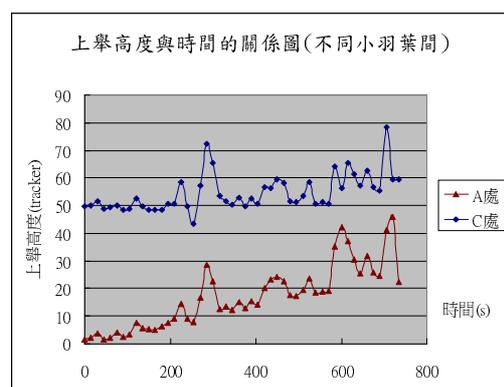


圖 10-4、10-5 光束照射在已標定的 A 處及上舉高度與時間關係圖

四、討論

- (一)從觀測的角度來看，僅能清楚看見 A、C 兩處。因此，就以此兩處來分析加以說明。(A 點是遠處、C 點是近處)
- (二)A 處為光束的中心位置，而 C 處距離中心位置最遠。換句話說，在同一葉片中所受的光照度不均時，各小羽狀複葉是如何反應上舉運動呢？
- (三)從高度與時間關係圖得知，A 處的小羽狀複葉上舉效果比 C 處的小羽狀複葉上舉效果好。

$$\Delta h_{A \text{ 處}} = 23.6 - 1.50 = 21.0$$

$$\Delta h_{C \text{ 處}} = 59.4 - 49.6 = 9.8$$

(四)故各小羽葉的上舉運動的變化量是以照光的強弱程度來呈現。

實驗十一、當光線是由葉子的下方往上照時，羽狀複葉還是會向上舉嗎？

一、說明

陽光大都由上而下照射，也許地面會少量反射。若光源相反方向照射(由下往上)會如何？

二、步驟

- (一)選擇疣果葉下珠的羽狀複葉為觀察植物，且沒有被日照直射的地方。
- (二)開啟自製數位顯微鏡觀察並記錄。
- (三)調整光源 C **由下往上**(圖 11-1)，照約 15 分鐘，分析羽狀複葉是否有上舉運動。



圖 11-1 光源 C 由下往上

三、結果

- (一)**羽狀複葉會進行上舉運動。**
- (二)因為會造成過度曝光，所以用標籤來協助觀察與分析。



圖 11-2 為解決過度曝光用標籤來協助觀察與分析

四、討論

- (一) 間隔 30 分後，調整光源 C **由上而下**，照射約 15 分鐘。且光源 C 上、下距離羽狀複葉約 10 公分。收集資料後，繪出**由上而下**、**由下往上**照射的上舉運動資料，做一比較。分析後，羽狀複葉會]向上(y 軸)移動即羽狀複葉會

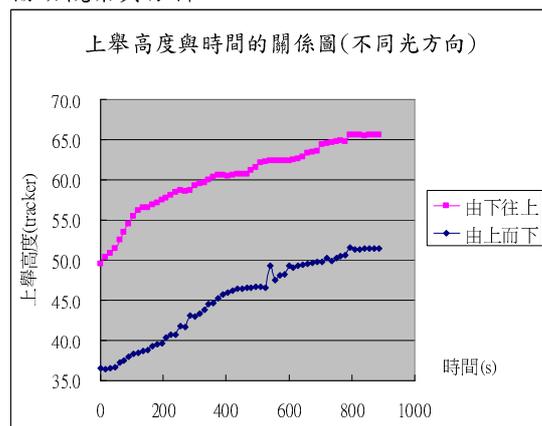


圖 11-3 上舉高度與時間的關係圖

進行上舉運動。

(二) Δh 由下往上 = $65.5 - 49.5 = 16.0$ 且 Δh 由上而下 = $51.4 - 36.5 = 14.9$ ，從數據上得知，由上而下照射的上舉效果(16.0)比由下往上照射的上舉效果(14.9)相差不多。須考量由上而下照射是在較後時段來操作。推論：羽狀複葉的上、下葉面皆有光感應的受體存在，且感受光的能力約相同的。

實驗十二、何種光譜區段觸發了葉下珠的上舉運動機制？

一、說明

- (一) 已知紅光、藍光的光譜區段可以使植物進行有效光合作用。
- (二) 因此，選用紅光、綠光、藍光、UV-A 四種強光源來探討。請相關實驗室幫忙測定四種強光源的特性，並測量照度電壓。如下表 12-1、圖 12-1：

種類	紅光	綠光	藍光	UV-A
特性				
波長(nm)	637.96	524.22	452.84	400.08
強度	59336.89	60133.69	60213.53	60367.00
照度電壓(V) (室內測得)	1.55	1.60	1.64	1.92

表 12-1 四種光源的特性

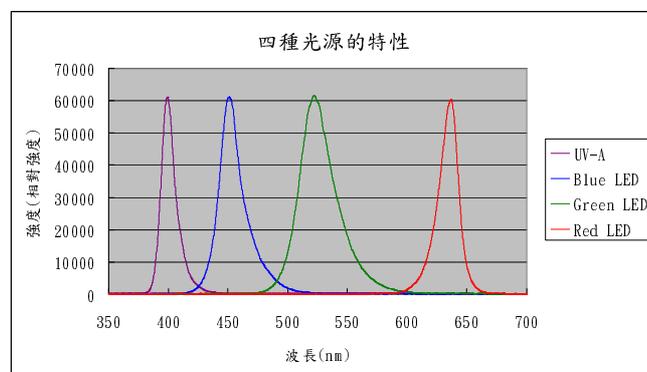


圖 12-1 四種光源的特性

二、步驟

- (一) 無日照下，先以疣果葉下珠進行實驗。
- (二) 以每日的 8-15 時為測量時段，每間隔一小時照射一次，每次 8 分鐘。並持續觀察 12 分鐘。
- (三) 以一天為單位，確定各光源在各時段是否上舉運動後，再更換光源。直到四種光源確定完畢。
- (四) 開啟自製數位顯微鏡並觀測的羽葉是否上舉，並分析與討論上舉運動的情形。
- (五) 觀測植物更換為小返魂，重複步驟(一)-(四)。

三、結果

將上舉結果填入下表中：

品種	時間 光源 上舉	8時	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時
		疣果葉下珠	紅光	否	否	否	否	否	否
	綠光	否	否	否	否	否	否	否	否
	藍光	是	是	是	是	是	是	是	是
	UV-A 光	是	是	是	是	無法判定	是	是	是
	紅+綠光	否	否	否	否	否	否	否	否
小返魂	紅光	否	否(微下)	否	否(微下)	否	否	否	否
	綠光	否(微下)	否(微下)	無法判定	否(微下)	否	否	否(微下)	否
	藍光	是	是	是	是	是	是	是	是
	UV-A 光	是	是	是	否(微下)	是	是	無法判定	是
	紅+綠光	否	否	否	否	否	否	否	否

四、討論

- (一) 依上表推論：在非睡眠運動時，**藍光(453nm)及 UV-A(400 nm)皆可促發上舉運動**，但紅光與綠光不可促發此運動。
- (二) 在室內測得四種光源的強度與照度電壓。因為紅光與綠光的照度電壓較低，所以將兩色光同時打開(2.01V)再測量一次上舉運動的效果，實驗結果是未能促發此運動。**所以光源的波長範圍也是一項促發上舉運動因素之一。**
- (三) 藍光 與 UV-A 何者促發上舉運動效率高須進一步設計實驗來討論？

實驗目的：植物的上舉運動是否是另一種防止紫外線的保護行為。

實驗設計原理：利用疣果葉下珠的延遲上舉的時間來測定。

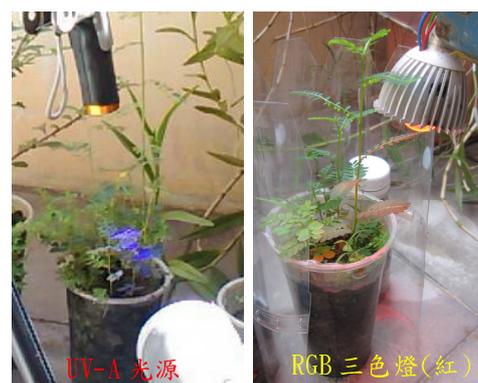


圖 12-1, 12-2 不同光譜區段照射

陸、實驗討論

- 一、以小返魂與疣果葉下珠二種植物為研究上舉運動植物的對象，因為這兩種植物在生物的分類上是同屬不同種，有許多性質是相似，又有許多特質是不同的。而且校園中易取得的植物。故在實驗中可相互比較及討論。
- 二、為了能在實驗中多收集一些數據，我們將縮時攝影的時間間隔設定為每 15 秒拍攝一張照片。當轉換成影片檔後，其檔案大小約小於 20MB。
- 三、有許多的實驗應該在植物實地生長處實施；但考慮到操作的方便性(無日照時間)及儀器的安全性(遺失)，所以用飲料杯栽種植物來測量上舉運動的相關實驗。若實驗項是可以到實地生長處測量的，就會在原生長地方操作，但也增加

- 了實驗上許多的難度(陰晴、人力、儀器、電源等等)。
- 四、自製數位顯微鏡的製作已簡化，有些規格雖都已經訂出來(ex:鏡筒 63.5 公分，直徑是 3 吋半)。製作程序的 SOP 化已用 3D printer 完成並公開於網站中 (<http://class.kh.edu.tw/13806>)。
 - 五、使用自製光照度計時，光敏電組都儘量靠近待測羽狀複葉，已減少羽狀複葉受光的測量差異。
 - 六、自製光照度計的單位未轉換成一般照度的單位 Lux，用 0~5V 的電壓來表示。
 - 七、本實驗常以調整光源與羽狀複葉間的距離，來改變光照的強度。
 - 八、小返魂與疣果葉下珠的上舉運動的照度電壓應會有所差異，本實驗尚未明確去測量。
 - 九、高度與位置的上下跳動往往是因為風吹動所影響的。但用此方法來觀測整個“上舉運動”變動趨勢是很明顯的。
 - 十、使用 Tracker 軟體時，未轉換成公制長度來表示。公制單位有其優點，但本實驗中要表達是變化量，所以直接使用 Tracker 軟體的數值。然轉成公制長度的部分仍會持續努力。
 - 十一、使用 RGB 三色燈，是因為需要高強度的 LED 燈且三色光的照射高度、角度及照度儘量相同。
 - 十二、相信仍有更多的特性，例如：“照光越久與羽狀複葉上舉運動的越高”，上舉的高度有限制嗎？是哪一個因素來決定的？仍須持續努力。
 - 十三、比較小返魂與疣果葉下珠的上舉運動行為的差異，也是可以探索的方向。

柒、結論

- 一、可促發上舉運動的“人工光源”的取得，是探索上舉運動的“關鍵”，在此關鍵之下，探討了羽葉的日照上舉與向前閉合睡眠的兩運動差異性。上舉運動僅在白天非睡眠運動期間進行。由光能引發且在某一定強度下才會產生的運動型態；在不同品種比較時，疣果葉下珠會發生遲滯上舉的現象；當不同強度、每天不同時段時，所上舉運動的高度皆不同；上葉面與下葉面皆有光的受器存在；藍光與 UV-A 光譜區段的才能促發上舉運動。
- 二、目前尚在研究的有：
 - (一)、藍光與 UV-A 何者促發上舉運動的效果較佳。
 - (二)、光受器是如何分布在羽葉上。
- 三、從能量的觀點來說，藍光與 UV-A 是光生化學能轉成機械能的關鍵，如何善用此關鍵將能量轉換成可利用的能源且此能量有再生及零污染的特性存在。亦是能源方面另一項研究議題的方向。
- 四、從機械的觀點來說，無論是上舉運動或是睡眠運動都是多維度的運動；動物需要以關節及肌肉來完成此動作，機械需要轉軸來完成此動作，那麼此植物是用何種機制來完成此動作的呢？雖然膨壓是動力來源，但多維度的運動是如何協調出來的呢？也是另一項探討的方向。

五、從演化過程的觀點來看，上舉運動若是避熱及減少葉子的水分蒸發為目的，那光受器應接受紅光或遠紅外區的光線才會有相關性；但光受器卻是接受藍光甚至是 UV-A，難道還有比散失熱量還要重要的事情存在嗎？這就如同演化過程中，吃不到樹葉長頸鹿是希望得是腿變長而非脖子變長，雖然長腿對於吃樹葉有幫助，但腿的功能是跟行走有關，所以我們應該會有長腿鹿的物種出現才對。

捌、參考資料及其他

- 一、小返魂 @ 烈嶼觀察筆記 :: 痞客邦 PIXNET ::。民 102 年 09 月 16 日，取自：
<http://taconet.pixnet.net/blog/post/35711697>
- 二、疣果葉下珠 @ 烈嶼觀察筆記 :: 痞客邦 PIXNET ::。民 102 年 09 月 16 日，取自：
<http://taconet.pixnet.net/blog/post/35702049>
- 三、植物在逆境下的生理反應。民 102 年 09 月 16 日，取自：
<http://life.nthu.edu.tw/~lsly/phy/g1.html>
- 四、Comm_port 軟體、TakeSnapshot 軟體。民 104 年 03 月 16 日，取自高雄市資優中心互動網：
<http://class.kh.edu.tw/12821>
- 五、複式顯微鏡成像原理。2015 年 4 月 8 日，取自
http://w1.chjhs.tyc.edu.tw/jim5631/slides/light_eyes/light_eyes.pps
- 六、阿簡生物筆記:用 tracker 分析植物生長動態。2015 年 4 月 8 日，取自
<http://a-chien.blogspot.tw/2012/10/tracker.html>
- 七、Tracker 的官方網頁。2015 年 4 月 8 日，取自 <http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker>
- 八、Arduino – Home。2015 年 4 月 8 日，取自 <https://www.arduino.cc/>
- 九、movie-maker。2015 年 4 月 8 日，取自
<http://windows.microsoft.com/zh-tw/windows/movie-maker>
- 十、膨壓運動補充。2015 年 4 月 8 日，取自 <http://ms1.hkjh.tc.edu.tw/~pei14/add352.htm>
- 十一、謝瑾安、簡瑜霆、陳逸帆，高雄市 102 年度國中學生獨立研究成果發表競賽 國中組 自然類：探討分析兩種葉下珠植物的睡眠運動模式。
- 十二、蔡佩穎、劉丞軒，中華民國第五十二屆中小學科展 國中組 生物科：不讓你睡~睡眠運動植物適應時差變化節奏之研究。
- 十三、鄭立欣、唐立怡、林宥成，中華民國第五十一屆高雄市中小學科展 高中組 化學科：X 的晶奇秘辛—探討晶體的成長。
- 十四、原作者:Willian G. Hopkins、P. A. Huner,編譯者:徐善德、廖玉琬,植物生理學, 初版, 台北,偉明圖書有限公司/范國宗, 2006 年 5 月, ISBN:986-81295-2-4
- 十五、楊仲準(2012/2), 生活中的物理(下): 錄影好好玩—由影像追蹤學物理, 科學研習月刊 國立臺灣科學教育館, No. 51-2
- 十六、楊仲準(中原大學 物理系 2012), 應用於物理教學之影像數位分析技術, 物理教育學刊, 第十三卷第一期, 41-50,
<http://phys5.ncue.edu.tw/physedu/article/13-1/5.pdf>