# 中華民國第 57 屆中小學科學展覽會
# 作品說明書

---

高級中等學校組　植物學科

## 第一名
## 最佳創意獎

052102

## 光與熱—再探葉下珠上舉運動的特性

學校名稱：國立中山大學附屬國光高級中學

| 作者： | 指導老師： |
| --- | --- |
| 高二 謝瑾安 | 黃翠瑩 |
| 高二 吳怡蓁 | 謝宜和 |


關鍵詞：加成性、傾性、綠色能源

# 得獎感言

這份作品伴著我們差不多快五年了，一路上要感謝得太多就一起說聲謝謝了。我真的很感謝你們。

隻字片語無法道盡我對這篇作品的種種，有發現新事物的開心，也有時間被零散到不能再零散的急躁等等。我們是有感情的，五味雜陳，它彷彿已成為我的朋友，成為我的習慣，一個例行公事。這些草就一部份就種在我家，若現在全數拔去，免不了心理空蕩蕩的。我曾經不想再做了，累了，但這就好像我的義務一樣，我必須把它完成。對我來說，它是一個很特別的存在，這些草就長著長著，誰會知道它藏著如此有趣的事情？估計對這些草來說，我們也很奇怪吧，每天一直被看著，應該會害羞吧！

除了感謝還是感謝，不只感謝郭校長及行政人員、老師、家人、夥伴、中山大學光電實驗室的大學長，最重要的感謝草兒，因為有你們，才有現在的我們，謝謝！在此能為學校，高雄市爭光，實在是我們的榮譽，謝謝！

和老師們在校園一同留影

和同學在比賽會場一同拍攝

得獎時一同留影

# 摘要

為更深入瞭解光與熱等環境因素，對葉下珠植物上舉運動的影響。運用 3D 列印技術提高自製顯微鏡的品質，並製作控溫箱來操控溫度變因。發現葉面上“光受器” 區域分布不均、特定波長範圍的光源和溫度升高皆可因發上舉運動。同時間照射不同波長的光對上舉程度有加成性，光與熱的刺激也會產生加成性。本研究提出光、熱和上舉運動三者之間的關係模型，運用這兩種加成性來解釋陽光照射時所產生的上舉程度，這不是單一光波長或熱能所造成的結果；並藉以探討膨壓所產生相關機械能的使用性。

# 壹、 研究動機

關於葉下珠的研究，又經過一年的收集暨分析實驗數據，並和師長們討論，我們將此次實驗重心放在“光”對於上舉運動的探討。由於“光”和“熱”關係密切，且對於上舉運動還有許多不確定的因素存在，故此次研究以光與熱對上舉運動之影響為主軸。

# 貳、 研究目的

一、 以位置與時間的關係圖說明上舉運動和睡眠運動的差異。
二、 找出葉面上光受器的分布區域。
三、 不同波長的光源對上舉運動的影響。
四、 以光、熱的加成性來說明陽光照射時的上舉程度。
五、 建立光、溫度、上舉運動三者關係模型。
六、 探討植物受外界環境刺激所產生機械能的重覆性、可用性及潛力。

# 參、 研究設備及儀器

一、硬體（自製數位顯微鏡的改良、自製數位天氣瓶、自製腳架與控溫箱）：

(一) 自製數位顯微鏡：

1. 材料：WebCam、凸透鏡、水管、角鋼、膠帶、鋸子、銼刀、3D 列印技術製成的材料、3D Printer。
2. 原理：以複式顯微鏡的原理為製作基礎。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)。故放大倍率是兩片凸透鏡倍率的相乘且為放大倒立的虛像。

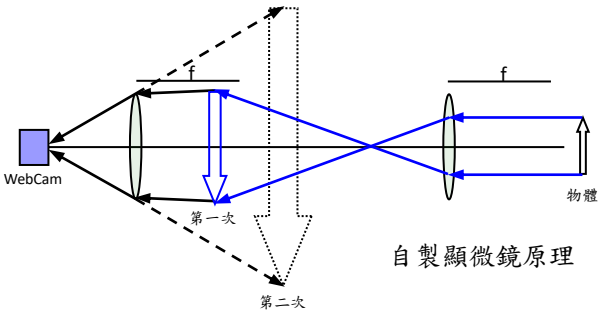
3. 之前的儀器缺點：

(1) 製作出來的鏡筒品質很難控制。

(2) 鏡片因使用時間過長有鬆脫現象。

(3) 接物鏡與接目鏡的兩主軸很難對齊。

(4) Webcam 的鏡架大小不相同，會影響實驗數據。



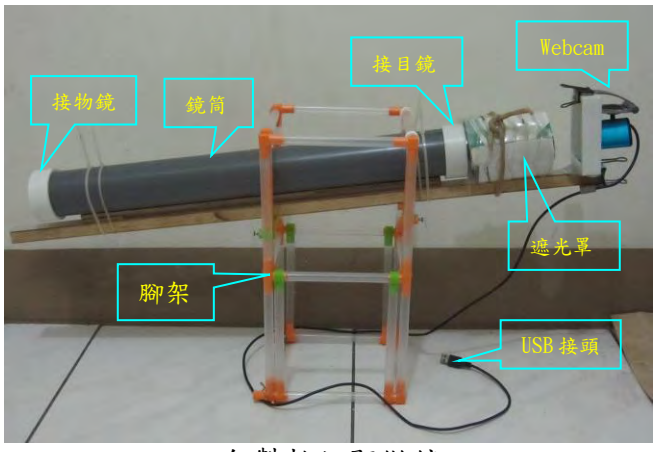
自製顯微鏡原理

4. 各裝置名稱及改進方式：

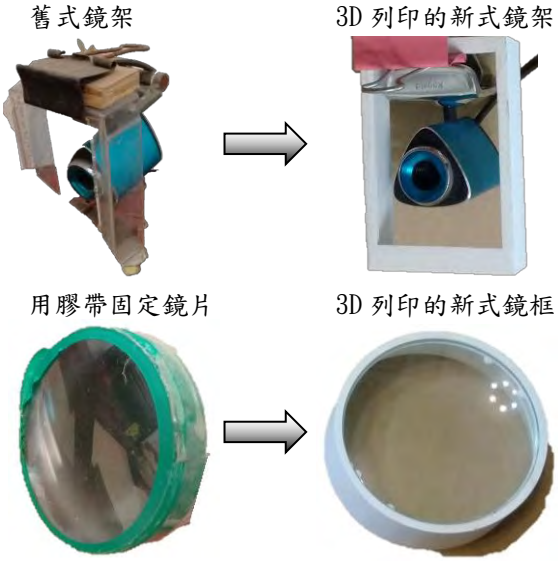
(1) 目的：想利用 3D 列印的技術改良此問題，希望能讓自製儀器的品質穩定並提高實驗觀測的效果。

(2) 步驟：運用 123D（塑模）及 Cura（切片）建立鏡框、鏡座模型，並在 3D 列印機（CR-8）製作。

(3) 實際圖：



自製數位顯微鏡



利用吸管和 3D 列印的接合器製作腳架

(二) 自製數位天氣瓶：

1. 材料：Arduino UNO、光敏電阻、BMP180 晶片（氣壓、溫度）、BH1750 晶片（光照度）、AM2302 晶片（溫度、濕度）、DS1307RTC（計時模組）、SD 卡模組。

數位天氣瓶示意圖

2. 說明：

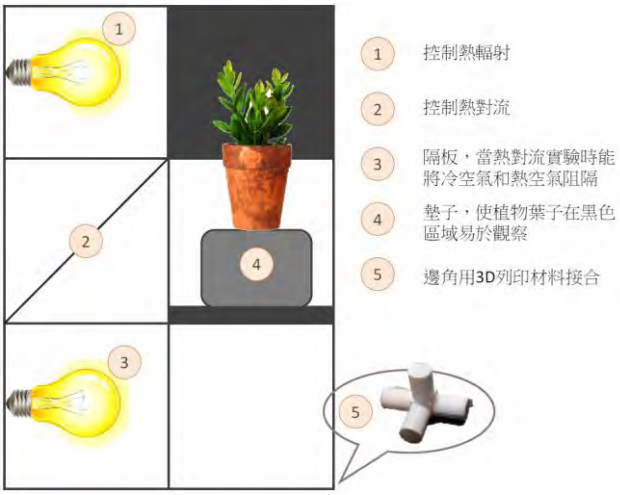
(1) 數位天氣瓶被設定成每隔 5 秒，會依序將日期、時間、相對濕度、溫度 1（℃）、電壓照度（伏特）、照度（Lux）、溫度 2（℃）、氣壓（Pa）存入 SD 卡。如下表。

(2) 其中“溫度 2”的數值被校正過的，為較準確的溫度值。

```
2017/2/15 1:58:12 ,Humidity: 69.90 ,Temperature: 17.00 , Lightness_Volt: 0.00 ,Lightness_Lux : 0 ,Temp2 : 15.70 ,Pressure : 102750 ,
2017/2/15 1:58:18 ,Humidity: 69.90 ,Temperature: 17.00 , Lightness_Volt: 0.00 ,Lightness_Lux : 0 ,Temp2 : 15.70 ,Pressure : 102756 ,
2017/2/15 1:58:23 ,Humidity: 69.90 ,Temperature: 17.00 , Lightness_Volt: 0.00 ,Lightness_Lux : 0 ,Temp2 : 15.70 ,Pressure : 102747 ,
2017/2/15 1:58:29 ,Humidity: 69.90 ,Temperature: 17.00 , Lightness_Volt: 0.00 ,Lightness_Lux : 0 ,Temp2 : 15.70 ,Pressure : 102748 ,
2017/2/15 1:58:35 ,Humidity: 69.90 ,Temperature: 17.00 , Lightness_Volt: 0.00 ,Lightness_Lux : 0 ,Temp2 : 15.70 ,Pressure : 102757 ,
2017/2/15 1:58:41 ,Humidity: 69.90 ,Temperature: 17.00 , Lightness_Volt: 0.00 ,Lightness_Lux : 0 ,Temp2 : 15.70 ,Pressure : 102747 ,
```

(三) 自製腳架與控溫箱：

1. 材料：粗吸管、保鮮膜、3D 列印技術製成的材料、扣環、塑膠板、燈泡（傳統鎢絲燈泡 60W）。
2. 原理：熱有三種傳遞方式。其中在空氣中最主要是熱輻射和熱傳導。熱輻射，是一種物體用電磁輻射的形式把熱能向外散發的熱傳遞方式。可在不需要介質的條件下來進行。熱對流，是指由於流體引起各部分之間發生相對位移（對流），冷熱流體相互混合所引起的熱量傳遞過程。我們利用此原理製作控溫箱，為保持內部熱量不散失，用保鮮膜包覆整個儀器外圍，並以感測器及燈泡加熱來維持控溫箱的恆溫。
3. 構造圖：




4. 實際圖：

5. 操作方式：熱輻射，開啟 A 燈泡即可操作；熱對流，開啟 B 燈泡，將隔板做區隔藉此達到熱對流之效果；C 是溫度感測器；D 是腳架。

二、軟體： TakeSnaphot 軟體（定時拍照）、Movie Maker 軟體（轉成影片）、Tracker 軟體（分析運動影片）、ACD see 軟體（瀏覽圖片用）、Arduino 軟體。

# 肆、 研究過程與方法

## 一、文獻探討：

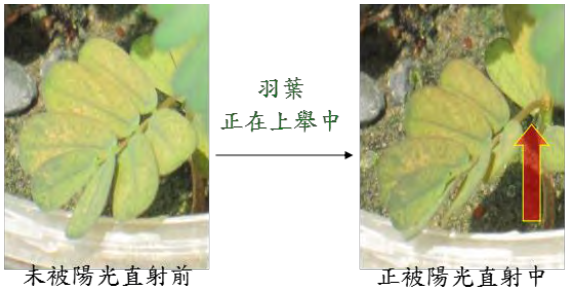
(一) 小返魂與疣果葉下珠二種植物在生物學的分類地位與特性如下：

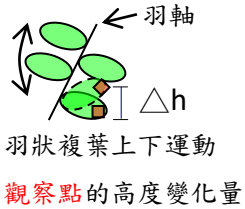
| 名稱 | 中文名:疣果葉下珠<br>學名:*Phyllanthus hookeri Muemll. – Arg.* | 中文名:小返魂<br>學名: *Phyllanthus amarus Schum & Thonn.* |
|---|---|---|
| 分類地位 | 植物界/木蘭植物門/木蘭綱/大戟目/大戟科 *Euphorbiaceae*/油柑屬 *Phyllanth* | 植物界/木蘭植物門/木蘭綱/大戟目/大戟科/*Euphorbiaceae*/油柑屬 *Phyllanth* |
| 別名 | 珠仔草、葉下珠 | 葉下珠、苦味葉下珠、珠子草、 |
| 外貌特徵 | 全株有毛，植株長 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。 | 一年生草木，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 | <br>圖二 疣果葉下珠果實與花近照 | <br>圖三 小返魂果實與花近照<br>照片取自 102 年度國中學生獨立研究成果發表競賽 |

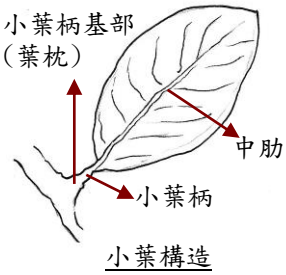
註：因為在兩者的別名中皆有葉下珠，**故以“葉下珠”統稱這兩種植物。**

(兩者皆屬於向前閉合的睡眠運動)

(二)上舉運動：受日光照射時，有些植物為降低葉面的溫度，改變葉面角度(使中肋偏向光源)，從觀察者的角度來看，葉子由與地面平行，進而運動成似乎向垂直上舉的狀態。



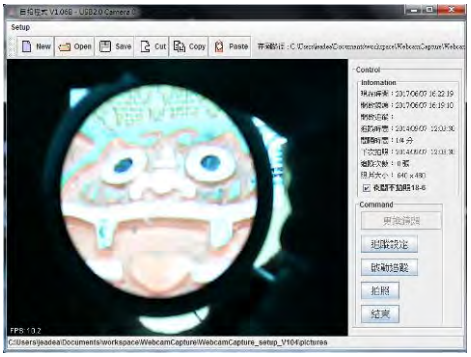




在實驗中，上舉角度不超過 90 度，因高度變化容易測量所以採用高度表示。**上舉程度：**即是在相同時間內觀察點的高度變化量，以△h 表示。

## 二、 研究方法：

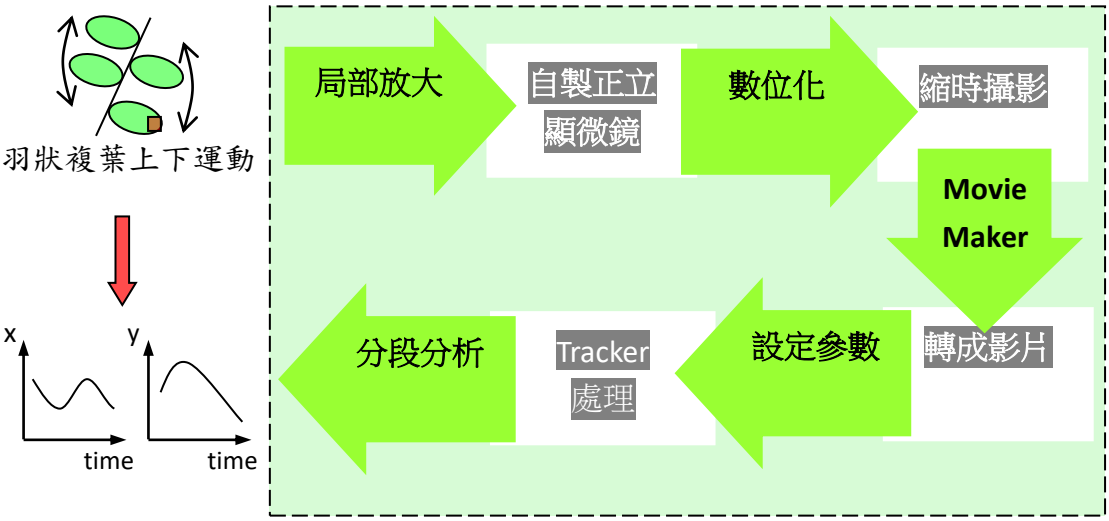
(一) 資料取得方式：軟體操作過程：

1. 將自製儀器的 USB 接上 Raspberry，並啟動自拍軟體，設定每 15 秒拍攝一次照片。
2. 放置觀察物距自製儀器接物鏡約 1f~2f 之間，並調整鏡筒角度，使觀測清晰。
3. 設定照片的儲存位置，按下拍照鈕並查看儲存位置的檔案。
4. 檢視拍照環境有無反光或背光情形。啟動自拍功能後檢視系統的運作情況。
5. 利用 Arduino 軟體結合電路板控制溫度和各光源。

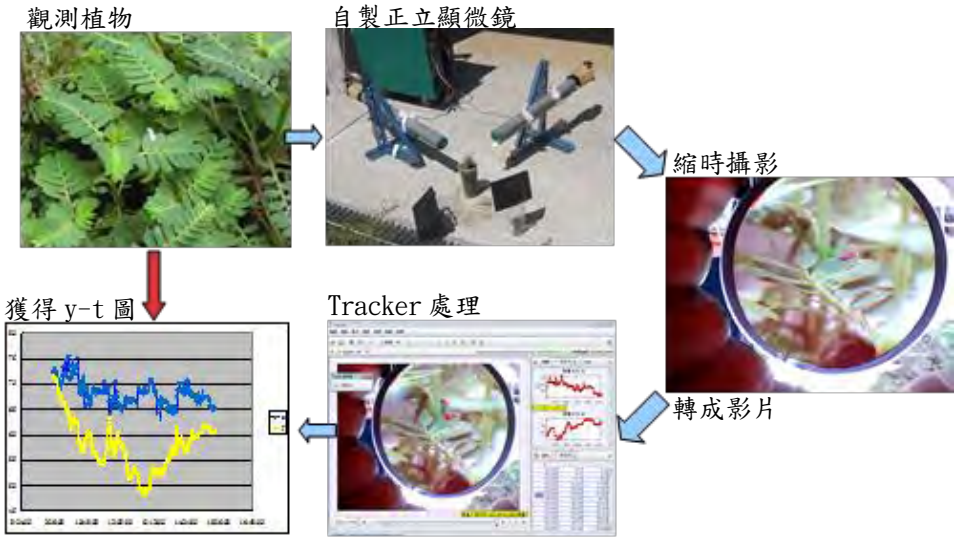


(二) 自製光學儀器及資訊科技的整合：

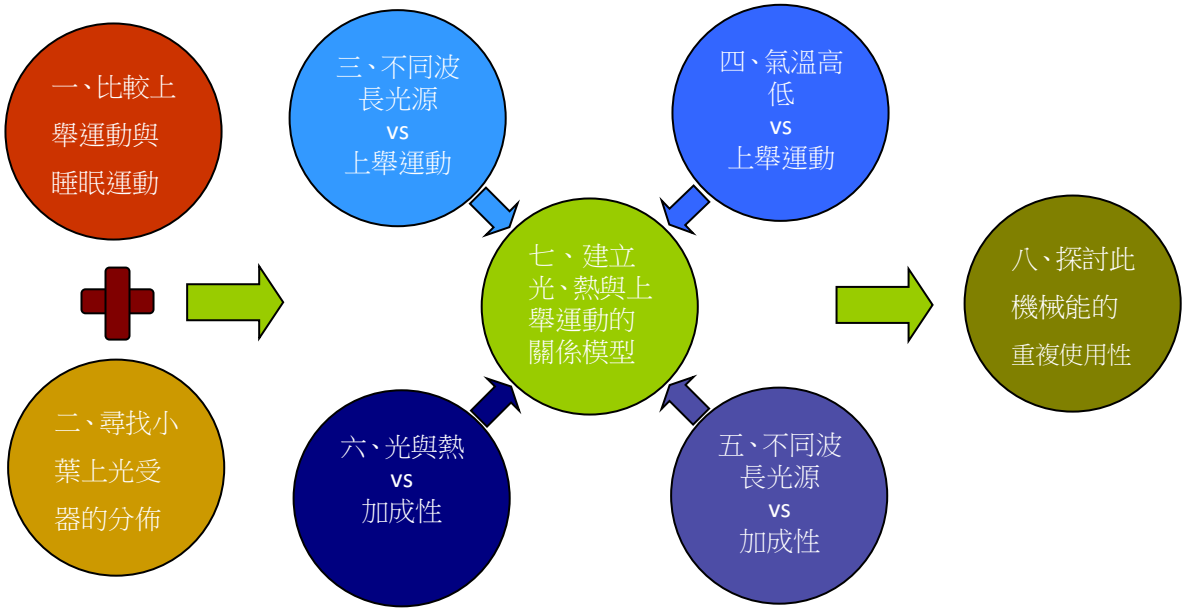
1. 示意圖：




2. 實際圖：



## 三、實驗流程及步驟：




（一）比較出兩種運動的不同：表列上舉運動和睡眠運動的差異。

（二）尋找葉面上光受器的分布：探討光受器的位置分布位於葉面?還是在小葉柄表面。

（三）不同波長的光源對上舉運動的影響：尋找引發上舉運動的波長範圍。

（四）氣溫高低對上舉程度的影響。

（五）不同波長光源對上舉程度是否有加成性：在可引發上舉運動的波長範圍內，同時照射不同波長，探討上舉程度的影響。

（六）光與熱對上舉運動是否有加成性：光和熱同時作用時，對於上舉程度的影響。

（七）建立光、熱、上舉運動三者關係模型：利用上述實驗結果，建立三者的關係模型。

（八）在不影響每日睡眠運動下，安裝掛勾來載重，希望此機械能可以重複被使用。

# 伍、研究結果

## 實驗（一）：比較上舉運動和睡眠運動的差異

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. 用貼紙當作標籤可以讓肉眼清楚觀察到植物運動；但小葉上舉過程呈現不同的角度會使拍照的標籤變型，進而讓 tracker 軟體不易分析出運動的座標圖數據出來。
3. 由於球體從任何角度拍照都是圓形，思考如何製作微小球體標示物，並貼於小葉上，而且不改變小葉原本的運動，讓此標示物作為實驗的分析點。

步驟：

1. 用火燒約直徑 0.5cm 的釣魚線，使成球體。剪斷後並用貼紙固定在小葉上。
2. 依儀器操作程序，拍照記錄同一小葉上舉運動(am 9:00-12:00)與睡眠運動(pm15:30-17:30)。
3. 用 tracker 軟體分析出運動時的數據資料，作圖討論。(Y 軸位置就是小葉高度 h)

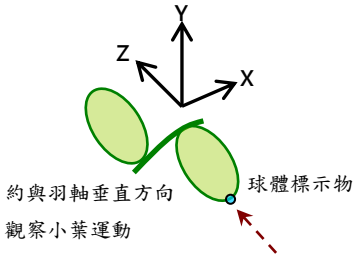



圖 1-1 小葉運動與觀測方向

結果：

1. 比較上舉運動和睡眠運動的差異
   a. 小葉可在上、下方向來回數次。

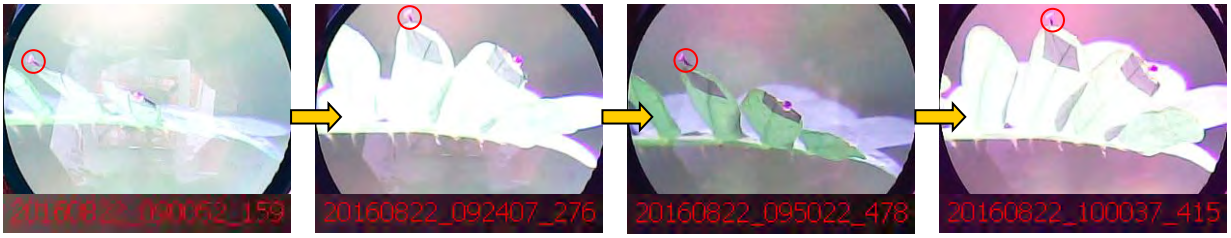



圖 1-2 上舉運動的縮時照片

   b. 小葉會以“中肋”及“小葉柄基部”為旋轉中心各轉動一次。

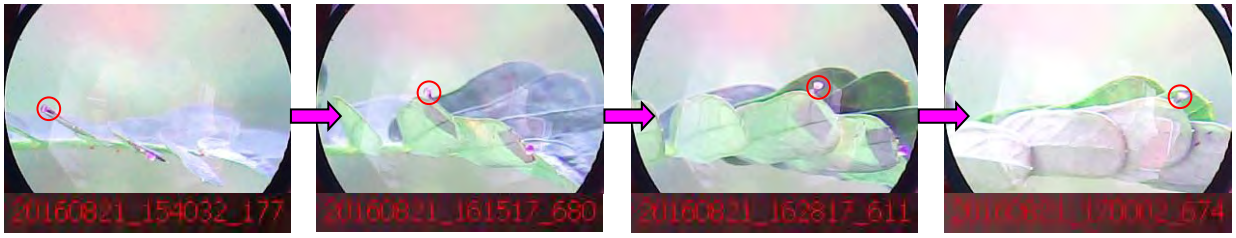



圖 1-3 睡眠運動的縮時照片

2. 分別在上舉運動及睡眠運動時，作出小葉高度與時間的關係圖：

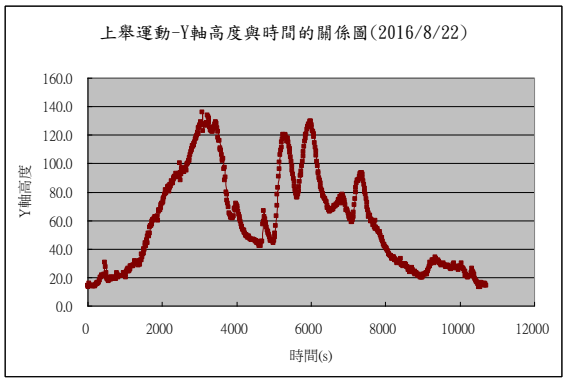



圖 1-4 疣果葉下珠進行上舉運動 y-t 圖

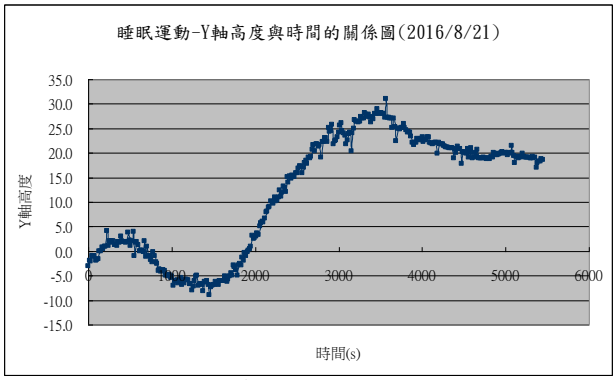



圖 1-5 疣果葉下珠進行睡眠運動 y-t 圖

討論：

1. 比較上舉運動和睡眠運動的差異，分析後填入下表中：

表 1-1 上舉和睡眠運動的比較

| 運動種類 / 分析方式 | 上舉運動 | 睡眠運動之向前閉合 |
|---|---|---|
| 運動時間 | 非睡眠時間 | 睡眠時間 |
| 作用原因 | 因強光而引起的膨壓 | 因生理周期而引起的膨壓 |
| 作用時機 | 當陽光直射的時候 | 約在每日下午 3:30 後<br>夏季較晚，冬季較早。 |
| 進行時間的長短 | 生長地點的日照時間長短<br>(約 11000 秒) | 開始進行睡眠運動(小葉轉動)<br>至小葉閉合不動 (約 5500 秒) |
| 葉面轉動 | 不轉動 | 會轉動(且是兩次 90°) |
| 運動路徑與圖型說明 | 1.因受日照強度的強弱影響，小葉會先上後降好幾次<br>2.被照射時，線段向上；未被照射時，線段向下。 | 1.從開始一直進行至小葉閉合，一次完成<br>2.因為是兩次轉動，所以會以連續弧線呈現。 |

2. 球體標示物的靈感來自葉子上的小水滴，其材質是釣魚線經加熱縮成球體。這說明了小葉是可以載重，並且此小葉高度與其他小葉高度不會有明顯差異。

圖 1-6 球體標示物靈感圖

## 實驗（二）：尋找葉子上光受器的分佈情形

說明：在文獻中，上下葉面皆有“上舉運動”的光受器，那麼光受器是均勻分布在葉面上嗎？

步驟：

1. 用 3D printer 製作矩形孔燈罩，使圓形光源變成矩形光源(16×4.5 mm)。並在光源與燈罩之間放入鋁箔，加強遮罩效果。
2. 將矩形光源照射在疣果葉下珠之羽葉的 A 區與 B 區上。
3. 以 1 小時為時間距，將白天分 8 個時段(am8:00 ~pm15:00)
4. 先照射 A 區，每個時段照射 8 分鐘後，觀察紀錄並分析出是否發生上舉運動，移開光源再觀察 12 分鐘，共觀察 20 分鐘。重複數天。
5. 再照射 B 區，重複步驟 3-4。

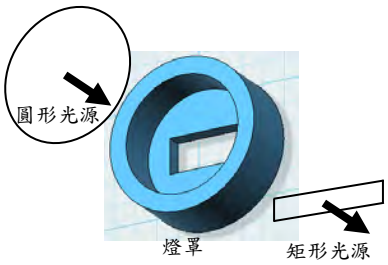



圖 2-1 燈罩功能

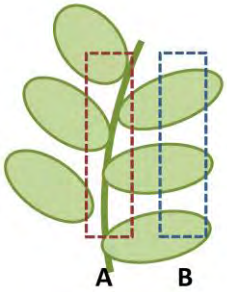



圖 2-2 羽葉的 A、B 區

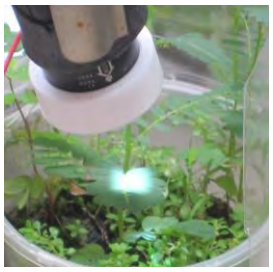


圖 2-3 矩型光源照射 A 區

結果：

1. 強光照射方式與觀察角度如下：

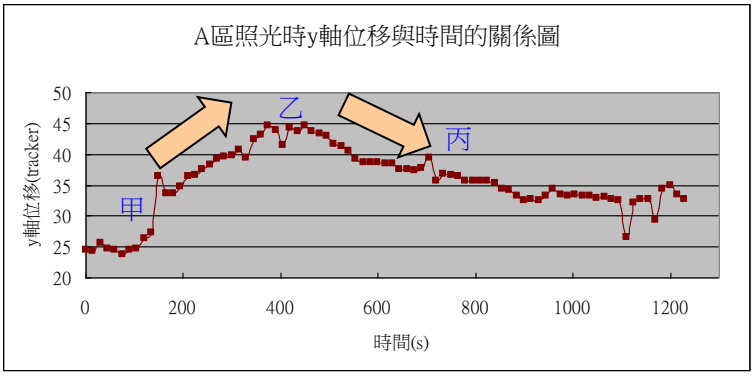
表 2-1

| 照射方式<br>觀察角度 | 無照射 | 照射 A 區 | 照射 B 區 |
|---|---|---|---|
| 相機 | | | |
| 自製顯微鏡 | | | |

2. 如何區分是因“人工強光”使小葉發生“上舉運動”：20 分鐘(1200 秒)為一個測量時段，前 8 分鐘(480 秒)照射強光，後 12 分鐘不照強光，小葉會行先上舉後下降的運動，這才是因“照射強光”而產生“上舉運動”。數據處理與說明如下：

＊ A 區照光為例：(2016/9/21　pm 13:00)

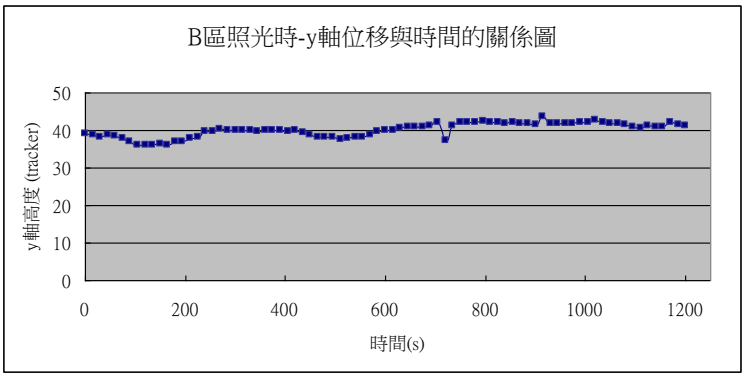
圖 2-4 A 區縮時攝影




此次實驗結果是因照射在“光受器”上而引發上舉運動。
記為：“○”

圖 2-4

＊ B 區照光為例：(2016/9/20　pm 13:00)




此次實驗結果是未照射在“光受器”上。
記為：“x”

圖 2-5

3. 分析各時段的實驗結果：

表 2-2

| | 天數　時段 | AM 8 | AM 9 | AM 10 | AM 11 | AM 12 | PM 1 | PM 2 | PM 3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A 區 | 第 1 天 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 第 2 天 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| B 區 | 第 1 天 | × | × | × | × | × | × | × | × |
| | 第 2 天 | × | × | × | × | × | × | × | × |

註：a. ○：上舉　，　x：不上舉。

b. 疣果葉下珠：8/27-B 區、8/29-A 區、8/30-A 區、8/31-A 區、9/1-B 區、9/20-B 區、9/20-B 區、9/21-A 區

c. 小返魂：9/22-B 區、9/23-B 區、9/24-A 區、9/25-A 區

4. 改用小返魂重複實驗，仍獲得相同的結果。

討論：

1. 綜合上述實驗結果：

表 2-3

| 照射區域 | A 區 | B 區 |
|---|---|---|
| 是否上舉運動 | 有 | 否 |

2. 找出促發上舉運動的光受器位置：

a. 此實驗結論：**光受器應分佈在產生葉枕組織的表面上(附近)，而不是均勻分布在小葉的上、下葉面上**。嘗試進一步推論：“如此方能即時將環境的訊息快速傳遞並產生相對應的行為”。

b. 發生上舉運動的流程應是：在白晝晴天時，用可引發上舉運動的光源照射在光受器上，此光源可引起葉子的生化反應，開始改變小葉柄基部的膨壓造成小葉上舉運動。反過來說，當光源未照射在光受器時，就無法引發這一系列的反應與運動。就利用此原理來尋找此光受器的分布情形，而 A 區包含了小葉少部份、小葉柄，小葉柄基部及羽軸。

c. 實驗時，為何要交叉日期測量照射區域：為了測試實驗結果是否有再現性或有無其他因素會影響。

d. 不是一開始就用矩形孔燈罩實驗，而是先用圓形孔燈罩。結果燈罩孔不是太小無法產生上舉，就是燈罩孔太大無法區分小葉上的區域。經過嘗試各種形狀的燈罩後，才改用方形孔(如圖)。

圖 2-6 各式燈罩設計

e. 小葉隨著環境變動會略上略下，觀測時間是早上 8 時到下午 15 時共 8 次，一天中超過 5 次產生“先照光上舉，不照光下降”的行為(每 20 分為一個測量時段)，才能判定“上舉運動”是光受器接受強光而產生的。

## 實驗（三）：不同波長的光源對上舉運動的影響

說明：已知不同的光波長會使植物產生不同的作用，例如紅光、藍光的波長可以使植物進行有效光合作用。希望能找出引發上舉運動的波長光譜為何？

步驟：

1. 測定七種光源的特性。(波長光譜、強度)。
2. 無日照下，先以疣果葉下珠進行實驗。以每日的 8-15 時為測量時段，每間隔一小時照射一次，每次照 8 分鐘後，移開光源，並持續觀察 12 分鐘。
3 開啟自製數位顯微鏡並觀測小葉是否上舉，分析與討論上舉運動的情形。
4. 以一天為單位，測量每一光源是否引發上舉運動；再更換另一光源，直到七種光源測試完成。
5. 更換觀測植物為“小返魂”，重複步驟 1 至 4。

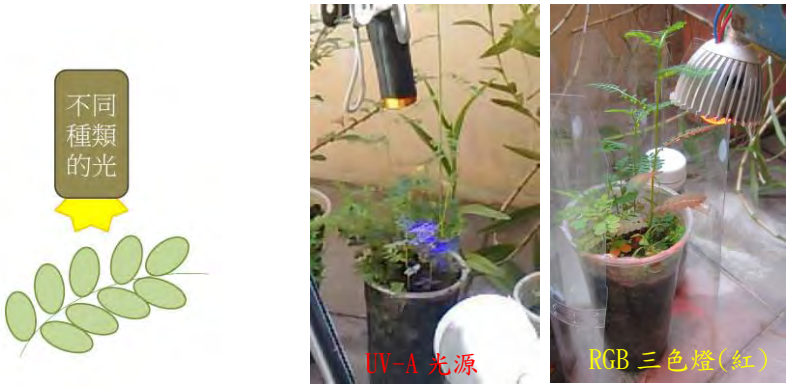



圖 3-1 實驗的示意圖與裝置圖

圖 3-2 七種光源

結果：

1. 各種光源的特性(皆為 LED 光源)：

表 3-1 各光源特性

| 種類<br>特性 | 紅光 | 綠光 | 藍光 | UV-A | UV-A | 強白光 | 黃光 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 波長(nm) | 637.96 | 524.22 | 452.84 | 400.08 | 369.87 | 446.73*<br>541.64 | 454.64<br>584.03* |
| 強度(相對強度) | 59336.89 | 60133.69 | 60213.53 | 60367.00 | 58960.00 | 60718.74 | 61953.93 |

ps: “*”是主要的強光波長。

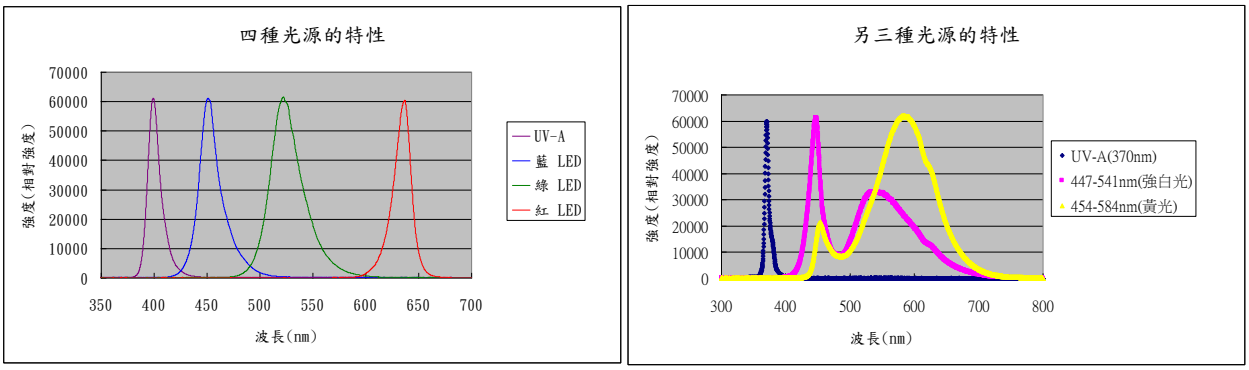



圖 3-3 各光源的光譜

2. 運用實驗二的數據處理方法，分析不同波長光源對上舉運動的影響，如下：

表 3-2

| 種類 | 紅光 | 綠光 | 藍光 (453nm) | UV-A (400nm) | UV-A (370nm) | 強白光 | 黃光 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 是否上舉 | × | × | ○ | ○ | × | ○ | × |

○：能上舉運動　×：不能上舉運動

討論：

1. 依上表實驗結果：在非睡眠運動時，**藍光(453nm)及 UV-A(400 nm)皆可促發上舉運動**，紅光與綠光不能促發此運動。
2. **強白光可促發上舉運動**，其藍光(447 nm)強度大於綠光(542nm)。**黃光不可促發上舉運動**，其藍光(455 nm)強度小於綠光(584nm)。故混合波長的光源時，須以主要強度的光源而定。
3. 綜合以上實驗，得出光譜與上舉運動的關係圖：

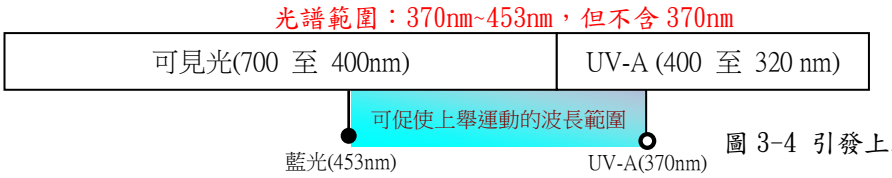



圖 3-4 引發上舉的光譜範圍

4. 發現陽光照射比使用任何單一人工光源照射的上舉高度“**高得多**”。如圖：

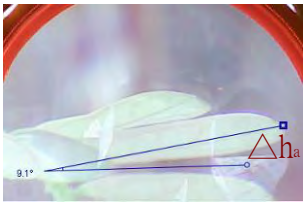



圖 3-5 太陽未照射(9.1°)

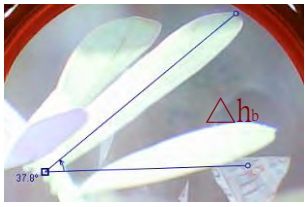



圖 3-6 太陽照射 8min(37.8°)

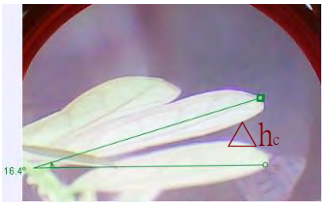



圖 3-7 單一光源照射 8min(16.4°)

**高低順序：△$h_b$ > △$h_c$ > △$h_a$**

## 實驗（四）：氣溫高低對上舉程度的影響

說明：之前的實驗記錄中，雖有記錄氣溫，但僅當作參考。經過實驗比對後發現，氣溫和上舉程度似乎有某種關聯性，故再次探討氣溫的影響。

步驟：

1. 選用疣果葉下珠為對象，並以波長 400nm 的光源照射。
2. 對照組：利用控溫箱，將溫度恆溫在 30℃，照光產生上舉運動。
   實驗組：等待寒流來襲時，測量氣溫，照光產生上舉運動。
3. 實驗完後取 2 次的資料，算出高度變化量後，計算平均值。
4. 用自製儀器紀錄實驗數據並進行分析。

結果：

1. 對照組（控溫箱中 30℃）為 02/04 的 12 時、13 時。
2. 實驗組（寒流來襲 13℃）為 02/11 的 12 時、13 時。

表 4-1 各組的上舉高度變化

| | 對照組 | 實驗組 |
|---|---|---|
| △h1（12 時） | 4.3 | 2.0 |
| △h2（13 時） | 3.8 | 2.0 |
| 平均△h | 4.1 | 2.0 |

3. 列出以下“環境情形”(平均氣溫、平均相對濕度)

表 4-2 環境狀態值

| 日期(月/日) | 氣溫(℃) | 濕度(%) |
|---|---|---|
| 02/04（下午） | 21.2 | 65.2 |
| 02/11（下午） | 13.2 | 62.6 |

討論：

1. 從對照組與實驗組的比較之中(約 2 比 1)，<u>上舉程度會隨著氣溫下降而明顯減少</u>。
2. 由於此類植物多分布在熱帶及亞熱帶，溫度也介於 30℃附近，故最高溫訂為 30℃。而 21.2℃是實驗當時環境溫度。

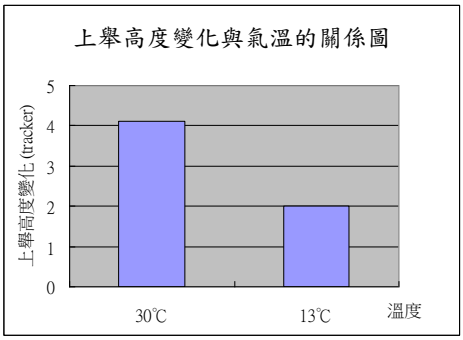



圖 4-1 上舉高度與氣溫的關係圖

## 實驗（五）：不同波長光源對上舉運動是否有加成性

說明：從實驗(三)的結果得知能促使上舉運動產生的光波長需在特定範圍(370nm~453nm，但不含 370nm)。在此範圍內，不同波長的光源先後次序照射後產生何種變化呢？

步驟：

1. 無日照下，以每日的 8-15 時為測量時段，每間隔一小時測試一次(共八次)，以一天為單位進行實驗。
2. 測試流程為：「在控溫箱中預熱 10 分鐘，使其固定溫度在 30℃左右，設定先以“A 光源”（453nm）照射 8 分鐘，再開啟“B 光源”（400nm）一同照射 8 分鐘。
3. 開啟自製數位顯微鏡 觀察與紀錄小葉運動情形。
4. 之後關閉熱源與光源。重複步驟 1-4，數天。
5. 更換照光順序 ：先“B 光源”（400nm）照射 8 分鐘，再開啟“A 光源”（453nm）一同照射 8 分鐘。重複實驗步驟 1-4。
6. 改以 A 光源照射 16 分鐘，重複步驟 1-4。
7. 改以 B 光源照射 16 分鐘，重複步驟 1-4。
8. 繪製 先 A 光再 B 光 的 △h 與 time 的關係圖。
9. 繪製 先 B 光再 A 光 的 △h 與 time 的關係圖。
10. 分析與討論實驗結果。

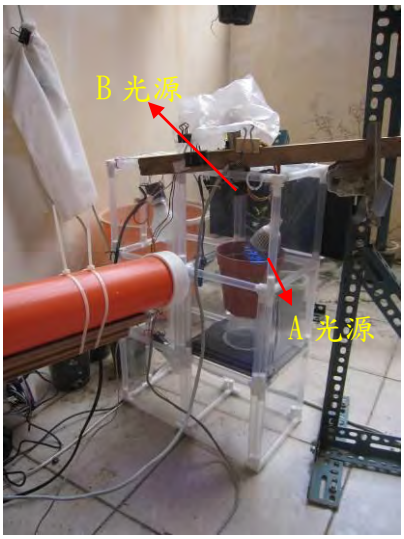


圖 5-1 儀器裝置圖

結果：

1. 兩種光源及控溫箱的裝置，如圖 5-1。
2. “先照射 A 光再加入 B 光”的作圖 3. “先照射 B 光再加入 A 光”的作圖

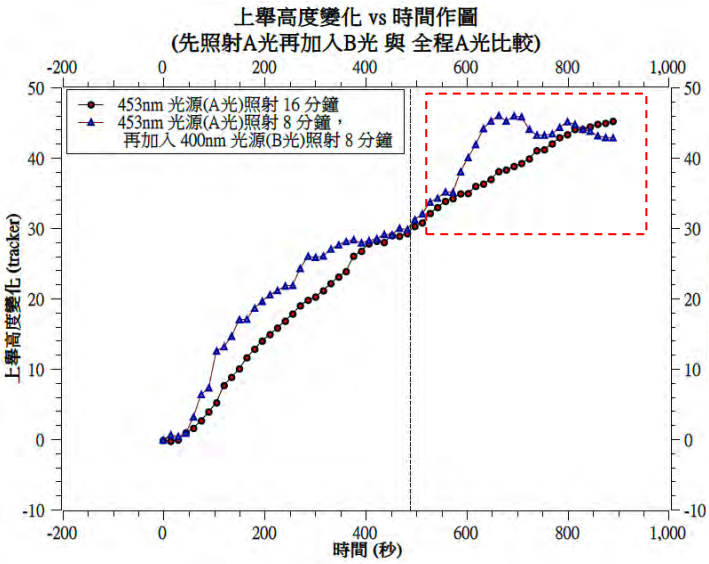


圖 5-2

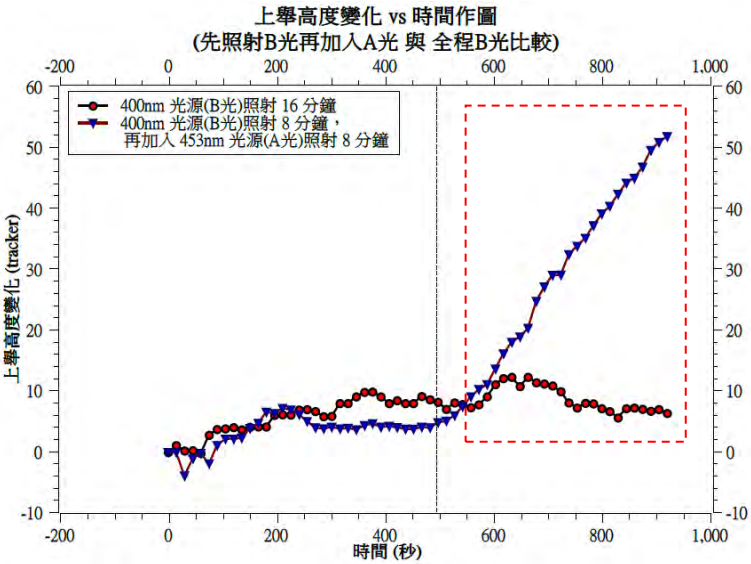


圖 5-3

4. 實驗資料為(列出 月/日)：

先照射 A 光再加入 B 光：1/28、1/29、1/30、1/31、5/15-5/21。

先照射 B 光再加入 A 光：2/03、2/05、5/8-5/14。

全程照射 A 光源：5/22、5/23。

全程照射 B 光源：5/24-5/27

討論：

1. 針對同一片葉子而言，A 光源(453nm)所引發的上舉程度大於 B 光源(400nm)，如圖 5-4：

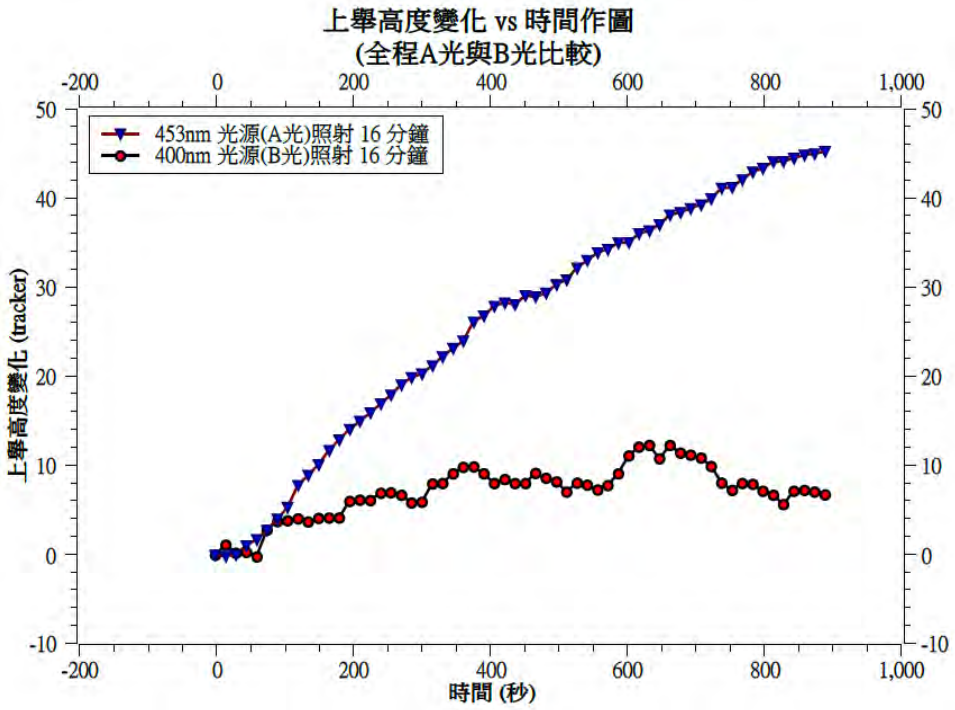



圖 5-4

2. 在圖 5-2 中，約 600 至 800 秒時，A、B 光源同時照射比僅 A 光源照射時上舉程度略大些。但在圖 5-3 中的 600 秒後，A、B 光源同時照射比 B 光源照射時上舉程度明顯大很多。**所以不同頻率的光源照射對於上舉效果具有加成性**。又 A 光源的上舉效果比 B 光源小，因此在圖 5-2 中其加成性不明顯。
3. 我們推論出：單一光源照射時，僅會使小葉上舉達到某一程度的高度。不同波長光源會有不同上舉程度。且不同波長光源的上舉程度具有加成性，**所以太陽光的上舉程度會比單一人工光源高**。

## 實驗（六）：光與熱對上舉運動是否有加成性

說明：從實驗（四）得知氣溫高能使葉下珠的小葉產生更高的上舉高度，若光和熱同時作用時，對於上舉高度是否有相加的效果呢？

步驟：

1. 利用自製控溫箱操作輻射熱及對流熱的產生。
   對照組為　　：照射 400nm 光源。
   實驗 A 組為　：照射 400nm 光源 ＋ 對流熱。
   實驗 B 組為　：照射 400nm 光源 ＋ 輻射熱。
2. 無日照下，以每日的 8-15 時為測量時段，每間隔一小時測驗一次，共八次。
3. 先預熱十分鐘至 30℃，對照組隨後照射 UV-A(400nm)八分鐘；實驗組則開起加熱裝置並照射 UV-A(400nm)8 分鐘。
4. 用自製儀器觀察與紀錄並分析與討論實驗結果。

結果：

1. 控溫箱示意圖(左)與實際裝置圖(右)：

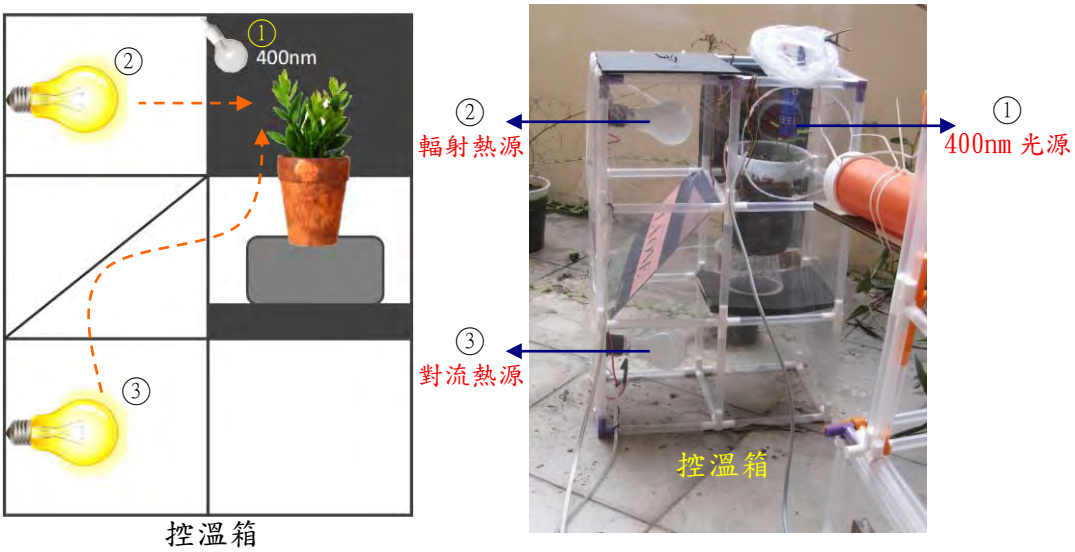



圖 6-1 實驗裝置圖

2. 各組的上舉高度變化與時間關係圖：

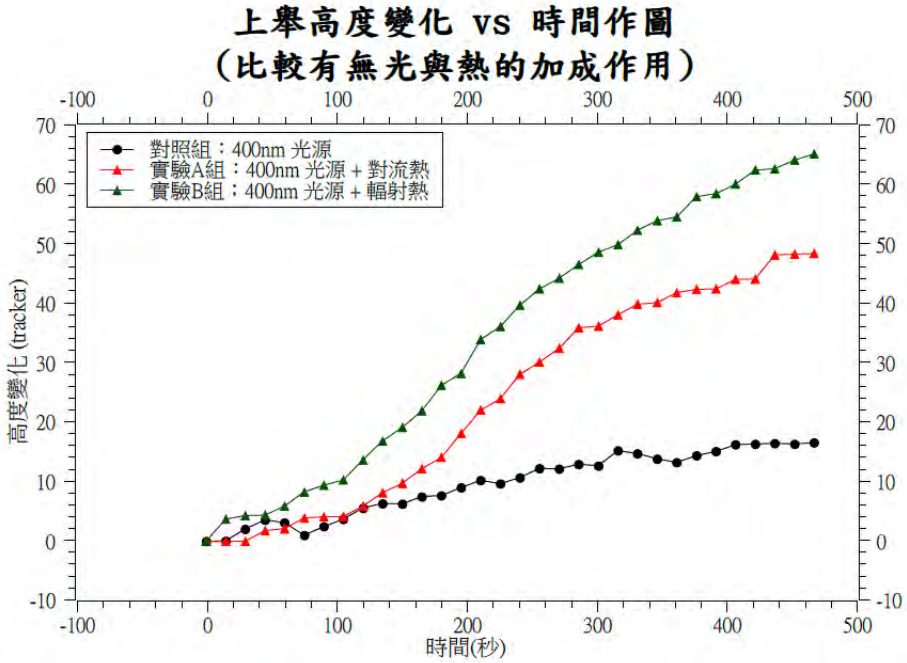



圖 6-2 光與熱的加成作用

3. 實驗資料為(列出天數)：

對照組：2016/12/23、2016/12/24、2016/12/27、2016/12/28、2016/12/29、2016/12/30

實驗 A 組：2016/12/31、2017/01/01

實驗 B 組：2017/01/08、2017/01/09

討論：

1. 從作圖中得知，有加熱的實驗組比對照組的上舉高度明顯高出許多。加熱(輻射熱或對流熱)是有助於提升上舉程度。因此，確定光與熱對於上舉程度是有**加成效果**的。
2. 因為是不同日期的比較，故皆以中午 12:00 為比較的基準。

## 實驗（七）：上舉運動的機械能有重複使用性嗎?

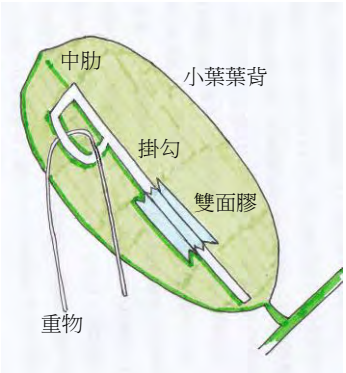
說明：對上舉運動來說，特定波長的光源成了啟動開關，不同光波長及環境熱能的加成性可增加上舉程度。雖然產生的能量不大，如何匯聚此小小能量，是科技上的大問題。但在此之前仍有一些性質需要探討的。例如：1. 可以在小葉上放上載物裝置嗎? 2. 小葉載物時，仍可受光而上舉嗎? 3. 上舉的能量有多少? 4. 會不會影響生理時鐘? 5. 可重複每日使用嗎?

步驟：

1. 依據葉下珠的睡眠運動及上舉運動的特性，運用 3D 列印設備設計掛勾及尋找其黏貼處。觀察此設計是否會影響兩者運動。
2. 取適當物測量質量並放入掛勾中，觀察照光(453nm)是否會產生上舉運動。並測量上舉高度。
3. 觀察是否會改變植物生理時鐘及是否會重複每日進行上述兩種運動。

結果：

1. 經討論與試作後，在小葉葉背黏上掛勾較不會干擾睡眠運動及上舉運動。如圖：



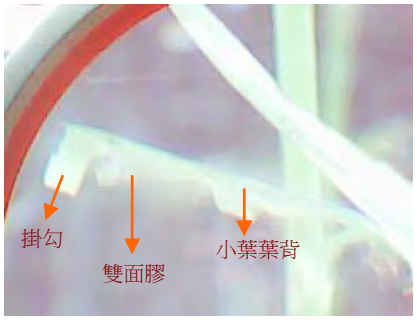




圖 7-1 實驗裝置圖

2. 適當物的質量(m)是：$6 \times 10^{-6}$ kg。
3. 小葉的平均質量($m_2$)是：$3 \times 10^{-7}$ kg。(平均 50 片葉子)
4. 加掛重物後，“不影響睡眠運動的進行”及“能與其他小葉同時完成上舉運動”。

圖 7-2 進行睡眠運動(向前閉合)

圖 7-3 完成向前閉合

圖 7-4 未照光的高度

圖 7-5 照光 8min 後上舉高度

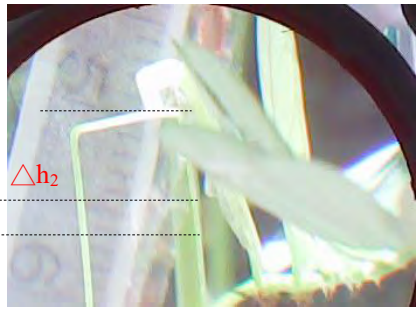



圖 7-6 經陽光照射達上舉最高點

5. 計算能量值：

表 7-1

| 光源種類 | 上舉程度(△h) | 位能(U=mg△h) |
|---|---|---|
| 453nm 光源 | $\triangle h_1 \fallingdotseq 0.002m$ | 約 $1.2 \times 10^{-7}$ 焦耳 |
| 太陽光 | $\triangle h_2 \fallingdotseq 0.006m$ | 約 $3.6 \times 10^{-7}$ 焦耳 |

6. 實驗資料為(列出天數)：6/3-6/10

討論：

1. 小葉可以安裝掛勾裝置且小葉載物後仍可受光而上舉。
2. 將“適當物的重量”比“小葉本身重量”約為 20 倍。

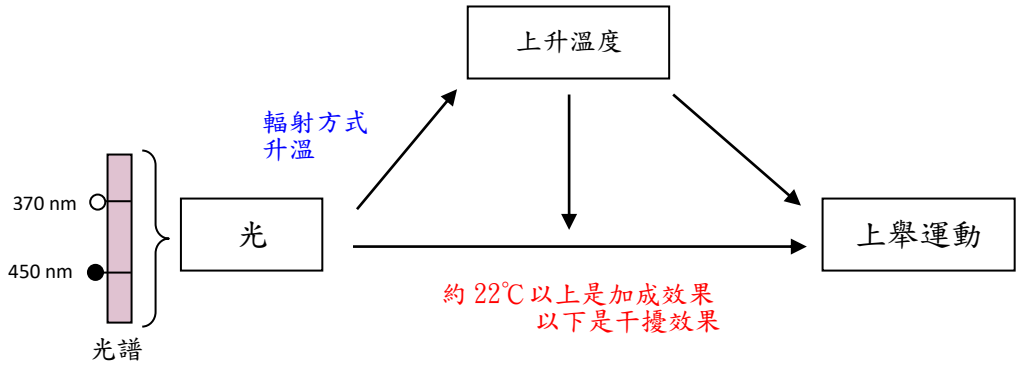
$$\frac{\text{適當物的重量 (0.006gw)}}{\text{小葉的平均重量(0.0003gw)}} \fallingdotseq 20\text{ 倍}$$

再將掛勾與雙面膠的重量合併計算，此比例將會超過 20 倍。所以利用膨壓產生上舉力量有著巨大的潛力。

3. 此掛勾設計不會影響植物生理時鐘的進行，可重複每日使用。
4. 未來可以培育出葉片較大的品種，增加載物的能力。
5. 進一步了解產生膨壓的機制及探索相關生化反應，並用以發電的可能性。

## 陸、綜合實驗討論

1. 依實驗(三)至(六)的實驗結果，繪製光、熱與上舉運動的模型來說明各變因的關係。




實驗（三）：370nm-453nm 波長的光源會促發上舉運動

實驗（四）：溫度上升(約 30℃以上)會促發上舉程度

實驗（五）：照射不同波長光源對上舉運動有加成性

實驗（六）：光與熱作用時，高氣溫(約 22℃以上)有兩者有加成性，低氣溫(約 22℃以下)會出現干擾性。

ps:提出 22℃是經驗值的數據，須經實驗進一步求出。

2. 利用粗吸管及 3D 列印的支架，可組裝出實驗過程中所需要的特殊儀器裝置。成本低廉、剪裁容易、組裝快速、重量輕與可重複使用的諸多優點。自行生產列印，大大提升未來自製與設計儀器的能力。
3. 光源的取得有兩項考慮，除了特定波長的選擇外，還要強度要達到某一程度才能促發上舉運動。因此本實驗應採用可連續性及可調整波長的強光源較佳。但在經濟的考量上是不易取得，僅以商場易取得的光源為主。
4. 目前 UV-A 的光源僅 370nm 及 400 nm 兩種，當 400 nm 光源可促發上舉，而 370nm 不能促發上舉時，我們標示“光譜上界範圍”起至 370nm(但不含 370nm)。然可見光的光源僅 450nm(藍光) 及 525 nm(綠光) 兩種，當 450 nm 光源可促發上舉，而 525nm 不能促發上舉時，我們標示“光譜下界範圍”終至 450nm。因此，明確的光譜上界與下界範圍須進一步實驗才能得知。

## 柒、結論

1. 植物的運動過程細微難以觀察。本研究以自製的儀器可成功簡化測量程序，為研究植物運動進行完整研究，可供日後欲探討類似植物運動的相關研究參考。
2. 研究中以強光及溫度上升為主軸來深入探討對葉下珠的上舉運動，使用了 3D 列印與 Arduino UNO 板子等技術來改進製作儀器的品質。依實驗的需

求自製可輻射方式加熱及可對流方式加熱的控溫箱來控制光與熱這些變因，及可蒐集天氣情報的數位天氣瓶來驗證光、熱與上舉運動的相互關係。

3. 確定了葉下珠葉子上光受器的分布區域是“葉枕組織的表面附近”。這可將接受到的環境刺激傳至葉枕內部組織並改變“膨壓”及產生相對應的行為(上舉)來是適應環境的變化。
4. 實驗發現：照射太陽光比單一波長光源上舉程度高。這個現象可由以下兩個“加成效果”解釋：一、結合不同波長的光源照射會使上舉程度有加成性；二、強光與溫度上升的共同作用下，上舉程度也出現加成性。
5. 雖然單一小葉的膨壓所產生的“機械能”是極其微小。但是站在“使用”的觀點看，此機械能可以被啟動，並控制其強弱，又可以重複“每日使用”。未來可以朝改良植物的品種，以利此機械能作用—這是一種新奇的綠色能源。

## 捌、參考資料


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/~lslty/phy/g1.html

四、Comm_port 軟體、TakeSnaphot 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 ,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 ,取自 http://a-chien.blogspot.tw/2012/10/tracker.html

七、Tracker 的官方網頁。2015 年 4 月 8 ,取自 http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker

八、Arduino – Home。2015 年 4 月 8 ,取自 https://www.arduino.cc/

九、movie-maker。2015 年 4 月 8 ,取自 http://windows.microsoft.com/zh-tw/windows/movie-maker

十、膨壓運動補充。2015 年 4 月 8 ,取自 http://ms1.hkjh.tc.edu.tw/~pei14/add352.htm

十一、簡瑜霆等三位，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
十七、普朗克常数，2017 年 03 月 12 ,取自 https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%99%AE%E6%9C%97%E5%85%8B%E5%B8%B8%E6%95%B0
十八、Cooper Maa: Arduino 入門教學，2017 年 03 月 12 ,取自 http://coopermaa2nd.blogspot.tw/2011/05/arduino.html
十九、Everything you need to rock 3D printing(3D printer 教學)，2017 年 03 月 12 , 取自 http://www.123dapp.com/3D-printing
二十、Unofficial QtiPlot packages for windows，2017 年 03 月 12 ,取自 https://intranet.cells.es/Members/cpascual/docs/unofficial-qtiplot-packages-for-windows

## 【評語】052102

1. 本研究探討光與熱等環境因素，對葉下珠植物上舉運動的影響。結果發現照射不同波長的光對上舉程度有加成性，而光與熱的刺激也會產生加成性。推論上舉程度不是單一光波長或熱能所造成的結果，分析具有合理性。

2. 能獨立進行實驗設計且具創意，實驗方法符合科學精神。

3. 實驗內容充實並能具體完成。

## 作品海報

# 一、摘要：


為深入瞭解**光**與**熱**等環境因素對葉下珠植物上舉運動的影響，運用3D列印技術提高自製顯微鏡的品質並製作控溫箱來操控溫度變因。

- 發現葉面上**光受器區域分布不均**以及**特定波長範圍的光源**和**溫度升高**皆可引發上舉運動。
- 同時間**照射不同波長**的光對上舉程度有**加成性**，**光與熱的刺激**也會產生加成性。

本研究提出光、熱和上舉運動**三者之間的關係模型**，運用這兩種加成性來**解釋陽光照射時所產生的上舉程度**，不是單一光波長或熱能所造成的結果；並藉以探討膨壓所產生**相關機械能的使用性**。


# 二、研究動機：

由於「**光**」和「**熱**」關係密不可分且對於上舉運動仍有許多不確定的因素存在，故此作品以光與熱對上舉運動之影響為主軸。

# 三、研究目的：

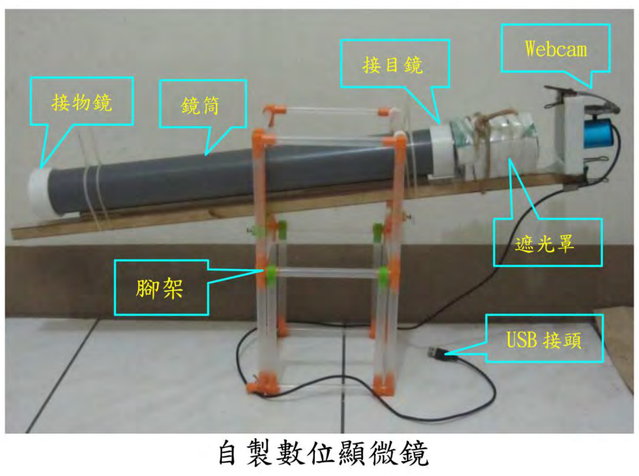
- 以**位置與時間的關係圖**說明**上舉運動**和**睡眠運動**的**差異**。
- 找出葉面上**光受器的分布區域**。
- **不同波長的光源**對上舉運動的影響。
- 以**光、熱的加成性**來說明陽光照射的上舉程度。
- 建立**光、溫度、上舉運動三者關係模型**。
- 探討植物受外界環境刺激所產生**機械能的重覆性、可用性及潛力**。

# 四、研究設備及儀器：

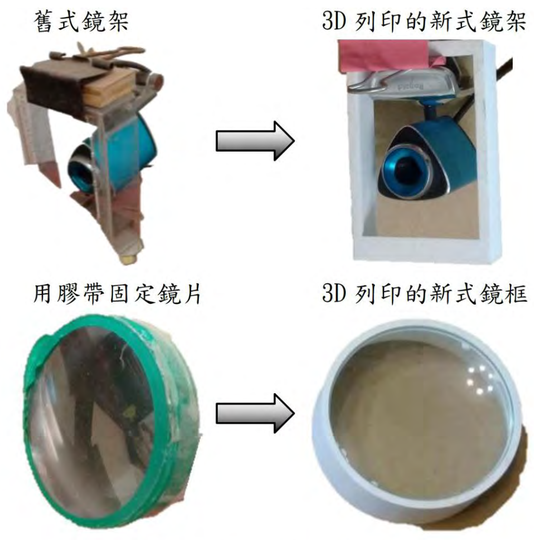
（一）硬體

- 自製數位顯微鏡：

以複式顯微鏡原理製作，輔以3D列印技術改良。

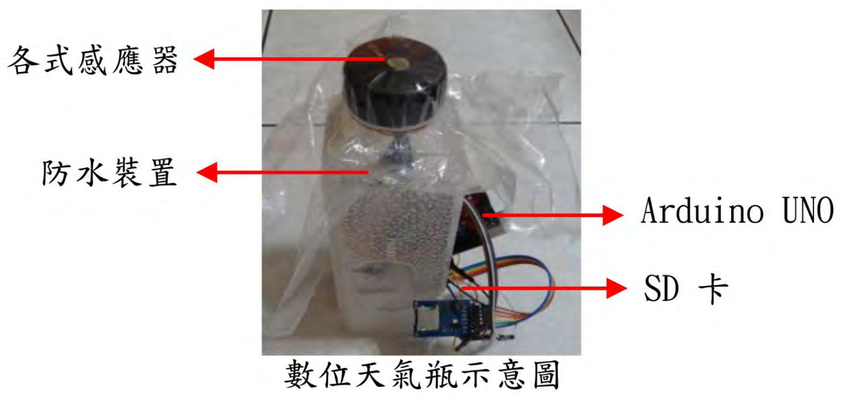


自製數位顯微鏡



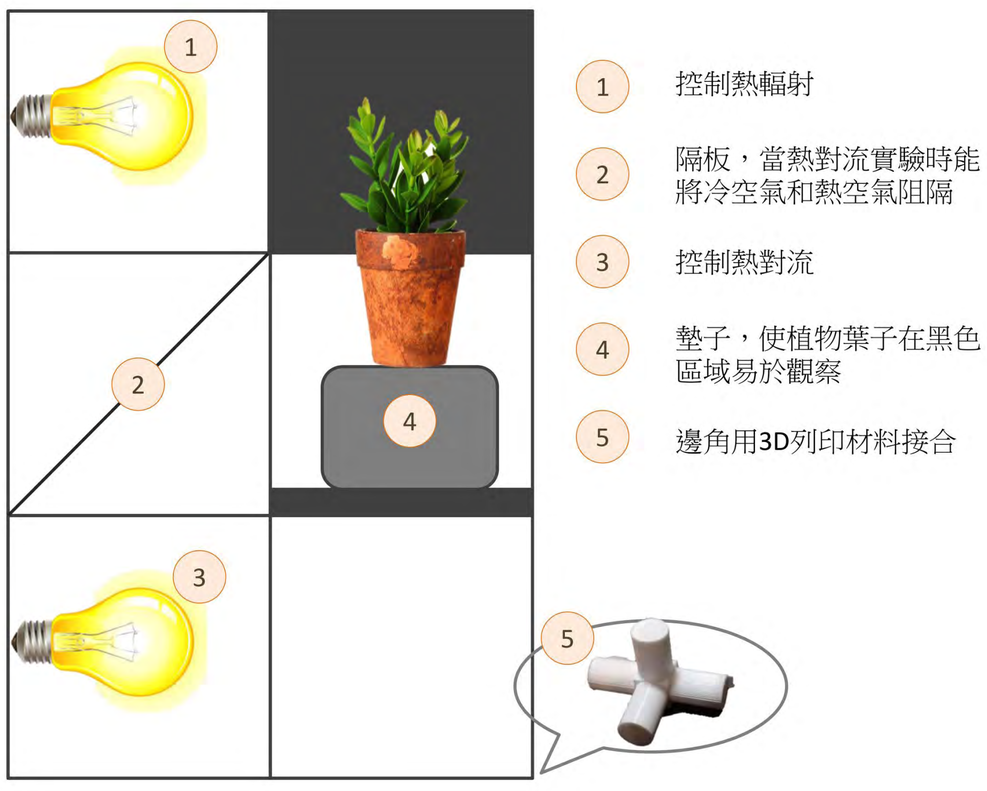
利用吸管和 3D 列印的接合器製作腳架

- 自製數位天氣瓶：



數位天氣瓶示意圖

- 自製鏡架與溫控箱：




（二）軟體：TakeSnaphot軟體（定時拍照）、Movie Maker軟體（轉成影片）、 Tracker軟體（分析運動影片）、ACD see軟體（瀏覽圖片用）、 Arduino軟體。

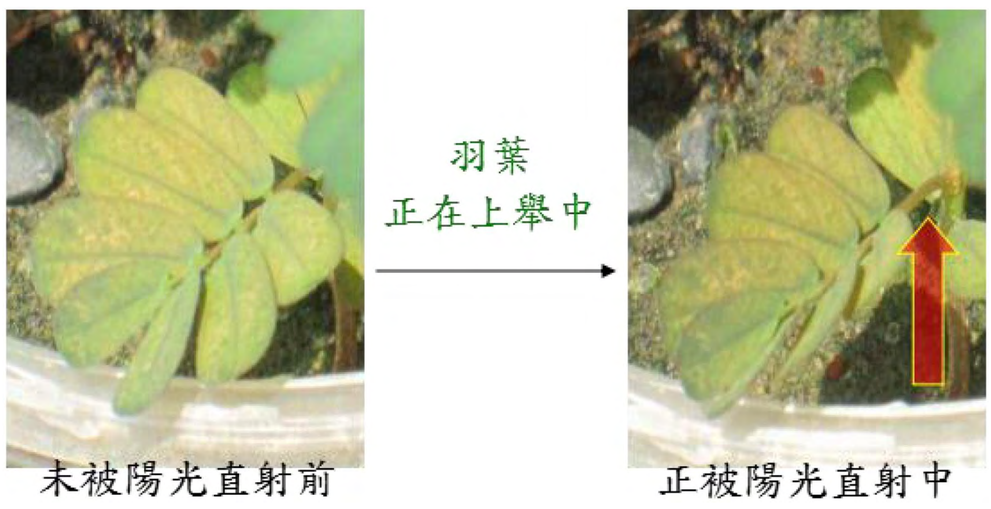
# 五、研究過程與方法：

（一）文獻探討：

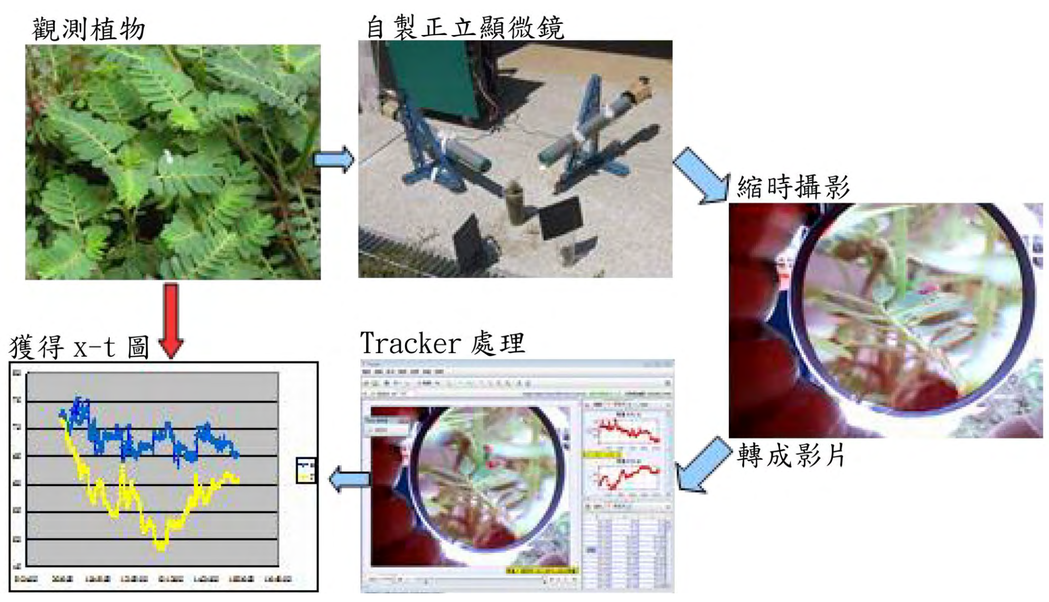
•小返魂與疣果葉下珠：

| 名稱 | 中文名:疣果葉下珠<br>學名:*Phyllanthus hookeri Muemll. - Arg.* | 中文名:小返魂<br>學名: *Phyllanthus amarus Schum & Thonn.* |
|---|---|---|
| 分類地位 | 植物界木蘭植物門木蘭綱大戟目大戟科 *Euphorbiaceae* 油柑屬 *Phyllanth* | 植物界木蘭植物門木蘭綱大戟目大戟科 *Euphorbiaceae* 油柑屬 *Phyllanth* |
| 別名 | 珠仔草、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。 | 一年生草木，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 | <br>圖二 疣果葉下珠果實與花近照 | <br>圖三 小返魂果實與花近照<br>照片取自 102 年度國中學生獨立研究成果發表競賽 |

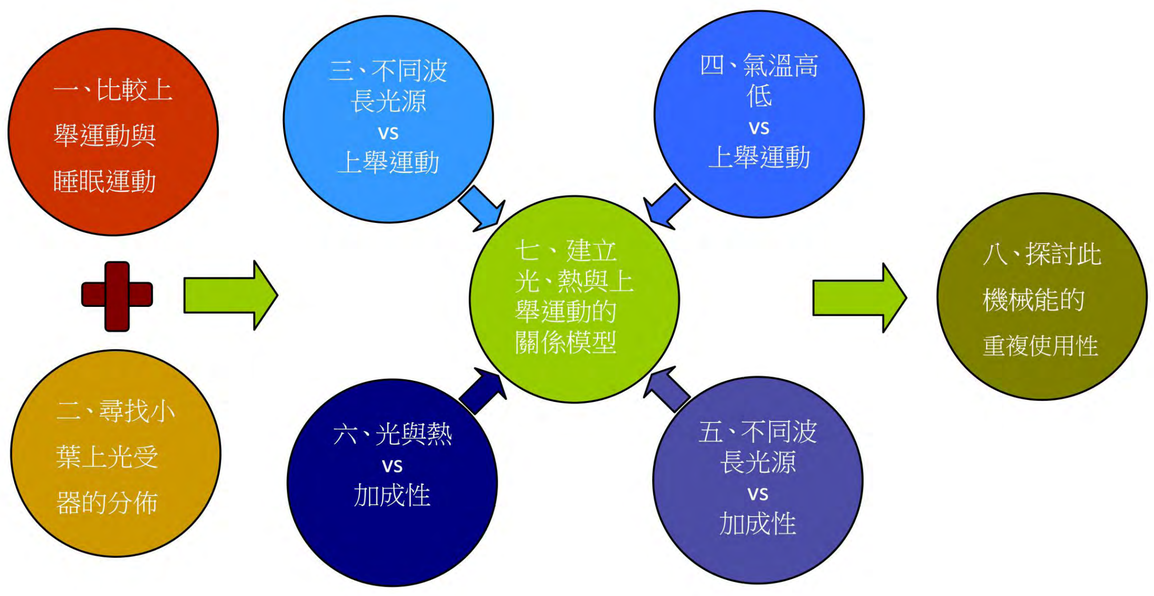
•上舉運動：




（二）研究方法




（三）實驗流程及步驟：



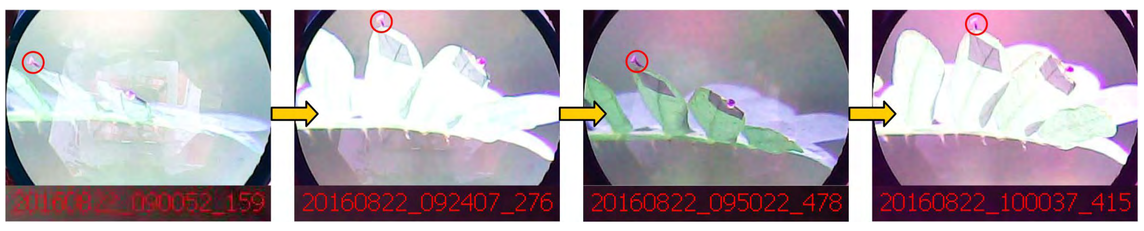

# 六、研究結果：

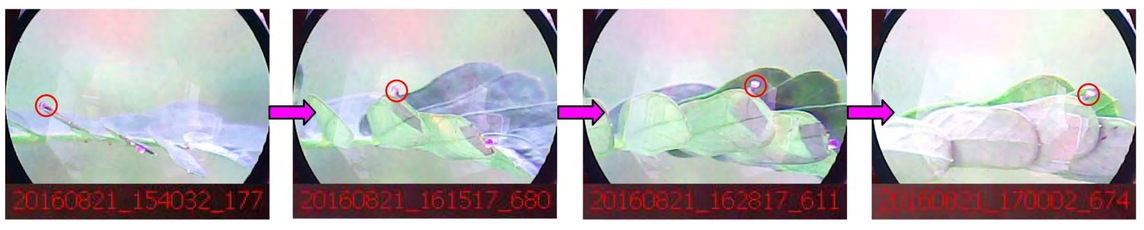
## （一）比較上舉運動和睡眠運動的差異

•說明：用運動的座標圖說明上舉運動與睡眠運動的差異，並製表說明兩者異同。

•結果：

(1) 照片：（上圖：上舉運動；下圖：睡眠運動）



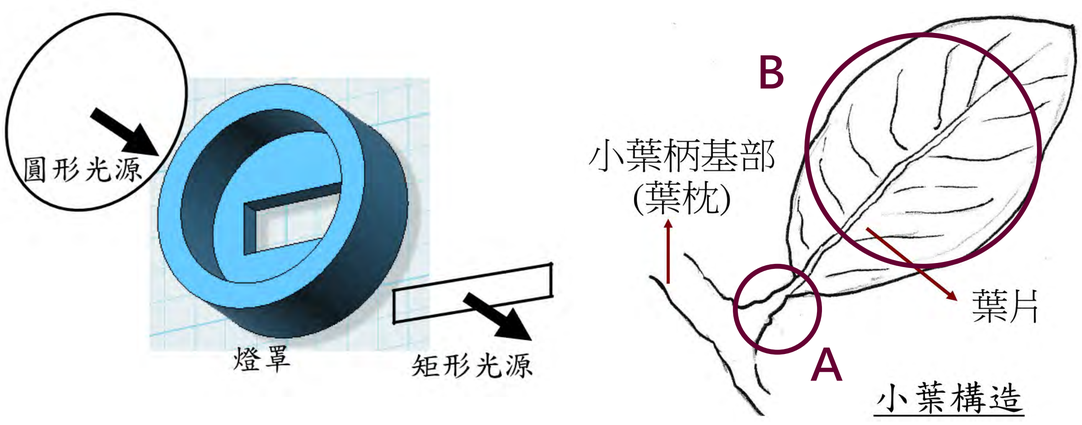

(2) 作圖：

(3) 討論：比較上舉運動和睡眠運動的差異

| 運動種類<br>分析方式 | 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 |
| 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 |

## （二）尋找葉面上光受器的分佈

•說明：製作矩形孔燈罩，將矩形光源照射在葉下珠羽葉的A區與B區上，以尋找光受器。




•結果：用運動的座標圖判定是否有上舉運動（○：能上舉運動，如右圖； ×：不能上舉運動，如左圖）

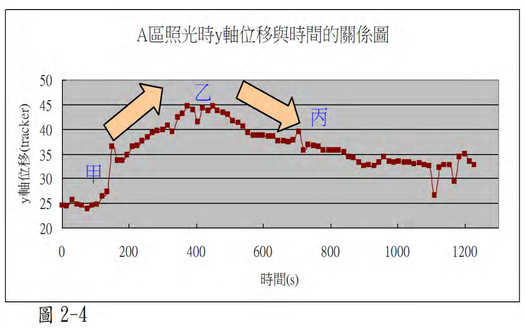



圖 2-4

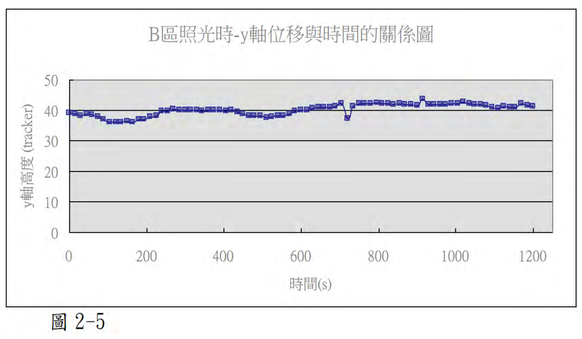



圖 2-5

3. 分析各時段的實驗結果：

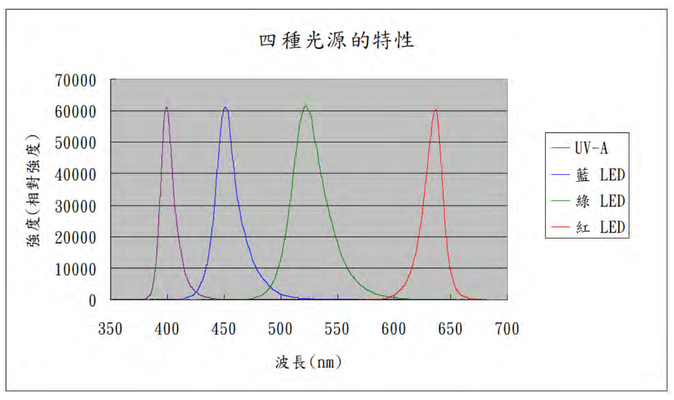
表 2-2

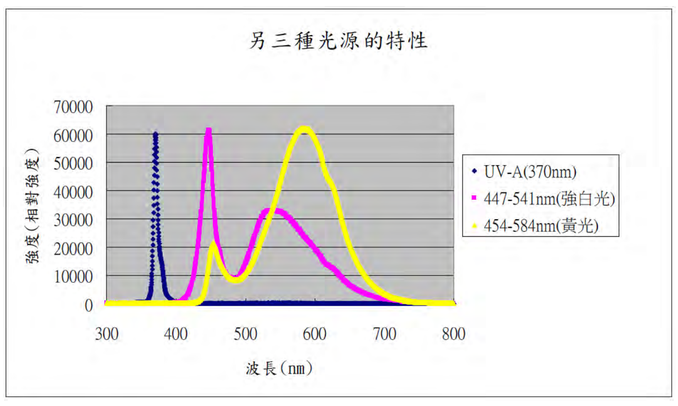
| | 天數 時段 | AM 8 | AM 9 | AM 10 | AM 11 | AM 12 | PM 1 | PM 2 | PM 3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A 區 | 第 1 天 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 第 2 天 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| B 區 | 第 1 天 | × | × | × | × | × | × | × | × |
| | 第 2 天 | × | × | × | × | × | × | × | × |

•討論：光受器應分佈在A 區（小葉柄基部，葉枕）。

## （三）不同種類的光對上舉運動的影響

・說明：利用不同光譜區段的光源（紅、綠、藍、UV-A（400nm）、UV－A（370nm），找出能讓植物進行有效上舉運動的波段為何。

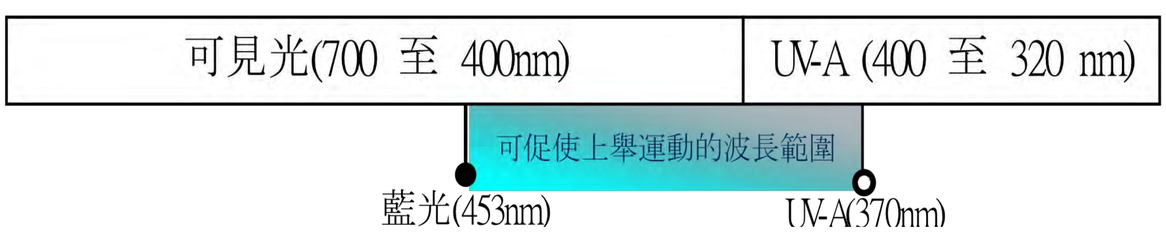



・結果：列表呈現不同光源對上舉運動的影響：
（○：能上舉運動 ；×：不能上舉運動 ）

| 紅光 | 綠光 | 藍光 | UV-A(400) | UV-A(370) | 強白光 | 黃光 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| × | × | ○ | ○ | × | ○ | × |

•討論：在非睡眠運動時，能促使上舉運動的**光譜範圍：370nm~453nm，但不含370nm**




(2) 混合波長的光源時，須以**主要強度的光源**而定。
(3) 發現陽光照射比使用任何單一人工光源照射的上舉高度**高得多**。

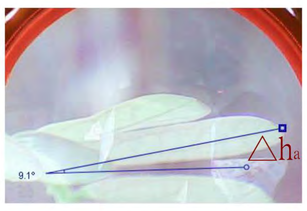



圖 3-5 太陽未照射(9.1°)

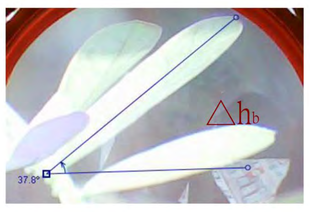



圖 3-6 太陽照射 8min(37.8°)

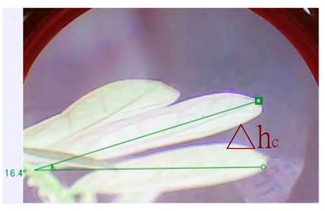



圖 3-7 單一光源照射 8min(16.4°)

**高低順序：△hb ＞ △hc ＞ △ha**

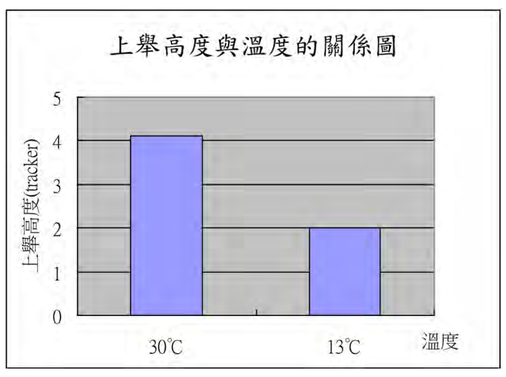
## （四）氣溫高低對上舉程度的影響

・說明：再次證明在之前的實驗紀錄中，溫度好像和上舉運動有某一程度的關聯，故經由實驗應證此項關係，利用控溫箱內設定30℃與寒流來的13℃逕行比較分析。

・結果：
(1) 對照組（控溫箱中30℃）為02/04 的 12時、13時。
(2) 實驗組（寒流來襲13℃）為02/11 的 12時、13時。

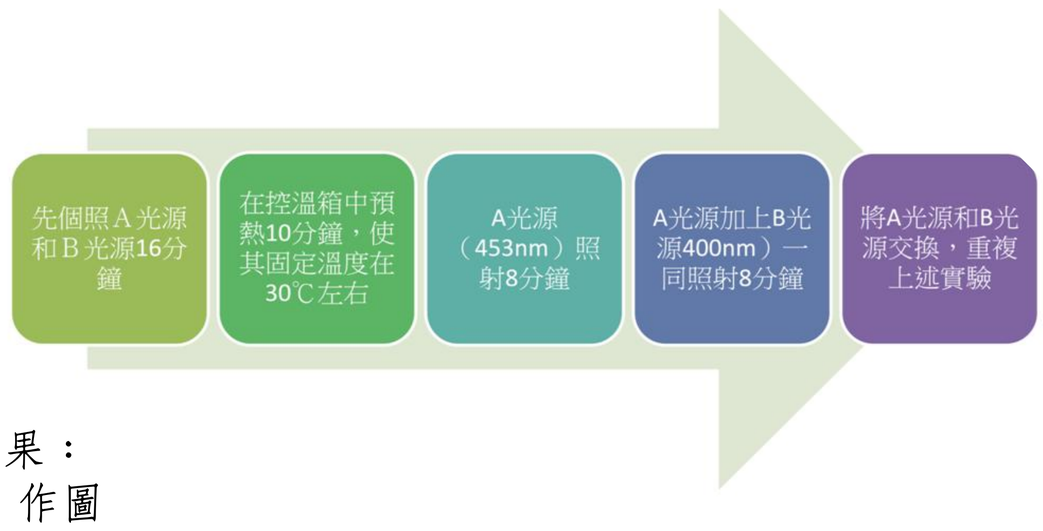
| | 對照組 | 實驗組 |
|---|---|---|
| △h1（12 時） | 4.3 | 2.0 |
| △h2（13 時） | 3.8 | 2.0 |
| 平均△h | 4.1 | 2.0 |

・討論：**上舉高度會隨 著氣溫下降而明顯減少**。

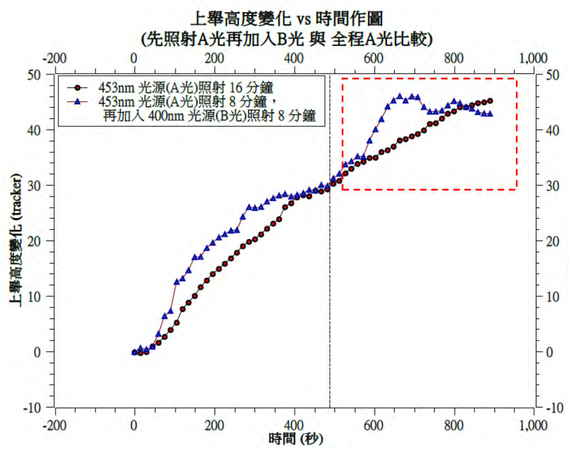


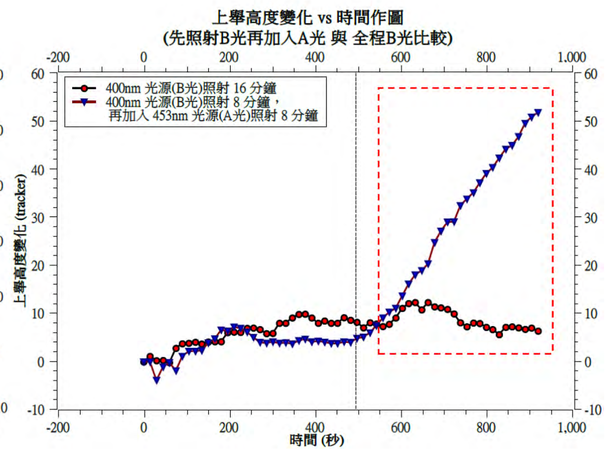

## （五）不同波長光源對上舉運動是否有加成性

・說明：實驗（三）的結果得知能促使上舉運動產生的光波長需在**特定範圍（370nm～450nm，但不含370nm）**。在此範圍內，不同波長之光源先後照射後產生何種變化呢？下為實驗步驟。

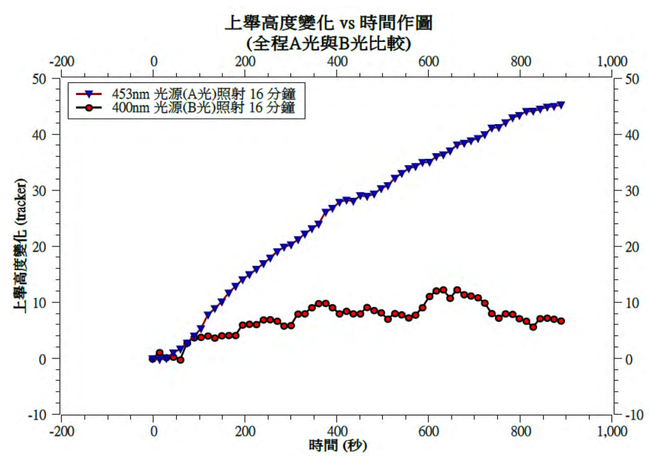



・結果：
(1) 作圖



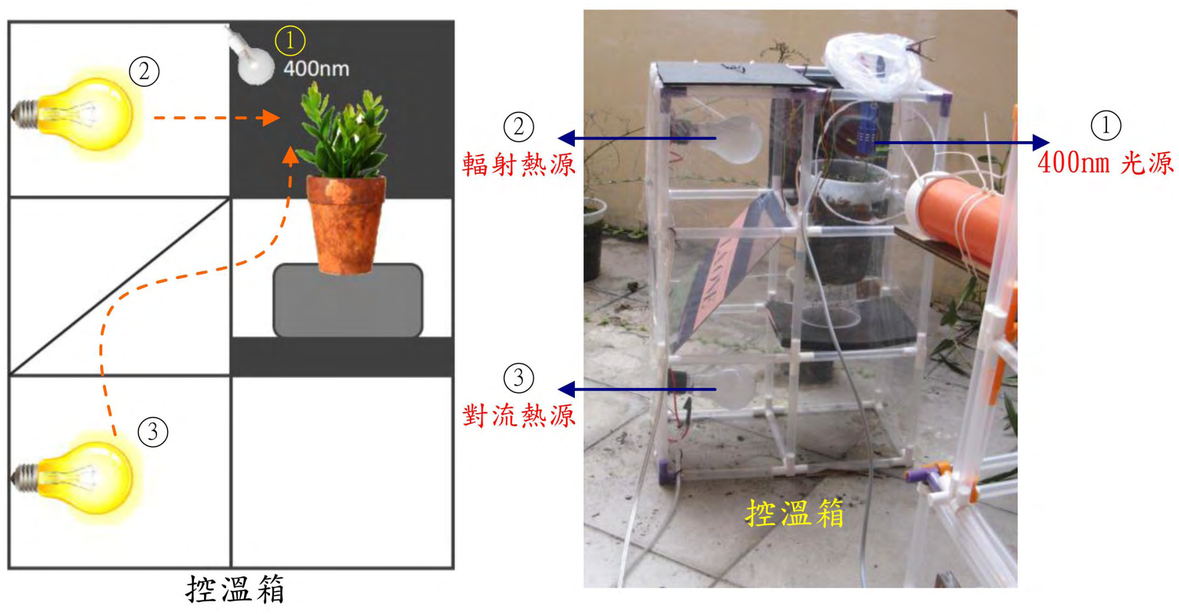

・討論：
(1) A光源(453nm)所引發的上舉程度大於B光源(400nm)：




(2) **不同頻率的光源照射**對於上舉效果具有**加成性**。
(3) **單一光源照射時僅會使小葉上舉達到某一程度的高度。**
(4) 不同波長光源會有不同上舉程度，且不同波長光源的上舉程度具有加成性，故**太陽光的上舉程度會比單一人工光源高**。

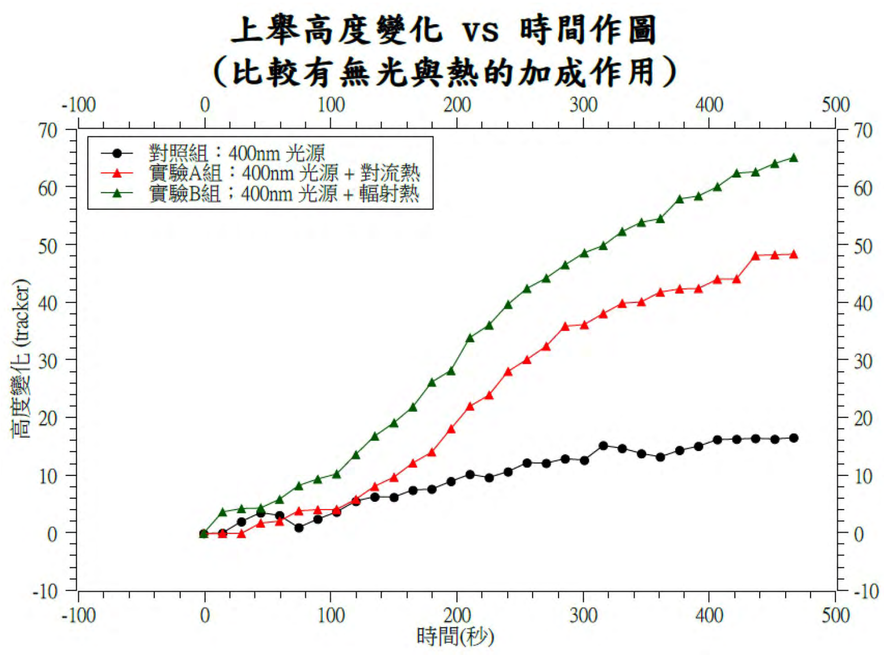
## （六）光與熱對上舉運動是否有加成性

- 說明：若光和熱同時作用時，對於上舉高度是否有相加的效果呢？利用自製控溫箱操作輻射熱及對流熱的產生和利用數位天氣瓶，記錄氣溫、濕度及其他環境情形。




控溫箱

- 結果：
  (1) 對照組為　　：照射400nm光源。
  (2) 實驗A組為　：照射400nm光源 ＋ 對流熱。
  (3) 實驗B組為　：照射400nm光源 ＋ 輻射熱。




- 討論：
  (1) 有加熱的實驗組比對照組的上舉高度明顯高出許多。加熱(輻射熱或對流熱)是有助於提升上舉程度。因此，**確定光與熱對於上舉程度是有加成效果的**。
  (2) 因為是不同日期的比較，故皆以中午12:00為比較的基準。

## （七）上舉運動的機械能有重複使用性嗎？

- 說明：對上舉運動來說，特定波長的光源成了啓動開關，不同光波長及環境熱能的加成性可增加上舉程度。雖然產生的能量不大，如何匯聚此小小能量，以此作為機械能作用。

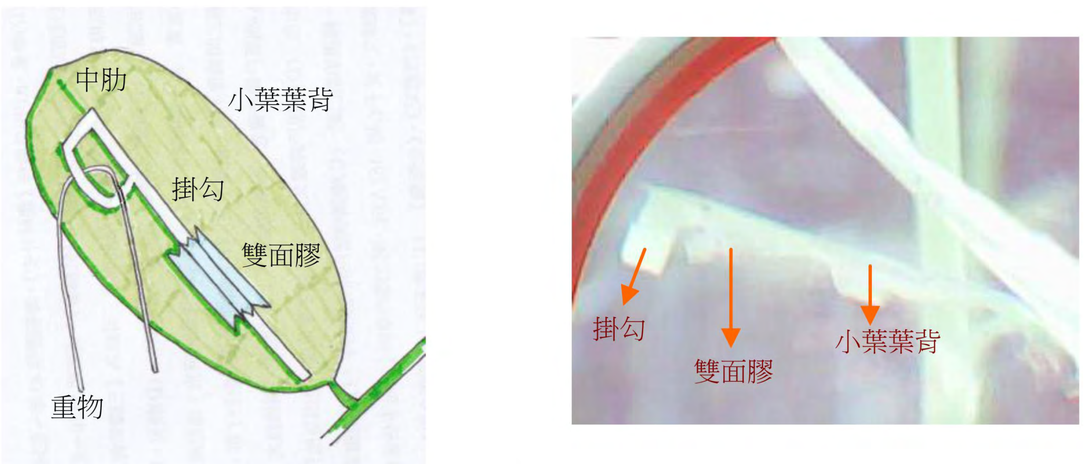



圖 7-1 實驗裝置圖

- 結果：
  (1) 適當物的質量是：$6 \times 10^{-6}$ kg；
  　　小葉的平均質量是：$3 \times 10^{-7}$ kg。
  (2) 加掛重物後，**不影響睡眠運動的進行及能與其他小葉同時完成上舉運動**。

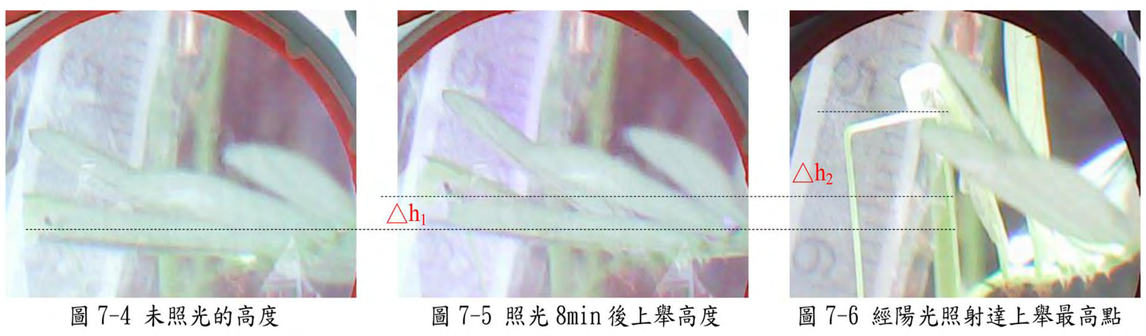



圖 7-4 未照光的高度　　圖 7-5 照光 8min 後上舉高度　　圖 7-6 經陽光照射達上舉最高點

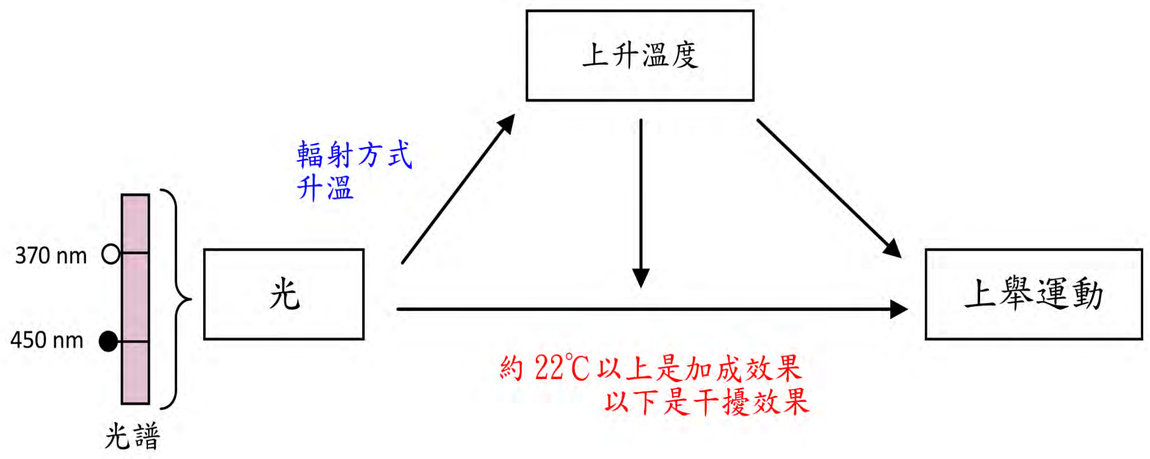
(3)計算能量值：

| 光源種類 | 上舉程度(△h) | 位能(U=mg△h) |
|---|---|---|
| 453nm 光源 | $\triangle h_1 \fallingdotseq 0.002m$ | 約 $1.2 \times 10^{-7}$ 焦耳 |
| 太陽光 | $\triangle h_2 \fallingdotseq 0.006m$ | 約 $3.6 \times 10^{-7}$ 焦耳 |

討論：　此能量可重複每日使用，且**適當物的重量比小葉本身重量約為 20 倍。**所以利用膨壓產生上舉力量有著巨大的潛力。若將深入了解其機制，此將有用以發電可能性

# 七、綜合實驗討論

依實驗(三)至(六)的實驗結果，繪製光、熱與上舉運動的模型來說明各變因的關係。




**實驗（三）：370nm-453nm波長的光源會促發上舉運動**

**實驗（四）：溫度上升(約30℃以上)會促發上舉程度**

**實驗（五）：照射不同波長光源對上舉運動有加成性**

**實驗（六）：光與熱作用時，高氣溫(約22℃以上)有兩者有加成性，低氣溫(約22℃以下)會出現干擾性。**

**（提出22℃是經驗值的數據，須經實驗進一步求出）**

# 八、結論

植物的運動過程細微難以觀察。本研究以自製的儀器可成功簡化測量程序，為研究植物運動進行完整研究，可供日後欲探討類似植物運動的相關研究參考。

研究中以強光及溫度上升為主軸來深入探討對葉下珠的上舉運動，使用了3D 列印與Arduino UNO板子等技術來改進製作儀器的品質。依實驗的需求自製可輻射方式加熱及可對流方式加熱的控溫箱來控制光與熱這些變因，及可蒐集天氣情報的數位天氣瓶來驗證光、熱與上舉運動的相互關係。確定了葉下珠葉子上光受器的分布區域是“葉枕組織的表面附近”。這可將接受到的環境刺激傳至葉枕內部組織並改變“膨壓”及產生相對應的行為(上舉)來是適應環境的變化。

實驗發現：照射太陽光比單一波長光源上舉程度高。這個現象可由以下兩個“加成效果”解釋：一、結合不同波長的光源照射會使上舉程度有加成性；二、強光與溫度上升的共同作用下，上舉程度也出現加成性。

雖然單一小葉的膨壓所產生的“機械能”是極其微小。但是站在“使用”的觀點看，此機械能可以被啓動，並控制其強弱，又可以重複“每日使用”。未來可以朝改良植物的品種，以利此機械能作用——這是一種新奇的綠色能源。

# 九、參考資料


•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/~lslty/phy/g1.html
•http://class.kh.edu.tw/12821
•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
•複式顯微鏡成像原理。2015年4月8 ，取自：
•http://w1.chjhs.tyc.edu.tw/jim5631/slides/light_eyes/light_eyes.pps
•Tracker的官方網頁。2015年4月8 ，取自：http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker
•Arduino — Home。2015年4月8 ，取自：https://www.arduino.cc/
•Everything you need to rock 3D printing(3D printer 教學)，2017年03月12 ,取自 http://www.123dapp.com/3D-printing
•簡瑜霆等，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。
•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。