

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 生物科

030311

探討影響跳舞草側葉擺動的機制

學校名稱： 新竹市立光武國民中學

| | |
|--------|-------|
| 作者： | 指導老師： |
| 國二 熊文箏 | 陳怡仁 |
| 國二 朱蕾安 | 蔡明曉 |
| 國二 涂玢烺 | |

關鍵詞： 跳舞草、動物互動關係、植物電訊號感測

摘要

本研究以跳舞草與動物互動的演化關係，探討影響跳舞草側葉擺動因素，了解其小葉擺動背後的機制與生物意義。我們針對光照、音頻、溫度、電流干擾及大葉處理等條件進行實驗設計，亦使用自製的植物電壓感測器測量電位變化。結果顯示，跳舞草小葉在溫暖、光照充足、高頻音環境條件下，擺動速度加快、振幅增大。進一步分析顯示，小葉擺動與葉枕的電位變化有相關，且外加電流會干擾使其擺動速率變慢。大葉遮光會降低小葉擺動速率，而摘除大葉則會提升擺動速度。綜合實驗結果，推測跳舞草的擺動機制除受環境影響外，也是一種生物演化策略，用以模擬昆蟲活動以吸引掠食性動物，有助於驅離害蟲。且進一步揭示跳舞草葉片運動的電生理基礎與可能的生態意涵。

壹、前言

一、研究動機

我們曾在課本上看過跳舞草（*Codariocalyx motorius*），當中提到當植株長到 15 公分以上且葉柄上長出三片葉時，它對環境的變化會變得非常敏感，並使葉片旋轉、擺動等反應，這讓我們非常好奇其轉動的原因，網路上眾說紛紜。其中有一種有趣的說法：葉片的轉動是一種模擬昆蟲振翅的機制，為了避免蟲類在植物身上產卵，或是吸引鳥禽來吃棲息在植物上的昆蟲，且在光線充足時擺動速度增快以吸引鳥類視線，晚上則因光線昏暗視覺不佳而放慢擺動速率，因此我們為了探討跳舞草轉動的機制，我們模擬了動物行為相關的變因，設計一系列的實驗。

從文獻中我們得知跳舞草會因為不同溫度、照光、音頻影響葉片的擺動（文獻 1、2、5），我們發現那和植物的電訊號有關，所以我們開發了植物電訊號感測器，希望能更了解跳舞草葉片擺動的機制。

二、實驗目的

我們由跳舞草轉動演化的觀點，來探討影響其轉動的因素，並進一步探討轉動時的電訊息變化，我們的實驗目的及架構圖如下：

(一) 跳舞草的擺動規律性分析

(二) 動物行為對於跳舞草轉動的成因探討

1. 光線對跳舞草小葉擺動的影響

(1) 光照強度對小葉轉動之影響

(2) 光照角度對小葉轉動之影響

2. 聲音對跳舞草小葉轉動的影響

(1) 昆蟲振翅對小葉轉動之影響

(2) 鳥類鳴叫對小葉轉動之影響

(三) 環境溫度對跳舞草小葉轉動的影響

(四) 跳舞草轉動時的電訊號分析

1. 植物電訊號分析

(1) 轉動中與轉折點的電位變化比較

(2) 轉動週期的電位變化分析

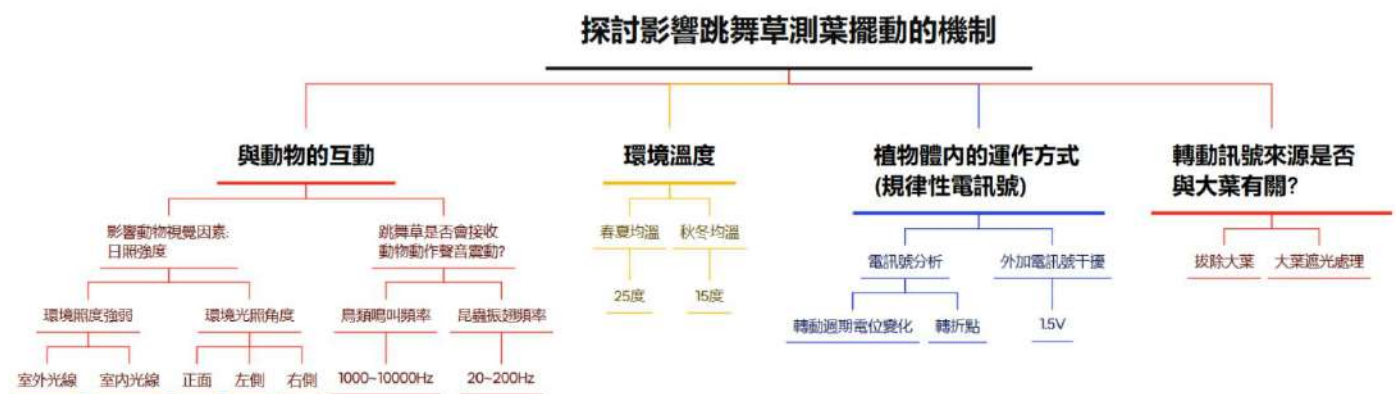
2. 不同音頻的植物電位變化

(五) 外加電流干擾對跳舞草小葉轉動週期的影響

(六) 分析大葉是否為小葉轉動訊號的來源

1. 大葉遮光處理對小葉轉動的影響

2. 拔除大葉對小葉轉動的影響



(圖 1-2-1) 實驗架構圖

三、文獻回顧

關於跳舞草小葉擺動的成因，眾說紛紜。有一種常見的說法認為其擺動是為了爭取更多光照。然而，我們觀察發現，跳舞草的大葉幾乎不會轉動，而小葉面積較小，若植物是為了吸收光線，應該優先調整面積較大的大葉，顯示此假說並不合理。

我們認為較具說服力且與實際觀察相符的推論，是從植物演化的角度出發。根據文獻 8 指出，跳舞草小葉規律性的橢圓形擺動，可能是一種模擬有翅節肢動物(如蝴蝶)振翅的擬態行為。這種運動會使經過的蝴蝶誤認該植物已被同類佔據，而避免在其上產卵；同時也可能吸引食蟲鳥類、爬蟲類或其他節肢動物，使牠們誤以為葉片上有獵物，進而捕食真正在啃食植物的害蟲。

雖然已有研究指出，小葉在 8kHz 音頻下擺動速率最快(文獻 1)，但我們查到的資料，鳥類的鳴叫聲頻率大多落在 1000Hz~10000Hz 之間，而昆蟲的振翅音頻大約在 20Hz~200Hz 之間(文獻 8、11、12)。因此我們據此選定實驗所用的音頻範圍，以模擬跳舞草可能接收到的動物聲音刺激。

另一方面，跳舞草僅在光照充足、水分充沛的情況下會持續擺動，若遇陰天、夜晚、或缺水狀態則進入「睡眠狀態」，葉片下垂並停止擺動(文獻 9)，而強光照射亦可加快小葉的擺動(文獻 10)。基於此，我們想模擬自然光線下，光線充足與陰暗處的光照，當作動物視覺清晰度的分界。

至於擺動的生理機制，許多文獻指出與葉枕細胞水分變化和植物電訊號密切相關。跳舞草受到特定環境刺激時，會產生特殊的電訊號。研究發現葉枕細胞的膜電位變化具有震盪特性，與小葉擺動的周期性息息相關(文獻 4)。當氫離子進入細胞產生跨膜電位梯度時，會打開膜上的鉀離子通道，影響鉀離子的流動方向，進而控制葉片的擺動速度與方向。當葉枕細胞處於萎縮狀態時，細胞外鉀離子濃度較高，膜電位約為 36 mV，呈去極化狀態；反之，當細胞膨脹時膜電位可能達到約 -136 mV，呈現過極化狀態，並進一步改變細胞水勢與體積，產生擺動。

綜合以上，我們提出跳舞草小葉擺動可能源於動物性擬態的演化機制，並受到光線、音頻、溫度等環境因素的影響。為驗證此推論，設計了一系列實驗，從動物視覺與聽覺刺激進行模擬，並使用自製的植物電壓感測器，進一步分析跳舞草擺動時葉枕細胞的電訊號變化，以深入了解其轉動機制(文獻 6、10、14、15)。

貳、研究設備及器材

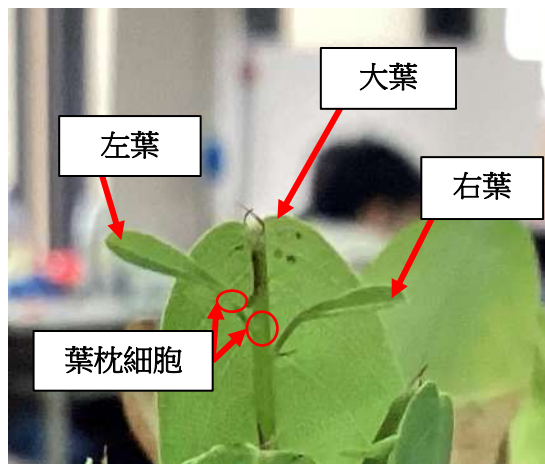
一、實驗植物

跳舞草（*Codariocalyx motorius*）別名：鐘萼豆，為臺灣原生植物，分布在丘陵及山區，多用於藥用或觀賞。本研究所使用的跳舞草原生於苗栗縣卓蘭鎮。葉片型態呈三出複葉，側生小葉通常成雙或僅具單小葉，本研究將其稱為小葉，頂生葉則稱為大葉。此外，將背對大葉時的左側小葉稱為左葉，右側小葉稱為右葉（圖 2-1-2）

我們觀察到跳舞草小葉擺動時的軌跡，在面對大葉時會呈上下擺動；在大葉側面觀察時軌跡則呈橢圓形或是圓形；大葉也有運動的現象，但只能上下擺動且擺動幅度極小。另外我們有觀察到主莖也會隨著環境刺激而產生平移的現象，但和大葉一樣不明顯且不易觀察，所以在之後的實驗中只探討小葉的擺動情形。



(圖 2-1-1) 跳舞草



(圖 2-1-2) 跳舞草各部位標示

二、實驗器材

| | | |
|-------------|---------------|-------------|
| 複式顯微鏡 | 平板*2 | 溫度計 |
| 自製隔音箱 | 直流電源供應器 | 鐵架 |
| 針灸針 | 導電凝膠 | 冰袋 |
| 喇叭 | 加熱器 | 訊號產生器 |
| 麵包版 | INA111 放大器晶片 | 單芯線 |
| LM7912 穩壓晶片 | DSOX1102G 示波器 | LM7812 穩壓晶片 |
| 針灸針 | 鱷魚夾 | |

(表 2-2-1)實驗材料

參、研究過程或方法

一、實驗裝置、步驟及方法

(一) 跳舞草的擺動觀察分析

1. 小葉擺動的軌跡分析

- (1) 在安靜無人的教室裡，分成正面擺動、側面擺動兩組進行實驗
- (2) 架設平板錄影，確認左、右葉有無擺動後，拍攝小葉擺動狀態，約三分鐘，並重複三次
- (3) 切下小葉葉柄，並使用複式顯微鏡觀察並分析

2. 左、右小葉的擺動差異比較

- (1) 在安靜無人的教室裡開燈進行實驗，並分成左、右葉兩組進行實驗
- (2) 架設平板錄影，確認左、右葉有無擺動後，拍攝小葉擺動狀態，約五分鐘，並重複五次，比較其擺動速率

(二) 動物行為對於跳舞草小葉轉動的成因

1. 照光對跳舞草小葉擺動速率的影響

我們推測跳舞草的小葉轉動是昆蟲翅膀揮舞的擬態，對於鳥類與昆蟲勢必需要能用視覺察覺，才能達到擬態的效果，而自然光線的強弱會影響動物的視線，因此我們在中午時段(一到兩點)用手機 APP 偵測室外與室內的自然光線照度，並模擬此光照照度來進行跳舞草的轉動分析。

- (1) 我們使用安卓手機的 phyphox 軟體測量室外照度及室內照度，在空教室中利用強光手電筒使環境照度和室外相同，分成室外組 (9144.4 lux) 和室內組 (469.8lux) 進行實驗，架設 iPad 錄影，確認左、右葉擺動後，再開始拍攝小葉的擺動狀態，約四分鐘，並重複六次



(圖 3-1-1)室外組



(圖 3-1-2)室內組

日照隨著時間的變化角度也會有所改變，植物具有向光性，所以我們想要觀察跳舞草是否會因為強光的照射而產生正面擺動軌跡的改變。

1. 在黑暗安靜無人的教室裡架設平板，面對右葉的正面分成左側照光、右側照光及正面照光三組進行實驗。
2. 將手電筒架設在右葉的正面、左側及右側。
3. 以右葉轉動週期為一錄製單位。



(圖 3-1-3)右側照光



(圖 3-1-4)左側照光



(圖 3-1-5)正面照光

2.音頻對於跳舞草小葉擺動速度的影響

已知跳舞草對於周遭環境的聲音很敏感，但我們想進一步了解是否動物的音頻聲更能引發跳舞草的小葉快速轉動，因此分別進行無音頻、昆蟲振翅音頻及鳥類鳴叫音頻的比較。

- (1) 在安靜無人的教室，開啟教室內的日光燈，分成昆蟲振翅音頻範圍(20、200Hz 和無音頻)和鳥禽鳴叫音頻範圍(1000、5000、10000Hz 和無音頻)兩組進行實驗。
- (2) 架設 iPad 錄影，並確認左、右葉擺動。
- (3) 用訊號產生器播放音頻，並將喇叭對準小葉，如圖 3-1-6 所示。
- (4) 以三分鐘為一錄製單位，中間間隔三分鐘。



(圖 3-1-6)音頻實驗的實驗裝置

(三)溫度對跳舞草小葉擺動速率的影響

跳舞草原生於苗栗縣，所以我們上網查尋台灣北部最冷月份的平均溫度約為 $15^{\circ}\sim 19^{\circ}\text{C}$ 。台灣北部夏季的月平均溫度約為 $27\sim 29^{\circ}\text{C}$ ，所以我們在實驗中操控溫度以模擬秋冬(15°C)和春夏(25°C)的季節溫度，當作昆蟲活動溫度的一個分界來探討，以下為實驗步驟：

1. 在安靜且無人的教室開燈進行實驗，並分成 15°C (秋冬)組、 25°C (春夏)組，進行實驗。
2. 15°C (秋冬)組：放入冰袋，將溫度控制在 15°C 。架設平板錄影，確認左、右葉有無擺動後，拍攝小葉的擺動狀態，約三分鐘，並重複七次
3. 25°C (春夏)組：放入加熱器，並將溫度控制在室溫 25°C 。架設平板錄影，確認左、右葉是否擺動後，拍攝小葉的擺動狀態，約三分鐘，並重複七次



(圖 3-1-7) 15°C 實驗裝置

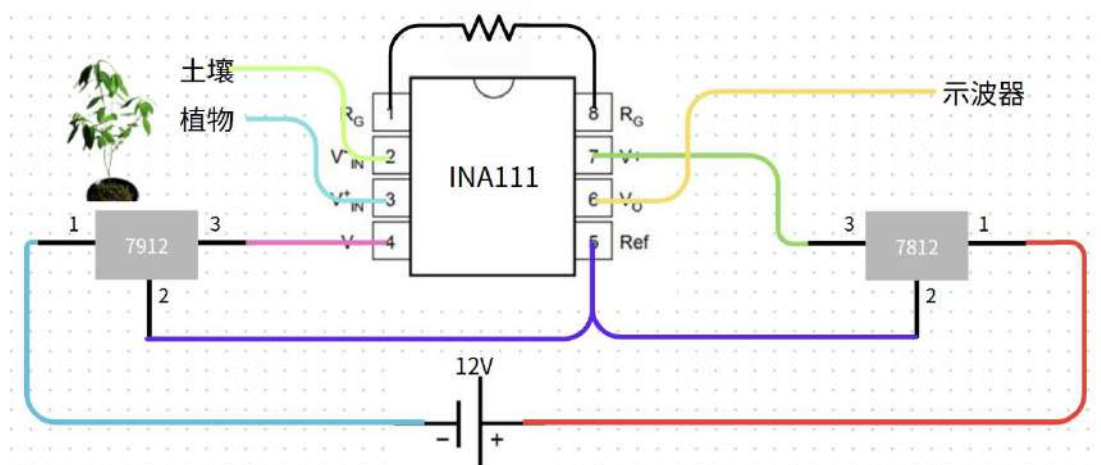


(圖 3-1-8) 25°C 實驗裝置

(四)跳舞草小葉轉動時的電位差異分析

1. 植物電訊號分析

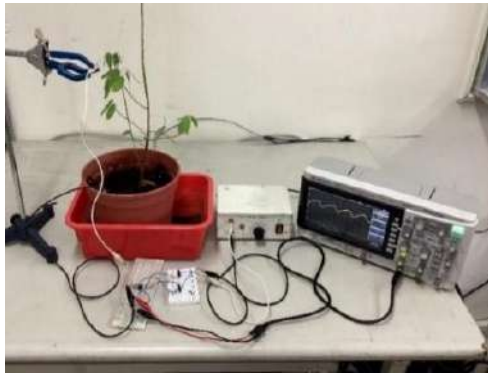
前置測驗：因為植物的電流較為微弱，因此我們使用 INA111 放大器，並使用電阻控制增益，我們將測出來的電壓值除以放大倍率進而推算出植物體原始的電壓值。電流供應器的正極端連接 LM7812 穩壓器，負極端連接 LM7912 穩壓器，提供運算放大器 INA111 的運作電流。



(圖 3-1-9) 自製植物電壓感測器電路

為了測試自製植物電壓感測器是否能夠準確的測得植物細胞電位，我們先做了背景值的測試：

- 將兩根針灸針插入土中。
- 各種音頻的聲音。
- 所有音頻下所呈現的波紋應為一水平線，確認環境中並沒有干擾的電訊號



(圖3-1-10) 自製植物電壓感測器連接跳舞草 (圖3-1-11) 自製植物電壓感測器連接位置

(2) 比較跳舞草擺動至最高點和擺動期間的電位變化

- 先錄下植物葉片的擺動情形，並觀察何處小葉的擺動幅度最大
- 將自製的植物電壓感測器的正極端插在跳舞草擺動幅度最大的小葉基部上，負極插在側莖
- 打開電流供應器提供INA111的運作電流
- 當即將擺動到最高點時，擷取植物的電訊號
- 擷取擺動期間的植物電訊號
- 比較兩著的差異

(3) 尋找跳舞草小葉擺動角度和電位有何關聯

- 先錄下植物葉片的擺動情形，並觀察何處小葉的擺動幅度最大
- 將自製的植物電壓感測器的正極端插在跳舞草擺動幅度最大的小葉基部上，負極插在側莖
- 打開電流供應器提供INA111的運作電流
- 開始錄影的同時使示波器接收電位值
- 當達到三分鐘時，同時按下錄影停止鈕和示波器訊號擷取鈕
- 分析影片中小葉的擺動角度
- 將植物的電位圖和擺動角度圖進行比對

(4)比較跳舞草在不同音頻下的電位變化

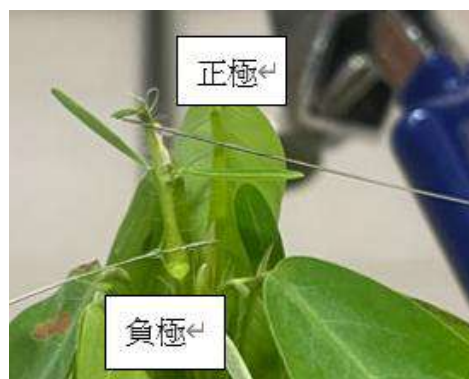
- 先錄下植物葉片的擺動情形，並觀察何處小葉的擺動幅度最大。
- 將自製的植物電壓感測器的正極端插在跳舞草擺動幅度最大的小葉基部上，負極插在側莖上。
- 打開電流供應器提供 INA111 的運作電流。
- 開啟示波器後，植物電位的波形便會出現在屏幕上。
- 播放不同音頻(2000、5000、10000Hz)3 分鐘，將測得的波形以 excel 格式儲存分析

(五) 電流對跳舞草小葉擺動速度的影響

- 在安靜的教室開燈，使用 1.5V 進行實驗
- 將正極放在小葉上方的主莖，負極放在小葉下方的主莖，讓電流通過小葉葉柄基部的葉枕細胞，並在接點塗上導電凝膠，以增加導電面積
- 以一轉動周期為一錄製單位
- 架設平板錄影，拍攝通電前小葉擺動情形
- 第一個轉動週期：拍攝通電前小葉擺動
- 第二個轉動週期：開啟電源後，錄製通電時的小葉擺動
- 第三個轉動週期：關閉電源，錄製通電後的小葉擺動



(圖 3-1-12) 通電實驗的裝置



(圖 3-1-13) 對跳舞草通電的位置

(六) 大葉處理對於跳舞草小葉擺動速度的影響

我們發現大部分的雙生小葉的莖末端皆有一片頂生大葉，且大葉會隨著環境變化而抬升、下降，因此推測大葉的狀態可能會影響跳舞草小葉的擺動速率，因此，在實驗中我們針對大葉進行處理，分成對照、遮光(貼絕緣膠帶)、大葉摘除三組做比較。

- 在安靜無人的教室裡，架設 iPad 並確認左、右葉擺動狀況
- 拍攝小葉轉動，以一右葉轉動週期為一錄製單位，重複六遍，如圖 3-1-14。
- 在大葉正面貼上黑色絕緣膠帶，拍攝小葉轉動，以一右葉轉動週期為一錄製單位，重複六遍，如圖 3-1-15。
- 摘除大葉，拍攝小葉轉動，以一右葉轉動週期為一錄製單位，重複六遍，如圖 3-1-16。



(圖 3-1-14) 對照大葉



(圖 3-1-15) 遮光大葉



(圖 3-1-16) 摘除大葉

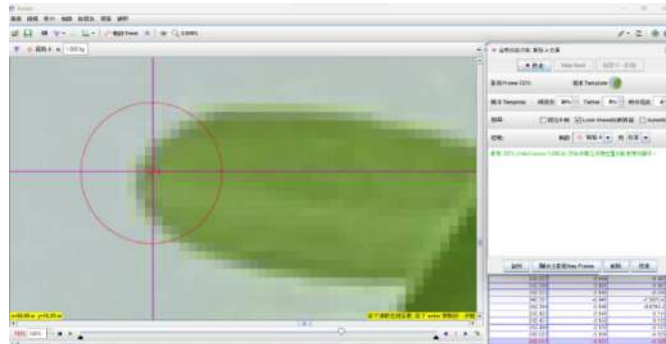
二、分析方法

(一) 小葉擺動角度分析

1. 我們使用 Tracker 影像分析軟體進行分析

(1) 側面擺動速率

設定葉尖為一質點，自動追蹤其軌跡，觀察擺動的角度變化，並算出速率。



(圖 3-2-1)Tracker 追蹤葉尖位置

(2) 正面的擺動軌跡

以八百到四百格影像為一單位，手動追蹤軌跡，紀錄正面的擺動方式。

2. t 檢定

- (1) 定義：表示兩組數據是否有顯著差異。若 p 值小於 0.05 則在統計上達顯著差異；若 p 值大於 0.05 小於 0.1 則在統計上達有點顯著；若 p 值大於 0.1 則在統計上未達顯著差異。

- (2) 使用 Excel 進行統計分析。

3. 標準差

- (1) 定義：指每一組數字離平均值的距離，可以代表每組數據的離散程度。
- (2) 使用 Excel 進行分析。

肆、研究結果



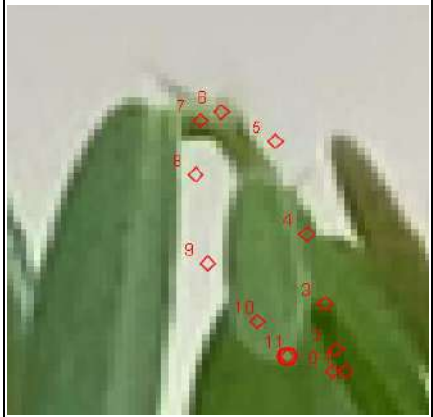
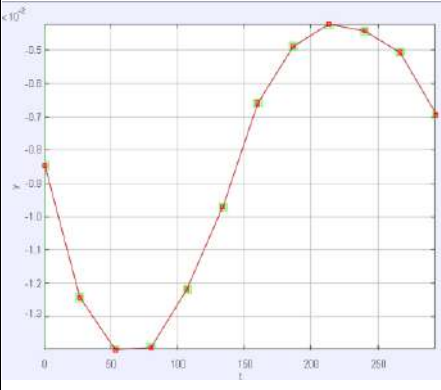
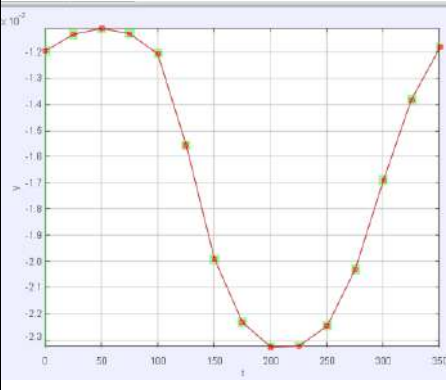
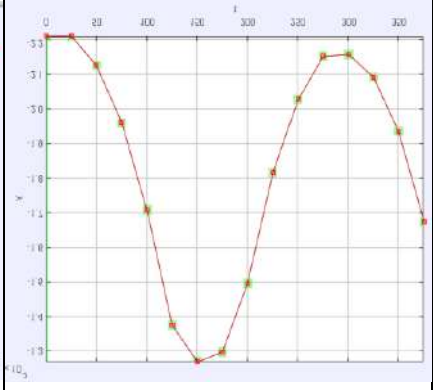
一、跳舞草的擺動觀察分析

(一) 小葉擺動的軌跡分析

在安靜的教室中拍攝跳舞草的擺動，攝影時間約 5 分鐘，使用 Tracker 進行分析，並分成正面和側面分析，為了方便比較，所以我們統一分析左葉。

1、小葉正面擺動分析

(1) 擺動觀察分析

| | 第一次實驗 | 第二次實驗 | 第三次實驗 |
|----------|---|--|---|
| 正面擺動軌跡圖 |  |  |  |
| | 葉尖(紅點位置)軌跡以逆時針方向進行 | 葉尖(紅點位置)軌跡以逆時針方向進行 | 葉尖(紅點位置)軌跡以逆時針方向進行 |
| Y 軸角度變化圖 |  |  |  |

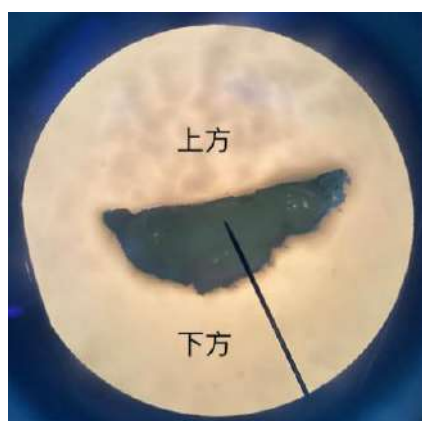
(表 4-1-1)tracker 正面擺動軌跡及 Y 軸角度變化分析圖

結果分析：

- 1.葉尖(紅點位置)軌跡以逆時針方向進行。
- 2.紅色質點是小葉正面的擺動軌跡，質點越多表示停留時間越久。可以發現跳舞草的最高點和最低點停留時間最久(即滯留點)，且向上擺動的時間會比向下擺動更久(因為質點數較多)。而跳舞草正面的擺動軌跡倒呈水滴的形狀，並非文獻中所提到的橢圓形擺動 (文獻 8、16、17)。

(2) 葉枕細胞切片觀察

透過觀察小葉轉動，我們發現是其葉片基部的葉枕細胞膨脹和萎縮，帶動小葉旋轉，並將葉柄切片，切片結果如圖 4-1-1 所示，由切片可觀察到，葉柄的形狀如半月形，我們將在後面探討葉柄形狀和擺動軌跡的關聯性。



(圖 4-1-1) 葉柄的切片



(圖 4-1-2) 使用 Tracker 分析小葉側面軌跡

2、小葉側面擺動分析

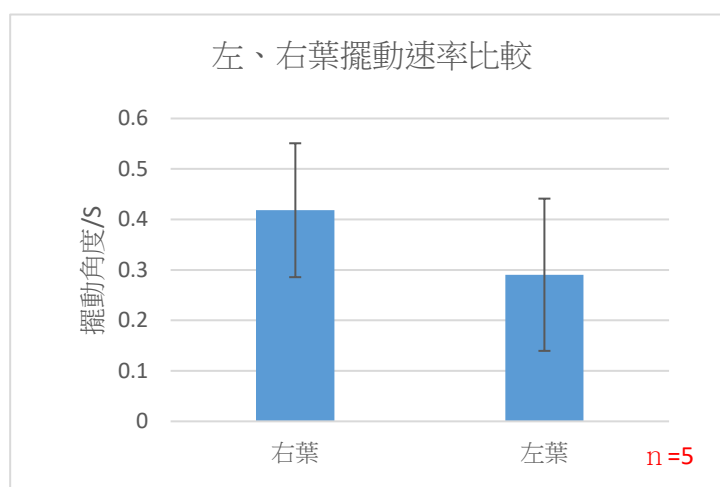
如圖 4-1-2 所示，使用 Tracker 程式從側面分析的結果可發現路徑呈現圓弧形，最高點和最低點停留時間較長。向上擺動的速率較向下擺動慢，和正面擺動分析的結果一致。由於側面較容易觀察和分析，故後續對於跳舞草小葉的擺動分析，我們採取側面擺動進行分析。

(二) 左、右小葉的擺動差異比較

為了瞭解兩片小葉的轉動速率與角度是否會存在差異，我們在室溫攝氏 19 度的無人教室拍攝小葉轉動持續三分鐘，再將影片進行分析

1. 小葉的擺動速率差異分析

(1) 左、右葉的擺動速率比較

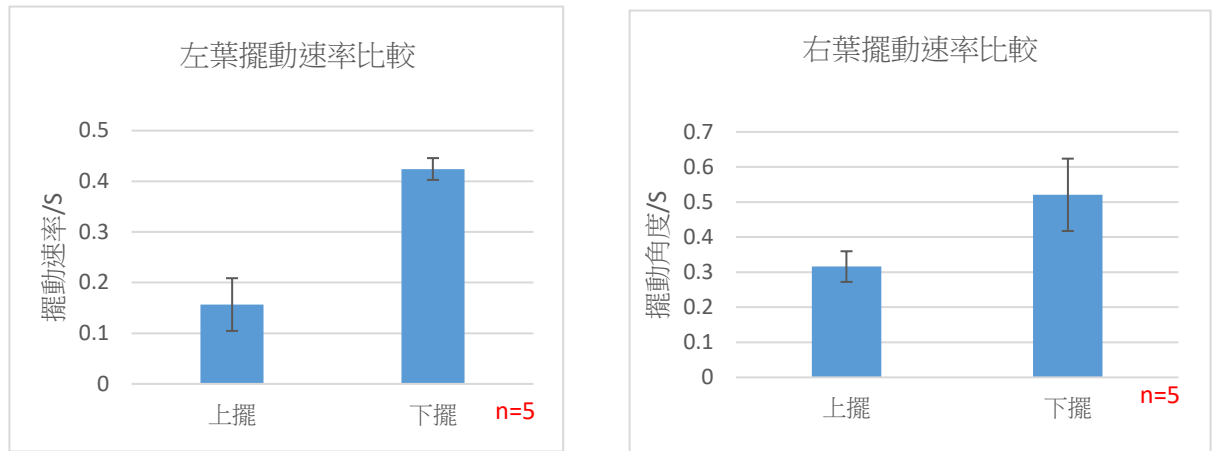


(圖 4-1-3) 左、右葉的擺動速率比較

右葉較左葉快，進行統計分析後， p 值為 0.07，表示兩者擺動速率達顯著差異。

(2) 向上與向下擺動速率的差異比較

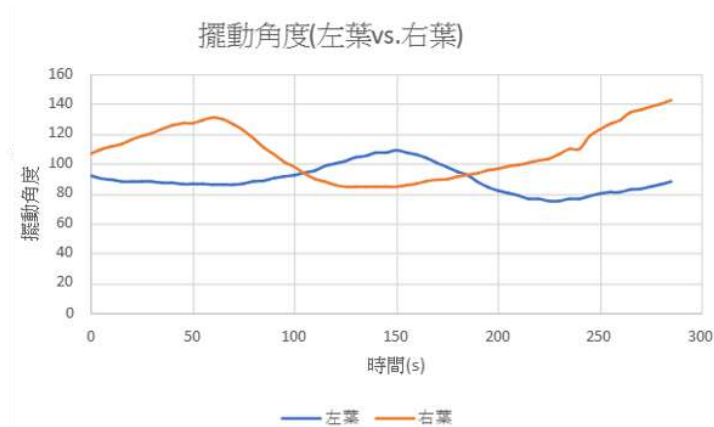
我們在拍攝小葉擺動影片時，用肉眼觀察到小葉往下擺動較明顯，為了驗證觀察到的差異，將左、右葉擺動的資料分為「向上擺」和「向下擺」兩組，各進行五次實驗，分析結果如下：



(圖 4-1-4) 左葉上擺和下擺的擺動速率比較 (圖 4-1-5) 右葉上擺和下擺的擺動速率比較
由實驗結果可知，左、右葉往下擺動時的速率皆較快於往上擺動時，做統計分析後， p 值分別為 0.001 (左葉) 和 0.02 (右葉)，皆達顯著差異。

2. 左、右葉的擺動角度比較

我們將跳舞草完整的擺動視為一個周期，所得到的擺動角度分析如下：



(圖 4-1-6) 左、右葉的擺動角度比較

由上圖可知，左、右葉會交錯擺動，當左葉擺動至最高點時，右葉剛好在最低點，反之亦然。且每次擺動的最高點和最低點會有些微差異。從本次分析我們也發現，當小葉擺動到最高點或最低點時，跳舞草會停留一陣子，才開始往下轉動，與之前查到的相關文獻一致，於是將小葉擺動到最高點與最低點時，停留的位置稱為「滯留點」(文獻 1)。以下實驗皆是以最高的滯留點計算停留時間，以減少誤差。

由跳舞草的小葉轉動觀察分析可以發現左葉及右葉的擺動除了擺動角度之外其他反應皆一致，所以在後面的實驗我們將左、右葉擺動振幅、速率及滯留點時間合併分析，但擺動角度具有方向性，因此擺動角度不合併分析，另外滯留點的長短亦會影響小葉的速率分析，因此我們在後續的探討實驗會將這些因素納入考量，以減少誤差。

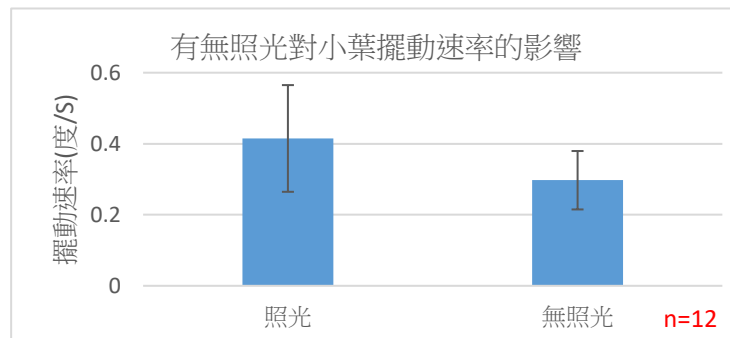
二、動物互動關係對於跳舞草轉動的成因探討

(一)照光對跳舞草小葉擺動的影響

我們將室外組置於室溫 27.5 度的空教室裡，並在上方架設強光手電筒，室內組則開啟日光燈進行約四分鐘的拍攝，並且我們使用安卓手機的 phyphox 軟體測量照度，室外組為 9144.4 lux，室內組為 469.8lux，各別拍攝六組，影片分析結果如下：

1.有無照光對跳舞草小葉擺動的影響

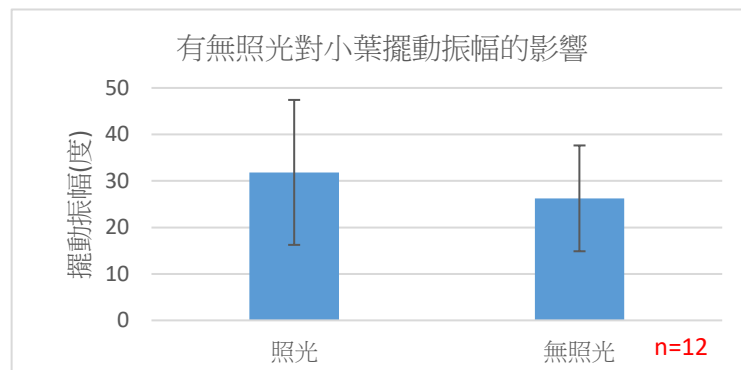
(1) 有無照光對跳舞草小葉擺動速率的影響



(圖 4-2-1)有無照光對跳舞草小葉擺動速率的影響

照光的擺動速率較無照光的擺動速率快。 p 值=0.01，在統計上達顯著差異。

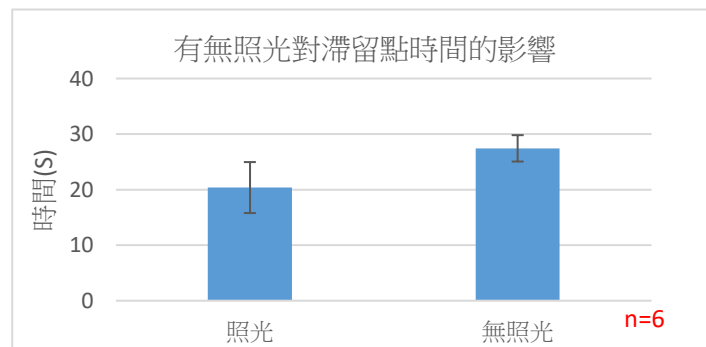
(2) 有無照光對跳舞草小葉擺動振幅的影響



(圖 4-2-2)有無照光對擺動振幅的影響

照光的擺動振幅較無照光的高。 p 值=0.1，在統計上未達顯著差異。

(3) 有無照光對跳舞草小葉滯留點時間的影響

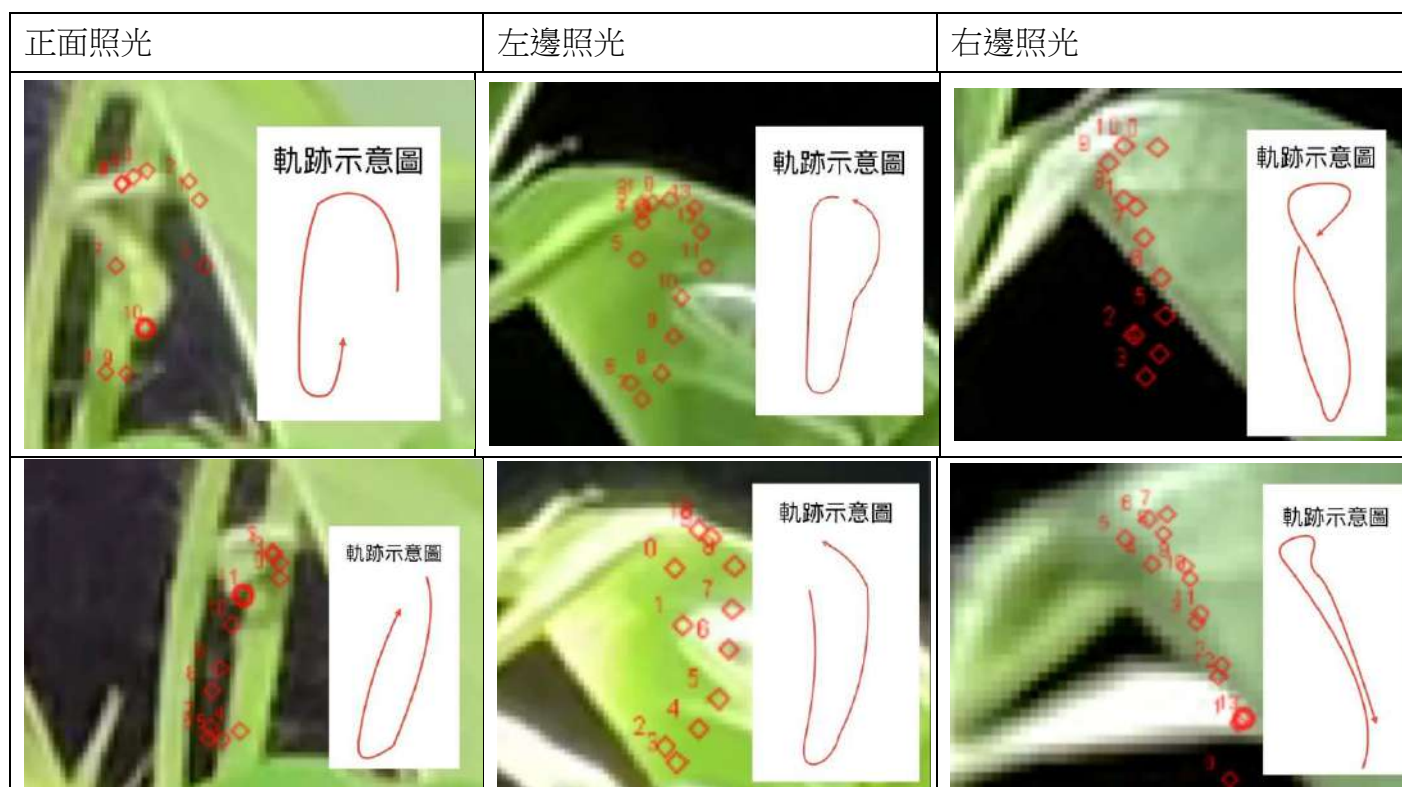


(圖 4-2-3) 有無照光對跳舞草小葉滯留點時間的影響

照光的滯留點時間較無照光短。 p 值=0.003，在統計上達顯著差異。

2. 照光方向的不同對跳舞草小葉擺動軌跡的影響

我們將跳舞草置於黑暗且室溫 30 度的空教室中架設強光手電筒照光，分成正面照光、左側照光、右側照光三組，分別拍攝五組。



(表 4-2-1) 不同的照光方向與跳舞草小葉擺動軌跡的差異

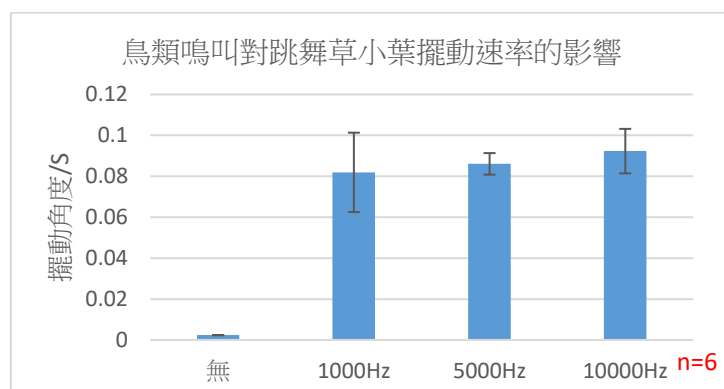
正面擺動軌跡呈現彎月形，左側照光的擺動軌跡下擺的時候會向右彎，右側照光的擺動軌跡變得不規律。

(二) 音頻對跳舞草小葉擺動的影響

為了探討音頻對小葉擺動的影響，我們將實驗分成鳥類音頻和昆蟲音頻，與跳舞草一同放在室溫約 16 度 (鳥類音頻) 和 28 度 (昆蟲音頻) 的空教室錄影，觀察在其音頻下小葉擺動的差異：

1. 鳥類鳴叫對跳舞草小葉擺動的影響

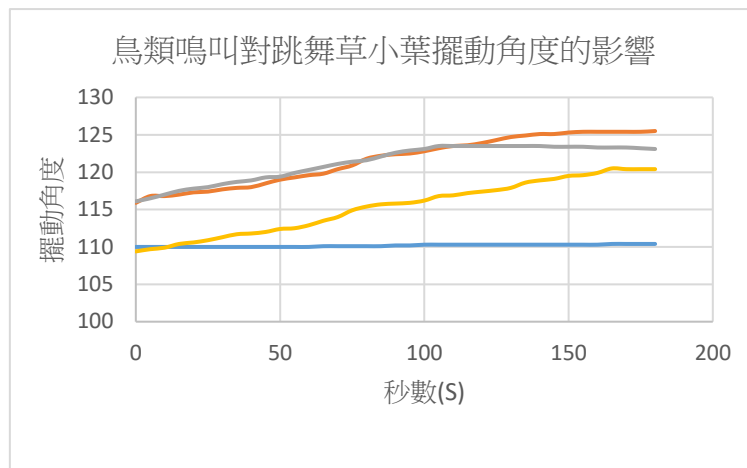
(1) 鳥類鳴叫對跳舞草小葉擺動速率的影響



(圖 4-2-4) 不同音頻對小葉擺動速率的影響

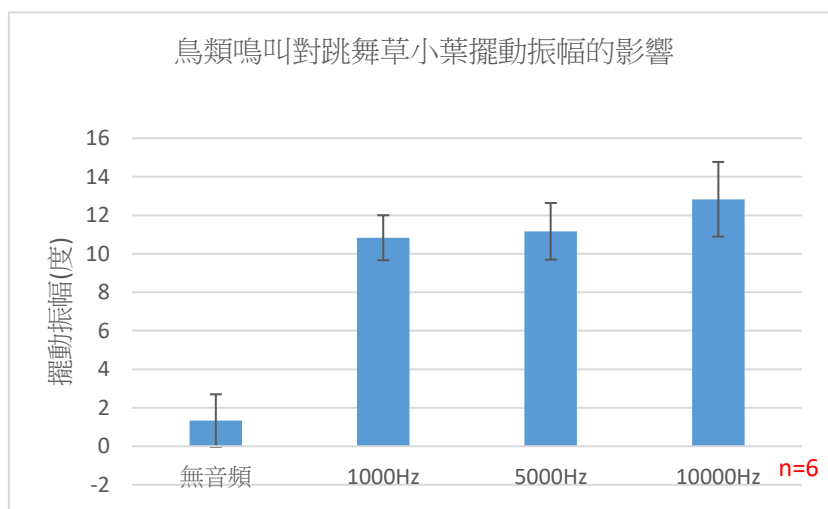
由上圖可知，小葉擺動速率的快慢依序為：無音頻<1000<5000<10000Hz，因此可知音頻越高，小葉的擺動的速率越快。

(2) 鳥類鳴叫對跳舞草小葉擺動角度的影響



(圖 4-2-5) 鳥類鳴叫對跳舞草小葉擺動角度的影響

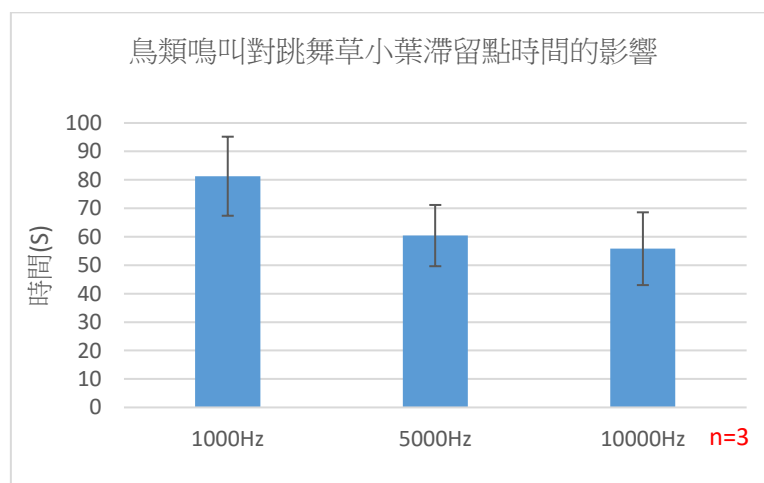
由上圖可知，1000~10000Hz 的擺動斜率幾乎相同，無音頻則幾乎沒有擺動。



(圖 4-2-6)鳥類鳴叫對跳舞草小葉擺動振幅的影響

由上圖可知音頻越高擺動振幅越大。

(3) 鳥類鳴叫對跳舞草小葉滯留點時間的影響

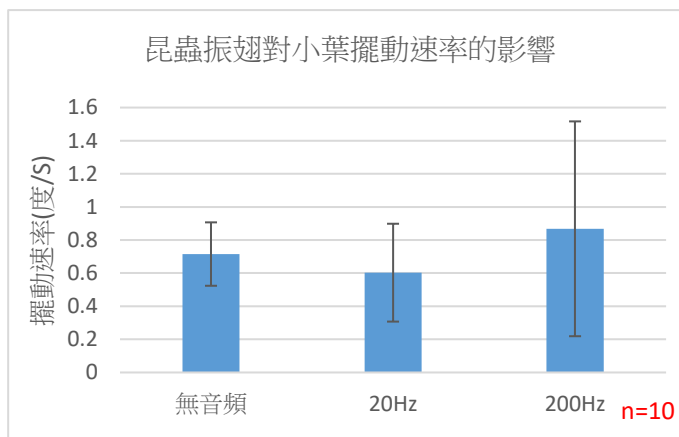


(圖 4-2-7) 鳥類鳴叫對跳舞草小葉滯留點時間的影響

由上圖可知，音頻越高，小葉的滯留點時間越短。因為無音頻幾乎不擺動，所以不列入圖表分析。

2. 昆蟲振翅對跳舞草小葉擺動的影響

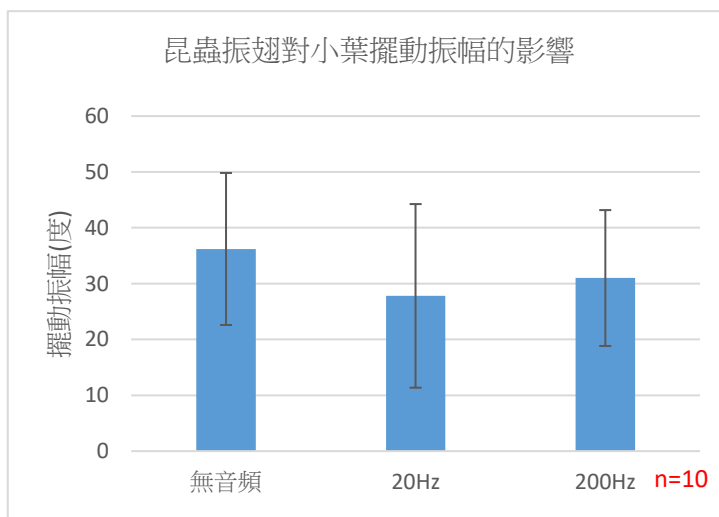
(1) 昆蟲振翅對跳舞草小葉擺動速率的影響



(圖 4-2-8) 昆蟲振翅對跳舞草小葉擺動速率的影響

由上圖可知，20Hz 擺動速率最慢，200Hz 的擺動速率最快。

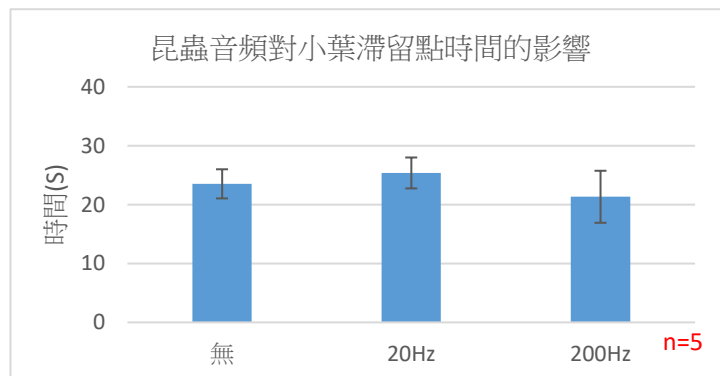
(2) 昆蟲振翅對跳舞草小葉擺動振幅的影響



(圖 4-2-9) 昆蟲振翅對小葉擺動振幅的影響

由上圖可知，無音頻的擺動振幅最大，20Hz 的擺動振幅最小。

(3) 昆蟲振翅對跳舞草小葉滯留點時間的影響



(圖 4-2-10) 昆蟲音頻對小葉滯留點時間的影響

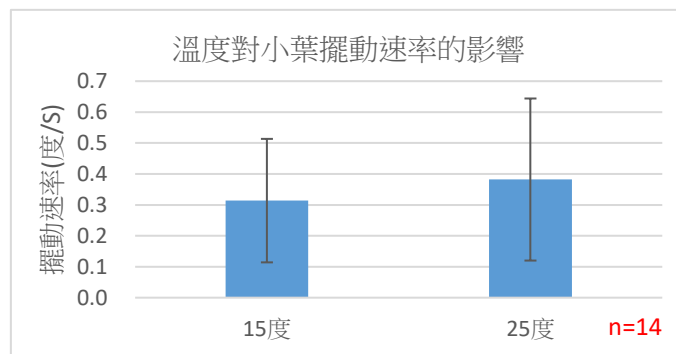
由上圖可知，20Hz 時滯留點時間最久，200Hz 滯留點時間最短。

三、環境溫度對跳舞草小葉擺動的影響

為了探討不同季節的溫度高低對小葉轉動速率與角度的影響，我們將跳舞草放在不同溫度的環境，拍攝小葉轉動的狀況，再分析小葉上擺轉動的速率

(一) 溫度對小葉擺動速率的影響

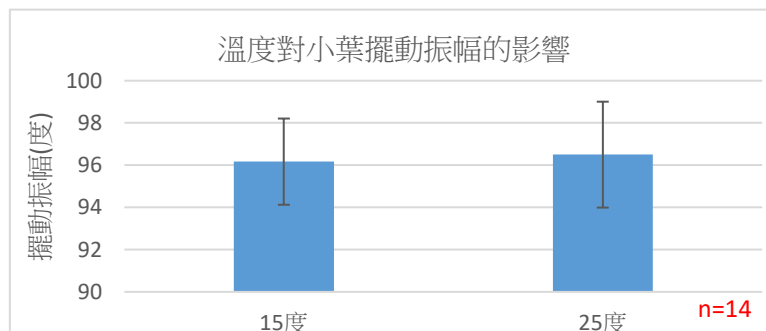
我們使用加溫設備及降溫裝置，達到目標溫度約 15 度(秋冬組)和 25 度(春夏組)兩組，各六次數據進行分析：



(圖 4-3-1) 溫度對小葉擺動速率的影響

由以上結果可得知，溫度較高時的小葉擺動速率較快。統計分析的 p 值=0.2，在統計上未達顯著差異

(二) 溫度對小葉擺動振幅的影響

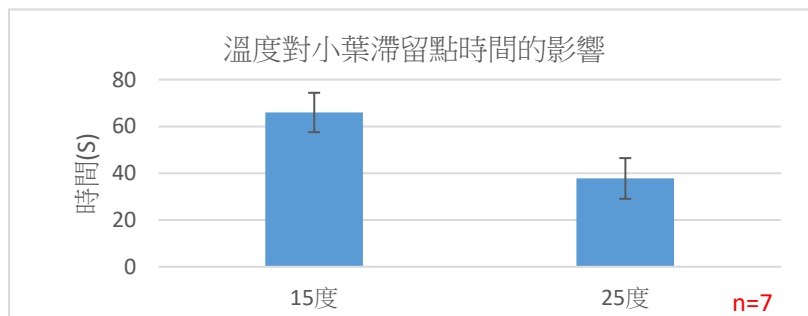


(圖 4-3-2) 溫度對小葉擺動振幅的影響

由上圖可知，25 度的擺動振幅較 15 度大。 p 值=0.3，在統計上未達顯著差異。

(三) 溫度對小葉滯留點時間長短的影響

因右葉擺動差異較明顯，因此溫度的滯留點皆以分析右葉為主：



(圖 4-3-3) 不同溫度對滯留點時間的影響

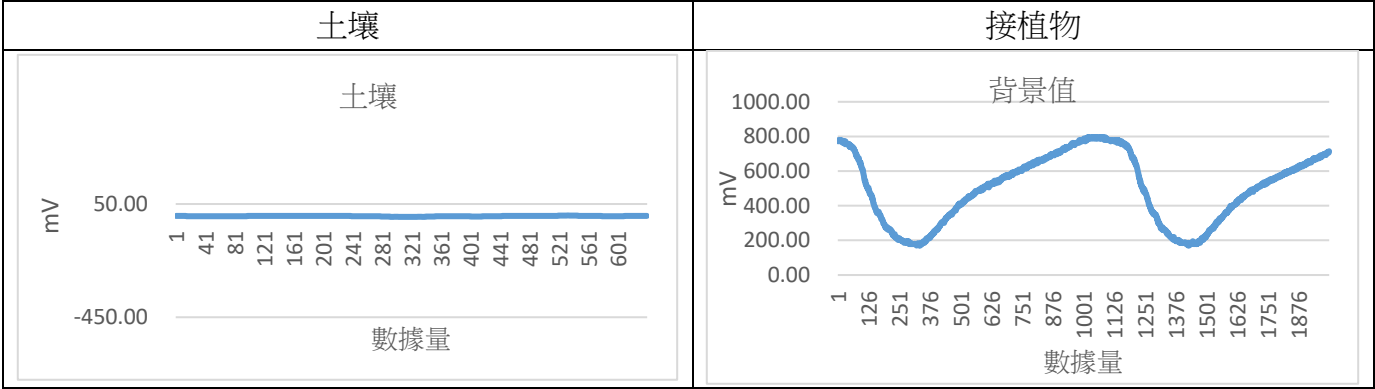
由上圖可知溫度越低，小葉的滯留點時間越長。 p 值=0.00002，在統計上達顯著差異

四、跳舞草擺動時的電訊號分析

(一)植物電訊號分析

1.前置實驗—背景值測試

為了確認我們自製的植物電壓感測器是否可以正確測得相對應的電壓，我們使用探測針測試土壤及植物，測試結果如圖 4-4-1 及 4-4-2 所示：



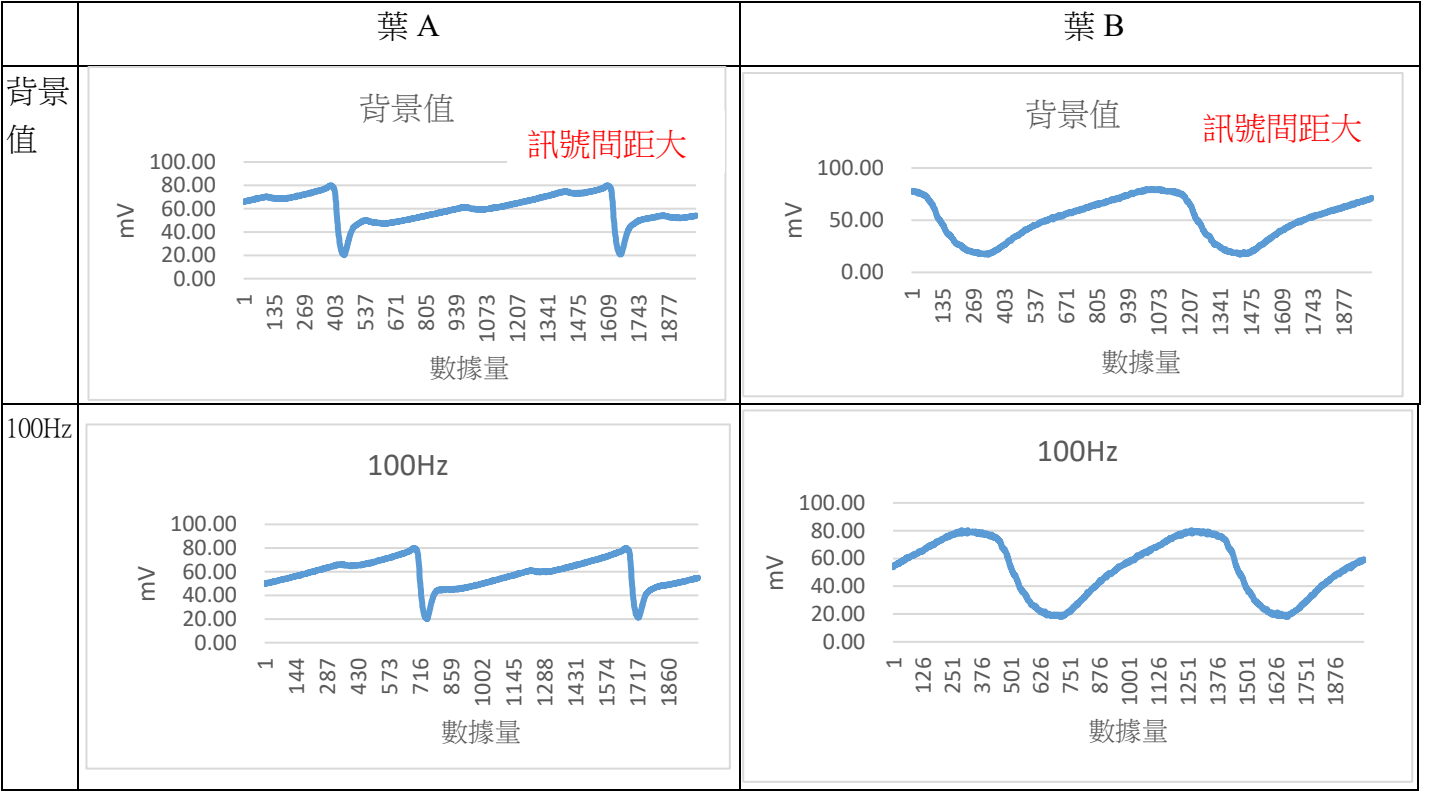
(圖 4-4-1) 探測針插在土壤時的波形

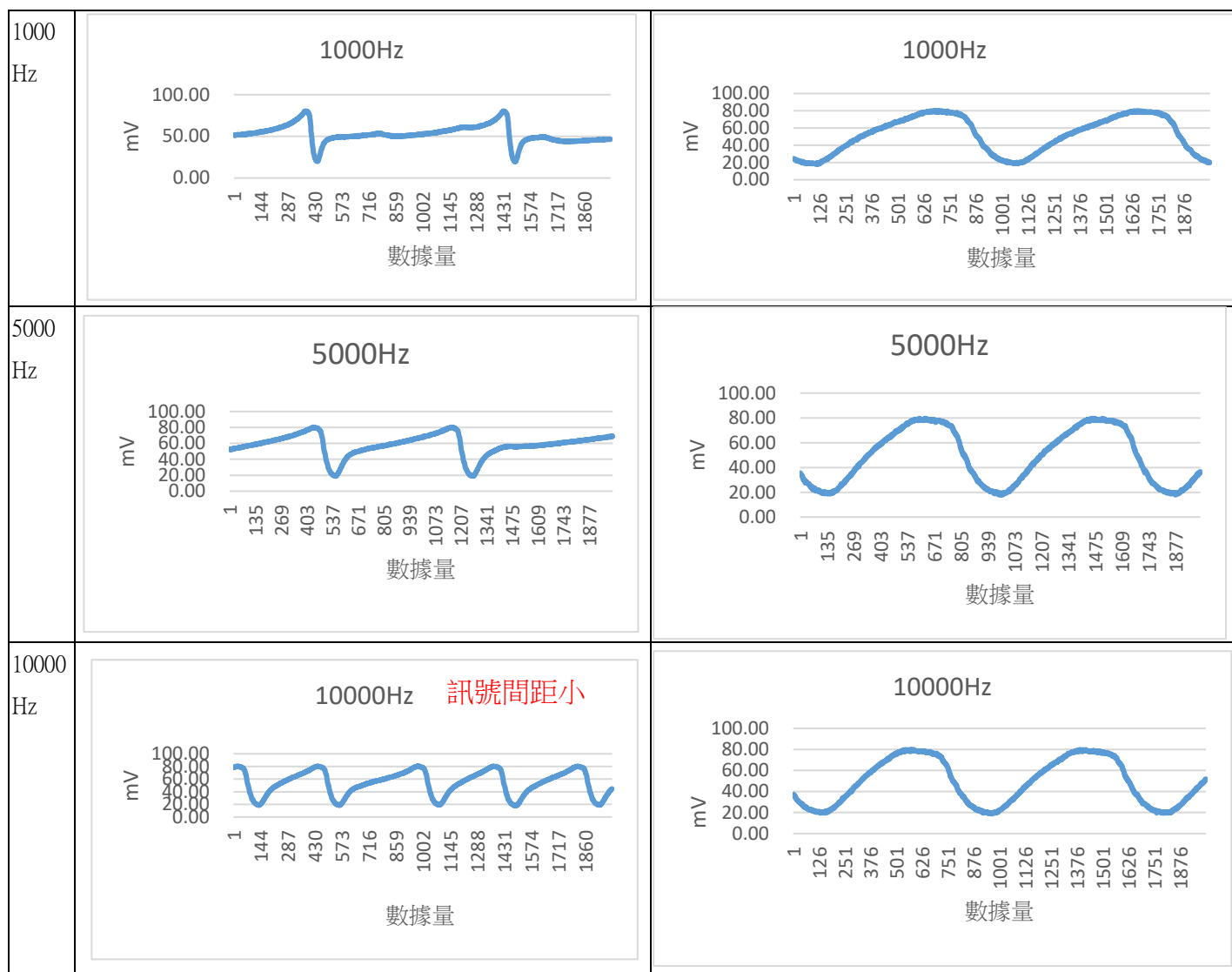
(圖 4-4-2) 探測針接在植物上時所產生的波形

由結果可以得知當自製的植物電壓感測器插在土壤中時，不會有任何電壓變化，因此可以確信此感測器可以正常的接收植物電壓

2.不同音頻對植物電位的影響

本實驗在未做隔音處理的實驗室內進行，所以在不播任何音頻的情況下，也會有環境雜音。我們用處於擺動狀態的小葉(分別為小葉 A 與小葉 B)進行測量，紀錄環境背景值及提供各種固定音頻下的植物電位變化，結果如下：

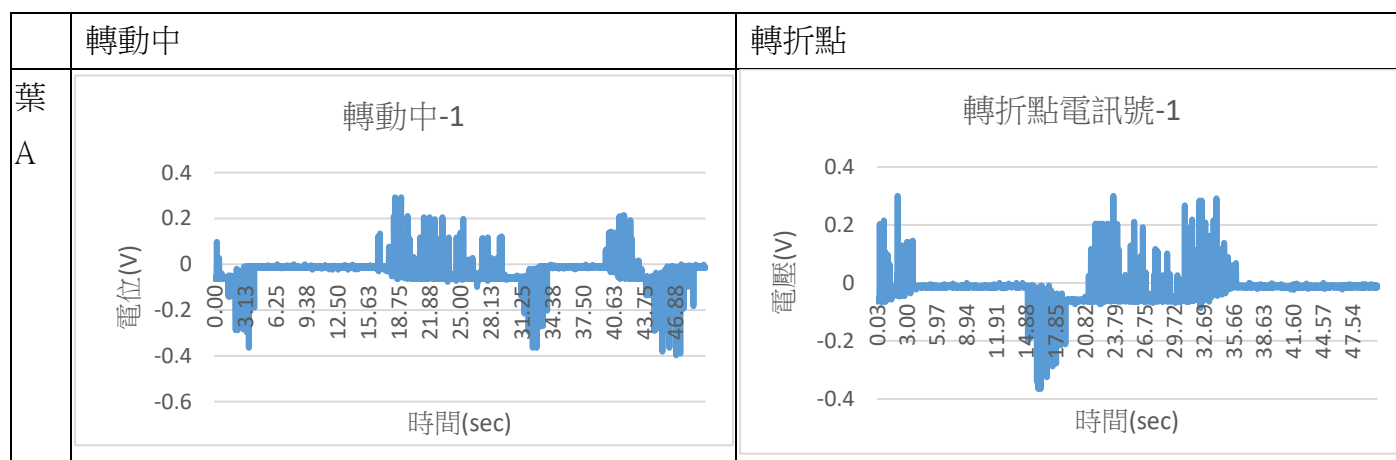


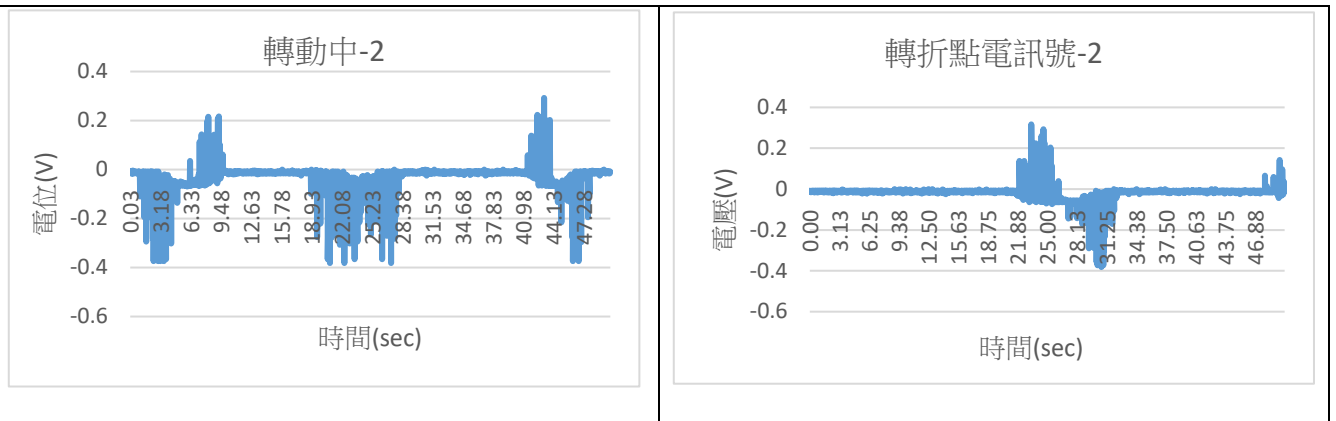


(表 4-4-1)不同音頻下植物的電波變化

3.轉動期間轉折點之間的差異

接著我們想了解當小葉產生反轉時，是否會產生更大的電訊號。於是我們接收了這兩種轉動狀態下的電訊號。比較如下：



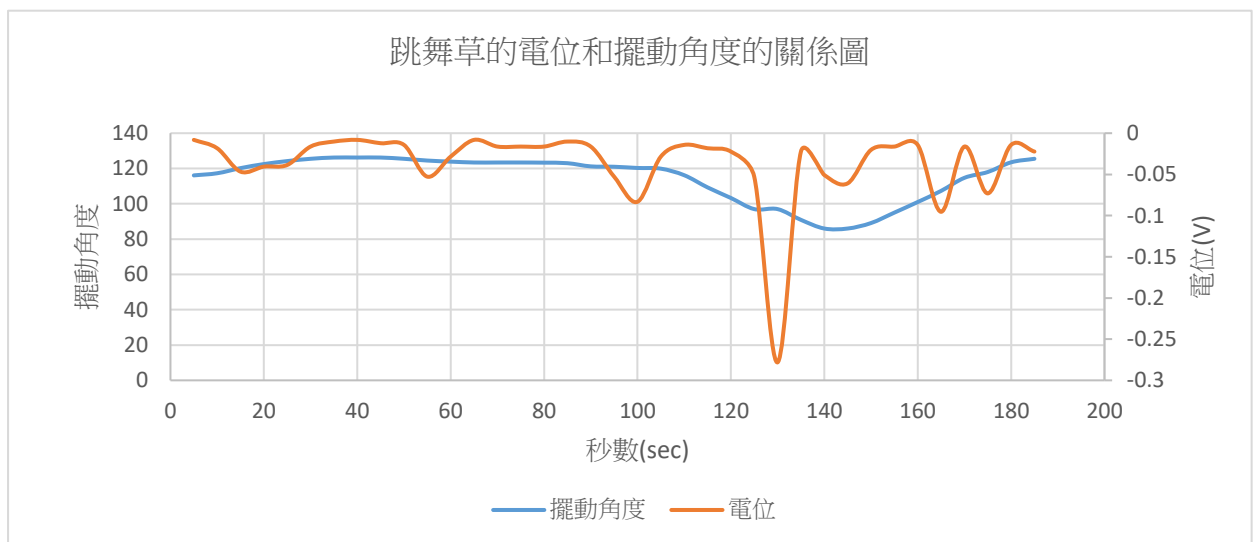


(表4-4-2)轉折點和轉動中的植物電波變化

我們發現轉動期間，小葉的電位變化較規律。轉折點時的電位變化較不規律，且有長時間變化的電訊號

從以上結果得知，當植物接受到的音頻越高，電位的變化越頻繁。且植物電位皆在-400-300mV間震盪，所以表示音頻不會影響到植物細胞的最高電位和最低電位之數值。

4.為了瞭解小葉的電位和其運動角度的相關性，於是我們比對這兩種實驗數據。實驗結果如下



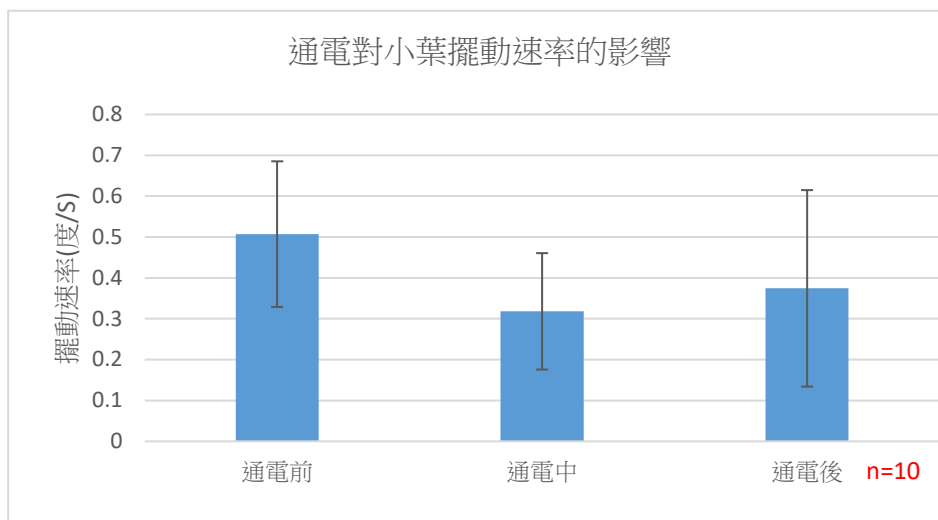
(圖 4-4-3)跳舞草的電位和擺動角度的關係

我們發現當跳舞草即將開始擺動時，其電位變高。當小葉擺動到最低點時，其電位亦達到最低點。且當小葉向上擺動時，電位也逐漸上升。

五、通電對跳舞草小葉擺動的影響

分析完環境因素對跳舞草的影響後，我們想進一步了解電流是否會影響跳舞草的轉動機制。以 1.5V 的電流對跳舞草的葉枕細胞通電後，預期能讓細胞膜電位改變，進而影響小葉擺動速率，並錄影觀察小葉的擺動情形：

(一) 通電對小葉擺動速率的影響

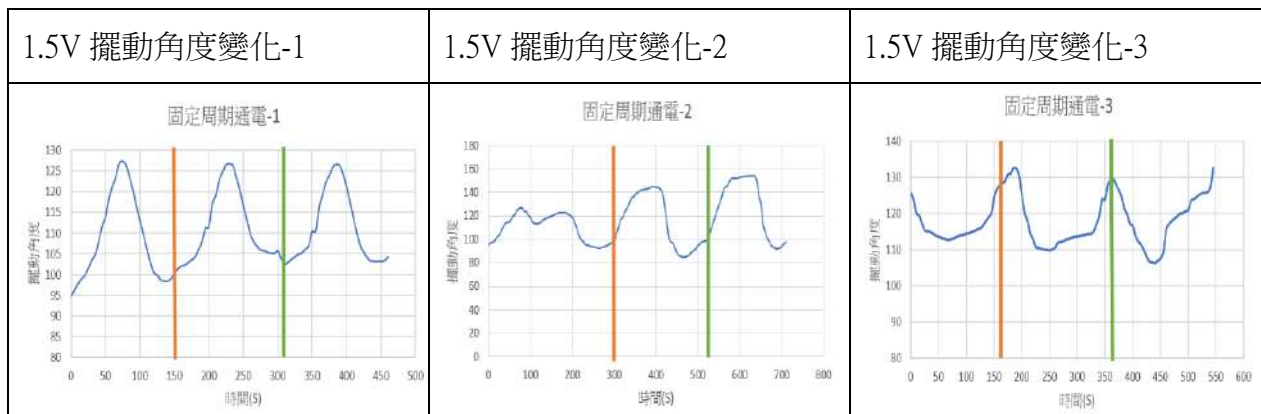


(圖 4-5-1) 通電對小葉擺動速率的影響

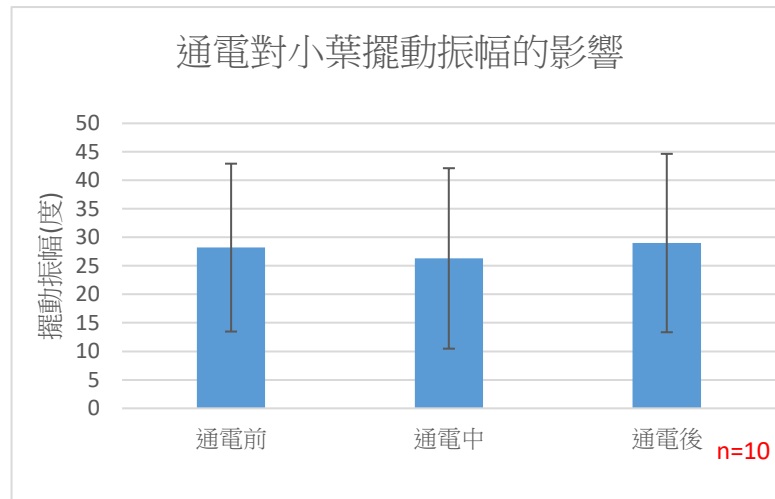
由結果可知，通電期間小葉擺動速率會變慢，而電通電結束後的擺動速率會較通電中稍快。

(二) 通電對小葉擺動角度的影響

以下是通電前、通電中和通電後的小葉擺動角度分析圖，橘色線為開啟電源，綠色線為開啟電源：



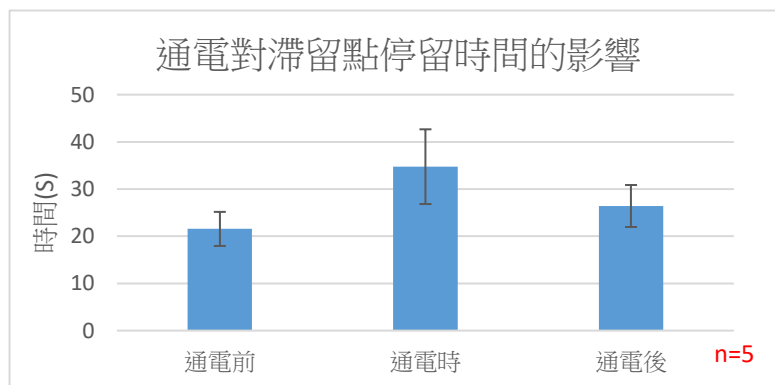
(表 4-5-1) 通電對小葉擺動角度的影響



(圖 4-5-2)通電對小葉擺動振幅的影響

由上圖可知，通電對擺動角度、振幅並無明顯的影響。

(三) 通電對小葉滯留點時間的影響



(圖 4-5-3)滯留點時間影響

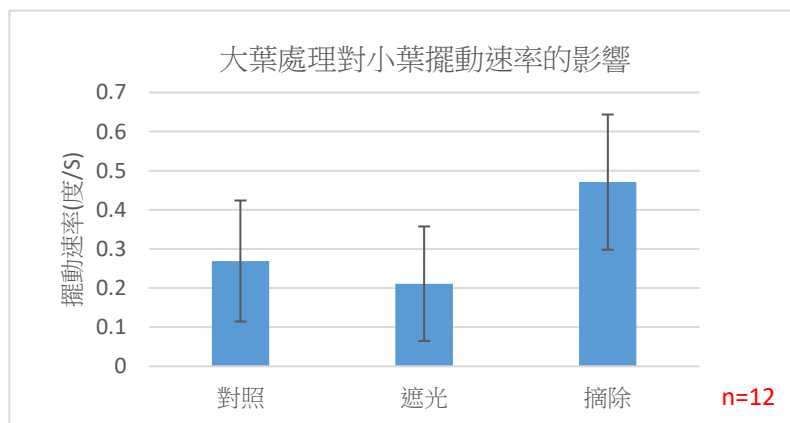
由上圖可知，通電時的小葉滯留點時間最久，通電前的滯留點時間最短。

六、大葉對於跳舞草小葉擺動的影響

從照光實驗推測，小葉擺動可能與大葉有關，因此設計以下實驗證明我們的論點。

在安靜教室拍攝跳舞草擺動，溫度 27.5 度，攝影約 3 分鐘，對照、大葉遮光和摘除三組：

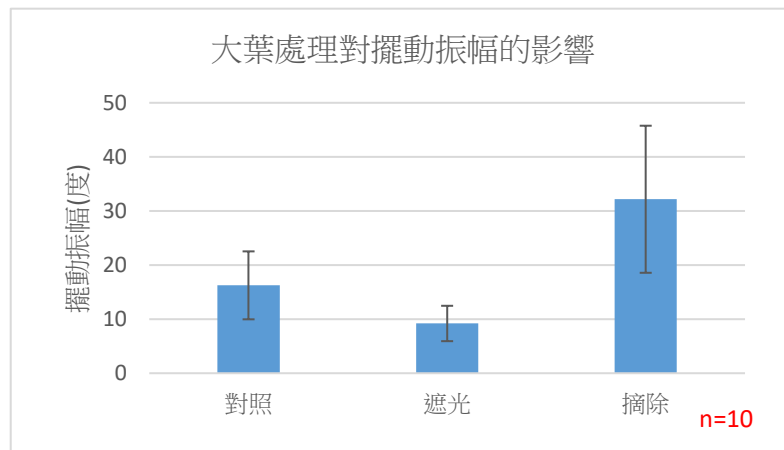
1.大葉處理對於跳舞草小葉擺動速率的影響



(圖 4-6-1) 大葉處理對於跳舞草小葉擺動速率的影響

由上圖可知，大葉遮光時小葉擺動速率變慢，將大葉摘除時擺動速率則會變快。

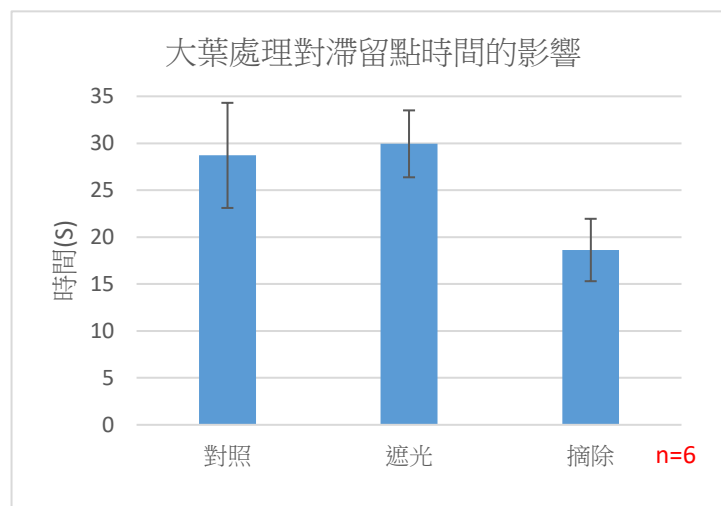
2.大葉處理對於跳舞草小葉擺動振幅的影響



(圖 4-6-2)大葉處理對擺動振幅的影響

由結果可知大葉遮光的擺動振幅最小時擺動振幅變小，摘除大葉則會造成擺動振幅則變大

3.大葉處理對於跳舞草小葉滯留點時間的影響



(圖 4-6-3)大葉處理對滯留點時間的影響

由實驗結果可知，大葉遮光時滯留點時間變長，摘除大葉則會造成滯留點時間縮短。

伍、討論

一、跳舞草的擺動觀察分析

由實驗結果，我們整理出跳舞草小葉的擺動規則如下：

小葉轉動的正面的軌跡形狀為倒水滴形，轉動一圈為一轉動周期，到最高點和最低點時皆會停留一段時間，我們將其定義為滯留點，且向上擺的擺動速率較向下擺慢。

跳舞草轉動的側小葉有兩葉，右葉的擺動較比左葉快，同時間的擺動方向也剛好相反，左葉擺動到最高點時，右葉葉尖位置剛好在最低點，且小葉轉動的最高點和最低點並不一致，有時振幅較大，有時振幅較小。

二、動物互動關係對對於跳舞草轉動的成因探討

(一) 光線對跳舞草小葉轉動的影響

1. 當陽光強烈的中午時段，室外與室內的光線強度較高，此時跳舞草在照光下小葉擺動速率明顯快於無光照時，顯示充足光照會促進側小葉的擺動；此外，照光情況下小葉在擺動過程中的滯留時間也較短。因此若從與動物互動的演化關係上，我們推論光線充足的環境下，小葉轉動快速明顯，可以提升吸引動物視覺上的注意的成效。
2. 不同光照角度對小葉轉動軌跡之影響

正面照光的擺動軌跡較為橢圓，方向有順時針與逆時針擺動，並沒有特別的偏向；左邊照光的擺動軌跡下擺的時候彎月形會向右彎；右邊照光的擺動軌跡較為不規則且軌跡較長。我們猜測也許與大葉在右側有關，當右邊照光時，光照在大葉葉面上，讓大葉產生光合作用等代謝機制，進而影響小葉轉動。因此我們在後續實驗進一步分析大葉對小葉的轉動影響。

(二) 聲音對跳舞草小葉轉動的影響

1. 昆蟲振翅對小葉轉動的影響

根據實驗結果顯示，200 Hz 的昆蟲振翅音頻會使小葉擺動速率加快，20 Hz 的振翅聲則會使擺動速率減緩。由此我們推論，當蝴蝶或蛾類等振翅頻率較低的昆蟲接近小葉時，並不會引發其加速擺動，這與「小葉擺動是為了驅趕欲產卵的蝴蝶」之假設並不相符。相反地，當蜂類等昆蟲靠近時，其振翅頻率較高，反而較會引起小葉轉動反應，顯示跳舞草對特定頻率的聲音具有選擇性反應。

2. 鳥類鳴叫對小葉轉動的影響

實驗顯示，隨著音頻的升高，小葉的擺動速率明顯提升，擺動的振幅也隨之增加，且滯留點時間縮短。這說明高頻聲音能有效促進小葉擺動，推測可能原因是跳舞草葉面具有對高頻振動敏感的特殊感受細胞，高頻聲引發強烈且急促的空氣震動，從而刺激葉片加

速擺動。無音頻與 1000~10000 Hz 高頻聲音處理組之間，在擺動速率與角度方面均呈顯著差異。我們推測當鳥類靠近並發出鳴叫時，跳舞草的小葉擺動會加快，進而吸引鳥類注意，協助牠們發現並捕食藏匿於葉片上的昆蟲或其他無脊椎動物。

由以上音頻模擬實驗結果，我們認為跳舞草側葉轉動的演化機制，可能是吸引鳥類或蜂類等昆蟲的天敵，進而除掉入侵的食草昆蟲或毛蟲。

三、環境溫度對跳舞草小葉轉動的影響

25 度時的擺動速率都較 15 度時快，擺動振幅也較大，且溫度越高滯留點時間越短。而高溫會使跳舞草擺動速率變快的原因我們推測有兩個：

- (一) 高溫且未超過其適應極限溫度時，會有較好的細胞內生理反應，膜蛋白及水分滲透等。
- (二) 25 度是台灣春夏的月均溫，在春夏季節時，由於氣候溫暖濕潤，許多昆蟲的活動力更強，也是繁殖旺季，因此跳舞草本身容易被昆蟲產卵或毛蟲啃咬，此時透過快速轉動小葉來吸引天敵吃掉這些昆蟲，增加自身的存活率。

四、跳舞草轉動時的電訊號分析

(一) 轉動週期的電位變化分析

文獻中所提到跳舞草擺動時的膜電位差在 10mV ~ -10mV (文獻10)，但因我們的探測針無法精確的量測到單一細胞內外膜的電位變化，而是葉枕細胞間的電位差，因此電位差的數值會較大，約在 -400-300mV 之間。

我們推測跳舞草在轉折點時會使葉枕的細胞膨脹和萎縮，產生較大的植物電訊號，根據跳舞草電位和擺動角度的關係分析，結果顯示，當小葉即將進入最低的轉折點時，小葉葉枕細胞組織的電位會降低，此時細胞膜電位產生過極化，為負電位，此時細胞膨脹，但當翻轉結束時電位則慢慢恢復。

(二) 不同音頻的植物電位變化分析

從實驗結果可觀察到，播放越高音頻時，植物葉枕細胞組織的電訊號變化的間隔越短，推測音波的高速振動(高音頻)會讓細胞產生頻繁的電位差變化，導致細胞快速膨脹和萎縮，因此振動越快(高音頻)小葉轉動越快。

五、外加電流干擾對跳舞草小葉擺動的影響

在上一個實驗看到小葉轉動時電訊號的差異，因此我們推想外較大電流是否會對轉動有明顯影響，而進行了電流干擾實驗，得到下列三項實驗結果：

- (一) 小葉擺動速率：通電前> 通電後> 通電時
- (二) 小葉滯留點時間：通電時> 通電後> 通電前
- (三) 小葉的擺動振幅沒有一定變大或變小的規律性。

跳舞草的轉動與葉枕細胞的電位變化有關，實驗結果也證實外加電流對於小葉擺動速率有影

響，推測外加的電流會影響跳舞草電訊號的傳遞，導致小葉葉柄基部的葉枕細胞調節水分變慢，但其通電干擾結束後，葉枕細胞電位訊號慢慢調整回來，並細胞的水分變化恢復，但仍無法達到通電前的轉動速率。

另外，在通電或停止通電瞬間，可以觀察到小葉轉動角度的變化圖曲線，都會產生波折，但部會影響整體轉動，也就是雖然電流干擾對其膜電位產生影響，但小葉細胞仍可很快調整並恢復其轉動機制，持續轉動。

六、分析大葉是否為小葉轉動的訊號來源

由於光照實驗發現向大葉葉面打光時，小葉會有較不規律地轉動軌跡，因此我們假設大葉是小葉轉動的訊號來源，然而此實驗結果中發現大葉遮光時的擺動速率變慢，滯留點時間變長，擺動振幅變小，而摘除大葉反而使擺動速率變快，滯留點時間變短，擺動振幅變大，與我們的假設不符合，因此我們推測：

- (一)大葉在貼上膠帶後會變得更加不透光，使得小葉接受到的光源減少，使其轉動速率減慢
- (二)大葉的面積大，容易將小葉遮住，因此有大葉時小葉照度較小，擺動速率較快。
- (三)小葉偵測環境訊號與大葉無關。

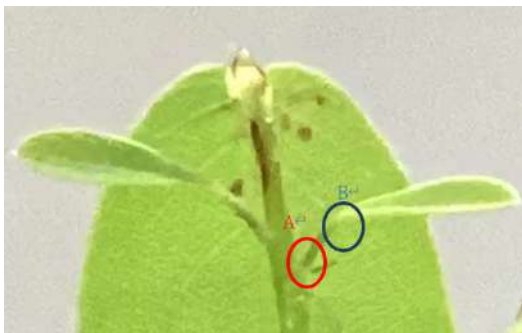
七、跳舞草小葉轉動機制綜合探討

(一)小葉擺動的演化因素

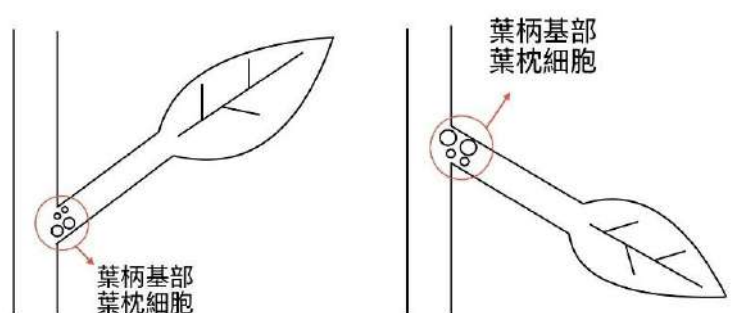
光線強、音頻高、溫度高的狀態下，小葉轉動較快速、明顯，透過我們實驗驗證，這些環境條件符合蜂類或鳥類與跳舞草的互動關係，進而吸引這些昆蟲的天敵，來獵食跳舞草上的蟲類，增加跳舞草的存活機率。

(二)小葉擺動的機制

跳舞草小葉的擺動機制，最主要是因為葉枕細胞的水分變化（文獻 4）。當跳舞草受到各種環境刺激後，葉枕細胞會膨脹或萎縮，使跳舞草的小葉可以進行擺動。我們透過觀察跳舞草的小葉擺動，發現小葉有兩種擺動方式，分別為上下擺動和旋轉，我們認為上下擺動是因為葉柄基部的葉枕細胞(A 處)膨脹和萎縮造成的，而旋轉擺動是因為葉片基部的葉枕細胞(B 處)所影響，如圖 5-7-1 所示。



(圖 5-7-1)葉柄基部和葉片基部的葉枕細胞標示



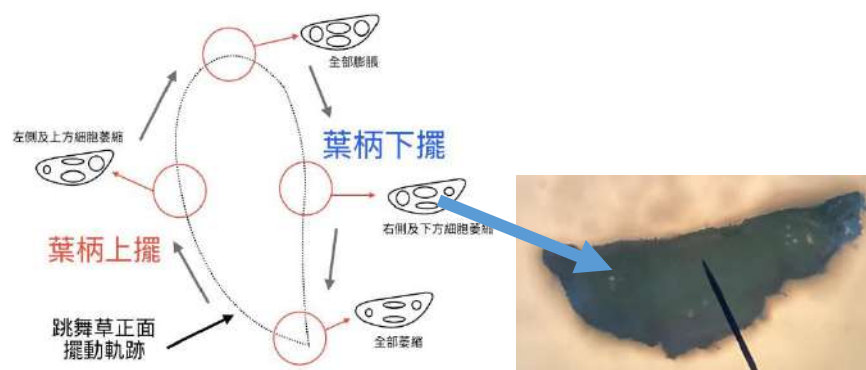
(圖 5-7-2) 小葉上下擺動原理示意圖

1.跳舞草上下方向擺動的原理(A 區葉枕細胞)

當小葉往上擺動時，上方的葉枕細胞會萎縮，下方的葉枕細胞則會膨脹，使小葉向上擺動。當小葉往下擺動時，上方的葉枕細胞會膨脹，下方的葉枕細胞萎縮，使小葉向下擺動，如圖 5-7-2 所示。

2.小葉旋轉的擺動原理(B 區葉枕細胞)

從前面的實驗可得知跳舞草小葉正面擺動時，擺動軌跡會呈現倒水滴的形狀進行轉動，而葉柄的切片呈現半月形的形狀，因此我們同時探討在葉柄上下擺動時，葉片基部的葉枕細胞膨脹或萎縮變化的轉動情形如下圖(圖 5-7-3)，雖然小葉基部的葉枕細胞呈現半月形，但旋轉的同時，葉柄上下擺動，將旋轉軌跡拉長，從而變成倒水滴形。



(圖 5-7-3) 小葉旋轉擺動原理示意圖

(二)外加電訊號對小葉葉枕細胞膜電位變化影響推論

因為通電實驗中的 1.5V 的電流，遠大於跳舞草的膜電位差 (約 36mV~136mV)，並且透過前面的實驗結果，可以得知通電會導致跳舞草小葉的擺動變慢。

由文獻得知小葉擺動與葉枕細胞的膜電位變化有關 (文獻 6、7)，因此推論額外提供的電子流 (通電)，經過葉柄基部的葉枕細胞時，可能導致鉀離子進出細胞速度變慢，使膨脹中或萎縮中的葉枕細胞停頓。

陸、結論

- 一、跳舞草側葉擺動軌跡為倒水滴狀，與葉柄基部及葉片基部葉枕細胞的膨脹萎縮有關，下擺速率較快，左、右葉成交錯擺動且速率不一致，但對環境刺激的感知反應是相同的。
- 二、自製植物電壓感測器成功測得葉枕細胞組織的微電壓變化，當小葉擺動即將反轉時，會有較大的電訊號變化，且有越高的音頻植物電訊號越頻繁。在通電干擾時其轉動速率變慢，但不影響轉動幅度，表示小葉葉枕細胞對於外加電流會有其適應性。
- 三、摘除大葉，會使小葉照到的光線變多，擺動速率變快，大葉遮光則會使擺動速率變慢。
- 四、在光線充足、溫暖的環境下，或接受到高音頻的刺激，小葉擺動速率加快，振幅增大，小葉轉動明顯，我們推論因為在春夏為昆蟲出沒的季節，在植物身上產卵的機率較高，因此跳舞草側葉增加擺動速率，像是昆蟲展翅飛舞，吸引蜂類與鳥類等昆蟲天敵來幫助去除植物體上的蟲類。

柒、參考文獻資料

1. 台灣二〇〇五 年國際科學展覽會。(2005)。科別：植物學 作品名稱：聞音起舞—聲音對跳舞草小葉擺動之影響。台灣。取自：<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-2/2005/pdf/060001-01.pdf>
2. 舞動奇蹟—跳舞草對聲音的感應。(1994)。科展類別：全國中小學科展 屆次：第 44 屆。台灣。取自：<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/44/D/030311.pdf>
3. 中華民國第 63 屆中小學科學展覽會。(2023)。科別：生物科 組別：國中 作品名稱：探討電位差變化對含羞草觸發運動過程的影響。台灣。取自：<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/63/pdf/NPHSF2023-030319.pdf?0.8510101141873747>
4. Meder, F., Saar, S., Taccola, S., Filippeschi, C., Mattoli, V., & Mazzolai, B. (2021). Ultraconformable, self-adhering surface electrodes for measuring electrical signals in plants. *Nature Materials*, 20(5), 609-617. 取自：https://www.researchgate.net/publication/349847446_Ultraconformable_Self-Adhering_Surface_Electrodes_for_Measuring_Electrical_Signals_in_Plants
5. 暗藏玄機—跳舞草的秘密武器。(2018)。科展類別：全國中小學科展 屆次：第 45 屆 科別：生物及地球科學科。台灣。取自：<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/45/high/0317/031721.pdf>
6. Han, M., & Kim, S. (1995). Oscillations of apoplasmic K⁺ and H⁺ activities in *Desmodium motorium* (Houtt.) Merril. pulvini in relation to the membrane potential of motor cells and leaflet movements. *Plant Physiology*, 107(3), 1049-1056. 取自：https://pure.mpg.de/pubman/faces/ViewItemOverviewPage.jsp?itemId=item_1794514
7. Takahashi, A., & Yamaguchi, S. (1995). Oscillations of the membrane potential of pulvinal motor cells in situ in relation to leaflet movements of *Desmodium motorium*. *Journal of Experimental Botany*, 46(12), 1353-1360. 取自 <https://academic.oup.com/jxb/article-abstract/42/7/901/535046?redirectedFrom=fulltext>
8. **The enigmatic fast leaflet rotation in *Desmodium motorium***. (2013). *Nature Reviews*, 40(3), 230-240. 取自：<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3908938/>
9. 台北植物園好花共賞系列 44-神奇的舞草。取自：https://www.tfri.gov.tw/News_Content.aspx?n=7658&s=450
10. Nucleotide Sequence and Transcriptional Analysis of the Flanking Region of the Gene (*spb*) for the *trans*-Acting Factor That Controls Light-Mediated Expression of the *puI* Operon in *Rhodobacter sphaeroides* 取自：<https://academic.oup.com/pcp/article-abstract/38/5/558/1935419?redirectedFrom=fulltext&login=false>
11. 鳥的身分證-鳥類聲譜資料庫的建立。取自：https://www.mxeduc.org.tw/scienceaward/history/projectDoc/4th/doc/SA4-100_final.pdf
12. 昆蟲的摩斯密碼——以聲波防治害蟲的可能性。取自：https://www.mdares.gov.tw/files/mdais/web_structure/6486/A01_1.pdf

【作品內圖表照片說明】本作品『探討影響跳舞草側葉擺動的機制』內容所有照片、圖片、圖表皆由作者自行拍攝、繪製。

【評語】 030311

1. 本研究聚焦於跳舞草小葉擺動與擬態行為的可能關聯，此研究的假說明確，即跳舞草小葉擺動為擬態演化行為且與電訊號變化有關。各次實驗均圍繞此假說設計驗證步驟，結構完整。研究結合行為觀察與自製電位感測器，創意新穎且具跨領域特色。
2. 部分圖表統計結果（如 p 值 >0.05 ）未達顯著，仍使用「明顯」或「影響」等字詞，建議後續更謹慎用語。另實驗樣本數不一致、對統計意涵理解有誤，也建議再加強統計素養與圖表說明能力，提升結論的信度與說服力。
3. 部分段落用語偏口語，建議全篇統一為科學論述體；名詞如「滯留點」應於方法或前文先定義，提升作品的邏輯連貫性與閱讀清晰度。
4. 本研究嘗試連結跳舞草小葉擺動與昆蟲或鳥類的聲音刺激，具高度創意與科學探索潛力。未來可模擬觀察跳舞草與鳥類、昆蟲間的實際互動，以驗證擺動行為是否具有驅避或吸引功能，進一步強化其擬態演化的生態意涵與應用價值。

作品海報

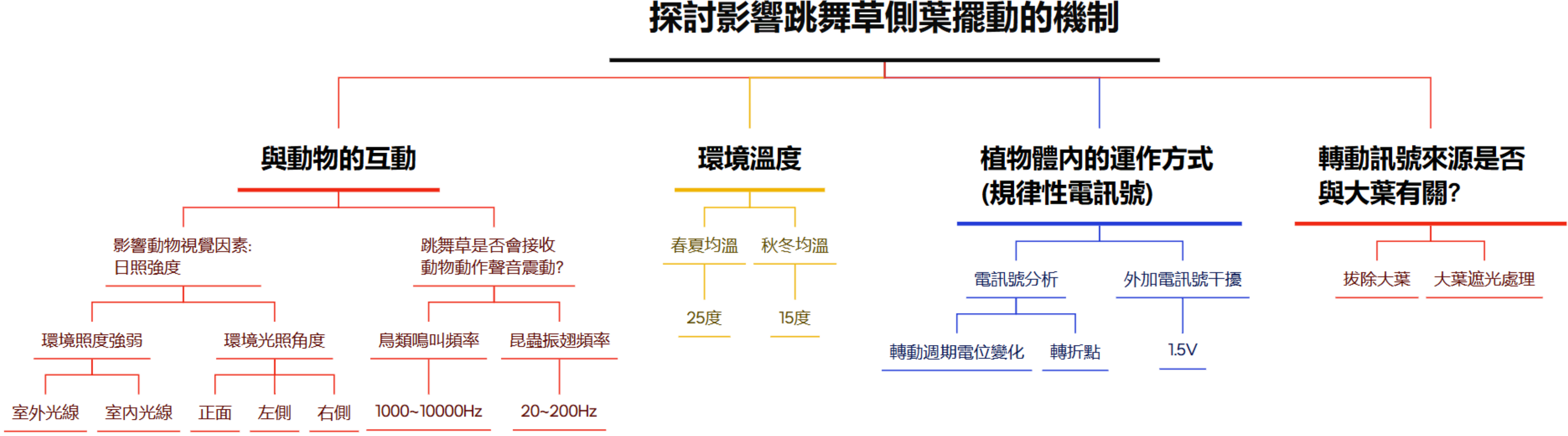


探討影響跳舞草

側葉擺動的機制

前言

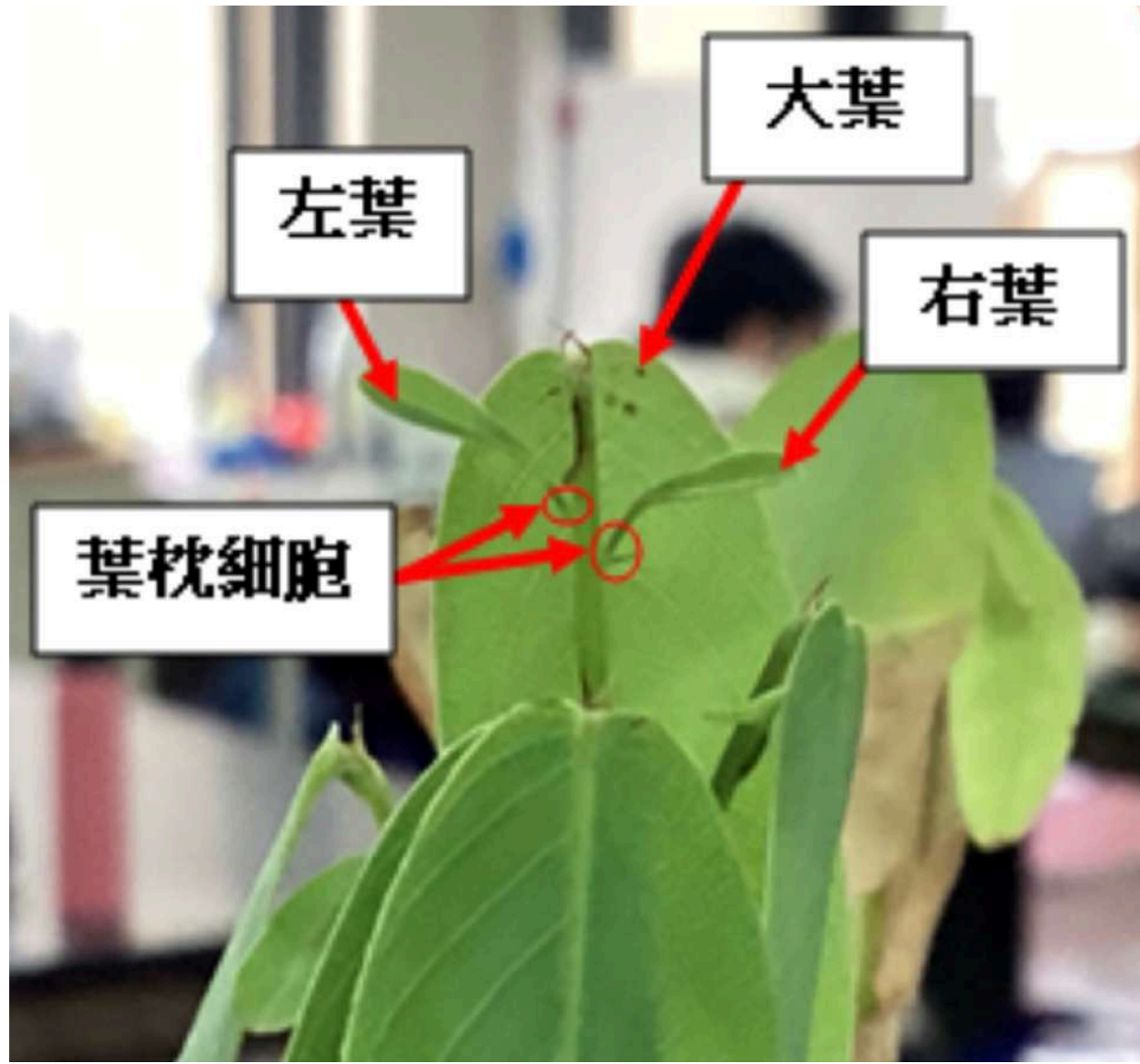
針對跳舞草的轉動網路上有種說法：葉片轉動模擬昆蟲振翅，避免蟲類在植物上產卵，或吸引鳥來吃棲息在植物上的昆蟲，且在光線充足時擺動速度增快以吸引鳥類視線，反之亦然，因此我們模擬了相關的變因，設計一系列的實驗。



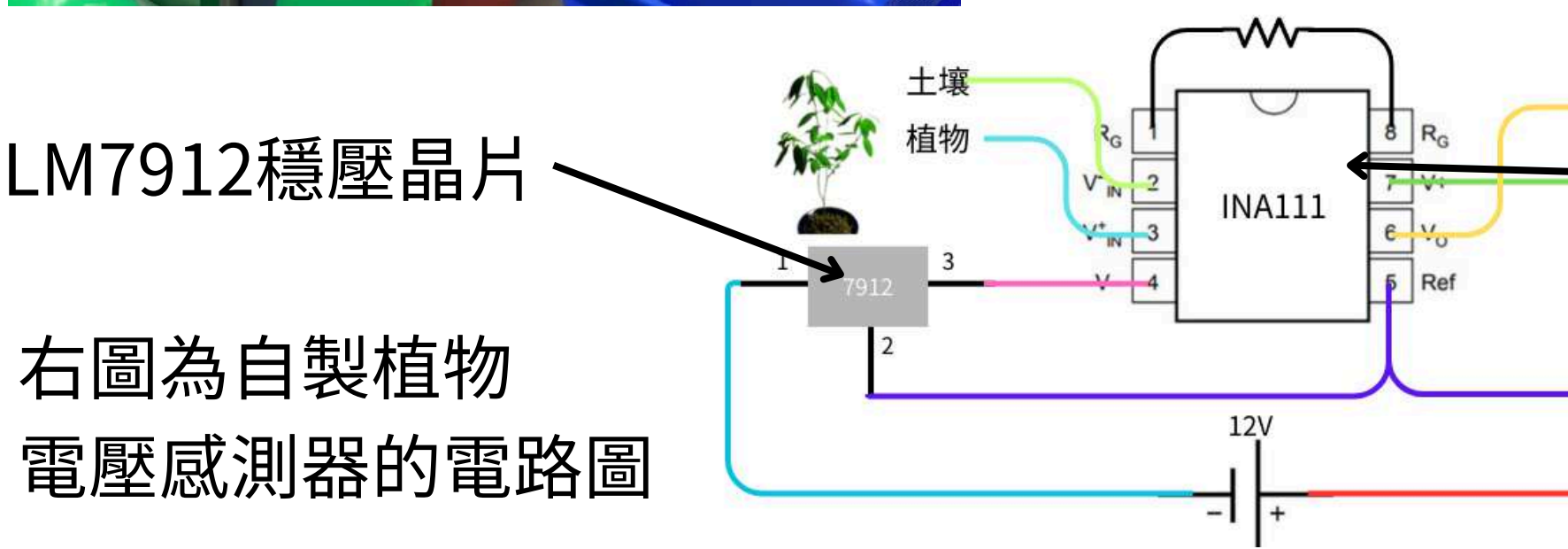
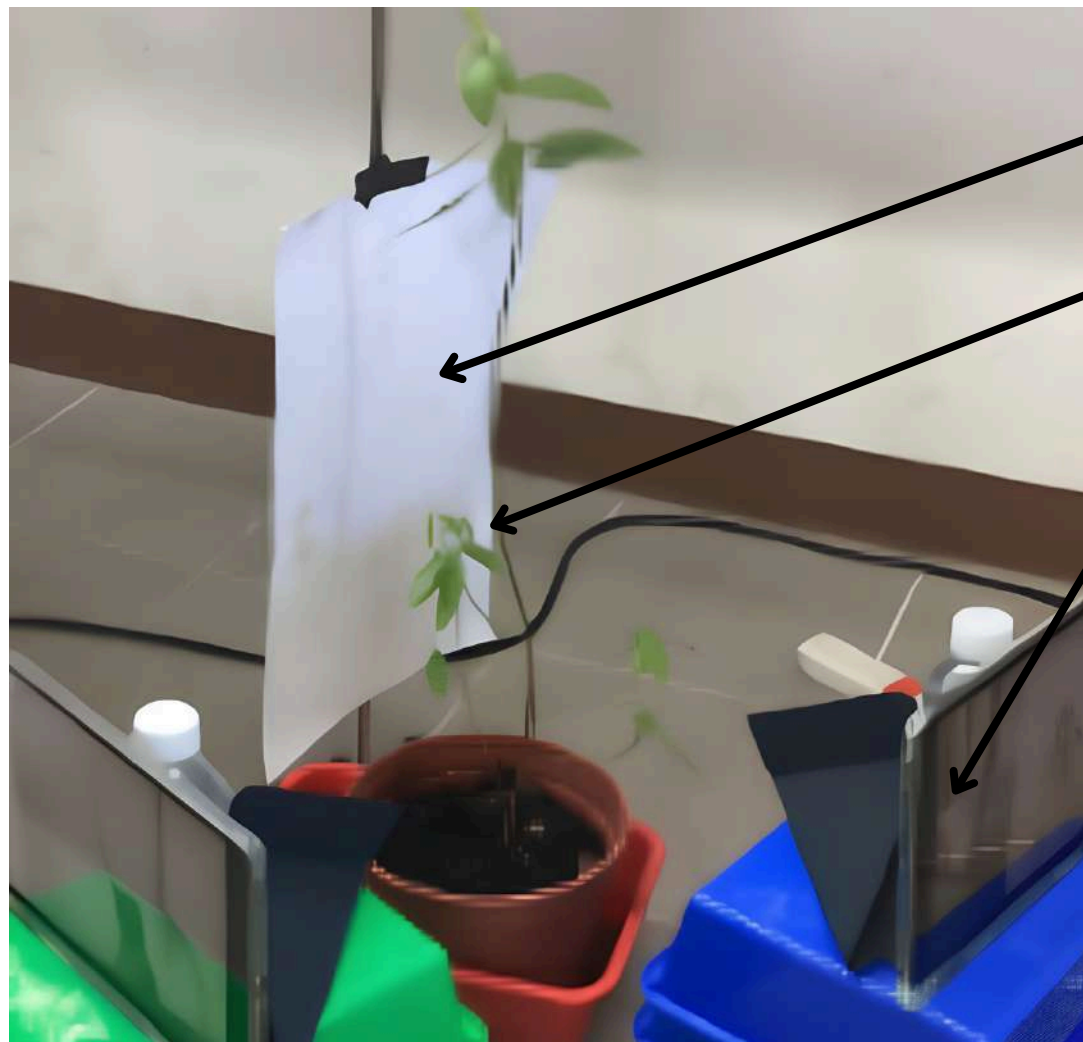
研究設備器材

實驗植物

跳舞草 (*Codariocalyx motorius*) 本研究所使用的跳舞草原生於苗栗縣卓蘭鎮。葉片型態呈三出複葉，葉片定義如下圖：



實驗裝置圖



實驗過程及方法

(一)、環境變因對跳舞草小葉擺動速度的影響

- 1.在安靜且無人的教室開燈進行實驗
- 2.布置環境
- 3.固定植物主莖架設iPad錄影，並確認左、右葉擺動。
- 4.進行拍攝

(二)、自製植物電壓感測器背景值的測試

- 1.將兩根針灸針插入土中。
- 2.播放各種音頻的聲音。
- 3.所有音頻下所呈現的波紋應為一水平線，確認環境中並沒有干擾的電訊號。

(三)、測量小葉在擺至最高點和擺動期間的電位變化

- 1.先錄下植物葉片的擺動情形，並觀察何處小葉的擺動幅度最大
- 2.將感測器的正極端插在跳舞草擺動幅度最大的小葉基部上，負極插在側莖
- 3.打開電流供應器提供INA111的運作電流
- 4.當即將擺動到最高點時，擷取植物的電訊號，再擷取擺動期間的植物電訊號比較兩著的差異

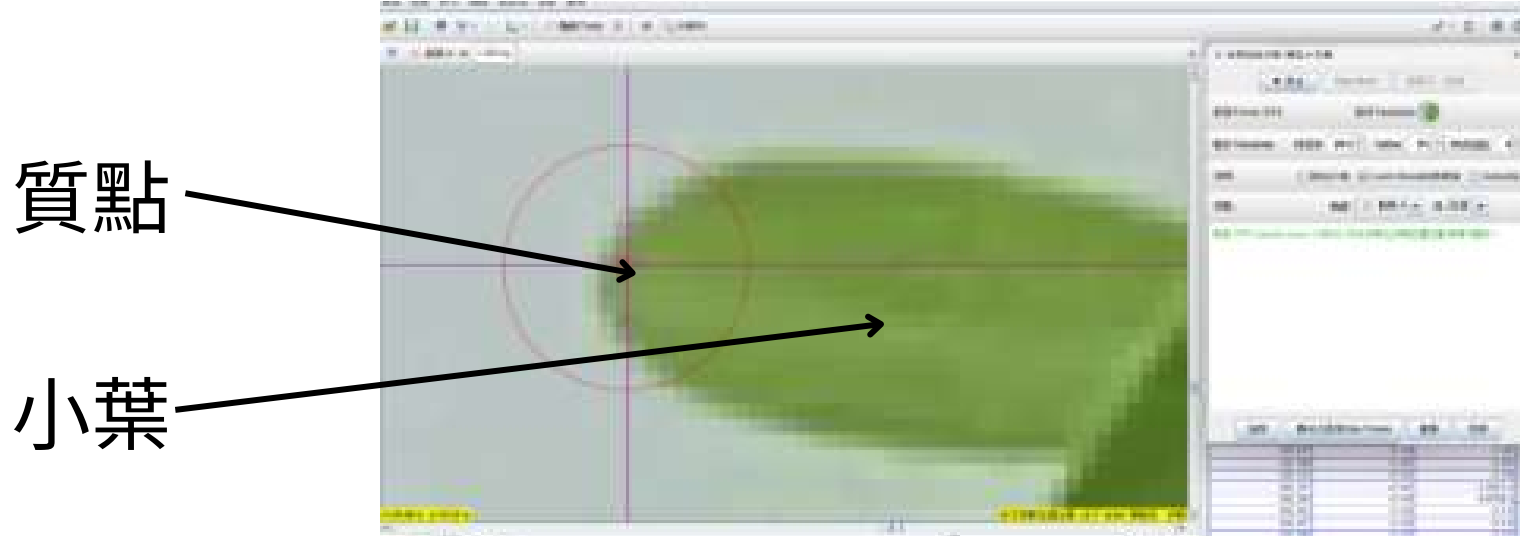
(四)、比較跳舞草在不同的音頻下與其電位的變化

- 1.先錄下植物葉片的擺動情形。
- 2.將自製的植物電壓感測器的正極端插在跳舞草小葉基部上，負極插在土中，並在正極接點塗上導電凝膠，增加導電面積。
- 3.打開電流供應器提供電路電力，開啟示波器植物電位波形便會出現在屏幕上。
- 4.播放不同音頻(100、1000、5000、10000Hz)3分鐘，將測得的波形以excel格式儲存至電腦分析

(五)、小葉擺動角度分析

Tracker影像分析軟體分析方法

- 1.側面擺動速率
設定葉尖為一質點，自動追蹤其軌跡，觀察擺動的角度變化，並算出速率。
- 2.正面的擺動軌跡
以八百到四百格影像為一單位，以手動追蹤軌跡，紀錄下正面的擺動方式。

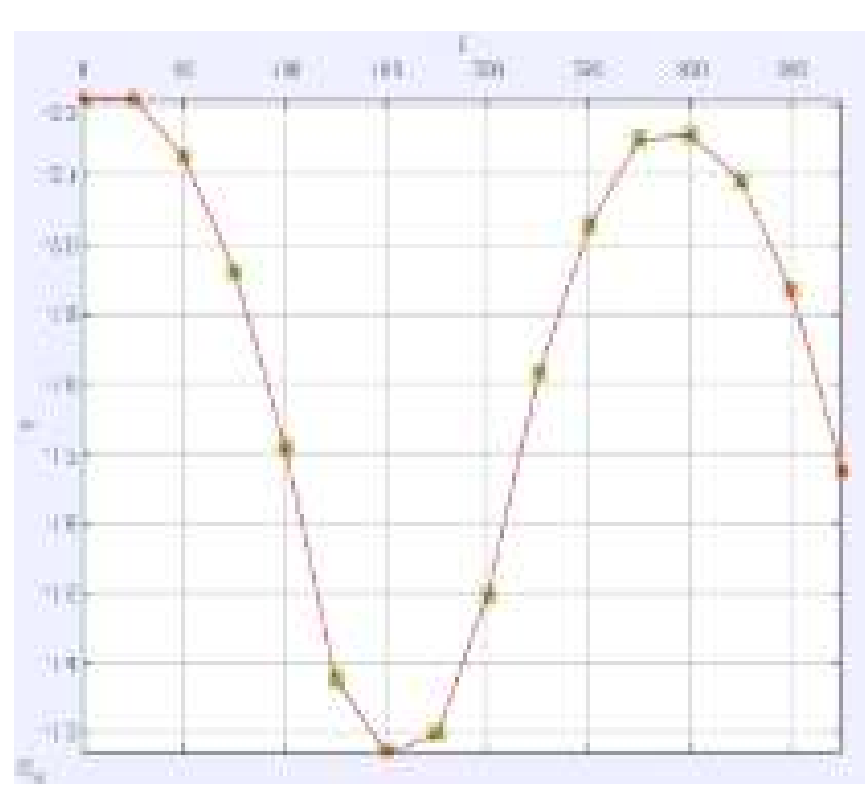
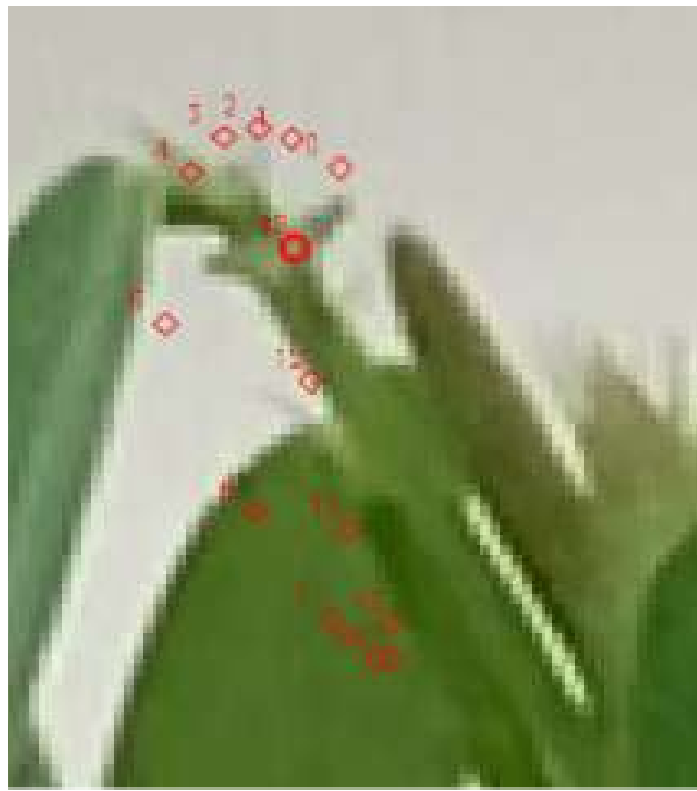


研究結果

實驗一、跳舞草的擺動觀察分析

(一) 小葉擺動的軌跡分析

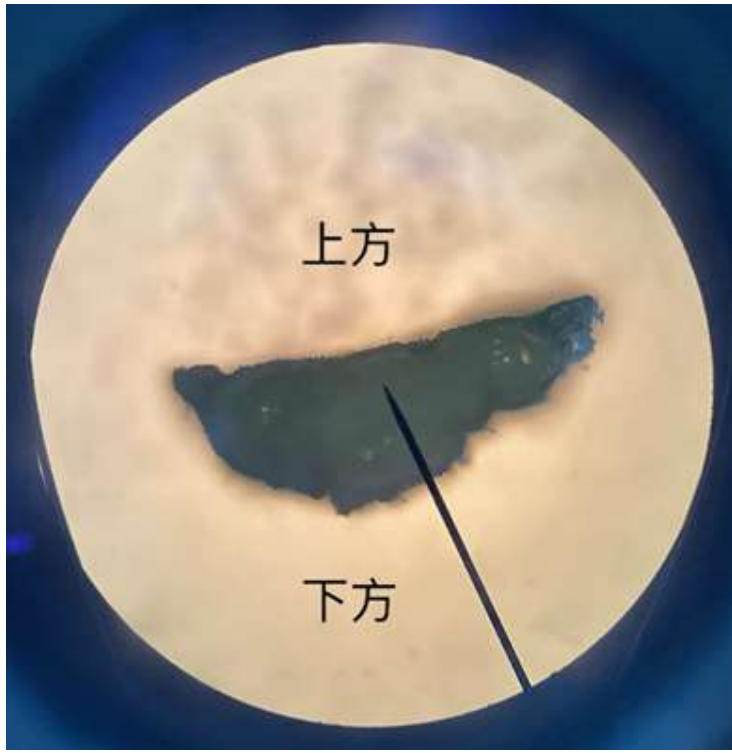
1.小葉正面擺動分析



2.小葉側面擺動分析



葉柄的形狀如半月形

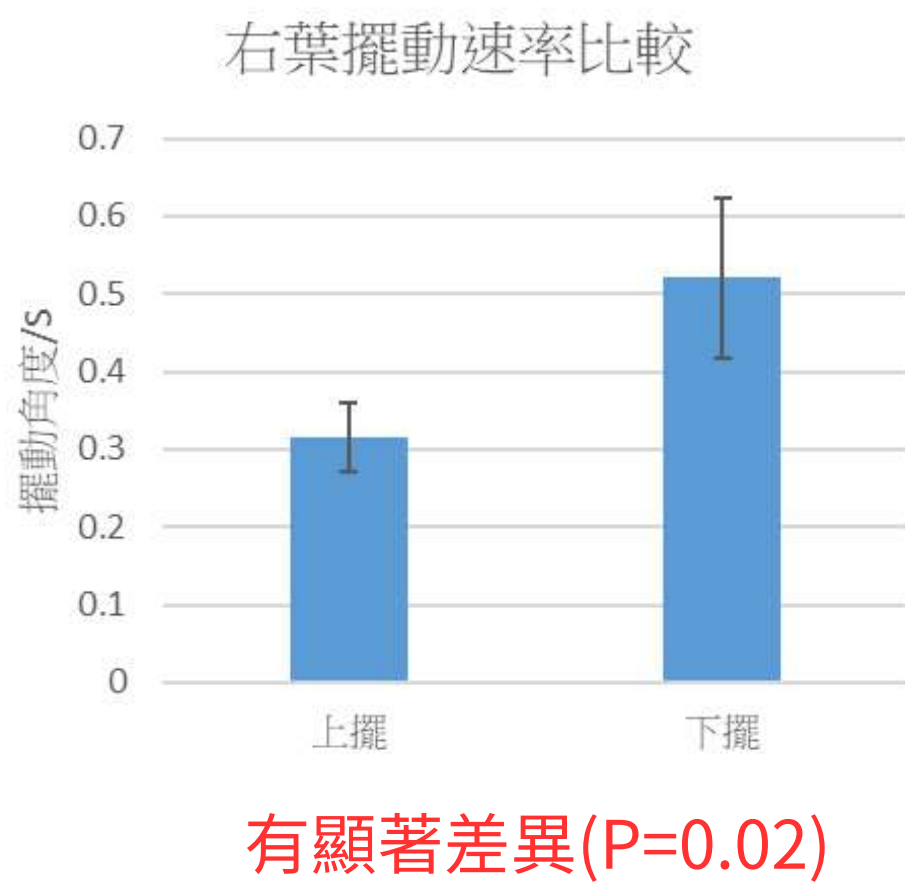
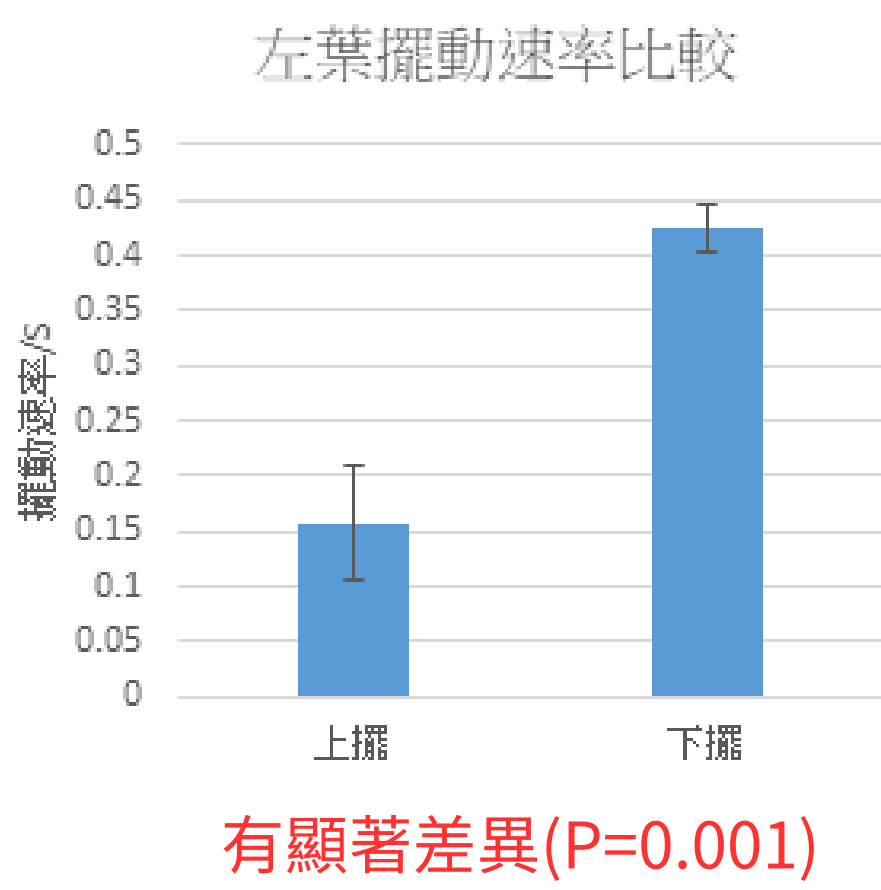


實驗結果：

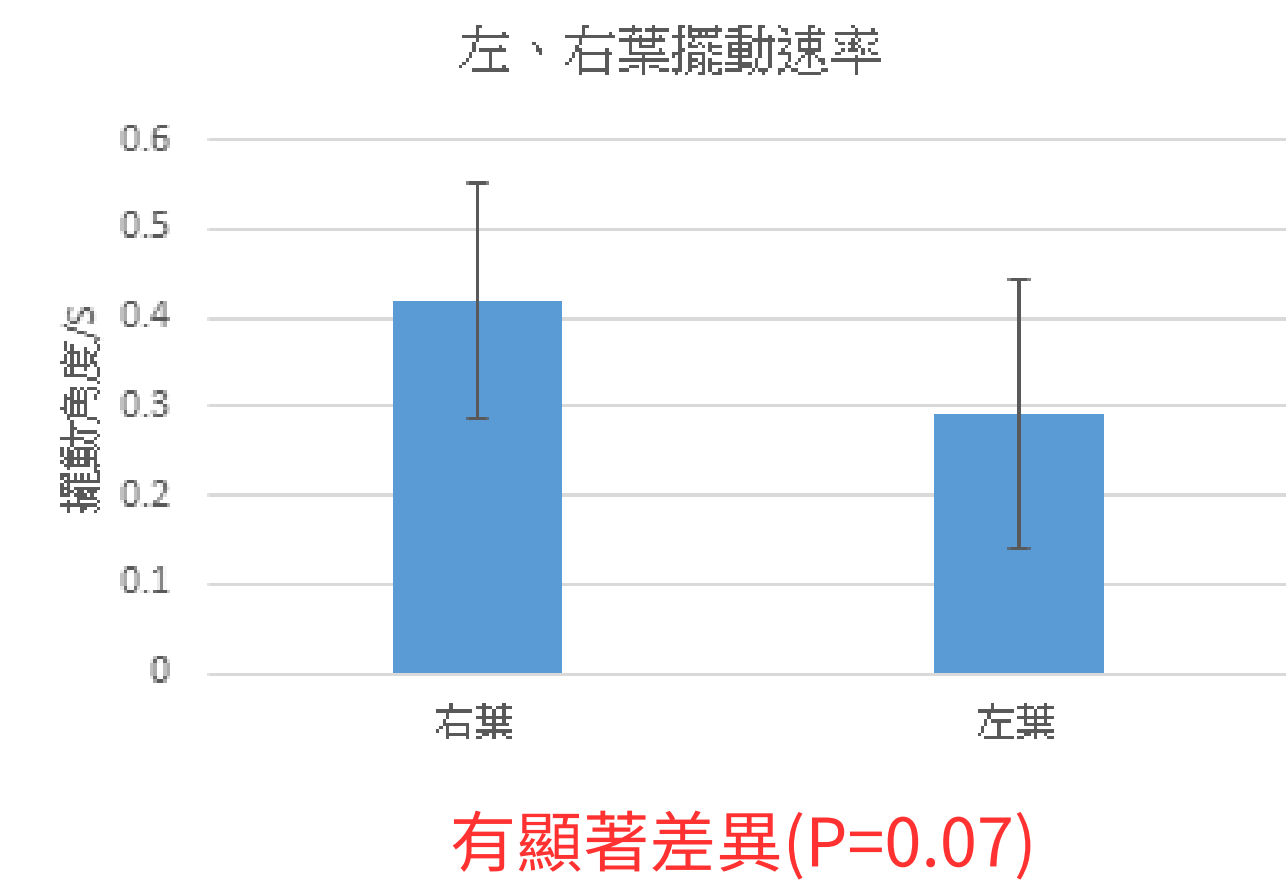
- (1)擺動路徑呈現圓弧形，最高點和最低點停留時間較長。
- (2)上擺速率較下擺慢，和正面擺動分析一致。

(二) 左、右小葉的擺動差異比較

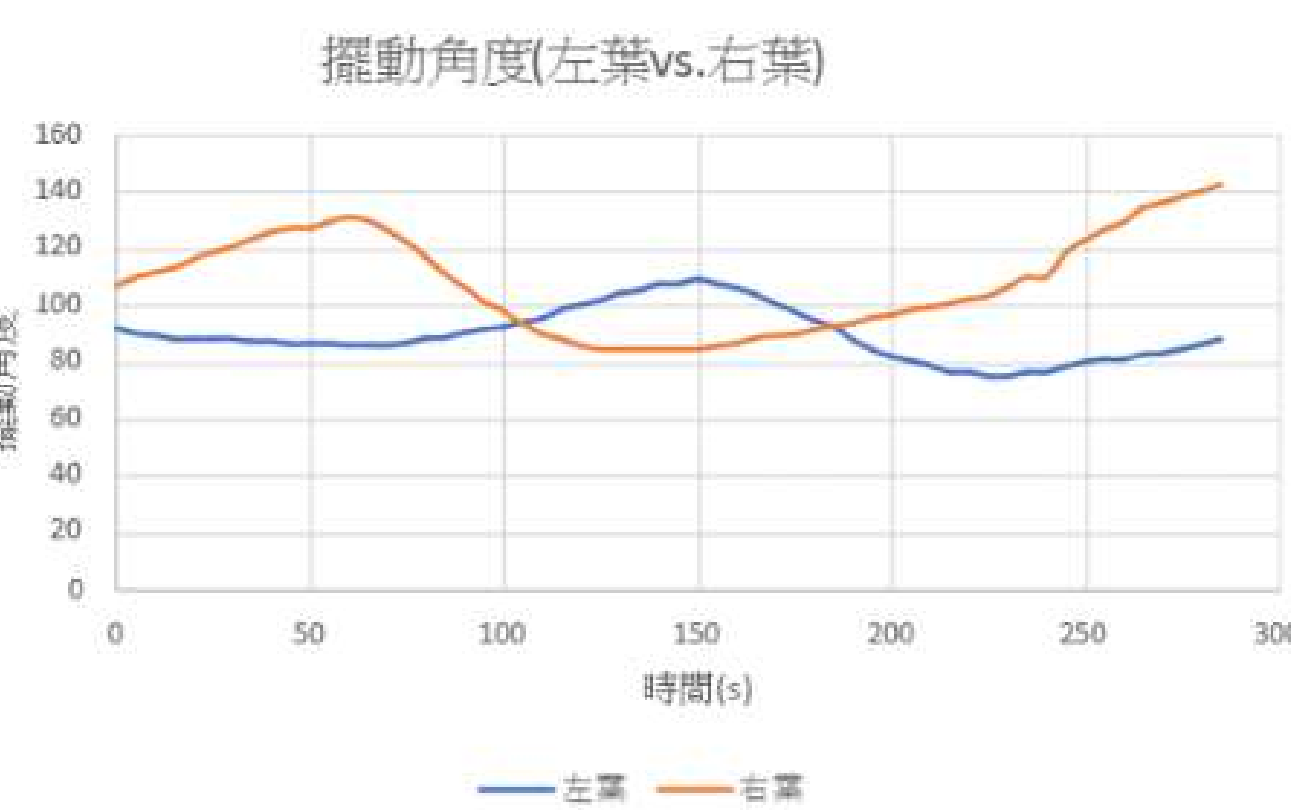
1.向上與向下擺動速率的差異比較



2.左、右葉的擺動速率差異分析



3.左、右葉的擺動速率差異分析



實驗結果：

- (1)往下擺動時的速率快於往上擺動時。
- (2)左、右葉擺動速率不一致，右葉較左葉快。
- (3)左、右葉會交錯擺動，當左葉擺動至最高點時，右葉刚好在最低點，反之亦然。
- (4)小葉擺動到最高或最低點時，會停留一陣子後，再往下轉動，稱之為「滯留點」。

分析：跳舞草小葉的擺動呈倒水滴形軌跡，轉動周期內最高點與最低點為滯留點，向上擺動較慢，兩片葉子擺動方向相反。

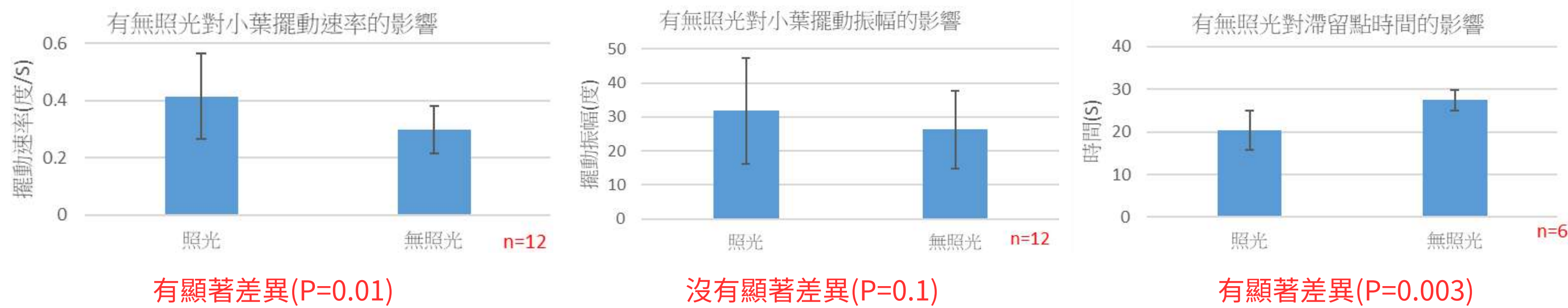
實驗二、動物互動關係對於跳舞草轉動的成因探討

(一)照光對跳舞草小葉擺動的影響

1.有無照光對跳舞草小葉擺動的影響

2.照光方向的不同對小葉擺動軌跡影響

(1)有無照光對小葉擺動速率影響 (2)有無照光對小葉擺動振幅影響 (3)有無照光對小葉滯留點時間影響

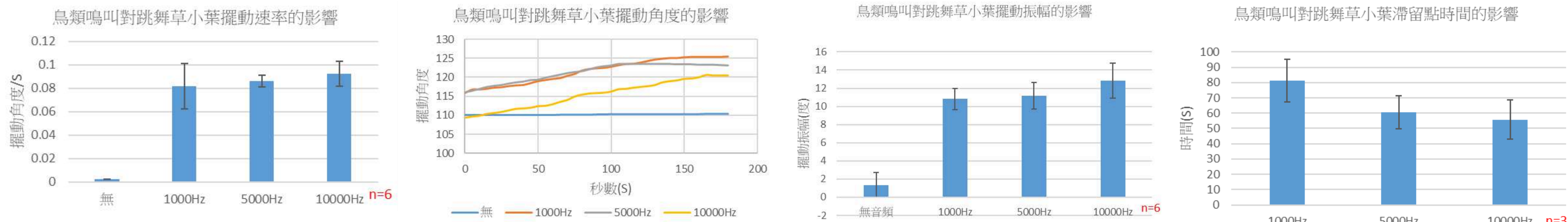


強光可促進跳舞草小葉擺動，使其速度加快、振幅增大、滯留時間縮短。不同照光角度亦會改變擺動軌跡。推測光照有助於跳舞草模擬昆蟲活動，吸引天敵驅趕害蟲，具生態意義。

(二)音頻對跳舞草小葉擺動的影響

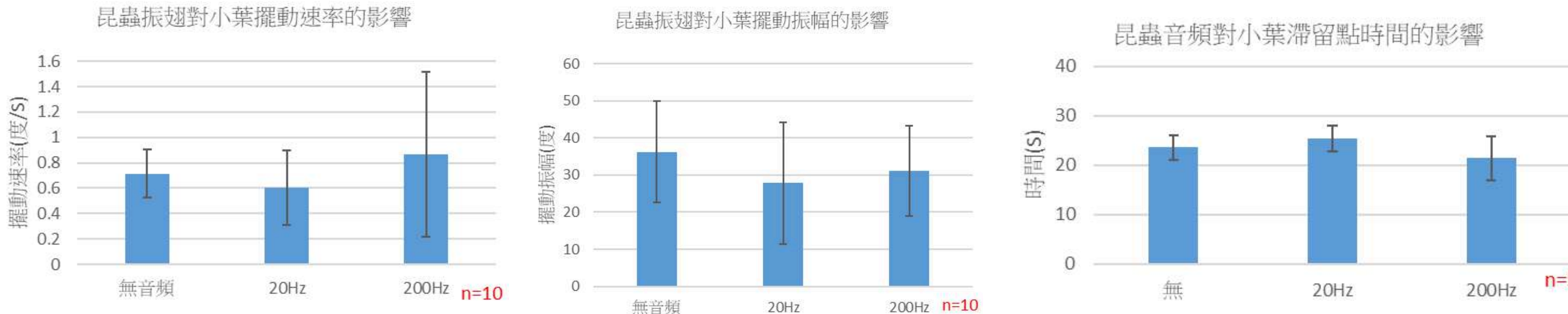
1.鳥類鳴叫對跳舞草小葉擺動的影響

(1)鳥類鳴叫音頻對小葉擺動速率影響 (2)鳥類鳴叫對小葉擺動角度影響 (3)鳥類鳴叫對小葉擺動振幅影響 (4)鳥類鳴叫對小葉滯留點時間影響



2. 昆蟲振音頻翅對跳舞草小葉擺動的影響

(1) 昆蟲振翅對小葉擺動速率的影響 (2) 昆蟲振翅對小葉擺動振幅影響 (3) 昆蟲振翅對小葉滯留點時間影響



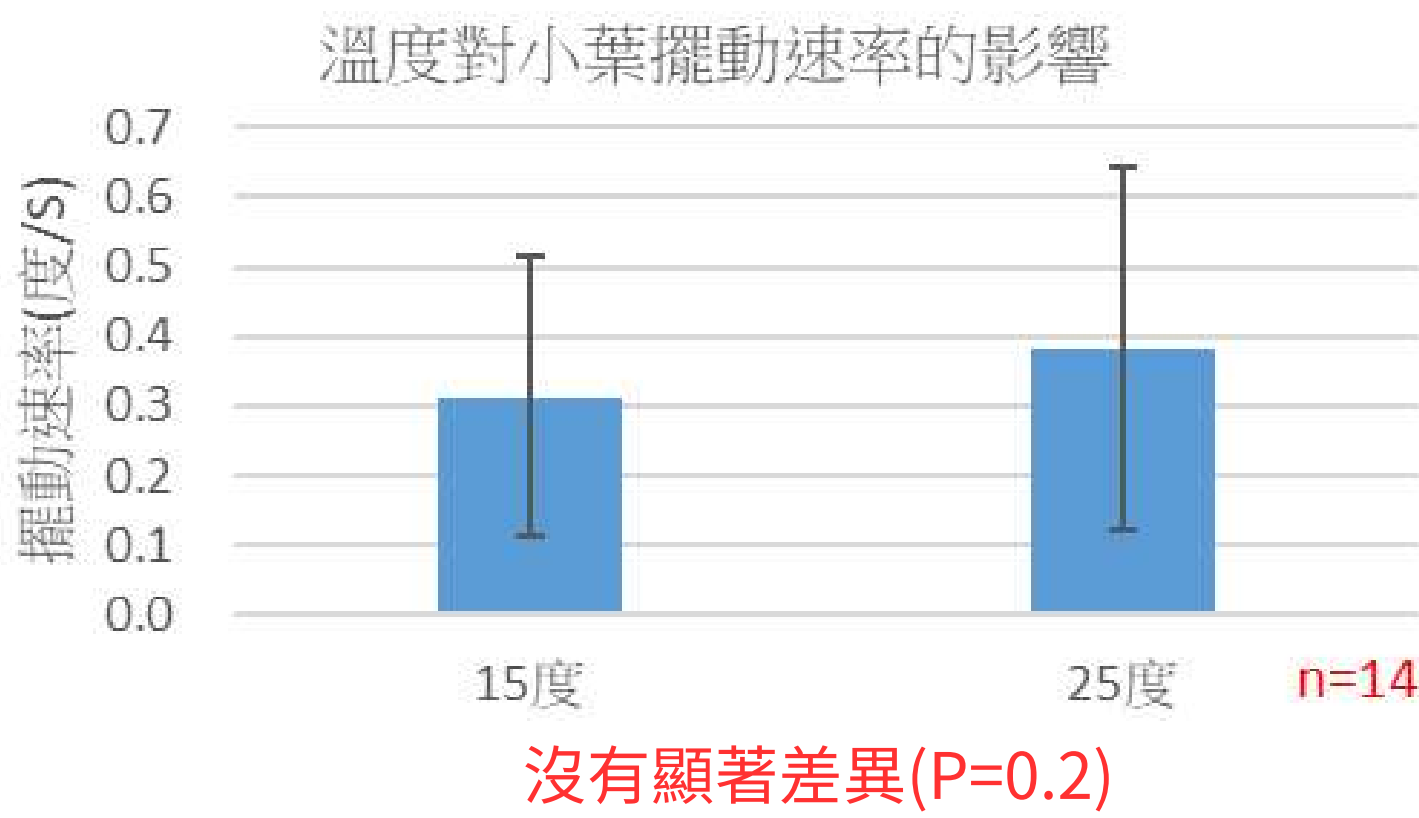
高頻音可加快小葉擺動，縮短滯留時間並增大振幅。不同照光角度與音頻頻率會改變擺動軌跡與反應程度，顯示跳舞草可能受鳥類及蟲類音頻影響加速擺動，藉擬態吸引鳥類等天敵，驅趕害蟲，具演化意義。

實驗結果：

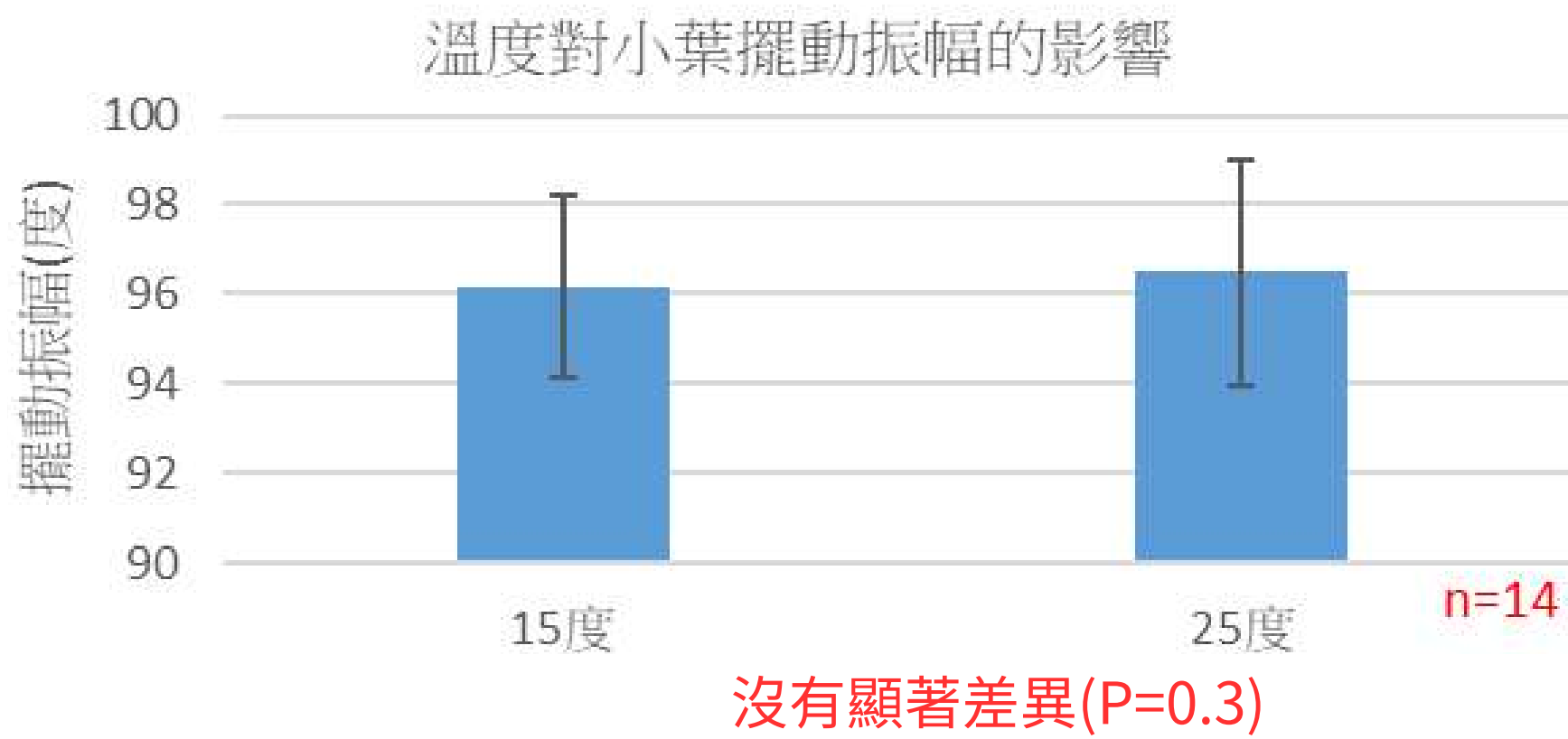
- (1)鳥類鳴叫音頻越高，小葉擺動的速率越快、震幅越大，滯留點時間越短。
- (2)1000~10000Hz的擺動斜率幾乎相同，無音頻則幾乎沒有擺動。
- (3)昆蟲振翅20Hz擺動速率最慢、滯留點時間最久，200Hz的擺動速率最快、滯留點時間最短。
- (4)無音頻的擺動振幅最大，20Hz的擺動振幅最小。

實驗三、環境溫度對跳舞草小葉擺動的影響

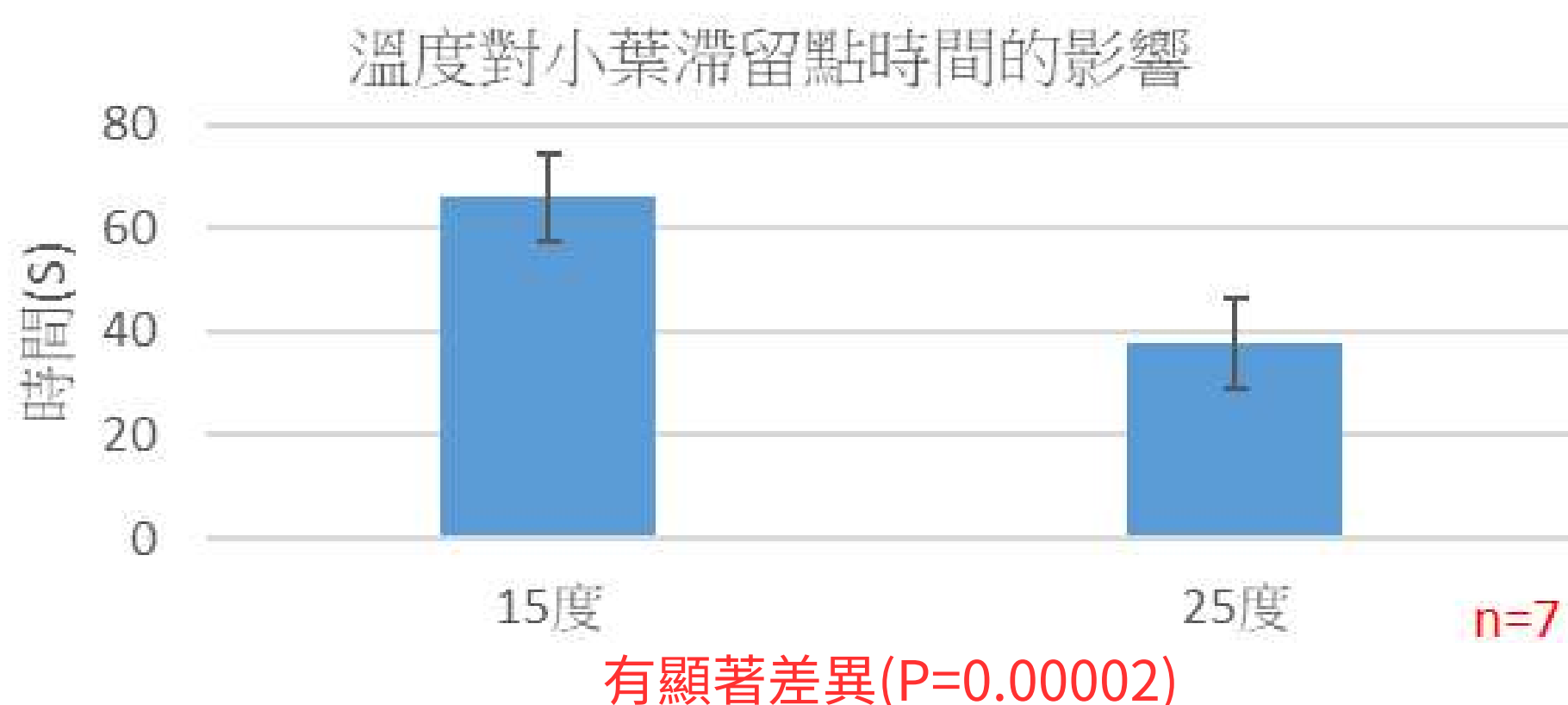
(一) 溫度對小葉擺動速率的影響



(二) 溫度對小葉擺動振幅的影響



(三)溫度對小葉滯留點時間長短的影響



實驗顯示，溫度越高跳舞草小葉擺動越快，振幅增大，滯留點時間縮短。25°C時比15°C更活躍，推測高溫有助於葉枕細胞生理反應，並與昆蟲活躍季節相關，提升跳舞草擬態效果。

實驗四、跳舞草擺動時的電訊號分析

(一)植物電訊號分析

1.前置實驗—背景值測試



實驗結果：

由結果可以得知當自製的植物電壓感測器接在土壤中時，不會有任何電壓變化，因此可以確信此感測器可以正常的接收植物電壓

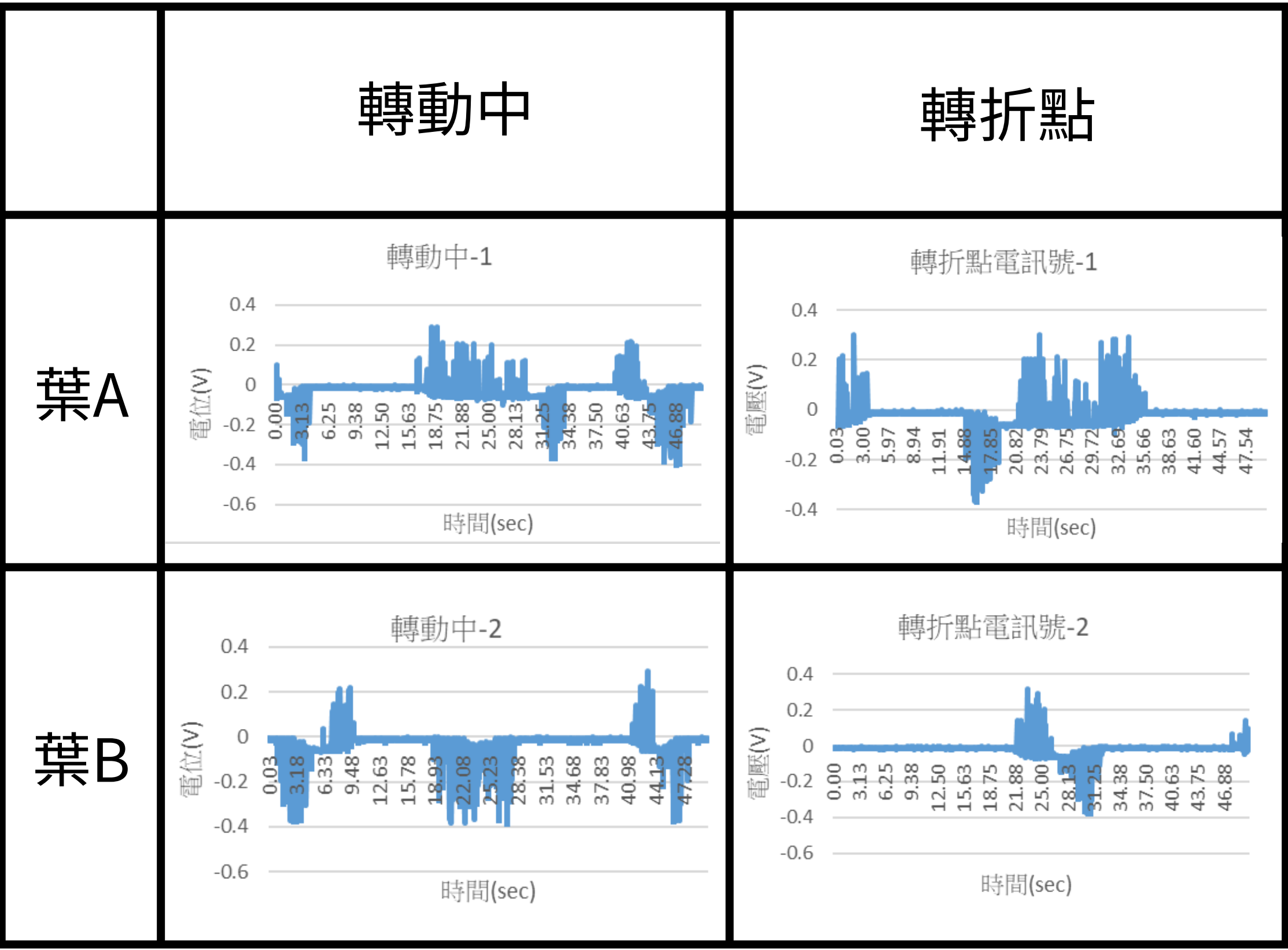
實驗結果：

從以上結果得知，當植物接受到的音頻越高，電位變化越頻繁。而且植物電位皆在20-80mV間震盪，所以表示音頻不會影響到植物細胞的最高電位和最低電位之數值。

分析：自製植物電壓感測器成功測得擺動時細胞的微電壓變化，且當小葉轉動速度越快時，電位變化越頻繁，未來可用於進一步分析跳舞草的電生理機制。

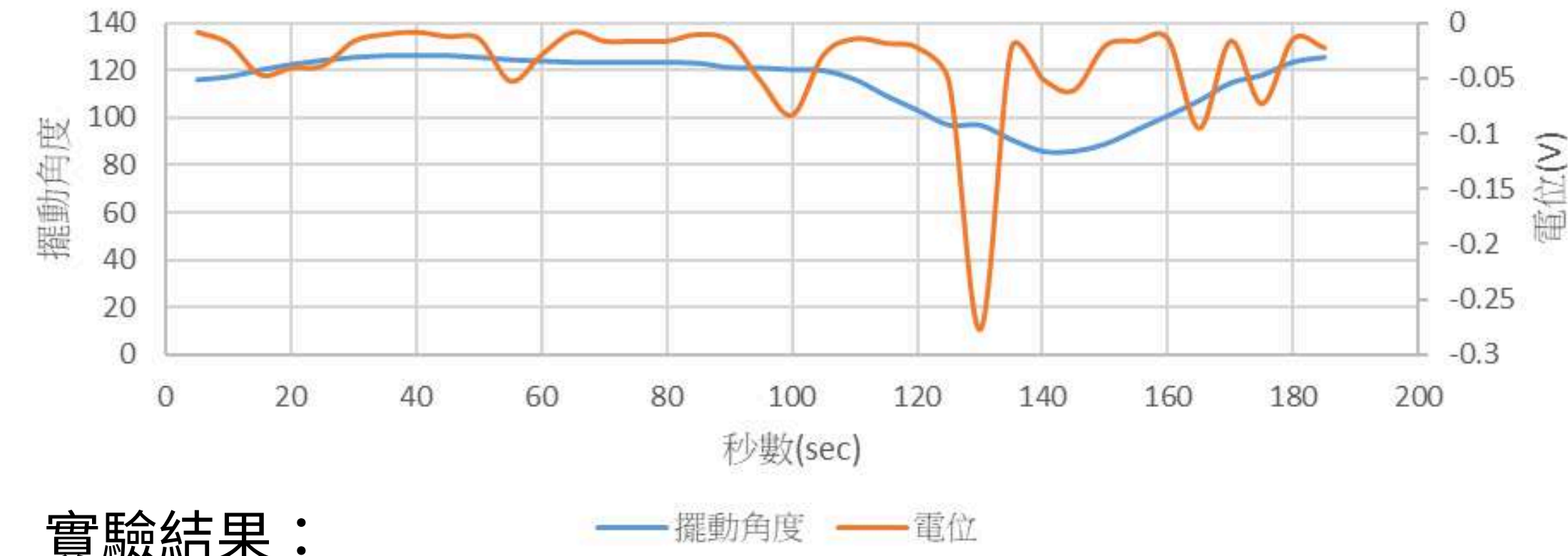
| | | | | | |
|----|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | | | |
| | 背景値 | 100Hz | 1000Hz | 5000Hz | 10000Hz |
| 葉A | <p>背景値 訊號間距大</p> <p>mV</p> <p>データ量</p> | <p>mV</p> <p>データ量</p> | <p>mV</p> <p>データ量</p> | <p>mV</p> <p>データ量</p> | <p>mV</p> <p>データ量</p> |
| 葉B | <p>背景値 訊號間距大</p> <p>mV</p> <p>データ量</p> | <p>mV</p> <p>データ量</p> | <p>mV</p> <p>データ量</p> | <p>mV</p> <p>データ量</p> | <p>mV</p> <p>データ量</p> |

3.轉動期間轉折點之間的差異



4.跳舞草的電位和擺動角度的關係

跳舞草的電位和擺動角度的關係圖



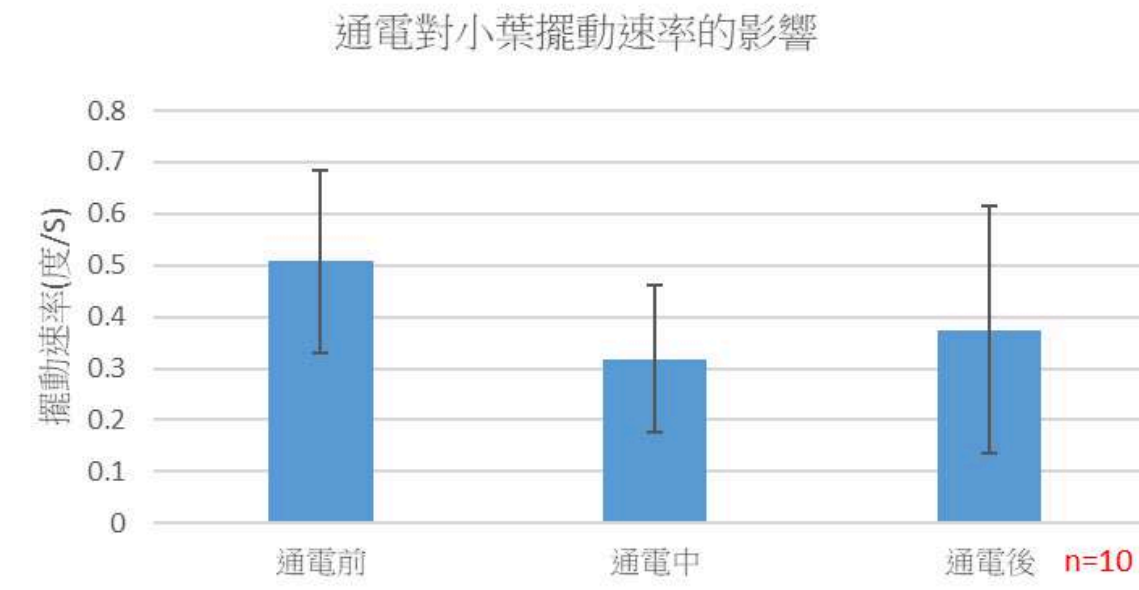
實驗結果：

- (1)轉動期間，小葉的電位變化較規律，轉折點時電位變化較不規律，且有長時間變化的電訊號。
- (2)當跳舞草即將開始擺動時，電位變高。當小葉擺動到最低點時，電位達到最低點，上擺時則上升。

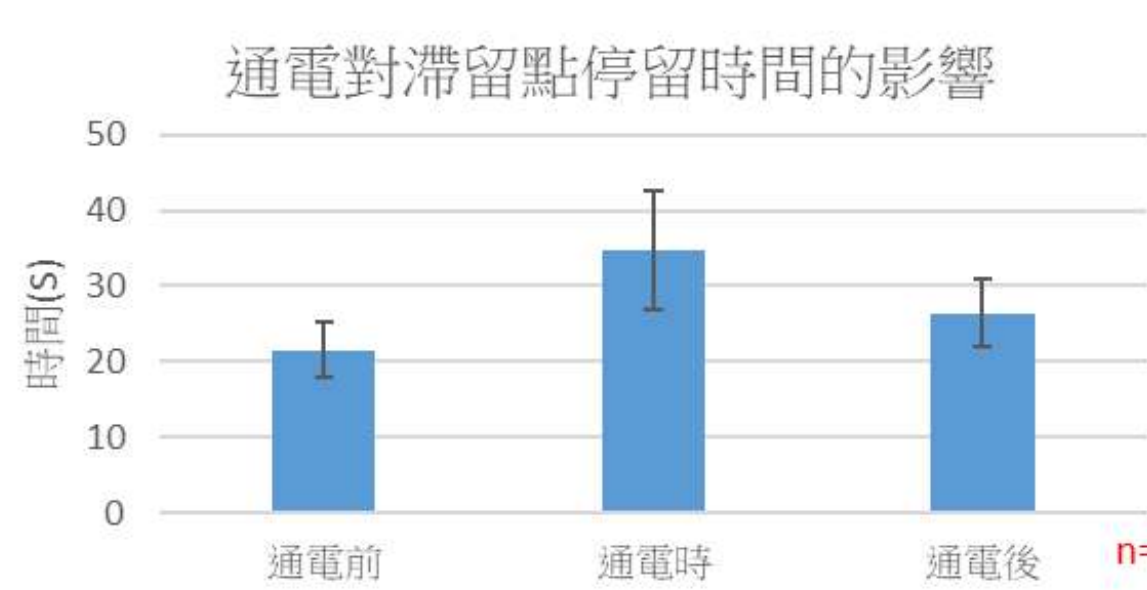
分析：跳舞草在轉折點時，葉枕細胞會膨脹或萎縮，產生明顯電訊號。分析電位與擺動角度的關係發現，小葉進入最低轉折點前，葉枕電位降低並產生過極化，導致細胞膨脹；翻轉結束後，電位逐漸恢復。

實驗五、通電對跳舞草小葉擺動的影響

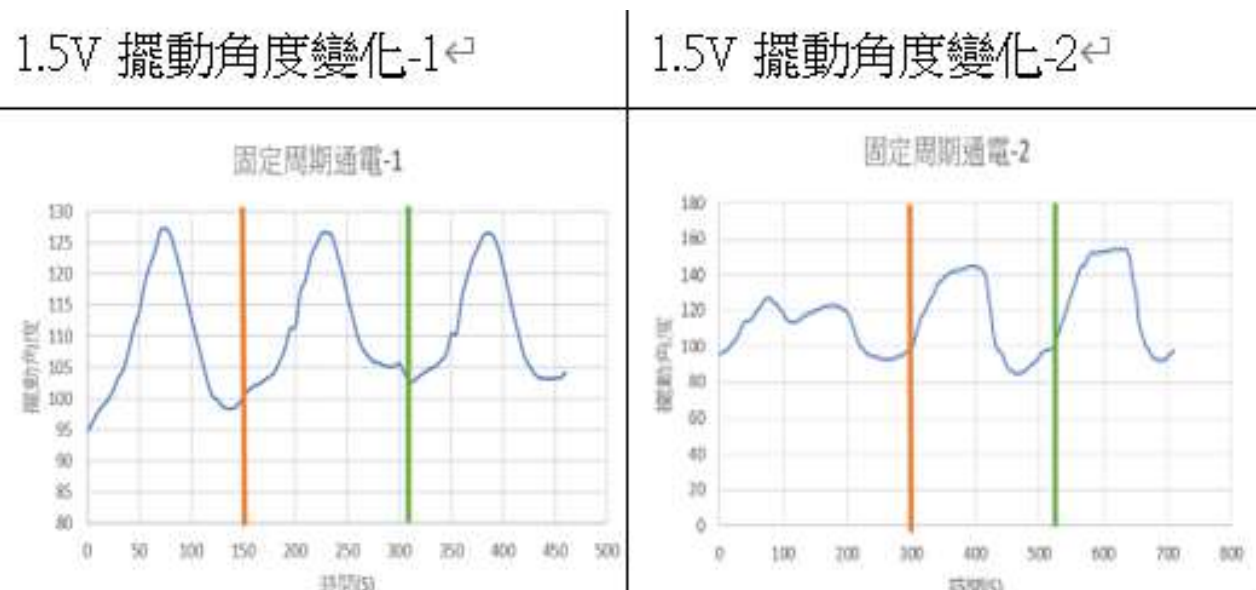
(一) 通電對小葉擺動速率的影響



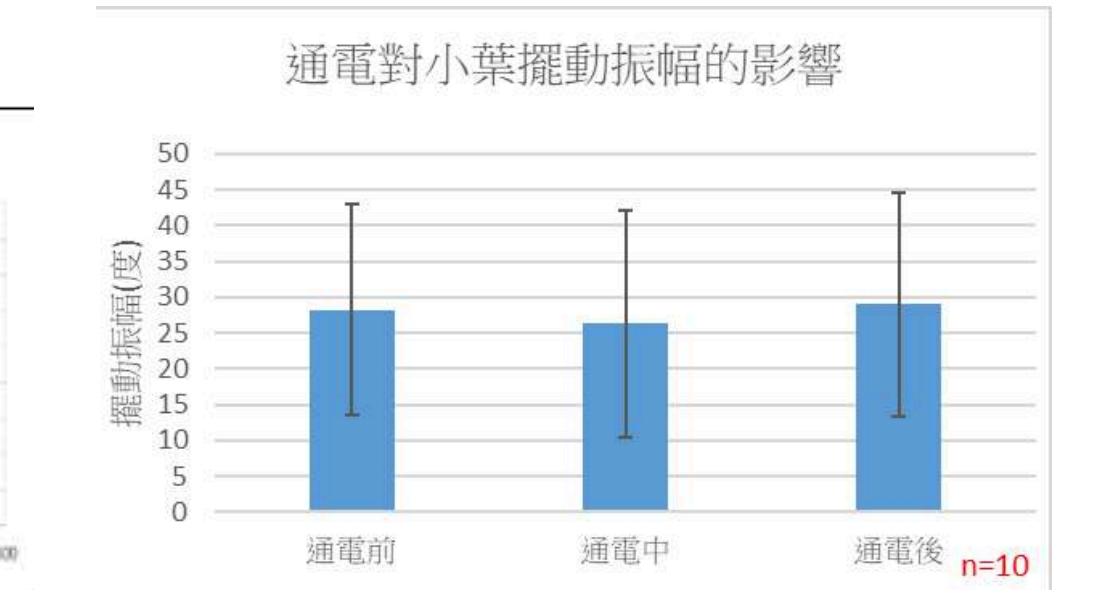
(二) 通電對小葉滯留點時間的影響



(三) 通電對小葉擺動角度的影響



(四) 通電對小葉擺動振幅的影響



實驗結果：

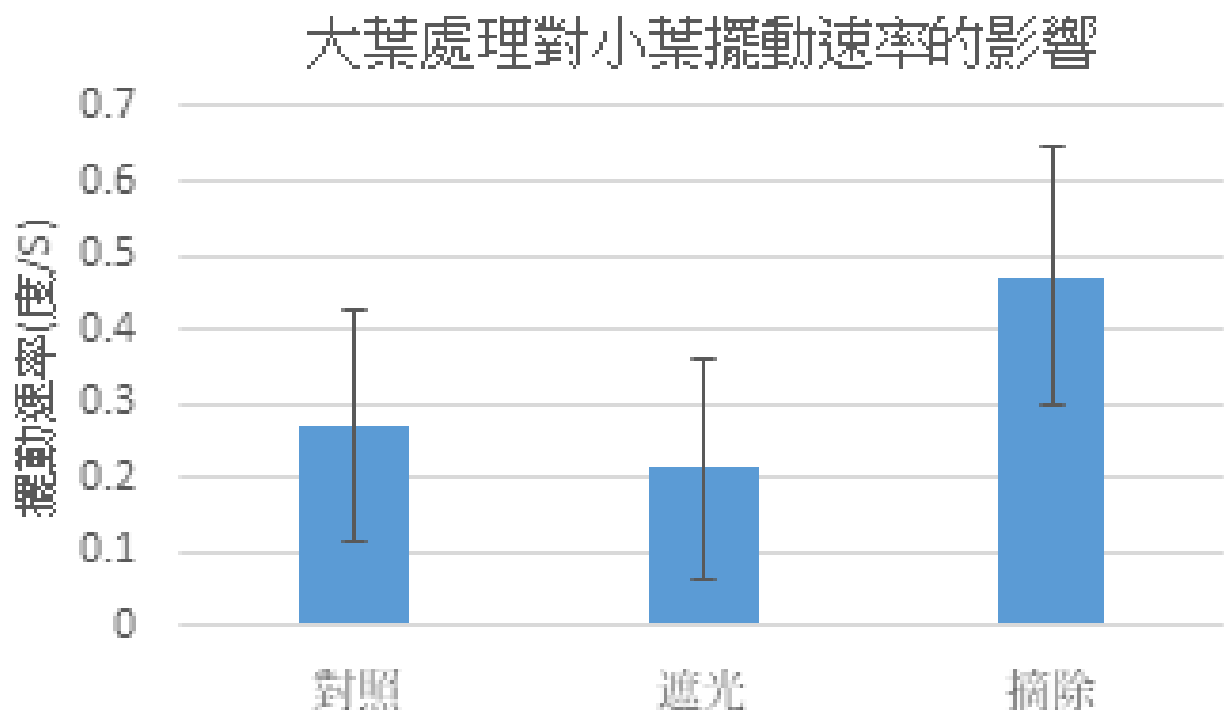
- (1)跳舞草在通電時擺動速率變慢，通電結束後擺動速率較通電時稍快。
- (2)對擺動振幅沒有明顯差異。
- (3)通電中的滯留點時間最久，通電前最短。

分析：外加的電流會影響跳舞草電訊號的傳遞，導致小葉葉柄基部的葉枕細胞無法正常的調節水分變化，擺動速率變慢。

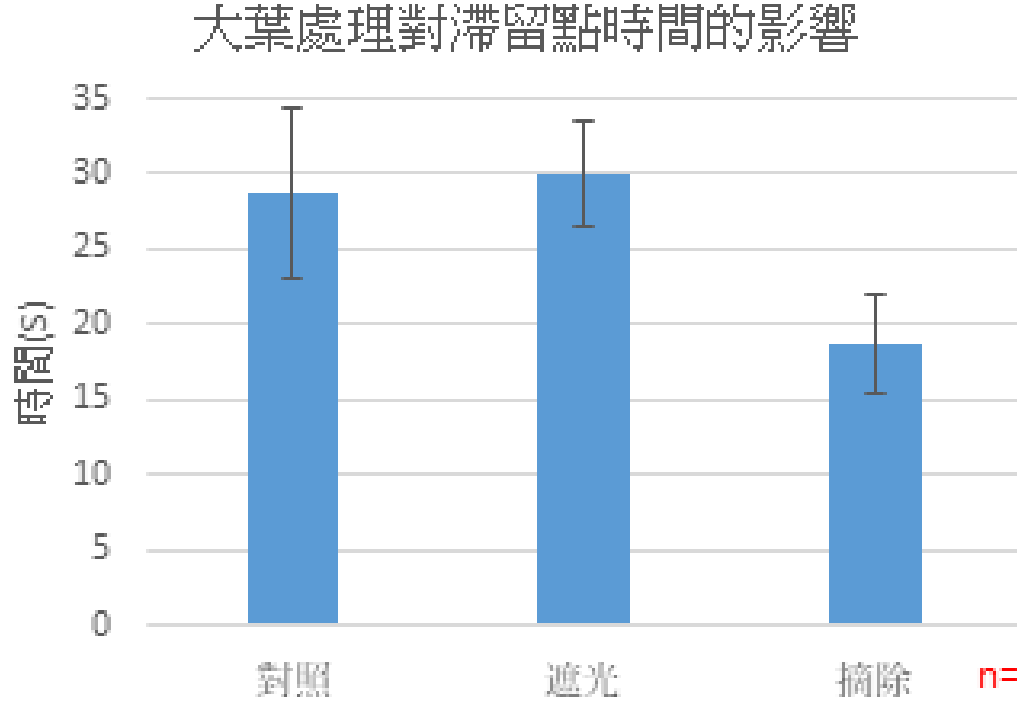
實驗六、大葉對於跳舞草小葉擺動的影響

(一) 大葉處理對於跳舞草小葉擺動速率的影響

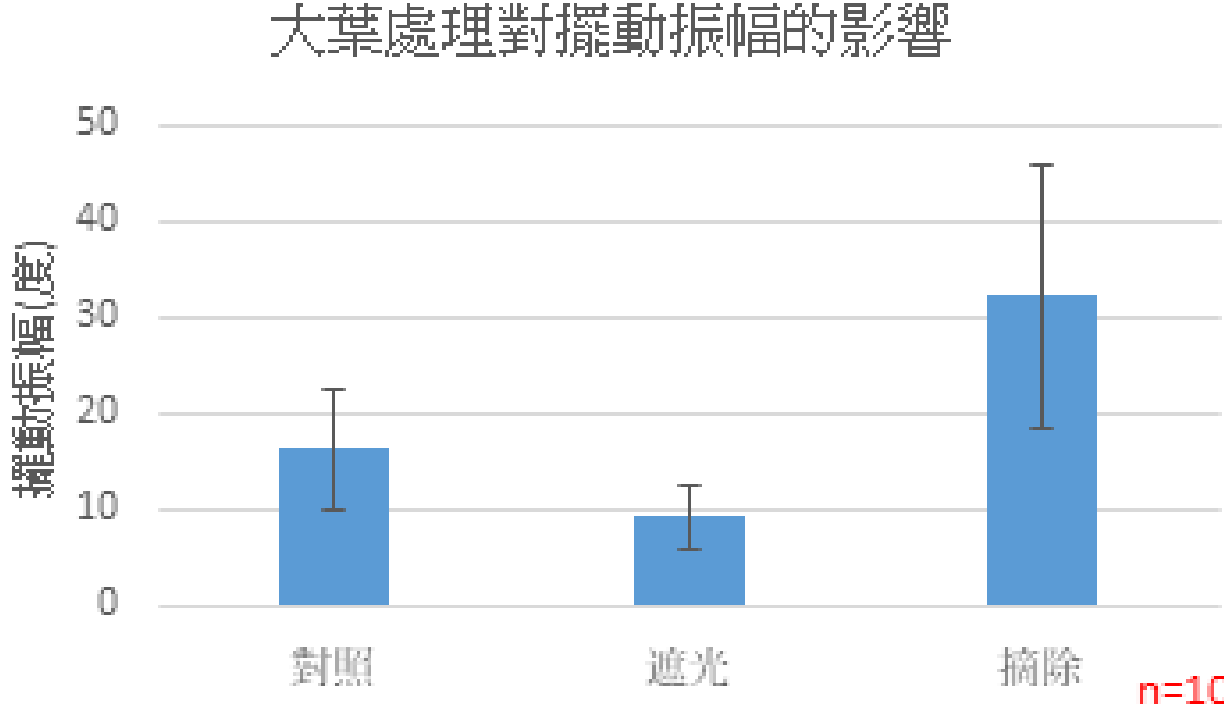
(1)大葉處理對小葉擺動速率影響



(2)大葉處理對小葉滯留點影響



(3)大葉處理對小葉擺動振幅影響



實驗結果：

- (1)大葉遮光時小葉擺動速率變慢，大葉摘除時擺動速率則會變快。
- (2)大葉遮光的時擺動振幅變小，摘除大葉擺動振幅則變大。
- (3)大葉遮光時滯留點時間變長，摘除大葉滯留點時間縮短。

分析：大葉本身面積大，容易遮住小葉阻擋光線，再貼上膠帶後會變得更加不透光，使小葉接受到的光源減少，轉動速率減慢，小葉偵測環境訊號與大葉無關。

綜合討論

(一)小葉擺動的演化因素

光線強、音頻高、溫度高的狀態下，小葉轉動較快速、明顯，透過我們實驗驗證，這些環境條件符合蜂類或鳥類與跳舞草的互動關係，進而吸引這些昆蟲的天敵，來獵食跳舞草上的蟲類，增加跳舞草的存活機率。

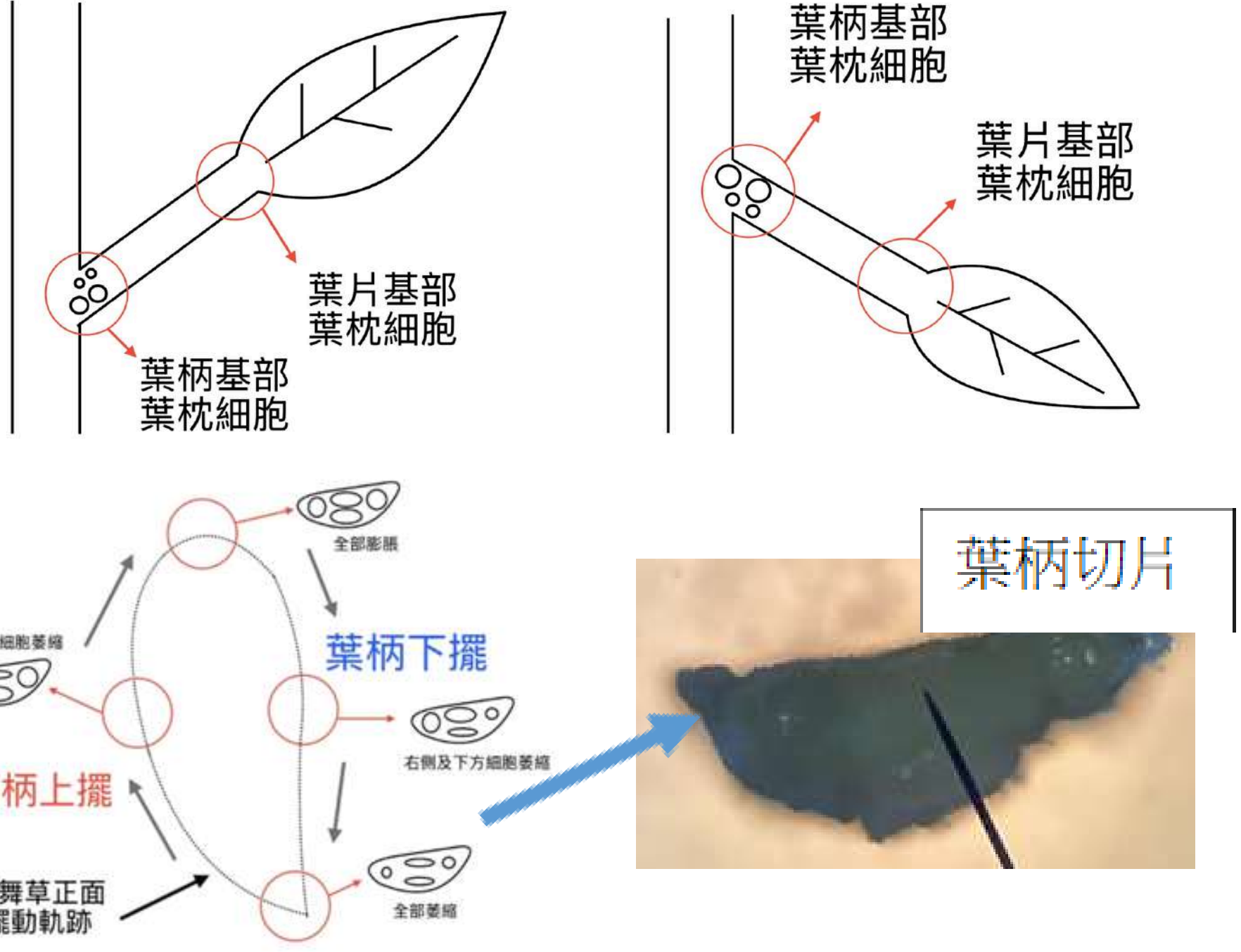
(二)小葉擺動的機制

小葉上下方向擺動的原理
我們透過觀察跳舞草的小葉擺動，發現小葉有兩種擺動方式，分別為上下擺動和旋轉，分別為葉柄與葉片基部的葉枕細胞膨脹和萎縮造成。

小葉旋轉的擺動原理
同時探討在葉柄上下擺動時，葉片基部的葉枕細胞膨脹或萎縮變化的轉動情形如右圖，而小葉葉柄切片呈現半月形，當旋轉的同時，葉柄上下擺動，將旋轉軌跡拉長，從而變成倒水滴形。

(三)外加電訊號對小葉葉枕細胞膜電位變化影響推論

因為實驗中的1.5V的電流，遠大於跳舞草的膜電位差 (約36mV~-136mV)，且透過前面實驗結果，得知通電使小葉擺動變慢。因此推論額外提供的電子流 (通電)，經過葉柄基部的葉枕細胞時，導致鉀離子進出細胞速度變慢，使膨脹或萎縮中的葉枕細胞停頓。



結論

- 一、小葉正面擺動軌跡為倒水滴狀，與葉柄及葉片基部葉枕細胞膨脹萎縮有關，下擺速率較快，左、右葉對環境刺激的感知反應相同。
- 二、自製植物電壓感測器成功測得當小葉擺動即將反轉時，會有較大的電訊號變化，且有越高的音頻植物電訊號越頻繁。
- 三、在通電干擾時其轉動速率變慢，但不影響轉動幅度，表示小葉葉枕細胞對於外加電流會有其適應性。
- 四、摘除大葉，會使小葉照到的光線變多，擺動速率變快，大葉遮光則會使擺動速率變慢。
- 五、在光線充足、溫暖的環境，或接受到高音頻刺激，小葉擺動速率加快，振幅增大，轉動明顯，推論因為在春夏為昆蟲出沒的季節，在植物身上產卵的機率較高，因此跳舞草側葉增加擺動速率，像昆蟲展翅飛舞，吸引蜂類與鳥類等昆蟲天敵幫助去除植物體上的蟲類。