

2024 年【科學探究競賽-這樣教我就懂】

普高組 成果報告表單

題目名稱：橫紋幼蟲會彎腰(保衛細胞纖維環對於氣孔開闔的影響)

一、摘要

植物氣孔的開闔由保衛細胞的變形所控制，保衛細胞的細微結構可影響開闔的方式。其細微結構包含纖維環、端點與細胞壁厚薄。藉由製作模型，可了解其影響方式。其中微纖維環的數量影響張開程度最為明顯。設計等式可模擬與預測纖維環與開闔的關係，也可將此原理導入仿生機具或模組。

二、探究題目與動機

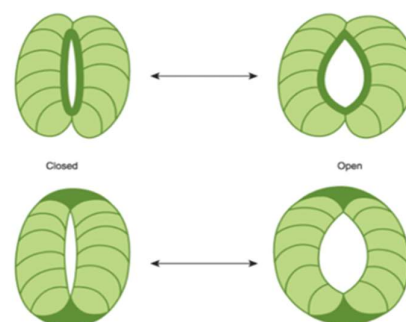
之前實驗課用顯微鏡觀察紫背萬年青下表皮保衛細胞時，覺得保衛細胞中間的氣孔很有趣，於是我便和我的組員開始上網查保衛細胞氣孔的相關資料

在一番研究後，我們發現保衛細胞氣孔運作方式比想像中複雜，便好奇是否可以以模型來模擬氣孔來更清楚的解釋其運作原理，將其重要的細微結構轉化成模型，可以更方便調整變因進而觀察到它們的相互關係。

三、探究目的與假設

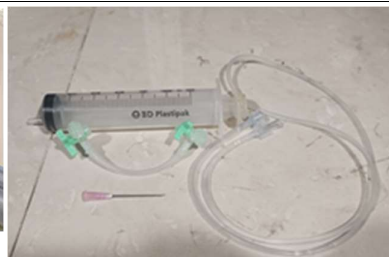
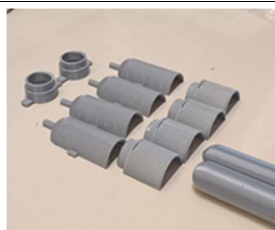
經過模型製作後的實際演練，藉由細微結構包含纖維環、端點與細胞壁厚薄可以讓保衛細胞呈現彎曲現象，造成氣孔的開闔。將其操作變因設定為端點的固定與否，細胞壁的厚薄與否與纖維環的數量，應變變因設定為開闔程度。我們進行以下實驗：

1. 端點固定與否對保衛細胞彎曲程度的影響
2. 纖維環的數量對保衛細胞彎曲程度的影響



四、探究方法與驗證步驟

研究設備與器材



點滴延長線	點滴三通接頭	50ml 針筒	矽膠·硬化劑與脫模劑
3D 灌模模具一組	廚房·浴室專用矽利康	3D 模組骨架*	3D 纖維環模型*
電器絕緣膠帶	橡皮筋·攪拌長匙	18G 針頭·免洗杯	座台蓋子·精密磅秤
Arduino UNO 開發板	雷射測距模組	步進馬達	馬達驅動 LN298n 模組

* 由 SketchUp 建模後，由 3D 列印機印出模型

3D 建模製作模型以矽膠材質定案

1. 以 3D 列印機將各個矽膠灌模組件印出
2. 組裝矽膠灌模加以固定，混和矽膠與硬化劑灌入模具中，震動模具來排除氣泡
3. 上下矽膠脫模後，以浴室用矽利康膠合，再以矽膠加環成形。

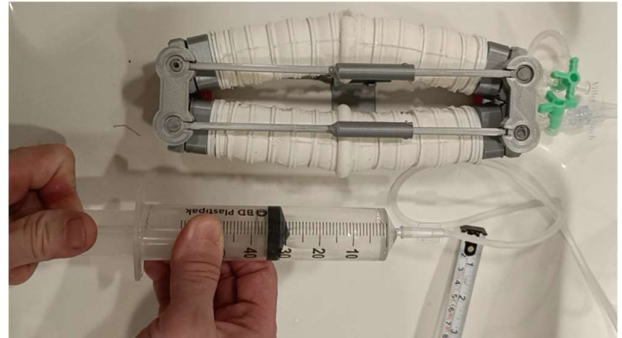


4. 做出整個保衛細胞模型後，在端點插入針頭連結管路。
5. 以 3D 列印機把氣孔外框印出(支架模式)
6. 組合矽膠模型與支架，連結管路至針筒。

研發以矽膠本體材質，依照觀察的外型用 3D 列印製作模具，做出可模擬氣孔保衛細胞的矽膠模型。除了膨壓增加時，開闔的動作與觀察的外型相似，其膨壓的增加與開闔的大小也呈正相關。由於矽膠模型的結構會彈性變化，所以模型變化需要在固定的臺座上比較好觀察。以 3D 建置氣孔模型骨架，上下有旋轉樞紐讓保衛細胞可以自由的變形不受干擾，我們把端點的固定與纖維環的數量當作操作變因來觀察氣孔開闔大小。

手動量測各項變因數值

1. 將 50ml 針筒吸滿自來水
2. 注入水至保衛細胞模型到飽滿與些微膨脹，關閉管路 (填充模型至滿水位)
3. 重新將針筒吸水
4. 注入 40ml 觀察保衛細胞模型變化(測試漏水以矽利康膠封)
5. 恢復保衛細胞模型飽滿狀態
6. 注入 20ml 水並維持壓力
7. 量測保衛細胞模型開口展開寬度
8. 再注入 20ml 至總水量達 40ml 並維持壓力
9. 量測保衛細胞模型開口展開寬度
10. 改變結構變因(固定端點，纖維環數量 6 個，纖維環數量 12 個)再將實驗步驟重複



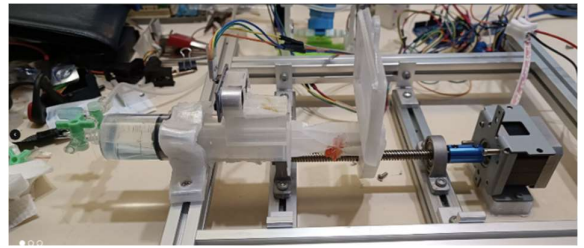
兩個保衛細胞模型置於骨架中，以手動推壓針筒，模擬膨壓增加，量尺測量張開寬度

開始以定容量的水壓作為膨壓增加的量，尺規量測開闔程度為結果，觀察到影響較大的操作變因為纖維環的數量。但由於手動尺規的量測與注入水量由肉眼觀察造成每次的實驗結果有落差且數據間距過大造成劃出的趨勢線不準確，進而發展以儀器量測。

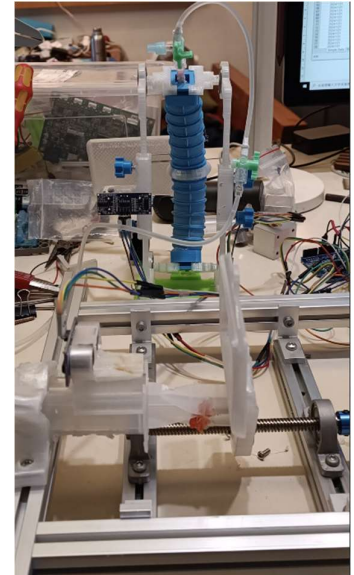
儀器量測數據以電腦程式分析

1. 架設距離感測器在單一保衛細胞模形的中點
2. 架設針筒推進器(裝置於步進馬達模組上)
3. 架設距離感測器於針筒本體與推桿之間
4. 連結針筒與保衛細胞的注水管路
5. 連結距離感測器至 Arduino UNO 開發板
6. 使用 LN298n 馬達驅動板連接 UNO 開發板與外接 12V 電源
7. 撰寫 Arduino 程式語言來驅動步進馬達每轉 18 度後測距一次
8. 測量矽膠模型彎折至中線距離，測量針筒推桿移動距離
9. 將數據傳輸至 EXCEL 表格且同時以圖形呈現

以 Arduino 裝置為量測裝置，Arduino 語言撰寫程式擷取量測結果，將其匯入 EXCEL 分析與製圖。由於 Arduino 超音波量距模組有變異產生，以程式語言撰寫濾波器將離群變異值去除。得到同質性高與反覆實驗一致性佳的實驗數據。後續以步進馬達作為加壓工具，考慮針筒水壓較大，直接驅動推進針筒可能扭距不足會推不動，因而使用廢棄的 3D 列印機的零件與螺桿組合成 Arduino 注射器，可用程式調整轉動量與速度，進而達到固定的加壓容量區間。由於是機器驅動，可以自行調整停頓時超音波量測的次數，可以排除離群值再將數值平均。



以 Arduino 控制步進馬達推壓針筒，模擬膨壓增加。

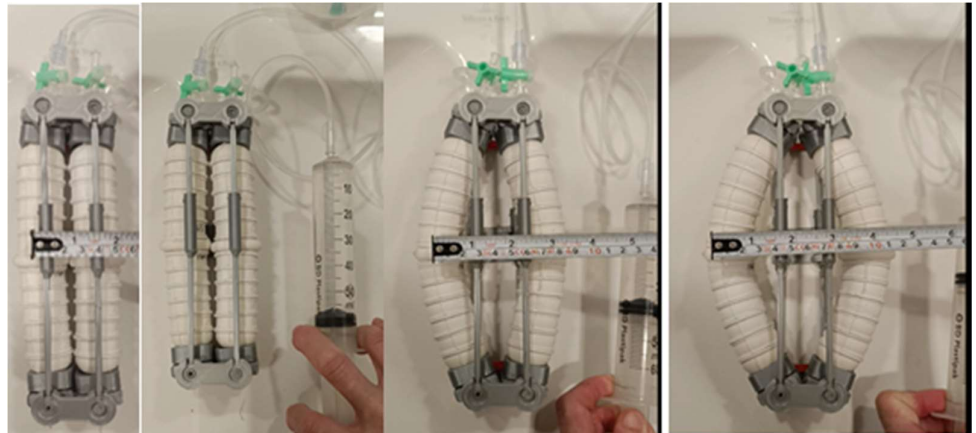


管路連接模型，裝置測距模組，測量單邊模型彎折張開距離與針筒推擠距離

研究結果

手動量測注水結果

矽膠模型的延展性極佳，防水性良好，注水時可以產生像氣孔開闔的外型。隨著水注入越多(膨壓越大)，保衛細胞模型彎曲變形越明顯，外觀即

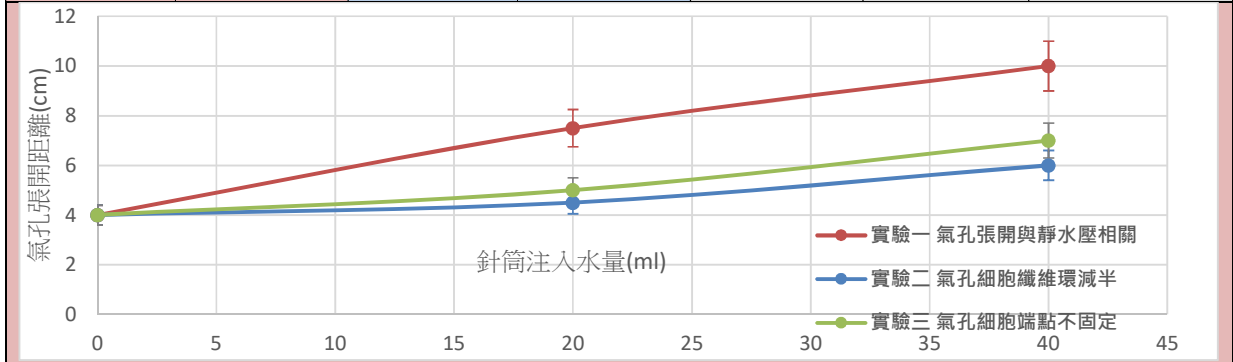


類似氣孔開口變大。以此模型注水操作時，改變其結構變因後，保衛細胞模型變形與注水之間的關係有著不同的差異，用尺規量測

由左到右為 1.未注水量測寬度 2.連接針筒注水測試 3.注入 20ml 後量測寬度 4.注入 40ml 後量測寬度

的應變變因結果，可以用圖表呈現改變結構變因造成注水與張開程度關係的差異。

實驗一 氣孔張開與靜水壓相關		實驗二 氣孔細胞纖維環減半		實驗三 氣孔細胞端點不固定		
針筒注入水量(ml)	氣孔張開距離(cm)	針筒注入水量(ml)	氣孔張開距離(cm)	針筒注入水量(ml)	氣孔張開距離(cm)	氣孔細胞長度(cm)
0	4	0	4	0	4	15
20	7.5	20	4.5	20	5	15.5
40	10	40	6	40	7	16



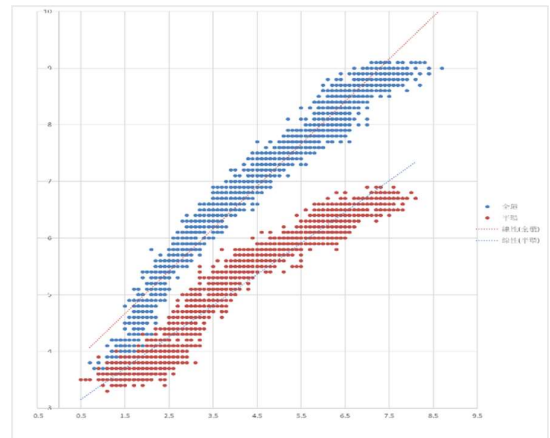
Arduino 連續性量測結果

雖然使用步進馬達可以得到較集中的測量值(在圖形中)，但仍然有相當大的變化，尤其要篩除很多的離群值也會消耗到整個測量過程的時間，我們開始檢討超音波測距模組的準確性。一開始選用超音波測距是參考網路上的測試結果 4 而決定。但是一再受到量測值變化不准的困擾，使我們想轉換雷射測距看看。我們選定範圍較小(20mm-100mm)的雷射測距模組(VL6180x)，經過一連串的試誤校正，終於得到了不用移除變異值也可以有集中的量測值的曲線。

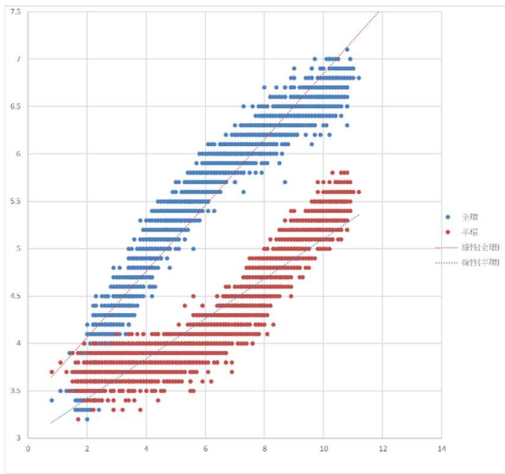
由圖形的變化可得知，不管是以時間作為橫軸或是以注入水量作為橫軸，全環的張開比半環的張開還要大，而且水量注入越多時，差異越大。由時間軸也可得知，注水到達終末端時半環的張開效率變差。

連通管同時測試結果

雖然個別測試可以得出明顯的曲線趨勢差異，但是在於測試的基準點並沒有很精準的零點，也就是起始的條件不同（壓力與內含水量）。在手動注水實驗時可以做到連通管相接，使兩組裝置的壓力相同，當以步進馬達注水，水壓過大時會導致馬達扭力不足無法推進。且改用



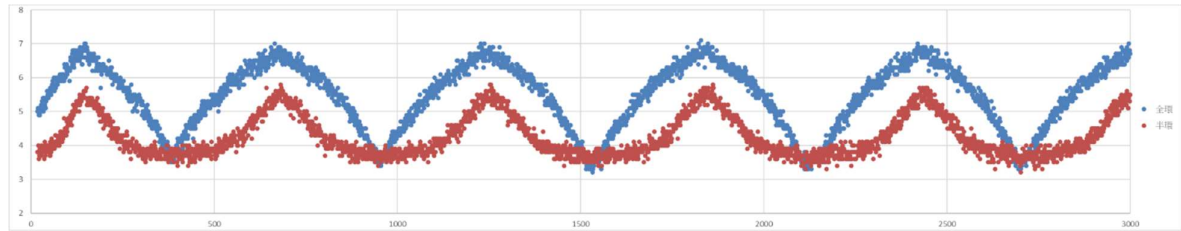
以雷射測距模組量測，不需移除變異值即可得到非常集中的測量點，也可容易看出兩者的趨勢性



以連通管同時量測作圖，可見起始點一致，彼此在同一個 X 軸值的比值會較精準

(之前的量測圖形為分開量測後，再重疊比較，而連通管的注入水量在兩個模型中，為個別注水量的一半，所以圖形也呈現一半)

以連通管同時量測作圖，X 軸為時間單位(以步進馬達的推進單位計算)，收集 3000 量測點(步進馬達推進一次，量測一次)，可見圖形約有五個週期。



雷射測距後，同時使用多組感應器的 Arduino 程式較為複雜，經過推進模組加上光軸減震引導可以增加馬達的推進力，同時使用三組雷射測距模組（經過反覆測試修改 Arduino 程式）兩組量測半環與全環模型的張開距離，一組量測針筒推進距離，換算成注水體積。可以得到兩種曲線，一種是以注水量作為 X 軸，打開的距離作為 Y 軸。另一種曲線是以時間為 X 軸，打開距離為 Y 軸做出連續性曲線圖。



連通管連接頂部端點，不會干擾模型彎折運動，也能確保兩個模型內注水壓力



半環模型與全環模型並排比較，

左圖為注水初期兩個模型皆彎折較少

右圖為注水末期兩個模型彎折明顯，且全環模型比半環模型彎折較大(雷射測距也量測到較大距離)

五、結論與生活應用

顯微鏡下的氣孔看起來，開闔的形態各不相同。雖然教科書上強調它的可活動性！如果以觀察的方法，應該是不可能看到連續性的變化。一個穩定模型需要採用矽膠作為主結構，文獻所提到的細微結構皆有重要的功能與角色，特別是纖維環，更是舉足輕重且影響鉅大。在顯微鏡外重現氣孔的開闔，是一件令人興奮的事，但是以科學方法紀錄則是一個相當漫長的過程，由於沒有相關的資料可供參考，實驗中走了很多彎折的遠路，最終理想的科學紀錄法為 Arduino 下用雷射測距與步進馬達注水加壓。科學量測的結果如果能以數學方式驗證，代表著操縱變因與應變變因關係為定律(纖維環的密度可以增加彎曲變化的效率與程度)，甚而可將應用於生活當中，像是放在水缸中的閥門，不需要電線與防水，只要水管注水便可以控制開闔，來達成"仿生"的運用面，也可以做個條紋毛毛蟲玩具，用一條幫浦水管，就可以讓毛毛蟲爬來爬去了。由此實驗我們可探知植物細胞的動力學(氣孔動力學 stomatal biomechanics)，決定性參數包含端點固定與纖維環數量，特別是纖維環數量不曾在我們有搜尋的文獻出現過，也沒有學者探討過纖維環數量與動力學的影響(只有在電子顯微鏡下描繪纖維環的外觀與走向)，發現纖維環與保衛細胞的動力關係，除了在物理的仿生可以作為演示(不需要關節，水壓可以轉換為有向量的活動)，甚至之後可以探討各種植物纖維環的差異，與它在演化上可能的角色。

參考資料

1. Woolfenden, H. C., & Baillie, A. L., & Gray, J. E., & Hobbs, J. K., & Morris, R. J., & Fleming, A. J. (Eds.). (2018). *Models and Mechanisms of Stomatal Mechanics*. Cambridge, MA: Cell Press.
2. 會鞠躬的毛毛蟲(氣孔開闔實驗), 2023 第六屆全國科學教具創意設計競賽高中大專組第三名
3. Reddy, J. N., *An Introduction to the Finite Element Method (Third ed.)*. An Introduction to the Finite Element Method (Third ed.). McGraw-Hill. 2006.
4. Arduino 筆記 (96) : HC-SR04 與 VL53L0X(GY-530) 的測距比較 , <https://atceiling.blogspot.com/2020/11/Arduino96hc-sr04vl53l0xgy-530.html>
5. Hojae Yi, Charles T Anderson, Bottom-up multiscale modelling of guard cell walls reveals molecular mechanisms of stomatal biomechanics, in *silico Plants*, Volume 5, Issue 2, 2023, diad017,