

2017 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 060011
參展科別 植物學
作品名稱 利用混沌系統偵測植物覺知人體之反應
得獎獎項 大會獎：四等獎

就讀學校 國立臺南第一高級中學

國立臺南女子高級中學

指導教師 郭人仲、楊志鴻

作者姓名 楊承遠、林又暄

關鍵字 植物電容、混沌系統、蔡氏電路

作者簡介



楊承遠

排行老二，沒有弟弟妹妹的我，成了家中最受疼愛與關懷的初生之犢，敢衝敢撞。在國中階段，關於自我的時間管理不好，常常需依賴家長與師長的安排。在他們的指導之下，國一時期的科展利用了好神拖研究人力發電，國二之後則進一步研究如何榨乾廢電池並幸運地進入全國科展競賽的舞台，這個過程啟蒙了我對科學研究的興趣。同時參加日本世界童軍大露營的經驗，讓我開始有了參與國際活動的視野。

進了高中之後，因為自由的校風，讓參加熱舞社的我享受盡熱血的高中生活，無拘束盡情舞動我的身軀，同時間，和國中的科展研究夥伴繼續進行這個因為參加混沌科學營時突發奇想的題目，讓從小看了怪醫黑傑克後對生物及人體醫學工程的研究有所憧憬的我，享受了探究人體與植物間互動機制的樂趣。

這個研究的成果非常有趣，希望未來不管對於植物傳遞訊息與人體腦波或是經絡訊息等議題，提供一個創新可行的研究方向。



林又暄

我出生於一個溫暖的家庭，從小就很喜歡玩立體拼圖，組裝樂高玩具，小學時我發現自己對數理、空間、向量很有興趣，進國中時，我嘗試過參加數理資優班的考試，雖然沒能如願考上，但在三年的國中生活裡，多元的學習：體育、音樂、童軍、社團、科展、發明展、獨立研究……我過得很充實也很快樂。

國中的學科，我最喜歡的科目是數學，尤其是幾何的部分，好像對那些圖形特別有感覺，國二時，發現理化也很有趣，我喜歡去探究生活中大大小小事情的原因，例如說冰塊融在水裡，為甚麼水位不會變化？為甚麼天氣乾燥時容易靜電？我常常用一大堆問題考倒自己，再去翻書找答案，或許別人會覺得這樣很煩、很無聊，但我覺得這樣不僅有自己找到答案的成就感，也有學習新知識的樂趣。上了高中後，生活總是避免不了讀書、考試、挫折、壓力，有時候會覺得自己很累，我就會看課外讀物，更喜歡彈彈鋼琴、聽聽音樂，任由自己徜徉在音樂的世界裡，再重新找回自己的節奏，也有新的動力再繼續前進。除了學科之外，藝術創作也是我的興趣和專長，我喜歡畫圖、剪剪貼貼、隨意創作，有一次畫作比賽竟得到了第三名，對我來說也是非常開心的事！

歷經多次的科展和發明展競賽，當中遇到許多困難，有時候幾乎想放棄，但我學到了很多，不只是研究的精神和方法，更學到了與夥伴合作的重要，尤其是如何分工、溝通與討論、相互間的默契……過程和結果都讓我收穫滿滿。未來，我希望可以學習更多科學新知，也希望以後的日子能過得快樂充實。

摘要

本研究證明用手觸摸植物或土壤時，會造成處於混沌狀態的蔡氏電路發生電位相圖的改變，經由微調並聯在模擬線路電源端的可變電容來比對相變過程，可以測量到非常微小的等效電容變化量。不同於傳統透過改變電阻來實現混沌行為的方法，證實本研究假設確實存在且具應用價值。

我們透過改變電極接點、電路初始狀態、人體靠近或觸摸不同部位等方式，探討兩种植物因微擾所產生的相變。結果發現微擾植物與其棲地時會產生「混沌制抑」的現象，整體系統的電容變動範圍界於 0 到 100pF 之間。更重要的是，本方法還可以偵測到微擾遠端植物時經根系及土壤同步產生的電容變化訊號，這是一般電容計所感測不到的。

利用混沌行為的特性，可以應用於偵測與分析生物體或宇宙間微弱且複雜的訊號，不需經由訊號轉換或放大等的處理程序，是本研究的重大發現，未來極具發展潛力。

Abstract

Different from the previous studies, instead of observing the various chaotic behaviors via modifying the resistance in Chua's Circuit, we perturb the plant capacitance which is imposed on Chua's Circuit and analyze the phenomenon. In this work, We used plants to experienced outside stimulation, the phenomenon of chaotic suppression is found as a result when plants are slightly perturbed, namely, the capacitance of the plants would vary due to the effect of capacitive coupling, ranging from 0pF~100pF. Additionally, the results would potentially lead to further developments of measuring technology of micro-signals.

壹、前言

一、研究動機

電影阿凡達中納美人用手觸摸「母親之樹」便可以和植物們溝通交流。BBC 中文網也曾探討過「樹與樹之間也會交流對話嗎？」這個有趣的議題，報導中提到專家對於這種猜測的解釋觀點是「樹與樹之間乃是通過樹根和真菌網路之間進行交流的」。但是，我們認為這樣的解釋仍不夠具體詳細，所謂的「交流」是如何進行的？是傳遞化學物質(如費洛蒙或氣味分子)？抑或是存在一種物理訊號的傳遞？從最近台灣醫學學者提出「白老鼠覺知環境冷熱的能力乃是與腦內某些離子的通道有關係」等發現，啟發了我們試圖從「改變生物電位所產生的體內離子重新分布之電容微擾量」來探討「植物是否能覺知人體觸摸」這個議題。

二、研究目的

人體碰觸植物時，植物會有反應嗎？如果有，又是什麼反應呢？如果把植物當成是一個可變電容，同時利用混沌系統的特性讓植物也成為實現混沌行為之電路系統的一份子，假設人體觸摸植物時的反應是電容發生變化，那麼這種微小的擾動會讓電路的狀態產生明顯的改變嗎？而這種改變是可以測量得到的嗎？變動範圍的尺度又是多大呢？

因為參加過有關「混沌」概念的科學營隊課程，學習過「混沌系統具有對初始條件敏感」這樣的物理新觀念和特性。因此，我們將植物並聯到「蔡氏電路」的電路之中，透過示波器的紀錄及模擬程式的比對，觀察植物對於外界刺激的物理反應，進行擾動期間物理變化量的測量，並與一般常用的電子儀器做比較，看不同的測量原理會不會有不同的測量結果。

我們以人體與黃金葛等觀賞植物為研究對象，進行下面幾個方向的探究：

- 一、實作與模擬「蔡氏電路」並探討產生混沌行為的過程與條件。
- 二、探討人體靠近不同種類的植物時對「蔡氏電路」電位相圖之影響。
- 三、探討人體觸摸不同種類的植物時對「蔡氏電路」電位相圖之影響。
- 四、和一般電容計比較測量水耕與土耕植物電容微擾量的差異。

貳、研究方法或過程

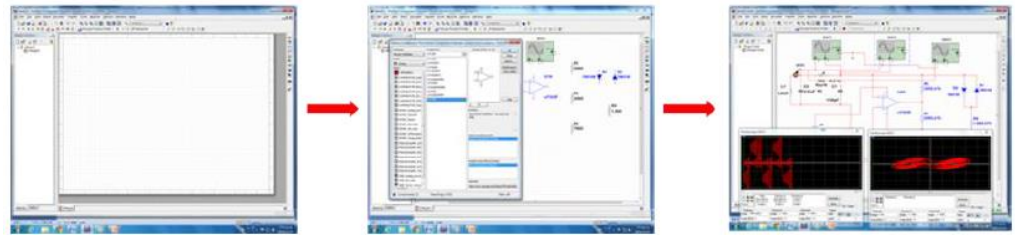
一、器材與設備

<p>示波器(oscilloscope) 型號：</p> 	<p>萬用 PCB(universal circuit board) 型號：87mm*97mm (半玻纖)</p> 	<p>二極體(diode) 型號：1N4148</p> 
<p>運算放大器(operational amplifier) 型號：LF353P</p> 	<p>陶瓷電容器(ceramics capacitor) 規格：0.01uF/50V、0.001uF/50V</p> 	<p>可變電阻(variable resistor) 規格：3KΩ</p> 
<p>電感(inductor) 規格：2.2mH</p> 	<p>電阻(resistor) 規格：220Ω*2、720Ω*1、1.2KΩ*1</p> 	<p>電源供應器(switching adapter) 規格：AC110V / DC15V、1.5A *2</p> 
<p>電容計(LCR METER) 型號：DE-500</p> 	<p>萬年青竹(學名：Dracaena.Sanderiana cv.)</p> 	<p>黃金葛(學名：Epipremnum aureum)</p> 

二、模擬軟體

NI Multisim Component Evaluator Mouser 版(以下簡稱 Multisim 版)，是知名的貿澤電子 (Mouser Electronics) 與國際大廠 National Instruments 合作推出免費且功能強大的電子電路設計軟體，整合了許多強大的功能，包括 PCB 佈局與材料清單(BOM)，還能支援設計、模擬、PCB 設計、BOM 匯出及直接下單採購等功能，能夠滿足設計工程師的需求。因為此軟體操作簡單且容易理解又可輸出 excel 格式的資料，所以正好可以利用其設計、模擬的功能來進行研究。

簡單的操作介面：



三、過程與方法

(一) 發展研究架構。

(二) 原理分析與文獻探討。

1. 關於植物阻抗與電容效應。
2. 關於植物根系電容。
3. 關於植物有無神經？！
4. 關於「混沌系統」。
5. 關於「蔡氏電路」。

(三) 探討人體微擾不同種類的植物電容時對「蔡氏電路」電位相圖之影響。

1. 用「模擬比對法」建立微擾電源電容時等效電容變化量的判準。
2. 比較用手靠近植物時不同電極接法之電路電位相圖的變化。
3. 比較用手碰觸植物時對電路不同起始狀態的電位相圖變化。
4. 探討用手觸摸黃金葛不同部位時的等效電容變化量。

(四) 和一般電容計比較測量水耕與土耕植物電容微擾量的差異。

1. 用一般電容計測量土生與水生黃金葛被觸摸時的電容變化量，並與本研究的模擬比對法做比較。
2. 測量用手觸摸遠端土耕的土壤，蔡氏電路可偵測之最遠距離。

參、研究結果與討論

一、發展研究架構

「微擾可以改變相態?!」，當系統的狀態不敏感或是因為微擾量的尺度過小等問題，通常需要透過累積或是放大擾動量，才能明顯地改變原始狀態。但若是系統處於一種很敏感的状态時，或許可以輕易地讓我們看到微擾對原有相態的立即影響。

我們從發現植物電容對外界環境的變動具有敏感性這樣的現象後，提出「物理微擾量是否會對混沌相圖產生影響？」的研究假設，進而設計「實驗與模擬比對」的研究方法，希望能找出植物覺知人體的觸摸時所產生的實際物理變動量。研究架構發展如下：

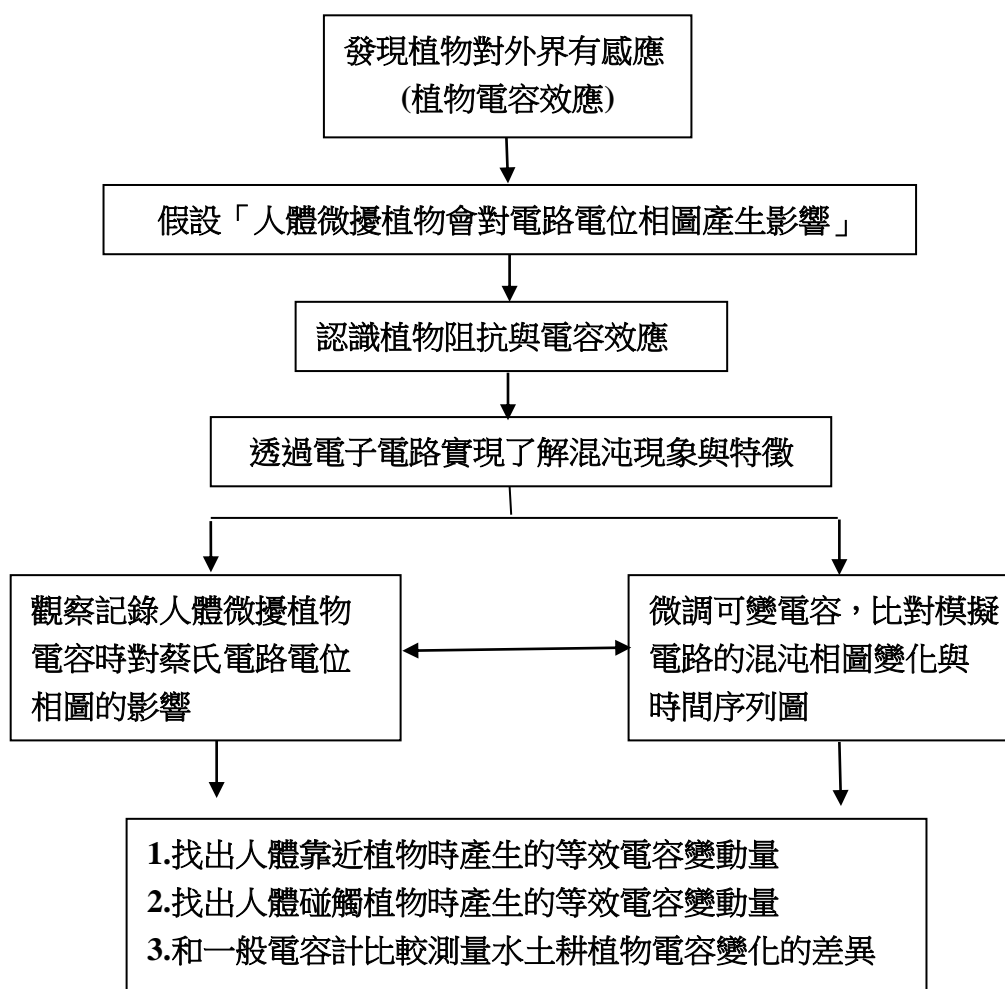


圖 3-1 研究架構

二、原理分析與探討

(一) 植物阻抗與電容效應

目前量測植物阻抗的方式可依取樣時是否侵入植物而分為「非侵入式」和「侵入式」兩種。「非侵入式電極測量法」中目前較常用的是二電極法，如圖 3-2-1。

由於植物組織的最基本單位是植物細胞，而生物的各项反應其實就是細胞的反應。當生物在微小的體積密度下，生物阻抗與細胞數量可視為線性的關係，像是量測單一細胞時，在相同頻率下此細胞內部的等效電容與電阻所複合組成的阻抗是固定的。但是，

若是要測量生物組織時，便會因太多的因素如複雜的串並

聯接合過程以及導電離子的種類與分布情形等，導致阻抗值與細胞數量呈現非線性的關係。細胞內的細胞核和細胞質其導電特性與電阻相似，而細胞內的液泡其導電特性則

與電容相似，故亦可將生物組織等效成一組電容和電阻串並聯的電子元件模型如圖 3-2-2 所示， R 代表等效電阻、 C 代表等效電容及 Z 代表探針阻抗。

因為植物阻抗和細胞數量的關係並非線性關係，所以不同頻率的電源信號通過植物組織會產生不同的阻抗響應，細胞膜的電容效應亦會改變電流通過植物組織的路徑。目前已知的研究結果是較低頻率的電流通過植物組織時，細胞膜與液泡所造成的電容效應會使電容值增加，導致植物細胞的阻抗值增加，迫使電流僅能通過細胞與細胞間阻抗值較低的外液組織。至於較高頻率的電流通過植物組織時，細胞內的容抗效應將降低，當電流頻率大與某臨界值時，容抗效應完全消失，電流可直接通過組織，如圖 3-2-3 所示。

研究者於前期試探研究中發現，電流通過植物組織時，外界物體(如人體)的靠近與輕觸植物的某些部位，就會產生電流訊號的改變。由於這類的擾動方式(如圖 3-2-4 所示)，並未改

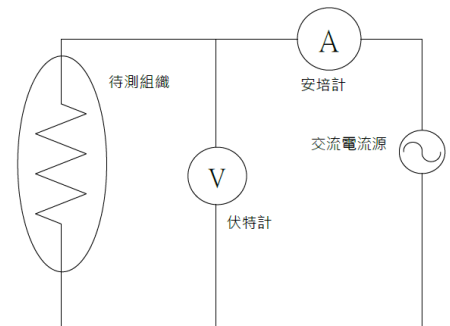


圖 3-2-1 二電極法量測示意圖

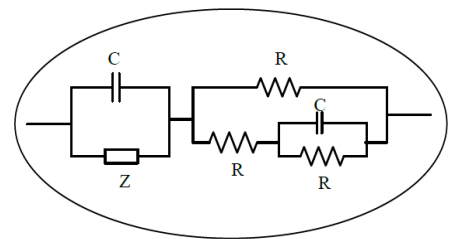


圖 3-2-2 組織等效電阻元件模型

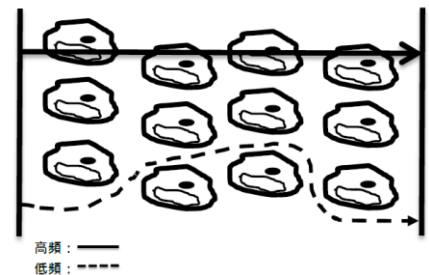


圖 3-2-3 不同頻率電流通過植物組織的路徑示意圖

變其內部的組織結構(內部複雜的串並聯阻抗接合方式)以及阻抗的探針,唯一的解釋是因外界電場的擾動改變了內部導電離子的分布情形,細胞膜的電容效應產生了對應阻抗響應的訊號輸出。通常,這類非常微弱的訊號變化需要藉由一系列的訊號放大裝置來將變動量明顯地表現出來,我們的設計則是想要利用一種簡單的非線性電路,先將電路狀態調整至具有奇異吸引子的混沌狀態,藉以直接觀察電路電位相圖的變化情形,並設法量出物理量的大小與尺度。

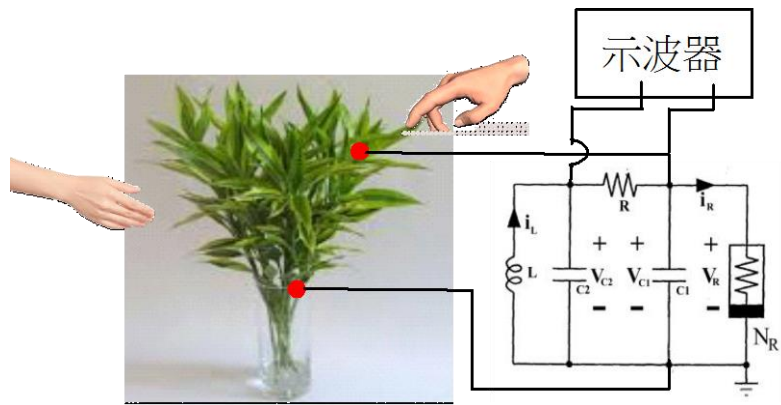


圖 3-2-4 觀察物體靠近或輕觸植物產生的微擾

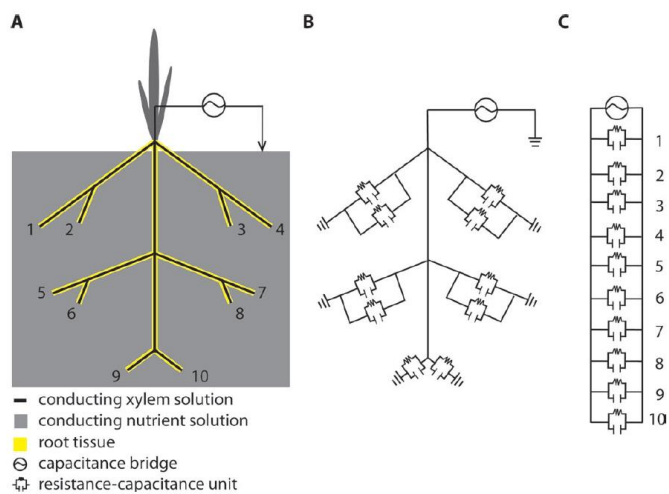


圖 3-2-5 Dalton's plant root resistance-capacitance model

Adapted from <http://jxb.oxfordjournals.org/> by guest on January 18, 2016.

(二) 植物根系的電容

關於植物根部電容的討論,最廣為被接受的是 Dalton(1995)所提出的模型,如圖 3-2-5 所示。圖 3-2-5A 以一具有十條分離根鬚為例,用圖 3-2-5B 表示對應的 RC 元件分佈,圖 3-2-5C 則為此種根系的等效電路,每一部位的 RC 值分別是獨立且可不同大小的。1972~2010 年期間,關於植物根系的電容與

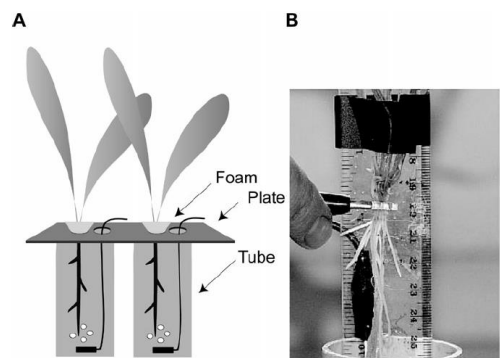


圖 3-2-6 測量根系電容的電極接法

根系的之間的相關研究,針對不同的植物物種與棲地條件已有一系列的發現。圖 3-2-6 顯示測量植物根部電容時的電極接法,當植部浸泡在含有 NH_4Cl 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 KNO_3 、 MgSO_4 、 FeEDTA 、 KH_2PO_4 及其他微量元素等營養液中,探討拉高根部離開液面、剪除液面下不同位

置的根部和改變電極間的距離等過程所測到的根系電容變化如圖 3-2-7A~E 所示，Ralf C. Dietrich 等(2012)發現浸在液中的根部質量愈多、與電極距離愈近均會造成電容變大，但拉高根部後浸泡在液中的根部質量與測量到的電容值並未呈線性相關，此結果與 Dalton 模型不太相同；在水溶液的導電度在 39.1ms、水溫約在 19.3°C 的條件下，測量頻率在 0.8~5KHz 的範圍所測得的電容值約為 0~600nF。

目前的研究均只僅於植物根系電容的直接量測，並未討論植物整體的電容是否會因外界的擾動而產生非常微小變化。也就是說，植物是否具有類似於人體觸覺神經一樣的覺知能力，如果有的話，和植物體內的離子分佈與變動所產生的細胞阻抗與電容效應有關係嗎？不同於文獻所探討的電極接法，本研究乃是於植物的莖部包上銅箔，再將電極夾在銅箔上即可。透過不同電極接點的改變所產生不同程度的電路狀態改變，來選擇最能偵測植物感知人體碰觸的接法。

(三) 植物也有神經！？

「植物神經學」是個備受質疑的生物學門，一般的直覺與普遍的認知是植物不會有神經的。其實關於動物神經與植物神經的研究都起始於相近的時期，但發展至今，動物神經學已成為熱門及重要的生物學門，相較之下「植物是否有神經」卻仍是生物學上及哲學上探討的問題。1880 年，達爾文於他的著作中寫道：「植物的根尖，就好像『低等動物的腦』一般。」（a plants' s root tip acts like the brain of one of the lower animals.）並且在當時，他們也已偵測到植物體有「動作電位(action potential)」在傳遞，且其特性跟動物的神經衝動一致，不過當時還是認為植物並沒有中樞神經系統。這可能是因為依靠當時的科技及儀器，並無法在植物解剖學上提出有效的證據來支持植物神經學說。

自達爾文以來直到近代，大量的電生理學、感知生物學、分子細胞生物學、遺傳學及生物化學都顯示植物擁有許多「特殊能力」，例如植物的向性、覓食性、記憶能力、遠距電訊號、植物溝通、聽覺、自我認知，辨認親戚的能力等等。在 1873 年，由桑德森 (Burdon-Sanderson)

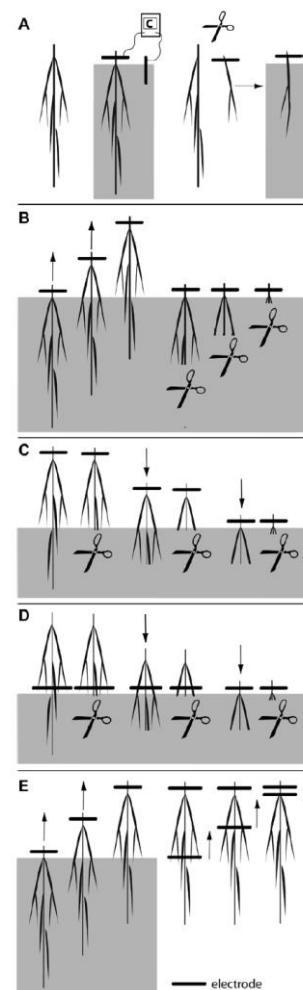


圖 3-2-7
改變根部會產生電容變化

透過偵測捕蠅草的葉子而發現植物動作電位，而且這種現象不只發生在捕蠅草等食蟲植物及含羞草的身上，也出現在一般常見的植物當中，研究紀錄包括蕃茄、玉米、大麥、豌豆、向日葵及阿拉伯芥等等，在被子植物中可說是相當普遍的現象。植物除了有一般動物神經的動作電位之外，另外還擁有所謂的「變異電位(variation potential)」。植物的動作電位主要透過篩管組織在傳遞，跟動物神經動作電位一樣遵守「全有全無律」，亦有「自我放大傳遞」、「等速等幅傳遞」的特性。植物及動物的動作電位都是透過「電位閘控離子通道」來感應膜電位的改變而產生並傳播，其動作電位的去極化過程是透過鈣離子的流入及氯離子的流出所導致；相較於動作電位，植物的變異電位並不是一種自我放大傳遞的電訊號，它起因於導管內某化學物質的經過或張力的改變而導致的局部膜電位變化，它沿著導管傳遞，主要是經由「配體閘控離子通道」或「機械性感應通道」所調控，並不以等速等幅的方式傳播，因此稱為「變異電位」。

2009年，一德國研究團隊另外發現一種新的植物電訊號，是從植物受傷的部位產生並系統性地傳播到整個個體，稱之為「系統性電位 (system potential)」。電訊號讓植物可以快速地傳遞訊息，並使全身或局部對環境的刺激做出的反應。電訊號不只可讓捕蠅草和含羞草做出快速的葉子閉合，科學家也發現電訊號參與了許多植物的生理反應，例如系統性防禦、調控篩管的流動，亦會影響授粉、呼吸作用、光合作用、RNA 轉錄、蛋白質轉譯、酵素活性、細胞質流、細胞骨架等等。此外，捕蠅草的電記憶、鬼針草的記憶訊息運輸、阿拉伯芥對不同色光的分辨及記憶等，都發現會與特定的電訊號波圖有所連結。

本研究特別針對植物覺知人體觸摸的反應進行探討，並且針對上述植物電位的變化所引發的離子分佈變化(物理學上以電容視之)，試圖找到一種新的偵測模式與量測機制來探究這種尚待進一步驗證的神秘現象，給予正確且符合科學邏輯的解釋方式。

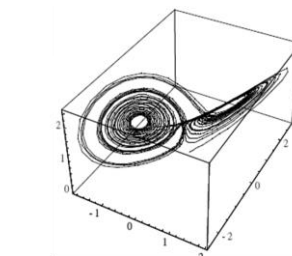
(四) 混沌系統(Chaotic System)

我們都知道有些方程式可以經由取指數的過程，將方程式兩邊的函數(幕次可不為 1)轉化為線性關係；其實中學期間所面對的力學問題，亦多是在經過近似或是假設為理想狀況的條件下，可透過適當數學轉換和求出其解的「線性微分方程」。但是，在真實世界裡是必需考量如摩擦力或驅策力等實際且複雜的交互作用的，因此當完整描述真實的複雜系統時，方程式常常就可能變成非線性的關係。也就是說有些因次在方程式中，疊加原理並不適用，即

$f(a+b) \neq f(a)+f(b)$ 及 $f(kx) \neq kf(x)$ ；通常這類複雜的動力系統因無法直接求出其特定解而採用數值分析的方法來處理，如透過軟體的模擬(用疊代的方式求解)來了解系統的運作模式，並藉以觀察其中可能出現的混沌行為與特徵。

二十世紀初數學家龐加萊(Henri Poincaré)面對討論三個以上的星體間複雜的引力作用下，提出運動軌跡似乎不能用十八世紀拉普拉斯(Pierre-Simon Laplace)所提之「決定論」來看待。他亦提出利用截面來分析看似混亂的運動軌跡，數學家斯梅爾(Stephen Smale)提出彎曲扭轉的馬蹄形截面可以看出混沌行為中的規律與碎形維度，李亞普洛夫(Aleksandr Mikhailovich Lyapunov)則是提出判斷是否可以進入混沌狀態的指數，1963年氣象學家羅倫茲(Ed Lorenz)發現所謂的「蝴蝶效應」，了解到「混沌行為對初始條件敏感」的重要特性，最後於1978年費根鮑姆(Feigenbaum)提出「混沌的普遍性理論」，發現了週期倍增發生速度的收斂值4.669，這個數字代表著不同的系統都可展現相同的行為，混沌普遍性的成立開啟了混沌科學的重要性。在真實世界的複雜系統中，包括電機電子、通訊、生物、數學、物理、化學甚至是經濟問題等領域都能看得到混沌理論的身影。

勞倫茲研究兩無限平面之間的流體，其下層加熱後對流的運動，藉以模擬大氣在地表受陽光加熱時氣流對流的情形，經過簡化後得到下列的運動方程式，此即有名的勞倫茲方程，進行混沌行為的3D相圖如圖3-2-8，經轉換簡化後的微分方程式如下所示，三個自變相X、Y、Z分別代表氣壓、氣溫和溼度：



Lorenz 吸引子立體圖

圖 3-2-8

$$x' = \sigma(y - x)$$

$$y' = -xz + rx - y$$

$$z' = xy - bz$$

混沌理論是一門新興的科學學門，由於混沌運動的軌跡不會與之前的路徑重疊，外表看似極為混亂，但內部卻又有其規律與控制運動的「奇異吸引子」。一直以來，令研究者困擾的非線性複雜動力學常被忽略於強調確定論的線性科學之外，但若想分析長時間的非週期性行為，必需先掌握住其中的兩個重要且明顯的特徵：

1. 決定性：代表混沌系統的演化是遵循嚴格的規則(亦即方程式)，並不是由亂數或者雜訊

所引起，圖形運行軌跡看似混亂的現象乃皆是來自於系統的非線性行為所產生。

2. 對初始值敏感：會使得混沌系統中兩條非常接近的軌道，會以相當於指數的形式快速分離。混沌是一種看似混亂但是卻有其隱藏規則的現象。

當年勞倫茲利用大氣的模擬方程式首次看到了混沌的面貌，不過當時卻未引起科學家們的重視。我們猜想「或許利用此敏感性，微擾也可以產生明顯的混沌相態變化吧?!」。

(五) 蔡氏電路(Chua's Circuit)

「蔡氏電路」是一種將「羅倫茲方程式」簡化後的非線性電子電路實現，其中具有一個可製造周期震盪的 LC 元件、一個等同於震盪阻尼的電阻元件以及一個代表驅策力的電源用電容元件，於此電源用電容元件輸入非線性電源訊號後便能產生具奇異吸引子的混沌相圖。如圖 3-2-9~10，用克希荷夫定律(Kirchhoff's Law)分析蔡氏電路(Chua's Circuit)所寫出的微分方程組如下：

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dv_1}{dt} &= \frac{1}{R}(v_2 - v_1) - \dot{f}(v_1) \\ C_2 \frac{dv_2}{dt} &= \frac{1}{R}(v_1 - v_2) + i_3 \\ L \frac{di_3}{dt} &= -v_2 \end{aligned}$$

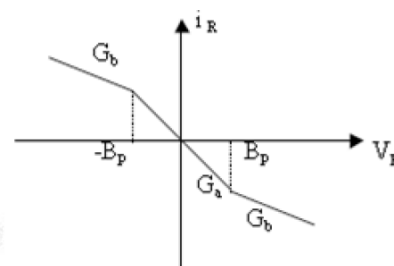
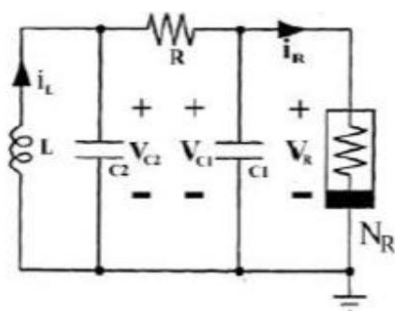


圖 3-2-9 蔡氏電路示意圖

圖 3-2-10 非線性電阻 V-I 曲線

其中

$$i_R = f(v_R) = G_b v_R + \frac{1}{2}(G_a - G_b) \{|v_R + B_V| - |v_R - B_V|\}$$

非線性電阻的 V-I 特性曲線如圖 5-2-3 所示，Ga、Gb 為斜率，於 VR=±Bp 時轉折。

利用變數變換法可以將上述的微分方程組改寫成下列的形式：

$$\begin{aligned} \frac{dx}{d\tau} &= k\alpha(y - x - f(x)) & f(x) &= bx + \frac{1}{2}(a - b)\{|x + 1| - |x - 1|\} \\ \frac{dy}{d\tau} &= k(x - y + z) & x &\equiv \frac{v_1}{B_V} & y &\equiv \frac{v_2}{B_V} & z &\equiv i_3 \left(\frac{R}{B_V}\right) \\ \frac{dz}{d\tau} &= -k\beta y & \alpha &\equiv \frac{C_2}{C_1} & \beta &\equiv \frac{R^2 C_2}{L} & k &\equiv \text{sgn}(RC_2) \\ & & a &\equiv RG_a & b &\equiv RG_b & \tau &\equiv \frac{t}{|RC_2|} \end{aligned}$$

目前是用一運算放大器(OP)做成的負阻抗電器來決定非線性電阻的斜率 G_a 、 G_b 與轉折點 B_p ^{註一}；只要改變 R 、 C_1 、 C_2 及 L 等參數，便可以透過示波器觀察到 V_1 及 V_2 的相圖與時間序列圖。一般封裝好的 C_1 、 C_2 及 L 都是不容易改變的參數，因此非線性電路的實現都是改變可變電阻來觀察相圖的變化。

本研究最重要的想法是「想要於 C_1 處並聯一個可變電容 C_v (如接上植物加以微擾)，是一創新且具挑戰性的嘗試。

【註一】本研究使用之非線性電阻 I-V 特性曲線詳見附錄一。

三、探討人體微擾不同種類的植物電容時對「蔡氏電路」電位相圖之影響。

本步驟將於蔡氏電路中的電源電容 C_1 與植物並聯(如圖 3-3-1)，並於軟體的模擬電路中之電源電容 C_1 處並聯一個可變電容(如圖 3-3-2)來做相圖及時間序列的等效電容比對，根據前期試探研究多種植物的經驗，先選取萬年青竹(學名：*Dracaena.Sanderiana cv.*)、黃金葛(學名：*Epipremnum aureum*)兩種常見的觀賞用草本植物(如圖 3-3-3)，了解它們感受外界干擾時的物理反應機制。



圖 3-3-1 C_1 與植物並聯實際電路圖

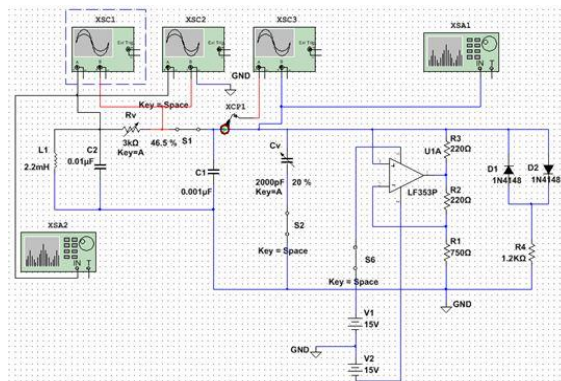


圖 3-3-2 C_1 並聯可變電容之模擬電路圖

(一) 建立「模擬比對法」的判準

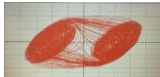
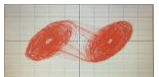




由於我們在電源電容處並聯一個可變電容(0~1000pF)來代表植物的等效電容，若要產生雙吸引子的混沌行為，不同的可變電阻初始值及調整可變電容的過程均會產生電位相圖的不同變化，因此需要先行建立一套進行模擬比對時的判準。

我們發現微擾處於雙吸引子態的非線性系統，雖然敏感但卻因為是一種不斷變動的振盪行為，所以很難確認實際微擾的電位相圖變化與模擬時的暫態相圖是否完全一致(因為振盪波形是動態的)。不過，若是仔細觀察相態的改變時，如雙吸引子態先變成陣發混沌態再變成週

期態的過程(混沌抑制)，其等效電容的變動範圍應該還是可以明顯區分出來才是，因此有必要建立一組對照表。

透過模擬，紀錄不同的可變電阻初始值下進行調變等效電容產生「混沌制御」的過程，找出其電容臨界值以利對比出電容變動的區間，如表 3-3-1~3 所示。

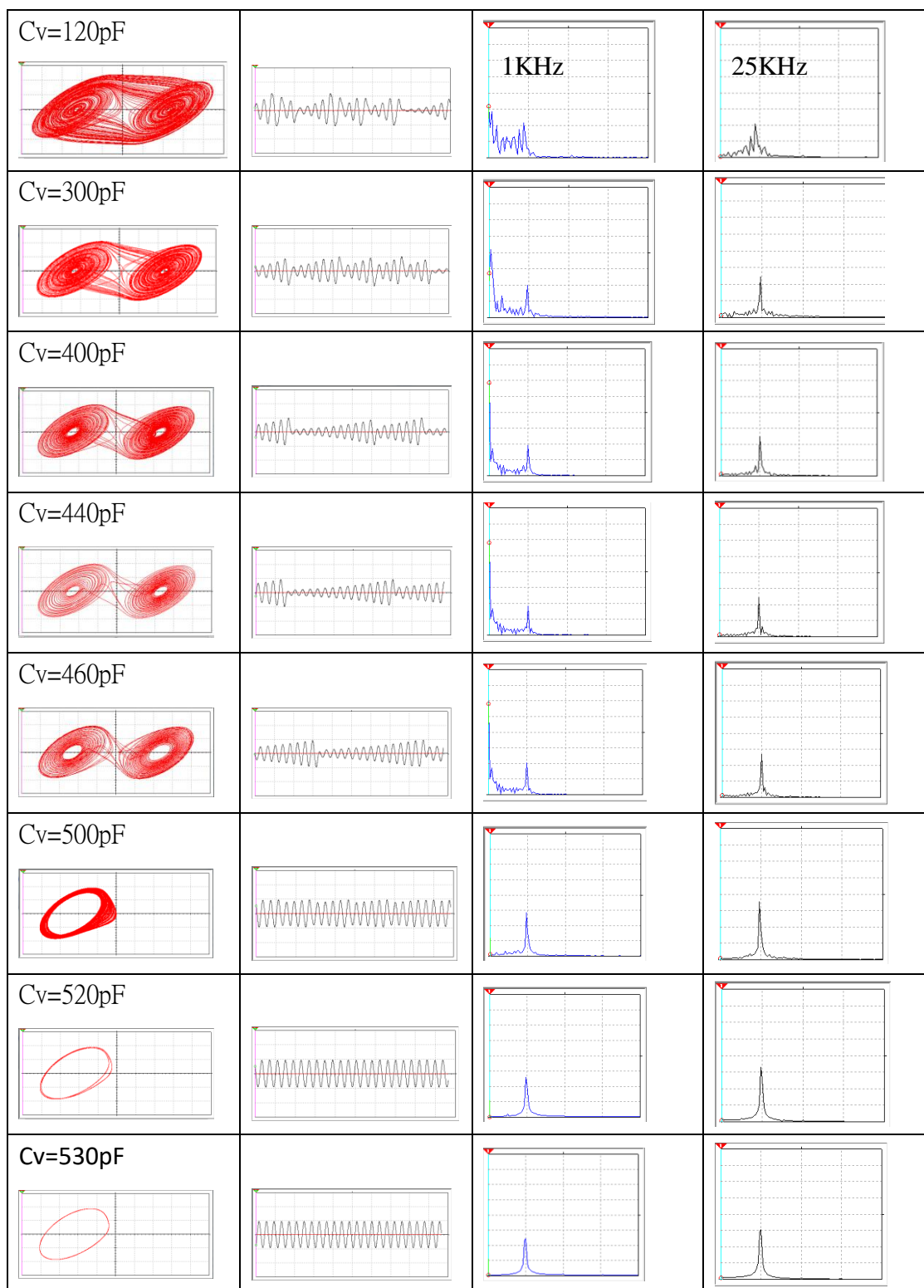
表 3-3-1 不同可變電阻值之混沌制御過程各電位相圖臨界可變電容值彙整表

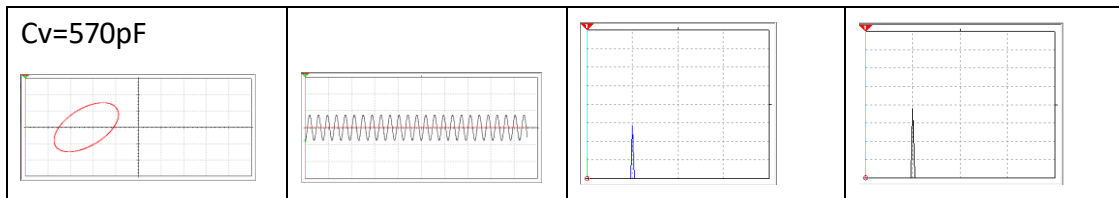
可變電阻 $V_x/V_y(\text{Div})$	臨界雙吸引子	雙吸引子 I	雙吸引子 II	陣發混沌	週期態 I	週期態 II
$R_v = 900\ \Omega$ $100\text{mV}/500\text{mV}(\text{Div})$	 $C_v = 1460\text{pF}$	 $C_v = 1700\text{ pF}$	 $C_v = 1724.2\text{ pF}$	 $C_v = 1766.7\text{ pF}$	 $C_v = 1908.8\text{ pF}$	 $C_v = 1926.3\text{ pF}$
$R_v = 1200\ \Omega$ $500\text{mV}/1\text{V}(\text{Div})$	$C_v = 611.48\text{ pF}$	$C_v = 778.8\text{ pF}$	$C_v = 806.82\text{ pF}$	$C_v = 896.54\text{ pF}$	$C_v = 929.42\text{ pF}$	$C_v = 961.16\text{ pF}$
$R_v = 1350\ \Omega$ $500\text{mV}/1\text{V}(\text{Div})$	$C_v = 282.1\text{ pF}$	$C_v = 440.1\text{ pF}$	$C_v = 525.2\text{ pF}$	$C_v = 562.4\text{ pF}$	$C_v = 575.3\text{ pF}$	$C_v = 589.9\text{ pF}$
$R_v = 1500\ \Omega$ $1\text{V}/2\text{V}(\text{Div})$	$C_v \leq 0\text{ pF}$	$C_v = 210.5\text{ pF}$	$C_v = 223.8\text{ pF}$	$C_v = 256.2\text{ pF}$	$C_v = 263.2\text{ pF}$	$C_v = 285.7\text{ pF}$

- 【討論】**
1. 發現電源電容 C_1 處並聯一可變電容後，可變電阻 R_v 需變小至 $1500\ \Omega$ 以下才會產生雙吸引子態。
 2. 產生雙吸引子態後，振盪會因為振幅過大而回不到隨遇平衡的狀態(吸引子吸不住了)，我們稱之為「爆掉」，此臨界狀態我們稱之「臨界雙吸引子」，此時的可變電容值隨可變電阻 R_v 的初始值愈小而愈大，而且相圖的電位振幅隨初始電阻設定值愈大而愈大。
 3. 固定可變電阻 R_v 的初始值後，可變電容值愈大，會產生「混沌制御」的現象。
 4. 可以透過調整模擬器上的示波器刻度大小(Div)，比對實際電路在示波器上的電位振幅，便可看出匹配的固定可變電阻值，此時的可變電容值即為接上植物時的等效電容。
 5. 對照前期試探研究的結果，接上植物並且調出雙吸引子態的可變電阻應該是在

$R_v = 1395\Omega$ 附近，進一步建立較多的雙吸引子電位相態圖變化情形與時間序列圖，如表 3-3-2 所示，可以幫助我們理解整個系統的動力行為變化趨勢，並且提升比對時的準確度。

表 3-3-2 $R_v = 1395\Omega$ 時隨等效電容變大進行「混沌制抑」之相圖、C2 時間序列及 C1、C2 傅立葉轉換頻譜變化情形(詳見附錄一)





【討論】1. $R_v = 1395\Omega$ 時，可變電容小於 120pF 時振盪會「爆掉」。

2. 電位相圖的整體「混沌制抑」過程，可變電容變化量 ΔC_v 約為 450pF 。

3. 從電位相圖的振幅和並接植物時的前期試探研究結果來比對，此電阻設定值最為吻合，因此下面步驟的微擾結果將以此表格進行比對。

(二) 比較用手靠近植物時不同電極接法之電路電位相圖的變化

觀察用手靠近植物時，比較不同電極接點方式產生的電路相圖變化

1. 將電路中的電源電容 C_1 與植物並聯，調整可變

電阻，讓示波器相圖呈現雙吸引子的初始狀態。

2. 改變並聯至植物的接點位置與電極正負，定義接點

代號如圖 3-3-3 所示，L 為葉片接點、S1 為與 L

同莖的接點、S2 為不與 L 同莖的接點、G 為土壤

接點。觀察初始狀態的相圖與變化情形，











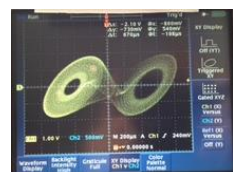















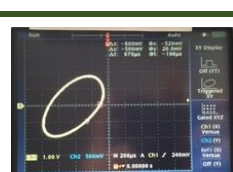







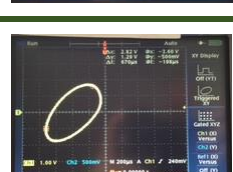
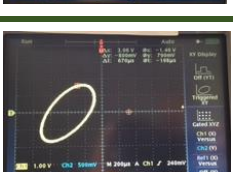
記錄如表 3-3-3。



圖 3-3-3

表 3-3-3 改變接點位置與電極正負的混沌相圖變化(由遠靠近至約 1cm 的距離)

植物種類		黃金葛		萬年青竹	
接點位置	電極正負	起始相圖	手靠近後	起始相圖	手靠近後
S1L	S1(-)L(+)				
	S1(+L)(-)				

S2L	S2(-)L(+)				
	S2(+L(-)				
GL	G(-)L(+)				
	G(+L(-)				
S2S1	S2(-)S1(+)				
	S2(+S1(-)				
GS1	G(-)S1(+)				
	G(+S1(-)				
GS2	G(+S2(-)				



【討論】1.發現僅手靠近植物，電位相圖會有些微的改變，但並不明顯；不同的電極接法也會有不同程度的變化，有些接法則無任何改變。

2. 電極接法為 S1(-)L (+)時，黃金葛和萬年青竹皆出現等效電容變大的現象， ΔC_v 約為 10~20pF；萬年青竹因為電極接法改變會直接出現混沌抑制現象。

3. 不管正負電極接盆栽的土壤(G)時，電位相圖的變化均較為敏感。


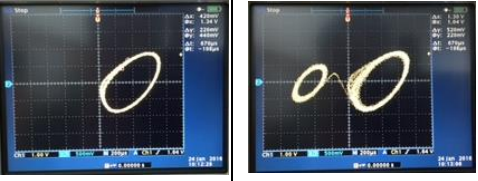

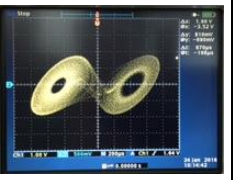

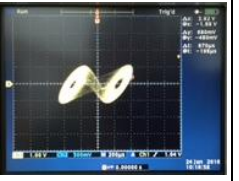

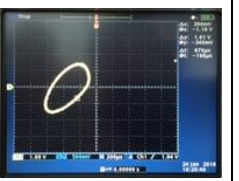

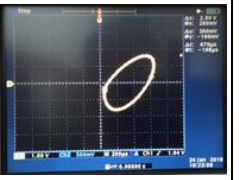




4. 黃金葛電極接法為 G(-)S1 (+)及 G(+)S1(-)時，因為電流通過植物的組織長度變短，出現等效電容變大而產生混沌抑制現象，並且不因手的靠近而產生微擾。

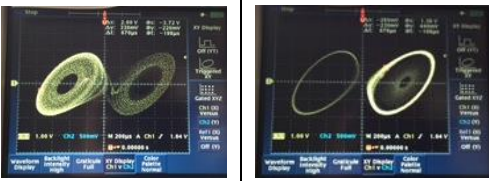
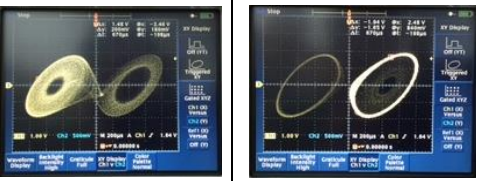

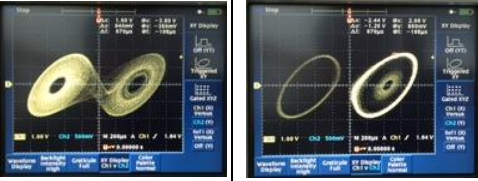
(三) 比較用手碰觸植物時對電路不同起始狀態的電位相圖變化

根據上一步驟的結果，選擇(S1、L)及(G、L)兩接點，改為用手指碰觸葉片(L)這種強烈一點的微擾方式，比較兩種植物不同起始狀態的電位相圖變化如表 3-3-4。

表 3-3-4 有無用手指碰觸時在不同電路起始狀態下對電位相圖的變化與比對等效電容變化量

植物種類		黃金葛		萬年青竹	
起始狀態	電極正負	起始相圖	手碰觸葉尖	起始相圖	手碰觸葉尖
單周期	S1(-)L (+)				
			$\Delta C_v \doteq 607.2 - 576.4 = 30.8\text{pF}$		$\Delta C_v \doteq 597.2 - 588.6 = 8.6\text{pF}$
單周期	S1(+)L(-)				
			$\Delta C_v \doteq 607.2 - 576.4 = 30.8\text{pF}$		$\Delta C_v \doteq 0\text{ pF}$
雙周期	S1(-)L (+)				

		$\Delta C_v \doteq 562.4 - 575.8 = -13.4\text{pF}$	$\Delta C_v \doteq 561.8 - 575.8 = -14\text{pF}$
	S1(+)-L(-)		
		$\Delta C_v \doteq 562.4 - 575.8 = -13.4\text{pF}$	$\Delta C_v \doteq 560.2 - 575.8 = -15.6\text{pF}$
雙吸引子	S1(-)-L(+)		
		$\Delta C_v \doteq 561.8 - 525.4 = 36.4\text{pF}$	$\Delta C_v \doteq 559.8 - 515.6 = 44.2\text{pF}$
	S1(+)-L(-)		
		$\Delta C_v \doteq 561.8 - 525.4 = 36.4\text{pF}$	$\Delta C_v \doteq 554.3 - 500.6 = 53.7\text{pF}$
單周期	G(-)-L(+)		
		$\Delta C_v \doteq 607.2 - 576.4 = 30.8\text{pF}$	$\Delta C_v \doteq 605.2 - 576.4 = 28.8\text{pF}$
	G(+)-L(-)		
		$\Delta C_v \doteq 605.2 - 576.4 = 28.8\text{pF}$	$\Delta C_v \doteq 604.1 - 576.4 = 27.7\text{pF}$
雙周期	G(-)-L(+)		
		$\Delta C_v \doteq 578.6 - 575.8 = 2.8\text{pF}$	$\Delta C_v \doteq 572.4 - 575.8 = -3.4\text{pF}$
	G(+)-L(-)		

		$\Delta C_v \doteq 578.6 - 575.8 = 2.8\text{pF}$	$\Delta C_v \doteq 562.4 - 575.8 = -13.4\text{pF}$
雙吸引子	G(-)L(+)		
		$\Delta C_v \doteq 561.8 - 525.4 = 36.4\text{pF}$	$\Delta C_v \doteq 561.8 - 525.4 = 36.4\text{pF}$
	G(+L(-)		
		$\Delta C_v \doteq 560.8 - 525.4 = 35.4\text{pF}$	$\Delta C_v \doteq 560.8 - 524.5 = 36.3\text{pF}$

- 【討論】** 1.微擾前的狀態調為單週期時，不管電極接法、電極正負或是植物種類，均出現等效電容變大的現象，變化範圍為 0~30pF 左右。
2. 微擾前的狀態調為雙週期時，電極接法為 S1-L，不管電極正負或是植物種類，會出現等效電容變小的反常現象，變化範圍為 10~20pF 左右；電極接法為 G-L 時，不管電極正負，黃金葛會出現等效電容變大的現象，但是萬年青竹則仍是電容變小，變化範圍為 0~10pF 左右。
3. 微擾前的狀態調為雙吸引子態，均會出現等效電容變大現象，而且幅度較為明顯，增大幅度約為 30~50pF。

(四)探討用手觸摸黃金葛不同部位時的等效電容變化量

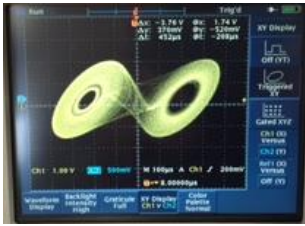
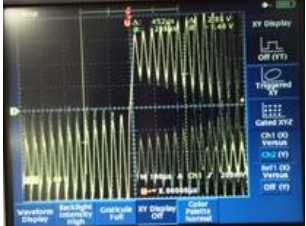
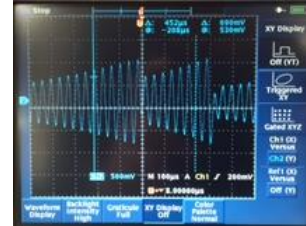

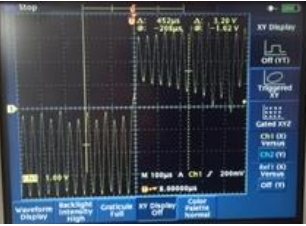


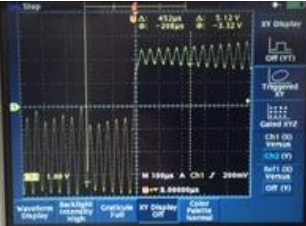
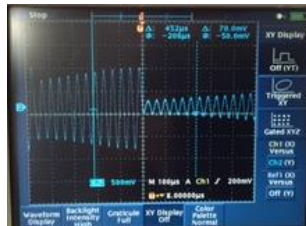
根據(二)、(三)的結果，選取黃金葛為進一步探討的對象，固定電極接點為 G(+L(-)，分別用手觸摸不同部位，如圖 3-3-4 所示，A 株葉子接有負極，A1 為用手碰觸葉部，A2 則是用手碰觸莖部；B 株則為不同根的另外一株，B1 為碰觸葉部，B2 為碰觸莖部。紀錄電位相圖的變化情形與時間序列，利用 Multisim 軟體進行比對，找出產生相近相位變化的可變電容變化量。

結果如表 3-3-5~8 所示。



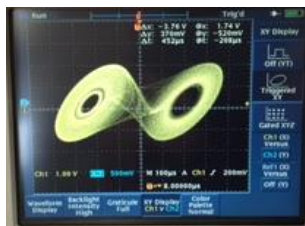
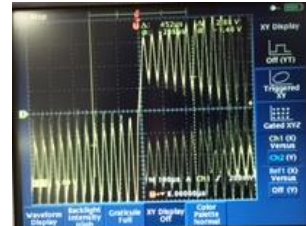
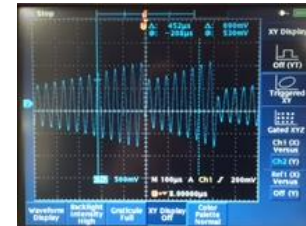

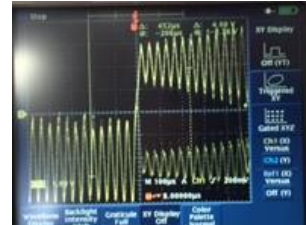
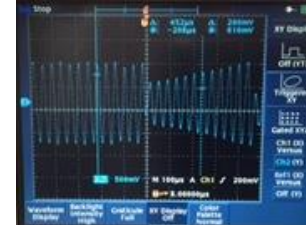
圖 3-3-4 擬碰觸的部位標示


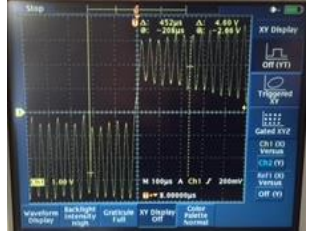

表 3-3-5 碰觸同株葉部與莖部

植物：黃金葛	電位相圖	V _x -t 時間序列暫態圖	V _y -t 時間序列暫態圖
電極：G(+) L(-)			
碰觸同株葉部後			
比對結果	R_v = 1395 Ω ; 500mV/1V(Div) ; Timebase : 相圖 10ms/時間序列 100 μs ΔC_v ≅ 404 - 360 = 44pF		
碰觸同株莖部後			
比對結果	R_v = 1395 Ω ; 500mV/1V(Div) ; Timebase : 相圖 10ms/時間序列 100 μs ΔC_v ≅ 430 - 360 = 70pF		

【討論】正極接地(盆栽的土壤)時，碰觸比較靠近正極的與葉(負極)同株莖部，產生較大的等效電容增幅。



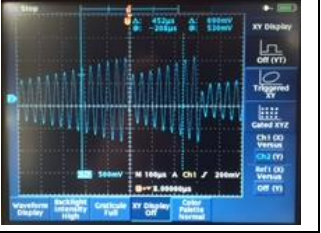

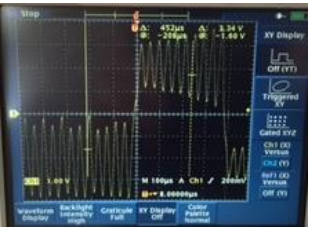
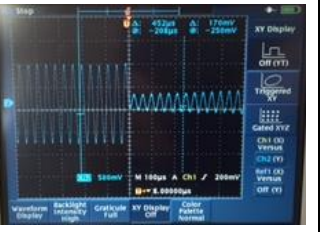
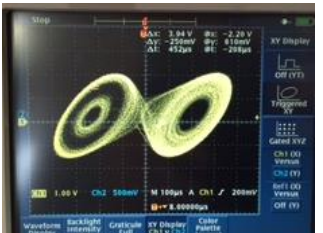
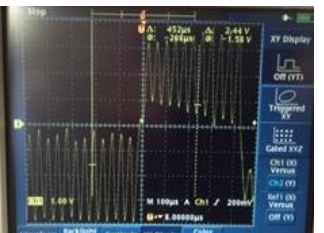

表 3-3-6 碰觸不同株葉部與莖部

植物：黃金葛	電位相圖	V _x -t 時間序列暫態圖	V _y -t 時間序列暫態圖
電極：G(+) L(-)			
碰觸不同株葉部後			

比對結果	Rv = 1395 Ω ; 500mV/1V(Div) ; Timebase : 相圖 10ms/時間序列 100 μs ΔCv ≅ 395 - 360 = 35pF		
碰觸不同株莖部後			
比對結果	Rv = 1395 Ω ; 500mV/1V(Div) ; Timebase : 相圖 10ms/時間序列 100 μs ΔCv ≅ 440 - 360 = 80pF		

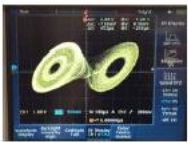




【討論】同樣碰觸比較靠近正極的與葉(負極)不同株莖部，產生較大的等效電容增幅。

表 3-3-7 碰觸盆栽的土壤與花盆

植物：黃金葛	電位相圖	V _x -t 時間序列暫態圖	V _y -t 時間序列暫態圖
電極：G(+) L(-)			
碰觸土壤後			
模擬結果	Rv = 1395 Ω ; 500mV/1V(Div) ; Timebase : 相圖 10ms/時間序列 100 μs ΔCv ≅ 450 - 360 = 90pF		
碰觸陶瓷花盆後			
模擬結果	Rv = 1395 Ω ; 500mV/1V(Div) ; Timebase : 相圖 10ms/時間序列 100 μs ΔCv ≅ 410 - 360 = 50pF		

【討論】發現用手觸碰陶瓷花盆一樣能產生近 50pF 的電容微擾；手指按壓盆栽的土壤時，等效電容的變化最為明顯，不同的按壓力道會有不同的反應。

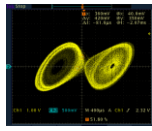
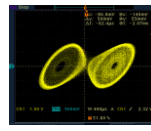
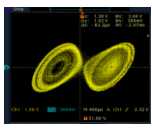
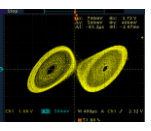
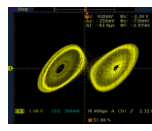
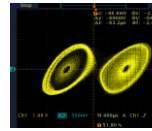
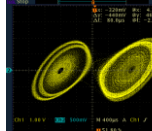
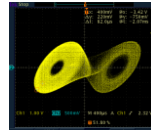
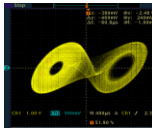
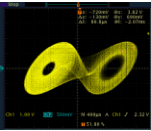
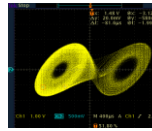
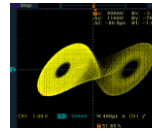
表 3-3-8 不同力道碰觸土壤與模擬比對結果

力道	用手輕觸	小力按壓	中力按壓	大力按壓	壓到最緊
電位相圖					
壓力	約 10gw/cm ²	約 40gw/cm ²	約 60gw/cm ²	約 80gw/cm ²	約 100gw/cm ²
ΔCv	20 pF	60 pF	90 pF	114 pF	150 pF

四、和一般電容計比較測量水耕與土耕植物電容微擾量的差異。

根據步驟三-(二)~(四)的結果，發現植物受到外界微擾時，從不同的電極接點與改變觸摸部位產生的混沌相圖改變，似乎其訊號的傳遞路徑也是可以進一步探索的問題。我們先透過電極選擇 G(+)/L(-) 及 L(+)/S2(-) 此兩種模式來做比較，分別用手觸摸不同株的葉片及花盆，紀錄相圖變化情形如下表 3-4-1 所示：

表 3-4-1 比較不同電極接點進行觸摸不同部位時偵測到的電位相圖變化情形

電極接法	原電極葉	他株葉(1)	他株葉(2)	他株葉(3)	單手摸盆	雙手摸盆
G(+)/L(-)						
L(+)/S2(-)						

由上表可以發現，當電極接點未接地時，觸摸不同株的葉片或是花盆時並不容易出現明顯的微擾效應，由此推論，植物對外界的反應透過根系與棲地(如土壤)同步產生電容阻抗的變化應該是最為明顯可見。

因為黃金葛也可水生植栽，因此若是將盆栽改用水耕養植，用人體觸摸時所生的電容變化量又會有何差異呢？為了確認本方法所測到的電容量值與尺度是否符合真實的變化範圍，透過和電容計的實測結果做比較，探討改變棲地種類的差異：

(一) 用一般電容計測量水耕與土耕黃金葛被觸摸時的電容變化情形，並與本研究的模擬比對法做比較。

1.分別於長條形壓克力容器中每隔 8 公分用水耕與土耕方式植栽黃金葛，如圖 3-4-1~2 所示。



圖 3-4-1 水耕裝置接電容計



圖 3-4-2 土耕裝置接電容計

2.根據步驟三觀察到產生混沌抑制過程的頻率變動範圍為 1KHz~10KHz，將電容計(規格與型號)之測量頻段設定在 10KHz，電極接法選擇 G(+)/L(-)，分別測量用手觸摸水耕與土耕中不同位置之黃金葛，並用電容計紀錄觸摸前後的電容值，結果如下表 3-4-2 所示。

表 3-4-2

觸摸前電容計測到之整體盆栽起始電容值，水耕為 18.26pF、土耕為 33.74pF					
用手觸摸位置	第一株	第二株	第三株	第四株	第五株
棲地種類	接電極株	距 8cm	距 16cm	距 24cm	距 32cm
水耕	25.11pF $\Delta C_v=6.85pF$	18.26pF $\Delta C_v=0pF$	18.26pF $\Delta C_v=0pF$	18.26pF $\Delta C_v=0pF$	18.26pF $\Delta C_v=0pF$
土耕	37.45pF $\Delta C_v=3.71pF$	33.74pF $\Delta C_v=0pF$	33.74pF $\Delta C_v=0pF$	33.74pF $\Delta C_v=0pF$	33.74pF $\Delta C_v=0pF$

3.待測電極改並聯到「蔡氏電路」的電源電容 C1，電極接法仍為 G(+)/L(-)，如圖 3-4-3~4 所示，重複步驟四-(一)之 1、2，測量用手觸摸水耕與土耕中不同距離之黃金葛，紀錄示波器上雙吸引子混沌態之電位相圖變化情形與模擬比對後之電容變化量如表 3-4-3。

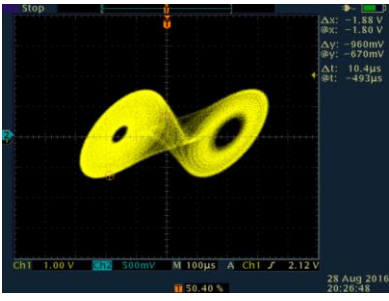
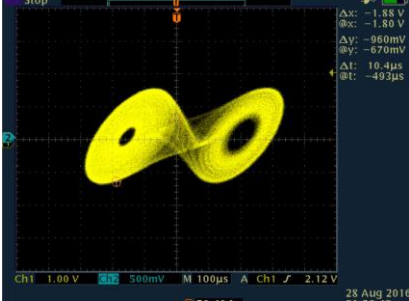
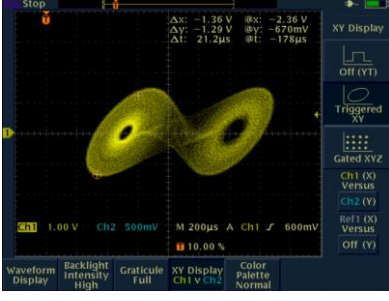
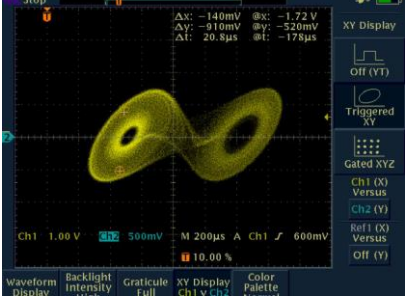




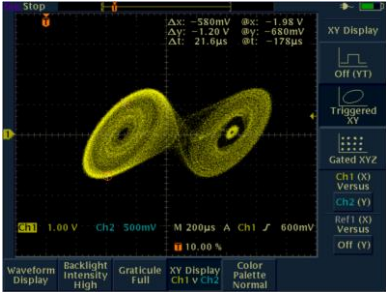
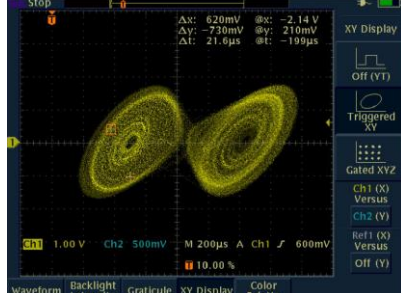
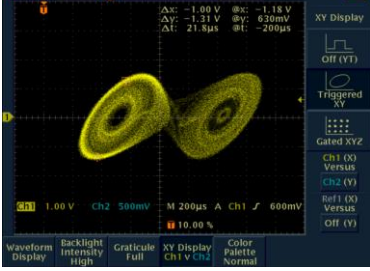
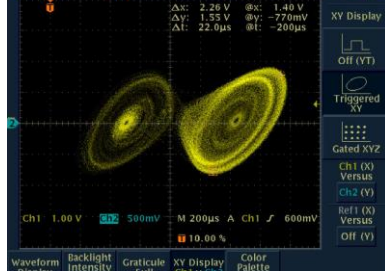
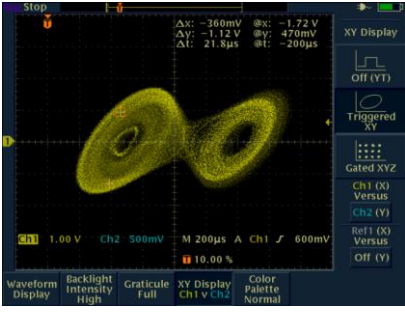
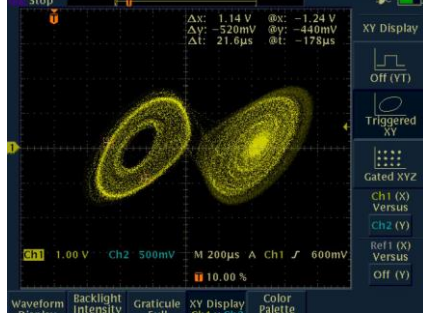
圖 3-4-3 水耕裝置接蔡氏電路



圖 3-4-4 土耕裝置接蔡氏電路

表 3-4-3

裝置種類	水耕(盛裝一般自來水)	土耕(盛裝培養土加泥炭土)
起始電位相圖	 <p>$C_v = 400 \text{ pF}$</p>	 <p>$C_v = 400 \text{ pF}$</p>
用手觸摸第一株 (接電極株)	 <p>$\Delta C_v \cong 10 \text{ pF}$</p>	 <p>$C_v \cong 10 \text{ pF}$</p>
用手觸摸第二株 (距離 8 公分)	 <p>$\Delta C_v \cong 20 \text{ pF}$</p>	 <p>$\Delta C_v \cong 20 \text{ pF}$</p>

<p>用手觸摸第三株 (距離 16 公分)</p>	 <p>$\Delta C_v \cong 30\text{pF}$</p>	 <p>$\Delta C_v \cong 40\text{pF}$</p>
<p>用手觸摸第四株 (距離 24 公分)</p>	 <p>$\Delta C_v \cong 30\text{pF}$</p>	 <p>$\Delta C_v \cong 50\text{pF}$</p>
<p>用手觸摸第五株 (距離 32 公分)</p>	 <p>$\Delta C_v \cong 25\text{pF}$</p>	 <p>$\Delta C_v \cong 40\text{pF}$</p>

【註】觸摸植物時會因為力道大小不同產生不同程度的變動，故紀錄最大變動值。

4. 承四-(一)之 1~3，比較電容計與蔡氏電路偵測到之電容變化範圍，如圖 3-4-5 所示。

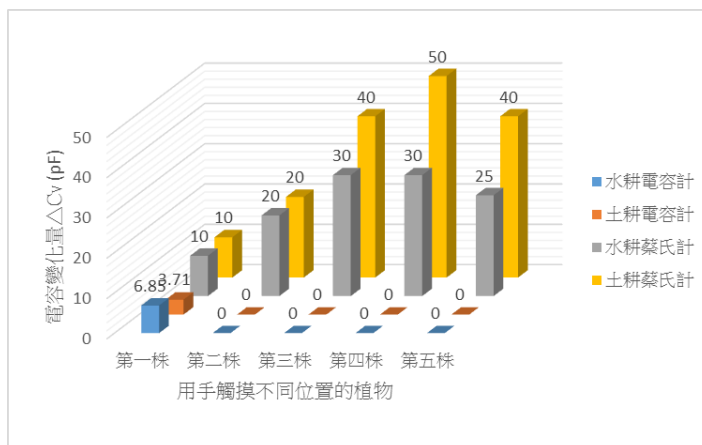


圖 3-4-5






【討論】

1. 透過與電容計的測量結果比較，證實本研究方法測到的電容變化量尺度的確是在 0~100pF 之間，電容也是一樣往電容變大的方向做變動。
2. 電容計透過發出特定頻率的訊號去偵測並計算待測物的電容值，在本研究中發現只能測到有接電極的第一株植物的變動訊號，並無法測到遠端植物被擾動時的訊號。但是，讓植物與棲地成為蔡氏電路整個系統的一部分時，當整體非現性動力系統處於奇異雙吸引子的混沌狀態時，可以利用混沌行為的特性，透過各個部位的植物或棲地，偵測到人體靠近或接觸時所產生的電容耦合效應。

(二) 測量用手觸摸遠端土耕的土壤，蔡氏電路可偵測之最遠距離。

紀錄用手觸摸土壤的不同位置時，蔡氏電路混沌電位相圖與平均電容變化量如表 3-4-4 所示，繪製觸摸距離與電容變化關係圖如圖 3-4-6，外插可得偵測的最遠距離約 0.7 公尺。

表 3-4-4

距離 (cm)	10	20	30	40	50
電位相圖					
電容變化	$\Delta C_v \doteq 115\text{pF}$	$\Delta C_v \doteq 100\text{pF}$	$\Delta C_v \doteq 85\text{pF}$	$\Delta C_v \doteq 60\text{ pF}$	$\Delta C_v \doteq 30\text{ pF}$

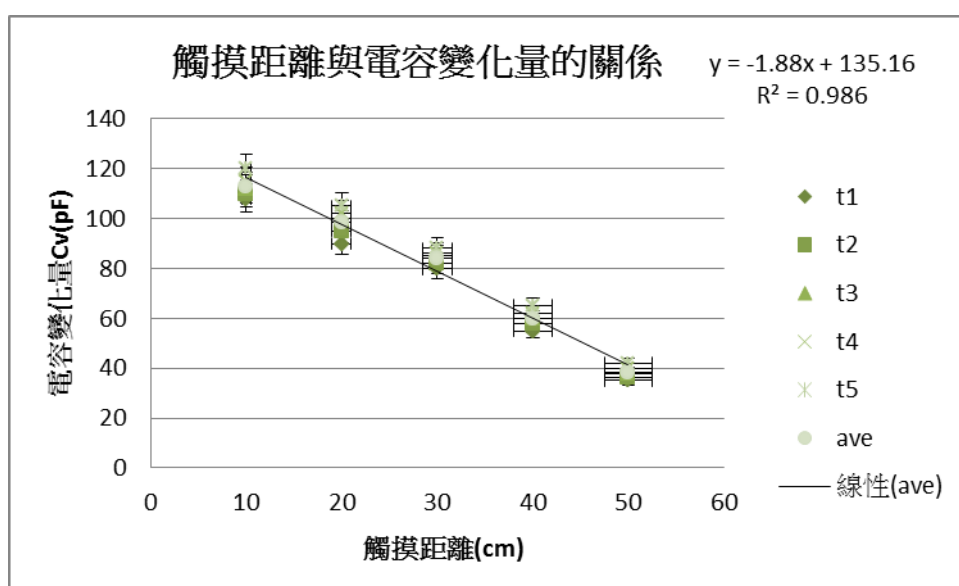


圖 3-4-6

肆、結論與應用

一、結論

(一)人體是一個電氣訊號源是已知的事情，如右圖 4-1 所示，利用本研究的蔡氏電路就可以偵測到人體的電訊號產生的微擾，但是本研究的待答問題是「植物可以覺知人體的電訊號嗎？」，透過本研究

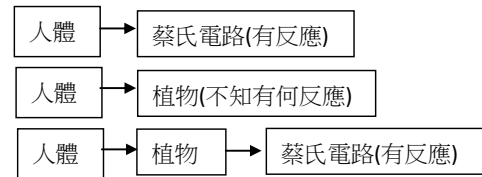


圖 4-1 研究邏輯示意圖

設計，我們證實人體的電氣訊號透過植物的感知也會改變混沌系統的相態，確認「微擾能夠產生相變」的研究假設。

(二)植物的確能感應外界的電容微擾，經查文獻與研究的結果顯示，本研究示波器上所顯示的電位相圖變化過程，與目前已廣泛利用的面板多點電容式觸控技術相同，其原理皆與「人體靜電(電容)耦合」有關。

(三)植物受到外界微擾時產生的訊號反應可以從「植物等效電容發生變化」的角度來解釋，並非如媒體所言測到人體的心跳頻率；不過，若是採用本研究提出的實驗設計，將測量人體心電訊號的電極接點與匹配的非線性電子電路的電源電容並聯，應該也是可以測出心跳頻率變化時的等效電容差異。

(四)黃金葛和萬年青竹這兩種觀賞用植物均會因人體的靠近或碰觸產生電容變化，變化的幅度與電極的接點、正負極的位置、碰觸的位置及碰觸的力道有關。

(五)透過模擬的過程可以觀察到「混沌行為」中較細微的相態變動模式；發現調大可變電阻或可變電容均可產生「混沌制抑」的現象，不同的可變電阻設定值會有相對應的可變電容變化範圍，可變電阻設定值愈大，「混沌制抑」的電容變化範圍愈小。

(六)本研究提出之「等效電容模擬比對法」可以找出並聯植物後的等效電容值與其受到微擾後的電容變動量，與實際電容計測到的尺度相符合，具有測量微訊號反應的應用價值。

(七)植物或棲地受到「人體靜電(電容)耦合」的微擾時，大部分出現「混沌制抑」的現象，系統的等效電容變動量約 0~100pF。目前可以偵測距離約 0.7~1 公尺左右。

(八)本研究證實植物變異與系統電位的存在，透過電容耦合的過程，造成體內離子的重新分佈來產生系統的電容變化，其路徑又以透過根部經棲地(如土壤)再傳至各部位最為明顯。

二、應用

不同於目前生物的機電研究都是傳送電流訊號給植物來了解植物因為環境因素和不同的健康狀況所產生的電位與電阻的反應，我們的方法是讓植物成為非線性電路系統的一份子，當植物因為生長環境的改變或外界的刺激時，在不需要經過任何訊號放大與後製的程序下，便能夠即時且直接地觀察到植物體與棲地的極微小改變(離子分佈與植物電位的同步改變)。

本研究建立的模擬比對程序與判準，經與傳統電容計的比較，電容變化的尺度完全吻合，甚至更為敏感精確，程序如下：**1.調整可變電阻**，對應混沌相圖的振幅大小。**2.將相圖切換成時間序列**，比較頻率變化情形。**3.經傅利葉轉換產生頻譜**，比對頻譜中各波峰的組合與分布情形。

未來在植物科學與其他領域的相關研究與應用，應該可以朝以下幾個方向發展：

(一)植物栽培的應用：延續本研究中水耕與土耕棲地的比較，可以進一步改變棲地(如水耕植物)的營養液濃度、電導度、酸鹼度、濕度與溫度等，觀察測量植物各部位的電容變化情形。可嘗試藉此即時探知植物電容變動類型反應與生長情況及水耕液間的關係，以作為快速調整培養液等因素之參考依據。

(二)逆境中植物的生長情形：逆境泛指環境因缺水、異常高低溫、蟲害等非一般狀況產生對植物生長的影響，未來可利用本方法觀察逆境中植物發芽期與生長期各部位的變化與反應。

(三)植物接受外界刺激的反應與訊息傳遞：透過各種氣味給予植物刺激，如能讓植物產生防禦作用的物質、生活中常見的廢氣、有機溶劑等等，利用本方法探知植物對外界刺激的反應類型及可能意義與解釋方式。例如：本研究針對含羞草的觸發運動進行量測，發現觸摸含羞草造成葉片閉合均呈現等效電容變大的現象。不同於傳統簡略的膨壓說法，我們認為於外界觸摸時含羞草枕葉細胞裡的帶電離子會移到表皮與組織細胞中，因此這些細胞電容變大的同時，枕葉細胞因滲透壓的關係啟動水分往外擴散的動作，因而造成枕葉細胞的萎縮，所以導致葉片逐漸閉合，據此便可以做出更為詳盡的解釋。

(四)跨領域的創新思維與應用

透過本研究的實驗証實，人體與植物之間的接觸是一種類似手機面板多點觸控的「電容耦合」原理，未來透過電容的耦合與微擾，可以進一步發展的應用領域有以下幾種方向：1.

生物物理與機電領域：植物物聯網的應用與植物神經學、腦科學、中醫經絡學等研究。**2.天文科學領域**：宇宙訊息與空間磁場的微小複雜變化之感知。**3.地球科學領域**：土壤地質潛勢與地殼微小變動之應力測量。

伍、參考文獻

中文部分

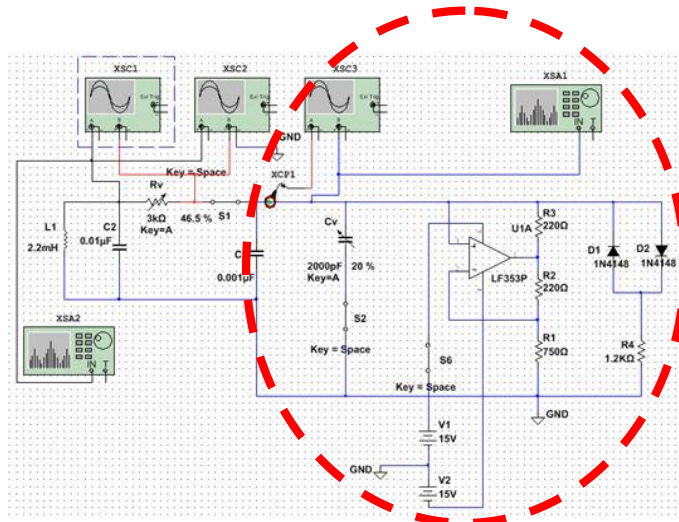
- 一、陳沿菴等(2013)。植物維管束的電模型建構。中華民國第 53 屆中小學科學展覽會。台灣科學教育館。台北市。
- 二、吳冠德等(2014)。植物阻抗量測應用於蝴蝶蘭病徵檢測之初探。農林學報 63(1)：65-73。
- 三、林建輝(2012)。非線性電子電路與固態雷射系統之混沌相位同步研究。國立中山大學物理學系研究所博士論文。高雄市。
- 四、陳義裕。淺談混沌。數學傳播。十八卷十期。
- 五、曾顯權等(2011)。觸控技術。科學發展。465 期。61-65 頁。
- 六、蕭蔚。德國對植物行為及溝通方式的探索。科技部。105 年 2 月 4 日取自
https://www.most.gov.tw/germany/ch/detail?article_uid=d184d73a-8590-4fd5-9f93-e4c8805a85e2&menu_id=9bebd1a9-1738-429c-8eee-4f2ba95329ba&content_type=P&view_mode=list
View

英文部分

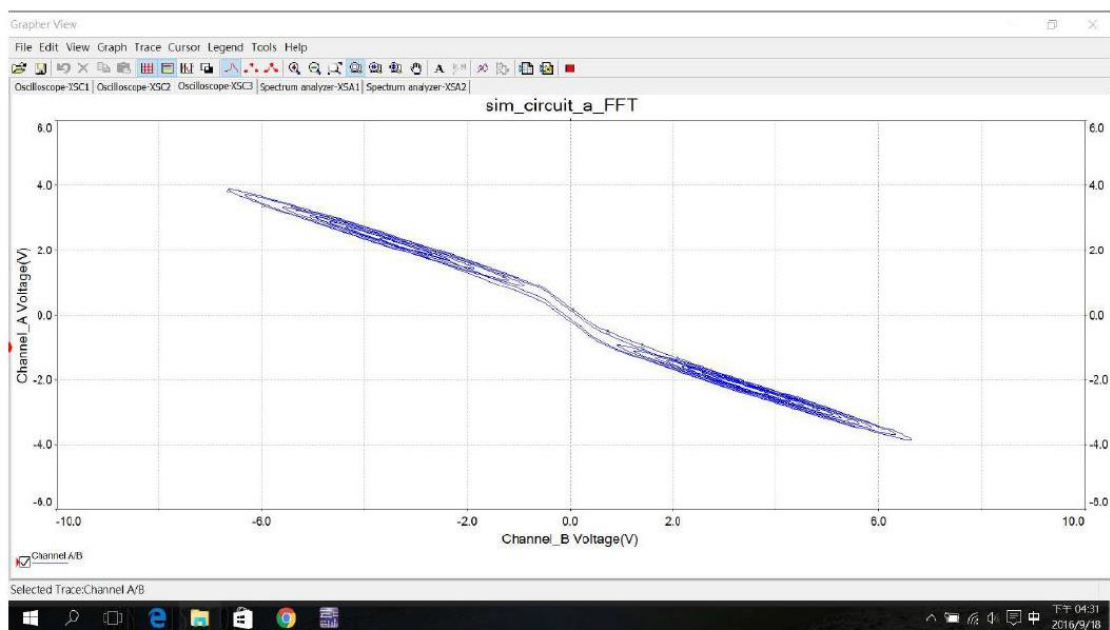
1. C. M. Lin, L. H. Chen, and T. M. Chen(2012), "The development and application of an electrical impedance spectroscopy measurement system for plant tissues," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 82.
2. Y. Yamamoto, H. Harada, K. Yasuhara, and T. Nakamura(1995), "Automatic sensing device of electrical characteristic of living tree," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 44, no. 3, pp. 729-732.
3. Ralf C. Dietrich, Anthony G. Bengough, Hamlyn G. Jones and Philip J. White(2012), "A new physical interpretation of plant root capacitance", *Journal of Experimental Botany*, Downloaded from <http://jxb.oxfordjournals.org/> by guest on January 18, 2016.

附錄一 非線性電阻 I-V 特性曲線

透過程式模擬如圖附-1，本研究使用 OP 型號為 LF353P 輸出之電源端負電阻訊號如圖附-2 所示。



圖附-1 模擬電路圖



圖附-2 非線性電阻 I-V 特性曲線

【評語】 060011

本實驗利用偵測植物電位的微細變化，來探討人體觸摸所造成的影響。本實驗欲探討問題：職務是否有感知的能力，十分吸引人。所得的結果也發現，人體觸摸會造成電容的變化，且不同植物可能透過根系傳遞感知的訊息。雖然實驗結果十分明顯，但由於是偵測極端微細的變化，均須要做非常精確的控制，例如是否此變化真的是非線性？電擊放置的位置？以及確認是否真的為人體觸碰造成改變。本實驗十分有趣，建議繼續進行相關實驗。