生理感測器在溫室環境控制上之利用

◎農試所農工組 姚銘輝 梁連勝

一、前言

對溫室作物栽培環境的自動化控制一直是非常重要的課題，國內對這方面的研究甚多，許多研究成果也都能商品化，解決業者或農民在實際栽培上的問題，而感測器及控制系統在機電工程及電腦不斷發展的結果下，更能精準控制栽培環境，但仍有一些問題尚待解決。本文除介紹溫室環境控制相關研究的進展外，也針對溫室栽培有待解決的問題，特別是如何偵測作物本身生理狀態及相關感測器的開發進行探討，同時著重於感測器之實用性及經濟效益評估。

二、溫室環境控制進展

溫室環境控制大致可分爲三部份，分別爲感測器、自動控制系統及控制設備等。感測器（特別指氣象感測器）：包括溫度計、濕度計、光度計、風速計及二氧化碳感測器等，這些商品化的感測器有不同適用範圍及規格，在溫室環控設計時只需針對精確度需求及成本效益作評估，即有合適的感測器供利用。感測器的訊號輸出已標準化，0-1V及4-20 mA是常見的規格，可接於資料搜集器（datalogger），電腦介面或可程式邏輯控制器（programmable logic control；PLC）等控制系統。

自動控制系統：感測器的訊號接收、處理、判斷及控制指令的發出，都需要有一套控制系統來完成，目前利用人工智慧（例如類神經網路觀念）可由系統本身透過自我學習（self-learning）作調整，對於控制指令可利用模糊（Fuzzy）理論來針對不確定訊號作判斷，以得到合理的控制效果。

控制設備：控制系統將指令透過繼電器（relay）或由PLC驅動控制設備，例如空調設備、水牆、噴霧系統、遮光網及灑水噴頭等，這部份皆有商品化產品供選擇利用。由於大部分溫室設備皆已商品化，對溫室設計及使用者而言，較會著重於設備成本和作物產值的關係，栽種何種產值的作物需用何種等級的設備才能有利潤。但就環境控制過程中仍有難以偵測或控制的部份，其中最主要在於作物本身生長狀態的偵測，過去一種新興作物移入溫室內栽培，會依據產地氣侯條件或是實驗室測定資料而訂定初始條件，在移入溫室後再做觀察以修正設定條件，當條件設定完成後，如何維持生長過程中最佳狀態，則必須透過各種感測器加以監測。感測器一般

作　　者：姚副研究員銘輝
連絡電話：04-23302301轉709

泛指對環境氣象的感測，當然這些感測器可以描述溫室內環境狀態，但環境條件和生長狀態間仍存在許多難以量化的變數，因此，較直接方法是量測植體本身生理反應，再配合氣象觀測數據，以改善生長環境是較符合作物生長控制的作法，而這其中以作物生理感測器的開發利用最爲迫切。

作物在不同栽培環境（包括組織瓶苗、溫室或田間）維持最佳生長狀態是栽培者所關切的，但環境的不穩定性常造成作物生長逆境（stress），如何偵測逆境進而研擬改進措施是作物生理感測器設計所需考慮的。對於作物逆境的偵測有許多方法，包括對作物生長環境或是由植體本身生理反應的偵測，在強調自動化及精準管理的設計前題下，強調非破壞性、直接且快速的遙測方式是未來發展的趨勢，同時該作物感測器在溫室自動化的運用也需能長期紀錄及與周邊控制系統相連結的便利性。目前利用植物葉片對於太陽光的反射特性，包括熱影像(thermography)，反射光譜(reflectance spectrum)及螢光影像(fluorescence image)皆是值得開發的新興生物感測器，同時這些感測器可由顯微鏡的視野到載具的遙測皆可適用，對於植物生長逆境可作早期預警，並且避免非可逆性傷害的發生。以下就簡單介紹上述三種影像系統的運用範圍及限制。

1.熱影像系統：

熱影像是由偵測近紅外光輻射(長波近紅外光8-14 μm)，利用輻射原理經電腦軟體轉換爲不同色階影像，色階所代表爲該區域的溫度。熱影像系統所拍攝的植物溫度梯度影像和蒸散冷卻有關，由葉片蒸散能力的改變可反應不同特殊的逆境，同時也表示局部葉片的含水量。

植物葉片的水分蒸散可由氣孔導度計(porometer)偵測，但此種方式僅是點的資料，無法顯示整個葉片或是整個植被(canopy)的差異。熱影像則可解決氣孔導度計不足之處，同時基於偵測快速及量測區域大的優點，可利用在水分利用效率的育種選拔上。而在一些森林苗木的研究中，熱影像可測定移植前苗體活力，以此種非接觸性方式評估苗體的良窳。此外，利用氣孔關閉使葉片溫度上昇的原理作爲偵測的工具，利用這種方式也可用於病蟲害、空氣污染及環境逆境(例如高溫、低溫及乾旱等)上。

2.反射光譜：

當太陽光之光子撞擊到葉片表面，有些波長會被吸收，有些則反射回天空。吸收的主要是行光合作用的波段(400-700 nm)，反射的以近紅外光(700-1100 nm)爲主。基本上，太陽光照射至地面的光譜中，可見光及近紅外光除晨昏外，大致是恆定。利用地面植被吸收可見光的比率，可作爲評估植被分布或是植株生長情形的指標。

3.葉綠素螢光：

當植物遭遇逆境時，不論經由代謝過程、水分平衡或直接對葉片表層結構的破壞，會使葉綠體對照射在葉表面的輻射能有不同反應機制。在低光狀態下，光量子產量高時，葉片所接受光能97%用於光反應，2.5% 以熱釋放，0.5% 以螢光釋放。當逆境發生時，光能用於光反應的比例減少，而以熱或螢光釋放的比例相對增高，這在高溫、寒害、高光、植體營養不良或

污染所引起的傷害皆有相同現象。葉片所吸收或釋放的能量中，光反應或熱能釋放偵測較困難，而螢光釋放量具有專一性且偵測容易，利用此特性可得到作物逆境的受害指標。

過去葉綠素螢光是以手持式夾取葉片方式測定，測定需人工操作，同時測定範圍僅限於極小區域，這種方式不適合遙測及即時監測的需求。近年來，高光度的紫外光雷射誘發螢光(Laser-induced fluorescence；LIF)影像系統正逐漸發展，所選擇波譜區域以藍、綠、紅及遠紅外光爲主，其中以藍－紅；藍－遠紅外光兩種組合對於環境改變和逆境偵測最爲敏感。在螢光影像中，葉片之葉脈及側脈主要爲綠或藍色螢光波段，非葉脈部份則以紅光及遠紅光爲主，在影像分析系統中可將每一像元(pixels)加以運算，而所能照射區域由幾個像元到果樹整個植株（面積約爲3×5 m^2）皆可，同時偵測距離可由20公分到40公尺，此種特性可用於溫室或田間的偵測定量不同波段的螢光量。

上述三種偵測方式大致符合遙測、快速偵測等特徵，但仍有一些限制，熱影像大致是針對水分蒸散部份，對於植體營養診斷則無法偵測；反射光譜可偵測到葉片行光合作用能力下降，但無法辨識是何種逆境，所以必須配合植體的逆境生理特性，找尋特定波長的反應，建立不同逆境的波譜反應；螢光的優點是所偵測目標光源是植體所自發的，避免其他溫室內器材及地表的干擾，但葉片所釋放的螢光極爲微弱，必須配合其他訊號處理及增強的儀器共同利用。

三、生長感測器之開發

我國農業在加入WTO後面臨嚴峻考驗，加強具有競爭性農產品生產及技術的開發是農業永續生存唯一的路，其中農業生產走向自動化及環境控制精準化是生產具有競爭性農產品重要一環。

溫室建置感測器雖可增加自動化程度，但設施成本更應加以考慮，以目前手持式熱影像儀或光譜分析儀的價格大約介於70-100萬元間，螢光偵測儀較便宜，但大約也在30萬元左右，所以利用此種手持式儀器並不符合大多數溫室生產農作物之成本效益，而如何將偵測農作物群落熱影像、反射光譜及螢光等觀念帶入生長感測器的開發及溫室栽培的體系內是值得思考的方向，尤其是簡化量測項目以降低成本方面。就上述三種量測過程中有些參數對於界定逆境種類及受害程度並無助益，舉例來說，葉綠素螢光測定由實測或估算的參數種類高達二十幾種，但實際對於某種逆境敏感的參數可能僅有一、二種而已，因此溫室內逆境（如夏季之高溫）僅選擇具有特徵性的參數即可，其餘參數所需的配備則可省略，如此可降低感測器（或系統）開發時的成本。當然，特徵參數必須實測及分析才能取得，這必需藉助於手持式儀器的量測。

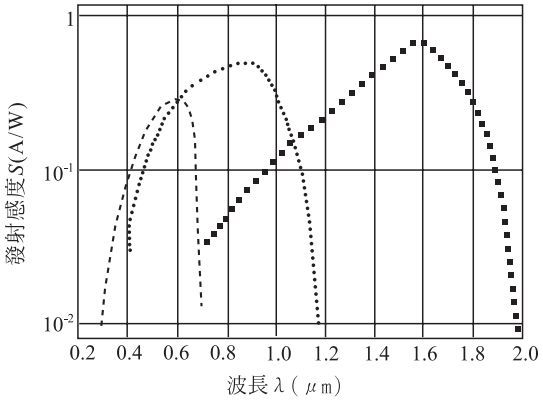
接下來是如何利用電子材料或感測元件組成完整的監測系統。目前感測元件商品化的樣式極多，尤其是光學相關的元件。元件主要是利用金屬半導體的特性加以開發，在化學元素週期表中矽(silicon)及鍺(germanium)的電阻介於絕緣體與導體之間，一般將此類金屬稱爲半導體，將半導體摻雜其他類金屬，因爲金屬間電子數的

不同，會形成帶負電荷之n型半導體(negative之n)及帶正電荷之p型半導體(positive之p)，利用不同p-n型形成光電二極體(photodiode)，是一種價格低廉的元件，依據功能可分爲發光元件（例如發光二極體LED，詳見技術服務36:9-12）及受光元件。受光元件在照光後，無外部電源供應也會有電流的產生，且入射光量與輸出電流的線性良好；同時受光元件的受光範圍受p-n結合構造影響，一般使用範圍爲400-1100nm之波長內，其中矽光二極體以700-900nm之間的靈敏度最高；鍺光二極體以紅外線爲主，感度以1400-1800nm之間較高；含鎵砷磷金屬材料之二極體最佳感度在400-700nm之間，也就是在可視光及紅外光波段皆合適的二極體供使用(圖一)，因此針對一些具有指標性的反射光譜或螢光的波段，利用特定波長範圍之濾片裝置在適合的二極體受光元件上，或是將受光元件所接受訊號進行編碼，選取特定波長之光亮度(可節省濾片購置的費用)，再將所吸收特定波長的訊號，經由訊號處理後，驅動控制設備（如灑水或施肥系統），控制流程可如(圖二)所示，如此才能達到自動控制之目的。

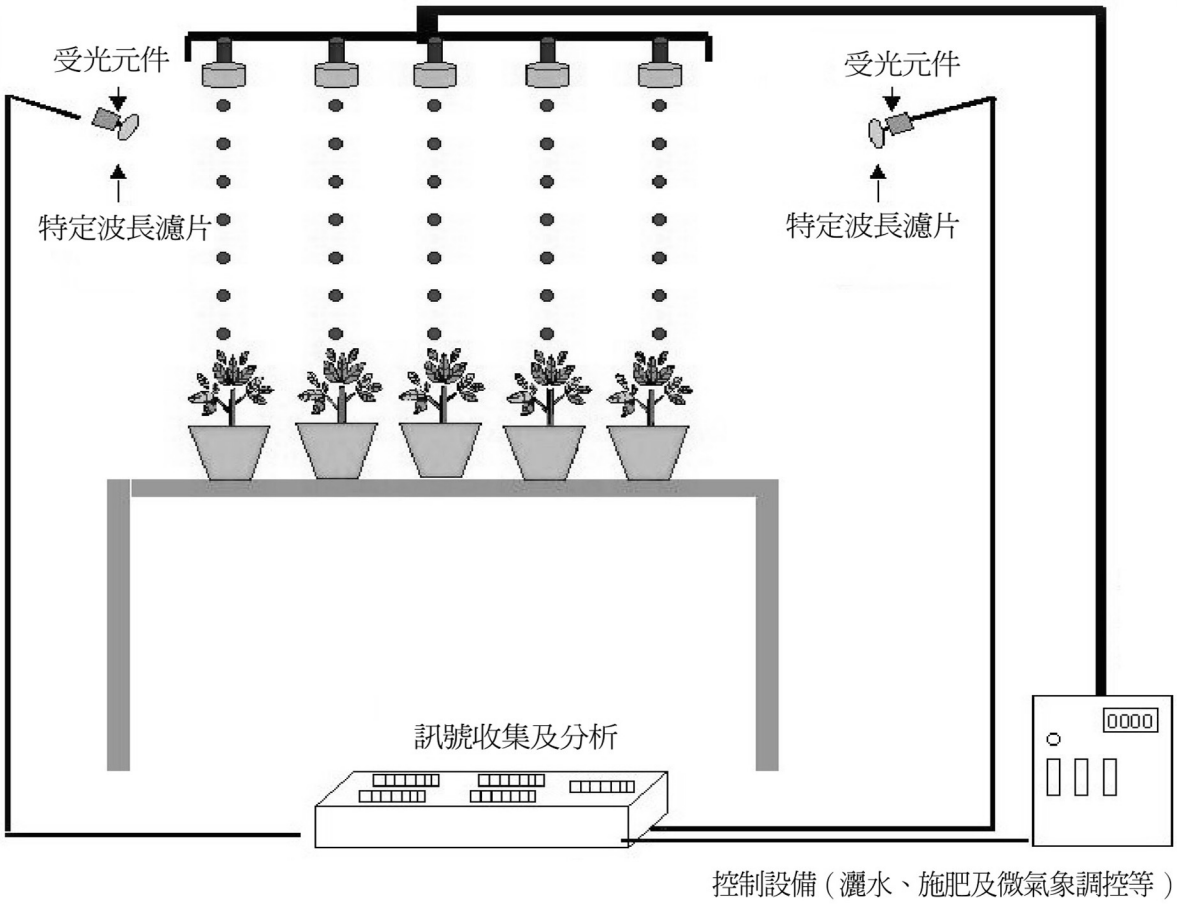
自動控制系統中如何將感測元件所偵測到的訊號加以處理及控制指令的發出也是整個控制系統開發重要的一環。目前有多種方式可供選擇，在精密溫室內大多配備電腦，利用訊號接收或控制介面即可達到需求，但在一般商業性利用可程式控制器或氣象資料收集器較符合成本效益，可程式控制器價格較低廉，一組約2萬5千元，但須有程式撰寫及迴路設計的經驗；氣象資料收集器操作簡便，但有些廠牌的收集器並無控制埠（control port），價格約在3-10萬元間，上述儀器皆具有顯示及多頻道功能，對於單點控制會形成資源浪費，另一種可思考方向爲開發控制晶片，利用IC晶體將感測元件訊號-處理-控制作流程整合，同時若能量產則價格可大幅下降，國內良好IC代工設計及生產的電子產業，如何將這些資源運用在增加農業競爭力上，是值得思考及嘗試的路。

四、結語

溫室作物以實際生理狀態的偵測較由氣象環境或作物模式等方式直接且精確，每種作物逆境發生時，受害訊號會反映在葉片的光學特性上，反射光譜集中在特定的波長，葉綠素螢光則反應在釋放量及時間。當然特性波長的取捨必須經由實測資料加以分析，取得特定波長後，由固定波長濾片經受光元件紀錄反射光量或螢光量，再由訊號分析及處理而得到控制指令，驅動環控設備，此過程仍需配合氣象感測器的訊號加以分析，同時也需要生理



圖一、不同受光元件材料之分光感度特性
--- 鎵砷磷(GaAsP) ..... 矽(Si) ▬ 鍺(Ge)



圖二、生理感測器偵測流程圖

試驗的數據加以佐證，才能達到精確控制的目標。事實上，不同溫室作物遭受逆境及其生理反應間並不一致，由於葉片、群落及植株間結構及化學組成份的差異，致使對逆境敏感度不同。因此，生理感測器開發時必須加入所欲量測作物的生理特性，是和氣象感測器不同之處，同時也是最爲困難的部分，當然有些參數在作物間會有較一致的反應，例如NDVI值和氮素含量的相關性，但大部分逆境目前尚未有一致定論，仍需個別作物及逆境種類作生理試驗分析才能有結論。

五、參考文獻

Chaerle, L and D. Van Der Straeten。2000。Trends Plant Sci. 2000:495-501.

Jones, H.G.。1999。Plant Cell Environ. 22:1043-1055.

Lichtenthaler, H.K and J.A. Miehe。1997。Trends Plant Sci. 8:316-320.

Saito, Y., R. Saito, T.D. Kawahara, A. Nomura and S. Takeda。2000。For. Ecol. Manage. 128:129-137.