

## 第八章 設施栽培之新技術

### 8.1 植物體感測在自動灌溉管理的應用

灌溉管理是作物生產過程中很重要的一環。灌溉水不僅滋潤了植物體，作為養分與藥劑的介質，亦可提供額外的冷卻。精確的控制給水可以節約資源的使用並獲得最佳的產品品質。過度灌溉不但浪費水資源，更因需要使用馬達而浪費電，同時由於容易造成過濕也因而增加病蟲害防治的需求。

灌溉管理在整合式病蟲害防治(integrated pest management)策略中也是很重要的一環，透過控制根系與葉冠面的水分含量，可降低黴菌孢子的活動力與萌發率。譬如，減短根系飽和含水時間可有效降低根腐病，保持葉冠面的乾燥可抑制真菌類繁衍造成的疾病，譬如粉霉病(Powdery Mildew)與軟腐病(Botrytis)等兩種溫室中最常見的疾病。澆水時造成的水滴四濺是造成病菌蔓延的主因，減少灌溉次數可有助於防止病菌蔓延。

在溫室管理中經常在水中加入營養元素，結合灌溉與施肥作業以節約作業成本。在英文中以 Fertigation 稱之，係結合 fertilization 與 irrigation 兩個單字組成。過度的施肥與灌溉均會造成栽培上與環保上的問題。在根系或介質中的鹽分累積可能造成對根系的傷害，對長期栽培的作物而言，此種問題特別需要注意。一般多採大量灌溉來沖刷多餘的鹽分，但這需要額外的工人與浪費水資源，沖刷下來的飽含營養鹽的廢水在環保法規較嚴的已開發國家中無法隨意排放。法規要求溫室業者做到零排放的呼聲是促成研發更精準的肥培灌溉管理的動力。有效率的肥培灌溉管理不僅可大幅降低對環境的衝擊，亦可降低作物的生產成本。

水分管理亦可用來作為改善農產品品質、提高收益的重要工具。在輕微乾旱的季節之後市場上通常會有受到消費者喜歡的較甜的西瓜、較辣的辣椒、口味更佳的水果就是明證。較佳品質產品的生產主要是因為有輕微的水逆境造成較高量的二次代謝物的產生。有不少研究證實環境因子中土壤內水分與營養的逆境對作物體內二次代謝物(植物化學)的產生有很大的影響 (Gershenzon 1984; Waterman and Mole 1989)。譬如，水分與營養的逆境影響許多藥草作物(herbs)精油產量與組成成份 (Clark and Menary 1980; Diatloff 1990; Rhizopoulou and Diamantoglou 1991; Rajeswara et al., 1996)。一般而言，生長較慢或者在逆境下生長的作物多能生產較高濃度的二次代謝物 (Herms and Mattson 1992; Herms 1999)。對於在控制環境下生長的作物而言，將水分管理策略納入日常管理不僅至少可提高管理效率也可提高作物品質。

消費者喜歡結實、枝葉開展的植株，而不喜歡瘦長纖弱狀的植株。透過水分管理也能作到植株高度的調整而不需使用化學藥品。有經驗的農友可目測植物體的涵水狀態，較淺的土壤表面顏色、晦暗的葉片顏色或輕微萎凋的葉冠等都可作為判斷是否需要灌溉的指標。此時提供少量的水以防止植物脫水，但不足以讓細胞持續生長。此方法在學理上有其依據，但純粹採人工作業方式則不太容易落實執行，因為首先需要有經驗充足的農友，其次頗為耗工，需要灌溉頻度會提高。最好是能建立完整的灌溉策略，透過自動化設備來決定灌溉的時機與所需的水量。

### 1) 溫室灌溉管理自動化

傳統的灌溉時機與灌溉水量的決定取決於農友的經驗，農友則多半依據介質的田間容水量作判斷。以下篇幅主要介紹為降低生產成本或與提高作物品質，目前市面上已商品化或正在研發的的自動化精準給水管理相關設備與方法。

#### (1) 灌溉量的決定

要回答需要灌溉多少水，不外乎就是要知道植物體與介質等由於蒸散作用 (Evapotranspiration, ET) 損失了多少水，在下次灌溉時便應加以補充。蒸散包括了由自由水面如地面與介質表面等蒸發 (Evaporation) 與由植物體散發 (Transpiration) 的水分，其英文單字也是兩個英文單字的總稱。多年來學界建立了多個蒸散模式以評估所需的灌溉量：Penman (1948) 使用熱力學與空氣動力學基礎原理建立蒸騰模式，他認為由植物體蒸散的水分量可以透過植物體吸收的能量與水分蒸散是所散失能量的平衡關係中求得。模式中使用一個泛用的與風量相關的函數來評估水蒸氣離開葉面的阻力大小。Monteith (1973) 所建的 Penman-Monteith 模式在估算蒸散量時增加了植物體內在阻力與環境外在阻力的考量。Stanghellini (1987) 修正 Penman-Monteith 模式，增加了針對溫室栽培作物所特殊考量的因子譬如葉面積指標 (leaf area index) 與低風速狀況 輻射加熱與溫室結構等。Prenger 等 (2001) 則詳細討論了四種不同的蒸散模式。Penman-Montieth 模式中主要用來計算蒸散量的計算式簡列如下：

$$ET = \frac{2LAI \cdot \rho \cdot c_p \cdot VPD_a + d \cdot Q_{rad}}{d + g \left( 1 + \frac{r_i}{r_e} \right)} \frac{1}{l} \quad (1)$$

其中，

ET - 蒸散量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ )

LAI - 葉面積指標

$\rho$  - 空氣密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$c_p$  - 空氣比熱 ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$VPD_a$  - 空氣的蒸氣壓差 (Pa)

$\delta$  - 濕氣圖中飽和蒸氣壓曲線的斜率 ( $\text{Pa} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$Q_{rad}$  - 輻射量 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )

$\gamma$  - 濕氣常數 ( $\text{Pa} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$r_i$  - 水蒸氣由植物體內往外傳輸的內部阻力(如氣孔、葉肉等) ( $\text{sec} \cdot \text{m}^{-1}$ )

$r_e$  - 水蒸氣由植物體內往外傳輸的外部阻力 ( $\text{sec} \cdot \text{m}^{-1}$ )

- 蒸發潛熱 ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

式 1 中大多數的變數屬於溼氣熱力特性的範疇，可以透過濕氣計算公式求出，但是  $r_i$  與  $r_e$  的比例則與作物種類極為相關，一般較難量測 (Hattendorf et al., 1990; Jalali-Farahani et al., 1994)。常見的求法是用已知某環境狀態下的蒸散速率值去反求  $r_i/r_e$  的值。所求得的值被當作常數，代回式 1 去求出其他環境狀態下的蒸散速率。精確的散速率值有助於精準灌溉中所需的灌溉水量的決定。

## (2)灌溉時機的決定

### 1 間接量測植物的需水量

溫室內的灌溉管理運用感測技術，許多感測器可用來偵測土壤中含水狀態以了解供應面，偵測空氣的蒸氣壓差以了解植物體的可能失水程度(需求面)，甚至直接量測植物體在缺水或補水過程中的反應。照片 8-1 所示為灌溉決策可依據空氣狀態求得的需求面資訊，根系狀態中的供應面資訊或供需之間的平衡或失衡資訊，作進一步的判斷。有時儘管土壤的含水量低，但因為失去的少，所以仍無灌溉的需求。此種精準的灌溉控制需同時了解供需兩方面的資訊。

如前述有關蒸散量的計算也可用來評估灌溉時機，當損失的水量相當於前次灌溉的水量時就是該灌溉的時候。此損失的水量包括蒸發與發散，可透過了解輻射能量的大小與蒸氣壓差的數據求得。基本上，蒸散模式求出的是如照片 8-1 所示需求面的資訊。

如照片 8-1 所示供應面的資訊可透過土壤含水量的感測器來求得，當根系水分不足時即觸發灌溉的動作。此類水分感測裝置包括石膏塊(gypsum block)、中子管(neutron probe) 時域反射式(time domain reflectometry based)等大多為研究單位使用的感測器與已廣為溫室業者使用的張力計(tensiometer)。張力計主要量測栽培介質中的水分張力來了解介質中的含水量。高的張力值代表植物必須更辛苦的作工才能取得水分。市售張力計的使用一般必須用在直徑 10 公分(2.5 吋)以上的容器，在插入張力計時必須一次插到定位以確保感測頭與介質有緊密的接觸，插入不當可能在感測頭與介質間產生空隙，將影響感測數據的正確性。照片 8-2 所示為兩型市售張力計，栽培介質的張力值可由錶頭的指針讀出，有些設備具有數位輸出訊號，可直接連至繼電器或電腦控制供水泵的開閉。基本上，張力計求出的是如照片 8-1 所示供應面的資訊。

要了解栽培介質的含水情形，張力計是一種很好的工具，但問題是這仍然只是片面的資訊。相同的張力值代表介質含水狀態相同，但此時植物體是否處於缺水逆境則仍未能確定。較完整的灌溉決策是需要同時分析供應面與需求面，當需求大於供應時才進行給水動作。更直接的做法是直接量測植物體的反應。

### 2 直接量測植物體的反應

直接依據植物體的含水狀態進行灌溉決策近來頗受重視，溫室工程領域中儀器與感測相關研究人員研發多種直接量測植物體的方法，所謂的“會說話的植物(speaking plant)”的理念即植基於此。譬如使用多種換能器(transducers)來量測葉片內的水分潛勢(使用 porometer)，莖/果實的膨脹與縮小(使用 dendrometer) 與木液的流動情況(使用 sap flow 感測器)。這些方法均需要與植物有實體的接觸，雖然理論架構都很完整，但在量產規模的商業化作物生產下頗難落實推動。所以，研發非接觸式，能將植物體遭受缺水逆境的生理訊號予以量化的感測方法就顯得特別需要，包括使用數位影像、紅外線光譜與多光譜方式。數位影像用在將葉片因為缺水造成大幅的位置偏移予以量化，由於蒸散作用造成葉冠面溫度降低與由於缺水使得植物膨壓降低造成近紅外與中紅外光譜特徵的變化都是研究的方向。

a.葉片的擺動 影像處理的技術已被用來研究植物體由於缺水時葉片的擺動模式。植物總被誤認為是固定不動的，實際上葉片的擺動模式是頗複雜的。凋萎就是一種葉片的擺動，研究顯示可由植物體含水狀態與單獨各個葉片的擺動模式直接相關。

Oosterhuis 等 (1985) 研究大豆植株小葉片的擺動, Seginer 等 (1992) 追蹤番茄葉尖的運動軌跡與缺水狀態的關係。Revillon 等 (1998) 則探討觀賞植物葉片展開角度的變化。很明顯的, 各個葉片的位置變化展現了植物體的某些生理狀態。

有些研究則針對整體的葉冠面進行探討, 如 Kacira 等 (2002a) 觀察鳳仙花葉冠面來偵測缺水逆境。透過影像擷取各不同時間的葉冠面的上視投影面積 (TPCA), 予以分析後得知整個葉冠面葉片的擺動狀態。此研究不涉及單一葉片的擺動變化, 而是應用整個葉冠面 (植物群的最上層) 的資訊來及早偵測缺水逆境。老葉通常會先凋萎受到 (Nyakwende et al., 1997), 完全長成的葉片在遭遇缺水逆境時, 其葉片的擺動可針對缺水狀態提供較精確的指標意義 (Nyakwende 等, 1997; Seginer 等, 1992)。

Kacira 等 (2002a) 定義植物體的瞬間偏移比例以該瞬間 TPCA 值與日平均 TPCA 值的差除以日平均 TPCA 值, 如式 2 所示:

$$Biotic\ Movement = \frac{TPCA_i - TPCA_{ave}}{TPCA_{ave}} \times 100 \quad (2)$$

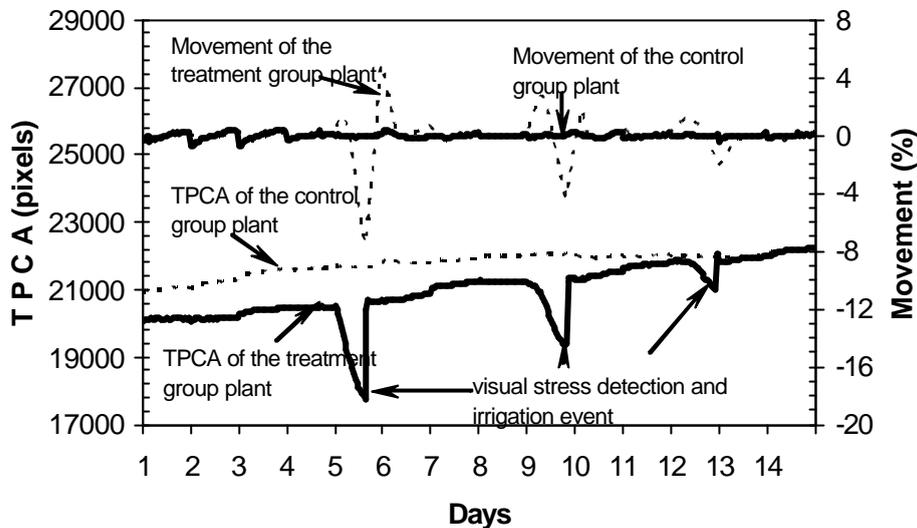
其中  $TPCA_i$  是在時間  $i$  時作物葉冠面的上視投影面積,  $TPCA_{ave}$  則是量測 TPCA 的日平均值。

某一時段內植物葉冠活動範圍則由 TPCA 值的變異係數 (coefficient of variation) 來定義 ( $COV_{TPCA}$ )。作者選定 5 小時範圍做為代表,  $COV_{TPCA}$  計算方式如下:

$$COV_{TPCA} = \frac{s_{TPCA}}{m_{TPCA}} \times 100 \quad (3)$$

其中  $s_{TPCA}$  與  $m_{TPCA}$  分別為給定的 5 小時範圍內 TPCA 值的標準差與平均值。

研究發現在針對完全沒有缺水逆境的作物而言, 公式 2 所求出的數據只有  $\pm 1\%$  的誤差, 如圖 8-1 最上方的實線 (控制組曲線) 所示。圖 8-1 中上下各兩條曲線分別為右側與左側 Y 軸的數據, 上兩條曲線為控制組 (實線) 與處理組 (虛線) 葉冠面葉片的偏移比例 (Movement, %), 下兩條曲線為控制組 (虛線) 與處理組 (實線) 葉冠面的 TPCA 值 (以像素值為單位)。作物不論是否處於缺水逆境, 這種稱為日偏移 (*diurnal movement*) 的現象每日都會固定發生在葉片上。此種每日的葉片位置偏移變化可以由如圖 8-1 中標示 A 點的位置開始觀察, 在光期開始時, 葉片為直立狀態, 然後葉片逐漸向下展開, 使得上視的投影面積增加, 所以造成 TPCA 值的增加。完全沒有缺水逆境的作物在一開始給光時其偏移比例為負值 (葉片位置比平均狀態更為直立), 在給光期間逐漸增加, 給光停止後又回至給光前的初始位置 (圖 8-1 中字母 "A" 處) 的原因。此種稱為葉片由直立至下垂展開再回到直立的每日固定的擺動方式是典型的葉片運動。



? 8-1 ? ? 徑咖壤? 徑? ? ? 標? 旭? ? 標? 帙? 咖? ? 浣? ? ? ? ? ? ?  
? ? ? ? ? 投? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? 械? ? ? 標?  
啞俵? ? ? ? 函力? ?

b.葉溫 葉冠面的溫度是另一個可做為判斷植物體是否缺水的指標(Wiegand and Namken, 1966)。葉冠面溫度會隨著葉冠面能量平衡關係而變動，此能量平衡包括太陽輻射能熱量的傳入與水分的蒸散等因素。水分蒸散取決於氣孔內與空氣的蒸氣壓差，蒸散所需的蒸發潛熱造成植物體的降溫。葉冠面溫度低於氣溫顯示有良好的蒸散作用進行，反之則代表植物體在水的供應面上趕不上需求面的需要，於是葉冠面溫度上升(Gates, 1964)。葉冠面與空氣的溫差也可代表植物體根系中可用的水量，研究顯示當可用水比例低於 20%時，此溫差會急速變大 (Ehrler et al., 1978a; 1978b)。所以，葉冠面與空氣的溫差可用來做為代表介質、植物體與空氣之間水分消長的指標。

葉冠面溫度的量測可透過接觸或非接觸方式進行，使用細小的熱偶線插入植物葉脈或貼在葉面上，在商業化作物生產的溫室中頗難落實執行，一般使用非接觸的紅外線感溫器。學術界也使用精準的紅外線熱電偶 (IRTC)來量測葉冠面溫度(Kacira 等, 2002b)。此種感測器可安裝於單或雙軌懸臂自走式灌溉裝置上，應用於大面積栽培。

葉冠面與空氣的溫差值不僅與系統中水分含量有關，更與空氣狀態相關，Idso (1982)定義了作物水逆境指標(crop water stress index, CWSI)來據以判斷需要灌溉的時機 (Idso et al., 1981; Gardner et al., 1992; Jackson et al., 1981)，早期應用於農藝作物與田間栽培環境，後續證實此理念可同樣應用於控制環境下的作物栽培(Kacira 等, 2002b; Chen 與 Ling, 2001)。

CWSI 值為 0 代表無缺水逆境，值為 1 代表極度缺水。在一般的灌溉策略中，設定 CWSI 為 0 可確保不缺水，但一些較特殊的給水管理策略中可能需要設定 CWSI 為某一值來控制株高或加強某種二次代謝物的生長。採用回饋控制系統可依據某一預設的 CWSI 閾值來驅動灌溉作業的進行。

c.近紅外線與中紅外線光譜特徵 葉片上的光譜特徵可用來偵測其含水量，照片

8-3 所示為不同含水率(93.8% 至 67.0%)的萵苣葉片針對 400-2500 nm 光譜範圍的反射率。一般而言，在量測的光譜範圍內，含水率愈高，反射率愈低。將照片 8-3 中數據分可見光、近紅外線與中紅外線等波段做進一步觀察可發現愈長波長愈適於分辨不同含水率。有經驗的農友可觀察葉冠面顏色來得知植物是否處於水逆境，此現象主要與葉綠體因乾旱而失能(chlorophyll degradation)，造成數量減少有關，可經由前述可見光範圍(400-750 nm)的反射率差異來偵測。近紅外線(NIR)與中紅外線(MIR)用於分辨植物葉片含水量有高度的發展潛力，其偵測原理主要在於所量測的反射率會受到細胞結構與葉片內水分含量的影響。

有不少研究討論應用近紅外線 (NIR)與中紅外線(MIR) 反射率來偵測植物體的含水率(Hunt et al., 1987; Hunt and Rock, 1989; Miemann et al., 2002; Ceccato et al., 2001, Tian et al., 2001), 多種使用多重波段的指標譬如 LWCI (Hunt 等, 1987), MIR/NIR 比例 (Hunt, 1991)與 NDWI (Gao, 1996)等，被用來探討植物葉片的反射率與植物體生理狀態的關係，並進一步用來決定植物體的含水率。此些做法的限制在於每次使用都需要有事先的校正，在使用上頗不方便。由植物葉片與葉冠面水分含量的估計來求出植物體含水狀況的模式化研究則頗具發展潛力。

另一種使用光譜資訊的做法是建立生物物理模式(biophysical models)並應用葉片與葉冠面的反射率變化來估算植物體含水率變化。要偵測植物體的缺水逆境，研究發現葉綠體含量，葉冠面結構與葉片內水分含量等都發現分別與可見光(VIS)、近與中紅外線(NIR 與 MIR)與紅外線(IR)範圍的反射率相關。

使用多光譜量測植物的研究多見於遠距遙測領域，學界應用量測所得的反射率資訊可成功預估葉片內的水分含量，建立葉片光譜特徵模式(PROSPECT) (Jacquemoud and Baret, 1990; Aldakheel and Danson, 1997)。Ceccato 等(2001) 反過來應用 PROSPECT 模式來偵測葉片內的水分含量。Gao 與 Goetz (1995)則在葉冠面量測整體的反射率以求出平衡水體厚度(Equilibrium water thickness, EWT)。Jacquemoud (1993) 與 Jacquemoud 等 (1995) 結合葉片反射率模式 PROSPECT 與葉冠面反射率模式 SAIL，並證實此二模式的相通性。透過此二模式的整合，植物體的生物物理特徵，如葉冠面內葉片的平衡水體厚度(EWT)可透過可見光範圍內的反射率光譜資訊來求得。

EWT 通常用於遠距遙測領域，相對水分含量(RWC)則多用於園藝領域，兩者均與水分含量有關。Yang 與 Ling (2001) 將上述領論應用於溫室作物的生產，成功建立 EWT 與 RWC 的關係，此關係可用於溫室內作物非破壞性水分含量量測的依據。由於較少受到諸如溼度，落塵等環境因子的影響，溫室內應用多光譜資訊可提供靈敏與準確的訊號，可及早準確偵測缺水緊迫。

### (3)提高附加價值的灌溉管理

透過水分管理來調節生長可創造作物的附加價值。可行的優點包括：較高品質帶來的較高收益與減少使用化學藥品帶來的節約成本。有不少研究已證實維持植物體於輕微的水分逆境狀態下，完全不需生長調節劑，植物體自動會長得較矮壯，薄荷樹也會產生較高濃度的薄荷，番茄糖度也會提高。

#### 1 透過水分管理控制植株高度

業者經常調整植株的高度，透過掌控其型態來掌握其品質達到提升價值的目標。一般言之，業者有三種工具，包括生長調節劑，環境溫度的調整與水分管理。生長調

節劑可非常有效的控制植株的高度，藥劑施用到每一株植物體上則非常費工。日夜溫差(DIF)的調控(Heins 與 Erwin, 1990) 可非常有效的控制植株高度，DIF 值為正 (高日溫，低葉溫)促進節間伸長，負的 DIF 值 (高夜溫，低日溫) 維持植株矮小。此方法的缺點在於夜間保持較高溫度需耗費能源，提高栽培成本。

透過水分管理來控制植株高度應該是上述三種方法中最環保也耗能最少的一種。傳統上業者多靠肉眼偵測植株處於輕微萎凋狀態才開始施以小量水分的灌溉，該水量足夠植物體由缺水逆境中紓解但仍不足以供應植株作完全的伸展。

#### 2 二次代謝物的生產

有愈來愈多人喜歡吃保健食品，其多數為添加植物性營養的食品，傳統的藥材取自植物與其他自然資源，譬如英國雛菊(English Daisy, *Bellis Perennis*) 的花有益於肝臟，甜羅勒 (Sweet Basil, *Ocimum Basilisum*) 有益於腎臟，薄荷(Peppermint, *Mentha Piperita*) 葉片則有益於強化神經與放鬆子宮。在營養食品/保健食品工業(nutraceutical industry)中，常被用作添加劑的具生物活性的化學藥品(Phytochemicals)，多是植物的二次代謝產物。

二次代謝物的產生可透過栽培管理來促進，有多篇文獻報導缺水逆境可增加二次代謝物的產生。譬如：Charles 等 (1990)提到在遭遇缺水逆境時，小黃瓜(*Cucumis Sativus*)種苗的子葉會增加黃酮(flavonoid) 含量，薄荷(peppermint, *Mentha Piperita*)會提高精油濃度。類似的研究結果包括檸檬草(lemongrass)中香葉醇(geraniol)與檸檬醛(citral)含量，辣椒(*Capsicum Annum*) 葉片中的酚(phenolic)，香薄荷 (*Origanum Majorana*)中精油含量與總脂質的增加等都與缺水逆境相關。

缺水狀態不應影響植物體生長，適度的缺水逆境卻有利於植物體產生二次代謝物，各類健康食品的植物性添加劑(nutraceuticals)的產量多是利用缺水緊迫來產生。此類商業化生產系統需要具備將缺水緊迫程度予以量化的技術，精確的灌溉與環境控制的能力都是必備的。

Ling 與 Herms (2002)為了證實缺水逆境可提升薄荷中精油成分的假設，量測 carvone 成分的濃度。研究結果顯示薄荷生長於 30% 與 60% 水分含量的環境中，其 carvone 成分的濃度比生長於 80+% 水分含量的環境中為高。

#### (4)CWSI 系統的田間應用

Idso (1982)將葉冠面與空氣的溫差與環境的空氣狀態透過 CWSI 的定義予以整合。葉冠面與空氣的溫差與空氣的蒸氣壓差之間的關係可予以量化表現，如圖 8-2 所示，溫度的上下限曲線所定義的範圍即為蒸散過程中可行的溫度變化範圍。上限為當植物體處於極度水逆境情況(完全無蒸散發生)下葉冠面與空氣的溫差，下限為當植物體處於完全無水逆境情況(最大蒸散速率進行)下葉冠面與空氣的溫差。CWSI 透過此事先設定的上下限與量測所得的葉冠面與空氣的溫差與當時的空氣蒸氣壓差來判斷植物體的蒸散狀態。CWSI 計算式如下：

$$CWSI = \frac{\overline{LM}}{\overline{KM}} = \frac{(T_c - T_a) - (T_{ll} - T_a)}{(T_{ul} - T_a) - (T_{ll} - T_a)} = \frac{T_c - T_{ll}}{T_{ul} - T_{ll}} \quad (4)$$

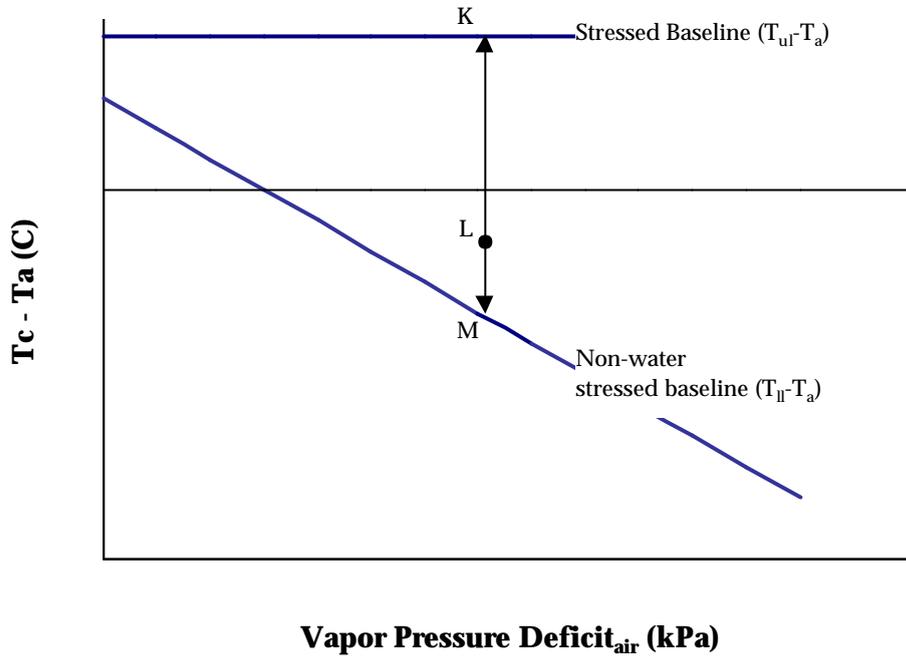


圖 8-2 作物水分胁迫指数 (Gardner et al., 1992)

基本上, CWSI 是兩條線段長度的比例, 如圖 8-2 所示為線段 LM 與 KM 之比, 其中  $T_c - T_a$  是葉冠面溫度與空氣的溫度差,  $T_{ul} - T_a$  則是葉冠面的上限溫度與空氣的溫度差, 葉冠面上限溫度值不隨橫座標的蒸氣壓差值變化。葉冠面下限溫度值的取得則是在多個不同日照情況的晴朗天候下, 針對完全無缺水狀態下的植物所量測的多筆數據所作的線性迴歸式。

Jackson 等(1981)建議針對 CWSI 中有關葉溫溫度上下限的部分應透過理論求解, 模式中涉及環境中各項因子的能量平衡, 包括輻射能, 蒸氣壓差, 氣孔內與外的蒸氣傳輸過程中涉及的各项阻力等。換言之, 式 2 計算 CWSI 的計算式中有關  $T_{ll}$  與  $T_{ul}$  的部分均透過理論式來求解。

Clawson 等 (1989) 建議修正 CWSI 中有關葉溫溫度下限的定義, 其建議使用當下的無缺水逆境下的作物來提供數據。換言之, 式 4 中有關  $T_{ll} - T_a$  中的  $T_{ll}$  為在當下無缺水逆境下的作物的葉冠面溫度。由於可提供較正確的下限溫度, 其預測效果優於習知的方法。

有關低限的設定可透過環境溫溼度變異的經驗關係式來達成, Chen 與 Ling (2001) 證實 CWSI 的低限可透過空氣溫度、蒸氣壓差與溫室內夜間的氣溫等求出。此方面的研究正持續進行中。

CWSI 指標可透過當下的實際的水分損失率與最大可能的水分損失率來計算 (Kacira 等, 2002b), 如下式所示:

$$CWSI = 1 - \frac{ET_{actual}}{ET_{potential}} \quad (5)$$

其中， $ET_{actual}$  代表由於蒸散作用實際的水分損失率， $ET_{potential}$  代表當作物處於完全不缺水的狀態下，由於蒸散作用的最大可能的水分損失率。

針對植物體的感測可比量測介質中或空氣中的狀態更直接，控制更精準。作物水逆境控制系統需整合精確的量測與給水，溫室中掌握植物生長與用水的較佳控制是可以達成的。  
(P. P. Ling 林平；方煒譯)

### 引用 參考文獻

1. Aldakheel, Y. Y., and F. M. Danson. 1997. Spectral reflectance of dehydrating leaves: measurements and modeling. *International journal of remote sensing*, 18: 3683-3690.
2. Ceccato, P., S. Flasse, S. Tarantola, S. Jacquemoud, and J. Gregoire. 2001. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote sensing of environment*, 77: 22-33.
3. Charles, D. J., R. J. Joly, and J. E. Simon. 1990. Effects of osmotic stress on the essential oil content and composition of peppermint. *Phytochemistry*, Vol 29(9): 2837-2840.
4. Chen, Y. and P.P. Ling. 2001. A Portable Drought Stress Monitoring System for Greenhouse New Guinea Impatiens Production. ASAE Paper number 014082. St. Joseph: MI.
5. Clark, R.J., & R.C. Menary. 1980. The effect of irrigation and nitrogen on the yield and composition of peppermint oil (*Mentha piperita* L.). *Aust. J. Agric. Res.*, 31:489-498.
6. Diatloff, E. 1990. Effects of applied nitrogen fertiliser on the chemical composition of the essential oil of three *Leptospermum* spp. *Aust. J. Exer. Agric.* 30:681-685.
7. Ehrler, W.L., S.B. Idso, R.D. Jackson, and R. J. Reginato. 1978a. Wheat canopy temperature: relation to plant water potential. *Agronomy Journal*, 70:251-256.
8. Ehrler, W.L., S.B. Idso, R.D. Jackson, and R. J. Reginato. 1978b. Diurnal changes in plant water potential and canopy temperature of wheat as affected by drought. *Agronomy Journal*, 70:999-1004.
9. Gao, B. C. and A. F. H. Goetz. 1995. Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical components of vegetation canopies from AVIRIS data. *Remote sensing of environment*, 52: 155-162.
10. Gao, B.C. 1996. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water. *Remote Sensing of Environment*, 58:257-266.
11. Gardner, B.R. D.C. Nielsen, and C.C. Shock. 1992. Infrared thermometry and crop water stress index: I. History, theory, and baselines. *Journal of Production*

- Agriculture, 5(4): 462-466.
12. Gardner, B.R., D.C. Nielsen, and C.C. Shock. 1992. Infrared thermometry and crop water stress index: I. History, theory, and baselines. *Journal of Production Agriculture*, 5(4): 462-466.
  13. Gates, D.M. 1964. Leaf temperature and transpiration. *Agronomy Journal*, 56:273-277.
  14. Gershenzon, J. 1984. Changes in the levels of plant secondary metabolites under water and nutrient stress. In B.N. Timmermann, C. Steelink, & F.A. Leows, eds. *Phytochemical Adaptations to Stress*. Plenum Press, New York.
  15. Hattendorf M.J.D., D.W. Evans, and R.N. Peaden. 1990. Canopy temperature and stomatal conductance of water stressed dormant and non-dormant alfalfa types. *Agronomy Journal*, 82: 873-877.
  16. Heins, R. and J. Erwin. 1990. Understanding & applying DIF - Here's how to use this powerful production tool. *Greenhouse Grower* 8(2):73-78. February
  17. Herms, D.A. 1999. Physiological and abiotic determinants of competitive ability and herbivore resistance. *Phyton* 39:53-64.
  18. Herms, D.A. and W. Mattson. 1992. The dilemma of plants: To grow or defend. *The Quarterly Review of Biology*, Vol(67), No:3: 283-335.
  19. Hunt, E. R. and B. N. Rock. 1989. Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances. *Remote sensing of environment*. 30: 43-54.
  20. Hunt, E. R. Jr. 1991. Airborne remote sensing of canopy water thickness scaled from leaf spectrometer data. *International Journal of Remote Sensing*, 12(3): 643-649.
  21. Hunt, E. R., B. N. Rock, and P. S. Noble. 1987. Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote sensing of environment*. 22: 429-435.
  22. Idso, S. B. 1982. Non-water-stressed baselines: A key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology*, 27: 59-70.
  23. Idso, S. B., R. D. Jackson, P. J. Pinter, R. J. Reginato, and J. L. Hatfield. 1981. Normalizing the stress degree day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24: 45-55.
  24. Jackson R.D., S.B. Idso, R.J. Reginato and P.J. Pinter. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17(4): 1133-1138.
  25. Jacquemoud, S. 1993. Inversion of the PROSPECT+SAIL canopy reflectance model from AVIRIS equivalent spectra: theoretical study. *Remote sensing of environment*. 44: 281-292.
  26. Jacquemoud, S. and F. Baret. 1990. Prospect: A model of leaf optical properties spectra, *Remote sensing of environment*. 34: 75-91.
  27. Jacquemoud, S., F. Baret, B. Andrieu, F. M. Danson and K. Jaggard. 1995. Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT+SAIL models on sugar beet canopy reflectance data. Application to TM and AVIRIS Sensors. *Remote sensing of environment*. 52:163-172.
  28. Jalali-Farahani, H.R., D.C. Slack, D.M. Kopec, and P.W. Brown. 1994. Evaluation of

- resistances for bermuda grass turn crop water stress index models. *Agronomy J.* 86: 574-581.
29. Kacira, M., P. P. Ling, and T. H. Short. 2002a. Machine vision extracted plant movement for early detection of plant water stress. *Transactions of the ASAE* 45(4): 1147-1153.
  30. Kacira, M., P. P. Ling, and T. H. Short. 2002b. Establishing crop water stress index (CWSI) threshold values for early and non-contact detection of plant water stress. *Transactions of the ASAE* 45(3): 775-780.
  31. Ling, P. P. and D. Herms. 2002. Unpublished data.
  32. Ling, P. P., G. A. Giacomelli and T. P. Russell. 1996. Monitoring of plant development in controlled environment with machine vision. *Advances in Space Research*, volume 18(4-5):101-112.
  33. Miemann, K. O., D. G. Goodenough, and A. S. Bhogal. 2002. Remote Sensing of relative moisture status in old growth Douglas fir. *International Journal of Remote Sensing*. 23(2): 395-400.
  34. Monteith, J. L. 1965. Evapotranspiration and environment. In: *The State and Movement of Water in Living Organisms*, 19th Symp. Soc. Exp. Biol. Pp.205-234. 1975.
  35. Monteith, J. L. 1973. *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold Limited, 25 Hill Street, London, UK.
  36. Nyakwende, E., C. J. Paull, and J. G. Atherton. 1997. Non-destructive determination of leaf area in tomato plants using image processing. *Journal of Horticultural Science*, 72(2): 255-262.
  37. Oosterhuis, D. M., S. Walker, and J. Eastham. 1985. Soybean leaflet movements as an indicator of crop water stress. *Crop Science*, Vol. 25: 1101-1106.
  38. Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London (A)* 193: 120-145.
  39. Prenger, J. J., R. P. Fynn, and R. C. Hansen. 2001. An Evaluation of Four Evapotranspiration Models. ASAEPaper number 018010. St. Joseph: MI.
  40. Rajeswara, B. R., P. N. Kaul, G.R. Mallavarapu, and S. Ramesh. 1996. Effect of seasonal climatic changes on biomass yield and terpenoid composition of rose-scented geranium (*Pelargonium* species). *Biochem. Syst. Ecol.* 24:627-635.
  41. Revollon, P., G. Chasseriaux, L. M. Riviere, and R. Gardet. 1998. The use of image processing for tracking the morphological modification of *Forsythia* following an interruption of watering. *Proceedings of International Conference on Agricultural Engineering, AgEng OSLO98, August 24-27, Oslo, Norway*: 872-873.
  42. Rhizopoulo, S., and S. Diamantoglou. 1991. Water stress-induced diurnal variations in leaf water relations, stomatal conductance, soluble sugars, lipids and essential oil content of *Origanum majorana* L. *Journal of Horticultural Science*. 66:119-125.
  43. Seginer, I., R. T. Elster, J. W. Goodrum, and M. W. Rieger. 1992. Plant wilt detection by computer-vision tracking of leaf tips. *Transactions of the ASAE*, 35(5):

- 1563-1567.
44. Stanghellini, C. 1987. Transpiration of Greenhouse Crops: An Aide to Climate Management. Ph.D. Thesis. IMAG, Wageningen.
45. Tian, Q., Q. Tong, R. Pu, X. Guo, and C. Zhao. 2001. Spectroscopic determination of wheat water status using 1650-1850 nm spectral absorption features. *International Journal of Remote Sensing*. 22(12):2329-2338
46. Waterman, P. G., and S. Mole. 1989. Extrinsic factors influencing production of secondary metabolites in plants. In E.A. Bernays, ed. *Insect-Plant Interactions*, Vol. 1. CRC Press, Boca Raton, Florida.
47. Wiegand, C. L. and L. N. Namken. 1966. Influences of plant moisture stress, solar radiation, and air temperature on cotton leaf temperature. *Agronomy Journal*, 58: 582-586.
48. Yang, Y. and P. P. Ling. 2001. Multi-spectral Plant Drought Stress Detection: PROSPECT Model Calibration. ASAE Paper No. 013074. St. Joseph: MI.

## 8.2 ACESYS 在植物工程系統之應用

植物保護設施的範疇涵括簡易的塑膠布被覆至複雜的環控設施，這是一個特殊，極具挑戰性且需要整合不同領域的專長，譬如：植物生理，工程技術與兩者的相關性等都是在設計技術上與經濟上可行系統的必備條件。不論在系統設計或管理上，工程界與植物科學界多年來的研發成果已成功奠定植物工程系統(phytation systems)的學術基礎。

植物工程系統的演進由溫室結構設計，節約能源與環境控制開始，結合創新的栽培方法，生產規劃，自動化與對環境生態上的覺醒，近來，亦有研究將植物在環控室內栽培，栽培植物的目的不在因應市場需求而改為將植物視為工程元件，譬如以水耕方式栽培植物，利用根系來吸收水中的重金屬或輻射核種，或者是除了生產植物供做食用之外，亦利用植物來消耗二氧化碳，提供氧氣並淨化水質。後者見於太空農業中先進維生系統(advanced life support systems, ALSS)的研究。發展ALSS系統的目的在于提供人類在太空中活動所需之食物與氣體。所謂的植物工程系統(phytation)即是用來代表如前述的在人造的環控系統中的植物栽培系統，植物在系統中扮演多元化的角色，提供多元化的功能。此類系統的研發需要多個領域的科學家譬如：植物科學，生物技術，食品科學，營養學，農業經濟，環境科學等，另外還需要工程技術人員來落實與整合。

以下將以多個代表性範例來描述上述技術的發展歷程，包括由習知的植物保護設施，進展到溫室，進展到環控下植物生產系統，再進展到植物工程系統。最後以日昇公司應用ACESYS理念在台灣建立蝴蝶蘭小苗與組培苗量產工廠的規劃經驗做總結。

### 1) 植物工程系統與 ACESYS

植物工程系統(phytation systems)係指與植物相關的人為系統，尤其是在控制環境下的系統。植物工程系統中的植物可以是最終的產品，也可能是某過程中涉及的元

件。植物工程系統的演化包括使用農用塑膠布被覆的簡易設施、環境控制下的作物生產系統(CEPPS)、技術密集的精密溫室、組織培養/微體繁殖室、植物生長箱、生物污染防治設施、可去除土壤與水中污染源的植物除污(phytoremediation)系統與太空農業中用於生產生質(biomass)/空氣淨化/水質淨化的先進維生系統(ALSS)。

(1)由植物保護到環控下植物生產系統到植物工程系統

植物是人類生命延續、生活改善的重要資源，多年來有關植物的研究已產生許多高價值與/或新用途的產品與改良的生產方法。植物工程系統提供有效率的，更經濟也更環保的應用生物技術的方法，這些系統包括簡易設施下的植物栽培與高度環控下的系統(圖 8-3)。

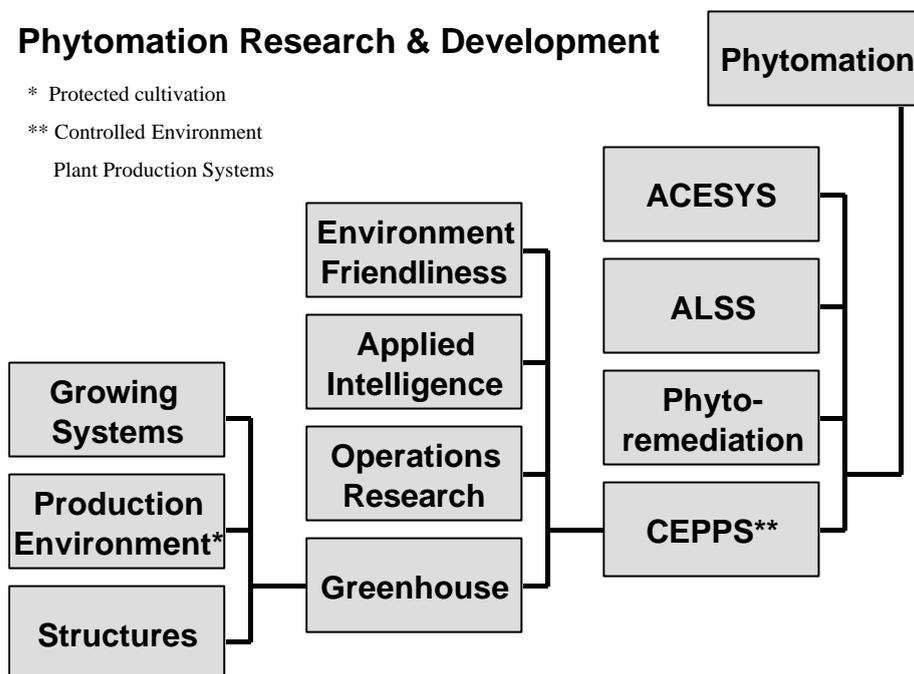
(2)ACESYS 的範疇

成功建立植物工程系統需要來自下列領域的專業人才，包括：自動化(automation)，作業法(culture)，環境(environment)與系統化(systems)。凡涉及控制環境下生物生產系統的組成與處理程序均可以 ACE 三者來描述或分類，並以系統方法來分析，以系統整合來要求。ACE 三者分別為組成系統的子系統，系統與子系統均以物件(Object)視之，物件透過屬性(Attribute)來定義，屬性的內容也可以是新的物件，透過物件導向的程式設計語言(Object Oriented Programming, OOP)為工具(Fleisher and Ting, 2000)，吾人可建立整合整體系統的決策支援工具(方與丁, 1992a, 1992b; Fang, et al., 1992; Ting, et al., 1991)，以協助執行者針對 ACE 三者或三者之間關係進行分析。

ACESYS 方法論由當時擔任美國羅格斯大學生物資源工程學系主任的丁冠中(Ting, K.C.)教授首度於 1994 年提出，前三個字母分別為自動化(Automation)、作業法(Culture)與環境(Environment)的首字，SYS 代表透過系統分析工具的建立來探討三者各自與彼此之間的關係，亦代表系統整合的重要，系統中每一環節都關係系統的成敗，系統成功與否，與所有參與的軟、硬體組件與人員皆息息相關。

## Phytomation Research & Development

\* Protected cultivation  
 \*\* Controlled Environment  
 Plant Production Systems



? 8-3 ? ? ? ? 帆 ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? 俚 ? ? ? ? ?

自動化(Automation) 在系統中舉凡涉及資訊的處理與工作項目的執行均屬之。自動化的目的在提供工程系統觀察，推理，學習，溝通，規劃與執行的能力。常見的自動化項目包括：儀器，控制，電腦化，機械化，決策支援，機器視覺，機械人與人工智慧等。

作業法(Culture) 包括直接與生物生長、分化相關的因子與作業方式。所謂栽培相關因子(cultural factors)譬如與植物型態與生理狀況相關的因素，可用來監測植物生長與分化者均屬之，栽培相關作業方式(cultural practices)則包括調整或直接改變植物外型與/或生理狀態的作業方法，譬如：增殖、發根、移植、摘心、灌溉、施肥、病蟲害防除、收穫與收穫後處理等。

環境(Environment) 包括植物體週遭的全部，舉凡微氣候、營養供應、結構/機械狀態等均屬之。近年來，環境控制技術被視為環境控制下作物生產系統的最大工程挑戰，植物體週遭微氣候的調控一直是學術研究的重點。控制系統的精確度與複雜度則與植物體所處的結構體息息相關。結構體內、外環境的互動與結構體內所欲維持的狀態則主導著控制系統軟、硬體與驅動設備的設計。由於作物生產系統旨在提供植物生長/分化/搬運的一個有利環境，在整個植物工程系統中，此環境在設計上便還需要有助於自動化系統與作業方法等的操作。

系統(Systems) 在開始定義一個系統與其目標後，需要透過系統分析與整合的方法來了解系統的可行性、產能、可靠度、風險等表現指標。在建立植物工程系統時，確保系統的正常有效的運作是最終的目標，所以站在系統層次的分析工作的重要性是不言而喻的。系統分析的成功則有賴資訊的有效運用。在系統分析工作中有兩項主要

的資源，包括：(1)系統中組成成分的資訊與彼此間的相關性，(2) 資訊收集的方法與整合資訊產生附加價值的程序。

### (3)細說 ACESYS

#### ? 自動化 (Automation)

為什麼要自動化的原因在許多出版刊物與文獻中均已有記載，自動化設施與自動化系統的設計策略也有許多已商業化的商品，採取自動化常被視為解決管理問題的最快解決方案。但對於植物工程系統的自動化問題則面臨以下幾個問題：(1) 與其他製造業的工廠比較，植物工廠的工作環境較不結構化，(2) 對象物(植物) 叫沒有固定的尺寸與形狀，(3) 缺乏直接的感測儀器來量測植物的生長，(4) 業者不同的栽培管理策略，(5) 系統操作與維護愈簡單愈好，與 (6)不易評估大額度投資的效益。所以，在植物工程系統的自動化中容錯空間頗為狹小，所以在落實執行植物工程系統的自動化工作時，應強調價值工程(value engineering)的設計理念 (Ting and Giacomelli, 1991)。

在過去，機械設備備用來取代人力並達成操作上要求的均勻度或均一性(Garrett, 1985)，近來，納入電腦化與感測技術，於是就形成自動化系統。在植物工程系統的現代化過程中，愈重視自動化愈能維持市場的競爭性。在植物工程系統中的自動化項目，廣義來說可包括：電腦技術與測試儀器的使用，環境因子與植物體生理訊號的感測，生物程序模式的建立，專家系統的建立 (包括資料庫，程式與啟發式等)，生物系統的工程化，環境控制策略的建立與彈性自動化，機械人與智慧型機械的建立等。在完全自動化的系統被建立之前，人機介面的建立也必須再設計自動化系統之時納入考量。

自動化是在機械化系統之上增加觀察(perception)、推理(reasoning)、學習(learning)、溝通(communication)、工作規劃(task planning)與執行(execution) 的能力 (Ting, 1992)。自動化系統可以設計成允許面對多個層次的預設的複雜狀況，一般分為固定式(fixed automation)與彈性自動化 (flexible automation) 系統。前者通常適合量產製造某種固定產品，較合乎經濟效益，後者在相當程度上可符合前者的需求，但又具備可因應訂單做彈性調整的能力。電腦整合通用機械工具使得彈性自動化變得可能，彈性自動化的成功關鍵就在是否具備只需修正軟體與局部的硬體更動就可因應不同的製造/生產需求的能力 (Ting, 1997)。

a.觀察 為了因應外界的多變，具備觀察外界變遷的能力是必要的，這包括對資訊的蒐集、處理與解讀的能力，用來達成此目的的硬體稱為感測器。外界資訊頗為多元，了解為何需要蒐集此些資訊是選擇感測器之前最需決定的事。有關外界的物理、化學與生物狀態可直接或間接的蒐集。間接資訊的量測需要了解該訊息與所欲了解的物理量之間的相關性。在植物生長方面，溫度、溼度、光量、二氧化碳濃度、養液溫度、酸鹼度、導電度等的量測均屬常見，近年來，植物生長/分化的偵測與品質的量化量測已獲得更多重視，後者尤其被用在小苗與最終產品的篩選，前者則用在評估作物是否如預期的生長/分化。某些感測方法屬破壞性量測，某些屬非破壞性但需要實體接觸，某些則屬非接觸式量測，譬如影像處理就是研究的重點，學者研究建立植物體外型與光譜資訊作為植物體是否處於逆境或判斷其品質高下的依據，影像處理使用的數位影像多為使用 CCD 攝影機作為感測頭，有些則有加上分光的濾鏡。植物體生理訊號的量測是近年來研究的重點。

Ruzhitsky 與 Ling (1992a)建立機器視覺系統來評估種苗與芽胚品質的好壞，後續亦透過此視覺功能來驅動機械手臂去除列等種苗。其策略是在兩個光譜波段的圖形計算每個像素的灰階比例 (gray level ratio)，以便在一般光量下找出具明顯差異的種苗。相同策略後亦用在分辨在不同光照情況下使用岩綿栽培的綠色、淺綠色與黃色番茄種苗(Ling 與 Ruzhitsky, 1996)。Ruzhitsky 與 Ling (1992b) 建立 adaptive Otsu 閾值法來找出包含背景、岩綿快與番茄種苗影像中的番茄莖葉部分，此研究旨在量測莖葉的投影面積來進一步求出種苗的品質。Giacomelli 等 (1993) 建立番茄種苗影像的分級系統，目的在選擇類似品質的種苗，期能在一開始做到盡量均一以求得收穫品質的均一。

Cheng 與 Ling (1994) 應用機器視覺技術對咖啡胚芽(somatic embryos)進行品質分級，其設計 Y 型模板來測試胚芽的活力，並設計改良的細線化技巧(improved thinning algorithm)來獲得一個像素寬度的胚芽影像。除了上述透過胚芽影像外型來分析之外，Ling 等(1996) 亦研究胚芽成長過程的動態影像，並據以探討其成長速率。後續發現此成長速率與發芽率(germination rate)有良好的關係。Kacira 與 Ling (2001)設計一系列可自動偵測植物生長的感測系統，包括：影像處理、紅外線溫度量測與水分感測設備等。植物採點滴控制灌溉方式並種在可旋轉的檯面，研究成果之一在成功應用紅外線測溫儀建立水逆境指標(crop water stress index, CWSI)的量測，可即早偵測植物體的水逆境而及時予以灌溉 (Kacira 等，2002)。

Kondo 等 (1996) 建立雙眼式立體影像系統來偵測小番茄果串在 3 度空間的立體座標以指揮機械手臂進行收穫。番茄果串的辨識方法主要是在可見光範圍內擷取適當的反射率資訊。對一個視覺感測器而言，距離的判定一直是一個難題，Kim 與 Ling (2001) 建立一個具電腦控制的鏡頭伸縮功能的攝影機，配合紅外線測溫儀的使用，可將目標葉片定位並予以在物鏡範圍內放至最大。

b.推論與學習 就自動化系統而言，推論 (reasoning)能力代表著分析、解讀資訊並找出答案的能力，其與資訊的蒐集同樣重要。推論通常透過邏輯演算、數學解析與啟發推理等方式達成，其目的在進行決策、下達命令並引導系統的作業。溫室環境的控制策略、影像分析的策略、專家系統與各種形式的決策支援都是系統具備推理能力的極佳範例。涉及如植物生長等生物程序的系統的挑戰在於經常必須使用多變、不完整、不夠精準與/或不確定的資訊進行推理。另一個與植物生產系統有關的議題在於有許多解決問題的經驗與知識通常缺乏量化的依據而且也頗為分散。透過啟發推理可獲得的知識與經驗的蒐集與累積目前正進行中，另一個有關機器學習的研究也正積極進行，期望機器能透過本身自己的資訊進行學習而不需事先建立更類知識之間的連結，譬如類神經網路的使用。近年來，有不少農業與食品生產的例子使用類神經網路進行學習。

Louwsma (1996) 在 Rutgers 大學進行短期訪問時曾進行一項使用類神經網路分辨萵苣種苗影像的研究。透過上視圖中葉面積與葉片數目與不同時段所拍圖片顯示出的生長速率資訊中得出最終產品的乾物重資訊。此研究分別使用由 NeuralWorks Explorer(Neuralware, Inc., Pittsburgh, Pennsylvania, USA)軟體所提供的一種認知(perceptron)與四種回溯 (backpropagation) 神經網路。預測結果與萵苣專家的判斷結果進行比對，發現使用最佳表現的回溯神經網路(best performing backpropagation network)可得到最準確的預測能力。

Humphreys 等(1994) 發展選用溫室被覆材料的專家系統，知識基礎的建立透過文獻蒐集與請教該領域的專家。詢答系統建立則依據作物的需求、溫室建造的地理位置與溫室的需求等。使用軟體為 DOS 版的 Personal Consultant Easy (Texas Instruments, Austin, Texas, USA)。

Ting 等 (1995) 獲得紐澤西州政府科技委員會創新研究補助發展了 Thermal Bank<sup>TM</sup> 能量儲存系統的數學模式。此 Thermal Bank<sup>TM</sup> 能量儲存系統係由相變材料包覆於管片狀材料內垂直懸吊於一箱子中組成，管片之間有循環水流通。數學模式包括管片元件與循環水體本身與兩者接觸表面的熱傳分析：能量、溫度與相的變化等。此模式的後續研發為建立兩套電腦輔助設計軟體，來選擇最佳參數值與分析使用離峰電力時相變材料在使用年限內的經濟效益。

Chiu (1996) 評估單果串番茄生產系統中三種不同的人工補光策略，使用 Visual Basic 軟體建立的決策支援系統的輸入條件包括：當地太陽能訊息與農民的生產規劃計劃，輸出內容則為溫室內所需安裝的人工補光系統的規格與數量與各種不同補光控制策略下的比較。

c. 通訊 要了解一個系統需要來自各方面的資訊，作物生產系統的複雜度日增，自動化作業涉及元件更需予以充分了解與整合，所以資訊流的有效暢通是非常重要的。在建立資訊流通管路時最常被問到的就是在何時需要提供何種程度的什麼訊息？電腦以高速運算著稱，網路世界發展之後，其無遠弗屆的功能使得高速傳輸亦顯重要。電腦整合製造(computer integrated manufacturing, CIM) 系統在製造業已落實執行多年，商場、技術與操作相關資訊可透過 CIM 的概念即時予以整合。

許多較先進的溫室業者已開始採用具備 CIM 整合能力的自動化設備。Tai 等 (1994) 發展機器視覺系統檢測移植作業後穴盤中的缺株位置，允許後續再使用機械手臂進行補植。所建立介於機器視覺系統與機械手臂兩個工作機具之間的溝通管道，可作為類似 CIM 概念在溫室產業內落實執行的範例。

d. 工作規劃與執行 在密閉式作物生產系統中機械設備通常執行兩項工作：控制驅動與實際作業，譬如風扇啟動、加熱器動作、遮蔭網啟動屬於前者，需要適當的控制策略 (control strategy)。種苗自動移植、物料搬運、機械採果等則屬於後者，需要適當的工作規劃(task planning)，才能確保此些設備正常動作。機械人/手臂系統的研發可用來解釋工作規劃的重要性。有關控制驅動所需的控制策略，也可看成是另一種形式的工作規劃。

許多作物生產系統中涉及精密的環境因子調控與勞力密集作業，兩者以自動化系統代勞時，除了需要適當的軟、硬體之外，還需要控制策略。植物體的需求與溫室環境的動態變化為環控策略設計時的主要考量，植物自動化搬運與收穫的主要考量則是其不同的尺寸、形狀 (Kondo and Ting, 1998)。Ting 等 (1996) 執行一系列研究探討機器手臂工作區間的規劃用來處理不同規格穴盤苗之間的移植與胚芽品質的分級。研發成果包括：工作區間規劃、物流系統設計、獲得專利的機械手臂前端抓取指、判斷誤植種苗的機器視覺策略、機率模式機械手臂作業模擬軟體、工程經濟分析軟體等 (Ting, 1995)。照片 8-4 所示為獲得專利的用於種苗移植的附掛感測頭的滑動針式抓取指 (Ting et al, 1991)。Bolkestein 與 Ting (1993) 也發展了整合固定與彈性自動化於一體的工作區間用於種苗移植與補植，以確保離開工作區間的最終產品為無缺株的苗盤。

Chen 與 Ting (1994) 將 Cheng 與 Ling (1994) 和林等 (1996) 所發展的機器視覺系統整合於一機械手臂工作區間中用來將胚芽加以分辨與分級；該工作區間亦可視視覺系統的需求更改操作模式。該研究同時透過 IGRIP 軟體(Deneb Robotics, Inc., Auburn Hill, MI)建立立體模擬模式將機械手臂的動作在電腦上以實體動畫方式顯現。

Monta 等 (1998a; 1998b)針對倒懸式(inverted)單果串番茄栽培系統發展番茄採果機械人，所謂倒懸式單果串番茄栽培系統係將水耕栽培的水槽(flume)透過纜線懸吊於空中，允許沿著支撐軸橫向輸送。此橫向輸送機制一方面允許調整番茄植株的間距，二方面允許將成熟番茄送往工作區進行自動收穫。番茄的花梗與花萼端處頗為容易彎折，所以可以將果實與枝葉分開，方便機械手臂的採收。以下篇幅介紹機械手臂用來收穫番茄的手端抓取指的設計。

由於水耕植床可以橫向輸送至工作區，所以機械手臂為固定不動，只需配備控制器、視覺系統與手端抓取指。控制器使用直座標系機械手臂，視覺系統的目的在判斷番茄的成熟度、位置與方位。理想狀況是水耕水槽的兩側均能有一台機械手臂，如此可確保每一顆番茄皆能採收(照片 8-5)，除了藏在葉片內視覺系統找不到的番茄。

機械手臂手端抓取指的設計採用 4 支彈性指等間距地安裝於 60 mm 直徑的環上(照片 8-6)。環中央有直管，直管末端安裝有吸盤。每支抓取指由四條中空管透過彈簧串接成環柱狀，一條纜線經過環柱中央一端與指端連接。所有抓取指的纜線可以由手端的另一側拉放來形成手指的動作。當手指彎曲時就代表抓取指要抓取番茄果實。抓取指指端黏貼一塊 5 mm 厚的橡膠墊，可防止打滑與對果實的傷害。抓取指纜線的拉放動作透過直流馬達正反轉驅動齒條前後移動來達成。

使用吸盤的目的在讓抓取指靠近果實之前將果實單一化，吸盤採用矽膠材料製造，可前進超過指端 2 公分，其前進距離與停止位置可透過旋轉式電位計來偵測。吸力達約 15 牛頓，使用真空泵產生。管路中連接壓力感測器量測氣壓變化以偵測是否吸住果實。感測器的輸出類比電壓(0 至 5 V) 與吸力的錶壓力大小(-0.1 至 0 Mpa)成正比。

機械手臂具備兩個自由度，首先一個軸(prismatic joint)將手端抓取指移近目標果實，另一個位於手端的轉動軸(rotational joint)允許扭轉手端抓取指來對果實產生足夠的扭力。初步實驗擬採摘所有番茄果實，不論是否成熟與否，結果顯示可摘下 80% 的果實，成熟果實可成功採摘且不會造成傷害，緊密連接的果實也可正確判斷其位置而一一採摘。剩餘 20% 未採收的番茄不是過度成熟就是未成熟。過熟的果實因為表皮太軟，機械手臂指端頗難堅實的握住果實，所以無法對花梗處產生足夠的彎曲力距(bending moment)以摘下果實。未熟的果實可被指端緊密握住，但由於果實與花梗的連接仍然非常緊密，機械手臂無法產生足夠大的扭力來摘下果實。後續改善可在機械手臂的手端增加一個轉動關節(rotational joint)，如此機械手臂手腕部位的功能可再提升，允許在更多方向摘取果實。

#### ？作業法 (Culture)

不同作物有不同的栽培管理辦法，同一作物在不同生長階段也有不同的栽培管理辦法。以菊花為例，過去習慣使用的摘心方式，旨在促進側芽的生長，使得枝葉茂盛。近年來由日本引進台灣的一條籠栽培方法，則不予以摘心，著重商品的提早上市。番茄栽培一般採多果串方式，有避過夏天，一年栽培兩季的做法，也有由夏末播種，秋季移植，栽種至隔年夏初的長季節栽培方法。多果串的栽培方式，基於避免植物體彼

此遮蔭的考量，所以栽培密度低，通常一平方米不超過 4 株，Rutgers 大學所發展的單果串(摘除頂芽)與後來量產的雙果串栽培方式，由於植株不高，允許較高密度栽培，可以在一平方米種 12 株，栽培密度是多果串方式的 3 倍以上。台南改良場試驗推廣成功的夏菜冬花模式則提供另一種選擇：在夏天種植耐熱的串收番茄，冬季改種菊花。

蝴蝶蘭大苗在冬季有足夠的低溫累積下，會造成花梗芽的萌發。在台灣平地地區的自然天候下，只有農曆年期間才會有開花株的出現。若欲達全年皆能有花的目標，則將大苗運往山上栽培，在溫室或環控室中增加冷氣設備皆可達到目的，但操作成本不同。

日本市場喜愛五葉一心的蝴蝶蘭，台灣平地溫室的蝴蝶蘭在長到五葉之前多半已會經歷至少一個冬季而長出花梗。要維持成長至五葉才允許長出花梗，則台灣平地的溫室勢必在冬季需使用加溫設備。另一個辦法是在緯度比台灣更南端的四季溫暖的地方生長，長至五葉以後再移至山區或使用冷氣進行催花。基本上，運輸成本與能源成本的比較是主要考量。

不論蔬菜或花卉的栽培，種苗與成株的栽培逐漸走向分工的道路，種苗栽培中穴盤苗的使用也日趨普及，苗盤的標準化一直是令人頭痛的問題，穴格形狀也有不同設計，有的尚有導根槽。穴格大小不同，介質容量也不同；介質愈少者，其對水分與肥培管理的容錯能力也愈小。美國紐澤西州的 Kube-Pak 種苗公司使用 20x30 的穴盤，穴格底部甚至沒有排水的開口。業者具備高度的管理技巧，可將種苗栽培的非常好。相同面積的穴盤，也有人使用 5x6 或 4x5 的規格，單位面積的產能差了 20-30 倍。

基本上，栽培管理方式不僅因應作物生長階段與作物種類之不同而異，包括管理者的能力與企圖、所處位置天候的不同、廉價能源的有無、使用資材的種類、搬運設備的能力與市場需求等均可能影響栽培管理、收穫、收穫後處理的方式。

#### ？ 環境 (Environment)

有關環境控制的主題在本書其他章節中多有涉獵，不擬贅述。筆者等過去建立多套環境控制相關的軟體，多用於個人的教學與實務設計上，部分軟體亦在美國、日本、荷蘭等地應用於溫室工程相關課程教學。此些 DOS 軟體包括：濕空氣熱力特性分析(馮與方，1986；方等，2001)、太陽能工程基礎(Fang 等，1992b)、溫室單、雙與多層被覆資材光學性質分析(方，1992)、台灣各地溫溼度氣象，溫室設施環控力量化指標，溫室通風系統設計(Fang 等，1992c)與蒸發冷卻降溫系統設計(方，1993；1994)等。目前已將部份軟體改為 Windows 版本(方等，2001；方，2003a,b)。

#### ？ 系統 (System)

以工程化的眼光來看，系統設計及管理的第一步是識別可行的系統並進而決定最佳的系統，所謂可行的系統乃指一系統能滿足所有的限制條件，並允許所有給定的工作能順利完成，最佳系統則由可行系統中產生，最佳系統具備最佳的目標函數值。

溫室生產比傳統露地栽培需要更多的單位面積投資成本，是以吾人預期能有更高的回收。整合溫室生產系統涉及複雜的設計、規劃與操作，在其間必須作許多不同的決定。欲有正確的決定，首先需要有適當的資訊，完整的資訊需要來自不同的來源，以溫室生產系統為例，我們需要工程、園藝、作業研究、電腦、統計等方面的知識，再者，具溫室內實際工作多年的經驗更是有價值。

鑑於在溫室生產系統中不論設計、規劃或操作均需具備足夠的有用的知識，筆者

發展了由許多模組組成的決策支援電腦軟體。決策支援包括蒐集、存取有用的資訊，加以分析，並予以解釋，使原有資訊提升附加價值，進而幫助決策者作決定，以下針對這些軟體做概略介紹（方與丁，1992c）。

a. 工程經濟 Ting 等(1988)針對溫室上的應用發展了一套工程經濟軟體，可計算溫室系統之可行性。程式中有許多工程經濟方面之基本運算，模式中亦分出許多小程序以計算在特定條件下，某種設計所需之成本及所可獲得之利潤（方與丁，1992a 與 b）。在溫室作業方面，有關工程經濟之可能用途包括如下：

- 就現有之溫室設備或未來提出之計畫作個案分析。
- 對選擇性之作業進行敏感度分析。
- 就輸入之某特定參數在特定範圍下，進行其影響分析。
- 使投資之風險分析更為容易。
- 可將此一經濟分析模式與其他技術性模式，如作物生產系統、環境控制、溫室之自動化及機械化等等合併研究。
- 在一個系統最佳化過程中，可提供一種估算目標函數之量化方法。

Giacomelli 等(1988)所述的配有輔助加熱系統的單果串番茄生產溫室座落於紐澤西州，部分為雙層塑膠布被覆，其他則為玻璃溫室。有關初始資料及分析結果有興趣者可參考丁等(1989)之論文。在溫室生產工程經濟分析軟體（EEGA）中，使用者可依據程式之指引，輸入成本及利潤資料，並獲得表列及圖示之結果。程式輸出包括溫室企劃案之投資報酬率及其損益平衡點。EEGA 亦曾用來分析具有人工補光的單果串番茄生產系統。總計共有 159 個不同的個案被進行分析。其操作參數包括(1)收穫參考點；(2)每年種植次數；(3)人工補光之月數；(4)每日補光之時數等。在分析中，番茄之市場價格影響最大。市場價格只要些微的增加，即會使整個投資報酬率大幅上升。

b. 溫室內部搬運模擬 方等(1990a)使用 SIMAN 電腦語言發展出一套動態電腦模式來模擬溫室內部的物料運搬情形，此模式係與另一家公司(Systems Modeling Corp., Sewickley, Pa, USA)發展之 CINEMA 軟體相結合而成，可用來研究溫室內物料運搬的情況。

所建立的軟體提供動畫功能，可模擬溫室運搬作業的情形。一般潛在之運搬的瓶頸可在電腦螢幕上實際看到，各系統參考的統計分析結果，譬如工作人員及機器的使用率，工人工作時間，機器是否處於怠工狀態，總共操作時間等諸多涉及的因子，皆能加以記錄、分析，並直接顯示在螢幕上。由這些獲得的資料吾人能夠對機器、工作人員以及溫室內部配置情形的相互關係作進一步的研究(方與丁，1993；方與 Giacomelli，1993)。軟體提供的主要功能如下：

- 溫室之規劃可作多重選擇。
- 系統之參數如作業之型態、各棟之生產能量、工人之搬運速度等等均可加以改變，以符合需要。
- 可選擇使用動畫表示作業過程。
- 在模擬當中，可提供依時間變化之系統參數。而系統性能之摘要將可存在檔案中以供後來使用。
- 動畫可顯示溫室資料之實際時間變化。其中包括：機器與工作之利用率、工人運搬時之週期及上盆機與收穫站之作業時間等。

- 模擬進行以後，所有相關資料均可建檔記錄，以供分析。

c.資源最佳化配置 方等(1990b)亦發展出一套可使溫室作物生產系統在有限的資源下達到最佳的經濟效益的模擬程式。在此所謂有限的資源及限制的條件包括作物生產時間表、溫室內可用的生產空間、可用的人力以及可動用的活動資金。

基本資料庫亦隨各參數之需要分別建立。軟體中包括一作物資料庫以及一最佳化的程式模組。軟體設計之組織架構可參考方(1990b)等的著作。作物資料庫及最佳化程式之模組化架構主要目的在使整個系統更加有彈性，以供未來作物資料之修正與增添。如此可以協助生產者或經營者規劃其未來之生產計畫，是一項相當有用的工具。尤其在有許多情況提供選擇時，本軟體更能提供最佳之答案。整個程式輸出資料之精確性將可依資料庫內容之更新而在未來加以改進。

資料庫中收集了34種溫室每月常見盆栽作物所需的資源及操作成本，並計算各作物的總支出、總收益、生產邊際值(growth margin)等。生產邊際值是該作物在溫室中佔一平方公尺的空間停留一週時間的總回收值(\$/m<sup>2</sup>/週)，此值可作為一初始指標以決定各作物的經濟效益。最佳化程式模組首先決定某生產計劃的可行性再決定該年內各作物的產量以達最大利益。

一個最佳策劃將包括一組作物資料庫、作物模組程式及一個最佳模組程式。作物資料庫可提供不同作物之相關資訊，如生產中之材料及能源成本、不同時期所需之空間及工人數，以及所預測之利潤等等。作物模組程式則允許使用者進入相關之資料庫，以計算各種作物在不同時期下，其所需之空間、時間及勞動人力。同時並可執行邊際利潤之運算以及準備未來進行最佳化過程中，其所需之生產時間表檔案。最佳化模組程式之主要功能則有：(1)執行個案研究，亦即決定一個生產計畫之可行性；(2)解決最佳化之問題，亦即決定在最大利潤狀況下，需生產之作物數量。一個生產系統之可行性是以檢驗其是否滿足限制條件為基準。經過最佳化之運算則可找出可行之方案，此方案並可產生最適當之目標函數值。最佳化之目標亦即在於如何使一年為週期之生產能獲得最大利潤。基本之限制條件則包括作物之種植方式、可用之空間、勞力與資金。

d.單果串番茄栽培系統 此系統的設計在於定期收穫固定量與固定品質的番茄，系統假設番茄栽種於使用可輸送的栽培植床(transportable bench)，植床安裝於有人工補光系統的溫室內，軟體允許使用者輸入每年收穫批次數，再由輸入補光時間與人工光源單位時間的補光量(已知)及平均太陽能輻射資料(由歷史資料庫取得)，求出可能的每日累積光量。透過作物生長模式的背景知識，進而求出單果串番茄由移植至開花所需時間，由開花至收穫所需栽培時間與每株番茄的產量，再配合已知的作業法，每日需要工人工作項目與作業時間均為可求，此軟體集溫室配置、勞力分配、產程規劃、補光控制與產能預測於一身(Ting等，1993)，更新的視窗版軟體亦已完成(簡，2002)。

e.溫室生產系統的策略性規劃 方(1989)發展了一套由許多模組合成的軟體，此軟體除了包括以上提及的各程式及資料庫外，尚有許多程式與資料庫針對溫室內物料運搬設備的選擇、配置的安排等問題，可用來協助溫室系統的設計、操作與管理。整套系統包括(1)作物模組。(2)設備模組，除設備資料庫外尚有程式以協助使用者決定如何選擇不同的機械設備。(3)配置(Layout)模組提供使用者一有用的工具以決定在給定尺寸的一個或多個溫室中使用何種尺寸的植床(bench)為最佳。此模組同時定義了一個通用的方法來表示不同的溫室內部配置情形。(4)模擬模組可用來研究溫室內部物料運

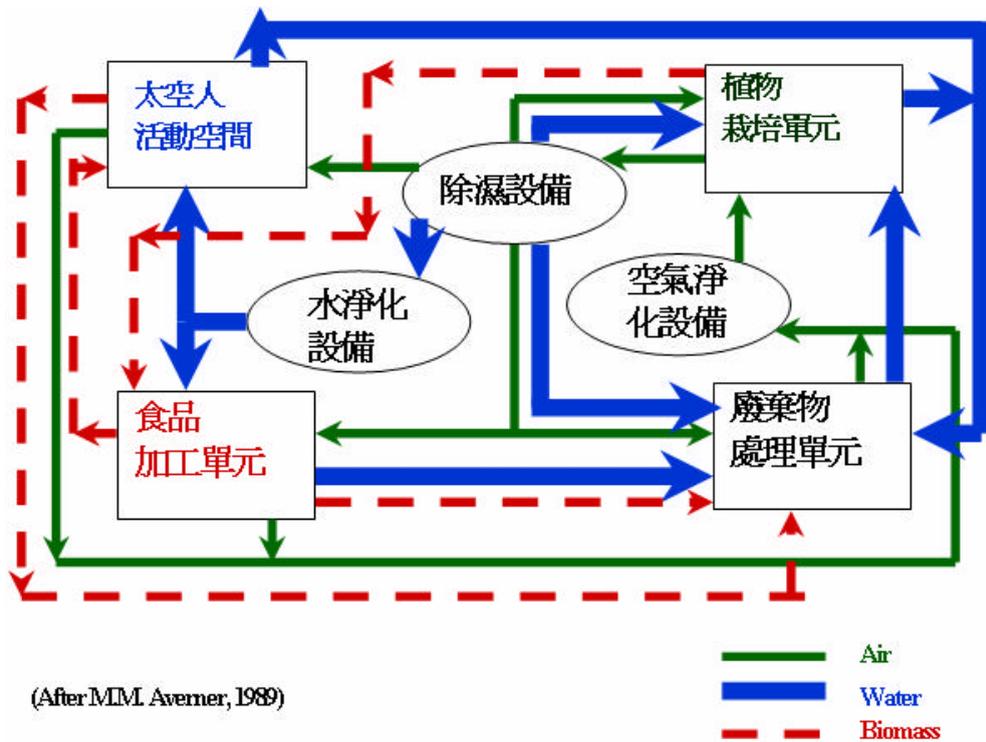
搬的情形、勞工、設備與配置的關係等。(5)最佳化模組。(6)工程經濟模組。

f.系統規劃與軟體整合 將所有前面所介紹之模組程式組合而成為一套決策支援系統，此稱為電腦輔助系統工程(Computer Aided Systems Engineering, CASE)整合性軟體。此套軟體將維持其模組化之精神，並保留其動態資料模組及靜態程序模組。資料模組本身相當具有彈性，因為所有資料內容均可由使用者藉其友善的介面輸入或修改。這些模組包括作物、溫室規劃、植物搬運器材及工程的規格等之相關資料。程序模組則為進行資料分析時，需操作相關資料之運算法。這些計算法純屬靜態方式，因為使用者不必加以修改。這些程序模組具有下列功能：提供使用者介面，資料庫之操作，作物搬運模擬(人員、機具及溫室配置之關係)，整年之生產規劃(時程可行性及最佳化)，工程設計，工程經濟分析(投資報酬率等)。

顯然此套決策支援系統有多方面的用途。其資料庫存取容易，可提供相當有用的資訊，可作為研究及教學之用，更可應用於溫室規劃、設計及操作等實務層面。這種自動式的資訊驅動架構，在設若(what if)的可行性分析上相當有用，為決策分析中甚為重要的過程。透過與某提案相關的關鍵參數數值的輸入，提案是否可行可立即求出。各模組中關鍵參數同時代表系統成敗的主要因子，管理者對此些參數必須能明確掌握，新學習者能夠迅速掌握這些關鍵參數的數值，有助於及早進入狀況，掌握全局。

## 2) ACE 理念在太空農業之應用

登陸火星為美國太空總署的既定目標，為了解決太空人的飲食、呼吸與廢棄物處理等問題，栽培植物提供了可行的方案。除了用作食物之外，植物可吸收二氧化碳並產生氧氣，根系亦提供淨化水質的功能。在這樣的系統中，植物被作為工程元件，其生產生質(biomass)的能力，淨化空氣與水質的能力等均需要被量化，以求出栽培多少面積的什麼植物可提供四個太空人在太空中生活之所需。圖 8-4 所示為上述理念的示意圖。



(After M.M. Avener, 1989)

? 8-4 ALSS ? 五? km?

上述研究由 NASA 委託多所大學進行, Ting (2002)負責建立整合各研究成果的系統與建立研發過程中各研究群同步溝通與協助分析的管道。基於 ACE 理念,透過物件導向的分析方式,定義了 8 種基礎模組,分別為:Automation, Culture\_Plant, Culture\_Task, Culture\_Facility, Environment\_Rootzone, Environment\_Aerial, Environment\_Spatial 與使用者介面(Shell)。後續又建立用來代表密閉系統內作物生長系統的物件導向模式,第一代版本為作物生長模式,應用於美國太空總署火星登陸計劃屬於太空農業部分的系統內先進維生系統(advanced life support system, ALS)中生質(biomass)的生產單元。此軟體使用 JAVA 語言撰寫,允許透過網際網路整合其它模組的基本資料,計算作物產量、不可食用部分的比例、蒸散水份量、電力消耗、勞力消耗、多種作物混合、產程規劃等。此模式透過局部修改可適用於其它密閉式作物生產系統(Fleisher 等, 1999; Fleisher 與 Ting, 2000; Ting, 2000)。

### 3)植物量產工程在台灣的實現

應用 ACES YS 理念在台灣建立植物量產系統也有成功的經驗,以下以國內日昇生物科技公司建造蝴蝶蘭小苗生產與大苗催花植物工廠的經驗為例,說明如何依據決策支援系統協助訂定重大方針的過程(方與賴, 2001)。在此所謂的植物量產系統,包括植物細胞、組織、種苗與成株等的大量栽培;所謂的環境控制下的植物量產系統的實體則包括溫室、環控室、組織培養室、生物反應器等。

結合過去的研究成果 (Fang, 1989; Fang 等, 1990; 饒與方, 1996; 方, 1994; 1995;

方與 Giacomelli, 1993; 方與丁, 1993), Fang 與 Jao (1996)於台大的實驗室建構自走燈具,並於 1997 年配合日昇蘭園建立小規模植物工廠測試立體栽培與自走光源,展示了整套理念之可行。後來由業者自行擴建,建立全世界第一座蝴蝶蘭小苗立體栽培與大苗催花的植物工廠;再經公司改組引進外來資金,成立日昇生物科技股份有限公司。表 8-1 所示為依 ACESYS 理念分類的該植物工廠現況,第一欄為子系統,第二欄為各子系統的屬性,以第一層屬性稱之;屬性之內仍可以有屬性,以第二層屬性稱之。系統、子系統與所有屬性都是物件。

圖 8-1 ACESYS 五層分類法

子系統	第一層屬性	第二層屬性
自動化	自走燈光系統	光量、移動頻度、距作物距離、反射罩、成本、折舊年限等
	水牆降溫系統	風扇廠牌、風量、水量、溫度設定值、成本、折舊年限等
	水耕淹灌系統	營養成分、淹灌頻度、淹灌水深、成本、折舊年限等
	其他	略
作業法	小苗栽培	需光量、所佔空間、所需時間、成本、利潤等
	大苗催花	能源需求、需光量、所佔空間、所需時間、成本、利潤等
	栽培介質	水草、岩綿、樹皮屑
	灌溉/肥培管理	營養鹽比例、淹灌頻度、淹灌水深
	其他	略
環境	環控室	材質、面積、層數等,立體栽培床架層數、面積等
	介質	岩棉、水草、樹皮等
	空氣	日、夜溫度、溼度、二氧化碳含量,催花管理溫控等
	光	光量、光質、光週期、均勻度,催花管理光控等
	水	溫度、導電度、酸鹼度等
	其他	略
系統分析/整合	工具建立	工程經濟分析、風險分析、敏感度分析 系統模擬、最佳化分析、內部配置與物流分析等

(1) 自動化 (Automation)

植物工廠所需的建構成本較高,但也由於結構較強固,其折舊年限也可較長,換算單年的折舊費用與溫室並不會相差太多。譬如,在台灣溫室建構成本為 6000 至 10000 元/坪,假設分五年攤題,一年折舊費用為 1200 至 2000 元/坪。鐵皮屋式搭蓋的植物工廠的建構成本為 14000 至 20000 元/坪,假設折舊期為 10 年,則單年的折舊費用正好與溫室相同,然而,植物工廠承受台灣多變天候的風險要比溫室要小多了。同時,植物工廠在建造之初就考慮到不追求無病、蟲害的境界而只侷限於無特定病蟲害。無止境的追求無塵、無菌將使系統在建造之初就難以回收。小苗栽培植物工廠比起組織培養苗栽培植物工廠在此方面的要求可說寬鬆多了。

照片 8-7a 所示為日昇公司的配備自走燈具的立體植床,每座植床共分為 7 層,每

層配備燈具。照片 8-7b 所示為自走燈具移動中的照片，7 層的燈具同步移動。筆者過去的研發成果證實環控室內使用自走燈具具有不少優點，包括：較無熱量在燈管下累積，燈管至植物的距離可縮短；燈管至植物的距離縮短，栽培層數可增加，可有較高的空間使用率；相同燈管可有較高的光量，因為光量與距離平方成反比；燈具為自走式，可水平方向移動，對下方的植物可均勻給光；燈管開閉次數較少，可延長使用壽命，降低操作成本；所需燈管數量較少，降低燈具所需的固定成本；在暗處的植物，呼吸作用旺盛，室內的平均二氧化碳濃度較高，光合作用較為旺盛。

照片 8-8 所示包括植物工廠內單一樓層的尺寸與所使用燈具的配置情形，該廠的尺寸為 26 m x 45 m，高度為一層 4.5 m，共兩層。每層室內有 20 座栽培床架，每座有 7 層栽培床。每層可擺放 8000 株蝴蝶蘭小苗，平均一層樓可擺放 1.12 百萬株。小苗的週轉率為一年兩次，所以每年可栽培 2.24 百萬株。每個床架分成 6 區，每組燈具包括 14 支螢光燈管與反光片，涵括一區的範圍，並負責兩區的光照。換言之，一組燈具可在兩區上方來回移動。以栽培面積論之，該植物工廠的栽培面積為相同土地面積的溫室的 14 倍(7 層/樓 x 2 層樓)。另外，由於自走光提供較均勻的光照，植物的安置間距可再緊縮，而且由於植物工廠為較密閉的建築，病蟲害防治工作較容易進行，所以作物栽培的存活率也較溫室栽培為高。上述三個因子相輔相成的結果，使得相同土地面積下的產能可提高至溫室的 19 倍。另外，每 4-6 個床架上的所有燈具透過 1 個馬達來驅動亦是一個特殊的設計，在每次啟動中，馬達 1, 2, 3 與 4 分別同時帶動 1764, 1176, 1764 與 1176 支螢光燈管。

透過在立體植床配備水耕淹灌系統，對植物的灌溉與施肥可完全自動化。蝴蝶蘭為 CAM 型氣生根植物，對水分的需求並不高，再加上作為栽培介質的水草為高吸濕材料，視天候狀況，一般多為兩週至三週只需淹灌 10 分鐘即可。

#### (2)作業法 (Culture)

植物工廠的建造與操作成本都不便宜，所以只能栽培高單價的作物，方(1989)與方等(1990)建立溫室生產決策支援系統，允許針對作物栽培資料庫中的各種作物選擇最能獲利的作物，其選擇原則係依據每單位面積與單位時間內的淨利(\$/週/m<sup>2</sup>)為指標。針對植物工廠而言，該指標可改為每單位體積與單位時間內的淨利(\$/週/m<sup>3</sup>)。選擇適合在植物工廠內栽培的作物的原則包括：所佔面積與高度均小的作物，需光量小的作物，週轉率高的作物(栽培期短)，高淨收益的作物，需要人工維護時間少的作物，可以用水耕方式栽培的作物等。

基於此些原則，以下的作物均為考慮的對象，包括：由種子生長的種苗，組培苗與嫁接苗等。在此些可行對象中，進一步針對個別的獲利能力進行分析，其次基於本身栽培技術與市場行銷能力進行考量。日昇公司最後選擇在植物工廠內栽培蘭科作物種苗與本身家族企業長久以來即在此領域中有部分關係，但主要的考量還是由於每組燈具在兩區來回移動的設計，使得對每區的作物而言，仍然每天只能接受到累計最多 12 小時的光照(燈管為 24 小時連續給光)，此光照時數會比溫室的日照時間較短，是否會造成生長速率的減緩是必須考慮的因子。每天累計 12 小時的光期對蝴蝶蘭已經足夠的特性，使得其最適合使用自走燈具。

由種子至成株的蝴蝶蘭栽培過程可簡單分為如表 8-2 所示的六個階段，其中，階段 0 為長至可出瓶的瓶苗，階段 1 為由瓶苗長至 12cm 葉幅的小苗，階段 2 為由 12cm

葉幅的小苗長至 20cm 葉幅的中苗，階段 3 為由 20cm 葉幅的中苗長至 30cm 葉幅的大苗，階段 4 為針對大苗進行催花至花梗長 5cm，階段 5 為讓花梗長至市場需求的尺寸。傳統上，只有階段 0 在組織培養室內栽培，其他均在溫室內，事實上，階段 1 至 4 都可在植物工廠內使用立體床架與人工燈光栽培。經過經濟效益的分析，前述的植物工廠主要針對階段 1 的小苗進行栽培。

圖 8-2 娃? 豎? ? ? ? ? ? ? ( ? ? 啦)

栽培階段	0	1	2	3	4	5
由	種子	瓶苗	小苗	中苗	大苗	花梗苗
至	瓶苗	小苗	中苗	大苗	花梗苗	開花株
栽培時間	4-6 月	4-6 月	3-5 月	5-7 月	2 月	2 月
栽培密度	25 株/瓶	180 盆/m <sup>2</sup>	75 盆/m <sup>2</sup>	32 盆/m <sup>2</sup>	25 盆/m <sup>2</sup>	25 盆/m <sup>2</sup>
葉幅		12 cm	20 cm	30 cm	30 cm	30 cm
盆器		1.5 吋盆	2.5 吋盆	3.5 吋盆	3.5 吋盆	3.5 吋盆
花梗長		NA	NA	NA	5-10 cm	> 40 cm
可能栽培地點	環控室， 溫室	環控室， 溫室	環控室， 溫室	環控室， 溫室	環控室， 溫室	溫室

日昇公司另有其他的植物工廠與溫室配備冷氣系統用於大苗催花，決策過程簡介如下：傳統上，平地地區的大苗催花多移至高海拔的溫室進行，但由於運輸成本與運輸時的損傷，造成獲利程度有限；若再加上山上的溫室屬於他人所有，額外的租金更造成成本的提高，導致難以獲利。亦有在平地的溫室配備冷氣系統以進行大苗的催花，此種做法的獲利情況比前者有自有山區溫室者稍差，但優於承租山區溫室者。前兩種方式均受限於只能栽培一層，而且溫室內需配備其他設施以縮小需要冷氣的空間，此舉不僅增加成本亦增加遮蔭，可能造成光照不足，衍生後續的花梗不長或開花不良等問題。在植物工廠內進行催花，仍然使用人工燈光，所以可立體化栽培為第一個優點，植物工廠絕熱效果佳，冷氣使用更節約為第二個優點。如表 8-3 所示為三種大苗催花方式的獲利程度比較，細部計算從略。

圖 8-3 ? ? 娃? 豎? 啦? 哇? 地? ? ? ? ? ? 憤

	移至高海拔山區	冷氣溫室	冷氣植物工廠
售價	20-30 元/株	20-30 元/株	20-30 元/株
成本	17-22 元/株	20-25 元/株	15-20 元/株

(自有山區溫室)

豈? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? 豕? ? 咖? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?

### (3)環境 (Environment)

照片 8-8 所示的日昇公司的植物工廠配置圖的左右兩側為傳統的溫室所用的水牆與風扇，此為有別於日本與其他地方的大多數植物工廠的設計。其他的植物工廠多使用冷氣，這是造成電費過高，難以回收的一大主因。日昇公司植物工廠的設計，基於作物的需求，當地的天候，病蟲害防治與成本等多方面的考量，決定採用現行的通風設計，確實有多方面的優點，較明顯的缺點在於如前述使用自走燈光時室內可有較高的平均二氧化碳濃度的優勢，由於有高的通風量而無法被利用。然而，與通風不良可能造成的病蟲害問題，如何取舍是相當容易的。總共使用 12 台 1 hp 的 48 吋風扇 (Euroemme, Italy)，每台風扇在 25 Pa 壓降的情況下可提供 8.83 m<sup>3</sup>/s 的風量，室內、外空氣總交換量為略小於每分鐘 1 次。

### (4)系統 (System)

系統運作涉及前述三個子系統的整合，針對選擇的栽培作物在各階段的需求，各項調控條件需與之呼應。譬如灌溉養液的 EC 值應隨著灌溉頻度調整，雖屬常識，但許多業者不見得做得到。

各個子系統的最佳操作條件不見得就整個系統而言仍是最佳，所以需有一個整體的目標為評比的依歸。通常，以提高獲利程度為目標。有關栽培與環境的各項操作條件，最終反映在成品的存活率；一個可保證高存活率的穩定系統，為系統成功的基礎。以下討論內容，不涉及病蟲害管理，也不涉及肥培灌溉管理，但不表示其不重要，而是表示其為充分且必要的條件，無法保證兩者技術的成熟，則植物工廠將無任何經濟效益可言。以下討論植物工廠的經濟效益，使用的數據均為評估當時的資料，與現在情況可能不同，建立評估軟體的最大好處是分析工作只需做一次，後續情況改變做新的分析只需修正輸入的參數值即可。

植物工廠內每層樓總共使用 5880 支燈管，燈管含安定器的單價為約台幣 700 元，初始燈管費用即為 4.416 百萬元，相當於 125 k 美元。以單位土地面積估算為 106 美元/m<sup>2</sup>/層樓。透過大量訂貨可有相當不錯的折扣，實際成本少於上述數字的一半，但在此不考慮此折扣。鐵皮屋式植物工廠外殼建構成本以每坪 2 萬估算，相當於 183 美元/m<sup>2</sup>，內部植床架，燈具移動架，馬達，風扇等造價約為 200 美元/m<sup>2</sup>。總固定成本約為 489 美元/m<sup>2</sup>。假設建物與植床的折舊為 10 年，燈管為 1 年，則單年所攤提的固定成本為  $106 + (183+200)/10 = 144.3$  美元/m<sup>2</sup>。

一些有關電費的估算簡列如下：每支燈管與安定器需 36 W，燈管為連續使用，功率因數為 0.7，電費每度以台幣 3 元估算，5880 支燈管連續操作一年的總電費為 118 k 美元。進一步假設燈管電費佔總電費 70% (Kozai, et al., 1999)，則總電費為 168 k 美元，相當於 5.56 百萬元台幣/層樓。此數字似乎頗高，但若考慮每層樓每年可栽培 2.24 百萬株蝴蝶蘭小苗，則每株小苗攤提的電費則只有 0.074 美元，相當於 2.47 元台幣。一株的市場售價為 10 元，扣除生產成本，淨收益仍有每株 4-5 元，年淨收益相當於 524 美元/m<sup>2</sup> (17307 元台幣/m<sup>2</sup>)，大約一年即可回收。

如表 8-4 所示為在植物工廠栽培小苗與進行大苗催花的比較，以前者為獲利較高，但由於後者的週轉期較短，可一年六次，此需要時間短的優點不僅反映在風險低，也反映在有較快的現金流(cashflow)上，此兩點均有助於管理者對現金流的操作與對風險的控制。



國內較大的花卉生物科技公司如台灣糖業公司與台灣花卉生技公司等半公家單位應該有此社會責任，除了要能利用已有的國際通路協助將台灣的花卉產業(不只蘭花)推向國際之餘，更要能積極開創新的通路，讓花農集中心力於作物的栽培與技術的改進上。老實說，台灣糖業公司與台灣花卉生技公司目前並未能真正發揮龍頭的作用，大多數稍具規模的農民仍是靠自己國際上衝撞。面對來自大陸回銷、韓國輸日與荷蘭國際行銷能力的競爭，多數花卉業者都頗憂心。當南半球的紐西蘭花卉空運日本的價格比台灣空運日本相同地點的價格低了許多時，你說政府在不損失航空業者的權益之下能否幫忙呢？泰國空運/海運日本或歐洲都比我們便宜，政府要產業留在台灣，是吧！我們發展出低成本、高產能的生產系統，我們有國際行銷能力，但是光是運輸費用可以一次就抹煞其他各層面的優勢。政府有責任營造適當的環境，提供包括獎勵投資、補助/輔導參展、提供國際產銷資訊等誘因之餘，協助降低貿易障礙與協助運銷恐怕也是很重要的一環。

## 結語

這是個資訊爆炸的時代，資訊需要處理才能成為知識，光資訊並不足以成事，太多未經處理的資訊反而容易造成困擾。良好的資訊來源配合有效的處理、運用，將能對決策分析者有很大的助益。近年來政治、經濟、社會的變遷與科技的發展使得環控農業變得更複雜。就溫室而言，是否有整體化的設計與管理變得非常的重要，這常常是企業成敗的關鍵。由於某部分的改變通常會影響到其他部份，正所謂牽一髮而動全身，所以一定要應用系統分析的技術來整合相關資訊以求得某問題的改善或解決。

電腦的應用已日益普及，由於其具備大量儲存資訊並作快速計算的能力使得其成為針對大型、複雜的系統作系統分析的最佳工具，這也是發展決策支援系統自動化的理念。ACESYS 理念可協助規劃者對新的生物生產系統進行分類與評估，同時亦可針對系統或子系統內的任何更動進行評估，旨在協助決策者做最後的決定。ACESYS 理念已成功應用在複雜如 NASA 火星登陸計劃的太空農業研究上，也成功應用於商場上高度競爭的蝴蝶蘭產業上並在執行層面上獲得驗證。

ACESYS 理念是一個分析生物生產系統的好方法，然而，現階段系統分析工具的建立，仍需因為應用項目有別而重新建立。美國微軟公司所建的 Powerpoint 是現階段大多數人要進行簡報設計時所使用的工具軟體，然而，眾人的簡報內容雖然有別，但使用的工具則相同。理想的系統分析工具或許可模仿 Powerpoint 之於簡報設計的方向規劃。眾人擬分析的生物生產系統雖然有別，但應用 ACESYS 理念進行分析的方式則相同，使用的工具希望也能相同，這是後續值得發展的方向。

(K.C. Ting 丁冠中 方煒 賴建洲)

## 引用 參考文獻

1. 方煒。1992。多層透明被覆材料太陽能輻射性質之理論探討：I. 使用光跡追蹤法。農業機械學刊 1(4)：31-41。
2. 方煒。1994。水牆設計與使用。農業機械學刊 3(4)：57-70。
3. 方煒。1995。溫室蒸發冷卻系統降溫效果量化指標之建立。農業機械學刊

- 4(2) : 15-25。
4. 方煒。2003a。台灣地區溫溼度與輻射相關決策支援系統之建立。2003 資訊科技在農業應用研討會。12 月 1-2 日。台北。中華民國。
  5. 方煒。2003b。溫室蒸發冷卻降溫系統設計與模擬軟體之建立。2003 資訊科技在農業之應用研討會。12 月 1-2 日。台北。中華民國。
  6. 方煒、Giacomelli, G.A. 1993。大面積溫室物流系統之最佳化設計要則。農業機械學刊 2(2) : 1-14。
  7. 方煒、丁冠中。1992a。工程經濟之公式概論。環控農業機械工程研討會專輯 P58-63。財團法人農業機械化研究發展中心。
  8. 方煒、丁冠中。1992b。工程經濟在溫室的應用。環控農業機械工程研討會專輯 P64-74。財團法人農業機械化研究發展中心。
  9. 方煒、丁冠中。1992c。整合溫室生產系統之決策支援。環控農業機械工程研討會專輯 P85-92。財團法人農業機械化研究發展中心。
  10. 方煒、丁冠中。1993。大面積溫室物流系統設計與勞力規劃決策支援。農業機械學刊 2(2) : 15-26。
  11. 方煒、馮丁樹、簡志樺、王岱淇。2001。生物環境控制工程電腦軟件之更新及其應用-I.濕空氣熱力性質。中國國際果蔬技術論壇論文集。廈門市。中國。
  12. 方煒、賴建洲。2001。植物量產工程在台灣的實現。生物科技在農業上的應用研討會論文集。楊盛行主編。台灣大學。pp295-311。
  13. 馮丁樹、方煒。1986。個人電腦應用之三：空氣線圖之電腦模擬。中國農業工程學報 32(2) : 49-64。
  14. 簡志樺。2002。番茄栽培植物工廠決策支援系統之建立。碩士論文。台大生物產業機電工程學研究所。
  15. 饒瑞估、方煒。1996。螢光燈管光譜分析與合成。台大農學院學報 36(3): 205-215。
  16. Bolkestein, G.B. and Ting, K.C. 1993. Assuring completeness of transplanted seedling flats using a robot. Proceedings of the Twenty-Fourth National Agricultural Plastics Congress:19-24.
  17. Chen, F.S. and Ting, K.C. 1994. Robotic workcell for quality sorting of somatic embryos. Proceedings of SPIE: Optics in Agriculture, Forestry, and Biological Processing 2345:59-70.
  18. Cheng, Z and Ling, P.P. 1994. Machine vision techniques for somatic coffee embryo morphological feature extraction. Transactions of the ASAE 37(5):1663-1669.
  19. Chiu, H.C. 1996. Computer simulation of supplemental light control strategies in a single truss tomato production system. NJAES Publication No. P-03232-08-96, Bioresource Engineering Department, Rutgers University, New Brunswick, NJ.
  20. Fang, W. 1989. Strategic planning through modeling of greenhouse production systems. Ph.D. Dissertation, Biological and Agricultural Engineering Dept., Rutgers University, New Brunswick, NJ. USA.
  21. Fang, W. and Jao, R.C. 1996. Simulation of Light Environment with Fluorescent Lamps and Design of a Movable Light Mounting Fixture in a Growing Room. Acta

- Horticulturae. 440: 181-186.
22. Fang, W., Ting, K.C. and Giacomelli, G.A. 1990a. Animated simulation of greenhouse internal transport using SIMAN/CINEMA. Transactions of the ASAE 33(1):336-340.
  23. Fang, W., Ting K.C. and Giacomelli, G.A. 1990b. Optimizing resource allocation for greenhouse potted plant production. Transactions of the ASAE 33(4):1377-1382.
  24. Fang, W., Ting, K.C. and Giacomelli, G.A. 1992a. Greenhouse Layout Design and Labor Planning. ASAE paper No. 924071.
  25. Fang, W., Ting, K.C. and Giacomelli, G.A. 1992b. Computer software development for greenhouse design and management. In Proceedings of the 4th International Conference on Computers in Agricultural Extension Programs, ASAE, St. Joseph, MI:274-279.
  26. Fang, W., Ting, K.C. and Giacomelli, G.A. 1992c. Computer Aided Instruction on Solar Engineering Fundamentals. ASAE paper No. 927031.
  27. Fleisher, D.H., Ting, K.C., Hill, M, Eghbali, G. 1999. Top level modeling of biomass production component of ALSS. The 29th International Conference on Environmental Systems, SAE Technical Paper No.1999-01-2041, Warrendale, PA.
  28. Fleisher, D.H. and Ting, K.C. 2000. Object-oriented analysis and modeling of closed plant production systems. Transplant Production in the 21st Century, C. Kubata and C. Chun, Eds., Kluwer Academic Publishers, The Netherlands: 53-58.
  29. Garrett, RE. 1985. Social impacts of automation in agriculture. In Proceedings of the Agri-Mation<sup>TM</sup> 1 Conference & Exposition, February 25-28, Chicago, IL:15-20.
  30. Giacomelli, G..A., van Weel, P.A. and van der Shilden, M. 1987. Expert systems development for greenhouse potted plant production. ASAE Paper No. 87-5012. St. Joseph, MI:ASAE.
  31. Giacomelli, G.A., Fang, W., Ting, K.C. and van Weel, P.A. 1990. Behavior of internal transport system for potted plant production. The XXIII International Horticultural Congress, Firenze, Italy. August 27, September 1, Abstract No. 2343.
  32. Giacomelli, GA et al. 1993. Greenhouse plant growth monitoring with machine vision. NABEC Paper No. 93-208, St. Joseph, MI:ASAE.
  33. Giniger, M. S., McAvoy R. J., Giacomelli G. A. and Janes H. W. 1988. Computer simulation of a single truss tomato cropping system. Transactions of the ASAE 31(4):1176-1179.
  34. Humphreys, M., et al. 1994. Expert system for greenhouse glazing selection. Proceedings of the Twenty-Fifth National Agricultural Plastics Congress:52-58.
  35. Kacira, M. and Ling, P.P. 2001. Design and development of an automated and non-contact sensing system for continuous monitoring of plant health and growth. Transactions of the ASAE 44(4):989-996.
  36. Kacira, M., Ling, P.P., Short, T.H. 2002. Establishing crop water stress index (CWSI)

- threshold values for early and non-contact detection of plant water stress. Transactions of the ASAE 45(3):775-780.
37. Kim, Y. and Ling, P.P. 2001. Machine vision guided sensor positioning system for leaf temperature assessment. Transactions of the ASAE 44(6):1941-1947.
  38. Kondo, N., Nishitsuji, Y, Ling, P.P., Ting, K.C., 1996 Visual feedback guided robotic cherry-tomato harvesting. Transactions of the ASAE 39(6):2331-2338.
  39. Kondo, N. and Ting, K.C. 1998. Robotics for plant production. Artificial Intelligence Review-Artificial Intelligence for Biology and Agriculture, 1998, 12(1-3):227-243. N. Kondo, K.C. Ting.
  40. Ling, P.P., et al. 1996. Quantification of somatic coffee embryo growth using machine vision. Transactions of the ASAE 38(6):1911-1917.
  41. Ling, P.P. and Ruzhitsky, V.N. 1996. Machine vision techniques for measuring the canopy of tomato seedling. Journal of Agricultural Engineering Research 65:85-95.
  42. Louwsma, L.S. 1996. Classification of lettuce seedlings using machine vision and artificial neural networks. NJAES Publication No. R-03232-03-96, Bioresource Engineering Department, Rutgers University, New Brunswick, NJ.
  43. McAvoy, R. J. and Giacomelli, G..A. 1985. Greenhouse tomato production in a transportable, potted plant cropping system. Presented at the Symposium on Mechanization, IISHS, Bonn, Germany. May 1985.
  44. Monta, M., Kondo, N., Ting, K.C., Giacomelli, G.A., Mears, D.R., Kim, Y., Ling, P.P. 1998 Harvesting end-effector for inverted single truss tomato production systems, Journal of JSAM 60(6):97-104.
  45. Monta, M., Kondo, N., Ting, K.C. 1998. End-effectors for tomato harvesting, Artificial Intelligence Review-Artificial Intelligence for Biology and Agriculture 12(1-3):11-25.
  46. Ruzhitsky, V.N. and Ling P.P. 1992a. Machine vision for tomato seedling inspection. Paper No. 927020, St. Joseph, MI:ASAE.
  47. Ruzhitsky, V.N. and Ling P.P. 1992b. Image analysis for tomato seedling grading. Paper No. 923588, St. Joseph, MI:ASAE.
  48. Tai, Y.W., et al. 1994. Machine vision assisted robotic seedling transplanting. Transactions of the ASAE 37(2):661-667.
  49. Ting, K. C., Dijkstr J., Fang W. and Giniger M. 1989. Engineering economy of controlled enviroment for greenhouse porduction. Transactions of the ASAE 32(3):1018-1022.
  50. Ting, K.C., Giacomelli, G.A., Mears, D.R., Shen, S.J., Kabala, W.P., Williamson, S.E. 1991. Piercing Elements Gripping Apparatus, U.S. Patent No. 5,054,831, Issue Date October 8, 1991.
  51. Ting, K.C., Fang, W. and Giacomelli, G.A. 1991a. Decision Support for Integrated Greenhouse Production Systems. Horticulture --- New Technologies and Applications, Proceedings of the International Seminar on New Frontiers in Horticulture, J. Prakash and R.L.M. Pierik (eds), Kluwer Academic, Dordrecht, the

- Netherlands: 293-298.
52. Ting, K.C., Fang, W. and Giacomelli, G.A. 1991b. Decision Support Software for Integrated Greenhouse Production Systems. International Seminar on New Frontiers in Horticulture, Bangalore, India.
  53. Ting, K.C. and Giacomelli G.A. 1991. Systems integration of automation, culture and environment within CEA. Proceedings of the Automated Agriculture for the 21st Century Symposium:518-525.
  54. Ting, K.C. 1992. Mechanization, automation, and computerization for greenhouse production. HortTechnology 2(1):59-63.
  55. Ting, K.C., Giacomelli, G.A. and Fang, W. 1993. Decision Support Systems for Single Truss Tomato Production. Proceedings of XXV CIOSTA-CIGR V Congress. Wageningen, The Netherlands. 70-76.
  56. Ting K.C., et al. 1995. Finite difference model of phase change thermal storage. NABEC Paper No. 95-9525, St. Joseph, MI:ASAE.
  57. Ting, K.C. 1995. Systems analysis of robotic workcells for plug transplanting and somatic embryos quality sorting. Proceedings of International Symposium on Automation and Robotics in Bioproduction and Processing 2:181-188.
  58. Ting, K.C., et al. 1996. Research on flexible automation and robotics for plant production at Rutgers University. Advances in Space Research 18(1/2): (1/2)175-(1/2)180.
  59. Ting, K.C. 1997. Automation and systems analysis. Plant Production in Closed Ecosystems, E. Goto et al. (eds.), Kluwer Academic Publishers 171-187.
  60. Ting, K.C. 2000. Automation-culture-environment oriented systems analysis (ACESYS) for controlled environment bio-production. Research for the Utilization of Insect Properties, National Institute of Sericultural and Entomological Science, Tsukuba, Japan: 23-29.
  61. Ting, K.C. 2002. Concurrent science and engineering approach to decision support for controlled environment plant production. Acta Horticulturae 578:35-43.
  62. van Weel, P.A. and Giacomelli, G.A. 1990. Systematic model for the design of integrated greenhouse production systems. The XXIII International Horticultural Congress, Firenze, Italy, August 27-September 1, Abstract No. 2271.