

設計泛用型滴灌控制器適合於設施內 盆栽植物灌溉管理需求

Designing the Universal Type of Drip Irrigation Controller for Suitably Implemented on Irrigation Requirement and Management of Pot Plants in Greenhouses

國立宜蘭大學
生物機電工程學系
教授

周立強*

Li-John Jou

國立宜蘭大學
生物機電工程學系
教授

邱奕志

Yi-Chieh Chiu

國立宜蘭大學
生物機電工程學系
學士班學生

范力達

Li-Da Fan

摘 要

本文以控制團塊機制論點設計一種在設施內之盆栽植物在週遭環境(日射、溫及相對濕度)交互作用下能滿足水分需求管理的滴灌控制器。本文將設施內盆栽植物在週遭環境交互作用下所產生的動態蒸發散量變化視為一種水份需求的黑盒子，以團塊化盆栽觀點利用蒸發散量荷重變化偵測，去解決植物生理蒸散作用下水份需求與週遭氣候環境交互作用機制下所需多重感測器問題，並採用布林邏輯語言(Boolean logical language)演繹滴灌管理控制程序(deducing the control procedure of drip irrigation management)。本文採用工業上普及使用可程式控制器及其週邊元件設計製作能適用於亞熱帶地區半開放式棚架溫室內盆栽作物環境資訊與滴灌管理的組合控制箱，以滿足容易設定操作及維修之需求。在功能測試中選定合果芋綠精靈及聖誕紅盆栽作物，驗證此一泛用型滴灌控制器之功能，其灌溉水量控制標的與參照標的之抽樣均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)分別為 9.5%及 4.5%。此設計泛用型滴灌控制器能適合於設施內盆栽植物灌溉管理需求並不限定僅適用於單一特定盆栽作物。

關鍵詞：盆栽，水份需求，灌溉管理，滴灌控制。

*通訊作者，國立宜蘭大學生物機電工程學系教授，26047 宜蘭市神農路一段 1 號，ljjou@niu.edu.tw

ABSTRACT

In this paper, based on the mechanism endpoint of a controlled lump, the drip irrigation control modules is designed to satisfy water requirement and management of pot plants under interactive mechanism of surrounding environmental conditions such as solar radiation, temperature and relative humidity (RH) in greenhouses. We regard the variation of dynamic evapotranspiration in a pot plant, which is caused from the interactive mechanism of surrounding environmental conditions, as a black box for simply quantifying its water requirement. According to the endpoint of a lumped pot plant, the weight variation is used as a synthetic physical quantity, which is a combined interactive outcome integrating evapotranspiration and ambient environmental factors, that can be measured with a load cell to offer the cost-reduced supervisory apparatus for building the modular drip irrigation controller. We used a programmable logical controller (PLC) associated with its interface devices, which were popular commercial apparatuses widely used in industrial control, to develop a modular control box consisted of environmental sensors and drip irrigation controller for suitably implemented on water requirement and management of pot plants in semi-closed type greenhouses extensively employed in Taiwan. A Boolean logical language was employed to deduce the control procedure of irrigation management to transform into a PLC program. Our developed modular control box was designed to satisfy the requirement of easy operation and maintenance for users. The performance outcomes show that the universal type of drip irrigation controller can satisfactorily command the expected functional requirement for use in various kinds of pot plants.

Keywords: Pot plant, water requirement, irrigation management, drip irrigation control.

一、前 言

灌溉管理中灌溉期距與灌溉量的控制均取決於作物需水量的掌握，而作物需水量的決定常用兩種方式；一般可分為直接測定與間接推估，土壤水分觀測即屬實際量測作為，由土壤有效水分(Soil available moisture)來決定；間接推估則以理論或經驗公式配合氣象因子予以推估，由作物蒸發散量(crop evapotranspiration, ET_c)決定。在設施中土壤水分平衡方程式， $\Delta M = I + D - ET$ ，式中 I 、 D 、 ET 及 ΔM 分別為灌溉水量、根系土層與下層土壤之水分交換(滲透量或毛管水補充)、蒸發散量及土壤水分變化量。在作物能正常生育的前提下，有效土層中根部周圍土壤的水分減少量稱為消費水量，此減少量會依土壤面蒸發、作

物吸收、蒸散及下層的水分供給來決定，而這幾點因素又會與作物附近環境微氣候有極大關係。設施內田間栽培，其根系深度較深且非均一土層，盆栽土層淺大多為人工介質土，為有效解決及簡化問題，盆栽土層應視為單一及均勻有效土層，因此根系土層與下層土壤之水分交換 D 之因子不復存在，由前述土壤水分平衡方程式中可簡化為 $\Delta M = I - ET$ 。若 $I = 0$ ，則 $ET = -\Delta M$ ，即作物蒸發散量等於遞減土壤水分變化率，根系土壤水分遞減量絕大部分是供應作物蒸散所需，而僅有少部分是出於土壤表面蒸發損失(施與張，1993)。

在設施內有關作物蒸發散量模式，Ilahi (2009)以文獻整理分析各類作物(perennial grass, sweet pepper, banana, tomato, chrysanthemum,

red sunset red maple trees and ornamental species) 其蒸發散量模式應用在各類型溫室設施之精確性 (r^2 : coefficient of correlation; RMSE: root mean square error) 比較。以作物蒸發散量模式計算是分為二類(Allen *et al.*, 1998); 一是僅考慮氣候資料而不考慮作物特性及土壤因素, 其二是藉由作物資料、氣象、土壤因子及作物係數所整合, 包含空氣動力與遮覆阻抗(aerodynamic and canopy resistances)及葉面積指標(Leaf area index, LAI)等整合因子計入考慮。Ilahi (2009) 指出滿足後者模式有 Stanghellini、Fynn、Penman-Monteith 網室(screen-house)及簡易(simplified)共四種模式, 這四種模式就精確性而言是應用在控制環境下的溫室設施, 而就花卉及觀賞植物而言, Fynn 模式應用在菊花(chrysanthemum), 而簡易模式則有秋海棠(begonia)、櫻草(cyclamen)、梔子花(gardenia)、大岩桐(gloxinia)、木槿(hibiscus)、鳳仙花(impatiens)、天竺葵(pelargonium)、聖誕紅(poinsettia)及室宿(schefflera)等 9 種植物應用(Baille *et al.*, 1994b)。Ilahi (2009)也比較整理指出在上述四種作物蒸發散量模式計算所需要的最少量測資訊至少三個, 也是 Fynn 及 Simplified 模式, 僅需要淨日射(net radiation, R_n)、蒸氣壓差(vapor pressure deficit, VPD)及葉面積指標(leaf area index, LAI)三個量測資料, 而此二種模式是應用在控制環境下的溫室設施, 前者 r^2 及 RMSE 分別為 0.94 及 2.1%, 後者 r^2 則在 0.87-0.97, 兩者之 r^2 都有相當高的精確度, 雖然 Simplified 模式之 RMSE 評估未能提供, 但 Simplified 模式應用於花卉及觀賞植物種類是最多。

在以往設施內自動灌溉系統大多採用定時定量方式, 這種方式容易安裝、成本低、維修保養簡易, 但是灌溉策略無法決定正確的灌溉量。因為陰、晴不定天氣就會影響作物需水量, 而且水壓變化時段不同, 管線末端等問題造成以時間來控制灌溉水量很難準確。若是以增加定時器數目及分區分時段的灌溉管理方式, 的確可以解決灌溉水量均勻度問題, 但是整體來說自動化灌溉

終究受到資訊取得與感測控制成本極大影響, 使得灌溉水量的多寡仍無法精確解決。前提是必需瞭解作物蒸發散量及適當提供感測訊號給灌溉自動化系統運用。目前商品化可執行灌溉控制的有張力計法、電阻法及熱分散法。張力計法的優點是準確易安裝, 但量測範圍受到一定限制, 維護保養不易成本高且僅能實施點量測。電阻法是容易安裝成本低, 也可自動記錄, 但容易受到土壤化學物含量影響, 必須經常校正也僅能實施點測定。熱分散法是準確易安裝, 不受鹽分影響, 但水潛勢範圍受到限制, 設備昂貴複雜也是只能點測定。由於盆栽栽培介質非一般土壤, 有關介質配方也並未建立各種型態上標準化, 而且大多數土壤水分感測器並非均適用於在介質水分之量測, 若以介質水分直接量測來進行灌溉控制之可行性不高。點測定幾乎是所有自動化管理共通點, 如何使感測器擺放位置能代表全面控制是需要解決的問題, 此外容易安裝、成本低、維修保養方便、不受太多因子影響(土壤化學物含量、溫度、鹽分、高水分等)更是共同目標。在設施內作物蒸發散量資訊取得或量測設備是可以作為作物灌溉需求依據也最準確, 但裝置成本高(Sánchez *et al.*, 2012), 而以電子重量測定獲得蒸散量方式已適用在多種花卉及觀賞植物(Baille *et al.*, 1994a; 1994b)、菊花(Fynn *et al.*, 1993), 因此開發一種簡單有效且成本低的自動灌溉管理裝置顯得重要。

吳等(1994)在聖誕紅栽培灌溉技術之比較分析一文中曾探討不同灌溉方式對聖誕紅生育之影響及分析比較成本效益, 發現以滴灌及虹吸式灌溉法生育狀況較其他二種噴霧及噴灑灌溉方式為佳, 也指出滴灌設備成本中等, 省工、省水、省肥清潔, 但水質要乾淨避免阻塞, 而虹吸式灌溉由於吸水較多, 在陰雨期略有徒長現象且設備成本昂貴, 必須要定期洗鹽。傅氏(1996)在盆花灌溉管理一文中也指出底部灌溉的方式會造成可溶性鹽類累積在盆內表面, 相較於其他灌溉方式, 是可省水省肥, 但是底部灌溉所需要的初期設置成本是最高, 也還需要精準床架及電腦協助設定控制, 因此在聖誕紅需水量大, 苞片又容易

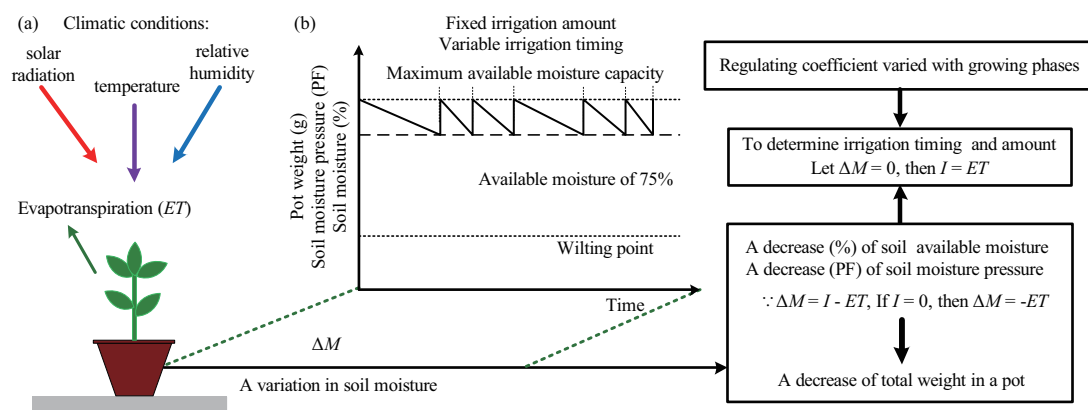


圖 1 (a)本文實行盆栽植物灌溉管理之架構。(b)定量不定時(固定灌溉水量，不定的灌溉期距)的灌溉管理觀念

殘留水漬就較適合用滴灌方式。

本文目標是以控制團塊機制論點設計一能泛用於設施內盆栽植物在週遭氣候環境(日射、溫、相對濕度)影響下能滿足盆栽植物水分需求管理的滴灌控制器。在此將設施內盆栽植物在週遭環境交互作用下所產生的動態蒸發散量變化視為一種水份需求的黑盒子，以控制團塊機制論點利用蒸發散量荷重變化偵測迴授訊號，去解決植物生理蒸散作用下水份需求與週遭氣候環境複雜的交互作用機制下所需多重感測問題。本文利用目前既有的知識蒸發散量與氣候環境之關係，進行滴灌管理控制組設計製作，採用工業級可程式控制器(Programmable Logical Controller, PLC)及其週邊低壓工業配線元件設計製作應用於亞熱帶地區棚架溫室內盆栽作物滴灌控制器與環境資訊的套用組合。PLC 具有商品化程度高、量產低廉的特點，並不需要研發特定的微電腦控制器，是屬開放式控制器，程式稍作修改可適用於各種灌溉管理的控制場合，維修更改均方便。最後本文選擇合果芋綠精靈及聖誕紅兩類盆栽作為滴灌控制器功能測試標的，同時本文也將滴灌功能測試對應下之設施內作物環境區溫、濕度、日射量及盆栽重量值，以一 2 參數簡易模式(2-parameter simplified model)進行盆栽蒸散速率之擬合分析作為對照參考，間接驗證及評估此一滴灌控制器功能不限定適合一種特定盆栽作物。

二、材料與方法

2.1 控制器設計

2.1.1 制定灌溉管理策略

為了簡單而有效決定較精確滴灌水量，本文將盆栽植物生育期分階段以週為單位，而忽略短期生長因素所導致的重量變化，把盆栽植物視為一個單一區塊，依土壤水份平衡觀念可得 $\Delta M = I - ET$ ，控制水分散失變化使 $\Delta M = 0$ ，換句話說，盆栽植物土壤水分保持在一合適有效水分範圍內(對應上下限內)，則滴灌水量 $I = ET$ 。圖 1a 為本文實施盆栽植物灌溉管理策略的架構，作物滴灌水量(I)的決定是以補充盆栽蒸發散量(ET)所引起土壤水份減少(ΔM)為依據並輔以植物各生育期之係數作調整。

本文以重量變化量測盆栽累積蒸發散量(包含氣候資料)作為其滴灌水量之依據，土壤水份張力計法僅作為參考對照。在此我們定義作物能正常生育的有效水分範圍是經過 24 小時重力自然排水後之含水量(此為有效水分上限)至使作物形成生長阻礙的土壤水份含量(此為有效水分下限)之間。本文取樣 5 個盆栽以淹灌浸泡方式使達飽和狀態再經過 24 小時後重力自然排水，取得有效水分上限所對應之重量，而以土壤水分張力計測定取得土壤水分(pF: 1.5-2.0)作為參考對照及作物的有效水分上限。而作物產生生長阻害的水

分點其對應之土壤水分張力值(pF: 2.4-3.0)即可作為作物生育的有效水分下限，並可對應當時之重量下限值，而這樣的概念，如圖 1b 所示。圖 1b 顯示為定量不定時(固定灌溉水量，變動灌溉期距)灌溉管理觀念示意圖，這樣觀念在於解決需要多少水量就給多少的問題，不會像定時定量，有時會太多，有時會不足。但是定時不定量灌溉方式，在決定固定灌溉期距後，變動灌溉水量取決於氣候變化因子，以作物生育的有效水分上限作為灌溉停止點是沒問題，不過在氣候變化差異大時，有可能實際土壤有效水份在已經降至足以產生逆境生長阻礙水份點以下時，不當的固定灌溉期距缺乏彈性調整反而會使得以重量偵測蒸發散量作為自動的灌溉系統無法即時反應作業。在上述這樣的情況下，本文選擇固定灌溉水量及變動的灌溉期距作為灌溉管理策略是比較合適，也能因應氣候變化作不定時調整灌溉週期。在本文中以盆栽重量法作為滴灌管理的依據，而以團塊方式來看，則盆栽重量法也是一種主要由介質水分變化所引起的重量變化。因此本文滴灌控制器控管之有效水分設計範圍是以淹灌浸泡方式使盆栽栽培土達飽和狀態再經過 24 小時後重力自然排水之含水量作為有效水分上限即 TAM (Total Available Moisture)，本文即以取得之有效水分上限所對應之重量作為滴灌控制器控管之滴灌水量上限，同理本文以實驗方式取得盆栽在 3/4TAM 狀態下之重量值，作為控管滴灌水量之下限。這樣的方式是等同滴灌水量設計不會高於基本入滲率做法，可使滴灌系統不會造成多餘滲水由盆栽底部排出。對於不同種類盆栽及栽培介質，本文所指的「泛用型」滴灌控制器，在運轉之初必須完成以上做法及因地因類別而制宜設定控制參數。因此控制策略的採行其基本假設如下：

- (1) 同一設施內微氣候條件是均一的，設施內的作物種類、生育期是相同的，此可確立同區中盆栽作物蒸發散量是趨於一致，僅點測一盆可代表全部，即使每盆重量有所差異(即初始重量不盡相同)，這對採差動控制觀念上，在每盆所需要的滴灌水量不

會有太大的個別差異，而採用差動重量(differential weight)觀點作為迴授盆栽水份需求之控制架構，如圖 2a 所示。

- (2) 同區中是可以由灌溉管線分割成數個分區，各分區管線均採用雙頭給水，初步可降低各分區間水量及水壓差異，再藉由微調校正灌溉控制器秒數補償後端管流的水頭損失下差異水量，可使各分區內前後端管線出水量差異再降低，以達到均勻水量目標，圖 2b 則為滴灌管線系統的配置圖。

2.1.2 確定目標功能

本文以 3 個栽培區滴灌盆栽作物作為控制對象，進行設計灌溉管理控制組，圖 2b 為一 3 區滴灌的管理控制系統包含電磁閥及管線配置分佈在 3 個栽培區，灌溉區內所有情況都是相同的，如種植的盆栽種類、數量等。又為了減少設備成本，因此只有一套荷重感測器與一只加壓泵，所以無論選擇哪一區皆可，但其限制條件為該區一定要有標的盆栽作為樣本達到自動灌溉目的。而本灌溉管理控制組是選擇以第 1 區指標盆栽重量變化 Δw_i (即對應栽培土介質之 1/4 有效水份差值變化)為標的控制。當第 1 區指標盆栽重量變化 $\Delta w(t_i)$ 等於 Δw_i 時，第 1 區即進行灌溉動作，當控制器程式功能會同步記憶學習此灌溉動作所耗費的灌溉時間 Δt_i ，接著模仿以相同灌溉時間 Δt_i 實施於第 2、3 區得到對應之灌溉水量 Δw_{2i} 及 Δw_{3i} 。滴灌控制器的設計可隨著同區內盆栽蒸發散量多寡補充盆栽散失的水份需求，亦可依使用者經驗以人為增減微調方式以更符合現狀需求(例如每栽培區盆栽生育期或微氣候間之差異化)。適當採取分區輪灌方式，可避免大區域管線前後端水量不均問題，亦使得同時期各區灌溉水量趨於一致。在進行灌溉動作時，若有某區(本文為第 2 或 3 區)無擺放或出貨盆栽，則該區不進行灌溉動作予以隔離狀態略過，其他各區仍依序完成灌溉動作，直到最後一區結束灌溉動作，此一循環才算結束。

2.1.3 動作說明

根據上述本文設計一種泛用型滴灌控制器適合於設施內盆栽植物灌溉環境管理控制組。此

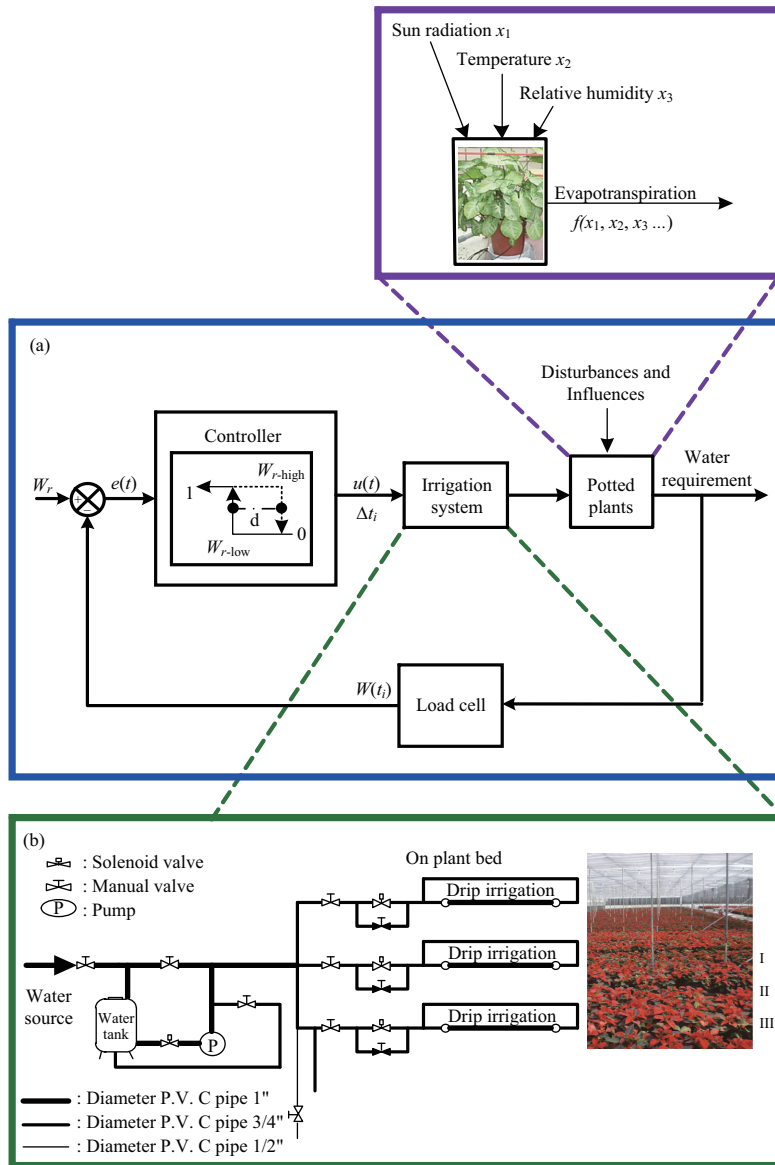


圖 2 (a)採用差動重量作為迴授盆栽水份需求之控制架構。(b)滴灌管線系統配置

控制組包含一 PLC 主機(Sharp JW20 型)結合一荷重單元(load cell: Tedeia-1022/output: DC 0-10 mV/input 5V 及 converter: 4-20 mA), 並有日射計(Pyranometer sensor: LI-COR-200SZ)、溫濕度感測器(HTS-801)作為溫室內部顯示用(在未來可聯結作為適當環境控制用)。操作方式有手及自動兩種。於手動操作時, 按下第 1 區的灌溉按鈕, 第 1 區開始進行灌溉動作(第 1 區灌溉燈亮)。若要隔

離其餘兩區, 只要按下該區隔離按鈕(該區隔離燈亮), 則該區在稍後的循環中即不進行灌溉動作。若盆栽重量已達使用者需求, 則再按下第 1 區的灌溉按鈕即可結束此灌溉動作, 而於無隔離狀態下, 接著是第 2 區進行灌溉動作(第 2 區灌溉燈亮), 再來是第 3 區依此類推。然而當最後一區灌溉結束後, 表示此分區循環灌溉動作結束。於自動操作時, 主要是根據荷重計設定元件, 進行分

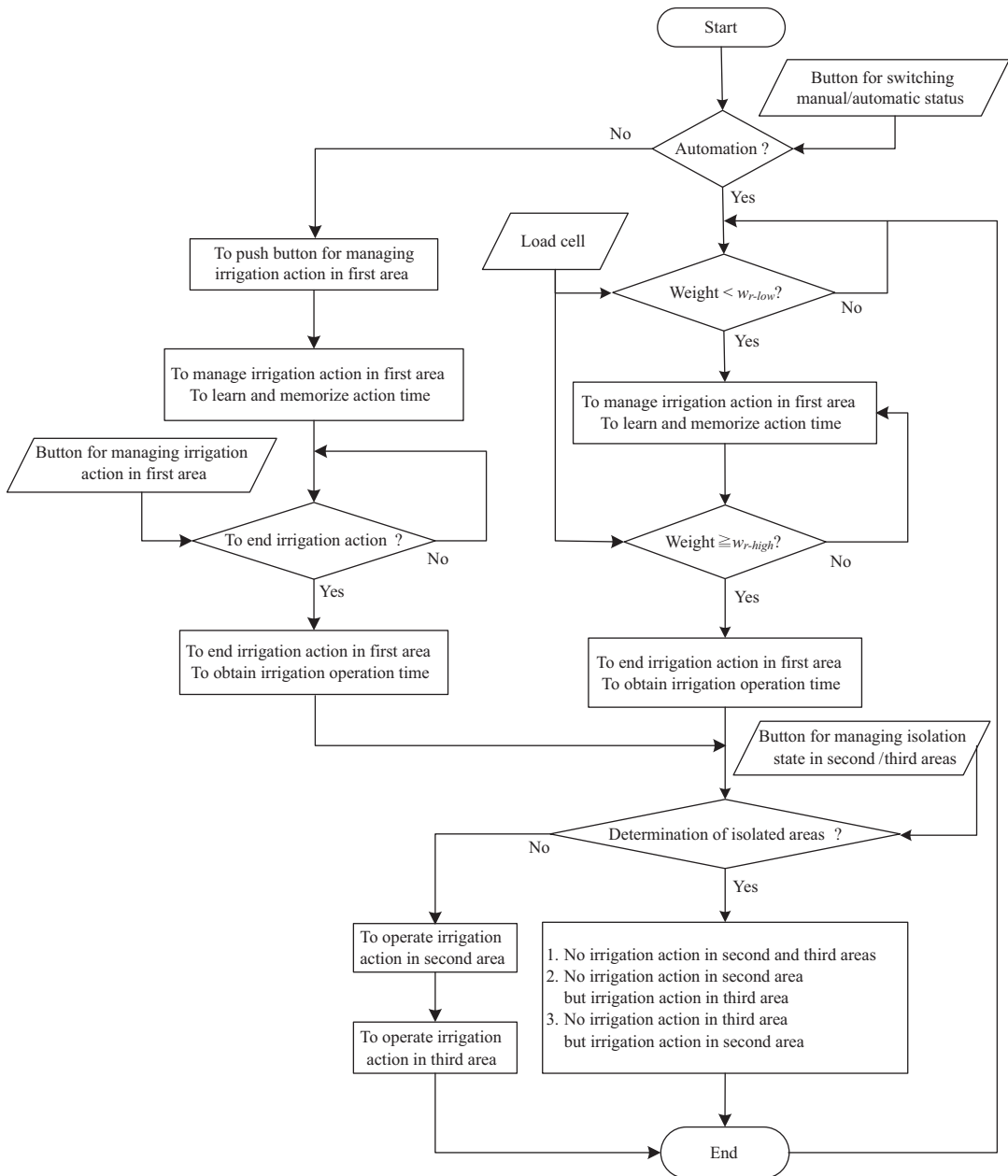


圖 3 在定量灌溉及變動灌溉期距下之控制邏輯流程圖

區循環灌溉動作，若有隔離狀態，則同手動操作之隔離動作流程，毋須再按下第 1 區的灌溉按鈕，因為此部份已被荷重計設定元件之上限接點取代之。無論在手動或自動操作時，第 1 區的按鈕(燈)定義為灌溉用，其餘的第 2 與 3 區則定義為隔離按鈕(燈)。

2.1.4 控制流程與程式演繹

本文所使用的荷重單元可以檢測 0-20 kgw 內的物件，靈敏度為 $0.8 \mu\text{A/g}$ ，其輸出類比電流 I (4-20 mA)與被感測物重量 W (kg)成一線性關係即 $W = 1.25 \cdot I - 5$ 。以 PLC 結合類比至數位轉換器(Analog to Digital converter, ADC)，可得數

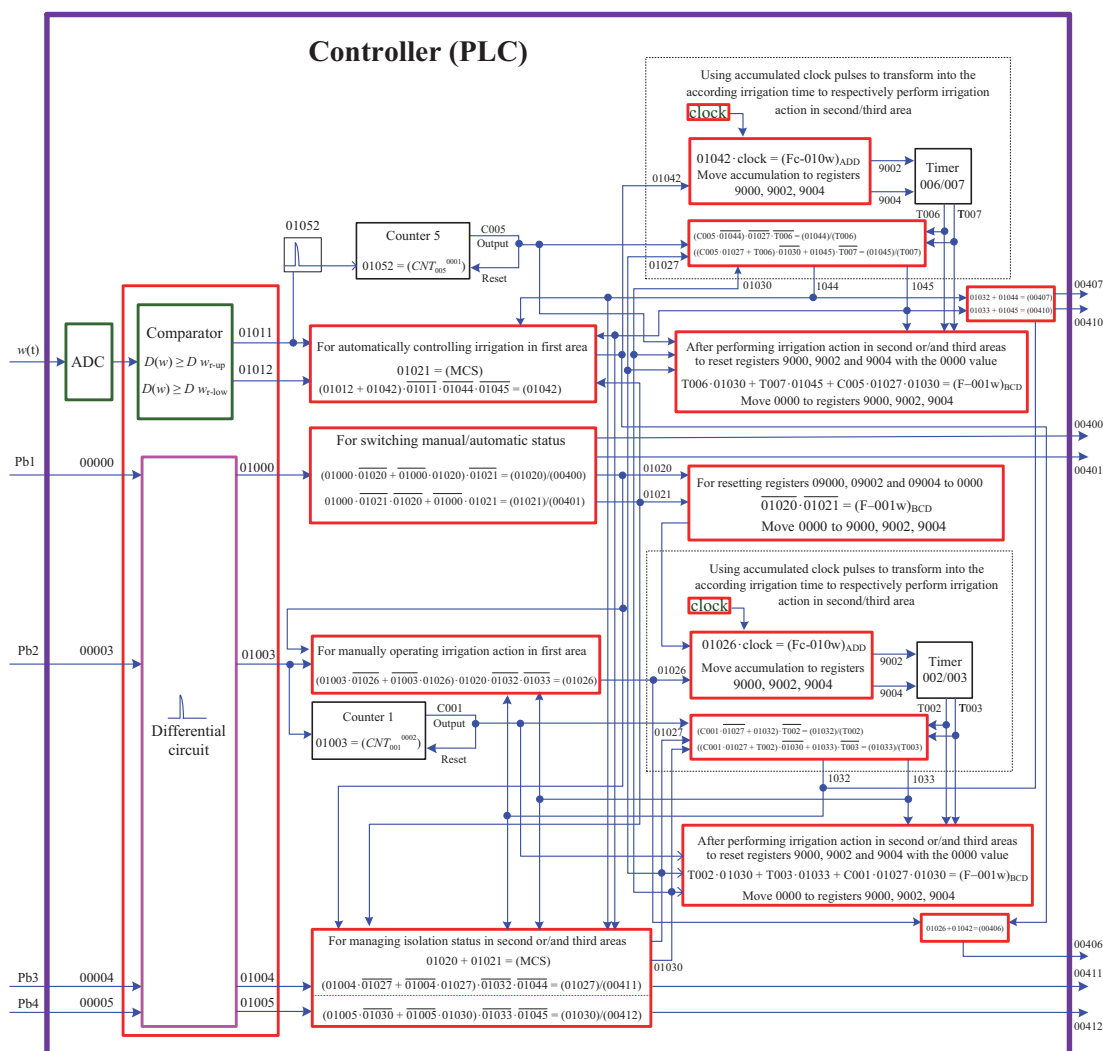


圖 4 演繹在定量灌溉及變動期距調控下之盆栽植物滴灌控制器之程式區塊(符號說明參照附錄)

位碼 D 與類比電流 I (mA)之轉換關係為 $D = 100 \cdot I$ ，依此關係可獲得根據設定盆栽重 W 與數位碼 D 之換算式 $D = 80 \cdot W + 400$ 及每一位元解析度是 12.5 g。透過 PLC 與 ADC 結合，由 ADC 負責接收盆栽重量類比訊號，並將其訊號轉換為 PLC 內部之邏輯變數，接著使用 PLC 內建比較器 (built-in comparator) 功能，將此邏輯變數藉由數值比較方式作多段比較輸出，能產生複數個邏輯變數 (即 PLC 之內部電驛) 作各種功能需求上之邏輯演算。本文根據前述目標功能動作將之轉譯為控制流程型式之邏輯語言 (圖 3)，圖 4 則為控制

器之區塊程式演繹結果。以 PLC 為主之控制器的輸入/輸出外部配置線路及階梯程式，如附錄資料圖 A 及 B 所示，其內部電驛編碼序號可參照圖 B 之符號說明，依序對應出各程式區塊內部電驛的序號編碼及邏輯階梯電路構成。

2.2 功能測試

國內聖誕紅產區主要為宜蘭、桃園、卓蘭及埔里等地，其盆花產銷已在臺灣花卉產業具有組織規模 (傅，2010)，合果芋綠精靈是一種居家栽培小品盆花深受都市消費者喜愛，對室內

揮發性有機物質苯氣體污染物及致癌物，具有很高吸收效率，其沈降速率可達 0.16 mm/sec (楊等，2009)。目前許多觀賞植物盆栽業者均採用人工栽培土，而市面上所售之栽培土介質種類及品牌眾多，本文所設計「泛用型」滴灌控制器的適用意義是指不限定盆栽種類及品牌眾多栽培土介質均可適用，我們配合宜蘭地區業者在棚架溫室選定一季節性市場價值盆栽聖誕紅及合果芋綠精靈，使得作物各方面均已受到良好品質控制下進行設施內作物氣候(溫、濕度、日射)及蒸發散量現場環境參數觀測。同時盆栽的介質土重、盆體積及夯實度之差異範圍均在 10% 以內，盆栽落葉及盆栽間葉面交錯現象，在指標及對照盆栽均被排除此不確定性因素，此功能測試目的在於驗證此泛用型滴灌控制組，感測指標盆栽，因氣候環境變化所造成盆栽蒸發散量之差動重量，轉化為對應之灌溉時間，以實施至他盆之滴灌量控制能力。在此本文將灌溉區分成在三個栽培區，以第 1 區其中一盆栽重量為盆栽重量指標區，第 2 或 3 區為驗證對照區。將控制組連結至此 3 區之各電磁閥、幫浦、第 1 區之荷重計及設施內作物環境區之溫溼度與日射計，依前述方式本文設定第 1 區盆栽之有效水分之上下限對應重量。第 2、3 區的荷重計及設施內作物環境區之溫溼度、日射量之量測值均儲存於 PLC 記憶單元。藉由定量不定時的灌溉管理策略，由可程式控制器經由荷重感測器傳回來的訊號判斷何時灌及該灌多少水(定量不定時)動作輸出到電磁閥，同時進行學習記憶功能，分區執行於每區灌溉作業。我們分別針對定量不定時策略記錄第 1 區與 2 及 3 區隨機每次灌溉量(即荷重計前後差值即 Δw_{2i} 及 Δw_{3i})及灌溉次數評估滴灌控制器功能之穩定及精確性，本文是以均方根誤差(RMSE)作為量化值，即

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta w_{2i} - \Delta w_1)^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta w_{3i} - \Delta w_1)^2}{2n}} \times \frac{100\%}{\Delta w_1} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中 Δw_{2i} 及 Δw_{3i} 分別為第 2 及 3 區之每次灌溉水量， n 為第 2 及 3 區之灌溉次數。

1994 年 Baille 在溫室作物需水量研究中指出以作物蒸發散量值所表示之室內日射量、飽和蒸汽壓差的線性式是可用以量化作物需水量。對此許多研究學者(Baptista *et al.*, 2005; Medranoa *et al.*, 2005; Katsoulas *et al.*, 2006; Carmassi *et al.*, 2013)陸續皆提出以 Baille 等(1994b)根據 Penman-Monteith 方程式所推導以室內條件日射量、VPD 及 LAI 為關係式預測植物蒸發散量 ET 速率。本文之工作以重量法直接量測並以作物蒸發散量模式為室內短波日射量與蒸汽壓差之函數，推導盆栽蒸發散重量速率可表示為，

$$\begin{aligned} \dot{ET}_{pot} &= \alpha \cdot \frac{I_s}{\lambda} + \beta \cdot VPD, \\ \lambda &= 2502.53529 - 2.38575242 \cdot (T - 273.16) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

其中 $\dot{ET}$ 為盆栽花卉蒸發散重量速率($g \cdot h^{-1} \cdot pot^{-1}$)， I_s 為室內短波輻射量(W/m^2)， λ 為水蒸發潛熱(J/kg)， α (無因次單位轉換)及 β ($g \cdot h^{-1} \cdot pot^{-1} \cdot Pa$) 均為經驗常數依作物別包含生長期及溫室狀態操作條件而定(Jolliet and Bailey, 1992; Lorenzo *et al.*, 1998; Katsoulas *et al.*, 1999)。根據濕空氣性質推導 $VPD = P_s - P_v$ ，其中 P_s (Pa) 為飽和蒸汽壓， P_v (Pa) 為蒸汽分壓。由相對濕度 $RH = P_v/P_s$ (%)，代入得 $VPD = (1 - RH) \cdot P_s$ 。由 Keenan and Keyes (1936) 指出飽和蒸汽壓 P_s 與乾球溫度 $T(^{\circ}K)$ 之關係為

$$\ln\left(\frac{P_s}{R}\right) = \frac{a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4}{fT - gT^2}, \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$273.16 < T < 533.16$$

其中 $R = 22,105,649.25$, $a = -27,405.526$, $b = 97.5413$, $c = -0.146244$, $d = 0.12558 \times 10^{-3}$, $e = -0.48502 \times 10^{-7}$, $f = 4.34903$, $g = 0.39381 \times 10^{-2}$ 。換句話說飽和蒸汽壓 P_s (Pa) 可視為乾球溫度 $T(^{\circ}K)$ 之函數 $f(T)$ ，即得 $VPD = (1 - RH) \cdot f(T)$ ，最後我們獲得盆栽蒸發散重量速率可表示為：

$$\dot{ET}_{pot} = \alpha \cdot \frac{I_s}{\lambda} + \beta \cdot (1 - RH) \cdot R \cdot \exp\left(\frac{a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4}{fT - gT^2}\right) \dots\dots\dots(4)$$

在此可充份獲得盆栽蒸發散重量速率 $\dot{ET}_{pot}$ ($g \cdot h^{-1} \cdot pot^{-1}$) 是受到短波輻射量 I_s ，相對濕度(RH)及室內作物空氣溫度(T)之綜合影響。在本文中經由重量法量測盆栽蒸發散重量速率及設施內作物環境區之日射、溫溼度與上述(4)式，可驗證評估此一綜合影響。

三、結果與討論

本文根據前面所述的條件假設與實驗設計，以「定量不定時」的灌溉管理控制模式進行合果芋綠精靈及聖誕紅兩類盆栽滴灌控制器功能測試。實驗係從 9 月 27 日至 10 月 21 日進行四週，此「定量不定時」的灌溉管理模式之控制組功能測試，其觀念是灌溉量(振幅)是保持一定，而灌溉間距時間(週期)會隨著氣候因素而有所調整，適時適量地補充盆栽作物需水量(圖 5、6 及附錄圖 C)。最後本文也將上述合果芋綠精靈及聖誕紅兩類盆栽滴灌控制器功能測試過程中對應下設施內作物環境區之溫、濕度、日射量值及盆栽蒸發散速率，以(4)式作一 2 參數簡易模式(2-parameter simplified model)之盆栽蒸發散量擬合分析作為對照參考，間接驗證及評估此一滴灌控制器功能不限定適合一種特定盆栽作物。

3.1 合果芋綠精靈滴灌控制

圖 5(a)為 9 月 27 日至 10 月 2 日第二區與第三區盆栽蒸發散量及滴灌補充之重量變化歷線，第一區為控制標的，第二及三區為參照標的，圖 5(b)及(c)則為對應期間設施內日射量及溫濕度變化歷線，而進行盆栽植物是綠精靈。控制標的盆栽重量變化調整設定在 2688 (數位碼 $D_{wr-low} = 615$)至 2825 (數位碼 $D_{wr-up} = 626$) g 之間，等同定量設定為 137 g，參照標的在不微調由控制標的盆栽重量變化所獲得的灌溉時間

下，其重量變化是 2880 至 3010 g 之間。自 9 月 29 至 10 月 2 日來看，在定量蒸發散量(盆栽重量)控制下滴灌，明顯地變動灌溉期距長短確實取決於設施內短波日射量、溫度及相對濕度呈現一個水份需求關係；9 月 29 日短灌溉期距 1260 min，累積日射量 $479.25 W/m^2 \cdot h$ ，溫度 $23.5-34.5^\circ C$ ，RH 31.7-82%；9 月 30 日長灌溉期距 1620 min，累積日射量 $275.2 W/m^2 \cdot h$ ，溫度 $23.6-27.4^\circ C$ ，RH 70.6-92.2%。依圖 5(a)中第二區及三區的控制滴灌量為 $131.3 \pm 12.5 g$ (RMSE = 9.5%)，這是在各點水壓並非完全一致及量測上誤差下所造成(解析度 12.5 g/bit)，這個結果仍為業者所能接受，這也表示在施灌時，將第一區盆栽其感測重量差的變化，用可程式控制器的技術轉換成其內部計時器的時間差來控制其他各區的滴灌水量並無太大差異。

3.2 聖誕紅滴灌控制

10 月 4 日至 10 月 10 日進行盆栽植物聖誕紅滴灌控制器功能測試，第一區為控制標的，第二及三區參照標的之盆栽蒸發散量及滴灌補充之重量變化歷線，如圖 6(a)所示。圖 6(b)及(c)為對應期間設施內日射量及溫濕度變化歷線。第一區控制標的自下限 2,763 (數位碼 621)至上限 2863 g (數位碼 629)即盆栽重量變化調整設定在 100 g。自 10 月 5 日 12 時起至 10 月 10 日十時來看，10 月 4 至 5 日之短灌溉期距為 1450 min，累積日射量 $1169.5 W/m^2 \cdot hr$ ，溫度 $24.7-42.8^\circ C$ ，RH 30.0-88.4%；10 月 8 至 9 日 5 之長灌溉期距 2492 min，累積日射量 $383 W/m^2 \cdot hr$ ，溫度 $21.5-30.5^\circ C$ ，RH 47.5-94.5%。依圖 6(a)當中，第二及三區的控制滴灌量為 $99 \pm 4.6 g$ (RMSE = 4.5%)，這個結果仍相同於圖 5 所述。

3.3 蒸發散量模式驗證評估

本文蒸發散量模式驗證評估實驗重點並非考量此二作物之全生育期，然本系統設計是可以根據栽培管理者或使用者的經驗及設施操作條件調整作物各生長期參數值以擬合現場作物需水量，本文是就該二種觀葉植物的重要生長階段

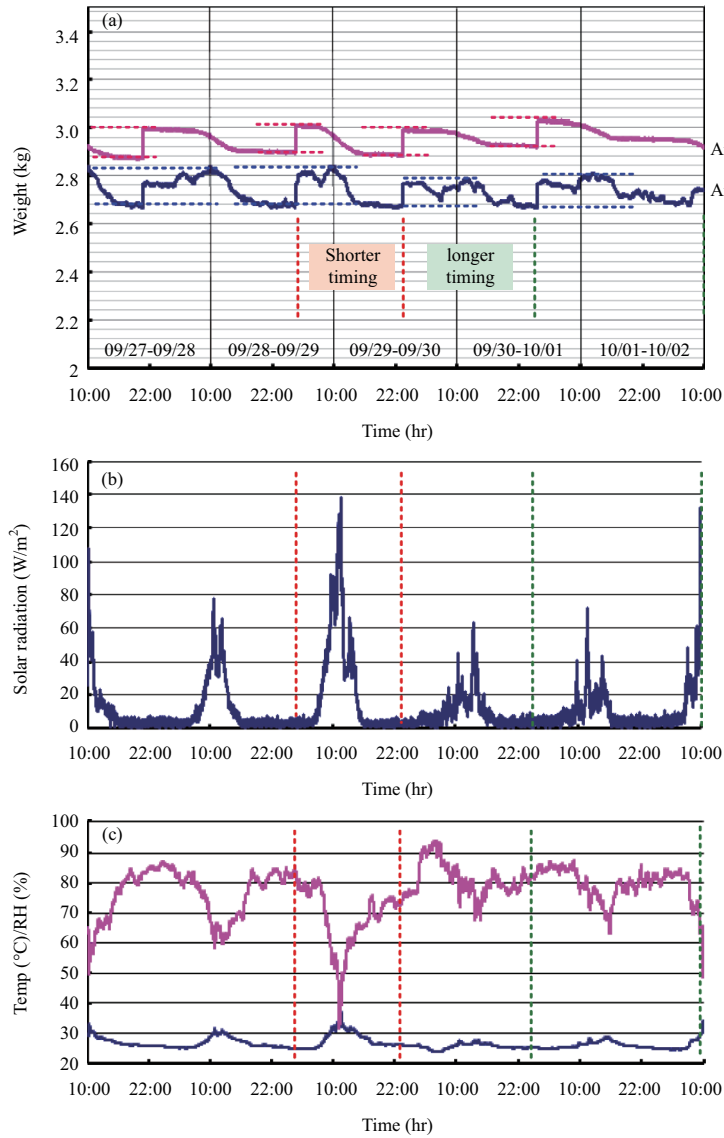


圖 5 (a)採定量不定時的灌溉管理方式在 09/27 至 10/02 期間，於 II 及 III 區盆栽重量變化對照情形，
(b)相同期間設施內日射量及(c)溫濕度變化

(9 月至 10 月栽培成長末期至收穫品質控管出貨期前)予以比較分析作物需水量(灌溉)實測值與蒸發散量模式模擬(估計)值。本文根據前述在「定量不定時」滴灌控制下所獲得合果芋綠精靈及聖誕紅兩類盆栽各三盆，擷取其中一週由 9 月 29 日(合果芋綠精靈)及 10 月 5 日(聖誕紅)設施內作物環境區日射量、溫濕度及盆栽重量遞減之變

化記錄，以每半小時之平均值共 144 筆資料，採用(4)式進行二變數曲線擬合，分別得到對應作物別之各參數值如表 1。接著本文以 9 月 28 至 30 日及 10 月 4 至 6 日期間分別在合果芋綠精靈及聖誕紅盆栽作物環境區內所記錄之每半小時日射量及溫濕度值變化共 144 筆資料，以表 1 中曲線擬合所得之參數代入(4)式分別計算其蒸發散

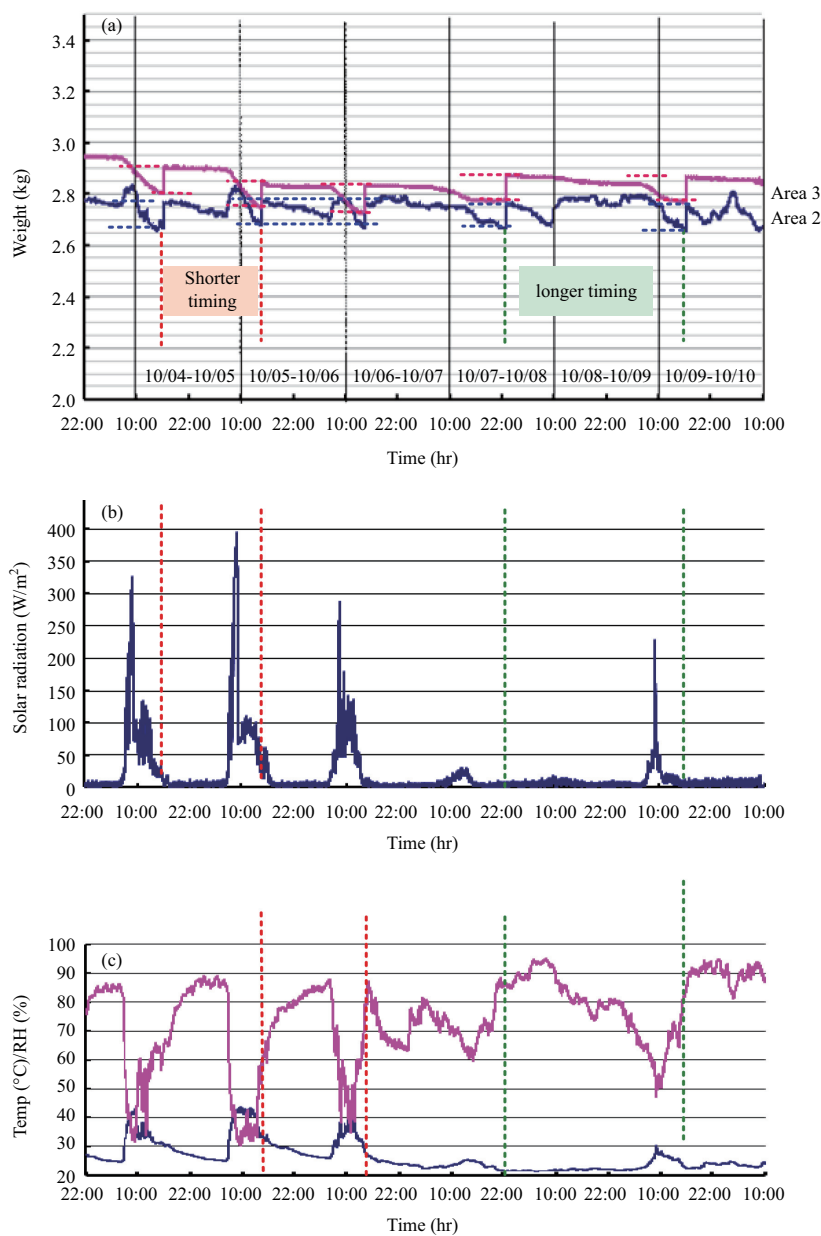


圖 6 (a)採定量不定時的灌溉管理方式在 10/05 至 10/10 期間，於 II 及 III 區盆栽重量變化對照情形，
(b)相同期間設施內日射量及(c)溫濕度變化

表 1 合果芋綠精靈及聖誕紅兩類盆栽重量蒸發散速率以(4)式所擬合之參數評估

Crop	$\alpha (\pm SE)$	$\beta (\pm SE)$	r^2	n
Goosefoot plant	553.937 ± 66.31	0.00145 ± 0.000564	0.846	144
Poinsettia	136.356 ± 11.613	0.00178 ± 0.000232	0.957	144

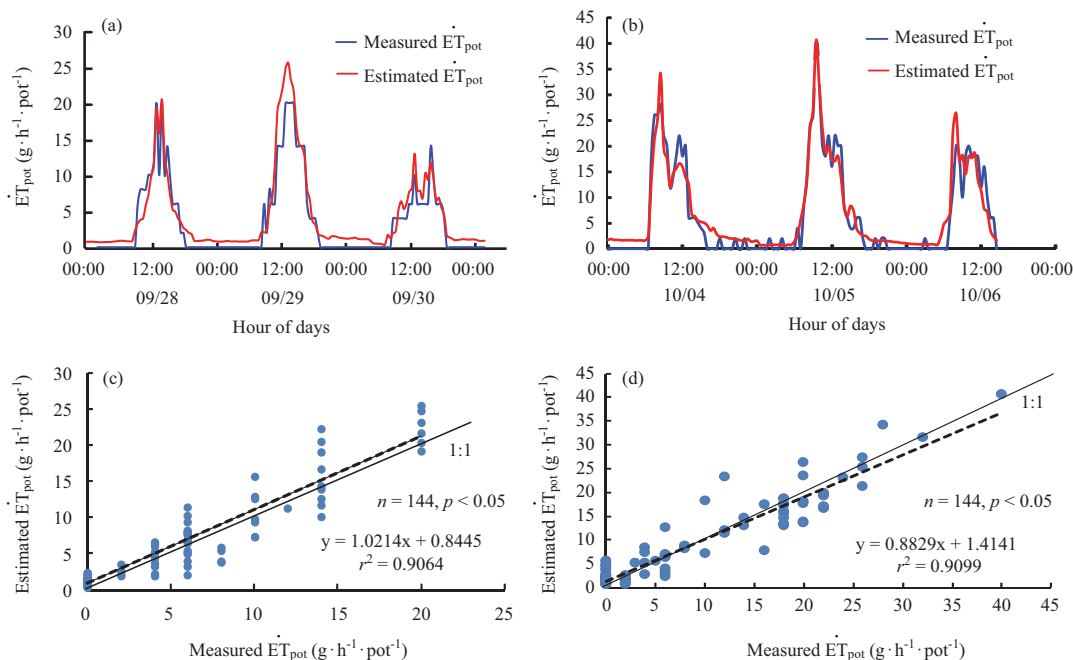


圖 7 (a)合果芋綠精靈盆栽於 9 月 28-30 日及(b)聖誕紅盆栽於 10 月 4-6 日，其蒸發散重量速率 ET_{pot} ($g \cdot h^{-1} \cdot pot^{-1}$)量測值及以簡易蒸發散模式之計算值對照。(c)合果芋綠精靈盆栽於 9 月 28-30 日及(d)聖誕紅盆栽於 10 月 4-6 日，其蒸發散重量速率 ET_{pot} ($g \cdot h^{-1} \cdot pot^{-1}$)之模式計算及量測值之線性迴歸分析

重量速率 ET_{pot} ($g \cdot h^{-1} \cdot pot^{-1}$)變化，並對照以重量法量測其蒸發散重量速率變化，可得圖 7(a)及(b)，此結果顯示有一致趨勢變化。而圖 7(c)及(d)亦分別為合果芋綠精靈及聖誕紅盆栽，其蒸發散重量速率($g \cdot h^{-1} \cdot pot^{-1}$)之蒸發散量模式計算(y)對應於其量測值(x)之線性迴歸分析，也顯示蒸發散量模式驗證評估與量測其蒸發散重量速率變化之間有一致趨勢。圖 7 之結果是視 3-4 天之 LAI 為不變而以一天量測數據擬合參數 α 及 β 並代入原模式推估三天之盆栽蒸發散速率，單位為($g \cdot h^{-1} \cdot pot^{-1}$)並非($g \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$)，而每 m^2 是放置 8-10 盆。此設施內簡易蒸發散量模式結合一個以電子重量為主之泛用型滴灌控制器可驗證評估合果芋綠精靈及聖誕紅兩類盆栽在此生長期之作物需水量(灌溉)實測值與根據現場氣候(溫濕度及日射量)之估計值，其趨勢是一致的。

3.4 討論

我們發現在配合業者實驗區配置上，在同一

設施內微氣候條件不會達到理想上均一(例如設施內的風速、受日光照射位置及夜間葉片結露水之多寡)，測試設施是在東面日照下(上午十時前後) Area-2 上方區域並有噴霧降溫管線，使 Area-2 盆栽葉面承受噴霧沉降未霧化細微水份，並計入盆栽當下所含水份(重量)。在這些種種干擾因素下，本文是採取將設施內盆栽植物在週遭環境交互作用下所產生的動態蒸發散量變化視為一種水份需求的黑盒子，以團塊化盆栽觀點利用蒸發散量荷重變化偵測，去解決植物生理蒸散作用下水份需求與週遭氣候環境交互作用機制下所需多重感測器問題，並採用布林邏輯演繹滴灌管理控制程序。因此本文合果芋綠精靈及聖誕紅盆栽之適時適量滴灌操作是以累積一段時間下盆栽水份對應重量作為灌溉依據(RMSE 分別為 9.5% 及 4.5%)，在未達灌溉依據下限設定之期間動態蒸發散量變化及干擾僅為參考對照。對於圖 5a 及圖 6a 之 Area 2 於若干時段(上午十時前後及夜間)灌溉後其水分(重量)在後續時段部份呈遞增

之趨勢，此與因作物生長耗水遞減趨勢未符(換句話說，動態蒸發散速率應為正值，在此反而在動態蒸發散速率變化為負值)，本文在處理上視為干擾因素，動態蒸發散速率變化已均視為零值，在「2.3.3 蒸發散量模式驗證評估」之如圖 7a 及 7b 所示。

設施內作物普遍都有過度灌溉問題，其結果導致水浪費及栽培環境失衡(Vox *et al.*, 2010)，過度灌溉主要原因是由不當灌溉時程，而經常地以栽培者經驗實施灌溉而不是精確評估水份需求(Pardossi and Incrocci, 2011; Thompson *et al.*, 2007)。方程式(4)的使用可用以估算作物蒸散量，其演算可用於環境及灌溉控制(Jolliet and Bailey, 1992; Lorenzo *et al.*, 1998; Katsoulas *et al.*, 1999)。Elings and Voogt (2007)指出作物蒸散量估算能提供栽培者一軟體感測器(soft-sensor)作為作物供水預警系統。本文認為每盆時變蒸發散速率可被視為一動態變化取決於環境中日射量、相對濕度、氣溫在植物熱平衡系統下之作用機制，對時間累積下之蒸發散量能估計作物需水量或灌溉量。Carmassi *et al.* (2013)研究生長於鹽水基質下之半密閉型溫室內之非洲菊，以溫室內 I_s 、VPD 及 LAI 為實驗變數，在地中海型氣候下進行蒸散量模式分析。S'anchez *et al.* (2012)曾以系統辨認技術應用於開發一非線性虛擬感測器(nonlinear virtual sensor)結合氣象因子(蒸氣壓差及日射)與作物生長模式(LAI)估計設施中作物蒸散量作為設計灌溉控制器依據，但僅於預測模擬。就臺灣地區及亞熱帶為主氣候以大多數棚架溫室盆栽植物之實際應用面而言，以控制團塊機制論點結合灌溉管線硬體改善輔助環境資訊，本文所採用重量差及滴灌控制策略是可以解決在植物生理蒸散作用下水份需求與週遭氣候環境複雜的交互作用機制下所需多重感測問題。對於設施內盆栽作物灌溉管理需求，本文已能透過由作物微氣候環境變化偵測，以設施中簡易蒸發散量模式((4)式)及重量測定驗證評估此研製之泛用型滴灌控制器功能，現階段本文並未考慮作物生長期對參數 α 及 β 影響如，

$$A = \alpha_0 \cdot (1 - e^{-k \cdot LAI}), \beta = \beta_0 \cdot LAI \dots \dots \dots (5)$$

式中 k 為光消除係數(light extinction coefficient)， α_0 及 β_0 為經驗常數取決於溫室狀態操作條件(如通風方式、水牆風扇、噴霧降溫及日射條件)。本文確信未來結合更多作物生長模式資料庫及設施中環控參數，以簡易作物蒸發散量模式((4)式)結合此硬體技術應用之滴灌控制器是可以精確決定何時灌及灌多少量。

四、結論與建議

以本文所設計的滴灌控制組而言是可以適用於任何一種盆栽作物，其控制方式係與品種、生長期無關。試驗中以重量上下限設定基準是為了方便使環境中因素(如日射量、溫度、濕度等)能對應出相對的蒸發散量(作物需水量)，以獲得動態的每日時作物需水量(蒸發散量)與環境中溫濕度及日射的對應關係。本文是採用「定量不定時」的灌溉控制方法，這種灌溉管理策略能適時適量地提供作物生長所需的水分。同時實驗中也獲知「定量不定時」的控制方式能夠確保盆栽介質的水分含量在一定的有效範圍內，有利於作物生長，比較適合應用在台灣或亞熱帶的氣候情況。

對於採差動間隙的控制觀念是比較適合以盆栽重量的減少量測作為作物需水量依據。本文根據每一次所量測代表的盆栽重量差的變化，運用程式控制器的技術可比對轉換成其內部計時器的時間差來控制其他各區盆栽的灌溉水量。控制組會隨著每一次的量測情況，加以比對轉換成時間差，這時間差的比對是以當時的管線水量水壓為基準，不會是一個固定值。此外控制組仍設計有調校的功能來增減程式控制器內部計時器的時間差，來更精確地控制其他各區之灌溉水量，因此這是一項可行的技術方法，在實驗中也獲得驗證。

謝 誌

本研究承蒙財團法人中正農業科技社會公益基金會贊助，在此致最大謝意。

參考文獻

1. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M., "Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements," FAO: Irrigation and Drainage paper, No. 56, 1998.
2. Baille, A., "Irrigation management strategy of greenhouse crops in Mediterranean countries," ISHS Acta Horticulturae 361, 105-122, 1994.
3. Baille, M., Ballie, A., and Delmon, D., "Micro-climate and transpiration of greenhouse rose crops," Agriculture and Forest Meteorology 71, 83-97, 1994a.
4. Baille, M., Baille, A., and Laury, J.C., "A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf," Scientia Horticulturae 59, 217-232, 1994b.
5. Baptista, F.J., Bailey, B. J., and Meneses, J.F., "Measuring and modeling transpiration versus evapotranspiration of a tomato crop grown on soil in a Mediterranean greenhouse," ISHS Acta Horticulturae 691: International Conference on Sustainable Greenhouse Systems – Greensys 2004, 313-320, 2005.
6. Carmassi, G., Bacci, L., Bronzini, M., Incrocci, L., Maggini, R., Bellocchi, G., Massa, D., and Pardossi, A., "Modelling transpiration of greenhouse gerbera (*Gerbera jamesonii*) Bolus grown in substrate with saline water in a Mediterranean climate," Scientia Horticulturae 156, 9-18, 2013.
7. Fynn, F.P., Al-shooshan, A., Short T.H., and McMahon, R.W., "Evapotranspiration measurement and modeling for a potted Chrysanthemum crop," Transactions of the ASAE 36, 1907-1913, 1993.
8. Ilahi, W.F.F., "Evapotranspiration Models in Greenhouse," Master thesis Irrigation and Water Engineering submitted in partial fulfillment of the Master of Science degree Agricultural and Bioresearch Engineering at Wageningen University, the Netherlands, 2009.
9. Jolliet, O., and Bailey, B.J., "The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison," Agricultural and Forest Meteorology 58, 43-62, 1992.
10. Katsoulas, N., Kittas, C., and Baille, A., "Estimating transpiration rate and canopy resistance of a rose crop in a fan-ventilated greenhouse," Acta Horticulturae, 548, 303-309, 1999.
11. Katsoulas, N., Kittas, C., Dimokas, G., and Lykas, C., "Effect of Irrigation Frequency on Rose Flower Production and Quality," Biosystems Engineering 93, 237-244, 2006.
12. Keenan, J.H., and Keyes, F.G., "Thermodynamic properties of steam: New York," John Wiley and Sons, 1936.
13. Lorenzo P., Medrano, E., and Sa'nchez-Guerrero M.C., "Greenhouse crop transpiration: an implement to soilless irrigation management," Acta Horticulturae 458, 113-122, 1998.
14. Medrano, E., Lorenzo, P., Sa'nchez-Guerrero, M.C., and Montero, J. I., "Evaluation and modelling of greenhouse cucumber-crop transpiration under high and low radiation conditions," Scientia Horticulturae 105, 163-175, 2005.
15. Pardossi, A., and Incrocci, L., "Traditional and new approaches to irrigation scheduling in vegetable crops," HortTechnology 21, 309-313, 2011.
16. S'anchez, J.A., Rodr'iguez, F., Guzm'an, J.L., and Arahal, M.R., "Virtual Sensors for Designing Irrigation Controllers in Greenhouses," Sensors 12, 15244 -15266, 2012.
17. Thompson, R.B., Mart'inez-Gaitan, C., Gallardo, M., Gim'enez, C., and Fern'andez, M.D., "Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss

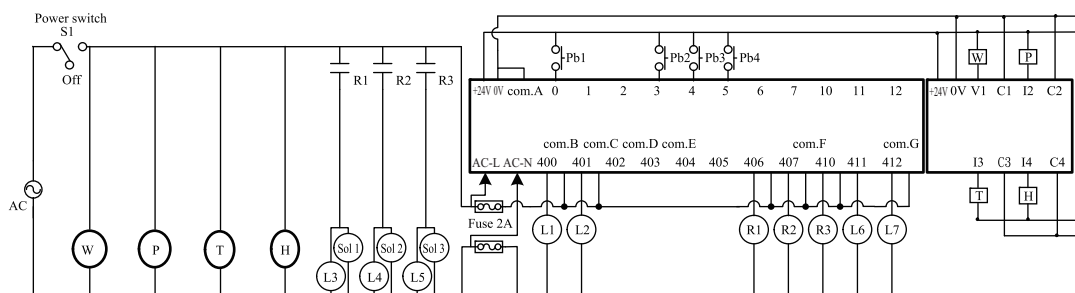
- from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey,” Agricultural Water Management 89, 261-274, 2007.
18. Vox, G., Teitel, M., Pardossi, A., Minuto, A., Tinivella, F., and Schettini, E., “Sustainable greenhouse systems. In: A Salazar, I Rios, (Eds.), Agriculture: Technology, Planning and Management,” Nova Sci Publishers, New York, 1-79, 2010.
 19. 吳麗春、傅仰人、王瑞卿：「聖誕紅栽培灌溉技術之比較分析」，桃園區農業改良場研究報告，第 17 期，51-54 頁，1994。
 20. 施嘉昌、張本初：「滴水灌溉方法探討高粱需水量之研究」，農業工程學報，第 39 卷第 4 期，13-25 頁，1993。
 21. 傅仰人：「盆花設施栽培要領—觀念篇(3)：盆花灌溉管理」，桃園區農業專訊，第 16 期，21-23 頁，1996。
 22. 傅仰人：「聖誕紅產銷概況」，桃園區農業技術專輯，第 3 期，41-43 頁，2010。
 23. 楊玉婷、曹哲維、孫岩章：「常見室內植物對苯氣體吸收之測試」，環境保護 32 卷，第 2 期，155-166 頁，2009。

收稿日期：民國 103 年 8 月 11 日

修正日期：民國 104 年 2 月 5 日

接受日期：民國 104 年 2 月 9 日

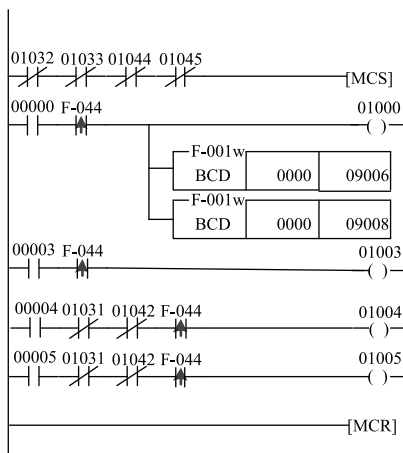
附 錄



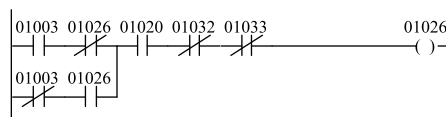
A notation for interpreting input/output according addresses in a PLC

- | | |
|--|---|
| Pb1 : push button for switching manual/automatic operation | L1 : indicator for showing manual status |
| Pb2 : push button for operating irrigation in first area | L2 : indicator for showing automatic status |
| Pb3 : push button for managing isolation status in second area | L3 : indicator for showing irrigation status in first area |
| Pb4 : push button for managing isolation status in third area | L4 : indicator for showing irrigation status in second area |
| R1 : relay for controlling solenoid valves in first area | L5 : indicator for showing irrigation status in third area |
| R2 : relay for controlling solenoid valves in second area | L6 : indicator for showing isolation status in second area |
| R3 : relay for controlling solenoid valves in third area | L7 : indicator for showing isolation status for third area |
| W : load cell in first area | T : Temperature sensor |
| P : Pyranometer | H : Humidity sensor |

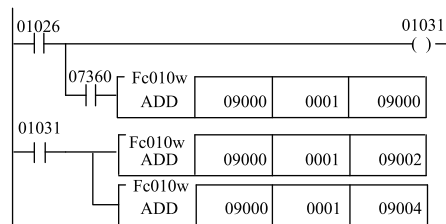
圖 A PLC 外部元件與其輸入及輸出之連結線路配置



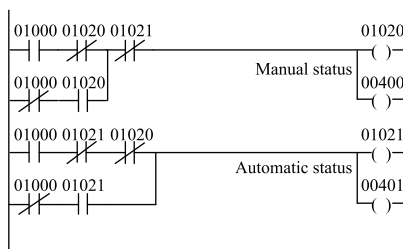
(a)設定外部各輸入點(X_{in})以轉換成PLC內部電驛程式



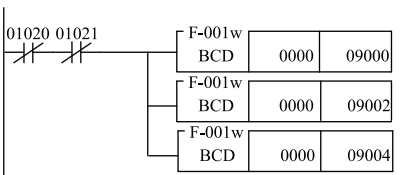
(e)人工操作第一區灌溉動作



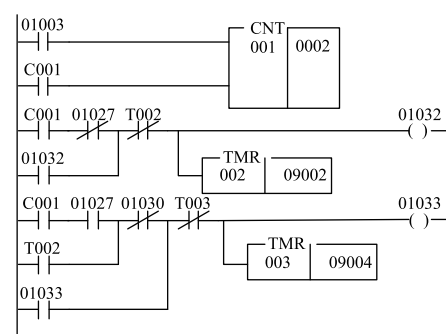
(f)當第一區執行人工灌溉操作時，使用加法器計數累計時脈，以轉換成對應灌溉時間並更新暫存器



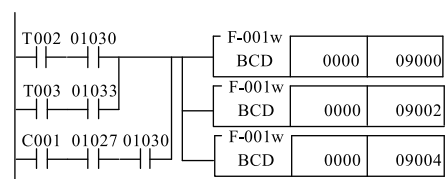
(b)切換手/自動操作狀態



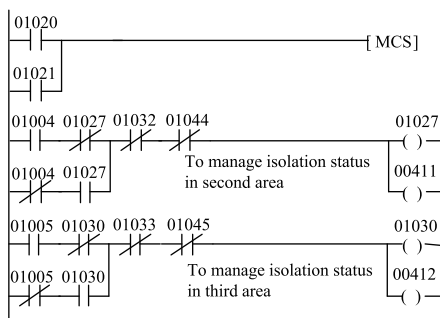
(c)重置暫存器09000, 09002 and 09004 為初始值 (0000)



(g)使用累計時脈，以轉換對應灌溉時間分別執行在第2/3區的灌溉操作

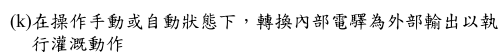
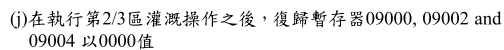
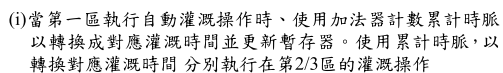


(h)在執行第2/3區灌溉操作之後，復歸暫存器09000, 09002 and 09004 以0000值



(d)設定II或(及)III區為隔離狀態

圖 B PLC 之各部份功能區塊之階梯程式



–45–

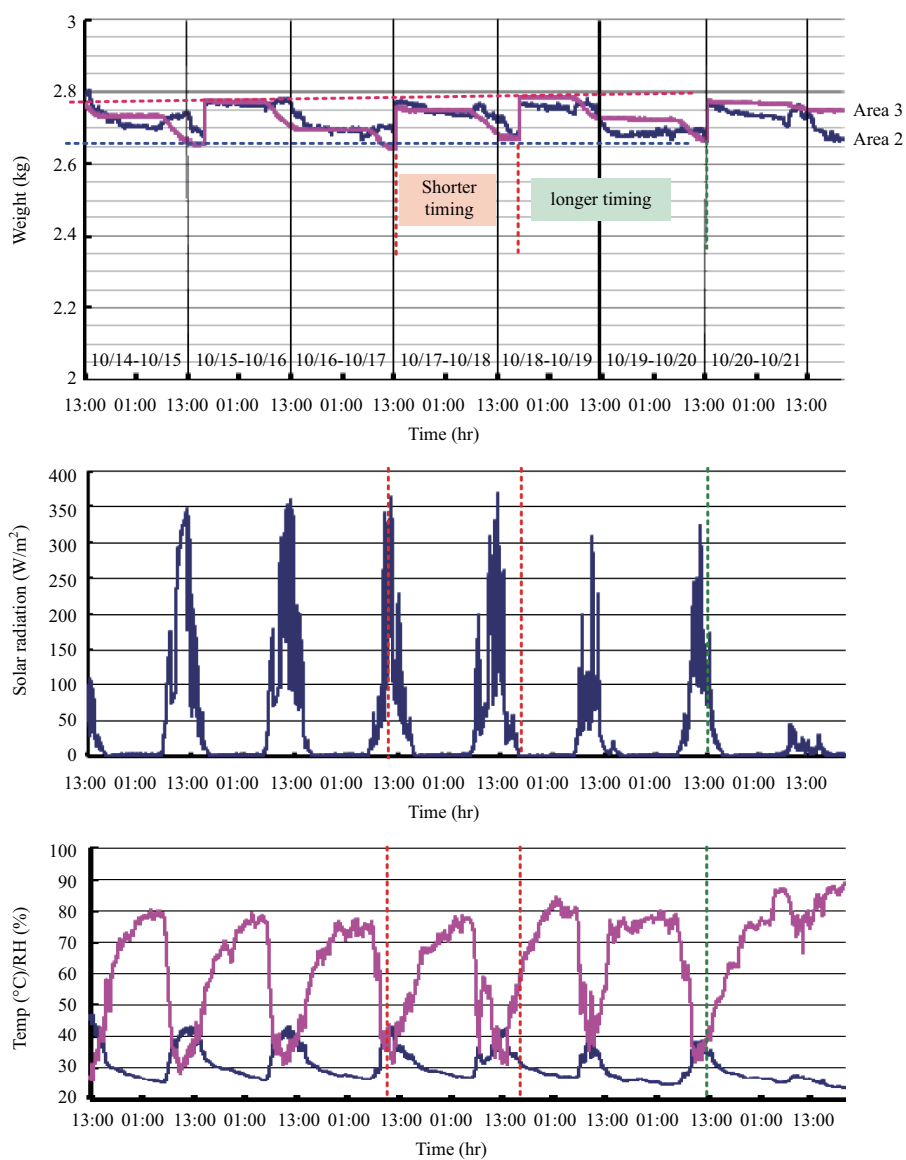


圖 C (a)採定量不定時的灌溉管理方式在 10/14 至 10/21 期間，於 II 及 III 區盆栽重量變化對照情形。
(b)相同期間設施內日射量及(c)溫濕度變化