亞熱帶溫室微氣候最佳化控制之模擬與分析－萵苣栽培為例[1]

楊清富[2]、林聖泉[3]

摘　要

楊清富、林聖泉。2018。亞熱帶溫室微氣候最佳化控制之模擬與分析－萵苣栽培為例。臺南區農業改良場研究彙報 72：63-75。

近年來臺灣陸續建造許多溫室來栽培作物。由於地處亞熱帶，高溫及潮濕的氣候對溫室環控形成更嚴苛的挑戰，特別是夏季的高溫，更是影響亞熱帶溫室作物能否周年生產的關鍵。為了降低環境控制的成本及栽培需求，亞熱帶溫室需著重於降溫的規劃與設計。藉由適當的環境控制，可在溫室中創造更合宜的微氣候，從而改善作物生長條件。然而人工環境控制衍生出能源耗用的問題，而能源過度消耗向來是溫室最為人所詬病的議題。因此，無論國內、外對溫室環境控制的研究從不間斷，並持續受到關注。近年來有許多國外溫室環境控制系統被引進臺灣，然而由於這些地區與臺灣的氣候環境有極大差異，致使這些系統在臺灣無法發揮其預期的功效，對經濟效益的提升並無太大的助益。透過數學模型對溫室在不同氣候條件下進行模擬，進而找到最佳的設計方案已成為研究溫室環境控制的趨勢。本研究以亞熱帶氣候條件，建立了一個包含植株乾物重、CO_2 濃度、溫度及濕度等狀態的動態模型。臺灣的設施農業正在蓬勃發展，除了硬體技術不斷的提升，以環境控制技術改善環境逆境的意識逐漸受到重視。但過多環境控制的投入對經濟效益有負面的影響，因此藉由權衡控制支出與收益才能獲得最大的經濟效益。本研究以溫室生產萵苣的最大化淨收益作為主要評估的性能指標。利用作物生長模型、歷史氣候數據，應用最佳化控制理論來推算最佳化控制策略，並與現有的環境控制策略進行比較。本研究推導的控制策略可以使萵苣生產的淨收益增加約 8%。

現有技術：溫室環境控制通常以能量平衡及作物生長需求作為控制參考。
創新內容：導入最佳化控制理論，推算亞熱帶溫室最佳化控制策略。
對產業影響：溫室微氣候最佳化控制，可作為未來溫室生產最大化淨收益生產模式之方法。

關鍵字：亞熱帶、溫室、微氣候、最佳化控制、模擬
接受日期：2018 年 7 月 12 日

1. 行政院農業委員會臺南區農業改良場研究報告第 496 號。
2. 行政院農業委員會臺南區農業改良場助理研究員。712 臺南市新化區牧場 70 號。
3. 國立中興大學生物產業機電工程學系教授。402 臺中市南區興大路 145 號。

前　言

溫室內作物的生長與溫室內的微氣候息息相關，調控得宜的氣候環境，才有利作物生長進而生產優質的農產品，創造更高的經濟收益。在臺灣每年約有半年的時間氣候偏高溫及潮濕，溫室設施在溫室效應的助長下，溫室內蓄積大量太陽輻射的熱能，造成高溫逆境影響作物生長，甚至可能造成生產停頓的窘境。且潮濕的環境提高了病害發生的機率，因此溫室環境控制成為溫室管理不可或缺的手段。在經濟效益的考量下，大部分溫室採通風、遮蔭及蒸發冷卻等方法降低室內高溫，並維持溫室內適當之濕度。傳統溫室環境控制通常透過閥值 (Threshold) 作為決策的依據，這種開迴路的控制方式並無回饋機制，通常不易達到好的控制結果。如要達到更好的控制效能，則需要有精確的作物和溫室微氣候動態模型，以及優異的控制決策系統。溫室科技隨著工程技術的不斷提升亦獲得快速的發展，具有高度準確性的感測器已經十分普及，因而對了解作物與其環境之間的關係提供了可靠的資訊。現今溫室的環控設備足以對與作物生長有關的氣候因素進行調節，例如溫室內的溫度、濕度、CO_2 濃度、太陽輻射以及根圈附近水和營養物質的可利用性。類比和數位電子的發展促進溫室氣候控制的高度自動化。現今溫室生產已經成為高度工業化的產業，然而，高耗能一直是溫室為人所詬病的議題。因此，任何能源效益的增加都可能對溫室作物生產的經濟結果有所改善。此外，提高生產效率符合政府政策，能有效應用自然資源和減少對環境的碳排放。本研究聚焦於半結球萵苣生產之最佳化溫室環境控制模擬，目標是要在生產過程產生最大化淨收益。

文獻探討

古典控制主要用於解決單輸入單輸出線性常微分系統控制器的設計，其主要目標是穩定被控制的對象，因此設計著重在暫態響應、頻寬及穩態誤差等控制性能。古典控制理論，以拉氏轉換 (Laplace transform) 所定義之轉移函數 (Transfer function) 為對象，利用根軌跡法 (Root locus method)，頻域響應法 (Frequency-response method) 設計出穩定且滿足性能需求之控制系統。常用的設計方法有解析法如羅斯 - 赫維茲穩定準則 (Routh-Hurwitz stability criterion) 和作圖法如波德圖 (Bode plot)、奈奎斯圖 (Nyquist plot)、尼可士圖表 (Nichols chart)。但對於高階系統或多輸入多輸出的系統，古典控制則難以獲得符合期望的控制性能。約在 1960 年後，為了滿足軍事、太空及工業上之需求，以及處理多輸入多輸出之複雜系統，近代控制理論開始蓬勃發展，其主要是以狀態方程式為基礎，由單純的系統設計朝向控制系統之最佳化設計。現代控制能有效解決高階系統或多輸入多輸出系統的設計，並且大幅降低設計工作對人員經驗的依賴。最佳化控制主要是根據被控對象的數學模型，在容許的範圍內設計出控制法則，使受控對象的性能指標達到最佳。有關溫室最佳化控制問題，其首先在 Seginer[11] 的園藝工程研究中作了定義，並且陸續被其他學者研究，例如 Van Henten 和 Bontsema[15]。關於最佳化溫室氣候管理量化分析的研究最早可追溯到 1978 年，Udink ten Cate *et al.*[14]、Bot *et al.*[3]，他們的研究首先將溫室氣候控制及作物的生長管理，從整體的角度一併考量。雖然他們想法的某些細節在後來幾年來被作了修正 (Challa[4]; Challa *et al.*[5]; Challa and Van Straten[6,7]; Tantau[12])，但其基本的理念是一致的。在這個理念中，溫室氣候管理是透過定義一個分層子系統來執行的，其中每個子系統按照上一層所定義的規則運作。

Hwang[8] 也將經濟目標引入到溫室氣候動態控制中，這些作者強調作物短期反應 (如光合速率) 的經濟最佳化控制。Kirk[9] 研究最佳化控制理論的應用，提供了一個嶄新方法來確定控制策略，其中，可銷售產品相關的收益和與其生產相關的成本是最主要的評估標的。這種方法需要溫室內氣候的函數與作物生長演化的適當模型。然而，作物生長模型的開發需要了解作物生長的生理，並且需要透過適當的驗證才能成功的應用。在 Van Henten 及 Bontsema[15] 的對照研究中，利用生長模型得出了萵苣栽培的溫度和 CO_2 濃度的經濟最佳化策略。該生長模型描述萵苣乾物質累積，為光合有效輻射和環境溫度及二氧化碳濃度的函數。在經濟生產的考量上，最佳化的溫室氣候控制策略與戶外氣候之間存在極密切的相關性。最佳化控制的理論在經長期的研究已日臻完善，其中 Pongtryagin 所發展的極大值理論 (Maximun Principle)[10]，解決了實際工程上經常碰到帶有限制條件的最佳化控制問題。

材料與方法

一、試驗溫室

本研究之試驗溫室為臺南區農業改良場 CB3 溫室，座向大致呈南北方向，面積約 154 m^2。溫室的被覆材料為單層玻璃 (5 mm)，簷高 3.5 m。配備兩具 54 吋負壓風扇，每具通風容量為 550 CMM，另一側則安裝水牆。溫室上方配置可移動之外遮光網 (50%)。溫室屋頂的正上方安裝日照計及溫、濕度感測器。溫室內部，溫、濕度感測器安裝在植冠上方約 30 cm 處。並使用環境控制系統 [1] 對溫室進行控制。環控模型如圖 1 所示。

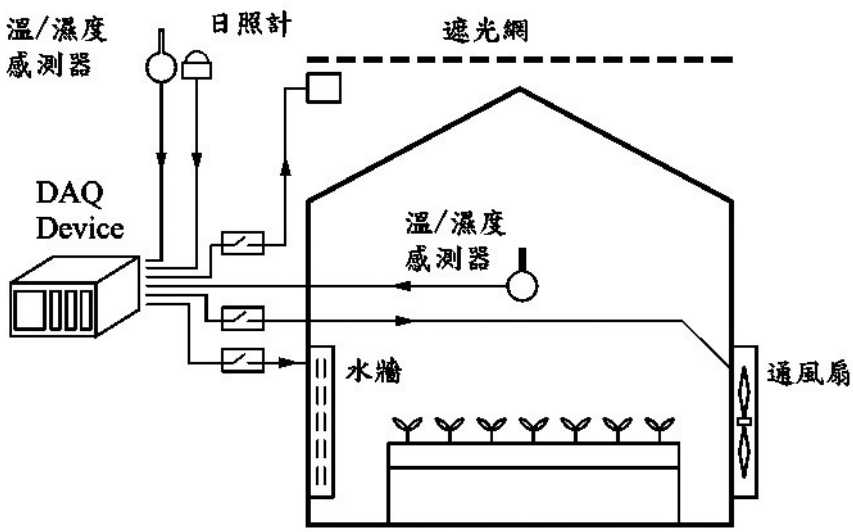

圖 1. 溫室環境監控系統

Fig. 1. Greenhouse environmental control system

二、育苗、栽培管理及採樣處理

栽培試驗之半結球萵苣為農友種苗公司販售的品種「翠妹」。本實驗將半結球萵苣先在育苗穴盤播種育苗 (12 ~ 14 天) 後，再移植到裝填泥炭土的栽培箱進行培育 (栽培

密度：18 株 / m^2)。植株鮮、乾重的測量，係將栽培區分為四區，從移植到採收整個生長期間，每 3 ~ 4 天從各區隨機取樣三株 (地上部) 並測量植株的鮮重，植株利用烤箱以 105℃之溫度烘乾 24 小時後，再以電子天平測量其乾重。

三、試驗紀錄

為了獲得溫室作物生產過程動態模型校準和驗證的數據，於 2015 年 9 月 24 日至 2015 年 10 月 30 日間 (共 36 天) 進行栽培試驗。外界氣候條件監測紀錄如圖 2 ~ 4 所示，溫室內氣候條件監測紀錄如圖 5 ~ 6 所示。通風控制狀態如圖 7 所示，水牆控制狀態如圖 8 所示，遮光控制狀態如圖 9 所示。

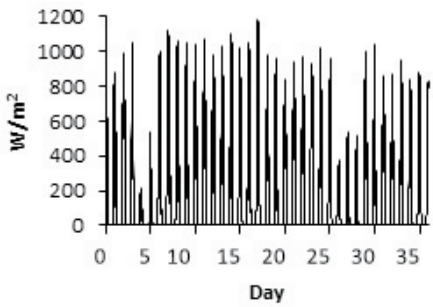

圖 2. 太陽輻射監測紀錄

Fig. 2. Solar radiation record

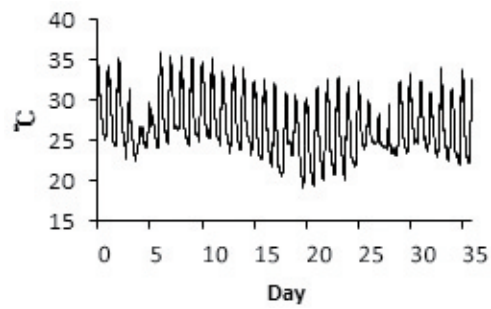

圖 3. 室外氣溫監測紀錄

Fig. 3. Outdoor air temperature record

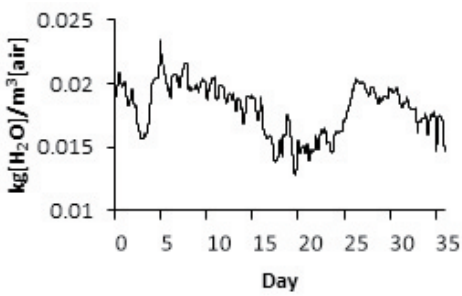

圖 4. 室外絕對濕度監測紀錄

Fig. 4. Outdoor absolute humidity record

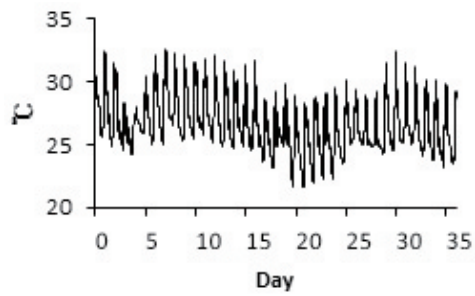

圖 5. 溫室內氣溫監測紀錄

Fig. 5. Greenhouse temperature record

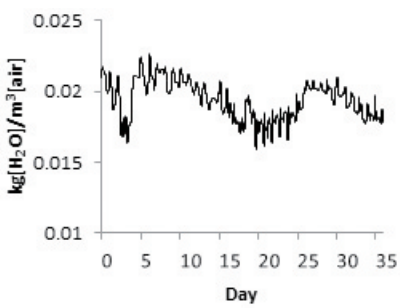

圖 6. 溫室內絕對濕度監測紀錄

Fig. 6. Greenhouse absolute humidity record

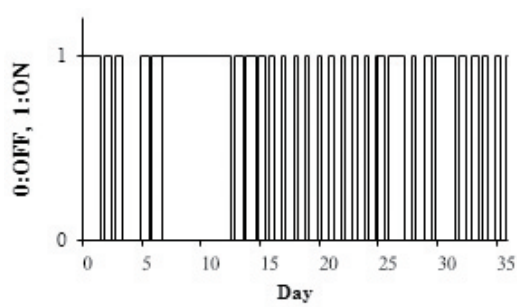

圖 7. 通風控制紀錄

Fig. 7. Ventilation control record

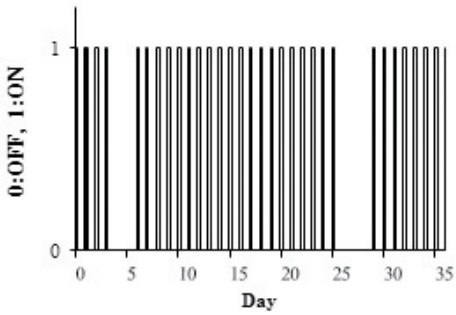

圖 8. 水牆控制紀錄
Fig. 8. Pad control record

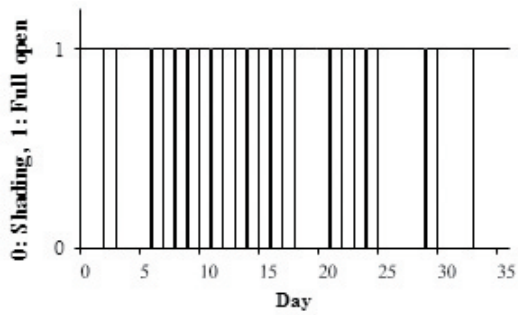

圖 9. 遮光控制紀錄
Fig. 9. Shading control record

數學模型

本研究採用最佳化控制的概念進行分析，首要之務即建立一個受控的溫室動態系統。最佳化控制一般的演算方式是讓系統從初始狀態演化到指定狀態，而使性能指標最大化。因此最佳化控制問題可用三個基本元素加以描述：即受控系統的數學模型 (model)、狀態 (state) 的限制條件和性能指標 (performance index)。動態系統具有從 t_0 到 t_f 的時軸 t；主要的函數成員包括狀態向量 x(t)、控制向量 u(t) 和外部輸入向量 d(t)，可用常微分方程組來描述：

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x},\mathbf{u},\mathbf{d},t), \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \quad (1)$$

其中 x_0 為狀態初始值。

控制輸入軌跡：

$$\mathbf{d}(t), t_0 \le t \le t_f \quad (2)$$

在此研究中萵苣生產過程由具有四個狀態變數 $\mathbf{x} = [x_w\ x_c\ x_t\ x_h]^T$ 的動態模型所描述。其中 x_w (kg m^{-2}) 是作物的乾物重，x_c (kg m^{-3}) 是溫室中的 CO_2 濃度，x_t (ºC) 是溫室空氣的溫度，x_h (kg m^{-3}) 是溫室空氣的濕度。控制輸入 $\mathbf{u} = [u_v\ u_p\ u_s]^T$。其中 u_v 是通風控制，u_p 代表水牆控制，u_s 代表遮光網控制。外部輸入向量 $\mathbf{d} = [d_c\ d_t\ d_h\ d_s]^T$。其中 d_c (kg m^{-3}) 代表外界 CO_2 濃度，d_t (ºC) 代表外界溫度，d_h (kg m^{-3}) 代表外界濕度，d_s (Wm^{-2}) 代表太陽輻射。$\mathbf{x}_0 = [x_w(t_0)\,x_c(t_0)\,x_h(t_0)]^T$代表 4 個狀態變數的初始值。因此，(1) 式實際上代表下列的數學式 [2]。

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_w\\ \dot{x}_c\\ \dot{x}_t\\ \dot{x}_h\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_f G_p - R_r x_2 2^{2.0x_t - 2.5} \\ \frac{1}{v_c}(-G_p + C_r x_w 2^{0.1x_t - 2.5} - M_c \\ \frac{1}{H_c}(-Q_f - Q_v + Q_r) \\ \frac{1}{v_g}(C_t - M_w + V_w) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix}x_w(t_0)\\ x_c(t_0)\\ x_t(t_0)\\ x_h(t_0)\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}7\times10^{-4}\\ 7.2\times10^{-4}\\ 25\\ 1.18\times10^{-2}\end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 Y_f 為產量因子；G_p (kg m^{-2} s^{-1}) 為植冠總光合速率；R_r (s^{-1}) 為呼吸率；V_c (m^3 m^{-2}) 是溫室單位容積；C_r (s^{-1}) 是呼吸係數；M_c 是通過通風口 CO_2 的質量傳遞 (kg m^{-2} s^{-1})；Q_f (W m^{-2}) 是風扇水牆移除的能量；Q_v (W m^{-2}) 是藉由通風和被覆材料熱傳與室外空氣的總能量交換；Q_r (W m^{-2}) 是太陽輻射的熱負荷；H_c (J m^{-2}°C^{-1}) 是溫室空氣的熱容量；C_t (kg m^{-2} s^{-1}) 是植冠蒸散量；M_w (kg m^{-2} s^{-1}) 是通過通風扇水蒸汽的傳質；Vw (kg m^{-2} s^{-1}) 是從水牆蒸發的水量；Vg (m^3 m^{-2}) 是溫室單位容積。

最佳化控制概述

最佳化控制一般的演算方式是，讓系統從初始狀態演化到指定狀態，而使性能指標最大化。狀態方程式通常以常微分方程組來描述：

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(x, u, d, t), \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \quad (4)$$

其中 x_0 為狀態初始值；

$$\mathbf{d}(t), t_0 \le t \le t_f \quad (5)$$

$$\mathbf{u}(t), t_0 \le t \le t_f \quad (6)$$

目標求解極大值 , 即

$$\text{Max} \quad J(u(t)) = \Phi(x(t_f)) - \int_{t_0}^{t_f} L(x, u, d, P)\, dt \quad (7)$$

其中 J(u(t)) 稱為性能指標，在本研究中代表淨收益，等號右邊第一項可視為產品販售所得，第二項相當於操作成本。

為使性能指標 J 最大化，同時滿足所有限制條件，所需的控制 u^* 需滿足必要與充分條件。為方便起見，將 Hamiltonian 定義為

$$H(x^*, u^*, \lambda^*, t) \equiv -L(x^*, u^*, t) + \lambda^{*T} f(x^*, u^*, t) \quad (8)$$

因此這些必要條件為：

$$x^* = \frac{\partial H}{\partial \lambda}(x^*, \lambda^*, u^*, t) \quad (9a)$$

$$-\lambda^* = \frac{\partial H}{\partial x}(x^*, \lambda^*, u^*, t) \quad (9b)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x}(x^*, \lambda^*, u^*, t) = 0 \quad (9c)$$

起始及終端條件為

$$x^*(t_0) = x_0 \quad (9d)$$

$$\lambda^*(t_f) = \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x^*(t_f), t_f) \quad (9e)$$

由 (9a) 至 (9e) 構成最佳的必要條件。其亦說明了最佳化控制是一個兩點邊界值問題 (Two-Point boundary value problem)。在初始時刻 t_0，對應的狀態變數為 $x^*(t_0) = x_0$。在終端時間 t_f，對應協態函數為 $\lambda^*(t_f) = \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x^*(t_f), t_f)$。一般情況下，兩點邊界值的問題不易解題，通常需要透過數值方法迭代求解。

但是當控制向量 u 是有限制範圍的情況，即

$$u_{i,\min}(t) \le u_i(t) \le u_{i,\max}(t), \quad i = 1, ..., m \quad (10)$$

根據 Pontryagin 的極大值原理，前述必要條件需進行修正。因此對所有在 $t \in [t_0, t_f]$ 區間和所

有控制 u(t) 滿足限制條件 (10) 式，最佳化的必要條件為

$$x^* = \frac{\partial H}{\partial \lambda}(x^*, \lambda^*, u^*, t) \quad \text{(11a)}$$

$$-\lambda^* = \frac{\partial H}{\partial x}(x^*, \lambda^*, u^*, t) \quad \text{(11b)}$$

$$H(x^*, u, \lambda^*, t) \le H(x^*, u^*, \lambda^*, t) \quad \text{(11c)}$$

起始及終端條件為

$$x^*(t_0) = x_0 \quad \text{(11d)}$$

$$\lambda^*(t_f) = \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x^*(t_f), t_f) \quad \text{(11e)}$$

(11c) 式稱為 Pontryagin 極大值原理。這個原理可確保性能指標最大化，這意味著 Hamiltonian 的值在整個時軸區間都是最大的。

性能指標

本研究將控制系統設計的目標制定為氣候控制策略，以及使半結球萵苣在歷經整個生長期的經濟收益最大化。經濟收益是由 (12) 式所定義，此方程式所代表的意義亦稱為性能指標，用以評估系統性能的依據。

$$J(u(t)) = \Phi(x(t_f)) - \int_{t_0}^{t_f} L(x, u, d, t)\, dt \quad \text{(12)}$$

其中 $\Phi(x(t_f))$ 代表販售收穫產品的收入，L(x,u,d,t) 是環控設備的暫時運轉成本，t_0 代表移植日期，t_f 是採收日期。半結球萵苣生產過程的性能指標 J，以每平方公尺溫室面積的新臺幣淨收益 (NTD m^{-2}) 表示之。因此，(12) 式所代表的意義即為採收產品販售後的收入減去整個生產期中環境調節設備所耗費的能源支出。溫室環境控制主要是提供作物更適合生長的環境，因此面對逆境 (如高溫、高濕及光照條件不良等)，通常藉由工程手段進行改善，其結果為作物產量增加，但同時也增加能源支出。因此權衡產量與操作成本，使整體收益達到最大化即為本研究最主要的目的。此意謂最佳化控制的結果，提供給作物的生長環境可能並非最適合的環境，但環境狀態仍能符合限制條件。在本研究中，主要的環境調節設備包括：機械通風、水牆及遮光。

最佳化控制之方法

一、控制法則

最佳化控制是透過不斷的迭代調整控制值直至獲得最佳結果。最陡峭上升演算法 (steepest ascent algorithm) 是常見用於找尋函數最大值的數值方法。在該演算法的迭代過程中，必須計算目標函數增加最快的方向 ; 也就是 Hamiltonian 的梯度 ($\partial H/\partial u$)，由於基本的最陡峭上升演算法無法處理控制受限制的問題，因此在最佳化控制問題的迭代求解過程使用一種改良最陡峭上升演算法 (modified steepest ascent algorithm)。控制的最大允許修正量如 (13) 式所示。如果 $\partial H/\partial u > 0$，增加控制對結果是有利的，則將控制調整為上限，一旦控制已在上限，則不進行調整。反之，如果 $\partial H/\partial u < 0$，則減少控制對結果是有利的，則將控制調整成下限。一旦控制已在下限，則不進行調整。

$$\delta u_{max}(t)=\begin{cases} u_{max}(t)-u^{(i)}(t) \text{ if } \dfrac{\partial H^{(i)}}{\partial u}(t)\geq 0, \\ u^{(i)}(t)-u_{min}(t) \text{ if } \dfrac{\partial H^{(i)}}{\partial u}(t)<0. \end{cases} \quad \text{.....(13)}$$

在某些情況下，$|\partial H/\partial u|$ 的值可能非常大。為確保控制修正量為正值且有一定的範圍，作法上實際修正量必須再乘上一個步長因子進行修正。步長因子的建立首先需限定其範圍 $0\leq\sigma^{*}\leq\overline{\sigma}_{max}$，其中步長最大值 $\overline{\sigma}_{max}$ 如 (14) 式所示。

$$\overline{\sigma}_{max}=\min\left(\frac{1}{\left|\dfrac{\partial H}{\partial u_j}\right|}\right) \quad \text{.....(14)}$$

其中 j=1,…, m,，m 為控制的數量，為求得步長的最佳值，可利用一維的線搜索在步長限制範圍內進行搜索得之。本研究以黃金分割搜索技術 (golden section search technique) 搜索 σ^{*}。(15) 式所描述的就是迭代後的控制新值，其由控制現值加上步長與控制修正量的乘積所決定。透過此方法可以逐步對控制進行修正，而獲得最大化的性能指標。

$$u^{(i+1)}=u^{(i)}+\sigma^{*}\frac{\partial H^{(i)}}{\partial u}(t)\,\delta u_{max}{}^{(i)}(t) \quad \text{.....(15)}$$

二、數值解的演算

本文以 Pontryagin 極大值原理透過迭代演算，找到最佳化控制軌跡 $u_j^{(i)}(t)$，在迭代求解過程中，使用四階 Runge-Kutta 演算法以 180 s 的積分步序模擬狀態和協態方程。演算的程式以 MATLAB 軟體計算模擬，並導入先前實驗所量測的外部氣候資料。這些資料同樣是以 180 s 的時間間隔所量測而得的數據，包括室外溫度，濕度和太陽輻射。本試驗以半結球萵苣 36 天的生長期進行分析。這個方法的求解步驟如下：

1. 載入先前實驗所記錄的外部氣候條件。
2. 從迭代數 i = 1 開始，並使用先前實驗所記錄的控制軌跡作為標稱控制軌跡 $u^{(i)}(t)$, $t\in[t_0, t_f]$。
3. 以初始邊界條件 $x(t_0)=x_0$ 及標稱控制軌跡 $u^{(i)}(t)$，對狀態方程從 t_0 到 t_f 進行積分，求解狀態軌跡 $x^{(i)}(t)$ 並儲存之。
4. 計算性能指標 $J^{(i)}$。
5. 利用標稱控制 $u^{(i)}(t)$、狀態軌跡 $x^{(i)}(t)$ 及終端邊界條件 $\lambda^{(i)}(t_f)=\partial\phi(x^{(i)}(t_f),t_f)/\partial x$，從 t_f 到 t_0 的反向積分協態方程式，求解並儲存所得的協態軌跡 $\lambda^{(i)}(t)$。
6. 在 $t=[t_0, t_f]$ 的時域內計算梯度 $\partial H^{(i)}/\partial u$ 並計算 (14) 式中的$\overline{\sigma}_{max}$。以及 (13) 式控制最大允許修改量 $\delta u_{max}{}^{(i)}(t)$。
7. 使用 (15) 式計算新的控制值，及在 $0\leq\sigma^{*}\leq\overline{\sigma}_{max}$ 的範圍內對 σ^{*} 執行線搜索使得性能指標 $J^{(i+1)}$ 最大化。
8. 如果當前迭代中的性能指標 $J^{(i+1)}<J^{(i)}$，則停止迭代過程，並儲存最佳控制軌跡 $u^{*}=u^{(i)}$。否則，設 i = i + 1，並返回步驟 3。

三、狀態解

狀態解是利用初始邊界條件 $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$ 及標稱控制軌跡 $\mathbf{u}^{(1)}(t)$，對狀態方程式 (3) 從 t_0 到 t_f 積分所得的。圖 10 顯示狀態 x_w 的模擬值，對照圖 2、3，顯示生物量生成率與太陽輻射和溫度密切相關。圖 11 顯示狀態 x_c 的模擬值，對照圖 2、7，顯示 CO_2 的濃度變化與光合作用、呼吸作用及通風密切關聯。圖 12、13 分別顯示溫室內溫、濕度模擬結果，對照圖 7 ~ 9，顯示溫、濕度受到調控設備運轉的影響極鉅。

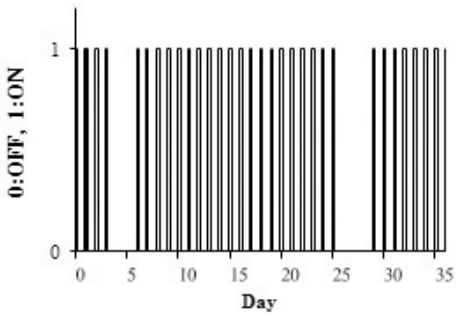

圖 10. 最佳化控制之乾物重模擬 (x_w)

Fig. 10. Optimized control of simulated dry matter (x_w)

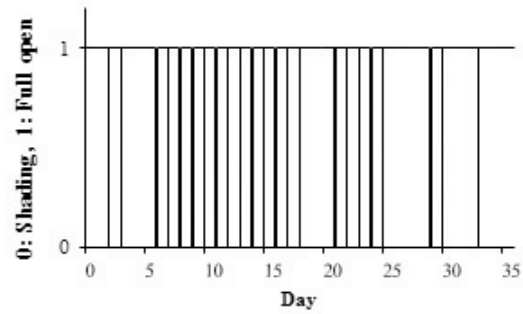

圖 11. 最佳化控制之 CO_2 濃度模擬 (x_c)

Fig. 11. Optimized control of CO_2 concentration (x_w)

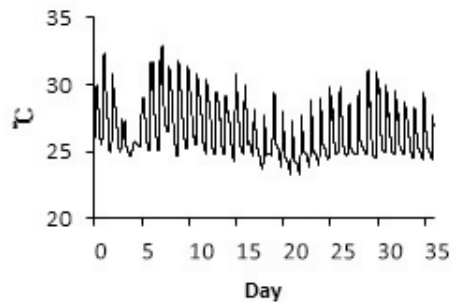

圖 12. 最佳化控制之溫度模擬值 (x_t)

Fig. 12. Optimized control of greenhouse temperature (x_t)

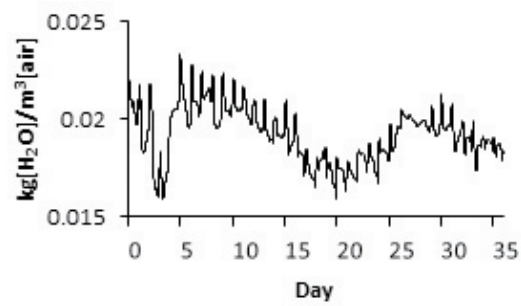

圖 13. 最佳化控制之濕度模擬值 (x_h)

Fig. 13. Optimized control of greenhouse absolute humidity (x_h)

四、最佳化控制解

圖 14 ~ 16 顯示了最佳化控制 ($\mathbf{u}^*$) 的解。與原來的環境控制系統相比，最佳化通風控制採用了更節能的通風策略，而降低操作成本。最佳化水牆和遮蔭控制與原有系統控制策略相似。

圖 14. 通風最佳化控制 (u_v^*)

Fig. 14. Ventilation optimization control (u_v^*)

圖 15. 水牆最佳化控制 (u_p^*)

Fig. 15. Pad optimization control (u_p^*)

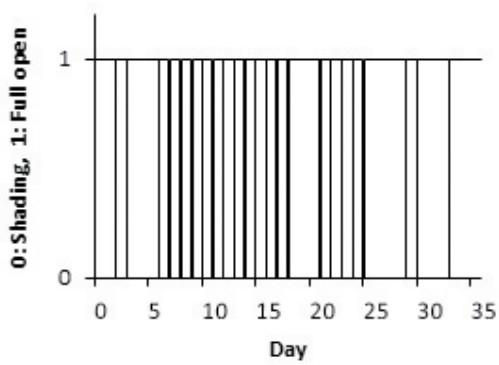

圖 16. 遮光最佳化控制 (u_s^*)

Fig. 16. Shading optimization control (u_s^*)

五、最佳化解的演化

藉由使用上述的演算法，在經迭代後即達到最佳化的解。表 1 顯示標稱和最佳化解的比較。在標稱和最佳化解的比較中，乾物重結果分別為 0.1632 和 0.1616 (kg m^{-2})，操作成本分別為 19.9073 和 17.2904 (NTD m^{-2})，性能指標分別為 27.6449 和 29.7918 (NTD m^{-2})。此結果顯示，最佳化方案的目的並不以最大產量為目標，而是能權衡產量與操作成本，以達到最高的淨收益 (性能指標)。因此，溫室環境利用最佳化控制可以實現最大可能的淨收入，這對於溫室栽培經濟生產至關重要。本研究模擬的結果顯示，在目前環控系統的基礎上，藉由最佳化控制演算獲致的結果，可使性能指標再提高約 8%。

表 1 標稱解和最佳化解之比較

Table 1 Comparison of the nominal and optimal solution

	乾物重 (kg m^{-2})	販售收入 (NTD m^{-2})	操作成本 (NTD m^{-2})	性能指標 (NTD m^{-2})
標稱解	0.1632	47.6588	19.9073	27.6449
最佳化解	0.1616	47.1909	17.2904	29.7918
變異 (%)	-1%	-1%	-13%	+8%

結　論

溫室微氣候模型一般均以能量平衡的觀點建立分析模型，然而溫室微氣候與作物生長息息相關，因此兩者應該一併考量，才能瞭解其交互作用的影響。藉由動態生長模式可在工程問題與生物材料間進行連結，進而更準確建立其因果關係。經濟效益一般在農業工程的研究中較少被探討，但經濟效益卻是農業生產最重要的目標。溫室設施的主要功能就是提供作物一個更有利的生長環境，而具體的做法就是導入環境控制系統。環境控制系統固然可能提升產量與品質而增加收益，但相對的必須付出更多的能源代價。因此經濟效益應該要從權衡產量 (或品質) 與環控成本著手，才能獲得最大的淨效益。最佳化控制有完整的理論基礎，透過模型、數值方法，能找到滿足條件的控制輸入得到最大化的性能指標。因此，最佳化控制可能是解決溫室經濟生產的關鍵方法之一，未來國內應在這個領域投入更多的研究，以提升農業生產效益。本研究模擬的結果，最佳化通風控制採取了更節能的通風策略，降低了運行成本。最佳化水牆和遮蔭控制與截止區控制的結果相似。藉由最佳化控制，性能指標可以提高約 8%。最佳化方案的目的並不以最大產量為目標，而是權衡產量與操作成本，以達到最高的淨收益為目標。雖然本研究提出了模擬結果，但這個方法為亞熱帶溫室氣候控制提供了一個潛在的願景。

引用文獻

1. 楊清富、林聖泉。2012。圖控程式應用於溫室環控之研究。臺南區農業改良場研究彙報 59：54-70。
2. 楊清富、林聖泉。2017。半結球萵苣亞熱帶地區動態生長模式之建立。臺南區農業改良場研究彙報 70：56-66。
3. Bot, G. P. A., J. J. van Dixhoorn and A.J. Udink ten Cate. 1978. Beheersing van de teelt in kassen met behulp van de computer [in Dutch]. Bedrijfsontwikkeling 9(10): 729-731.
4. Challa, H. 1985. Report of the working party "Crop growth models". *Acta Horticulturae* 174: 169-174.
5. Challa, H., G. P. A. Bot, E. M. Nederhoff and N. J. van de Braak. 1988. Greenhouse climate control in the nineties. *Acta Horticulturae* 230: 459-470.
6. Challa, H. and G. van Straten. 1991. Reflections about optimal climate control in greenhouse cultivation. In: Hashimoto, Y. and W. Day (eds.). Mathematical and control applications in agriculture and horticulture. IFAC Workshop Series 1: 13-18.
7. Challa, H. and G. van Straten. 1993. Optimal diurnal climate control in greenhouses as related to greenhouse management and crop requirements. In: Hashimoto, Y., G. P. A. Bot, W. Day.
8. Hwang, Y. 1993. Optimization of greenhouse temperature and carbon dioxide in subtropical climate. Ph. D. Thesis, University of Florida, Florida.
9. Kirk, D. E. 1970. Optimal Control Theory. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
10. Pontryagin L. S., B. V. G., Gammkrelidze R. V. 1962. The Mathematical Theory of Optimal

Processes. John Wiley and Sons, New York.
11. Seginer, I. 1989. Optimal greenhouse production under economic constraints. Agricultural Systems 29: 67-80.
12. Tantau, H. J. 1991. Optimal control for plant production in greenhouses. In: Hashimoto, Y. and W. Day (eds.). Mathematical and control applications in agriculture and horticulture. IFAC Workshop Series 1: 1-6.
13. Tchamitchan, M., L. G. van Willigenburg and G. van Straten. 1992. Short term dynamic optimal control of greenhouse climate. MRS Report 29-3, Wageningen Agricultural University, Wageningen.
14. Udink ten Cate, A. J., G. P. A. Bot, and J.J. Dixhoorn. 1978. Computer control of greenhouse climates. *Acta Horticulturae* 87: 265-272.
15. Van Henten, E. J., and J. Bontsema. 1991. Optimal control of greenhouse climate. In Mathematical and Control Applications in Agriculture, ed. Y. Hashimoto and W. Day, 1: 27-32. IFAC Workshop Series.
16. Van Henten, E. J. 1994. Greenhouse climate management: an optimal control approach, Ph. D. thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.

Simulation and analysis of microclimate optimal control in subtropical greenhouse-lettuce cultivation as example[1]

Yang, C. F.[2] and T. C. Lin[3]

Abstract

In recent years, many greenhouses had been built in Taiwan to cultivate crops. Ventilation and cooling must be designed carefully in greenhouses to reduce the cost of environmental control. By employing an adequate environmental control, a better microclimate can be achieved in the greenhouse, to improve the crop growth conditions. Therefore, environmental control in greenhouses has continually won considerable research attentions. In recent years, many foreign environmental control systems have been introduced to Taiwan. However, there the climate and environment are different between these regions and Taiwan, these systems did not perform well as expected, and the promotion of economic benefits was limited. Through the mathematical model of the greenhouse under different climatic conditions of simulation, and then developing the best design has become the trend of research on greenhouse environment control. Taiwan's facility agriculture is booming. Using environment control technology to improve the environment and adversity has gradually been paid more attention. However, too much investment in environmental control may cause a negative impact on economic benefits. In this study, a dynamic model containing plant dry matter weight, CO_2 concentration, temperature and humidity was established based on subtropical climatic conditions. The maximum net income from lettuce production in greenhouse was defined as the main performance index. We applied the theory of optimal control to estimate the best control strategy. A comparison was performed with an existing environmental control strategy. The results showed that the proposed control strategy could increase the net income of lettuce production by approximately 8%.

What is already known on this subject?
Greenhouse environmental control is usually connerned by energy balance and crop growth requirements.

What are the new findings?
Introduce optimization control theory and calculate subtropical greenhouse optimization control strategy.

What is the expected impact on this field?
Greenhouse microclimate optimization control can be used as a method to maximize net income production model in the future.

Key words: Subtropical, Greenhouse, Microclimate, Optimal control, Simulation
Accepted for publication: July 12, 2018

1. Contribution No.496 from Tainan District Agricultural Research and Extension Station.
2. Assistant Researcher, Tainan District Agricultural Research and Extension Station. 70 Muchang, Hsinhua, Tainan 712, Taiwan, R.O.C.
3. Professor, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Chung Hsing University. 145 Xingda Rd., South Dist., Taichung City 402, Taiwan, R.O.C.