

基於 LoRaWAN 之無線灌溉控制系統研發¹

吳有恒²、李汪盛²

摘 要

本研究開發無線灌溉控制系統，並應用於溫室槽耕牛番茄栽培，進行滴灌控制測試。在 6 個月栽培期間內，可穩定維持介質體積含水率介於 30.0%-43.5%。無線灌溉控制系統包含控制主機、泵、過濾器、電磁閥及三合一無線土壤感測器。控制主機管控土壤含水率、溫度及電導度感測信號的接收與顯示、灌溉參數設定、邏輯判斷、泵及電磁閥的啟閉。灌溉控制系統同時具備手動、排程、自動感測及遠端控制等 4 種模式，使用者可依作物栽培方式選擇不同控制模式。本系統透過 LoRa 傳輸感測器信號，溫室管理人員可於遠端透過手機、平板或電腦設定灌溉參數及控制灌溉系統。感測所得資料同時直接上傳雲端伺服器，透過農業分析軟體運算處理，可即時顯示感測數值、歷史曲線與累積值分析，相關數據可供作為後續作物栽培管理之依據。

關鍵字：智慧農業、土壤含水率、灌溉自動化、精準灌溉

前 言

光合作用 (photosynthesis) 與蒸散作用 (transpiration) 是植物重要的生理代謝過程。植物透過根系由土壤中吸取養分與水分，經由葉片行光合作用以累積有機化合物，多數的水分則透過葉片的蒸散作用散失到大氣中。灌溉的目的即在合理的補充作物蒸散與土壤蒸發的水分，提供植物生長的需求 (吳, 2014)。

植物生長過程需多少灌溉水，受到氣候狀況 (光累積量、環境溫度、相對溼度)、土壤條件 (含水率、土壤溫度、土壤結構)、作物種類、生長階段、灌溉方法等眾多因子影響 (Brouwer and Heibloem, 1986)。灌溉水不足，會使作物生長減緩及產量與品質下降，且容易造成土壤鹽化 (Allen *et al.*, 1998; Medyouni *et al.*, 2021)；灌溉水過

¹ 農業部桃園區農業改良場研究彙報第 556 號。

² 桃園區農業改良場副研究員(通訊作者, yhwu@tydais.gov.tw)及作物環境科科長。

多，則土壤容易缺氧，植物根部呼吸受到阻礙，且根部吸水能力受阻，養分吸收不良（Kirkham, 2000），同時也浪費灌溉水。一般溫室內灌溉方式主要採用滴灌或噴灌作業，不同的作物其適用的灌溉方式不同，但不論採用哪一種灌溉方式，最重要的灌溉技術還是在於決定植物何時需要灌溉、需給多少水及灌溉水給予的方式等灌溉決策控制作業（Nikolaou *et al.*, 2019; Prenger *et al.*, 2005）。

目前最廣泛使用的灌溉控制方式是利用定時器控制灌溉系統的啟、停（Nikolaou *et al.*, 2019），此種方式簡單，只需設定灌溉時間與頻度；然而，由於作物生長受到環境強烈的影響，植株對水分的需求會因環境變化而有所不同，定時控制的灌溉方式難以精準地提供作物所需的水分，常導致水分供給過度或缺乏，因而影響作物的成長，無法培育出高品質的農產品。因此，產業上以定時器控制灌溉時，需要頻繁地依天氣陰晴與作物生長狀況調整灌溉時間與頻度，為目前亟需改善的缺失。

本研究開發無線灌溉控制系統，透過 LoRa 無線網路，將三合一無線土壤感測器（含水率、溫度、電導度）信號無線傳輸至灌溉控制主機，再依控制主機設定之控制策略啟、閉泵及電磁閥，以進行灌溉作業。土壤感測器信號並可同步上傳至雲端伺服器，溫室管理人員可於遠端使用行動裝置或電腦查看感測器資料，並設定灌溉參數及控制灌溉系統的起、停，以達到最適灌溉之目的。

材料與方法

一、無線灌溉控制系統 LoRaWAN 架構

圖 1 顯示無線灌溉控制系統 LoRaWAN 之架構。此系統透過 LoRa 網路，將三合一無線土壤感測器感測信號傳至灌溉控制主機，感測器信號除用於灌溉控制主機進行邏輯判斷以控制灌溉作業外，並可併同感測器及設備運作狀況上傳至雲端伺服器，透過連結農用無線感測共用平台系統（吳，2017），進行相關運算與分析，以利管理人員於遠端透過行動裝置或電腦下載、分析與決策。

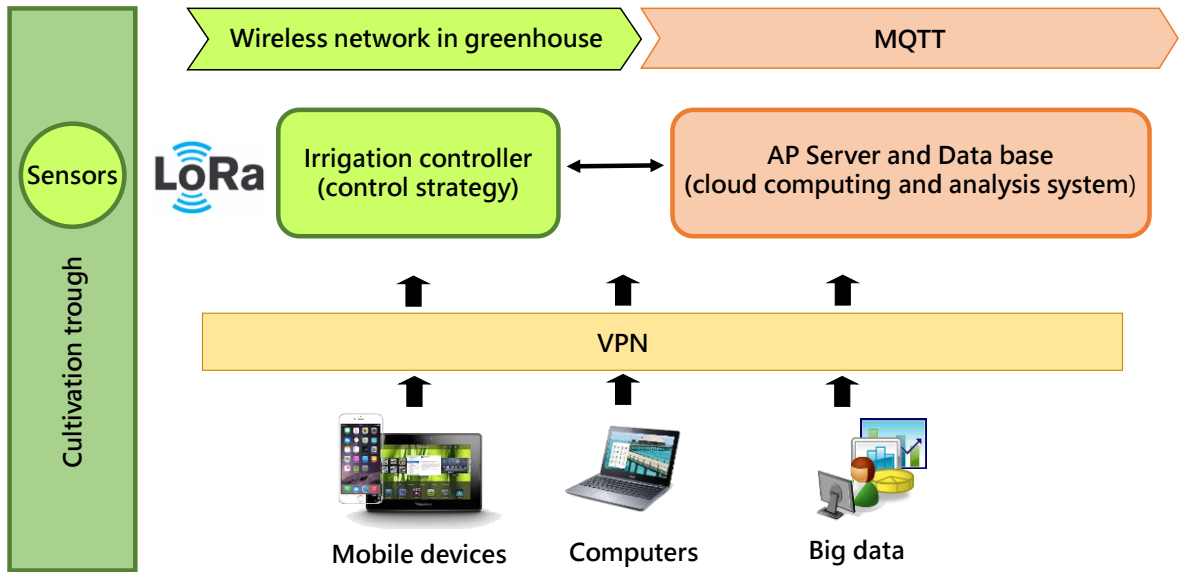


圖 1. 無線灌溉控制系統 LoRaWAN 架構

Fig. 1. LoRaWAN architecture of the wireless irrigation control system.

二、無線灌溉控制系統硬體架構

無線灌溉控制系統如圖 2，包含 LoRa 無線網路、控制主機、泵、5 μm 過濾器、電磁閥、三合一無線土壤感測器（圖 3，Murata Manufacturing Co., Ltd.）。其中，電磁閥及三合一感測器各有 4 組，可同步執行 4 個區域的土壤感測及灌溉控制作業。LoRa 無線網路負責三合一土壤感測器與控制主機間通訊，4G 網路負責感測資料上傳雲端伺服器，控制主機負責灌溉邏輯判斷、泵及電磁閥的啟、閉。控制主機面板上有切換開關可切換成手動或自動模式。在手動模式下，使用者可於溫室現場直接控制灌溉水的給予；自動模式下則設有排程、感測及遠端控制等 3 選項。此系統 4 種灌溉控制模式如表 1 說明。



圖 2. 無線灌溉控制系統

Fig. 2. Wireless irrigation control system.



圖 3. 三合一無線土壤感測器（含水率、溫度、電導度）

Fig. 3. 3-in-1 wireless soil sensor (moisture content, temperature, conductivity).

表 1. 灌溉控制模式

Table 1. Irrigation control modes.

控制模式	控制方式	作業方式
手動	手動控制	可於溫室現場隨時開啟、關閉灌溉作業
自動	排程控制	可依需求設定最多 8 組灌溉時段
	感測控制	1. 可依設定之土壤含水率上、下限值關閉、開啟灌溉作業 2. 可依設定之土壤含水率下限值開啟灌溉作業，於設定一定灌溉時間後關閉
	遠端控制	可於遠端設定、調整控制系統參數；並可於遠端控制灌溉作業

三、無線灌溉控制試驗

無線灌溉控制試驗於新竹縣新埔鎮之簡易溫室（圖 4）內執行，以離地槽耕栽培方式種植牛番茄。灌溉管路採滴灌系統，滴灌管直接置於耕槽之介質上。灌溉控制採自動模式下之感測控制方式，控制主機設定土壤含水率低於體積含水率（volumetric water content）30.0%即啟動灌溉，灌溉處理 10 分鐘後停止。對照組為農場原設定之定時灌溉控制模式，30 分鐘滴灌 1 次，中午 12 至 13 時時段為 15 分鐘 1 次，每次滴灌 1 分鐘，灌溉時間均於白天進行，農場管理員並會視天氣狀況調整灌溉頻度與時間。

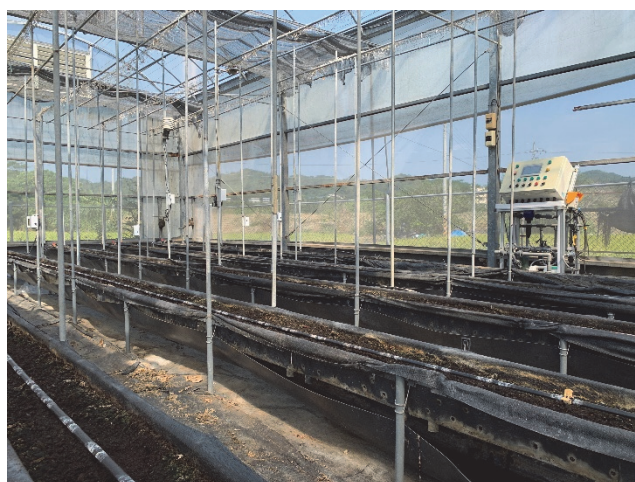


圖 4. 無線灌溉控制試驗之槽耕栽培系統

Fig. 4. Trough cultivation system in the wireless irrigation control experiment.

結果與討論

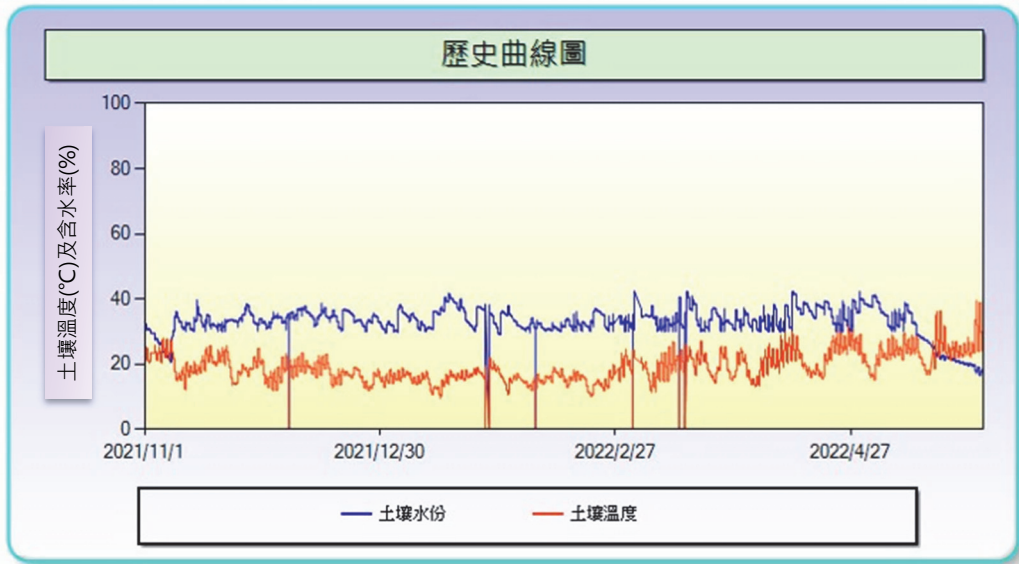
一、無線灌溉控制試驗

溫室牛番茄無線灌溉控制試驗之介質含水率與介質溫度變化如圖 5-A；在 6 個月的栽培期間，介質最低含水率均可維持在設定值 30.0%，最高含水率為 43.5%。以定時器控制灌溉給水結果如圖 5-B；在大多數時段內，介質含水率均在 60%左右，於 2 月下旬則有數天之介質含水率低於 20%。

圖 5-A 顯示以介質含水率作為灌溉啟動之下限點，並搭配灌溉時間之控制方式，可控制介質含水率在小區間範圍內波動。此種灌溉控制方式設定簡單、穩定性高，不易過量灌溉。一般在灌溉給水時，當水體持續進入土壤後，土壤內水分會不斷地增加；即使停止給水，由於重力與毛細現象的作用，土壤含水率仍會不斷地增加，並且持續一段時間才會穩定。因此，以土壤含水率作為停止給水的控制模式中，當感測器量測到上限含水率，水閥關閉後，土壤含水率實際上仍會持續增加而超過上限含水率，因而導致過度澆灌。

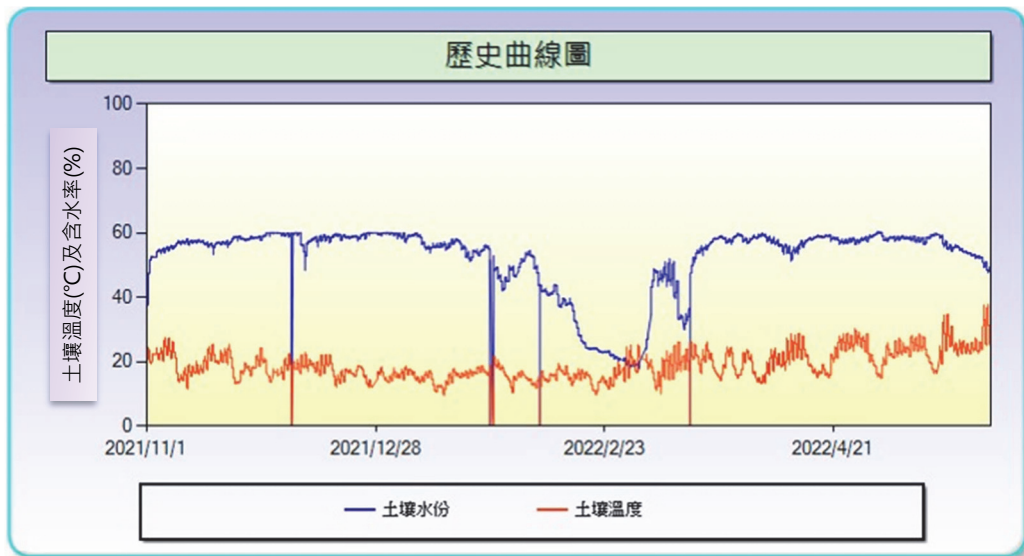
圖 5-A 顯示在控制模式下，隨著環境溫度增加，介質溫度上升，灌溉水頻度增加。顯示此種灌溉控制模式可因應環境溫度變化而適時提供作物水分；同時介質含水率增幅較圖 5-B 明顯，介質因此可以維持乾、溼交替狀態，有助於增加介質的透氣性。

圖 5-B 顯示以定時器控制灌溉的作業中，介質大多數時間均在飽合體積含水率狀態下。實際上由現場的觀察也顯示，灌溉過程中，不少的液體會由耕槽底下流出。因此，在實際管理作業上，於溫室番茄或小黃瓜的離地栽培上，利用定時器控制灌溉的農友常會擔心澆灌不足，因而採取過度澆灌方式，即是將介質澆到全濕且滴水的狀態。此方式除浪費灌溉水外，介質中的養分也會因此流失；同時由於介質長期處於高含水率，介質的透氣性變差，也不利植物根系的發展。



A：實驗組－介質體積含水率低於 30.0%啟動滴灌，灌溉 10 分鐘後停止

A: Experimental group - Drip irrigation initiated when substrate volumetric moisture content drops below 30.0%, stopped after 10 minutes of irrigation.



B：對照組－採用定時器控制滴灌

B: Control group - Drip irrigation controlled by a timer.

圖 5. 溫室牛番茄灌溉控制試驗之介質含水率與溫度變化

Fig. 5. Changes in substrate moisture content and temperature in an irrigation control experiment for greenhouse beef tomatoes.

圖 6 顯示使用無線灌溉控制滴灌與對照組栽培結束後的介質的表面狀態。明顯可看出利用無線灌溉控制系統作業的介質表面無青苔產生（圖 6-A）；而對照組以定時灌溉方式，則因為澆灌過度，導致介質含水率過高而青苔滋生（圖 6-B）。



A：實驗組－採用無線灌溉控制滴灌
A: Experimental group - Drip irrigation controlled wirelessly.



B：對照組－採用定時器控制滴灌
B: Control group - Drip irrigation controlled by a timer.

圖 6. 溫室牛番茄灌溉控制試驗之介質表面狀態

Fig. 6. Substrate surface conditions in the irrigation control experiment of greenhouse beef tomatoes.

圖 7 顯示溫室牛番茄灌溉控制試驗植株根系的發育狀況。以無線灌溉控制系統控制滴灌，介質含水率可長期維持在 30.0%-43.5%（圖 7-A），相較於長期處於約 60% 含水率的控制組（圖 7-B），其根系明顯較白、主根強壯、根鬚較長且不易斷裂，顯示在前述含水率狀況下，介質可以維持較好的通氣性，其根系發展亦較佳。圖 7-A 同時顯示以槽耕系統進行牛番茄栽培，其根系幾乎佈滿整個耕槽並與介質交纏；因此，以滴頭間距 20 cm 的滴灌管進行滴灌作業，滴頭滴下的水體可透過重力及介質的毛細現象傳輸，以供根系吸收利用，不致因滴頭間距而影響作物灌溉。



A : 實驗組－採用無線灌溉控制滴灌
A: Experimental group - drip irrigation controlled wirelessly.



B : 對照組－採用定時器控制滴灌
B: Control group - drip irrigation controlled by a timer.

圖 7. 溫室牛番茄灌溉控制試驗之植株根系發育狀況

Fig. 7. Root development status of plants in the irrigation control experiment for greenhouse beef tomatoes.

二、溫室使用 LoRaWAN 無線傳輸的優勢

無線灌溉控制系統感測裝置是透過 LoRa 網路進行無線傳輸，數據收、送分別僅消耗 10.3 及 28 mA 的電流；而閒置及睡眠狀態則更只消耗 1.5 及 0.2 μ A 電流。由於其功耗小，4 顆四號電池即可維持 6-7 個月的信號通訊，在牛番茄栽培期間無須更換電池，相當適合溫室作物栽培使用。同時由於 LoRa 的信號穿透性強、傳輸距離遠（可達數公里），抗干擾性佳（Trinh *et al.*, 2018; Usmonov and Gregoretti, 2017; Zhao, 2017），亦適用於較大面積溫室或內部有結構阻隔的溫室。

本系統原採用 Wi-Fi 無線網路進行感測器信號傳輸，但由於其功耗大，為避免頻繁地更換電池，採用接市電的電源供應器（power adapter）。然而，一般溫室內電源供應點可能僅有一處，安裝感測器需要額外再接電，容易干擾溫室內去老葉、拉藤、

灌溉、搬運及收穫等管理作業，因此在使用上有一定的不便性。再者，雖然 Wi-Fi 網路數據傳輸量大，可達 54 Mbps，但本系統僅傳輸感測器信號，無影像等需高數據傳輸之需求，採用 LoRa 網路具備合理性。

無線灌溉控制系統支援遠端控制功能，可透過手機、平板及電腦等裝置，於遠端設定灌溉參數或控制灌溉系統（如圖 1），此方式非常方便溫室管理者或工程師進行遠端管理與檢修。再者，由於感測數據可即時傳輸至雲端伺服器，溫室管理者可隨時檢視與分析感測數據，藉以調整灌溉作業；或透過歷史灌溉資料對應各階段牛番茄產量，以作為未來作物栽培灌溉的決策依據。

三、無線灌溉控制系統整合應用

無線灌溉控制系統之控制主機、泵、過濾器及電磁閥等構件均整合於一可移動機台上（圖 8），使用者僅需將機台移至溫室內定位，同時接入電源、連接滴灌管路及於耕槽內插入無線土壤三合一感測器後，即可全程自動化作業。對於小農而言，可免除系統安裝與設定的困擾；而於較大溫室安裝，則可直接將控制主機搭配農場的灌溉系統後即可運作。

無線灌溉控制系統配置有 4 組三合一無線土壤感測器及 4 組電磁閥，可同步進行 4 區的感測及灌溉控制作業（圖 9）；此方式允許於 4 區栽培相同的作物，並採用不同的灌溉控制模式（表 1）；或於 4 區栽培不同的作物，而採用相同的灌溉模式，可滿足多樣的栽培灌溉需求。

目前灌溉控制系統採用的三合一無線土壤感測器，可同步監測土壤的含水率、溫度及電導度。未來將應用此機監測土壤含水率與電導度，並進行溫室小黃瓜養液灌溉控制測試，評估與傳統定時器控制灌溉在養液需求、人力作業及作物成長的差異性。



圖 8. 無線灌溉控制系統控制主機面板

Fig. 8. The controller panel of the wireless irrigation control system.

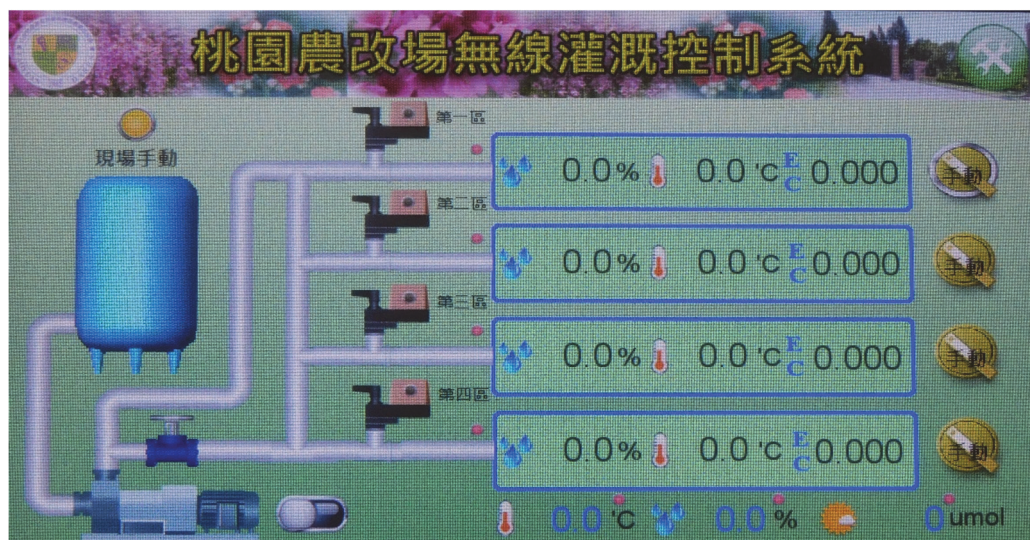


圖 9. 無線灌溉控制系統人機介面可控制 4 區灌溉

Fig. 9. Human-machine interface of the wireless irrigation control system, enabling control of irrigation across four zones.

致 謝

本研究感謝農業部計畫經費贊助（計畫編號：109 農科-7.4.2-桃-Y3），以及梁書鳴先生提供牛番茄溫室協助系統測試；作者也感謝桃園區農業改良場作物環境科詹德財先生及邱中正先生協助相關試驗。

參考文獻

- 吳有恒。2014。溫室灌溉技術。桃園區農業專訊 89:9-13。
- 吳有恒。2017。結合雲端服務平台之溫室無線通訊感測系統開發。桃園區農業改良場研究彙報 82:61-79。
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9):D05109.
- Brouwer, C., and M. Heibloem. 1986. Irrigation water management: Irrigation water needs. Training Manual 3:1-5.
- Kirkham, M.B. 2000. Water use in crop production (Vol. 2). 1st ed. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Medyouni, I., R. Zouaoui, E. Rubio, S. Serino, H.B. Ahmed, and N. Bertin. 2021. Effects of water deficit on leaves and fruit quality during the development period in tomato plant. Food Science & Nutrition 9(4):1949-1960.
- Nikolaou, G., D. Neocleous, N. Katsoulas, and C. Kittas. 2019. Irrigation of greenhouse crops. Horticulture 5(1):7.
- Prenger, J.J., P.P. Ling, R.C. Hansen and H.M. Keener. 2005. Plant response-based irrigation control system in a greenhouse: system evaluation. Transactions of the ASAE 48(3):1175-1183.
- Trinh, D.C., T.C. Truvent, and T.D. Bui. 2018. Design of automatic irrigation system for greenhouse based on LoRa technology. 2018 International conference on advanced technologies for communications. p. 72-77.
- Usmonov, M., and F. Gregoretti. 2017. Design and implementation of a LoRa based wireless

control for drip irrigation systems. 2017 2nd international conference on robotics and automation engineering. p. 248-253.

Zhao, W., S. Lin, J. Han, R. Xu, and L. Hou. 2017. Design and implementation of smart irrigation system based on LoRa. 2017 IEEE Globecom Workshops. p. 1-6.

Development of a Wireless Irrigation Control System Based on LoRaWAN¹

Yu-Heng Wu² and Wang-Sheng Li²

Abstract

This study developed a wireless irrigation control system applied to greenhouse cultivation of beef tomatoes, and conducted drip irrigation control tests. During the six-month cultivation period, this system can stably maintain soil volumetric water content between 30.0% and 43.5%. The wireless irrigation control system includes a control unit, pump, filter, solenoid valves, and three-in-one wireless soil sensors. The control unit manages the reception and display of soil moisture content, temperature, and conductivity sensor signals, irrigation parameter settings, logic judgment, and the on and off of the pump and solenoid valves. The irrigation control system features four modes: manual, scheduled, automatic sensing, and remote control, allowing users to select different control modes according to crop cultivation methods. The system transmits sensor signals via LoRaWAN, enabling greenhouse managers to set irrigation parameters and control the irrigation system remotely through mobile phones, tablets, or computers. The sensed data is also directly uploaded to a cloud server to process the data through the agricultural analysis software, providing real-time display of sensor values, historical curves, and cumulative value analysis. The related data can serve as a basis for subsequent crop cultivation management.

Key words: smart agriculture, soil moisture content, irrigation automation, precision irrigation

¹. Contribution No. 556 from Taoyuan DARES, MOA.

². Associate Researcher (Corresponding author, yhwu@tydais.gov.tw) and Chief of Crop Environment Section, Taoyuan DARES, MOA.