

農業生態系長期研究場址無線感測器網路建置¹

詹岳魁² 陳琦玲^{2,10} 吳泓書³ 林晉卿⁴ 侯平君⁵ 姚銘輝⁶ 許禎坤⁷ 陳建文⁸ 林朝欽⁹

摘 要

詹岳魁、陳琦玲、吳泓書、林晉卿、侯平君、姚銘輝、許禎坤、陳建文、林朝欽。2012。
農業生態系長期研究場址無線感測器網路建置。台灣農業研究 61:269–284。

完整生態系資料的收集與分析有助於對自然環境與生態系發展之瞭解，本研究目的係運用生態資訊學所建構的新方法論，在農業試驗所嘉義分所荔枝園及其溪口農場與臺南改良場雲林分場等三處農業長期生態研究站，建置無線感測器網路系統，以加強資料收集之完整性與監控。本研究利用無線網路，將各類型感測器如熱感應、影像、紅外線及聲音感測器所監測的周遭環境與生態資訊，包括氣象、渦流通量、氮素滲漏、作物物候及生態聲景等，自動化收集並傳輸至農試所伺服器之資料庫，並顯示在監測系統網頁中讓研究者可隨時截取資料，以進行資料分析。藉著無線感測網路的建置，可即時偵測與維護感測器的正常運作，提升資料的完整性與品質，以進行週年性環境資料分析。本研究採用生態資訊學所發展出的生態後設資料語言 (ecological metadata language, EML)，建立國際生態研究共同使用的資料格式，有助於資料的存取、解讀與利用，促進資料的分享。

關鍵詞：農業生態系、長期生態研究、無線感測器網路、生態資訊學、生態後設資料語言。

前 言

在長期生態研究過程中將會累積數量龐大、分散且性質差異大的資料，加上這些資料分散各地不易取得，使得即時獲取資料的分享

機能無法發揮，不僅難以擴大資料的應用面，許多資料更因缺乏資料庫的管理極易造成資料的流失，不但減少研究資料的價值，同時也提高研究成本，更無法有效整合既有資料，產

1. 行政院農業委員會農業試驗所研究報告第 2694 號。接受日期：101 年 7 月 30 日。
2. 本所農業化學組研究助理、研究員。台灣 台中市。
3. 本所嘉義分所農藝系助理研究員。台灣 嘉義市。
4. 行政院農業委員會臺南區農業改良場作物環境課研究員。台灣 台南市。
5. 國立成功大學生命科學系教授。台灣 台南市。
6. 本所農業工程組副研究員。台灣 台中市。
7. 本所技術服務組聘用助理研究員。台灣 台中市。
8. 行政院農業委員會林業試驗所植物園組助理研究員。台灣 台北市。
9. 行政院農業委員會林業試驗所森林保護組研究員。台灣 台北市。
10. 通訊作者，電子郵件：chiling@tari.gov.tw；傳真機：(04)23302805。

生新的研究價值。而生態研究已從小規模小尺度的研究逐漸朝向以大規模的時間與空間尺度探討複雜的生態系統，其所要分析的資料也非傳統單一的範圍，研究人員需要蒐集更多相關資料，並且開始需要藉由資料庫來達成資料共享、整合甚至於應用到資料探勘 (Lu & Lin 2005)。因此，資料的完整收集、保存與交流對於長期生態研究是非常重要的，有了完整資料的收集與分析，才能對生態系有所瞭解。

以往生態研究的資料收集，多數需仰賴人工定時前往採集點讀取感測器收集所需之資料，所收集回來之資料需經過整理、分類、分析與處理等步驟後，才能提供給研究者使用 (Ho 2008)。假若感測器發生狀況損壞時，也無法第一時間得知相關訊息，需待資料收集時才能發現，容易造成資料收集不完整、資料斷層之現象；這些步驟既需耗費大量的人力資源，也不符合研究效率，更會增加許多不必要的困擾。

隨著資訊軟硬體、通訊技術與網路頻寬等快速發展，目前許多國家都開始發展無間隙網路 (ubiquitous network) 的計畫，將無線區域網路、無線廣域網路、無線個人網路等不同領域的通訊技術相互組合搭配，希望藉由各種不同通訊技術的結合，形成綿密通訊網，為人們的日常生活帶來更多安全與便利 (Burgess *et al.* 2010)。無間隙網路的應用，其中一個重要的架構即是無線感測器網路 (wireless sensors network, WSN)。

無線感測器網路是一種在一個特定區域建置許多感測器並相互連結所組成的網路。當感測器建置於特定區域，可依照感測器所提供之功能對環境進行感測，資料取得則透過無線網路傳輸，將多個感測器所組成的傳輸路徑傳回資料接收端，提供給研究人員進行資料分析與對應動作。目前主要應用於工業、航太、軍事、生醫、環境監控等許多領域 (Mainwaring

et al. 2002)，應用範圍廣泛，成為當今世界上備受關注的技術焦點之一，2003 年 MIT 技術評論 (Technology Review, <http://www.technologyreview.com>)，在預測未來技術發展報告中，亦將其列為改變世界的十大技術之一 (Ankur *et al.* 2006; Cao *et al.* 2008)。

生態學界亦已逐漸發展出一門稱為生態資訊學 (ecoinformatics) 的理論與技術，不但可以協助紀錄、整合及分析個體、族群、群聚和生態系各階層的龐大資料，更能藉由網路服務技術達到分享的目的。生態資訊學的興起，也改變了傳統以人工資料蒐集與利用的模式，轉變為透過無線網路的方式將感測器所收集的資料回傳至指定的資料庫，並依照生態資訊學所發展出的生態後設資料語言 (ecological metadata language, EML) 資料規格，建立國際生態研究共同使用的資料格式檔，有助於研究人員日後對資料的存取與利用，促進資料的分享與整合，進而達到知識管理的目的 (Lin *et al.* 2008)。

農業試驗所與臺南改良場於 2006 年開始農業生態系長期生態研究 (long term ecological research, LTER)，其目的為瞭解農業耕作對生產力維持、生物多樣性與環境的長期影響 (Chen *et al.* 2009)。原來係將感測器偵測之資料存於資料收集器，再以人工前往收集，但此方式不能即時偵測感測器狀態，有時會產生資料中斷等問題。為了提升資料收集的完整性與品質，本研究之目的係在農業生態系長期研究站建立無線感測器網路系統，以加強各研究站資料收集的即時性與完整性。

材料與方法

本研究系統建置範圍包括：(1) 農業試驗所嘉義分所溪口農場雙期作水田與水旱輪作田生態研究站；(2) 臺南改良場雲林分場雙期作水田與水旱輪作田生態研究站；(3) 農業試驗

所嘉義分所荔枝原生種保存區及慣行農耕荔枝園區生態研究站。主要收集資料包括氣象、渦流通量、氮素滲漏、作物物候、生態聲景等，透過前端感測器、無線網路以及中繼資料收集站，整合成一無線感測器網路系統，並將所收集之感測器資料回傳至農試所，建立感測器資料庫顯示於監測系統網頁中。

無線網路系統評估

目前常見的無線網路種類主要有以下幾種：(1) 2.5G (GPRS)；(2) 3G (CDMA2000; WCDMA)；(3) ZigBee；(4) Wi-Fi (IEEE802.11a, b, g, n)；(5) Wi-MAX (IEEE802.16d, 16e)，其中以 ZigBee 及 Wi-Fi 較常用於建構無線感測器網路 (Fang 2006)，相關說明與特性如表 1 (Young & Young 2007)。每一種無線網路系統有其特性及適合運用之環境與場所，需考量各研究站的環境因素，選擇最適當的無線網路架

構。各研究站的環境因素說明如下：

農業試驗所嘉義分所溪口農場：溪口農場的環境屬平原地形，地勢平坦，試驗區為雙期作水田及水旱輪作區，田區形狀為狹長方形 (長 800 m、寬 200 m、8.0 ha)。試驗田區已有部分 Wi-Fi 基礎網路設施。

臺南改良場雲林分場：雲林分場的環境屬平原地形，地勢平坦，試驗區為雙期作水田及水旱輪作區，田區形狀似長方形 (長 360 m、寬 250 m、7.0 ha)，研究站辦公室與試驗田區之間，有一果樹保存園遮蔽 (長 100 m、寬 40 m)。

農業試驗所嘉義分所荔枝園：嘉義分所為丘陵地，園區形狀屬狹長型 (長約 800 m、寬約 200 m、2.5 ha)，地勢起伏較大；其中原生種自然保存園區 (Natural ecosystem, NE, 1.4 ha)，遍植各種原生種荔枝樹，樹木數量多且高大，人為干擾少，區域內生態景觀豐富，為生態

表 1. 常見之無線網路規格比較

Table 1. Comparison of common specifications of various wireless networks (Young & Young 2007)

Type	2.5G	3G	ZigBee	Wi-Fi	Wi-MAX
International standard	GPRS CDMA GSM TDMA	CDMA2000 TD-SCDMA WCDMA	IEEE802.15.4	IEEE802.11a IEEE802.11b IEEE802.11g IEEE802.11n	IEEE802.16d (fixed) IEEE802.16e (Mobile)
Transmission speed	115–384 Kbps	144 Kbps–2 Mbps	20–250 Kbps	11–54 Mbps	10–70 Mbps
Transmission distance	Average transmission radius: 0.5–5 km	Average transmission radius: 0.5–5 km	100–300 m	Indoor: 32 m Outdoor: 95 m	Optimal distance 1–10 km, far to 30 km
Feature	Digital voice transmission Peer-to-Peer (P2P) Point-to-Multi-point (P2MP) Multimedia messaging service (MMS)	Provide videophone Real-time video/ audio Mobile TV services	Low power requirement Support large network nodes Many kinds of network topologies	Low establishment cost High speed transmission for short distance	None line of sight (NLOS)& line of sight (LOS) wireless technology transports long distance Cover large frequency High transmission rate which wasn't easily effected by varied terrain
Defect	Narrow transmission bandwidth and need cell phone number	Bandwidth limit to base station coverage	Narrow transmission bandwidth	Signal sensitive to terrain and environmental	High establishment cost
Establishment cost	low	middle	low	middle	high

景觀觀測之最佳場所；慣行農耕 (Conventional Agroecosystem, CA, 1.1 ha) 荔枝園區所種植的荔枝品種為黑葉，園區果樹已進行矮化管理。

網路系統架構

系統建置目的是提供長期生態研究資料蒐集便利性，將試驗田區的儀器及感測器，結合無線網路將資訊傳送並儲存於各研究站之中繼伺服器，再透過中華電信非對稱數位用戶線路 (asymmetric digital subscriber line, ADSL) 實體線傳回農試所中央伺服器，經由伺服器處理轉換成分類網頁，讓研究人員可以從網頁中即時監控、分析、設定、控制處理所有感測器之資訊。系統架構基本規劃如圖 1，系統主要由 3 個部分所組成，分別說明如下：

中央伺服器與資料庫：中央伺服器為電腦 IBM System X3650，安裝 SQL server 作為感測器資料庫，設置於農業試驗所，負責儲存各試驗田區中繼站所回傳的感測器資料，且透過程

式語言 ASP.NET 設計系統網頁 (<http://lter-wsn.tari.gov.tw/TARI/welcome.aspx>)，可將各項感測器收集資料顯示於系統網頁，讓研究人員透過網際網路便能線上查詢各研究站感測器相關資料。

研究站設置中繼資料收集站及備援資料庫：雲林分場、溪口農場及嘉義分所，各設置中繼伺服器 (site server) 負責透過無線網路收集及備援試驗田區感測器資料，再將所收集的資料透過中華電信 ADSL 網路回傳至農業試驗所感測器資料庫系統。

研究站無線感測器網路建置及感測器節點資料回傳程序：試驗田區各感測器與無線網路設備連結，所形成之無線感測器網路系統，所有感測器資料先轉換成統一數位化資料，並透過無線網路傳送至各研究站的中繼伺服器。

感測器設備

本研究所採用的感測器系統外觀如圖 2 所示，各感測項目與感測頻率設定說明如下：

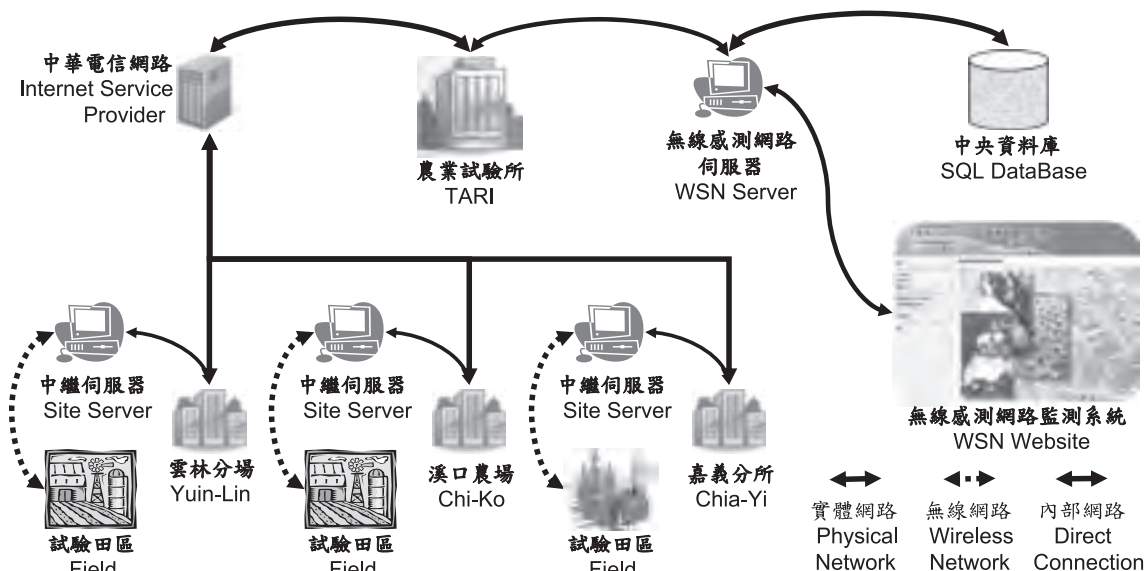


圖 1. 本研究網路系統架構示意圖。

Fig. 1. A diagram showing the framework of network system in this study.

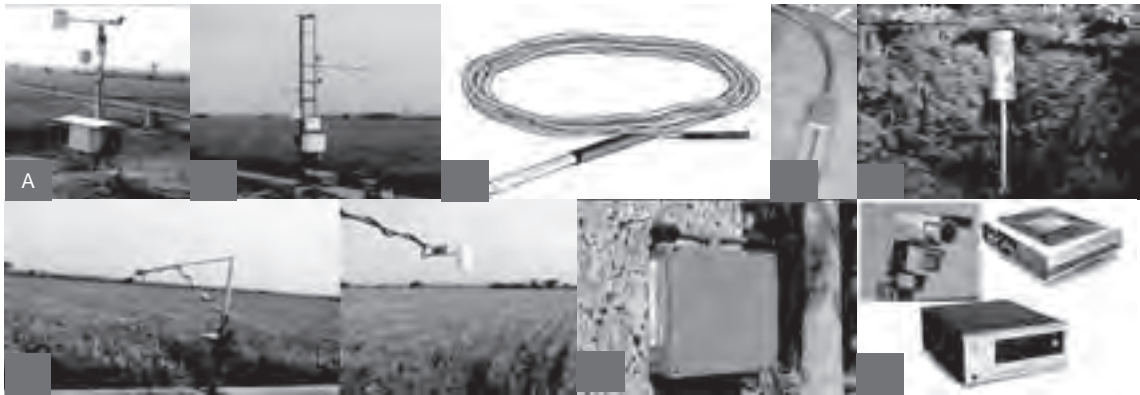


圖 2. 本研究無線感測器網路感測器種類。(A) 氣象站；(B) 渦流通量偵測系統；(C) 土壤溫度計；(D) 土壤水分計；(E) 滲漏計；(F) 植物影像記錄器；(G) 數位錄音記錄器；(H) 移動偵測攝影系統。

Fig. 2. Various sensors used in the wireless sensor network at experimental sites in this study. (A) Weather station; (B) Eddy flux detection system; (C) Soil temperature; (D) Soil moisture; (E) Lysimeter; (F) Video recorder of plant growth; (G) Digital audio recorder; (H) Portable image detection system.

氣象站 (weather station)：氣象站主要是收集氣象相關資料，包括有氣溫、相對濕度、日射量、日照時數、降雨、風向和風速等感測器項目。本研究採用 Campbell Scientific 公司型號為 thermocouple fw3 之氣溫計；Campbell Scientific 公司型號為 HMP50 之溫濕度計；PP systems 公司型號為 PAR 之光度計；大田計器公司型號為 34-T (RA-1) 之雨量計；Young 公司型號為 81000 之三維音波風速計。氣象站每秒掃描各感測器一次，但資料記錄器 (玖廷公司型號為 HL20) 再計算與記錄每小時各氣象感測器量測之平均值，並回傳至伺服器。

渦流通量偵測系統 (eddy flux detection system)：渦流通量偵測系統主要收集通量資料，架設於所觀測田區上方 2 m 處，包含瞬間氣溫變化、淨輻射、土壤溫度、土壤濕度、CO₂ 通量、潛熱通量、可感熱通量及熱流板通量等相關通量數據。本研究採用 Campbell Scientific 公司型號為 thermocouple fw3 之氣溫計；Campbell Scientific 公司型號為 Q-7.1 Net Radiometer 之淨輻射計；Campbell Scientific 公司型號為 107 之土壤溫度計，固定埋設於地

表下 5 cm 的深度；Campbell Scientific 公司型號為 CS616 之土壤濕度計，固定埋設於地表下 30 cm 的深度；LI-COR 公司型號為 7500 之 CO₂ 及 H₂O 偵測計；Campbell Scientific 公司型號為 REBS HFT3-L 之土壤熱流板。每秒掃描 10 次通量變化，但資料記錄器 (Campbell Scientific 公司型號為 CR1000) 僅記錄每小時平均值，並回傳至伺服器。

土壤溫度計 (soil temperature)：本研究採用 Campbell Scientific 公司型號為 Model 109 之土壤溫度計，固定埋設於地表下 10 cm 的深度，記錄與監測土壤溫度。每秒掃描一次，但資料記錄器 (Campbell Scientific 公司型號為 CR200X Series) 僅記錄每 10 分鐘之平均值，並定時將資料回傳至伺服器。

土壤水分計 (soil moisture)：本研究採用 Decagon Devices 公司型號為 EC-5 之土壤水分計，固定埋設於地表下 10 cm 的深度，另有多層式土壤水分計可量測不同深度的土壤含水率變化。每秒掃描一次，但資料記錄器 (Campbell Scientific 公司型號為 CR200X Series) 再計算與記錄每 10 分鐘之平均值，並定時將資料

回傳至伺服器。

滲漏計 (lysimeter)：本研究採用 Decagon Devices 公司型號為 Drain Gauge G2 之滲漏計，主要是量測地表下 1 m 處之滲漏水量，並收集滲漏液供分析。每 3 秒掃描 1 次，但資料記錄器 (Campbell Scientific 公司型號為 CR10X 與 CR200X Series) 再計算與記錄每 10 分鐘累積的滲漏數據資料，並定時將資料回傳至伺服器。樣本瓶中收集之滲漏水樣，在下雨過後或灌溉後仍需由試驗人員抽取水樣，送回實驗室進行分析，以瞭解滲漏水質。

植物影像記錄器 (video recorder of plant growth)：本研究採用 AXIS 公司型號為 223M 之網路攝影機，將攝影機裝設於所需觀測的試驗田區中，架設於所觀測作物上方 2 m 處，在每天上午九點與下午三點利用定時拍攝影像照片 1 張，直接回傳伺服器。

數位錄音記錄器 (digital audio recorder)：本研究採用 Wildlife 公司型號為 SM1-P 之數位野外錄音記錄器，具有高解析度的聲音感應器，能將聲音頻譜收錄轉換成數位資料，可應用音頻辨識軟體，辨別田間兩棲動物的種類，有助於物種分析與生態調查之研究。目前受限於設備本身並無具備無線網路之功能，故暫以人工方式進行資料擷取。

移動影像偵測系統 (portable image detection system)：移動影像偵測系統主要由 (1) 攝影機；(2) 影像辨識伺服器；(3) 資料儲存系統組合而成，主要應用於生態影像資料收集。本研究採用 Panasonic 公司型號為 WV-CW380 Series 之攝影機；ioimage 公司型號為 box-trk-100d 之影像分析處理器；Heitel 公司型號為 CamDisc SVR 4S 之數位影像/數據存儲系統。使用方式是將移動偵測攝影機系統，置放於試驗區中，利用其影像分析辨識之特點，來取得試驗園區中特定生物類型及活動情形影像資訊，並可將資料回傳至伺服器。

結果與討論

無線網路種類選擇

無線網路之使用需考慮設置區的環境狀況、網路頻寬、建置費用、系統維持費用等因素，在考慮前述因子與表 1 所列各種網路之特性，本研究綜合評析如下：(1) 使用 2.5G 及 3G 傳輸，除了需負擔額外的電信建置費用，並且後續維持費及使用費所費不貲。(2) 研究田區並非在人或電力所不及的地方，在研究站數百公尺範圍內，感測器設置點附近皆有基礎電力設施。(3) 需收集影像及聲音等較大量的數位資料，其網路傳輸需穩定且頻寬達到一定需求。(4) 嘉義分所因果樹茂盛、地型高低起伏，感測器設置點彼此相距最遠達 600 m，無線網路架設需考量網路傳輸距離、地形因素及網路穩定性等限制因素。(5) Wi-MAX 具有涵蓋範圍遠、高頻譜效率，高傳輸速率不易遭受地形限制影響的特性，但是設備單價相對較高。在審慎評估各類無線網路之建置成本與效益後，本研究選擇 Wi-Fi 作為主要的無線網路架構，主要原因為：(1) 不需額外的電信費用；(2) 傳輸穩定以及網路頻寬符合傳輸影像及聲音的需求；(3) 若傳輸距離過遠，可透過增加無線網路基地台或指向型天線延長傳輸距離；(4) 所使用設備可為市面上的無線網路產品，未來若有設備損壞，皆可快速更換，設備價格也較 Wi-MAX 便宜許多。

無線感測器網路系統建置

本研究選擇以 Wi-Fi 系統作為通訊系統，所配置的感測器項目與數量如表 2，各研究站建置之無線感測器網路系統說明如下：

農業試驗所嘉義分所溪口農場：採用 Wi-Fi 無線網路系統，溪口農場無線感測器網路的感測器及網路架設如圖 3，感測器系統包含氣象站、渦流通量偵測系統、土壤溫度計、土壤水分計、滲漏計以及植物影像記錄器，其中

表 2. 各研究站的感測器種類與數量

Table 2. Kind and quantity of sensors established at the experimental sites of Chi-Ko, Yun-Lin, and Chia-Yi research sites

Sensors	Chi-Ko		Yuin-Lin		Chia-Yi	
	SA ^z	CA	SA	CA	NE	CA
Weather station		1		1		1
Eddy flux detection system		1		0		0
Soil temperature	1	1	1	0	1	1
Soil moisture	2	1	1	0	1	2
Lysimeter	1	1	4	4	4	2
Video recorder of plant growth		2		1		0
Digital audio recorder	Total quantity 6, according to studies by randomly placed in each site					
Portable image detection system	Total quantity 2, according to studies by randomly placed in each site					

^z NE: Nature Agro-ecosystem; CA: Conventional Agro-ecosystem; SA: Sustainable Agro-ecosystem.

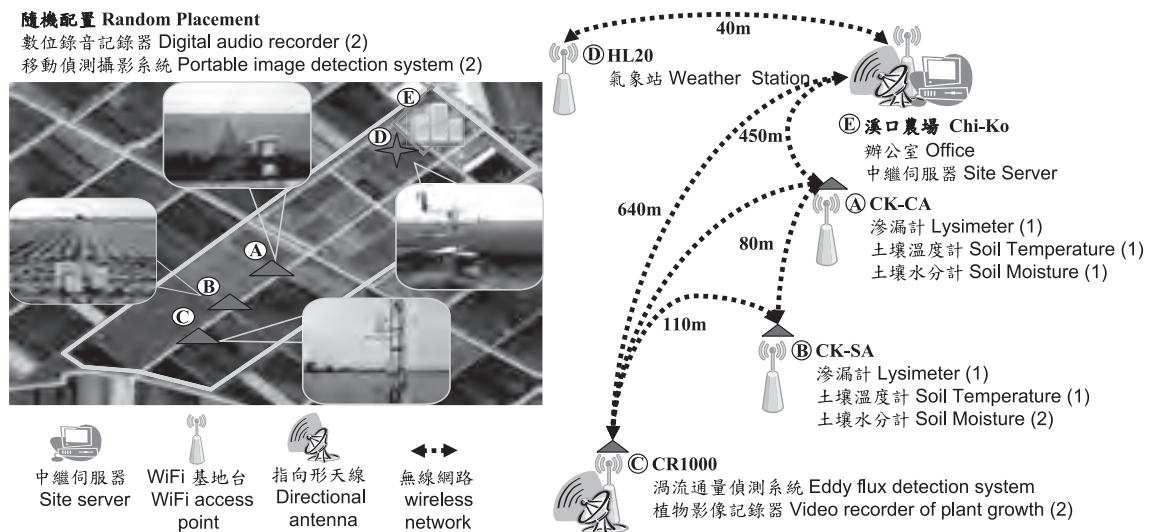


Fig. 3. A wireless sensor network established at Chi-Ko branch farm.

土壤水分計 1 支為固定深度 10 cm，另 2 支水分計可量測不同深度的土壤含水率變化，量測深度分別為 4 cm、18 cm、70 cm、100 cm 及 150 cm。無線感測器網路配置是以辦公室為中心點，設置有 Wi-Fi 基地台 (access point)、全向型天線及中繼伺服器，接收感測器設置點 (A)、(B)、(C) 及氣象站所回傳的資料，並同時傳送至農試所中央伺服器進行備份及顯示在

系統網頁；點 (A)、(B)、(C) 及氣象站各設置 Wi-Fi 基地台，透過無線分布式系統 (wireless distribution system, WDS) 技術與中繼 (repeater) 應用，使點 (A)、(B)、(C) 與辦公室無線網路構成一個完整的無線網路系統。為了避免傳輸距離過遠，在點 (C) 加裝指向型天線 (16 db) 及強波器 (booster)，指向辦公室所設置的全向型天線，確保網路結構完整性。

臺南改良場雲林分場：雲林分場採用 Wi-Fi 無線網路系統，雲林分場無線感測器網路的感測器及網路架設如圖 4，感測器包含土壤溫度計、土壤水分計、滲漏計以及植物影像記錄器。無線感測器網路配置以辦公室為中心點設置，包括 Wi-Fi 基地台、全向型天線 (15 db) 及中繼伺服器電腦，接收感測器設置點 (A)、(B)、(C)、(D) 所回傳的資料，並同時傳送至農試所中央伺服器進行備份及顯示在系統網頁；點 (A)、(B)、(C)、(D) 設置 Wi-Fi 基地台，同樣透過 WDS 技術將點 (A)、(B)、(C)、(D) 與辦公室無線網路連結，同時為了避免傳輸距離過遠而導致系統網路不穩定，在點 (D) 架設指向型天線 (16 db) 及強波器，指向辦公室基地台所設置的全向型天線，以結合成一完整的無線網路系統。雲林分場於 100 年度配合農委會政策，基於分場網路安全，將場內網路變更為利用已加密的通道協議 (tunneling protocol) 來達到保密、傳送端認證、訊息準確性等私人訊息安全效果的虛擬私有網路 (virtual

private network, VPN) 方式運作。未來與雲林分場同屬農委會的農試所也可能基於網路安全為由變更使用 VPN 方式運作，在有雲林分場現階段之處理經驗後，農試所也將採用同一方法維護系統的正常運作。

農業試驗所嘉義分所：嘉義分所採用 Wi-Fi 無線網路系統，嘉義分所無線感測器網路的感測器及網路架設位置如圖 5 所示，感測器包含氣象站、土壤溫度計、土壤水分計以及滲漏計，其中土壤水分計 2 支埋設深度 10 cm，另 1 支水分計可量測不同深度的土壤含水率變化，量測埋設深度分別為 4 cm、18 cm、70 cm、100 cm 及 150 cm。無線感測器網路配置主要以辦公室為中心點，其中點 (B) 與點 (C) 距離過遠，因此，於中途設置兩點中繼站架設指向型天線增強無線網路訊號，點 (A)、(B)、(C)、(D) 設置 Wi-Fi 基地台，建構區域無線網路熱點，點 (B) Wi-Fi 基地台並透過 WDS 技術使點 (C) Wi-Fi 基地台能透過點 (B) 作為中繼站以傳送資料至中繼伺服器，分所伺服器接收

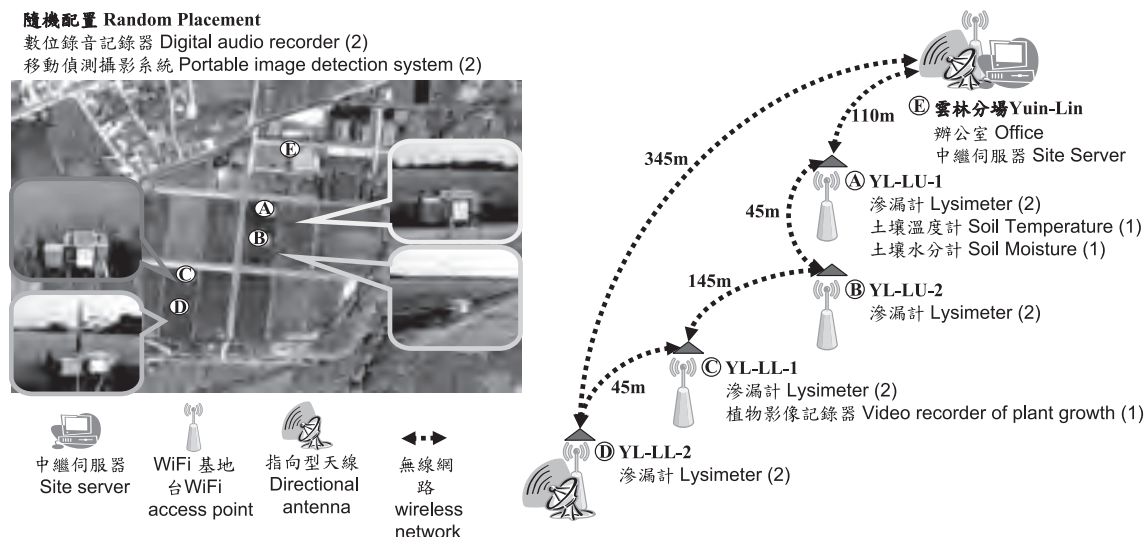


圖 4. 雲林分場試驗田無線感測器網路。

Fig. 4. A wireless sensor network established at Yuin-Lin branch farm.

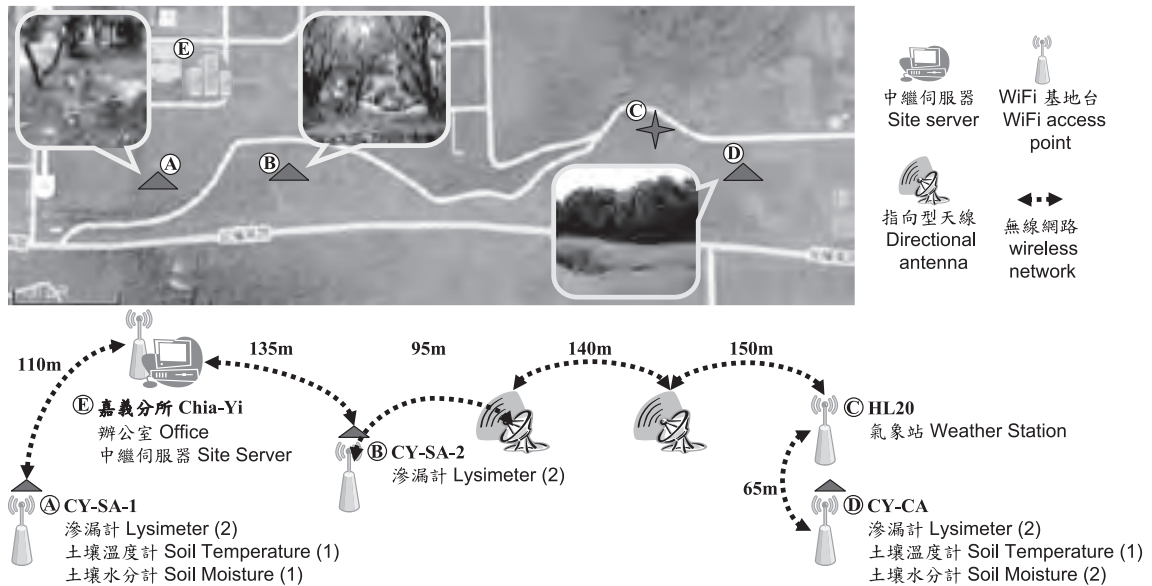


圖 5. 嘉義分所無線感測器網路。

Fig. 5. A wireless sensor network established at Chia-Yi branch farm.

感測器設置點 (A)、(B)、(C)、(D) 所回傳的的感測器資料，並同時傳送至農試所中央伺服器進行備份及顯示在系統網頁，完成涵蓋嘉義分所荔枝園之無線感測器網路系統。

三個研究站點之氣象站因原有軟、硬體設備上不同，故氣象資料在本系統上也以不同方式提供查詢。溪口農場氣象站透過資料轉換之方式，將氣象資料直接儲存於無線感測器網路系統資料庫中提供查詢。雲林分場氣象站已包含在中央氣象局之農業氣象觀測網中，嘉義分所氣象站已包含在農業氣象諮詢系統中，因此不另將雲林分場及嘉義分所之氣象資料重複儲存於無線感測器網路系統資料庫，而採用網頁連結至該系統中直接查詢的方式取代。

儀器與感測器介面轉換

本系統整合了數種不同的感測器或儀器，並運用無線網路進行資料傳輸，整合成完整的無線感測器網路建置。然而各種感測器系統之訊號數據格式及介面不同，因此需經過數據格

式轉換及介面轉換資料取得與匯入，為此系統建置時的最大困擾。

本系統建置前，各場原有之研究設備多是使用資料記錄器連結感測器如滲漏計、溫度計、水分計等，由人工以筆記型電腦，運用資料記錄器所隨附之應用軟體，透過串列埠傳輸介面 (recommended standard-232, RS-232) 連結資料記錄器，進行感測器資料取得。在無線網路系統完成建置後，資料記錄器則直接透過介面轉換器 MOXA NPort 5150型 (其功能為串列傳輸轉乙太網路介面)，將原本資料記錄器的串列資料轉換成乙太網路介面資料，匯入資料庫，解決了介面轉換的問題。

無線感測器網路系統網頁

目前，最常用的三種動態網頁語言有 ASP (Active Server Pages)，JSP (JavaServer Pages)，PHP (Hypertext Preprocessor)。三者都提供在 HTML (HyperText Markup Language) 標記式語言中混合某種程序程式碼，由語言引擎解釋執

行程序程式碼的能力。在 ASP、JSP、PHP 環境下，HTML 標記式語言主要負責描述信息的顯示樣式，而程序程式碼則用來描述處理邏輯。普通的 HTML 頁面只依賴於 Web 伺服器，而 ASP、JSP、PHP 頁面需要附加的語言引擎分析和執行程序程式碼。程序程式碼的執行結果被重新嵌入到 HTML 程式碼中，然後一起傳送給瀏覽器。ASP、JSP、PHP 三者都是針對 Web 伺服器的技術，客戶端瀏覽器不需要任何附加的軟體支持。

系統網頁最後選用非免費的 ASP.NET 程式語言撰寫，係因 ASP.NET 為完全的物件導向程式語言，以物件為基本架構，網頁與程式完全分離，使程式易於維護，並能夠存取 .Net Framework 下載數千種的物件，降低程式開發時程。因此在建構系統網頁時，容易依使用者需求而快速建置對應功能，且拿來和程式語言做結合，能有效的整合不同儀器所提供的應用程式介面 (application programming interface, API)，建置成多功能網頁資訊系統，或是透過 ADO.NET 和資料庫做連結，其效果優於 JSP 與 PHP。

試驗田間的感測器資料，主要透過各站中繼伺服器進行田間資料擷取與儲存，然後透過中華電信之 ADSL 網路，最短每 10 分鐘將資料傳送至農試所中央伺服器資料庫，研究人員可以經由網路，即時查詢感測器即時及歷史資料。

為了讓管理者或研究人員對於感測器資料能一目瞭然，系統網頁如圖 6 (A) 所示，提供研究站田區分布、感測儀器分布、各種圖表及歷史資料查詢的功能，以及可以 Word、Excel、Csv、Xml、Html 等多種資料檔案格式下載。氣象站即時資訊，如圖 6 (B) 所示，提供線上即時氣象資訊 (包含：風速、氣溫、相對溼度及光度) 以及近三日走勢圖。渦流通量觀測資料，如圖 6 (C) 所示，提供近三日渦流

通量走勢圖 (包含：瞬間氣溫變化、淨輻射、土壤溫度、土壤濕度、CO₂通量、潛熱通量、可感熱通量及熱流板通量)。土壤溫溼度資料報表及歷史查詢如圖 6 (D) 所示，可查詢目前所上傳的資料、總筆數及上傳時間，查詢區間變化如圖 6 (E) 所示，可查詢特定區間溫溼度的變化情況，藉以瞭解特定區間溫溼度的變化趨勢。滲漏計資料報表及歷史查詢如圖 6 (F) 所示，可查詢目前所上傳的資料、總筆數及上傳時間，查詢區間變化如圖 6 (G) 所示，可查詢特定區間滲漏計的變化情況，藉以瞭解特定區間滲漏計的變化趨勢。植物生長影像即時監控影像，如圖 6 (H) 所示，提供線上即時植物生長影像即時監控以及影像存檔。

系統建置現況與效益評估

系統運作情形：溪口農場與雲林分場無線感測器網路系統於 98 年度 8 月間完成，因其試驗田區周圍較為空曠且遮蔽物少，因此，有利於無線網路傳輸，唯有在多雨及落雷頻繁的季節容易影響無線網路傳輸的效率，或造成總開關跳電，而無法供給無線網路基地台電源，而使感測器資料無法回傳，可藉由人員前往田區現場打開總開關恢復供電。

嘉義分所無線感測器網路系統於 99 年度 5 月完成，嘉義分所為丘陵地，地勢起伏大，對於無線感測器網路傳輸影響較大的區域為荔枝原生種自然保存園區，因為園區樹木多且高大濃密，有時會使無線網路的傳輸不穩定，使感測器資料無法順利回傳至中繼伺服器。未來可藉由增加中繼站數量或使用 3G 系統作為替代之無線傳輸方式以進行改善，但以本研究現行系統而言，若要變更為 3G 系統，還需要再增加輔助設備以及 3G 系統每點每月之固定通信費用，兩種方案相較之下，應以增加中繼站數量為優。

在硬體部分，目前為止僅嘉義分所在落雷頻繁的季節造成網路設備故障的情形，由於是

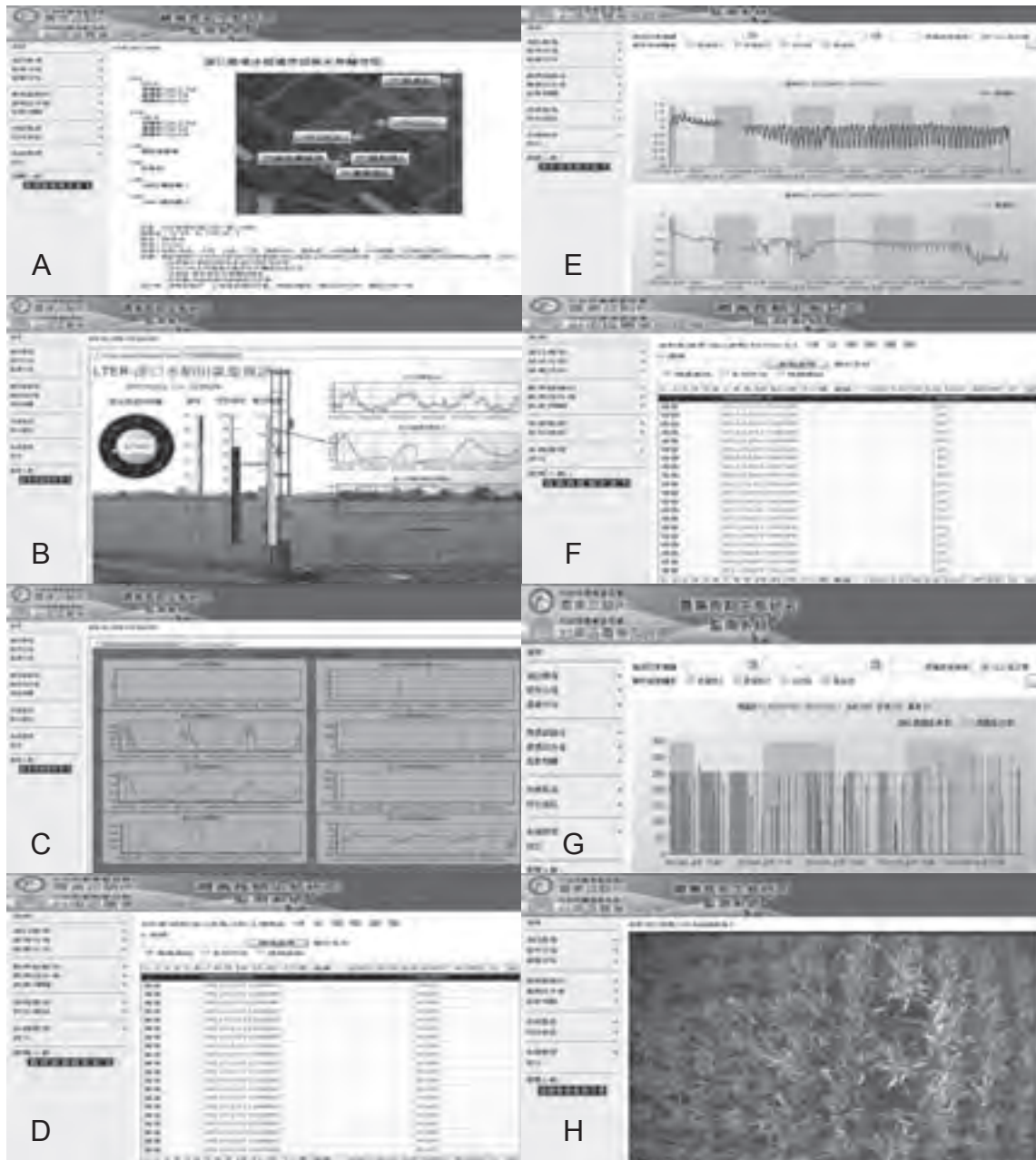


圖 6. 無線感測器網路系統網頁可查詢各感測器 (A-H) 之即時與歷史資料。(A) 感測器分布、狀態圖；(B) 氣象站即時資訊；(C) 即時渦流通量觀測資料；(D) 土壤溫度計、溼度計歷史資料；(E) 土壤溫度計、溼度計趨勢圖；(F) 滲漏計歷史資料；(G) 滲漏計趨勢圖；(H) 植物生長即時監控影像。

Fig. 6. A website showing the real time and history data of various sensors (A-H) installed in the wireless sensor network. (A) Sensors operation status chart; (B) Real-time weather information; (C) Real-time eddy flux data; (D) Soil temperature, moisture history data; (E) Soil temperature, moisture chart; (F) Lysimeter history data; (G) Lysimeter leaching chart; (H) Real-time video recorder of plant growth.

使用市面上常見的無線網路設備，因此，可以快速的從市面上取得相關設備的替品，並經過簡單的無線網路設定，快速的進行系統復原。

在軟體及韌體部分，因本研究需結合數種不同儀器與感測器，並利用其所提供之軟體 API 套件或韌體相關支援資訊文件，整合成統一數位化資料，分門別類儲存於中央資料庫中，再經由 ASP.NET 程式語言開發無線感測器網路監測系統網頁。但開發此系統軟體、韌體功能，主要是依靠研發人員進行整合不同的感測器並撰寫對應資料轉換程式，爾若後續有新儀器或感測器需加入，也還需靠研發人員的開發撰寫相對應程式並連結至感測器與資料庫，因此後續要維持系統正常運作及持續更新，系統開發相關文件及說明、研發人員的能力、經驗與傳承就非常重要。

系統效益評估：本研究無線感測網路建置對環境資料收集之完整性有明顯的提升，如以往半個月才至田間收集滲漏計資料，若期間感測器損壞，資料收集即中斷，而無法計算

期作或全年的滲漏量，藉由無線感測網路的建置可即時偵測與維護感測器的正常運作，而獲得完整資料，以計算週年累積滲漏量，可大幅提升監測資料的準確性。完整性差異以雲林分場 2008 年及 2010 年一期作期間 WSN 系統建置前後之試驗田區 LU-1-SA 及 LU-2-CA 作比較，如圖 7 所示，圖中顯示 2008 年資料中斷期間較多，而使用 WSN 之後的 2010 年則相對較為完整。此外，在感測器運作正常的情況下，大幅降低前往收集資料之費用。本研究亦為農業生態系長期生態研究提供一種新的研究環境，透過網際網路提供了資料的取得、儲存、管理、整合、挖掘與其他有關計算與資訊處理程序的服務。研究人員可以藉由資料的流通，在複雜的時間與空間尺度的生態研究上，提供跨研究站合作的機會。

EML 文件建置

生態後設資訊語言 (ecological metadata language, EML) 為國際生態研究共同使用的格式檔，以方便資料交流，本研究採用 Morpho

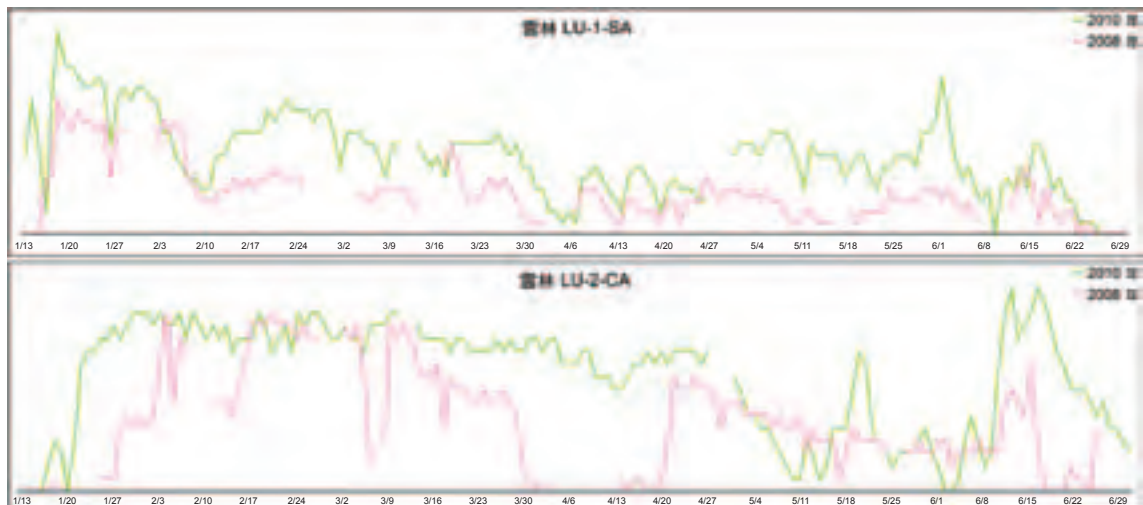


圖 7. 無線感測器網路系統建置前後 (2008 與 2010 年) 滲漏資料完整性比較。

Fig. 7. Comparison of integrity of leaching data collected before (in 2008) and after (in 2010) establishing the wireless sensor system at Yuin-Lin branch farm.

軟體作為後設資料建置與 EML 文件之管理工具，並以 Metadata Catalog (Metacat) 做為 EML 文件的資料庫以及網頁形式的查詢介面。本研究所建置的無線感測器網路系統網頁，可將感測器原始數據輸出成 .xls 及 .csv 格式，此格式可直接匯入 Morpho，協助研究人員能更為便利地將其原始數據進行建檔，進而將研究資料分享於網路中，以提供各國研究人員研究之參考資料。未來亦將撰寫程式直接將資料傳入 Morpho 資料庫中。

未來展望

若純粹針對以文字形式記錄之生態環境資訊取得，或非使用聲音或影像等耗費頻寬之儀器時，亦可運用 Crossbow Technology[®] 所生產的集成電路多功能無線感測器及閘道器所使用的方式與架構 (Doolin & Sitar 2005; Morais *et al.* 2008; Nadimi *et al.* 2008)，透過網眼結構，使感測器可以透過彼此作為中繼，將資料逐步的傳送至田野間網路閘道器，回傳至中繼站與中央資料庫。如此一來系統便可以快速的進行田野間感測器部署，降低系統建置費用及系統安裝時程等，未來若要進行感測器遷移或增加監測點，應可考慮採用。

目前因聲音偵測系統設備本身未具備無線網路之功能外，且還未固定觀測位置與時段，故仍以人工方式收集，尚未透過無線網路直接回傳中央伺服器進行建檔，未來若有需要將添購無線網路設備，亦會將錄音紀錄器所收集的動物聲音資料直接回傳至資料庫並顯示於網頁中，使 WSN 系統網頁所提供的資料更加完善，亦可分享更多的資料給研究人員參考。

未來也可以結合 GPS 將所有感測器相關布署座標位置、海拔高度、地形，土壤及氣候等相關資料，結合地理資訊系統 (geographic information system, GIS)，直接呈現在網路上，提供研究者更詳細之研究參考資訊。

結 論

本研究於農業生態系長期生態研究站 (溪口農場、雲林分場及嘉義分所) 建置無線感測器網路，結合感測器、通訊、網路、網頁與資料庫，建置成全自動化生態資料收集平台。研究人員可隨時隨地經由網路進行各項的感測器資料取得、分析與處理，並可即時針對異常感測器或數值作進一步分析、比較與維護，不僅降低人力需求，也降低以往人力資料收集與整理過程中所造成誤植、或儀器損壞所造成的資料錯誤與資料斷層，更提升了資料收集的即時性，讓感測器資料可以即時性回傳並顯示在系統網頁中，讓所有感測器資料或影像即時呈現，以建構亞熱帶農業生態系長期研究站最佳研究環境，提升我國科技研究水準，並提供國際合作之試驗平台。

致 謝

感謝農委會 e-化領域經費補助 [計畫編號：98 農科-8.5.2-農-C1 (1)、99 農科-6.1.4-農-C1 (2)，100 農科-6.1.2-農-C1 (2)] 使研究站之無線感測器網路得以建置，並感謝農試所網管人員盧文琪先生在系統架構與網路通訊上的建議與協助，臺南區農業改良場雲林分場孫文章分場長在網路配置上的配合與協助，計畫助理許堅致與林世強先生在工作上的協助。

引用文獻 (Literature cited)

- Ankur, S., S. S. Iyengar, and E. Cho. 2006. Ecoinformatics using wireless sensor networks: an overview. *Ecol. Inform.* 1:287-293.
- Burgess, S. S. O., M. L. Kranz, N. E. Turner, R. Cardell-Oliver, and T. E. Dawson. 2010. Harnessing wireless sensor technologies to advance forest ecology and agricultural research. *Agric. For. Meteorol.* 150:30-37.
- Cao, X., J. Chen, Z. Yan, and Y. Sun. 2008. Development of an integrated wireless sensor network micro-environmental monitoring system. *ISA*

- Trans. 47:247–255.
- Chen, C. L., B. H. Chen, S. N. Huang, H. B. Kin, W. C. Sun, H. Y. Guo, C. C. Chen, R. H. Lin, C. C. Young, and Z. S. Chen. 2009. Establishment and perspectives of a long term ecological research in agricultural ecosystem in subtropics. *Crop Environ. Bioinform.* 6:233–246. (in Chinese with English abstract)
- Doolin, D. M. and N. Sitar. 2005. Wireless sensors for wildfire monitoring. p.477–484. *in the Proceedings of Smart Structures and Materials 2005: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems.* SPIE. San Diego.
- Fang, W. 2006. International development of field server and wireless sensor network. *Crop Environ. Bioinform.* 3:78–95. (in Chinese with English abstract)
- Ho, J. H. 2008. Remote sensing technique and agriculture application. *Res. Bull. Taichung Dist. Agric. Res. Exten. Stat.* 98:69–80. (in Chinese with English abstract)
- Lin, C. C., M. R. Jeng, and S. S. Lu. 2008. A review of the development and applications of ecoinformatics in Taiwan. *Taiwan J. For. Sci.* 23:S1–S10. (in Chinese with English abstract)
- Lu, S. S. and C. C. Lin. 2005. Ecological information search criteria and use- introduction EML (Ecological Metadata Language). *For. Res. Newsl.* 12:5–8. (in Chinese with English abstract)
- Mainwaring, A., D. Culler, J. Polastre, R. Szewczyk, and J. Anderson. 2002. Wireless sensor networks for habitat monitoring. p.88–97. *in the Proceeding of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications.* American for Computing Machinery. New York.
- Morais, R., S. G. Matos, M. A. Fernandes, A. L. G. Valnte, S. F. S. P. Soares, P. J. S. G. Ferreira, and M. J. C. S. Reis. 2008. Sun, wind and water flow as energy supply for small stationary data acquisition platforms. *Comput. Electron. Agric.* 64:120–132.
- Nadimi, E. S., H. T. Sogaard, and T. Bak. 2008. ZigBee-based wireless sensor networks for classifying the behaviour of a herd of animals using classification trees. *Biosyst. Eng.* 100:167–176.
- Young, F. F. and F. R. Young. 2007. *Computer Networking.* Xbook Marketing Co. Taipei. 656 pp. (in Chinese)

Cyberinfrastructure for Long-Term Ecological Research on Agricultural Ecosystem¹

Yueh-Kuei Chan², Chi-Ling Chen^{2,10}, Hong-Shu Wu³, Chin-Ching Lin⁴, Ping-Chun Lucy Hou⁵, Ming-Hwi Yao⁶, Jen-Kuan Shii⁷, Chien-Wen Chen⁸, and Chau-Chin Lin⁹

Abstract

Chan, Y. K., C. L. Chen, H. S. Wu, C. C. Lin, P. C. L. Hou, M. H. Yao, J. K. Shii, C. W. Chen, and C. C. Lin. 2012. Cyberinfrastructure for long-term ecological research on agricultural ecosystem. *J. Taiwan Agric. Res.* 61:269–284.

Extensive collection and comprehensive analysis of environmental and ecological data are important in understanding ecological phenomena in agricultural ecosystems. The objective of this study was to explore the potential of establishing wireless sensor network (WSN) for collection of environmental and ecological data at three field research sites in Taiwan based on the new methodology of eco-informatics. The WSN system was installed at the lychee orchard and Chi-Ko Branch Farm in the Chiayi Agricultural Experiment Station (CAES) of the Taiwan Agricultural Research Institute (TARI) and the Yunlin Branch Station of the Tainan District Agricultural Research and Extension Station. The sensors such as thermal, visual, infrared, and acoustic with high sensitivity for collection of environmental data were installed in each site to monitor a wide range of ambient conditions and ecological complexities, including meteorological phenomena, eddy fluxes, nitrogen leaching, crop growth, and ecological soundscape. Data collected from the three experimental sites were sent to the database server at TARI for analysis by researchers. Results showed that the establishment of WSN improved accuracy and quality of environmental data collected from the three sites as the normal operation of

-
1. Contribution No. 2694 from Taiwan Agricultural Research Institute (TARI), Council of Agriculture. Accepted: July 30, 2012.
 2. Respectively, Assistant and Researcher, Agricultural Chemistry Division, TARI, Taichung, Taiwan, ROC.
 3. Assistant Researcher, Department of Agronomy, Chiayi Agricultural Experiment Branch, TARI, Chiayi, Taiwan, ROC.
 4. Researcher, Crop Environment Division, Tainan District Agricultural Research and Extension Station, Tainan, Taiwan, ROC.
 5. Professor, Department of Life Sciences, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, ROC.
 6. Associate Researcher, Agricultural Engineering Division, TARI, Taichung, Taiwan, ROC.
 7. Assistant Researcher, Technical Service Division, TARI, Taichung, Taiwan, ROC.
 8. Assistant Researcher, Forest Protection Division, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Taipei, Taiwan, ROC.
 9. Researcher, Botanical Garden Division, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Taipei, Taiwan, ROC.
 10. Corresponding author, e-mail: chiling@tari.gov.tw; Fax: (04)23302805.

sensors could be maintained by instant detection of problems derived from sensors. The format of data collected in this study was based on the Ecological Metadata Language (EML), which is in common use among researchers in the field of ecological studies and, therefore, the data stored in the database server are readily access by internet.

Key words: Agricultural ecosystem, Long-term ecological research (LTER), Wireless sensing network (WSN), Ecoinformatics, Ecological metadata language (EML).