

薤菜葉綠素含量多光譜影像遙測系統之研發¹

李汪盛²

摘 要

葉綠素含量是植物營養、光合作用能力和生長狀況之重要指標。即時、可靠的作物營養診斷是進行合理化施肥管理的基礎，也是實施精準農業的關鍵技術之一。本研究主要目的在開發薤菜葉綠素含量多光譜影像遙測系統。利用 CCD 攝影機及濾鏡更換模組，以非接觸及非破壞方式擷取薤菜之多光譜影像，並透過無線網路將作物影像傳回遠端伺服主機，藉由前向式逐步迴歸分析，建立薤菜葉綠素含量多光譜影像檢量線，即時量測薤菜葉綠素含量，供肥培管理參考依據。試驗結果顯示，薤菜葉綠素含量多光譜影像遙測系統開發是可行的。

關鍵詞：多光譜影像遙測系統、葉綠素、薤菜

前 言

葉綠素含量是植物光合作用能力及生長狀況之重要指標。對植物葉綠素含量進行檢測，可監測植物生長發育狀況，做為栽培及施肥管理參考，確保作物生長良好，提高作物產量及品質，對精準農業發展具有重要的意義。傳統的葉綠素含量檢測為化學分析法，亦即將葉片採集後，經化學溶劑提取，利用分光光度計測定提取液在兩個特定波長處的吸光度，根據公式計算出葉綠素的含量。該方法量測精度高，但操作繁瑣、費時費力，且取樣時對植株會造成損傷，無法滿足現場快速非破壞檢測需求。

葉綠素計法是利用葉綠素計量測葉色值，得出植株葉片葉綠素含量的一種方法。黃（2002a）及楊（2003）研究均指出葉片葉綠素含量與葉綠素計讀值具有顯著相關，可利用葉綠素計讀值量測法替代化學分析的葉綠素值。羅等人（2000）亦指出葉色濃

¹ 行政院農業委員會桃園區農業改良場研究報告第 451 號。

² 桃園區農業改良場副研究員(通訊作者，wslee@tydais.gov.tw)。

綠之葉片其葉綠素及氮素含量均較高。葉綠素計法具有即時、快速及不破壞葉片等優點。現有可攜式葉綠素計中最具代表性者為日本 Minota 公司的 SPAD-502。SPAD-502 使用波長 650 nm 及 940 nm 發光二極體 (Light Emitting Diode, LED)，葉綠素對 650 nm 紅光具有較高的吸光度，而對 940 nm 紅外光吸光度極低。SPAD-502 工作原理是以 940 nm 紅外光為參照，測定葉片在 650 nm 處的吸光度。但 SPAD-502 僅對一個波段進行量測，得到的吸光度資訊有限，僅能表示葉綠素的相對含量，適用於兩兩比對，不適用葉綠素含量之定量測定。雖然目前葉綠素計得到的數值是相對含量，但其即時、快速及非破壞性的優點仍然引起研究者的關注。近年來，我國 (李, 2012) 及大陸地區 (何等人, 2008; 李等人, 2009; 張, 2009) 對葉綠素計開發進行研究，並推廣應用；惟上述研究均著重於可攜式或晶片型葉綠素計開發，對於葉綠素計應用於溫室蔬菜栽培、施肥管理並結合遠端監控應用研究則相對較少。爰此，本研究擬利用多光譜影像技術並結合實測葉綠素計讀值資料，建立多光譜影像葉綠素檢量線，開發應用於溫室內蔬菜葉綠素含量非破壞檢測系統，達到遠端監控作物生長目的，供為肥培管理之參考。

材料與方法

一、材料

試驗材料為蕹菜 (*Ipomoea aquatic* Forsk.)，別名空心菜、蕹菜。試驗地點桃園市新屋區 (桃園區農業改良場) 簡易溫室。

二、分析方法

- (一) 每日上午 10 時以葉綠素計量測蕹菜播種萌芽後至採收期間葉綠素讀值。
- (二) 將溫室分為 13 小區，利用多光譜影像遙測系統於每日上午 9 時及下午 4 時各擷取每小區蕹菜影像乙次，擷取之資料透過無線網路儲存於電腦資料庫中。
- (三) 結合蕹菜葉綠素計讀值及多光譜影像資料，利用前向式逐步迴歸法 (Forward stepwise regression) 建立蕹菜多光譜影像葉綠素計讀值檢量線。

三、試驗設備

本研究使用之設備包括主控電腦系統、多光譜影像遙測系統、簡易溫室及葉綠素

計，其零組件及功能分述如下：

- (一) 主控電腦系統：包括網路伺服器及資料庫電腦兩部份，採用威達電腦公司 Rack-360 工業電腦兩部，資料庫為微軟公司 SQL 資料庫。
- (二) 多光譜影像遙測系統：本系統包括電荷耦合元件 (Charge-coupled device, CCD)、鏡頭、步進馬達及可程式邏輯控制器等零組件 (圖 1)。
 1. 電荷耦合元件：採用日本 WATEC 公司 WAT-902DM2S 型 CCD。
 2. 鏡頭：日本 Computar 公司自動光圈鏡頭。
 3. 濾鏡更換模組：包括濾鏡、轉盤、步進馬達及可程式邏輯控制器等零組件 (圖 2)。
 - (1) 濾鏡：採用美國 Andover 公司 450FS40-25、550FS10-25、680FS10-25、780FS20-25、850FS00-25 及 950FS40-25 型帶通 (band pass) 濾鏡。
 - (2) 轉盤：固定六片不同波段帶通濾鏡用，PE 材質，自行加工製造，如圖 3 所示。
 - (3) 步進馬達：轉動轉盤可更換不同濾鏡，步進馬達採用大內實業有限公司 EXMK296-02 型步進馬達，步進角為 1.8° 。
 - (4) 可程式邏輯控制器 (Programmable logic controller, PLC)：台達電子工業股份有限公司 DVP-14SS，接受影像處理及控制電腦命令，控制步進馬達轉動轉盤可更換不同濾鏡。
 4. 影像處理及控制電腦：威達電腦公司 Rack-360 工業電腦。
 5. 空間及色彩校正框：用於固定多光譜影像遙測系統零組件及校正白板，以不鏽鋼材料自行製作，空間及色彩校正框中心點固定於 CCD 鏡頭中心線位置之正下方處，CCD 攝影機鏡頭與空間及色彩校正框校正白板中心點距離為 1.6 m，且空間及色彩校正框位置可上下調整各 20 cm，以適用於不同種類蔬菜之影像擷取。
 6. 漏電保護器：漏電保護用，防止人員觸電。
- (三) 簡易溫室 1 棟：本試驗於桃園市新屋區 (桃園區農業改良場) 簡易溫室進行，溫室內靠近屋頂處設置一個 U 型軌道，軌道上設置懸掛式軌道驅動馬達 (圖 4)，下方設置一懸吊支架，支架上裝設空間及色彩校正框升降驅動馬達，藉由驅動輪轉動鋼索進而控制校正框與地面距離，懸掛式軌道驅動馬達以 PLC (台達電子工業股份有限公司 DVP-16SP) 進行驅動控制，繞行速度為 2 m/min。

(四) 葉綠素計：日本 Minota 公司 SPAD-502 型葉綠素計，用於量取薤菜葉綠素計讀值（Chlorophyll meter readings, CMR）。

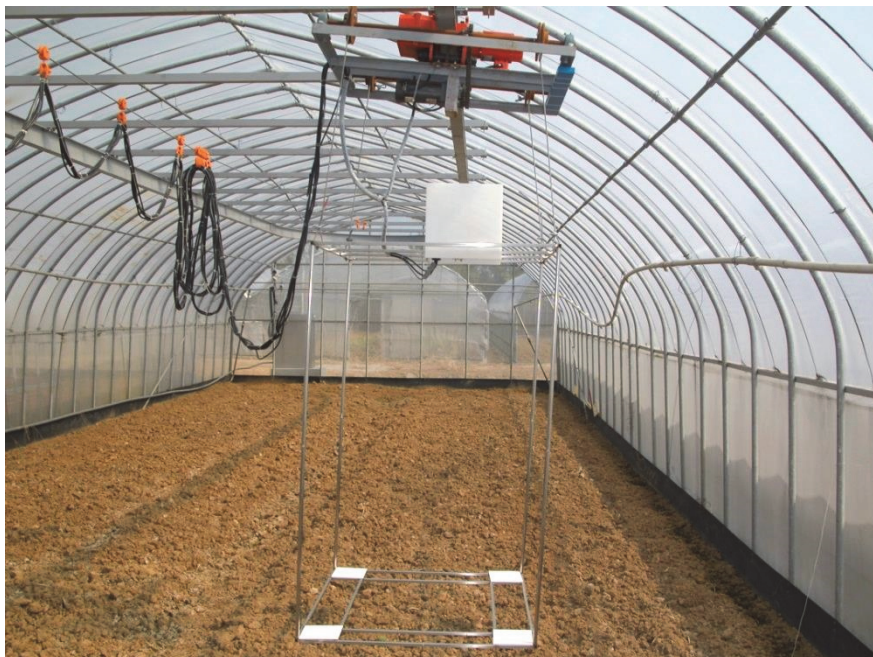


圖 1. 多光譜影像遙測系統全貌

Fig 1. View of multi-spectral remote imaging system.



圖 2. 電荷耦合元件、鏡頭、步進馬達及可程式邏輯控制器

Fig 2. View of charge-coupled device, lens, step motor, and PLC.



圖 3. 轉盤及濾鏡

Fig 3. View of rotary disk and band-pass filters.

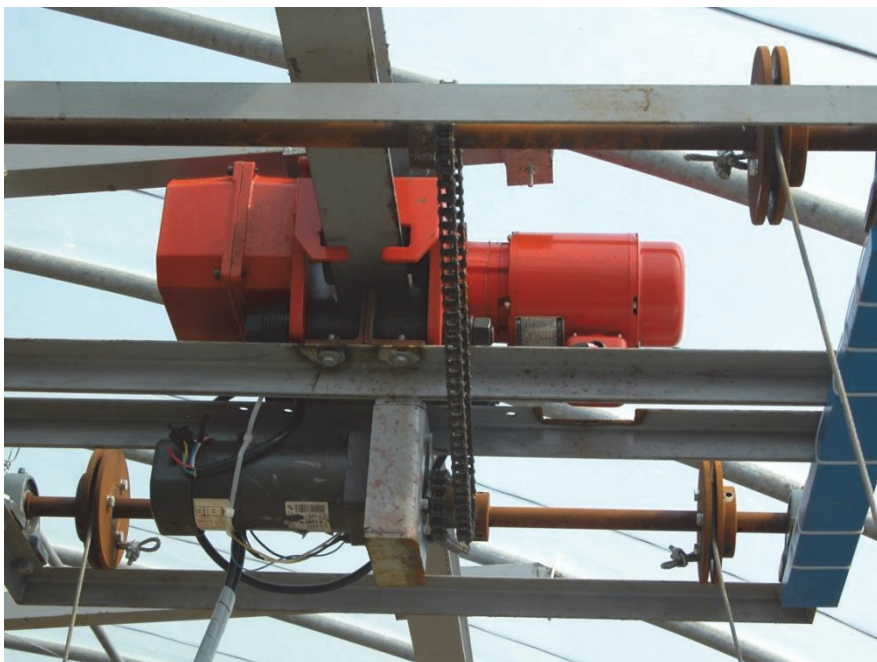


圖 4. 懸掛式軌道驅動馬達與空間及色彩校正框驅動馬達

Fig 4. View of hanged track, space and color calibrating frame driven motor.

四、理論分析

(一) 影像分割

影像擷取後，可藉由影像分割從影像中得到所需之資訊。二值化影像分割是最直接的方式，將一張物體影像簡化成物體與背景兩種灰階值，而將物體從背景中凸顯出來，以利後續的影像分割及辨識處理。

影像模型以二維的光強度函數 $f(x, y)$ 來表示，例如臨界值法是在 $[0, 255]$ 的灰階範圍內，選取 K 為門檻值 (threshold)，當 $f(x, y) > K$ 時，令該像素點標記為 1，對應於物體；當 $f(x, y) \leq K$ 時，則令該像素點為 0，對應於背景。一個臨界值化的二值化影像 $g(x, y)$ 如式 (1)。門檻值 K 的選取方式眾多，考量電腦運算時間，本研究臨界值的選取採用 Tsai (1985) 動差保留法，尋找物體邊界與背景之間的最佳臨界值，作為影像分割的門檻值。

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, f(x, y) > K \\ 0, f(x, y) \leq K \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

(二) 多光譜影像遙測系統理論分析

Beer-Lambert 定律主要在探討一均質的物質受到特定波長光束照射時，光束被吸收的量與該物質內吸光成分含量的關係。Beer-Lambert 定律主要可以式 (2) 表示：

$$\log\left(\frac{1}{R}\right) \propto c \dots\dots\dots (2)$$

c ：吸光物質的成分濃度

R ：反射值

本研究利用 6 片帶通濾鏡並結合濾鏡更換系統自動更換濾鏡，即時由田間分別擷取不同波段之蔬菜及鐵弗龍白板影像，並計算出影像平均亮度值；再將平均亮度值轉換成樣品在波長 λ 時之樣品反射值 (R_λ)，特定濾鏡波長 (λ) 樣品吸收光譜值 A_λ 可以式 (3) 表示：

$$A_\lambda = \log\left(\frac{1}{R_\lambda}\right) \dots\dots\dots (3)$$

(三) 多重線性迴歸 (MLR)

由 Beer-Lambert 定律可應用多重線性迴歸以建立光譜及化學成分的關係，而多重線性迴歸模式可以式 (4) 表示：

$$CMR = K_0 + \sum_1^m K_m A_\lambda \dots\dots\dots (4)$$

其中：

K_0 ：常數項

K_m ：第 m 個波長之迴歸係數

A_λ ：第 m 個波長之吸收光譜值

利用前向式逐步迴歸法建立檢量線之相關理論 (Marten and Naes, 1989; Haaland and Thomas, 1988)。

五、性能評估的相關統計定義

有關性能評估的相關統計符號說明如下： Y 為校正組之葉綠素計讀值量測值， \hat{Y} 為校正線葉綠素計讀值預測值， \bar{Y}_c 為校正組之所有樣品之葉綠素計讀值平均值， \bar{Y}_p 為校正線所有樣品之葉綠素計讀值預測值之平均值， n 為校正樣品數目。

(一) 相關係數 (r)：

$$r = \left[\frac{\sum (\hat{Y} - \bar{Y}_p)^2}{\sum (Y - \bar{Y}_c)^2} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (5)$$

(二) 判定係數為 r^2

(三) 均方根誤差 (Root mean square error of calibration, RMSEC)：

$$RMSEC = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{n - 1} \right)^{0.5} \dots\dots\dots (6)$$

結果與討論

蔬菜葉綠素含量多光譜影像遙測系統，主要架構包括多光譜影像遙測系統及主控電腦網路伺服器與系統資料庫兩部分，本系統利用無線網路，以定時、定點方式擷取栽培作物之多光譜影像，結合人工量測之葉綠素計讀值資料進行迴歸分析，建立蔬菜葉綠素含量多光譜影像檢量線，即時量測溫室蔬菜葉綠素含量，提供施肥參考。

一、多光譜影像遙測系統帶通濾鏡選擇

綠色植物葉綠體中接受光能的主要分子為葉綠素 (chlorophyll) (包括葉綠素 a (chlorophyll a) 及葉綠素 b (chlorophyll b))、類胡蘿蔔素 (carotenoid)、胡蘿蔔素 (carotene) 及葉黃素 (xanthophyll); 細菌及藻類中還有藻膽色素 (phycobiliproteins)、藻紅素 (phycoerythrin) 及藻藍素 (phycocyanin) 等。葉綠素 a 及 b 最高吸收率的位置不同，葉綠素 b 在 460 nm，葉綠素 a 在 680 nm 的位置，光合色素吸收光譜如圖 5 所示 (光合色素, 2014)。

Minolta Co., Ltd. (1989) 開發葉綠素計使用發光二極體波長為 650 nm 與 940 nm。李 (2001) 研究多光譜影像之鳳京白菜植被 CMR 值使用帶通濾鏡波長為 450 及 677 nm。黃 (2002a) 研究建立水稻田間多光譜遙測方式偵測水稻植被之葉綠素讀值，使用帶通濾鏡波長為 555、647、660、680 及 945 nm。黃 (2002b) 針對稻株含氮量多光譜影像遙測系統進行研究，使用帶通濾鏡波長為 555、680、780。陳等人 (2003) 稻株含氮量地面多光譜影像遙測系統之開發研究使用帶通濾鏡波長為 555、660、680 及 700 nm。張和楊 (2003) 由植被高解析反射光譜模式化稻株之氮素含量研究，一期作使用帶通濾鏡波長為 403、505 及 710 nm，二期作使用 403、558 及 1607 nm 帶通濾鏡。申等人 (2003) 機載簡易多光譜影像拍攝系統應用於施肥研究，使用帶通濾鏡波長為 550、660 及 800 nm。法國 Astrium Services' GEO-Information division SPOT 1 衛星使用波段為 500-590、610-680 及 790-890 nm。美國 Landsat.org Landsat TM 衛星使用波段為 500-590、450-520、520-600、630-690、760-900、1550-1750、2080-2350 及 10400-12500 nm。

根據光合色素吸收光譜及綜合前人研究結果並考量 CCD 之感度，本研究選擇使用 450、550、680、780、850 及 950 nm 帶通濾鏡，以建立蔬菜葉綠素含量多光譜影像遙測系統。

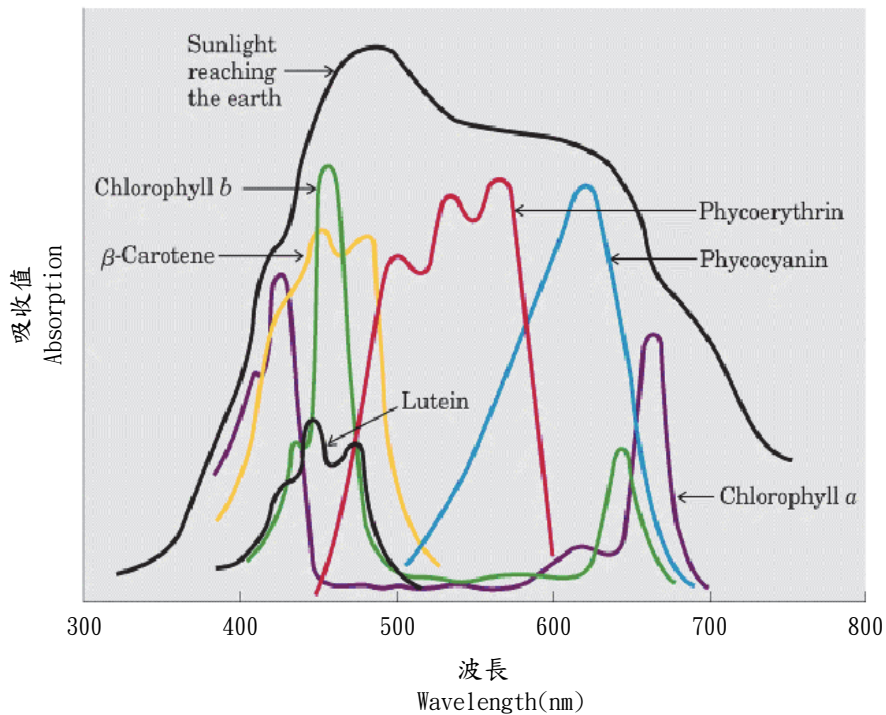


圖 5. 光合色素吸收光譜

Fig 5. Absorption spectra of photosynthetic pigments.

二、多光譜影像遙測系統田間試驗

田間影像分析在桃園市新屋區（桃園區農業改良場）簡易溫室進行，溫室沿著 U 型軌道正下方設置 13 個小區，整地後播種蕹菜，發芽後進行葉綠素計讀值量測並進行多光譜影像擷取。多光譜影像遙測系統可接受主控電腦命令自動或手動方式定時及定點進行影像擷取及資料傳送。多光譜影像遙測系統遙測控制介面如圖 6 所示，其中 logRF 及 logRB 符號表示前景（蕹菜）及背景（土壤）吸收光譜值，RF、RB 及 WB_Rf 符號表示前景、背景及參考白板灰階影像平均亮度值。

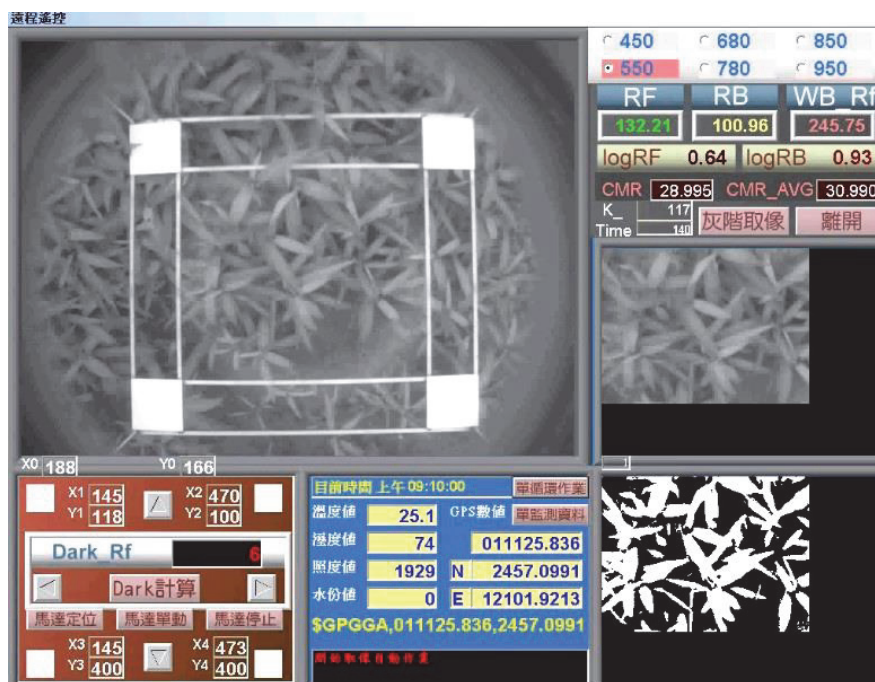


圖 6. 多光譜影像遙測系統控制介面

Fig 6. Control interface of multi-spectral remote imaging system.

蔬菜栽培過程不同波段濾鏡組合多光譜影像 CMR 檢量線分析結果如表 1 所示。採用前向式逐步迴歸方法分析，分析軟體為 UNISTAT 6.0 (UNISTAT Ltd., UK)，第一個至第六個選擇波長分別為近紅外光 780 nm、綠光 550 nm、紅光 680 nm、藍光 450 nm、近紅外光 850 nm 及近紅外光 950 nm， r^2 分別為 0.66、0.69、0.73、0.77、0.78 及 0.78，RMSEC 則分別為 1.75、1.66、1.57、1.46、1.44 及 1.43。加入第二至第六個選擇波長 r^2 增加值分別為 0.035、0.036、0.038、0.008 及 0.006，RMSEC 減少值分別為 0.09、0.09、0.11、0.02 及 0.01。其中 850 nm 及 950 nm 二個波段提供的資訊極小，考量成本時，僅選擇增加 850 nm 濾鏡波段即可。採用 450、550、680、780 及 850 nm 之蔬菜葉綠素含量多光譜影像遙測系統與 2012 年 9 月 9 日發射 SPOT 6 衛星使用波段 455-525、530-590、625-695、760-890 及 455-745 nm 近似，使用六個波段濾鏡多光譜影像遙測系統量測蔬菜葉綠素讀值與葉綠素計量測值之關係如圖 7 所示。不同波段之葉綠素讀值預測校平方程式迴歸係數列於表 2。使用六個波段之蔬菜多光譜影像葉綠素量測系統 MLR 模式預測校平方程式，如式 (7) 所示。

$$CMR = 41.9 - 14.77A_{450} - 23.31A_{550} + 19.08A_{680} + 28.25A_{780} + 14.61A_{850} - 5.66A_{950} \dots\dots(7)$$

表 1 不同波段前向式逐步迴歸法分析結果

Table 1. Performance of different wavelength band using forward stepwise regression.

Wavelength band (nm)	r	r ²	RMSEC
780	0.812	0.66	1.75
550、780	0.833	0.69	1.66
550、680、780	0.854	0.73	1.57
450、550、680、780	0.876	0.77	1.46
450、550、680、780、850	0.881	0.78	1.44
450、550、680、780、850、950	0.884	0.78	1.43

表 2 不同波段之葉綠素讀值校正方程式迴歸係數

Table 1. Regression coefficients of different wavelength bands of CMR calibration equations.

No. of Bands	constant	Regression coefficients					
		A ₄₅₀	A ₅₅₀	A ₆₈₀	A ₇₈₀	A ₈₅₀	A ₉₅₀
1	32.28				19.58		
2	41.37		-15.96		26		
3	38.36		-26.14	11.31	32.76		
4	41.72	-16.72	-18.32	18.16	33.29		
5	39.93	-15.35	-21.98	19.02	23.33	14.65	
6	41.9	-14.77	-23.31	19.08	28.25	14.61	-5.66

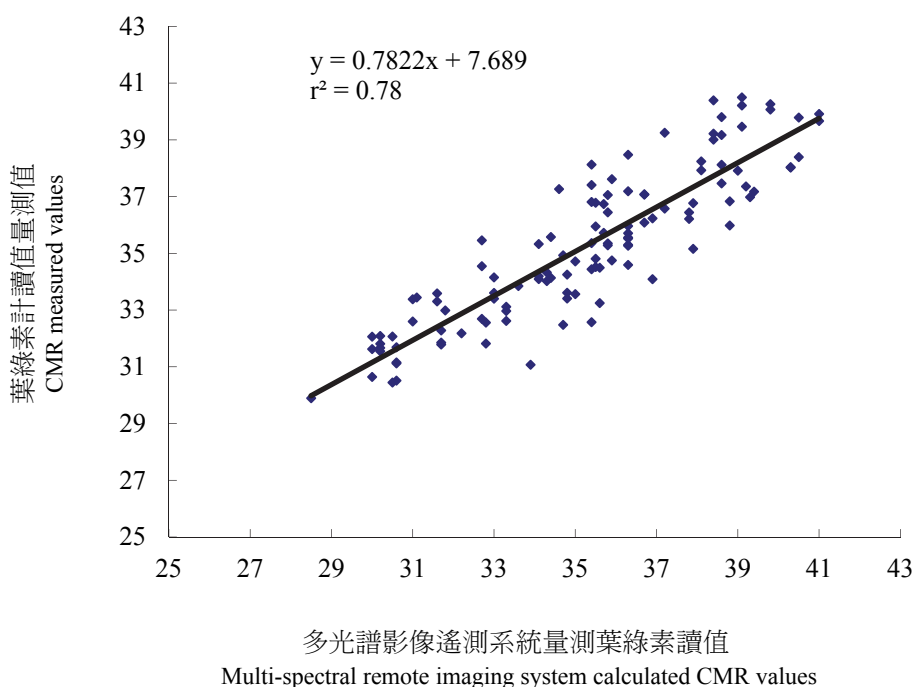


圖 7. 多光譜影像遙測系統量測蔬菜葉綠素讀值與葉綠素計量測值之關係圖

Fig 7. Relationship between multi-spectral remote imaging system calculated CMR values and by CMR meter measured values for *Ipomoea aquatica*.

三、主控電腦系統

建構主控電腦之網路伺服器與系統資料庫，首先將預計呈現的網頁建構成實體畫面，並將程式鑲入網頁畫面中，形成動態網頁，並將田間伺服器控制電腦所接收的數據資料經過整理後連結至 SQL 資料庫中（儲存於資料庫電腦），便於歷史資料的查詢及統計分析運用。最後利用 SQL 指令，透過 ADO 物件，連接網頁及資料庫，構成一個完整的動態網頁資料庫系統。操作者可透過任何能支援瀏覽 HTML 之工具，利用網路連結伺服器電腦端所建立之動態網頁，經由資料庫內提取最新數據至伺服器動態網頁。另外，透過主控電腦開放之遠端登入遙控程式的設定，可使用手動或自動方式操作遠端溫室之蔬菜葉綠素含量多光譜影像遙測系統。主控電腦之網路伺服器與系統資料庫整合控制介面如圖所示。

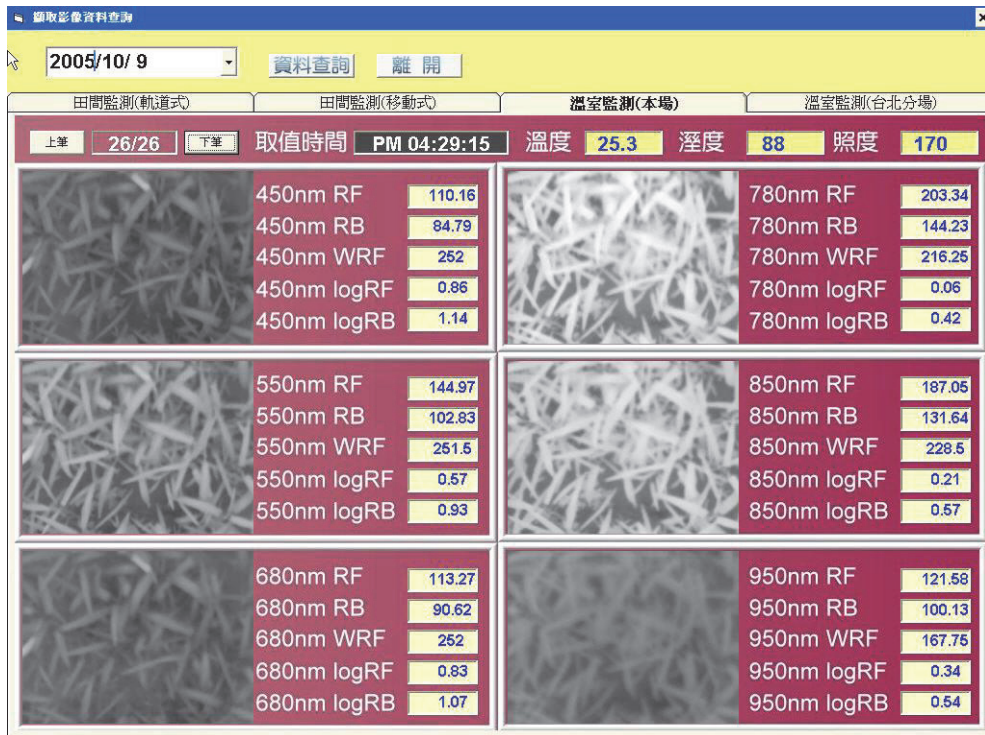


圖 8. 網路伺服器與資料庫整合控制介面

Fig 8. Integration control interface of internet server and database.

結 論

本研究應用多光譜影像技術於簡易溫室蔬菜葉綠素含量非破壞檢測，利用 CCD 攝影機及濾鏡更換模組，以非接觸、非破壞方式擷取蔬菜之多光譜影像，並透過無線網路技術將作物影像傳回遠端伺服主機，藉由前向式逐步迴歸分析，建立蔬菜葉綠素含量多光譜影像檢量線，即時量測蔬菜葉綠素含量，供肥培管理參考依據，為行動溫室管理提供一套有效且準確的葉綠素遙測系統。

參考文獻

- 申雍、李裕娟、章國威、姚明輝。2003。機載簡易多光譜影像拍攝系統之應用。出自“水稻精準農業體系”。農業試驗所特刊編號第 105 號 p.97-104。
- 光合色素。生物秀。2014 年 10 月 27 日，取自
<http://www.bb100.com/lifesciences/43-19185-1.html>
- 何明霞、王璞、李進才。2008。基於 RGB 顏色感測器的葉綠素計的設計，貴州農業科學 36(4): 184-186。
- 李明達。2001。水分逆鏡下植物影像特徵分析之研究。碩士論文。臺北：國立臺灣大學生物產業機電工程學系。
- 李哲民。2012。葉綠素含量讀出系統與晶片化實現。碩士論文。中原大學電子工程學研究所。
- 李慶波、黃彥文、張廣軍、張倩暄、李響、吳瑾光。2009。基於可見-近紅外光譜的植物葉綠素含量無損檢測方法研究。光譜學與光譜分析 29(12): 3275-3278。
- 陳世銘、黃政偉、吳德輝、楊智凱、黃竣吉、蔡養正、繆八龍。2003。稻株含氮量地面多光譜影像遙測系統之開發研究。出自“水稻精準農業體系”。農業試驗所特刊編號第 105 號 p.188-206。
- 黃政偉。2002a。多光譜影像應用於水稻植株含氮量之遙測。碩士論文。臺北：臺灣大學生物產業機電工程學系。
- 黃竣吉。2002b。稻株含氮量多光譜影像遙測系統之研究。碩士論文。臺北：臺灣大學生物產業機電工程學系。
- 張芳明、楊純明。2003。由植被高解析反射光譜模式化稻株之氮素含量研究。出自“水稻精準農業體系”。農業試驗所特刊編號第 105 號 p.35-42。
- 張素娟。2009。RGB 葉綠素儀的優化與其測量回歸模型。碩士論文。天津：天津大學精密儀器工程系。
- 楊純明。2003。由葉綠素測計估測和追蹤稻株之葉綠素及氮素狀態。出自“水稻精準農業體系”。農業試驗所特刊編號第 105 號 p.188-206。
- 羅正宗、陳一心、劉啟東。2000。水稻植株葉色變化與測定方法。嘉義大學學報 69:15-22。

- Haaland, D. M. and E. V. Thomas. 1988. Partial least-squares methods for spectral analyses. *Anal. Chem.* 60:1193-1202.
- Marten, H. and T. Naes. 1989. Methods for calibration. In: *Multivariate calibration*. New York: John Wiley & Sons.
- Minolta Co., Ltd. 1989. Chlorophyll meter SPAD-502 instruction manual. Japan: Minolta Co., Ltd.
- Tsai, W. H. 1985. Moment-Preserving Thresholding: A New Approach. *Computer Vision, Graphics, Image processing.* 29:377-393.

Development of a Multi-Spectral Remote Imaging System to Measure Chlorophyll Content in *Ipomoea Aquatica*¹

Wang-Sheng Li²

Summary

Chlorophyll content is an important indicator of plant nutrition, photosynthesis capacity and growth conditions. Rapid and reliable crops nutrition diagnosis is the basis of rationalization of fertilizer management, but also the implementation of one of the key technologies of precision agriculture. The purpose of this study was to develop a multi-spectral remote imaging system to measure chlorophyll content in *Ipomoea aquatica*. Multi-spectral images of *Ipomoea aquatica* were acquired, noncontactly and nondestructively by using the CCD camera and filter replacement module, and then uploaded image data to remote host server through the wireless network. By means of the forward stepwise regression analysis, the calibration line of multi-spectral images was established. The chlorophyll content of *Ipomoea aquatic* can be instantly measured as the reference basis for fertilizer management. The experimental results showed that the development of multi-spectral remote imaging system to measure chlorophyll content in *Ipomoea aquatica* is feasible.

Key words: multi-spectral remote imaging system , chlorophyll content, *Ipomoea aquatica*.

¹. Contribution No.451 from Taoyuan DARES, COA.

². Associate Researcher (Corresponding author, wslee@tydais.gov.tw) Taoyuan DARES, COA.