應用於水稻精準農業體系之知識與技術
稻株含氮量遙測系統之開發
113-128, 2002

9 稻株含氮量遙測系統之開發

陳世銘[1] 吳德輝[2] 楊智凱[3] 蔡養正[4] 黃政偉[1] 繆八龍[5]

[1] 國立臺灣大學生物產業機電工程學系

[2] 國立嘉義大學生物機電工程學系

[3] 行政院農業委員會農業試驗所農工組

[4] 國立臺灣大學農藝學系

[5] 國立臺灣大學農業試驗場

E-mail:schen@ccms.ntu.edu.tw

摘 要 －－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－ 114

壹、前 言 －－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－ 115

貳、材料與方法 －－－－－－－－－－－－－－－－－－－－ 116

參、結果與討論 －－－－－－－－－－－－－－－－－－－－ 119

肆、結論 －－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－ 124

伍、引用文獻 －－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－ 125

9 稻株含氮量遙測系統之開發

陳世銘[1] 吳德輝[2] 楊智凱[3] 蔡養正[4] 黃政偉[1] 繆八龍[5]

[1] 國立臺灣大學生物產業機電工程學系

[2] 國立嘉義大學生物機電工程學系

[3] 行政院農業委員會農業試驗所農工組

[4] 國立臺灣大學農藝學系

[5] 國立臺灣大學農業試驗場

E-mail:schen@ccms.ntu.edu.tw

摘 要

本研究進行稻株含氮量遙測系統之開發研究，以可攜式輻射光譜儀(GER-2600)定期於五種不同追肥及雜草管理之田區進行水稻植被之反射光譜遙測，並使用多光譜影像裝置遙測不同波段的稻株影像，以建立水稻特徵光譜影像之非破壞性檢測模式。另一方面並開發稻株含氮量遙測系統，以供即時監測田間水稻生育過程氮素的狀況，以達到依稻株體內氮素而施肥的精準農業管理模式。試驗結果發現，一次微分光譜479、623、632、715與1611 nm五個特徵波長組合之Stepwise MLR檢測模式最佳(r = 0.89，SEC = 0.29，SEP = 0.46)。另一方面，亦發現一次微分光譜中藍光段之單一特徵吸收波長479 nm與氮素呈現較高之正相關， 其Stepwise MLR之單一波長檢測模式之結果爲r = 0.79，SEC = 0.40，SEP = 0.42。在MPLSR模式方面，則以模擬SPOT 4四個感測器波段遙測監控水稻生長期含氮濃度的二次微分模式結果最佳(r = 0.91，SEC = 0.26，SEP = 0.39）。在PLS-BPN模式方面則以一次微分數學處理的結果最佳，r = 0.96，SEC = 0.18，SEP = 0.52。探討多光譜影像方面，已使用RGB三個波段建立室內多光譜影像偵測植株氮素含量之檢量線(r = 0.83，SEC = 0.20)；使用660、680、945與960nm四個波段濾鏡之多光譜影像遙測稻株氮素，其MLR分析之最佳結果爲r = 0.88，SEC = 0.27，本研究並據以開發稻株含氮量遙測系統。

關鍵詞：遙測、多光譜影像、水稻、氮素、精準農業。

壹、前言

水稻是台灣最重要的作物，它提供了人類賴以維生之糧食。水稻的產量會受到施肥的影響，其中影響最大的是氮肥的施用，因爲施用適量的氮肥可以促進水稻之營養生長及產量構成要素，提昇其總產量(Arai and Kono, 1979； Wada *et al*., 1991；Jongkaewwattana *et al*., 1993)。張(1988)和申等人(2000)提到水稻從插秧後至開花期間均需要氮素持續的供應，而其中之營養生長期和幼穗形成期是兩個關鍵時段，若能提供充分之氮素供應即可得到好的生產株型與高的產量。水稻氮肥施用方式，一般是依據農民過往之經驗來判別並施用。所以在施肥時常因不同人而有不同的施肥量，施用大量的氮肥也不一定表示產量會增加，蔡(1982)提到施用氮肥雖能增大水稻生育初期之葉面積並提高物質生產量，但最後水稻會因碳水化合物減低而降低結實率。另一方面，過量的氮肥施用亦可能會造成集水區、地下水、甚至是飲用水的污染，因此如何適量的施用氮肥技術則日漸受到重視(謝，1994)，而且也是目前環保所需解決的重要問題之一。目前的施肥管理方式須於適當的水稻生長期分別施加基肥、2~3次的追肥和穗肥，但以個人之經驗決定施肥的時間與用量，往往不能做到依稻株體內之實際氮素狀況而進行精準之管理，甚至造成過量施用的氨害，引發環境污染等問題。因此，若能及時利用遙測技術，以迅速且非破壞的檢測方式獲取田間水稻氮素狀況之空間分佈資訊，將有助於水稻精準管理的實施(楊與林，2000；盧，2000；Lu *et al*., 2000)。

以往對於作物氮素的檢測常需要做破壞性且相當耗時的化學量測，然而利用諸如輻射光譜儀與多光譜影像之遙測技術則可以針對作物在不同時期之含氮量多寡做迅速且非破壞性的檢測。作物可藉遙測(Remote sensing)之技術來表達其生理狀態(Nilsson, 1995)，遙測是一種與作物在非接觸且非破壞的情況下，擷取並分析作物相關資訊的現代化科技，遙測技術包含光譜輻射儀、攝影術、電視攝影、紅外線熱像、多光譜影像與核磁共振影像等。輻射光譜資料的應用及處理方法，早期多藉由寬波段反射值定義植被指數或以葉色估測植物的健康狀態。Tucker(1979)指出植生指數在強調由密集的葉綠素色素對寬波段紅光的吸收度與植物體對近紅外光段的高反射值的對比，藉此可用以推估如葉面積指數(LAI)之植生變數。Blackmer *et al*.(1994)指出輻射波段550nm的遙測結果可以分辨出作物不同的氮素處理，其光譜吸收與植株之氮素含量有著強烈的相關性。近年來由於可見光及近紅外線光譜之微分數學處理與統計方法已廣泛應用在農產品組成及性狀之檢測研究上(陳等，1998)，再加上高解析輻射光譜與影像拍攝儀器的快速進展，吸收光譜之微分處理與統計方法亦被應用於遙測作物的性狀與葉綠素(吳與陳, 2000)及氮素濃度等健康狀態之判釋或監測(吳等，2001)。Iida *et al*.,(2000)使用一個CCD的攝影機加上535nm(綠光)和670nm(紅光)的濾鏡拍攝多光譜影像遙測水稻植株氮素含量，李(2001)亦以多光譜影像分析鳳京白菜植被含水率，則爲多光譜影像在遙測方面的應用。

在模式化方面，近年來農業與食品工業常使用分光光度計量測標的物的光譜，

並應用於光譜分析與較佳模式特徵波長的選擇研究上。 Chang *et al*., (1998) 分析果汁透射光譜時，利用近紅外光段之特徵波長2240 nm吸收的二次微分值建立可廣泛精確使用於多種水果的果汁可溶性固形物濃度 (Brix)之 MLR(Multiple Linear Regression)檢測模式。而這些線性統計模式隨著高解析輻射光譜儀的發展，亦逐漸被應用在精準農業農作物之地眞遙測研究上 (吳與陳，2000； 吳等人，2001)。類神經網路 (Artificial Neural Network, ANN) 的能位則更優於前述線性統計之數學方法，主要是因爲它們具有自我學習的能力，無須依賴人爲解析的專業鑑定就可以發現並使用非線性關係建立檢測模式。類神經網路已廣泛地應用於圖案辨識問題，例如影像分類、特徵辨識、標的辨識與語音辨識之研究。另一方面亦被發現可有效地應用於農業之光譜資料處理上，例如 Chen (1992) 應用ANN模式線上監控家禽肉類品質的分類系統。Dowell (1994) 應用ANN模式進行受損、非受損花生仁的分類。Chen *et al*., (1995) 應用倒傳遞神經網路 (Back propagation Neural Network, BPN) 分析近紅外光譜以分類冬天與春天不同季節性的小麥。Chen *et al*., (1999) 應用ANN模式探討不同的原始光譜、一次微分光譜與二次微分光譜處理近紅外線光譜 (1000-2500nm) 對果汁糖度檢測的影響，均呈現極佳的預測結果。唯ANN在遙測植被光譜的分析應用，尚屬少見。

綜觀以上各種研究方式可知，高解析輻射光譜拍攝儀器等遙測技術的快速進展，再加上適當遙測光譜數學處理方法與分析之持續研究與模式的建立，應能獲取更精確的地眞(ground truth)資訊並促使遙測科技在精準農業體系的應用更上一層樓。本研究之主要目的在於進行稻株含氮量遙測系統之開發研究，以可攜式輻射光譜儀(GER-2600)定期於五種不同追肥及雜草管理之田區進行水稻植被之反射光譜遙測，並使用多光譜影像裝置遙測不同波段的稻株影像，以建立水稻特徵光譜影像之檢測模式，探討稻株之光譜反射性質應用於估測植株氮素濃度之可行性，並可據以開發稻株含氮量遙測系統供即時監測田間水稻生育過程氮素的狀況，達到依稻株體內氮素而施肥的精準農業管理模式。

貳、材料與方法

本研究於民國89年2期稻作至90年1期稻作栽培期間，使用不同的遙測裝置分別進行試驗進行稻株含氮量遙測系統之開發研究。首先以可攜式輻射光譜儀定期於台灣大學安康農場進行水稻植被之反射光譜稻株含氮量遙測試驗，建立稻株含氮量之特徵波長遙測模式。田區之處理方式則分別爲：(1)有追肥，無除草劑。(2)無追肥，有除草劑。(3)無追肥，無除草劑。(4)有追肥，有除草劑。(5)有機肥。本研究藉由五種管理方式使整個生育期稻株含氮量產生較大之變異。另一方面則於台中縣農業試驗所之試驗田區，以多光譜影像裝置遙測不同波段的稻株影像，建立水稻特徵光譜影像之非破壞性檢測模式，進行開發稻株含氮量遙測系統之研究，以供即時監測田間水稻生育過程氮素的狀況，達到依稻株體內氮素而施肥的精準農業管理模式。

一、可攜式輻射光譜儀遙測稻株含氮量

1. 稻株含氮量量測

本研究選擇臺灣大學安康農場5.25公頃的田地種植台粳14號水稻，分別於分蘗盛期、幼穗形成期、孕穗期、開花期、糊熟期、黃熟期及收穫期進行採樣，調查五種不同追肥及雜草處理方式之水稻含氮量。經由田中取回的水稻樣本，則採用凱式氮的分析方法，把乾燥後磨好的水稻粉末取0.2g與0.5g之催化劑($KaSO_4$：$CuSO_4$・5(H_2O)：Se = 100：10：1)充份混合，放入一試管中。然後以375℃加熱二個小時進行硝化作用，待試管冷卻後再利用氮素蒸餾儀進行蒸餾，最後再計算滴定量求得氮素含量之百分比。

2. 光譜量測與數學處理過程

試驗進行期間係使用可攜式輻射光譜儀(GER 2600)及其附屬配件10度視角鏡頭於水稻不同的生長期，分別在每個不同處理的田區抽樣量測共96叢水稻的反射光譜。如圖1所示，本研究於田間使用輻射光譜儀裝置於每株稻叢植被上方約5m處遙測波長範圍自400至2500nm 的連續反射光譜，並透過RS-232C傳輸線將其下載至筆記型電腦。每次的光譜量測均做一次標準白板參考校正，再立即對該叢水稻量測其輻射反射，以求出其相對反射比R (Reflectance, %)，藉以建立水稻生長期的反射光譜資料。本研究首先對輻射光譜計算反射比(Reflectance, R %)、取對數運算($\log_{10}(1/R)$)及平滑化數學處理，將此值定義爲水稻植被的原始反射光譜(Original Reflectance Spectrum)。

3. 建立水稻含氮量與植被反射光譜之遙測模式

本文使用輻射光譜儀量測台粳14號水稻於不同生長期之反射光譜後，進一步將不同水稻生長期所調查的含氮量與不同波長之植被反射吸收光譜進行統計相關性分



圖1. 台灣大學自製的近地面高程水稻氮素遙測裝置。

析，比較含氮量與各個波長植被反射光譜之相關性高低，以選擇適當的遙測波段加以分析並建立較佳的檢測模式。本文將所收集採樣之所有水稻光譜樣本比對其生長期當時監測調查的含氮量，建立逐步多變量線性回歸模式 (Stepwise Multiple Linear Regression, Stepwise MLR)、修正型部分最小平方回歸模式(Modified Partial Least Square Regression, MPLSR)及部份最小平方型倒傳遞類神經網路模式(PLS Back-propagation Neural Network, PLS-BPN)對水稻含氮量遙測之分析結果。

二、多光譜影像遙測稻株含氮量

本實驗之試驗品種爲台農67號水稻，地點在台中農業試驗所；農試所之三個試驗田區氮肥處理方式，係在每一田區分別施以0、60、120與180 kg N / ha四種氮肥處理，以造成一塊田區有四種氮肥處理以上的差異，採樣方式爲在每一種不同氮肥處理之田區以等距方式取四株水稻樣本，每塊田區共有12點，三塊田區共取36株，取完樣本後即進行多光譜影像之拍攝。如圖2所示，試驗方法又分爲使用CCD攝影機(CV-M50IR, JAI)與使用Kodak DC4800彩色數位相機擷取影像。使用CCD攝影機時係依序先在鏡頭前換裝上9個不同波長的濾鏡，並在穩定的光源下攝取多張不同光譜之影像。再利用了倒傳遞類神經網路程式(李，2001)進行葉片與背景的分離。



圖2. 多光譜影像系統。

另一方面，試驗初期爲了驗証多光譜影像的實用性，所以也進行RGB彩色影像比較試驗。

參、結果與討論

本研究使用不同的遙測裝置進行稻株含氮量遙測系統之開發研究，分別以可攜式輻射光譜儀與多光譜影像裝置遙測不同波段的稻株影像，建立水稻特徵光譜及影像之非破壞性檢測模式。

一、 可攜式輻射光譜儀裝置遙測稻株含氮量

圖3所示係本研究採用台灣大學自製的近地面高程光譜遙測裝置(圖1)，將附掛10度視角鏡頭的輻射光譜儀吊升至水稻植被上方約5公尺高的位置，遙測參考白板及其視角範圍的水稻植被反射，去除1750-2500nm雜訊較多之波段後所獲得之水稻植生相對反射比光譜(Reflectance spectrum)。

本文在分析的過程採用一次微分光譜數學處理方式，以建立5個特徵波長組合之Stepwise MLR模式。如表1所示，爲近地面高程遙測水稻整叢(株)氮素之Stepwise MLR模式所獲致之一次微分光譜5個特徵波長(Wavelength, W_i)477、724、788、921與1483 nm組合之稻株含氮量最佳檢量方程式，模式之相關係數 r = 0.85，檢量組標準誤差SEC = 0.26，預測組標準誤差SEP = 0.22 。另一方面，亦發現一次微分光譜中藍光段之單一特徵吸收波長479 nm與氮素呈現較高之正相關， 其Stepwise

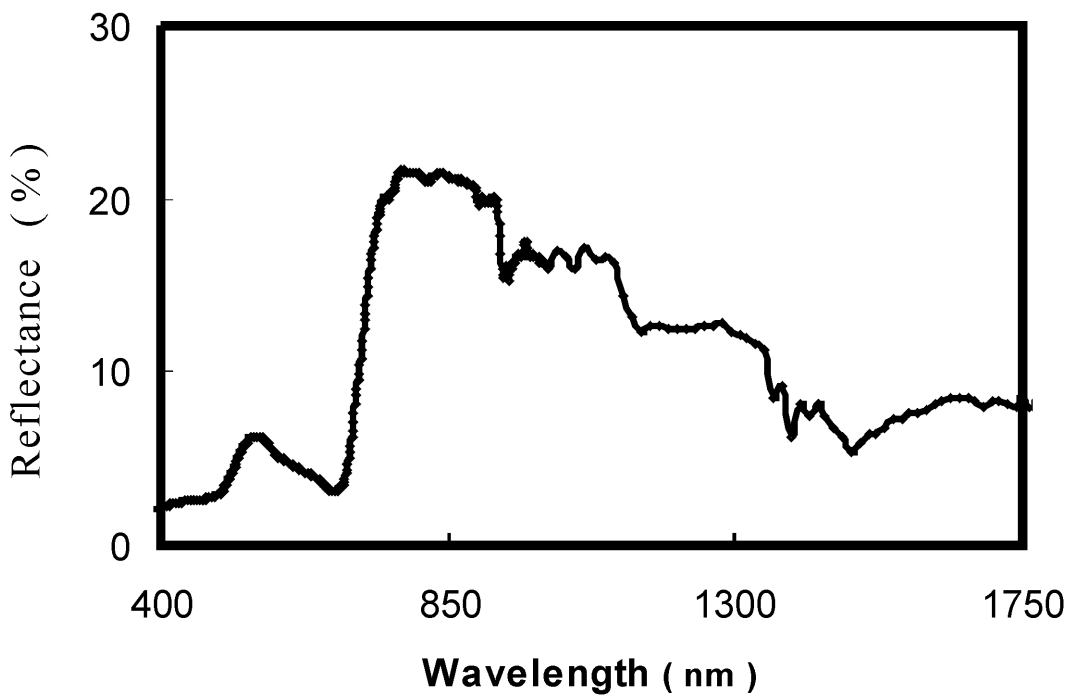


圖3. 水稻分蘗期之近面地高程植被反射光譜。

表1. 近地面高程遙測水稻整叢氮素之Stepwise MLR模式。

光譜種類	波長組合，nm					檢量組		預測組
	W1	W2	W3	W4	W5	SEC,%	r	SEP,%
一次微分光譜	477	724	788	921	1483	0.26	0.85	0.22

MLR之單一波長檢測模式之結果爲r = 0.79，SEC = 0.40，SEP = 0.42。

如表2所示，本研究進一步比較並探討一次微分光譜遙測水稻葉部氮素(r = 0.89)與遙測水稻整叢氮素模式(r = 0.85)的結果發現，由於遙測的大部份植被反射光譜資訊多來自葉面，莖部則提供較少的資訊，所以地面高程遙測水稻葉部氮素所獲致之稻株含氮量結果則與整叢的氮素模式頗爲相近。如表2所示，一次微分光譜的5個特徵波長W1、W2、W3、W4與W5組合爲479、623、632、715與1611 nm，其Stepwise MLR模式之分析結果 r = 0.89，SEC = 0.29，SEP = 0.46。

進行MPLSR模式分析時，本研究特別挑選SPOT4資源衛星上的四個特別的感測器波段加以模擬，表3所示係以二次微分光譜的MPLSR模式遙測水稻含氮量時有最佳的結果，r = 0.91, SEC = 0.26, SEP = 0.39。其次爲一次微分光譜，而以原始光譜的檢測結果最差。

類神經網路模式近年來常被應用來解決非線性模式的各類問題，本研究進一步應用WinISI光譜分析軟體提供的PLS-BPN類神經網路，以分析不同數學處理的水稻遙測光譜，比較監測水稻葉部氮素與整叢氮素的結果，如表4所示，葉部氮素檢測部份以二次微分光譜處理的結果r值0.96最高，一次微分的結果次之。由此可知，類神經網路應用在稻株含氮量遙測系統亦頗具可行性。再與表4中整叢氮素的檢測結果相比較，發現整叢的氮素檢測以一次微分處理的光譜結果最好r = 0.90，SEC=0.20，SEP=0.25，原始光譜的結果次之。換言之，就網路訓練學習的檢量模式成效r值而言，葉部的含氮量檢測與整叢的結果差距不大。

二、 多光譜影像裝置遙測稻株含氮量

表2. 近地面高程遙測水稻葉部氮素之Stepwise MLR模式。

光譜種類	波長組合 , nm					檢量組		預測組
	W1	W2	W3	W4	W5	SEC,%	r	SEP,%
一次微分光譜	479	623	632	715	1611	0.29	0.89	0.46

表3. 近地面高程遙測模擬SPOT波段之水稻葉部氮素之MPLSR模式。

光譜種類	檢量組		預測組
	SEC,%	r	SEP,%
原始光譜	0.45	0.71	0.42
一次微分光譜	0.39	0.79	0.38
二次微分光譜	0.26	0.91	0.39

*SPOT 4之四個波段，G:500-590nm，R:610-680nm，NIR:680-780nm，SWIR:1580-1750nm

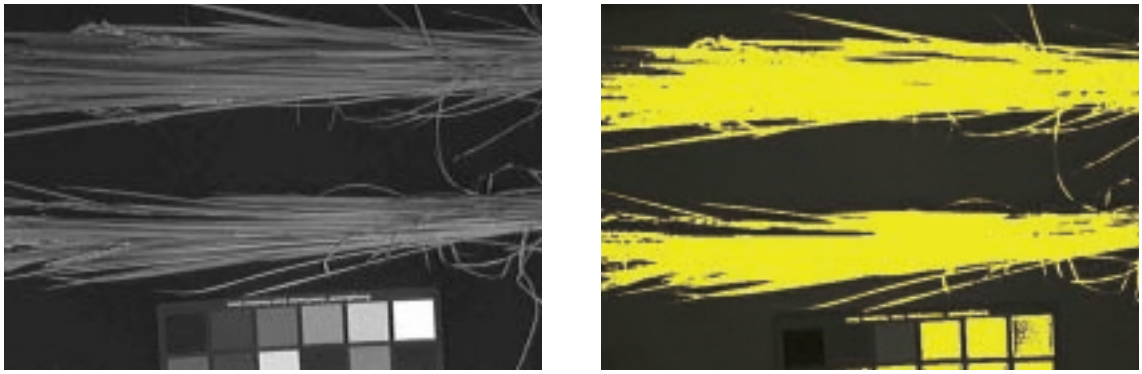
表4. 近地面高程遙測水稻氮素之PLS-BPN模式。

生長性狀	光譜種類	檢量組		預測組
		SEC,%	r	SEP,%
葉部氮素	原始光譜	0.37	0.82	0.36
	一次微分光譜	0.33	0.85	0.34
	二次微分光譜	0.18	0.96	0.52
整叢氮素	原始光譜	0.25	0.84	0.26
	一次微分光譜	0.20	0.90	0.25
	二次微分光譜	0.31	0.76	0.35

本試驗以多光譜影像來探討遙測稻株含氮量之可行性時並加入了彩色影像的檢測輔以驗証，分析方式則是利用倒傳遞類神經網路(李，2001)進行葉片與背景的分離。倒傳遞類神經網路設定的參數學習速率因子爲0.3，慣性因子爲0.6，訓練次數到350次左右即可收斂。圖4a爲葉片背景分離前的水稻田間影像，而圖4b爲葉片分離後之水稻田間影像，由圖4可以清楚的看到，利用類神經網路可以完全的分離出葉片的影像，然後再把分離出的葉片影像，以株爲單位計算其葉片的總平均灰度值。因爲各波段之光譜灰階影像與在水稻株體氮素含量的多寡均有相關，因此可利

用多光譜的特性建立葉片含氮的檢量線。最後把得到的多光譜影像灰度值與氮素含量進行多重線性迴歸，以分析水稻葉片所反射之多光譜影像資料。

就多光譜影像而言，本研究利用各波段所量測到的多波段影像灰度值與化學實



(a)分離前影像 (b)分離後影像

圖4. 應用倒傳遞類神經網路分離葉面與背影。

驗測定的氮素含量(%)進行回歸比較。表6爲氮素回歸分析結果，由表6可看出其單波長結果對於氮素含量相關結果比較好的是960nm這個波段，其校正組模式之相關係數r_c = 0.77，SEC = 0.33。選擇多光譜組合波段分析時，若就所有四波段MLR組合結果則可得660、680、945與960nm波段之最佳MLR組合結果爲r_c =0.88，SEC = 0.27。因此本研究選定室內遙測水稻植株含氮量之最佳檢量線特徵波段爲660、680、945與960 nm。其檢量方程式爲：

$$\text{稻株含氮量(\%)} = -0.071T_{660} - 0.030T_{680} - 0.008T_{945} - 0.008T_{960} + 5.156$$

其中，Ti爲i波段的影像灰度值。

圖5與圖6分別爲檢量組與預測組之水稻氮素含量實驗量測值對檢量線所檢測之

表6. 多光譜影像回歸結果。

波段（nm）	r_c	SEC,%
450	0.2479	0.5036
555	0.5139	0.4459
647	0.6576	0.3916
660	0.6908	0.3758
677	0.6693	0.3862
680	0.7542	0.3413
773	0.2915	0.4972
945	0.7615	0.3369
960	0.7658	0.3342
660,680,945,960	0.8803	0.2736

水稻氮素含量預測值之比較結果，預測組相關係數r_p =0.82與檢量組r_c=0.88相近，而且可預測組結果SEP與檢量組SEC差距不大，換言之，稻株含氮量與光譜影像間有著一定程度的相關性。因此本研究之結果亦顯示以多光譜影像遙測氮素的模式之可行性，應可進一步可取代傳統之凱氏氮分析法。

在試驗初期，爲了驗證光譜影像的可行性，因此加入彩色影像之遙測方式加以

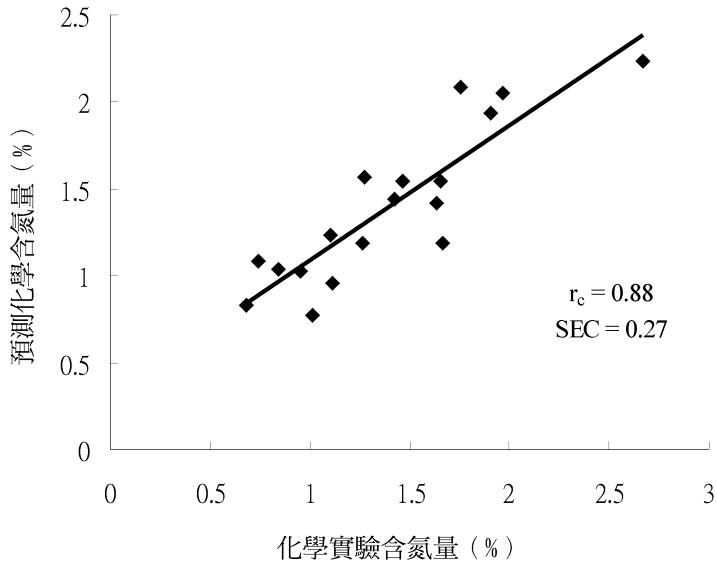


圖5. 檢量組樣本之水稻氮素最佳檢量線預測結果。

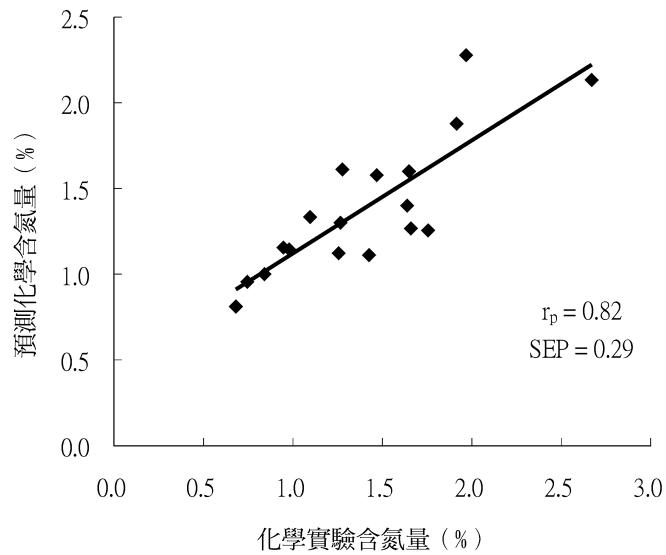


圖6. 預測組樣本水稻氮素最佳檢量線預測結果。

比較。彩色影像的結果如表7所示。在水稻葉片部份，其RGB之灰度值獨立來預測氮素含量相關性結果，以G值之0.75最好，B值之0.13最差。而RG灰度值經過回歸後所得到之氮素值，與RGB灰度值回歸後所得之結果也很相近，其相關性僅差了0.01，而SEC之差距也爲0.08。但是，因爲擷取彩色影像時是RGB三種值一起取進來，因此如果能使用RGB一起來回歸分析，結果一定是最好的。其RGB彩色影像與RG影像回歸後之回歸線爲：

彩色影像(RGB)預測含氮量(%) = 0.06R-0.071G-0.056B+3.135
彩色影像(RG)預測含氮量(%) = 0.045R-0.061G+2.54
其中 R、G、B爲彩色影像分離出RGB後之各張影像灰度值。

表7.彩色影像回歸結果。

波段	r_c	SEC,%
R	0.61	0.24
G	0.75	0.20
B	0.13	0.31
R+B	0.62	0.26
G+B	0.76	0.22
R+G	0.82	0.19
R+G+B	0.83	0.20

肆、結　論

本研究已由遙測水稻植被光譜之研究並配合文獻之探討，挑定氮素偵測之特徵波段，並初步完成稻株含氮量多光譜影像遙測系統與田間載具之設製與測試。稻株含氮量遙測系統之開發研究進行，包括以可攜式輻射光譜儀(GER-2600)定期於五種不同追肥及雜草管理之田區進行水稻植被之反射光譜遙測試驗，以及使用多光譜影像裝置遙測不同波段的稻株影像試驗，以建立水稻特徵光譜影像之非破壞性檢測模式，並據以開發稻株含氮量遙測系統。試驗結果發現，一次微分光譜479、623、632、715與1611 nm五個特徵波長組合之Stepwise MLR檢測模式最佳(r = 0.89，SEC = 0.29，SEP = 0.46)。另一方面，亦發現一次微分光譜中藍光段之單一特徵吸收波長479 nm與氮素呈現較高之正相關，其Stepwise MLR之單一波長檢測模式之結果爲r = 0.79，SEC = 0.40，SEP = 0.42。在MPLSR模式方面，則以模擬SPOT 4四個感測器波段遙測監控水稻生長期含氮濃度的二次微分模式結果最佳(r = 0.91，SEC = 0.26，SEP = 0.39)。在PLS-BPN模式方面則以一次微分數學處理的結果最佳，r = 0.96，SEC = 0.18，SEP = 0.52。在多光譜影像遙測田間水稻植株含氮量方面，本研究應用室內遙測多光譜影像MLR

模式預測水稻氮素之最佳四個特徵波段的組合爲660、680、945與960nm，r = 0.88，SEC=0.27。此結果優於以室內RGB彩色影像遙測的結果。此亦進一步顯示應用多光譜影像遙測田間水稻植株含氮量的可行性。換言之，稻株之光譜反射吸收性質具有被應用於估測植株氮素濃度之可行性，並可據以開發田間稻株含氮量遙測系統。

伍、引用文獻

1. 申雍、羅正宗、鄭世朋。2000。稻株氮營養狀況遙測技術之建立。中華農業氣象7:23-31。
2. 申雍、李裕娟。2001。簡易高光譜影像拍攝系統之研發與應用。出自"水稻精準農業(耕)體系之研究計畫階段性成果研討會暨九十年度期中檢討會論文摘要集"，9-10，台中：行政院農業委員會農業試驗所。
3. 李明達。2001。水分逆境下植物影像特徵分析之研究。碩士論文。台北：國立台灣大學生物產業機電工程學研究所。
4. 李裕娟、張愛華、申雍、章國威、羅正宗。2001。稻株氮營養狀態檢測技術。出自"水稻精準農業(耕)體系之研究計畫階段性成果研討會暨九十年度期中檢討會論文摘要集"，5-6，台中：行政院農業委員會農業試驗所。
5. 吳德輝、陳世銘。2000。應用近紅外光遙測水稻生長性狀。出自"八十九年農業機械論文發表會論文摘要集"，131-132。台北：中華農業機械學會。
6. 吳德輝、陳世銘、盧福明、楊宜璋、蔡養正、繆八龍。2001。遙測技術應用於水稻氮素非破壞性檢測之研究。出自"九十年農業機械論文發表會論文摘要集"，204-205。台北：中華農業機械學會。
7. 陳世銘、張文宏、謝廣文。1998。果汁糖度檢測模式之研究。農業機械學刊。7(3):41-60。
8. 張正賢。1988。稻作學精要。台北：國立編譯館。
9. 蔡金川。1982。水稻葉色與葉片全氮濃度之品種間差異。中華農業研究31(3):246-253
10. 謝順景。1994。台灣農業環境與永續性農業體系之建立。台中農業推廣簡訊14:4-21
11. 楊純明、林俊義。2000。發展精準農業關鍵性技術，加速農業生產技術升級。出自"水稻精準農業(耕)體系之研究論文集"，p.2-6。台中：行政院農業委員會農業試驗所。
12. 盧福明。2000。精準農業體系之農機研發趨勢。出自"水稻精準農業(耕)體系之研究論文集"，p.106-110。台中：行政院農業委員會農業試驗所。
13. Arai, K. and Y. Kono.1979.Development of the rice panicle. Jpn. J. Crop Sci. 48:335-342.
14. Blackmer, T.M., J.S. Schepers and G.E. Varvel.1994.Light reflectance compared with other nitrogen stress measurement in corn leaves. American Society of Agronomy 86(6)：934-938.
15. Chang W. H., S. Chen and C. C. Tsai. 1998. Development of a universal algorithm for use of NIR in estimation of

soluble solids in fruit juices. Transactions of the ASAE 41(6):1739-1745.

16. Chen, Y. R. 1992. Classifying diseased poultry carcasses by visible and near-IR reflectance spectroscopy. p. 46-55 In:Optics in agriculture and forestry.SPIE vol. 1836. J.A. Deshazer, B.F. Fyodoroz, and G.E. Meyer eds. Soc. Photo-optical Instrumentation Eng.:Bellingham, WA.
17. Chen, Y. R., S. R. Delwiche and W. R. Hruschka. 1995. Classification of hard red wheat by feedforward backpropagation neural networks. Cereal Chem. 72(3):317-319.
18. Chen, S., K. W. Hsieh and W. H. Chang. 1999. Neural network analysis of sugar content in fruit juice. ASAE Paper No. 99-3083, St. Joseph, MI, USA: ASAE.
19. Dowell, F. E. 1994. Neural network classification of undamaged and damaged peanut kernels using spectral data. Optical Eng. 33:2728-2732.
20. Iida, k., M. Suguri, M. Umeda and T. Matsui. 2000. Estimation of nitrogen content using machine vision in a paddy field. An ASAE Meeting Presentation. Paper No.003021, St. Joseph, MI, USA:ASAE.
21. Jongkaewwattana, S.S., S. Geng, D. M. Brandon and J.E. Hill.1993.Effect of nitrogen and harvest grain moisture on head rice yield. Agron. J. 85:1143-1146.
22. Lu, F. M., S. Chen, C. K. Yeh, T. T. Lin, K. N. Wang, T. H. Wu, F. S. Chang and W. J. Chen. 2000. Utilization of satellite-based information on the development of precision agriculture for crop production system in Taiwan. p.442-447. In Proceedings of the XIV Memorial CIGR World Congress 2000. Tsukuba, Japan: Tsukuba University.
23. Nilsson, H.1995. Remote sensing and image analysis in plant pathology. Can. J. plant pathol 17:154-166
24. Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sens. Environ. 8:127-150.
25. Wada, G., R. C. Aragones, H. Ando.1991.Effect of slow release fertilizer (Meister) on the nitrogen uptake and yield of the rice plant in the tropics. Jpn. J. Crop Sci. 60 : 101-106.

9 Development of a Remote Sensing System for Rice Nitrogen Concentration Determination

Suming Chen[1], Te-Hui Wu[2] , Chih-Kai Yang[3], Yang-Zenq Tsai[4], Cheng-Wei Huang[1], and Pa-Lung Miao[5]

[1] Dept. of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan, ROC

[2] Dept. of Biomechatronic Engineering, National Chiayi University, Chiayi 600, Taiwan, ROC

[3] Dept. of Agriculture Engineering, Taiwan Agricultural Research Institute, Wufeng, Taichung Hsien 413, ROC

[4] Dept. of Agronomy, National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan, ROC

[5] The Experimental Farm, National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan, ROC

E-mail:schen@ccms.ntu.edu.tw

ABSTRACT

This study was aimed to develop a remote sensing system for the determination of nitrogen concentration in rice. Both portable spectroradiometer and multi-spectral imager were used to measure the reflectance characteristics of rice crops with different treatments of fertilization. The calibration models were developed and evaluated; and the remote sensing system was designed with the goal of nondestructive measurement of the nitrogen content in rice stalk. The results showed that the best model of stepwise multiple linear regression (MLR) was the first derivative of spectra with 5 wavelengths of 479, 623, 632, 715 and 1611 nm (r = 0.89, SEC = 0.29, SEP = 0.46). The wavelength at 479 nm in blue band was found in best MLR correlation with nitrogen concentration (r = 0.79, SEC = 0.40, SEP = 0.42). The analysis by MPLSR (modified partial least square regression) with the second derivative spectra provided the best results in simulating the SPOT 4 satellite spectra data (r = 0.91, SEC = 0.26, SEP = 0.39). The PLS-BPN (PLS back-propagation neural network) model with the first derivative spectra yielded the results of r = 0.96, SEC = 0.18, SEP = 0.52. In evaluating the multi-spectral images of rice stalk, the calibration model established with RGB bands gave the results with r = 0.83 and SEC = 0.20,

while the calibration model with multi-spectra at 660, 680, 945 and 960 nm yielded the results with r = 0.88 and SEC = 0.27. A remote sensing system for determining the nitrogen concentration in rice stalk was developed by using the reflectance properties of rice canopy obtained in this study.

Key words: Remote sensing, Multi-spectral image, Rice, Nitrogen, Precision agriculture.