

以 SOPC 為基礎的近紅外線光譜儀用於小番茄糖度檢測

楊尚銘

國立彰化師範大學電子工程系

e-mail: m97642015@mail.ncue.edu.tw

黃其泮

國立彰化師範大學電子工程系

e-mail: cphwang@cc.ncue.edu.tw

摘要

以 SOPC 為基礎的近紅外線光譜儀由廉價的近紅外線濾光片組、簡易的伺服系統、CMOS 攝像頭、以及大型的 FPGA 元件構成，配合光譜反射平均數據 I_{av} 所轉換成吸收光譜值 A_λ ，並以統計軟體 SAS 進行多重線性回歸(MLR)分析，將所得到的糖度校正方程式，帶入系統從而驗證所研製的系統用於農產品的糖度檢測。經由實測結果與昂貴的紅外線光譜檢測儀，進行糖度檢測比較，結果相近甚或優於其所判定的結果。

關鍵詞：SOPC、近紅外線濾片、吸收光譜值、統計軟體 SAS。

Abstract

A SOPC-based near-infrared spectrometer has been constructed by the cheap simple servo system, near-infrared filter glass set, CMOS camera, and a large FPGA component that cooperated with the average spectral reflectance data I_{av} transforming into the absorption spectrum value A_λ and SAS statistical software for multiple linear regression (MLR) analysis to apply to sugar test for agricultural products. By the experimental results, the SOPC-based near-infrared spectrometer is similar or even better than the results of the expensive infrared spectral detector.

Keywords: SOPC, near-infrared filter glass set, absorption spectrum value, SAS statistical software.

1. 前言

無損量測在農業、工業、醫學、食品上的應用相當廣泛，例如光學、X 射線、超音波、近紅外線(NIR)與核磁共振(MRI)等在無損量測技術上的使用種類繁多，其中以近紅外線的應用最為廣泛，而多數農產品都擁有 C-H、O-H、N-H 等的有機分子[1]，其固定吸收振動光譜也都在近紅外線 700nm~2500nm 的光譜範圍內，

加上統計方法的搭配，使得現在近紅外線的應用，在農產品的糖度檢測技術研究上有相當大的成長。由於紅外線光譜儀其售價都在百萬以上，在農產品的檢驗上其售價很難被一般常人所能接受，故開發低成本的近紅外線檢測儀是當前必要的。以 SOPC(system on a programmable chip)為影像信號處理基礎配合 CMOS 攝像頭與近紅外線濾光片，研製近紅外線光譜儀用於農產品的糖度檢測。並以小番茄的糖度檢測作為系統功能驗證的依據。

本論文第二節敘述整體系統結構。第三節詳細說明 SOPC 信號處理系統設計與實作。第四節闡述校正方程式的取得。第五節利用實驗結果執行系統功能驗證。第六節為本論文結論。

2. 系統結構

以 SOPC 為基礎的研究在於簡易近紅外線光譜儀的實現，目前在近紅外線檢測方面的研究所使用的感測器大多都是以矽偵測器[2]或 CCD 偵測器[3]當作感測元件，利用數位攝像頭當作感測器的報告目前還很少，所以本論文主要是著重硬體的設計，系統的硬體結構圖如圖 1 所示，使用 SOPC 晶片、CMOS 攝像頭 (TRDB-D5M)、液晶顯示器 (TRDB-LTM) 與 SDRAM、濾鏡轉輪更換裝置、濾片、七段顯示器、SWITCH 與 KEY、RS232 與 PC、鹵素燈，搭配數位式糖度計所測得的糖度，利用 SOPC 整合與應用，以實現獨立運作且即時顯示量測值的近紅外線光譜儀。

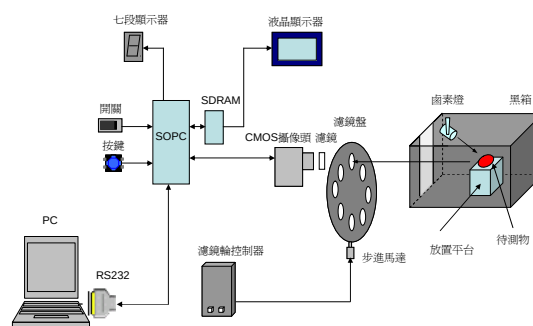


圖 1 檢測儀器系統結構圖

2.1 影像抓取方法

在實驗的階段先使用黑箱遮斷其他光源的干擾，在近紅外影像感測器，若採用精密近紅外線 CCD 攝影機(Near Infrared CCD Camera C3077-78)[2]造價動輒就要五十萬以上，並不符合低成本的理念，所以本研究採用一般可取得的 CMOS 攝像頭(TRDB-D5M)作為近紅外線影像感測器。鹵素燈(DC12V, 50W, OSRAM)能夠產生近紅外線光，為了有穩定的光源輸出，因此使用直流光源以達到光源穩定的目的。

而在近紅外線波段的選擇，本論文只使用其中幾個波段作為實驗的使用。因為全譜分析儀是全光譜範圍的分析，導致分析的工作時間冗長耗時，為了節省分析的時間，因此使用幾個對糖度反應較明顯的特定波長作為濾片的選擇。在濾片波長的選擇，參考[4]中的第一批蓮霧二次微分光譜與糖度值之相關係數圖可知，在 952nm、906nm、884nm、858nm、778nm、686nm 及 642nm 波長對糖度的反應有明顯的反應，故濾片波長選擇上選取相近的波段 1050nm、1000nm、950nm、905nm、855nm、800nm 及 766nm 作為本論文的濾片選擇，表 1 為濾鏡規格表。

為了避免手動更換濾片時所造成的人為誤差，在濾片更換的選擇選用濾鏡轉輪更換裝置，將濾片嵌入具有 8 孔的轉輪，並利用步進馬達轉動轉輪，旋轉一圈恰為 2000 步。

表 1 濾片規格表

中心波長 (nm)	直徑 (mm)	誤差 (nm)	波長半高寬度 (nm)
1050、1000、950、 905、855、800、766	25.4	±2	10

2.2 影像與糖度顯示

因為系統要能獨立運作，因此在顯示資料與影像的部份，利用液晶顯示器(TRDB-LTM)作為光譜影像顯示單元，在糖度數值的顯示則使用七段顯示器表示之。而 CMOS 攝像頭的時脈與液晶顯示器的時脈不同，所以還需搭配一顆 SDRAM 儲存 CMOS 攝像頭的影像，以解決時脈不匹配的問題。

2.3 建立校正方程式

校正方程式的建立主要是，將光譜數據藉由 RS232 傳回 PC，等分析完畢後將所得到的糖度校正方程式套入 SOPC 所建立的系統內。

3. SOPC 信號處理系統設計與實作

圖 2 為 SOPC 信號處理架構圖，硬體部分由 SOPC 的 NIOS II 做複雜演算、影像處理模組進行光譜影像處理與糖度預測值的顯示。軟體部分由 PC 的統計軟體 SAS 與 Excel 進行校正方程式的建立。

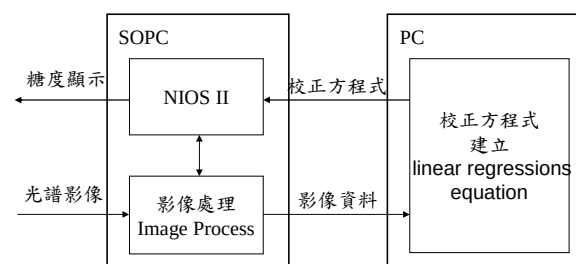


圖 2 SOPC 信號處理架構圖

3.1 NIOS II

NIOS II 是 32 位元的嵌入式處理器，專門設計給 Altera 的 FPGA 使用，而我們所使用的 SOPC 晶片是 Cyclone II 2C70 FPGA device，故能使用 NIOS II 來處理較為複雜的運算工作。

NIOS II 主要有兩個工作要執行，一個是影像處理的中心點座標運算，一個是校正回歸方程式運算，所執行的工作有中心點座標運算與校正回歸方程式運算。

3.2 影像處理

在進行影像處理之前需要做影像校正的動作。由[5]中提到，數位相機在光亮度的校正上需做亮度飽和校正與無光校正，從[6]中一文提到，無光校正稱做暗電流值(I_D)校正。首先將校正白板擺至檢測平台上，以手動調整 CMOS 攝像頭的曝光值，讓白板影像的亮度值調整至 243，低於飽和值(I_S)255，當調整完成後再調整暗電流值，當此濾片校正完畢後即轉入下個濾片，直到每個濾片都調整完畢後，就不再更動濾片的曝光值。

而圖 3 為影像處理的架構圖，待測物的光譜影像，需經過影像灰階、影像二值化、影像

邊緣化、中心點座標收尋與中心點座標值平均後，輸出平均光點數據，進而建立出校正方程式或輸出至 NIOS II 分析出糖度預測值，而其工作內容如以下幾個小節所示。

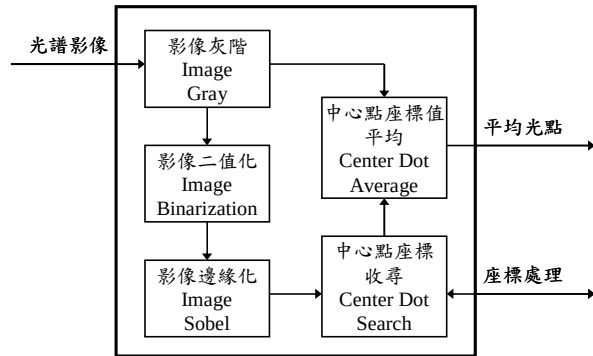


圖 3 影像處理架構圖

3.2.1 影像灰階

原始光譜影像是由 RGB 三種像素所構成的，每種像素都由 12bit 資料所組成的，因為只是要辨識光譜反光點數據(I_i)的中心點座標(X_{av} , Y_{av})，顏色並不重視，所以這邊只採用 R 像素當中的高 8bit 資料來做分析，影像灰階的轉換的方式如 Eq. 1 所示。

$$Gray(x, y) = R[11:4](x, y) \quad (1)$$

圖 4 為小番茄經灰階處理後所得到的影像。經影像灰階所產生 8bit 的灰階資料，以簡化後續分析的複雜度。

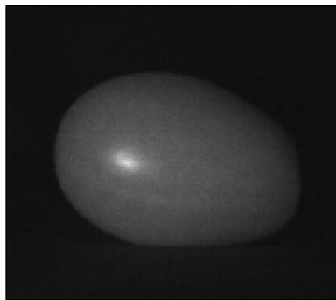


圖 4 灰階影像

3.2.2 影像二值化

因為所得到的灰階影像除了光譜反光點與背景雜訊，故須利用影像二值化將背景與雜訊做濾除的動作。圖 5 為影像二值化所得到的結果。

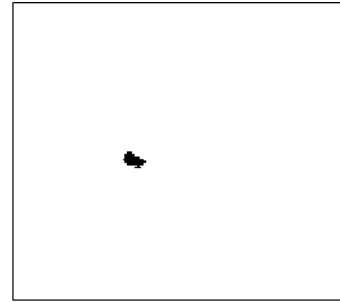


圖 5 影像二值化

二值化就是設定一個門檻值(T)，只要像素值超過門檻值(T)就讓該點(P_i)設為 1，即表示像素為黑色。當低於門檻值(T)就讓該點(P_i)設為 0，即表示像素為白色，Eq. 2 為運算公式：

$$P_i = \begin{cases} 0, & Gray(x, y) < T \\ 1, & Gray(x, y) \geq T \end{cases} \quad (2)$$

在門檻值的判斷上，根據圖 6 灰階化的光譜影像值分析的曲面圖可知，光譜反光點從光點強度 90 以上就有很明顯的強度變化，所以將門檻值(T)設定為 120 就能將背景雜訊隔開來。

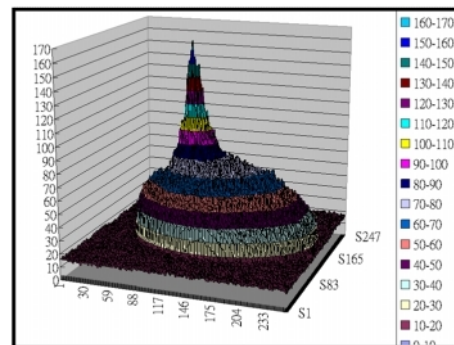


圖 6 光譜影像值分析

3.2.3 影像邊緣偵測

影像邊緣偵測的目的是為了得到光譜反光點的中心數據，所進行的前置處理，而圖 7 為處理後所得到的結果。

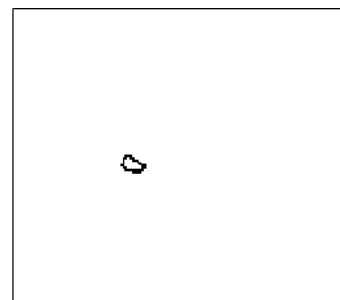


圖 7 影像邊緣化

一般使用 3X3 的垂直遮罩矩陣與水平遮罩矩陣來做遮罩，但經二值化處理後只需處理黑色與白色兩種像素，所以在這邊只要考慮每一點像素周圍相鄰的八個點，圖 8 即為 3x3 Pixel 矩陣資料。

P ₁	P ₂	P ₃
P ₄	P ₅	P ₆
P ₇	P ₈	P ₉

圖 8 3x3 Pixel 矩陣資料

而根據 Eq. 3 之公式[7]計算即可得到邊緣化的結果。

$$G(P_5) = P_5 \cap (\overline{P_1} \cup \overline{P_2} \cup \overline{P_3} \cup \overline{P_4} \cup \overline{P_6} \cup \overline{P_7} \cup \overline{P_8} \cup \overline{P_9}) \quad (3)$$

其中 $G(P_5)$ 代表目前光譜影像裡其中一個像素，從圖 5 中即可知道圖中的 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_6 、 P_7 、 P_8 、 P_9 為該點相鄰的八個點，而在先前二值化的處理可知，黑色代表著近紅外線光點的區塊，白色代表著背景色，所以只要該點為黑色且相鄰的八個點中的任意點為白色就認定該點為邊緣，其餘都予以去除。

3.2.4 中心點搜尋

中心點搜尋主要是標示出中心點座標的位置，進而對座標位置的資料做處理，而處理後所得到的結果如圖 9 所示，物體邊緣線的中心點即為中心點座標。

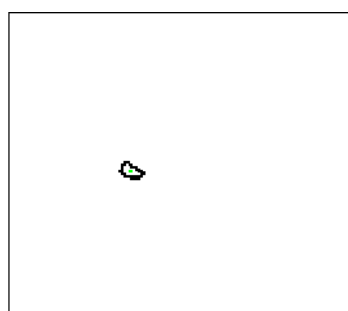


圖 9 光譜反光點中心

因為光譜反光點為不規則的形體，所以需使用 Eq. 4 與 Eq. 5[7]實現之：

$$X_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4)$$

$$Y_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (5)$$

搜尋光譜反光點中心的方法，是將被認定為邊緣的像素座標 (x_i, y_i) 全部加總起來，假設全部的被認定為邊緣的座標有 N 個，而因為需做浮點數運算，所以將總 (x_i, y_i) 座標與 N 送至 NIOS II 處理後方可得到正確的中心點座標 (X_{av}, Y_{av}) 。

3.2.5 中心點座標值平均

中心點座標值平均目的是取得較穩定且正確的數據，所以對中心點座標 (X_{av}, Y_{av}) 的光譜反光點數據 (I_i) 都是取 256 次掃描之平均值，Eq. 6 為光譜反射平均數據 (I_{av}) 之公式：

$$I_{av} = \frac{1}{256} \sum_{i=1}^{256} I_i \quad (6)$$

4. 校正方程式

校正方程式的建立如圖 10 所示，先將影像處理所得到的資料傳送至 PC 做資料運算，再將運算後的資料傳至統計軟體 SAS 做 MLR 分析，再將所得到的最佳的校正方程式套入 NIOS II 內，套入完成後系統即可獨力運作近紅外線光譜儀。

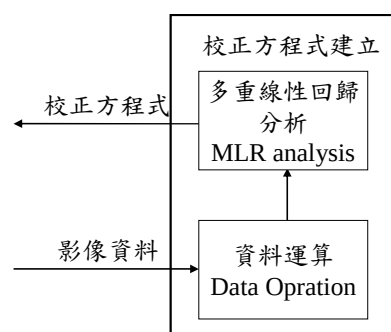


圖 10 校正方程式建立方塊圖

在評估判定校正方程式的優劣時，可利用判定係數 (r^2) 、標準校正誤差 (SEC) 與標準預測誤差 (SEP) 作為評估樣本分析能力的指標，故當 r^2 、SEC 與 SEP 值越小時，所得到的校正方程式就越準確，而 SEC 與 SEP 的公式如 Eq. 7 與 Eq. 8 所示：

$$SEC = \sqrt{\frac{1}{n-m-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_c)^2} \quad (7)$$

$$SEP = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_p)^2} \quad (8)$$

其中 n 為樣品的個數， m 為 MLR 分析時所使用的波長數， $\hat{y}_c$ 為校正組的預測值， $\hat{y}_p$ 為驗證組的預測值， y_i 為實際量測到的化學成分分析值。

而近紅外線光譜在做定量分析時都是使用比爾定律(Beer's law)分析透光率(transmittance)得到吸收光譜值(A_λ)。但[8]中提到反射率(R)與透光率(transmittance)扮演相同的腳色，因此可將透光率(transmittance)使用反射率(R)取代之，Eq. 9 為修改後的比爾定律(Beer's law)之方程式：

$$A_\lambda = \log\left(\frac{1}{R_\lambda}\right) \quad (9)$$

$$R_\lambda = \frac{I_{av} - I_D}{I_s - I_D} \quad (10)$$

其 R_λ 的公式如 Eq. 10 所示，其中 I_D 會影響數據分析的正確性，故須將 I_D 去除才能得到正確的分析數值，再將所得的 R_λ 代入 Eq. 9 之方程式轉換成 A_λ ，之後將所得的 A_λ 利用統計軟體 SAS 進行 MLR 分析與 excel 統體運算，找出擁有最大 r^2 與最小 SEC 的波段組合，並將由此波段所組合的校正方程式作為 SOPC 內的 NIOS II 校正方程式，當 NIOS II 套入校正方程式後即可使系統進行獨立的近紅外線檢測分析。

5. 實驗結果分析與系統功能驗證

以建立好的系統對 89 顆聖女品種的小番茄分別取得各濾片波長的 89 筆相對應的 I_{av} ，傳至 PC 做校正方程式建立之動作，利用統計軟體 SAS 進行 MLR 分析與 excel 統體之運算，從表 2 可知由 950nm、855nm、800nm、766nm 所組成的校正方程式有最大的 $r^2=0.567$ 與最小的 $SEC=0.785$ ，其四組所建立的校正方程式擁有較佳的預測結果，所組成的校正方程式如 Eq. 11 所示，Brix 為糖度的單位。而圖 11 為校正組的小番茄糖度回歸線圖。

$$\begin{aligned} \text{Brix} = & 5.04411 \\ & + 20.14632A_{950\text{nm}} \\ & + 34.42791A_{855\text{nm}} \\ & + 29.08438A_{800\text{nm}} \\ & - 74.47093A_{766\text{nm}} \end{aligned} \quad (11)$$

當校正方程式建立完成後將確認 NIOS II 所套入的校正方程式與系統是否能獨立運作，再準備同樣是聖母品種的小番茄作為成果驗證。預測的糖度由七段顯示器即時顯示，並紀錄七段顯示器的糖度值，利用 99 顆聖母品種的小番茄作為驗證組，從而確認校正方程式的正確與否。

圖 12 為驗證組的小番茄糖度回歸線圖，而驗證組所得到的 r^2 為 0.501、SEP 為 0.521，以此可證明校正組的校正方程式是能應用在系統上的。

表 2 光譜校正與預測結果

波長個數	最佳波長 (nm)	判定係數 (r^2)	校正標準誤差 (SEC)
1	950	0.428	0.888
2	950、766	0.474	0.857
3	950、800、766	0.545	0.800
4	950、855、800、766	0.567	0.785

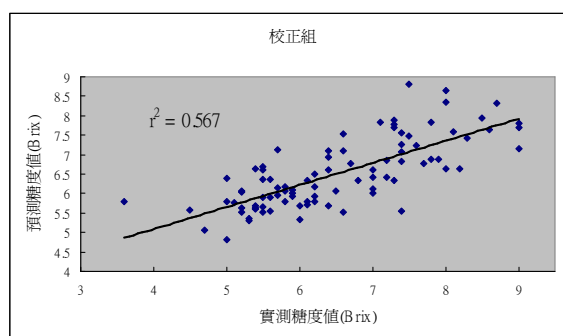


圖 11 校正組小番茄糖度回歸線

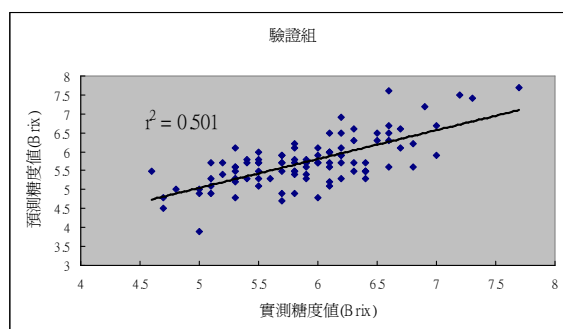


圖 12 驗證組小番茄糖度回歸線

6. 結論

本論文研製以 SOPC 為基礎的近紅外線光譜儀為主軸，並以小番茄糖度的檢測驗證系統的可行性。在小番茄糖度的預測能力上，與[3]中同樣是檢測小番茄糖度結果做比較。

本論文所得的校正結果與驗證結果由 950nm、855nm、800nm、766nm 四個波段所組成，校正組校正樣本 89 顆所得 $r^2=0.567$ 、 $SEC=0.785$ ，驗證組預測樣本 99 顆所得 $r^2=0.501$ 、 $SEC=0.524$ ，與[3]中利用自製單元與 NIRS 6500 近紅外線光譜分析儀的校正結果由 951nm、742nm、863nm、726nm 及 973nm 五個波段所組成，自製的檢測單元校正樣本 89 顆所得 $r^2=0.461$ 、 $SEC=0.622$ ，NIRS 6500 近紅外線光譜分析儀校正樣本所得 $r^2=0.292$ 、 $SEC=1.037$ 。本論文的結果與[3]中的結果相比較後，本論文的結果有較佳預測能力。

故本論文所研製以 SOPC 為基礎的近紅外線光譜儀，具有檢測近紅外線光譜的能力，並驗證 CMOS 攝像頭能作為近紅外線檢測元件，且系統能獨立完成近紅外線即時檢測。

而在近紅外線檢測上也有使用其他水果當檢測樣本，如芭樂、橘子、蘋果、葡萄與柳丁，不過數據尚未齊全所以並未顯示出來。未來除了在農業糖度檢測的發展之外，也希望能在工業、醫學、食品等領域有所應用。

參考文獻

- [1] 張世英、羅蘇秦，“近紅外光譜儀器之分析技術及其應用，” *科儀新知*，第二十卷第五期，1999。
- [2] 林連雄，近紅外線影像及發光二極體檢測系統偵測白米內部品質之研究，國立台灣大學生物產業機電工程學研究所，博士論文，2007。
- [3] 蔡兆胤，近紅外線檢測之應用—小番茄糖度檢測單元之研製，國立屏東科技大學機械工程系，碩士論文，2000。
- [4] 王信智、曾國珍、鄭經偉、鍾昭台，“近紅外線光譜技術應用於蓮霧糖度檢測之研究，” *農業機械學刊*，第 13 卷，第 4 期，2004。
- [5] 陳君彥，“色彩量測，” *科儀新知*，第二十二卷第二期，2000。
- [6] 卓敬凱，線性陣列式檢波器應用於水果糖度檢測之研製，國立屏東科技大學機械工程系，碩士論文，2002。
- [7] 林汝喆，麻將牌辨識系統，國立中央大學電機工程研究所，碩士論文，2001。
- [8] 林群富、陳志文、黃泰綸，“近紅外光譜儀之開發及應用，” *科儀新知*，第二十九卷第二期，2007。