

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

以多頻譜為基礎之色彩量測系統(2/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC 93-2213-E-216-003

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：中華大學資訊工程學系

計畫主持人：鄭芳炫

計畫參與人：張政暉，楊志強，楊士賢

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 94 年 10 月 6 日

摘要

多頻譜影像擷取系統的架構早在數年前已經被出來，當時多頻譜影像擷取系統的影像擷取方式是利用一台單色的取樣設備並搭配一組吸收式的濾片組將物體的頻譜正確地重建，然而 Munsell Color Science Laboratory (MCSL) 認為利用一般三原色的數位相機並搭配著一組濾片組也可以提供另一個多頻譜影像擷取的方法。多頻譜影像擷取系統其目的是將一個物體的 Digital Counts (Dc) 值轉換成其頻譜值，換句話說，一張影像上的每一個像素的頻譜值都可以透過這一些 Dc 值轉換求得，然而相關研究中所使用到的影像擷取系統不單單複雜度高，建置成本也高，但無庸置疑的，這一些複雜的系統可以提供相當不錯的色彩品質。然而，基於同時考量色彩品質與系統複雜度，本計畫提出了一個新的架構，將影像擷取系統的複雜度降低，並使得色彩品質可以達到 $\Delta E_{a^*b^*} = 3.0623$ 。

本計畫中，我們試著利用 Kodak Pro 14n 一般的三原色數位相機去取代傳統多頻譜影像擷取系統內複雜的取樣設備。除此之外，本計畫不僅僅提出了新的方法改善傳統影像擷取設備的複雜度，本計畫也透過實驗證明其可行性。

Abstract

The multispectral image acquisition system had been proposed several years ago. It usually uses a monochromatic imaging device that combines with a set of absorption filters to reconstruct the object's spectra correctly. However, the Munsell Color Science Laboratory (MCSL) believes that a conventional trichromatic digital camera combined with absorption filters can provide an alternative way to capture multispectral images. In other words, the spectral reflectance function of each pixel of the image can be calculated by the digital camera counts. Using a conventional trichromatic digital camera combined with absorption filters not only makes the imaging device of the multispectral image acquisition system easier but also decreases the cost.

In this project, we try to use Kodak Pro 14n to replace complex imaging device of the multispectral image acquisition system. Besides, we not only propose a low complexity multispectral image acquisition system but also do the experiment to prove this proposed system is feasible.

Keywords: multispectral analysis, principal components analysis, multiple linear regression

目錄

1. 序論.....	1
2. 相關研究.....	2
3. 理論基礎探討	3
3.1. 色度學.....	3
3.1.1. RGB 色彩空間.....	3
3.1.2. CIE 1931 XYZ Color Space	4
3.1.3. CIE 1976 $L^*a^*b^*$ Color Space	4
3.1.4. 色差公式.....	5
3.2. 主軸分析.....	5
3.3. 複線性迴歸.....	6
4. 系統架構.....	7
4.1. 低複雜度多頻譜擷取系統架構.....	7
4.2. 多頻譜分析.....	8
4.2.1. 頻譜分析.....	8
4.2.2. Gamma 校正.....	10
4.2.3. 多線性回歸.....	10
4.3. 多頻譜重建.....	11
5. 實驗結果.....	12
5.1. 實驗環境.....	12
5.2. 實驗流程.....	14
5.2.1. 頻譜函數的量測.....	14
5.2.2. Kodak Pro 14n 數位相機.....	18
5.2.3. LUT 校正.....	23
5.2.4. 結合濾片.....	24
5.3. 實驗結果.....	25
5.4. 實驗分析與討論.....	25
6. 結論.....	26
7. 參考文獻.....	27

1. 序論

多頻譜取樣的方法最早是在 1993 年 National Gallery, UK 的 VASARI system 中所被提出來的，在 VASARI system 中利用一台掃描器搭配著七個獨立的濾片組合而成七個頻道數目的取樣設備去擷取藝術作品影像，而掃描器上的感測器是一個單色且高解析度的 CCD。取得到影像後，接著透過一些適當的訊號處理將這些擷取到的影像儲存紀錄下來。由於 National Gallery 非常成功將其圖書館內的藝術影像實現數位化典藏，因此這樣的方法受到一些研究單位的重視。其中比較有名的是 Munsell Color Science Laboratory (MCSL)。由於 VASARI System 需要發費大量的時間在掃描影像上，因此 MCSL 提出了利用單色的 CCD 數位取樣設備同樣搭配七個獨立的濾片去改善 VASARI system 中的取樣設備，在同樣的訊號處理下，MCSL 實驗證明了這樣的方法也可以達到不錯的效果，並降低了取樣時所需要花費的時間。另外，MCSL 又認為不一定要利用單色的數位取樣設備，若是三原色的數位取樣設備應該也是可以達到不錯的效果，於是我們基於這樣的一個理念，提出了我們的改進的方式。

在本篇論文中，我們利用 Kodak Pro 14n 三原色的數位取樣設備當成是多頻譜影像擷取系統中的取樣設備，並且直接把感測到值當成是 Digital Counts(Dc 值)；這樣的方法跟以往的必須先求得相機的感測函數、光源的能量分布、影像的反射函數以及濾片頻譜值，再由這四個函數的積分而得到 Dc 值。直接把感測到的值當成是 Dc 值這樣的方法有效的解決了系統的複雜度。我們知道多頻譜影像取樣系統的目的在於，當輸入一個影像的 Dc 值後，透過此系統的轉換可以得到該影像的頻譜值，將此系統特性化並了解 Dc 值與頻譜值之間的關係之前，必須要先得到 Dc 值以及頻譜值。Dc 值在本實驗中可以由 Kodak Pro 14n 拍攝得到，而頻譜值則是又光度計所量測得到。然而擁有龐大資料量的頻譜值將會使得特性化的轉換模型變得很龐大，因此除了在 Dc 值擷取上的改善，我們亦也在頻譜分析上提出了改善，最後利用複線性找到此轉換模型。由於是利用線性迴歸的方法找到轉換矩陣的模型，我們在 Kodak Pro 14 取得 Dc 值後，又用了三種不同的非線性校正方法來修正 Kodak Pro 14n 的非線性特性。

2. 相關研究

在[1]我們知道 VASARI system 非常成功將其圖書館內的藝術影像實現數位化典藏。這樣的成功案例使得 MCSL 也對這樣的系統感到了興趣並針對其架構提出了改進方法 [2] [10]，並且在色彩品質上得到了不錯的品質。然而幾個研究當中從掃描影像擷取方式轉換成直接用攝影術的方式，僅僅只提昇了影像擷取的效率，在 Dc 值方面仍必須去量測光源的光譜能量頻譜值、影像物體的反射值、濾片的頻譜值以及去估測相機的感測函數，並藉由這四個參數的積分值得到 Dc 值，使得此系統中仍擁有相當程度的運算量，這樣的系統複雜度造成其發展上較不容易。另外在頻譜值分析當中，雖然透過了主成分分析的方法有效降低了頻譜值的資料量，但仍然有一定資料量使得在求得 Dc 與頻譜值之間的轉換函數仍有一定程度的運算量。然而雖然有著一定程度的運算量，但是這樣的方式求得的色彩品質卻是可以達到接近於量測儀器的標準，於是我們了解到要達到相當程度的色彩品質則必須依靠這樣複雜的系統，但是不是這樣的系統架構就是唯一，在複雜度與色彩品質互斥的兩者之間我們試著去找尋一個低複雜度且有還不錯色彩品質的一個系統，基於這一個理由我們提出新的架構改善這樣的問題，相關方法將在下一個章節中被探討。

3. 理論基礎之探討

在介紹我們所提出的系統架構之前，我們先再這一個章節介紹所會使用到的色度空間以及數學方法

3.1. 色度學

RGB Color Space、CIE 1931 XYZ Color Space、CIE 1976 $L^*a^*b^*$ Color Space 這三個常見的色度空間將在本章節被介紹。

3.1.1. RGB 色彩空間

CIE (Commission Internationale de l'Eclairage – the International Commission on Illumination) 在 1931 年定義下列三個主要顏色的波長：紅 = 700 nm, 綠 = 546.1 nm, 藍 = 435.8 nm。色匹配函數為匹配單位能量的每個波長所需要的三色光的刺激量。CIE 以 W. D. Wright (1928~1929) and J. Guild (1931) 提出的積分法取得 $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ 的色匹配函數。如圖 3.1。

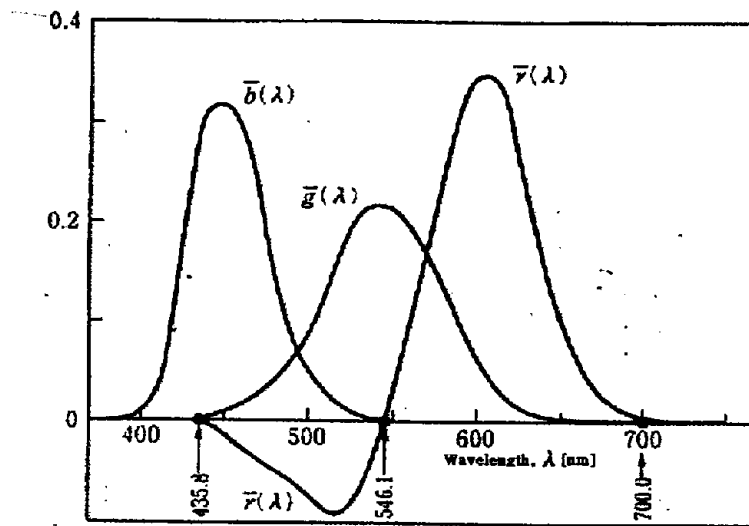


圖 3.1 CIE $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ 色匹配函數

根據這些函數就可以計算給定的光譜能量分佈曲線。光譜輻射能量分佈函數 $L(\lambda)$ 的三刺激值可以表示成

$$\begin{aligned} R &= \int L(\lambda)\bar{r}(\lambda)d\lambda \\ G &= \int L(\lambda)\bar{g}(\lambda)d\lambda \\ B &= \int L(\lambda)\bar{b}(\lambda)d\lambda \end{aligned} \quad (3.1)$$

3.1.2. CIE 1931 XYZ Color Space

為了改良 RGB color Space 會在計算中出現負值的缺點，CIE 重新定義了新的三個主要顏色 $[X], [Y], [Z]$ ，成為 CIE1931 - (X , Y , Z) 系統，Figure 3.2 為 CIE 1931 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 色匹配函數。光譜輻射能量分佈函數 $L(\lambda)$ 的三刺激值可以表示成

$$\begin{aligned} X &= \int L(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\ Y &= \int L(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\ Z &= \int L(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \end{aligned} \quad (3.2)$$

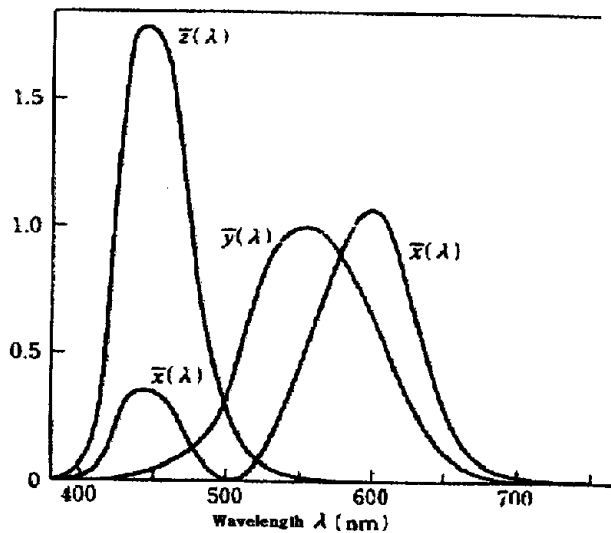


圖 3.2 CIE 1931 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 色匹配函數.

然而 XYZ 的值取決於輸入光源的能量大小，可以標準化如下

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z} \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z} \end{cases} \quad (3.3)$$

3.1.3. CIE 1976 $L^*a^*b^*$ Color Space

有時，色彩視覺需要一個均勻的色彩空間。因此，CIE 定義了 $L^*a^*b^*$ 色彩空間。XYZ 與 $L^*a^*b^*$ 的轉換表示如下：

$$\begin{aligned}
L &= 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \\
a^* &= 500\left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right] \\
b^* &= 200\left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right]
\end{aligned} \tag{3.4}$$

其中

$$f(\alpha) = \begin{cases} \alpha^{\frac{1}{3}}, & \alpha \geq 0.008856 \\ 7.787\alpha + \frac{16}{116}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$X_n Y_n Z_n$: 參考白的三刺激值

3.1.4. 色差公式

一般用來比較量測的色差公式 $\Delta E_{a^*b^*}$ 定義如下：

$$\Delta E_{a^*b^*} = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \tag{3.5}$$

3.2. 主軸分析

影像的反射頻譜函數可以用差補技術來估測，像是 cubic spline [7], modified discrete sine transformation (MDST) [6], 或 spectral reconstruction methods based on statistical analysis such as principal components analysis (PCA) [14-16]。Burns 和 Berns 比較使用差補的方法和主軸分析，並發現主軸分析比差補還要精確 [17]，因此大部分的研究都利用主軸分析來分析頻譜資料，透過主軸分析找出最重要的幾個成分，而原來頻譜的資料便可藉由這幾個最重要的成份模擬而成。

主軸分析是基於隨機變數的統計表示法，假設我們有一群隨機的向量 X

$$X = (x_1, \dots, x_n)^T \tag{3.6}$$

其平均向量為

$$\mu_X = E\{X\} \tag{3.7}$$

其協方差矩陣 (covariance matrix)

$$C_{ij} = E\{(x_i - \mu_{x_i})(x_j - \mu_{x_j})\} \tag{3.8}$$

其中 $i=1, \dots, n$ and $j=1, \dots, n$ 。公式 3.8 表示了隨機變數組件 x_i 和 x_j 協方差。

有了協方差矩陣就可以經由求其特徵向量和特徵值來計算出正交基底。特徵向量 e_i 和特徵值 λ_i 為公式 3.9 的解

$$C_{ij}e_i = \lambda_i e_i \quad (3.9)$$

特徵值 λ_i 可經由特徵方程式求得，如下：

$$|C_{ij} - \lambda I| \quad (3.10)$$

符合的特徵向量即為主軸。

3.3. 複線性迴歸

我們知道多頻譜影像取樣系統的目的在於，當輸入一個影像的 Dc 值後，透過此系統的轉換可以得到該影像的頻譜值，將此系統特性化並了解 Dc 值與頻譜值之間的關係之前，必須要先得到 Dc 值以及頻譜值。當擁有 Dc 值與頻譜值後，我們利用複線性去找到此轉換模型。

4. 系統架構

在這一個章節中將對所提出的系統架構做介紹，主要可以分為多頻譜分析與多頻譜重建。本計畫的目的不只要用一般的三原色數位相機來取代多頻譜影像擷取系統還要用線性轉換矩陣來代表數位相機的 DC 值與估測特徵空間分析重建頻譜的係數之間的關係

4.1. 低複雜度多頻譜擷取系統架構

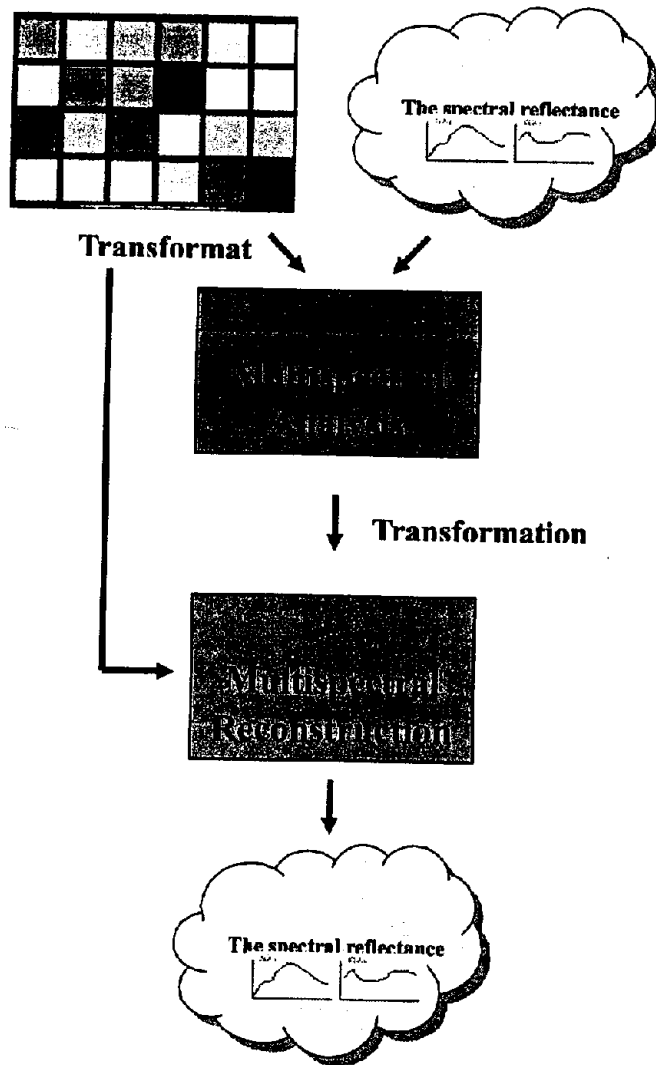


圖 4.1 低複雜度多頻譜擷取系統架構

本系統的系統架構圖如圖 4.1 所示。首先表達系統的特性。系統的目的為取得相機 DC 值的頻譜。也就是說，我們需要找到相機 DC 值與頻譜之間的線性轉換關係。系統的特色可以分為兩部分，多頻譜分析與多頻譜重建。在多頻譜分析中，將得到線性轉換矩陣，接著用來估測頻譜。

4.2. 多頻譜分析

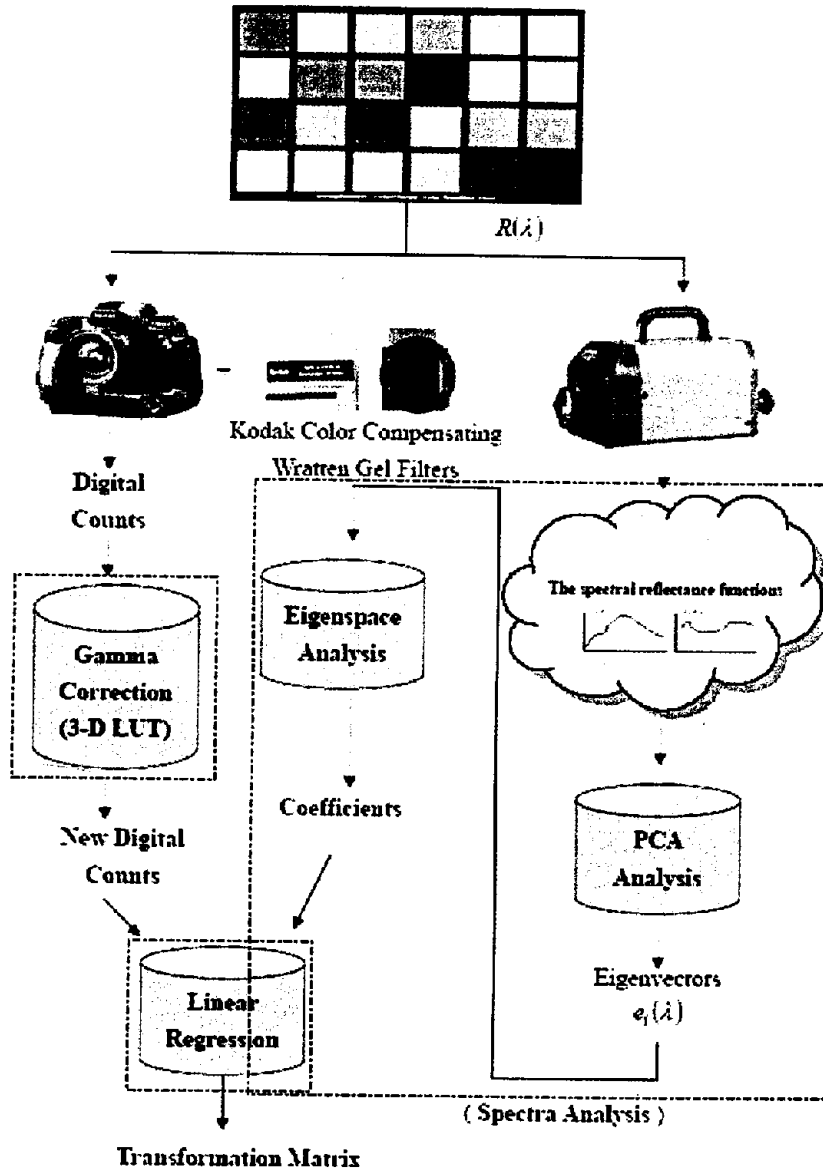


圖 4.2 多頻譜分析的流程圖

由圖 4.2 可看出系統流程可分為三部分：頻譜分析、Gamma 校正、多線性回歸

4.2.1. 頻譜分析

我們假設有 24 組用分光光譜儀量測得來的頻譜數據，每組數據有 101 個頻譜樣本。用向量與矩陣表示如下：

$$\begin{aligned}
Sr &= (Sr_1(\lambda), Sr_2(\lambda), \dots, Sr_{24}(\lambda))^T \\
&= \begin{pmatrix} Sr_1(\lambda_1) & Sr_1(\lambda_2) & \dots & Sr_1(\lambda_{101}) \\ Sr_2(\lambda_1) & Sr_2(\lambda_2) & & Sr_2(\lambda_{101}) \\ \vdots & & & \\ Sr_{24}(\lambda_1) & Sr_{24}(\lambda_2) & \dots & Sr_{24}(\lambda_{101}) \end{pmatrix} \quad (4.1)
\end{aligned}$$

其中， λ_i 為頻譜樣本且 $i=1 \sim 24$ 。

有了這些頻譜數據，接著用主軸分析法來分析。經由主軸分析，我們可以得到一組主軸組件： $(e_1(\lambda), e_2(\lambda), \dots, e_{101}(\lambda))^T$ ，稱為基底函數，這些基底函數的線性組合可以構成最小誤差的原始頻譜數據。所以每一組原始頻譜數據 $Sr_i(\lambda)$ 可以用基底函數近似如下：

$$\begin{aligned}
Sr_i(\lambda) &= \alpha 1_i e_1(\lambda) + \alpha 2_i e_2(\lambda) + \dots + \alpha 101_i e_{101}(\lambda) \\
&= (\alpha 1_i \quad \alpha 2_i \quad \dots \quad \alpha 101_i) \begin{pmatrix} e_1(\lambda_1) & e_1(\lambda_2) & \dots & e_1(\lambda_{101}) \\ e_2(\lambda_1) & e_2(\lambda_2) & \dots & e_2(\lambda_{101}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ e_{101}(\lambda_1) & e_{101}(\lambda_2) & \dots & e_{101}(\lambda_{101}) \end{pmatrix} \quad (4.2)
\end{aligned}$$

其中 $(\alpha 1_i, \alpha 2_i, \dots, \alpha 101_i)$ 代表對應的係數。這些對應的係數 α 可以經由公式 4.3 來計算

$$\alpha = Sre^{-1} \quad (4.3)$$

其中 $e = (e_1(\lambda), e_2(\lambda), \dots, e_{101}(\lambda))^T$ 代表基底函數。

公式 4.3 展開得到公式 4.4

$$\begin{aligned}
&\begin{pmatrix} \alpha 1_i & \alpha 2_i & \dots & \alpha 101_i \\ \alpha 1_2 & \alpha 2_2 & & \alpha 101_2 \\ \vdots & \vdots & & \\ \alpha 1_{24} & \alpha 2_{24} & \dots & \alpha 101_{24} \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} Sr_1(\lambda_1) & Sr_1(\lambda_2) & \dots & Sr_1(\lambda_{101}) \\ Sr_2(\lambda_1) & Sr_2(\lambda_2) & & Sr_2(\lambda_{101}) \\ \vdots & & & \\ Sr_{24}(\lambda_1) & Sr_{24}(\lambda_2) & \dots & Sr_{24}(\lambda_{101}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1(\lambda_1) & e_1(\lambda_2) & \dots & e_1(\lambda_{101}) \\ e_2(\lambda_1) & e_2(\lambda_2) & \dots & e_2(\lambda_{101}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ e_{101}(\lambda_1) & e_{101}(\lambda_2) & \dots & e_{101}(\lambda_{101}) \end{pmatrix}^{-1} \quad (4.4)
\end{aligned}$$

經由選取前 k 個主軸 $(e_1(\lambda), e_2(\lambda), \dots, e_k(\lambda))^T$ ，每個頻譜 Sr_i 可以近似成

$$\begin{pmatrix} Dc1_1 & Dc2_1 & \dots & Dcn_1 \\ Dc1_2 & Dc2_2 & \dots & Dcn_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Dc1_{24} & Dc2_{24} & \dots & Dcn_{24} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha1_1 & \alpha2_1 & \dots & \alpha k_1 \\ \alpha1_2 & \alpha2_2 & \dots & \alpha k_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \alpha1_{24} & \alpha2_{24} & \dots & \alpha k_{24} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{1n} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \dots & \delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_{k1} & \delta_{k2} & \dots & \delta_{kn} \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

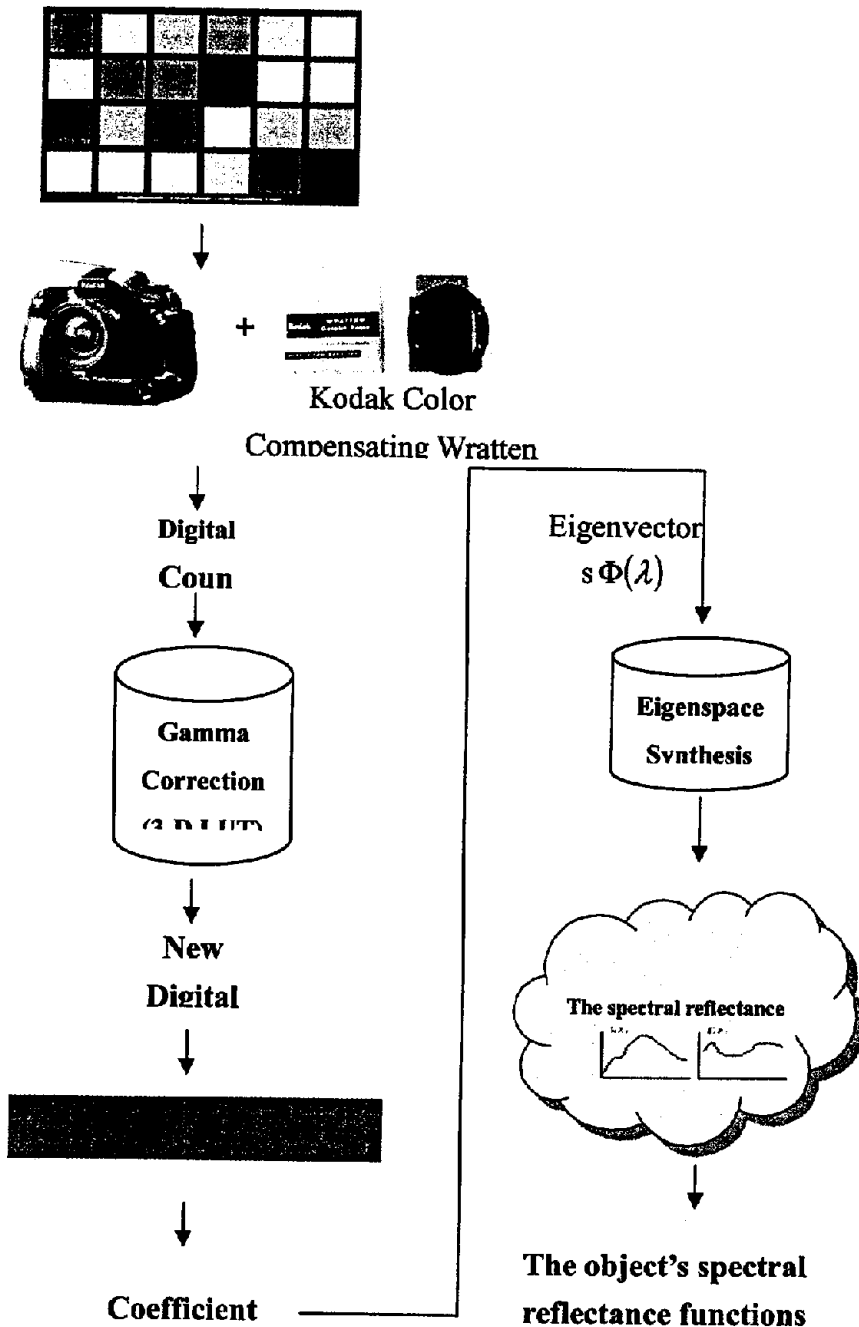
因此，我們可以用多線性回歸求得 n 乘 k 的線性轉換矩陣 M。

4.3. 多頻譜重建

有了線性轉換矩陣，我們可以將 Dc 值轉換成係數 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$ 。頻譜數

據則可以用這些係數和基底函數 $e_k = (e_1(\lambda), e_2(\lambda), \dots, e_k(\lambda))^T$ 代入公式 4.5 求出。多

頻譜重建的流程圖，如下圖：



5. 實驗結果

在本章節當中，我們將介紹實驗的建置與流程，以及拍攝條件與設定值。

5.1. 實驗環境

實驗環境建置的部分，我們使用兩個人造太陽光源系統，其色溫大約為 6500K，如圖 5.1。量測頻譜的儀器為 MINOLTA CS1000A 其量測範圍為 380nm to 780nm，如圖 5.2。

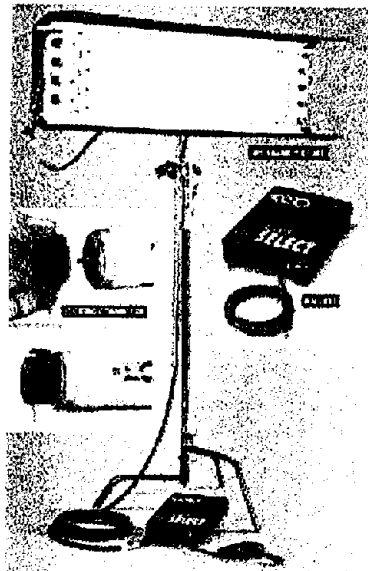


圖 5.1 the 4 Bank system artificial solar illuminant lamps

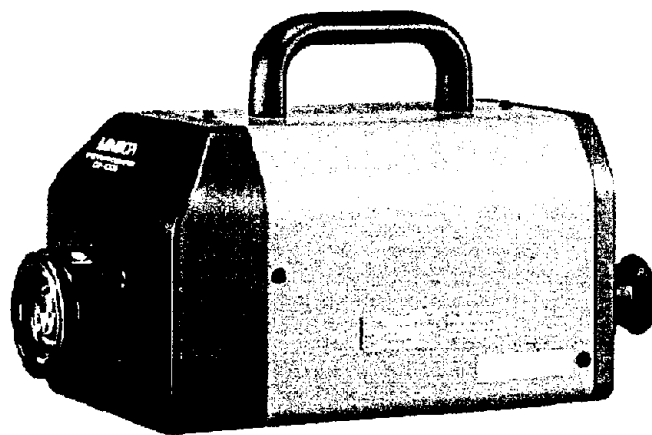


圖 5.2 分光光譜儀：MINOLTA CS1000A

為了量測的一致性，我們使用 X-Y 水平垂直移動軸來輔助量測，作法是將 Macbeth ColorChecker 24 color patches 固定在 X-Y 水平垂直移動軸上方，經由 X-Y 水平垂直移動軸的移動來量測 24 個色塊，如圖 5.3。

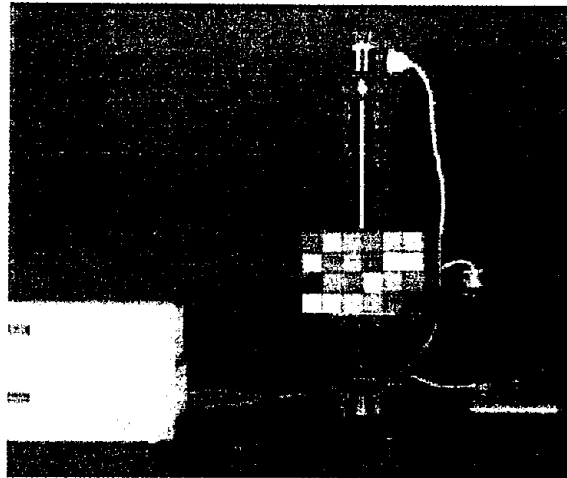


Figure 5.3 the X-Y measuring table

光源也會直接影響數據，故光源與儀器皆須暖機 30 分鐘以後才能開始測量。而環境的設置，如圖 5.4 所示，光源以 45° 的夾角將光線打在量測體上。

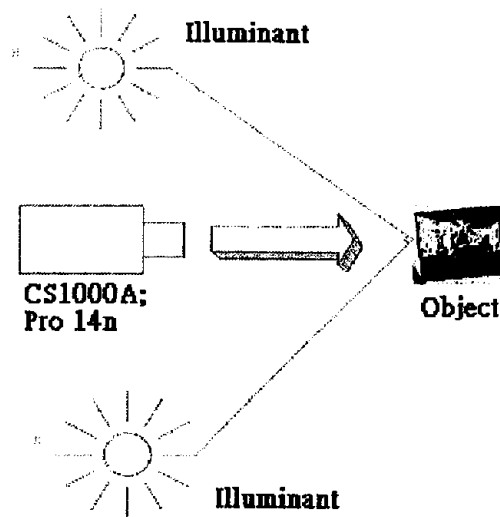


圖5.4 量測環境的設置

用來獲取三色 Dc 值的儀器，我們使用 Kodak Pro 14n 並結合 Nikon LENS SERIES E (Zoom 36~72mm 1:3.5) 的鏡頭，來拍攝 Macbeth ColorChecker。Kodak Pro 14n 的感光元件使用 CMOS trichromatic 並且擁有 4500 * 3000 的高解析度。兩者如圖 5.5 所示。

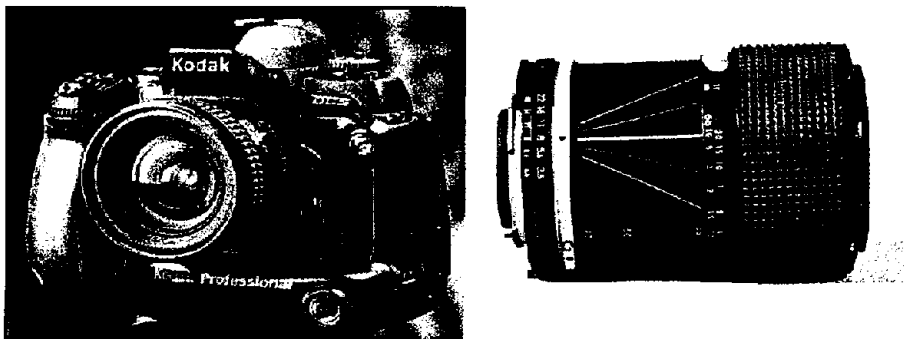


圖5.5 相機 Kodak Pro 14n 與鏡頭 Nikon LENS SERIES E

5.2. 實驗流程

接下來將介紹相關的實驗步驟。其中包括了如何擷取頻譜資料、如何擷取 Dc 值、Dc 值經過校正相機的非線性特性的三個方法得到新的 Dc 值以及增加濾片去增加 Dc 值的資料量，透過第四章中介绍的複線性回歸找到線性轉換矩陣，最後利用此線性轉換矩陣估測影像頻譜值。

最後針對分別增加六個不同的濾片以及三種非線化校正方法，呈現其實驗結果。

5.2.1. 頻譜函數的量測

在這裡，我們量測反射頻譜來當作頻譜反射函數，這兩者的關係如公式 5.1：

$$Sr(\lambda) = L(\lambda)R(\lambda) \quad (5.1)$$

其中 $L(\lambda)$ 為光元的頻譜能量分佈函數、 $R(\lambda)$ 為頻譜反射函數。我們用 MINOLTA CS1000A 來量測 Macbeth ColorChecker 24 color patches 的反射頻譜，且每個區塊量測兩次以減少實驗誤差。

Macbeth ColorChecker 24 color patches 為色彩研究領域普遍使用的一種量測標準，如圖 5.6 所示：

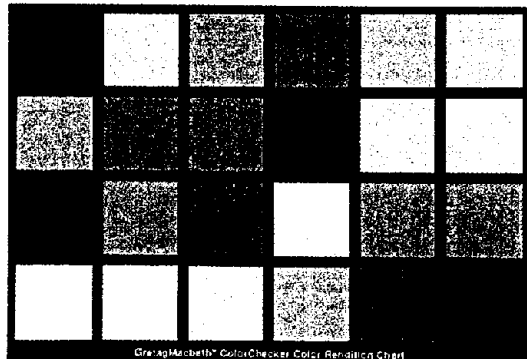


圖 5.6 the 24 patches of Macbeth ColorChecker.

有了這些頻譜反射函數就可以用來作主軸分析。我們計算了累積成長 (cumulative contribution) 和 RMS 錯誤來代表近似的誤差。累積成長的計算方法定義如下：

$$C = \frac{\sum_{i=1}^k \sqrt{v_i}}{\sum_{i=1}^{101} \sqrt{v_i}} \quad (5.2)$$

其中 v_i 代表第 i 個特徵值。設 Macbeth ColorChecker 24 color patches 中的每個色塊頻譜為 $Sr_i(\lambda_c)$ ，而近似的頻譜函數為 $Sr'_i(\lambda_c)$ ，因此 RMS 錯誤可以定義如公式

5.3。

$$E_{RMS} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} \sqrt{\frac{1}{101} \sum_{\tau=1}^{101} (Sr_i(\lambda_\tau) - S_{\tau_i}(\lambda_\tau))^2} \quad (5.3)$$

其中 λ_τ 代表色塊的頻譜函數取樣編號， $\tau = 1 \sim 101$ 。表 5.1 顯示了特徵向量的多寡對累積成長、RMS 錯誤、 $\Delta E_{a^*b^*}$ 所造成的影響。 $\Delta E_{a^*b^*}$ 代表將頻譜轉換到 DC 值之後的色差，轉換的方法是根據 CIE1931 的色匹配函數積分來計算，Dc 值間的色差計算則使用公式 3.5。

表 5.1 特徵向量數量對近似所造成的誤差影響

特徵向量數量	累積成長 (%)	RMS 錯誤	$\Delta E_{a^*b^*}$
1	62.86	0.0000057265	37.66
2	88.60	0.000002.5735	30.52
3	97.80	0.0000011572	6.08
4	99.07	0.0000011569	2.17
5	99.61	0.0000011554	0.67
6	99.77	0.00000071931	0.55
7	99.88	0.00000068045	0.39
8	99.91	0.00000050406	0.27

圖 5.7(a)~(h) 展示了前 K 組特徵值的原始頻譜數據和近似頻譜函數間的比較， $K = 1 \sim 8$ 。如表 5.1，當特徵向量數目到達 6 組時，其累積成長達 99.77%、RMS 錯誤達 0.00000071931。這六組基底函數的圖列於圖 5.8。

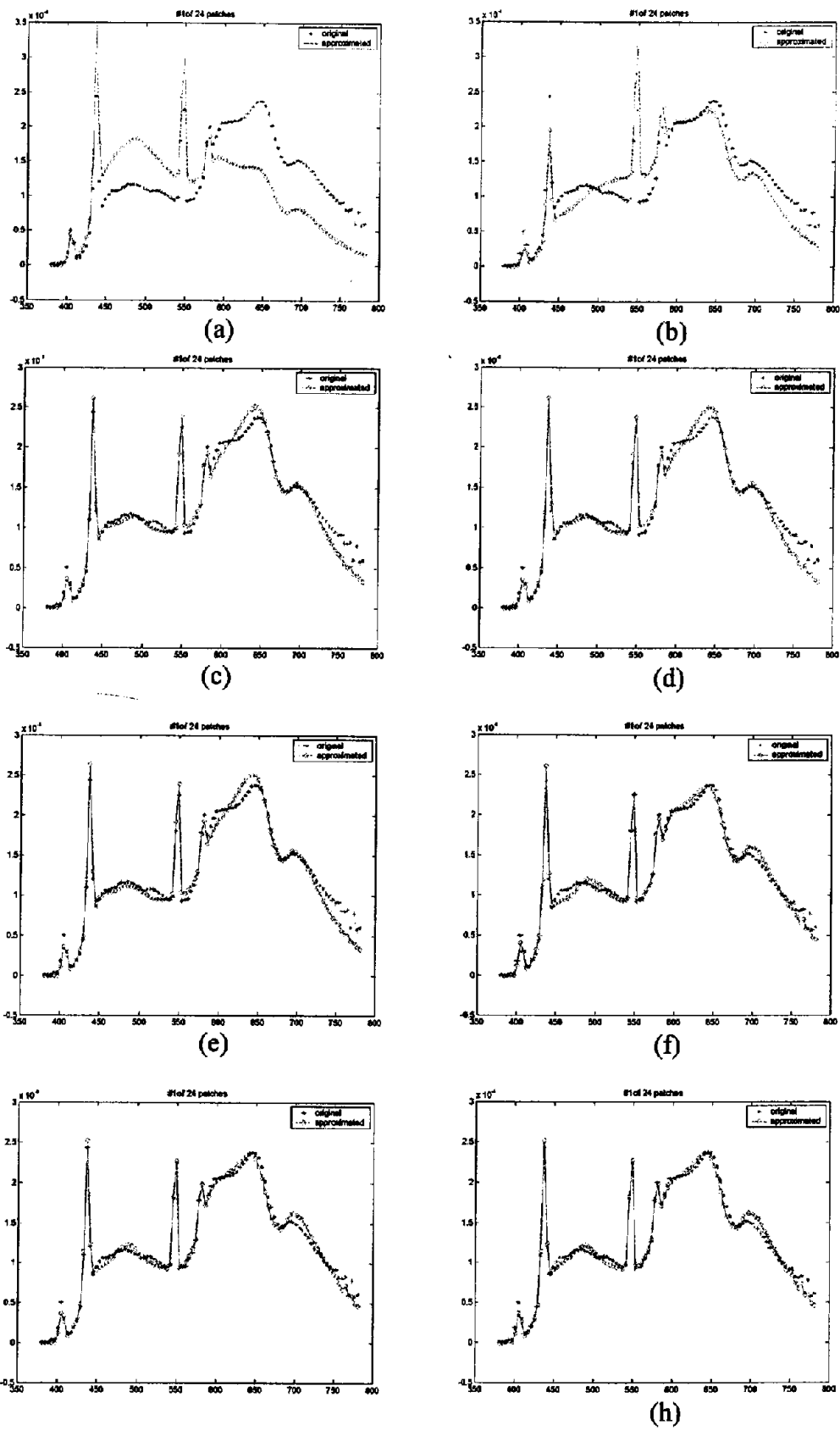


圖 5.7 (a)-(h) 原始頻譜與近似頻譜的比較

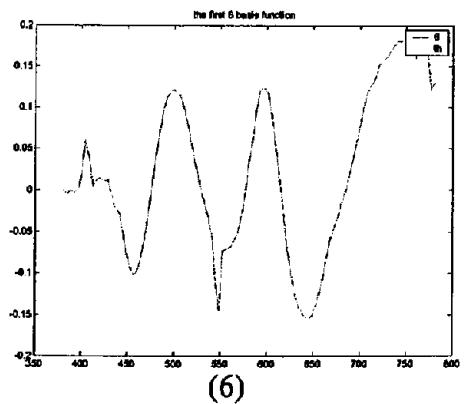
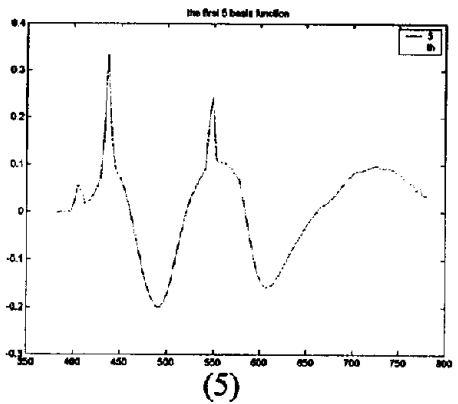
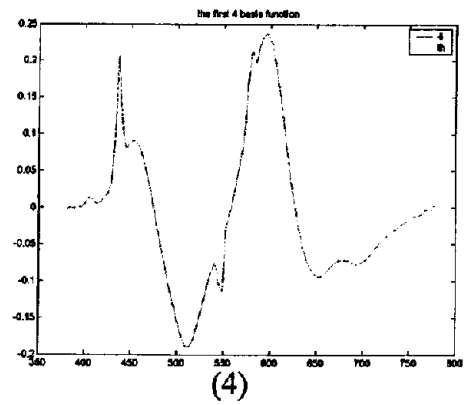
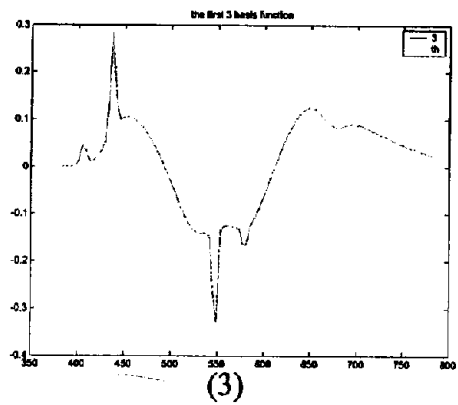
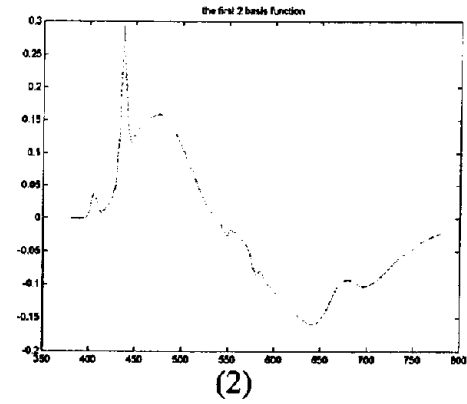
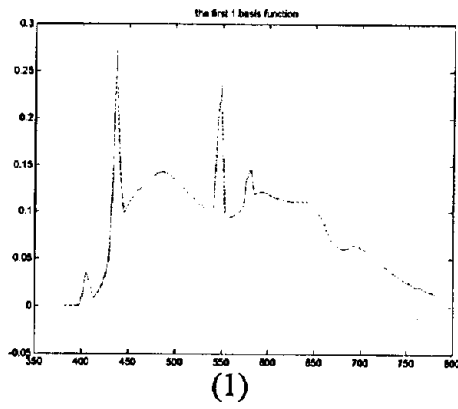


圖 5.8 (1)-(6) 前六個基底函數

有了這些基底函數就可以用公式 4.6 來計算出每個頻譜的係數 $e_1(\lambda) \sim e_6(\lambda)$ ，表 5.2 列出了所有色塊的頻譜係數。近似的頻譜和原始頻譜的比較則列於圖 5.9。

表 5.2 Macbeth ColorChecker 24 color patches 的係數

Patch (#)	$e_1(\lambda)$	$e_2(\lambda)$	$e_3(\lambda)$	$e_4(\lambda)$	$e_5(\lambda)$	$e_6(\lambda)$
#1	0.0013	-0.0005	0.0002	0.0000024	0.0000059	0.0000913
#2	0.0048	-0.0013	0.0007	-0.0001385	-0.000176	0.0002476
#3	0.0032	0.0013	0.0006	0.0000439	0.000078	0.0001321
#4	0.0014	-0.0002	-0.0003	-0.0001138	0.0001893	-0.0000214
#5	0.0043	0.0011	0.0012	0.0000585	0.0002707	0.0001251
#6	0.0051	0.0015	-0.0006	-0.0006006	0.0000791	0.0001465
#7	0.0035	-0.0028	0.0005	0.0004669	-0.0002523	0.0002387
#8	0.0029	0.0016	0.0012	0.0002796	0.0003707	0.0001965
#9	0.0033	-0.0021	0.0016	-0.0001657	-0.0002592	0.000165
#10	0.0015	-0.0001	0.001	-0.000088	0.0006334	0.0004849
#11	0.0043	-0.0012	-0.0016	-0.0005359	0.0004111	0.0001574
#12	0.0045	-0.0031	-0.0003	0.000664	0.0000715	0.0001876
#13	0.0018	0.0014	0.0009	0.0003933	0.0001585	-0.0001197
#14	0.0022	0.0001	-0.0011	-0.0005297	0.0000735	0.0001443
#15	0.0026	-0.0028	0.0021	-0.0009671	0.0000911	-0.0000117
#16	0.0061	-0.0037	-0.001	-0.0001689	0.0002641	0.0000136
#17	0.0043	-0.0015	0.0027	-0.0004031	0.0003634	0.000032
#18	0.0036	0.0022	0.0004	-0.0005362	-0.0005008	0.0002795
#19	0.0125	0.0007	0.0007	-0.0000355	0.0001118	0.0000935
#20	0.0084	0.0007	0.0005	0.000024	0.0001139	0.0000442
#21	0.0052	0.0004	0.0003	0.0000508	0.0000608	0.0000134
#22	0.0029	0.0003	0.0002	0.0000299	0.000037	0.0000014
#23	0.0013	0.0001	0.0001	0.0000166	0.0000222	0.0000007
#24	0.0004	0.0001	0.0001	0.0000014	0.0000103	0.0000074

5.2.2. Kodak Pro 14n 數位相機

Kodak Pro 14n 數位相機的相關數據列於表 5.4。

表 5.4 Kodak Pro 14n 的設定

Firmware Version	4.2.2
Resolution	4500 by 3000 (13.5MP)
ISO Speed	80
Aperture	F3.5
Shutter	1/30

Kodak Pro 14n 數位相機拍攝 Macbeth ColorChecker 24 color patches 的結果列於下表，下表的數據為沒有結合濾片時所拍攝的結果。

表 5.5 數位相機拍攝所得的 Dc 值

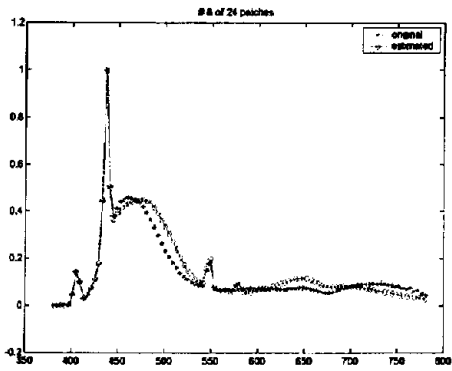
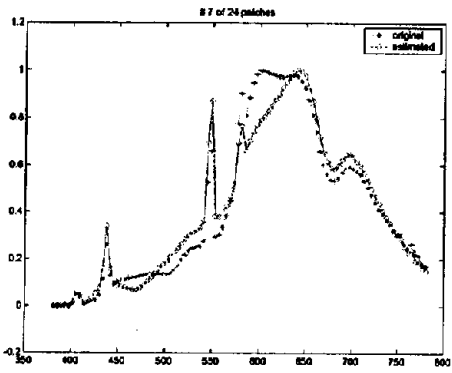
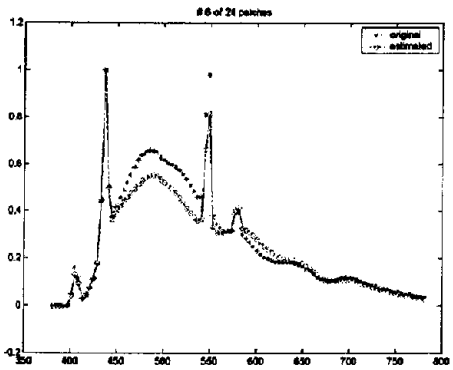
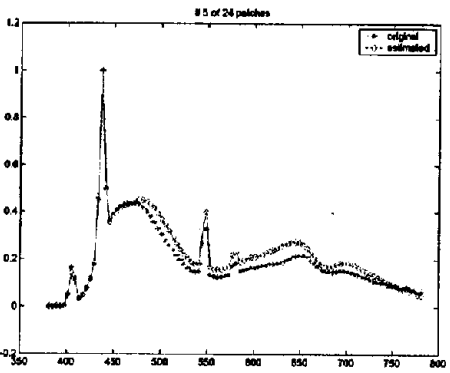
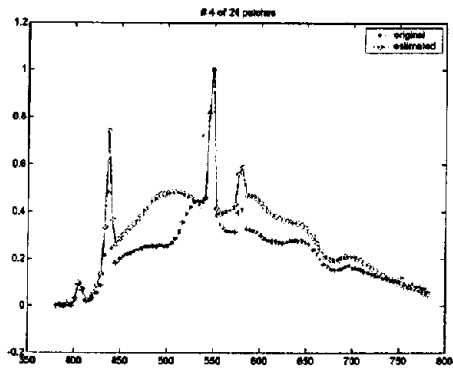
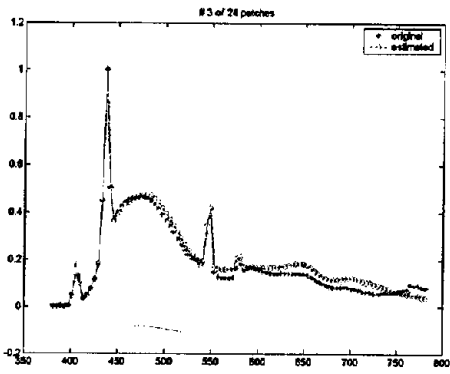
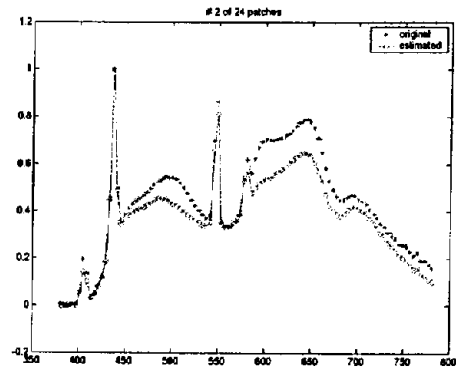
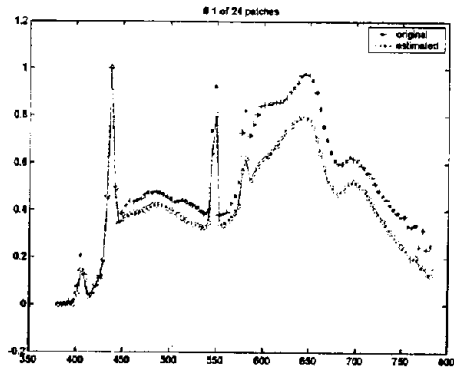
Patch (#)	R	G	B
#1	106.28	70.59	66.76
#2	201.15	151.06	143.24
#3	100.78	118.88	160.79
#4	92.95	102.39	75.74
#5	138.08	130.18	176.56
#6	130.75	183.65	179.27
#7	219.02	118.52	69.26
#8	71.11	88.77	163.03
#9	197.03	86.21	108.47
#10	88.77	59.67	98.91
#11	179.35	186.25	100.47
#12	227.81	158.53	87.33
#13	36.39	55.43	136.64
#14	85.85	141.80	90.11
#15	177.84	62.33	69.04
#16	242.09	196.27	83.37
#17	188.45	91.08	150.12
#18	51.41	133.18	175.64
#19	230.86	224.75	226.77
#20	207.24	198.79	203.51
#21	171.97	161.96	169.10
#22	130.03	122.03	131.35
#23	89.47	83.74	90.31
#24	46.72	41.41	44.64

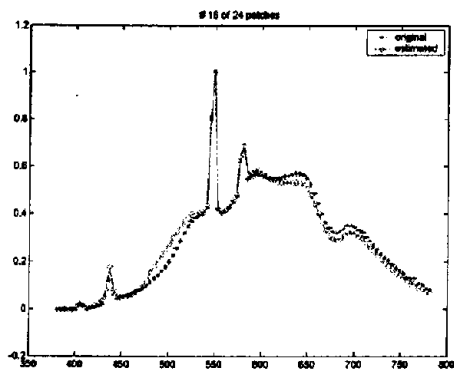
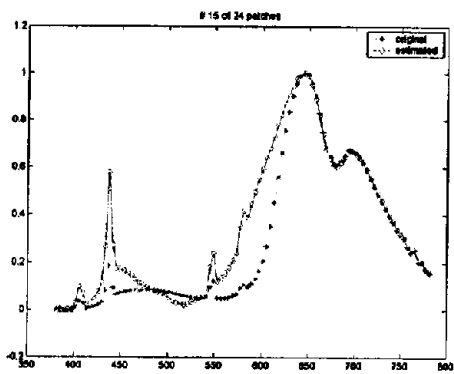
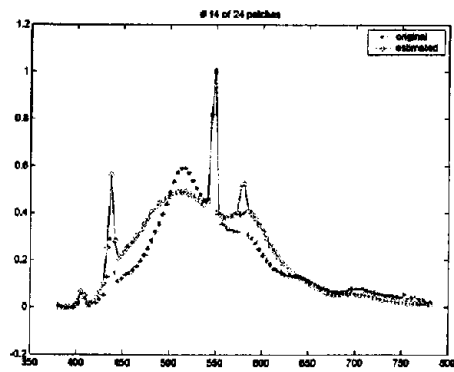
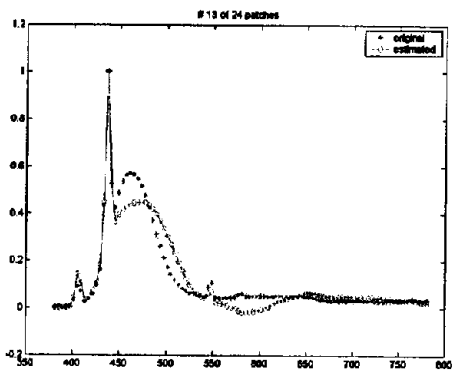
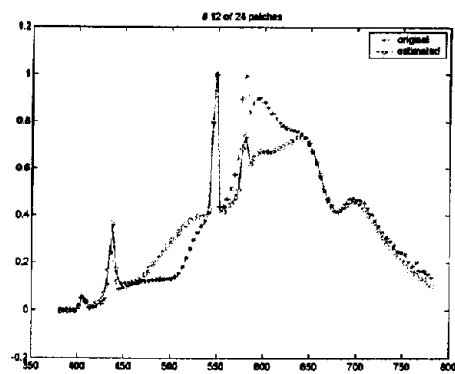
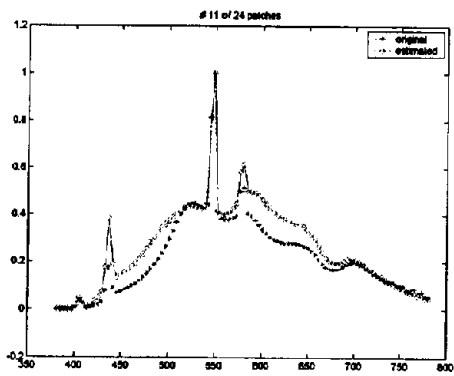
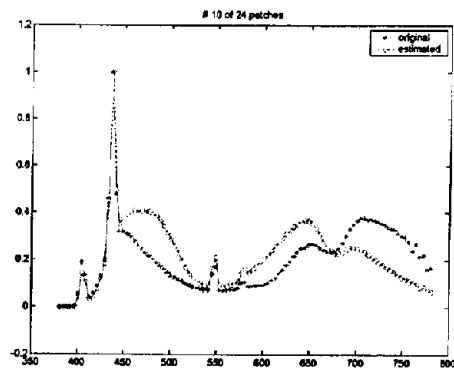
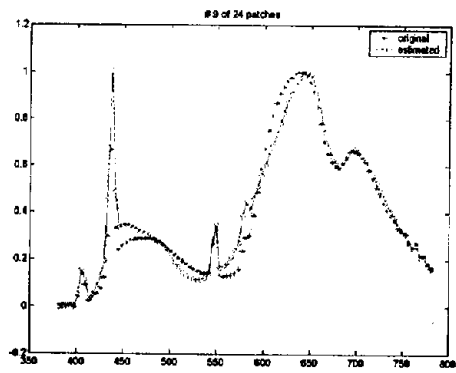
將上表的數據和表 5.2 的係數作複線性回歸得到表 5.6 的矩陣

根據這個矩陣就可以將相機所拍攝得到的 DC 直轉變為相對應的係數，在代入公式 4.2 就可以求得完整的頻譜數據，圖 5.10 為所有的色塊原始頻譜和近似頻譜的比較。

表 5.6 轉換矩陣

0.00000701	0.00001598	0.00000922
0.00002357	0.00000624	0.0000183
0.00001224	-0.0000283	0.00001754
0.00000053	-0.0000015	0.00000021
0.00000027	-0.0000002	0.00000056
0.00000025	0.00000008	0.00000046





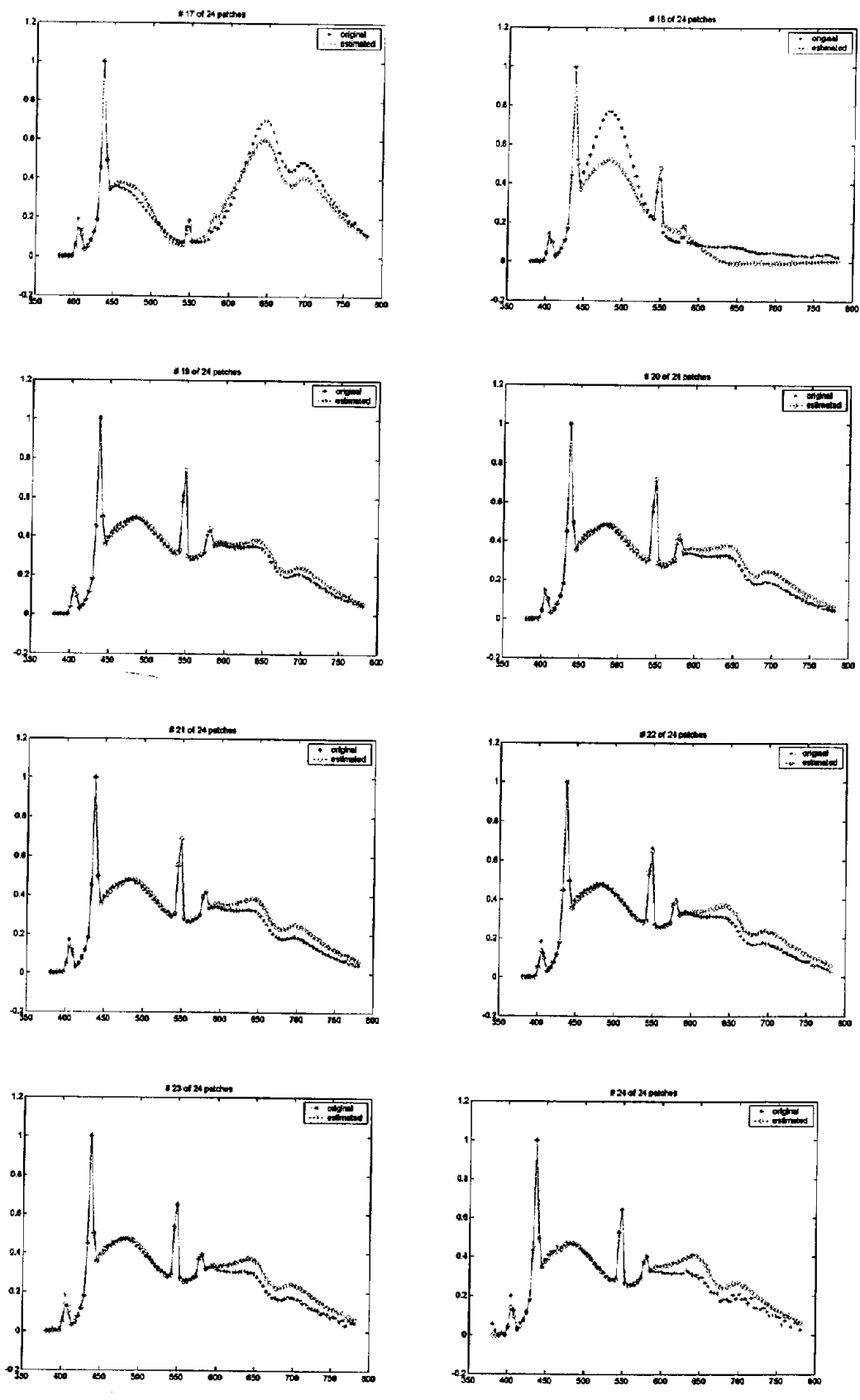
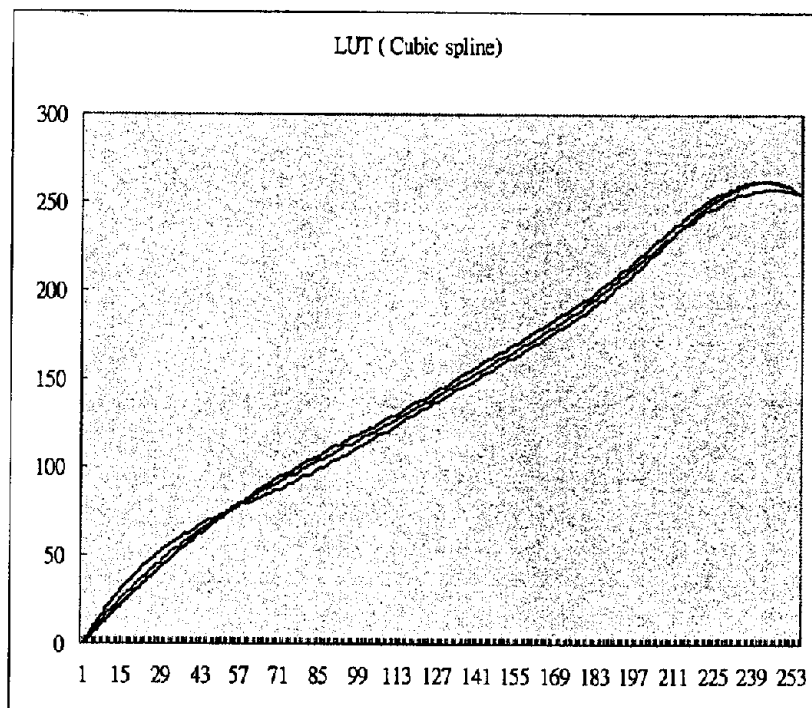
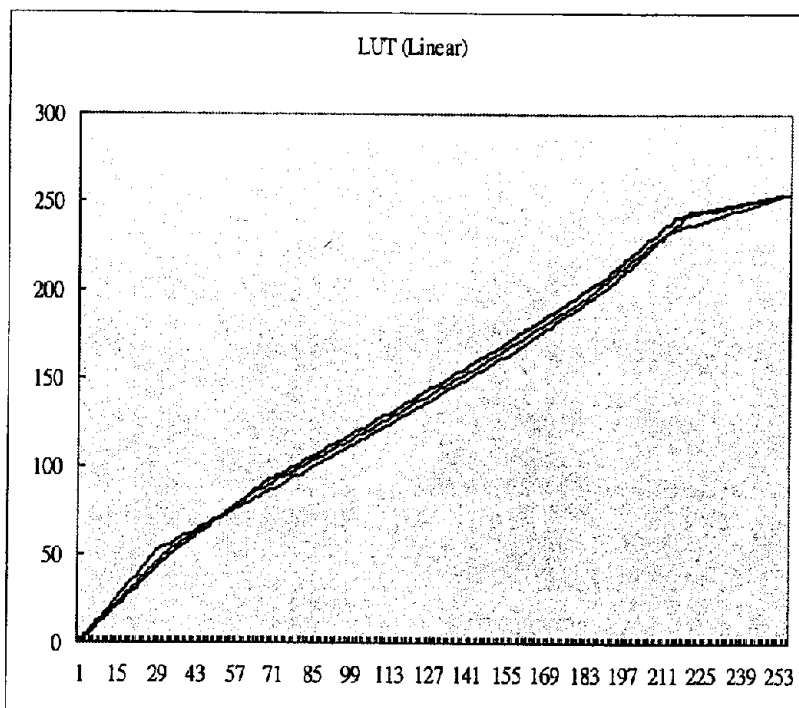


圖 5.10 原始頻譜和近似頻譜的比較

5.2.3. LUT 校正

由於數位相機的敏感函數並非線性，故要以 LUT 來做 Gamma 校正



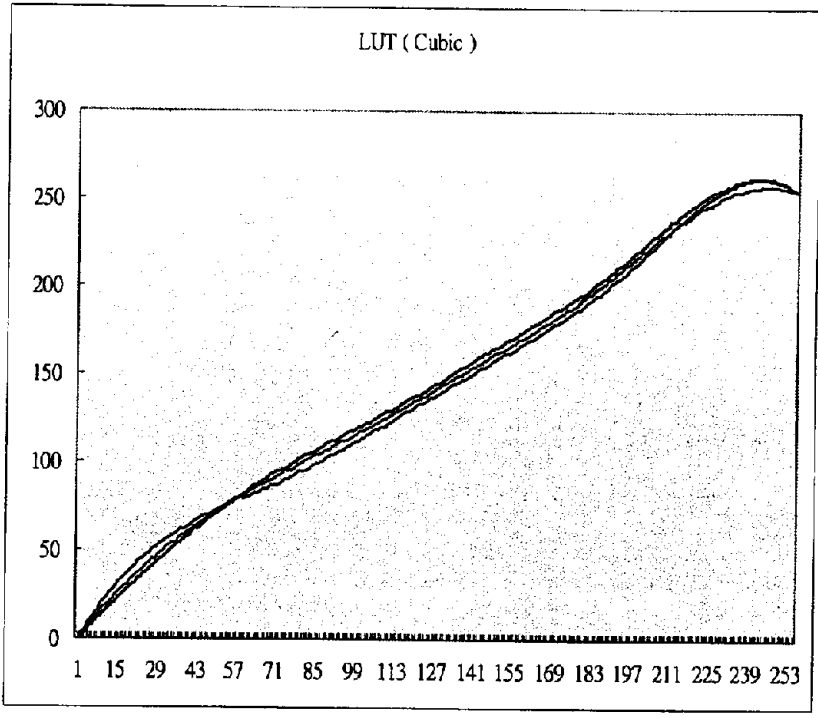


圖 5.11 三種差補方法的 LUT Table 會製成圖表

5.2.4. 結合濾片

在本計畫中也結合了多組的濾片來增加實驗的正確率。在相機拍攝 Macbeth ColorCheckerg 時，相機鏡頭前端增加了多組 Kodak WRATTEN Gelatin Filters 的濾鏡，圖 5.9 為這些濾鏡的頻譜

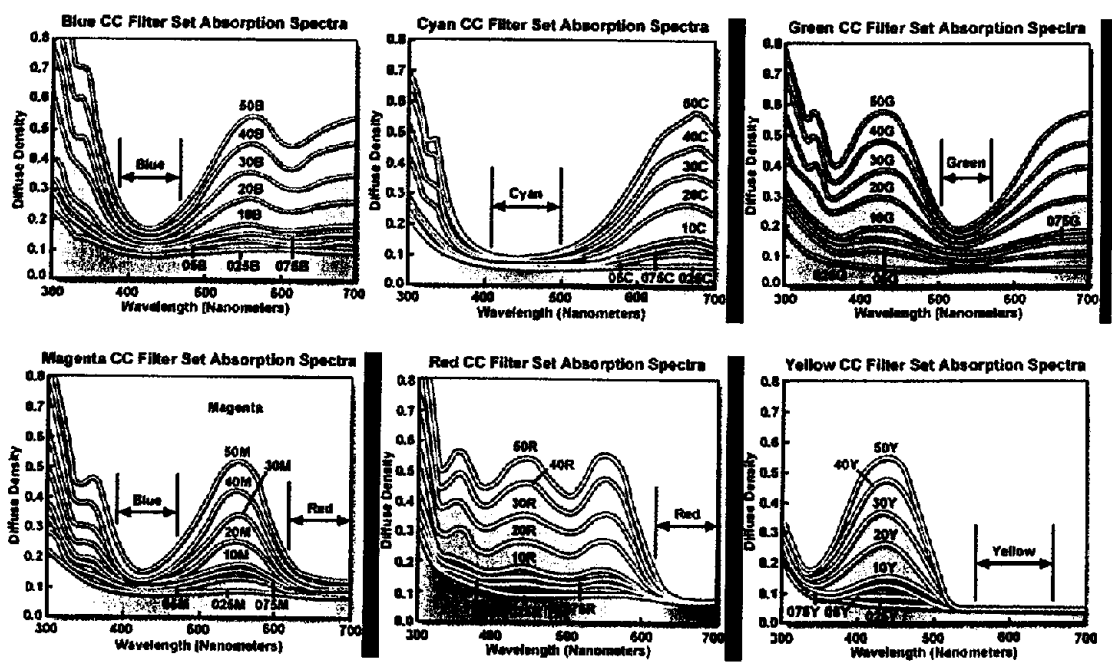


圖 5.11 Kodak WRATTEN Gelatin Filters 的頻譜

5.3. 實驗結果

各種不同的實驗結果列於下表

表 5.3 實驗結果

Without Filters	
	$\Delta E_{a^*b^*}$
Without LUT	6.9956
With LUT (Linear interpolation)	5.9051
With LUT (Cubic spline interpolation)	5.8945
With LUT (Cubic interpolation)	5.9353

(a)

With CC40G Filters	
	$\Delta E_{a^*b^*}$
Without LUT	10.243
With LUT (Linear interpolation)	5.9774
With LUT (Cubic spline interpolation)	5.5475
With LUT (Cubic interpolation)	5.9053

(b)

5.4. 實驗分析與討論

根據表 5.3 的結果顯示，結合濾片 CC40G 並使用 Cubic spline 差補的 LUT 校正擁有最佳的實驗結果，雖然還比不上專業的分光光譜儀，但是已經比 IBM PRO/3000 結合 Kodak Wratten gelatin filters number 38 (Light blue) 誤差 $\Delta E_{a^*b^*} = 6.9$ [10]，還要好上許多。

6. 結論

直觀看來我們所提出系統確實可以有效的降低實驗的複雜度，並透過實驗驗證的方式證明當增加一個 CC40Y 的濾片以及利用 Cubic Spline 非線性校正方法可以使得色差 $\Delta E_{a^*b^*} = 3.0623$ 與 MCSL[10] 中所開發的系統利用一個 Kodak Wratten gelatin filters number 38 (Light blue) 所做出來的色差 $\Delta E_{a^*b^*} = 6.9$ 來說有不錯的效果。然而並非每一個濾片都可以達到這樣的效果，因此在以後的研究上除了可以在挑選濾片上深入研究外，亦可透過更複雜的轉換模型來求得更小的色差 $\Delta E_{a^*b^*}$ ，達到更好的影像品質。

7. 参考文献

- [1] Saunders, D., Cupitt, J., "*Image processing at the National Gallery: The VASARI Project*", National Gallery technical bulletin, 14, pp. 72-86, 1993.
- [2] Roy S. Berns, Francisco H. Imai, Peter D. Burns, and Di-Y. Tzeng, "*Multi-spectral-based Color Reproduction Research at the Munsell Color Science Laboratory*", Proc. SPIE 3409-08: pp. 14-25, 1998.
- [3] Maitre, H., Schmitt, F. J. M., Crettez, J.-P., Wu, Y., Hardeberg, J. Y., "*Spectrophotometric image analysis of fine art paintings*", Proc. IS&T/SID Fourth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, pp. 50-53, 1996.
- [4] Haneishi, H., Hasegawa, T., Tsumura, N., Miyake, Y., "*Design of color filters for recording artworks*", Proc. IS&T's 50th Annual Conference, pp. 369-372, 1997.
- [5] Miyake, Y., Yokoyama, Y., "*Obtaining and reproduction of accurate color images based on human perception*", Proc. SPIE 3300-26: pp. 190-197, 1998.
- [6] König, F., Præfke, W., "*A multispectral scanner*", Proc. CIM'98 Colour Imaging in Multimedia, University of Derby, pp. 63-73, 1998.
- [7] Vent, D. S. S., "*Multichannel analysis of object-color spectra*", Master Degree Thesis, R.I.T., 1994.
- [8] Burns, P. D., "*Analysis of image noise in multi-spectral color acquisition*", Ph.D. Thesis, R.I.T., 1997.
- [9] König, F., Præfke, W., "*Practice of multispectral image acquisition*", Proc. SPIE 3409-10: pp. 34-41, 1998.
- [10] Francisco H. Imai, "*Multispectral image acquisition and spectral reconstruction using a trichromatic digital camera system associated with absorption filters*", report, R.I.T., 1998.
- [11] "*Pro/3000 Digital Imaging System Reference Guide*", IBM, 1996.
- [12] "*Kodak Pro 14n Digital still camera Spec*", Kodak, 2003.

- [13] Imai, F. H., Berns, R. S., "*High-Resolution Multi-Spectral Image Archives – A Hybrid Approach*", Proc. IS&T/SID Sixth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, pp. 224-227, 1998
- [14] Francisco H. Imai, "*Multispectral image acquisition and spectral reconstruction using a trichromatic digital camera system associated with absorption filters PART VIII General Discussion*", report, R.I.T., 1998.
- [15] Vrhel, M. J., Trussel, H. J., "*Color correction using principal components*", Proc. Color Res. Appl. 17, pp.328-338, 1992.
- [16] Præfke, W., Keusen, T., "*Optimized basis functions for coding reflectance spectra minimizing the visual color difference*", Proc. IS&T/SID 1995 Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, pp.37-40, 1995.
- [17] König, F., "*Reconstruction of natural spectra from a color sensor using nonlinear estimation methods*", Proc. IS&T's 50th annual conference, pp.454-458, 1997.
- [18] Burns, P. D., Berns, R. S., "*Analysis multispectral image capture*", Proc. IS&T/SID 1995 Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, pp.19-22, 1996.
- [19] Hung P.-C., "*Colorimetric Calibration in Electronic Imaging Devices using a Look-Up-Table Model and Interpolations*", Journal of Electronic Imaging, 2, pp.53-61, 1993.