

臺灣二〇〇六年國際科學展覽會

科 別：工程學

作 品 名 稱：廉價取像設備之色彩校正

得 獎 獎 項：第一名
赫伯特胡佛青年工程獎 第一名

學 校 / 作 者：國立新竹女子高級中學 張廖曉蓉
國立新竹女子高級中學 徐于康



張廖曉蓉,就讀國立新竹高級女子中學二年級.

對電腦相當有興趣,甫自國小即接觸網際網路,而在家長的指導下對電腦的了解日益增加,畢業時竟得到有關電腦的獎狀.

國中社團參加了電腦研習社,但後來因為社團時間被拿來上資優課程,故上不到一學期便退社.

高中的專題研究毫不考慮選擇了應用科學,因我對電腦的熱情已到了不可思議的地步,甚至連摸到電腦都會感到非常興奮.

在這次作品中,我對影像處理及程式方面的有很多的認識.在作這個專題時,受到許多人的協助,非常感謝.



徐于康,就讀國立新竹女子高級中學二年級
從小便喜歡科學,於國小開始參加科展,從當中收穫良多.很開心這次能參與 2006
年的國際科展,與來自各地的朋友們交流、互動。
寒暑假時,我亦熱衷於參與科學活動,像去年暑假的清大電機營,和今年寒假的全
國高中生數學研習營,都讓我留下了深刻的印象,並對該領域了解更多。
期許自己能繼續保持對科學的熱忱,繼續向前學習。

英文摘要(Abstract) :

Color Calibration for Low Cost Image Acquisitions

The applications of digital image are rapidly growing with the developments in computer technology. This enforces digital image industry to produce devices with better quality. Despite the today's advanced level of technology, it is known that input and output devices somewhat cause color distortions. International Color Consortium suggests that we can use ICC profile to overcome the problem mentioned above. But the related hardwares and softwares are too expensive for the general users. In this study, we base on the ICC profile's mechanism to develop a color calibration method for low cost image acquisitions. From the theoretical and experimental results, it can be demonstrated that our method appears satisfactory.

中文摘要：

廉價取像設備之色彩校正

數位影像的應用隨著電腦資訊科技的快速成長而蓬勃發展，這也促使著數位影像工業的相關產品漸漸地普及與廣泛地使用，時至今日，雖然有著很好的製造技術，但是任何數位影像設備均無法完美無失真地將原有的色彩呈現出來或紀錄下來，或多或少都有色彩偏差的存在，尤其在價格越低廉的設備上更為明顯。雖然可以依據國際色彩協會的建議，使用每項設備的專屬色彩描述檔來克服色差的缺點，但是用來產生色彩描述檔的相關軟硬體均價格昂貴，實非一般使用者所能承受的負擔，本篇研究以色彩描述檔的色彩轉換機制為基礎，發展出針對廉價取像設備的色彩校正程序，無論從理論數據上的探討以及實際影像上的測試看來，我們的校正方法確實有效，讓原有的色彩能精準地重現。

一、研究動機與目的：

隨著數位影像工業的快速成長與蓬勃發展，掃描器、數位相機、網路攝影機等相關取像用產品也漸漸地普及與廣泛地使用，由於設計上的考量或製作技術上的瓶頸，任何取像設備均無法完美無失真地將原有的色彩紀錄下來，或多或少都有色彩偏差的存在，尤其在價格越低廉的取像設備上更為明顯。

爲了改善前述取像設備的色彩偏差缺點，國際色彩協會建議可以使用每項設備的專屬色彩描述檔來讓原有的色彩精準地呈現，但是能夠依據每項設備的特性而產生專屬色彩描述檔的色彩管理軟體都價格不菲，這對於一般使用者而言，可真是昂貴的負擔啊！我們是否可以利用色彩描述檔的轉換機制發展出取像設備的色彩校正程序，以後任何由此取像設備所取得的影像，皆可使用此校正程序來校正色彩，讓原有的色彩能精準地重現。

二、研究過程：

1. 色彩空間與相關理論

色彩空間亦稱爲色彩系統或色彩模型，其目的是方便於使用某種標準而且一般大眾可以接受的方式來指定色彩，常用到的有 RGB、CMYK、CIEXYZ、CIELAB、CIELUV、HSB、YIQ 等色彩空間，以下僅就本研究所使用到的色彩空間及相關理論做個介紹[1][2]。

(1)RGB 色彩空間

RGB 色彩空間廣泛的運用在數位系統(掃描器、數位相機等)、彩色電視與攝影機上，此色彩空間是建立在以紅色 (R)、綠色 (G)、藍色 (B) 爲三軸的立體直角座標系統上，所以每一個色彩均可用立體座標的三個分量來表示。在電腦系統中的 24 位元全彩影像中，其紅色 (R)、綠色 (G)、藍色 (B) 三軸的分量可用 8 個位元來表示 (0 至 255)，共可顯示 $2^{24} = 16,777,216$ 種色彩。

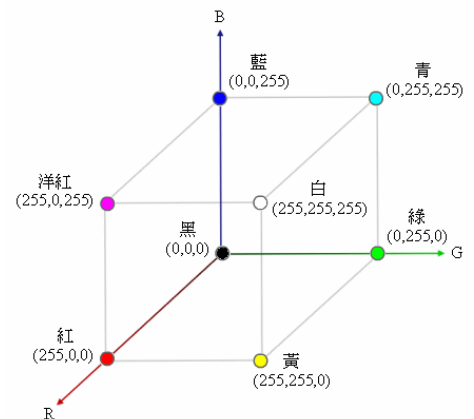


圖 1 RGB 色彩空間示意圖

(2)CIEXYZ 色彩空間

CIEXYZ 色彩空間是由國際照明委員會 (CIE) 依據 1931 年一項人類視覺的實驗，以 X (表示紅色色光)、Y (表示綠色色光)、Z (表示藍色色光) 三刺激值來精確描述人眼視覺所見色彩的系統。若是直接使用 X、Y、Z 三刺激值來表示色彩會造成很大的不方便，因此，多使用圖 2-1 所示的二維色度座標 (x, y) 來表示，其中

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

由於色度座標僅能代表色彩的色相與飽和度，必須如圖 2-2 所示加入明度軸 Y 軸成爲 (x, y, Y) ，才能完整的表達色彩。

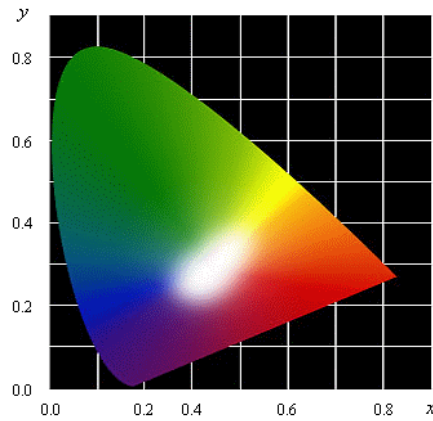


圖 2-1 (x, y) 色度圖

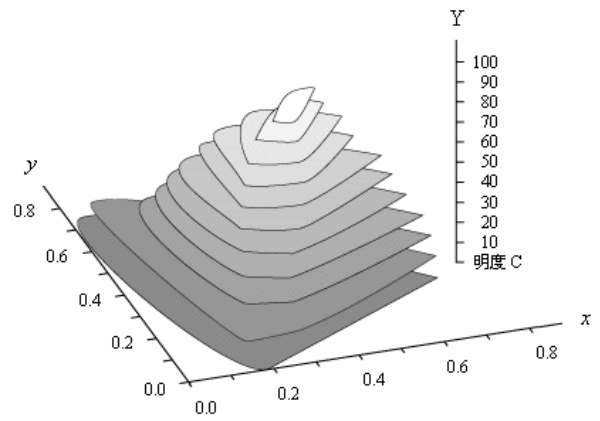


圖 2-2 (x, y, Y) 色度立體空間

(3) CIELAB 色彩空間

由於人類眼睛對於不同色彩的寬容度缺乏一致性，使得 CIEXYZ 色彩空間並非一個均勻的色彩空間，所以國際照明委員會 (CIE) 於 1976 年發展出兩個比較可以呈現視覺上均勻色彩空間 CIELAB 與 CIELUV，其中 CIELAB 是以對立色理論爲基礎，以三組可區分不同色彩訊號的 L (明度)、a (紅與綠)、b (黃與藍) 爲座標軸，分別命名爲 L^* 、 a^* 、 b^* ，進而產生 CIELAB 色彩空間。

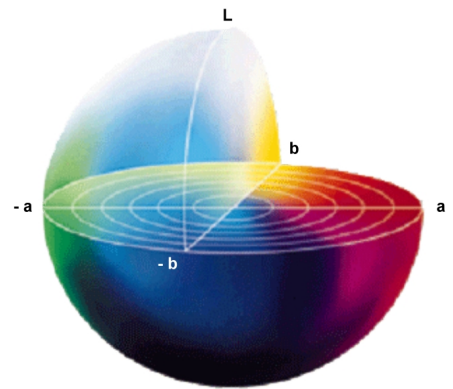


圖 3 CIELAB 色彩空間示意圖

(4) 色彩空間的轉換

現今存在了許多的色彩空間，爲了因應不同的需求而使用不同的色彩空間，在許多的情況下我們需要將影像色彩資料從一個色彩空間轉換到另一個色彩空間，下面列出本研究所使用到的色彩空間轉換[8]。

• RGB 色彩空間與 CIEXYZ 色彩空間的轉換 (以 sRGB 爲例)

RGB 色彩空間與 CIEXYZ 色彩空間的轉換可用轉換矩陣來表示，不過轉換矩陣會因爲適用的環境光源不同而改變，我們以 sRGB 爲例，其參考白點 D65 光源的三刺激值分別爲 $X_{white} = 95.04$ 、 $Y_{white} = 100.00$ 、 $Z_{white} = 108.89$ ，轉換的方式如下：

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R & G & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.1618 & 0.0834 & 0.0076 \\ 0.1402 & 0.2805 & 0.0467 \\ 0.0707 & 0.0283 & 0.3727 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} R & G & B \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 8.2633 & -2.4717 & 0.1418 \\ -3.9196 & 4.7838 & -0.5202 \\ -1.2712 & 0.1061 & 2.6959 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

• CIEXYZ 色彩空間與 CIELAB 色彩空間的轉換

CIEXYZ 色彩空間與 CIELAB 色彩空間遵守著下列的函數作轉換，式中的 X_{white} 、 Y_{white} 、 Z_{white} 為參考光源的三刺激值：

$$L = 116f\left(\frac{Y}{Y_{white}}\right) - 16$$

$$a = 500\left[f\left(\frac{X}{X_{white}}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_{white}}\right)\right]$$

$$b = 200\left[f\left(\frac{Y}{Y_{white}}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_{white}}\right)\right]$$

$$f(\alpha) = \begin{cases} \sqrt[3]{\alpha} & \alpha > 0.008856 \\ 7.787\alpha + \frac{16}{116} & \alpha \leq 0.008856 \end{cases}$$

(5) 不同光源間的色彩轉換

同樣的物體在不同的光源下會呈現不同的顏色，1985 年提出的 *Bradford* 轉換 [8]，可將色彩的三刺激值在不同光源間作轉換，其方式如下：

$$[X \ Y \ Z]_{dest.} = [X \ Y \ Z]_{source} \begin{bmatrix} Bradford \\ transform \\ matrix \end{bmatrix}_{source \rightarrow dest.}$$

常用的 *Bradford* 轉換矩陣如下：

$$\begin{bmatrix} 1.0377 & 0.0171 & -0.0120 \\ 0.0154 & 1.0057 & 0.0204 \\ -0.0583 & -0.0189 & 0.6906 \end{bmatrix}_{C \rightarrow D50} \quad \begin{bmatrix} 0.9649 & -0.0161 & 0.0173 \\ -0.0164 & 0.9941 & -0.0297 \\ 0.0810 & 0.0258 & 1.4486 \end{bmatrix}_{D50 \rightarrow C}$$

$$\begin{bmatrix} 1.0479 & 0.0296 & -0.0092 \\ 0.0229 & 0.9905 & 0.0150 \\ -0.0502 & -0.0171 & 0.7518 \end{bmatrix}_{D65 \rightarrow D50} \quad \begin{bmatrix} 0.9556 & -0.0284 & 0.0124 \\ -0.0232 & 1.0101 & -0.0206 \\ 0.0633 & 0.0211 & 1.3306 \end{bmatrix}_{D50 \rightarrow D65}$$

(6) 色差公式

色差公式是將人類視覺系統對於兩種色彩的差異以量化的方式來表示，國際照明委員會 (CIE) 於 1976 年定義了在 CIELAB 色彩空間兩個顏色 (L_1, a_1, b_1) 與 (L_2, a_2, b_2) 的色差為 [1][2][8]：

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2}$$

一般說來， $\Delta E_{ab} \leq 3.2$ 的時候，人眼是無法分辨出色彩之間的差異； $3.2 < \Delta E_{ab} \leq 6.5$ 的時候，專業訓練的印刷師傅可以辨別其不同，多數人仍感到色彩是相同的； $6.5 < \Delta E_{ab} \leq 13$ 的時候，色彩差別已經可以判別，但色調本身仍然相同；當 $13 < \Delta E_{ab} \leq 25$ 的時候，可以確認是不同的色調表現； $25 < \Delta E_{ab}$ 時，則代表另一種不同的顏色了。

2. 國際色彩協會 (ICC) 的色彩管理架構

1993 年，有八家業界廠商（包括了 Adobe、Agfa-Gevaert、Apple、Kodak、Microsoft、Silicon Graphics、Sun Microsystems、Taligent）共同成立了「國際色彩協會」(International Color Consortium，簡稱 ICC)，他們的目標是建立並推廣一套開放式的跨平台色彩管理系統（如圖 4 所示）。國際色彩協會 (ICC) 的色彩管理包括下列了三個要素[3][5]：

(1) 與設備無關的色彩空間

爲了能在不同設備上得到一致性的色彩呈現，國際色彩協會 (ICC) 使用了與設備無關的描述檔連結空間 (Profile Connection Space，簡稱 PCS) 連接來自於不同設備的色彩資訊，在此空間中進行轉換作業，將來源色彩轉換成目標色彩，國際色彩協會 (ICC) 規定必須使用 CIEXYZ 或 CIELAB 色彩空間。

(2) 描述設備特性的「色彩描述檔」

色彩描述檔 (ICC Profile) 提供了該項設備在「與設備相關」及「與設備無關」的色彩空間轉換時，所有必要資訊的檔案，不同的設備各有不同的色彩描述檔。

(3) 可解讀色彩描述檔並對映彼此色域的「色彩管理模組」

色彩管理模組 (Color Management Module，簡稱 CMM) 又稱爲色彩引擎，它是負責色彩空間轉換計算及處理色域對映的軟體，常見的 CMM 有 Microsoft Windows 的 ICM、Mac OS 的 Color Sync、Adobe 的 ACE。

我們以掃描器所掃描的影像至印表機印出的色彩轉換流程爲例（如圖 5 所示），掃描器的「與設備相關」色彩空間爲 RGB 色彩空間，經過該掃描器的色彩描述檔將色彩資料由 RGB 色彩空間轉換至「與設備無關」的 CIEXYZ 色彩空間（或稱描述檔連結空間 PCS），色彩管理模組 CMM 透過色域對映及印表機的色彩描述檔，再將色彩資料轉換到「與設備相關」的 CMYK 色彩空間而列印出來。

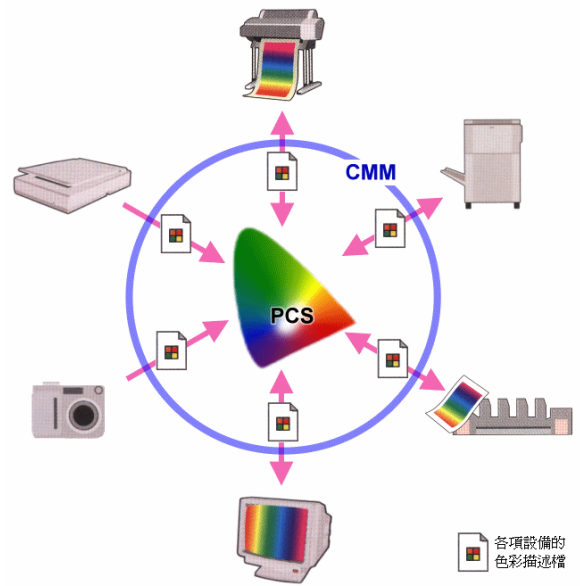


圖 4 國際色彩協會 ICC 的色彩管理系統示意圖

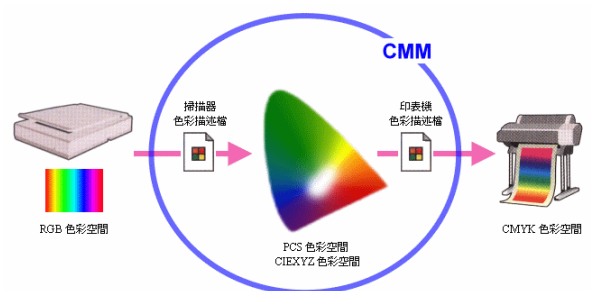


圖 5 掃描影像至印出的色彩轉換流程

3. 色彩描述檔 (ICC Profile) 的色彩空間轉換機制

我們可從參考資料[5][7]知道色彩描述檔的詳細內容以及色彩空間轉換的機制，這些轉換機制是由一維對照表 (1D Lookup Table，簡稱爲 1D LUT)、多維對照表 (Multi-Dimensional Lookup Table，簡稱爲 CLUT)、線性轉換矩陣等三種基本資

料結構所組合而成，色彩管理模組 CMM 就是利用這些機制將「與設備相關」的色彩空間轉換至「與設備無關」色彩空間，關於輸入設備（掃描器、數位相機等），比較具有代表性的轉換機制如圖 6 所示。

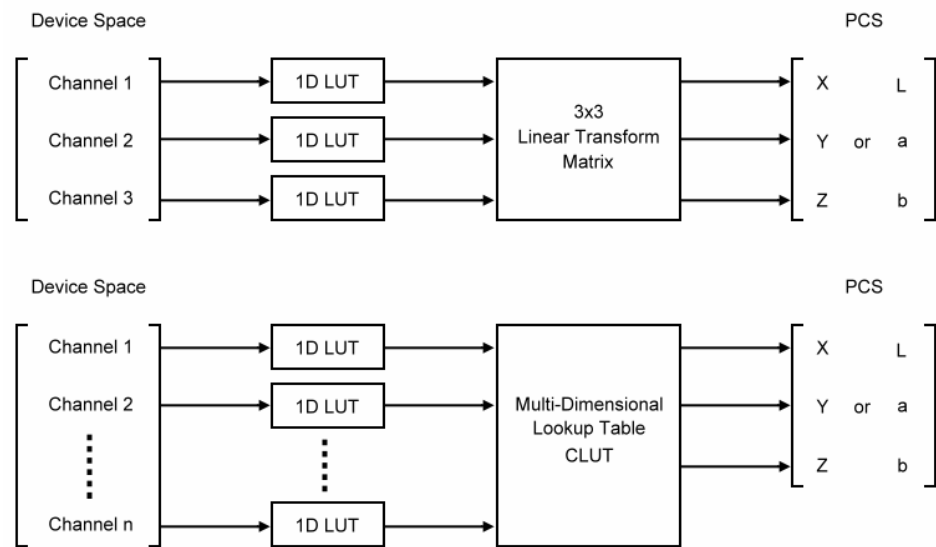


圖 6 輸入設備的色彩空間轉換機制

4. 取像設備利用色彩描述檔之色彩校正

(1) 取像設備的色彩描述檔製作

由於每項輸出入設備的色彩特性都不一樣，所以都要有專屬的色彩描述檔，取像設備的色彩描述檔製作過程如圖 7 所示，先使用取像設備掃描或是拍攝標準色彩導表（如 ANSI IT8 / Kodak Q60 R2、GretagMacbeth ColorChecker），將取得的影像輸入至色彩管理軟體中（如 Monaco Proof、Monaco EZ color、GretagMacbeth Profile Maker、X-Rite Pulse ColorElite、Color Tune、LinoColor），色彩管理軟體就會自動產生該項設備之專屬色彩描述檔[3]，有了該項設備的專屬色彩描述檔後，色彩管理模組就可以將取像設備所取得的影像依據其特性轉換至與設備無關的色彩空間。

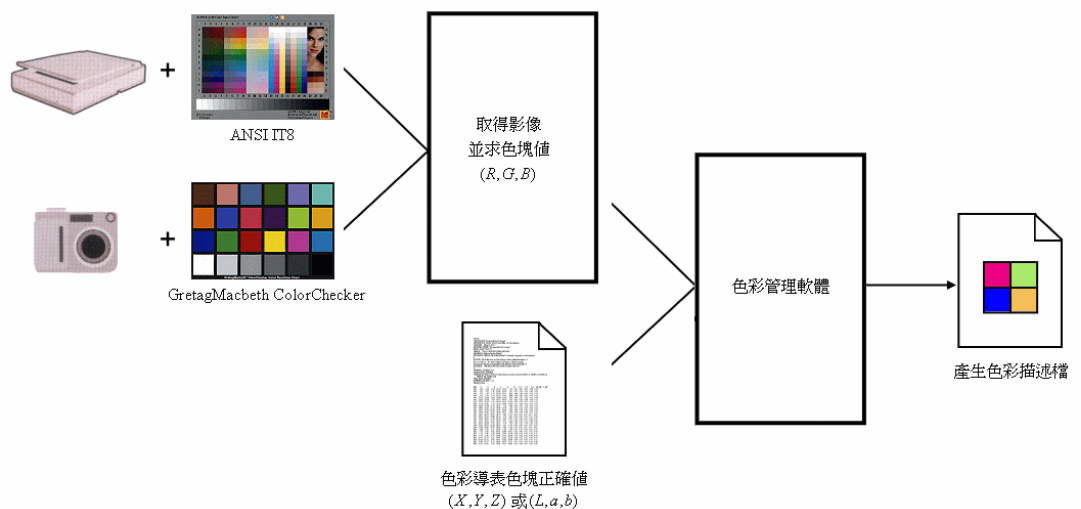


圖 7 取像設備的色彩描述檔製作過程

由於色彩導表上各色塊的色彩值均是已知的（廠商使用精密的分光光度計測量

後提供)，色彩管理軟體就依據這些正確值及取像設備所取得的色彩值作運算以產生最小轉換誤差之色彩描述檔，所以色彩描述檔除了提供色彩空間轉換時所需的資訊外，同時也提供了色彩調整與校正的功能。

(2) 利用色彩描述檔轉換機制之色彩校正模式

雖然色彩描述檔提供了色彩空間轉換及簡便的色彩校正的功能，但是產生色彩描述檔的色彩管理軟體都價格不菲（例如功能最為陽春的 Monaco EZ color，定價為台幣 24,000 元），這對於一般使用者而言，可真是昂貴的負擔啊！在沒有色彩描述檔的情況下，使用者只能依照自己的喜好與經驗利用影像處理軟體（如 Photoshop、Photoimpact 等）作影像色彩的調整。想要有精準的調整讓影像原有的色彩重現，我們可如圖 8 所示，利用色彩描述檔的色彩空間轉換機制發展出取像設備的色彩校正程序，任何由此取像設備所取得的影像，皆可使用此校正程序來校正色彩，此外，若搭配上光源轉換與色彩空間轉換就可以保有原有影像的色彩空間格式。

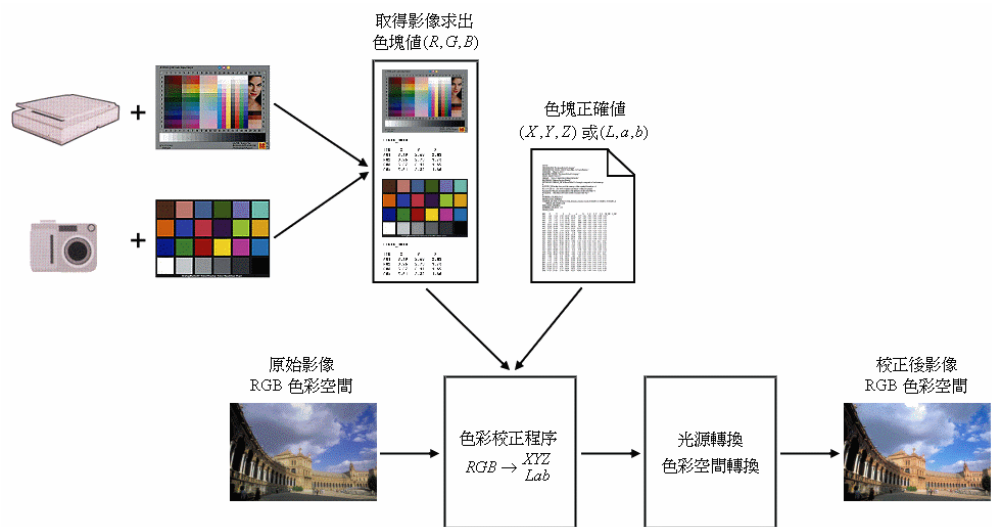


圖 8 取像設備的色彩校正模式

5. 色彩校正程序

色彩描述檔中關於輸入設備（掃描器、數位相機等）的色彩空間轉換及色彩校正的機制有 3×3 線性轉換矩陣與三維對照表 3D LUT 兩種，在使用這兩種機制之前，依據國際色彩協會的建議，須先使用一維對照表 1D LUT 將輸入設備的色彩資料由非線性分佈轉換為線性分佈[5][8]。本節就依據色彩描述檔的色彩轉換及校正機制來發展出色彩校正程序，此外，並對所使用的儀器設備及校正程序的色彩校正能力評估也做個說明。

(1) 取像設備及標準色彩導表

我們研究所使用的儀器設備有掃描器 Umax Astra 4600（圖 9-1）、網路攝影機 Logitech QuickCam（圖 9-2），標準色彩導表 Kodak Q60 R2 IT8.7/2-1993 2004:04（圖 9-3）。由參考文獻[6]知道，數位相機類之取像設備的色彩校正遠比掃描器困難，掃描器的光源是固定的，但是數位相機類之取像設備所面對的是自然界多變的光源，所以本研究關於數位相機類之取像設備是在固定光源的情況下做

色彩校正，這種固定光源的情形也普遍運用在相片畫冊翻拍、網路購物商品拍攝、醫學內視鏡影像等需要忠實呈獻原有色彩的作業上。



圖 9-1 Umax Astra 4600



圖 9-2 Logitech QuickCam

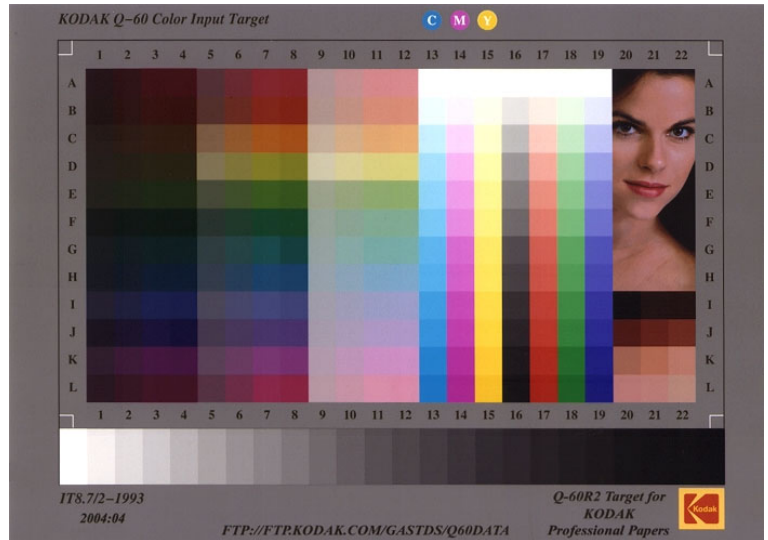


圖 9-3 標準色彩導表 Kodak Q60 R2 IT8.7/2-1993 2004:04

(2) 色彩校正能力評估

我們可如圖 10 所示，先求出取像設備所取得的標準色彩導表影像上各色塊的色彩值，將其輸入校正程序而得到各色塊校正後的色彩值，然後使用 CIE 1976 年的色差公式計算出色塊校正後的色彩值與正確值間的平均色差，平均色差越小的校正程序表示其色彩校正能力越佳。

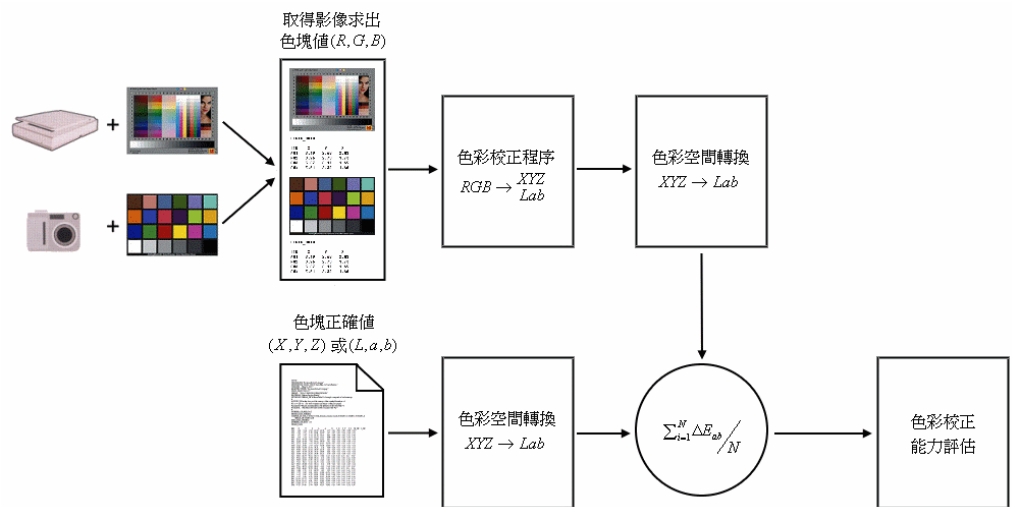


圖 10 校正程序的色彩校正能力評估

(3) 一維對照表 1D LUT

由於人類視覺對於低亮度變化的感覺比對高亮度變化的感覺來得敏銳，實驗研究指出人眼所能分辨的亮差層次並非以線性方式分佈，而是以近乎對數的方式分佈（Gamma 曲線），數位影像工業以這項研究為依據，在其產品中也做了因應的調整。依據國際色彩協會的建議，在輸入設備使用 3×3 線性轉換矩陣與三維對照表 3D LUT 等兩種色彩空間轉換與色彩校正機制前，須先使用一維對照表 1D LUT 將輸入的色彩資料由非線性分佈方式轉換為線性的分佈方式，所以

一維對照表 1D LUT 也稱為 Gamma 表格 (Gamma Table) 或是色調響應曲線 (Tone Response Curve, 簡稱 TRC) [5][8]。

標準色彩導表 IT8.7/2 的下方提供了 24 階段等分明度的灰階色塊，我們就利用這些色塊來產生一維對照表 1D LUT，所採取的方法與步驟如下，實際製作範例可參見表格 1：

- 取得標準色彩導表影像上灰階變化部分各色塊的色彩值 (R, G, B) 。
- 取得廠商所提供標準色彩導表上灰階變化部分各色塊的正確值 (X, Y, Z) ，並將與亮度有關的 Y 值以等比例的方式調整為 Y' ，使其範圍介於 0 ~ 255。
- 將調整後的 Y' 值與各色塊影像的取得值以一維插值法 (可用 Matlab 軟體實作) 分別製作紅色 (R)、綠色 (G)、藍色 (B) 等三個色調的一維對照表 1D LUT。

灰階色塊											
灰階色塊編號	0	1	2	3	.....	21	22	23		
色塊正確值 Y	81.4	71.0	63.3	55.8	.....	1.0	0.8	0.5	0.0	
範圍調整 Y'	255.0	222.5	198.5	175.0	.....	3.2	2.5	1.5	0.0	
各灰階色塊取得值	R	R_0	R_1	R_2	R_3	.....	R_{21}	R_{22}	R_{23}	0
	G	G_0	G_1	G_2	G_3	.....	G_{21}	G_{22}	G_{23}	0
	B	B_0	B_1	B_2	B_3	.....	B_{21}	B_{22}	B_{23}	0
以插值法製作各色調 1D LUT	用 Y' 與 R 製作紅色調 1D LUT			用 Y' 與 G 製作綠色調 1D LUT			用 Y' 與 B 製作藍色調 1D LUT				

表格 1 一維對照表 1D LUT 實際製作範例

製作好紅色、綠色、藍色等三個色調的一維對照表後，就可以利用這些一維對照表將取像設備輸入的色彩資料 (R, G, B) 由非線性分佈方式轉換為線性分佈方式的 (R', G', B') 。

(4) 3×3 線性轉換矩陣

3×3 線性轉換矩陣提供了最簡潔快速的色彩空間轉換及色彩校正機制，可將取像設備輸入的線性分佈色彩資料 (R', G', B') 轉換並校正為與設備無關的色彩資料 (L, a, b) ，其方式如下：

$$[L \ a \ b] = [R' \ G' \ B'] \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

由於 3×3 線性轉換矩陣共有 9 個未知數，理論上，只要有 3 個標準色彩導表色塊色彩的取得值與正確值，就可以求得 3×3 線性轉換矩陣，但是並不保證能達到最佳的整體色彩校正能力，比較正確與適當的做法，就是採用多一點的色塊取得值與正確值，再利用 Matlab 軟體所提供的迴歸分析法[4]求得具有最小色

差的 3×3 線性轉換矩陣，其方法如下：

令

$$T = \begin{bmatrix} L_1 & a_1 & b_1 \\ L_2 & a_2 & b_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_n & a_n & b_n \end{bmatrix}_{n \times 3} \quad n \text{ 個色塊影的正確值}$$

$$S = \begin{bmatrix} R'_1 & G'_1 & B'_1 \\ R'_2 & G'_2 & B'_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R'_n & G'_n & B'_n \end{bmatrix}_{n \times 3} \quad n \text{ 個色塊影像的線性分佈色彩資料}$$

$$M = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad \text{具有最小色差的 } 3 \times 3 \text{ 線性轉換矩陣}$$

依據 3×3 線性轉換矩陣的轉換方式 $T \approx SM$ ，若要使得 T 與 SM 之間有最小的平方誤差，可用尤拉方程式（Euler Equation）推得

$$M = (S^T S)^{-1} S^T T$$

(5) 三維對照表 3D LUT

三維對照表 3D LUT 提供了較精準的色彩空間轉換及色彩校正機制，不需要經過複雜的運算，藉著快速檢索三維表格的方式，利用設備輸入的線性分佈色彩資料 (R', G', B') 來取得與設備無關的色彩資料 (L, a, b) ，圖 11 顯示了利用三維對照表 3D LUT 的色彩轉換及校正檢索方式。

不過，回到現實面來說，一個完整的三維對照表 3D LUT 有 256^3 個格子點，每個格子點有三筆資料，若每筆資料需佔用 1 Byte，那麼共需要 $256^3 \times 3 = 48 \text{ MB}$ 的空間來儲存，所以不可能針對每一個格子點所代表的 CIELAB 色彩去做測定，大都是對 R' 、 G' 、 B' 三軸逐一以 n 點樣本取樣（一般來說 $n = 5、9、17$ 或 33 ），共有 n^3 個格子點所對應的 CIELAB 色彩值，然後將此 n^3 個格子點所形成的三維對照表 3D LUT 交由色彩管理模組（如 ICM、Color Sync、ACE 等）以三維插值法將所有資料補齊[1]。

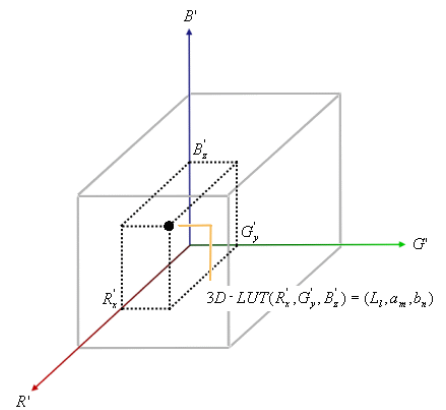


圖 11 3D LUT 的色彩轉換及校正檢索

6. 光源轉換與色彩空間轉換

當取像設備所取得的影像經過校正程序的處理後，除了色彩的校正外，色彩空間也由 RGB 轉換為 CIELAB，為了顧及影像格式的一般性與普遍性，是有必要再將影像轉換回 RGB 色彩空間，完整的轉換程序有下列四個步驟，最後得到的影像即為所求[8]。

(1) Lab_{D50} 轉換為 XYZ_{D50}

本研究採用的標準色彩導表 Kodak Q60 R2 IT8.7/2-1993 2004:04，廠商所提供的色塊色彩正確值是在 D50 光源環境下所取得，依據 CIEXYZ 色彩空間與 CIELAB 色彩空間的轉換，以及 D50 光源的三刺激值分別為 $X_{white} = 96.42$ 、 $Y_{white} = 100.00$ 、 $Z_{white} = 82.49$ ，我們可推得 Lab_{D50} 至 XYZ_{D50} 的轉換。

若 $L \leq 7.9996$

$$Y = \frac{100.00}{7.787} \times \frac{L}{116}$$
$$X = \frac{96.42}{7.787} \times \left(\frac{a}{500} + \frac{L}{116} \right)$$
$$Z = \frac{82.49}{7.787} \times \left(\frac{L}{116} - \frac{b}{200} \right)$$

若 $L > 7.9996$

$$Y = 100.00 \times \left(\frac{L+16}{116} \right)^3$$
$$X = 96.42 \times \left(\frac{a}{500} + \frac{L+16}{116} \right)^3$$
$$Z = 82.49 \times \left(\frac{L+16}{116} - \frac{b}{200} \right)^3$$

(2) XYZ_{D50} 轉換為 XYZ_{D65}

代表白晝室外光的 D65 光源是目前最普遍與最常用的標準光源，我們可使用 Bradford 轉換將影像色彩資料由 D50 光源轉換為 D65 光源。

$$\begin{bmatrix} X_{D65} & Y_{D65} & Z_{D65} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{D50} & Y_{D50} & Z_{D50} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.9556 & -0.0284 & 0.0124 \\ -0.0232 & 1.0101 & -0.0206 \\ 0.0633 & 0.0211 & 1.3306 \end{bmatrix}_{D50 \rightarrow D65}$$

(3) XYZ_{D65} 轉換為 $R''G''B''$

以 D65 光源為參考白點的 CIEXYZ 與 RGB 色彩空間的轉換如下。

$$\begin{bmatrix} R'' & G'' & B'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{D65} & Y_{D65} & Z_{D65} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 8.2633 & -2.4717 & 0.1418 \\ -3.9196 & 4.7838 & -0.5202 \\ -1.2712 & 0.1061 & 2.6959 \end{bmatrix}$$

(4) Gamma 函數轉換

(R'', G'', B'') 為線性分佈的色彩資料，為了配合人類視覺對於低亮度變化的感覺比對高亮度變化的感覺來得敏銳，必須使用下列 Gamma 函數將色彩資料由線性分佈方式轉換為非線性的分佈方式，一般來說 Gamma (以符號 γ 代表) 值介於 1.8 至 2.2 之間。

$$R''' = \text{Gamma}(R'') = 255 \times (R''/255)^{1/\gamma}$$
$$G''' = \text{Gamma}(G'') = 255 \times (G''/255)^{1/\gamma}$$
$$B''' = \text{Gamma}(B'') = 255 \times (B''/255)^{1/\gamma}$$

三、研究結果：

1. 掃描器 Umax Astra 4600 的色彩校正

(1)標準色彩導表各色塊色彩取得值

標準色彩導表 Kodak ANSI IT8.7/2 經由掃描器 Umax Astra 4600 掃描後而得到影像 (圖 12-1)，我們可以利用影像處理軟體 Photoimpact 來取得影像上各色塊的 RGB 色彩值，為了避免雜訊的干擾，同一色塊中可採用較多的取樣點，以其中位數或平均值來代表該色塊的色彩取得值 (如圖 12-2 所示)。

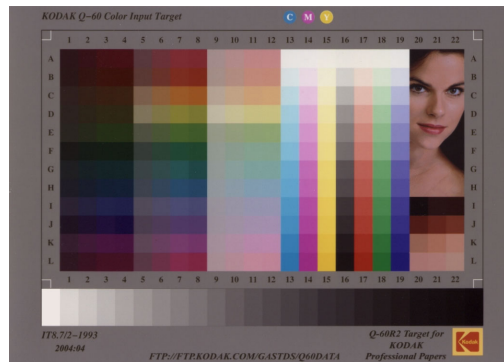


圖 12-1 掃描器取得的標準色彩導表影像

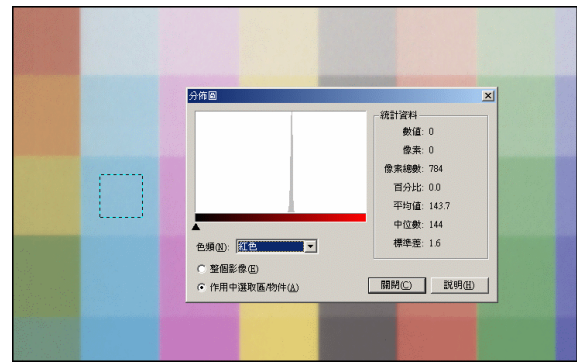


圖 12-2 以多個取樣點的平均值來避免雜訊的影響

(2)一維對照表 1D LUT

標準色彩導表下方的 24 個灰階色塊的色彩值取得後，就可以利用表格 2 的方法與 Matlab 軟體來實作各色調的一維對照表 1D LUT。

灰階色塊編號	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23		
色塊正確值 Y	81.4	71.0	63.3	55.8	48.5	41.8	36.1	31.7	27.4	23.0	18.9	15.6	13.2	10.8	8.4	6.1	5.1	3.7	2.7	2.0	1.3	1.0	0.8	0.5	0.0	
範圍調整 Y'	255.0	222.5	198.5	175.0	151.9	131.2	113.2	99.2	85.8	72.1	59.2	48.9	41.2	33.7	26.5	19.0	15.9	11.5	8.5	6.3	4.1	3.2	2.5	1.5	0.0	
各灰階色塊取得值	R	237	216	201	185	170	155	142	132	121	110	99	88	80	72	63	53	48	41	35	31	25	22	20	16	0
	G	230	210	195	179	163	147	134	123	112	100	88	78	71	62	53	43	38	31	25	21	16	14	12	7	0
	B	226	207	192	178	162	147	135	125	115	103	92	82	74	66	57	48	43	34	28	24	19	17	14	11	0

<p>以插值法製作各色調 1D LUT</p> <pre> Rmax=237; Gmax=230; Bmax=226; Ynorm; %載入範圍調整 y' RX; %載入各灰階色塊取得值 GX; BX; Rx=0:1:Rmax; Gx=0:1:Gmax; Bx=0:1:Bmax; Ry=interp1(RX,Ynorm,Rx,'spline'); Gy=interp1(GX,Ynorm,Gx,'spline'); By=interp1(BX,Ynorm,Bx,'spline'); plot(RX,Ynorm,'r*',Rx,Ry,'k:'); plot(GX,Ynorm,'g*',Gx,Gy,'k:'); plot(BX,Ynorm,'b*',Bx,By,'k:'); </pre>	<p>校正後之 R'G'B' 值</p>
---	----------------------

表格 2 掃描器 Umax Astra 4600 的一維對照表 1D LUT 實作

(3)3×3 線性轉換矩陣

將標準色彩導表上 228 個色塊的取得值 (RGB) 分別經過各色調一維對照表 1D LUT 轉換後填入矩陣 T ，將各色塊的正確值 (CIELAB) 填入矩陣 S ，再使用下列 Matlab 程式以迴歸分析的方法求得最佳 3×3 線性轉換矩陣 M 。

```

colorRsrc; %載入 228 個色塊取得值
colorGsrc;
colorBsrc;
for i=1:228 %將色塊色彩資料轉換為線性
    colorRlinear(i)=Ry(colorRsrc(i)+1);
    colorGlinear(i)=Gy(colorGsrc(i)+1);
    colorBlinear(i)=By(colorBsrc(i)+1);
end
colorL; %載入 228 個色塊正確值 Lab
colorA;
colorB;
for i=1:228 %產生 S 矩陣與 T 矩陣
    S(i,1)=colorRlinear(i);
    S(i,2)=colorGlinear(i);
    S(i,3)=colorBlinear(i);
    T(i,1)=colorL(i);
    T(i,2)=colorA(i);
    T(i,3)=colorB(i);
end
M=inv(S'*S)*S'*T; %產生最佳轉換矩陣

```

$$T = \begin{bmatrix} 18.09 & 11.65 & 3.10 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 19.91 & 34.77 & -67.27 \end{bmatrix}_{228 \times 3}$$

$$S = \begin{bmatrix} 12.68 & 6.80 & 7.34 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 6.27 & 7.35 & 68.60 \end{bmatrix}_{228 \times 3}$$

$$M = (S^T S)^{-1} S^T T = \begin{bmatrix} 0.1776 & 0.4453 & 0.1295 \\ 0.1820 & -0.5390 & 0.4053 \\ 0.1182 & 0.0926 & -0.5279 \end{bmatrix}$$

一維對照表 1D LUT 與 3×3 線性轉換矩陣所組成的校正程序的校正能力如何？我們以各色塊校正後的 CIELAB 色彩值與正確值間的平均色差來做個評估，經過計算後得到 228 個色塊的平均色差為 20.02、標準差為 8.44、最大誤差為 46.66、最小誤差為 3.75。

(4) 三維對照表 3D LUT

相對於輸出設備，影像輸入設備很難製作出以三維對照表 3D LUT 為轉換機制的色彩描述檔，因為我們可以很精準地產生任何 RGB 色彩空間的取樣點供輸出設備輸出，但是，很難去製作出想要的 RGB 色採空間取樣點供輸入設備來取像，圖 13 顯示的是標準色彩

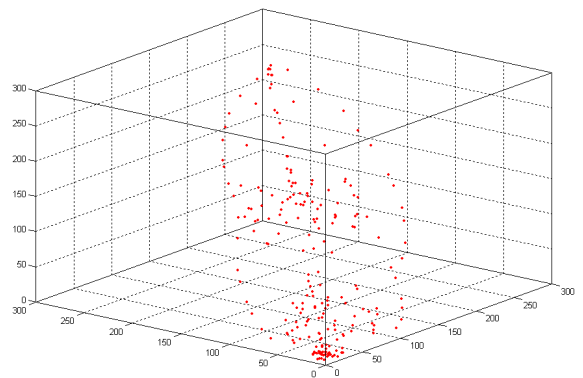


圖 13 228 個色塊在 RGB 色彩空間的分佈情形

導表 228 個色塊的色彩取得值經過一維對照表 1D LUT 轉換後在 RGB 色彩空間的分佈情形，由於分佈的不是

很均勻，我們很難依據這些取樣點以插值法來建置三維對照表 3D LUT。

Matlab 軟體中的多項式迴歸分析法提供了尋找兩組資料間的最佳轉換多項式的方式[4]，我們可將其套用到取像設備的線性分佈色彩資料(R', G', B')及與設備無關的色彩資料(L, a, b)間的轉換，再利用多項式迴歸分析法求得的最佳轉換多項式來建置三維對照表 3D LUT。

三維 n 階多項式的轉換函數定義如下，其中 a_{ijk} 、 b_{ijk} 、 c_{ijk} 為係數， R' 、 G' 、 B' 為取像設備的線性分佈色彩資料， L 、 a 、 b 為與設備無關的色彩資料， n 為多項式的階數。

$$\begin{aligned} L &= f_L(R', G', B') = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ijk} R'^i G'^j B'^k, \quad i + j + k \leq n \\ a &= f_a(R', G', B') = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n b_{ijk} R'^i G'^j B'^k, \quad i + j + k \leq n \\ b &= f_b(R', G', B') = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n c_{ijk} R'^i G'^j B'^k, \quad i + j + k \leq n \end{aligned}$$

我們可以用矩陣的型態來表示三維 n 階多項式轉換函數，然後再利用 Matlab 軟體中的多項式迴歸分析法來求得最佳的轉換多項式。以 $n = 2$ 為例，三維 2 階多項式轉換函數如下：

$$\begin{aligned} L &= a_0 + a_1 R' + a_2 G' + a_3 B' + a_4 R'^2 + a_5 R' G' + a_6 G'^2 + a_7 R' B' + a_8 G' B' + a_9 B'^2 \\ a &= b_0 + b_1 R' + b_2 G' + b_3 B' + b_4 R'^2 + b_5 R' G' + b_6 G'^2 + b_7 R' B' + b_8 G' B' + b_9 B'^2 \\ b &= c_0 + c_1 R' + c_2 G' + c_3 B' + c_4 R'^2 + c_5 R' G' + c_6 G'^2 + c_7 R' B' + c_8 G' B' + c_9 B'^2 \end{aligned}$$

矩陣型態的表示法

$$[L \ a \ b] = [1 \ R' \ G' \ B' \ R'^2 \ R'G' \ G'^2 \ R'B' \ G'B' \ B'^2] \begin{bmatrix} a_0 & b_0 & c_0 \\ a_1 & b_1 & c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_9 & b_9 & c_9 \end{bmatrix}$$

利用多項式迴歸分析法求得最佳的轉換矩陣

$$T = \begin{bmatrix} L_1 & a_1 & b_1 \\ L_2 & a_2 & b_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_n & a_n & b_n \end{bmatrix}_{n \times 3}$$

$$S = \begin{bmatrix} 1 & R'_1 & G'_1 & B'_1 & R_1'^2 & R'_1 G'_1 & G_1'^2 & R'_1 B'_1 & G'_1 B'_1 & B_1'^2 \\ 1 & R'_2 & G'_2 & B'_2 & R_2'^2 & R'_2 G'_2 & G_2'^2 & R'_2 B'_2 & G'_2 B'_2 & B_2'^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & R'_n & G'_n & B'_n & R_n'^2 & R'_n G'_n & G_n'^2 & R'_n B'_n & G'_n B'_n & B_n'^2 \end{bmatrix}_{n \times 10}$$

$$M = \begin{bmatrix} a_0 & b_0 & c_0 \\ a_1 & b_1 & c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_9 & b_9 & c_9 \end{bmatrix}_{10 \times 3}$$

$$T \approx SM$$

$$M = (S^T S)^{-1} S^T T$$

求得最佳的轉換多項式後，我們就可以依實際的需要求得取樣點的色彩值，進而用來建置三維對照表 3D LUT。經過程式實作計算後，各階多項式轉換函數的色彩校正能力如表格 3 所示。

三維 n 階多項式	平均色差	標準差	最大誤差	最小誤差
$n = 1$	14.08	7.49	47.64	2.15
$n = 2$	7.31	4.91	31.81	1.06
$n = 3$	4.44	3.41	24.43	0.4
$n = 4$	2.75	2.10	16.81	0.33

表格 3 三維 n 階多項式轉換函數的色彩校正能力（利用標準色彩導表的 228 個色塊）

(5) 增進色彩校正能力的探討

由二-1-(4)節色彩空間的轉換知道，RGB 色彩空間的色彩資料是無法直接轉換至 CIELAB 色彩空間的，必須先經過線性轉換至 CIEXYZ 色彩空間，再透過立方根函數（指數為 1/3 的指數函數）轉換至 CIELAB 色彩空間。但是上述的 3×3 線性轉換矩陣與三維對照表 3D LUT，均是將色彩資料由 RGB 色彩空間校正並轉換至 CIELAB 色彩空間，我們可以做個嘗試，除了將輸入的 RGB 色彩資料由非線性分佈轉換為線性分佈外，再加上立方根函數的處理，說不定會有更佳色彩校正能力。在實作上，我們可以將此概念融入

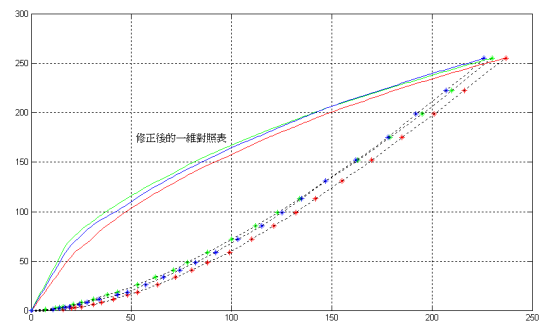


圖 14 修正後的一維對照表 1D LUT

到一維對照表 1D LUT 中，圖 14 中的紅、綠、藍三條曲線，就是經過線性分佈轉換及立方根函數處理過的一維對照表 1D LUT。由表格 4 可以看出，使用修正後的一維對照表，確實可以增進色彩的校正能力。

色彩轉換與校正機制	平均色差	標準差	最大誤差	最小誤差
3×3 線性轉換矩陣	5.92	3.40	24.73	0.68
三維 1 階多項式	2.89	2.86	24.88	0.24
三維 2 階多項式	1.47	1.18	11.13	0.06
三維 3 階多項式	1.10	0.70	5.93	0.24
三維 4 階多項式	0.84	0.52	2.81	0.07

表格 4 使用修正後的一維對照表各機制的色彩校正能力（利用標準色彩導表的 228 個色塊）

(6) 掃描器 Umax Astra 4600 的色彩校正實例

我們以兩張照片作為原始影像（圖 15-1 與圖 16-1），使用 Umax Astra 4600 取得掃描影像後分別以各種校正程序來校正色彩，再搭配光源轉換與色彩空間轉換將影像保有原有的色彩空間格式，由兩張照片的校正實例看來，成果還算不錯。

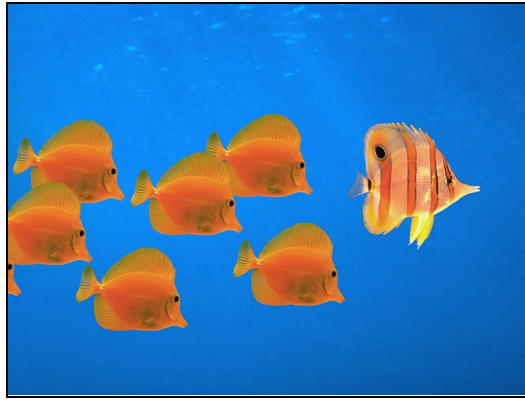


圖 15-1 原始相片(一)



圖 15-2 掃描影像



圖 15-3 3×3線性轉換矩陣



圖 15-4 三維 1 階多項式



圖 15-5 三維 2 階多項式



圖 15-6 三維 3 階多項式



圖 15-7 三維 4 階多項式



圖 16-1 原始相片(二)



圖 16-2 掃描影像



圖 16-3 3×3線性轉換矩陣



圖 16-4 三維 1 階多項式



圖 16-5 三維 2 階多項式



圖 16-6 三維 3 階多項式



圖 16-7 三維 4 階多項式

2. 網路攝影機 Logitech QuickCam 的色彩校正

(1) 拍攝裝置與一維對照表 1D LUT 製作

由於數位相機類之取像設備所面對的是自然界多變的光源，所以其色彩校正遠比固定光源的掃描器困難，本研究是將網路攝影機在固定光源的情況下做色彩校正，這種固定光源的情形普遍運用在相片畫冊翻拍、網路購物商品拍攝、醫學內視鏡影像等需要忠實呈獻原有色彩的作業上，整個取像裝置如圖 17-1 所示，圖 17-2 是標準色彩導表經由網路攝影機 Logitech QuickCam 拍攝後得到的影像，並依此來實作各色調的一維對照表 1D LUT，由表格 5 可以看出我們拍攝裝置的光源比較欠缺藍色光部分，所以拍攝出來的影像會比較偏向黃色。



圖 17-1 網路攝影機拍攝裝置

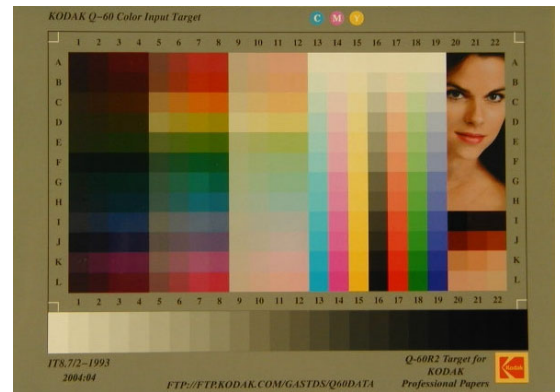
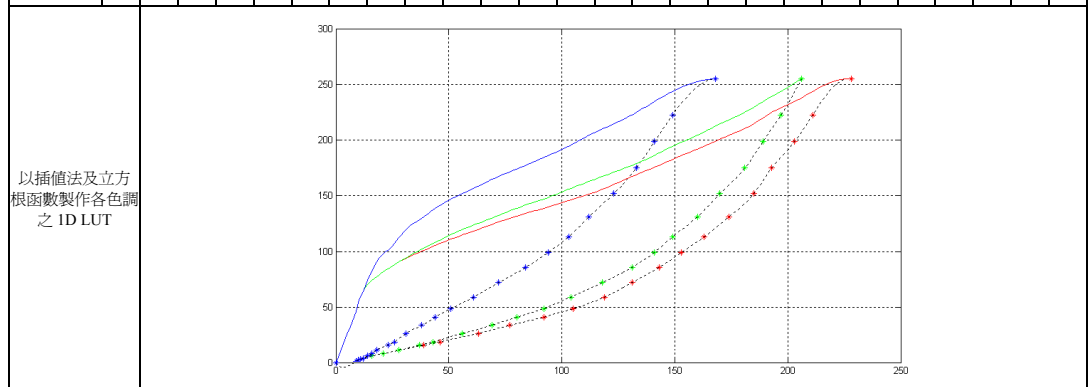


圖 17-2 網路攝影機取得的標準色彩導表影像

灰階色塊編號	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23		
色塊正確值 Y	81.4	71.0	63.3	55.8	48.5	41.8	36.1	31.7	27.4	23.0	18.9	15.6	13.2	10.8	8.4	6.1	5.1	3.7	2.7	2.0	1.3	1.0	0.8	0.5	0.0	
範圍調整 Y'	255.0	222.5	198.5	175.0	151.9	131.2	113.2	99.2	85.8	72.1	59.2	48.9	41.2	33.7	26.5	19.0	15.9	11.5	8.5	6.3	4.1	3.2	2.5	1.5	0.0	
各灰階色塊取得值	R	228	211	203	193	185	174	163	153	143	131	119	105	92	77	63	46	39	28	21	16	12	11	10	9	0
	G	206	197	189	181	170	160	149	141	131	118	104	92	80	69	56	43	37	28	21	16	12	11	10	9	0
	B	163	149	141	133	123	112	103	94	84	72	61	51	44	38	31	26	23	18	16	14	12	11	10	9	0



表格 5 網路攝影機經過立方根函數處理過的一維對照表 1D LUT

(2)各項色彩轉換與校正機制的色彩校正能力

參照前述掃描器色彩校正的模式，我們可以 Matlab 軟體發展出網路攝影機的各项色彩轉換與校正機制，其個別的色彩校正能力詳列於表格 6。

色彩轉換與校正機制	平均色差	標準差	最大誤差	最小誤差
3×3 線性轉換矩陣	9.67	6.45	31.24	1.98
三維 1 階多項式	7.51	6.15	29.88	0.78
三維 2 階多項式	4.14	3.73	23.08	19.36
三維 3 階多項式	2.82	2.62	19.36	0.08
三維 4 階多項式	2.24	2.10	14.96	0.15

表格 6 網路攝影機各項機制的色彩校正能力（利用標準色彩導表的 228 個色塊）

(3)網路攝影機 Logitech QuickCam 的色彩校正實例

我們以兩張照片作為原始影像（圖 18-1 與圖 19-1），使用 Logitech QuickCam 在固定光源的情形下取得拍攝影像，再分別以各種校正程序來校正色彩，並搭配上光源轉換與色彩空間轉換使得影像還原回原來的 RGB 格式，由於光源的關係，會使得所拍攝的影像偏黃，不過經過校正程序後，大都可以還原並呈現出原有的色彩。



圖 18-1 原始相片(三)

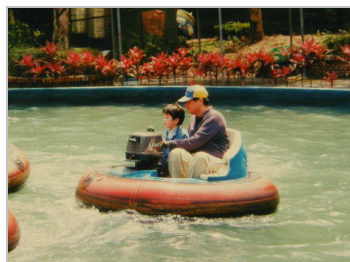


圖 18-2 拍攝影像



圖 18-3 3×3 線性轉換矩陣



圖 18-4 三維 1 階多項式



圖 18-5 三維 2 階多項式



圖 18-6 三維 3 階多項式



圖 18-7 三維 4 階多項式



圖 19-1 原始相片(四)



圖 19-2 拍攝影像



圖 19-3 3×3線性轉換矩陣

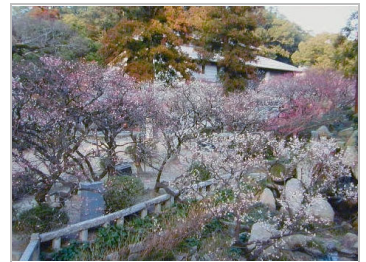


圖 19-4 三維 1 階多項式



圖 19-5 三維 2 階多項式

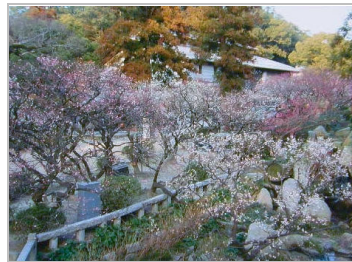


圖 19-6 三維 3 階多項式

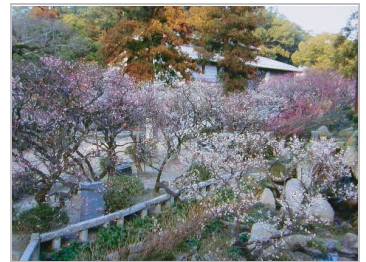


圖 19-7 三維 4 階多項式

四、討論與應用：

眼尖的人依然可以從圖 15 與圖 16 中發現，原始的相片與校正後的影像仍然有色差的
存在，我們經過討論後認為主要原因可能有下列兩點：

- 本項研究所採用的標準色彩導表 Kodak Q60 R2，其廠商提供的各色塊正確值是在 D50 光源下取得，我們將校正後影像做色彩空間轉換回原有 RGB 格式的時候，是採用 sRGB 色彩空間，而 sRGB 色彩空間的考白點為 D65 光源，所以在色彩空間轉換前需先做光源轉換由 D50 轉換成 D65，可能因為光源轉換的關係而造成了些微的色差。
- 標準色彩導表廠商所提供的各色塊正確值是整批製造時的平均值，所以其本身就存在著差異性，而且我們所採用的標準色彩導表 Kodak Q60 R2 IT8.7/2-1993 2004:04 為 2004 年 4 月出廠，因時間的關係而使得色彩導表上的色塊或許有些變質。

我們的色彩校正程序目前僅是以 Matlab 軟體來模擬色彩描述檔的色彩轉換機制，來達到廉價取像設備之色彩校正功能，若是真的能夠製作出設備的色彩描述檔，那麼在使用上會更具有便利性。由於本項研究所提出的方法具有共通性與一般性，所以同樣的方法應該可以用來作用在其他的取像設備，諸如照相機以及固定光源下的數位相

機、攝影機等。

五、結語：

廉價取像設備如掃描器與網路攝影機在價格上具有經濟實惠的優勢，但是其所取得的影像均有不小的色差存在，若是因此而去購買昂貴的彩色管理軟體來校正色差，實在是非常沉重的負擔，本篇研究以色彩描述檔的色彩轉換機制為基礎，以便宜的標準色彩導表發展出針對廉價取像設備的色彩校正程序，無論從理論數據上的探討以及實際影像上的測試看來，我們的校正方法確實有效，能讓原有的色彩較精準地重現。

六、參考資料：

1. 陳鴻興, 陳君彥譯, “基礎色彩再現工程”, 全華科技圖書股份有限公司, 2004。
2. 鄭柏左著, “色彩理論與數位影像”, 新文京開發出版股份有限公司, 2004。
3. MD 研究會, DTPWORLD 編集部著, “圖解色彩管理的實踐”, 博碩文化股份有限公司, 2005。
4. 洪維恩著, “Matlab7 程式設計”, 旗標出版股份有限公司, 2005。
5. Specification ICC.1:2004-04 “Image technology colour management - Architecture, profile format, and data structure,” International Color Consortium, 2004.。
6. White Paper #17, “Using ICC Profiles with Digital Camera Images,” International Color Consortium, <http://www.color.org/whitepapers.html>。。
7. Dawn Wallner, “Building ICC Profiles - the Mechanics and Engineering,” http://www.color.org/info_profiles2.html, 2000.。
8. D. Pascale, “RGB coordinates of the Macbeth ColorChecker,” <http://www.babelcolor.com>, 2003.。

評語

利用標準彩色導表在數位影像設備所呈現的色彩而發展出一套色彩轉換機制，並且用於校正一般取像設備的色彩，以呈現原貌。此作品從理論的建構到實驗的驗證，皆證明其實用性，是一好作品。