

第一章 論文介紹

1.1 研究動機

隨著數位科技技術的成熟，數位資訊應用亦趨廣泛，在眾多數位產品中，數位相機的價格在一般大眾的消費能力範圍內，其功能及影像品質也持續增強中，因此數位相機成為數位影像製作的主要來源之一，儘管許多數位相機已在市面上流通，彩色影像處理流程的設計仍未在過去的文獻中被詳細描述，因為影像處理流程的設計與考量仍是許多相機大廠的機密技術。

如果沒有正確的處理流程，是不可能得到優良且穩定影像品質，即使每一階段都有用適合的演算法，要判斷如何將上述的處理階段放置在影像處理流程的正確位置上是非常困難的，各級的影像處理擺放順序將影響最後照片的品質，除此之外，還有種種其他的因素關係著數位相機的好壞，諸如像是其影像品質或是效率等等。

這篇論文提出一個彩色影像處理流程，演算流程處理從 CCD 或 CMOS 感測器上擷取的原始資料到最後為正確顏色和色調的照片，雖然有許多獨立影像處理的方法已經發表[1 - 3]，但卻沒有優良的影像處理整合流程；而在該彩色影像處理流程系統中，已將理論影像科學和實際影像處理流程之間的缺口建立起橋樑。經由提出的影像處理演算法，計算各種景色在各種光源下得到不錯的結果，證明出提出的方法是很有成效的，而這樣處理流程便稱為彩色影像處理流程（Color Image Processing Pipeline，IPP）[4]。

一個典型的彩色影像處理流程通常包含了下列主要各階段：彩色濾鏡陣列插補（Color Filter Array，CFA），自動色階（Auto Level，AL），自動白平衡（Auto White Balance，AWB）[5 - 10]，雜訊濾除（Noise Filter，NF），色調重現（Tone Reproduction，TR），伽瑪校正（Gamma Correction，GC）[11]，邊緣增強（Noise Enhancement，NE），色彩飽和度增強（Color Saturation

Enhancement, SE), 以及色彩校正 (Color Correction, CC) [12 - 16] 等等彩色影像處理。

由於人的眼睛具有適色性，所以在任何光源下，人的眼睛以及大腦能仔細地分析從眼睛所接收的訊號，因應不同的色溫來顯示相同的白色，並適應環境使得白色物體看起來還是白色。但數位相機沒有這樣的能力，導致一般的照片，在早晨時分相片的顏色偏紅，而黃昏時則偏黃，就算同一張的白紙在不同的環境下被拍攝，如不同的時間，不同的光源，都會因此出現不同的偏差。為了能夠正確地記錄我們眼睛所看到的，數位相機則利用首先看到的色彩，來調整適當的色彩平衡以配合主題物體周圍的光源，使白色物體看起來還是白色，這種調整就被稱之為白平衡。所以白平衡設定對於數位攝影的領域實在佔據著舉足輕重的地位。

1.2 相關研究

在過去關於彩色影像處理的文獻相當的多，在此將區分為自動白平衡、色彩校正、色彩空間轉換及彩色影像處理流程四大類的文獻回顧。

1.2.1 彩色影像處理流程

Illgner et al. [4] 提出一數位影像處理流程，而其實現的平台為TI TMS320C549上，其影像最早從CCD感應器擷取後，再經過一連串的影像處理過程，並且在最後將影處給予壓縮的處理來節省空間。Black Clamp是為了將CCD的暗電流消除，所以會所有的像素值都給以一個偏移量，但小心不要使負值發生。Lens Distortion Compensation是為了解決鏡頭在影像亮處所產生非線性的問題，此程序可改善影像中心點至影像邊界處的亮度感覺，而其調整大小當然就是依像素在影像中的位置來決定。Fault Pixel Interpolation是為了挽救在CCD中少數的點缺陷。White Balance其目的是為了解決影像在

因為不同光源下產生的色偏情形，一般的作法是將綠色不動，調整紅色和藍色，使三個元素平衡一致。CFA Interpolation其目的是將Bayer Pattern上遺失的像素計算出來，而該程序最大的好處是節省CCD的使用數目，而該程序也是最耗時的步驟。Gamma Correction是為了解決顯示器非線性的問題，Color Space Conversion是為了解決將RGB轉成YCbCr來因應壓縮的處理，Edge Enhancement為了增強物件的銳利度。Auto Focus為影像自動對焦。Image Compression則為了節省影像儲存空間。

Koh et al. [20] 的作法是將色彩插補以及壓縮的過程做一個調換動作，也就是把 CFA Pattern 所截取到的色彩陣列原始資料直接做壓縮的動作，等到有需要檢視影像的時候，先將資料解壓縮還原為原來的色彩陣列原始資料，然後再進行全色彩插補的動作，把影像插補為全影像。因為是將 CFA 的原始資料直接壓縮，而其原始資料為完整資料的三分之一大小，故若是採用建議的影像壓縮流程，則壓縮大小亦可達到傳統方式的三分之一大小。本篇論文所採用的壓縮法仍是 JPEG 壓縮法，而此壓縮法較適用於低頻的影像，意即未插補的影像其實是不適合 JPEG 壓縮法。因為在 Bayer pattern 下，其實是沒有足夠的像素來實現每一個位置的轉換，所以改為每個區塊具備兩個綠色，一個紅色以及一個藍色。故在 RGB 轉成 YCbCr 的過程中就得做一些的轉換，將色彩系統轉為 YCbCr 之後，便是將 CbCr 色度的部份直接用 JPEG 的壓縮法壓縮。此時剩下 Y 部份形成梅花陣列，故本篇論文作者有提出一個壓縮架構，稱為結構分離法，目的是為了將梅花陣列轉為矩形陣列以方便 JPEG 可以做壓縮動作。

Quinn et al. [22] 提到，在影像處理中，將軟體和 FPGA 結合不僅能夠降低成本，而且可將處理的效能提高，除此之外，在並行處理中的各個元件皆採用不同的影像演算法，而這各個元件便是軟體和 FPGA，以軟體和硬體結合的架構之下，將會產生最有效率的平行運算，換言之，從事影像處理的分

析人員便可以專心致力於元件的選用，而使需要創造性的部分交由人去執行，而創造力低的工作交給電腦去做，如此就能使效能達到最大。本篇論文將會著墨在平行運算的任務指派上，故將會使用窮舉搜尋法、整數線性規劃法以及區域搜尋法來做這一方面的探討，文中會使用二十組平行運算元件的架構來做例子。因為 FPGA 的速度是比軟體來得快，所以原則上來說，對於小的影像最好是用軟體來處理，而大的影像則是用 FPGA 來實現。

1.2.2 自動白平衡

Gasparini et al. [5] 提出一色彩處理架構，可用來偵測且移除數位影像中其色彩失真的部位，其中偵測的類別區分為四類，no cast，evident cast，ambiguous cast，intrinsic cast。一旦影像中確定出現evident cast或是ambiguous的情形，便會將影像送往失真移除的步驟。偵測色彩失真的影像要先轉至 CIELAB 的色彩空間，並且統計其顏色分佈是否遠離 ab 色彩平面的圓心，若遠離圓心則表示失真越嚴重，越靠近圓心則失真的情形較低，此概念類似灰世界的想法，而本篇論文共測試了超過 650 張影像。

Barnard et al. [7] 提到其論文實現了很多不同的演算法，然而，其使用的實驗輸入數值是“合成”出來的資料，之所以這樣做的原因是因為鏡頭的物理特性未知以及影像的前置處理也是未知的，該兩者皆會影響實驗的正確性，所以採合成的數值資料。另一篇論文[8]使用的實驗輸入資料則是真實的影像，同樣也實現了很多不同的演算法，然而，其中共採用了 33 種不同的影像，並且分別在 11 種不同的光源下。其中實現演算法包含了兩個不同版本的灰世界方法，Retinex 方法，Gamut-Mapping 方法，類神經方法以及 Color by Correlation 方法。並且對這些方法各別針對其景物亮度，所有亮度的強度以及影像亮度的一致性，這三個方向來作評比。

Finlayson et al. [10] 的論文在探討如何預測未知光源。也就是說，經由

本篇論文的方法，可以把一張未知光源的原始照片，還原其拍照時所處的光源。在採用該方法來預測光源前，必須先建立在各種不同光源下與其對應顏色所建立的資料庫，再經由該資料庫和欲校正之影像作色域比對，其最相似度最大者，則採用該光源下之對應顏色來校正“生”的影像。然而每種光源需蒐集足夠數量的來源影像，以便來製作出高準確度的資料庫。舉例來說，針對標準光源D65而言，我們搜集在D65下，各式各樣不同場景的影像資料，並將其各別從*sRGB*色彩空間都轉換至*CIEXYZ*的色彩空間，並且統計其色彩分佈情形。如此一來，便可以得到棋盤似的二維平面分佈圖，再者，將該光源下，所有不同場景的影像資料都轉換至*CIEXYZ*的色彩空間，將可得到*CIEXYZ*的三維立體分佈圖。接下來，將光源下佔據最大色值的數目當作正規化的依據，將其他色值做正規化動作，如此便可以得到該光源下與其對應顏色的資料庫。將要校正的原始影像同樣轉換至*CIEXYZ*的色彩空間，比對最接近的色彩組合，便由該光源來修正該原始的影像。

Funt et al. [9] 使用類神經網路來分析建立影像和光源間的關係，也就是說，經由類神經網路的方式，可以將影像校正至標準光源下的色彩。其實驗的結果顯示出該方法比灰世界與最亮點好，但是，該結果只有在局部區域有較佳的成果，這意味著類神經方法只有適用於局部影像空間區域。然而不幸的是，一張影像的光源往往不是單一的，所以，使用類神經的方法時，其光源必須是單一的，而且是針對影像中局部的區域。在運用類神經方法時，其影像中的*RGB*要先轉換到*rg*空間，其值域便會分佈在單位長度的三角形內，而公式為 $r = R/(R + G + B)$ ， $g = G/(R + G + B)$ ，而*rg*空間其取樣單位為*S*，故所有的chromaticity都是以*S*的平方大小取樣下得到的，每個平方大小又對應於每個類神經網路的神經元輸入，當該神經元為0時，表示在*rg*空間中該*RGB*值域是不存在於影像中的，而該神經元為1時，則表示在*rg*空間中該*RGB*值域是存存於影像中。而此取樣的概念，也將會造成一些chromaticity的解析度

降低的情形。但是另一個好處是神經元的輸入便都是獨立的，如此一來，可大大降低輸入資料的大小，類神經網路的輸出端會產出r和g的值，而該值會介於0和1之間。本篇論文作者分別採用256、512、1250及5000的網路層大小來做訓練，以1250大小為例，其取樣率為0.020，而隱藏層為16-32個神經元，輸出層則只有2個神經層。

Lam[18]介紹了灰世界以及Retinex的作法，灰世界和Retinex有各別的優點。除此之外，本篇論文作者提出一個平方對應式將這兩種方法作一個結合動作，並且可以同時保有灰世界及Retinex的優點。簡單來說，灰世界的想法就是假設這個世界就是一個灰色的世界，而所謂灰色，就是指RGB這個元素都是一樣時的色階，一旦經由該影像得知紅綠比值及藍綠比值時，便可以經由該比值去調整影像的色彩去符合灰世界的想法，由於灰世界的想法是假設RGB這個元素都一樣，所以，如果影像的顏色複雜度夠高，也就是色彩非常豐富的場景，那麼使用灰世界的做法，通常都可以得到很好的效果，然而，如果影像的色調有大部份都呈現某個色系的趨勢，那麼失敗的情形會非常大。而Retinex的做法為找尋影像中其RGB三個元素中，其各別最大的數值，一旦找到之後，便將紅綠比值及藍綠比值用來當作紅色及藍色的增益值，進而調整這張影像的色彩。可是如果該原始影像若是有呈現過曝的情形，也就是其得到最大值已經是該數值系統的極限時，該方法也就會失效了，因為其比值都會變成1。

Weng et al. [19] 採用類似最亮白點的方式來計算白平衡，而特別之處在於邊界值是動態決定的。同樣地，分成兩個步驟，第一階段是偵測最亮白點，第二階段是調整影像。首先，影像需先切割成12等份的區塊，並且將RGB轉換至YCbCr色彩空間，並且各別計算每個區塊中Cb以及Cr的平均值。根據該12等份的區塊找出Near White Region，我們再將The Near White Region中最亮的前百分之十挑選出來，取其RGB的平均值，而為了保持整張影像維持在

相同的水平，再把整張影像中最大的Y取出，便可以得到各元素的增益值。再運用Von Kries模型，便可以得到調整後的三元素了。

Lee[3]在書中有提到，黑體幅射其色彩變化類似於標準日光下的反應，藉此特性我們可以將此應用於影像處理系統中。在一個窄頻影像系統（小於100nm）中，其黑體幅射在色彩空間取對數的反應幾乎是呈現線性，這個現象有助於影像處理的運作，因為線性的運算只需要簡單的數學操作即可完成。

1.2.3 色彩校正

Lee[3]在書中有提到，由於數位影像擷取感應裝置於製造時，無法保證所有的CMOS或CCD都有完全一樣的光學物理特性，所以必須要有一個色彩校正的影像處理，以便將所有的CMOS或CCD都校正成同樣的光學物理特性。首先第一步便是移除感應響應的非線性特性，也就是把數位影像資料轉換到線性空間，一旦將色彩影像資料轉換到線性空間後，我們便可再將色彩影像資料轉換到其他的色彩空間，諸如像是CIEXYZ或是CIELAB等色彩空間，而實現的方式通常便是針對三個彩色元素紅綠藍，各別使用一個一維的查表法來做轉換，要不然便是採用一個三乘三的矩陣來省略其資料表的體積，然而， 3×3 矩陣的方式是較為方便使用。

1.2.4 色彩空間轉換

Connolly et al. [17] 主要探討的問題在於如何有效率地將色彩空間RGB轉換至CIELAB，其著眼點在於時間，空間，演算複雜度以及精確度來作分析。本篇論文作者之所以會研究這個轉換問題有兩個原因：數位相機必須能夠產出穩定且重現性高的數位影像、整張數位影像的處理時間要在很短的時間內完成。然而之所以會造成轉換困難的原因當然是因為轉換過程中有一個立方開根號的動作，若是我們將所有的可能輸入組合都做成LUT，那麼這個

三維的矩陣將會有16,777,216個數。作者以512×512的全彩點陣圖檔，在Pentium 133MHz上，以Pascal語言，浮點數並且採用標準函數EXP (exponential) 以及LN (natural logarithm) 來實現色彩空間轉換花費了81秒；然而相同的程式碼，用C語言實現，使用在math.h中的exp及log標準函式，則花費了22秒。以上這些時間都不包含了影像擷取或是讀取硬碟資料的時間。作者一共使用泰勒展開式、牛頓法以及查表法三種方式來驗證其各項評比。其中泰勒法採用六階運算，產生的最大誤差為176，是發生在 $R=2$ ， $G=2$ ， $B=4$ 時；而牛頓法因為在每次的疊代中含有一個除法的運算，然而，即使是在疊代八次的運算後，也是沒有得到很好的效果，更何況速度太慢了；查表法是最快速的方式，但較耗費空間。用以計算其精確度的評比方式為 $\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$ 。從歸納的結論可以看到查表法為最佳的方法，而其表的取得從一般電腦的運算即可得到，對於複雜的計算便有了解決方案。

1.3 問題探討

許多存在於過去被提出的彩色影像處理流程中，普遍的基本問題如下：

- (a) 大部分彩色影像處理流程設計都缺少彩色影像科學的基礎，被設計出來的影像流程都不夠嚴謹。
- (b) 一些彩色影像處理流程於 RGB 、 $YCbCr$ 、 $CIEXYZ$ 及 HIS 色彩空間進行影像處理。但這些色彩空間中，其亮度和彩度卻不是完全的分離，並且已被證明非均勻導致於太複雜，而無法去掌控色彩平衡問題，所以改變上述色彩空間中的元素將會影響到亮度和彩度。
- (c) 由於伽瑪校正和色調重現是屬於非線性的轉換，其實是不應該被放置在彩色影像處理流程中前面的流程。因為 CCD 感測器放置於線性區段，以致於可以讓原始資料的每一元素能夠線性的呈現光的強度。然而，一些有問題的影像流程卻在影像處理的前級執行伽瑪校正來增加

暗部或物體的亮度。如此一來，整個影像資料便被非線性的轉換給破壞掉，而導致色彩失真的情形發生。

- (d) 許多可行的自動白平衡演算法使用探索式的想法，例如簡單灰世界假設或最亮點判斷。這些演算法並沒有完全使用感測器的特性去預測光源，以致於原始資料缺乏足夠的資訊去預測色溫及環境光源。
- (e) 假使後續的處理，諸如像是雜訊率除及邊緣增強放置在不正確的處理順序可能會產生一些不預期的顏色或缺陷。
- (f) 邊緣擷取及增強通常一起是完成或相依並行的執行。然而，如果演算法不是以全面來擷取邊緣的分佈狀況則可能會放大不想要的雜訊部分。儘管使用更強的雜訊濾除，但已被放大的雜訊不能輕易在彩色影像處理流程後級階段被消除掉。
- (g) 在原始資料及畫面的幅射校正及頻譜分佈必須要調整，如此才能夠讓原始資料能夠正確的轉換到 *sRGB* 色彩空間。然而，在過去的影像流程中，這些資訊有時沒有使用到及放置於適合的處理階段。

1.4 提出方法

我們提出的彩色影像處理流程乃是建立在彩色影像科學的基礎上，然而在整個彩色影像處理的系統中，由於為了要加大其影像數值系統的範圍，所以在過程中，其輸入的數值儘可能為最大範圍。由於點陣圖檔全彩格式為 24 位元，其紅綠藍各別為 8 位元，其資料範圍便是 0~255，在本系統中，最大數值範圍預設為十六位元。也就是說，當彩色影像資料要輸入時，會先將所有的資料都向左移位 8 次，如此一來，其數值系統中最大值將為 65535，而最小值仍為 0，而在整個彩色影像處理的過程中，一直都是處理 16 位元的大小，直到整個彩色影像處理流程結束之後，其輸出便改為點陣圖的八位元大小。

自動色階的處理在於希望能夠利用拉大其影像動態範圍的方式，解決影像的暗電流以及過曝的問題，而暗電流現象為 CCD 或 CMOS 在製造時的不完美所造成的誤差值，而過曝現象為影像的數值範圍超過其最大的可能表示範圍，而自動色階校正的方程式為線性的。然而，由於自動色階的處理置於色彩插補處理之前，所以處理的資料量會大為減少，會使影像處理的速率提高。

提出的自動白平衡方法乃是根據感測器的光譜響應以及色溫曲線調整為校正依據來預測光源，故原始資料必須具有足夠的資訊去預測色溫及環境光源，所以能夠正確估計其光源。此外，自動白平衡演算部份會只針對其影像中物件邊緣偵測的結果來做計算，此想法是為了避免影像中大色塊對於自動白平衡的紅藍因子計算將會左右其數值，因而，影響到彩色影像校正的結果，接下來一步的作法為利用一色溫曲線，來做為標準光源校正的依據，而該色溫曲線乃是經由各種光源下，並取其景物中標準色卡的灰階部份之綠紅比例以及綠藍比例，經由上百張不同場景以及不同時辰的統計而得來，一旦邊緣偵測結果用於色溫曲線時，只要逼近其色溫曲線上最靠近的光源，便可獲得紅色因子以及藍色因子，而該兩個因子便可用來校正彩色影像的結果，除此之外，由於自動白平衡的處理置於色彩插補處理之前，所以處理的資料量會大為減少，會使影像處理的速率提高。

提出的色彩校正演算法乃是由於數位影像擷取感應裝置於製造時，無法保證所有的CMOS或CCD都有完全一樣的光學物理特性，所以必須要有一個色彩校正的影像處理，以便將所有的CMOS或CCD都校正成同樣的光學物理特性。首先第一步便是移除感應響應的非線性特性，也就是把數位影像資料轉換到線性空間，一旦將色彩影像資料轉換到線性空間後，我們便可再將色彩影像資料轉換到其他的色彩空間，諸如像是CIEXYZ或是CIELAB等色彩空間，而實現的方式通常便是針對三個彩色元素紅綠藍，各別使用一個一維的

查表法來做轉換，要不然便是採用一個三乘三的矩陣來省略其資料表的體積，然而， 3×3 矩陣的轉換方式是較為方便使用的。

為了避免彩度以及亮度在演算的過程中同時被變動到，所以，我們提出的彩色影像處理流程會從線性 *RGB* 色彩空間轉到 *CIELAB* 色彩空間，因為 *CIELAB* 色彩空間為彩度以及亮度分離的色彩空間，並且其彩度分佈是非常均勻的，所以可以很安心的只對彩度或是亮度做影像處理。一旦將線性 *RGB* 色彩空間轉到 *CIELAB* 色彩空間之後，便可以進行色彩飽和度增強處理以及邊緣加強處理，色彩飽和度增強處理會針對 *CIELAB* 色彩空間中的彩度 a^* 以及彩度 b^* 做增強處理， a^* 在彩度空間的顏色為紅色以及綠色，而 b^* 在彩度空間的顏色為黃色以及藍色。邊緣增強處理則是針對 *CIELAB* 色彩空間中的亮度 L^* 做增強處理，然而由於 *RGB* 色彩空間轉換到 *CIELAB* 的過程中，必須要先轉到 *CIEXYZ* 色彩空間之後才可以轉到 *CIELAB* 色彩空間，所以此演算法太過於複雜，所以，可使用諸如整數化計算以及查表法的技巧來加速其轉換的速度，亦或是干脆將該彩色影像轉換處理流程改用硬體的方式來改善轉換效率。

此外，伽瑪校正的目的在於校正螢幕的非線性輸出，而且其演算式很單純，只有一個乘冪輸入的演算式，然而在處理較暗的像素值域時，如 $0 \sim 10$ 之間的色域時，由於不確定該像素是否為雜訊，而其雜訊會一下子全部都被放大，為了能夠希望這樣的轉變不要太劇烈，所以我們將原來的伽瑪校正的做一點小小的修改，也就是在處理較暗的像素值域時採用較緩和的線性方程式，以避免雜訊放大的可能性。此外，正由於伽瑪校正的處理是屬於非線性的轉換，所以我們會將這部份的影像處理階段移到影像處理流程的最後面階段去完成。

1.5 論文架構

第二個章節部份，我們將先敘述彩色影像處理系統的架構，及其各個彩色影像處理步驟的功能，從最初的原始資料影像到最後產生的完美影像。

第三個章節部份將會描述其架構下的各級影像處理程序，其說明其功能為何，除此之外，也會詳細說明各個流程的彩色影像學理及其相關研究。

第四個章節部份，將會說明提出的彩色影像處理流程架構其各個流程的詳細演算法。

第五個章節部份，由於我們要驗證在數位信號處理器平台上的效能，我們會介紹如何將彩色影像處理流程從個人電腦的環境如何移植到德州儀器的 TMS320C6416T DSK 發展平台上，並展示彩色影像處理流程的影像成果。

第六個章節部份，展示彩色影像處理流程的效果，並且和其他的自動白平衡方法做比較，並且說明如何驗證影像處理的效果。

第七個章節部份，結論與未來展望會在此章節做說明。