

第三章 色調重現相關研究及探討



3.1 相關背景

現今的生活中，彩色影像技術幾乎是無所不在。例如彩色攝影、彩色螢幕、彩色列印、彩色掃瞄和數位相機。要瞭解這些彩色影像技術應用之前，應該要先瞭解彩色影像技術，彩色影像技術結合了多門學科知識，包括了光學、醫學、心理學、數學及電腦科學。因此人類視覺系統對景物、光線和顏色的反應，色彩的描述有哪些色彩空間，以及常用於影像增強的技術是我們要瞭解和探討的。

3.1.1 影像的動態範圍

影像的動態範圍定義指的是最高亮度與最低亮度的比例，動態範圍可表現在亮度、解析度或是其他的物理特性上，在此論文針對的是亮度的動態範圍。在真實世界裡，從夜晚星空下到白天的雪地裡，動態範圍大約是 $10^8:1$ ，人的眼睛可以察覺到的範圍是 $10^6:1$ ，而一般的螢幕顯示器動態範圍是 $255:1$ 。影像的動態範圍是影響影像品質好壞的重要因素，動態範圍越高，所能看到的高亮度與低亮度的資訊越多，影像看起來也更貼近原始景物。

最常見的高動態範圍(High Dynamic Range, HDR)影像的例子就是在微暗屋內同時看室內和明亮室外的場景，相機無法同時清楚呈現室內和室外的影像，拍出來的照片不是一個過曝就是一個過暗，但人眼所看到的不論是被陽光照耀顯得很明亮的物體或是室內陰暗的角落，都可以看得很清楚。因此透

過影像處理的技術，可以將高動態範圍影像真實正確呈現在低動態範圍的輸出設備。近幾年開始，高動態範圍影像的處理技術越來越受到重視，應用在像是消費型相機或是商業軟體的後制處理上。

3.1.2 人類視覺系統

視覺是我們身上五種感知器官的其中一種，平時這五種感知器官不斷感覺周遭環境，收集大量資訊送到腦中來做判斷。視覺神經大約包括一百萬神經纖維來將影像從視網膜傳送到大腦。相較之下，聽覺神經只包含了大約 30,000 神經纖維，另外像背部根部纖維進入整個脊椎神經也少於一百萬。因此視覺接收大約佔整個感知器官神經輸入到大腦的 40%。所以很明顯的，我們的視覺信號處理是很複雜且重要的。大部分的信號處理是於大腦內來做處理和判斷。我們所處的生活環境，光的強度範圍是非常大的，在白天正午時是晚上子夜時亮度的一千萬倍，圖 3-1[4]是我們平常所處環境的自然光源亮度的範圍示意圖，並且整理了相對應是由我們視覺系統中的哪些細胞元來感知。我們的視覺系統根據主導環境光源的亮度來調整以適應變化很大的亮度範圍，因此我們的視覺系統器官能適應大約 14 log 單位的亮度範圍。

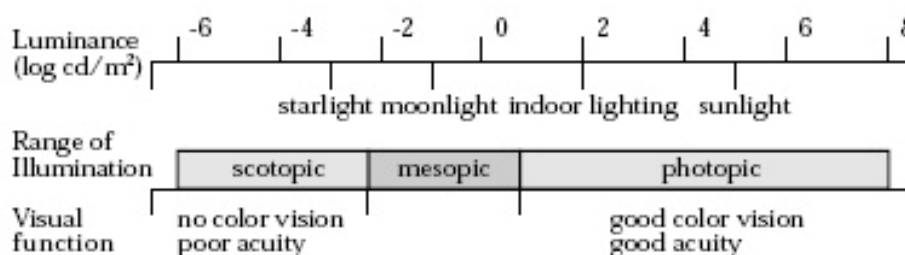


圖 3-1 自然環境亮度範圍及及相應視覺感知細胞元

儘管適應的能力讓視覺器官處於周遭亮度範圍很大的環境，但並不是說任何亮度下我們都能清楚看見東西。例如在很暗的光源下，我們的眼睛對亮度變化變得很敏銳，我們能夠察覺很細微的亮度變化，然而對於樣式和顏色的辨識能力就變得很差。這就是為什麼我們在昏暗的情況下很難去讀報紙，或是黎明前選錯要穿的襪子顏色。相對地，在白天的時候，我們的眼睛對顏色的變化變的很敏銳，但對於亮度變得很差，除非亮度的改變是很大的以致眼睛能察覺到。這也是為什麼無法在白天時無法看到空中的星星。另外，眼睛的適應性是無法及時的。大家應該都有過暫時性失明的經驗，例如去電影院看電影，當從亮的環境進入到很暗的環境時，必須要過幾分鐘才能適應找到你買的座位。同樣的當電影演完，從電影院出來時到很亮的戶外時，會感覺到目眩，必需眯著眼睛看東西，或者用手遮住眼睛，但過一會眼睛又能恢復正常。當我們在看東西時，所看到的景物以光的形式進入我們的視網膜，視網膜上分佈了許多離散光受體的視覺接收器，能將進來的光產生圖像的形式。光受體主要分成錐狀體(cones)及桿狀體(rods)，大約有七千五百萬到一億五千萬的桿狀體以及六百萬到七百萬的錐狀體。桿狀體分佈在視網膜(retina)表面，分佈面積大且為幾個桿狀體和一個神經末梢相連，所以能分辨的細節減少，但對低亮度卻很敏感，看到的是無色彩的景象，例如白天看到色彩鮮明的物體，在月光下卻看不出色彩，此現象稱為夜視覺(scotopic)或昏暗視覺，亮度範圍從 10^{-6} 到 10 cd/m^2 。錐狀體主要位於視網膜中央部分的中央凹(fovea)，每個錐狀體都與自身的神經末梢相連，所以能分辨微小的細節，對色彩很敏感，提供景物的顏色資訊，錐狀體視覺稱為白晝(photopic)視覺或亮光視覺，亮度範圍從 0.01 到 10^8 cd/m^2 。 0.01 到 10 的亮度範圍錐狀體和桿狀體同時作用，稱為 mesopic 範圍。因此桿狀體主要是提供所看到景物暗處影像，錐狀體則提供了所看到景物影像的細節和顏色。圖 3-2 為桿狀體和錐狀體分別在 scotopic 和 photopic 視覺亮度下正規化後的有效亮度函數分佈。桿狀細胞和錐狀細胞可感應光的波長從 400 nm 到 700 nm ，對不同波長的光有

不同的敏感度，桿狀細胞的有效最高峰值波長大約是 505 nm，錐狀細胞則為 555 nm。

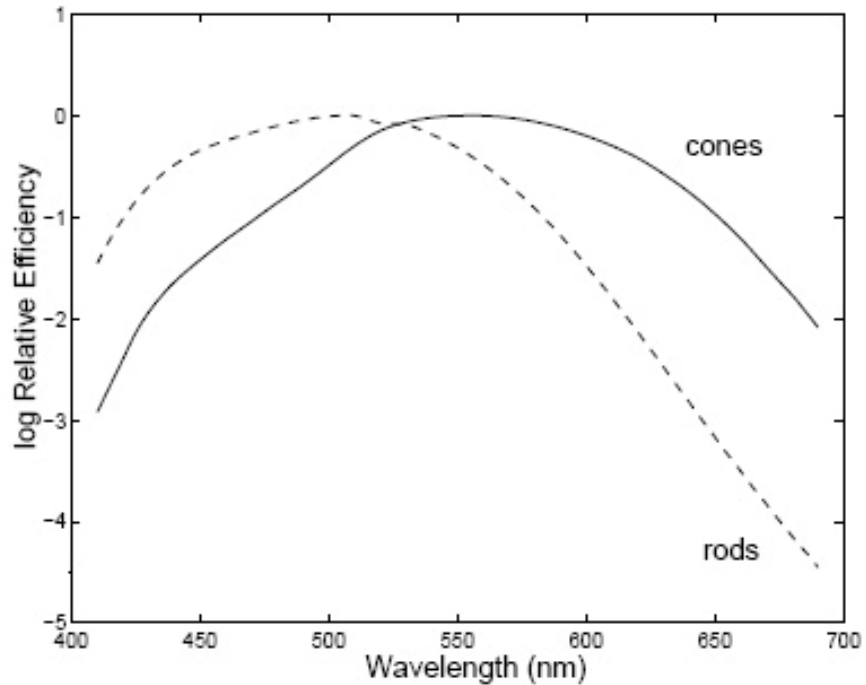


圖 3-2 桿狀細胞及錐狀細胞亮度效率函數

3.1.3 CIELAB 色彩空間

色調重現的技術通常會將影像分解成亮度和彩度部分，然後將影像中每一像素原來的亮度值轉換到新的值，最後結合新的亮度值和原來的彩度值，最後結合的這個動作最主要原因是維持原來影像的色彩，避免亮度改變造成顏色失真。1976年國際照明學會 CIE(Commission International de L'Eclairage) 根據 CIE 1931 XYZ 的系統增修了非線性的色彩公式 CIE 1976 L^*, a^*, b^* ，制訂了一個可以將亮度和彩度分離的色彩空間，叫做 CIE 1976 L^*, a^*, b^* 色彩空間，簡稱“CIELAB”。首先先來看 L^*, a^*, b^* 分別代表什麼，圖 3-3 是 CIELAB 的立體座標圖。a 軸表了紅綠對立兩色，+a 越靠近紅色，-a 越靠近綠色。b 軸表了黃藍對立兩色，+b 越靠近黃色，-b 越靠近藍色。

軸代表了黃藍的對立兩色，+b 越靠近黃色，-b 越靠近藍色。l 軸代表了亮度，從底部黑色：0 慢慢增加到頂端的白色：100。CIELAB 色彩空間的中要特性就是它完全跟所用的設備無關，例如掃描機、影印機，所以它是客觀的顏色描述。也就是只要是相同的 L^*, a^*, b^* 組合，不管怎樣都會對應到相同的顏色。

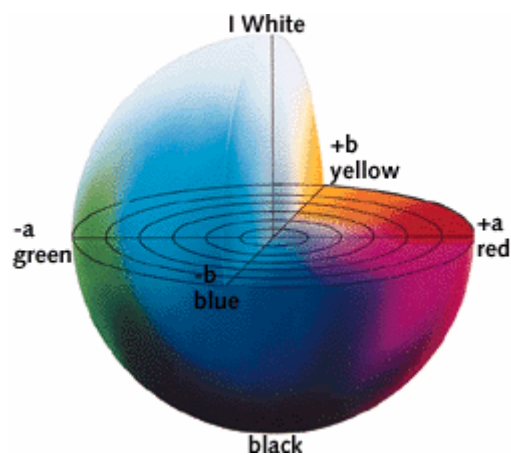


圖 3-3 CIELAB 的立體座標圖

圖 3-4 CIELAB 為某一固定亮度值切平面圖，代表每一顏色只能用特定的 L^*, a^*, b^* 來表示。

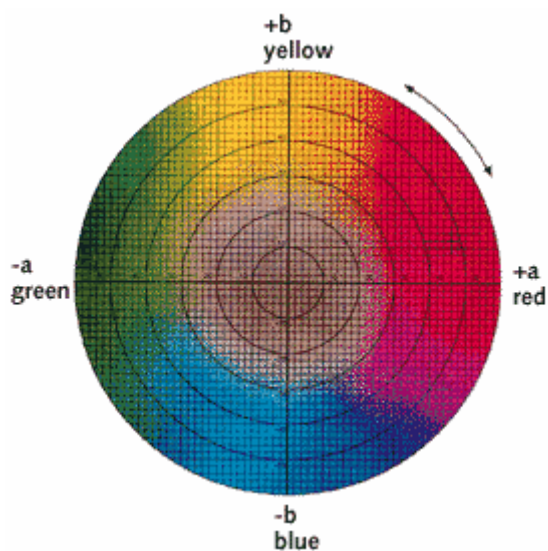


圖 3-4 CIELAB 切平面圖

CIE 1976 L*,a*,b*色彩空間公式定義：

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \quad (1)$$

$$a^* = 500\left(f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right) \quad (2)$$

$$b^* = 200 \times \left(f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right) \quad (3)$$

$$\text{其中 } f(t) = \begin{cases} t^{1/3} & t > 0.008856 \\ 7.787t + \frac{16}{116} & t \leq 0.008856 \end{cases} \quad (4)$$

(X_n, Y_n, Z_n)為在自然光源下參考白點的三刺激值。注意其中的改變參數是 X, Y, Z 三刺激值相對於參考白點 X_n, Y_n, Z_n 的比值。這種形式的調整和 von Kries model 的色彩適應類似，von Kries model 是說人類視覺器官對於不同的周遭環境會採用某種特定形式的調節方式，以適應環境的改變，利用這種方式，可以用來模擬人眼中的視覺感知細胞，以預測出在不同的環境下，人眼所感知出的視覺外觀。在不同的參考白(reference white)的影響下，vonkries 認為三種角錐細胞的響應值會成比例的調節變化。然而 von Kries model 需要每一種角錐細胞的比值，但 CIELAB 空間並不是依照此模式，因為三刺激值 X, Y, Z 是角錐細胞線性組合響應。不管 CIELAB 色彩空間理論多困難，它在實際應用上是很適合的。彩色視覺系統是很複雜的，視網膜直接接收紅藍綠三色輻射光，接著將 RGB 轉到 CIE 1931 XYZ 色彩空間，由於 CIE RGB 系統具有負數值，如圖 3-5 CIE RGB 色彩匹配函數所示，計算時較不易。為彌補此缺點，因此於 CIE 1931 年提出 CIE 1931 XYZ，如圖 3-6 所示。CIE RGB 與 CIE XYZ 轉換公式如式(5)所示[5]。

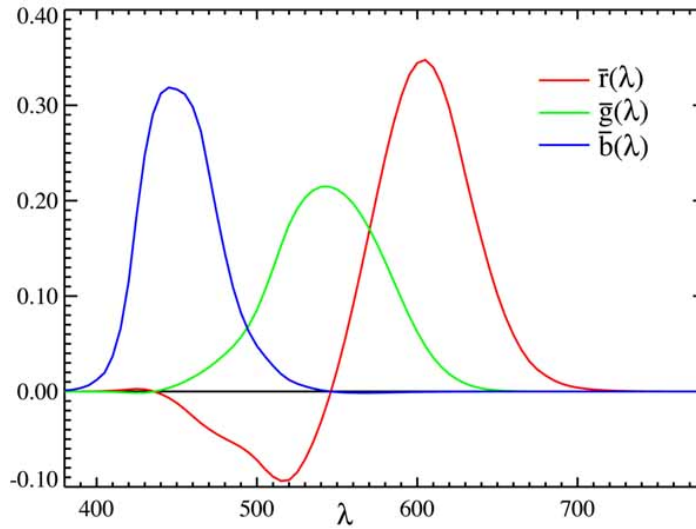


圖 3-5 CIE RGB 色彩匹配函數

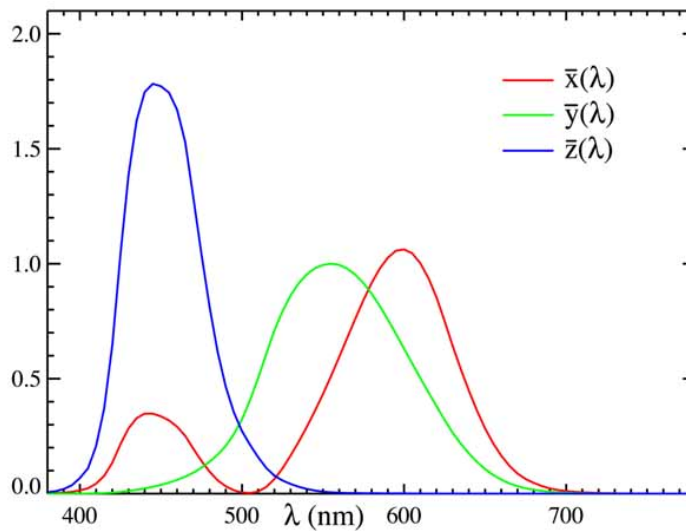


圖 3-6 CIE XYZ 色彩匹配函數

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412453 & 0.357580 & 0.180423 \\ 0.212671 & 0.715160 & 0.072169 \\ 0.019334 & 0.119193 & 0.950227 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (5)$$

CIELAB 色彩空間中的三種色彩座標：紅-綠、黃-藍、黑-白為色彩互補系統，圖 3-7 CIELAB 互補色彩座標，紅色不含有綠色，藍色不含黃色，白

色不含有黑色，根據這互補的概念，CIELAB 將亮度和色彩分離不是只有數值上分離還引含了分離的品質。

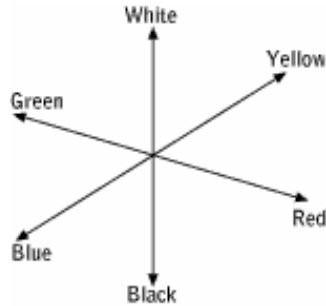


圖 3-7 CIELAB 互補色彩座標

使用 CIELAB 的一項好處，就是他可以用來計算色彩的差異，從 a^* 和 b^* 可得到色度(chroma)和色相(hue)，CIE 1976 a, b 色度(chroma)和色相(hue)定義如(6) (7)：

$$C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (6)$$

$$h_{ab} = \arctan(b^*/a^*) \quad (7)$$

假設有兩個不同的顏色物 1,2，則它們之間的亮度差 ΔL^* 、色度差 ΔC_{ab}^* 、色相差 ΔH_{ab}^* 及整個色彩差 ΔE_{ab}^* 如(8)~(11)所示：

$$\Delta L^* = L_1^* - L_2^* \quad (8)$$

$$\Delta C_{ab}^* = C_{ab,1}^* - C_{ab,2}^* \quad (9)$$

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (10)$$

$$\Delta H_{ab}^* = [(\Delta E_{ab}^*)^2 - (\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{ab}^*)^2]^{1/2} \quad (11)$$

由於 CIE LAB 與裝置無關的特性，以及明確的定義出色彩的差異性，在許多色彩管理系統(color management system, CMS)上都選擇 CIE LAB，所以在眾多均勻色彩空間中，CIE LAB 色彩空間是被最為廣為使用的，並且 CIE LAB 具有色度以及亮度分離的特性，也就是說，在 CIE LAB 色彩空間中調整色度時並不會影響其亮度的變化，反之，調整亮度時也不會影響其色度的變化。

3.1.4 Tone Reproduction Curve

影像重新調整後的亮度和原來影像的亮度之間的關係，通常是以一個曲線來表示，就叫做色調重現曲線(tone reproduction curve)，或者叫色調調整曲線(tone scale curve)。因為每一影像處理系統擁有自己的光譜響應函數，CIE 定義的亮度並不一定總是最適合的表示單位。然而 CIE 亮度是根據人眼視覺感覺所推算而得，因此相當適合來表示色調重現的視覺效果。因為這原因，亮度已經總是來當作色調重現曲線的依據值。

已經有許多方法可以畫出調整前後影像亮度關係的 TRC，最常見的是直接根據景物亮度和調整後亮度來畫，圖 3-8 是一般反射的紙上品所看到三種不同照射亮度的 TRCs，這種畫法有許多缺點。首先，一個反射的紙上會有許多 TRCs，每一 TRC 對應不同的照射亮度。可以看到，從 250 lux 到 1000 lux 的照射亮度，都有大部區域的在反射的紙上所看到的輸出變化不大，因此用絕對亮度值當變數是效果不大的。對於反射的紙或可穿透的投影片，使用相對刻度來表示重調亮度是較有效果的。接著是我們人眼所感覺到一個物件上的亮度或光線強度並不是跟光源亮度呈線性比例關係。在圖 3-8 中的線性畫法並沒有告訴我們在任何區域範圍中亮度改變的察覺率。由於韋伯定律已經被大家所接受，大部分都使用亮度取對數來取代一般亮度尺度。

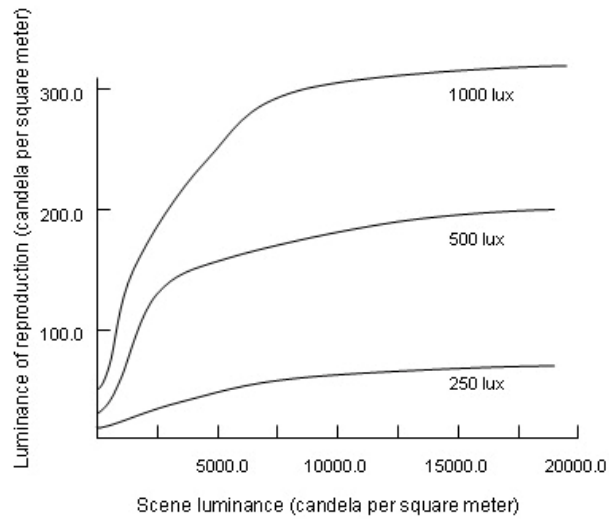


圖 3-8 不同照射亮度在反射物上的 TRCs

同時我們也知道對數亮度和對數量度尺度所畫曲線的斜率跟對比度感覺有關，因此取對數座標的的畫法是經常使用於畫 TRC，圖 3-9 是上述使用對數座標所畫的 TRC。對數座標所畫的 TRC 不只看起來跟線性座標所畫不同，並且可以得到更多影像資訊例如圖中藍色圈

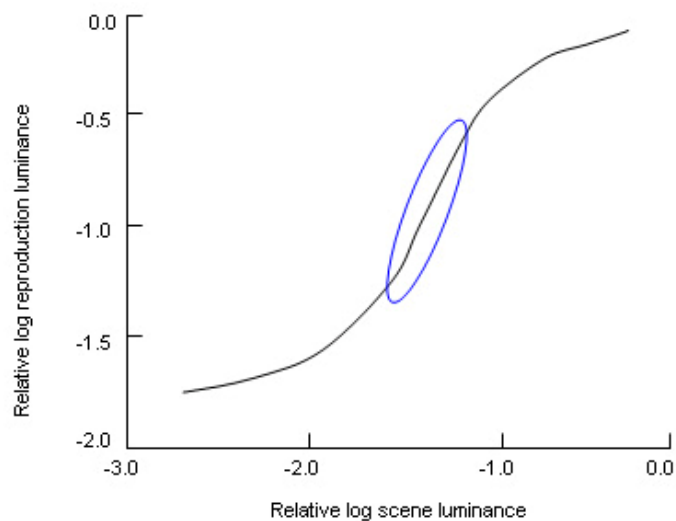


圖 3-9 相對對數座標的 TRC

起來部分，曲線幾乎成直線(大約是 x 軸上的-1.6 到-1.0)，它告訴我們這區間

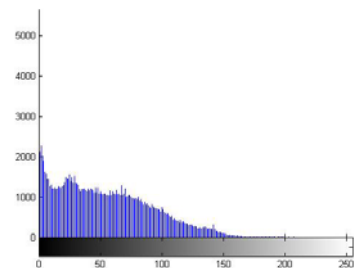
相對應亮度所感覺到的對比度幾乎不變是一個常數值。這段區域在線性座標軸所對應到的亮度值是 500 到 2000 cd m^{-2} ，只佔整個範圍的一小部分。

3.1.5 直方圖處理

直方圖的處理是色調重現中常用到的方法[6][7][8][9][10][11]，直方圖是很多空間域處理技術的基礎[12]，直方圖處理可被有效地使用於影像增強。除了提供有用的影像統計外，直方圖中所具有的資訊也對諸如影像壓縮和分割等其它的影像處理應用相當有用。考慮圖 3-10 四種基本灰階圖來說明影像直方圖的特性，圖的右邊顯示這些圖所對應的直方圖，水平軸對應到灰階值 r_k ，垂直軸為對應的 r_k 的像素個數。在暗的影像中，直方圖集中在左方灰階值低的一邊。明亮的影像直方圖則集中在右方灰階值高的一方。至於低對比影像的直方圖則集中於灰階值的中間。對於一個單色影向來說代表鈍化而褪色的樣子。最後，高對比影像直方圖分佈範圍較廣，影像看起來較清楚，所以結論是影像直方圖分佈傾向佈滿整個灰階範圍。除此之外，直方圖均勻分佈的影像會有高對比度的樣子且存在大量不同灰階色調，也就是說影像呈現很多灰階的細節及高動態範圍。



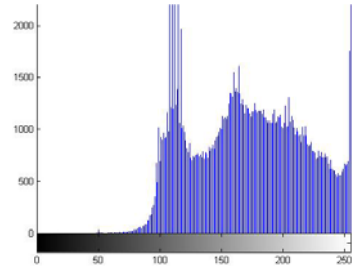
(a)暗的影像



(b)暗的影像直方圖



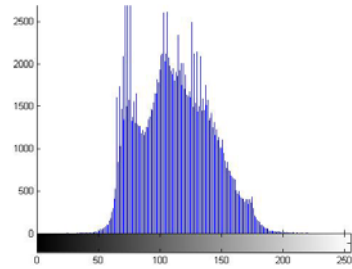
(c) 亮的影像



(d) 暗的影像直方圖



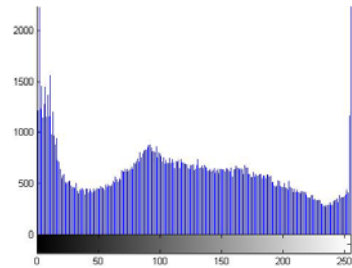
(e) 低對比的影像



(f) 低對比的影像直方圖



(g) 高對比的影像



(h) 高對比的影像直方圖

圖 3-10 四種基本影像形式

有了上述的基本概念，我們便知道要獲得高動態範圍影像，必須有分佈均勻且廣的直方圖，因此就有了自動達成直方圖等化的轉換函數。先來看連續函數[12]，經由初級的機率論以及微積分學的推導，對原始影像中的每一像素灰階 r 經由(12)轉換產生一個灰階 s ，其中假設 r 已經正規劃至區間 $[0,1]$ 上。

$$s = T(r) \quad 0 \leq r \leq 1 \quad (12)$$

令 $P_r(r)$ 和 $P_s(s)$ 表示隨機變數 r 和 s 的機率密度函數，因為

$$P_s(s) = P_r(r) \left| \frac{dr}{ds} \right| \quad (13)$$

且(12)式累加機率密度函數的形式

$$s = T(r) = \int_0^r P_r(w) dw \quad (14)$$

$$\frac{ds}{dr} = \frac{dT(r)}{dr} = P_r(r) \quad (15)$$

將(15)式帶回(13)

$$P_s(s) = P_r(r) \left| \frac{1}{P_r(r)} \right| = 1 \quad 0 \leq s \leq 1 \quad (16)$$

可得到(16)式的 $P_s(s)$ 的形式是一個均勻的機率密度函數。

對於離散值，可以得到對於離散值的影像中灰階值 r_k 所發生的機率可近似為

$$P_r(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad k = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (17)$$

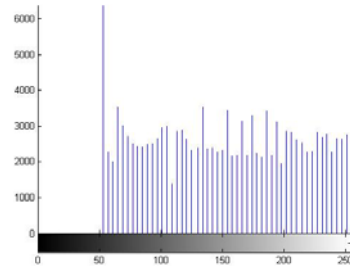
n 是影像中的像數總數， n_k 是灰階 r_k 之像素的數目， L 是影像中可能的灰階總數。其轉換函數為

$$\begin{aligned}
 s_k &= T(r_k) = \sum_{j=0}^k P_r(r_j) \\
 &= \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n} \quad k = 0, 1, 2, \dots, L-1
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

(18)式所得到的轉換稱為直方圖等化(histogram equalization)或線性化(histogram linearization)。圖 3-11 為圖 3-10 中的影像經過直方圖等化後的結果，右方為對應的直方圖。



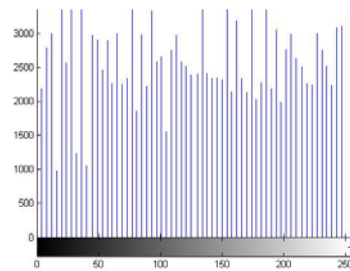
(a)



(b)



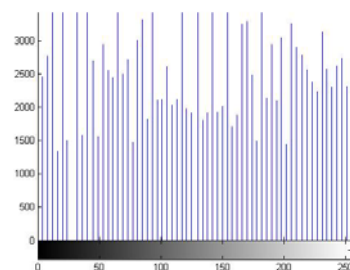
(c)



(d)



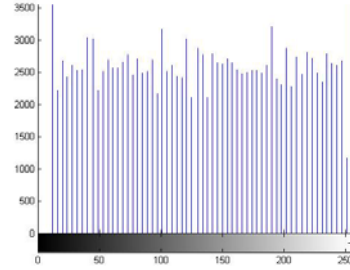
(e)



(f)



(g)



(h)

圖 3-11 直方圖等化後的結果

3.2 相關研究概述

在過去的文獻中，許多對高對比度影像做色調重現的方法已發表，大致上可分成兩種類型：色調重現曲線 (Tone reproduction curve, TRC) 及色調重現運算子 (Tone reproduction operator, TRO)。TRC 是調整影像像素的分佈，將原來像素強度值映射到新值而不用考慮它在空間中的位置，較早開始的文獻 Tumblin and Rushmeier [13]做法是設計一個色調重現比對方法，去比對人眼所看到的真實景象和經由色調重現輸出到螢幕之間的亮度是否一致。最近的發表文獻 Reinhard, and K. Devlin [31]中則提到引入人眼視覺系統的觀點。而 Ward, Rushmeter and Piatko[6]在所設計的方法中，提出一個相當複雜色調重現曲線技術，引入了關於人眼對比的感受性，及刺眼強光、視覺敏銳和色彩感受性等模式，去開發了人眼視覺系統的限制條件。TRO 是每一像素強度會與它周圍像素值的資訊有關，一樣強度值的像素，可能會映射到不同強度值，或者不一樣強度值會映射到新的強度值，通常可分好幾種等級。TRO 科學的原理是根據影像格式模型 $I(x,y) = L(x,y) R(x,y)$ ，這式子說明了影像強度函數 $I(x,y)$ 是亮度函數 $L(x,y)$ 和景物的反射函數 $R(x,y)$ 乘積，因為真實世界的反射函數 $R(x,y)$ 有較低的動態範圍(通常不會超過 100:1)，若將影像強度函數 $I(x,y)$ 中的亮度函數 $L(x,y)$ 和物的反射函數 $R(x,y)$ 分開，則去降低亮

度函數 $L(x,y)$ 將因此可以去降低影像強度函數 $I(x,y)$ 的動態範圍。以這理論為基礎的方法有 Tumblin and Turk[17] 和 Durand and Dorsey[18]，他們主要的差別在於將亮度函數 $L(x,y)$ 和物的反射函數 $R(x,y)$ 分開的方法。幾乎所有 TRO 方法都跟 Retinex 方法有關[16]，Jobson, Rahman and Woodell[15] 直接將 Retinex 理論用在高動態範圍壓縮。最近 Reinhard, Stark, Shirley and Ferwerda[20] 則是將傳統照相術的方法結合到處理高動態範圍的數位影像中。Fattal, Lischinski and Wermann[19] 觀察人眼視覺系統對相對區域的對比比較敏感，利用多重解析度的梯度技術，這也是一種 TRO 的型態。底下我們將分成兩個小節來探討這兩中類別的相關研究。

3.3 色調重現曲線映射

Ward, Rushmeter and Piatko[6] 提出一個新的直方圖調整的方式，直方圖的統計是依據景物中局部適應性亮度的分佈。為了和人眼所看到是一樣的，因此考慮了人眼對對比的感受性，及刺眼強光、視覺敏銳和色彩感受性對人眼視覺的限制條件。演算法步驟敘述如下：

1. 直方圖的統計

因為人眼構造關係，最佳的視力是位在視網膜中央凹的地方，所以我們計算景物中的大約 1° 視覺角的平均亮度值，也就是離中央凹的中心的角度。使用對數尺度來做直方圖以得到最佳的亮度分佈直方圖和廣闊動態範圍的主觀反應。

2. 直方圖調整

若希望最後輸出影像的亮度值都是一樣的分佈機率，則直覺上的直方圖等化即可，但這樣的結果不但壓縮分佈較少地方對比，還延伸了分佈較高的

地方對比，於是造成大多數區域有誇張的對比。所以設定等化限制條件，限制條件的理論是，非線性的映射曲線不應該超過線性的映射方法，也就是顯示的亮度對真實亮度的微分要小於等於顯示亮度和真實亮度的比值，如式(19)所示。線性限制 (linear ceiling) 調整後的直方圖每一亮度位置所存放的數目必須滿足式(20)，結果線性限制 (linear ceiling) 調整後的影像對比就不會像直方圖等化那麼誇大。比較線性映射、直方圖等化以及線性限制後的 TRC 如圖 3-12 所示。

$$\frac{dL_d}{dL_w} \leq \frac{L_d}{L_w} \quad (19)$$

$$f(b) \leq \frac{T\Delta b}{\log(L_{d\max}) - \log(L_{d\min})} \quad (20)$$

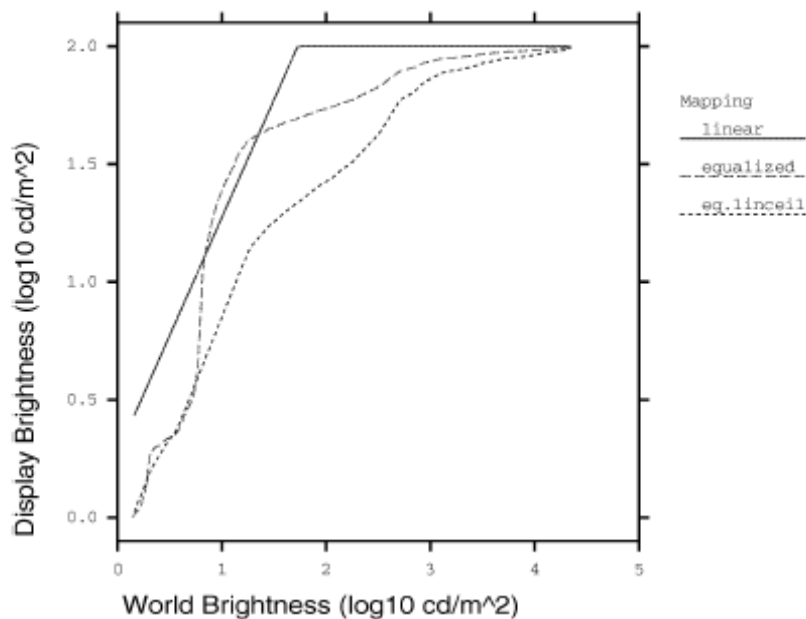


圖 3-12 直方圖等化、線性限制調整、線性映射的 TRC[6]

為了滿足人眼對比感受性，當環境亮度越來越暗時，人眼將會很難辨識影像的對比能力會減弱，因此還要考慮人眼對比感受的修正條件。利用 Ferwerda 等人[4]所推導桿狀體和錐狀體轉換暗到亮感受性的反應函數，將它

結合並叫做：恰好能察覺適應亮度 L_a 差異 $\Delta L_t(L_a)$ 。為了保證顯示的對比沒有比真實的對比明顯，必須還要對顯示和真實的適應臨界值比值的斜率加以限制，如式(21)。最後對人眼對比感受性的直方圖調整每一亮度位置所存放的數目必須滿足式(22)。比較線性映射、線性限制後以及人眼對比感受的 TRC 如圖 3-13 所示。在這裡線性限制後以及人眼對比感受的 TRC 很難區分出來，那是因為此環境的光源亮度分佈範圍已經跟顯示輸出的很接近。如果將環境的光源亮度降低為原來的 100 倍，則人眼對比感受性的直方圖調整效果才會明顯，如圖 3-14 所示，所看到的真實才會跟顯示的類似。

$$\frac{dL_d}{dL_w} \leq \frac{\Delta L_t(L_d)}{\Delta L_t(L_w)} \quad (21)$$

$$f(b) \leq \frac{\Delta L_t(L_d)}{\Delta L_t(L_w)} \cdot \frac{T \Delta b L_w}{[\log(L_{d \max}) - \log(L_{d \min})] L_d} \quad (22)$$

3. 人類視覺限制調整

為了滿足人眼看到與真實世界最大相似性，還考慮人眼對刺眼和變動光源的空間敏銳反應以及色彩感受情況的人眼視覺限制條件，去達到符合人眼所看到的及能見度。

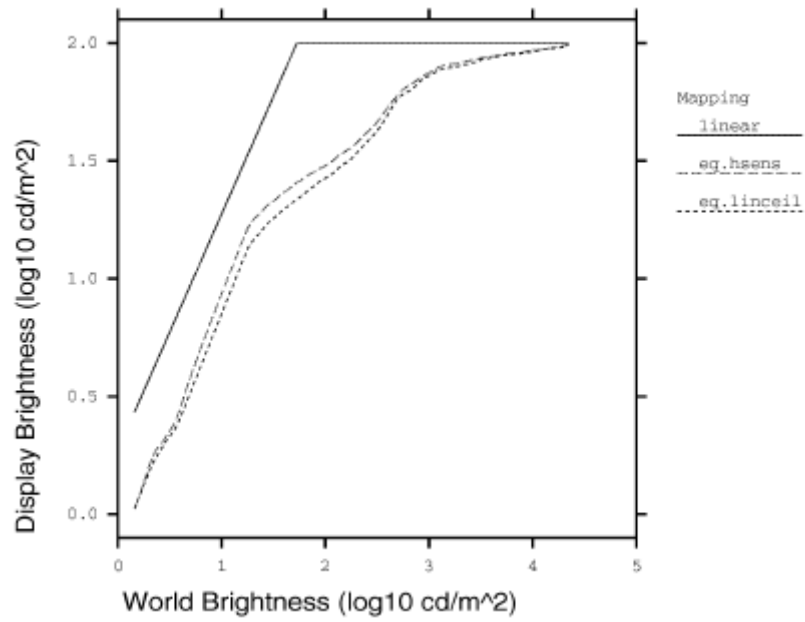


圖 3-13 人眼對比感受、直方圖線性限制調整、線性映射的 TRC[6]

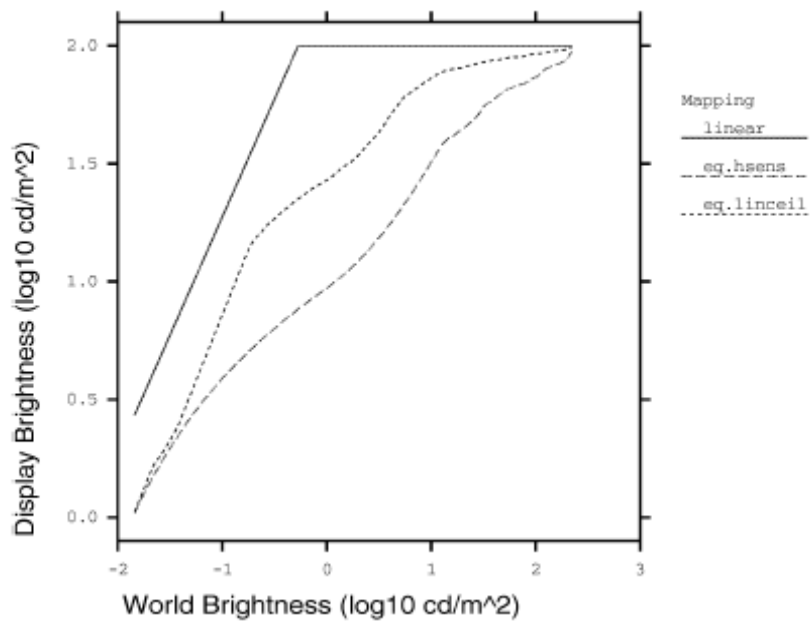


圖 3-14 環境亮度降低 100 倍後人眼對比感受、直方圖線性限制調整、線性映射的 TRC[6]

Tumblin and Rushmeier [13]提出一個色調重現算子架構，圖 3-15 所示。主要是保存觀看者的印象亮度，當眼睛所處的環境亮度改變，觀看者的印象和能看見的範圍關係也跟著改變。利用 Stevens and Stevens[32]所提出的亮度函數，比對觀

看真實景象者的印象亮度和經由色調重現算子輸出到螢幕的影像亮度 $B_{rw} = B_d$ ，可得到得到輸入到螢幕的 n ，如式(23)所示。

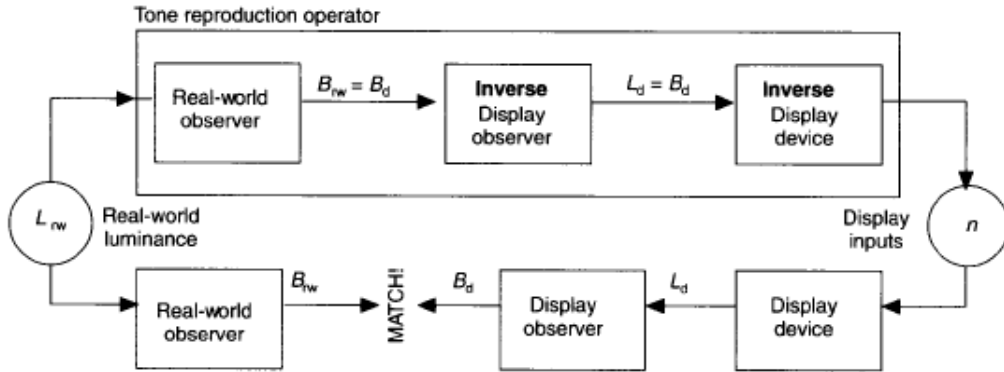


圖 3-15 色調重現算子的架構

$$n = \left[\left(\frac{L_{rw}}{L_{d \max}} \right)^{\left(\frac{\alpha_{rw}}{\alpha_d} \right)} \cdot 10^{\left[\frac{(\beta_{rw} - \beta_d)}{\alpha_d} \right]} - \left(\frac{1}{C_{\max}} \right) \right]^{\left(\frac{1}{\gamma_d} \right)} \quad (23)$$

其中 α 和 β 是亮度 L 的複雜表示。

Reinhard, and K. Devlin[31]提出的方法是根據生理學的證實，光的吸收在人眼的感光體作用，因此將可以很容易的以這觀念來建立色調重現演算法。人類視覺神應系統經由許多接收機制可有效克服光的高動態範圍，在這許多機制組成的視覺處理流程中，光感受體 (photoreceptors)也就是桿狀體(rods)和錐狀體(cones)是首要的處理細胞，所以色調重現模型將以感受體已知的行為來做模擬。由錐狀體所產生的電位 V 式(24)所示。

$$V = \frac{I}{I + \sigma(I_a)} V_{\max} \quad (24)$$

$$\sigma(I_a) = (f I_a)^m$$

m 是跟影像對比有關，不同的 m 值會有不同的 TRC，如圖 3-16 所示。

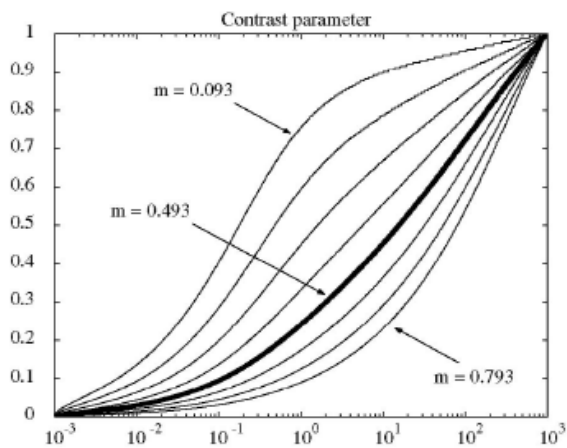


圖 3-16 改變 m 相對應的色調重現曲線

f 是控制影像的亮度，考慮改變 m 和 f 時，影像變化情形如圖 3-17。

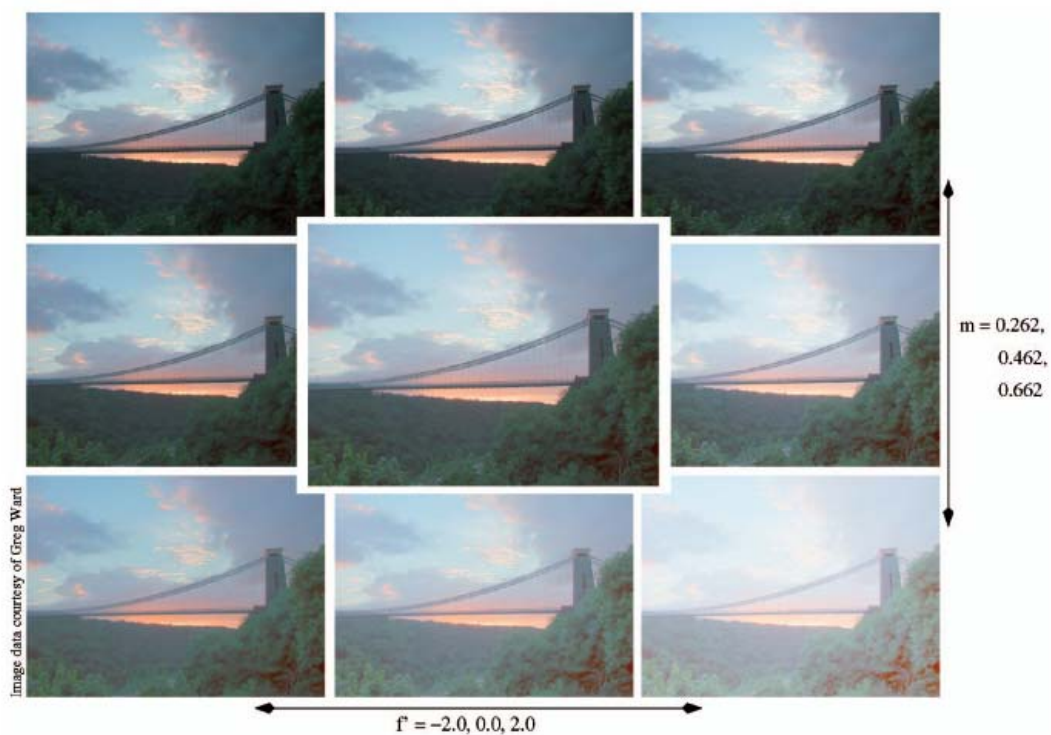


圖 3-17 影像對比 m 和亮度 f 改變所對應影像的

為了移除影像中主導的色彩，經由參數 c 來改變 R,G,B 適應亮度 I_a 式(25)的獨立或相依的關係， $c=1$ ，則 R,G,B 三個適應亮度是獨立的， $c=0$ ，適應亮度對 R,G,B 來說都一樣。

$$I_a = cI_{r|g|b} + (1-c)L \quad (25)$$

接著還考慮了適應亮度 I_a 是區域性的還是全域性的， $a=1$ 為區域的， $a=0$ 為全域的，式(26)所示。

$$I_a = aI_{r|g|b} + (1-a)I_{r|g|b}^{av} \quad (26)$$

最後結合適應亮度 I_a 與彩度的相依或獨立和全域或區域，得到式(27)

$$\begin{aligned} I_a &= aI_a^{local} + (1-a)I_a^{global} \\ I_a^{local} &= cI_{r|g|b} + (1-c)L \\ I_a^{global} &= cI_{r|g|b}^{av} + (1-c)L^{av} \end{aligned} \quad (27)$$

圖 3-18 為 a 和 c 分別從 0 到 1，從左到右每次改變 0.2 影像變化的情形，可以看到原本左邊主宰黃色往右漸漸被移除。



圖 3-18 色彩適應 c 和亮度適應 a 改變所對應影像

藉由設定參數 m, f, c, a ，可以快速控制對比、亮度、色彩適應的不同影像，達到人眼所看到的真實影像。

Qiu and Duan [7]提出利用直方圖的方式將高動態範圍影像映射到低動態範圍的輸出設備，將高動態範圍影像切割成輸出所要的動態範圍為 $255:1$ ，落在同一切割帶的會映射到相同的輸出值。如果每一切割範圍內像素的數量一樣，那就代表直方圖等化圖；若是每一切割間格都一樣，那就代表是線性調整映射，圖 3-19 為示意圖。這裡對他們之前提出的方法[8]提出了改進，提出了兩項代價函數來改善線性調整映射和直方圖等化映射，如式(28)所示。(28)式的最佳解為(29)式可得，但這條件卻是不夠解出答案來，且直接的數值解也是很難看出。

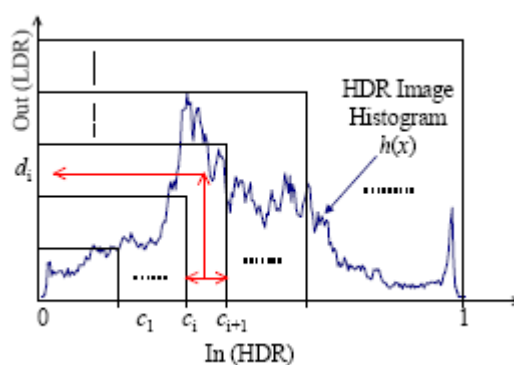


圖 3-19 直方圖切割映射

$$E = \sum_{i=1}^{255} \left(c_i - \frac{i}{256} \right)^2 + \lambda \sum_{i=1}^{255} \left(\int_0^{c_i} h(x) dx - \frac{i}{256} \right)^2 \quad (28)$$

$$\frac{\partial E}{\partial c_i} = 0 \quad i=1,2,\dots,255 \quad (29)$$

因此想出另外的一個近似解方法，利用遞迴二分法的概念，找出所有的 c_i 。首先由(28)式變形後的(30)式，再由(31)式得到 c_0 將動態範圍切割成兩份，接下來個別再切割成兩份，一直持續下去，直到所有的 c_i 都找到為止。其概念示意圖如圖 3-20 所示。

$$E_b(c) = \frac{(c - 0.5(L_{\max} + L_{\min}))^2}{L^2} + \lambda \frac{\left(\sum_{x=0}^c h(x) \right)^2}{N^2} \quad (30)$$

$$c = \arg(\min(E_b(x))) \quad (31)$$

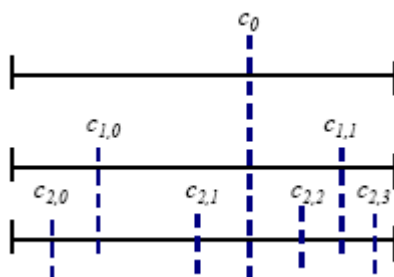


圖 3-20 遞迴二分切割圖

Zhang and Lucchese[33]提出一個簡單不需參數調變的方法，首先式(32)是針對影像暗部的亮度提升， a 越小暗部亮度會提高越多，很不幸這麼做會造成亮部區域過曝。因此(33)式是針對亮部的改善。最後影像的輸出值為(34)式。

$$L' = \frac{L}{\frac{L}{a} + 1} \quad (32)$$

$$L'' = L'(1 - L') + L^2 \quad (33)$$

$$(R', G', B') = (R, G, B) \frac{L}{L''} \quad (34)$$

Pardo and Sapiro[34]提出的方法可以提高影像的顯示度，讓影像細節更清晰。首先從(r, g, b)求得亮度 L 和色彩資訊(r/L, g/L, b/L)，接著將影像亮度分成兩個區段或者更多， $[L_{wmin}, L_1], [L_2, L_3], \dots, [L_n, L_{wmax}]$ ，必須是接著順序，否則會破壞 TRC 的單調性限制。第三步為利用 Ward 等人[6]的直方圖調整方法，將每個劃分的區段做直方圖調整，得到該區段亮度 TRC 映射關係。最後重新算出色彩值 $((r/L)*L', (g/L)*L', (b/L)*L')$ 。此概念的和一般線性映射比較的示意圖如圖 3-21 所示。

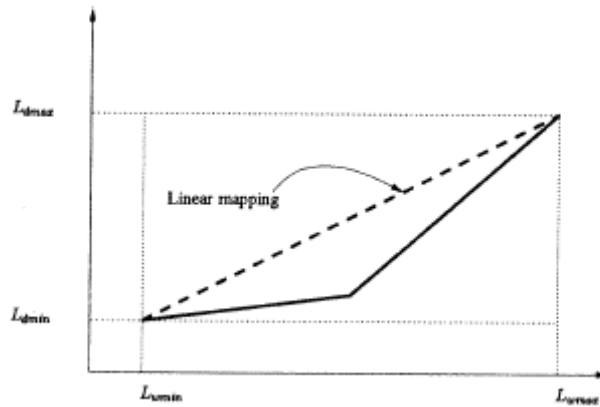


圖 3-21 片段線性 TRC 映射

Tumblin, Hodgkins and Guenter[14]提出提出了兩種方法，第一種叫做階層方法，將影像分成六種不同的本質層共三對，如圖 3-22 所示。第一對是關於景物的散佈的反射係數層和照度層，第二層是關於反射物的反射係數層和照度層，第三對關於透明層和透明照度層。我們只對亮度層做壓縮，以致於能將景物的反射和

穿透的特性保存下來。

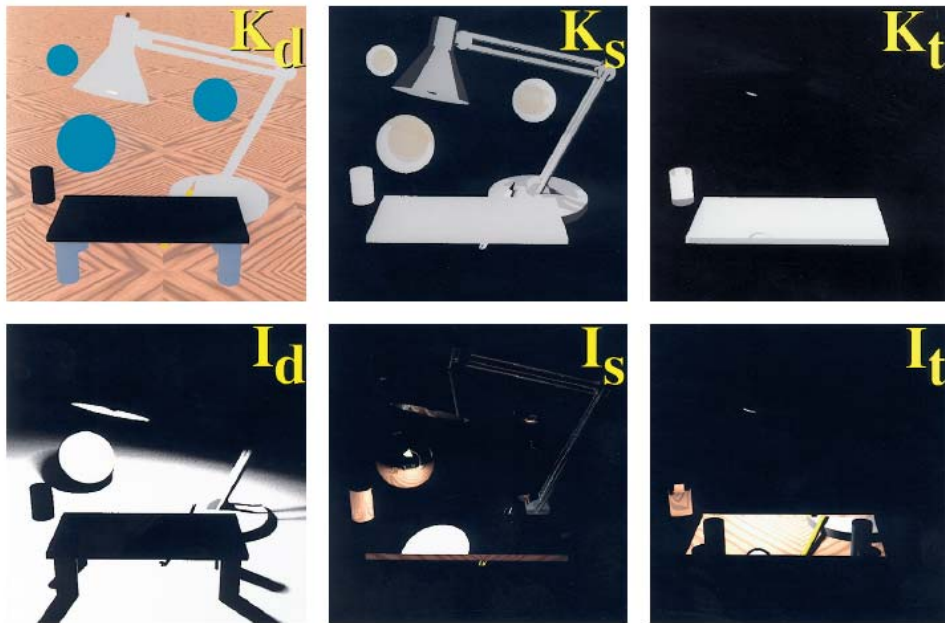


圖 3-22 六種階層影像

第二種叫做視網膜感知的方法，他是由滑鼠來控制指到觀看者眼睛注視的地方，互動式的把細節保存起來，並且壓縮其餘未注視到的地方。如圖 3-23 所示。

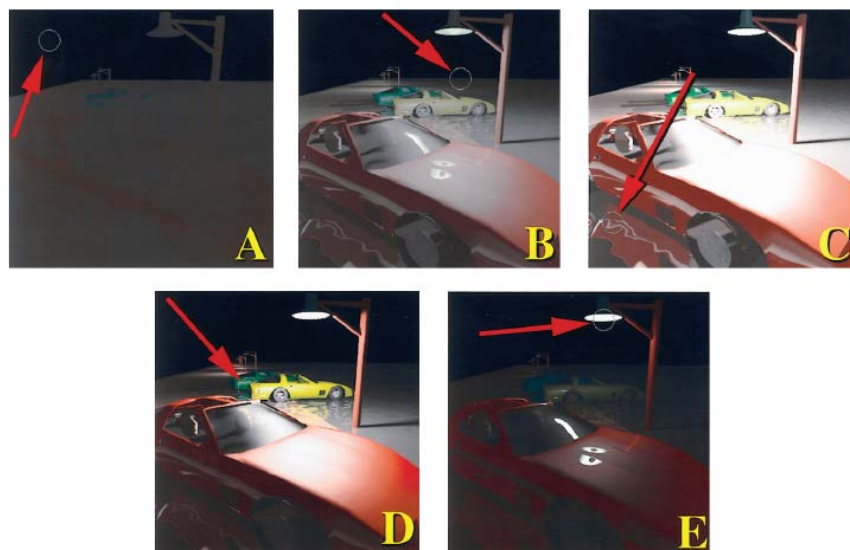


圖 3-23 視網膜感知相互作用

3.4 色調重現運算子映射

Reinhard, Stark, Shirley and Ferwerda[20]提出的方法結合了全域的色調重現曲線及區域的帶通濾波器，會提出這方法的靈感來自於傳統輸出技術 dodging-and-burning，主要是攝影師在使用。這個技術可以解決一個景象中有過曝和曝光不足的問題。首先要將場景的亮度映射到適合顯示的動態範圍內，然後使用自動化 dodging-and-burning 來增加對比。使用 dodging-and-burning 之前應該要先測量區域對比，是以兩種不同大小的高斯濾波器來得到，如圖 3-24 所示。在這方法中，高斯濾波器特徵的大小必須要適當的決定。若太小，區域的算子結果會像全域算子一樣；若太大又會造成有暗環在亮的邊緣附近。如圖 3-25 所示

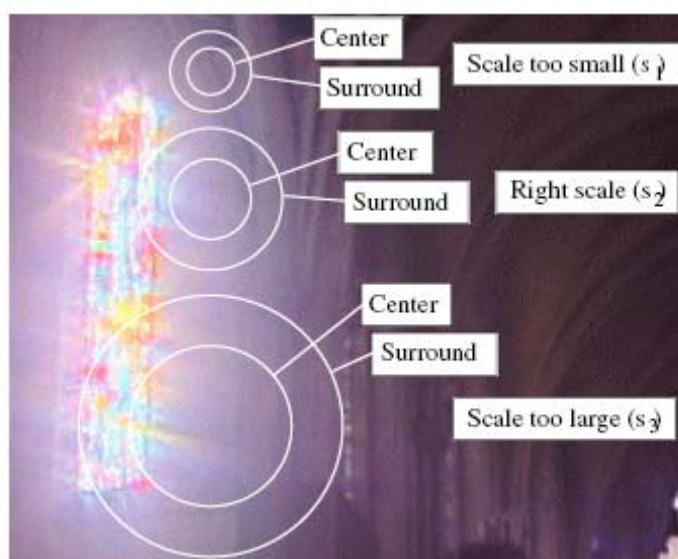


圖 3-24 不同大小的高斯濾波器

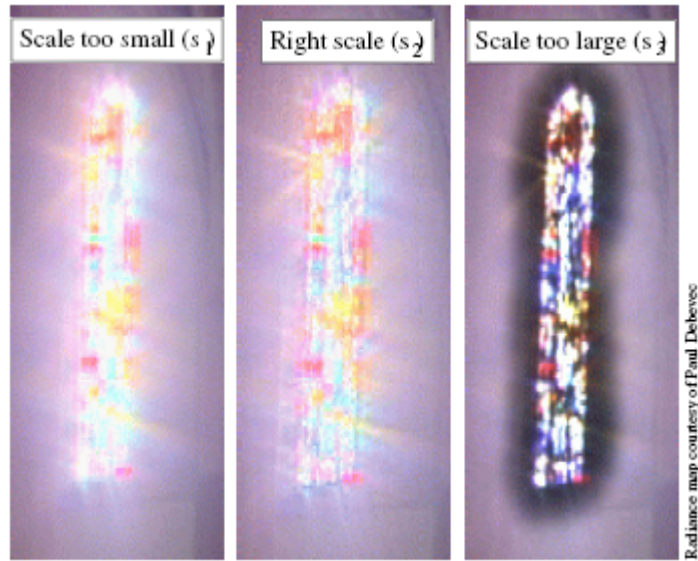


圖 3-25 錯誤的高斯大小所造成的效應

Tumblin and Turk[17]提出的方法類似藝術家在畫畫或塗色時，許多藝術家都會先從畫較大及較重要景物的輪廓開始，然後再慢慢增加其他細微的細節。首先利用非等向性擴散方法去將輸入影像分成邊緣和平滑遮罩在不同等級下的層級中。使用非等向性擴散最特別的好處就是邊緣和平滑遮罩有自己的權值，如圖 3-26 所示。

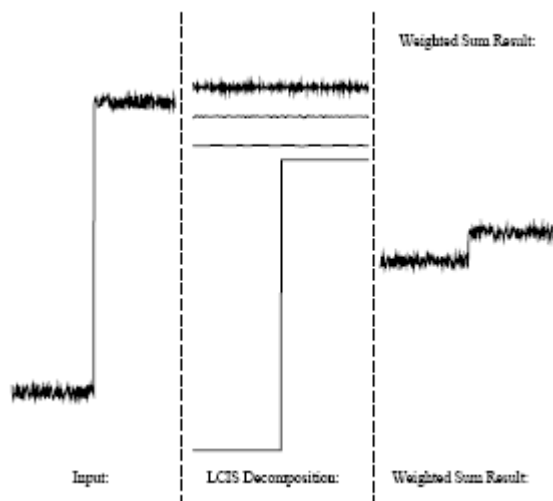


圖 3-26 有非等向性擴散濾波器

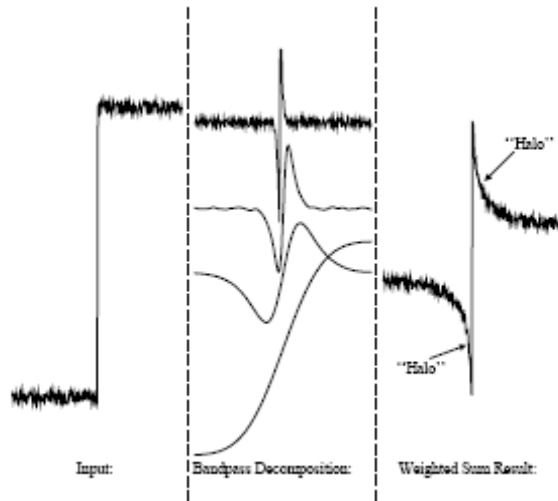


圖 3-27 傳統帶通濾波器

最後結果就是整合邊緣和平滑遮罩在各層級各自乘上自己的權值，如圖 3-28 所示。

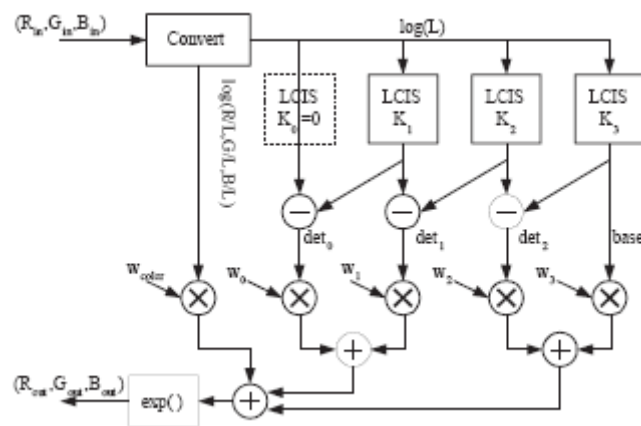


圖 3-28 LCIS 方法示意圖

Fattal, Lischinski and Wermann[19]提出的方法簡單的就可以看出。在一張高動態影像中亮度劇烈的變化，則亮度梯度將會有很大的量出現在一些等級中。他們的方法是去分辨出有大的梯度改變等級，然後去降低它低度的量而不會改變到方向。然後就可以重建調低梯度場來降低高動態範圍影像。由圖 3-29 可以瞭解。

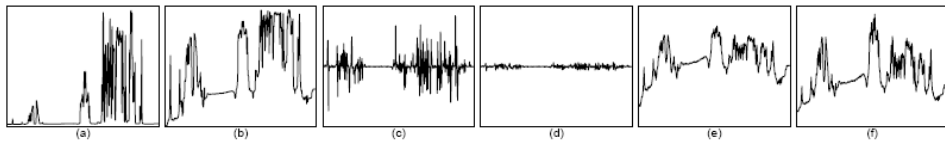


圖 3-29 梯度下的動態範圍壓縮流程

假設有一張高動態範圍影像，首先把它轉化到對數模式，然後計算他的梯度影像，接著可以區分影像中有大的亮度改變是像尖刺一樣，接著降低高尖刺的地方而不改變其它地方，然後整合新的被降低影像，最後得到新的低動態範圍的影像。

Jobson, Rahman and Woodell[15] 提出的方法是以彩色視覺的 retinex 理論[16] 為基礎，設計出一個多重等級視覺來同時達成動態範圍壓縮、色彩正確以及亮度描述。根據 retinex 理論，延伸了 single-scale retinex (35)式，發展新的 multiscale retinex 演算法，此方法包含對影像動態範圍的壓縮、色彩的修復、以及增加亮度的表現，其中的色彩修復是針對一類會違反 gray-world 假設的照片，在 retinex 理論下會造成影像失真情況，對 multiscale retinex 所做的修正，從實驗結果得知，此系統可以仿效的很接近人眼視覺的如當時所看到的真實世界。

$$R_i(x, y) = \log I_i(x, y) - \log[F(x, y) \otimes I_i(x, y)] \quad (35)$$

Monobe, Yamashita, Kurosawa and Kotera[30]提出一個可以改善高亮度區域對比的方法，叫做 LCRT(Local Contrast Range Transform)，特別針對高亮度區域，去算出和高斯濾波器所算出的區域平均亮度的比值是和輸出比值關係，以決定是要用傳統的 Knee curve 或是使用 LCRT，如圖 3-30 所示。

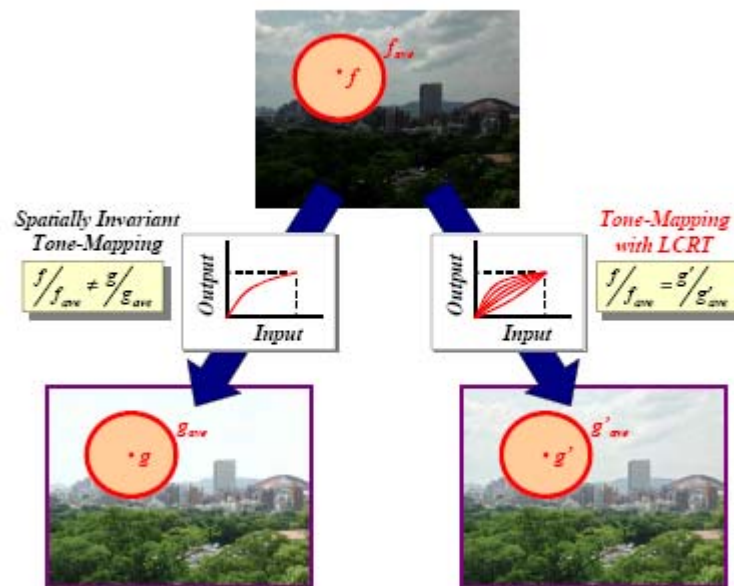


圖 3-30 LCRT 的概念圖

3.5 相關研究問題討論

色調重現實驗之前，一個可靠的實驗平台環境以及測試條件需被定義好。在許多發表的論文中，演算法是拿一般消費相機所拍的非原始資料檔照片來測試，相機做過哪些影像流程根本無法得知。我們必須要考慮這些照片已處理和壓縮過的事實。照片在這樣情況的測試下，許多的爭議必須在這提出：

1. 色調重現只是扮演一個影像後製處理的角色，將消費型相機處理過的照片再修飾而已。除非這台相機是你設計的，否則無法知道拍攝下來的 JPEG 影像經過哪些處理步驟。在這樣的測試方法下是很難評斷色調重現的表現。只能說後來加上使用的色調演算法是一個對相機中的色調重現演算法不錯的補償，但相機的色調重現演算法仍然無法得知。
2. 大多數一般數位相機所拍的照片都已經過伽瑪校正及動態壓縮，來補償顯示器的非線性效應，這是標準 sRGB 空間的定義。然而，有許多可能的伽瑪曲線可被選擇來適應光源條件和隨機的雜訊程度。很少相機設計

只使用一條伽瑪曲線。假設不考慮伽瑪校正的影響，在伽瑪校正後做色調重現會得到無法預期的結果，那是因為影像資料已被轉換到非線性的 sRGB 色彩空間。

3. 大部分相機中的影像流程都有色調重現，有些是將色調重現和伽瑪校正合在一起使用查表法，有些不是。若處理過後的影像已經不錯，但影像流程處理的資訊和色調重現演算法都是未知的，再加入其它色調重現演算法時，這樣是很容易得到難看的影像。