

國立交通大學

顯示科技研究所

碩士論文

微杯電泳電子紙之顯色特性化

**Colorimetric Characterization of Microcup®
Electrophoretic Display**



研究生：李家豪

指導教授：田仲豪 博士

中華民國九十九年七月

微杯電泳電子紙之顯色特性化

Colorimetric Characterization of Microcup®

Electrophoretic Display

研究生:李家豪

Student : Chia-Hao Li

指導教授:田仲豪

Advisor: Chung-Hao Tien

國立交通大學



Submitted to Department of Display

College of Electrical and Computer Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Department of Display

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十九年七月

微杯電泳電子紙之顯色特性化

碩士研究生：李家豪

指導教授：田仲豪博士

國立交通大學

顯示科技研究所

摘要

本文研究目的為電子紙的顯色特性化，對於新顯色媒介的出現，定義「媒介色彩空間(或設備從屬色彩空間)與 CIE 色度資料(非設備從屬色彩空間)之間的轉換關係」，亦即「建立此媒介與其他設備之間具有相同或共通色彩語言的溝通方式」。並且在各家電子紙技術當中，以微杯電泳式(Electrophoretic)電子紙為例，介紹如何從物理顯色機制開始，參考加法系統和減法系統的文獻，結合物理模式、數值模式和對照表模式的顯色特性化方法，發展出屬於微杯電泳式電子紙的顯色特性化(characterization)，最後藉由 CIEDE2000 驗證顯色特性化的準確性。

Colorimetric Characterization of Microcup® Electrophoretic Display

Master Student: Chia-Hao Li Advisor: Dr. Chung-Hao Tien

**Institute of Display
National Chiao Tung University**

Abstract

The objective of the research was to characterize the colorimetric properties of E-paper such novel media appears. To address this issue, we build up a model to link the correspondence between the device independent space and corresponding CIE colorimetry. Namely, we successfully construct a common color language among all information media. Based on various characterization methods including physical models, numerical models and look-up-table, we successfully characterize a microcup® electrophoretic display. Close agreement with measurement results of CIEDE2000 verify the proposed methodology.

致謝

首先感謝田老師讓我成為 OISLAB 的一員，這裡是充滿溫暖和關心的大家庭，大家長田老師對大家都非常照顧，在學業上更是給予中肯的建議與幫助，雖然我的資質平平，但在學長小陸的細心帶領下，還有翔翔哥、進哥、BLUE 都會給予很多意見，讓我在這二年之中獲益良多，可以順利畢業，除了自己努力外，真是要歸功於大家的幫忙。

再來要感謝同屆的展燁跟筱儒，FINFIN 也勉強算吧！跟你們一起奮鬥，總是激起了我的鬥志，讓我一直往前走，還有實驗室的學弟們鍾岳、鍾議寬、銘佐、杰恩、威哥，以及在背後默默幫助我們的小兔，能跟大家一起笑到流眼淚真的是很幸福的事。

最後要感謝我的父母跟老哥們，讓我可以不用學貸，還有三不五時都可以去享受新竹美食。還有也要謝謝女友，總是在我低潮時，鼓勵我不要氣餒，以失敗為成功的基礎，並且一起為未來努力。謝謝你們，謝謝大家。



目錄

摘要	I
Abstract.....	II
致謝	III
目錄	IV
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 電子紙技術簡介	1
1.3 研究目的	4
1.4 預期困難	5
1.5 顯色特性化方法	6
1.6 論文架構	6
第二章 色度學計算與色差	8
2.1 色度學計算	8
2.2 色差	13
第三章 顯色特性化理論	18
3.1 加法系統顯色特性化	18
3.2 減法系統顯色特性化	23
3.3 Eugene Allen 演算法	27
3.4 色光學密度	32
第四章 微杯型電泳顯示器之顯色特性化	34
4.1 微杯型電泳顯色機制	34
4.2 微杯型電泳顯色特性化	35
第五章 單色微杯電泳電子紙實驗驗證與應用	39
5.1 實驗架構	39

5.2	吸收頻譜的純量化驗證	41
5.3	表面反射修正	42
5.4	灰階與純量對應關係	44
5.5	顯色模型驗證	45
第六章	結論與未來課題	47
	參考資料	49

圖表目錄

[圖 1-1]	各種軟性顯示器顯示介質與機制	2
[圖 1-2]	微膠囊電泳式電子紙結構與顯色模型	3
[圖 1-3]	微杯電泳式電子紙結構與顯色模型	4
[圖 1-4]	各媒介之間具有相同或共通色彩語言的溝通方式	5
[圖 2-1]	CIE 1931 配色函數	9
[圖 2-2]	基本色彩計算流程示意圖	9
[圖 2-3]	Luo 和 Rigg 實驗的色彩辨別橢圓圖	14
[圖 2-4]	RIT-DuPont 與 BFD 實驗(紅色)和 CIEDE2000(黑色)MacAdam 橢圓圖	17
[表 2-1]	CIE 標準光源的三刺激值和色度座標	12
[圖 4-1]	單色微杯電子紙灰階控制機制	34
[圖 4-2]	吸收頻譜預測示意圖	36
[圖 5-1]	量測實驗平台：(a)幾何量測示意圖；(b)實際架設圖	40
[圖 5-2]	測量實驗方塊圖	40

[圖 5-3] 照明光源 F7*之頻譜分布	41
[圖 5-4] 微杯型電泳式單色電子紙 (a)反射頻譜；(b)歸一化之反射頻譜	41
[圖 5-5] 微杯型電泳式單色電子紙 (a)吸收頻譜；(b)歸一化之吸收頻譜	42
[圖 5-6] 表面炫光和微杯牆等微結構所造成的反射示意圖	42
[圖 5-7] 各灰階和純量的對應關係：(a)顯色模型一；(b)顯色模型二	44
[圖 5-8] 各個灰階的色差值：(a)顯色模型一；(b)顯色模型二	45
[圖 5-9] 預測和實際量測值的吸收頻譜分布	46
[圖 5-10] 預測和實際量測值之反射頻譜和配色函數(Z)乘積的分布	46
[圖 6-1] 最佳 γ 的觀察條件依存度	48



第一章 緒論

此章節裏將介紹電子紙的發展與技術簡介，並且提出本文的研究目的與方法。

本章目錄：

- 1.1 前言
- 1.2 電子紙技術簡介
- 1.3 研究目的
- 1.5 顯色特性化方法
- 1.6 論文架構

1.1 前言

電子紙(E-paper)為一具有雙穩態(Bi-stable)之反射式顯示器，由於使用性質與傳統紙張應用有許多重疊，因而得名。此種低耗能之顯示器，對於資訊傳遞的便利性以及製造成本上極具一定程度的優勢，有機會滲透部分紙張印刷以及穿透式顯示器市場。舉凡一般書籍、海報、標籤等，皆屬於電子紙應用範疇，因此電子紙成為近年來最熱門的新型顯示器技術之一。除此之外，隨著高階主動式電子紙全彩化技術的不斷發展，電子紙所呈現的影像品質逐漸成為一項重要的研究議題。如何建立一套精準地描述電子紙顯色與混色機制之物理模型，進而發展出屬於電子紙之特性模型與色彩重現技術即為各家廠商所不斷努力的方向。由於電子紙兼具一般顯示器可複寫資訊(soft copy)與傳統紙張(hard copy)的外貌特徵，如何扮演正確傳達圖文資訊的媒體，為電子紙是否能在市場上占有一席之地之關鍵課題之一。

1.2 電子紙技術簡介

目前電子紙包含多種反射型顯示技術，按結構和顯示原理大致可分為下述三大類型：

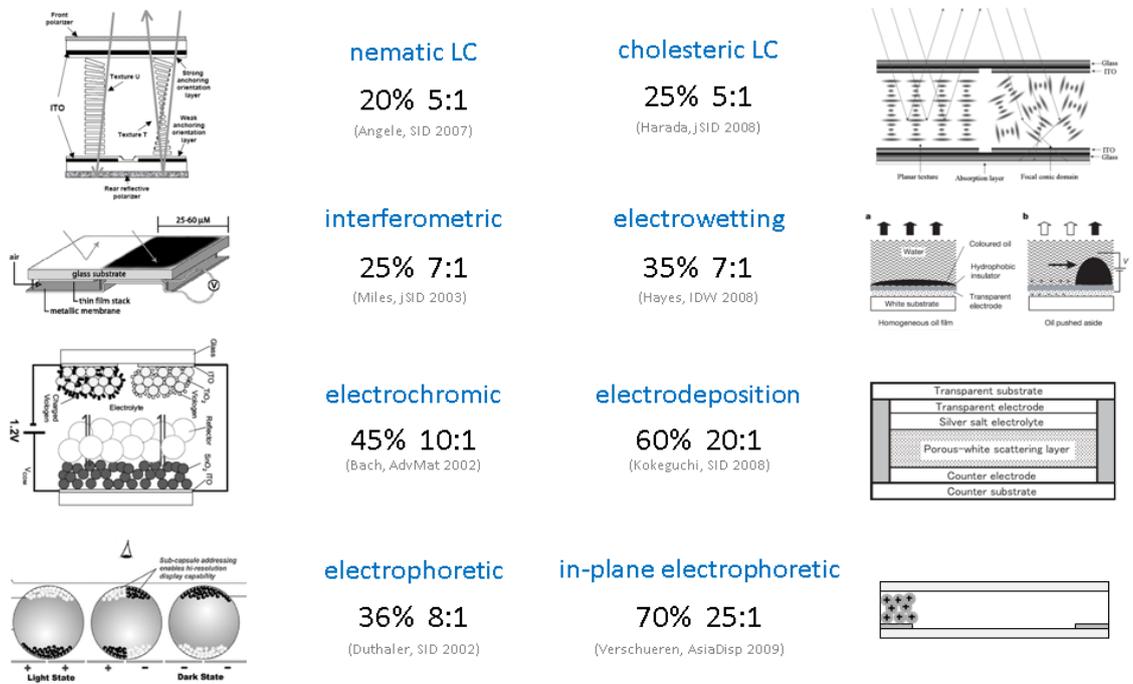
- (1) 液晶顯示(Liquid Crystal Display)，包含膽固醇液晶、光寫入型液晶、高分子

分散型液晶等。

(2) 有機電激發光(Electro-Luminance)顯示，包含小分子有機 EL 型、彩色撓性大分子有機 EL 型。

(3) 以真正電子紙為目標的類紙型(paper-like)電子紙，包含微膠囊電泳式(Electrophoresis)、微杯電泳式、旋轉微球式、熱覆寫式、電子粉流體式等技術。

下圖為目前各種軟性顯示器上的顯示介質與機制，其中包含現有各技術之反射率與對比度特性[1]。



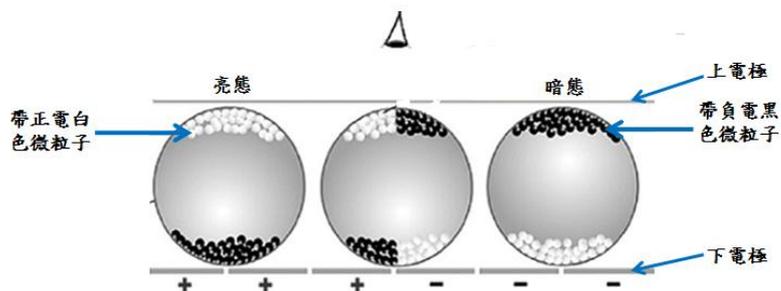
[圖 1-1] 各種軟性顯示器顯示介質與機制

(資料來源：菲利浦)

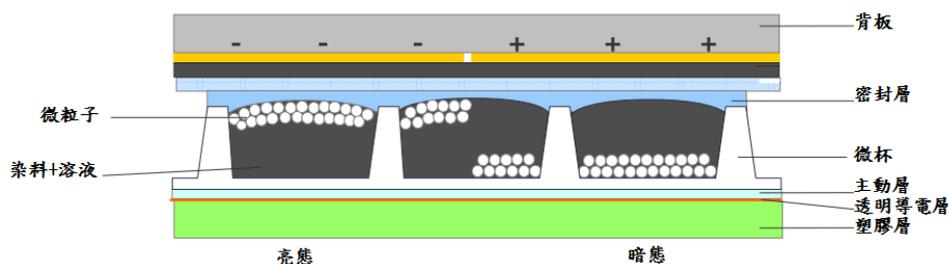
真正電子紙為目標的類紙型(paper-like)電子紙代表需具有雙穩態特性，即除了在更換影像資訊外，不需再持續充電即可維持該畫面至下次信號更新，具有低耗電量，方便應用於攜帶型產品。本文也將以具有雙穩態特性的微杯電泳式電子紙作為研究的對象。目前電泳技術主要分為微膠囊(Microcapsule)電泳與微杯(Microcup)電泳兩種主

流，前者俗稱電子墨水(Electronic Ink, E-Ink)，以 E-Ink 為主要研發公司，後者以 SiPix 為主要研發公司。電泳動基本顯示原理主要是以外加電場驅動懸浮在溶液(fluid)中的帶電粒子(一般以 TiO_2 為主)，利用粒子存在位置或角度的改變，來組合粒子、溶液、基板之間的亮度對比，進而呈現單色或全彩影像[2-5]。

E-ink 發展的微膠囊電泳技術，在兩片透明的玻璃或塑膠基板中間，灌入包覆帶有極性的黑、白帶電粒子之微膠囊，並且膠囊和個別像素不需完全對位。當施加外加電位於上下兩片基板時，會形成電場以驅動不同極性的微帶電粒子，膠囊中以電泳(electrophoresis, EP)的機制，達成新的粒子分佈狀態，以調節各別畫素之反射率，最後形成畫面，如圖 1-2 所示。和 TFT-LCD 相比，它少了背光模組、彩色濾光片和偏光片等元件，所以重量與生產成本可大幅降低。相對於 E-ink 利用微膠囊將流動的微粒子包覆，SiPix 則是將微杯製作在可撓性塑膠基板上。該基板包括一個 $80\text{-}150\mu\text{m}^2$ 尺寸的氧化銦錫(ITO)透明導電膜，隨後微杯被密封並層壓在一個佈滿電極的顯示器驅動背板上。微杯製造採用一種捲軸式壓印製程，首先利用透明導電膜，然後是專用樹脂，對連續 PET 塑料薄片進行塗佈。微壓印機在樹脂上鑄出微杯，這些微杯被染料填滿、密封，再黏接到背板上，如圖 1-3 所示。與微膠囊不同之處，在於微杯型電子紙利用電壓調整白色微粒子於微杯中的分布位置，改變染料的光學密度，進而達到灰階的控制。



[圖 1-2] 微膠囊電泳式電子紙結構與顯色模型



[圖 1-3] 微杯電泳式電子紙結構與顯色模型

現階段市面的電子紙依然以黑白或單色為主，除了 Fujitsu 的電子書和 Magink 的膽固醇液晶，未來達到全彩化的方法基本上可分成三種：

1. 利用彩色濾光波加在黑白電子紙上，在製程上最容易達成，但反射率會較低。
2. 利用空間排列的子畫素形成全彩，如 SiPix 在各個微杯中填入不同顏色的溶液或微粒子，使得光進入微杯後，反射不同的顏色形成全彩的畫面。
3. 利用不同顏色層的堆疊選擇性吸收光的波段，形成全彩畫面，如飛利浦控制 CMYK 四原色層堆疊。

下表為此三種全彩化方法的比較：

[表 1-1]全彩化電子紙方法比較表

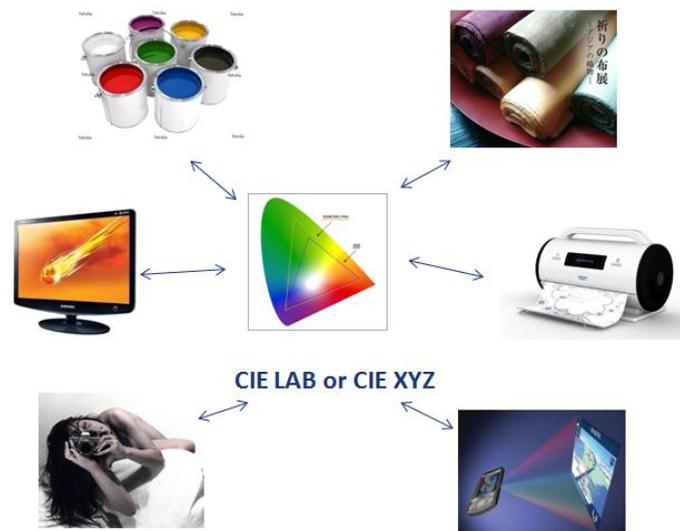
Full-Color Method	Advantages	Challenges	Suitable Technologies
Spatial color filter on top of a monochrome display	Straight forward	Resolution becomes 1/3 of the mono version, White reflectivity reduced >50%, color looks faded	Electrophoretic, electrochromic, bi-stable LCD
Spatial color sub-pixels	Color looks vivid	Resolution becomes 1/3 of the mono version	Electrophoretic, MEMS, Electrochromic, bi-stable LCD
Stacking of transparent color layers	Resolution won't reduce, reflectivity won't reduce	Complex structure, layer alignment	Must be transparent: Electrowetting, Bi-stable LCD, transparent electrophoretic

(資料來源:DISPLAYSERCH)

1.3 研究目的

本文研究目的為電子紙顯色特性化。顯色媒介的色彩管理中，主要可分成三個重點：顯色特性化、色彩重現和人因實驗。首先顯色特性化的目的在於定義「媒介色彩空間(或設備從屬色彩空間)與 CIE 色度資料(非設備從屬色彩空間)之間的轉換關係」，

如圖 1-4 所示，亦即「建立此媒介與其他設備之間具有相同或共通色彩語言的溝通方式」；色彩重現是指依據配色原理，對被攝物體或彩色原稿等的原物製作複製影像，主要分成頻譜配色和條件配色，通常以條件配色為主，若為不同的顯色媒介則需選擇適當的色域對映方法，以及觀色環境的差異；人因實驗的目的在於研究色彩的物理刺激值與感知之間的關係，即如何將人眼視覺的感知轉化成量化的數值。由於目前全彩化電子紙的技術還在研發中，所以本文研究著重於顯色特性化，並且在各家電子紙技術當中，以微杯電泳式(Electrophoretic)電子紙為例，介紹如何從物理顯色機制開始，發展出屬於電泳式微杯電子紙的顯色特性化(characterization)。



[圖 1-4] 各媒介之間具有相同或共通色彩語言的溝通方式

1.4 預期困難

電子紙是一項嶄新的顯示科技，包含過去 softcopy 和 hardcopy 的優點，如以電子式讀取、重覆改寫、方便閱讀和方便攜帶等等，但不同於 softcopy 的光源來自於背光或是自發光，乃是和 hardcopy 一樣由外界光源照明，而顯色機制則皆不同於兩者。雖然 softcopy 和 hardcopy 在色彩工程已經發展的相當成熟，但我們無法直接套用他們已臻至完備的顯色特性化模型於電子紙，而必須根據電子紙的顯色機制，發展出適合的

顯色特性化模型。

1.5 顯色特性化方法

將電子紙色彩特性化的方法有許多種類，但最終的目的仍需保有下列幾項特點：「色彩之正確性」、「視覺可接受性」、「計算容易」、「測量次數的減少」及「可逆的解析解」等要素[6]。大體上，顯色特性化可歸納為三種方式，包含物理模式(Physical model)、數值模式(Numerical model)、及對照表模式(Look-Up table)。

物理模式：利用成像設備的色彩物理特性，將色彩轉換至所需的色彩屬性。例如混合加法模型、混合減法模型(Beer-Bouguer 定律、Kubelka-Munk 理論)等。皆是利用元件顯色之物理特性找出其相互關係之理論定律。

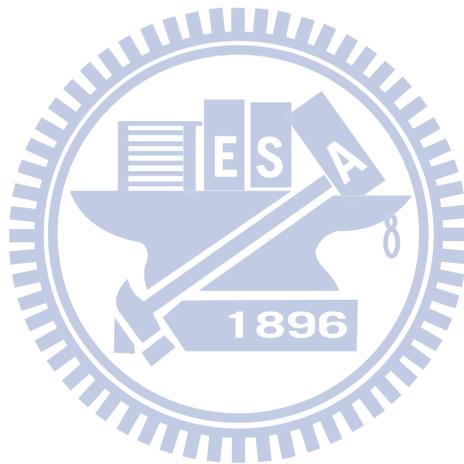
數值模式：利用少數測試樣本的測量資料並利用多項式迴歸數學模式，導出設備色彩之轉換相關係數。原則上，利用多項式求出之方程式階數愈高，色彩的轉換預測結果愈準確，但計算時間相對較長。

對照表模式：對照表模式的作法是利用已知前面二種模式任一種方式得到「轉換前」與「轉換後」的色彩資訊，建立像素間數位訊號與色度資訊之間直接的轉換對照關係。本文將針對電子紙的色彩特性，結合上述三種模式建立適用於電子紙的色彩模型。

1.6 論文架構

本論文的目的是在於根據電子紙的顯色機制，建立其色彩模型。在第一章中，首先介紹電子紙的重要性和各家簡略的技術比較，接著深入介紹微杯電泳式的顯色機制，並且說明本文的研究目的和特性化建立的方法；第二章則介紹基本的色度學計算和色差，並以 CIEDE2000 作為色差討論的重點，目的在於驗證本文顯色模型的準確性；第

三章以顯色特性化理論作為本文的理論核心，分別介紹加法混色和減法混色的顯色特性化，以及兩種特性化的演算方法；第四章針對單色微杯電子紙的顯示機制，建立其顯色模型；第五章為建立顯色特性化的實驗，並以 CIEDE2000 作為模型準確度的評估指標；第六章為結論。



第二章 色度學計算與色差

本章節中將概述色度學原理中，色彩的定量化描述和計算，主要針對國際照明委員會(CIE)所制定的標準進行介紹。第二部份以 CIEDE2000 作為色度值差量的指標，常用於色彩複製時，評估目標色票和標準色票的色差

本章目錄：

2.1 色度學計算

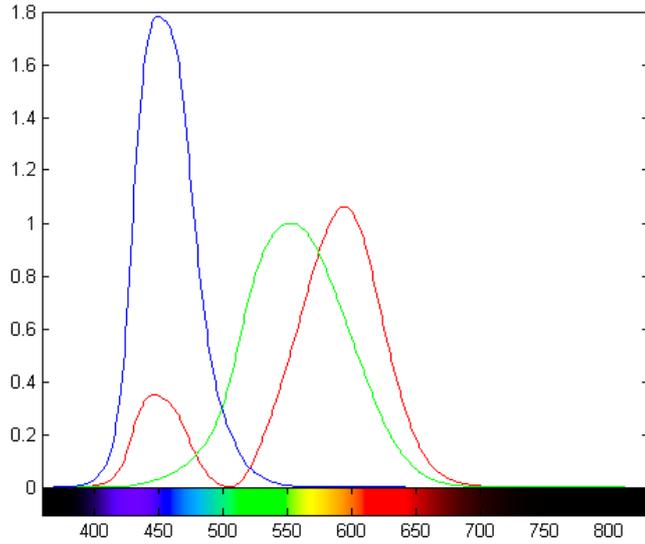
2.2 色差

2.1 色度學計算

色度學的目的為量化人眼所感知的色彩，此目的將延伸出三個主要的概念：

1. 每一種顏色有唯一的色度座標，亦即不同的色度座標將呈現不同的色外貌。
2. 色度值描述於色彩座標系統裡，各維度之間互相獨立，並且跟人眼所感知的色彩有一定的關聯，如 Lab 系統表達亮度、紅綠軸和黃藍軸。
3. 色度值的差量應正相關於人眼所感知的差量。

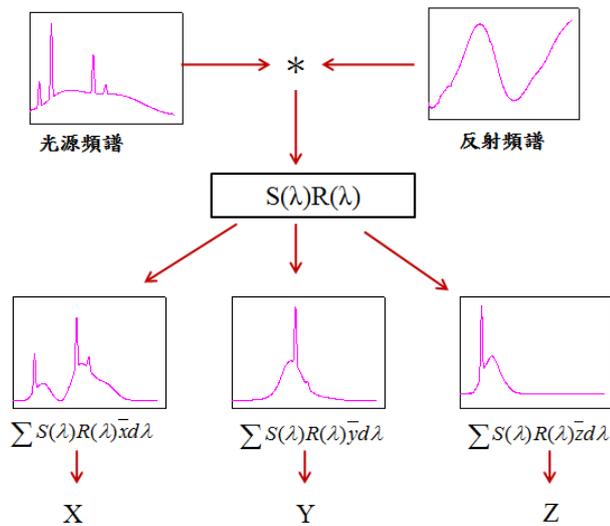
CIE 制定的標準色度系統便以這些概念作為基礎。首先 CIE 1931 定義出新的原色刺激 XYZ 和配色函數，如圖 2-1 所示，它是基於 2° 度角的配色實驗，可由 RGB 色度系統的配色函數經由一次線性轉換求得，並且皆為正值以利於計算方便。



[圖 2-1] CIE 1931 配色函數

將配色函數、照明光源頻譜和物體反射頻譜互相乘積，並於有限波長範圍內疊加起來，其值即為色三刺激值，如式 2.1 所示，其計算的流程可由圖 2-2 所示：

$$\begin{aligned}
 X &= k \sum_l^u \bar{x}(\lambda) S(\lambda) R(\lambda) \Delta\lambda \\
 Y &= k \sum_l^u \bar{y}(\lambda) S(\lambda) R(\lambda) \Delta\lambda \\
 Z &= k \sum_l^u \bar{z}(\lambda) S(\lambda) R(\lambda) \Delta\lambda
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$



[圖 2-2] 基本色彩計算流程示意圖

其中 $S(\lambda)$ 為照明光源光譜的能量分布，可以是量測結果，也可以是一組數據， $R(\lambda)$ 為物體反射的能量分布(若考慮透射物體則換成穿透頻譜 $T(\lambda)$)， \bar{x} 、 \bar{y} 和 \bar{z} 為人眼視覺系統的配色函數。 u 跟 l 為波長範圍的上下限，在 CIE Publication 15.2 中規定全波長範圍為 360-830nm，並以 1nm 為間隔，可見光範圍為 380-780nm，而實際應用中，將波長範圍 380-760nm 並以 5nm 為間隔的數值，再進行內插計算，便有足夠的準確性，在其它文獻中，有進一步討論不同波長範圍和不同間隔的內插計算對三刺激的影響[7]。 k 是當物體為完全擴散面($R(\lambda)=100$)時，為了使 Y 為 100 所選定的常數。如式 2.2 所示：

$$k = \frac{100}{\sum_l^u \bar{y}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda} \quad (2.2)$$

因為配色函數的分布使得原三色刺激值 XYZ 必皆為正值，並且刺激值 Y 會正相關於人所感知到的明度(lightness)，通常把 Y 定義為物體的亮度(luminous)。

得到三刺激值後，進一步計算求得色座標，如式(2.3)所示：

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z &= \frac{Z}{X+Y+Z} \end{aligned} \quad (2.3)$$

由於 $x+y+z=1$ ，通常會忽略 z 值，亦即以 xy 為色座標和刺激值 Y 便足夠得到唯一的色度表示。

式(2.1)的計算為較單純的非自發光情況，若要深入考量不同環境因素下的三刺激值，則需要更複雜的顯色模型，如 CIECAM97s[8]。另一方面，CIE 所制定的標準照明，如白熾燈(A)、日光(D65)、螢光燈(F2)等等，最常使用的 D65 和 D50，前者應用

於顯示器中，如 CRT、LCD 等等，因為在肉眼看來 D65 是最接近純白色的，將顯示器的白色調成 D65 可避免人眼色度適應現象所造成的視覺色彩偏移。而 D50 則應用於圖像藝術品，因為在 ISO3664:2000，D50 光源才是真正意義上觀察顏色的標準色溫。當用於色彩量測時，照明光源會因供應電源的穩定性或長期使用而導致衰減，需定期校正。而以非實體存在的標準光源，如 D65 光源，其色溫定義在 6500K，並無一自然光源可完全產生 D65 的能量光譜，其光譜分布為統計的結果，並作為色彩量測計算的基礎。

雖然色三刺激和色座標已可滿足前述的第一個概念，但其值的等量變化對於人眼而言，為非均勻的改變，在實用上產生了許多問題，所以為了得均等性的色度變化，CIE 發展出各種均勻色彩空間(Uniform Color Space UCS)，如 CIE 1964 $U^*V^*W^*$ 、CIE 1976 $L^*u^*v^*$ 和 CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 。CIELUV 主要用於顯示器和照明，CIELAB 則用於表面色工業(Surface color industries)，定義分別如下：

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16 \\
 u^* &= 13L^*(u' - u'_n) \\
 v^* &= 13L^*(v' - v'_n) \\
 u' &= 4X/(X + 15Y + 3Z) \\
 v' &= 9Y/(X + 15Y + 3Z)
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - 16 \\
 a^* &= 500\left(\left(\frac{X}{X_n}\right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3}\right) \\
 b^* &= 200\left(\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{1/3}\right)
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

其中 X_n, Y_n, Z_n 為參考白的三刺激值，一般系統的參考白可藉由完全擴散面反射光源得到，標準參考白則由 CIE 1931 制定，如表 2-1 所示。

[表 2-1] CIE 標準光源的三刺激值和色度座標

(資料來源:ASTM)

	X	Y	Z	x	Y
D50	96.4222	100	82.521	0.3457	0.3585
D55	95.682	100	92.149	0.3324	0.3474
D65	95.047	100	108.882	0.3127	0.329
A	109.85	100	35.585	0.4476	0.4074
C	98.074	100	118.232	-.3101	0.3161

若刺激值較低時，式2.4需作以下修正：

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - 16, & Y/Y_n > 0.008856 \\
 L^* &= 903.3\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3}, & Y/Y_n \leq 0.008856 \\
 a^* &= 500\left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right] \\
 b^* &= 200\left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right]
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

其中

$$\begin{aligned}
 f(X/X_n) &= (X/X_n)^{1/3}, & X/X_n > 0.008856 \\
 f(X/X_n) &= 7.787(X/X_n) + 16/116, & X/X_n \leq 0.008856 \\
 f(Y/Y_n) &= (Y/Y_n)^{1/3}, & Y/Y_n > 0.008856 \\
 f(Y/Y_n) &= 7.787(Y/Y_n) + 16/116, & Y/Y_n \leq 0.008856 \\
 f(Z/Z_n) &= (Z/Z_n)^{1/3}, & Z/Z_n > 0.008856 \\
 f(Z/Z_n) &= 7.787(Z/Z_n) + 16/116, & Z/Z_n \leq 0.008856
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

其中 a^* 和 b^* 分別代表紅綠軸和黃藍軸，並且垂直(orthogonal)於 L^* ，當 $a^*=b^*=0$ 時，即為無彩度軸或明度軸 L^* (Lightness)。將直角座標 a^*b^* 轉成極座標色相角 h_{ab} (hue angle) 和彩度 C_{ab}^* (chroma)，定義如下：

$$\begin{aligned} C^* &= (a^2 + b^2)^{1/2} \\ h_{ab} &= \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

其中色相角範圍為 0° - 360° ，但也必須考慮其相對計算條件，例如，當 $a^*>0$ 和 $b^*>0$ 時，則色相角的條件為 $0^\circ < h_{ab} < 90^\circ$ 。然而相關的色度逆計算便不在此贅述，可參考相關文獻[6]。

2.2 色差

假設一感知均勻和維度相互垂直的色彩空間，其色差可用 Euclidean 距離表示。例如前述所提的 CIELAB 和 CIELUV，便大幅改進原先 CIEXYZ 不均勻的缺點，其色差公式分別表示如下：

$$\Delta E_{ab}^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2} \quad (2.9)$$

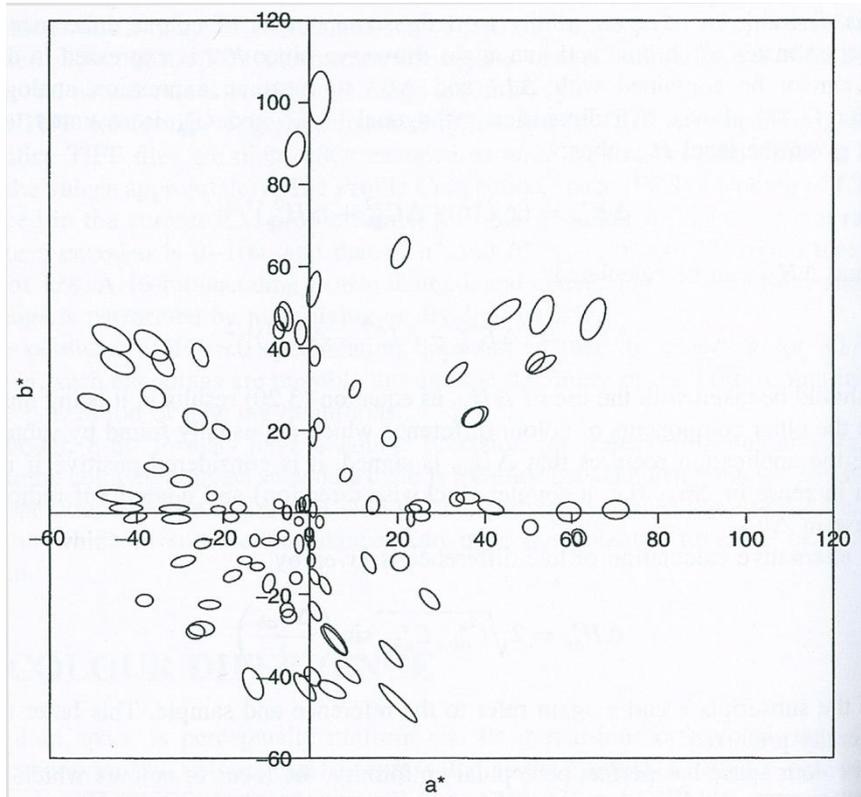
$$\Delta E_{uv}^* = (\Delta L^{*2} + \Delta u^{*2} + \Delta v^{*2})^{1/2} \quad (2.10)$$

其中 ΔL 、 Δa 、 Δb 等等差異量代表目標和參考色的差異，例如：

$$\Delta L^* = L_r^* - L_s^* \quad (2.11)$$

若是理想的均等色彩空間，其恰可識別的界限為一個圓形，並且此圓形的半徑在

色度圖上的任一區塊皆為定值。目前 CIELUV 和 CIELAB 已有一定程度改善了 xy 色度圖的不均等性，但依然非完美的圓形，如圖 2-3 所示，越遠離中間色，其長短軸的差異更加明顯，並且在飽合藍色區域附近，長軸並非完全指向中心。



[圖 2-3] Luo 和 Rigg 實驗的色彩辨別橢圓圖

為了接近人眼所感知的色差，陸續有人提出新的色差公式，如 ΔE_{CMC} 色差以紡織品作為實驗樣本[9]，並於 1995 作為 ISO 於紡織應用的標準； ΔE_{BFD} 於 1987 提出，以多種材料作為實驗樣本[10]；還有 ΔE_{94} 和 ΔE_{00} 等等。這些色差公式可以式(2.11)作為代表：

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H}\right)^2} + \Delta R \quad (2.12)$$

其中

$$\Delta R = R_T f(\Delta C'_{ab}, \Delta H'_{ab})$$

其中 $\Delta L'$ 、 $\Delta C'_{ab}$ 、 $\Delta H'_{ab}$ 分別代表標準樣本和配色樣本的亮度差、彩度差和色相差。 ΔR 為彩度差和色相差的交互作用項，可改變橢圓的長軸角度。 S_L 、 S_C 和 S_H 代表權重項，影響橢圓的長短軸的長度。 k_L 、 k_C 和 k_H 為參數因子，會根據實驗的條件而變，如樣本的材料、背景等等。

在此我們以介紹 CIEDE2000 為主，它主要改善飽合藍色區域和中間色的色差部份，公式如下：

$$\begin{aligned} \Delta E_{00} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H}\right)^2 + \Delta R} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H}\right)} \end{aligned} \quad (2.13)$$

CIEDE2000 計算流程如下：

1. 求得 a' 、 C' 和 h' ：

$$L' = L^*$$

$$a' = (1+G)a^*, \quad G = 0.5 \left(1 - \left(\frac{\overline{C_{ab}^*}}{C_{ab}^* + 25}\right)^2\right)$$

$$b' = b^*$$

$$C'_{ab} = \sqrt{a'^2 + b'^2}$$

$$h'_{ab} = \tan^{-1}(b'/a')$$

(2.14)

其中 $\overline{C^*}$ 代表兩樣本 C^* 的數術平均值。

2. 計算 $\Delta L'$ 、 $\Delta C'$ 和 $\Delta H'$ ：

$$\begin{aligned}
\Delta L' &= L'_r - L'_s \\
\Delta C'_{ab} &= C'_{ab,r} - C'_{ab,s} \\
\Delta H'_{ab} &= 2\sqrt{C'_{ab,r}C'_{ab,s}} \sin\left(\frac{\Delta h'_{ab}}{2}\right), \Delta h'_{ab} = h'_{ab,r} - h'_{ab,s}
\end{aligned} \tag{2.15}$$

3. 計算權重因子 S_L 、 S_C 和 S_H ：

$$\begin{aligned}
S_L &= 1 + \frac{0.015(\overline{L'} - 50)^2}{(20 + (\overline{L'} - 50)^2)^{\frac{1}{2}}} \\
S_C &= 1 + 0.045\overline{C'_{ab}} \\
S_H &= 1 + 0.015\overline{C'_{ab}}T, T = 1 - 0.017 \cos(\overline{h'_{ab}} - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\overline{h'_{ab}}) \\
&\quad + 0.32 \cos(3\overline{h'_{ab}} + 6^\circ) - 0.2 \cos(4\overline{h'_{ab}} - 63^\circ)
\end{aligned} \tag{2.16}$$

$\overline{L'}$ 、 $\overline{C'_{ab}}$ 和 $\overline{h'_{ab}}$ 分別代表兩樣本 L' 、 C'_{ab} 和 h'_{ab} 之算術平均數，其中 $\overline{h'_{ab}}$ 有範圍規定：

$$\begin{aligned}
\overline{h'_{ab}} &= (h'_{ab,r} + h'_{ab,s})/2, & h'_{ab,s} \leq 180 \\
\overline{h'_{ab}} &= (h'_{ab,r} + h'_{ab,s})/2 - 180, & h'_{ab,s} > 180
\end{aligned}$$

4. 計算色調和彩度的交互因子 R_T ：

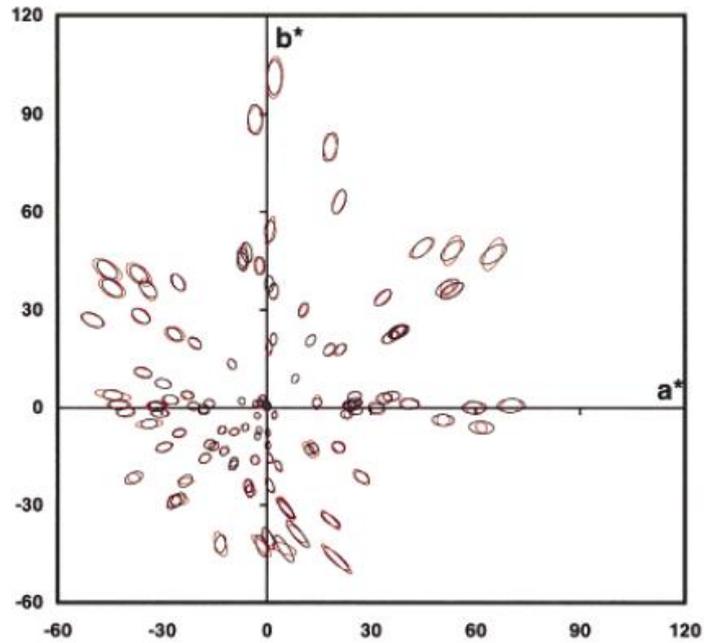
$$\begin{aligned}
R_T &= -\sin(2\Delta\theta)R_C, \Delta\theta = 30 \exp\{-[(\overline{h'_{ab}} - 275^\circ)/25]^2\} \\
R_C &= 2\left(\frac{\overline{C'_{ab}}}{\overline{C'_{ab}} + 25^7}\right)^{\frac{1}{2}}
\end{aligned} \tag{2.17}$$

5. 選擇適當的參數值 k_L 、 k_C 和 k_H (根據實驗條件和觀測條件選擇適當的參數，標準參考條件為 $k_L = k_C = k_H = 1$)。

6. 利用式 2.11 求得色差 CIE ΔE_{00} 。

上述中，權重因子 S_L 、 S_C 和 S_H 改善 a*b*色度圖的均勻性，而 R_T 改善原 CIE94 在飽合

藍色區域的色差表現，並且重新定義 a^* 的尺度改善中間色的色差，亦即藉由 CIE2000 預測的色差和人眼的感知已經相當吻合，如圖 2-3 所示，紅色橢圓為 RIT-DuPont 和 BFD 的實驗結果，黑色橢圓為 CIE2000 預測的結果。



[圖 2-4] RIT-DuPont 與 BFD 實驗(紅色)和 CIEDE2000(黑色)MacAdam 橢圓圖

第三章 顯色特性化理論

在一般顯示器和印刷系統中，常用顯色物理模型與混色模型來描述色料(colorant)的產生和混合後的頻譜分布與色彩特性。色料可以為染料(dye)、顏料(pigment)、墨水(ink)或是色光(chromatic lights)，前三者主要使用於印刷系統中，顯色機制和混色模型由減法原理建構，而色光用於一般顯示器中，如傳統 CRT，其顯色機制主要為利用電子槍激發螢光粉產生色光，而混色模型則由加法原理建構。概括來說，增加混色時的混合成份數，所形成的色彩明度會像加法般地變亮，則為加法系統，反之，有如減法般地變暗，則為減法系統。

根據 Roy Berns 在他經典的 *Principles of Color Technology* 書中，指出在建立顯色模型時，核心觀念為找出顯色機制中線性與非線性的部分[11]，而具體可分成兩項步驟：第一步驟為找到具有純量化(scalability)特性的頻譜關係，亦即在不同的灰階下，此色料(colorant)的頻譜分佈皆可以藉由一歸一化(normalization)頻譜再乘上一純量值獲得，並滿足線性疊加(addictivity)而形成全彩畫面。接下來我們會分別介紹加法系統和減法系統的顯色特性化，以及配色色彩計算常用的演算法。

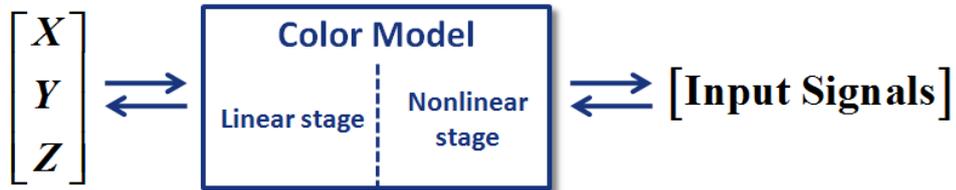
本章目錄：

- 3.1 加法系統顯色特性化
- 3.2 減法系統顯色特性化
- 3.3 Eugene Allen 演算法
- 3.4 色光學密度

3.1 加法系統顯色特性化

顯色特性化的目的主要在於定義媒介色彩空間(或設備從屬色彩空間)與 CIE 色度

資料(非設備從屬色彩空間)之間的轉換關係，如圖 3-1 所示，亦即建立顯色模型作為輸入訊號和 CIE 色度資料彼此的轉換橋樑，而顯色模型包含線性和非線性的成份。



[圖 3-1] 顯色特性化目的

顯色特性化具體可分成兩步驟，第一步是要找到頻譜的線性關係，即此頻譜需具有可純量化的特性。首先利用頻譜儀測量各灰階的輻射頻譜分布，以單位波長做為量測間隔(至少要小於 10nm 間隔，再用內插的方法求得間隔內的數值)。一般在加法混色系統中，我們常以輻射頻譜功率分佈(Spectral power distribution, SPD)來描述光源，以 CRT 的紅色頻道(R-channel)為例，公式(3.1)：

$$L_{\lambda} = RL_{\lambda, \max} \quad (3.1)$$

其中 L_{λ} 代表輸出亮度頻譜分佈，一般由螢光粉配方決定， $L_{\lambda, \max}$ 代表此頻道最高輸出亮度， R 為一比例值(radiometric scalar)。公式(3.2)描述全彩化(RGB)的線性疊加關係：

$$L_{\lambda} = RL_{\lambda, r, \max} + GL_{\lambda, g, \max} + BL_{\lambda, b, \max} \quad (3.2)$$

其中 RGB 代表輻射純量，即和最大輻射強度相對比值關係。式(3.2)的意義代表可純量化和線性疊加的特性為顯色特性化的基礎。

進一步將各波長的疊加關係以矩陣表達，如式(3.3):

$$\begin{bmatrix} L_{\lambda=1} \\ \vdots \\ L_{\lambda=n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\lambda=1,r,\max} & L_{\lambda=1,g,\max} & L_{\lambda=1,b,\max} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{\lambda=n,r,\max} & L_{\lambda=n,g,\max} & L_{\lambda=n,b,\max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

乘以 CIE XYZ 的配色函數，如公式(2.1)，進一步轉換為色三刺激值 XYZ，但需注意的是，公式(2.1)中 $S(\lambda)$ 為某一色光之頻譜分布，對 LCD 而言， $S(\lambda)$ 代表 LCD 面板內部某一彩色濾光片與背光板光源等元件的綜合頻譜分布，並且沒有反射頻譜 $R(\lambda)$ 。再將色三刺激值 XYZ 和輻射純量寫成矩陣關係，如公式(3.4)所示，即每一畫素的色度值，可藉由各子畫素最大灰階的色度值乘以純量值 RGB 互相疊加而成。其中 Y 代表發光亮度，其單位為 cd/m^2 。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r,\max} & X_{g,\max} & X_{b,\max} \\ Y_{r,\max} & Y_{g,\max} & Y_{b,\max} \\ Z_{r,\max} & Z_{g,\max} & Z_{b,\max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

若系統有不理想效應則需加入修正項，如 LCD 中會有面板內部少許的訊號互相干擾和大部份的漏光，造成稱作黑色浮底的現象發生，即當色彩輸入訊號為黑時，在 LCD 面板上原本應無任何刺激量的反應產生，卻有多餘少許刺激量的現象，此時，需要作以下的修正：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r,\max} & X_{g,\max} & X_{b,\max} \\ Y_{r,\max} & Y_{g,\max} & Y_{b,\max} \\ Z_{r,\max} & Z_{g,\max} & Z_{b,\max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

其中 $X_k Y_k Z_k$ 為修正項。根據輻射比值可得到各 RGB 的值，即為純量，以紅色頻道為例，如式(3.6)所示：

$$R = \frac{Y_r}{Y_{r,\max}} \quad (3.6)$$

$$R = \frac{\int_{\lambda} L_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda} L_{\lambda,\max} d\lambda}$$

在找到具有純量化(scalability)特性的頻譜關係後，接下來第二步驟為定義輸入信號端(user controls)與純量(scalars)之間的關係，輸入信號端在此代表數位值(或是灰階)，而純量為經過先前歸一化步驟的純量數值(radiometric value)。以 CRT 紅色頻道為例，其關係式可用式(3.7)來描述：

$$R = \begin{cases} (k_{g,r} (\frac{d_r}{2^N - 1}) + k_{o,r})^{\gamma_r}; k_{g,r} (\frac{d_r}{2^N - 1}) + k_{o,r} \geq 0 \\ 0 & k_{g,r} (\frac{d_r}{2^N - 1}) + k_{o,r} \leq 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

其中 N 為灰階數， k_g 為系統的增益項， k_o 為補償項， r 為指數值。對於不同的硬體系統，上述各項參數會有其特定值。

從色彩管理的角度，若以標準色票作為色彩複製的對象時，我們必需計算相對應的純量值，如式(3.8)(3.9)所示，因為模型的可逆性是色彩科學中不可或缺的一環，並且解析解明顯優於多項式表示。

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r,\max} & X_{g,\max} & X_{b,\max} \\ Y_{r,\max} & Y_{g,\max} & Y_{b,\max} \\ Z_{r,\max} & Z_{g,\max} & Z_{b,\max} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{std.} \quad (3.8)$$

$$d_r = \left(\frac{2^N - 1}{k_{g,r}} \right) (R^{1/\gamma} - k_{o,r}); 0 \leq R \leq 1 \quad (3.9)$$

其中 std.表示標準色票(standard)。

若要和標準色票的頻譜作比對時，則以式(3.10)求得相對應的純量，並且可用最小平方方法得到配對頻譜間的最小差異。

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (3.10)$$

其中

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{X}^T = \begin{bmatrix} \bar{x}_{\lambda=1} & \bar{x}_{\lambda=2} & \cdots & \bar{x}_{\lambda=n} \\ \bar{y}_{\lambda=1} & \bar{y}_{\lambda=2} & \cdots & \bar{y}_{\lambda=n} \\ \bar{z}_{\lambda=1} & \bar{z}_{\lambda=2} & \cdots & \bar{z}_{\lambda=n} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} L_{\lambda=1,r,\max} & L_{\lambda=1,g,\max} & L_{\lambda=1,b,\max} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{\lambda=n,r,\max} & L_{\lambda=n,g,\max} & L_{\lambda=n,b,\max} \end{bmatrix},$$

and $\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} L_{\lambda=1} \\ \vdots \\ L_{\lambda=n} \end{bmatrix} \text{ std.}$

\mathbf{b} 代表純量， \mathbf{X}^T 代表 CIE 配色函數， \mathbf{Y} 代表標準色票在反射某環境光源後的能量頻譜分布。

相對於一些特定的系統如 LCD 而言，輸入信號端和純量之間通常為非線性轉換關係，難以用線性的數學關係來表達，所以通常會以對照表等形式來定義輸入信號端和純量的對應關係。

顯示器若遵守上述的加法混色原理，亦即滿足輻射頻譜的可量化特性，則該顯示器的子畫素 RGB 在 CIE-xy 色度圖上的色度座標位置為三個固定的色點，此三個色點不隨著亮度變化而移動。亦即各子畫素的輸入訊號強弱不會改變本身的色度座標，此現象稱為色度恆常性(Chromaticity Constancy)。

3.2 減法系統顯色特性化

減法系統包括簡單減法和複雜減法系統，前者只考慮吸收，後者包含吸收和散射。以高階染料擴散熱轉寫式彩色印表機（Dye Diffusion Thermal Transfer）的頻譜和色彩特性作為特性化減法系統的例子，它是將 CMY 染料以擴散熱的方式轉寫至紙上。特性化的第一步驟為找到具有可純量化的頻譜，首先藉由光學頻譜儀量測反射頻譜，再利用式(3.11)歸一化：

$$R_{\lambda,normalized} = \left(\frac{R_{\lambda,measured}}{R_{\lambda,paper}} \right) / R \text{ at } \lambda_{min} \quad (3.11)$$

因為減法系統是選擇性吸收（先不考慮散射），藉由控制色料的量來得到最小的反射強度，如調配最濃的顏料來得到最深但反射最低的顏色，所以將最小反射強度之頻譜分布作為歸一化的標準。過去文獻已發現對於減法系統而言，反射頻譜經過歸一化後並不會重疊，即對於減法系統而言，各灰階的反射頻譜之間不具線性關係，而是必須要轉化成吸收的概念來描述，最早是由 Bouguer-Beer law 定義穿透物質的反射與吸收的非線性轉化關係，如式(3.12)所示：

$$\log\left(\frac{1}{T_{\lambda,i}}\right) = K_{\lambda} = a_{\lambda}bc \quad (3.12)$$

其中 k_{λ} 為吸收度(absorptance)， a_{λ} 為色料的吸收特性常數，與濃度無關， b 為厚度， c 為濃度。特別是 c 以摩耳濃度表示濃度時的 a_{λ} 稱為摩耳吸收係數。式(3.12)定義單一色料的吸收由本身的吸收特性、厚度和濃度有關，並且此關係只適用於單波長。若為顏色混合，則總吸收為各色料的吸收值互相疊加，如下所示：

$$\begin{aligned}
K_{\lambda,mix} &= K_{\lambda,1} + K_{\lambda,2} + K_{\lambda,3} + \dots \\
&= a_{\lambda,1}b_1c_1 + a_{\lambda,2}b_2c_2 + a_{\lambda,2}b_2c_2 + \dots
\end{aligned}
\tag{3.13}$$

將式(3.13)代入式(3.12)可得混合後的吸收與穿透之間的關係，如下所示：

$$T_{\lambda,i,mix} = 10^{-K_{\lambda,i,mix}} \tag{3.14}$$

若進一步考慮幾近透明的染料和不透明材質光學接觸時，我們可用式(3.15)來描述其色料量和反射的關係：

$$R'_{\lambda} = R'_{\lambda,g} \exp\{-2(Ck_{\lambda,c} + Mk_{\lambda,m} + Yk_{\lambda,y})\} \tag{3.15}$$

其中 R'_{λ} 代表紙張的反射因子， $R'_{\lambda,g}$ 為未上染料的紙張反射， CMY 為純量，此純量代表吸收程度的比例， k 是各色料的吸收因子。值得注意的是，其中 $Ck_{\lambda,c} + Mk_{\lambda,m} + Yk_{\lambda,y}$ 即代表此線性系統的純量化(scalability)與疊加(additive)。式(3.16)為吸收頻譜的歸一化公式：

$$k_{\lambda,normalized} = \frac{-0.5 \ln\left(\frac{R_{\lambda,measured}}{R_{\lambda,paper}}\right)}{[-0.5 \ln\left(\frac{R_{\lambda,measured}}{R_{\lambda,paper}}\right)]_{max\ absorbance}} \tag{3.16}$$

其中分母代表最大吸收時的吸收度。進一步用矩陣式(3.17)表各波長的線性混合系統：

$$\begin{bmatrix} K_{\lambda=1} \\ \vdots \\ K_{\lambda=n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{\lambda=1,c,max} & k_{\lambda=1,m,max} & k_{\lambda=1,y,max} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{\lambda=n,c,max} & k_{\lambda=n,m,max} & k_{\lambda=n,y,max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

其中 K_λ 代表吸收度(absorptance)為各色料吸收的混合值，吸收係數 k_λ (absorptivity)代表單一色料的吸收，各色料的最大吸收係數可直接用式(3.16)得到。我們可利用統計的方法如主元素分析法分析各色料的吸收頻譜[12]，特徵值是 scalability 的定量量測。色料的純量由式(3.18)定義：

$$C = \frac{\int_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda} K_{\lambda, \max} d\lambda} \quad (3.18)$$

第二步是要得到輸入信號端和純量的關係。在一般影像系統中，通常為非線性的關係，如下所示：

$$C = f(d_c), f(c_c) \dots \quad (3.19)$$

其中 $f(X)$ 為變數 X 的獨立方程式，如在印表機和紡織中，數位值 d_c 和體積濃度 c_c 則為其輸入信號端。在理想的情況下，此方程式應具有物理意義並且可逆，如下所示：

$$d_c, c_c, \dots = f(C) \quad (3.20)$$

也可以利用一維的對照表直接得到式(3.19)的可逆關係。總結來說，以吸收頻譜來描述各灰階的線性關係為特性化的第一步驟，定義輸入信號端和純量之間的轉換為第二步驟。

對於色彩管理或是電腦配色而言，顯色模型的目的不在於順向的過程，而是利用其逆向的推導去定義信號輸入端如何得到目標色彩，如在加法系統中，利用式(3.8)和式(3.9)即可得到逆向的推導；而減法系統的逆向則較為複雜，因為反射和吸收為非線性的關係。為了方便色彩複製，在這利用吸收頻譜去定義標準色票的似三刺激值，以似三刺激值 X^p (Pseudo tristimulus) 為例，如下所示：

$$X_{std}^p = \frac{100}{\int_{\lambda} S_{\lambda} \bar{y} d\lambda} \int_{\lambda} S_{\lambda} k_{\lambda, std} \bar{x} d\lambda \quad (3.21)$$

其中 S_{λ} 為環境光源頻譜， \bar{x} 為 CIE 配色函數的 x 值。似三刺激是類比於加法混色所形成的虛設值(dummy value)，與傳統顯示器三刺激值的物理意義略有不同。

我們也可以利各色料的吸收頻譜得出似三刺激值，如式(22):

$$\begin{aligned} X^p &= \frac{100}{\int_{\lambda} S_{\lambda} \bar{y} d\lambda} \int_{\lambda} S_{\lambda} k_{\lambda} \bar{x} d\lambda \\ Y^p &= \frac{100}{\int_{\lambda} S_{\lambda} \bar{y} d\lambda} \int_{\lambda} S_{\lambda} k_{\lambda} \bar{y} d\lambda \\ Z^p &= \frac{100}{\int_{\lambda} S_{\lambda} \bar{y} d\lambda} \int_{\lambda} S_{\lambda} k_{\lambda} \bar{z} d\lambda \end{aligned} \quad (22)$$

則似三刺激的混合關係可由線性的矩陣關係表達，如下所示:

$$\begin{bmatrix} X^p \\ Y^p \\ Z^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c^p & X_m^p & X_y^p \\ Y_c^p & Y_m^p & Y_y^p \\ Z_c^p & Z_m^p & Z_y^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

若要顯示標準色票的似三刺激值，則其純量由式(3.24)可得:

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c^p & X_m^p & X_y^p \\ Y_c^p & Y_m^p & Y_y^p \\ Z_c^p & Z_m^p & Z_y^p \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X^p \\ Y^p \\ Z^p \end{bmatrix}_{std}. \quad (3.24)$$

即減法系統的配色可藉由似三刺激值的配色來達成，但需注意的是，似三刺激是方便於配色計算，不具有色彩的意義。若直接以吸收頻譜來配色，同樣可由式(3.10)可得，其中:

$$b = \begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} k_{\lambda=1,c} & k_{\lambda=1,m} & k_{\lambda=1,y} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{\lambda=n,c} & k_{\lambda=n,m} & k_{\lambda=n,y} \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} K_{\lambda=1} \\ \vdots \\ K_{\lambda=n} \end{bmatrix}_{std}$$

其中 Y 需藉由標準色票的反射頻譜代入公式(3.14)得到, X 則為系統的吸收頻譜分布。

3.3 Eugene Allen 演算法

在上述的加法系統和減法系統中,除了反射頻譜和吸收頻譜之間的非線性轉換,兩者特性化的過程幾近相同。在這裡必須要注意的是,在做色彩複製時,公式(3.24)不適用於重現顏色樣品具有同色異譜(metamerism)的關係。否則配對似三刺激不等同於配對三刺激值,即優化吸收頻譜不等同於優化反射頻譜,這是因為吸收和反射之間為非線性關係。除了考慮條件等色,當我們在決定純量值時,為了得到最相近的 CIE 色三刺激值(Tri-stimulus color reproduction),還需考量光源、XYZ 色度系統的配色函數和吸收與反射之間的非線性關性,所以在此將介紹的色彩計算 Eugene Allen 演算法[13]便綜合以上的考量,概念和牛頓-拉普森法(Newton-Raphson method)一樣為逐次近似法原理,即先求出初始值再代入疊代法求出真正的純量。

初始值計算

首先定義 CIE 配色函數 T 以矩陣形式表達,

$$T = \begin{bmatrix} \bar{x}_{380} & \bar{x}_{385} & \cdots & \bar{x}_{780} \\ \bar{y}_{380} & \bar{y}_{385} & \cdots & \bar{y}_{780} \\ \bar{z}_{380} & \bar{z}_{385} & \cdots & \bar{z}_{780} \end{bmatrix}$$

其中底標數字代表波長,單位為 nm,並以 5nm 為間隔作代表,間隔內的資訊可藉由內插法得到。

接著定義環境光源函數矩陣 S :

$$S = \begin{bmatrix} S_{380} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & S_{385} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & S_{780} \end{bmatrix}$$

再定義標準樣本 $r^{(s)}$ 和配色樣本 $r^{(m)}$ 的反射頻譜矩陣(或穿透頻譜)：

$$r^{(s)} = \begin{bmatrix} R_{380}^{(s)} \\ R_{385}^{(s)} \\ \vdots \\ R_{780}^{(s)} \end{bmatrix}, \quad r^{(m)} = \begin{bmatrix} R_{380}^{(m)} \\ R_{385}^{(m)} \\ \vdots \\ R_{780}^{(m)} \end{bmatrix}$$

若是完美的配色(在此為條件配色)，會符合式(3.25)：

$$t = TSR^{(s)} = TSR^{(m)} \quad (3.25)$$

因此

$$TS[r^{(s)} - r^{(m)}] = \mathbf{0} \quad (3.26)$$

一般而言，標準和配色樣本的每個波長之反射值或穿透值並不相同。因此，我們可以用式(3.27)來合理的描述單一波長的差值：

$$\begin{aligned} R_{\lambda}^{(s)} - R_{\lambda}^{(m)} &= \Delta R_{\lambda} = [dR/df(R)]_{\lambda} \Delta f(R)_{\lambda} \\ &= [dR/df(R)]_{\lambda} [f(R)_{\lambda}^{(s)} - f(R)_{\lambda}^{(m)}] \\ &= d_{\lambda} [f(R)_{\lambda}^{(s)} - f(R)_{\lambda}^{(m)}] \end{aligned} \quad (3.27)$$

其中 $f(R)$ 代表吸收和反射(或穿透)之間的非線性函數，若是透明物質 $f(R)$ 為 $\log(1/R)$ ；若是不透明物質則為 $(1-R)^2/2R$ 。 d_i 為權重函數修正條件等色所造成的誤差，

若是透明物質為 R_{λ} 的-2.3026 倍，不透明則為 $-2R_{\lambda}^2/(1-R_{\lambda}^2)$ 。並定義以下矩陣：

$$f^{(s)} = \begin{bmatrix} f(R)_{380}^{(s)} \\ f(R)_{385}^{(s)} \\ \vdots \\ f(R)_{780}^{(s)} \end{bmatrix}, \quad f^{(m)} = \begin{bmatrix} f(R)_{380}^{(m)} \\ f(R)_{385}^{(m)} \\ \vdots \\ f(R)_{780}^{(m)} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} d_{380} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & d_{385} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & d_{780} \end{bmatrix}$$

所以式(3.25)可改寫成:

$$TSDf^{(s)} = TSDf^{(m)} \quad (3.28)$$

再定義純量矩陣 C 和色料的吸收矩陣 Φ

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} \phi_{385,1} & \phi_{385,2} & \phi_{385,3} \\ \phi_{390,1} & \phi_{390,2} & \phi_{390,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_{780,1} & \phi_{780,2} & \phi_{780,3} \end{bmatrix}$$

進一步將系統分成基板和色料的吸收，如下所示：

$$f^{(m)} = f^{(t)} + \Phi c \quad (3.29)$$

其中 $f^{(t)}$ 即為基板的吸收， Φ 為色料的吸收，通常代表色料的最大吸收值， c 為吸收純量。結合式(3.28)和式(3.29)可得式(3.30):

$$TSD\Phi c = TSD[f^{(s)} - f^{(t)}] \quad (3.30)$$

因此欲達到目標色(or 標準色票)所需的純量可由式(3.31)表示:

$$Scalars = c = (TSD\Phi)^{-1} TSD[f^{(s)} - f^{(t)}] \quad (3.31)$$

值得注意的是，式(3.31)中的 $TSD\Phi$ 無法預先建立，因為權重 D 是由目標色樣本的反射頻譜決定。藉由式(3.31)即可得到純量的初始值。

疊代法

得到純量的初始值後，我們再藉由疊代法得到更精準的純量值。首先代入初始值後，可得離目標色樣本的三刺激值差 Δt ，並假設需改變純量差 Δc 使得 Δt 為零，亦即達到完美配色：

$$\Delta t = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}, \quad \Delta c = \begin{bmatrix} \Delta C_1 \\ \Delta C_2 \\ \Delta C_3 \end{bmatrix}$$

因為三刺激為純量的函數，我們可由 B 矩陣來連結 Δt 和 Δc ，如式(3.32):

$$\Delta t = B\Delta c = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial C_1} & \frac{\partial X}{\partial C_2} & \frac{\partial X}{\partial C_3} \\ \frac{\partial Y}{\partial C_1} & \frac{\partial Y}{\partial C_2} & \frac{\partial Y}{\partial C_3} \\ \frac{\partial Z}{\partial C_1} & \frac{\partial Z}{\partial C_2} & \frac{\partial Z}{\partial C_3} \end{bmatrix} \Delta c \quad (3.32)$$

接著定義矩陣 P 和 Q :

$$P = \begin{bmatrix} \frac{\partial X^{(m)}}{\partial R_{380}} & \frac{\partial X^{(m)}}{\partial R_{385}} & \dots & \frac{\partial X^{(m)}}{\partial R_{780}} \\ \frac{\partial Y^{(m)}}{\partial R_{380}} & \frac{\partial Y^{(m)}}{\partial R_{385}} & \dots & \frac{\partial Y^{(m)}}{\partial R_{780}} \\ \frac{\partial Z^{(m)}}{\partial R_{380}} & \frac{\partial Z^{(m)}}{\partial R_{385}} & \dots & \frac{\partial Z^{(m)}}{\partial R_{780}} \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} \frac{\partial R_{380}^{(m)}}{\partial C_1} & \frac{\partial R_{385}^{(m)}}{\partial C_2} & \frac{\partial R_{780}^{(m)}}{\partial C_3} \\ \frac{\partial R_{380}^{(m)}}{\partial C_1} & \frac{\partial R_{385}^{(m)}}{\partial C_2} & \frac{\partial R_{780}^{(m)}}{\partial C_3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial R_{380}^{(m)}}{\partial C_1} & \frac{\partial R_{385}^{(m)}}{\partial C_2} & \frac{\partial R_{780}^{(m)}}{\partial C_3} \end{bmatrix}$$

則我們可得式(3.33):

$$B = PQ \quad (3.33)$$

我們進一步討論矩陣 P ，由於刺激值可寫成以下的關係

$$X = \bar{x}_{380} S_{380} R_{380}^{(m)} + \cdots + \bar{x}_{780} S_{780} R_{780}^{(m)}$$

則波長為 380nm 時，反射函數 R 對刺激值 X 微分可得

$$\frac{\partial X}{\partial R_{380}} = \bar{x}_{380} S_{380}$$

同理可得，我們可重寫矩陣 P ，如式(3.34)所示

$$P = \begin{bmatrix} \bar{x}_{380} S_{380} & \bar{x}_{385} S_{385} & \cdots & \bar{x}_{780} S_{780} \\ \bar{y}_{380} S_{380} & \bar{y}_{385} S_{385} & \cdots & \bar{y}_{780} S_{780} \\ \bar{z}_{380} S_{380} & \bar{z}_{385} S_{385} & \cdots & \bar{z}_{780} S_{780} \end{bmatrix} = TS \quad (3.34)$$

接著討論矩陣 Q ，波長在 380nm 時，吸收可表示成式(3.35)

$$f(R)_{380}^{(m)} = f(R)_{380}^{(t)} + C_1 \phi_{380,1} + C_2 \phi_{380,2} + C_3 \phi_{380,3} \quad (3.35)$$

其中 $f(R)_{380}^{(t)}$ 代表波長 380nm 時基板的吸收值。則純量對反射的偏微分為

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_{380}^{(m)}}{\partial C_1} &= \left(\frac{dR}{df(R)} \right)_{380} \frac{\partial f(R)_{380}^{(m)}}{\partial C_1} = d_{380} \frac{\partial f(R)_{380}^{(m)}}{\partial C_1} \\ &= d_{380} \phi_{380,1} \end{aligned}$$

所以矩陣 Q 可重寫成:

$$Q = \begin{bmatrix} d_{380\phi_{380,1}} & d_{380\phi_{380,2}} & d_{380\phi_{380,3}} \\ d_{385\phi_{385,1}} & d_{385\phi_{385,2}} & d_{385\phi_{385,3}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{780\phi_{780,1}} & d_{780\phi_{780,2}} & d_{780\phi_{780,3}} \end{bmatrix} = D\Phi \quad (3.36)$$

結合式(3.33)、式(3.34)和式(3.36)代入式(3.32)後，可重寫成式(3.37)

$$\Delta t = TSD\Phi\Delta c \quad (3.37)$$

所以，要得到真正的目標顏色所需改變的純量 Δc ，可由式(3.38)定義：

$$\Delta c = (TSD\Phi)^{-1}\Delta t \quad (3.38)$$

疊代次數越多可得到越精準的結果。藉由 Eugene Allen 的演算法，除了計算色彩複製時所需的純量外，也可以應用於求原系統各灰階的吸收頻譜之間的比例關係，即可建立一維對照表來對應各灰階的純量值。

3.4 色光學密度

嚴格來說，以 Allen 演算法所得到的純量值是嚴謹而完整的推演，然而在一般影像的色彩複製應用中，往往只有目標色的三刺激值(CIE XYZ)，而無完整的頻譜資訊，因而不易達到相對應且正確的純量值。為了避免此問題，本文亦介紹第二種顯色模型，主要為引入色光學密度(colorimetric density)，直接和色三刺激值作轉換，如式(3.39)，以刺激值 Y 作為例子：

$$D_y = \ln\left(\frac{Y_{white}}{Y_i}\right) \quad (3.39)$$

其中 D_y 代表色光學密度，下標 white 表示系統的白點。色光學密度來自於吸收和反射之間為指數關係，如式(3.39)所示，式(3.39)雖為近似的假設，但無需目標色完整的頻

譜資訊，並且可以建立一線性矩陣來作為 CIEXYZ 和輸入信號之間的轉換橋梁，如下所示：

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{x,c,\max} & D_{x,m,\max} & D_{x,y',\max} \\ D_{y,c,\max} & D_{y,m,\max} & D_{y,y',\max} \\ D_{z,c,\max} & D_{z,m,\max} & D_{z,y',\max} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

最後我們定義出各灰階下的色度值與色光學密度值的關係為式(3.40)：

$$\ln \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \ln \begin{bmatrix} X_{white} \\ Y_{white} \\ Z_{white} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D_{x,c,\max} & D_{x,m,\max} & D_{x,y',\max} \\ D_{y,c,\max} & D_{y,m,\max} & D_{y,y',\max} \\ D_{z,c,\max} & D_{z,m,\max} & D_{z,y',\max} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

此即為全彩顯色特性化模型。但必須注意的是式(3.40)是適用全彩化的機制為色料之間可以互相混合，若是混色機制為三個子畫素互相獨立，即利用空間分配形成全彩畫面，稱為並置混色，則模型必須修正為：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_R + \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_G + \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B \quad (3.41)$$

$$\log \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_R = \log \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D_{x,\max} \\ D_{y,\max} \\ D_{z,\max} \end{bmatrix}_R [R], \log \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_G = \log \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D_{x,\max} \\ D_{y,\max} \\ D_{z,\max} \end{bmatrix}_G [G], \log \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B = \log \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D_{x,\max} \\ D_{y,\max} \\ D_{z,\max} \end{bmatrix}_B [B] \quad (3.42)$$

式(3.41)等號左邊為混合後色度值，由各 RGB 子畫素的色度值相加所得，即各子畫素的顯色機制為減法原理，形成全彩顯色機制為加法原理，且因為加法原理中以 RGB 為三原色可以得到較廣的色域，所以式(3.41)和式(3.42)以 RGB 為例。

第四章 微杯型電泳顯示器之顯色特性化

在各類電子紙顯色技術當中，我們以微杯型電泳式電子紙作為建構顯色特性化的例子，對於其他不同的顯色機制，下面所提出的模型必須做一定程度的修正。

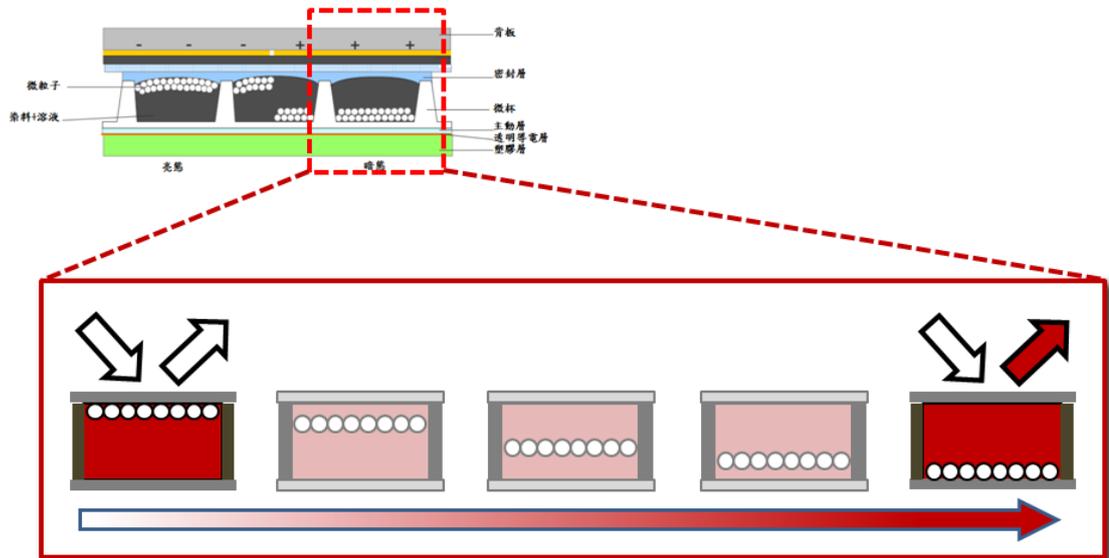
本章目錄：

4-1 單色微杯型電泳顯色機制

4-2 單色微杯型電泳顯色特性化

4.1 微杯型電泳顯色機制

以目前製程較為成熟的單色微杯電子紙為例，其顯色機制為泳動式，主要是以外加電場驅動懸浮在溶液中的帶電粒子，利用粒子存在位置的改變，來展現不同的等效溶液厚度，以達到不同的吸收效果，如圖 4-1 所示，隨著等效溶液厚度越厚，反射後的顏色越深，但亮度越低。



[圖 4-1] 單色微杯電子紙灰階控制機制

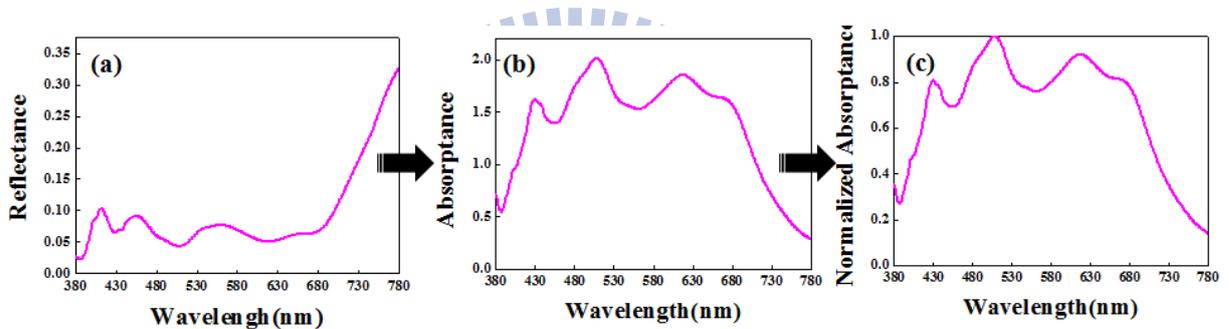
此機制相似於傳統的油墨印刷，控制油墨的厚度可顯現顏色深淺，是故用減法系

統的顯色模型作為微杯型電泳顯色特性化的基礎。

4.2 微杯型電泳顯色特性化

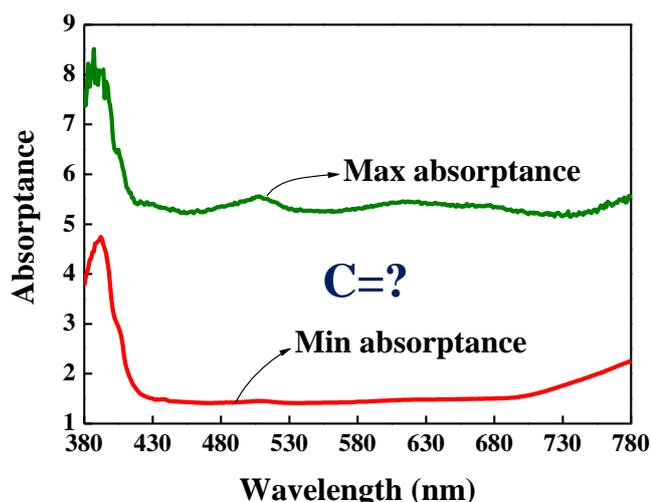
為了簡化討論，我們先不考慮著色劑之間的疊加，而以單色(monocolor)作為起點。我們首先量測各灰階的反射頻譜，代入公式(3-15)轉化成吸收頻譜，再經過歸一化步驟(公式 4-1)，驗證其吸收頻譜的可量化特性，具體量測的示意圖由圖 4-2 所示。

$$K_{\lambda,normalized} = \frac{K_{\lambda}}{K_{\lambda,max}} \quad (4-1)$$



[圖 4-2] 微杯型電泳電子紙顯色特性化第一步之流程示意圖 (a)反射頻譜 (b)吸收頻譜 (c)歸一化吸收頻譜

顯色模型第二步驟為定義輸入信號端(user controls)與純量(scalars)之間的關係，目的為利用系統最暗態灰階的吸收頻譜去預測其它灰階的吸收頻譜，如圖 4-3 所示，其中綠色曲線為最暗態灰階的吸收頻譜，紅色曲線是最亮態的吸收頻譜(非系統的白點)，則最暗灰階的吸收頻譜需乘以某一純量去配對另一灰階的吸收頻譜，使得預測和實際量測有最小的誤差。



[圖 4-3] 吸收頻譜預測示意圖

為了避免同色異譜所造成的誤差，我們使用 Eugene Allen 所提出的演算法，得到各灰階下的純量關係，如式(4-2)：

$$C = (TSD\Phi)^{-1}TSDf \quad (4-2)$$

其中 C 為純量(colorant scalar)， T 為 CIE 配色函數， S 為光源頻譜， D 為權重函數， Φ 為系統中最暗灰階的頻譜， f 為系統中目標色的吸收頻譜。由於我們將微杯中白色粒子層的反射直接考慮在光源項中，即式 4-2 中的 S 為外界環境光源乘以系統白點的反射頻譜，所以式 4-2 並無第三章中式 3-30 的基板項 $f^{(t)}$ 。

如第三章所述，以 Allen 演算法所得到的純量值是嚴謹而完整的推演，然而在一
般影像的色彩複製應用中，往往只有目標色的三刺激值(CIEXYZ)，而無完整的頻譜資
訊，因而不易達到相對應且正確的純量值。由於單色微杯電泳顯示器為 softcopy，同
樣難以得到完整的頻譜資訊，所以建立第二種顯色模型時，主要為引入色光學密度
(colorimetric density)，直接和 CIE 色三刺激值作轉換，如式(4-3)，以刺激值 Y 作為例

子：

$$D_y = \ln\left(\frac{Y_{white}}{Y_i}\right) \quad (4-3)$$

其中 D 代表色光學密度， Y_{white} 為系統白點的 Y 刺激值。色光學密度來自於吸收和反射之間為指數關係(由 Lambert Beer law 所定義，如第三章所述，但只適用於單波長)，式(4-3)雖為近似的假設，但無需目標色完整的頻譜資訊，並且可以建立一線性矩陣來作為 CIEXYZ 和輸入信號之間的轉換橋樑，如式(4-4)：

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{x,max} \\ D_{y,max} \\ D_{z,max} \end{bmatrix} \times C \quad (4-4)$$

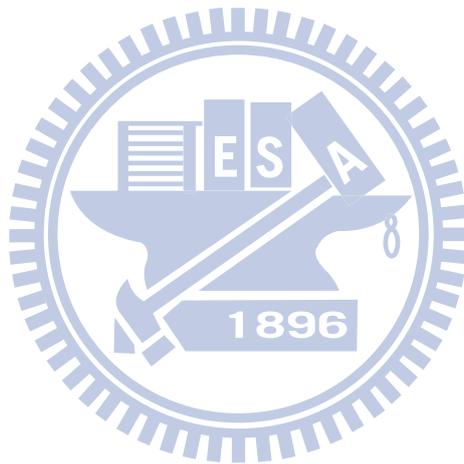
最後我們定義出各灰階下的色度值與電泳液量值的關係為：

$$\log \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \log \begin{bmatrix} X_{white} \\ Y_{white} \\ Z_{white} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D_{x,max} \\ D_{y,max} \\ D_{z,max} \end{bmatrix} \times C \quad (4-5)$$

此即為單色電子紙顯色特性化模型。而此一機制乃是基於著色劑減法原理，最後仍需以實驗驗證其正確性，並根據微杯型 EPD 的實驗量測結果，修正所提出之顯色物理模型。

建立的過程一樣先量測各灰階的反射頻譜，再考慮光源和 CIE 配色函數積分求得色三刺激值，代入式(3-3)得色光學密度，再代入式(4-4)求得各灰階的純量，由於色光學密度(D_x, D_y, D_z)分別有對應的純量(C_x, C_y, C_z)，選其一作為代表即可，如 CRT 每

個頻道中，三刺激值 XYZ 與灰階的對應曲線經過歸一化後將會幾近重疊，所以通常以 Y 的歸一化曲線作為純量的代表，這是因為反射頻譜具有可純量化的特性，在此為吸收頻譜具有可純量化的特性，使得三條色光學密度曲線經過歸一化後將會幾近重疊，所以選其一作為代表(在此選 Cy 曲線)。



第五章 單色微杯電泳電子紙實驗驗證與應用

在第四章中我們提出二種微杯電泳電子紙的二種顯色模型，本章節將以一可市化的電子紙作為驗證的例子，首先是實驗架構，接下來是吸收頻譜的純量化驗證，並且先修正不理想效應，再討論二種顯色模型的結果與誤差。

本章目錄：

5-1 實驗架構

5-2 吸收頻譜的純量化驗證

5-3 不理想效應修正

5-4 灰階與純量對應關係

5-5 顯色模型驗證

5-6 顯色模型比較



5.1 實驗架構

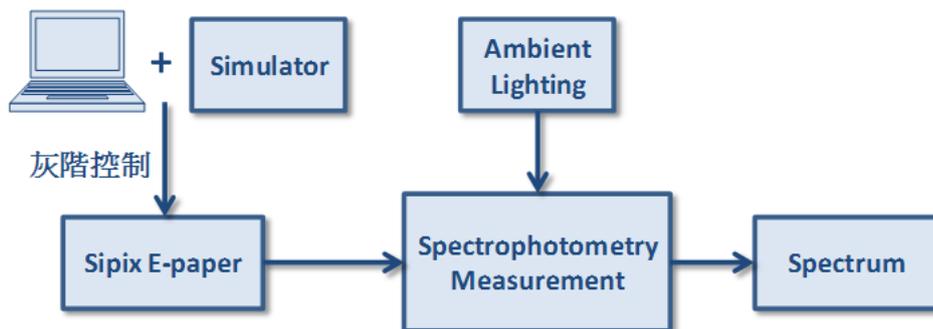
且彼此成一非線性關係為了驗證第三章中顯色模型的正確性，我們必須要架設一固定且穩定之實驗量測平台，以方便物理模型的驗證以及特性化流程的建立。本計劃實驗平台最主要有三個要件：(a)穩定而均勻之環境光源；(b)可自由調整灰階之待測電子紙；(c)可量測各種所需光學物理量之頻譜儀。在量測的過程中，我們選定如圖 5-1(a)所示之幾何條件：照明光束的光軸與測試樣本表面的法線夾角為 $45^{\circ} \pm 2^{\circ}$ ；觀測方向和測試樣本法線的夾角不應超過 10° ；照明光束和觀測光束的任一種光束與其中心線的夾角不得大於 8° 。而圖 5-1(b)則為本實驗用來量測微杯電子紙之實驗平台，並於暗房中進行實驗量測。

圖 5-2 為量測實驗流程圖。電腦將數位訊號給模擬器去控制電子紙的灰階，微杯

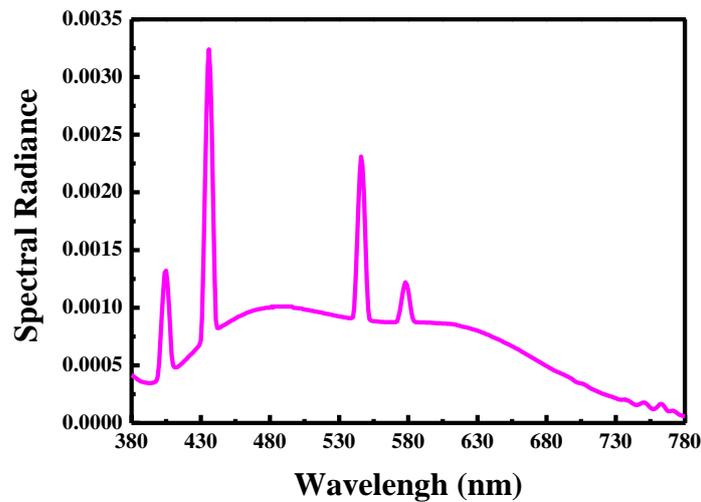
電子紙為單色灰階之 9 吋的面板。接著利用頻譜儀(SR-UL1R)進行量測，在固定環境光源下可得到不同灰階下電子紙之反射頻譜。所使用之照明光源為 CIE 代表性螢光燈光譜 F7*，環境亮度為 240nits，相關色溫為 6500K，實際照明光源頻譜如圖 5-3。而往後所有特性化流程的建立與物理模型的驗證，均根據此量測得到之反射頻譜進行運算及演繹。



[圖 5-1] 量測實驗平台：(a)幾何量測示意圖；(b)實際架設圖



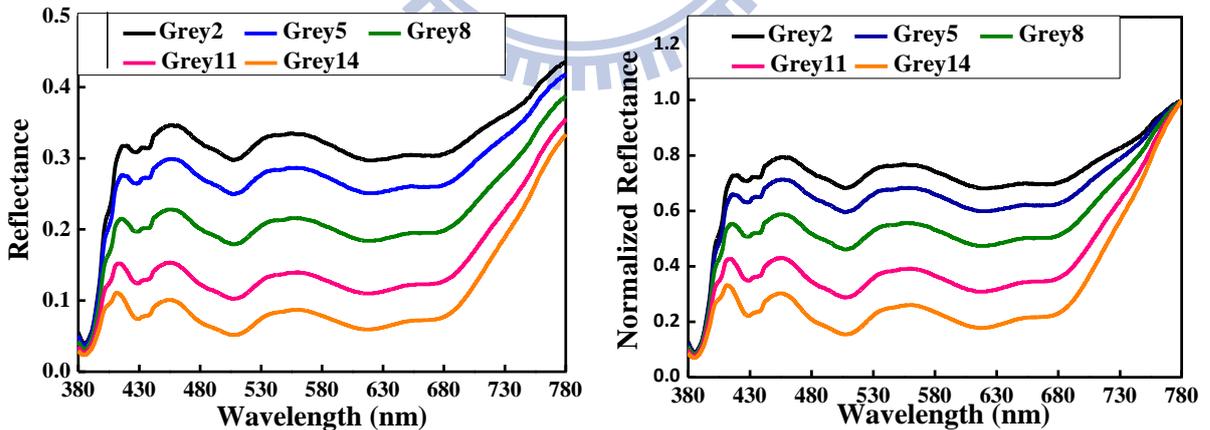
[圖 5-2] 測量實驗方塊圖



[圖 5-3] 照明光源 F7*之頻譜分布

5.2 吸收頻譜的純量化驗證

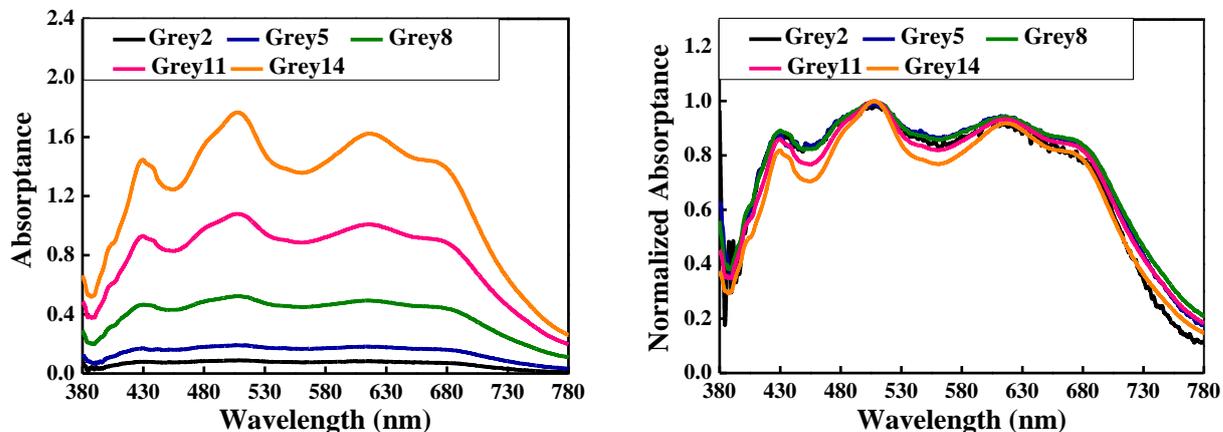
顯色模型的第一步驟為找到具有可量化的頻譜線性關係。首先在固定光源下，我們量測各灰階的反射頻譜，並且為了方便結果比較，我們取五個灰階作為代表，如圖 5-4(a)所示。再將反射頻譜歸一化，如圖 5-4(b)所示：



[圖 5-4] 微杯型電泳式單色電子紙 (a)反射頻譜；(b)歸一化之反射頻譜

由圖 5-4 可知，歸一化的反射頻譜並不重疊，即不具有可量化的特性。將反射頻譜代入式(3-15)求得吸收頻譜，如圖 5-5(a)所示，再經過歸一化，如圖 5-5(b)所示，和

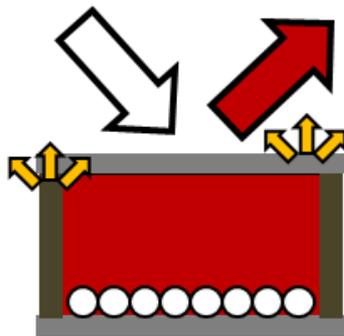
反射頻譜相較之下，吸收頻譜較具有歸一化的特性，證明特性化微杯電子紙必須以吸收頻譜來描述各灰階的線性關係，而不同於一般自發光式顯示器以反射頻譜(或穿透頻譜)。



[圖 5-5] 微杯型電泳式單色電子紙 (a)吸收頻譜；(b)歸一化之吸收頻譜

5.3 表面反射修正

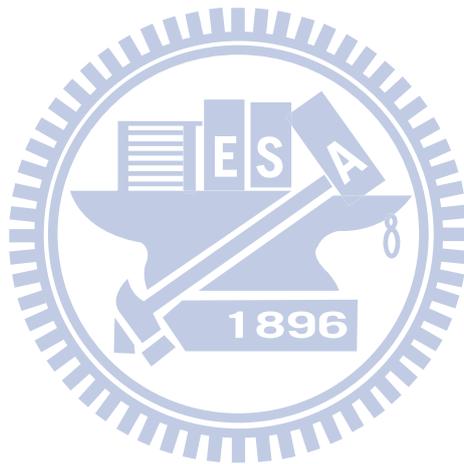
從圖 5-5(b)中，我們發現在波長 450nm 和 550nm 附近，對於不同灰階值有些許的差異，這主要是因為光進入微杯後除粒子造成的反射之外，還有顯示器表面炫光和微杯牆等微結構所造成的反射，如圖 5-6 所示。



[圖 5-6] 表面炫光和微杯牆等微結構所造成的反射示意圖

這些不理想的效應會造成一定程度的誤差，所以必須引入補償項修正。我們假設最暗態灰階時，光進入微杯中為完全吸收，即光度計所量測的數值為表面炫光和牆的反射部分，所以先將各灰階的反射值扣除最暗態灰階的反射值，即扣除不理想效應。除此

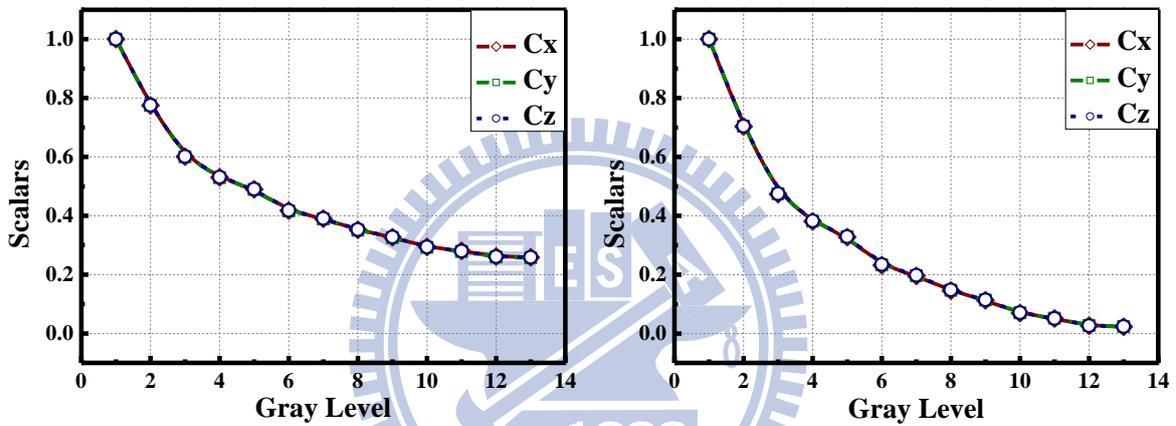
之外，如果溶液內有其他色素(pigment)所造成散射效應，建議必須用 Kubelka-Munk 理論作修正。



5.4 灰階與純量對應關係

在驗證完純量化關係之後，顯色模型第二步驟為定義輸入信號端(user controls)與純量(scalars)之間的關係，其目的為利用系統最暗態灰階的吸收頻譜去預測其它灰階的吸收頻譜。

我們利用第三章所述之顯色模型(公式 3-2 和 3-3)，求出各灰階對應的純量值，如圖 5-7 所示：

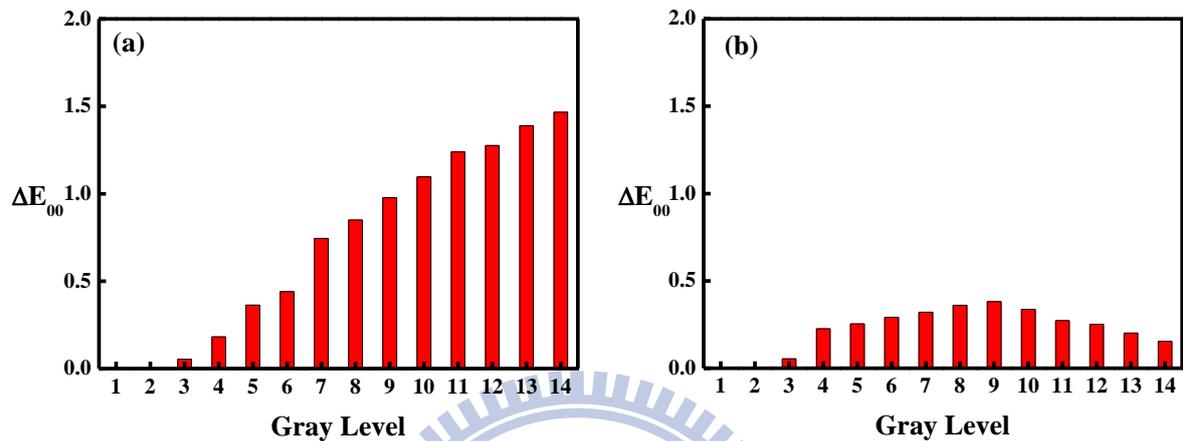


[圖 5-7] 各灰階和純量的對應關係：(a)顯色模型一；(b)顯色模型二

圖 5-7(a)為第一種顯色模型(Allen 演算法)求出的對應關係，圖 5-7(b)則為第二種顯色模型的對應關係。由圖 5-7 可知，各三刺激值都有其對應的純量，此三條曲線重疊的情形越好，會有越好的預測結果，因為將以其中一條曲線作為對應關係的代表。

5.5 顯色模型驗證

最後以 CIEDE2000 色差來評估模型的準確性，如圖 5-8 所示，計算實際量測和由模型預測的色差值：



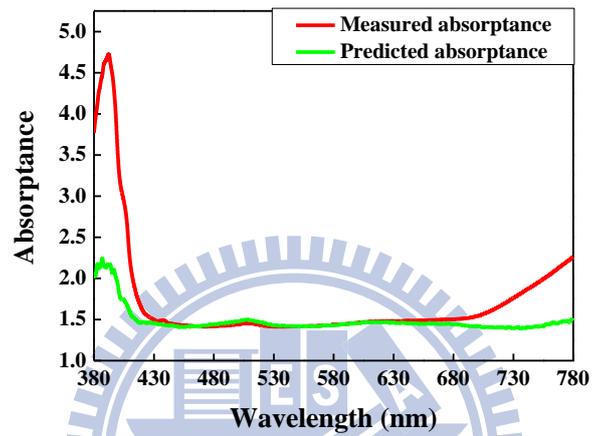
[圖 5-8] 各個灰階的色差值：(a)顯色模型一；(b)顯色模型二

由圖 5-8 可知，顯色模型二預測與實驗結果相當吻合，色差 ΔE_{00} 皆小於人眼所能辨別範圍。色差的原因來自於之前不理想效應未完全扣除，即最暗態灰階並非完全吸收，而有其他的漏光效應。

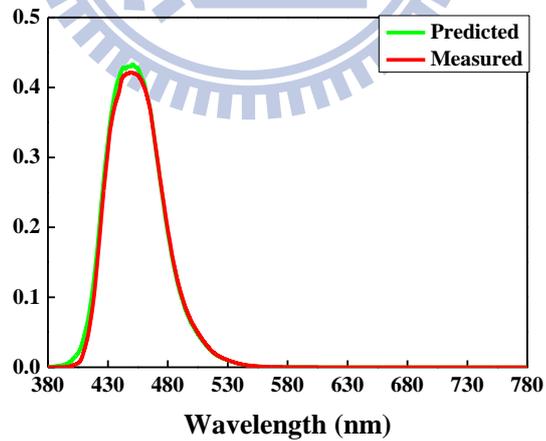
顯色模型一預測結果較不精確是因為 Eugene Allen 演算法是求出頻譜配對時所需的相對比例值(純量)，然而經過全波長的積分後，在三刺激值上會造成較大的誤差，如以圖 5-9 為例，紅色曲線為實際量測的頻譜分布，綠色曲線為利用最大吸收頻譜乘以純量後的頻譜分布，其中在短波長部份和長波長部分明顯沒有重合，隨著灰階數變大，未重合現象會更加明顯，造成圖 5-8(a)中色差隨著灰階增大，這是因為 CIEDE2000 色差來自於兩者色三刺激值的轉換後計算的結果，所以必須先將吸收頻譜轉換成反射頻譜，再求得色三刺激。

在此更進一步舉例說明色差來源，我們將預測的吸收頻譜轉換成反射頻譜，並乘以 CIE 配色函數(Z)，所圖 5-9 所示，可發現預測和實際量測的曲線未完全重疊，經過

積分後，會在色刺激值 Z 上造成較大的誤差，進而影響色差結果。



[圖 5-9] 預測和實際量測值的吸收頻譜分布



[圖 5-10] 預測和實際量測值之反射頻譜和配色函數(Z)乘積的分布

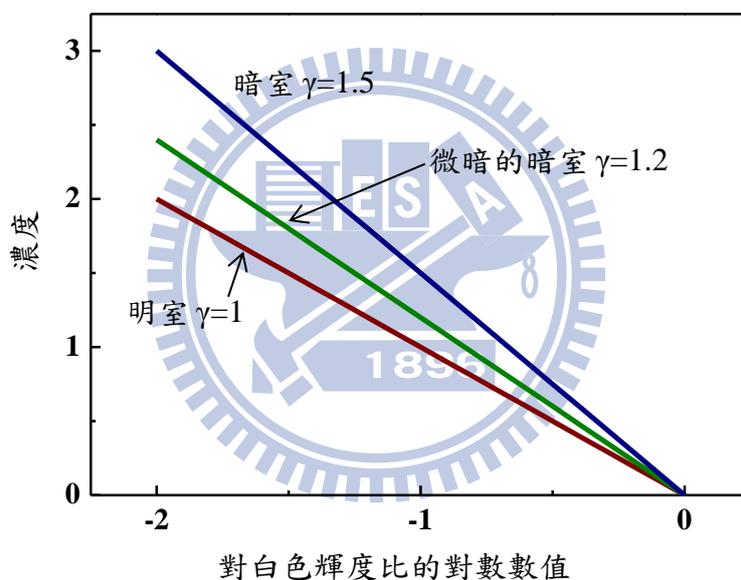
第六章 結論與未來課題

隨著綠色能源的重視，電子紙的需求與日俱增，全彩化電子紙更是目前研究的主流。本文目的在於建立電子紙的顯色特性化模型，以過去加法和減法系統的顯色模型為基礎，並根據微杯電子紙的顯色原理，建構出單色的顯色特性化模型。

我們根據 Eugen Allen 的演算法，以吸收頻譜的可量化特性來描述各個灰階的線性關係，再藉由一維對照表來對應各灰階和吸收純量的關係，建立起嚴謹的顯色模型。當色彩複製時，此演算法須具備完整的頻譜資訊，不便於一般以色三刺激轉換為主的顯色媒體，所以本文提出第二種顯色特性化的方法，即以色光學密度和色三刺激值的轉化關係，建立起可藉由矩陣形式表達的顯色模型，方便應用於跨媒體的影像複製中，最後經由 CIEDE2000 色差驗證也得到精準的結果。對於其他不理想效應也將做更進一步的修正。

在未來跨媒體複製的應用中，主要分成色彩複製和階調複製，由於目前微型電泳式電子紙為黑白單色，無法作色彩複製，而只能扮演階調再現(tone reproduction)的角色，複製原稿明暗知覺(visual brightness/lightness)的壓縮過程，以正確複製原始輝度為目的稱作客觀的階調再現，是理想的再現方式，在照相曲線中直線斜率為 1($\gamma = 1$)，但實際上受到影像輸入系統的動態範圍及觀察條件影響而難以實踐，如圖 6-1 所示，當周圍環境越暗時，越高的 γ 值較為人們所接受[14]。所以一般以與原稿外貌一致為目標之主觀階調再現為主，並且根據不同的跨媒體應用，考量人眼視覺系統，選擇適當的階調再現處理。在此以階調再現為目的時，我們可忽略黑白單色電子紙灰階改變時的些微色偏，採用各灰階的反射頻譜和配合一維對照表，來描述系統中各灰階的相互關係，再進一步建立階調複製曲線來對照原始影像和複製物的亮度，此跨媒體的階調再現為下一階段的研究主題。

對於將來全彩化的微杯型電泳式電子紙，或是其他不同顯示原理的電子紙，亦可依照其顯色機制，以相似的方法流程建立合適的顯色模型，並藉由此顯色模型定義出電子紙色彩空間與 CIE 色度資料之間的轉換關係，再引入至下一階段的跨媒體色彩複製。另一方面，也將考量不同的外界環境光源對電子紙所造成的影響，如不同的照明頻譜分布是否會影響純量值大小。以及設計相關的人因實驗，量化人眼的感知，如建立彩度、亮度和對比的權重方程式。



[圖 6-1] 最佳 γ 的觀察條件依存度

參考資料

1. Verschueren A. R. M., Stofmeel L. W. G., Baesjou P. J., van Delden M. H. W. M., Lenssen K. M. H., Mueller M., Oversluizen G., van Glabbeek J. J., Osenga J. T. M. and Schuurbiens R. M., "Optical Performance of In-Plane Electrophoretic Color e-Paper," *Asia Display*, Taipei, Taiwan (2009).
2. Liang R. C., Hou J., and Zang H., "Microcup Electrophoretic Displays by Roll-to-Roll Manufacturing Process," *IDW*, Hiroshima, Japan (2002).
3. Liang R. C., Hou J., Chung J., Wang X., Pereira C. and Chen Y. "Microcup(R) Active and Passive Matrix Electrophoretic Displays by A Roll-to-Roll Manufacturing Processes," *in SID Symp. Dig. Tech. Papers*, Boston, America (2003).
4. Duthaler G., Au J., David M., Gates H., Hone B., Knaian A., Pratt E., Suzuki K., Yoshida S. and Ueda M., "Active-matrix color display using electrophoretic ink and color filters," *in SID Symp. Dig. Tech. Papers*, Baltimore, America (2002).
5. Gregory P., "flexible flat panel displays," *Wiley* (2005).
6. Green P. and MacDonald L. W., "Colour Engineering – Achieving Device Independent Colour," (eds.), *John Wiley & Sons, Ltd.* (2002).
7. Gardner J. L., "Uncertainty estimation in colour measurement," *Col. Res. App.*, **25**, 349 (2000).
8. Fairchild M. D., "Color Appearance Models," Second Edition, *John W & S, Ltd.* (1998).
9. Clarke F. J., McDonald R. and Rigg B., "Modification to the JPC79 colour difference formula," *J. Soc. Dyers Col.*, **100**, 117 (1984).
10. Luo M. R., Cui G. and Rigg B., "The development of the CIE 2000 colour difference formula," *Col. Res. App.*, **26**, 340 (2001).
11. Berns R. S., "A generic approach to color modeling," *Col. Res. App.*, **22**, 318 (1997).
12. Tzeng D. Y., Berns R. S., "A Review of Principal Component Analysis and Its Applications to Color Technology," *Col. Res. App.*, **30**, 84 (2005).
13. Allen E., "Basic Equations Used in Computer Color Matching," *Journal of the Optical Society of America*, **56**, 1256 (1966).
14. Hunt R. W. C., "The reproduction of color," *Wiley* (1995).