



國立台灣科技大學  
電子工程系

---

## 碩士學位論文

LED 投影機色彩特性量測與修正暗階三刺激值  
Colorimetric Characterization of a LED Projector and  
Correcting Dim Levels Tristimulus



M9302336

指導教授：黃忠偉、胡能忠 博士

中華民國 九十五 年 六 月 二十七日

## 碩士學位論文指導教授推薦書

本校 電子工程 研究所 碩士 學程 李明燐 君

所提之論文 LED投影機色彩特性量測與修正暗階三刺激值

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授



9 5 年 6 月 2 7 日

## 碩士學位考試委員會審定書

本校 電子工程 系(所) 碩士 學程 李明燐 君

所提論文 LED投影機色彩特性量測與修正暗階三刺激值

經本委員會審定通過，特此證明。

學位考試委員會

委

員：

陳鴻興

溫照華

徐明景

黃忠輝

胡紀忠

指導教授：

黃忠輝

學程主任：

系主任(所長)：

郭良

中華民國 95 年 6 月 27 日

## 摘要

隨著 LED 亮度愈來愈亮，製作 LED 投影機不再是夢想，使用 LED 取代傳統燈泡光源不僅減小投影機的尺寸，還可以降低系統複雜度，LED 的主要優點是顏色純、壽命長、低功率消耗、體積精巧、高亮度。不過 LED 也有缺點，其中一個是低照度值，加上 LED 投影機的集光效率不夠好，這些原因限制了 LED 投影機只能在完全暗室裏使用，另外一缺點則是適合的投影距離小於一公尺，理由是照度隨著距離平方成反比，如此投影畫面將不會大。

此研究主要探討的是解決在暗階(dim levels)時量測儀器靈敏度不夠高導致量測的三刺激值不準的問題，解釋如下：

所有投影機皆會在輸入訊號為零時漏光，這稱為 black level，主要的原因是因為內部的雜散光。Black level 會導致每一 channel 的色座標值隨著亮度變化而變化，我們已經知道在色彩特性量測中把 black level 量測準確是非常重要的，而解決儀器對 black level 靈敏度不高的方法已經被提出，不幸的是 LED 投影機的輸出值特別地低，量測儀器甚至是在輸入訊號不高時也不靈敏，而不只是 black level 而已。

所以為了增加準確性，在此研究中引用了兩個方法，其中一個是 black level 預測最佳化，另一個是把 black level 切割成三個 channel 的個別貢獻。對於暗階的問題，於此文章中我們提出一個迴圈程序，迴圈包含已經提出的 black level 預測最佳化以及用非線性內插取代暗階三刺激值，也就是說我們修正了所量測的 black level 和暗階三刺激值。

除了儀器靈敏度的問題之外，還有測量三原色加法性、色域、對比、均勻度、時間穩定性、頻譜穩定性、空間不均勻性、channel 獨立性、空間獨立性，這些特性皆與某篇 LCD 投影機色彩特性論文裏的數據做一比較。最後比較各種 model 的色彩預測準確性，以及探討減少大量的測量資料及時間的可能性。

**關鍵詞：**LED 投影機、暗階、black level、色彩特性量測、非線性內插、三刺激值



## Abstract

As brightness of LEDs is brighter and brighter, making LED projector is possible. Taking the place of conventional UHP (ultra high pressure) lamp with LEDs reduces the projector size and system complexity. The major advantages of LEDs are natural pure color, long lifetime, low power consumption, small size, and high brightness. LEDs also has defects, one is low lux value, it limits LED projector to perform only in absolutely dark room, another is the suitable projection distance is below 1 meter. The reason is that illuminance varies with inversely proportional to the square of projection distance, and gathering efficiency of LED projector is not good enough. Additionally, power and brightness of LEDs are not high enough to be an illuminant source at present. If so, the projection image will be not large.



The major research of this article is solving the problem of low sensitivity of measuring device at dim levels, that will cause inaccurate tristimulus, and explained below :

When digital input values are zero, display still outputs light. The phenomenon is referred to as display' s black level. The basic reason is internal scattering. The black level will cause chromaticity variation. It is already known measuring black level precisely in colorimetric characterization is very important. The low instrument sensitivity for black level had been solved and proposed. Unfortunately, output tristimulus for dim levels of LED projector are especially low. Measuring device is not sensitive enough for low digital values, not only black level.

To improve accuracy, two proposed method are employed. One is black

level estimation, another is cutting black level into respective contribution of each channel. For dim levels problem, a routine procedure including proposed black level estimation and nonlinear interpolation of low output tristimulus in place of raw data is proposed, namely tristimulus of every dim level output as well as black level are corrected.

In addition to sensitivity problem, primary additivity, color gamut, contrast, uniformity, temporal stability, spectral stability, spatial non-uniformity, channel independency, spatial independency are measured, All the characteristics are compared to data in a paper about colorimetric characteristics of a LCD projector. Color prediction accuracy of various model are compared eventually, and we probed into possibility of reducing large number of measuring data and time.

**Keywords** : LED projector, dim levels, black level, colorimetric characterization, nonlinear interpolation, tristimulus



## 誌 謝

首先要感謝黃忠偉老師，在進入實驗室後對我們進行的一些訓練，不管是在上台口頭報告或是書面報告，都獲得相當多的助益，在我們怠惰時給我們鞭策，在我們困惑時給我們指引方向，再三感謝。

另外要感謝的是胡能忠教授，讓我除了光學以外得以接觸色彩工程的知識，在做研究方面給我相當多的啟發，讓我在專業領域上增加不少分數。

感謝趙永祥學長借我使用 LED 投影機，以及世新大學的平面傳播科技學系的陳鴻興教授借我們實驗室使用頻譜儀，沒有他們的支持，本論文不可能順利完成。



感謝實驗室的學長，陳怡永、吳錦銓，在我困惑時給我不少啟發；還有實驗室的同學及學弟們，元鼎、世奇、峻豪、佳瓏、卜僑、亨哲、義隆、昇良、亨霖、世偉、俊賢、鈞憲、柏毅、鎮銘，這兩年研究生活給我不少歡樂，若沒有他們研究生的生活將失色不少。

最後要感謝的是我的爸媽，有他們的支持，我才有機會攻讀碩士學位，也有此篇論文的出現。



## 目 錄

第 1 章	序論.....	1
1.1	研究背景.....	1
1.2	研究動機.....	1
第 2 章	基礎知識.....	3
2.1	傳統投影機與LED投影機比較.....	3
2.1.1	穿透式LCD投影機.....	3
2.1.2	反射式LCD投影機.....	4
2.1.3	DLP投影機.....	5
2.1.4	LED投影機.....	6
2.2	色彩學簡介.....	9
2.2.1	顯示器混色方法.....	9
2.2.2	色差公式.....	10
2.3	顯示器基本色彩架構.....	11
2.4	各種顯示器色彩model簡介.....	12
2.4.1	不考慮channel interaction的model.....	13
2.4.2	考慮channel interaction的model.....	17
第 3 章	量測實驗.....	19
3.1	量測設備.....	19
3.2	實驗架設.....	20
第 4 章	量測結果及數據.....	22
4.1	加法性(Additivity).....	22
4.2	色域(Color gamut).....	23
4.3	對比(Contrast).....	24
4.4	均勻度(Uniformity).....	25
4.5	時間穩定性(Temporal stability).....	26
4.6	頻譜穩定性(Spectral stability).....	27
4.7	空間不均勻度(Spatial non-uniformity).....	30
4.8	Channel獨立性(Inter-channel independency).....	36
4.9	空間獨立性(Spatial independency).....	39
4.10	量測儀器靈敏度不夠之問題.....	44
4.10.1	量測實驗.....	44
4.10.2	black level最佳化.....	44
4.10.3	修正暗階時不準確的三刺激值.....	47
4.11	各種model色彩預測準確性.....	51
4.11.1	建立model的量測實驗.....	51
4.11.2	各種model預測準確性比較.....	51

4.12	減少大量的量測時間可能性之探討.....	53
第 5 章	總結.....	55
5.1	LED投影機色彩特性.....	55
5.2	未來及展望.....	55



## 圖 目 錄

圖 1	3 片式LCD投影機技術.....	3
圖 2	反射式LCD.....	4
圖 3	反射式LCD投影技術.....	4
圖 4	DLP投影技術.....	5
圖 5	DLP三片式投影技術.....	6
圖 6	DLP式LED投影架構(一).....	7
圖 7	DLP式LED投影架構(二).....	8
圖 8	LCD式LED投影機.....	8
圖 9	LCD與CRT光電轉換函數比較圖 .....	15
圖 10	量測架設側視圖.....	20
圖 11	量測架設上視圖.....	21
圖 12	色彩量測PATCH.....	21
圖 13	頻譜加法性.....	23
圖 14	LED投影機三原色色座標.....	23
圖 15	LED投影機與其餘視訊系統色域比較.....	24
圖 16	對比量測LUX值.....	24
圖 17	ANSI標準均勻度量測.....	25
圖 18	RGB LED混光後ROD出口端放大圖.....	36
圖 19	白光時間穩定性.....	26
圖 20	灰色時間穩定性.....	26
圖 21	LCD投影機時間穩定性.....	27
圖 22	LCD投影機R CHANNEL頻譜穩定性.....	27
圖 23	LCD投影機B CHANNEL頻譜穩定性.....	28
圖 24	LED投影機R CHANNEL頻譜穩定性.....	28
圖 25	LED投影機G CHANNEL頻譜穩定性.....	29
圖 26	LED投影機B CHANNEL頻譜穩定性.....	29
圖 27	LED投影機灰色頻譜穩定性.....	30
圖 28	空間不均勻度量測圖.....	31
圖 29	LED投影機空間不均勻度XY座標變化 .....	33
圖 30	LED投影機空間不均勻度LAB座標變化 .....	33
圖 31	LCD投影機空間不均勻度色座標變化.....	35
圖 32	由原始測量資料扣掉最佳化BLACK LEVEL後RGB色座標偏移圖 .....	45
圖 33	由原始測量資料扣掉其餘兩CHANNEL所貢獻的BLACK LEVEL後RGB色座標偏移圖.....	47
圖 34	R CHANNEL輸出亮度值。黃色菱形代表內插值，紅色五角形代表BLACK LEVEL與高階亮度值(DIGITAL COUNT大於 56).....	48

圖 35	暗階三刺激值由內插值取代後的RGB色座標偏移圖.....	49
圖 36	迴圈程序流程圖.....	49
圖 37	最佳的三原色恒定性(PRIMARY CONSTANCY).....	50
圖 38	扣掉BLACK LEVEL之前由原始資料計算出的RGB色座標偏移 .....	50
圖 39	扣掉BLACK LEVEL之前由內插暗階後資料計算出的RGB色座標偏移 .....	51



## 表 目 錄

表 1	加法性量測三原色和白光的色座標.....	22
表 2	加法性測試結果.....	22
表 3	LED投影機空間不均勻度YXY資料 .....	31
表 4	LED投影機空間不均勻度色差分佈.....	32
表 5	LCD投影機空間不均勻度YXY資料 .....	34
表 6	LCD投影機空間不均勻度色差資料.....	34
表 7	LED投影機各種不同MODEL與LCD投影機的T矩陣比較表.....	38
表 8	比較LED投影機和LCD投影機的S-CURVE MODEL II 的CHANNEL干擾增益係數	39
表 9	空間獨立性測試色量測資料.....	40
表 10	LED投影機不同背景測試色所產生的亮度差異.....	41
表 11	LED投影機不同背景測試色產生的MCDM色差值.....	42
表 12	LCD投影機不同背景測試色所產生的亮度差異.....	43
表 13	LCD投影機不同背景測試色產生的MCDM色差值.....	43
表 14	RGB三CHANNEL暗階三刺激量測值 .....	47
表 15	量測 33 點各種MODEL準確度比較.....	52
表 16	尋找MODEL參數時的 33 點平方誤差.....	53
表 17	減少量測點與量測 33 點各種MODEL準確度比較.....	54

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

早期的投影機分成 CRT 與 LCD，CRT 在解析度、飽和度、對比方面都是一時之選，可惜的是 CRT 電子槍難以縮小，當輕巧的 LCD 投影機出現後，CRT 慢慢退出幕後，現在 LCD 與 DLP 的色彩表現也慢慢追上 CRT。

目前市面上的投影機分為 LCD 與 DLP(Digital light processing)兩種陣營，而最新的革命是以 LED 做為投影機光源，如果以 LED 做為投影機光源，體積、重量、光學架構大都大大簡化，方便攜帶、耗電量小，但是 LED 一直有個亮度不足的缺點存在，不過如果未來 LED 亮度愈來愈足並且大量生產降低成本，極有可能出現行動投影機。

LED 光源反應速度快，開關機幾乎不需等待，簡報完畢後可以立即拔除電源，對於需要趕時間的情況，實是非常便利，這不是現在燈泡式光源的投影機可以相比的；不僅 LED 相對於燈泡來說是屬於冷光源，對散熱問題是一大優勢，LED 的壽命相對於 UHP 燈泡更是長的多，因為 UHP 燈泡是屬於高價耗材。

大多數的公司都設立會議室，共用幾部投影機的方式節省成本，不過因為大型的投影機笨重，只能限於固定的會議室使用。如果投影機變成攜帶式的話，這對於強調機動的商務人士而言是一大福音，即便是女士也方便攜帶。

## 1.2 研究動機

影像信號在不同儀器間轉換時，往往會有色彩失真的問題。色彩再現的目的是將輸入端裝置的信號經過一系列的演算及處理過程，轉換成輸出端裝置信號，使得輸出畫面的影像色彩與輸入影像色彩一致，要達到色彩再現的目的，必須對顯示器做色彩特性量測。

LED 投影機光學設計的論文已有幾篇問世，關於 LCD 顯示器的色彩研究，已

有為數不少的論文出現，LCD 投影機方面也有頗準的色彩 model 提出了，然而 LED 投影機色彩特性的研究尚未有人發表相關文獻，這也是因為 LED 投影機才剛剛問世，尚未有能力商業化，LED 投影機剛開始萌芽時期，若研究其色彩特性，相信對 LED 的投影機的設計也會有所幫助。



## 第2章 基礎知識

### 2.1 傳統投影機與 LED 投影機比較

現在一般的投影機，不管是穿透式 LCD 投影機還是反射式 LCD 投影機，甚至是 DLP(Digital light processing)投影機，都是使用 UHP(Ultra High Pressure)燈泡光源，若要製作攜帶式投影機，燈泡光源的高功率消耗和大體積將是個很大的障礙，而 LED 的低功率消耗、精巧體積完全改善了燈泡光源的缺點，所以若是改採用 LED 做為攜帶式產品光源是個不錯的選擇，系統複雜度將簡化的多，以下將一一介紹：

#### 2.1.1 穿透式 LCD 投影機

依構造的不同又可以分為單片式和三片式系統，其差異除了使用的液晶片數不同之外，還有分合光系統，以下只介紹市面上常見的三片式 LCD 系統。依照 LCD 可分為非晶矽(a-si)以及多晶矽(poly-si)，非晶矽(a-si)的 TFT LCD 面積較大，造成光學體積龐大，製造成本較高，相形成下多晶矽(poly-si)的 TFT LCD 較有優勢。如圖 1 所示[1]，燈泡光源先經過濾光鏡，陸續分成 RGB 三原色，經過折射鏡投至各自的 LCD 面板，每一個 channel 分別經過各自的 LCD 調變後，再經過聚光稜鏡(x-cube)合光，最後從投影鏡頭出來，投射至屏幕上。

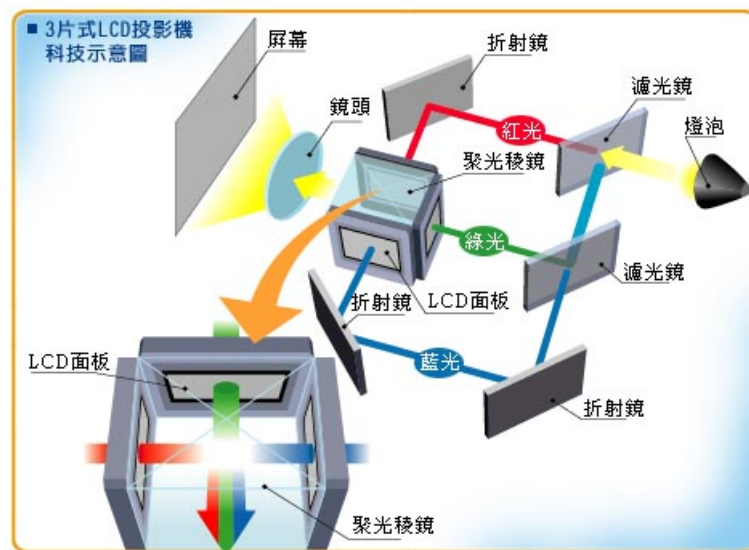


圖 1 3 片式 LCD 投影機技術



### 2.1.2 反射式 LCD 投影機

由於穿透式 LCD 投影機結構的關係，black matrix 及 TFT 本身都會阻擋光線的通過，會降低光效率，反射式 LCD 則克服了這個缺點，反射式 LCD 的控制電路隱藏在反射鏡面之後，不會阻擋反射光，所以可以提高開口率(透光率)，見圖 2[2]；反射式 LCD 的另一好處是類似半導體製程，容易提高製造的精密度，降低成本，台灣的半導體產業又相當完整，是個相當有潛力的投影技術。

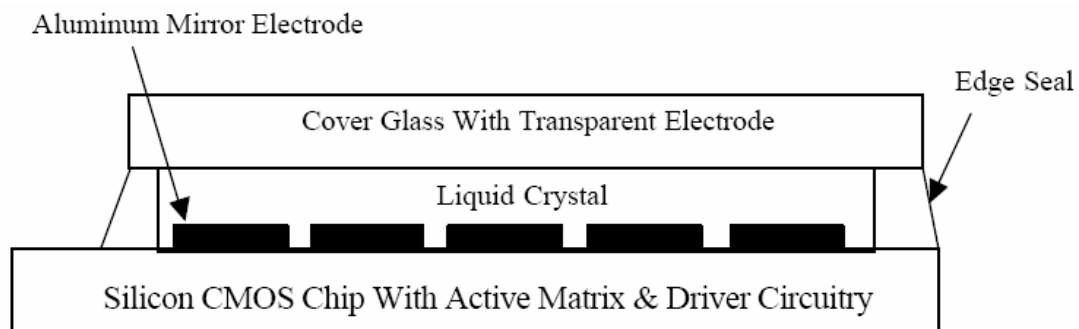


圖 2 反射式 LCD

反射式 LCD 投影系統大體上和穿透式 LCD 相同，同樣是分合光系統，如圖 3[2]，HDLV 指的是 High Density Light Valve；較特殊的地方 PBS(Polarizing Beam Splitter，極化分光鏡)，作用是隨著光路的方向不同，阻擋不同的極化光，但是因為光路前後來回，光學系統結構需要更高的精密性。

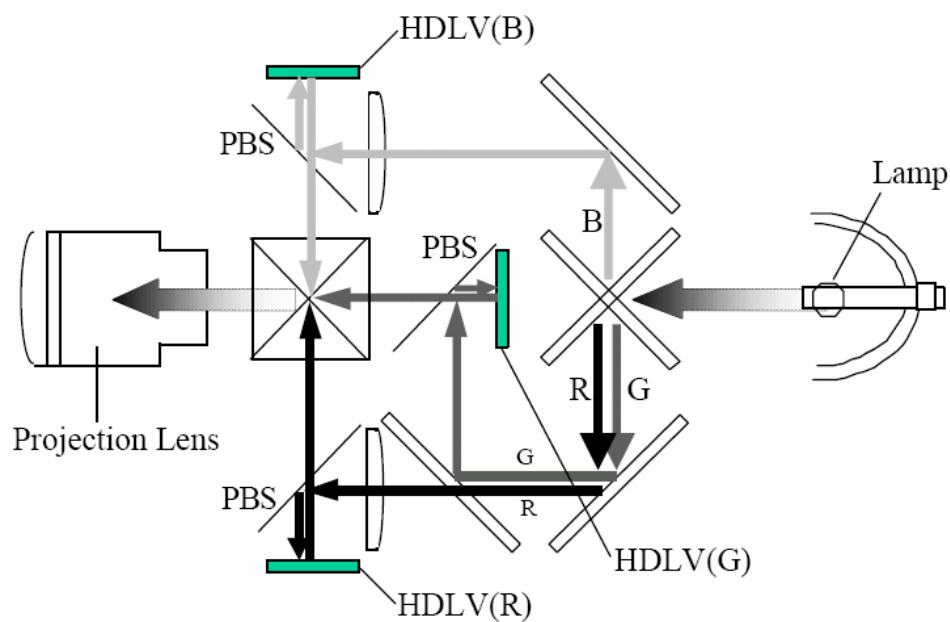


圖 3 反射式 LCD 投影技術

### 2.1.3 DLP 投影機

此投影技術是由德州儀器 TI(Texas Instrument)所發明，是屬於數位反射式投影機，容易縮簡投影系統體積與重量，以下將 DLP 投影系統分為單片式與三片式來介紹。

#### 2.1.3.1 DLP 單片式系統

其架構如下圖所示，光源經光罩集光後，再經過集光透鏡聚焦，通過色輪(此圖為 RGBW 四段色輪)後，分出 RGB 三色光場，射至 DMD(數位微鏡面陣列晶片)，利用驅動鏡面偏轉達到每一對應畫素的灰階和混色變化，色輪的轉速為 60HZ，利用 RGB 連續光場和人眼積分效果造成全彩效果。

相較於 LCD 投影機，色輪雖然可以減少系統複雜度，卻會阻擋三分之二光能，所以通常會增加空白區段，以增加亮度，就如圖 4[1]所示，不過這樣又會降低色彩飽和度，不過一片式 DLP 投影系統最大優勢是在於體積輕巧。

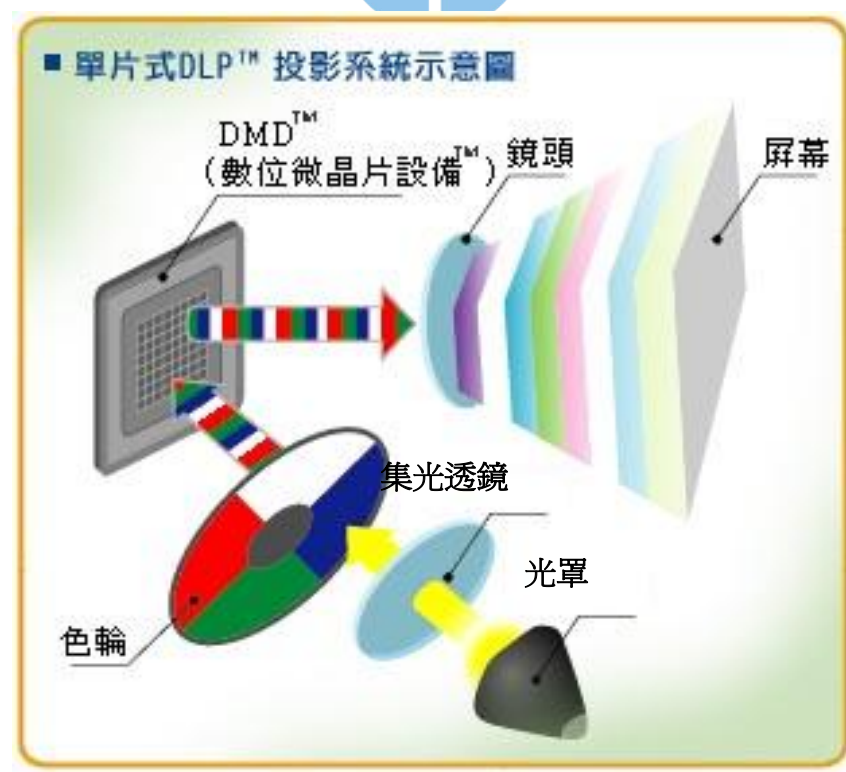


圖 4 DLP 投影技術

### 2.1.3.2 DLP 三片式系統

為了提高投影解析度和降低色輪不穩定的因素，DLP 也有三片式架構，只是不再用色輪，而是使用三個 TIR Prism(Total Internal Reflection Prism，全內反射稜鏡)產生 RGB 三原色，每一原色對應一個 DMD，然後再將 RGB 三原色混在一起變成全彩，三片式的架構雖然比較複雜，不過在訊號處理上演算法比較容易，亮度也比較足，主要應用在像劇院等需要畫面精美的場合，如圖 5：

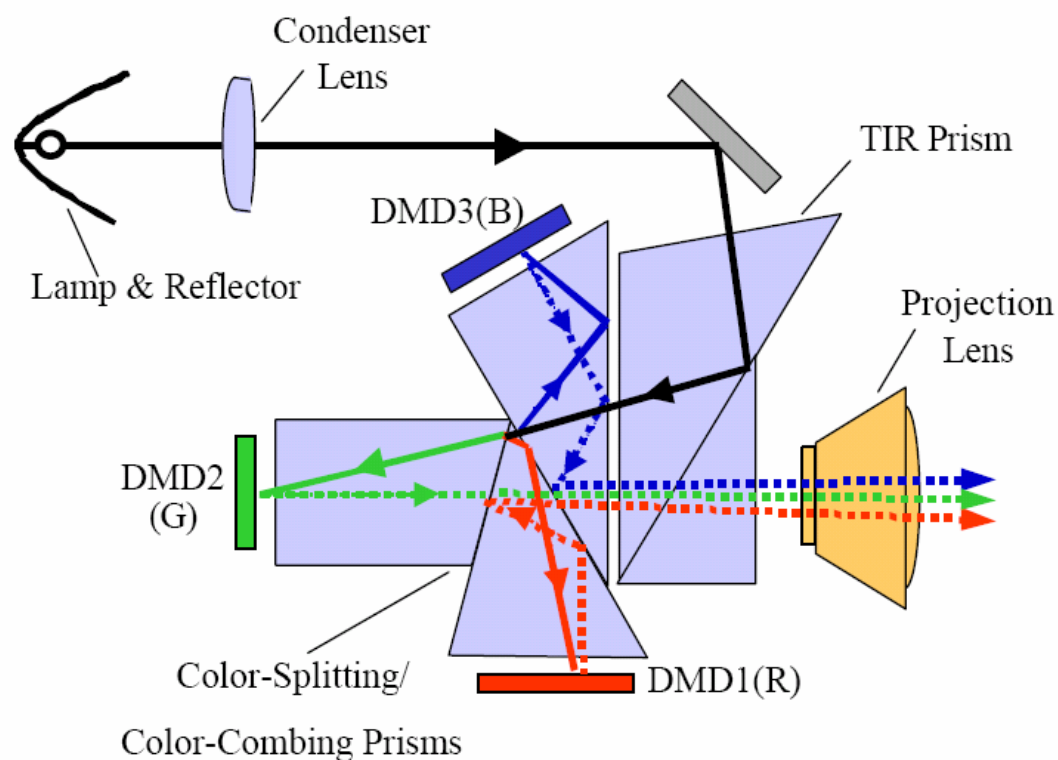


圖 5 DLP 三片式投影技術

### 2.1.4 LED 投影機

因為 LED 的顏色很純，所以 RGB 三原色的 x、y 座標是幾乎落在頻譜軌跡 (spectrum locus) 上，所以所造成的色域(color gamut)比燈泡式的投影機來的大。LED 也不含汞，符合歐盟的最新規範；而且 LED 的靈敏度高，開關機都很即時，不像燈泡光源式的投影機需待機時間；LED 跟燈泡式光源比起來是屬於冷光源，運作時不像燈泡式光源溫度那麼高，散熱方面有極大優勢，種種的好處，擋不住 LED 是未來的趨勢。

#### 2.1.4.1 DLP 式

LED 投影機架構更精簡，因為利用 RGB 三色 LED 模組可以省去色輪，增加光效率。只單純利用準直透鏡(Collimator)、分光鏡(Dichroic)、集光透鏡(Condenser lens)、ROD(Light tunnel)、DMD、投影鏡頭即可建構一個投影系統，架構將更形精簡，缺點是進入 ROD 的 RGB 光場方向不一致，導致混光效果較差，較不均勻，如圖 6[3](ROD 之後就是接 DMD 和投影鏡頭了，圖中省略)：

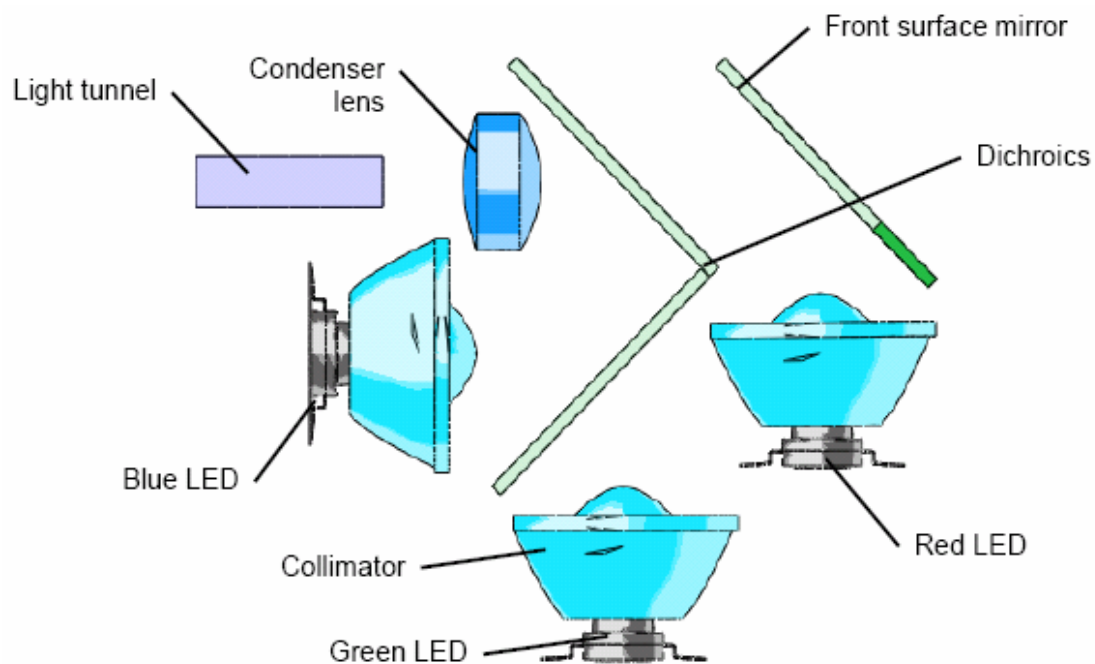


圖 6 DLP 式 LED 投影架構(一)

如果直視 LED 的話，LED 是高光輝度的光源，不過當 LED 照射物體時就是另一回事了，也是 LED 的致命缺點——低照度，所以投影至屏幕上的亮度往往不夠，加上 LED 投影機集光效率不是那麼地好，所以多加別種顏色 LED 是其中一個方案，色彩表現也比較好，如圖 7[4]所示：

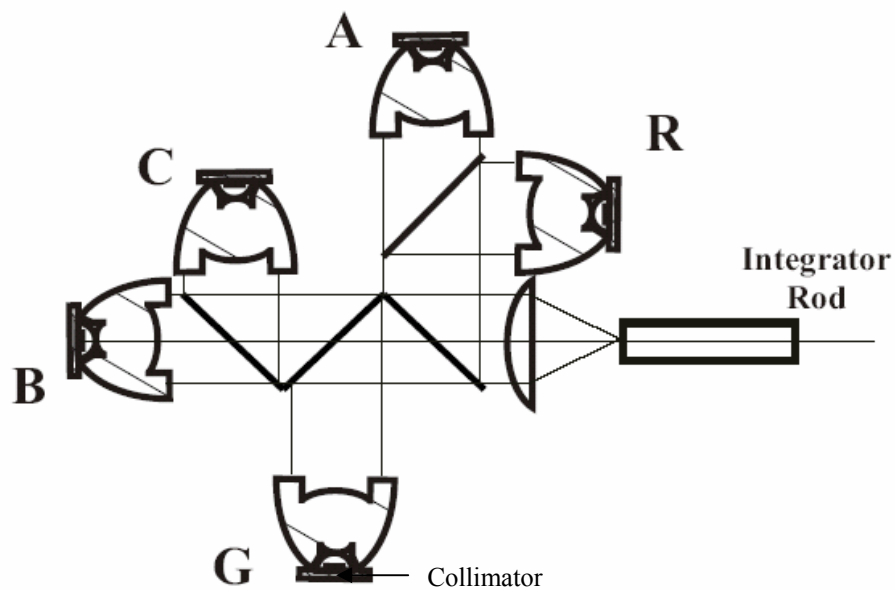


圖 7 DLP 式 LED 投影架構(二)

圖中的 ABCGR 分別代表 Amber(琥珀色)、Blue(藍色)、Cyan(青綠色)、Green(綠色)、Red(紅色)，和上一圖只差在 LED 模組個數。



#### 2.1.4.2 LCD 式

如圖 8[5]所示，RGB 三 LED 模組，一個模組四顆，一共十二顆。LED 經過 collimator 增加集光效率，然後直接經由 ROD 混光增加均勻度，分別由三片 LCD 面板調變後，再由 X cube 合光，由投影鏡頭投至屏幕上。

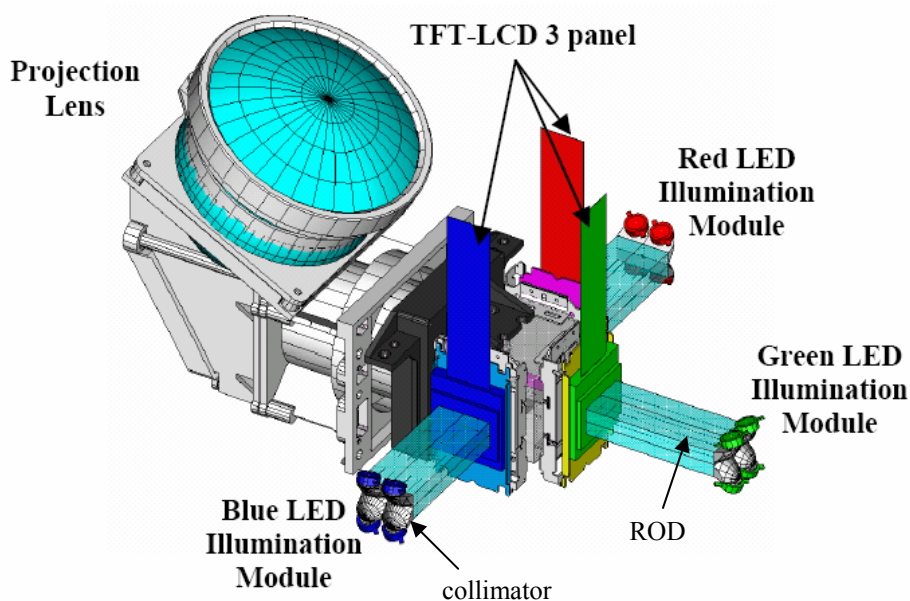


圖 8 LCD 式 LED 投影機

## 2.2 色彩學簡介

### 2.2.1 顯示器混色方法

在顯示器裡用到的都是加法混色，所以以下只介紹此種混色方法[6]。加法混色又分為：

- 同時混色：色彩同時混合的情況
- 時序混色：色彩同時混合的情況，例如在圓盤上分別塗有紅色和綠色的部份，使其高速旋轉，可以觀察到黃色的現象
- 並置混色：在畫面上配置難以辨識的微細紅點和綠點，在隔一段距離觀察時，可以看到兩色融和為黃色

同時混色原理說明如後，在可見波長範圍內(400~700nm)，將白色分成三等分：紅色 R(400~500nm)、綠色 G(500~600nm)、藍色 B(600~700nm)，它們之間的關聯表示如下：



若將這些顏色兩兩互相混色，則會變為：

$$R+G=Y \quad G+B=C \quad B+R=M$$

加法混色中採用三種不同色刺激稱為加法混色原色(additive primaries)，雖然也可以採用不同任意色，不過一般都是採用 RGB 三原色。當我們以混合量  $r, g, b$  對原色刺激 RGB 作混色時，可以得到色  $F$ ，表達如下：

$$F=rR+gG+bB$$

所以 RGB 在等量混色時會形成白色，而從許多關於色光的同時混色實驗中，可以發現當色光  $F_1$  和  $F_2$  等色、色光  $F_3$  和  $F_4$  等色時，有著以下的關係存在：

- 比例法則：光強度變成  $c$  倍時，等色關係仍然成立， $cF1=cF2$  且  $cF3=cF4$
- 加法法則：加上互為等色光得到的新色光，等色關係仍然存在， $F1+F3=F2+F4$

以上兩種法則稱為格拉斯曼法則(Grassmann Law)，是現代色彩的基礎。如果把此法則擴大到三刺激值，對於兩個色刺激  $R$  和  $G$  的三刺激值分別定義為  $(Xr, Yr, Zr)$  和  $(Xg, Yg, Zg)$ ，在僅有混合量  $r, g$  的條件下，所得到的混色三刺激值為：

$$X_F = rX_r + gX_g \quad Y_F = rY_r + gY_g \quad Z_F = rZ_r + gZ_g$$

同理如果擴大到 RGB 三色混合時，最後三刺激值可以利用下式求得：

$$\begin{pmatrix} X_F \\ Y_F \\ Z_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix}$$

## 2.2.2 色差公式

在本文中用到的色差公式有兩個：

➤ CIE 1994 色差公式：

首先必須介紹 CIE 1976( $L^*$   $a^*$   $b^*$ )色彩空間，簡寫為 CIELAB，定義如下：

$$\begin{aligned} L^* &= 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}] \\ b^* &= 200[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}] \\ C_{ab}^* &= (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \end{aligned}$$

$X_n, Y_n, Z_n$  代表著參考白的三刺激值



$$\Delta E_{ab}^* = [\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}]^{1/2} = [\Delta L^{*2} + \Delta C_{ab}^{*2} + \Delta H_{ab}^{*2}]^{1/2}$$

$$\Delta H_{ab}^* = [\Delta E_{ab}^{*2} - \Delta L^{*2} - \Delta C_{ab}^{*2}]^{1/2}$$

最後可得：

$$\Delta E^*_{94} = \left[ \left( \frac{\Delta L^*}{K_L S_L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta C^*_{ab}}{K_C S_C} \right)^2 + \left( \frac{\Delta H^*_{ab}}{K_H S_H} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$S_L = 1$$

$$S_C = 1 + 0.045 C^*_{ab}$$

$$S_H = 1 + 0.015 C^*_{ab}$$

➤ MCDM (Mean Color Difference from the Mean)：

從字義可知意義為：從平均值中計算色差 (from the mean)，色差總和再取平均值 (mean color difference)：

$$MCDM = \frac{\sum_{i=1, N} \left[ \left( L_i^* - \bar{L}^* \right)^2 + \left( a_i^* - \bar{a}^* \right)^2 + \left( b_i^* - \bar{b}^* \right)^2 \right]^{1/2}}{N} \quad (2)$$

- $\bar{L} \cdot \bar{a} \cdot \bar{b}$ ：代表 N 組 Lab 座標的平均值
- N：代表一共 N 組資料

## 2.3 顯示器基本色彩架構

以下將介紹的 model 都包含了兩個階段轉換，第一階段轉換是非線性的，從 RGB 的 digital counts 轉換到亮度比例值，如公式(3)所定義：

$$\begin{aligned} R &= EOTFr(dr) \\ G &= EOTFg(dg) \\ B &= EOTFb(db) \end{aligned} \quad (3)$$



其中 RGB 為亮度比例值;dr、dg、db 是 digital counts。亮度比例值與 digital counts 兩者之間的關係稱為光電轉換函數(optoelectronic transfer function，簡稱 OETF)，或稱為 gamma curve。

第二階段的轉換是線性轉換，從 RGB 亮度比例值轉換至螢幕上每點對應的 XYZ 三刺激值，如公式(4)所定義：

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{rmax} & X_{gmax} & X_{bmax} \\ Y_{rmax} & Y_{gmax} & Y_{bmax} \\ Z_{rmax} & Z_{gmax} & Z_{bmax} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中 Xmax、Ymax、Zmax 指的是 RGB 三通道在訊號強度最大時的三刺激值，這 model 是建立在通道加法性、通道獨立性、以及可忽略的 black level 皆成立的情況下。



當 black level 不可忽略時，公式(4)應修改如下：

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{rmax}-Xk & X_{gmax}-Xk & X_{bmax}-Xk \\ Y_{rmax}-Yk & Y_{gmax}-Yk & Y_{bmax}-Yk \\ Z_{rmax}-Zk & Z_{gmax}-Zk & Z_{bmax}-Zk \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Xk \\ Yk \\ Zk \end{pmatrix} \quad (5)$$

在這裡 k 指的是 black level，LED 投影機的 black level 和傳統投影機的 black level 比較起來小的多，可是 LED 投影機在整個訊號輸入範圍內的輸出三刺激值也很小，所以我們不可以忽略 black level。

## 2.4 各種顯示器色彩 model 簡介

所有的 model 除了 LUT(以下將說明)，第二階段轉換皆相同，差別只差在第一階段的非線性轉換，所以皆下來的說明只強調每一種 model 的第一轉換預測方式。

## 2.4.1 不考慮 channel interaction 的 model

### 2.4.1.1 GOG(Gain Offset Gamma) model

GOG model 用於 CRT 螢幕上非常準確，由 Berns[7,8]所提出，以 R channel 為例，其非線性轉換關係如下：

$$R \begin{cases} [Gr \cdot dr + o_r]^{\gamma_r} & [Gr \cdot dr + o_r] \geq 0 \\ 0 & [Gr \cdot dr + o_r] < 0 \end{cases} \quad (6)$$

G 及 B channel 的轉換式子也是類似的：

- R、G、B：分別代表 RGB 三個 channel 的亮度比例值
- Gr、Gg、Gb：分別代表 RGB 三個 channel 的 model gain(增益值)
- dr、dg、db：分別代表 RGB 三個 channel 的 normalized digital count(歸一化後的數位輸入訊號)
- Or、Og、Ob：分別代表 RGB 三個 channel 的 model offset(偏移量)
- $\gamma_r$ 、 $\gamma_g$ 、 $\gamma_b$ ：gamma value。分別代表 RGB 三個 channel 的非線性轉換關係的指數值

### 2.4.1.2 GOGO(Gain offset Gamma offset) model

GOGO model 只比 GOG 多了一個偏移係數，以 R channel 為例，其非線性轉換關係如下：

$$R \begin{cases} [Gr \cdot dr + o_{r1}]^{\gamma_r} + o_{r2} & [Gr \cdot dr + o_{r1}] \geq 0 \\ 0 & [Gr \cdot dr + o_{r1}] < 0 \end{cases} \quad (7)$$

G 及 B channel 的轉換式子也是類似的：

- R、G、B：分別代表 RGB 三個 channel 的亮度比例值
- Gr、Gg、Gb：分別代表 RGB 三個 channel 的 model gain(增益值)

- $dr、dg、db$ : 分別代表 RGB 三個 channel 的 normalized digital count(歸一化後的數位輸入訊號)
- $Or_1、Og_1、Ob_1$ : 分別代表RGB三個channel的model offset(偏移量)
- $Or_2、Og_2、Ob_2$ : 分別代表RGB三個channel的second offset
- $\gamma_r、\gamma_g、\gamma_b$ : gamma value。分別代表 RGB 三個 channel 的非線性轉換關係的指數值

#### 2.4.1.3 多項式(Polynomial)model

由經驗中發現以 4 階多項式較的準確度較高，同樣地以 R channel 為例，公式如下：

$$R = ar \cdot dr^4 + br \cdot dr^3 + cr \cdot dr^2 + er \cdot dr + fr \quad (8)$$

G 及 B channel 的轉換式子也是類似的：

- $R、G、B$ : 分別代表 RGB 三個 channel 的亮度比例值
- $dr、dg、db$ : 分別代表 RGB 三個 channel 的 normalized digital count(歸一化後的數位輸入訊號)
- $ar、br、cr、er、fr$  皆為多項式 model 的常數參數；如果是 G、B channel，下標 r 分別換成 g、b 表示

#### 2.4.1.4 S-curve model I

S-curve model 是專門應用於 LCD 顯示器的，其 OETF 函數的形狀類似一個 S 形，不像 CRT 的是冪級數函數，其差別如圖 9 所示：

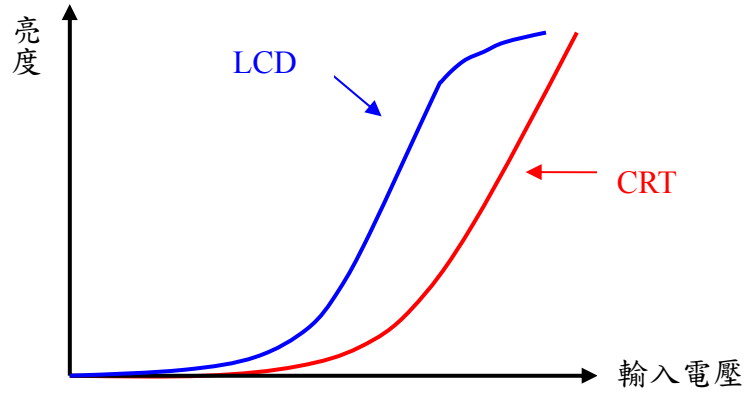


圖 9 LCD 與 CRT 光電轉換函數比較圖

RGB 三個 channel 的 OETF 函數公式如下，仔細觀察非常類似人口成長函數：

$$R = A_r \frac{dr^{\alpha_r}}{dr^{\beta_r} + C_r}, \quad G = A_g \frac{dg^{\alpha_g}}{dg^{\beta_g} + C_g}, \quad B = A_b \frac{db^{\alpha_b}}{db^{\beta_b} + C_b} \quad (9)$$

- R、G、B：分別代表 RGB 三個 channel 的亮度比例值
- dr、dg、db：分別代表 RGB 三個 channel 的 normalized digital count(歸一化後的數位輸入訊號)
- Ar、Ag、Ab：分別代表 RGB 三個 channel 的 model gain(增益值)
- $\alpha_r$ 、 $\beta_r$ 、 $\alpha_g$ 、 $\beta_g$ 、 $\alpha_b$ 、 $\beta_b$ ：分別代表 RGB 三個 channel 的指數參數
- Cr、Cg、Cb：分別代表 RGB 三個 channel 的偏移參數

#### 2.4.1.5 LUT(Look up table)

所謂的 LUT 就是所謂的查表法，如下面公式(10)所示：

$$\begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{pmatrix} = LUT_r(dr), \quad \begin{pmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{pmatrix} = LUT_g(dg), \quad \begin{pmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{pmatrix} = LUT_b(db) \quad (10)$$

最後每一個 pixel 的最終 XYZ 值就是直接相加，R channel 的  $X_r$ 、 $Y_r$ 、 $Z_r$

並非歸一化後的值，G 和 B channel 也相同：

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Xr \\ Yr \\ Zr \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Xg \\ Yg \\ Zg \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Xb \\ Yb \\ Zb \end{pmatrix} \quad (11)$$

#### 2.4.1.6 Compound exponent model I(CE model I)

此為本篇文章所提出的 model，需強調的是在本研究中，Br、Bg、Bb(底數變數)皆小於 1，如此隨 digital count 增加，才能繪出向上攀升的曲線：

$$R = Br \left[ o_r + \frac{\alpha r}{\beta r + dr} \right], \quad G = Bg \left[ o_g + \frac{\alpha g}{\beta g + dg} \right], \quad B = Bb \left[ o_b + \frac{\alpha b}{\beta b + db} \right] \quad (12)$$

- R、G、B：分別代表 RGB 三個 channel 的亮度比例值
- dr、dg、db：分別代表 RGB 三個 channel 的 normalized digital count(歸一化後的數位輸入訊號)
- Br、Bg、Bb：分別代表 RGB 三個 channel 的 model base value(底數值)
- $o_r$ 、 $o_g$ 、 $o_b$ 、 $\alpha_r$ 、 $\beta_r$ 、 $\alpha_g$ 、 $\beta_g$ 、 $\alpha_b$ 、 $\beta_b$ ：分別代表 RGB 三個 channel 的混合指數參數

#### 2.4.1.7 Compound exponent model II(CE model II)

此 model 與上一個 model 的差別只在於多一個偏移係數：

$$R = o_{r1} + Br \left[ o_{r2} + \frac{\alpha r}{\beta r + dr} \right], \quad G = o_{g1} + Bg \left[ o_{g2} + \frac{\alpha g}{\beta g + dg} \right], \quad B = o_{b1} + Bb \left[ o_{b2} + \frac{\alpha b}{\beta b + db} \right] \quad (13)$$

- R、G、B：分別代表 RGB 三個 channel 的亮度比例值
- dr、dg、db：分別代表 RGB 三個 channel 的 normalized digital count(歸一化後的數位輸入訊號)

- Br、Bg、Bb：分別代表 RGB 三個 channel 的 model base value(底數值)
- Or2、Og2、Ob2、 $\alpha r$ 、 $\beta r$ 、 $\alpha g$ 、 $\beta g$ 、 $\alpha b$ 、 $\beta b$ ：分別代表 RGB 三個 channel 的混合指數參數
- Or1、Og1、Ob1：分別表示 model 的偏移參數

## 2.4.2 考慮 channel interaction 的 model

### 2.4.2.1 Matrix model

此 model 是由 IEC[9]所提供：

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = S \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = S \cdot T \cdot L = \begin{pmatrix} X_{rmax}-X_k & X_{gmax}-X_k & X_{bmax}-X_k \\ Y_{rmax}-Y_k & Y_{gmax}-Y_k & Y_{bmax}-Y_k \\ Z_{rmax}-Z_k & Z_{gmax}-Z_k & Z_{bmax}-Z_k \end{pmatrix} \cdot T \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ R \\ G \\ B \\ RG \\ GB \\ BR \\ RGB \end{pmatrix} \quad (14)$$

- R、G、B：分別代表 RGB 三個 channel 的亮度比例值
- S 矩陣(3\*3)代表第二階段的線性轉換，從 RGB 亮度比例值轉換至 XYZ 三刺激值
- T 矩陣(3\*8)代表 RGB 三個 channel 之間的干擾關係，T 矩陣的係數大小表示 channel 之間 cross-talk 嚴重程度

### 2.4.2.2 S-curve model II

這是 S-curve model I 的改良版，因為 model I 是假設 channel 之間是獨立的，並沒有考慮 channel 之間的干擾問題，所以如果 channel 之間之互相干擾的話，model I 不夠準確，model II 公式如下：

$$\begin{aligned}
R &= Arr \cdot Fr(dr) + ArgFg'(dg) + ArbFb'(db) \\
G &= Agr \cdot Fr'(dr) + AggFg(dg) + AgbFb'(db) \\
B &= Abr \cdot Fr(dr) + AbgFg(dg) + AbbFb'(db) \\
F(x) &= \frac{x^\alpha}{x^\beta + C}, \quad F'(x) = \frac{(\alpha - \beta)x^{\alpha + \beta - 1} + \alpha \cdot C \cdot x^{\alpha - 1}}{(x^\beta + C)^2}
\end{aligned} \tag{15}$$

- R、G、B：分別代表 RGB 三個 channel 的亮度比例值
- dr、dg、db：分別代表 RGB 三個 channel 的 normalized digital count(歸一化後的數位輸入訊號)
- Arr、Agg、Abb 即是 model I 裏的 Ar、Ag、Ab
- Arg、Arb、Agr、Agb、Abr、Abg：channel cross-talk 係數，數字愈大，代表之間的影响愈嚴重



## 第3章 量測實驗

### 3.1 量測設備

- 一個 Dalite 標準屏幕
- LED 投影機 — Premier PD-S682

---

光閥系統：0.55 吋 DMD

亮度：12 吋畫面 200 流明

對比：300：1

均勻度：60%

光源：RGB LED 模組

LED 壽命：5000 小時

建議解析度：800\*600

色彩品質：16.7 百萬色

投影鏡頭：固定焦距

Video 訊號：PAL、NTSC、SECAM、HDTV

電腦訊號：VGA、SVGA、XGA、SXGA

交流變壓器：輸入 100-240V AC、50-60HZ，輸出 15V DC

消耗功率：19W

尺寸：121\*99\*47mm(W\*D\*H)

重量：0.5kg

---

- 頻譜儀 — Specbos 1200

---

頻譜範圍：380-780nm

波長準確性：±0.5nm

測量距離/直徑：20cm~100cm/5mm~26mm

亮度測量範圍： $2 \times 10^{-4}$ ~ $7 \times 10^4$  nits

照度測量範圍：10-100000lx

照度準確性：±5%(A 光源)

亮度準確性：±5%(A 光源)

亮度值再現性：±2%



色座標準確性： $\pm 0.002$  x、y(A 光源)

色座標再現性： $\pm 0.0005$  x、y

色溫再現性： $\pm 20\text{K}$ (A 光源)

色散元件：繞射光柵

光接收元件：128 像素光二極體陣列

運作環境溫度：10-40 度

運作環境溼度：在  $35^{\circ}\text{C}$  時，小於 85%相對溼度

---

### 3.2 實驗架設

所有的量測都是遵守 IEC(國際電氣委員會)標準，像是進行量測前先熱機一小時，所有量測在暗室裏進行，預設的亮度、對比和解析度設定值(800\*600)…等等。

投影螢幕對角尺寸為 51.3 cm(大約 20 吋)，投影距離為 65 cm。除了均勻度量測之外，所有用 Microsoft 的 PowerPoint 軟體做成的顏色測試檔案都是以均勻的正方形投影在螢幕的正中央，投影畫面中的其餘地方設成黑色( $d_r = d_g = d_b = 0$ )。

較特殊的是頻譜儀，是偏一個角度的方式量測，原因是因為做每一量測需要積分時間，且積分時間與量測亮度成反比，偏偏 LED 投影機亮度很弱，所需量測時間很久，為了提高測量效率，所以盡可能地將頻譜儀靠近屏幕，架設方式以圖 10 至圖 12 所示：

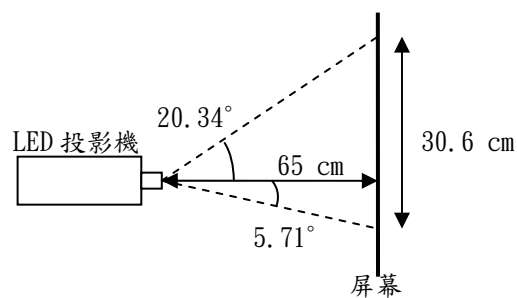


圖 10 量測架設側視圖

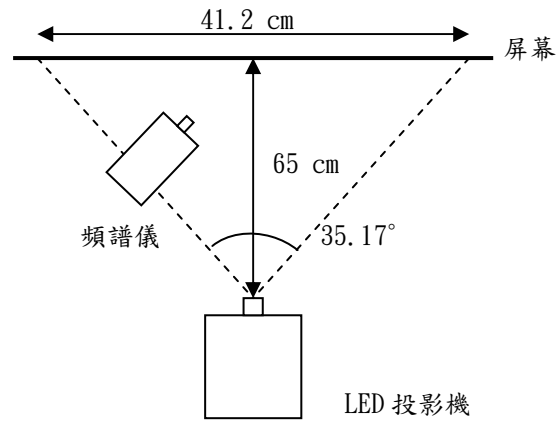


圖 11 量測架設上視圖

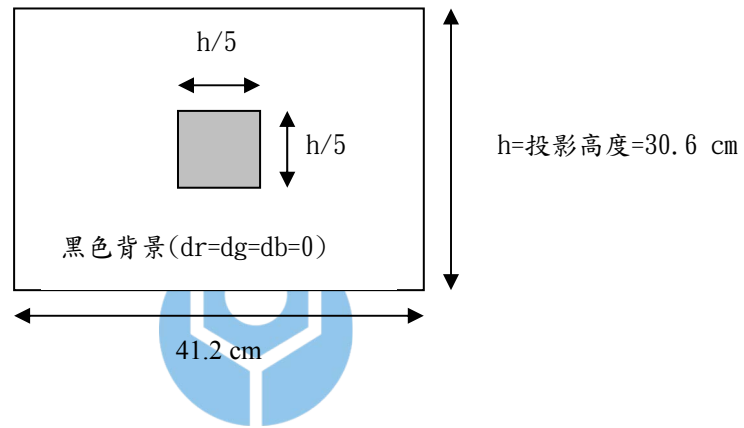


圖 12 色彩量測 patch

## 第4章 量測結果及數據

4.4 節之後的內容：均勻度、時間穩定性、空間不均勻度、channel 獨立性、空間獨立性皆與 Y. Kwak 和 L. MacDonald[10]的論文中 LCD 投影機(Sanyo PLC-5605B)做一比較。

### 4.1 加法性(Additivity)

RGB 三原色、black level、白光的色座標如下表所示：

表 1 加法性量測三原色和白光的色座標

Color	dr	dg	db	X	Y	Z	x	y	u'	v'
Black	0	0	0	0.060	0.051	0.064	0.343	0.291	0.236	0.451
White	255	255	255	31.190	35.600	40.428	0.291	0.332	0.182	0.467
Red	255	0	0	14.237	6.057	0.127	0.697	0.297	0.540	0.517
Green	0	255	0	10.045	27.300	1.599	0.258	0.701	0.095	0.579
Blue	0	0	255	6.774	1.863	38.298	0.144	0.040	0.181	0.112

CCT for white : 7721.33K

加法性的好壞是藉由比較白光的三刺激值和RGB三個channel的三刺激相加值[11]，如表 2 所示，在加法性實驗中並不考慮black level，因為black level和RGB 最大三刺激值比起來，小到足夠可以忽略。如表中數字，Y(亮度值， $\text{cd}/\text{m}^2$ )和Z的加法性稍微差了一點，不過總體的加法性相當不錯：

表 2 加法性測試結果

	X	Y	Z	X+Y+Z
white	31.1898	35.6000	40.4284	107.2182
R+G+B	31.0564	35.2200	40.0236	106.3000
Difference(%)	0.4275	1.0674	1.0013	0.8563

由頻譜來看來，加法性也是相當的好，由於 LED 的顏色很純，RGB 的頻寬都相當的窄，注意到綠色 LED 的頻譜比起其他紅光和藍光的 LED 稍微寬些，如圖 13 所示：

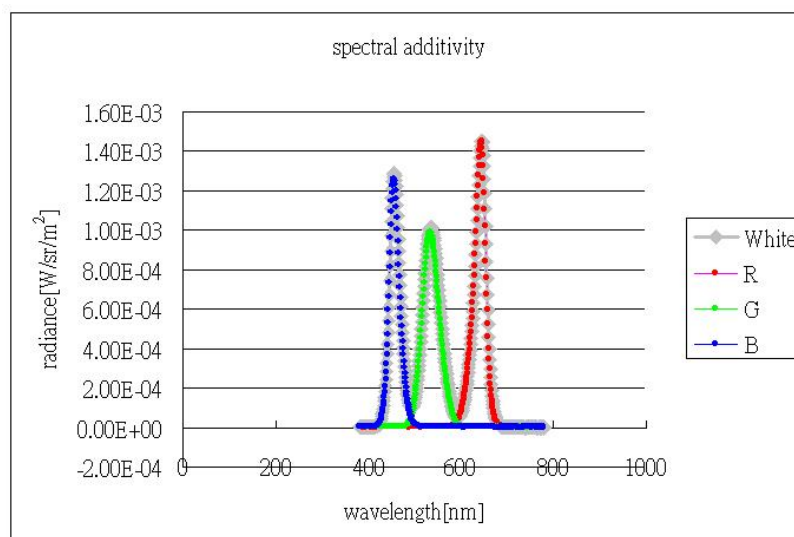


圖 13 頻譜加法性

## 4.2 色域(Color gamut)

LED 的顏色很純，所以 LED 的投影機的三原色色座標會幾乎座落於頻譜軌跡 (spectrum locus) 上，如圖 14 所示，不過綠色 LED 的色座標相對來說較為遠離頻譜軌跡，這表示與紅色和藍色 LED 相比，顏色相對不純些，這也印證了的圖 13 的說明。

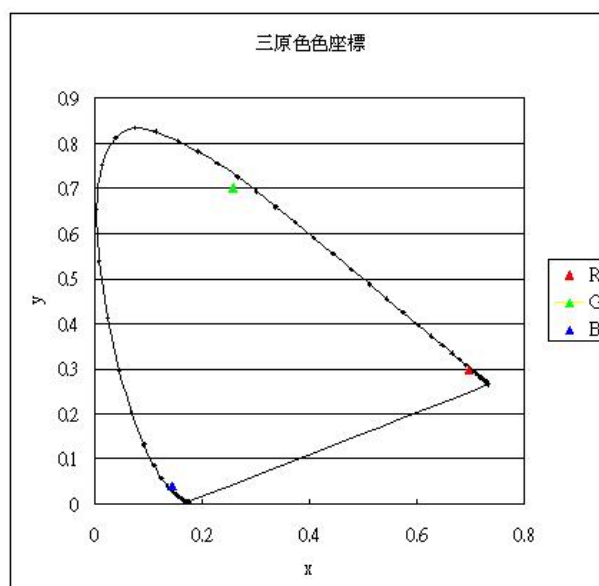


圖 14 LED 投影機三原色色座標

也就是因為 LED 的顏色很純，所造成的色域(color gamut)也比起其餘的視訊系統大很多，如下圖所示：

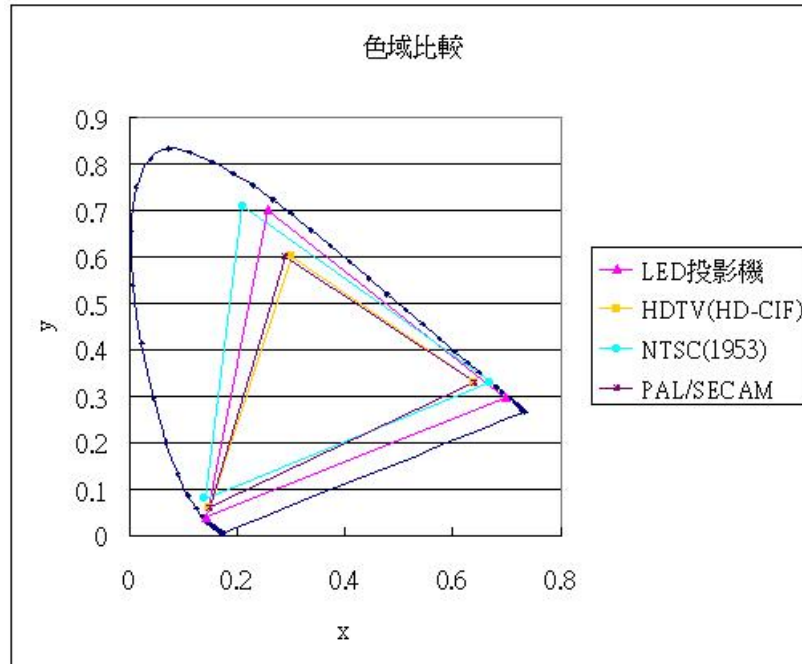


圖 15 LED 投影機與其餘視訊系統色域比較

由圖 15 中，可看出與 LED 投影機色域大小可一較長短只有 NTSC 系統，不過總括來說 LED 投影機的色域相對較大。

#### 4.3 對比(Contrast)

對比的量測 lux 值(照度值)如圖 16[12]所示，較灰暗的部份表示  $dr=dg=db=0$ ，白色部份表示  $dr=dg=db=255$ ：

0.496	84.867	0.85	77.4
60.333	1.155	116.3	1.159
0.904	102.5	1.582	102.033
51.133	1.465	102.4	1.139

圖 16 對比量測 lux 值

而對比度的計算公式為：

$$C = \frac{L_w - L_b}{L_b} \quad (16)$$

- $L_w$ ：代表白色區域的照度平均值
- $L_b$ ：代表黑色區域的照度平均值

而計算後所得到的對比度  $C=78.63$ ，可見投影至 20 吋的對比實在很差，只能在暗室裡才看得清楚畫面。

#### 4.4 均勻度(Uniformity)

均勻度按照較嚴格的 ANSI 標準 13 點量測，全白畫面( $dr=dg=db=255$ )量測 lux 值(照度值)如圖 17 所示：

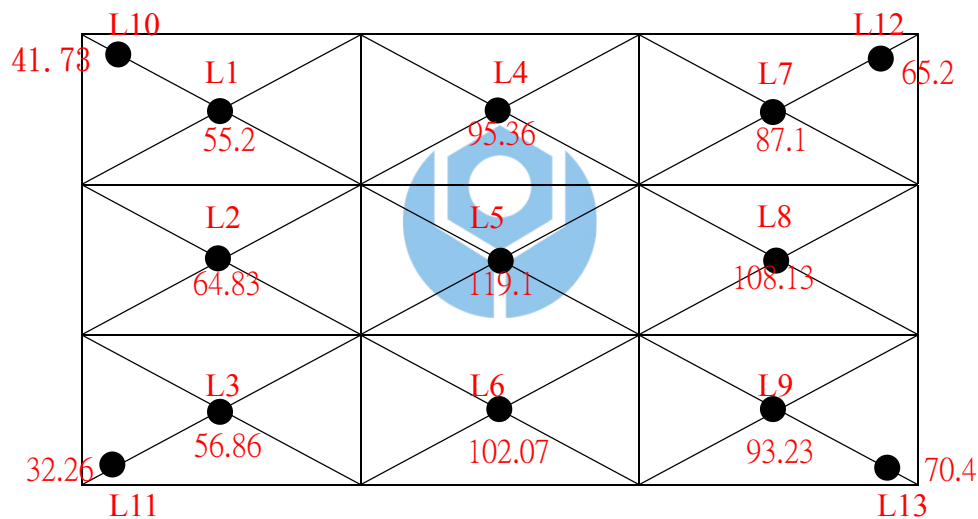


圖 17 ANSI 標準均勻度量測

均勻度的計算公式如下：

$$U = \frac{\text{MIN}(L10, L11, L12, L13)}{(L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8 + L9) / 9} \times 100\% \quad (17)$$

- $\text{MIN}(L10, L11, L12, L13)$ ：L10 至 L13 中的最小值

而計算後所得到的均勻度  $U=37.18\%$ ，顯示均勻度也有很大的改進空間。

#### 4.5 時間穩定性(Temporal stability)

時間穩定性量測主要是了解從冷開機(cold start)到暖機(warm up)之間的色彩特性，方法是在白色( $dr=dg=db=255$ )測量圖片及灰色( $dr=dg=db=128$ )量測圖片之間切換交替量測[11](以圖 12 的方式投影至屏幕)，白色及灰色皆是平均每 4 至 5 分鐘量測一次，連續量測二小時，量測的結果如圖 19 及圖 20。結果顯示白光的三刺激值在 5 分鐘以內就達到穩定值，不過因為 LED 投影機亮度低，量測儀器需要比較長時間抓取資料，實際上達到穩定的時間可能短的多；至於灰色則在約 32 分鐘後平均每隔約 28 分鐘時間重複出現類似的三刺激值。

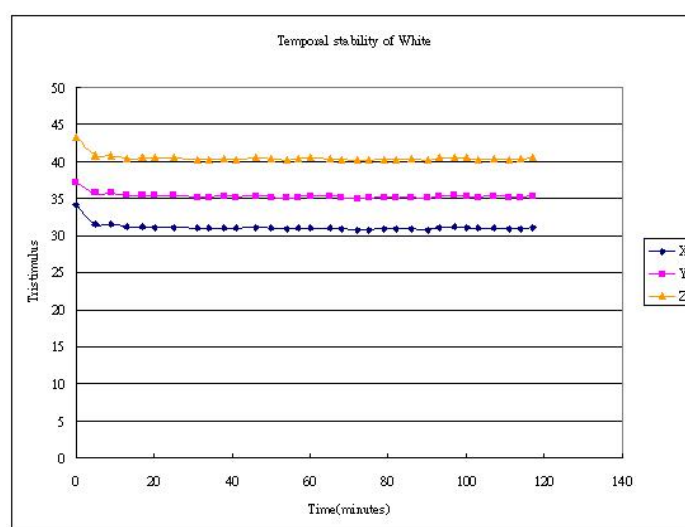


圖 18 白光時間穩定性

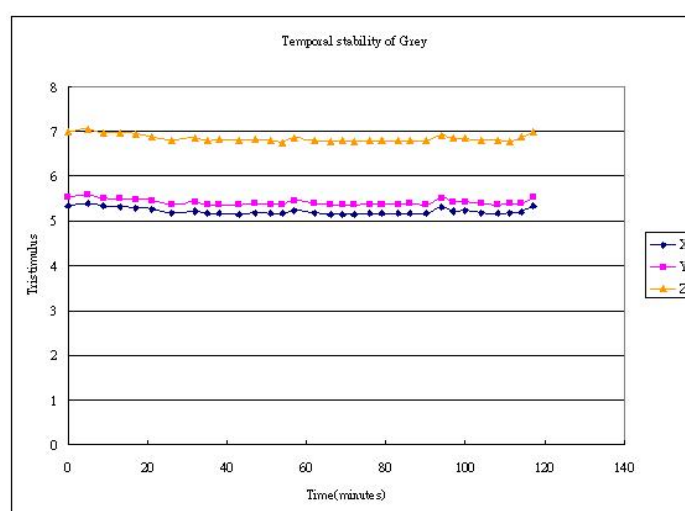


圖 19 灰色時間穩定性

與 LCD 顯示器比較大約需要 10 分鐘後才穩定下來，比較起來以 LED 為光源的顯示器穩定的速度快的多，不過 LCD 投影機的灰色穩定後不會晃動，如圖 21：

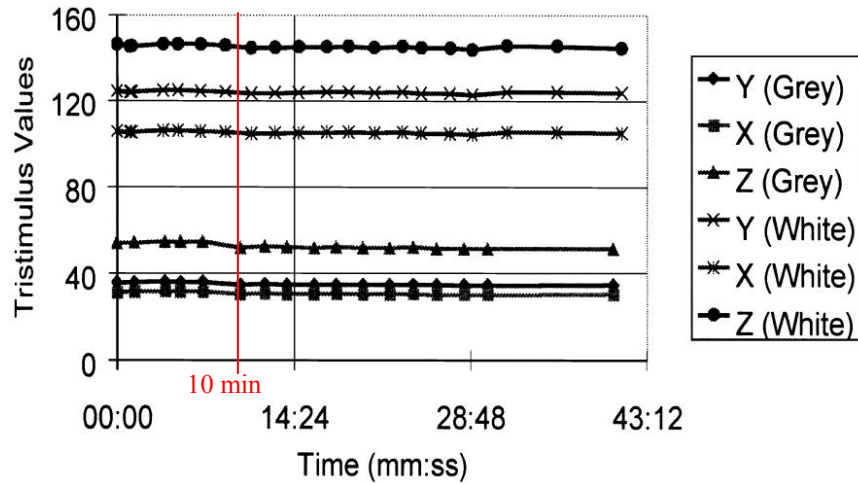


圖 20 LCD 投影機時間穩定性

#### 4.6 頻譜穩定性(Spectral stability)

所謂的頻譜穩定意思是指 RGB 的頻譜不隨著 digital count 變化而變化，測量方法為各別量測 RGB 三原色和白光的量測圖片，digital count 分別為 35、81、145、255(取對數值為等間距) [13]。如果是穩定的話，頻譜歸一化後將會是趨於一致，以 LCD 投影機(PHILIPS 4600 Endurance)[14]為例，不過 LCD 同樣有 black level 的影響，頻譜不可能完全一樣，但已經非常相像：

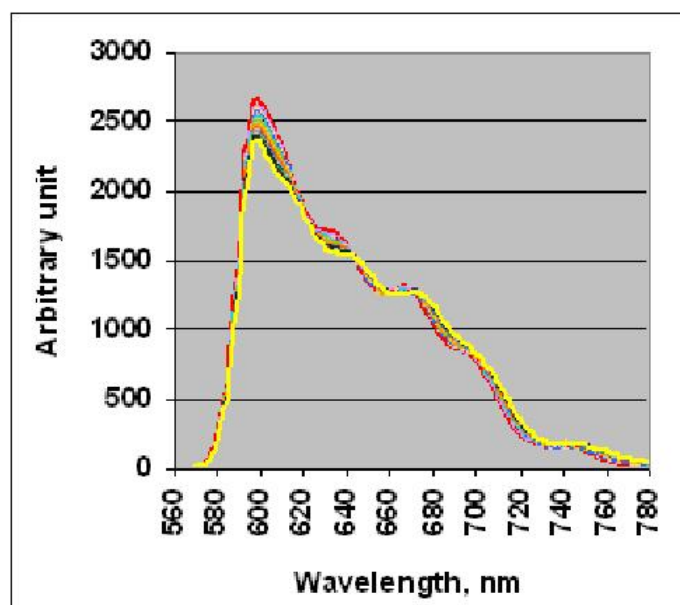


圖 21 LCD 投影機 R channel 頻譜穩定性



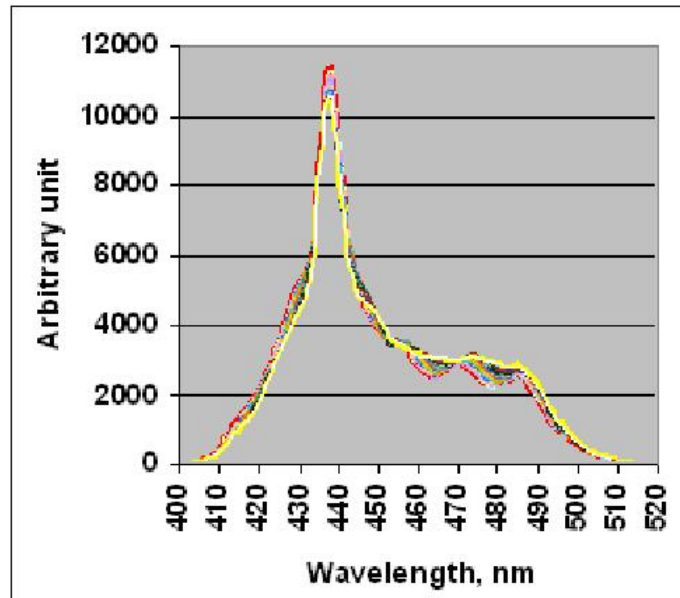


圖 22 LCD 投影機 B channel 頻譜穩定性

LED 投影機按照相同的方法量測，所得的結果如下圖，不過 LED 的特性與 LCD 投影機不同，頻譜是隨著 digital count 變化而變化，輻射強度隨著 digital count 增強而增強，如圖 24-27：

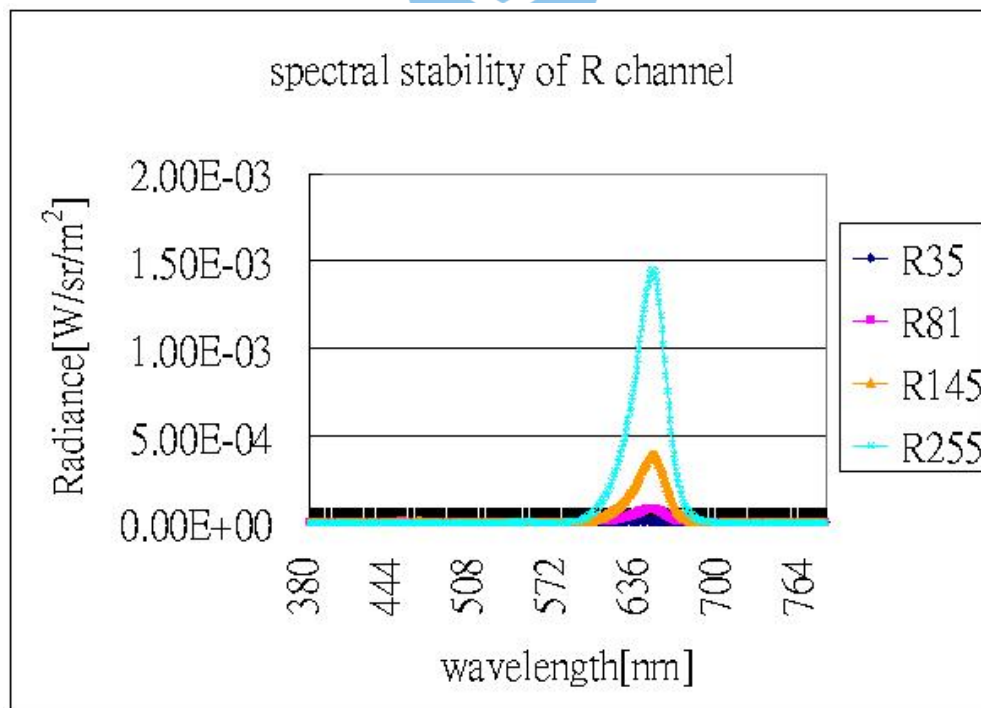


圖 23 LED 投影機 R channel 頻譜穩定性

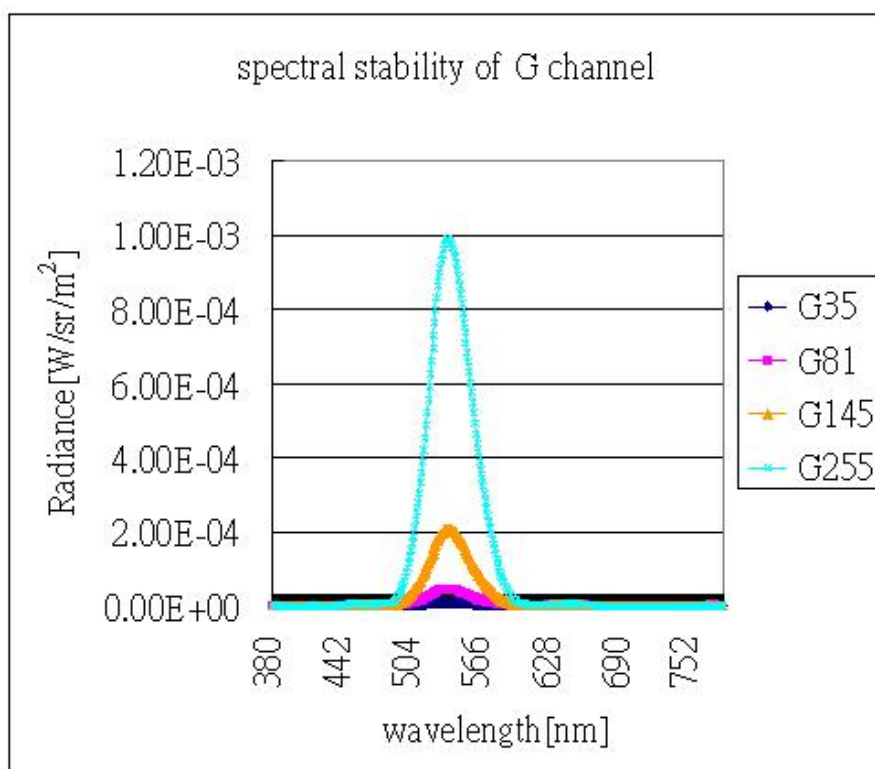


圖 24 LED 投影機 G channel 頻譜穩定性

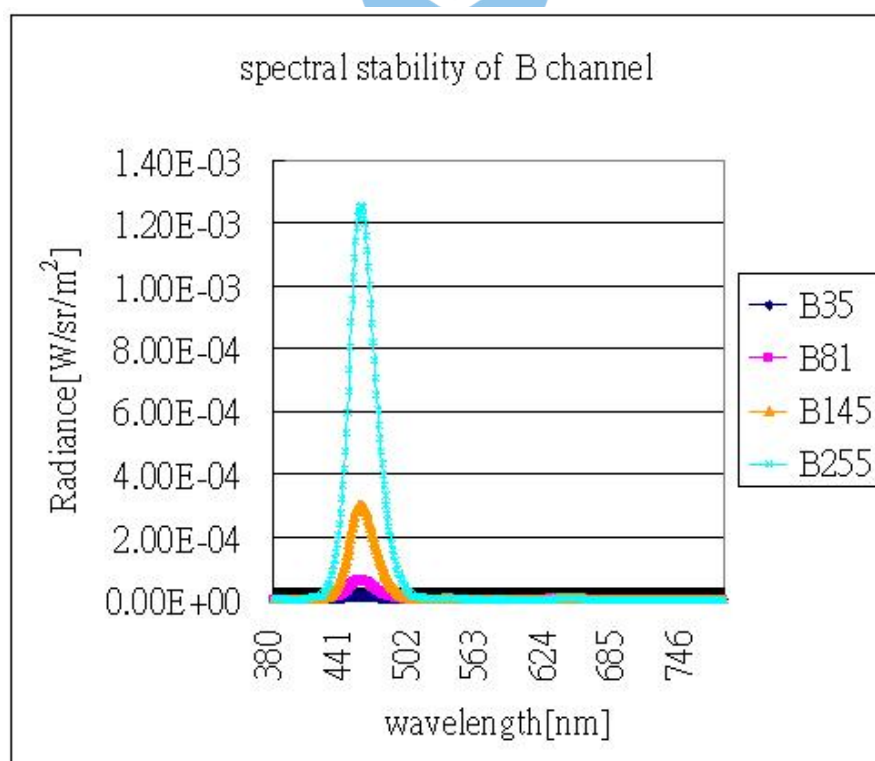


圖 25 LED 投影機 B channel 頻譜穩定性

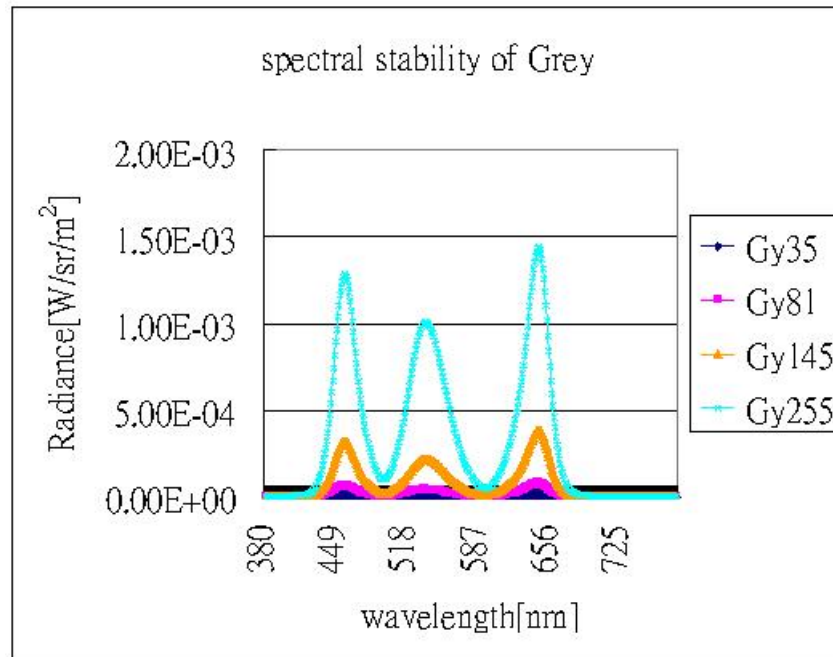


圖 26 LED 投影機灰色頻譜穩定性

從圖 27 來看，LED 的頻譜因為狹窄，頻譜分離的很清楚，隨著 digital count 的增強，頻譜並無嚴重的交錯現象，似乎不會造成 channel interaction，至於這個問題將在 4.8 節中探討。

#### 4.7 空間不均勻度(Spatial non-uniformity)

就算從 ROD 混出來的光線再怎麼均勻，所有的投影機都不可能在屏幕上達到完全均勻的畫面，中央的區域永遠比邊緣的亮度強，而且投影機的畫面都是往斜上的方向投影，下半部與投影鏡頭的距離比上半部與投影鏡頭的距離來的短(如 3.2 節中的圖 10)，所以畫面的下半部一定比上半部來的亮些，因為這些固有的因素，使得投影機永遠不可能達到均勻的畫面，投影的距離愈長，不均勻的情況愈明顯。測量投影機的不均勻性的方法為在全白的畫面中量測 25 點[10]，次序從左至右、從上至下，如圖 28，分為 5 個 column：

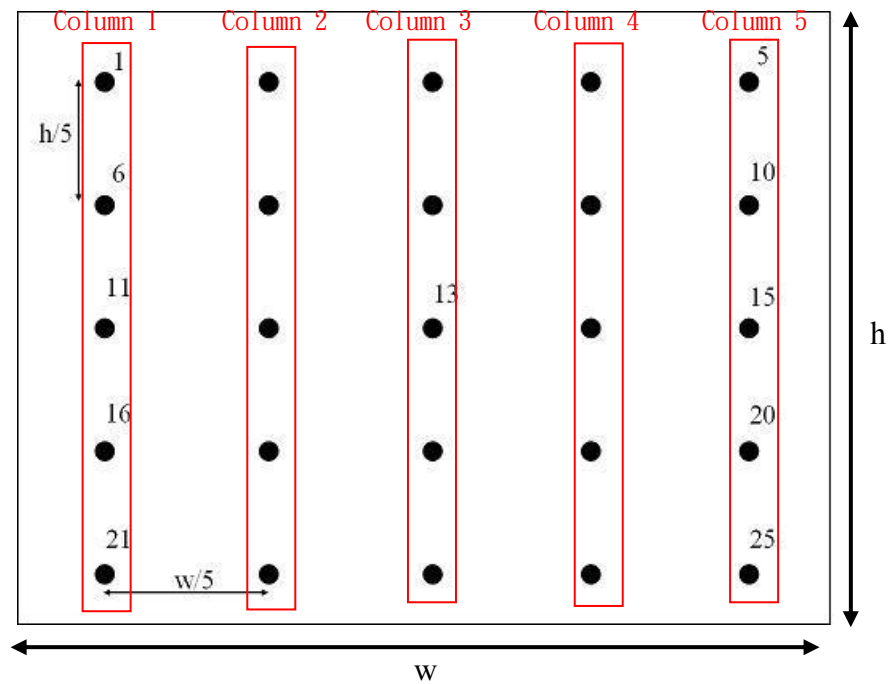


圖 27 空間不均勻度量測圖

量測得出的色彩資料如表 3，column 3 的位置的亮度平均比其餘的 column 要亮，若以 column 3 做為區隔，右半邊比左半邊要亮，不過在實驗中，LED 投影機是擺在平面上投影，沒有屏幕最底部最亮情形，反而是最接近投影鏡頭的地方最亮。隨著位置的不同，顏色跟著不同，可以看出顏色分佈不只受光程差的影響，還受到光學元件的影響：

表 3 LED 投影機空間不均勻度 Yxy 資料

色座標及亮度	column				
	1	2	3	4	5
Y	14.5	22.6	28.3	27.3	21.6
x	0.3053	0.3067	0.2987	0.2861	0.2729
y	0.3174	0.3118	0.3122	0.3148	0.3231
Y	19.2	27	35.1	33.2	27.2
x	0.3004	0.2948	0.2886	0.2808	0.2731
y	0.3147	0.3129	0.3201	0.3205	0.3257
Y	18.1	30.8	38.8	38.2	32.3
x	0.3013	0.2932	0.2908	0.2838	0.2762
y	0.3194	0.3187	0.3317	0.3317	0.331

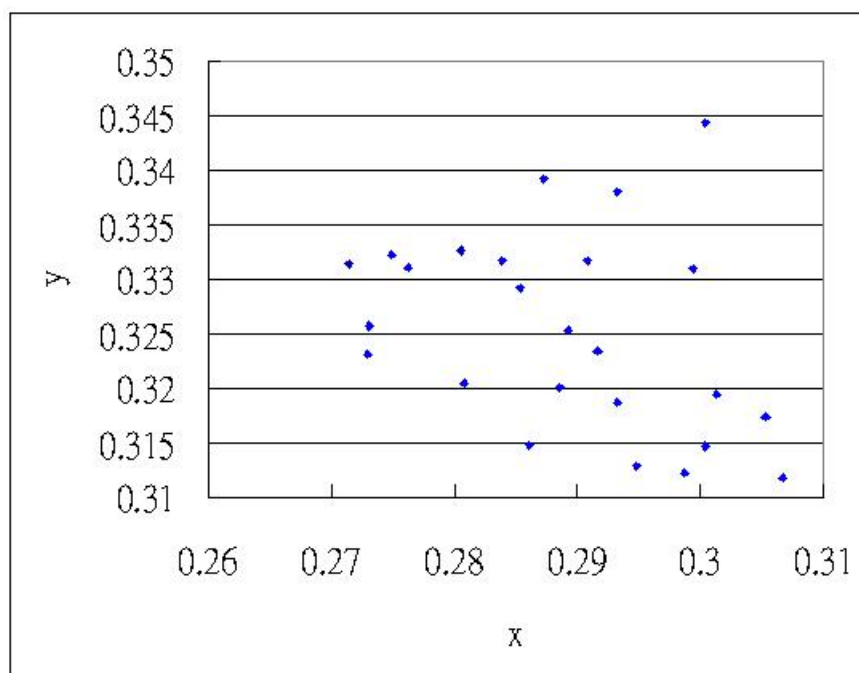
Y	19	29.5	37.3	37.2	30.4
x	0.2994	0.2916	0.2932	0.2872	0.2749
y	0.3309	0.3234	0.338	0.3392	0.3322
Y	14.6	25.1	31.7	31.9	25.5
x	0.3004	0.2892	0.2853	0.2805	0.2714
y	0.3443	0.3253	0.3292	0.3326	0.3314

而且上表的色彩資料轉至 CIELAB 空間後，以中央的第 13 點當標準，計算色差得到的結果如下：

表 4 LED 投影機空間不均勻度色差分佈

column 色差	1	2	3	4	5
$\Delta L^*$	-32.4455	-19.1238	-11.5818	-12.8265	-20.5743
$\Delta a^*$	11.3057	16.3325	13.3038	5.3686	-5.0771
$\Delta b^*$	-2.1059	-4.0805	-5.5355	-6.5165	-5.2432
$\Delta L^*$	-24.2482	-13.2058	-3.8111	-5.8731	-12.9526
$\Delta a^*$	11.3778	10.7638	4.5350	-0.1020	-6.5462
$\Delta b^*$	-3.8439	-5.8121	-4.6655	-5.7165	-4.7495
$\Delta L^*$	-26.0350	-8.5934	0	-0.6010	-6.8773
$\Delta a^*$	9.5858	7.4983	0	-4.0236	-7.6815
$\Delta b^*$	-2.2153	-4.2248	0	-1.2223	-2.6425
$\Delta L^*$	-24.5679	-10.1263	-1.5145	-1.6169	-9.0604
$\Delta a^*$	4.1678	4.2928	-1.7398	-5.6887	-8.7860
$\Delta b^*$	0.9672	-2.7596	2.7527	2.1408	-2.3801
$\Delta L^*$	-32.2538	-15.6759	-7.5573	-7.3297	-15.1458
$\Delta a^*$	-0.5775	2.0178	-1.7929	-6.0147	-9.7622
$\Delta b^*$	4.6354	-2.3483	-1.7870	-1.3719	-3.0270

色座標的變化如圖 29 及圖 30：



而 LCD 投影機的色差資料及色座標變化如下：

表 5 LCD 投影機空間不均勻度 Yxy 資料

		1	2	3	4	5
1	Y	112.3	119.1	117.8	120.3	114.2
	x	0.3003	0.3036	0.3056	0.3073	0.3043
	y	0.3614	0.3649	0.3680	0.3779	0.3730
2	Y	126.1	128.6	128.8	130.9	125.3
	x	0.2997	0.3005	0.3014	0.3035	0.3054
	y	0.3616	0.3608	0.3628	0.3747	0.3785
3	Y	134.4	134.5	138.8	138.0	133.9
	x	0.2988	0.2967	0.2981	0.2997	0.3042
	y	0.3608	0.3538	0.3579	0.3680	0.3769
4	Y	135.1	139.8	141.9	141.1	136.1
	x	0.2954	0.2951	0.2946	0.2974	0.3017
	y	0.3548	0.3523	0.3533	0.3626	0.3702
5	Y	134.5	141.3	143.8	143.1	137.0
	x	0.2922	0.2937	0.2936	0.2965	0.2980
	y	0.3490	0.3502	0.3512	0.3620	0.3616



表 6 LCD 投影機空間不均勻度色差資料

		1	2	3	4	5
1	$\Delta L^*$	-7.91	-5.77	-6.17	-5.40	-7.30
	$\Delta a^*$	-0.36	-0.15	-0.45	-3.79	-3.18
	$\Delta b^*$	1.64	3.53	4.99	8.88	6.45
2	$\Delta L^*$	-3.65	-2.91	-2.86	-2.24	-3.89
	$\Delta a^*$	-0.80	-0.01	-0.41	-4.57	-5.08
	$\Delta b^*$	1.66	1.54	2.44	7.23	8.87
3	$\Delta L^*$	-1.24	-1.21	0.00	-0.22	-1.38
	$\Delta a^*$	-0.94	1.15	0.00	-3.69	-5.10
	$\Delta b^*$	1.22	-1.84	0.00	4.11	8.21
4	$\Delta L^*$	-1.04	0.28	0.86	0.64	-0.76
	$\Delta a^*$	-0.03	0.96	0.17	-2.60	-3.61
	$\Delta b^*$	-1.69	-2.72	-2.44	1.65	5.31
5	$\Delta L^*$	-1.21	0.69	1.38	1.19	-0.50
	$\Delta a^*$	0.85	1.16	0.61	-2.81	-1.75
	$\Delta b^*$	-4.51	-3.83	-3.45	1.25	1.36

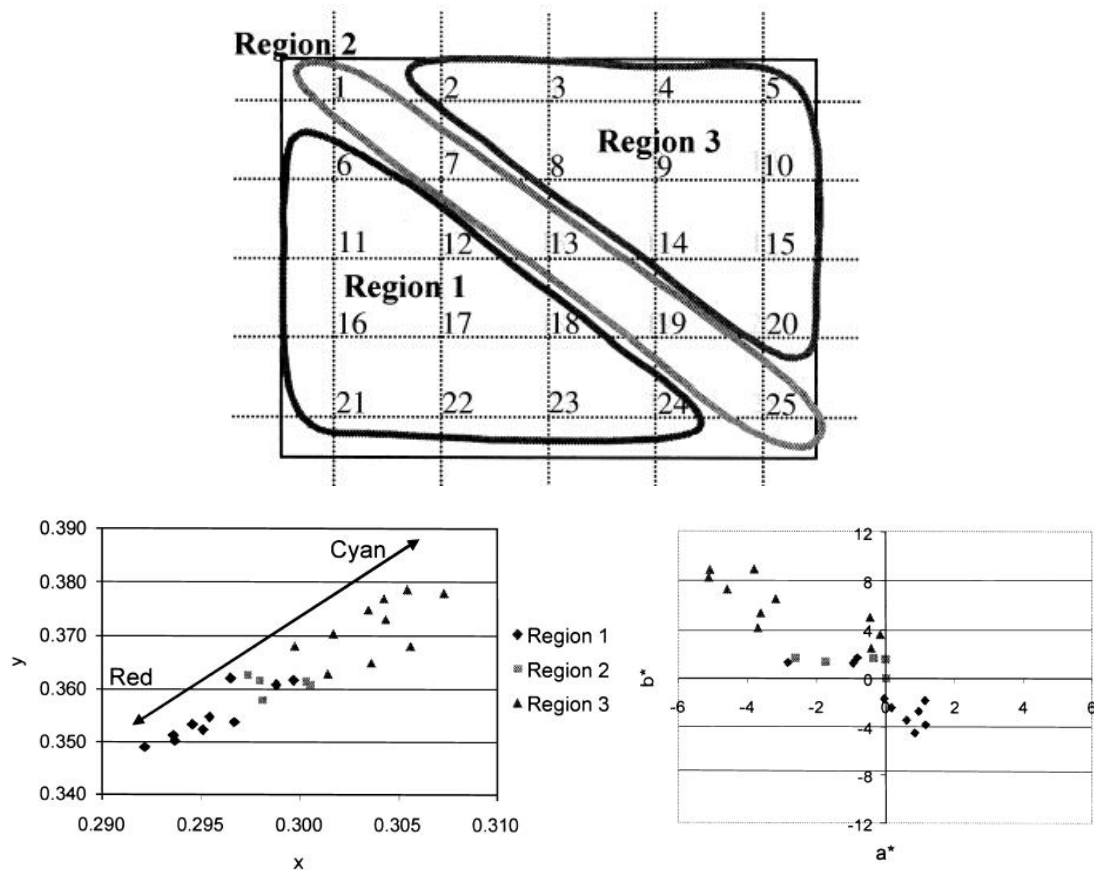


圖 30 LCD 投影機空間不均勻度色座標變化

比較圖 29、30 和圖 31，LED 投影機色座標分散的很開，並無一致性，這點與 LCD 投影機差異頗大，LCD 可在屏幕分離出三個色彩相近的區域，導致兩者的不同的原因應是照明系統所致。

傳統 DLP 式投影機是使用燈泡搭配色輪的方式濾出 RGB 光場，分時序的方式快速的打在同一畫素上達到混色的效果，分時序只是在時間上錯開，RGB 光場在整個投影系統內的光路徑、ROD 出射角度幾乎是一致的，在同一畫素上混色效果較為理想。

DLP 式 LED 投影機混光的方式則是採用三色 LED 模組快速輪流閃爍，依序收集至 ROD 內混光，搭配 DMD 演算法然後反射至投影鏡頭，也是採取分時序的方式，這或許是三種顏色的 LED 模組的擺放位置並不同，在 ROD 出口端的出射角度並不一樣，當然打在 DMD 後反射至投影鏡頭的角度也不同，混光的效果並不會像傳統



燈泡搭配色輪的方式那麼好，如圖 18 所示的例子是 RGB LED 全亮混白光，經 x-cube 混光後，再經透鏡收集至 ROD 內，光線從 ROD 出口端出射，經投影鏡頭放大，觀察圖 18，畫面右上半部偏紅，左下半部偏藍，混光效果不盡理想：

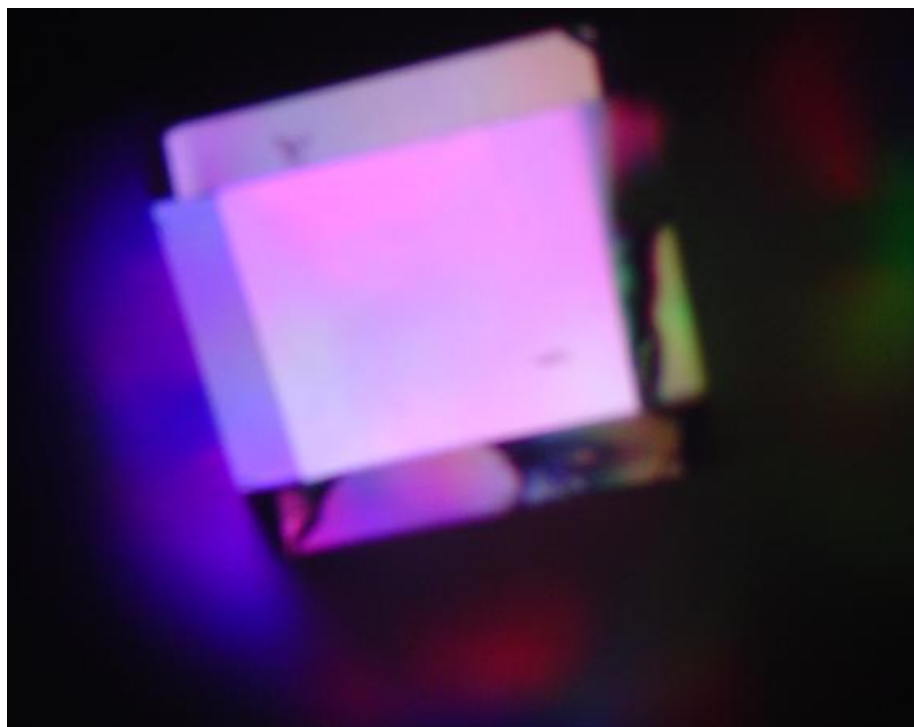


圖 31 RGB LED 混光後 ROD 出口端放大圖

#### 4.8 Channel 獨立性(Inter-channel independency)

所謂的 channel 的獨立性就是量測 RGB 三個 channel 之間會不會互相干擾(channel cross-talk)，假如 channel 之間的獨立性愈好，那在 4.1 節所提到的加法性就會愈好，而探討這個問題可以從兩種 model 著手，即 2.4.2 節所提到的兩個 model 裏有 channel interaction 的係數(公式(12)裏的 T 矩陣係數及公式(13)裏的  $A_{rg}$ 、 $A_{rb}$ 、 $A_{gr}$ 、 $A_{gb}$ 、 $A_{br}$ 、 $A_{bg}$ )，由係數大小來判斷 channel 之間干擾程度。

測量方法為準備 32 個測試色，包括 digital count 從 0-255 均分為 8 個灰色步階，及 4 個紅色、綠色、藍色、黃色、紫紅色(magenta)、青綠色(cyan)均分步階。

尋找係數的方法如下：

- matrix model：

$A^t = STL^t$ ，其中L矩陣及A矩陣如(18)及(19)式

$$L = \begin{pmatrix} 1 & R_1 & G_1 & B_1 & R_1 G_1 & G_1 B_1 & B_1 R_1 & R_1 G_1 B_1 \\ 1 & R_2 & G_2 & B_2 & R_2 G_2 & G_2 B_2 & B_2 R_2 & R_2 G_2 B_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & R_{32} & G_{32} & B_{32} & R_{32} G_{32} & G_{32} B_{32} & B_{32} R_{32} & R_{32} G_{32} B_{32} \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$A = \begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{32} & Y_2 & Z_{32} \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$A_2 = A - K$$

$$\text{最後可以得到 } T = S^{-1} A_2^t (L^t)^{-1} = S^{-1} [(L^t L)^{-1} L^t A_2]^t$$

- R、G、B：分別代表 RGB 三 channel 的亮度比例值
- A 矩陣：代表總共 32 種測試色的三刺激值
- S 矩陣：公式(5)裏的線性轉換矩陣，從 RGB 亮度比例值轉換至螢幕上每點對應的 XYZ 三刺激值
- K 矩陣：為 3\*1 的 black level 矩陣，元素為 black level 的三刺激值

比較預測 LED 投影機各種 model 和 LCD 投影機所得到的 T 矩陣係數，比較如表 7，由表 7 的數據可看出在所有 LED 投影機的 model 中，S-curve model I 的準確度愈高，T 矩陣係數最小(4.11 節將探討 model 準確度)。如果把 T 矩陣看成是修正矩陣，準確度一提高，自然將 T 矩陣的 channel interaction 的係數變小。GOGO 和 GOG 係數差不多，多了一個 offset 參數並無多大影響，觀察係數，雖然 LED 投影機的 channel 互相干擾很輕微，不過 LCD 投影機的 channel 互相的干擾

係數比 LED 投影機任何一個 model 都還要小：

表 7 LED 投影機各種不同 model 與 LCD 投影機的 T 矩陣比較表

Model	T 矩陣
多項式	$\begin{bmatrix} -0.0081 & 0.9771 & 0.0121 & 0.0101 & -0.0051 & -0.0096 & -0.0062 & 0.0088 \\ -0.0029 & 0.0108 & 1.0132 & 0.0088 & 0.0094 & -0.0061 & -0.0109 & 0.0027 \\ -0.0040 & 0.0121 & 0.0117 & 1.0024 & -0.0102 & -0.0226 & -0.0035 & 0.0193 \end{bmatrix}$
GOG	$\begin{bmatrix} -0.0142 & 0.9610 & 0.0139 & 0.0120 & -0.0295 & -0.0142 & -0.0287 & 0.0415 \\ -0.0046 & 0.0095 & 1.0027 & 0.0073 & 0.0014 & -0.0131 & -0.0110 & 0.0163 \\ -0.0077 & 0.0095 & 0.0087 & 0.9810 & -0.0110 & -0.0347 & -0.0162 & 0.0403 \end{bmatrix}$
GOGO	$\begin{bmatrix} -0.0110 & 0.9575 & 0.0180 & 0.0160 & -0.0311 & -0.0187 & -0.0302 & 0.0430 \\ -0.0032 & 0.0117 & 1.0013 & 0.0097 & 0.0002 & -0.0143 & -0.0136 & 0.0174 \\ -0.0038 & 0.0147 & 0.0143 & 0.9803 & -0.0169 & -0.0374 & -0.0186 & 0.0428 \end{bmatrix}$
CE model I	$\begin{bmatrix} -0.0144 & 0.9655 & 0.0186 & 0.0165 & -0.0287 & -0.0191 & -0.0279 & 0.0404 \\ -0.0052 & 0.0123 & 1.0069 & 0.0104 & 0.0012 & -0.0136 & -0.0138 & 0.0156 \\ -0.0063 & 0.0151 & 0.0148 & 0.9870 & -0.0170 & -0.0359 & -0.0169 & 0.0407 \end{bmatrix}$
CE model II	$\begin{bmatrix} -0.0061 & 0.9663 & 0.0083 & 0.0067 & -0.0064 & -0.0074 & -0.0071 & 0.0169 \\ -0.0020 & 0.0083 & 1.0109 & 0.0061 & 0.0104 & -0.0048 & -0.0083 & 0.0037 \\ -0.0065 & 0.0083 & 0.0073 & 0.9934 & -0.0075 & -0.0226 & -0.0040 & 0.0254 \end{bmatrix}$
S-curve I	$\begin{bmatrix} -0.0049 & 0.9763 & 0.0098 & 0.0081 & -0.0021 & -0.0075 & -0.0035 & 0.0048 \\ 0.0001 & 0.0091 & 1.0095 & 0.0070 & 0.0120 & -0.0035 & -0.0098 & 0.0006 \\ -0.0013 & 0.0096 & 0.0089 & 1.0044 & -0.0095 & -0.0180 & 0.0005 & 0.0120 \end{bmatrix}$
LCD projector	$\begin{bmatrix} -0.0023 & 1.0033 & -0.0011 & 0.0032 & 0.0004 & -0.0019 & -0.0043 & 0.0030 \\ -0.0008 & 0.0008 & 1.0011 & 0.0005 & -0.0012 & -0.0007 & -0.0006 & 0.0009 \\ 0.0000 & 0.0002 & 0.0002 & 1.0000 & -0.0021 & -0.0002 & -0.0002 & 0.0023 \end{bmatrix}$

- S-curve model II :

直接使用 EXCEL 的 solver function(增益集裏的規劃求解)，及 32 個量測值尋找參數，和 LCD 投影機比較，如表 8，表中的 0 並不代表完全沒有互相影響，而是代表係數太小可以忽略：

表 8 比較 LED 投影機和 LCD 投影機的 S-curve model II 的 channel 干擾增益係數

干擾係數	LED 投影機	LCD 投影機
Arg	0.118	0
Arb	0	0
Agr	0.002	-0.033
Agb	0.003	0.002
Abr	0	0.016
Abg	0.036	-0.007

比較起來 LED 投影機的係數跟 LCD 投影機比起來，除了 Agr 比較小，Agb 幾乎相同，其他係數如 Arg、Abg 的值都比 LCD 投影機大很多，至於 Arb=Abr=0，可由觀察圖 24-27 得知，紅光和藍光頻譜是根本不會交錯的，相然紅光和藍光之間的干擾可以忽略。

LED 的頻譜很窄，channel 間的頻譜獨立性頗佳，影響應不至如此嚴重才是，但由表 7 與表 8 都顯示出這台 LED 投影機比起 LCD 投影機(Sanyo PLC-5605B)，channel 間的干擾要稍微大一點，這或許是量測環境不同的緣故。

#### 4.9 空間獨立性(Spatial independency)

這個實驗主要是在探討在屏幕上某個區域的顏色對另一個區域上另一種顏色的影響，此實驗按照 Fairchild[11]所提出的方法，一共有 9 種測試色，每一種測試色擺在其餘九種背景色上，然後進行量測，此 9 種顏色的 digital count、XYZ 三刺激值、CIELAB 空間座標如下：

表 9 空間獨立性測試色量測資料

color	dr	dg	db	X	Y	Z	L	a*	b*	C*ab
Black	0	0	0	0.0766	0.0702	0.0879	-1.426	4.7925	-0.830	4.8638
Blue1	0	0	128	1.21	0.362	6.56	9.186	60.908	-65.85	89.702
Red1	128	0	0	2.6	1.13	0.0843	20.797	60.402	37.845	71.278
Blue2	0	0	255	6.76	1.87	38.2	27.551	113.42	-121.4	166.15
Red2	255	0	0	14.1	6	0.0997	48.208	107.94	83.639	136.55
Green1	0	128	0	1.52	4.03	0.303	40.22	-59.27	57.72	82.733
Grey	128	128	128	5.15	5.39	6.76	45.929	8.0852	-3.572	8.839
Green2	0	255	0	10	27.1	1.62	90.159	-114.4	114.42	161.82
White	255	255	255	32.66	37.33	42.085	100	0	0	0



將量測所得到的三刺激值藉由 LED 投影機的白光( $d_r=d_g=d_b=255$ )當參考白(上表的最後一列)，然後轉換成 CIELAB 座標，再以測試色和背景同色時當標準，計算亮度差異值。亮度差異如表 10，差異最大時發生於最暗的測試色擺在最亮的背景色時，即發生在 Black 擺在 White 上(粗體字)，如果總體的來看亮度的差異是測試色愈暗或背景愈亮時影響愈嚴重。總平均差異值為 1.6231，表示此 LED 投影機的中央亮度值會被背景色的亮度所影響，但影響程度不大。

表 10 LED 投影機不同背景測試色所產生的亮度差異

$\Delta L^*$										Average
stimulus Background	Black	Blue 1	Red 1	Blue 2	Red 2	Green 1	Grey	Green 2	White	
Black	0	-0.2878	-0.4746	-0.5505	-0.7760	-0.6965	-0.8291	-1.3352	-1.3977	-0.7053
Blue 1	1.0818	0	-0.3378	-0.3487	-0.6261	-0.6520	-0.5201	-1.3775	-1.3977	-0.4642
Red 1	2.1832	0.4303	0	-0.1986	-0.5802	-0.5041	-0.5201	-1.3352	-1.2917	-0.2018
Blue 2	2.6808	0.8125	0.1001	0	-0.4542	-0.4158	-0.4479	-1.3352	-1.2917	-0.0390
Red 2	6.3221	2.5978	1.3870	0.4886	0	0.0651	0.2657	-1.1665	-1.0803	0.9866
Green 1	6.4834	3.0346	1.1365	0.5128	-0.1696	0	-0.2679	-1.0823	-1.1859	0.9402
Grey	7.4219	3.7101	1.3247	0.9666	-0.0451	0.1517	0	-1.1244	-1.2211	1.2427
Green 2	19.2514	12.7903	7.3089	5.4604	2.2747	3.1848	2.5124	0	-0.2422	5.8379
White	<b>21.5992</b>	14.6132	9.3219	6.7697	3.1157	4.0296	3.4843	0.1646	0	7.0109
Average	7.4471	4.1890	2.1963	1.4556	0.3044	0.5737	0.4086	-0.9546	-1.0120	1.6231

表 11 顯示CIELAB空間為基礎的 $\Delta E^*_{ab}$ 色差值(請參考 2.2.2 節)，總平均值為 9.7602，表示此LED投影機有相當大的空間相依性 (spatial dependence)存在，如果固定背景色來看的話，色差最大是發生在背景為Blue 2、Green 2 時(**粗體字**)，也就是發生在色彩特性是高亮度及高彩度時，如果固定測試色來看的話，測試色亮度愈差或是彩度愈低，色差也愈嚴重，如同表 11 所示：

表 11 LED投影機不同背景測試色產生的 $\Delta E^*_{ab}$ 色差值

$\triangle E^*_{ab}$	Average									
stimulus										
Background	Black	Blue 1	Red 1	Blue 2	Red 2	Green 1	Grey	Green 2	White	
Black	0	0.5918	1.9081	1.5644	1.2278	1.0272	0.8502	2.7237	1.4466	1.2600
Blue 1	11.7560	0	13.6016	1.5390	13.4794	7.5824	1.6591	4.9566	1.6059	6.2422
Red 1	10.6547	1.9375	0	1.8497	1.1062	3.6563	1.2638	3.0012	1.4214	2.7656
Blue 2	36.2740	4.0030	35.1775	0	32.8164	26.1262	6.0042	14.7399	2.6033	17.5272
Red 2	27.2777	6.2727	3.4078	3.1236	0	11.7164	4.8334	5.0045	2.1268	7.0847
Green 1	20.5806	11.5615	6.2134	5.1419	2.8649	0	1.6028	2.2065	1.2046	5.7085
Grey	7.7765	10.1262	11.0429	5.9694	11.5921	7.0107	0	4.7718	1.2817	6.6190
Green 2	50.5779	48.1175	28.0918	25.1822	11.3900	6.3320	9.9403	0	2.7854	20.2686
White	23.0954	38.0823	29.4667	23.6203	30.0627	21.6697	4.0984	13.1968	0	20.3658
Average	20.8881	13.4103	14.3233	7.5545	11.6155	9.4579	3.3614	5.6223	1.6084	9.7602

碰巧的是上述情況和 LCD 投影機類似，如表及表，亮度影響比 LED 投影機來的小，當測試色是 black、背景色是 white 時亮度差異最大，總體來看當測試色愈暗或背景愈亮時亮度差異愈大，這點和 LED 投影機是一致的，如表 12：

表 12 LCD 投影機不同背景測試色所產生的亮度差異

$\Delta L^*$		Stimulus									Avg
		Black	Blue1	Red1	Blue2	Red2	Green1	Grey	Green2	White	
Background	Black	0.00	-1.13	-0.06	-0.07	-0.42	-0.56	-0.59	-0.67	-0.84	-0.48
	Blue1	-0.06	0.00	-0.03	-0.31	-0.54	-0.62	-0.43	-1.19	-1.03	-0.47
	Red1	0.16	-1.00	0.00	-0.22	-0.56	-0.69	-0.65	-1.03	-1.06	-0.56
	Blue2	0.88	1.54	0.15	0.00	-0.81	-0.84	-0.54	-0.93	-1.34	-0.21
	Red2	3.30	0.49	1.33	0.37	0.00	-0.30	-0.64	-0.87	-0.86	0.31
	Green1	2.81	0.27	0.89	0.40	-0.20	0.00	-0.52	-0.71	-1.43	0.17
	Grey	3.54	1.62	1.05	0.69	-0.51	-0.08	0.00	-0.90	-0.84	0.51
	Green2	11.69	5.77	5.34	2.95	1.33	2.36	1.87	0.00	-0.08	3.47
	White	13.78	8.74	6.64	3.47	1.92	2.82	3.04	0.10	0.00	4.50
Average		4.01	1.81	1.70	0.81	0.02	0.23	0.17	-0.69	-0.83	0.80

LED 投影機的色差影響比 LCD 投影機嚴重的多，如表 13 所示，LCD 投影機的色差平均值是 6.10，但是空間獨立性還是不夠好，LED 投影機的色差計算如果改成 MCDM 而不是  $\Delta E^*_{ab}$ ，得出的平均值為 9.4812，仍然比 LCD 投影機差。

表 13 LCD 投影機不同背景測試色產生的 MCDM 色差值

CIELAB colour difference  $\Delta E^*_{ab}$  by different background colours

$\Delta E^*_{ab}$		Stimulus									Avg
		Black	Blue1	Red1	Blue2	Red2	Green1	Grey	Green2	White	
Background	Black	0.00	6.56	0.40	0.88	0.78	0.97	6.40	2.11	1.82	2.21
	Blue1	6.76	0.00	6.18	0.41	7.57	4.83	0.51	4.12	1.97	3.59
	Red1	2.74	6.86	0.00	0.62	1.05	1.50	5.50	1.73	1.93	2.44
	Blue2	21.53	6.59	19.19	0.00	20.49	14.58	7.16	8.15	2.45	11.13
	Red2	15.74	8.24	3.84	1.51	0.00	3.97	6.04	2.88	1.99	4.91
	Green1	7.81	11.87	4.00	1.68	1.79	0.00	7.79	1.42	1.83	4.24
	Grey	3.57	4.50	5.40	2.01	7.46	4.13	0.00	3.37	1.41	3.54
	Green2	27.16	30.79	16.93	11.40	6.12	4.31	12.98	0.00	0.80	12.28
	White	14.19	15.04	13.63	12.24	17.20	9.75	5.88	6.73	0.00	10.52
Average		11.06	10.05	7.73	3.42	6.94	4.89	5.81	3.39	1.58	6.10



#### 4.10 量測儀器靈敏度不夠之問題

所有投影機皆會在輸入訊號為零時漏光，這稱為 black level，主要的原因是因為內部的雜散光。Black level 會導致每一個 channel 的色座標值隨著亮度變化而變化，我們已經知道在色彩特性量測中把 black level 量測準確是非常重要的，而解決儀器對 black level 靈敏度不高的方法已經被提出，不幸的是 LED 投影機的輸出值特別地低，量測儀器甚至是在輸入訊號不高時也不靈敏，而不只是 black level 而已。所以為了增加準確性，我們引用了一個已經提出的方法把黑階切割成 3 個 channel 的個別貢獻，於此文章中我們提出一個迴圈程序以得到一個好很多的結果，迴圈包含已經提出的 black level 預測最佳化以及用非線性內插取代暗階三刺激值，也就是說我們修正了所量測的 black level 和暗階三刺激值。

##### 4.10.1 量測實驗

對於 RGB 三 channel，每一個 channel 從 digital count 0 - 255 每隔等間距 8 量一次，所以每一個 channel 一共是 33 組資料(IEC[9]建議至少 33 次以上)，每一筆記錄是連續三次量測的平均值。

##### 4.10.2 black level 最佳化

在這裡為了尋找最佳化的 black level 所引用的方法是 Berns[15]所提出的，詳述如下：

此 black level 最佳化的找法最主要是最小化下面的函數：

$$\text{Minimize}(\sigma^2_{x,y,\text{red}} + \sigma^2_{x,y,\text{green}} + \sigma^2_{x,y,\text{blue}}) \quad (20)$$

以 R channel 為例， $\sigma^2_{x,y,\text{red}}$  表示色座標偏移的程度由下式計算而得：

$$\sigma_{x,y,red}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (d_{i,xy,red} - \bar{d}_{xy,red})^2}{n-1} \quad (21)$$

- $\bar{d}_{xy,red}$  表示  $d_{i,xy,red}$  差異量值的平均值 ( $i=1 \sim n$ )
- $d_{i,xy,red}$  表示第  $i$  次量測值  $xy$  座標與  $n$  組  $xy$  平均值的差異量，計算由下式而得：

$$d_{i,xy,red} = \sqrt{(x_{i,red} - \bar{x}_{red})^2 + (y_{i,red} - \bar{y}_{red})^2} \quad (22)$$

- $x_{i,red}$  和  $y_{i,red}$  表示第  $i$  次量測值扣掉 black level 後所得到的色座標值
- $\bar{x}_{red}$  和  $\bar{y}_{red}$  表示  $n$  次  $xy$  色座標的平均值

G 和 B channel 的公式比照上面說明。不過所得到的三原色色座標變化仍然很大，如圖 32：

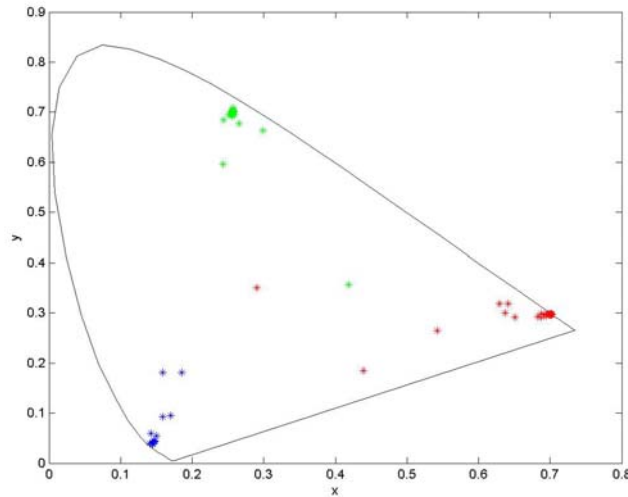


圖 32 由原始測量資料扣掉最佳化 black level 後 RGB 色座標偏移圖

由圖 32 可以看出，有 7 個離散紅點遠離叢聚點，其餘 23 紅點則縮在某個小

範圍內(從 0-255，每隔等間距 8 做一次量測)，這意味著當 digital count 小於 56 時的輸三刺激值因為太小而頻譜儀不靈敏，需要注意的是因為 black level 已最佳化，所以離散的 7 個紅點相對應的 digital count 為 8、16、24、32、40、48、56，並不包括 digital count 為零時的 black level。

LED 投影機的輸出三刺激值因為是如此的低，所以對於 black level 的計算必須非常小心，理想的計算方式是應該從所量測的三刺激值中扣掉其餘 2 個 channel 所貢獻的 black level，方法已經放 Cazes[16]等人所提出，或請參考 Hardeberg 和 Skogstad[17]的論文，並且在下面重新解釋：

假設 black level 與最大三刺激扣掉 black level 後的值成正比，也就是說在公式(5)中，當 digital count 為 0 時，RGB 亮度比例值並不是 0，而且在公式(5)中最右邊的 black level 矩陣必須省略：

$$\begin{pmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{rmax}-X_k & X_{gmax}-X_k & X_{bmax}-X_k \\ Y_{rmax}-Y_k & Y_{gmax}-Y_k & Y_{bmax}-Y_k \\ Z_{rmax}-Z_k & Z_{gmax}-Z_k & Z_{bmax}-Z_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \quad (23)$$

注意在公式(21)中的 3 乘 3 矩陣的元素，嚴格地來說，應該僅僅扣掉其餘 2 個 channel 所貢獻的 black level，而元素裏式子表達的是，對於每個 channel 來說，從最大三刺激值中扣掉整個 black level 這並不正確，但是卻是個不錯的近似值，因為 black level 和最大三刺激值比起來非常的小。

現在把 black level 切割成 3 個 channel 的貢獻：

$$\begin{pmatrix} X_{qk} \\ Y_{qk} \\ Z_{qk} \end{pmatrix} = h \begin{pmatrix} X_{qmax}-X_k \\ Y_{qmax}-Y_k \\ Z_{qmax}-Z_k \end{pmatrix} \quad (24)$$

上式中當 q 代表 rgb，h 分別代表 abc，計算 R channel 的三刺激值較正時，33 次所量測的三刺激值扣掉其餘 2 個 channel 所貢獻的 black level，而 G 和 B

channel 進行同樣的運算，所得到的結果好的多，但是還不夠好，如圖 33 所示：

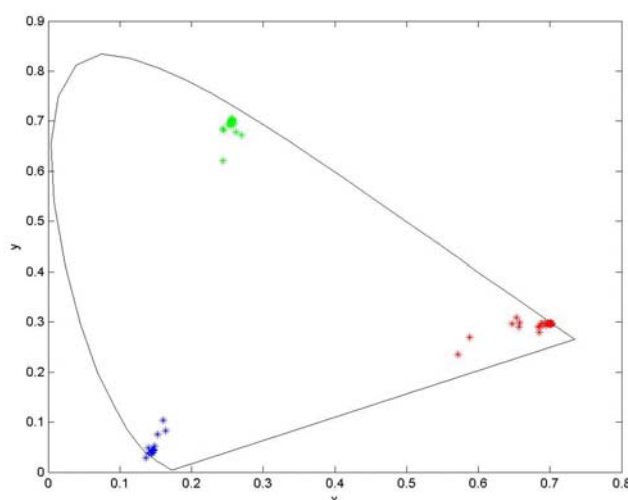


圖 33 由原始測量資料扣掉其餘兩 channel 所貢獻的 black level 後 RGB 色座標偏移圖

如上圖，每一 channel 的點都靠近的多，不過離散點仍然存在，而且注意到有一藍點在頻譜軌跡(spectrum locus)的外面。

#### 4.10.3 修正暗階時不準確的三刺激值

觀察上圖，現在已經有理由相信暗階時的輸出三刺激值因為太低，導致測量儀器靈敏度不夠而量測值不精準，這些不準確的值應該修正，明顯的証據列於表 14，粗體字顯示出量測值並未隨著 digital count 增加而增加。

表 14 RGB 三 channel 暗階三刺激量測值

digital count 三刺激值	8	16	24	32	40	48	56
X of R	0.0867	0.1004	0.1305	0.1624	0.2013	0.2732	0.3389
Y of R	0.0660	0.0748	0.0889	0.1054	0.1213	0.1503	0.1743
<b>Z of R</b>	<b>0.0916</b>	<b>0.0759</b>	<b>0.0964</b>	<b>0.0790</b>	<b>0.0862</b>	<b>0.0912</b>	<b>0.0829</b>
X of G	0.0792	0.0984	0.1060	0.1324	0.1542	0.1957	0.2408
Y of G	0.0885	0.1387	0.1720	0.2287	0.3030	0.4103	0.5437
Z of G	0.0748	0.0949	0.0850	0.0874	0.0846	0.0998	0.1108
<b>X of B</b>	<b>0.0805</b>	<b>0.0848</b>	<b>0.1019</b>	<b>0.1305</b>	<b>0.1283</b>	<b>0.1603</b>	<b>0.2095</b>
<b>Y of B</b>	<b>0.0720</b>	<b>0.0653</b>	<b>0.0784</b>	<b>0.0935</b>	<b>0.0751</b>	<b>0.0863</b>	<b>0.1096</b>
Z of B	0.1260	0.1843	0.2468	0.3559	0.4426	0.5997	0.8404

假設在 4.10.2 節所計算的最佳 black level，和高階 digital count 所輸出的三刺激值皆是準確的，理由是當 digital count 愈高時，black level 對輸出三刺激值的影響愈小，就如之前的例子，當 digital count 大於 56 時，三刺激值扣掉 black level 後都聚成一點，所以假設高階輸出三刺激值準確是可靠的。由這些準確的值，可以藉由最小平方迴歸法得到一個 4 階的多項式，接著再用這個多項式預測內插暗階的值，如圖 34，顯示 R channel 的 Y 值(亮度值)的例子：

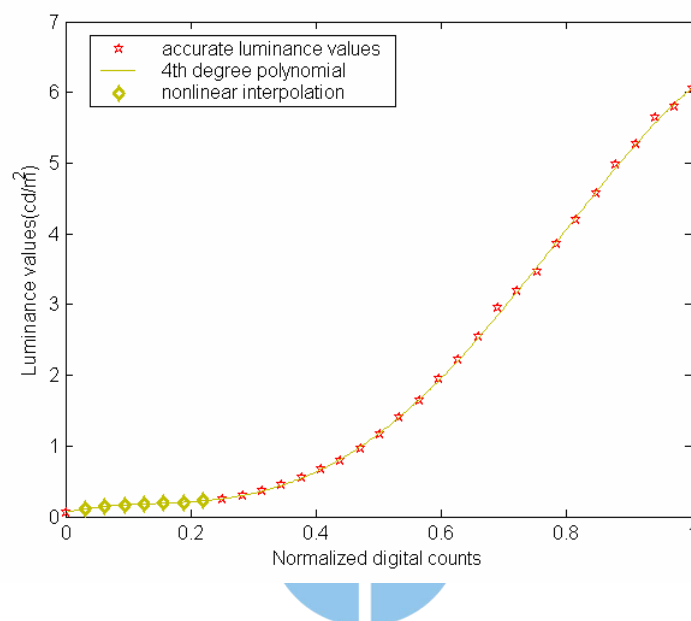


圖 34 R channel 輸出亮度值。黃色菱形代表內插值，紅色五角形代表 black level 與高階亮度值(digital count 大於 56)

RGB 3 channel 經過這非線性內插的步驟後，再利用 4.10.2 節所提到的方法重新計算一次三原色恒定性(primary constancy)，得到的結果好很多，如圖 35，注意看這張圖，每一個 channel 都有一點在叢聚點旁邊，這些點皆是由 black level( $d_r=d_g=d_b=0$ )扣掉其餘 2 個 channel 的貢獻而來，這也意味著 black level 對於內插以後的資料已不再最佳化的了，注意到仍然有一藍色的點在頻譜軌跡(spectrum locus)的外面。

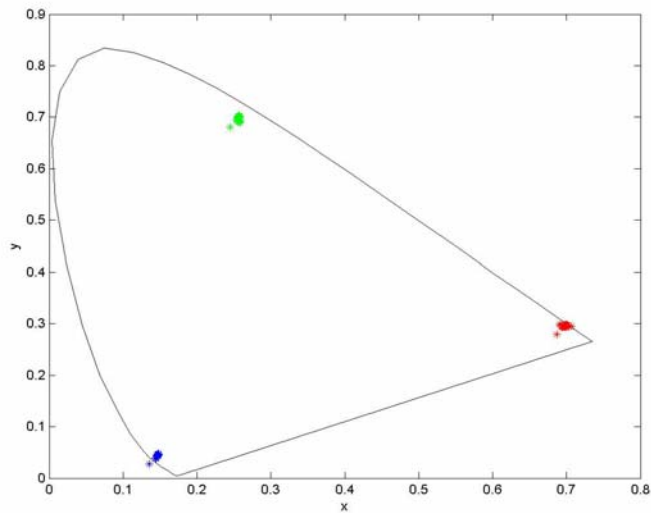


圖 35 暗階三刺激值由內插值取代後的 RGB 色座標偏移圖

有必要再次計算最佳的 black level，最佳化的方法和 4.10.2 節提到的一樣，一旦得到新的最佳化 black level，就重新計算暗階的內插三刺激值，這過程是個迴圈程序，直到所計算的最佳化 black level 收斂為止，流程圖如下所示：

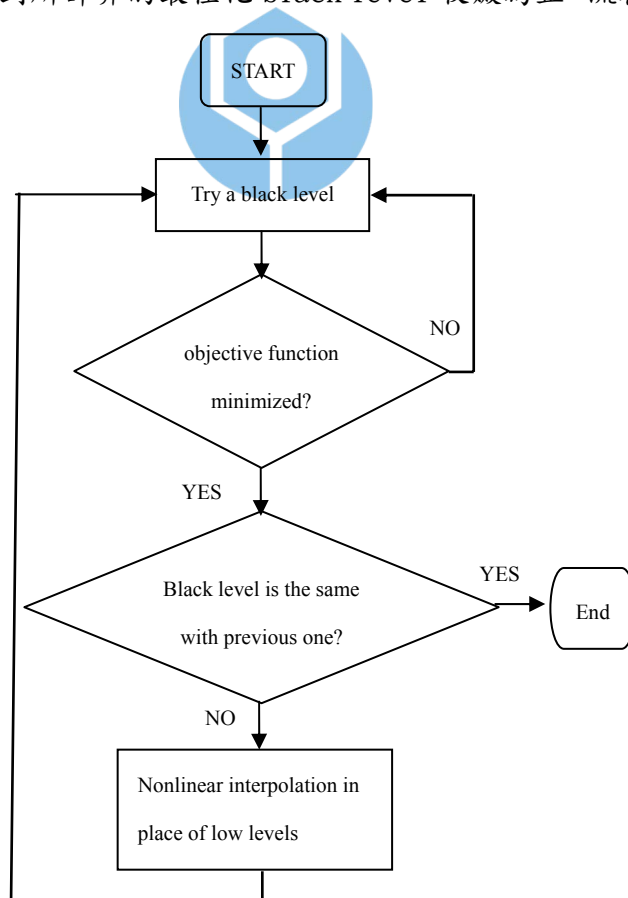


圖 36 迴圈程序流程圖

最後我們得到一個最佳的結果，如下圖所示，所有的點皆叢聚在一起而且再也沒有點在頻譜軌跡(spectrum locus)的外面。

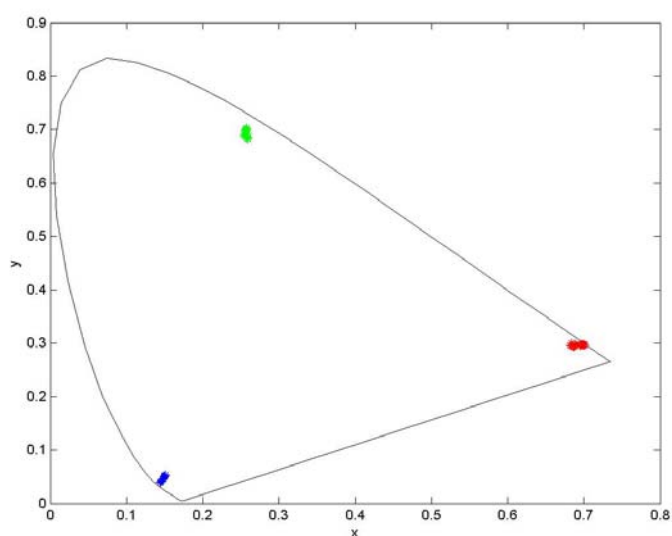


圖 37 最佳的三原色恒定性(primary constancy)

我們從圖 32 至圖 37 瀏覽一遍，如果暗階(包括 black level)的三刺激值的愈準確，則三原色的色座標變化愈小，也不再有點落在頻譜軌跡(spectrum locus)的外面。比較由原始測量資料和經由迴圈程序所得資料而繪出的色座標偏移圖，如圖 38 及圖 39，最佳化後的結果比較平滑也比較可令人接受，這迴圈程序是有用的。

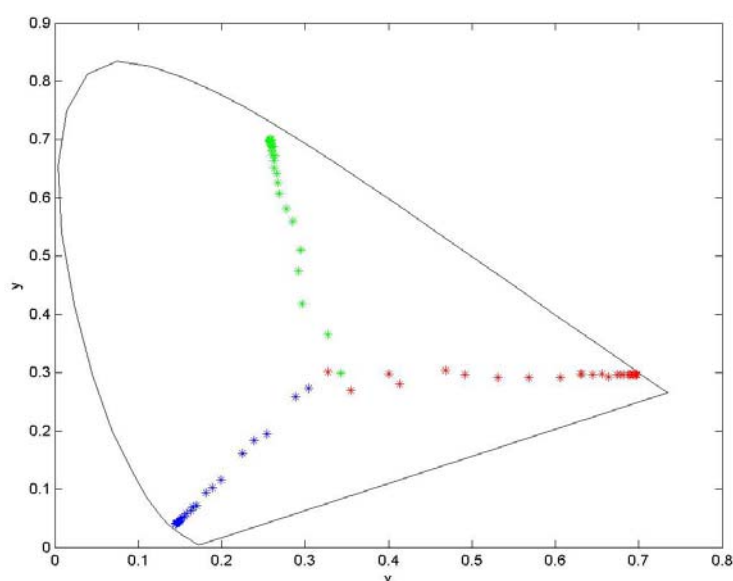


圖 38 扣掉 black level 之前由原始資料計算出的 RGB 色座標偏移

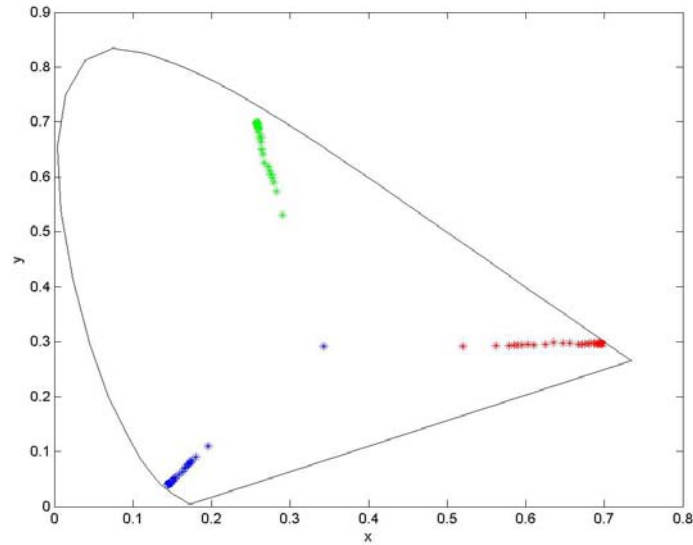


圖 39 扣掉 black level 之前由內插暗階後資料計算出的 RGB 色座標偏移

## 4.11 各種 model 色彩預測準確性

### 4.11.1 建立 model 的量測實驗

量測實驗和 4.10.1 節提及的一樣，量出 33 點資料後，使用最小平方迴歸法找出各別 model 的參數，關於這方面可以用 EXCEL 的 solver function(增益集裏的規劃求解)功能或是使用 matlab 的 fminsearch 函數尋找參數，找出各個 model 參數後，其餘的 223 點就代入相對應的 digital count 得到；只有 LUT 是直接使用 spline interpolation 內插法填補沒量測的 223 點。另外必須提及的是，在這裡並不使用 4.10 節所提到的方法內插暗階的修正後三刺激值，因為頻譜儀沒有更換，所以仍然使用原始量測得到的 32 點資料尋找各個 model 的參數，black level 仍然使用公式(20)尋找最佳值。

### 4.11.2 各種 model 預測準確性比較

所有的 model 皆使用 2.2.2 節裏的色差公式(1)，也就是  $\Delta E^*_{94}$ ，所有 model 皆使用 EXCEL 規劃求解尋找參數。測試圖片一共 50 個(27 個規則測試色及 23 個隨機測試色[13])，規則測試色由 digital count 44、128、212 組合而成，也就是說每一個 channel 皆有 3 個 digital count level，而一共有 3 個 channel，所以



一共 27 種組合，例如第 1 個測試的RGB digital count為{44 44 44}，接下來就是{44 44 128}、{44 44 212}...{212 212 212}；而 23 個測試色的RGB digital count 是隨機選擇的。測試的結果如表 15，由準確度高往低的順序由上往下排列：

表 15 量測 33 點各種 model 準確度比較

$\Delta E^*_{94}$ Model	Average	max	min
S-curve 1 <sub>T</sub>	2.4733	5.6848	0.5445
LUT	2.6121	4.6422	0.4138
CE 1 <sub>T</sub>	2.7835	4.7747	0.2223
S-curve 1	2.9830	6.0142	1.0596
GOGO	3.0019	6.6399	0.7614
Polynomial <sub>T</sub>	3.0849	7.7227	0.7112
CE 1	3.1048	7.5535	0.3554
GOG <sub>T</sub>	3.1206	5.4950	0.5022
GOG	3.1393	6.7495	0.7760
GOG <sub>T</sub>	3.4424	6.2835	0.2330
CE 2 <sub>T</sub>	3.4625	14.9790	0.7372
polynomial	3.4631	8.1296	0.4135
S-curve 2	3.6579	8.5893	1.1728
CE 2	4.2316	20.2670	0.3924

注意到，表中的下標T表示使用(14)式裏的T矩陣來增加預測準確度，由表中可以清楚看出，除了GOG和GOGO model以外，搭配了T矩陣可以使準確度提高；除了LUT以外，準確度最好的model的就是搭配T矩陣的S-curve model I和compound exponent model I。這兩個model同樣為 4 個參數，S-curve model I的準確度稍為好一點；其餘的model雖然較差， $\Delta E^*_{94}$  大部份都維持在 4 以內，準確度相當不錯。比較特殊的是compound exponent model II比compound exponent model I多了一個偏移參數，但準確度反而明顯變差， $\Delta E^*_{94}$  最大值竟然高達 20.267!，這個測試色的digital count為{50 70 0}，或許原因出在於當digital count為 0 時的預估值和量測值誤差太大所導致，如果把此大的 $\Delta E^*_{94}$  值忽略，則其餘的測試色的平均 $\Delta E^*_{94}$  降低成為 3.771，再次比較，準確度仍差。

把所有 model 在尋找參數時的預估值和 33 點量測值(black level 為最佳化後得到)的平方誤差列於下表，由誤差低的往高的順序由上往下排列，如表 16：

表 16 尋找 model 參數時的 33 點平方誤差

平方誤差 Model	R 通道	G 通道	B 通道	總誤差
S-CURVE 1	0.0011	0.0020	0.0022	0.0053
CE 2	0.0033	0.0019	0.0045	0.0097
CE 1	0.0162	0.0041	0.0106	0.0309
GOGO	0.0188	0.0049	0.0129	0.0366
GOG	0.0189	0.0049	0.0130	0.0369

觀察表 16，的確是 S-curve model I 最為準確，和表 15 的結果相互呼應，不過 compound exponent model II 的結果卻與不符合表 15 的結果，如果找出它的每一個測試色色差值，大部份的測試色的色差是小的，但是有 2、3 個測試的色差極大，使得整體準確度下降。



#### 4.12 減少大量的量測時間可能性之探討

在做 33 點量測時，發現到一個實驗上的問題，因為本文所用的頻譜儀的測量時間是和測量光源成反比，而 LED 投影機的亮度特別的弱，如表 14，使得測量得花大量的時間，暗階的三刺激值又不見得準確。在這種情況下按照 IEC[9] 的建議必須每一個 channel 量測 33 點以上是否有其必要？這是本章節要探討的問題。

之前所述皆為量測 33 點，此 33 點 digital count 為在 0-255 之間以等間隔 8 量一次，而在 4.10.2 節的圖 32 說明過 digital count 小於 56 以下量測值不準確，所以我們只取 13 點(在 64-255 等間隔 16 取一點)來抓 model 的參數值，而 model 是選擇最準確的 S-curve model I。再更一步只取 7 點(64-255 等間隔 32 取一點)，分別藉由量測 13 點及 7 點使用(20)式計算最佳化 black level。藉由 13 點、7 點及 black level 的亮度值抓到 S-curve model I 的參數後，可以估計出 digital count 0-255 全部的亮度比例值，也就是可以得到 gamma curve，

再由公式(5)即可得出三刺激值。

將抓取 13 點及 7 點後所得到的 gamma curve 分別計算 50 個測試色的的三刺激值，色差結果綜和表 15 重新排列如表 17，依準確度由高往低，由上往下的順序排列：

表 17 減少量測點與量測 33 點各種 model 準確度比較

$\Delta E^*94$	Average	max	min
Model			
S-curve $1_T$ (取 7 點)	2.4605	4.8846	0.5157
S-curve $1_T$	2.4733	5.6848	0.5445
LUT	2.6121	4.6422	0.4138
CE $1_T$	2.7835	4.7747	0.2223
S-curve 1	2.9830	6.0142	1.0596
GOGO	3.0019	6.6399	0.7614
S-curve 1(取 7 點)	3.0432	5.9152	0.8607
S-curve 1(取 13 點)	3.0710	5.5008	1.1148
Polynomial $_T$	3.0849	7.7227	0.7112
CE 1	3.1048	7.5535	0.3554
GOGO $_T$	3.1206	5.4950	0.5022
GOG	3.1393	6.7495	0.7760
S-curve $1_T$ (取 13 點)	3.3162	11.1730	0.4853
GOG $_T$	3.4424	6.2835	0.2330
CE $2_T$	3.4625	14.9790	0.7372
polynomial	3.4631	8.1296	0.4135
S-curve 2	3.6579	8.5893	1.1728
CE 2	4.2316	20.2670	0.3924

如表 17 所示，準確度最準確的反而是取 7 點的 S-curve model I 搭配 T 矩陣，而且取 13 點的 S-curve model I 準確度與所有 model 比起來也不算差，顯示量測點數與準確度並無絕對關係，只量某些亮階，然後計算最佳 black level，接著抓取 model 參數，得到 gamma curve，即可估計出暗階的亮度比例值，或許是個可行的方法。

## 第5章 總結

### 5.1 LED 投影機色彩特性

LED 投影機的好處在於它的色彩飽和(頻寬狹窄)、反應速度快。這些優點反應在色域大、良好的時間穩定性、channel cross talk 微小；但是 LED 亮度不足的缺點使得均勻度、對比度顯得十分差勁，另外一點就是空間的獨立性不是很好，這或許是光學元件設計或是光源設計的問題。而本篇文章最主要是專注於校正暗階不準確的三刺激值，因為 LED 投影機的暗階輸出值是如此的微弱，在計算 black level 方面必須僅僅扣掉其餘兩個 channel 所貢獻的 black level，如此才可以得到好的三原色恒定性。

至於色彩預測的準確性方面，發現到搭配 T 矩陣可以增加準確度，不過 GOG 和 GOGO model 例外，搭配 T 矩陣反而使得準確度下降，而就數據來看預測最準確的 model 是 S-curve model。由於 LED 投影機的暗階三刺激值非常微弱，忽略暗階量測，只量測亮階部份，然後求出最佳 black level 值，求出 model 參數，得到 gamma 曲線，得到的準確度不見得較差，或許這是個可行性的方式。

### 5.2 未來及展望

LED 投影機是個潛力無窮的產品，畢竟輕薄短小是未來電子產品的趨勢，假使 LED 的亮度有所突破，則投影機將顛覆以往的印象，搭配多媒體如 DVD，有可能走入家庭，家庭劇院變成人人可以實現的夢想。

由本篇文章的研究顯示 LED 投影機與傳統燈泡式投影機還有很多方面待改進，如亮度及均勻度的缺點，尤其是 LED 模組的擺放方式是影響整體效能的關鍵因素，因為 LED 投影機尚未達到商品化標準，市場也未見明朗，它還有很長的路要走，就像當初沒人覺得電腦會走入家庭，但是現在電腦變成生活不可缺少的一部份，誰知道呢？

## 參考文獻

- [1] <http://www.fuji.com.tw/shownews.asp?RecordNo=529>
- [2] [www.pida.org.tw/optolink/optolink\\_pdf/87111810.pdf](http://www.pida.org.tw/optolink/optolink_pdf/87111810.pdf)
- [3] Matthijs H. Keuper, Gerard Harbers, Steve Paolini, "RGB LED Illuminator for Pocket-Sized Projectors," *SID Symposium Digest of Technical Papers*, Vol. 35, pp. 943-945 (2004)
- [4] G. Harber, M. Keuper, and S. Paolini, "Performance of high power LED illuminators in color sequential projection displays," *10th Int. Display Workshop, IDW'03*, pp. 1585 - 1588 (2003)
- [5] Won Yong Lee, Young Chol Lee, Kirill Sokolov, Hee Joong Lee, "Led Projection Display," *Proc. of SPIE*, Vol. 5529 (2004)
- [6] 大田 登原著, 陳鴻興、陳君彥編譯, "基礎色彩再現工程", 全華科技圖書有限公司 pp. 4-2~4-7(1992)
- [7] R. S. Berns, R. J. Motta, M. E. Gorzynski, "CRT colorimetry, part I: theory and practice," *Col. Res. Appl.* Vol. 18, pp. 299-314 (1993)
- [8] R. S. Berns, "Methods for characterizing CRT displays," *Displays* Vol. 16, pp. 173-182 (1995)
- [9] IEC 61966-6, Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - part 6: Front projection displays, International Electrotechnical Commission, April (2004)
- [10] Y. Kwak and L. MacDonald, "Characterisation of a desktop LCD Projector," *Displays* vol. 21, no. 5, pp. 179-194 (2000)
- [11] M. D. Fairchild, D. R. Wyble, "Colorimetric characterization of the Apple Studio Display (Flat Panel LCD)," *Munsell Color Science Laboratory Technical Report* (1998)
- [12] ANSI IT7.215-1992, Data Projection Equipment and Large Screen Displays—Test Methods and Performance Characteristics
- [13] J E Gibson and M D Fairchild, "Colorimetric Characterization of Three Computer Displays," *Munsell Color Sci Lab Tech Report* (2000)
- [14] Madár G, Kránicz B, Schanda J, "Colour reproduction with different types of projectors," *Laboratory of Colour and Mulimedia*, University of Veszprém, Hungary, CORM (2003)
- [15] Roy S. Berns, Scot R. Fernandez, and Lawrence Taplin, "Estimating Black-Level Emissions of Computer-Controlled Displays," *Color research & Application*, Vol. 28, no. 5, pp. 379-383 (2003)
- [16] A. Cazes, G. Braudway, J. Christensen, M. Cordes, D. DeCain, A. Lien, F. Mintzer, and S. L. Wright, "On the color balancing of liquid

- crystal displays,” in *Flat Panel Display Technology and Display Metrology, SPIE Proceedings*, Vol 3636, pp. 154 – 161 (1999)
- [17] J.Y. Hardeberg, L. Seimea, and T. Skogstad, “Colorimetric characterization of projection displays using a digital colorimetric camera,” *Proc. SPIE*, Vol. 5002, pp. 51-61 (2003)



## 國立臺灣科技大學博碩士論文授權書

(本授權書裝釘於紙本論文內)

本授權書所授權之論文為李明燐〔M9302336〕在國立臺灣科技大學電子工程系 94 學年度第 2 學期取得碩士學位之論文。

論文題目： LED投影機色彩特性量測與修正暗階三刺激值  
指導教授： 黃忠偉

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文〔含摘要〕，非專屬、無償授權本校圖書館及國家圖書館，不限地域、時間與次數，以紙本、微縮、光碟或其他數位化方式將上列論文重製典藏，並提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索書目、館內閱覽、或複印。

授權人 李明燐 黃忠偉

簽章

(請親筆正楷簽名)

李明燐

黃忠偉

備註：

1. 授權人不因本授權而喪失上述著作之著作權。
2. 本授權書請授權人簽章後，裝釘於紙本論文內。

中 華 民 國

95 年 6 月 27 日



## 國立臺灣科技大學博碩士論文授權書

(本授權書裝釘於紙本論文內)

本授權書所授權之論文為李明燐〔M9302336〕在國立臺灣科技大學電子工程系 94 學年度第 2 學期取得碩士學位之論文。

論文題目： LED投影機色彩特性量測與修正暗階三刺激值  
指導教授： 黃忠偉

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文〔含摘要〕，非專屬、無償授權本校圖書館及國家圖書館，不限地域、時間與次數，以紙本、微縮、光碟或其他數位化方式將上列論文重製典藏，並提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索書目、館內閱覽、或複印。

授權人 李明燐 黃忠偉

簽章

(請親筆正楷簽名)

李明燐

黃忠偉

備註：

1. 授權人不因本授權而喪失上述著作之著作權。
2. 本授權書請授權人簽章後，裝釘於紙本論文內。

中 華 民 國 95 年 6 月 27 日