

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 ☒ 成果報告
☐ 期中進度報告

題目：具高畫質、低功率與人因優化之 LCD 面板及光源系統研究計畫

類別：☐ 個別型計畫 ☒ 整合型計畫

計畫編號：NSC 96—2628—E—009—020—MY3

執行期間：96 年 08 月 01 日至 99 年 07 月 31 日

計畫主持人：謝漢萍 教授

共同主持人：黃乙白 副教授、田仲豪 副教授

計畫參與人員：陳均合、林芳正、鄭裕國、廖凌堯、王國振、魏景明、蔡期竹、黃怡菁、謝毅翰、林姚順、易宛徵、陳勝昌、陸彥行、洪健翔、董雨隴、鍾積賢

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：☐ 精簡報告 ☒ 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- ☐ 赴國外出差或研習心得報告一份
- ☐ 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- ☐ 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- ☐ 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

☐ 涉及專利或其他智慧財產權，☐ 一年 ☐ 二年後可公開查詢

執行單位：國立交通大學 顯示科技研究所

國立交通大學 光電工程研究所

中 華 民 國 99 年 09 月 30 日

摘要

子計畫一：高動態畫質面板之視覺效應模型建構

為驗證高亮度動態範圍液晶顯示器的影像品質，本計畫使用影像色貌模型(iCAM)，以及其延伸的 iCAM06 做為研究及評估，並且將之套用於以白色發光二極體以及紅、綠、藍三原色發光二極體為光源的區域可控式背光模組完成驗證。在傳統高動態範圍技術的液晶補償法中，因只考慮亮度，無法準確呈現目標影像的色彩，因此調整後的 HDR 影像會產生色偏現象。在此階段，本計畫完成液晶訊號優化演算法，考慮背光的漏光項以及規一化的背光強度，以準確預測 HDR-LCD 的色彩表現。如此一來不僅可將傳統液晶顯示器的漏光項列入考慮，也同時以 dimming 背光強度做為修正項。更進一步，提供一個單一數值用以評估由色序型顯示器所造成的色分離現象的標準-相關對比敏感度。色分離邊緣效應被認為與 RCS 高度相關，而相關對比敏感度則是經由座標域相對認知方程式過濾後的對比色信號積分而成的差值所構成。在此，以心理測量學的實驗下用以檢驗所提出的數值依據，並得到目前實驗上以人眼主觀判斷以及計算出來的最高相關係數可高達 98.9%。其應用的可信度則由四種抑制色分離現象的演算法做為驗證，為色序型顯示器提供一客觀性的評斷指標。

關鍵字：影像色貌模型、高動態範圍液晶顯示器、區域可控式背光、液晶補償、色序型顯示器、色分離、相對認知方程式

Abstract

In high-dynamic-range liquid crystal display (HDR LCD) we use the image color appearance model (iCAM) and the next generation of iCAM, called iCAM06, for research and evaluation. We also use the white and the RGB LED as the back light source to verify the prototype model and to examine by some psychophysical experiments to deduce the evaluation index and to optimize the model for system applicability.

The traditional liquid crystal compensation method only considers brightness, combine adjustment liquid crystal signal to maintain the same picture brightness, but the correlation between brightness and color performance of human eye's sensitivity is not linear. Therefore, the reproduced image cannot represent accurate color information and cause color distortion. The project here is to complete the liquid crystal signal optimization calculating method. We take the leakage of the back light into consideration as well as a gauge back light intensity, achieving perfect forecast HDR LCD the color performance. HDR-LCD color model, not only the consideration tradition liquid-crystal

display's leakage of light item, but considered that the dimming back light intensity takes the correction term, therefore may predict the accurate color information to HDR-LCD.

A single-valued index, relative contrast sensitivity (RCS), was developed to quantitatively evaluate color break-up (CBU) phenomenon. The sensibility of CBU fringes was hypothesized to strongly correlate with RCS, which was defined as the integrated difference of the opponent-color signals filtered by spatial contrast sensitivity functions. Psychometric experiments were conducted to examine the proposed numerical metric. The results showed that the maximal correlation coefficient was as high as 98.9% between the subjective judgments and the computed numerical values of current experimental results. A useful application of RCS index was demonstrated by the evaluation of four driving schemes for CBU suppression.

Keywords: *image color appearance model, high-dynamic-range liquid crystal display, area-adaptive backlight, liquid crystal compensation, field sequential-color (FSC), color break-up (CBU), contrast sensitivity function*

子計畫二: LCD 面板與光源之整合式驅動架構研發

有了評斷高動態對比及色分離的指標，本計畫第一年度同時完成背光訊號灰階控制及調整。在取得背光訊號後以 Inverse of Mapping Function 的方法再將背光訊號做調整，以獲取更合適的背光灰階值。其次，依據背光訊號的變化補償出相對應的液晶補償訊號可維持影像亮度並使影像細節清楚呈現。另外，由於液晶補償採用的捲積法(Convolution)計算量龐大，在硬體實現上為一大困難，本計畫提出另一種用於模擬背光分布的方法- 模糊遮罩法(Blur Mask Approach)，其演算法可以簡化運算的複雜度，並可提供優於捲積法的影像表現。

然而，灰階控制的背光調變對於畫面偏於某個色彩(例如純紅、綠、藍等畫面)的畫面來說，其節省的能源相當有限，若能夠分別調控紅、綠、藍 LED 亮度，則能夠更加節省消耗功率。本計畫第二年度完成彩色背光調變的演算法 Delta-Color-Adjustment 法以及 Segment-Color-Control 法。依照影像資訊可分別控制紅、綠、藍三色的背光訊號以得到彩色的背光訊號。其次，依據背光訊號的變化可補償出相對應的液晶補償訊號。彩色背光調變不僅可維持影像亮度並可使色彩飽和度提升，最重要的是能夠大幅降低功率消耗。

最後，本計畫第三年度結合了高亮度動態範圍(High Dynamic Range, HDR)與場色序型(Stencil-FSC)顯示技術，有效抑制色序型液晶顯示器的色分離現象。為達到低耗能的液晶顯示技術，在考慮色分離現象的抑制及硬體運算的複雜度，最佳化的 Stencil-FSC 硬體參數被實現於

32吋色序型液晶顯示器上。利用這樣的技術，畫面的影像對比度不僅比傳統冷陰極燈管式的液晶顯示器提高10倍以上，而且平均功率消耗也大幅降低至40瓦以下，約僅有現行液晶顯示器的35%能量消耗。

關鍵字：高動態液晶顯示器、區域可控式背光、彩色背光調變、液晶補償、模糊遮罩法、捲積法、場色序型、色分離

Abstract

A high dynamic range liquid crystal display (HDR-LCD) can enhance the image contrast ratio using a locally controlled dynamic backlight. The controlled and adjusted methods of backlight signals have been finished in the first year. After dividing the backlight into the appropriate regions, the gray level of each backlight region is determined by its corresponding image area. Then we use the Inverse of Mapping Function (IMF) method to get the appropriate gray level of backlight signals. According to the corresponding backlight signals, we get the LC compensation signals for keeping the brightness and the details of image. Besides, because of the complex calculation of convolution method, we propose another method, which is the Blur Mask Method to simulate the backlight distribution. The algorithm can simplify the computation and provide the better image than the convolution method.

However, the power reduction of intensity controlled backlight for some pure color images like red, green, or blue image was limited. Therefore, we proposed the Delta-Color-Adjustment (DCA) method and Segment-Color-Control (SCC) method to appropriately adjust the backlight intensity of three primary-color LEDs independently. The determination algorithm of the three primary-color backlight signals has been completed in the second year. The red, green, and blue backlight signals can be controlled independently according to the image. Therefore, a color backlight signal can be determined. According to the corresponding backlight signals, the LC signals were compensated to maintain the brightness and image details. Consequently, the color-controlled backlight can not only maintain the image brightness, but also enlarge the NTSC gamut. The most important thing is the power consumption can be further reduced.

In the third year, by combining the High Dynamic Range (HDR) and Stencil-FSC display technology, it can suppress color breakup efficiently in field sequential color LCD (FSC-LCD). Considering color breakup suppressing and hardware computing complexity, the optimal parameter of Stencil-FSC was applied in the 32" FSC-LCD. By using this technology, the image contrast can be

increased time times than conventional CCFL display, and the average power consumption can be decreased lower than 40W, which is about the 35% power consumption of current LCD.

Keywords: *high dynamic range liquid crystal display, area-adaptive backlight, color-controlled backlight, liquid crystal compensation,, blur-mask method, convolution method, Stencil-FSC, color breakup*

子計畫三: 全彩色序式 LED 光源顯示系統開發

發光二極體具有高亮度、高色彩飽和度、直流驅動、快速反應時間等特點，隨著發光效率不斷提升，液晶顯示器之背光模組，逐漸從單純提供高亮度及均勻度之白光光源，發展成一主動式全彩高反應速度之低解析度顯示器，亦可視為二次面板。發光二極體背光模組之光場擴展函數，搭配高空間解析度之液晶訊號，可有效提升整體液晶顯示器之系統效率與影像品質。本計畫目標為次世代全彩式雙顯示面板技術提供一套結合色彩序列、掃描式驅動與高亮度動態範圍之背光二次面板。我們將建立一套演算法與光學設計流程，可套用至各種尺寸之面板與不同解析度之背光源，定義出最適合的光場分布，最後利用優化過之光學元件來實現。

關鍵詞：發光二極體、背光模組、全彩式雙顯示面板

Abstract

Due to the rapid progress in luminous efficiency of light emitting diodes (LEDs), the backlight module of the liquid crystal display (LCD) was highly penetrated by using LEDs associated with unique advantages of high brightness, high color gamut, DC driving and fast response. In this project, combining side emitting LEDs with micro-structured light features, we developed an LED backlight module, secondary smart panel, which enables a localized independently light distribution. The backlit is able to simplify the kernel of convolution during the image processing. With field-sequential-color driving and high dynamic range rendering, we optimized the optical configuration to commit the optical fields subject to different panel sizes.

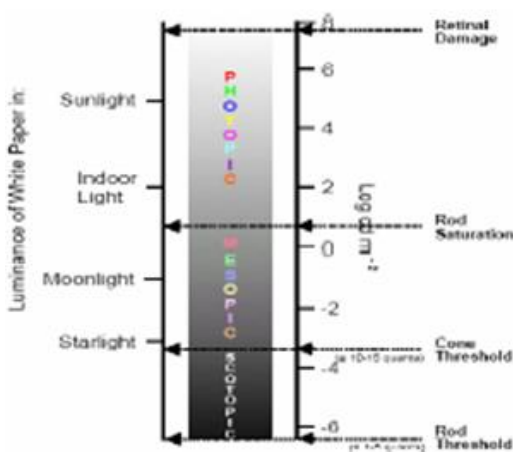
Keywords : *Light emitting diodes 、backlight module 、full-color dual panel system*

一.前言及研究目的

子計畫一：

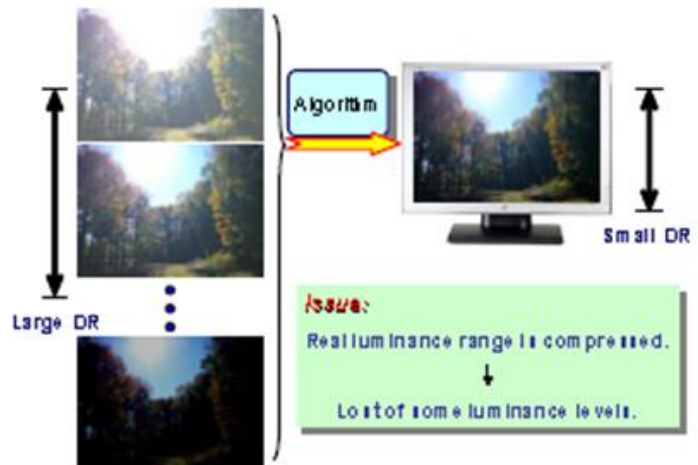
過去在表現高亮度動態範圍(high dynamic range, HDR)之影像時，均透過數位影像處理(digital image process, DIP)技術，讓亮度範圍涵蓋至四個數量級或以上的影像，得以在兩個或三個數量級的顯示裝置上，呈現出近似於人類視覺系統所感知的亮度變化。(圖一、圖二)

本計畫的主要目標在於建立適合高亮度對比的視覺模型，建立評估具該特性的高對比顯示器之指標，並進行該類型顯示器之最佳化設計極發展所需之影響處理技術以期達成整體研發的能力。



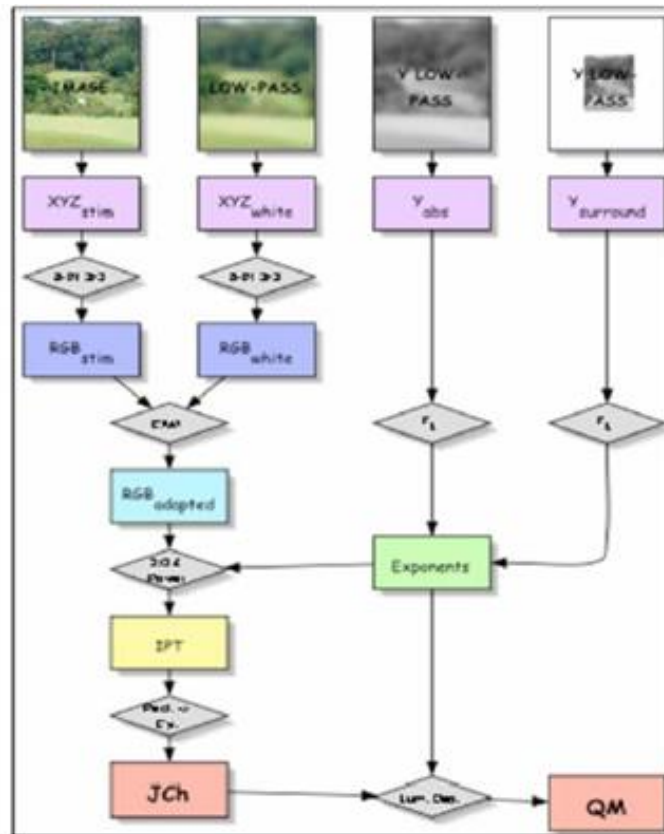
Hood and Finkelstein [1986]

圖一、人眼視覺範圍



圖二、數位影像處理(壓縮)後的真實景觀

視覺效果決定顯示畫面的最終評價，無論顯是媒體式顯示器、印刷或是相片皆可適用，固發展描述視覺效果之模型具有根本而實用之意義。視覺科學(vision science)本身兼具多門領域及多深度層次的綜合性科學。以人類視覺系統而言，可從解剖學分析結構性的構造、由生理學解釋視覺響應的運作、由心理學或心理物理學對視覺進行感受性認知的理解，也可從工程的角度類比生物的光接受器。然而，真正的視覺效應則是涵蓋上述以及更多機制而形成的結果。在此，我們尋求一個視覺模型以描述產生視覺、預期視覺效果。在色彩視覺科學及工程應用上，最初為色貌模型(CAM)的發展，而近年來的研究則發現，影像內容代表著光刺激的空間域信號，影像的更新則對應到光刺激對時間域的信號，為此我們發展出更為完整的影像色貌模型(iCAM)。此模型以不同的低通濾波器(low-pass filter)分別描述人眼觀察影像及受環境影響的響應，紀錄對亮度變化的感知並轉換到固定色名(constant hue)的 IPT 表色空間進行運算，最後再利用先前所得的亮度數值得到處理後的影像輸出。(圖三)iCAM 雖具備較完善的考量，但仍尚未臻完美，有許多因素尚未列入考量，例如：時間域的影響、視覺資料不足、無法真正涵蓋全亮度範圍的變化、運算量大而耗時等問題，都是本研究所需改善之處。



圖三、處理複雜空間光刺激(spatially-complex stimuli)的 iCAM 流程圖

在上述第一階段具一定程度結果後，將以修訂後之 iCAM 做為模型基礎，搭配其他子計畫所建構之 HDR 系統，做為一個理想的模型驗證平台。由於預期該平台將具有極大亮度範圍，得以滿足視覺資料的收集，故在第二階段的研究將著重於設計並執行心理物理實驗，並藉由實驗結果進行模型的修正與改善。

經過第一、二階段的發展及修正後，進入系統性整合的階段，即 HDR 影像品質相關的研究：適用於 HDR 系統的影像處理。此階段的研究將以發展適用之演算法，以硬體語言載入對應之可程式化邏輯閘陣列等可程式化硬體，以進行演算、模擬，及可依序影像內容及視覺效應的考量使系統呈現最佳化的視覺表現。同時，配合其他子計畫知色彩型色彩呈現原理，由進行 iCAM 在時間域視覺效應的研究，西記得以進一步完成整合高對比暨色序型液晶顯示器的目標。

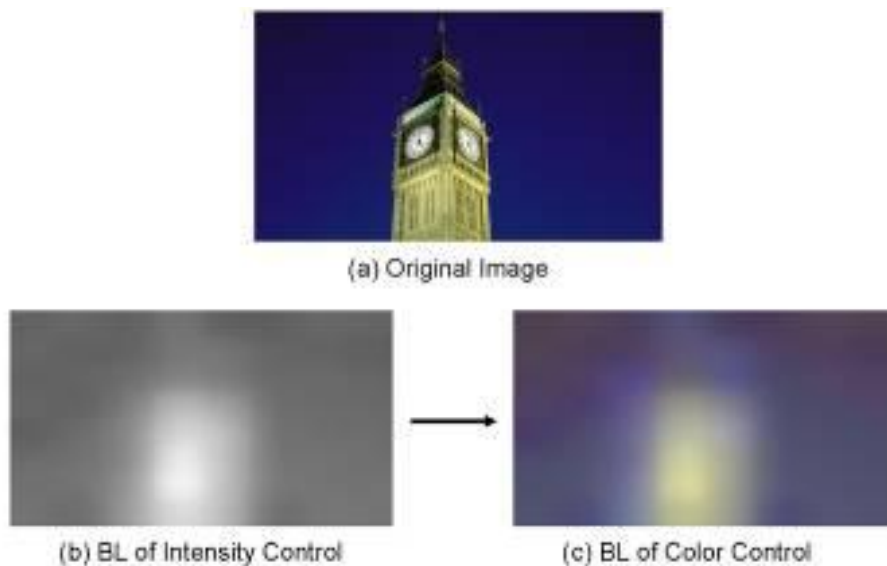
子計畫二:

高動態範圍液晶顯示器(HDR-LCD) 概念的提出一種具有雙調變器的顯示器(dual-panel display)，除了傳統的高解析度液晶顯示面板外，另一個可分區調變的背光技術可將背光模組視為一個用來調整顯示器對比度的低解析度顯示器；而原本液晶面板之高解析度的特性則可用來維持畫面細節，透過此種雙面板調變的方式可以有效地提高顯示器的影像品質及降低功率消耗。

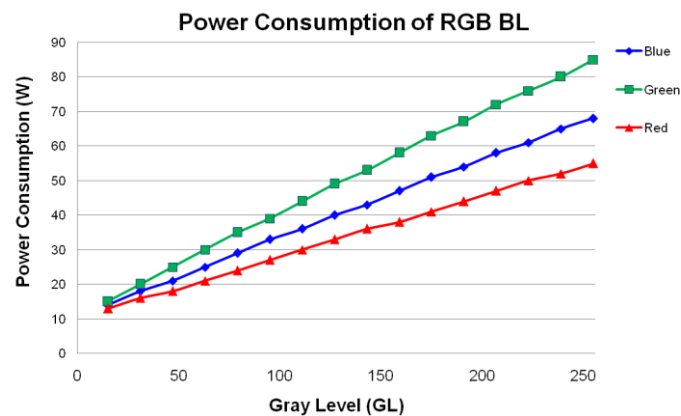
隨著顯示技術的日益提升，顯示品質正逐漸被消費者關注著。本計畫第一年目標乃為建立一高動態對比影像之顯示器，預期使高對比影像達 20,000:1 的對比度。在考量量產的可能性下，將 37 吋 HDR-LCD TV (High Dynamic Range Liquid Crystal Display Television)背光分成 8×8 個區域，各區由 3×6 個發光二極體(LED)組成，分區調變背光使達高動態對比影像，並進一步降低電源消耗功率，以達環保節能的目的。

為了使顯示器功率消耗能夠進一步降低，本計畫第二年提出可分別調控紅、綠、藍三色 LED 背光訊號的演算法，如圖四所示。除進一步降低消耗功率外，更同時保有灰階調變時高對比度的好處。為了評估彩色背光調變所能節省之功率消耗，我們量測 RGB 三色 LED 在不同灰階值下的功率消耗(如圖五)，初步估計能更進一步節省 20~40% 背光全亮狀態下的功率消耗。

本計畫第三年度提出結合高亮度動態範圍與場色序型顯示技術來有效抑制色序型液晶顯示器的色分離現象。考慮色分離現象的抑制及硬體運算的複雜度，最佳化的 Stencil-FSC 硬體參數被實現於 32 吋色序型液晶顯示器上。利用這樣的技術，畫面的影像對比度不僅比傳統冷陰極燈管式的液晶顯示器提高 10 倍以上，而且平均功率消耗也大幅降低至 40 瓦以下，約僅有現行液晶顯示器的 35% 能量消耗。



圖四、原圖(a)分別採用灰階背光調變(b)以及彩色背光調變(c)



圖五、三原色不同背光灰階值所對應的電功率(傳統全點亮的背光功率：190W)。單位：Watt

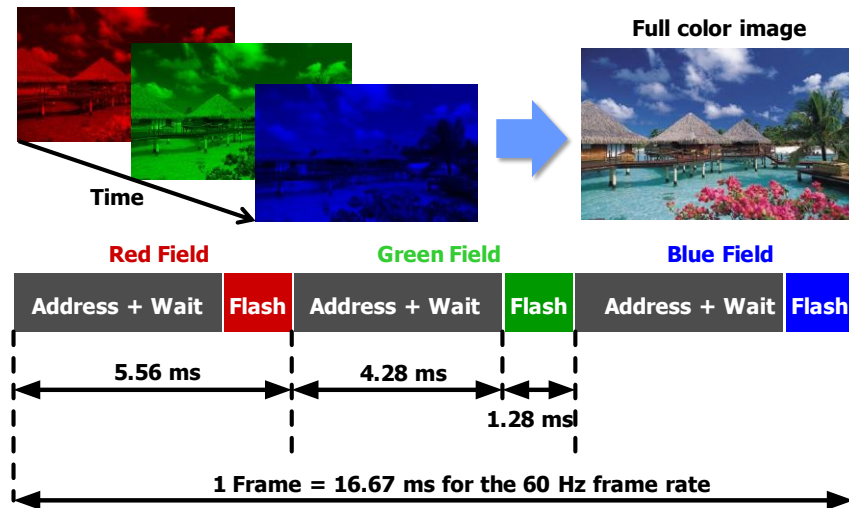
子計畫三:

本計畫為整合性計畫:具高畫質、低功率與人因優化之 LCD 面板及光源系統研究之分項子計畫:全彩色序式 LED 光源顯示系統開發。而計畫的主要目標,在利用發光二極體具有局部光場、快速驅動及高色彩飽和度等特點,建立一全彩序列式驅動之低解析度背光面板,以下先就本計畫的主要重心加以說明。

傳統的液晶顯示器背光模組(Backlight Module, BLM),以提供高亮度及均勻度之白光色溫為其主要設計訴求。發光二極體具有高亮度、高色彩飽和度、直流驅動、快速反應時間等特點,隨著發光效率(Luminous efficiency lm/W)不斷提升,以 LED 做光源之背光模組的技術,已有大量的研究資料以及開發技術在各國際期刊當中發表出來。LED 背光模組除了上述的各項特點外,更由於它具有點光源的性質,可以任意的排列擺放,各色分離,因此在應用面上比起傳統冷陰極管(Cold Cathode Fluorescent Lamp)更為廣泛。其中又以下列幾項技術最廣為受人矚目:

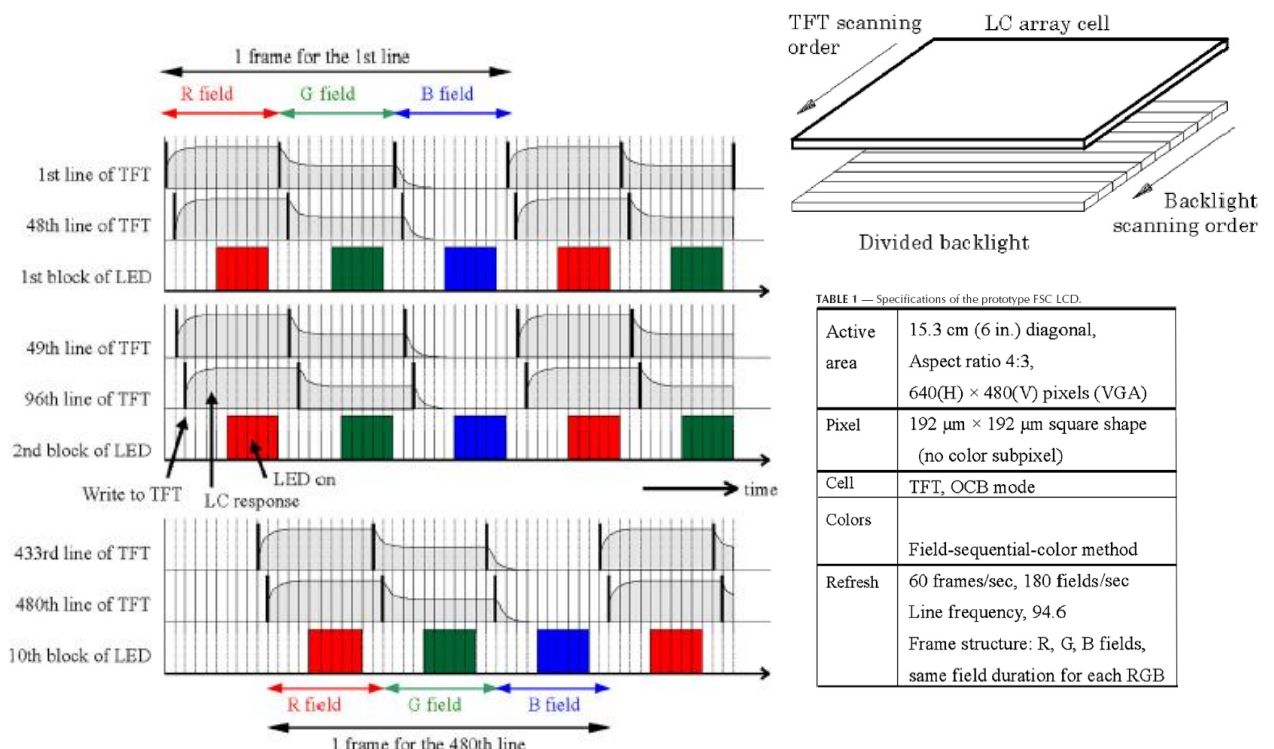
A. 色彩序列液晶顯示器(Field-Sequential-Color Liquid Crystal Display, FSC-LCD)背光模組:

FSC-LCD 乃是利用具有很短的響應時間之液晶材料,結合能快速開關並序列切換顏色之 LED 背光模組,在一個畫面時間(Frame Time)之內依序切換紅、綠、藍三色光源,並控制相對應的 TFT 與液晶訊號,經過人眼對於三色光之視覺暫留現象形成全彩影像。此種技術能免除在液晶顯示器的成本中佔有很大比例的色彩濾波器(Color Filter, CF),進而提高光源的使用效率以及影像品質。



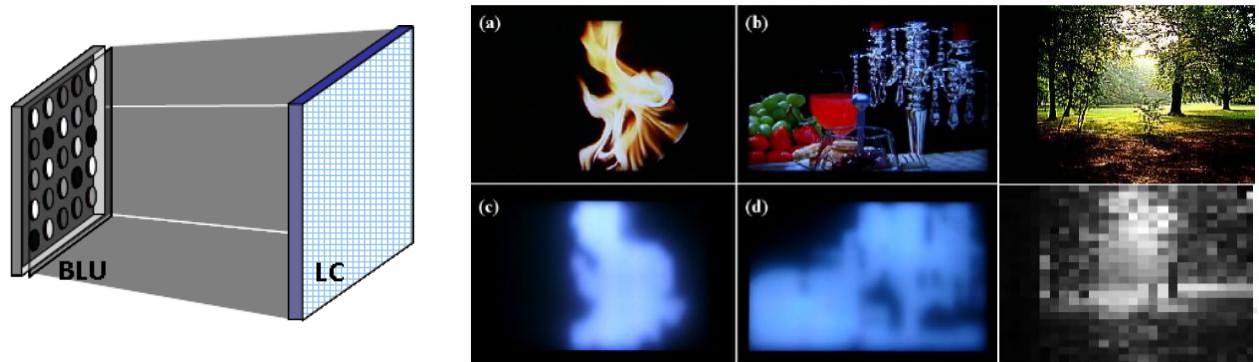
圖六、場色序法(Field-Sequential-Color, FSC)原理，以 60Hz 驅動頻率為例。

B. 掃描式背光模組(Scanning BLM): 根據液晶驅動訊號的寫入方向，將背光源做一維或二維空間的掃描驅動，除了能有效的減輕液晶顯示器在動態播放時，由於液晶反應時間不足而形成的殘影(Motion Blur)問題，提高動態影像品質，若結合 FSC-LCD 的技術，亦能減輕在動態影像中產生的色分離(Color Breakup, CBU)現象，同時減少背光模組的功率消耗：



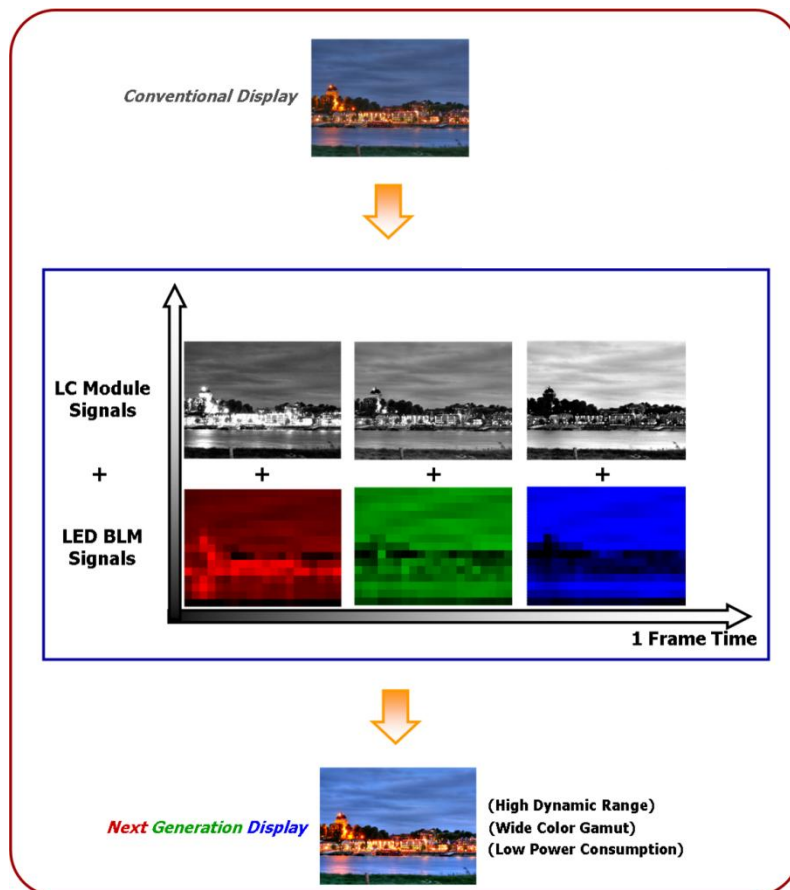
圖七、以 60Hz RGB sequential, 640(H)×480(V) VGA 規格為例，背光模組分為十區，每區(48 lines)沿 y 方向做序列式掃描，每個 subframe time ($16.6\text{ms}/3 = 5.56\text{ms}$) 分別包含 TFT, LC 與 LED 的驅動時間，可適度解決液晶反應速度不足問題。

C.高亮度動態範圍顯示器(High Dynamic Range Display, HDRD)背光模組：過去在呈現高亮度動態範圍影像時，一般均透過種種數位影像處理(Digital Image Processing)技術，令亮度(brightness)範圍涵蓋四個或更高數量級的影像或照片，得以在僅兩個數量級(筆記型電腦螢幕等)或三個數量級(液晶螢幕等)的顯示裝置上，呈現出近似於人類視覺系統所感知的亮度變化。近年來配合 LED 背光模組，藉由 LED 具 RGB 灰階且能獨立控制光場擴展函數(light spreading function)的特性，可由系統硬體提供 HDR 的實際光亮度，如下圖所示：



圖八、以 LED 光源為基礎之低空間解析度全彩二次面板，搭配後級高解析度的液晶面板，完成具影像對比及高色彩重現之高亮度動態範圍顯示器建立。

由上述的三種 LED 背光模組技術可以發現兩個特點：一是分區控制，從提供 Full-on 的均勻光場，到掃描式的一維分區，最後進入高亮度動態範圍顯示器(HDR)的二維獨立分區光場，背光模組已經不僅是扮演一單純提供光源的角色，轉而演變根據液晶控制訊號提供一低空間解析度的光場分布，能有效減少功率消耗與提昇顯示器的對比度，亦可視為一種智慧型面板(smart panel)技術；二是配合驅動時間從灰階光源到全彩色序式光源，讓背光源不單純提供光源的強度亦能對於色彩的表現上面有所改進。此外，也可有效的提升光源使用效率，進而達到節省成本與省能的效果。綜觀以上所述，本子計畫目標在為次世代全彩式雙顯示面板技術提供一套結合上述三種 LED 背光模組特點之全彩序列式驅動之低解析度背光面板，如圖九所示。我們將建立一套設計的流程，可套用至各種尺寸大小之面板與不同解析度之背光源，找到且定義出最適合的光場分布，最後利用優化過的特殊光學元件來實現。

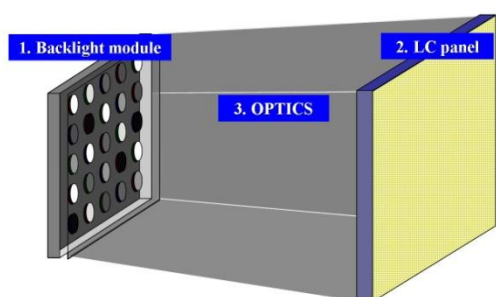


圖九、與子計畫一之人因工程及子計畫二之驅動介面之整合，開發出最適合人眼觀賞與接近自然的高畫質影像，做到真正具有高影像對比、高色彩重現、低功率消耗以及動態影像表現優良的次世代顯示器

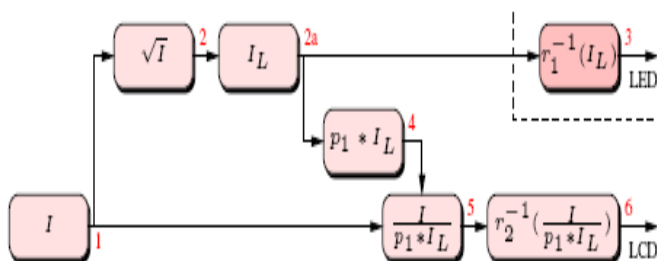
二.文獻探討

圖十的 Backlight module 即為 LED 背光源陣列，此背光源陣列可依照畫面資訊作局部的背光調變，由於背光源陣列本身為一低解析度顯示器，其所產生之光強度分布尚需搭配液晶面板之高解析度訊號，才可展現細緻而具有高對比度的影像。

BrightSide 公司所提出之完整演算流程如圖十一所示，一開始由一輸入影像(步驟 1)，進行影像增強動作(步驟 2)，根據背光決定演算法決定出背光訊號(步驟 2a)並將之送至 LED 驅動(步驟 3)，把背光訊號 I_L 與光分布函數 p_1 進行捲積運算模擬光分布情形(步驟 4)，以此做為液晶補償依據算出液晶補償訊號(步驟 5)，在將之送至 LCD(步驟 6)。透過此完整的演算過程，我們可由一原輸入影像推得相對應之背光訊號及液晶補償訊號。

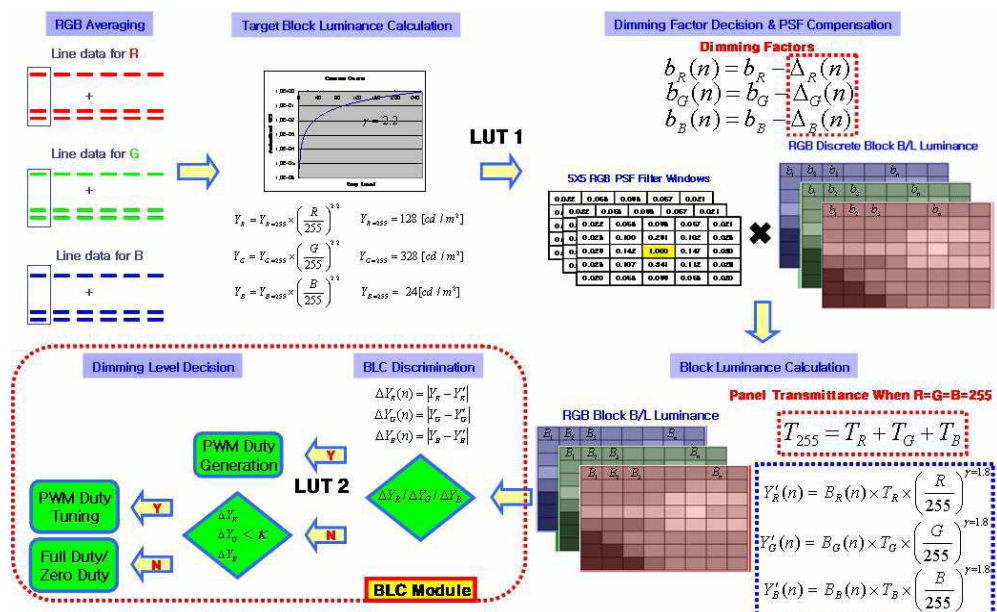


圖十、LED 背光 HDR-LCD 系統



圖十一、BrightSide 公司所提出之演算流程

圖十二為 Samsung 公司所提出彩色背光調變的演算法流程圖。首先，計算出每一區背光所需要的目標亮度，第二，計算每一區背光紅、綠、藍三色背光的理想亮度與目標亮度之差稱為調變因子(dimming factor) $\Delta_R(n)$ 、 $\Delta_G(n)$ 與 $\Delta_B(n)$ 。第三，根據光分佈函數對於每一區的背光亮度做補償並計算補償完之背光亮度與目標背光亮度之差 $\Delta Y_R(n)$ 、 $\Delta Y_G(n)$ 及 $\Delta Y_B(n)$ 。若 $\Delta Y_R(n)$ 、 $\Delta Y_G(n)$ 、 $\Delta Y_B(n)$ 滿足一個標準值，則背光的調變則由第二步的調變因子所決定，若不滿足則必須另作補償。此演算法能夠得到一彩色的背光訊號，依照此演算法所得之影像能維持影像品質並且降低顯示器功率消耗。然而，此演算法較為複雜。實際應用於硬體上會是一困難之處。



圖十二、Samsung 公司所提出彩色背光調變之演算法流程圖

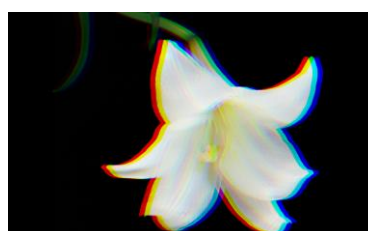
色序型液晶顯示器為一種不需彩色濾光片(Color Filter)的高光效率液晶顯示器。不同於傳統利用彩色濾光片的空間色彩混合，色序型液晶顯示器利用時序且快速地顯示紅、綠、藍三種色場。透過時間混色的方法(視覺暫留)，人眼可以看到全彩的影像。由於移除了彩色濾光片，色序型液晶顯示器有著更高的光效率、廣色域、低材料成本及三倍可能的螢幕解析度等特點。

然而，色序型液晶顯示器有著潛在的色分離現象，導致影像品質大幅降低(如圖十三)。其主要發生於顯示的目標畫面與眼睛有相對速度(如眼球的跳視及平滑追跡等運動)，三原色場的資訊無法完全重疊在視網膜的同一位置，致使物體邊緣的組成色錯開，色分離現象隨之而生。此現象常使得觀察者感到不舒服，甚至有暈眩的情形。

早期為了解決在數位光學處理技術 (digital light processing, DLP) 投影機上的色分離現象，直接且有效的辦法是加入多個單色場或增加場速率至 540Hz 以上。因此，色序型液晶顯示器的傳統解決方法亦加入單色場或直接增加色場速率來抑制。然而，即使 LED 背光可以非常快速的開關，但是液晶的反應時間卻阻礙了上述方法在大尺寸色序型液晶顯示器的使用。



(a) Lily



(b) 色分離影像

圖十三、(a) 目標影像 Lily, (b) 色序型顯示器上的色分離影像。

三. 研究方法

子計畫一:

本計畫分為三個階段，首先從新提出的影像色貌模型(iCAM06)著手，完成基本運算架構並提出評估之標準；其次為色彩模型優化並驗證；最後則進入系統性整合：考慮到色序型顯示器的色分離現象，配合其他子計畫之色彩型色彩呈現原理，以整合高對比暨色序型液晶顯示器的目標。

A. iCAM 色貌模型

此階段的研究分為幾個步驟：

1. 從現階段 iCAM06 著手，完成優、缺點分析，並依據本計畫所需之特性，進行應用分析及訂定所需之參數。
2. 依循 iCAM06 演算法則，進行初版程式編寫，完成模型基本運算架構。
3. 依據二階段法(two-stage approach)，完成 HDR LCD 的色彩特性化模型。
4. 依據先前對於 HDR LCD 之研究成果，配合建構完成之初版 iCAM06 程式，推演 HDR 系統可行之評估指標，做為該類顯示器評估之標準。

用於傳統均勻背光 LCD 的色彩特性化模型可以下列方程式表示：

$$\begin{aligned} R &= \text{LUT}(d_r) \\ G &= \text{LUT}(d_g) \\ B &= \text{LUT}(d_b) \\ 0 &\leq R, G, B \leq 1 \end{aligned} \quad (2)$$
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r,\max} - X_k & X_{g,\max} - X_k & X_{b,\max} - X_k \\ Y_{r,\max} - Y_k & Y_{g,\max} - Y_k & Y_{b,\max} - Y_k \\ Z_{r,\max} - Z_k & Z_{g,\max} - Z_k & Z_{b,\max} - Z_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

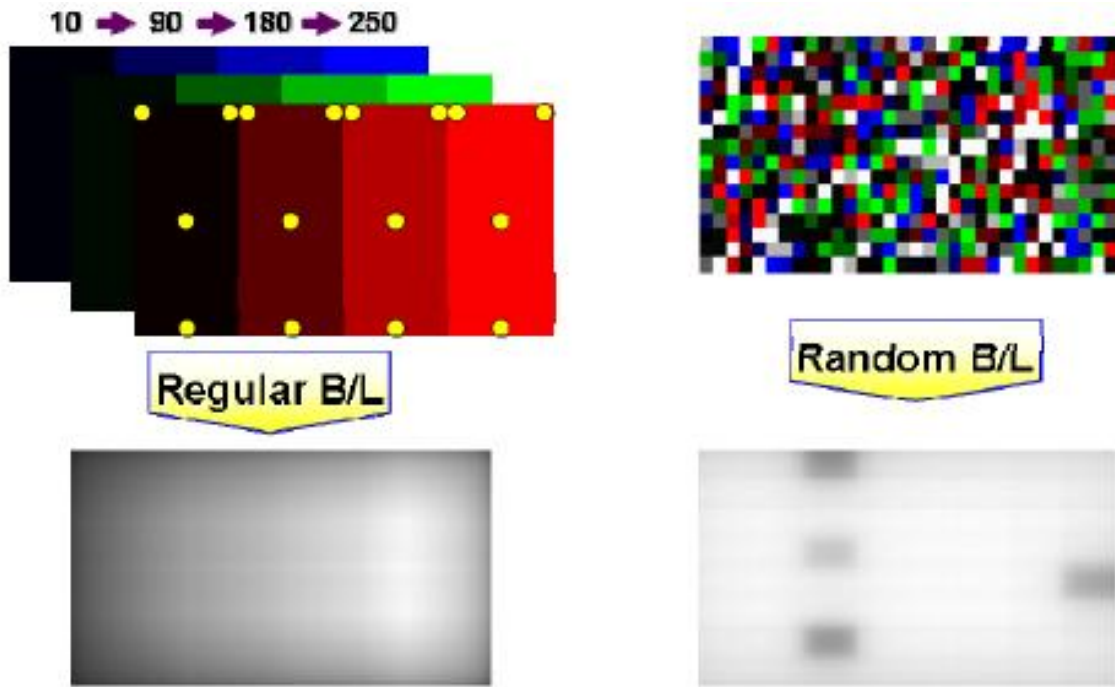
其中 R、G、B 為三個一維的對照表(look-up table, LUT)，用以描述 LCD 三個圓色的 OETF， d_r 、 d_g 、 d_b 為輸入數位信號； $X_{i,\max}$ 、 $Y_{i,\max}$ 、 $Z_{i,\max}$ 表示三刺激值在原則 i 的最大值，i 代表 r、g、b。 $[X_k \ Y_k \ Z_k]^T$ 代表著 LCD 在驅動信號為零時的三刺激值，稱為 flare。然而，在過去量測的經驗中，發現適用於純統均勻背光 LCD 的方程式(2)、(3)，並無法描述 HDR LCD 的一對多對應(one-to many mapping)結果，及同一組輸入信號，得到不同的三刺激值。經過深入研究，發現此一現象與入射至 LC 面板的背光強度有關，因此，我們提出了修訂方程式(2)、(3)的修訂方程式(4)、(5)做為白色發光二極體區域可控式背光的 HDR LCD 的色彩特性模型，如下：

$$\begin{aligned} R &= \text{LUT}(d_r') \\ G &= \text{LUT}(d_g') \\ B &= \text{LUT}(d_b') \\ 0 &\leq R, G, B \leq 1 \\ 0 &\leq L \leq 1 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r,max} - X_k & X_{g,max} - X_k & X_{b,max} - X_k \\ Y_{r,max} - Y_k & Y_{g,max} - Y_k & Y_{b,max} - Y_k \\ Z_{r,max} - Z_k & Z_{g,max} - Z_k & Z_{b,max} - Z_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} L + \begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix} L \quad (5)$$

其中 d_r' 、 d_g' 、 d_b' 為經過 HDR LCD 演算法處理過的二次信號， L 則為歸一化的背光強度。

實驗平台為 37" HDR LCD，面板解析度為 1080×1920，背光分區為 8×8 區，最大亮度 500cd/m²，對比度大於 10,000:1。以下面兩組影像-color-ramp 與 random-mosaic 做為測試信號(圖十四)，其中前者呈現規律背光強度變化，而後者呈現無序背光強度變化。



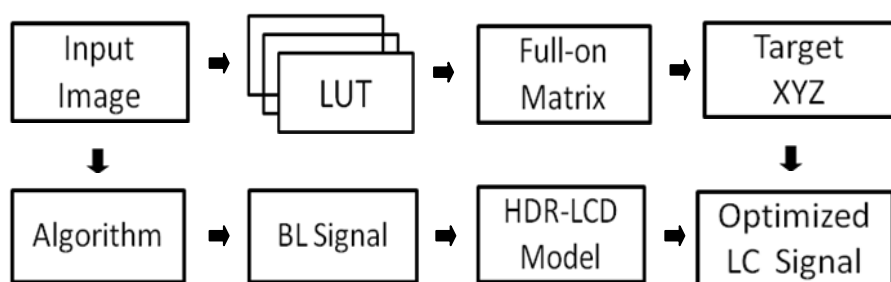
圖十四、測試影像，color-ramp(左) 與 random-mosaic(右)

B. 色彩模型優化流程/色彩模型優化結果分析

在背光訊號依照演算法決定之後，將背光訊號與光分佈函數(LSF)進行摺積以取得背光分佈情形，此光分佈函數是以單一區背光的 LSF 決定。在 HDR-LCD 特性化模型中，背光強度的準確性將大幅影響色彩模型之正確性，因此為了考慮真實的邊緣效應，我們實際紀錄 8×8 區 LSF 以疊加方式達到準確預測背光強度。

色彩優化流程

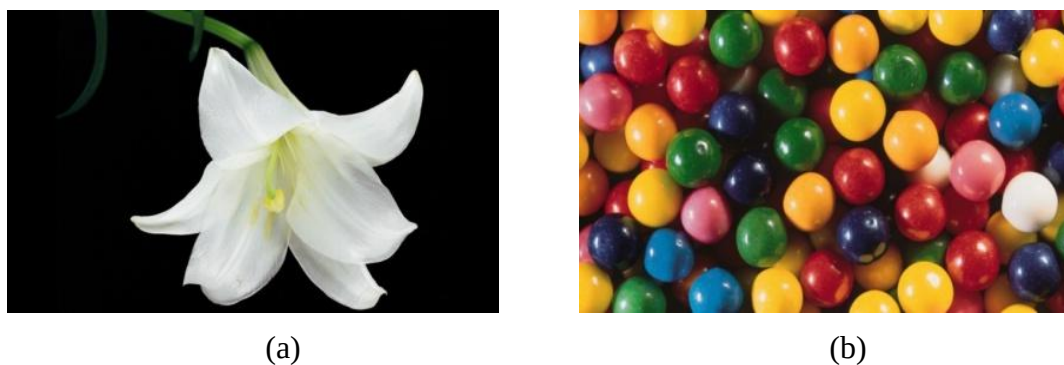
為了維持低耗電的優點，我們選擇調整液晶來達到準確的色彩，藉由原始的輸入影像訊號、傳統顯示器的色彩模型以及 mapping function 可得到目標三刺激值，另一方面，依照先前提出的 inverse of mapping function (IMF) method 決定背光訊號，同時考慮背光分佈以及目標三刺激值，使用 HDR-LCD 色彩模型模擬正確的液晶訊號，達到色彩色度重現，以維持相同色彩表現，如圖十五所示。



圖十五、色彩優化之流程圖

色彩模型優化結果分析

本年度提出的色彩優化方式選擇以 IMF 以及 DCA 決定背光訊號，搭配準確的背光強度預測和色彩模型，調整液晶訊號以達到色彩色度重現，為了驗證此種優化方式，我們分別對 Intensity 控制和彩色控制背光個別討論優化的結果，其中以高對比影像(Lily)以及色彩豐富影像(Color Ball)以驗證模型以及優化準確性。



圖十六、目標影像 (a) Lily (b) Color Ball

色彩模型驗證：

由於色彩的預測在彩色背光時最為複雜，因此我們用 IMF 和 DCA 決定彩色背光訊號，搭配傳統亮度補償法的液晶訊號，藉由色彩模型預測得到三刺激值；另一方面，使用 Charge Coupled Device (CCD) 量測實際三刺激值，下表為用 CIEDE2000 色差公式評斷兩者誤差，誤差最大值為 2.42，如表一所示。在傳統顯示器 CRT 的特性化模型中，若平均色差可小於 3，表示此色彩模型是可被人眼接受。因此建立的 HDR-LCD 色彩模型可以準確的預測色彩表現，對於後續的色彩優化將更準確。

【表一】色彩模型預測值與實際量測值之色差

Target Images	CIEDE2000
Lily	2.42
Color Ball	2.37

色彩優化表現：

Intensity control backlight (IMF method) :

我們使用 IMF method 決定背光訊號，搭配 8x8 區 LSF 疊加法預測背光強度，考慮亮度補償法以及色彩模型法之 HDR 影像，評估兩種 HDR 影像與目標影像之色差，模擬結果如下。

Lily

(a) 亮度補償法

(b) 色彩模型法

液晶
影像



HDR
影像



ΔE_{00}



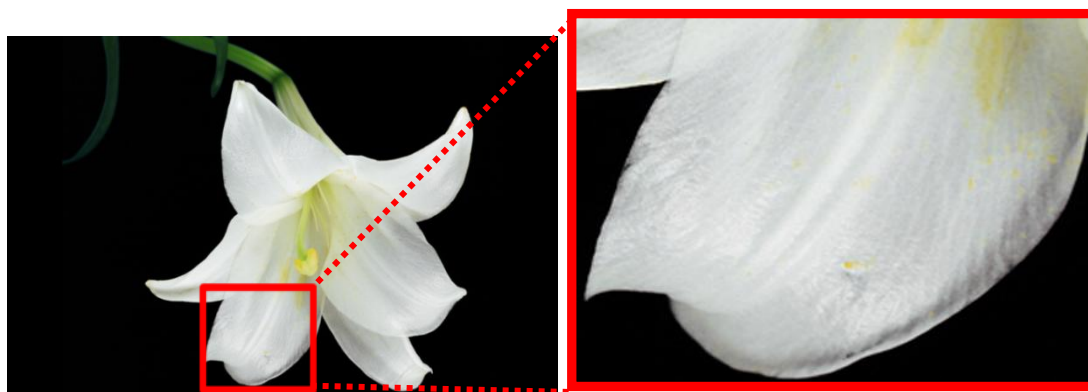
ΔE_{00} 4.6

ΔE_{00} 2.1

圖十七、評估亮度補償法(a)與色彩模型優化法(b)的色差，可見色彩模型優化過 HDR 影像的色彩準確性提高。

影像細節：

我們使用色彩模型來重現色度，除了可以減少色偏現象，另一方面也能維持影像細節，減少亮度補償法因過度補償是得細節消失的現象。由下圖可知，考慮色彩模型優化的影像更為接近目標影像的細節。



(a) 目標影像

(b) 目標影像之細節



(c) 亮度補償之影像細節



(d) 色彩模型優化之影像細節

圖十八、比較亮度補償法與色彩模型優化後的 HDR 影像，可發現色彩模型優化後的影像(d)較為接近目標影像(b)。

Color Ball

(a) 亮度補償法

(b) 色彩模型法

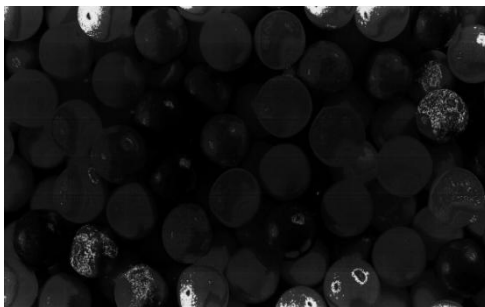
液晶
影像



HDR
影像



ΔE_{00}



$\Delta E_{00} \ 9.0$

$\Delta E_{00} \ 1.3$

圖十九、使用色彩模型優化法可以把色差值從 9.0 減少到 1.3，大幅提高色彩的準確性 85.6%

Color control backlight (IMF&DCA method) :

上述討論了 intensity control 的色彩誤差，因為其背光僅為分區 dimming 白光，因此對色彩的擾動影響不大。之後提出的彩色背光控制除了能夠廣色域且節省耗電量，卻也大幅提升顏色的複雜度，因此使用色彩模型優化影像顯得更為重要。

Lily

(a) 亮度補償法

(b) 色彩模型法

液晶
影像



HDR
影像



ΔE_{00}

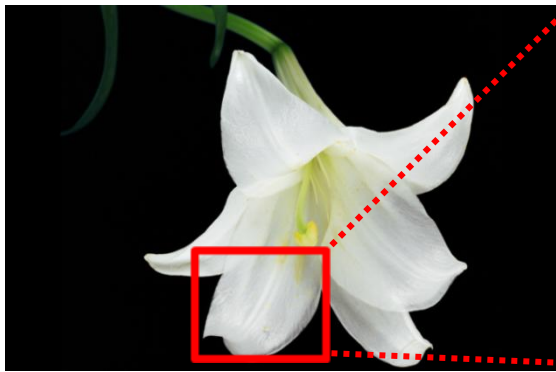


ΔE_{00} 17.3

ΔE_{00} 2.7

圖二十、以色彩模型優化之 HDR 影像，色差可以從 17.3 減少到 2.8，為人眼可接受範圍

影像細節：



(a) 目標影像



(b) 目標影像之細節



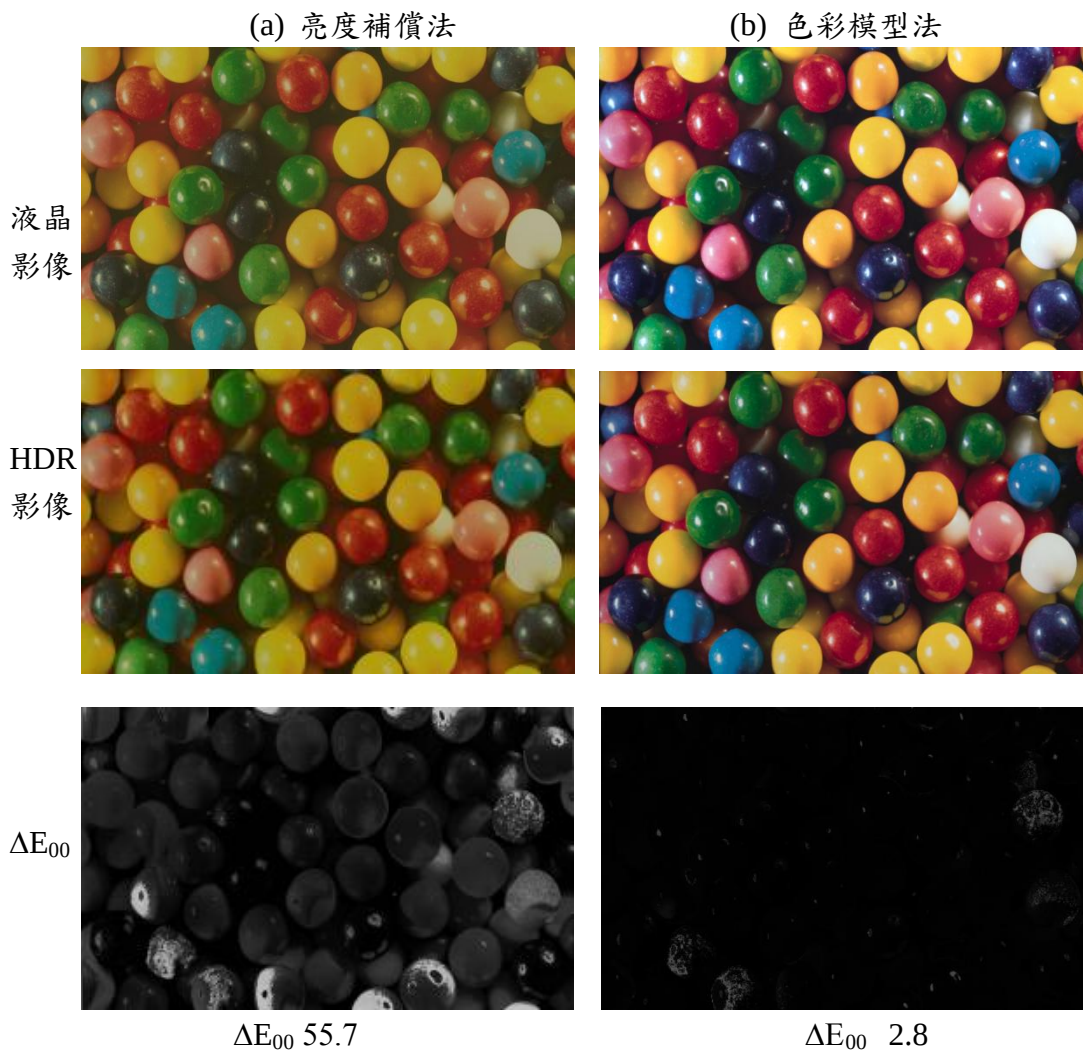
(c) 亮度補償之影像細節



(d) 色彩模型優化之影像細節

圖二十一、色彩模型優化後的 HDR 影像(d)能夠維持影像細節

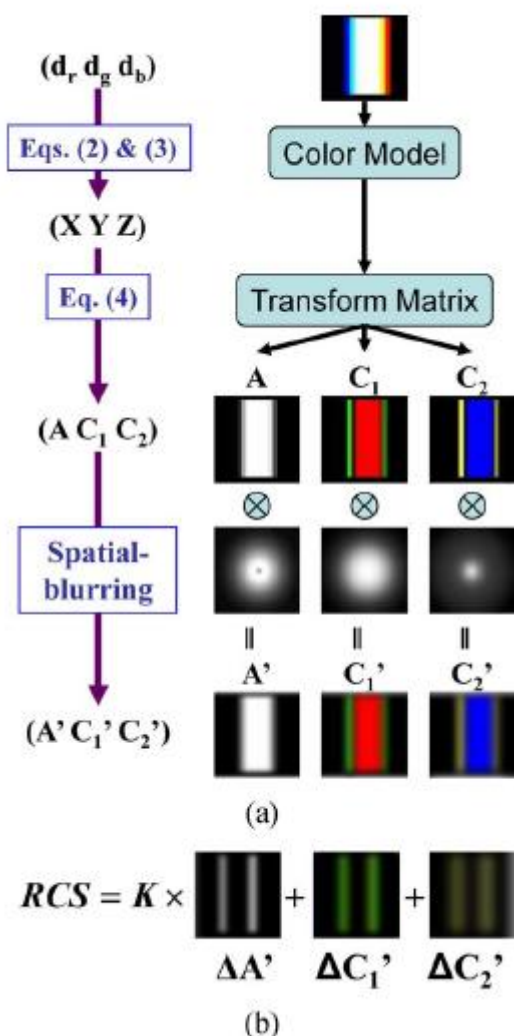
Color Ball



圖二十二、色彩模型優化的 HDR 影像(b)能夠重現目標影像之色彩，解決亮度補償法的色偏問題

C. 系統性整合

由於色分離現象被認為與神經信號高度相關，所以根據色彩可分離的模式理論，神經中樞的影像信號與路徑上對顏色模式的敏感度、刺激值的強度，以及路徑對空間域的敏感度有關。此階段的優化分為下列幾個步驟(流程圖見[圖二十三])：



圖二十三

1. **三刺激值轉換**：自從許多色分離的相關研究被提出後，LCD 對三刺激值的對應轉換是不可或缺的。先前所提出的相關研究所預測出的色彩準確度是可以被人眼所接受的。在三個由 R、G、B 所表示一維的對照表(LUT)中，可將 R、G、B 轉換至 X、Y、Z 三刺激值，並將漏光項列入考量(見(2)、(3)式)。

在色序型液晶顯示器中，由對應的彩色背光可分別測量出各原色的三刺激值，並得到漏光項的三刺激值。值得注意的是由於色序型顯示器符合使用三個子畫素(sub-pixel)的傳統液晶顯示器，這兩個轉換方程式可應用於由三個色場所構成的色序型顯示器，但若是當色序型液晶顯示器多於三個色場時，這個轉換的模型就必須再根據情形做優化。

2. **XYZ 轉換 AC1C2**：AC1C2 對比色認知信號是透過心理物理學的實驗所測得的一套色座標。計算上，AC1C2 與 XYZ 座標可透過線性轉換而得，其轉換式如下：

$$\begin{bmatrix} A \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.297 & 0.72 & -0.107 \\ -0.449 & 0.29 & -0.077 \\ 0.086 & -0.59 & 0.501 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (6)$$

3. **空間域濾波**：對於對比色座標的空間域濾波可以轉移到頻率域做運算。先將 A、C1、C2 信號利用傅立葉轉換至頻率域，再利用對應的對比感知方程式(CSFs)分別對對比信號做運算。在頻率域的計算方式在(7)、(8)式中表示：

$$csf_{lum}(f) = a \times f^c \times e^{-b \times f} \quad (7)$$

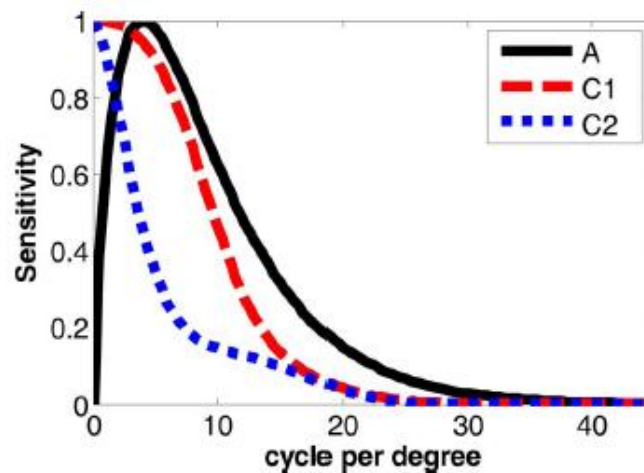
$$csf_{chrom}(f) = a_1 \times e^{-b_1 \times f^{c_1}} + a_2 \times e^{-b_2 \times f^{c_2}} \quad (8)$$

其中 csf_{lum} 和 csf_{chrom} 表示 CSFs 中的亮度項以及色度項， f 為頻率。其餘各項係數將於[表二]

列出，而歸一後的一維 CSF 將於[圖二十四]中描繪。在此濾波器中，對於亮度 A 為帶通 (band-pass) 濾波，而對於其餘兩個色度 C1、C2 則為低通濾波 (low-pass)。

[表二] (7)、(8)式中各項係數數值

Parameters	Values (Channel A)	Parameters	Values (Channel C ₁)	Values (Channel C ₂)
a	75	a1	109.1413	7.0328
b	0.2	b1	0.00038	0.000004
c	0.5	c1	3.4244	4.2582
		a2	93.5971	40.6910
		b2	0.00367	0.10391
		c2	2.1677	1.6487



圖二十四

4. RCS：色分離的邊緣是 RCS 計算的目標，如在白色條紋兩邊由分離的色場所形成的帶狀邊緣。經過濾波後的 A、C1、C2 信號是由扣掉對於這三個信號差值額外的加總所提出來的，如流程圖所示。而流程圖中最後一項的參數 K 是由心理物理實驗中所得。

在完成此加總之前，還有兩項因素必須列入考量。其一，由於 C1、C2 的正負號只表示顏色的不同，所以在加總的過程中必須加上絕對值。其次，再將 A、C1、C2 加總之前，須用一個參照人眼視覺系統的合適比例。

在此實驗中，我們使用 32 吋雙折射光學補償模式 (optically-compensated-birefringency mode, OCB) 的色序型顯示器 (FSC LCD) 做為測試平台，光源則使用紅、綠、藍三合一的發光二極體 (LEDs)，場率為 180Hz。受測者的部分則是由三位女性和八位男性，年齡範圍從 23 歲到 26 歲所組成。受測者皆有接受視力矯正，並在暗室接受測試。在測試影像部分則是在一全黑背景的正中心播放一寬度為 2 公分不同顏色的方形，視角約為 2 度，觀測距離為屏幕對角線長的五分之三。當影像水平移動時，在方形的邊緣便會出現視角約 0.1 度的色分離邊緣。

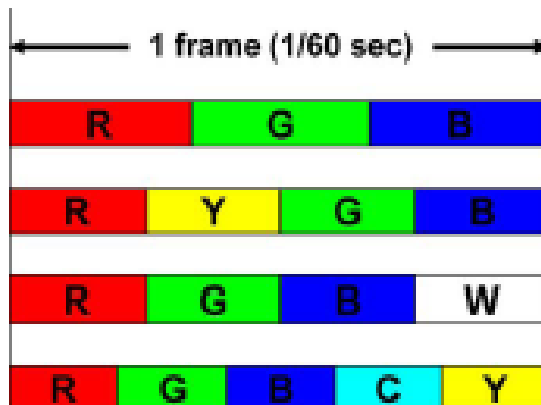
實驗一開始，在顯示器上顯示一白色區塊，在移動的過程中會出現彩色邊緣，而其寬度會隨著移動速度而改變。在此，移動速度由 200mm/s 到 800mm/s，以 100mm/s 為間隔共七組。另外，提供四組亮度給白色區塊做為測量，分別為 18、28、42、56 cd/m^2 。

在此提供一個數值-平均評價分數 (mean opinion score, MOS) 做為參考，將人眼對色分離程度的感知分為 1 到 5 分，由觀測者評分，其分數的考量依據參考 [表三]。

[表三] MOS 分數定義

Score	Evaluation result
1	Imperceptible
2	Perceptible, but not annoying
3	Slight annoying
4	Annoying
5	Vary annoying

RCS 在此將被應用於各種不同抑制色分離的方法，如 RGB、RYGB、RGBWmin 和 RGBCY 等如 [圖二十五] 所示。在這些顯示多於三個色場的方法下，色分離的影像會被分解為信號並輸入至測試平台中。在此我們挑選一些較為特別的顏色做為測試：白色 (255, 255, 255)、亞洲人的膚色 (213, 139, 112)、白人膚色 (205, 163, 144)、大紅色 (186, 70, 73) 和天藍色 (65, 75, 163)，如 [表四] 所示。這些比較皆是以物體移動速度為 800mm/s 做為基準，所模擬出來的色分離邊緣影像，以上述所提到的 MOS 決定方式來比較這些影像的品質優劣。



圖二十五、各種先前所提出的色分離抑制方法示意

[表四] 各種不同色分離抑制方法在移動速度 800mm/s 之下其 RCS 的比較

(C.C 為相關係數)

Driving Scheme	RGBWmin	RGBCY	RYGB	RGB	C.C.(%)
White (255, 255, 255)					
MOS	1	2.7	3.7	4.8	
RCS	0.215	0.408	0.807	1	97.2
CIEDE2000	0	45.859	58.662	68.587	96.8
Asia Skin (213, 139, 112)					
MOS	2.9	2.4	4.1	4.7	
RCS	0.299	0.312	0.840	1	97.7
CIEDE2000	23.67	27.277	33.594	38.417	91.0
Light Skin (205, 163, 144)					
MOS	3.1	2.2	3.7	4.8	
RCS	0.394	0.337	0.827	1	93.8
CIEDE2000	23.518	29.108	37.257	42.647	80.2
Strong Red (186, 70, 73)					
MOS	3.2	2.3	4.2	4.8	
RCS	0.254	0.255	0.849	1	94.0
CIEDE2000	16.276	24.648	26.392	27.329	46.2
Sky Blue (65, 75, 163)					
MOS	1.6	2.7	3.7	4.6	
RCS	0.271	0.475	0.887	1	98.1
CIEDE2000	5.6316	12.745	18.055	20.34	98.9

子計畫二:

本計畫第一年度提出背光訊號灰階控制及調整、液晶補償方法與模糊遮罩法來簡化運算的複雜度。第二年度提出兩種彩色背光演算法，Delta-Color-Adjustment (DCA)演算法以及 Segment-Color-Control (SCC)演算法。第三年提出 Stencil-FSC 方法以及背光分區最佳化來有效抑制色分離現象，以下將分別進行說明。

A. 背光訊號的決定：

在大多數的文獻中，其在低解析度的背光顯示器部分，多不考慮輸入影像為何，僅使用單一的背光調整曲線，如 BrightSide 公司所提的開根號法僅對初步決定的背光值做一加強的動作，如此雖能保留住畫面的最大亮度，但有時卻也會過度提升而造成背光過度的消耗，同時也可能使得暗處的背光過強，造成對比度的提升不足。考慮到這點，我們提出一種背光決定方法：Inverse of Mapping Function (IMF)，其能在不同畫面輸入時，依其影像訊息而調整背光的映象函數(Mapping Function)，使得在高對比影像輸入時，背光便能拉開其對比度，並藉由液晶的補償使影像細節清楚呈現。

背光信號的調變分為兩個步驟，第一步驟是由畫面資訊初步決定一組背光值，第二步驟是利用背光調整曲線，進一步調整此背光值。以下將就一輸入影像分成8x8區塊後，個別求其對應之背光訊號的方法做比較探討。以下列出的方式皆為在各背光分區取得每個畫素中單一子畫素的最大值，之後再取下列幾種方式作為背光值：

1. Max→Avg：(簡稱 Avg)

取一區之中每個畫素最大值後，再取其平均值，此取決法雖可擁有較高之對比度及較少的功耗，但會造成影像失真嚴重。

2. Max→Avg→Normalization→Root：(簡稱 Root)

取一區之中每個畫素最大值的平均值後，做歸一化再開根號之訊號增強，可避免取平均之後背光較暗的問題，但仍避免不了影像細節的失真情形。(目前 Brightside 提出之方法)

3. Max→Max：(簡稱 Max)

取一區之中每個畫素最大值的最大值，可避免背光不夠亮，雖可保持大部分影像細節，但卻有對比度不高及高功耗的問題。

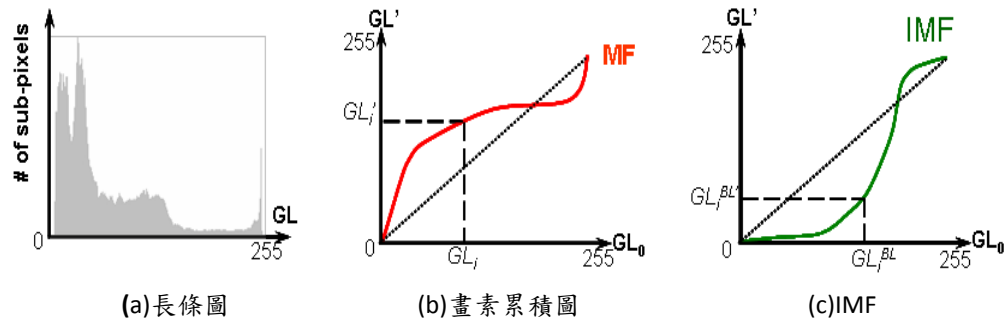
4. Max→Max→IMF：(簡稱 IMF)

取一區之中每個畫素中子畫素最大值後，用IMF曲線調整背光，此作法根據每一畫面灰階分布資訊對Max法進一步調整背光訊號，已證實可以獲的較高的對比度及較低的功耗表現，並可維持大部分的影像細節。

B. IMF 背光決定法：

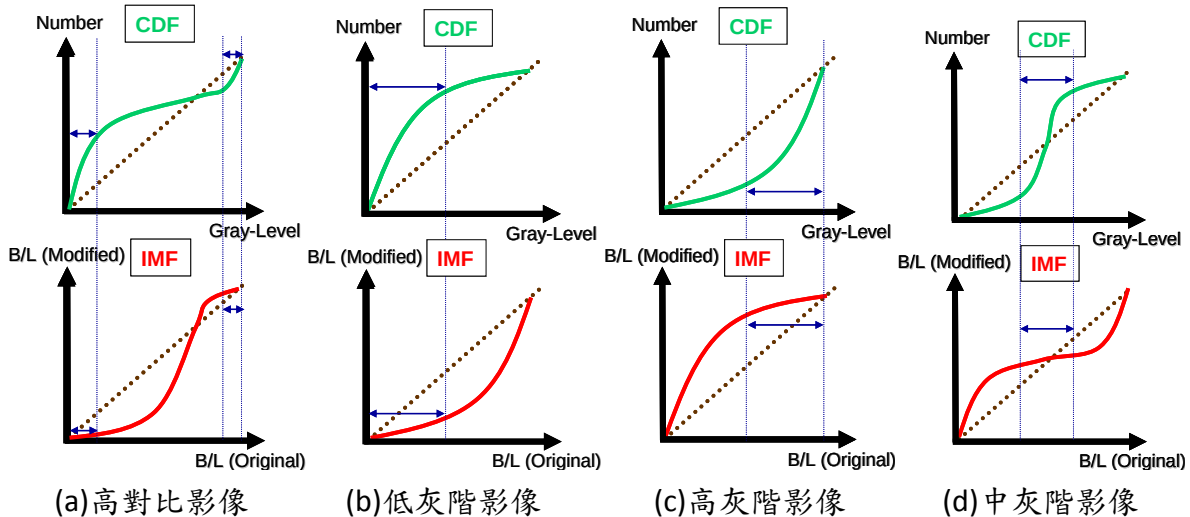
由於雙調變顯示器的概念是利用背光當作另一個調變器，使顯示器對畫面的控制性更好。我們提出一種叫做 Inverse of Mapping Function(以下簡稱 IMF)的方式當作第二步驟的背光調整曲線，有別於傳統背光決定方式只用單一曲線來調整背光信號，更能針對不同畫面特性改善影像品質，此曲線的獲得方式如圖二十六所示：

首先統計整張畫面的長條圖(Histogram)，將長條圖由低灰階累積至高灰階後，對 $y=x$ 直線作鏡射得 IMF 曲線。



圖二十六、IMF 曲線獲得過程

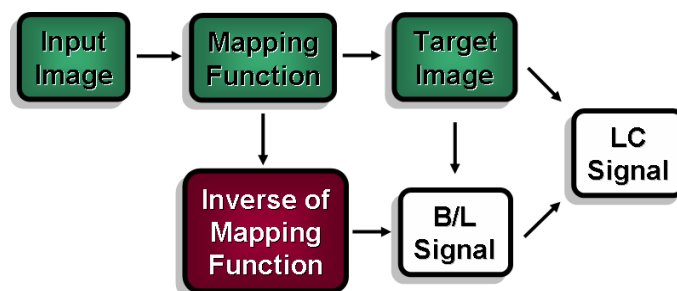
IMF 法將可適用於不同的影像資訊，來調整出更適合的背光訊號，例如對於高對比畫面資訊而言，如圖二十七(a)所示，由於高低灰階偏多，根據此一 IMF 曲線調整背光訊號，可將背光亮暗更進一步拉開而使整體對比度提高；對一低對比畫面資訊來說，如圖二十七(b)所示，由於畫面中間灰階偏多，對其 IMF 做調整可以使背光亮度分佈均勻，不會有背光亮暗差距過大的情形。



圖二十七、IMF 優點說明圖

使用 IMF 決定背光信號的流程圖如錯誤！找不到參照來源。二十八所示，IMF 之優點如下：

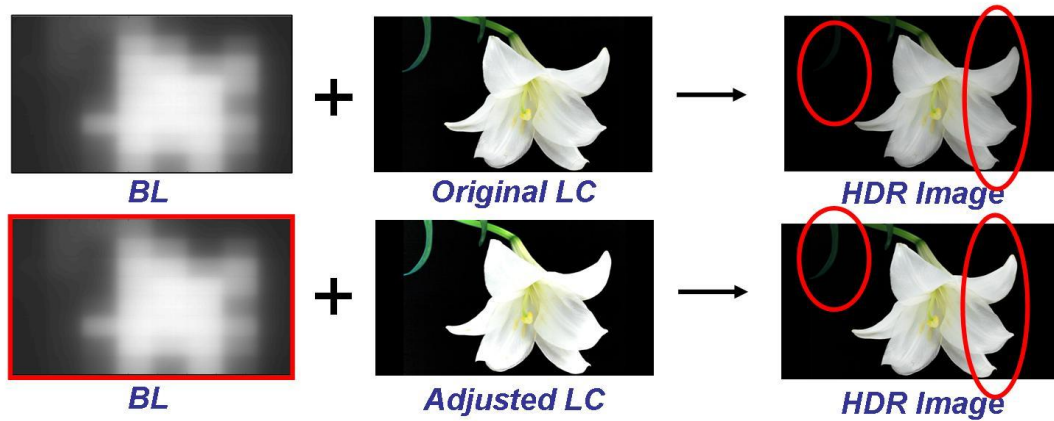
1. 能依不同畫面資訊決定出不同的背光調整方式。
2. 改善畫面品質，提高高對比影像的對比度或提高低對比影像的畫面均勻度。
3. 未來可依影像處理端對液晶訊號的映射函數做鏡射的動作，即可決定出不同的 IMF 曲線，以達更好的背光調整效果，且不需要太多額外的運算量。



圖二十八、IMF 流程圖

C. 液晶補償：

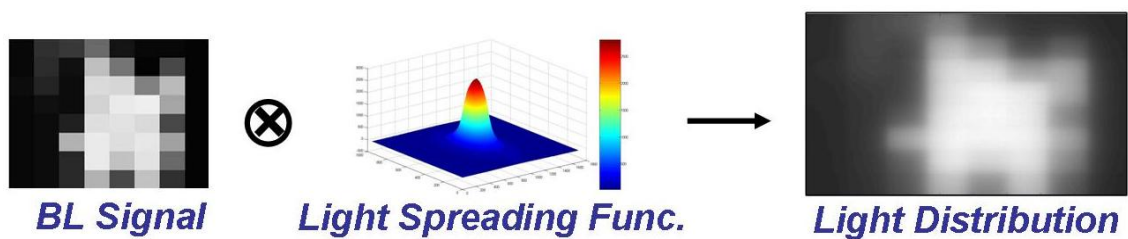
單純的背光源陣列調變並無法展現目標影像之內容，如果液晶訊號沒有做相對應的調整補償，會造成影像細節及畫面亮度的失真，如圖二十九所示。



圖二十九、(上)無液晶補償及(下)有液晶補償之效果

由圖 10 可發現，單純只作背光調變之系統所產生之 HDR 影像會有明顯偏暗之現象。而考慮液晶訊號補償之系統不但可保有高對比度之效果，並可保持大部分的影像細節，所以液晶訊號補償在 HDR 顯示系統中有其執行的必要性。

在液晶訊號補償中，背光源陣列之光強度分布是作為液晶訊號的補償依據，首先，在背光訊號決定後，將單一區背光訊號與光分布函數(Light Spread Function, LSF)，進行捲積運算(Convolution)，如圖三十，以模擬真實背光強度分布情形，以此作為進入液晶層前之光強度分佈，接著根據錯誤! 找不到參照來源。推算液晶之補償訊號。

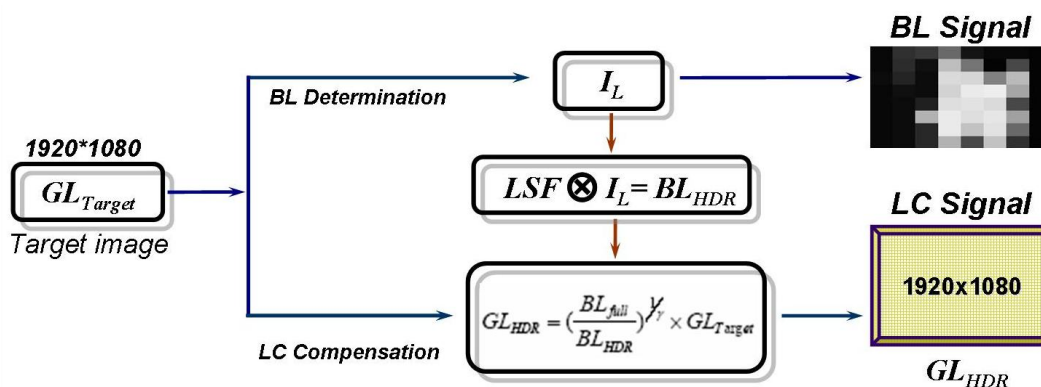


圖三十、捲積運算過程

$$GL_{HDR} = \left(\frac{BL_{full}}{BL_{HDR}} \right)^{\frac{1}{r}} \times GL_{Target} \quad (1)$$

在考慮顯示器 γ 調整的條件下，將目標影像除以背光分布，其中 BL_{full} 及 BL_{HDR} 分別表示傳統全亮以及HDR顯示器動態調整背光的背光強度，根據此公式可由原本的液晶訊號 GL_{Target} 推得補償後的液晶訊號 GL_{HDR} 。完整的演算流程如錯誤! 找不到參照來源。三十一所

示：



圖三十一、HDR 顯示器系統獲得背光訊號及液晶訊號之演算流程

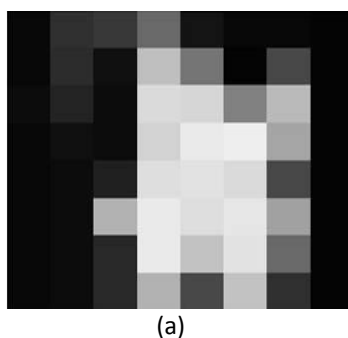
雖然液晶補償可進一步的利用液晶訊號來補償畫面亮度不足的部份，但並非所有情況皆可靠液晶訊號將亮度補足，若背光本身強度過低，縱使液晶轉至 255 灰階值(8bit)的全亮狀態，仍無法將其亮度補足，所以液晶訊號補償的優劣與否，實決定於最初背光訊號之決定。

D. 模糊遮罩法：

雖然採用捲積方式的液晶補償可以模擬出接近真實的背光分布，然而捲積法計算量龐大，在硬體實現上是一大困難，另外一項窒礙難行的因素在於 LSF，由於單一區背光發光時，其影響範圍擴及整張影像，這意味著 LSF 的考慮範圍必須等於或甚至大於一張影像之大小(1920×1080)，因此我們無法提供如此的記憶體容量來存取此大小之 LSF。事實上，在我們的實驗中，2430×1215 大小的 LSF 亦無法解決邊界效應的問題，所以捲積法的演算過程必須被簡化。

我們提出另一種用於模擬背光分布的方法—模糊遮罩法(Blur Mask Method)，其演算的過程可以省去儲存 LSF 的麻煩並簡化捲積的運算，我們也在硬體上證實了模糊遮罩法的可行性以及可提供優於捲積法的影像表現。

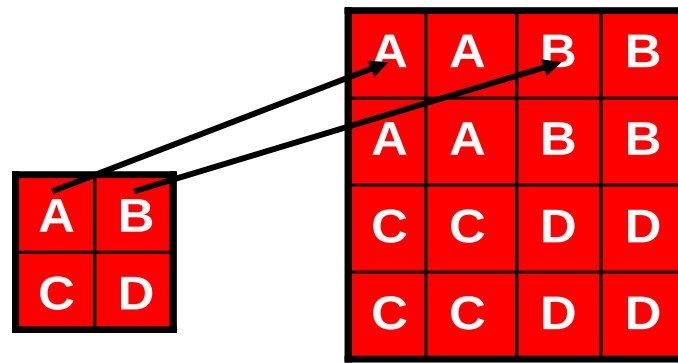
模糊遮罩法是使用一模糊遮罩對原始的背光灰階值影像(如圖三十二(a)所示)進行模糊，接著反覆執行擴張及模糊的動作，其結果可以模擬出近似真實背光的光分布，最後液晶補償訊號的決定與捲積法相同，其中模糊遮罩的權重如圖三十二(b)所示，為求便於硬體計算，因此將其權重值設為 2 的次冪。



$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{16}$
$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$
$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{16}$

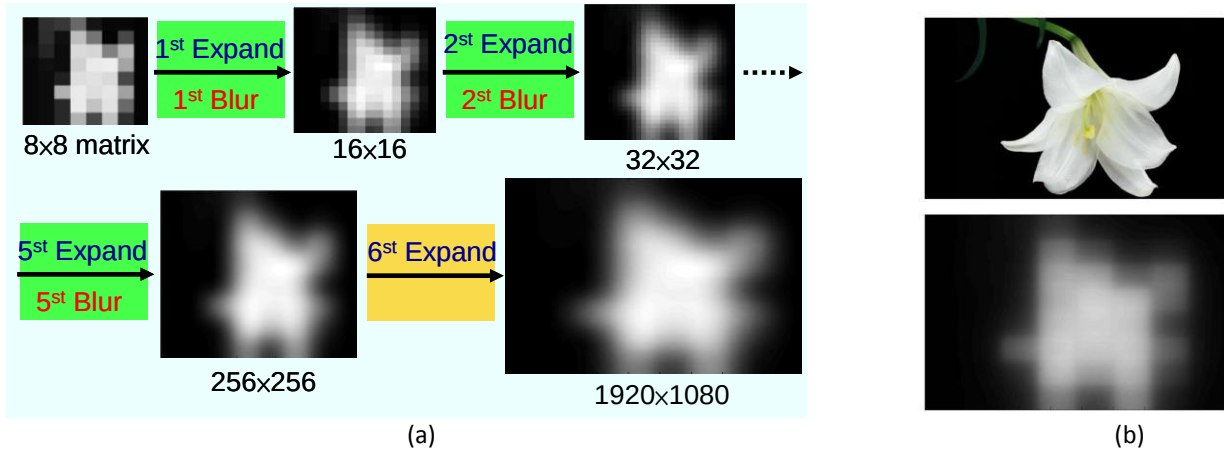
(b)

圖三十二、(a) 8×8 區的背光灰階值影像及 (b)模糊遮罩



圖三十三、影像擴大方式圖，其中的 A、B、C 和 D 表示該畫素之灰階值

模糊遮罩法的主要步驟如下，首先，將原始 8×8 區的背光灰階值影像之長寬各放大兩倍成為一 16×16 之影像，其放大的方式示於圖三十三，接著將此 16×16 之影像與模糊遮罩進行捲積以達到模糊的目的，之後再進行同樣放大及模糊的動作，直到模糊影像被放大模糊至 256×256 後，為求運算簡化，直接將此 256×256 之模糊影像放大到 1920×1080，此 1920×1080 所表現之灰階值即做為背光分佈之模擬結果，演算過程及模擬結果如圖三十四 (a)所示；圖三十四 (b)為原始影像及捲積法所模擬之背光分布，比較可發現，模糊遮罩法的模擬結果與捲積法之結果有相似的分佈。



圖三十四、(a)模糊遮罩法之演算過程及(b)原始影像(上)、捲積法之背光模擬結果(下)

綜合以上結論，模糊遮罩法擁有以下優缺點：

優點：

1. 減低硬體負荷，不需額外的 frame buffer 儲存 LSF。
2. 簡化運算量。
3. 提供較高的影像細節。
4. 解決捲積法 LSF 邊界效應的問題。

缺點：

1. 不如捲積法來得接近真實的模擬，但實驗結果與捲積法十分接近。

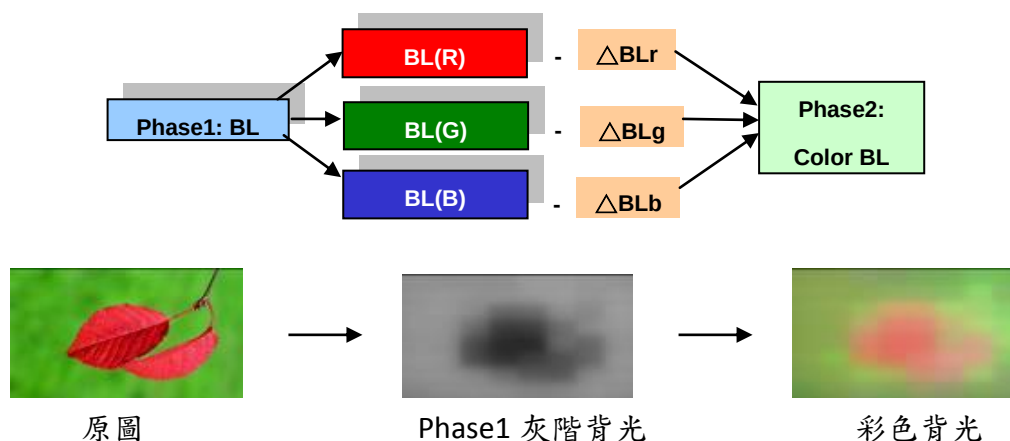
2. 最大亮度不及捲積法，但改善方式已被提出且證實可行。

E. Delta-Color-Adjustment (DCA)演算法：

Delta-Color-Adjustment (DCA)可針對不同影像對 RGB 三色背光在原始灰階調變的基礎上獨立進行調變，不僅能保有灰階調變時高對比的好處，並且能進一步降低顯示器功率消耗。

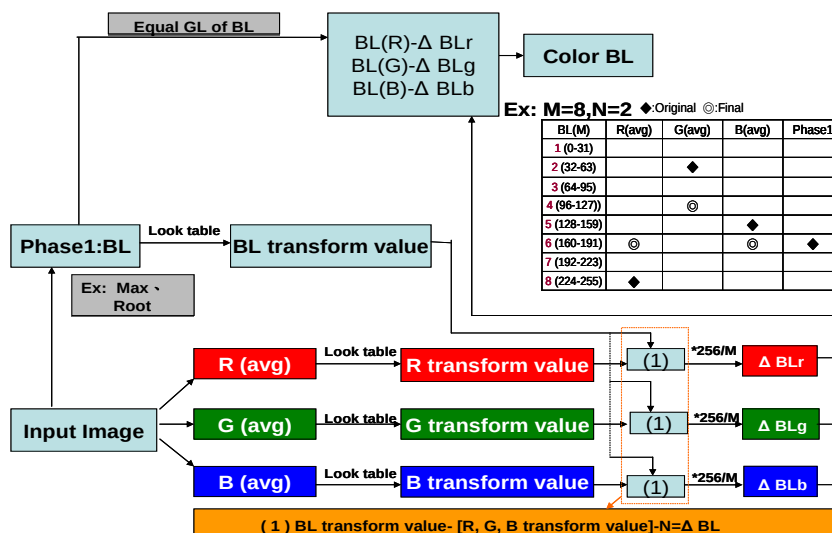
此彩色背光演算法概念如圖三十五所示。依據 Brightside Co.發表之灰階背光演算法的流程架構[1-2]，可得 Phase1 的背光(Phase1: BL)。將此背光分成三個維度：紅色背光 BL(R)、藍色背光 BL(B)並使(Phase1:BL) = BL(R) = BL(G) = BL(B)，再分別對 R、G、B 的每一區做細部調變(ΔBL_r 、 ΔBL_g 、 ΔBL_b)，即可獲得一個新的彩色背光值(Phase2: Color BL)。此彩色背光演算法具有下列優點：

1. 低硬體運算量
2. 節省功率消耗
3. 提高對比度



圖三十五、彩色背光演算法概念：彩色背光可由 Phase1 灰階背光分別再就 RGB 三色 LED 調整而得

DCA 演算法的關鍵在於適當的決定三色背光微調量，即 ΔBL_r 、 ΔBL_g 、 ΔBL_b 。此演算法的流程圖如圖三十六所示：



圖三十六、演算法流程圖

- (1) 首先把 0~255 的背光值等比例($\Delta=32$)分割成 M 區，再依所屬的區域轉換其所代表的值域(1~8)，參照錯誤! 找不到參照來源。。例如：當背光值落在 0~31，則對應到 1；當背光值落在 32~63，則對應到 2...若背光值落在 224~255，則對應到 8。
- (2) 比較 Phase I 的每一區背光轉換值和影像每一區背光平均值。
- (3) 帶入 Phase I(BL)- [R, G, B(avg)]-N= Δ BL (若 Δ BL ≤ 0 ，則 Δ BL 視為 0 $\rightarrow$ 不做調整)。
- (4) 只做減少的動作，不做增加的動作。

舉例而言，在表五中(M=8、N=2)，灰階背光演算法決定好的某區背光落在 160~191 之間，則此背光轉換值記為 6。再分別算出影像各區中 R、G、B 的平均值，分別置換成所對應到的數值，R=8、G=2、B=5。接著再帶入公式： Δ BL_r=6-8-2=-4 $\leq 0 \rightarrow 0$ ， Δ BL_g=6-2-2=2， Δ BL_b=6-5-2=-1 $\leq 0 \rightarrow 0$ 。因此，最後此區背光值僅調變 G，減少兩個 Δ (即減少 64 個灰階)；而 R、B 則維持原來灰階背光演算法的值，不予變動。因此 DCA 背光演算法中會有兩個重要的參數(M 和 N)。以下將進行實際量測以找尋最恰當的 M、N 值以優化 DCA 彩色背光決定法。

[表五] Delta-Color 背光演算法對應表

◆:Original ◎:Final

BL(M)	R(avg)	G(avg)	B(avg)	Phase1
1 (0-31)				
2 (32-63)		◆		
3 (64-95)				
4 (96-127))		◎		
5 (128-159)			◆	
6 (160-191)	◎		◎	◆
7 (192-223)				
8 (224-255)	◆			

F. Delta-Color-Adjustment (DCA) 優化實驗：

實驗圖片：

本實驗預計要量測各種不同類型的圖片來驗證此彩色背光演算法的優缺點。圖三十七為測試圖片，其中包含單一原色偏多，可觀察能否節省較多的功率；多細節圖片，可觀察是否能維持原影像細節；中對比圖片，可觀察是否能提高對比並節省功率；高對比的圖片，可觀察是否能維持 Phase1 演算法高對比之優點並且達到更節省功率之目的。



高對比圖片



中對比圖片



多細節圖片

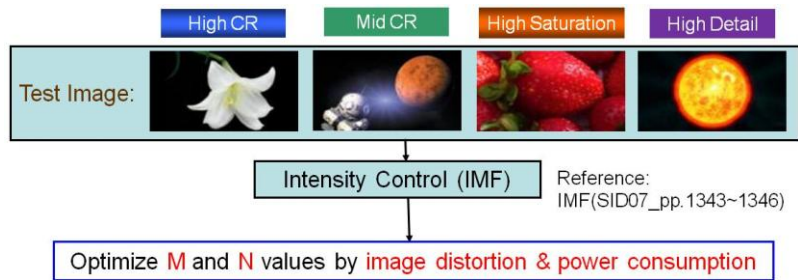


單原色偏多圖片

圖三十七、實驗圖片

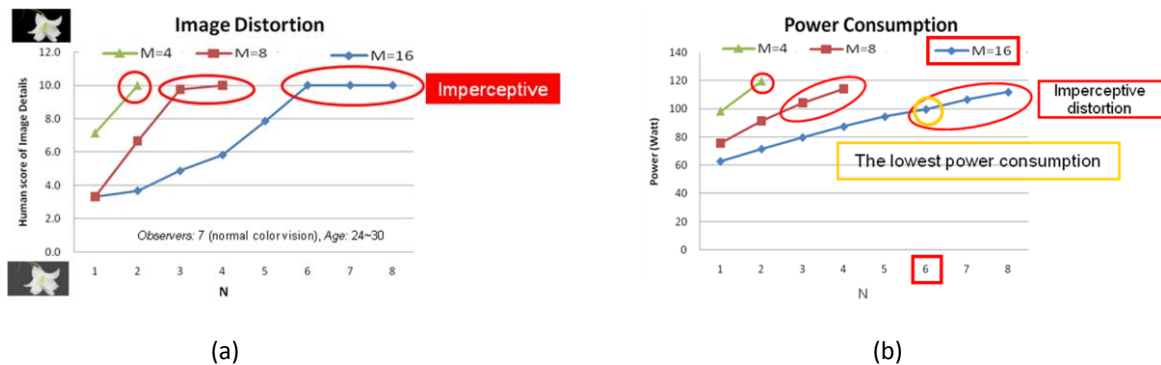
實驗流程:

本實驗流程如圖三十八所示，選擇了四張不同測試圖片，接下來利用 IMF 結合 DCA 並搭配不同的 M 與 N，可得到不同的背光值，下一步再分別使用 convolution 的液晶補償方式分別去補償影像的細節，最後再利用影像品質與功率損耗當做評估的指標，進而找到理想的 M,N 值。



圖三十八、DCA 實驗流程

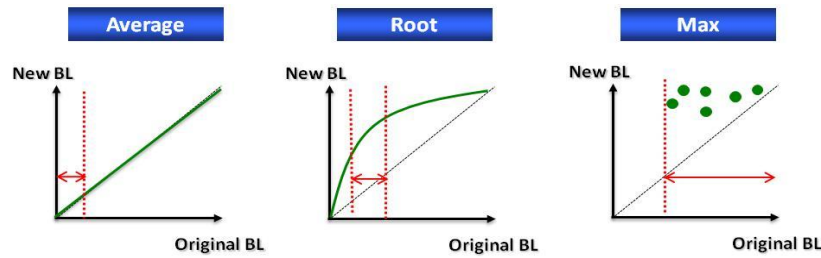
經由上面的實驗可得到許多組M與N的結果。首先為了維持影像的細節度，我們找了七個人做主觀的人因實驗並給予影像評分。而為了能達到高畫質的影像，我們定義了十分為門檻（分數越高表示畫面品質越好）。從圖三十九(a)可以發現有六組的M與N滿足此門檻，因此我們再使用功率消耗當作第二個評斷的指標，從上面六組找尋到最低功率消耗的組合，從圖三十九(b)可知，此DCA方法的M與N優化值為M=16與N=6。



圖三十九、DCA 實驗結果

G. Segment-Color-Control (SCC)演算法：

第二年度計畫中新提出的第二個彩色背光演算法為 Segment-Color-Control (SCC)演算法。此方法可結合 Average, Root 與 Max 三種黑白背光的優點，如圖四十所示。Average 在暗態可以有效的降低漏光，使暗處能達到更暗；Root 在中灰階處可以使背光值平滑，使亮暗處不致於產生明顯的落差；Max 在亮態可以有效的維持住細節。除此之外，此法運算簡單易於硬體實現。

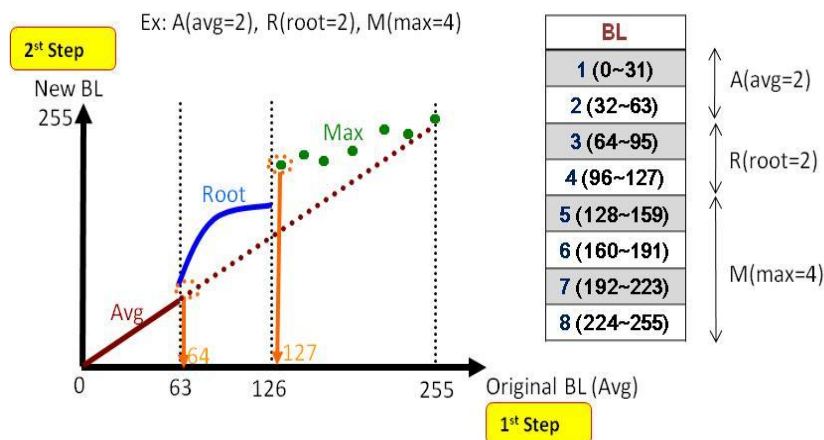


圖四十、各種黑白背光演算法的優點

此彩色背光演算法概念如圖四十一所示，依據 Brightside Co.發表之灰階背光演算法的流程架構可得到黑白背光，將此背光分為三個區域，再分別對 R、G、B 所落到的每一區做對應，如果對應到 A 區則使用 Average 演算法；如果對應到 R 區則使用 Root 演算法；如果對應到 M 區，則使用 Max 演算法，最後即可獲得一個新的彩色背光值。

此彩色背光演算法具有下列優點：

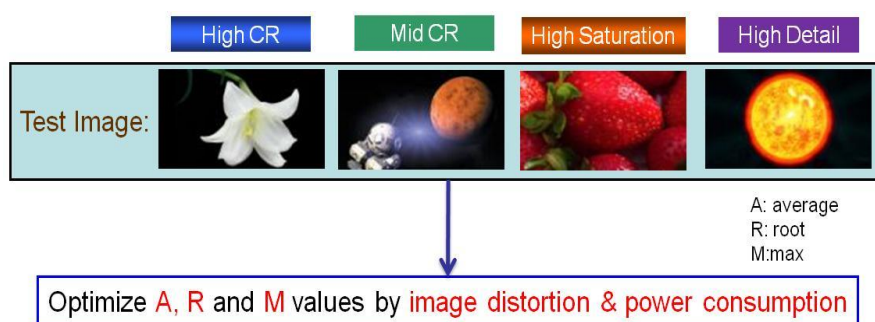
- 1.硬體運算量低(不需要藉由黑白背光去調變)
- 2.節省功率消耗
- 3.提高對比



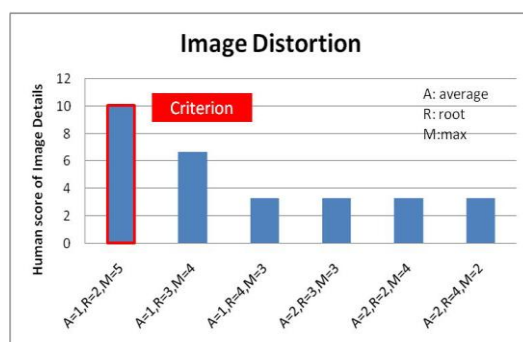
圖四十一、SCC 演算法流程圖

H. Segment-Color-Control (SCC)優化實驗：

SCC演算法中有三個重要的參數(A,R與M)，分別代表三個演算法所佔的區域，而SCC的實驗流程與DCA幾乎完全一樣，如圖四十二。同樣是用影像的細節與功率損耗當作評斷指標，最後從實驗結果(圖四十三)可以發現A=1,R=2,M=5擁有最好的影像畫質與最低功率。



圖四十二、1SCC 演算法流程圖



圖四十三、2SCC 演算法流程圖

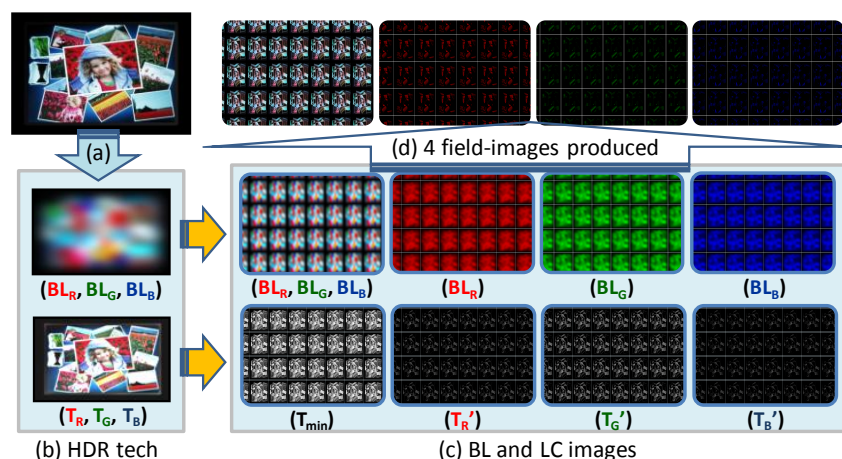
I. Stencil-FSC演算法與模擬

普通的色序型液晶顯示器在相同的畫素上時序顯示三個高強度的單色（紅、綠、藍）色場形成一個彩色畫面。當人眼因為相對運動而個別地看到這三個高亮度影像時，色分離即被觀察到而降低影像清晰度。而 Stencil-FSC 法，在第一個色場顯現大部分亮度及色彩內容，加上其餘三個較暗的三原色色場組成一個鮮明的彩色畫面。因此，即使有著相當快的相對速度，三個原色場所拉出的色彩也不意被察覺，而能有效地降低色分離現象。

為了在無彩色濾光片的色序型液晶顯示器中產生一個彩色的畫面，我們採用區域的背光控制技術或稱為高動態範圍 (high dynamic range, HDR)(圖四十四)。首先，根據目標影像的資訊 (例: Girl © Microsoft)，計算出背光(BL)訊號— BL_r 、 BL_g 及 BL_b 。根據 BL_r 、 BL_g 及 BL_b 的強度分佈，紅、綠、藍三個場的液晶穿透率 T_r 、 T_g 、 T_b ，隨即被補償以維持原影像的亮度及彩度，如圖四十四(b)所示。接著我們取每個畫素的液晶穿透度最小值 $T_{\min}$ 做為第一個場的液晶訊號後，從(2)式可得另外三原色場的新訊號— T_r 、 T_g 及 T_b ，如圖四十四(c)。

$$\begin{bmatrix} T'_R \\ T'_G \\ T'_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_R \\ T_G \\ T_B \end{bmatrix} - T_{\min} \quad \text{where } T_{\min} = \min(T_R, T_G, T_B) \quad (2)$$

決定背光及液晶訊號後，結合三原色的背光訊號(BL_r 、 BL_g 及 BL_b)及最小液晶訊號($T_{\min}$)成為顯示高亮度及色彩的第一個色場。同樣的，藉由 BL_r 跟 T_r 、 BL_g 跟 T_g 、 BL_b 跟 T_b 的搭配，形成三個其他的原色色場，如圖四十四(d)所示。最後，在 1/60 秒時序顯示這四個色場，一個全彩且察覺不出的色分離影像可被產生。除此之外，由於高動態範圍技術的利用，Stencil-FSC 不僅可以提高動態對比度也能大幅降低功率消耗。



圖四十四、Stencil-FSC 方法的演算過程

J. 背光分區最佳化

為了更有效的抑制色分離，利用 MATLAB 軟體去最佳化在 Stencil-FSC 方法下的背光分區數。直覺上，越多的背光分區數，可以越接近目標影像進而越有效地抑制色分離，如圖四十五所示。相對的，越高的背光分區數所需的驅動 IC 也越多，同時增加硬體運算的複雜度。模擬時，根據 LED 背光的總數 1152(48×12)將背光的分區分成九種(圖四十五)。此外，我們選了九張不同影像細節及顏色複雜度的圖片作為測試影像，如表六所示。



圖四十五、目標影像_Lotus 在不同分區數的背光影像

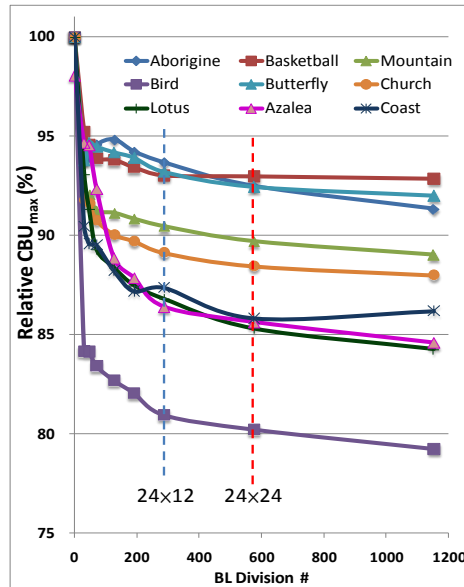
[表六] 九張不同影像細節及顏色複雜程度的測試影像 (*: 取自於 <http://jac3158.com/blog>)

Color Detail	High	Mid	Low
High	Aborigine	Basketball	Mountain
Mid	Bird	Butterfly*	Church
Low	Lotus*	Azalea*	Coast

為了作為最佳化模擬時的評斷指標，我們引入 CIELAB 的色差公式(ΔE^*_{ab})，累加目標影像及色分離影像畫素間的色差($\sum \Delta E^*_{ab}$)以評斷色分離的嚴重性。在不同背光分區數使用 Stencil-FSC 法的狀況下， $relative\ CBU_{max}$ 被定義為任一 $p \times q$ 的背光分區比上九種分區下最嚴重中的色差總值(p 為行數， q 列數)，如(3)式。愈小的 $relative\ CBU_{max}$ 值表示在這樣的背光分區中，有較輕微的色分離影像。

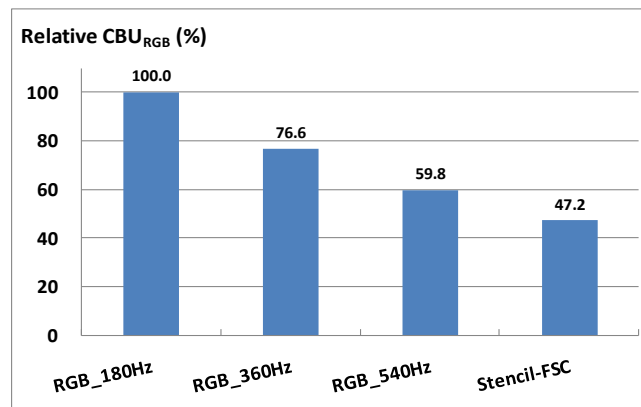
$$relative\ CBU_{max} \equiv \frac{\sum \Delta E_{ab}^*(Target, Stencil)_{p*q}}{\max[\sum \Delta E_{ab}^*(Target, Stencil)_{p*q}]} \times 100\% \quad (3)$$

從模擬的結果可知(圖四十六)，當背光分區數越高，則 $relative\ CBU_{max}$ 越小。超過24×12區後，減少的趨勢減緩。若同時考慮色分離的抑制以及硬體的複雜性，24×12~24×24 是最佳的背光分區數。



圖四十六、九張測試圖片的 $relative\ CBU_{max}$ 對於不同背光分區數的模擬結果

將 Stencil-FSC 抑制色分離的效果與兩倍 (360Hz)及三倍(540Hz)場速率兩種方法比較。將三種方法下所計算出的 $\Sigma \Delta E^*_{ab}$ ，除以傳統用 180Hz RGB 驅動的 $\Sigma(E^*_{ab})$ (標示為 $relative\ CBU_{RGB}$)以做為相互比較的依據。在九張目標影像下，360Hz, 540Hz 及 240Hz Stencil-FSC 方法的 $relative\ CBU_{RGB}$ 值分別為 76.6%, 59.8%, 及 47.2%(圖四十七)。很明顯的，若同時考慮色分離的抑制及硬體的實行，Stencil-FSC 方法比增加色場速率的方法來的有效許多。

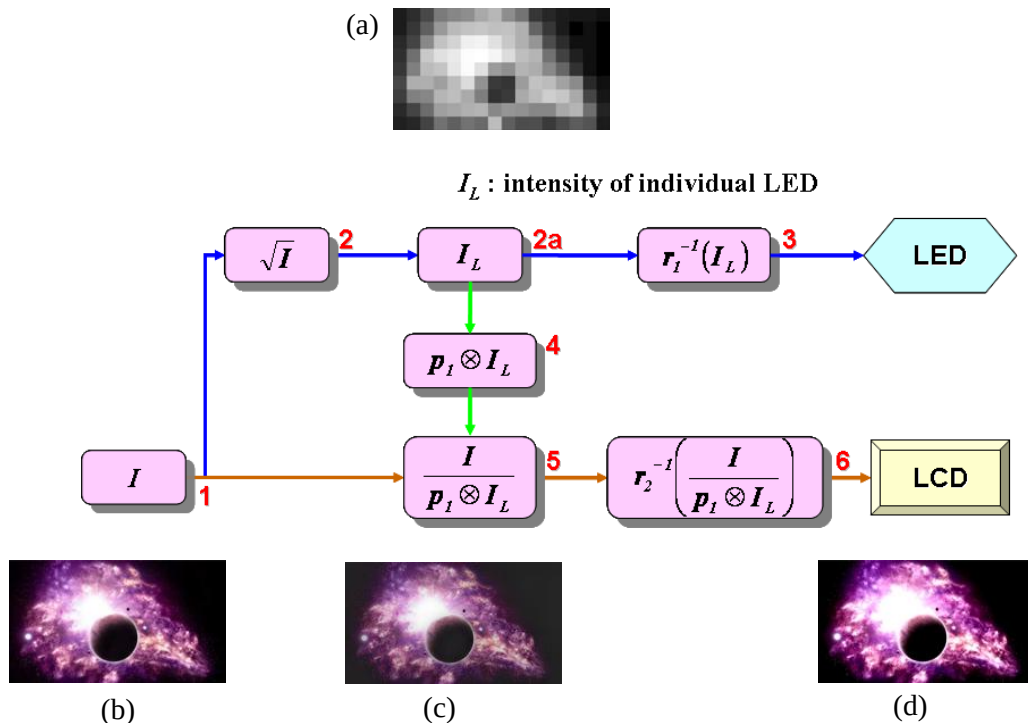


圖四十七、九張測試圖片於 180Hz，360Hz，540Hz 的 RGB 驅動及 240Hz Stencil-FSC 的 $relative\ CBU_{RGB}$ 平均值

子計畫三：

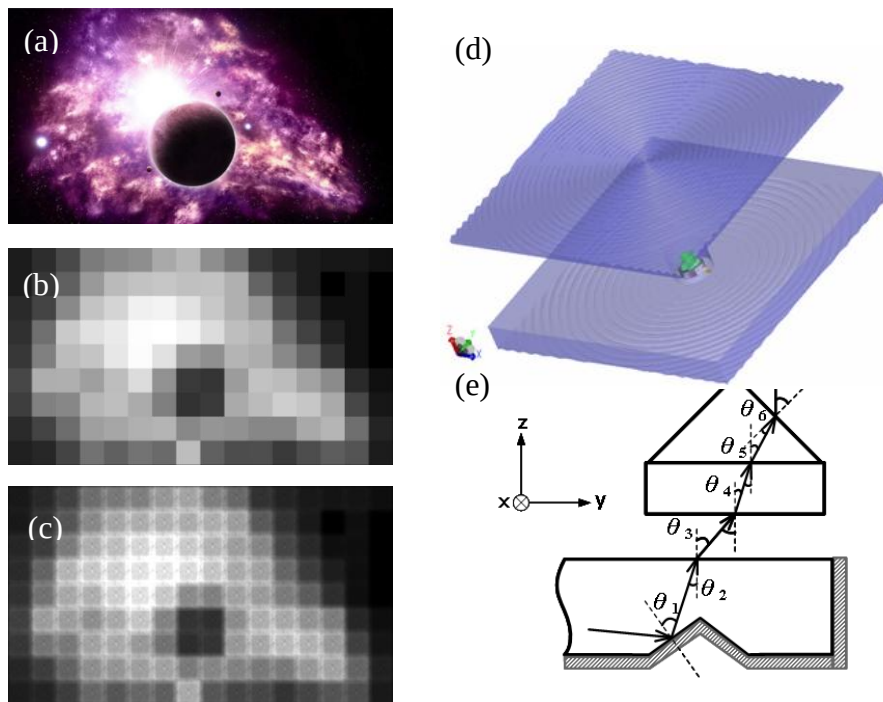
本計畫:全彩色序式 LED 光源顯示系統開發,係透過光學的方法建立一全彩序列式驅動之低解析度背光面板,具有空間調變(local dimming)、時間調變(field-sequential-color)以及全域二維時空主動調變(scanning drive)。獨立區域控制背光之光型擴展函數(light spread function)與色彩資訊,必須參考子計劃二所設計之液晶面板與相關演算法,完成具影像對比及高色彩重現之雙顯示面板(LED 背光+液晶面板)。並輔佐子計畫一,提供視覺資料的實驗數據進行協同研究。

適合序列型高亮度動態範圍(FSC-HDR)顯示器的背光模組必須具有底下幾個特性：像素化排列、獨立控制、高度灰階等因素。LED 的微小面光源發光特性非常符合 FSC-HDR 系統之背光模組,且同時還兼具有高亮度及驅動速度快的優點。目前高對比影像處理先驅 BrightSide 公司於 2003 年提出一個以發光二極體背光(LED BLM)為架構的高亮度動態範圍液晶顯示系統,如圖一所示。 I 為強度歸一化後的原始影像,經過縮減取樣(down sampling)後,取出要傳送給低解析度發光二極體背光的訊號 I_L ; P_1 則是單顆 LED 發光至液晶面板的光擴展函數(Point Spread Function; PSF)。因此 $P_1 \otimes I_L$ 即為背光光源於液晶面板上的分佈;和原始影像比較後,即可求得補償後要傳送給液晶面板的影像訊號。由圖中的演算法可以發現,本光學設計目標,最重要的乃是設計 P_1 (LED 封裝與二次光學)及利用優化過的特殊光學元件獲得最佳「 $P_1 \otimes I_L$ 」光場這個步驟。



圖四十八、BrightSide 提出之 LED-based HDR 系統演算法(a)背光的灰階訊號 I_L (b)原始影像 (c) 補償後的液晶面板訊號 (d) 高動態對比度影像

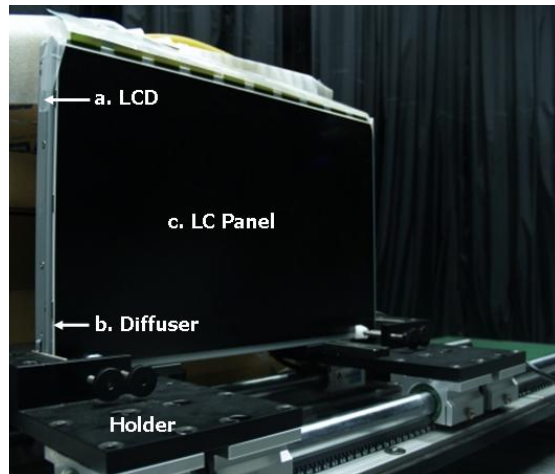
根據圖四十八流程所提出的背光源設計，光源發散的點擴展函數會涵蓋近乎整個液晶面板，如此一來，當背光訊號 I_L 和 PSF 做褶積(convolution)運算時，計算量會非常龐大並佔用過多硬體的資源，增加系統計算時間與複雜度。這對於即時動態影像的訊號處理具有相當程度的負擔，必須要提高硬體的規格以避免因處理不及而造成影像延遲。為了解決褶積造成運算速率下降的問題，我們希望能提出一個新的高亮度動態範圍背光模組技術，利用光學的方法，使得該背光源能呈現特定的局部光場分佈，並只會在相對應控制的面板區域上有均勻的角度分佈，即該背光源能在液晶面板有完美的灰階低解析度影像。理想狀況下，若任何一個背光模組中的 LED 光源，均能在面板上產生同樣獨立不受彼此影響的方形(rectangular function)分佈，那在與液晶的褶積運算中，我們僅需要乘上一個強度常數，這可大幅度的簡化運算的時間與複雜度，此乃序列型高亮度動態範圍液晶顯示器的背光理想分佈情形。在實際的光學系統當中，LED 光源在液晶面板上獨立的光場分佈，無可避免會稍微覆蓋到相鄰的對應控制區域，如此雖不能避免褶積的計算，可是卻可以減小褶積運算的核心(kernel)，如圖四十九所示。(a)為原始的影像訊號，由此可計算得到圖五中步驟 1 的光場函數；而(b)(c)則是經過我們影像處理後，在步驟 4 所得到的結果 $P_1 \otimes I_L$ ，其中(b)為前文所述在理想狀況下背光於面板上的方形擴展函數，這也是我們希望透過光學結構所能達到的目標，而(c)則為實際製作得到的發光場型，可看出雖然無法達到理想中的方形擴展函數，但是能有效的減少褶積運算時的 kernel 以及考慮整體背光分區不滿足 shift invariant 的補償信號。



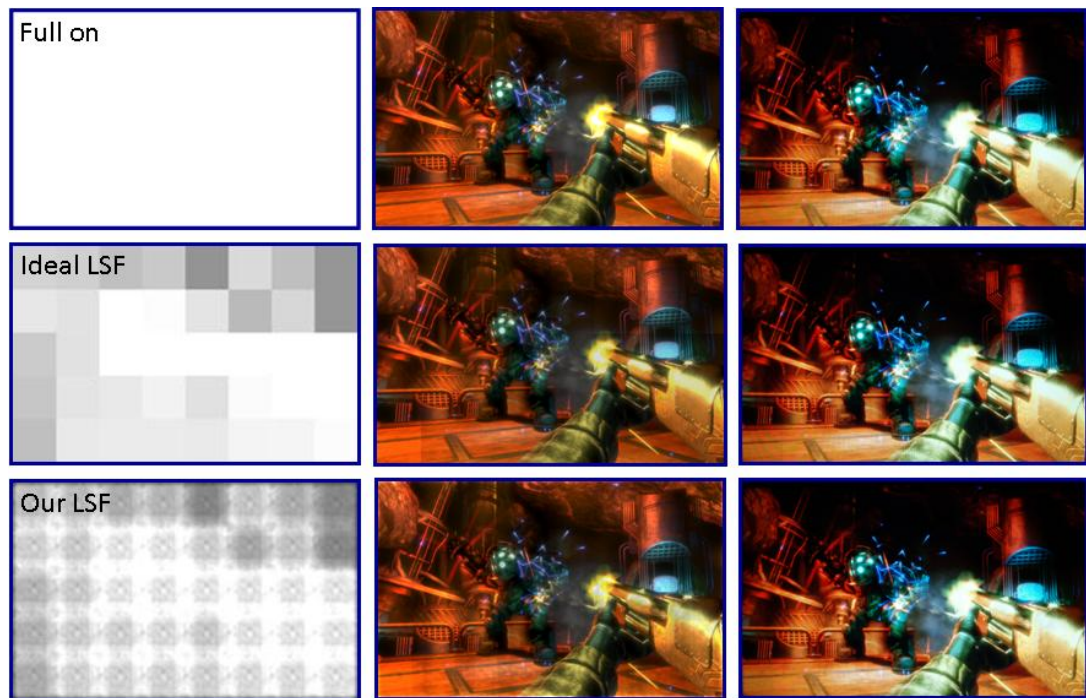
圖四十九、序列型高亮度動態範圍(FSC-HDR)顯示器的背光模組光學(a)原始影像訊號；(b)理想狀況中，背光模組所控制的完美局部光場於面板上的 PSF (rectangular function)；(c)實際背光模組在面板上的局部光場 $P_1 \otimes I_L$ ；其光學結構包含(d)(e)側發光式 RGB 3in1 LED cluster 以及底部佈滿特殊微結構的導光板，堆疊逆稜鏡以控制角度，最後再加上擴散片以控制出光場型的均勻性。

圖四十九(d)(e)為此分區模組之光學結構示意圖，其中包含一側發光式 LED 以及底部佈滿特殊微結構的導光板將光場沿測邊均勻擴展並控制出光，最後並增加一逆稜鏡結構，與底部 v 型稜鏡配合

以控制最後出光角度。圖五十為 19 吋高亮度動態範圍液晶顯示器的原型機(prototype)以及測試影像(電腦動畫)。



Size	19-inch diagonal
Panel Resolution	1440 x 900 pixels
Backlight Resolution	8 x 5 regions (180 x 180 pixels)
Uniformity	68 %
Brightness	Max: 10.2 nit Min: 0.01 nit
CR	1000:1



(a)

(b)

(c)

圖五十、(上圖) 19 吋高亮度動態範圍液晶顯示器原型機與量測結果 (下圖) (a) 背光模組場型 (b) 液晶面板補償訊號 (c) 最後完成具影像對比及高色彩重現之高亮度動態範圍顯示器。

圖四十九所提出的背光模組光學結構與參數，亦可針對不同尺寸與規格定義出最適合的光場分布，做進一步的場型調整。為了進一步評估此分區背光對不同影像的影像品

質與計算速度，我們與子計畫一整合，提出以白色 LED，及紅、綠、藍三原色 LED 為光源的區域可控式背光模組之高對比液晶顯示器色彩特性化模型(iCAM)，並已在初步建構的平台上完成驗證。詳細的設計流程與影像品質評估可參考”Design and Evaluation of Light Spread Function for Area-Adaptive LCD System,” IEEE Journal of Display Technology, 5 p. 66-71 (2009)，圖五十一為不同影像(分別為單調物體、黑白 X 光片、風景、電腦動畫等各類圖片)的影像品質與訊號處理時間，我們發現利用本計畫所提的分區近似方形擴展函數，可大幅減少運算時間，與理想方形擴展函數的差異，亦可藉由後級液晶訊號的補償作修正。相關光學設計與影像處理技術 ”二維可控制局部光場區域背光模組之光學元件裝置” 已於 2010 年獲得美國專利，目前中華民國與日本專利亦在做最後審核。

	Contrast Ratio	Full on	143:1	Processing Time (sec)	Convolution	0.469
		Ideal LSF	419:1		$P_C \times I_L$	0.032
		Our LSF	410:1		$P_S \otimes I_L$	0.094
	Contrast Ratio	Full on	260:1	Processing Time (sec)	Convolution	0.484
		Ideal LSF	539:1		$P_C \times I_L$	0.016
		Our LSF	536:1		$P_S \otimes I_L$	0.094
	Contrast Ratio	Full on	329:1	Processing Time (sec)	Convolution	0.485
		Ideal LSF	536:1		$P_C \times I_L$	0.016
		Our LSF	536:1		$P_S \otimes I_L$	0.094
	Contrast Ratio	Full on	157:1	Processing Time (sec)	Convolution	0.484
		Ideal LSF	415:1		$P_C \times I_L$	0.016
		Our LSF	405:1		$P_S \otimes I_L$	0.094

	Contrast Ratio	Full on	278:1	Processing Time (sec)	Convolution	0.484
		Ideal LSF	399:1		$P_C \times I_L$	0.031
		Our LSF	339:1		$P_S \otimes I_L$	0.094
	Contrast Ratio	Full on	370:1	Processing Time (sec)	Convolution	0.485
		Ideal LSF	541:1		$P_C \times I_L$	0.016
		Our LSF	563:1		$P_S \otimes I_L$	0.094
	Contrast Ratio	Full on	234:1	Processing Time (sec)	Convolution	0.485
		Ideal LSF	341:1		$P_C \times I_L$	0.032
		Our LSF	339:1		$P_S \otimes I_L$	0.109
	Contrast Ratio	Full on	340:1	Processing Time (sec)	Convolution	0.484
		Ideal LSF	490:1		$P_C \times I_L$	0.016
		Our LSF	566:1		$P_S \otimes I_L$	0.109

圖五十一、對於傳統全開背光(Full on)、理想方形擴展函數(ideal LSF)、實際擴展函數(our LSF)，針對各種不同影像作品質評估與計算時間，可看出雖然無法達到理想中的 rectangular distribution，但是能有效的減少褶積運算時的 kernel。因此，本計畫所提出的控制局部獨立光場的光學裝置，將對於新型 HDRD BLM 有極高的助益。

四.實驗結果

子計畫一:

在亮度與色度間的規模比例(scale ratio)是由分析上述 MOS 實驗的相關係數而來。由於白色區塊所造成的色分離程度最為嚴重，故被拿來當作參考數據。其相關係數與規模比例的關係呈現於圖六十七，由於規模比在 10 的時候其相關係數高達 98.9%，故將規模比選為 10。

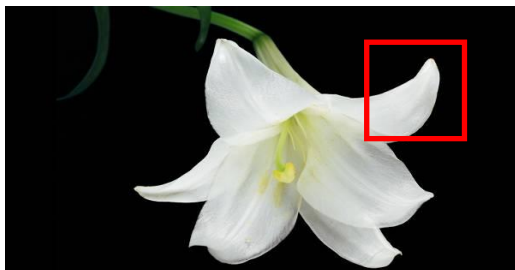
而在上述各項方法比較的實驗中，各種抑制方法的平均且歸一後的 RCS 值分別為：RGBWmin(0.27)、RGBCY(0.37)、RYGB(0.82)、RGB(1)，可以很明顯的知道其與平均 MOS 的數值相關，分別為：RGBWmin(2.4)、RGBCY(2.5)、RYGB(3.9)、RGB(4.7)。這些結果驗證了 RCS 對於分類不同抑制色分離的方法非常有用，RGBWmin 是現行最有效的方式。在此實驗中，也使用了 CIEDE2000 當做指標性的數值，與 RCS 比較，白色與天藍色在 CIEDE2000 的表現較好而膚色與大紅色的表現則較差。而 CIEDE2000 和 MOS 的相關係數小於 RCS 和 MOS 間的相關係數的二分之一。由此可證明先前對於人眼對色分離的趕之不完全與色度相關的假設，故 CIEDE2000 在此並不適用。

現行使用的 CSF 較值得被拿來探討，已知視網膜上的相對運動在調整對比敏感度時可改變 CSF 的曲線，並且隨著頻率而平移。一般來說，此調整比起平移較為顯著，尤其對於平滑的眼球追蹤運動(eye-tracking movement)。總結來說，雖然現行的結果表示出觀察和 RCS 是符合的，在色分離的評估實驗中 CSF 也必須被考慮進去。

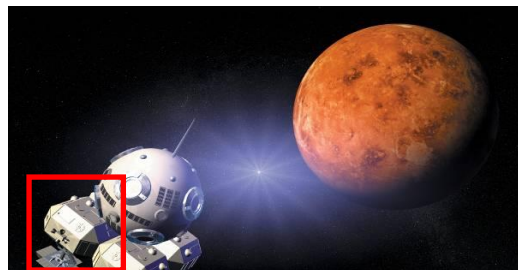
子計畫二:

a. IMF 與模糊遮罩法

IMF (Inverse Mapping Function)動態調整背光方式有別於傳統背光決定方式只用單一曲線來調整背光信號，可以依照輸入影像不同做適當的調整。例如對於高對比畫面資訊而言，由於高低灰階偏多，根據此一 IMF 曲線調整背光訊號可將背光亮暗更進一步拉開而使整體對比度提高；對一低對比畫面資訊來說，由於畫面中間灰階偏多，對其 IMF 做調整可以使背光亮度分佈均勻，不會有背光亮暗差距過大的情形。可參考下圖五十二~圖五十四之結果。

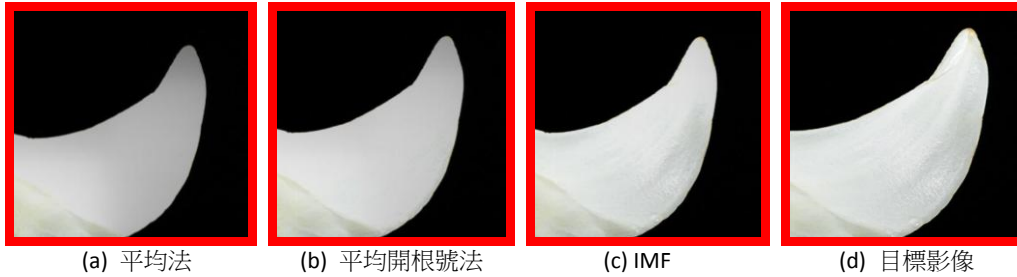


(a)

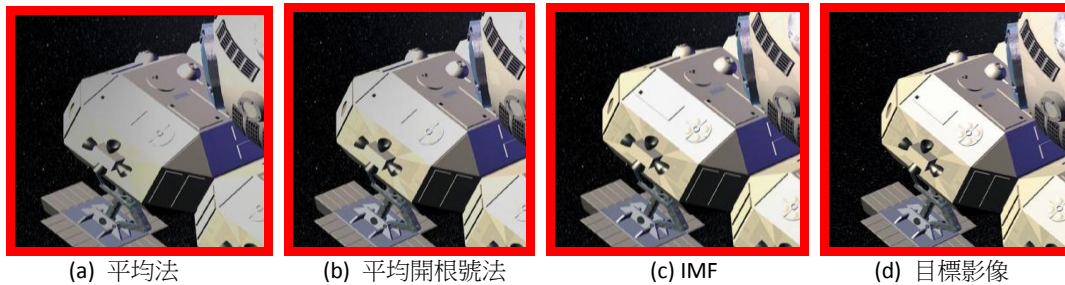


(b)

圖五十二、(a)Lily (b)Space Robot 圖



圖五十三、局部放大目標影像 Lily 的模擬結果，(a)~(c)分別為平均法、平均開根號法及 IMF 之背光決定方式，液晶則使用捲積法補償；(d)為目標影像



圖五十四、局部放大目標影像 Space Robot 的模擬結果，(a)~(c)分別為平均法、平均開根號法及 IMF 之背光決定方式，液晶則使用捲積法補償；(d)為目標影像

綜合以上結果證實，IMF 的確適用於背光訊號的決定，在對比度的表現上，不但將原本的 CR 值提升突破 20,000:1，畫面最大亮度也直逼傳統液晶顯示器，比較各方法，IMF 皆提供了雙贏的結果。在畫面細節的表現上，IMF 更有驚人的表現，不但維持了原本的亮度，畫面細節更直逼目標影像。所以 IMF 之優點如下：

1. 能依不同畫面資訊決定出不同的背光調整方式。
2. 改善畫面品質，提高高對比影像的對比度或提高低對比影像的畫面均勻度。
(~20000:1)。
3. 未來可依影像處理端對液晶訊號的映射函數做鏡射的動作，即可決定出不同的 IMF 曲線，以達更好的背光調整效果，且不需要太多額外的運算量。

而單純只做背光調變之系統所產生之 HDR 影像會有明顯偏暗之現象。考慮液晶訊號補償之系統不但可保有高對比度之效果，並可保持大部分的影像細節，所以液晶訊號補償在 HDR 顯示系統中有其執行的必要性。

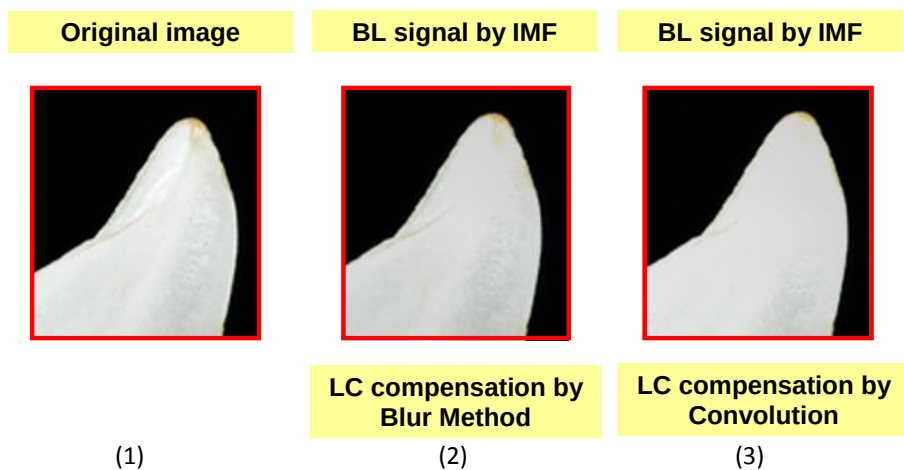
在硬體運算量方面，由於捲積法的運算量龐大，其演算法的簡化有其必要性，而模糊遮罩法的提出簡化了背光模擬的複雜度，不必像捲積法需以龐大的記憶體空間來儲存 LSF，模糊遮罩法需要的僅僅是原始的背光灰階影像以及一 3×3 大小的模糊遮罩，如此大大地簡化了模擬背光分布的需求。在影像表現上，雖然捲積法提供了最正確的補償方式，但由於此法容易遭遇液晶補償失敗的情況，造成影像失真。相較於模糊遮罩法，其本身背光模擬是由原本 8×8 的背光灰階影像模糊而來，可以保留原始影像的亮度特性，在相對於影像之亮處，背光模擬會提供相對高亮度的背光值，這在液晶補償上可以降低補償失敗的情況，所以在圖五十五及圖五十六中可以發現，模糊遮罩法比捲積法能展現更多的畫面細節。



(1)

(2)

圖五十五、目標影像 Lily 分別採 (1) 模糊遮罩法及(2) 捲積法之 HDR 影像模擬結果



(1)

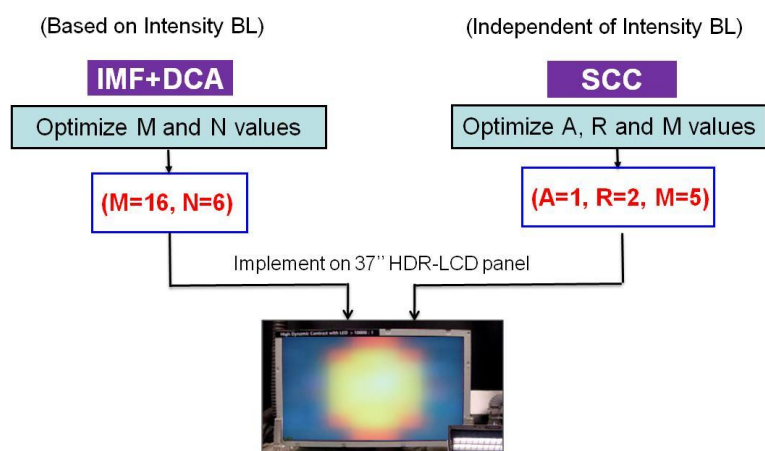
(2)

(3)

圖五十六、(1)為原目標影像之局部放大，(2)~(3)分別為模糊遮罩法及捲積法之局部放大，由圖可發現，模糊遮罩法所能表現之影像細節超越捲積法

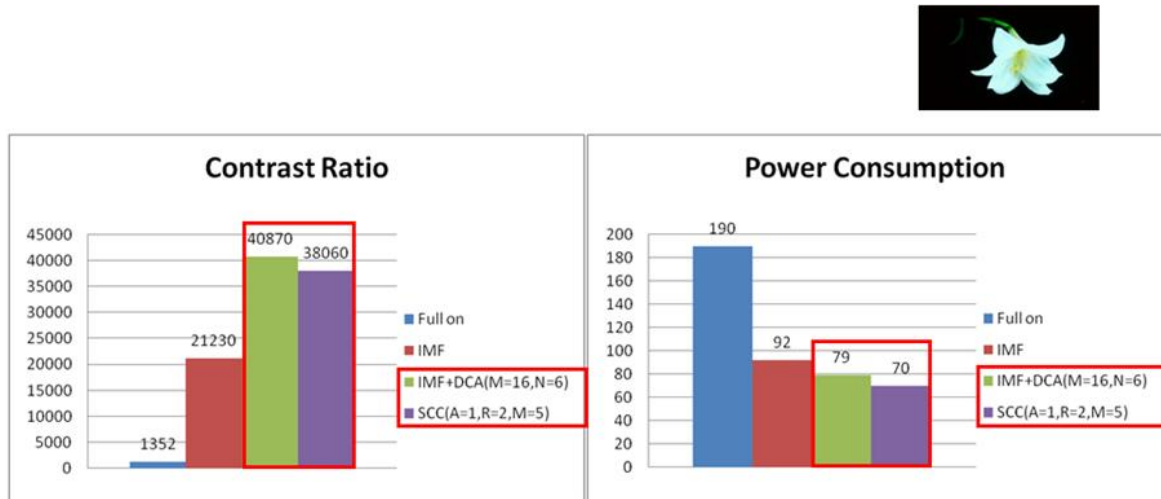
b. DCA 與 SCC 演算法

最後將兩個新提出的彩色背光演算法(DCA 和 SCC)，實際應用在 37 吋 HDR-LCD 面板上做驗證，實驗流程如圖五十七所示。

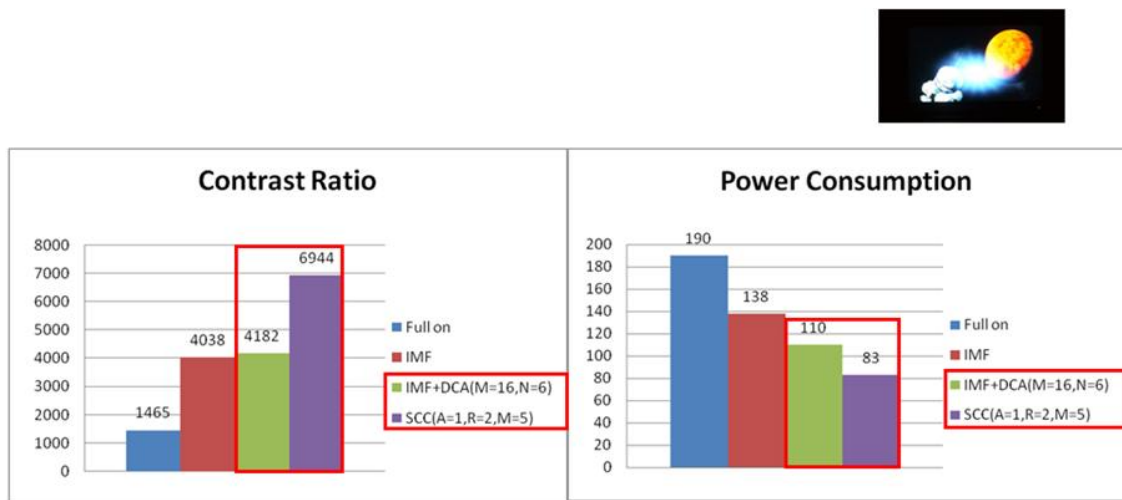


圖五十七、實驗流程圖

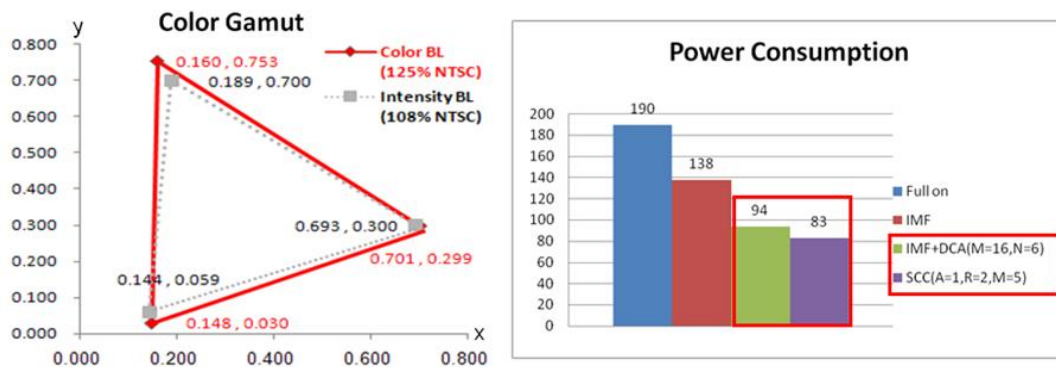
在高對比影像的實驗結果(圖五十八)中，兩個彩色背光演算法皆可以達到高對比度(~40000:1)與節省更多的功率。在中對比影像的實驗結果(圖五十九)中，兩個彩色背光演算法皆可以提昇高對比度與節省功率。在單一原色偏多的影像實驗結果(圖六十)中，兩個彩色背光演算法皆可以有效的提昇色彩飽和度從108% NTSC到125% NTSC與節省更多的功率。在高細節的影像結果(圖六十一)中，兩種彩色背光演算法皆可以維持影像的細節，幾乎與原本背光全亮的一模一樣。



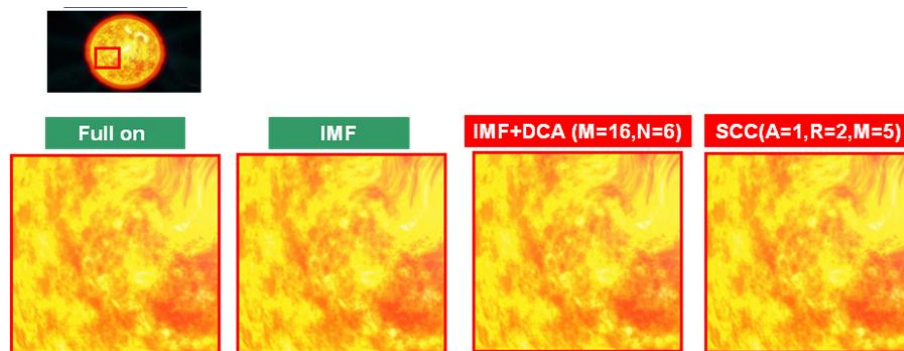
圖五十八、高對比影像實驗結果



圖五十九、中對比影像實驗結果



圖六十、單一原色偏多影像實驗結果



圖六十一、高細節影像實驗結果

c. Stencil-FSC 法

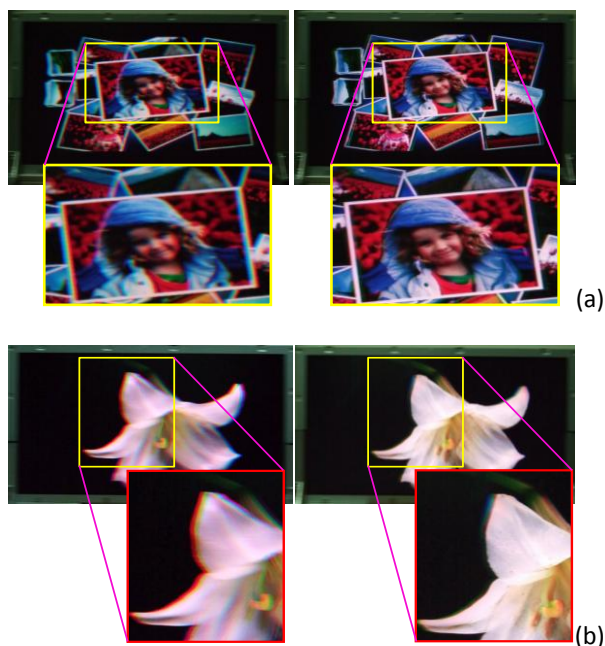
將 Stencil-FSC 硬體實現於 32 吋 OCB 液晶態的色序型液晶顯示器上，並以 Girl 及 Lily 這兩張圖片作為測試影像。在圖六十二(a)中第一個色場呈現一個大部分亮度及色彩內容的彩色影像，在接下來的紅、綠、藍三色場中表現剩餘的顏色細節而形成一個全彩的影像。這讓影像的能量能夠集中在第一個色場，減少紅、綠、藍三原色場的強度，達到抑制色分離的效果。



(a) 四色場的畫面 (b) Stencil-FSC 液晶顯示器

圖六十二、(a) Girl 在 Stencil-FSC 的 32 吋色序型液晶顯示器的四色場圖(b) Stencil-FSC 液晶顯示器的背光

為了捕捉色分離影像，我們將數位相機架在移動的平台上來模擬人眼運動。圖六十三的實驗照片顯示 Stencil-FSC 的確可有效地抑制色分離現象。此外，由於加上區域控制的 LED 背光，Girl 的對比度可以在功率消耗為 44 瓦的情況下被大幅提升至 5973:1。對於高對比度的 Lily 圖片，對比更能在功率消耗只有 35 瓦的情況下被提升至 27050:1。表七列出了三台 32 吋液晶顯示器(IPS-冷陰極燈管式的液晶顯示器、傳統 RGB 驅動的色序型液晶顯示器及 Stencil-FSC 液晶顯示器)在 Girl 及 Lily 兩張測試圖片的對比度、功率消耗、色分離現象及色彩飽和度。從實驗的結果可歸納 Stencil-FSC 法用在 32 吋色序型液晶電視上不僅可以抑制色分離現象，也在低功率消耗下達成高對比度的效果。



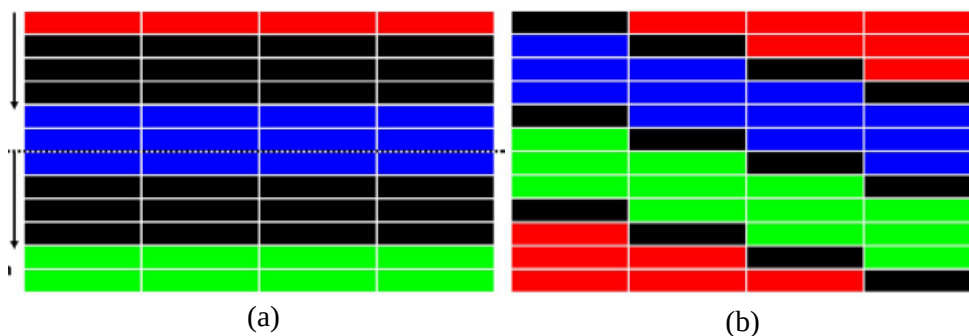
圖六十三、用傳統色序型液晶顯示器(左)及 Stencil-FSC(右)所實驗出來的色分離圖片(a) Girl 及(b) Lily

表七、三種 32 吋 LCD-TV 對 Girl 及 Lily 的對比度、功率消耗及最大顯色色域表現比較 (*: LCD 的最大色域 NTSC)

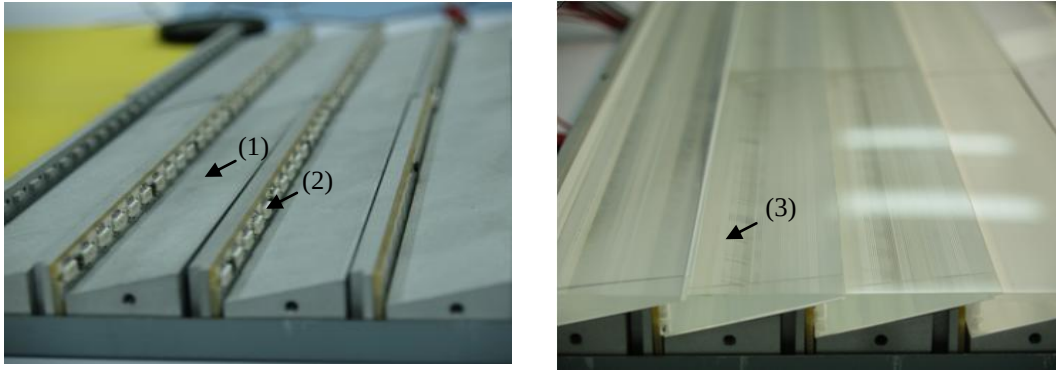
		IPS-CCFL	OCB- mode FSC (RGB-driving)	Stencil-FSC
 Girl	CR	692 : 1	442:1	5,973:1
	P (W)	105	67	44
	CBU	-----	Fig. 40a(left)	Fig. 40a(right)
 Lily	CR	766 : 1	512 : 1	27,050 : 1
	P (W)	105	67	35
	CBU	-----	Fig. 40b(left)	Fig. 40b(right)
NTSC*		72 %	114 %	114 %
Power consumption of a 32" conventional LED- based TV: ~180W				

子計畫三：

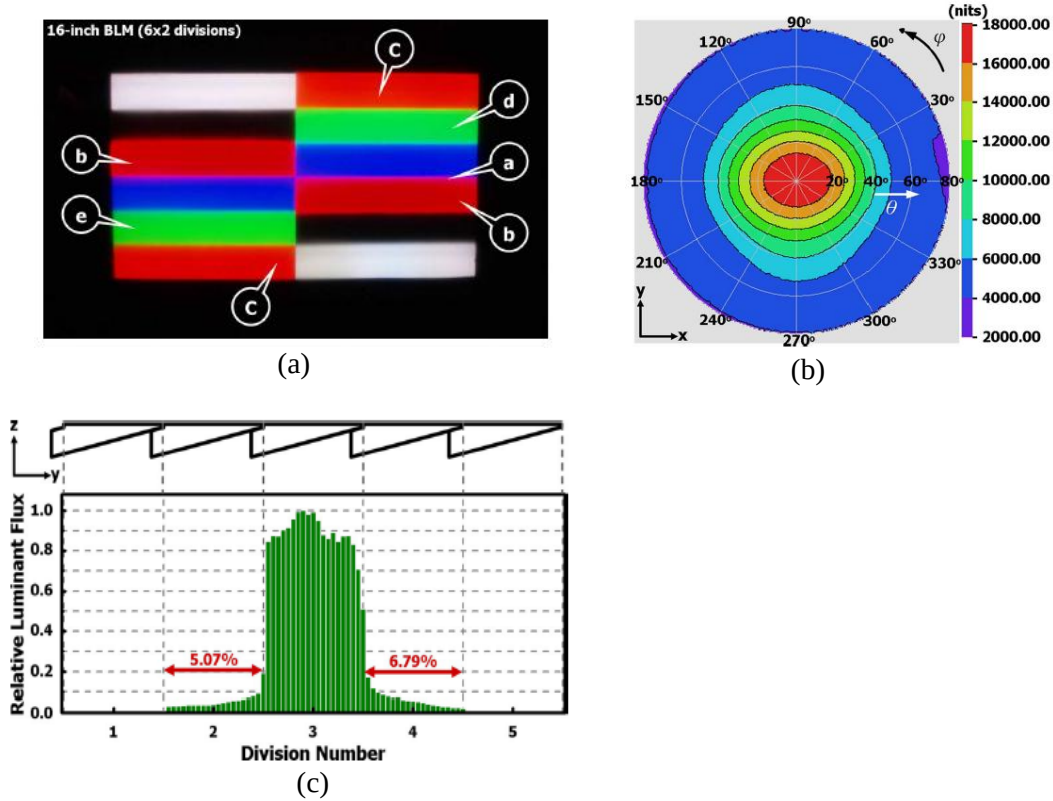
儘管已經實際建構出序列型高亮度動態範圍(FSC-HDR)顯示器的背光模組，然而直下式的設計會增加系統的體積以及 LED 顆數。是故近年來薄型化結構為大尺寸 LED 背光模組重要研發課題，為了針對側邊式掃描式色彩序列(Scanning Field Sequence Color FSC)驅動方式，本計畫亦同時設計並製作一組二維可控制局部區域性發光二極體背光模組以及對應的驅動方式。驅動方式如圖六十四所示。主要原理為將液晶面板分隔成數個區域(partition)，每個區域間成掃描式的接續驅動，將可降低液晶反應速度不足所產生的殘影、色分離等不良影響。此項技術電路採用與 CRT 類似的 impulse-type 驅動方式。單色影像資料訊號傳送給液晶時，待液晶讀取且反應後，才將該單色之 LED 光源點亮，而在下一筆單色光源影像資料訊號傳送給液晶之前，將該單色之 LED 光源關掉。藉由人眼視覺暫留，將 RGB 三色影像疊加而呈現完整的全彩畫面。光學分區設計概念主要落實在不同尺寸的背光模組光學設計上，我們利用非成像光學之邊緣光線理論(edge-ray theory)，根據不同的面板尺寸，設計並實做出改良後的分區結構 [“A Localized Partition Approach for High-Dynamic-Range Display,” SID07, P-69, 449-452 (2007)]。如圖六十五所示，於分區導光板底部各個位置設計不同尺寸的非對稱矩形微結構藉以控制出光角度分佈。以大尺寸背光為例，我們提出一特殊的楔型(wedge-type)導光板結構設計，可在不影響光學特性與混色均勻的前提下實現薄型大尺寸導光板架構，圖六十六顯示各分區背光靜態分佈情形，各區間的漏光影響僅為 11.86%，各區均勻度皆可達 83%，發散角(FWHM)可控制在正負 40 度以內，總背光模組厚度包含機構可壓縮至 25 mm，為 Scanning FSC 於大尺寸 LCD 上的進階設計[IEEE Journal of Display Technology, 4 p. 147-152 (2008).]。



圖六十四、 Illustration of multi-area scanning and sequential operation (a) 12 vertical partitions are set to operate in dual scanning with 50% duty cycle and (b) four horizontal divisions are used for 2D scanning algorithm.



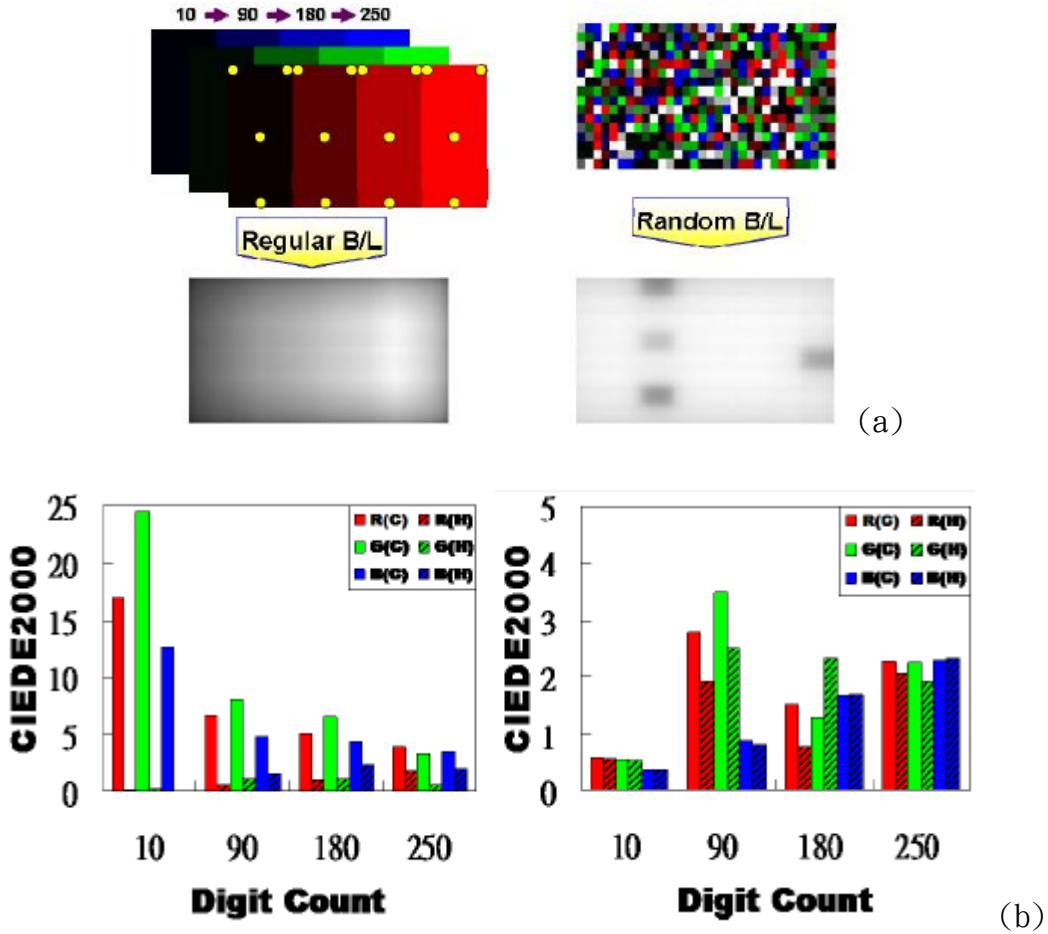
圖六十五、 Configuration of proposed scanning backlight module which consists of: (1) optomechanical holder and heat sink (2) RGGB LED light-bars (3) wedge-shaped light guides with micro line prism on the bottom, finally, diffusing and prism sheets were placed above the overall



圖六十六、 (a) A static striped flag pattern performed by the 6x2 backlight prototype. The indices a to e indicate the erroneous inter-field color mixture. For example, an unapparent purple line (marked a) was caused by the red and blue color mixing. Fortunately, such undesirable behavior can be alleviated by changing the sequence order with dual scanning. (b) Luminance in angular distribution of the light guide plate with diffusing and prism sheets. The FWHM of the elliptical luminance was $\theta_x = 37^\circ$ and $\theta_y = 30^\circ$, respectively. (c) Measured relative luminance flux leakage between five divisions. In this case, only the third division was illuminated, flux leak into adjacent region was 5.07% and 6.79%, respectively.

五.結論與建議

由前述研究方法中，我們可得知 HDR LCD 具有一對多的特性。在計算量測值分別與傳統液晶顯示器和 HDR 液晶顯示器的色彩特性化模型所預測的三刺激值之誤差，以 CIEDE2000 的色差值表示，如圖六十七所示。如圖中所示，傳統 LCD 所使用之模型無法計入背光隨影像信號的同步變化；而 HDR LCD 的模型則可充分計入背光變化，故會得到較小的誤差。在 random-mosaic 圖中的量測結果，雖然 HDR LCD 的色度模型仍相對準確，然其與傳統 LCD 的模型色差已相差不大，其原因在於背光分布的正確性。



圖六十七、(a)為 color-ramp 與 random-mosaic 測試影像(b)為色彩特性化模型驗證，CIEDE2000 色差表示：

(左)color-ramp (右)random-mosaic

背光分布的正確性影像所提之 HDR LCD 模型在預測三刺激值的可靠度。受限於目前背光的單顆發光二極體的光分布函數(light spread function, LSF)在背光中各處不同，使得目前普遍使用的 convolution 計算原則上無法得到正確背光分布估算。因此如何獲得正確的背光分布為一關鍵。至於適用於多原色區域可控式背光 HDR LCD 的色彩特性化模型以下列方程式(式 9、10)表示(以紅、綠、藍三原色為例)：

$$0 \leq f(d'_r), f(d'_g), f(d'_b) \leq 1 \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \sum_{l=R,G,B} \left\{ \sum_{i=r,g,b} \left\{ \begin{bmatrix} X_{il,di=\max} - X_{il,di=0} \\ Y_{il,di=\max} - Y_{il,di=0} \\ Z_{il,di=\max} - Z_{il,di=0} \end{bmatrix} f(d_i) L_l + \begin{bmatrix} X_{il,di=0} \\ Y_{il,di=0} \\ Z_{il,di=0} \end{bmatrix} L_l \right\} \right\} \quad (10)$$

其中， $f()$ 表示 LUT，大寫 R/G/B 用以表是三原色發光二極體，小寫 r/g/b 則表示紅、綠、藍三個次畫素(sub-pixel)。

Intensity control backlight (IMF method)

考慮在 intensity control 背光以色彩模型優化之 HDR 影像，其色彩正確性可以改善很多，如表八所示，尤其是色彩豐富的影像(Color Ball)，色彩正確性可以提高 85.6%，且色差為人眼可接受的色差範圍，另一方面，由於能夠準確的重現色彩，更可以維持 Lily 影像細節。

[表八] 比較傳統亮度補成與色彩模型補償之色差

CIEDE2000				
Target Images	Conventional intensity model	Proposed color model	Color accuracy	Acceptable
Lily	4.6	2.1	53.2%	◎
Color Ball	9.0	1.3	85.6%	◎

Color control backlight (IMF&DCA method)

我們使用 IMF 與 DCA 法控制彩色背光，藉由色彩模型大幅降低色偏現象，以色彩豐富影像(Color Ball)為例，色彩正確性提高 95%，此外 Lily 影像細節也能維持，且平均色差值皆為人眼可接受的範圍，如表九所示。

[表九] 比較傳統亮度補成與色彩模型補償之色差

CIEDE2000				
Target Images	Conventional intensity model	Proposed color model	Color accuracy	Acceptable
Lily	17.3	2.7	84.4%	◎
Color Ball	55.7	2.8	95.0%	◎

RCS 被用來評估色序型顯示器的色分離現象。按照色分離邊緣的視覺反應進行以視覺為基礎的驗證在 RCS 的值和心理物理學的 MOS 之間的絕對相關係數高達 98.9%。在四個抑制色分離現象的驅動方式之間的比較被表示在出現 RCS 最小值之處。此結果論證了 RCS 比起 CIEDE2000 更適合被用來做為色分離現象的評估。要改善 RCS 尚有幾個工作需要處理。首先，雖然 RCS 可能適用於二維的複雜圖像，但是周圍分離的色分離邊緣對於複雜的影像是一大挑戰。其次，需要從不同種類的色序型液晶顯示器，以及不同的觀測環境下，收集

更多的心理物理實驗數據。最後建議以高速相機取代合成的色分離影像。

本計畫第一年提出 Inverse of Mapping Function (IMF)法及模糊遮罩法(Blur Mask Method)。在取得背光訊號後以 IMF 的方法再將背光訊號做調整，以獲取更合適的背光灰階值。其次，依據背光訊號的變化補償出相對應的液晶補償訊號可維持影像亮度並使影像細節清楚呈現。另外，由於液晶補償採用的捲積法(Convolution Method)計算量龐大，在硬體實現上為一大困難，故提出另一種用於模擬背光分布的方法-模糊遮罩法(Blur Mask Method)，其演算法可以簡化運算的複雜度。由實驗結果可知，IMF 法適用於背光訊號的決定，在對比度的表現上，不但將原本的 CR 值提升突破 20,000:1，畫面最大亮度也直逼傳統液晶顯示器，而模糊遮罩法其本身背光模擬是由原本 8×8 的背光灰階影像模糊而來，可以保留原始影像的亮度特性，在相對於影像之亮處，背光模擬會提供相對高亮度的背光值，這在液晶補償上可以降低由捲積法之背光模擬的液晶補償失敗的情況，因此模糊遮罩法比捲積法能展現更多的畫面細節。

本計畫第二年提出兩種新的彩色背光調變演算法 Delta-Color Control (DCA)法及 Segment-Color Control (SCC)法。DCA 法能夠套用在不同灰階控制的背光演算法中，因為 DCA 是以灰階控制為基礎去調變 LED。而 SCC 法相對 DCA 法演算更為簡單，因為 SCC 法是直接計算畫面的彩色背光。由實驗的結果可知，此兩種演算法在高對比度的畫面時，不僅能達到高對比度(~40000:1) 也能夠將影像細節維持得很清晰。而且，此兩種演算法能夠提升顯示器的色彩飽和度至 125% NTSC。此外，其功率消耗也比傳統 CCFL 型液晶顯示器及灰階背光控制液晶顯示器來的低。因此，DCA 法與 SCC 法可以是未來彩色背光調變液晶顯示器應用的一種選擇。

本計畫第三年提出了 Stencil-FSC 法，在有限的驅動頻率下(240Hz)，能夠有效抑制傳統色序行液晶顯示器的色分離現象。藉由第一個色場呈現大部分的亮度及色彩內容，其他三個色場的亮度可以被大幅降低，使得幾乎察覺不到色分離。在背光分區數的最佳化後，色分離的抑制相對於傳統 RGB 驅動來說，平均可以改善 50%以上。此外，Stencil-FSC 亦被實現在 32 吋的色序型液晶電視上，不僅得到 27050:1 的高影像對比度、低於 40 瓦的平均消耗功率、114%NTSC 的寬廣色域表現。最重要的是 Stencil-FSC 在液晶反應時間的限制下成功地抑制了色分離。因此，Stencil-FSC 液晶顯示技術將成為新世代高畫質綠色節能顯示器的重要技術之一。

六.計畫成果自評

子計畫一完成 iCAM06 的程式撰寫，修正了圖使報告中的色彩矩陣錯誤，並依據本計畫系統特性掌握調變參數。而 HDR-LCD 色彩模型，不僅考慮傳統液晶顯示器的漏光項，同時考慮 dimming 背光強度作為修正項，因此可以準確的預測 HDR 影像之色彩表現。藉由準確的色彩模型建立，實際應用到硬體，優化後的 HDR 影像成功地實現了與目標影像具有相同的亮度以及色度並且維持影像細節。

將子計畫一已完成 Inverse of Mapping Function (IMF)的方法將背光訊號再做調整，以獲取更合適的背光灰階，搭配液晶訊號之補償，依據背光訊號之變化，補償出相應之液晶訊號，完成目標影像的展現。再加上模糊遮罩法，不僅可以大幅減少運算量及硬體負荷，同

時也可以解決捲積法之 LSF 邊界效應問題。

子計畫二已完成彩色背光調變 Delta-Color-Adjustment (DCA) 演算法及 Segment-Color-Control (SCC)演算法的開發。此兩種背光演算法都相當簡單，搭配液晶訊號之補償，此兩演算法在高對比的圖片皆可以達到高對比(~40000:1)；在色彩偏向性高的圖片可以達到高色彩飽和度(125% NTSC)。除此之外，幾乎都可以更有效的節省功率損耗(40~50%)。DCA可以對各種不同的黑白背光做優化而SCC可以直接查表獲得彩色背光。在本計劃的實驗中，DCA中重要的參數為M=16 與 N=6; SCC中重要的參數為A=1, R=2, M=5。

本計畫第三年已完成 Stencil-FSC 演算法的開發，有效抑制色序型液晶顯示器的色分離現象。考慮色分離現象的抑制及硬體運算的複雜度，最佳化的 Stencil-FSC 硬體參數被實現於 32 吋色序型液晶顯示器上。利用這樣的技術，畫面的影像對比度不僅比傳統冷陰極燈管式的液晶顯示器提高 10 倍以上，而且平均功率消耗也大幅降低至 40 瓦以下，約僅有現行液晶顯示器的 35%能量消耗。

● 已發表之國際期刊及研討會論文

- [1] Yu-Kuo Cheng, and Han-Ping D. Shieh, "Colormetric Characterization of High-Dynamic-Range LCDs" SID Symposium Digest Tech Paper(2008)
- [2] Yi-Ling Chen, et al., "Color Optimization Model for High Dynamic Range LCDs with RGB Color Backlights," SID09, pp. 636-639, 2009
- [3] Chun-Ho Chen, Ke-Horng Chen, Yi-Pai Huang, Han-Ping D. Shieh, and Ming-Tsung Ho, Society for Information Display 2008 (SID'08), pp. 1096-1099.
- [4] Chun-Ho Chen, Fang-Cheng Lin, Yi-Pai Huang, Ya-Ting Hsu and Han-Ping D. Shieh "A Field Sequential Color LCD Based on Color Fields Arrangement for Color Breakup and Flicker Reduction", Journal of Display Tech., vol. 5(1), pp. 34-39.(2009)
- [5] Chun-Ho Chen and Han-Ping D. Shieh, "Effects of Backlight Profiles on Perceived Image Quality for High Dynamic Range LCDs," IEEE/OSA Journal of Display Technology (JDT), Vol. 4(2), pp. 153-159, 2008.
- [6] Yu-Kuo Cheng and Han-Ping D. Shieh, "Relative Contrast Sensitivity for Color Break-Up Evaluation in Field-Sequential-Color LCDs," Journal of Display Tech., Vol. 5(10), pp.379-384. (2009)
- [7] Guo-Zhen Wang, Yi-Pai Huang, Fang-Cheng Lin, Han-Ping D. Shieh, and Szu-Che Yeh, "Delta-Color Adjustment (DCA) Method for Color Controlled Backlight of High Dynamic Range LCD TVs," SID Symposium Digest Tech Papers, vol. 39, pp. 768-771, (2008)
- [8] Guo-Zhen Wang, Yi-Pai Huang, Szu-Che Yeh, SID Symposium Digest Tech Papers, vol. 15, pp. 757-759, (2009)
- [9] Guo-Zhen Wang, Fang-Cheng Lin, Yi-Pai Huang, and Han Pin D. Shieh, "Delta-Color

Adjustment (DCA) for Spatial Modulated Color Backlight Algorithm on High Dynamic Range LCD TVs," submitted to J. Display Technol.

- [10] Fang-Cheng Lin, et al., "Dynamic Backlight Gamma on High Dynamic Range LCD TVs," accepted by *IEEE/OSA JDT*, 2008/01.
- [11] Fang-Cheng Lin, et al., "Inverse of mapping Function (IMF) Method for Image Quality Enhancement of High Dynamic Range LCD TVs", *SID07 Digest*, pp. 1343-1346, 2007.
- [12] Lin-Yao Liao, et al., "A Real-Time Liquid Crystal Signal Compensation Method for High Dynamic Range LCD," *2007IDW*, pp. 1433-1434
- [13] Cheng-Yu Liao, et al., "Inverse of Mapping Function Method for Image Quality Enhancement of Dual-Panel Displays," *IDMC 2007*, pp.431-434
- [14] F. C. Lin, Y. P. Huang, C. M. Wei, and H. P. D. Shieh, "Color Breakup Suppression and Low Power Consumption by Stencil-FSC Method in Field-Sequential LCDs," *J. Soc. Info. Display*, vol. 17(3), pp. 221-228 (2009).
- [15] F. C. Lin, Y. P. Huang, C. M. Wei, and H. P. D. Shieh, "Color Filter-Less LCDs in Achieving High Contrast and Low Power Consumption by Stencil Field-Sequential- Color Method," *J. Display Technol.*, vol. 6(3), pp. 98-106 (2010).
- [16] F. C. Lin, Y. P. Huang, and H. P. D. Shieh, "Color Breakup Reduction by 180Hz Stencil-FSC Method in Large-Sized Color Filter-Less LCDs," *J. Display Technol.*, vol. 6(3), pp. 107-112 (2010).
- [17] Y. P. Huang, F. C. Lin, C. C. Tsai, and H. P. D. Shieh, "Stencil Field-Sequential Color Method for Color Breakup Suppression on 180Hz LCD-TV," *Eurodisplay Symp. Digest Tech Papers*, vol. 29, (2009).

● 專利

- [1] 王國振,林芳正,黃乙白,汪德美,葉斯哲,謝漢萍"高動態範圍液晶顯示器彩色背光演算."
台灣申請號(TW) : 96141050@2007/10/31 公告證書號 : I328212@20100801
大陸申請號(CN) : 200710187301 @2007/11/19 公開號 : 101162565 @ 2008/04/16
- [2] 王國振, 黃乙白,簡民峰, 葉斯哲, 謝漢萍, "高動態範圍液晶顯示器分段控制彩色背光演算"
台灣申請號(TW) : 97723575 @20080624
- [3] 林芳正,黃乙白,魏景明,謝漢萍, "降低液晶顯示器色分離之顯示方法."
台灣申請號(TW) : 096141627 @2007/11/05 公開號 : 200921609 @20090516

美國申請號(US)：12/003,995 @2008/01/04 公開號：US 20090115719 A1 @2009/05/07
“Display method for LCD device with reduced color break-up”

- [4] 林芳正,黃乙白,魏景明,謝漢萍,“壓縮反應時間之畫面控制訊號產生方法.”
台灣申請號(TW)：096146958 @2007/12/10 公開號：200926120 @2009/06/16
美國申請號(US)：12/007,323 @2008/01/09 公開號：US 20090146990 A1 @2009/6/11
“Method of generating frame control signal for reducing reaction time”

- [5] 魏景明,黃乙白,林芳正,謝漢萍,“色序法顯示器之顯示方法.”
台灣申請號(TW)：97131042 @2008/08/14 公開號：201007680@ 2010/02/16

參考文獻

- [1] H. Seetzen, Lorne A. Whitehead, and Greg Ward, “A High Dynamic Range Display Using Low and High Resolution Modulators”, *SID Symposium Digest Tech Papers*, vol. **34**, pp. 1450-1453, (2003).
- [2] H. Seetzen, et al., “High Dynamic Range Display Systems”, *SIGGRAPH 2004*, ACM Transactions on Graphics, **23**(3), pp. 760-768, 2004.
- [3] E.Y. Oh, S. H. Baik, M. H Sohn, K. D. Kim, H. J. Hong, J. Y. Bang, K. J. Kwon, M. H. Kim, H. Jang, J. K. Yoon, and I. J Chung, “IPS-mode dynamic LCD-TV realization with low black luminance and high contrast by adaptive dynamic image control technology”, *J Soc Info Display*, vol. **13**, pp. 215-219, (2005).
- [4] Y. W. Wang, et al., “Analyses of Point spread function in high dynamic range display system,” *Optics and Photonics Taiwan 2005*, No. G-SA-X 4-3 (2005).
- [5] Dong-Min Yeo, Yong-hoon Kwon, Eui-Jeong Kang, Se-Ki Park, Byungchoon Yang, Gicheul Kim, and Taeseok Jang, “Smart Algorithm for Local Dimming LED Backlight”, *SID Symp. Digest Tech Papers*, vol. **39**, pp. 986-989 (2008)
- [6] F. Yamada, H. Nakamura, Y. Sakaguchi, Y. Taira, “Sequential-color LCD based on OCB with an LED backlight,” *J. of Info. Display* **10**, pp. 81-85 (2002).
- [7] I. Miettinen, R. Näsänen, and J. Häkkinen, “Effects of Saccade Length and Target Luminance on the Refresh Frequency Threshold for the Visibility of Color Break-Up,” *J. of Display Technology*, 4(1), pp. 81-85 (2008).
- [8] E. H. A. Langendijk, S. Swinkels, D. Eliav, and M. Ben-Chorin, “Suppression of color breakup in color-sequential multi-primary projection displays,” *J. of Info. Display*, Vol. **14**, pp.325-329 (2006).
- [9] N. Koma and T. Uchida, “A new field-sequential- color LCD without moving-object color break- up,” *J. of Info. Display*, Vol. **11**, pp. 413-417 (2003).
- [10] C. H. Chen, F. C. Lin, Y. T. Hsu, Y. P. Huang, and H. P. D. Shieh, “A Field Sequential Color LCD Based on Color Fields Arrangement for Color Breakup and Flicker Reduction,” accepted by *Journal of Display Tech.* (2008/06).
- [11] Y. P. Huang, K. H. Chen, C. H. Chen, F. C. Lin, and H. P. D. Shieh, “Adaptive LC/BL Feedback Control in Field Sequential Color LCD Technique for Color Breakup Minimization,” *Journal of Display Tech.*, Vol. **4**(3), pp. 290-295 (2008).

- [12] Guo-Zhen Wang, Yi-Pai Huang, Fang-Cheng Lin, Han-Ping D. Shieh, and Szu-Che Yeh, "Delta-Color Adjustment (DCA) Method for Color Controlled Backlight of High Dynamic Range LCD TVs," *SID Symposium Digest Tech Papers*, vol. **39**, pp. 768-771, (2008)
- [13] Guo-Zhen Wang, Fang-Cheng Lin, Yi-Pai Huang, and Han Pin D. Shieh, "Delta-Color Adjustment (DCA) for Spatial Modulated Color Backlight Algorithm on High Dynamic Range LCD TVs," *submitted to J. Display Technol.*
- [14] Guo-Zhen Wang, Yi-Pai Huang, and Szu-Che Yeh, *SID Symposium Digest Tech Papers*, vol. **15**, pp. 757-759, (2009)
- [15] F. C. Lin, L. Y. Liao, C. Y. Liao, Y. P. Huang, H. P. D. Shieh, T. M. Wang, and S. C. Yeh, "Dynamic Backlight Gamma on High Dynamic Range LCD TVs," *J. Display Technol.*, vol. **4**(2), pp. 139-146 (2008).
- [16] L. Y. Liao, F. C. Lin, Y. P. Huang, H. P. D. Shieh, and S. C. Yeh, "A Real-Time Liquid Crystal Signal Compensation Method for High Dynamic Range LCD," *IDW'07*, pp. 1433-1434 (2007/12).
- [17] G. Z. Wang, Y. P. Huang, F. C. Lin, H. P. D. Shieh, S. C. Yeh, and Julienne Lyu, "Delta-Color Adjustment (DCA) Method for Color Controlled Backlight of High Dynamic Range LCD-TVs," *SID Symposium Digest Tech Papers*, vol. 39, pp. 768-771 (2008/5).
- [18] M. Anandan, "Progress of LED backlights for LCDs," *Journal of the SID* **16-2**, pp. 287-310, (2008).
- [19] Yoichi Taira, et al., "Color Filterless Liquid Crystal Display Illuminated with LEDs," *SID International Symposium. Digest Tech Papers*, pp. 1250-1253, (2003).
- [20] F. Yamada, et al., "Sequential-color LCD based on OCB with an LED backlight," *Journal of the SID*, **10-1**, pp. 81-85, 2004.
- [21] Toni Jarvenpaa, "Measuring Color Breakup of Stationary Images in Field-Sequential-Color Displays," *SID International Symposium. Digest Tech Papers*, 7.2, (2004).
- [22] Yuan-Jung Yao, Yen-Hsing Lu, and Chung-Hao Tien, "Tandem Light-Guide with Prismatic Micro-Bumps Structures for Field-Sequential-Color Scanning Backlight Module," *IDMC 2007*, pp. 409-412 (2007/7).
- [23] Yen-Hsing Lu, Yuan-Jung Yao, Jen-Chang Hsiao, and Chung-Hao Tien, "A Scanning Backlight Module for FSC-LCD Using Tandem Light-Guides with Micro-Line Prism Structures," *SID Symposium Digest Tech Papers* 39, pp. 1618-1620, (2008).
- [24] Chung-Hao Tien, Yen-Hsing Lu, and Yuan-Jung Yao, "Tandem Light-Guides with Micro-Line-Prism Arrays for Field-Sequential-Color Scanning Backlight Module," *Journal of Display Technology*, Vol. 4, No. 2, pp. 147-152, (2008/6)
- [25] F. C. Lin, Y. P. Huang, C. M. Wei, and H. P. D. Shieh, "Stencil-FSC Method for Color Break-Up Suppression and Low Power Consumption in Field-Sequential LCDs," *SID Symposium Digest Tech Papers*, vol. 39, No.71.5, 2008.
- [26] Y. R. Cheng, et al., "Two-color-field Driving Scheme for Color Filterless LCD-TV," *IDMC 09*
- [27] Y. K. Cheng, et al., "Two-Color-Field Sequential Method for color-Filter-Free MVA-LCDs," *SID 09*.
- [28] Chung-Hao Tien, Yen-Hsing Lu, and Yuan-Jung Yao, "Tandem Light-Guides with Micro-Line-Prism Arrays for Field-Sequential-Color Scanning Backlight Module," *Journal of Display Technology*, Vol. 4, No. 2, pp. 147-152, (2008/6)

- [29] K. Kälantär, et al., "Spatio-Temporal Scanning Backlight for Color-Field Sequential Optically Compensated Bend Liquid-Crystal Display," *SID International Symposium. Digest Tech Papers*, pp. 1316-1319, (2005).
- [30] K. Sekiya, et al., "Spatio-Temporal Scanning LED Backlight for Large Size Field Sequential Color LCD," *IDW'05 Technical Digest*, pp. 1261-1264, (2005).
- [31] H. Seetzen, et al., "High Dynamic Range Display Systems," *ACM Trans. on Graphics (Proc. of SIGGRAPH)*, 23(3): 760-768 (2004).
- [32] T. Shirai, et al., "RGB-LED Backlights for LCD-TVs with 0D,1D,and 2D Adaptive Dimming", *SID Symposium Digest Tech Papers.*, 44.4, 2006.
- [33] Inseok Choi, et al., "DLS-Dynamic Backlight Luminance Scaling of Liquid Crystal Display", *IEEE Trans.VLSI Syst.*, Vol.12, p.837-846, 2004.
- [34] Yen-Hsing Lu, Yu-Kuo Cheng, Chung-Hao Tien, "A Localized Partition Approach for High-Dynamic-Range Display," *SID Symposium Digest Tech Papers.*, P-69, 449-452 (2007)
- [35] K. Kälantär , "Highly Light Collimating Unit for Realization of Mosaic Structure Large Size RGB Backlight," *IDW'05 Technical Digest*, pp. 1273-1276, (2005).
- [36] Yen Hsing Lu and Chung-Hao Tien, "A Novel Direct-LED-Backlight Unit Using Grooved Hexagonal Light-Guide Plate," *SID Symposium Digest Tech Papers.*, 44.2, 1513-1516, (2006).
- [37] Fang-Cheng Lin, Lin-Yao Liao, Cheng-Yu Liao, Yi-Pai Huang, and Han-Ping D. Shieh, "Dynamic Backlight Gamma on High Dynamic Range LCD TVs", *Journal of Display Technology*, Vol. **4**, No. **2**, pp. 139-146, (2008/6)
- [38] Fang-Cheng Lin, Cheng-Yu Liao, Lin-Yao Liao, Yi-Pai Huang, and Han-Ping D. Shieh, "Inverse of Mapping Function (IMF) Method for Image Quality Enhancement of High Dynamic Range LCD TVs," *SID Symposium Digest Tech Papers* **38**, pp. 1343-1346, (2007/5).
- [39] Cheng-Yu Liao, Fang-Cheng Lin, Lin-Yao Liao, Yi-Pai Huang, and Han-Ping D. Shieh, "Inverse of Mapping Function Method for Image Quality Enhancement of Dual-Panel Displays," *IDMC 2007*, pp.431-434 (2007/7).
- [40] Guo-Zhen Wang, Yi-Pai Huang, Fang-Cheng Lin, Han-Ping D. Shieh, Szu-Che Yeh, and Julianne Lyu, "Delta-Color Adjustment (DCA) Method for Color Controlled Backlight of High Dynamic Range LCD-TVs," *SID Symposium Digest Tech Papers*, **39**, No. 51.2, 2008.
- [41] Perduijn, et al., "Light Output Feedback Solution for RGB LED Backlight Applications," *SID Symposium Digest Tech Papers*, pp. 1-3, (2000).
- [42] G. Harbers, et al., "High Performance LCD Backlighting using High Intensity Red, Green and Blue Light Emitting Diodes," *SID Symposium Digest Tech Papers*, pp. 702-705, (2001).
- [43] Hoelen, et al., "LCD Backlighting with High Luminescent Colored Light Emitting Diodes," *SID Symposium Digest Tech Papers*, LS-9, (2001).
- [44] G. Harbers, et al., "LED Backlighting for LCD-HDTV," *SID Symposium Digest Tech Papers*, I-13.2, (2002).
- [45] R. S. West, et al., "High Brightness Direct LED Backlight for LCD-TV," *SID Symposium Digest Tech Papers*, pp. 1262-1265, (2003).
- [46] Seiji Sakai, et al., "A Thin LED Backlight System with High Efficiency for Backlighting 22-in. TFT-LCDs," *SID Symposium Digest Tech Papers*, pp. 1218-1221, (2004).
- [47] K. Kälantär, et al., "Functional Light-Guide Plate Characterized by Direct Light-Extraction Microstructures for Luminance Enhancement of the Transmissive and Transflective LCD

- Backlight Units," *IDW'02 Technical Digest*, pp. 509-512, (2002).
- [48] H. Ohtsuki, et al., "TFT-LCD with more than 100%-NTSC color reproduction using LED-Backlighting and well tuned TFT-LCD panel," *IDW'04 Technical Digest*, pp.687-690, (2004).
 - [49] A. Funamoto, et al., "Prism-sheetless High Bright Backlight System for Mobile Phone," *IDW'04 Technical Digest*, pp. 497-500, (2004).
 - [50] K. Käläntär, et al., "RGB-LED Backlighting MonitorTV for Reproduction of Images in Standard and Extended Color Spaces," *IDW'04 Technical Digest*, pp. 683-686, (2004).
 - [51] Yoichi Taira, et al., "Color Filterless Liquid Crystal Display Illuminated with LEDs," *SID Symposium Digest Tech Papers*, pp. 1250-1253, (2003).
 - [52] F. Yamada, et al., "Sequential-color LCD based on OCB with an LED backlight," *Journal of SID*, Volume 10, Issue 1, pp. 81-85, 2004.
 - [53] A. Voronovich, "Small-slope Approximation for Electromagnetic Wave Scattering at a Rough Interface of two Dielectric Half-spaces, " *Wave in Random Media* 4, 337-367 (1994).
 - [54] A. Voronovich, *Wave Scattering from Rough Surfaces*, 2nd Edition (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg , 1994).
 - [55] K. E. Torrance and E. M. Sparrow, "Theory for Off-Specular Reflection from Roughened Surface," *J. Opt. Soc. Am.* **57**, 1105-1114 (1967).
 - [56] B. van Ginneken, M. Staveridi and J. J. Koendrik, "Diffuse and Specular Reflectance from Rough Surface," *Appl. Opt.* **37**, 130-139 (1998).
 - [57] K. Tang and R. O. Buckius, "A Statistical Model of Wave Scattering from Random Rough Surfaces," *Int. J. Heat Mass Transfer* **44**, 4095-4073 (2001).
 - [58] L. Tsang, J. A. Kong, K. -H. Ding and C. O. Ao, *Scattering of Electromagnetic Waves, Numerical Simulations* (Wiley, New York, 2000).
 - [59] F. D. Hastings, J. B. Schneider, and S. L. Broschat, "A Monte Carlo FDTD Technique for Rough Surface Scattering," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **43**, 1183-1191 (1995).
 - [60] N. Garcia and E. Stoll, "Monte Carlo Calculation for Electromagnetic-Wave Scattering from Random Rough Surfaces," *Pgys. Rev. Lett.*, **52**, 1798-1801 (1984).
 - [61] A. M. Nuijs and J. J. L. Horikx, "Diffraction and Scattering at antiglare structures for display devices," *Appl. Opt.*, **33**, 4058-4068 (1994).
 - [62] J. E. Harvey and C. L. Vernold, "Transfer Function Characterization of Scattering Surface," *Proc. SPIE* **3141**, 113-127 (1997).
 - [63] M. W. Hodapp, "Applications for High-Brightness Light-Emitting Diodes" in *Semiconductors and Semimetals Vol. 48*, G. B. Stringfellow and M. G. Craford ed., (Academic Press, San Diego, 1997) *Semiconductors and Semimetals Vol. 48*, Chap. 6.