

國立臺灣師範大學跨域科技產業創新研究學院

AI 跨域應用研究所

碩士論文

Graduate Institute of AI Interdisciplinary Applied Technology

College of Interdisciplinary Industry-Academia Innovation

National Taiwan Normal University

Master's Thesis

基於巨觀邊緣感知與對比圖分析的高動態範圍成像

High Dynamic Range Imaging via Macro-Edge Awareness and
Contrast Map Analysis

鄭翔元

Hsiang-Yuan Cheng

指導教授：高文忠 博士

Advisor: Wen-Chung Kao, Ph. D.

中華民國 114 年 7 月

July 2025

致謝

研究所的旅程即將劃下句點，回首這段日子，既充實又充滿驚喜。首先，我要衷心感謝我的指導教授——高文忠教授。感謝老師以開放的胸懷接納來自不同背景的學生，讓我得以在實驗室中學習與成長。老師不僅擁有深厚的專業與研究成就，也經常與我們談笑風生，毫不吝嗇地分享人生經驗與研究心得。老師常以「獵人」作比喻，提醒我們不要自我設限，要廣泛吸收各種養分，持續累積實力。老師的人生故事與研究態度，鼓舞我勇於挑戰與跨越界線。更感謝老師給予極大的自由與彈性，讓我能在開放的環境中探索，並透過多次產學合作機會提早培養實戰能力。我很慶幸能在研究所階段跟隨如此傑出的老師，也希望未來能不負所託走出自己的一片天。

我也要感謝實驗室的學長、學弟與同學們，一起營造出輕鬆卻積極的氛圍，讓學習與休閒在歡笑聲中交織。特別感謝忠謀與璽文兩位學長，為我們樹立了學術與生活的榜樣，指引我們少走許多彎路，也很懷念與你們在實驗室討論學術、熬夜奮戰、玩桌遊、吃宵夜的時光。尤其是與忠謀討論研究，那份純粹的求知熱情，總能激起我全力投入的動力。也感謝同屆的夥伴——少榆、秋貴、陳灝、鈺珊。在研究與生活上的互相扶持，特別是少榆，感謝你在我繁忙時總願意陪我跑步、熬夜，是我在研究與休閒上的好戰友。此外，還要感謝學弟宇彤、柏睿，總是樂於幫我分擔雜事，讓我能專心研究。特別是宇彤，總能帶來輕鬆愉快的氣氛，雖然有時直言不諱，但在關鍵時刻總是義無反顧地幫忙，解決了許多問題。

此外，我要感謝我的女友虹均。在碩二最繁忙的時期遇見你，是我最大的幸運。謝謝你在我忙碌時不離不棄，體諒我的時間安排，聽我分享生活、陪我熬夜，讓我在最艱難的階段也不感孤單。你的陪伴與支持，是我能夠走到最後的重要力量。最後，要感謝我的家人，給予我充分的自由與信任，讓我能安心投入研究，也在我做決定時給予肯定與鼓勵。尤其是在剛進實驗室、對自己缺乏信心時，是家人的打氣讓我能抬頭挺胸地走下去。碩士生涯雖將告一段落，但這段旅程中獲得的經驗與感動，將伴隨我繼續前行，願大家在各自的道路上，都能展翅高飛、前程似錦。

基於巨觀邊緣因感知與對比圖分析的高動態範圍成像

學生：鄭翔元

指導教授：高文忠 教授

國立臺灣師範大學 AI 跨域應用研究所

摘要

本研究主要探討高動態範圍影像處理中，在極端光照條件下的影像主體重建與色調映射問題。當畫面遭遇強烈背光、低光源或大面積背景干擾時，傳統的影像處理方法經常無法有效地凸顯主體，且在壓縮動態範圍過程中容易造成細節喪失與色彩失真。本研究針對上述問題，提出一套考慮巨集邊緣資訊的影像處理方法，結合全域與區域對比度評估，透過調整適合的色調映射曲線，使暗部細節清晰且避免亮部過曝。此外，研究中亦針對色彩還原問題，於色彩轉換過程中引入色域映射模型的補償機制，有效避免傳統方法常見的色相偏移與飽和失真現象。本論文透過實驗驗證所提出方法的有效性，並經由業界常見的客觀指標評估其在亮度、色彩準確性與視覺對比度上的改善效果，期望能提供未來影像訊號處理系統設計的重要參考。

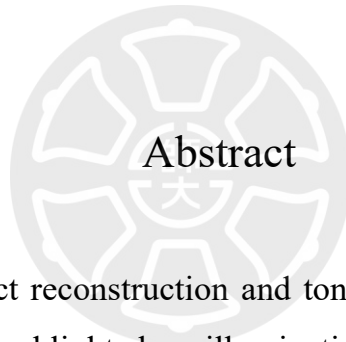
關鍵字：高動態範圍、色調重現、色域映射、對比增強

High Dynamic Range Imaging via Macro-Edge Awareness and Contrast Map Analysis

Student : Hsiang-Yuan Cheng

Advisor : Dr. Wen-Chung Kao

Graduate Institute of AI Interdisciplinary Applied Technology
National Taiwan Normal University



Abstract

This study addresses subject reconstruction and tone mapping in HDR images under extreme lighting—strong backlight, low illumination, or large-area distractions. We propose a framework that leverages macro-edge information and combines global and local contrast evaluation to adapt tone-mapping curves, preserving shadow detail without over-exposing highlights. To improve color fidelity, an OKLab-based compensation is applied during color conversion, reducing hue shifts and saturation errors. Experimental results and VCX metrics confirm notable gains in luminance reconstruction, color accuracy, and visual contrast, offering a practical reference for future ISP system design.

Keywords: HDR, Tone Reproduction, Tone Mapping, Contrast Enhancement

目錄

致謝	i
摘要	ii
Abstract	iii
目錄	iv
表目錄	vii
圖目錄	viii
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	2
1.2 研究問題及目的	4
1.2.1 主體資訊在極端光照下的重建困難	4
1.2.2 色調映射過程中的細節流失	6
1.2.3 色彩還原過程中的飽和值與偏色問題	6
1.3 提出的方法	7
1.4 論文架構	8
第二章 文獻探討	9
2.1 一般性彩色影像訊號處理流程	9
2.2 色調映射演算法	10
2.2.1 直方圖等化與其最佳化改進方法	12
2.2.2 攝影色調映射演算法	13
2.2.3 快速頻率分割色調重現	15
2.2.4 區域對比圖評估色調重現	17
2.2.5 梯度導向色調曲線增強法	19
2.3 高動態範圍影像邊緣抽取	20
2.3.1 基於多重曝光融合之高動態範圍影像邊緣抽取	20
2.3.2 亮度條件自適應之多重濾波邊緣補償	22

第三章 研究方法	23
3.1 整體系統架構說明	23
3.2 巨集邊緣抽取模組設計	26
3.2.1 巨集區塊大小選擇與人眼視覺頻率響應分析	27
3.2.2 高低亮度補償係數設計	29
3.3 色調映射模組設計	31
3.3.1 影像初始縮放	32
3.3.2 中間灰參數計算	33
3.3.3 中央測光權重矩陣亮度估測	33
3.3.4 影像對比圖壓縮映射	35
3.3.5 影像對比圖評估	36
3.4 色彩還原補償模組	38
3.5 AI 顯著圖方法	41
第四章 實驗結果	43
4.1 實驗環境與設備	44
4.2 評估指標與評測方法	46
4.2.1 亮度分析與評估指標	47
4.2.2 色彩正確性分析與評估指標	48
4.2.3 對比度分析指標	48
4.3 影像亮度調節分析	49
4.3.1 與攝影色調重現之亮度比較	50
4.3.2 與快速頻率分割色調重現亮度比較	51
4.3.3 與區域對比評估色調重現亮度比較	53
4.3.4 與梯度導向色調曲線增強法亮度比較	54
4.3.5 與 AI 顯著圖方法亮度比較	56
4.4 影像色彩正確性分析	57
4.5 影像對比度分析	59

4.5.1 影像全域對比度分析	60
4.5.2 影像區域對比度分析	61
4.6 人工偽影與色彩還原分析	62
第五章 結論及未來展望	66
5.1 結論	66
5.2 未來展望	67
參考文獻	68
附錄 A 測試影像處理結果	71
自傳	97
學術成就	98



表目錄

表 4-1	在中等照度下各方法的全域對比值.....	60
表 4-2	在低照度下各方法的全域對比值.....	60
表 A-1	測試影像場景光源與相機參數設定.....	72



圖目錄

圖 1-1	高動態範圍與標準動態範圍的直觀差異.....	2
圖 1-2	自然界的動態範圍.....	2
圖 1-3	多重曝光合成影像技術.....	3
圖 1-4	長、短曝光原始影像與合成影像訊號處理結果.....	5
圖 2-1	一般性的彩色影像訊號處理流程.....	9
圖 2-2	全域與區域運算子映射函式差異.....	11
圖 2-3	最佳化模型的直方圖等化分割.....	13
圖 2-4	白點與影射曲線之關係.....	15
圖 2-5	快速頻率分割色調重現演算法架構.....	16
圖 2-6	區域對比圖評估色調重現架構.....	17
圖 2-7	多重曝光邊緣圖合併與偽邊濾除流程.....	21
圖 2-8	各亮度條件下之梯度補償響應曲線.....	22
圖 3-1	影像訊號處理流程架構圖.....	24
圖 3-2	對比感感測函數曲線.....	28
圖 3-3	視覺化對比度與頻率的關係.....	28
圖 3-4	邊緣梯度補償係數.....	29
圖 3-5	係數補償前後梯度資訊比較.....	30
圖 3-6	本研究提出的色調映射演算法.....	31
圖 3-7	影像初始縮放流程與影像處理示意圖.....	32
圖 3-8	中央權重測光模型矩陣與巨集邊緣套用權重示意圖.....	34
圖 3-9	影像對比圖壓縮流程與亮度映射曲塊.....	35
圖 3-10	高斯函數處理後的影像對比值.....	36
圖 3-11	區域與全域對比圖視覺化圖像.....	38
圖 3-12	RGB 色彩模型與過飽和像素的映射直線.....	39
圖 3-13	色彩空間在藍色色相上，不同亮度的視覺表現.....	40

圖 3-14	OKLab 於藍色色相的拐角問題.....	40
圖 3-15	使用 AI 顯著圖方法之影像訊號處理流程	41
圖 3-16	巨集邊緣與顯著圖抽取資訊比較.....	42
圖 4-1	VCX 實驗測試場景與實拍畫面示意圖	43
圖 4-2	本次實驗測試場景平面配置圖.....	44
圖 4-3	實驗測試場景實拍示意圖.....	44
圖 4-4	實驗測試背景投射場景.....	46
圖 4-5	在中等照度下與攝影色調重現亮度差異.....	50
圖 4-6	在低照度下與攝影色調重現亮度差異.....	51
圖 4-7	在中等照度下與快速頻率分割色調重現亮度差異.....	52
圖 4-8	在低照度下與快速頻率分割色調重現亮度差異.....	52
圖 4-9	在中等照度下與區域對比評估色調重現亮度差異.....	53
圖 4-10	在低照度下與區域對比評估色調重現亮度差異.....	54
圖 4-11	在中等照度下與梯度導向色調曲線增強法亮度差異.....	55
圖 4-12	在低照度下與梯度導向色調曲線增強法亮度差異.....	55
圖 4-13	在中等照度下與 AI 顯著圖方法亮度差異	56
圖 4-14	在低照度下與 AI 顯著圖方法亮度差異	57
圖 4-15	在低照度下各方法的色彩誤差值.....	58
圖 4-16	在中等照度下各方法的色彩誤差值.....	59
圖 4-17	各方法的人物細節對比比較 1.....	61
圖 4-18	各方法的人物細節對比比較 2.....	62
圖 4-19	中等照度下色彩還原修正前後比較.....	63
圖 4-20	低照度下色彩還原修正前後比較.....	64
圖 A-1	測試影像 1 (Black 場景, A 光源 20 lux)	73
圖 A-2	測試影像 2 (Black 場景, D 光源 250 lux)	74
圖 A-3	測試影像 3 (Gray 場景, A 光源 20 lux)	75
圖 A-4	測試影像 4 (Gray 場景, D 光源 250 lux)	76

圖 A-5	測試影像 5 (White 場景, A 光源 20 lux)	77
圖 A-6	測試影像 6 (White 場景, D 光源 250 lux)	78
圖 A-7	測試影像 7 (Blue 場景, A 光源 20 lux)	79
圖 A-8	測試影像 8 (Blue 場景, D 光源 250 lux)	80
圖 A-9	測試影像 9 (Green 場景, A 光源 20 lux)	81
圖 A-10	測試影像 10 (Green 場景, D 光源 250 lux)	82
圖 A-11	測試影像 11 (Red 場景, A 光源 20 lux)	83
圖 A-12	測試影像 12 (Red 場景, D 光源 250 lux)	84
圖 A-13	測試影像 13 (Cyan 場景, A 光源 20 lux)	85
圖 A-14	測試影像 14 (Cyan 場景, D 光源 250 lux)	86
圖 A-15	測試影像 15 (Magenta 場景, A 光源 20 lux)	87
圖 A-16	測試影像 16 (Magenta 場景, D 光源 250 lux)	88
圖 A-17	測試影像 17 (Yellow 場景, A 光源 20 lux)	89
圖 A-18	測試影像 18 (Yellow 場景, D 光源 250 lux)	90
圖 A-19	測試影像 19 (Sky 場景, A 光源 20 lux)	91
圖 A-20	測試影像 20 (Sky 場景, D 光源 250 lux)	92
圖 A-21	測試影像 21 (Grassland 場景, A 光源 20 lux)	93
圖 A-22	測試影像 22 (Grassland 場景, D 光源 250 lux)	94
圖 A-23	測試影像 23 (City 場景, A 光源 20 lux)	95
圖 A-24	測試影像 24 (City 場景, D 光源 250 lux)	96

第一章 緒論

隨著影像技術的快速發展，高動態範圍（high dynamic range, HDR）影像已逐漸成為主流影像應用中的重要趨勢，廣泛應用於手機攝影、數位相機、顯示器、監控系統、車載影像處理等領域。高動態範圍影像的優勢在於它能夠捕捉並呈現自然場景中極為寬廣的亮度範圍，使影像能同時保留亮部與暗部的豐富細節，貼近人眼真實觀感。

在影像擷取階段，高動態範圍影像通常透過更高的位元深度（如 10-bit 或以上）或多重曝光技術記錄亮度資訊，相較於傳統標準動態範圍（standard dynamic range, SDR）影像能保留更多細節。然而，目前絕大多數的影像顯示與處理流程仍以標準動態範圍為主，包括一般顯示器的 8-bit 色深限制，以及模型訓練、檔案儲存與傳輸等多數流程，皆習慣以標準動態範圍影像格式為標準。即使現今市場上已逐步出現支援 10-bit HDR 螢幕的設備，實際應用仍受限於顯示動態範圍不足與向下相容需求，導致高動態影像需經過色調重現（tone reproduction）處理後，方能正確顯示。

色調重現的主要目的，是將高動態範圍影像中寬廣的亮度範圍壓縮至標準動態範圍顯示設備所能呈現的區間，並儘可能保留原始影像的細節與對比層次。若僅以簡單的線性縮放或直接截斷亮度資訊處理高動態範圍資料，將可能導致影像中的亮部與暗部細節大量流失，或整體對比度下降，特別是在低亮度區域中更容易造成細節淹沒、辨識困難。

圖 1-1 即展示了此現象的視覺效果：當高動態範圍影像未經適當處理時，直接映射至標準動態範圍的顯示範圍，會導致最亮與最暗區域的資訊遭到截斷；或整體影像灰階壓縮嚴重，視覺層次感大幅下降。因此，設計一套有效的色調重現

演算法，使高動態範圍影像在轉換至標準動態範圍顯示過程中，仍能保留足夠的視覺細節與真實感，是目前影像處理領域中極具挑戰性與實用價值的課題。

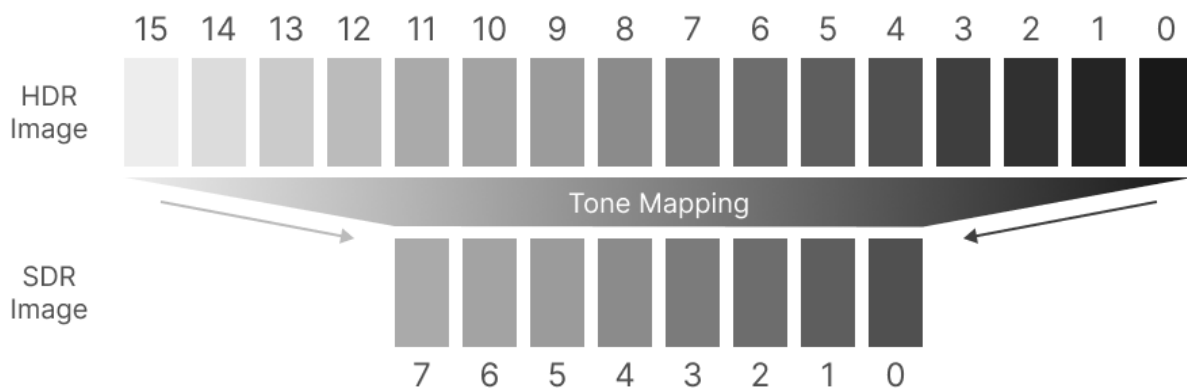


圖 1-1 高動態範圍與標準動態範圍的直觀差異

1.1 研究背景

自然界中的亮度分布範圍極為寬廣，從夜晚微弱的星光到正午直射的陽光，如圖 1-2 [1]所示，其動態範圍可達數十萬倍，遠遠超出一般影像感測器在單次曝光下所能捕捉的能力。雖然自然環境擁有極大的亮度變化幅度，但現今感測器的可擷取範圍卻相對有限，導致許多場景中無法同時保留亮部與暗部的細節。

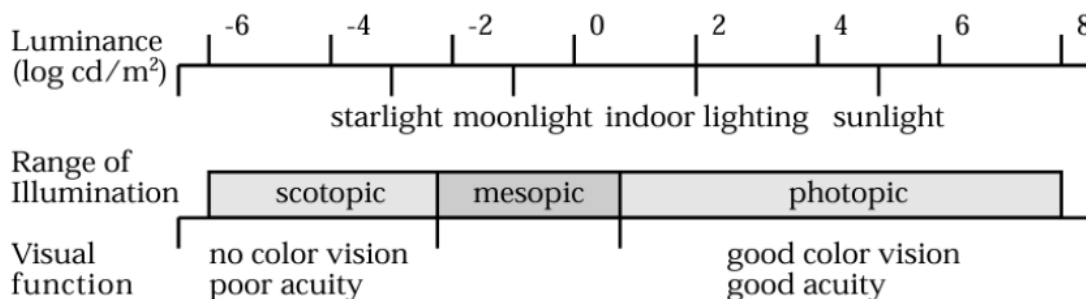


圖 1-2 自然界的動態範圍

為了克服此一限制，現代影像系統除了持續提升感測器的位元深度（如 10、12、14 bits 以上），亦發展出多重曝光合成技術（multi-exposure fusion），藉由擷取同一場景在不同曝光條件下的影像再進行融合，得以重建出高動態範圍影像。圖 1-3 [2]展示了典型的多重曝光合成流程，透過五張不同曝光程度的影像進行融合，有效擴展了感測系統所能記錄的動態範圍。

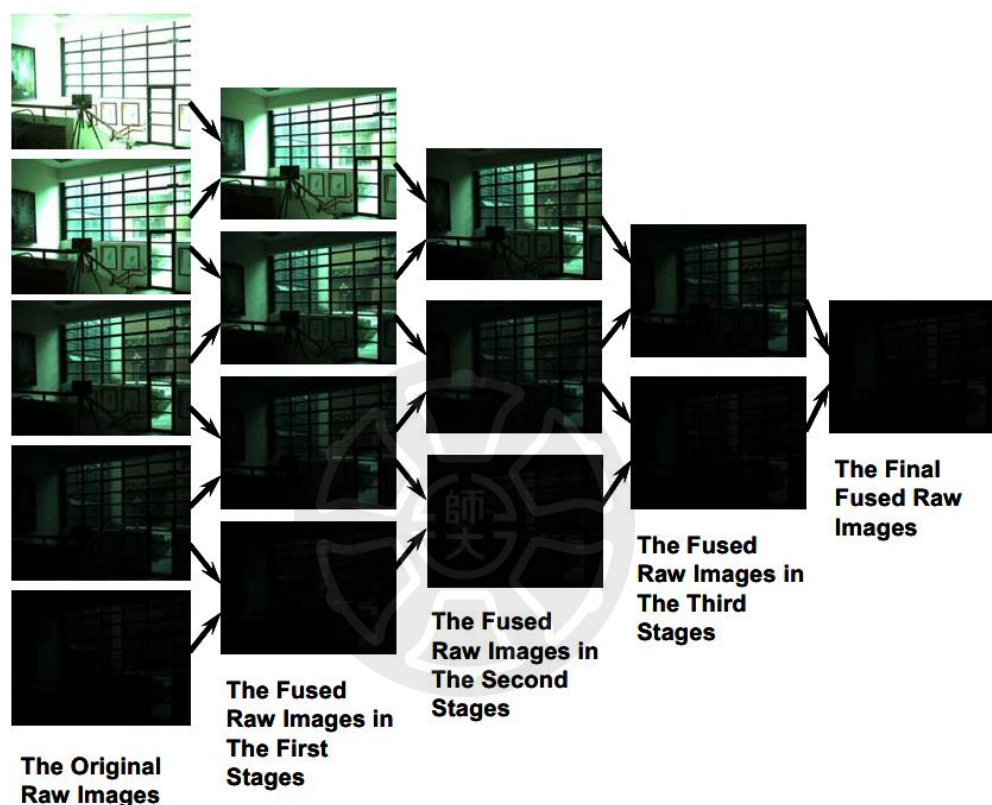


圖 1-3 多重曝光合成影像技術

然而隨著技術的進步，目前多重曝光影像擷取裝置已不再侷限於使用固定曝光比進行合成，轉而採用根據場景內容動態調整之自適應曝光策略。此類設計能根據畫面中不同區域的亮暗分布，彈性調整各張影像的曝光設定，使所有像素的亮度皆落在感測器可擷取的範圍內。雖然此方式提升了整體細節的保留能力，但也帶來新的挑戰。由於各張影像的曝光條件不固定，最終合成影像的動態範圍呈現浮動，且主體區域的亮度不再如傳統自動曝光（auto exposure, AE）機制般，穩定地對齊至中間灰區，使得主體辨識性與視覺亮度的平衡性下降。

換言之，現行高動態範圍影像合成技術雖能有效防止畫面出現過曝與死黑現象，卻未必能針對影像主體進行適當優化，影響整體視覺體驗與實用價值。因此，本研究旨在設計一套針對具動態曝光比之高動態範圍影像所對應的色調重現演算法，能夠根據場景與內容特性，自動強化影像主體的可辨識性，同時保留整體畫面中的細節與色彩真實感，進而提升最終影像品質，並回應未來高動態範圍影像技術於多元應用場景中的實際需求。

1.2 研究問題及目的

採用動態曝光比的高動態範圍影像合成技術，雖然能有效擴展影像的亮度範圍，使高光與暗部細節得以同時保留，提升整體資訊豐富度與視覺真實感，但在實際應用中仍面臨諸多挑戰。特別是在主體亮度未對齊、影像細節壓縮，以及色彩還原失真等問題上，皆對最終影像品質產生不良影響。為了提升高動態範圍影像在標準顯示設備與實務應用中的可用性與觀感一致性，本研究針對這些關鍵問題進行分析，並據此設計一套具主體感知能力的色調重現演算法，期望在保留整體細節的同時，強化影像主體的可辨識性與色彩表現。接下來將從主體重建、細節壓縮與色彩偏差三個面向，說明本研究所聚焦的核心問題與對應解法：

1.2.1 主體資訊在極端光照下的重建困難

在強烈背光或低照度的場景中，影像常出現主體曝光不足、背景過亮的情況。例如當拍攝一位站在明亮天空下的人物時，系統為了保留天空的高光與雲層細節，往往會將大部分動態範圍分配給背景，使得人物臉部僅落在高動態範圍影像中低亮度的狹窄區段。若在支援高動態範圍的顯示設備上觀看，此結果因受到較小程度的壓縮故仍可呈現較自然的線性亮度資訊；但在傳統標準動態範圍的顯示器上，由於顯示能力有限，必須經由色調映射演算法將高動態範圍內容壓縮至可顯示範

圍內。現有方法多以考慮相機有做過適當的自動曝光，以整張影像的原始亮度為主，導致壓縮後仍保留過多動態範圍給天空，人物主體則被壓縮至亮度極低、對比不足的區域，使其在畫面中難以辨識，甚至造成「喧賓奪主」的視覺失衡現象。

本研究所處理的高動態範圍合成影像來自具動態曝光比的影像擷取裝置，系統會根據場景亮暗條件動態調整每張影像的曝光設定，最大化保留整體亮度資訊。然而，這種設計進一步強化了主體與背景亮度失衡的問題，影像主體往往落在非理想的曝光區間，無法自然對齊至中間亮度範圍，因此需要額外處理以提升主體的可見度與視覺優先性。

為了具體說明上述問題，我們拍攝了圖 1-4 所示之範例場景。圖 1-4 採用分區呈現方式：左右側分別顯示合成前的短曝光與長曝光影像的處理結果，以對應原始線性亮度下主體與背景應有的細節分布；中間則為合成後的高動態範圍影像經由一般的色調重現演算法壓縮至標準動態範圍後的顯示結果。從圖中可觀察到，儘管天空細節得以保留，但人物主體卻因亮度不足與細節壓縮而變得很暗難以辨識，突顯出現行映射方法在極端光照條件下，對主體重建能力的侷限，也呼應本研究提出改進策略的必要性。

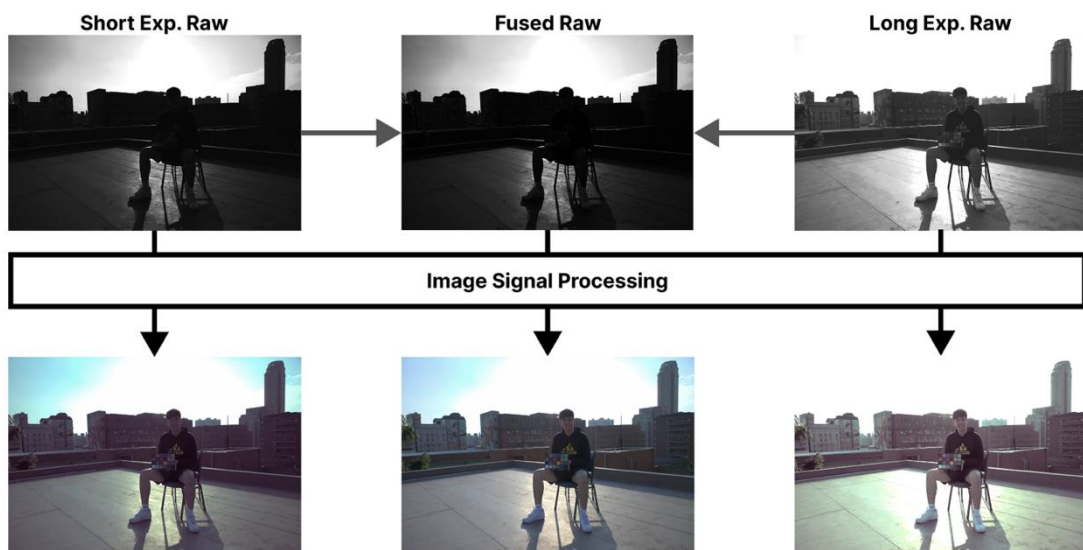


圖 1-4 長、短曝光原始影像與合成影像訊號處理結果

1.2.2 色調映射過程中的細節流失

色調映射 (tone mapping) 是色調重現流程中最關鍵的非線性壓縮步驟，主要目的在於將高動態範圍影像壓縮至標準動態範圍顯示設備所能支援的亮度範圍。由於這是一種不可逆的壓縮過程，若處理不當，將導致影像中原有的對比與細節資訊大量流失，特別是在亮度梯度較小或對比度不強的區域，更容易被壓扁成單一亮度層次而難以辨識。

為了降低細節流失的情形，過去已有多種色調映射方法相繼提出，透過各種策略強調影像的區域對比 (local contrast)，使得標準動態範圍影像仍能保留類似高動態範圍影像的視覺層次與質感。然而，這類強化局部對比的方法亦可能引入新的問題，例如過度銳化導致的光暈 (halo artifacts)、亮暗反轉或其他非自然的人工偽影。此外，過度增強也可能使影像中原本不明顯的高頻雜訊被放大，進而影響整體觀感。

1.2.3 色彩還原過程中的飽和值與偏色問題

為了在色調重現過程中維持顏色的準確性並避免色偏，現行多數彩色影像處理流程會將影像自 sRGB 色彩空間轉換至亮度與色彩分離的色彩空間(如 CIE Lab 或 CIE xyY)，於該空間中進行亮度調整，並在處理結束後再轉回 sRGB 空間以生成最終影像。此作法理論上能維持色相不變的前提下，單獨調整亮度值。然而，在實際操作中，若調整後的亮度與原始色彩比例差異過大，往往會產生超出 sRGB 色域的「過飽和像素」。

舉例而言，假設原始線性 sRGB 空間中的一個像素為 $\{R, G, B\} = \{100, 0, 200\}$ ，其在色彩亮度分離空間中對應的值約為 $\{x, y, Y\} = \{0.29, 0.14, 0.13\}$ 。若在色調重現過程中，我們將其亮度 Y 從 0.13 增加至 0.52，經轉換後將得到一個過飽和的

RGB 值為 $\{400, 0, 800\}$ ，遠遠超出可顯示的數值範圍。此時業界常見的處理方式，是直接對超出範圍的像素進行截斷 (clipping)，將各通道值限制在最大顯示範圍 (如標準動態範圍為 255) 以內。然而這種簡單處理，可能導致嚴重的色偏或亮度失真，尤其當原始像素中某通道為 0 (例如 $G=0$) 時，會使亮度與色相在還原後無法維持原比例，進一步導致影像產生不自然的偽影或明顯偏色現象。

在本研究處理的影像情境中，由於裝置未具備完善的自動曝光機制，導致影像亮度變化範圍較大，色調重現過程中需調整的亮度差異也相對顯著，使得超出色域範圍的過飽和像素比例比一般場景更多。這使得傳統的截斷策略不再適用，反而會放大色彩錯誤。因此設計一套能夠有效抑制過飽和問題、在亮度調整後仍能正確還原原始色相與明度的色彩還原演算法，是本研究的另一項重要目標。

1.3 提出的方法

針對前述在極端光照條件下所觀察到的三項問題：主體辨識困難、細節壓縮流失與色彩還原偏誤。本研究提出一套整合巨集邊緣分析、色調映射、對比圖增強與色彩還原的高動態影像處理方法，旨在提升影像在標準動態範圍顯示下的主體清晰度、細節呈現與色彩自然度。

首先，為改善主體在非均勻曝光情境中的亮度失衡問題，本研究設計一種針對高動態範圍影像的巨集邊緣抽取技術，透過分析影像中具高頻特徵的區塊，如人臉輪廓、物體邊界等區域，作為後續亮度與對比度調整的優先處理對象，使整體映射結果更能聚焦於關鍵主體，避免背景主導畫面視覺重心。

其次，為因應高動態範圍壓縮至標準動態範圍所造成的細節流失，本研究重新設計一套結合全域與區域資訊的色調重現方法，透過控制亮部壓縮與暗部擴張的映射策略，達到亮暗細節兼顧的效果。此外，也藉由對全域與區域對比度的評

估，建立「對比圖」引導強化邊緣細節與整體影像對比度，使最終結果保有更佳的層次感與視覺立體性，並避免過度映射造成的人工偽影，如光暈與亮暗反轉等現象。

最後，為解決在色調映射過程中常見的飽和溢出與色偏問題，本研究採用 OKLab 色彩空間進行色彩還原。透過建立一組亮度與色相對應的飽和度查詢表，可動態限制飽和值於可顯示色域內，並維持原有色相與明度關係，避免因簡單截斷 (clipping) 所導致的非自然色彩與亮度誤差，使影像在色調重現後仍能保持正確且自然的色彩呈現。

整體而言，本研究所提出之方法，針對動態曝光合成下高動態範圍影像的特性，從主體重建、細節強化到色彩修正進行系統性設計，致力於改善提升影像在標準顯示環境中的實用價值與視覺品質。

1.4 論文架構

本篇論文共分為五章，架構設計旨在循序漸進地引導讀者理解本研究的背景、技術內容與成果驗證。第一章說明本研究的背景與動機，並針對高動態範圍影像於極端光照場景下所面臨的挑戰進行探討，進而提出本研究的主要目標與解決策略。第二章則回顧與本研究相關的文獻與技術，包括高動態範圍影像合成技術、數位影像處理流程、色調映射方法與色彩還原機制等，藉由整理現有方法的優缺點，闡明本研究之切入角度與創新性。第三章詳細介紹本研究所設計的影像處理系統架構，內容涵蓋巨集邊緣資訊抽取、色調重現策略、對比圖分析技術與色彩還原演算法等模組之設計理念與實作方式。第四章則透過多樣化的測試場景與拍攝條件，進行實驗設計與影像品質評估，從主觀視覺效果與客觀數據指標兩個層面驗證所提出方法的有效性。最後，第五章總結本研究的整體成果與貢獻，並針對研究過程中所發現的限制與未來可能的延伸方向提出展望。

第二章 文獻探討

2.1 一般性彩色影像訊號處理流程

在數位相機所擷取的高動態範圍影像資料中，如何妥善設計其影像處理流程（image processing pipeline, IPP）一直是影像系統設計中的關鍵問題。傳統的影像處理方法雖然涵蓋了白平衡（AWB）、色彩校正、插值、去噪、色彩增強、色調重現以及伽瑪校正等多個模組，但其處理步驟的排列順序與邏輯設計往往依賴經驗法則，缺乏一致且具理論依據的系統架構，容易導致色彩失真或影像品質不穩定。

Kao 等人針對上述問題提出了一套泛用性的彩色影像處理流程 [3]，該流程特別強調各處理模組的合理排序與色彩科學的理論基礎。如圖 2-1 [3]所示，其流程設計的一大特色在於：將所有具線性特性的處理模組前置，包括自動白平衡與色彩校正矩陣等步驟。由於感光元件所輸出的原始資料本身具有線性特性，若在非線性處理前進行這些操作，能有效保留物理量與感知亮度的一致性，避免產生色偏或失真。

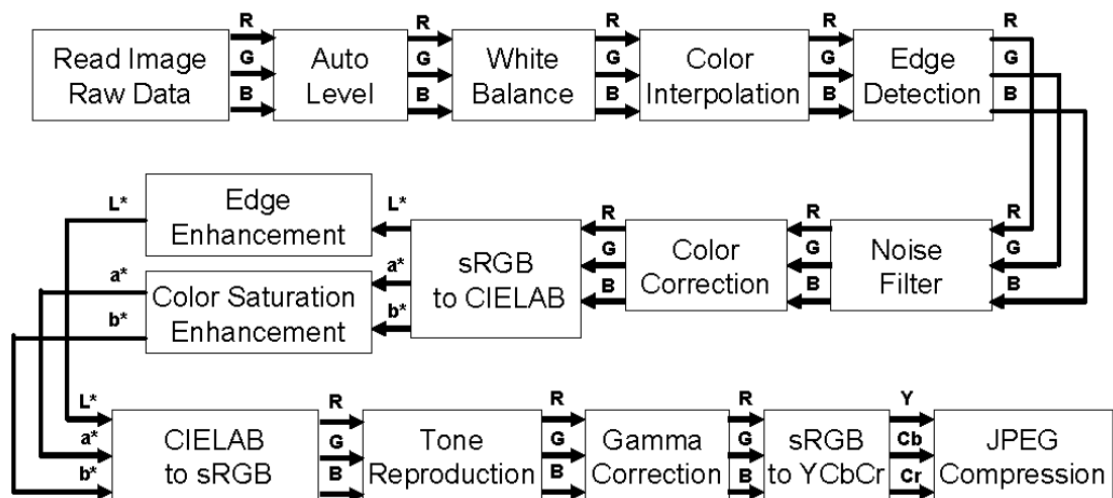


圖 2-1 一般性的彩色影像訊號處理流程

接續的處理中，影像會被轉換至具備亮度與色度分離特性的色彩空間，該研究採用國際照明委員會（International Commission on Illumination, CIE）推薦的 CIELAB 色彩空間，使後續的處理如色彩飽和度增強或邊緣增強，能夠更精準地作用於色度或亮度資訊上，並減少色彩偽影的產生。

此外，該流程亦強調將色調重現與伽瑪校正安排於整體流程的後期階段。這是因為上述兩者屬於非線性轉換，若過早套用會破壞影像資料的線性關係，影響後續處理準確性。色調重現負責將高動態範圍壓縮至標準動態範圍影像能表現的範圍，而伽瑪校正則用於補償顯示設備的非線性響應。兩者在此流程中被設計為可合併處理以提升運算效率。

2.2 色調映射演算法

色調映射（tone mapping）可視為色調重現過程中一項具體的實作方式，其核心概念在於建立一組對應關係，將影像的輸入亮度轉換至視覺上更具可讀性的輸出亮度，藉此達到視覺細節與結構資訊的最佳保留。這一映射過程不僅關係到亮度的再分佈，同時也決定了影像整體的對比感、層次感與真實性。

依據運算策略的不同，色調映射方法可大致分為兩大類：全域運算子（global operators）與區域運算子（local operators）。全域運算子是根據影像整體的亮度分佈統計資訊，推導出一條統一的色調映射曲線（tone reproduction curve, TRC），並將該曲線應用於所有像素點。這類方法具有計算簡便與實作效率高的優點，但由於忽略了像素間的空間關係，在複雜場景中可能導致細節或對比的損失。

相較之下，區域運算子則進一步考慮像素之間的局部關係與空間結構，針對各區域特性調整映射方式。這使得區域運算子能更有效保留邊緣細節與區域對比，提升影像的立體感與真實感。然而，其實作複雜度也相對提高，若設計不當，容易產生光暈（halo）或過度銳化（overshoot）等視覺偽影。

圖 2-2 示意了全域與區域運算子的概念差異。圖中左側為典型的全域色調映射曲線，顯示輸入亮度如何根據統一曲線轉換為輸出亮度；右側則以區域框選的方式說明區域運算子在空間上所針對的特定範圍，該範圍內的映射運算可根據區域特性自適應調整。此圖可視為理解兩類運算子行為差異的重要輔助。

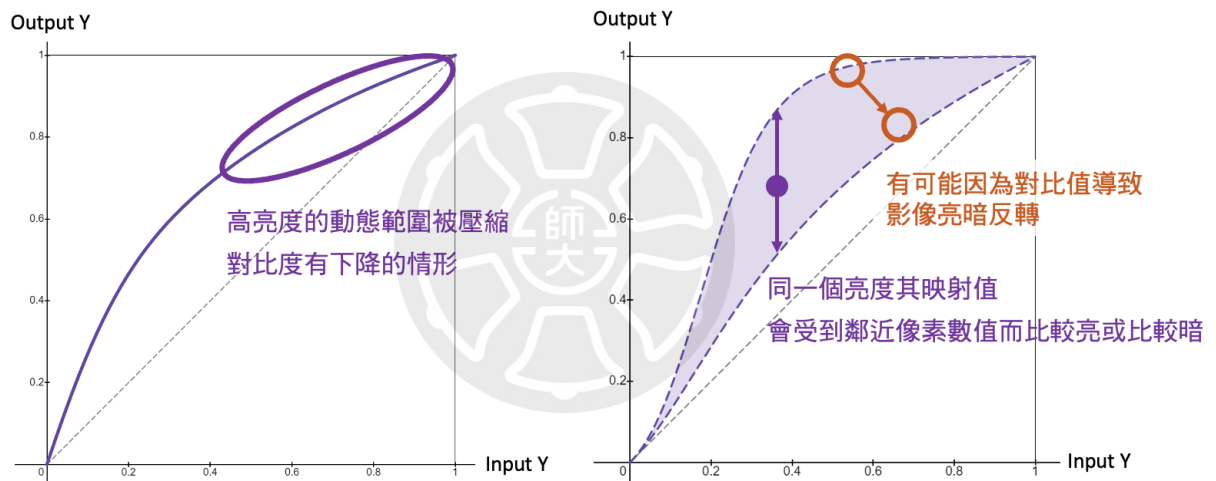


圖 2-2 全域與區域運算子映射函式差異

為進一步探討各類色調映射策略之特性與實務表現，接下來將於小節中，分別介紹幾種具有代表性的色調映射方法，並從其設計理論、應用情境與優劣分析等面向加以說明，作為本研究方法設計的參考基礎。

2.2.1 直方圖等化與其最佳化改進方法

在實作色調映射演算法時，最直觀的作法之一便是使用直方圖等化（histogram equalization）技術來產生色調映射曲線，作為一種全域運算子的代表方法。此方法透過重新分配輸出亮度，使每個亮度區間含有相近數量的像素，從而達到動態範圍壓縮與細節提升的目的。然而，傳統直方圖等化存在一項核心缺陷：當輸入亮度分布極不平均時，部分亮度區段會被過度拉伸或壓縮，導致視覺對比不自然，甚至失真。特別是在高光或陰影處像素密集的区域，容易造成過度強化或細節流失等問題。

針對此限制，Qiu 與 Duan 提出一種基於最佳化模型的直方圖色調映射曲線演算法 [4]，將問題形式化為一個最小化目標函數（cost function）的優化問題。該函數結合兩項設計目標：一方面希望保留場景的原始對比：「傾向線性縮放」；另一方面則嘗試提升細節呈現：「傾向直方圖等化」。透過調整兩者之間的權重參數 λ ，使用者即可靈活控制最終影像的視覺風格與對比強度。

圖 2-3 [4]顯示了該方法的對應架構與映射示意。圖中展示了直方圖分布與不同映射策略下的亮度切割位置。可見若切點過於傾向直方圖等化的極端，將導致過度擴張密集像素區間；而若過於接近原始對比線性縮放位置，則會忽略細節變化。該研究證明，透過在這兩者之間尋找最佳平衡點（如圖中所示落在線性縮放與直方圖等化之間的切點），可以同時保留場景的原始視覺印象與高動態細節。

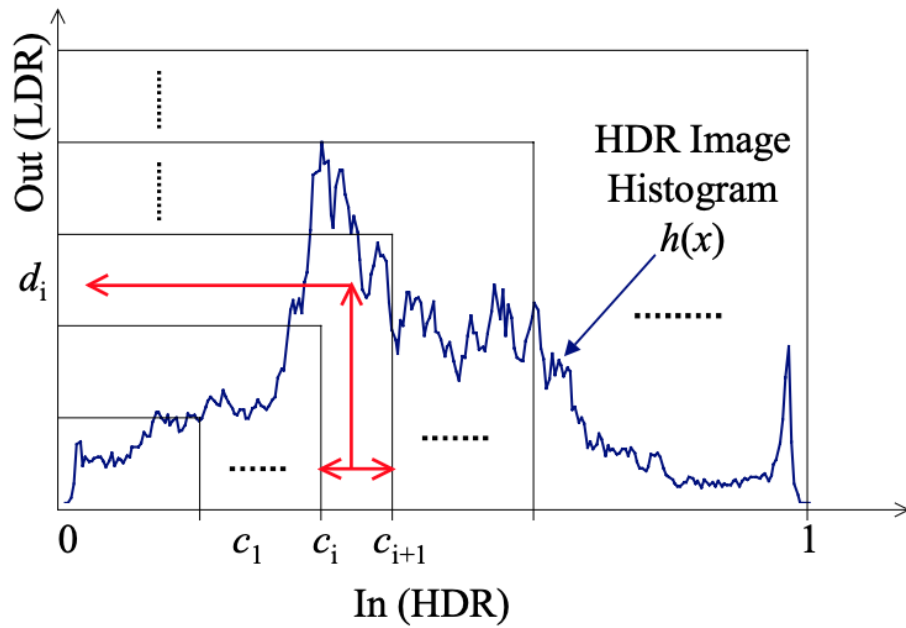


圖 2-3 最佳化模型的直方圖等化分割

2.2.2 攝影色調映射演算法

Reinhard 等人提出的攝影色調映射演算法 (photographic tone reproduction) [5] 是一種以簡潔數學模型模擬人眼視覺適應與攝影曝光控制邏輯的全域色調重現方法。該方法的核心精神在於重現人眼在觀察真實場景時，對整體光線條件進行自動調節的能力，並將這種適應機制轉化為一套適用於數位影像的映射策略。

在實際情境中，無論處於明亮的戶外或昏暗的室內環境，人眼都會透過瞳孔的收縮與放大，主動控制進光量，並依據所處場景的亮度分布重新校準對「中等亮度」的知覺基準。攝影師在實務操作中亦有類似思維，通常會根據場景整體亮度設定合適的曝光參數，使主體位於影像可辨識與細節充足的亮度區間內。本演算法即是以此為啟發，提出先估算整張影像中人眼所可能採用的亮度適應基準，再將影像亮度對齊至顯示系統的中間灰區域，最後透過一條具壓縮特性的非線性

映射曲線，將亮度值映射至標準動態範圍中。

演算法中的「視覺基準點」是透過計算影像的對數平均亮度來建立，藉此模擬人眼對整體場景亮度的感知適應。接著以此平均亮度為依據，將所有像素亮度透過比例縮放對齊中間灰 α （一般而言為 0.18），實現全域曝光調整如 (2-1)。完成對齊後，再套用一條非線性亮度壓縮函數 (2-2)，將高亮區域平滑地壓縮回顯示裝置所能呈現的亮度範圍，同時保有暗部細節與中間層次。此壓縮函數的特性在於其對輸入亮度的增長反應逐漸趨緩，無論輸入值多高，都不會造成亮度溢出，因而能有效避免高光區域的細節流失。

$$L(x, y) = \alpha \times \frac{L_w(x, y)}{L_w} \dots\dots\dots (2-1)$$

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y)}{1 + L(x, y)} \dots\dots\dots (2-2)$$

為進一步處理極端高亮區域，該方法亦引入白點 (white point) 參數，映射公式改如 (2-3) 所示。當輸入亮度超過此臨界值時，會被映射為純白，從而避免高亮像素佔據過多的動態範圍。透過調整此參數，可彈性控制高光壓縮的程度，使最終影像更具層次與視覺平衡。圖 2-4 [5]顯示白點數值對色調映射曲線的影響，可以看到當我們設定輸入亮度 (world luminance) 大於白點 L_{white} 數值時，將被設定為 1 視為白色。

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y) \times \left(1 + \frac{L(x, y)}{L_{white}^2}\right)}{1 + L(x, y)} \dots\dots\dots (2-3)$$

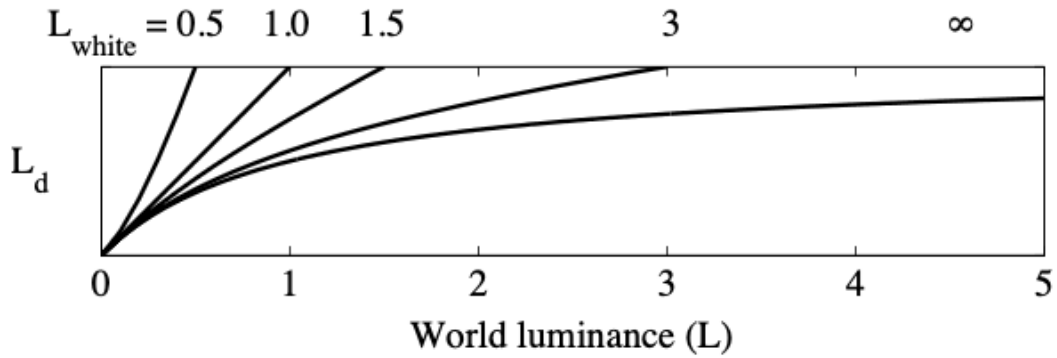


圖 2-4 白點與影射曲線之關係

整體而言，此方法兼具運算效率與視覺穩定性，適合應用於一般動態範圍的影像處理系統。然而，作為全域方法，其在面對高動態或區域明暗對比劇烈的影像時，仍可能因缺乏區域調整能力而壓縮掉部分細節。

2.2.3 快速頻率分割色調重現

為同時提升色調重現處理的即時性與視覺細節的保留能力，Kao 等人提出一套針對錄影應用場景所設計的快速頻率分割色調重現演算法 [6]。不同於傳統以全域統一映射函數為主的設計邏輯，此方法透過頻率域分離技術，將影像的亮度成分拆解為低頻與高頻資訊，再針對兩者進行獨立處理與重建，藉此在動態範圍壓縮與細節保留之間取得良好平衡。由於其對於空間亮度分佈具有局部響應特性，此方法可歸類為區域運算子類型的色調映射策略。

該方法的設計流程如圖 2-5 [6]所示。輸入影像首先進行 Y 通道分離，提取亮度資訊後透過低通濾波與殘差運算拆解為低頻平面與高頻平面。低頻平面代表場景整體的亮度架構，包含如天空、牆面等大範圍光照區域；而高頻平面則保留紋理、邊緣等細節。為避免像素邊緣被過度壓縮導致模糊，演算法僅對低頻部分執行色調映射，而保留高頻結構不變。

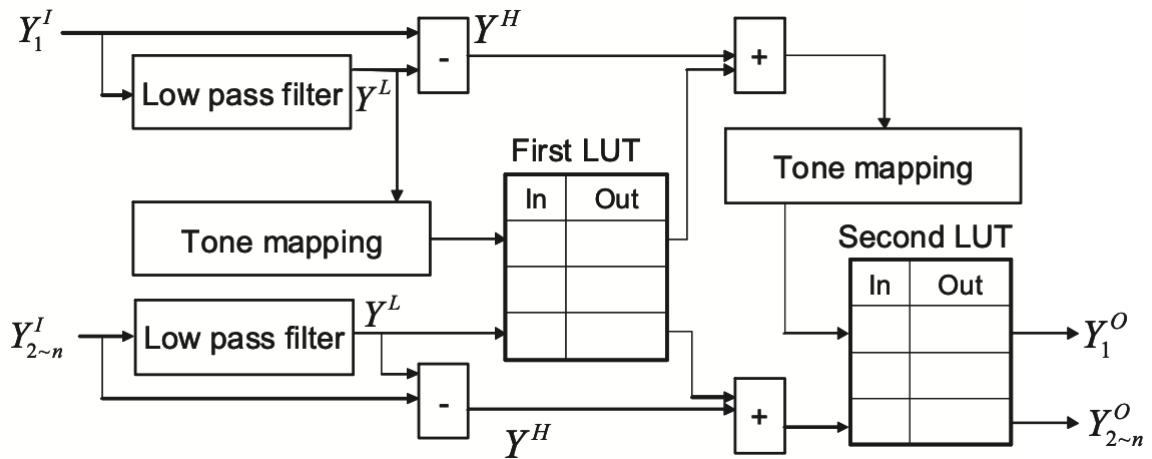


圖 2-5 快速頻率分割色調重現演算法架構

此方法進一步設計了雙階段映射機制。第一階段針對低頻影像建立色調映射曲線並生成對應的查表 (look up table, LUT)，經過低頻壓縮與高頻重建後，得到初步增強影像。此影像再進行第二階段映射，進一步調整整體對比與亮度範圍，以適應輸出裝置的動態需求。此雙階段設計提供了更彈性且分層的控制方式，讓暗部提升與整體對比調整可分別調控，避免衝突。

整體而言，該方法在設計上兼顧了區域性處理、即時運算效率與視覺品質之平衡，特別適合應用於嵌入式錄影系統或需低延遲處理的視訊應用場景。然而，此方法也存在潛在限制：一方面並非所有設備皆具備足夠的感測動態範圍，若輸入影像本身已經過壓縮，則進一步的色調映射效果可能受限，或導致影像暗處被過度放亮，有灰化影像暗部的現象產生。另一方面，由於其使用簡易的低通濾波器進行頻率分離，可能導致邊緣平滑化或解析度下降，使得影像部分區域出現輕微模糊現象，影響整體清晰度表現。因此，在實際應用中，仍需根據裝置規格與場景特性進行參數微調與濾波器優化，以獲得最佳視覺效果。

2.2.4 區域對比圖評估色調重現

針對高動態場景中易出現的亮部過曝與暗部細節不足問題，Kao 等人提出 [7] 一套整合「局部對比強化」與「攝影式色調重現」概念的影像重現流程。此方法設計目的在於提升極端光照環境下的可視性，透過一系列具空間響應特性的處理流程，提升影像在亮度與色彩層面的整體表現。由於其運算邏輯高度依賴像素間的相對亮度差與局部結構，此演算法可歸類為區域運算子的色調重現方法。

整體流程如圖 2-6 [7] 所示，方法首先針對輸入影像建立一張對比圖 (contrast map)，此圖透過像素與其鄰域之間的亮度差異計算所得，代表影像中細節紋理與邊緣結構的分佈情形。為降低因影像雜訊導致的對比計算誤差，作者首先使用雙邊濾波 (bilateral filter) 平滑亮度分量，並進一步引入一種基於顏色相似度的鄰域平均機制，僅針對色彩接近的像素進行亮度平均，以保留真實結構邊緣、降低雜訊與光暈現象。

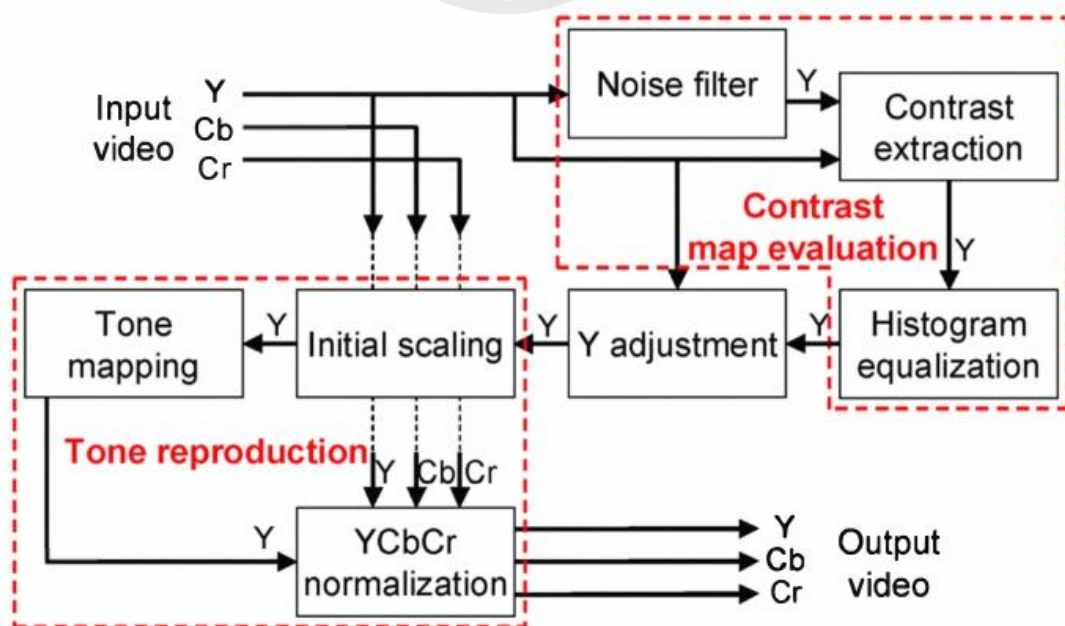


圖 2-6 區域對比圖評估色調重現架構

為建構能反映視覺感知的區域對比圖，該方法不採用傳統像素差值運算，而是設計一組具備非線性響應特性的亮度比較公式，考慮了區域平均亮度與視覺壓縮的行為。具體來說，對比圖的每個像素值 Y_{LC} 定義如 (2-4)。

$$Y_{LC}(x, y) = \log \left(\frac{Y_B(x, y)}{\bar{Y}(x, y) + 1} + 1 \right) \frac{L(x, y) \times \left(1 + \frac{L(x, y)}{L_{white}^2} \right)}{1 + L(x, y)} \dots\dots\dots (2-4)$$

其中， $Y_B(x, y)$ 表示經過雙邊濾波器 (bilateral filter) 處理後的亮度圖像， $\bar{Y}(x, y)$ 為該像素在區域鄰域內的亮度平均值，可由 (2-5) (2-6) 計算得出，其中雙邊濾波器同時考量亮度 G_r 與距離 G_s 的兩個數值呈現高斯常態分布的因子。這樣的設計能有效避免雜訊，且使對比計算能在空間上具備平滑性與邊緣感知能力，並透過 \log 函數壓縮亮度變化幅度，減少局部亮度突變對結果的影響，貼近人眼對亮暗變化的非線性感知行為。

$$Y_B(x, y) = \frac{\sum G_s(\|(p, q) - (x, y)\|) \times G_r(\|Y(p, q) - Y(x, y)\|) \times Y(p, q)}{w} \dots\dots\dots (2-5)$$

$$\bar{Y}(x, y) = \frac{1}{(2m+1)(2n+1)} \sum_{p=x-m}^{x+m} \sum_{q=y-n}^{y+n} Y(p, q) \dots\dots\dots (2-6)$$

此區域對比圖建立後，將與原始亮度圖進行融合，以生成後續色調映射所使用的輸入亮度資訊。融合方式採用幾何平均，以兼具原始亮度結構與對比圖所提供的局部細節強化特性，其計算方式如 (2-7) 所示。

$$Y(x, y) = \sqrt{Y_B(x, y) \times Y_{LC}(x, y)} \dots\dots\dots (2-7)$$

融合後的亮度資訊即作為 tone mapping 的輸入，並進一步進行非線性亮度壓縮處理，以完成最終的色調重現步驟。

整體而言，該方法能夠有效強化影像中的局部細節，特別是在暗部與邊緣區域，其對比圖導向的增強策略能夠凸顯主體輪廓與結構，同時透過雙邊濾波與區域性對比評估，有助於抑制雜訊與非目標紋理的干擾，達到較為穩定的視覺增強效果。

然而，該方法也存在一定限制。由於需先計算完整的區域對比圖並執行像素級融合，其運算量相對較大，不利於即時應用；此外，前期對比圖的建立若未妥善處理，容易破壞原始影像的亮度分布，使原本接近黑的像素失去色彩飽和度，呈現偏灰或發霧的現象。此問題在低亮度區域尤為明顯，較之快速頻率分割方法更容易出現色樣漂移，對主體色彩保真造成影響。

2.2.5 梯度導向色調曲線增強法

為因應寬動態範圍場景下影像的亮度壓縮與細節保留需求，Kojima 與 Suetake 等人提出一種基於梯度導向的色調映射方法 [8]。此方法設計了一套以亮度梯度大小為依據之色調映射曲線建構流程，藉此將具有視覺意義的亮度範圍賦予較高權重，使色調映射的過程中能夠強調影像的主體結構與明顯變化區域。

演算法首先對輸入影像計算每個像素點的水平與垂直亮度梯度 $d_H(p)$ 與 $d_V(p)$ ，取其中最大者作為代表性變化量，藉此凸顯邊緣與結構。此一梯度值被當作權重，重新加權建立亮度分布直方圖，形成一組受梯度導向控制的全域色調映射曲線如 (2-8)(2-9)。為避免平坦區域主導整體色調映射的形狀，作者引入一組權重抑制函數 $w_E(l)$ ，針對過度平滑的區域予以抑制，使色調映射曲線能夠更集中於邊緣與結構區域。

$$h_w(l) = \omega_E(l) \sum d(p) \times \delta(I(p), l) \dots\dots\dots (2-8)$$

$$d(p) = \max(|d_H(p)|, |d_V(p)|) \dots\dots\dots (2-9)$$

整體而言，此方法結合色調映射與結構導向結合的優勢，能強化視覺感知上重要的亮暗變化區域，並透過後續的局部修正機制補償色調壓縮可能造成的細節損失。由於依賴梯度資訊，此方法對於影像主體的保留特別具有優勢。然而，由於初步的色調映射為全域性質，當影像中存在大範圍暗區時，容易發生低亮度區塊被拉白、色彩發灰的問題。特別是在影像邊緣區域或陰影區塊中，此現象會更加明顯。此外，梯度計算本身對雜訊敏感，若影像本身存在感光不均或顆粒雜訊，則容易導致雜訊被放大，且整體流程相對複雜，在即時應用上仍需權衡運算負擔與效能。

2.3 高動態範圍影像邊緣抽取

在影像訊號處理系統中，邊緣資訊扮演著不可或缺的角色。邊緣不僅是構成畫面結構的重要元素，更常作為演算法中識別主體、進行細節強化或局部分析的依據。然而在高動態範圍影像中，由於亮度跨度極大，低亮度區常因線性壓縮導致梯度過低而無法被偵測為邊緣，反之亦可能在壓縮過程中使高頻雜訊被誤判為結構細節。因此，如何穩定地擷取跨亮度區域的邊緣輪廓，成為後續影像分析與色調重現演算法設計的關鍵技術。為此，本節將探討兩種針對高動態範圍影像邊緣處理所提出的方法，並作為本研究後續演算法設計的重要參考依據。

2.3.1 基於多重曝光融合之高動態範圍影像邊緣抽取

Kao 等人提出一種應用於高動態範圍影像的邊緣導向細節增強方法 [9]，結合多張不同曝光的原始影像進行融合，再透過邊緣資訊引導後續色調重現與對比增強。其方法首先針對多張曝光影像分別進行 Sobel 邊緣偵測，並在不同曝光條件下擷取細節，如圖 2-7 [2]所示。

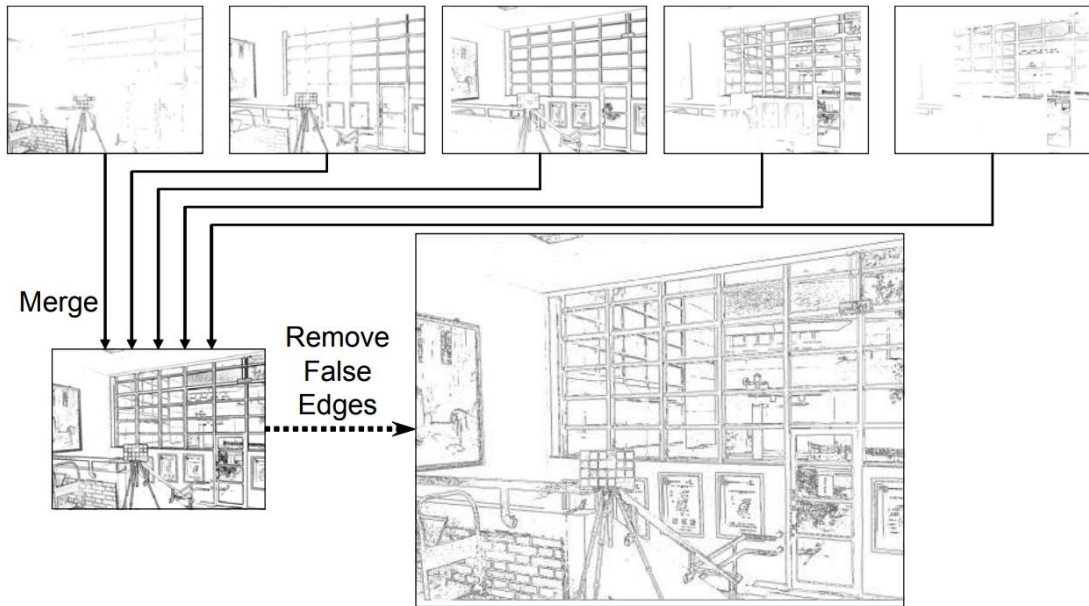


圖 2-7 多重曝光邊緣圖合併與偽邊濾除流程

這些初步邊緣圖像經過重複縮放與濾波處理後進行合併，產生一張初步的全域邊緣圖。為避免融合過程將不同曝光造成的邊緣雜訊放大，該方法額外設計一套偽邊（false edge）移除機制，透過區域亮度一致性與結構連續性評估，濾除非真實邊緣與感測雜訊，最終得到乾淨且具代表性的邊緣圖。該邊緣圖再作為色調重現階段的依據，用以調整局部亮度與色彩飽和度，強調主體細節並減少過度失真。

此方法的優勢在於可結合多張曝光下的邊緣資訊，補足單張影像在極亮或極暗區的邊緣偵測盲點，並透過偽邊過濾設計提升視覺穩定性。然而其使用之 Sobel 濾波器對於極低亮度區的雜訊敏感，容易將背景雜訊或陰影誤認為結構，因此若能導入像 Canny、LoG 或深度學習式邊緣偵測器，預期能獲得更準確的邊緣輪廓。

2.3.2 亮度條件自適應之多重濾波邊緣補償

Li 與 Wang 提出一種無需圖像分割的高動態範圍邊緣偵測方法 [10]，透過三組針對不同亮度條件設計的梯度補償濾波器，解決傳統固定參數無法同時適用於全亮度範圍的問題。圖 2-8 [10]展示不同亮度區所分別採用的個別補償係數。其中 G_{ND} 用以補償低亮度暗部區域、 G_{NM} 用於中等亮度區、 G_{NB} 則針對高亮區域進行補償，計算方式由 (2-10) 所列。

$$G_{ND} = \sum_i \sqrt{I_i}, \quad G_{NM} = G, \quad G_{NB} = \sum_i I_i \times G \dots \dots \dots (2-10)$$

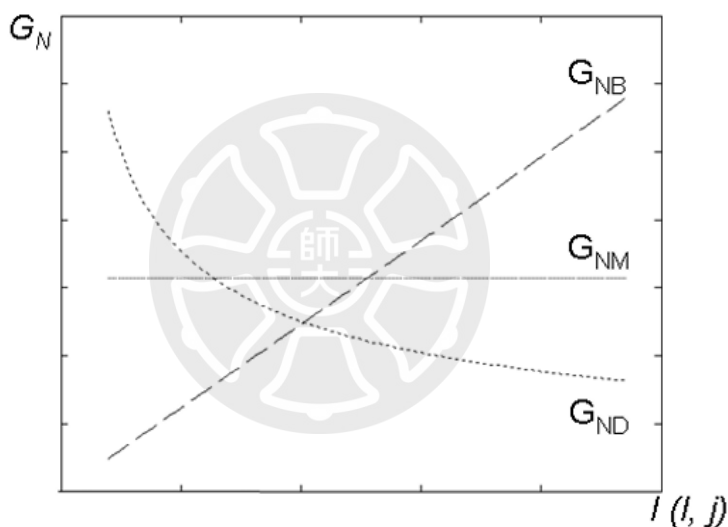


圖 2-8 各亮度條件下之梯度補償響應曲線

針對每一像素，方法會依其亮度條件計算三組梯度響應，經正規化後挑選出最大值作為該點的最終梯度輸出。此設計無需分割畫面即可實現空間自適應響應，有效提升邊緣偵測的覆蓋率與正確性。然而，此方法仍有潛在挑戰。由於高光區增益倍率大，若未適當抑制背景雜訊，容易使低亮度區的隨機訊號被誤判為邊緣。因此，是否設計適當的濾波或混合臨界值是未來發展方向。

第三章 研究方法

本研究的實驗裝置具備多重曝光合成功能，可針對不同場景動態調整曝光比，以合成涵蓋亮部與暗部細節的高動態範圍影像。然而，這種合成方式的邏輯，與相機一般透過自動曝光 (auto exposure, AE) 將主體亮度對齊至中間灰有所不同。合成高動態範圍影像的目標是確保所有影像區域皆落在可紀錄的動態範圍內，而非僅針對主體進行曝光優化。這導致即使影像整體動態範圍增加，主體物件的亮度仍可能偏離理想的中間亮度區間。

為了解決上述主體亮度無法凸顯與背景喧賓奪主的問題，本研究提出了一套結合巨集邊緣感知與差異化色調映射策略的高動態範圍影像處理方法，旨在針對不同場景動態分布特性，強化主體細節呈現，同時維持背景必要的亮度與色彩資訊。本方法的核心概念與主要模組設計，將於 3.1 小節中詳細介紹。

3.1 整體系統架構說明

本章將介紹用於合成高動態範圍影像的處理流程設計，如圖 3-1 所示。旨在解決傳統多重曝光高動態範圍合成影像中，主體區域亮度與細節無法充分表現，背景反而過度突出的問題，同時維持影像色彩的準確性與自然感。

本研究的影像處理流程，是在一般相機彩色影像處理架構的基礎上，進行改編與新增模組設計而成。流程中，圖中的白色方框表示既有的標準處理步驟，而黃色方框則為本研究重新設計、新增的模組。此架構的優勢在於，影像會先經過一系列線性校正處理後，再進行非線性步驟將影像壓縮至標準動態範圍，且過程中轉換至色彩亮度分離的色彩空間進行運算，能有效維持影像的自然感與色彩恆定性。

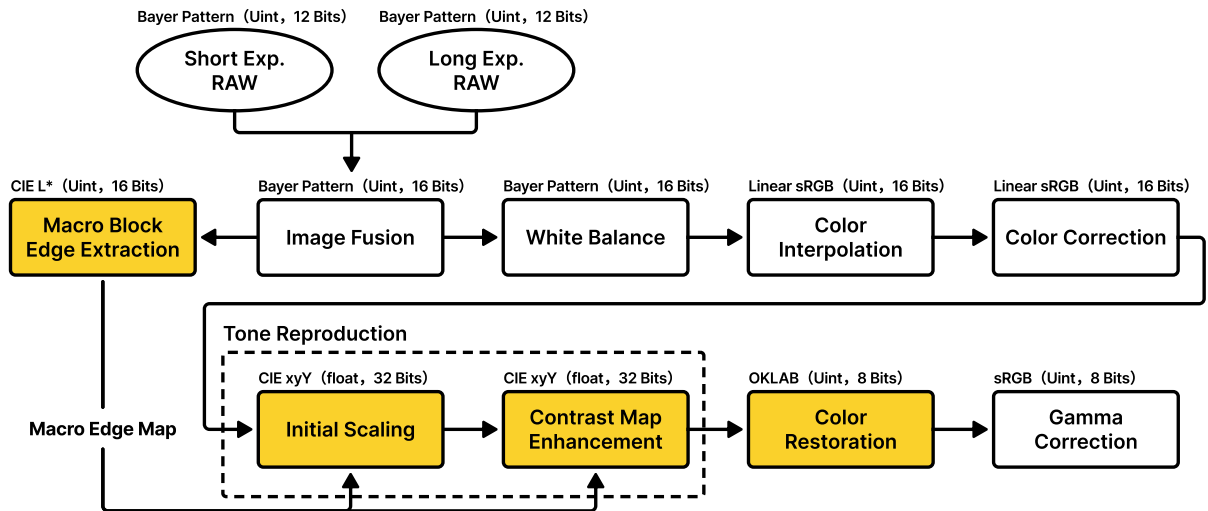


圖 3-1 影像訊號處理流程架構圖

在影像輸入階段，系統首先由相機拍攝兩張具有不同曝光比的影像，進行影像融合 (image fusion)，將短曝光與長曝光影像整合，生成涵蓋更廣動態範圍的影像。接著，透過白平衡 (white balance) 校正，消除環境光對影像色溫的影響；之後，使用色彩校正 (color correction)，透過色彩校正矩陣，將影像色彩調整至貼近實際物件的真實色彩。

在此過程中，系統需經由色彩插值 (color interpolation) 步驟，將原始影像從拜爾 (Bayer) 色彩濾光陣列 (color filter array, CFA) 格式還原成具備完整 RGB 通道的彩色影像。其本質上即為一次空間上採樣 (up sampling) 與插值運算，其精準度直接關係到最終呈現的高頻細節與色彩準確度。然而，不當的插值方式可能導致高頻細節流失、偽色 (false color) 或邊緣鋸齒等人工偽影，顯著影響視覺品質。

針對這些挑戰，已提出多種高精度策略 [11] [12] [13] [14]。而本研究則採用 Li 所提出基於高次多項式模型 high-order polynomial interpolation 的色彩插值策略 [15]，目的是在最大程度保留高頻資訊的同時，有效抑制偽色現象，以提升輸出影像的細節表現與色彩真實性。

完成上述線性校正後，影像會轉換至 CIE xyY 色彩空間。此色彩空間由國際照明委員會（CIE）制定，與 Linear RGB 之間具有線性的轉換關係，能真實表達像素亮度，並在進行動態範圍壓縮時，保持 RGB 數值比例不變，達到真正的色彩亮度分離，避免色偏問題。接著影像進入色調重現（tone reproduction）模組，執行動態範圍壓縮，最後透過伽瑪校正（gamma correction），調整影像亮度以符合顯示器的非線性響應曲線，使最終影像在顯示設備上呈現接近人眼感知的線性亮度分布。

在此標準流程架構上，本研究設計了三個核心模組，進一步強化高動態範圍影像的品質與主體表現：

1. 巨集邊緣抽取模組（macro block edge extraction）

本模組透過計算巨集區塊（ $n \times n$ 像素）內的亮度梯度，快速且準確地偵測影像中具有視覺重要性的主體區域。系統將影像劃分為多個巨集區塊，並於 CIE L* 色彩空間計算每區塊的亮度梯度，生成 Macro Edge Map，作為後續色調映射與邊緣強化的依據，避免主體區域亮度被背景所稀釋，提升後續處理的精準度。

2. 色調重現模組（tone reproduction）

此模組負責將 HDR 影像的寬廣動態範圍壓縮至 SDR 顯示範圍，同時保留主體細節與背景層次感。其設計結合了巨集邊緣感知的亮度對齊模組（initial scaling）與對比圖強化（contrast map enhancement）方法，確保主體區域能維持在理想亮度，擁有足夠的動態範圍與細節對比度，呈現更佳的視覺效果。

3. 色彩還原模組 (color restoration)

在色調映射後，影像需從色彩亮度分離的 CIE xyY 色彩空間還原回 Linear sRGB 空間，然而此過程容易產生飽和溢出，導致色相或亮度偏移。本模組將影像轉換至 OKLab 色彩空間，利用預先建立的色相與亮度對應飽和值查詢表，對過飽和像素進行補償與修正，最終輸出色彩真實自然的影像。

綜合這三個模組的設計，本研究提出的高動態範圍影像處理演算法能有效克服傳統多重曝光高動態範圍影像中，主體亮度與細節未能被正確凸顯、背景過度搶眼，以及色彩失真等問題，最終實現同時保留動態範圍、強化細節與主體表現，並維持色彩真實性的高品質高動態範圍影像處理系統。

3.2 巨集邊緣抽取模組設計

巨集邊緣抽取最早源自 Kao 等人提出的方法 [2]，其核心思想是將影像劃分為多個巨集區塊 (macro block)，以降低雜訊干擾並保留主要的結構輪廓。本研究在此基礎上進行改良，並將其應用於高動態範圍影像的邊緣偵測流程。

首先，對於輸入的拜爾濾色矩陣 (Bayer pattern)，我們不直接在插值後的 RGB 影像上運算，而是先在原始拜爾資料上計算每個 $n \times n$ 巨集區塊的紅色、綠色與藍色通道的平均值如 (3-1)。接著將這三個平均值轉換至 CIE XYZ 色彩空間，其中亮度分量 Y 依照 sRGB/D65 標準計算如 (3-2) 所示。

$$\bar{R} = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j \in block} R_{i,j}, \quad \bar{G} = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j \in block} G_{i,j}, \quad \bar{B} = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j \in block} B_{i,j} \dots\dots\dots (3-1)$$

$$Y = 0.2126 \times \bar{R} + 0.7152 \times \bar{G} + 0.0722 \times \bar{B} \dots\dots\dots (3-2)$$

接著我們對亮度通道計算梯度 ∇Y ，本研究採用 Sobel 運算子進行水平方向與垂直方向的梯度變化計算 (3-3)，以獲取影像局部亮度變化的幅度。為避免高動態範圍影像在低亮度區域的梯度過小而導致邊緣遺失，我們引入梯度補償函數 $G_c(x)$ ，適度提升暗部梯度值。最後將加權補償後的梯度圖輸入 Canny 邊緣檢測器 (Canny edge detector)，有效去除孤立雜訊並保留連續且具視覺重要性的邊界。整體流程可由式 (3-4) 描述最終梯度 Y_G 的計算方式，而梯度補償與中央權重測光的設計細節，將於 3.2.2 與 3.2.3 中進一步說明。

$$\nabla Y = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial y}\right)^2} \dots\dots\dots (3-3)$$

$$Y_G = G_c(\nabla Y) \dots\dots\dots (3-4)$$

3.2.1 巨集區塊大小選擇與人眼視覺頻率響應分析

在本研究的巨集邊緣抽取模組中，巨集區塊的大小參數 n 是影響邊緣偵測精度與運算效率的關鍵因素。我們採用將影像劃分為巨集區塊的方式 [2]，以區域平均取代單像素的亮度計算，能有效降低像素層級的亮度對比起伏所引發的高頻雜訊干擾。然而，巨集大小的選擇涉及精度與穩定性的權衡。較小的巨集能更精確地保留細部邊緣位置，但容易同時捕捉雜訊；而較大的巨集雖可進一步抑制雜訊，卻可能導致邊緣位置模糊化，甚至遺失細小的邊緣資訊。

為了找到合理的巨集大小，我們參考了在色彩亮度分離後的對手色彩空間 (opponent color space) 中，各通道的對比敏感度函數 (contrast sensitivity function, CSF) 曲線，如圖 3-2 [16] 所示。該函數描述了人眼對不同空間頻率下影像對比的感知能力，並可視覺化為對比度與頻率的關係圖。從圖 3-3 可見，當圖樣的空間頻率逐漸提高時，人眼對其對比的感知能力會顯著下降，最終將高頻細節視為均勻的灰色區域。

依據此視覺特性，並結合本研究使用之影像解析度 6240×4180 的實際需求，我們選定巨集大小為 16×16 像素。此設定在精度與雜訊抑制之間取得平衡，既能有效過濾高頻雜訊，又能保留足夠的結構邊緣資訊，為後續的梯度計算與邊緣強化提供穩定輸入。

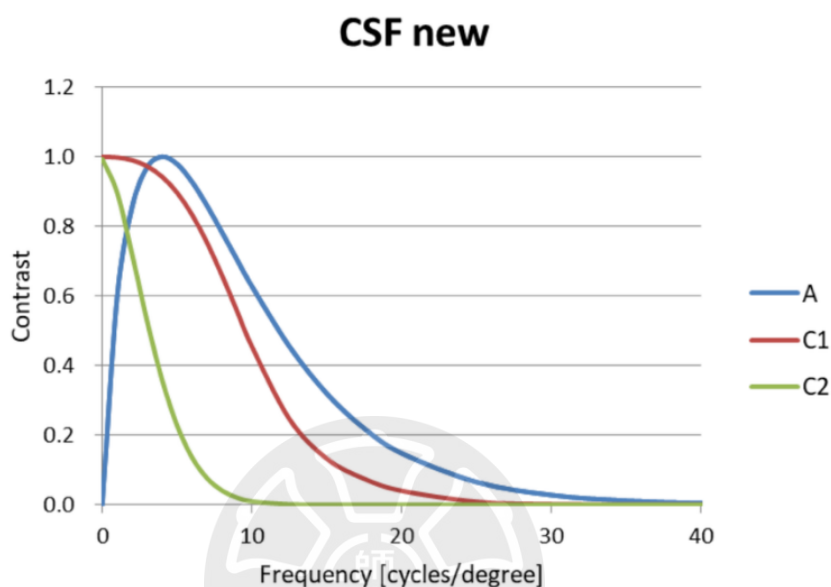


圖 3-2 對比感感測函數曲線

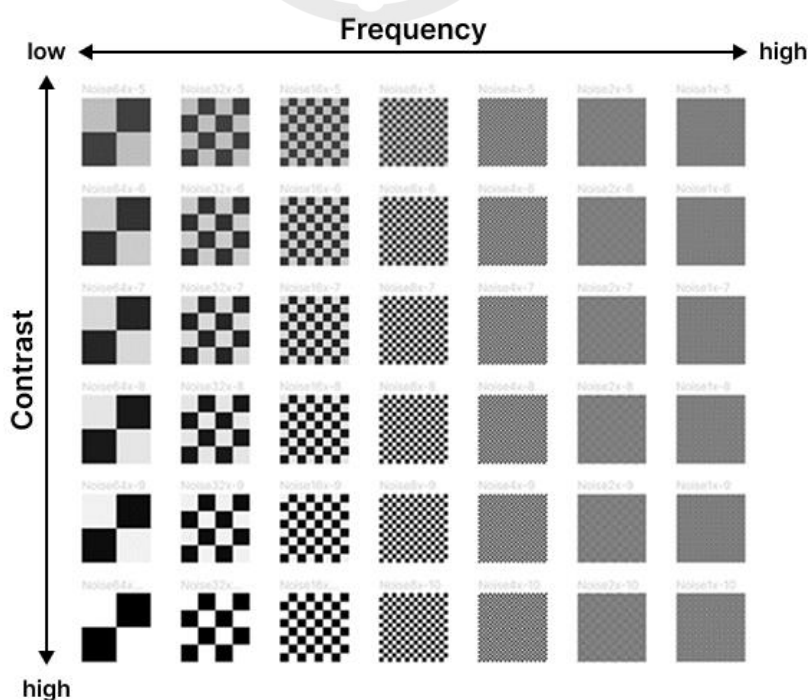


圖 3-3 視覺化對比度與頻率的關係

3.2.2 高低亮度補償係數設計

在完成巨集區塊亮度計算並利用 Sobel 運算子取得初始梯度後，可以發現高動態範圍影像在亮度兩端的邊緣響應並不均衡。暗部區域因亮度值被壓縮至較小範圍，梯度幅度往往不足，容易在後續檢測中被忽略；而高亮度區域，特別是在接近飽和的高光部分，即使亮度變化平緩，梯度仍可能達到檢測閾值，造成多餘的邊緣響應。

為了讓梯度在不同亮度範圍中都能更接近人眼對細節的感知，本研究針對梯度值引入一個依亮度調整的補償函式 $G_c(G_i)$ 修正原始梯度 G_i ，使暗部細節能被適度放大，同時抑制高光過渡區的過度響應。這個補償設計同時考慮了標準動態範圍最大值 I_{SDR} 與高動態範圍最大值 I_{HDR} ，並依照巨集區塊的平均亮度 G_i 分別進行不同的計算：當亮度小於 I_{SDR} 時，梯度會依比例放大以增強細節；而當亮度大於 I_{SDR} 時，則利用亮度差項 $I_i - I_{SDR}$ 進一步修正梯度幅度，以降低高光區檢索為邊緣的情形，圖 3-4 視覺化補償梯度的情形。

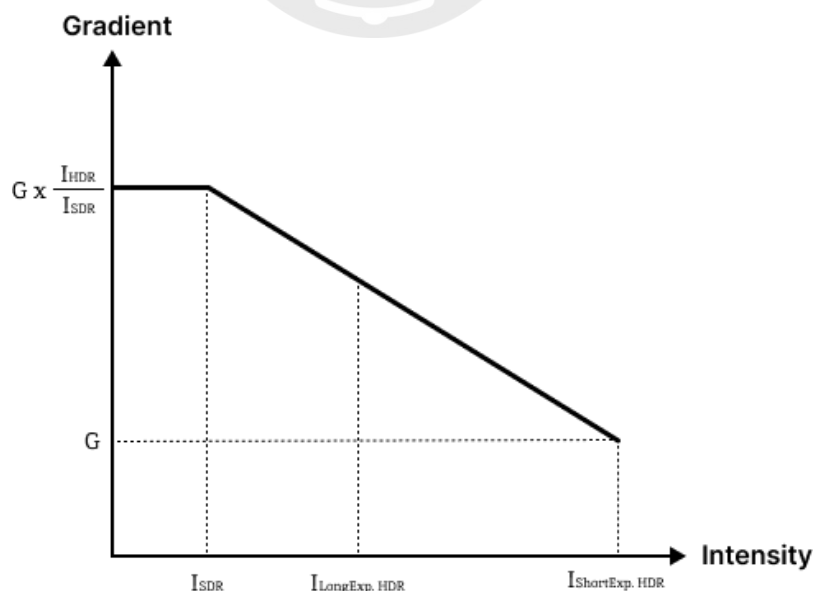


圖 3-4 邊緣梯度補償係數

整體公式的計算方式如 (3-5) 所示，其中 G_i 為原始梯度幅值，為 I_i 巨集區塊的平均亮度值。透過這樣的補償方式，暗部梯度會被強化，使低亮度細節能順利通過後續的邊緣檢測；高光區域則因修正而降低不必要的響應，保留的邊緣更加穩定且連續。

$$G_c(G_i) = \begin{cases} G_i \times \left((I_i - I_{SDR}) \times \frac{I_{HDR}}{I_{SDR}} \right), & I_i > I_{SDR} \\ G_i \times \frac{I_{HDR}}{I_{SDR}}, & I_i \leq I_{SDR} \end{cases} \quad (3-5)$$

從圖 3-5 可以觀察到，經過梯度補償後，暗部區域的細節邊緣得到了明顯的增強，使原本因亮度壓縮而被忽略的輪廓得以成功檢出。例如，人物中間衣褶的細節與色卡上各格的邊界線，在補償後的結果中變得更加清晰，同時整體邊緣結構更連續。此外，補償策略有效避免了高亮度區域（特別是光源周圍）產生過多偽邊緣的情況。在中間亮光處的光暈部分，即使經過梯度加權，其平緩的亮度變化仍未被誤判為邊緣資訊，顯示該方法能在增強暗部細節的同時，抑制高光過渡區的雜訊響應。

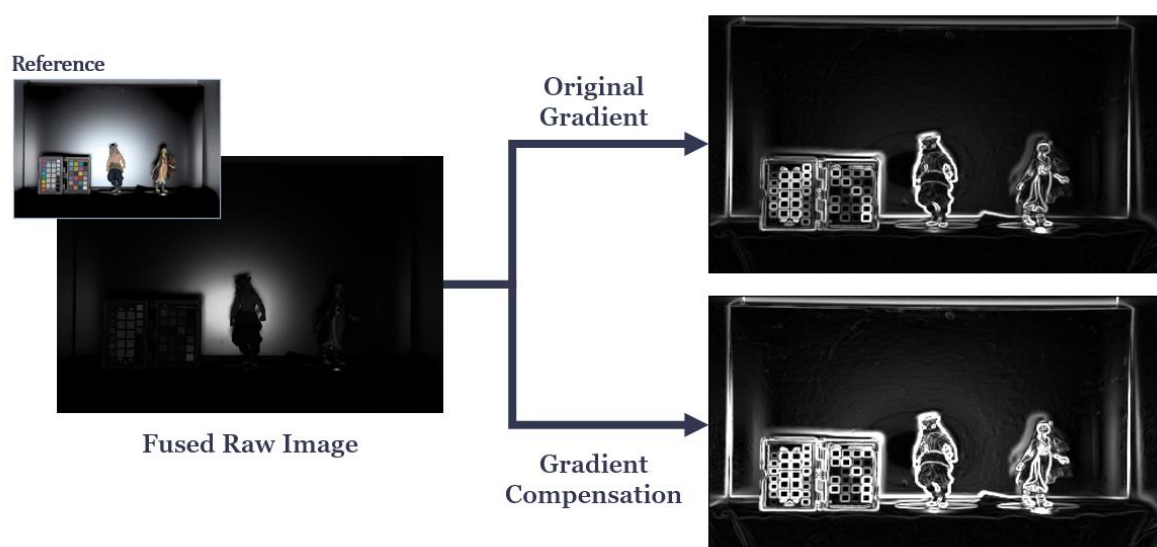


圖 3-5 係數補償前後梯度資訊比較

3.3 色調映射模組設計

色調重現演算法的核心目標，是在將高動態範圍影像轉換至標準動態範圍時，能夠最大程度保留暗部與亮部的細節，模擬人眼在高對比環境中對亮度的自適應能力。這樣的設計可確保暗部細節不被淹沒於陰影，同時避免亮部過曝，達到真實且平衡的視覺效果。本研究在實驗室先前提出的方法基礎上進行延伸設計，針對影像動態範圍調整與對比度維護之間的平衡進行優化，使輸出影像在視覺感受上更加自然，且具有足夠的細節層次。圖 3-6 展示了本研究的色調重現流程。

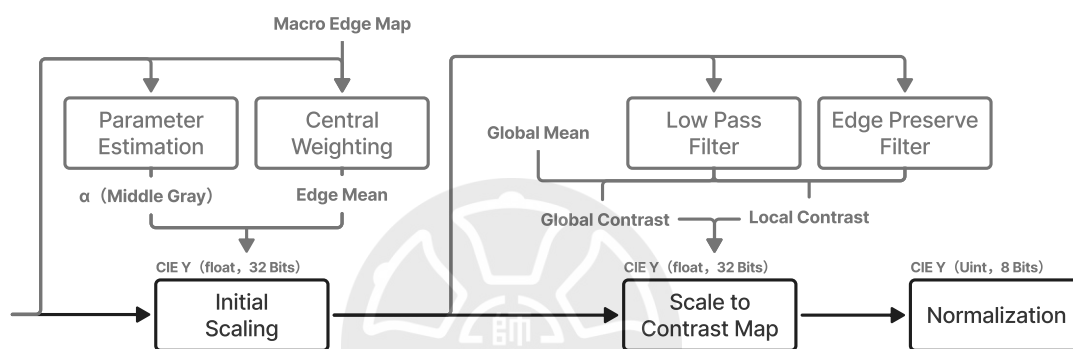


圖 3-6 本研究提出的色調映射演算法

在整體流程中，我們首先進行全域且線性的初始縮放（initial scaling），結合前一節所計算的巨集邊緣資訊（macro edge map），將影像的關鍵亮度區域對齊至合適的中間灰階（middle gray），以確保主要視覺元素在亮度呈現上的正確性與穩定性。

隨後，流程進入非線性的區域運算：對比圖壓縮映射（scale to contrast map），透過高亮度範圍的對比度壓縮機制，精確評估並調整全域對比度（global contrast）與區域對比度（local contrast）。這個步驟不僅能強化局部細節，還能避免在壓縮亮部動態範圍時對暗部或中間亮度層次造成過度影響，使最終影像在質感、深度與細節還原度上都有顯著提升。

接下來的 3.3.1 與 3.3.4 小節將分別介紹初始縮放與對比圖壓縮映射的設計細節與數學模型，說明它們在整體色調重現流程中所扮演的關鍵角色。

3.3.1 影像初始縮放

影像初始縮放的流程如圖 3-7 所示，其設計理念與 Reinhard 提出的攝影色調重現演算法 [5] 中的線性調整步驟相似，主要目的是將影像的亮度範圍對齊至中間灰階，為後續的非線性亮度壓縮提供穩定的基礎，避免關鍵影像資訊在高亮或低亮區間被過度壓縮而喪失細節。



圖 3-7 影像初始縮放流程與影像處理示意圖

與傳統方法直接使用整張影像的平均亮度不同，本研究改以巨集邊緣區域的平均亮度作為對齊依據。這樣的設計能讓線性調整的過程更專注於畫面中的主要拍攝主體，而不受背景或非關鍵區域的影響。此外，在巨集邊緣亮度計算中，我們引入了中央權重測光模型，以進一步強化中央區域的影響力，確保最終亮度對齊能更貼近觀察者的視覺關注區域。

從圖 3-7 的示例影像可觀察到，經過線性縮放後，主體物件的亮度被有效提升至較為可見且適中的亮度範圍，使得後續的非線性壓縮能夠在保留細節的同時維持良好的對比度。初始縮放的數學模型可表示如下式 (3-6)。

$$f_{IS}(Y_i) = \alpha \times \frac{Y_i}{C_w(\overline{Y_E})} \dots\dots\dots (3-6)$$

其中 Y_i 為輸入影像的原始亮度值， α 為計算得到的中間灰參數， $C_w(\overline{Y_E})$ 則是經過中央權重加權的巨集邊緣亮度均值。中央測光權重與巨集邊緣均值的計算細節，將於 3.3.2 與 3.3.3 進一步說明。

3.3.2 中間灰參數計算

在本研究的初始縮放步驟中，中間灰參數 α 的計算方式延續了攝影色調重現演算法 [5] 中的設計理念。傳統上中間灰通常設定為固定值 0.18，對應人眼在自然場景中對亮度的平均感知。然而固定值並不能適應所有拍攝情境，特別是在日景、夜景或高反差場景下，固定的中間灰可能導致影像整體亮度偏高或偏低，影響觀感的一致性。

因此，我們採用於快速頻率分割色調重現 [6]，所提及到的動態調整的方式。根據影像的平均亮度與亮度範圍，自動修正 α 的數值，使其能更貼近該場景的亮度分佈。其計算公式如式 (3-7) 所示，其中 Y_{mean} 為影像的亮度均值， Y_{max} 與 Y_{min} 分別為影像的最大與最小亮度值。這種調整機制能有效保持場景的自然亮度，讓影像在後續處理中兼顧細節與對比。

$$\alpha = 0.18 \times 2^{\left(2 \times \frac{2 \times \log_2 Y_{mean} - \log_2 Y_{max} - \log_2 Y_{min}}{\log_2 Y_{max} - \log_2 Y_{min}}\right)} \dots\dots\dots (3-7)$$

3.3.3 中央測光權重矩陣亮度估測

在獲得中間灰參數 α 後，下一步需計算巨集邊緣的加權亮度均值 $C_w(\overline{Y_E})$ ，以便將影像正確對齊至中間灰位置。不同於傳統演算法多以全域亮度均值進行估測，我們採用了 Kao 等人提出的亮度量測與曝光控制方法 [17] 作為基礎，該方法原

本用於提升亮度估測在複雜自然場景中的穩定性。本研究將其改良為僅針對巨集邊緣像素進行亮度計算，能有效避免單調背景或大面積色塊場景對估測結果的影響，特別適合在測試圖卡與低紋理背景中保持主體亮度的準確性。

此外，為進一步模擬相機測光系統中「中央加權測光」的特性，我們將邊緣像素根據其在影像中的位置套用不同權重，使影像中央區域的邊緣在亮度估測中佔據更高比例，而邊緣區域則給予相對較低權重。這樣的設計能在保持主體亮度準確對齊的同時，降低背景或非關鍵物體對結果的干擾。

其計算方式如式 (3-8) 所示，其中 $\overline{Y_E}$ 代表巨集邊緣像素的亮度均值， W_i^c 為中央加權矩陣對應位置的權重，透過加權平均後再取指數形式，以獲得更符合人眼感知的亮度估測值。

$$C_w(\overline{Y_E}) = 2^{\left(\frac{\sum_i^n (\log_2 \overline{Y_E} \times W_i^c)}{\sum_i^n W_i^c} \right)} \dots \dots \dots (3-8)$$

如圖 3-8 所示，中央權重矩陣會根據影像解析度與構圖位置進行縮放與套用，示例中可以看到巨集邊緣區域被賦予不同程度的權重，以確保亮度估測結果更專注於影像的關鍵主體。

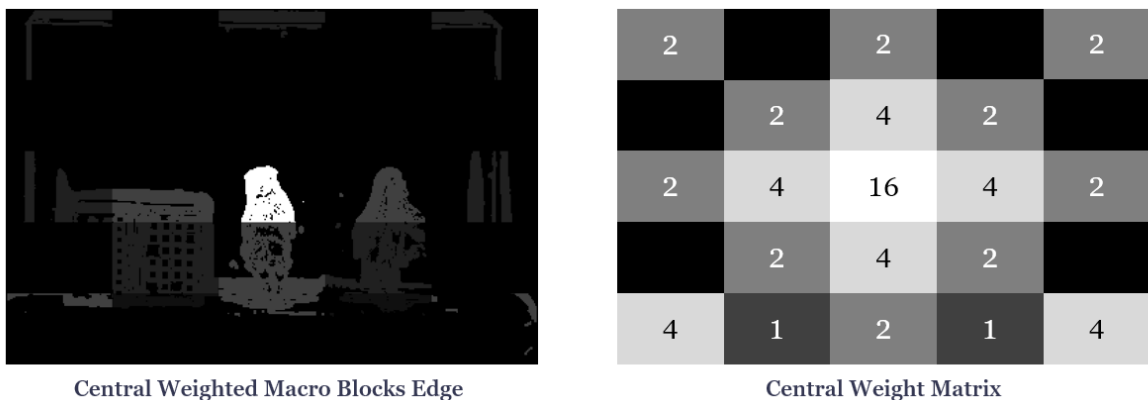


圖 3-8 中央權重測光模型矩陣與巨集邊緣套用權重示意圖

3.3.4 影像對比圖壓縮映射

在完成初始縮放後，影像會進入對比圖壓縮映射的步驟。此階段的目的是在盡量避免亮部過曝的同時，提升暗部細節的可見度。傳統的非線性壓縮通常透過單一色調曲線來壓縮高亮度區域並提升低亮度部分，但這樣的作法在亮部區域往往會過度壓平，使得局部對比顯著降低。

為了改善這個問題，本研究引入了區域對比(local contrast)與全域對比(global contrast)兩項資訊，將原本的單一曲線映射拓展為一個曲塊範圍。如圖 3-9 所示，曲塊映射方式能針對不同亮度區段保留一定的局部對比，特別是在高亮度區域，避免其被壓縮到低斜率而失去細節。

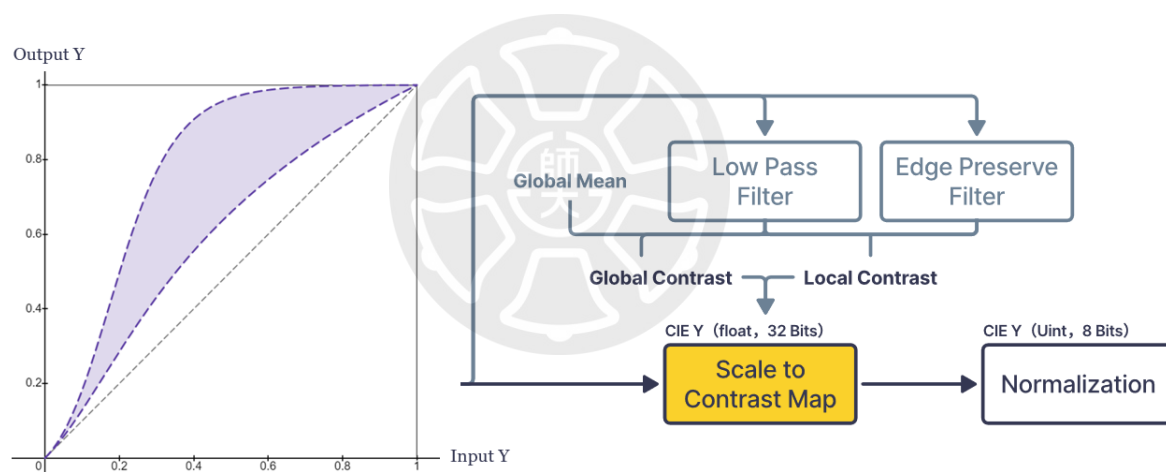


圖 3-9 影像對比圖壓縮流程與亮度映射曲塊

在運算流程上，我們首先計算影像的全域均值，並利用低通濾波器 (low pass filter) 與邊緣保持濾波器 (edge preserve filter) 分別獲取全域對比與區域對比，接著將這兩項資訊結合至非線性壓縮公式中，依據輸入亮度 Y_i 計算對應的輸出亮度。映射公式如式 (3-9) 所示，其中 C_{LN} 與 C_{GN} 分別代表經過正規化強化的區域與全域對比值，詳細計算方式將於 3.3.5 小節中分別介紹。

$$f_{SC}(Y_i) = \frac{Y_i}{C_{LN}(L_i) + C_{GN}(L_i) + Y_i} \dots \dots \dots (3-9)$$

3.3.5 影像對比圖評估

為了更貼近人眼對亮度的感知，我們先將輸入影像的亮度通道 Y 轉換為 CIE Lab 色彩空間中的 L 通道 [18]，轉換公式如 (3-10) 所示。Kao 等人在對比度評估上 [7]，使用像素亮度與其鄰域均值的比值取對數的方法，雖然能有效避免負值，但在分母接近零或亮度極小時，容易產生過大的對比值並造成人工偽影。

$$L = \begin{cases} 1.16 \times Y^{\frac{1}{3}} - 0.16 & , \text{if } Y > \left(\frac{6}{2900}\right)^3 \\ \left(\frac{29}{300}\right)^3 & , \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots\dots (3-10)$$

為改善此問題，Wang 採用高斯函數的方式 [19] 計算對比值 (3-11)，能將對比度穩定限制在 0 至 1 區間內，避免極端值的產生。如圖 3-10 所示，在比較的兩個亮度相等時，會落在 0.5 的中間值，而隨著比例落差越大，其數值會漸漸傾向 0 或 1 的數值。

$$C(I) = e^{-1.44 \times \frac{I_A}{I_B}} \dots\dots\dots (3-11)$$

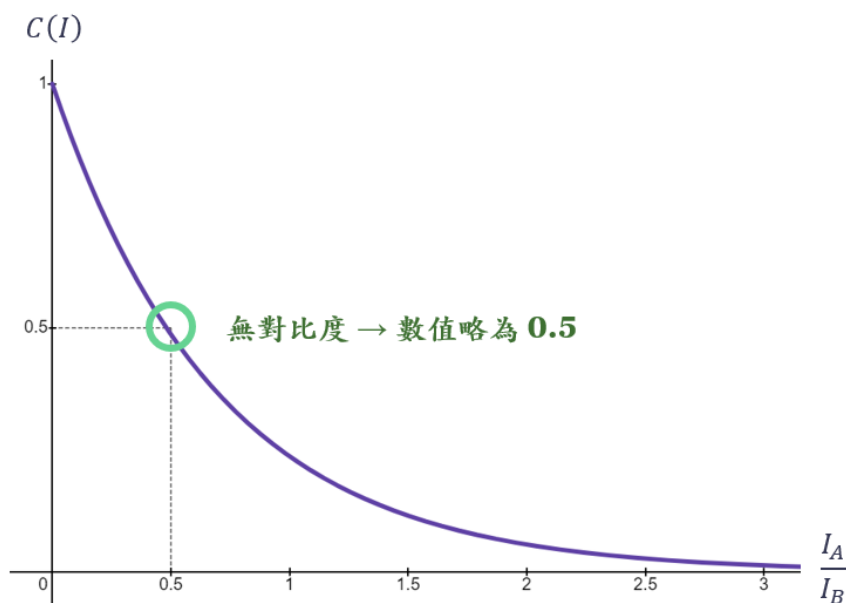


圖 3-10 高斯函數處理後的影像對比值

本研究的區域對比與全域對比計算方式如 (3-12) (3-13) 所示。其中，區域對比 $C_L(L_i)$ 是將影像經低通濾波器 $f_M(L_i)$ 與邊緣保留濾波器 $f_{EPW}(L_i)$ 結果相除，獲取去除雜訊後的邊緣對比資訊；全域對比 $C_G(L_i)$ 則為低通濾波 $f_M(L_i)$ 結果與全域均值 \bar{L} 之比值，用以反映該區域與整體亮度的差異。

$$C_L(L_i) = e^{-1.44 \times \frac{f_{EPW}(L_i)}{f_M(L_i)}} \dots\dots\dots (3-12)$$

$$C_G(L_i) = e^{-1.44 \times \frac{f_M(L_i)}{\bar{L}}} \dots\dots\dots (3-13)$$

此外，我們對比度的直方圖統計分析顯示，大部分的對比值通常落在中間值範圍內，很少達到 0 或 1 的極端對比值。儘管通過直方圖等化可以加強對比度，但我們發現這種方法往往過於激烈，容易導致光暈和描邊現象的嚴重化。因此，我們選擇使用一種較為溫和的正規化方法來輕微強化對比圖，以獲得更自然的視覺效果並減少不自然的圖像偽影。強化的方式如公式 (3-14) (3-15) 所示，由於小於 0.5 的對比值的區域對比將會使得像素變亮而可能超越取代影像最亮值，因此我們取值 0.5 不做強化，只針對大於 0.5 的數值做暗部的正規化強化。這樣的調整能使得對比度做適當的強化，並避免了一些因為高對比值而產生的視覺問題。

$$C_{LN}(L_i) = \begin{cases} 0.5, & \text{if } C \leq 0.5 \\ C_L(L_i) \times \frac{1}{C_L^{Max}}, & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots\dots (3-14)$$

$$C_{GN}(L_i) = C_G(L_i) \times \frac{1}{C_G^{Max}} \dots\dots\dots (3-15)$$

透過以上方式強化後，我們得到如圖 3-11 的對比圖結果，全域對比圖能夠幫助影像最亮與最暗的對比進行拉伸，避免壓縮過程中的圖像灰化降低對比；而區域對比透過對於細節強化輪廓，使得壓縮後的影像細節依然可見。

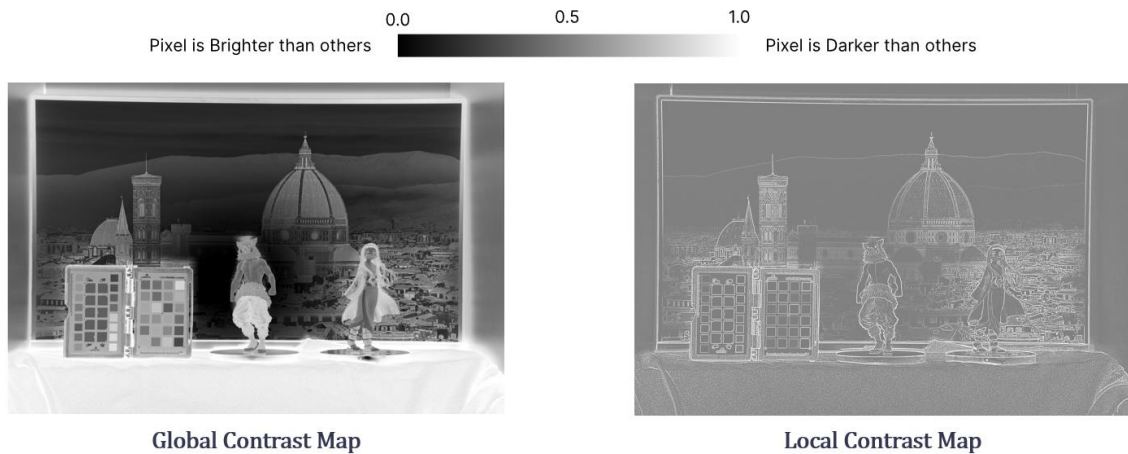


圖 3-11 區域與全域對比圖視覺化圖像

3.4 色彩還原補償模組

在色調重現演算法處理後，將影像亮度 Y 調整到一個適合的動態範圍，再透過色彩空間轉換將調整後的數值映射到對應的 RGB 色彩空間。由於 CIE xyY 色彩空間與 RGB 色彩空間之間存在線性轉換關係，這使得我們可以較為方便地通過衡量色調重現結果的變化量來計算色調重現後所對應的 RGB 數值，具體計算公式見 (3-16)。

$$\begin{cases} Y_{gain} = Y' \div Y \\ [R', G', B'] = [R \times Y_{gain}, G \times Y_{gain}, B \times Y_{gain}] \end{cases} \dots\dots\dots (3-16)$$

在色彩空間的轉換過程中，有時會發現無法對應到特定的 $[R', G', B']$ 值，即出現數值超過最大值的過飽和情形。通常這些過飽和的數值會簡單地設為最大值來處理，儘管這樣的處理會導致輕微的色相和亮度偏差。尤其在極端飽和色彩的情況下，這種色偏現象將顯著加劇，我們通過將顏色轉換到 CIE Lab 色彩空間進行觀察後發現這一點。

如圖 3-12 所示，中間的彩色方塊為 RGB 色彩在 CIE Lab 的色彩空間可顯示的色彩模型；而紅點模擬了經過色調重現後，超出色彩模型的過飽和像素。從圖中可見，若使用直接設為最大值的方法，色彩的色相會發生偏移，且亮度也會隨之改變，而非僅僅是降低飽和度。

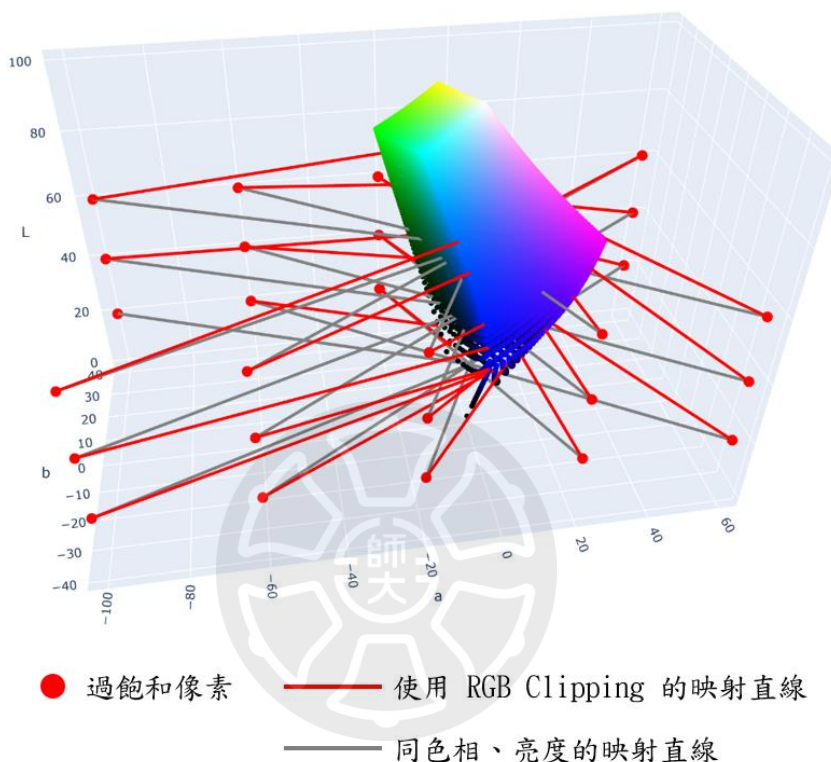


圖 3-12 RGB 色彩模型與過飽和像素的映射直線

因此，我們在 OKLab 色彩空間建立 RGB 色彩模型，並針對每個色相與亮度，創建彩度飽和值的查詢表。透過此表，我們將每個過飽和像素的數值以表中同一色相、亮度的彩度飽和值取代。選擇 OKLab 色彩空間而非 CIE Lab 的原因在於，後者在藍紫色相的表現存在問題。如圖 3-13 [20]所示 CIE Lab 在同一色相下，隨著亮度變化會出現由藍偏紫的現象，這在視覺上可能難以接受。

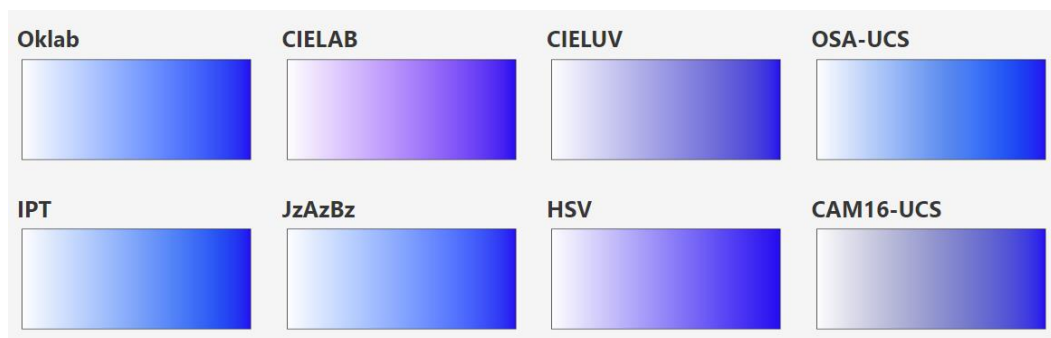


圖 3-13 色彩空間在藍色色相上，不同亮度的視覺表現

此外，CIE Lab 在藍色色相的飽和值表現可能會有兩個不同的飽和值，因為 CIE Lab 色彩空間的 RGB 色彩模型中藍色區塊會出現拐角，如圖 3-14 所示。右圖顯示色彩模型上的拐角，而左圖則是繪製以亮度為 Y 軸、彩度為 X 軸的情況下，顯示出飽和後又出現值的奇怪情形。為避免此問題，我們根據每個色相、亮度找到對應的最小飽和值來建立查詢表，並將所有像素轉入 OKLab 色彩空間，檢驗其飽和度是否大於查表上的數值，並進行必要的替換。

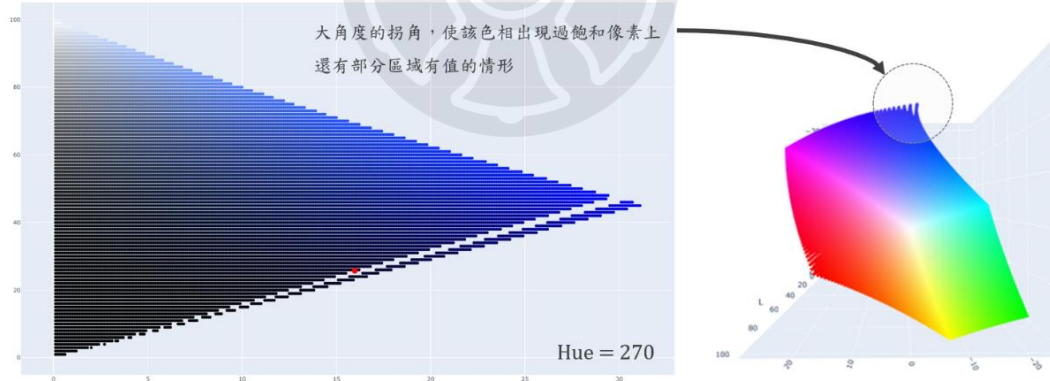


圖 3-14 OKLab 於藍色色相的拐角問題

3.5 AI 顯著圖方法

在本研究的主要方法之外，我們額外嘗試引入一種人工智慧顯著圖 (saliency map) 計算方式，作為補充性的方法來驗證在複雜背景中主體區域的精準定位是否能進一步提升影像處理效果。傳統的巨集邊緣抽取雖然能有效檢測場景中的主要邊界，但在背景紋理複雜或前景與背景對比不足的情況下，往往會同時包含大量非主體的邊界訊息，使得後續增強過程中，背景區域可能被錯誤加權而影響視覺效果。

基於此，我們選用 Qin 等人提出的 U²-Net 深度神經網路 [21]作為顯著圖的計算核心。U²-Net 原設計用於顯著物體檢測 (salient object detection, SOD) 能在複雜背景中找出最具視覺吸引力的區域。其多層次殘差 U-block 結構在保留全域語意資訊的同時，也能捕捉細節紋理，並以相對輕量的模型實現高精度輸出，適合整合進影像訊號處理流程中。

我們將此方法嵌入至影像訊號處理流程如圖 3-15，並與巨集邊緣方法進行比較。從圖 3-16 可觀察到，顯著圖能更精確地集中於主體物件，並有效抑制背景中的干擾資訊。雖然這並非本研究的主要方法，但作為補充嘗試，它驗證了 AI 導向的主體定位，也為未來的改進方向提供了可能性。

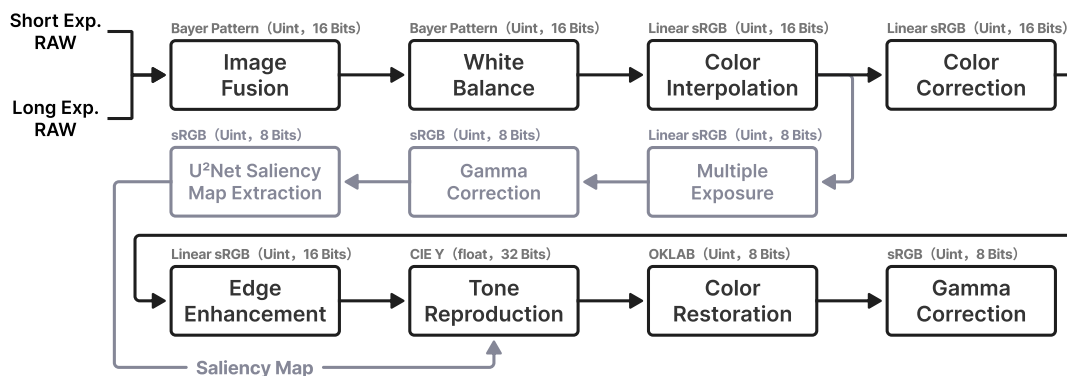


圖 3-15 使用 AI 顯著圖方法之影像訊號處理流程

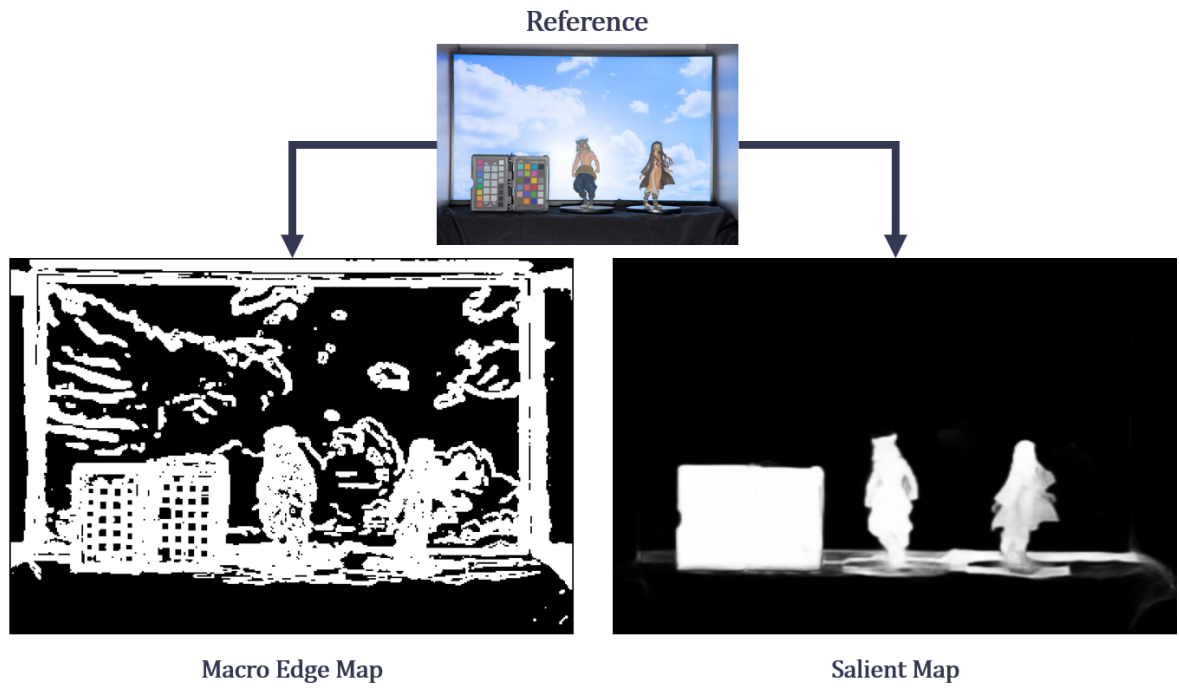


圖 3-16 巨集邊緣與顯著圖抽取資訊比較



第四章 實驗結果

本章將同時以主觀與客觀角度分析，展示本研究針對高動態範圍影像設計的方法其實驗結果。我們參考 VCX Webcam 的評估標準 [22]，規劃了多組實驗場景進行測試，圖 4-1 [23] 示意 VCX 場景中的其中一個典型的實驗配置。拍攝物件主要可分為兩部分：一為受控光源照明的主體，包括人物模型、標準色卡等測試物件；另一為可變化的背景，透過 LCD 螢幕顯示各種圖像模擬真實場景。此設計可模擬出主體與背景在不同亮度對比下的高動態場景，例如主體位於陰影區而背景明亮的背光場景，或主體清晰明亮而背景黯淡甚至漆黑的情境。我們亦搭配純色與高飽和度背景進行色彩還原測試，以評估影像處理系統在與 RGB 各通道正交條件下的色調重現能力。

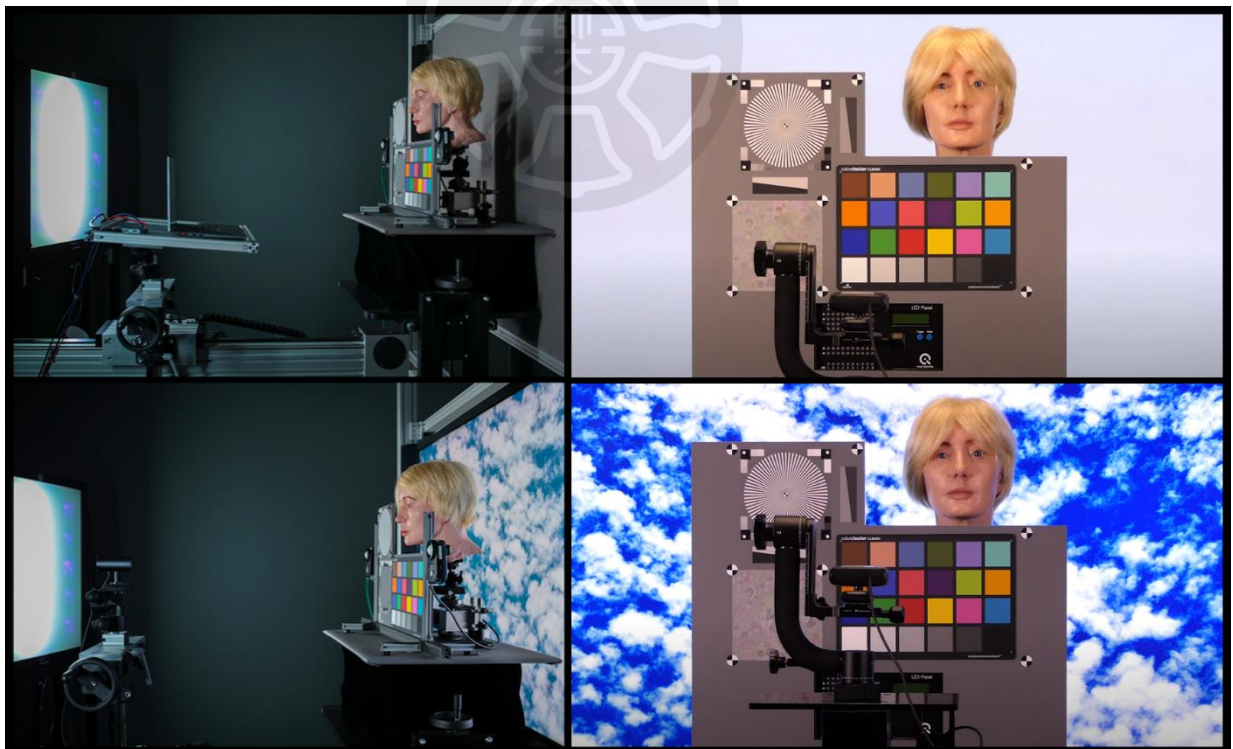


圖 4-1 VCX 實驗測試場景與實拍畫面示意圖

4.1 實驗環境與設備

為驗證所提出方法於高動態範圍場景下的成效，我們參閱 VCX Webcam 測試規範 [22]，設計一套模擬實驗場景進行系統性測試。圖 4-2 為本次實驗場地之平面配置圖，圖 4-3 為實際測試場景與由實拍擷取畫面。

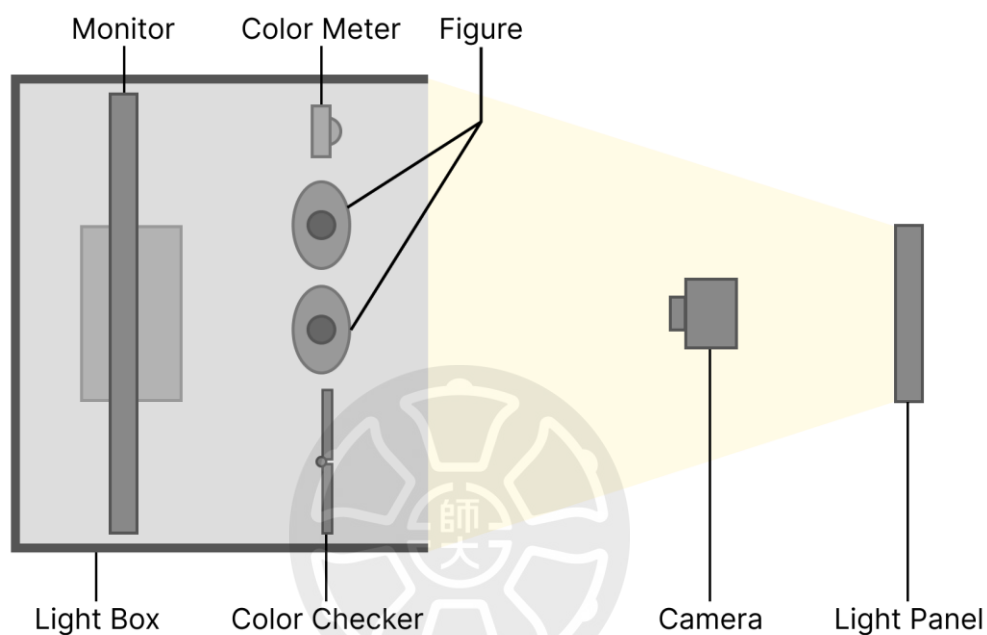


圖 4-2 本次實驗測試場景平面配置圖



圖 4-3 實驗測試場景實拍示意圖

本實驗主要拍攝環境建置於 X-Rite Macbeth Judge II 標準光源箱中，透過密閉式控制環境，有效隔絕外部環境光源的干擾，確保實驗光照的一致性與再現性。拍攝裝置選用 Canon 6D Mark II 全片幅數位單眼相機，並以不同曝光參數 (exposure value, EV) 進行多組拍攝，以模擬雙重曝光或多重曝光設備的成像效果。此替代方案雖無法完全仿效 VCX 規範中所使用的專業硬體，但能提供具代表性的高動態成像數據，滿足本研究之比較需求。

拍攝主體包含兩個小型人物模型及一組標準色卡 (Color Checker) [24]，用於評估影像系統對主體亮度與色彩的重建能力。為進行色偏與色彩準確度的測試，背景圖像由 ASUS ProArt PA279CRV 專業色準螢幕呈現。該螢幕具備 $\Delta E < 1$ 的高色彩準確度，可作為演算法色偏評估的參考標準。

主體照明則採用 Aputure Pano 60c 全彩 LED 柔光燈，具備色溫與亮度可調特性，可靈活模擬各種光照條件下之成像表現，並配合照度計進行量測實現亮度的精準控制。我們設定兩組光源條件，模擬 VCX 實驗測試場景中，低照度 (low light) 與中照度 (mid light)：一為 20 lux 的 A 光源模擬低照度場景；另一為 250 lux 的 D65 標準日光模擬正常照明環境。藉此可觀察演算法在不同光強對比下的表現差異。

背景內容設計方面，為模擬各類可能的真實應用情境，我們共製作 12 組背景圖像，如圖 4-4 所示，包含灰階色調、主色系 (primary colors) 高彩度純色、具與模擬真實複雜場景 (complex scenes) 等類型。所有背景皆經由高色準螢幕投影，與主體共同構成高動態場景。各場景在兩組光照條件下皆拍攝多組影像，並記錄拍攝時的相機曝光參數，詳列於附錄 A。透過上述配置，我們得以完整模擬主體與背景在極端亮度落差與色彩刺激下的成像情境，進一步分析本研究方法於實際應用中之表現。

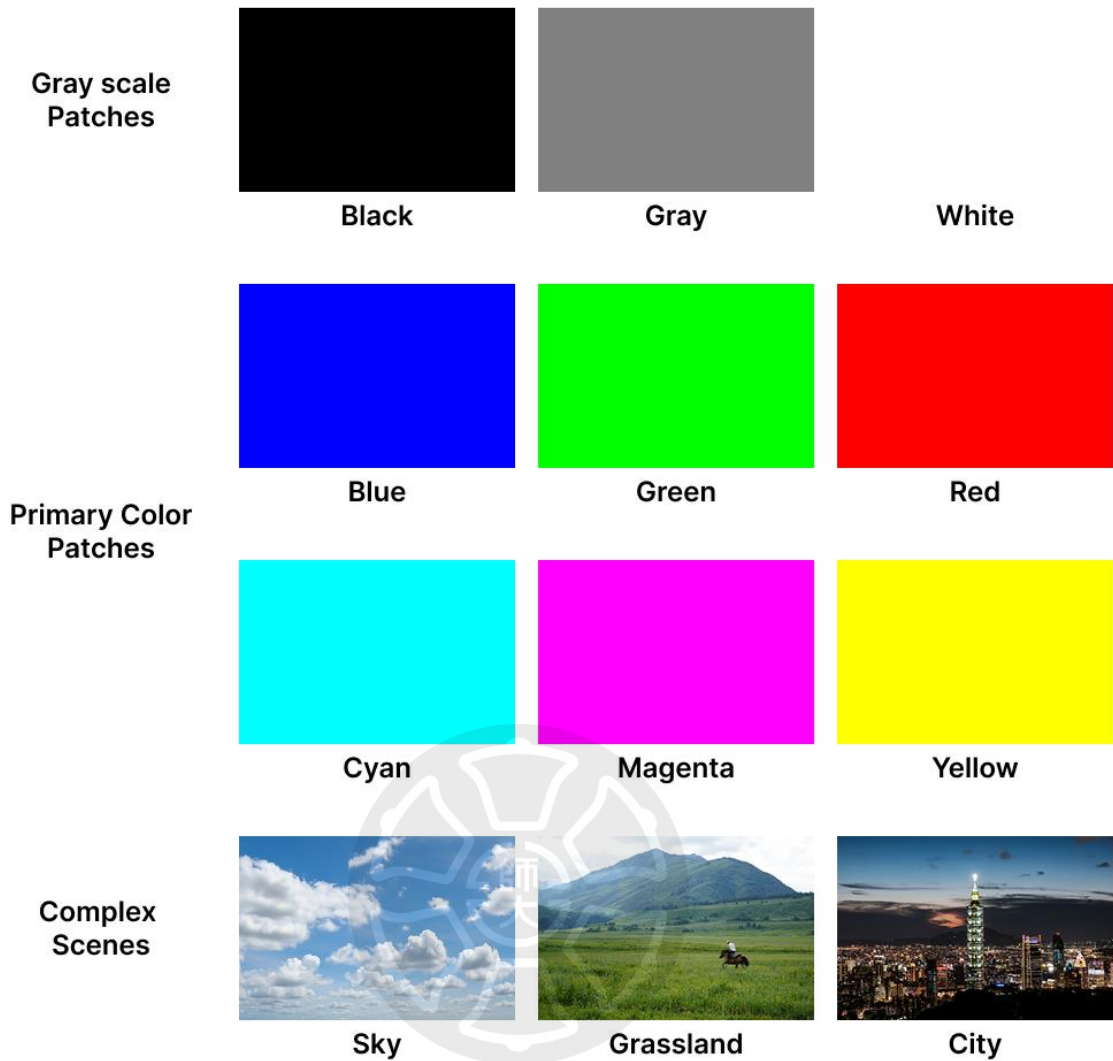


圖 4-4 實驗測試背景投射場景

4.2 評估指標與評測方法

為全面評估本研究所提出之方法在影像處理上的實質改善效果，特別針對前述所觀察到的問題：如主體亮度不足導致的重建困難、色彩還原不準所造成的色偏，以及傳統演算法對於物件細節與對比表現不足等現象。本研究設計一套結合主觀觀察與客觀量測的評估架構。我們以包含標準色卡的測試場景為對象，進行系統性的數據量測，並選用亮度準確性、色彩正確性與細節對比表現等三大評估指標，作為後續各方法比較的依據。透過這些指標的量化分析，具體驗證本研究

方法在影像品質上的優勢，並對主觀視覺感受提供客觀數據上的佐證。接下來將分別說明各項評估指標之理論基礎與實際測量方式。

4.2.1 亮度分析與評估指標

為客觀評估影像的整體亮度表現與色調重現精準度，我們參考國際標準色卡 Color Checker classic 中的底部灰階區塊作為亮度分析依據。這些灰階色塊（色卡第 19 至 24 的色塊）具有已知的密度值（optical density），分別為 0.05、0.23、0.44、0.70、1.05、1.50，代表從亮到暗的六階灰度層級 [24]。根據 Imatest 的官方影像測試文件 [25]，我們可使用公式 (4-1) 將密度值轉換為理想的像素亮度值 P (Pixel Level)。 γ (Gamma) 為顯示設備的非線性參數，一般而言我們在 sRGB 或 Adobe RGB 色彩空間都設定 $\gamma = 2.2$ 。

$$P = \left(10^{-\frac{\text{density}}{1.06}}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \dots\dots\dots (4-1)$$

接著為量化實際影像與理想亮度之差異，我們計算曝光誤差 (exposure error)，其單位使用攝影常用之 f-stop 來表示。具體計算方式可由公式 (4-2)(4-3) 實現。其中 3.32 為換底常數，其值近似於 $\log_2(10)$ ，目的是因為 f-stop 代表的是曝光加倍與減半的等級變化，能夠更直觀的反映亮度與感知的關聯性。

$$\Delta(\log_{10} Exposure) = \frac{\log_{10}(P_{measured}) - \log_{10}(P_{reference})}{\gamma} \dots\dots\dots (4-2)$$

$$Exposure Error (f-stops) = 3.32 \times \Delta(\log_{10} Exposure) \dots\dots\dots (4-3)$$

4.2.2 色彩正確性分析與評估指標

為了評估影像處理後的色彩正確性，我們採用國際照明協會（CIE, International Commission on Illumination）於 2000 年所提出的 CIEDE2000 色差公式（ ΔE_{00} ）作為客觀指標。該指標是目前最符合人眼知覺差異的色彩距離衡量方式，能夠克服過去 CIE76、CIE94 等色差模型在飽和色與不同色相下所產生的誤差問題 [26]。

CIEDE2000 的計算建立於 CIE Lab 色彩空間之上，對傳統 ΔE_{ab} 色差公式進行修正，並進一步考慮了人眼對亮度（Lightness）、色彩飽和度（Chroma）與色相（Hue）三者感知靈敏度的差異。相較於以往以球形距離衡量色差的方法，CIEDE2000 改用橢圓形等知覺色差等高線的方式進行加權與修正，能更準確地反映知覺意義（JND, just noticeable difference）。CIEDE2000 色差公式定義如（4-4）所示。

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)} \dots\dots\dots (4-4)$$

4.2.3 對比度分析指標

為評估影像系統呈現視覺對比的能力，我們選取 Color Checker Classic 色卡 [24] 中最亮（第 19 格）與最暗（第 24 格）兩格灰階色塊進行對比度分析。這兩格色塊分別代表影像中的高光與陰影區，其亮度差可反映整體明暗階調的延展程度，公式如（4-5）所示。

$$Contrast(f-stops) = \frac{3.32}{\gamma} \times \log_{10}\left(\frac{P_{19,Bright}}{P_{24,Dark}}\right) \dots\dots\dots (4-5)$$

其中， γ 為顯示系統的 gamma 值（本研究設為 2.2），3.32 為對應 \log_2 的換底常數。此指標可量化影像中亮與暗區之間的階調距離，值越大代表對比度越高，能更清晰地呈現明暗差異與視覺細節。

4.3 影像亮度調節分析

本節的亮度分析將依據前述所定義之亮度評估指標，分別量化各方法在不同場景下的亮度重現能力表現。測試條件與場景配置如 4.2.1 所述，光源分為中等照度與低照度兩種：中等照度場景屬於較為單純的情況，前景與背景亮度接近，主要檢驗方法在一般拍攝環境下的亮度還原精度；低照度則模擬極端背光環境，前景僅受到微弱光照，而背景由螢幕顯示的高亮度影像構成，形成強烈的亮度反差與高背光干擾，屬於極具挑戰性的條件。

本研究的背景設計可大致分為兩類：純色背景（Black、Gray、White、Blue、Green、Red、Cyan、Magenta、Yellow）與真實場景背景（Sky、Grassland、City）。前者用於測試演算法能否排除大面積單一色塊的干擾，專注於主體亮度的還原；後者則模擬真實應用中的複雜視覺場景，檢驗演算法是否具備辨識與分離背景的能力，避免主體亮度受到背景元素影響。

接下來我們將比較本研究方法與其他既有方法在量化數據上的表現，並探討造成差異的原因。透過在不同照度與背景類型下的亮度與對比度量測，不僅能評估各方法在正常與極端情境下的亮度調節與細節保留能力，也能從數據分析中觀察各演算法在光照分佈處理與背景干擾抑制上的優劣之處。

4.3.1 與攝影色調重現之亮度比較

攝影色調重現屬於單次色調映射的方法，在面對可調曝光比且亮度落差極大的高動態範圍場景時，無法進行充分的亮度壓縮以將主體調整至適當亮度。因此，在中等照度條件下，圖 4-5 可以看見該方法整體亮度偏低，曝光誤差普遍落在負值區間，顯示其在正常光照下對主體亮度還原能力不足。

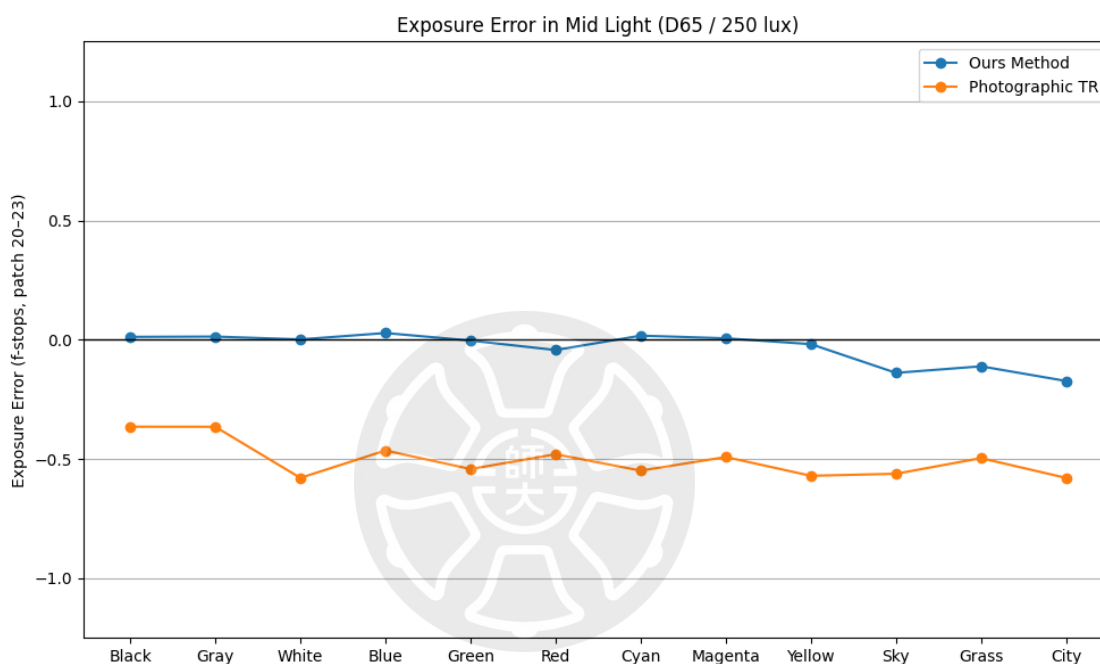


圖 4-5 在中等照度下與攝影色調重現亮度差異

由於此方法並未針對主體進行亮度優化，在低照度條件下如圖 4-6，更容易受到背景顏色與亮度分佈的影響。例如在複雜背景場景中，其亮度調節出現顯著波動，部分場景的曝光誤差甚至超過 1 f-stop，反映出該方法在強背光與複雜光源條件下的穩定性不足。相較之下，本研究方法能在不同背景與光照下維持接近零誤差的亮度表現，顯示其在極端動態範圍下的亮度調節精確性與穩定性更佳。

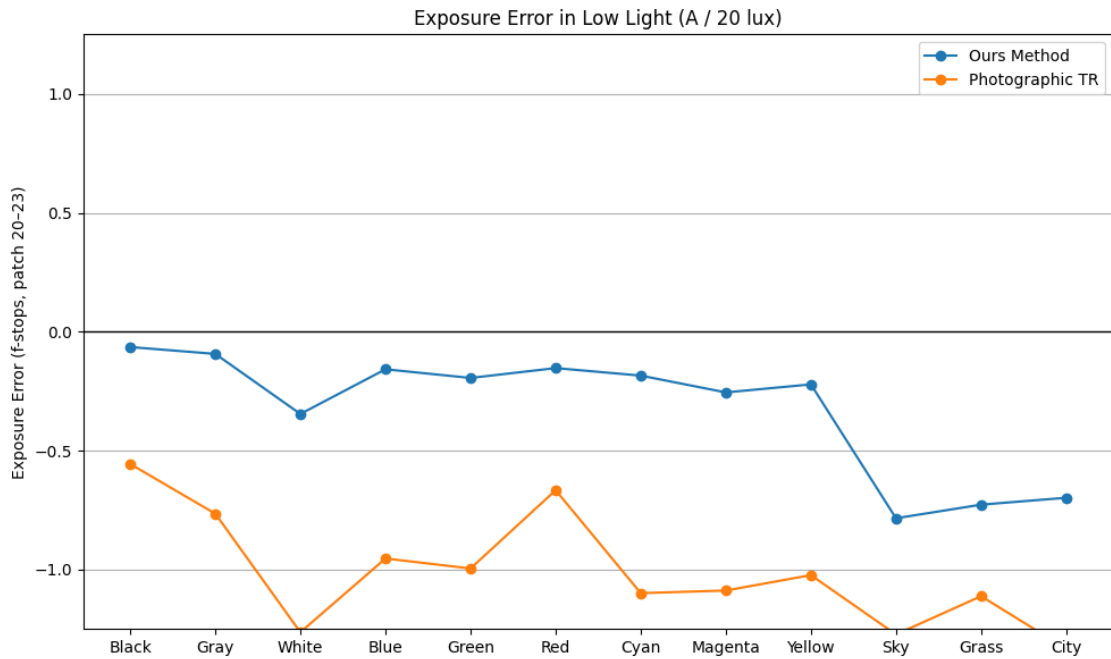


圖 4-6 在低照度下與攝影色調重現亮度差異

4.3.2 與快速頻率分割色調重現亮度比較

快速頻率分割色調重現方法採用了兩次非線性壓縮，能有效提升暗部細節的亮度，使其接近可視範圍的中間區域。因此，在圖 4-7 中等照度條件下該方法在大部分場景中與本研究方法的亮度誤差均控制在極小範圍內，兩者表現幾乎並駕齊驅。

然而，在圖 4-8 低照度條件下，由於本研究方法在複雜背景場景中邊緣抽取可能受到干擾，造成主體區域定位精度下降，加上我們並未如快速頻率分割方法透過兩次壓縮將大部分暗部物件亮度統一提升，因此在最後三個複雜背景場景（Sky、Grassland、City）中，亮度誤差相對較大，顯示此類場景對本方法在暗部調節與背景干擾抑制上提出了更高挑戰。

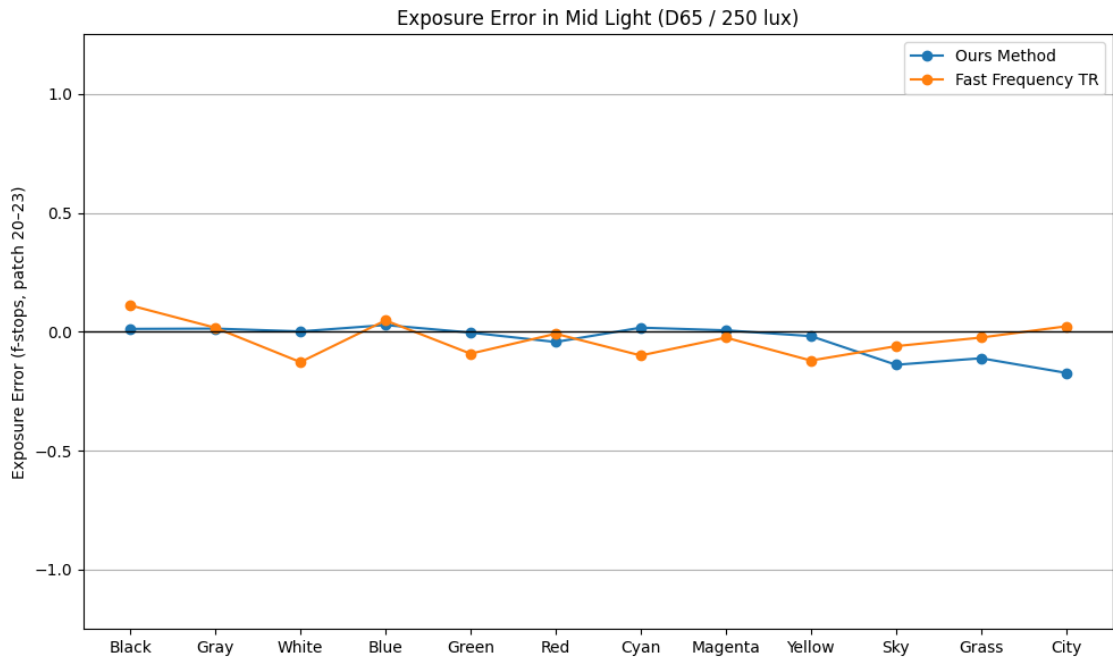


圖 4-7 在中等照度下與快速頻率分割色調重現亮度差異

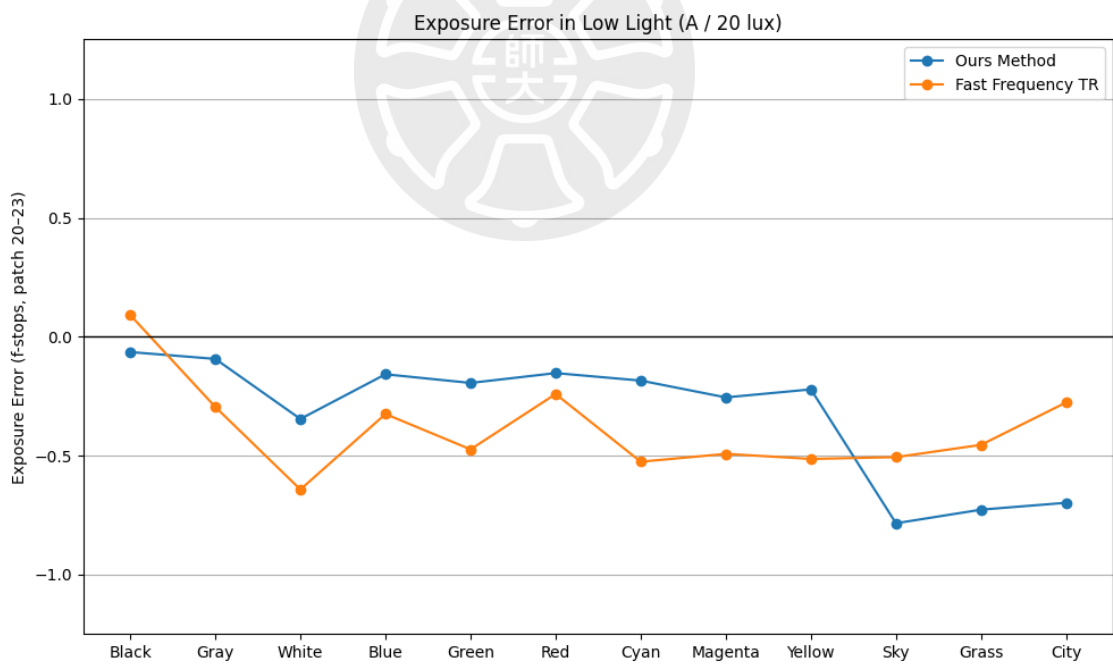


圖 4-8 在低照度下與快速頻率分割色調重現亮度差異

4.3.3 與區域對比評估色調重現亮度比較

區域對比評估色調重現方法會在非線性壓縮前先建立一張局部對比圖，並與原圖進行幾何平均，以此強化影像的局部邊緣與細節。然而，由於該操作發生在亮度調整步驟之前，因此其最終輸出在亮度上普遍偏高。

從圖 4-9 中等照度結果我們可以觀察到，該方法在多數場景下的曝光誤差呈現正值，代表暗部細節被提亮；而在圖 4-10 低照度情況下，此方法的行為與快速頻率分割色調重現類似，即便未能將亮度完全對齊主體物件，但由於暗部被抬亮的緣故，使得主體物件即使沒在中間亮度也能有較小的亮度誤差，因此其曝光誤差在多數場景中仍小於本研究方法。相比之下，本研究方法在暗部亮度的控制上會做全域的對比增強，這可能使得未對齊亮度的主體物件亮度誤差進一步擴大。

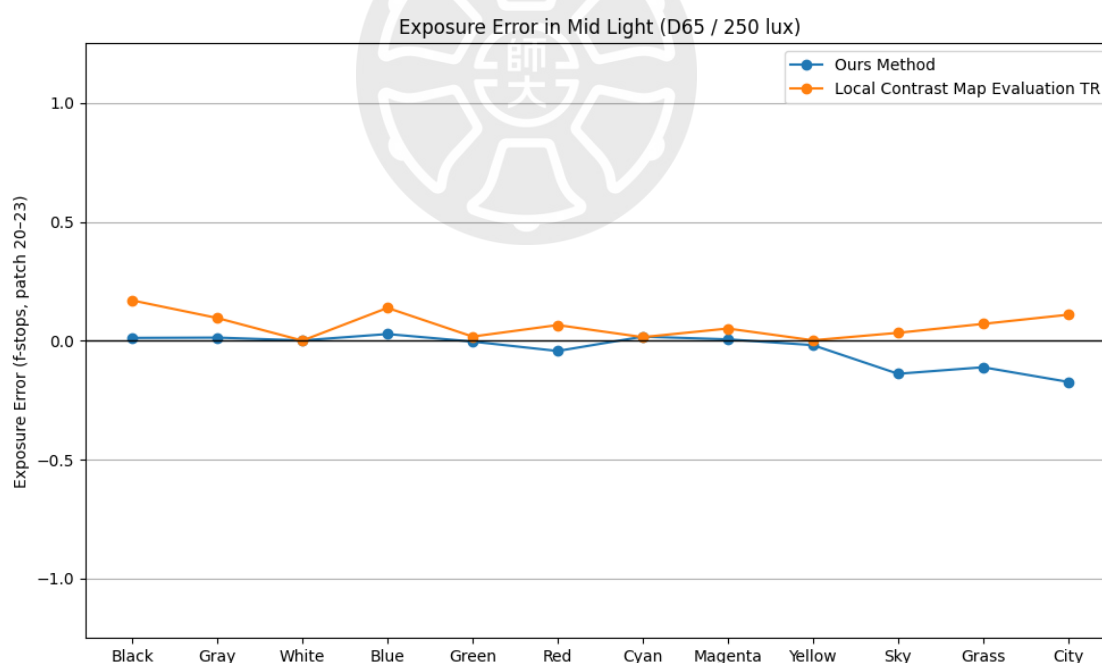


圖 4-9 在中等照度下與區域對比評估色調重現亮度差異

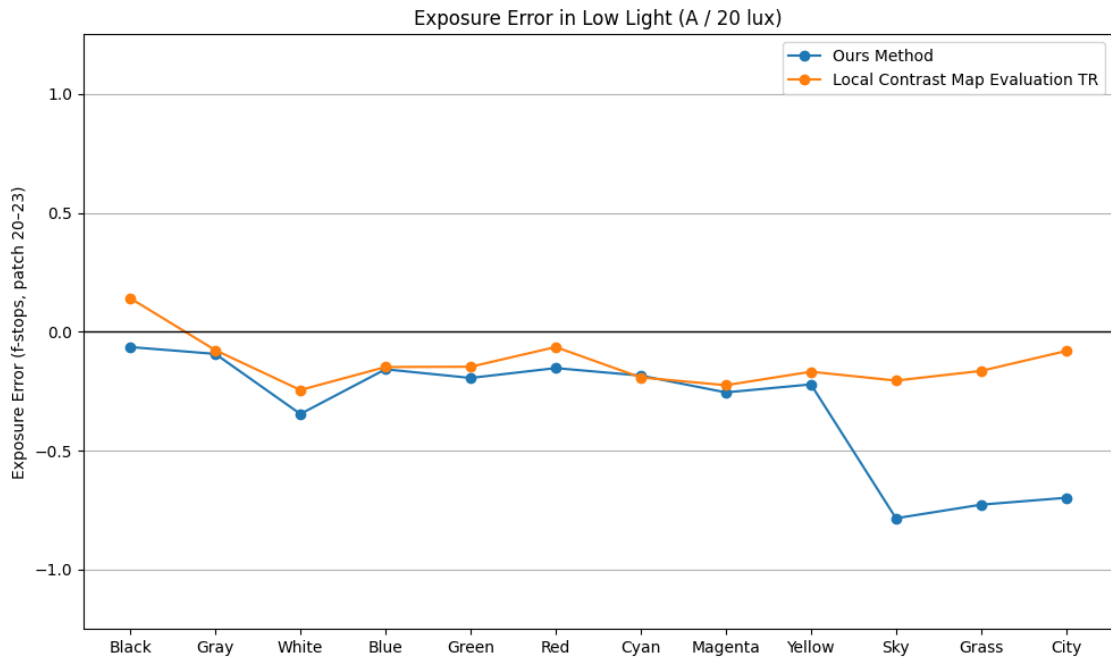


圖 4-10 在低照度下與區域對比評估色調重現亮度差異

4.3.4 與梯度導向色調曲線增強法亮度比較

梯度導向色調曲線增強法結合直方圖統計與梯度資訊，針對影像細節進行強化，同時對邊緣區域進行亮度優化，以提升主體與細節的視覺清晰度。在圖 4-11 中等照度下，該方法的亮度表現與本研究方法接近，大部分場景的曝光誤差控制在極小範圍內，顯示其在正常光照條件下具備穩定的亮度還原能力。

然而，在圖 4-12 低照度條件下，由於該方法在細節與對比增強過程中會額外提升局部亮暗差異，可能造成暗部區域進一步壓暗，使得部分主體亮度低於最佳可視範圍，因此在多數場景中的曝光誤差均顯著低於本研究方法，整體表現不如我們的方法穩定。

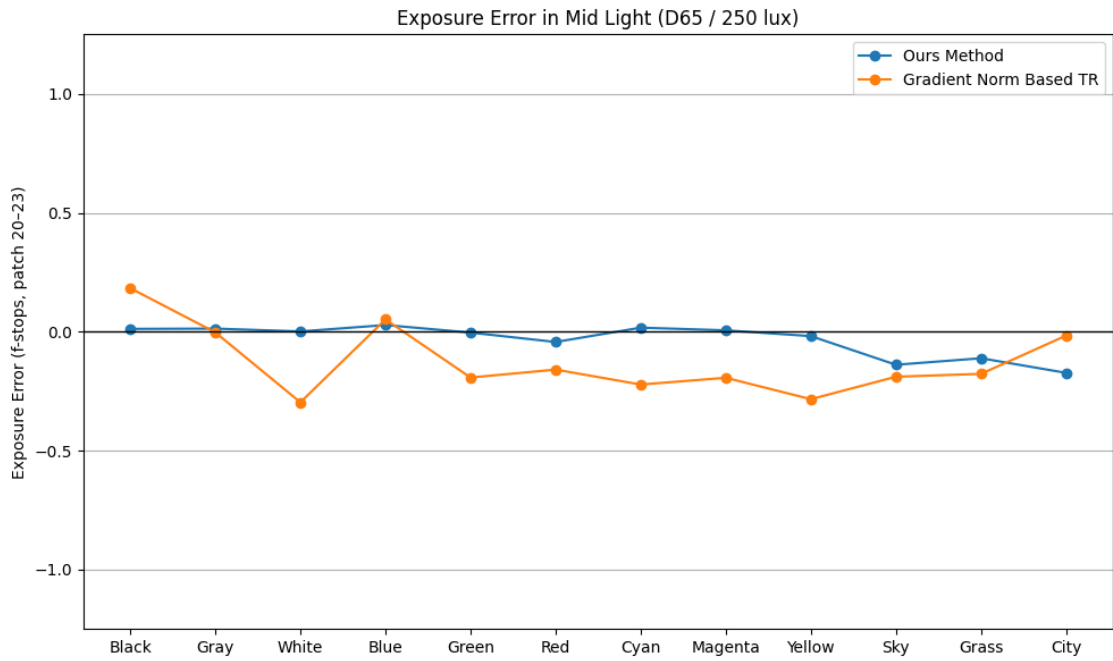


圖 4-11 在中等照度下與梯度導向色調曲線增強法亮度差異

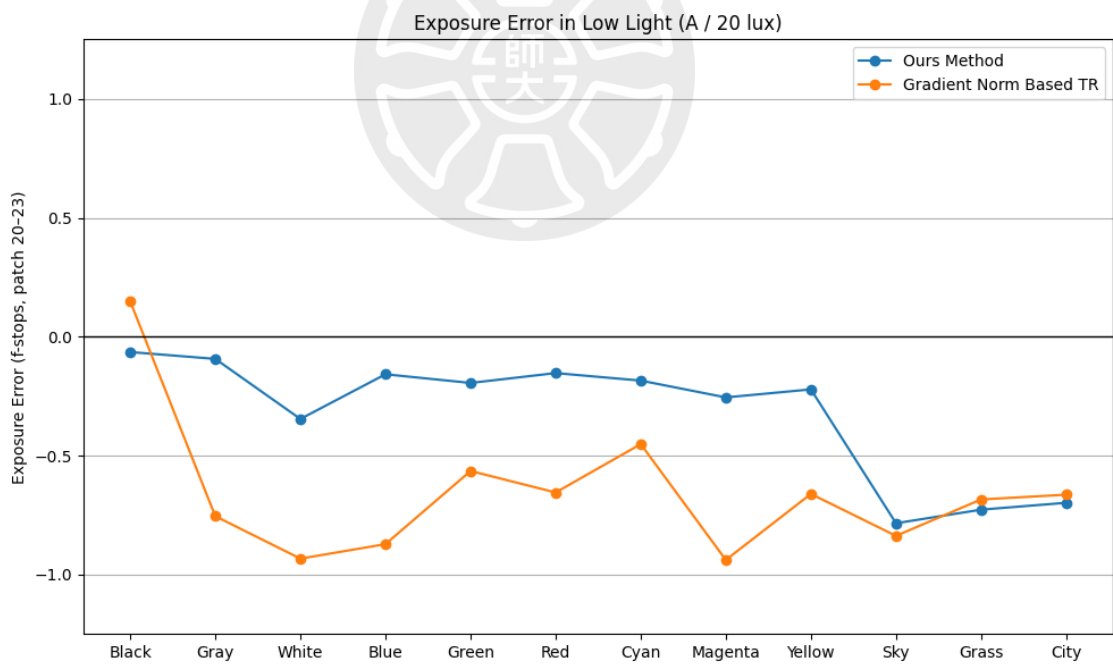


圖 4-12 在低照度下與梯度導向色調曲線增強法亮度差異

4.3.5 與 AI 顯著圖方法亮度比較

為進一步驗證背景辨識對亮度調節精度的影響，我們將原本以巨集邊緣資訊為基礎的方法，改為使用 AI 產生的顯著圖作為主體區域的判定依據。由結果可見在中等照度條件下如圖 4-13。在引入 AI 顯著圖後，亮度誤差在所有場景中均維持於極小範圍，且曲線更為平穩，顯示其在主體亮度的還原精度上具備更高的一致性。

在低照度條件下，圖 4-14 的比較可以看出 AI 顯著圖方法有效改善了原方法在複雜背景（如天空、草地、城市）中出現的亮度偏差問題，使曝光誤差大幅減小並接近零值，反映出該方法在背景干擾抑制與主體亮度精準控制上的顯著優勢。整體而言，引入 AI 顯著圖可同時提升亮度準確度與複雜場景下的穩定性。

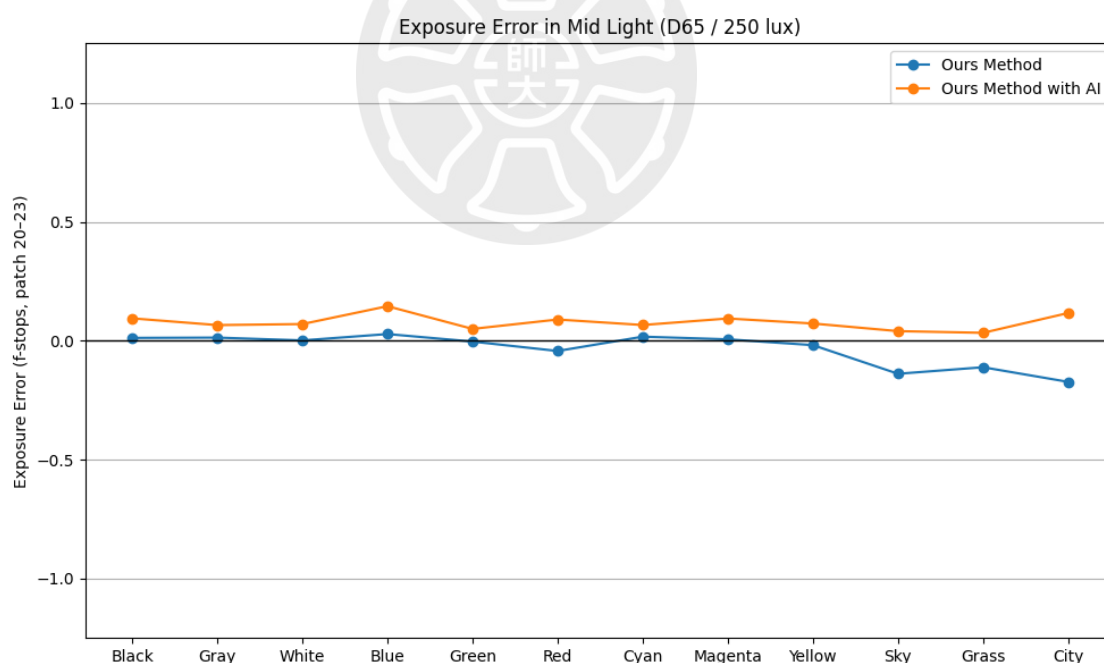


圖 4-13 在中等照度下與 AI 顯著圖方法亮度差異

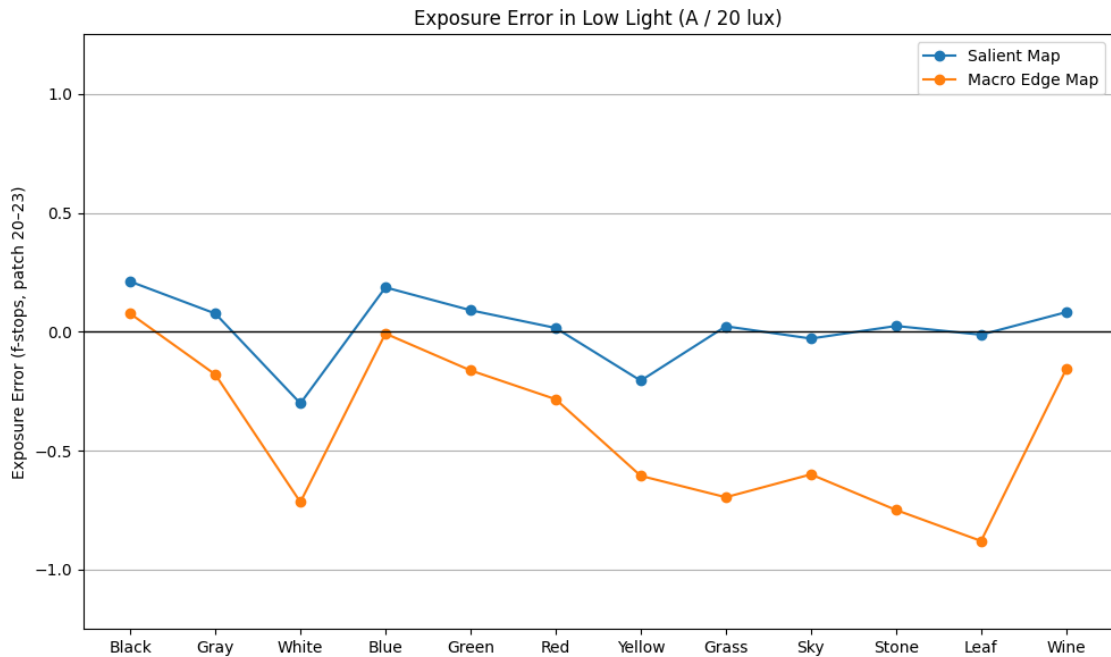


圖 4-14 在低照度下與 AI 顯著圖方法亮度差異

4.4 影像色彩正確性分析

本節的色彩分析依據前述 0 所提及的 CIEDE2000 色差 (ΔE_{00}) 作為評估指標，量化各方法在不同照度條件下對色彩還原的準確性。 ΔE_{00} 值越低，代表影像色彩越接近真實值，人眼感知的色差越小。為避免單一場景或特定顏色造成偏差，我們將各場景的 ΔE_{00} 取平均後進行比較。

在圖 4-15 低照度條件 (A 光源 / 20 lux) 下，攝影色調重現 (PHTR) 方法的平均 ΔE_{00} 高達 41.2，顯示其在弱光環境下的色彩偏差極大；快速頻率分割 (FFTR) 與梯度導向色調曲線增強法 (GNB) 分別約為 27.4 與 33.8，表現亦顯著劣於本研究方法的 24.5。區域對比評估 (LCME) 與引入 AI 顯著圖的本研究變體 (Ours-AI) 則分別為 17.5 與 14.3，均優於其他方法。由於在 A 光源條件下，本研究方法的亮度還原在部分場景中略有失準，使得 CIE Lab 空間中 L 分量的誤差偏大，進而影響 ΔE_{00} 的最終結果；引入 AI 顯著圖後，能有效改善複雜背景下的亮度準

確度，間接降低 L 分量的誤差，因此在弱光下色彩還原精度顯著提升。但整體而言，即使在亮度還原稍有偏差的情況下，本研究方法的 ΔE_{00} 依然明顯低於多數對照方法。

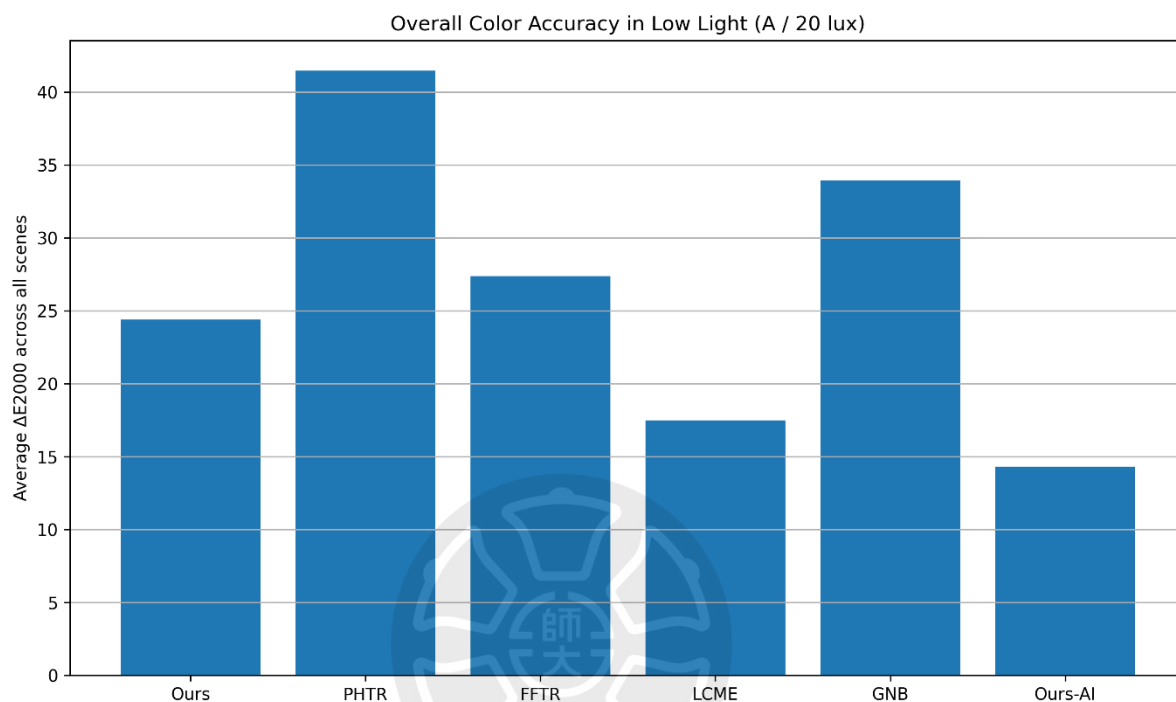


圖 4-15 在低照度下各方法的色彩誤差值

在圖 4-16 中等照度條件 (D65 / 250 lux) 下，整體色彩誤差明顯下降。PHTR 依然誤差最高 ($\Delta E_{00} = 29.4$)，GNB 次高 (12.6)，LCME 與本研究方法 (Ours) 誤差分別為 9.6 與 6.5，快速頻率分割 (FFTR) 與 AI 顯著圖方法 (Ours-AI) 則分別為 6.7 與 7.1，皆保持在低色差範圍內。這顯示在正常光照下，各方法的色彩表現差距縮小，但本研究方法依然維持穩定且低誤差的優勢。

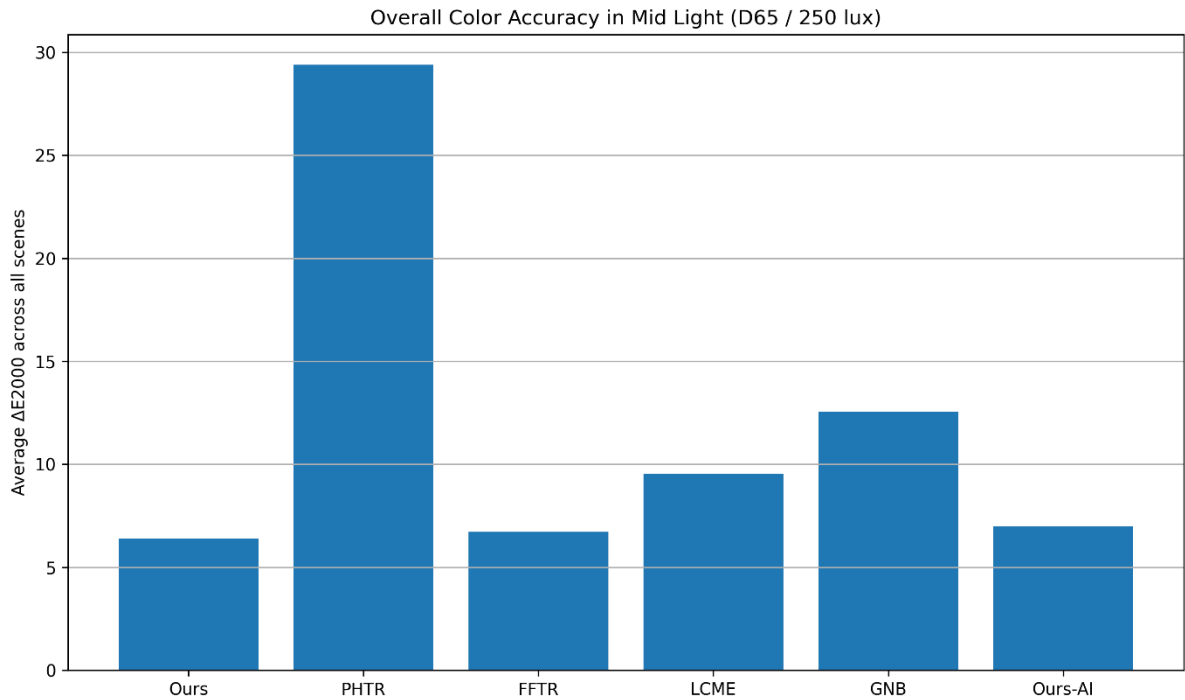


圖 4-16 在中等照度下各方法的色彩誤差值

綜合比較，在低照度條件下的色彩偏差普遍高於中等照度，而引入 AI 顯著圖的方法在弱光情境中對色彩還原有明顯助益。本研究方法在兩種光照條件下均能維持低色差，兼顧亮度與色彩的整體準確度。

4.5 影像對比度分析

影像對比度是衡量影像品質的重要指標之一，能反映亮暗區域之間的階調延展與細節層次表現。本研究從全域對比度與區域對比度兩個層面進行評估：前者著重於量化影像在極端亮度範圍內的延展性，後者則透過視覺觀察評估局部細節的對比呈現與可見性。此雙重分析框架，能兼顧數據精準性與視覺真實性，全面反映不同演算法在對比度處理上的特性與優劣。

4.5.1 影像全域對比度分析

全域對比度的評估著重於整體影像在高光與暗部之間的亮度差距，其數值可反映影像階調的延展程度與整體立體感。分析結果如表 4-1 與表 4-2 所示，分別對應中等照度（D65/250 lux）與低照度（A/20 lux）條件下，各種方法在不同場景的全域對比值。

表 4-1 在中等照度下各方法的全域對比值

Scenes	Black	Gray	White	Blue	Green	Red	Cyan	Magenta	Yellow
Ours	2.08	2.03	1.89	1.98	2.05	2.01	2.00	1.89	1.94
PHTR	2.42	2.39	2.48	2.50	2.63	2.36	2.64	2.36	2.49
FFTR	1.52	1.75	1.89	1.66	1.98	1.68	1.99	1.70	1.89
LCME	0.96	1.12	1.07	1.12	1.16	1.06	1.17	1.05	1.07
GNB	1.33	1.79	1.62	1.85	1.60	1.74	1.64	1.77	1.60

對比強弱：最強、次強、中等、次弱、最弱

表 4-2 在低照度下各方法的全域對比值

Scenes	Black	Gray	White	Blue	Green	Red	Cyan	Magenta	Yellow
Ours	2.20	2.47	2.31	2.65	2.39	1.60	2.45	1.89	1.77
PHTR	2.65	3.48	3.40	3.70	2.77	1.85	2.94	2.61	2.51
FFTR	1.57	2.62	2.59	2.78	2.47	1.52	2.60	2.00	1.96
LCME	1.02	1.65	1.63	1.78	1.85	0.76	1.91	1.16	1.21
GNB	1.32	1.39	1.20	1.23	2.02	1.00	1.90	0.96	1.38

對比強弱：最強、次強、中等、次弱、最弱

從結果可見，攝影色調重現(PHTR)在兩種光照條件下皆呈現最高的對比度，顯示其在亮暗差異的保留上最為激進。然而，結合亮度分析可知，該方法由於缺乏足夠的壓縮處理，暗部與亮部之間的落差過大，造成暗部細節在高對比情況下被掩蓋。相較之下，區域對比評估色調重現(LCME)與梯度導向色調曲線增強法(GNB)在處理暗部時壓縮幅度較大，雖能提升暗部亮度，但會使黑階層次喪

失，產生黑色物體發灰的現象，導致全域對比度偏低。快速頻率分割色調重現（FFTR）則介於兩者之間，對比度表現屬中等水準，但在低照度場景下延展性仍不足。

綜合觀察，本研究方法在兩種光照條件下均能維持穩定且均衡的對比度表現，既避免了暗部過暗導致的細節損失，也不會因過度抬亮而使黑階偏灰。整體而言，雖然在數值上僅次於 PHTR，但在兼顧觀感真實性與細節保留方面表現更為均衡。

4.5.2 影像區域對比度分析

區域對比度分析著重於評估影像局部範圍內的亮度變化與細節層次呈現，藉此觀察不同方法在物體紋理、邊緣輪廓及高頻細節的保留能力。本研究透過主觀視覺檢視的方式，挑選具明顯紋理與邊緣的測試物件，並在相同拍攝條件下對比各方法處理後的局部影像表現，如圖 4-17、圖 4-18 所示。

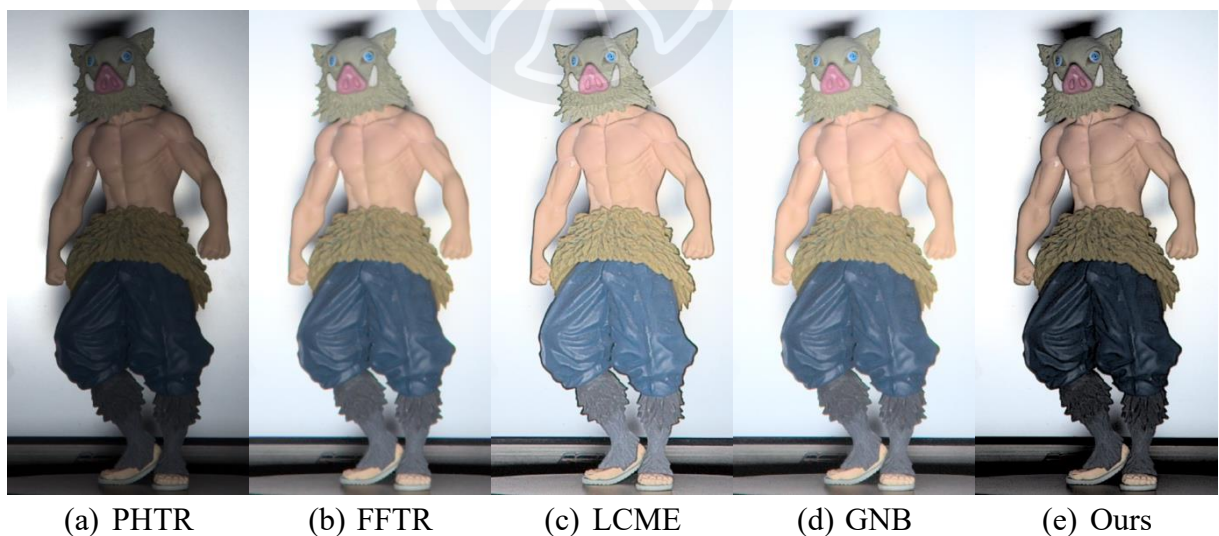


圖 4-17 各方法的人物細節對比比較 1

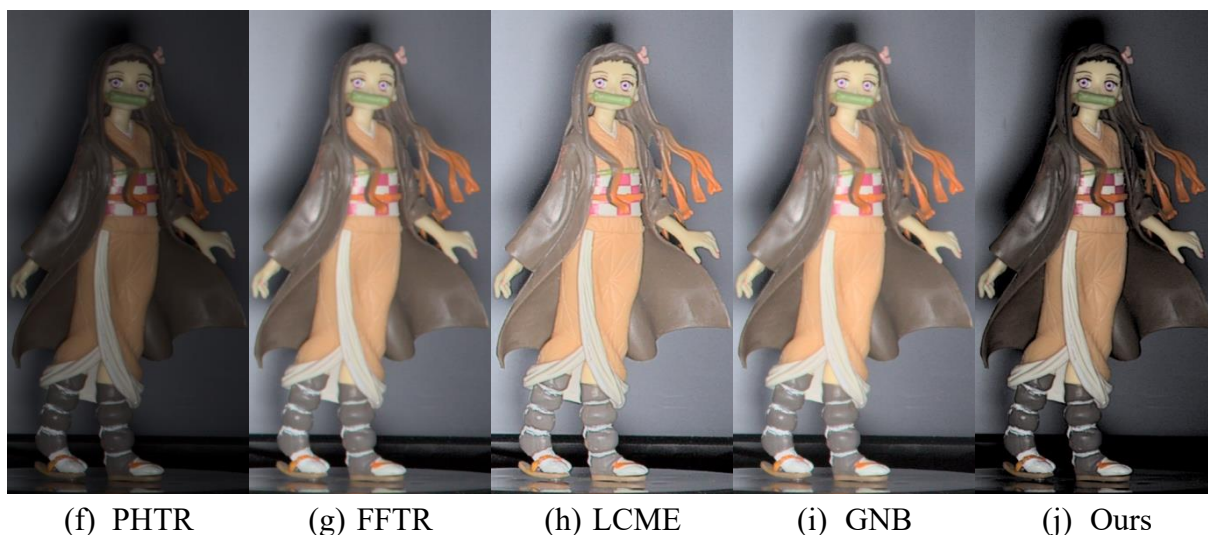


圖 4-18 各方法的人物細節對比比較 2

觀察結果顯示，本研究方法在不同光源與場景下均能維持自然且清晰的細節層次，物體邊緣輪廓銳利度適中，避免了因過度銳化而產生的人工邊緣感，亦不會因平滑處理而損失細節。相比之下，快速頻率分割色調重現（FFTR）雖能保留部分細節，但在放大檢視時可觀察到局部紋理有輕微模糊，高頻細節的表現略顯不足。區域對比評估色調重現（LCME）則透過強化邊緣的方式提升局部對比，遠距離觀看時對整體觀感有正面效果，但近距離檢視會出現描邊過重的不自然現象。梯度導向色調曲線增強法（GNB）在保留邊緣輪廓方面雖有一定水準，但細節層次相較於本研究方法仍略顯單薄，特別是在低對比區域的紋理較為平淡。

綜合而言，本研究方法在區域對比度的表現兼顧細節保留與視覺自然度，能在不同場景下有效呈現立體感與層次感，且在局部細節的真實性上優於其他方法。

4.6 人工偽影與色彩還原分析

色彩還原的核心目的在於正確復原場景的色相與相對亮度分佈，避免因色調映射過程造成色偏、亮度反轉問題。圖 4-19 與圖 4-20 分別展示了不同照度條件下，本研究方法在色彩還原修正前後的影像對比。



(a) Blue 場景修正前



(b) Blue 場景修正後



(c) Green 場景修正前



(d) Green 場景修正後



(e) Red 場景修正前



(f) Red 場景修正後

圖 4-19 中等照度下色彩還原修正前後比較



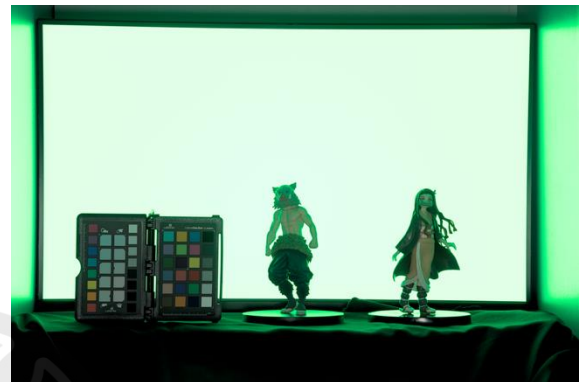
(a) Blue 場景修正前



(b) Blue 場景修正後



(c) Green 場景修正前



(d) Green 場景修正後



(e) Red 場景修正前



(f) Red 場景修正後

圖 4-20 低照度下色彩還原修正前後比較

在多種場景中，藍色背景的案例最能突顯傳統方法的不足。由於藍色屬於飽和度高且亮度偏低的色彩，在背光場景中若直接將主體提亮，理論上背景亮度應接近飽和白，但藍色的亮度特性會限制其通道輸出，導致背景亮度被壓制甚至發生亮暗反轉。傳統的簡單截斷方式雖可避免通道過曝，但會造成背景亮度不自然或階調中斷。本研究的色彩還原方法能在保留藍色飽和度的同時，正確提升背景亮度，使影像的光照關係與真實場景一致，並有效消除藍色背景下的亮暗錯位偽影。相比之下，綠色與紅色場景並未出現顯著的人工偽影，主要差異體現在亮度層次的還原。

整體而言，該色彩還原機制在多種色彩場景中皆能維持色相準確與亮度關係的合理性，特別是在藍色背景的高飽和色情況下，能有效修正傳統方法易出現的亮暗反轉問題，提升視覺真實亮度與避免偽影的發生。



第五章 結論及未來展望

5.1 結論

本研究針對高動態範圍影像在極端光照條件下的處理需求，提出一套結合巨集邊緣感知、顯著性圖與對比圖強化的色調映射與色彩還原方法。系統藉由顯著性圖與巨集邊緣資訊的融合，能自適應地辨識並強化場景中具視覺重要性的區域，在複雜背景、強背光或低照度等情境下，亦能有效避免主體亮度錯估與細節喪失。

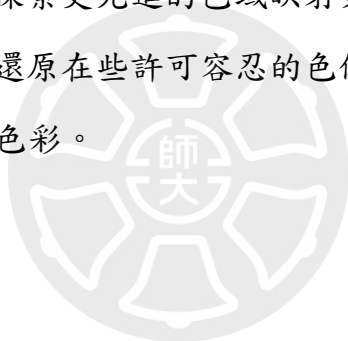
在色調映射模組中，本研究採用主體導向的亮度對齊與中間灰調整策略，使高動態範圍影像在映射至標準動態範圍時，仍能兼顧暗部與亮部細節的保留。透過全域與區域對比圖的建立與強化，不僅提升影像的立體感與細節層次，也抑制了光暈等人工偽影。在色彩還原部分，本方法結合 OKLab 色彩空間與飽和度查詢表修正色偏並維持色相與亮度關係的一致性，尤其在藍色高飽和背景下有效解決亮暗反轉問題。然而，此查表策略在計算時間與記憶體空間上均有較高需求，實作上可能影響系統效能。

實驗結果顯示，本研究方法在多種光源與場景下，於亮度穩定性、細節保留、對比度與色彩準確性方面均較原始 ISP 模組有明顯提升。雖然本研究並非直接採用 VCX 評測，而是仿效其核心精神並建立幾個相似的量化指標進行評估，但結果仍充分驗證了本方法在多場景下的穩定性與應用潛力。

5.2 未來展望

雖然本研究已成功透過顯著性圖與巨集邊緣結合，實現針對不同場景自適應的亮度與色調調整，但整體演算法的運算量偏高，且所使用的 AI 模型規模不小，對即時系統或嵌入式平台而言可能構成計算負擔。此外，色彩還原模組目前依賴高解析度的飽和度查詢表，雖能精確控制色偏與亮度一致性，但在運算時間與記憶體使用上成本較高，未來可考慮以數學模型或壓縮映射函數取代，以降低系統資源消耗。

未來研究方向可聚焦於以下兩點：第一，針對演算法進行運算優化與模型輕量化，包括減少顯著性圖生成與色彩還原查表的計算負擔，使其更適用於低功耗與即時應用環境；第二，探索更先進的色域映射策略，例如計算色彩空間距離的最小值進行映射，使色彩還原在些許可容忍的色偏與亮度偏移的狀況下，得到一個更接近人類視覺觀感的色彩。



參考文獻

- [1] Ferwerda, J. A.; Pattanaik, S. N.; Shirley, P.; Greenberg, D. P., "A model of visual adaptation for realistic image synthesis," in *Proceedings of SIGGRAPH 1996*, New York, NY, 1996.
- [2] Kao, W.-C.; Hsu, C.-C.; Chen, L.-Y.; Kao, C.-C.; Chen, S.-H., "Integrating image fusion and motion stabilization for capturing still images in high dynamic range scenes," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 52, no. 3, p. 735–741, 2006.
- [3] Kao, W.-C.; Wang, S.-H.; Chen, L.-Y., "Design consideration of color image processing pipeline for digital cameras," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 52, no. 4, p. 1144–1152, 2006.
- [4] Qiu, G.; Duan, J., "An optimal tone reproduction curve operator for the display of high dynamic range images," in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Kobe, Japan, 2005.
- [5] Reinhard, E.; Ward, G.; Pattanaik, S.; Debevec, P., *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting*, San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2005.
- [6] Kao, W.-C.; Huang, X.-T.; Wang, H.-C.; Pan, C.-C.; Yang, F.-C., "Real-time tone reproduction for video recording," in *IEEE 16th International Symposium on Consumer Electronics*, Harrisburg, PA, 2012.
- [7] Kao, W.-C.; Huang, W.-C.; Chen, L.-Y.; Tai, H.-S.; Wu, H.-H., "Taking Images in Extremely High Dynamic Range Scenes by Fusing Multiple Exposed Images And Tone Reproduction," in *Digest of Technical Papers – International Conference on Consumer Electronics*, Las Vegas, NV, 2008.
- [8] S. Kojima and N. Suetake, "Single Image Enhancement Using Gradient-Norm-Based Tone Curve for Images Captured in Wide-Dynamic-Range Scenes," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 1839-1851, 2024.
- [9] W.-C. Kao, "High dynamic range imaging by fusing multiple raw images and tone reproduction," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 54, no. 1, p. 10–15, 2008.
- [10] Li, J.; Wang, C., "Multiple-filtering process and its application in edge detection," in *IEEE*

International Midwest Symposium on Circuits and Systems, Cancun, Mexico, 2009.

- [11] Chen, Xiangdong and He, Liwen and Jeon, Gwanggil and Jeong, Jechang, "Multidirectional Weighted Interpolation and Refinement Method for Bayer Pattern CFA Demosaicking," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 25, no. 8, pp. 1271-1282, 2015.
- [12] Ni, Zhangkai and Ma, Kai-Kuang and Zeng, Huanqiang and Zhong, Baojiang, "Color Image Demosaicing Using Progressive Collaborative Representation," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. PP, p. 1, 3 2020.
- [13] M.S. Safna Asiq and WR Sam Emmanuel, "Efficient colour filter array demosaicking with prior error reduction," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 4, pp. 1191-1199, 2022.
- [14] Pekkucuksen, Ibrahim and Altunbasak, Yucel, "Gradient based threshold free color filter array interpolation," in *2010 IEEE International Conference on Image Processing*, Hong Kong, China, 2010.
- [15] Li, J.; Randhawa, S., "Color Filter Array Demosaicking Using High-Order Interpolation Techniques With a Weighted Median Filter for Sharp Color Edge Preservation," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 18, no. 9, p. 1946–1957, 2009.
- [16] "Photography – Electronic still-picture imaging – Noise measurements," ISO, 2013.
- [17] Kao, W.-C.; Cheng, L.-W.; Chien, C.-Y.; Lin, W.-K., "Robust brightness measurement and exposure control in real-time video recording," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 4, p. 1206–1216, 2011.
- [18] H.-C. Lee, *Introduction to Color Imaging Science*, Cambridge: Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [19] H.-C. Wang, *Color and Tone Reproduction for High Dynamic Range Image Display*, Taipei: National Taiwan Normal University, 2013.
- [20] B. Bottosson, "A Perceptual Color Space for Color and Image Manipulation," 23 12 2020. [Online]. Available: <https://bottosson.github.io/posts/oklab/>.
- [21] Xuebin Q. and Zichen Z. and Chenyang H. and Masood D. and Osmar R. Z. and Martin J., "U2-Net: Going deeper with nested U-structure for salient object detection," *Pattern Recognition*, vol. 106, p. 107404, 2020.
- [22] VCX-Forum, "The Procedure - Whitepaper," 21 08 2020. [Online]. Available:

- https://www.dhd.com.tw/wp-content/uploads/2020/11/VCX_Whitepaper_V2020.01.pdf.
- [23] VCX-Forum, "WebCam Test," 2025. [Online]. Available: <https://vcx-forum.org/standard/webcam-test>.
- [24] D. Pascale, "RGB coordinates of the Macbeth Color Checker," 2006.
- [25] I. LLC, "Color/Tone and Colorcheck Appendix," 2023. [Online]. Available: https://www.imatest.com/support/docs/23-2/colorcheck_ref/#exposure.
- [26] Sharma, G.; Wu, W.; Dalal, E. N., "The CIEDE2000 Color-Difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data, and Mathematical Observations," *Color Research and Application*, vol. 30, no. 1, p. 21–30, 2005.
- [27] Reinhard, E.; Stark, M.; Shirley, P.; Ferwerda, J., "Photographic tone reproduction for digital images," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 21, no. 3, p. 267–276, 2002.



附錄 A 測試影像處理結果

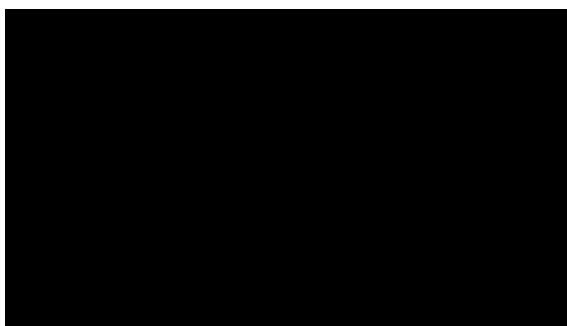
本附錄彙整本研究所拍攝之所有測試影像，並呈現各影像在不同色調重現方法下的結果比較。表 A-1 詳細列出每組測試影像所對應的拍攝參數與實驗條件，作為評估依據。影像結果共涵蓋以下六種色調重現方法：

1. 攝影色調重現 [27] (Photographic Tone Mapping)
2. 快速頻率分割色調重現 [6] (Fast Frequency Separation Tone Mapping)
3. 區域對比圖評估色調重現 [7] (Local Contrast Tone Mapping)
4. 梯度導向色調曲線增強法 [8] (Gradient Norm Tone Mapping)
5. 提出之方法結合巨集邊緣感知
6. 提出之方法結合 AI 顯著圖 [21]



表 A-1 測試影像場景光源與相機參數設定

編號	場景	光源照度	ISO	光圈	長曝光時間	短曝光時間	曝光比
1	Black	A, 20 lux	400	7.1	1	1/2	2
2		D65, 250 lux	400	7.1	1/10	1/20	2
3	Gray	A, 20 lux	400	7.1	1/2	1/8	4
4		D65, 250 lux	400	7.1	1/10	1/20	2
5	White	A, 20 lux	400	7.1	1/5	1/20	4
6		D65, 250 lux	400	7.1	1/20	1/80	4
7	Blue	A, 20 lux	400	7.1	2/5	1/10	4
8		D65, 250 lux	400	7.1	1/10	1/40	4
9	Green	A, 20 lux	400	7.1	2/5	1/10	4
10		D65, 250 lux	400	7.1	1/10	1/40	4
11	Red	A, 20 lux	400	7.1	4/5	1/5	4
12		D65, 250 lux	400	7.1	1/10	1/40	4
13	Cyan	A, 20 lux	400	7.1	2/5	1/10	4
14		D65, 250 lux	400	7.1	1/10	1/40	4
15	Magenta	A, 20 lux	400	7.1	2/5	1/10	4
16		D65, 250 lux	400	7.1	1/10	1/40	4
17	Yellow	A, 20 lux	400	7.1	2/5	1/10	4
18		D65, 250 lux	400	7.1	1/10	1/40	4
19	Sky	A, 20 lux	400	7.1	1/5	1/20	4
20		D65, 250 lux	400	7.1	1/10	1/40	4
21	Grassland	A, 20 lux	400	7.1	2/5	1/10	4
22		D65, 250 lux	400	7.1	1/10	1/40	4
23	City	A, 20 lux	400	7.1	1/5	1/20	4
24		D65, 250 lux	400	7.1	1/10	1/40	4



(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-1 測試影像 1 (Black 場景, A 光源 20 lux)



(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-2 測試影像 2 (Black 場景, D 光源 250 lux)



(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



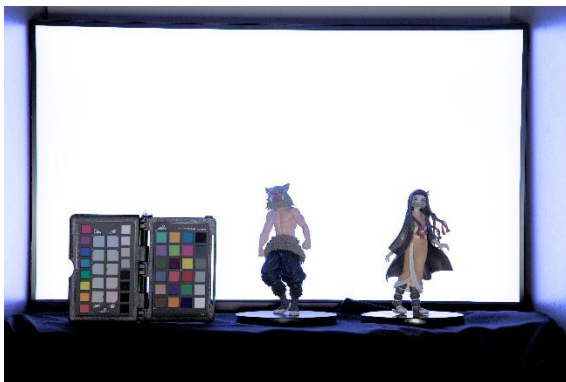
(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

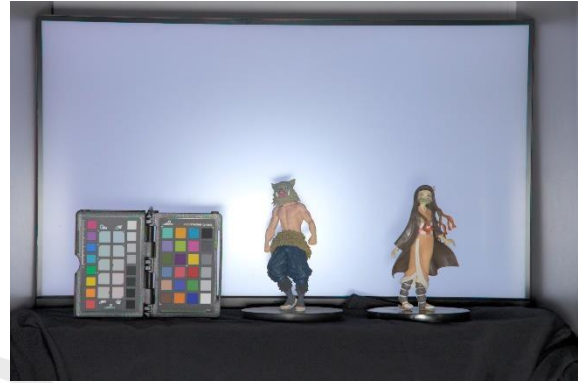
圖 A-3 測試影像 3 (Gray 場景, A 光源 20 lux)



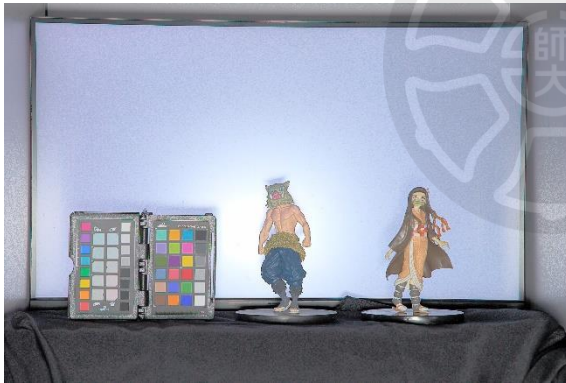
(a) 螢幕投影場景圖示意



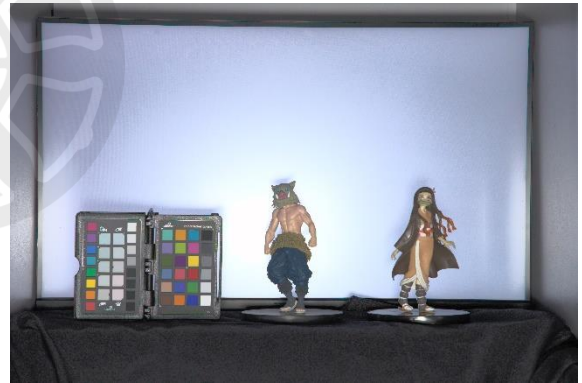
(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法

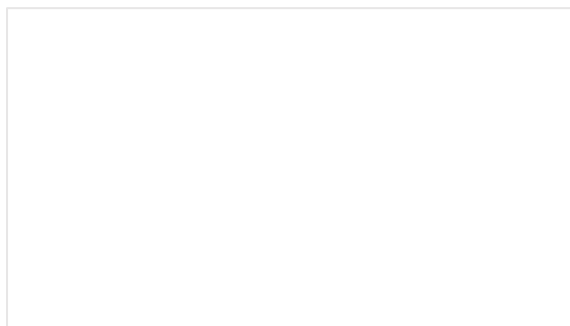


(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-4 測試影像 4 (Gray 場景, D 光源 250 lux)



(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法

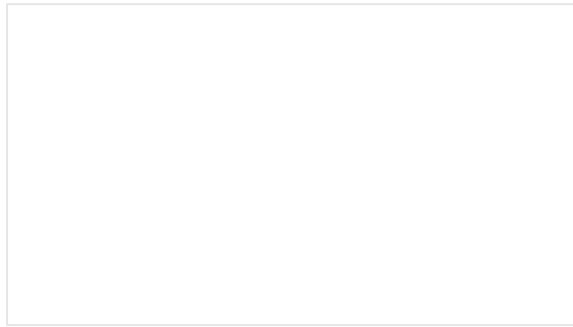


(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-5 測試影像 5 (White 場景, A 光源 20 lux)



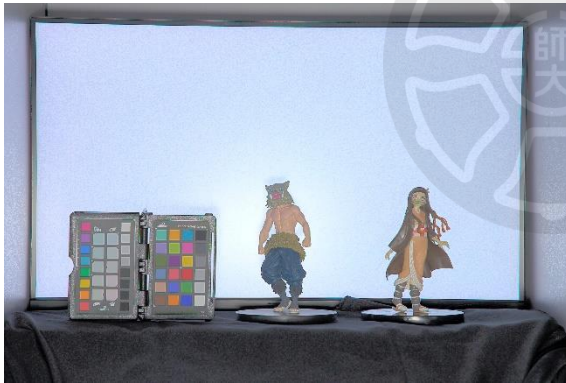
(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



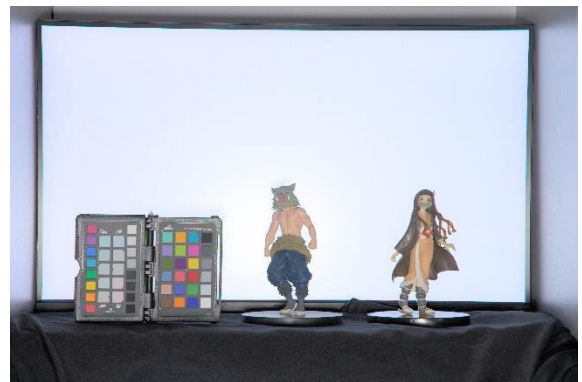
(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-6 測試影像 6 (White 場景, D 光源 250 lux)



(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



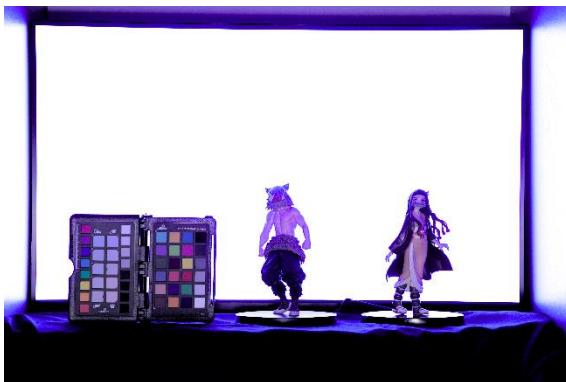
(c) 快速頻率分割色調重現



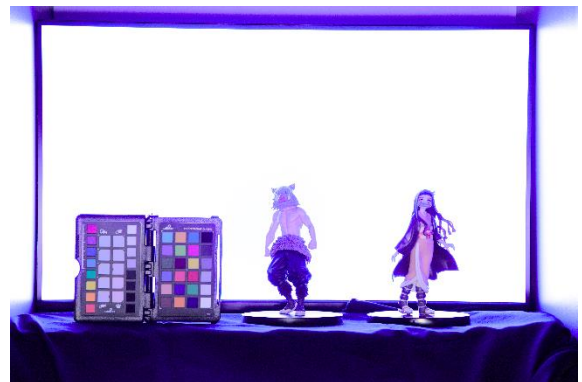
(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-7 測試影像 7 (Blue 場景, A 光源 20 lux)



(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法

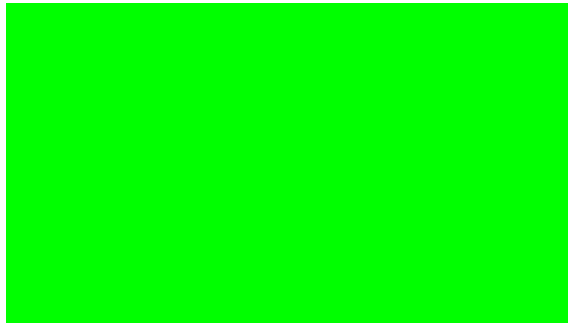


(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-8 測試影像 8 (Blue 場景, D 光源 250 lux)



(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



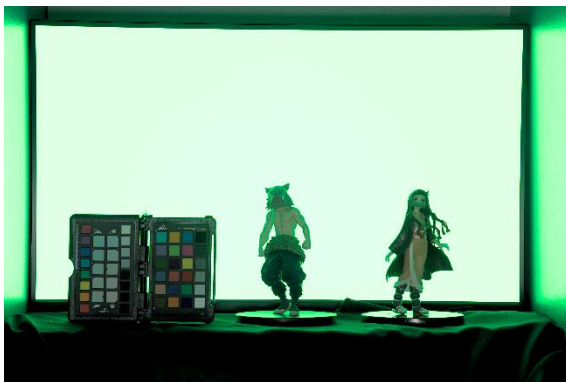
(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法

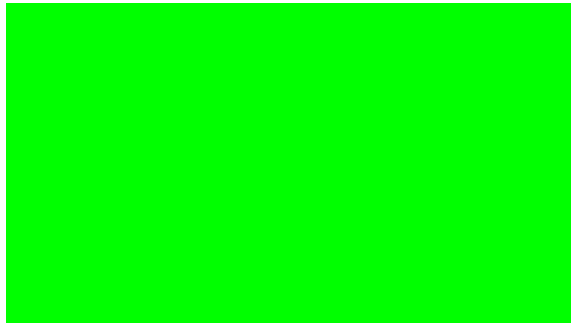


(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-9 測試影像 9 (Green 場景, A 光源 20 lux)



(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-10 測試影像 10 (Green 場景, D 光源 250 lux)



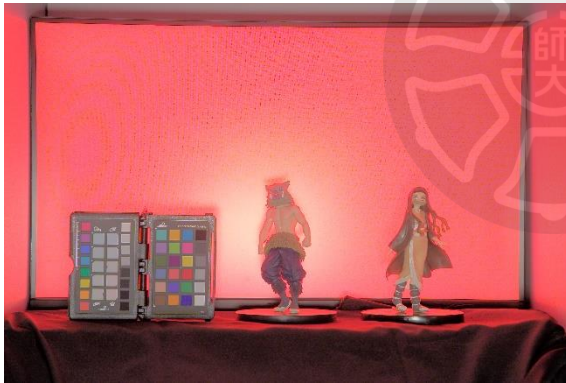
(a) 螢幕投影場景圖示意



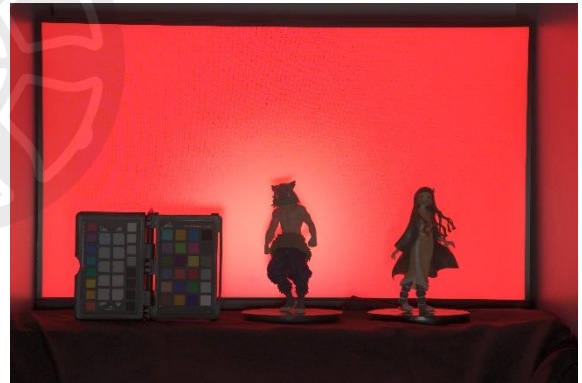
(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-11 測試影像 11 (Red 場景, A 光源 20 lux)



(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知

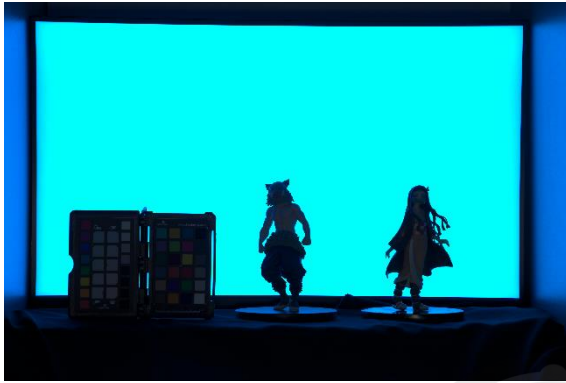


(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-12 測試影像 12 (Red 場景, D 光源 250 lux)



(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

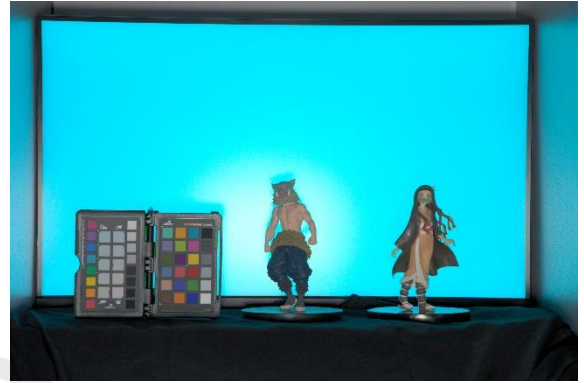
圖 A-13 測試影像 13 (Cyan 場景, A 光源 20 lux)



(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-14 測試影像 14 (Cyan 場景, D 光源 250 lux)



(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-15 測試影像 15 (Magenta 場景, A 光源 20 lux)



(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知

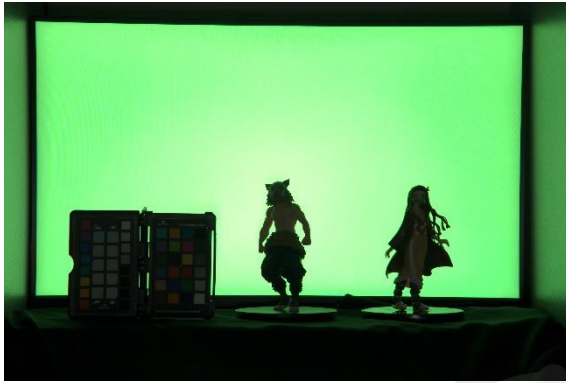


(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

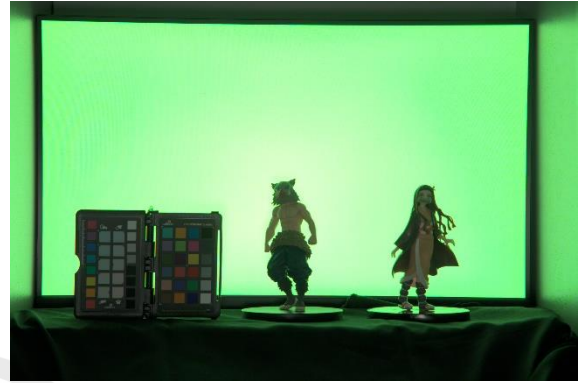
圖 A-16 測試影像 16 (Magenta 場景, D 光源 250 lux)



(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-17 測試影像 17 (Yellow 場景, A 光源 20 lux)



(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

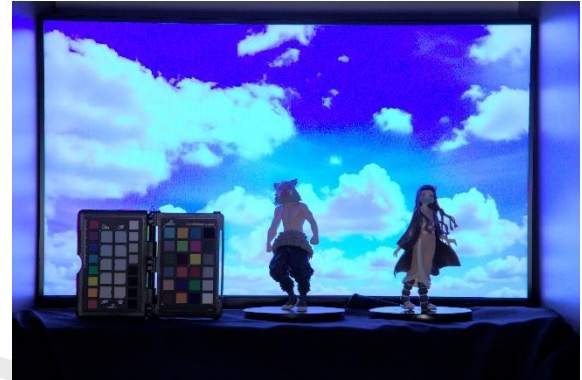
圖 A-18 測試影像 18 (Yellow 場景, D 光源 250 lux)



(a) 螢幕投影場景圖示意



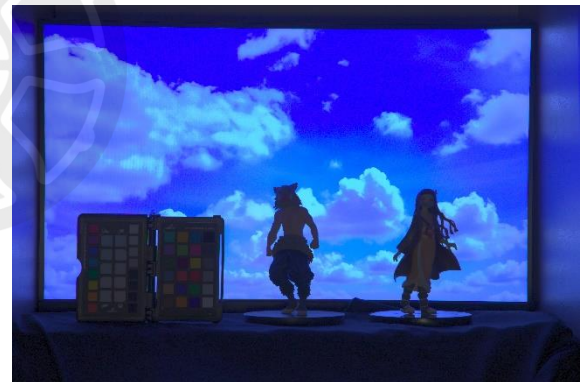
(b) 攝影色調重現



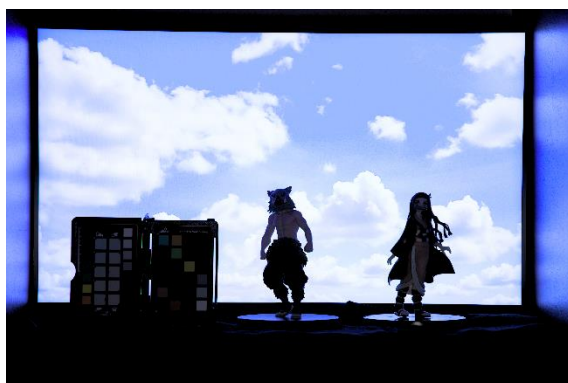
(c) 快速頻率分割色調重現



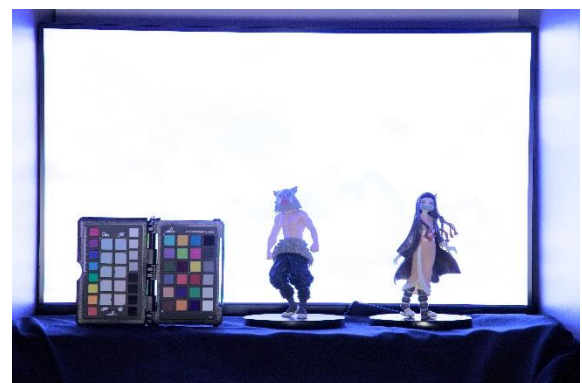
(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法

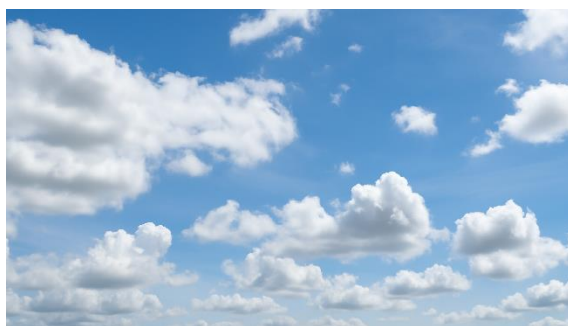


(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

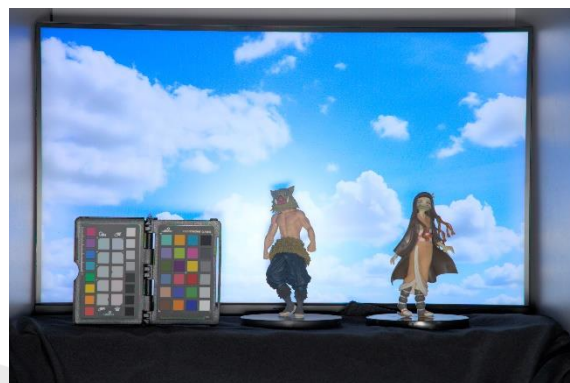
圖 A-19 測試影像 19 (Sky 場景, A 光源 20 lux)



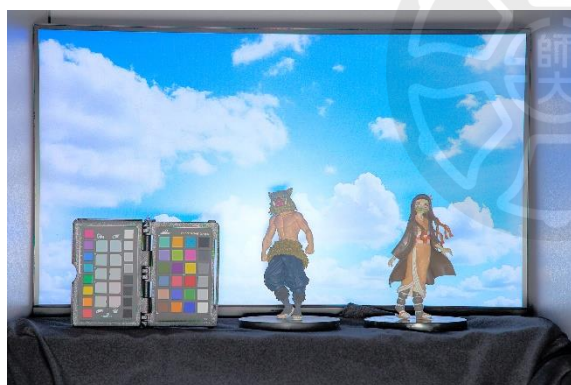
(a) 螢幕投影場景圖示意



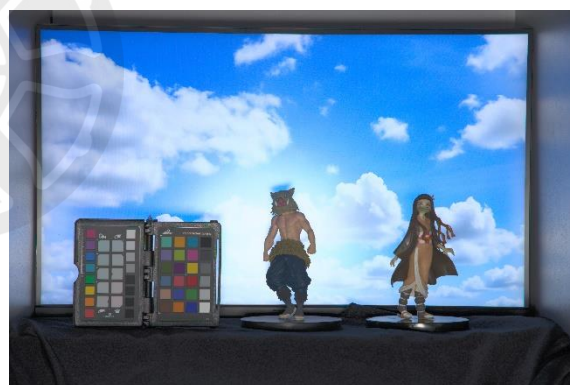
(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



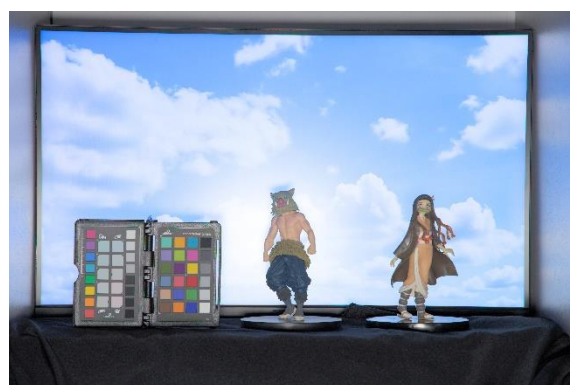
(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-20 測試影像 20 (Sky 場景, D 光源 250 lux)



(a) 螢幕投影場景圖示意



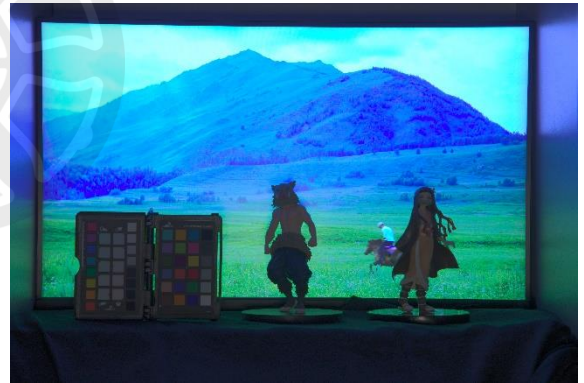
(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-21 測試影像 21 (Grassland 場景, A 光源 20 lux)



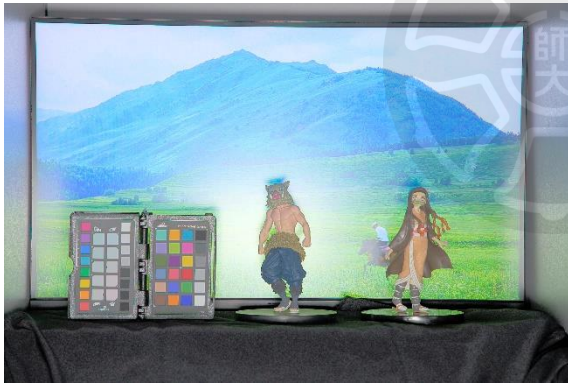
(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知

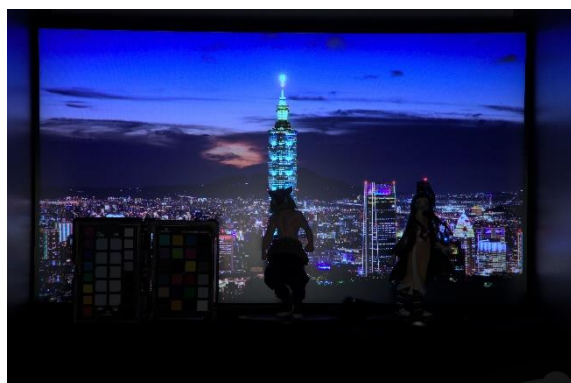


(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-22 測試影像 22 (Grassland 場景, D 光源 250 lux)



(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-23 測試影像 23 (City 場景, A 光源 20 lux)



(a) 螢幕投影場景圖示意



(b) 攝影色調重現



(c) 快速頻率分割色調重現



(d) 區域對比圖評估色調重現



(e) 梯度導向色調曲線增強法



(f) 提出之方法結合巨集邊緣感知



(g) 提出之方法結合 AI 顯著圖

圖 A-24 測試影像 24 (City 場景, D 光源 250 lux)

自傳

我叫鄭翔元，來自新竹市。父母都在科技產業工作，從小耳濡目染之下，對於理工知識自然有了濃厚的興趣。升上大學時，我選擇就讀國立臺灣師範大學產品設計系，因為我相信設計是改變人們生活的重要力量。然而，在學習設計的同時，我對資訊與工程的興趣並未減退，因此同時雙主修資訊工程系，希望將設計思維與技術實作結合，培養跨領域的能力。

在大學最後一年，我參加了與國立故宮博物院合作的產學競賽，負責設計並開發一款博物館導覽應用程式，從介面設計、功能規劃到系統實作，都結合了設計與資工的專業。最終，我們的作品獲得銀獎肯定，這次經驗讓我更確信跨域整合能帶來實際成果，也讓我在未來的進修方向上更加明確。

研究所期間，我錄取國立臺灣師範大學 AI 跨域應用研究所，進入高文忠教授的系統晶片實驗室。實驗室的研究領域包含影像處理與色彩科學，這與我在設計系的色彩理論學習形成呼應，使我能將過去的設計背景延伸到更深層的技術應用。我參與了瑞昱半導體的產學合作計畫，開發數位相機影像處理系統，處理高動態範圍影像、偽色與紫邊等議題；同時也協助元太科技進行電子紙色彩校正專案，涵蓋感測模組設計、演算法開發與系統整合。在這些專案中，我累積了影像處理、AI 演算法、系統程式開發以及與企業協作的經驗。

回顧這些年，我始終保持開放心態學習不同領域的知識，並嘗試將它們整合起來，解決實際問題。未來，我希望能持續在設計、美學與技術的交會處發揮所長，讓自己的專業在不同舞台上持續發光發熱。

學術成就

參與計畫

瑞昱半導體 112.08.01~113.07.31、113.09.01~114.08.31
AI ISP：Camera ISP

