

Digital Visual Effects - High Dynamic Range Imaging

Kuan-Ting Chen

Department of Biomechatronics Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

ABSTRACT

現今攝影領域對於高動態範圍 (High Dynamic Range, HDR) 影像的需求日益提升。為了準確捕捉場景中極暗與極亮的細節，本研究以 iPhone 16 所拍攝的 13 張不同曝光影像 (解析度 4284x5712, 曝光時間 1/4329 秒至 1/244 秒) 為資料，探討高動態範圍 (HDR) 影像生成與色調映射技術。在實驗中，首先使用中值閾值位圖 (Median Threshold Bitmap, MTB) 方法對序列影像進行對齊，以第 1 張曝光最短的影像作為參考。對齊後的影像分別輸入 Debevec & Malik 攝影測光法與 Robertson 估計理論法進行 HDR 輻射影像合成，並透過 Drago、Mantiuk、Reinhard 三種色調映射 (tone mapping) 方法壓縮動態範圍至可顯示的低動態範圍 (LDR) 影像。結果比較顯示，不同 HDR 合成法所產生的輻射圖與相機反應曲線略有差異，而色調映射方法對最終影像的視覺效果和量化指標影響明顯。其中，Debevec 演算法配合 Reinhard 色調映射在本實驗條件下呈現出最佳的整體表現，能在有效壓縮動態範圍的同時保留良好的對比細節與色彩真實度。

Keywords: High Dynamic Range (HDR), Multiple Exposure Time, Radiance map, Tone mapping, Camera response curve, Median Threshold Bitmap (MTB), Estimation-theoretic

1. INTRODUCTION

隨著感光元件技術的進步，一般相機也能拍攝出一定程度的動態範圍；然而在複雜光線環境下，單一曝光往往難以兼顧場景中的暗部與亮部細節。高動態範圍 (HDR) 成像技術通過融合多張不同曝光的照片來重建場景的輻射亮度圖，使得每個像素值與實際輻射亮度成正比[2]。

然而，多張影像在拍攝過程中往往因手持抖動或移動物體而導致影像不對齊。若在合成 HDR 前無法將其校正，最終將出現「鬼影」(ghost) 或邊緣模糊等現象。為解決此一問題，引入了 Median Threshold Bitmap (MTB) 演算法，作為對齊方法的範例。MTB[1] 透過多層金字塔(level)縮放影像，逐層尋找最佳對齊位移，使最終對齊精度大幅提升。

Debevec 與 Malik 於 1997 年提出經典方法，利用帶有平滑項約束的線性系統求解相機反應函數 (response function) g ，以及場景的對數輻射值[2]。Robertson 等人在 2003 年則從估計理論出發，提出透過最大似然迭代同時估計反應函數和輻射值的算法[3]。本研究以這兩種 HDR 合成算法為基礎，搭配 MTB 對齊及三種色調映射技術 (Drago[4], Mantiuk[5], Reinhard[6])，分析在實際拍攝資料上的表現差異。

作業相關重點說明：

1. **Baseline**：合成 HDR 實作 Debevec 方法[2] 並實作 Reinhard 的 Tone Mapping 演算法[6] 產生最終的 RGB 圖像。
2. **Bonus**：實作 Ward's MTB algorithm[1]
3. **Bonus**：合成 HDR 額外實作 Robertson 方法[3]
4. **Bonus**：HDR Tone Mapping 額外使用 Drago 方法[4]
5. **Bonus**：HDR Tone Mapping 額外使用 Mantiuk 方法[5]
6. **Bonus**：Radiance map Tone Mapping



Figure 1. These 13 photographs, captured using the iPhone 16's native camera at various exposure times(1/4329, 1/3831, 1/2865, 1/2208, 1/1751, 1/1337, 1/1016, 1/782, 1/756, 1/586, 1/395, 1/296, 1/244), serve as the input images for the HDR process discussed in this paper.

2. METHODOLOGY

2.1 Image Acquisition and Programming Environment

使用 iPhone 16 手機拍攝具有不同曝光時間的照片序列，共 13 張 JPEG 影像（4284×5712 像素，48MP 感測器的 24MP 輸出）。曝光時間從 1/4329 秒逐漸延長至 1/244 秒，每級曝光約相差 0.3 至 0.4 EV，以涵蓋場景的完整亮度範圍。

所有影像檔名通常包含曝光時間的數值（如 img_0.005.jpg, img_0.00023.jpg），若無法解析則預設使用 1.0。影像皆為 8-bit 並且在先使用 MTB 修正對齊後的影像。

相機			進階相片	
相機製造商			鏡頭廠商	Apple
相機型號			鏡頭型號	iPhone 16 back dual wide camera 5.96mm f/1.6
光圈孔徑			閃光燈廠商	
曝光時間			閃光燈型號	
ISO 速度			相機序號	
曝光偏差			對比	
焦距			亮度	7.76997130426733307
最大光圈			光源	
測光模式			曝光程式	一般
主體距離			飽和度	低飽和度
閃光燈模式			清晰度	
閃光燈能源			白平衡	自動
35mm 焦距			光度測定解譯	
			數位縮放	
			EXIF 版本	0232
			檔案	
			名稱	img_0.00023.jpg
			項目類型	JPG 檔案

Figure 2. The sample image file "img_0.00023.jpg" ("img_[exposure time].jpg.") contains iPhone 16 Exchangeable Image File Format (EXIF) metadata, providing detailed capture information such as exposure time, aperture, ISO settings, and focal length, which help elucidate the lighting conditions and camera parameters used during the photograph's capture.

實驗程式以 Python 3 執行，主要使用 OpenCV、NumPy、SciPy 與 Matplotlib 等函式庫。其中，OpenCV 的函式提供了兩種色調映射的實作，NumPy 用於矩陣運算，SciPy (lsqr) 用於求解線性最小二乘問題，Matplotlib 則用於繪製曲線與結果視覺化。

2.2 Median Threshold Bitmap (MTB) for global alignment

根據 Ward 的論文[1]，MTB 對齊方法的主要思想是：

1. 灰階轉換與中位數閾值化

將每幅影像轉換成灰階後，計算其灰階像素的中位數，再根據中位數進行二值化，生成一幅位圖 (Bitmap)。這個二值圖 (MTB) 對曝光差異具有很高的穩健性，因為無論曝光如何變化，影像中大部分像素的相對順序保持不變。

2. 金字塔策略

為了加快對齊速度並提高精度，MTB 演算法採用了多解析度金字塔。從低解析度開始搜尋最佳平移，再逐級細化到原始解析度，最終獲得最佳的對齊位移。

3. 搜索最佳位移

在每一層金字塔中，嘗試在鄰域 (通常是 [-1, 0, 1] 的移動) 內尋找使得兩幅 MTB 差異 (例如 XOR 差異或絕對差和) 最小的平移量。該平移量被累積起來，最後用於對原始影像進行平移校正。

用 python 實作的 MTB 演算法(HDR_MTB.py)的方法如下：

將所有影像對齊到參考影像（曝光最短的第 1 張）。MTB 方法先將彩色影像轉為灰階(Figure 3 right)，計算灰階圖的中值亮度，然後將高於中值的像素標記為 1，低於中值的標記為 0，即形成二值位圖(Figure 3 left)。

由於不同曝光的影像經過此二值化處理後，亮部與暗部均以相對關係表示，可有效消除曝光差異對對齊的影響。實作上，建立五層高斯金字塔逐層對齊：從最低解析度開始搜索使兩張位圖差異最小的平移向量，逐級放大平移量在高解析度上微調。最終得到每張影像相對參考圖的最佳位移($\Delta x, \Delta y$)，並平移校正影像。

程式亦將各層金字塔的最佳位移記錄並繪製成圖(Figure 4)，以視覺化對齊過程中位移隨解析度的變化（例如在 5 層金字塔中，低分辨率層找出的位移逐步收斂至高分辨率層的精細位移）。經 MTB 對齊後，13 張輸出對齊影像保存於“aligned”資料夾，每張名稱與原始影像相同，以便後續 HDR 合成使用。



Figure 3. Two unaligned exposures (middle) and their median threshold bitmaps (left) and gray scale image (right).

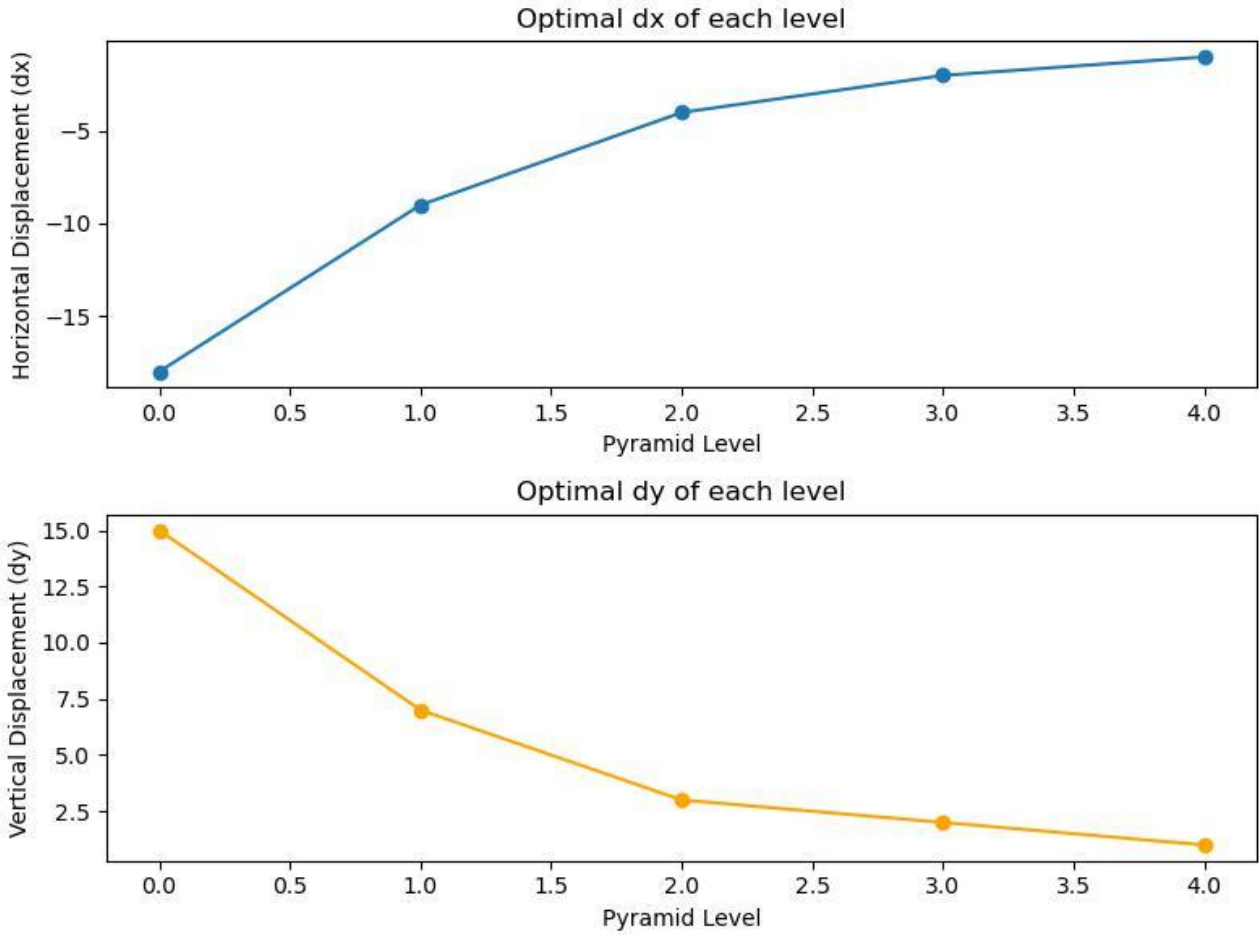


Figure 4. This chart illustrates the optimal horizontal and vertical shifts computed at each pyramid level during the MTB alignment process. Both vertical and horizontal displacements gradually approach zero.

通過計算每幅影像的中位數閾值位圖並採用金字塔策略，能夠快速且穩健地對齊具有不同曝光的影像，從 Figure 4 可以發現，使用 MTB 能讓圖片到第五層金字塔時位移趨近於 0。這種方法對於接下來的 HDR 合成特別有用，因為它能夠有效抑制曝光差異帶來的影響，從而獲得準確的對齊結果。

2.3 HDR Algorithm - Debevec's method (攝影測光法)

經由 MTB 對齊後的影像序列首先輸入 Debevec 與 Malik 提出的方法[2]進行 HDR 合成。該方法假定所有輸入影像共享同一相機反應函數 $g(z)$ ，且每個像素的真實輻射值 E 在不同曝光下遵循關係：

$$Z_{ij} = g^{-1}(E_i) \cdot \Delta t_j$$

其中 Z_{ij} 為第 j 張影像中第 i 個像素的像素值， Δt_j 為曝光時間

演算法透過最小化以下能量函數來同時求解 g 與各像素的對數輻射值 $\ln E_i$

$$O(g, \mathbf{E}) = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^N w(Z_{ij})(g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j)^2 + \lambda \sum_{z=1}^{254} [g(z+1) - 2g(z) + g(z-1)]^2$$

其中 P 為取樣像素點數、 N 為影像數量， $w(z)$ 為像素值的權重函數

權重函數 $w(z)$ （將像素值低於 `lower_limit` 或高於 `upper_limit` 的區域視為過暗或過亮，並降低它們的權重。）
第二項為平滑約束（ $\lambda = 100$ ）。

從每張影像隨機取樣 100 個非飽和像素，共組成 $P = 100$ 個像素位置，在 13 張影像上對應的像素強度形成 Z_{ij} 矩陣。將各曝光時間取對數後得到 $B_j = \ln \Delta t_j$ 。利用 SciPy 的 LSQR 解線性方程可得每個顏色通道的反應曲線 g 及取樣像素的 $\ln E$ 。

對紅、綠、藍三通道分別求解 g 曲線，並固定 $g(128) = 0$ 作為曝光基準。接著，使用求得的 $g(z)$ 將完整影像序列轉換到輻射域；對於每個像素，根據各影像的像素值 Z_{ij} 和曝光 Δt_j ，利用加權平均公式計算該像素的對數輻射值：

$$\ln E(i, j) = \frac{\sum_{n=1}^N w(Z_{ijn})(g(Z_{ijn}) - \ln \Delta t_n)}{\sum_{n=1}^N w(Z_{ijn})},$$

最後取指數得到線性輻射值 $E(i, j)$ 。如此對每個像素求得 HDR 輻射圖（radiance map）。

Debevec 與 Malik 方法

根據文獻，由 Debevec & Malik (1997) 所提出的 HDR 合成理論[2]，先求解相機反應曲線（Camera Response Function, CRF），再估計各像素在真實場景中的輻射值 (radiance)。

用 python 實作的合成 HDR 攝影測光法(HDR_Debevec.py)核心流程如下：

1. 以隨機抽樣像素求解相機反應函數 $g(z)$ 與 $\ln E$ 。
2. 每一像素值 Z_{ij} (第 i 個取樣點，第 j 張影像) 對應曝光時間 $\ln \Delta t_j$ ，權重函式 $w(z)$ 用帽狀函式。
3. 最終可重建每個像素的 HDR 輻射值，並輸出 Radiance Map 進行可視化或保存為 .hdr 檔案。

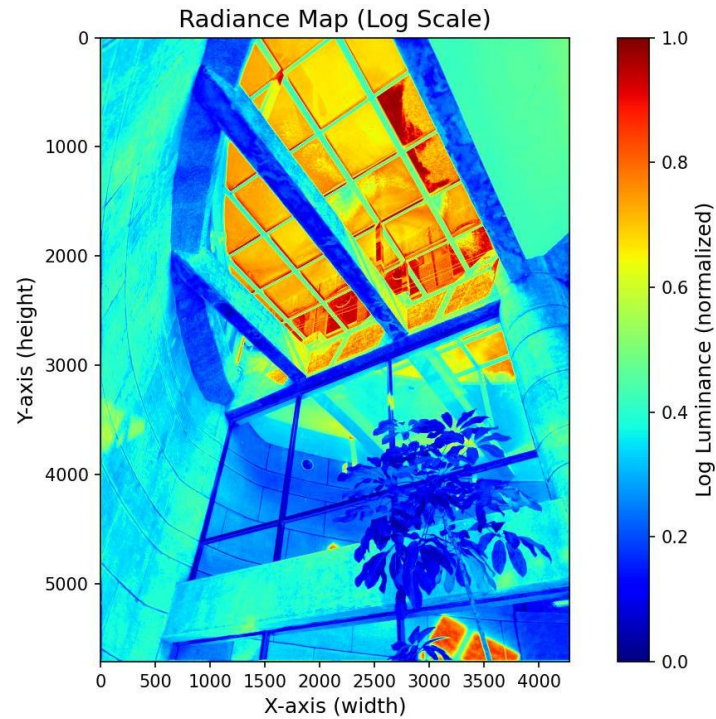


Figure 5. Depicts a color-coded radiance map of an interior scene by Debevec's method, where each pixel's luminance is represented on a logarithmic scale. Warmer colors correspond to higher radiance values, while cooler colors indicate lower radiance. The x-axis (width) and y-axis (height) are measured in pixels, and the accompanying color bar shows the normalized log luminance range from 0.0 to 1.0. This visualization facilitates the analysis of the scene's dynamic range and highlights areas of varying brightness.

本實驗將結果保存為 Radiance 格式檔 (*.hdr) 以及一張可視化的偽彩色輻射圖以供觀察。



Figure 6. The hdr file by Debevec's method illustrates an intentionally overexposed rendering of the interior space, causing most structural details to appear washed out. This exaggerated brightness highlights regions of high luminance, enabling closer examination.

2.4 HDR Algorithm - Robertson 's method (估計理論法)

亦對齊影像序列套用 Robertson 等人於 2003 年發表的 HDR 合成法[3]。該方法以最大近似估計為基礎，透過迭代同時估計相機反應函數和場景輻射值。其核心思想是在沒有先驗假設反應曲線形狀的情況下，利用所有像素資料估計每個強度值對應的輻射量，提高利用資訊的效率並考慮感測器雜訊模型。

原演算法需迭代求解，在本實作中採用簡化的**單次加權平均法**實現（相當於 Robertson 方法的一步），假定反應曲線近似線性。首先將輸入影像轉換為浮點表示並歸一化到 0,1 區間。為降低過曝與欠曝對結果的影響，定義權重函數 $w_n(i, j)$ ：當像素在第 n 張影像的值介於 ϵ, sat （如 $\epsilon=0.02, sat=0.98$ ）之間時，權重為 1；若像素過暗 ($<\epsilon$) 或過亮 ($>sat$) 則權重為 0。接著對每個像素計算輻射值的估計：

$$E(i, j) = \frac{\sum_{n=1}^N w_n(i, j) I_n(i, j) \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N w_n(i, j) (\Delta t_n)^2},$$

其中 $I_n(i, j)$ 為第 n 張影像該像素的歸一化強度值

上述公式與 Robertson 原始論文[3]中的推導結果一致，即在給定相機響應函數的情況下，最佳的輻射估計可表示為各影像強度值依曝光時間加權的平均。由於權重已經忽略飽和區域像素，實際上等效於假設反應曲線在有效強度範圍內接近線性。計算完成後得到 HDR 輻射圖並輸出檔案。

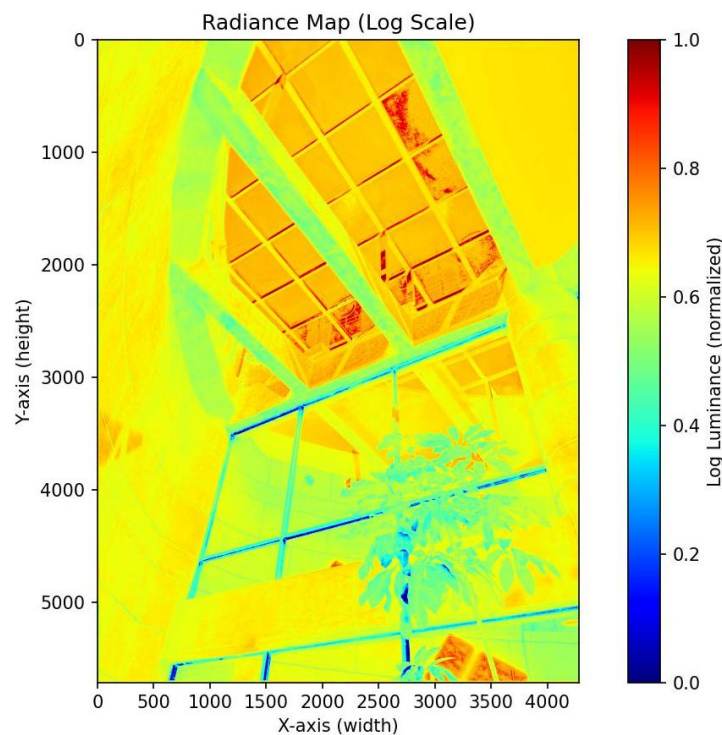


Figure 7. Depicts a color-coded radiance map of an interior scene by Robertson's method, where each pixel's luminance is represented on a logarithmic scale. Warmer colors correspond to higher radiance values, while cooler colors indicate lower radiance. The x-axis (width) and y-axis (height) are measured in pixels, and the accompanying color bar shows the normalized log luminance range from 0.0 to 1.0. This visualization facilitates the analysis of the scene's dynamic range and highlights areas of varying brightness.

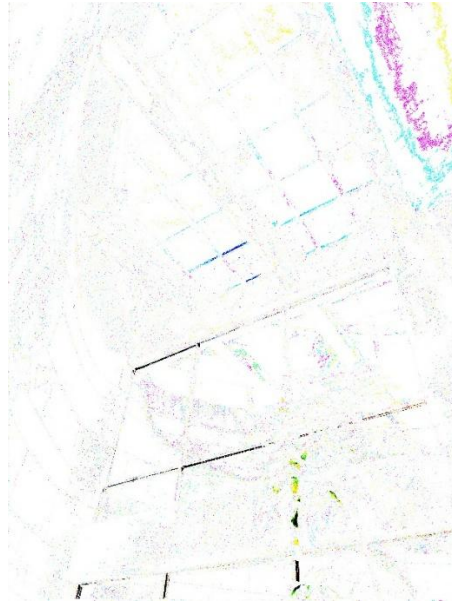


Figure 8. The hdr file by Robertson's method illustrates an intentionally overexposed rendering of the interior space, causing most structural details to appear washed out. This exaggerated brightness highlights regions of high luminance, enabling closer examination.

Robertson 方法

使用 OpenCV 提供的 CalibrateRobertson，透過迭代方式估計相機反應曲線並完成 HDR 合成。

用 python 實作的合成 HDR 向量化估計理論法(HDR_Robertson.py)核心流程如下：

1. 讀入對齊後的影像與曝光時間，呼叫 cv2.createCalibrateRobertson() 與 process() 執行合成。
2. 繪製相機反應曲線與輸出 HDR 格式檔。
3. 實作「估計理論方法 (estimation-theoretic)」對 HDR 影像進行檢驗與比較。

2.5 Tone Mapping Algorithm

為將 HDR 輻射圖轉換為普通顯示器可呈現的 LDR 圖像，選用了三種代表性 Tone Mapping 演算法：

1. **Drago 對數映射法**：一種**全域**演算法，利用對數函數壓縮亮度範圍並引入可調參數 Bias 控制壓縮強度。

此方法對人眼暗部細節敏感度進行調適，能快速地將高對比影像映射成較平坦的結果。

在 OpenCV 中使用 cv2.createTonemapDrago(gamma=2.2, saturation=1.0, bias=0.85) 實現，gamma=2.2 用於逆顯示伽瑪校正。輸出影像經裁剪及 8-bit 量化得到最終 LDR。

2. **Mantiuk 局部對比法**：一種**局部**演算法，注重保留細節和對比。

OpenCV 的實現基於 R. Mantiuk 等人提出的方法[5]：先將 HDR 影像構建高斯金字塔各尺度的對比圖，再根據人眼對不同尺度對比的敏感度（HVS 模型）縮放這些對比，最後重建影像。該方法相當於模擬傳統暗房中的「閃避與燒蝕」（dodging and burning）技術，在亮部和暗部局部提升對比度。

使用 OpenCV 的 cv2.createTonemapMantiuk(gamma=2.2, scale=0.85, saturation=1.0)，其中 scale 控制對比縮放程度（預設 0.85），其他步驟同上。

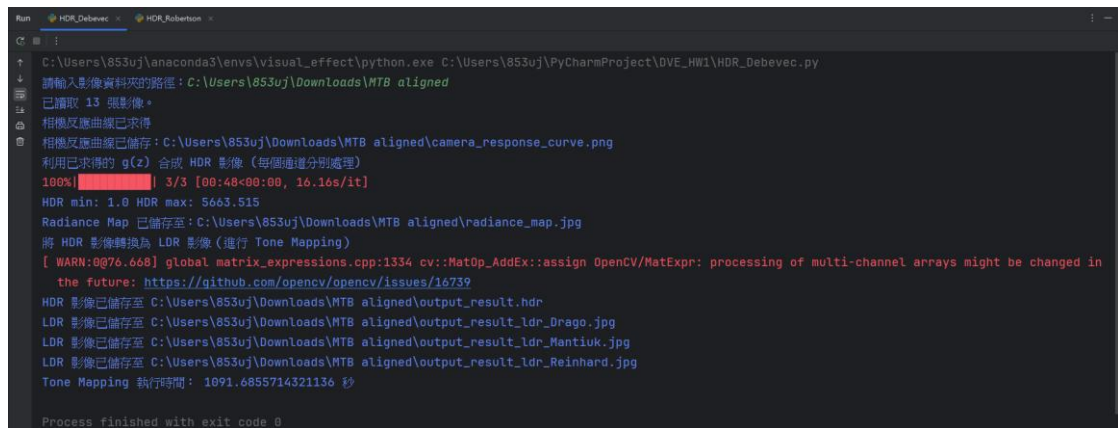
3. **Reinhard 攝影圖像法**：一種全域映射演算法，模擬傳統攝影膠片的特性和人眼觀察行為。

算法先計算影像的平均對數亮度 L_{avg} ，再根據設定的關鍵值（key，預設 0.18，相當於 Zone 系統中的 18%灰）縮放影像亮度，之後套用映射函數 $L_{mapped} = \frac{L \cdot key / L_{avg}}{1 + L \cdot key / L_{avg}}$ ，將亮度壓縮到 0,1 區間。最後再按原各像素相對亮度比例將 RGB 顏色映射回去。

我依據 Erik Reinhard 等人 2002 年論文[6]中的公式實現此演算法，並確認輸出效果，是三種演算法中最好的，選擇此結果做為 result.png。

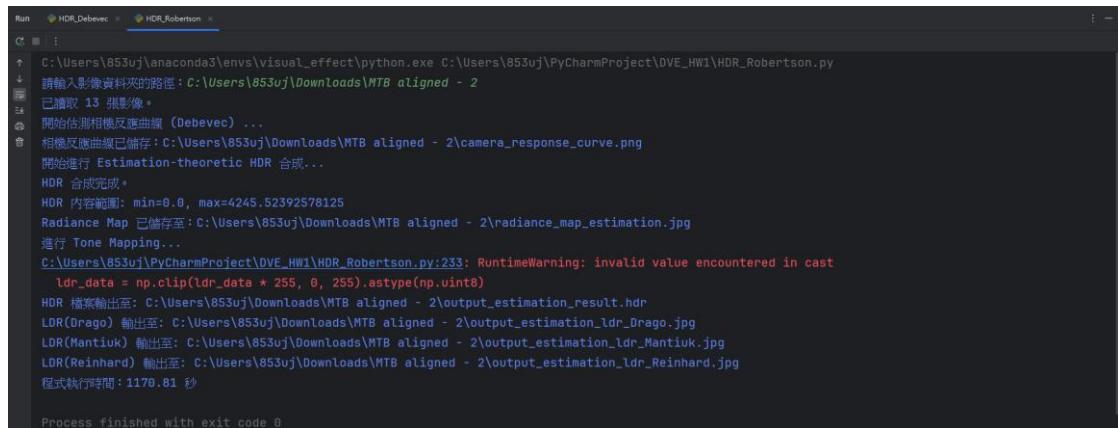
3. RESULTS

上述流程中，Python 程式會記錄耗時與中間結果，以利分析。在 Camera response curve 計算、Radiance map 色調映射圖繪製和 HDR 合成步驟完成後，將兩種 HDR 結果分別輸入三種 tone mapping 函式，得到對應的 LDR 影像（共 6 張，用兩種 HDR 合成法各對應 3 種 tone mapping）。為進行量化比較，計算了各 LDR 結果的亮度直方圖、平均亮度、亮度標準差以及色彩飽和度等指標。



```
Run HDR_Debevec - HDR_Robertson
C:\Users\853uj\anaconda3\envs\visual_effect\python.exe C:\Users\853uj\PyCharmProject\0VE_HW1\HDR_Debevec.py
請輸入影像資料夾的路徑: C:\Users\853uj\Downloads\MTB_aligned
已讀取 13 張影像。
相機反應曲線已求得
相機反應曲線已儲存: C:\Users\853uj\Downloads\MTB_aligned\camera_response_curve.png
利用已求得的 g(z) 合成 HDR 影像 (每個通道分別處理)
100%|██████████| 3/3 [00:48<00:00, 16.16s/it]
HDR min: 11.7 HDR max: 2878.594
Radiance Map 已儲存至: C:\Users\853uj\Downloads\MTB_aligned\radiance_map.jpg
將 HDR 影像轉換為 LDR 影像 (進行 Tone Mapping)
[ WARN:0076.668] global_matrix_expressions.cpp:1334 cv::MatOp_AddEx::assign OpenCV/MatExpr: processing of multi-channel arrays might be changed in
the future: https://github.com/opencv/opencv/issues/16739
HDR 影像已儲存至 C:\Users\853uj\Downloads\MTB_aligned\output_result_hdr
LDR 影像已儲存至 C:\Users\853uj\Downloads\MTB_aligned\output_result_ldr_Drago.jpg
LDR 影像已儲存至 C:\Users\853uj\Downloads\MTB_aligned\output_result_ldr_Mantiuk.jpg
LDR 影像已儲存至 C:\Users\853uj\Downloads\MTB_aligned\output_result_ldr_Reinhard.jpg
Tone Mapping 執行時間: 1091.6855714321136 秒
Process finished with exit code 0
```

Figure 9. The console output from HDR_Debevec.py script used for high dynamic range (HDR) image processing. The script processes the aligned images, computing the camera response curve, and generating a radiance map. It then performs tone mapping and outputs several results, including the HDR file and LDR images with different tone-mapping methods such as Drago and Reinhard. The HDR minimum value = 11.7, maximum value = 2878.594 and tone mapping execute time = 1091s are also displayed during the processing.



```
Run HDR_Debevec - HDR_Robertson
C:\Users\853uj\anaconda3\envs\visual_effect\python.exe C:\Users\853uj\PyCharmProject\0VE_HW1\HDR_Robertson.py
請輸入影像資料夾的路徑: C:\Users\853uj\Downloads\MTB_aligned - 2
已讀取 13 張影像。
開始估計相機反應曲線 (Debevec) ...
相機反應曲線已儲存: C:\Users\853uj\Downloads\MTB_aligned - 2\camera_response_curve.png
開始進行 Estimation-theoretic HDR 合成...
HDR 合成完成。
HDR 內容範圍: min=0.0, max=4245.52392578125
Radiance Map 已儲存至: C:\Users\853uj\Downloads\MTB_aligned - 2\radiance_map_estimation.jpg
進行 Tone Mapping...
C:\Users\853uj\PyCharmProject\0VE_HW1\HDR_Robertson.py:233: RuntimeWarning: invalid value encountered in cast
ldr_data = np.clip(ldr_data * 255, 0, 255).astype(np.uint8)
HDR 檔案輸出至: C:\Users\853uj\Downloads\MTB_aligned - 2\output_estimation_result_hdr
LDR (Drago) 輸出至: C:\Users\853uj\Downloads\MTB_aligned - 2\output_estimation_ldr_Drago.jpg
LDR (Mantiuk) 輸出至: C:\Users\853uj\Downloads\MTB_aligned - 2\output_estimation_ldr_Mantiuk.jpg
LDR (Reinhard) 輸出至: C:\Users\853uj\Downloads\MTB_aligned - 2\output_estimation_ldr_Reinhard.jpg
程式執行時間: 1170.81 秒
Process finished with exit code 0
```

Figure 10. The console output of HDR_Robertson.py script. The script processes the aligned images, camera response curve estimation, and radiance map generation. Tone mapping is applied, and several outputs are generated, including HDR and LDR images with different tone-mapping methods (Drago, Mantiuk, Reinhard). The HDR minimum value = 0.0, maximum value = 4245.524 and tone mapping execute time = 1170s are also displayed during the processing.

3.1 HDR Radiance Map and Camera Response Curve

Debevec 法與 Robertson 法均成功融合了 13 張不同曝光影像，生成完整的輻射圖 Figure 11(top)。兩者的輻射圖在整體亮度分佈上相似，皆涵蓋從暗部陰影到亮部高光的細節。以線性輻射值表示的 HDR 影像 Figure 11(bottom)，Debevec 結果的像素輻射值範圍落在 11.7 ~ 2878.594 之間，而 Robertson 結果範圍則在 0.0 ~ 4245.524 之間。

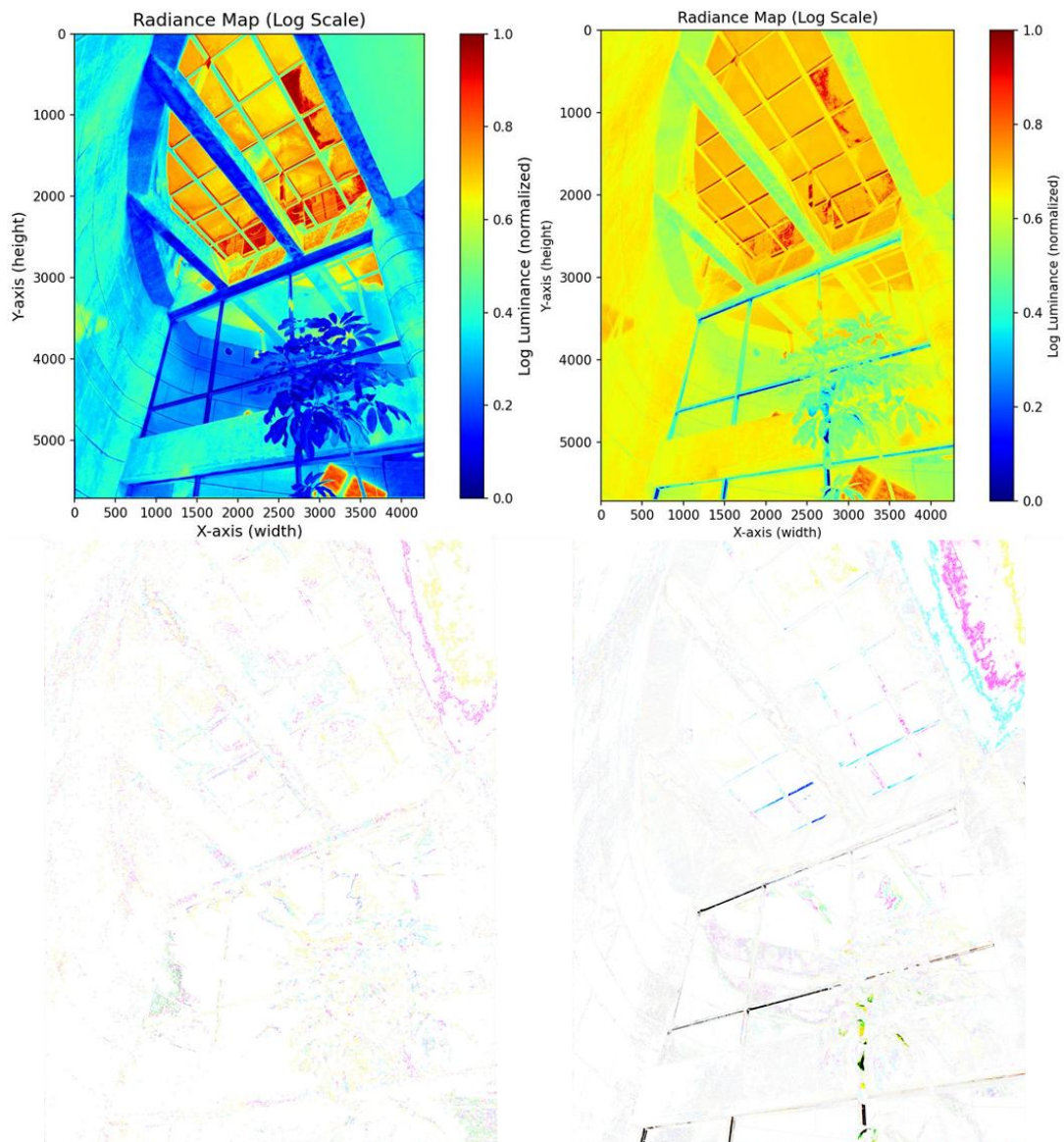


Figure 11. The radiance maps and HDR files generated using the **Debevec** (left) and **Robertson** (right) methods, which successfully fuse 13 images with different exposures to create comprehensive radiance maps (top two images) and the HDR files (bottom two images). The pixel radiance range for the Debevec result is between 1.0 and 5663.515, while the Robertson result falls between 0.0 and 4245.524.

兩者最大值有約33%的差異，可能源於對反應曲線的處理。

相機反應曲線方面，如 Figure 12 和 Figure 13所示：

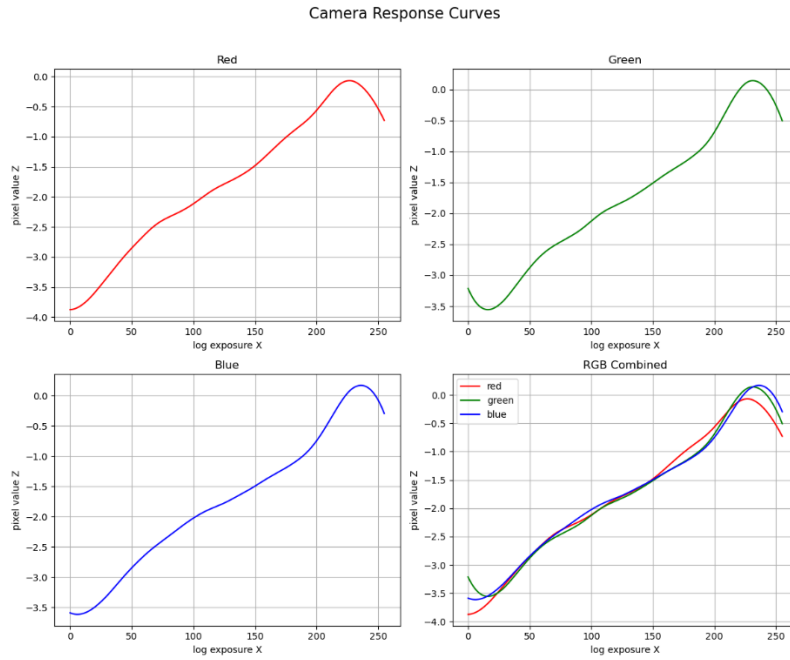


Figure 12. The camera response curves for the red, green, and blue channels obtained using the **Debevec & Malik** method, applied to images captured with the iPhone 16. Each graph displays the relationship between the logarithm of exposure (x-axis) and the pixel value (y-axis) for individual color channels (top left for red, top right for green, bottom left for blue). The combined RGB curve (bottom right) shows the overall response for all three channels. These curves are crucial for understanding the camera's exposure behavior and are used to reconstruct high dynamic range (HDR) images.

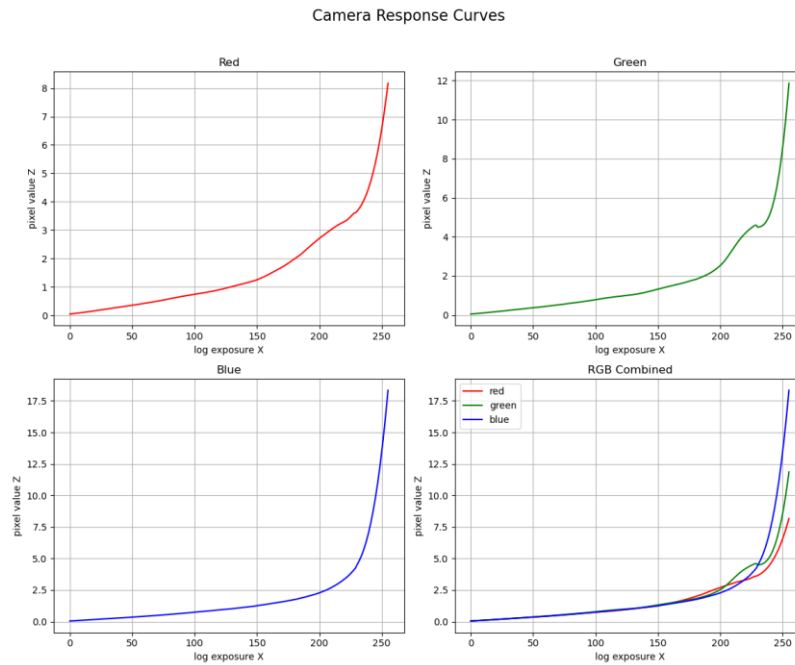


Figure 13. The camera response curves for the red, green, and blue channels, obtained using the **Robertson** method, applied to images captured with the iPhone 16. The graphs show the relationship between the logarithm of exposure (x-axis) and pixel values (y-axis) for each individual color channel (top left for red, top right for green, bottom left for blue). The combined RGB curve (bottom right) represents the overall camera response. The curves illustrate the nonlinear response of the camera, with rapid increases in pixel values at higher exposure levels.

Figure 12 和 Figure 13 顯示了兩種方法（Debevec & Malik 和 Robertson）獲得的紅色、綠色和藍色通道的相機響應曲線，這些曲線分別應用於 iPhone 16 拍攝的影像。Figure 12 中的曲線顯示了相機的響應是平滑且逐漸增加的，並且整體 RGB 曲線呈現出較為平衡的響應，適合用於 HDR 影像的重建。與此相比，Figure 13 中 Robertson 方法的曲線在較高曝光水平下像素值迅速增加，顯示出較為明顯的非線性響應，這可能是由於不同的曝光處理方式。兩者的組合 RGB 曲線均顯示了各自的相機響應特性，且都強調了在不同曝光下的像素變化，但 Robertson 方法的非線性特徵更為明顯。

總體而言，本實驗中兩種 HDR 合成演算法在對齊後、影像品質良好的條件下產生了不同的輻射圖與相機曲線，反映了不同的曝光處理方式。

3.2 HDR Tone Mapping to LDR for Visualization

將 Debevec-HDR 和 Robertson-HDR 各自經過 Drago、Mantiuk、Reinhard Tone Mapping，產生 6 幅 LDR 影像。

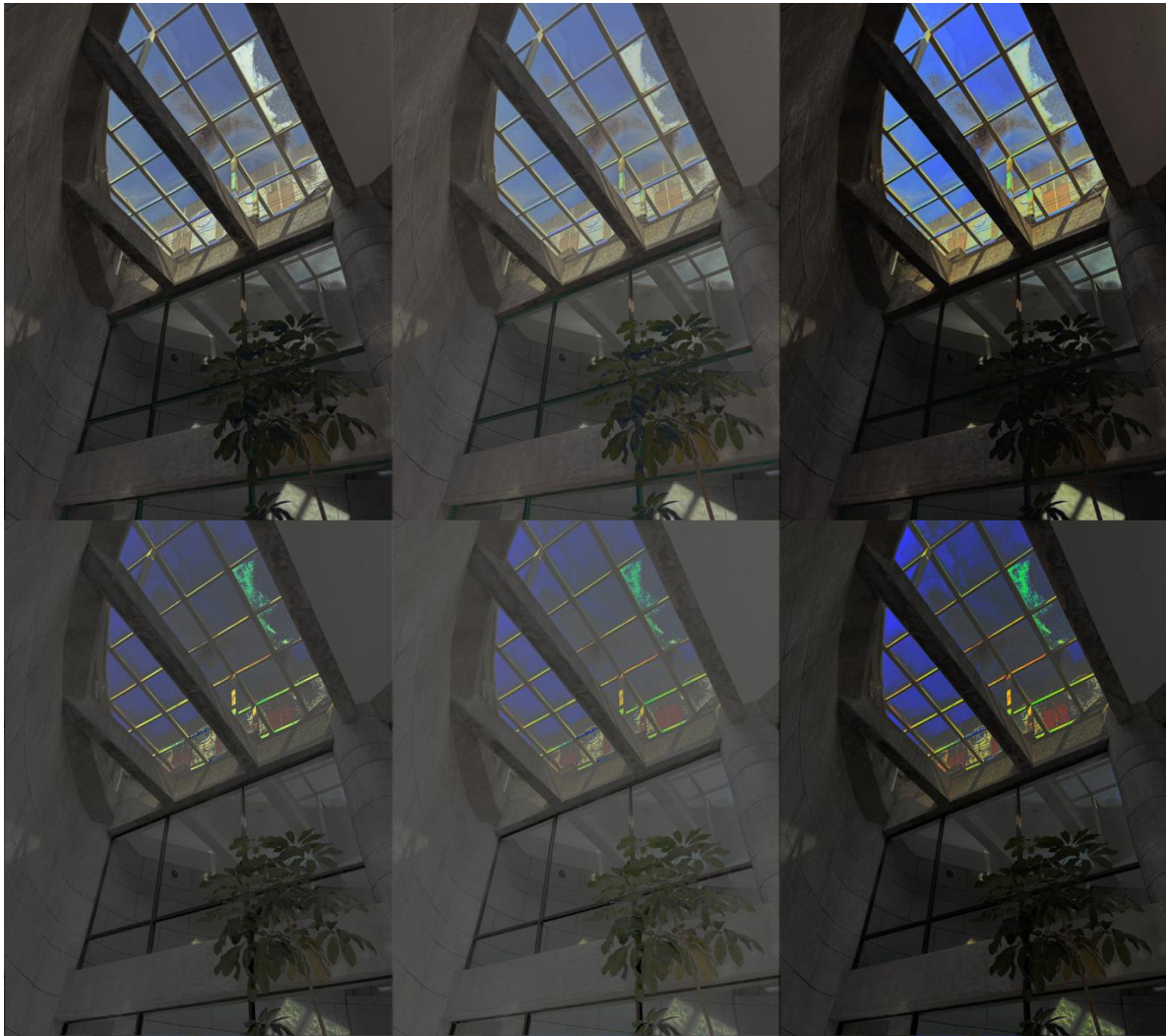


Figure 14. Displays six low dynamic range (LDR) images produced by applying three different tone-mapping methods (Drago, Mantiuk, Reinhard) to HDR images generated using the **Debevec** (top row) and **Robertson** (bottom row) methods. These LDR images represent the tone-mapped results of both HDR images, showcasing the different visual effects achieved by each tone-mapping technique. The Drago method emphasizes contrast in high luminance areas, the Mantiuk method maintains overall brightness balance, and the Reinhard method compresses the luminance range to enhance details in both shadows and highlights.

展示了三種技術的不同視覺效果，Drago, Mantiuk, Reinhard 分別強調高亮度對比、整體亮度平衡及陰影與高光細節增強，以上結果都是經過 10 多次參數調整後，相對較清楚的版本，因為以人眼觀看，結果因人而異，因此我選擇撰寫程式 (HDR_color.py) 以相關指標（平均亮度、亮度標準差、色彩飽和度等）判斷。

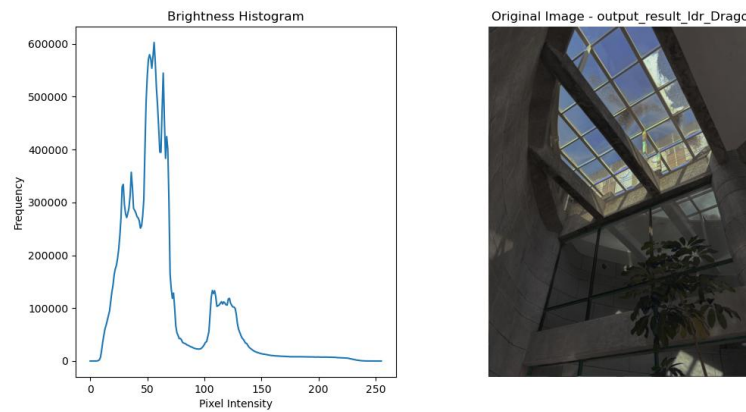


Figure 15. Presents the calculated image metrics for **Debevec_Drago**, including the **average brightness** (63.03), **brightness standard deviation** (35.75), **average saturation** (21.46), and **saturation standard deviation** (21.26).

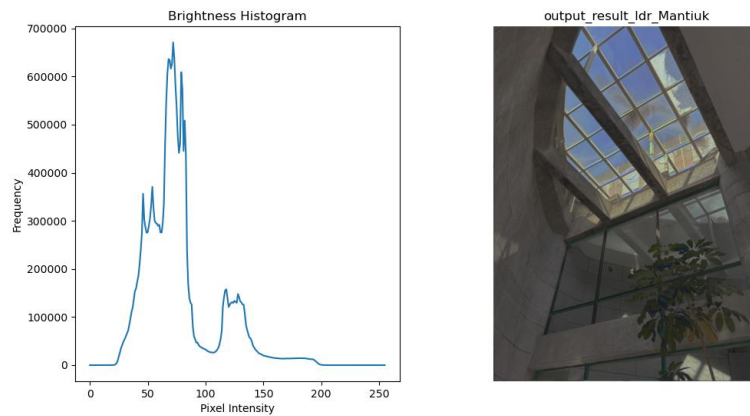


Figure 16. Presents the calculated image metrics for **Debevec_Mantiuk**, including the **average brightness** (77.31), **brightness standard deviation** (30.32), **average saturation** (20.96), and **saturation standard deviation** (20.80).

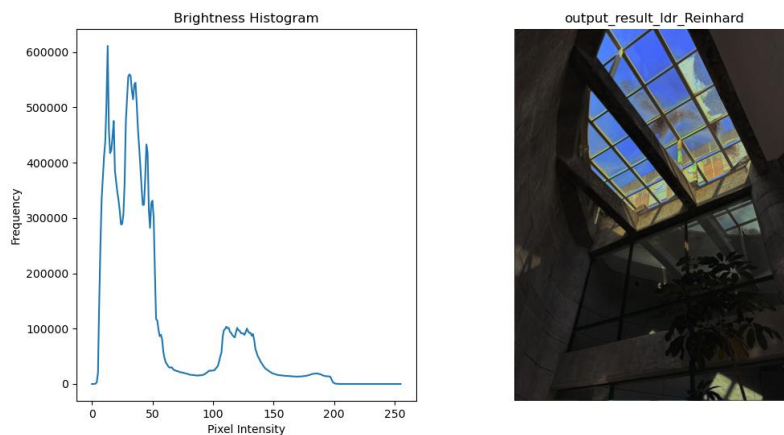


Figure 17. Presents the calculated image metrics for **Debevec_Reinhard**, including the **average brightness** (48.41), **brightness standard deviation** (41.44), **average saturation** (41.13), and **saturation standard deviation** (47.63).

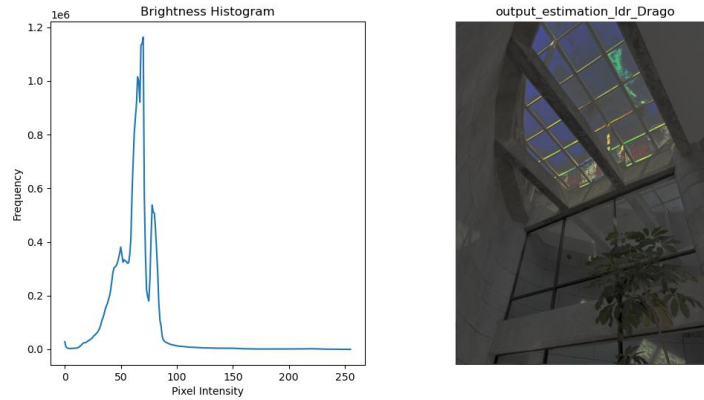


Figure 18. Presents the calculated image metrics for **Robertson_Drago**, including the **average brightness** (63.15), **brightness standard deviation** (18.67), **average saturation** (12.92), and **saturation standard deviation** (21.46).

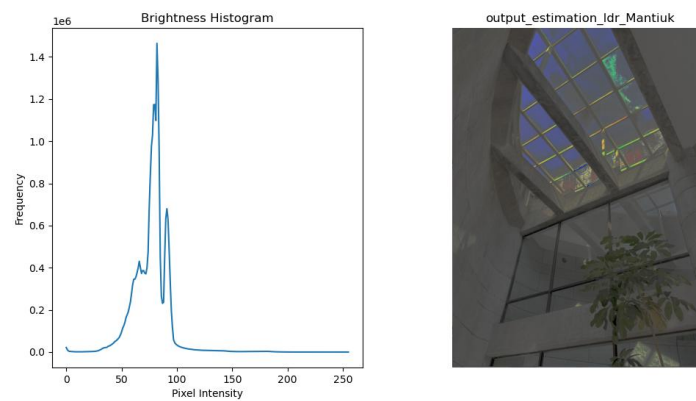


Figure 19. Presents the calculated image metrics for **Robertson_Mantiuk**, including the **average brightness** (77.16), **brightness standard deviation** (15.43), **average saturation** (12.53), and **saturation standard deviation** (20.20).

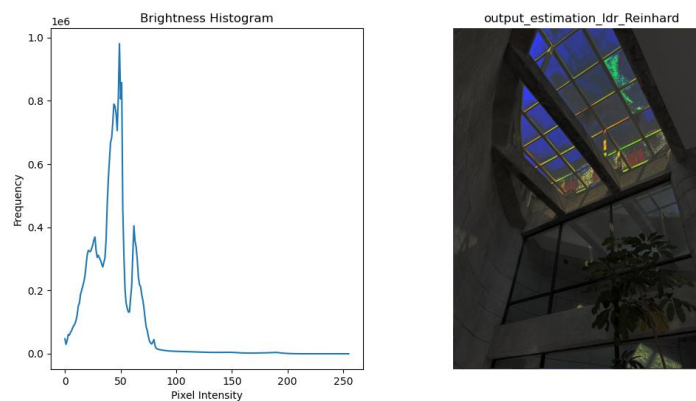


Figure 20. Presents the calculated image metrics for **Robertson_Reinhard**, including the **average brightness** (43.59), **brightness standard deviation** (21.19), **average saturation** (26.27), and **saturation standard deviation** (37.10).

根據提供的數值，可以進行以下判斷：

平均亮度 (Average Brightness)：亮度範圍在 0-255，這個值較低，表示圖像的亮度偏暗。

亮度標準差 (Brightness Standard Deviation)：標準差較低意味著亮度分佈較為均勻。

平均飽和度 (Average Saturation)：飽和度範圍在 0-100（理論上），這個值相對較低，表示圖像色彩偏淡。

飽和度標準差 (Saturation Standard Deviation)：較低的標準差顯示圖像的色彩分佈比較均勻。

總結：

- 大多亮度偏低(<100)，顯示圖像較暗，適合處理需要顯示更多光線的圖像，推測為原始圖片曝光時間較短，導致圖像較暗。
- 大多亮度標準差較高(>20)，顯示出較強的對比度，推測也是因為圖像較暗，展現圖像亮暗細節需要更大的對比。
- 大多飽和度較低(<30)，色彩較為淡化，若圖像需要更多色彩，可以進行色彩增強，Figure 17 是唯一一張飽和度>40 的，所以 **Debevec_Reinhard** 也是我認為這幾張中最好看的。
- 大多飽和度標準差較高(>20)，表示圖像中的某些區域有顯著的色彩變化，原因同亮度標準差。

最終結果，依照以上判斷，將亮度調高 30(不能再高，會損失亮部細節)，如下 Figure 21 所示：

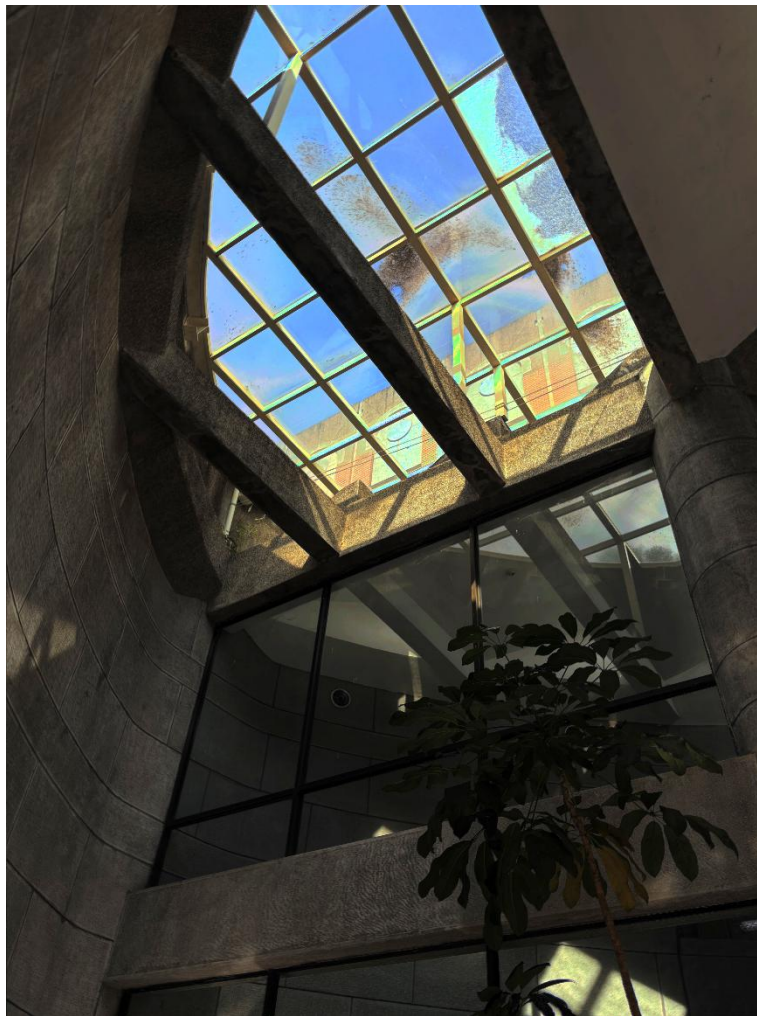


Figure 21. Image of **Debevec_Reinhard**, including the **average brightness** (66.20), **brightness standard deviation** (57.31), **average saturation** (56.42), and **saturation standard deviation** (67.03).

4. CONCLUSIONS

本研究成功比較了兩種不同的高動態範圍（HDR）影像合成方法，分別為 Debevec & Malik 方法與 Robertson 估計理論方法，並探討了這兩種方法在生成輻射圖（radiance map）與相機反應曲線（camera response curve）方面的差異。透過 iPhone 16 所拍攝的 13 張不同曝光時間的影像，實現了有效的影像對齊和 HDR 合成。

實驗結果顯示，兩種 HDR 合成方法均能有效融合多張曝光影像，並生成涵蓋完整動態範圍的輻射圖。Debevec 方法與 Robertson 方法所產生的輻射圖在整體亮度分佈上相似，但在高亮區的數值範圍上存在約 33% 的差異，這主要與對反應曲線的處理方式有關。

此外，實驗中應用了三種色調映射方法（Drago、Mantiuk 和 Reinhard），並將其應用於兩種 HDR 合成結果中。結果顯示，不同的色調映射方法對最終影像的視覺效果有顯著影響，其中 Drago 方法強調高亮區的對比度，Mantiuk 方法保持整體亮度平衡，而 Reinhard 方法則強調陰影與高光的細節增強。在所有結果中，Debevec 與 Reinhard 色調映射的組合顯示出了最佳的整體表現，不僅能有效壓縮動態範圍，還能保留較好的色彩真實度和細節。

從量化指標來看，Reinhard 色調映射法的平均亮度和飽和度標準差表現最佳，顯示出它在保留色彩與亮度細節方面的優勢，並且其最終的圖像效果較為自然，符合一般視覺需求。這使得 Debevec 與 Reinhard 的結合成為本研究中最理想的 HDR 影像處理方法。

綜合來說，本研究表明，透過有效的影像對齊與不同的 HDR 合成方法搭配適當的色調映射技術，可以生成高質量的 HDR 影像，對於需要精確亮度範圍表現的應用具有重要的實際意義。未來可以進一步探討不同場景或光線條件下的影像合成效果，以及引入更多先進的色調映射技術來進一步提升影像的視覺效果。

Data Availability Statement:

All the codes, datasets and files can be viewed and downloaded via the links : [High Dynamic Range Imaging](#)

REFERENCES

- [1] G. Ward, “Fast, robust image registration for compositing high dynamic range photographs from hand-held exposures,” J. Graphics Tools, vol. 8, no. 2, pp. 17–30, 2003.
- [2] P. E. Debevec and J. Malik, “Recovering high dynamic range radiance maps from photographs,” ACM SIGGRAPH, pp. 369–378, 1997.
- [3] M. A. Robertson, S. Borman, and R. L. Stevenson, “Estimation-theoretic approach to dynamic range enhancement using multiple exposures,” Journal of Electronic Imaging, vol. 12, no. 2, pp. 219–228, 2003.
- [4] F. Drago, K. Myszkowski, T. Annen, and N. Chiba, “Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes,” Computer Graphics Forum, vol. 22, no. 3, pp. 419–426, 2003.
- [5] R. Mantiuk, S. Daly, and L. Kerofsky, “Display adaptive tone mapping,” ACM Trans. Graphics, vol. 27, no. 3, article 68, 2008.
- [6] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, and J. Ferwerda, “Photographic tone reproduction for digital images,” ACM Trans. Graphics, vol. 21, no. 3, pp. 267–276, 2002.