

# Digital Visual Effects

Homework 1: High Dynamic Range Imaging

R09922188 曾泓硯  
R09922089 蔡忠翰

## Project Description

在真實世界中，即便是同個場景，其亮度資訊都可以差異至數十萬倍以上。而因大部分相機的動態範圍有限，無法完美地記錄場景中的資訊，所以在過亮或過暗的部分會喪失圖像細節。

而這次作業主要就是利用多張已知之不同曝光時間的照片，估算出 Camera Response Function(CRF)，藉此就可以將許多張 LDR 影像結合成一張 HDR 影像，並且利用 Tone Mapping 將 HDR 影像之值域壓回一般螢幕所能顯示的 LDR 影像。

## Implemented Algorithms

Image Alignment

- Median Threshold Bitmap Algorithm

HDR Image Reconstruction

- Paul Debevec's Method

Tone Mapping

- Bilateral Filtering
- Reinhard

## Implementation Details

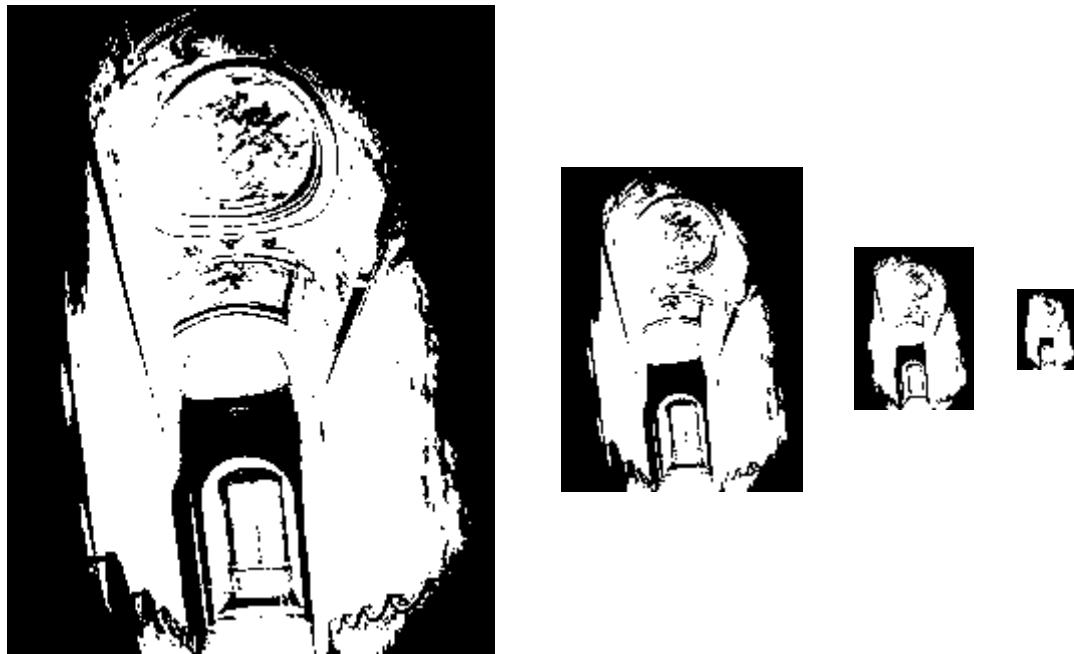
Image Alignment

在拍照的過程中，即使有用腳架固定，也難以保證每張拍出來的相片都沒有位移：有可能因為腳架本身阻尼設置不當或是相機本身機械裝置的震動而導致位移。因此，在進行後續的演算法之前，應先將各相片的像素都對齊好。

而我們這邊實作的是 Median Threshold Bitmap 的對齊演算法，這個演算法假

設要對齊的影像是平行位移，並且曝光時間可能不同。因為每張影像的曝光時間不同，因此即使是同一物體，在不同照片中其亮度值也會有差異。而他的解決方式就是利用同一場景中，亮到暗的相對關係應該是不會改變的，所以對各圖片統計出中位數以後，就可以將場景分為亮部與暗部，再來就針對搜索範圍將圖片進行位移，計算各位移下的誤差以後，取最小誤差的那個位移為答案。

但這樣直接進行暴力搜索，在搜索範圍很大的時候會需要很多計算。因此，他利用金字塔的方式，每一層都將圖片縮小一半，這樣就可以在計算同樣的搜索範圍下，將計算量以對數方式降低。譬如原先要計算  $9 \times 9$  範圍內的位移，這樣要進行 91 次位移與誤差的計算，而利用金字塔的方式，每一層都只要搜索  $3 \times 3$  範圍內的位移：在長寬縮小四倍的第三層，其對應到的搜索範圍是  $6 \times 6$  至  $9 \times 9$  範圍內的位移；在長寬縮小兩倍的第二層，其對應到的搜索範圍是  $3 \times 3$  至  $6 \times 6$  範圍內的位移；在原圖的第一層，其對應到的搜索範圍即是  $3 \times 3$  範圍內的位移，總共是  $(3 \times 3) \times 3$  次位移與誤差的計算。



金字塔，由左到右逐漸對長寬各縮小兩倍，白色為亮部，黑色為暗部

在實作的時候，會發現縮小的層數(對應到搜索範圍)是有限制的，這通常是需要手動設定的參數：其直覺也很簡單，如果位移太大的時候，就表示圖片中有許多資訊是無法互相比對的，違反了演算法的假設。在有用腳架的狀況下，位移通常都不會太大，都在 10 個像素內，因此通常將金子塔的層數設定為 5 就已經很足夠了。

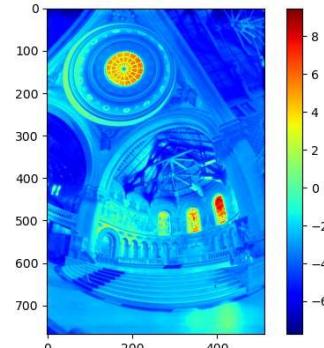
## HDR Image Reconstruction

將圖片對齊以後，就可以開始重建 CRF，接著我們就可以利用 CRF 將各個圖片所記錄的值反推回真正的能量分布。

我們這邊實作的是 Paul Debevec 的方法，其原理如同上課所述，作者也有提供程式碼，此處我們就將其 Matlab 的程式碼轉成 Python 程式碼而已。不過其中有兩個參數的設定會影響解出來的 CRF，一個是圖片中取樣的方式，一個是控制 Function 平滑與否的  $\lambda$  (對應到原文的  $\lambda$ )。對於前者，我們實作了兩種方式，分別是隨機採樣與在空間上等距採樣，而針對兩者的比較，在後面的結果與討論中有進一步的敘述。

在計算 CRF 時，對於各個圖片過亮或是過暗的像素，其資訊並沒有太多參考性 (因為超過一定的值都會被變成 0 或是 255)，因此我們要有個方法降低這些資料在計算時的權重；另外，因為我們有多張影像，在各個圖片中的同一位置所反推的 radiance 不太可能完全相同，我們也需要利用權重的方式將這些資訊整合以後輸出單一值。這裡共實作了兩種權重，分別是常數與帽子函數(值為 127 或 128 時權重最大，靠近 0 或是 255 的值其權重會線性遞減)，而針對兩者的比較同樣地在後面有進一步的敘述。

至此，我們就得到了一張 HDR 影像，但未經過 Tone Mapping 的 HDR 影像沒辦法有效地顯示，因此若我們想要了解能量分布的大致樣貌，我們可以利用假色的方式對取了 log 的 HDR 影像進行繪製。



## Tone Mapping

我們自己實做出來的 Tone Mapping 是利用 Fast Bilateral Filtering 這篇論文的概念來實作的，我們將影像通過高斯濾波器來算出低頻影像，並且利用最大最小值的差異來縮小低頻影像中的 noise，最後透過原圖扣掉低頻影像的方式來取得高頻影像。在這個演算法中，我們想要做到的是在維持高頻影像解析度的同時，保留影像顏色的相對關係，並且同時降低 noise 所造成的影響。

透過上述的方法，我們取得的影像會稍許模糊，因此我們除了考慮高斯濾波器中像素距離的因素，還需要考慮原本像素的強度。此演算法在高斯濾波器的作用範圍內再加上一項強度差異的指數項，其結果會降低強度差異大的像素對最

終像素強度的影響。

此外，由於 HDR 影像取得的是現實世界中的能量分佈，因此我們在實作 tone mapping 的時候會先算出影像的強度，並且將 R, G, B 的值除以此強度，最後經過 tone mapping 完再乘回去。從結果上來看，雖然此演算法的確有將亮部以及暗部的細節保留，但是在顏色的還原上有點差強人意。

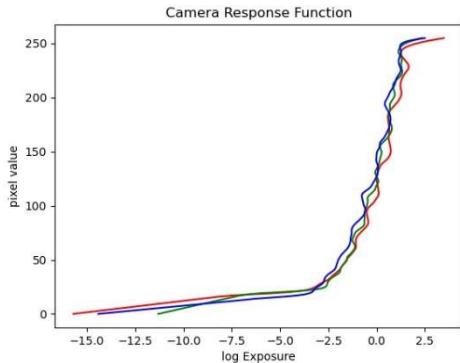
另外，我們也實作了 Reinhard 於 2005 年另外提出的演算法。其演算法主要也是透過一些經驗觀察與數學擬合的方式去貼近人類的視覺經驗，並提供了幾個比較具有解釋意義的參數去調整。

## Results and Discussion

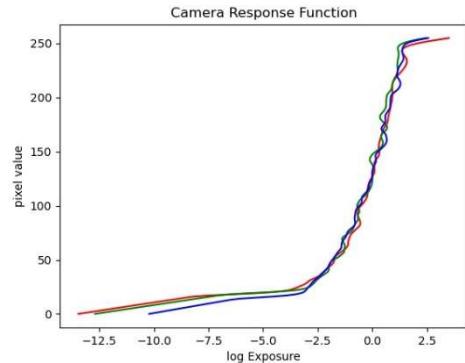
### Parameter Difference

以下我們將課程網頁提供的教堂測試圖片稱為 memorial 系列圖片；自己拍攝的圖片稱為 building 系列圖片。

#### 取樣方式差異

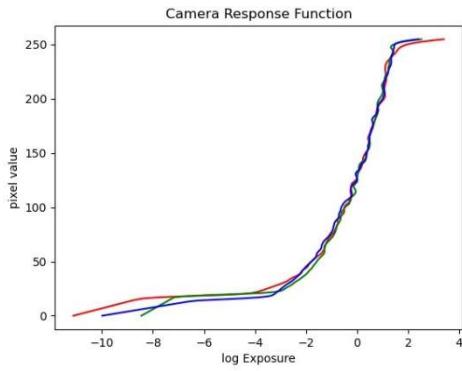


隨機採樣 10 個點

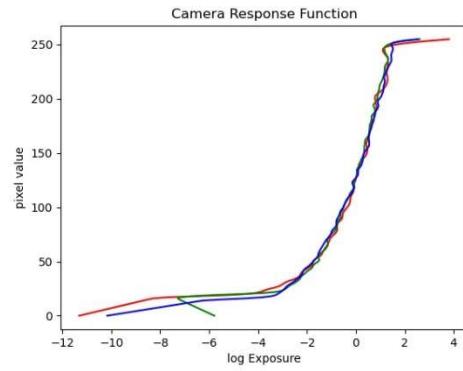


空間上等距採樣 100 個點

上圖的兩個實驗皆是在  $l = 10$  的狀況下，取 100 個點，合併 radiance 時用相同的權重計算 memorial 系列的圖片所得到的 CRF。可以看到左圖在 RGB 三個通道上的 CRF 之差異相較右圖大一點，但其實這個差距並不是很明顯。



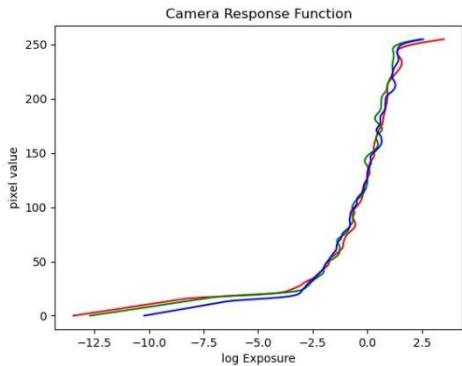
隨機採樣 500 個點



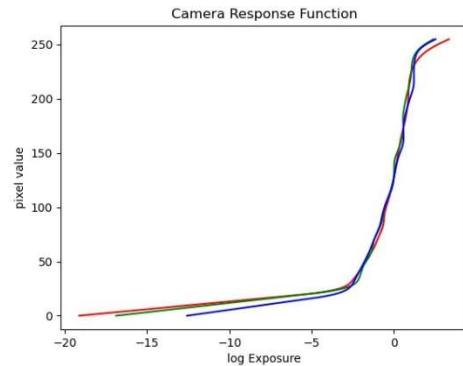
空間上等距採樣 50 個點

上圖的兩個實驗皆是在  $l = 10$  的狀況下，取 500 個點，合併 radiance 時用相同的權重計算 memorial 系列的圖片所得到的 CRF。即使將取樣點的數量增加，兩者所計算出的 CRF 其實並沒有太大的差別。因此我們認為取樣方式對於計算 CRF 並不是一個顯著的影響因素。

### Lambda 的大小差異

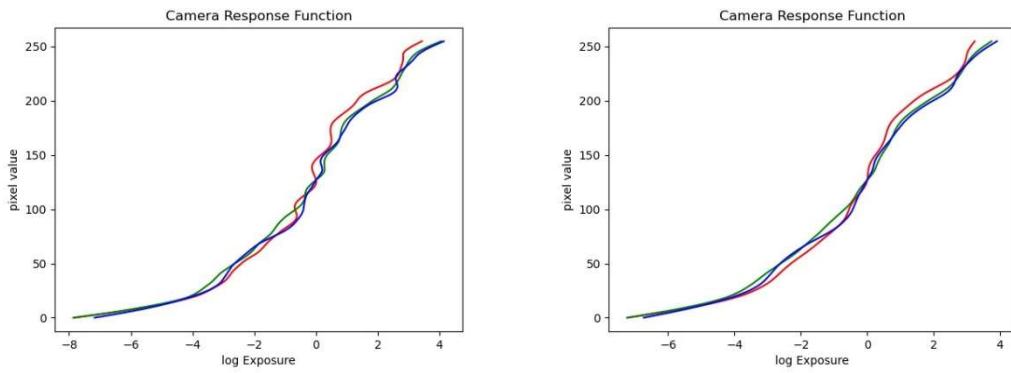


$l = 10$



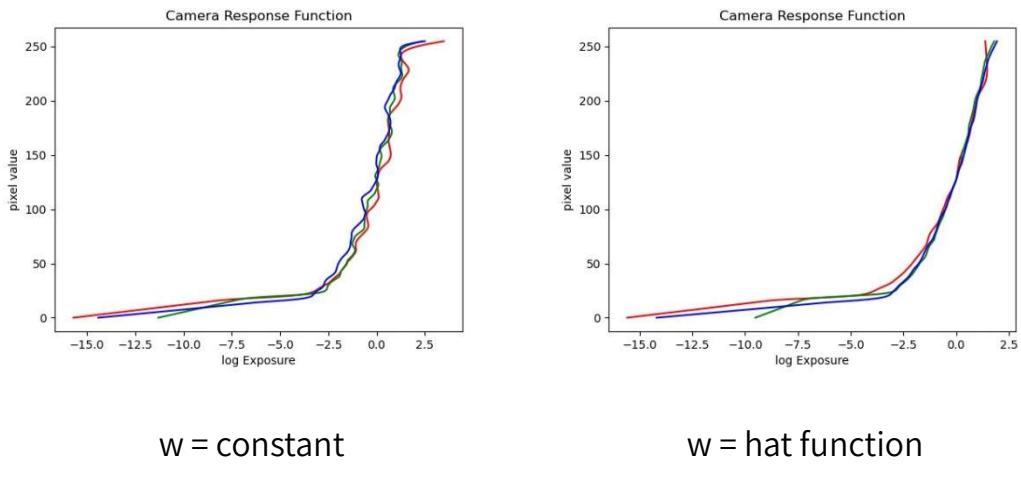
$l = 50$

上圖的兩個實驗皆是在空間上等距採樣 100 個點，合併 radiance 時用相同的權重計算 memorial 系列的圖片所得到的 CRF。可以看到，左圖當  $l = 10$  的時候，在曲線的右半部不太連續；而右圖當  $l = 50$  時，曲線的右半部就沒有太大的斷點，相對平滑許多。



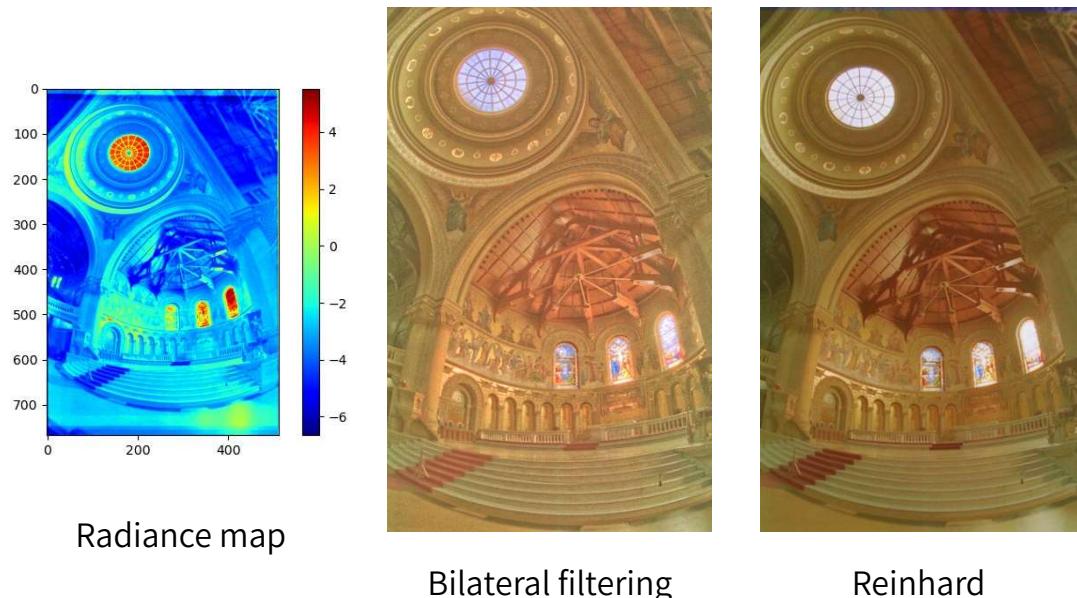
上圖的兩個實驗皆是在空間上等距採樣 100 個點，合併 radiance 時用相同的權重計算 building 系列的圖片所得到的 CRF。與上一組圖有類似的狀況，當 CRF 不太連續時，增加  $l$  的大小即可使其變平滑。故，我們可以得出 lambda 的值會明顯地影響到 CRF 的結果。

### Weighting Function 的差異

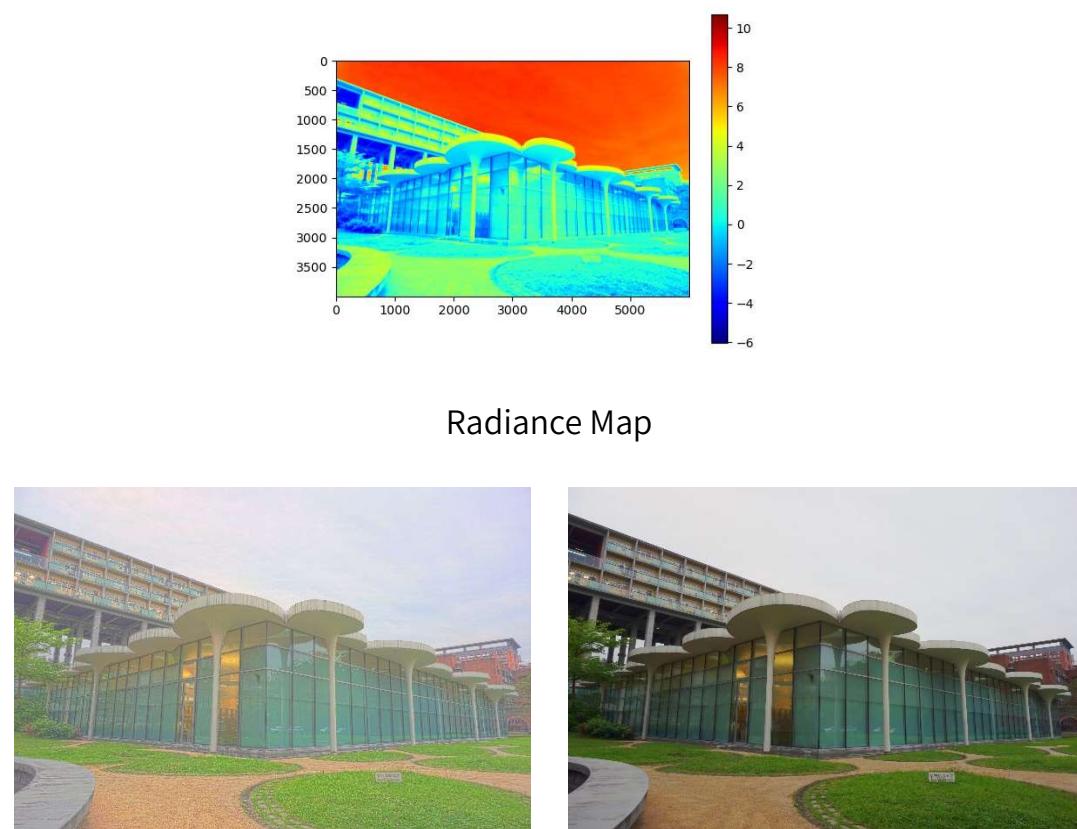


上圖的兩個實驗皆是隨機採樣 100 個點， $l = 10$  計算 memorial 系列的圖片所得到的 CRF。可以看到如左圖使用常數函數時，CRF 同樣地並不是很平滑；而換成如右圖使用帽子函數時，即使沒有更動  $l$ ，依然能夠有平滑的 CRF。可見使用帽子函數去除一些影響計算的資料，是能夠明顯地影響到 CRF 的結果。

## Result of Memorial Image



## Result of Our Image



## Reference

Ward, Greg. "Fast, robust image registration for compositing high dynamic range photographs from hand-held exposures." *Journal of graphics tools* 8.2 (2003): 17-30.

Debevec, Paul E., and Jitendra Malik. "Recovering high dynamic range radiance maps from photographs." *ACM SIGGRAPH 2008 classes*. 2008. 1-10.

Durand, Frédo, and Julie Dorsey. "Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images." *Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 2002.

Reinhard, Erik, and Kate Devlin. "Dynamic range reduction inspired by photoreceptor physiology." *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 11.1 (2005): 13-24.