

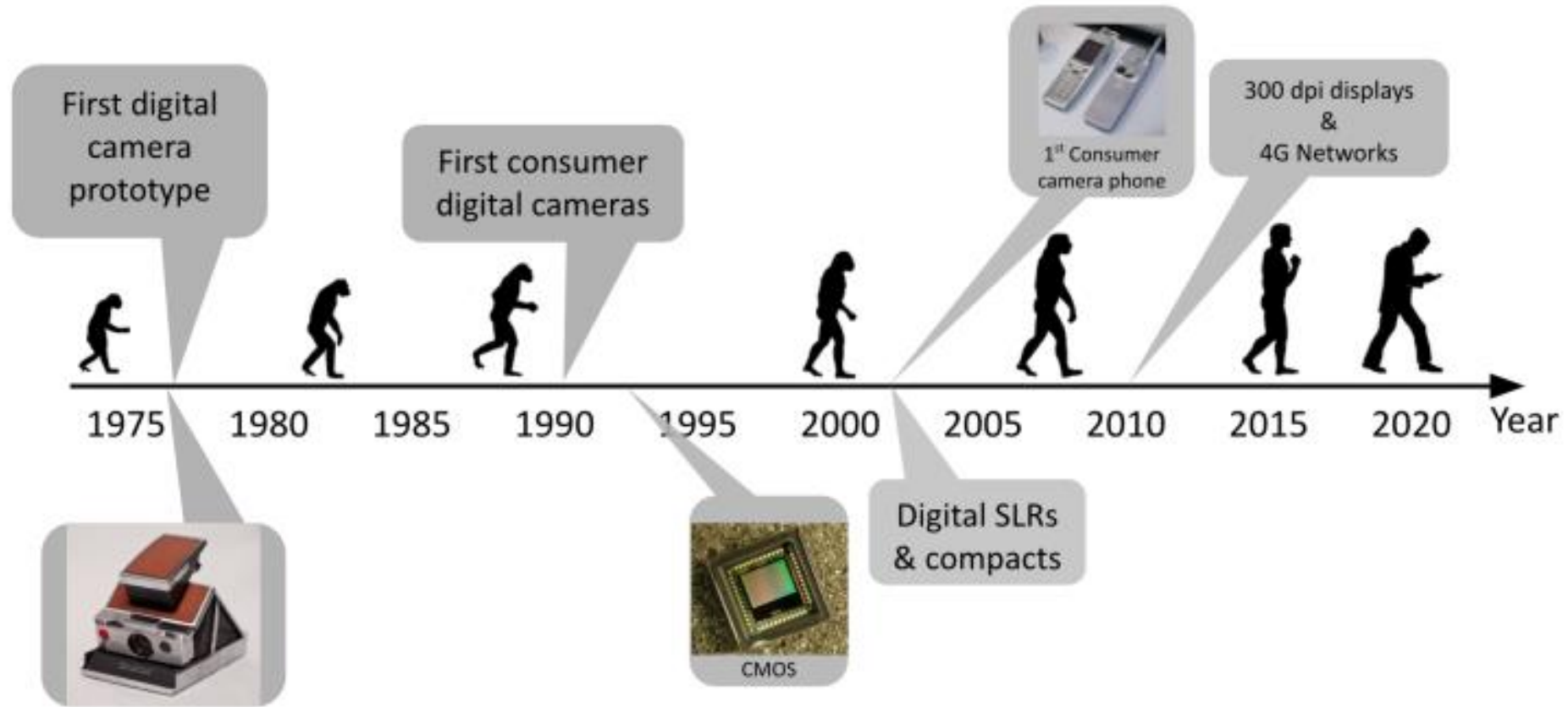
Presentation

Mobile Computational Photography: A Tour

吳柏志

報告連結: <https://youtu.be/57O2FKBWNIQ>

Introduction and historical overview



CCD V.S. CMOS

CCD

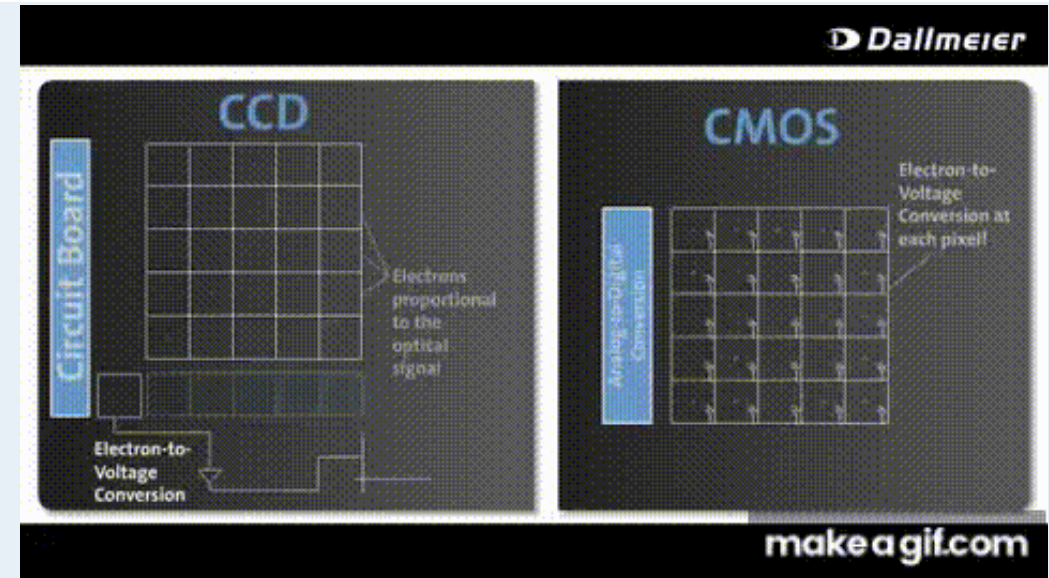
Charge-Coupled Device
電荷耦合器件

- 光子轉為電荷
- 電荷傳遞至電壓轉換器
- 電壓經由ADC轉換為訊號

成像品質好、低噪點

CMOS

Complementary Metal-Oxide Semiconductor
互補式金屬氧化物半導體



高效率、低功耗、成本低

Hardware and its Limitations

Sensor size and limited aperture

- 光感測器大小
- 光圈可否調整
- 變焦範圍
- 計算能力
- 成本花費
- 鏡頭多寡(變焦、廣角、主相機...)

Mobile phone camera

Cons

5×4 mm

Sensor



- Tiny
- 10 bit per pixel

Optics

- Limited zoom
- Fixed aperture

Pros

- + High computing power
- + Low-cost



DSLR/Mirrorless camera

Pros

36× 24 mm

Sensor



- + Large
- + 12-14 bit per pixel

Optics

- + Wide zoom range
- + Adjustable aperture

Cons

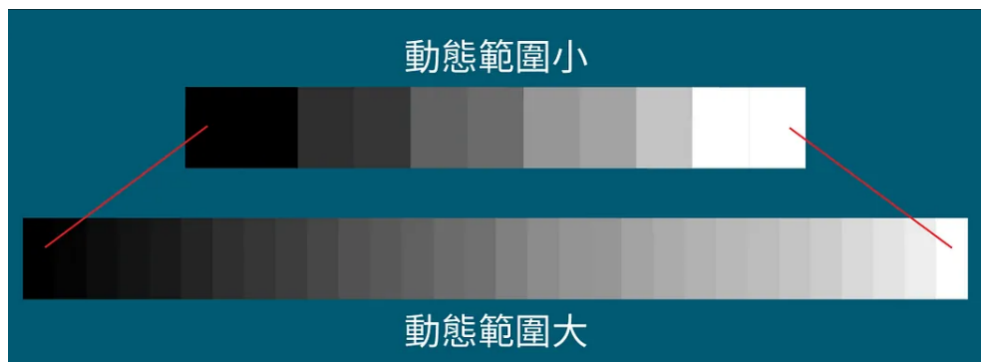
- Low computing power
- High-cost



Hardware and its Limitations

Noise and limited dynamic range

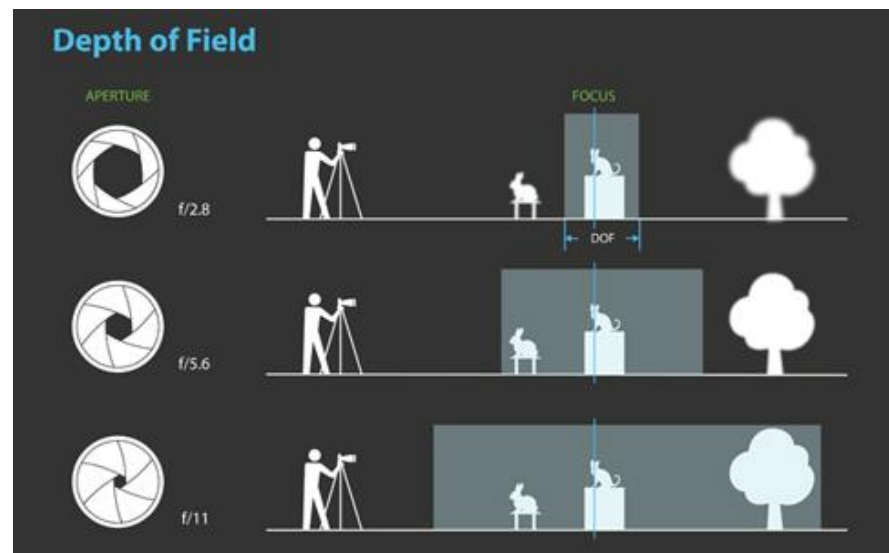
- 噪點 (Noise)：影像產生亮度或顏色的隨機不良變化
 - 電子元件發熱
 - 散粒雜訊 (photon shot noise)：吸收光子的過程中存在一定的不確定度，這種隨機性是由於光子的離散本質決定。呈現 Poisson Distribution
- ISO放大了感測器的光感度和噪點
- 動態範圍 (Dynamic Range)：光電二極體的最大容量與其噪點之比
 - 正常情況下捕捉到場景的最亮和最暗範圍
 - 數位相機和手機相機光電二極體大小差異



Hardware and its Limitations

Limited depth of field

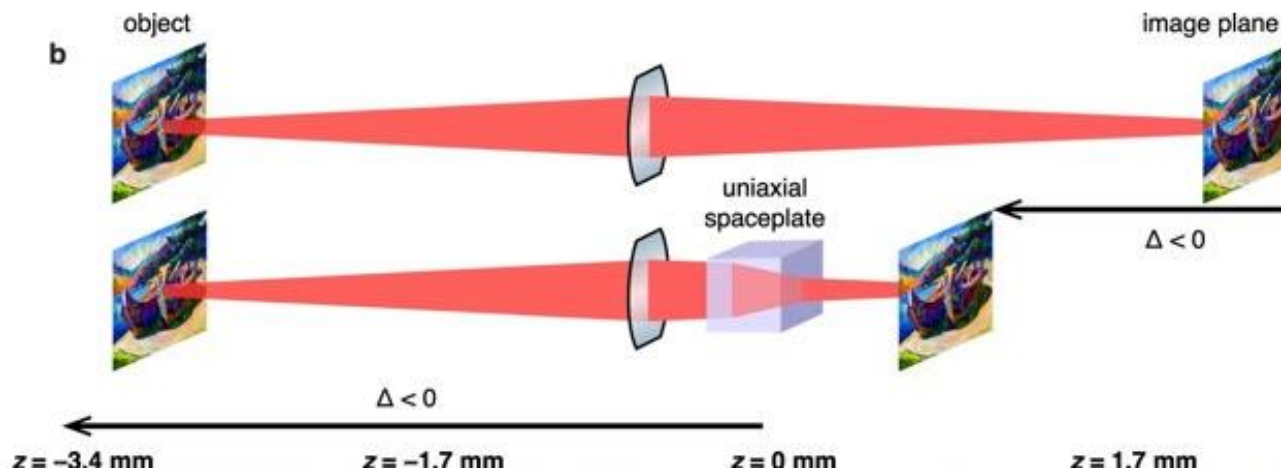
- 景深 (Depth Of Field): 相機對焦點前後相對清晰的成像範圍
- 光圈越大，景深越淺；光圈越小，景深越深
- Digital Bokeh
 - 分割出人和臉，然後使用分割結果結合模糊背景



Hardware and its Limitations

Limited zoom

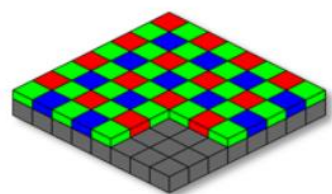
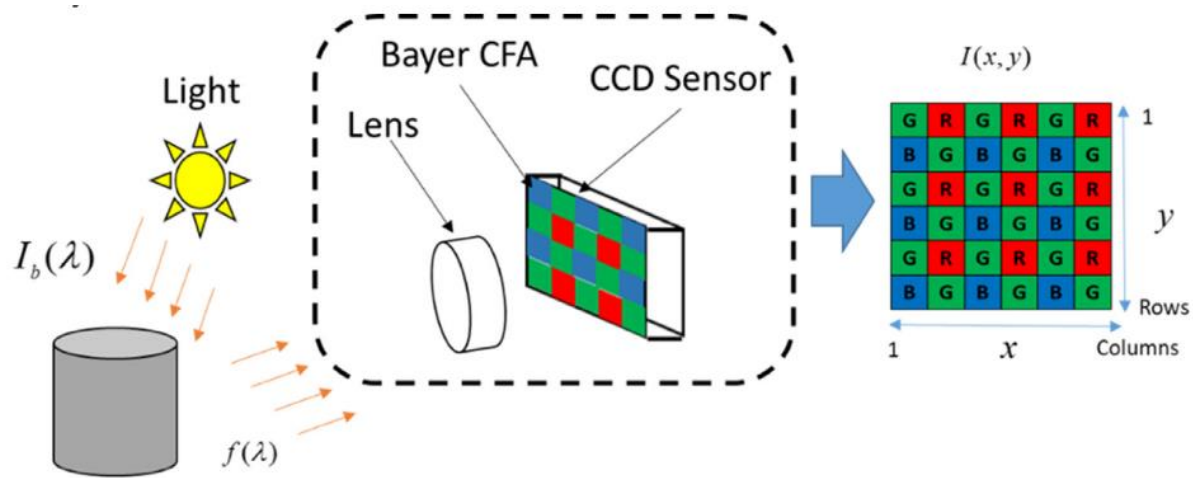
- 手機相機有厚度限制，限制了相機光學變焦能力
- 多鏡頭
- 光學摺疊
- 薄創新(Thinovation)



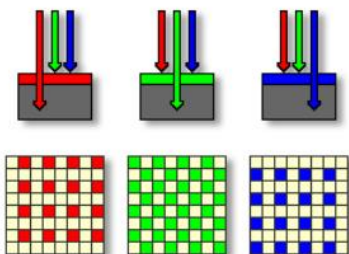
The Camera Imaging Pipeline

Camera sensor

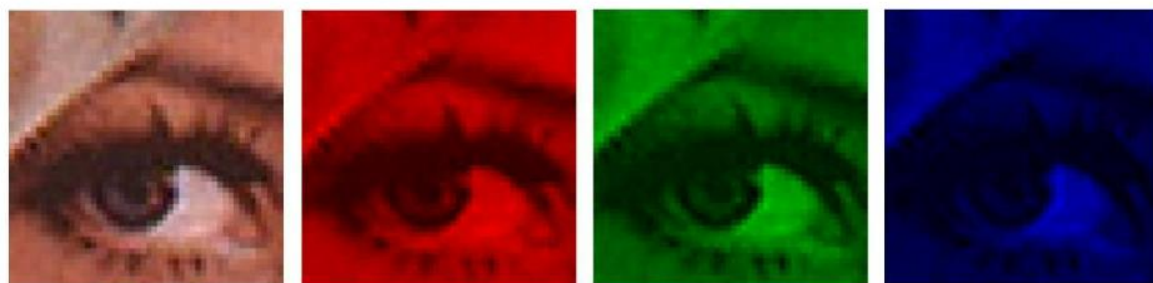
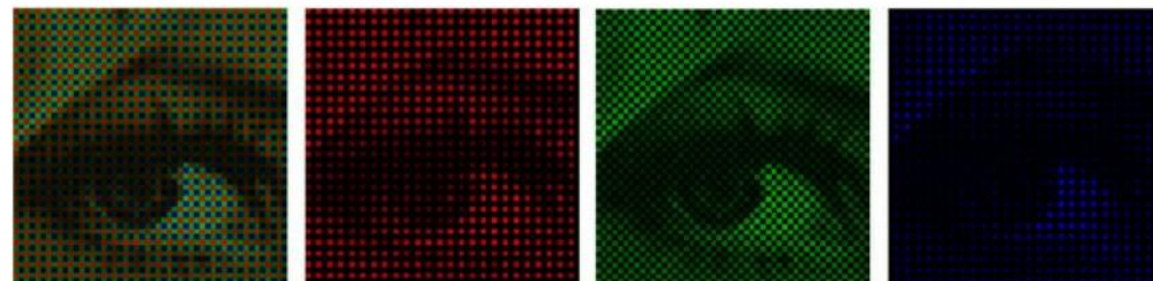
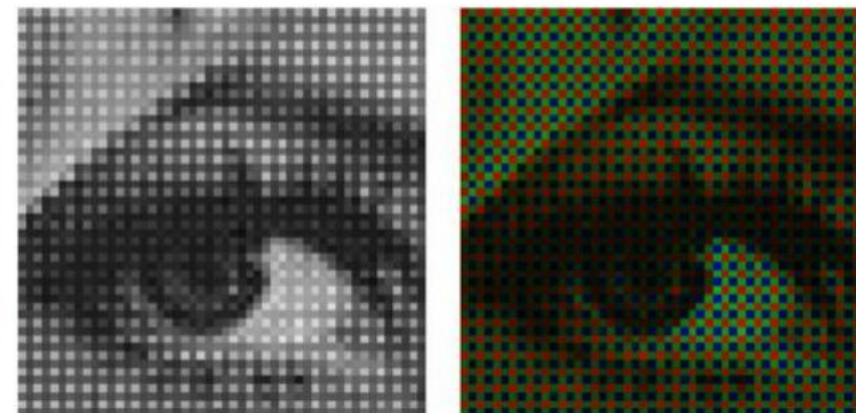
- 相機感測器由光電二極體所組成
 - 光子轉換為電荷的裝置
- 濾色片(Color Filter Array, CFA)
 - 放置在感測器上
 - Bayer Pattern: 模擬眼睛對光靈敏度的CFA排列方式
- 去馬賽克(Demosaic)
 - 將RGB合成為色彩影像



Color Filter Array Sensor



Neighboring green values



The Camera Imaging Pipeline

The camera pipeline

- ISP (image signal processor)
 - 影像訊號處理，是用來對相機感測器輸出訊號進行處理的元件
- Sensor frame acquisition
 - 當相機感測器把 Bayer Pattern 傳到 ISP，會根據場景亮度，調整所需快門速度和光圈
調整 ISO 值
 - Bayer Pattern 被視作 Raw Image
- Raw-image pre-processing
 - 感測器影像進行統一化， $\text{BlackLevel} = 0$ ， $\text{WhiteLevel} = 1$
 - 校正感測器上的任何有缺陷的像素，透過鄰近的像素進行插值
 - 均勻光線分布，透過 Lens Shading 進行處理
- Bayer demosaicing

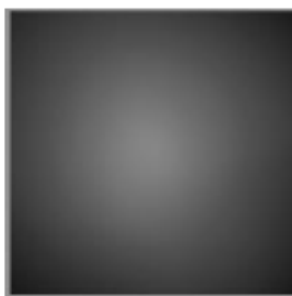


Image of a uniformly illuminated surface. The light falling on the sensor is reduced in a radial pattern.



Bayer image before lens shading correction.



Lens shading mask required to correct the radial fall-off.

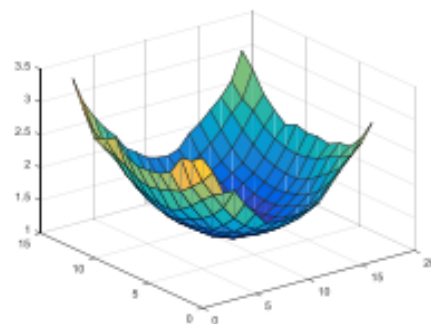
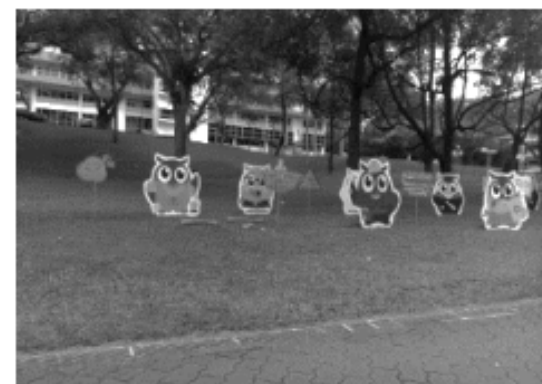


Image of a uniformly illuminated surface after lens shading correction has been applied.



Bayer image after lens shading correction.

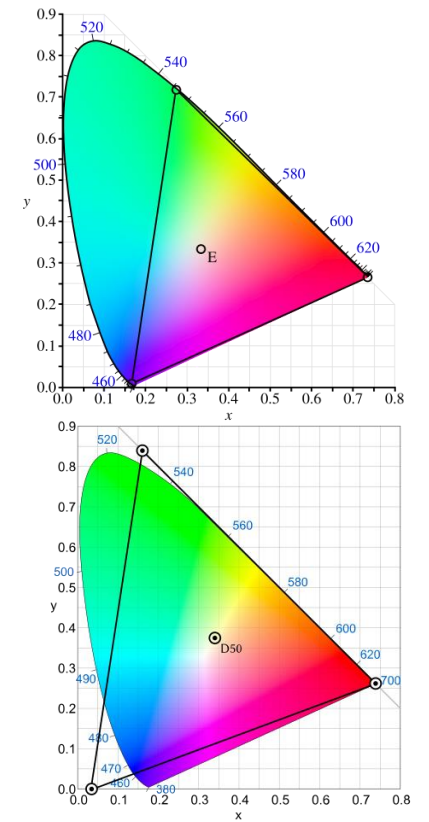
The Camera Imaging Pipeline

The camera pipeline

- White Balance
 - 將在不同環境色溫中的白色物體都還原成真正的白色
 - 原廠預設不同情況下白平衡模式，舉例: 陽光、傍晚、白熾燈泡等
 - AWB (Auto White Balance): Gray World Assumption (GWA)
- Color Space Transform
 - 感測器原本 RGB color space 為 CIE 1931 XYZ color space 的範圍
 - ProPhoto RGB color space 90% 顏色均能被表示出來

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K}{R_{acc}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K}{G_{acc}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K}{B_{acc}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

$$K = (R_{acc} + G_{acc} + B_{acc})/3$$



The Camera Imaging Pipeline

The camera pipeline



- Color Manipulation

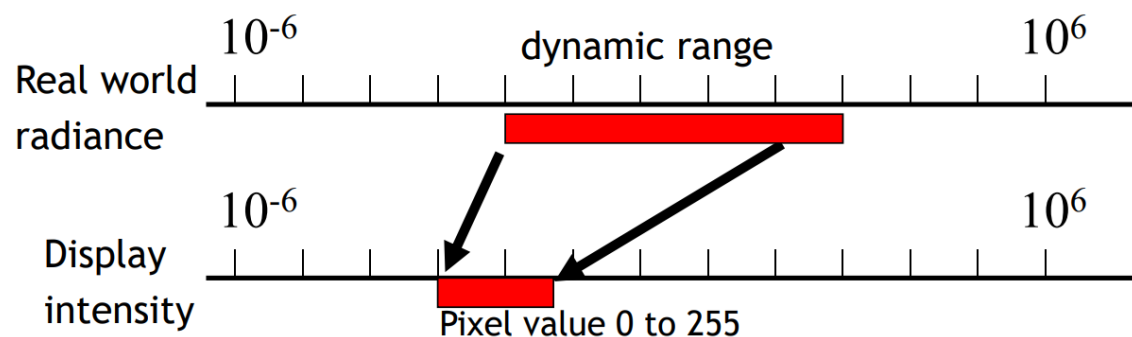
- 增強圖像的視覺美感，舉例: 鮮豔、風景、人物等
- LUT (Look-Up-Table): 一種用來將輸入數值轉換為新的對應數值的對照表
- 3D LUT: 能同時對 RGB 的數值去做轉換，舉例: 色相、飽和度等，要儲存資料較多

- Tone Mapping

- 將高動態範圍 (HDR) 的影像，調整至顯示低動態範圍 (LDR) 的設備
- 與 Color manipulation 結合，增強影像的美感
- 1D LUT: 對單一 RGB 的數值去做轉換，舉例: 亮度、對比度等，要儲存資料較少

- Noise Reduction

- 過多太過模糊；過少分散注意力
- 降噪演算法



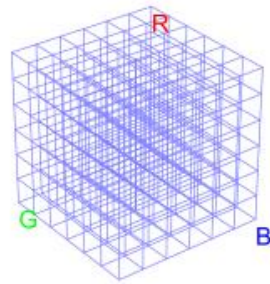
Different photo-finishing picture styles



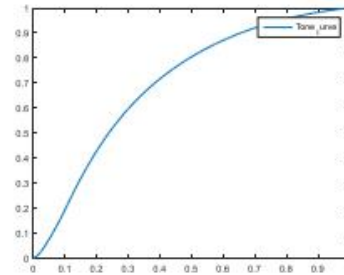
Photo-Finishing



Before photo-finishing



Color manipulation
3D LUT

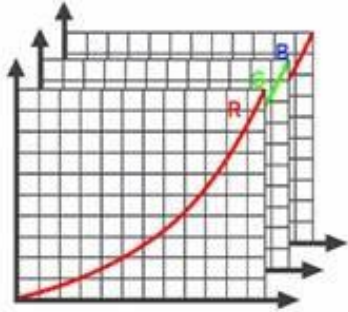
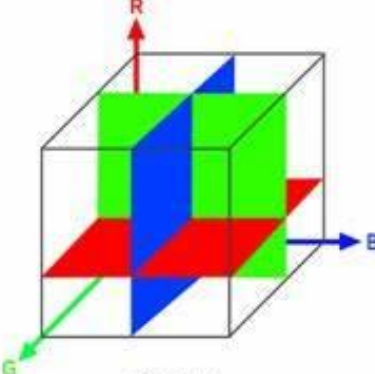


Tone manipulation
as a 1D LUT



After photo-finishing

1D LUT V.S. 3D LUT

1D LUT	3D LUT
對單一 RGB 的數值去做轉換	能同時對 RGB 的數值去做轉換
 <p data-bbox="963 1019 1054 1048">1D LUT</p>	 <p data-bbox="1462 1019 1564 1048">3D LUT</p>
亮度、對比度等	色相、飽和度等
儲存資料較少	儲存資料較多

The Camera Imaging Pipeline

The camera pipeline

- Output Color Space Conversion

- 顯示設備只能顯示有限的顏色範圍
- sRGB、AdobeRGB、Display-P3等
- 伽馬校正(Gamma correction)

- Image Resizing

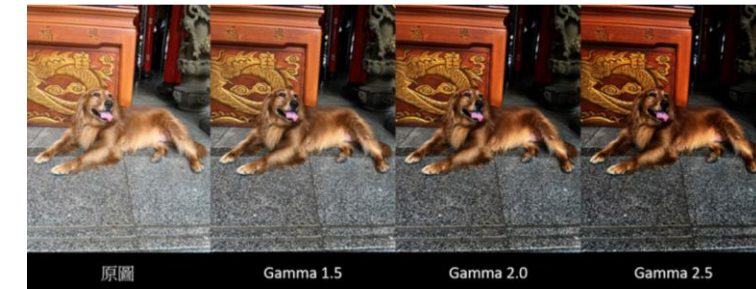
- 根據使用者偏好或設備調整影像大小
- 數位變焦 (Digital Zoom): 改變照片視野 (FOV)，放大裁剪區域獲得所需變焦倍數

- JPEG Compression And Metadata

- JPEG 格式進行壓縮並保存
- 時間、GPS 位置和曝光設定等額外資訊能被儲存為 Metadata



Figure 18: The full Super Res Zoom pipeline enhances image resolution in two distinct ways: the merge step, and single-frame upscaling step.



The Camera Imaging Pipeline

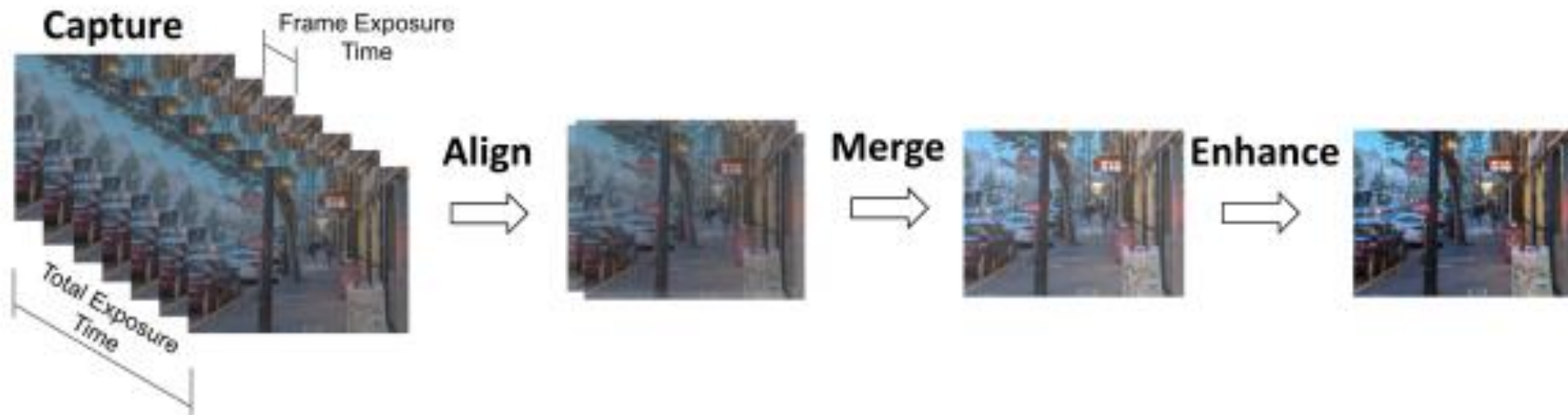
Modern multi-frame (burst) pipeline

- Burst Pipeline
 - 通過捕捉和合併多幀影像生成比單幀影像更精緻的圖片
 - Capture、Align、Merge、Enhancement
 - 零快門延遲 (ZSL)： 按下快門時，Buffer 內的影像被傳遞到相機處理區進行處理
- Exposure Control
 - 光圈、ISO、快門
 - 單幀拍攝曝光時間：使用場景中最大和最小亮度之間的差距、平均亮度等值作估算
 - 多幀拍攝曝光時間：定義一個曝光時間表，以計算輸出幀的曝光時間
 - 光學影像穩定器 (OIS)

The Camera Imaging Pipeline

Modern multi-frame (burst) pipeline

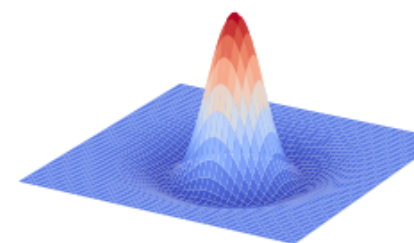
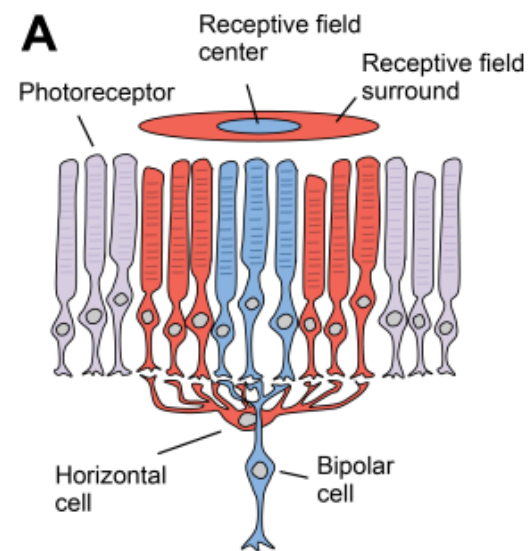
- Alignment
 - Optic flow 來解決對齊的問題，舉例: Horn and Schunck method
 - 曝光不足或低光的場景可能會導致噪點，使對齊變得困難
 - 未對齊，在場景中移動物件的邊緣可能會發生常見的錯誤
- Merge
 - HDR+: 採用多幀合併，為了減少噪點並增加動態範圍



The Camera Imaging Pipeline

Photo-finishing

- Denoising
 - Classical Gaussian filters、The bilateral filter、Non-local means、Locally adaptive regression kernel
 - 使用卷積神經網路(CNNs)進行降噪效果佳，但手機計算能力不足於應付
 - SIDD (Smartphone Image Denoising Dataset) 和 DND (Darmstadt Noise Dataset) 被相繼提出，用於訓練降噪的深度學習模型
- Tone Mapping
 - $T(r) = s$ (1D LUT)
 - Global tone mapping: 均勻套用至影像中的所有像素
 - Local tone mapping: 影像各個部分套用不同的效果
- Sharpening
 - 減少捕捉到的影像模糊，增加清晰度
 - 對焦錯誤、物體景深不同、相機與物體間產生運動等
 - $U_{unsharp} = u + \kappa(u - G \cdot \sigma \cdot u)$



Laplace operator

Lateral inhibition in Vertebrates
from (Kramer & Davenport, 2015)

The Future and Upcoming Challenges

- Deep Neural Network (DNN)
 - 較高的計算和記憶體需求
 - 消費者不能接受生成出不自然的特徵
 - DeepISP
- Neural Image Assessment
 - 針對影像內容進行詮釋
 - 尚未必然迎合個人品味