

適用於數位相機單 CCD 之影像內插演算法

張峰碩 林健和 高健恩 顏瑞穎 連志原¹

國立高雄應用科技大學電子工程系

¹E-mail: cylien@kuas.edu.tw

摘要

數位相機多以單一的感光裝置(single CCD or CMOS sensor)並搭配光學濾鏡擷取像素,再以類似馬賽克的排列方式儲存成彩色濾波矩陣(Color Filter Array, CFA),由於每個像素點只有一個色相,所以使用解馬賽克法(demosaicking)或稱彩色濾波矩陣內插法(CFA Interpolation),將缺少色相填補。

在本論文中,我們提出了一種低複雜度的解馬賽克演算法,主要藉由邊緣的特性、顏色間的關聯度和梯度方向性來重建彩色圖像。我們將重建的過程分為兩個階段,第一階段為初步的插補,得到一張 RGB 全彩圖像;第二階段為重建,將先前得到的 RGB 圖像,透過參考鄰近點方法,再重建影像。經由實驗結果得知,我們的方法較其他方法有較好的視覺品質與較佳的數據評斷(CPSNR),又因為計算複雜度較低,所以適合應用在硬體實現上。

關鍵詞: 彩色濾波陣列, 色彩插補, 解馬賽克。

Abstract

Most of the digital cameras use a single sensor (CCD or CMOS) with optical filter to capture pixels' color into Color Filter Array(CFA). In this way, each pixel only has one information of colors instead of three. The image reconstruction process is called demosaicking or CFA interpolation.

In this paper, a low complexity demosaicking algorithm is proposed. It uses the characteristic of edge, relationship among three primary colors and weight of direction to reconstruct RGB color image. In our scheme, the procedure is divided into two stages: first stage is rudimentary interpolation that we acquire a RGB color image from Single CCD. Second stage is refinement that uses the neighboring pixels to obtain a better RGB color image. The experimental results show that the proposed method performs better in terms of both quantitative evaluation and visual quality.

Keywords: Color Filter Array, Color Interpolation, Demosaicking.

1. 前言

傳統相機與數位相機的差別在於感光元件,傳

統相機使用底片上的藥水作為感光元件;數位相機則是利用電荷藕荷元件(CCD)或是互補式金屬氧化物半導體(CMOS)作為感光元件。傳統相機須將感光元件沖洗後才可以看見所拍攝的影像,並且感光元件不可重複使用;相對於數位相機卻可以立即觀看拍攝的影像,並且不需更換感光元件。兩者比較下,數位相機的便利性優於傳統相機,因此成為現今主流。

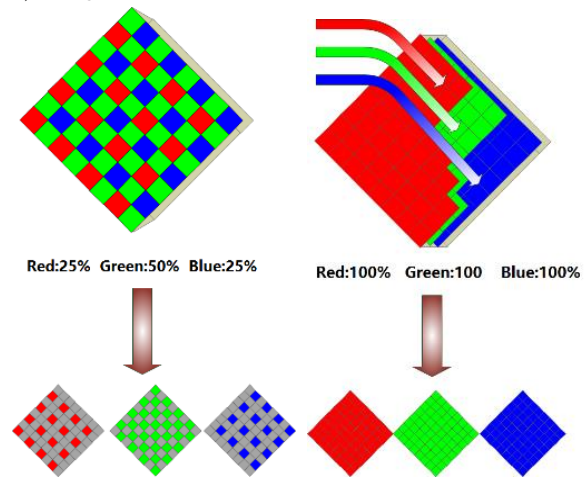


圖 1. 單層 CCD(左)與三層 CCD(右)的儲存方式

感光元件只能夠感測光源強度,因此市面上的數位相機主要有兩種架構:三層 CCD 與單層 CCD,如圖 1。在三層 CCD 的架構下,拍攝物的光源訊號會先經過鏡頭與光學濾鏡等元件,在經過三種色彩濾波器各別濾出紅色、綠色、藍色,並且將其分別存入三個 CCD 之中,如此一來,每個像素位址皆包含三種顏色的亮度資訊。但此種架構需要使用三層 CCD 儲存影像資訊,不僅成本高、耗電以及相機不易攜帶;單層 CCD 就是為了改善三層 CCD 所帶了的不便性與高價格,所以現今市面上的數位相機大多是單層 CCD 架構,此架構較適合一般消費者使用,如圖 2 為單層 CCD 的數位相機架構。

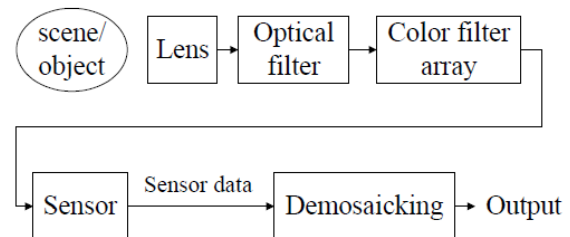


圖 2. 單層 CCD 的相機架構

由於單層 CCD 架構只有一個可感測紅色、綠色、藍色強度的感光元件，因此必須以特定的排列方式來擷取像素值，目前較常見的排列方式為 Bayer Pattern[1]，也稱為 CFA，如圖 3。其中每一個格子都代表一個像素，排列的方式是綠色與紅色交錯成一列、藍色與綠色交錯成一列。由於綠色的像素可以包含大部分的亮度，而人類的視覺對亮度變化比對色彩變化來得敏感，因此綠色像素佔整個色彩濾波器陣列二分之一的數量，其餘的由紅色與藍色像素各佔一半(四分之一)。解馬賽克的功用正是將已知的 CFA 添補成一張完整的 RGB 圖像。

至今有許多解碼賽克的方法已被提出，其中最簡單的方式為雙線性內插法(bilinear) [2]，此內插法是將相鄰的像素以平均的方式，內插在遺失的像素之中，此演算法雖然非常簡單，但沒有考慮物體邊緣以及細節，所以影像造成嚴重的失真與錯色，如圖 4 所示，左為放大後的原圖，右為放大後的重建圖，故此演算法在影像品質上無法得到令人滿意的效果。

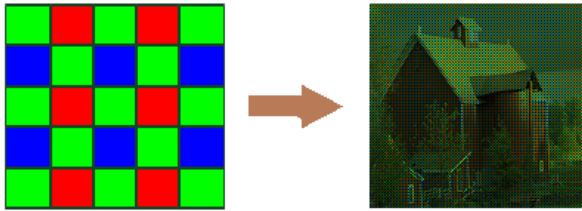


圖 3. Bayer Pattern 樣式



圖 4. 原圖(左)與重建後的圖(右)，出現失真與錯色問題

在 2003 年，S.-C. Pei 和 I.-K. Tam 提出 ECI 方法 (An Efficient Color Interpolation, ECI) [3]，此演算法利用空間域上的顏色關聯來插補，因為在類比的圖像中，所有的顏色間都會存在某種關聯，因此找尋到關聯性就可以減少不正確的彩色差值，也會有較佳的視覺效果，但此方式對於邊緣和細節還是會產生些許錯色，不過有許多的解碼塞克演算法都是此方法的延伸，在我們這次提出的方法也是用此篇改善。

此外，先前 J. F. Hamilton 和 J. E. Adams 有提出適應性的插補演算法 (Adaptive Color Plane Interpolation, ACPI)[4]，漸漸把邊緣的概念加入其中。L. Chang 和 Y.-P. Tan 提出的增強型 ECI (enhanced

ECI)[5] 演算法與 S.-C. Hsia 提出快速且高品質的插補 (Fast high-quality color-filter-array interpolation method for digital camera systems, FHQ)[6]，皆提出權重的概念插補遺失的資訊。

本論文只有針對低複雜度的方法作探討與比較，最後我們提出一個有效率且低複雜度的插補方式，本方法也提供了較佳的視覺感知。

2. 主要方法

我們將針對 Bayer pattern 的 CFA 模型實作解馬賽克方法。我們必須先定義圖像在電腦中所代表的符號。一張彩色的圖像為 $f(i, j)$ ，其長度與寬度分別為 $Height$ 與 $Width$ ，因此可以定義出以下公式：

$$f(i, j) = \begin{cases} f_R(i, j) \\ f_G(i, j) \\ f_B(i, j) \end{cases} \quad (1)$$

其中 i 會介於 $0 \sim Height - 1$ ， j 會介於 $0 \sim Width - 1$ ， $f_R(i, j)$ 、 $f_G(i, j)$ 、 $f_B(i, j)$ 代表目前紅色、綠色、藍色亮度資訊與像素位置。

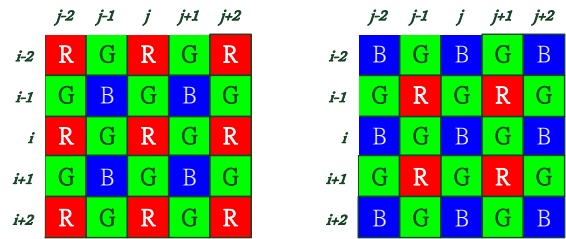


圖 5. 以 $f_R(i, j)$ 點為目標位置(左)，以 $f_B(i, j)$ 點為目標位置(右)

2.1 在 R 或 B 像素點上插補 G 像素

參考[3]與[5]，首先在 R 或 B 像素點上對 G 像素做插補為例，如圖 5-(左)，我們必須找出 R 與 G 像素間的關係 d_{GR} ，其算法如下：

$$d_{GR}(i, j) = f_G(i, j) - f_R(i, j) \quad (2)$$

接下來利用公式 2 的 G 和 R 的關係，在 R 像素上插補 R 像素 $f'_G(i, j)$ ，其公式為：

$$f'_G(i, j) = f_R(i, j) + \hat{d}_{GR}(i, j) \quad (3)$$

其中 $\hat{d}_{GR}(i, j)$ 為 $f_R(i, j)$ 像素上、下、左、右的 d_{GR} 差值，其表示式為：

$$\begin{aligned} \hat{d}_{GR}(i, j) &= \\ &= \frac{\frac{d_{GR}(i-1, j)}{4} + \frac{d_{GR}(i, j-1)}{4}}{\frac{d_{GR}(i, j+1)}{4} + \frac{d_{GR}(i+1, j)}{4}} \\ &= \frac{\sum d_{GR}(i+x, j+y)}{4}, \end{aligned} \quad (4)$$

$(x, y) \in \{(-1, 0), (0, -1), (0, 1), (1, 0)\}$

在公式 4 中，而 d_{GR} 的算法為

$$d_{GR}(i-1, j) = f_G(i-1, j) - \frac{(f_R(i-2, j) + f_R(i, j))}{2} \quad (5)$$

$$d_{GR}(i, j-1) = f_G(i, j-1) - \frac{(f_R(i, j-2) + f_R(i, j))}{2} \quad (6)$$

$$d_{GR}(i, j+1) = f_G(i, j+1) - \frac{(f_R(i, j) + f_R(i, j+2))}{2} \quad (7)$$

$$d_{GR}(i+1, j) = f_G(i+1, j) - \frac{(f_R(i, j) + f_R(i+2, j))}{2} \quad (8)$$

找出關聯後，接著我們開始考慮邊界的特性，藉此來達到更佳影像品質。我們在根據區域邊界的特性給予相對應的權重 α ，因此我們將公式 4 改良成：

$$\hat{d}_{GR}(i, j) = \frac{\frac{d_{GR}(x_1, y_1)}{1+\alpha(x_1, y_1)} + \frac{d_{GR}(x_2, y_2)}{1+\alpha(x_2, y_2)} + \frac{d_{GR}(x_3, y_3)}{1+\alpha(x_3, y_3)} + \frac{d_{GR}(x_4, y_4)}{1+\alpha(x_4, y_4)}}{\frac{1}{1+\alpha(x_1, y_1)} + \frac{1}{1+\alpha(x_2, y_2)} + \frac{1}{1+\alpha(x_3, y_3)} + \frac{1}{1+\alpha(x_4, y_4)}} \quad (9)$$

其中 x_1, y_1 表示：

$$\begin{cases} x_1 = i-1, y_1 = j-1 \\ x_2 = i+1, y_2 = j+1 \\ x_3 = i+1, y_3 = j-1 \\ x_4 = i-1, y_4 = j+1 \end{cases} \quad (10)$$

以上為 R 與 G 關聯上的插補方式，而在 B 與 G 關聯上的插補方式與 R 與 G 的相似。

2.2 在 R 或 B 像素點上插補 B 或 R 像素

如圖 5-(右)，在 B 點像素上，插補 R 像素。我們會使用以下公式做 R 像素的插補：

$$f'_R(i, j) = f_G(i, j) - \hat{d}_{GR}(i, j) \quad (11)$$

其中， $\hat{d}_{GR}(i, j)$ 的計算方式如下：

$$\begin{aligned} \hat{d}_{GR}(i, j) &= \frac{\frac{d_{GR}(i-1, j)}{4} + \frac{d_{GR}(i, j-1)}{4}}{\frac{4}{4} + \frac{4}{4}} \\ &+ \frac{\frac{d_{GR}(i, j+1)}{4} + \frac{d_{GR}(i+1, j)}{4}}{\frac{4}{4} + \frac{4}{4}} \\ &= \frac{\sum d_{GR}(i+x, j+y)}{4}, \end{aligned} \quad (12)$$

$(x, y) \in \{(-1, 0), (0, -1), (0, 1), (1, 0)\}$

在公式 12 中，我們會使用上一次插補過後的 G 像素來與這次的 R 做關聯。如圖 5-(左)，由於在 R 點像素上插補 B 的方式與公式 11、12 的方式相同，因此省略。

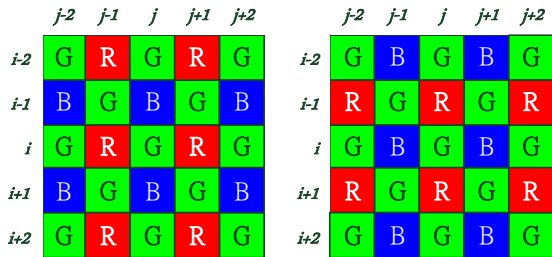


圖 6. 目標位置 $f_G(i, j)$ 像素上，插補 R、B 像素

2.3 在 G 像素點上插補 B 和 R 像素

在做完上述步驟之後我們已經有較完整的 G 平面與較豐富的 R 平面、B 平面。因此在插補的最後一個步驟，我們將會使用過去插補過後的像素來填補不完整的像素點。首先在我們在 G 像素點上插補 R，如圖 6-(左)，其公式如下：

$$f'_R(i, j) = f_G(i, j) - \hat{d}_{GR}(i, j) \quad (13)$$

其中， $\hat{d}_{GR}(i, j)$ 的運算是將過去重建過後的 G 像素與 R 像素列入，並得出一個 GR 的關聯，其公式如下：

$$\hat{d}_{GR}(i, j) = \frac{\sum \beta_{GR}(x, y) d_{GR}(i+x, j+y)}{4}, \quad (x, y) \in \{(-1, 0), (0, -1), (0, 1), (1, 0)\} \quad (14)$$

其中， d_{GR} 的關聯是建立方式會使用到先前插補過後的 R 像素； β 則是依梯度的方向所給予的權重，若垂直梯度方向若小於水平梯度方向，我們將決定垂直梯度方向的像素影響目標像素最多，水平方向我們則不考慮；若水平梯度方向小於垂直梯度方向，我們將只考慮垂直方向的像素值；然而，當垂直與水平梯度相等時，我們認為四周的像素點均會影響目標值，因此給予公平的權重。

3. RGB 平面重建

我們已經將 Bayer Pattern 的圖像轉換成一張擁有完整 RGB 平面的圖像，接著，我們為了獲得更接近原圖的圖像，因此我們將重建的概念加入解馬賽克的方法中。我們為了可以在硬體中實作，因此加入一種簡單的重建方式，來達到更佳的效果。

3.1 G 像素重建

在 R 或 B 像素上做 G 像素重建，其公式如下：

$$f''_G(i, j) = f'_R(i, j) + \hat{d}_{GR}(i, j) \quad (15)$$

$$\hat{d}_{GR}(i, j) = \frac{\sum \gamma_{GR}(x, y) d_{GR}(i+x, j+y)}{4}, \quad (x, y) \in \{(-1, 0), (0, -1), (0, 1), (1, 0)\} \quad (16)$$

因為現在所擁有的像素是完整的，所以在關聯式的建立是以下列公式建立：

$$d_{GR}(i-1, j) = f_G(i-1, j) - f'_R(i-1, j) \quad (17)$$

$$d_{GR}(i, j-1) = f_G(i, j-1) - f'_R(i, j-1) \quad (18)$$

$$d_{GR}(i, j+1) = f_G(i, j+1) - f'_R(i, j+1) \quad (19)$$

$$d_{GR}(i+1, j) = f_G(i+1, j) - f'_R(i+1, j) \quad (20)$$

接著我們計算邊緣的特性給予 γ 參數， γ 是調整 G 平面插補中 d_{GR} 的權重符號。其概念與前述的方式相同。

由算式可知，假設垂直方向的差值小於水平方向的差值時，我們就給予垂直的 $d_{GR}(i-1, j)$ 和 $d_{GR}(i+1, j)$ 較高的權重，又因為在類比的圖像中，

目標像素四周的元素皆會影響其中心點，因此我們給予水平垂直線上的參數 $d_{GR}(i, j - 1)$ 和 $d_{GR}(i, j + 1)$ 較小的權重；反之水平方向梯度值若小於垂直方向梯度，給予水平垂直線上的參數 $d_{GR}(i, j - 1)$ 和 $d_{GR}(i, j + 1)$ 較大的權重，而垂直線上的 $d_{GR}(i - 1, j)$ 和 $d_{GR}(i + 1, j)$ 即給予較低的權重。最後可能也會有垂直與水平梯度都相等的情況，為了處理此條件我們給予四周參數相同的權重值。

3.2 R 和 B 像素重建

在 G 或 R 點像素上做 B 像素重建與 G 或 B 點上做 R 像素重建，其公式為：

$$f_R''(i, j) = f_G'(i, j) - \hat{d}_{GR}(i, j) \quad (21)$$

$$\hat{d}_{GR}(i, j) = \frac{\sum \delta_{GR}(x, y) d_{GR}(i + x, j + y)}{4},$$

$$(x, y) \in \{(-1, 0), (0, -1), (0, 1), (1, 0)\} \quad (22)$$

再來加入邊緣特性，其概念如公式 14。

4. 實驗結果

在此，我們將提出的方法用在柯達(Kodak)公司提供的 24 張全彩無失真影像作為測試依據。首先我們會將這 24 張全彩影像轉換成 CCD 的原始資訊做為本方法的輸入，之後，比較我們的方法與其他的方法，如表一，證明我們的方法有較高的 CPSNR 值。

表 1. CPSNR 比較

	#1	#2	#3	#4	#5
Bilinear	26.79	33.81	32.79	34.12	27.06
ECI	34.60	39.1	40.95	40.35	35.88
EECI	36.13	40.66	41.63	40.31	36.95
ACPI	27.19	34.17	33.07	34.59	27.72
LCR	36.04	39.77	42.09	40.15	37.43
Proposed	38.79	41.68	43.81	41.98	39.18

	#6	#7	#8	#9	#10
Bilinear	28.26	33.84	24.06	32.75	32.99
ECI	35.55	40.84	31.59	39.95	40.79
EECI	36.52	41.94	34.23	41.38	41.57
ACPI	28.67	34.41	24.44	33.22	33.53
LCR	37.41	41.88	34.22	42.37	43.06
Proposed	39.95	42.96	36.45	43.80	44.40

	#11	#12	#13	#14	#15
Bilinear	29.58	33.81	24.37	29.58	33.72
ECI	36.79	40.66	32.02	35.89	39.89
EECI	37.90	40.61	32.23	37.24	39.54
ACPI	30.05	34.21	24.88	30.07	34.15
LCR	38.45	42.49	33.11	37.00	40.24
Proposed	40.52	44.07	36.29	37.81	41.50

	#16	#17	#18	#19	#20
Bilinear	31.71	32.41	28.92	28.55	32.04
ECI	38.64	39.67	36.36	35.76	39.10
EECI	39.79	39.98	36.78	38.70	40.31
ACPI	32.07	32.95	29.42	28.94	32.56
LCR	40.60	41.76	37.02	38.43	41.40
Proposed	42.83	43.74	39.28	40.32	43.22

	#21	#22	#23	#24
Bilinear	29.00	30.81	29.78	27.45
ECI	36.33	36.9	41.90	34.35
EECI	37.31	37.80	42.40	34.10
ACPI	29.47	31.26	29.92	27.88
LCR	37.96	38.72	42.87	35.97
Proposed	40.26	40.07	43.73	37.89

5. 結論

解馬賽克演算法在數位相機中是非常重要的，本論文提出一個簡單又具低複雜度的演算法，主要藉由顏色間的關聯和邊緣與影像的重複重建來處理。由實驗結果得知，我們的方法較其他方法有較好的視覺品質與較佳的數據評斷(CPSNR)，又因為是使用低運算複雜度，所以未來也可以應用在硬體實現上。

參考文獻

- [1] B. E. Bayer, "Color imaging array," U.S. Patent No. 3 971 065, to Eastman Kodak Company, Rochester, NY 1976.
- [2] R. Ramanath, W.E. Snyder, G.L. Bilbro, and W.A. Sander III, "Demosaicking methods for Bayer color arrays," J. Electron. Imaging, vol. 11, no. 3, pp. 306-315, July 2002.
- [3] S.-C. Pei and I.-K. Tam, "Effective color interpolation in CCD color filter arrays using signal correlation," IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., vol. 13, no. 6, pp. 503-513, June 2003.
- [4] J. F. Hamilton and J. E. Adams, "Adaptive color plane interpolation in single sensor color electronic camera," U.S. Patent 5 629 734, 1997.
- [5] L. Chang and Y.-P. Tan, "Effective use of Spatial and Spectral Correlations for Color Filter Array Demosaicking," IEEE Trans. Consumer Electronics, vol. 50, no. 1, pp. 355-365, Feb. 2004
- [6] S.-C. Hsia, "Fast high-quality color-filter-array interpolation method for digital camera systems," J. Electron. Imaging, vol. 13, no. 1, pp. 244-250, Jan. 2004.
- [7] Rastislav Lukac, Karl Martin and Konstantinos N. Plataniotis, "Demosaicked image postprocessing using local color ratios," IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 14, no. 6, pp.914-920, June 2004