

文章编号:1007-2780(2016)02-0179-06

低复杂度 Bayer 图像色彩重建算法

徐少雄^{1,2*}, 张 宇¹, 陈长征¹, 任建岳¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对 Bayer 图像色彩重建效果越好的算法需要越多计算量, 占用越多硬件资源问题, 提出了一种低复杂度的色彩重建算法。首先使用 Hamilton-Adam (H-A) 算法对 Bayer 图像进行预插值并求出色差通道, 接着通过求出 5×5 模板内判断插值方向的综合梯度因子, 重新更新 G 通道缺失像元值, 最后利用已重建的 G 通道求出缺失的 R 和 B 通道颜色。柯达测试图仿真结果表明, 相对于其他算法, 所提出的算法在 PSNR 上有较大优势; 相机输出图像的色彩重建结果表明, 本文算法在判断插值方向上的准确率更高; 可抑制其他算法插值后出现的斑点现象, 图像边缘清晰、完整。平均每个像元, 本文算法只需要 56 次算数运算, 不需要乘法和除法运算, 减轻了 FPGA 算法实现中 IP 核的负担, 易于硬件实现, 完全满足项目需要。

关 键 词:色彩重建; 低复杂度; Bayer 图样; 色差通道

中图分类号:TP274 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163102.0179

Low complexity demosaicing algorithm for Bayer pattern image

XU Shao-xiong^{1,2*}, ZHANG Yu¹, CHEN Chang-zheng¹, REN Jian-yue¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049, China*)

Abstract: Algorithms that have better performance also need more arithmetic operations. As a result, they will consume more hardware sources. In this paper, a new algorithm which has low complexity is proposed. Bayer pattern image is pre-interpolated by using Hamilton-Adam (H-A) algorithm firstly. Then the color-difference channel (CDC) and a direction factor (DF) in a 5×5 template are evaluated. Green channel is updated by using CDC and DF. R and B channel is evaluated via interpolated G channel. Simulation by Kodak test images shows that the algorithm has high PSNR. Experimental results also show that the algorithm not only maintains the sharp edges but also suppresses the speckle phenomenon which will be induced by VCD and MSG algorithm. Moreover, the algorithm just needs 56 arithmetic operations per pixel and can be accomplished via FPGA while MUL (multiplication) and DIV (division) are not needed. As a result, the proposed algorithm eases the burden of IP core in FPGA accomplishment and it's easy to be accomplished. The algo-

收稿日期:2015-04-03; **修订日期:**2015-05-18.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 863-2-5-1-13B)

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (No. 863-2-5-1-13B)

* 通信联系人, E-mail: hitxsx@163.com

rithm satisfies the needs for our camera.

Key words: demosaicing; low complexity; Bayer pattern; color-difference channel

1 引 言

成像系统通过表面覆盖 Bayer 型彩色滤波阵列(CFA)的 CCD 对像面进行采样,输出 Bayer 图像。由于图像中每个像元只含三基色(RGB)中的一种颜色信息,需要通过插值算法的插值以重建缺失的颜色信息。通常情况下,重建效果越好的插值算法运算量越大,硬件资源需求越大。如何在保证重建效果的情况下,使硬件资源占用最小,是实际存在的问题,也是重建算法研究的一个重点,具有现实意义^[1]。

一般的重建法直接在 RGB 空间进行,如双线性插值(BI)、边缘及色差权重法(WEDC)^[2]、迭代投影法(AP)^[3]、集成梯度法(IGD)^[4]、色差方差插值法(VCD)^[5]、多范围梯度法(MSG)^[6]、色差空间迭代插值法^[7]等。部分插值算法在其他颜色空间中进行,如在 Lab 空间定义颜色领域进行插值的自适应颜色相似法^[8]、YCbCr 空间的插值法^[9]。转换

颜色空间和迭代插值需要较多的硬件资源,直接在 RGB 空间进行的非迭代插值方法的研究现实意义更大。本文算法首先利用 H-A 算法对缺失的 G 通道进行预插值并求出出色差通道,然后求出方向判断准确率较高的综合梯度因子,并以此判断插值方向,以单方向插值的方法重新求出 G 通道,最后利用 G 通道求出其他两种颜色通道缺失的颜色信息。文中最后通过仿真和外场成像图像的色彩重建结果,在 PSNR、外场图像色彩重建效果和算法复杂性上,与所列举算法进行了对比。

2 Bayer 图像插值算法

2.1 实验成像图像

图 1(a)及图 1(b)所示为实验室研制的两款基于 FPGA 驱动的小型彩色相机,其光学系统焦距分别为 6.5 mm 和 60 mm。相机输出为 Bayer 图样的图像,Bayer 图样如图 1(c)所示。图 1(d)、图 1(e)分别为图 1(a)及图 1(b)相机输出的 Bayer 图像。

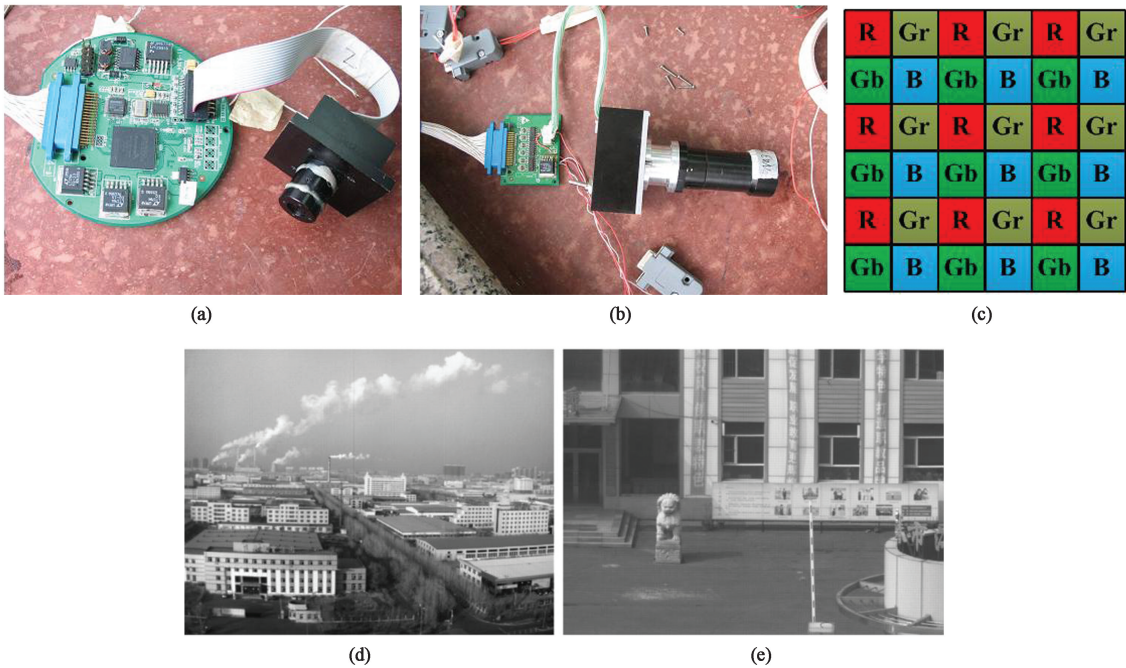


图 1 CCD 相机及其成像图像。(a)和(b):6.5mm 焦距相机和 60mm 焦距相机;(c)Bayer 图样;(d)和(e):相机 (a)、(b)的输出图。

Fig. 1 CCD cameras and acquired images. (a) and (b) are CCD cameras with 6.5 mm and 60 mm focal length; (c) Bayer pattern, (d) and (e) are acquired from cameras in (a) and (b) respectively.

2.2 文中算法

彩色插值算法中,插值方向选择错误导致的插值颜色比由插值算法带来的误差更明显,因为前者往往和周围颜色在颜色空间中的位置相差甚远,导致图像失真严重。插值方向判断准确率越高的插值算法,其重建效果越好。

本文的插值算法首先通过插值预求出色差通道,接着通过求出待插值周围 5×5 模板内判断插值方向的综合梯度因子,通过综合梯度因子判断插值方向,最后利用预先插值出的色差值在插值方向上插值出新的色差值,用以更新 G 通道。算法最后通过已求出的 G 通道,对缺失的 R 和 B 进行插值。

2.2.1 G 通道插值

H-A 插值法同时利用 G 通道和 R 通道求解缺失的 G 通道,重建效果较好^[5,10]。然而其插值方向判断的准确率略显不足,可利用 H-A 算法预求出其水平和垂直方向上的 G 值,作为后续计算的基础:

$$\begin{cases} \tilde{G}^H(i, j) = [G(i, j-1) + G(i, j+1)]/2 + \\ [2X(i, j) - X(i, j-2) - X(i, j+2)]/4 \\ \tilde{G}^V(i, j) = [G(i-1, j) + G(i+1, j)]/2 + \\ [2X(i, j) - X(i-2, j) - X(i+2, j)]/4 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: X 可以是 R 或 B。式(1)预求出了缺失绿色值在水平和垂直方向上的估计值。则在 $R(B)$ 上,水平和垂直两个方向上的色差通道值,可用式(2)表示:

$$\begin{cases} \tilde{\Delta}_{g,x}^H(i, j) = \tilde{G}^H(i, j) - X(i, j) \\ \tilde{\Delta}_{g,x}^V(i, j) = \tilde{G}^V(i, j) - X(i, j) \end{cases}, \quad (2)$$

其中: X 可以是 R 或 B。式(2)不要求出 G 上的色差值。设 Bayer 图像为 $F(i, j)$, 在像元 (i, j) 处,水平及垂直方向的梯度因子 D^H 和 D^V 用式(3)求出,是判断插值方向的基本要素。

$$\begin{cases} D^H(i, j) = | [F(i, j+1) - F(i, j-1)]/2 - \\ [F(i, j+2) - F(i, j-2)]/4 | \\ D^V(i, j) = | [F(i+1, j) - F(i-1, j)]/2 - \\ [F(i+2, j) - F(i-2, j)]/4 | \end{cases}, \quad (3)$$

式(3)将位置更远的像元 $(F(i \pm 2, j \pm 2))$, 通过归一化系数加入考虑范围,可增加梯度因子的准确率。但是梯度因子只与 $F(i, j)$ 相邻的 4 个

像元值有关,因此,只通过 D^H 和 D^V 判断边缘及插值方向的准确率并不高,为更好评估某点的插值方向,引入 $F(i, j)$ 点周围 5×5 窗口的综合梯度因子 ω_H 和 ω_V :

$$\begin{cases} \omega_V(i, j) = \sum_{k=i-2}^{i+2} \sum_{l=j-2}^{j+2} D^V(k, l) \\ \omega_H(i, j) = \sum_{k=i-2}^{i+2} \sum_{l=j-2}^{j+2} D^H(k, l) \end{cases}, \quad (4)$$

综合梯度因子以插值周围 25 个梯度因子的和作为新的插值方向判断因子,减小只通过单个梯度因子判断插值方向的局限性,增加插值方向判断的准确率。式(4)中的 ω_H 和 ω_V 只用于判断插值方向,而不以加权因子的方式求色差值,避免了与插值方向无关的色差值加入到色差通道,外场成像图像的色彩重建也证实这种方法的可行性及优越性。求出综合梯度因子后,使用单方向加权方法求出 R 上新的色差通道值。即当 $\omega_H(i, j) \leq \omega_V(i, j)$:

$$\begin{aligned} \tilde{\Delta}_{g,x}(i, j) &= [\tilde{\Delta}_{g,x}^H(i, j-2) + \\ & 2\tilde{\Delta}_{g,x}^H(i, j) + \tilde{\Delta}_{g,x}^H(i, j+2)]/4, \end{aligned} \quad (5)$$

当 $\omega_H(i, j) > \omega_V(i, j)$:

$$\begin{aligned} \tilde{\Delta}_{g,x}(i, j) &= [\tilde{\Delta}_{g,x}^V(i-2, j) + \\ & 2\tilde{\Delta}_{g,x}^V(i, j) + \tilde{\Delta}_{g,x}^V(i+2, j)]/4, \end{aligned} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中的 X 可以是 R 或 B。采取

相隔一个插值点的色差值求 $\tilde{\Delta}_{g,x}$, 减小了色差通道的计算量。缺失的 G 值的最终插值用式(7)表示:

$$\tilde{G}(i, j) = R(i, j) + \tilde{\Delta}_{g,x}(i, j). \quad (7)$$

2.2.2 R 和 B 通道插值

R 和 B 通道缺失的颜色值通过已求出的绿色通道值插值得出。首先插值 R 上缺失的颜色 B 和 B 上缺失的颜色 R。算法的硬件实现中,缓存图像行数过多会占用较多的片上 RAM 资源。因此,利用 VCD 算法里具有抑制噪声的功能的模板 Prb 求解 R 和 B 的值^[4],模版只需要缓存的 3 行图像数据。

$$\begin{cases} \text{Prb} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{4} \\ \tilde{R}_{i,j} = \tilde{G}_{i,j} - \tilde{\Delta}_{g,r} \otimes \text{Prb} \\ \tilde{B}_{i,j} = \tilde{G}_{i,j} - \tilde{\Delta}_{g,b} \otimes \text{Prb} \end{cases}, \quad (8)$$

⊗表示相应位置相乘并求和。式(8)的优点是可以只通过加法器及移位完成。

绿色值上缺失的 R 颜色值可通过该绿色值和 R 通道和 G 通道的差求出,如式(9)所示。

$$\begin{cases} \tilde{R}_{i,j} = G_{i,j} + (R_{i,j-1} - \tilde{G}_{i,j-1} - R_{i,j+1} - \tilde{G}_{i,j+1})/2, \\ \tilde{R}_{i,j} = G_{i,j} + (R_{i-1,j} - \tilde{G}_{i-1,j} - R_{i+1,j} - \tilde{G}_{i+1,j})/2 \end{cases},$$

(9)

B 颜色通道求法类似。Bayer 图像所有缺失的颜色信息都已通过插值完成。

3 仿真及实验结果对比

3.1 算法仿真

图 2 为 6 幅柯达测试图,用以测试插值算法。



图 2 6 幅柯达测试图
Fig. 2 6- image Kodak test set

仿真中采用 PSNR 评价色彩重建图像与原图的差别^[1-6]。表 1 所示的是所选取的 5 种算法和本文算法在重建图 2 中的测试图上,PSNR 的对比。

表 1 不同插值算法的 PSNR 对比

Tab.1 PSNR performance of various algorithms						
Pic	WEDC	AP	IGD	VCD	MSG	Prop
a	39.65	41.63	43.42	42.71	43.72	42.69
b	36.2	40.16	40.68	40.62	41.13	41.14
c	38.34	41.84	42.7	42.26	43.51	42.52
d	36.35	39.43	39.92	39.84	40.3	40.31
e	35.25	39.53	41.84	41.03	42.17	41.04
f	32.35	34.74	35.36	35.15	35.69	34.75

可以看出,色彩重建后,MSG 算法的 PSNR 在六种算法中最高,本文的算法在图 2(b)及图 2(d)的色彩重建上有少许的优势。图 3 列出了不同算法在图 2 中的灯塔图恢复中的细节效果。

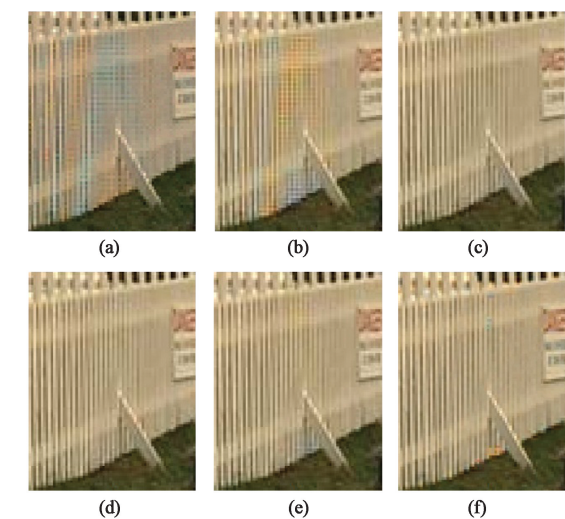


图 3 不同算法的效果对比。(a) WEDC[2],(b) AP [3],(c)IGD[4],(d)VCD[5],(e)MSG[6],(f) 本文算法。

Fig. 3 Details of the demosaicing results. (a) WEDC[2], (b) AP[3], (c) IGD[4], (d) VCD[5], (e) MSG[6]and (f) Prop.

图 3 显示,本文算法在插值方向上的预测上具有较高的成功率,栅栏的伪彩色较图 3(a)和图 3(b)有较大的改善。IGD、VCD、MSG 和本文算法都具有较好的色彩重建效果。

对于 2×2 窗口的 Bayer 图像,表 2 列出了 4 种算法的复杂度情况,以比较不同算法的运算量。其中 WEDC 及 AP 运用了迭代的方法,运算量不确定,不列入比较表格。

表 2 不同插值算法复杂度对比

Tab.2 Computational complexity of various algorithms				
	IGD	VCD	MSG	Prop
ADD	180	340	348	176
MUL	60	144	100	0
SHT	36	30	44	38
ABS	32	16	8	8
DIV	20	16	22	0
CMP	4	8	0	2
Total	332	554	522	224

表 2 表明,本文算法的计算量最小,2×2 窗口的 Bayer 图像重建算法只需要 224 次数学运算,平均每个像素只需要 56 次算数运算,仅为 MSG 的 42.9%,算法易于硬件实现。值得注意的是,本文算法不需要乘法和除法,可通过移位完成相关操作,减轻了硬件实现过程中,FPGA 的

IP 核负担。

3.2 外场成像图像色彩重建对比与讨论

使用双线性、VCD、MSG 和本文算法对微小相机输出的 Bayer 图像进行插值。由于没有计算 PSNR 所需的原始图像信息,本文采用插值后图像细节部分对比,以比较各算法的插值效果。

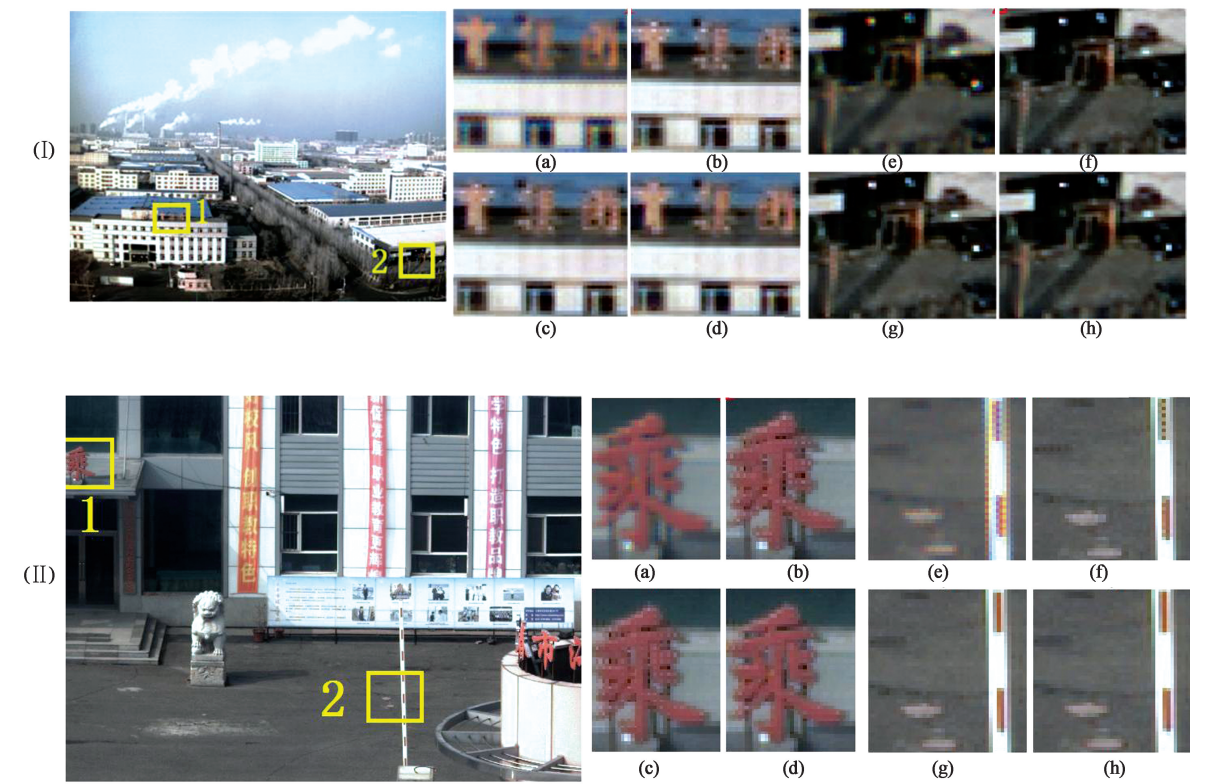


图 4 不同算法插值效果图:(I)图 1d 色彩重建:(a)和(e)双线性,(b)和(f)VCD[5],(c)和(g)MSG[6],(d)和(h)本文算法。(II)图 1e 色彩重建:(a)和(e)为双线性,(b)和(f)为 VCD[5],(c)和(g)为 MSG[6],(d)和(h)本文算法。

Fig. 4 Results of different methods: (I) Results of Fig. 1d: (a) & (e) BL. (b) & (f) VCD[5]. (c) & (g) MSG[6]. (d) & (h) Prop. (II) Results of Fig. 1e: (a) & (e) Bilinear. (b) & (f) VCD[5]. (c) & (g) MSG[6]. (d) & (h) Prop.

双线性插值算法的边缘保持能力差,出现拉链效应及模糊。VCD、MSG 和本文的方法可较好地保持图像轮廓,重建细节效果较好。由于 MSG 算法在重建 G 通道上,采用了加权法同时引入了水平和垂直两个方向的插值,插值偏离理想值较多而出现斑点现象。从(1)图及(2)图中(a)~(d)子图的色彩重建可以看出,VCD 的斑点现象最严重,其次是 MSG 算法,这些斑点现象同时也存在于图像的其他地

方。本文算法存在的斑点现象则较轻,说明本文算法的插值误差较小。(2)图中(e)~(f)子图表明,VCD 算法在插值方向上有判断错误,而 MSG 及本文算法未发生判断错误,说明基于综合梯度因子判断图像边缘的准确率高于 VCD 算法采用的色差方差判断法。实验结果显示,本文方法在保持轮廓边缘,体现物体细节的同时,斑点现象得到较好的抑制,体现了本文算法的优越性。

4 结 论

提出了一种基于色差通道的低复杂度色彩重建算法,该算法使用综合梯度因子判断插值方向,采用单方向插值的方法重建 G 通道再利用重建的 G 通道重建 R 和 B 通道。柯达测试图仿真表明,所提出算法在 PSNR 上有一定的优

势,并且在实验成像图像的色彩重建结果中,减轻了 VCD 及 MSG 算法出现的斑点现象,插值误差更小。在算法复杂度上,所提出的算法平均一个像元只使用了 56 次数学运算,不需要乘法和除法,提升了计算效率,减小了硬件实现中硬件资源的消耗。结果表明,算法在保证了 Bayer 图像色彩重建质量的情况下,易于硬件实现,具有现实意义。

参 考 文 献:

- [1] 李华,朱波. 基于 FPGA 的彩色图像实时采集系统设计[J]. 液晶与显示, 2014, 29(2): 258-265.
LI H, ZHU B. Design of real-time color image acquisition system based on FPGA [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(2): 258-265. (in Chinese)
- [2] BU F, QIAO W D, QIU Y H, *et al.* A novel weighted edge-directed and weighted-color-difference interpolation for demosaicking bayer-pattern color images [J]. *Jour of Information & Computational Science*, 2012, 9(7): 1781-1794.
- [3] GUNTURK B K, ALTUNBASAK Y, MERSEREAU R M. Color plane interpolation using alternating projections [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(9): 997-1013.
- [4] CHUNG K H, CHAN Y K. Low-complexity color demosaicing algorithm based on integrated gradients [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2010, 19(2): 021104.
- [5] CHUNG K H, CHAN Y H. Color demosaicing using variance of color differences [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(10): 2944-2955.
- [6] PEKKUCUKSEN I, ALTUNBASAK Y. Multiscale gradients-based color filter array interpolation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(1): 157-165.
- [7] 梁晓芬,乔卫东,杨建峰,等. 基于色差空间的 Bayer 图像的迭代插值算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 3128-3133.
LIANG X F, QIAO W D, YANG J F, *et al.* Iterative interpolation algorithm of Bayer images based on color difference space [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3128-3133. (in Chinese)
- [8] Keigo Hirakawa, Thomas W. P. Adaptive homogeneity-directed demosaicing algorithm [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(3): 360-369.
- [9] 喻再光,赵群飞. 基于 YCbCr 三基色插值及其在 DSP 上的实现[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(10): 104-106.
YU Z G, ZHAO Q F. Three-color interpolation algorithm based on YCbCr and its implementation on a DSP system [J]. *Computer Engineering and Application*, 2005, 41(10): 104-106. (in Chinese)
- [10] ADAMS JR J E, HAMILTON JR J F. Adaptive color plane interpolation in single sensor color electronic camera; United States, U. S. Patent 5629734[P]. 1997-07-29.

作者简介:徐少雄(1987—),男,广西防城港人,博士研究生,主要从事图像视觉及算法,光学成像方面的研究。

E-mail: hitxsx@163.com

任建岳(1952—),男,吉林长春人,研究员,主要从事光学遥感器的研制及性能评价方面的研究。E-mail: renjy@sohu.com