

基于色差空间的 Bayer 图像的迭代插值算法

梁晓芬^{1,2}, 乔卫东¹, 杨建峰¹, 薛彬¹, 秦佳^{1,2}

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 单 CCD/CMOS 传感器相机捕捉图像信息靠在传感器表面覆盖一层颜色滤波阵列(CFA), 经过 CFA 后每个像素点只能获得物理三基色(红, 绿, 蓝)其中一种分量。另外缺少的两种颜色分量, 需要通过周围像素的值来估算。首先利用 5×5 模板内的像素来估计插值的方向并用最优的权重系数来插值 G 分量。其次利用了基于有理函数的二维插值算子在色差空间插值 $R(B)$ 处缺少的 $B(R)$ 分量。再次利用色差插值 G 处缺少的 R 和 B 分量。最后, 使用方差约束条件, 迭代插值过程被重复多次直到达到了最优的插值结果。通过在 24 幅柯达图片以及笔者相机拍摄的图片上的 Matlab 仿真实验, 结果显示, 被提出的算法无论是在视觉方面还是在量化的数据方面都表现出了优势。

关键词: 彩色复原; 颜色插值; 双线性插值; PSNR

中图分类号: TP391.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-3128-06

Iterative interpolation algorithm of Bayer images based on color difference space

Liang Xiaofen^{1,2}, Qiao Weidong¹, Yang Jianfeng¹, Xue Bin¹, Qin Jia^{1,2}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China;

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

Abstract: Signal CCD/CMOS sensors capture image information by covering the sensor surface with a color filter array (CFA). For each pixel, only one of three primary colors (red, green and blue) can pass through the CFA. The other two missing color components are estimated by the values of surrounding pixels. The first step was to estimate interpolation direction taking advantage of the pixels in 5×5 template and use the optimal weighting factors to interpolate G components. The second step was to interpolate $R(B)$ components at the location of $B(R)$ using the interpolation operator based on two-dimensional rational function. The third step was to interpolate R and B components at the location of G components by color difference interpolation. Lastly, the iterative interpolation repeated until approaching the optimal results using variance-constrained condition. Through Matlab simulate experiments based on 24 Kodak images and the images captured from our camera, the proposed algorithm outperforms both in visual and numerical aspects.

Key words: color recovery; color interpolation; bilinear interpolation; PSNR

收稿日期: 2014-01-17; 修订日期: 2014-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(60808028); 国家 863 计划(2009AA122203)

作者简介: 梁晓芬(1988-), 女, 硕士生, 主要从事图像与多源信息处理方面的研究。Email: liangxiaofen2011@126.com

导师简介: 乔卫东(1968-), 男, 硕士生导师, 主要从事图像与视频信息处理、高速光电信息获取与处理方面的研究。

Email: qwd@opt.ac.cn

0 引言

在图像采集系统的结构中,为了获得可观景象最详尽的信息,最佳的方案是用三块 CCD/CMOS 传感器分别接收红、绿、蓝三种颜色分量的信息,再合成为彩色图像。但出于成本和制造工艺等多种因素的制约,绝大多数图像采集系统采用单片图像传感器来获取物体信息。一般在单传感器表面覆盖一层颜色滤波阵列(CFA),其中 Bayer 格式的 CFA 作为经典的阵列应用广泛,这种方法获取的图像在每个像素的位置上只能获得一种颜色分量,要获取另外两种缺少的颜色分量就必须通过周围像素的值来估算。从原始图像到最终形成真彩色图像的变换过程,称为颜色插值^[1]。

在过去的 20 多年里,图像插值算法一直是研究的热点,同时也产生了大量有价值的插值算法^[1]。最简单的是双线性插值(Bilinear)算法。2000 年前,Admas 和 Hamilton^[2]提出了自适应插值算法。2000 年后,Lukac 和 Plataniotis^[3]提出了一种利用正规化的颜色比进行插值的高效算法。Lu 和 Tan^[4]提出了基于探索邻域像素的空间、光谱相关性的高效复原算法。而后,Lukac 等人提出了一种新的高效 CFA 插值框架。近年来,C.Y.Su^[5]提出了基于边缘和色差插值的迭代复原算法。FanBu^[6]等人提出了一种新的基于边缘和色差的插值算法,获得了不错的效果,但是这种方法运算比较复杂而且实时性比较差。选择好的插值算法对获取高质量的图像非常重要,文中针对 Bayer 格式的图像提出了一种高效的复原算法。

1 文中算法

算法流程如图 1 所示。

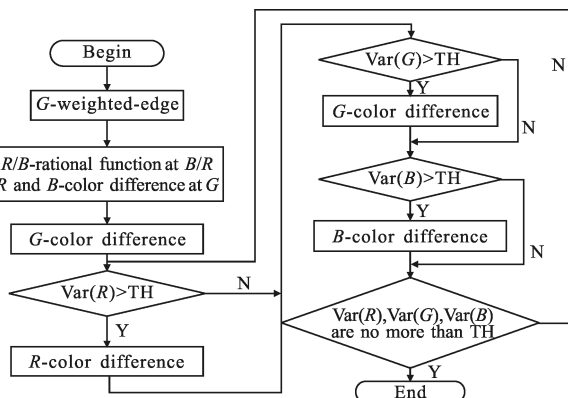


图 1 文中算法流程图

Fig.1 Flow chart of the algorithm proposed in this paper

(1) 基于边缘检测插值绿色分量 G

在 Bayer 模板中,绿色分量的信息占了总像素数的一半,而红色和蓝色分量的信息各占 1/4。所以在插值中,绿色像素能体现更多的细节。此外,由于人眼对绿色更敏感,并且绿色也占据了可见光谱中最重要和最宽的位置。因此,正确地恢复 G 分量是至关重要的,在文中算法中, G 分量被首先进行插值。其他两种颜色分量在 G 分量插值的结果上再进行插值。考虑到边缘像素的问题,对 G 分量采用了基于边缘检测的插值算法。首先定义了 5×5 模板的水平梯度 ΔH 和垂直梯度 ΔV 用于估计 5×5 模板内是否存在水平方向和垂直方向的边缘。如果某一方向的梯度值比较大,就意味着那个方向存在着边缘。水平梯度和垂直梯度的定义如下:

$$\Delta H = \text{abs}[G(i-2, j-1) + G(i+2, j-1) - 2G(i, j-1)] + \text{abs}[G(i-2, j+1) + G(i+2, j+1) - 2G(i, j+1)] + \text{abs}[G(i-1, j) - G(i+1, j)] \quad (1)$$

$$\Delta V = \text{abs}[G(i-1, j-2) + G(i-1, j+2) - 2G(i-1, j)] + \text{abs}[G(i+1, j-2) + G(i+1, j+2) - 2G(i+1, j)] + \text{abs}[G(i, j-1) - G(i, j+1)] \quad (2)$$

判断方向后对缺少的 G 分量进行插值,以插值红色像素处缺少的绿色像素为例:

如果 $\Delta H < \Delta V$, 那么

$$G_{i,j} = W_1 \left[G_{i,j-1} + G_{i,j+1} + \frac{(2R_{i,j} - R_{i,j-2} - R_{i,j+2})}{4} \right] + W_2 \left[G_{i-1,j} + G_{i+1,j} + \frac{(2R_{i,j} - R_{i-2,j} - R_{i+2,j})}{4} \right] \quad (3)$$

如果 $\Delta H > \Delta V$

$$G_{i,j} = W_2 \left[G_{i,j-1} + G_{i,j+1} + \frac{(2R_{i,j} - R_{i,j-2} - R_{i,j+2})}{4} \right] + W_1 \left[(G_{i-1,j} + G_{i+1,j}) + \frac{(2R_{i,j} - R_{i-2,j} - R_{i+2,j})}{4} \right] \quad (4)$$

如果 $\Delta H = \Delta V$

$$G_{i,j} = \frac{(G_{i,j-1} + G_{i,j+1} + G_{i-1,j} + G_{i+1,j})}{4} + \frac{(4R_{i,j} - R_{i,j-2} - R_{i,j+2} - R_{i-2,j} - R_{i+2,j})}{8} \quad (5)$$

式中: W_1 和 W_2 是权重系数,最佳的 W_1 和 W_2 的值会使最高峰值信噪比(PSNR)值最大。假设最优的 W_1 和 W_2 的值是 W_1^* 和 W_2^* (为了减少计算的复杂性,强加了一个限制性条件 $W_1^* + W_2^* = 1$),它们应该满足公式:

$$(W_1^*, W_2^*) = \arg \max_{W_1^* + W_2^* = 1} \{ \text{PSNR}(R) + \text{PSNR}(G) + \text{PSNR}(B) \} \quad (6)$$

通过 24 幅 Kodak 图片上的实验,计算了多次实验后的 PSNR 值的平均值,发现 W_1^* 最优的取值范围为 0.7-0.99。PSNR 值的平均值随 W_1 的变化情况如图 2 所示。对于流程图中的 TH 的值设为 1^[6]。因为当每个颜色通道的方差小于 1 时,PSNR 值会开始降低。PSNR 值的平均值与 TH 的变化关系如图 3 所示。

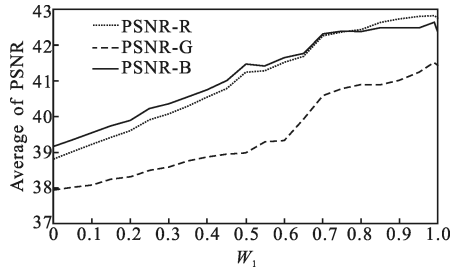


图 2 PSNR 值随 W_1 的变化

Fig.2 Change of PSNR as W_1 increasing

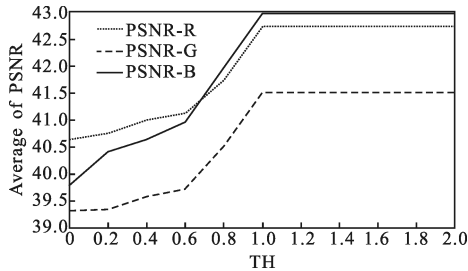


图 3 PSNR 值随 TH 的变化

Fig.3 Change of PSNR as TH increasing

(2) 同样的方法可以插值 B 分量处缺少的绿色分量 G 。

(3) 基于二维有理函数插值算子插值 B 分量处缺少的 R 分量。

通常的彩色插值算法之所以无法得到较好的图像质量,主要是采用了同样的插值系数。基于有理函数的插值算子是一种非线性的插值算子,其本身具有保持边界细节的特性^[7]。所以把基于有理函数的插值算子应用在了色差空间进行插值。有理函数是一种非线性的信号处理技术,具有如下输入输出形式:

$$y = \frac{\alpha_0 + \sum_{j=1}^m \alpha_{1,j} \cdot x_j \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \alpha_{2,j} \cdot x_j x_k + \dots}{\beta_0 + \sum_{j=1}^m \beta_{1,j} \cdot x_j \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \beta_{2,j} \cdot x_j x_k + \dots} \quad (7)$$

式中: x_1, x_2, \dots, x_m 为滤波器的输入; $\alpha_0, \beta_0, \alpha_{i,j}, \beta_{i,j}$, 为滤波器的参数; y 是滤波器的输出。

文中提出的插值算法对色度分量(R 和 B)的插值采用了基于二维有理函数的插值算子在色差空间进行插值。图 4 列出了二维图像的插值模式,实质是

通过 Pa_1, Pa_2, Pa_3, Pa_4 等 4 个像素的灰度值来插值得到 P 像素的灰度值。并假设像素的灰度为 a_i , 二维有理函数插值算子可以表示为:

$$P = RF^{2D}(a_1, a_2, a_3, a_4) = \frac{w_{1,2}(a_1+a_2) + w_{2,3}(a_2+a_3) + w_{3,4}(a_3+a_4) + w_{4,1}(a_4+a_1)}{2(w_{1,2} + w_{2,3} + w_{3,4} + w_{4,1})} \quad (8)$$

式中: $w_{m,n} = 1/8 + k(a_n - a_m)^2$, $m, n = 1, 2, 3, 4$, k 为非线性系数,当 $k=0$ 时,等价于双线性插值。

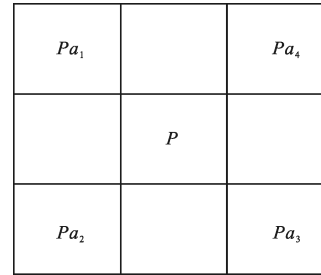


图 4 二维图像插值模式

Fig.4 Interpolation mode of two-dimension image

以插值所有蓝色像素 B 处的红色像素 R 为例,用图 4 的二维插值模式,其中, P 位置为蓝色像素, $Pa_i (i=1, 2, 3, 4)$ 位置为红色像素。在进行插值时,需要首先计算像素 P 上的颜色差 $K_R(P)$:

$$RF^{2D}(K_R(P_{R1}), K_R(P_{R2}), K_R(P_{R3}), K_R(P_{R4})) \quad (9)$$

其中 $K_R(P_{Ri}) = G_i - R_i (i=1, 2, 3, 4)$ 从而可以得出蓝色像素上缺少的红色分量为:

$$R_{i,j} = G_{i,j} - K_R(P) \quad (10)$$

(4) 同样的方法可以恢复红色像素处缺少的蓝色分量。

(5) 恢复绿色分量 G 处缺少的 R 和 B 分量

文中把边界检测的原理引入到了 G 分量处色度信号的恢复中,并利用亮度的二阶导数作修正,在色差空间进行插值。以插值红色分量 R 为例,当绿色分量 G 的上下位置有两个 R 值是已知时,计算公式如下:

$$G_{i,j} = [R_{i,j-1} + R_{i,j+1}] / 2 + [2G_{i,j} - G_{i,j-1} - G_{i,j+1}] / 2 \quad (11)$$

当绿色分量 G 的左右位置有两个 R 已知时,计算公式如下。

$$G_{i,j} = [R_{i-1,j} + R_{i+1,j}] / 2 + [2G_{i,j} - G_{i-1,j} - G_{i+1,j}] / 2 \quad (12)$$

(6) 同样的方法可以插值出绿色像素处缺少的蓝色像素值。

(7) 通过色差插值更新 G 分量的值

在插值得到的 R/B 分量的基础上,对 G 分量使用色差插值的方法进行更新。更新 R 分量处的 G 分

量的值,公式如下:

$$G_{i,j}=(G_{i-1,j}+G_{i+1,j}+G_{i,j-1}+G_{i,j+1})+ [4R_{i,j}-(R_{i-1,j}+R_{i+1,j}+R_{i,j-1}+R_{i,j+1})] \quad (13)$$

根据对称性,可以更新 B 分量处的 G 分量。

(8) 迭代的过程

当执行完上述过程之后,可以在所有像素上得到红、绿、蓝三种颜色的分量。然而,结果可能不是最优的。因此,为了进一步提高图像的质量,又对图像进行了迭代插值的过程。迭代插值的过程基于色差空间进行插值。如果所有的颜色分量的方差值不超过 TH,或者达到了最大的迭代次数,那么迭代过程被终止。图 5 给出了多次实验的 PSNR 值的平均值随着迭代次数的变化曲线。结果显示当迭代 3 次之后,结果开始收敛。

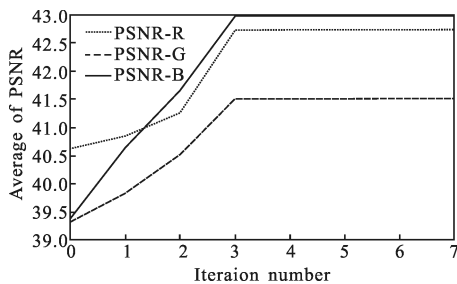


图 5 PSNR 随迭代次数的变化

Fig.5 Change of PSNR as the iteration number increasing

每一种颜色分量的方差的计算公式为:

$$\text{Var}(C)=\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (C^{n+1}(i, j)-C^n(i, j)-m_c)^2 \quad (14)$$

式中: C 代表 R, G, B 三种颜色分量; M 和 N 分别为图像的行列的大小; m_c 为两次插值结果差的均值。由下面的公式计算出:

$$m_c=\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (C^{n+1}(i, j)-C^n(i, j)) \quad (15)$$

2 实验结果的对比

为了验证文中方法的效果,文中算法与 Adams-Hamilton(A-H),Lukac 和 Plataniotis(L-P),Lu 和 Tan(L-T),以及 C.Y.Su,和 Fan Bu 等人提出的算法做了对比。分别对边缘和色彩信息丰富的 Kodak 的图片进行了处理,Kodak 图片如图 6 所示^[8]。为了更精确地对比效果,截取了 Kodak19 图片的一部分进行对比,结果如图 7 所示。



图 6 Kodak 图片(从图 1 到图 24)

Fig.6 Kodak images(From number 1 to number 24)

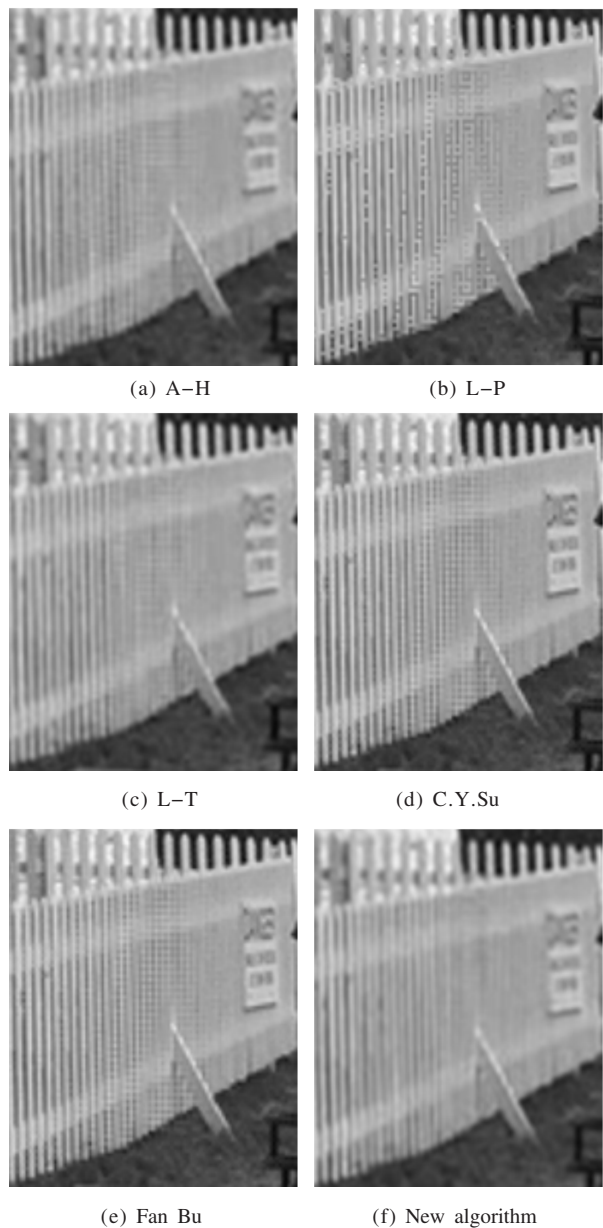


图 7 算法结果

Fig.7 Results of algorithms

从视觉方面看,L-P 算法和L-T 算法结果明显较差,摩尔条纹比较严重。然而在图像处理中有两种评价图像质量的标准:主观评价和客观评价。主观评价是经常使用的,但是不精确。所以又采用了客观评价的方法:PSNR。PSNR 能够反映插值后图像与原图像相符合的程度^[4,6,8,10]。PSNR 值越大,说明插值后得到的图像质量越好。

为了进一步地证明文中算法的优越性,用折线图来表示了 A-H,C.Y.Su,Fan Bu,以及文中算法的在 24 幅 Kodak 图片上的实验结果,虚点曲线是文中算法的结果。如图 8 所示。A-H,C.Y.Su 和 Fan Bu,以及文中算法的 PSNR 值的对比如表 1 所示,粗体高亮显示了最大的 PSNR 值^[6]。

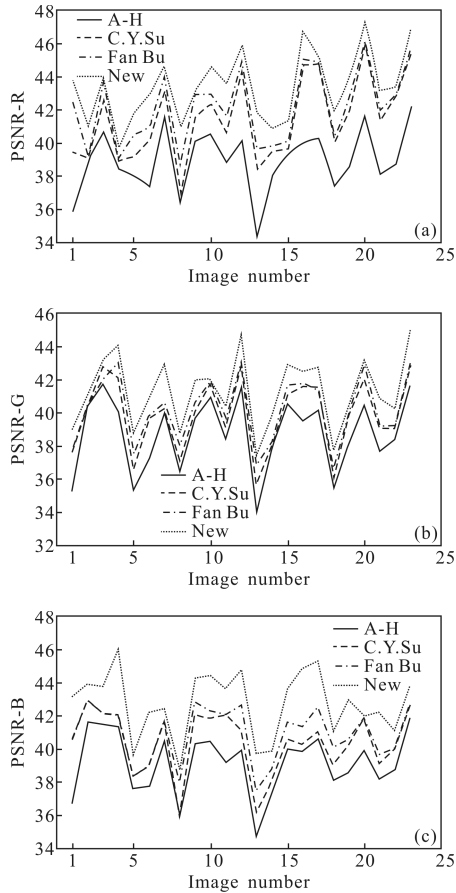


图 8 PSNR 值的对比
Fig.8 Contrast of PSNR

从图 8 中可观察到文中算法计算的三个颜色通道的 PSNR 值最大。

为了评估算法的可行性,文中选用了完成插值过程所需要的加减、乘除等运算步骤的次数以及 Matlab

表 1 PSNR 值的对比

Tab.1 Contrasts of PSNR

		A-H	C.Y.Su	Fan Bu	New
	PSNR-R	38.62	42.00	42.78	43.95
	PSNR-G	38.11	39.83	39.97	43.37
	PSNR-B	38.58	40.18	40.56	42.99
	PSNR-R	40.17	41.91	42.98	43.22
	PSNR-G	39.68	40.07	40.62	41.96
	PSNR-B	40.31	42.02	42.82	44.26
	PSNR-R	38.05	39.21	40.54	41.83
	PSNR-G	35.31	36.51	37.51	38.76
	PSNR-B	37.64	38.38	38.41	39.62
	PSNR-R	42.22	45.41	45.69	46.79
	PSNR-G	41.62	42.81	42.99	44.99
	PSNR-B	41.87	42.63	42.69	43.82

仿真运行时间的均值对复杂度进行了分析。经统计,此插值算法迭代 3 次所需的加减运算次数为:

$$\frac{MN}{4} [14+10+22] \times 2 + \frac{MN}{2} [5+5] + \frac{MN}{4} \times 11 \times 2 + 3 \times \left[\frac{MN}{4} (5+11) \times 2 + \frac{MN}{2} \times 11 \times 2 \right] = 85 MN \quad (16)$$

乘除运算次数为:

$$\frac{MN}{4} [2+8] \times 2 + \frac{MN}{2} [2+2] + \frac{MN}{4} \times 2 \times 2 + 3 \left[\frac{MN}{4} (2+2) \times 2 + \frac{MN}{2} \times 2 \times 2 \right] = 16 MN \quad (17)$$

式中:MN 表示整幅图像包含的像素个数。表 2 给出了文中算法与 A-H 算法, C.Y.Su(迭代 3 次)算法, Fan Bu(迭代 3 次)算法复杂度的对比结果。

表 2 复杂度对比

Tab.2 Contrasts of complexity

Methods	A-H	C.Y.Su	Fan Bu	New
“+,-”	24 MN	83.5 MN	197 MN	85 MN
“*,/”	6 MN	18 MN	72 MN	16 MN
Time/s	1.069	3.798	6.842	3.662

从表 2 可以观察到文中算法的复杂度明显低于 Fan Bu 算法,和 C.Y.Su 算法相当,但是视觉效果和 PSNR 值都优于 C.Y.Su 算法。

最后,用文中提出的算法对笔者相机拍摄的图片进行了处理。并与 C.Y.Su 算法以及 Fan Bu 算法做了对比,结果显示,文中算法复原效果更优秀。结果如图 9 所示。对应的 PSNR 的对比结果如表 3 所示。

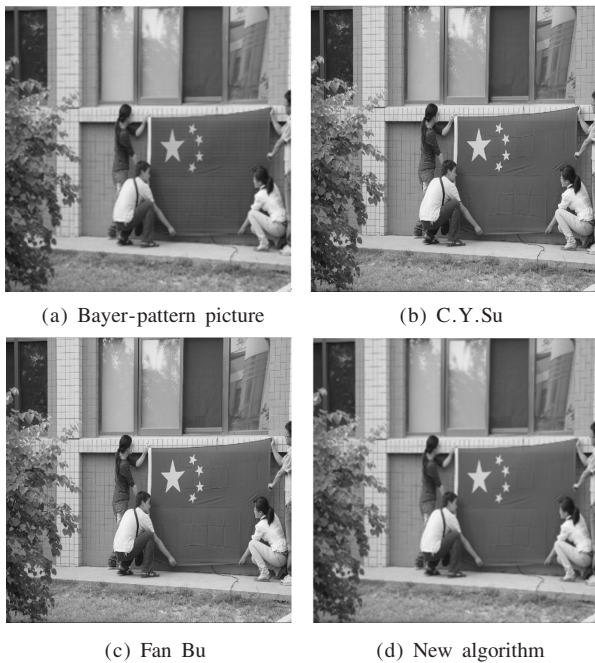


图 9 红旗

Fig.9 Red flag

表 3 PSNR 的对比

Tab.3 Contrasts of PSNR

Methods	C.Y.Su	Fan Bu	New
PSNR-R	35.141 2	36.802 9	37.623 8
PSNR-G	37.205 6	37.659 8	37.926 2
PSNR-B	35.881 7	36.927 9	37.975 4

3 结 论

提出了一种 Bayer 格式图像彩色复原的算法, 该算法是一种基于色差空间的迭代插值算法。该算法综合利用了在颜色滤波阵列中, 绿色像素总数比红色和蓝色像素多一半, 进而, 在插值中, 绿色能体现更多的细节这一事实, 从而首先对绿色分量选择基于边缘检测的算法进行插值。考虑到有理函数插值算子是一种非线性的插值算子, 因此在对 R 和 B

恢复时充分利用了有理函数插值算子。和其他迭代算法相比, 该算法不仅计算量少, 而且在主观评价和客观评价方面都显示了优秀结果。

参 考 文 献 :

- [1] Yin Yong. The research of CCD image color interpolation and implemented on FPGA [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [2] Hamilton J, Adams J. Adaptive color plane interpolation in signal sensor color electronic camera: USA, 5629734 [P]. 1996-03-17.
- [3] Lukac R, Plataniotis K N. Digital camera zooming based on unified CFA image processing steps[J]. *IEEE Trans Consum Electron*, 2004, 50(1): 737-745.
- [4] Lu W, Tan Y P. Color filter array demosaicking: new method and performance measures [J]. *IEEE Trans Image Process*, 2003, 12(10): 1194-1210.
- [5] Su C Y. Highly effective iterative demosaicking using weighted-edge and color-difference interpolations [J]. *IEEE Trans Consum Electron*, 2006, 52(2): 639-645.
- [6] Fan Bu, Qiao Weidong, Qiu Yuehong. A novel weighted edge-directed and weighted-color-difference interpolation for demosaicking Bayer-pattern color images [J]. *Journal of Information & Computational Science*, 2012, 9(7): 1781-1794.
- [7] Liu Xiaosong, Yang Jin, Wen Jun, et al. A color interpolation method for digital image sensors[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8(5): 516-521. (in Chinese)
- [8] Sun Haijiang, Wu Chuan, Wang Yanjie. Application of CFA images interpolation algorithm in DSP real-time system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 182-187. (in Chinese)
- [9] Yang Chihyuan. Color information interpolation method: US, 0050235[P]. 2013-02-28.
- [10] Zhang L, Zhang D. A joint demosaicking-zooming scheme for single chip digital color cameras [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2007, 107(1): 14-25.