

文章编号: 1007-2780(2013)03-0417-07

# Bayer 图像色彩还原线性插值方法

孙 辉, 柏旭光, 孙丽娜, 李志强

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室,  
吉林 长春 130033, E-mail: sunh@ciomp.ac.cn)

**摘 要:** 基于 Bayer 模板的单 CCD 相机通过彩色滤波阵列采集图像数据, 图像中的每个像素只有红、绿、蓝 3 种颜色分量中的一种, 为提高图像分辨率, 获取高质量的彩色图像, 需要通过色彩还原方法恢复另外两种颜色分量。线性插值方法算法简单、运算速度快, 在数字图像色彩还原中经常采用。文章结合 Bayer 模板结构特点, 介绍目前常用的 3 种色彩还原插值算法, 包括基于像素复制法、双线性插值法和高质量插值法, 分析和讨论了这些算法的思路和性能特点。通过样本图像色彩还原对比实验, 对各种算法进行了图像质量和处理速度性能比较, 结果表明, 高质量插值法还原图像细节丰富, 具有最佳的色彩还原性能。文中最后对色彩还原技术的未来发展趋势进行了展望。

**关 键 词:** Bayer 模板; 色彩还原; 彩色滤波阵列; 线性插值

**中图分类号:** TP391      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.3788/YJYXS20132803.0417

## Linear Interpolation of Demosaicing for Bayer Pattern

SUN Hui, BAI Xu-guang, SUN Li-na, LI Zhi-qiang

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China, E-mail: sunh@ciomp.ac.cn)

**Abstract:** Single CCD digital color cameras generally use a Bayer mask over the CCD. Bayer filter mosaic is a color filter array for arranging color filters on a square grid of photosensors and each CCD element captures either red, green or blue light. The acquired images have only one of the three color components at each pixel location. In order to improve quality and resolution of the color image, it is necessary that the Bayer pattern demosaicing algorithm is used to reconstruct the missing two components at each location. The linear interpolation algorithm is fast and easy, that has been applied to the demosaicing for image of digital camera. The three classical linear interpolation algorithms based on Bayer pattern is presented in detail, including a pixel doubling interpolation, a bilinear interpolation and a high quality linear interpolation. The basic theories and performance characteristics of the three methods are analyzed. The comparison of the interpolation accuracy as well as the speed of the different methods is based on the sample images. The results show that the high quality linear interpolation has best results on demosaicing performance. And lastly future development of demosaicing is discussed.

**Key words:** Bayer pattern; demosaicing algorithm; color filter array; linear interpolation

收稿日期: 2012-10-17; 修订日期: 2012-11-19

基金项目: “973”国家重点基础研究发展计划(No. 2009CB72400607); 国家“863”计划资助项目(No. 2008AA121803)

作者简介: 孙辉(1963—), 男, 吉林柳河人, 研究员, 主要从事数字图像处理及计算机仿真研究。

1 引    言

在彩色数字相机的成像传感器结构中,为准确获取目标景物信息,通常采用 3 片 CCD 同时采集红、绿、蓝三种颜色信号,通过模数转换器和图像处理单元生成彩色图像,彩色图像每个像素包括红、绿、蓝三个颜色分量,图像分辨率高、细致明锐。由于采用 3 片 CCD 结构,相机体积大、设计和生产成本高,因此 3-CCD 彩色相机一般只限于在专业研究和应用领域使用,大多数彩色数字相机都采用一片 CCD 作为图像传感器。单 CCD 相机通过使用彩色滤波阵列(Color Filter Array, CFA)覆盖在 CCD 表面获取颜色信息,每个 CCD 单元只有一种颜色分量通过,为获得全彩色图像,需要通过色彩还原方法恢复另外两种颜色分量。目前在彩色数字相机中普遍采用基于 Bayer 模板的色彩还原算法对图像质量十分重要,如何构建色彩还原算法,提高图像还原质量和还原效率是数字图像研究领域的热点之一。

数字相机图像处理过程一般应包括图像白平衡<sup>[1]</sup>和色彩还原,其中色彩还原是一项基本而又关键的图像处理技术,具有重要的学术和应用价值。在过去的几十年中,许多来自不同领域的专家学者从不同角度、不同应用背景出发对色彩还原问题进行了深入探索和研究,提出很多行之有效的方法,包括邻域插值法、线性插值法<sup>[2]</sup>、立方卷积插值法<sup>[3]</sup>、像素相关插值法<sup>[4]</sup>、信号相关插值法等<sup>[5-7]</sup>。色彩还原基本原理是根据像素周围的已知颜色分量进行插值,估算未知的颜色分量。从理论上来说,插值方法越简单,还原图像质量越低,处理时间越短;反之,插值方法越复杂,还原图像质量越高,处理时间越长。因此,在实际应用中,选择适当的色彩还原方法,在图像还原质量和处理速度方面能够达到平衡就显得十分必要,是数字相机图像处理技术中的重要环节。

本文通过对比 3-CCD 和单 CCD 彩色相机结构特点,简要介绍单 CCD 相机彩色滤波阵列应用原理,分析讨论图像处理中的色彩还原问题,介绍 3 种基于邻域线性插值的色彩还原方法,通过样本图像色彩还原对比实验,客观评价图像还原质量,测试算法处理时间。最后对色彩还原技术的未来发展趋势进行了展望。

2 CCD 彩色数字相机原理与 Bayer 模板

2.1 CCD 彩色数字相机工作原理

CCD 彩色数字相机包括光学系统、CCD 成像传感器、图像处理单元和处理电路等。首先通过光学镜头将客观景物成像在 CCD 靶面上。在光线作用下,CCD 将光线作用强度转化为电荷积累,经过模数转换(A/D)芯片转换为数字信号,传输到图像处理单元。图像处理单元对数字信号进行判读,生成数字图像,由处理电路进行增益控制、校正、功率放大、存储和输出。

由于 CCD 器件只能感受光线的强度,不能感受光线的颜色,为记录客观景物的颜色信息,采用在成像系统结构中加装分色棱镜或滤光片将光线分成不同颜色谱段投射到 CCD 靶面。在彩色数字相机中,依据 CCD 结构和编码方式不同可分为 3-CCD 相机和单 CCD 相机,两者在光学设计、结构设计、电路设计及图像处理等方面都有较大差异。

3-CCD 相机由一组分色棱镜和 3 片 CCD 等组成,3 个 CCD 同频同步工作。入射光线经过分色棱镜后,被分为红、绿、蓝 3 种颜色,在分色棱镜后面分别用一片 CCD 同时接收一种谱段的光线并转换为电信号,产生红、绿、蓝单色图像数据,通过图像合成生成 RGB 全彩色图像数据<sup>[8]</sup>。3-CCD 相机分色棱镜光路如图 1 所示。3-CCD 相机具有高分辨率、低噪声等优点,拍摄图像自然、细致、明锐。但是结构复杂,需要多个 CCD 传感器并且要求精确对准,设计和生产成本较高,所以一般只在一些专业领域使用。

单 CCD 相机使用 1 片 CCD 转换光信号到电

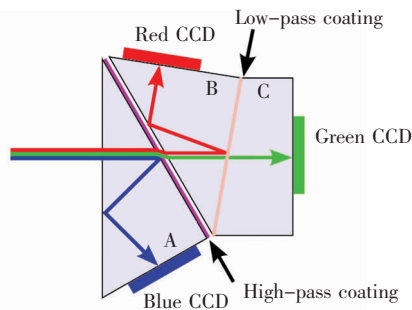


图 1 3-CCD 相机分色棱镜光路示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the 3-CCD separation mechanism

信号,通过使用彩色滤波阵列(Color Filter Array, CFA)覆盖在 CCD 成像传感器表面获取颜色信息。依据彩色滤波阵列不同和通过的光线谱段不同,单 CCD 相机彩色滤波阵可分为许多不同种类: Bayer (red, green, blue)、CMYW (cyan, magenta, yellow, white)、RGBW (red, green, blue, white)等。与 3-CCD 相机相比,单 CCD 相机优点是体积小、成本低,但在分辨率和成像质量方面低于 3-CCD 相机。

2.2 Bayer 模板与色彩还原

在单 CCD 相机中,基于 Bayer 模板的数字相机应用最为广泛。Bayer 彩色模板在 1976 年由

Bryce E. Bayer 等人提出<sup>[9]</sup>,其基本原理是在二维空间上通过彩色滤波阵列将感光单元分成以  $2 \times 2$  为单位的子单元,每个子单元独立接受红、绿和蓝光线。在入射光线到达 CCD 表面时,彩色滤波阵列只有红、绿或蓝一种谱段的光线透过,图像中的每个像素只有红、绿、蓝这 3 个分量中的一个分量,Bayer 彩色模板参见图 2。从 Bayer 编码结构可以看出:

(1)在 Bayer 颜色滤波阵列中,RGB 三色的感光单元不是平均分布。基于人眼对绿色比较敏感,绿色 (G) 占 50%,红色 (R) 和蓝色 (B) 各占 25%;

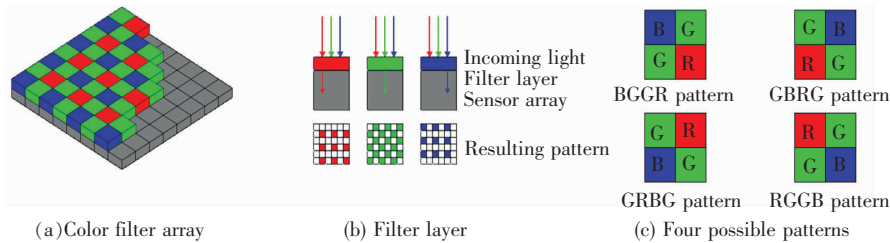


图 2 Bayer 模板示意图

Fig. 2 Bayer arrangement of color filter on CCD

(2)图像信号分辨率低于相机感光单元的分辨率。例如相机感光单元总数为  $1\,024 \times 1\,024$ ,实际得到的图像只有  $512 \times 512$  个 R、 $512 \times 512 \times 2$  个 G 和  $512 \times 512$  个 B。

通过 Bayer 模板获取的图像称之为 Bayer 彩色图像或 Bayer 模板图像,根据彩色滤波阵列的排列不同,Bayer 彩色图像可分为 BGGR、GBRG、GRBG 和 RRGB 四种格式。

与 3-CCD 相机获取的全彩色图像相比,Bayer 彩色图像每个像素只有红、绿、蓝其中的一个分量,信息量只有全彩色图像的  $1/3$ ,图像分辨率和图像质量低于全彩色图像。为提高图像分辨率和图像质量,需要通过色彩还原方法恢复另外两种颜色分量,重建全彩色图像。

本文以 RRGB 格式图像为例,简要介绍 3 种典型的色彩还原线性插值方法: $2 \times 2$  邻域复制插值法、 $3 \times 3$  邻域双线性插值法和  $5 \times 5$  邻域高质量插值法。

3 色彩还原插值算法

3.1  $2 \times 2$  邻域像素复制插值

$2 \times 2$  邻域像素复制插值 (Pixel Doubling

Interpolation)的基本特征是“复制”,对缺失的颜色分量完全使用 Bayer 模板基本单元  $2 \times 2$  块内相同颜色的分量,通过颜色分量复制实现色彩还原。色彩还原结果是: $2 \times 2$  块内的 4 个像元具有相同的红色和蓝色,第 1 列和第 2 列的两个像元具有相同的绿色值。该算法的优点是算法简单、计算量小,缺点是在图像细节和边缘处有明显的“锯齿效应”。 $2 \times 2$  邻域见图 3。

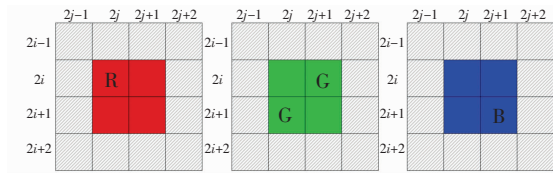


图 3  $2 \times 2$  邻域示意图

Fig. 3 Bayer pattern's  $2 \times 2$  unit

$2 \times 2$  邻域像素复制插值的颜色分量计算公式如下:

$$\begin{cases} r_{2i,2j} = R_{2i,2j} \\ r_{2i,2j+1} = R_{2i,2j} \\ r_{2i+1,2j} = R_{2i,2j} \\ r_{2i+1,2j+1} = R_{2i,2j} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} g_{2i,2j} = G_{2i,2j+1} \\ g_{2i,2j+1} = G_{2i+1,2j} \\ g_{2i+1,2j} = G_{2i,2j+1} \\ g_{2i+1,2j+1} = G_{2i+1,2j} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} b_{2i,2j} = B_{2i+1,2j+1} \\ b_{2i,2j+1} = B_{2i+1,2j+1} \\ b_{2i+1,2j} = B_{2i+1,2j+1} \\ b_{2i+1,2j+1} = B_{2i+1,2j+1} \end{cases} \quad (3)$$

3.2 3×3 邻域双线性插值

3×3 邻域双线性插值(Bilinear Interpolation)是广泛采用的插值算法之一,其基本特征是“平均”。在估算缺失的颜色分量时,选择 1 个 3×3 邻域,根据邻域内相同颜色分量值,使用双线性插值算法计算平均值实现色彩还原。该方法算法简单,在图像平滑区域可以收到较好的还原效果,

在图像边缘区域,因为像素的取值具有方向性,不能简单地由周围的像素计算平均值估计,还原效果较差。与 2×2 邻域还原法相比,在算法设计上需要增加 16 次加法运算和 8 次除法运算,运算量较大。如图 4 所示。

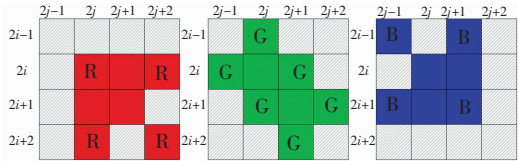


图 4 3×3 邻域示意图

Fig. 4 Neighborhood for bilinear interpolating R, G and B components.

3×3 邻域双线性插值的颜色分量计算公式如下:

$$\begin{cases} r_{2i,2j} = R_{2i,2j} \\ r_{2i,2j+1} = \frac{1}{2}(R_{2i,2j} + R_{2i,2j+2}) \\ r_{2i+1,2j} = \frac{1}{2}(R_{2i,2j} + R_{2i+2,2j}) \\ r_{2i+1,2j+1} = \frac{1}{4}(R_{2i,2j} + R_{2i,2j+2} + R_{2i+2,2j} + R_{2i+2,2j+2}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} g_{2i,2j} = \frac{1}{4}(G_{2i-1,2j} + G_{2i,2j-1} + G_{2i,2j+1} + G_{2i+1,2j}) \\ g_{2i,2j+1} = G_{2i,2j+1} \\ g_{2i+1,2j} = G_{2i+1,2j} \\ g_{2i+1,2j+1} = \frac{1}{4}(G_{2i,2j+1} + G_{2i+1,2j} + G_{2i+1,2j+2} + G_{2i+2,2j+1}) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} b_{2i,2j} = \frac{1}{4}(B_{2i-1,2j-1} + B_{2i-1,2j+1} + B_{2i+1,2j-1} + B_{2i+1,2j+1}) \\ b_{2i,2j+1} = \frac{1}{2}(B_{2i-1,2j+1} + B_{2i+1,2j+1}) \\ b_{2i+1,2j} = \frac{1}{2}(B_{2i+1,2j-1} + B_{2i+1,2j+1}) \\ b_{2i+1,2j+1} = B_{2i+1,2j+1} \end{cases} \quad (6)$$

3.3 5×5 邻域高质量线性插值

前面介绍的 2×2 邻域像素复制插值法和 3×3 邻域双线性插值法在估算未知的颜色分量时,仅仅使用与未知分量相同颜色的分量进行插值处理,没有利用各个颜色分量之间的相关性。事实上,在图像局部范围内,不同颜色分量之间的差值通常变化较缓慢,可以看作是一个常数。因此在估计恢复某分量的过程中,如果能综合利用

其他两个分量的信息,就可以准确恢复各种颜色分量,有效提高图像还原质量。

基于上述分析,2004 年由 Malvar 等人提出一种新型高质量线性插值方法<sup>[10]</sup>,其基本特征是“平均+修正”。该方法使用 5×5 邻域估计未知的颜色分量值。为恢复某点处的颜色分量,充分利用了各个颜色分量之间的相关性,在计算该点邻域内相同颜色分量平均值时,同时加入其他颜

色分量的差分运算结果作为修正值,通过选择适当的权重系数控制未知颜色分量估计结果,使之更好地接近真实颜色分量值<sup>[11]</sup>。

文献[10]给出 8 个 5×5 的线性滤波器,在插值时根据像元具体位置选择相应的线性滤波器,见图 5。其中图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)用于估计

红色分量,图 5(d)、图 5(e)用于估计绿色分量,图 5(f)、图 5(g)、图 5(h)用于估计蓝色分量。在 8 个的线性滤波器中,为估计未知的颜色分量,共计使用了 6 个红色分量、12 个绿色分量和 6 个蓝色分量,这种设计方式充分利用了绿色分量包含的丰富信息。

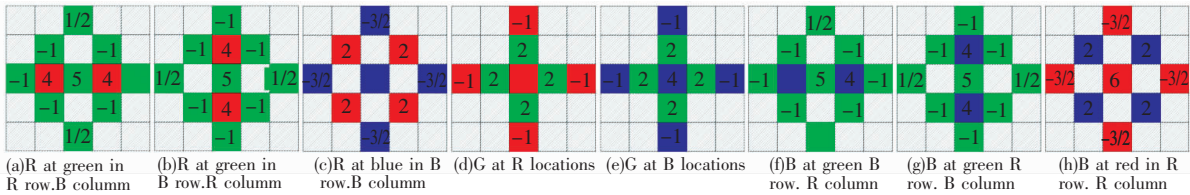


图 5 5×5 邻域高质量插值滤波器

Fig. 5 8 kernels for a high quality linear interpolation

3.4 效果评价

图像质量评价方法可分为主观评价和客观评价两类<sup>[12]</sup>。主观评价就是首先确定评价指标,通过人们观察图像评定图像优劣,得出评价结果。客观评价是根据评价指标构造数学模型,通过测试数据评价图像质量。与主观评价相比,客观评价速度快、费用低、实用性更强。

在客观评价方法中,均方误差 (Mean Square Error, MSE) 和峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 是常用的两种图像质量评价方法,本文选择峰值信噪比评价色彩还原效果。

设原始图像  $f(i, j)$ , 色彩还原图像  $g(i, j)$ , 图像尺寸  $M \times N$ , 则均方误差 MSE 和峰值信噪比 PSNR 计算公式如下:

$$MES = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f(i, j) - g(i, j))^2 \quad (7)$$
$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{MSE} \quad (8)$$

4 实验结果与分析

色彩还原实验的目的是考察算法对 Bayer 彩

色图像的处理能力,包括图像还原质量和处理时间两项指标,为了客观比较图像的质量,使用峰值信噪比作为评价指标。测试软件通过 Microsoft Visual Studio 2005 平台开发,运行硬件环境是 IBM ThinkPad 笔记本电脑(型号 W701, Core i7/4G 内存),操作系统是 64 位 Windows7 专业版。

实验中选择 4 幅 RGB 格式的标准图像 Lena、Baboon、Peppers 和 Airplane 作为原始样本图像,分别进行 BGGR、GBRG、GRBG 和 RRGB 格式的降采样处理,生成 4 幅 Bayer 模板图像。采用本文介绍的 3 种线性插值算法,分别对上述 4 幅 Bayer 彩色图像进行色彩还原处理,根据公式 (8) 计算还原图像峰值信噪比,统计色彩还原算法处理时间。色彩还原对比图像见图 6、图 7、图 8 和图 9。其中图(a)表示原始样本图像、图(b)表示降采样处理的 Bayer 模板图像,图(c)、图(d)和图(e)分别表示 2×2 邻域、3×3 邻域和 5×5 邻域 3 种插值算法色彩还原结果图像,色彩还原结果对比数据见表 1。



图 6 BGGR 格式色彩还原结果

Fig. 6 Demosaicing results of BGGR format

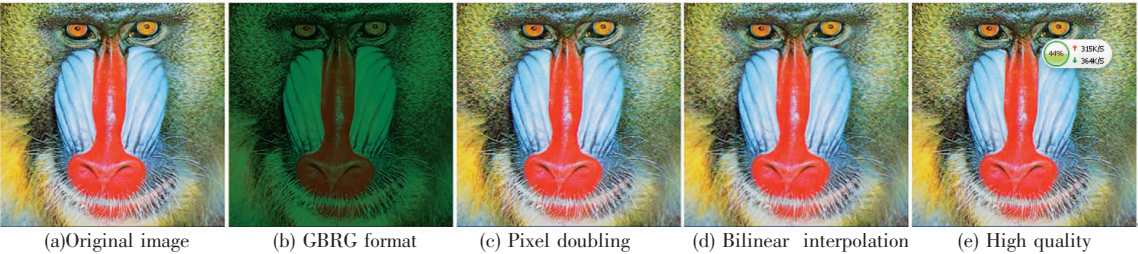


图 7 GBRG 格式色彩还原结果

Fig. 7 Demosaicing results of GBRG format

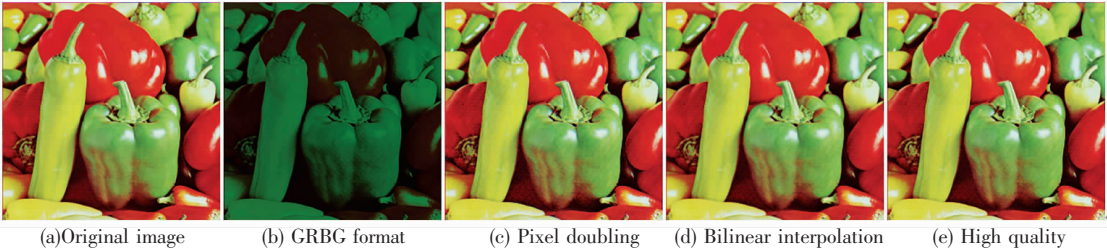


图 8 GRBG 格式色彩还原结果

Fig. 8 Demosaicing results of GRBG format

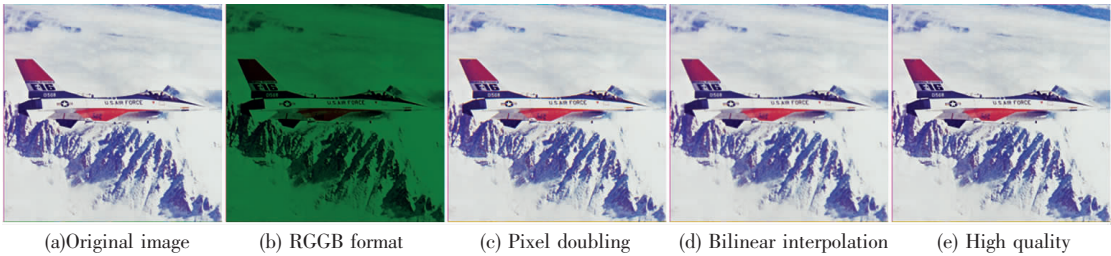


图 9 RGGG 格式色彩还原结果

Fig. 9 Demosaicing results of RGGG format

表 1 样本图像色彩还原结果

Table 1 Demosaicing results for sample

| 样本图像     | 2×2 邻域  |         | 3×3 邻域  |         | 5×5 邻域  |         |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 处理时间/ms | PSNR/dB | 处理时间/ms | PSNR/dB | 处理时间/ms | PSNR/dB |
| Lenna    | 1.32    | 29.2    | 4.00    | 32.4    | 9.10    | 34.07   |
| Baboon   | 1.30    | 20.1    | 4.12    | 23.2    | 9.06    | 24.98   |
| Peppers  | 1.28    | 27.0    | 4.08    | 30.3    | 9.29    | 31.75   |
| Airplane | 1.29    | 27.1    | 4.15    | 30.8    | 9.15    | 32.10   |

通过观察色彩还原结果图像可以看出,2×2 邻域法还原图像在平滑区域恢复较好,在图像边缘处存在较明显的“马赛克”现象;3×3 邻域算法有效抑制了“马赛克”现象,但图像模糊、缺少细节;5×5 邻域法还原图像细节丰富、边缘清晰。客观评价结果数据表明,5×5 邻域高质量插值算

法还原质量最佳,大致优于 3×3 邻域双线性插值法 2 dB。

5 结论与展望

色彩还原在图像处理与分析、计算机视觉等领域有着广泛需求,受到广大专家学者的广泛关

注,如何提高图像还原质量和效率,人们进行了很多理论分析和实践探索。本文通过分析单 CCD 彩色数码相机结构特点,简要介绍了 Bayer 彩色滤波阵列应用原理和 3 种典型的色彩还原线性插值方法的基本思路和计算公式,分析讨论了这些插值方法的性能特点,通过样本实验,测试了 3 种方法的色彩还原质量和运算时间。

样本实验结果表明,在图像还原质量方面,  $5 \times 5$  邻域高质量插值法通过复杂的算法设计,在图像边缘和细节恢复效果显著,实现了最佳的色彩还原性能;在运算时间方面,  $2 \times 2$  邻域像素复制法算法简单、运算时间短、易于实现;  $3 \times 3$  双线

性插值法在图像质量和运算时间上实现了很好的平衡。在实际应用中,人们可以根据还原质量和处理时间需求,选择适当的还原方法,以期达到最佳效果。

随着数码相机技术的发展和新型成像传感器彩色滤波阵列的问世,色彩还原技术仍将面临两个亟待解决的问题,一个是在现有技术基础上,通过改进算法进一步提高色彩还原质量和处理效率;另一个是针对新型彩色滤波阵列模板的特点,借鉴现有研究成果,构建适合新模板的色彩还原算法,满足实际需求。

## 参 考 文 献:

- [1] 甘波,魏廷存,郑然. CMOS 图像传感器芯片的自动白平衡算法 [J]. 液晶与显示, 2011, 26(2):224-228.
- [2] Kuo K T, Chen S G. Fast integrated algorithm and implementations for the interpolation and color correction of CCD-sensed color signals [C]// *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuit and System*, Monterey, CA, USA:IEEE Circuit and System Society, 1998:225-228.
- [3] Keys Robert. Cubic convolution interpolation for digital image processing [J]. *IEEE Trans. Acoustics Speech. Signal Processing*, 1981, 29(6):1153-1160.
- [4] Kuno Tetsuya, Sugiura Hiroaki, Matoba Narihiro. New interpolation method using discriminated color correlation for digital still cameras [J]. *IEEE Trans. Consumer Electronics*, 1999, 45(1):259-267.
- [5] 李奇,徐之海,冯华君. 面向数字相机的 CCD 像素颜色插值新算法研究 [J]. 光电工程, 2002, 29(3):68-71.
- [6] 陈春宁,王延杰. 利用信号相关对 BAYER 格式图像色彩复原 [J]. 电子器件, 2007, 30(4):1417-1419.
- [7] 周国瑞,孙世新,王文江. 结合 Bayer 模式与局部相关模型的 Demosaicing 算法 [J]. 计算机学报, 2007, 30(7):1179-1185.
- [8] 宋丰华. 现代空间光电系统及应用 [M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
- [9] Bayer B E. Color imaging array, US Patent:3971065 [P]. 1976-07-27.
- [10] Malvar H S, HE L W, Cutler R. High quality linear interpolation for demosaicing of bayer-patterned color images [C]// *Processing of the IEEE International Conference on Speech, Acoustics, and Signal Processing*, Montreal, Canada:IEEE, 2004.
- [11] 罗潇,孙海江,陈秋萍,等. Bayer 格式图像的实时彩色复原 [J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2):182-187.
- [12] 姚军财. 基于人眼对比度敏感视觉特性的图像质量评价方法 [J]. 液晶与显示, 2011, 26(3):390-396.