

文章编号:1007-2780(2019)03-0310-07

基于 Bayer 格式图像的实时色彩还原算法

王 麓, 徐弘基, 王若溪, 孙 畅, 常玉春*

(吉林大学 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要:为了实现大面阵高帧频 CMOS 相机输出的 Bayer 格式图像的实时精准还原,恢复其真实色彩,减少整幅图像(特别是边缘图像)的色彩失真,提出一个既能够准确还原图像色彩又能够尽量减少复杂性的算法。首先对目标图像进行预处理,即将图像进行扩大,整幅图像采用统一算法进行色彩还原,以减少边缘处像素单独还原所增加的计算量。而后利用改进的梯度插值,通过计算一个 5×5 邻域内的水平梯度边缘值和竖直梯度边缘值,统计其两个方向边缘值的和来对边界方向进行仲裁。最后利用 G 分量插值结果对其他两分量进行还原,从而大大减小了传统算法所引入的色彩失真。用 MSE、PSNR 两种方法对本文提出的改进算法进行评估,结果表明本方法能够改善图像色彩还原程度、锐化图像边缘、提升计算效率、减少色彩失真。该方法可以实现 $12k \times 5k @ 10 \text{ f/s}$ 的图像数据实时色彩还原。本算法不仅色彩还原优于传统算法,而且适合使用 FPGA 实现高速图像数据的实时色彩还原。

关 键 词: Bayer 图像; 彩色滤波; 梯度插值; FPGA

中图分类号: TN919 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20193403.0310

Real-time color reduction algorithm based on Bayer format

WANG Lu, XU Hong-ji, WANG Ruo-xi, SUN Chang, CHANG Yu-chun*

(College of Electronic Science and Engineering, Jilin University.,
Changchun 130012, China)

Abstract: To achieve the accurate real-time restoration of Bayer image from the output of large area array and high frame CMOS camera, restore its true color and reduce the color distortion of the whole image (especially the edge image), this paper proposes an algorithm that can accurately restore image colors as well as minimize complexity of algorithm. Firstly, the algorithm preprocesses the target image, that is, expands the image and use a unified algorithm to restore the entire image to reduce the amount of computation of channel of pixel at the image edge. Then the improved gradient interpolation is used to calculate the horizontal edge gradient value and vertical edge gradient value in a 5×5 neighborhood. Then, the direction of border is arbitrated by counting the sum of the two direction gradient values. Finally, the interpolation of G component is used to restore the other two components, which can greatly reduce the distortion of color introduced by the conventional algorithm. The proposed algorithm is evaluated by using MSE and PSNR methods. The proposed method can improve the color reproduction of images, sharpen the edges of images, improve the computational efficiency, and reduce

收稿日期:2018-08-05; 修订日期:2018-09-23.

基金项目:国家自然科学基金青年基金(No.61602432)

Supported by Youth Fund of National Natural Science Foundation(No. 61602432)

* 通信联系人, E-mail: changyc@jlu.edu.cn

the color distortion. This method can achieve $12k \times 5k @ 10 \text{ f/s}$ image data real-time color restoration. This algorithm is not only superior to the traditional algorithm, but also beneficial to the use of FPGA to realize the real-time color restoration of high-speed image data.

Key words: Bayer image; color filter; gradient interpolation; FPGA

1 引言

随着 CMOS 图像传感器的飞速发展,在实时图像处理和目标识别中大多采用单 CMOS Bayer 格式图像传感器作为成像元件进行彩色图像捕获,再将 Bayer 图像转换成为 RGB 图像数据,用于实时图像记录、处理及数据传输,转换方式大多采用外部处理器来实现,如果处理器的速度足够快,可以实现实时色彩还原,但随着分辨率和帧频的大幅度增加,目前的色彩还原的图像处理算法很难满足实时性的需要,例如 Kimmel 的加权系数法^[1]、AHD 算法^[2]以及 Gunturk 的基于小波变换的迭代方法^[3]等等。尽管这些算法能做到较为准确的色彩还原,但由于这些算法的复杂程度过高,所消耗的资源过大,无法实现实时色彩还原。所以本文提出一种新的基于突变检测机制及色差空间理论的颜色插值算法,旨在解决色彩还原程度和计算复杂二者之间的矛盾,能够满足大面阵高帧频数字相机在实时图像处理中的应用。

2 两种经典的 Bayer 图像还原算法

两种传统的 Bayer 插值算法分别是:双线性插值^[4]和边缘检测算法^[5]。

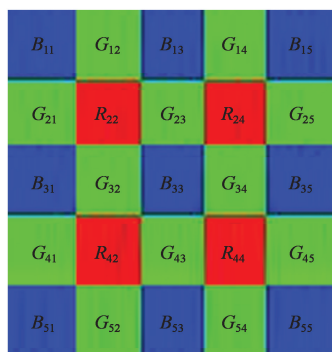


图1 Bayer 格式图像示意图
Fig.1 Bayer format image diagram

根据图 1,双线性插值算法利用目标位置附近距离最小的相同颜色像素点的均值对该点进行插值计算。计算规则如下:

$$G_{33} = \frac{G_{32} + G_{34} + G_{23} + G_{43}}{4}, \quad (1)$$

$$R_{33} = \frac{R_{22} + R_{24} + R_{42} + R_{44}}{4}, \quad (2)$$

$$B_{32} = \frac{B_{31} + B_{33}}{2}, \quad (3)$$

$$R_{32} = \frac{R_{22} + R_{42}}{2}. \quad (4)$$

通过这样简单的计算,会使最终的色彩还原有较大失真。

边缘检测算法是一种基于梯度插值的算法,以 B_{33} 为例,计算规则如下:

水平方向梯度表达式为

$$\alpha = |G_{32} - G_{34}|, \quad (5)$$

竖直方向梯度表达式为

$$\beta = |G_{23} - G_{43}|, \quad (6)$$

通过比较两个方向梯度值的大小最终确定 G_{33} 的表达式:

$$\begin{cases} G_{33} = \frac{G_{32} + G_{34}}{2}, & \alpha < \beta \\ G_{33} = \frac{G_{23} + G_{43}}{2}, & \alpha > \beta \\ G_{33} = \frac{G_{32} + G_{34} + G_{23} + G_{43}}{4}, & \alpha = \beta \end{cases}. \quad (7)$$

它在一定程度上弱化了利用梯度分量的大小还原出 G 分量的值,再根据该分量的值,利用双线性插值恢复出 R 分量和 B 分量的像素值。

经典色彩还原算法,对视场边缘像素色彩还原时需要单独处理,不能用同一的算法实现快速的流式处理。对于实时图像处理具有较大影响。同时在突变区域会产生色彩混叠效应,图像边缘色彩还原错误。

3 改进的插值算法

3.1 插值前预处理

为了简化整幅图像边界处像素点的计算,适合用 FPGA 实现实时色彩还原,本文采用了一种扩展卷边的图像预处理方法。即采用每幅图像的左右及上下的边缘 2 个像素单位作镜像,添加到原图像上,假设原图像的大小 $m \times n$,利用该规则将原图像的行列值均扩大 4 个像素单位,即扩大后的图像大小为 $(m+4) \times (n+4)$ 个像素单位。图像扩大前的像素值分布示意图如图 2 所示,图像扩大后的像素值分布示意图如图 3 所示。

对于预处理后的图像,可以利用一套算法实现对整幅图像的色彩还原,无需判断该像素是否

A_{11}	A_{12}	...	$A_{1(n-1)}$	A_{1n}
A_{21}	A_{22}	...	$A_{2(n-2)}$	A_{2n}
$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
$A_{(m-1)1}$	$A_{(m-1)2}$	...	$A_{(m-1)(n-1)}$	$A_{(m-1)n}$
A_{m1}	A_{m2}	...	$A_{m(n-1)}$	A_{mn}

图 2 图像扩大前像素值分布示意图

Fig.2 Distribution diagram of pixel values before image expansion

A_{33}	A_{32}	A_{31}	...	A_{3n}	$A_{3(n-1)}$	$A_{3(n-2)}$
A_{23}	A_{22}	A_{21}	...	A_{2n}	$A_{2(n-1)}$	$A_{2(n-2)}$
A_{13}	A_{12}	A_{11}	A_{12} ... $A_{1(n-1)}$	A_{1n}	$A_{1(n-1)}$	$A_{1(n-2)}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$... $\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
		$A_{(m-1)1}$	$A_{(m-1)2}$... $A_{(m-1)(n-1)}$	$A_{(m-1)n}$		
A_{m3}	A_{m2}	A_{m1}	A_{m2} ... $A_{m(n-1)}$	A_{mn}	$A_{m(n-1)}$	$A_{m(n-2)}$
$A_{(m-1)3}$	$A_{(m-1)2}$	$A_{(m-1)1}$	...	$A_{(m-1)n}$	$A_{(m-1)(n-1)}$	$A_{(m-1)(n-2)}$
$A_{(m-2)3}$	$A_{(m-2)2}$	$A_{(m-2)1}$	...	$A_{(m-2)n}$	$A_{(m-2)(n-1)}$	$A_{(m-2)(n-2)}$

图 3 图像扩大后像素值分布示意图

Fig.3 Distribution diagram of pixel values after image expansion

属于该幅图像的边缘。也确保了整幅图像的色彩还原没有边缘轮廓效应。也提高了计算效率,更适合流式处理。最后将色彩还原后的图像数据每个边缘区域去掉两行与两列。

3.2 全图像绿色缺失点插值算法

以图 1 的 B_{33} 点为例,水平方向梯度表达式为:

$$\partial H = |2B_{33} - B_{31} - B_{35}| + |G_{32} - G_{34}|, \quad (8)$$

即利用向量 $[B_{31} \ G_{32} \ B_{33} \ G_{34} \ B_{35}]$ 与向量 $[-1 \ 1 \ 2 \ -1 \ -1]^T$ 做乘积运算,竖直方向梯度表达式为:

$$\partial V = |2B_{33} - B_{13} - B_{53}| + |G_{23} - G_{43}|, \quad (9)$$

即利用向量 $[B_{13} \ G_{23} \ B_{33} \ G_{43} \ B_{53}]$ 与向量 $[-1 \ 1 \ 2 \ -1 \ -1]^T$ 做乘积运算。通过两个方向梯度大小的比较,确定该点水平方向边缘值和竖直方向边缘值^[6-7]。依据式(8)和式(9),突变处像素值的计算规则如下:

$$\begin{cases} \partial H < \partial V \text{ 时, } H_{(i,j)} = 0, V_{(i,j)} = 1 \\ \partial H = \partial V \text{ 时, } H_{(i,j)} = 0.5, V_{(i,j)} = 0.5, \\ \partial H > \partial V \text{ 时, } H_{(i,j)} = 1, V_{(i,j)} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

得出 B_{33} 点处水平方向边缘值和竖直方向边缘值后,取一个像素点 5×5 的邻域,统计该邻域内水平方向边缘值和竖直方向边缘值并带入下式,得:

$$\begin{aligned} \text{flag_H} &= [H_{(i-2,j)} \ H_{(i-1,j)} \ H_{(i,j)} \\ &\quad H_{(i+1,j)} \ H_{(i+2,j)}] [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]^T, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{flag_V} &= [V_{(i,j-2)} \ V_{(i,j-1)} \ V_{(i,j)} \\ &\quad V_{(i,j+1)} \ V_{(i,j+2)}] [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]^T, \end{aligned} \quad (12)$$

从而得到该点处的水平/竖直方向梯度标志位的值。

根据参考文献[6]可知,每幅图像都具有平滑的特性,只有在边缘区域会有可能出现色差突变的情况。因此可以得到如下结论:图像边缘处的色差梯度值将远大于图像其他地方的色差梯度值。所以,本文根据此结论选取色差梯度值小的方向作为插值方向。故利用式(11)和式(12),通过对比水平梯度标志位与竖直梯度标志位值的大小的方法,确定 B_{33} 点处的插值方向,求出 G_{33} 如公式(13)所示。

$$G_{33} = \begin{cases} \frac{G_{32} + G_{34}}{2} + \frac{2B_{33} - B_{31} - B_{35}}{4}, & flag_V > 2.5 \\ \frac{G_{23} + G_{43}}{2} + \frac{2B_{33} - B_{13} - B_{53}}{4}, & flag_H > 2.5 \\ \frac{G_{32} + G_{34} + G_{23} + G_{43}}{4} + \frac{4B_{33} - B_{31} - B_{35} - B_{13} - B_{53}}{8}, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

3.3 蓝(红)色通道红(蓝)色缺失分量插值算法

当红、蓝通道的绿色分量已经求得之后,就利用图像平滑特性,根据色差法求得蓝(红)色通道红(蓝)色缺失点像素值^[8]。正如前文所提到过的,每幅图像只有在边缘区域才会出现色差突变,这样就可以通过求某点周围的色差值的均值来等效替代该点处的色差值,进而计算得到红、蓝通道的对应缺失分量^[9]。具体方法如下(以计算某蓝色通道的红色缺失分量为例):

$$\Delta Cr_{(i-1,j-1)} = G_{(i-1,j-1)} - R_{(i-1,j-1)}, \quad (14)$$

$$\Delta Cr_{(i-1,j+1)} = G_{(i-1,j+1)} - R_{(i-1,j+1)}, \quad (15)$$

$$\Delta Cr_{(i+1,j-1)} = G_{(i+1,j-1)} - R_{(i+1,j-1)}, \quad (16)$$

$$\Delta Cr_{(i+1,j+1)} = G_{(i+1,j+1)} - R_{(i+1,j+1)}, \quad (17)$$

利用式(14)~(17)可以计算得出某蓝色通道处周围右上方(45°)、右下方(135°)、左下方(225°)、左上方(315°)4个方向的红、绿色差分量。根据图像平滑特性,有下式成立:

$$\Delta Cr_{(i,j)} = [\Delta Cr_{(i-1,j-1)} + \Delta Cr_{(i-1,j+1)} + \Delta Cr_{(i+1,j-1)} + \Delta Cr_{(i+1,j+1)}] / 4, \quad (18)$$

通过 $\Delta Cr_{(i,j)} = G_{(i,j)} - R_{(i,j)}$ 可以得到:

$$R_{(i,j)} = G_{(i,j)} - \Delta Cr_{(i,j)}, \quad (19)$$

至此,某蓝色通道的红色缺失分量得以求取。某红色通道的蓝色缺失分量的计算方法同上。

3.4 绿色通道红、蓝缺失分量插值算法

绿色通道红、蓝缺失分量插值算法类似于前文的蓝(红)色通道红(蓝)色缺失分量插值算法,但由于 Bayer 图像通道颜色的分布规律,每个绿色通道周围只能存在两个相同的通道颜色,所以在计算时只需计算两个相同通道颜色的色差值,再取其均值,带入色差公式,即可求得绿色通道红、蓝缺失分量。

4 算法仿真与分析

为了验证本算法的性能,本文采用恢复马赛克图像最常用的两种指标—峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)和均方误差(mean squared error, MSE)来对色彩恢复后的图像进行分析。PSNR 和 MSE 定义如下:

$$K_{\text{PSNR}} = 10 \lg \left(\frac{(2^B - 1)^2}{K_{\text{MSE}}} \right), \quad (20)$$

$$K_{\text{MSE}} = \frac{1}{MN} \sum_{i=r,g,b} \sum_{y=1}^M \sum_{x=1}^N (f_0(x,y,i) - f_r(x,y,i))^2, \quad (21)$$

其中, M 和 N 代表图像的大小为 $M \times N$ 个像素单位, B 代表编码一个像素所需要的二进制位数(B 取 8), $f_0(x,y,i)$ 代表原始图像在 x 行 y 列的强度分量, $f_r(x,y,i)$ 代表恢复后图像在 x 行 y 列的强度分量。

通过以上的计算方法,不难发现,PSNR 的值越大,代表图像色彩还原出的水平越高^[10]。

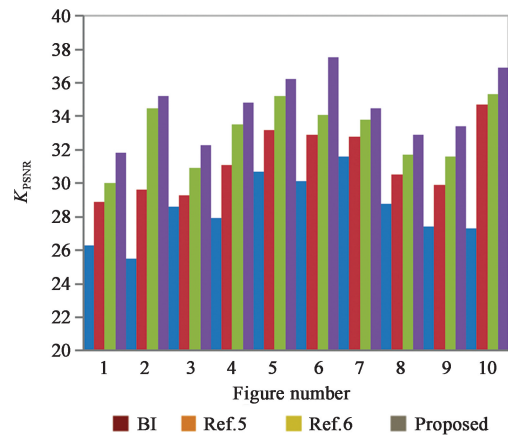


图4 不同算法的 PSNR 结果统计

Fig.4 Statistics of PSNR results by different algorithm

几种不同算法恢复结果的 PSNR 统计如图 4 所示。我们可以很容易发现,从 PSNR 的角度来看,本文的算法明显优于其它几种算法,尤其是在细节多且复杂的情况下,这种优势更为明显。

5 本文算法与其它算法的比较

图 5 是经过不同算法进行色彩还原后,从目测结果可知经过双线性插值法(BI)还原后的图 5(b)在色彩还原方面有很大程度上的偏差,距离原图像

色彩还有较大差距;经过参考文献[5]还原后的图 5(c)会产生 Zipper 效应^[11],且在图像边缘位置出现较明显的不规则区域,使得图像色彩突变部分出现较为明显的失真;经过参考文献[6]还原后的图 5(d)会在某些区域会产生小面积的色彩失真,影响最终成像;经过本文算法还原后的图 5(e)的色彩基本和原图保持一致,并且细节丰富、锐化了图像纹理并大大减少了 Zipper 效应,极大程度上改善了目标图像的视觉质量,达到了预期的效果。

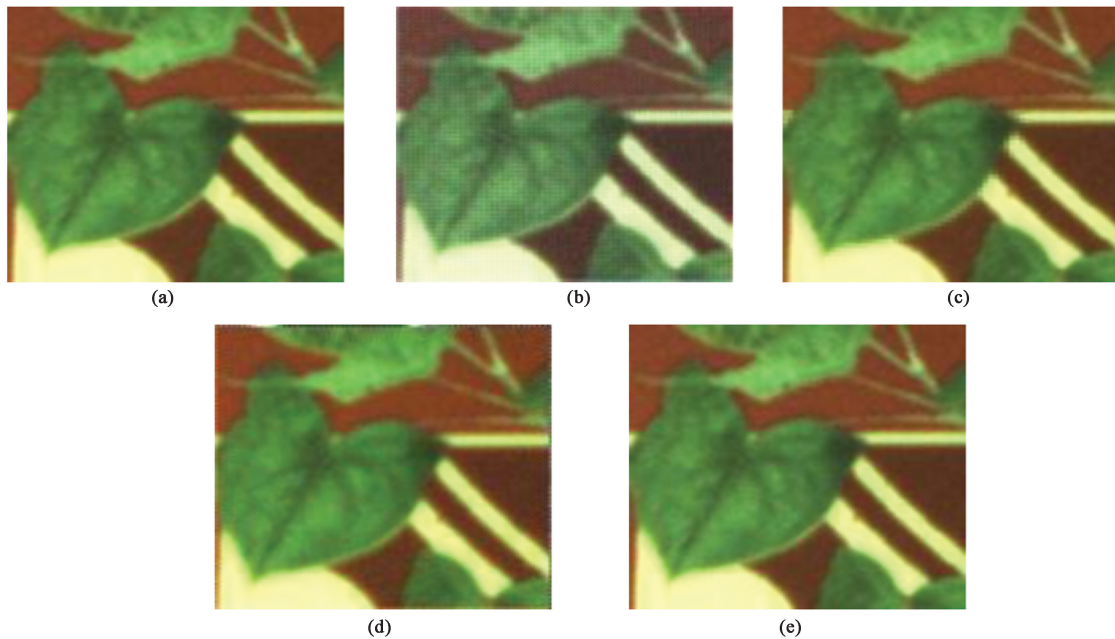


图 5 不同算法对应的色彩恢复结果。(a)原图;(b)BI 方法;(c)参考文献[5]方法;(d)参考文献[6]方法;(e)本文算法。

Fig.5 Color recovery results of different algorithm.(a)Original figure.(b)BI method.(c)Ref.[5] method.(d)Ref.[6] method.(e) Proposed meth.

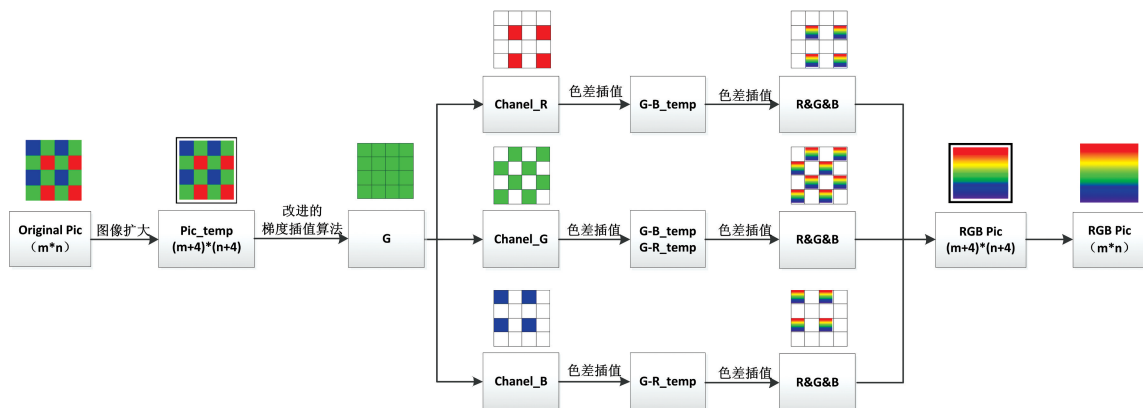


图 6 算法硬件实现流程图

Fig.6 Flow diagram of the hardware implementation of the algorithm

6 算法的硬件实现

本算法在基于 Virtex-6 的实时图像处理平台实现,通过带有预处理的自适应插值方式对 Bayer 图像进行色彩恢复,具体过程如下:接收分辨率为 $12k \times 5k$ 的 CMOS 图像传感器中的 Bayer 图像数据,通过 FPGA 内部的仲裁机制把数据存储在存储器中。然后利用 Virtex-6 的性能优势对采集到的图像进行色彩恢复的相关图像处理过程。经过处理的图像再根据后续的需要通过 Camera Link 接口或者 DVI 接口协议进行后续传输。同时,该系统基于单片 XC6VLX240T FPGA 进行设计,并预留了丰富的外部接口,以满足

后续的升级、扩展等需求。表 1 为采用本文算法实现 $12k \times 5k$ Bayer 数据还原时 FPGA 资源的使用情况,从表中可以看出此算法占用资源少,执行效率高,适合用 FPGA 做并行处理^[12]。



图7 硬件实现平台

Fig.7 Hardware implementation platform

表1 FPGA 资源利用率

Tab.1 FPGA resource utilization ratio

Slice Logic Utilization	Used	Available	Utilization
Number of Slice Registers	17,003	301,440	6%
Number of Slice LUTs	17,210	150,720	11%
Number of occupied Slices	3,240	37,680	9%
Number of RAMB36E1/FIFO36E1s	73	416	18%
Number of RAMB18E1/FIFO18E1s	15	832	2%
Number of BUFG/BUFGCTRLs	12	32	38%
Number of ILOGICE1/ISERDESE1s	65	720	9%
Number of OLOGICE1/OSERDESE1s	122	720	17%
Number of BUFIODQSs	8	72	11%
Number of BUFRs	8	36	22%
Number of IDELAYCTRLs	6	18	33%
Number of IODELAYE1s	90	720	13%

7 结 论

本文提出了一种基于 FPGA 实现的 Bayer 图像色彩还原方法,与传统的双线性插值和梯度插值算法相比稍显复杂,但由于其巧妙的加入了图像边界处的预处理,令其可以与内部像素点运算方法一致,无需考虑判断像素点位置。各个步骤的运算也充分考虑到了每个像素点中 R、G、B

3 种颜色的关系以及相邻像素点的平滑特性,通过对 5×5 邻域内特定方向梯度值的统计,大大消除传统方法所带来的色彩混叠错误,尽可能还原出更高精度的画面色彩。在完成色彩还原的同时,做到提高计算效率并降低复杂度。经过色彩还原后的图像具有边界清晰,细节丰富的特点且满足项目的实时性要求。实验结果表明,利用该方法可以实现 $12k \times 5k @ 10 \text{ f/s}$ 的图像数据实时色彩还原。

参 考 文 献:

- [1] KIMMEL R. Demosaicing: image reconstruction from color CCD samples [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, 8(9): 1221-1228.
- [2] HIRAKAWA K, PARKS T W. Adaptive homogeneity-directed demosaicing algorithm [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(3): 360-369.
- [3] GUNTURK B K, ALTUNBASAK Y, MERSEREAU R M. Color plane interpolation using alternating projections [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2002, 11(9): 997-1013.
- [4] ADAMS J, PARULSKI K, SPAULDING K. Color processing in digital cameras [J]. *IEEE Micro*, 1998, 18(6): 20-30.
- [5] HAMILTON J F JR, ADAMS J E JR. Adaptive color plane interpolation in single sensor color electronic camera; US, 5652621 [P]. 1997-07-29.
- [6] MENON D, ANDRIANI S, CALVAGNO G. Demosaicing with directional filtering and a posteriori decision [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(1): 132-141.
- [7] LEE J, JEONG T, LEE C. Edge-adaptive demosaicking for artifact suppression along line edges [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2007, 53(3): 1076-1083.
- [8] BAYER B E. Color imaging array: US, 3971065[P]. 1976-07-27.
- [9] ZHANG L, WU X L, BUADES A, *et al.* Color demosaicking by local directional interpolation and nonlocal adaptive thresholding [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2011, 20(2): 023016.
- [10] 杨金宝,王新伟,周燕.动目标选通探测的闪光抖动 [J]. *光电子·激光*, 2012, 23(2): 315-319.
YANG J B, WANG X W, ZHOU Y. Stroboscopic jitter of range-gated detection for moving target [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(2): 315-319. (in Chinese)
- [11] ZHANG L, DONG W S, WU X L, *et al.* Spatial-temporal color video reconstruction from noisy CFA sequence [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2010, 20(6): 838-847.
- [12] 李华,朱波,刘宝盈,等.基于 FPGA 的高分辨率彩色实时成像系统设计 [J]. *半导体光电*, 2015, 36(2): 293-298.
LI H, ZHU B, LIU B Y, *et al.* Design of real-time demosaicking-zooming image acquisition system based on FPGA [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, 36(2): 293-298. (in Chinese)

作者简介:



王 麓(1992—),女,吉林长春人,硕士研究生,2016 年于吉林大学获得学士学位,主要从事 CMOS 相机的图像采集与处理的硬件设计及目标识别的研究。E-mail: wanglu1912 @ mails. jlu. edu.cn



常玉春(1973—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,2002 年于吉林大学获得博士学位,主要研究方向数模混合集成电路设计,专用集成电路设计,CMOS 图像处理器及图像信号处理电路与技术等。E-mail: changyc @ jlu. edu.cn