

文章编号:1007-2780(2014)05-0839-05

一种 CMOS 相机色彩还原算法

张 涛*, 王成龙, 赵新宇

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:在靶场光学测量中为了兼顾目标跟踪测量和实况记录,提出一种使用 CMOS 相机进行色彩还原的方法。设计了基于该方法的硬件平台,并对软件算法的还原质量进行了定量分析。介绍了基于彩色滤波阵列的 Bayer 滤波算法原理,并建立了数学模型。介绍了双线性插值算法并分析了算法在图像边缘会造成拉链效应的不足,加入了边缘检测方法以克服该缺点。介绍了基于该算法的硬件平台和软件设计。实验结果表明,基于最高峰值比评价方法,还原效果可提高 14% 左右,时间性能满足实时性要求。改进的算法可以兼顾实时跟踪测量和实况记录的要求,客观判据和主观观感均表明还原效果较好。

关键词:光电经纬仪; Bayer 滤波; 图像处理; 色彩还原

中图分类号: TP394.41 **文献标识码:** A **doi:**10.3788/YJYXS20142905.0839

Color reversion algorithm of CMOS camera

ZHANG Tao*, WANG Cheng-long, ZHAO Xin-yu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to take advantages of tracking and real time record, a color reversion algorithm based on CMOS camera is proposed. The hardware platform is designed and reversion quality is analyzed quantitatively. First, the Bayer filter method based on color filter array is presented and mathematics module is designed. Then the bilinear algorithm is introduced and the edge detection method is added in order to reduce the zip effect when the edge of an image is crossed. The hardware and software is introduced. Experimental results indicate that the algorithm can offer a better PNSR which is 14% increased than the bilinear algorithm while the real time processing is achieved. The algorithm can give consideration to tracking and real time record, the objective calculation and subjective judgment indicate a better visual effect.

Key words: optic-electronic theodolite; Bayer filter; image processing; color reversion

1 引言

光电经纬仪^[1]在现代靶场光学测量中得到了

广泛应用,随着被测目标向高速、小型化、低可探测性方向发展,光电经纬仪所搭载的传感器也开始向高分辨率、多光谱、彩色成像方向发展。为了更好的测量目标特性和取得更真实、鲜艳的目标

收稿日期:2014-04-03;修订日期:2014-04-17.

* 通信联系人, E-mail:20737887@qq.com

图像,靶场对彩色图像的需求日益增加。

以往为了取得彩色图像,一般采用 3CCD 彩色相机,这种相机具有色彩真实鲜艳、对比度高、动态范围大等优点,但同时也有光学系统复杂、装调维护困难、帧频低(广播级 3CCD 相机一般为 24 Hz 或 25 Hz)、总像素有限、数据处理困难等缺点^[2],所以用于实况记录更多而用于跟踪与测量较少。而普通的 CCD 和 CMOS 相机光学系统简单、帧频高、总像素数高,适用于跟踪和测量而不适合作为实况记录。因此研究出一种能兼顾跟踪测量和实况记录的色彩还原系统就有了非常重要的意义。

2 Bayer 滤波原理及还原算法

2.1 Bayer 滤波

如果在黑白 CCD 或 CMOS 成像器件表面覆盖一层微小的光学滤镜,使器件的每个像素仅能对 RGB 三色中的一个分量感光,这样整个成像器件产生的图像有类似马赛克的效果,在针对单个像素计算其真正的颜色时,需要获取其邻接像素的感光信息,然后进行白平衡计算再进行色彩还原。这种方法被称为彩色滤波阵列^[3-4](Color Filter Array, CFA)。CFA 算法可用于黑白成像器件,如果算法合适,则既能利用 CCD 和 CMOS 器件的高帧频高像素数,又可获取彩色图像。

在 CFA 算法中,Bayer 滤波^[5-7]应用广泛且效果良好,其基本结构如图 1 所示。其中 R、G、B 分别代表红、绿、蓝三色分量。

G_{11}	R_{12}	G_{13}	R_{14}	G_{15}
B_{21}	G_{22}	B_{23}	G_{24}	B_{25}
G_{31}	R_{32}	G_{33}	R_{34}	G_{35}
B_{41}	G_{42}	B_{43}	G_{44}	B_{45}
G_{51}	R_{52}	G_{53}	R_{54}	G_{55}

图 1 Bayer 滤波结构

Fig. 1 Construction of Bayer filter

从图 1 可看出,在 Bayer 滤波中,R、G、B 三个分量总数不同。考虑到人眼视觉对绿色更敏感,分辨能力更强,而且绿色在可见光中占据了更宽的光谱范围,所以 G 分量占了总数的一半。因

此对 R 和 B 分量进行计算时,可以 G 分量为基准。

2.2 双线性插值法及其改进

在 Bayer 滤波的色彩还原中,双线性插值算法^[5]是对单个分量进行独立插值的经典算法,以图 1 的 CFA 为例,取坐标(3,2)点,对 R 分量感光,则计算其 G 和 B 分量的公式为:

$$\begin{cases} G_{32} = \frac{G_{22} + G_{31} + G_{33} + G_{42}}{4} \\ B_{32} = \frac{B_{21} + B_{23} + B_{41} + B_{43}}{4} \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)易知,双线性插值法的优点是算法简单,滤波器设计容易,计算量小,非常适用于实时处理。但缺点也很明显,首先是滤波器大小始终为 3×3 ,忽略了图像细节,更重要的是这种算法在单个颜色分量间独立插值,忽略了 3 个颜色分量之间的相关性。

可以预见该算法在图像中的平滑区域内效果较好,但在图像的边缘处,由于像素取值具有方向性,如果颜色反差大,则用双线性插值会产生很大误差,在图像边缘呈现锯齿状效果,称为拉链效应^[8-9]。由上所述 G 分量在图像中总数更多,则拉链效应更明显,所以在插值运算中应更精确地恢复 G 分量,改善色彩还原效果。

基于双线性插值法的缺点和 G 分量的重要性,考虑在恢复 G 分量时使用梯度算法^[7],即通过计算梯度来检测边缘的方向,进而选择合适的插值方向,使计算过程不跨越边缘,从而减少拉链效应。

仍以图 1 为例,假设 Δ_h 和 Δ_v 分别是该像素在水平方向和垂直方向的梯度,则有:

$$\begin{cases} \Delta_h = |G_{31} - G_{33}| \\ \Delta_v = |G_{22} - G_{42}| \end{cases} \quad (2)$$

若 $\Delta_h < \Delta_v$,即认为水平方向有边缘的概率大于垂直方向,则插值在水平方向进行,反之若 $\Delta_h > \Delta_v$,则在垂直方向进行,若 $\Delta_h = \Delta_v$,则该像素仍在平滑区域,在两个方向都进行插值。可将式(1)中计算 G 分量的算式优化为:

$$\begin{cases} G_{32} = \frac{G_{22} + G_{31} + G_{33} + G_{42}}{4} & (\Delta_h = \Delta_v) \\ G_{32} = \frac{G_{31} + G_{33}}{2} & (\Delta_h > \Delta_v) \\ G_{32} = \frac{G_{22} + G_{42}}{2} & (\Delta_h < \Delta_v) \end{cases} \quad (3)$$

而对于 B 分量,对于坐标 $(3,2)$ 因为并不是水平和垂直邻接的像素,则计算时无法直接判断边缘是否在两个方向,需要对 $(2,1)$ 、 $(2,3)$ 、 $(4,1)$ 、 $(4,3)$ 4 个对 B 分量感光的像素进行判断。则有如下判据,设

$$\begin{cases} \beta_1 = B_{23} - B_{21} \\ \beta_2 = B_{23} - B_{43} \\ \beta_3 = B_{43} - B_{41} \\ \beta_4 = B_{41} - B_{21} \end{cases} \quad (4)$$

则对 B 分量,优化后的算式为:

$$\begin{cases} \frac{B_{21} + B_{23}}{2} & (\beta_1 < \beta_2) \cap (\beta_1 < \beta_3) \cap (\beta_1 < \beta_4) \\ \frac{B_{23} + B_{43}}{2} & (\beta_2 < \beta_1) \cap (\beta_2 < \beta_3) \cap (\beta_2 < \beta_4) \\ \frac{B_{41} + B_{43}}{2} & (\beta_3 < \beta_2) \cap (\beta_3 < \beta_1) \cap (\beta_3 < \beta_4) \\ \frac{B_{21} + B_{41}}{2} & (\beta_4 < \beta_1) \cap (\beta_4 < \beta_3) \cap (\beta_4 < \beta_2) \end{cases} \quad (5)$$

而对 R 分量其值保持不变。

式(2)、(3)、(4)、(5)联立求解同样可以得到还原参数,这种方法和式(1)对比可以看出两种算法可以的算法复杂度和计算量并没有显著的增加。

3 硬件设计

CMOS 相机采用 Dalsa 公司的 1M120,使用的工作模式为 $1024(H) \times 1024(V)$,帧频 100 Hz,数据位宽 8 bit,该相机灵敏度高、动态范围宽,像元大小适中,可兼顾捕获和测量功能。

在以往的光测设备中,为了满足实时跟踪的要求,图像处理硬件平台多选用 DSP+FPGA 的模式,但随着 PC 硬件处理能力的快速发展,使用 PC 平台+工业级数字图像采集卡的模式也可以满足实时性的要求。

数字图像采集卡使用 Dalsa 公司出品的 X64-Xcelera-full,该卡支持 Camera-Link full 标准,接口为 PCI-E $\times 4$,硬件的结构和数据流程图如图 2 所示,处理软件从采集卡缓存读入图像,进行处理后得到目标脱靶量和还原的彩色图像,将脱靶量输出至串行通信卡,将彩色图像输出至显卡,显卡有数字和模拟接口,再分别输出给相应的传输和显示设备。

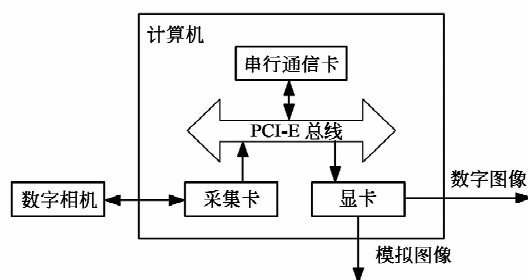


图2 硬件数据流图

Fig. 2 Flow chart of hardware

4 软件设计

采用 VC++ 进行软件设计^[10-11],同时利用采集卡提供的 Spera 开发库简化一些如接收、发送、控制相机等底层操作。同时考虑到一帧数据量比较大,采用乒乓算法,在软件中为图像处理开辟两个缓存区,首先写满第一个缓存区,然后进行计算,读入的数据写入第二个缓存区以备使用,第一个缓存区的数据计算完毕后清空,计算第二个缓存区中数据,同时将读到的数据再写入第二个缓存,如此往复,以提高软件运行效率。软件的关键流程图如图 3 所示。

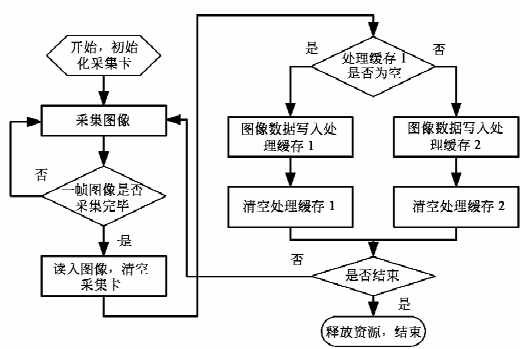


图3 软件流程图

Fig. 3 Flow chart of software

5 效果评价

在图像处理中评价重构图像质量常用两种方法:均方根误差(Mean Square Error, MSE)和最高峰值比^[12](Peak Signal - to - noise Ratio, PSNR)。这两种计算方法分别如下:

$$\text{MSE} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f_0(i,j) - f_r(i,j))^2, \quad (6)$$

$$\text{PSNR} = 10 \times \lg\left(\frac{255^2}{\text{MSE}}\right), \quad (7)$$

式中: M 和 N 分别代表图像尺寸的行列数, $f_0(i, j)$ 和 $f_r(i, j)$ 分别代表原始图像和恢复后图像的第 (i, j) 个像素的强度分量。在式(7)中, PSNR 是某个分量的值, 即真彩色图像可以分成 R 、 G 、 B 三个分量独立的比较, 反映了原始图像和恢复后的图像相似的程度, PSNR 越大, 则越相似。表 1 给出了本文所论述方法和双线性插值算法对实验图像进行处理后的 PSNR 值以进行定量对比。

表 1 算法 PSNR 比较

Tab. 1 Comparison of algorithms

插值算法	B 分量 PSNR	G 分量 PSNR	R 分量 PSNR
双线性	25.04	23.83	24.87
检测边缘	28.08	28.53	27.38
性能提高	12.1%	19.7%	10.1%

从表 1 中可以看出, 检测边缘而后插值的算法 PSNR 比双线性插值法更高, 平均提高了 14% 左右, 性能有较大幅度提升。

考虑到靶场光测的实时性需求, 需要对处理算法的时间性能进行定量测量。同样在相机的典型使用条件下进行测量。对 100 Hz, $1\,024 \times 1\,024$ 的图像进行还原, 对快速运动和慢速运动图像进行计算, 每次计算 10 s 数据, 计算所有图像的平均处理时间和最长一次的处理时间, 结果如表 2 所示。

表 2 算法时间性能比较

Tab. 2 Comparison of time performance of algorithms

插值算法	快速运动 图像/ms	慢速运动 图像/ms
双线性插值平均	7.13	6.29
检测边缘插值平均	7.72	6.40
双线性插值最长	8.56	8.09
检测边缘插值最长	9.52	8.29

由表 2 可以看出:

(a) 相机工作于 100 Hz 时, 最长的一帧处理时间也小于 9 ms, 可见两种方法的处理时间均满足实时性要求;

(b) 在都满足实时性要求的前提下, 处理快速运动图像时, 检测边缘插值算法的平均处理时间比双线性插值算法的处理时间长大约 8%, 处理慢速运动图像时处理时间长大约 2% 左右, 性能差距不是特别大, 而考虑到 PSNR 提高了 14% 左右, 在时间性能上的损失是值得的。

6 结 论

根据 Bayer 格式 CFA 的原理提出了一种改进的彩色图像恢复算法, 利用图像的梯度信息进行边缘检测而后再进行插值, 算法复杂度低的同时性能提高 14% 左右, 可以用于 100 Hz, $1\,024 \times 1\,024$ 的图像实时彩色还原处理, 达到了预期目的。如果增大边缘检测的邻域范围和使用卡尔曼滤波等算法, 效果会更好, 但同时算法复杂度会提高, 时间性能会降低, 如何在提高还原效果的同时保证实时处理所需要的时间性能则是下一步研究的重点。

参 考 文 献:

- [1] 贾涛, 吴能伟, 陈涛. 光电经纬仪组网测量位置估计的 Cramer-Rao 限[J]. 光电工程, 2005, 32(7): 4-6.
Jia T, Wu N W, Chen T. Cramer-Rao lower bounds of position estimation in a photoelectric theodolite-based network [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(7): 4-6. (in Chinese)
- [2] 甘波, 魏延存, 郑然. CMOS 图像传感器芯片的自动白平衡[J]. 液晶与显示, 2011, 26(2): 224-228.
Gan B, Wei Y C, Zheng R. Auto white balance algorithm for CMOS image sensor chip [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2011, 26(2): 224-228. (in Chinese)
- [3] Funt B, Cardei V. Learning color constancy [C]// *Proc of the 4th Int. Conf on Color Imaging and Applications*, [S. I.]: IEEE Press, 1996: 58-60.
- [4] 孙立新. LCD 显示器的白平衡调整[J]. 液晶与显示, 2011, 26(2): 220-2223.

- Sun L X. LCD white balance adjustment [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2011, 26(2): 220-2223. (in Chinese)
- [5] 赵兴梅, 刘建伟, 李孝强. 数字相机色差空间双线性插值算法的实现[J]. 电子科技, 2009, 2(4): 57-59.
Zhao X M, Liu J W, Li X Q. Realization of bilinear interpolation method in color difference space for digital camera [J]. *Electronic Science and Technology*, 2009, 2(4): 57-59. (in Chinese)
- [6] Pei S C, Tam I K. Effective color interpolation in CCD color filter array using signal correlation [J]. *IEEE Trans. Circuit and System for Video Technology*, 2003, 13(6): 503-513.
- [7] 尹勇, 胡磊. 一种改进的 Bayer 图像彩色恢复差值算法[J]. 计算机科学, 2010, 37(4): 278-280.
Yin Y, Hu L. Improved Interpolation algorithm for demosaicing Bayer pattern images [J]. *Computer Science*, 2010, 37(4): 278-280. (in Chinese)
- [8] 杨永明, 李清军, 李文明, 等. 基于 Bayer 滤波的彩色面阵 CCD 调制函数[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1611-1618.
Yang Y M, Li Q J, Li W M, et al. Modulation transfer function for color area CCD based on Bayer filter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1611-1618. (in Chinese)
- [9] Kimmel R. Image reconstruction from CCD samples [J]. *IEEE Trans, Image Processing*, 1999, 8(9): 1221-1228.
- [10] 冉峰, 杨辉, 黄舒平, 等. 面阵 CCD 彩色视频图像实时采集系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 273-280.
Ran F, Yang H, Huang S P, et al. Design of real-time color video capture system for area array CCD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 273-280. (in Chinese)
- [11] 修吉宏, 黄浦, 李军, 等. 大面阵彩色 CCD 航测相机的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1365-1373.
Xiu J H, Huang P, Li J, et al. Radiometric calibration of large area array color CCD aerial mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1365-1373. (in Chinese)
- [12] 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.
Luo X, Sun H J, Chen Q P, et al. Real-time demosaicing of Bayer pattern images [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(2): 182-187. (in Chinese)

作者简介: 张涛(1982—), 男, 河南信阳人, 硕士, 助理研究员, 主要从事机器视觉及计算机网络方面的研究。E-mail: 20737887@qq.com