

自适应自动白平衡算法的改进与实现

田立坤^{1,2}, 刘晓宏², 李洁², 郭晓光²

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009; 2. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471009)

摘要: 为了实现高分辨率图像采集系统图像色彩的实时校正, 提出一种改进的自适应自动白平衡算法。该算法在 YCbCr 颜色空间进行色温估计, 通过加入循环调节环节不断提高通道增益计算的精度, 与其他几种典型白平衡算法相比, 获得更优的颜色校正效果。根据 FPGA 实现特点进行硬件实现优化设计。实验结果表明: 该算法图像处理速度快且占用硬件资源少, 满足高分辨率图像采集系统的实时性要求。

关键词: 图像处理; 色彩校正; 白平衡; FPGA; 色温

中图分类号: V271.4; TP319 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)12-0037-05

Improvement and Implementation of the Adaptive and Automatic White Balance Algorithm

TIAN Likun^{1,2}, LIU Xiaohong², LI Jie², GUO Xiaoguang²

(1. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471009, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optic Equipment, AVIC, Luoyang 471009, China)

Abstract: In order to correct the unrealistic color of the images captured by the high-resolution image acquisition system in real time, an improved adaptive and automatic white balance algorithm was proposed. The color temperature estimation in the YCbCr color space was completed by this algorithm, and a regulation module was added to improve the calculation precision of channel gain continuously. Compared with some other automatic white balance algorithms, it could obtain better color correction performance. The circuit design was optimized according to the characteristic of FPGA. The experiment results show that the algorithm consumes less hardware resources, is fast in image processing and can meet the real-time requirement of high-resolution image acquisition system.

Key words: image processing; color correction; white balance; FPGA; color temperature

0 引言

当光源的色温发生改变时, 人眼视觉系统能够自动调整光敏感度, 使人眼对物体颜色的感知近似保持不变, 这种现象称为色彩恒常性。然而高分辨率图像采集系统本身不具备色彩恒常性功能, 为了使采集的图片与人眼现场所见效果接近, 需要利用自动白平衡 (Auto White Balance) 等技术进行颜色实时校正。

目前, 对于白平衡有一定数量的成熟算法, 这些算法针对不同类型的偏色图像有着较理想的处理结果。常见的灰色世界法 (Gray World Algorithm, GWA) 最大

优点是计算简单, 然而当图像场景颜色并不丰富, 有大量纯色物体存在时, 这种方法校正效果并不佳^[1]。完美反射法 (Perfect Reflector Algorithm, PRA), 当影像的目标以单一颜色为主时有较好的还原能力, 而当影像色彩丰富的时候, 处理后的影像依然有偏色^[2]。文献 [3] 则将 GWA 与 PRA 的特性相结合, 适用于较广采集情形下的自动白平衡处理。但算法计算过程中使用了平方这种非线性运算, 对于高分辨率图像采集系统, 将消耗大量的时间, 无法满足实时性要求。

本文提出一种改进的自适应白平衡算法。该方法在 YCbCr 颜色空间进行色温估计来检测白色参考区域, 进而根据色温信息实现颜色校正。

1 颜色空间

颜色空间是颜色集合的数学表示, 通常使用 3 个

相对独立的属性来表达和描述。在计算机图像领域最常见的颜色空间为由三原色组成的 RGB 颜色空间,在视频系统领域常用全球数字视频部件接口标准 ITU-R BT. 601 提出的 YCbCr 颜色空间来表示。

高分辨率图像采集系统采用彩色滤波阵列(CFA)采集到 Bayer 格式原始图像,经颜色插值算法处理后为 RGB 格式图像。为了实现在 YCbCr 颜色空间进行自动白平衡处理,首先要实现 RGB 颜色空间到 YCbCr 颜色空间的转换,算式为^[4]

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.1687 & -0.3313 & 0.5 \\ 0.5 & -0.4187 & -0.0813 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:“Y”表示亮度,提供色彩中的亮度信息;“C_b”和“C_r”代表色差,提供色彩中的色度和饱和度。YCbCr 空间具有与人类视觉感知过程相类似的构成原理,并且将亮度信息和色彩信息相分离,受亮度变化的影响小,同时计算过程和空间坐标表示形式比较简单^[5]。

2 改进的自适应白平衡算法描述

颜色插值后得到的 RGB 格式图像存在严重的偏色现象,需要进一步进行自动白平衡处理。自动白平衡的目标是调节不同色温光照条件下图像的颜色,使图像中的白色看上去与现实世界的白色一致。自动白平衡算法主要包括 3 个操作,即色温估计、增益计算和色温校正。

2.1 色温估计

色温估计是自动白平衡算法中最重要的一环,只有估算出正确的色温信息才能保证后续操作的正确性。自动白平衡的目标是调节不同色温光照条件下图像的颜色,使图像中的白色看上去显示真正的白色,因此色温估计只需计算白色区域的平均色差来代表整帧图的色差。

YCbCr 颜色空间将满足一定条件的像素认为是白点基准点,以此来建立白色参考区域,而区域以外的像素认为是非白色的。对于白色像素,R、G、B 3 种颜色分量相等,表现在 YCbCr 颜色空间上为蓝色差分量 C_b 和红色差分量 C_r 均为零。为此,可将 Y 足够大,C_b、C_r 足够小的像素认为是白点。Nakano 等提出的白色区域约束条件为^[6]

$$\begin{cases} Y > \chi \\ -\alpha < C_b < \alpha \\ -\beta < C_r < \beta \end{cases} \quad (2)$$

式中, χ 、 α 、 β 分别为亮度和色差分量的控制阈值。

然而式(2)中未考虑 C_b、C_r 之间的相关性,因此,在此基础上加入 C_b、C_r 之和的约束条件^[7]为

$$-\gamma < (C_b + C_r) < \gamma \quad (3)$$

除此之外,Y 和 C_b、C_r 之间也存在一定的相关性。通过增加控制阈值 φ 来进一步提高白点检测的正确性

$$Y - |C_b| - |C_r| > \varphi \quad (4)$$

检测白点的约束条件在 YCbCr 颜色空间定义了一个六边形三维区域,如图 1 所示。

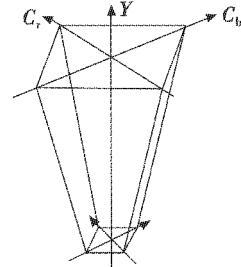


图 1 YCbCr 颜色空间的白色区域

Fig. 1 White region based on YCbCr color space

白色区域的检测使得参与增益计算的像素具有更强的白色特征,提高了色温估计的有效性。为了避免在出现大量色块的场景出现色彩振荡现象,本文提出增加对白点区域有效性的判断,即只有场景的参考白点数目大于一定值(总像素的 2^{-10})才认为色温估计有效。

2.2 增益计算

在色温估计完成后,需要判断出当前图像的偏色情况。如果存在偏色,则需要计算出 C_b、C_r 的通道增益来调整图像的色差。增益 u 和 v 计算的目标就是将白色区域 C_b、C_r 通道的平均色差调整到 0 或接近 0。

改进的自适应白平衡算法根据 C_b、C_r 通道平均色差的关系加入循环调节环节,进行迭代增益 u 和 v 的计算。当白色区域的平均色差 C_b 与 C_r 绝对值之和大于控制阈值 θ ,说明图像存在偏色现象,需减小相应的 C_b 或 C_r 通道的增益。迭代计算过程中,检测到平均色差 C_b 与 C_r 绝对值之和小于控制阈值 θ ,则需提高通道增益调节步长 2^{-n} 的精度,即实现 n 加 1 处理,并将控制阈值 θ 缩小一半。平均色差 C_b 与 C_r 绝对值之和越接近于 0,代表颜色校正效果越好。自适应自动白平衡算法具体流程如图 2 所示。

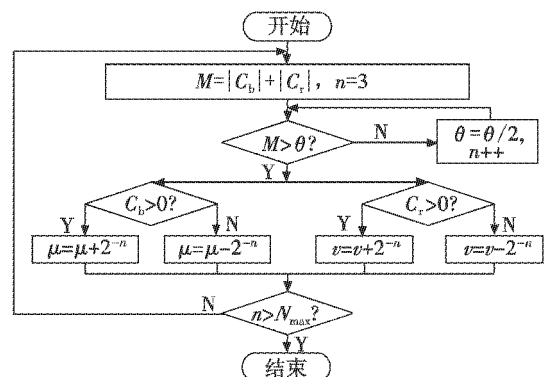


图 2 增益计算正流程图

Fig. 2 Flow chart of gain calculation

如果白色区域平均色差 C_b 大于 0, 则增加蓝色通道增益 u , 反之减小红色通道增益 u 。同理可得 C_r 通道增益调节过程。调节的方法是 u, v 上加上或减去一个自适应的变量 2^{-n} 。 n 的最小值决定了增益计算的最大步长, 它的最大值决定了通道增益计算的精度。当 n 值大于迭代控制阈值 N_{\max} 时, 则白平衡迭代过程结束。

2.3 色温校正

通过加入循环调节环节, 随着 n 的增加不断增加 C_b 与 C_r 通道增益计算的精度, 最终得到 C_b 与 C_r 通道增益 u 和 v 。利用增益 u 和 v 进行整帧图像的色温校正。色温校正过程为^[8]

$$\begin{cases} C_{b_{\text{new}}} = C_b \times \mu \\ C_{r_{\text{new}}} = C_r \times \nu \end{cases} \quad (5)$$

式中: C_b 和 C_r 分别为输入图像每个像素经颜色空间转换后 C_b, C_r 通道的值; $C_{b_{\text{new}}}$ 和 $C_{r_{\text{new}}}$ 分别为色温校正后每个像素 C_b, C_r 通道的值。

3 算法分析

由于检测的白色区域平均色差 C_b, C_r 越接近 0 则意味着颜色校正效果越好, 为了客观地评价图像白平衡效果, 提出了基于色差分量 C_b, C_r 的评价方法, 如式 (6) 所示^[9], 其中, C_b, C_r 分别为图像白色区域的平均色差, s_q 和 M 值越小则表明颜色校正效果越好。

$$\begin{cases} s_q = \sqrt{C_b^2 + C_r^2} \\ M = |C_b| + |C_r| \end{cases} \quad (6)$$

改进的自适应白平衡算法加入循环调节环节的同时, 也加入了两个控制阈值 N_{\max} 和 θ , 两者相互作用促使增益计算的精度不断提高。现以大小为 550×800 偏色图像为研究对象, 通过调整控制变量 N_{\max} 和 θ 的取值, 分析两个控制阈值对算法处理效果产生的影响。

研究控制阈值 N_{\max} 过程中, 为了减小控制阈值 θ 的影响, 保证算法的实时性, 应保证 θ 有充足的裕量, 故取 $\theta = 10$ 。在 Matlab 平台下 N_{\max} 取不同值进行白平衡仿真处理, 得到的结果如表 1 所示。

表 1 控制变量 N_{\max} 对颜色校正影响

Table 1 The effect of N_{\max} on color correction

| N_{\max} | u | v | M | s_q | C_r | C_b |
|------------|--------|--------|---------|---------|----------|---------|
| 7 | 1.1250 | 1.0156 | 0.03111 | 0.02975 | -0.02972 | 0.00139 |
| 8 | 1.1250 | 1.0273 | 0.02672 | 0.02557 | -0.02554 | 0.00118 |
| 9 | 1.1250 | 1.0391 | 0.01800 | 0.01699 | -0.01696 | 0.00104 |
| 10 | 1.1250 | 1.0420 | 0.01598 | 0.01513 | -0.01511 | 0.00087 |
| 11 | 1.1250 | 1.0439 | 0.01453 | 0.13759 | -0.01373 | 0.00080 |

由表 1 可知, 随着控制变量 N_{\max} 的不断增大, 颜色校正的效果不断提高, 但与此同时, 算法的迭代次数也不断提高, 增加了算法的完成时间。综合考虑计算精

度和处理速度, $n = 9$ 时取得最佳的算法性能。

为了进一步验证控制阈值 θ 对白平衡产生的效果, 在 $n = 9$ 情况下 θ 分别取不同值。实验结果如表 2 所示。

表 2 控制阈值 θ 对白颜色校正影响

Table 2 The effect of θ on white correction

| θ | u | v | M | s_q | C_r | C_b |
|----------|--------|--------|---------|---------|----------|---------|
| 5 | 1.1250 | 1.0781 | 0.00452 | 0.00342 | 0.00314 | 0.00138 |
| 3 | 1.1250 | 1.0703 | 0.00224 | 0.00172 | -0.00084 | 0.00140 |
| 1 | 1.1211 | 1.0723 | 0.00138 | 0.00996 | 0.00056 | 0.00082 |
| 0.5 | 1.1250 | 1.0781 | 0.00497 | 0.00377 | 0.00345 | 0.00152 |
| 0.3 | 1.1250 | 1 | 0.03242 | 0.03108 | -0.03105 | 0.00137 |

由实验结果可知, 随着控制阈值 θ 的减小, 在一定程度上会取得更好的自动白平衡效果, 但当控制阈值 θ 减小到一定值, 反而会降低算法的性能。

为了验证本文算法的有效性, 利用不同场景的图片进行白平衡处理。大量的图像的测试结果表明, 本文提出的改进的自适应白平衡方法颜色校正正确率在 87% 以上。Matlab 平台分别采用灰色世界法、GW 和 PR 正交组合法^[3]、动态检测法^[10]进行白平衡处理仿真, 与本文的改进的自适应白平衡算法进行效果对比, 实验结果如图 3 所示。



图 3 白平衡效果比较

Fig. 3 Comparison of AWB algorithms

由仿真实验结果可知, 灰色世界法处理结果依旧有偏色现象, GW 和 PR 正交组合出现了曝光现象, 动态检测法实现了较好的色彩校正处理, 本文提出的改进的自适应白平衡算法取得白平衡处理结果最好。

4 自动白平衡算法硬件实现

4.1 基于 DSP48E 的颜色空间转换

为了简化颜色空间转换的运算过程, 式 (1) RGB 色彩空间与 YCbCr 色彩空间的转换可以优化为

$$\begin{cases} Y = CA \times (R - G) + G + CB \times (B - G) \\ C_b = CC \times (B - Y) + 128 \\ C_r = CD \times (R - Y) + 128 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $CA = 0.299$; $CB = 0.144$; $CC = 0.564$; $CD = 0.713$ 。

根据以上公式可知,输入数据需要与浮点系数相乘,会消耗很多 FPGA 内部资源。为了尽量减少不必要的资源消耗,决定通过寄存器左移 16 位实现取整处理,公式两边扩大 2^{16} 倍。

$$\begin{cases} Y \times 2^{16} = 19595 \times (R - G) + G \times 2^{16} + 7471 \times (B - G) \\ C_b \times 2^{16} = 36962(B - Y) + 128 \times 2^{16} \\ C_r \times 2^{16} = 46727(R - Y) + 128 \times 2^{16} \end{cases} \quad (8)$$

为保证颜色空间转换的实时性,采用 Virtex-5 中结构灵活、高效低耗的 DSP 专用结构——DSP48E 单元进行乘法运算。基于 DSP48E 单元的 RGB 色彩空间转 YCbCr 色彩空间硬件设计结构如图 4 所示^[11]。

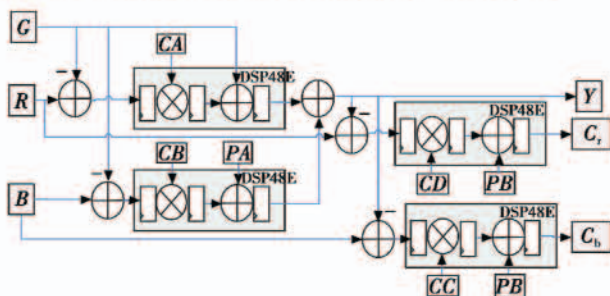


图4 颜色空间转换硬件设计结构图

Fig.4 Operational principle of color space conversion

4.2 基于FPGA的优化设计

每帧图像的有效数据首先进行白点检测获得白色区域。在此基础上分别计算白色区域中 C_b 、 C_r 通道的平均色差。通过循环调节环节计算得到增益后,将增益参数存入 FPGA 内部 RAM。由于高分辨率图像采集系统在 60 frame/s 数据采集状态下进行,前后相邻帧图像数据变化不会太大,因此可以将上一帧图像计算得到的通道增益 u 和 v 用于当前帧色温实时校正。这样,改进的自适应白平衡算法在进行大数据量图像处理时,在不需要图像帧存储的情况下便能完成颜色实时校正。改进的自适应白平衡算法流程如图 5 所示。

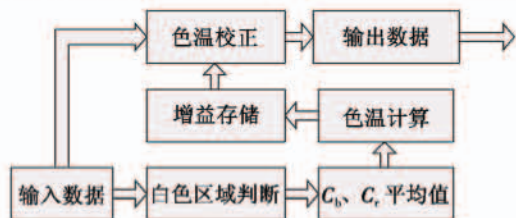


图5 自适应AWB算法实现流程图

Fig.5 Flow chart of the adaptive AWB algorithm

在FPGA中实现定点运算比较容易。为了避免浮点运算带来不必要的硬件损耗,改进的自适应白平衡算法在增益计算阶段将 u 和 v 分别通过移位运算扩大 2^{16} 倍取整后参与计算。调整步长 2^{-n} 同样通过移位运算实现整数化,即 $2^{-n} \times 2^{16} = 2^{16-n}$ 。在计算结束后,通

过右移 16 位来实现相应的后处理。

Precision 软件对改进的自适应白平衡算法模块程序进行综合后可知,该模块程序最大时钟频率为 292.325 MHz,满足高分辨率图像采集系统大数据量实时图像处理要求。除此之外,算法的硬件实现资源消耗很少,具体资源使用情况如表 3 所示。

表3 资源利用表

Table 3 Resource consumption

| 资源 | 占有数量 | 可用数量 | 利用率/% |
|-----------------|------|-------|-------|
| Slice Registers | 1907 | 28800 | 6 |
| Slice LURs | 1301 | 28800 | 4 |
| LUT-FF pairs | 133 | 2491 | 29 |
| Bonded IOBs | 56 | 220 | 25 |
| BUFG/BUFGCTRLs | 2 | 32 | 6 |
| DSP48E | 6 | 48 | 12 |

本文提出改进的自适应自动白平衡算法最终在以 Xilinx 公司的 XC5VLX50 芯片为核心的高分辨率采集系统中进行验证。参数 $(\chi, \alpha, \beta, \gamma, \varphi, \theta, u, v)$ 初始化为 $(200, 30, 30, 40, 150, 2, 1, 1)$ 。白平衡处理前后效果对比如图 6 和图 7 所示。

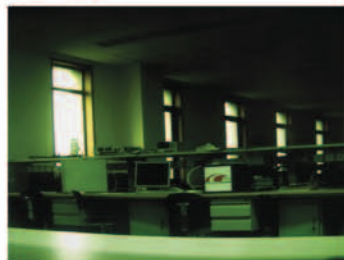


图6 原始图像

Fig.6 The original image



图7 校正后图像

Fig.7 The corrected image

5 小结

自动白平衡算法的优劣直接决定了图像采集系统图像色彩还原能力的好坏。本文提出改进的自适应自动白平衡算法通过加入循环调节环节,不断提高增益计算的精度,相对其他几种典型白平衡算法获得更优的颜色校正效果。硬件验证结果表明,该算法无论在资源消耗上还是处理速度上都达到了较高的水平,具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 徐晓昭,蔡铁珩,刘晓民,等.改进灰度世界颜色校正算法[J].光子学报,2010,39(3):559-564.
- [2] ADAMS J, PARULSKI K, SPAULDING K. Color processing in digital cameras[J]. IEEE Micro, 1988, 18(6):20-30.
- [3] LAM E Y. Combining gray world and retinex theory for automatic white balance in digital photography[C]//The 9th International Symposium on Consumer Electronics, June, 2005:134-139.
- [4] 金晓冬,常青.基于FPGA的RGB到YCbCr色空间转换[J].现代电子技术,2009(18):95-100.
- [5] BENSALI F. Power modeling and efficient FPGA implementation of color space conversion[C]//ICECS106, 13th IEEE International Conference, 2006:164-167.
- [6] NAKANO N, NISHIMURA R, SAI H. Digital still camera system for mega pixel CCD [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1998, 44(3):581-586.
- [7] 金黄斌,秦兴,郭斌林.基于灰度世界和白点检测的自动白平衡算法[J].电子器件,2011,34(2):226-231.
- [8] CHIKANE V, FU C S. Automatic white balance for digital still camera[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2006, 22:497-509.
- [9] 周荣政,何捷,洪志良.自适应的数码相机自动白平衡算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(3):529-533.
- [10] WENG C, CHEN H, FUH C. A novel automatic white balance method for digital still cameras[C]//The IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2005:3801-3804.
- [11] 田耘,徐文波. Xilinx FPGA 开发实用教程[M].北京:清华大学出版社,2008.
- (上接第 36 页)
- [4] QIN S J. An overview of subspace identification [J]. Computer and Chemical Engineering, 2006, 32 (10): 1502-1513.
- [5] 王建宏,王道波.子空间预测控制算法在主动噪声振动中的应用[J].振动与冲击,2011,30(10):129-135.
- [6] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. UK:Cambridge University Press, 2008.
- [7] ZEILINGER M. Real time suboptimal model predictive control using a combination of explicit MPC and online optimization[J]. IEEE Transactions of Automatic Control, 2011, 56(7):1524-1534.
- [8] BEMPORAD A. Model predictive control based on linear programming the explicit solution[J]. IEEE Transactions of Automatic Control, 2002, 47(12):1974-1984.
- [9] DONG J, VERHAEGEN M. Cautious H optimal control using uncertain Markov parameters identification in closed loop[J]. Systems & Control Letters, 2009, 58 (3): 378-388.
- [10] SODERSTORN T, MOSSBERG M, HONG M. Accuracy analysis of a covariance matching approach for identify errors in variables systems [J]. Automatica, 2011, 47 (1):272-282.
- [11] PINTELON R, SCHOUKENS J. Frequency domain maximum likelihood estimation of linear dynamic errors-in-variables models [J]. Automatica, 2007, 43(2):621-630.
- [12] PILLONETTO G, DE NICOLAO G. A new kernel based approach for linear system identification [J]. Automatica, 2010, 46(1):81-93.
- [13] AGUERO J C, ROJAS C R, HJALMARSSON H, et al. Accuracy of linear multiple-input multiple-output (MIMO) models obtained by maximum likelihood estimation [J]. Automatica, 2012, 48(4):632-637.
- [14] HJALMARSSON H, JONAS M. A geometric approach to variance analysis in system identification [J]. IEEE Transactions of Automatic Control, 2011, 56 (5): 983-997.
- [15] 王建宏,王道波.多个未知时延的MISO系统的递推辨识[J].控制与决策,2010,25(1):93-98.
- [16] AGUERO J C, GOODWIN G C, PAUL M. J. et al. A virtual closed loop method for closed loop identification [J]. Automatica, 2011, 47(8):1626-1637.

欢 迎 投 稿 欢 迎 刊 登 广 告