

基于 FPGA 的 Bayer 彩色自动白平衡设计与实现

程本飞^{1,2}, 戴明¹, 孙丽娜¹

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2.中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 针对物体在不同色温光源照射下呈现偏色的现象, 用 FPGA 实现对 Bayer CCD 数字相机的自动白平衡处理。根据 CFA(Color Filter Array)的分布特点, 利用双端口 RAM(DPRAM), 实现了颜色插值与色彩空间转换。在 FPGA 上设计了自动白平衡的三大电路模块: 色温估计、增益计算和色温校正, 并连接形成一个负反馈回路, 然后结合 EDA 设计的特点, 改进了增益计算的过程, 有效地抑制了色彩振荡现象。

关键词: 自动白平衡; 可编程逻辑器件; 贝尔彩色; Camera Link; 双端口 RAM

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 0258-7998(2010)08-0055-05

The design and realization of Bayer color auto white balance based on FPGA

CHENG Ben Fei^{1,2}, DAI Ming¹, SUN Li Na¹

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2.Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: To resolve the phenomenon of color offset of object under different colored light source, this paper develops and implements a method of auto white balance based on FPGA for Bayer CCD digital camera. The Bayer interpolation algorithm and color space conversion process are conducted by using the on-chip DPRAM. The system is composed of three modules(color temperature estimation, gain computation and color temperature adjustment) which form a feed-back loop. Taking the advantages of FPGA, our designs improve the gain computation process restrain the phenomena of color trembles.

Key words: auto white balance; FPGA; Bayer color; camera link; DPRAM

在不同的光源或者天气条件下光谱特性是互不相同的, 这被称之为色温。从物理意义上讲, 人们看到的物体之所以呈现出特定的颜色, 是因为光线照向物体时, 物体所反射的光在人眼视觉系统中呈现出这种特定的颜色。也就是说, 能看到的物体颜色不仅取决于其反射特性, 而且还和照向物体的光线有关系, 如一张白纸在钨丝灯下会偏橘黄色调, 在荧光灯下会偏绿, 而在日光下会有点偏蓝。自动白平衡的目的就是自动调整不同色温光照下图像的三基色分量的比例, 使其看上去和标准光源下拍摄的颜色一致。

目前在工程上应用的自动白平衡算法主要有全局白平衡算法和局部白平衡算法两大类。全局白平衡算法以“灰度世界法”GWM(Gray World Method)为代表, 其认

为所拍摄的图像有丰富的色彩变化, R、G 和 B 三色分量的统计平均值应该相等, 并以该均值作为白平衡校准的依据。局部白平衡算法以“镜面法”PRM(Peak Reflectance Method)为代表, 该算法认为一幅图像中最亮像素点对应于光滑或者镜子表面的物体, 这样的像素点最大限度反映了照射光线的光谱信息, 对这部分点做色彩信息统计并作为色温校正的依据。全局白平衡算法有较大的局限性, 当场景过亮、过暗, 或者色彩比较单一时, 算法几乎完全失效。局部白平衡算法的关键在于寻找参考白点, 而在户外拍摄的过程中, 总是可以找到参考点的, 文献[1]、[2]、[3]介绍了几种能精确寻找参考点的方法。

在工程上, 需要对帧频较高的原始视频图像做实时的白平衡恢复, 而目前的自动白平衡方法, 算法复杂, 计

算时间较长,难以实现对视频流的实时处理。本文就针对以上问题,讨论了一种在 FPGA 上实现的、对视频流实时白平衡处理的自适应方法。

1 自动白平衡算法

在 FPGA 设计的过程中,采用局部白平衡的方法,主要有 3 个基本步骤:

(1)色温估计

色温估计是自动白平衡中最重要的一步,根据算法估计当前场景的色温,给增益计算提供依据。文献[1]利用“镜面法”,严格控制 Y、Cb 和 Cr 三分量的关系,在 YCbCr 空间定义了一个六面体的区域,凡是落入该区域的点都可以作为参考白点。文献[2]提出先对图像的 R、G 和 B 三个分量分别作直方图均衡化,然后将直方图均衡化后的图像转换到 YCbCr 空间,对转换后的 Y 分量进行边沿检测,在边沿包含的各个区域中寻找满足文献[1]条件的区域,作为参考白点区域。选择符合一定条件的区域而不是选择符合一定条件的点,可以提高参考点选择的准确性,但是直方图均衡化处理本身存在灰度级“简并”现象,这也是该文算法的不足。文献[3]直接在原图像的 YCbCr 空间,用 LoG 算子对 Cb 和 Cr 分别作色度边缘提取,获得的色度边缘即为参考白点区域。综合考虑参考点选择的准确性和电路设计的难易程度,本文选用文献[1]的方法选择参考点。

(2)增益计算

增益计算是在色温估计的基础上,求取色温修正系数的过程,主要有 3 种方法:

①查表法^[1]。事先统计出一张表,记录不同的色温所对应的通道增益,具有速度快的优点。但由于表的容量有限,不能实现各种色温情况的连续调节。

②平均值法。对于参考白点区域有 $R=G=B$,即 Cb 和 Cr 的分量为零。得到各通道的增益如下:

$$\begin{cases} R_{\text{gain}} = Y_{\text{mean}} / R_{\text{mean}} \\ G_{\text{gain}} = Y_{\text{mean}} / G_{\text{mean}} \\ B_{\text{gain}} = Y_{\text{mean}} / B_{\text{mean}} \end{cases} \quad (1)$$

其中 Y_{mean} 为参考区域的亮度平均值。 R_{mean} 、 G_{mean} 和 B_{mean} 分别是所选参考白点区域内像素点的 R、G 和 B 分量的平均值。

③迭代法。设 G 通道的增益为常数 1, R 和 B 通道的增益分别为 v, μ 。迭代法根据参考白点区域 Cb 和 Cr 的关系,通过不断地调节 μ 和 v 的值,便可得到各通道最终增益值。文献[1]中提到的方法,在场景出现大量色块时,容易出现色彩振荡现象。本文在其基础上做出了如下改进,增加对白点总数的判断:判断是否 $\text{White-PointNum} > N$,只有场景的白点数目大于阈值 N 时,才认为色温估计有效,这样能避免色温估计无效时对修正系数的误操作导致的色彩振荡。增加了对当前色温的判断:判断是否 $|\text{Cb}| + |\text{Cr}| < M$,如果小于阈值 M ,则认为修

正后的图像已经达到白平衡,不做增益调节。文献[1]所示方法,只适应于相机的一次拍摄,而摄像机拍摄时间长,场景变化快,所以有必要对每帧或隔几帧图像做如图 1 的处理,以应对场景色温的变化。图 1 中 μ 和 v 的初始值为常数 1, λ 为迭代步长。

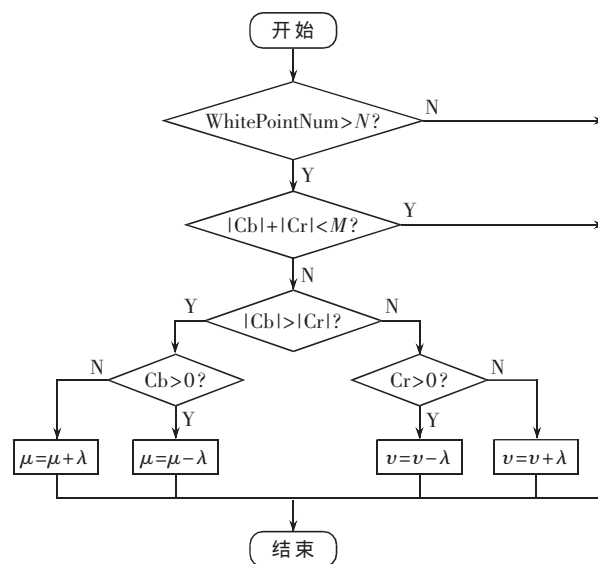


图 1 迭代法过程

(3)色温校正

在获得各颜色通道的增益量后,按照下面的等式对原图像所有像素进行调整。

$$\begin{cases} R_{\text{new}} = R_{\text{gain}} \times R \\ G_{\text{new}} = G_{\text{gain}} \times G \\ B_{\text{new}} = B_{\text{gain}} \times B \end{cases} \quad (2)$$

其中, R 、 G 和 B 是原图像的像素值, R_{new} 、 G_{new} 和 B_{new} 分别是调整后的像素值。值得注意的是经过调整后的像素有溢出的情况,必须进行溢出处理。

上述 3 种增益计算方法中,平均值法和查表法多用于对单张图片处理,迭代法用于对连续图片序列的处理。迭代法获得的修正系数,用于下一帧图像的色彩校正,每次色温估计都是在色彩校正的基础上进行的。

2 系统硬件结构

系统硬件结构如图 2 所示。

目前彩色 CCD 相机,分为 3CCD 全色相机和单 CCD Bayer 彩色相机两大类。全色相机中,光线被分光系统分为 R、G 和 B 三色光后,分别投向三块 CCD,这样在信号输出时就可以获得每个像素的三基色信息。Bayer 格式的 CCD 感光表面覆盖有如图 3 所示的 CFA, CFA 上每个格点仅允许通过一种颜色分量,使每个感光单元只产生一个分量的灰度值。要获得每个像元的 $[r, g, b]$ 信息,需要用到色彩空间插值。

Bayer CCD 相机与全色相机相比,有价格相对便宜、要求进入光线的照度低、输出帧频高等优点,被广泛应用于工程实践中。本文所用的 Bayer CCD 相机有效像元

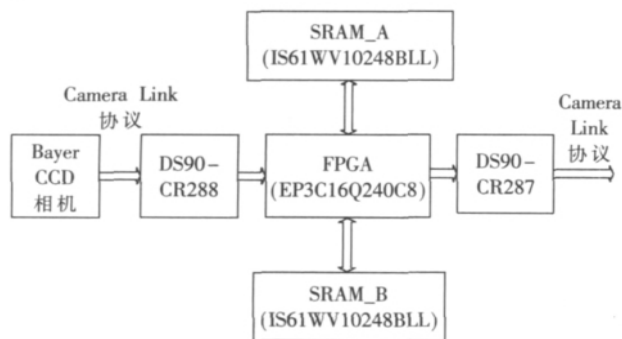


图2 系统硬件结构图

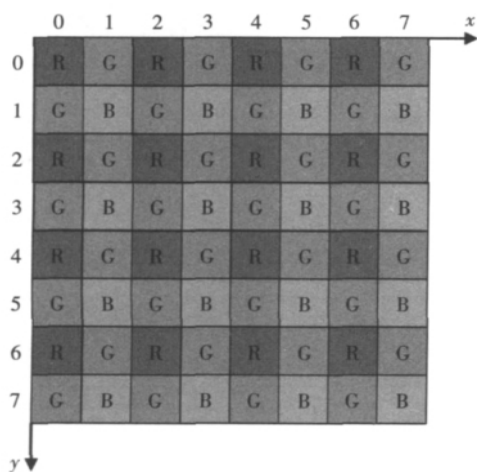


图3 Bayer CFA——RGGB

数为 1024×1024 , 帧频为 30 Hz, 像素时钟为 45 MHz, 像素位深度为 8 bit, 以 Camera Link 协议输出。

Camera Link 是专门为数字摄像机提出的一种工业级的高速数据连接与传输协议。采用 LVDS (Low Voltage Differential Signaling) 技术, 使用较少的连线, 却能达到理论上最大 1.923 G b/s 的传输速率, 并且传输距离比普通的传输方式更远。Camera Link 标准中包含 Base、Medium、Full 3 种规范, 其中 Base 规范只需要一个 26 针的连接器即可实现。26 bit 信号中包括: 5 对图像数据信号 (X0, X1, X2, X3, Xclk), X0~X3 传递图像数据, Xclk 传递像素时钟; 4 对相机控制线 (CC1, CC2, CC3, CC4), 相机制造商可以自由定义各控制信号的功能以满足其特殊产品; 2 对异步串行通信信号线 (SerTC, SerTFG), 可用于相机和图像采集卡之间的异步串行通信; 2 对屏蔽线, 直接接地即可。在本文所述的系统只需要用到 5 对图像数据信号线。

本文采用的 Camera Link 协议芯片为 DS90CR288A 和 DS90CR287, 最高工作频率为 85 MHz, 能满足系统设计要求。DS90CR288A 把接收到的 4 路 LVDS 数据信号和 1 路 LVDS 时钟信号, 分别转换为 28 bit 的 CMOS/TTL 并行数据和像素时钟信号。4 路 LVDS 数据线能传递 28 bit 数据, 传递频率是 LVDS 时钟信号的 7 倍, 最高可达 595 MHz。

《电子技术应用》2010 年第 36 卷第 8 期

28 bit 数据中包括 24 bit 像素信号, 1 bit 帧同步信号 (FVAL)、1 bit 行同步信号 (LVAL)、1 bit 数据有效信号 (DVAL) 和 1 bit 保留信号。在 FPGA 设计中, 只需要应用帧、行同步信号, 像素时钟和有效的像素信号即可完成对图像数据的处理。DS90CR287 的工作过程和 DS90CR288A 相反, 把数据和同步信号转换为 LVDS 信号传递出去。

系统用的主芯片为 Altera 公司的 Cyclone III 系列芯片 EP3C16Q240C8, 其具有丰富的逻辑资源和触发器资源, 内嵌大量乘法器和丰富的 RAM 资源, 特别适合时序操作和大量数据的并行运算。系统还用到容量 2 MB 的 2 块 SRAM, 最短访问周期 10 ns, 可以把处理后的图像数据存于其中, 供板上其他系统使用。

3 EDA 设计

FPGA 的设计采取自顶向下的模块化设计方法, 系统的一级框图如图 4 所示。

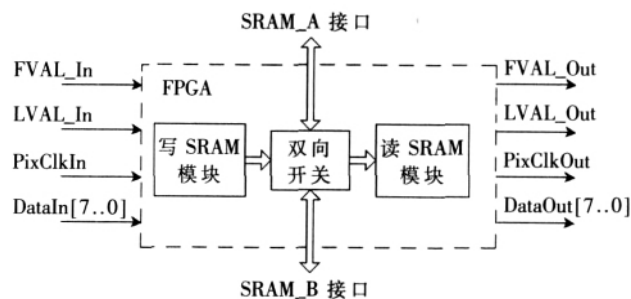


图4 EDA 设计一级框图

写 SRAM 模块根据帧、行同步信号、像素时钟以及行、列偏移量, 获得有效像素的起止, 把像素数据存入 SRAM。白平衡处理过程就在写 SRAM 模块中完成。“双向开关”由 FVAL_In 信号触发, 起到信号线切换的作用, 完成乒乓操作。当写 SRAM 模块把数据写入 SRAM_A 的同时, 读 SRAM 模块从 SRAM_B 读取数据, 当写 SRAM 模块把数据写入 SRAM_B 的同时, 读 SRAM 模块从 SRAM_A 读取数据。读 SRAM 模块读取 SRAM 中的像素数据并以 Camera Link 协议的形式传出。从整体效果上看, 数据能源源不断地流过系统。

写 SRAM 模块中白平衡过程如图 5 所示。

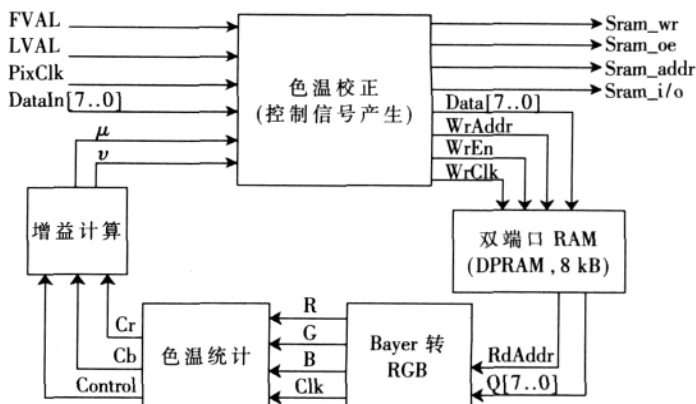


图5 白平衡系统图

电路中色温校正模块，色温统计模块和增益计算模块连接形成一个负反馈回路，能根据场景色温的变化，实时修正增益系数，使修正后的图像稳定在白平衡状态。

在色温统计的过程中没有必要对全平面像素做统计，为了编程和设计的方便，本文在每个4×4的块中选两点做色温统计，如图3中的(2,1)和(1,2)两个点。在色彩空间转换之前需要进行色彩插值，恢复待测像素的三原色数据[r,g,b]，用线性插值法恢复的算法如下。

$$\begin{cases} r_{(2,1)}=R_{(2,0)}+R_{(2,2)} \\ g_{(2,1)}=G_{(2,1)} \\ b_{(2,1)}=B_{(1,1)}+B_{(3,1)} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} r_{(1,2)}=R_{(0,2)}+R_{(2,2)} \\ g_{(1,2)}=G_{(1,2)} \\ b_{(1,2)}=B_{(1,1)}+B_{(1,3)} \end{cases} \quad (4)$$

恢复每一个像素的[r,g,b]值，需要用到相邻的3×3范围的像素值，然而相机数据是逐行依次输出的，所以必须暂存至少3行的像素值。本文引入一块8 KB的DPRAM，可以存储8行的像素信息。色温校正模块把数据写入外部SRAM的同时也把数据存入了内部的DPRAM，存满了8 KB的空间后，从地址0重新开始写入。把DPRAM分为上下两半页，每存好半页后，Bayer转RGB模块便从刚存的半页中寻址，读取数据，进行插值转换。

用Quartus II设计的DPRAM宏模块，如图6所示。可以看出输入DPRAM的信号都是在时钟上升沿锁存的，输出不锁存。访问DPRAM以及完成插值过程可用“12状态法”实现，如图7所示。实验仿真图，如图8所示。

时间分析：相机输入4行数据的时钟周期数至少为1 144×4=4 576 T，上述过程操作时间为：1 024/4×12=3 072 T，所以上述转换过程能在色温校正模块填满半页DPRAM的时间内完成，且不会产生访问DPRAM冲突。在满足时间的条件下，可以寻址更多的点，采用更复杂的插值方法做转换。

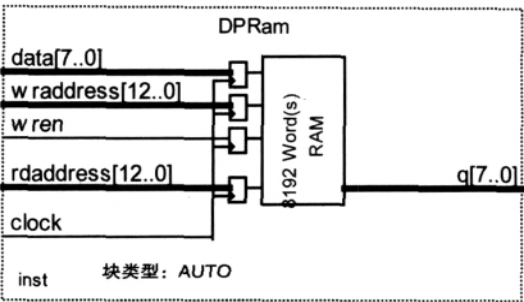


图6 DPRAM 宏功能模块

| 状态 | 程序操作 | DPRAM 输入操作 | 程序操作 |
|----|-------------|-------------|----------------------------|
| 0 | 复位 | —— | —— |
| 1 | 送出 R(2,2)地址 | —— | —— |
| 2 | 送出 R(2,0)地址 | 锁存 R(2,2)地址 | —— |
| 3 | 送出 B(1,1)地址 | 锁存 R(2,0)地址 | 暂存 R(2,2)值 tempR=Q |
| 4 | 送出 B(3,1)地址 | 锁存 B(1,1)地址 | r(2,1)=(tempR+Q)/2 |
| 5 | 送出 G(2,1)地址 | 锁存 B(3,1)地址 | 暂存 B(1,1)值 tempB=Q |
| 6 | —— | 锁存 G(2,1)地址 | b(2,1)=(tempB+Q)/2 |
| 7 | 送出 R(0,2)地址 | —— | g(2,1)=Q |
| 8 | 送出 B(1,3)地址 | 锁存 R(0,2)地址 | 送出 RGB 转 YCbCr 启动信号 Clk |
| 9 | 送出 G(1,2)地址 | 锁存 B(1,3)地址 | r(2,1)=(tempR+Q)/2 |
| 10 | —— | 锁存 G(1,2)地址 | b(1,2)=(tempB+Q)/2 |
| 11 | —— | —— | g(2,1)=Q |
| 12 | —— | —— | 送出 RGB 转 YCbCr 启动信号 Clk |

图7 访问 DPRAM 状态图

色温统计模块，在接收到转换信号后，完成 RGB 到 YCbCr 色彩空间转换，并把符合式(5)的点的 Cb 和 Cr 值累加，在一帧末的时候，完成除法运算，输出满足条件点的 Cb 和 Cr 的平均值以及 Control 信号。

$$\begin{cases} Y>\lambda \\ -\alpha<Cb<\alpha \\ -\beta<Cr<\beta \\ -\gamma<Cb+Cr<\gamma \\ Y-|Cb|-|Cr|>\phi \end{cases} \quad (5)$$

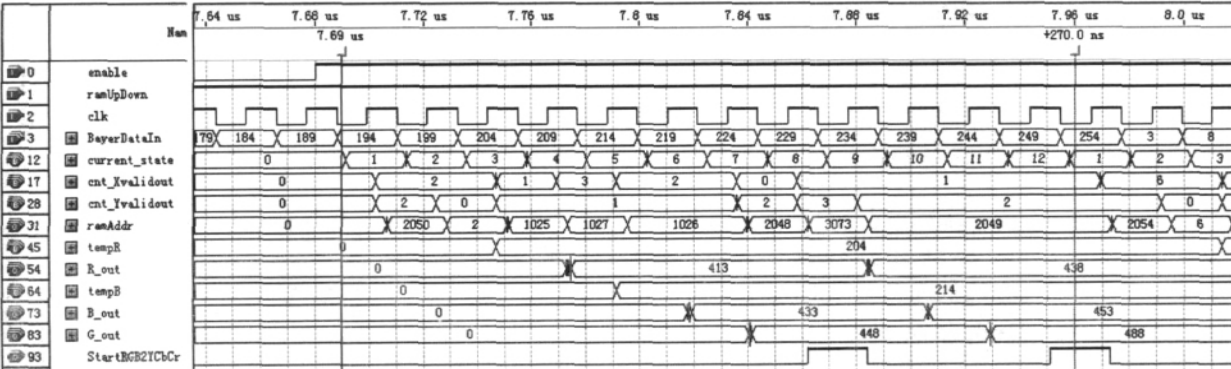


图8 Bayer 转 RGB 时序图

4 实验结果

在试验的过程中参数($\chi, \alpha, \beta, \gamma, \phi, M, N$)分别设定为(120, 30, 30, 50, 100, 8, 2000)。图 9 为在荧光灯下的偏绿图像及其各通道直方图, 图 10 为硬件白平衡后的图像及其直方图。图 11、图 12 是户外拍摄图像及恢复的情况。

由图 9、图 10 可以看出荧光灯下的物体偏绿, 且 G

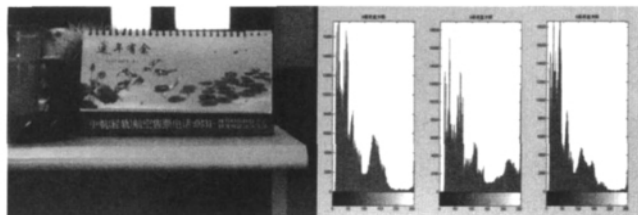


图 9 荧光灯下的图像及直方图

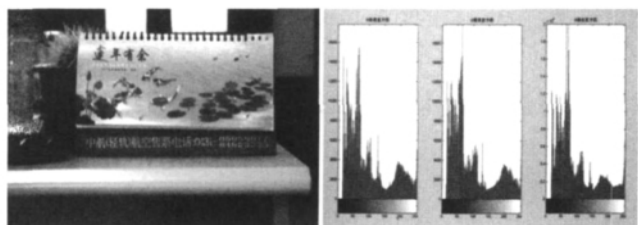


图 10 恢复后的图像及直方图

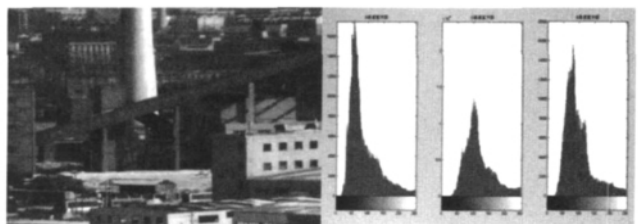


图 11 户外图像及直方图

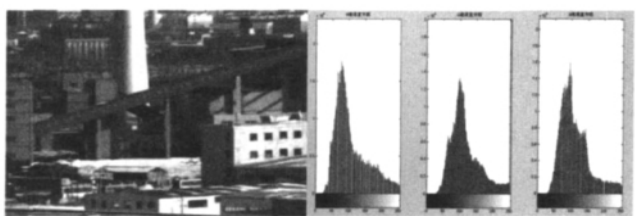


图 12 恢复的户外图像及直方图

通道直方图高灰度级的像素明显多于其他通道。处理后的图像视觉效果较好, 各通道像素灰度级趋于均衡。通过实验发现, 处理后的图像比原图偏亮, 这可以通过前级调光系统实现更好的处理效果。

本文分析了目前的自动白平衡算法, 结合 EDA 设计的特点, 对迭代法进行了改进, 能有效抑制色彩振荡。系统能根据场景色温的变化, 实时调整色温修正系数, 恢复场景的真实色彩。结合当前相机常用的 Camera Link 接口, 在一块芯片上实现了图像预处理, 减小了 CPU 运算负担, 系统功耗小, 应用前景较好。

参考文献

- [1] 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): 350-353.
- [2] 张钰, 姚素英, 胡燕翔. 一种基于边缘检测的图像自动白平衡方法[J]. 光电子·激光, 2008, 19(6): 804-807.
- [3] 赵全友, 潘宝昌. 改进的 LoG 边缘自动白平衡算法[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(2): 775-777.
- [4] 张静. 基于 DSP 和 FPGA 的数字图像采集与处理系统的实现[D]. 西安电子科技大学硕士论文, 2006.
- [5] 沈斌, 张多利, 何亚军. 一种低功耗色彩空间转换模块的 FPGA 实现[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(22): 84-86.
- [6] 彭俊, 高伟. 基于 FPGA 的 Bayer 图像彩色恢复快速算法研究及实现[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(13): 3084-3086.
- [7] 张向飞, 张刚, 程永强. 基于 FPGA 的高分辨率贝尔 CFA 插值算法的设计与实现[J]. 太原理工大学学报, 2006, 5 (专辑): 12-15.
- [8] 赵全友, 潘保昌, 郑胜林. 复杂光照下的两步法颜色恒常性增强[J]. 光学精密工程, 2009, 17(4).

(收稿日期: 2010-03-29)

作者简介:

程本飞, 男, 1984 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 航空数字图像处理与视频压缩。

戴明, 男, 1965 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 光电平台稳定技术和图像稳定技术。

孙丽娜, 女, 1973 年生, 研究员, 主要研究方向: 航空图像摄取与航空测量。

(上接第 54 页)

QY50B 型汽车起重机和 BBS5280JXFJP18 型举高喷射消防车上试用。此外, 本系统的发射机和接收机均能工作在收发方式, 并预留多种接口, 方便扩展功能和组网, 也适用于其他具有无线通信功能的应用场合。

参考文献

- [1] 胡大可. MSP430 系列 FLASH 型超低功耗 16 位单片机[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
- [2] 郑晓艳. 热药灌注机中无线通信装置的设计[J]. 微计算机信息, 2008(12): 101-103.

- [3] 郝卫亮. 无线传输系统中 nRF2401 芯片数据丢失问题的研究[J]. 电子技术应用, 2007(8): 55-57.

- [4] Nordic VLSI ASA. NRF2401 Single Chip 2.4 GHz Radio Transceiver Data sheet[OL], 2003. <http://www.nvlsi.no>.

(收稿日期: 2010-03-05)

作者简介:

王琼, 女, 1958 年生, 硕士生导师, 主要研究方向: 信号检测系统, 嵌入式系统与控制, 无线与网络通信。

张焱, 男, 1985 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式系统与控制, 无线与网络通信。