

基于 FPGA 的自适应白平衡算法实现

周倩^{1,2} 李建伟¹ 裴浩东¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 上海 200083; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 针对自动白平衡算法(AWB)存在适用场景有限等问题,提出了一种基于直方图调整的自适应白平衡算法,并使用现场可编程逻辑门阵列(FPGA)对提出算法进行硬件实现,满足嵌入式系统实时处理需求。算法通过统计彩色图像不同颜色通道的直方图,利用通道间直方图形态相似度作为判断条件,结合自适应直方图调整策略对不同场景图像进行白平衡校正。实验结果表明,该算法在色彩丰富及含有大面积单色块的图像场景中均表现出良好的适应性。与传统白平衡算法相比,图像色彩还原效果明显,校准正确率平均提高6%,且能在嵌入式设备上以1280×720@30fps的分辨率实现实时处理,工程应用前景良好。

关键词: 白平衡;FPGA;颜色直方图;嵌入式;实时处理

中图分类号: TN791; TP391 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1010

Implementation of adaptive white balance algorithm based on FPGA

Zhou Qian^{1,2} Li Jianwei¹ Pei Haodong¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In response to the problems such as the limited applicable scenarios of the automatic white balance algorithm (AWB), an adaptive white balance algorithm based on histogram adjustment is proposed, and the proposed algorithm is implemented in hardware using a field-programmable gate array (FPGA) to meet the real-time processing requirements of embedded systems. The algorithm statistically calculates the histograms of different color channels in a color image, uses the similarity of histogram shapes between channels as the judgment condition, and combines an adaptive histogram adjustment strategy to perform white balance correction for images in different scenes. The experimental results demonstrate that this algorithm exhibits excellent adaptability in both colorful and image scenarios containing large areas of monochromatic blocks. Compared with traditional white balance algorithms, the image color restoration effect is remarkable, the average accuracy of calibration is increased by 6%, and it can achieve real-time processing at a resolution of 1280×720@30 fps on embedded devices, presenting a promising prospect for engineering applications.

Keywords: white balance; FPGA; color histogram; embedded; real-time process

0 引言

图像是人类感知外界最直观的重要方式之一。相比黑白图像,彩色图像不仅包含亮度信息,还蕴含丰富的色彩信息,在自动驾驶、医学影像、工业测量以及空间监视等领域具有重要应用价值。尽管人眼具有颜色恒常性,能够在不同光照条件下通过自我调节保持颜色感知的稳定性,但图像传感器并不具备这一功能。在不同场景光源下,传感器采集的彩色图像往往会出现偏色现象^[1-2],这对实际应用造成一定影响。为减轻这种偏色,就需要白平衡来还原不同

色温光照下拍摄图像的颜色。

目前,自动白平衡算法主要包括以下两大类:基于假设的传统白平衡算法,如灰度世界法(grey world method, GWM)、完美反射法(perfect reflector method, PRM)以及二者结合的正交法(quadratic combining GWM&PRM, QCGP)。该类算法计算复杂度较低,可用于资源受限的嵌入式系统。然而,这类方法对应用场景的假设较为严格。基于深度学习的白平衡算法^[3-6]能够在多样化场景下实现较高精度的白平衡校正。但这类算法依赖于大规模标注数据集,通常具有较高的计算复杂度和资源需求,难以适配嵌

入式硬件实时处理的要求。

此外,一些研究探索了利用直方图特性的白平衡方法。例如,文献[7]通过最大化 RGB 通道直方图重叠面积实现校正,但对色彩单一的图像效果较差。文献[8]提出基于直方图偏移的低复杂度算法,可有效避免单色区域的过度校正,但在色彩丰富场景中仍存在局限性。近年来,也不乏基于 FPGA 实现的自动白平衡算法。例如,文献[9]于 2023 年提出基于 FPGA 的优化灰度世界算法,对含大面积单一色块的图像具有改进效果,但整体性能仍有不足。同年,文献[10]提出改进的自动白平衡算法,通过结合优化灰度世界法和优化完美反射法提升了校正效果,但硬件资源消耗率较高。

综上,现有白平衡算法在场景适应性、计算复杂度和硬件实现方面仍存在不足。为满足嵌入式图像传感器系统实时处理需求,保证较小硬件开销,本文提出了一种基于直方图的自适应白平衡算法。该算法在校正准确率上优于传统算法,复杂度低于深度学习算法,更适合 FPGA 实现。算法通过对 RGB 图像颜色直方图的模式切换,结合直方图拉伸和偏移技术,自适应完成不同场景下的白平衡校正。

1 自适应白平衡算法设计

有研究发现,标准色温下的彩色图像,RGB 通道直方图通常重叠面积较大^[7],反之,则较小。因此,可采用重构或平移对直方图进行调整,校正图像色偏。其中,直方图重构算法对颜色单一的图像处理效果较差,直方图平移算法则对由某一颜色主导的图像处理效果较好。基于此,可以将直方图平移作为重构算法的补充,以此来适用更多的场景。

1.1 改进直方图重构算法

改进直方图重构算法是在原有拉伸算法基础上,考虑人眼对绿色敏感这个因素,保留 G 通道原像素值,利用新设定的边界阈值,对 R、B 通道的像素值进行修正,步骤如下:

首先获取 RGB 图像 3 种颜色通道的直方图 R_h 、 G_h 、 B_h ,公式如下:

$$h(i) = \frac{1}{total\ pixels} \sum_{x \in Height} \sum_{y \in Width} \begin{cases} 1, & I(x, y) = i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $i \in (0, 255)$, $total\ pixels$ 为总像素个数, $h(i)$ 表示通道直方图, $I(x, y)$ 为通道每个像素点的值, $Height$ 、 $Width$ 为图像行、列。

然后从直方图求出两个特征值:下界 L 、上界 U 。下界 L 定义如下:

$$\sum_{i=0}^L H(i) \geq low_per \times Sum \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^{L-1} H(i) < low_per \times Sum \quad (3)$$

其中, L 为下界, Sum 为图像的总像素数, low_per 为最小

像素数之和占总像素数的百分比。同样,上界 U 定义如下:

$$\sum_{i=0}^U H(i) \geq up_per \times Sum \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^{U-1} H(i) < up_per \times Sum \quad (5)$$

其中, U 为上界, up_per 为最大像素数之和占总像素数的百分比。 L 、 U 代表了原始图像颜色分布的特征。接着,对原边界进行平均,得到新的边界。虽然完全平均可能更好地消除偏色,但它很容易矫枉过正。不完全平均应该是一个更好的平衡。本文决定将上界拉伸如下:

$$U_{r1} = (2 \times U_r + U_g + U_b) / 4 \quad (6)$$

$$U_{b1} = (U_r + U_g + 2 \times U_b) / 4 \quad (7)$$

其中, U_{r1} 、 U_{b1} 是 R、B 通道直方图的新上界。同样,新的下界如下:

$$L_{r1} = (4 \times L_r + L_g + L_b) / 8 \quad (8)$$

$$L_{b1} = (L_r + L_g + 4 \times L_b) / 8 \quad (9)$$

其中, L_{r1} 、 L_{b1} 是 R、B 通道直方图的新下界。由于下界的变化不像上界的变化那么明显,所以对下界的拉伸要小一些。

最后一步便是将新边界应用于输入图像的每个像素点, R 通道计算公式如下:

$$R_{out} = \frac{R_{in} - L_r}{U_r - L_r} \cdot (U_{r1} - L_{r1}) + L_{r1} \quad (10)$$

其中, R_{in} 为输入像素值, R_{out} 为输出像素值, U_r 、 L_r 为原 R 通道颜色分布特征。当然, R_{out} 可以是负数,也可以大于 255(对于 8 位图像)。这个公式得到的结果通常不是整数。因此,需要对结果进行规范化。

B 通道修正过程同理。

1.2 直方图平移算法

直方图平移法即通过平移颜色直方图,调整直方图重叠面积,获得最佳平移系数后,修正原通道像素值,从而实现对图像的白平衡校正。方法步骤如下:

首先,统计 R、G、B 通道直方图 R_h 、 G_h 、 B_h 。

然后,利用下式计算重叠面积 $OverlapArea$, 并分别平移 R、B 通道直方图,找出使 $OverlapArea$ 最大的平移系数 $BestShift_R$ 、 $BestShift_B$ 。

$$OverlapArea = \sum_{i=1}^{256} R_h(i) \cap G_h(i) \cap B_h(i) \quad (11)$$

算法实现流程如图 1 所示。

1.3 算法切换

算法切换部分是在满足一定条件的情况下,选择合适的算法进行自动白平衡。本文首先统计彩色图像的颜色直方图。接着,以 G 通道为基准,分别计算 R、B 通道与 G 通道直方图的差值绝对值之和 S_{rg} 、 S_{bg} , 并与阈值 T_{h1} 、 T_{h2} 进行比较,以此来判断 R、B 通道与 G 通道之间直方图的形态相似度,从而进行算法切换。若 S_{rg} 、 S_{bg} 任一大于阈值 T_{h1} 、 T_{h2} , 则采用直方图平移算法,否则采用改进直方图重构算法。切换流程如图 2 所示。

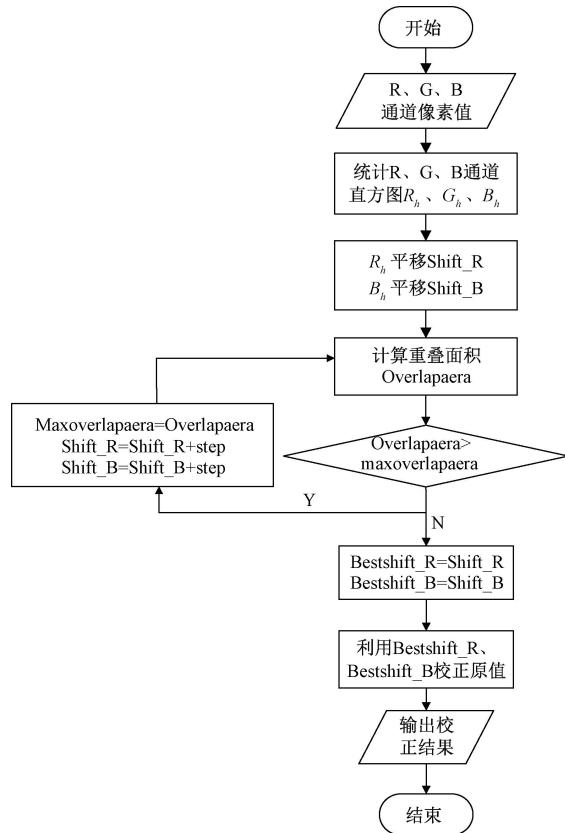


图1 直方图平移流程

Fig. 1 Histogram translation process

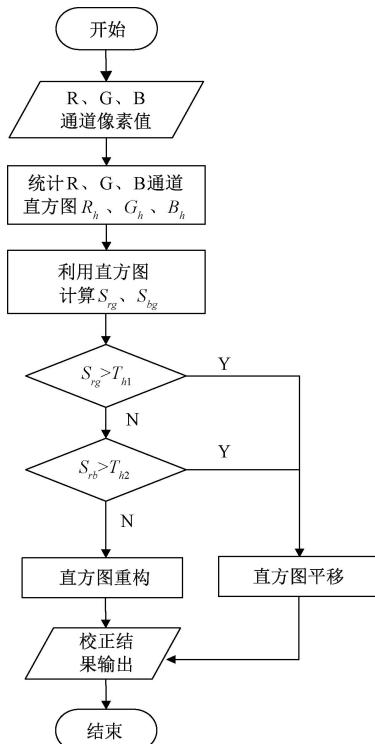


图2 算法切换流程

Fig. 2 Algorithm switching process

2 FPGA设计与实现

2.1 硬件系统搭建

本文使用Xilinx公司的XCZU15-FFVB1156-2i芯片为核心的ZYNQ开发板作为硬件平台。利用OV5640摄像头采集图像^[11-12],片外DDR存储器缓存图像,HDMI接口显示器显示图像。其中,硬件开发及仿真软件为Vivado2021.1,Verilog HDL为设计语言。

图3为本文FPGA图像处理系统的总体架构,主要分为图像采集、图像处理、图像显示三部分。其中,自动白平衡模块已用其他颜色标出。

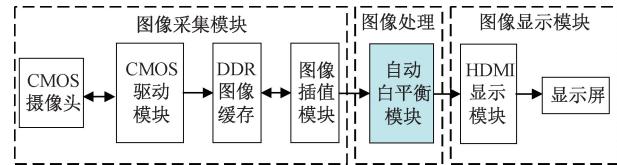


图3 硬件系统架构图

Fig. 3 Hardware system architecture diagram

2.2 自动白平衡模块的FPGA实现

对本文提出的算法进行RTL级设计与FPGA实现。图4为自动白平衡模块的结构图,主要分为直方图统计模块、模式切换模块、白平衡校正模块三大部分。

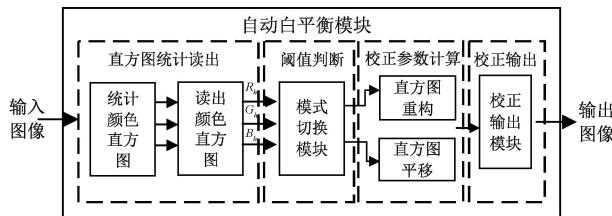


图4 自动白平衡模块结构图

Fig. 4 Automatic white balance module structure diagram

其中,直方图统计模块统计输入图像不同颜色通道的直方图并在相关标志位拉高后读出直方图 R_h 、 G_h 、 B_h ,用于后续处理;模式切换模块以读出颜色直方图为基础,利用阈值判断通道直方图之间的相似度,自适应选择AWB算法;白平衡校正模块则根据模式切换结果,选择直方图平移或直方图重构模块进行校正参数计算,并利用该校正参数修正原值,输出白平衡校正后图像。

1) 直方图统计模块

直方图统计模块主要是进行RGB图像颜色直方图的统计,设计思想以状态机为基础,共分为4个状态:空闲态(IDLE)、清零态(CLEAR)、统计态(CACULATE)、读出态(GET),状态转化图如图5所示。

在下一帧信号来临之前,模块状态由空闲态转为清零态,此时,清空上一帧统计存储的颜色直方图,为下一帧统计做准备。清零完毕后,等待下一帧有效信号来临,当帧有效信号上升沿到来,状态转至统计态,开始利用双端口ram

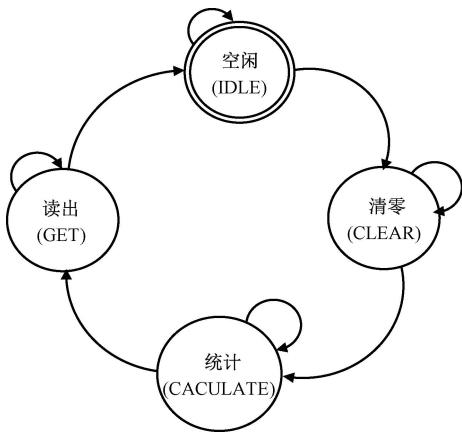


图 5 直方图统计状态转化图

Fig. 5 Histogram statistical state transformation

进行数据统计写入^[13]。设置读出标志位,待统计完成后,拉高读出标志位,进入读出态,读出颜色直方图并寄存,同时,将读出数据用于下一模块处理。

2) 模式切换模块

模式切换模块是 AWB 算法自适应选择的关键模块。当直方图读出标志拉高时,模式切换模块开始。该模块先比较 R、B 通道与 G 通道直方图,接着计算出 R、B 通道与 G 通道直方图像素点数量的差值绝对值,并求和。待直方图读出完成,将求和得到的 S_{rg} 、 S_{bg} 与设定好的阈值进行比较,若 S_{rg} 、 S_{bg} 任一大于阈值,说明 R、B 通道与 G 通道直方图相似度高,此时, $doflag$ 信号输出为低电平,选择改进直方图拉伸模块进行 AWB 处理;否则, $doflag$ 信号输出为高电平,选择平移模块进行处理。模式切换模块结构如图 6 所示。

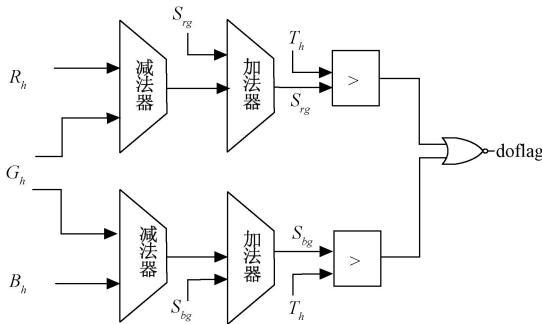


图 6 模式切换模块结构图

Fig. 6 Structure of the mode switching module

3) 直方图重构模块

硬件实现该模块主要有以下几个步骤:

首先,读出已寄存的直方图数据并累加,利用式(2)和(3)计算出下边界,式(4)和(5)计算出上边界,然后寄存上下边界。接着,将寄存的上下边界代入式(6)~(9)求出新的上下边界。最后,在下一帧数据有效信号来临时,利用式(10)对原像素值做修正,R、B 通道并行处理。同时,要注意的

是,直方图重构模块涉及小数和除法,在 FPGA 实现时,需要进行一定的处理。小数部分可采用先放大再缩小的策略,除法部分可使用右移操作来实现,以此来减少硬件资源消耗。

4) 直方图平移模块

本文在直方图统计结束后,会将不同颜色通道的直方图分别寄存在深度为 256 的 8 位 ram 中,即 ram 地址代表直方图的灰度级。因此,一个通道直方图向左或向右平移,即代表 ram 读地址的加减。而颜色直方图重叠面积为移动通道 ram 地址加减平移步数读取的数值和固定通道 ram 地址读取数值的交集。然后,比较每一次平移得到的颜色直方图重叠面积。当获得最大重叠面积时,寄存此时的平移值。并在下一帧有效数据信号来临时,利用寄存平移值修正原像素值。

3 实验结果与分析

为验证算法有效性,本文采用 Graybill 数据集进行 AWB 效果验证。实验软件环境为 windows11 系统,实验硬件有配置为 AMD R7 6800HS 3.20 GHz CPU 及 16 GB 内存的计算机和 XCZU15-FFVB1156-2i 芯片为核心的 FPGA 开发板以及 OV5640 摄像头等。实验主要通过 Matlab2024 和 Vitis2021.1 联合对算法进行软件和硬件验证,最后进行 FPGA 板上实时验证。

3.1 软件验证

目前,对于 AWB 算法效果的评价主要分为主观评价和客观评价。为了验证算法鲁棒性,本文选取数据集不同类型图像进行多次测试,以其中 3 幅图像为例进行说明。

1) 主观评价

人眼对于颜色的感受是比较主观直接的,针对 AWB 效果的主观评价即用肉眼观察处理前后的图像,进行效果评价。各个算法处理前后图像如图 7 所示,其中,图 7(a)为原图,图 7(b)为 GWM 处理后的图像,图 7(c)为 PRM 处理后的图像,图 7(d)为 QCGP 处理后的图像,图 7(e)为文献[9]算法处理后的图像,图 7(f)为文献[10]算法处理后的图像,图 7(g)为本文算法处理后的图像。

由图 7 可以看出,PRM 对于严重偏色的图像有一定的校正效果,且处理后画面没有偏紫;GWM、QCGP、文献[9]算法和文献[10]算法对于严重偏色的图像虽有矫正效果,但放大观察,可以看到处理后图像有少许偏紫的画面,即过度校正;本文算法对于严重偏色图像校正效果明显且没有出现偏紫现象。

GWM 对于色彩丰富的图像校正效果较好,以图 7 中灰球为例,经 GWM 处理后的图像,灰球颜色比原图更接近灰色,但 GWM 对于含有大面积单色块的图像校正效果较差,甚至出现过度校正,致使图像整体偏紫;PRM 在处理颜色丰富的图像和含有大面积单色块的图像时都会失效;QCGP 对色彩丰富的图像校正效果优于 GWM,同样,以图

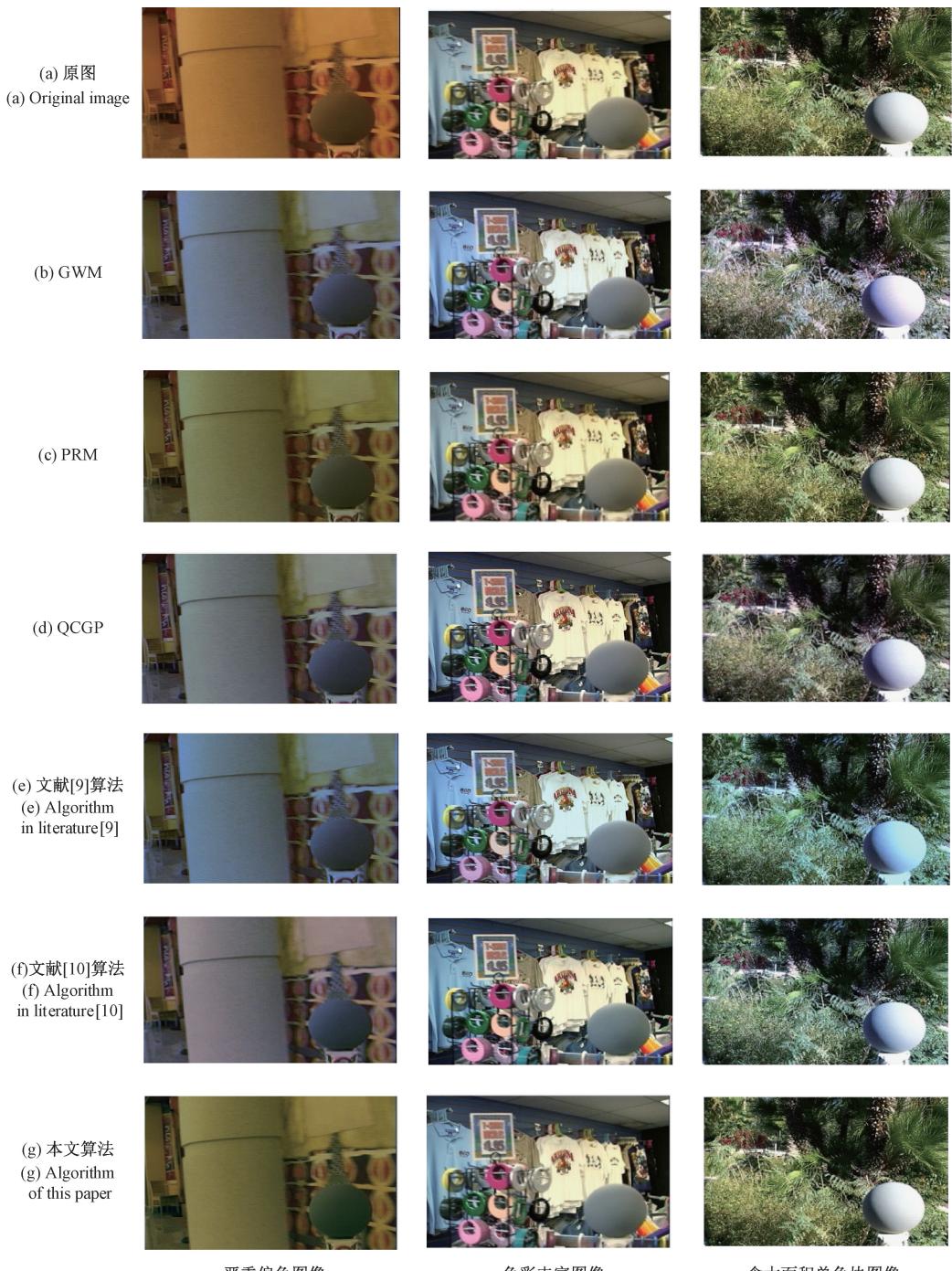


图 7 本文算法与其他法定性比较结果

Fig. 7 Results of qualitative comparison between the proposed algorithm and other algorithms

中灰球为例,经 QCGP 算法处理过后的图像,灰球颜色比经 GWM 处理后的更接近于灰色。QCGP 对含有大面积单色块的图像校正效果较差,也会出现画面偏紫的情况,但略优于经 GWM 处理后的图像。文献[9]算法对颜色丰富的图像有一定的校正效果,经该算法处理后的图像灰球颜色比经 GWM、QCGP 处理后的更接近于灰色,但该算法对含有大面积单色块的图像校正效果略差,图像偏色现象

仍比较明显。文献[10]算法对色彩丰富和含有大面积单色块图像的处理都优于 GWM、QCGP、文献[9]算法,但图像仍有偏色。本文算法对色彩丰富的图像和含有大面积单色块的图像都有一定的处理效果,且不会出现画面偏紫。

2) 客观评价

针对图像白平衡效果的客观评价,主要是利用彩色图

像的色差均值 V 进行衡量^[14-16]，该值计算公式如下：

$$V = \sqrt{C_a^2 + C_b^2} \quad (12)$$

其中, C_a 、 C_b 为图像中消色块 R、B 通道的色差, V 值如表 1 所示。一般来说, V 值越小, 说明图像偏色越小, 白平衡校正效果越好。

表 1 图像色差均值

Table 1 Image color difference mean results

算法	严重偏色	色彩丰富	含有大面积单色块
原图	180.194 2	176.527 2	180.536 2
GWM	183.245 1	180.600 1	193.099 4
PRM	175.842 7	176.527 2	180.536 2
QCGP	183.739 0	180.386 7	187.074 5
文献[9]	182.924 6	180.201 4	184.419 9
文献[10]	182.766 4	178.289 8	184.363 7
本文	174.111 7	174.705 6	180.420 3

由表 1 可知, PRM 对于偏色图像有校正效果, 但对大多数自然图像失效, 没有 GWM 应用广泛; QCGP 算法对于含有大面积单色块的图像校正效果较差, 仅优于 GWM 算法; 文献[9]算法对于偏色图像、色彩丰富的图像以及含有大面积单色块的图像的校正效果优于 GWM、PRM、QCGP; 文献[10]算法则较文献[9]算法校正效果更优; 本文提出的基于直方图的自适应 AWB 算法, 处理偏色图像、色彩丰富图像以及含有大面积单色块图像后得到的色差均值最小, 即对色彩丰富和含有大面积单色块的图像处理效果都优于前述算法。

对数据集的所有图像分别用 GWM、PRM、QCCGP、文献[9]算法、文献[10]算法以及本文算法进行处理,然后计算处理后所有图像色差均值的平均值,本自适应方法的校正准确率平均提高了 6%。

3.2 硬件验证

联合 Vivado 软件和 Matlab 软件对本文提出的自动自平衡算法实现仿真。然后,利用搭建好的硬件系统,对设计的自动自平衡模块进行板级验证。

1) 硬件仿真及实现

首先,利用 Matlab 将图像数据转换为 Vivado 可读的 hex 文件;接着,使用 Verilog HDL 语言编写图像读写及时序产生等测试代码,对自动白平衡模块进行功能仿真,得到波形仿真结果如图 8 所示。

其中, $data[23:0]$ 信号为彩色图像 RGB 三通道像素值, rpo_histo_data 、 gpo_histo_data 、 bpo_histo_data 为 RGB 三通道的直方图数据。经仿真验证功能正确后, 使用搭建好的硬件平台, 对自动白平衡模块进行板级验证, 通过 HDMI 接口显示器得到 OV5640 摄像头实时处理结果如图 9 所示。

由图 9 可知, 单一光源下, 图像颜色显示良好, 并未出

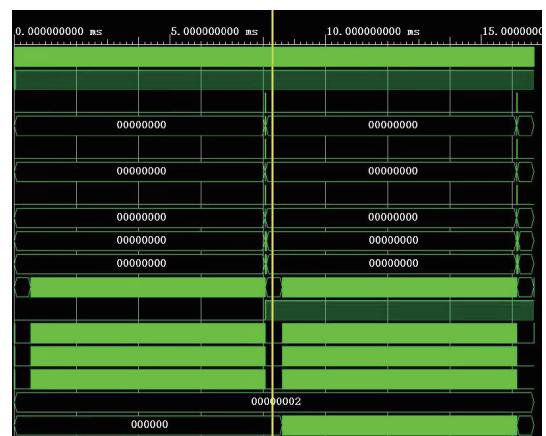


图 8 Vivado 波形仿真结果图

Fig. 8 Vivado waveform simulation results



图 9 实时处理结果

Fig. 9 Real-time processing results

现明显色偏,模块功能正常实现。

2) 结果评价

为了验证自动白平衡算法的实际效果,本文对系统进行了测试,并从主观和客观两个角度对结果进行分析与评估。

主观评价主要通过观察和分析系统在不同测试场景中的实际表现。图 10 和 11 展示了本文提出的算法在不同场景下的处理效果, 其中, 图 10 和 11(a) 为系统未白平衡处理前的图像, 图 10 和 11(b) 为白平衡处理后图像。通过对比两组图像, 可以直观评估算法的校正能力与视觉改善效果。



(a) 未白平衡处理 (b) 白平衡处理后
 (a) No white balance (b) After white balance

图 10 色彩丰富的场景一

Fig. 10 Colorful scene 1

由图 10 和 11 可知,本文提出的算法在实际测试中对于色彩丰富的场景以及含有大面积单色块(即色彩较为单一)的场景均表现出良好的校正效果。

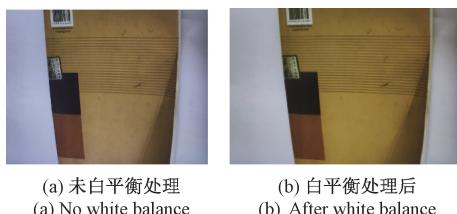


图 11 含有大面积单色块的场景二

Fig. 11 Scene 2 with large monochrome blocks

客观评价方面,通过计算色差均值对算法校正效果进行定量分析。针对不同测试场景,分别计算系统在有无白平衡处理情况下的色差均值,结果如表 2 所示。

表 2 测试场景色差均值

Table 2 Test the color difference mean results of the scene

算法	场景一	场景二
未处理原图	181.367 0	182.165 9
GWM	181.064 2	181.019 6
PRM	181.433 2	181.838 0
QCGP	181.143 8	180.692 5
文献[9]	181.251 9	181.539 9
文献[10]	181.314 3	181.536 7
本文(MATLAB)	179.001 4	178.814 5
本文(FPGA)	180.468 3	177.468 4

根据表 2 可知,对于场景一和场景二,经过 FPGA 处理后的 V 值相比软件处理结果略高,而相较于未处理的则明显降低。结合此前提到的色差均值越小,白平衡校正效果越优的评判标准,可以得出结论:本文提出的基于 FPGA 的自适应白平衡算法在色彩丰富场景及含有大面积单色块场景中均表现出较好的适应性和校正效果,且优于传统算法。同时,由于 FPGA 的硬件计算特性,其算法实现精度较软件实现略有损失,但仍满足嵌入式系统的实际应用需求。

4 结 论

在已有算法基础上,本文提出并实现了一种基于 FPGA 的自适应白平衡解决算法。该方法利用彩色图像颜色直方图进行判断,将直方图平移算法与改进直方图重构算法结合,可自适应处理不同场景下的图像。实验结果表明,相较于其他传统算法,本文提出的基于直方图调整的自适应白平衡方法适用于大多数场景,校正效果优于其他单一算法,且复杂度低,硬件消耗资源少,能够对 $1280 \times 720 @ 30$ fps 的图像,进行实时白平衡校正。

参考文献

[1] 田宗浩,雷鸣,郭佳晖. 基于 FPGA 的弹载相机自动白平衡算法设计及实现[J]. 战术导弹技术, 2022(2):

131-138.

TIAN Z H, LEI M, GUO J H. Design and implementation of automatic white balance algorithm for missile-borne camera based on FPGA[J]. Tactical Missile Technology, 2022(2): 131-138.

[2] 王飞,王伟. 一种暗通道优先的快速自动白平衡算法[J]. 光电工程, 2018, 45(1): 76-82.

WANG F, WANG W. A fast automatic white balance algorithm with dark channel priority [J]. Optoelectronic Engineering, 2018, 45(1): 76-82.

[3] 全雪峰. 基于改进 U-Net 网络的图像自动白平衡算法[J]. 新型工业化, 2021, 11(4): 244-247.

QUAN X F. Image automatic white balance algorithm based on improved U-Net network [J]. New Industrialization, 2021, 11(4): 244-247.

[4] 黄成强. 结合深度卷积神经网络的智能白平衡研究[J]. 光电子·激光, 2020, 31(12): 1278-1287.

HUANG CH Q. Research on intelligent white balance combined with deep convolutional neural networks[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31 (12): 1278-1287.

[5] AKAZAWA T, KINOSHITA Y, SHIOTA S, et al. N-white balancing: White balancing for multiple illuminants including non-uniform illumination [J]. IEEE Access, 2022, 10: 89051-89062.

[6] FARGHALY M, MANSOUR R F. Two-stage deep learning framework for sRGB image white balance[J]. Signal, Image and Video Processing, 2023, 17(1): 277-284.

[7] 魏超,贺光辉. 基于直方图的白平衡算法的研究[J]. 微电子学与计算机, 2018, 35(6): 75-78.

WEI CH, HE G H. Research on histogram based white balance algorithm [J]. Microelectronics & Computer, 2018, 35(6): 75-78.

[8] 葛润林,林珊玲,林志贤,等. 基于 FPGA 的图像自适应 AWB 系统设计与实现[J]. 半导体光电, 2022, 43(2): 377-382.

GE R L, LIN SH L, LIN ZH X, et al. Design and implementation of image adaptive AWB system based on FPGA[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(2): 377-382.

[9] 李华,蔡嘉烨. 基于 FPGA 的自动白平衡算法设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(1): 53-56.

LI H, CAI J Y. Design of automatic white balance algorithm based on FPGA [J]. Automation & Instrumentation, 2023(1): 53-56.

[10] 鲜玲霞,何彦棣,夏欢,等. 数字图像的自动白平衡算法设计与 FPGA 实现[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(12):

- 5-8.
- XIAN L X, HE Y K, XIA H, et al. Design and FPGA implementation of automatic white balance algorithm for digital image [J]. Automation & Instrumentation, 2023(12): 5-8.
- [11] 宋倩男, 刘光柱, 武乐林, 等. 基于 Sobel 的 FPGA 图像边缘检测系统设计[J]. 电子测量技术, 2024, 47(13): 68-73.
- SONG Q N, LIU G ZH, WU L L, et al. FPGA based on Sobel edge detection system design[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(13): 68-73.
- [12] 吴昊, 刘楠, 丁朋, 等. 改进 CORDIC 算法实现及其在边缘检测中的应用[J]. 电子测量技术, 2023, 46(16): 148-157.
- WU H, LIU N, DING P, et al. Improvement of CORDIC algorithm and its application in edge detection [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(16): 148-157.
- [13] 林立芃, 杨朝阳, 伍明诚, 等. 改进型 CLAHE 图像增强算法及其 FPGA 实现[J]. 电子测量技术, 2024, 47(10): 126-133.
- LIN L P, YANG ZH Y, WU M CH, et al. Research on the improved CLAHE image enhancement algorithm and its FPGA-based implementation [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(10): 126-133.
- [14] 王超, 甄国涌, 单彦虎. 基于 FPGA 的暗通道白平衡算法设计与实现[J]. 电子技术应用, 2021, 47(2): 77-80, 91.
- WANG CH, ZHEN G Y, SHAN Y H. Design and implementation of dark channel white balance algorithm based on FPGA [J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(2): 77-80, 91.
- [15] 王达, 赵冬青, 储成群. Bayer 彩色自动白平衡算法设计及其 FPGA 实现[J]. 激光杂志, 2021, 42(10): 74-77.
- WANG D, ZHAO D Q, CHU CH Q. Design and FPGA implementation of Bayer color automatic white balance algorithm[J]. Laser Journal, 2021, 42(10): 74-77.
- [16] 王晨, 王晓凯, 徐鹤丁. 基于 FPGA 的图像自动白平衡研究和实现[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(S1): 346-347, 350.
- WANG CH, WANG X K, XU H D. Research and implementation of image automatic white balance based on FPGA [J]. Application Research of Computers, 2019, 37(S1): 346-347, 350.

作者简介

周倩, 硕士研究生, 主要研究方向为 FPGA 图像处理等。

李建伟(通信作者), 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电路与系统及图像处理等。

裴浩东, 博士, 研究员, 主要研究方向为空间目标识别及图像处理等。

E-mail: 2678795081@qq.com