

基于 HLS 的自动白平衡算法实现

何昱, 彭伟[†]

(湖南大学物理与微电子科学学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:随着高品质相机的普及和图像处理领域的不断发展,人们对图像质量提出了更高的要求。现有的工业相机采集到的图像信息都存在一定的色偏现象,一般需要图像处理器(Image Signal Processor, ISP)对图像进行处理。白平衡处理作为ISP处理中一个非常重要的功能,直接决定着图像信息的色彩效果。本文基于Vitis HLS平台实现了AXI-stream视频流接口的白平衡算法IP,同时基于ZYNQ的ARM+FPGA的片上系统对IP进行了上板验证。本算法IP在 $1920 \times 1080 @ 60\text{fps}$ 的视频流下保证了算法的实时性,同时对图像具有良好的校正效果。

关键词:Vitis HLS; 白平衡; 图像处理器; ZYNQ

中图分类号:TN46

文献标识码:A

Implementation of Automatic White Balance Algorithm Based on HLS

HE Yu, PENG Wei[†]

(School of Physics & Electronics, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: With the popularity of high-quality cameras and the continuous development of image processing, people have put forward higher requirements for image quality. The Image information collected by existing industrial cameras has certain color bias phenomenon, which generally requires Image Signal Processor (ISP) to process the image. As a very important function in ISP processing, white balance processing directly determines the color effect of image information. In this paper, the white balance algorithm IP of AXI-stream video stream interface is implemented based on Vitis HLS platform, and the on-chip system based on ZYNQ ARM+FPGA verifies IP on the board. The IP address of the algorithm in $1920 \times 1080 @ 60\text{fps}$ ensures the real-time performance of the algorithm and has good image correction effect.

Key words: Vitis HLS; white balance; image signal processor; ZYNQ

白平衡是指对白色物体颜色进行还原。物体在光照下之所以能够呈现出某些特定的颜色,是因为物体反射的光在人的视觉系统可以呈现特定的颜色,因此我们使用肉眼观察外界时对于相同颜色的感知是基本保持恒定的。但是CMOS或者CCD传感器并没有人眼的这种特性^[1],很难像人眼一样实现自动白平衡,所以通常需要增加自动白平衡的

功能,使其根据外部环境的光线变化特征进行色彩调整,使图像颜色信息更接近于人的视觉系统。

白平衡处理是ISP处理中一个非常重要的功能,直接决定着图像信息的色彩效果,其广泛运用于摄影、视频监控等多个领域,具有很大的研究意义。目前的白平衡实现主要通过软件算法完成,且计算过程复杂。本文从硬件实现的角度出发,基于

Xilinx HLS 平台,实现了一种实用性强、计算复杂度低的自动白平衡算法。

1 算法介绍

1.1 灰度世界算法(GW)

灰度世界算法(GW)^[2-4]是自动白平衡的经典算法。灰度世界算法假设认为:所有物理表面的平均反射都是灰色的,对应到图像信息中就是对于一张有着大幅色彩变化的图像,其中 R、G、B 三个色彩的分量的均值都趋向于同一个值^[5]。

$$R_{ave} = G_{ave} = B_{ave} \quad (1)$$

其中, R_{ave} 、 G_{ave} 、 B_{ave} 为 R、G、B 通道中颜色的均值,如果当前 R、G、B 通道中颜色平均值并没有趋向于同一个值,则需要对该通道中像素值进行矫正。

$$\begin{cases} K = \frac{R_{ave} + G_{ave} + B_{ave}}{3} \\ R_{new} = \frac{K}{R_{ave}}R; G_{new} = \frac{K}{G_{ave}}G \\ B_{new} = \frac{K}{B_{ave}}B \end{cases} \quad (2)$$

其中, R_{new} 、 G_{new} 、 B_{new} 为 R、G、B 通道中颜色的均值经过矫正后得到的值。

灰度世界算法作为白平衡的经典算法,适用于各种图像与场景,能够有效地提升各类图像的质量。然而,灰度世界算法是针对整个图像区域的平均亮度进行调整,难以处理含有强烈光照变化或阴影的图像的局部细节亮度差异。

1.2 完美反射算法(PR)

完美反射算法(PR)^[2-4]认为在一副彩色图像中最亮的一部分像素相当于物体最有光泽的点,包含了场景中的光线信息。完美反射算法还认为在有光泽的平面中,有光泽的平面本身不吸收光线,其反射的光线就是场景中真实的颜色信息,因此,如果场景中含有纯白色的部分,就可以得到场景中的光源信息。

$$R_{new} = \frac{255}{R_{max}}R; G_{new} = \frac{255}{G_{max}}G; B_{new} = \frac{255}{B_{max}}B \quad (3)$$

其中, R_{max} 、 G_{max} 、 B_{max} 为 R、G、B 通道中颜色的最大值,通过基于白点的信息将 R、G、B 三个通道的数值进行调整,从而实现白平衡的效果。

相较于灰度世界算法,完美反射算法在处理主色图像时可以很好地将主色图像中的偏色图像还原为原有的颜色,但是处理色彩丰富的偏色图像时会存在一定色偏。

1.3 基于传统算法改进

根据上述两种经典算法的特点,许多学者提出了对两种经典算法的改进。根据文献^[6]中利用人眼对于绿色较为敏感的特点,通过将灰度世界算法与完美反射算法的优点相结合,使得算法能够很好地对图像进行白平衡处理。以 R 通道为例进行白平衡校正,算法的实现步骤如下:

首先求出 R、G、B 通道的均值以及最大值,根据绿色通道均值能够使算法更适用于色彩丰富的图像,绿色通道最大值能够使算法更好地处理主色图像的原理,得到像素校正系数的求解公式:

$$\begin{cases} uR_{ave}^2 + vR_{ave} = G_{ave} \\ uR_{max}^2 + vR_{max} = G_{max} \end{cases} \quad (4)$$

对式(4)进行求解,得到 u 、 v 的表达式如下:

$$\begin{cases} u = \frac{(G_{max}/R_{max}) - (G_{ave}/R_{ave})}{(R_{max} - R_{ave})} \\ v = \frac{G_{max}}{R_{max}} - uR_{max} \end{cases} \quad (5)$$

求得 u 、 v 的值后,对 R 通道进行白平衡校正, R_{new} 为白平衡校正后 R 通道的值。同理可以使用同等的计算方式对 B 通道进行白平衡校正。

$$R_{new} = uR^2 + vR \quad (6)$$

2 算法的 HLS 实现

HLS(High Level Synthesis)是指使用高级设计语言如 C 或 C++ 综合后转化为硬件 RTL 语言^[6-8]。传统的 FPGA 设计是以 verilog 或者 VHDL 语言进行电路设计,再经过仿真验证、综合、上板实现数字逻辑设计。因此,使用传统的 FPGA 设计流程通常在逻辑设计与验证环节需要花费较多的时间,对于一些逻辑设计以及时序要求较为宽松的设计,使用 HLS 工具进行 FPGA 开发可以大大减少开发成本与时间。同时,利用 Xilinx 公司提供的套件 Vitis HLS,并借助 OpenCV 的图像处理函数库,极大提高了图像算法的开发设计效率。Vitis HLS 设计流程如图 1 所示。首先编写好算法源代码以及测试平台,然后使用 C 仿真来验证源代码中是否实现了算法的功能,如果验证结果达到了算法的功能要求,通过 Vitis HLS 将源代码转换为 RTL 代码。

本系统通过相机采集原始数据,采集到的原始数据为 Bayer 类型排布的像素数据,然后通过颜色插值得到 R、G、B 格式的像素数据,在 R、G、B 像素数据的基础上进行白平衡算法实现。算法的实现流程如图 2 所示。

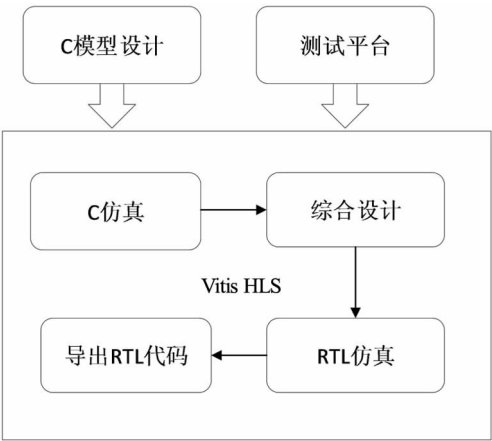


图 1 Vitis HLS 设计流程

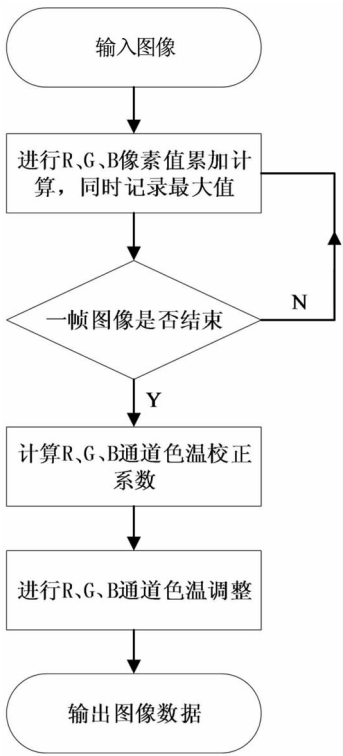


图 2 算法计算流程图

本设计采用 AXI-stream 接口对 IP 进行封装。AXI-stream 接口是由 ARM 和 Xilinx 公司提出的一种总线标准,其优点为支持数据突发传输、数据量不受限制,因此可以有效地实现数据的高速传输。通过使用 AXIvideo2xfMat 函数将 AXI-stream 数据流转化为 HLS::Mat 格式,便于白平衡处理函数对数据进行处理。在设计统计函数中,计算每个通道的像素均值以及最大值。在一帧图像循环中,如果输入的像素值大于当前存储在函数中的通道最大值,则将通道中最大值更新,同时对像素数据进行累加,在一帧图像循环结束后对像素的均值进行求解。由式(5)可知,求解校正系数 u 、

v 时涉及浮点数运算,在传统 Verilog 设计中,涉及浮点数运算需要设计专门的硬件电路完成计算,如果使用 HLS 就可以方便地进行浮点数运算。HLS 中有着丰富的数据类型,可以类比于 C 语言中使用 float 类型进行 u 、 v 参数求解,在本设计中通过定义 ap_fixed<>数据类型替代 float 类型进行计算可以有效地节省资源。得到校正参数后,将其传入像素更新函数,将原通道中像素乘以 u 、 v 值进行像素更新,得到校正后的像素值。

为了更好地实现 PS 与 PL 端的数据交互,添加了 AXI-lite 接口用于 IP 内部寄存器配置,AXI-lite 接口可以用于配置输入 IP 图像的大小以及 IP 的启动,提升了 IP 的通用性。封装好的 IP 核如图 3 所示。



图 3 封装后自动白平衡 IP 核

在 IP 的验证方面,使用 Vitis HLS 的 C Simulation 对 IP 进行 C 验证。通过联合 OpenCV 将图像数据转化为 AXI-stream 流格式,提取像素数据进行白平衡计算。通过 C 仿真得到的白平衡处理后图像效果如图 4 所示,可以看到处理后图像的颜色更加丰富,也更贴近人眼的视觉效果。通过编写测试文件联合 Vitis HLS 的 RTL 仿真可以对 IP 进行 RTL 验证。图 5 为顶层 AXI-stream 接口的波形仿真图。

3 硬件平台设计以及实验结果

本文选用 Xilinx 公司的 ZCU102 开发板作为硬件平台来实现白平衡算法。ZCU102 开发板是一款面向工业、图像处理设计的专用开发板,其 FPGA 芯片为 xczu9eg-ffvb1156-2-e,是 Xilinx 公司基于 16 nm 工艺的可编程逻辑器件,含有 ARM Cortex A53 实时处理器以及多种外设接口,同时含有大量逻辑资源,为后续 IP 上板评估提供了极大的便利。

该系统使用 Sony IMX274 传感器对图像信息进行采集,使用 ZCU102 开发板上 FMC 接口与传感器进行物理连接,通过 Xilinx Vivado 设计工具进行硬件平台设计。硬件部分设计采用数据接收模块、ISP 模块、Vitis HLS 生成的白平衡 IP 核、数

据转存模块、ARM 处理器以及 HDMI 显示模块。通过 Vivado 设计平台实现模块之间连接,管脚约束综合实现后生成比特流。软件部分完成相机以及 IP 的相关配置后,可以通过外接 HDMI 显示器

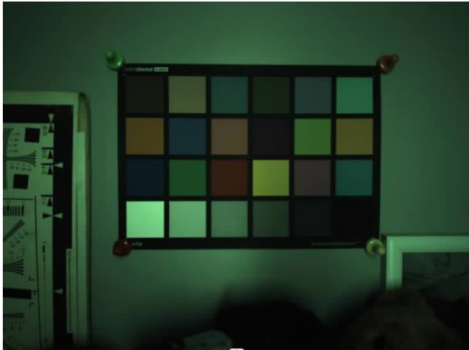


图 4 原图(左)与白平衡算法处理后图像(右)

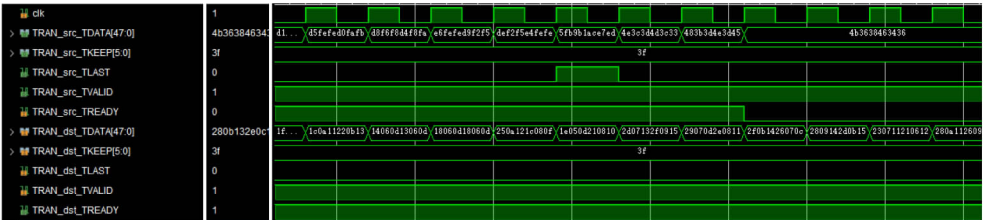
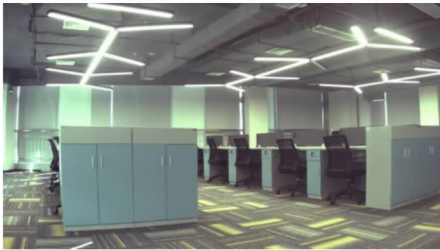


图 5 RTL 仿真波形



(C=18.172)



(C=1.767)

图 6 原图(左)与白平衡算法处理后图像(右)

4 结 论

利用 FPGA 以及 Vitis HLS 实现了基于 Xilinx 平台的自动白平衡 IP 的设计。使用 HLS 开发工具,有效地减少了算法的硬件开发时间。使用 ZCU102 开发板实现了图像采集、自动白平衡校正并实现了 IP 的上板验证。通过实验结果对算法的正确性进行验证,证明了算法能满足实际工作的需求。本文充分发挥了 FPGA 在图像处理领域的计算优势,对高速、高质量图像处理 FPGA 设计具有较好的指导意义。

参考文献

[1] 李华,蔡嘉烨. 基于 FPGA 的自动白平衡算法设计[J]. 自动

观察图像的白平衡效果。图 6 为添加白平衡 IP 前后内存中缓存的帧图像,可以观察到,通过白平衡 IP 后的帧图像有效地解决了图像中色偏的问题,图像中的颜色更接近于物体本身的颜色。

化与仪器仪表,2023(1):53—56.

[2] 王达. 基于 FPGA 自动白平衡算法的设计与实现[D]. 太原: 中北大学,2022.

[3] 黄之豪. 面向 SOC 的自动白平衡算法研究及实现[D]. 西安: 西安科技大学,2020.

[4] 金黄斌. 自动白平衡算法研究及软硬件实现[D]. 杭州: 杭州电子科技大学,2011.

[5] 韩强,戎蒙恬,刘文江. 图像信号处理器中自动白平衡的算法研究[J]. 信息技术,2009,33(11):55—59.

[6] 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.

[7] 基于 Vivado HLS 雾天图像预处理 IP 核设计[J]. 电脑编程技巧与维护,2023(4):158—161.

[8] 樊宇亮. 红外图像舰船目标快速识别及 HLS 实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2022.