光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021112602

基于FPGA的图像自适应AWB系统设计与实现

葛润林[1,2]，林珊玲[2,3]，林志贤[1,2,3]*，郭太良[1,2]

（1. 福州大学 物理与信息工程学院，福州 350116；
2. 中国福建光电信息科学与技术创新实验室，福州 350116；
3. 福州大学 先进制造学院，福建 泉州 362200）

摘　要： 为了解决常见自动白平衡(Auto White Balance,AWB)方法的场景适应能力不足且实时性较差等问题,提出了一种基于颜色通道直方图重构的自适应AWB方法,并使用现场可编程门阵列(FPGA)对所提出的算法进行硬件电路实现,在校正图像白平衡的同时也确保了系统高速实时处理图像。首先对图像进行限制对比度自适应直方图均衡化(CLAHE)处理来提高图像对比度,然后对图像进行灰度级区间的通道分区统计,对不同场景类别的图像采用颜色直方图匹配或平移的重构方式做自适应处理。实验结果表明,该算法在处理图像白平衡时,相比基于光源估计的AWB算法,色温校正准确率提高了14%,对不同色彩场景有更好的适应性,具有实时处理能力。

关键词： 自动白平衡；颜色直方图；FPGA；色温校正；实时处理

中图分类号： TP391.41　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0377－06

Design and Implementation of FPGA-Based Image Adaptive AWB System

GE Runlin[1,2], LIN Shanling[2,3], LIN Zhixian[1,2,3], GUO Tailiang[1,2]

(1. School of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, CHN;
2. China Fujian Photoelectric Information Science and Technology Innovation Laboratory, Fuzhou 350116, CHN;
3. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou 362200, CHN)

Abstract: In order to solve the problems of insufficient scene adaptability and poor real-time performance of common automatic white balance (AWB) methods, an adaptive AWB method based on color channel histogram reconstruction is proposed, and the hardware circuit of the proposed algorithm is implemented by field programmable gate array (FPGA). It not only corrects the white balance of the image, but also ensures the high-speed real-time image processing of the system. In this method, firstly, the image is processed by restricted limited adaptive histogram equalization (CLAHE) to improve the image contrast, then the channel partition statistics of gray level interval is carried out for the image, and the reconstruction method of color histogram matching or translation is adopted for the images of different scene categories. Experimental results show that compared with AWB algorithm based on light source estimation, the accuracy of color temperature correction of the proposed algorithm is improved by 14%, which has better adaptability to different color scenes and real-time processing ability.

Key words: automatic white balance; color histogram; FPGA; color temperature correction; real-time processing

收稿日期：2021－11－26.
基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFB3600603)；福建省自然科学基金项目(2020J01468).
* **通信作者：**林志贤　**E-mail：**lzx2005000@163.com

0 引言

人眼的视觉系统具有颜色恒常性，当身处不同光照环境时，通过人眼的自我调节，最后所看到物体颜色基本相同。而摄像头不具有人眼的自适应性，所以当场景的光照情况发生变化时，拍摄出的照片色温也会发生变化。为了减轻这种色偏，需要通过白平衡来对各种色温下的图像进行还原[1]。

常见的自动白平衡算法有基于光源估计的灰度世界法(GWM)[2]、完美反射法(PRM)[3]和基于物理特性的动态估计法(DTM)[4]，但这类算法能处理的场景不够丰富。基于深度卷积神经网络的白平衡算法可以有效解决多种图像场景中的白平衡校正[5-7]，但是这类算法需要大量的图片数据集，算法复杂且对硬件需求较高，无法做到实时处理。文献[8]对图像进行直方图均衡化并使用改进的约束条件进行白点检测，但无法体现图像局部的细节信息；文献[9]通过计算RGB直方图重叠面积最大的增益系数来对图像进行白平衡处理，但在颜色单一场景下处理效果较差。

基于直方图的AWB处理算法的校正准确率高于光源估计算法，同时其复杂性远低于深度学习算法，故更适用于在FPGA上进行图像的实时处理。在此基础上，本文提出一种基于颜色通道直方图重构的自适应ABW算法，并对其进行了FPGA硬件电路实现。在软件算法设计部分，采用CLAHE算法提高图像局部对比度，且不会丢失图像细节，适用于对低照度图像的增强。对增强后的图片进行通道分区统计，计算出每个区间的像素百分比比值，对小于设定阈值的图像进行颜色直方图匹配重构，而对于需要保留直方图细节的图片，采用直方图平移进行重构，可以有效避免图片单色区域被破坏导致色调信息调整过大的情况，使算法调整的色温范围更广。硬件电路设计部分，以软件算法为基础，对其进行FPGA映射。在数据处理过程中使用乒乓操作和流水线等并行设计来提高算法的实时处理能力；最后使用EDA软件对系统进行逻辑功能仿真并对FPGA进行板级验证，在确保图像采集实时性的同时完成白平衡校正。

1 AWB算法设计与验证

1.1 算法原理

彩色图像有R,G,B三个颜色通道，每个颜色通道的色度等级分布不均就会导致图像的色偏。研究发现，合适色温下的图像RGB通道直方图通常具有较大的重叠面积[10]，否则图像中的RGB通道直方图的重叠面积通常较小。可采用重构颜色直方图的方法使得图像各通道的直方图保持面积的重叠。

1.2 本文提出AWB自适应算法

RGB通道直方图不仅描述了色彩分布，也包含了亮度信息，但是图像的亮度信息对白平衡校正没有影响，且增大了计算量，所以应该将图像进行RGB～rgb的空间转换。色度空间的r,g和b值是对RGB空间中的r,g和b值进行归一化，这种归一化消除了亮度的影响，保持了图像的色度灵敏度。可以计算出各通道的直方图，然后通过式(1)进行RGB颜色空间到rgb空间的像素变换。

$$r=\frac{R}{R+G+B},g=\frac{G}{R+G+B},b=\frac{B}{R+G+B} \tag{1}$$

分别定义U和L两个阈值，U为输入图像颜色直方图或百分位数的最大像素值，L为输入图像颜色直方图中的最小像素值或百分位数的最小像素值。U和L的计算公式如式(2)所示：

$$\begin{cases}\sum_{n=0}^{U}H(n)\geqslant \text{up_per}\times S\\ \sum_{n=0}^{L}H(n)\leqslant \text{low_per}\times S\end{cases} \tag{2}$$

其中，up_per和low_per分别为较大和较小像素值的总量占图像总像素的百分比，S为像素总数目。由式(3)计算出输出像素的色度值：

$$C_{\text{out}}=\frac{C_{\text{in}}-L}{U-L}\times R+C_{\text{min}} \tag{3}$$

式中，C_{out}表示图片像素的输出值，C_{in}表示图片像素的输入值，R是输出色度范围，默认为255，C_{min}是图片像素的最低色调值，可以默认为0。随后需要判断各通道相似度并进行颜色直方图的重构处理。对于RGB颜色通道相似度的判断，本算法采用分区统计的方式，将不同通道的直方图分为4个区间，然后计算每个区间内的像素数量H_i_sum。以G通道为标准，计算RB通道各区间内像素数量和G通道各区间内像素数量的比值，若两个及以上区间的比值大于所设的最大阈值Th_max或者小于最小阈值Th_min，则表明该通道的直方图和G通道直方图相差过大，需要进行平移的重构处理。为了获得三个通道颜色直方图的交集，在每个灰度级

上保持最小值，通过从 0 级到 255 级的求和得到重叠区域。根据式(4)计算得到 RGB 通道直方图的重叠面积：

$$H(h_r,h_g,h_b)=\sum_{i=1}^{n}h_r(i)\cap h_g(i)\cap h_b(i) \quad (4)$$

其中，H 表示 r，g 和 b 通道颜色直方图的重叠区域，该重叠区域源自三个颜色通道的所有灰度级的交点。

2　FPGA 设计与实现

2.1　硬件系统平台搭建

本文所用的硬件平台是以 Altera 公司的 Cyclone IV 系列芯片为核心的 FPGA 开发板，采用 OV5640 摄像头作为图像传感器，片外 SDRAM 存储器作为图像缓存，VGA 接口显示器作为图像显示设备。开发软件为 QuartusII13.0，验证软件为 ModelSim-SE10.4，采用 Verilog HDL 作为逻辑设计语言。

本实验系统的搭建主要分为图像数据采集、图像处理、数据缓存以及输出显示四个部分，系统的整体架构如图 1 所示。

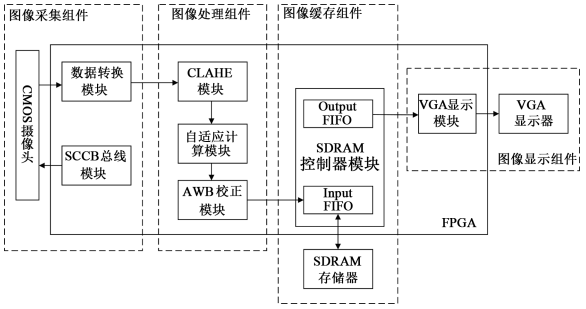


图 1　系统结构框图

图像数据采集部分包括 CMOS 摄像头、SCCB 总线控制以及数据转换等 3 个模块。系统图像输入使用了 OV5640 摄像头，通过配置 CMOS 摄像头的内部寄存器来实现不同输出格式。本系统输入图像采用 RGB565 格式，采集数据位宽为 8 位，故需要两个时钟周期的数据拼接表示 16 位的 RGB565 图像像素。因此本系统设计了一个数据转换模块用来对原始数据进行拼接，并设置标志信号表明拼接操作的完成。

图像数据缓存部分包括 FPGA 外部的 SDRAM 缓存模块和 FPGA 内部的 SDRAM 控制器模块。FPGA 的片内资源无法满足对大量视频图像数据的缓存，因此本系统引入了外部缓存器件，并在 FPGA 内部设计了控制器模块进行数据读写的控制操作。

视频图像显示部分包括 FPGA 外部的显示器以及 FPGA 内部的 VGA 显示模块。该模块需要正确描述 VGA 时序协议中的行场同步信号，并通过权电阻网络将数字图像信号转换为 VGA 能够识别的模拟信号，由此驱动 VGA 显示器生成视频图像。

2.2　自适应 AWB 算法的 FPGA 实现

硬件系统平台搭建完成后，需要 AWB 算法进行 RTL 级设计以及 FPGA 映射。自适应算法实现流程如图 2 所示，按照 CLAHE 模块、自适应计算和 AWB 校正模块的顺序进行。

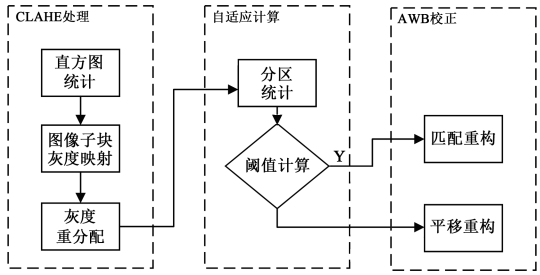


图 2　自适应算法实现流程图

2.2.1　CLAHE 模块设计

(1)直方图统计

CLAHE 模块首先需要完成对图像直方图的统计，模块状态机设计如图 3 所示，共包含 5 个状态：IDLE(空闲状态)、CLEAR(清空数据状态)，CALCULATE1(数据判断状态)、CALCULATE2(数据统计状态)、GET_HISTO(结果输出状态)。

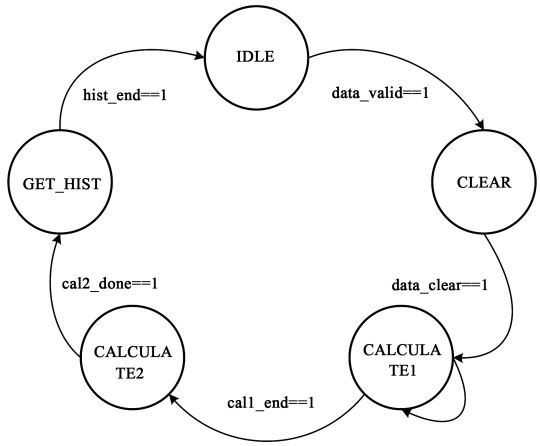


图 3　直方图统计模块状态机

直方图统计模块主要结构如图 4 所示，RGB 三通道直方图统计并行执行，使用相同的读写标志信号，三组 RAM 的写入值分别为读出之前的统计值

加一，地址信号分别为RGB通道的输入值。图像输入完成后统计结束，此时对 val_fin 信号进行采样，采样到下降沿的同时拉高结束标志信号 cla_end，图像的直方图统计结束。

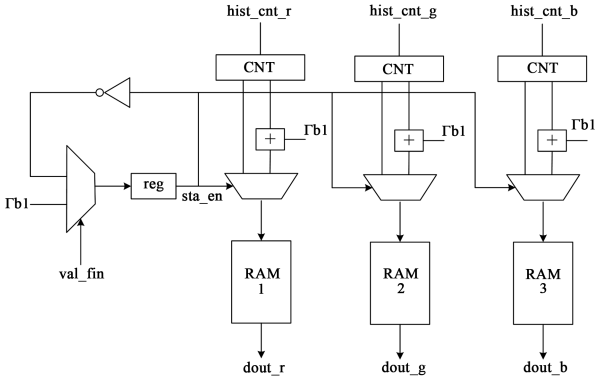


图 4 直方图统计模块结构

(2)图像子块灰度值映射与重分配

在行同步信号和场同步信号的有效期间，根据当前像素所在的图像子块，在统计完成后的 RAM 中取出以当前灰度值为地址的数据并根据式(5)进行直方图均衡，即计算原始图像灰度与增强图像灰度之间的映射关系。

$$s_k = E(r_k) = (L-1)\sum_{j=0}^{k}\frac{n_j}{W \times H} \tag{5}$$

其中，L 表示图像灰度级数，r_k 表示直方图中任一灰度级，n_k 表示灰度级 r_k 的像素数量，W 和 H 分别为图像宽和高的像素数量，s_k 为映射后的新灰度级。最后根据像素所在位置采取不同的重分配方式，模块状态机设计如图 5 所示，共包含 5 个状态：IDLE(空闲状态)、BLOCK_GAIN(映射子块获取状态)、RD_RAM(读数据状态)、BI_CAL(插值计算状态)、WR_RAM(写地址和写数据状态)。

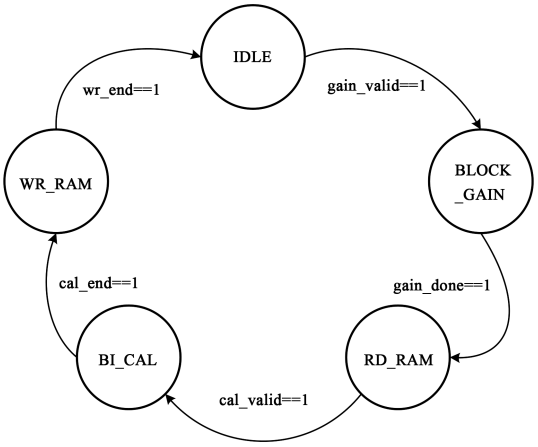


图 5 重分配模块状态机

2.2.2 自适应计算模块设计

自适应计算模块起始信号为直方图统计模块的结束信号。该模块需要统计 RB 通道的亮度饱和像素值 sa_num_r，sa_num_b 以及 G 通道的高明度像素值 h_num_g，并通过像素值的比较来判断图片颜色直方图的通道相似度，对相似度高的图像进行 RGB 通道直方图匹配的重构处理，否则进行 RGB 通道平移操作的重构处理。像素值的计算通过读取 CLAHE 模块中 RAM 的存储数据累加得到，计算模块结构如图 6 所示。

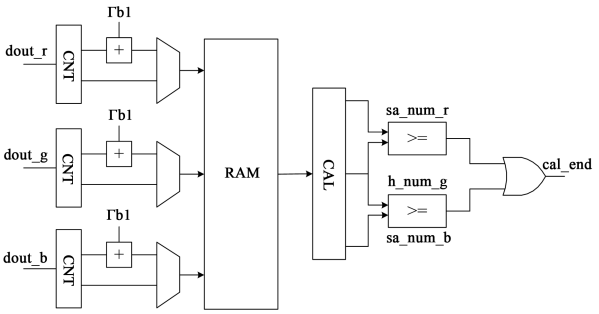


图 6 自适应计算模块结构

当 RB 任一通道的亮度饱和像素值大于 G 通道的高明度像素值，则使用直方图匹配算法作为重构方式进行 AWB 校正，即 cal_end 信号输出为高电平。否则采用直方图平移算法作为重构方式进行 AWB 校正，即 cal_end 信号输出为低电平。

2.2.3 AWB 校正模块设计

AWB 校正模块主要根据自适应计算模块的结果来选择适合采用的直方图重构算法。

对于直方图平移算法，硬件实现过程中采用 RAM 地址读取不断增加的方式。另一个通道直方图向左或向右移动 step 个单位，此时像素重叠面积为固定通道的 RAM 地址读取的两个数值与移动通道的 RAM 地址加上 step 读取数值的最小值。对于直方图匹配算法，如图 7 所示，硬件实现过程中采用并行计算的方式来减少匹配累积的运算次数，并节省存储资源。

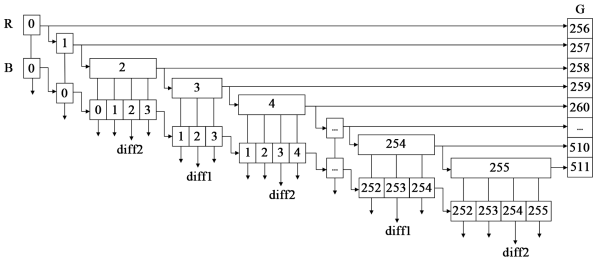


图 7 直方图匹配模块结构

其中，diff1 和 diff2 分别表示 RB 通道累积值因为累积计算而延迟一个时钟周期和两个时钟周期的差值。当通道像素累积值满足式(6)时，$Cumr_i$ 与 $Cumg_i$ 的差值最小，表明像素匹配成功。

$$|Cumr_i - Cumg_{i-1}| \leqslant |Cumr_i - Cumg_i| \quad (6)$$

其中，$Cumr_i$ 表示 R 通道第 i 像素累积值，$Cumg_i$ 表示 G 通道第 i 像素累积值。当成功完成一组数据的匹配后再进行下一组数据的匹配，R 通道计数至 255 时结束匹配。

3　实验结果与分析

实验采用的软件环境为 Windos10-64 位操作系统，使用配置为 AMD R7-4800H 2.9 GHz CPU 及 16 GB 内存计算机，通过 MATLAB2018 以及 ModelSim-SE10.4 仿真软件对比验证本文方法的准确性，最后进行 FPGA 板级的实时性验证。

3.1　主观评价

使用 ModelSim-SE10.4 仿真软件并按照 SCCB 总线时序生成像素时钟以及行场同步信号，读取由 MATLAB 生成的图像数据文件，可以得到 AWB 校正后的图像。如图 8 和 9 所示两组实验分别采用的是室内和室外色彩单一的图像。可以看出GWM算法在处理大面积单色图像时并不能有效校正色偏；而 PRM 算法是基于白点检测实现，在光源较好的室外相比室内有更好的校正情况，但无法满足校正场景的多样性。如图 10 和 11 所示两组实验分别采用的是室内和室外色彩丰富度较高的图像。由于图像色彩丰富，基于白点检测的 PRM 算法校正效果较差。实验结果表明，本文算法能够处理不同光源场景和不同色彩丰富度的图像，具有更好校正效果的同时适用范围也更广。

3.2　客观评价

采用计算图像色差均值的方式对图像白平衡的校正效果进行客观分析与评估[11]。色差均值的计算如式(7)所示，其中 C_r 和 C_b 分别为图像红色和蓝色通道的像素平均值。

$$C = \sqrt{C_r^2 + C_b^2} \quad (7)$$

本实验色差均值结果如表 1 所示。图像的色差均值越低，则 AWB 算法的处理效果越好。从表 1 的处理结果可以看出，当图像存在大面积单色背景时，GWM 算法处理的效果较差；而当图像色彩较丰富时，PRM 处理的效果较差。虽然图 10 的处理效果不如 DTM 算法，但经过数据集的测试后，本文算法的平均色差均值结果更低，能够处理的场景更多。



图 8　室内单一色彩图像

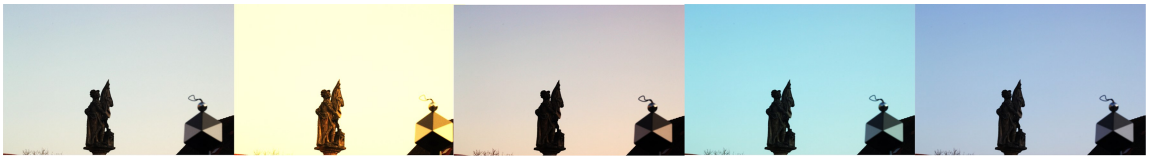


图 9　室外单一色彩图像



图 10　室内丰富色彩图像



图 11　室外丰富色彩图像

对数据集中的所有图片分别进行不同算法的白平衡处理，本文算法的色彩校正准确率与传统基于光源估计的 AWB 算法相比提高了 14%。可见，本文算法能够处理更加丰富的色彩场景。

表 1 色差均值结果

图片	原图	GWM	PRM	DTM	本文算法
图 1	19.23	16.69	12.89	12.37	10.58
图 2	24.15	19.38	17.63	17.75	13.86
图 3	17.64	13.76	15.54	10.62	11.93
图 4	23.57	16.34	19.42	15.68	12.91

3.3 实时性评价

为了验证系统的实时性，对比了本文算法在 PC 平台上通过 MATLAB 软件处理与其在 FPGA 平台上处理的时间。通过设置不同分辨率来测试本文算法在不同环境下的图像 AWB 校正时间，结果如表 2 所示。

表 2 不同平台的图像 AWB 处理情况

处理平台	时钟频率	分辨率/pixel	处理用时/ms
PC	2.9 GHz	1 280×720	120.42
		640×480	58.17
FPGA	100 MHz	1 280×720	1.31
		640×480	0.76

实验结果表明，尽管 FPGA 时钟频率远低于 CPU 时钟频率，但使用 FPGA 处理图像的速度却快于 PC 平台，其原因在于 PC 平台上使用软件处理图像时 CPU 需按顺序执行操作，计算完数据后需要放回内存。而 FPGA 进行处理时采用的是并行结构，通过流水线处理或运算展开的方式，在处理部分图像算法时仅需几个时钟周期即可完成，故具有较好的实时性。

4 结论

本文在现有的图像 AWB 算法基础上，设计并实现了一种基于 FPGA 的图像自适应 AWB 系统，该系统集成了图像传感器、FPGA 芯片以及显示器，可对不同场景的图像采用自适应的直方图 AWB 处理方法。实验结果表明，相比传统 AWB 算法，本文提出的自适应算法在面对各类型的图像场景时处理效果更好。在图像分辨率为 1 280×720 的情况下，处理帧频大于等于 30 f/s，满足实时性的同时硬件资源消耗较少，验证了系统的正确性和实用性。

参考文献：

[1] Gao Shaobing, Ren Yanze, Zhang Ming, et al. Combining bottom-up and top-down visual mechanisms for color constancy under varying illumination[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2019, 28(9): 4387-4400.

[2] Sun Xinyu, Xie Kai, Lin Sen, et al. Research on calculation method based on gray edge color constant [C]// Adv. Electronic Mater., Computers and Software Engineering, Shenzhen, 2020.

[3] 董国伟，侯作勋，王 震，等. CMOS 图像传感器自动白平衡算法及其 FPGA 实现[J]. 航天返回与遥感，2016，37(3)：82-90.
Dong Guowei, Hou Zuoxun, Wang Zhen, et al. Automatic white balance algorithm of CMOS image sensor and its FPGA implementation[J]. Aerospace Return and Remote Sensing, 2016, 37(3): 82-90.

[4] 方 靖，张 锐，崔 巍，等. 基于白平衡修正的室外光照估计算法[J]. 计算机科学，2019，46(S1)：211-214，221.
Fang Jing, Zhang Rui, Cui Wei, et al. Outdoor illumination estimation algorithm based on white balance correction[J]. Computer Science, 2019, 46(S1): 211-214, 221.

[5] Md A H, Akbar S A. Color constancy algorithm for mixed-illuminant scene images[J]. IEEE Access, 2018, 6: 8964-8976.

[6] Ho-Hyoung, ChoiByoung-Ju Yun. Deep learning-based computational color constancy with convoluted mixture of deep experts (CMoDE) fusion technique[J]. IEEE Access, 2020, 188: 309-320.

[7] 颜 深. 基于端到端全卷积网络的自动白平衡算法研究[D]. 合肥：国防科技大学，2018.
Yan Shen. Research on automatic white balance algorithm based on end-to-end full convolution network [D]. Hefei: National University of Defense Technology, 2018.

[8] Chi Chungting, Wu Bingfei. Visual contrast enhancement algorithm based on histogram equalization[J]. Sensors, 2015, 15(7): 16-19.

[9] Kento M, Hirotsugu O. FPGA implementation of an algorithm that enables color constancy[C]// Inter. Symp. on System Integration, 2020: 991-995.

[10] Huang C, Zhang Q, Wang H, et al. A low power and low complexity automatic white balance algorithm for amoled driving using histogram matching [J]. J. of Display Technology, 2017, 11(1): 53-59.

[11] 郭惠楠，曹剑中，周祚峰，等. 彩色数字图像色彩平衡的客观性评价方法[J]. 红外与激光工程，2013，42(z1)：214-218.
Guo Huinan, Cao Jianzhong, Zhou Zuofeng, et al. Objective evaluation method of color balance of color digital images[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(z1): 214-218.

作者简介：

葛润林(1997—)，男，重庆市云阳县人，硕士研究生，主要研究方向为电路与系统及图像处理技术；

林志贤(1975—)，男，福建省泉州市人，教授，博士生导师，主要研究方向为电子纸显示和平板显示驱动以及图像处理技术研究。