

基于 FPGA 的快速视频图像去雾算法及硬件实现

周晓波, 刘 桑

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘 要: 针对雾天采集图像的退化问题, 基于暗通道先验理论, 提出一种能够处理视频图像的快速去雾算法。根据视频图像在实时处理系统中的应用, 基于现场可编程门阵列(FPGA)硬件平台的特性, 对算法进行硬件实现。经过 Matlab 环境的仿真验证, 并在自行设计的 FPGA 视频图像处理平台上进行实现。实验结果表明, 该系统工作稳定有效, 能够处理高达 60 frame/s 的视频图像, 有效解决雾霾因素对所采集图像带来的图像退化问题。

关键词: 暗通道先验; 实时视频图像; 快速去雾; 现场可编程门阵列; 硬件系统

中文引用格式: 周晓波, 刘 桑. 基于 FPGA 的快速视频图像去雾算法及硬件实现[J]. 计算机工程, 2016, 42(6): 310-315.

英文引用格式: Zhou Xiaobo, Liu Sang. Fast Video Image Haze Removal Algorithm and Hardware Implementation Based on FPGA[J]. Computer Engineering, 2016, 42(6): 310-315.

Fast Video Image Haze Removal Algorithm and Hardware Implementation Based on FPGA

ZHOU Xiaobo, LIU Sang

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

[Abstract] Aiming at the problem of degradation among foggy images, a fast haze removal algorithm based on the theory of dark channel prior is proposed to deal with video images. According to the application of real-time processing of video images in many occasions, this algorithm is implemented on the hardware platform, based on certain characteristics of Field-programmable Gate Array(FPGA) hardware platform. The algorithm is simulated and verified with Matlab, and is realized on the FPGA hardware platform, which is especially designed for video processing. Experimental results show that this system is stable and effective. It is capable of processing video images up to 60 frames per second. It can effectively solve problems brought by the haze and other factors on the collected image.

[Key words] dark channel prior; real-time video images; fast haze removal; Field-programmable Gate Array(FPGA); hardware system

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.06.054

1 概述

在雾霾天气下, 大气微粒的散射作用导致光学传感器捕获到的场景图像严重失真, 其颜色值、对比度等特征被破坏, 这影响了人类的视觉感受和计算机的后期处理^[1]。当上述场景图像被应用于智能交通等领域时, 其造成的后果将更加严重^[2-3]。因此, 对含雾图像的快速、精确而有效的去雾, 成为当前计算机视觉领域的一个研究热点。

目前, 对于雾化图像处理的研究与实现, 主要集中在 PC 平台, 通过 C, Matlab 等环境, 着眼于算法层面的处理。在这种情况下, 去雾处理主要有 2 种思路: 文献[4]基于图像增强的去雾算法; 文

献[5-6]基于图像恢复的去雾算法。上述算法均在 PC 平台取得了良好的去雾效果。但是, 考虑到许多实际的系统中需要对视频图像进行实时的去雾处理, 而这些软件算法却无法同时满足实时性、高速视频流等要求^[7-11]。

因此, 本文在研究文献[6]算法(以下简称 He 算法)的基础上, 针对 FPGA 硬件平台的结构与特性, 通过对算法进行改进与简化, 提出一种快速去雾算法, 并基于此算法, 在 FPGA 硬件平台上实现视频图像的去雾处理。

2 快速去雾算法

本文提出的快速去雾算法, 其最初思想来源于

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2013JBM010)。

作者简介: 周晓波(1973-), 男, 副教授、博士, 主研方向为图像处理、专用集成电路设计; 刘 桑, 硕士。

收稿日期: 2015-04-02 **修回日期:** 2015-06-17 **E-mail:** xbzhou@bjtu.edu.cn

He 算法。在此基础上,通过对此算法的研究与仿真,分析算法复杂度、运算耗时、去雾效果等指标,对其进行简化与改进,最终得到快速去雾算法。

2.1 暗通道先验理论

He 算法中所提到的暗通道先验理论,首先对雾天所采集图像的模糊现象的原因进行分析。此理论建立在 McCartney 大气模型^[6]之上,通过这个模型来模拟雾天所采集图像的退化过程。该模型又可以称为大气光照模型,可以用式(1)表述。

$$I(x) = t(x) \cdot J(x) - (1 - t(x)) \cdot A(x) \quad (1)$$

其中, I 是待处理的雾天退化图像; J 是需要恢复的无雾图像; A 是全局大气参数; t 是大气透射率。图像去雾处理,即是要在已知 I 的情况下,根据式(1),通过 t, A 这2种参数,最终求解出无雾图像 J 。对式(1)变形可以得到式(2)。

$$\frac{I^c(x)}{A^c} = t(x) \cdot \frac{J^c(x)}{A^c} + 1 - t(x) \quad (2)$$

但是,式(1)是一个病态的方程,由于缺乏足够的约束,无法直接从一个公式获得 t, A, J 这3种变量。因此,在上述模型的基础上,He 提出了暗通道(Dark Channel)这一概念。对于任意的彩色图像 I ,其暗通道可以用式(3)表述。

$$I^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in \{r, g, b\}} I^c(y)) \quad (3)$$

其中, I^{dark} 表示彩色图像的暗通道; I^c 表示彩色图像的每个通道; $\Omega(x)$ 表示以像素 x 为中心的一个窗口。

并且,理论中提出一个先验性的假设:对于任意一幅室外无雾图像 J ,其暗通道的灰度值非常小,甚至近乎于0(一般不包括天空区域),即用式(4)表述。

$$J^{\text{dark}} \rightarrow 0 \quad (4)$$

式(4)即是对式(1)添加的一个约束。对式(2)进行2次最小值运算,得到式(5);依据上述的暗通道假设,得到式(6)。由这2个公式进而可以推导出式(7)。

$$\begin{aligned} & \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \\ &= \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{J^c(y)}{A^c} \right) + 1 - t(x) \end{aligned} \quad (5)$$

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (\min_c \frac{J^c(y)}{A^c}) = 0 \quad (6)$$

$$t(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \quad (7)$$

由式(7)所求的 t 即为粗略的大气透射率的预估值。在实际的图像去雾过程中发现,此粗略预估值对于图像中的景深突变的区域无法进行正确的估计,导致区域中产生马赛克现象。因此,He 算法中

提出使用软抠图(Soft Matting)或者导向滤波(Guided Filter)^[12]2种方式,对式(7)所表述的粗略预估值进行精确化计算,可得到更加准确的大气透射率 t 。

同时,理论给出了获取全局大气参数 A 的方法:首先,取暗通道 I^{dark} 中的前0.1%亮度最大的像素;然后,取这些像素对应在原图 I 中的最大值作为 A 的值。

在确定了 $A, t(x)$ 后,便可由式(8)恢复出无雾图像 J :

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{t(x)} + A \quad (8)$$

2.2 快速去雾算法

本文在研究 He 算法的基础上,结合 FPGA 硬件平台的硬件并行性、数据串行性和现场可编程等特性^[13],对算法中的大气透射率 t 和全局大气参数 A 的获取方法进行简化,减少算法处理图像的耗时;同时,针对去雾处理后的图像普遍偏暗的问题,采用 Gray World 假设对图像进行亮度校正。最终实现视频图像的快速去雾。

(1) 简化大气透射率 t' 的获取

对任意一幅彩色图像,其暗通道的定义如式(3)所示。在原算法中,为求取一幅图像的暗通道,需要先对图像上每个像素点上的 R, G, B 这3个通道的颜色值(灰度值)求最小值,然后对这个跟原图相同尺寸的、由这些最小值构成的中间结果进行最小值窗口滤波,窗口半径 R 一般为3,15或其他值。

考虑到在 FPGA 硬件平台上,视频图像数据多以串行的方式输入,对图像的最小值窗口滤波这一运算需要较大的片上缓存空间(On-Chip RAM),当滤波半径非常大(如 $R = 15$ pixel)的时候,这种情况将更加严重。因此,将暗通道简化为式(9)所示。

$$I'^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} I^c(y) \quad (9)$$

在式(9)中,只需对图像的每个像素的3个通道进行最小值运算,即可获得暗通道 I'^{dark} 。

在此基础上修改式(7),并引入去雾强度调节因子 ω ,得到式(10)。

$$\begin{aligned} t'(x) &= 1 - \omega \cdot \min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \\ &= 1 - \omega \cdot \frac{I'^{\text{dark}}(x)}{A^c} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, t' 即为所求的大气透射率;因子 ω 主要是为去雾后的图像保留一定的景深,一般取0.8。

通过快速去雾算法得到的大气透射率 t' 与 He 算法中的大气透射率 t ,如图1所示。

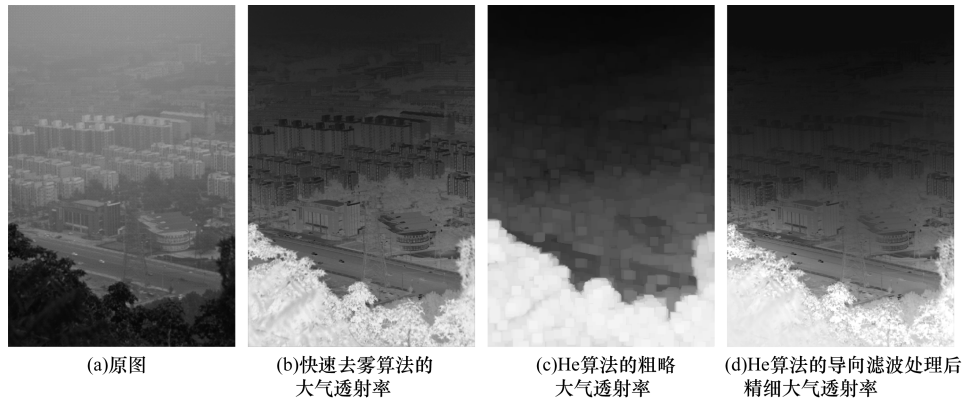


图1 快速去雾算法与 He 算法获取的大气透射率

(2) 简化全局大气参数 A' 的获取

暗通道先验理论中对全局大气参数 A 的求取方法已在 2.1 节阐述。

在定义 I'^{dark} 的基础上,给出获取 A 的简化方法:对 I'^{dark} 中的数据求其最大值,并减去一个修正因子 ΔA ,作为全局大气参数,记为 A' 。其中的因子 ΔA 一般可取 30。

获取 t' , A' 后,即可根据式(8)恢复出无雾图像 J' 。

(3) 优化去雾图像的亮度

通过上述的快速去雾算法所获得的无雾图像 J' 一般会偏暗。因此,本文采用 Gray World 假设^[14]对图像进行亮度校正。

Gray World 假设认为,任何一幅图像,当有足够

的色彩变化时,其 R, G, B 分量均值会趋于平衡,即 R, G, B 这 3 个数值相等,一般为 128。

由此假设,对无雾图像 J' 进行如式(11)所示的颜色变换,即可得到最终的校正后的无雾图像 J'' :

$$J''_c(x) = \frac{128}{\text{Avg}_c} \cdot J'_c(x) \quad (11)$$

其中, c 表示图像的 R, G, B 3 个通道; Avg_c 表示某一通道的灰度值的均值。

通过以上 3 个部分的优化,最终得到本文基于视频图像的快速去雾算法。本文在 PC 端(OS: Windows 7; CPU: Intel® Core™ i3 330 @ 2.13 GHz; RAM: 2.00 GB),基于 Matlab 环境实现该算法。其仿真结果如图 2~图 4 所示。



图2 去雾算法的处理结果 1



图3 去雾算法的处理结果 2



图 4 去雾算法的处理结果 3

通过算法仿真结果可以看出,由本文所提出的快速去雾算法,能够在一定程度上消除原图 2(a)~图 4(a)中的雾所造成的影响,得到最终的去雾图像图 2(c)~图 4(c),并与 He 算法的结果图 2(d)~图 4(d)相比,可以看到这两者之间在细节处理、颜色保真度上确实还有一定的差距。但是,该算法在保留了去雾能力的基础上,降低了算法复杂度,算法的实时性得到了大幅提升,且更加易于硬件实现。

3 FPGA 实现

本文快速去雾算法在自行设计的 FPGA 视频

图像增强平台上得以实现。此平台上主要包括核心的 ALTERA Cyclone IV EP4CE15F17 FPGA 芯片及其外围电路、负责输入视频转换的 AD9984 A/D 转换器芯片、负责输出视频转换的 ADV7123 D/A 转换芯片和负责视频输入和输出的 VGA 图形图像接口。

3.1 硬件结构及模块划分

本文所设计的 FPGA 内部的硬件结构如图 5 所示。

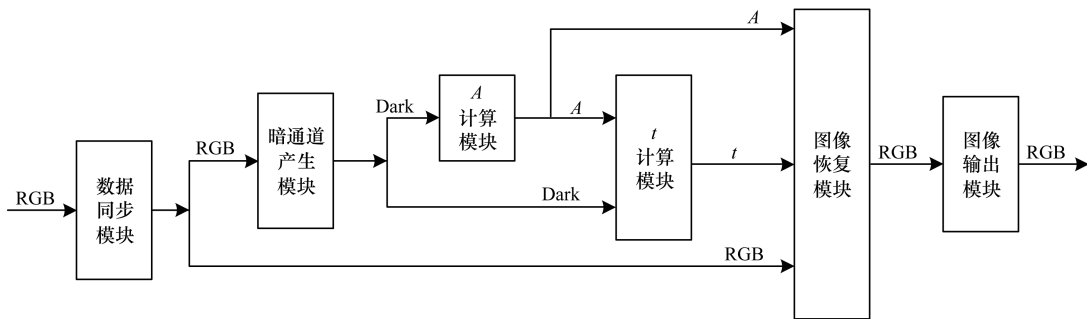


图 5 快速去雾算法的硬件结构

硬件结构主要包括以下模块:

(1) 数据同步模块

输入至 FPGA 的数字化视频图像信号主要包括: R,G,B 3 个通道的 8 位视频图像数据;行同步信号 HS;场同步信号 VS;像素时钟 PCLK。这些信号是由片外的 A/D 转换模块产生,但是信号间的时序存在一定的偏差。因此,使用数据同步模块来调整这些信号之间的时序关系,同时进行一个简单的同步处理,以保证向后级提供稳定的、符合时序的数据。

(2) 暗通道产生模块

此模块的功能是产生彩色图像的暗通道 I^{dark} ,其

所完成的运算如式(9)所示。由于一个像素点的 R, G, B 3 个通道的数据是在时钟的控制下同时到来的,因此只需要简单的比较,即可得出 3 个通道的数据中的最小值。

(3) A 计算模块

此模块的功能是求取图像的全局大气参数 A。如 2.2 节中所述,从暗通道产生模块所产生的一幅图像的暗通道中,选取最大的值,并减去一个修正因子 ΔA ,得到所需要的 A。

值得注意的是,对于选取暗通道的最大值这一操作,需要遍历整幅图像的暗通道数据,对于串行视

频图像而言,即要等到一帧图像结束,才能计算出 A ,用于计算 t 等后续的数据。一般而言,可以选择对当前帧进行帧缓存的方式来行处理,但是这种方式势必会造成图像处理的延迟,而且需要大容量片外存储器的支持,提升了开发难度。

因此,本文在此处提出使用帧迭代^[15]的方式,充分利用了视频图像逐帧之间差别很小的这一特点,将当前帧结束后所计算出来的 A 用于下一帧的运算。这样操作在保证数据正确性的同时,既避免了帧延迟,又可以降低开发难度。

(4) t 计算模块

根据之前的功能模块所得到的暗通道 I^{dark} , A , 再根据式(10)所描述的运算,选用合适的去雾强度调节因子 ω ,即可计算得到 t 。实验中 ω 选取 0.8。

(5) 图像恢复模块

根据之前的功能模块所得到的 A , t 以及原始的 R, G, B 3 个通道的彩色图像数据,由式(8)所示的运算过程,即可计算得到无雾图像 J 。

除此之外,本模块还须完成对无雾图像 J 的亮度校正的任务,如式(11)所示。在实际的硬件实现过程中,使用 G 通道的颜色值作为图像的灰度图,再通过遍历串行图像数据,求取图像的灰度图的平均值,即为 Avg 。此模块再次使用上文提到的帧迭代的方法,将当前帧所计算出的 Avg 用于下一帧的计算。

(6) 图像输出模块

此模块的主要任务是:整合无雾图像 J 的 R, G, B 3 个通道的图像数据、行同步信号 HS 、场同步信号 VS 等必要的视频信号,并且按照 VGA 协议的标准时序,将这些视频信号输出。

3.2 实验结果与分析

为在硬件平台上实现快速去雾算法,本文设计了专用于视频图像处理的 $FPGA$ 开发平台。在此平台上,从 PC 端的显卡输出的模拟 VGA 图形图像信号被输入至 $AD9984$ A/D 转换器芯片进行模拟到数字的转换;转换完成后的视频信号被传送至 $FPGA$ 进行视频图像处理; $FPGA$ 输出处理完后的视频图像被送入 $ADV7123$ D/A 转换芯片进行数字到模拟的转换,将视频数据再封装成 VGA 图形图像信号,输出至显示器,显示图像处理的结果。

通过此平台,可以对 PC 端播放的视频或者图片进行去雾处理。快速去雾算法的 $FPGA$ 实现结果如图 6 所示。在得到如图 6 所示的基于 $FPGA$ 的硬件实现结果后,需要验证此结果与 PC 平台上的软件算法设计的结果是否一致,以验证此算

法是否正确地在 $FPGA$ 上实现。本文将硬件实现结果与图 2(c) ~ 图 4(c) 的 $Matlab$ 软件仿真结果的像素值逐个进行对比与分析。结果表明,软、硬件算法的运算结果之间,每个像素点的色彩值仅有 ± 1 的偏差。分析其原因,应该是硬件的数学运算(如浮点转定点运算)中数据精度不可避免的丢失而导致的。

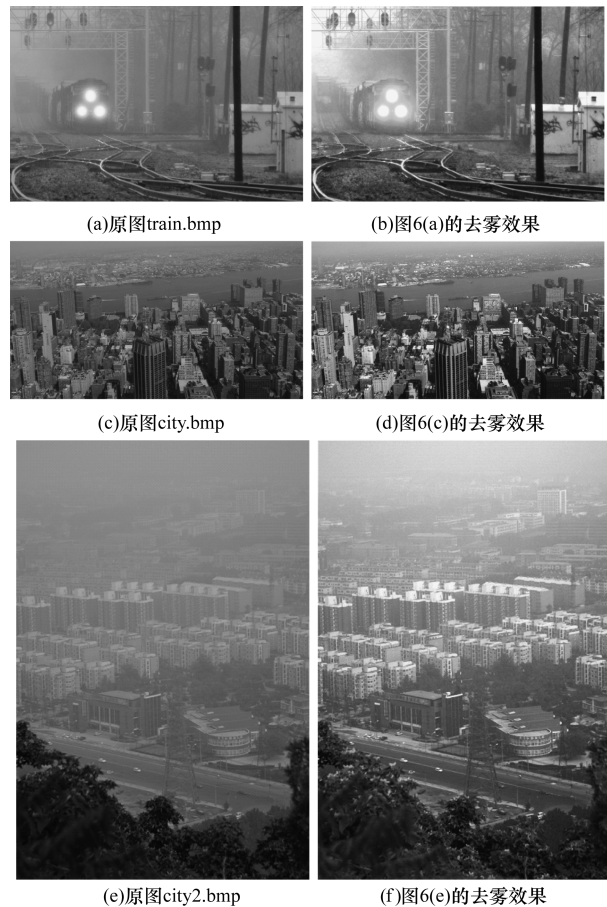


图 6 快速去雾算法的 $FPGA$ 实现结果

在验证了硬件结果的正确性的基础上,将硬件结果与 He 算法的结果进行对比分析,以评估因为简化 He 算法而带来的性能损失。评估主要从 2 个方面进行:(1)从人眼的直观视觉感受的角度而言,硬件结果的整体场景亮度较为合理,但色彩保真度以及景深真实性不如 He 算法的结果精确。(2)使用图像对比度作为图像质量的评判标准,对以上 2 种算法的结果进行对比(对比度的值越大,图像对比度越高)。参考表 1 的对比度结果可知,本文的硬件结果在对比度的指标上虽然弱于 He 算法的结果,但较原图而言有了很大的质量提升,且在如 $train. bmp$ 等某些例子上,效果可能好于 He 算法。

表 1 算法对比度结果对比

测试 图像	图像对比度		
	原图	基于 FPGA 的快速去雾 算法	He 算法 (使用导向滤波)
train. bmp 400 × 600	288.647 7	641.482 7	519.963 5
city. bmp 431 × 800	326.720 2	868.358 6	937.240 4
city2. bmp 600 × 400	478.424 7	760.388 8	805.927 8

在分析了此硬件系统处理结果的可靠性后,本文对系统的优势及其意义进行评估:(1)实时性。系统能够处理的对象为 60 Hz 帧频的 VGA 图形图像信号,其图像分辨率可为 640 像素 × 480 像素到 1 280 像素 × 1 024 像素。因此,系统完全有能力对高速、高帧率的视频图像进行处理。(2)低成本。整个硬件系统只需要极少的硬件电路(如 FPGA 芯片为 ALTERA 公司的 Cyclone IV 芯片)就能实现,其中,FPGA 内部的硬件资源消耗如图 7 所示。因此,系统所需要的硬件成本很低,具有很高的实用价值。(3)硬件接口特性。基于 FPGA 的硬件系统具有很灵活的接口特性,可以根据不同的现场应用进行用户定制的、可编程的接口设计。因此,本文系统可以非常方便地与其他嵌入式系统连接,进行数据交换,例如,作为视频图像处理的协处理器。

Family	Cydone IVE
Device	EP4CE15F17C8
Timing Models	Final
Total logic elements	1,937/15,408(13%)
Total combinational functions	1,590/15,408(10%)
Dedicated logic registers	1,064/15,408(7%)
Total registers	1064
Total pins	67/166(40%)
Total virtual pins	0
Total memory bits	48,958/516,096(9%)
Embedded Multiplier 9-bit elements	9/112(8%)
Total PLLs	1/4(25%)

图 7 FPGA 内部的硬件资源消耗

4 结束语

本文基于 FPGA 硬件平台,提出一种针对视频图像的快速去雾算法,并通过硬件方式实现此算法对视频图像进行去雾处理。算法仿真与实际的硬件实现结果均表明,该设计兼顾去雾算法的效果与视

频图像处理的实时性,有着良好的实际应用价值。但由于对原算法的大量简化,必然使得其中的某些参数不够精确,导致去雾效果降低。因此,下一步的研究将在保留设计实时性的基础上,考虑对其中的参数(如大气透射率 t)进行精确化计算与硬件实现,以实现更好的去雾效果。

参考文献

- [1] 胡伟,袁国栋,董朝,等.基于暗通道优先的单幅图像去雾新方法[J].计算机研究与发展,2010,47(12):2132-2140.
- [2] 嵇晓强,程揭章,郎小龙,等.雾霾天交通视频监控系统图像实时清晰化处理[J].科学技术与工程,2014,35(14):254-258.
- [3] 龚亮.基于FPGA面向车牌识别图像增强算法的设计与实现[D].长春:长春理工大学,2013.
- [4] Tan R T. Visibility in Bad Weather from a Single Image[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C., USA:IEEE Press,2008:1-8.
- [5] Fattal R. Single Image Dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics,2008,27(3):72-76.
- [6] He Kaiming, Sun Jian, Tang Xiaoou. Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2011,33(12):2341-2353.
- [7] 龚亮,孙俊喜,顾播宇,等.基于FPGA的视频图像去雾系统的设计与实现[J].电视技术,2013,37(7):6-8.
- [8] 贺柏根,刘剑,马天玮.基于DSP+FPGA的实时图像去雾增强系统设计[J].液晶与显示,2013,28(6):968-972.
- [9] 许志远,王庸凯,孙康,等.基于CLAHE的DSP实时去雾系统[J].沈阳大学学报:自然科学版,2014,26(4):296-300.
- [10] 孔小丽.一种实时去雾图像增强算法的DSP实现[J].电子世界,2014(15):86-86.
- [11] 张祥.高帧率视频图像获取与实时处理系统硬件设计[D].成都:西南交通大学,2014.
- [12] He Kaiming, Sun Jian, Tang Xiaoou. Guided Image Filtering[M]. Berlin, Germany: Springer,2010.
- [13] 吴岳骏.单幅图像去雾算法的研究及其FPGA实现[D].西安:西安电子科技大学,2013.
- [14] Rizzi A, Gatta C, Marini D. Color Correction Between Gray World and White Patch [C]//Proceedings of International Society Conference on Electronic Imaging. Washington D. C., USA:IEEE Press,2002:367-375.
- [15] Bailey D G. Design for Embedded Image Processing on FPGAs [M]. New York, USA: John Wiley & Sons,2011.

编辑 索书志