

基于FPGA的微光成像系统的研究

黄少肃^{1,2,3}, 陈文明^{2,3}, 沈健^{2,3*}

(1. 安徽师范大学物理与电子信息学院, 安徽芜湖 241001; 2. 中航华东光电有限公司, 安徽芜湖, 241002; 3. 特种显示技术国家工程实验室, 安徽芜湖 241002)

摘 要: 设计并搭建了一种微光成像系统, 包含硬件部分和逻辑部分, 采用以FPGA为核心的图像信号处理模块, 结合图像采集模块、接口模块、光学镜头、GAMMA校正、图像滤波处理算法以及MultiBoot。相关实验结果表明, 微光成像系统可以通过FPGA对微光CMOS图像传感器进行控制, 以采集不同照度下的微光图像; 上位机借助串口, 通过在线加载功能, 可实现对FPGA程序的更新; 在0.001 lux的环境下, 输出的微光图像分辨率不小于1.0 mrad, 图像可实现信息判读, 所得结果能够解决人眼在夜晚无法获取信息的问题。

关键词: 图像处理; 微光成像系统; 现场可编程门阵列; 在线加载

中图分类号: TN223 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2022)02-0112-07

Research on Low-light-level Imaging System Based on FPGA

HUANG Shaosu^{1,2,3}, CHEN Wenming^{2,3}, SHEN Jian^{2,3}

(1. Department of Physics, Anhui Normal University, Wuhu Anhui 241000, CHN; 2. AVIC Huadong Optoelectronics Co., Ltd, Wuhu Anhui 241002, CHN; 3. National Engineering Laboratory of Special Display Technology, Wuhu Anhui 241002, CHN)

Abstract: Under the condition of extremely low illumination, the images collected by the low-light CMOS image sensor generally has the problems of excessive noise, deviation of brightness, and difficulty in updating the system program after assembly. In view of this, a low-light-level imaging system, including hardware and logic, was designed and built, by using an image signal processing module with FPGA as the core, and combining with image acquisition module, interface module, optical lens, GAMMA correction, image filtering processing algorithm and MultiBoot. Related experimental results showed that the low-light-level imaging system could control the low-light-level CMOS image sensor through FPGA to collect low-light images under different illuminations. The host computer could use the serial port to update the FPGA program through the online loading function. It was testified that in the environment of 0.001 lux, the output low-light image resolution was not less than 1.0 mrad, the image could realize information interpretation, and the results could help solve the problem that the human eye could not obtain information at night.

Key words: image process; low-light-level imaging system; FPGA online loading

收稿日期: 2021-12-21

作者简介: 黄少肃(1995—), 男, 硕士, 主要研究方向为微光成像系统; (E-mail: 1952933017@qq.com)

陈文明(1984—), 男, 硕士, 主要研究方向为数字视频图像处理;

沈健(1977—), 男, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为光电显示与成像。

* 通讯作者

引言

在只有大气辉光的环境下,人眼对于外界信息的捕获存在很大的难度,而普通的相机在照度很低的时候,也很难获得信息^[1]。在这种情况下,微光夜视摄像机的出现可以有效的改善信息捕获难的问题,方便人们夜晚活动^[2]。

在市场需求推动下,微光夜视技术发展迅速^[3-6]。文献[7]使用CCD图像传感器搭建成像系统,可以将传感器采集到的信号进行转换、处理,使得图像符合人眼观察。文献[8]中对微光图像主要使用伽马变换,将图像由原本的全彩色视频信号转换为夜视场景灰度视频信号,但是在使用时,需要对夜视镜头进行调校,确保最佳的视觉灵敏度。文献[9]用光电传感器进行夜视照明设计,可以在0.000 92 lux下采集到图像,但是需要使用红外LED阵列作为照明光源。文献[10]中选用了像素阵列为744×480像素、最低照度为0.02 lux的CCD图像传

感器,设计出一种偏振成像系统,能够提高目标与自然背景之间的对比度,方便进行夜间搜救等工作。

鉴于此,结合微光CMOS图像传感器能够采集低照度图像和FPGA并行计算的特性,设计了一种基于FPGA的微光成像系统,使用FPGA对微光CMOS图像传感器进行控制,采集图像信号。采集到的图像信号经过GAMMA校正、图像滤波处理后,微光图像噪点明显减少,有利于信息的判读。该系统不仅体积小、重量轻,而且在系统组装完成之后,无需拆卸即可对系统程序进行升级,有望在安防领域发挥作用^[11]。

1 整体系统架构

微光成像系统由光学镜头组件、图像采集模块、图像信号处理模块、接口模块组成,如图1所示。

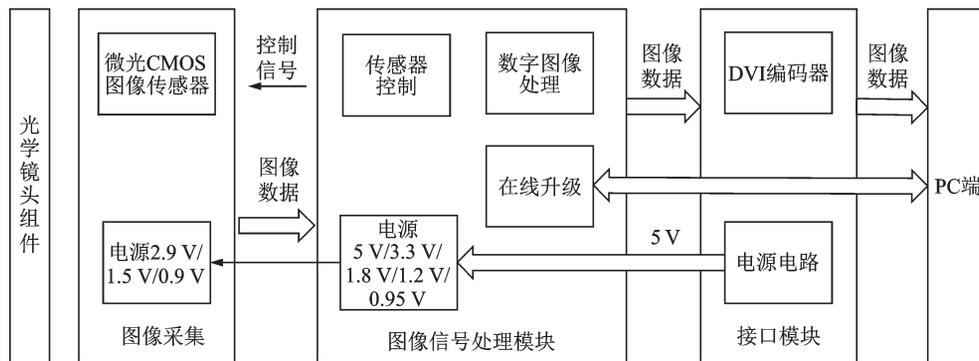


图1 微光成像系统架构

Fig.1 The structure of low-light imaging system

光学镜头组件为公司光学部自主设计,采用特定材料,使镜头组件部分体积小、质量轻,从而减少使用者的负担。图像采集模块主要由电源和微光CMOS图像传感器组成。微光CMOS图像传感器采用某款国产微光图像传感器,该传感器体积小,功能强大,支持多种工作模式。图像信号处理模块分为硬件部分和逻辑部分,硬件部分采用XILINX公司的A7系列FPGA,以FPGA为核心,结合其它电子元器件,构建图像信号处理平台;使用硬件编程语言VHDL和verilog构建图像处理模块的逻辑部分。硬件和逻辑部分相结合,组成图像信号处理模块。接口模块主要用于对其它模块的供电、图像信号转换为DVI数字视频信号并输出以及模块之间信息的交互。

微光成像系统开始工作时,需要对系统供电,驱动各个部分的电子元器件开始运转。携带外界信息的光线通过光学镜头模块,聚集到微光CMOS图像传感器上。聚集的光线通过光电效应使微光CMOS图像传感器上硅半导体内的电子得到释放,电子在曝光时间内被累加,后被转换成电压后输出并进入图像信号处理模块^[12]。进入图像信号处理模块的图像信号,在FPGA内进行图像处理,包括GAMMA校正、图像滤波。经过处理后的图像信号被输出到视频格式转换芯片,输出显示终端支持的格式的信号。

2 微光CMOS图像传感器简介

微光夜视摄像机所用微光CMOS图像传感器

为国内某公司生产,该图像传感器应用领域广泛,可用于军用夜视摄像机、安防监控系统、网络摄像机、可移动设备相机、科研级摄像机。

系统中所用国产微光图像传感器由六个模块组成,分别是光学阵列、模拟处理模块、数字处理模块、系统控制模块、PLL 模块、IIC SLAVE 模块,如图 2 所示。该微光图像传感器通过接口,将信号传输到其它部分,接受传输过来的控制信号和电压。

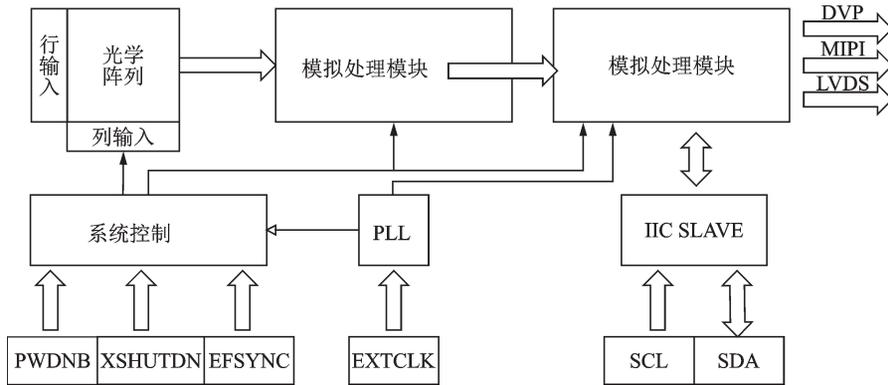


图 2 微光 CMOS 图像传感器架构

Fig.2 The structure of low-light CMOS image sensor

3 系统关键模块设计

3.1 传感器驱动模块

系统上电之后,电源芯片将输入电压进行转换,生成微光 CMOS 图像传感器的工作电压,分别为 2.9 V、1.5 V、0.9 V。电压满足需求时,微光 CMOS 图像传感器进入工作状态。FPGA 通过 IIC 接口寄存器,配置传感器中的寄存器值,使 CMOS 图像传感器正常工作。

对微光 CMOS 图像传感器供电时,需要注意上电时序,传感器初始化上电时序如图 3 所示。按照上电时序图要求对微光 CMOS 图像传感器进行供电,传感器才能正常工作,否则,传感器将会无法进入正常工作状态。在芯片初始化时,按照一定的时间间隔,依次对 DOVDD(I/O 电源)、DVDD(数字电源)、AVDD(模拟电源)进行供电。三种电源全部进入正常供电状态,后将 XSHUTDN(复位信号)和 PWNB(掉电信号)由低电平变为高电平,使信号处于无效状态。DOVDD(I/O 电源)时序由低电平变成高电平,FPGA 将通过 IIC 接口对传感器中的寄存器开始配置,使其处于预期的工作状态,配置的寄存器包括模拟电路控制寄存器、曝光时间、

同时,该图像传感器支持 IIC 接口寄存器编程,其寄存器由 FPGA 控制,改变寄存器配置的数值,使传感器按照设定的模式工作。

该微光图像传感器支持多种输出接口,包括 MIPI、LVDS 等,输出格式为 RAW RGB/MONO,其工作温度范围大,可以在 -40°C 至 $+70^{\circ}\text{C}$ 之间正常工作。其阵列规模为 1936×1216 像素,最大图像传输速率为 $1920 \times 1200@60\text{ fps}$,输出分辨率可调整。

数字增益、输出图像尺寸控制等。

在所有信号满足时序要求,寄存器完成配置工作后,微光 CMOS 图像传感器开始工作,将光学镜头模块采集到的光信号转化为电信号,并输出到图像信号处理模块。

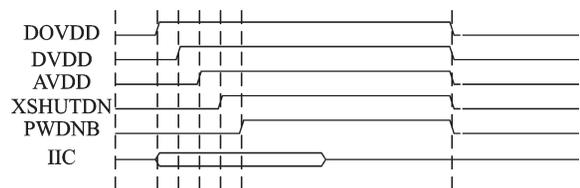


图 3 传感器初始化上电时序图

Fig.3 The diagram of sensor initialization and power-on sequence

3.2 在线加载模块

微光成像系统经装配后,外部结构将微光成像系统内部的模块全部密封起来,以提高微光夜视摄像机的抗干扰能力和可靠性。密封后,如果程序需要升级,必须拆开结构,才能通过 JTAG 接口对程序进行升级。微光夜视摄像机被拆开,电路板易受到损坏,摄像机内部易附着水汽、灰尘、霉菌等微小物,为消除上述隐患,借助 FPGA 的 MultiBoot 功能,采用在线加载功能解决上述问题。

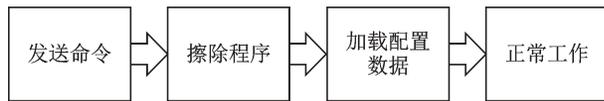


图4 在线升级系统流程图

Fig.4 The flow chart of system online upgrade system

使用MultiBoot功能,将FLASH划分为主程序部分和引导程序部分,将多个bitstream存储其中^[13]。主程序部分存放主程序bitstream文件,当FPGA处于主程序工作状态时,微光CMOS图像传感器采集图像信息并传输,FPGA对采集的图像进行处理并输出;引导程序部分存放引导程序bitstream文件,当FPGA处理引导程序工作状态时,可以将FLASH中主程序部分存放的bitstream文件擦除并更新。在需要升级程序的时候,通过上位机发送在线加载开始指令,使微光成像系统由主程序工作状态,跳转到引导程序工作状态。发送擦除指令,将FLASH内部指定地址中的数据清除,不保留任何信息;后通过串口将新的bitstream存储到FLASH指定地址中。通过热启动地址和IPROG源语,将新存储的bitstream文件中的配置数据加载进FPGA。FPGA按照配置数据改变内部电路功能后开始工作,同时发送引导程序工作状态结束指令,从引导程序工作状态跳转回主程序状态,实现程序的在线升级。

3.3 数字图像处理模块

微光CMOS图像传感器将采集到的光信号转变为电信号,后以MIPI格式输出。信号进入图像信号处理模块后,为方便对信号进行数字图像处理,将该差分模拟信号进行处理,转变为LVTTTL信号。对该信号进行GAMMA校正、图像滤波等处理,能够有效改善显示画面充满噪点、亮度偏差^[14]的问题。

3.3.1 GAMMA校正

人眼对画面的明暗对比的曲线不同于屏幕显示的明暗对比曲线,为更好的迎合人眼,需要对输入图像的亮度进行GAMMA校正^[15],使得亮度偏差问题得到解决。

$$g(x,y)=f(x,y)^{\gamma} \quad (1)$$

公式(1)中 $f(x,y)$ 为输入像素值, $g(x,y)$ 为输出像素值。GAMMA校正对输入的灰度图像进行指数变换,进而调节校正亮度偏差,各灰阶值的颜色误差减少,解决图像显示时亮度变化和外部电压呈现非线性失真而导致的亮度偏差问题。如图5所示,图中曲线表明在不同指数的情况下,GAMMA

曲线的变化趋势。

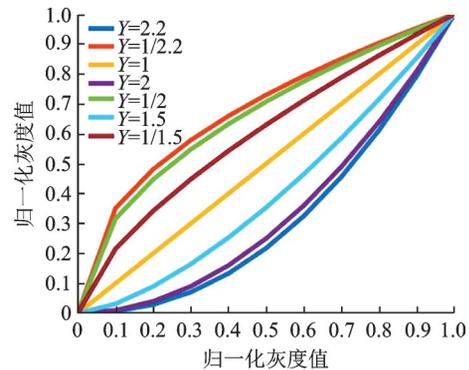


图5 不同参数下的GAMMA校正曲线图

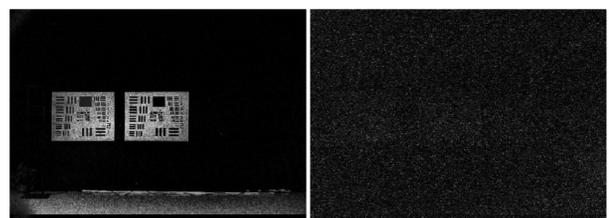
Fig.5 The curves of GAMMA correction versus different parameters

由于图像处理载体FPGA的独特性,GAMMA校正的实现和在PC机上采用的方法不一样。FPGA因其内部的资源有限,无法直接进行指数运算,所以需要对GAMMA校正处理过程进行优化,使得其能够在FPGA上运行。

因输入图像为8位灰度图像,使用GAMMA校正公式,计算出灰阶等级在0到255之间的应该输出的灰度值。然后将256级灰度值分为16段,分别对每段进行处理。根据GAMMA公式得到的灰度值对不同段的输入灰度值进行补偿,使得输出的曲线向GAMMA曲线逼近。根据灰阶等级的不同将灰度值分段处理,可以节约大量的FPGA内部资源,同时也可以加快硬件运行速度。

3.3.2 图像滤波

电子元器件工作时产生的热噪声、信号传输时受到的环境干扰、微光CMOS图像传感器制作工艺等诸多因素,会导致微光图像在采集、传输、处理时会受到噪声的污染。例如在照度为0.1 lux和0.000 01 lux下,微光成像系统显示的画面上的噪点差异明显,观察图6可知,当照度极低时,噪点严重影响信息判读。



(a) 照度为0.1 lux的微光图像 (b) 照度为0.000 01 lux的微光图像

图6 照度为0.1 lux(a)和0.000 01lux(b)的微光图像

Fig.6 The images of low-light with illuminance of 0.1 lux(a) and 0.000 01 lux (b)

为方便对画面信息的判读,需对噪点进行滤除。常见的滤波算法很多,例如中值滤波、均值滤波、高斯滤波、FIR滤波等过程较为简单的算法,还有3D滤波、NLM等复杂算法。由于本系统中图像信息处理载体为FPGA,其内部资源有限,同时微光图像中椒盐噪声

居多,文中采用中值滤波算法处理微光图像的噪声。

传统的中值算法对微光图像进行处理,应先对数据进行行缓存。利用FIFO的读写使能信号组成的状态机,控制两个FIFO对数据进行缓存,构建3×3滤波窗口,时序如图7所示。

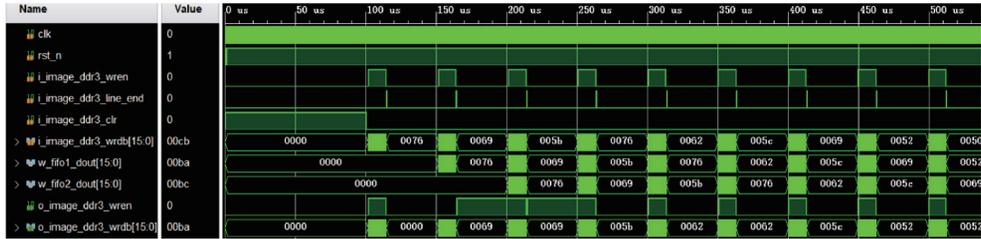


图7 滤波窗口

Fig.7 Filter window

在上述3×3滤波窗口形成之后,对滤波窗口中的九个数据进行大小比较,在对第一行数据进行比较得到最大值、最小值、中值后,对第二行、第三行数据进行相同操作。随后对三行数据中的中值进行比较,得到九个像素值中的中值,将中间值取代窗口中心值输出,显示效果如图8中(b)所示,可以发现噪声数量有所下降。

的微光图像,微光图像的灰度值分布较集中,灰度值主要分布在50左右,超过150的像素点相比较而言很少。故当判断一个点为噪点,经过校正处理之后,其灰度应分布在0~150和255这个范围之内。

窗口的选择对于滤波效果影响很大,故将传统的3×3的窗口变为5×5,7×7的窗口,扩大邻域,其处理效果如图8中(c),(d)所示。从图8中可以看到,微光图像上存在的噪点随着邻域扩大数量减少,对应图像细节的模糊程度上升,故采用扩大邻域的方法来增强滤波效果的处理方法不可取。

对数据进行缓存得到3×3滤波窗口后,对其进行中值处理,可得滤波窗口中的中值。随后求滤波窗口中心值与周围领域八个像素值的差值,得到差值F00,F01,F02,F10,F12,F20,F21,F22个值,将F01,F10,F12,F21四个窗口对角线上的像素值取高八位,得到a,b,c,d四个值。对F00,F02,F20,F22四个像素值取高八位后左移一位得到e,f,g,h四个值,将a,b,c,d,e,f,g,h相加,得到和值为A。对A进行判断,当A的值超过512时,则该点为噪点,反之为正常点。

对微光图像进行分析,对于8位256级灰度值

假设中心点为正常点,则将上述运算得到的中值输出。假设该中心点为噪点,则需要对该点进行校正处理,校正关系式为 $f_x = I g_x$, f_x 为校正之后的像素灰度值, g_x 为校正之前的像素灰度值, I 为校正前后的像素灰度映射关系函数,图9为校正前后像素之间对应关系曲线。

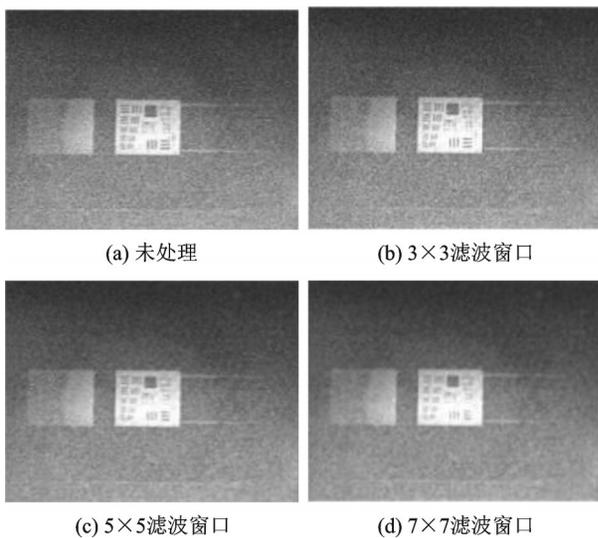


图8 未经过处理以及3×3、5×5、7×7滤波窗口处理后的微光图像

Fig.8 Low-light images without processing and processed by 3×3,5×5,7×7 filter window

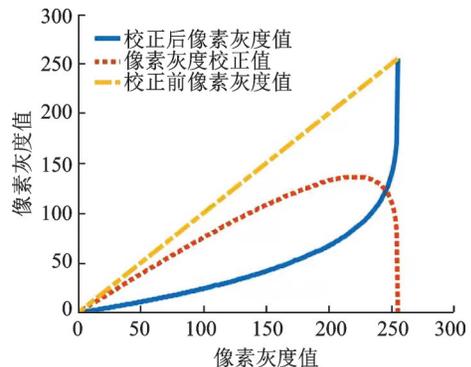


图9 校正前后灰度及灰度校正曲线

Fig.9 The curves of correspondence between gray value before and after correction and gray correction value

考虑到FPGA运算的独特性,可以采用查找表的形式对噪点进行处理。通过其他工具,例如matlab,先计算出输入噪点经过校正处理之后得到的结果 f_x 。在FPGA上构造一个RAM,将 f_x 存储在其中。将噪点的灰度级数值作为寻址地址,噪点判断信号为使能信号,输出为校正之后的 f_x ,构成一个基于RAM的查找表。通过噪点校正查找表,加速算法运行,同时节约FPGA内部资源。

对图10进行分析,经过改进的中值滤波算法处理后,整个画面中的噪点消散明显,与传统的中值滤波算法处理的图片相比,画面显示效果得到改善,细节模糊程度减轻,信息的判断更加明确。

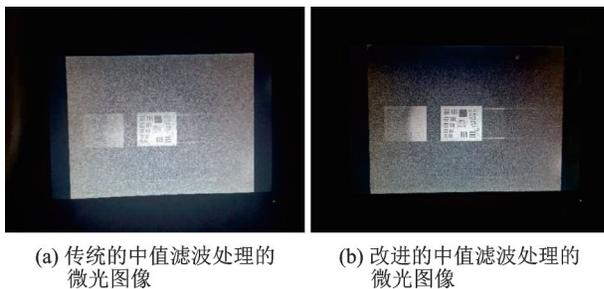


图10 传统的中值滤波处理(a)和改进的中值滤波处理(b)的微光图像

Fig.10 Low-light images of traditional median filter processing (a) and improved median filter processing (b)

4 实验

4.1 分辨率测试实验

将微光夜视摄像机放在暗室中进行分辨率测试。实验采用星迪仪器公司的微光夜视仪成像性能测试系统,如图11所示,检测在不同光照下所能达到的分辨率。

将微光摄像机放置在光学旋转基台上,见图12,调整光学旋转基台,使得微光摄像机的光学镜头的中心正对准准直透镜。接着根据照度的要求选择配置不同的光源,通过观察在普通屏幕上显示的微光夜视摄像机采集处理后的图像,找到能够分清横竖条纹的目标靶板上的最小的一组刻线,可以得到此照度下的微光摄像机的可分辨情况。

在暗室中,在无外界光源的环境中,分别采用九种不同照度的光源照射目标靶板,使用微光成像系统采集图像,通过笔记本电脑截取微光图像。图13为采用改进的中值滤波算法处理后不同照度下的微光图像,其中图像所处照度依次为300 lux、0.1 lux、0.01 lux、0.001 lux、0.000 1 lux、0.000 01 lux。

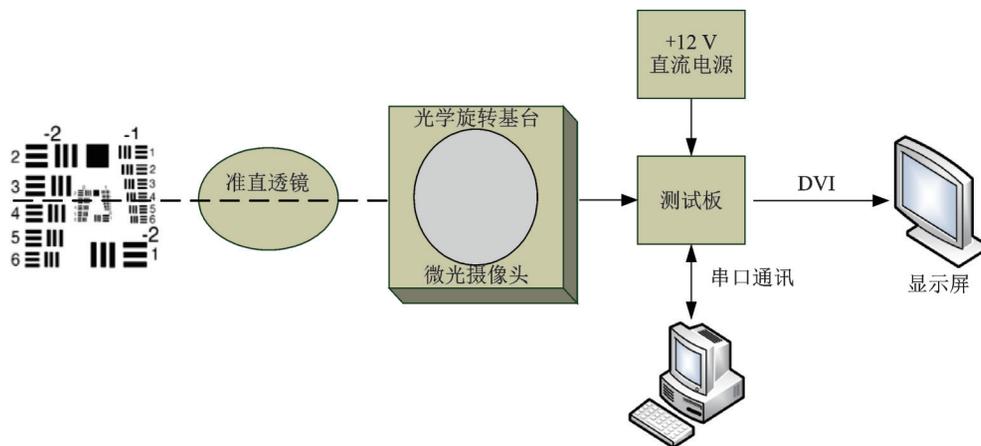


图11 微光图像测试系统

Fig.11 Low-light image test system

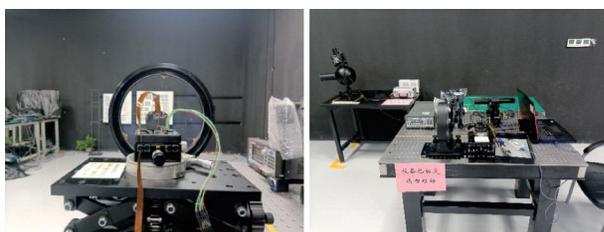


图12 置于光学旋转基台上的微光摄像机

Fig.12 Low-light camera placed on an optical rotating base

对微光摄像机显示图像的分辨率进行统计,统计图如图14。根据分辨率统计图,经不同滤波算法处理之后的图像总体变化趋势相同。在照度处于0.1 lux到0.000 01 lux之间时,分辨率随着照度的降低而变大,处于上升的趋势。当照度处于0.1 lux到0.001 lux时,分辨率变化很慢。传统的中值滤波处理的图像,其分辨率在0.74~0.83 mrad,而滤波算法改进之后,分辨率处于0.66~0.79 mrad。当照度处



图 13 不同照度下微光夜视摄像机采集的图像(改进的中值滤波)

Fig.13 Images collected by low-light night vision cameras under different illuminances with improved median filtering

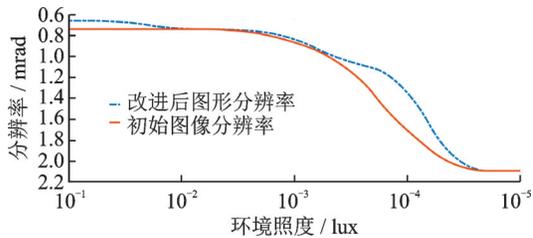


图 14 分辨率与环境照度之间的变化关系

Fig.14 The relationship between resolution and environment illuminances

于 0.001 lux 到 0.000 01 lux 时,分辨率下降变化最大。传统的中值滤波处理的图像,其分辨率从 0.83 mrad 上升到 2.095 mrad,而滤波算法改进之后,其分辨率从 0.79 mrad 上升到 2.095 mrad。经过改进的中值滤波算法处理的微光图像,其分辨率变化曲线要小于传统的中值滤波算法处理的图像,细节处理效果更好。

4.2 在线加载程序实验

准备程序 A 和程序 B,使用程序 A 显示的图像存在大量拉线,而使用程序 B 显示的图像不存在拉线。首先将程序 A 固化进 FPGA,断电后重新上电,显示效果如图 15(a)所示。接着按照在线加载步骤,将程序 B 通过串口存储在 FLASH。断电后重新上电,显示效果如图 15(b)所示。由图 15 可知,屏幕上显示的图像由初始的存在拉线变为不存在拉线,FLASH 中存储的程序发生改变,故在线加载功能实现。



(a) 存在拉线的程序 A

(b) 拉线消除的程序 B

图 15 存在拉线的程序 A(a)及拉线消除的程序 B(b)

Fig.15 Program A (a) with cable pull and program B with cable elimination (b)

5 结 论

提出一种基于 FPGA 的微光成像系统,可实现在线加载,并对数字图像处理部分的中值滤波进行优化。经过改进的中值滤波算法处理后的图像,噪声被大量滤除,细节清晰,显示效果得到改善,有利于图像信息的读取。经测试,微光夜视摄像机在环境照度 0.001 lux 下,分辨率不大于 1.0 mrad,能有效满足人们在夜间进行活动时的需要,对安防领域具有一定的参考和应用价值。

参 考 文 献

- [1] Purohit M, Chakraborty A, Kumar A, et al. Image processing framework for performance enhancement of low-light image sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 99: 1.
- [2] 向世明. 现代光电子成像技术概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
- [3] 田金生. 微光像传感器技术的最新进展[J]. 红外技术, 2013, 35(9): 1-14.
- [4] 李金平, 张 洋, 王 云. 微光像增强器用核心材料的发展现状与展望[J]. 光学技术, 2017, 43(3): 284-288.
- [5] 刘文彬. 微光成像技术在航空机载领域的应用研究[J]. 电子测试, 2019, 1: 57-59.
- [6] 徐鹏霄, 唐光华, 唐家业, 等. EBCMOS 混合型光电探测器研究[J]. 光电子技术, 2016, 36(4): 232-236+252.
- [7] 李和仙. 微光视环境的 CCD 成像系统设计[J]. 吉林化工学院学报, 2019, 36(5): 38-41.
- [8] 王 聪, 于 飞, 杨明浩, 等. 一种微光夜视成像系统设计[J]. 空军医学杂志, 2021, 37(1): 5-8.
- [9] 贾世奎, 杨 凌, 陈 博, 等. 一种船用摄像机的主动红外系统设计与实现[J]. 激光与红外, 2017, 47(5): 562-567.
- [10] 茹志兵, 刘 冰, 李双全, 等. 基于微光像增强器的偏振成像系统设计与实验[J]. 应用光学, 2015, 36(3): 435-441.
- [11] 郭 晖, 向世明, 田民强. 微光夜视技术发展动态评述[J]. 红外技术, 2013, 35(2): 63-68.
- [12] Bailey Donald G. Design for embedded image processing on FPGAs[M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2011.
- [13] Chiuchisan I. A new FPGA-based real-time configurable system for medical image processing[C]. E-health & Bioengineering Conference, IEEE, Romania, 2014: 1-4.
- [14] 何颖秋, 方子涵, 谢亮天. 基于 FPGA 的实时图像处理与实现[J]. 电子设计工程, 2020, 28(7): 137-141.
- [15] 李 娜, 刘文进, 杜育宽, 等. 基于 FPGA 的红外图像清晰化系统设计[J]. 激光与红外, 2021, 51(5): 612-618.