

文章编号:1007-2780(2022)04-0501-07

基于 FPGA 的自适应夜景增强系统设计与实现

乔鑫¹, 万毅^{2*}

(1. 兰州大学 信息科学与工程学院, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州大学 信息科学与工程学院, 信息与通信工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:为了在夜间环境下对相机拍摄画面进行图像增强,以FPGA结合模拟电路设计了一种自适应夜景增强系统。首先,模拟摄像头采集视频;接着,AD603芯片对采集到的模拟视频信号进行放大,TVP5150芯片对放大后的模拟视频信号进行解码,输出ITU-R BT. 656格式数据;然后,FPGA进行有效数据提取、分辨率修改和视频插针等预处理;最后,使用自适应算法和D/A转换电路控制AD603芯片调节放大倍数,达到系统对周围环境的自适应调节,使每帧图像的平均灰度值稳定在所设阈值附近。采用硬件电路代替复杂的软件算法,在达到效果的同时,大幅度减少了FPGA资源消耗,并在ALINX AX545 FPGA平台上实现设计。实验结果表明:在分辨率640×480,60帧/s的情况下,能够对夜间画面进行自适应的实时增强,最终将图像的平均灰度值稳定在所设阈值附近。该系统能够应用在目标检测和视频监控等领域。

关键词:图像增强;FPGA;自适应;实时

中图分类号:TP391.4; TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2021-0249

Adaptive night scene enhancement system design and implementation based on FPGA

QIAO Xin¹, WAN Yi^{2*}

(1. School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Institute of Information and Communication Engineering, School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to enhance the image taken by the camera in night environment, an adaptive night scene enhancement system combined with analog circuit is designed. Firstly, the analog camera captures the video. Next, the AD603 chip amplifies the captured analog video signal decoded by the TVP5150 chip that outputs the data in the ITU-R BT. 656 format. Then, the FPGA performs effective data extraction, resolution modification and preprocessing such as video pin. Finally, the adaptive algorithm and D/A conversion circuit control the AD603 chip to adjust the magnification to achieve the system's adaptive adjustment to the surrounding environment, so that the average gray value of each frame of image is stabilized near the set threshold. The paper uses hardware circuits instead of complex software algorithms to achieve results, while it greatly reduces FPGA resource consumption and implements the design on the ALINX

收稿日期:2021-09-28;修订日期:2021-12-07.

基金项目:中央高校基本研究基金(No. lzuxxy-2019-tm22)

Supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities(No. lzuxxy-2019-tm22)

*通信联系人, E-mail: wanyi@lzu.edu.cn

AX545 FPGA platform. The experimental results show that at the resolution of 640×480 and 60 frame/s, it can perform adaptive real-time enhancement of night images, and finally stabilize the average gray value of the image near the set threshold. The system can be applied in the fields of target detection and video surveillance.

Key words: image enhancement; FPGA; adaptive; real time

1 引言

图像增强技术主要用于改善图像的质量,增强视觉效果,突出图像中的重要信息,获得更加清晰并且可使用的图像^[1]。随着夜间环境下工作以及生活场景的增多,为了让视觉设备在此环境下获得高质量的图像,图像增强变得尤为重要。现场可编程门阵列(FPGA)内部拥有丰富的硬件资源。相比于数字信号处理器(DSP),具有高速的并行处理能力,可以实现实时性处理,提高图像增强处理效率^[2-3]。FPGA的优越性,使其更方便、更高效地实现软件算法以及算数运算,拥有灵活性高、通用性强和开发周期短等优点^[4],所以使用FPGA作为图像增强的硬件实现,变得越来越广泛。通常FPGA实现图像增强要进行较多处理,如邱永生采用图像融合^[5],武继瑞采用直方图均衡化^[6]实现图像增强。两者方法的处理过程复杂且使用了较多的FPGA内部资源。因此,本文提出新的方法,采用ALINX FPGA开发平台AX545结合模拟电路,可以实现自适应实时图像增强,在保证效果的同时,缩短了开发周期,减小了开发难度和成本,并拥有更广泛、更灵活的应用场景。

2 夜景增强系统的构成及其工作原理

2.1 夜景增强系统的硬件构成

图1为夜景增强系统结构框图。它主要由视频采集模块、程控放大模块、视频解码模块、FPGA模块、D/A模块、DDR3存储模块以及VGA显示器组成。

模拟摄像头用于采集图像,AD603对模拟视频信号放大,TVP5150对模拟视频信号解码,FPGA对图像预处理、实现自适应算法并控制D/A调节AD603放大倍数,DDR3缓存图像,

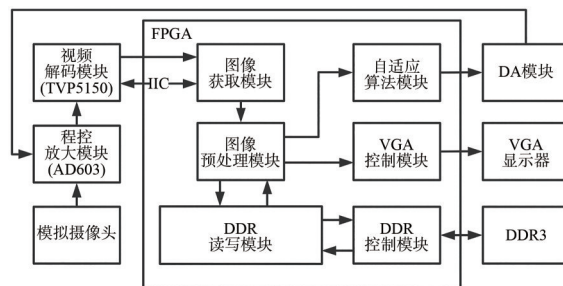


图1 系统结构框图

Fig. 1 System structure block diagram

VGA显示增强效果。

2.2 夜景增强系统的工作原理

该系统的基本工作原理为:通过模拟摄像头获取模拟视频信号并传输给程控放大模块。

程控放大模块通过输入增益控制电压来调节其放大倍数,对模拟视频信号进行放大调节,并将放大后的模拟视频信号传输给视频解码模块。

视频解码模块解码模拟视频信号,输出ITU-R BT. 656格式数据,并将其传输给FPGA模块。

FPGA模块从ITU-R BT. 656格式数据中提取有效视频数据以及同步信号,修改图像分辨率,对视频进行插帧,得到分辨率为 640×480 、60帧/s的视频数据。对图像进行灰度变换,通过每两帧图像参数计算出新一帧的放大倍数 A ,并传输给D/A模块。

D/A模块将 A 转换成模拟量传输给程控放大模块的增益控制端,来改变每帧图像的放大倍数,使其平均灰度值稳定在阈值附近。

VGA控制模块读取增强后图像数据,生成视频时序控制VGA进行实时显示。

DDR3存储模块进行图像的缓存,生成DDR3控制信号和突发读/写信号。

2.2.1 环境条件

本系统使用模拟摄像头采集图像,图像均为

电压信号。在拍摄环境光照非常弱或无光的情况下,模拟摄像头输出的电压幅值几乎是直线,即像素间对应的模拟电压幅值相差很小。在此情况下,对模拟视频信号放大,只是将信号幅值进行了搬移,并没有放大像素之间的差异。对无光场景进行手动放大,结果表现为图像整体变亮,但没有增加图像细节。实验效果如图2所示。

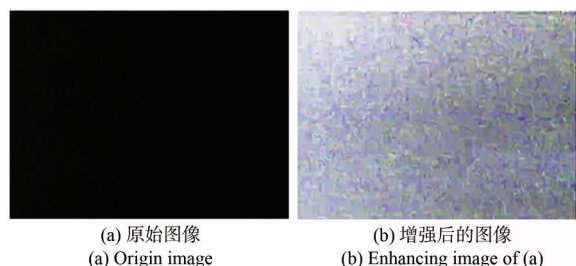


图2 无光环境增强效果

Fig. 2 Matte environment enhancement effect

对以上场景,添加微光再进行手动放大,实验结果表现为图像整体变亮,并增加了图像细节,实验效果如图3所示。

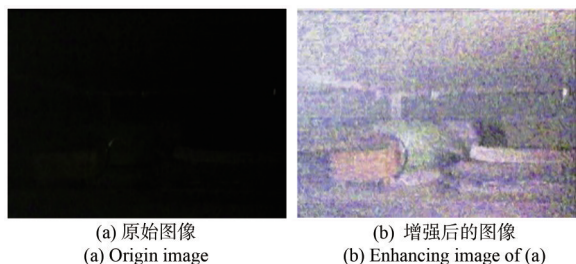


图3 弱光环境增强效果

Fig. 3 Low-light environment enhancement effect

结果表明,若场景光照非常弱或无光,则放大图像中缺失细节。若场景中有微光或低照度场景,则增强效果明显。

2.2.2 预期图像平均灰度值

对系统实现手动放大测试中,可将场景分为整体颜色偏暗、适中以及偏亮3种。如图4所示,放大到可以清晰观察到细节时,测得(a)、(b)、(c)图的平均灰度值分别在40,80,120左右。

如图4(a)所示,对于整体颜色偏暗的场景,放大到能看清细节时图像平均灰度值较小;如图4(b)、(c)所示,对于整体颜色适中、偏亮的场

景,放大到能看清细节时图像的平均灰度值可以达到一个较大的值。故为了使更多的场景达到较好的增强效果,设置系统的预期图像平均灰度值为80。当系统将原图像平均灰度值调节到预期平均灰度值附近时,对于整体颜色偏暗的场景可以更好地增加图像细节和提升亮度,对于整体颜色偏亮的场景可以避免图像过亮而丧失一些细节,最终使整个系统能实现较好的增强效果。

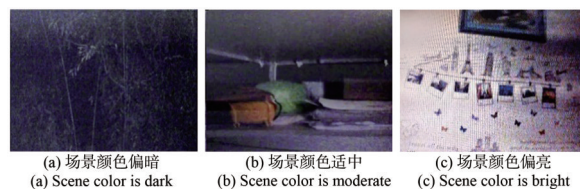


图4 不同场景增强效果

Fig. 4 Different scene enhancement effects

3 夜景增强系统的硬件组成

3.1 外设模块

程控放大模块的核心是ADI公司的AD603芯片,它具有低噪声、低畸变、带宽可选、增益可调等特性。将其5、7引脚短接,可选择带宽为90 MHz,增益范围为 $-10\sim 30$ dB^[7-8]。AD603的输入增益控制电压差在 $-500\sim 500$ mV间与增益成线性关系,其关系如式(1)所示^[9]。

$$\text{Gain(dB)} = 40V_G + G_0, \quad (1)$$

其中 V_G 是施加的增益控制电压差, G_0 为起始增益。

视频解码模块的核心是TI公司的TVP5150芯片,具有超低功耗、封装小等特性。使用14.318 18 MHz时钟就可以实现NTSC/PAL/SECAM各种制式视频的解码。它支持两路复合信号或一路S-video视频信号输入。输出格式一种是8位图像信号,同步信号分离输出;一种是同步信号内嵌于图像信号中的ITU-R BT. 656格式数据^[10-11]。

3.2 FPGA模块

FPGA模块的核心是Xilinx公司Spartan-6系列的XC6SLX45-2CSG324芯片。该芯片内部具有43 661个逻辑单元、401 kb的可配置逻辑块、58个DSP48乘法器、4个时钟单元、2 088 kb的Block RAM,最多218个可用I/O口。同时板

模块负责对提取的视频流进行插帧处理。图像写入DDR的频率为50帧/s,读出频率为60帧/s。写入5帧与读出6帧所用时间相同,对DDR存储区域进行划分,结合乒乓操作思想,每缓存5帧则进行读取。在读取完第5帧图像数据时,对第5帧图像数据重读,实现5帧扩6帧,1s内便可实现50帧扩60帧操作。缓冲区为划分DDR内部存储区域实现,故不会占用RAM资源。

4.2 自适应算法模块

自适应算法是实现系统自适应调节的关键,每帧图像的平均灰度值为评估图像亮度的依据。灰度值计算公式如式(4)所示^[16]:

$$Y = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (4)$$

系统初始放大倍数为1,自适应算法公式如式(5)~(7)所示:

$$y'_k = y_k \times g_{k-1} \approx y, \quad (5)$$

$$y'_{k+1} = y_{k+1} \times g_k \approx y, \quad (6)$$

$$g_i = \frac{y}{y'_i} \times g_{i-1} = \frac{y}{y'_i / g_{i-1}} = \frac{y}{y_i}, \quad (7)$$

式中: y'_k 为第 k 帧原图像放大后图像的平均灰度值, y_k 为第 k 帧原图像的平均灰度值, y 为增强后图像的预期平均灰度值, g_{k-1} 为通过第 $k-1$ 帧得到的第 k 帧的放大倍数。如式(5)所示,第 k 帧原图像乘以放大倍数 g_{k-1} 就是第 k 帧放大后的图像,其平均灰度值接近于 y 。同理第 $k+1$ 帧原图像乘以第 k 帧得到的放大倍数 g_k 就是第 $k+1$ 帧放大后的图像,其平均灰度值也接近于 y 。以此类推可得到,通过当前帧的 y' 和上一帧的 g 得到下一帧的 g ,如式(7)所示。每帧计算出的 g 均要存储,参与下一帧的运算。最终将此关系应用到所有帧,便可达到实时的自适应调节。自适应算法模块结构框图如图7所示。

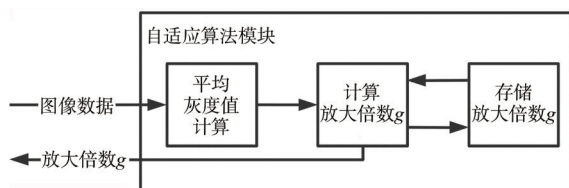


图7 自适应算法模块

Fig. 7 Adaptive algorithm module

5 实验结果

5.1 图像增强结果

在黑暗环境下,使用低照度光源的不同光强照射拍摄场景的情况,用本系统实时进行拍摄,并将增强效果在VGA上显示。增强效果如图8所示。

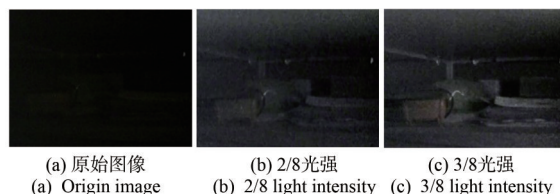


图8 图像增强效果

Fig. 8 Image enhancement effect

图8中(a)、(b)分别为低照度光源2/8光强照射场景下的原始图像和增强后的图像,观察到增强效果较不明显。图8中(c)为3/8光强下增强的图像,发现效果明显,细节突出。

5.2 自适应增强结果

图像的自适应增强结果如图9所示。随着光强的逐渐增大,拍摄到的原图像越来越清晰,同时系统的放大倍数也在自动调节逐渐变小,对于场景的变化达到自适应调节,最终增强后图像的平均灰度值逐渐稳定在所设阈值附近。实物如图10所示。

FPGA实现整个系统的资源使用如表2所示。

将本文方法与图像融合和直方图均衡化两种方法的FPGA内部资源使用进行对比,进一步突出了本文系统的优势。比较结果如表3所示。从表3可以看出,图像融合和直方图均衡化两种方法会使用较多的FPGA内部逻辑资源。故本文方法使用更少的FPGA内部资源,降低了开发成本和难度。

在实际应用中,为了防止系统对光照非常弱或无光环境的过度放大,对系统设定17 dB的放大上限,避免如图2中无意义的增强。同时图像增强效果会受到实际芯片性能、D/A数模转换芯片存在的偏移现象,甚至环境因素的影响。在系统设计中,尽管会使用屏蔽线等措施进行改善,但依旧会存在误差。



图 9 自适应增强效果
Fig. 9 Adaptive enhancement effect

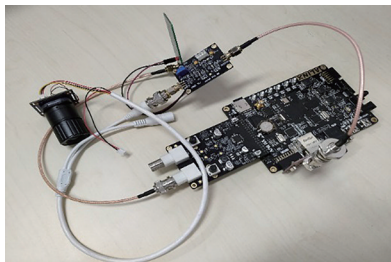


图 10 系统实物图
Fig. 10 System physical image

表 2 FPGA 资源使用情况
Tab. 2 Usage of FPGA resource

逻辑资源	使用数	总数	百分比/%
LUT	4 163	27 288	15
FF	5 035	54 576	9
DSP	9	58	15
I/O	100	218	45
PLL	1	4	25

表 3 FPGA 资源使用对比
Tab. 3 Usage comparison of FPGA resource

逻辑资源	图像融合法 ^[5]	直方图均衡化 ^[6]	本文方法
LUT	8 512	11 366	4 163
FF	12 768	9 246	5 035
DSP	8	1	9
BRAM	19	17	0

6 结 论

对于图像增强,本文提出了FPGA结合模拟电路的自适应夜景增强系统。通过硬件电路实现对模拟视频信号的放大。使用IIC总线配置TVP5150视频解码芯片,将模拟视频信号转换为数字视频信号。对ITU-R BT. 656格式数据进行处理,得到有效视频数据以及同步信号。用自适应算法和D/A数模转换电路控制AD603芯片,最终实现系统的自适应实时夜景增强。本文方法缩短了开发周期,降低了开发难度和成本,同时经过本系统增强图像后,增加了图像细节和图像对比度,使得拍摄到的画面更加清晰,改善了拍摄画面的图像质量。实验结果表明,本系统具有成本低、实时性强以及自适应调节等特点,能够很好地应用在目标检测及监控等领域。

参 考 文 献:

[1] 赵建,赵凡,曲锋. 彩色图像的FPGA实时增强系统实现[J]. 液晶与显示,2014,29(4):629-636.
ZHAO J, ZHAO F, QU F. Implement of system for color image enhancement in real-time based on FPGA [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(4): 629-636. (in Chinese)

[2] 郑争兵. 基于FPGA的图形点阵液晶显示系统设计与实现[J]. 液晶与显示,2013,28(3):403-407.
ZHENG Z B. Design and implementation of graphics dot matrix LCD based on FPGA [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(3): 403-407. (in Chinese)

[3] 李华,朱波. 基于FPGA的彩色图像实时采集系统设计[J]. 液晶与显示,2014,29(2):258-265.
LI H, ZHU B. Design of real-time color image acquisition system based on FPGA [J]. *Chinese Journal of Liquid*

- Crystals and Displays*, 2014, 29(2): 258-265. (in Chinese)
- [4] 王永杰. 基于FPGA的低照度环境下激光图像增强研究[J]. 激光杂志, 2021, 42(5): 68-72.
WANG Y J. Research on laser image enhancement under low illumination environment based on FPGA [J]. *Laser Journal*, 2021, 42(5): 68-72. (in Chinese)
- [5] 邱永生. 便携式红外与可见光夜景图像融合系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2021.
QIU Y S. Design and implementation of a portable infrared and visible light night scene image fusion system [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2021. (in Chinese)
- [6] 武继瑞. 图像增强在FPGA上的高性能实现[D]. 成都: 中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2016.
WU J R. High-performance implementation of image enhancement based on FPGA [D]. Chengdu: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optoelectronic Technology), 2016. (in Chinese)
- [7] 王亚婕. 可编程微弱信号放大器研究[C]//2019中国信息通信大会论文集(CICC 2019). 北京: 人民邮电出版社, 2019: 160-167.
WANG Y J. Research on programmable weak signal amplifier [C]//2019 *Proceedings of China Information and Communication Conference (CICC 2019)*. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 2019: 160-167. (in Chinese)
- [8] 马建如. 程控电压控制器的仿真分析与研究[J]. 电子制作, 2020(21): 67-68, 12.
MA J R. Simulation analysis and research of programmable voltage controller [J]. *Practical Electronics*, 2020(21): 67-68, 12. (in Chinese)
- [9] AD603: low noise, 90 MHz variable gain amplifier data sheet (Rev. K) [EB/OL]. [2012]. <http://www.analog.com/>.
- [10] LI J, LIU Y Y. Design of TVP5150 controller based on FPGA [J]. *IEEE Conference Anthology*, 2013: 1-4.
- [11] 任帅, 陈锋, 吕昊博. 基于FPGA的TVP5150的视频解码模块[J]. 科技创新导报, 2014, 11(6): 61.
REN S, CHEN D, LV H B. Video decoding module of TVP5150 based on FPGA [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2014, 11(6): 61. (in Chinese)
- [12] 王凯. 基于TVP5150的视频LCD显示设计[J]. 电子设计工程, 2011, 19(1): 178-182.
WANG K. Design of video LCD monitor based on TVP5150 [J]. *Electronic Design Engineering*, 2011, 19(1): 178-182. (in Chinese)
- [13] TVP5150AM1 ultralow-power NTSC/PAL/SECAM video decoder [EB/OL]. [2006]. <http://www.ti.com.cn/>.
- [14] 喻洋. 基于FPGA的实时反射式全景视频展开系统的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
YU Y. The research of real-time unwarping system for catadioptric panoramic video based on FPGA [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. (in Chinese)
- [15] 包新月, 俞磊. 计算机数字图像处理常用颜色空间及转换[J]. 电子技术与软件工程, 2021(7): 122-123.
BAO X Y, YU L. Common color space and conversion in computer digital image processing [J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2021(7): 122-123. (in Chinese)
- [16] 吕艳娜, 朱晓, 朱长虹. 计算机数字图像处理常用颜色空间及其转换[J]. 计算机与数字工程, 2006, 34(11): 54-56, 171.
LV Y N, ZHU X, ZHU C H. Common color space and its conversions in image processing [J]. *Computer and Digital Engineering*, 2006, 34(11): 54-56, 171. (in Chinese)

作者简介:



乔鑫(1996—),男,甘肃兰州人,硕士研究生,2019年于兰州城市学院获得学士学位,主要从事基于FPGA图像处理方面的研究。E-mail: qiaox19@lzu.edu.cn



万毅(1970—),男,陕西西安人,博士,教授,2002年于美国莱斯大学获得博士学位,主要从事信号处理、无线通信、图像处理、嵌入式系统以及机器人技术等方面的研究。E-mail: wanyi@lzu.edu.cn