

文章编号: 2095-4980(2024)12-1388-06

红外夜视观瞄系统的目标轮廓提取方法及 FPGA 实现

李文, 王洪涛, 黄晓江, 钱佳, 唐骏, 赵志堃, 高雪军, 杨光, 邱卫根

(江苏北方湖光光电有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要: 针对红外夜视观瞄系统中的目标凸显需求, 提出一种可用于红外图像的目标轮廓提取方法。该方法立足于实时红外成像系统, 在分析红外目标图像特性的基础上, 通过高斯滤波预处理、对比度增强以及暗背景边缘去除等操作, 改善了 Sobel 算子在红外图像中应用的不足, 仿真实现了红外图像目标边缘的准确提取。在现场可编程门阵列(FPGA)实时处理平台验证了算法在红外夜视观瞄系统中的应用效果。结果表明, 针对红外夜视观瞄系统的目标轮廓提取方法在 FPGA 实时系统中具有良好的边缘提取效果, 在占用低于 2% 的硬件资源条件下获得了较为显著的目标凸显性能。

关键词: 红外夜视; 目标凸显; 边缘检测; 预处理

中图分类号: TN957.52

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023132

Edge detection algorithm for infrared night vision system and FPGA implementation

LI Wen, WANG Hongtao, HUANG Xiaojiang, QIAN Jia, TANG Jun, ZHAO Zhikun, GAO Xuejun,
YANG Guang, QIU Weigen

(Jiangsu North HuGon Opto-Electronics Co.Ltd, Wuxi Jiangsu 214000, China)

Abstract: In response to the need for target highlighting in infrared night vision aiming systems, a method for extracting target contours from infrared images is proposed. This method is based on real-time infrared imaging systems, and after analyzing the characteristics of infrared target images, the shortcomings of the application of Sobel operator in infrared images are improved through operations such as Gaussian filtering pre-processing, contrast enhancement, and dark background edge removal. The simulation has achieved accurate extraction of target edges in infrared images. The application effect of the algorithm in the infrared night vision aiming system is verified on a Field-Programmable Gate Array(FPGA) real-time processing platform. The results show that the method for extracting target contours in the infrared night vision aiming system has good edge extraction effects in the FPGA real-time system and has achieved significant target highlighting performance with less than 2% hardware resource occupation.

Keywords: infrared night vision; target highlighting; edge detection; pretreatment

红外辐射因其良好的大气透过性及其被动探测性能, 在军事、安防、工业等领域应用越来越广泛。在军事领域, 装备了红外探测器的观瞄系统^[1]可捕获人眼观察不到的目标信息, 在夜视侦查^[2]、多波段图像融合^[3]、目标检测^[4]、危险预警等方面具有重要应用优势。针对红外图像中目标的处理有边目标检测、边缘检测等方法。基于深度学习的目标检测方法^[5]采用深度训练模型, 可获得更令人满意的目标检测效果, 但在实时系统中应用存在困难。而基于传统的边缘检测算法有 Sobel 边缘检测算法^[6-7]、Canny 边缘检测算法^[8-9]、LOG 算法^[10]等。该方法通过对红外图像的目标进行边缘提取, 再与红外原始图像进行特征融合, 以轮廓勾勒的方式达到危险预警的目的。具有运算简单、实时性高等特点, 通常可在现场可编程门阵列(FPGA)平台实现, 具有很高的实用价值。目前国内相关学者对传统的边缘提取算法进行了丰富的研究工作。结合文献[11]与文献[12]可知, Sobel 边缘算子运算简单, 但边缘定位精确度不高; 而 Canny 算子的边缘定位相对准确, 但存在边缘不连续且计算相对复杂的不足。针对红外目标, Katrcolu^[13]提出了一种基于导热矩阵的红外图像边缘检测方法, 可以获取清晰且无噪声的红

外目标边缘图像，但模型较为复杂。文献[14-15]在研究目标边缘检测时，未考虑到红外图像中目标特性，且计算复杂，不利于在实时系统中推广应用。

本文使用 Intel 公司的 Cyclone IV 数据处理平台，立足于实时应用场景，在 Sobel 算子的基础上，结合红外目标特性，采用高斯滤波预处理、图像对比度增强以及暗背景边缘去除等操作，并在 FPGA 平台实现了红外目标边缘实时准确提取，具有较好的目标凸显效果。

1 算法机理

1.1 高斯滤波

红外图像细节不如可见光图像，受限于器件工艺等因素，红外图像不可避免地存在条纹噪声与随机噪声。若直接进行边缘检测，会形成大量的伪边缘，因此在进行处理之前先对红外图像按式(1)进行高斯滤波预处理，避免图像噪声对边缘提取的影响并产生连续性更好的边缘信息。

$$R(x,y) = \sum_{k=-n}^{k=n} \sum_{t=-n}^{t=2} I(x+k,j+t)G(k,t) \quad (1)$$

式中： $R(x,y)$ 为高斯滤波预处理后的图像； $I(x,y)$ 为原始红外图像； $G(k,t)$ 为 2 维 $2n+1$ 阶高斯核，由高斯函数(式 2)计算产生：

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

式中 σ^2 为图像方差。

1.2 边缘检测算法

采用 Sobel 算子对输入的红外图像进行实时边缘获取。Sobel 算子主要用作边缘检测，属于离散型差分算子。在图像的某一像素点使用该算子，可产生对应的灰度矢量或法矢量。基于 Sobel 的边缘提取算法采用水平和垂直两个方向的滤波模板 G_x 和 G_y ，如式(3)、式(4)所示。

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

使用 G_x 和 G_y 分别与图像数据进行卷积，得到水平梯度 $g_x(x,y)$ 和垂直方向梯度 $g_y(x,y)$ ：

$$\begin{cases} g_x(x,y) = \sum_{i=-1}^{i=1} \sum_{j=-1}^{j=1} G_x(i,j) \cdot I(x+i,y+j) \\ g_y(x,y) = \sum_{i=-1}^{i=1} \sum_{j=-1}^{j=1} G_y(i,j) \cdot I(x+i,y+j) \end{cases} \quad (5)$$

如果不进行阈值处理，Sobel 算子的计算结果为：

$$g(x,y) = \sqrt{[g_x(x,y)]^2 + [g_y(x,y)]^2} \quad (6)$$

通过对梯度结果 $g(x,y)$ 进行阈值分割可实现边缘提取。

1.3 对比度增强与暗背景边缘去除

通过上一节的计算，可通过阈值分割获得红外图像中灰度变化超过设定阈值的边缘信息，其中也包含了大量的暗背景边缘。直接对梯度结果 $g(x,y)$ 进行阈值分割会导致处在阈值附近的梯度数据被分开，目标的边界连续性差，可采用基于指数函数对比度增强模型对梯度图像进行对比度展宽处理：

$$q = \frac{1}{1 + \left(\frac{Th}{p}\right)^E} \times 255 \quad (7)$$

式中： q 为经过指数对比度增强后的图像； p 为输入图像灰度值； Th 和 E 均为可设置的参数，根据不同系统的红

外图像的特征确定。该过程可以展宽 Th 值附近的灰度值，使阈值分割更为自然。

同时，边缘提取算子会自动计算出灰度图像中灰度值变化较大的边缘，其中包括亮目标边缘和暗背景边缘。在红外夜视观瞄应用场景下，典型目标在红外图像中通常表现为高亮度区域。根据红外图像的这一特性，可以考虑适当去除部分暗背景的边缘，有助于快速定位目标边缘。本文使用局部阈值判断方法对 Sobel 算子计算得到的梯度图像进行边缘取舍，舍去原始红外图像中较暗区域的边界信息。通过对原始图像进行 3×3 开窗操作，使用窗口内均值作为该窗口的局部均值，当该局部均值超过设定的目标阈值时，该窗口内的边界保留；否则，认为该窗口内的边界信息为暗背景边缘信息，直接舍去。通过局部阈值判断，可避免红外图像中零星噪点对边缘提取带来的影响，有效去除暗背景的边缘信息。

2 算法实现与仿真

2.1 算法处理流程

本文立足于红外夜视观瞄产品中对目标凸显的应用需求，设计了基于经典边缘检测算子的目标边缘提取算法。针对观瞄类夜视产品中红外图像的特点，对输入红外图像进行高斯滤波预处理后，使用 Sobel 边缘提取算法进行边缘计算；同时，为了保持目标边缘的连续性并对热目标进行边缘提取，使用对比度增强算法和局部阈值分割算法进行边缘筛选，实现红外观瞄系统中目标边缘准确提取。其算法处理流程图如图 1 所示。

算法设计过程中充分考虑了算法在 FPGA 系统中的可移植性与流水线工作机制。首先对输入的原始红外图像一分为二，第一路经高斯滤波预处理后，再依次使用 Sobel 算子和指数对比度增强处理得到目标的边缘图像；第二路则通过局部阈值计算经数据延迟后与边缘图像进行时序对齐。最后通过一个判断选择输出计算结果。

2.2 算法流水线实现

FPGA 因其独特的流水线并行处理机制，在实时图像处理系统中具有重要应用优势，目前在夜视观瞄系统中应用较为广泛。为验证算法实际效果，本文选择 Intel 公司型号为 EP4CE75U19I7 的 FPGA 芯片实现。该芯片资源丰富，具有 75 408 个逻辑单元，2 810 880 个位存储器以及 400 个 9 位乘法器，可完全满足算法的资源需求。算法在 FPGA 中实现框图如图 2 所示。

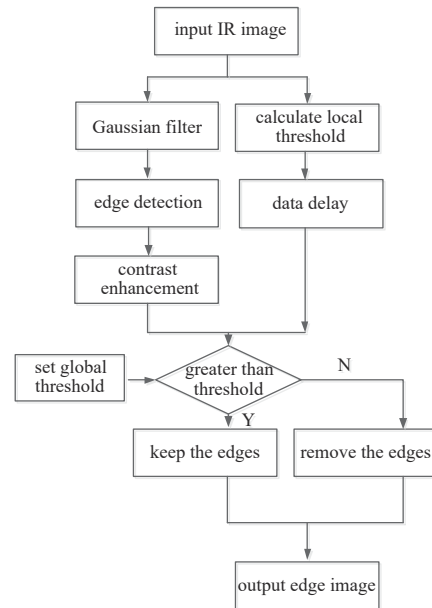


Fig.1 Flow chart of infrared target contour extraction algorithm
图1 系统红外目标轮廓提取算法流程图

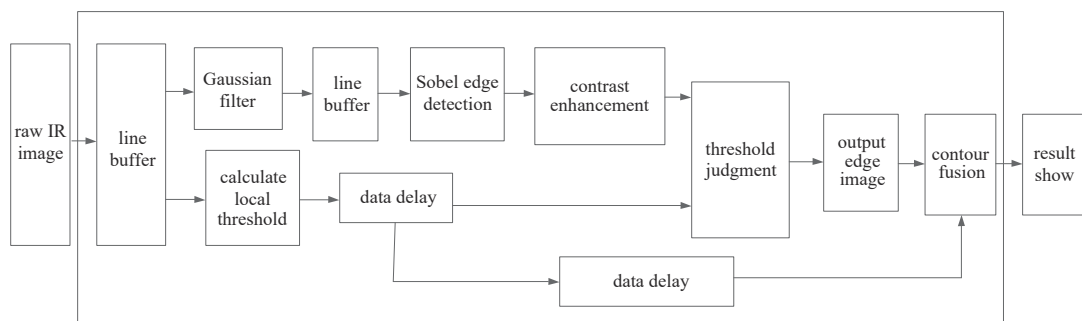


Fig.2 FPGA implementation block diagram of the algorithm
图2 算法FPGA实现框图

实现高斯滤波和 Sobel 边缘检测算法时，需进行 3×3 开窗卷积运算。图像视频在 FPGA 中以流水线形式存储和处理，因此需要利用 FPGA 内部存储资源。使用 shift register IP 核构建行缓存器，并通过 2 个行缓冲器级联分别存储 $n-1$ 行数据和 $n-2$ 行数据，再加上当前行数据，可同时获取 3 行像素数据，如图 3 所示。使用模板与图像数据进行卷积操作即可分别得到高斯滤波后图像及梯度图像。行缓存器的 FPGA 仿真效果如图 4 所示。

另外，在 FPGA 中实现指数运算会消耗大量计算资源和逻辑资源，不利于产品的低功耗实现，因此在 FPGA 内部进行指数计算是一大难点。为简化计算过程且节约资源，本文通过查找表的形式实现。在线下计算好所有

灰度值的指数运算结果，并存入 FPGA 的片上只读存储器(Read Only Memory, ROM)中，将像素灰度值作为地址索引，可在一个时钟内实现指数运算，具体实现方式如图 5 所示。指数运算的 FPGA 仿真效果如图 6 所示，消耗一个时钟即可输出相应的结果。

经过模块设计与调试，本文针对红外夜视观瞄系统的目标轮廓提取方法在 EP4CE75U1917 综合后资源占用量见表 1。

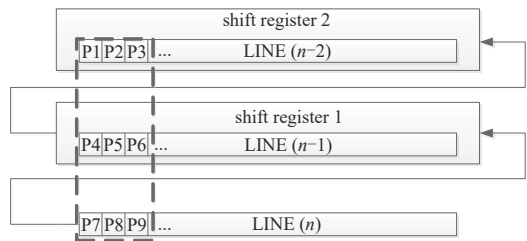


Fig.3 Schematic diagram of data buffering and alignment
图 3 数据缓冲与对齐示意图

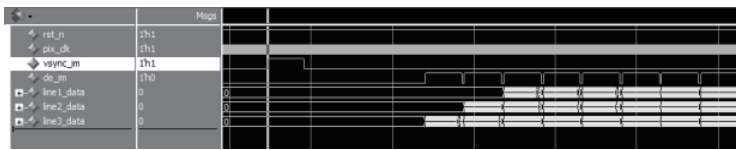


Fig.4 Simulation result of the line-buffer
图 4 行缓冲器仿真结果

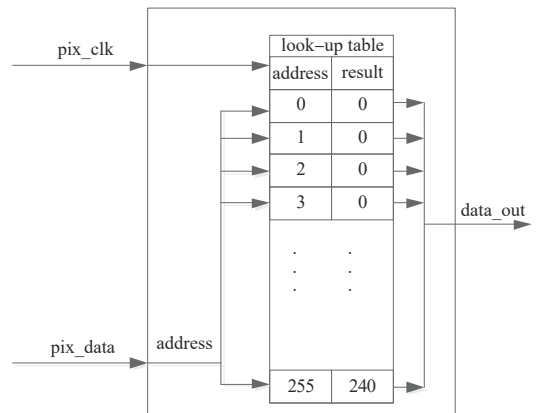


Fig.5 Exponential operations by using look-up tables
图 5 查找表实现指数运算

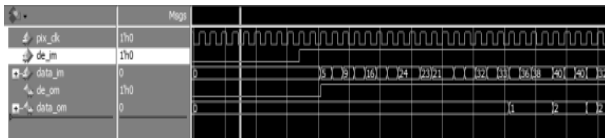


Fig.6 Simulation result of exponential operations
图 6 指数运算仿真

可见本文算法对 FPGA 内部资源的需求量完全可以满足在红外夜视观瞄系统中的应用。使用采集的静态图像进行红外目标轮廓提取仿真，结果如图 7 所示。

图 7(b)为直接对图 7(a)采用 Sobel 算子进行边缘提取的效果图；图 7(c)为经过高斯滤波预处理后再使用 Sobel 算子进行边缘提取的效果图，可以看出，经过高斯滤波预处理后可明显去除一些杂散边缘；图 7(d)为使用指数对比度操作对图 7(c)进行处理的结果，可见杂散边缘被进一步抑制，留下原图中主要的目标轮廓；再经过暗边缘去除操作即可获得最终目标的边缘图像，如图 7(e)所示，树干和马路围栏的边缘被很好地抑制了；使用 Canny 算子的计算结果如图 7(f)所示，其边界连续性稍差。

表 1 算法占用资源统计

Table1 Statistical data on resource utilization

resources	logic elements	memory bits	embedded multiplier
consume	1 462	38 866	4
rate of utilization	1.9%	1%	1%

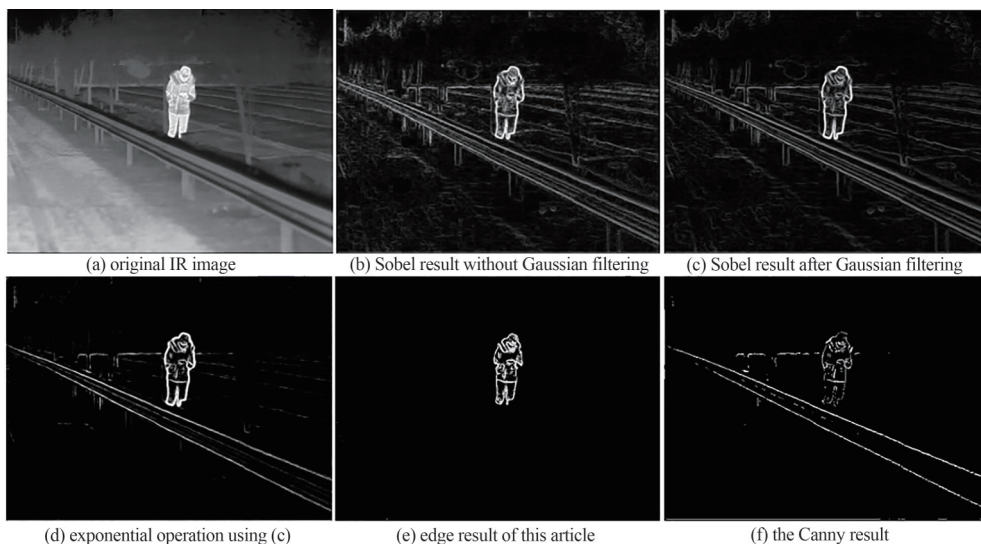


Fig.7 Simulation results of the algorithms
图 7 算法仿真效果图

在实际使用中，可以对边缘进行不同颜色渲染并叠加到原始红外图像，达到凸显目标的目的。

3 试验结果与分析

搭建实时红外成像系统测试算法在实时成像系统的性能与效果。将目标轮廓提取算法植入成像系统的FPGA处理器中，并将边缘显示为红色进行目标轮廓勾勒，起到凸显目标的作用。系统红外视频帧频为 25 Hz，分辨率为 1 280×1 024。本文算法在红外夜视观瞄系统中应用的实际效果如图 8 所示。

图 8(a)为关闭勾边功能的人物图像，图 8(b)为打开勾边功能的凸显图像，可以看出，背景中除了天地线以外，其他绝大多数背景的边缘被有效消除了。采用文献[16]的显著度评价方法计算图 8(a)和图 8(b)的目标显著度，结果如图 8(c)~(d)所示。对比图 8(d)与图 8(c)可以看出，开启了勾边功能的红外图像其目标显著区域更加集中在人物目标附近，相比没有开勾边功能的图像，目标凸显性更强。



Fig.8 Results in real-time image systems

图8 实时成像系统效果

4 结论

针对红外观瞄产品中对目标凸显的使用需求，本文通过分析红外图像中目标的灰度特性，使用 Intel 公司的 Cyclone IV 数据处理平台，提出并实现了一种基于 Sobel 边缘检测算子的目标边缘提取方法。试验证明，该方法可以在占用低于 2% 资源的条件下获取较好的目标边缘提取效果，能有效抑制背景杂散边缘对目标的影响，起到目标凸显的作用，同时具有较好的实时性，具有在实时红外成像系统中推广应用的前景。

参考文献：

- [1] 史训豪. 夜视仪在单兵观瞄系统中的应用[J]. 科技风, 2019(28):18-19. (SHI Xunhao. The application of night vision instrument in individual observation system[J]. Technology Wind, 2019(28):18-19.) doi:10.19392/j.cnki.1671-7341.201928017.
- [2] 白宏刚. 红外夜视技术及其军事应用[J]. 现代物理知识, 2011,23(6):44-46. (BAI Honggang. Infrared night vision technology and its military applications[J]. Modern Physics, 2011,23(6):44-46.) doi:10.13405/j.cnki.xdwz.2011.06.003.
- [3] 胡德超,朱尤攀,罗琳,等. 基于红外目标提取的夜视图像融合实时系统研究[J]. 红外技术, 2014(2):125-130. (HU Dechao, ZHU Youpan, LUO Lin, et al. Research of real-time night-vision image fusion system based on infrared object extraction[J]. Infrared Technology, 2014(2):125-130.)
- [4] 罗群,刘俊. 基于光谱尺度空间与管道滤波的红外目标检测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(4):346-353. (LUO Qun, LIU Jun. Infrared target detection algorithm based on fast spectral scale space and dynamic pipeline filtering[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(4):346-353.) doi:10.11805/TKYDA2020605.
- [5] 吴捷,马小虎. 基于特征融合与通道感知的无人机红外目标跟踪算法[J]. 激光与红外, 2023,53(4):626-632. (WU Jie, MA

- Xiaohu. UAV infrared target tracking algorithm based on feature fusion and channel awareness[J]. Laser & Infrared, 2023,53(4): 626-632.) doi:10.3969/j.issn.1001-5078.2023.04.022.
- [6] 徐旭,陈曦. 基于 FPGA 的 Sobel 边缘检测算法的实现[J]. 电子测试, 2022,36(23):63-65. (XU Xu,CHEN Xi. Implementation of Sobel edge detection algorithm based on FPGA[J]. Electronic Test, 2022,36(23):63-65.) doi:10.3969/j.issn.1000-8519.2022.23.016.
- [7] 张萍萍,李童,李茹,等. 一种改进的 Sobel 图像边缘检测算法及其实现[J]. 电视技术, 2022,46(5):42-45. (ZHANG Pingping,LI Tong,LI Ru,et al. An improved Sobel image edge detection algorithm and its implementation[J]. Video Engineering, 2022,46(5): 42-45.) doi:10.16280/j.videoe.2022.05.009.
- [8] 崔玉,俞建定,邹洪彬,等. 改进的 Canny 实时边缘检测算法在 FPGA 上的实现[J]. 无线通信技术, 2021,30(4):27-31,36. (CUI Yu, YU Jianding, ZOU Hongbin, et al. Implementation of improved Canny real-time edge detection algorithm on FPGA[J]. Wireless Communication Technology, 2021,30(4):27-31,36.) doi:10.3969/j.issn.1003-8329.2021.04.006.
- [9] 张梅,王涛. 一种工业恶劣环境下的图像二值化方法及 FPGA 实现[J]. 微型电脑应用, 2017,33(7):69-72. (ZHANG Mei, WANG Tao. Research on image binarization in industrial harsh environment and implementation on FPGA[J]. Microcomputer Applications, 2017,33(7):69-72.) doi:10.3969/j.issn.1007-757X.2017.07.019.
- [10] 刘泽皓,王新宇,王媛媛,等. 边缘检测算法的对比研究及 FPGA 的实现[J]. 计算技术与自动化, 2023,42(1):146-152. (LIU Zehao,WANG Xinyu,WANG Yuanyuan,et al. Comparative research on edge detection algorithms and FPGA implementation[J]. Computing Technology and Automation, 2023,42(1):146-152.) doi:10.16339/j.cnki.jsjsyzdh.202301026.
- [11] 金汉均,梅洪洋. Sobel 算子在提取视频运动目标轮廓中的应用研究[J]. 电子测量技术, 2014,37(11):29-32. (JIN Hanjun, MEI Hongyang. A research of extracting the contour of moving target using Sobel operator[J]. Electronic Measurement Technology, 2014,37(11):29-32.) doi:10.3969/j.issn.1002-7300.2014.11.008.
- [12] 陈海峰,庄金雷,朱标,等. 基于改进 Canny 算子的图像边缘融合方法[J]. 新乡学院学报, 2022,39(12):23-27. (CHEN Haifeng, ZHUANG Jinlei, ZHU Biao, et al. Image edge fusion method based on improved Canny operator[J]. Journal of Xinxiang University, 2022,39(12):23-27.) doi:10.3969/j.issn.1674-3326.2022.12.005.
- [13] KATRCOLU F. Edge detection method based on heat conduction matrix for infrared image[J]. Optical Engineering, 2020,59(9): 093103.
- [14] 隋旭阳,陈卓,刘议聪,等. 基于 FPGA 的实时视频边缘检测系统[J]. 兵工自动化, 2021,40(2):58-60,80. (SUI Xuyang,CHEN Zhuo,LIU Yicong,et al. Real-time video edge detection system based on FPGA[J]. Ordnance Industry Automation, 2021,40(2): 58-60,80.) doi:10.7690/bgzdh.2021.02.015.
- [15] RAVIVARMA G,GAVASKAR K,MALATHI D,et al. Implementation of Sobel operator based image edge detection on FPGA[J]. Materials Today:Proceedings, 2021,45(2):2401-2407. doi:10.1016/j.matpr.2020.10.825.
- [16] HOU Xiaodi,ZHANG Liqing. Saliency detection:a spectral residual approach[C]// 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Minneapolis,MN,USA:IEEE, 2007:1-8. doi:10.1109/CVPR.2007.383267.

作者简介:

李 文(1992-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为数字图像处理.email:njustliw@163.com.

王洪涛(1983-), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为光电产品设计.

黄晓江(1984-), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为光电产品设计.

钱 佳(1990-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电子电路设计.

唐 骏(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为图像处理软件设计.

赵志堃(1995-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为嵌入式软件设计.

高雪军(1981-), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为光电产品设计.

杨 光(1982-), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为光电产品设计.

邱卫根(1965-), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为光电产品设计.