Improved Edge Detection Based on FPGA and Ethernet Transmission*

LIU Ningzhuang*, ZHAO Qian
(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China)

Abstract: Edge detection is a vital component of image processing techniques in domains such as autonomous driving, pattern recognition, and machine vision. Targeting at the issues of poor adaptability and high noise susceptibility in traditional Sobel edge detection algorithms implemented on FPGA, an improved edge detection algorithm is proposed. This algorithm extends the traditional Sobel operator to eight directions and combines it with a bilateral filter as well as an adaptive thresholding technique, which is modified from median filtering. The modified algorithm processes image data captured by a camera, and the processed images are then uploaded to the host computer for display via the Ethernet UDP protocol. Experimental results indicate that the images output by this design, while effectively reducing noise, offer significantly improved adaptability and robustness compared to traditional algorithms. Furthermore, the proposed approach provides a feasible solution for the host computer to implement higher-level image processing tasks such as feature recognition and image fusion.

Key words: FPGA; Ethernet; bilateral filtering; Sobel operator; adaptive thresholding
EEACC: 6135 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.03.022

基于 FPGA 和以太网传输的改进边缘检测*

刘宁庄*, 赵 乾
(西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 边缘检测是无人驾驶、模式识别、机器视觉等领域的图像处理技术的重要环节之一。针对传统 Sobel 边缘检测算法在 FPGA 中存在自适应性差, 易受噪声影响的问题, 提出了一种改进的边缘检测算法, 将传统的 Sobel 算子扩展至 8 方向, 结合双边滤波和由中值滤波更改的自适应阈值, 对摄像头采集的图像数据进行处理, 并通过以太网 UDP 协议上传至上位机显示。实验结果表明: 本设计输出的图像在有效降噪的同时, 相比于传统算法有更良好的自适应性和鲁棒性。为后续上位机实现特征识别、目标检测等高层级图像处理提供一种可行方案。

关键词: FPGA; 以太网; 双边滤波; Sobel 算子; 自适应阈值
中图分类号: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)03-0633-05

图像边缘检测是提取图像的边缘和轮廓的技术。边缘和轮廓蕴藏着的许多重要信息, 在机器视觉、模式识别等领域发挥着不可替代的作用[1]。

FPGA 具有并行性的优势, 可以通过直接和图像传感器芯片连接获取数据流并进行实时流水线运算, 可以达到较高实时性的目的[2]。因此, 用 FPGA 实现图像边缘检测算法, 得到高质量的图像边缘信息, 具有重要意义。

为了实现这一目标, 采用 FPGA 进行图像处理实现图像边缘检测有了逐步的研究和发展。叶惠娇等[3]基于 Sobel 边缘检测, 完成了从图像数据的采集、存储到显示的 FPGA 图像处理系统。杨康等[4]利用 FPGA 实现了改进的 Canny 算法, 虽然 Canny 算子对图像边缘检测效果更佳, 但由于 Canny 算子较复杂, 对逻辑资源占用较大, 处理速度较慢。柯青林等[5]实现了 8 方向 Sobel 自适应阈值边缘检测系统, 但由于其使用中值滤波去噪, 对图像的噪声处理较弱。许冰等[6]先对图像进行高斯滤波, 然后用 Sobel 算子实现边缘检测。本文在现有的研究基础上, 一方面采用改进的 8 方向 Sobel 算子, 丰富边缘信息的提取, 同时完成双边滤波的 FPGA 实现。双边滤波相比于传统的中值滤波、高斯滤波, 对噪声有更强的去噪能力, 同时又能很好地保护边缘。另一方面, 使用以太网 UDP 传输, 把 FPGA 中处理过的图像数据在上位机实时显示, 将硬件图像处理与软件相连。为后续上位机高层级的图像处理奠定基础。

项目来源: 国家自然科学基金项目(52174149)
收稿日期: 2024-01-13 **修改日期**: 2024-05-06

1 系统框架

图像边缘检测处理系统采用 FPGA 芯片 EP4CE10 作为主控芯片，OV5640 摄像头作为前端视频数据源，SDRAM 芯片用于图像数据存储，以太网 PHY 芯片用于图像数据的传输，最终在上位机上显示图像[7]。整体架构如图 1 所示。

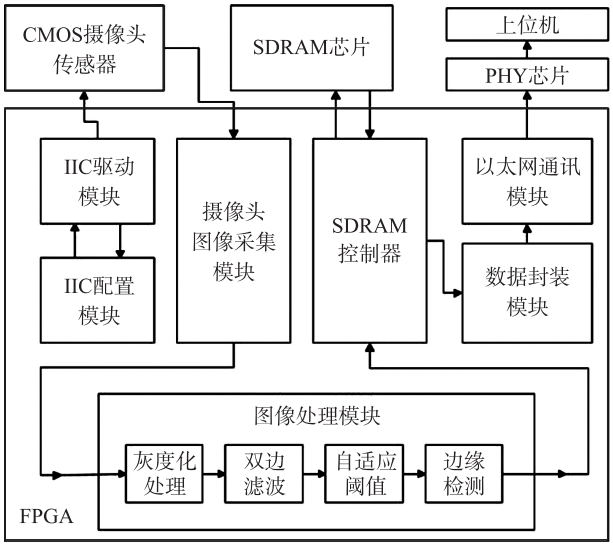


图 1 系统框架

该系统通过 FPGA 主控芯片配置并驱动 CMOS 摄像头，把 CMOS 摄像头的图像数据传至摄像头图像采集模块，完成 8 位数据转 16 位 RGB565 数据，然后将 RGB565 数据传至图像处理模块，进行图像数据的流水线处理，处理完成后缓存进 SDRAM 芯片中。数据封装模块将 SDRAM 芯片中读取的 16 位图像数据转换成以太网发送模块方便调用的 32 位数据，并添加图像数据的帧头。最后以太网通讯模块完成以太网通讯的收发功能，上传至上位机显示。

2 图像处理算法原理及 FPGA 实现

图像处理算法模块内部分为灰度化模块、双边滤波模块、自适应阈值模块、边缘检测模块，如图 2 所示。

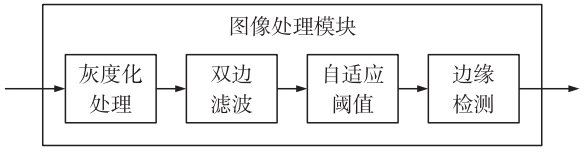


图 2 图像处理模块

其流程首先将接收的 RGB565 格式的彩色视频图像数据做灰度化处理，然后经过双边滤波模块，对图像数据中的噪声进行滤波处理，同时保持边缘信息。再将图像数据输入自适应阈值模块提取动态阈值。最后将数据输入到边缘检测模块提取边缘信息。

2.1 定点化双边滤波

双边滤波是一种非线性滤波器，采用加权平均的方法，用周边像素亮度值的加权平均来代表某个像素的强度，所用的加权平均也是基于高斯分布的[8]。

双边滤波的权重，不仅考虑了像素的空间距离（如高斯滤波），还考虑了像素范围的辐射差异（如像素与中心像素的相似程度），结合空间距离与相似度，计算得到最终权重[9]。

引用双边滤波公式：

$$\mathrm{BF}[I]_p=\frac{1}{W_p}\sum_{q\in S}G_{\sigma_s}(\|p-q\|)G_{\sigma_r}(|I_p-I_q|)I_q \quad (1)$$

式中：G_{σ_s} 为空域核，G_{σ_r} 为值域核，两者相乘，得到 $G_{\sigma_s}\times G_{\sigma_r}$，为同时考虑了当前像素空间距离与相似度的权重，累加后进行归一化，得到最终的权重。W_p 为归一化因子，也就是 G_{σ_s} 与 G_{σ_r} 两者的乘积。σ_s 为空域标准差，σ_r 为值域标准差。由上式进一步细化，可得下式：

$$I_p^{\mathrm{new}}=\frac{1}{W_p}\sum_{p\in S}G_{\sigma_s}[(\|p-q\|)G_{\sigma_r}(|I_p-I_q|)I_q]=\frac{1}{W_p}\sum_{p\in S}[\mathrm{e}^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_s^2}}\mathrm{e}^{-\frac{(I_p-I_q)^2}{2\sigma_r^2}}I_p] \quad (2)$$

本设计采用 3×3 窗口，$\sigma_s=3$，G_{σ_s} 的值只与 σ_s 和所选取的矩阵有关。由 MATLAB 计算出浮点数空域卷积核，如表 1 所示，再由归一定点化，可得定点空间域卷积核，如表 2 所示。

表 1 浮点数空域卷积核

0.894 8	0.946 0	0.894 8
0.946 0	1	0.946 0
0.894 8	0.946 0	0.894 8

表 2 定点数空域卷积核

109	115	109
115	122	115
109	115	109

对于 G_{σ_r} 而言，由于每个像素点 I_p、I_q 的取值在 0~255 之间。I_p、I_q 作差后的绝对值也在 0~255 之间。因此可以等效为：

$$G_{\sigma_r}=\mathrm{e}^{-\frac{x^2}{2\sigma_r^2}},x\in[0,255] \quad (3)$$

具体原理如下：

①取 $\sigma_r=0.1$，用 MATLAB 绘制函数曲线并对该

曲线离散化,如图 3 所示。在 x 轴对其进行 255 次等间隔采样,实现像素在[0,255],$e^{-\frac{x^2}{2\sigma_r^2}}$的查找表,同时为了避免出现浮点,将结果扩大 1 024 倍。

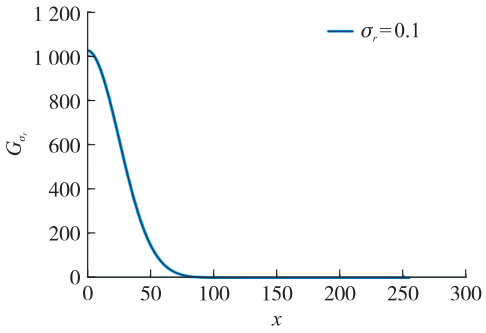


图 3　G_{σ_r}简化函数曲线

②根据查找表 H,实现 G_{σ_r}的计算,其结果位宽为 10 bit。

③将步骤②输出结果再扩大 1 024 倍后进行归一化,避免出现浮点数运算。

④将归一化的结果缩小 1 024 倍,得到最终 8 bit 的 G_{σ_r}计算结果。

将空域核与值域核相乘得到 3×3 双边滤波权重,在于 3×3 窗口的像素进行卷积并累加得到 sum_result,对其进行四舍五入处理后,作为双边滤波的结果[10]。最后判断 3×3 窗口的中心像素是否位于图像边界,如果位于图像边界,则直接将中心像素作为结果输出。

2.2　改进的 Sobel 算法

边缘是图像灰度或结构等信息发生突变的地方,边缘检测就是利用微分算子具有突出灰度变化的作用对图像进行微分运算[11]。然而,数字图像函数并不连续变化,因此需要利用差分运算来近似表达微分运算,在点(x,y)处的梯度定义为:

$$G_x=\frac{\partial f(x,y)}{\partial x}=f(x+1,y)-f(x,y) \tag{4}$$

$$G_y=\frac{\partial f(x,y)}{\partial y}=f(x,y+1)-f(x,y) \tag{5}$$

式中:G_x 和 G_y 分别为 x 方向和 y 方向的梯度,因此,点(x,y)处的梯度幅值为,

$$|G(x,y)|=\sqrt{G_x^2+G_y^2} \tag{6}$$

传统的 Sobel 算子的检测方向是 x 和 y 两个方向,对于其他方向的梯度信息无法检测,丢失边缘信息[1]。本设计在此基础上扩展至八个梯度检测方向,分别是 0°、45°、90°、135°、180°、225°、270°、315°。各个检测方向模板如图 4 所示。

根据 8 个方向的检测算子,求出各个方向的梯度,则改进后的算法(x,y)点处的梯度为:

$$|G(x,y)|=\sqrt{G_{0°}^2+G_{45°}^2+G_{90°}^2+G_{135°}^2+G_{180°}^2+G_{225°}^2+G_{270°}^2+G_{315°}^2} \tag{7}$$

将开方后的值与阈值 T 进行比较,若大于阈值 T 则为边缘信息,小于阈值 T 则为非边缘信息[12]。

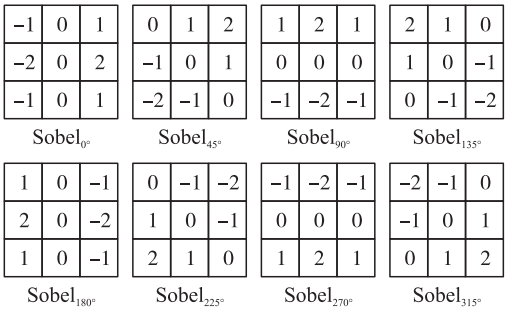


图 4　八方向 Sobel 卷积核

2.3　自适应阈值

本设计的自适应阈值借鉴了中值滤波算法的思想,中值滤波算法就是取滤波窗口的中间值进行计算的算法。把中值滤波算法得到的中间像素值做为边缘检测的阈值 T,实现在图像中的动态自适应阈值[13]。

传统中值滤波算法采用冒泡法,对 3×3 窗口的 9 个像素进行排序,再取其第 5 个像素即中间值,共计需要 36 步[14]。本设计利用硬件加速优势,采用流水线设计处理,实现快速中值滤波,如图 5 所示。

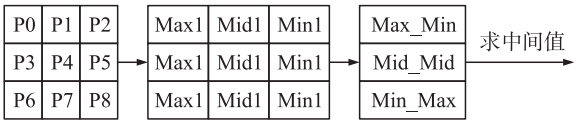


图 5　快速中值滤波

具体步骤如下:

①首先进行滑窗处理,获得 3×3 窗口。获得 3×3 窗口后,分别对每行 3 个像素进行两两比较,得到最大值 Max、中间值 Mid、最小值 Min。

②求 3 个最大值的最小值 Max_Min、3 个中间值的中间值 Mid_Mid,以及 3 个最小值的最大值 Min_Max。

③求 Max_Min、Mid_Mid、Min_Max 的中间值,即为最终结果。

若在图像边界处,就直接将中心像素作为结果输出;否则就将算法结果作为自适应阈值结果输入给边缘检测模块。

3　以太网及 UDP 通信

用户数据报协议(User Datagram Protocol,UDP)是一种面向无连接的传输层协议。无连接是指在传输数据时,数据的发送端和接收端不建立逻辑连接。

图 6 所示为以太网通过 UDP 传输单包数据的格式。以太网的数据包就是对各层协议的逐层封装来实现数据的传输[15]。

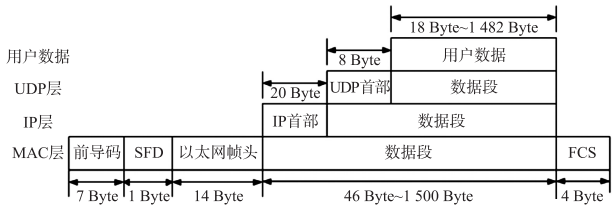


图 6 以太网包数据格式

MAC 层就是以太网的帧格式，MAC 帧中的数据段为 IP 数据报，IP 报文中的数据段为 UDP 报文，UDP 报文中的数据段为用户需要传输的数据内容。图 7 所示为 UDP 数据格式。

图 7 UDP 数据格式

本文中设计的 UDP 模块由 UDP 接收摸块、UDP 发送模块和 CRC 校验模块组成。UDP 接收模块功能为判断目的 MAC 地址与开发板 MAC 地址、目的 IP 地址与开发板 IP 地址是否一致，并完成了 8 位数据转 32 位数据的功能。

UDP 发送模块相比接收模块多了 IP 首部校验和 CRC 循环冗余校验，并完成 32 位数据转 8 位数据的功能[16]。图 8 和图 9 为这两个模块的状态转移图。

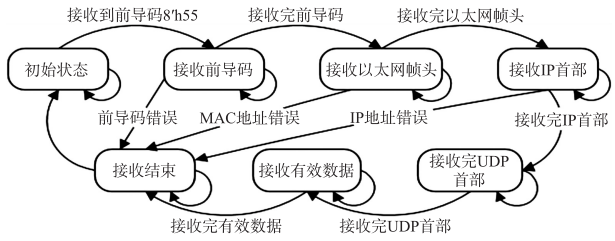


图 8 接收模块状态转移图

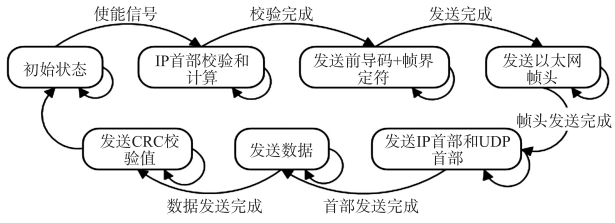


图 9 发送模块状态转移图

CRC 校验模块是对 UDP 发送模块的数据（不包括前导码和帧起始界定符）做校验，把校验结果值拼在以太网帧格式的 FCS 字段。CRC32 校验在 FPGA 实现的原理是线性反馈移位寄存器（Linear Feedback Shift Register，LFSR），其思想是各个寄存器储存着上一次 CRC32 运算的结果，寄存器的输出即为 CRC32 的值。

4 实验结果及分析

4.1 滤波评估

为了评估改进算法对噪声的去除效果，采用峰值信噪比（Peak Signal-to-Noise Ratio，PSNR）进行评价。PSNR 是一种常用的图像质量评价指标，用于衡量两张图像之间的差异。PSNR 的最小值为 0，而 PSNR 值越大，表示两张图像之间的差异越小，即滤波效果越好[17]。其公式为：

$$\mathrm{MSE}=\frac{1}{mn}\sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=0}^{n-1}\|I(i,j)-K(i,j)\|^2 \tag{8}$$

$$\mathrm{PSNR}=10\times\lg\frac{255^2}{\mathrm{MSE}} \tag{9}$$

系统处理结果在 MATLAB2016a 上进行滤波算法对比，以改进的八方向 Sobel 算法边缘检测为参考图像，并添加高斯噪声进行对比。实验结果如表 3 所示，本文提出算法的 PSNR 相比采用中值滤波的文献[5]提高了 46%，相比采用高斯滤波的文献[6]提高了 13%。

表 3 滤波检测结果

算法	均方误差（MSE）	峰值信噪比（PSNR）
文献[5]	165.67	25.96 dB
文献[6]	89.13	28.63 dB
本文算法	36.48	32.51 dB

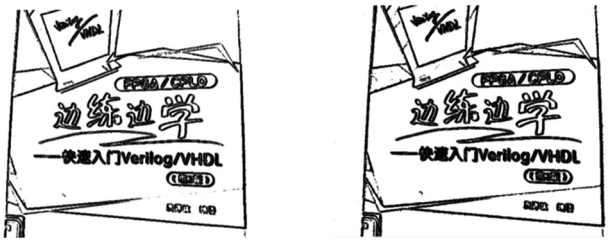
4.2 实验结果

本系统采用 Verilog 语言作为开发语言，视频图像分辨率是 640×480，在 Quartus 软件开发平台上完成编译及程序下载。图 10 所示为对原图的灰度化处理。图 11（a）所示为传统 Sobel 算法，图 11（b）所示为改进后的 8 方向 Sobel 算法加中值滤波算法，可以看出在增加检测方向后，边缘信息更加丰富。图 12（a）所示为结合了高斯滤波的 Sobel 算法，虽然高斯滤波对高斯噪声有抑制作用，但同时也会弱化

(a) 原图　　(b) 灰度化

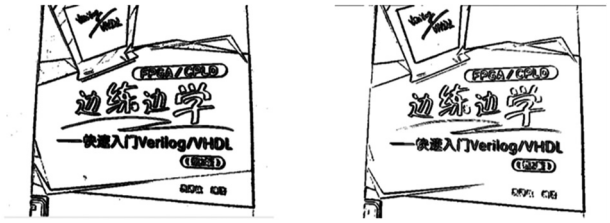
图 10 灰度化处理

边缘信息。图 12(b)所示为本文的融合算法,可以看出图中原本的噪点被去除,同时边缘信息更加细致。



(a) 传统Sobel　　(b) 中值+八方向Sobel

图 11　处理效果 a



(a) 高斯+八方向Sobel　　(b) 本文融合算法

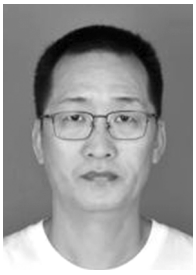
图 12　处理效果 b

5　结束语

本文设计基于 FPGA 的改进 Sobel 边缘检测算法,该设计从图像采集、图像处理到以太网传输至上位机显示为一体。该融合算法通过扩展 Sobel 算子检测方向,结合定点化双边滤波算法和基于中值滤波的阈值选取策略,解决了传统 Sobel 算法存在的问题。同时,通过以太网通信,将图像数据上传至上位机显示。为后续更高层级的图像处理算法提供一种可行方案。实验结果表明:该系统可以在不同场景下高效地检测图像,具有较好的自适应性和鲁棒性,实时高效地检测出图像的边缘信息。

参考文献:

[1] 祁欣,陈剑锋,罗伟林. 图像预处理算法的 FPGA 实现[J]. 国外电子测量技术,2021,40(2):102-107.
[2] 杨美娜,肖世伟,冯祥虎,等. 基于 FPGA 和 USB3.0 的实时边缘检测系统[J]. 电脑与电信,2022(10):98-101.
[3] 叶惠娇,冉全,成果. FPGA 图像边缘检测系统的设计与实现[J]. 计算机应用与软件,2018,35(12):237-240,302.
[4] 杨康,卫敏,孙磊. 基于 FPGA 的自适应阈值边缘检测系统设计[J]. 传感器与微系统,2019,38(12):96-99.
[5] 柯青林,张文涛,余英铨,等. 基于 FPGA 的 8 方向 Sobel 自适应阈值边缘检测系统设计与实现[J]. 现代电子技术,2022,45(24):92-97.
[6] 许冰. 基于 FPGA 的田间视频图像实时分割系统的设计与实现[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2019.
[7] 刘跃成. 基于 FPGA 的高分辨率图像采集装置设计[D]. 太原:中北大学,2023.
[8] 孟晨光,刘跃成,甄国涌. 机器视觉领域的 FPGA 非线性双边滤波系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2023,23(7):57-61.
[9] 许蓉,王直,宗涛. 基于改进高斯滤波的医学图像边缘增强[J]. 信息技术,2020,44(4):75-78.
[10] 严飞,陈佳宇,张华西,等. 基于 FPGA 的图像双边滤波器系统设计[J]. 仪表技术与传感器,2022(6):99-104.
[11] 吕兴宇. 基于 DSP 焊缝实时图像处理的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2015.
[12] 郭常青. 基于 FPGA 的实时图像预处理技术研究与实现[D]. 太原:中北大学,2022.
[13] 陈浩林,王擎宇,卢振坤,等. 基于 FPGA 的高速低噪声目标检测系统[J]. 南京理工大学学报,2022,46(5):623-631.
[14] 程昊坤,和晓军. 一种改进中值滤波算法的 FPGA 硬件实现[J]. 通信与信息技术,2023(3):23-26.
[15] 杨振雷,刘承敏,青先国,等. 基于 Zynq-7000 的千兆以太网传输系统设计与实现[J]. 核技术,2021,44(2):37-44.
[16] 高尚尚,王新宇,王小丫,等. 基于以太网传输的图像处理系统设计及 FPGA 实现[J]. 计算机测量与控制,2022,30(7):213-218.
[17] 陈伟,党榕. 混合噪声图像的去噪算法研究及 FPGA 实现[J]. 电子测量技术,2021,44(16):135-140.



刘宁庄(1973—),男,硕士,副教授,主要研究方向为 SOC 嵌入式系统应用技术、FPGA 应用技术、智能检测和控制,liuningzhuang@ xust.edu.cn;

赵　乾(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为 FPGA 应用技术、数字图像处理,1175286835@ qq.com。