

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.02.011

基于现场可编程门阵列的边缘检测系统

张阵委^{1,2}, 章伟^{1,2}, 颜晨航^{1,2}

(1. 上海工程技术大学 机器人智能控制实验室, 上海 201620;
2. 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:针对目前使用 CPU 或者树莓派图像处理实时性差、边缘检测实际效果差等缺点,课题组提出了基于现场可编程门阵列的边缘检测系统。设计了基于现场可编程门阵列的边缘检测系统的硬件方案,介绍了边缘检测的原理;基于硬件设计了图像采集与处理方案;算法上先通过实验设定卷积核的大小,然后使用 Sobel 卷积核对获取的图像进行卷积,再使用 Robert 卷积核进行卷积,并在显示器上显示实时图像处理结果。实验表明该系统的检测效果更加清晰,断点更少。该系统能够并行处理数据,提高图像处理速度,且实际的边缘检测效果好。

关键词:边缘检测;现场可编程门阵列;Sobel 卷积核;Robert 卷积核;实时性;图像噪点

中图分类号:TH164;TP274 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)02-0064-05

Edge Detection System Based on Field Programmable Gate Array

ZHANG Zhenwei^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, YAN Chenhang^{1,2}

(1. Laboratory of Intelligent Control and Robotics, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;
2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of current CPU or Raspberry Pi image processing such as poor real-time performance and poor edge detection, an edge detection system based on field programmable gate array was proposed. The hardware scheme of the edge detection system based on field programmable gate array was designed and the principle of edge detection was introduced. The image acquisition and processing scheme was designed based on hardware. In the algorithm, the size of the convolution kernel was set through experiments and the acquired image were convolved by Sobel convolution kernel. Afterwards, the convolution was performed by Robert convolution kernel and the real-time image processing results were displayed on the monitor. The experimental results show that the detection effect of the system is clearer and with fewer breakpoints. The system can process data in parallel and improve image processing speed with good actual edge detection effect.

Keywords: edge detection; FPGA (field-programmable gate array); Sobel convolution kernel; Robert convolution kernel; real-time; image noise

边缘检测是众多图像处理研究的基础^[1],也是观察图像基本信息的依据。计算机进行图像处理分析时^[2],边缘检测保留图像中主要的物体边缘信息,减少了图像处理的信息。不同的边缘检测处理方法获取的边缘信息和效果会有差异,因此在不同的场景要选用不同的卷积处理方式来达到最佳的效果。

实时图像处理中,在算法优化的前提下,图像处理对硬件的要求越来越高^[3],不仅要求算法处理数据量

小、精度高,同时也对硬件处理数据的构架和方式有了更高的要求^[4]。树莓派或者单片机往往无法满足快速处理的要求^[5]。即使是一幅(256×256) dpi 的图像也有大约 7 万多个像素点组成^[6],况且这么低的分辨率完全达不到实际应用的要求^[7]。一幅分辨率(1 920×1 080) dpi 的图像就有两百多万像素点组成,对大量像素数据的处理可采用现场可编程门阵列 FPGA 芯片进行运算处理^[8]。课题组基于优化的 Sobel 和

收稿日期:2019-07-23;修回日期:2019-10-15

第一作者简介:张阵委(1993),男,河南周口人,硕士,主要研究为机器人视觉。通信作者:章伟(1977),男,安徽桐城人,博士,教授,主要研究领域为机器视觉避障算法、非线性控制技术。E-mail:wizzhang@foxmail.com

Robert 边缘检测算法^[9],利用 FPGA 硬件结构实现图像的实时边缘提取,保证图像处理的实时性^[10];采用 CMOS 调焦距工业相机进行原始图像采集,保障了采集图像的质量;通过搭建软件和硬件结合的实验平台进行室内物体边缘检测^[11],然后通过比较分析实验结果得出结论。

1 检测系统

根据 FPGA 的逻辑数字原理来进行检测系统的设计,以及功能模块的分配^[12],通过合理的分配模块的功能来达到最佳的数字图像处理速度。

1.1 检测系统构架设计

基于 FPGA 构架的快速实时视觉边缘检测系统设计如图 1 所示。

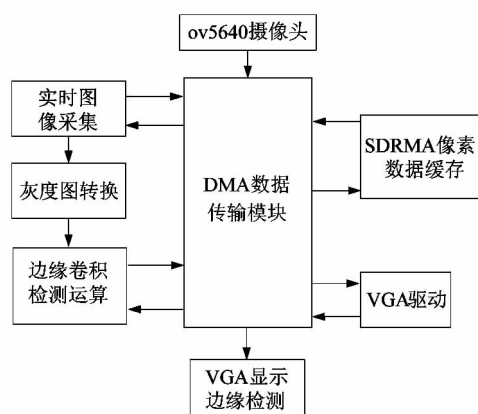


图 1 系统设计

Figure 1 System design

通过可变焦工业相机进行 RGB 格式的图像信息获取,接着进行图像的灰度图处理,联合 VHDL 和 Verilog 语言进行联合编程^[13],通过边缘检测 Sobel 卷积核和 ROG 卷积核对图像信息进行卷积处理^[14],然后进行检测结果对比,获得最佳的无人机障碍物检测方案。

1.2 FPGA 芯片的优势

FPGA 具有高速并行处理图像像素信息的能力,且具有大量的算法计算逻辑资源^[15],大量的块存储器和 DSP 资源用于图像处理、信号传输等^[16]。采集的像素信息数据采用并行处理,比串行处理的速度快很多倍。逻辑系统中有 4 种值^[17],也即 4 种状态:逻辑 0,表示低电平,对应电路 GND;逻辑 1,表示高电平,对应电路的 VCC;逻辑 X,表示未知,可能是高电平,也可能是低电平;逻辑 Z,表示高阻态,当外部没有激励信号时,它表示悬空状态。丰富的逻辑资源,使得像素数据处理更加稳定和快速。

2 边缘检测算法设计

实现边缘检测有很多不同的方法,一直以来都是图像处理的研究热点。人们期望能够有一种抗噪强,定位准,不误检的检测算法^[18-19],因此出现了很多卷积核用来进行卷积图像处理,比如 Sobel 卷积核、Robert 卷积核和 LOG 卷积核等,它们各有特长^[20-21]。

2.1 Sobel 卷积核

Sobel 卷积核是滤波算子的形式,用于提取图像边缘。图像中的每个像素点都用图 2 所示的 2 个模板进行卷积运算处理。 G_x 代表第 1 个卷积核模板,主要针对垂直边缘的像素影响最大^[22]; G_y 代表第 2 个卷积核模板对水平边缘的像素卷积影响最大。具体计算如下:

$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}; \quad (1)$$

$$|G| = |G_x| + |G_y|; \quad (2)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{G_y}{G_x} \right). \quad (3)$$

公式(1)表示灰度图的梯度计算公式,属于核心计算, $|G|$ 的大小反映灰度图的灰度变化。公式(2)为公式(1)的简化计算。公式(3)是表示 2 个像素相对角度的大小^[23]。如果角度 θ 等于零,即代表图像该处拥有纵向边缘^[24],左方较右方暗,计算结果的大值作为该点的输出,即图像的边缘像素值。运算结果是一幅边缘幅度图像。Sobel 算子对噪声具有平滑作用^[25],可以提供较为精确的边缘信息,是一种较为常用的边缘检测方法。

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

(a) G_x 卷积核

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

(b) G_y 卷积核

图 2 Sobel 卷积核

Figure 2 Sobel convolution kernel

2.2 Robert 卷积核

Roberts 边缘算子是一个 2×2 的模板,如图 3 所示。

Z_1	Z_2
Z_3	Z_4

(a) 像素图

0	-1
1	0

(b) G_x 卷积核

-1	0
0	1

(c) G_y 卷积核

图 3 Robert 卷积核

Figure 3 Robert convolution kernel

采用的是对角方向相邻的2个像素之差。从图像处理的卷积核结构来看,用卷积核的边缘定位较准,对噪声也比较敏感^[26]。Roberts 边缘检测算子是一种利用局部差分算子寻找边缘的算子。计算公式为:

$$G_x = (Z_4 - Z_1); \quad (4)$$

$$G_y = (Z_3 - Z_2)。 \quad (5)$$

公式(4)和(5)都是进行灰度图像像素点的计算,得到 G_x 与 G_y 的数值后再进行像素的梯度和角度计算。

2.3 联合卷积算法设计

Sobel 算法的卷积核要比 Robert 卷积核大,所以 Sobel 每次能处理的像素信息比 Robert 要多。卷积核的大小对卷积的效果有很大的影响。相同的卷积核,卷积核的大小不一样,实验的结果会差别很大,因此要针对像素的大小,物体特点去设定卷积核的大小。本次实验在室内进行,室内光源比较稳定,障碍物特征比较明显,针对这些特点实验采用 6×6 的 Sobel 卷积核对图像进行卷积处理。Sobel 卷积核比较大,能够快速的进行图像卷积,获得卷积图像的边缘信息。然后再使用 2×2 的 Robert 卷积核对图形进行卷积处理,能够优化卷积处理的结果。

3 硬件实验

3.1 Sobel 与 Robert 边缘检测的模块设计

实验采用 ALTERA—7 系列的芯片作为核心处理芯片,基本处理流程如图 4 所示。

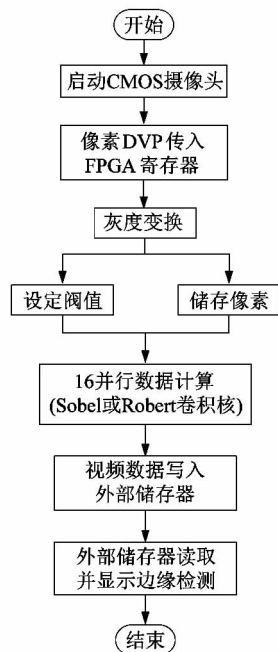


图4 硬件实现流程

Figure 4 Hardware implementation process

3.2 系统简介

实验采用 Verilog 语言和 VHDL 语言进行联合编程。采用 VHDL 语言对 CMOS 摄像头 OV5640 进行底层驱动描述语言设计。通过 DMA 模块进行灰度图像像素信息的传递,它是一种并行传输的信息模式,可以同时处理多条信息,加快信息处理速度。FPGA 的 DMA 通道把灰度图像像素信息从 OV5640 相机通过 PCI 总线、PCI 桥和局部总线传输到 SDRAM 模块存储起来,最后把采集的信息放入逻辑算法模块进行计算。完成后把像素数据存储在 SDRAM 中,用 DMA 通道把灰度像素处理结果传送到 VGA 显示器进行结果显示。

边缘检测系统架构主要分为2个模块:第1个模块是输入数据的累积,用于输入的累积数据先进入寄存器的存储器模块;第2个模块是边缘检测操作模块,用于执行卷积、加法和阈值比较等操作。2个模块都是同步的输入时钟到系统。

3.3 系统设计

把摄像头采集的图像的输入设置为 cmos 信号,并用 cmos_d 表示采集像素信息,输入的信号通过像素信息筛选模块 cmos_select_inst 进行原始像素信息的筛选,同时使用 FPGA 内部的锁相环 video_pull_mo 模块配置像素筛选模块的时钟,锁相环配置的模块时钟为 300 MHz,原始像素信息的采集的速度决定了整个系统实时性的基本要求,因此要保障图像采集的速度,模块的设计图如图 5 所示。

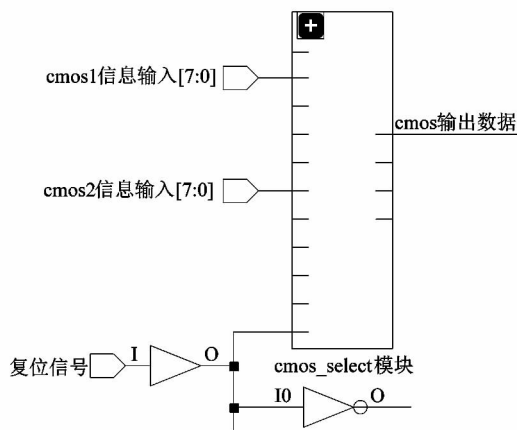


图5 视频信号输入输出模块

Figure 5 Video signal input and output module

系统把外界的图像信息采集到系统中后需要把采集的像素储存起来,然后调用 FPGA 内部的逻辑资源进行像素信息的卷积处理,加入采用 Sobel 卷积核进行卷积处理的情况,Sobel 模块的信号输入为灰度图的

像素信息的输入,经过 FPGA 内部逻辑资源处理后输出,它的模块输入输出如图 6 所示。



图 6 卷积模块输入输出

Figure 6 Convolution module input and output

卷积像素转换模块用于执行卷积、加法和阈值比较等操作,本实验采用的卷积核是根据摄像头像素大小进行设计的。实验中将摄像头分辨率设置为 $1\,280 \times 720$,帧率为 60 帧/s,图像输出格式是 RGB565。由于室内环境的物体边缘特征比较复杂,因此将采集像素的梯度强度与沿正负梯度方向上的两个像素进行比较,通过比较后,如果获得的像素图梯度强度与另外 2 个像素相比为最大值,就保留该像素点作为边缘像素点,否则该像素点将被抑制,采用这种方案进行边缘像素点的优化。卷积核像素值的逻辑运算处理采用 Verilog 语言进行编写。

其中算法的实现是依靠 FPGA 内部的逻辑电路运算完成。采用的 FPGA 开发板和摄像头如图 7 所示。

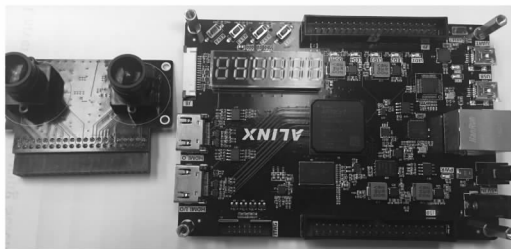


图 7 实验器材

Figure 7 Experimental equipment

实验器材的摆放位置如图 8 所示,FPGA 开发板上扩展了一个 OV5640 摄像头,摄像头的前方摆放的是边缘处理实物。

仿真测试成功后就可以进行程序的烧写了,首先使用 Sobel 卷积核进行图像处理,根据室内环境的特点调节 Sobel 的阈值,最终得出如图 9 所示的测试结果。然后再使用 Robert 卷积核进行卷积处理图像,调节设定阈值后进行 Robert 卷积核的实时图像处理,实时图像处理结果如图 10 所示。



图 8 器材摆放位置

Figure 8 Equipment placement

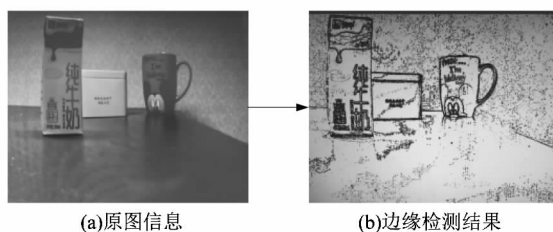


图 9 Sobel 检测结果

Figure 9 Sobel test results

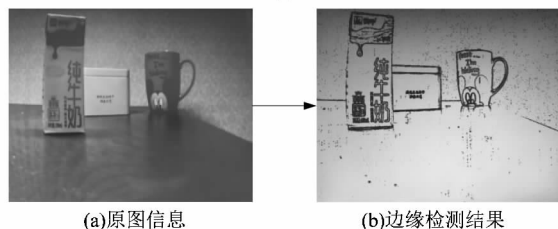


图 10 Sobel 与 Robert 联合检测结果

Figure 10 Sobel and Robert joint test results

通过对比图 9 和图 10 后发现,在 200 MHz 的超频下使用 OV5640 摄像头采集图像信息在 FPGA 上进行实时室内物体边缘检测时,Sobel 与 Robert 联合检测的结果比 Sobel 算法检测的结果更清晰,且产生的黑点更少,即二次卷积算法在 FPGA 上进行室内物体边缘检测时具有更清晰的边缘信息和更少的黑点。

4 结语

课题组利用 FPGA 的高速并行处理数据的特点进行设计图像的采集与处理系统,设计一种新型的联合卷积算法进行图像处理。该处理方法相比单一的卷积算法的处理结果更清晰,比传统的串行处理器实时性更好。由于本实验只使用了 1 个摄像头进行图形采集处理,无法像双目视觉摄像头获取物体的三维图像信

息,所以本系统只适合处理平面的图像信息。进一步的研究可以将双目摄像头应用到本系统,就可以获取图形的三维像素信息,然后通过双目摄像头的视差可以计算出物体的距离和位置信息,进而可以模拟人的双目视觉进行物体的检测。

参考文献:

- [1] CHAPLE G,DARUWALA R D. Design of Sobel operator based image edge detection algorithm on FPGA [C]//2014 International Conference on Communication and Signal Processing. Melmaruvathur, India:IEEE,2014:788-792.
- [2] 焦淑红,关晨辉. 实时视频信号的 Sobel 边缘检测的 FPGA 实现[J]. 电子科技,2014,27(9):62.
- [3] 李涛. 基于 FPGA 的 Sobel 算子实时图像边缘检测系统的设计[D]. 北京:北京交通大学,2013:24-26.
- [4] XU Hua,ZHANG Fan,WANG Wei. Implicit feature identification in Chinese reviews using explicit topic mining model[J]. Knowledge-Based Systems,2015,76:166-175.
- [5] ABBASI T A, ABBASI M U. A novel FPGA-based architecture for Sobel edge detection operator [J]. International Journal of Electronics,2007, 94(9):889-896.
- [6] 温建飞,岳凤英,李永红. 基于 FPGA 硬件架构的实时高速图像特征检测系统[J]. 电子世界,2015(21):124-125.
- [7] 方惠蓉. FPGA 在边缘检测中的应用[J]. 信息通信,2015(1):9-12.
- [8] 张丽红,凌朝东. 基于 FPGA 的 Sobel 边缘检测应用[J]. 电子技术应用,2011,37(8):26-29.
- [9] JOSE A,DIXON K D M,JOSEPH N,et al. Performance study of edge detection operators[C]//2014 International Conference on Embedded Systems (ICES). Coimbatore, India:IEEE,2014:7-11.
- [10] 林青,黄玉蕾,焦纯. 基于 FPGA 的实时图像采集与分析系统设计[J]. 计算机测量与控制,2017,25(7):218-221.
- [11] 陈虎,凌朝东,张浩,等. 基于 FPGA 的实时彩色图像边缘检测算法的实现[J]. 液晶与显示,2015,30(1):143-150.
- [12] BHASKER J. A VHDL primer[M]. 3rd. Upper Saddle River, NJ, USA:Prentice-Hall, Inc., 2008:71-72.
- [13] ALGHURAIR D,AL-RAWI S S. Design of Sobel operator using field programmable gate arrays [C]//2013 The International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE). Konya,Turkey:IEEE,2013:589-594.
- [14] 金大超,冷建伟. 基于 FPGA 边缘检测算法的设计[J]. 电子设计工程,2017,25(13):159-162.
- [15] 刘占. 基于局部期望阈值分割的图像边缘检测算法[J]. 计算机与现代化,2016(8):52-55.
- [16] 朱海洋,徐根玖,李元晨,等. 基于图像分块的局部区域动态阈值选取方法[J]. 计算机与现代化,2016(11):53-57.
- [17] 万智萍. 基于 FPGA 的数据采集及传输系统的设计[J]. 计算机与现代化,2012(5):134-136.
- [18] 杨媛,陈福. 图像深度估计硬件实现算法[J]. 中国图象图形学报,2018,23(3):362-371.
- [19] 许鑫杰,王秀峰,鲁文其,等. 基于边缘检测的零件轮廓识别系统开发[J]. 机电工程,2019,36(2):201-205.
- [20] 许宏科,秦严严,陈会茹. 一种基于改进 Canny 的边缘检测算法[J]. 红外技术,2014,36(3):210-214.
- [21] 涂盼盼,何毅斌,熊文豪,等. 一种基于数学形态学的齿轮边缘检测方法研究[J]. 机电工程,2019,36(8):839-841.
- [22] 田杰,王广龙,乔中涛,等. 基于 FPGA 高速视频图像实时采集与处理系统设计[J]. 电子器件,2016,39(3):623-627.
- [23] 丁继生. 基于 FPGA 的数字图像处理算法研究及实现[D]. 合肥:合肥工业大学,2015:24-28.
- [24] ONAT E. FPGA implementation of real time video signal processing using Sobel, Robert, Prewitt and Laplacian filters[C]//2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). Antalya,Turkey:IEEE,2017:1-4.
- [25] 罗林. 基于 FPGA 的快速图像处理算法的研究与实现[D]. 重庆:重庆交通大学,2015:18-25.
- [26] 宁赛男,朱明,孙宏海,等. 一种改进的 Sobel 自适应边缘检测的 FPGA 实现[J]. 液晶与显示,2014,29(3):395-402.

(上接第 63 页)

该技术对于提高棉袜机控制系统的稳定性和实时性具有重大意义。课题今后的研究方向是如何提高针筒与哈夫盘电机同步旋转精度,该技术在国内外还未得到解决,与国外成熟技术间有不小差距,通过控制系统的设计对该方向的突破应有重要帮助。

参考文献:

- [1] 徐载熊. 意大利袜机[J]. 国际纺织导报,2005,23(12):43-47.
- [2] 王红. 电脑袜机结构和性能的研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2009:18.
- [3] 方圆,夏凡甜. 基于 UG NX/Motion 的电脑横机成圈机构建模与仿真[J]. 纺织学报,2013,34(1):122-127.
- [4] 伍仲. 多路进线袜机成圈机构结构和性能的研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2014:22.
- [5] 黄利力. 基于 CAN 总线的织机上位机单元设计[D]. 杭州:浙江理工大学,2014:12.
- [6] 项宏年. 高速丝袜机控制系统的研制[D]. 杭州:浙江理工大学,2017:10.
- [7] 张宇航. CMOS 反相器 HPM 损伤及扰乱效应研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2017:21.
- [8] 戴宁,彭来湖,胡旭东,等. 一种多功能鞋面圆机控制系统的研究[J]. 机电工程,2019,12(36):104-108.
- [9] 彭来湖,杨敏,史伟民. 双总线架构圆纬机编织机构控制单元设计[J]. 机电工程,2012,29(6):30-31.