

基于 ZYNQ SoC 的黑白色选系统设计^{*}

朱江波¹ 赵志衡¹ 刘 洋¹ 马佳艺¹ 孙 磊²

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院 哈尔滨 150001; 2. 上海安西机械制造有限公司 上海 201109)

摘 要: 针对传统黑白色选系统检测速度慢、集成度低等问题,设计了一种基于 ZYNQ-7000 系列全可编程 SoC 为核心的新型图像色选系统。采用软硬件协同设计的方法;首先在 PL 端实现了线阵 CCD 图像采集、图像预处理等功能,然后使用 AXI 接口,将补正后灰度值、气阀输出信号和设置参数缓存至 DDR3 SDRAM 存储器,最后在 PS 端移植嵌入式 Linux 操作系统,进行图像特征检测和人机交互。实验结果表明,该系统可有效对待筛选物料的特征值参数进行测量,并进行选别,运行稳定可靠,满足工业应用要求。

关键词: 机器视觉;色选系统;图像处理;ZYNQ

中图分类号: TN05 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Design of image color selection system based on ZYNQ SoC

Zhu Jiangbo¹ Zhao Zhiheng¹ Liu Yang¹ Ma Jiayi¹ Sun Lei²

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Shanghai Anxi Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201109, China)

Abstract: A new black and white color selection system based on ZYNQ-7000 series fully-programmable SoC is designed to solve the problem of slow detection speed and low integration of traditional black and white color selection system. Using hardware and software co-design methods, firstly linear CCD image acquisition, grayscale correction, threshold comparison and valve output are implemented on the PL side. Then using the AXI interface to cache the compensated grayscale value, valve output signal, and setup parameters to the DDR3 SDRAM memory, and finally The PS side is ported to an embedded Linux operating system for real-time display and human-computer interaction. The experimental results show that the system can effectively measure the eigenvalue parameters of the materials with screening, and carry out the selection, the operation is stable and reliable, and meets the requirements of industrial applications.

Keywords: machine vision; color selection system; image processing; ZYNQ

0 引 言

机器视觉是一门具有综合性质的交叉学科,主要包括光学成像、图像处理、计算机科学、人工智能、自动控制、模式识别等^[1]。色选技术是基于机器视觉而发展起来的一种集成各项高科技的综合技术,它利用待处理物料的光学特性,在大量物料中将不合格的残次品检测出来,并且予以剔除^[2]。

图像色选系统对准确率、实时性、体积、集成度等方面有较高的要求,单一的 ARM、DSP、FPGA 嵌入式平台处理效果不甚理想。采用多个芯片结合的方案,往往又会导致硬件结构复杂、开发难度大以及系统不够稳定等问题^[3]。而 Xilinx Zynq7000 系列芯片,是以双核 ARM Cortex-A9

多核处理器的处理系统(processing system, PS)为核心,以 FPGA 可编程逻辑(programmable logic, PL)为外设的全新架构处理平台,不仅利用了 FPGA 强大的并行运算能力及其丰富的逻辑资源,还结合了 ARM 在搭建操作系统和实现复杂算法方面的优势,其内部使用 AXI4 通信接口进行信息交互,提高了系统的稳定性和集成度^[4-5]。

本文研究的基于 ZYNQ SoC 的嵌入式黑白色选系统,采用软硬件协同设计的方法,具有实时性好、集成度高的特点,在工农业等领域具有广阔的应用前景。

1 图像色选系统结构及原理

基于 ZYNQ SoC 的黑白色选系统的结构如图 1 所示。

黑白线阵 CCD 相机对传送带上的待处理物料的图像信息进行采集,输出像素时钟信号、像素模拟灰度值信号和行同步信号。ZYNQ SoC 主要分为 PL、PS 和 AXI 通信等三部分。其中 PL 部分主要对 CCD 相机进行控制从而实现图像采集,并进行相应图像预处理,如阴影补正、图像滤波和阈值分割。PS 部分主要对图像进行特征提取,检测出物料的合格程度,通过人机界面进行反馈和交互。AXI 通信部分负责数据交互,采用的是 AXI4 通信协议,它是由 ARM 公司推出的一种高性能、高带宽、低延迟的片内总线协议。

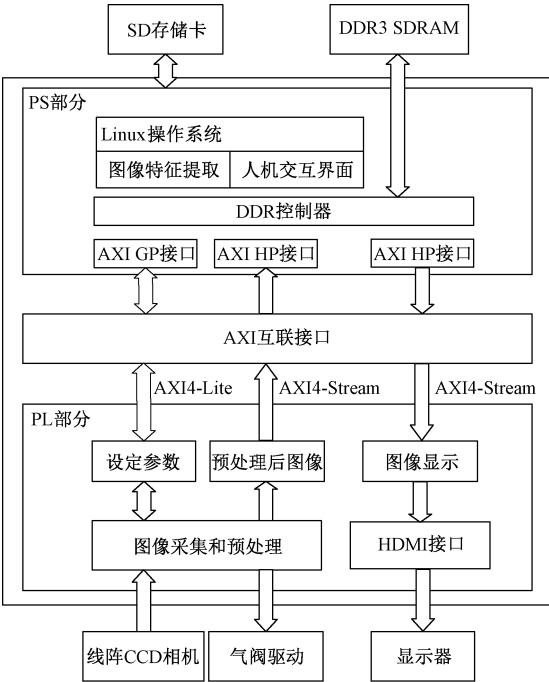


图 1 图像色选系统结构

2 PL 设计

PL 部分主要实现图像采集和预处理功能。在设计过程中,通过改进算法和优化结构,根据 FPGA 的特性,对硬件资源有效使用,快速高效地实现相应功能。

2.1 图像采集设计

图像采集模块主要功能为根据时序和 CCD 输出信号,对 AD9280 芯片进行控制,将 CCD 输出的模拟灰度值信号转化为 8 bit 数字灰度值信号。黑白线阵 CCD 相机扫描像素点为 2 048 个,行频为 4 kHz,数据输出速率为 8 MHz。当行同步信号有效,启动 AD9280 芯片进行模数转换,延迟 3.5 个时钟周期后输出转换完成的 8 bit 数字灰度值信号。模数转换芯片 AD9280 的采样速率可达 32 MSPS,在每一个时钟信号 CLK 的下降沿对输入的模拟信号进行采集,第 N 次采集的数据经过 3.5 个时钟周期的延迟之后转换完成,AD9280 时序图如图 2 所示。本设计中,选用工作模式为顶底模式,该模式下电压输入范围为 2 V,采用内部基

准,通过 ad_clk 时钟输入来控制 AD 采集过程,在时钟信号控制下,并行输出 8 bit 二进制数据信息。

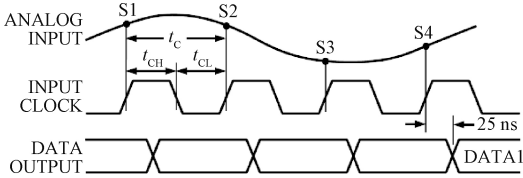


图 2 AD9280 时序

2.2 阴影补正

由于色选设备传送带上存在光照不均匀的现象,CCD 相机采集的灰度图像数据会产生偏差,因此有必要对采集后的灰度图像数据进行阴影补正。传送带光照强度如图 3 所示。

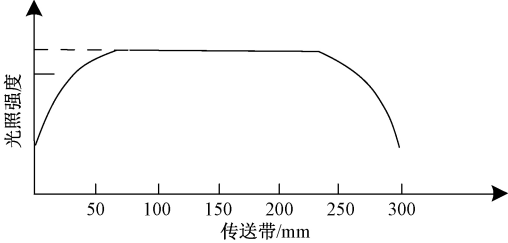


图 3 传送带光照强度

当用户在人机交互界面启用补正功能时,补正模块开始运行。前 1 024 个像素点因光照条件良好,无需进行补正。因此阴影补正可分为 2 个阶段,在第 1 个阶段,地址计数器的计数小于等于 1 023,在每个像素时钟的上升沿读入灰度值并进行累加;在第 2 个阶段,地址计数器的计数大于 1 023,计算出前 1 023 个像素点累加灰度值的均值,作为光源基准值。对应像素点的补正值即为光源基准值减去读入的灰度值。补正模块运行流程如图 4 所示。

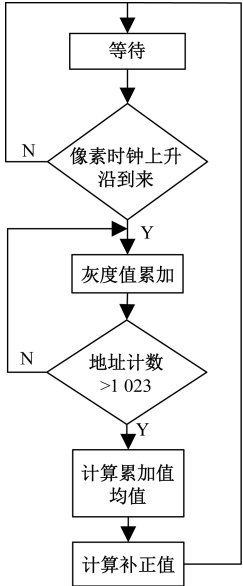


图 4 补正模块运行流程

2.3 中值滤波

中值滤波是一种常用的非线性滤波。把滑动窗口中的像素按灰度等级进行排序,然后选择该组的中间值作为输出像素值^[6-7]。它能减弱或消除傅里叶空间的高频分量,但会对低频分量造成影响。中值滤波可将高频分量对应图像中的区域边缘滤除,使图像平滑。

中值滤波处理时需先进行排序操作。用 FPGA 实现排序时,在流水线模式下,必须要保证排序次数对于拥有任何元素的列表都是确定的,并且由于直到第一个结果输出前每次都要保留整个列表的元素,如果排序周期过长,所造成的资源消耗是巨大的。因此本设计采用比较矩阵排序算法。

比较矩阵排序算法主要思想是,首先为滑动窗口中的每个数据建立一个比较计数寄存器。在第 1 个时钟周期,将此数据和其他的数据进行并行比较,将比较的结果写入比较计数寄存器的对应位。在第 2 个时钟周期,对每一个寄存器中“1”的个数进行统计,统计得到的结果即为该元素经过排序后的序号^[8],其原理如图 5 所示。原始图像与中值滤波后结果如图 6 所示。

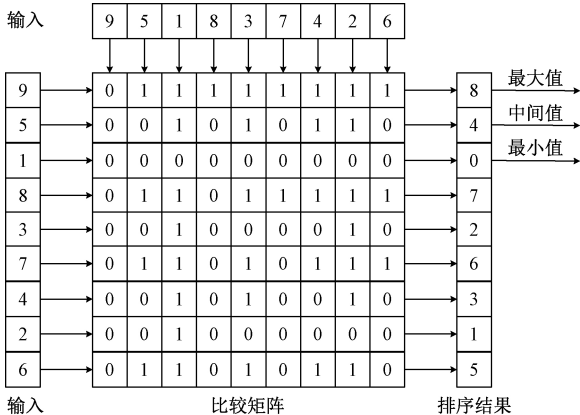


图 5 比较矩阵排序算法原理

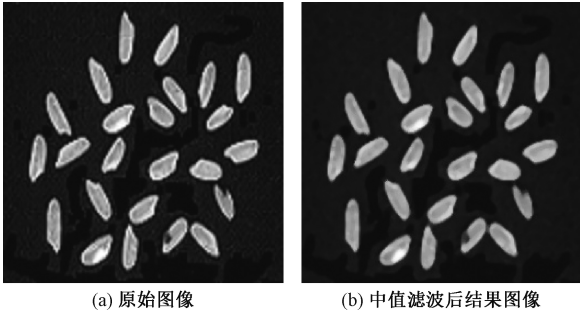


图 6 中值滤波结果

2.4 阈值分割

图像分割是将图像划分为具有不同特征的子区域,从中提取感兴趣的目标,区分前景和背景。为了正确地分离待检测物体像素和背景像素,并结合 FPGA 的硬件特点,

本文采用直方图双峰法进行图像分割。

若图像的灰度直方图呈现出明显的“双峰”形状,则可以选取两峰之间的谷底所对应的灰度值作为阈值^[9]。对图像的每个像素 $f(i, j)$, 设定阈值为 Th , 做如下灰度变换:

$$g(i, j) = \begin{cases} g_0, & f(i, j) \leq Th \\ g_1, & f(i, j) > Th \end{cases} \quad (1)$$

式中: g_0 为处理后的背景灰度值; g_1 为处理后的待检测物体灰度值。在实际生产操作中,合格物料与不合格的残次品在灰度值上有明显差异,用户通过观察人机界面上实时显示已补正后的灰度值,通过设定筛选阈值来设定不合格残次品灰度值的范围。在阈值分割模块中,当输入灰度值小于设定的筛选阈值,判断为不合格的残次品。图 7 为阈值分割后的结果。

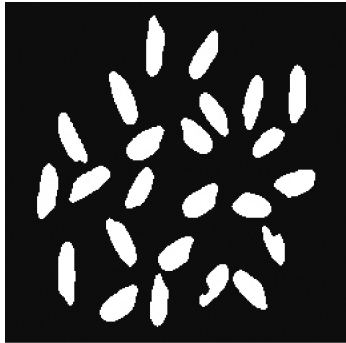


图 7 阈值分割结果

3 PL 与 PS 数据交互设计

Zynq SoC 平台是 Xilinx 公司推出的首款将 ARM CortexA9 系列处理器与高性能 FPGA 在单芯片内紧密结合的架构体系^[10]。搭建 ARM 与 FPGA 之间高效的数据交互动路是设计的关键部分。在 Zynq SoC 中 PL 与 PS 之间数据交互协议是 AXI4 通信协议,它是由 ARM 公司推出的一种高性能、高带宽、低延迟的片内总线协议。

AXI4 协议包括 3 种接口标准,分为 AXI4、AXI4-Lite 和 AXI4-Stream^[11-12]。AXI4 接口支持猝发模式,提供高速的系统内部互连通道,主要用于处理器访问外部存储器这样需要高速数据传输的场合。AXI4-Lite 接口是 AXI4 接口的子集,专用于元件内的控制寄存器进行通信。AXI4-Stream 接口主要面向于高速流数据传输,数据传输不需要地址,而是从存储设备上直接连续读取数据,主要用于如视频、高速 AD、DMA 接口等高速数据传输的情况。

根据数据传输数量和传输方向,本系统使用 AXI4-Lite 接口传输设定参数和气阀输出信号,使用 AXI4-Stream 接口传输补正后灰度值和图像显示数据。

系统使用自定义 AXI4-Lite IP 核时,只需将传输的数据定义为内部寄存器,并为 IP 核分配唯一的地址空间,便可以根据 AXI-Lite 协议操作寄存器的值,完成数据的交

互。自定义 AXI4-Lite IP 核封装如图 8 所示。

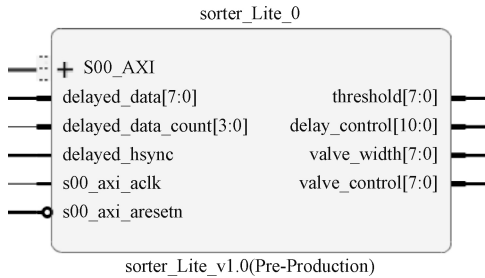


图 8 自定义 AXI4-Lite IP 核封装

而当使用 AXI4-Stream 接口时,由于数据传输不需要地址,需要将自定义 AXI4-Stream IP 核接入到 AXI DMA 核的 S_AXIS_S2MM 接口,并能中断。系统使用直接内存存取(direct memory access,DMA)的方式对流数据进行读写。自定义 AXI4-Stream IP 核连接如图 9 所示。

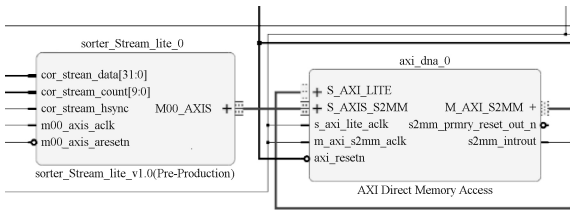


图 9 自定义 AXI4-Stream IP 核连接

在传统的 ARM+FPGA 架构中,主要采用 2 种方式进行数据交互:第 1 种方式是构建常用的串行通信总线,如 SPI、I2C、CAN 等;第 2 种是在 FPGA 内构建 RAM,ARM 通过读取外设 RAM 进行数据传输。这 2 种方式通信速率主要取决于 IO 接口最大传输速率和协议限制,一般吞吐率不超过 25 MB/s,而采用 AXI4 协议,吞吐率可达 600 MB/s。

4 PS 设计

本系统使用 PetaLinux 开发工具在 PS 端 ARM 处理器中构建 Linux 操作系统,实现图像特征提取,并使用 Qt 图形用户界面开发框架设计人机交互界面。

PetaLinux 是 Xilinx 公司推出的嵌入式 Linux 开发工具,提供在 Xilinx 处理系统上定制、构建和调配嵌入式 Linux 解决方案所需的所有组件。该解决方案与 Xilinx 硬件设计工具协同工作,简化了 Linux 系统的开发。

在开发调试中,需要在 PC 机上运行 Qt 开发环境,使用交叉编译方式,生成 ARM 处理器上可执行的应用程序,并搭建网络文件系统(network file system,NFS)服务器,将应用程序部署到 ZYNQ SoC 平台。

4.1 图像轮廓跟踪

为了对图像中的目标进行识别,需要跟踪待检测物体的边缘轮廓,即轮廓跟踪^[13-14],其原理如图 10 所示。该算法首先根据检测标准在待检测物体的轮廓上找到第一个像

素,然后对其所有相邻点进行顺时针检查,找到满足跟踪准则的所有相邻点,从而得到目标对象的轮廓。

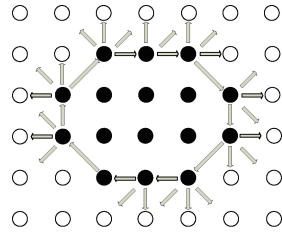


图 10 轮廓跟踪算法原理

阈值分割后对待检测物体进行轮廓跟踪结果如图 11 所示。

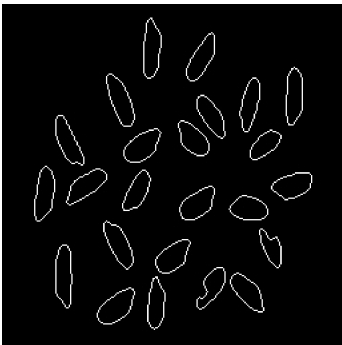


图 11 待检测物外围轮廓

4.2 图像特征参数计算

在进行图像分割和轮廓跟踪后,需要进一步测量物体的尺寸和几何特征,以进行图像识别和分类。色选系统中待检测物体主要选取的特征为物体的长度、宽度、物料面积以及面积比。通过对测量这些特征参数,即可判断物体是否存在缺陷。

使用最小外接矩形法,可以测量和计算相应的图像特征。在直角坐标系中,将物体的轮廓在 90°范围内以相等的间隔进行旋转,并且记录每次旋转得到的外接矩形参数,则必然在某个角度下所得到的外接矩形的面积达到最小^[15-16]。取面积最小的外接矩形的参数为主轴方向上的长度和宽度,并计算最小外接矩形面积和物料面积。

采用轮廓跟踪算法和最小外接矩形法得到的待检测物特征参数如图 12 所示。

4.3 人机交互界面设计

为了实时显示图像灰度值数据和设定运行参数,需要对人机交互界面进行设计。Qt 是一个跨平台的图形用户界面开发框架,使用 C++ 编程语言可以方便地设计人机交互界面,并且移植到嵌入式开发平台上。

本系统设计的人机交互界面包括以下 3 个部分:

- 1) 图像灰度值显示区,位于界面左上方,用来显示补正后的灰度值数据,横坐标为位置,纵坐标为灰度值。
- 2) 气阀动作显示区,位于界面左下方,用来显示气阀动

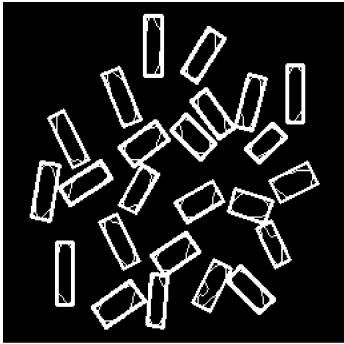


图 12 待检测物特征参数

作状态,指示灯点亮为开启,指示灯熄灭为关闭。

3)参数设定区,位于界面右方,用来设定筛选阈值、延迟时间、气阀宽度和气阀动作阈值等相关参数。

图 13 为本系统设计的人机交互界面布局,图 14 为人机交互界面实际运行。

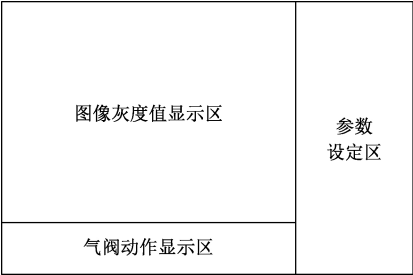


图 13 人机交互界面布局

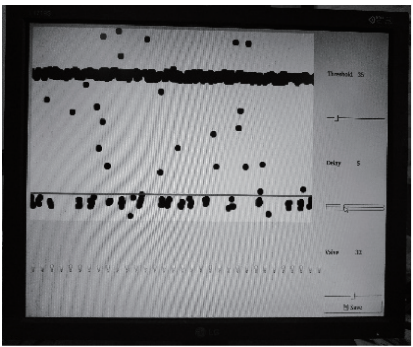


图 14 人机交互界面实际运行

Qt 提供了信号与槽机制用于完成界面操作的响应。信号会在某个特定情况或动作下被触发,槽是等同与接受并处理信号的函数。

在本系统中人机交互界面主要生成 2 种信号,保存设定按钮点击信号和显示刷新定时器信号。保存设定按钮被点击后,使用 mmap 函数映射出设定参数的寄存器物理地址,通过直接操作寄存器的方式更改设定。

显示刷新定时器信号是为了动态显示图像灰度值和气

阀动作状态,设定触发周期为 20 ms。显示气阀动作状态同样使用 mmap 函数读取状态值,而为了避免显示撕裂,读取和写入图像灰度值缓冲区使用乒乓操作。在应用程序中,开启 DMA 通道,在内存中开辟两组相同大小的空间,将传输的补正后的灰度值数据不断地依次写入内存空间当中。显示灰度值时,读取另外一个内存空间所保存的灰度值。

5 结果分析

选用稻米为实验测试对象,利用本系统对 24 粒待检测物进行测试。将 CCD 输入的图像通过 AXI 总线传输至 ARM 处理核心当中,在进行相关算法处理后,分别对每个待检测物计算粒长、粒宽、物料面积、最小矩形面积和面积比,选取典型的 4 粒待检测物特征参数如表 1 所示。

表 1 待检测物特征参数表

序号	长/宽/ mm	物料面积/ mm ²	矩形面积/ mm ²	面积比/ %
1	6.27/2.31	11.688 3	14.483 7	80.7
2	6.08/2.69	12.511 7	16.355 2	76.5
3	5.08/2.46	7.698 0	12.496 8	61.6
4	6.58/2.47	12.417 0	16.252 6	76.4

经实验分析可知,形状完好、颗粒饱满的待检测物面积比在 70% 以上,物料面积在 100 mm² 以上,可根据实验结果设定筛选阈值,进行物料选别。

采用精度为 0.02 mm 的游标卡尺,通过三次人工测量得到每粒稻米的粒长,再取平均值为人工测量结果值,并与算法处理结果进行对比,相关数据如表 2 所示。算法的处理结果与人工测量结果的最大绝对误差为 0.18 mm,最大相对误差为 2.81%。实验结果说明,算法对待检测物料特征参数的检测结果较好。

表 2 算法处理结果误差表

序号	算法处理 结果值/mm	人工测量 结果值/mm	绝对误差/ mm	相对误差/ %
1	6.27	6.36	0.09	1.42
2	6.08	5.96	0.12	2.01
3	5.08	5.06	0.02	0.40
4	6.58	6.40	0.18	2.81

6 结 论

本文设计的基于 ZYNQ SoC 的图像色选系统,利用 PL 端搭建图像色选系统主控制模块,采集黑白线阵 CCD 相机图像数据,依次进行阴影补正、阈值比较等图像预处理步骤;实现 PL 端与 PS 端高速数据交互,保证系统运行的

稳定性和实时性;利用 PS 端实现图像特征参数检测并搭建人机交互界面,实现图像数据与气阀动作状态的实时显示,并能根据不同物料与应用环境设定相应参数。实验结果表明,本图像色选系统实时性好,可靠性强,集成度高,体积小,成本低,可适用于多种物料筛选领域。

参考文献

- [1] 李朗. 基于 Zynq-7000 高清视频采集处理系统 Linux 移植与应用程序设计[D].南京:南京邮电大学,2017.
- [2] 贺能. 基于 Zynq 的运动车辆检测与跟踪系统设计[D].大连:大连海事大学,2017.
- [3] 梁新宇. 基于 ZYNQ 的行人检测系统软硬件协同实现[D].大连:大连海事大学,2016.
- [4] 周鹏飞,唐康华,吴美平,等.微小型组合导航系统软硬件协同设计[J].计算机测量与控制,2015,23(12):4110-4113.
- [5] 夏国标,陈剑云,夏孟显. 基于 ZYNQ 的谐波检测系统设计[J].华东交通大学学报,2018,35(4):89-96.
- [6] 赵辉. 应用于图像处理的自适应中值滤波算法的研究[D]. 沈阳:东北大学,2009.
- [7] 赵亮,刘鹏,王晓曼,等.基于 FPGA 快速中值滤波算法的硬件实现[J].长春理工大学学报(自然科学版),2018,41(5):102-105,120.
- [8] 吕伟新,李清清,娄俊岭.FPGA 比较矩阵排序法及在中值滤波器中的应用[J].电子器件,2012,35(1):34-38.
- [9] 拜颖乾. 图像分割阈值选取方法的研究[J]. 信息系统工程,2014(2):146-147.
- [10] 张龙,冯帅. 基于 ZYNQ 的视频图像处理平台的设计[J]. 计算机与数字工程,2016,44(12):2519-2523.
- [11] 马飞,刘琦,包斌. 基于 FPGA 的 AXI4 总线时序设计与实现[J]. 电子技术应用,2015,41(6):13-15.
- [12] 范秋香,吴琼之,孙宁霄,等.AXI 标准协议在微型机载采集设备中的应用[J].电子设计工程,2014,22(3):62-65.
- [13] 陆宗骥. 图象处理领域轮廓跟踪及应用[J]. 中国经济和信息化,1994(10):49-52.
- [14] 刘海峰,张超,罗江,等.基于凸壳检测的红外船舶轮廓提取技术[J].指挥与控制学报,2017,3(3):255-259.
- [15] 袁佐云,牛兴和,刘传云. 基于最小外接矩形的稻米粒型检测方法[J]. 粮食与饲料工业,2006(9):7-8.
- [16] 姚一鸣,陈龙.基于 OpenCV 的汽车插片保险丝定位算法研究[J].软件导刊,2018,17(5):53-55.

作者简介

朱江波(通信作者),硕士研究生。

E-mail:enviedepleurer@foxmail.com

赵志衡,博士,教授,主要研究方向为高电压强脉冲磁场、嵌入式系统。