

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106941

混合噪声图像的去噪算法研究及 FPGA 实现

陈伟 党榕

(西安科技大学 通信与信息工程学院 西安 710600)

摘要: 针对数字图像中常见的混合噪声以及边缘轮廓模糊的问题,提出一种修正的阿尔法均值滤波与边缘增强算法相结合的图像预处理算法。修正的阿尔法均值滤波算法首先对像素矩阵中的像素值统计排序,其次去除定量的最大值和最小值,再次求取像素矩阵中剩余像素点的均值,最后用求取的均值代替原始中心点的像素值从而实现图像去噪。边缘增强算法首先使用 Sobel 算子定位图像边缘信息,提取图像的边缘后,将边缘叠加于去噪图像,最终实现图像的边缘复合增强。经验证,随着噪声密度的不断增加,该算法相比于传统算法始终保持着较小的均方误差值,且均方误差的增长率约为 31%。结果表明,该算法有效滤除了数字图像的混合噪声,增强了边缘信息,同时满足图像降噪系统的实时性要求。

关键词: 修正的阿尔法均值滤波;边缘增强;Sobel 算子;CMOS 图像传感器

中图分类号: TN791 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Research on denoising algorithm of mixed noisy image and FPGA implementation

Chen Wei Dang Rong

(College of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710600, China)

Abstract: Aiming at the common problems of mixed noise and fuzzy edge contour in digital images, an image preprocessing algorithm combining modified alpha mean filtering and edge enhancement algorithm is proposed. The modified alpha mean filter algorithm first statistically sorts the pixel values in the pixel matrix, then removes the quantitative maximum and minimum values, and then calculates the average value of the remaining pixels in the pixel matrix. Finally, the average value obtained is used to replace the pixel value of the original center point to achieve image denoising. The edge enhancement algorithm first uses the Sobel operator to locate the edge information of the image, and after extracting the edge of the image, the edge is superimposed on the denoised image, and finally the edge composite enhancement of the image is realized. It has been verified that with the continuous increase of noise density, the algorithm has always maintained a smaller mean square error value than traditional algorithms, and the mean square error growth rate is about 31%. The results show that the proposed algorithm effectively filters out the mixed noise of digital images, enhances the edge information, and satisfies the real-time requirements of the image noise reduction system.

Keywords: modified alpha mean filter; edge enhancement; Sobel operator; CMOS image sensor

0 引言

随着计算机技术和成像技术的不断发展,数字图像已经成为人们日常生活中不可或缺的重要组成部分。由于成像环境、电子元器件特性、传感器材质等原因,数字图像中往往存在噪声污染、成像模糊以及轮廓丢失等问题^[1]。经由传感器的原始图像数据包含各种混合噪声,其中以高斯噪声和椒盐噪声最为常见。高斯噪声是指概率密度函数服

从高斯分布的一类噪声,消除高斯噪声一般考虑使用均值滤波方法,可有效地抑制这种噪声^[2]。椒盐噪声也称脉冲噪声,是一种随机出现的白点或者黑点,传统地去除此类噪声的有效手段是使用中值滤波^[3]。然而,对于高斯和椒盐噪声混合的情况,无论是均值滤波还是中值滤波,都不能达到同时有效地抑制两种噪声的目的。滤除噪声的过程本质是使图像平滑的过程,滤除噪点的同时也会滤除图像边缘点,使得图像边缘特征信息缺失^[4],降低图像的识别率。

收稿日期:2021-06-15

国内外学者在图像处理领域进行了很多相应的研究,在图像去噪^[5]、图像分割^[6]、图像边缘检测^[7]等方面都有重要技术突破。文献[8]基于软件平台上的中值滤波算法理论研究十分深入,但这类算法采用串行的排序方法,计算耗时;文献[9]实现了基于 FPGA 的双边滤波器,但不能实时调节算法参数,具有局限性;文献[10]对在 FPGA 端映射数字图像处理算法进行了研究;文献[11]提出了一种加速的视频流核心处理算法,保证了视频图像处理的实时性;文献[12]基于 FPGA 构建多种二维卷积滤波器,降低了计算的复杂性,但不能较好地保留图像的纹理特征。

因此,针对以上问题,本文设计一种图像去噪和边缘增强相结合的预处理算法。首先使用一种修正的阿尔法均值滤波器,该算法弥补了传统滤波算法去噪单一的缺陷,适用于图像包含多种噪声的情况,例如高斯噪声和椒盐噪声混合的情况^[15];其次,加入图像的边缘增强算法,通过对滤波后的图像进行处理,强调突出图像的轮廓信息,从而提高图像的识别效率。由于传统的软件实现方式无法与图像采集、传输与存储系统形成一套流水线的问题,基于 FPGA 可配置、功耗低、易于实现流水和并行结构的特点^[17],本文将上述算法移植于硬件平台,有效地改善了图像的输出质量,同时实现图像数据的实时处理,为后续图像的深度处理打下良好的基础。

1 修正的阿尔法均值滤波算法

1.1 原 理

修正的阿尔法均值滤波器属于统计排序滤波器的一种,是一种非线性空间域滤波器^[15]。这种滤波器的响应是以滤波器包围图像区域中的像素排序为基础,然后使用统计排序结果决定的值代替中心像素的值^[16]。修正的阿尔法均值滤波器将滤波范围内的数据进行排序,以从大到小的顺序和从小到大的顺序去除 d 个数据,并将剩下的数据

计算均值,代替中心点的像素值。

假设在领域 S_{xy} 内去掉 $g(s, t)$ 最低灰度值的 $d/2$ 和最高灰度值的 $d/2$ 。令 $g_r(s, t)$ 代表剩下的 $mn - d$ 个像素。由这些剩余像素的平均值形成的滤波器称为修正的阿尔法均值滤波器:

$$\hat{f}(x, y) = \frac{1}{mn - d} \sum_{(s, t) \in S_{xy}} g_r(s, t) \quad (1)$$

其中, d 的取值范围可为 $0 \sim mn - 1$ 。当 $d = 0$ 时,修正的阿尔法均值滤波器退化为算数均值滤波器;如果选择 $d = mn - 1$, 则修正的阿尔法均值滤波器退化为中值滤波器;当 d 取其他值时,修正的阿尔法均值滤波器适用于处理多种噪声混合污染的图像,例如高斯噪声和椒盐噪声混合污染后的图像。

1.2 仿真测试与结论

如图 1 所示,为了验证算法的有效性,以 256×256 的图像 lena 作为实验对象,对原始图像分别运用不同密度的高斯噪声和椒盐噪声进行污染。图 1(a) 为原始图像,图 1(c) 加入密度为 $(0.01, 0.01)$ 的高斯噪声和密度为 0.1 的椒盐噪声,图 1(i) 加入密度为 $(0.02, 0.02)$ 的高斯噪声和密度为 0.2 的椒盐噪声,图 1(m) 加入密度为 $(0.03, 0.03)$ 的高斯噪声和密度为 0.3 的椒盐噪声。对其分别使用 5×5 的算数均值、中值以及 5×5 且 $d = 16$ 的修正的阿尔法均值滤波器对原始图像以及带有混合噪声的图像进行滤波处理,图 1 所示为滤波后的结果图。

主观方面,从图 1(f)、(j) 和 (n) 可以看出,由于脉冲噪声的存在,算数均值滤波器并没有达到良好的去噪效果。图 1(g)、(k) 和 (o) 对应的中值滤波和图 1(h)、(l) 和 (p) 对应的修正的阿尔法均值滤波器去噪效果则好得多,而对于高的 d 值,修正的阿尔法均值滤波器接近于中值滤波器的性能,但仍然保留了平滑能力,因此修正的阿尔法均值滤波的效果更好一些。





图 1 不同噪声密度下的滤波效果对比

客观方面,根据算数均值滤波算法、中值滤波算法以及修正的阿尔法均值滤波算法的滤波结果,运用均方误差(mean-square error, MSE)量化地评价实验的结果。MSE 是基于图像能量计算误差的方法,计算公式如下:

$$MSE = \frac{1}{ab} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b [x(i, j) - y(i, j)]^2 \quad (2)$$

式中: a, b 为图像的宽度和高度, x 为噪声图像, y 为原始图像。MSE 越小,证明待检测图像与原始图像越接近。3 种算法对不同参数的混合噪声图像进行滤波,所对应的具体 MSE 如表 1 所示。从客观实验数据可以看出,本文滤波方法对于混合噪声的处理能够保持较好的去噪效果,与其余两种滤波算法相比 MSE 的值最小,且随着混合噪声密度的不断增加, MSE 的速度增长比率分别为 33%、36% 和 31%,由此说明随着密度增加,图像的质量逐渐降低,各算法的滤波效果受到一定影响,但本文的滤波算法相比之下可以一定程度缓解噪声密度带来的影响。

表 1 3 种滤波算法的 MSE 比较

高斯噪声 密度	椒盐噪声 密度	算数均值 滤波	中值 滤波	本文 滤波
(0.01,0.01)	0.1	408.392 8	261.175 1	240.542 3
(0.02,0.02)	0.2	645.824 6	414.262 0	349.783 4
(0.03,0.03)	0.3	912.661 1	624.614 6	510.228 4

1.3 FPGA 实现及仿真

1) 窗口生成模块

像素矩阵是卷积运算和滤波算法的实现基础^[17]。本文使用的修正的阿尔法均值滤波算法在 FPGA 中实现需要创建 5×5 的窗口模板,可调用 Quartus 库中的移位寄存器 Shift-Register(RAM-based) IP core 将数据转化为串行

数据,以 5 行并行数据输出^[18]。生成 5×5 的像素矩阵后,将所得 25 个像素数据存储到一个利用窗口边长设置位宽的数据中,实现数据的区域提取。生成区域数据的过程中,每个时钟对应输出一个区域数据,便于后续实现 5×5 窗口矩阵中数据的排序和剔除。

2) 排序模块

排序模块采用并行全比较排序算法^[19],该算法实现过程如图 2 所示。首先,将 5×5 的像素矩阵中的每个像素值与剩余像素值进行比较,采用 0 和 1 记录比较结果。例如,当前像素值 $P_i > P_{i+1}, a_{(i,i+1)}$ 记为 1;则说明 $P_{i-1} < P_i, a_{(i+1,i)}$ 记为 0。以此类推,随着 i 值的增大, P_i 比较的次数不断减少,比较得到所有像素点与其余像素点的结果后,将每个像素点对应的所有 a 值相加得到 A_i, A_i 的值代表其对应像素点在整个像素矩阵中的排序位置。计算每个像素点的 A_i 值得到 $(A_1 A_2 A_3 \dots A_{25})$ 对其进行排序得到 $(A_1' A_2' A_3' \dots A_{25}')$,最终得到矩阵中所有像素值的排序结果 $(P_1' P_2' P_3' \dots P_{25}')$ 。图 3 是排序模块的仿真结果,可以看出输入是乱序的,输出已经按照从大到小的顺序排列。根据本文使用的修正的阿尔法均值滤波算法,取 $d=16$ 将排序后的像素数据去掉 8 个最大值和 8 个最小值,得到剔除后的数据。

3) 均值模块

均值模块首先进行数据的求和计算,之后对结果求取均值。由于加法是组合逻辑,直接用组合的形式实现延迟太高,占用资源太多,因此本文采用基于流水线的并行加法树算法来实现多个数据相加^[20]。图 4 举例说明对 $N=8$ 个数进行并行加法树求和的流程示意图。首先将输入数据分成两组,每一组递归调用模块自身,然后在递归调用的模块里再继续分为两组,同时在每两个数的加法逻辑后都插入一级流水线寄存器,不断重复直到分解为两个数的

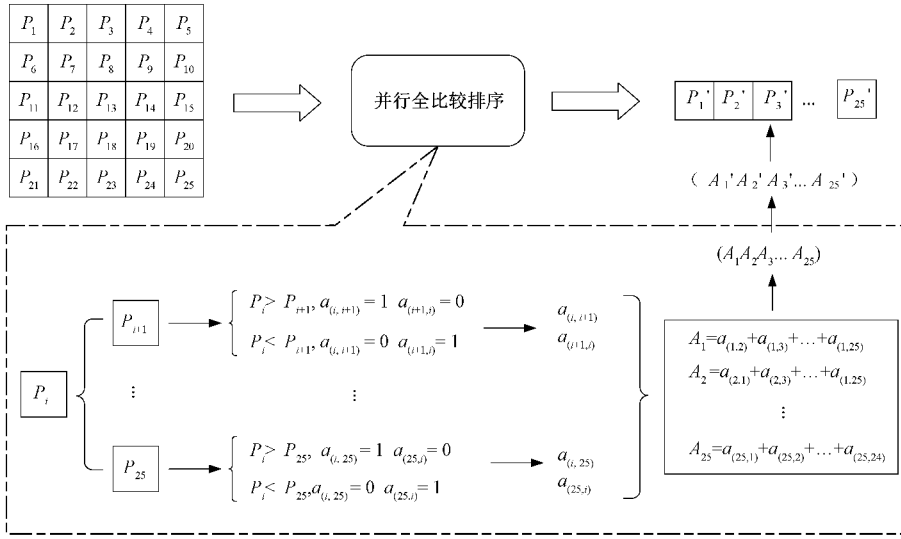


图 2 并行全比较排序算法

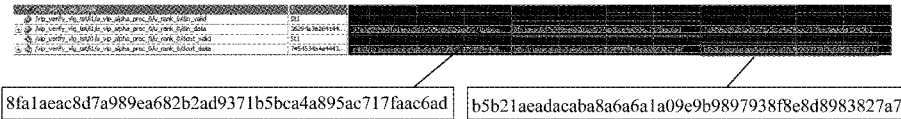


图 3 排序模块仿真结果

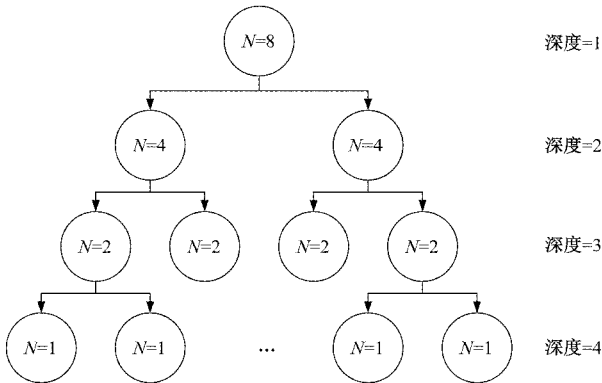


图 4 加法树并行求和示意图

加法或单个数。最后,从树的最底层逐层向上进行计算,直至达到最顶层得出求和结果。如图 5 所示为求和模块的仿真结果,可以看出求和模块的输入数据是 0x9f9c9b99999969693,即所有的加数为 0x9f、0x9c、0x9b、0x99、0x99、0x96、0x96、0x96、0x93,观察输出波形可知求和结果 0x55d 延迟 4 个时钟周期输出,符合设计预期。求和之后调用 Quartus 库中的除法器 LPM_DIVIDE IP core 对得到的求和结果进行除法计算,最终得到像素数据的平均值。

2 边缘增强算法

2.1 原 理

图像的边缘是图像最本质的特征,它指的是图像中有

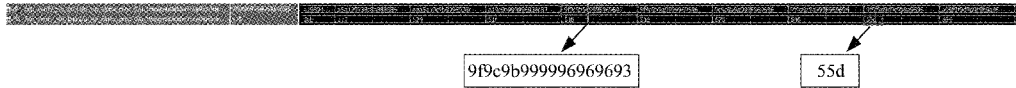


图 5 求和模块仿真结果

阶跃性变化的像素灰度值的集合。传统的边缘增强算法大致可分为空域类和频域类。空域类包括 Sobel、Canny、灰度变换等^[21];频域类包括小波变换、快速傅里叶变换、短时傅里叶变换等^[22]。本文使用 3×3 的 Sobel 边缘增强算子,提取图像的边缘信息,并将所得图像的边缘信息叠加于原始图像实现图像的边缘增强。

Sobel 算子采用空域微分算子来计算图像梯度,通过计算得出每个像素灰度值的一阶梯度变化来判断边沿的位置。采用两组 3×3 模板作为水平卷积核和垂直卷积

核,对图像的每一个像素点的灰度值,计算它的邻域像素与卷积核的卷积,分别得到图像在该点的水平梯度 G_x :

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

垂直梯度 G_y :

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

式中: A 是 3×3 像素矩阵,然后将两者结合求出其均方根作为实际梯度:

$$G(x, y) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (5)$$

最后将梯度与设定的阈值相比较,如果比较的结果大于阈值,则判定是边缘部分,用 255 来代替图像中央的灰度值;否则就认为不是边缘部分,用 0 来代替窗口中央的像素灰度。

2.2 仿真测试与结论

如图 6 所示,以 256×256 的图像 lena 作为实验图像,通过 MATLAB 实现图像的 Sobel 边缘增强,仿真结果可明显看出,增强后的图像着重突出了图像的边缘信息,更符合人眼的视觉特性^[28]。

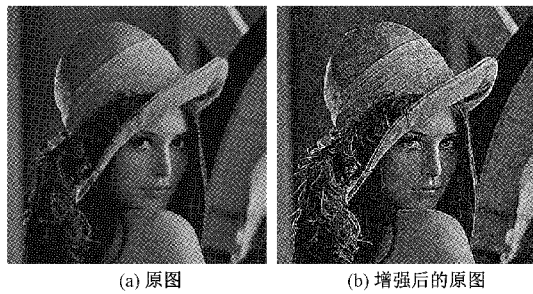


图 6 Sobel 边缘增强对比图

2.3 FPGA 实现及仿真

在前文对 Sobel 边缘检测算法研究的基础上,可以得到 FPGA 实现边缘检测包含梯度计算和阈值比较两部分。阈值比较可以通过编写简单的 Verilog HDL 代码来实现,重点在梯度计算算法的实现上,因此如下主要介绍梯度计算模块。

梯度计算模块的算法结构如图 7 所示。与滤波部分同样,调用 Quartus 库中的移位寄存器 Shift-Register (RAM-based) IP core 生成 3×3 的矩阵窗口,然后用生成的 3×3 矩阵与 Sobel 的水平算子进行卷积,将矩阵中的像素点通过移位运算实现与卷积模板的对应系数相乘,最后各行并行相加得到 G_x, G_y 与 G_x 实现方式类似。计算得出 G_x 与 G_y 之后,将 G_x 与 G_y 分别平方并相加,调用官方 IP ALTSQRT 实现开方运算,得到像素点的实际梯度。为

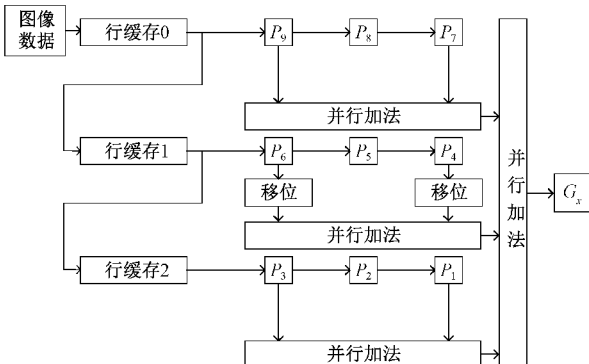


图 7 水平梯度计算结构

为了防止计算结果的溢出,将实际梯度右移两位叠加于原始灰度图像,且经过实际验证,边缘的增强效果较好。

3 板级测试

为进一步验证系统的有效性,将本文设计的实时图像预处理系统利用 Quartus 18.1 软件综合,在 Altera 公司提供的 Cyclone IV 系列芯片 EP4CE15F23C8N 上实现,摄像头采用 OV7725 的 CMOS 图像传感器,图像显示选择 VGA 接口的显示器。硬件测试时,开发板的按键 SW1 控制系统的图像预处理模块。图 8 是 VGA 屏幕显示的原始采集图像,当按下 SW1 按键时,对采集进来的原始图像进行图像处理,得到图 9。图 10 为处理前后图像的细节图对比,可以看到原始图像图 10(a)模糊,且边缘纹理不清。经过处理后的实时图像图 10(b),不仅图像整体变得更平滑,同时图像边缘轮廓得到增强,图像质量得到明显改善。

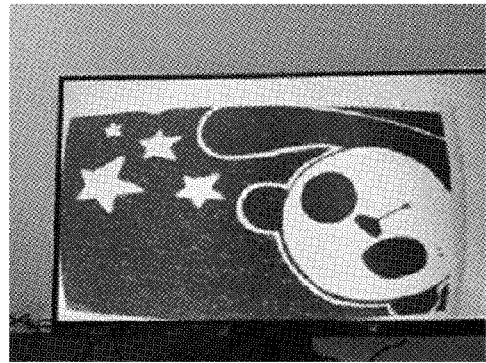


图 8 处理前的实时图像

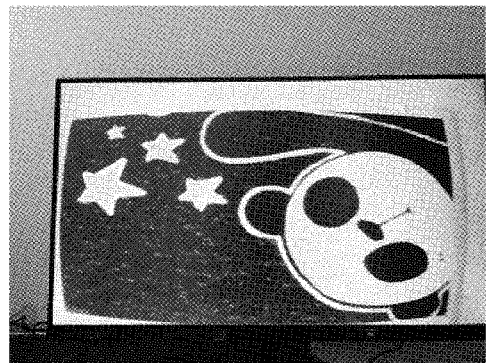


图 9 处理后的实时图像

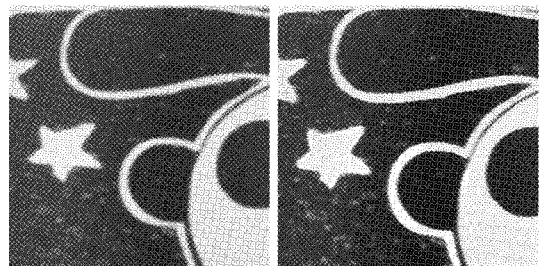


图 10 实时图像处理结果细节对比

4 结 论

本文提出了一种结合修正的阿尔法均值滤波和边缘增强算法的图像预处理算法,同时进行了设计仿真和硬件逻辑实现。测试结果表明,修正的阿尔法均值滤波改善了传统滤波算法的单一性,可以有效去除混合噪点、平滑图像;Sobel 边缘增强算法对滤波后的图像进行边缘的提取与叠加,增强了图像的边缘轮廓。该算法具有平滑图像的同时还能保持边缘的特征,可以广泛应用于图像处理领域。由于在设计系统时只考虑到对算法的实现与验证,在工程实现中还有一些不足,例如算法硬件资源消耗较大,这也是后期工作的重点。

参考文献

- [1] 周林鑫,余飞鸿.图像降噪算法的FPGA实现方法[J].电子测量技术,2020,43(24):135-140.
- [2] 武昊男,储成群,任勇峰,等.基于FPGA的图像自适应加权均值滤波设计[J].电子技术应用,2019,45(3):32-35,41.
- [3] 万丰丰,周国民,周晓.一种去除椒盐噪声的自适应模糊中值滤波算法[J].浙江大学学报(理学版),2019,46(4):445-453.
- [4] 康宇,赵冬青,上官鹏,等.基于FPGA的图像边缘保护高斯滤波算法实现[J].电子设计工程,2021,29(6):94-98,110.
- [5] 王延年,李雄飞.基于深度密连网络的自然图像去噪算法[J].国外电子测量技术,2021,40(3):23-27.
- [6] 刘俊,吕芳,薛海鹏.结合高斯核与各向异性邻域抑制的模糊聚类图像分割[J].电子测量技术,2020,43(3):132-138.
- [7] 余震,何留杰,王振飞.基于中智理论与方向 α -均值的图像边缘检测算法[J].电子测量与仪器学报,2020,34(3):43-50.
- [8] 卢晨,凌兴宏.基于强度-梯度映射与多方向中值滤波的红外弱小目标检测算法[J].电子测量与仪器学报,2020,34(12):151-158.
- [9] 张爱杰,刘士建,张瑞,等.基于FPGA的双边滤波器设计[J].红外技术,2019,41(1):13-17.
- [10] 王佳超,王思懿,李党娟,等.基于FPGA图像采集系统的硬件电路设计[J].自动化仪表,2020,41(3):76-79,83.
- [11] MEZENI D, SARANOVAC L. Fast guided filter for power-efficient real-time 1080p streaming video processing[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2020,17(3):511-525.
- [12] KUMAR S, JHA R K. An FPGA-based design for a real-time image denoising using approximated fractional integrator[J]. Multidimensional System and Signal Process,2020,31(4):1317-1339.
- [13] PANDEY J G, KARMAKAR A. Unsupervised image thresholding: Hardware architecture and its usage for FPGA-SoC platform [J]. International Journal of Electronics,2019,106(3):455-476.
- [14] REICHE O, OZKAN M A, MEMBARTH R, et al. Generating FPGA-based image processing accelerators with Hipacc [C]. 2017 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD), 2017:1026-1033.
- [15] 陈顺,李登峰.融合Canny算子和形态学的齿轮图像边缘检测研究[J].机电工程,2020,37(7):821-825.
- [16] FARAGALLAH O S, IBRAHEM H M. Adaptive switching weighted median filter framework for suppressing salt-and-pepper noise [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2016,70(8):1034-1040.
- [17] 刘博熙,刘一清.基于FPGA的MIPI CSI-2图像采集系统设计[J].电子测量技术,2020,43(6):169-173.
- [18] AMIRI M, SIDDIQUI F, KELLY C, et al. FPGA-based soft-core processors for image processing application[J]. Journal of Signal Processing Systems, 2017,87(1):139-156.
- [19] 李大琳,陈涛.基于FPGA的浮点数线性排序器设计[J].数字技术与应用,2019,37(11):143-144.
- [20] 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.
- [21] SIDDIQUI F, AMIRI S, MINHAS U I, et al. FPGA-based processor acceleration for image processing applications[J]. Journal of Imaging, 2019,5(1):1-16.
- [22] 任勇峰,武昊男,储成群,等.基于FPGA的二维FFT图像边缘增强设计[J].图学学报,2019,40(1):139-144.
- [23] 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.

作者简介

陈伟,博士,副教授,主要研究方向为光电信息处理。

E-mail:zebeck@111.com

党榕,硕士研究生,主要研究方向为数字图像处理。

E-mail:19207205065@stu.xust.edu.cn