

基于 FPGA 图像分析的路面破损检测系统的研究与实现

李 鹏^{1,2,3}, 杜 敏^{1,2,3}, 赵芬芬^{1,2,3}

(1 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044;

2 南京信息工程大学 江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 江苏 南京 210044;

3 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044)

摘 要: 以路面破损之一的横向裂缝为例, 提出一种基于 FPGA 图像分析的路面破损检测装置的实现方法. 该装置采用 Sobel 算法, 并通过 Verilog HDL 语言编程在 FPGA 开发板上实现对输入路面图像分析和特征提取. 为了提高检测准确性和抗干扰能力, 在 Sobel 方法算法中加入可变分母的差分运算, 并在图像二值化处理后进行形态学膨胀腐蚀. 仿真和实验表明该检测装置能够准确检测路面裂缝.

关键词: 裂缝检测; Sobel 算子; 膨胀腐蚀; FPGA

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)03-0100-05

Pavement Damage Detection System Based on FPGA Image Analysis Research and Implementation

LI Peng^{1,2,3}, DU Min^{1,2,3}, ZHAO Fen-fen^{1,2,3}

(1 College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2 Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Proccession, Nanjing 210044, China; 3 Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on pavement damage, one of the transverse crack as an example, put forward a kind of image analysis based on the FPGA realization method of pavement damage detection device. The device adopts the Sobel algorithm, and through the Verilog HDL language programming implementation on FPGA development board to enter the road image analysis and feature extraction. The result of the judge is dealing with the analysis of crack damage. In order to improve the detection accuracy and anti-interference ability, the method of Sobel algorithm with variable denominator difference operation, and the morphology after image binarization processing corrosion expansion. Through the simulation and experiment show that the detection device can accurately detect cracks.

Key words: crack detection; sobel operator; corrosion&expansion; FPGA

1 引言

随着国家高等级公路建设的快速发展,路面病害自动检测必然发展为公路管理和养护部门的技术之一. 计算机图像处理和分析技术已经逐步成为路面病害检测一个新的发展方向. 然而,现有的基于计算机图像处理和分析技术的路面病害检测存在采集

的图像灰度不均匀,相关检测算法的通用性、检测实时性差等问题^[1-2]. 本文以路面病害之一的裂缝为研究对象,提出一种基于公路路面图像特征提取和分析的路面破损检测方法,并用 FPGA 构建硬件系统进行处理,然后将处理结果通过 USB 上传给 PC 机显示. 路面特征分析的主要方法是边缘提取,能够用于路面图像裂缝边缘提取的方法有 Roberts 算子、

Prewitt 算子、Sobel 算子、Canny 算子等^[2-3]。其中, Sobel 边缘检测算子考虑了像素位置对检测效果的影响,并将这种影响以加权的形式表现出来,这在一定程度上降低了边缘的模糊程度,因而被广泛研究。本文也采用 Sobel 边缘检测算法。不同的是在原来算法的基础上加入可变分母的差分运算,提高检测准确性和抗干扰能力。并根据硬件资源和处理特点优化程序,以减少由于图像分析中增加方向而导致的计算量大和实时性差等问题。

2 路面裂缝的图像分析

整个路面裂缝图像分析装置由三个部分组成:图像采集、图像处理、图像显示。

图像处理的运算量较大,且要确保路面裂缝检测实时性,所以具体实现中选择数据处理性能强大的 FPGA,其能够将一个复杂而又庞大的数据处理任务分割成相对于整体而言较为简单的子任务,并且在并行的流水线上同时进行处理^[4],这样就可以降低整个数据处理的时间,从而可以保证系统处理的实时性。整个系统以 FPGA 为核心,选用 cyclone IV 系列的 EP4CE15E17C8N 芯片,该芯片能够同时 4 个能级联、具有动态配置功能的锁相环 PLL,能生成 20 个 Global clock,给本系统设计极大的提供了灵活性。系统通过型号为 OV7725 的 cmos 图像传感器进行路面信息的图像采集,采用 I²C(inter integrated circuit)总线配置方式对 cmos 图像传感器及 EEPROM 进行参数设置,由于系统采用的是 24 MHz 的外部时钟晶振,而 cmos 图像传感器工作时钟是 25 MHz,所以需将外部输入时钟通过锁相环 PLL 进行倍频,将全局时钟设为 100 MHz,选择输入时钟设定为 25MHz。对获取的路面图像进行图像处理(灰度中值滤波处理,改进的 Sobel 边缘检测,形态学膨胀),事前将固件烧写进 EEPROM,通过 USB 控制处理芯片(CY7C68013A-56PVXC 芯片)将经过处理后的图像传输至 PC 上位机^[5],其流程实现在硬件上的系统框图如图 1 所示。

3 Sobel 算子及其改进

3.1 Sobel 算子

Sobel 边缘检测算法被广泛的运用在计算机视觉识别领域^[6],其算法是对获取的图像的像素平滑处理后进行横向和纵向的 3×3 矩阵卷积即可得到横向和纵向的差分近似值,假设 A 代表获取平滑滤波处理后的图像, G_x, G_y 表示经过纵向和横向边缘

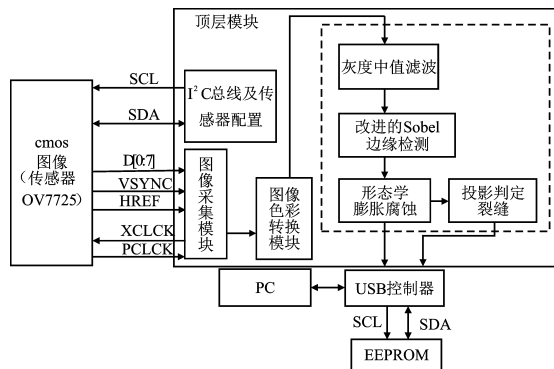


图 1 硬件系统的实现框图

检测的图像,其定义如下:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \cdot A$$

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

获取的图像的梯度值的近似值可以用下面的公式计算而来:

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

然而实际使用时,为了提高效率,直接使用求绝对值取代开平方根,如式(3)所示。

$$|G| = |G_x| + |G_y| \quad (3)$$

同时梯度方向由 $\arctan(D_x/D_y)$ 所决定^[7]。

3.2 改进的 Sobel 算子

传统的 Sobel 边缘检测算法只对横向和纵向作卷积运算,因此对于一些纹理比较复杂的图像可能边缘检测效果不是那么明显,尤其是对路面这样噪声较多的图像,根据沥青路面的高噪声的情况下,对传统的 Sobel 边缘检测算法进行改进,加入抗噪能力更强的可变分母差分算法^[8],用 $f(i, j)$ 表示图像中的像素点, D_x, D_y 分别表示水平和垂直方向的像素差分,其计算方法如下:

$$\begin{cases} D_{x1} = f(i+1, j-1) + 2 \times f(i+1, j) + f(i+1, j+1) \\ D_{x2} = f(i-1, j-1) + 2 \times f(i-1, j) + f(i-1, j+1) \\ D_{y1} = f(i-1, j+1) + 2 \times f(i, j+1) + f(i+1, j+1) \\ D_{y2} = f(i-1, j-1) + 2 \times f(i, j-1) + f(i+1, j-1) \\ D_x = \frac{D_{x1} - D_{x2}}{D_{x1} + D_{x2}} \\ D_y = \frac{D_{y1} - D_{y2}}{D_{y1} + D_{y2}} \end{cases} \quad (4)$$

$$D = 255 \times \sqrt{D_x^2 + D_y^2} \quad (5)$$

上述改进算法的理论基础是,只有当图像中像

素点 $f(i,j)$ 相邻的像素点的像素值的差值满足设定的阈值标准,计算得到的 D 值才可以更新为原图边缘点的像素值.

4 图像处理模块设计及 FPGA 实现

图像处理部分主要包括灰度中值滤波模块、改进 Sobel 的边缘检测模块、形态学膨胀模块.

4.1 灰度中值滤波模块

中值滤波是一种空域滤波技术,在不影响图像边缘信息保留的同时,使之不被模糊,让周围的像素值接近的真实值,还能够有效地过滤掉孤立的噪声点,因此被广泛地运用在图像降噪处理中.灰度中值滤波模块是由图像窗口提取模块和排序模块组成.

4.1.1 3×3 的窗口提取模板

本设计方案选择 3×3 的窗口提取模板,窗口提取模块可以通过 2 个或 3 个 RAM 的存储、2 个或 3 个 FIFO 的存储、2 行或 3 行的 Shift-RAM 的移位寄存来实现,本设计方案选择最为方便的 2 行 Shift-RAM 的移位寄存来实现^[9],并根据 OV7725 的 cmos 传感器获取图像的大小定义数据宽度、移位的行数、每行的深度.本文选择 8 bit 的数据宽度,每行 640 个数据,同时移位寄存 2 行.其硬件实现框图如图 2 所示.

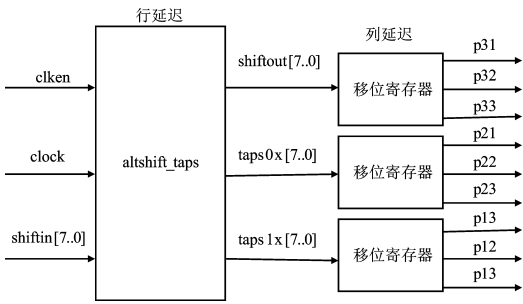


图 2 3×3 的窗口提取模板实现框图

4.1.2 排序模块

为了减少计算的次数,降低 FPGA 内部资源的使用,因此排序模块中的重点就是如何实现快速求出 9 个像素的中值,本设计方案充分利用 FPGA 的并行设计和流水线工作特性,只需使用 3 个时钟,7 个比较器,将 7 个比较器分为 3 轮,前两轮分别将 3 个比较器并行工作,第三轮包含 1 个比较器.第一轮是将 9 个像素分为 3 组分别进行比较,3 个比较器均输出最大值、中值、最小值;第二轮是将前一轮的 3 组最大值、中值、最小值分别进行比较,最大值比较的输出最小值,中值比较的输出中值,最小值比较

的输出最大值;第三轮将第二轮输出的三个值进行比较输出中值^[10],其模块的实现流程图如图 3 所示.

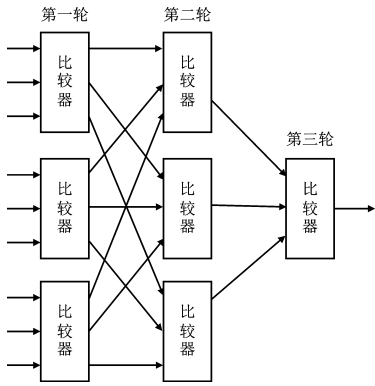


图 3 实现中值提取模块的流程图

4.2 改进的 Sobel 边缘检测模块

为了更加精确地获取边缘,所以就需要进行相应复杂一点的运算,硬件实现时就会对 FPGA 提出更高的数据运算能力,需要发挥并行设计和流水线的特性,从而达到系统实时性的要求.

4.2.1 梯度值的计算模块

文中使用 2 条行缓冲器来获取 3×3 的像素矩阵,对经过灰度平滑后的图像的像素值的通过加法器、乘法器、减法器、除法器、求平方根的操作来实现整个运算,最终输出是经过改进后的 Sobel 算子求得的梯度值并且用来取代原 3×3 像素矩阵的中心像素值.

4.2.2 运算的实现

在硬件中实现乘法、除法和平方根是比较繁琐且占据资源较大,简单的乘除法可以通过直接运用运算符除号进行或者移位,然而复杂的乘除法就通过在参数可设置模块库(LMP)中调用 IP 核简便地实现,本系统乘法采用向右移位的方式实现,除法采用调用 IP 核实现;平方根一般采用取绝对值的方法来取代平方根,但是这个运算在 FPGA 实现中,可只需设置输入根数的位宽就可以更加准确地计算出梯度值,根据系统设计要求将 IP 核的输入设置成相应参数即可.

4.2.3 阈值的比较模块

根据原先设定好的阈值,判定并进行边缘的检测,实际上就是简单的判定平方根 IP 核输出的 q 值的大小,根据灰度值性质和裂缝的特征,因此选择大于阈值,视为有效,赋 1;反之则赋 0,这样就可以输出一个二值化的图像以方便后续的图像处理.

4.3 形态学膨胀腐蚀模块

在边缘检测的实现工程中,由于光线不均匀的照射、传感器的感光问题、沥青路面的噪声等原因,会造成边缘间断,使路面图像所提取的裂缝边缘可能不闭合或者缺失,所以使用连接的算法将间断或者缺失的边缘部分填充起来,从而获得较为完整的闭合连接的裂缝图像.形态学膨胀算法被广泛用来填补有效目标区域的空白,裂缝的连接也属于膨胀算法的应用,膨胀算法的工作原理是将获取的二值化图像中像素值为 1 的像素点作为有效目标点,沿着该目标点的 8 个方向进行膨胀.

在 FPGA 中使用 Verilog HDL 语言来实现膨胀运算,是将 3×3 窗口所选取的二值化后的像素值进行“或”的运算,通过 2 个时钟来完成,腐蚀算法的工作原理则与膨胀算法相反,在 FPGA 中实现只需将膨胀算法中的“或”运算改成“并”运算即可.

4.4 投影判断裂缝模块

获取二值化的图像信息后就需要对该图像进行是否存在裂缝的判断,通过调用 IP 核中的双口 RAM 来实现二值化图像的垂直和水平投影,这样极大的降低了 FPGA 内部资源的占用,并根据事前设定好的阈值进行判定,当垂直投影大于阈值并且

水平投影小于阈值则该裂缝是纵向的;当垂直投影小于阈值并且水平投影大于阈值则该裂缝是横向的;当垂直投影大于阈值并且水平投影大于阈值则该裂缝是龟裂的.本文选最为常见的横向裂缝作为实验判定,考虑到 FPGA 内部资源的有限,以及数据处理的实时性,通过降采样的方法将图像进行缩小成像素为 128×128 的图像,计数器 1 生成写地址,计数器 2 生成行地址,计数器生 3 成列地址,计数器 4 是为了列数据累加的次数,满 128 次置 0,比较器是为了累加后的 7 位数据与设定好的阈值 64 进行比较,当大于阈值则输出判定裂缝的使能信号.双口 RAM 的读写控制实现裂缝识别判定的模块如图 4 所示.图 5(a)为按列读取地址生成器的仿真图,图 5(b)为按行读取地址生成器的仿真图.

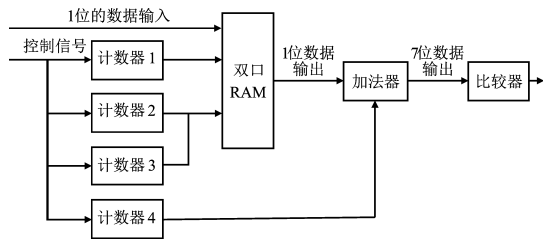
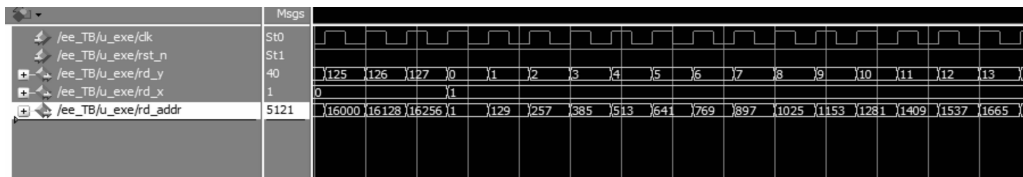


图 4 双口 RAM 的读写控制实现裂缝识别判定



(a) 按列读取地址生成器的仿真图



(b) 按行读取地址生成器的仿真图

图 5 仿真图

5 实验结果与分析

通过 ModelSim-Altera 仿真软件对图像处理部分(灰度中值滤波,改进的 Sobel 边缘检测算子,形态学膨胀和腐蚀算法)进行功能性仿真,通过 ModelSim-Altera 仿真软件对图像处理部分(灰度中值滤波,改进的 Sobel 边缘检测算子,形态学膨胀和腐蚀算法)进行功能性仿真,验证了其算法的可行性,并且完成中值滤波耗时 1.200 ms,改进的边缘检测耗时 1.208 ms.膨胀算法耗时 1.278 ms,腐蚀算法耗

时 1.126 ms,表明本系统的实时性较好,从而可以在路面裂缝检测中有更好的实用价值.

为了验证本文提出的改进算法的实际有效性,以 VIP-Board 视频图像处理开发板为平台,分别将传统的 Sobel 算法和改进的 Sobel 算法的实现边缘检测效果进行比对.图 6(a)是获取的路面裂缝原始图像,图 6(b)是传统 Sobel 边缘检测图像,图 6(c)是改进后的 Sobel 边缘检测图像,图 6(d)是改进后的 Sobel 边缘检测图像经过形态学三次膨胀两次腐蚀后的图像,通过比对发现,改进的 Sobel 算法实现

的边缘检测效果要明显优于传统的,尤其是在抑制噪声的处理方面且传统的 Sobel 算法伪边缘较大.

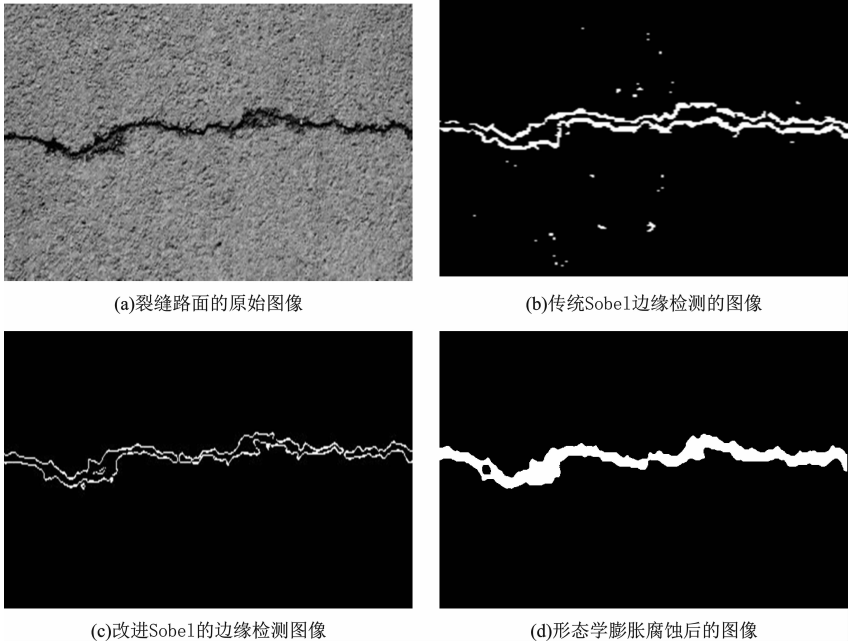


图 6 效果对比

表 1 实验结果			%
技术指标	横向	纵向	龟裂
识别率	96	95	90
误识率	4	5	10
拒识率	0	0	0

6 结束语

根据现实路面裂缝的特殊性,传统的 Sobel 算子提取到的信息噪声较多可能会造成在其裂缝的识别时候出现误判,所以在传统的算子的基础上提出改进,加入可变分母的差分运算,分别通过仿真和实验证明,本文中提出的算法克服了传统 Sobel 算子存在检测出现边缘较粗且抑制噪声效果差等缺陷,从而能够更加精准地检测识别出路面图像中的裂缝.

参考文献:

[1] 周林. 基于图像处理的路面裂缝检测系统设计与研究[D]. 太原:太原理工大学,2013:13-14.

[2] 郝爱枝. 沥青路面裂缝检测系统研究[D]. 太原:太原理工大学,2014:7-8.

[3] 邱兴汉. 基于图像分割的路面裂缝检测与识别研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012:11-13.

[4] 杨新华,寇为刚. 基于FPGA的Sobel算子的图像边缘检测算法[J]. 仪表技术与传感器,2013,34(1):

表 1 所示的是通过选取横向、纵向、龟裂各 100 张裂缝图像实验结果.

102-104.

[5] 赵健博. 基于 FPGA 和 USB3.0 的高速 CMOS 图像数据采集系统设计[D]. 长春:吉林大学,2015:27-30.

[6] 张建军,罗静. 基于改进 Sobel 算子的表面裂纹边缘检测算法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2011,34(6):845-848.

[7] 曹杨,苏丽娜,沈琪,等. 一种改进的 Sobel 边缘检测算法的设计及其 FPGA 实现[J]. 微电子学与计算机,2012,29(10):124-127.

[8] 何春华,张雪飞,胡迎春. 基于改进 Sobel 算子的边缘检测算法的研究[J]. 光学技术,2012,38(3):332-337.

[9] Donald GBailey, Donald GBailey. Design for embedded image processing on FPGAs [M]. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd,2011:214-218.

[10] 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.

作者简介:

李 鹏 男,(1966-),博士,副教授. 研究方向为声学测量与成像、信号与信息处理、北斗应用技术.

杜 敏(通讯作者) 男,(1990-),硕士研究生. 研究方向为图像处理、视觉定位. E-mail:dm3269956@qq.com.

赵芬芬 女,(1990-),硕士研究生. 研究方向为图像处理.