

一种改进的 Sobel 边缘检测算法的设计及其 FPGA 实现

曹 杨, 苏丽娜, 沈 琪, 顾晓峰

(轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江南大学电子工程系, 江苏 无锡 214122)

摘 要: 为了快速得到边缘更清晰、敏感度更高的实时边缘图像数据, 提出了一种改进的 Sobel 边缘检测算法. 对原始图像的边缘进行平滑滤波后, 利用 2 个 3×3 模板对选定的二维图像中同样大小区域内的数据进行卷积, 合并水平及垂直方向的导数得到该区域的梯度值, 再通过添加的梯度方向模块对该区域进行 4 个方向的判断以帮助确定边缘, 最后通过非极大值抑制及二值化处理确定图像边缘. 将改进后的 Sobel 边缘检测算法在 FPGA 上进行了实现并证明了其有效性.

关键词: 边缘检测; Sobel 算法; 梯度方向; 现场可编程门阵列

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)10-0124-04

Design and Realization of Improved Sobel Edge Detection Algorithm Based on FPGA

CAO Yang, SU Li-na, SHEN Qi, GU Xiao-feng

(Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry (Ministry of Education),
Department of Electronic Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: An improved Sobel edge detection algorithm has been proposed to obtain the real-time edge of image data quickly with sharper edge and higher sensitivity. After applying the smoothing filter to the edge of the original image, two 3×3 templates are used to perform convolution on the data of the same size region in the selected two-dimensional image. The gradient values of this region can be obtained by combining the horizontal and vertical direction derivatives. Then, the gradient direction module is used to help judging the four directions of this region and defining the edge. The image edge is finally determined by non-maxima suppression and binarization. The improved Sobel edge detection algorithm is realized based on the FPGA and proved to be effective.

Key words: edge detection; Sobel algorithm; gradient direction; FPGA

1 引言

图像边缘是图像的最基本特征之一, 也是观察和识别图像的重要依据. 在利用计算机进行图像处理时, 图像边缘检测技术占有重要的地位. 良好的边缘不仅能大大减少所要处理的信息, 还能保留图像中主要形状的信息, 在实时图像处理中, 运用 Sobel 等边缘检测算法进行边缘检测时, 通用的软件往往无法满足快速处理的要求, 因此, 对大量数据的处理

可采用现场可编程门阵列(FPGA)芯片. 本文将基于优化的 Sobel 边缘检测算法, 探索利用并行硬件结构实现图像的实时边缘提取.

2 传统 Sobel 边缘检测算法及改进

2.1 图像卷积及 Sobel 模板

边缘检测算法多以原始图像的灰度值为基础, 通过检测每个像素在某领域内灰度值的变化, 利用边缘一阶导数来检测边缘, 如经典的 Sobel 边缘检

收稿日期: 2012-01-16; **修回日期:** 2012-03-31

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(JUSRP20914, JUDCF10031); 江苏省普通高校研究生创新计划(CXLX11-0486)

测算法^[1]. 基于一阶导数的边缘检测算法是目前应用最广泛的边缘检测方法.

将原始图像进行平滑滤波得到平滑图像 $G(x, y)$, 其梯度值可利用 2 个 3×3 模板, 对选定的二维图像中同样大小区域内的数据进行卷积而得到^[2]. 将梯度值与设定的阈值进行比较, 若所得结果大于设定的阈值, 此二维图像即处于边缘, 将 3×3 图像矩阵中央像素的灰度值用 255 表示; 若所得结果小于设定的阈值, 将 3×3 图像矩阵中央像素的灰度值用 0 表示, 即梯度值的非极大值抑制.

上述所用的 2 个 3×3 模板分别对应水平和垂直两个方向, 用来提取水平和垂直方向的边缘. G_x 、 G_y 分别表示水平、垂直方向边缘提取算子, 由计算可得:

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

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

将选定区域内的数据分别与 G_x 、 G_y 卷积可得梯度值 D_x 、 D_y , 则该选定区域的梯度值 D 为

$$|D| = \sqrt{D_x^2 + D_y^2} \quad (3)$$

通常用 $|D| = |D_x| + |D_y|$ 表示. 同时, 梯度方向由 $\arctan(D_y/D_x)$ 决定.

2.2 图像非极大值抑制及二值化处理

考察一个大小为 1024×768 像素的原始图像, 经过 3×3 模板卷积处理后, 成为 1021×765 的梯度的图像. 虽然图像的边缘信息增强了, 但由于传统的 Sobel 边缘检测算法处理的边缘精度较差, 得到的边缘仍然较粗. 为得到更高精度的边缘, 减小后续信息处理的复杂度和强度, 可对卷积后的梯度图像进行非极大值抑制及二值化处理^[3].

非极大值抑制 (Non-Maximum Supression, NMS) 是将当前像素的梯度值同沿其梯度方向相邻的 2 个梯度值进行比较, 如果比相邻的梯度值小, 则此像素点被判断为非边缘点; 反之, 则判断为边缘点^[4].

最终的边缘二值图像 $B(x, y)$ 可通过以下方法得到: 对于梯度图像上任意像素点 $G(x, y)$, 如果梯度值大于设定的阈值 (本文定为 60), 且该点是局部变化的最大点, 则将此点定义为图像边缘点, 否则, 视作非边缘点^[5].

3 基于 FPGA 的实现流程及模块设计

传统的 Sobel 边缘提取法是将原始像素经过平滑滤波、梯度计算及二值化等处理后确定输出边缘像素的. 本文增加了梯度方向模块, 对边缘像素的方向作进一步处理以帮助确定边缘. 由前文分析可知, Sobel 边缘检测方法的根本在于对每个像素进行 8 邻域的模板卷积, 进而对卷积后的梯度图像进行非极大值抑制运算. 由于涉及的运算数据量很大, 一般运算器的顺序执行或通用软件都很难满足实时性要求, 而 FPGA 的高并行性有助于解决实时性的问题, 因此, 可考虑基于 FPGA 实现 Sobel 边缘检测算法. FPGA 的硬件处理模式、流水线数据处理技术及并行信息处理等优势, 能显著提高图像的处理速度^[6].

本工作所用硬件为 Digilent 发布的 FPGA 平台 ATLYS-Spartan-6 XC6SLX345 板, 软件为 Xilinx ISE 10.1. 硬件共用了 888 个 slice, slice 组成 FPGA 中的基本单元 CLB (Configurable Logic Block, 可配置逻辑块), 以及 2 420 个 LUTs (Look Up Table, 显示查找表), 可在高达 89 MHz 频率下工作. 每经过一个时钟周期检测一个边缘像素; 设计中采用流水结构, 每阶段的数据都存储在缓存器中.

3.1 实现流程

在 FPGA 上实现改进的实时 Sobel 图像边缘检测的流程如下:

(1) 从数字摄像头获取 8 bit 灰度图像数据流, 经过 4 个行缓冲器, 流水得到 5×3 大小的窗口;

(2) 由 5×3 窗口并行输出出的数据通过梯度模块 (用于该窗口的梯度值计算) 及梯度方向模块处理, 得到带比较位的 10 bit $D(x, y)$, 同时根据行信号 HREF、场信号 VSYNC 及像素时钟信号确定 $D(x, y)$ 的有效时钟信号及区间;

(3) 由上一步生成的梯度值及梯度方向数据, 流水经过 2 个行缓冲器, 形成 3×3 大小的窗口;

(4) 由上一步并行输出的数据流经过非极大值抑制及二值化模块的处理, 判断窗口中心的像素是否为边缘, 然后生成梯度二值图像 $B(x, y)$. 由场信号 VSYNC、 $G(x, y)$ 的有效时钟信号及区间确定 $B(x, y)$ 的有效时钟信号及区间;

(5) 一次图像处理完成, 返回进行下一次的图像处理.

图 1 中给出了上述一次完整的图像处理流程.

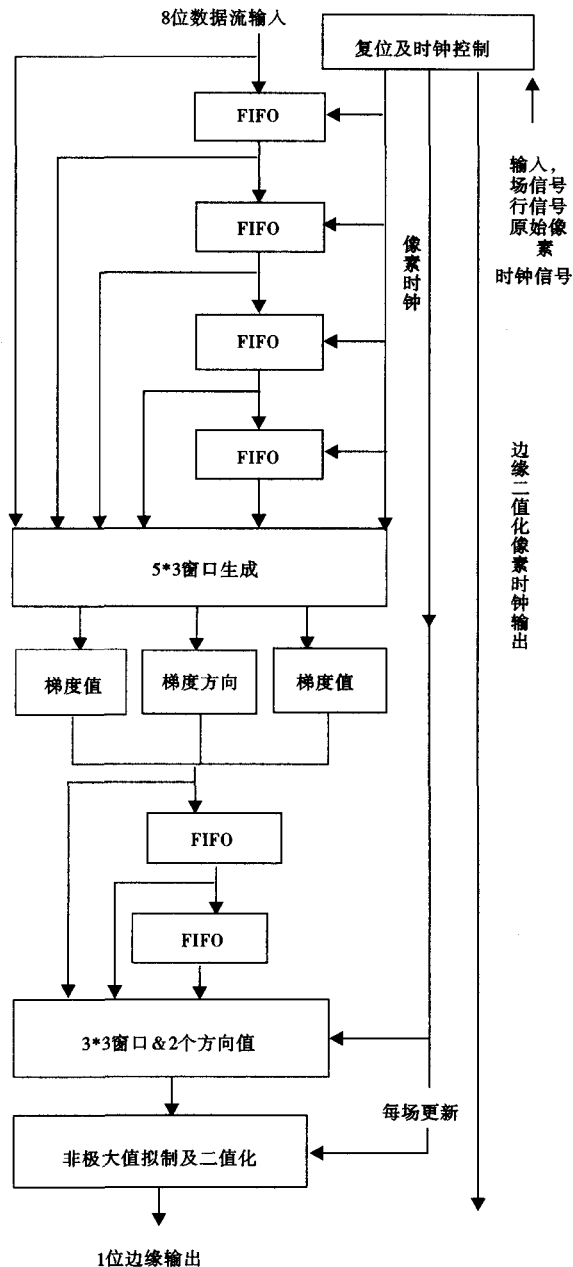


图1 改进的 Sobel 边缘提取算法流程

3.2 模块设计

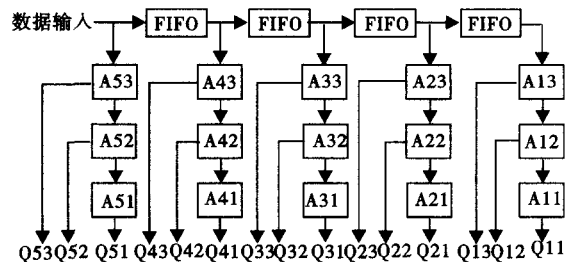
设计的模块主要包括时钟控制及复位模块、FIFO(先进先出)及窗口生成模块、梯度方向模块、非极大值抑制及二值化模块。

利用 Dalsa 公司的 Spyder2 系列黑白 CCD 线阵相机采集图像。Spyder2 系列相机具有体积紧凑、快速、高效等特性,摄像机在感光敏感的同时,仍然能够提供高质量的图像输出。本工作中采用的相机型号为 S2-1x-02k40,图像信号分辨率为 1024,输出为 8 bit Base Camera Link(Camera Link 是专门为数字摄像机的数据传输提出的接口标准,Base

Camera Link 是 Camera Link 标准模式中的一种,为基本配置模式)。相机信号包括串行通信信号、相机控制信号和图像数据信号三个部分。串行通信信号用于在标准的 RS-232 替代异步串口时,保证主控机可对相机曝光时间、分辨率等参数进行调节。相机控制信号部分用了 4 对差分信号对相机进行控制。图像数据信号直接连接在 FPGA 上,并由 FPGA 来控制采集时序。

复位及时钟控制模块中的逻辑实现如下:12 bit 的数据包括 1 个 8 bit 的数据端口和 4 个视频控制信号,分别为 FVAL(帧有效)、LVAL(行有效)、DVAL(数据有效)和 SPARE(未使用)。设计中以场为处理周期单位,除了阈值以外,所有寄存器都会在场开始时清零。生成窗口的过程中,经过每个像素时钟时都会流水生成窗口,但并非每个都有效。以 3×3 为例,若使用 8 邻域的模板进行卷积,只有行数大于 2 且行内像素数大于 2 的点才是有效窗口。

以 5×3 像素矩阵为例,为实现像素矩阵窗口的并行结构,需要 4 个先进先出缓存器(FIFO)和 9 个 8 bit 寄存器,形成 FIFO 及窗口生成模块。由于使用 FPGA 内部逻辑资源构成 FIFO 将占用大量内部逻辑资源,因此本设计选用 FPGA 内部的 2 420 个 RAM 实现。FIFO 通过 2 个指针来控制数据读写操作,读时钟与写时钟是分离的。图 2 中给出了 5×3 像素矩阵结构。

图2 5×3 像素矩阵结构

按前文所述,利用算子 G_x 、 G_y 分别得到水平方向及垂直方向的梯度值 D_x 、 D_y ,由式(3)可得到梯度值 D ,即梯度模块的逻辑,该逻辑用 $D = \text{abs}(D_x) + \text{abs}(D_y)$ 实现。为避免数据溢出, D_x 、 D_y 为 11 bit 有符号数,其绝对值算法如下:若最高位为 1,则结果为原数取反再加 1,舍掉有符号位所得;否则直接将最高位舍去^[7]。

得到梯度值后,考虑到图像的边缘存在不同的方向,因此增加了一个梯度方向模块。本工作中它主要检测边缘像素矩阵的水平、垂直及对角方向,即 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个方向^[8]。方向判断的算法按如

下方法实现:以检测垂直方向为例,在确定绝对值 abs_dx, abs_dy 后,首先将 abs_dx 右移一位与 abs_dx 左移一位所得值求和,记作 x 方向的变化值 Δx ,再用 abs_dy 减去 Δx 所得记作 y 方向的变化值 d_y_branch ,最后对 y 方向变化值的最高位 $d_y_branch[11]$ 进行判断,若 $d_y_branch[11]=1$,再计算 dx, dy 最高位 $dx[10], dy[10]$ 的同位异或值,结果为 1 时,表示像素的梯度方向值为 135° ,否则为 45° ;若 $d_y_branch[11]=0$,则像素的梯度方向值为 90° 。同理进行水平方向检测,若 $d_x_branch[11]=1$,计算 $dx[10]$ 与 $dy[10]$ 同位异或值,结果为 1 时,像素的梯度方向值为 135° ,否则为 45° ,若 $d_x_branch[11]=0$,像素的梯度方向值为 90° ,其余情况下像素的梯度方向值均为 0° 。

非极大值抑制及二值化模块主要判断对应像素是否为边缘,如果是,则 $B(x, y)$ 为 1,否则为 0。

4 仿真结果及分析

通过引进梯度值方向判断,改进了传统 Sobel 算法,可得到边缘更清晰的边缘图像。图 3 中给出了利用传统算法及改进算法在 FPGA 上实现的仿真结果。结果比较表明,利用传统的 Sobel 算法产生的图像边缘较粗,而利用改进的 Sobel 算法产生的图像边缘较细且定位准确,提高了边缘检测的精度。

相比于传统的软件模拟,本文采用 FPGA 实现改进的 Sobel 边缘检测算法速度更快,其主要原因如下:

(1) 采用并行结构中的流水线结构,从硬件上实现了图像处理速度的提高;

(2) 采用了通用异步接收/发送(UART)接口,在计算机内部进行并行数据处理,CPU 先把准备写入串行设备的数据放到 UART 的寄存器(临时内存块)中,再通过 FIFO 传送到串行设备,保证了数据的准确性;

(3) 采用基于 Xilinx MIG 3.61 的 DDR2 存储接口,运行速率达到每引脚 667 Mb/s 或更高,使 FPGA 的实现成为一个既快速又流畅的过程。

可见,采用以上结构有效地提高了硬件处理速度,减少了资源占用,克服了软件模拟速度较慢的问题,满足了系统实时性的要求。

5 结束语

在传统 Sobel 边缘检测算法的基础上,通过增加梯度方向检测模块,提出了一种改进的 Sobel



(a) 原始图像



(b) 传统 Sobel 图像



(c) 改进 Sobel 图像

图 3 传统 Sobel 图像和改进 Sobel 图像的对比

边缘检测算法。基于 FPGA 对该算法进行了验证,

(下转第 132 页)

性和应对状态突变的鲁棒性.

5 结束语

本文将 SCKF-STF 引入到 IMM 算法中, 设计了 IMM-SCKF-STF 滤波算法. 新算法有效克服了传统非线性滤波器精度不高、稳定性差的不足. 同时, “强跟踪滤波”思想的引入也使得新算法具备应对目标状态突变的能力, 更加符合机动目标跟踪的场景. 仿真结果表明, 与 IMM-UKF 相比, 本文的算法在提高估计精度的同时, 还具备处理突发机动的性能, 具有较好的实际应用价值. 本文进一步的研究工作是将结果推广到多传感器机动目标和多传感器多机动目标跟踪算法的设计与性能分析中.

参考文献:

- [1] BLOM H A, BAR-SHALOM Y. The interacting multiple model algorithm for systems with markovian switching coefficient[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1988, 33(8): 780-783.
- [2] 齐文斌, 张玮. 基于高斯-厄米特粒子漂移的机动目标跟踪算法[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(10): 61-64.
- [3] 郝晶, 李卫忠, 白剑林. 一种多速率的交互式多模型粒子滤波算法[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(2): 163-166.
- [4] Julier S J, Uhlmann J K. A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems[C] // The 11th Int

Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls, Orlando, FLorida : IEEE, 1997: 182-193.

- [5] 赵域, 张剑云, 毛云祥. 基于 IMM-UKF 的主/被动雷达融合算法[J]. 电子信息对抗技术, 2011, 26(4): 21-25.
- [6] Ienkar A, Simon H. Cubature Kalman Filters[J]. IEEE transactions on automatic control, 2009, 54(6): 1254-1269.
- [7] Ge Q B, Li W B, Wen C L. SCKF-STF-CN: a universal nonlinear filter for maneuver target tracking [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE C (Computers & Electronics), 2011, 12(8): 678-686.
- [8] Zhou D H, Ye Y Z. Modern fault diagnosis and fault-tolerant control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.

作者简介:

李国伟 男, (1975—), 硕士, 讲师. 研究方向为无线网络和目标跟踪.

董跃钧 男, (1978—), 硕士, 讲师. 研究方向为网络安全与无线网络.

汤显峰 男, (1981—), 硕士, 助理工程师. 研究方向为信息融合与目标跟踪.

葛泉波 男, (1980—), 博士后, 副教授, 硕士生导师. 研究方向为信息融合、目标跟踪、海上智能交通系统和智能消防系统.

(上接第 127 页)

结果表明, 边缘检测精度和处理速度均获得了提高. 在上述改进的基础上, 还可扩展到彩色图像的边缘检测中, 选择合适的色彩空间来检测彩色图像, 以更好地适应当前图像处理的发展.

参考文献:

- [1] 郎瑶. 一种改进的 Sobel 边缘检测算子[J]. 广西轻工业, 2011, 27(5): 59-60.
- [2] 张春雪, 陈秀宏. 基于双阈值非线性导数的边缘检测算子[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(7): 113-116.
- [3] 付光远. 一种基于 Sobel 分解算子的图像边缘检测并行算法[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(9): 132-134.
- [4] 张丰, 收王飞, 崔凤奎, 等. 一种基于梯度的亚像素边缘检测算法[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(3): 108-114.
- [5] 梁沂, 彭刚, 薛明华, 等. 便携式吸波涂料吸波性能测

试系统的研究[J]. 微波学报, 2005, 21(2): 60-62.

- [6] Abbasi TA, Abbasi MU. A novel FPGA-based architecture for sobel edge detection operator[J]. International Journal of Electronics, 2007, 94(9): 889-896.
- [7] 冯辉宗, 陈叶, 徐洋, 等. 基于 FPGA 的实时图像采集与 Sobel 边缘检测[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(6): 116-118.
- [8] Wenshuo Gao, Xiaoguang Zhang, Lei Yang, et al. An improved sobel edge detection[J]. Computer Science and Information Technology, 2010(7): 67-71.

作者简介:

曹杨 女, (1989—), 硕士研究生. 研究方向为信号及信息处理.

顾晓峰 男, (1971—), 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向为电子系统设计.