

抗噪型 Sobel 边缘检测算法及其硬件加速设计

唐永鹤, 胡谋法, 卢焕章

(国防科学技术大学 ATR 实验室, 长沙 410073)

摘要: 根据序列图像实时边缘检测应用需求, 提出一种抗噪型 Sobel 边缘检测算法, 并对其进行硬件加速设计。用分离中值滤波代替二维中值滤波, 改进梯度幅值和方向计算优化算法结构。通过采用改进分离中值滤波硬件结构、缓存中间数据以避免重复计算、并行计算梯度幅值和方向等措施提高算法实时性, 减少硬件资源消耗。ModelSim 仿真结果和 ISE 综合报告显示, 该硬件加速设计使得处理速度较快, 硬件资源消耗较少, 且该算法具有较好的抗噪性和边缘检测特性。

关键词: 边缘检测; Sobel 算子; 分离中值滤波; 硬件加速; 实时图像处理

Anti-noise Sobel Edge Detection Algorithm and Its Hardware-accelerated Design

TANG Yong-he, HU Mou-fa, LU Huan-zhang

(ATR Lab, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

【Abstract】 Aiming at the application requirement of real-time edge detection in image sequences, an anti-noise Sobel edge detection algorithm is proposed, and its hardware-accelerated design is developed. The algorithm structure is optimized by replacing two-dimensional median filter with separate median filter and improving the computation of the magnitude and orientation of the gradient. Several measures such as improving the hardware architecture of separate median filter, storing the temporary data to avoid computing repeatedly and calculating the magnitude and orientation of the gradient in parallel are taken to improve the real-time performance and reduce the hardware resources cost. Simulation results of ModeSim and the synthesis report of ISE illuminate that the hardware-accelerated can accelerate the speed and reduce the hardware resources consumption. The proposed algorithm performs better in noise immunity and edge detection performance.

【Key words】 edge detection; Sobel operator; separate median filtering; hardware-accelerated; real-time image processing

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.24.068

1 概述

序列图像实时边缘检测是图像处理中的一个重要研究课题, 广泛应用于目标检测与跟踪、实时视频监控等领域中。在这些应用中, 边缘检测的准确性、实时性和抗噪性是衡量算法性能的重要指标。

传统的边缘检测算法用边缘检测算子求解图像的梯度, 并选择合适的阈值提取边缘, 如 Roberts、Sobel 和 Canny 等, 其中, Roberts 和 Sobel 通过对图像的每一点计算邻域灰度加权提取边缘, 算法简单, 但抗噪性能较差; Canny 利用高斯函数对原图像作平滑处理, 运算量加大。基本的形态学边缘检测算法运算量小, 实时性强, 但抗噪性能较差, 抗噪型形态学边缘检测算法^[1-3]抗噪性能较好, 但运算量增加, 实时性能降低。因此, 在保持边缘检测准确性的同时, 提高其抗噪性和实时性是边缘检测算法的一个重要研究方向。

中值滤波可以有效滤除脉冲噪声, 对高斯噪声也有一定的滤波效果, 能够很好地保持边缘特性。Sobel 算子计算简单, 对噪声有一定的平滑作用, 能够提供较为准确的边缘方向信息。本文将中值滤波和 Sobel 算子相结合, 提出一种抗噪型 Sobel 边缘检测算法, 并对其进行硬件加速设计。

2 抗噪型 Sobel 算法及其性能分析

中值滤波虽去噪性能较好, 但其运算量随模板的增大而大幅增加。文献[4]提出分离中值滤波算法, 先对图像进行一维行中值滤波, 然后对行中值滤波结果进行一维列中值滤

波, 其性能与二维中值滤波基本相当, 而计算量大幅降低, 且易于硬件实现, 故本文采用分离中值滤波代替二维中值滤波作去噪处理。

Sobel 算子的模板如图 1 所示, 设模板中心点为 (x, y) , 其灰度值为 $f(x, y)$, 令:

$$A_1(x, y) = f(x-1, y-1) + 2f(x, y-1) + f(x+1, y-1)$$

$$A_2(x, y) = f(x-1, y+1) + 2f(x, y+1) + f(x+1, y+1)$$

$$B_1(x, y) = f(x+1, y-1) - f(x-1, y-1)$$

$$B_2(x, y) = f(x+1, y) - f(x-1, y)$$

$$B_3(x, y) = f(x+1, y+1) - f(x-1, y+1)$$

则水平方向梯度为:

$$f_x(x, y) = A_2(x, y) - A_1(x, y)$$

垂直方向梯度为:

$$f_y(x, y) = B_1(x, y) + 2B_2(x, y) + B_3(x, y)$$

梯度幅值为:

$$S(x, y) = \sqrt{f_x(x, y)^2 + f_y(x, y)^2}$$

梯度方向为:

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{f_y(x, y)}{f_x(x, y)} \right)$$

作者简介: 唐永鹤(1983—), 男, 博士研究生, 主研方向: 图像特征提取, 图像匹配; 胡谋法, 讲师; 卢焕章, 教授、博士生导师

收稿日期: 2011-06-07 **E-mail:** tyh_983@126.com

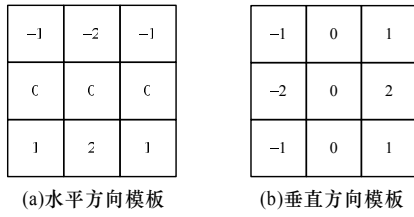


图 1 Sobel 算子模板

Sobel 虽然比较简单,但梯度幅值计算包括平方和开方运算,梯度方向计算包含反正切算子,两者均难于硬件实现,故本文对梯度幅值和方向计算进行改进,通过判断 $|f_x(x,y)|$ 和 $|f_y(x,y)|$ 的大小,按照式(1)和式(2)并行计算梯度幅值和方向,避免了平方、开方和反正切运算。

$$S(x,y) = \begin{cases} |f_x(x,y)| & |f_x(x,y)| \geq |f_y(x,y)| \\ |f_y(x,y)| & |f_x(x,y)| < |f_y(x,y)| \end{cases} \quad (1)$$

$$\theta(x,y) = \begin{cases} 0 & |f_x(x,y)| \geq |f_y(x,y)| \\ \frac{\pi}{2} & |f_x(x,y)| < |f_y(x,y)| \end{cases} \quad (2)$$

为了获取单像素宽边缘,本文将梯度幅值大于阈值 T 且沿梯度方向为极大值的像素点定义为边缘点,因此,需进行阈值比较和沿梯度方向作非极大值抑制(Non Maximum Suppression, NMS)。

具体方法是:当 $|f_x(x,y)| \geq |f_y(x,y)|$ 且 $|f_x(x,y)| > T$ 时,若 $S(x,y) > S(x-1,y)$ 且 $S(x,y) > S(x+1,y)$,则点 (x,y) 为边缘点;当 $|f_x(x,y)| < |f_y(x,y)|$ 且 $|f_y(x,y)| > T$ 时,若 $S(x,y) > S(x,y-1)$ 且 $S(x,y) > S(x,y+1)$,则点 (x,y) 为边缘点,其中阈值 T 可以根据图像的梯度幅值均值确定。因此,本文算法流程如图 2 所示。

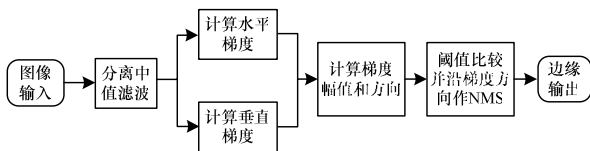


图 2 抗噪型 Sobel 边缘检测算法流程

为了验证算法的性能,将本文算法与 Sobel 算法、Canny 算法、文献[1]提出的算法进行比较,结果如图 3~图 5 所示。图 3(a)为 256×256 像素原始灰度图像(Lena 图,灰度值取值范围为 $0 \sim 1$);图 4(a)为加 $N(0,0.05)$ 的高斯噪声图像;图 5(a)为加浓度为 0.2 的脉冲噪声图像。本文算法的分离中值滤波窗口为 5×5 。

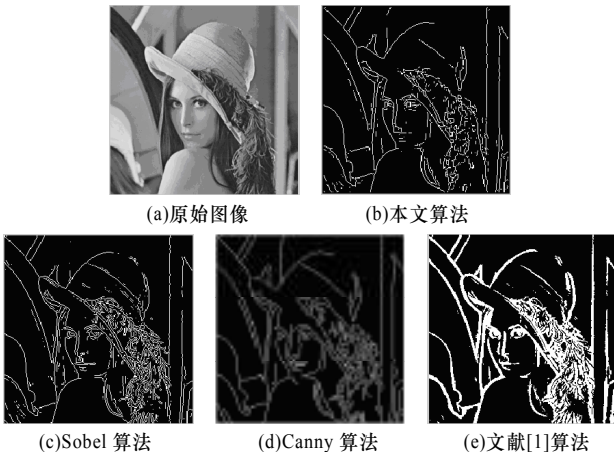
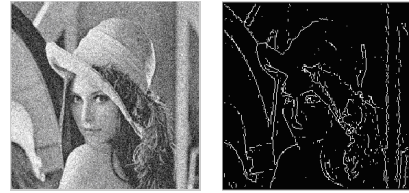


图 3 原始灰度图像边缘检测结果

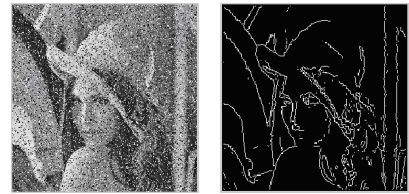


(a)高斯噪声污染图像 (b)本文算法

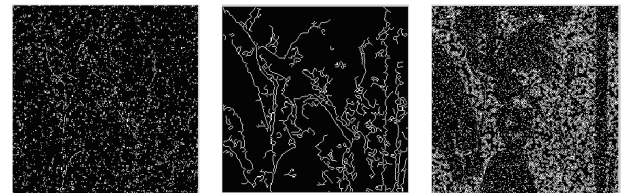


(c)Sobel 算法 (d)Canny 算法 (e)文献[1]算法

图 4 受高斯噪声污染图像边缘检测结果



(a)脉冲噪声污染图像 (b)本文算法



(c)Sobel 算法 (d)Canny 算法 (e)文献[1]算法

图 5 受脉冲噪声污染图像边缘检测结果

从图 3~图 5 可以看出,对于原始图像,4 种算法检测效果都比较好,对于受高斯噪声污染的图像,本文算法处理效果仅比 Canny 稍差,能够较好地检测边缘,对于受脉冲噪声污染的图像,本文算法处理效果最好。从整体上来看,本文算法具有较好的抗噪特性。

4 种算法的平均处理时间如表 1 所示(Matlab 仿实现,电脑配置:双核 CPU 2.66 GHz, 2.00 GB 内存)。从表 1 可以看出,本文算法虽将中值滤波和 Sobel 算子结合在一起,但其处理速度仅次于 Sobel 算法,依然较快。

表 1 处理时间比较

算法	处理时间/ms
本文算法	94.0
Sobel	15.3
Canny	114.7
文献[1]算法	1 510.0

3 硬件加速设计及性能分析

本文提出的抗噪型 Sobel 边缘检测算法虽然计算简单,速度较快,但仍难满足高速计算机视觉应用需求(每秒种处理 100 帧以上图像),设计专用的硬件电路是提高算法速度的一种有效途径。

现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)具有资源丰富、设计灵活等优点,故本文采用 FPGA 对算法进行硬件加速设计。

文献[4]提出了一种基于排序网络的分离中值滤波硬件实现方法,通过对输入数据排序提取中值,而本文旨在求解一系列数据的中值,不必对其进行排序,可以采用如图 6 所示

的硬件结构，电路只有3级延迟，共需7个比较器。因此，滤波窗口为5×5时，一个像素点的分离中值滤波只需14个比较器，而二维中值滤波需94个，基于排序网络的分离中值滤波方法需18个。

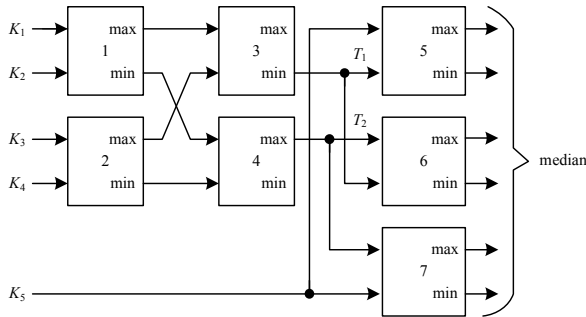


图6 改进的5输入分离中值滤波结构

计算梯度幅值和方向时，2次相邻的运算之间，模板有一部分重叠区域，其中有些运算是重复的，因此，可以通过缓存这些运算结果节省计算资源。

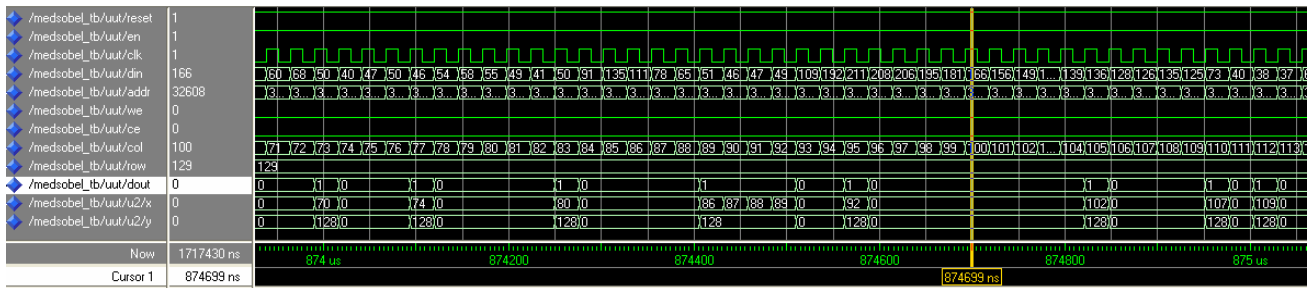


图7 ModelSim 仿真结果

测试图像和 ModelSim 仿真结果如图8所示，从图8可以看出，硬件加速设计的边缘检测性能较好。

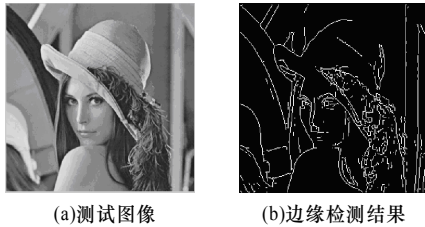


图8 测试图像及硬件设计边缘检测结果

采用 Xilinx 公司的 xc2v3000-4bg728 芯片，在 ISE 上对本文算法硬件加速设计进行综合，其资源消耗和实时性能与文献[5-6]中的硬件结构设计比较如表2所示。

表2 硬件资源消耗及实时性能

硬件结构	图像大小/像素	Slices	Brams	最大频率/MHz
本文结构(滤波窗口 3×3)	256×256	460	6	129.643
本文结构(滤波窗口 5×5)	256×256	627	8	129.643
本文结构(滤波窗口 3×3)	512×512	620	6	129.643
本文结构(滤波窗口 5×5)	512×512	831	8	129.643
文献[4]结构(7×7 模板)	512×512	685	0	58.720
文献[5]Prewitt 结构	512×512	328	32	99.499

从表2可以看出，本文硬件加速设计资源消耗较少，但其最大工作频率远大于其他2种设计。本文算法的硬件加速设计能够以129 MHz的时钟频率稳定工作，因此，处理一帧512×512像素的灰度图像最快只需2.05 ms，意味着每秒能够处理480帧这样的图像，能够满足高速计算机视觉应用

以计算点(x,y)的梯度值为例，由A₁、A₂、B₁、B₂和B₃的定义可知，A₁(x,y+2)=A₂(x,y)，B₁(x,y+1)=B₂(x,y)，B₂(x,y+1)=B₃(x,y)，因此可以缓存A₂(x,y)用于计算点(x,y+2)的梯度值，缓存B₂(x,y)和B₃(x,y)用于计算点(x,y+1)的梯度值。

由于梯度幅值和方向计算均取决于|f_x|和|f_y|的比较结果，因此只需一个比较器即可并行实现。沿梯度方向非极大值抑制是涉及梯度幅值和方向的二维邻域操作。为了避免缓存梯度幅值和方向，节省存储空间，本文采用4个FIFO缓存4行灰度图像数据，并行处理梯度幅值、方向计算和沿梯度方向非极大值抑制，从而提高算法的处理速度。

为了验证硬件加速设计的性能，用VHDL实现了本文算法，并用ModelSim进行仿真，测试图像为Lena图。仿真结果如图7所示，分离中值滤波窗口为5×5；clk为40 MHz的图像输入时钟信号；din为灰度图像数据；row和col分别为行列计数；dout为边缘检测结果，dout输出为1时，x和y是该边缘点的列坐标和行坐标，处理时间约为1.72 ms。

需求。

4 结束语

本文提出了一种抗噪型 Sobel 边缘检测算法，并对其进行了硬件加速设计。算法具有较好的抗噪性和边缘检测特性，其硬件加速设计资源消耗较少，实时处理能力很强，在实时图像处理、计算机视觉等领域有一定的应用价值。

参考文献

- [1] 付永庆, 王咏胜. 一种基于数学形态学的灰度图像边缘检测算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(5): 685-687.
- [2] Li Zhenhua, Yang Yingping, Jiang Wei. Multi-scale Morphologic Tracking Approach for Edge Detection[C]//Proc. of the 4th International Conference on Image and Graphics. New York, USA: IEEE Press, 2007: 358-362.
- [3] 薛丽霞, 李涛, 王佐成. 自适应的形态学边缘检测算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(23): 214-216.
- [4] Narendra M P. A Separable Median Filter for Image Noise Smoothing[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1981, 3(1): 20-29.
- [5] Huitzil C T, Estrada M A. An FPGA Architecture for High Speed Edge and Corner detection[C]//Proc. of the 5th IEEE International Workshop on Computer Architectures for Machine Perception. [S. l.]: IEEE Press, 2000: 112-116.
- [6] Abbasi T A, Abbasi M U. A Novel Architecture for Prewitt Edge Detector[J]. Journal of Active and Passive Electronic Devices, 2009, 8: 203-211.