Kirsch算子地质图像边缘检测算法并行化研究*

田宸玮[1,2,3]，王雪纯[4]，杨嘉能[1,2,3]，钱育蓉[1,2,3]†

(1. 新疆大学 软件学院，新疆 乌鲁木齐 830008；2. 新疆维吾尔自治区信号检测与处理重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830008；
3. 新疆大学 软件工程重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830008；4. 中国石油吐哈油田公司勘探开发研究院，新疆 哈密 839009)

摘　要： 针对大尺寸地质图像边缘检测算法计算密集和数据密集的特性，为提高地质图像边缘检测算法的计算效率，提出一种自适应阈值的Kirsch算子的边缘检测算法. 从传统算法层面，通过减少运算次数以及针对阈值设定随机性较大的问题提出自适应阈值的方法对其进行优化. 从算法并行层面，在CPU-GPU传输开销以及线程规模选取上分析优化. 经测试，改进的算法比现有算法减少了计算量，获取的边缘更清晰，对大于2 048×2 048尺寸的地质图像加速比可以保持在80倍以上（不考虑传输开销可保持在300倍以上）. 该方法的并行较易实现，为实时在线的地质图像边缘检测提供了可能.

关键词： 边缘检测；Kirsch算子；并行计算；地质图像；统一计算设备架构
DOI： 10.13568/j.cnki.651094.651316. 2020.06.05.0001
中图分类号： TP391.413；TP751.1　**文献标识码：** A　**文章编号：** 2096-7675(2021)01-0054-07
引文格式： 田宸玮, 王雪纯, 杨嘉能, 等. Kirsch算子地质图像边缘检测算法并行化研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021, 38(1): 54-60+68.
英文引文格式： TIAN C W, WANG X C, YANG J P, et al. Research on parallelization of Kirsch operator edge detection algorithm for geological Image[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38(1): 54-60+68.

Research on Parallelization of Kirsch Operator Edge Detection Algorithm for Geological Image

TIAN Chenwei[1,2,3], WANG Xuechun[4], YANG Jianeng[1,2,3], QIAN Yurong[1,2,3]

(*1. School of Software, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830008, China; 2. Key Laboratory of Signal Detection and Processing in Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi Xinjiang 830008, China; 3. Key Laboratory of Software Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830008, China; 4. Research Institute of Exploration and Development, Tuha Oil Field Branch Company Ltd. of Petro China, Hami Xinjiang 839009, China*)

Abstract： Aiming at the computation-intensive and data-intensive characteristics of the edge detection algorithm of large-scale geological images, in order to improve the computational efficiency of the edge detection algorithm of geological images, an adaptive threshold kirsch operator edge detection algorithm was proposed. From the perspective of traditional algorithm, an adaptive threshold method is proposed to optimize the algorithm by reducing the number of operations and aiming at the problem of setting the random threshold. At the parallel level, cpu-gpu transmission overhead and thread size were selected for analysis and optimization. Compared with the existing algorithm, the improved algorithm requires less computation and gets clearer edges. The acceleration ratio of the geological image larger than 2 048×2 048 can be maintained at more than 80 times (the transmission cost can be maintained at more than 300 times). The parallel optimization scheme is easy to implement and can be applied to the edge detection of online real-time geological images.

Key words： edge detection; Kirsch operator; parallel computing; geological image; CUDA

0　引 言

近年来，飞速发展的数字图像处理技术普遍应用于各个领域，在地质勘探领域中也展现出巨大的潜力，用

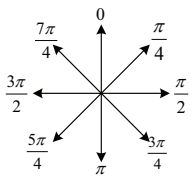
* **收稿日期：** 2020-06-05
基金项目： 国家自然科学基金（61966035）；国家自然科学基金联合基金-重点项目（U1803261）；新疆维吾尔自治区科技厅国际合作项目（2020E01023）.
作者简介： 田宸玮(1995-)，男，硕士生，CCF学生会员(B1131G)，从事软件理论与服务计算领域的研究.
† **通讯作者：** 钱育蓉(1980-)，女，博士，教授，CCF高级会员（23806S），从事网络计算和遥感图像处理领域的研究；E-mail:qyr@xju.edu.cn.

于检测及分析各种地质学信息[1,2]. 在视频图像处理领域，边缘检测也是较为基本的方法，常见的边缘检测算子包括Sobel算子、Prewitt算子、Roberts算子、LoG算子、Kirsch算子、Canny算子[3,4]. Sobel算子和Prewitt算子在边缘定位方面有较好的效果，但是像素边缘容易产生过量[5−7]；Roberts算子同样在定位边缘时有较高的准确度，但是在抗噪声方面表现较差[8]；LoG算子在噪声抑制时会平滑较为尖锐的边缘，所以在弱边缘检测方面表现较差[9]；Canny算子检测具有较高的检测准确率以及信噪比，且图像边缘的连续性和完整性较好，但是伪边缘的存在、抗噪声能力较差等问题依旧存在[10,11]；Kirsch算子的边缘连续性和完整性较差，优点在于能较好的抑制噪声[12]. 因此，本文提出CUDA（Compute Unified Device Architecture，计算统一设备架构）下基于自动阈值的Kirsch算子边缘检测算法.

Kirsch算子通过对原始图像进行8个方向的边缘检测，对这8个方向的噪声具有一定平滑的作用. 该算法需要对每一个像素进行相应的计算[13]，属于典型的SIMT（Single Instruction Multiple Threads，单指令多线程）计算模式. 考虑到边缘检测算子需要计算整个图像、处理效率不理想的问题，使用CUDA用于设计和优化并行算法. 近年来，CUDA表现出很强的并行计算性能. GPU架构是围绕具有弹性的SM（Streaming Multiprocessor，流多处理器）阵列构建的，在边缘检测方面应用也较为广泛，如Adhir Jain[14]使用CUDA进行Sobel算子的边缘检测；Yam-Uicab R[15]使用CUDA加速霍夫变换；张晗[16]基于CUDA使用Prewitt算子检测地质图像边缘. 本文通过验证算法的计算效率以及在并行传输开销方面对所提出算法进行测试.

1　改进后的边缘检测算法

Kirsch算子的边缘检测算法是对图像像素使用顺时针循环求梯度的方法进行边缘检测，将其中方向响应最大者作为边缘幅度图像的边缘. 八个方向的卷积模板如下所示:



$$W_0=\begin{bmatrix}-3&-3&5\\-3&0&5\\-3&-3&5\end{bmatrix},\quad W_{\frac{\pi}{4}}=\begin{bmatrix}-3&5&5\\-3&0&5\\-3&-3&-3\end{bmatrix},\quad W_{\frac{\pi}{2}}=\begin{bmatrix}5&5&5\\-3&0&-3\\-3&-3&-3\end{bmatrix},\quad W_{\frac{3\pi}{4}}=\begin{bmatrix}5&5&-3\\5&0&-3\\-3&-3&-3\end{bmatrix},$$

$$W_{\pi}=\begin{bmatrix}5&-3&-3\\5&0&-3\\5&-3&-3\end{bmatrix},\quad W_{\frac{5\pi}{4}}=\begin{bmatrix}-3&-3&-3\\5&0&-3\\5&5&-3\end{bmatrix},\quad W_{\frac{3\pi}{2}}=\begin{bmatrix}-3&-3&-3\\-3&0&-3\\5&5&5\end{bmatrix},\quad W_{\frac{7\pi}{4}}=\begin{bmatrix}-3&-3&-3\\-3&0&5\\-3&5&5\end{bmatrix}.$$

边缘梯度选取大小为：

$$e(m,n)=\max\{1,\max\{|5s_k-3t_k|,k=0,1,...,7\}\}\tag{1}$$

其中：$s_k=W_k+W_{k-\frac{\pi}{4}}+W_{k-\frac{\pi}{2}}$；$t_k=W_{k-\frac{3\pi}{4}}+W_{k-\pi}+W_{k-\frac{5\pi}{4}}+W_{k-\frac{3\pi}{2}}+W_{k-\frac{7\pi}{4}}$. 当$k=(0,\pi/4,\pi/2,3\pi/4,\pi,5\pi/4,3\pi/2,+7\pi/4)$时，使用以上8个模板，图像中任意一点$P_{mn}$及其周围3×3领域内的像素模板如下所示：

$$W_i=\begin{bmatrix}W^i_{-1,-1}&W^i_{0,-1}&W^i_{1,-1}\\W^i_{-1,0}&W^i_{0,0}&W^i_{1,0}\\W^i_{-1,1}&W^i_{0,1}&W^i_{1,1}\end{bmatrix}$$

$$P_{mn}=\begin{bmatrix}P(m-1,n-1)&P(m,n-1)&P(m+1,n-1)\\P(m-1,n)&P(m,n)&P(m+1,n)\\P(m-1,n+1)&P(m,n+1)&P(m+1,n+1)\end{bmatrix}$$

其中：i方向对应的模板为W_i；坐标(m,n)处的中心3*3像素区域为P_{mn}.

Kirsch算子的边缘检测算法要对原始图像的每一个像素点进行卷积运算，故存在边缘问题（最外围一圈像

素，周围像素个数不为8），使用扩展法来减少判断边缘的计算量，在图像边缘填充模板尺寸二分之一的像素边缘，根据式（1）可知，计算单个像素的响应度所需的总计算量为：加法56（7*8）次，乘法16（2*8）次，还有求比较最大响应的7次比较运算，计算一副图像像素为$x*y$的图像计算量为：加法56（$x*y$）次，乘法16（$x*y$）次，比较运算7（$x*y$）次，故不符合实时图像处理系统的要求. 为减少计算量，通过模板W_i对每个像素区域进行卷积求和的方法，得出计算各个方向的二范数公式：

$$F_i(m,n)=\sum_{j=-1}^{1}\sum_{k=-1}^{1}P(m+j,n+k)W_{j,k}^{i} \tag{2}$$

其中：$F_i(m,n)$为$P(m+j,n+k)$与$W_{ij,k}$卷积运算得到的二范数；$W_{j,k}^{i}$为i方向对应模板坐标(j,k)处的元素；$i=(0,\pi/4,\pi/2,3\pi/4,\pi,5\pi/4,3\pi/2,7\pi/4)$.

最后按照垂直组合的规则将8个方向结合成四组，分别计算梯度的二范数：

$$\|G_i\|_2=\sqrt{f_{i_m}^2+f_{i_n}^2} \tag{3}$$

其中：i=(1,2,...8), $j_i=\pi/4*(i-1)$, $k_i=\mathrm{mod}\left((3\pi/2+\pi/4*(i-1)),2\pi\right)$，取$\|G_i\|_2 i$=(1,2,...8)的最大值为该点像素的梯度，即：

$$G=\max(\|G_i\|_2) \tag{4}$$

传统的Kirsch算子在保持边缘细节和抑制噪声方面有很好的效果，但边缘连续性和完整性较差. 针对Kirsch算子的缺点，使用整幅图像的平均灰度作为阈值对其进行二值化，阈值(TH)如式(5) 所示：

$$TH=\frac{\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1}P(m,n)}{M\times N} \tag{5}$$

其中：M为图像宽度，N为图像高度.

遍历整个图像，将每个像素点与得到的阈值进行对比后更新，更新规则如式(6)所示：

$$G(m,n)=\begin{cases}1, & G(m,n)\geq TH\\ 0, & G(m,n)<TH\end{cases} \tag{6}$$

分析(1)~(5)式可知，算法执行过程中对每一个像素点进行独立操作，故存在并行的可能性. 设计较好的并行算法可达到减少计算时间、增大算法实时可能性的目的.

2 基于CUDA对改进后的算法并行分析

2.1 算法总流程

每一个像素使用单个线程进行计算，多线程可以实现大量像素的并行计算，极大提高了计算效率. 阈值自适应的Kirsch算子边缘检测并行计算流程如图 1 所示.

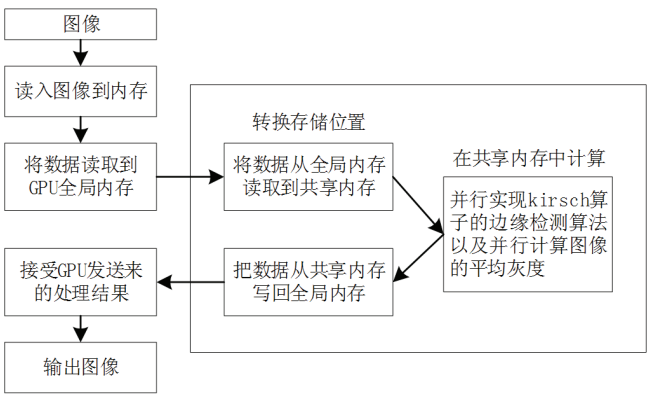


图 1 算法总流程

Fig 1 Algorithm process

Step1Host读入图像到内存；

Step2Host将数据发送给Device全局内存；

Step3Host启动Device核函数，此时Device多线程执行；

Step4 Device处理结果回传到Host内存；

Step5Host生成最终图像.

在Step3中，处理的数据为图像，图像是由二维点集构成的，根据图2所示映射结构创建二级线程模式，Grid为二维线程格子，Block为二维线程块.

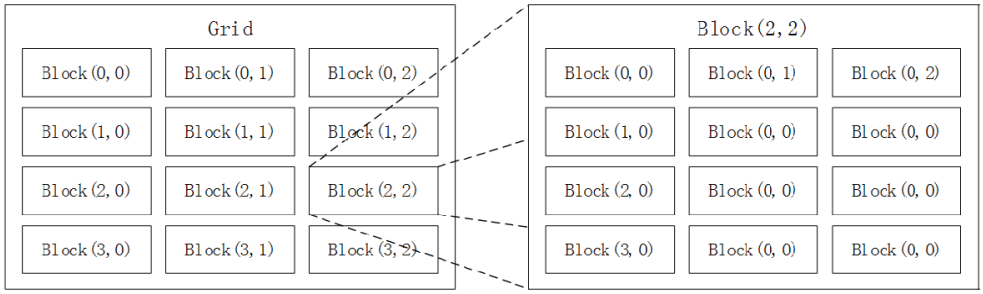


图 2　二级线程模式

Fig 2　Secondary thread mode

2.2　累计灰度值以及计算阈值的并行化

该步骤主要设计思想是累加各个线程块计算所得到的局部阈值，最后汇总得到总的阈值. 具体实现思路是先把Block内所有的线程从全局内存中将图像像素读取到共享内存，此时块内的线程需要进行同步操作来确保全部线程已经读取像素，最后通过累加各个线程块得到的局部阈值来确定最终的全局灰度阈值.

2.3　算法优化部分

二维卷积操作同样会遇到与一维卷积操作一样的边界问题. 本文使用拓展法（如图3所示，选取到的二维像素点在周围添加卷积核大小二分之一的像素填充并赋值为0）来解决边界判断问题. 使用此方法卷积操作无需考虑边界问题，但是需要调整计算索引. 算法1展示了主要的处理流程.

算法1：

（1）设置共享内存空间

（2）__shared__ float Data[BLOCK_WIDTH][BLOCK_WIDTH];

（3）获取线程块中线程坐标

（4）int tx = threadIdx.x;

（5）int ty = threadIdx.y;

（6）每个线程相对于所有线程的坐标

（7）int row_o = blockIdx.y * 14 + ty;

（8）int col_o = blockIdx.x * 14 + tx;

（9）使用拓展法，调整正确索引

（10）int row_i = row_o - 1;

（11）int col_i = col_o - 1;

（12）int size = width * height;

（13）for (循环图像的通道数) {

（14）读取每个像素点并将拓展的像素进行赋值

（15）if ((row_i>= 0) && (row_i< height) && (col_i>= 0) && (col_i< width)){

（16）Data[ty][tx] = InputData[row_i * width + col_i + layer * size];

（17）}

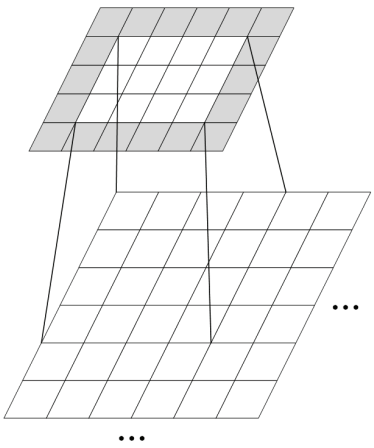


图 3　填充边缘

Fig 3　Fill the edge

（18）else{

（19）Data[ty][tx] = 0.f;

（20）}

（21）同步等待所有线程完成操作

（22）__syncthreads();

（23）计算四对二范数，取最大值作为梯度值，完成后将结果写回全局内存

（24）__syncthreads();

（25）}

表 1 NVIDIA GeForceGTX 1070 规格

Tab 1 NVIDIA GeForceGTX 1070 parameter

参数	数值
CUDA处理核	2 048个
全局内存容量	8GB
Warp大小	32
每个块共享内存容量	48KB
每个块线程最多数目	1 024个

3 实验结果与分析

计算机平台包含支持CUDA加速的显卡. 主机系统配置为IntelCorei7-7820 HK，时钟频率2.90 GHz，内存大小16 GBRAM，GPU规格见表1.

3.1 线程块索引与数据传输开销分析

调整线程块索引主要针对数据在共享内存时使用，为了降低线程的发散程度，表2所示分别在全局内存和共享内存上做了对比，说明本算法使用共享内存是更好的选择. 主要原因是：1.硬件方面，共享内存位于设备上，而使用全局内存计算需要频繁地在主机和设备之间执行拷贝操作，这无疑大大增加了算法执行的时间；2.软件层面，通过线程索引的调整降低了线程的发散程度.

表 2 全局内存和共享内存读取时间对比

Tab 2 Global memory and share memory read time compare

图片尺寸	GlobalMemory /ms	ShareMemory/ms
512×512	1.58	1.46
1 024×1 024	3.34	2.98
2 048×2 048	11.47	8.32

3.2 线程规模对计算性能的影响

NVIDIAGeForce 1070中，由于每次都需要计算幅度值以及方向，故在单个线程块中需要使用三个区域，其中两个保存上个任务的处理结果和本次的处理结果，另一个用来保存梯度方向. 所以每个拓展块的容量不能超过16 KB. 如表1所示，GPU硬件规定warp大小为32，故选择线程块大小为16×16，包含16×16个线程.

表 3 文献[17]并行与串行算法执行时间(ms)与加速比(倍)

Tab 3 Parallel and serial algorithm execution time(ms) and acceleration ratio (times) in literature[17]

图片尺寸	GPU运行时间	CPU运行时间	加速比
512×512	22	41	1.86
1 024×1 024	82	149	1.81

表 4 文献[18]并行与串行算法执行时间(ms)与加速比(倍)

Tab 4 Parallel and serial algorithm execution time(ms) and acceleration ratio (times) in literature[18]

图片尺寸	GPU运行时间	CPU运行时间	加速比
256×256	5.38	20	3.72
640×480	7.69	80	10.40
1 024×768	12.07	210	17.39
1 920×1 200	28.89	607	21.01
2 560×1 440	38.49	1 030	24.52
4 800×3 600	131.74	4 009	30.43

为验证算法并行处理的优势，选取不同尺寸图片对比CPU串行执行时间和GPU并行执行时间，并与文献[14]、文献[15]的实验对比，表明本文提出的算法可以较大缩短执行时间、提高检测效率，见表3~表5.

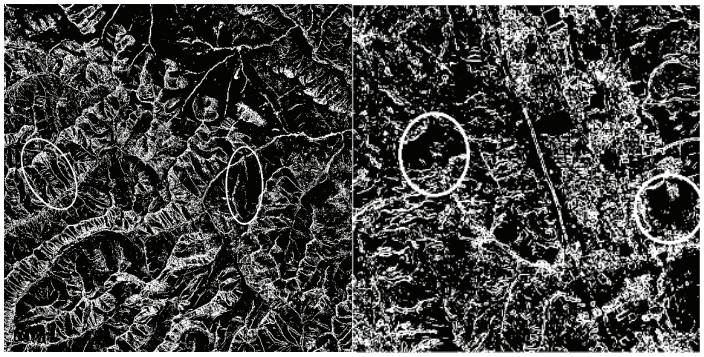
表 5　本文并行与串行算法执行时间(ms)与加速比(倍)

Tab 5　Parallel and serial algorithm execution time(ms) and acceleration ratio (times) in this paper

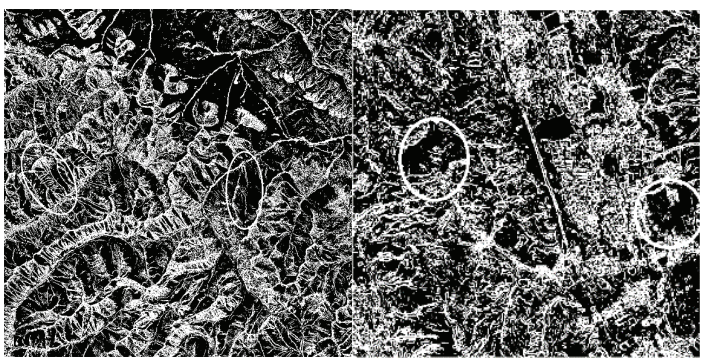
图片尺寸	GPU运行时间	CPU运行时间	加速比
512×512	1.46	49.20	31.90
1 024×1 024	2.98	184.33	62.60
1 536×1 536	5.37	419.05	78.63
2 048×2 048	8.32	696.86	83.87
2 560×2 560	12.64	1 135.09	86.40
3 072×3 072	17.49	1 579.77	90.43
4 608×3 072	26.03	2 294.53	88.20

所用实验数据选取不同分辨率的遥感图像测试并行算法的检测效果，如图4所示．本文提出的算法能够清晰的分辨出地质的纹路．

(a)原图



(b)传统算法



(c)改进后的算法

图 4　遥感地质图像

Fig 4　Remote sensing geological image

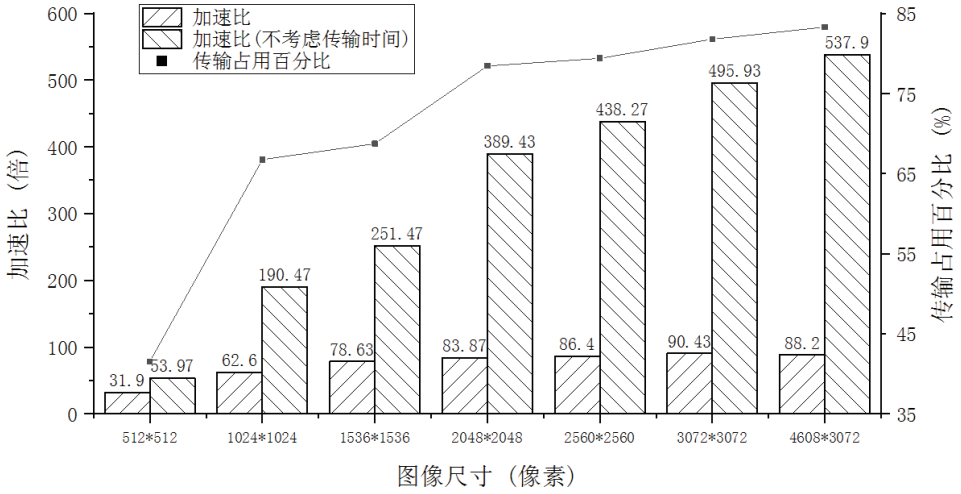


图 5 算法加速效果与传输时间

Fig 5 Algorithm execution effect and transmission time

4 结束语

本文主要完成了CUDA下自适应性阈值Kirsch算子边缘检测算法并行优化研究，对优化传统Kirsch算子的边缘检测算法分析，使用拓展法节省边缘判断计算所消耗的时间，将原有8个方向的计算减少为计算4个方向的二范数；其次，使用平均灰度作为二值化阈值避免人工设定阈值随机性较大的问题. 并行方面从线程块大小的设置以及传输开销方面分析算法瓶颈. 实验验证如图5所示，针对图像尺寸大于2 048*2 048的地质图像，在考虑传输开销的情况下算法的加速效果保持在80倍以上，不考虑传输开销可保持在300倍以上. 可见使用CUDA加速的部分瓶颈在于主机与设备的传输开销所占用时间比例过大，之后会对CUDA的传输开销做进一步研究. 图像的处理获得了较为满意的结果，提高了算法的执行效率，适用于大规模地质图像的边缘检测.

参考文献：

[1] VASUKI Y, HOLDEN E J, KOVESI P, et al. An interactive image segmentation method for lithological boundary detection: A rapid mapping tool for geologists[J]. Computers & Geosciences, 2017, 100: 27-40.

[2] JOSEPH S, UIIR H, HIPINY I. Unsupervised classification of intrusive igneous rock thin section images using edge detection and colour analysis[C]//2017 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA). IEEE, 2017: 530-534.

[3] MARR D, HILDRETH E. Theory of edge detection[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences, 1980, 207(1167): 187-217.

[4] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986 (6): 679-698.

[5] GONZALEZ C I, MELIN P, CASTRO J R, et al. An improved sobel edge detection method based on generalized type-2 fuzzy logic[J]. Soft Computing, 2016, 20(2): 773-784.

[6] SONG Y, MA B, GAO W. Medical image edge detection based on improved differential evolution algorithm and prewittoperator[J]. Acta Microscopica, 2019, 28(1).

[7] 郭江, 丰义, 朱程辉. 基于特征颜色的车牌边缘检测方法[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2007, 24(2): 126-130.
GUO J, FENG Y, ZHU C H. Detection method of license plate edge based on characteristic color [J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2007, 24(2): 126-130. (In Chinese)

[8] DORAFSHAN S, MAGUIRE M, CHANG M. Comparing automated image-based crack detection techniques in the spatial and frequency domains[C]//26th ASNT Research Symposium, 2017: 34-42.

[9] ALI M M H, YANNAWAR P, GAIKWAD A T. Study of edge detection methods based on palmprint lines[C]//2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). IEEE, 2016: 1344-1350.

(下转第 68 页)

CHEN K, YANG Y J, SU Q, et al. Influence of different drought stress on yield of maize[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2016(6): 70-71+162. (in Chinese)

[15] 唐华俊. 新形势下中国粮食自给战略[J]. 农业经济问题, 2014, 35(2): 4-10+110.
TANG H J. China's grain self-sufficiency strategy in new situation[J]. Issues in Agricultural Economy, 2014, 35(2): 4-10+110. (in Chinese)

[16] 解卫海, 马淑杰, 祁琳, 等. Na+吸收对干旱导致的棉花叶片光合系统损伤的缓解作用[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6549-6556.
JIE W H, MA S J, QI L, et al. The mitigating effects of Na+ accumulation on the drought-induced damage to photosynthetic apparatus in cotton seedling[J]. Acta Ecologica Sinca, 2015, 35(19): 6549-6556. (in Chinese)

[17] ZHANG C F, HU J, LOU J, et al. Sand priming in relation to physiological changes in seed germination and seedling growth of waxy maize under high-salt stress[J]. Seed Science and Technology, 2007, 35(3): 733-738.

[18] HAMAMA H, MURNIATI E. The effect of ascorbic acid treatment on viability and vigor maize (*Zea mays* L.) seedling under drought stress[J]. Hayati Journal of Biosciences, 2010, 17(3): 105-109.

[19] 付长方, 张海艳. 盐胁迫对玉米种子萌发、幼苗叶绿素含量和渗透势的影响[J]. 山东农业科学, 2015, 47(5): 27-30.
FU C F, ZHANG H Y. Effects of salt stress on seed germination and seedling chlorophyll content and osmotic potential of maize[J]. Shandong Agricultural Science, 2015, 47(5): 27-30. (in Chinese)

[20] YAO X Q, CHU J Z, WANG G Y. Effects of selenium on wheat seedlings under drought stress[J]. Biological Trace Element Research, 2009, 130(3): 283-290.

[21] OUYANG X R, GUAN C Y, HILHORST H W M. Sensitivity of maize seed germination and seedling growth to water environment[J]. Journal of Hunan Agricultural University, 2001, 27(1): 7-12.

[22] 徐文强, 杨祁峰, 牛俊义, 等. 温度与土壤水分对玉米种子萌发及幼苗生长特性的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(1): 69-74.
XU W Q, YANG Q F, NIU J Y, et al. Effects of temperatures and soil moisture content on seed germination and seedling growth characteristics of maize[J]. Journal of Maize Science, 2013, 21(1): 69-74. (in Chinese)

责任编辑：赵新科

(**上接第** 60 **页**)

[10] 梅琪, 哈力旦·A, 帕力旦·吐尔逊. 二维图像的基本处理与边缘检测[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2008, 25(2): 235-240.
MEI Q, HALIDAN A, PALIDAN T. Basic processing and edge detection of 2D images [J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2008, 25(2): 235-240. (In Chinese)

[11] NIKOLIC M, TUBA E, TUBA M. Edge detection in medical ultrasound images using adjusted Canny edge detection algorithm[C]//2016 24th Telecommunications Forum (TELFOR). IEEE, 2016: 1-4.

[12] QIAO B, JIN L, YANG Y. An adaptive algorithm for grey image edge detection based on grey correlation analysis[C]//2016 12th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS). IEEE, 2016: 470-474.

[13] 郭萌, 胡辽林, 赵江涛. 基于Kirsch和Canny算子的陶瓷碗表面缺陷检测方法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 27-33.
GUO M, HU L L, ZHAO J T. Detection method of ceramic bowl surface defects based on Kirsch and Canny operators[J]. Acta Optics, 2016, 36(9): 27-33. (In Chinese)

[14] JAIN A, NAMDEV A, CHAWLA M. Parallel edge detection by SOBEL algorithm using CUDA-C[C]//2016 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS). IEEE, 2016: 1-6.

[15] YAM-UICAB R, LOPEZ-MARTINEZ J L, TREJO-SÁNCHEZ J A, et al. A fast Hough Transform algorithm for straight lines detection in an image using GPU parallel computing with CUDA-C[J]. The Journal of Supercomputing, 2017, 73(11): 4823-4842.

[16] 张晗, 钱育蓉, 侯海耀. CUDA下地质图像边缘检测算法并行优化[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(3): 98-105.
ZHANG H, QIAN Y R, HOU H Y. Parallel optimization of geological image edge detection algorithm under CUDA[J]. Computer Engineering and Design, 2019, 40(3): 98-105. (In Chinese)

[17] 唐斌, 龙文. 基于GPU + CPU 的CANNY 算子快速实现[J]. 液晶与显示, 2016, 31(7): 714-720.
TANG B, LONG W. Fast implementation of CANNY operator based on GPU + CPU [J]. LCD and Display, 2016, 31(7): 714-720. (In Chinese)

[18] 马歌, 肖汉. 基于OpenCL的Prewitt算法的并行实现[J]. 现代电子技术, 2014(20): 103-106.
MA G, XIAO H. Parallel implementation of prewitt algorithm based on OpenCL [J]. Modern Electronic Technology, 2014(20): 103-106. (In Chinese)

责任编辑：闫新云