引文格式：李平超. 运用GMS算法自动识别相似模拟材料实验裂隙场[J]. 地理空间信息, 2024, 22(3): 51-54. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.03.012

运用GMS算法自动识别相似模拟材料实验裂隙场

李平超[1]
（1. 河南省地质矿产勘查开发局 测绘地理信息院，河南 郑州 450006）

摘　要：通常采用沙盘物理模型与近距离摄影测量相结合的方法来探索上覆地层的断裂机制，但由于沙土物理模型裂缝图像的信噪比较低，该算法往往提取得不完整。鉴于此，提出了一种基于计算机视觉的图像梯度原理、图像匹配和区域筛选技术（GMS算法）的裂隙检测算法。首先利用峰峰市九龙煤矿15235工作面的钻孔柱状图建立沙盘物理模型；再利用定焦数码相机拍摄该模型的正射影像；最后根据模型图像的纹理特征，分别采用图像匹配技术、区域筛选技术分割规则的大面积非裂缝纹理和微小非裂缝纹理。研究结果表明，GMS算法具有很强的抗干扰能力，能准确识别并自动提取相似模拟材料中上覆地层的裂隙场。

关键词：采矿沉降；沙盘物理模型；裂缝检测；计算机视觉；图像处理
中图分类号：P234.1　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）03-0051-04

Automatic Identification of Experimental Fracture Fields of Similar Simulated Materials by GMS Algorithm

LI Pingchao[1]
(1. Mapping and Geographic Information Institute, Henan Provincial Bureau of Geological and Mineral Exploration and Development, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: The fracture mechanism of overburden strata is usually explored by the combination method of sand-physical model and close-range photogrammetry. Due to the low signal-to-noise ratio of fracture images from the sand-physical model, the application of this algorithm often leads to incomplete extraction. To solve this challenge, we proposed a fracture detection algorithm based on image gradient principle of computer vision, image matching and region screening techniques (GMS algorithm). Firstly, we used a synthetic columnar section of the 15235 working face of Jiulong coal mine in Fengfeng City to establish a sand-physical model. Then, we took the orthophoto image of model with Nikon digital camera. Finally, based on the texture characteristics of model images, we used image matching technique and area screening technique to segment the regular large non-fractured texture and the tiny non-fractured texture. The results show that the GMS algorithm is highly resistant to interference and can accurately identify and automatically extract the fracture fields of overburden strata in similar simulated materials.

Key words: mining settlement, sand-physical model, fracture detection, computer vision, image processing

煤炭开采破坏了围岩的应力平衡，上覆岩层将产生垮落、断裂和弯曲变形，因此研究采动覆岩裂隙场发育规律可保障矿井的安全生产。相似材料模拟实验是研究采动覆岩裂隙场的重要手段之一，若能采用图像处理技术自动提取模型表面裂隙，则可降低人工判读的误差。文献检索发现，裂隙识别研究可分为两类[1]：人工辅助自动识别，主要包括阈值分割法、边缘检测法和区域生长法，如伏金浩[2]、Jiang C F[3]、李晓峰[4]等提高了医学影像分割方法的信噪比，王世芳[5]、吴洪宪[6]等提出了一种沥青路面裂缝检测方法，闫东阳[7]、法炜[8]等利用改进的区域生长算法来分割遥感影像；机器学习智能识别，主要包括统计机器学习和深度学习，如陶开云[9]等针对大坝表面裂隙损伤提出了一种机器识别算法，逐步融合区域生长算法与卷积神经网络来识别裂隙[10]，Zhang L[11]等利用神经网络来识别道路裂隙。此外，对裂隙识别还有神经网络和深度学习方面的研究[12-16]。综上所述，前人从不同行业背景和专业视角构建了形式各异、功能多样的数学模型，丰富了裂隙、裂隙场的识别理论；但识别相似材料模拟实验在开挖过程中形成的裂隙场的研究还不多。

基于此，本文以峰峰市九龙煤矿15235工作面为工程研究背景，开展物理模拟实验，首先利用定焦相机从不同视角批量获取目标区影像；再对这些影像进行拼接、校正，生成正射影像；最后采用Python编写

收稿日期：2022-06-30。
项目来源：河南省科技攻关资助项目（212102310404）。
作者简介：李平超（1983—），本科，工程师，主要研究方向为地质测绘，E-mail：77112483@qq.com。

机器学习自动识别模型，自动识别相似材料模型表面的裂隙信息。

1 研究方法

1.1 GMS算法

确定数字影像上图形边界的方法是检测影像上每个像素及其直接邻域的状态，具有所需特性的像素点称之为边界点。当图像中各像素点灰度值用来反映各像素点符合边界点要求的程度时，这种图像就是边缘图或边界图。检测边界图边界上每个像素的邻域并对亮度值进行量化的过程即为边缘检测。本文算法也是一种边缘检测过程。

为计算方便，将目标图像呈现黑白效果，为凸显图像中的物体轮廓，将数字图像二值化。假设目标图像 $S(x,y)$ 是大小为 $m\times n$ 二值化图像，$f(i,j)$ 为像素点 (i,j) 的亮度值。

$$S(x,y)=\begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,n) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1,n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(m,0) & f(m,1) & \cdots & f(m,n) \end{bmatrix} \tag{1}$$

由于 $S(x,y)$ 为二值化灰度图，因此其像素灰度值可表示为：

$$S(x,y)=\begin{cases} 255 & f(x,y)\geqslant T \\ 0 & f(x,y)<T \end{cases} \tag{2}$$

式中，T 为阈值。

式（1）的轮廓图形包含兴趣轮廓和干扰轮廓，采用影像匹配方法消除规则化干扰图形，假设 $T(x,y)$ 是大小为 $M\times N$ 的模板图像，且 $M<<m$，$N<<n$。

$$T(x,y)=\begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,N) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1,N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(M,0) & f(M,1) & \cdots & f(M,N) \end{bmatrix} \tag{3}$$

在目标图像 S 中，以 $M\times N$ 大小的子图为窗口，遵循从左至右、从上至下的原则，滑动子图窗口。假设以点 (i,j) 为窗口左上角，计算其与模板图像的相似度，遍历整个目标图，在所有子图中找到与模板图最相似的子图作为最终匹配结果。选取平均绝对差 $D(i,j)$ 作为相似度评价标准，值越小，表明模板图像和目标图像越相似，因此只需找到最小的 $D(i,j)$，即可确定目标图像中最优匹配结果的子图位置，则有：

$$D(i,j)=\frac{1}{M\times N}\sum_{S=1}^{M}\sum_{t=1}^{N}\left|s(i+s-1,j+t-1)-T(s,t)\right| \tag{4}$$

式中，$1\leqslant i\leqslant m-M+1$，$1\leqslant j\leqslant n-N+1$。

由式（4）可知，最佳匹配结果投影到目标图像 $S(i,j)$ 中是以像素坐标 (i,j) 为起点的 $M\times N$ 子图像素矩阵。令子图像素阵列元素为零，对 $S(i,j)$ 中匹配结果的投影像素矩阵掩膜，即令子图像素阵列亮度值 $f(x,y)=0$，获得消除有规律的干扰图像的目标图像。

$$S(x,y)=\begin{bmatrix} f(1,1) & & \cdots & & f(1,n) \\ & f(i-1,j-1) & \cdots & f(i-1,j+N+1) & \\ \vdots & \vdots & 0 & \vdots & \vdots \\ & f(i+M+1,j-1) & \cdots & f(i+M+1,j+N+1) & \\ f(m,1) & & \cdots & & f(m,n) \end{bmatrix} \tag{5}$$

当目标图形边缘和背景亮度值反差足够清晰时，按照从左至右、从上至下的顺序遍历 $f(x,y)$ 中的元素，从左至右扫描时，在 $S(x,y)$ 中找到第一个子集 $[0\quad 255]$，即为第一个轮廓起点的左上角位置点左边界，找到第一个子集 $[255\quad 0]$，即为第一个轮廓终点的右上角位置点右边界；从上至下扫描时，找到第一个 $[0\quad 255]^{\mathrm{T}}$ 子集，即为第一个轮廓的左上角边界点上边界，找到第一个 $[255\quad 0]^{\mathrm{T}}$ 子集，即为第一个轮廓的左下角边界点。同理，遍历 $S(x,y)$ 中 $f(x,y)$ 值，即可找出轮廓 $G(x,y)$，见图1。

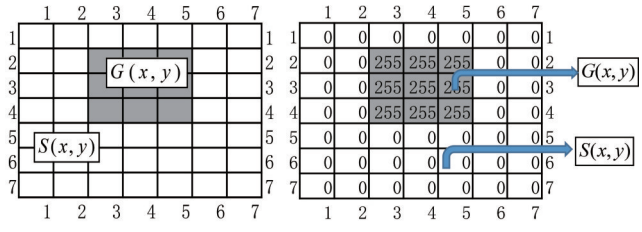


图1 算法示意图

假设在 $S(x,y)$ 中共找到 k 个轮廓，将第 k 个轮廓 $G(x_k,y_k)$ 对应的面积 $G(k)$ 作为元素放到新的矩阵中，则有：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} G(1) & G(2) & \cdots & G(k) \end{bmatrix} \tag{6}$$

遍历式（6）中所有轮廓面积矩阵元素，求取矩阵中轮廓面积的众数值 M_0 作为阈值，对面积进行筛选。

$$M_0=\mathrm{Mode}\{G(1)\quad G(2)\quad \cdots\quad G(k)\}\quad k\in z \tag{7}$$

式中，z 为正整数。

此时轮廓面积矩阵可表示为：

$$A=\begin{cases}G(x,y) & G(k)\geqslant M_0\\ \text{NULL} & G(k)<M_0\end{cases} \tag{8}$$

式中，NULL为空集。

在某些条件下，当M_0不能满足筛选要求时，可参考M_0来调节$G(k)$的取值，从而改变筛选范围，用筛选后轮廓面积矩阵元素信息在式（5）上勾绘轮廓，即得到使用本文算法获取的裂隙检测结果。

1.2　编程实现

本文提出的识别相似模拟材料裂纹的图像处理流程见图2。为验证GMS算法的有效性，本文采用Python语言编写程序，将GMS分解为基本的计算机可执行的指令序列，再编译成计算机语言，让其执行GMS的每一个计算步骤。

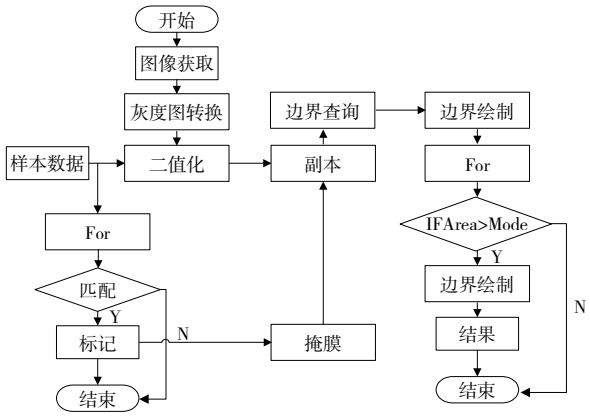


图2　程序流程图

首先将原始彩色图像转换为灰度图像，为突显裂缝和背景的色差，对灰度图像做二值化处理；然后在二值化图像上执行一系列操作。二值化完成后，整个计算机处理过程包括两个部分：①消除规则大面积非裂隙形状，利用图像匹配技术清除规则大面积的干扰裂缝，逐像素地将一个模板图像窗口大小的灰度矩阵与目标图像所有可能的窗口灰度阵列进行匹配，采用平均绝对差度量相似性的方法进行搜索，获得消除大面积规则形状的目标图像；②消除不规则小面积非裂隙形状，利用小区域连通域筛选技术去除不规则的小面积噪声点。

2　研究结果

将尺寸为393×874的原图导入程序，通过人机交互、修改阈值、二值化、去除杂噪等一系列处理，识别原图中的裂缝，整个过程见图3，可以看出，原图中存在毛笔笔迹、网格线等非裂隙阴影干扰时，常规算法会将非裂隙阴影识别为裂隙，而通过二值化，可更加突显裂隙阴影和非裂隙阴影。在训练样本中使用多种形态的线段，以匹配不同图像中形状各异的线段目标。对大面积规则非裂缝阴影进行标记并掩膜，再将掩膜后的图像中所有阴影作为裂隙进行识别。由于规则大面积非裂隙阴影被掩膜，剩余非裂隙阴影虽然形状不规则，但面积较小，通过筛选可得到裂隙识别结果。

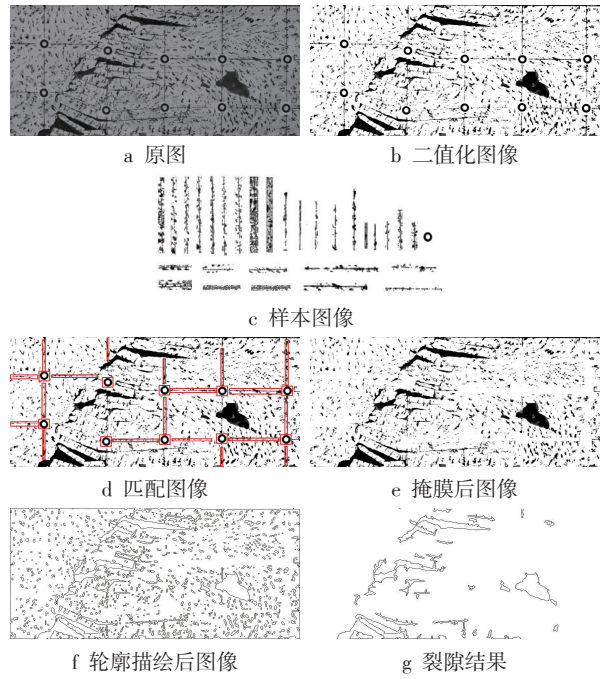


图3　相似模拟材料平台照片裂隙识别

3　结　语

研究发现，常规的裂隙识别算法在识别沙盘物理模型实验平台模拟煤炭开采时垮落裂隙的效果不佳。因此，根据计算机视觉中的图像阶跃状边缘梯度幅值变化原理，选取大面积非裂隙阴影作为训练样本集，采用机器学习技术分割相似模拟实验平台中的网格点、网格线非裂缝形状；以连通域面积筛选技术和众数值为筛选阈值，丢弃任何小于阈值的连通域方法，提出了一种新的裂隙识别算法。结果表明，在沙盘物理模型平台模拟开采沉陷的垮落裂隙识别应用中，该算法在去除非裂隙阴影的前提下，能够较完整地保留上覆岩层垮落裂隙的识别。与传统裂隙识别算法，尤其是Canny算法相比，本文算法的识别效果较接近，比其他算法中图像开闭运算过程中裂隙信息损失少。Canny算法是对非裂缝阴影识别的处理，能更好地保留裂缝阴影的识别；而本文算法在裂隙识别过程中加入了机器学习技术和连通域面积筛选算法，使计算机视觉能更好地判断非裂缝信息，但也存在训练样本数据多、计算量大、面积筛选过程中自适应性弱等局限性。

本文在沙盘物理模型实验平台进行研究，为研究模拟开采沉陷上覆岩层垮落裂隙的发育规律提供一种参考方法，但并不局限于沙盘物理模型实验平台的裂隙识别，也可用于骨折医学影像识别、高速公路路面裂缝灾害的识别、纪念碑裂缝识别和古老建筑墙面裂缝发育识别等文物保护领域。

参考文献

[1] 薛东杰,唐麒淳,王傲,等. 基于FCN的岩石混凝土裂隙几何智能识别[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(增刊2):3 393-3 403

[2] 伏金浩,王剑平,闻路红,等. 基于改进阈值与边缘梯度的亮场干细胞图像分割方法[J]. 电子测量技术,2020,43(20):109-114

[3] Jiang C F, Tsai K. Image Segmentation Techniques for Stem Cell Tracking[C]. IEEE International Conference on Acoustics,2013:1 109-1 112

[4] 李晓峰,焦洪双,李东. 基于量子蚁群算法的医疗图像阈值分割算法[J]. 沈阳大学学报(自然科学版),2020,32(6):490-495

[5] 王世芳,车艳丽,李楠,等. 一种基于多尺度脊边缘的沥青路面裂缝检测算法[J]. 中国公路学报,2017,30(4):32-41

[6] 吴洪宪,郑少兰. 基于模糊贴近度的SAR影像变化检测方法研究[J]. 地理空间信息,2022,20(1):23-26

[7] 闫东阳,明冬萍. 基于自动多种子区域生长的遥感影像面向对象分割方法[J]. 工程科学学报,2017,39(11):1 735-1 742

[8] 法炜,常军,韩丽华. 基于特征指数合成影像的不透水面提取和分析[J]. 地理空间信息,2022,20(4):48-53

[9] 陶开云,魏海,廖敏,等. 一种基于SVM的坝面裂缝损伤智能识别方法[J]. 价值工程,2017,36(19):124-125

[10] Cha Y J, Choi W, Buyukoztur K, et al. Deep Learning-based Crack Damage Detection Using Convolution Nerual Networks[J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering,2017,32(5):361-378

[11] Zhang L, Yang F, Zhang Y M, et al. Road Crack Detection Using Deep Convolutional Neural Network[C]. IEEE International Conference on Image Processing,2016:3 708-3 712

[12] 李琛,骆汉宾,魏威,等. 基于图像的混凝土表面裂缝和孔洞检测[J]. 土木工程与管理学报,2020,37(6):118-123

[13] 韩晓健,赵志成. 基于计算机视觉技术的结构表面裂缝检测方法研究[J]. 建筑结构学报,2018,39(增刊1):418-427

[14] Han X J, Zhao Z C. Research on Structural Crack Detection Method Based on Computer Vision Technology[J]. Journal of Architectural Structure,2018,39(S1):418-427

[15] 谢钇. 基于U-net神经网络的混凝土路面图像裂缝识别算法研究[D]. 重庆:重庆邮电大学,2020

[16] Tong Z, Fao J, Zhang H. Recognition, Location, Measurement, and 3D Reconstruction of Concealed Cracks Using Convolutional Neural Networks[J]. Construction and Building Materials,2017,146:775-787

（上接第50页）

[3] 司敬知,李英成,王恩泉,等. 移动GIS土地执法动态巡查监察体系研究与应用[J]. 测绘通报,2017(增刊2):158-163

[4] 聂光涛,黄华. 光学遥感图像目标检测算法综述[J]. 自动化学报,2021,47(8):1 749-1 768

[5] 眭海刚,冯文卿,李文卓,等. 多时相遥感影像变化检测方法综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(12):1 885-1 898

[6] 张永忠,高俊华,罗建强. 湖南省自然资源月度执法监管工作机制探讨[J]. 地理空间信息,2022,20(2):152-155

[7] 张毅,吉波,阮婧. 基于塔基视频监控的自然资源智能感知模式实践和思考[J]. 国土资源信息化,2021(5):8-14

[8] 李晓波,吴洪涛,张爱民,等. 感知国土:挑战、机遇与策略[J]. 国土资源信息化,2020(3):3-8

[9] Bhatt D, Patel C, Talsania H, et al. CNN Variants for Computer Vision: History, Architecture, Application, Challenges and Future Scope[J], Electronics,2021,10(20):2 470

[10] 孙琦钰,赵超强,唐漾,等. 基于无监督域自适应的计算机视觉任务研究进展[J]. 中国科学:技术科学,2022,52(1):26-54

[11] Wan S H, Goudos S. Faster R-CNN for Multi-class Fruit Detection Using a Robotic Vision System[J]. Computer Networks,2020,168(16):107 036

[12] 高乔裕,金银龙,张宏阳,等. 单目视觉测量强夯夯沉量的误差分析[J/OL]. (2022-03-18)[2023-01-12]. https://doi. org/10. 14188/j. 2095-6045. 2022052

[13] 王勇,陈国良,李晓园,等. 一种相机标定辅助的单目视觉室内定位方法[J]. 测绘通报,2018(2):35-40

[14] Chen Y, Liu Q, Wang T, et al. Rotation-invariant and Relation-aware Cross-domain Adaptive Object Detection Network for Optical Remote Sensing Images[J]. Remote Sensing,2021,13(21):4 386