

基于 K-means 聚类与数学形态学的侧扫声呐图像目标轮廓自动提取方法

王 涛, 潘国富, 张济博

(自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要: 针对侧扫声呐图像斑点噪声强、背景海底散射干扰严重, 海底目标轮廓自动提取困难的问题, 提出了一种基于 K-means 聚类与数学形态学相结合的海底目标轮廓自动提取算法。为克服噪声干扰, 该算法首先利用中值滤波去除侧扫声呐图像中的强斑点噪声; 然后采用 K-means 聚类算法对侧扫声呐灰度图像进行分割, 并二值化, 除去大部分海底背景噪声, 初步提取出目标; 接着利用数学形态学运算去除提取结果中的孤立噪点, 并填充目标内部孔洞, 得到连续化、圆滑的目标边缘; 最后对处理后的侧扫声呐图像进行边缘检测, 提取出目标轮廓。实验结果表明: 该算法思想简单易行, 具有很强的克服背景噪声的能力, 自动提取的目标轮廓连续性较好, 结果准确可靠。目前, 在侧扫声呐图像目标轮廓提取过程中, 主要采用人工方式, 自动性较差, 效率较低。本文算法可以实现目标轮廓的自动提取, 提高效率, 具有较强的实用价值。

关键词: 侧扫声呐图像; K-means 聚类; 数学形态学; 边缘检测; 自动提取

中图分类号: P733.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2019)08-0080-06

DOI: 10.11759/hyxx20181217001

声探测技术是目前主要的海底探测技术。侧扫声呐作为一种高分辨率的水下声探测成像设备, 在海底勘查、水下目标探测和识别等方面发挥着重要的作用。对于水下目标探测, 侧扫声呐可在多种场合发挥重要作用。在民用上, 可以搜寻失事落水飞机、沉船、海底构筑物等人工目标和出露的礁石等自然目标; 在军用上, 可以探测潜航器、水雷等军事目标。水下目标探测的一项重要工作是根据声呐图像进行目标识别, 开展水下声呐图像目标自动识别技术研究, 在民用和军事领域都具有极其重要的意义和价值。在对水下声呐图像进行目标识别之前, 需要对声呐图像进行目标检测和特征提取, 其中目标轮廓是其重要特征之一。

侧扫声呐是基于声学散射原理来进行海底探测的。它随船行进的拖鱼向左右两侧发射脉冲声波, 声波碰到海底、沉物、构筑物等物体发生散射, 后向散射回来的信号由拖鱼接收系统接收, 然后由信号处理器处理, 并以图像的形式记录, 形成海底侧扫声呐图像^[1], 简称声图。侧扫声呐图像的像素灰度的大小(或色彩渲染的颜色)取决于海底物质反射声波的强弱。一般情况下, 硬的、粗糙的、凸起的海底, 回波强; 软的、平滑的、凹陷的海底回波弱, 被遮挡的

海底不产生回波, 距离越远回波越弱。在目标检测中, 声图通常可分为目标高亮区、目标阴影区和海底背景区^[2]。

前人对水下声呐图像目标轮廓特征自动提取技术, 进行了多年的探索, Reed S 等^[2]利用改进的 snake 模型对声呐图像轮廓进行提取; Liu Zhuofu 等^[3]提出一种基于细胞神经网络结构的 snake 模型来提取声呐图像目标轮廓, 但是文献[2-3]中基于 snake 模型来提取声呐图像目标轮廓的方法, 对于错断、有孔洞和不规则的水下目标体, 轮廓提取的结果不是很理想。陈立强等^[4]先将声呐图像规格化, 然后采用 Canny 算子提取水雷轮廓用于水雷分类识别中; 王兴梅^[5]利用 MRF 目标检测和水平集的方法对声呐图像进行了轮廓提取, 但是轮廓提取结果中含有较多的噪声点轮廓; 罗进华等^[6]基于数学形态学提取了侧扫声呐图像轮廓, 但是文中用大律法对侧扫声呐图像进行

收稿日期: 2018-12-17; 修回日期: 2019-01-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179169)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.51179169]

作者简介: 王涛(1994-), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 研究方向为海洋地球物理探测, 电话: 15066297709, E-mail: wangtao19940501@163.com; 潘国富, 通信作者, 电话: 0571-81963266, E-mail: panguof@china.com

二级分割, 不够精确。

本文针对侧扫声呐图像, 提出一种基于 K-means 聚类与数学形态学相结合的海底目标轮廓自动提取方法。该算法思想简单易行, 具有很强的克服背景噪声的能力, 自动提取的目标轮廓连续性较好, 结果准确可靠。目前, 在侧扫声呐图像目标轮廓提取过程中, 主要采用人工方式, 自动性较差, 效率较低。本文算法可以实现目标轮廓的自动提取, 提高效率, 具有较强的实用价值。

1 基本原理

1.1 K-means 算法

1.1.1 算法原理

K-means 算法, 也被称为 K-平均或 K-均值, 是一种无监督的聚类算法。它比较容易实现, 并且聚类效果较好, 因此被广泛应用。算法的主要思想是将各聚类中的对象均值作为聚类中心, 通过迭代, 将数据集中的对象按照距离聚类中心最小原则划分到 k 个类中, 并且使得评价聚类性能的准则函数达到最优, 即使得每个聚类本身尽可能的相似, 而各聚类之间尽可能的不同^[7-8]。

1) 数据样本间的相似度评价指标

K-means 算法是以距离作为数据样本间相似度评价指标。在实际操作时, 根据不同的需要可以选择不同的距离计算方法, 常见的有欧式距离、曼哈顿距离、马氏距离等。本文采用的是欧式距离, 下面具体介绍一下欧式距离。

在欧几里得空间中, 数据样本 $x_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ih})$ 和数据样本 $x_j=(x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jh})$ 之间的欧式距离为

$$d(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^h (x_{ik} - x_{jk})^2}, \quad (1)$$

$d(x_i, x_j)$ 越小, 即距离越小, 样本 x_i 和 x_j 之间相似度越高, 更趋于同一类, 反之, 距离越大, 样本 x_i 和 x_j 之间的相似度越低, 更趋于不同类。

2) 聚类性能评价指标

K-means 聚类算法使用误差平方和准则函数来评价聚类性能。假设数据集 X 含有 k 个聚类子集 X_1, X_2, \dots, X_k ; 各个聚类子集中的样本数量分别为 n_1, n_2, \dots, n_k ; 各个聚类子集的聚类中心分别为 m_1, m_2, \dots, m_k , 那么误差平方和准则函数公式为:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{p \in X_i} \|p - m_i\|_2, \quad (2)$$

1.1.2 算法步骤

算法步骤:

- 1) 输入包含 n 个对象的数据集和类的数目 k ;
- 2) 从包含 n 个对象的数据集中选取 k 个对象作为初始聚类中心;
- 3) 计算每个对象到聚类中心的欧式距离, 并根据最小距离原则重新生成 k 个聚类;
- 4) 计算每个聚类的样本均值作为新的聚类中心;
- 5) 重复步骤 3、4, 直到误差平方和准则函数收敛, 即聚类中心不再变化;
- 6) 结束, 输出 k 个类。

1.2 数学形态学

数学形态学(mathematical morphology)是在集合论的基础上发展起来的一个应用性很强的数学分支, 在图像处理领域, 被用于去噪、区域合并、提取骨架、检测边缘等多方面^[9]。数学形态学利用一个称作结构元素的“探针”收集图像的信息, 当探针在图像中不断移动时, 便可考察图像各个部分之间的相互关系, 从而了解图像的结构特征^[10]。数学形态学定义了 4 种基本运算, 即膨胀(或扩张)与腐蚀(或侵蚀), 开和闭运算。这些运算, 在二值图像和多值图像中各有特点, 本文只讨论基于二值的形态学方法。

设 A, B 为整数空间 Z^2 中的两个集合, ϕ 为空集, A 被 B 膨胀, 记为 $A \oplus B$, \oplus 为膨胀算子, 集合 B 称为结构元素, 膨胀的集合定义式为:

$$A \oplus B = \{x | [(\hat{B})_x \cap A] \neq \phi\}, \quad (3)$$

式中 $(\hat{B})_x$ 表示集合 B 作关于原点的映射, 然后平移 x 。 A 被 B 膨胀的结果就是 $(\hat{B})_x$ 与 A 至少有一个公共非零元素的集合。

A 被 B 腐蚀, 记为 $A \ominus B$, \ominus 为腐蚀算子, 其定义公式为:

$$A \ominus B = \{x | (B)_x \subseteq A\}, \quad (4)$$

该式表示 A 被 B 腐蚀的结果为所有使 B 被 x 平移后包含于 A 的点 x 的集合。

膨胀有扩大对象和连接裂缝的作用, 腐蚀有缩小对象和消除小且无意义的物体的作用。

A 被 B 作开运算, 记为 $A \circ B$, 其公式为:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B, \quad (5)$$

从公式(5)可以看出 A 被结构元素 B 作开运算就是 A 被 B 腐蚀后的结果再被 B 膨胀。

A 被 B 作闭运算, 记为 $A \bullet B$, 其公式为:

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B, \quad (6)$$

从公式(6)可以看出 A 被结构元素 B 作闭运算就是 A 被 B 膨胀后的结果再被 B 腐蚀。

开运算一般用于消除对象中的细小突变从而进行光滑处理; 闭运算可用于填塞小的孔洞和轮廓中的断裂, 也可以用于轮廓的光滑。

2 本文算法描述

基于 K-means 聚类与数学形态学相结合的海底目标轮廓自动提取算法的主要步骤为: (1)针对侧扫声呐图像斑点噪声强的问题, 利用中值滤波对图像进行去噪; (2)然后根据 K-means 聚类算法获取声呐图像的初始分割结果, 并二值化, 初步提取出目标; (3)接着采用数学形态学的方法对目标进行优化; (4)最后对目标进行边缘检测, 提取目标轮廓。

2.1 侧扫声呐图像降噪处理

侧扫声呐工作的水体介质中的各种散射体和海底介质引起的海洋混响噪声, 常常导致声呐图像出现严重的斑点噪声, 给后续的检测识别等处理带来困难。中值滤波是图像处理中一种常用的方法, 它对于抑制斑点噪声来说尤为有用, 并且容易实现、运算效率高。

2.2 侧扫声呐图像目标提取

侧扫声呐图像主要由目标高亮区、目标阴影区和海底背景区组成。因此利用 K-means 聚类算法对降噪后的侧扫声呐图像进行 3 级分割。首先将侧扫声呐图像的灰度值作为将要聚类的样本集, 然后从侧扫声呐图像 3 个特征区域各选取一个灰度值作为初始的聚类中心, 通过循环迭代, 直至聚类中心不再改变, 最终将侧扫声呐图像分割为 3 个灰度级的图像; 接着对分割后的侧扫声呐图像进行二值化, 将目标高亮区的灰度级用 0 表示, 其他两个灰度级用 1 表示; 最后对二值化后的侧扫声呐图像进行一系列数学形态学运算, 去除残留的背景干扰, 并且让目标物的孔洞得到填充、不连续部分得到连接。

2.3 侧扫声呐图像目标轮廓提取

经过上述处理的结果后, 使用边缘检测算子提取目标轮廓。图像的边缘是指其周围像素灰度急剧变化的那些像素的集合, 它是图像最基本的特征^[11]。边缘检测的基本思想是先检测图像中的边缘点, 再按照某种策略将边缘点连接成轮廓。常见的一阶边

缘检测算子有: Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子等。一阶微分边缘检测算子也称为梯度边缘算子, 它是利用图像在边缘处的阶跃性, 即图像梯度在边缘取得极大值的特性进行边缘检测。常见的二阶边缘检测算子有: Canny 算子、LoG 算子等。二阶微分边缘检测算子是利用图像在边缘处的阶跃性导致图像二阶微分在边缘处出现零值这一特性进行边缘检测的。

下面的程序片段演示了本文算法操作流程。

```
//读入原始声图
Image = imread('原始声图');
//将声图转为灰度图
I_gray = rgb2gray(Image);
//进行中值滤波降噪
I_graymf = medfilt2(I_gray);
//K-means 三级聚类和二值化
[g bin] = k_means(I_graymf, 3);
//数学形态学运算, 操作多次
//腐蚀, se_0 为腐蚀算子
ge_0 = imerode(bin, se_0);
//膨胀, se_1 为膨胀算子
ge_1 = imdilate(ge_0, se_1);
...
ge_n = imdilate(ge_n-1, se_n);
//边缘检测, 提取目标轮廓
target_contour = edge(ge_n);
```

3 应用实例与结果分析

为了验证本文算法的效果, 实验数据使用了某海域一架沉于海底的飞机的侧扫声呐图像(图 1a)。

图 1a 为原始的侧扫声呐图像, 图 1b 是对其进行了 3×3 窗口的中值滤波处理后的结果, 从图 1a 与图 1b 的对比中可以看到斑点噪声得到明显削弱。接着利用 K-means 聚类算法对图 1b 进行 3 级分割, 并且二值化后得到图 1c。从图 1c 中可以看到飞机主体基本被提取出来了, 但还残余一部分海底散射强度与飞机体相近的背景干扰。为了消除残余背景干扰, 采用 3×3 正方形算子对图 1c 进行腐蚀运算得到图 1d。从图 1d 中可以看到背景干扰完全被消除, 但同时飞机体的连续性变差, 孔洞增大, 飞机体有所减小。为了保证后面提取的飞机轮廓完整连续, 又采用半径为 6 的圆形算子对图 1d 进行膨胀处理得到图 1e。从图 1e 中可看出目标物飞机的孔洞得到填充, 飞机体更加完整, 但同时飞机体有所增大。于是再采用 3×3 正方形算子对图 1e 进行腐蚀得到图 1f。最后对图 1f

使用 Sobel 算子提取边缘, 从图 1g 中可看到提取的飞机轮廓完整连续。图 1h 是对图 1a 直接用 Soble 算子进行边缘检测的结果, 可以看到提取的飞机不连续, 破碎, 受到背景严重干扰。

为了验证本文算法具有普遍性, 又对不明物体的侧扫声呐图像(图 2a)和一艘沉于海底的船的侧扫声呐图像(图 3a)进行自动轮廓提取, 结果表明本文算法提取的轮廓完整连续, 抗干扰能力强。

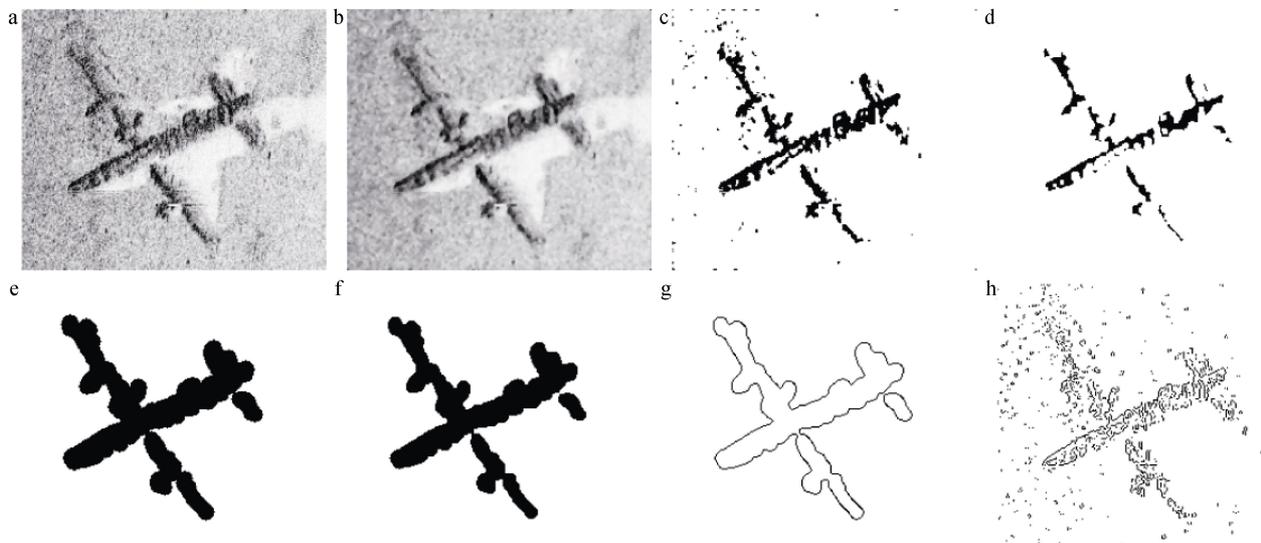


图 1 沉于海底的飞机轮廓自动提取结果示意图

Fig. 1 Results of automatic extraction of an aircraft contour under the sea

a: 原始声图; b: 对图 1a 进行中值滤波后的结果; c: 对图 1b 进行 K-means 聚类并二值化后的结果; d: 对图 1c 使用 3×3 正方形算子腐蚀后的结果; e: 对图 1d 使用半径为 6 的圆形算子膨胀后的结果; f: 对图 1e 使用 3×3 正方形算子腐蚀后的结果; g: 对图 1f 使用 Sobel 算子提取飞机轮廓结果; h: 直接对图 1a 使用 Sobel 算子提取飞机轮廓结果

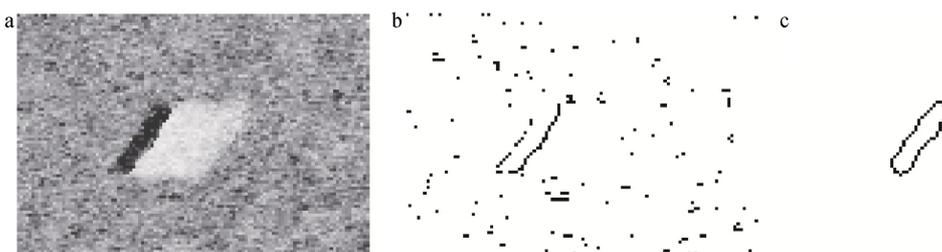


图 2 不明物体目标轮廓自动提取结果

Fig. 2 Results of automatic extraction of an unknown target contour

a: 原始声图; b: Sobel 算子边缘检测法提取目标轮廓结果; c: 本文方法提取目标轮廓结果

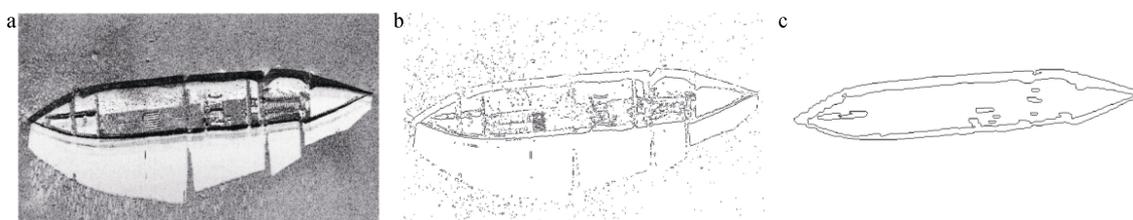


图 3 海底沉船目标轮廓自动提取结果

Fig. 3 Results of automatic extraction of a wreck contour

a: 原始声图; b: Sobel 算子边缘检测法提取目标轮廓结果; c: 本文方法提取目标轮廓结果

4 结论

通过试验得到以下几点结论:

1) 基于 K-means 聚类与数学形态学的侧扫声呐图像目标轮廓自动提取算法是可行的, 该算法具有实现简单、运算快、提取的轮廓连续完整等特点, 因

此具有比较好的实用性。

2) K-means 算法分割的结果与初始聚类中心的选择有关, 初始聚类中心选择不同, 分割的结果不尽相同, 因此有待进一步改进。

3) 在进行数学形态学处理时, 结构元素的尺寸与形状需要根据目标体的大小和形态进行选取, 有时需要进行多次膨胀、腐蚀、开闭运算, 操作次数需要根据目标物的完整性和背景复杂性凭经验确定。另外经过数学形态学处理后, 目标体有轻微变形, 轮廓定位可能会有小的偏差, 有待进一步解决。

参考文献:

- [1] 张济博, 潘国富, 丁维凤. 侧扫声呐图像改正研究[J]. 声学技术, 2009, 28(6): 44-47.
Zhang Jibo, Pan Guofu, Ding Weifeng. Research on side-scan sonar images' correction[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(6): 44-47.
- [2] Reed S, Petillot Y, Bell J. An automatic approach to the detection and extraction of mine features in sidescan sonar[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2003, 28(1): 90-105.
- [3] Liu Zhuofu, Sang Enfang, Liao Zhenpeng. Sonar image segmentation using snake models based on cellular neural network[C]//IEEE. IEEE International Conference on Information Acquisition. Hong Kong, China: IEEE, 2005: 448-452.
- [4] 陈立强, 刘忠, 田晓东. 基于边缘特征的水下目标分类识别算法[J]. 自动化技术与应用, 2007, 26(8): 77-79.
Chen Liqiang, Liu Zhong, Tian Xiaodong. Classification and recognition of underwater target based on edge feature[J]. Pattern Recognition and Simulation, 2007, 26(8): 77-79.
- [5] 王兴梅. 水下声纳图像的 MRF 目标检测与水平集的轮廓提取方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
Wang Xingmei. Research on underwater sonar image objects detection and contours extraction based respectively on MRF and level set[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [6] 罗进华, 蒋锦朋, 朱培民. 基于数学形态学的侧扫声呐图像轮廓自动提取[J]. 海洋学报, 2016, 38(5): 150-157.
Luo Jinhua, Jiang Jinpeng, Zhu Peimin. Automati extraction of the side-scan sonar imagery outlines based on mathematical morphology[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 38(5): 150-157.
- [7] 郭秀娟. K-均值聚类算法在图像分割中的应用[J]. 吉林建筑大学学报, 2015, 32(6): 63-66.
Guo Xiujuan. The application of K-means clustering algorithm in image segmentation[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2015, 32(6): 63-66.
- [8] Steinley D. K-means clustering: A half-century synthesis[J]. British Journal of Mathematical and Statistical Psychology, 2006, 59(1): 1-34.
- [9] 赵荣椿, 赵忠明, 赵歆波. 数字图像处理与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 136-137.
Zhao Rongchun, Zhao Zhongming, Zhao Xinbo. Digital Image Processing and Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 136-137.
- [10] 袁悦锋, 朱培民, 赵娜, 等. 基于数学形态学的月海圆形撞击坑自动识别方法[J]. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2013, 43(3): 324-332.
Yuan Yuefeng, Zhu Peimin, Zhao Na, et al. Automatic identification of circular mare craters based on mathematical morphology[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2013, 43(3): 324-332.
- [11] 赵小川. 现代数字图像处理技术提高及应用案例详解[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 18-38.
Zhao Xiaochuan. Modern Digital Image Processing Technology Improvement and Application Case Details[M]. Beijing: Beihang University Press, 2012: 18-38.

Automatic extracting target contour of side-scan sonar images by uniting K-means clustering with mathematical morphology

WANG Tao, PAN Guo-fu, ZHANG Ji-bo

(Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China)

Received: Dec. 17, 2018

Key words: side-scan sonar image; K-means clustering; mathematical morphology; edge detection; automatic extraction

Abstract: To address the issues of strong speckle noise and severe scattering interference of seabed background in side-scan sonar images along with difficulty in the automatic extraction of seabed target contour, an automatic extraction algorithm of seabed target contour based on K-means clustering and mathematical morphology is proposed. First, the algorithm uses median filtering to eliminate strong speckle noise in the sonar images. Second, the K-means clustering algorithm is used for the segmentation of the side-scan sonar images, and the process of binarization is used to remove most of the seabed background noise along with a preliminary extraction of the target. Third, mathematical morphology is used to eliminate the isolated noise in the extraction result, and the internal hole of the target is filled to obtain continuous and smooth target edge. At last, edge detection is performed on the processed side-scan sonar images, and the target contour is extracted. The experimental results demonstrate that the proposed algorithm is simple and easy to implement and has a strong ability to overcome background noise. The automatic extraction of the target contour has good continuity, and the results are accurate and reliable. At present, in the process of extracting target contour of the side-scanning sonar image, the manual method is mainly adopted, and the automaticity is poor and the efficiency is low. The proposed algorithm can achieve the automatic extraction of target contours, improve their efficiency, and has a strong practical value.

(本文编辑: 刘珊珊)