



DOI: 10.12086/oe.2018.180039

基于局部 Otsu 分割与 Hough 变换的海天线检测

戴永寿¹, 刘博文^{1*}, 李立刚¹, 金久才², 孙伟峰¹,
邵峰¹

¹中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266000;

²国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266000

摘要:海面波浪、船只与光照等因素的影响,使得可见光海面图像中的海天线难以被准确检测。为提高海天线检测的准确性与鲁棒性,提出了基于局部 Otsu 分割与 Hough 变换的海天线检测方法。首先,通过纵向中值滤波快速地抑制灰度图像中的光斑等高频噪声。然后,根据图像特点进行纵向分块处理来补偿光照的不均匀性并将船只的干扰范围限定在部分图像块中,再进行局部 Otsu 分割得到二值图像并提取其中的边缘像素,抑制了波浪边缘的干扰。最后,采用 Hough 变换拟合边缘像素以得到海天线。实验结果表明所提方法具有较高的准确性、鲁棒性与实时性,其检测准确率可达 93.0%,显著高于三种代表性的海天线检测方法。

关键词:海天线检测;边缘提取;图像分块;Otsu 分割;纵向中值滤波;Hough 变换

中图分类号: TP391

文献标志码: A

引用格式: 戴永寿,刘博文,李立刚,等. 基于局部 Otsu 分割与 Hough 变换的海天线检测[J]. 光电工程, 2018, 45(7): 180039



Sea-sky-line detection based on local Otsu segmentation and Hough transform

Dai Yongshou¹, Liu Bowen^{1*}, Li Ligang¹, Jin Jiucui², Sun Weifeng¹, Shao Feng¹

¹College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266000, China;

²The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, Shandong 266000, China

Abstract: Due to the interference such as sea waves, ships and light, it is difficult to accurately detect the sea-sky-line of the visible light maritime image. To improve the detection accuracy and robustness, a sea-sky-line detection method based on local Otsu segmentation and Hough transform is proposed. Firstly, high-frequency noise such as light spot in the gray image is rapidly suppressed by longitudinal median filter. Then, according to the image features, the gray image is divided into image blocks in longitudinal to compensate for inhomogeneity of illumination and limit the interference scope of ships to some image blocks. Afterwards, local Otsu segmentation is performed on the gray image to obtain the binary image where edge pixels are extracted, which suppresses the interference of waves. Finally, Hough transform is used to fit edge pixels to complete the sea-sky-line detection. Experimental re-

收稿日期: 2018-01-09; 收到修改稿日期: 2018-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(61401111); 国家重点研发计划(2017YFC1405203); 国家海洋公益性行业科研专项(201505005-2); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(16CX06053A)

作者简介: 戴永寿(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋环境安全信息提取方面的研究。E-mail: daiys@upc.edu.cn

通信作者: 刘博文(1992-), 男, 硕士, 主要从事海洋图像处理方面的研究。E-mail: 1194701821@qq.com

sults show that the proposed method is relatively accurate, robust and real-time. The detection accuracy of the proposed method is 93.0%, which is significantly higher than that of three representative sea-sky-line detection methods.

Keywords: sea-sky-line detection; edge detection; image blocking; Otsu segmentation; longitudinal median filter; Hough transform

Citation: Dai Y S, Liu B W, Li L G, *et al.* Sea-sky-line detection based on local Otsu segmentation and Hough transform[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(7): 180039

1 引言

无人水面艇等海面载体搭载的摄像机采集的可见光图像中,舰船目标通常出现在海天线附近,而且海天线在图像中的位置与摄像机姿态有关。因此,海天线的准确检测具有缩小目标检测范围^[1]、辅助图像校准^[2]等重要的意义。此外,还可以利用海天线将图像分割为两个部分,有利于使用不同的方法对这两部分进行处理。

海天线检测相关研究较多,大多应用于红外图像,主要可以概括为两类方法。第一类是基于边缘点直线检测的方法^[2-8],通过对高梯度边缘像素进行直线拟合或投影,来实现海天线或候选海天线的检测。这类方法的优点是在海浪边缘干扰较少的情况下能获得高精度检测结果,但其缺点在于根据梯度提取边缘无法兼顾海天线边缘的提取与波浪边缘的抑制,且难以适应海天线梯度随光线等因素的变化。第二类方法是基于图像分割的方法^[9-11],通过灰度阈值处理或背景建模等方式实现图像的分割,然后提取海水区域的上方边界作为海天线。这类方法的优点是对海浪等边缘干扰具有很强的鲁棒性,但缺点是受限于图像分割精度而无法获得准确的海天线检测结果。此外,还有基于行扫描的方法^[12]与基于剪切波变换的方法^[13],但前者难以适应存在近景船只或海天线倾斜的图像,而后者计算复杂、实时性差。

船载摄像机采集的可见光海面图像存在波浪、反

光、船只等干扰因素,并且图像清晰度随海况与光线不断变化,这对海天线检测方法的鲁棒性与普适性提出了很高的要求。针对可见光海面图像的特点并借鉴现有方法的优点,本文提出了一种基于局部 Otsu 分割与 Hough 变换的海天线检测方法,其流程如图 1 所示。首先,进行纵向中值滤波抑制高频噪声。然后,基于局部 Otsu 图像分割提取边缘像素。最后,利用 Hough 变换拟合边缘像素得到海天线直线方程。

2 纵向中值滤波

海面图像中光斑与小型浪花等噪声会降低海水区域与天空区域各自的灰度一致性,而且此类噪声在图像分割环节易被错误归类,形成干扰边缘。高斯滤波、均值滤波与中值滤波都是典型的图像滤波方法^[14]。高斯滤波与均值滤波属于非边缘保持滤波,会造成海天线边缘的模糊。而中值滤波(通常为二维)属于边缘保持滤波,常用于去除脉冲噪声,但缺点是计算量较大。

光斑与小型浪花具有面积小且灰度高的特点,且浪花多为水平条形状。分析含有光斑或浪花的图像单列的灰度剖面图,发现光斑或浪花的灰度呈脉冲尖峰,在垂直方向上进行中值滤波即可抑制脉冲尖峰。图 2 为以上论述的示意图,图 2(a)中红色箭头指向随机选取的图像单列,图 2(b)为该图像单列的灰度剖面图,图 2(c)为图 2(b)的纵向中值滤波结果。图 2(b)、图 2(c)的横坐标表示像素的行数,纵坐标表示像素的灰度级。

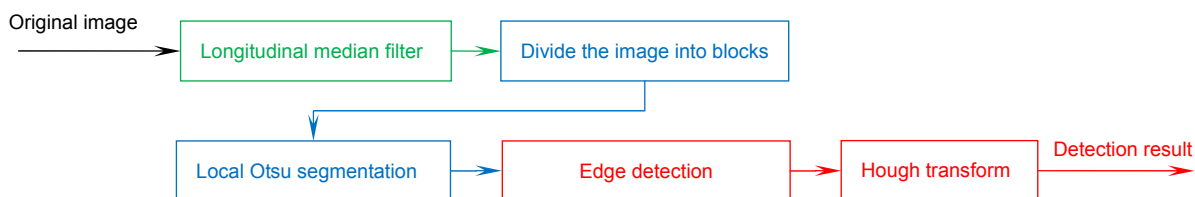


图 1 基于局部 Otsu 分割与 Hough 变换的海天线检测流程

Fig. 1 Flowchart of sea-sky-line detection based on local Otsu segmentation and Hough transform

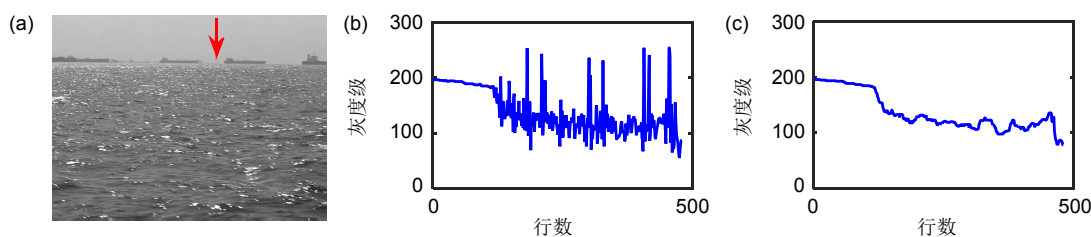


图 2 光斑等高频噪声的分析与滤波。(a) 原始图像; (b) 图像单列的灰度剖面图; (c) 图 2(b) 的中值滤波结果

Fig. 2 Analysis and filter of high frequency noise such as light spot. (a) Original images; (b) The profile plot of the gray image single column; (c) The median filter result of Fig. 2(b)

为此, 采用计算量小于二维中值滤波的纵向(一维)中值滤波, 计算公式为

$$I_f(m,n) = \underset{(m'-m) \in [-s,s]}{\text{median}} I(m',n), \quad (1)$$

式中: I_f 为滤波后的图像, m 、 n 分别表示像素的行、列坐标, median 表示中值运算, I 为原灰度图像, s 表示滤波窗口的纵向半径。滤波窗口大小需要人为设定, 窗口过大会导致图像模糊且增大了计算量, 窗口过小则无法有效降噪。对于大小为 480 pixels×640 pixels 的图像, 光斑、小型浪花等高频噪声在垂直方向上的长度通常小于 10 pixels, 结合滤波测试效果, 将滤波窗口大小设置为 15 pixels×1 pixels。

3 基于局部 Otsu 分割的边缘提取

基于局部 Otsu 分割的边缘提取是本文海天线检测方法的核心环节。首先对图像进行纵向分块以补偿光照的不均匀性, 然后对各图像块进行 Otsu 分割得到二值图像, 最后将图像中与纵向邻域像素发生二值变化的像素标记为边缘像素。

3.1 图像分块处理

海天线是海水区域与天空区域的分界线, 若能将这些区域分离, 即可提取两区域分界线并将其作为海天线边缘。根据图像灰度直方图选择阈值进行图像分割, 具有直观、实现简单且计算速度快的特点。当图像主要由两类像素组成且这两类像素灰度分布具有明显差异时, 可用单个适用于整幅图像的全局阈值^[14]。然而, 受光照与目标等因素的影响, 海面图像的灰度分布往往更为复杂。海水反光像素的灰度值通常与天空像素灰度值更为接近, 而且会造成海水像素灰度一致性降低。图像中的目标会使图像的灰度种类增多, 尤其是当图像中出现近景目标时, 图像的主要像素种类将超过两类。对于光照不均或存在近景目标的图像, 图像已经不具有主要由两类像素组成且这两类像素灰

度分布具有明显差异的特点, 应用全局阈值分割显然难以准确地将海水与天空区域分离。

为解决全局阈值分割在光照不均或存在近景目标的图像中分割效果不佳的问题, 在竖直方向上对图像进行了分块处理。假设图像大小为 $M \times N$ 像素, 将图像均匀裁剪为 B 个依次相邻图像块(综合考虑实时性与图像分割准确性并结合测试效果, 将图像块数量设置为 $B=16$), 每个图像块的大小为 $(M \times N)/B$ 像素。相比于整幅图像, 图像块中同类像素的灰度级更少、灰度一致性更强, 再加上图像分块将船只与反光等干扰因素分散至部分图像块, 保证大部分图像块具有主要由两类像素组成且这两类像素灰度分布具有明显差异的特点。

3.2 Otsu 图像分割

Otsu 方法^[14](又名最大类间方差法)是一种被广泛应用的阈值分割方法, 由日本学者大津(Otsu)于 1979 年提出。该方法采用类间方差来描述两类像素间的差别, 选择使两类像素类间方差最大的阈值作为最佳阈值。相对于其他阈值分割方法, Otsu 方法对图像灰度直方图分布的要求较低, 且不需要人为设定参数。

设大小为 $M \times N$ 像素的图像具有 L 个灰度级, n_i 表示灰度级为 i 的像素数量, 归一化直方图纵坐标的值为 $p_i = n_i / MN$ 。设阈值为 k , 将灰度值小于或等于 k 的像素归为类 1, 将灰度值大于 k 的像素归为类 2, 使得类间方差 σ_B^2 最大的 k 值, 即为最佳阈值, 其中:

$$\sigma_B^2(k) = P_1(k)[m_1(k) - m_G]^2 + P_2(k)[m_2(k) - m_G]^2, \quad (2)$$

式中: $P_1(k)$ 与 $P_2(k)$ 分别表示类 1 像素与类 2 像素所占比例, $m_1(k)$ 与 $m_2(k)$ 分别表示类 1 像素的灰度均值与类 2 像素的灰度均值, m_G 为图像的灰度均值, 它们的计算公式如下:

$$P_1(k) = \sum_{i=0}^k p_i, \quad (3)$$

$$P_2(k) = \sum_{i=k+1}^{L-1} p_i = 1 - P_1(k) , \quad (4)$$

$$m_1(k) = \frac{1}{P_1(k)} \sum_{i=0}^k ip_i , \quad (5)$$

$$m_2(k) = \frac{1}{P_2(k)} \sum_{i=k+1}^{L-1} ip_i , \quad (6)$$

$$m_G = \sum_{i=0}^{L-1} ip_i . \quad (7)$$

对于每个图像块,都利用 Otsu 方法计算相应的阈值并进行二值化,完成每个图像块的二值化,即可得到完整的二值图像 I_{bw} 。

图 3 为存在典型影响因素的海面图像及其分割结果,其中图 3(a)~图 3(d)为原图像,图 3(e)~图 3(h)为全局 Otsu 阈值分割结果,图 3(i)~图 3(l)为局部 Otsu 阈值分割结果。虽然图 3(a)~图 3(b)存在海浪干扰,而且图 3(b)的清晰度很低,但两图像天空与海水区域各自的灰度一致性较强,采用全局 Otsu 阈值方法即可获得较为准确的分割结果。而对于图 3(c)这种光照不均的图像与图 3(d)这种存在近景目标的图像,可以看出局部 Otsu 阈值分割的效果要显著优于全局 Otsu 阈值分割。

3.3 边缘提取

考虑到海面图像中天空区域与海水区域自上而下

的分布,因此沿垂直方向检查二值图像 I_{bw} 中像素值发生突变的位置。若某像素与其相邻行像素的数值不同,则将该像素标记为 1,表示边缘像素,否则置 0。遍历图像 I_{bw} 即可得到二值边缘图像 I_{edge} :

$$I_{edge}(m,n) = I_{bw}(m,n) \oplus I_{bw}(m+1,n) , \quad (8)$$

式中 \oplus 为“异或”运算。

由于边缘提取结果取决于图像分割的效果,而不是图像梯度,因此避免了 Canny 与 Sobel 等基于梯度的边缘提取算法普遍存在的问题——固定梯度阈值难以适应海天线与海浪边缘梯度的变化。

为进一步说明所提边缘提取方法的适应性,将它与被广泛应用的 Canny 边缘提取算法^[14]进行对比,图 4 为部分测试结果。图 4(a)~图 4(d)分别为图 3(a)~图 3(d)的低梯度阈值 Canny 边缘提取($T_1=0.05, T_2=0.1$)结果,可以看出,设置较低的梯度阈值有利于 Canny 算法提取低对比度图像中的海天线边缘,但会引入大量噪声边缘,可能导致海天线边缘被噪声淹没。图 4(e)~图 4(h)分别为图 3(a)~图 3(d)的高梯度阈值 Canny 边缘提取($T_1=0.05, T_2=0.4$)结果,可以看出,设置较高的梯度阈值,有利于 Canny 算法从图 3(a)这种高对比度图像中提取海天线边缘并抑制波浪边缘,但会导致对比度相对较低的图 3(b)~图 3(d)中海天线边缘的漏

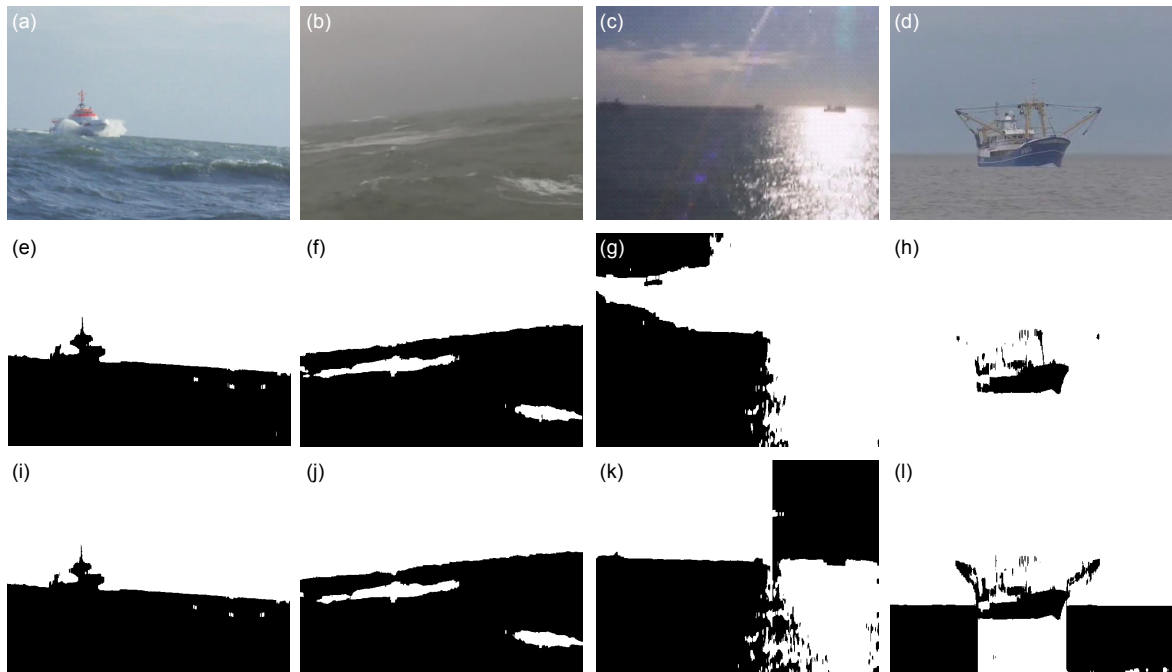


图 3 典型海面图像的分割结果对比图。(a)~(d) 原始图像; (e)~(h) 全局 Otsu 阈值分割结果; (i)~(l) 局部 Otsu 阈值分割结果

Fig. 3 Segmentation results comparison of typical maritime images. (a)~(d) Original images; (e)~(h) Results of global Otsu segmentation; (i)~(l) Results of local Otsu segmentation

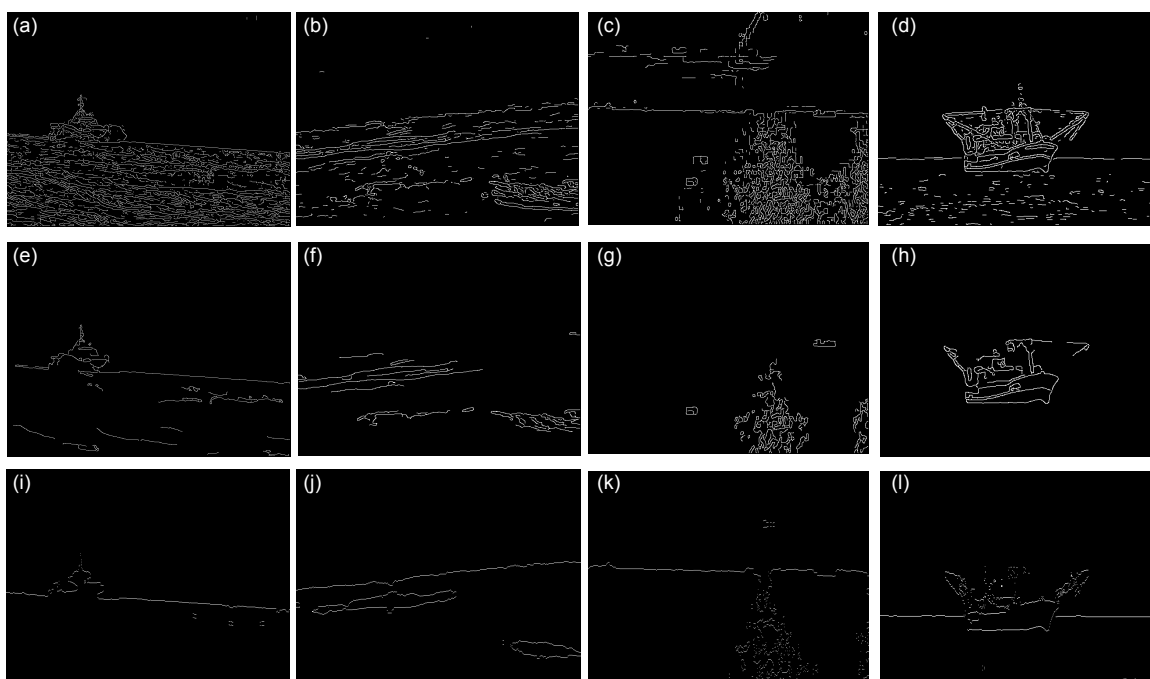


图 4 典型海面图像的边缘提取结果对比图。(a)~(d) 低梯度阈值 Canny 边缘提取结果; (e)~(h) 高梯度阈值 Canny 边缘提取结果; (i)~(l) 基于局部 Otsu 分割的边缘提取结果

Fig. 4 Edge detection results comparison of typical maritime images. (a)~(d) Edge detection results of Canny with low gradient threshold; (e)~(h) Edge detection results of Canny with high gradient threshold; (i)~(l) Edge detection results based on local Otsu segmentation

检测。图 4(i)~图 4(l)分别为图 3(a)~图 3(d)经过本文边缘提取方法处理的结果，可以看出本文方法在提取出海天线边缘的同时也有效抑制了海面噪声，对海天边缘与海浪边缘的梯度变化具有良好的适应性。

4 基于 Hough 变换的直线检测

边缘图像中海天线边缘通常不连续且存在干扰边缘，因此需要对边缘像素进行直线拟合以提取连续海天边缘并抑制干扰。常用的直线拟合方法有最小二乘法、随机抽样一致性(random sample consensus, RANSAC)算法和 Hough 变换法。最小二乘法拟合直线容易受到干扰点的影响，RANSAC 算法计算量大且需要设定拟合范围。相比之下，Hough 变换^[14]具有实时性好、抗干扰能力强的特点。

Hough 变换的主要思想是将图像空间的边缘像素映射到直线参数空间中，通过搜索参数空间中的局部峰值点来确定直线的参数。变换前在图像空间 (x, y) ，变换后在参数空间 (ρ, θ) ，直线方程转换为极坐标形式：

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta, \quad (9)$$

对参数 (ρ, θ) 所对应的直线进行累积投票，投票

值为图像空间中位于该直线上的边缘像素数量，计算公式如下：

$$H(\rho, \theta) = \iint_{x, y} I_{\text{edge}}(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - \rho) dx dy. \quad (10)$$

式中： I_{edge} 为边缘图像， $\delta(\cdot)$ 为冲激函数。

直线的投票值 H 越大，表明该直线包含的边缘像素越多，也就意味着该直线为海天边缘的可能性越大。因此，对边缘图像进行 Hough 变换后，选择具有最大 H 值的直线作为海天边缘。

5 实验结果与分析

为了验证本文方法的有效性，利用可见光海面图像数据集对方法进行了测试。由于目前公开的可见光海面图像数据集较少，为获得更多的接近多变海面场景的图像，从三篇文献^[9,15-16]提供的可见光海面图像数据集与某船只图像收藏网站 (<http://www.shipspotting.com>) 中挑选出 100 幅有代表性的图像。文献[9]提供的数据集由无人船上的摄像机采集，文献[15]提供的数据集由快艇上的摄像机采集，文献[16]提供的数据集由海岸监控摄像机采集。为方便测试与对比，将图像大小调整为 480 pixels×640

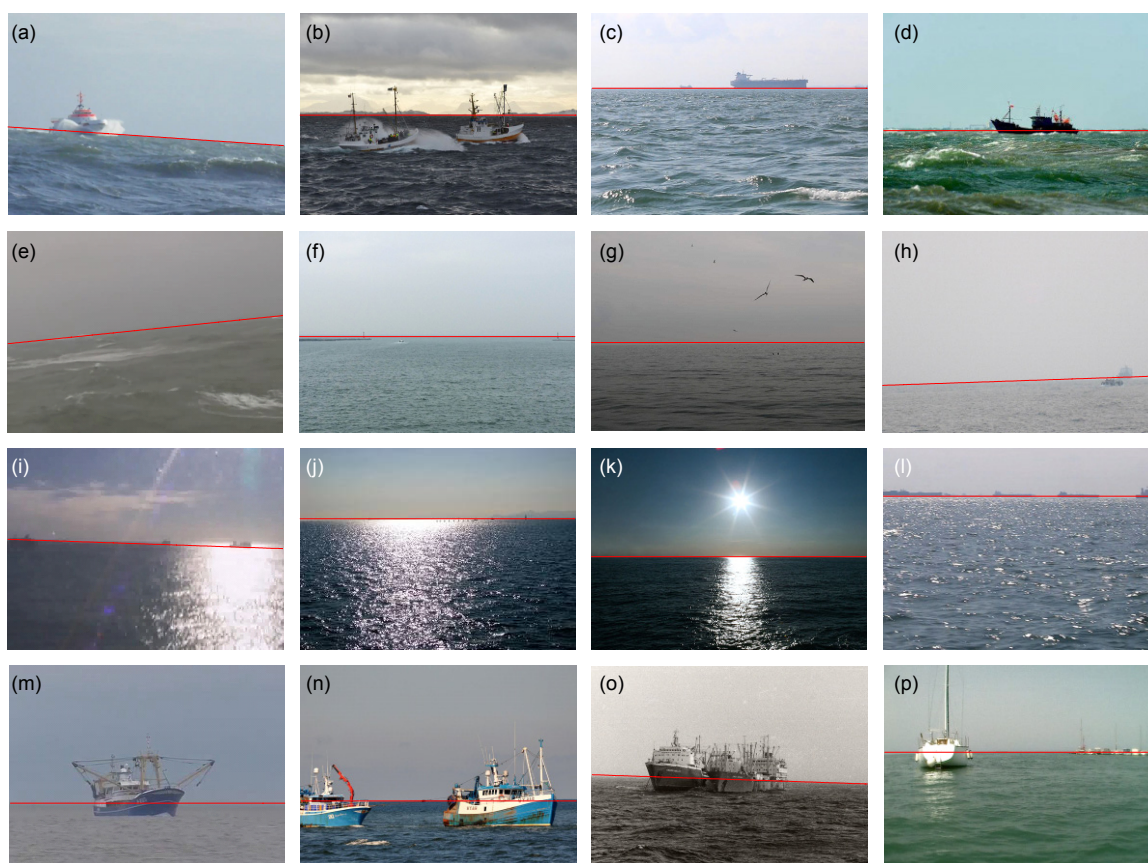


图 5 典型海面图像中本文方法的海天线检测结果。(a)~(d) 海浪干扰图像; (e)~(h) 模糊图像; (i)~(l) 反光干扰图像; (m)~(p) 近景船只干扰图像

Fig. 5 Sea-sky-line detection results of the proposed method on typical maritime images. (a)~(d) Images with many waves; (e)~(h) Blurred images; (i)~(l) Images with sea reflection; (m)~(p) Images with close target

pixels。测试所使用的硬件平台为 Intel Core i5 处理器，2 GB 内存，软件平台为 Matlab 2015。

根据海天线检测的主要影响因素，将测试图像分为四种类型：1) 海浪干扰图像；2) 模糊图像；3) 反光干扰图像；4) 近景船只干扰图像。部分测试结果如图 5 所示，其中图 5(a)~图 5(d)为海浪干扰图像，图 5(e)~图 5(h)为模糊图像，图 5(i)~图 5(l)为反光干扰图像，图 5(m)~图 5(p)为近景船只干扰图像，图 5 中红色实线为海天线检测结果。测试结果表明，本文方法对于海浪、船只与反光干扰以及图像对比度的变化，具有较强的鲁棒性。

将本文方法与三种代表性的海天线检测方法进行对比，包括一种综合 Hough 变换与最小二乘直线拟合结果的海天线检测方法^[7](代码由文献[7]的作者 Prasad 提供，下文简称为 Prasad 方法)，一种综合边缘与颜色统计信息的海天线检测方法^[2](代码由本文作者实现，下文简称为 Fefilatyevev 方法)，一种基于高斯

混合模型图像分割的海天线检测方法^[9](代码由文献[9]的作者 Kristan 提供，下文简称为 Kristan 法)。三种方法的部分测试结果如图 6 所示，图中红色实线为海天线检测结果。

图 6(a)~图 6(d)是 Prasad 方法的测试结果，由于图 6(b)与图 6(d)中海天线的低梯度边缘未被提取出，再加上波浪与船只边缘的干扰，导致海天线未能被准确检测。图 6(e)~图 6(h)是 Fefilatyevev 方法的测试结果，该方法假设海天线上两个区域的颜色分布差异最大，然而当图像光照不均或存在近景船只时，该假设难以成立。图 6(i)~图 6(l)是 Kristan 方法的测试结果，由于难以对复杂的海面图像建立准确的高斯模型，从而导致分割不准确，也就无法得到令人满意的海天线检测结果。图 5(a)、图 5(e)、图 5(i)、图 5(m)显示了对应图像上本文方法的检测结果，可以看出本文方法的检测效果优于上述三种方法。

为定量分析方法的准确性，规定当海天线检测结

果与人为标记结果(视作真实值)的像素误差均值小于 3 时,检测结果准确。对 100 帧样本图像的测试结果进行了统计与分析,结果如表 1 所示。数据表明,本文方法的检测准确率与实时性均优于其他三种方法。

虽然本文方法在大部分测试图像上取得了良好的海天线检测结果,但对以下两种图像的海天线检测效

果欠佳: 1) 大部分海天线边缘被物体遮蔽; 2) 海雾或光线造成海天线区域模糊不清。图 7 为这两种图像的海天线检测与局部 Otsu 分割的失败案例,图中红色实线为检测出的海天线。从图 7(a)、图 7(b)可以看出,海天线边缘长度小于船只吃水线长度,经过船只吃水线的直线具有更大的 H 值,从而造成了误检测。图 7(c)

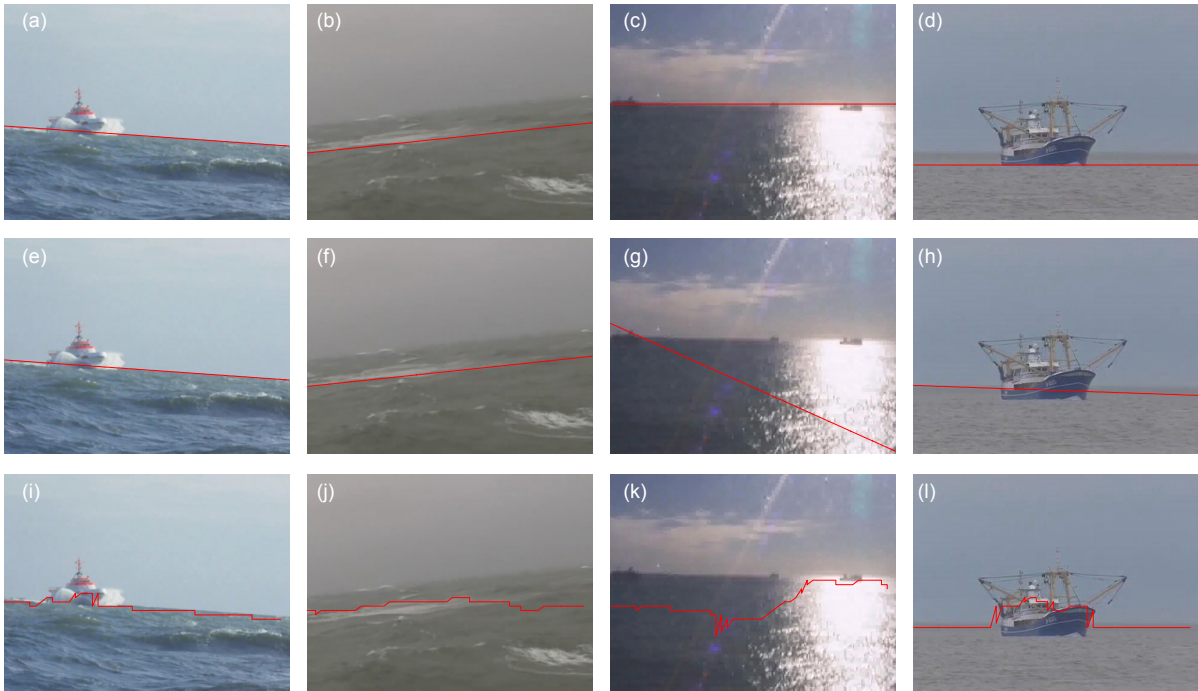


图 6 海天线检测方法的测试结果对比图。(a)~(d) Prasad 方法的测试结果; (e)~(h) Fefilatyevev 方法的测试结果; (i)~(l) Kristan 方法的测试结果

Fig. 6 Sea-sky-line detection results comparison of three methods. (a)~(d) Results of Prasad method; (e)~(h) Results of Fefilatyevev method; (i)~(l) Results of Kristan method

表 1 100 帧测试图像的海天线检测结果对比
Table 1 Sea-sky-line detection result comparison of 100 frames test images

	Prasad method	Fefilatyevev method	Kristan method	Proposed method
Detection rate/%	77.0	72.0	64.0	93.0
Time consumed per frame/ms	685	370	267	216

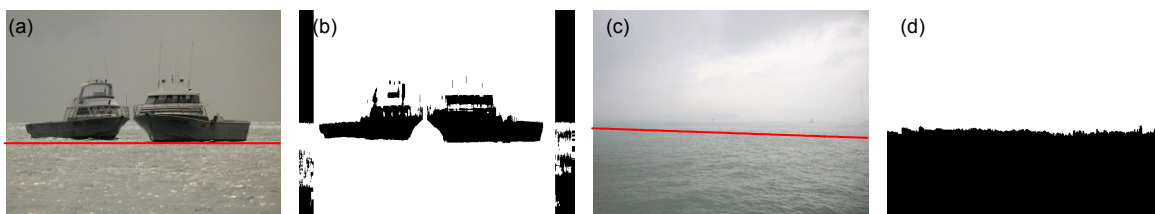


图 7 失败案例。(a) 海天线被严重遮蔽的图像; (b) 图 7(a)的局部 Otsu 分割结果; (c) 海天区域模糊不清的图像; (d) 图 7(c)的局部 Otsu 分割结果

Fig. 7 Failure cases. (a) The image that sea-sky line is shaded; (b) The local Otsu segmentation results of image 7(a); (c) The image that sea-sky region is blurred; (d) The local Otsu segmentation results of image 7(c)

和 7(d)表明了海天区域模糊不清所造成的图像分割不准确,进而导致海天检测结果出现偏差。对于海天被严重遮蔽的图像,借助图像序列或其它传感器的信息有可能实现海天的准确检测。而对于模糊图像,通过“图像除雾”等图像增强处理来提高海面与天空区域的对比度,有可能会提高海天检测的准确率,但代价是方法实时性的降低。

6 结论

为满足多变海洋环境下可见光图像中海天线检测的要求,解决现有海天检测方法准确性与鲁棒性不足的问题,本文提出了一种基于局部 Otsu 分割与 Hough 变换的海天线检测方法。通过图像分块来补偿光照的不均匀性,保证图像分割具有较高的精度。基于图像分割提取海天边缘,降低了海天梯度变化与波浪等干扰边缘的影响。测试结果表明,本文方法能够有效抑制海浪、反光与船只等因素的干扰并适应海洋环境的变化,具有较高的鲁棒性、准确性与实时性。

参考文献

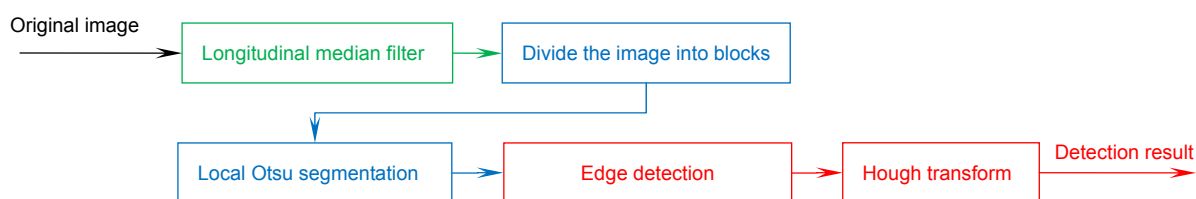
- [1] Zeng W J, Wan L, Zhang T D, et al. Fast detection of weak targets in complex sea-sky background[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(2): 403–412.
曾文静, 万磊, 张铁栋, 等. 复杂海空背景下弱小目标的快速自动检测[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(2): 403–412.
- [2] Fefilatyeve S, Goldgof D, Shreve M, et al. Detection and tracking of ships in open sea with rapidly moving buoy-mounted camera system[J]. *Ocean Engineering*, 2012, **54**: 1–12.
- [3] Wang D H, Niu Z D, Zhang P Y, et al. Sea-sky-line extraction in infrared images using fuzzy synthetical judgment[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, **39**(11): 67–74.
王丁禾, 牛照东, 张聘义, 等. 利用模糊综合评判技术提取红外图像海天线[J]. *光电工程*, 2012, **39**(11): 67–74.
- [4] Wang B, Su Y M, Wan L, et al. Sea sky line detection method of unmanned surface vehicle based on gradient saliency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(5): 58–67.
王博, 苏玉民, 万磊, 等. 基于梯度显著性的水面无人艇的海天线检测方法[J]. *光学学报*, 2016, **36**(5): 58–67.
- [5] Xu L Y, Ma L K, Xie X, et al. Sea-sky line detection based on structured forests edge detection and Hough transform[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2017, **23**(1): 47–55.
徐良玉, 马录坤, 谢燮, 等. 基于结构森林边缘检测和 Hough 变换的海天线检测[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2017, **23**(1): 47–55.
- [6] Mou X Z, Wang H. Image-based maritime obstacle detection using global sparsity potentials[J]. *Journal of Information and Communication Convergence Engineering*, 2016, **14**(2): 129–135.
- [7] Prasad D K, Rajan D, Prasath C K, et al. MSCM-LiFe: multi-scale cross modal linear feature for horizon detection in maritime images[C]//*Proceedings of 2016 IEEE Region 10 Conference*, Singapore, 2016: 1366–1370.
- [8] Liu S T, Zhou X D, Wang C G. Robust sea-sky-line detection algorithm under complicated sea-sky background[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(8): 5–10.
刘松涛, 周晓东, 王成刚. 复杂海空背景下鲁棒的海天线检测算法研究[J]. *光电工程*, 2006, **33**(8): 5–10.
- [9] Kristan M, Kenk V S, Kovačič S, et al. Fast image-based obstacle detection from unmanned surface vehicles[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, **46**(3): 641–654.
- [10] Han J L, Mao Z, Wang N, et al. Algorithm for sea-sky-line extraction based on two-dimension OTSU[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2016, **35**(8): 67–70.
韩嘉隆, 毛征, 王宁, 等. 基于二维 OTSU 的海天分界线提取算法[J]. *国外电子测量技术*, 2016, **35**(8): 67–70.
- [11] Xie H, Liu L, Liu Y Y. Research on complicated sea-sky-line area detection algorithm[J]. *Applied Science and Technology*, 2006, **33**(6): 96–98.
谢红, 刘玲, 刘艳艳. 复杂海天区域检测算法研究[J]. *应用科技*, 2006, **33**(6): 96–98.
- [12] Liu S J, Jiang M, Zhuang L. A fast and effective algorithm for sea-sky-line extraction in infrared images[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(4): 230–232, 240.
刘士建, 蒋敏, 庄良. 一种快速有效的红外图像中海天线提取算法[J]. *红外技术*, 2011, **33**(4): 230–232, 240.
- [13] Zou R B, Shi C C, Mao E K. Shearlet-based infrared target detection algorithm on complex sea[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, **32**(5): 1103–1108.
邹瑞滨, 史彩成, 毛二可. 基于剪切波变换的复杂海面红外目标检测算法[J]. *仪器仪表学报*, 2011, **32**(5): 1103–1108.
- [14] Gonzalez R C, Woods R E. *Digital Image Processing*[M]. Ruan Q Q, Ruan Y Z, trans. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.
- [15] Prasad D K, Rajan D, Rachmawati L, et al. Video processing from electro-optical sensors for object detection and tracking in a maritime environment: a survey[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, **18**(8): 1993–2016.
- [16] Bloisi D D, Iocchi L, Pennisi A, et al. ARGOS-Venice boat classification[C]//*Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, Karlsruhe, Germany, 2015: 1–6.

Sea-sky-line detection based on local Otsu segmentation and Hough transform

Dai Yongshou¹, Liu Bowen^{1*}, Li Ligang¹, Jin Jiucui², Sun Weifeng¹, Shao Feng¹

¹College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266000, China;

²The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, Shandong 266000, China



Flowchart of sea-sky-line detection based on local Otsu segmentation and Hough transform

Overview: Unmanned surface vehicle (USV) has a great potential to play an important role in the near future, such as sea environmental monitoring and maritime rescue. USV obtains information about surrounding sea surface environment by processing the visible light maritime image from the camera mounted on the USV. Sea-sky-line detection is useful in the visible light maritime image processing. It can provide important reference for the target detection and image calibration. Existing sea-sky-line detection methods are mainly used in infrared maritime images with simple scenes and less interference. In contrast, there are few studies on sea-sky-line detection in complex visible light maritime images. There are two main methods for the detection of sea-sky-line, namely the method based on line extraction from edge pixels and the method based on image segmentation. However, the former method is susceptible to the gradient change of sea waves and sea-sky-line, while the latter is limited by the accuracy of image segmentation. Due to the interference such as sea waves, ships and light, it is difficult to accurately detect the sea-sky-line of the visible light maritime image. To improve the detection accuracy and robustness, a sea-sky-line detection method based on local Otsu segmentation and Hough transform is proposed. Firstly, high-frequency noise such as light spot in the gray image is rapidly suppressed by longitudinal median filter. Then, according to the image features, local Otsu segmentation is performed to obtain binary images where edge pixels are extracted. Finally, Hough transform is used to fit edge pixels to complete the sea-sky-line detection. In the proposed method, image block processing compensates for the inhomogeneity of illumination and limits the interference scope of ships to some image blocks, which makes the local Otsu segmentation more accurate than the global Otsu segmentation. In addition, compared with the edge detection of the sea-sky-line based on the gradient, the edge detection of the sea-sky-line based on image segmentation can better adapt to the change of the image gradient and suppress the interference of the wave edge. Hough transform can ensure the accurate fitting of the sea-sky-line from the edge pixel if the number of edge pixels extracted of the sea-sky-line is more than half of the image width. Experimental results show that the interference of sea waves, ships and light can be effectively suppressed by the proposed method, which is relatively accurate, robust and real-time. The sea-sky-line detection accuracy of the proposed method is 93.0%, which is significantly higher than that of three representative sea-sky-line detection methods.

Citation: Dai Y S, Liu B W, Li L G, *et al.* Sea-sky-line detection based on local Otsu segmentation and Hough transform[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(7): 180039

Supported by National Natural Science Foundation of China (61401111), National Key R&D Plan (2017YFC1405203), National Marine Public Welfare Industry Research Projects (201505005-2), and Special Funds for Basic Scientific Research Operations of Central Universities (16CX06053A)

* E-mail: 1194701821@qq.com