

# 基于梯度显著性的水面无人艇的海天线检测方法

王 博 苏玉民 万 磊 庄佳园 张 磊

哈尔滨工程大学水下机器人技术国防科技重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 水面无人艇技术在气象监测、海面搜救、对敌侦察、精确打击等方向发挥着越来越重要的作用,但实际海面环境中的云层辐射、波浪反射、气象条件等光学图像形成中的各种干扰因素,使海天线的准确检测难以实现。为了解决这一问题,提出一种基于梯度显著性的海天线检测方法,梯度显著性的计算有效增强了海天线的直线特征并抑制了各种干扰因素,采用区域生长方法实现了对海天线的检测和辨识,最后使用 XL 水面无人艇在实际海面环境下采集的光学图像进行验证,结果证明了所用方法的准确性和实时性。

**关键词** 成像系统; 图像处理; 海天线检测; 梯度显著性; 区域生长; 直线特征

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0511002

## Sea Sky Line Detection Method of Unmanned Surface Vehicle Based on Gradient Saliency

Wang Bo Su Yumin Wan Lei Zhuang Jiayuan Zhang Lei

*National Key Laboratory of Science and Technology on Autonomous Underwater Vehicle,  
Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China*

**Abstract** Unmanned surface vehicle (USV) plays a more and more important role in various areas such as meteorological monitoring, maritime search and rescue, enemy reconnaissance, and precision strike. However, special features in real marine environment such as cloud clutter, sea glint, and weather conditions result in various kinds of interference in optical images, which makes it very difficult to detect the sea sky line accurately. To solve this problem, a sea sky line detection method is proposed based on gradient saliency. The line features of sea sky line are enhanced effectively through the computation of gradient saliency; other interference factors are suppressed; sea sky line detection and identification are achieved by region growing method. In the end, the proposed method is tested on optical images from "XL" USV in real marine environment and the experimental results demonstrate that the proposed method is significantly superior to other state-of-the-art methods in terms of detection rate and real-time performance.

**Key words** imaging systems; image processing; sea sky line detection; gradient saliency; region growing; line feature

**OCIS codes** 110.2970; 100.2960; 100.2000; 330.1880

## 1 引 言

近年来,水面无人艇技术在气象监测、海面搜救、反潜、反水雷、对敌侦察、精确打击等方向发挥着越来越重要的作用。水面无人艇需要在无人干预的情况下自主航行并完成各种任务,所以必须具备对海洋环境及其中的各类目标实现完全自主的感知和理解能力,一般需要配置雷达、摄像机、红外成像仪等传感器获取一

**收稿日期:** 2015-12-01; **收到修改稿日期:** 2016-01-06

**基金项目:** 国家 863 计划(2014AA09A509)、国家自然科学基金(51009040)、中央高校基本科研业务费自由探索计划(HEUCF150118)

**作者简介:** 王 博(1985—),男,博士研究生,讲师,主要从事水下成像与机器视觉方面的研究。

E-mail: wb@hrbeu.edu.cn

**导师简介:** 万 磊(1964—),男,硕士,研究员,博士生导师,主要从事水下无人系统控制方法与系统集成等方面的研究。

E-mail: wanlei@hrbeu.edu.cn

定范围内的环境和目标的信息。其中,摄像机由于具有分辨能力强、获取信息量丰富、与人眼视觉特性接近、成本较低等优势,成为水面无人艇需要配置的重要传感器之一。

在摄像机采集的海面环境的光学图像中,海天线是最重要的参考因素。1) 光学图像中以海天线为分界线,上方天空区域和下方海面区域具有不同的像素值分布特性,确定海天线的准确位置有利于实现对目标的准确检测;2) 当远处的目标进入摄像机的视场范围时,在光学图像中该目标总是首先出现在海天线附近,然后在接近过程中逐渐运动到天空区域或者海面区域中,确定海天线的准确位置能够有效缩小目标搜索范围,抑制噪声和虚假目标的干扰,有效提高对目标的检测、识别、跟踪的准确性和实时性;3) 根据检测到的海天线的位置及其运动规律,还可以实现对艇体运动状态的评估并采取相应的主动措施,提高航行过程的安全性和稳定性。

在光学图像中海天线是天空区域向海面区域过渡的由像素梯度极大值点形成的一条分界线,在不考虑海面曲率和光学畸变的情况下海天线是一条直线。然而,在实际海面环境下的光学图像中常常存在由云层辐射和海面波浪反射形成的强烈背景干扰,海面多变的气象条件(如雨、雪、雾等)会严重降低图像的清晰度和对比度,并形成噪声干扰,因此实现海天线的准确检测十分困难。Kim 等<sup>[1]</sup>利用随机抽样一致性(RANSAC)算法实现了对海天线的拟合,但该方法会受到云层和波浪高梯度边缘的严重干扰,一般需要姿态传感器信息对拟合结果进行校验。Zou 等<sup>[2]</sup>提出了一种基于剪切波变换的海天线检测方法,该方法能够提取边缘的梯度方向信息并进行辨识,但计算复杂度非常高。曾文静等<sup>[3-5]</sup>采用了周围纹理抑制的 Canny 边缘检测和 Hough 变换的方法实现了海天线检测,但该方法需要在检测精确度和计算复杂度之间进行折中,并且受波浪、云层等高梯度边缘的干扰,常常误差较大或形成虚假的海天线。Tang 等<sup>[6]</sup>提出了一种基于 Radon 变换的海天线检测方法,但该方法面临与 Hough 变换类似的问题,并且难以确定直线段的始终点。针对目前存在的问题,本文提出了一种基于梯度显著性的海天线检测方法,梯度显著性的计算有效增强了海天线的直线特征并抑制了各种干扰因素,采用区域生长方法实现了对海天线的检测和辨识,最后使用 XL 水面无人艇在实际海面环境下采集的光学图像对本文方法进行了验证。

## 2 像素的梯度显著性

显著性的概念源于视觉的独特性、不可预测性、稀缺性和奇异性,与人类的视觉认知机理密切相关,人类的视觉系统总是更多地注意图像中的颜色、梯度、边缘等要素的变化,高梯度的边缘对视觉系统能够产生更强的刺激,即具有更高的显著性<sup>[7]</sup>。本文采用了一种基于 RGB 色彩空间的全局的梯度显著性,选择 RGB (R-红色, G-绿色, B-蓝色)色彩空间而非灰度空间进行梯度显著性计算,这是因为 RGB 彩色图像向灰度图像转换的过程中会造成梯度信息的损失,例如,不同的色彩可能会转换为相同的灰度,从而对海天线的检测结果造成不利影响<sup>[8]</sup>。

对于光学图像  $I$ ,可将 RGB 色彩的分量矩阵分别与 Sobel 算子进行卷积得到各梯度分量矩阵,则图像  $I$  中任意像素  $i$  的梯度显著性可通过与其他像素梯度的距离测度来表示,即

$$S(i) = \sum_{j \in I} D(g_i, g_j), \quad (1)$$

式中  $D(g_i, g_j)$  为图像  $I$  中像素  $i$  和  $j$  的梯度向量  $g_i$  和  $g_j$  的距离测度。假设图像  $I$  中的像素数量为  $N$ ,则图像中全部像素的梯度显著性的时间复杂度为  $O(N^2)$ 。事实上,由于梯度显著性的定义忽略了空间因素,具有相同梯度的像素将得到相同的显著性值,因此梯度显著性的计算公式可以改写为<sup>[9]</sup>

$$S(i) = \sum_{k=1}^n h(g_k) D(g_i, g_k), \quad (2)$$

式中  $n$  为图像  $I$  中存在不同梯度的向量的数量,  $g_k$  和  $h(g_k)$  分别是第  $k$  种梯度向量及其在图像中出现的频率,此时计算全部像素的梯度显著性的时间复杂度降低为  $O(N + n^2)$ 。距离测度  $D(g_i, g_k)$  有两种计算方法:

1) 梯度向量  $g_i$  是由 RGB 色彩的梯度分量构成的三维向量,即

$$g_i = [\partial R_i, \partial G_i, \partial B_i]^T, \quad (3)$$

距离测度  $D(g_i, g_k)$  定义为向量  $g_i - g_k$  的 1-范数,即

$$D(g_i, g_k) = \|g_i - g_k\|_1, \quad (4)$$

若各色彩的梯度级数正规化为  $l$ , 则图像中梯度向量的数量  $n = l^3$ , 最终产生  $3l$  种梯度显著性值。该方法产生的梯度显著性划分较为精细, 有利于实现更加精确的海天线检测, 但计算的时间复杂度  $O(N + l^6)$  较高, 检测出的海天线容易发生断裂。

2) 梯度  $g_i$  是 RGB 色彩的梯度分量合成的标量, 即<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases} g_i = \left\{ \frac{1}{2} [(\varphi_{xx} + \varphi_{yy}) + (\varphi_{xx} - \varphi_{yy}) \cdot \cos 2\theta_i + 2\varphi_{xy} \cdot \sin 2\theta_i] \right\}^{\frac{1}{2}}, \\ \theta_i = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\varphi_{xy}}{\varphi_{xx} - \varphi_{yy}}\right) \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $\theta_i$  是像素  $i$  的梯度方向,  $\varphi_{xx}$ 、 $\varphi_{xy}$  和  $\varphi_{yy}$  是二阶梯度模量, 即

$$\begin{cases} \varphi_{xx} = \frac{\partial R_i}{\partial x} \frac{\partial R_i}{\partial x} + \frac{\partial G_i}{\partial x} \frac{\partial G_i}{\partial x} + \frac{\partial B_i}{\partial x} \frac{\partial B_i}{\partial x} \\ \varphi_{xy} = \frac{\partial R_i}{\partial x} \frac{\partial R_i}{\partial y} + \frac{\partial G_i}{\partial x} \frac{\partial G_i}{\partial y} + \frac{\partial B_i}{\partial x} \frac{\partial B_i}{\partial y}, \\ \varphi_{yy} = \frac{\partial R_i}{\partial y} \frac{\partial R_i}{\partial y} + \frac{\partial G_i}{\partial y} \frac{\partial G_i}{\partial y} + \frac{\partial B_i}{\partial y} \frac{\partial B_i}{\partial y} \end{cases}, \quad (6)$$

距离测度  $D(g_i, g_k)$  可简化为

$$D(g_i, g_k) = |g_i - g_k|, \quad (7)$$

若  $g_i$  的梯度级数正规化为  $l$ , 则图像中梯度向量的数量  $n = l$ , 最终产生  $l$  种梯度显著性值。该方法的时间复杂度降低为  $O(N + l^2)$ , 检测出的海天线连续, 经实验验证其准确性也能满足要求, 因此采用该方法计算梯度显著性。

图 1 是 XL 水面无人艇在典型不利天气条件下采集到的光学图像的梯度及其显著性的图像化显示结果。图 1 (a)~(c) 分别是在雨雪天气、存在强烈背景干扰的晴朗天气和海雾条件下采集的光学图像。图 1 (d)~(f) 是采用 Sobel 算子计算得到的图像中的梯度幅值的图像化显示结果, 可以发现由于图像中存在艇体、山峦、背景光、波浪等诸多因素形成的高梯度边缘, 使得梯度相对较弱的海天线难以分辨, 无法对其实现准确的检测。图 1 (g)~(i) 是根据本文算法计算得到的梯度显著性的图像化显示结果, 可以发现各种干扰因素形成的边缘依然存在, 海天线的梯度显著性却得到了增强, 尽管海天线仍然有部分缺失, 但已有可能对其实现准确检测。

### 3 基于梯度方向的区域生长方法

区域生长方法的基本思想是将在空间上邻近的具有相似性质的像素聚集起来形成区域。海天线在光学图像中具有典型的直线特征, 海天线构成的区域是具有较高梯度幅值并且梯度方向基本一致的邻近像素点集合形成的具有一定宽度的矩形区域, 因此可以考虑采用区域生长方法实现对直线特征的检测。根据梯度显著性选择开始生长的种子点, 以梯度方向的相似性作为生长准则, 得到具有梯度同向性质的近似矩形区域, 称之为直线支撑区域。观察梯度显著性图像可以发现, 具有较高梯度显著性并且具有几何意义的像素实际上只占图像像素总数的极小比例, 因此可以只选择一定比例的具有最高梯度显著性的像素参与区域生长, 这样能够有效降低时间复杂度。基于梯度方向的区域生长方法的具体实现过程为<sup>[11]</sup>:

1) 计算梯度显著性的直方图, 选择直方图中 10% 比例的具有最高梯度显著性的像素, 按照显著性值由高到低排序形成显著性列表  $L$ , 将  $L$  中所有像素置为“未标记”状态;

2) 依次从显著性列表  $L$  中取出一个“未标记”像素  $i$ , 初始化一个直线支撑区域  $C_k$  为空集, 将像素  $i$  加入  $C_k$  并设置为“已标记”状态,  $C_k$  的区域主方向  $\theta_k$  初始化为像素  $i$  的梯度方向;

3) 对  $C_k$  中的每一个像素  $j$ , 若其 8 个邻接的像素  $m$  在显著性列表  $L$  中处于“未标记”状态, 并且满足条件

$$|\theta_k - \theta_m| < \tau, \quad (8)$$

式中  $\theta_m$  是像素  $m$  的梯度方向,  $\tau$  是角度容许偏差。令  $\tau = \pi/8$ , 则可将像素  $m$  加入  $C_k$  且设置为“已标记”状态, 更新区域主方向为

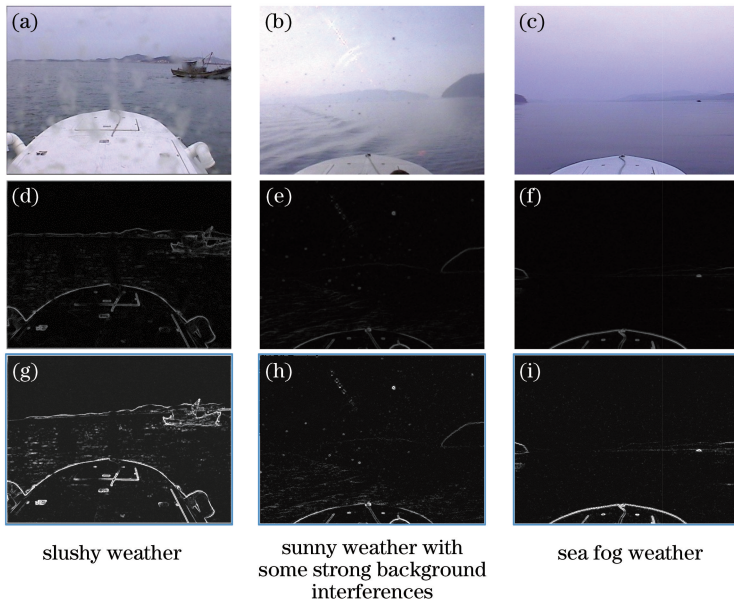


图 1 典型不利天气条件下光学图像及其梯度和其显著性。(a)、(b)、(c) 原始图像；  
(d)、(e)、(f) 梯度图；(g)(h)(i) 梯度显著性图

Fig. 1 Original images, gradient map, and saliency map of optical images under typical infaust weather conditions.  
(a),(b),(c) Original images; (d),(e),(f) gradient maps; (g),(h),(i) gradient saliency maps

$$\theta_k = \arctan \frac{\sin \theta_k + \sin \theta_m}{\cos \theta_k + \cos \theta_m}, \quad (9)$$

若有新的像素加入  $C_k$  则重复本步骤；

4) 重复步骤 2)~3) 直至显著性列表 L 中所有像素都是“已标记”状态。

图 2(a)~(c) 分别是根据图 1(g)~(i) 梯度显著性计算得到的直方图, 其中红色点划线为选择像素的阈值, 图 2(d)~(f) 是根据显著性排序形成的显著性列表的图像化显示结果, 可以观察到显著性列表基本包含了原梯度显著性图中的所有边缘的信息。

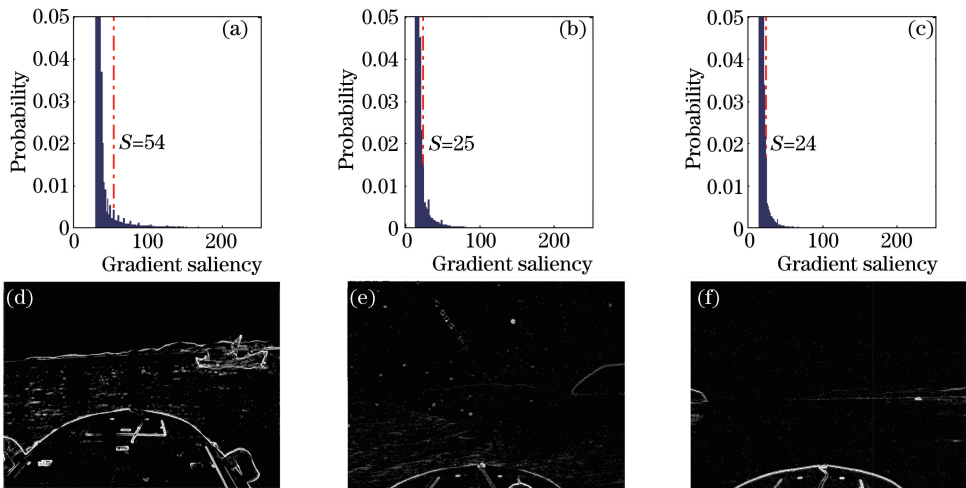


图 2 与图 1(g)~(i) 对应的梯度显著性的直方图和显著性列表的显示图像。(a)、(b)、(c) 梯度显著性的直方图；  
(d)、(e)、(f) 显著性列表的显示图像

Fig. 2 Histograms of gradient saliency and saliency list images for Fig. 1(g) to Fig. 1(i).  
(a),(b),(c) Histograms of gradient saliency; (d),(e),(f) saliency list images

图 3 是以海天线附近  $20 \text{ pixel} \times 20 \text{ pixel}$  的局部区域为例说明了基于梯度方向的区域生长过程, 图 3 (a) 是该局部区域的图像, 图 3 (b) 中各箭头所指方向是该位置像素的梯度方向, 其中红色箭头是根据梯度显

著性选择的开始生长的种子点,图 3(c)中红色框是由种子点生长得到的直线支撑区域,通过吸收邻接的梯度方向一致的具有高梯度显著性的像素,直线支撑区域继续沿海天线方向生长[图 3 (d)],直至形成图 3 (e)中所示的直线支撑区域,图 3 (f)中蓝色方框是该区域的最小外接矩形。

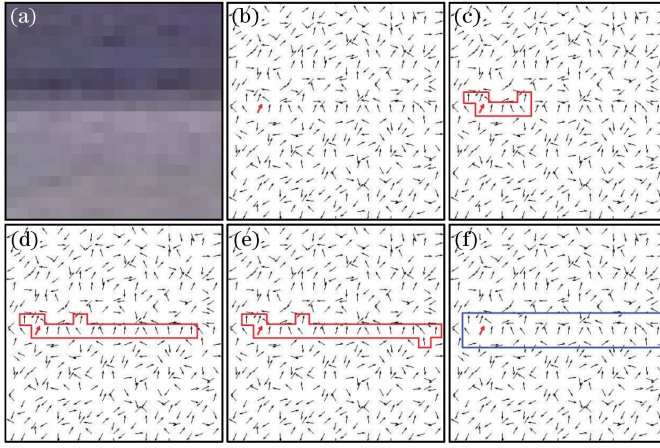


图 3 基于梯度方向的区域生长过程。(a) 局部区域的原始图像;(b)、(c)、(d) 生长中的直线支撑区域;  
(e) 区域生长结束后的直线支撑区域;(f) 直线支撑区域的最小外接矩形

Fig. 3 Region growing process based on gradient direction. (a) Original image of local area; (b), (c), (d) line support regions in growing; (e) line support region after region growing; (f) minimum enclosing rectangle

#### 4 直线特征的计算与改善方法

区域生长方法得到的直线支撑区域表明图像中存在直线特征,计算该区域的关键统计参数,能够得到对直线特征的数学描述。直线支撑区域  $C_k$  的显著性中心  $(\bar{x}_k, \bar{y}_k)$  的计算公式是<sup>[11]</sup>

$$\bar{x}_k = \frac{\sum_{i \in C_k} S(i) x_i}{\sum_{i \in C_k} S(i)}, \quad \bar{y}_k = \frac{\sum_{i \in C_k} S(i) y_i}{\sum_{i \in C_k} S(i)}, \quad (10)$$

式中  $(x_i, y_i)$  是像素  $i$  的坐标,  $S(i)$  是像素  $i$  的梯度显著性。直线支撑区域  $C_k$  的相关矩阵  $\Phi_k$  为

$$\Phi_k = \begin{bmatrix} \Phi_{xx} & \Phi_{xy} \\ \Phi_{xy} & \Phi_{yy} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中  $\Phi_{xx}$ 、 $\Phi_{xy}$ 、 $\Phi_{yy}$  是二阶显著性中心矩,其计算公式是

$$\Phi_{xx} = \frac{\sum_{i \in C_k} S(i) (x_i - \bar{x}_k)^2}{\sum_{i \in C_k} S(i)}, \quad \Phi_{yy} = \frac{\sum_{i \in C_k} S(i) (y_i - \bar{y}_k)^2}{\sum_{i \in C_k} S(i)}, \quad \Phi_{xy} = \frac{\sum_{i \in C_k} S(i) (x_i - \bar{x}_k)(y_i - \bar{y}_k)}{\sum_{i \in C_k} S(i)}, \quad (12)$$

相关矩阵  $\Phi_k$  的特征值是两个正实数,其中较小的特征值对应的特征向量即为直线支撑区域  $C_k$  的主方向  $\theta_k$ ,实际上也是  $C_k$  代表的直线特征的方向。将  $C_k$  中像素的坐标以  $(\bar{x}_k, \bar{y}_k)$  为中心旋转  $\theta_k$ ,统计新像素坐标的极值可以得到  $C_k$  的最小外接矩形  $R_k$  的长度  $l_k$  和宽度  $w_k$ ,实际上是  $C_k$  代表的直线特征的长度和宽度。

由于区域生长方法是以梯度方向的相似性作为生长准则,梯度方向与区域主方向之差不超过容许偏差的邻近像素都被加入直线支撑区域,因此一些曲率较小的曲线边缘或者方向变化缓慢的折线边缘可能生长成直线支撑区域。局部区域的梯度显著性图像如图 4 所示,其中红色方框所示的是图 4(a)中的折线状边缘和图 4(b)中的圆弧状边缘,由于梯度方向的变化较小,在进行区域生长时它们分别形成了直线支撑区域,此时若计算直线特征会出现较大的误差。针对这一问题,计算每个直线支撑区域的有序点密度,并据此对直线支撑区域进行改善。

直线支撑区域  $C_k$  的有序点密度  $d_k$  定义为  $C_k$  包含的像素数量  $n(C_k)$  与其最小外接矩形  $R_k$  包含的像素数量  $n(R_k)$  的比值,即

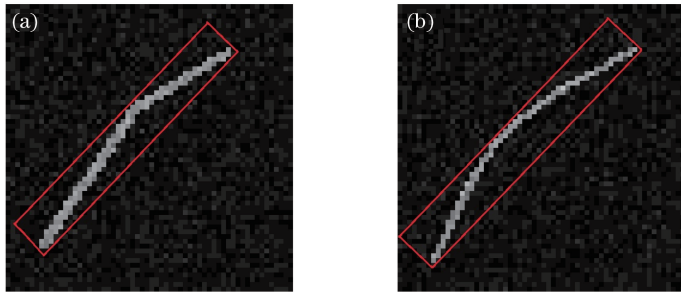


图 4 直线特征的错误检测情况。(a) 折线边缘；(b) 曲线边缘

Fig. 4 False detections of line features, (a) Broken line edge; (b) curve edge

$$d_k = \frac{n(C_k)}{n(R_k)} = \frac{n(C_k)}{l_k \cdot \tau w_k}, \quad (13)$$

若有序点密度  $d_k$  大于阈值  $t_d$ , 则表明该直线支撑区域有效, 否则表明该区域实际上是一条曲线或折线, 需要采用以下两种方法对其进行切割:

- 1) 区域生长方法的角度容许偏差减小至  $\tau = \pi/16$ , 并对该直线支撑区域所包含的像素重新进行区域生长, 计算新的直线支撑区域的有序点密度;
- 2) 若方法 1) 中的新的直线支撑区域的有序点密度小于阈值  $t_d$ , 则定义直线支撑区域  $C_k$  的半径  $r_k$  为  $C_k$  中的所有像素到种子点的最大距离, 减小  $r_k$  到当前值的 0.8 倍, 移除  $C_k$  中到种子点的距离大于  $r_k$  的所有像素, 重复该方法直到  $d_k > t_d$ 。

阈值  $t_d$  需要根据经验设置, 若阈值较大将会将图像中的边缘过度切割, 若阈值较小则无法解决曲线或折线问题, 一般  $t_d$  设置为 0.7 即可满足要求。

图 5 为利用直线支撑区域计算得到的直线特征在原始图像上显示的结果, 根据有序点密度对直线支撑区域进行切割, 改善了直线特征, 可以注意到图像中的曲线边缘都是由多条直线段逼近表示的, 而并没有形成错误的直线特征。采用这种方法可以抑制各种边缘对海天线检测准确性的不利影响。

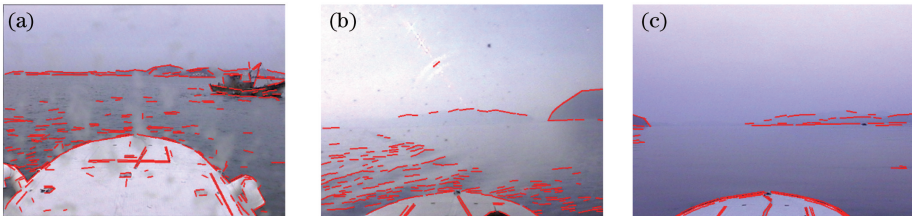


图 5 典型不利天气条件下的直线特征检测结果。(a) 雨雪天气；(b) 存在强烈背景干扰的晴朗天气；(c) 海雾天气

Fig. 5 Line feature detection results under typical infaust weather conditions. (a) Slushy weather; (b) sunny weather with some strong background interferences; (c) sea fog weather

## 5 海天线的判别方法

观察在典型不利天气条件下采集的光学图像的直线特征检测结果, 可以发现, 由于物体、背景光、雨雪、海雾等因素的影响, 海天线常常出现断裂或部分缺失的情况, 若要实现海天线的准确判别, 需要将海天线的各部分直线特征连接起来形成表示海天线的完整直线段。对光学图像检测得到的直线特征集合表示为  $\{\psi_k\}$ , 且  $\psi_k$  是直线特征的唯一参数向量, 即

$$\psi_k = [x_{1k}, y_{1k}, x_{2k}, y_{2k}, \theta_k]^T, \quad (14)$$

式中  $(x_{1k}, y_{1k})$  和  $(x_{2k}, y_{2k})$  是直线特征的始点和终点坐标,  $\theta_k$  是该直线特征的方向角。则两直线特征向量  $\psi_j$  和  $\psi_k$  属于同一直线段的充要条件是

$$\left\{ \begin{array}{l} |\bar{\theta}_j - \bar{\theta}_k| < \delta \\ \left| \begin{array}{ccc} x_{1j} & y_{1j} & 1 \\ x_{2j} & y_{2j} & 1 \\ x_{1k} & y_{1k} & 1 \end{array} \right| < \lambda \left\| (x_{1j}, y_{1j}) - (x_{2j}, y_{2j}) \right\|_2 \\ \left| \begin{array}{ccc} x_{1j} & y_{1j} & 1 \\ x_{2j} & y_{2j} & 1 \\ x_{2k} & y_{2k} & 1 \end{array} \right| < \lambda \left\| (x_{1j}, y_{1j}) - (x_{2j}, y_{2j}) \right\|_2 \end{array} \right. , \quad (15)$$

式中  $\delta$  是直线特征方向的容许偏差且  $\delta = \pi/32$ ,  $\lambda$  是距离容许偏差, 且根据经验设置为  $\lambda = 2$ , 当该充要条件得到满足时, 将  $\psi_j$  和  $\psi_k$  合并形成新的直线特征。为了降低合并直线特征的时间复杂度, 可以将直线特征集合  $\{\psi_k\}$  按照方向角  $\theta_k$  进行排序, 每次只需检验相邻的两直线特征  $\psi_k$  和  $\psi_{k+1}$  是否满足上述充要条件, 此时对  $\{\psi_k\}$  中的所有直线特征进行一次检验即可完成直线特征的合并连接, 若  $\{\psi_k\}$  中包含  $n_\psi$  个直线特征, 则该过程的时间复杂度可由  $O(n_\psi^2)$  降低为  $O(n_\psi \lg n_\psi)$ 。

图 6 为对光学图像中检测到的直线特征进行合并连接得到的结果, 其中蓝色直线表示由若干直线特征合并形成的新的直线特征, 可以注意到图像中除了代表海天线的直线特征外, 还有一些波浪、艇体、山峦、背景光等形成的直线特征, 需要结合直线特征的长度、方向角等因素实现对海天线的判别。

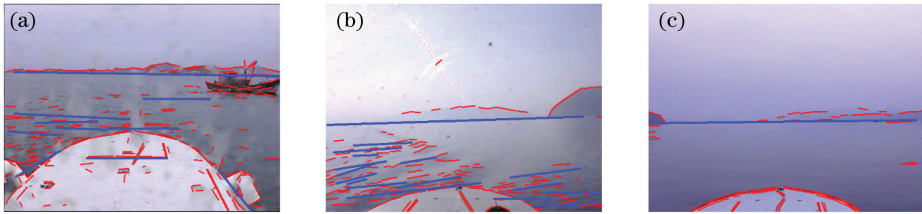


图 6 光学图像中直线特征合并连接的结果。(a) 雨雪天气; (b) 存在强烈背景干扰的晴朗天气; (c) 海雾天气

Fig. 6 Line feature merger results in optical images. (a) Slushy weather; (b) sunny weather with some strong background interferences; (c) sea fog weather

利用完成直线特征合并连接得到的直线特征集合  $\{\psi_k\}$ , 计算各直线特征的拟然值  $\mu_k$ , 作为判断其是否是海天线, 依据计算公式为

$$\mu_k = \exp\left(\frac{l_k}{l_0} - 1\right) \cos \theta_k, \quad (16)$$

式中  $l_k$  和  $l_0$  分别为直线特征和图像对角线的长度, 最终选择似然值最大的直线特征作为海天线检测的结果。光学图像的分辨率为  $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$  时, 图像对角线长度  $l_0 = 800 \text{ pixel}$ , 计算得到图 6(a)~(c) 中直线特征的似然值  $\mu_k$  的最大值分别为 0.82、0.76 和 0.70, 相应的直线特征即为海天线检测结果。

## 6 实验验证与结果分析

为了验证基于梯度显著性的海天线检测方法的有效性和优越性, 在山东蓬莱海域利用 XL 水面无人艇在雨雪天气、存在强烈背景干扰的晴朗天气、海雾等典型不利天气条件下采集海天线场景的光学图像(图 7), 成像的曝光和对焦方式均设置为自动模式, 获得了 400 帧分辨率为  $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$  的 RGB 彩色图像。以这 400 帧光学图像为测试样本, 将该方法与现有的 RANSAC 直线拟合<sup>[1]</sup>、Hough 变换<sup>[3-4]</sup>、Radon 变换<sup>[6]</sup>、剪切波变换<sup>[2]</sup>等方法进行性能的对比和分析, 测试工具是 Intel Core 2.5 GHz CPU, 2G 内存和 Microsoft Visual Studio 2012 的 C++ 编译器。

该方法与 Hough 变换、Radon 变换方法类似, 都是对图像中存在的直线特征进行检测, 因此首先对这三种方法在直线特征检测方面的性能进行对比, 如图 8 所示。图 8(a)~(c) 是采用 Hough 变换方法得到的结果, Hough 变换的主要思想是将检测到的高梯度边缘映射到直线参数空间中, 通过搜索局部峰值点确定直线特征参数, 然而图像中波浪、背景光、山峦、云层等干扰边缘在 Hough 变换得到的直线参数空间中累加并随机形成了许多峰值点, 导致大量的原本互不相关的干扰边缘被错误地连接起来形成虚假的直线特征, 从

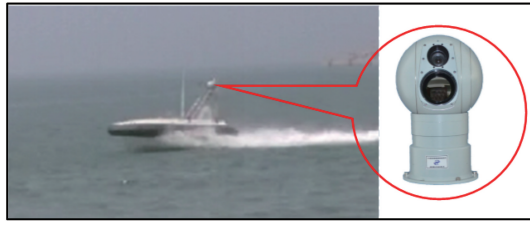


图 7 XL 水面无人艇及其光电成像单元

Fig. 7 “XL” USV and its photoelectric imaging unit

这些直线特征中辨识出真正的海天线是非常困难的任务。图 8(d)~(f)是采用 Radon 变换方法得到的结果, Radon 变换是将梯度图像以线积分的形式投影到直线的参数空间, 通过搜索局部峰值点检测直线特征并确定其参数, 因此存在与 Hough 变换类似的问题, 在检测结果中出现了大量的虚假直线特征, 此外, Radon 变换无法确定直线特征的始终点, 从而使准确辨识海天线的任务更加困难。图 8(g)~(i)是采用本文所提出的方法得到的结果, 该方法是基于像素的梯度显著性提出的, 海天线的梯度显著性得到了有效的增强, 而干扰边缘相对受到了抑制, 尽管图像中仍然存在少量干扰边缘, 但这些干扰边缘之间相互独立, 没有错误地相互连接而形成虚假的直线特征, 因此能够较容易地准确辨识出海天线的直线特征, 该方法在直线特征检测方面的性能明显优于其他两种方法。

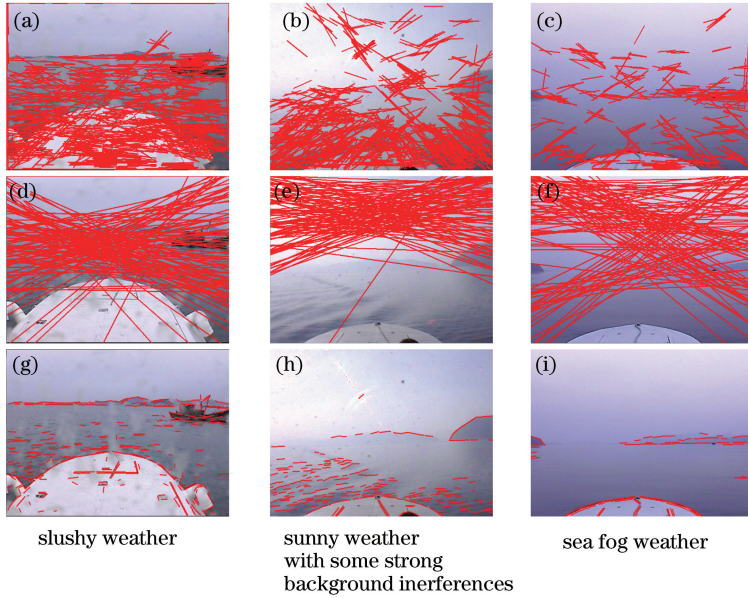


图 8 光学图像的直线特征检测结果。(a)、(b)、(c) Hough 变换方法的结果; (d)、(e)、(f) Radon 变换方法的结果; (g)、(h)、(i) 本文方法的结果

Fig. 8 Line feature detection results of optical images. (a), (b), (c) Results of Hough transformation method; (d), (e), (f) results of Radon transformation method; (g), (h), (i) results of the proposed method

分别采用 RANSAC 直线拟合、Hough 变换、Radon 变换、剪切波变换和本文方法对 400 帧测试样本图像进行海天线检测, 选取较典型的海天线检测结果进行对比和分析(图 9)。图 9 中(a)、(f)、(k)、(p)、(u)是采用 Hough 变换方法得到的结果, 由于各种干扰边缘在图像中形成了虚假的直线特征, 因此检测到的海天线出现了较大偏差; (b)、(g)、(l)、(q)、(v)是采用 Radon 变换方法得到的结果, 与 Hough 变换的问题类似, 该方法检测到的海天线也出现了较大偏差; (c)、(h)、(m)、(r)、(w)是采用 RANSAC 直线拟合方法得到的结果, RANSAC 直线拟合方法的基本思想是随机选取高梯度边缘点确定一条直线, 再检验并统计符合这条直线的边缘点数量, 最后统计边缘点数量最多的直线作为海天线检测结果, 然而图像中干扰边缘的梯度常常大于海天线梯度, 大量的干扰边缘随机形成的直线往往拥有较多甚至最多的边缘点数量, 因此该方法检测海天线不仅错误率较高, 而且计算复杂度也非常高; (d)、(i)、(n)、(s)、(x)是采用剪切波变换方法得到的结果,



剪切波变换具有方向分析的能力,能够检测图像中的边缘并提取其几何特征,通过对几何特征的辨识来实现海天线的检测,但是图像中海天线的梯度方向基本一致且存在一定偏差,大量的干扰边缘可能形成梯度方向一致性更好的直线特征,因此该方法检测海天线的准确率不高,并且计算复杂度非常高;(e)、(j)、(o)、(t)、(y)是采用本文方法得到的结果,可以观察到本文方法在存在各种干扰因素的情况下能够准确检测出海天线的位置,性能明显优于其他4种方法。

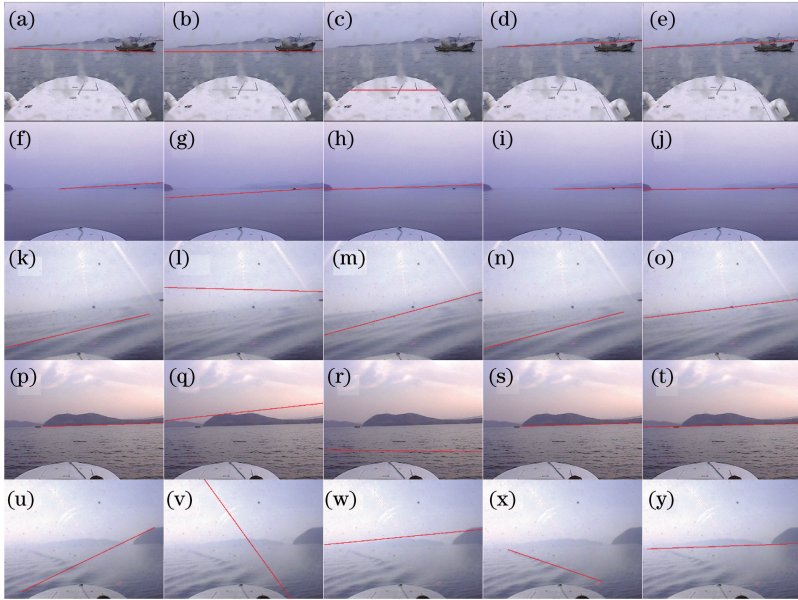


图9 5帧较典型样本图像的海天线检测结果对比。(a)、(f)、(k)、(p)、(u) Hough变换方法的结果;  
(b)、(g)、(l)、(q)、(v) Radon变换方法的结果;(c)、(h)、(m)、(r)、(w) RANSAC直线拟合方法的结果;  
(d)、(i)、(n)、(s)、(x) 剪切波变换方法的结果;(e)、(j)、(o)、(t)、(y) 本文方法的结果

Fig. 9 Sea sky line detection result comparison of 5 frames typical sample images. (a), (f), (k), (p), (u) Results of Hough transformation method; (b), (g), (l), (q), (v) results of Radon transformation method; (c), (h), (m), (r), (w) results of RANSAC line fitting method; (d), (i), (n), (s), (x) results of shearlet transformation method; (e), (j), (o), (t), (y) results of the proposed method

海天线准确检测的判据是检测结果能够覆盖真实海天线的50%以上,在这400帧测试样本图像的基础上对Hough变换<sup>[3-4]</sup>、Radon变换<sup>[6]</sup>、RANSAC直线拟合<sup>[1]</sup>、剪切波变换<sup>[2]</sup>和本文方法的准确性进行了对比和分析,此外考虑到在水面无人艇上的实际应用的实时性需求,对各方法处理图像的平均处理时间进行了统计,如表1所示,其中本文方法1和本文方法2分别是采用本文第2节中方法1和方法2来计算海天线检测统计结果。采用方法2)计算梯度显著性能够有效改善本文方法的实时性,而检测准确率仅略微下降,其误检率约为5.2%,其主要原因是部分海天线的梯度显著性过于微弱,造成检测到的直线特征长度较小,从而影响了对海天线的正确判别。本文方法的检测准确率显著高于其他四种方法,且平均处理时间最短,实时性较好,Radon变换方法的准确率略高于Hough变换方法,造成这种差别的原因是Hough变换的对象是二值边缘图像,而Radon变换的对象是梯度图像,因此也导致Radon变换的实时性稍差,RANSAC直线拟合方法的准确率最低,并且其时间复杂度较高,平均处理时间较长且实时性较差,剪切波变换的时间复杂度和消耗的计算量都非常大,尽管其检测准确率稍高,但平均处理时间最长,实时性最差。

表1 400帧测试样本图像进行海天线检测的结果对比

Table 1 Sea sky line detection result comparison of 400 frames test sample images

	Hough method	Radon method	RANSAC line fitting method	Shearlet method	Proposed method 1	Proposed method 2
Detection rate / %	76.8	79.0	67.3	84.3	95.5	94.8
Time consumed per frame / ms	167	185	1354	5629	79	52

## 7 结 论

在典型不利天气条件下采集的海天线场景的光学图像中存在各种强干扰因素,对海天线的准确检测产生了严重干扰,针对这一问题,提出了一种基于梯度显著性的海天线检测方法,利用梯度显著性的计算有效增强了海天线的直线特征并抑制了各种干扰因素,采用基于梯度方向的区域生长方法实现了对海天线的检测和辨识,最后使用 XL 水面无人艇在实际海面环境下采集的测试样本图像对本文方法进行了验证和分析,结果表明本文方法在检测准确率和实时性方面显著优于现有的 Hough 变换、Radon 变换、RANSAC 直线拟合和剪切波变换方法。

## 参 考 文 献

- 1 Kim S, Lee J. Small infrared target detection by region-adaptive clutter rejection for sea-based infrared search and track [J]. *Sensors*, 2014, 14(7): 13210-13242.
- 2 Zou R B, Shi C C. A sea-sky line identification algorithm based on shearlets for infrared image[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 846: 1031-1035.
- 3 Zeng Wenjing, Wan Lei, Zhang Tiedong, *et al.*. Fast detection of sea line based on the visible characteristics of marine images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0111001.  
曾文静, 万磊, 张铁栋, 等. 基于海面可见光图像的海界线快速检测[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0111001.
- 4 Dong Y F, Zhang Y F, Zhu C, *et al.*. Extracting sea-sky-line based on improved local complexity[C]// *Conference on Computer Mechatronics, Control and Electronic Engineering*. IEEE, 2010, 6: 82-85.
- 5 Lan J H, Jia Z L, Wu C H, *et al.*. Sea-land-line extraction using weighted optimum neighborhood algorithm [C]// *International Conference on Optical Instruments and Technology (OIT 2013)*. SPIE, 2013, 9045: 90451M.
- 6 Tang D, Sun G, Wang D H, *et al.*. Research on infrared ship detection method in sea-sky background[C]// *ISPDI 2013-Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging*. SPIE, 2013, 8907: 89072H.
- 7 Yang Linna, An Wei, Lin Zaiping, *et al.*. Small target detection based on visual saliency improved by spatial distance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0715004.  
杨林娜, 安玮, 林再平, 等. 基于空间距离改进的视觉显著性弱小目标检测[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0715004.
- 8 Lin Chang, He Bingwei, Dong Shengsheng. An indoor object fast detection method based on visual attention mechanism of fusion depth information in RGB images[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1108005.  
林昌, 何炳蔚, 董升升. 融合深度信息的室内 RGB 图像视觉显著物体快速检测方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1108005.
- 9 Cheng M M, Zhang G X, Mitra N J, *et al.*. Global contrast based salient region detection[J]. *IEEE Transactions on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2011, 37(3): 409-416.
- 10 Di Zenzo S. A note on the gradient of a multi-image[J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1986, 33(1): 116-125.
- 11 von Gioi R G, Jakubowicz J, Morel J-M, *et al.*. LSD: A fast line segment detector with a false detection control[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(4): 722-732.