

# 基于海面可见光图像的海界线快速检测

曾文静<sup>1,2</sup> 万磊<sup>1,2</sup> 张铁栋<sup>1,2</sup> 徐玉如<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 哈尔滨工程大学船舶学院, 黑龙江, 哈尔滨 150001  
<sup>2</sup> 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** 针对海面运动载体的可见光序列图像, 紧密结合海面图像的特点, 提出了一种适用于海天背景和海岸背景的海界线检测方法。根据量子化图像的区域复杂度以及单元区域上下邻域的灰度差异, 来判断海界线区域是否存在, 若存在则预测海界线区域的位置, 若不存在则放弃后续处理。由于海界线是自然视野中最长的连续性最好的直线, 所以先利用周围纹理抑制的改进 Canny 算子提取轮廓边缘, 然后对 Hough 变换进行投票加权, 精细检测水平或倾斜的海界线。实验证明, 该方法能够快速定位海界线区域, 并得出既包含有效信息又大幅缩减了无意义信息的二值图像, 可在轮廓边缘中准确找到海界线, 具有很好的稳健性和实时性, 可以应用于需要精确的海界线信息的工程任务中。

**关键词** 图像处理; 海界线检测; 区域预测; 周围纹理抑制; 投票加权

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0111001

## Fast Detection of Sea Line Based on the Visible Characteristics of Marine Images

Zeng Wenjing<sup>1,2</sup> Wan Lei<sup>1,2</sup> Zhang Tiedong<sup>1,2</sup> Xu Yuru<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China  
<sup>2</sup> State Key Laboratory of Autonomous Underwater Vehicle, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** A feasible method combining the characteristics of marine visible image is proposed to detect sea-line in the sequential images from surface vehicle. It is not only appropriate for sea-sky background but also for offshore background. The complexity of sub-images and the average gray difference of their up and down neighborhoods are measured to predict the sea-line region and the consequent processing of images without the existent of sea-line region is given up. Since the sea-line is the longest line with best continuity in the whole nature vision, improved Canny edge detection with surround texture suppression is applied to extract the contour of the object ready for line detection. Weighted vote in Hough transforming is introduced to pick the right line which is horizontal or tilted. The experimental results prove that this method can locate the sea-line region fast and obtain the binary image including the necessary information and attenuating meaningless information. Sea line can be found precisely in the contour edge. It is robust and real-time and is competent for real task where the correct sea-line location is needed.

**Key words** image processing; sea-line detection; region prediction; surround texture suppression; weighted vote

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

## 1 引言

安装于海面运动载体如水面艇以及水面船的可见光传感器, 通常用作雷达导航的重要辅助设备。它所获得的海面图像不同于固定在港口或码头的监

控摄像头, 虽然两者的背景与前景都是随时间发生变化的, 但由于前者载体自身的运动加之传感器的运动都将导致视野内容的不可预知性, 再加上实时性的要求等因素, 其图像处理起来更加富有挑战性。

收稿日期: 2011-06-27; 收到修改稿日期: 2011-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(51009040, E091002)和国家 863 计划(2011AA09A106)资助课题。

作者简介: 曾文静(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事模式识别方面的研究。E-mail: zenwenjing@163.com

导师简介: 徐玉如(1942—), 男, 教授, 中国工程院院士, 主要从事机器人技术方面的研究。

E-mail: xuyuru@hrbeu.edu.cn

无论是对于单目视觉的目标检测来说,还是对于双目视觉的目标测距来说,海天线或海岸线都是非常有意义的信息。一般地,当载体启航时,图像中出现的大多为海天线,而当载体返航时,图像中出现的大多为海岸线。两者的图像背景截然不同,所以用检测海天线的方法来检测海岸线或用检测海岸线的方法来检测海天线都无法得到正确的结果。

目前,出现了许多关于红外图像海天线提取的研究,主要是基于梯度变化、最大方差或小波变换以及 Hough 变换等原理。比如冯德瀛等<sup>[1]</sup>提出的使用线检测模板检测出水平方向上的所有直线以确定海天线的位置,该方法不利于检测倾斜的海天线。张冰等<sup>[2]</sup>将要检测的图像进行多尺度小波变换,再采用多尺度边缘匹配,将不同尺度的输出集成为一个简单边缘图像,该方法实时性还有待改善。桂阳等<sup>[3]</sup>首先依据区域内方差最大值的位置确定出海天线候选点,然后结合 Ransac 算法拟合海天线,该方法在选取候选点时容易受到天空中的云团或海面上的船只的影响。刘松涛等<sup>[4]</sup>用方向梯度算子得到差分图像,然后二值化图像并采用 Hough 变换检测海天线,该方法在海面梯度变化剧烈时,由传统 Hough 变换检测直线可能会误检。对于可见光图像的海天线检测,Qi 等<sup>[5]</sup>将基于奇异点分析技术的小波变换用于检测水平海天线,同样面临着倾斜线检测问题。暂时未见效果较好的既适用于水平线检测、又适用于倾斜线检测,既适用于海天线背景、又适用于海岸线背景的实时检测方法。

本文提出了一种检测方法以解决以上问题,该方法利用海面图像的分块复杂度和相邻块间灰度的差异来判断海界线是否存在并粗略定位海界线区域,之后利用在海面背景呈现于视野内的海界线是图像中最长的连续直线的特点,首先提取海界线区域的主要轮廓,然后对 Hough 变换进行投票加权处理,快速精确地得出海界线的位置。

## 2 海面可见光图像的特点

载体航行过程中,可见光摄像机得到的图像背景虽然时刻变化,但总体来讲图像由上中下三部分组成,即天空区域、海界线区域和海面区域。海界线区域无论是海天交接还是海陆交接,由于它含有贯穿整个视野的信息量,可认为具备一定的复杂度。然而当海面波浪汹涌或视野内船只所占海面面积过大时,海面区域的复杂度可能会超过海界线区域的复杂度,所以仅依靠这一点来衡量海界线区域并不

充分。

海界线区域的另一个特征,是整个图像中该区域邻接天空的邻域与其邻接海面的邻域之平均灰度差最显著。这是由于正常情况下以海为背景的图像中三个区域不可变更的位置顺序所决定的。在白天,天空区域的灰度均值远大于海面区域的灰度均值。当船随海浪颠簸严重时,就可能出现全天空背景或全海面背景,即不存在海界线区域。此时,即使背景中有飞鸟或船只等噪声因素,相对于广阔的天空和大片的海面,这些噪声只占其中的微小部分,所以图像从上至下的平均灰度也不会发生较大的波动。

再者,在海界线区域,如果岸上的建筑物轮廓中或海面上连成片的波纹中正好出现了连续直线,其长度足够大,那么它有可能被误检为海界线。除了这种较为极端的现象以外,自然界中的海界线才是横贯图像连接最紧的最长直线,尽管有时这条直线可能会被船只分裂开来。

## 3 预测并定位海界线

量化海面图像各个区域的视觉感受特征<sup>[6]</sup>有助于判断海界线是否存在及其存在于图像中的位置,这个部分通常是其他检测海天线或海岸线的方法所忽略的,然而它却对后续处理有指导性的意义。1) 如果图像中根本不存在海界线,那么之后的细检过程完全可以省略;2) 如果先预测出了海界线区域的位置,将直线检测限制在一个局部区域,既减少了非海界线区域的干扰又减少了对非有效信息区域的时间分配。两者都大大降低了误检概率并为避障或跟踪争取了宝贵的时间资源。

为了便于快速处理,首先将采集的彩色图像转化为灰度图像。已知原始图像大小为  $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ , 沿着列方向将该图像  $F(x, y)$  平均分割为  $T(T > 3)$  幅子图像  $f_1, f_2, \dots, f_T$ , 每幅子图像的尺寸皆为  $A \text{ pixel} \times N \text{ pixel}(A = M/T)$ 。规定每相邻 3 幅子图像  $(f_{i-1}, f_i, f_{i+1})$ ,  $(1 < i < T)$  组成一个单元区域,每个单元区域的视觉感受特征量化指标  $Q(f_{i-1}, f_i, f_{i+1})$  由两部分因素构成,即中间子图像  $f_i$  的复杂度和与之相邻的上下子图像  $f_{i-1}, f_{i+1}$  间的灰度差异。

1) 灰度均值能够直接体现子图像的整体灰白程度,而且使用灰度均值的差来表示相邻子图像之间的灰度差异简单易行,其形式为

$$\Delta \bar{G}(f_{i-1}, f_{i+1}) = \bar{G}(f_{i-1}) - \bar{G}(f_{i+1}), \quad (1)$$

式中  $\bar{G}(f_{i-1})$  与  $\bar{G}(f_{i+1})$  分别为子图像  $f_{i-1}$  和子图像  $f_{i+1}$  的平均灰度。

2) 信息熵是描述图像中所含信息量的有效途径,基本上熵值越大对应区域的灰度种类越多、变化越剧烈,包含的信息量越大<sup>[7]</sup>。使用这一概念来表示海面子图像的复杂度,对于具有 256 个灰度级的子图像,设  $p_s$  是子图像  $f_i$  中灰度值  $s$  出现的概率,其图像信息熵形式为<sup>[8]</sup>

$$H(f_i) = - \sum_{s=0}^{255} p_s \lg p_s, \quad (2)$$

当  $p_s = 0$  时,  $p_s \lg p_s = 0$ 。其中  $0 \leq p_s \leq 1 (s = 0, 1, \dots, 255)$ ;  $\sum_{s=0}^{255} p_s = 1$ 。

3) 将量化指标  $Q(f_{i-1}, f_i, f_{i+1})$  表示为

$$Q(f_{i-1}, f_i, f_{i+1}) = \Delta G(f_{i-1}, f_{i+1}) \times H(f_i). \quad (3)$$

当中间子图像的熵值越大,而且相邻上下子图像间的灰度均值之差越大时,这个单元区域的特性越接近于海界线区域的特性,它属于海界线区域的可能性就越大。计算各个单元区域的指标  $Q(f_{i-1}, f_i, f_{i+1})$ ,找出最大值  $Q_{\max}$ ,假设  $Q_{\max}$  对应的单元区域为  $(f_{m-1}, f_m, f_{m+1})$ ,依据该单元区域的上相邻子

图像与下相邻子图像的灰度之差  $\xi$  来验证图像中是否存在海界线区域。衡量  $\xi$  的计算公式为

$$\xi = G_{(m-2)} - G_{(m+2)}. \quad (4)$$

当  $m-2 < 0$  或  $m+2 > T$  时,则  $G_{(m-2)}$  或  $G_{(m+2)}$  由  $G_{(m-1)}$  或  $G_{(m+1)}$  来代替。由对  $N$  组海面图像的处理经验,设置该阈值为  $Q_\xi$ ,若  $\xi < Q_\xi$ ,则不存在海界线区域。反之,  $Q_{\max}$  对应的单元区域即为海界线区域。

## 4 基于改进的 Canny 算子检测海界线轮廓

### 4.1 原始 Canny 算子的局限

Canny 算子是一种常用且较为出色的边缘检测算子<sup>[9]</sup>。然而它也有自身的局限性。比如,对于单帧图像,虽然背景悬殊,但 Canny 算子的参数经过人工调整之后,都能够将海界线的轮廓较好地凸现出来。但是由于水面载体的运动,其背景可能是海岸或海空;由于天气原因,其背景可能时而清晰时而模糊,这样固定的 Canny 参数就无法在各种条件下均适用。例如图 1 与图 2 是海界线区域在分别使用

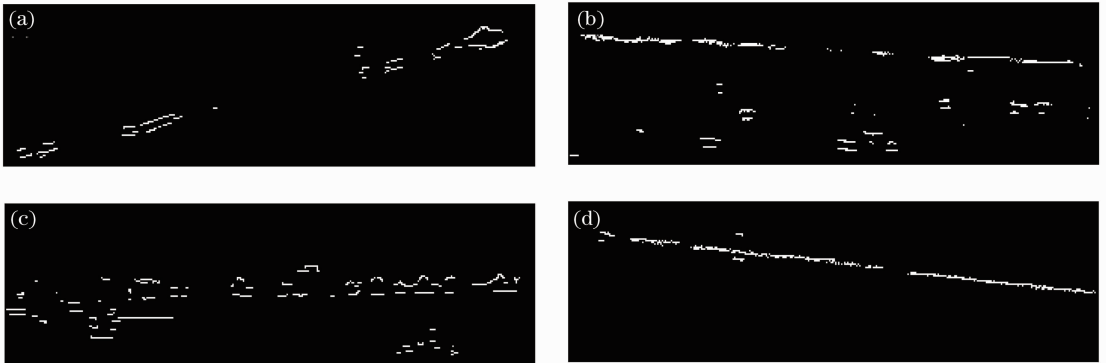


图 1 参数组 1 ( $\sigma=1, T_{\text{high}}=0.95, T_{\text{low}}=0.9$ ) 下海界线的边缘检测效果

Fig. 1 Edge detection result with the parameter set 1 ( $\sigma=1, T_{\text{high}}=0.95, T_{\text{low}}=0.9$ )

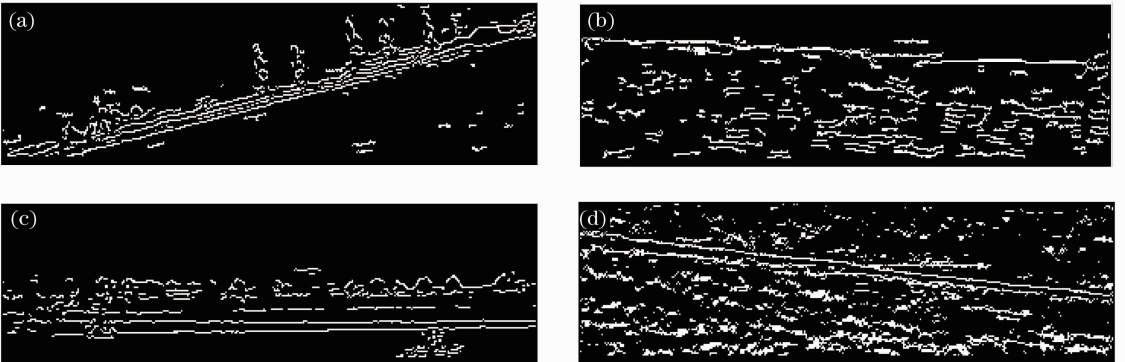


图 2 参数组 2 ( $\sigma=0.5, T_{\text{high}}=0.9, T_{\text{low}}=0.8$ ) 下海界线的边缘检测效果

Fig. 2 Edge detection result with the parameter set 2 ( $\sigma=0.5, T_{\text{high}}=0.9, T_{\text{low}}=0.8$ )

同一组参数时获得的边缘图像。对于图 1(b)和(d)来说,该组参数是较为合适的,而对于图 1(a)和(c)来说,有效信息丢失严重;对于图 2(a)和(c)来说,该组参数使得边缘信息完整,而对于图 2(b)和(d)来说,虽然海界线的信息隐含于边缘中,但是其余的非边缘信息干扰太大。

#### 4.2 周围纹理抑制方法

为了对 Canny 算子扬长避短,既使得到的边缘中包含海界线信息,同时又使其受到的纹理干扰较小,将基于周围纹理抑制的改进 Canny 算子方法<sup>[10]</sup>用于水面图像的海界线轮廓提取。该算法主要在以下两个部分区别于原始算法。

##### 1) 尺度相关梯度计算

小邻域内的有限差分易受噪声的影响,高斯平滑能够在消除噪声和保持梯度之间取得最好的折中,所以首先对图像进行高斯卷积。 $f(x,y)$  为输入图像, $g_\sigma(x,y)$  为二维高斯核函数, $\sigma^2$  为方差,决定平滑尺度,

$$f_\sigma(x,y) = f(x,y) * g_\sigma(x,y) = (f * g_\sigma)(x,y), \quad (5)$$

$$g_\sigma(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right). \quad (6)$$

由于海界线是沿着行方向连续的直线,所以只计算  $y$  方向的梯度,以减少计算量和非  $y$  方向的梯度影响。用  $G_M$  表示图像梯度, $G_M(y)$  表示图像  $y$  方向的梯度:

$$G_M = G_M(y) = \frac{\partial f_\sigma(x,y)}{\partial y}. \quad (7)$$

然而这种离散差分方法从分析上来讲具有不稳定性<sup>[11]</sup>,因此对上式右侧做一个变换:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_\sigma(x,y)}{\partial y} &= f(x,y) * \frac{\partial g_\sigma(x,y)}{\partial y} = \\ &\left(f * \frac{\partial g_\sigma}{\partial y}\right)(x,y). \end{aligned} \quad (8)$$

高斯核函数的一阶导数使得梯度计算省略了差分过程,这也就是梯度称为尺度相关的原因。

##### 2) 各向同性纹理抑制

纹理抑制概念是由 Grigorescu 等<sup>[11]</sup>提出的,主要用来消除 Canny 边缘算子所带来的轮廓内部纹理产生的无意义边缘。其原理是当一个边缘像素的梯度与它周围的梯度强度相似时,就对其予以抑制,这样可以在一定程度上减弱内部纹理,使得边缘能量集中在轮廓上。定义权重函数  $w_\sigma$ :

$$w_\sigma = \frac{H[D_{G_\sigma}(x,y)]}{\|H(D_{G_\sigma})\|_1}, \quad (9)$$

$$D_{G_\sigma}(x,y) = g_{4\sigma}(x,y) - g_\sigma(x,y), \quad (10)$$

$$H(z) = \begin{cases} 0, & z < 0 \\ z, & z \geq 0 \end{cases}, \quad (11)$$

(9)式中的  $\|\cdot\|_1$  为 L1 范数。

图 3 为  $\sigma = 1$  时,  $w_\sigma$  的变化趋势<sup>[12]</sup>。图 4 为图 3 对应的具备抑制作用的环形区域。半径为  $r_1$  的圆内,  $D_{G_\sigma}(x,y) < 0$ , 权重  $w_\sigma$  为 0, 即在这个邻域内, 支持原始梯度大小。在半径为  $r_2$  的圆外,  $D_{G_\sigma}(x,y)$  微乎其微, 工程上不考虑它的贡献, 所以仅圆环区域为抑制区。一般地,  $r_1 \approx 2\sigma, r_2 = 4r_1$ 。这种纹理边缘抑制方法是符合人眼视觉感受的。从日常经验也可以发觉, 如果感兴趣的点周围很小范围内有其他的点存在, 那么人类视觉很容易将感知粒度调节到略粗一点的程度而不致影响感知; 对于远离感兴趣点的其他点, 视觉注意力也不会集中在它们身上。而只有在一个合适距离内的大量其他点的存在, 才会显著干扰对感兴趣点的感知。

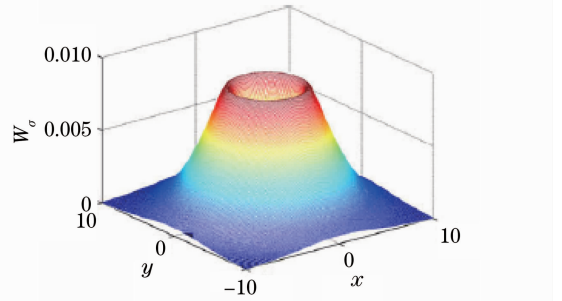


图 3 权重函数  $w_\sigma$

Fig. 3 Weight function  $w_\sigma$

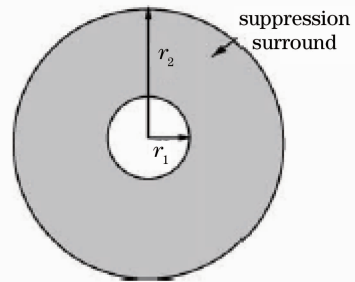


图 4 抑制作用的环形区域

Fig. 4 Ring zone of suppression surround

将梯度与权重函数进行卷积, 得到每个像素点的周围加权抑制因素, 从原梯度中减去抑制部分, 则可以得到人眼希望保留的部分  $G_M(ss)$ , 突出感兴趣的边缘, 大多表现为轮廓形式, 计算公式如下<sup>[13]</sup>:

$$G_M(ss) = G_M - G_M * w_\sigma. \quad (12)$$

之所以采用这一算法, 是因为海界线可看作一个非闭合的轮廓。在图像的所有轮廓中提取海界线

要比在图像的所有边缘中提取海界线更简单快捷,这一点将在下一小节中得到充分体现。之后,继续原始 Canny 算法步骤中的非极大值抑制以及双阈值化以得到二值图像<sup>[14]</sup>。纹理抑制过程已经较好地减弱了非轮廓边缘对轮廓边缘的干扰。为了使得各种背景下的二值图像中都尽量包括海界线这条关键性的轮廓,一般将阈值设定为一个较小的数。

## 5 Hough 变换加权投票

Hough 变换是工程应用中不可或缺的一种图像直线检测方法,根据实际需要对其进行恰当改进即能够得到满意的结果。例如,在检测海天线或海岸线时,对边缘图像采用原始 Hough 变换会产生较多无意义的直线,影响直线检测的准确性。通过分析海界线存在于图像中的特点,得知该直线应该是视野中连续性最好的最长直线。而其余的非海界长直线,则是由算法本身得到的轮廓上的点与其他随机点的集合,这些点组成的直线长度有可能比海界线的长度更长,所以不能单纯依靠直线参数空间中最多的投票数来确定海界线。另外,尽管海界线时有被船只隔断的情况,但其剩余线段的连续性仍然要好于非海界线。借助这个特征,提出对参数空间的每个投票做加权的方法来求直线的有效长度,选择有效长度最长的直线作为海界线。

为了在海界线区域的轮廓中定位海界线,首先对边缘图像做标准 Hough 变换,它的基本理论是图像中的任何点都可能是一些候选直线集合的一部分<sup>[15]</sup>。变换前在图像空间 $(x, y)$ ,变换后在参数空间 $(\rho, \theta)$ 。直线方程均可以转化成极坐标方程的形式:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta. \quad (13)$$

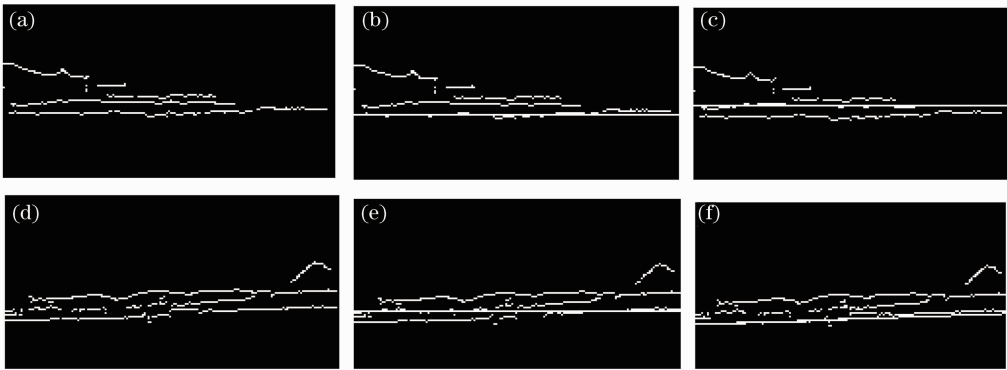


图5 直线检测结果比较。(a),(d)原始二值图像;(b),(e)表象长度  $S$  最大的直线;(c),(f)有效长度  $E$  最大的直线

Fig. 5 Line detection results. (a),(d) Original binary image; (b),(e) line with longest representative length  $S$ ;

(c),(f) line with longest effective length  $E$

对图像边缘上的每一个像素点 $(x, y)$ ,计算经过该点的所有直线对应的参数 $(\rho, \theta)$ ,对参数空间进行图像空间像素点个数的投票累积。实际上,累积的投票就是在图像中支持该参数对应直线的边缘点的数量,这里称之为表象长度  $S$ 。设对应直线在图像中表现为  $n$  条分线段构成,每条分线段的像素数为  $L_i (1 < i < n)$ ,那么

$$S = \sum_{i=1}^n L_i \quad (L_i \geq 1). \quad (14)$$

选取参数空间中表象长度大于某个阈值的直线作为候选直线。由于正常状态下海天线和海岸线的长度总是大于或等于图像的宽度,所以将图像的宽度设置为标准长度  $L_s$ ,将阈值设置为  $L_s$  的  $1/5$  (或者更多),以体现海界线的长度特性,减少部分干扰源。若候选直线的条数  $t=1$ ,那么这条直线即为所求的海界线;若  $t>1$ ,必须做进一步处理以确定海界线。

为了在候选直线中提取出最可能成为海界线的直线,对所有  $S > L_s/5$  的候选直线进行投票加权,求其有效长度  $E$ 。对于  $n$  条分线段,每条分线段上的像素赋予相同的权值  $w_i$ ,定义为该线段的长度  $L_i$  占候选直线横贯图像的长度  $L_i$  的比例,即

$$w_i = \frac{L_i}{L_i}, \quad (15)$$

$$E = \sum_{i=1}^n w_i L_i. \quad (16)$$

很明显,分线段占标准长度的比例越大,该线段对直线的投票权值越大,对有效长度的贡献也就越大。而且表象长度  $S$  最大并不代表有效长度  $E$  最大,如图5所示。选择有效长度最大的那条直线作为海界线。



直线有效长度的计算结果对直线上分线段的间隔与长度很敏感。连续较长的分线段对直线的有效长度起着决定性的作用,候选直线上连续较长的分线段越多,其有效长度越长,则该直线越有可能是海界线。反之,候选直线上的细碎线段越多,其有效长度越小,相比之下,成为海界线的可能性越小。自然现象反映在海面图像上,可以看出除了海天线与海岸线是天然连续长直线,其余的候选直线均由不连续的线段组成,有效长度的表示方法符合人眼观测海界线的连续性特征。

## 6 实验结果分析

为了验证文中提出方法的有效性,对某型艇在海面高速运动时其光视觉系统采集的可见光视频图像进行处理,图像序列的背景包含平静的海面 and 颠簸的海面。当背景为海岸时,海岸线的检测率达到了 95%;当背景为海天时,海天线的检测率达到了 90%;

当背景为纯天空和纯海面时,排除率达到了 100%。由于篇幅有限,只取其中较为典型的图像进行结果展示。原始图像大小为 352 pixel×288 pixel,首先粗检海界线区域,如无海界线区域,则不继续后续检测;反之,定位海界线区域,接着对海界线区域进行轮廓检测与直线检测,精细提取海界线。

这里处理过程稍作改善,取  $T=12, Q_{\xi}=20$ 。由于图像最下面的单元区域容易受到水面艇自身首部及其运动产生强波浪的影响,所以将其排除不参与竞争海界线区域。当海界线区域为海岸线时,为了减弱大熵值海岸子图像的主导地位,取最大指标  $Q$  对应的单元区域附加其下相邻子图像一起组成海界线区域。预检结果如图 6 所示,图 6(a),(b)均不包含海界线,图 6(c)~(f)中的两条白线之间即为得到的区域,其中海界线区域的轮廓提取与直线检测结果如图 7 所示。相应的指标如表 1 所示。

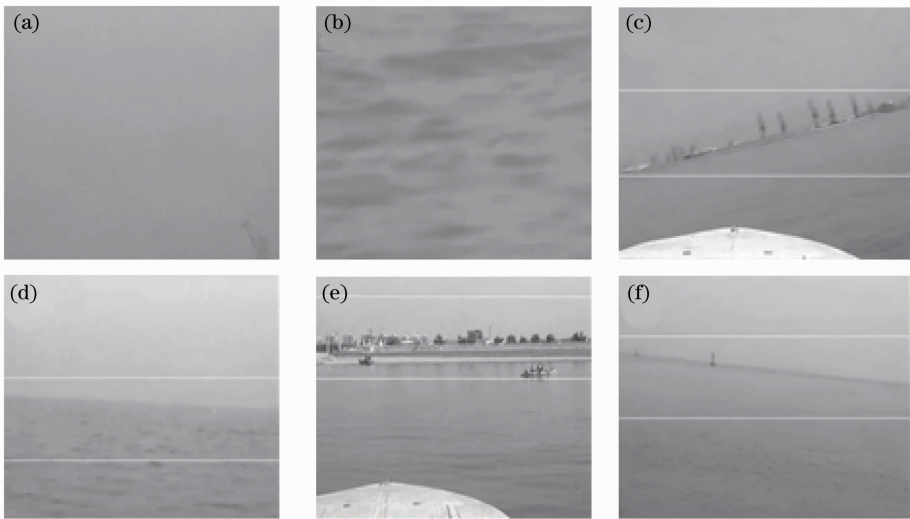


图 6 海界线区域检测结果  
Fig. 6 Sea-line region detection results

表 1 图像由上至下单元区域的指标  $Q$  与  $Q_{\max}$  上下子图像的灰度差  $\Delta\bar{G}$

Table 1  $Q$  of unitary region from top to bottom and  $\Delta\bar{G}$  of  $Q_{\max}$  of top sub and bottom ones images in Fig. 6

Fig. 6	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$Q_7$	$Q_8$	$Q_9$	$\Delta\bar{G}$
(a)	17.2	12.1	13.9	17.0	16.5	13.8	10.1	10.7	14.9	8
(b)	66.2	15.1	-34.4	0	4.90	0	9.43	-9.6	-18.3	8
(c)	3.56	13.0	31.9	63.1	72.7	67.0	42.6	31.4	-39.5	27
(d)	43.6	49.0	45.3	50.6	102.8	150.2	66.6	38.1	39.4	44
(e)	63.0	255.6	177.6	-75.9	35.88	63.0	60.7	69.2	-88.0	42
(f)	45.7	51.5	88.1	117.4	91.8	92.9	80.8	70.7	40.0	40

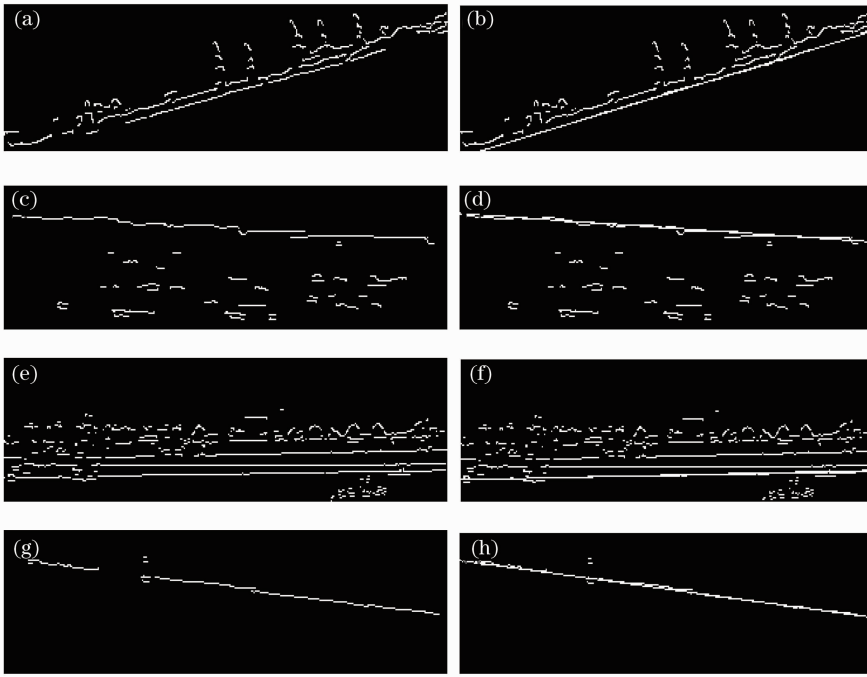


图 7 (a),(c),(e),(g)对应图 6(c)~(f)经过纹理抑制的轮廓检测结果;(b),(d),(f),(h)对应图 6(c)~(f)海天线检测最终结果

Fig. 7 (a),(c),(e),(g) Sea-line region contour of Fig. 6 (c)~(f) after texture suppression; (b),(d),(f),(h) final detection results of sea-sky-line of Fig. 6(c)~(f)

实验平台为 Pentium IV 处理器,1 GB 内存,软件平台为 Windows XP 操作系统,采用 Visual C++6.0 编辑器。海界线区域预测平均花费时间不到 1 ms,轮廓检测平均花费时间为 20 ms,直线提取平均花费时间为 20 ms,而在水面艇运动过程中,对于每一帧图像,相应处理总时间在 100 ms 以内便能够达到实时性要求,可见该方法不仅为后续的目标检测与跟踪等任务提供了准确的海界线信息,还为之预留了可观的时间资源。

## 7 结 论

针对海面运动载体可见光序列图像,紧密结合海面图像的特点,提出了一种广泛适用的海界线检测方法。由于海界线区域复杂度较大以及其上下邻域存在一定的灰度差异,所以据此来预测海界线区域的位置,并摒弃不含海界线区域的图像。而且海界线在人的视觉感受来看,是视野中最长的连续直线,那么利用周围纹理抑制的 Canny 算子将图像中明显的轮廓提取出来,并对 Hough 变换的投票进行加权,精细检测海界线。经过实验验证,该方法具有很好的稳健性和实时性,既能检测倾斜的海界线,也能检测海岸背景的海界线。在需要准确的海界线信息的工程任务中,该方法可以达到应用标准。

## 参 考 文 献

- 1 Feng Deying, Xu Kaiyu, Xu Zhijing. Sea-sky-line detection in infrared images[J]. *Infrared*, 2008, **29**(9): 33~36  
冯德瀛, 许开宇, 徐志京. 红外图像中海天线的检测[J]. *红外*, 2008, **29**(9): 33~36
- 2 Zhang Bing, Zhao Ningxia, Liu Weiting. Research on water-sky-line detection technique based on wavelet transform[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(4): 297~299  
张冰, 赵凝霞, 刘维亭等. 基于小波变换的水天线提取算法研究[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(4): 297~299
- 3 Gui Yang, Li Lichun, Wang Kunpeng. A new method of sea-sky-line detection based on region variance and RANSAC algorithm [J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(11): 1149~1151  
桂阳, 李立春, 王鲲鹏等. 基于区域方差和 RANSAC 的海天线检测新方法[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(11): 1149~1151
- 4 Liu Songtao, Zhou Xiaodong, Wang Chenggang. 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
- 5 Qi Baojun, Wu Tao, He Hangen *et al.*. Real-time detection of small surface objects using weather effects[C]. *CVPR*, 2010, 1129~1140
- 6 Li Xin, Zhao Yigong, Chen Bing. A new approach of small and dim target detection in cloud cluster infrared image based on classification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3036~3042  
李欣, 赵亦工, 陈冰. 基于分类的红外云层背景弱小目标检测方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3036~3042
- 7 Yang Bo, Xu Guangyou. Similarity measurement and retrieval of texture images [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, **30**(6): 991~998  
杨波, 徐光佑. 纹理相似性度量研究及基于纹理特征的图像检索[J]. *自动化学报*, 2004, **30**(6): 991~998
- 8 Dou Yan, Kong Lingfu, Wang Liufeng. A computational model

- of visual attention based on visual entropy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2512~2515
- 窦 燕, 孔令富, 王柳锋. 基于视觉熵的视觉注意计算模型[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2512~2515
- 9 Cao Qi, Bi Duyan. Characteristic-selecting filtering in infrared small target detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2408~2412
- 曹 琦, 毕笃彦. 红外弱小目标检测中的特征选择性滤波方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2408~2412
- 10 Bai Tingting, Deng Caixia, Geng Ying. Image edge detection based on wavelet transform and Canny operator [J]. *J. Harbin University of Science and Technology*, 2010, **15**(1): 44~51
- 白婷婷, 邓彩霞, 耿 英. 基于小波变换与 Canny 算子融合的图像边缘检测方法[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2010, **15**(1): 44~51
- 11 Cosmin Grigorescu, Nicolai Petkov, Michel A. Westenberg. Contour and boundary detection improved by surround suppression of texture edges[J]. *Image and Vision Computing*, 2004, **22**(8): 609~622
- 12 Guo Siyu, Pridmore Tony, Kong Yaguang *et al.*. An improved Hough transform voting scheme utilizing surround suppression [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2009, **30**(13): 1241~1252
- 13 Ray Hidayat. Texture-Boundary Detection in Real-Time [D]. Christchurch: University of Canterbury, 2010. 75~76
- 14 Zhang Ting, Lu Yuangang, Zhang Xuping. Minimum-discontinuity phase unwrapping algorithm based on edge detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 180~186
- 张 婷, 路元刚, 张旭苹. 基于边缘检测的最小不连续相位展开算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 180~186
- 15 Lian Ming, Fu Hongya, Fu Shen. Study on precollimation based on Hough transforms and color character[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2386~2389
- 廉 明, 富宏亚, 付 森. 基于 Hough 变换和颜色特征的预瞄准技术研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2386~2389

栏目编辑: 李文喆