



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2016
05
VOL.21

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



图像自动聚类 P574



第21卷第5期（总第241期）
2016年5月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院
主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文
编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会
邮政信箱 北京9718信箱
邮 编 100101
电子信箱 jig@radi.ac.cn
电 话 010-64807995
网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)
印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

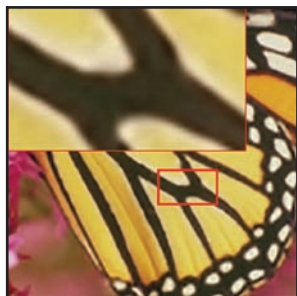
Title inscription: Song Jian Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

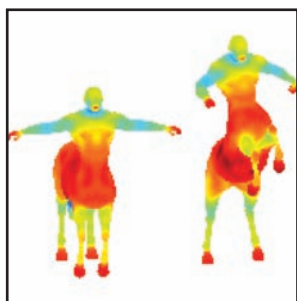
Editor-in-Chief LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics
P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China
Zip code 100101
E-mail jig@radi.ac.cn
Telephone 010-64807995
Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

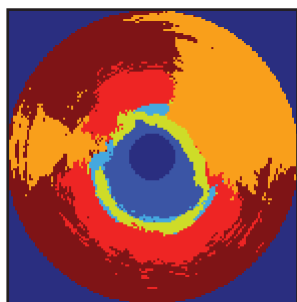
CN 11-3758/TB
ISSN 1006-8961
CODEN ZTTXFZ
国外发行代号 M1406
国内邮发代号 82-831
国内定价 60.00元



利用双通道卷积神经网络的
图像超分辨率算法(第556页)



融合特征描述符约束的3维
等距模型对应关系计算(第
628页)



结合先验形状信息和序贯学
习的心血管内超声外弹力膜
检测(第646页)

综述

中国图像工程: 2015

章毓晋 533

图像处理和编码

基于代价敏感Adaboost目标跟踪

薛一哲, 王拓 544

利用双通道卷积神经网络的图像超分辨率算法

徐冉, 张俊格, 黄凯奇 556

图像分析和识别

局部均匀模式描述和双加权融合的人脸识别

任福继, 李艳秋, 许良凤, 胡敏, 王晓华 565

K步稳定的鞋印花纹图像自动聚类

王新年, 舒莹莹 574

空间约束混合高斯运动目标检测

董俊宁, 杨词慧 588

图像理解和计算机视觉

分层信息融合的物体级显著性检测

李波, 金连宝, 曹俊杰, 冷成财, 卢春园, 苏志勋 595

结合区域协方差分析的图像显著性检测

张旭东, 吕言言, 缪永伟, 郝鹏翼, 陈佳舟 605

前景判别的局部模型匹配目标跟踪

刘大千, 刘万军, 费博雯 616

计算机图形学

融合特征描述符约束的3维等距模型对应关系计算

杨军, 闫寒, 王茂正 628

一类加权有理插值样条曲面及局部约束控制

刘植, 肖凯, 陈晓彦, 江平, 谢进 636

医学图像处理

结合先验形状信息和序贯学习的心血管内超声外弹力膜检测

林慕丹, 杨丰, 梁淑君, 赵海升, 黄铮, 崔凯 646

遥感图像处理

局部显著特征下的光学遥感图像舷靠舰船检测

李轩, 刘云清, 卞春江, 毛博年 657

长时序高光谱图像清晰度影响因素分析

尚任, 黑保琴, 李盛阳, 覃帮勇, 张九星 665

基于变差函数的中高分辨率SAR影像农村建筑区提取

林晨曦, 周艺, 王世新, 刘文亮, 田野, 张燕楠 674

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

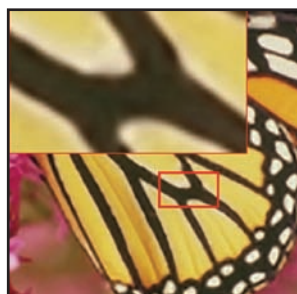
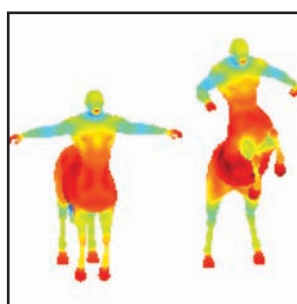
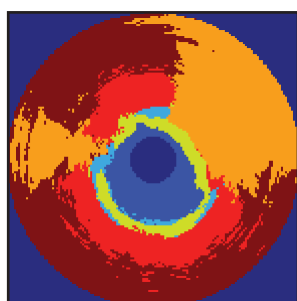


Image super-resolution using two-channel convolutional neural networks(P556)



Calculation of correspondences between three-dimensional isometric shapes with the use of a fused feature descriptor (P628)



External elastic membrane border detection based on for intravascular ultrasound images(P646)

Review

Image engineering in China: 2015	
Zhang Yujin	533

Image Processing and Coding

Object-tracking method based on improved cost-sensitive Adaboost	
Xue Yizhe, Wang Tuo	544
Image super-resolution using two-channel convolutional neural networks	
Xu Ran, Zhang Junge, Huang Kaiqi	556

Image Analysis and Recognition

Face recognition method based on local mean pattern description and double weighted decision fusion for classification	
Ren Fuji, Li Yanqiu, Xu Liangfeng, Hu Min, Wang Xiaohua	565
K-steps stabilization based on automatic clustering of shoeprint images	
Wang Xinnian, Shu Yingying	574
Moving object detection using improved Gaussian mixture models based on spatial constraint	
Dong Junning, Yang Cihui	588

Image Understanding and Computer Vision

Object level saliency detection by hierarchical information fusion	
Li Bo, Jin Lianbao, Cao Junjie, Leng Chengcai, Lu Chunyuan, Su Zhixun	595
Image saliency detection using regional covariance analysis	
Zhang Xudong, Lyu Yanyan, Miao Yongwei, Hao Pengyi, Chen Jiazhou	605
Foreground discrimination in local model-matching tracking	
Liu Daqian, Liu Wanjun, Fei Bowen	616

Computer Graphics

Calculation of correspondences between three-dimensional isometric shapes with the use of a fused feature descriptor	
Yang Jun, Yan Han, Wang Maozheng	628
Weighted rational interpolation spline surfaces and local constraint control	
Liu Zhi, Xiao Kai, Chen Xiaoyan, Jiang Ping, Xie Jin	636

Medical Image Processing

External elastic membrane border detection based on sequential learning and prior shape information for intravascular ultrasound images	
Lin Mudan, Yang Feng, Liang Shujun, Zhao Haisheng, Huang Zheng, Cui Kai	646

Remote Sensing Image Processing

Inshore ship detection method in optical remote sensing images using local salient characteristics	
Li Xuan, Liu Yunqing, Bian Chunjiang, Mao Bonian	657
Analysis of factors influencing clarity of hyper spectral images in long time series	
Shang Ren, Hei Baoqin, Li Shengyang, Qin Bangyong, Zhang Jiuxing	665
Variogram-based rural build-up area extraction from middle and high resolution SAR images	
Lin Chenxi, Zhou Yi, Wang Shixin, Liu Wenliang, Tian Ye, Zhang Yannan	674

中图分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2016)05-657-08

论文引用格式: Li X, Liu Y Q, Bian C J, Mao B N. Inshore ship detection method in optical remote sensing images using local salient characteristics[J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(5): 657-664. [李轩, 刘云清, 卞春江, 毛博年. 局部显著特征下的光学遥感图像舷靠舰船检测[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(5): 657-664.] [DOI:10. 11834/jig. 20160513]

局部显著特征下的光学遥感图像舷靠舰船检测

李轩¹, 刘云清¹, 卞春江², 毛博年²

1. 长春理工大学电子信息工程学院, 长春 130022;

2. 中国科学院国家空间科学中心 复杂航天系统电子信息技术重点实验室, 北京 100190

摘要: 目的 在光学遥感图像中, 针对舷靠舰船灰度和纹理特征与港口相近, 传统方法检测效果不理想的问题, 提出一种基于局部显著特征的舷靠舰船检测方法。方法 首先, 对原始图像预处理得到海陆分割后的二值图像; 然后, 提取二值图像中的直线段作为局部显著特征检测舰船目标; 再将直线段提取结果与舰首检测相结合, 建立舷靠舰船检测模型; 最后, 通过计算舰船几何尺寸及环境信息分析确定舰船目标。结果 在两幅不同场景的光学遥感图像中验证本文方法并与其他算法进行对比, 本文方法识别率可达 100%, 且不存在误检和漏检情况, 相比于其他算法具有一定优势。在舰船背景复杂或停泊朝向不定时, 文中方法可有效判别舰船停靠方向并对舰船目标进行正确标记。结论 在复杂背景环境及其他干扰下, 应用本文方法检测舷靠舰船目标准确率高, 鲁棒性强, 具有较高适应性。

关键词: 光学遥感图像; 舷靠舰船; 目标检测; 直线段; 局部显著特征

Inshore ship detection method in optical remote sensing images using local salient characteristics

Li Xuan¹, Liu Yunqing¹, Bian Chunjiang², Mao Bonian²

1. School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Key Laboratory of Electronics and Information Technology for Space Systems, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: **Objective** Automatic inshore ship detection from remote sensing imagery has many important applications, such as ship change detection and harbor dynamic surveillance. Stable performance of inshore ship detection is vital to the analysis of ship change and the determination of the harbor surveillance effect. Ship detection using optical remote sensing images has been a hot research topic. However, detecting inshore ships utilizing the traditional area-based method is difficult because the gray scale and texture character of inshore ships are similar to that of the shore. Therefore, we propose a method of inshore ship detection using local salient characteristics. **Method** First, the binary image is obtained by water and land segmentation preprocessing. Then, the line segments from binary images are extracted as the local salient features to detect ship targets. Next, line segment extraction result is combined with ship bow detection result to generate the ship detection

收稿日期: 2015-08-20; 修回日期: 2015-12-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973) 基金项目(613192)

第一作者简介: 李轩(1987—), 男, 现为长春理工大学信息与通信工程专业博士研究生, 主要研究方向为遥感图像处理。

E-mail: liken1027@163.com

通信作者: 刘云清, 教授, 博士生导师, E-mail: mzliuyunqing@163.com

Supported by: National Basic Research Program of China (613192)

model. Finally, the ship targets are acquired by calculating the ship geometric size and analyzing the environmental information. **Result** Experimental results indicate that the proposed inshore ship detection method is more effective and can robustly adapt to the complex background and mooring orientation. The detection result is more accurate compared with that of traditional methods, and the recognition rate is 100%. **Conclusion** In the complex background environment and other interferences, this method exhibits a high recognition rate, with high robustness and high adaptability.

Key words: optical remote sensing images; inshore ship; target detection; line segment; local salient characteristics

0 引言

在光学遥感图像中,目标检测是图像目标识别和图像理解方面研究的重点领域。其中,针对海上近岸舰船目标检测在军事上具有重要研究意义。例如,通过检测和监视感兴趣的港口区域内舰船目标并估计出其位置、尺寸、类型等参数信息,对及时获取海上作战军事情报、确保海上战场主动权起到了重要的作用。港口内的舰船根据停泊方式的不同分为停靠在港口内海域和港口码头两种情况,而第2种根据停靠方式又可分为舷靠和尾靠,分别如图1所示。

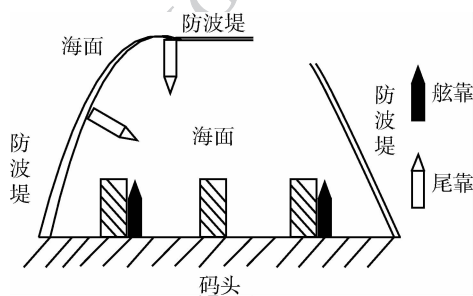


图1 近岸舰船停靠位置示意图

Fig. 1 The diagram of ships docked inshore

本文针对近岸情况中的舷靠舰船目标检测进行研究。而针对港口内的舷靠舰船检测研究起步较晚,相关资料较少。不同于海洋背景,光学遥感图像中的舷靠舰船与港口连成一体,且港口中建筑物较多,背景较为复杂,如图2所示,基于传统的海面舰船检测方法难以有效对舷靠舰船目标进行检测。

截至目前,国内外大量的研究工作是基于光学遥感图像海洋背景下的舰船目标进行检测^[1-4],大多采用自适应阈值图像分割或者纹理分割的方法就可粗略定位舰船目标^[5-6],但在实际应用过程中对于大尺寸的遥感图像检测效果不佳;文献[7]通过检测舰首区域有效地解决了旋转、尺度不变以及舰

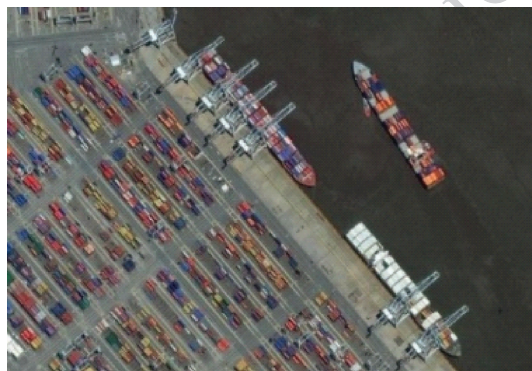


图2 舷靠舰船光学遥感图像

Fig. 2 The optical remote sensing image of inshore ship

船之间差异等问题,但是该方法仅能检测舰首呈“V”形的舰船目标,具有一定局限性。因此,针对复杂背景下的光学遥感图像中不同种类舷靠舰船检测进行深入研究具有重要意义。

1 舷靠舰船检测

提出一种基于局部显著特征的舷靠舰船检测方法,检测流程如图3所示。先对原始图像预处理获得海陆分割二值图像;然后,提取预处理后图像中的直线段特征,结合对舰船的特征分析,将直线段作为局部显著特征检测舰首区域;再将预处理和直线段提取结果结合,建立可提供直线段空间信息的网格

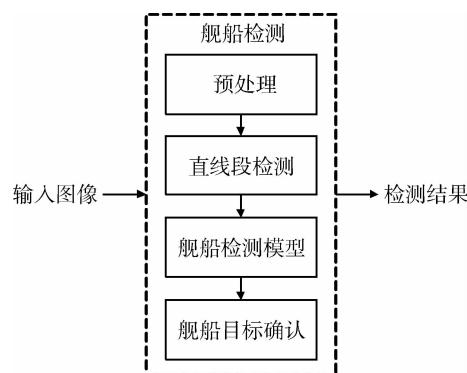


图3 舷靠舰船检测方法

Fig. 3 Inshore ship detection method

和舰船检测模型;最后,通过计算舰船几何尺寸,并分析其环境信息定位舰首位置,从而最终确定舰船目标。所有计算过程都是在二值图像上完成,因此,计算所需参数不受灰度图像中的强度差异和不同对比度影响。

1.1 预处理

在预处理过程中,先使用中值滤波以降低斑点噪声对图像的影响;再对滤波后的图像进行海陆分割,减少陆地和码头上大量边缘点对目标检测的干扰,由于海面区域变化缓慢且灰度尺度低,使得其灰度分布稳定,然而人造物体则表现出相反的特征,所以使用基于直方图的1维Kapur熵法^[8]对图像进行海陆分割;最后,采用数学形态学中的闭运算去除目标内的孔洞和噪声区域。图4是预处理过程示意图。

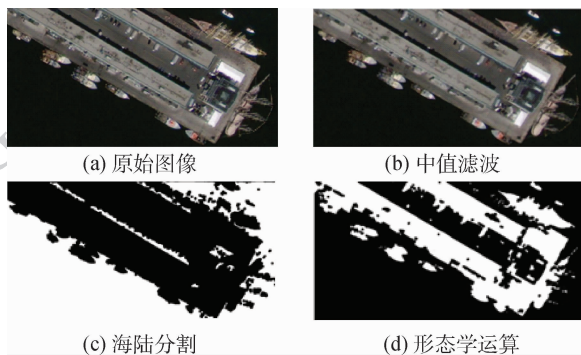


图4 预处理过程图

Fig. 4 The pre-processing diagram ((a) original image; (b) filtering; (c) sea-land segmentation; (d) morphology operation)

1.2 舰船检测模型

由于港口背景较复杂,导致舰船和背景不易区分,直线段易被截断。此外,相比于行人和车辆检测,舰船检测的最大不同是图像中舰船朝向不定。所以在实际检测过程中,需要解决旋转不变和尺度不变问题。文献[7]方法采用检测舰首区域,并将其作为最主要特征。然而,除了舰首呈“V”形的舰船外,还可通过直线段特征检测到除文献[7]以外种类的舰船。此外,当舰船并排停靠时,无法利用文献[7]中对舰船停靠位置的分析结果。因此,不同于文献[7],本文先使用LSD(line segment detection)检测子提取海陆边界上的直线段,并建立直线表格和舷靠舰船检测模型;再用直线段信息检测舰首,确定舰首类型;最后通过外接矩形框对整个舰船

目标进行检测。

1.2.1 直线段检测

物体的直线段提供了丰富的图像几何信息,因此,在计算机视觉领域,直线段检测技术具有广泛的研究基础。经典的方法是通过Hough变换^[9]得到Canny边缘检测子^[10]检测物体直线特征,然而其在计算时间和准确率上都不令人满意。近些年的研究成果一定程度上改进了上述问题,文献[11]提出了LSD方法,通过区域生长使用梯度方向检测直线段特征,在规定时间内能精确检测出直线段,并能较好地抑制虚警。因此,尝试利用LSD检测子对光学遥感图像中的舷靠舰船目标进行检测。

LSD检测子的主要目的是检测图像中的局部直线轮廓,即称之为直线段。轮廓是图像中的某些特殊区域,在这些区域中,图像的灰度从黑到白或者从白到黑的剧烈变化。因此,梯度和直线等级是两个重要的概念,如图5所示。

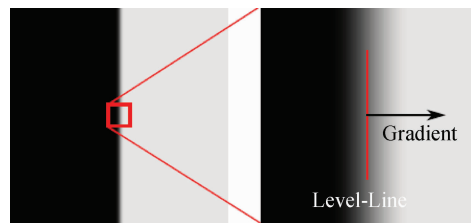


图5 梯度和直线等级示意图

Fig. 5 The gradient and level-line diagram

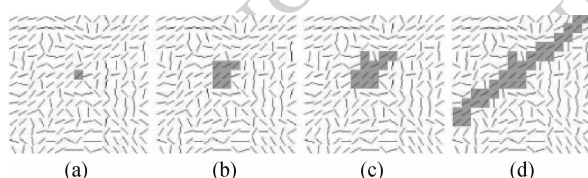
LSD检测子计算过程如下:

- 1) 按照梯度由大到小的方式对像素进行排列。
- 2) 选择未使用的像素进行区域生长运算,获得支持区域,如图6灰色部分所示,直线段呈现出像素的梯度方向。图6(a)是种子点,经过一系列变化形成最终的支持区域,如图6(d)所示。在区域生长过程中,由于候选像素的方向不同,所以支持区域必须确定在小范围内。
- 3) 将直线支持区域(即像素集)和直线段(矩形)结合,直线段由终点和舰船宽度决定。
- 4) 验证LSD检测子对虚警的抑制效果。虚警是由与直线支持区域中像素方向完全不同的像素所组成的集合形成。当NFA(the number of false alarms)大于所设阈值时,则将该直线段判为虚警信息,计算表达式为

$$NFA = (c, x) = N_{\text{line}} B(l(c), k_x(c), \sigma) \quad (1)$$

式中, c 为待检测图像疑似感兴趣区域内的像素数;
 x 为待检测图像; N_{line} 为待检测图像中疑似直线段
 区域内的像素数量, 表达式为 $N_{\text{line}} = (mn)^{5/2}$, mn 为
 待检测图像的尺寸; $B(l(c), k_x(c), \sigma)$ 是二项分
 布, 具体的表达式为: $B(l(c), k_x(c), \sigma) =$

$$\sum_{i=k}^l \binom{l}{i} \sigma^i (1 - \sigma)^{l-i}$$
, 式中的 $l(c)$ 为矩形框内全部
 像素数, $k_x(c)$ 为测量函数, 用以评估图像 x 中候选
 区域 c 的结构等级, σ 是检测精度, 根据大量实验总
 结得出当取 $\sigma = 1/8$ 时检测效果最佳。当
 $NFA_{\text{line}} = (mn)^{5/2} B(l(c), k_x(c), \sigma) \leq 1$ 时, 所检测
 的结果即为直线段区域。

图6 基于连接点的区域生长算法过程^[11]Fig. 6 The process of the region growth algorithm
for the aligned points^[11]

当在海陆边界上检测到直线段时, 利用如图 7
 所示的直线段表格数据结构将图像划分为许多宽度
 是 w , 高度是 h 的网格, 用来提供直线段间的信息。
 在表格中, 每一个直线段可以高效地搜索到其相邻
 的直线段。对通过网格的直线段进行标记, 第 2 行
 第 4 列部分表示直线段 0 和 3 通过网格 7。

光学遥感图像舷靠舰船的直线段检测结果如
 图 8 所示。可以看出, LSD 检测子的检测结果较为
 精确。然而, 该算子会丢失一些对于舰船检测很重
 要的直线段特征。因此, 需要建立一种有效的舷靠
 舰船检测模型。

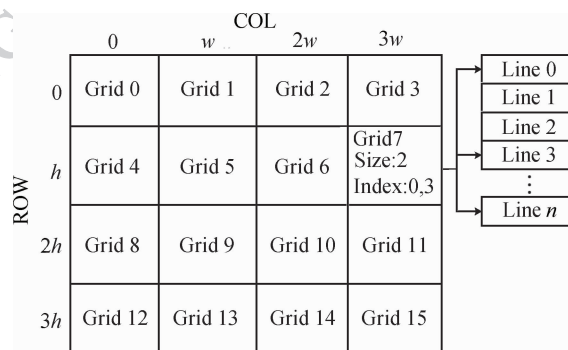


图7 直线表格

Fig. 7 The line table

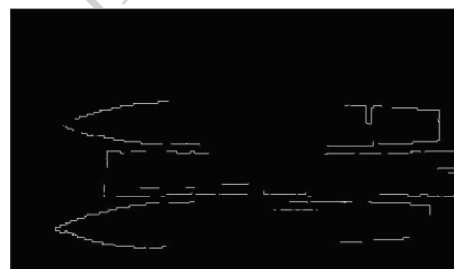


图8 直线段检测结果

Fig. 8 The LSD result

1.2.2 舰首检测

1) V 形舰首检测。在对光学遥感图像预处理
 及直线段特征检测后, 首部是“V”字形的舷靠舰船
 表现出了明显的轮廓特征, 如图 9(a) 所示。针对这
 一显著特征定义一个局部自相似特征提取算子, 如
 图 9(b) 所示。将检测模板的圆心与舰首端点处重
 合, 以圆形区域作为滑动窗口对舰首图像窗口内的
 像素灰度值与窗口中心灰度值在不同方向的子区域
 内进行差异加权求和操作, 得出特征描述符, 展开后
 作为窗口中心像素点的特征向量。该检测模板具有
 旋转不变性, 提取的是局部相似特征, 不易受图像对
 比度等干扰, 提取区域分成多个子区域, 使得算子对
 图像中轻微的仿射形变也有很好的适应性。

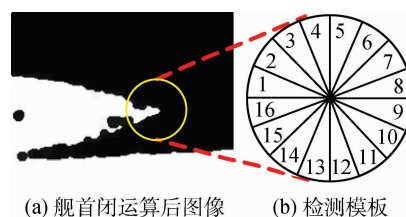


图9 检测模板

Fig. 9 Detection template ((a) the close operation
image of ship bow; (b) detection template)

对舰首区域进行一系列预处理运算后, 检测模
 板中位于舰首端点处的区域呈明显的高斯平均分布
 特征, 如图 9(a) 所示, 令该区域 S 的平均值是 μ , 方
 差是 σ , 二值化区域 S 的阈值是 $\mu + k\sigma$ 。

将模板中心定义为 (i, j) , 半径是 r , 将其等分
 成 16 个子区域, 计算每部分中像素点总和, 并按照
 1 ~ 16 的顺序顺时针对每部分进行标记, 形成不同
 的特征向量。令 $\alpha = V_1/U$, 其中, V_1 是具有显著性
 特征的向量, U 是检测模板内的像素值总和, α 是规
 范化的像素值, 即模板内某一特征向量与模板内的
 像素值总和之比。通常情况下, 由于舰首的朝向具

有不确定性,首先校准舰船停靠方向,使其和舰首朝向一致;然后,按照灰度值从大到小的顺序重新排列规范化特征向量 α ,产生校正舰首方向后新的特征向量 b ,同时获得舰船方向向量 d 。在特征向量 b 中,前 3 个向量反应了像素值最大的区域,并且与舷靠舰船表现出了一致的特征,因此构造显著性特征因子

$$S = \sum_{b=1}^3 b / \sum_{b=4}^{16} b \quad (2)$$

当 S 大于给定阈值时,可以看做舰船特征向量与其舰首区域相对应,向量 α 和向量 b 在不同的模板子区域中的取值如表 1 所示。

表 1 向量 a 和向量 b 取值
Table 1 Vector a and vector b values

向量	模板子区域编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
a	0.01	0.06	0.02	0	0	0	0.01	0.32
b	0.32	0.96	0.54	0.41	0.11	0.03	0.03	0.02

向量	模板子区域编号							
	9	10	11	12	13	14	15	16
a	0.96	0.54	0.41	0.11	0.03	0.03	0.02	0.01
b	0.01	0.01	0.06	0.02	0	0	0	0.01

在制备完检测模板后,依据 SUSAN 检测原理,分别计算 16 个区域内的 $c(r, r_0)$ 值,共有 16 个方向。分别对每个子区域内的差异进行求和,得到特征描述符,即

$$D(r_0, n) = \sum_{r_n} w(r) c(r_n, r_0), 1 \leq n \leq 16 \quad (3)$$

根据式(3)每个像素点得出一个特征向量,即 $D(r_0, n)$, r_0 是以圆形区域作为模板的滑动窗口的圆心, r_n 是以 r_0 为中心的滑动窗口内编号为 n 的区域中所有原图像素的灰度值, $w(r)$ 为 2 维高斯函数加权值或者平均加权,式(3)中的 $1 \leq n \leq 16$ 反映出了窗口区域内的像素和在不同方向上与 r_0 的差异,即引入了方向的概念, $D(r_0, n)$ ($1 \leq n \leq 16$) 可以按照图 9(b)中标明的顺序展开成为一个特征向量。

由于舰船首部的特殊形状和区域灰度分布特性,使得所提取的舰首区域像素点的特征向量分布明显区别于舰船其他部分像素点的特征向量分布。对于由像素点组成每条直线段,分别检查两个最近直线段的两个端点。当最近直线段与当前直线段的角度在 12° 到 75° 范围时,将这两个直线段看做是“V”形状的舰首,如图 10 所示。

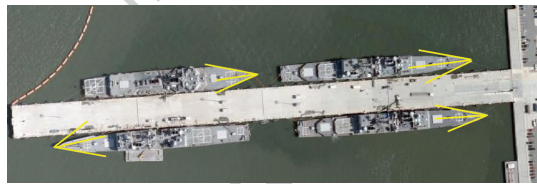


图 10 舰首检测结果

Fig. 10 The ship bow detection result

2) 方形舰首检测。检测过程可描述如下:

(1) 对于每条直线段,找到其最邻近直线段的两个端点,并当距离小于最小阈值时对其标记。

(2) 对于每条直线段,如果当前直线段不能组成舰首,并且其两个端点都分别存在相邻直线段,则分别对两条最近直线段进行检测。当两条最近直线段与当前直线段所成夹角在 $12^\circ \sim 75^\circ$ 范围内时,则将这 3 条直线段看做方形舰首,如图 11 所示。

完成上述步骤后,通过对直线段的标记检测候选舰首区域。此外,可以对由两条直线段组成的舰首计算其平均方向,将结果作为舰首最终方向。

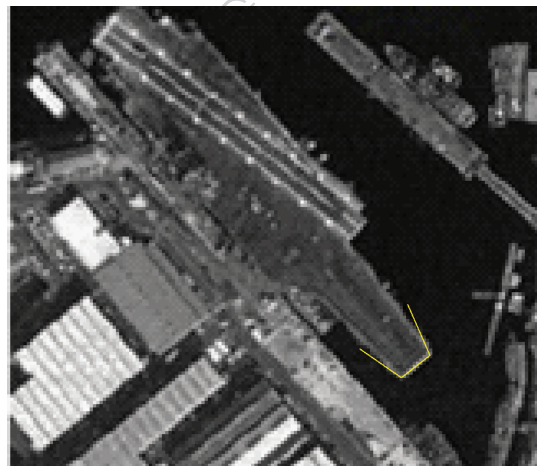


图 11 舰首检测结果

Fig. 11 The ship bow detection result

1.2.3 船身检测

对于每个舰首候选区域,其存在两个直线段的端点。因此,对于每个端点,在直线表网格中搜索属于其端点相对应的直线段。对于每个端点 P ,当候选直线段满足下列条件时,则认为是船身。1) 候选直线段与舰首平行;2) 候选直线段是舰首侧部的一部分,且与直线段端点 P 的交点在直线段端点 P 的外部或在端点 P 上。

通过上述分析,当检测出船身一侧,则初步认定检测到整个舰船目标。

1.3 舰船目标确认

在光学遥感图像中,受港口的复杂背景和传统检测方法局限性影响,舷靠舰船的直线段特征会部分丢失,缺少相应的几何信息。因此,将先前对舷靠舰船直线段分析和检测结果与其几何尺寸计算结合,并以舰首为起点,沿船身得到舰船外接矩形框,再分析舰船周围环境信息,从而确定舷靠舰船目标。

1) 计算舰船宽度。首先利用舰船前端检测结果计算其宽度,如图 12(a) 所示。为了有效解决舰船与港口相连接而无法单独检测舰船的问题,描述一个舰船宽度计算步骤,具体如下:

(1) 设置舰船扫描步长,令其沿着舰船方向从舰首端的 O 点向 A 点移动;

(2) 随着扫描步长的增加, OA 的长度也随之增加,在 A 点两侧首次检测到非港口边缘点 B 和 C ,它们与舰船方向 OA 线性垂直,如图 12(a) 中的红线所示;

(3) 如果 AB 长度值小于或远大于舰船原始宽度的一半,则令 AB 为舰船原始宽度的一半, AC 同理于 AB ,不断加入新的宽度计算结果以对其进行更新,更新后的结果最大数值为 $\max(2AB, 2AC)$;

(4) 如果两次出现更新后的舰船宽度与初始宽度一致,则停止计算;否则,返回步骤(2)继续操作。

2) 计算舰船长度。通过确定舰船尾部位置计算舰船长度,如图 12(b) 所示。定义一个包含区域 A 和区域 B 的矩形,使其从舰船前端点沿着舰船方向扫描舰船,通过计算两个区域内港口上的点所占该区域面积的比例,来定位舰船尾部,即当区域 A 所占比例小于阈值 th_a ,且区域 B 所占比例大于阈值 th_b 时,检测到舰船尾部,具体表达式为 $ratio(A) < th_a$ 和 $ratio(B) > th_b$ 。区域 A 和 B 的长度以及它们之间的距离依据经验设定, A 和 B 之间的宽度由舰船宽度决定。在扫描的过程中,当没有区域满足上述约束条件时,认为该区域为非舰船区域,检测失败。

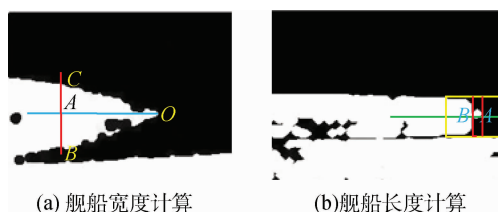


图 12 舰船几何尺寸计算示意图

Fig. 12 Calculation of ship geometry schematic diagram

((a) calculation of ship width; (b) calculation of ship length)

3) 建立外接矩形框。对于外接矩形框内的每条直线段,将距舰首最远端的直线段看做船尾,通过以下步骤可以找到舰船尾部:

(1) 计算外接矩形框方向并用 α 表示角度;

(2) 使用 Hough 变换公式,即

$$\gamma(\theta) = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta \quad (4)$$

式中,可将 XY 坐标变换到 $\gamma(\alpha)\gamma(\beta)$ 坐标。

对于外接矩形框的每个短边,将其边缘上的一个点代入

$$\gamma(\alpha) = x_0 \cos \alpha + y_0 \sin \alpha \quad (5)$$

对于外接矩形框的每个长边,将其边缘上的一个点代入

$$\gamma(\beta) = x_0 \cos \beta + y_0 \sin \beta \quad (6)$$

式中, α 与 β 垂直。

如图 13 所示,对于包含在外接矩形框内的直线网格上的每条直线段,将两个端点代入式(4)(5),如果两个端点都在新的外接矩形框内,记录从当前直线段到舰首的距离;当最远距离长度无法组成舰船长度时,排除候选舰船目标。根据统计结果得出,舰船长度最少是其宽度的 4 倍。最后,在新坐标系 $\gamma(\alpha)_0, \gamma(\beta)_0, \gamma(\alpha)_1, \gamma(\beta)_1$ 下得到最终外界矩形框。



图 13 近岸舰船检测结果

Fig. 13 The inshore ship detection result

2 实验结果

目前,由于缺少舷靠舰船的光学遥感图像作为舰船目标检测的数据集。因此,实验图像是从 Godeyes 上获取的由 GeoEye-1 卫星拍摄于波士顿港,如图 14 所示。其尺寸是 $3\,000 \times 3\,000$ 像素,分辨率是 0.5 m,图中共有 12 艘船只。其中包括船只与港口相连、船只与港口不相连、船只间并排停泊以及船只单独停泊的情况,对图 14 中舷靠舰船的检测结果黄色用矩形框标记。

针对舷靠舰船目标检测过程中的参数设置具体如下:在预处理中,设定 $\alpha = 1/3, \lambda = 1\,200, \mu = 100$,可有效将舷靠舰船从港口和水域背景中分离,

为后续步骤提供舰船检测模型;在计算舰船长度时,通过总结大量参考文献及实验结果,外接矩形框区域中 A 的长度设为 15 像素,区域 B 设为 10 像素,两个区域中的空间设为 3 像素,外接矩形框的宽度设为所计算出的舰船宽度的 0.6 倍,检测结果如图 14 所示。



图 14 本文方法检测结果
Fig. 14 The result of our detection method

本文检测算法过程示意图如图 15 所示,可以看出算法能够处理光学遥感图像中舷靠舰船目标,通过对舰首形状分类检测,去除虚警信息,再通过计算舰船几何尺寸及环境信息分析确定舷靠舰船目标。

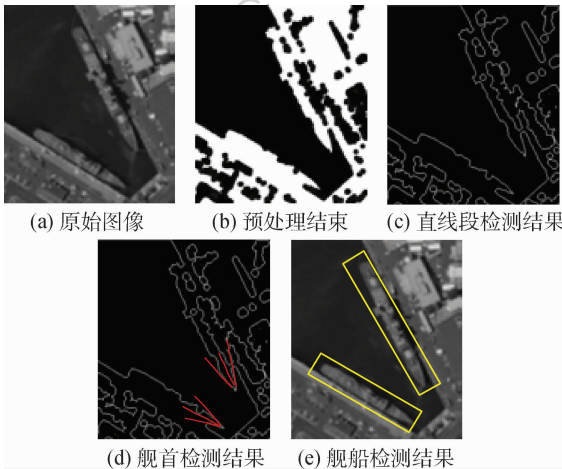


图 15 检测过程
Fig. 15 The process of detection ((a) original image; (b) pretreatment result; (c) line segment detection result; (d) ship head detection result; (e) ship detection result)

为了定量分析本文算法的性能,实验选取两幅不同场景下的光学遥感图像,并分别与文献[12]中的检测方法对比,结果如图 16 所示。从表 2 可以看出,文献[12]所述方法在场景 1 中存在误检测现象,在场景 2 中存在漏检和误检现象,即在背景环境简单时,使用文献[12]方法检测准确率较高;本文算法在场景 1 和场景 2 中均能正确检测出舷靠舰船

目标,没有受到复杂背景环境的影响,同时不存在误检及漏检现象,并且对海陆间灰度变化差异、阴影干扰以及舰船并排停泊时均具有较强的适应性和鲁棒性。

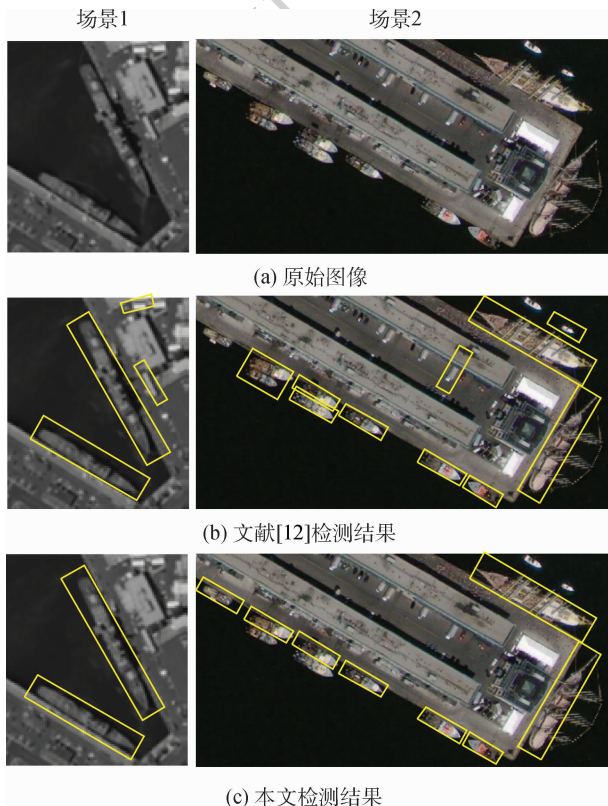


图 16 实验结果
Fig. 16 The experiment result ((a) original images; (b) the detection result of reference [12]; (c) the detection result of proposed method)

表 2 文献[12] 和本文方法检测结果对比
Table 2 Comparison of reference[12] and proposed method

	场景 1	场景 2
实际舷靠舰船数量	2	8
文献[12]方法检测数量	2	6
本文方法检测数量	2	8
文献[12]方法检测率/%	100	75
本文方法检测率/%	100	100

3 结 论

针对目前关注较少的舷靠舰船目标检测问题进行了深入研究。首先使用直线段检测子在海陆边界上提取直线段特征,建立舰船检测模型,再对不同类

型的舷靠舰船舰首进行分析,通过本文方法进行检测,最终确认舷靠舰船目标。实验结果表明,本文方法对复杂背景环境下的舷靠舰船目标检测效果较好;其次,本文方法不受舰船停泊位置及阴影的干扰,目标识别率较高,鲁棒性较强。

然而,实验结果同时表明利用 LSD 算子检测出的直线段会部分地被判定为虚警成分而排除,所以在未来的研究中,将改进直线段检测算子的性能作为研究的重点。同时,还可充分利用舰船和港口的其他特征以及标志性物体等作为舰船检测的辅助特征因子,提高检测准确率。对于舰船检测模型而言,也可很容易地将其他方法,如 HOG^[13] 和 SVM 与 LSD 算子相结合以降低算法虚警率。

参考文献 (References)

- [1] Wang Y Q, Ma L, Tian Y. State-of-the-art of ship detection and recognition in optical remotely sensed imagery[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(9): 1029-1039. [王彦情, 马雷, 田原. 光学遥感图像舰船目标检测与识别综述[J]. *自动化学报*, 2011, 37(9): 1029-1039.] [DOI: 10.3724/SP.J.1004.2011.01029]
- [2] Zhu C R, Zhou H, Wang R S, et al. A novel hierarchical method of ship detection from spaceborne optical image based on shape and texture features[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(9): 3446-3456. [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2046330]
- [3] Proia N, Page V. Characterization of a Bayesian ship detection method in optical satellite images[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(2): 226-230. [DOI: 10.1109/LGRS.2009.2031826]
- [4] Ai J Q, Qi X Y, Yu W D, et al. A new CFAR ship detection algorithm based on 2-D joint log-normal distribution in SAR images[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(4): 806-810. [DOI: 10.1109/LGRS.2010.2048697]
- [5] Xiao L P, Cao J, Gao X Y. Detection for ship targets in complicated background of sea and land[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(6): 6-10. [肖利平, 曹炬, 高晓颖. 复杂海地背景下的舰船目标检测[J]. *光电工程*, 2007, 34(6): 6-10.] [DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2007.06.002]
- [6] Long G. A method for automatic detection of ships in harbor area in high-resolution remote sensing image[J]. *Computer Simulation*, 2007, 24(5): 198-201. [隆刚, 陈学俭. 高分辨率遥感图像港内舰船的自动检测方法[J]. *计算机仿真*, 2007, 24(5): 198-201.] [DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2007.05.054]
- [7] Hu J H, Xu S S, Chen H L, et al. Detection of ships in harbor in remote sensing image based on local self-similarity[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(4): 591-597. [胡俊华, 徐守时, 陈海林, 等. 基于局部自相似性的遥感图像港口舰船检测[J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(4): 591-597.] [DOI: 10.11834/jig.20090405]
- [8] Kapur J N, Sahoo P K, Wong A K C. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram[J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1985, 29(3): 273-285. [DOI: 10.1016/0734-189X(85)90125-2]
- [9] Ballard D H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes[J]. *Pattern Recognition*, 1981, 13(2): 111-122. [DOI: 10.1016/0031-3203(81)90009-1]
- [10] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6): 679-698. [DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851]
- [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. [DOI: 10.1109/TPAMI.2008.300]
- [12] Lin J L, Yang X B, Xiao S J, et al. A line segment based in-shore ship detection method[C]//*Proceedings of the 2nd International Conference on Future Control and Automation*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 261-269. [DOI: 10.1007/978-3-642-31003-4_33]
- [13] Dalal N, Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection[C]//*Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Diego, CA, USA: IEEE, 2005, 1: 886-893. [DOI: 10.1109/CVPR.2005.177]