

光学遥感图像舰船目标检测与识别综述

王彦情¹ 马雷¹ 田原¹

摘要 遥感图像舰船目标自动检测与识别是遥感图像处理与分析领域备受关注的课题,其核心任务是判断遥感图像中是否存在舰船目标,并对其进行检测、分类与精确定位,它在海面交通监控、船只搜救、渔业管理和海域态势感知等领域具有广阔的应用前景.本文主要围绕光学卫星遥感图像中的舰船目标自动检测与识别,分析舰船目标检测与识别面临的难点问题,综述当前光学遥感图像舰船检测与识别的主要处理方法,在此基础上指出研究中尚存在的问题并展望未来的发展趋势.

关键词 光学遥感图像, 舰船目标检测, 自动目标识别, 图像理解

DOI 10.3724/SP.J.1004.2011.01029

State-of-the-art of Ship Detection and Recognition in Optical Remotely Sensed Imagery

WANG Yan-Qing¹ MA Lei¹ TIAN Yuan¹

Abstract Ship detection and recognition is one of the most active research topics in the field of remote sensing. This strong interest is driven by a wide spectrum of promising applications in many areas such as ocean traffic surveillance, ship rescuing, fisheries management, maritime situational awareness (MSA), etc. The aim of ship detection and recognition is to extract, identify and locate ship targets in remotely sensed images. This paper provides a comprehensive survey of recent developments on ship detection and recognition in optical remotely sensed imagery. The influencing factors are analyzed, and the state of the art methods are reviewed. Furthermore, the remaining problems and future development trends are provided for detecting and recognizing ship targets in optical remotely sensed images.

Key words Optical remotely sensed imagery, ship detection, automatic target recognition, image understanding

遥感图像目标检测与识别一直是遥感图像处理 and 模式识别领域研究的热点课题,而舰船作为海上运输载体和重要的军事目标,其自动检测与识别具有非常重要的现实意义,无论在民用还是军事领域都有着广阔的应用前景^[1].在民用方面,可以监控特定港口或海域的海运交通,辅助遇难船只救援,配合安全管理部门监测和打击非法捕鱼、非法倾倒油污、走私和海盗等违法行为;在军事领域,可以监视敌方重点港口和海域的舰船部署与动态,分析敌方的海上作战实力,评估战时海上打击效果,形成海上作战情报等^[2].

近年来,随着对地观测技术的飞速发展,卫星遥感进入了一个前所未有的新阶段,一批高空间分辨率、短重访周期的成像卫星涌现,为海域侦察和舰船目标监视提供了极为丰富的数据源.如,法国 SPOT-5 卫星全色图像星下点分辨率为 2.5 米,重访周期为 1~4 天,美国 IKONOS 卫星全色图

像星下点分辨率为 1 米,重访周期为 3 天,美国 Quickbird 卫星全色图像星下点分辨率为 0.6 米,重访周期为 1~3.5 天,美国 GeoEye-1 卫星全色影像星下点分辨率为 0.41 米,重访周期为 2~3 天,美国 WorldView-2 卫星全色影像星下点分辨率为 0.46 米,重访周期为 1.1~3.7 天,而美国最先进的军用间谍卫星已经可以获取 0.05 米分辨率的高清图像.而且,随着地球成像卫星系统、下一代光电系统等一系列天基侦察系统和项目的推进与实施,未来将不断出现性能更好、分辨率更高、重访周期更短的对地观测卫星,可利用的卫星遥感图像数据也将呈指数级爆炸式地增长.

面对如此海量的遥感图像数据,单纯依靠人工目视判读来获取舰船目标信息的传统方式,由于效率低、主观性强、成本高、信息获取周期长等缺陷,已远远不能满足现代社会对高效信息的需求.如何快速准确地从海量遥感数据中自动提取和识别出舰船目标已成为当前迫切需要解决的难题.

由于合成孔径雷达 (Synthetic aperture radar, SAR) 可全天时、全天候成像,目前基于遥感图像的舰船检测研究大多是围绕 SAR 图像开展的,算法已经比较成熟.相比而言,基于光学遥感图像的舰船目标检测与识别研究起步较晚,公开报道的技术文献也

收稿日期 2010-11-22 录用日期 2011-01-22
Manuscript received November 22, 2010; accepted January 22, 2011

国家自然科学基金 (61101222, 60873161, 61005067) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61101222, 60873161, 61005067)

1. 中国科学院自动化研究所综合信息系统研究中心 北京 100190
1. Integrated Information System Center, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

比较少. 虽然易受光照和云雾等因素影响, 但是光学图像直观易理解, 空间分辨率通常比较高, 在有光照和晴朗天气条件下, 图像内容丰富, 目标结构特征明显, 在海域舰船侦察尤其是舰船识别方面具有 SAR 图像不能比拟的优势, 是 SAR 图像进行海洋目标监视的重要补充.

当前关于光学遥感图像舰船目标检测与识别方面的研究工作, 主要是针对舰船检测与识别中的某个或某些特定问题开展的, 尚缺乏对整体研究现状的专门性综述. 虽然最近也有综述性文章涉及光学图像舰船目标检测技术^[3], 但其关注点主要在于天基海洋目标监视的系统分析及其相关研究的回顾, 对光学图像舰船目标检测介绍得比较简单, 也不够全面. 为了使广大科研人员对光学遥感图像舰船目标检测与识别技术现状有个全面清晰的了解, 本文将对光学遥感图像, 特别是基于光学卫星遥感图像的舰船检测与识别技术进行回顾与分析, 并指出未来发展方向, 以便为未来技术发展提供支撑.

1 研究现状

舰船目标作为海上监测和战时打击的重点目标, 是遥感图像自动目标检测与识别的重要内容. 科研人员在 SAR 图像舰船目标自动检测与识别方面已开展了大量的研究, 主要是利用舰船目标与水体之间不同的电磁散射特性在 SAR 图像上所表现出来的差异. 目前已完成或正在开发的 SAR 舰船目标监视系统主要有^[2, 4]: 加拿大的海洋监视工作站 (Ocean Monitoring Workstation, OMW) 系统、美国阿拉斯加 SAR 演示验证 (Alaska SAR demonstration system, AKDEMO) 系统、欧盟联合研究中心 (Joint Research Center, JRC) 的 VDS (Vessel detection system) 系统、英国 Qinetiq 的 MaST 系统、挪威 FFI 的 Eldhuset 和挪威 Kongsberg 的 MeosView、法国 Kerguelen 的 CLS 和 BOOST 舰船遥感探测系统、英国国防评估署 (Defence Evaluation and Research Agency, DERA) 的舰船探测系统、罗马大学安装在 ESA-ESRN (European Space Agency - European Space Research Institute) 上的舰船探测系统、意大利 Alenia Aerospazio 公司的舰船探测系统、澳大利亚的 ADSS (Analysts' detection support system)、中国科学院微波成像实验室的 Ship-SurveillanceUS 等.

而基于光学遥感图像的舰船目标检测与识别研究起步较晚, 技术相对滞后, 目前仍主要处于理论研究阶段. 然而, 随着光学卫星图像分辨率的不断提高, 光学图像在舰船侦察尤其是舰船目标分类与识别方面的突出优势引起了海洋监测部门和国内外学者的高度关注, 近年来关于光学遥感图像舰船目

标检测与识别的研究呈现不断增多的趋势. 欧盟第五框架 DECLIMS (Detection and classification of marine traffic form space) 项目中德国的 Definiens 和法国的 IRD (Institute for Research and Development) 利用光学图像进行舰船目标检测^[4], 近年来基于光学卫星图像的舰船目标检测和分类应用系统开始出现^[5], 这方面的技术文献也在逐渐增多^[1-2, 6-47].

基于光学卫星遥感图像的舰船目标检测与识别主要有如下特点:

1) 图像数据量大: 随着卫星数量的增多、重访周期的缩短、图像分辨率的提高, 遥感图像数据量越来越大, 数据量每天以 TB 级的速度增长, 且随着新卫星的升空, 数据量还将会不断增加;

2) 图像受天气、光照、海况、成像传感器参数等多种因素影响: 图像获取时间、天气状况 (晴天、多云等)、光照、海浪大小、成像视角、图像空间分辨率, 以及船舶行驶速度、船舶颜色、船舶材料、尾迹等不同, 舰船目标在光学图像中表现出来的特征也有所变化;

3) 舰船目标为人造刚体目标, 或行驶在海面上, 或停靠在港口码头, 且靠岸舰船通常与码头岸线平行;

4) 除航母外, 为了适航, 舰船多呈轴对称结构, 且一般为舰首较尖的狭长形状; 不同的舰船由于其用途不同, 外形结构也相应地有所差异.

为了快速准确地提取舰船目标, 目前的舰船检测方法通常采取由粗到精的策略, 首先从大幅图像中快速提取出候选区域, 利用反映舰船目标的最为明显且计算量小的一些特征, 确定出舰船目标可能存在的区域; 然后再利用精细特征对候选区域进一步确认分析, 去除虚警, 找出真实的舰船目标.

当前的舰船检测识别研究多采用面向对象的思想^[43], 针对舰船检测方法受图像所覆盖场景影响较大的特点, 将光学遥感图像舰船目标检测识别分为纯海洋背景和海陆背景中的舰船目标检测识别, 如图 1 所示.

除预处理模块外, 纯海洋背景中的舰船目标检测识别主要包括离岸舰船目标检测和舰船目标分类识别两大模块, 其中离岸舰船目标检测模块由离岸舰船目标候选区域提取和舰船目标确认两个子模块组成, 而海陆背景下的舰船目标检测识别则主要包括海陆分离、舰船目标检测、舰船目标分类识别三大模块, 其中舰船目标检测模块由离岸舰船目标候选区域提取、靠岸舰船目标候选区域提取和舰船目标确认三个子模块组成. 离岸舰船目标候选区域提取, 是指从海洋背景中确定行驶中的舰船目标可能存在的区域; 海陆分离, 即把海陆背景图像中的海洋

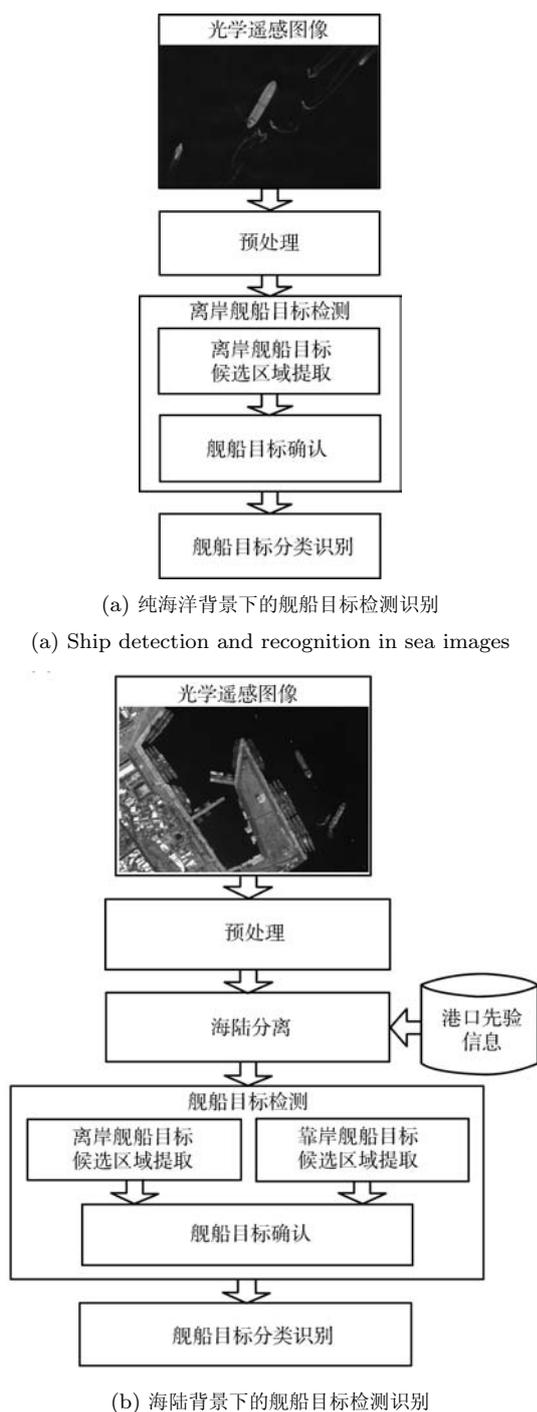


图 1 光学遥感图像舰船目标检测识别的一般处理框架
 Fig. 1 General framework for ship detection and recognition in optical remotely sensed images

区域和陆地区域分离开来; 靠岸舰船目标候选区域提取, 即确定靠岸停放的舰船目标可能存在的区域; 舰船目标确认, 主要任务是对提取出的舰船目标候选区域进行确认, 去除虚假目标, 找出真正的舰船目标; 舰船目标分类识别, 指依据尺寸、几何外形、纹

理结构等特征对不同类型的舰船目标进行分类。

下面将重点从处理方法入手, 对海陆分离、靠岸舰船目标候选区域提取、离岸舰船目标候选区域提取、舰船目标确认和舰船目标分类识别这几个方面分别回顾并分析技术发展现状。

1.1 海陆分离

1.1.1 基于港口先验信息的方法

港口建成后, 整个港口的结构及码头的分布情况相对会比较稳定, 在较长一段时间内其布局一般不会发生变化。根据港口这一特点, 当有港口的地理信息、海岸线或港口背景图像等先验信息时, 可通过匹配实现海陆分离^[1, 4, 25]。

德国的 Definiens 利用 eCognition 软件和 GIS 数据进行海陆分离^[4]; 文献 [25] 利用港口几何布局相对稳定这一假设, 采用基于地理信息的模板技术, 将港口轮廓以模板的形式预先存储起来, 通过匹配实现海陆分离; 而文献 [1] 以特定港口的先验图像为参照, 采用 SIFT 特征匹配方法, 判断待处理图像中是否存在该特定港口, 再根据先验图像的覆盖范围和港口先验结构分布信息, 在待处理图像中定位港口覆盖区域, 实现港口的定位识别。

对于基于港口先验信息的海陆分离方法而言, 地理信息、海岸线和背景图像等港口先验信息的获取是实现海陆分离的前提, 待处理图像与港口先验信息的配准是实现海陆分离的基础。受先验信息的影响, 基于港口先验信息的海陆分离方法存在如下问题:

- 1) 港口布局的调整易引起匹配模板的失准;
- 2) 当待处理图像中停靠舰船遍布码头沿线时, 待处理图像与海岸线、港口背景图像之间很难找到稳定的对应特征点, 易导致配准结果不稳定;
- 3) 对于海陆分界不明显的场合, 如海岸区域受到云层遮挡或水深较浅时, 实现待处理图像与港口先验信息的精确配准比较困难;
- 4) 成像季节、卫星距地高度、拍摄角度、舰船阴影遮挡等因素, 常导致待处理图像与港口先验信息之间存在畸变, 影响待处理图像与港口先验信息的精确配准。

1.1.2 基于图像分析的方法

当港口先验信息不易获得或由于年代久远、港口变化较大等原因导致先验信息已不再适用时, 通常采用图像分析方法实现海陆分离。

对于中低分辨率光学遥感图像而言, 海面区域相对于陆地地面来说通常灰度较低, 灰度分布较均匀, 变化缓慢, 一般采用灰度阈值分割的方法就可以较好地提取出水域。然而对于分辨率较高的图像, 由于海浪、天气、光照、薄云、卫星拍摄角度、尾迹等

多种因素的影响, 水域的灰度分布往往比较复杂, 有些区域水域像素灰度较低, 而另一些区域水域像素灰度反而比较高, 而舰船目标也存在黑白极性, 而且舰船的不同部位, 其灰度和纹理结构等也可能有很大差异. 如果仍采用传统的水域分割方法, 往往会导致误分割. 下面归纳出目前常用的几种方法.

1) 阈值分割法

基于阈值分割的方法主要是利用海面与舰船、陆地等不同区域的灰度或纹理统计特征的差异来提取海面区域的一种技术^[6-14], 常用的方法主要有灰度阈值法和区域纹理分析法.

a) 灰度阈值法

基于灰度阈值的海面区域提取方法主要利用海面与舰船、陆地的灰度差异进行分割, 它根据某种测度准则确定分割阈值, 将图像中每个像素的灰度值和阈值比较, 从而将目标和背景分开. 阈值的选取方法有很多, 如直方图谷底法^[7]、最大类间方差法 (OTSU 法)^[8]、最大熵法^[9]、最小误差法^[10]、迭代最优阈值法^[11]、局部阈值法^[12]、多阈值分割法^[13]、自适应阈值法^[14], 其中常用的有直方图谷底法和自适应阈值法等. 受传感器噪声、云块或陆地中小块水域或灰度较暗区域的影响, 灰度阈值分割的结果往往存在孤立点或孤立小区域, 所以阈值法通常和其他方法 (如形态学滤波) 结合使用.

灰度阈值分割的优点是计算简单, 运算效率高, 速度快. 但是, 在实际应用中, 海况复杂, 加上云雾、强光反射、舰船阴影等噪声的影响, 使得海面区域的灰度分布并不均匀, 基于灰度阈值的分割方法效果并不稳定. 可考虑对纹理等更为复杂的特征进行分析, 结合特征分析的方法来实现海陆分离.

b) 区域纹理分析法

区域纹理分析法主要是根据海域与舰船、陆地区域的纹理差异进行分析. 常用的纹理分析方法有区域方差^[6]、区域直方图^[13]、统计分类阈值法^[2]. 文献 [6] 采用十字型模板, 以区域方差作为区域纹理特性进行方差直方图统计, 计算分割的门限实现海域和复杂背景的分隔; 文献 [13] 构造灰度-邻域灰度均值二维直方图并对其进行量化, 借助快速分水岭算法从新直方图获取分割阈值来提取海域; 而文献 [2] 对光学图像中海域灰度进行统计特性分析, 从统计学角度获取分割阈值实现海陆分离.

2) 区域生长法

基于区域生长法的海陆分离通常是对种子点进行区域生长提取海面区域^[15-18].

文献 [15] 基于纹理特征相似度完成图像的初始分割, 获得种子点; 文献 [16] 利用基于先验地理信息的区域生长方法在多谱图像中实现海域和陆地的分离; 而文献 [18] 利用梯度直方图曲线拟合方法获得

水域种子点.

基于区域生长法的优点是计算简单. 不足之处在于: a) 每个待抽取的区域需要种子点, 种子点的选取通常需要人工交互获得; b) 对噪声敏感, 导致抽取出的区域有空洞或者在局部体效应的情况下将原本分开的区域连接起来. 与阈值分割类似, 也很少单独使用.

3) 港口轮廓提取法

为了方便舰船停靠, 港口码头毗邻海面的部分通常是比较平直的, 可利用码头的长直线特性将码头与靠岸舰船分开. 文献 [8] 基于港口岸线平直这一特性, 利用港口轮廓几何特征进行海陆分离, 通过 Hough 变换提取码头的长直线边缘并将其首尾相连, 实现码头区域和海面区域的分离, 之后将码头区域屏蔽从而将码头停靠的舰船置于海洋背景中, 最后在海域背景中检测舰船. 该类方法在码头停靠舰船较少时可取得比较好的结果, 但不适用于沿码头岸线舰船密集停靠的场合.

以上三类方法主要是基于图像的二维分析实现的, 近年来也出现了基于图像三维重建信息实现海陆分离的方法^[35], 利用明暗变化信息来重建图像海拔信息, 再结合形态学滤波和动态阈值分割算法划分陆地和海洋区域.

1.2 靠岸舰船目标候选区域提取

对于靠岸停放的舰船而言, 其所处的背景区域复杂多样, 不仅包含海面自然背景, 还有港口码头等大量人工目标. 虽然在光学遥感图像中海面与舰船有较大的差异, 但是靠岸舰船与码头往往通过缆绳等附属设施相连, 且舰船与陆地目标在灰度、纹理等方面存在较大的相似性, 从图像中直接提取靠岸舰船目标比较困难. 因此, 靠岸舰船目标的检测工作通常在海陆分离的基础上进行, 舰船检测算法与海陆分离方法紧密相关, 主要也分为两大类: 基于港口先验信息的方法和基于图像分析的方法.

1) 港口先验信息法

若依据港口先验信息将陆地 (码头与内陆区域) 与海域 (海面和舰船区域) 分离开来, 则靠岸舰船的检测问题转化为从海面提取舰船的问题, 检测方法 with 离港舰船的检测方法类似, 不同之处主要在于靠岸舰船之间可能并排停放. 并排停放舰船的分割, 以及舰船间阴影遮挡和自遮挡问题是靠岸舰船检测的难点问题^[1, 25].

文献 [1] 针对港内并排停靠的舰船, 采用基于轮廓区域统计属性的目标切分方法来提取舰船. 文献 [25] 针对舰船并排和阴影遮挡问题, 利用舰船形状规则且有明显轴向、停靠舰船的主轴与码头方向基本一致、并联舰船在图像中反映为轴向垂直方向细

小粘连的假设, 通过投影搜索相邻目标区域间的连通点, 实现并舰船目标的切分; 并基于“被阴影割断的部分一般都是船头”以及“同一舰船被阴影割断的不同候选区域的重心连线与主轴方向一致”的假设, 完成断裂舰船的连接。然而, 由于实际成像时光照方向、舰船停放方位等因素的影响, 被阴影割断的舰船部分不一定是船头, 而且同一舰船被阴影割断的不同候选区域的重心连线与主轴方向并没有直接关系, 不一定具有相同的方位, 因此, 文献 [25] 的假设具有较强的局限性。

2) 图像分析法

基于图像分析的靠岸舰船目标检测方法, 其主要思路是对图像进行两次分割: 首先根据海域与舰船、陆地(码头等)的明显差异性, 实现海陆分离, 将图像分割海面区域、陆地区域(主要包括舰船和码头等); 然后对陆地区域进行分析, 根据舰船和港口码头的特征差别, 在图像中实现停靠舰船与港口码头的分离。由于靠岸舰船目标和码头区域相连, 且在灰度和纹理结构特征方面不存在明显的差异性, 如何选择合适的特征来区分舰船目标和码头区域, 是该类方法面临的难点问题。

从目前的研究来看, 所采用的舰船特征主要有两大类: 一类是基于全局几何形状的特征^[7, 24], 另一类是基于局部结构显著性的特征^[32]。

在舰船目标全局几何形状特征方面, 文献 [7] 通过搜索向水体多边形凸出的部位来大致确定疑似靠岸舰船区域, 再利用船只宽度范围、长宽比范围、形状参数、对称规整度等一系列尺寸和外形指标, 进一步判定疑似区域是否含有靠岸舰船; 文献 [24] 提出基于可变夹角链码的靠岸舰船目标检测方法, 采用可变夹角链码来描述舰船的轮廓特征, 通过对可变夹角链码进行特征匹配实现停靠码头舰船的检测。

在舰船目标局部显著性特征方面, 文献 [32] 利用邻域自相似提取算子提取港口舰船的局部显著性特征点, 形成显著性区域, 分析区域特征(区域面积、质心位置、方向、尺寸特征、占空比、平均亮度), 并利用舰船停靠位置的先验知识, 自动检测靠岸舰船。

1.3 离岸舰船目标候选区域提取

对于纯海洋背景中的离岸舰船目标, 其检测任务的关键主要在于, 如何利用舰船目标与海洋背景的差异, 从海域中获取舰船目标的候选区域, 然后再根据舰船与其它干扰因素(如垃圾漂浮物、小型海岛等)的区别, 去除虚警, 提取出真正的舰船目标。

当海面平静且无云雾干扰时, 光学卫星遥感图像中水体的灰度值一般比较低, 而舰船目标通常比较亮, 利用基于灰度阈值分割的方法提取离岸舰船, 往往就能取得比较好的结果。然而, 受光照、云雾、

海况、成像视角、舰船类型和舰船材料等多种因素的影响, 图像中海面区域和舰船目标复杂多样, 如何稳定有效地从海洋背景中提取舰船候选区域, 仍是一项很有挑战性的工作。

目前, 用于离岸舰船目标候选区域的提取方法主要可分为四大类:

1) 基于灰度统计特征的方法

基于灰度统计特征的方法^[7, 10, 15, 19, 33-34]主要是利用水体与舰船目标的灰度统计差异性特征进行图像分割, 从而获取舰船目标候选区域。这些灰度差异性特征包括: 灰度^[7]、图像信息熵^[10, 19]、形态学对比度^[15]、局部统计方差^[33]、类高阶梯度^[34]等。

这类方法一般适用于海面较为平静、纹理均匀且水体灰度较低的情况。然而, 对于海面复杂的情况, 图像中难免出现大海浪、云层遮挡或水体灰度较亮, 以及噪声、阴影等干扰因素, 加上舰船目标的黑白极性, 同一舰船目标不同部位的灰度特征也不一致, 在这类图像中采用基于灰度统计特征阈值分割的方法, 则易产生较多的漏警和虚警。

2) 基于边缘信息的方法

基于边缘信息的方法^[45]主要利用舰船船缘在高分辨率光学卫星遥感图像中边缘特征较为明显的特点, 依据目标边缘信息, 并结合形状分析, 获取舰船目标候选区域或舰船疑似目标。

典型的方法有, 文献 [45] 通过对由原始灰度和边缘强度图像线性组合而成的图像, 进行 OTSU 自适应阈值分割, 并结合简单的形状特征(包括面积、长、宽、区域外接矩形的长宽比), 获得舰船目标候选区域。

这类方法利用了人造舰船目标边缘特征显著特性, 在海面平静且舰船与海面对比度明显时, 效果较好。当海况复杂, 大海浪及海浪亮块产生的边缘会带来很多干扰, 严重时甚至会将舰船目标淹没。

3) 基于分形模型和模糊理论的方法

对于舰载光电传感器获取的海空背景图像, 由于受到海浪、云层的影响, 其灰度变化非常大, 尤其是在恶劣气象条件下, 目标与背景的灰度对比度低, 阈值分割法和边缘检测法都难以得到满意的检测结果。有关研究表明^[22-23], 海浪、云层等自然背景具有分形特征, 而舰船等人造目标不具有分形特征, 利用目标与背景之间分形特征的差异成为有效解决海空背景图像中舰船目标自动检测的可能途径之一。典型的研究工作有: 文献 [22] 针对复杂海面环境下的舰船目标检测, 利用纹理分形维和缝隙特征进行海面舰船目标检测; 文献 [23] 采用多尺度分形方法检测舰船目标。

当背景比较复杂, 如可见光图像受到云雾等干扰时, 背景自相似性降低, 用分形模型拟合误差较

大, 分割时易出现误分割, 此时, 算法检测效率比较低.

4) 基于视觉感知机理的方法

基于视觉感知机理的方法主要是将人类视觉系统可快速聚焦于感兴趣区域的特性引入到舰船目标候选区域的提取中. 文献 [24] 基于选择性注意机制, 依据灰度及面积显著特征的引导, 快速圈定可能存在舰船的疑似区域, 形成可疑目标 ROI 切片. 文献 [21] 采用视觉显著度模型, 通过纹理、亮度和方向等多特征视差计算来对疑似的目标进行筛选. 而文献 [35] 基于人眼多级视觉感知和视觉非对称机制, 首先利用一种改进的计算频谱残差的方法得到视觉显著图; 其次利用 Tophat 形态学滤波去除视觉上不属于舰船目标的区域, 并计算兴趣关注点; 最后利用一种方向自适应的 Gabor 滤波算法对兴趣关注点周围进行聚焦、联想分析, 从复杂海况背景下检测舰船目标.

这类方法是近些年来舰船目标检测研究的一个热点, 旨在借鉴人类视觉系统感知周围事物的强大能力, 但是受光照、天气、海况、舰船目标自身特性、成像传感器参数、舰船运动参数等多种因素的影响, 不同成像条件下图像复杂多变, 显著特征的自适应分析与提取以及显著图的有效获取是该类方法需要解决的难点问题.

当受云干扰时, 光学遥感图像中的舰船检测将变得非常困难, 关于有云图像的海洋舰船目标检测问题, 近年来也取得了一些研究进展. 文献 [20] 研究了带云层的图像舰船检测问题, 对图像进行小波分解, 在人造目标边缘方向进行 Frost 滤波, 然后通过阈值分割方法剔除大块云层, 并根据区域的平均边缘梯度剔除小块云层从而实现舰船检测; 文献 [2] 针对有云和阴影的复杂海洋背景图像, 提出基于视觉注意机制的舰船目标检测算法, 在分析舰船尾迹模式后, 利用区域纹理检测舰船尾迹, 并联合多个特征对舰船目标进行序贯鉴别; 而文献 [35] 针对大块且成像复杂云层的检测问题, 利用基于图像内容特征学习的方法, 从灰度、纹理、边缘等角度提取描述云层的特征向量, 再利用机器学习的思想加以学习建模, 进行云层分类.

1.4 舰船目标确认

舰船目标确认主要是在舰船目标候选区域或舰船疑似目标提取的基础上, 结合舰船目标自身特征, 进一步分析确认, 去除虚警, 提取出真正的舰船目标 [2, 7, 10, 21, 24, 33, 45-46]. 常用的舰船目标特征有: 灰度、尺寸、形状、纹理特征, 具体包括灰度、面积、长、宽、长宽比、偏心率、轮廓、不变矩、统计特征等.

在对舰船目标进行确认过程中, 通常采用联合多个特征的方式去除虚警, 得到舰船目标. 如, 形态学滤波和形状约束相结合 [7]; 灰度和纹理特征相结合 [2]; 轮廓、长宽比和平行线特征相结合 [24]; 尺寸、灰度、形状特征相结合 [10], 具体采用面积、长度、长宽比、灰度均值和 Zernike 不变矩等特征; 形状和纹理特征相结合 [46]. 或者采用一些其他的特征描述子, 如文献 [45] 针对舰船疑似目标, 基于小波特征、局部多值模式 (Local multiple patterns, LMP)、形状特征 (紧致度、凸度、矩形度、偏心率、矩不变量) 和简单纹理特征 (均值、方差、矩、熵) 等多个特征, 采用 SVM 分类器对疑似舰船目标进行确认识别. 法国的 IRD 系统 [4] 对检测到的每个对象提取 28 维特征, 包括灰度统计特征 (如均值、标准差、方差、最小值、最大值、偏斜度)、形状特征 (周长、面积、紧凑度、对称性、长宽比)、纹理特征 (灰度共生矩阵) 等, 并利用遗传算法 (Genetic algorithm, GA) 进行特征选择, 从所提取的 28 维特征中选出 8 个特征 (像素数目、均值、标准差、最小值、最大值、方差、长宽比、纹理均匀性), 以降低计算复杂度, 简化分类模型.

考虑到舰船目标在不同分辨率图像中呈现的特征有一定差异, 文献 [21] 对于分辨率小于 3 米的低分辨遥感图像, 提取候选目标的一阶灰度特征 (包括平均灰度、方差、一阶能量、一阶熵等) 来构建目标向量; 而对于高于 3 米的高分辨遥感图像, 在构建目标向量过程中, 增加灰度共生矩阵的二阶纹理特征 (包括相关性、局部平稳、惯性矩、二阶熵等) 和形状不变矩等特征.

1.5 舰船目标分类识别

随着光学卫星遥感图像的分辨率日益提高, 图像中的舰船目标结构和细节信息不断丰富, 在目标识别方面相对于 SAR 图像有很大的优势. 由于起步较晚, 目前关于光学卫星遥感图像舰船目标分类识别的文献还比较少. 光学卫星遥感图像舰船目标分类识别, 作为模式识别和人工智能的一个重要研究领域, 和其他目标的分类识别任务类似, 也主要包括特征提取与选择、分类两个模块.

1) 特征提取

特征提取是舰船目标分类识别任务中非常关键的步骤, 对后续的分类识别性能起着决定性的作用. 然而, 舰船特征受图像分辨率、成像参数、光照等多种因素的影响.

光学遥感图像舰船目标识别中常用的特征主要包括: 大小、灰度统计特征、形状特征、纹理特征等. 文献 [27] 在 QuickBird 0.6 m 分辨率遥感图像上, 选取不变矩特征、纹理特征构造舰船目标特征矢量;

Vyamsat 系统^[28] 在多光谱三个波段上分别提取 7 个不变矩组成 7×3 的特征向量, 然后通过 LDA 进行降维, 利用降维后的特征进行舰船分类; 文献 [43] 根据长度特征将舰船目标分为大、中、小几类。

由于不同分辨率图像中舰船目标在灰度分布、尺寸、形状、纹理结构等方面表现出来的特征差别较大, 加上阴影与遮挡等干扰的存在, 如何自适应地提取稳定有效的特征, 是舰船目标分类的一大难点问题。

2) 分类

在舰船分类识别方面, 科研人员尝试了很多分类方法, 包括神经网络分类器^[4, 31]、动态贝叶斯网络^[29-30] 等, 并取得了不错的效果。如, 法国的 IRD 系统利用误差后向传递多层感知器神经网络方法, 对舰船目标进行分类, 并且用 GA 算法代替 BP 算法来选择神经网络的最优权重^[4]; 文献 [29-30] 中利用动态贝叶斯网络来区分航母、驱逐舰、巡洋舰和护卫舰。这些方法在应用中需要事先大量收集不同类舰船的训练样本, 在小样本情况下分类效果难以保证, 而且在基于经验风险最小化原则时, 对大

量样本进行训练往往会导致过学习现象。然而, 收集大量不同种类的光学遥感图像舰船样本往往是有困难的, 因此, 针对上述分类方法的这些缺点, 有些科研人员将支持向量机 (Support vector machine, SVM) 引入到舰船目标的分类问题中。如, 文献 [27] 在 QuickBird 卫星图像中, 利用 SVM 对驱逐舰、护卫舰、油轮、集装箱船和散装货船进行分类识别。SVM 核函数的选择和相关参数的确定, 对分类结果影响很大, 如何自适应地确定分类器所需的参数, 仍是需要深入研究的问题。

光学遥感图像舰船目标检测与识别典型方法的比较与分析, 可详见表 1 所示。

2 尚存问题与发展趋势

尽管科研人员对光学遥感图像舰船目标检测与识别进行了一些探索, 并取得了一定的成果, 但在以下几个方面还存在很多难点问题尚未解决, 目前的舰船检测识别技术离真正成熟的应用还有较大的差距。

表 1 光学遥感图像舰船目标检测与识别方法比较与分析

Table 1 Method comparison and analysis for ship detection and recognition in optical remotely sensed images

模块	方法	优点	缺点/难点
离岸舰船目标 候选区域提取	基于灰度统计的方法	计算简单, 适用于海面较为平静、纹理均匀且水体较暗的图像	海面复杂时效果较差
	基于边缘信息的方法	海面平静且舰船与海面对比度明显时, 效果较好	海面复杂时效果较差
	基于分形模型和模糊理论的方法	利用舰船目标与背景之间分形特征的差异	背景复杂时效果较差
	基于视觉感知机理的方法	模拟人的视觉感知	显著特征与显著图的自适应分析与提取较难
海陆分离	基于港口先验信息的方法	利用港口的地理信息、海岸线或港口背景图像等先验信息	不适用于港口先验信息缺失或发生变化的场合
	阈值分割法	计算简单, 运算效率高	海况复杂时易失败
	基于图像分析的 区域生长法	计算简单	对噪声敏感; 种子点的稳定 自动提取比较困难
	港口轮廓提取法	利用码头的长直线特性	不适用于沿码头岸线舰船 密集停靠的场合
靠岸舰船目标 候选区域提取	港口先验信息法	依据港口先验信息将靠岸舰船检测	难点: 先验信息与待处理图像的精确配准; 并排停放舰船的分割与断裂舰船的连接
	图像分析法	对图像两次分割: 海陆分离, 舰船与码头的分离	难点: 舰船目标显著特征的有效提取; 并排停放舰船的分割与断裂舰船的连接
舰船目标确认	灰度、尺寸、形状、纹理特征, 具体包括: 面积、长、宽、长宽比、偏心率、轮廓、不变距、统计特征等		
舰船目标分类	特征提取 分类	大小、灰度统计特征、形状特征、纹理特征等 神经网络分类器、动态贝叶斯网络、支持向量机等	

1) 舰船目标特征提取与表示

图像分辨率不同, 舰船表现出来的特征也有较大差异. 在中低分辨率光学图像中, 舰船的整体形状特征较为明显, 但不同的舰船其形状特征差异可能很大. 在高分辨率图像中, 舰船的结构细节清晰可见, 然而不同种类和型号的舰船, 其结构特征也是复杂多变^[2].

舰船检测和识别的任务不同, 需要提取的舰船特征有所不同. 对于舰船检测而言, 主要是提取可明显区别于其他类型目标的、舰船所共有的特征, 然而由于舰船类型多样, 其类内特征各异, 再加上阴影、并排停放、码头毗连、周围背景复杂等多种因素, 使得舰船特征的选取成为非常困难的工作; 对于舰船识别而言, 则需要提取适于区分不同类型或型号的舰船特征.

舰船的灰度特征在光学遥感图像中表现出不均匀的特性, 不仅不同舰船目标可能呈现黑、白截然不同的极性, 即使在同一舰船目标上, 舰船的不同部位由于材料、结构等的不同, 其灰度也可能有很大的差异. 此外, 不同传感器、成像时间、成像视角、光照变化、气象、海况、舰船运动特性以及舰船并排停靠等对舰船目标在光学遥感图像中表现出来的特性也有影响. 因此, 舰船目标特征的选择与稳定提取仍是舰船目标检测与识别中的难点问题.

2) 港口内靠岸舰船检测

对于靠岸舰船而言, 一是舰船与港口区域的灰度、纹理特征没有明显差异, 区分性不好, 且舰船与码头相连, 加上舰船并排停放、阴影与遮挡的干扰, 难以提取到完整的舰船轮廓, 单纯依靠图像分析的方法检测舰船难度很大; 二是靠岸舰船的并排停放、阴影造成的舰船自遮挡、互遮挡、阴影与舰船毗连, 舰船密集排列于码头周围时, 依靠码头先验地理信息的方法也很难奏效.

3) 具有高度适应性的舰船检测方法

目前的舰船检测算法往往对于特定图像或特定环境条件可以取得较好的结果. 然而, 实际成像情况复杂多样, 天气状况、气候条件、太阳角度、成像视角、海面状况、高光反射、舰船运动特性等多种因素的影响, 使得光学遥感图像难免存在海浪、舰船尾迹、云雾、阴影等干扰. 研究具有高度适应能力、实用化的舰船提取方法, 是光学遥感图像舰船提取尚需解决的难点问题.

4) 海量遥感图像的舰船目标快速、准确提取

随着卫星的不断升空、图像分辨率的不断提高和卫星重访周期的不断缩短, 光学卫星遥感图像数据量越来越庞大, 且相对于幅员辽阔的海域而言, 舰船目标稀疏, 如何从海量的光学遥感图像中快速、准确地检测到舰船目标仍是一项具有挑战性的任务,

亟待解决.

5) 舰船目标分类识别

自然环境(天气、气象、海况等)、成像参数(传感器参数、成像视角)、舰船目标(运动特性、靠岸、舰船紧邻)等多种因素的影响, 往往会导致光学遥感图像中舰船目标存在阴影、遮挡、轮廓不完整、畸变、尾迹等, 而且不同分辨率图像中舰船目标反映出的特征也有差异, 为舰船的分类识别带来很多困难.

随着遥感图像处理、模式识别和人工智能技术的发展, 光学遥感图像舰船目标检测与识别正逐渐呈现如下的发展趋势:

1) 基于不同源图像融合的舰船检测识别

利用单一传感器获取目标图像, 在某些方面优势突出, 但在另一些方面存在劣势, 如, SAR 图像中运动舰船形成的尾迹明显且不受天气影响, 但分辨率较低; 红外图像中运动舰船呈现较亮的灰度且对云层也有一定的穿透作用, 与 SAR 图像类似, 其图像分辨率也不高; 光学图像易受天气影响但分辨率高, 在天气晴朗无云时舰船目标的细节特征丰富.

通过融合不同图像源来检测和识别舰船目标, 充分利用不同数据间的优势互补信息, 并通过多源数据间的冗余信息增强目标检测的可靠性, 不失为一种有效的途径. 在多种图像源融合利用过程中, 可考虑利用 SAR 图像全天候、红外图像对运动目标敏感的特性检测舰船, 而利用光学图像分辨率高、目标结构清晰、细节丰富等优点, 对 SAR 图像和红外图像检测出的舰船目标候选区域进一步确认和鉴别.

2) 多分辨率分析——中低分辨率图像的舰船检测引导高分辨率图像的舰船识别

中低分辨率卫星图像具有覆盖范围广、观测周期短等优点, 数据量相对较小, 而高分辨率图像中目标清晰细节丰富, 但数据量庞大, 直接从高分辨率图像中检测目标耗时相当多, 且易受其他目标和复杂背景的干扰, 因此从中低分辨率遥感图像着手进行舰船检测, 进而引导高分辨率图像的舰船识别, 是实现大范围区域内舰船目标快速普查与舰船目标区域重点详查的有效途径.

3) 视觉注意机制的有效运用

用于表征舰船目标的特征很多, 但不同特征对于舰船目标的显著程度和用于检测识别时所需的运行时间是有差别的. 人类视觉系统在大幅海域背景光学卫星图像中检测识别舰船目标时, 可以将人的注意力快速聚焦于舰船疑似目标, 这一过程对舰船的多种特征进行了不同层次和优先级的利用和综合. 借鉴人类视觉系统检测识别目标的过程, 优先使用区分能力强且耗时短的特征进行粗筛选, 而区分能力相对较弱但耗时较长的特征用于后续的目标分析中, 实现不同特征的有效综合利用, 既保证舰船检测

识别的精度又兼顾到时间效率。

4) 单纯依赖图像处理向借助于多种知识支撑的综合分析转变

目前研究大多集中在仅仅依赖对遥感图像自身的处理来完成目标识别任务, 往往很难适应传感器、图像分辨率、成像视角、天气、气候、海况等多种因素的复杂变化, 遥感图像目标识别过程中对知识运用的匮乏与片面是影响当前遥感目标识别技术实用化的重要技术障碍。将目标、环境、数据、算法等多种相关知识有机融合来为目标识别服务, 是遥感图像目标识别技术实用化的有效途径, 也是遥感图像智能分析的发展趋势。

3 结束语

遥感图像目标检测识别, 尤其是光学遥感图像中的舰船检测识别, 一直以来都是遥感图像处理和领域备受关注的重点方向, 它对于海洋运输、港湾监测和军事作战等具有极为重要的作用。近年来科研人员在光学遥感图像舰船检测识别方面, 从多个角度出发对舰船目标检测与识别进行了技术探索。本文围绕光学遥感图像离岸和靠岸舰船检测识别任务, 分别从其一般处理过程出发, 回顾了各个主要处理阶段的发展现状和常用方法, 同时对研究难点和未来的发展趋势作了详细的分析, 希望能对相关领域的研发工作起到促进作用。

References

- Zhang Zhen. A Study on Harbor Target Recognition in High Resolution Optical Remote Sensing Image [Master dissertation], University of Science and Technology of China, China, 2005
(张振. 高分辨率可见光遥感图像港口及港内目标识别方法研究 [硕士学位论文], 中国科学技术大学, 中国, 2005)
- Li Wen-Wu. Detection of Ship in Optical Remote Sensing Image of Median-Low Resolution [Master dissertation], National University of Defense Technology, China, 2008
(李文武. 中低分辨率光学遥感图像舰船目标检测算法研究 [硕士学位论文]. 国防科学技术大学, 中国, 2008)
- Xu Yi-Fan, Tan Yue-Jin, He Ren-Jie, Li Ju-Fang. System analysis and research overview of space-based maritime surveillance. *Journal of Astronautics*, 2010, **31**(3): 628–640
(徐一帆, 谭跃进, 贺仁杰, 李菊芳. 天基海洋目标监视的系统分析及研究综述. 宇航学报, 2010, **31**(3): 628–640)
- Zhang Feng-Li, Zhang Lei, Wu Bing-Fang. Progress of ship detection technology and system based on remote sensing technology in European union. *Journal of Remote Sensing*, 2007, **11**(4): 552–562
(张凤丽, 张磊, 吴炳方. 欧盟船舶遥感探测技术与系统研究的进展. 遥感学报, 2007, **11**(4): 552–562)
- Greidanus H. Satellite imaging for maritime surveillance of the European seas. *Remote Sensing of the European Seas*. New York: Springer, 2008: 343–358
- Zhou Jing, Tian Jin-Wen. Method of detecting small target in port-sea background. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(4): 486–489
(周静, 田金文. 基于海岸线背景的海面小目标检测方法. 红外与激光工程, 2005, **34**(4): 486–489)
- Wang Min, Luo Jian-Cheng, Ming Dong-Ping. Extract ship targets from high spatial resolution remote sensed imagery with shape feature. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, **30**(8): 685–688
(汪闽, 骆剑承, 明冬萍. 高分辨率遥感影像上基于形状特征的船舶提取. 武汉大学学报 (信息科学版), 2005, **30**(8): 685–688)
- Chen Kun, Chen Xue-Quan. A new ship and dock target segmentation method based on geometry feature. *Computer Engineering and Applications*, 2004, **40**(31): 197–199
(陈琨, 陈学全. 一种基于几何特征的舰船与码头目标分割的新方法. 计算机工程与应用, 2004, **40**(31): 197–199)
- Sun Ji-Xiang. *Image Analysis*. Beijing: Science Press, 2005
(孙即祥. 图像分析. 北京: 科学出版社, 2005)
- Chu Zhao-Liang, Wang Qing-Hua, Chen Hai-Lin, Xu Shou-Shi. Ship auto detection method based on minimum error threshold segmentation. *Computer Engineering*, 2007, **33**(11): 239–241
(储昭亮, 王庆华, 陈海林, 徐守时. 基于极小误差阈值分割的舰船自动检测方法. 计算机工程, 2007, **33**(11): 239–241)
- Perez A, Gonzalez R C. An iterative thresholding algorithm for image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence*, 1987, **9**(6): 742–751
- Lie W N. Automatic target segmentation by locally adaptive image thresholding. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, **4**(7): 1036–1041
- Hong Zhi-Ling, Jiang Qing-Shan, Dong Huai-Lin, Wang Sheng-Rui. Fast ship detection based on multi-threshold image segmentation. *Computer Science*, 2006, **33**(S11): 273–275
(洪志令, 姜青山, 董槐林, 王声瑞. 基于多阈值分割的快速舰船目标检测方法. 计算机科学, 2006, **33**(S11): 273–275)
- Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, **9**(1): 62–66
- Xiao Li-Ping, Cao Ju, Gao Xiao-Ying. Detection for ship targets in complicated background of sea and land. *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. 光电工程, 2007, **34**(6): 6–10)
- You Xiao-Jian, Xu Shou-Shi, Hou Lei. A new method for ship detection based on feature fusion in optical image. *Computer Engineering and Applications*, 2005, **41**(19): 199–202
(尤晓建, 徐守时, 侯蕾. 基于特征融合的可见光图像舰船检测新方法. 计算机工程与应用, 2005, **41**(19): 199–202)
- Espindola G M, Camara G, Reis I A, Bins L S, Monteiro A M. Parameter selection for region-growing image segmentation algorithms using spatial autocorrelation. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(14): 3035–3040
- Shen Ye-Jian, Xu Shou-Shi. Effective method for dam recognition from visible images. *Journal of Computer Applications*, 2006, **26**(8): 1972–1974
(沈叶健, 徐守时. 一种有效的可见光图像中水坝目标的识别方法. 计算机应用, 2006, **26**(8): 1972–1974)

- 19 Tang Ya-Bo, Liu Xiao-Jun, Xu Shou-Shi. Multilevel adaptive cluttering segmentation method for marine ship in remote sensing image. *Journal of Computer Applications*, 2005, **25**(9): 2126–2127
(汤亚波, 刘晓军, 徐守时. 一种遥感图像海上船舶多级自适应聚类分割方法. 计算机应用, 2005, **25**(9): 2126–2127)
- 20 Jiang Yun-Hui, Chen Huai-Xin. Ship detection method based on wavelet directional filter in cloudy remote sensing images. *Telecommunication Engineering*, 2008, **48**(1): 90–93
(蒋运辉, 陈怀新. 基于小波方向滤波的有云层遥感图像舰船检测方法. 电讯技术, 2008, **48**(1): 90–93)
- 21 Tian Ming-Hui, Wan Shou-Hong, Yue Li-Hua. Ship detection in remote sensing images with complex sea surface background. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2008, **29**(11): 2163–2166
(田明辉, 万寿红, 岳丽华. 遥感图像中复杂海面背景下的海上舰船检测. 小型微型计算机系统, 2008, **29**(11): 2163–2166)
- 22 He Si-Hua, Yang Shao-Qing, Shi Ai-Guo, Li Tian-Wei. Detection of ship target under sea background based on texture high-order fractal feature. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2008, **6**(4): 79–82
(何四华, 杨绍清, 石爱国, 李天伟. 纹理高阶分形特征在海面舰船目标检测中的应用. 光学与光电技术, 2008, **6**(4): 79–82)
- 23 Zhang Dong-Xiao, He Si-Hua, Yang Shao-Qing. Ship targets detection method based on multi-scale fractal feature. *Laser and Infrared*, 2009, **39**(3): 315–318
(张东晓, 何四华, 杨绍清. 一种多尺度分形的舰船目标检测方法. 激光与红外, 2009, **39**(3): 315–318)
- 24 Jiang Li-Bing. Research on the Ship Target Detection in High Spatial Resolution Optical Remote Sensing Image [Master dissertation], National University of Defense Technology, China, 2006
(蒋李兵. 基于高分辨光学遥感图像的舰船目标检测方法研究 [硕士学位论文], 国防科学技术大学, 中国, 2006)
- 25 Long Gang, Chen Xue-Quan. A method for automatic detection of ships in harbor area in high-resolution remote sensing image. *Computer Simulation*, 2007, **24**(5): 198–201
(隆刚, 陈学俊. 高分辨率遥感图像港内舰船的自动检测方法. 计算机仿真, 2007, **24**(5): 198–201)
- 26 Qu Ji-Shuang, Wang Chao, Wang Zheng-Zhi. A multi-threshold based morphological approach for extracting coastal line feature from remote sensing images. *Journal of Image and Graphics*, 2003, **8**(7): 805–809
(瞿继双, 王超, 王正志. 一种基于多阈值的形态学提取遥感图像海岸线特征方法. 中国图象图形学报, 2003, **8**(7): 805–809)
- 27 Li Yi, Xu Shou-Shi. A new method for ship target recognition based on support vector machine. *Computer Simulation*, 2006, **23**(6): 180–183
(李毅, 徐守时. 基于支持向量机的遥感图像舰船目标识别方法. 计算机仿真, 2006, **23**(6): 180–183)
- 28 Antelo J, Ambrosio G, Gonzalez J, Galindo C. Ship detection and recognition in high-resolution satellite images. In: Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Cape Town, South Africa: IEEE, 2009. 514–517
- 29 Chen H Y, Gao X G. Ship recognition based on improved forwards-backwards algorithm. In: Proceedings of the 6th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Tianjin, China: IEEE, 2009. 509–513
- 30 Wang Q J, Gao X G, Chen D Q. Pattern recognition for ship based on Bayesian networks. In: Proceedings of the 4th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Haikou, China: IEEE, 2007. 684–688
- 31 Jiang Ding-Ding, Xu Zhao-Lin, Li Kai-Duan. Surface ship target recognition research based on SGA. *Engineering Science*, 2004, **6**(8): 79–81
(蒋定定, 许兆林, 李开端. 应用基本遗传算法进行水面舰船目标识别研究. 中国工程科学, 2004, **6**(8): 79–81)
- 32 Hu Jun-Hua, Xu Shou-Shi, Chen Hai-Lin, Zhang Zhen. Detection of ships in harbor in remote sensing image based on local self-similarity. *Journal of Image and Graphics*, 2009, **14**(4): 597–591
(胡俊华, 徐守时, 陈海林, 张振. 基于局部自相似性的遥感图像港口舰船检测. 中国图象图形学报, 2009, **14**(4): 597–591)
- 33 Zhao Ying-Hai, Wu Xiu-Qing, Wen Ling-Yun, Xu Shou-Shi. Ship target detection scheme for optical remote sensing images. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(8): 102–106
(赵英海, 吴秀清, 闻凌云, 徐守时. 可见光遥感图像中舰船目标检测方法. 光电工程, 2008, **35**(8): 102–106)
- 34 Xu Jun, Xiang Jian-Yong, Zhou Xiang, Yang Yi-He. A target segmentation algorithm based on feature field. *Infrared and Laser Engineering*, 1998, **27**(2): 21–24
(徐军, 向健勇, 周翔, 杨宜禾. 基于特征域的目标分割算法. 红外与激光工程, 1998, **27**(2): 21–24)
- 35 Shi Peng. The Ship Detection Based on Optical Remote Sensing Images [Master dissertation], University of Science and Technology of China, China, 2010
(施鹏. 基于光学遥感图像的舰船目标自动检测技术 [硕士学位论文], 中国科学技术大学, 中国, 2010)
- 36 Corbane C, Najman L, Pecoul E, Demagistri L, Petit M. A complete processing chain for ship detection using optical satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, **31**(22): 5837–5854
- 37 Corbane C, Pecoul E, Demagistri L, Petit M. Fully automated procedure for ship detection using optical satellite imagery. In: Proceedings of the International Conference on Remote Sensing of Inland, Coastal, and Oceanic Waters. Noumea, New Caledonia: SPIE, 2008. 71500R-1–71500R-13
- 38 Corbane C, Marre F, Petit M. Using SPOT-5 HRG data in panchromatic mode for operational detection of small ships in tropical area. *Sensors*, 2008, **8**(5): 2959–2973
- 39 Burgess D W. Automatic ship detection in satellite multispectral imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1993, **59**(2): 229–237
- 40 Wu G F, Leeuw J D, Skidmore A K, Liu Y L, Prins H H T. Performance of landsat TM in ship detection in turbid waters. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2009, **11**(1): 54–61
- 41 Lapierre F D, Borghgraef A, Vandewal M. Statistical real-time model for performance prediction of ship detection from microsatellite electro-optical imagers. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, **2010**(2010): 1–15
- 42 Feineigle P A, Morris D D, Snyder F D. Ship recognition using optical imagery for harbor surveillance [Online], available: http://www.ri.cmu.edu/publication_view.html?pub_id=6070, March 18, 2011

- 43 Willhauck G, Caliz Juan J, Hoffmann C, Lingenfelder I, Heynen M. Object-oriented ship detection from VHR satellite images [Online], available: http://www.isprs.org/publications/related/semana_geomatica05/front/abstracts/Dijous10/R32.pdf, March 18, 2011
- 44 Wang M, Luo J C, Zhou C H, Ming D P. A shape constraints based method to recognize ship objects from high spatial resolution remote sensed imagery. In: Proceedings of the International Conference on Computational Science. Atlanta, USA: Springer, 2005. 963–970
- 45 Zhu Chang-Ren, Zhou Hui, Wang Run-Sheng, Guo Jun. A novel hierarchical method of ship detection from spaceborne optical image based on shape and texture features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**(9): 3446–3456
- 46 Bi F K, Liu F, Gao L N. A hierarchical salient-region based algorithm for ship detection in remote sensing images. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. New York: Springer, 2010. 729–738
- 47 Harvey N R, Porter R B, Theiler J. Ship detection in satellite imagery using rank-order grayscale hit-or-miss transforms. In: Proceedings of the International Society for Optical Engineering. Orlando, USA: SPIE, 2010. 770102-1–770102-12



王彦情 中国科学院自动化研究所助理研究员. 2007 年获中国科学院研究生院博士学位. 主要研究方向为遥感图像处理, 目标检测与识别, 多源图像融合. 本文通信作者.

E-mail: yanqing.wang@ia.ac.cn
(**WANG Yan-Qing** Assistant professor at the Institute of Automation,

Chinese Academy of Sciences. She received her Ph.D. degree from Chinese Academy of Sciences in 2007. Her research interest covers remote sensing image processing, target detection and recognition, multi-source image fusion. Corresponding author of this paper.)



马雷 中国科学院自动化研究所博士研究生. 2007 年获中国矿业大学(北京)硕士学位. 主要研究方向为遥感图像处理和目标识别.

E-mail: lei.ma@ia.ac.cn

(**MA Lei** Ph.D. candidate at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his

master degree from China University of Mining and Technology, Beijing in 2007. His research interest covers remote sensing image processing and target recognition.)



田原 中国科学院自动化研究所研究员. 1998 年获西安交通大学博士学位, 1999 年至 2001 年在中国科学院自动化研究所博士后研究. 主要研究方向为图像处理、模式识别、计算机视觉和智能视觉监控. E-mail: yuan.tian@ia.ac.cn

(**TIAN Yuan** Professor at the Institute of Automation, Chinese Academy

of Sciences. He received his Ph.D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1998. From 1999 to 2001, he worked as a postdoctoral research fellow at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers image processing, pattern recognition, computer vision, and intelligent visual surveillance.)