

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012
Vol.17 No.

4

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012 年 4 月 第 17 卷 第 4 期(总第 192 期)

目 次

综述

图像分割中的模糊聚类方法 李旭超, 刘海宽, 王飞, 白春艳(447)

图像处理和编码

GPU 辅助的希尔伯特变换轮廓术 周波, 赵小敏, 王东平(459)

引入连续性强度和置信度因子的快速图像修复 李开宇, 孙玉刚(465)

自适应的有效非局部图像滤波 许光宇, 檀结庆, 钟金琴(471)

改进的 PMD 距离图像超分辨率重建算法 张旭东, 沈玉亮, 胡良梅, 陈菁菁(480)

压缩感知在 Micro-CT 图像超分辨重建中的应用 王丽艳, 韦志辉, 罗守华, 顾宁(487)

对偶四元数单片空间后方交会算法 姬亭, 盛庆红, 王惠南, 刘微微(494)

利用运动强度判据的高效自适应运动估计算法 郭晓珉, 姚睿, 刘智跃, 王友仁(504)

图像分析和识别

核空间散度阈值法 吴成茂(512)

近邻自适应局部尺度的谱聚类算法 孔万增, 孙昌思核, 张建海, 胡三清, 杨灿(523)

LUV 色彩空间中多层次化结构 Nyström 方法的自适应谱聚类算法 刘雅蓉, 汪西莉(530)

结合图像增强的心血管内超声中-外膜边缘检测 邱璇, 黄靖, 杨丰, 邢栋, 涂圣贤(537)

融合图像特征的一致点匹配方法及其应用 张久楼, 李春丽, 冯前进, 陈武凡, 阳维(546)

图像理解和计算机视觉

多蚁群动态协作优化的道路图像分割算法 林丽莉, 周文晖(553)

篮球比赛视频中持球队员行为预测 王千,夏利民,谭论正(560)

利用 Principal Warps 评估颅面几何相似度 朱新懿,耿国华,温超(568)

计算机图形学

图形处理器空间插值并行算法的实现..... 赵艳伟,程振林 ,董慧,方金云(575)

虚拟现实与增强现实

面向 GPU 的批 LOD 地形实时绘制 张兵强,张立民,张建廷(582)

遥感图像处理

光学遥感舰船目标识别方法 杜春,孙即祥,李智勇,滕书华(589)

自适应超完备字典学习的 SAR 图像降噪..... 杨萌,张弓(596)

第 18 届中国遥感大会征文通知 封 2

第 33 届亚洲遥感会议征文通知 封 2

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健 月刊(1996 年创刊) 第 17 卷 第 4 期 2012 年 4 月 16 日出版

主管单位	中国科学院	Superintended by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院遥感应用研究所 中国图象图形学学会 北京应用物理与计算数学研究所	Sponsored by	Institute of Remote Sensing Application, CAS China Society of Image and Graphics Institute of Applied Physics and Computational Mathematics
主 编	李小文	Chief editor	LI Xiaowen
编辑出版	《中国图象图形学报》编辑出版委员会 北京 9718 信箱 邮编 100101 电子信箱:jig@irsa. ac. cn 电话:010-68407995 010-82614429 网 址:www. cjig. cn	Editor, Publisher	Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics (P. O. Box 9718 ,Beijing 100101 ,China) E-mail:jig@irsa. ac. cn
印刷装订	北京北林印刷厂	Distributed by	Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
广告经营许可证	京朝工商广字第 0346 号	Domestic	All Local Post Offices in China
总 发 行	北京报刊发行局	Foreign	China International Book Trading Corporation (P. O. Box 399 ,Beijing 100044 ,China)
订 购	全国各地邮局	Printed by	Beijing Beilin Printing House
国外发行	中国国际图书贸易总公司 (中国国际书店) (北京 399 信箱 邮编 100044)		

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

第 18 届中国遥感大会征文通知

“第 18 届中国遥感大会”将于 2012 年 10 月 19 日-23 日在武汉召开。本届会议由中国遥感委员会主办,中国测绘学会摄影测量与遥感专业委员会和武汉大学承办。会议将围绕“遥感—全方位的社会服务”这一宗旨,以遥感学界院士与知名专家的特邀报告,分会场专题技术交流与技术讲座,重点项目研讨汇报、技术展览,新技术与新产品发布,专业委员会理事会等多种形式开展,同时举行“第 7 届中国青年遥感辩论会”和“第 2 届全国高分辨率遥感数据处理与应用研讨会”。

会议将全方位地展示遥感(RS)、全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)等方面的最新成果,为专家、学者和政府主管部门搭建联系纽带,为研发和用户提供技术交流平台,共同促进遥感科技的发展、遥感产业化的推进和大遥感体系的建立。

本届会议围绕大会主题将就遥感新理论、技术、方法和应用进行征文,范围包含但不限于以下方面:

- 1) 国家遥感中长期发展战略、国际遥感前沿与进展;
- 2) 航天、航空、低空、地面遥感技术及系统;
- 3) 光学、红外、高光谱及激光遥感技术;
- 4) 主、被动微波及雷达遥感技术;

- 5) 数字摄影测量与制图;
- 6) 高分辨率遥感数据处理与应用;
- 7) 地理空间数据处理技术与方法;
- 8) 地理国情监测(土地、农业、林业、矿产、环境、地质及水资源等);
- 9) 海洋、气象与全球变化;
- 10) 遥感、地理信息系统与导航定位系统(3S)集成与应用;
- 11) 智慧城市与数字地球;
- 12) 深空探测与行星测绘;
- 13) 教育、培训与社会公共事业。

征文采用在线方式投稿;

投稿要求:论文内容不涉密,且未在国内外学术刊物或正式学术会议上发表过;被录用的全文将收入大会论文集(送 ISTP 检索),并精选 70~90 篇口头报告论文编辑出版英文 SPIE 会议文集;大会将评选青年优秀论文(参加口头报告),论文将直接进入英文 SPIE 会议文集。

论文摘要截止日期为 2012 年 5 月 15 日,全文截稿日期为 2012 年 6 月 15 日。

会议相关信息,请查阅会议网址:<http://rsgis.whu.edu.cn/18ccrs/index.html>

“第 18 届中国遥感大会”组委会

第 33 届亚洲遥感会议征文通知

“第 33 届亚洲遥感会议”将由泰国地理信息和空间技术发展局(GISTDA)、科技部(MOST)和亚洲遥感协会(AARS)联合主办,于 2012 年 11 月 26-30 日,在泰国芭堤雅市宗滴恩酒店举行。这是亚洲遥感协会每年一届的系列学术会议。本届大会征文包括传感器与平台、算法和图像处理、GIS 与 Web GIS、全球导航卫星系统、灾害、自然资源、环境科学、教育和宣传、健康科学、制图、其他等方面。

会议重要日期:

论文摘要提交截止:2012 年 5 月 15 日;
论文接收通知:2012 年 7 月 1 日;
论文全文提交截止:2012 年 9 月 30 日;
网上注册截止:2012 年 10 月 26 日;
会议召开日期:2012 年 11 月 26-30 日。
会议还将组织学生专场和技术展览,其他信息请访问会议网站:<http://acrs2012.gistda.or.th>
与往年一样,中国遥感委员会仍将鼓励中国遥感科研人员和企事业单位参加会议,并组团参加学术交流和会议展览。

中国遥感委员会

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 4 April 2012

Contents

Review

The survey of fuzzy clustering method for image segmentation Li Xuchao, Liu Haikuan, Wang Fei, Bai Chunyan (447)

Image Processing and Coding

GPU assisted Hilbert transform profilometry Zhou Bo, Zhao Xiaomin, Wang Dongping (459)

Fast image inpainting algorithm introducing continuous strength and confidence factor Li Kaiyu, Sun Yugang (465)

Adaptive efficient non-local image filtering Xu Guangyu, Tan Jieqing, Zhong Jinqin (471)

Improved super-resolution reconstruction algorithm for PMD range image

..... Zhang Xudong, Shen Yuliang, Hu Liangmei, Chen Jingjing (480)

Image superreconstruction for Micro-CT based on compressed sensing Wang Liyan, Wei Zhihui, Luo Shouhua, Gu Ning (487)

Dual quaternion of space resection with single-image Ji Ting, Sheng Qinghong, Wang Huinan, Liu Weiwei (494)

Efficient adaptive motion estimation algorithm based on motion intensity Guo Xiaomin, Yao Rui, Liu Zhiyue, Wang Youren (504)

Image Analysis and Recognition

Divergence thresholding method in kernel space Wu Chengmao (512)

Spectral clustering based on neighboring adaptive local scale

..... Kong Wanzeng, Sun Changsihe, Zhang Jianhai, Hu Sanqing, Yang Can (523)

Adaptive spectral clustering algorithm based on Nyström method with multi-level structure in LUV color space

..... Liu Yarong, Wang Xili (530)

Image enhancement based media-adventitia border detection in intravascular ultrasound images

..... Qiu Xuan, Huang Jing, Yang Feng, Xing Dong, Tu Shengxian (537)

Coherent point drift registration combined with image feature and its application

..... Zhang Jiulou, Li Chunli, Feng Qianjin, Chen Wufan, Yang Wei (546)

Image Understanding and Computer Vision

Dynamic multi-colony ant cooperative optimization schemes for road image segmentation

..... Lin Lili, Zhou Wenhui (553)

Behavior prediction of ball carriers in basketball match videos Wang Qian, Xia Limin, Tan Lunzheng (560)

Estimate of craniofacial geometry shape similarity based on principal warps

..... Zhu Xinyi, Geng Guohua, Wen Chao (568)

Computer Graphics

Realization of GPU parallel spatial interpolation method

..... Zhao Yanwei, Cheng Zhenlin, Dong Hui, Fang Jinyun (575)

Virtual Reality and Augmented Reality

GPU-based real-time terrain rendering algorithm using batched LOD

..... Zhang Bingqiang, Zhang Limin, Zhang Jianting (582)

Remote Sensing Image Processing

Method for ship recognition using optical remote sensing data

..... Du Chun, Sun Jixiang, Li Zhiyong, Teng Shuhua (589)

SAR images de-speckling algorithm via an adaptive over-complete learning dictionary

..... Yang Meng, Zhang Gong (596)

中图法分类号: TP75 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)04-0589-07

论文引用格式: 杜春, 孙即祥, 李智勇, 滕书华. 光学遥感舰船目标识别方法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(4): 589-595

光学遥感舰船目标识别方法

杜春, 孙即祥, 李智勇, 滕书华

国防科学技术大学电子科学与工程学院, 长沙 410073

摘要: 提出一种基于粗糙集理论和分层判别回归技术的光学遥感舰船目标识别方法。该方法首先提出新的光学遥感舰船识别特征——面积比编码, 并与四类特征组合作为备选特征; 然后基于粗糙集理论按同可区分度来计算各备选特征的重要性权值, 自动选择出对正确识别贡献较大的特征组合; 最后根据分层判别回归原理生成分类判决树来识别光学遥感舰船目标。实验结果表明, 本文方法在识别精度和速度方面优于最近邻和支持向量机方法, 且通用可行。

关键词: 舰船目标识别; 面积比编码; 粗糙集; 分层判别回归; 遥感

Method for ship recognition using optical remote sensing data

Du Chun, Sun Jixiang, Li Zhiyong, Teng Shuhua

College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Abstract: A new method for ship recognition using optical remote sensing data based on rough set and hierarchical discriminant regression (HDR) is presented in this paper. First, a new shape feature called area ratio code (ARC) is proposed and extracted as a candidate feature. Based on the rough set theory, the common discernibility degree is used to compute the significance weight of each candidate feature and select valid recognition features automatically. Ultimately, a decision tree based on the HDR theory is built to recognize ships in data from optical remote sensing systems. Experimental results on real data show that the proposed method is generalizable and can get better classification rates at a higher speed than the KNN or SVM method.

Key words: ship recognition; area ratio code; rough set; hierarchical discriminant regression; remote sensing

0 引言

舰船目标识别是计算机视觉和模式识别关注的重要问题, 其在精确制导、海上交通管理、反恐、搜救等军事和民用领域具有十分重要的意义。

以往对于舰船目标识别的研究主要基于合成孔径雷达或者前视红外的近距离侧视图像数据, 利用舰船上层建筑的差异来进行识别^[1-4]。近年来, 随着卫星遥感技术的发展, 光学遥感舰船目标识别逐

渐成为可能。张振^[5]将支持向量机技术应用到 Quick Bird 卫星数据的舰船目标识别中, Lan 等人^[6]利用改进的 Zernike 矩识别航空遥感影像中的大型军用舰船, Antelo 等人^[7]根据 Bayesian 准则设计似然函数来识别 Quick Bird 卫星影像舰船。现有光学遥感舰船目标识别方法在具体应用背景中取得了较好的识别效果, 然而其也存在一些不足: 1) 针对特定传感器提出, 对数据要求很高(分辨率优于 1 m), 难以广泛实用。2) 较少考虑识别特征的选择问题, 一般根据经验确定特征向量, 特征维数高且存在冗

收稿日期: 2011-03-15; 修回日期: 2011-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(40901216)

第一作者简介: 杜春(1983—), 男, 国防科学技术大学电子科学与技术专业博士研究生, 主要研究方向为计算机视觉与智能信息处理。

E-mail: yxduchun@gmail.com

余,容易降低识别正确率和识别速度。3)分类器进行特征匹配时需要进行全局搜索,算法复杂度高。

为了提高光学遥感舰船目标识别方法的有效性和通用性,本文以 4 m 以上分辨率的光学遥感图像数据作为研究对象,提出一种通用的舰船目标识别方法。该方法在特征提取、特征选择和分类器设计等识别关键环节作了必要改进,提出一种简单有效的舰船目标识别特征——面积比编码(ARC),利用粗糙集理论^[8]的属性约简思想进行识别特征选择,并将分层判别回归(HDR)^[9-10]技术引入舰船目标识别中,在获得较高识别率的同时提升了识别速度,较以往方法具有更好的实用性。

1 本文算法

首先提出通用光学遥感舰船目标识别算法需要具备的几个条件:1)识别算法应该具有层次性。不同传感器、不同分辨率条件下遥感图像所能达到的舰船识别能力是不相同的。比如根据经验及美国国家图像解译度分级标准(NIIRS)^[11],NIIRS 3-4 级(1.2~4.5 m 分辨率)遥感图像可进行舰种识别,而 NIIRS 5 级以上(优于 1.2 m 分辨率)的遥感图像则可进一步识别出舰船的级别。2)用于舰船目标识别的特征应具备较好的鲁棒性和不变性,适应视角、平移、旋转、尺度缩放等变化。3)不同的特征及其组合对于正确识别舰船目标的贡献是不一样的,应该提取对识别最有效的特征及其组合进行识别,提高识别精度和速度。4)舰船目标分类器应该具有较小的计算复杂度,满足实时处理的需求。

对于条件 1),本文设计多特征联合分类的识别算法,该算法具备开放性,能够处理多种类型传感器、多种分辨率的光学遥感影像数据,可以适应不同的识别目的。为便于说明,本文按图像分辨率将光学遥感舰船目标识别分为舰种识别和舰级识别两个层次,4 m 以上分辨率影像进行舰种识别,1 m 以上分辨率影像进行舰级识别。对于条件 2)3),在提取现有不变特征的基础上设计了 ARC 特征,并基于粗糙集理论进行特征选择。粗糙集理论作为一种处理不精确、不相容和不完全数据的新的数学工具,其能模拟人类抽象逻辑思维,在保证分类能力不下降的前提下进行特征和知识的约简,特别适用于处理不确定、不精确及含有噪声的特征选择问题。对于条件 4),设计了基于 HDR 的光学遥感舰船目标分类

器。HDR 是基于自主心智发育思想^[12]提出的一种新的分类识别方法。该方法在训练时间、识别正确率和识别速度较现有多数方法具有优势,且具备增量学习能力,适应实际识别问题的需要。

图 1 为本文算法的流程图。以舰种识别为例,首先对已有的光学遥感舰船目标切片进行特征提取,随后采用基于同可区分度的属性约简算法对特征集约简,消除冗余信息,选出对识别最有效的特征组合,并利用这些特征和样本类别信息进行训练,构造 HDR 树。最后,输入测试舰船切片并提取有效识别特征,利用 HDR 分类器得到识别结果。舰级识别的流程与舰种识别的基本一致,差别仅在于训练样本的类别由舰种标签改为舰级标签,同时在特征提取中考虑增加有利于舰级识别的特征。

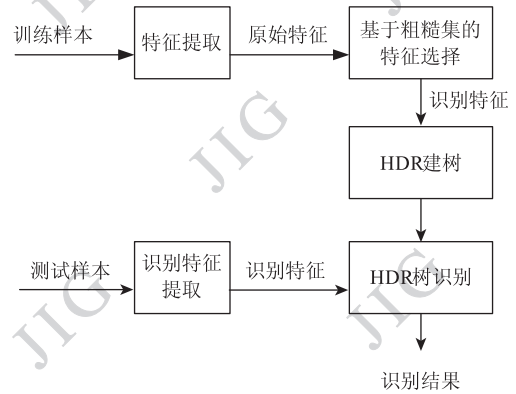


图 1 本文算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the proposed method procedure

2 舰船目标特征提取与选择

2.1 4 类舰船目标特征

区分性好的特征是舰船目标识别的重要依据。在光学遥感影像中,不同种类舰船在尺寸、形状、纹理、上层建筑上存在差异。本文从以下 4 个方面提取舰船目标特征。

尺寸特征:舰长 F_1 、舰宽 F_2 、长宽比 F_3 、面积 F_4 、周长 F_5 。

形状特征:舰首形状 F_6 、舰尾形状 F_7 、形状复杂度 F_8 、偏心率 F_9 、圆形度 F_{10} 、主轴长度 F_{11} 。

纹理特征:标准偏差 F_{12} 、熵 F_{13} 、平滑度 F_{14} 、分形维数 F_{15} 。

不变矩特征:7 个 Hu 不变矩 F_{16} — F_{22} 、阶数小于 8 的前 20 个 Zernike 矩 F_{23} — F_{42} 。

2.2 一种新的舰船形状特征

由于多数舰船目标类间形状差别较小,几何特征和不变矩特征的提取很容易因为噪声干扰、目标分割造成误差,最终降低舰船目标识别的正确率。鉴于此,本文深入分析高分辨率遥感舰船目标的几何特性,提出 ARC 特征。

2.2.1 ARC 特征定义

将目标切片沿主轴旋转至水平方向并获取其外接矩形,把矩形等分为 N 份,记第 i 份内目标区域所占面积的大小为 S_i ,按式(1)对各份进行编码,按式(2)定义 ARC。

$$C_i = \text{floor}\left(\frac{S_i}{\max_{1 \leq i \leq N}(S_i)} \times 10\right) \quad (1)$$

$$C = [C_1, C_2, \dots, C_N] \quad (2)$$

例如,图2为一幅1 m分辨率的舰船目标切片,根据定义得到 $N=6$ 时的 ARC 特征为 $C = [4, 8, 10, 10, 9, 7]$ 。

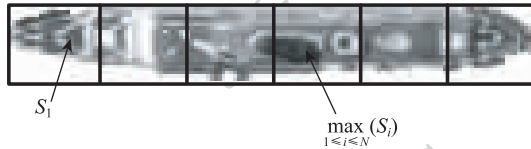


图2 面积比编码示例

Fig.2 Example of area ratio code

2.2.2 ARC 特征分析

ARC 是根据遥感舰船目标的识别特性提出的一种区域形状特征,其具有以下特点:1)具有平移、旋转和尺度缩放不变性,由其定义容易证明。2)根据面积要素而非单个像素要素计算,对噪声和分割算法造成的轮廓失真并不敏感,具有较强的鲁棒性。3)有效表征目标的舰首舰尾形状。多数舰船的形状差别体现在舰首舰尾形状的不同,其与 ARC 特征的对应关系大致可如图3所示。4)编码方案灵活,易于扩展。可灵活调整分块大小和数目计算出不同的面积比编码,并将这些面积比编码组合使用得到多个识别特征。

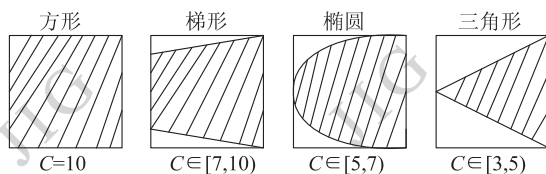


图3 ARC 表征舰首舰尾形状

Fig.3 Describing head and tail shape by area ratio code

需要说明的是,ARC 特征分块大小和数目的确定应以能有效描述舰首舰尾形状特性为原则。因此,所处理的图像分辨率应达到一定要求使舰船目标面积不要太小,每一个分块的大小也要尽量接近舰船目标舰首或舰尾的大小。在实际提取 ARC 特征时,一般要求图像分辨率优于 5 m。考虑到多数舰船目标中舰首舰尾部分约占舰船整体的 $1/3 \sim 1/8$,设置分块数目的取值范围为 $3 \leq N \leq 8$ 。

综合以上分析,本文取 $N=6$ 时的 ARC 特征码元作为特征 $F_{43}—F_{48}$,将所提取的全部特征组成特征向量 $F = (F_1, F_2, \dots, F_{48})$ 。

2.3 舰船目标特征选择

先验知识不充分往往会给特征提取带来盲目性,此时提取的特征相关性强,容易因为冗余而降低识别的效率。本文研究的舰船目标识别是一个多特征联合分类问题,各个特征及其提取精度对识别的贡献均存在不确定性,如何找到对识别最有效的特征组合直接关系到识别的精度和速度。本文基于粗糙集理论,采用基于同可区分度的属性约简算法(CDDBARK)^[13]来解决光学遥感舰船目标识别中的特征选择问题。

2.3.1 同可区分度的计算

粗糙集理论常用四元组 $S = (U, A, V, f)$ 表示一个信息系统,其中 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_{|U|}\}$ 为论域; A 为全部属性集合; V_j 表示属性 $a_j \in A$ 的值域,且 $V = \bigcup_{a_j \in A} V_j$; $f: U \times A \rightarrow V$ 是信息函数,满足 $\forall a_j \in A, f(x, a_j) \in V_j$; 如果 $A = C \cup D$ 且 $C \cap D = \emptyset$,则称 $S = (U, C, D)$ 为决策表, C 为条件属性集, D 为决策属性集。如果 $\exists a_j \in A$ 使得 V_j 包含空值“*”,则称 S 为不完备信息系统。

在不完备信息系统 S 中,首先定义属性集 $P \subseteq A$ 的可区分关系^[13]为

$$DIS(P) = \{(x, y) \in U \times U \mid \exists a \in P, f(x, a) \neq f(y, a), f(x, a) \neq *, f(y, a) \neq *\} \quad (3)$$

定义与 x 可区分对象的最大集合为

$$D_P(x) = \{y \in U \mid (x, y) \in DIS(P)\} \quad (4)$$

则属性集 P 的可区分度定义为

$$|DIS(P)| = \sum_{i=1}^{|U|} |D_P(x_i)| \quad (5)$$

式中, $|DIS(P)|$ 是对属性集 P 可区分能力大小的度量,其值等于 $DIS(P)$ 中有序对元素的个数。

进一步,可定义两个属性集 P 和 Q 的同可区分

关系为

$$DIS(Q;P) = DIS(Q) \cap DIS(P) \quad (6)$$

其对应的同可区分度为

$$|DIS(Q;P)| = |DIS(Q)| \cap |DIS(P)| \quad (7)$$

由式(6)(7)可以看出,同可区分关系 $DIS(Q;P)$ 是属性集 P 和 Q 中都能对论域 U 进行区分的有序对的集合,同可区分度 $|DIS(Q;P)|$ 是 $DIS(Q;P)$ 中元素的个数,其用于度量 P 和 Q 共同具有的区分能力。

2.3.2 特征选择算法步骤

1) 对提取的舰船目标特征进行离散化处理,构造特征决策表

$$S(U, C, D) = \begin{array}{c|ccc} & C_1 & \cdots & C_n & D \\ \hline U_1 & F_{11} & \cdots & F_{1n} & d_1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ U_m & F_{m1} & \cdots & F_{mn} & d_m \end{array} \quad (8)$$

式中, $U_i = (F_{i1}, F_{i2}, \dots, F_{in})$ 表示第 i 个目标的特征向量, $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ 表示目标集, $C_i = (F_{1i}, F_{2i}, \dots, F_{mi})^T$ 表示第 i 个候选特征, $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ 表示全部候选特征集, $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 表示舰船的决策(类别)集, F_{ij} 表示第 i 个训练样本的第 j 个特征, m, n 分别表示训练样本个数和特征维数。

2) 定义特征集 Q 和 T , 且令 $Q = \emptyset, T = C$, 按式(7)计算属性集 C 和 D 的同可区分度 $|DIS(D;C)|$ 。

3) 如式(9)定义特征集重要性函数, 按式(10)计算特征集 $C - Q$ 中最重要的特征 C_k , 且更新 Q 和 T , 即令 $Q = Q \cup C_k, T = T - \{C_k\}, 1 \leq i \leq |T|$ 。

$$SGF(C_k, Q, D) = |DIS(D; (Q \cup \{C_k\}))| - |DIS(D; Q)| \quad (9)$$

$$SGF(C_k, Q, D) = \max_{C_i \in T} SGF(C_i, Q, D) \quad (10)$$

4) 若 $|DIS(D; Q)| = |DIS(D; C)|$, 转到步骤 5), 否则转到步骤 3)。

5) 以最终的 $Q = \{C_1, C_2, \dots, C_l\}$ 作为特征选择结果, 建立约简后的训练样本特征集

$$X = \begin{array}{c|ccc} & C_1 & \cdots & C_l & D \\ \hline x_i & F_{i1} & \cdots & F_{il} & d_1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ x_m & F_{m1} & \cdots & F_{ml} & d_m \end{array} \quad (11)$$

式中, x_i 为约简后第 i 个目标的特征向量, l 为约简特征维数。

3 舰船目标分类器设计

本文基于 HDR 设计分类器, 该分类器将分类问

题和回归问题统一, 首先建立输入空间(特征)与输出空间(类别)的映射关系, 然后分别在输出空间和输入空间分别进行聚类, 由粗到精地实现输入样本与输出类别的对应。HDR 分类器可以实现增量学习, 学习初期只能建立粗糙的输入输出对应关系。随着训练样本的增加, 越来越多的细节和越来越复杂的分类情况被引入, 原有的聚类进一步分裂, 最终发育成一个完善的树分类器结构。

HDR 是一个树分类器, 其训练过程为建树, 识别过程为树的检索。

3.1 HDR 建树

将特征选择后的舰船目标训练样本集记为 $\{(x_i, d_i) | x_i \in X, d_i \in D, i = 1, 2, \dots, m\}$, HDR 建树步骤如下:

1) 输出空间聚类 将舰船目标训练样本集根据 d_i 进行聚类, 类数为 k , 根据特征与类别的对应关系将特征集合 X 划分为 k 个子空间, 并求出每个子空间中的聚类中心 $\bar{x}_i, i = 1, 2, \dots, k$ 。

2) 输入空间聚类 将各训练样本聚类到与其 SDNLL 距离^[9]最小的一个聚类中心的类中, 将重新划分的 k 个子空间作为 HDR 的第一层子节点。

3) 子节点分裂 考查每一个子空间的训练样本集, 如果 D 中最大类内距离小于临界值, 将该子空间作为叶节点, 停止分裂; 否则, 对该子空间重复第 1) 步和第 2) 步, 继续分裂, 直至子空间不能再划分出叶节点为止。

3.2 HDR 识别

HDR 识别步骤如下:

1) 设定搜索宽度为 w , 从根节点出发, 在第 1 层树结构中寻找与测试舰船样本 SDNLL 距离最近的前 w 个子节点 $N_{11}, N_{12}, \dots, N_{1w}$ 。

2) 在 $N_{11}, N_{12}, \dots, N_{1w}$ 分裂到第 2 层的子节点中继续搜索前 w 个与测试舰船样本最近的子节点 $N_{21}, N_{22}, \dots, N_{2w}$ 。

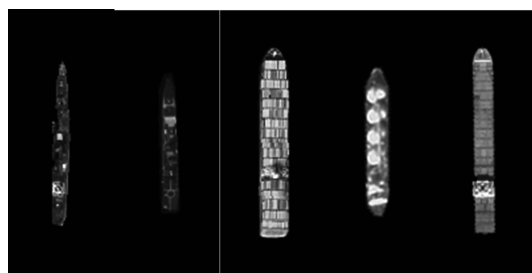
3) 当下一层搜索到的子节点不全为叶节点时, 重复以上搜索过程; 否则, 停止搜索, 并以叶节点中与测试样本距离最近的训练样本的类别作为结果输出。

4 实验结果与分析

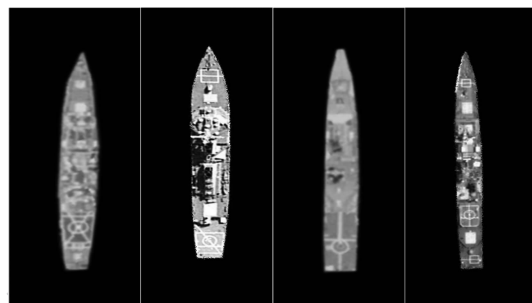
4.1 实验设置

为了验证本文算法的性能, 分别做了舰种识

别和舰级识别两组实验。实验数据来自真实遥感影像,首先进行海陆分割、云掩模等预处理,然后利用 Connected 算子^[14]进行形态滤波获得疑似舰船目标区域,最后通过 GPAC 图像分割算法^[15]得到目标切片,如图4所示。舰种识别的实验数据共计100幅,分为5个舰种,每种20幅,分辨率优于4 m,来自 SPOT 5、IKONOS 等传感器;舰级识别的实验数据共计40幅,分为4个舰级,每种10幅,分辨率优于1 m,来自 Quick Bird、Google Earth 和0.5 m左右分辨率的航空遥感影像。由图4可以看出,5个舰种主要在尺寸、形状上存在差异,由于单个舰种包含多个舰级,难以用纹理区分舰种;4个舰级在尺寸、形状、纹理上有所区别。本文实验在 MATLAB7.8.0 上运行,配置平台为 Intel Pentium CPU 2.50 GHz,2 GB RAM 的计算机。



(a) 舰种识别切片示例



(b) 舰级识别切片示例

图4 实验数据示例

Fig. 4 Examples of experiment data

4.2 识别特征提取与选择

对每个舰种任意选择10个样本作为训练样本,根据2.1节和2.2节对每个训练样本进行特征提取得到48维的特征向量。将舰船训练样本集作为论域 U ,相应的特征向量集合作为条件属性集 C ,相应的类别集合作为决策属性集 D ,则按式(8)构造出决策表为

$$S(U, C, D) = \left(\begin{array}{ccc|c} F_1^1 & \cdots & F_{50}^{48} & d_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ F_{50}^1 & \cdots & F_{50}^{48} & d_{50} \end{array} \right) \quad (12)$$

式中, F_i^j 表示第 i 个训练样本的第 j 个特征值。

在特征约简过程中,首先按式(7)求得 C 和 D 的同可区分度 $|DIS(D; C)| = 34$; 然后以同可区分度作为启发函数,按式(10)计算出 T 中最重要的特征 C_k 并置于集合 Q 中,同时从 T 中移除 C_k 。重复同样的操作把 T 中前几个最重要的特征 C_k 置于 Q 中,直至满足 $|DIS(D; Q)| = |DIS(D; C)|$ 为止,则求得约简结果为 $Q = \{C_1, C_3, C_5, C_{43}, C_{48}\}$, 其中 $C_i = (F_1^i \ F_2^i \ \cdots \ F_{50}^i)^T$ 表示由所有训练样本第 i 个特征组成的特征向量。在约简过程中可由式(9)求出单个识别特征 C_k 的重要性权值 $W_{C_k} = SGF(C_k, Q, D)$, 为方便可进一步归一化为

$$\bar{W}_{C_k} = W_{C_k} / \sum W_{C_i}, C_i \in Q \quad (13)$$

对照约简结果 Q 易知,所选择的特征组合为 $Z_1 = \{F_1, F_3, F_5, F_{43}, F_{48}\}$, 即所选择的识别特征包括舰长、长宽比、周长、ARC 特征第1和第6个码元。表1给出了各个识别特征的重要性权值。

表1 特征选择结果

Table 1 Results of feature selection

权值	特征				
	F_1	F_3	F_5	F_{43}	F_{48}
W_{C_k}	12	14	5	9	3
$\bar{W}_{C_k}$	0.279	0.326	0.116	0.209	0.070

对每个舰级任意选择5个样本作为训练样本,按同样的方法求得舰级识别的特征组合为 $Z_2 = \{F_1, F_3, F_5, F_{13}, F_{14}, F_{22}, F_{33}, F_{43}, F_{48}\}$, 即所选择的识别特征包括舰长、长宽比、周长、熵、平滑度、第7个 Hu 矩,第11个 Zernike 矩 $Z_{5,3}$, ARC 特征第1和第6个码元。按式(13)求得各特征的归一化重要性权值为 $\{0.058, 0.096, 0.173, 0.135, 0.077, 0.115, 0.212, 0.096, 0.039\}$ 。

图5给出了识别特征的权值图。由实验结果可以看出:1)舰种识别和舰级识别特征选择结果均包含本文2.2节提出的 ARC 特征码元 F_{43} 和 F_{48} , 验证了该特征在光学遥感舰船目标识别中的有效性。2)舰种识别和舰级识别由于识别目的和数据质量的差异,特征选择的结果有所差异。具体而言,二者识别特征均包含大小和形状特征,但舰级识别特征

比舰种识别特征多出 4 个,即 2 个纹理特征(熵、平滑度)和 2 个不变矩特征(Hu 矩,Zernike 矩)。一般来说,大小和形状特征是光学遥感舰船目标识别的通用特征;舰级识别所处理的图像质量较高,纹理特征和不变矩特征提取较为精确,对区分舰级也有重要意义。由图 5 可以看出,本文算法能根据识别目的和特征数据特点自动地选择出对正确识别贡献较大的特征组合。

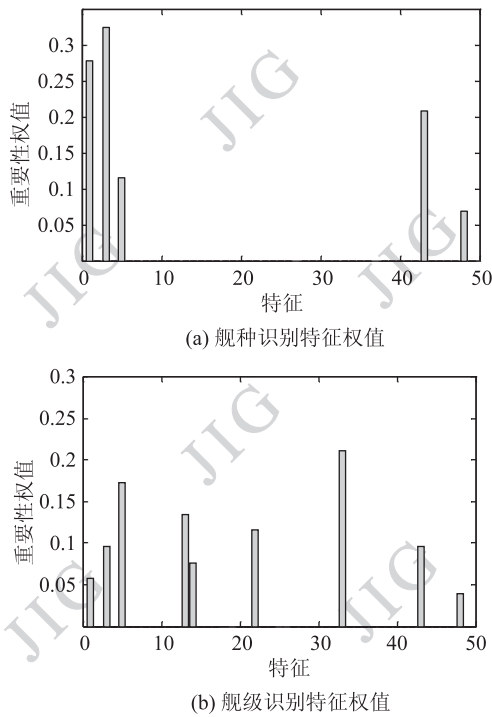


图 5 特征重要性权值

Fig. 5 Significance weight of candidate features

4.3 识别性能比较

将经过约简的特征集合作为样本集,采用交叉验证求平均识别率的方案验证识别性能,并与 K 近邻(KNN)方法和支持向量机(SVM)方法的识别结果进行比较。

舰种识别共做 4 组实验,每组实验从 5 类舰种各随机选取 $i(i=5,6,7,8)$ 个样本作为训练集,剩下的作为测试集,重复进行 10 次测试,取 10 次实验的平均值为该组最后的识别率。4 组实验分别表示为 5Train,6Train,7Train,8Train,表 2 给出了舰种识别实验的平均识别率和耗时。

舰级识别共做 4 组实验,每组实验从 4 类舰级各随机选取 $i(i=2,3,4,5)$ 个样本作为训练集,剩下的作为测试集,重复进行 10 次测试,取 10 次实验的

平均值为最后的识别率。4 组实验分别表示为 2Train,3Train,4Train,5Train。表 3 给出了舰级识别实验的平均识别率和耗时。

表 2 舰种识别结果

Table 2 Results of ship type recognition

方法		5Train	6Train	7Train	8Train
KNN	平均识别率/%	56.8	59.0	62.7	64.1
	耗时/ms	764	756	667	526
SVM	平均识别率/%	57.6	61.1	65.3	70.1
	耗时/ms	83	83	84	89
本文	平均识别率/%	66.4	70.0	73.3	76.0
	耗时/ms	69	67	65	65

表 3 舰级识别结果

Table 3 Results of ship class recognition

方法		2Train	3Train	4Train	5Train
KNN	平均识别率/%	65.6	69.6	70.8	77.5
	耗时/ms	492	469	415	331
SVM	平均识别率/%	60.9	71.4	72.9	78.1
	耗时/ms	77	78	79	77
本文	平均识别率/%	62.5	72.2	81.3	84.7
	耗时/ms	54	53	50	49

由表 2 和表 3 可以看出,在舰种识别实验中,本文方法在同等实验条件下较 KNN 算法提高约 10% 的识别正确率,耗时则减少约 90%,较 SVM 方法在耗时上略有减少,但识别率有明显提高。在舰级识别实验中,本文方法在同等实验条件下耗时最少,识别率方面 2Train 和 3Train 实验中没有明显提高,但在 4Train 和 5Train 实验中较 KNN 和 SVM 方法提升较快,其主要原因在于 2Train 和 3Train 实验中训练样本过少,难以生成有效的 HDR 识别树,随着训练样本数量的增加,HDR 判别树不断完善,识别性能逐步提高。

从实验结果容易看出,本文方法较传统的 KNN 方法和 SVM 方法存在优势。KNN 方法寻找与测试样本欧氏距离最近的样本类别作为输出,其思想十分简单,但不能有效利用训练样本的分布规律,而且还需要全局遍历寻优,识别效果较差。SVM 方法基于统计学习理论提出,其适合光学遥感舰船目标识别问题非线性、高维数的特点,但由于其是针对两类

问题提出的,将其扩展为多类识别问题时性能有所下降。本文方法在提取有效识别特征的基础上采用HDR技术进行识别,其在训练过程中根据样本分布规律在输入输出空间进行双重聚类,在测试过程中按树的分枝进行搜索,计算复杂度较低,识别正确率较高。

5 结 论

本文针对优于4 m分辨率的光学遥感影像数据,提出一种通用的光学遥感舰船目标识别方法。该方法在特征提取、特征选择和分类器设计3个方面做了工作,提出了新的舰船目标识别特征,并给出基于CDDBARK和分层判别回归技术进行光学遥感舰船目标识别的详细步骤。用本文方法进行舰种识别和舰级识别,可以在保证较高识别率的前提下达到实时处理的要求。本文所做的工作还只是初步的探索,未来需要研究的问题包括:1)寻找更多有效的舰船目标识别特征;2)收集更多的舰船目标样本,在大样本条件下进行增量学习,进一步提高光学遥感舰船目标识别的有效性、准确性和实用性。

参考文献 (References)

- [1] Zabidi M M A, Mustapa J, et al. Embedded vision systems for ship recognition [C]//IEEE TENCON. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2009: 1-5.
- [2] Alves J, Herman J, Rowe N C. Robust Recognition of Shiptypes from an Infrared Silhouette [R]. Monterey, CA, USA: Naval Postgraduate School, 2004.
- [3] Luo Q, Khoshgoftar T M, et al. Classification of ships in surveillance video [C]//IEEE International Conference Information Reuse and Integration. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2006: 432-437.
- [4] Li H, Wang X. Automatic recognition of ship types from infrared images using support vector machines [C]//International Conference on Computer Science and Software Engineering. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2008, 6: 483-486.
- [5] Zhang Z. A Study on Harbor Target Recognition in High Resolution Optical Remote Sensing Image [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. [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 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.]
- [6] Lan J, Wan L. Automatic ship target classification based on aerial images [C] //Proceedings of SPIE. Bellingham Wash: SPIE, 2009, 7156 (12): 1-10.
- [7] Antelo J, Ambrosio G, Gonzalez J, et al. Ship detection and recognition in high resolution satellite images [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2009, 4: 514-517.
- [8] Pawlak Z. Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data [M]. London: Kluwer Academic Publisher, 1991.
- [9] Hwang W S, Weng J Y. Hierarchical discriminant regression [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22 (11): 1277-1293.
- [10] Weng J Y, Hwang W. Incremental hierarchical discriminant regression [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2007, 18 (2): 397-415.
- [11] Driggers R G, Cox P, Kelley M. National imagery interpretation rating system and the probabilities of detection, recognition and identification [J]. Optical Engineering, 1997, 36 (7): 1952-1959.
- [12] Weng J, McClelland J, Pentland A, et al. Autonomous mental development by robots and animals [J]. Science, 2001, 291 (5504): 599-600.
- [13] Teng S H, Zan D C, Sun J X, Tan Z G. Attribute reduction algorithm based on common discernibility degree [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2010, 23 (5): 630-638. [滕书华, 咎德才, 孙即祥, 谭志国. 基于同可区分度的属性约简算法 [J]. 模式识别与人工智能, 2010, 23 (5): 630-638.]
- [14] Corbanc C, Najman L, Pecoul E, et al. A complete processing chain for ship detection using optical satellite imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31 (22): 5837-5854.
- [15] Manjunath B S, Sumengen B. Graph partitioning active contours (GPAC) for image segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28 (4): 509-521.