

地图图片的特征提取与自动识别方法

王雪冰¹, 郭庆胜¹, 王 勇², 柳其志¹, 魏智威¹

(1. 武汉大学 资源与环境科学学院 湖北 武汉 430079; 2. 中国测绘科学研究院 北京 100830)

摘 要: 自动从大量网络图片中识别出地图是地图监控中一个非常重要的任务。从人类视觉认知上, 地图图片明显不同于一般的图片, 因此需要研究地图图片的特征及其在自动识别中的应用。通过分析地图图片与一般图片的差异, 选择了地图图片的颜色特征、局部二值模式特征和灰度共生矩阵特征作为地图图片识别的基础特征, 然后针对不同特征找出最优的单核支持向量机, 通过线性加权组合生成多核支持向量机, 对地图图片进行自动识别。实验证明: 这些特征对地图图片的自动识别是有效的, 结合多核支持向量机, 地图图片识别准确率高。

关键词: 地图图片; 自动识别; 特征提取; 颜色直方图

中图分类号: P25; TP181

文献标识码: A

文章编号: 1672-5867(2019)09-0028-05

Feature Extraction and Automatic Recognition Method for Map Images

WANG Xuebing¹, GUO Qingsheng¹, WANG Yong², LIU Qizhi¹, WEI Zhiwei¹

(1. School of Resource and Environment Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China)

Abstract: Automatically identifying a map from a large number of network images is a very important task in map monitoring. From the perspective of human visual cognition, the map is obviously different from the general picture. Therefore, it is necessary to study the characteristics of the map image and its application in automatic recognition. After analyzing the difference between the map image and the general image, the color features of the map image, the local binary pattern feature and the gray level co-occurrence matrix feature are selected as the basic features of the map image recognition, and then the optimal single-kernel support vector is found for different features. The machine generates a multi-kernel support vector machine through linear weighted combination to automatically identify the map image. The experiment proves that these features are effective for automatic recognition of map images. Combined with multi-kernel support vector machine, the accuracy of map image recognition is improved.

Key words: map image; auto-recognition; feature extraction; color histogram

0 引 言

互联网的出现,使得地图的传播方式不再局限于纸质,它可以通过互联网瞬间输送给使用互联网的每一位用户^[1-2]。目前,网络图片数据数量呈爆炸式增长,使得地图图片的搜寻变得相对困难。因此,从大量网络图片中筛选出所需的地图图片数据是互联网地图监管工作的重要环节之一^[3-4]。

网络地图图片是地图的一种新型的存在方式,与普通的图片相比,存在着比较大的差异。地图图片的设计要遵循一定的原则^[5]。相对于普通的图片来说,网络地图图片存在着点、线等符号特征,线状符号一般用来表示铁路、河流、高速公路等,点状符号通常用来表示城市公共设施等^[6]。在视觉认知上,地图图片的颜色通常呈现出区域性分布,地图图片中森林、农业用地等一般用绿色来表示,水系通常用蓝色来表示^[7]。在行政区域用色方

收稿日期: 2018-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目——解决地图要素空间冲突的智能化协同模型和算法(41871378, 41471384) 资助

作者简介: 王雪冰(1995-) 男,河南周口人,地图学与地理信息系统专业硕士研究生,主要研究方向为图像分类与识别、WebGIS 与 GIS 工程。

通讯作者: 郭庆胜(1965-) 男,湖北黄石人,博士生导师,教授,博士,1998年毕业于武汉测绘科技大学地图制图专业,主要从事地图智能化设计与综合、地理空间推理、地理信息智能化处理与可视化、WebGIS 与 GIS 工程、互联网地理信息融合等应用研究工作。

面,用色种类相对一般的图片而言也较少,为了视觉上容易区分出相邻的地图要素,往往它们的视觉感受差异比较大^[8]。

图片识别与分类的算法有很多,目前常用的模型是支持向量机(Support Vector Machine, SVM)^[9-10]。近年来许多学者利用支持向量机在图片分类和识别方面进行了成功的应用,并表明颜色特征和纹理特征对于图片分类和识别方面具有重要的影响^[11-12]。在此基础上,本文提取出地图图片的颜色特征和纹理特征后,针对不同特征在不同的核函数下训练出基 SVM,并通过网格搜索方法找出最优参数,然后将得到的学习能力最好的基 SVM 进行线性加权组合形成多核 SVM,用于地图图片的识别。

1 特征提取

1.1 颜色特征

网络图片的颜色是基于像素点,颜色特征对于图片本身的尺寸、方向、视角等的依赖性较小,具有较好的旋转不变性和尺度不变性^[13]。网络图片常用的颜色空间有很多,如 RGB、HSV、L* a* b 以及 CMY 等。网络图片在电脑屏幕上都是用基于 RGB 颜色空间显示,所以本文选取的是 RGB 颜色空间^[14]。

地图图片给用户的第一印象是色彩效果,是因为地图图片各面状符号之间的色彩对比强烈,且每一个面状符号颜色保持一致性。另外,地图图片中,点状符号和线状符号的颜色也与面状符号的颜色有较大的反差^[15]。对于地图图片颜色特征的描述,可利用归一化颜色局部累积直方图^[16]。在 RGB 颜色空间中,可以分别从 R、G、B 三个颜色通道直接建立相应的颜色直方图用于统计描述图片颜色特征。由于每个色道的值范围都是在 [0, 255] 之间,如果不进行适当的降维则会有共 768 维特征,而且不能保证每个色道出现零值,在程序运行时,会导致机器运算量过大、运行效率低下。归一化颜色局部累积直方图是通过将颜色空间尽心近似色区间划分,然后将色区频率归一化后进行累积直方图法提取,减少统计直方图中出现零值的可能,降低特征值的维度,减少机器的计算量。另外,统计 R、G、B 三色道的均值、中值、标准差用于反映颜色值的集中趋势和离散程度。

1.2 纹理特征

彩色图片变换成灰度图后,灰度图片的灰度值值域是 [0, 255],每一种颜色对应于一个灰度级,对于图片像素点灰度值交替变化的描述即是图片的纹理特征。彩色地图图片转化成灰度地图图片后,相对于其他种类灰度图片,其纹理特征也会呈现出一些独有的特征:在不同面状符号连接处、面状符号与线状符号之间、面状符号与点状符号之间、不同线状符号连接处、线状符号与点状符号之间以及不同点状符号之间纹理上会发生剧烈的变化。因此,本文认为地图图片的纹理特征可以从纹理变化分布情况、纹理变化有序程度、局部纹理变化程度、纹理变化走向等方面进行考虑。

局部二值模式(Local Binary Pattern, LBP) 是一种用来描述图片局部纹理特征的算子,反映的是图片每一个像素点与周围像素点关系的特征,用于辅助图片局部对比度。局部二值模式的基本思想^[17]是:首先将每个像素与周围像素灰度值的大小进行比较,计算出图形的模式,最后再统计图片不同模式出现的次数用来表达图片的纹理特征,是统计法和结构法的结合。

灰度共生矩阵(Gray-level Co-occurrence Matrix, GLCM) 是基于统计分析方法,用于描述纹理特征的常用算子之一,是一种与像素的距离和角度相关的矩阵函数,能反映出图片在一定距离、一定角度等条件下纹理的变化幅度以及变化速率。灰度共生矩阵直接使用,数据维度会过大,一般是基于灰度共生矩阵进行二次统计获取其特征量。因此,结合前人的研究成果,本文选取了以下 4 个灰度共生矩阵特征量:角二阶距、熵、对比度以及相关性^[18]。角二阶距(Angular Second Moment, ASM) 反映了图片灰度的分布状况、纹理粗细程度以及结构特征等;熵(Entropy) 是对一个系统混乱程度的度量,可以反映一个系统的结构是否有序;对比度(Contrast) 又称为反差,是用来度量矩阵中值的分布情况以及图片的局部变化状况,能够反映出图片纹理的沟纹深浅以及图片的清晰度;相关性(Correlation) 主要是度量图片中灰度共生矩阵在横向或者竖向上的相似程度,能较好地反映出一个图片中局部的灰度相关程度。

2 支持向量机

支持向量机是建立一个最优分类的超平面,并且使得这个平面两侧的支持向量距离该平面的距离最大化,为分类问题提高良好的泛化能力^[19]。对于一个训练样本集:在线性可分情况下,直接从原空间寻找两类样本的最优分类超平面即可。在线性不可分的情况下,会先将数据从低维空间利用某种非线性方法转换到高维空间中,使得数据变成线性可分的状态,最后在高维空间中寻找数据的最优分类超平面即可。

支持向量机最大的优点就是通过核函数的引入,将输入空间中的线性不可分问题转化为高维空间中的线性可分问题,极大地提高了学习机器的非线性问题处理能力^[20]。高维空间的所有向量的内积运算都是通过原空间中的核函数来完成的,不需要直接利用映射后的样本在高维空间中进行复杂的运算,只是通过改变内积运算,并没有增加算法复杂度。常用的核函数有:线性核函数、RBF 核函数、Poly 核函数。线性核函数,主要用于线性可分的情况,其特征数据输入的空间维度并没有发生变化,其参数少并且处理的速度快,对于线性可分的数据,分类的效果很理想。RBF 核函数是一种局部性强的核函数,可以将一个样本映射到一个更高维的空间内,RBF 核函数是应用最广的一个核函数,无论大样本还是小样本都有比较好的性能,而且相对于多项式而言核函数参数要少。多项式核函数同样也可以实现将低维数据映射到高维的特征空间,但是多项式核函数的参数较多。当多项式的阶数比较高的时候,核矩阵的元素值将趋于无穷大

或者无穷小,计算复杂度会大到无法计算。在提取地图图片的颜色特征和纹理特征后,分别获得归一化颜色局部累积直方图、归一化 LBP 算子和局部共生矩阵特征量。由于提取的不是同一特征,同一特征提取的算子也不同,所以不能保证获取的算子都适合同一个核函数的 SVM 分类器。

多核 SVM (Multiple Kernel Learning Support Vector Machine, MKL-SVM) 的基本思想是^[21-22]: Mercer 定理及其性质下,核函数可以进行一定方式的组合,其结果仍然是一个核函数。假设在一个 $X \times X (X \subseteq R_m)$ 的空间,有核函数 $K1(x, z)$ 和 $K2(x, z)$, 则式(1)~式(3)公式同样为核函数:

$$K(x, z) = K1(x, z) + K2(x, z) \quad (1)$$

$$K(x, z) = K1(x, z) K2(x, z) \quad (2)$$

$$K(x, z) = \alpha K1(x, z) \quad (3)$$

挑选适合的核函数能够提高分类器的泛化能力,本文是通过训练多个基分类器进行加权构造出混合核函数。见公式(4):

$$K(x, z) = \sum_i d_i K_i(x, z) \quad d_i \geq 0 \quad \sum_i d_i = 1 \quad (4)$$

式中 d_i 是权重系数; K_i 是基核函数。本文通过对不同的特征算子利用不同核进行训练,通过网格搜索寻找最优参数,获得各个算子再不同核 SVM 分类器下的识别能力,挑选出识别准确率最高的核 SVM,通过识别准确率比值为各个核 SVM 赋予权值,最终组合形成一个多核 SVM。

3 实验与分析

本文硬件实验环境是 Windows10 系统,处理器是 Intel (R) Core (TM) i7-7700 CPU @ 3.60 GHz 3.60 GHz; 内存为 16 G; 系统类型为 64 位操作系统。软件环境为 Pycharm 2017.3.3 (Community Edition), 所用的机器学习库是 scikit-learn 0.19.1 版本。

3.1 实验数据

本实验数据是从网络爬取的。在获取的大量图片数据中,以人工方式从中挑选出地图图片和非地图图片数据各 200 张作为训练数据集,其中地图图片选取了普通地图和专题地图各 100 张,非地图图片挑选植物图片、风景图片、动物图片、人物图片等各 50 张,选取的图片均是 jpg 格式。提取特征时,地图图片标签定为“1”,非地图图片标签定为“-1”。对于最终组合的多核 SVM 分类器,另外在网络随机选取 2 500 张图片,其中地图图片 500 张,植物图片 500 张,风景图片 500 张,动物图片 500 张,人物图片 500 张。图 1 是使用图片数据的样本例图。



图 1 样本数据示例

Fig.1 Examples of the sample data

在颜色特征方面,本文提取出 R、G、B 三色道的均值、中值、标准后,再将各色道均匀分成 8 个区域块,每个区域块有 32 个颜色值,最终统计形成归一化颜色局部累积直方图。量化 R、G、B 各颜色通道的公式见式(5)~式(7):

$$R = \{R_i | r[i \times 32 : (i+1) \times 32]\} \quad (5)$$

$$G = \{G_i | g[i \times 32 : (i+1) \times 32]\} \quad (6)$$

$$B = \{B_i | b[i \times 32 : (i+1) \times 32]\} \quad (7)$$

式中 R_i, G_i, B_i 为各色道颜色直方图第 i 个区域块, $i \in [0, 1, \dots, 7]$; r, g, b 为各色道像素的值。

图 2 是以训练样本示例的颜色特征提取结果。在图 2 中,每幅图的并列柱状图左侧是地图图片的特征统计数据,右侧是非地图图片的特征统计数据。图 2(a)~2(c) 中显示,从均值和中值图上发现,地图图片各色道颜色值均聚集在较高颜色值区,非地图图片的各色道颜色值大多处于中低颜色值区;标准差反映地图图片的变化较非地图图片更为剧烈;如图 2(d)~2(f) 所示,地图图片的 R、G、B 色道的值分布两端极化, R 色道和 G 色道的高颜色值区远远高于其他颜色区域, B 色道的颜色值分布相对均匀,整幅图中低颜色值较少。而非地图图片的颜色值区分布较为均匀, R 色道和 G 色道的颜色值大都分布在中间区域, B 色道的低颜色值区远远高于其他颜色值区。总体而言,地图图片的颜色值分布分布更为极化,颜色值大都分布在高颜色值区,颜色变化相对非地图图片更为剧烈,说明地图图片用色上更偏向于浅色,且颜色使用上对比强烈。因此,文本选取颜色特征,并利用归一化颜色局部累积直方图以及各色道的均值、中值和标准差作为对颜色特征的描述。

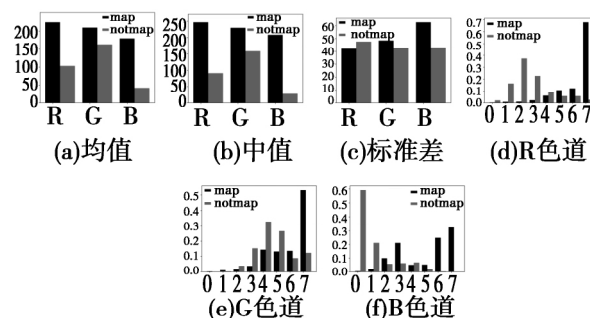


图 2 示例数据颜色特征训练展示图

Fig.2 Graph of color features training for the sample data

在 LBP 特征提取方面,本文先将彩色图片处理成灰度图片,然后进行 LBP 特征提取,建立频率直方图用于统计各灰度值的出现频率,最后将频率直方图划分为 16 个区域块并进行归一化,得到归一化 LBP 累积直方图。

图 3 是训练样本示例的 LBP 算子提取结果,数据反映地图图片的 LBP 值两端分布较高,中部区域分布较少,在低值区域和高值区域分布的 LBP 值远高于其他区域。非地图图片的 LBP 值分布相对地图图片来说更均等化,其不仅在两侧值区有较多的 LBP 值,在中部区域同样也有相当的 LBP 值。综上所述, LBP 算子能较好地对比点状

符号、线状符号和面状符号边缘交界交会处进行描述。所以,本文选取 LBP 作为描述地图图片纹理特征的算子之一。

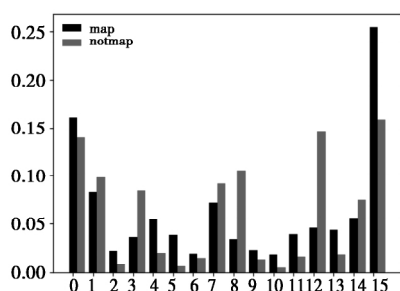


图3 示例数据 LBP 特征训练展示图

Fig.3 Graph of LBP features training for the sample data

在 GLCM 特征方面,本文先将彩色图片处理为灰度图片,然后提取出 0° 、 45° 、 90° 、 135° 等 4 个方向的灰度共生矩阵,最后根据灰度共生矩阵计算角二阶矩、熵、对比度和相关性。

图 4 是训练样本示例的 GLCM 特征量提取结果。图 4(a) 所示,地图图片的 ASM 值在 4 个方向均远大于非地图图片的 ASM 值,即地图图片的图片灰度分布变化比非地图图片的变化更为剧烈;图 4(b) 所示,地图图片熵值在 4 个方向上与地图图片相差不大,说明地图图片和非地图图片的结构有序程度相似;图 4(c) 所示,地图图片的 CON 值远大于非地图图片的 CON 值,反映出地图图片在 4 个方向上的局部纹理变化程度强烈于非地图图片;图 4(d) 所示,地图图片和非地图图片的 COR 值相差不大,说明它们的一致性程度相似。综合分析认为,灰度共生矩阵的 ASM、ENT、CON、COR 特征量,对地图图片的纹理变化分布情况、纹理变化有序程度、局部纹理变化程度、纹理变化走向等方面具有良好的表达能力。因此,本文选取灰度共生矩阵的角二阶矩、熵、对比度和相关性等 4 个特征量作为地图图片纹理描述的算子。

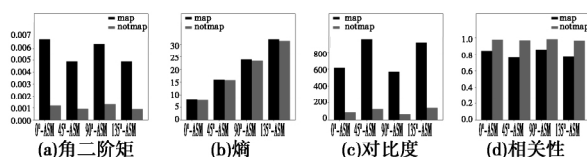


图4 示例数据 GLCM 特征训练展示图

Fig.4 Graph of GLCM features training for the sample data

3.2 实验结果分析

本文通过网格搜索方法来确定 C 和 $gamma$ 两个参数以获得最优识别率,并将 C 参数范围设定为 $[1, 10, 100]$; $gamma$ 参数范围设定为 $[10, 1, 0.1, 1e-2, 1e-3, 1e-4, 1e-5]$ 。

在利用地图图片训练基分类器的过程中,用网格搜索筛选参数,参数方案选择如下:在颜色特征训练分类器

时, C 值为 10; RBF 和 Poly 核函数时, $gamma$ 值为 $1e-04$ 。在 LBP 特征训练分类器时, C 值为 100; RBF 和 Poly 核函数时, $gamma$ 值为 10。在 GLCM 特征训练分类器时, C 值为 10; RBF 和 Poly 核函数时, $gamma$ 值为 $1e-05$ 。

由表 1 可知:以颜色特征训练的基 SVM 在 RBF 核函数以及 Poly 核函数条件下,准确率都是 92.5%,低于 Linear 核函数条件下的准确率 93.75%;以 LBP 特征训练的基 SVM 在 Linear 核函数条件下准确率为 83.75%,在 RBF 核函数和 Poly 核函数条件下,准确率都是 90%。但 RBF 核函数下耗时最少,性能更好一些。以 GLCM 特征训练的基 SVM 在 RBF 核函数和 Poly 核函数的条件下,准确率都是 85%,低于 Linear 核函数条件下的 87.5%。但是在 Linear 核函数下,其耗时过大,这样地图图片识别效率不高,所以还是选择 RBF 核更为合适。

表 1 基 SVM 实验数据

Tab.1 Experimental data for based-SVM

分类方法	维数	核函数	测试集准确率(%)
颜色特征	33	Linear	93.75
	33	RBF	92.5
	33	Poly	92.5
LBP 特征	16	Linear	83.75
	16	RBF	90
	16	Poly	90
GLCM 特征	16	Linear	87.5
	16	RBF	85
	16	Poly	85

本文将颜色特征、LBP 特征以及 GLCM 特征融合在一起成为一个 65 维的特征集合。选择的 C 为 10, $gamma$ 为 $1e-05$ 。由表 2 可知,在 Linear 核函数和 Poly 核函数条件下,准确率分别是 82.91% 和 83.42%,低于以 RBF 核函数为条件的 94.47%。

通过对颜色特征、LBP 特征以及 GLCM 训练出的基 SVM 准确率进行比较后,选择出最优的分类器作为基分类器,分别是:1) 以颜色特征为训练基础、Linear 为核函数的 SVM; 2) 以 LBP 特征为训练基础、RBF 为核函数的 SVM; 3) 以 GLCM 特征为训练基础、RBF 为核函数的 SVM。表 2 所示的用得到的 MKL-SVM 进行测试,所得到的准确率为 95.98%。

表 2 多特征融合 SVM 与多核 SVM 实验数据表

Tab.2 Experimental data of multi-feature fusion based on SVM and MKL-SVM

分类方法	维数	核函数	测试集准确率(%)
多特征融合 SVM	65	Linear	82.91
	65	RBF	94.47
	65	Poly	83.42
多核 SVM		混合核	95.98

4 结束语

结合地图图片的特点,本文提取地图图片的特征如下:1)归一化颜色局部累积直方图以及三色道的均值、中值和标准差;2)地图图片的归一化 LBP 累积直方图;3)地图图片 GLCM 的角二阶矩、熵、对比和相关性等 4 个特征量。图片识别算法方面是用已有的 SVM 算法,通过网格搜索算法找出最优的单一核 SVM 之后,进行线性加权组合将多个单一核 SVM 组合形成多核 SVM,进而判断图片是否为地图图片。

由试验数据可知,多特征融合 SVM 在地图图片分类方面准确率最高是 RBF 核函数下达到 94.47%。而多核 SVM 准确率可达到 95.98%,相比多特征融合 SVM 提高了 1.51%。

参考文献:

- [1] 王家耀.关于信息时代地图学的再思考[J].测绘科学技术学报,2013,30(4):329-333.
- [2] Michael P P,金君.地图和因特网[J].测绘通报,2000(12):36-37.
- [3] 韩权卫.关于建立国家互联网地图和网络地理信息服务监管平台的构想[J].测绘与空间地理信息,2009,32(6):70-73.
- [4] 陈万志,刘纪平,王勇.互联网地理信息安全监管平台架构研究[J].测绘通报,2011(8):73-75.
- [5] 徐德军,杜清运,钟美.网络地图设计的技术方法[J].测绘科学,2007,32(3):153-155.
- [6] 黄龙.一种快速挖掘互联网问题地图图像的方法[J].测绘与空间地理信息,2017,40(11):92-93.
- [7] 曹一冰,付洪贝,潘志超.地图设计中的美学研究[J].测绘与空间地理信息,2011,34(1):231-233.
- [8] 陈毓芬,廖克,江南.网络地图的设计原则[J].地理科学进展,2001,20(s1):78-87.
- [9] 张淑雅,赵一鸣,李均利.基于 SVM 的图像分类算法与

实现[J].计算机工程与应用,2007,43(25):40-42.

- [10] Huang J, Kumar S R, Zabih R. An automatic hierarchical image classification scheme[C]//ACM International Conference on Multimedia. ACM, 1998.
- [11] 王养廷.基于 SVM 的遥感图像自动分类研究[J].计算机仿真,2013,30(6):378-381.
- [12] Manjunath B S, Ohm J R, Vasudevan V V, et al. Color and texture descriptors[J]. Circuits & Systems for Video Technology IEEE Transactions on, 2001, 11(6):703-715.
- [13] 周美丽.基于三种颜色分量归一化累积直方图的图像检索系统设计[J].电子测试,2014(5):9-10.
- [14] Luo Y, Wu C M, Zhang Y. Facial expression recognition based on fusion feature of PCA and LBP with SVM[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(17):2767-2770.
- [15] 宋克臣,颜云辉,陈文辉,等.局部二值模式方法研究与展望[J].自动化学报,2013,39(6):730-744.
- [16] Singh D, Kaur K. Classification of Abnormalities in Brain MRI Images Using GLCM, PCA and SVM[J]. International Journal of Engineering & Advanced Technology, 2012(6):243-248.
- [17] 贾永红.数字影像处理[M].武汉:武汉大学出版社,2003.
- [18] Vladimir N. Vapnik. 统计学习理论[M].北京:电子工业出版社,2015.
- [19] Cristianini N, Taylor J S. 支持向量机导论[M].李国正,王猛,曾华军,译.北京:电子工业出版社,2004.
- [20] 汪廷华,陈峻婷.核函数的选择研究综述[J].计算机工程与设计,2012,33(3):1181-1186.
- [21] Hu H. A classification method of online reviews based on MKL-SVM[J]. Computer Era, 2012.
- [22] 刘冰,吴超,林怡.混合核特征加权 SVM 遥感湿地空间分类[J].测绘工程,2016,25(7):13-17.

[编辑:任亚茹]

(上接第 27 页)

- [4] 刘胜旋,张瑶,马金凤,等.多波束测深成果精度评估方法探讨[J].海洋测绘,2016,36(5):36-39.
- [5] 钟雨轩,葛磊,张鑫,等.无人水面艇岛礁海域完全遍历路径规划[J].上海大学学报,2017,23(1):17-26.
- [6] 黄贤源,陆秀平,邓凯亮,等.无人水面测量艇技术研究(二):测量设备加装及无线数据传输技术[J].海洋测绘,2016,36(3):32-36.
- [7] 万磊,曾文静,秦再白,等.海面目标自适应实时检测[J].上海交通大学学报,2012,46(9):1421-1427.
- [8] 杨瑞庆,徐海潮.基于 RTK 和无人艇的内河固定断面测量系统设计[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2014,38(1):236-240.
- [9] 于灏,王培刚,段康弘,等.合成孔径声呐技术在海底管道探测中的应用进展[J].海洋测绘,2015,35(3):

20-23.

- [10] 黄辰虎,陆秀,欧阳永忠,等.多波束水深测量误差源分析与成果质量评定[J].海洋测绘,2014,34(2):1-5.
- [11] 孔庆福,吴家明,贾野,等.USV 发展现状及展望[J].中国造船,2014,55(4):194-205.
- [12] 张树凯,刘正江,张显库,等.无人船艇的发展及展望[J].世界海运,2015,38(9):29-36.
- [13] 徐玉如,苏玉民,庞永杰.海洋空间智能无人运载器技术发展展望[J].中国舰船研究,2006,1(3):1-4.
- [14] 金久才,张杰,邵峰,等.一种海洋环境监测无人船系统及其海洋应用[J].海岸工程,2015,34(3):87-92.
- [15] 张福民,张勇.近期海洋综合调查船总体设计若干问题分析[J].船舶科学技术,2014,36(增刊1):25-31.

[编辑:刘莉鑫]