

文章编号 1004-924X(2017)增-0205-10

基于 F-B 模板的遥感图像港口高精度分割提取

杨 淼, 沈 沉, 高志升*

(西华大学 计算机与软件工程学院, 四川 成都 610039)

摘要:港口内舰船检测精度极度依赖于港口海陆分割的效果,港口内舰船停靠常常与岸堤相连,为降低港口分割检测难度,依据港口遥感图像特点,提出了一种港口高精度分割提取算法。首先通过遥感图像数据包含的经纬度坐标大致定位感兴趣的港口区域,然后依据港口对应的 F(Feature)模板完成检测图像到 B(Binary)模板的精确配准,最后根据 B 模板完成港口高精度分割提取。本文结果图像与模板图像大小、方向一致,具有精确的海陆分割,更有利于后续港口内舰船的高精度检测与识别。通过多组港口遥感图像进行实验,结果表明,与主流港口分割提取算法 MLE、OTSU、Mean-shift、LBE 和 LBP 相比,本文算法具有最高的港口分割检测精确度,无论是客观评价还是主管评价都优于同类方法,RUMA 评价指标相比同类方法取得显著提高,多组实验相比当前最好方法平均提高 2.5 倍。

关键词:港口分割提取;港口先验;F-B 模板;模板配准

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172513.0205

High-precision segmentation extraction of harbor in remote sensing images based on F-B template

YANG Miao, SHEN Chen, GAO Zhi-sheng*

(School of Computer and Software Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

* Corresponding author, E-mail: gzs_xihua@mail.xhu.edu.cn

Abstract: Detection precision of ship in harbor was extremely dependent on the effect of sea-land segmentation in the harbor. Docking of ships in the harbor was usually connected with embankment, which increased the difficulty of harbor segmentation and detection. A high-precision segmentation extraction algorithm of harbor was proposed according to remote sensing image features of the harbor. Interested harbor areas were roughly located by latitude and longitude coordinates contained in remote sensing image data, and then accurate registration from detection image to B (Binary) template was finished according to corresponding F (Feature) of harbor; finally, high-precision segmentation and extraction of harbor was finished according to B template. Resulting images in the thesis were consistent with size and direction of template images, had accurate sea-land segmentation and were more beneficial to high-precision detection and recognition of ships in subsequent harbors. Through experiment by multiple groups of remote sensing images of the harbor, the result shows that algorithm in the the-

收稿日期:2017-06-01;修订日期:2017-06-19.

基金项目:宇航动力学国家重点实验室开放基金资助项目(No. 2015ADL-DW0302);教育部春晖计划资助项目(No. Z2016149)

sis has the highest segmentation detection precision of harbor compared with segmentation extraction algorithm of mainstream harbor such as MLE, OTSU, Mean-shift, LBE and LBP and it is superior to other similar methods in both objective evaluation and subjective evaluation. RUMA evaluation index is improved significantly compared with other similar methods, and the best method at present has increased by 2.5 times at average compared with multiple groups of experiments.

Key words: harbor segmentation extraction; harbor priori; F-B template; template registration

1 引言

港口是重要的军事和民用建筑,是卫星遥感图像海洋应用研究的重要方面,准确、高效地在遥感图像中自动提取港口区域,对军事斗争和航运服务都具有重要的现实意义^[1]。港口内舰船目标、数量变化检测在港口交通的监管、海船调度、渔业管理、打击走私、海上舰船动态检测与跟踪、军事活动行为分析等方面有着重要的应用价值,因此越来越多的国家利用卫星遥感数据对重点港口进行监控,相关研究也越来越受到重视^[2]。然而港口内舰船目标的准确检测十分复杂和困难,其检测精度受到成像条件、遥感图像噪声和天气等多种因素的影响。然而,最重要的是港口内舰船与岸堤、码头紧密相连,在遥感成像中,舰船与码头、突堤在颜色分布和纹理特征上都极为相似,传统的方法很难将舰船区域从背景图像中分离出来^[3]。因此需要一种方法能够准确地分割提取港口海域区域、港口岸堤、突堤区域,完成海陆分离,避免陆地建筑对舰船检测的影响。

近年来,针对遥感图像进行港口检测的问题,国内外学者进行了一系列相关研究,这些方法概括起来主要可以分为两类:未知港口检测,已知港口定位分割提取。未知港口检测是指在包含海岸线的遥感图像中自动检测识别港口区域,这一类方法主要是根据港口是人工建筑的特点,提取港口几何特征,沿海岸线搜索检测港口。文献^[4]根据防波堤呈圆弧状的特点,提出一种基于并行曲线特征的港口检测方法。陈琪^[1,5]等人通过建立港口目标先验知识库,根据知识库规则进行港口检测。文献^[6]采用水平集分割提取海岸线,并通过数字曲线分裂归并算法提取岸线轮廓特征点,从而实现港口检测。文献^[7]利用港内水域半封闭的特点,根据突堤代表点间海岸线的封闭性测

度鉴别港口;已知港口检测是指在新观测的遥感图像中,对感兴趣的、已知的港口,准确进行港口内海域分割提取,港口岸堤、突堤和防波堤等关键部件的准确定位。当前研究主要集中在港口内海域的准确提取,研究方法主要分为两类:一是通过图像分割算法提取港口内海域,二是通过港口先验知识进行海陆分割。分割方法进行港口海陆分离,代表性的方法包括基于直方图分割的方法^[8-9],OSTU 分割方法^[10-11],水平集分割方法^[12],局部特征方法 LBP^[13]和统计学习方法^[14]等。港口一旦竣工,其周围的分布情况相对比较稳定,短时间内不会发生变化,据此,可根据港口海岸线或背景图像等先验知识,通过模板匹配来实现海陆分离^[15-16]。

现存方法中,对未知港口的检测方法仅能完成对港口位置的粗略定位,难以获得港口各组成单元的准确位置和边界。已知港口内海陆分割,功能单元准确定位的方法主要出现在舰船检测的论文中,没有作为重点研究,现有方法存在精度低、容易受到噪声影响等问题,对舰船和岸堤或突堤粘连的情况,不能有效区分舰船和陆地建筑,这极大影响了港口内舰船的精度。本文提出一种港口高精度精确分割提取方法,通过已知港口信息和已有遥感数据构造港口标准模板,新的观测图像自动与模板进行配准,通过标准模板准确提取港口内海域。本文提取的港口海域图像完全剔除了陆地及地面建筑的影响,提取图像仅仅包含舰船和海水背景,为港口内舰船的精确检测奠定了基础。本文的主要贡献有:(1)两阶段检测算法,通过遥感图像包含的经纬度坐标信息完成感兴趣港口的粗检测,在此基础上精确完成港口海域分割提取;(2)F-B 双模板精确海陆分割,所检测港口新图像具有模板图像一样的方向和几何尺度,更有利于确定港口内舰船的方向和尺寸,从而更有利于港口内舰船的精确检测。

2 F-B 双模板构建方法

2.1 F 模板

F 模板 (Feature Template) 是根据感兴趣港口标准图像提取代表性的特征点, 所有特征点及其描述构成的特征点集称为 F 模板。怎样在标准图像和检测图像中提取稳定可靠的关键特征点是 F 模板构建的关键。

遥感图像成像距离远, 容易受天气、传感器噪声等因素影响, 造成图像退化严重。SIFT^[17-18] 算法应用于多源遥感影像配准时面临低效率和高误匹配问题。在低质量图像情况下提取特征点, 采用局部区域代替像素点能获得更好的鲁棒性, 本文采用 Flora Dellinger 等人提出的 SAR-SIFT^[19] 关键点检测算法提取特征点集。

SAR-SIFT 对传统 SIFT 最主要的改进是重新定义了梯度的计算方法, 新的梯度计算方法对斑点噪声鲁棒。其算法核心在于将均值比率算子 (Ratio of Average, ROA) 改进为梯度比率算子 (Gradient Ratio, GR), 后将之应用于 Harris 函数的构建中, 并使用指数加权滤波替代高斯核, 形成多尺度 SAR-Harris 特征检测函数, 最后结合 SIFT 描述子, 构成 SAR-SIFT 特征。梯度比率算子源于 1988 年 Touzi 等提出的 ROA^[20], 其原理如图 1 所示。

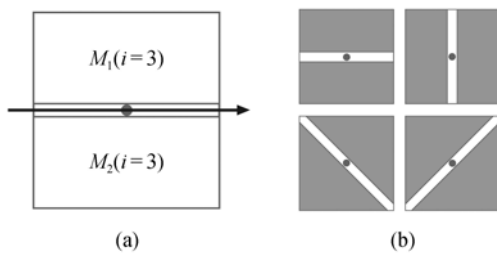


图 1 ROA 算子图例
Fig. 1 Example of ROA

图 1(a) 表示当方向 $i=3$ 时, ROA 对应于垂直方向上的局部均值比, (b) 图分别对应 $90^\circ, 0^\circ, 45^\circ$ 及 135° 等 4 个主要方向的均值比。

沿方向 i 的 ROA 算子计算如下:

$$R_i = \frac{M_1(i)}{M_2(i)}, \quad (1)$$

其中 $M_x(i)$ 表示为目标像素一侧局部的均值和,

R_i 表示目标像素一侧与另一侧的局部均值比, 其具体方向跟随 i 的相应取值。

随后, 于 1998 年 Fiortoft 等提出指数加权均值比率算子 (Ratio of Exponentially Weighted Averages, ROEWA)^[21], 在局部均值比的计算中加入指数权重, 是其具有更好的性能, 以垂直方向 ($i=3$) 为例, 具体计算如下:

$$\begin{cases} M_{1,\alpha}(i=3) = \int_{x=R_y=R^+} \int I(a+x, b+y) \times e^{-\frac{|x|+|y|}{\alpha}} \\ M_{2,\alpha}(i=3) = \int_{x=R_y=R^-} \int I(a+x, b+y) \times e^{-\frac{|x|+|y|}{\alpha}} \end{cases}, \quad (2)$$

其中, α 为指数加权系数, R 为选择具体范围数值, 其 $+$ 分别表示对立两侧。则结合公式 (1)、(2) 可知, 对于点 (a, b) , R_3 就是其上边局部区域的加权和除以下边局部区域的加权和。

定义水平及垂直梯度如下:

$$\begin{aligned} G_{x,\alpha} &= \log(R_{1,\alpha}), \\ G_{y,\alpha} &= \log(R_{3,\alpha}). \end{aligned} \quad (3)$$

定义梯度方向及幅值如下:

$$\begin{aligned} G_{n,\alpha} &= \sqrt{(G_{x,\alpha})^2 + (G_{y,\alpha})^2}, \\ G_{t,\alpha} &= \arctan\left[\frac{G_{y,\alpha}}{G_{x,\alpha}}\right], \end{aligned} \quad (4)$$

其中, α 同上述 ROEWA 相同, 均为局部均值指数加权系数。

由于加权系数 α 的存在, 可用于不同尺度上平滑图像, 即这种梯度可类似于高斯差分梯度使用, 结合基于一阶导数的多尺度 Harris 函数, 便形成了新的多尺度 SAR-Harris 函数, 如下:

$$\begin{aligned} C_{SH}(x, y, \alpha) &= \\ G_{\sqrt{2}\sigma} * \begin{bmatrix} (G_{x,\alpha})^2 & (G_{x,\alpha}) \cdot (G_{y,\alpha}) \\ (G_{x,\alpha}) \cdot (G_{y,\alpha}) & (G_{y,\alpha})^2 \end{bmatrix} \\ R_{SH}(x, y, \alpha) &= \\ \det(C_{SH}(x, y, \alpha)) - d \cdot \text{tr}(C_{SH}(x, y, \alpha))^2, \end{aligned} \quad (5)$$

其总体构成类似 Harris 函数, 其中 $G_{\sqrt{2}\sigma}$ 表示标准差为 $\sqrt{2} \cdot \sigma$ 的高斯核函数, $*$ 表示卷积操作, d 为经验参数。

此算法将原始图像经多尺度操作 ($\alpha_m = \alpha \cdot c^m, m \in [0, 1, \dots, m^{\max} - 1]$) 后, 构建尺度空间, 后使用上述公式形成多尺度 SAR-Harris 函数。令

每一尺度的极值点为候选关键点,并使用极值点领域双线性插值使其位置精确化,通过使用经验参数 d 来祛除强度较弱的点,最终得到效果较好的关键点坐标及其对应尺度,表示为 $p(x, y, \alpha)$ 。后续通过采用 SIFT 描述子等描述子提取步骤,构建 SAR-SIFT 描述算子,表示为 $p = f(x, y, \alpha, d)$,其表示关键点 p 的坐标 (x, y) ,尺度 α ,及其描述算子 f 。

通过对港口标准图像使用 SAR-Harris 算法进行特征点提取,选择一批具有代表性的特征点作为港口图像配准模板数据,可表示为:

$$F = \{p_1, \dots, p_N\}, \quad (6)$$

其中 p_i 表示第 i 个特征点数据, N 表示该港口图像配准模板包括的特征点的总数。一个特征点数据 p_i 表示为:

$$p_i = ((la_i, lo_i), (c_x, c_y), (s_i, \theta_i), (f_i^1, \dots, f_i^m)), \quad (7)$$

其中, (la_i, lo_i) 表示该点的经纬度坐标, (c_x, c_y) 表示该点在模板样例图像中的图像像素坐标, (s_i, θ_i) 表示该特征点的尺度和方向, (f_i^1, \dots, f_i^m) 表示特征点的特征向量。

港口图像 F 模板建立流程图如图 2 所示,具体步骤如下:

Step 1: 从历史数据中挑选出感兴趣的港口图像,切出感兴趣的港口区域图像,构建港口标准图像;

Step 2: 使用关键特征点检测器,对港口标准图像提取图像关键点特征;

Step 3: 挑选最具有代表性的 N 个特征点,计

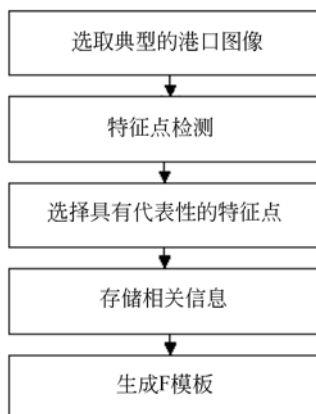


图 2 F 模板建立流程

Fig. 2 Flow chart of F template

算该点的特征描述算子;

Step 4: 依次存入 N 特征点的相关信息作为该港口的 F 模板。

2.2 B 模板

港口二值模板主要目的是航天侦察图像港口海域的提取及二值化。其创建方法是首先对上步中使用的港口标准切片图像,剔除港口内所有靠岸舰船,对图像进行二值化,海域部分灰度置位 0,陆地建筑部分灰度置为 255。一个感兴趣港口的 B 模板如图 3 所示,左侧为某港口的切片图像,右侧为该切片图像对应的 B 模板。

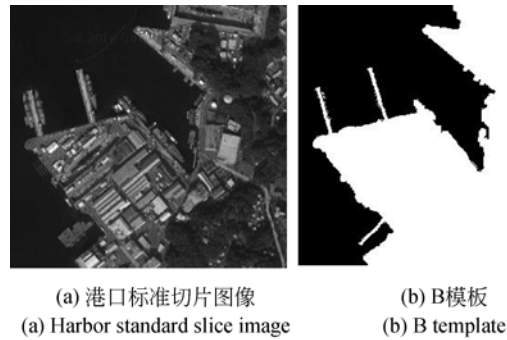


图 3 某港口标准图像和 B 模板

Fig. 3 Standard image and B template of a harbor

3 基于 F-B 模板港口高精度分割提取

由于港口在一定时间内的不变性,以及地域性限制,可以通过目视读译完成港口图像先验信息的获取,为目标港口的定位、区域提供便捷的方式。所以结合港口先验信息,可以首先将待分割图像和已知港口信息进行关联,通过经纬度信息完成港口的粗略配准。这大大减少了算法后续步骤的搜索空间,提高了算法的可用性。在此粗略配准的基础上,通过稳定的港口特征局部算子的提取完成港口模板与待处理图像的精确配准,准确提取港口的轮廓信息,达到高精度港口分割的目的,算法总体流程如图 4 所示,整个算法包括离线构建模板阶段和在线港口高精度分割提取阶段,遥感图像港口在线分割提取包括初检测、港口高精度配准和港口海域高精度提取几个阶段。

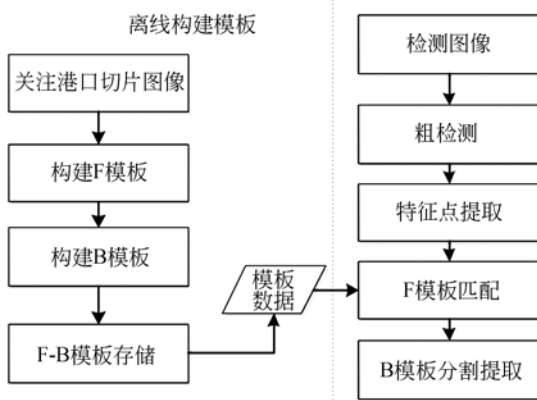


图 4 港口高精度分割提取算法流程

Fig. 4 Algorithm flow chart of high precision segmentation extraction for harbor

3.1 粗检测

航天侦察图像中包含图像数据的地理信息,包括选择的坐标系、地理变换模型,因此我们可以运用数据的经纬度信息和图像的坐标信息完成港口检测图像和模板图像的粗配准。

由于航天侦察图像通过星载传感器感知拍摄,其获得的经纬度具有一定的误差,从而导致通过经纬度信息完成的图像配准往往相差几个甚至几十个像素,因此需要通过图像中的特征点进行图像的高精度配准。

3.2 军港高精度配准

通过粗配准后,检测图像与模板数据已经基本配准,检测图像与模板数据在一定误差范围内拥有相同的尺度、角度和位置坐标。因此,我们可以从模板数据中一次取出特征点的信息,在检测图像给定的范围内搜索该特征点对应的匹配点。完成模板中所有特征点对应的匹配点搜索后,运用 SVD 分解^[22]的方法计算检测图像和模板数据精确的变换参数。整个算法过程如下:

Step 1 从对应军港的模板数据中取出一个特征点 p_i 。根据 p_i 中包含的坐标信息在测试图像中确定搜索范围 Ω_i ,搜索范围为 p_i 坐标为原点对应的以 R 为半径的外切矩形;

Step 2 在检测图像矩形区域 Ω_i 内计算与模板特征点 p_i 对应的特征点 q_i ,根据特征点匹配规则,如没有找到合适的匹配点,则忽略这一个特征点;

Step 3 重复步骤 1、2 直到处理完模板中所有的特征点,得到模板特征点集 $P = \{p_1, \dots, p_m\}$ ($m \leq n$) 和测试图像特征点集 $Q = \{q_1, \dots, q_m\}$ ($m \leq n$);

Step 4 通过 SVD 配准完成检测图像亚像素高精度配准^[22];

Step 5 对检测图像按照变换参数进行变换。

由于航天侦察图像的变换可以近似为仿射变换,所以我们在估计图像之间的变换模型参数时选择了仿射变换模型。该模型可以表示为:

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中, a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 b_1 和 b_2 为仿射变换参数, (x_i, y_i) 表示待配准航天侦察图像上所选取特征点的坐标, (x'_i, y'_i) 表示港口图像配准模板中对应的特征点的坐标。将检测图像和模板数据所有匹配的特征点坐标带入上式,进行迭代计算,求解出参考图像和待配准图像间的变换模型参数;

Step 6 求解出变换模型参数之后,就可以通过对检测图像进行重采样和插值,实现图像配准。本项目采用双线性插值法对待配准图像进行重采样,双线性插值法的计算式为:

$$\begin{aligned} f'(m, n) = & (1 - dx)(1 - dy)f(x_0, y_0) + \\ & dx(1 - dy)f(x_0 + 1, y_0) + \\ & (1 - dx)dyf(x_0, y_0 + 1) + \\ & dx dyf(x_0 + 1, y_0 + 1), \end{aligned} \quad (9)$$

其中, (x, y) 为检测图像 f 的坐标, (m, n) 为配准结果图像 f' 的坐标。

3.3 港口分割提取

港口配准算法可以精确地将待分割港口图像和 F 模板数据进行图像匹配,后在此基础上,将港口对应的 B 模板与匹配港口图像融合,融合公式如式(10)所示。

$$g(x, y) = \begin{cases} f(x, y), & \text{if } M(x, y) = 0 \\ 255, & \text{if } M(x, y) = 255 \end{cases}, \quad (10)$$

其中, $f(x, y)$ 为匹配港口图像, $M(x, y)$ 为 B 模板, $g(x, y)$ 表示融合结果。港口高精度分割提取的结果图如图 5 所示。

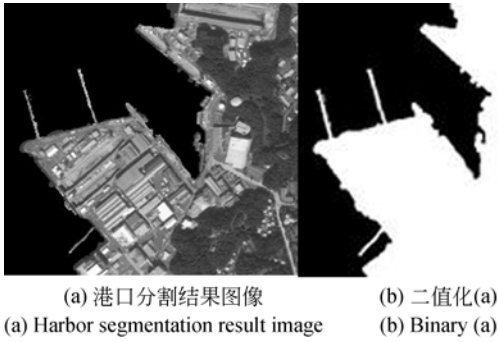


图 5 港口分割结果
Fig. 5 Segment result of harbor

4 实验结果与分析

为了验证所提出算法的有效性,在 3 组港口遥感图像数据上进行了实验,分别与港口水域经典检测方法进行了客观指标和主观对比分析。这些对比的方法包括基于 LBFE^[26]的方法,基于 LBP 的方法^[13],基于 MLE 的方法^[27-28],基于 OSTU 的方法^[29,10-11]和基于 Mean-Shift 的方法^[30]。4.1 描述了本文用到的客观评价指标。所有的实验在 MATLAB R2012b 平台运行,计算机性能为 3.20-GHz CPU 和 4.00-GB RAM。

4.1 评价指标

为客观分析比较算法之间的区别和性能,本文采用了 3 种经典的评价指标进行对比分析。Zhang 等提出的基于面积的最终测量精度(Ultimate Measurement Accuracy, UMA)^[23],Martin 等提出的全局一致性误差(Global Consistency Error, GCE)^[24],以及 Meil 等提出的变化信息(Variation of Information)^[25]方法。

(1) UMA

UMA 具有广泛的动态评估范围,可以在一个较小的范围内检测图像的分割精度,相应的表达式如下。

$$RUMA_f = \frac{|R_f - S_f|}{R_f} \times 100\%, \quad (11)$$

式中 $RUMA_f$ 表示分割图像特征与参考图像特征的比率, R_f 表示参考图像特征, S_f 表示分割结果特征, f 代表特征其包含面积,周长,形变度等。本文采用的评判标准为基于面积的,即上述表达式可改进如下。

$$RUMA_{ea} = \frac{|R_a - S_{ra}|}{R_a} \times 100\%, \quad (12)$$

其中, a 表示面积, ea 表示错误面积, $RUMA_{ea}$ 为错误面积比率, R_a 为参考图像面积, S_{ra} 表示分割图像的正确面积。

(2) GCE

GCE 是基于局部细分误差之上的。对于原始图像中的一点 p_i , 参考分割结果中 $p_i \in Region_1$, 实际分割结果 $p_i \in Region_2$, 若 $Region_2 \in Region_1$, 则存在

$$E(Region_1, Region_2, p_i) = \frac{\|R(Region_1, p_i) \setminus R(Region_2, p_i)\|}{\|R(Region_1, p_i)\|}, \quad (13)$$

其中, $\| \cdot \|$ 表示集合 R 中元素的个数, \setminus 表示差集。

显然该衡量标准并非对称的,其存在如下两种情况,即:(1)当分割区域 $Region_2$ 是 $Region_1$ 的子集,则 $E(Region_1, Region_2, p_i) = 0$; (2)若两分割区域不存在子集关系,则 $E(Region_1, Region_2, p_i) \neq 0$ 。所以对于每一个像素的每个方向上的局部细分误差,其总和即为全局一致性误差,如下式:

$$GCE = \frac{1}{n} \min \left\{ \sum_i E(Region_1, Region_2, p_i), \sum_i E(Region_2, Region_1, p_i) \right\}, \quad (14)$$

其中, n 为采样点数目,易得 GCE 值越小,说明全局一致性误差越小。

(3) VI

VI 是用来衡量实际分割结果相对参考分割图像的信息变化,具体利用参考分割图像的熵,实际分割结果的熵以及参考图像和实际结果的联合熵三个分量计算得出的,公式如下:

$$VI(F, F_{seg}) = H(F) + H(F_{seg}) - 2H(F, F_{seg}), \quad (15)$$

其中, $H(F)$, $H(F_{seg})$ 分别表示参考分割结果及实际分割结果的熵, $H(F, F_{seg})$ 为两图像的联合熵。易得 VI 值越小,说明实际分割结果相对参考分割图像信息变化越少,实际分割结果越接近参考分割图像。

4.2 实验数据

在实验中,本文利用 google-earth 以及 bing 等获得的光学遥感卫星图像以构成异源,并采用 google-earth 的遥感图像来进行 F 模板及 B 模板

的构建,后使用 bing 所得遥感图像进行多源遥感图像港口分割的实验。为避免随机性误差,本文以 3 组港口数据进行实验,分别采用分辨率为 3.9 m、 306×283 pixel 的 A 港口,4 m、 604×322 pixel 的 B 港口以及 3.92 m、 434×352 pixel 的 C 港口,部分图像数据如图 6 所示,左上为 A 港口,右上为 B 港口,下为 C 港口。



图 6 港口数据

Fig. 6 Image data of harbor

4.3 结果分析

A 港口分割提取结果如图 7 所示,各种算法和客观对比指标结果如表 1 所示。从图 7 种可以看出,本文方法分割的结果在所有算法中是最好的,准确地分割出了港口内港口的海域,去除了突堤和岸上建筑的影响。可以看出效果第二好的是基于 LBP 的方法,但其不能有效区分靠近岸堤和突堤的舰船。LBF、MLE 和 OSTU 的方法相比 LBP 在舰船区域的分割具有更好的效果,而 LBP 将舰船之间的空隙连接成了一片整体区域。从主观评价看,海陆分割效果最差的是 Mean-shift 方法。从结果表 1 中可以看出,RUMA 评价指标,本文方法为 5.751 1,远远好于其余的方法,排名第二的方法是 LBP,明显优于其余方法,这两种方法具有更好的分割整体性。GCE 指标上,本文方法也获得了最好的结果,排名第二的是 LBP 方法,本文相比 LBF 和 LBP 方法较优的原因是本文方法可以有效区分突堤和靠岸的舰船。VI 指标,本文方法结果最优,和 LBP 方法相近,效果最差的是 LBF 方法。

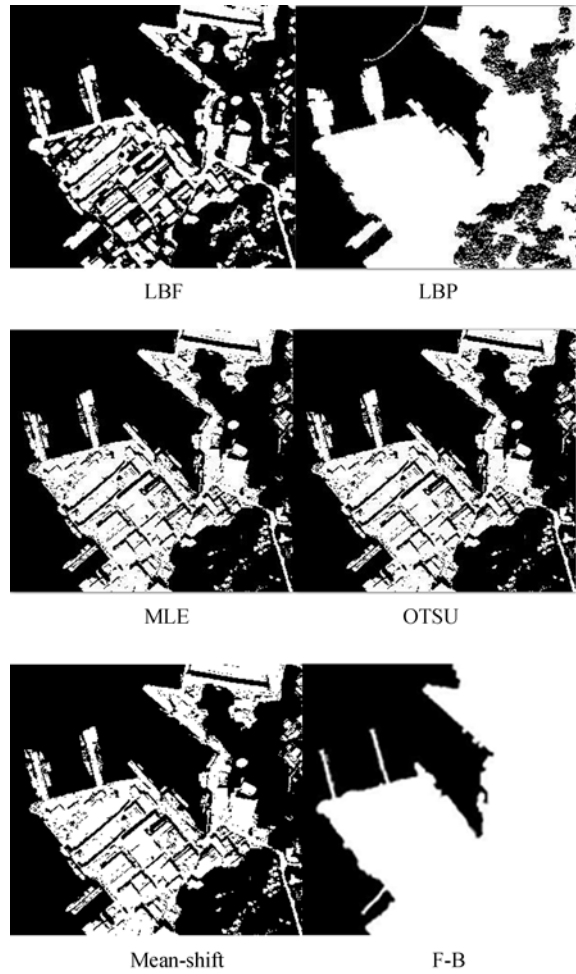


图 7 A 港口分割提取结果

Fig. 7 Segment extraction results of A harbor

表 1 A 港口分割提取结果对比

Tab. 1 Segment extraction results compare of A harbor

方法	RUMA	GCE	VI
MLE	30.284 0	0.388 4	7.089 5
OTSU	34.179 7	0.388 4	7.088 1
Mean-shift	31.735 8	0.388 2	7.081 0
LBF	44.209 6	0.507 5	8.124 5
LBP	17.804 6	0.312 0	6.860 5
F-B	5.751 1	0.241 8	6.755 5

B 港口分割提取结果如图 8 所示,各种算法和客观对比指标结果如表 2 所示。从图 8 中可以看出,该港口拥有较为复杂的结构,具有较多的难以区分的突堤和岸堤。从分割结果上看还是本文方法获得了最好的结果,效果最差的是 LBF 方

法。从结果表 2 可以看出,RUMA 和 GCE 两项指标,本文方法明显优于其余方法。LBF 算法 RUMA 指标最差,可以看出该算法有明显的错误分割。LBP 方法具有最好的 VI 指标结果。

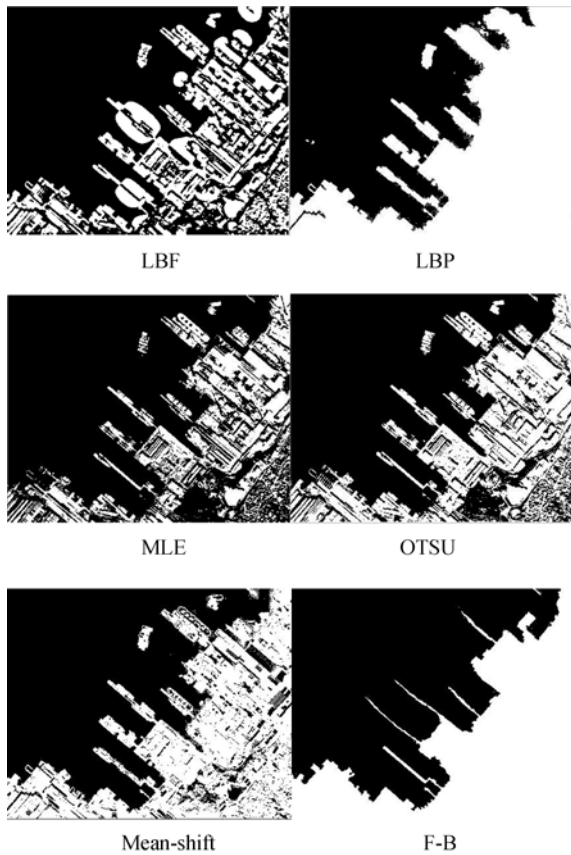


图 8 B 港口分割提取结果

Fig. 8 Segment extraction results of B harbor

表 2 B 港口分割提取结果对比

Tab. 2 Segment extraction results compare of B

方法	RUMA	GCE	VI
MLE	15.430 0	0.361 9	6.921 6
OTSU	15.434 6	0.362 5	6.849 5
Mean-shift	15.801 4	0.359 2	6.796 9
LBF	36.111 3	0.484 7	7.945 0
LBP	9.394 6	0.366 5	6.020 8
F-B	5.899 9	0.213 4	6.488 2

C 港口分割提取结果如图 9 所示,各种算法和客观对比指标结果如表 3 所示。从图 9 种可以看出,这个港口实际有多个小的港口组成,具有十分复杂的内部结构,具有较多的难以区分的突堤

和岸堤。从分割结果上看还是本文方法获得了最好的结果,LBP 方法也获得了不错的效果。从结果表 3 可以看出,对于 RUMA,本文方法明显优于其余方法。GCE 和 VI 指标 LBP 方法略优于本文方法,具有较好的全局一致性,但从实际分割效果看,还是本文方法具有更好的效果,尤其是能正确区分纤细的突堤和舰船。

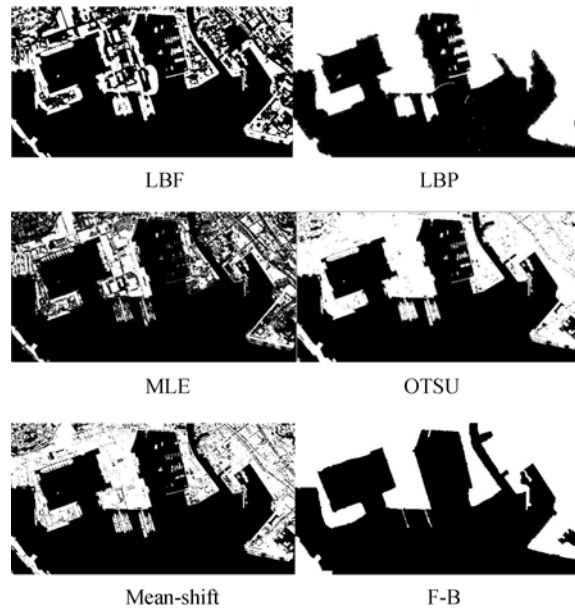


图 9 C 港口分割提取结果

Fig. 9 Segment extraction results of C harbor

表 3 C 港口分割提取结果对比

Tab. 3 Segment extraction results compare of C

方法	RUMA	GCE	VI
MLE	25.751 1	0.353 7	6.254 8
OTSU	12.775 8	0.238 4	5.752 2
Mean-shift	11.285 5	0.355 6	6.223 0
LBF	34.668 7	0.453 2	7.279 2
LBP	6.559 7	0.141 8	5.367 0
F-B	2.533 4	0.181 3	5.701 2

5 结 论

本文提出了一种新的基于 F-B 模板的遥感图像港口高精度分割提取方法,充分利用了港口的先验信息,利用港口模板在检测图像中自动提取港口区域。相比传统方法本文方法最大的优势在于,可以有效克服图像由于光照,植被,码头以

及礁石等干扰的影响,在远距离遥感影像中高精度提取港口区域,尤其是能准确提取港口内海域部分,有效区分停靠在港口岸堤和突堤边上的舰船区域。这为后续舰船检测、识别等工作打下坚

实的基础,在分割结果的基础上运用传统分割方法就能有效提取港口内舰船区域。未来工作在于提高本文方法在更严重的噪声情况下的配准精度,克服不同传感器畸变差异带来的精度影响。

参考文献:

- [1] 陈琪,陆军,杨全,等. 基于模型的遥感图像港口检测[J]. 信号处理, 2010, 26(6): 941-945.
CHEN Q, LU J, YANG T, *et al.*. Harbor detection of remote sensing images based on model[J]. *Signal Processing*, 2010, 26(6): 941-945. (in Chinese)
- [2] KADYROV A, YU H, LIU H. Ship Detection and Segmentation Using Image Correlation [C]. 2013 *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Manchester, 2013: 3119-3126.
- [3] LIU G, ZHANG Y, ZHENG X, *et al.*. A New Method on Inshore Ship Detection in High-Resolution Satellite Images Using Shape and Context Information[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(3): 617-621.
- [4] LIU C, XIAO Y Y, YANG J, *et al.*. Harbor Detection In Polarimetric SAR Images Based on the Characteristics of Parallel Curves [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(10): 1400-1404.
- [5] 陈琪,陆军,杨全,等. 基于感知编组的遥感图像港口港口提取方法[J]. 信号处理, 2010, 26(7): 1009-1103.
CHEN Q, LU J, HUANG G Y. Harbor detection method of remote sensing images based on perceptual organization [J]. *Signal Processing*, 2010, 26(7): 1009-1103. (in Chinese)
- [6] 刘春,殷君君,杨健. 基于岸线特征点合并的极化 SAR 图像小型港口检测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(8): 848-853.
LIU C, YIN J J, YANG J. Small harbor detection in polarimetric SAR images based on coastline feature point merging[J]. *Journal of Tsinghua University (Sci & Technol)*, 2015, 55(8): 848-853. (in Chinese)
- [7] 刘伟,陈建宏,曾阳帆,等. 利用先验约束的 SAR 图像港口检测与鉴别[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(10): 1319-1325.
LIU W, CHEN J H, ZENG Y F, *et al.*. Harbor Detection and Discrimination of SAR Images with Prior Constraint [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(10): 1319-1325. (in Chinese)
- [8] ZHAO H B, LI W H, YU N H, *et al.*. Harbor detection in remote Sensing images Based on Feature Fusion [C]. *5th International Congress on Image and Signal Processing*, 2012: 1053-1057.
- [9] 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.
HU J H, XU SH SH, 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.
- [10] 孙红光,卜倩,李欢利,等. 基于 OTSU 分割的云层背景下弱目标检测算法研究[J]. 东北师大学报(自然科学), 2009, 41(2): 79-83.
SUN H G, PU Q, LI H L, *et al.*. The weak target detection algorithm under cloud background based on OTSU segmentation [J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2009, 41(2): 79-83.
- [11] XIAO H H, XU Q Z, HU L. A Sea-land Segmentation Algorithm Based on Gray Smoothness Ratio [C]. *4th International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Application*, 2016: 117-121.
- [12] 刘春,谢春华,安文涛,等. 基于多方向突堤扫描的极化 SAR 图像人工港口检测[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 2(39): 392-297.
LIU CH, XIE CH H, AN W T, *et al.*. Man-made harbor detection in polarimetric SAR images based on multi-direction jetties scanning [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 2(39): 392-297.
- [13] XIA Y, WAN S, JIN P, *et al.*. A Novel Sea-Land Segmentation Algorithm Based on Local Binary Patterns for Ship Detection [J]. *International Journal of Signal Processing Image Process-*

- ing and Pattern Recognition, 2014, 3(7):237-246.
- [14] TANG J, DENG C, HUANG G B, *et al.*. Compressed-Domain Ship Detection on Spaceborne Optical Image Using Deep Neural Network and Extreme Learning Machine[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2015, 53(3):1174-1185.
- [15] 随银岭, 邹焕新, 雷琳, 等. 一种基于模板的港口舰船目标变化检测方法[J]. *计算机工程与科学*, 2013, 6(35):134-141.
- SUI Y L, ZOU H X, LEI L, *et al.*. A novel change detection method of harbor ship target based on template[J]. *Computer Engineering & Science*, 2013, 6(35):134-141.
- [16] BERIL BEŞBİNAR, A. A. ALATAN. Inshore ship detection in high-resolution satellite images: approximation of harbors using sea-land segmentation[C]. *SPIE Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics*, 2015:725-7.
- [17] LOWE D G. Object Recognition from Local Scale-Invariant Features[C]. *The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. IEEE*, 1999:1150.
- [18] LOWE D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91-110.
- [19] DELLINGER F, DELON J, GOUSSEAU Y, *et al.*. SAR-SIFT: A SIFT-Like Algorithm for SAR Images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2015, 53(1):453-466.
- [20] TOUZI R, LOPES A, BOUSQUET P. Statistical and geometrical edge detector for SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1988, 26(6):764-773.
- [21] JØRTOFT R F, LOPÉS A, MARTHON P, *et al.*. An Optimal Multiedge Detector for SAR Image Segmentation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1998, 36(3):793-802.
- [22] SHAPIRO L S, BRADY J. Feature-based correspondence: An eigenvector approach[J]. *Image and Vision Computing*, 1992, 10(5):283-288.
- [23] ZHANG Y J. A survey on evaluation methods for image segmentation [J]. *Pattern Recognition*, 1996, 29(8):1335-1346.
- [24] MARTIN D R, FOWLKES C, TAL D, *et al.*. A Database of Human Segmented Natural Images and its Application to[J]. *Proc. int'l Conf. computer Vision*, 2002, 2(11):416-423 vol. 2.
- [25] Marina Meilă. Comparing clusterings: an axiomatic view [C]. *International Conference. DBLP*, 2005:577-584.
- [26] LI C, KAO C Y, GORE J C, *et al.*. Implicit Active Contours Driven by Local Binary Fitting Energy[C]. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007. *CVPR '07. IEEE Conference on. IEEE*, 2007:1-7.
- [27] YAN C, SANG N, ZHANG T. Local entropy-based transition region extraction and thresholding [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24(16):2935-2941.
- [28] LI Z, ZHANG D, XX Y, *et al.*. Modified local entropy-based transition region extraction and thresholding [J]. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(8):5630-5638.
- [29] OHTSU N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms[J]. *Systems Man & Cybernetics IEEE Transactions on*, 1979, 9(1):62-66.
- [30] JARABO-AMORES P, ROSA-ZURERA M, MATA-MOYA D D L, *et al.*. Spatial-Range Mean-Shift Filtering and Segmentation Applied to SAR Images[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2011, 60(2):584-597.

作者简介:



杨 森 (1992—), 男, 四川泸州人, 硕士, 2015 年于电子科技大学成都学院获得学士学位, 主要从事图像处理和目标识别等方面的研究。E-mail: 100941102@qq.com

导师简介:



高志升 (1977—), 男, 四川万源人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 2012 年四川大学获博士学位, 主要从事图像处理、机器学习等方面的研究。E-mail: gzs_xihua@mail.xhu.edu.cn