

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209792

面向地理对象的高分光学与 SAR 影像一体化分割*

赵天宇¹ 胡晨浩² 徐赛博¹ 潘伟豪¹ 杨佳俊² 王超^{1,2}

(1.南京信息工程大学长望学院 南京 210044;2.南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044)

摘要: 由于光学和 SAR 影像成像方式的巨大差异,为提取统一的光学和 SAR 对象集合造成了很大的困难。为此,本文提出了一种面向地理对象的高分光学与 SAR 的一体化分割方法。该方法不同于传统一体化分割同时处理异源影像的策略,而仅对光学影像进行分割,从而获得可靠的地理对象集合;在此基础上,为每个对象自适应提取标记点,并依据粗配准结果将其投影到 SAR 影像中;最后,在 SAR 影像中开展基于标记点的区域增长,最终获得与光学影像分割对象相匹配的对象集合。通过对多组光学和 SAR 影像的实验结果表明,所提出方法提取的光学-SAR 匹配对象集合更加接近实际的地理对象,且 J-value 可达 7.8 以上,在日视分析和定量评价中均显著优于对比方法。

关键词: 光学影像;SAR;一体化分割;面向对象;区域增长

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Geographic object oriented integrated segmentation of high resolution optical and SAR images

Zhao Tianyu¹ Hu Chenhao² Xu Saibo¹ Pan Weihao¹ Yang Jiajun² Wang Chao^{1,2}

(1. Changwang School of Honors, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Due to the great difference of imaging methods between optical and SAR images, it is very difficult to extract a unified set of optical and SAR objects. Therefore, this paper proposes a geographic object-oriented integrated segmentation method of high resolution optics and SAR. This method is different from the traditional integrated segmentation strategy of processing heterogeneous images at the same time, but only segmenting optical images, so as to obtain a reliable set of geographical objects; On this basis, the marker points are extracted adaptively for each object, and projected into the SAR image according to the coarse registration results; Finally, the region growth based on marker points is carried out in SAR image, and finally the object set matching the segmented object of optical image is obtained. The experimental results of several groups of optical and SAR images show that the optical SAR matching object set extracted by the proposed method is closer to the actual geographical object, and the j-value can reach more than 7.8, which is significantly better than the comparison method in visual analysis and quantitative evaluation.

Keywords: optical image; SAR; integrated segmentation; object-oriented; region growth

0 引言

高分辨率光学与合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像是目前遥感目标监测应用中两种主要的数据源。光学影像具有丰富的光谱、纹理及空间细节信息,有助于实现地表覆盖的精细分类。然而,由于受到被动式成像机理限制,光学影像容易受到天气、云层、光照条件等因素的制约^[1-4]。另一方面,合成孔径雷达具有全天时、全天候工作的优点,其回波特性有助于描述地物的高度、结构

等信息,但光谱信息不足及存在斑点噪声等问题又严重影响了 SAR 影像的数据可靠性^[5-6]。鉴于光学与 SAR 影像具有较强的互补性,联合光学与 SAR 影像的遥感目标识别已成为遥感领域的研究热点之一^[7-10]。

在异源影像中提取统一的地理对象集合,是联合光学与 SAR 影像的优势来开展目标识别的前提。目前通常采用的方法主要包括像素级的特征点提取与配准,以及异源影像集成分割与配准一体化方法^[11]。前者主要基于 SIFT 等方法来提取特征点,在此基础上通过检测同名点对来进

收稿日期:2022-04-29

* 基金项目:江苏省博士后基金(2021K013A)、江苏省六大人才高峰工程(2019XYDXX135)、江苏省研究生实践创新计划项目(2022-132)资助

行配准。如王蒙蒙等^[12](2022)提出了一种基于空间约束和结构特征的光学与 SAR 影像配准方法,该方法提出对影像进行局部几何修正,以及构建几何结构特征描述符等策略,显著提高了配准精度;李泽一等^[13]提出了基于相位方向和尺度的光学、SAR 影像自动配准方法,其建立了一种对影像局部特征的描述符,再利用 LPCS 获取光学和 SAR 影像中的同名点;Wu 等^[14]则通过连续蚁群算法和互信息实现光学和 SAR 影像配准;臧丽日等^[15]则提出了一种基于图像空间结构的梯度互信息配准算法,但是对于具有仿射变换的图像配准精度有待提高。此类方法受制于光学和 SAR 影像成像机制的巨大差异^[16],采用传统的相似性度量方法难以获得可靠的匹配点对;另一方面,由于配准结果仅仅建立了多时相影像像素之间的一一对应关系,但并未实现异源影像中匹配对象的提取,无法直接应用于联合异源影像的对象级处理应用中。

与之相比,异源影像集成分割和配准一体化方法主要通过分割影像,来获取显著的区域特征和结构特征,然后在此基础上对光学和 SAR 影像进行配准。如徐川等(2013)^[17]提出了一种基于多特征多测度的光学与 SAR 影像自动配准方法研究。该方法使用多次分割与配准,进而构建了一种基于全局优化的三角网配准策略。高雨等^[18]则提出了一种异源影像融合算法对滨海湿地进行土地利用分类的方法,相较于单源影像精度显著提高;邓星涛^[19]提出了一种基于结构特征的复杂纹理图像水平集分割方法,其通过将局部灰度变换特征和相似性特征与灰度信息融入水平集方法中,显著改善了分割效果。王宇航等^[20]提出了基于面向对象的 QUICKBIRD 和 SAR 数据融合的地物分类方法。该方法将异源影像进行融合后再进行分割,从而提取图像的地物对象信息;珪海刚等^[21]提出了光学遥感影像与 GIS 数据一体化的水体分割、配准与提取方法,将影像分割、配准与变化检测集成为一体化处理流程,提高了对象提取的精度。但此类方法要求异源影像的视角差异较小,然而光学与 SAR 通常存在巨大的传感器成像差异,导致分割结果中存在目标不完备的情况,从而难以满足实际应用的要求。

尽管如此,一体化分割与配准的实现需要精确的分割结果和一定数量的闭合区域,而同样由于光学和 SAR 通常存在显著的成像差异,导致分割结果中存在目标不完备的情况,即分割结果往往与真实地物不匹配。事实上,相较于 SAR 影像,光学影像真实地反映了地物对象的轮廓及物理表现形式,因此基于光学影像提取的地理对象集合往往更加符合实际情况。在此基础上,依据光学影像中的地理对象在 SAR 影像搜寻相应的匹配对象,从而可最终获得异源影像地理对象集合。由于不再需要基于像素级的配准,而是面向对象,因此这种处理方式有助于从根本上突破现有两类方法中的不足。因此,有必要从原始影像出发,开展联合光学与 SAR 的统一对象集合研究,实现对地物对象的精

细刻画。

为此,本文提出了一种面向地理对象的光学与 SAR 联合分割方法。该方法不同于传统一体化分割同时处理异源影像的策略,首先仅对光学影像进行分割,从而获得可靠的地理对象集合;在此基础上,以每个对象的自适应点为该对象的标记点。结合粗配准结果将其投影到 SAR 影像中;最后,在 SAR 影像中开展基于标记点的区域增长,最终获得与光学影像分割对象相匹配的对象集合。实验表明,所提出方法不仅能够提取统一光学-SAR 的匹配对象集合,而且能够从异源影像自身出发分别确定合适的对象边界,从而可为后续的目标识别等提供可靠的分析单元。

1 方 法

本文所提出方法主要包括 3 个部分:基于 SIFT 特征点的异源影像粗配准;光学影像对象集合自适应标记点提取;结合映射与区域增长的 SAR 影像匹配对象集合提取。具体流程如图 1 所示。

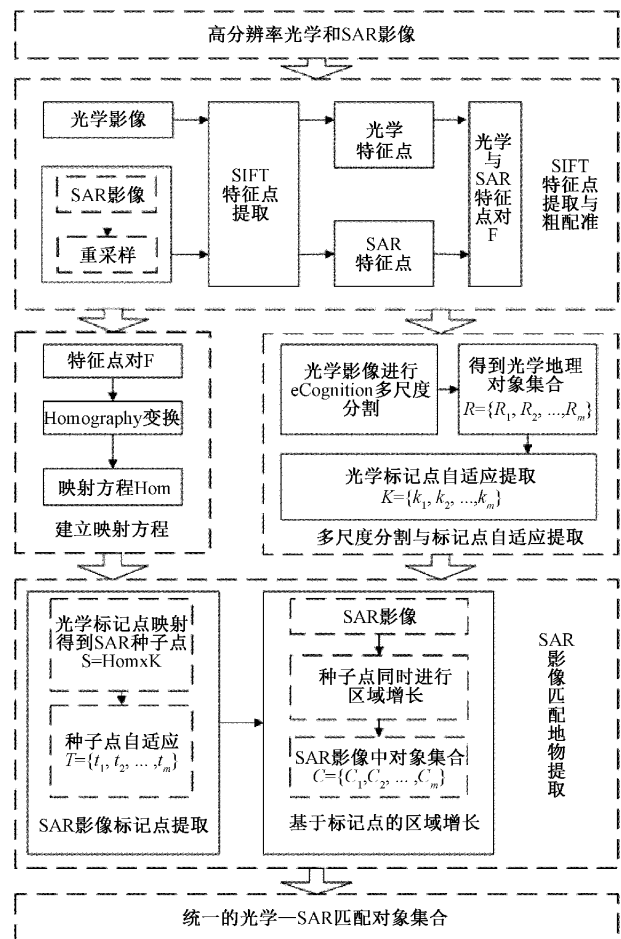


图 1 算法流程

1.1 粗配准

1) 数据准备与预处理

本文采用两组日本仙台地区高分辨率光学影像与

SAR 影像进行实验,如图 2、3 所示。两组影像的采集时间均为 2011 年 3 月,因此影像地物构成具有高度的一致性。其中,光学影像为 IKONOS 卫星影像,采集时间为 2011 年 3 月,空间分辨率为 1 m;SAR 影像为 TerraSAR-X 卫星影像,采集时间为 2011 年 3 月,空间分辨率为 3 m。

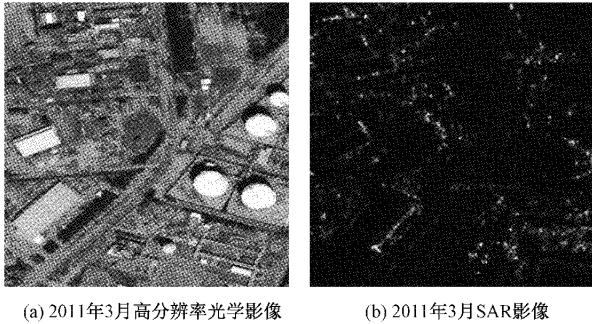


图 2 实验数据集一

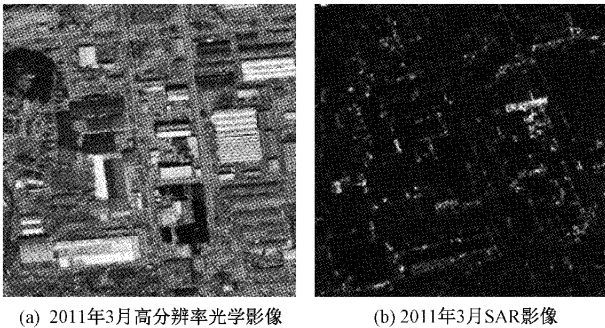


图 3 实验数据集二

如图所示,两组数据集均为常见的城市场景,包含居民楼、厂房、街道等典型地物对象。在此基础上,采用目前流行的遥感影像处理商业软件 ENVI 对异源影像进行重采样预处理。以光学影像为基准,对 SAR 影像采用双线性内插法重采样,从而获得相同分辨率的 SAR 影像与光学影像。

2) SIFT 提取及匹配方程的建立

本文采样 SIFT 算法来提取光学和 SAR 影像中的对应特征点,并以此进行光学与 SAR 影像的粗配准。由 D. G. Lowe 提出的 SIFT 特征提取方法不受尺度的影响,对视角变化、仿射变换、噪声具有较强的鲁棒性^[22-23]。根据文献[23],特征点 P_m 可由式(2)计算得到:

$$P_m = -\frac{\partial^2 D^{-1}}{\partial P^2} \frac{\partial D}{\partial P} \quad (1)$$

其中, D 为关键点的 DOG 值, $\frac{\partial^2 D^{-1}}{\partial p^2}, \frac{\partial D}{\partial p}$ 为尺度空间函数对 $P = (x, y, \sigma)^T$ 的偏导,从而获得特征点集合 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, 其中 n 为特征点对的总个数, $f_i = \{f_{gi}, f_{si}\} (i = 1, 2, \dots, n)$, $f_{gi}(x_i, y_i)$ 为光学特征点, $f_{si}(x'_i, y'_i)$ 为 SAR 影像对应特征点,在此基础上,本文采用 Homography 变换方法^[24]确定映射方程 Hom:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, (x, y, z) 和 (x', y', z') 分别为光学和 SAR 对应的归一化特征点, $z = z' = 1$, 利用得到的特征点集合 F 及矩阵的基本知识,可以获得映射方程:

$$Hom = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, h_1 到 h_9 为映射方程 Hom 的 9 个自由度参数。

1.2 多尺度分割与标记点自适应提取

鉴于光学影像具有丰富的光谱、纹理及空间细节信息。为此,我们将光学影像视为参考影像并进行影像分割,以期获得的对象集合更加接近真实地理对象。在此基础上,再为光学影像对象集合中的每个对象在 SAR 影像中搜寻匹配对象,从而获得统一的光学与 SAR 的对象集合。为此,本文首先对光学影像进行分割,再为每个对象提取对应的标记点,具体步骤如下:

1) 多尺度影像分割

在影像分割阶段,本文采用面向对象的商业软件 eCognition。与传统多尺度分割方法相比,eCognition 最显著的特点在于影像分类和多尺度分割时,通过计算影像内部像素之间的同质性进行分割,得到的多尺度分割对象轮廓接近地物边界^[25]。在多尺度分割过程中,主要涉及三个关键参数的设定,包括尺度参数 (Scale)、形状因子 (Shape)、紧致度因子 (Compactness),本文采用目视解译方法确定。两组数据集分割参数 (Scale, Shape, Compactness) 分别为 (80, 0.6, 0.6) 和 (85, 0.4, 0.6)。

2) 标记点自适应提取

令影像分割所提取的对象集合为 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$, 其中 m 为分割出来的对象总数。对于每个对象 R_i , 根据式(4)自适应确定其标记点坐标。

$$\begin{cases} X_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ Y_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \quad (4)$$

其中, x_i, y_i 为对象内像素点的横、纵坐标, n 为像素点的总数。求得的标记点坐标记为 $k_i(X_i, Y_i)$, 遍历所有对象,从而获得光学影像对象标记点集合 $K = \{k_1, k_2, \dots, k_m\}$ 。

1.3 SAR 影像匹配地物对象提取

基于映射方程 Hom 及光学影像标记点集合 K , 本文设计了一种 SAR 影像匹配地物对象提取策略,主要包括 SAR 影像标记点提取以及基于标记点的区域增长。

1) SAR 影像标记点提取

根据映射方程 Hom 对 K 进行投影,得到 SAR 影像中初始的种子点集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 。此时,由于光学和 SAR 图像之间的显著差异,导致处于光学影像边界上的

标记点在映射到 SAR 影像中时,可能处于 SAR 影像边界外。为此,本文设计了一种自适应补偿方法。当映射到 SAR 影像的种子点 $s_i(x_i, y_i)$ 处于 SAR 影像边界外时,则计算点 s_i 和 SAR 影像中点的欧式距离,以欧式距离 ρ' 最小的点 $t_i(x'_i, y'_i)$ 代替点 $s_i(x_i, y_i)$ 作为种子点。公式如下:

$$\rho' = \min \rho_i = \min \sqrt{(x'_i - x_i)(y'_i - y_i)} \quad (5)$$

而得到自适应后的 SAR 影像中的种子点集合 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 。

2) 基于标记点的区域增长

依据种子点集合 T ,对每个种子点同时进行区域增长。对任意种子点,若八邻域区域中的某点像素值满足式(6),则判定该点符合增长条件,加入到区域中,式(6)中, (X, Y) 为种子点八邻域中点坐标, $t_i(x_i, y_i)$ 为种子点坐标, Img 为 SAR 影像的像素矩阵。

$$\begin{cases} |\text{Img}(X, Y, 1) - \text{Img}(x_i, y_i, 1)| \leq q_i \\ |\text{Img}(X, Y, 2) - \text{Img}(x_i, y_i, 1)| \leq q_i \\ |\text{Img}(X, Y, 3) - \text{Img}(x_i, y_i, 1)| \leq q_i \end{cases} \quad (6)$$

其中,阈值 q_i 采用如下策略自适应确定。计算种子点 $t_i(x_i, y_i)$ 八邻域的点处的像素值与种子点像素之间的差值,在此基础上所有差值相加取平均从而确定 q_i 的值,如式(7)所示。

$$q_i = \frac{1}{8} \sum_{u=-1}^1 \sum_{v=-1}^1 \sum_{i=1}^3 [|\text{Img}(x+u, y+v, i) - \text{Img}(x, y, i)|] \quad (7)$$

区域增长全部完成后,可得到与光学影像对象集合 R 相对应的 SAR 影像对象集合 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$,从而最终获得统一的光学-SAR 匹配对象集合。

2 实验结果与分析

2.1 实验设置与对比方法

由于文本方法属于集成分割和配准一体化方法,实验中选择了两种先进的同类型方法进行对比,包括:文献[18](2022)提出的异源影像融合分割方法,表示为“策略 1”;文献[19](2021)提出的基于结构特征的复杂纹理图像水平集分割方法,表示为“策略 2”。

其中,策略 1 在影像分割阶段采用了面向对象的商业软件 eCognition 对融合影像进行分割,本文根据目视解译确定的分割参数 (Scale, Shape, Compactness) 分别为 (80, 0.6, 0.6) 和 (85, 0.4, 0.6)。此外,策略 2 由于是对光学和 SAR 影像分别进行分割,因此分割结果中的对象数量不同。为此,本文仅选取光学和 SAR 中相互匹配的对象进行分析。

2.2 实验结果与目视分析

基于两组数据集对本文方法及对比方法进行实验,结果如图 4、5 所示。此外,为便于目视分析,本文对影像中的典型区域用不同形状的线框进行了表示,并选择了三个典

型地物进行分析。在图 4、5 中,圆形框中代表的是建筑物,矩形框中代表的是道路,方形框中代表的是其它人造目标。

如图 4 和图 5 中(c)、(d)所示,由于策略 1 要先对异源影像进行融合,然后对融合影像再进行分割,使光学影像丰富的光谱、纹理信息在一定程度上受到了 SAR 影像的影响,导致分割效果较本文单一的光学影像分割有所下降。因此,策略 1 中由于在初始分割中需要综合考虑光学和 SAR 影像,反而导致了分割效果不佳。策略 2 中对光学和 SAR 影像同时进行水平集分割,分割结果如图 4 和图 5 中(e)、(f)所示,使用边缘检测方法提取分割后光学和 SAR 影像中的对象边界,如图 4 和图 5 中(g)、(h)所示,对影像分析,可以看出对于光学影像中部分对象的提取效果不明显,对光学和 SAR 影像之间对象的匹配造成了一定的难度。而且由于光学和 SAR 影像之间巨大的成像差异,导致了对于同一种分割方法,光学影像和 SAR 影像的分割效果也有较大差异,对寻找光学和 SAR 影像中相对应的对象造成了一定的困难。而在本文方法中,如图 4 和图 5 中(a)、(b)所示,由于选择对具有较丰富的光谱、纹理信息的光学影像进行分割,再将每个分割对象的自适应点投影到 SAR 影像中进行区域增长,从而得到与光学相对应的 SAR 影像中的对象。由本文方法得到的光学-SAR 对象不仅能够很好的进行一一匹配,而且能够得到清晰的对象边界。此外,尽管本文方法得到的 SAR 影像中对象在边缘上没有策略 1 得到的对象边缘平滑,但却更符合 SAR 影像中地物对象的真实边界,且对象内部均质程度更高。而从策略 1 中 SAR 影像的分割结果来看,尽管形状与光学对象一致,但却明显偏离了真实的地物,降低了其使用价值。从策略 2 中光学和 SAR 影像的分割结果来看,由于光学影像中一些对象没有较大的梯度值像素,且与周围区域的像素值差异不明显,从而导致一些对象没有分割出来,并且光学影像和 SAR 影像分割效果也有一定的差异,给得到统一光学和 SAR 的对象集合造成了一定的困难。而本文使用区域增长的方法将与种子点相类似的点加入到区域内形成对象,减弱了 SAR 影像中斑点噪声可能会对结果造成的影响,因而形成的区域更加接近真实地物。

此外,对于圆形框对应的建筑物,本文方法得到的对象具有良好的边界,且与光学影像中的对应对象结构十分相似,能够进行较好的匹配。而策略 1 得到的建筑物对象与真实建筑物有明显偏移。策略 2 中 SAR 影像分割得到的建筑物对象边缘不连贯,原因在于 SAR 影像受到斑点噪声的影响,一个对象内可能有多个像素值较大的点,导致分割时单独形成边界,对与光学对象的匹配造成了困难。对于矩形框对应的道路对象,本文方法提取效果一般,而策略 1 和策略 2 均较差。我们认为原因在于道路对象一般比较狭长,且一条道路上可能有多个种子点,导致本文区域增长的结果效果一般。而策略 1 中,由于道路较比较狭长,导致 SAR 分割出来的道路对象即使发生了很小的偏离,也可能

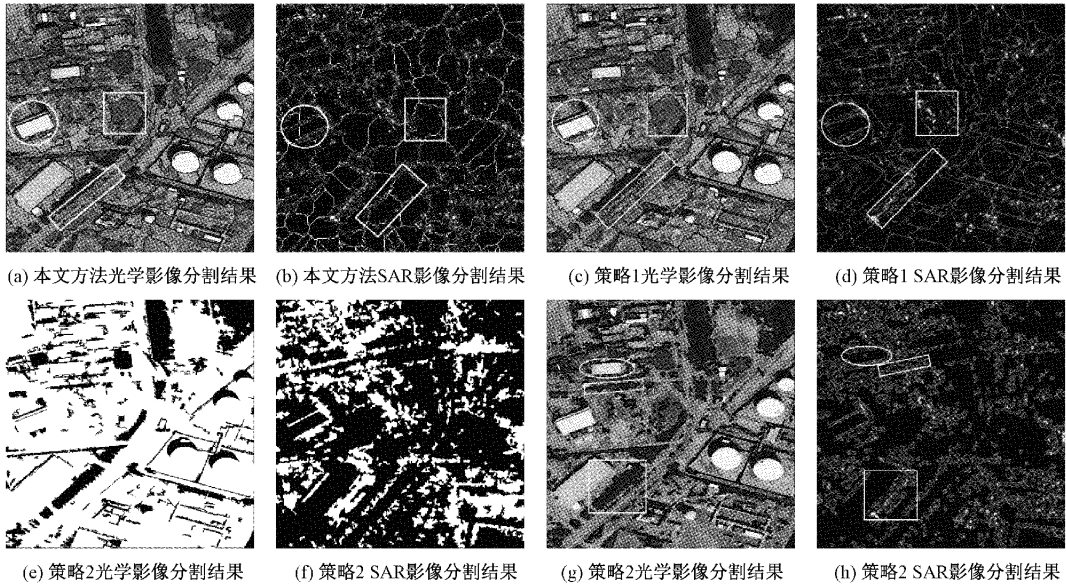


图 4 数据集一实验结果

本文方法:(a)、(b)策略 1:(c)、(d)策略 2:(e)、(f)、(g)、(h)

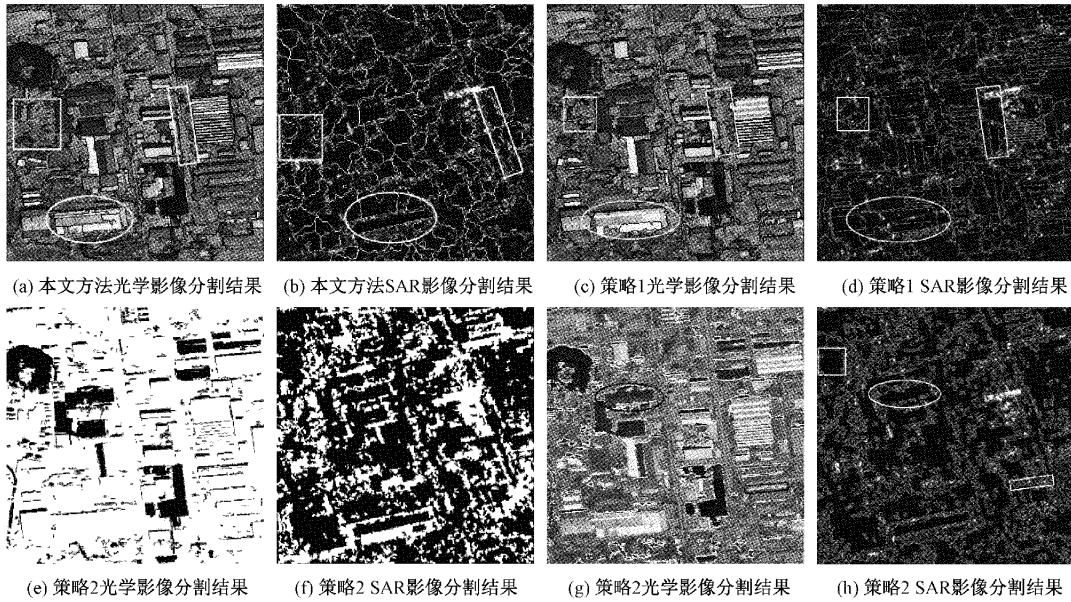


图 5 数据集二实验结果

与实际道路有较大差别,导致分割效果较差。策略 2 中,由于道路地区的灰度值与周围其它地区没有较大的差异,且道路中有明显特征的地方较少,导致策略 2 中使用水平分割算法对影像进行分割时,不易找到大梯度值像素的位置,即边界位置,因而不易把道路完整提取出来,所以策略 2 中对于道路对象的提取效果较差。对于方形框对应的其它人造目标,此类对象内部的均质程度较建筑物相对较低,因而本文用区域增长方法寻找与种子点相似的像素点加入到生长区域内的方法,对于其它人造目标的提取与匹配上效果一般。策略 1 中,由于其它人造对象的面积一般较大,即使 SAR 影像中分割得到的其它人造对象的位置发生一定的偏

移,但仍能较好的进行匹配,所以策略 1 对与其它人造对象的匹配上效果较好。而策略 2 中,光学影像和 SAR 影像对其它人造目标的提取效果均一般,但却不易匹配。原因在于其它人造目标内部均质程度较低,且没有较多的特征,与周围区域间的灰度值差异不是很明显,导致策略 2 中使用水平分割方法对影像进行分割时,难以找到明显的大梯度值像素的位置,即难以找到对象明显的边缘位置,因而不易将其它人造目标完整的提取出来,因而策略 2 中对此类目标的提取与匹配上效果较差。

2.3 定量评价结果

为了进一步定量分析不同方法的性能,本文选择标准

差、J-value, SSIM 三种指标。

其中,标准差代表了一组数据均值分散程度,本文中,计算每一个对象内像素的标准差,再取平均作为整体效果的度量指标,公式如下:

$$\sigma = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \sigma_k = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \left(\frac{1}{N_k - 1} \sum_{i=1}^{N_k} (x_i - \mu_k)^2 \right) \quad (8)$$

其中, m 为对象总数, N_k, μ_k 分别为第 k 个对象中像素点数目和均值, x_i 为对象中第 i 个点的像素值, σ_k 为第 k 个对象像素值的标准差, σ 为所有对象标准差的均值。

J-value 则反映一个对象内的均质程度,公式如下:

$$J = \frac{s_T - s_w}{s_w} \quad (9)$$

其中, s_T 为 z_i 内所有像素的总体方差, s_w 为 z_i 内所有像素以 256 个灰度值为中心分别计算方差,再对方差求和得到^[26]。

以上两种指标均用来衡量单一影像分割结果的均质程度。本文进一步采用 SSIM 来衡量两幅影像中匹配对象的相似度。此时,由于同一对象在异源影像中可能包含不同的像素,本文采用改进的 SSIM 进行度量,公式如下:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\sigma'_{xy} + C_2)}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (10)$$

其中, σ_x, σ_y 分别为光学对象和 SAR 对象的标准差, C 为常数,一般取 0.03, σ'_{xy} 为协方差。

这些指标的定量评价结果如表 1 和 2 所示。

表 1 数据集一 定量评价结果

策略/ 评价指标	数据源	对象 数目	标准差	J-value	SSIM
本文方法	光学	161	27.2	5.6	0.28
	SAR		6.4	7.8	
策略 1	光学	178	29.3	4.3	0.49
	SAR		23.2	3.8	
策略 2	光学	146	19.8	4.1	0.08
	SAR	215	22.4	4.8	

表 2 数据集二 定量评价结果

策略/ 评价指标	数据源	对象 数目	标准差	J-value	SSIM
本文方法	光学	217	42.7	6.2	0.31
	SAR		8.8	8.6	
策略 1	光学	232	32.6	4.7	0.55
	SAR		26.4	3.3	
策略 2	光学	166	21.6	3.9	0.06
	SAR	253	25.7	4.5	

对于策略 2,由于是对光学和 SAR 影像分别进行分割,因而分割得到的光学影像和 SAR 影像中对象的数目

也不相同,在表 1 和 2 中得到的策略 2 的实验结果,由分割后光学影像和 SAR 影像中能够进行匹配的对象得到。

首先,对 SAR 单一影像区域增长得到的对象内部进行定量评价,使用标准差和 J-value 来进行分析。从表 1、2 定量评价结果可以看出,本文方法得到的数据集一、数据集二 SAR 影像区域增长结果的标准差仅为 6.4 和 8.8,小于两种策略中 SAR 影像分割结果的标准差,说明本文方法得到的 SAR 影像中的对象,对象内所有点的像素值与像素均值的离散程度低。而一个真实地物内像素值一般不会有很大变化,因而表明运用本文方法得到的 SAR 影像中的对象更接近真实的地物,易于与光学地物相匹配。从 J-value 指标来看,本文方法得到的两组数据集中 SAR 影像对象集合的 J-value 值分别为 7.8 和 8.6,而策略 1 得到的 SAR 影像对象集合的 J-value 值,分别为 3.8 和 3.3,策略 2 得到的 SAR 影像对象集合的 J-value 值,分别为 4.8 和 4.5。说明本文方法得到的 SAR 影像地物对象的均质程度更高,更加接近真实地物对象。而根据原理,一个真实地理对象内像素点一般具有很高的相似性,本文运用区域增长的方法来对光学标记点投影后得到的种子点进行生长,由于设立了一定的生长规则,因而更容易将与种子点相似的点纳入区域内,因而得到的对象更接近真实地物,均质程度也就越高。基于图 4、5 也可证明实验结果和定量分析结果一致,证明本文方法得到的 SAR 影像中对象内部更加平滑,均质程度更高,能够与光学对象较好的匹配。

在此基础上,对得到的光学-SAR 对应对象进行相似性评价。从 SSIM 指标来看,本文方法得到的两组数据的结果仅为 0.28 和 0.31。结合图像定性分析,通过对图像相应对象目视检译可得,图 4、5 SAR 区域增长得到的对象在形状方面区别于光学影像分割得到的对象,这在 SAR 影像区域增长过程中是不可避免的,且由于光学和 SAR 成像原理不同以及时相的差异,光学影像和 SAR 影像中相同地物结构并不可能完全一致。由于对象结构不能保证一致,导致光学和 SAR 对应对象中的像素点数目并不相等,因而在计算两组影像中对应对象的 σ'_{xy} 时,相较于正常值有较大的偏差,导致 SSIM 结果较差。对于策略 1 中光学和 SAR 影像分割得到的地物对象,由于都是由融合影像分割对象边界投影得到,导致形状完全一致,且得到的 SSIM 结果高于本文方法,但在目视分析中, SAR 影像却明显偏离了真实地物对象。策略 2 中,由于光学影像和 SAR 影像固有的成像差异,导致在使用水平集分割算法对两种影像分别进行分割后,得到的分割结果也有较大的差异,虽然两幅影像各自的分割效果较好,但是却难以匹配,即使光学和 SAR 中部分对象能够进行匹配,但对象间的结构相似性仍较低,实际意义也较低。总体来说,本文区域增长得到的结果虽然在结构上与光学分割得到的对象并不相似,但却更接近 SAR 影像中的实际地物,也更具有

实际意义。

2.4 不同种类地物的投影效果分析

为进一步定量分析不同地物对象的分割效果,本文选择建筑物、道路及其他人造目标进行统计和评价。对异源影像的分割结果分别进行不同地物的数量占比统计,结果如表 3 和 4 所示。

表 3 数据集一不同地物分割占比统计 %

	数据源	建筑物	道路	其它人造目标
本文方法	光学	48	16	36
	SAR	43	9	48
策略 1	光学	53	16	31
	SAR	44	7	49
策略 2	光学	67	5	28
	SAR	53	10	37

表 4 数据集二不同地物分割占比统计 %

	数据源	建筑物	道路	其它人造目标
本文方法	光学	54	18	28
	SAR	48	13	39
策略 1	光学	49	18	33
	SAR	40	9	51
策略 2	光学	72	4	24
	SAR	60	7	33

从表 3 和 4 中可以看出,本文方法对光学和 SAR 中建筑物对象的提取效果较好,两者差异在 6%之内,而策略 1 的差异在 10%之内,策略 2 的差异达到了 14%。从原理上看,由于建筑物对象的均质程度较高,对象内部的特征也较多,所以由本文区域增长方法更容易得到与真实建筑物相近的对象。在道路提取方面,由于光学影像在进行多尺度分割时一条道路可能被分成数个区域,导致本文方法的差异达到了 7%,在策略 1 中,光学影像和 SAR 影像道路占比的差异达到了 10%,而在策略 2 中,虽然在道路提取上差异较小,但是提取出来的道路数量占比却明显小于实际占比,不具有实际意义。对于其它人造目标的提取,本文方法差异为 12%,而策略 1 和策略 2 的差异则分别为 18%和 9%。由此可见,面对光学与 SAR 影像巨大的成像差异,本文方法能够较好的保持匹配对象的类别一致性,相较于对比方法更具实际意义。

3 结 论

这篇文章中,我们提出了一种面向地理对象的高分光学和 SAR 影像的一体化分割方法。该方法不同于传统一体化分割同时处理异源影像的策略,而仅对光学影像进行分割,从而获得可靠的地理对象集合;在此基础上,为每个对象自适应提取标记点,并依据粗配准结果将其投影到

SAR 影像中;最后,在 SAR 影像中开展基于标记点的区域增长,最终获得与光学影像分割对象相匹配的对象集合。基于两组数据集的实验结果表明,本文方法得到的光学-SAR 影像匹配对象集合更加符合真实地物,J-value 指标达到了 7.8 以上,在目视分析和定量评价中均显著优于对比方法。未来,我们将进一步研究阴影对于分割结果的影响,以获得更加可靠的匹配对象集合。

参考文献

- [1] YU Q Z, NI D W, JIANG Y X, et al. Universal SAR and optical image registration via a novel SIFT framework based on nonlinear diffusion and a polar spatial-frequency descriptor [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 171: 1-17.
- [2] SU J, MENG J T, HOU W M, et al. Multi-angle optical image automatic registration by combining point and line features[J]. Sensors, 2022, 22(3): 739.
- [3] CHENG M L, MATSUOKA M. An efficient and precise remote sensing optical image matching technique using binary-based feature points [J]. Sensors, 2021, 21(18): 6035.
- [4] ZHAO X M, WANG H J, WU J, et al. A gamma distribution-based fuzzy clustering approach for large area SAR image segmentation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 18(11): 1-5.
- [5] JIANG Y Y, LI M, ZHANG P, et al. Hierarchical fusion convolutional neural networks for SAR image segmentation[J]. Pattern Recognition Letters, 2021, 147: 115-123.
- [6] 罗丹. 高分辨率光学与极化 SAR 影像城市地物协同分类[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [7] XU H P, WANG W, LIU X H. A novel decision-level fusion segmentation approach of SAR and optical images[J]. 电子学报(英文版), 2011, 20(4): 750-754.
- [8] XIANG Y M, WANG F, WAN L, et al. OS-Flow: A robust algorithm for dense optical and SAR image registration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(9): 6335-6354.
- [9] LI X, ZHANG G, CUI H, et al. MCANet: A joint semantic segmentation framework of optical and SAR images for land use classification [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 106, DOI:10.1016/J. JAG. 2021. 102638.
- [10] WANG L, SUN M C, LIU J H, et al. A robust algorithm based on phase congruency for optical and SAR image registration in suburban areas[J]. Remote Sensing, 2020, 12(20): 3339.
- [11] YU X C, LYU Z H, HU D. Review of remote sensing

- image registration techniques[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2960-2972.
- [12] 王蒙蒙,叶沉鑫,朱柏,等. 基于空间约束和结构特征的光学与 SAR 影像配准[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(1): 141-148.
- [13] 李泽一,张海涛,黄翊航,等. 基于相位方向和尺度的光学、SAR 影像自动匹配方法[J]. *光学技术*, 2021, 47(5): 519-524, 536.
- [14] WU Y, MA W P, MIAO Q G, et al. Multimodal continuous ant colony optimization for multisensor remote sensing image registration with local search[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2019, 47, DOI: 10.1016/j.swevo.2017.07.004.
- [15] 臧丽日,杨树文,张萌生,等. 耦合梯度互信息与 PV 插值的影像配准算法[J]. *测绘科学*, 2021, 46(4): 68-74.
- [16] FAN J W, WU Y, LI M, et al. SAR and optical image registration using nonlinear diffusion and phase congruency structural descriptor [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(9): 5368-5379.
- [17] 徐川. 基于多特征多测度的光学与 SAR 影像自动配准方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [18] 高雨,胡召玲,樊茹. 高分辨率影像融合算法对滨海湿地土地利用分类精度的影响[J]. *测绘通报*, 2022(1): 116-120.
- [19] 邓星涛. 基于结构特征的复杂纹理图像水平集分割方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [20] 王宇航,范文义,刘超逸. 基于面向对象的 QUICKBIRD 数据和 SAR 数据融合的地物分类[J]. *东北林业大学学报*, 2016, 44(9): 44-49.
- [21] 眭海刚,陈光,胡传文,等. 光学遥感影像与 GIS 数据一体化的水体分割、配准与提取方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2016, 41(9): 1145-1150.
- [22] DIVYA S V, SOURABH P, UMESH C P. Structure tensor-based SIFT algorithm for SAR image registration[J]. *IET Image Processing*, 2020, 14(5): 929-938.
- [23] 崔哲. 基于 SIFT 算法的图像特征点提取与匹配[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [24] ZHOU Q, LI X. STN-homography: Direct estimation of homography parameters for image pairs [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(23): 5187.
- [25] BEI X, XUE B, LIN X H. Water system segmentation method of high resolution remote sensing image based on ecognition [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1651(1): 012162.
- [26] 王超,张雪红,石爱业,等. 结合阴影补偿的对象级高分辨率遥感影像多尺度变化检测[J]. *通信学报*, 2018, 39(9): 159-167.

作者简介

赵天宇, 本科, 主要研究方向为遥感影像处理。

E-mail: 201983180008@nuist.edu.cn

王超(通信作者), 副教授, 研究生导师, 主要研究方向为高分辨率遥感影像处理。

E-mail: chaowang@nuist.edu.cn