

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107489

基于双边滤波和小目标抑制的异源遥感变化检测^{*}

徐 伟¹ 王驿飞¹ 张 艳⁴ 陈晓辉^{2,3} 徐劲节⁴ 王 超^{2,3,4}

(1.南京信息工程大学 长望学院 南京 210044; 2.三峡大学 湖北省水电工程智能视觉监测重点实验室 宜昌 443002; 3.三峡大学 水电工程智能视觉监测宜昌市重点实验室 宜昌 443002; 4.南京信息工程大学 电子与信息工程学院 南京 210044)

摘 要: 针对异源高分遥感影像变化检测中面临突出“伪变化”突出问题,提出了一种基于改进双边滤波和小目标抑制的变化检测方法。在传统基于全局像素的滤波策略的基础上,设计了一种分割对象边界约束条件下的改进双边滤波器,以提高对象内部像素间的空间结构一致性;此外,为进一步弱化局部异常值所导致的“伪变化”,提出了一种基于高阶神经元 on-off 通道的小目标抑制策略;最后,采用大津法对差分信息进行分类,从而获得最终变化检测结果。通过对多组异源高分遥感影像的实验结果表明,所提出方法能够有效减小“伪变化”所造成的检测误差,总体精度可达 92.2%,误检率低于 8.7%,在目视分析和定量评价中均显著优于 3 组对比方法。

关键词: 异源高分分辨率遥感影像;变化检测;双边滤波;小目标

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

Heterogeneous remote sensing image change detection based on bilateral filtering and small target suppression

Xu Wei¹ Wang Yifei¹ Zhang Yan⁴ Chen Xiaohui^{2,3} Xu Jinjie⁴ Wang Chao^{2,3,4}

(1. Changwang School of Honors, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Hubei Key Laboratory of Intelligent Vision Based Monitoring for Hydroelectric Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. China Yichang Key Laboratory of Intelligent Vision Based Monitoring for Hydroelectric Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Aiming at the prominent "pseudo-change" problem in the detection of changes in heterogeneous high-resolution remote sensing images, this paper proposes an object-level change detection method based on improved bilateral filtering and small targets suppression model. On the grounds of the traditional filtering strategy based on global pixels, this paper designs an improved bilateral filter under the boundary constraint of segmented objects to improve the spatial structure consistency between pixels in the object. Moreover, in order to further weaken the "false change" caused by local outliers, the paper proposes a small target suppression strategy based on high-order neuron on-off channel. Finally, the OTSU method is used to classify the difference information and obtain the final change detection results. The experimental results of multiple groups of heterogeneous high-resolution remote sensing images show that the proposed method can effectively reduce the detection error caused by "pseudo change", the overall accuracy can reach 92.2%, and the false detection rate is less than 8.7%. It is significantly better than the three groups of comparison methods in visual analysis and quantitative evaluation.

Keywords: multi-source high resolution remote sensing images; change detection; bilateral filter; small target

0 引 言

变化检测在遥感技术领域中,其目的是检测出同一区

域在不同时期的数据中变化的区域及类型,是土地利用、土地覆盖检测的关键技术^[1]。近年来,随着遥感技术水平的持续发展,传感器技术和航天技术的发展,使高分辨率遥感

收稿日期:2021-08-04

^{*} 基金项目:湖北省水电工程智能视觉监测重点实验室(三峡大学)开放基金(2020SDSJ05)、湖北省水电工程智能视觉监测重点实验室建设(2019ZYD007)、南京信息工程大学大学生创新创业训练计划项目(1514072101275)资助

影像的获取变得越发容易^[2]。高分辨率遥感影像不仅可以提供更加丰富的地物信息,其获取成本也在不断降低。因此,基于异源高分辨率遥感影像的变化检测成为当前遥感技术邻域的研究热点之一^[3]。

与单源遥感影像相比,异源遥感影像变化检测中具有数据冗余性和互补性等优点^[4]。尽管如此,不同传感器带来的光谱、纹理及成像视角等差异降低了对象内部像素的空间一致性,以及更加突出的“伪变化”问题。为提高对象内部像素的空间一致性,学者们尝试引入滤波模板来加以应对空间一致性问题^[5];例如,侯榜焕等^[6]提出了结合多尺度空间滤波与层级网络的基于结构保持的高光谱特征选择算法;赵程等^[7]利用滚动导向滤波能够更好地平滑图像纹理边缘信息,保留图像边缘信息的优势,结合混合多尺度分解方法,提出一种充分考虑了空间一致性的异源影像融合策略;朱建章等^[8]在传统背景感知滤波算法的基础上加入了空间一致性约束和时间约束,提出了学习时空一致性相关滤波算法,提升了算法在复杂情况下运行的鲁棒性得到提升。尽管如此,此类基于全局像素的滤波策略未考虑对象边界的约束,从而导致滤波模板与对象固有形状的不匹配,降低了滤波结果的准确性与可靠性。针对对象内部可能存在小目标(即局部异常值)所导致的“伪变化”问题,Wiederman 等^[9]提出了一种小目标检测神经元,在此基础上,黄凤辰等^[10]提出了一种基于高阶神经元 on-off 通道的多光谱遥感影像小目标仿生检测模型和目标检测方法,能够有效抑制背景纹理特征的同时实现小目标的检测和增强。尽管如此,该方法的小目标检测能力由影像空间分辨率决定,不仅无法实现对象内部的小目标检测,也缺乏对小目标的抑制策略,因此难以应对变化检测中小目标所引起的“伪变化”问题。

基于以上分析,本文提出了一种基于双边滤波和小目标抑制的异源遥感变化检测方法。1)在分割对象的边界约束条件下,采用以影像分割后对象作为滤波窗口的双边滤波以提高影像分割对象内部像素间的空间分布一致性。2)提出一种基于高阶神经元 on-off 通道建立的小目标抑制模型,通过保留相反极性边缘,对其他局部异常值进行进一步抑制,实现对分割对象内的小目标抑制,减少伪变化。3)采用传统的二分类方法获得最终的变化检测结果^[11]。最后,通过对比多组异源高分辨率遥感影像进行变化检测,实验证明了所提出算法的有效性。

1 方 法

所提出的方法主要包括 4 部分:首先,对影像进行配准和分割,得到统一的对象集合;其次,采用改进的自适应双边滤波以提高对象内部像素的空间结构一致性,在此基础上,通过建立小目标抑制模型,进一步弱化局部异常值所导致的“伪变化”;最后,计算不同对象间的 SSIM 值,并结合 OTSU 法确定最终的变化检测结果。算法实现流程如图 1 所示。

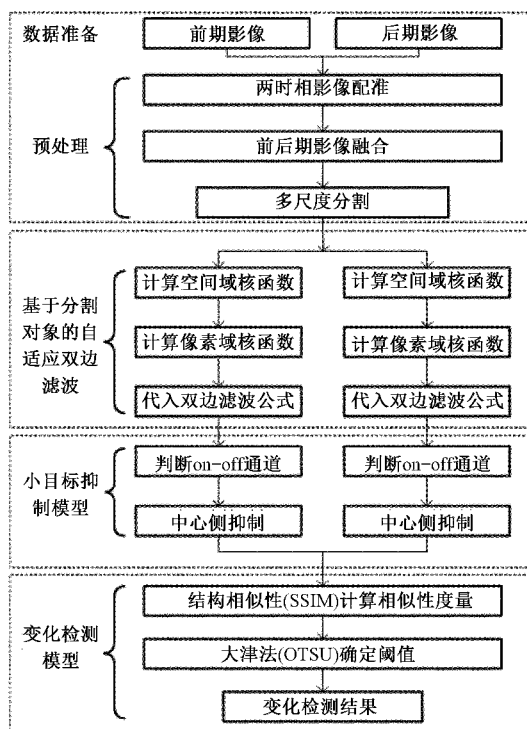
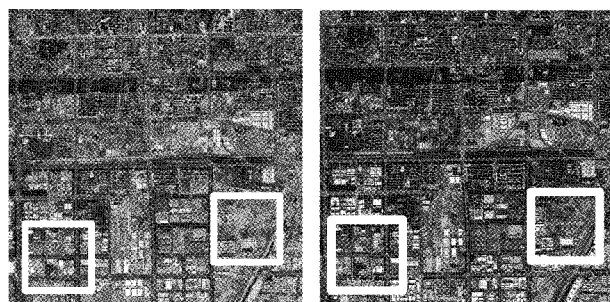


图 1 算法流程

1.1 数据准备和预处理

1) 数据准备

本文采用两组不同传感器的高分辨率遥感影像进行实验验证,具体为:第 1 组为宁夏银川市 2018 年 2 m 分辨率的高分一号卫星和 2020 年 0.81 m 分辨率高分二号卫星 R、G、B 三波段影像,如图 2 所示;第 2 组为陕西西安市 2019 年 2.1 m 分辨率资源三号卫星和 2020 年 2 m 分辨率高分一号卫星 R、G、B 三波段影像,如图 3 所示。



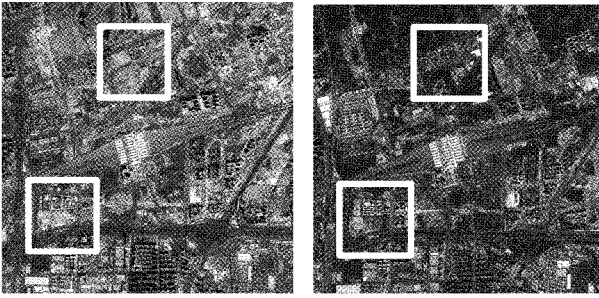
(a)宁夏银川2018年高分一号遥感影像 (b)宁夏银川2020年高分二号遥感影像

图 2 第 1 组遥感影像

如图 2~3 所示,两组影像均为包含植被、居民楼、建筑工地等典型地物的城市场景。实验中,本文在两组数据集分别选取了两块存在显著变化的区域进行分析,即图 2~3 中方框标识出的区域。

2) 预处理

在预处理阶段,采用目前流行的遥感处理商业软件



(a) 陕西西安2019年资源三号遥感影像 (b) 陕西西安2020年高分一号遥感影像

图 3 第 2 组遥感影像

ENVI,对不同分辨率的影像进行配准和分割,以获得统一的对象集合 R_{obj} 。其中,通过对配准之后的不同时相、相同分辨率影像的对应波段进行均值融合,从而获得新的 R、G、B 三波段融合影像,并作为分割的输入。

1.2 基于分割对象的自适应双边滤波

针对传统的高斯滤波会导致部分边缘模糊、边缘不连续^[12],由 Tomasi 等^[13]提出的双边滤波器,将影像的像素域信息和空间域信息作为两个高斯核函数进行非线性组合,在提高影像的平滑性同时,能够较好地保持影像边缘信息,并且提高影像的空间结构一致性^[14-15]。

尽管如此,传统的双边滤波没有考虑滤波窗口内不同位置像素的权重,依赖于空间标准差和像素灰度值标准差的选择,凭借经验预设参数值,不具备通用性从而降低了滤波的可靠性与自动化程度^[16]。为此,本文以对象边界为自适应滤波窗口,并提出了空间和像素域核函数的标准差自适应策略,具体步骤如下。

步骤 1: 设对象集合 R_{obj} 中的任一对象为 R_i , 以 R_i 的边界为滤波窗口,从而保证滤波窗口与实际应用中地理对象的相互匹配。在此基础上,采用 R_i 内的全部像素进行后续核函数的计算。

步骤 2: 由于采用了不规则的对象边界作为滤波窗口,本文以 R_i 的质心 o_i 作为滤波窗口的中心,计算 R_i 内每个像素到 o_i 的距离,得到距离集合 L_{obj} 。

步骤 3: 依据 L_{obj} , 依据式(1)计算空间域核函数 G_d :

$$G_d = c \frac{L_{obj}^2}{2(\arccos(C))^2} \quad (1)$$

其中, C 代表 R_i 内每个像素灰度值与所有像素灰度均值之差,表示该像素与对象内其他像素之间的关联程度,其值越小,表明两者关联程度越高。

步骤 4: 令 σ_p 为 R_i 内所有像素灰度的标准差,计算空间域核函数 G_p :

$$G_p = e^{-\frac{p_o^2}{2\ln(\sigma_p)^2}} \quad (2)$$

其中, P_o 代表 o_i 与 R_i 内其他像素灰度值之差。

步骤 5: 采用式(3)对每个时相的 R、G、B 进行双边滤波,以提升对象内像素的间的空间结构一致性。

$$I'_k = \frac{1}{W_p} \sum_{I \in R_i} G_d G_p I_k \quad (3)$$

式中: $W_p = \sum_{I \in R_i} G_d G_p$, I_k 为 R_i 中的任意像素 p 的灰度值, I'_k 为更新后的灰度值。

1.3 小目标抑制模型

针对对象内部可能存在小目标(即局部异常值)所导致的“伪变化”,本文受蝇视觉小目标检测启发,提出了一种基于高阶神经元 on-off 通道建立的小目标抑制模型。其中,高阶神经元 on 通道和 off 通道分别代表了小目标的一组边缘。由于在遥感影像中小目标可以近似为亮目标,因此分别通过判断行与列的邻域内是否存在灰度值先增加后减弱的趋势,即可获得小目标检测结果。基于这种假设,所提出模型通过提取极性相反的边缘像素,对小目标进行抑制,以达到减少伪变化的目的,具体步骤如下。

步骤 1: 令 R_i 内的任一像素 p 的灰度值为 $gray$, 在 R_i 边界约束下,分别计算 p 所在行和列的均值,定义为 \bar{I}_h 和 \bar{I}_v 。

步骤 2: 若满足 $gray \geq \bar{I}_h$, 则 p 对应行的 on 通道; 否则, 对应行 off 通道。

步骤 3: 若满足 $gray \geq \bar{I}_v$, 则 p 对应列的 on 通道; 否则, 对应列 off 通道。

步骤 4: 定义 p 的邻域为相邻的两个像素。以行为例, 若 p 对应 off 通道, 则不改变其灰度值; 若 p 对应 on 通道, 则如果行邻域内对应 off 通道的像素个数更多, 则将这些像素的灰度均值作为 p 的灰度值。

步骤 5: 对列采取相同的处理策略后, 对 p 在行和列中所取得的两个灰度值取平均, 作为小目标抑制后的 p 的灰度值, 定义为 $gray'$ 。

步骤 6: 重复步骤 1~5, 遍历所有对象及对象内的像素, 可获得影像抑制小目标处理结果。

1.4 变化检测模型

本文选择结构自相似性 SSIM (structural similarity index) 作为多时相影像对象间的相似性度量, 原因在于: SSIM 综合考虑了对象间的均值、方差和协方差, 能够综合反映光谱、纹理及空间结构特征相似性, 对不同传感器间的成像差异具有良好的鲁棒性^[17-18]。对两时相间的 R_i 计算 SSIM 公式如下:

$$SSIM(R_i) = \frac{(2\mu_1\mu_2 + 0.3)(2\sigma_{12} + 0.9)}{(\mu_1^2 + \mu_2^2 + 0.3)(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 0.9)} \quad (4)$$

其中, μ_1 、 μ_2 、 σ_1 、 σ_2 、 σ_{12} 分别是 R_i 在时相 1、2 影像中的均值、标准差与协方差。分别遍历 R、G、B 三波段中的所有对象, 可得到每个波段中 R_{obj} 对应的 SSIM 集合 $SSIM_{obj}$ 。利用大津法 (OTSU)^[19] 分别确定 R、G、B 波段的 SSIM 阈值 $\{T_R, T_G, T_B\}$ 。若 R_i 的 SSIM 值在三波段中小于阈值, 则该对象为变化对象, 否则为未变化对象, 从而可获得最终变化检测结果^[20]。

2 实验与结果

2.1 实验数据与对比策略

实验中,实验 1 和实验 2 在前文介绍的数据集 1 中分

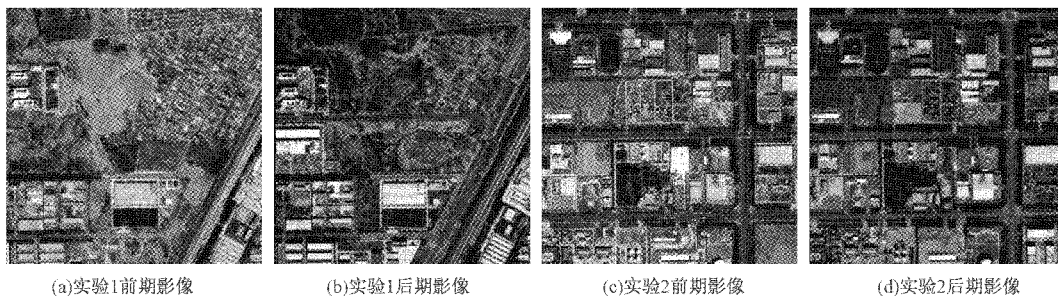


图 4 数据集 1 遥感影像



图 5 数据集 2 遥感影像

别选择了一块区域,尺寸均为 512×512 像素。实验 3 和实验 4 采用数据集 2 中的两块不同区域,尺寸均为 512×512 像素。如图 4 和 5 所示。

实验中,实验 1 和实验 2 在前文介绍的数据集 1 中分

验策略:策略 1,不采用改进双边滤波和小目标抑制模型,其他步骤与所提出方法一致;策略 2,仅使用改进双边滤波方法对图像进行处理,其他步骤与所提出方法一致;策略 3,仅使用小目标抑制模型方法对图像进行处理,其他步骤与所提出方法一致。通过本文方法与策略 1 进行对比,能够说明本文方法对变化检测精度的总体提升。通过策略 2 与策略 3 分别与策略 1 进行对比,能够说明所提出两种模型的有效性。通过本文方法与策略 2、策略 3 进行对比,能够说明所提出两种模型的互补性。此外,对策略 2、策略 3 进行了目视分析,体现了所提出两种模型较好地减小了“伪变化”。

2.2 实验结果与精度评价

1) 一般结果与分析

本文采用总体精度、错检率、漏检率、Kappa 精度评价指标对 4 组变化检测结果进行定量分析,精度评价结果如表 1~4 所示。各实验组结果如图 6~9 所示,实验结果证明,所提的两种策略均能有效地检测实际发生变化的区域,两者结合运用,变化检测虚检率和误检率下降,总体精度提升更高。

基于实验数据,将策略 2 与策略 1 对比,4 组实验总体精度平均提升 9.2%,说明了本文提出的改进双边滤波对变化检测总体精度有所提升,说明单靠一般的变化检测算法来判断结果并不准确,由于异源高分遥感影像受传感

器、时空等条件的制约,很容易受数据噪声的影响,而本文提出的以对象为边界约束的双边滤波器则通过对对象内的像素滤波,使对象内部像素具有良好的空间结构一致性,一定程度上克服了异源图像差异带来的变化检测误差。将策略 3 与策略 1 对比,4 组实验总体精度平均提升 7.5%,说明了局部异常值对于异源高分遥感影像的变化检测效果有直接影像,而本文提出的小目标抑制模型能有效减少局部异常值带来的伪变化。将本文方法与策略 1 进行对比,实验 1 总体精度提升 10%,实验 2 总体精度提升 18.8%,实验 3 总体精度提升 19.1%,实验 4 总体精度提升 1.4%,误检率、漏检率都得到了提升,本文方法总体精度在 3 组对比中达到最高,两种模型克服了针对不同方面对变化检测精度的影响,体现了模型间的互补性和所提策略的有效性,提高了变化检测结果的总体精度。

为了评价所提出方法的性能,本文设计了 3 种对比实

器、时空等条件的制约,很容易受数据噪声的影响,而本文提出的以对象为边界约束的双边滤波器则通过对对象内的像素滤波,使对象内部像素具有良好的空间结构一致性,一定程度上克服了异源图像差异带来的变化检测误差。将策略 3 与策略 1 对比,4 组实验总体精度平均提升 7.5%,说明了局部异常值对于异源高分遥感影像的变化检测效果有直接影像,而本文提出的小目标抑制模型能有效减少局部异常值带来的伪变化。将本文方法与策略 1 进行对比,实验 1 总体精度提升 10%,实验 2 总体精度提升 18.8%,实验 3 总体精度提升 19.1%,实验 4 总体精度提升 1.4%,误检率、漏检率都得到了提升,本文方法总体精度在 3 组对比中达到最高,两种模型克服了针对不同方面对变化检测精度的影响,体现了模型间的互补性和所提策略的有效性,提高了变化检测结果的总体精度。

如表 1~4 中总体精度所示,尽管实验 1 中采用策略 2 的总体精度和实验 4 中采用策略 3 的总体精度有所降低,但结合运用后总体精度仍然有所提高,验证了策略 2 与策略 3 之间的互补性。结合图像进行定性分析,通过图像的变化检测结果和目视检译分析可得,策略 2 下实验 1 总体精度降低的原因是图像内地物复杂,小建筑密集,空地上纹理丰富,导致数据预处理时,无法准确得到对象边界^[21],进而导致本文提出的改进双边滤波模型无法达到很好的效果。策略 3 下实验 4 总体精度降低的原因是图像中小目

标丰富,如工地设施、汽车等分布密不规则,道路密集,目视检译可发现对小目标抑制效果明显,而抑制小目标后的图像对象内空间结构一致性较差,进而影响了变化检测总体精度结果。

表 1 实验 1 各策略下的总体精度

策略/ 评价指标	总体精度/ %	错检率/ %	漏检率/ %	Kappa
策略 1	83.8	9.5	6.7	0.600
策略 2	82.1	10.1	7.8	0.556
策略 3	90.5	3.9	5.6	0.753
本文方法	92.2	3.3	4.5	0.798

表 2 实验 2 各策略下的总体精度

策略/ 评价指标	总体精度/ %	错检率/ %	漏检率/ %	Kappa
策略 1	73.0	1.1	25.9	0.492
策略 2	75.7	2.7	21.7	0.528
策略 3	82.5	2.7	14.8	0.649
本文方法	86.8	1.6	11.6	0.731

表 3 实验 3 各策略下的总体精度

策略/ 评价指标	总体精度/ %	错检率/ %	漏检率/ %	Kappa
策略 1	67.8	7.2	25.0	0.375
策略 2	69.2	8.2	22.6	0.396
策略 3	77.4	4.2	17.8	0.554
本文方法	80.8	4.3	14.9	0.617

表 4 实验 4 各策略下的总体精度

策略/ 评价指标	总体精度/ %	错检率/ %	漏检率/ %	Kappa
策略 1	76.1	10.9	13.0	0.514
策略 2	76.6	8.7	14.7	0.521
策略 3	71.7	12.5	15.7	0.424
本文方法	77.2	8.7	14.1	0.532

2) 基于代表性局部图的目视分析

为了进一步验证改进双边滤波和小目标抑制模型效果,本文在实验 3 和实验 4 中分别选择了一块代表性区域进行目视分析和讨论,如图 10 和 11 所示。

基于图 10 分析,与未滤波图像相比,滤波后图像光谱

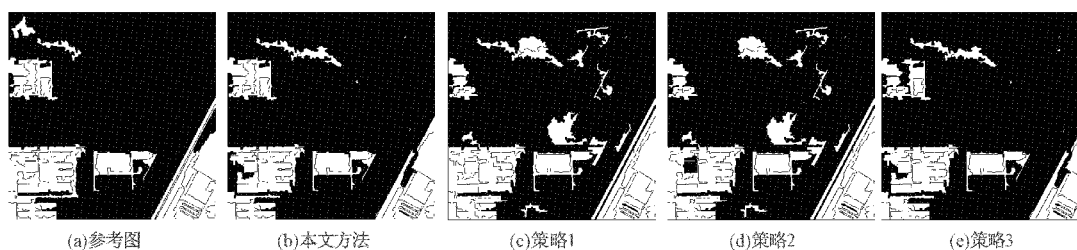


图 6 实验 1 结果图

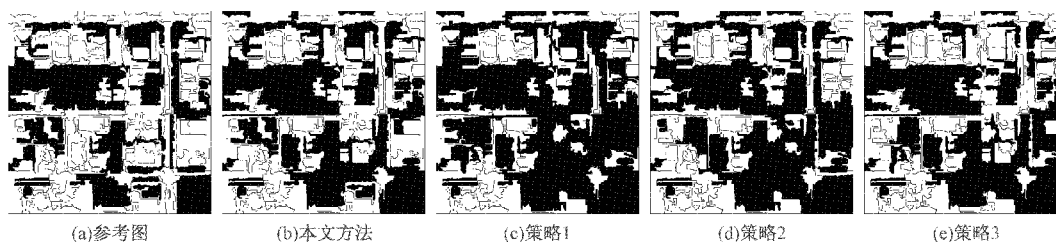


图 7 实验 2 结果图

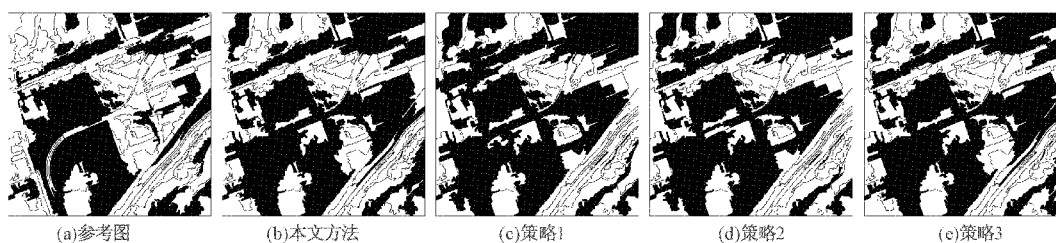


图 8 实验 3 结果图

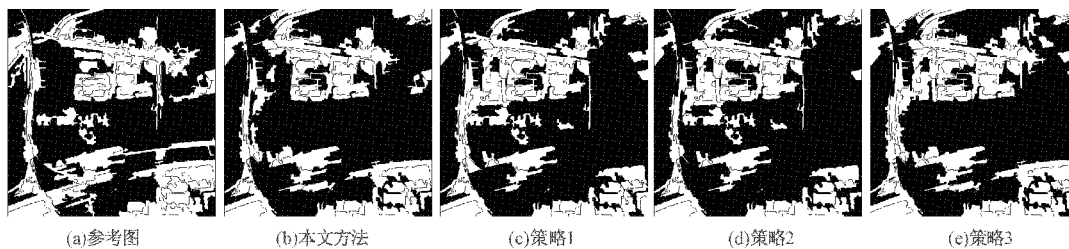


图 9 实验 4 结果图

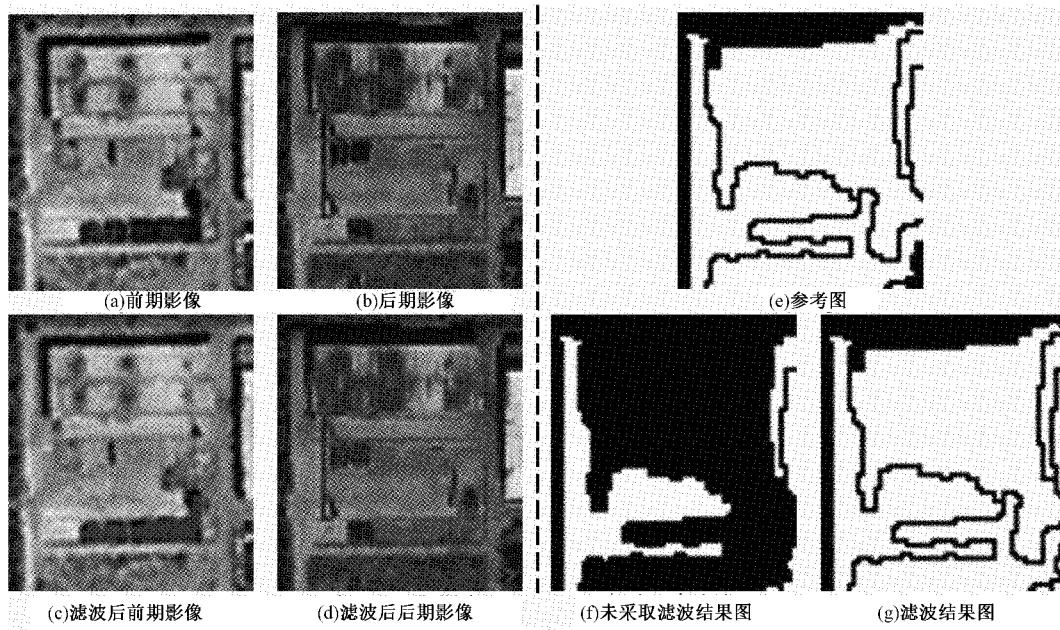


图 10 滤波前后影像及变化检测结果

差异更小,对象内部更加平滑,趋于均质化,对象边缘更加明显,提高了对象的空间结构一致性,在后续计算对象间的结构相似性时,能减少因为不同传感器对纹理的敏感性差异导致的误检和漏检,进而提升变化检测的精度。基于图 10(c)~(g)也可证明实验结果与定量分析结论一致,证明本文提出的双边滤波器能有效提高对象内的空间分布的一致性,平滑内部纹理。

从图 11 对比分析小目标抑制模型效果,原图像中城市场景中由大量道路、工厂、工地构成,各对象内可能存在传感器因时空差异导致产生的大量无关信息,如汽车、道路边界、屋顶的太阳能设备反光、工地的设施等小目标,这些目标所引起的变化应被视为伪变化,对判断对象间的变化产生影响,如图 11(a)、(b)中由于汽车移动所导致的局部异常值,会在变化检测判断两对象间的结构相似性时产生误差,影响变化检测结果。而此类小目标与对象内其他信息相比明显,其光谱强度较高,易造成对变化检测结果的影响。经过小目标抑制后,人眼检译能明显看出伪变化的减少。基于图 11(e)~(g)定性分析,小目标抑制也提高了变化检测的总体精度,证实了小目标抑制模型的有效性。

2.3 邻域参数对精度影响分析

由于邻域参数反映了“小目标”的提取范围,因此该参数的选择是否合理对本文方法的变化检测精度有显著影响。为此,设定邻域取值区间为 $[1,5]$,步长为 1,在 4 组实验中分析邻域参数设定与总体精度之间的关系,实验结果与变化趋势如图 12 所示。

由图 12 分析变化检测总体精度与邻域参数的关系,结果表明,4 组实验都在邻域参数从 1 增大到 2 时,变化检测总体精度上升;当邻域参数从 2 增大到 5 时,总体精度呈下降趋势。其可能的原因是,在邻域增大时,局部异常值在小目标抑制模型的 on-off 通道中有较好的匹配性,抑制小目标后对象内的有效信息得到增强,无关信息减弱;而邻域参数继续增大时,小目标抑制模型不仅对局部异常值进行匹配,对于尺寸较小的对象,若其边缘与内部光谱差异大,小目标抑制模型也会对其进行匹配,造成误判,虚检率上升,导致变化检测总体精度下降,而尺寸较大的对象不受影响。由此可见,随着邻域参数的增加,总体精度呈现先上升后下降的趋势。其中,4 组实验均为当邻域参数设定为 2 时总体精度最好,与本文设定一致。

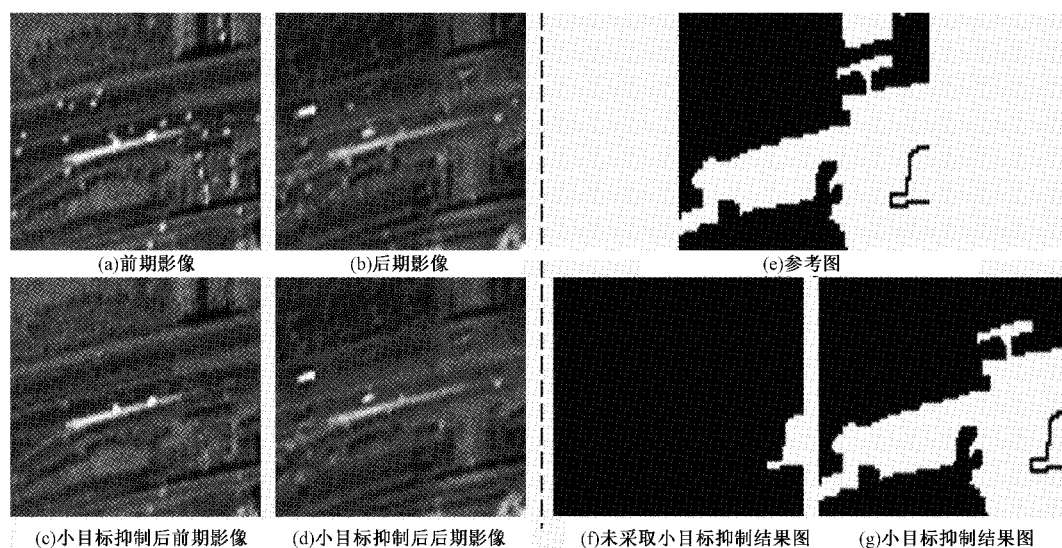


图 11 小目标抑制前后影像及变化检测结果

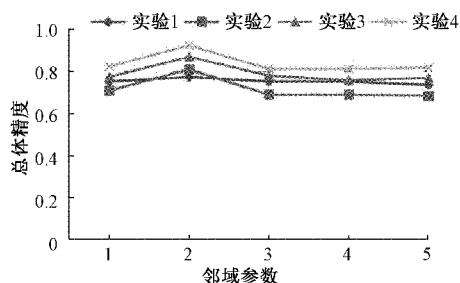


图 12 不同邻域下实验组总体精度变化趋势

3 结 论

面向异源高分辨率遥感影像变化检测,本文提出了一种基于改进的自适应双边滤波和小目标抑制的异源高分辨率遥感影像变化检测方法。针对传统双边滤波结果与对象内空间一致性不匹配的问题,本文采用分割对象的边界进行滤波约束,并提出了空间域与像素域的核函数参数自适应方法。在此基础上,受蝇视觉小目标检测机理启发,设计了一种基于高阶神经元 on-off 通道的小目标抑制模型,对对象中的小目标进行检测和抑制,以进一步减少异常值所引起的“伪变化”对检测精度的影响。通过多组异源高分辨率遥感影像变化检测实验表明,变化检测总体精度可达 92.2%,误检率低于 8.7%,在目视分析和定量评价中均显著优于 3 组对比方法。所提出的改进双边滤波器及小目标抑制策略均有助于显著提高变化检测精度,本文方法均能有效提高影像空间一致性,抑制小目标,减少“伪变化”,从而提高变化检测结果精度。

在本文提出的方法中,由于双边滤波器的滤波窗口采用影像分割后的对象,导致因个别滤波窗口尺寸过大而引起运算时间过长,运算效率低下等问题。在后续的研究中

将进一步对滤波算法进行优化,以提高方法的稳定性与运算效率。

参考文献

- [1] 任秋如,杨文忠,江传建,等. 遥感影像变化检测综述[J]. 计算机应用, 2021, 41(8): 2294-2305.
- [2] 李学亮,王维. 基于 CNN 和 SIFT 特征的遥感图像变化检测[J]. 电子测量技术, 2019, 42(21): 87-91.
- [3] 张钰. 视觉认知启发的高分辨率遥感影像建筑区提取方法[D]. 南京:南京邮电大学, 2020.
- [4] 李树涛,李聪好,康旭东. 多源遥感图像融合发展现状与未来展望[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 148-166.
- [5] 郭淑娟,高媛,秦品乐,等. 基于多尺度边缘保持分解与 PCNN 的医学图像融合[J]. 计算机工程, 2021, 47(3): 276-283.
- [6] 侯榜焕,张耿,王飞,等. 结合多尺度空间滤波和层级网络的基于结构保持的高光谱特征选择[J]. 光子学报, 2017, 46(5): 185-194.
- [7] 赵程,黄永东. 基于滚动导向滤波和混合多尺度分解的红外与可见光图像融合方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 106-120.
- [8] 朱建章,王栋,卢湖川. 学习时空一致性相关滤波的视觉跟踪[J]. 中国科学:信息科学, 2020, 50(1): 128-150.
- [9] WIEDERMAN S D, SHOEMAKER P A, O'CARROLL D C. A model for the detection of moving targets in visual clutter inspired by insect physiology[J]. PLoS One, 2008, 3(7): 2784.
- [10] 黄凤辰,李敏,石爱业,等. 受昆虫视觉启发的多光谱遥感影像小目标检测[J]. 通信学报, 2011, 32(9): 88-95.
- [11] 盛钊,高鑫. 多波段遥感影像变化检测中差异影像构

- 造研究[J]. 电子测量技术, 2013, 36(4):58-62.
- [12] 童胜杰, 江明, 焦传佳. 一种改进工件边缘检测方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(1): 128-134.
- [13] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images[C]. Proceedings of the 6th International Computer Vision(ICCV), 1998:839-846.
- [14] 孙会娇, 代煜, 张建勋, 等. 直流电源激励下的电路高分辨力应变信号处理[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 184-190.
- [15] 延翔. 多源图像融合算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2018.
- [16] 张巍巍, 张平, 唐妙奇. 应用自适应双边滤波的车载摄像头表面瑕疵检测[J]. 电子测量技术, 2019, 42(20): 148-151.
- [17] LONG Q, XIE Q W, MITA S, et al. A real-time dense stereo matching method for critical environment sensing in autonomous driving [C]. Proceedings of 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2014: 574-581.
- [18] 何浩. 顾及视差和阴影的城市典型地物高分遥感变化检测[D]. 武汉:中国地质大学, 2020.
- [19] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [20] 吕可枫, 张永生, 于英, 等. 超像素的随机森林遥感影像变化检测[J]. 测绘科学技术学报, 2020, 37(3): 269-274.
- [21] 李崇, 王双亭, 都伟冰, 等. 步进式区域生长的城区摄影测量点云分类[J]. 测绘科学, 2020, 45(1): 123-130, 137.

作者简介

徐炜, 本科生, 主要研究方向为遥感影像处理。

E-mail: 201883320032@nuist.edu.cn

王驿飞, 本科生, 主要研究方向为遥感影像处理。

E-mail: 201883320047@nuist.edu.cn

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

E-mail: chaowang@nuist.edu.cn