# 基于多时相遥感图像的人造目标变化检测算法

苏 娟 [1,2] 王贵锦 [1] 林行刚 [1] 刘代志 [2]

**摘 要** 传统的像素级变化检测方法的检测性能受到以下因素的严重制约: 图像辐射差异、配准误差和差异图像分类门限的选取, 并且难以从检测信息中提取出关键的变化. 本文针对遥感图像中人造目标的变化检测问题, 提出了一种综合特征级和像素级的两步变化检测算法. 首先将大幅多时相遥感图像分成一系列子图像对, 采用有监督子图像对分类方法, 提取人造目标变化的感兴趣区域, 然后采用像素级变化检测算法对感兴趣区域进行变化检测, 得到定量的检测结果. 实验结果表明了该算法的可行性和有效性.

**关键词** 变化检测, 人造目标, 几何结构, HOG 描述子, Gabor 纹理
**中图分类号** TP75

# A Change Detection Algorithm for Man-made Objects Based on Multi-temporal Remote Sensing Images

SU Juan[1,2] WANG Gui-Jin[1] LIN Xing-Gang[1] LIU Dai-Zhi[2]

**Abstract** The detection accuracy of traditional pixel-level change detection algorithms is seriously influenced by radiometric difference, registration error and the determination of classification threshold for a different image, and it is difficult to differentiate the true changes of interest from various kinds of detected changes. Therefore, a novel two-step change detection algorithm combining feature-level and pixel-level techniques is proposed to detect changes of man-made objects in multi-temporal remote sensing images. Large-size images are divided into overlapping sub-images, and the changed regions containing man-made objects are extracted by supervised sub-image classification. Then, a pixel-level change detection algorithm is developed to obtain quantitative detection results. Experimental results demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words** Change detection, man-made object, geometric structure, histogram of oriented gradient (HOG) descriptor, Gabor texture

随着遥感图像数据空间分辨率和时间分辨率的提高, 多时相遥感图像变化检测已成为遥感图像处理领域中重要的研究内容, 广泛地应用于地理信息系统更新、资源环境监测、城市规划和国防建设等方面. 根据图像分析的不同层次, 常用的变化检测方法可分为像素级变化检测、特征级变化检测与目标级变化检测. 其中, 目标级变化检测是一种基于目标模型的高层分析方法[1], 直接面向应用, 但易受目标检测算法准确性的制约, 尤其是在复杂的背景情况下. 像素级变化检测方法直接在原始图像上进行检测, 是比较常用和成熟的方法, 部分遥感图像处理软件都包含了相应的模块, 在基于中低分辨率遥感影像的资源环境监测领域取得了许多成功的应用. 但是, 像素级变化检测性能仍然面临以下三个主要因素的影响: 辐射差异、配准误差以及分类阈值的自动选取等[2−4], 当分析对象为大幅高分辨率遥感图像时, 影响尤为严重[5]. 并且, 像素级变化检测结果过于破碎, 难以对其进行分析与描述, 从而提取出真正关心的变化 (如人造目标的变化)[6]. 特征级变化检测对从原始图像中提取出的特征进行分析和检测, 主要用于具有特殊边缘特征和区域特征的地物变化检测, 在高分辨率遥感图像下具有明显的优势, 其检测性能受上述因素的影响相对较小. 但特征级算法用于定性检测居多, 而像素级变化检测可以得到定量检测结果. 因此, 如何有效地利用两种算法的特点, 进行优势互补, 得到准确率高的检测结果, 是目前变化检测方向的研究热点[7].

变化检测算法的选择和设计与具体应用背景和所利用的数据源密切相关, 本文关注的变化为两时相遥感图像中的人造目标变化, 该类变化的检测在军事侦察和城市规划等领域有着非常重要的意义. 一般情况下, 遥感图像中的人造目标与自然场景的组织结构和纹理分布存在较大差异[5−6, 8−10], 并且, 不同类别的人造目标具有不同的组织结构和纹理分布, 同类人造目标在外观或规模上的不同, 也必然导

收稿日期 2007-03-21 收修改稿日期 2007-10-17
Received March 21, 2007; in revised form October 17, 2007
国家自然科学基金 (60472028) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60472028)
1. 清华大学电子工程系 北京 100084 2. 第二炮兵工程学院 西安 710025
1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084 2. The Second Artillery Institute of Engineering, Xi′an 710025
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2008.01040

致其对应的组织结构和纹理分布的不同. 因此, 人造目标的变化可由目标所在局部区域的结构特征和纹理特征的变化进行描述. 文献 [5] 利用两时相全色图像和多光谱图像, 在构造的虚拟图像数据库上训练基于自组织映射的图像检索系统, 通过查询检索对人造目标及其变化进行检测, 算法中采用的特征包括从全色图像中提取的纹理特征和边缘直方图特征. 文献 [6] 从多时相遥感图像中提取具有一定组织结构的人造目标, 采用基于 Housdorff 距离的结构匹配方法对提取出的目标进行变化检测. 该算法的难点在于需要对人造目标进行分割. 文献 [11] 直接提取两幅不同时相图像的变化边缘, 通过排除几类伪变化边缘以得到真正感兴趣的变化边缘, 从而对人造目标变化区域进行定位. 该算法在较高分辨率影像条件下的城区变化检测中取得了较好的效果, 但算法对图像的配准精度要求较高. 文献 [8] 采用图论的方法, 用从不同时相图像中提取的边缘组成属性图, 从中提取出四个特征用于模式分类, 检测图像中有结构的组织的变化情况, 但只能对待检图像作出全局的定性检测, 无法对变化区域进行精确定位.

本文提出了一种适用于大幅高分辨率遥感图像的综合特征级和像素级变化检测的算法, 用于检测多时相遥感图像中人造目标的变化情况. 该算法充分考虑大幅高分辨率情况下图像配准和辐射校正的难度, 利用人造目标的变化会导致目标所在局部区域的组织结构和纹理分布发生变化的特点, 提取对辐射差异和配准误差鲁棒的基于边缘和纹理的区域特征, 采用有监督分类的方法, 对图像区域进行变化与否的分类, 然后对变化区域进行像素级变化检测. 该算法面向人造目标变化检测的特定任务, 无需显式进行人造目标提取或分割, 能直接定位感兴趣的人造目标的变化, 并且检测结果对图像的配准误差和辐射差异鲁棒, 可以有效降低像素层的虚警.

## 1　算法

从模式识别的角度看, 可以把变化检测理解为一个两类分类问题. 从两时相图像中提取分类特征, 设计分类器, 把图像中的像素点对分为变化和非变化两类. 如果将分类对象由像素扩展到区域, 则可以对图像中的区域进行变化情况的分类. 本文算法的特征级变化检测思路即源于此, 将图像划分为子图像对, 特征提取与模式分类均在子图像对上进行. 通过特征级变化检测, 得到一系列变化子图像对和非变化子图像对, 根据提取出的非变化子图像对, 采用回归分析的方法求取整图的辐射校正参数, 对提取出的变化子图像对进行辐射校正, 然后进行像素级变化检测, 从而将检测结果由定性转为定量. 本文提出的变化检测算法如图 1 所示.

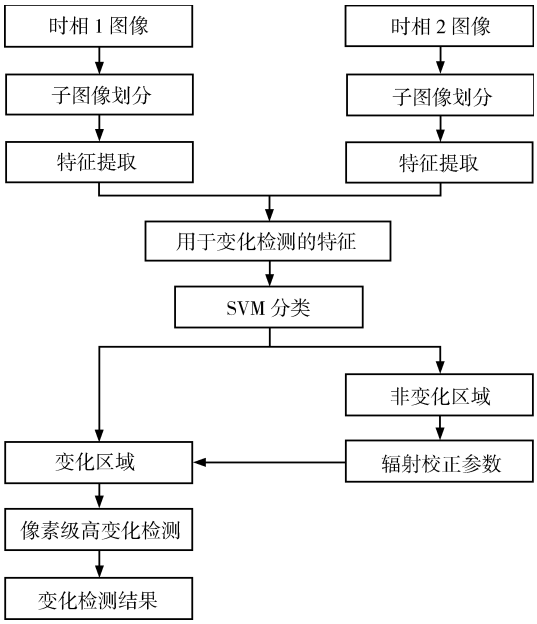



图 1　变化检测算法框图

Fig. 1　Flowchart of the proposed change detection algorithm

### 1.1　特征提取

由于人造目标的变化可由目标所在局部区域的边缘特征和纹理特征的变化进行可靠的描述[5−6, 8−10], 本文选用了以下 3 种特征进行特征级变化检测: 几何结构特征、HOG (Histogram of oriented gradient) 特征以及 Gabor 纹理特征.

#### 1.1.1　几何结构特征

在高分辨率遥感图像中, 几何结构特征是表征人造目标的主要特征. 相应地, 几何结构特征的变化是人造目标变化及毁伤的主要表现形式. 本文关注的人造目标主要包括建筑物、道路、桥梁、机场、油库、发电厂等. 经过大量样本统计发现, 上述目标的几何结构以线型结构、弧型结构或其组合为主, 具有较稳定的组织结构模式. 因此, 本文从图像的边缘图中按照目标的特征描述提取相应的几何结构边缘, 从而避免显式提取目标, 并根据几何结构边缘构造统计意义上的几何结构特征. 本文提取了 3 类几何结构边缘, 上述几类人造目标的几何结构边缘分别可以归类于其中:

1) 圆弧类目标边缘, 如油库、热电厂烟囱、微波雷达站等目标的边缘;

2) 建筑物类目标边缘, 如楼房等目标的边缘;

3) 道路类目标边缘, 如道路、桥梁、机场跑道等目标的边缘.

首先, 采用 Canny 算子得到边缘图像; 然后, 采用连通域搜索的方法将边缘图中的边缘点组合标识为边缘线段, 由于人造目标的边缘以直线或弧线为

主, 曲率比较稳定, 所以从标识的边缘线段中保留曲率稳定的边缘线段, 并去除大量杂乱散碎的边缘线段; 最后对剩余的边缘线段进行分类.

图 2 ∼ 4 分别给出了上述三类不同目标的几何结构边缘提取的中间过程与最后结果.

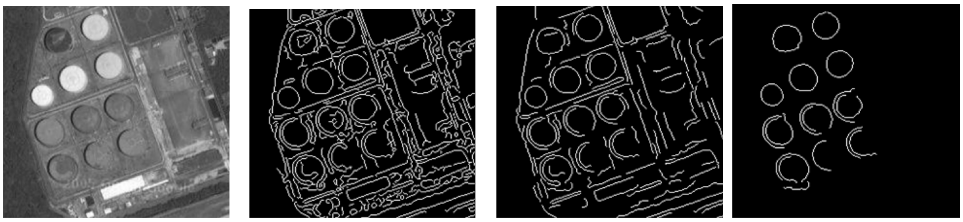
对于油库或其他圆弧类目标, 其边缘曲率比较稳定, 并且, 与直线相比, 其边缘线段长度与边缘线段两端点间距离之差较大. 预设阈值 $threshold$, 计算边缘线段长度 $line_length$ 和边缘线段两端点之间距离 $endpoint_{distance}$, 如果满足

$$\frac{line_length}{endpoint_{distance}} \geq threshold \tag{1}$$

则此边缘线段属于圆弧类目标的边缘. $threshold$ 根据大量的统计实验设为 1.5. 通过 20 余幅油库图像的实验, 表明上述圆弧边缘提取方法简单易行, 并能快速准确地提取出不同尺寸的油库边缘 (见图 2).

建筑物类和道路类目标边缘从剩余的边缘线段中提取. 对边缘线段进行直线拟合, 提取出垂直边缘和平行边缘.

在局部范围 (子图像的划分窗口) 内, 大部分建筑物的顶部边缘呈方形或方形的组合, 并且存在两个主要的相互垂直的主方向. 如果该窗口内建筑物类目标像素比例足够大, 则窗口对应的梯度方向直方图必然在建筑物对应的角度方向出现峰值, 如图 3 (c) 所示. 提取梯度方向直方图局部峰值, 按照峰值由大到小的顺序排列, 如果存在与第一峰值或第

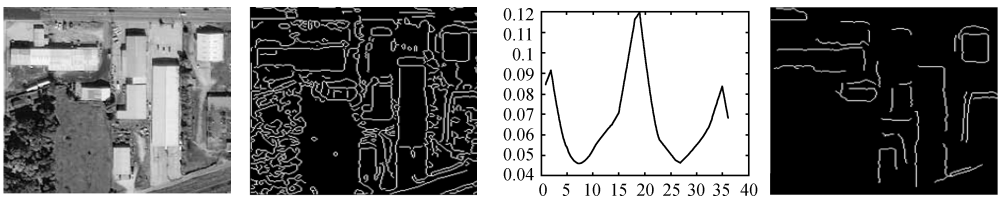


(a) 原始图像 (b) Canny 边缘图 (c) 曲率稳定边缘图 (d) 圆弧类目标边缘

(a) Original image (b) Canny edge map (c) Edges with constant curvature (d) Extracted curvilinear edge structure

图 2 圆弧类目标几何结构边缘提取

Fig. 2 Extraction of edge structure of curvilinear object

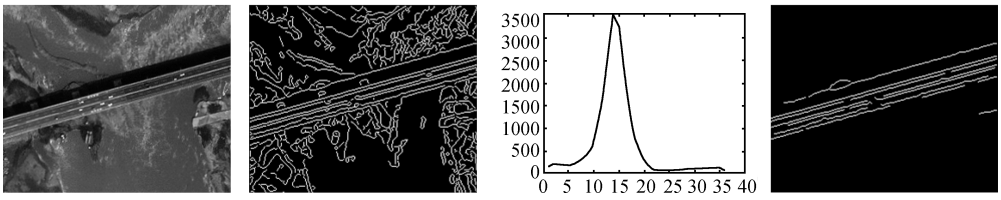



(a) 原始图像 (b) Canny 边缘图 (c) 梯度方向直方图 (d) 建筑物类目标边缘

(a) Original image (b) Canny edge map (c) Histogram of oriented gradient (d) Extracted building-like edge structure

图 3 建筑物类目标几何结构边缘提取

Fig. 3 Extraction of edge structure of building-like object




(a) 原始图像 (b) Canny 边缘图 (c) 对称边缘方向直方图 (d) 道路类目标边缘

(a) Original image (b) Canny edge map (c) Symmetrical edge orientation histogram (d) Extracted road-like edge structure

图 4 道路类目标几何结构边缘提取

Fig. 4 Extraction of edge structure of road-like object

二峰值近似垂直的峰值, 则将成对出现的峰值所对应的角度记录下来. 考察检测窗口的梯度直方图是否存在上述相似或近似垂直的峰值, 如果存在, 再考察提取出的垂直边缘的角度是否与峰值对应的角度相符, 如果符合, 则保留作为建筑物类目标的边缘.

同样, 在局部范围内, 道路类目标的轮廓边缘点群具有在一定距离意义上的对称性, 即沿这些边缘点的梯度方向上, 间隔一定距离, 总可以发现其他相同梯度方向的与之对称的边缘点. 因此, 道路边缘点群的拓扑结构可以用对称边缘点对来描述, 该点对具有相同的梯度方向、距离在一定范围内且连线方向与梯度方向基本一致. 在窗口中检测对称边缘点对, 并按其梯度方向累积计数, 形成能表征道路类目标特征的对称边缘方向直方图[12]. 如果该窗口内道路类目标像素比例足够大, 则窗口对应的对称边缘方向直方图必然在目标对应的角度方向出现峰值, 如图 4 (c) (见上页) 所示. 考察检测窗口的对称边缘方向直方图是否存在峰值, 如果存在, 再考察提取出的平行边缘的角度是否与峰值对应的角度相符, 如果符合, 则保留作为道路类目标的边缘. 对称边缘方向直方图的计算方法见文献 [12].

由上述讨论可知, 整个几何结构边缘的提取过程相当于对 Canny 边缘图进行滤波, 从中提取出有意义的、满足人造目标几何结构定义的边缘. 所以, 提取出的边缘是 Canny 边缘图的一个子集. 分别统计子图像内 3 类边缘点的数目, 则可得到一个表征子图像内几何结构的三维特征向量, 此即为几何结构特征.

### 1.1.2 HOG 特征

与 SIFT (Scale invariant feature transform) 特征类似, HOG 特征通过提取局部区域的边缘或梯度的分布, 可以很好地表征局部区域内目标的边缘或梯度结构, 进而表征目标的形状[13], 所以本文选用的第二个特征为 HOG 特征. 由于在局部区域统计求取, HOG 特征对辐射差异和配准误差有较强的鲁棒性[13]. HOG 特征的构造过程如图 5 所示.

首先将子图像划分为小尺寸的单元, 将梯度方向划分为 8 个区间, 计算每个单元对应的用梯度幅值加权的梯度方向直方图, 将其表示为一个 8 维的特征向量. 子图像中所有单元的特征向量联结起来, 即构成子图像对应的特征向量. 本文将尺寸为 $128 \times 128$ 的子图像划分为 $4 \times 4$ 组尺寸为 $32 \times 32$ 的单元, 对每个单元计算上述的梯度方向直方图, 可得一组 $4 \times 4 \times 8$ 的特征向量. 用整个子图像的直方图“能量”(如 $L_1$ 范数或 $L_2$ 范数) 对特征向量进行归一化处理, 可以进一步去除光照变化的影响.

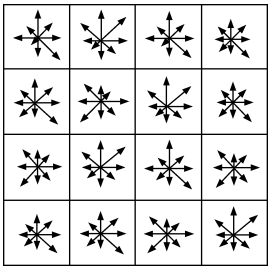


图 5　HOG 描述子

Fig. 5　HOG descriptor

### 1.1.3 Gabor 纹理特征

人造目标的出现或消失, 甚至毁伤会引起所在区域纹理的显著变化, 本文选用的纹理特征为 Gabor 纹理特征[14]. 二维 Gabor 滤波器是带通滤波器, 在空间域和频率域均有较好的分辨能力, 可以提取图像在不同频率尺度和纹理方向的信息. 当图像边缘特征的方向和二维 Gabor 滤波器纹理特征的方向一致时, 二维 Gabor 变换有较强的响应. 二维 Gabor 滤波器由二维高斯包络对平面波进行调制而成. 对于一幅尺寸为 $P \times Q$ 的图像 $I(x, y)$, 其 Gabor 变化由以下卷积的形式给出

$$\Psi_{mn}(x, y) = \sum_s \sum_t I(x - s, y - t) G^*_{mn}(s, t) \quad (2)$$

其中 $G^*_{mn}$ 为 Gabor 滤波器组 $G_{mn}$ 的复共轭, $m$ 和 $n$ 表示滤波器的尺度和方向. 通过将不同尺度和方向的 Gabor 滤波器作用于图像, 可以获得一组滤波图像的幅值

$$E(m, n) = \frac{1}{P \times Q} \sum_x \sum_y |\Psi_{mn}(x, y)| \quad (3)$$

本文中, 滤波器组的尺度和方向数目被设置为 4 和 6. 对每一个输入的子图像, 可以产生一个 24 维的 Gabor 纹理特征向量, 其中每一维为对应的滤波器对子图像的滤波结果的幅值之均值.

## 1.2 SVM 分类

采用上述特征提取算法, 可对每个子图像提取出三维的几何结构特征 $feature1$、128 维的 HOG 特征 $feature2$ 和 24 维的 Gabor 纹理特征 $feature3$. 令 $t_1$ 表示时相 1, $t_2$ 表示时相 2, 则子图像对用于变化检测的特征构造如下

$$\begin{aligned} F_1(t_1, t_2) &= \mathrm{Dist}(feature1_{t_1} - feature1_{t_2}) \\ F_2(t_1, t_2) &= \mathrm{Dist}(feature2_{t_1} - feature2_{t_2}) \\ F_3(t_1, t_2) &= \mathrm{Dist}(feature3_{t_1} - feature3_{t_2}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中特征向量之间的距离采用欧氏距离计算. 由于三个特征具有不同的值域, 在分类之前我们用训练

样本的各个特征的最大值对式 (4) 得到的特征进行归一化处理, 将三个特征的值域归一到区间 [0 1].

采用上述特征构造方法, 先对两幅不同时相图像划分得到的一系列子图像对求出差值意义上的特征向量, 然后采用模式分类的方法将这些子图像对分为变化子图像对和非变化子图像对. 分类器选用以径向基函数为核函数的支持向量机 (Support vector machine, SVM). 选用 SVM 分类的原因在于, SVM 是在统计学习理论基础上发展起来的一种机器学习方法, 是适用于小样本情况的一种强分类器, 能通过综合经验风险和置信范围的大小, 根据结构风险最小化原则取其折衷, 从而得到风险上界最小的分类函数[15].

### 1.3 像素级变化检测

相对辐射校正是像素级变化检测算法必需的步骤, 主要通过调整待校正图像的辐射值, 使相同地物在不同时相图像中的光谱反射值相等, 即“波谱不变”. 常用的相对辐射校正一般都假定待校正图像的灰度值与参考图像的灰度值之间存在线性关系[16]

$$DN_2 = a \times DN_1 + b \tag{5}$$

其中 $DN_1$ 是参考图像中不变目标区域的灰度值, $DN_2$ 是待校正图像中对应的不变目标区域的灰度值, $a$ 和 $b$ 表示增益和偏移. 目前常用的相对辐射校正算法中, 或者需要人机交互选择不变目标区域, 算法缺乏自动性; 或者直接利用整幅图像的统计特性进行参数的求取, 在消除图像间辐射差异的同时, 也削弱了地物的真实变化, 如果图像中变化区域太多, 辐射校正结果会受到变化区域的影响.

本文将特征级变化检测得到的不变区域作为利用式 (5) 求辐射校正参数 $a$ 和 $b$ 时所需的目标区域. 假设获取的不变区域数目为 $M$, 对每个不变区域计算它们在参考图像和待校正图像中的平均 $DN$, 并标记为 $RDN_i$ 和 $SDN_i$, 根据式 (5) 有

$$SDN_i = a_i \times RDN_i + b_i, \quad 1 \le i \le M \tag{6}$$

可对每个不变区域得到一组辐射校正参数 $(a_i, b_i)$, 整图的辐射校正参数 $a$ 和 $b$ 通过对 $M$ 组参数取均值得到. 最后根据式 (5) 对变化区域进行辐射校正, 对校正后的变化区域采用图像差值法进行像素级变化检测, 得到定量检测结果, 其中差异图像的分类门限由基于 EM (Expectation maximization) 算法的 Bayes 方法自动确定[4].

## 2 实验

实验采用的数据集包括 30 对两时相图像, 其中部分图像是从 http://www.spaceimaging.com 下载的 IKONOS 图像, 是近年美国遭受飓风袭击前后的对比图像, 部分图像是近年来网络发布的各种两时相图像. 两时相图像的真实变化主要来自飓风等自然灾害对地物的毁伤, 两时相间人工地物的增减, 军事行动或恐怖活动对人工地物的毁伤等. 所有的实验图像都用遥感商业软件 ENVI 进行配准, 并将配准后的两时相图像划分为 $128 \times 128$ 的子图像, 相邻子图像在上下左右各方向有 50% 的重叠. 子图像尺寸与重叠率的选取是综合考虑图像分辨率、图像中感兴趣的人造目标的尺寸、漏检率要求和计算量后作出的决策, 后文将对此问题进行详细讨论.

### 2.1 特征级变化检测统计实验

从实验图像中选择 100 对变化子图像和 100 对非变化子图像作为 SVM 分类器的训练样本, 为了使训练出的分类器能检测出各种不同性质、不同类型的变化, 选取的训练样本包含了各种变化情况. 将剩余的 5 645 对子图像作为测试样本进行统计实验, 得到的 ROC (Receiver operating characteristic) 曲线如图 6 表示, 纵轴表示正确检测率, 横轴表示对应的虚警率. 该曲线表明本文算法的有监督子图像分类模块在测试集上能取得较好的分类性能.

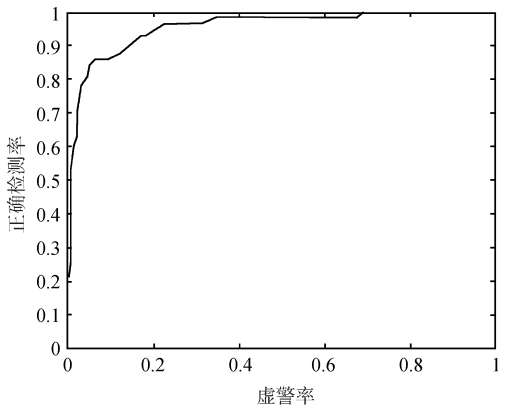



图 6 ROC 曲线

Fig. 6 ROC curve

### 2.2 两步变化检测与对比实验

特征级变化检测给出了变化可能存在的感兴趣区, 用于后续的像素级变化检测. 最终变化检测结果以变化图的形式给出. 由于篇幅所限, 本文仅以一对测试图像为例, 给出本文算法的变化检测结果, 并与同类算法进行了对比实验. 图 7 (a) 和 (b) (见下页) 表示已配准的两时相图像, 图中方框为通过人工视觉判读得到的人造目标变化区域, 其中图 7 (a) 方框里的目标为在时相 1 中存在、但在时相 2 中消失或改变的目标; 图 7 (b) 方框里的目标为在时相 1 中不存在、但在时相 2 中新增的目标; 图 7 (c) 为采用图

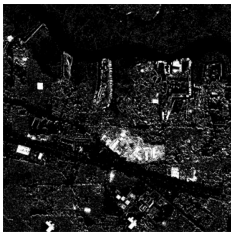
像差值法得到的检测结果; 图 7 (d) 为采用文献 [11] 算法得到的检测结果, 方框里的目标表示在两时相间发生变化的目标; 图 7 (e) 为采用本文算法得到的检测结果.

(a) 时相 1 图像

(a) Image taken at temporal 1

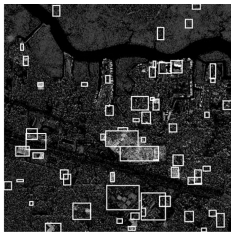
(b) 时相 2 图像

(b) Image taken at temporal 2



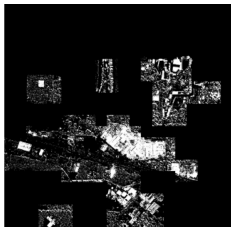
(c) 图像差值法检测结果

(c) Change detection results obtained by image differencing



(d) 文献[11]算法检测结果

(d) Change detection results obtained by algorithm proposed in reference [11]



(e) 本文算法检测结果

(e) Change detection results obtained by our algorithm

图 7　变化检测实验

Fig. 7　Change detection experiment

1) 与图像差值法的比较

由图 7 (c) 可知, 由于配准误差和辐射误差的存在, 图像差值法所得的检测结果中, 包含了大量的虚假变化像素点, 并且, 当检测目的为人造目标变化检测时, 还需对检测出的变化信息进行分析与解译, 从中提取出感兴趣的人造目标的变化. 采用本文算法, 在特征级变化检测定位的变化子图像对内进行图像差值法, 经过第一步的遴选, 虚假变化像素点大大减少, 并可直接定位人造目标的变化.

2) 与文献 [11] 算法的比较

通过对图 7 中两种不同算法所得的检测结果的比较以及分别与人工标注结果的比较可知, 两种算法均存在不同程度的虚警与漏警, 总体检测性能相当. 文献 [11] 算法在自然场景区域检测出不少虚警, 而本文算法因采用的特征强调人造目标与自然场景的区别, 能有效克服这个问题. 变化检测算法的选择和设计与具体应用背景和所利用的数据源密切相关. 正如文献 [11] 所言, 文献 [11] 算法主要适用于较高分辨率影像条件下的城区变化检测, 而本文的算法设计和实验结果均表明, 本文算法主要适用于解决位于自然场景中的人造目标的变化检测问题.

### 2.3　算法有效性分析

大量实验结果表明, 本文算法具有以下特点:

1) 能直接定位感兴趣的人造目标的变化. 本文算法定义了三类感兴趣的几何结构特征, 并结合对人造目标变化敏感的 HOG 特征和纹理特征, 因此能直接定位人造目标的变化.

2) 对配准误差和辐射差异比较鲁棒. 由于特征级变化检测在子图像对上进行, 提取的分类特征属于区域特征, 并且算法对像素级变化检测的辐射校正模块进行了改进, 因此算法能克服传统的变化检测算法对配准误差和辐射差异比较敏感的问题.

3) 具有较强的适应性. SVM 分类器一经训练完毕, 待检测的两时相遥感影像即可输入到分类器中, 对图像区域分类, 不需进行参数调整.

同时, 实验中还发现以下问题:

本文算法中, 子图像尺寸的合理选取十分重要. 如果尺寸过小, 待检测的人造目标易被分割到多个子图像内, 每个子图像内的部分不足以描述人造目标的特性; 如果尺寸过大, 子图像内会包含过多的非感兴趣目标, 使得小尺寸人造目标的分类特征被淹没. 本文通过分析图像分辨率与感兴趣的人造目标的可能尺寸, 并根据实验将子图像尺寸选取为 $128 \times 128$. 这个尺寸在普遍情况下十分有效, 但是当人造目标尺寸过小, 则不易准确提取该目标的特征, 易造成漏警.

在进行子图像划分时, 本文采取了子图像对在各个方向各有 50% 重叠的划分方案, 以避免出现同一个人造目标被划分为两个甚至多个部分的情况, 从而减少漏警. 同时, 这也减弱了变化检测定位精度. 对最终的变化检测结果而言, 此特点成为像素层虚警的一个来源. 但是, 在大部分人造目标变化检测的应用场合, 漏警比虚警的后果严重得多, 因此本文采用的子图像划分方案是合理的.

## 3　结论

本文提出了一种综合特征级和像素级的遥感图像两步变化检测算法, 主要用于在大幅高分辨率多

时相遥感图像中检测人造目标的变化. 实验结果表明, 该算法能在一定程度上克服传统像素级变化检测算法的缺陷, 减少虚假变化像素点, 直接定位感兴趣的人造目标的变化. 本文算法可用于对感兴趣地区进行长期动态监视. 将该地区久远的多时相遥感影像作为训练样本, 以提高分类器对该地区的子图像分类性能, 将训练出的分类器用于对该地区新近的多时相遥感影像进行人造目标变化检测, 实现长期动态监视的目的.

由于本文算法采用的特征强调人造目标与自然场景的区别, 比较适用于解决位于自然场景中的人造目标的变化检测问题. 而对于较高分辨率影像, 当图像中存在高层建筑物且视角差异较大或阴影影响较严重时, 该算法的检测性能有待提高. 并且, 本文算法以特征提取和有监督模式分类为基础, 其中特征提取的有效性和准确性直接影响到后续的检测工作. 因此, 为了提高变化检测性能, 应对待检测的变化目标做出更加严谨而合理的定义, 从子图像对中提取更加鲁棒的分类特征, 并消除或补偿阴影等虚假的目标边缘的影响, 这将是作者将来研究的重点.

## References


1 Hazel G G. Object-level change detection in spectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, **39**(3): 553−561

2 Lu D. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25**(12): 2365−2401

3 Dai X L, Khorram S. The effects of image misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, **36**(5): 1566−1577

4 Bruzzone L, Prieto D F. Automatic analysis of the difference image for unsupervised change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **38**(3): 1171−1182

5 Molinier M, Laaksonen J, Hame T. Detecting man-made structures and changes in satellite imagery with a content-based information retrieval system built on self-organizing maps. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45**(4): 861−874

6 Thonnessen U, Hofele G, Middelmann W. Change detection in satellite images. In: Proceedings of SPIE Conference on Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition. Orlando, USA: SPIE, 2005. 197−207

7 Paolo G, Fabio D A, Gianni L. Change detection of multitemporal SAR data in urban areas combining feature-based and pixel-based techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(10): 2820−2827

8 Sarkar S, Boyer K L. Quantitative measures of change based on feature organization: eigenvalues and eigenvectors. *Computer Vision an Image Understanding*, 1998, **71**(1): 110−136

9 Lacroix V, Idrissa M, Hincq A, Bruynseels H, Swartenbroekx O. Detecting urbanization changes using SPOT5. *Pattern Recognition Letters*, 2006, **27**(4): 226−233

10 Cao G, Yang X, Mao Z H. A two-stage level set evolution scheme for man-made objects detection in aerial images. In: Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE, 2005. 474−479

11 Li W M, Li X M, Wu Y H, Hu Z Y. A novel framework for urban change detection using VHR satellite images. In: Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition. Hong Kong, China: IEEE, 2006. 312−315

12 Tang L, Xie W X, Huang J J. Finding main road seeds based on symmetrical edge orientation histogram. *Electronics Letters*, 2004, **40**(4): 235−237

13 Dalal N, Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection. In: Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE, 2005. 886−893

14 Randen T, Husoy J H. Filtering for texture classification: a comparative study. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, **21**(4): 291−310

15 Duda R O, Hart P E, Stork D G. *Pattern Recognition*. Beijing: China Machine Press, 1996. 259−265

16 Singh A. Digital change detection techniques using remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, **10**(6): 989−1003

**苏 娟** 博士研究生. 主要研究方向为遥感图像处理与模式识别. 本文通信作者.

E-mail: suj04@mails.tsinghua.edu.cn

(**SU Juan** Ph. D. candidate in the Department of Electronic Engineering, Tsinghua University. Her research interest covers remote sensing image processing and pattern recognition. Corresponding author of this paper.)

**王贵锦** 清华大学电子工程系副教授, 主要研究方向为视频处理与通信.

(**WANG Gui-Jin** Associate professor in the Department of Electronic Engineering, Tsinghua University. His research interest covers video processing and communication.)

**林行刚** 清华大学电子工程系教授. 主要研究方向为图像/视频处理与分析、视觉信息压缩编码及应用、模式识别.

(**LIN Xing-Gang** Professor in the Department of Electronic Engineering, Tsinghua University. His research interest covers image/video processing and analysis, video coding and communications, and pattern recognition.)

**刘代志** 第二炮兵工程学院教授. 主要研究方向为模式识别、军事情报侦测工程和军事地球物理学.

(**LIU Dai-Zhi** Professor at the Second Artillery Institute of Engineering. His research interest covers pattern recognition, reconnaissance engineering of military intelligence, and military geophysics.)