

# 基于图论的无监督区域遥感图像检索算法研究

李丽萍<sup>1</sup> 赵传荣<sup>2</sup> 孔德仁<sup>1</sup> 王芳<sup>1</sup>

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)<sup>1</sup> (安徽工业大学电气与信息工程学院 马鞍山 243032)<sup>2</sup>

**摘要** 为了改善基于内容的遥感图像检索技术,以遥感图像区域检索为框架,提出了一种新的基于图论的无监督学习遥感图像检索算法。首先,提出的方法用图表为每一幅图像建模,同时结合局部信息和相关的空间结构,提供基于区域的图像代表。将每一幅图像初步划分为不同的区域,再通过属性关系图建模,节点和边界分别代表区域特征和它们之间存在的空间关系。然后,通过评估基于图像的相似点实现最类似于查询图像的图像检索。为匹配相应的图像以及按照图像相似点实现图像检索,采用了结合子图同构算法和光谱图嵌入技术的新型非精确图像匹配策略。实验结果显示,与其他两种无监督遥感图像检索方法相比,所提方法的检索性能明显改善。

**关键词** 图像检索,图论,无监督学习,属性关系图(ARG),子图同构

中图法分类号 TP391.41 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.07.057

## Research on Unsupervised Regional Remote Sensing Image Retrieval Algorithm Based on Graph Theory

LI Li-ping<sup>1</sup> ZHAO Chuan-rong<sup>2</sup> KONG De-ren<sup>1</sup> WANG Fang<sup>1</sup>

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)<sup>1</sup>

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In order to improve the content based remote sensing image retrieval technology, a new image retrieval algorithm based on graph theory was proposed. First, the proposed method models each image by a graph and combines local information and related spatial structures, which provides the region based image representation. Each image is initially divided into different regions. The nodes and boundaries of the attribute relation graph respectively represent the regional features and the spatial relations between them. Then, image retrieval is achieved based on image similarity. To match the corresponding image and realize image retrieval according to image similarities, a new type of non-accurate image matching strategy is used based on sub-graph isomorphism algorithm and spectral graph embedding technology. The experimental results show that compared with the most advanced unsupervised remote sensing image retrieval methods, the retrieval performance of the proposed method is significantly improved.

**Keywords** Image retrieval, Graph theory, Unsupervised learning, Attribute relation graph (ARG), Sub-graph isomorphism

## 1 引言

随着卫星系统技术的不断发展,遥感图像检索技术也得到了大幅改善,人们对利用遥感图像进行基于内容的精确检索产生了越来越大的兴趣。基于内容的图像检索(Content-Based Image Retrieval, CBIR)技术中最简单有效的方法就是 $k$ -最近邻分类算法<sup>[1-2]</sup>。

在基于 $k$ -最近邻分类算法的检索系统中,一旦用户选择图像进行查询,检索系统会自动根据查询图像的相似点排列图像,然后按照相似点显示出 $k$ 幅最相似图像<sup>[3-4]</sup>。图像的相似点评估基于描述和代表图像信息内容的低级特征。但CBIR技术的性能主要受到低级特征和高层语义之间的差距

限制。为了更好地描绘遥感图像内容的特征,可以通过兴趣点最小邻域弥补语义间隙。例如,通过尺度不变特征变换(SIFT)提取兴趣点周围部分图像的局部描述符,该方法在遥感图像检索中非常有效<sup>[5]</sup>。为了更好地运用局部图像描述符,通常运用视觉词袋(Big of Word, BoW)(BoW将局部描述符的分布规律概括成计算视觉词发生次数的柱状图)<sup>[6]</sup>。形态纹理描述符通过局部子窗进行计算,然后通过形态词袋表示构建基于内容图像检索(CBIR)的框架<sup>[7-9]</sup>。基于局部二值模式的图像描述符在近期被提出<sup>[10-14]</sup>。此类方法首先为每一个图像像素分配一个二进制码,然后结合邻近样本值的阈值计算出柱状图代码以获得图像描述符。但是此类基于图论方法的遥感图像检索技术存在局限性,即不能模拟一副图像

到稿日期:2016-12-29 返修日期:2017-02-06 本文受国家自然科学基金(11372143),国防科工局基础计量项目(J092013B003)资助。

李丽萍(1987—),女,博士生,主要研究方向为爆炸场参量测试与信号处理、机器学习、无监督学习, E-mail: lilipingup@163.com; 赵传荣(1989—),男,博士,副教授,主要研究方向为爆炸场参量测试、无监督学习; 孔德仁(1964—),男,博士,教授,主要研究方向为新型传感器设计、测试技术、无监督学习; 王芳(1966—),女,博士,讲师,主要研究方向为微电子、嵌入式设计、无监督学习。

中不同区域之间的空间关系,因此不能够更加全面完整地描述图像信息。

为了摆脱基于图论方法的遥感图像检索的局限性,提出了一种新的基于无监督图论的遥感图像描述特征和检索方法。提出的方法有两个主要步骤:1)使用无监督图像分割算法对每一幅图像进行分割,然后通过属性关系图(Attributed Relational Graph, AGR)为图像建模,从而可以有效地描绘出区域特征(节点)和它们之间的空间关系(边界)。2)利用非精确图像匹配策略计算出查询图和检索图像的相似性;非精确图像匹配策略包含了子图同构算法(衡量图节点间的相似性)和光谱嵌入算法(衡量图边界之间的相似性)。按照图相似性排列检索与查询最相似的图像。实验结果显示,与现有两种无监督遥感图像检索方法相比,所提方法的检索性能得到明显改善。

## 2 提出方法

设定  $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$  为  $N$  幅遥感图像的一个存档,其中  $X_i (i=1, \dots, N)$  为第  $i$  幅图像。给出查询图像  $X_q$ , 目的是在不带任何标签样本的情况下(图像存在区域相似模式)检索出最类似于  $X_q$  的图像。新的无监督方法实现检索的两个主要步骤:1)用图表建模图像;2)基于图匹配进行图像检索。详细步骤将在下文内容中进行解释。图1显示了本文研究的基于图论的无监督区域遥感图像检索方法的原理框图。

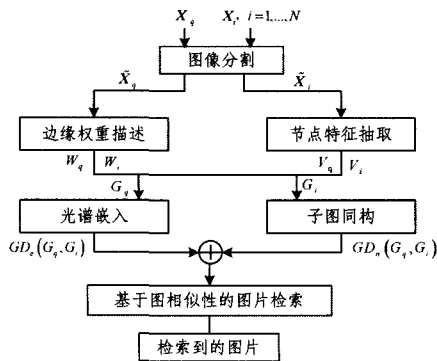


图1 所提方法的原理框图

### 2.1 图像建模

通过属性关系图(AGR)为每一幅图片建模,属性关系图的节点和边界分别代表图像区域和它们之间的邻接关系<sup>[11-12]</sup>。图像  $X_i$  的属性关系图定义为一个组  $G_i = (V_i, E_i, W_i)$ , 其中  $V_i = \{V_1^i, V_2^i, \dots, V_{n_i}^i\}$  为  $n_i$  节点集合;  $E_i = \{e_i^{(s,t)} \mid s, t \in \{1, 2, \dots, n_i\}\}$  为连接节点的边界集合;  $W_i \in R^{n_i \times n_i}$  为包含边界信息的带权邻接矩阵。当区域对应节点  $v_i^s$  并且与  $v_i^t$  彼此相邻时,存在一个边界  $e_i^{(s,t)}$ 。

最初将图像  $X_i$  和  $X_q$  分割成一组不相交的区域,分别形成分割图像  $\tilde{X}_i$  和  $\tilde{X}_q$ , 以定义节点。通过参数核心图像分割法执行无监督多区域图像分割的任务<sup>[13]</sup>, 可以自适应地将图像分割成语义上有意义的区域。然后,每个区域与低层次要素代表的节点相联系,例如,从区域中提取强度、结构和形状特征以形成节点属性。强度特征模拟样本光谱分布(样本不会因范围与视角的改变而改变),结构特征模拟内在空间结构

和局部模式,而形状特征模拟图像物体(相对于转化和循环为不变量)的内在属性。

两个相邻节点间的空间关系(如空间距离和空间方向)由边界属性表示。从  $\tilde{X}_i$  中构建一个矩阵  $W_i$  以定义边界,其首次记录为复合逻辑的 0 和 1, 如果  $e_i^{(s,t)}$  存在, 则  $W_i(v_i^s, v_i^t) = 1$ , 否则  $W_i(v_i^s, v_i^t) = 0$ 。然后给  $W_i$  的每一个非零值分配一个权重, 如式(1)所示:

$$W_i(v_i^s, v_i^t) = \alpha_1 \|c_{v_i^s} - c_{v_i^t}\|_2 + \alpha_2 |\theta_{v_i^s} - \theta_{v_i^t}| \quad (1)$$

其中,  $v_i^s$  和  $c_{v_i^t}$  为与节点  $v_i^s$  和  $v_i^t$  对应的区域内的像素的坐标重心;  $\theta_{v_i^s}$  和  $\theta_{v_i^t}$  为区域的定向角(椭圆中水平轴和主轴之间的角度与区域有着相同的二次矩,  $\theta \in [-90^\circ, +90^\circ]$ ), 以  $\|\cdot\|_2$  为  $L_2$  的范数。通过高视觉相似性对图像进行检索, 其中定向角的选择取决于最终检索目标。对于权重  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的选择, 应该考虑到检索相关变量的重要性。我们采用了无向加权图, 即  $W_i(v_k, v_k) = W_i(v_k, v_k)$ , 因此在全部对角元素 0 中,  $W_i$  是实际对称矩阵。

### 2.2 基于图匹配的图像检索

通过匹配相应的属性关系图和评估相关距离, 从文件中找出与查询图像最相似的图像。本文研究了结合子图同构算法和光谱嵌入算法的非精确图像匹配策略。本文提出的策略不要求节点数量完全相同, 也不需要匹配的两图间的特征严格对应。之所以提出这样的策略, 是因为绝大部分加权图匹配解决方法都有非常高的计算复杂度<sup>[8]</sup>。子图同构算法的目的如下:

- 1) 匹配图  $G_q$  和档案中的每一个图  $G_i$  之间的节点;
- 2) 依照图节点相似性评估图之间的距离。

如果  $G_i$  子图与  $G_q$  同构, 则可以说图  $G_i$  与  $G_q$  子图同构, 也就是说它们的节点间存在着一个映像。为了找出精确的映像, 本文提出的算法对  $G_i$  中的每一个节点  $v_i^q$  的距离(相异点)进行评估(在  $G_q$  中  $r \in \{1, 2, \dots, n_q\}$ , 对于所有的节点  $v_i^p$ ,  $p \in \{1, 2, \dots, n_j\}$ ), 以找出  $G_i$  中最类似(匹配)  $v_i^q$  的节点。为此, 定义了一个距离矩阵  $D \in R^{n_q \times n_i}$ , 此矩阵中包含了  $G_q$  和  $G_i$  中所有成对的节点属性间的距离(相异点), 由此,  $D(r, p)$  为  $v_i^q$  与  $v_i^p$  节点属性间的距离。文献中有关于衡量节点属性间距离的不同方法。每一个节点  $v_i^q (r \in \{1, 2, \dots, n_q\})$  与节点  $v_i^h (h \in \{1, 2, \dots, n_j\})$  相匹配, 得出最小的  $D(r, h)$  值。最后, 通过计算  $G_i$  与  $G_q$  间的节点距离  $GD_n$  评估图像相似性, 如式(2)所示:

$$GD_n(G_q, G_i) = \frac{1}{n_q} \sum_{r=1}^{n_q} \min_{p \in \{1, 2, \dots, n_j\}} \{D(r, p)\} \quad (2)$$

如果图之间相似, 那么式(2)中  $GD_n(G_q, G_i)$  很小, 反之亦然。如果  $n_q > n_i$ , 那么  $G_q$  中的  $(n_q - n_i)$  不能与  $G_i$  中的任何节点相匹配。在这种情况下, 节点匹配应该通过估算  $GD_n(G_i, G_q)$  来完成, 而不是  $GD_n(G_q, G_i)$ 。

光谱嵌入算法旨在根据边界相似性估算两图间的距离。光谱图嵌入法运用邻接矩阵拉普拉斯算子特征向量, 在小范围特征空间中实现嵌入<sup>[12]</sup>。图  $G_i$  的标准拉普拉斯算子定义为  $L_i = M_i^{-1/2} (M_i - W_i) M_i^{-1/2}$ ,  $M_i \in R^{n_i \times n_i}$  为对角矩阵, 每一个对角元素  $M_i$  为  $W_i$  相应列中所有元素的总和。对于  $G_q$  和  $G_i$ , 与  $K$  最小非零特征值相对应的特征向量代表嵌图主要组

成部分的方向<sup>[9]</sup>,其中  $K=\min(n_q, n_i)$ 。在  $n_q=n_i$  的情况下,  $G_q$  和  $G_i$  的边界相似性可以通过  $\|PW_qP^T - W_i\|_F^2$  估算,其中  $\|\cdot\|_F$  为 Frobenius 范数,  $P$  为包含所有正交矩阵的置换矩阵。 $\|PW_qP^T - W_i\|_F^2 \geq \sum_{e=1}^{n_q} (\lambda_q^e - \lambda_i^e)^2$ ,其中  $\lambda_q^e$  和  $\lambda_i^e$  分别代表  $W_q$  和  $W_i$  的相异特征值。然而,当  $n_q \neq n_i$  时,特征值将出现多重性(即不再明显)。  $G_q$  和  $G_i$  间的最小边界距离由  $L_q$  和  $L_i$  的  $K$  最小特征值差异平方值求得,具体公式如下:

$$GD_e(G_q, G_i) = \frac{1}{K} \sum_{e=1}^K (\tilde{\lambda}_q^e - \tilde{\lambda}_i^e)^2 \quad (3)$$

$\tilde{\lambda}_q^e$  和  $\tilde{\lambda}_i^e$  ( $e'=1, 2, \dots, K$ ) 分别代表  $L_q$  和  $L_i$  的  $K$  最小特征值。

本文结合式(2)得出节点距离,结合(3)得出边界距离,因为它们的加权值同时将区域特征和它们的关联相似性列入了考虑范围,因此  $G_q$  和  $G_i$  的总距离  $GD$  的计算公式为:

$$GD(G_q, G_i) = GD_n(G_q, G_i) + \beta GD_e(G_q, G_i) \quad (4)$$

其中,  $\beta \in (0, 1]$  为权重因数,与节点信息相比,较大值对边界信息的影响更大。在这种结合的基础上,如果  $X_q$  与  $X_i$  相近,则  $GD(G_q, G_i)$  值较小,反之亦然。

### 3 实验分析

#### 3.1 实验设置

为了验证本文所提算法的性能,选取了测试数据集进行检索实验,并与另外两种相关反馈方法得到的检索结果进行了对比。测试数据集包含 20 个区域的 2000 幅图像<sup>[15]</sup>。实验平台为 Windows 7 操作系统, CPU 为 Pentium Dual-Core E5200 处理器,内存为 2GB,仿真环境为 Matlab7.8。

#### 3.2 检索准确性评价指标

本文使用平均精度(Average Precision, AP)评估图像检索算法的准确度。用精度-召回率曲线<sup>[13-14]</sup>下的面积表示 AP, AP 的理论值在 0 和 1 之间变化, AP 的数值越大表示图像检索的准确度越高。

#### 3.3 实验结果

图 2 示出待检索的目标图像(教学楼)。图 3 示出 3 种算法关于遥感图像的检索结果。其中图 3(a)、图 3(d)和图 3(g)是采用文献[13]中的反馈方法分别反馈 5 次、10 次和 15 次所得的检索结果;图 3(b)、3(e)和 3(h)是采用文献[14]中的方法反馈 5 次、10 次和 15 次得到的检索结果;图 3(c)、图 3(f)和图 3(i)是采用本文提出方法得到的检索结果。从实验结果可以看出,本文提出的方法可以获得很好的检索结果。表 1 列出了 AP 检索性能。可以看出,本文所提算法所得的 AP 指标高于其他两种算法。



图 2 检索图像

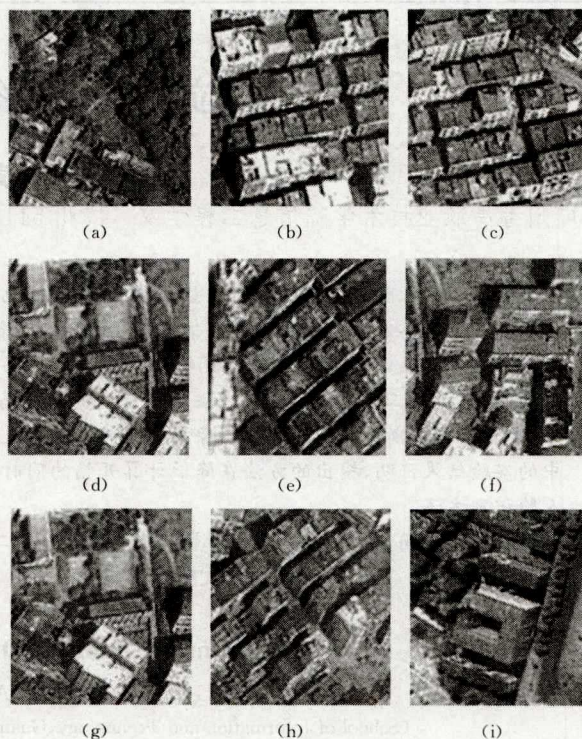


图 3 区域遥感图像检索结果

表 1 图像检索性能比较

检索方法	无遮挡数据	部分遮挡数据
文献[13]	0.48	0.22
文献[14]	0.66	0.36
本文所提算法	0.72	0.47

图 4 所示的精度-召回率关系中,本文方法在大部分召回率下都保持在 1 附近,但是准确性随召回率的增大均产生衰减。但是,所提算法的衰减速度慢于其他两种算法。

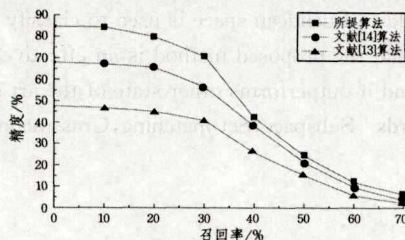


图 4 精度-召回率关系结果比较

本文算法的整体计算复杂性与图像尺寸、光谱段数量、节点和边界数量以及档案中的图像数量有关。在实验中,一幅图与数据集中的全部 2000 幅图进行匹配平均需要的时间为 80.65s。相比其他两种方法,本文需要更多的计算时间。

实验结果显示,本文所提方法与现有的两种无监督遥感图像检索方法相比,检索性能有明显改善,特别是针对复杂图像类别;但是,性能方面的改善是以增加计算复杂性为代价获得的。值得注意的是,本文提出的方法不受选择分割算法和描绘图像特征的特点限制。对于不同类型的遥感图像,可以通过选择合适的特征来精确描述不同空间分辨率和光谱特性的关联图像,然后用本文提出的方法对它们进行处理。

**结束语** 本文针对区域遥感检索问题提出了一种新的无

(下转第 323 页)

- [22] KIM M, KUMAR S, PAVLOVIC V, et al. Face tracking and recognition with visual constraints in real-world videos[C]// Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2008). Anchorage, Alaska, USA; IEEE Computer Society, 2008.
- [23] ROSS D A, LIM J, YANG M H. Adaptive Probabilistic Visual Tracking with Incremental Subspace Update[C]// 8th European Conference on Computer Vision Computer Vision (ECCV 2004). Prague, Czech Republic; Springer, 2004: 470-482.
- [24] WONG Y, CHEN S, MAU S, et al. Patch-based probabilistic image quality assessment for face selection and improved video-

based face recognition[C]// Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop. Colorado Springs, CO, USA; IEEE, 2011: 74-81.

- [25] GROSS R, SHI J. The CMU Motion of Body (MoBo) Database [J]. Monumenta Nipponica, 2001, 45(4): 1-7.
- [26] CAI D, HE X, HAN J. Speed up kernel discriminant analysis [J]. Vldb Journal, 2011, 20(1): 21-33.
- [27] HUANG Z, WANG R, SHAN S, et al. Face recognition on large-scale video in the wild with hybrid Euclidean-and-Riemannian metric learning[J]. Pattern Recognition, Elsevier, 2015, 48(10): 3113-3124.

(上接第317页)

监督图论方法。在提出的方法中,图像由属性关系图建模;然后,档案中的图像与查询图像通过新奇非精确图匹配策略进行匹配;最后,将与查询图像最相似的图像排列,按照图的相似性值进行检索。为匹配相应的图像以及按照图的相似点实现图像检索,采用了结合子图同构算法和光谱图嵌入技术的新型非精确图像匹配策略。实验结果显示,与其他两种无监督遥感图像检索方法相比,所提方法的检索性能得到了明显改善。

### 参考文献

- [1] NIU L, NI L, MIAO Y, et al. The compressed domain based on ROI multi spectral remote sensing image retrieval Chinese [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(10): 1212-1217. (in Chinese)  
牛蕾,倪林, MIAO Y, 等. 基于 ROI 的压缩域多波段遥感图像的检索[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(10): 1212-1217.
- [2] ZHU J L, LI S J, WAN D S, et al. Remote sensing image retrieval, feature selection and semi supervised learning based on China [J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(8): 1474-1482. (in Chinese)  
朱佳丽, 李士进, 万定生, 等. 基于特征选择和半监督学习的遥感图像检索[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(8): 1474-1482.
- [3] YANG J, LIU J B, DAI Q. An Improved Remote Sensing Image Retrieval Method Based on Bag of Word Framework[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 38(9): 1109-1113. (in Chinese)  
杨进, 刘建波, 戴芹. 一种改进包模型的遥感图像检索方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(9): 1109-1113.
- [4] TANG X H, QIN K, MENG L K. Qualitative description model of directional relations based on topological constraints [J]. Journal of Surveying and Mapping, 2014, 43(4): 396-403. (in Chinese)  
唐雪华, 秦昆, 孟令奎. 基于拓扑约束的方向关系定性描述模型[J]. 测绘学报, 2014, 43(4): 396-403.
- [5] XU Y X, CHEN F. Recent research progress of local image descriptor [J]. China Journal of Image and Graphics, 2015, 20(9): 1133-1150. (in Chinese)  
许允喜, 陈方. 局部图像描述符最新研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(9): 1133-1150.
- [6] DEMIR B, BRUZZONE L. A Novel Active Learning Method in

Relevance Feedback for Content-Based Remote Sensing Image Retrieval[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2015, 53(5): 2323-2334.

- [7] DU Z, LI X, LU X. Local structure learning in high resolution remote sensing image retrieval[J]. Neurocomputing, 2016, 207: 813-822.
- [8] SEVILLA J, JIMENEZ L I, PLAZA A. Sparse Unmixing-Based Content Retrieval of Hyperspectral Images on Graphics Processing Units[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2015, 12(12): 2443-2447.
- [9] CHAUDHURI B, DEMIR B, BRUZZONE L, et al. Region-Based Retrieval of Remote Sensing Images Using an Unsupervised Graph-Theoretic Approach [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2016, 13(7): 987-991.
- [10] JIAO L, TANG X, HOU B, et al. SAR Images Retrieval Based on Semantic Classification and Region-Based Similarity Measure for Earth Observation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2015, 8(8): 1-16.
- [11] JIANG J, MA X, CAI Z, et al. Sparse Support Regression for Image Super-Resolution [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(5): 1.
- [12] CHEN X, HAN G, ZHANG Z. Real-time video super-resolution reconstruction based on GPU acceleration[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(12): 3540-3543.
- [13] SEDAGHAT A, EBADI H. Remote Sensing Image Matching Based on Adaptive Binning SIFT Descriptor[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2015, 53(10): 5283-5293.
- [14] DEMIR B, BRUZZONE L. Hashing-Based Scalable Remote Sensing Image Search and Retrieval in Large Archives[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2015, 54: 1-13.
- [15] YANG Y, NEWSAM S. Geographic Image Retrieval Using Local Invariant Features[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2013, 51(2): 818-832.
- [16] ZHOU Y G, WANG P, GAO Y H. Remote Sensing Image Classification with Bag-of-Visual-Words Model [J]. Journal of Chongqing University Technology (Natural Science), 2015, 29(5): 71-77. (in Chinese)  
周宇谷, 王平, 高颖慧. 基于视觉词袋模型的遥感图像分类方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(5): 71-77.