

基于频率域信息的遥感图像数据库水体检索

李轶鲲 胡玉玺 杨 萍

(兰州交通大学测绘与地理信息学院 兰州 730070) (甘肃省地理国情监测工程实验室 兰州 730070)

摘 要 如何快速、准确地地在遥感图像数据库中找到目标图像,是遥感图像检索系统的核心所在。因为综合区域匹配算法能够有效减少对图像的分割所造成的检索错误,所以使用综合区域匹配算法为图像相似度度量标准,提出了以平均高频信号强度升序为排序标准的遥感图像数据库水体区域检索方法。另外使用3种不同类型的频率域滤波器所得到的平均高频信号强度进行检索实验。实验结果表明,所提方法将检索查准率提高了18%,而理想型高通滤波器为最优滤波器。所提方法具有较高的查准率和检索效率,能够满足用户的需要。

关键词 图像检索, 水体, 相似度度量, 查准率, 高通滤波器

中图法分类号 TP751.1 文献标识码 A

Frequency Domain Information Based Water Body Image Retrieval in High Resolution Satellite Image Databases

LI Yi-kun HU Yu-xi YANG Ping

(Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

(Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China)

Abstract The core of a remote sensing image retrieval system is to quickly and accurately find target images from remote sensing image database. Since integrated region matching (IRM) algorithm can effectively reduce the retrieval mistakes which are caused by inaccurate segmentation of images, this paper used IRM as image similarity measurement standard, and proposed a novel approach to retrieve water body images from remote sensing image database, which sorts the retrieved images in ascending order according to their average high frequency strength (AHFSS). Additionally, this paper used three different types of filters in frequency domain to obtain the AHFSS values of images and conduct retrieval experiments. The experimental results show that the proposed approach increases the retrieval precision by 18% and the ideal high frequency filter is the optimal filter. Therefore, the proposed approach has higher retrieval precision and retrieval efficiency to meet users' requirement.

Keywords Image retrieval, Water body, Similarity measurement, Precision ration, High-pass filter

随着遥感技术的发展,海量遥感数据的管理、访问难度变得越来越大,由此图像检索技术成为国内外研究的热点^[1]。其中,基于内容的图像检索技术(CBIR)在过去的十年里取得了巨大的发展。值得注意的是,最近几年高分辨率卫星图像中的水体信息成为了研究的热点。用户急需一种专门的方法来检索他们感兴趣的包含水体信息的卫星图像。该方法能够在很多领域得到广泛的应用,如水资源调查、干旱和洪灾监控、环境监控等,特别是在洪灾监控领域,本文提出的方法能快速准确地检索到所需的图像以便评估损失。

目前,基于内容的图像检索系统一般采用3种检索方式,即直方图检索(Histogram Search)、颜色布局检索(Color Layout Search)、基于区域的检索(Region-Based Search)。直方图检索算法是通过图像的颜色贡献率或者彩色直方图进行检索,其缺点是会丢失目标地物的位置、形状、纹理等信息;颜色布局检索算法虽然克服了直方图检索算法的不足,但以一组

局部属性作为特征来描述图像,最终仍会对变形、移动、旋转等变化很敏感^[2];基于区域的检索算法采取分割图像的方法,用区域特征来描述图像的局部特征,试图弥补颜色布局算法的不足,其最理想的分割结果是图像的每一个区域都只包含一种对象,但在实际应用过程中,往往由于不能准确地分割图像,从而对检索结果造成影响^[3]。

基于上述问题,Wang J Z 等人^[2]提出了综合区域匹配算法(Integrated Region Matching, IRM),该算法具有旋转和平移不变性,允许一个区域与多个区域进行匹配,对不准确分割具有鲁棒性。基于该研究成果,本文设计了一种以综合区域匹配算法为相似度衡量标准,根据平均高频信号强度(Average High Frequency Signal Strength, AHFSS)升序为排序条件的遥感图像水体区域检索的方法的遥感图像检索系统的模型,并以 IKONOS 图像为实验数据,设计了两组实验,第一组实验对使用不同的频率域滤波器获取图像的平均高频信号强

本文受甘肃省高等学校基本科研业务费项目:基于空间关系敏感的高分辨率卫星图像检索技术研究(213049),中国博士后科学基金资助项目:基于高分辨率遥感影像的滑坡自动提取方法研究(2014M552558XB),甘肃省科技计划资助项目:基于GIS和RS的城市土地利用动态演化与模拟研究(148RJZA028)资助。

李轶鲲(1978—),男,博士,副教授,主要研究方向为遥感图像处理 and 检索。

度的结果做出比较,第二组实验验证了不同的频率域滤波器对水体区域图像检索结果产生的影像。实验表明,使用理想型高通滤波器为佳选择,同时本检索方法能够显著地提高图像检索的查准率,可以满足用户的使用需求。

1 基于内容的图像检索算法

基于内容的图像检索是指用户提交样本图像,借助其底层特征,在数据库中检索出具有相同或相似内容图像的过程。与传统的利用文本标注的检索方式相比,基于内容的图像检索具有对图像内容描述准确、客观性强等优点,同时又自动地提取图像的颜色、纹理和形状等特征,并快速有效地从图像数据库中自动查找与查询图像有着类似的颜色、纹理、形状等信息的图像^[4]。CBIR 技术克服了传统检索方式过分依靠手工输入文字信息,不能充分描述图像的颜色纹理等特征的局限性^[5]。由此,本文基于 CBIR 技术,针对水体区域的图像检索,提出了改进的检索算法,主要实现算法包括特征提取和图像分割、综合区域匹配算法及平均高频信号强度计算与排序。

1.1 特征提取和图像分割

本研究中,依据图像数据的类型选择描述图像内容的特征向量。研究采用的方法是,先将多光谱图像分割成互不重叠的子图像,再提取子图像的 64 维颜色直方图作为光谱特征。为了确定图像的主要特征和限制特征向量的数量,利用 K 均值聚类算法对特征向量进行聚类。在图像领域,这一过程相当于把卫星影像的子影像合并成与每一个聚类 j 相对应的图像区域 R_j^i 。需要注意的是,在这样的背景下区域可以包含空间上没有连通的图像分区。虽然本文所使用的图像分割方法并不是最理想的,但是它能够分割出具有相似光谱或纹理特征的区域,并且可以显示出所提方法对于可能的错误分割具有鲁棒性^[6]。

1.2 综合区域匹配算法

综合区域匹配算法通过综合地计算图像中所有区域的相似度来确定图像的整体相似度。该算法的优势在于对图像可能存在的错误分割具有很强的鲁棒性。从数学的角度来看,图像的相似度可以通过计算在高维空间(特征空间)中两个点集之间的距离来确定。有很多种方法可以计算高维空间中点的距离,例如欧氏距离。然而,它并不适合计算两个点集之间的距离。定义特征空间中两个点集之间距离的最大的困难在于,如何让定义的整体相似度最大程度地和人类对两幅图像相似度的主观感觉相接近。综合区域匹配算法综合地考虑了图像中的所有区域,允许一个区域与多个区域进行匹配,减少了由于图像不准确分割而产生的误差。

根据 Wang J Z 等人的研究成果,综合区域匹配算法具体描述如下:

为了检索出数据库中与查询图像相似的图像,首先用查询图像与数据库中的图像进行区域匹配。假设查询图像由区域集 $R_1 = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 表示, r_i 表示区域 i 的特征向量。为了定义两幅图像之间的距离,假设图像 1 和图像 2 由集合 $R_1 = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 和 $R_2 = \{r_1', r_2', \dots, r_n'\}$ 来表示, r_i 和 r_j' 表示图像的分割区域 i 和 j 的特征向量。记 r_i 和 r_j' 之间的距离为 $d(r_i, r_j')$,简写为 $d_{i,j}$ 。

计算区域集合 R_1 和 R_2 之间的距离 $d(R_1, R_2)$ 时,先匹配两幅图像中的所有区域,计算出所有区域之间的距离 $d_{i,j}$,并根据区域之间的显著性因子 $s_{i,j}$ 给予相应的权重。显著性因子 $s_{i,j}$ 表示区域 r_i 和 r_j' 之间的匹配程度,则

$$S = \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & \dots & S_{1,n} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & \dots & S_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{m,1} & S_{m,2} & \dots & S_{m,n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

称为显著性矩阵。

定义综合区域匹配的距离,即两幅图像之间的距离为:

$$d(R_1, R_2) = \sum_{i,j} s_{i,j} d_{i,j} \quad (2)$$

在综合区域匹配算法中,显著性矩阵由显著性因子决定,而显著性因子是指某一区域在整个图像中所占的面积比。假设图像 1 中 r_i 的面积比为 p_i ,图像 2 中 r_j' 的面积比为 p_j' 。则有:

$$\sum_{j=1}^n s_{i,j} = p_i, i=1, \dots, m \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m s_{i,j} = p_j', j=1, \dots, n \quad (4)$$

标准状态下, $\sum_{i=1}^m p_i = \sum_{j=1}^n p_j' = 1$ 。在确定相似性的过程中,需要通过一个合理的匹配机制,才能够让两幅图像的每一个区域都参与其中,同时又能够让最相似的区域最优先地匹配到一起。例如,用两幅相同的图像进行匹配,在这种匹配机制下,图像 1 中的区域只会唯一地和图像 2 中相同的区域匹配到一起。也就是说,两幅图像之间的距离为 0,这与我们的感官是相一致的。在 IRM 算法中,通过分配区域的显著性因子,让两幅图最相似的区域通过最短的距离连接到一起,称为“最相似优先原则”(Most Similar Highest Priority, MSHP)。用迭代法求显著性矩阵,首先,假设 $d_{i',j'}$ 是最小距离,令 $s_{i',j'} = \min(p_{i'}, p_{j'})$ 。通常,不妨假设 $p_{i'} \leq p_{j'}$ 。当 $s_{i',j'} = 0, j \neq j'$ 时,区域 i' 和 j' 通过区域 i' 的显著性因子成功地匹配到一起。区域 j' 的显著性因子由 $p_{j'} - p_{i'}$ 计算出来。根据 MSHP 原则,当满足以下条件时,可以解决 $s_{i,j}$ 在 $i \neq i'$ 时的匹配问题^[7]。

$$\sum_{j=1}^n s_{i,j} = p_i, 1 \leq i \leq m, i \neq i' \quad (5)$$

$$\sum_{i: 1 \leq i \leq m, i \neq i'} s_{i,j} = p_j', 1 \leq j \leq n, j \neq j' \quad (6)$$

$$\sum_{i: 1 \leq i \leq m, i \neq i'} s_{i,j} = p_j' - p_{i'} \quad (7)$$

$$s_{i,j} \geq 0, 1 \leq i \leq m, i \neq i'; 1 \leq j \leq n \quad (8)$$

直到所有的显著性因子 p_i 和 p_j' 都计算出来时,迭代停止。显著性矩阵计算方法如下。

第一步:令 $L = \{\}$, $M = \{(i, j): i=1, \dots, m; j=1, \dots, n\}$ 。

第二步:当 $(i, j) \in M - L$ 时,选择最小有效距离 $d_{i,j}$;令相应的 (i, j) 为 (i', j') 。

第三步: $s_{i',j'} = \min(p_{i'}, p_{j'})$ 。

第四步:如果 $p_{i'} < p_{j'}$,令 $s_{i,j} = 0, j \neq j'$;否则,令 $s_{i,j} = 0, i \neq i'$ 。

第五步: $p_{i'} - \min(p_{i'}, p_{j'}) \rightarrow p_{i'}$ 。

第六步: $p_{j'} - \min(p_{i'}, p_{j'}) \rightarrow p_{j'}$ 。

第七步: $L + \{(i', j')\} \rightarrow L$ 。

第八步:如果 $\sum_{i=1}^m p_i > 0$ 并且 $\sum_{j=1}^n p_j' > 0$,跳转到第二步;否

则,程序结束。

综合区域匹配原理如图 1 所示。

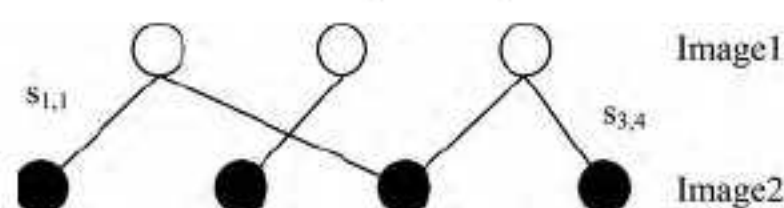


图 1 综合区域匹配原理

在图 1 中,圆代表图像的区域,如果两个圆是连接的,则表明两个区域通过直线所代表的权重匹配到一起;如果两个圆没有连接,则表明两个区域是在同一幅图像中或者它们之间的匹配权重为 0。

1.3 平均高频信号强度的计算

光谱信息是遥感图像中重要的组成部分。与其他地物类型相比,水体在图像中多呈现出表面平滑、基本无高频分量的特性,故高频信号强度较低。而高通滤波具有保留图像高频信息、消除图像中的低频成份的作用,故先对图像进行高通滤波处理,然后计算图像的平均高频信号强度,将其作为水体检索排序时的一个特征向量。

为了计算图像的平均高频信号强度,首先把图像 $f(x, y)$ 转换成一系列不同频率的二维正弦波傅里叶图像;然后在频率域内对傅里叶图像进行滤波处理,目的是对图像傅里叶变换的结果进行修改,从而减少低频成分,最后把频率域的傅里叶图像变换为空间域图像 $g(x, y)$ [8,9]。在本文研究中,分别使用理想型、高斯型和巴特沃斯型 3 种滤波器设计实验,分析检索结果,得出最佳的滤波器选择为理想型高通滤波器。

在对图像进行高通滤波处理之后,为了确定图像中所含有的高频信息的含量,定义变换后图像像元值的平均值为平均高频信号强度,平均高频信号强度的值由下式计算得出:

$$AHFSS = \frac{1}{PQ} \sum_{x=0}^{P-1} \sum_{y=0}^{Q-1} g(x, y) \quad (9)$$

其中, P 和 Q 分别表示图像的行数和列数。

2 实验设计与结果分析

2.1 滤波器实验

2.1.1 滤波器实验设计

滤波器实验分两部分进行,选取建筑、水体、植被具有代表性的图像各一幅。第一,分别计算使用理想高通滤波器、巴特沃斯高通滤波器和高斯高通滤波器所获得的平均高频信号强度的值。第二,改变巴特沃斯高通滤波器的波形,使其更靠近理想型高通滤波器和高斯型高通滤波器,比较获得的平均高频信号强度的值。实验表明,巴特沃斯滤波器阶数越高,波形越接近理想型滤波器,阶数越低,越靠近高斯型滤波器。表 1 是这 3 种滤波器的变换函数,其中, D_0 是截止频率, n 是巴特沃斯滤波器的阶数。

表 1 高通滤波器

理想高通滤波器	巴特沃斯高通滤波器	高斯高通滤波器
$H(u, v) = \begin{cases} 0, & D(u, v) \leq D_0 \\ 1, & D(u, v) > D_0 \end{cases}$	$H(u, v) = \frac{1}{1 + [D_0/D(u, v)]^{2n}}$	$H(u, v) = 1 - e^{-D(u, v)^2/2D_0^2}$

2.1.2 滤波器实验结果与分析

按照实验要求,分别选取典型的建筑、植被、水体影像各一幅进行实验,获得的实验结果如表 2、表 3 所列。

表 2 不同滤波器、截断频率水体图像 AHFSS 值的比较

	5	10	15	20
理想高通滤波器	2.8017	2.7671	2.6735	2.5976
巴特沃斯高通滤波器	2.9610	2.6920	2.5701	2.4536
高斯高通滤波器	4.5553	3.0597	2.7166	2.5127

表 3 水体、植被、建筑 AHFSS 值的比较

	高斯 ($D_0=5$)	巴特沃斯($D_0=5$)					理想 ($D_0=5$)
		$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	
水体	4.5333	2.9610	2.8078	2.8003	2.8012	2.8019	2.8017
植被	11.7307	10.3449	10.2505	10.2646	10.2784	10.2871	10.3453
建筑	25.8381	24.8757	25.3555	25.6732	25.8607	25.9787	26.7905

通过表 2 可以看出,在同一截断频率下,使用不同的滤波器,图像的 AHFSS 值基本稳定,无明显的波动,随着截断频率的增加,图像的 AHFSS 值逐渐减小,且减小速率相对稳定,说明选取合适的截断频率可以很好地获得图像的 AHFSS 值。

由表 3 可知,水体的 AHFSS 值明显低于建筑和植被。且在同一截断频率下,改变巴特沃斯型滤波器的阶数,图像的 AHFSS 值分别向使用高斯型滤波器和理想型滤波器所获得的结果接近,且变化趋势平稳。

2.2 图像检索实验

2.2.1 图像检索实验设计

在本文实验过程中,所用到的图像数据库是由对多光谱卫星图像进行重叠的分割构成的,图像大小为 300×300 像元,共计 10000 幅,涵盖了农田、水坝、岩石、城市、森林、海域等多种地物类型。在特征提取时,把图像分割成 30×30 像元的子图像,以图像的颜色直方图作为底层特征向量,利用 K 均值聚类算法依据颜色特征向量对图像进行聚类,并将聚类结果作为特征数据存入特征数据库。在检索过程中,用户提交检索图像,系统会自动地对图像进行相应的处理,获得图像的特征数据。然后按照 IRM 算法的匹配原则,计算出相应的 IRM 距离,并根据 IRM 距离,获取第一次检索结果。检索出的结果图像不仅与检索图像有相似的颜色信息,且具有相似的区域信息。最后,系统对检索出的前 200 幅图像,根据图像的平均高频信号强度,重新升序排序,返回平均高频信号强度最低的 50 幅图像作为最终的检索结果。

在图像检索实验中,共设计两组检索实验:第一组先使用综合区域匹配算法进行图像的相似性度量,选择最接近的 200 幅图像作为初次检索结果,然后使用 3 种滤波器对这 200 幅图像进行滤波处理,计算平均高频信号强度并升序排列,返回平均高频信号强度最低的 50 幅图像,比较检索结果。第二组实验针对巴特沃斯滤波器的特性,改变滤波器的阶数(2~6 阶),计算平均高频信号强度并降序排列,比较检索结果。整个图像检索系统的构成以及实验流程如图 2 所示。

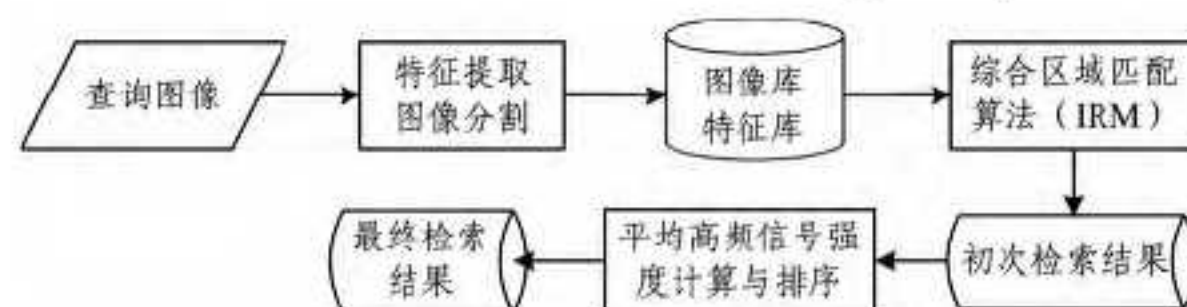


图 2 水体区域图像检索系统流程

2.2.2 图像检索实验结果分析

为了验证依据平均高频信号强度升序为排序标准对水体区域检索精度是否有所提高,在数据库中抽取了一幅具有人工建筑物、水体和植被的图像作为查询图像,通过查询接口进

行查询。查询图像含有较少的水体信息,而建筑和植被的干扰很明显。选取这样的图像作为查询图像,是因为该图像初始查询的效果不好,可以体现出后继的平均高频信号强度排序对准确率提升。同时,在实际应用中用户并不是总会有合适的图像作为查询图像,使用本方法可以让用户得到满意的检索结果。在本文实验中,分别使用理想高通滤波器、巴特沃斯高通滤波器和高斯高通滤波器计算图像的平均高频信号强度,并返回最终的检索结果。

本文选取 10 幅查询图像进行图像检索,对综合区域匹配算法的检索结果和平均高频信号强度逆序排序的检索结果作比较,取检索结果中前 50 幅图的准确度作为标准,综合区域匹配算法的查准率为 0.608,使用理想型滤波器和巴特沃斯型滤波器获取平均高频信号强度查准率为 0.788,使用高斯型滤波器获取平均高频信号强度查准率为 0.772。可以看出,所提方法让检索的查准率有了较大的提升。

在使用不同阶数的巴特沃斯高通滤波器进行检索时,最终获得的结果基本一致,无明显差别,均将查准率提高了 18%,只有在极少数时候会出现返回图像顺序不一致的情况,对检索查准率无太大影响。

经过综合的比较,由于理想型高通滤波器构成简单,计算时间复杂度相对其他两种滤波器较小,故推荐理想型高通滤波器作为最佳选择。使用 3 种滤波器的检索结果如图 3 所示(只列出前 10 幅,从左往右、从上往下依次排列,IRM 算法检索结果中的第一幅图像为查询影像)。

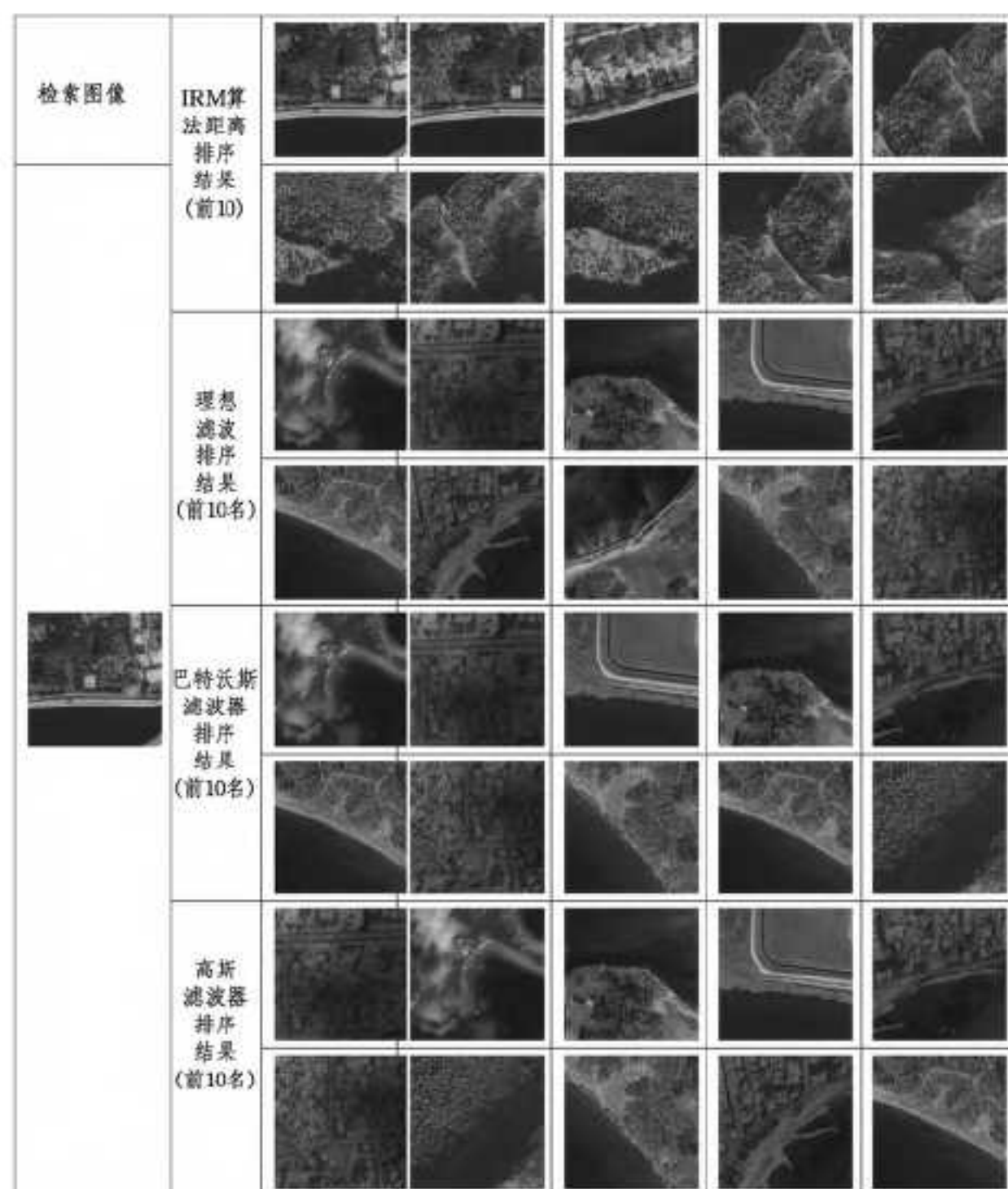


图 3 水体图像检索比较

实验表明,通过含有少量水体信息的图像检索出含有大量水体信息的图像,把少量的水体信息扩大化,提高了图像所含有的水体语义的利用率,减少了潜在存在的由于检索图像语义不明确所造成的检索错误。同时,在本文中 IRM 距离排序是基于图像区域的颜色直方图,所以检索出来的图像和查询图像在光谱特征上比较相似。但是,由于只考虑了光谱特征,IRM 往往会检索出与查询图像在光谱上相似,但语义上

无关的图像。为了解决这一问题,考虑到在水体影像中很少有阴影、边缘等高频信号较强的地物,可用平均高频信号强度来对 IRM 的检索结果按升序重新排序,把平均高频信号强度低的图像排在前面,如此虽然会导致排在前面的图像与查询图像的光谱特征相似性下降,但是提高了被检索到的图像与“水体区域”这一语义概念的相似度。本文用到的查询图像包含 3 种语义信息:水体、植被、建筑。在水体区域检索过程中,植被和建筑属于干扰因素,而水体属于需要的语义。如果单纯的使用只有水体的图像做查询图像,无法体现出其他语义的干扰作用。由于文章篇幅限制,只在检索结果中列出了平均高频信号强度最低的 10 幅图像,并没有完整地列出所有的检索结果。综合区域匹配算法检索到的有关图像,由于平均高频信号强度较高,也就是与水体语义的相似度较低,因此排序相对靠后,并未在文中列出。

结束语 在基于语义的图像检索中,由于“语义鸿沟(semantic gap)”的存在会给检索结果造成影响。如何减小语义鸿沟的存在,是基于语义的图像检索首先要解决的问题。水体区域多由平坦的表面构成,较少含有高频强度较高信号。本文针对“水体区域”这一特征,提出平均高频信号强度这一概念来弥补语义鸿沟。本方法检索查准率和检索效率较高,但是也存在一定的局限性,由于依据平均高频信号强度脱离了图像的光谱特征,在检索过程中虽然提高了水体区域检索的查准率,但在一定程度上降低了检索到的图像与查询图像在颜色特征方面的相似度,需要进一步研究解决。

参 考 文 献

- [1] Li Yi-kun. Semantic-Sensitive Remote Sensing Imagery Retrieval[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014(8): 1-7
- [2] Wang J Z, Li J, Wiederhold G. SIMPLIcity: Semantics-sensitive integrated matching for picture libraries[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(9): 947-963
- [3] Tian Y, Wu Z, Meng L. A region-interactive retrieval model based on IRM algorithm[C] // 2005 5th International Conference on Information Communications & Signal Processing. 2005: 692-695
- [4] Zakariya S M, Ali R, Ahmad N. Combining visual features of an image at different precision value of unsupervised content based image retrieval[C] // 2010 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC). IEEE, 2010: 1-4
- [5] Zhuang D, Wang S. Content-based image retrieval based on integrating region segmentation and relevance feedback[C] // 2010 International Conference on Multimedia Technology (ICMT). IEEE, 2010: 1-3
- [6] 李铁鲲, 闫浩文, 孙建国. 分步式卫星图像检索[J]. 测绘科学, 2009, 34(6): 53-55
- [7] 夏定元, 付翮, 刘丽端. 一种综合区域匹配的图像检索改进算法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(26): 197-200
- [8] 郭媛, 毛琦, 陈小天. 干涉条纹快速加窗傅里叶滤波方法的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 151-155
- [9] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理(第 1 版)[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 120-127
- [10] 李杰. 基于内容的图像检索方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008