

# 基于 Contourlet 旋转不变特征的遥感图像检索

郝玉保<sup>1),2)</sup> 王仁礼<sup>3)</sup> 顾立娟<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>(信息工程大学测绘学院, 郑州 450052) <sup>2)</sup>(75719 部队, 武汉 430074)

<sup>3)</sup>(河海大学水资环境学院, 南京 210098) <sup>4)</sup>(国家数字交换系统工程技术研究中心, 郑州 450002)

**摘要** 除了具有纹理属性外, 遥感图像中还包含大量的结构性边缘特征, 如何有效捕捉这些特征中的信息进行检索, 成为提高遥感图像检索效率的关键。文章依据 Contourlet 在离散域的多尺度几何分析的功能, 提出一种利用 Contourlet 子带能量分布特性提取原始图像在多个尺度下的边缘方向信息进行检索的方法。针对 Contourlet 变换捕获不同特征方向能力的差别, 文章采用正交补偿法加以改正, 并通过傅里叶算子的处理, 实现基于结构性边缘特征旋转不变的图像检索。实验结果表明, 该检索算法对含有丰富规则边缘特征的遥感图像更为有效。

**关键词** 轮廓波 旋转不变 边缘特征 遥感图像检索

中图法分类号: TP391.3 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)04-670-07

## A New Image Retrieval Method Using Contourlet-based Rotation-invariant Feature for Remote Sensing Images

HAO Yubao<sup>1),2)</sup>, WANG Renli<sup>3)</sup>, GU Lijuan<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>(Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052)

<sup>2)</sup>(75719 Troops, Wuhan 430074)

<sup>3)</sup>(College of Water Resources and Environment, Hehai University, Nanjing 210098)

<sup>4)</sup>(China National Digital Switching System Engineering and Technological Research Center, Zhengzhou 450002)

**Abstract** There are plenty of structure edge features in remote sensing images besides texture features. How to capture the information contained in these features is a key point to retrieve remote sensing image effectively. Given that Contourlet transform has the function of multi-scale geometric analysis in the discrete domain, we have put forward a novel approach for image retrieval, which extracts the energy features of Contourlet subbands to obtain the edge direction information under different scales. For the ability differences in capturing different direction features, we have adopted an orthogonal compensation method to remedy them, and realized rotation invariant image retrieval through processing them with Fourier operator. Experiments on remote sensing images demonstrate this retrieval algorithm is especially effective for those images containing rich structural edge features.

**Keywords** Contourlet, rotation-invariant, edge feature, remote sensing image retrieval

## 0 引言

2 维小波变换是由 1 维小波变换直接用张量积扩展得到的, 在表述具有 1 维奇异性的方向信息, 如

边缘、纹理等效果并不理想。本质上, 小波善于捕获 0 维的点状奇异, 在表示具有点奇异性的目标函数时是最优的基, 或者说是“最稀疏”的表示, 但是对具有 1 维奇异性的边缘, 小波基不是最优基。小波变换不能充分利用数据本身特有的几何特征, 发掘

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA12Z154)

收稿日期: 2008-10-09; 改回日期: 2009-02-21

第一作者简介: 郝玉保(1982—), 男。信息工程大学测绘学院摄影测量与遥感专业硕士研究生。主要研究方向为遥感影像处理、模式识别、遥感图像检索技术。E-mail: herrybob@sohu.com

图像中边缘方向信息。为了更好地捕获图像中的边缘和轮廓信息,产生了一系列以 let 后缀命名的多尺度几何分析方法,并将其统称为超级小波 (Beyond Wavelets) 或后小波,其中 Curvelet 和 Contourlet 可以有效地捕捉线奇异。与 Curvelet 在连续域中离散采样不同的是 Contourlet 变换是在数字域中定义的,将数字域与连续域联系起来,在连续域中讨论变换的逼近性能。采用不可分的滤波器组,可从每个尺度选择任意不同的多个方向描述图像信息,并且冗余度仅有 4/3。只要提供抛物尺度划分和足够的方向消失矩信息,Contourlet 变换能够对含曲线奇异的分段光滑函数进行最优逼近。

Contourlet 自从 2002 年提出以来,主要运用于图像去噪、图像增强和图像融合,而用于图像检索的研究相对较少,这其中以纹理图像的检索为主。诸如,杨家红等人提出的利用广义高斯模型对子带系数进行建模从而提取图像纹理特征的方法<sup>[1]</sup>。这种方法的优点在于仅需要考虑 Contourlet 变换各子带的边缘分布,无需考虑子带之间的相关信息,算法实现简单,计算复杂度低。但存在的问题是在利用子带系数的统计直方图特征描述子带时,由于子带数据的稀疏性,直方图集中在零值附近,这些低系数值更多地反映是图像上的不规则边缘特征,而不能很好地刻画人眼视觉系统所关注的规则边缘特征。Duncan Po 提出利用隐马尔可夫树 (hidden Markov tree, HMT)<sup>[2]</sup>对 Contourlet 变换系数进行建模,提取模型参数作为索引特征。这种算法的优点在于有效提取了不同子带系数之间的相关信息,提高了检索的精度,但是需要花费大量的计算时间,特别是隐马尔可夫树模型的训练过程耗时巨大。以上两种方法均没有考虑图像旋转的影响,即不具有旋转不变性,这对于具有细小基元的纹理图像影响并不明显,但是对包含大量结构性边缘信息的中高分辨率遥感图像影响比较显著。

由于 Contourlet 变换不同子带的能量反映了图像上边缘的方向分布特征,某个子带能量越大表示原图中有更多的边缘的切向为此方向,所以可以利用子带能量分布直方图描述原图中的方向信息。鉴于 Contourlet 变换对不同方向的能量的捕获能力不同,必须对其进行补偿,这样提取的直方图才具有对称性。另外,对于直方图中存在的圆平移 (circle-shift) 必须采用一定的方法予以消除,才能实现旋转不变的图像检索。

## 1 Contourlet 变换及其能量分布

Contourlet 变换亦称塔式方向滤波器 (PDFB),是由拉普拉斯塔式分解 (LP) 和方向滤波器组 (DFB) 共同实现的。Contourlet 基函数的支撑区间是随尺度而长宽变化的“长条形”结构。塔式分解进行多尺度分析,用来捕捉点奇异,把原始图像分解为低频子带和高频子带。接着用方向滤波器将高频子带分解为  $2^n$  个方向子带 (对于不同的分辨率,  $n$  可以取任意不同的正整数),将同一个方向上的奇异点结合,实现捕捉线奇异的功能。对低频子带重复上述过程可以实现图像的多分辨、多方向分解<sup>[3]</sup>。图 1 是对圆周的两层各 32 个方向的 Contourlet 分解,可以通过下列公式计算每个子带的平均能量。

$$E(i, j) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x_{ij}=1}^{N_x} \sum_{y_{ij}=1}^{N_y} |d_{x_{ij}, y_{ij}}| \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, level; j = 1, 2, \dots, 2^n$$

式中,  $i$  表示所在级数,  $j$  表示相应的方向子带;  $N_x$ ,  $N_y$  分别表示子带的行列像素数。图 1 为圆周两层 Contourlet 分解,图 2(a) 为相应于图 1 分解结果的一级方向子带能量分布直方图,其中虚线为直方图顶端二次拟合曲线。由图 2(a) 可见,Contourlet 变换子带在同一级的能量分布呈现出两端高、中间低的形态特征,这显然与圆形轮廓在任何方向的能量分布均匀的事实相违背。理想情况下圆形图案分解的子带能量分布直方图的顶端包络应为一水平直线,图中反映的情况说明 Contourlet 分解对不同方向能量的捕获能力不对称,因而必须对弱捕获子带的能量进行补偿。图 2(b) 为图 2(a) 导出的方向子带能量捕获能力模型,从图中可以发现,Contourlet 变换的能量捕获能力近似成“V”字形,其中央部分捕获能力最差,对应于  $45^\circ$  方向的边缘特征。

Contourlet 变换的这种特性,破坏了方向子带能

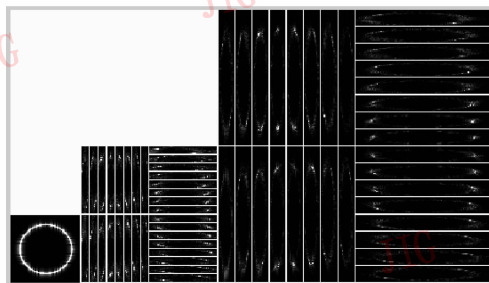
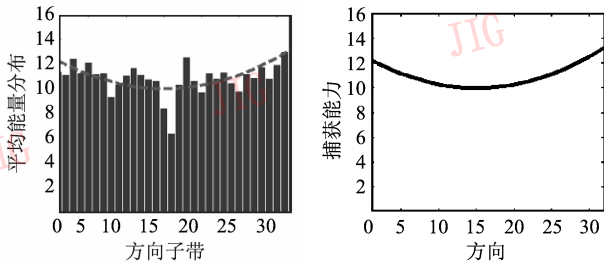


图 1 圆周两层 Contourlet 分解



(a) Contourlet 变换一级方向子带能量分布 (b) Contourlet 分解方向捕获能力分布图

图 2 能量分布直方图和能量捕获模型

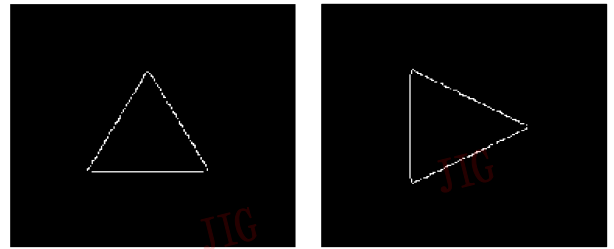
Fig. 2 Histogram of energy distribution and model capturing energy

量直方图在表示图像方向信息时的一致性。这对于消除图像旋转变形的影响,实现具有旋转不变特性的图像检索是十分不利的。

## 2 能量补偿

第 1 节揭示了 Contourlet 变换对不同方向能量捕获的不对称性,为了让子带能量直方图真实反映图像上的方向分布,必须对直方图特征进行补偿。一种简单的方法是直接根据图 2(b) 的能量捕获模型进行补偿,即对直方图中间部分进行向上拉伸,或对两端部分向下压缩。然而,此种方法存在的问题是不同方向的能量在捕获过程中存有误差,在对弱捕获子带能量进行补偿的同时噪声也得以放大,这样势必会影响到检索的可靠性。鉴于此,本文提出利用正交辅助图像的子带能量分布直方图对原始图像直方图进行补偿的方法。所谓正交辅助图像即为原始图像顺时针旋转  $90^\circ$  后得到的图像。由于正交辅助图像与原图像是同源图像,利用其直方图对原直方图进行补偿更为准确。

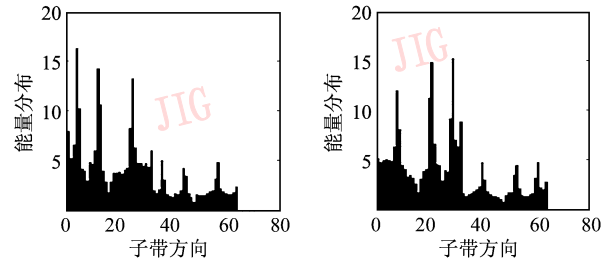
图 3 显示的是三角形及其正交辅助图像,图 4(a) 和图 4(b) 分别为各自的两级能量分布图,在两级直方图的中央同样出现明显的低谷。由于辅助图与原图经过  $90^\circ$  旋转所得,在原图上弱捕获的边缘在辅助图上被强捕获,而在原图上强捕获的边缘在辅助图上被弱捕获。需要注意的是图像的旋转体现在直方图上是圆平移,平移量的大小为子带方向数的一半。为了与原直方图的初始方位一致,必须对其进行反向平移。图 4(c) 为图 4(b) 反向平移的结果,图 4(d) 为图 4(c) 对图 4(a) 补偿后的结果,整个过程如图 5 所示。



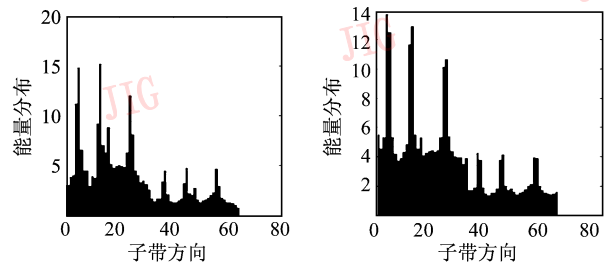
原图 辅助图

图 3 三角形及其正交辅助图像

Fig. 3 Triangle and the version that the former triangle was rotated by  $90^\circ$



(a) 三角形的能量分布 (b) 辅助图的能量分布



(c) 辅助图逆向平移后的结果 (d) 补偿后的能量分布

图 4 4 幅能量分布直方图

Fig. 4 Four histograms of energy distribution

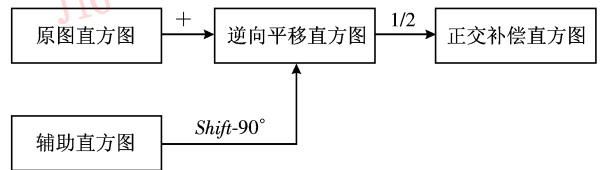


图 5 正交补偿过程

Fig. 5 Orthogonal compensation process

通过对图 4(d) 的分析发现,经过补偿后的三角形的能量直方图无论是高频域还是中频域均存有 3 个明显脉动,这与原始图像上存在 3 条明显的直线边相符。

依据同样的方法分析圆形图像经过能量补偿后的直方图特征。由于圆在旋转之后形状不变,其分解结果与图 1 一致,相应的一级方向子带能量分布直方图与图 2(a) 完全相同。按照以上过程得到补偿后的一级子带能量直方图如图 6 所示。

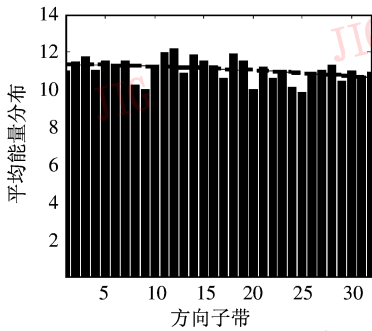


图 6 圆形图像补偿后的子带能量分布直方图

Fig. 6 Histogram of energy distribution after the primal was compensated for circle image

从图 6 可以看出,补偿后圆形图像 Contourlet 分解子带能量直方图的顶端拟合曲线近似水平直线,此时与圆的方向分布特征一致。直线稍有倾斜主要是因为样本容量比较小,拟合结果与理论值存有一定偏差,但也不排除模型中依然存有系统误差的可能。文中采用二次多项式进行拟合,拟合公式为

$$y = ax^2 + bx + c \quad (2)$$

式中,  $a, b, c$  分别为二次项、一次项和常数项的拟合系数,将补偿前后的拟合结果列于表 1。

表 1 圆形图像补偿前、后子带能量直方图拟合结果  
Tab.1 Parameters fitted energy histogram of circle image compensated and non-compensated

系数	$a$	$b$	$c$	拟合误差
补偿后	-0.000 4	-0.007 4	11.344 2	3.195 3
补偿前	0.011 6	-0.349 9	12.612 0	6.763 4

表 1 中,  $a$  反应的是曲线的弯曲程度,  $b$  反应的是曲线的倾斜程度。对比补偿前后的拟合结果可以看出,补偿后无论弯曲程度还是倾斜程度都比补偿前小很多,这就证实了补偿后的 Contourlet 方向子带能量特征改善了方向捕获的一致性。

### 3 遥感图像检索实验

#### 3.1 相似性度量

由于不同频域特征值之间的差异较大,使用欧氏距离容易将小特征值的作用掩盖,达不到预期效果。因此,本文采用 Canberra 距离进行相似性计算。该距离定义为<sup>[4]</sup>

$$d_c(t_q, t_d^j) = \sum_{i=1}^l \frac{|t_q(i) - t_d^j(i)|}{|t_q(i)| + |t_d^j(i)|} \quad (3)$$

式中,  $t_q$  为查询图像的特征向量,  $t_d^j$  为图像库中第  $j$  幅图像的特征向量,  $t_q(i)$  为查询图像的第  $i$  个特征值,  $t_d^j(i)$  为图像库中第  $j$  幅图像的第  $i$  个特征值,  $l$  为特征向量的长度。由式(3)看出,其将各个特征项的距离均归一化到 0~1 之间,使各个特征项在计算中起到同等作用。

#### 3.2 旋转不变性的实现

可以将子带能量分布直方图看成 1 维的离散信号。在连续域中,信号  $f(t)$  的傅里叶变换  $F(u)$  一般为复数,从而可以表示为复数形式<sup>[5]</sup>

$$F(u) = R(u) + iI(u) \quad (4)$$

式中,  $R(u)$  与  $I(u)$  分别为  $F(u)$  的实部与虚部。 $F(u)$  也可以写成指数形式

$$F(u) = |F(u)| e^{i\varphi(u)} \quad (5)$$

式中

$$|F(u)| = \sqrt{R^2(u) + I^2(u)} \quad (6)$$

$$\varphi(u) = \arctan[I(u)/R(u)]$$

由式(5)可知,1 维信号的傅里叶变换结果包含两部分的信息,即  $\varphi(u)$  相角和  $|F(u)|$  幅度。由于  $\varphi(u)$  与信号  $f(t)$  的初始相位有关,所以  $\varphi(u)$  为一个对旋转敏感的特征量;由于  $|F(u)|$  不受初始相位的制约,所以  $|F(u)|$  为旋转不变的特征量。同样,在离散域中有类似的结果。

为了使不同算法的检索结果具有可比性,本文对图像依然进行 3 层 Contourlet 分解,取第 1 层 4 个方向子带,第 2 层 8 个方向子带,第 3 层 16 个方向子带。然后分别对每一层方向子带能量分布直方图作傅里叶变换得到旋转不变特征向量,并按式(3)计算图像之间的相似性。

#### 3.3 实验分析与性能评价

由于多源遥感图像之间存在各种变形,情况比较复杂,本文主要研究中等比例尺遥感卫星图像的检索问题。这里以 SPOT 卫星图像为例进行分析研究。为了验证算法性能和适用范围,将实验数据分为自然区域,以山地和耕地为例;城镇区域和居民地以及多目标区域和大型独立目标进行检索实验。检索性能的评价可以在目视判读的基础上,进一步计算查准率和查全率指标来评价算法性能。实验中取与事例图像最相似的前  $n$  ( $n$  取 10 或 15) 幅图像作为检索结果。此种情况下,统计查全率没有意义,仅以查准率作为唯一性能评价指标,图像检索的查准率定义为<sup>[6]</sup>

$$C = \frac{\text{返回的正确图像的数目}}{\text{返回的图像的数目}} \times 100\% \quad (7)$$

### 3.3.1 自然区域检索实验

对于自然区域,如山地和耕地,在一个较大的区域范围内具有很强的纹理相似性。在实际应用中,检索出这些相似的纹理区域是有意义的。

首先从 10 m 分辨率的 SPOT 卫星图像中裁剪出  $1\,024 \times 1\,024$  规则大小的山地和耕地区域图像,并对这些相同尺寸的图像进行  $4 \times 4$  无重叠分块,得大小为  $256 \times 256$  像元的子块 16 幅,并以地域属性加 4 位编号为文件名存储为图像文件。其中,山地

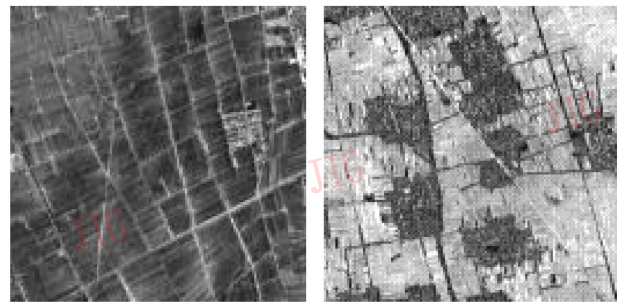
包括 4 个区域由前两位编号 01 ~ 04 区分;耕地包括 6 个区域由前两位编号 01 ~ 06 区分,共 10 类图像,后两位为子块编号。从每类图像中随机抽取一幅图像作为事例图像,构成 10 次检索,每次返回 15 幅图像。检索结果如表 2 所示。其中 CTH 表示本文方法;NCTH 方法中提取子带能量均值和方差作为特征量,不进行旋转不变性改造;GGD 为文献[1]中介绍的方法。以下实验中相同,故不再赘述。

表 2 自然区域检索结果

Tab. 2 Precision of retrieval for natural images

事例图号	耕地 01	耕地 02	耕地 03	耕地 04	耕地 05	耕地 06	山地 01	山地 02	山地 03	山地 04	MP	VP
CTH	11	4	10	12	10	2	12	14	4	11	9	4.109 6
NCTH	13	2	11	13	11	11	10	14	5	4	9.4	4.195 2
GGD	14	1	13	14	7	12	12	13	8	7	10.1	4.228 2

总体来看,基于 GGD 模型的算法检索精度较高,而 CTH 算法精度较低,这说明对于自然区域图像的检索,GGD 法比 CTH 法优良。图 7 是图像库中的两幅事例图像。



(a) 耕地 02

(b) 耕地 06

图 7 自然图像库中两幅图像

Fig. 7 Two images from natural image database

图 7(a)中,地块田埂清晰可见且比较密集,构成了比作物更高尺度的纹理特征。由于同一区域不同部分田埂分布极不规则,减弱了其不同部分子图像之间的相似性,使 3 种基于 Contourlet 变换检索方法的精度均比较低,但同时从一个侧面也反映了基于 Contourlet 变换的特征提取方法对线状边缘具有较强的响应。图 7(b)中,沟壑纵横,但分布比较稀疏。由于本文所提出的 CTH 法对规则边缘具有较强响应,沟壑的不规则性导致其检索精度的降低。从表 2 中的数据可以看出,此种情况下 NCTH 方法和 GGD 方法仍然保持较高的检索准确率,说明这两种方法具有较高的鲁棒性,可以克服纹理图像中不规则稀疏线奇异的影响,比较适合于自然区域纹理

图像的检索。

### 3.3.2 城镇区域检索实验

城镇区域的检索目的是要能够检索出同一个城市的卫星图像,需要验证的是算法对部分匹配的适应性,即可否将只包含部分城区影像的图像检索出来。由于同一城区不同时相的遥感图像难以获得,这里仅以某城市 A 3 个时相的卫星图像为例,验证算法的有效性。首先从这 3 个时相的 SPOT 卫星图像中裁剪出  $1\,500 \times 1\,500$  大小的图像,为了规范图像尺寸,将其缩小为  $1\,024 \times 1\,024$  大小的幅面,其余图像采用类似的处理。采用 5 叉树分解,将每一幅图像分解为 5 幅  $512 \times 512$  大小的子图像,并将其进一步缩小为  $256 \times 256$  像元大小,共得城市 A 的子图像 15 幅。加入其他城区的图像 15 幅,构建一个包含 30 幅图像的微型实验库。实验中,从 3 个时相城市 A 卫星图像中裁剪出带有一定偏移量、大小为  $1\,024 \times 1\,024$  像元的图像,并缩小成  $256 \times 256$  大小作为事例图像进行实验,返回与事例图像距离最近的前 15 幅图像作为检索结果。这样最少可检索出 0 幅城市 A 的图像,最多可以检索出 15 幅城市 A 的图像。实验结果如表 3 所示。

表 3 城市 A 检索结果

Tab. 3 Precision of retrieval for the urban district A

获取时相	时间 1	时间 2	时间 3	MP
CTH	10	11	12	11
NCTH	9	11	11	10.33
GGD	10	10	11	10.33

表 3 中的实验数据说明,3 种算法对城区的检索均有效,而 CTH 方法精度略高于其余两种方法,这证实了此算法对中分辨规则边缘图像的检索更为有效。

### 3.3.3 目标区域检索实验

为了获得空间上具有相似性同时存在摄影变形的大比例尺遥感图像,本文采用模拟的方法构建相似图像库。为了反映线阵 CCD 卫星图像行中心投影的成像特性,在模拟其变形时对图像的横向分辨率作线性拉伸。因为事例图像通常是一景遥感图像上局部区域的影像,所以在构建特征库之前,必须对库中的遥感图像进行分块,从而提取子图像的特征构建特征库。子图像幅面相对于整幅图像尺寸的比例

很小,所以可改线性拉伸为横向分辨率的均匀拉伸。由于遥感卫星姿态稳定,对同一地区摄影时姿态变化小,为了验证算法对旋转的鲁棒性进行了适度放大,模拟时取  $10^\circ$  的旋转角。

实验模拟了 10 类大型目标,每类来源于同一幅图像,首先对原始图像进行  $10^\circ$  的旋转,然后将旋转前后遥感图像的横向分辨率拉伸为 10.2 m,10.4 m,10.6 m,10.8 m 和 11 m 5 个档次,每类得 10 幅相关图像,共 100 幅构成一个小型实验库。检索时,从每类中任意挑选出一幅图像作为事例图像,共进行 10 次检索,每次返回与事例图像最相似的前 10 幅图像作为检索结果,并以 10 次检索的平均查准率作为算法性能的评价标准。检索结果如表 4 所示。

表 4 目标区域的检索结果

Tab.4 Precision of retrieval for regions of interest

事例图名	航母/%	湖/%	机场/%	建筑/%	街区/%	立交桥/%	码头/%	五角大楼/%	学校/%	油罐/%	MP/%	VP
CTH	100	100	100	100	100	90	100	100	100	100	99	0.031 6
NCTH	100	100	50	100	50	50	100	100	100	100	85	0.241 5
GGD	100	100	50	100	100	100	100	100	90	50	89	0.207 9

表 4 中的检索结果说明,这 3 种方法对图像的旋转均具有一定的鲁棒性,由于在实际遥感图像库的构建中通常采用分块策略,图像平移变形要比实验库大得多,且存在部分匹配情况。为了客观地分析算法性能,仅作相对比较。图 8 展示的是机场图像检索结果,图 9 为油罐图像的检索结果。图 8(a)和图 9(a)为基于本文所提出的 CTH 方法的检索结果,图 8(b)和图 9(b)为基于 GGD 方法的检索结

果。为了分析算法的性能,同时显示出了与事例图像最相似的前 15 幅图像。通过对图 8(a)和图 8(b)的比较可以发现,CTH 方法将主体目标一致的图像优先检索出来,而 GGD 方法则将与目标所在区域具有纹理相似性的图像优先检索出来。不仅如此,通过对检索结果的第 11 幅至第 15 图像的比较可以发现,CTH 法检索结果与人眼视觉响应具有一致性。图 9(a)和图 9(b)的检索结果中包含的均

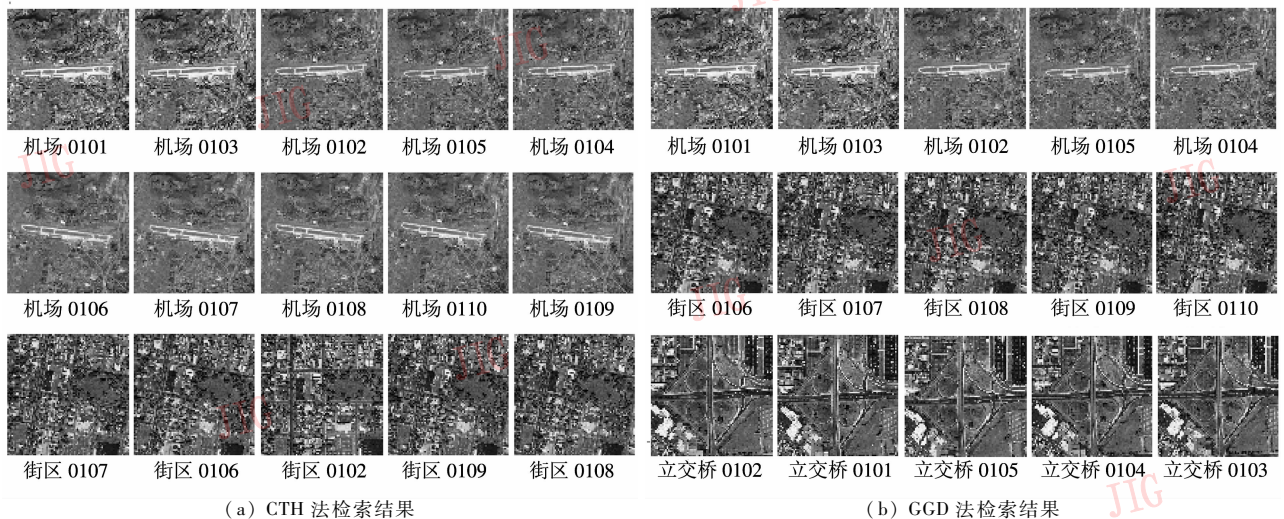


图 8 机场图像检索实验

Fig. 8 Experiments performed on the images containing an airport



(a) CTH 法检索结果

(b) GGD 法检索结果

图 9 油罐图像检索实验

Fig. 9 Experiments performed on the images containing some oilcans

为纹理层次上具有相似性的图像,但 GGD 法不能对图像中的细微差别做出响应,对图像内容的分解力不及 CTH 法,从而降低了检索的精度。

## 4 结 论

本文提出了一种基于 Contourlet 变换具有旋转不变特性的子带特征表达方式。由于这种表达能够更好地反映遥感图像中结构性边缘信息,从而弥补了利用纹理特征描述遥感图像内容的不足。文中成功地将此方法运用于遥感图像的检索实验,获得了良好的效果。通过对 3 组不同类型遥感图像所做的实验,进一步揭示了 GGD 法的鲁棒性高,适合于遥感图像上纹理特征丰富区域的检索;CTH 法对图像的分解力强,更适用于包含大量结构性边缘特征的遥感图像检索,如中分辨率的城镇影像和高分辨率的目标图像;NCTH 法性能比较适中,但是受图像旋转变形的影响最大。文章存在的不足是没有对 Contourlet 变换的分解层次以及方向子带划分的数目作具体的研究,由于不同层次的子带系数对特征的表达程度不同,表达能力强的可以进行更多的方向子带划分,表达能力弱的可以进行少量的划分,这可在一定程度上提高了计算的效率。另外,由于检索的性能除受特征描述方法的影响,而且受到相似性度量方法的制约,不同的相似性度量方法会对不

同的特征描述方法有效,这一点文中缺少分析。以上两点即为下一步需要研究的主要问题。

## 参考文献 (References)

- [1] Yang Jiahong, Xu Canhui, Wang Yaonan, et al. Texture image retrieval based on Contourlet transform using generalized Gaussian model[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(4): 691-694. [杨家红, 许灿辉, 王耀南, 等. 基于 Contourlet 广义高斯模型的纹理图像检索[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(4): 691-694.]
- [2] Duncan Po. Image Modeling in Contoutlet Domain[D]. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2003.
- [3] Minh N D, Martin Verterli. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2091-2106.
- [4] Wang Chengru, Wu Yahui. Rotation-invariant texture feature for two-stage image retrieval[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(3): 70-72. [王成儒, 吴娅辉. 旋转不变纹理特征用于图像检索[J]. 光电工程, 2005, 32(3): 70-72.]
- [5] Li Bicheng, Peng Tianqiang, Peng Bo, et al. Intelligent Image Processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 357. [李弼程, 彭天强, 彭波, 等. 智能图像处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 357.]
- [6] Bao Qian, Guo Ping. Comparative studies on similarity measures for remote sensing image retrieval based on histogram[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(6): 894-900. [包倩, 郭平. 基于直方图的遥感图像相似性检索方法比较[J]. 遥感学报, 2006, 10(6): 894-900.]