基于 Gabor 滤波器的航空图像居民区域提取

谷多玉 郭 江 李书晓 常红星

(中国科学院 自动化研究所, 北京 100190)

摘 要: 中低分辨率航空图像中居民区域的自动提取对地理信息系统更新和无人机导航具有重要作用. 详细分析了 Gabor 滤波器参数对纹理提取的影响,提出了一种基于 Gabor 滤波器的居民区快速提取算法. 算法包含 4 步:运用 Gabor 滤波器分析图像纹理,采用核密度估计生成居民区域置信图像,进而计算自适应阈值分割置信图得到候选区域,最后根据区域几何形状去除干扰得到居民区. 算法平均运算时间为 0.42 s,实验结果表明了算法的高效性和准确性.

关 键 词: 航空图像; 居民区域提取; Gabor 滤波器; 核密度估计

中图分类号: TP 391

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)01-0106-05

Resident region extraction using Gabor filter in aerial imagery

Gu Duoyu Guo Jiang Li Shuxiao Chang Hongxing

(Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: Automatic extraction of resident regions from medium and low revolution aerial images plays a crucial role in geographic information system(GIS) updating and unmanned aerial vehicle(UAV) navigation. The parameters of Gabor filter in detail were analyzed, and a fast resident region extraction algorithm based on Gabor filter was proposed. The method composed of four steps. Firstly, the texture features of input image were extracted using Gabor filter. And then the texture features were smoothed by the kernel density estimation method to get the confidence image. Subsequently, the confidence image was segmented by the basic global threshold algorithm to acquire candidate regions. Ultimately, the candidate regions were verified by the geometric structure information. The method has low computational complexity, and can run within 0.42 s in average. The efficiency and accuracy of the proposed algorithm were demonstrated by the experimental results.

Key words: aerial imagery; resident region extraction; Gabor filter; kernel density estimation

居民区域是人类活动集聚地,在航空图像中具有广泛的分布,实现其准确定位和提取对于无人机导航具有重要的作用,对 GIS(GIS,Geographic Information System)更新、城市规划、环境变化等研究也有重要的意义. 居民区域是由道路、建筑群、绿化带等多种地物相互交错延伸构成的混合体,人类目测判断居民区域时可以综合利用颜色、纹理、几何形状、空间关系等特征,而利用计算机准确描述居民区域特征则要困难得多,居民区域的提取是航空图像中地物特征分析处理的难点之一. 目前常用的居民区域提取算法包括基于训练分类的方法和基于纹理描述的方法两大类.

基于训练分类的方法可以将居民区域多种特征的综合利用,融合颜色和纹理信息,应用最大似然分类及确定性融合准则从彩色航空图像中分割城市区域[1]. 提取影像边缘特征,并统计单位区域边缘线的长度和对比度,将影像粗略分为城市区域和乡村区域[2]. 这类方法往往需要针对具体

收稿日期: 2010-09-06; **网络出版时间**: 2012-01-06 15:10; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20120106.1510.005

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120106.1510.005.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61005028)

作者简介: 谷多玉(1984 -),女,山东济南人,博士生,duoyu.gu@ia.ac.cn.

的对象人工确定合适的训练特征和分类类别,而且训练样本的选取精度很大程度上影响着分类的精度.

基于纹理描述的方法是当前国内外研究学者关注的重点,提出了多种纹理描述方法:用 8 链表模型[3]、统计纹理能量测度及建筑物直线直方图[4],多尺度梯度幅值、方向和线段长度等信息居民区域结构信息[5]等. 这些描述方法使用范围较窄,需要结合计算复杂度较高的分割方法. 文献[6]提取局部特征点并进行空间投影来检测城市区域及各独立的建筑物,计算效率较高,但仍然不能满足实时处理要求. 文献[7-8]对多种城市区域边缘密度、Pantex 纹理[9]、灰度协方差矩阵及 Gabor 滤波器等纹理检测算子进行了比对分析,实验结果表明 Gabor 算子具有较好的精确性和稳定性.

中低分辨率航空图像中居民区主要表现的特征有:①纹理信息丰富,灰度变化剧烈且有一定的规律,每个建筑物及相邻区域可以作为一个纹理基元;②具有一定的大小,在图像中占有一定的面积;③区域内建筑集聚成团状.

基于上述分析,本文分析了 Gabor 滤波器参数对纹理响应的影响,利用纹理信息结合自动阈值分割提取候选区域,并根据区域的几何结构特征去除干扰,实现居民区的快速提取.

1　Gabor 滤波器

1.1　Gabor 滤波器简介

Gabor 滤波器因其良好的纹理表述性而得到广泛的应用. 二维 Gabor 函数包括包络函数 Gaussian 函数和载波函数 sin 函数[10],在空域中数学描述如下:

$$F_{\varphi}(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2}\exp\left(-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}\right)\exp(\mathrm{j}(2\pi fu+\theta)) \quad (1)$$

其中,$u = x\cos\varphi + y\sin\varphi$;$v = -x\sin\varphi + y\cos\varphi$;$\sigma$ 为高斯函数尺度参数;φ 为滤波器方向参数;f 为载波函数频率;θ 为载波函数相位偏移.

Gabor 滤波器与待检图像 $I(x,y)$ 做卷积,即可得到图像中纹理响应,取其卷积中实部作为响应函数,即

$$R_{\varphi}(z) = \mathrm{Re}(I(z) * F_{\varphi}(z)) = I(z) * \mathrm{Re}(F_{\varphi}(z)) \quad (2)$$

$$\mathrm{Re}(F_{\varphi}(z)) = \frac{1}{2\pi\sigma^2}\exp\left(-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}\right)\cos(2\pi fu+\theta) \quad (3)$$

其中,$z = (x,y)$.

1.2　Gabor 滤波器参数分析

Gabor 滤波器的参数设置是纹理特征提取过程的一个重要问题,不同纹理对于同一个 Gabor 滤波器有不同的响应,因此需要针对不同的纹理设置不同的参数. Gabor 滤波器中主要参数分析如下:

σ 决定了滤波器峰值响应和窗口大小,其值越大,响应窗口越大,峰值越小. 反之亦然. 滤波器函数以 Gaussian 函数为包络,满足 3σ 准则,大于 99% 的能量落在$(\mu-3\sigma,\mu+3\sigma)$范围内.

φ 决定了 Gabor 滤波器的方向,不同方向的滤波器可以提取不同方向的纹理信息,图 1 显示了不同方向的 Gabor 函数示意图.

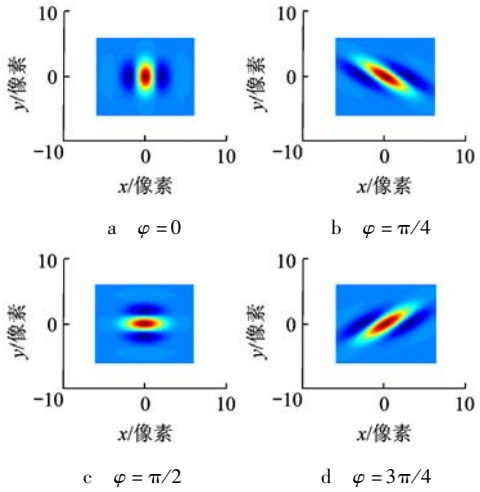


图 1　不同方向参数 Gabor 函数图

Gabor 滤波器的频率 f 越低,提取的纹理越稀疏;反之,f 越高,提取的纹理越稠密.

θ 为载波函数相位偏移参数,常用于纹理匹配,可解决小范围纹理平移问题. 当偏移相位不为 0 时,Gabor 函数不再是偶对称函数.

2　居民区域提取算法

本文算法首先对输入图像去噪后应用 Gabor 滤波器提取纹理特征;然后采用基于核密度估计方法平滑特征得到纹理置信图;接着基于纹理置信图自动计算全局阈值,并利用阈值分割得到候选区域;最后根据区域形状指数确定居民区域.

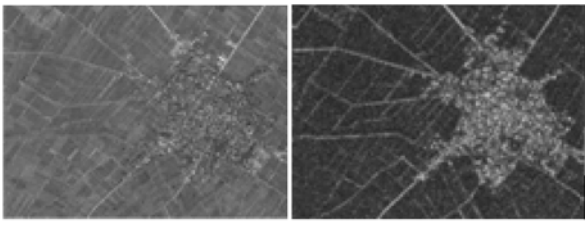
2.1　纹理特征提取

中低分辨率下,居民区域中的各建筑物可视为按一定顺序排列的纹理基元,该纹理特征不随季节的变换而改变,与农田、森林、水域等区域有明显差异,采用 Gabor 纹理提取算子能很好地提取这种具有强区分性的纹理特征.

区域中建筑物排列有序,排列方向和其垂直方向为主方向,由于无人机飞行方向的随机性,主方向不易确定,故选择多个不同方向 Gabor 滤波器进行纹理分析,将各个方向的函数响应值进行融合,取其均值为当前点的纹理响应值. 当各个方向的纹理响应都比较大时,该点纹理置信度较高. 设 N 为选择的方向波的个数,$T(z)$ 为图像中点 z 的纹理置信度值,则该过程可表示为

$$T(z) = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} \mid I(z) * \mathrm{Re}(F_{i\cdot\pi/N}(z)) \mid \quad (4)$$

图 2a 为航空图像,图 2b 是应用 Gabor 滤波器得到的纹理置信图,通过图像可以看出居民区域的纹理响应比较明显,大于农田等区域的纹理响应. 图像中的道路因其显著性,纹理响应也比较强.



a 一帧航空图像 b 纹理图像

图 2 航空图像居民区域纹理置信图

2.2 基于核密度估计的居民区置信图生成

2.1 节得到的纹理图像中,建筑物及道路上的像素点的纹理响应值均较大. 不同的是,建筑物区域响应值较大的点密集,呈团状聚集状态;道路区域响应值较大的点呈狭长状态. 基于上述观察可采用核密度估计的方式来生成表征居民区域存在的置信图像:

$$\tilde{I}(z) = \sum_{z_i \in R(z)} I(z_i) k\left(\left\|\frac{z_i - z}{h}\right\|\right) \quad (5)$$

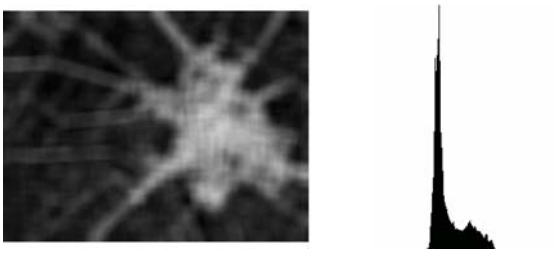
其中,$\tilde{I}(z)$ 为点 z 处的特征值;$R(z)$ 为 z 的邻域;$k(z)$ 为核函数的外形函数,满足非负、非递增和有限可积的条件;h 为带宽即加权邻域的大小.

常用的外形函数有常数函数、高斯函数、指数函数等. 在此,选择外形函数为常数函数,采用积分图像[11]快速计算区域加权值,根据式(5)计算纹理特征置信图.

图 3 给出了某航空图像中存在居民区的置信图. 比较图 2b 和图 3a 可以看到,道路区域的纹理密度较低,与居民区域的纹理密度差异显著. 图 3b 为置信图的统计灰度直方图.

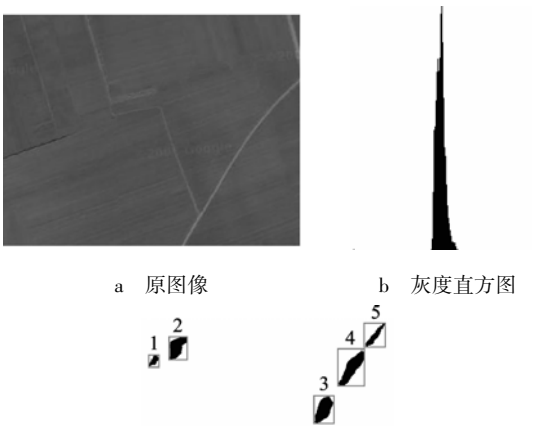
2.3 居民区域分割

纹理分析得到特征图像后,首先根据特征图像判断是否存在前景目标. 如没有前景目标,各点的纹理响应通常基本一致,其灰度直方图呈单峰分布;如存在前景目标,则在目标处纹理响应大,灰度直方图呈明显的双峰分布. 求出直方图最大峰值对应的灰度值 i,统计灰度值在 $i \pm h$ 范围内像素个数所占比例,如果比例大于一定阈值 T_1,则说明图像中没有前景目标. 其中 h 取经验值 7,图像中不存在前景目标时,比例一般大于 95%,而图像中如果存在前景目标,比例一般小于 60%,据此 T_1 取值 0.8. 图 4 显示了没有前景目标时的特征图像及灰度直方图.



a 置信图 b 灰度直方图

图 3 基于积分图像的区域纹理特征分析



a 原图像 b 灰度直方图

c 分割结果

图 4 无前景目标

如果图像中存在前景目标,特征图像灰度直方图为双峰,如图 3b 所示,其最佳分割阈值在图示波谷位置,根据基本全局门限[12]算法思想,迭代求取全局最优阈值 T_2:

1) 设定阈值最小值 t_1 及最大值 t_h,最大迭代次数 K,容忍误差 ε;

2) 当前阈值为 $T_2 = (t_1 + t_h)/2$;

3) 根据此阈值二值分割;

4) 分别统计小于及大于阈值的灰度均值 A_1,A_2,更新最小值 t_1 为 A_1,更新最大值 t_h 为 A_2;

5) 重复 2) ~4) 步,直到两次阈值之间差小于容忍误差 ε 或者迭代次数大于 K.

该方法能快速得到全局最优阈值,有效分割

出前景目标,取经验值 $K=100$,容忍误差 $\varepsilon=1$,迭代结果与 t_l 和 t_h 初始取值基本无关,为避免过暗及过亮小目标影响,t_l 和 t_h 分别取统计灰度达到 0.1 倍和 0.9 倍直方图总和时的灰度值.

2.4　候选区域确定

二值分割结果往往存在孤立小区域、道路狭长片段等干扰,如图 4c 所示. 分析可知居民区具有如下几何特性:居民区域在图像中占有一定的面积,由此可以去除面积过小的干扰区域;居民区域成团状而一般道路成线状,宽度仅有几个像素,根据形状指数[13]可以去除道路干扰确定居民区域. 形状指数计算如下:

$$d = D/S \tag{6}$$

其中,D 为区域周长;S 为区域面积.

去除干扰后居民区域提取结果如图 5 所示,其中黑色轮廓为最终提取出的居民区域,浅色轮廓为人工标注的居民区域. 提取出的居民区域轮廓与人工标注接近,对于导航定位等应用能提供足够的信息.

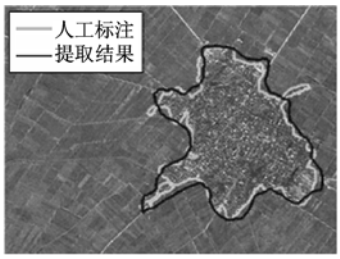


图 5　航空图像中居民区域提取结果

3　实验结果

对部分图像人工标注出居民区域作为基准数据,并将提取结果与人工标注结果相比较. 图 6 显示了不同测试数据的提取结果. 为了更好地描述

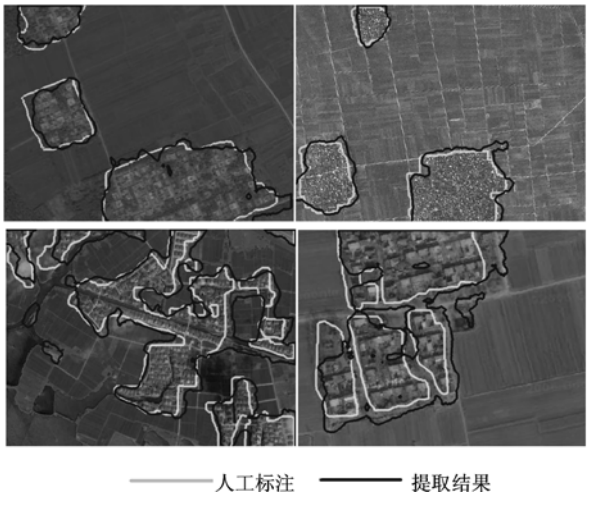


图 6　不同测试图像提取结果

算法效果及统计结果的准确率 R_p 和回收率 R_r,并以此计算 F 测度值:

$$F_\alpha = (1+\alpha^2)\frac{R_p \cdot R_r}{\alpha^2 \cdot R_p + R_r} \tag{7}$$

式中,α 为测度系数,一般取值为 1.

实验计算机配置为 Inter Core 2 Duo 双核处理器,主频 2.66 GHz,内存 2.00 GB,平台为 Microsoft Visual C++ 6.0.

3.1　参数分析

本节讨论 Gabor 滤波器参数的设定及对算法结果的影响. Gabor 滤波器中相位偏差 θ 主要用于特征匹配,以解决同一纹理特征在不同图像中的相位偏差问题. 本文纹理检测过程中设定相位偏差参数 θ 为 0. 下面采用的枚举方法观测参数变化对结果的影响,并分别讨论不同方向参数、不同尺度参数、不同频率对提取结果的影响.

1) 任意选择两个参数,如 σ 和 f,枚举方向波参数,观察其变化对结果的影响,然后依次变化尺度参数和频率,观测在同尺度和不同频率下,方向波参数对提取结果的影响. 图 7 为在一定尺度参数和频率下不同方向波的提取结果的 F 测度值. 由图可见,方向波个数大于 4 时算法效果无明显改善. 当方向波个数越多时,算法计算量越大,算法耗时分别为 0.19,0.23,0.42,0.74,1.0,1.5 s,因此采用 4 个方向波.

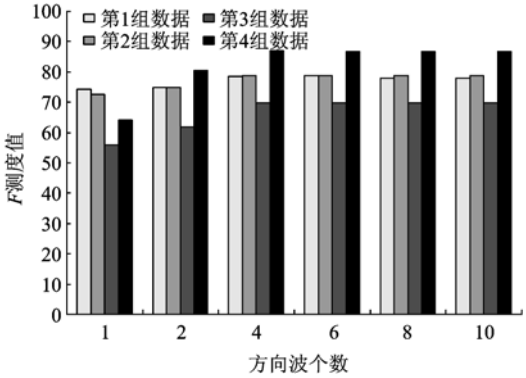


图 7　不同方向波个数提取结果

结果中第 3 组数据 F 测度值偏低,这是因为居民建筑物周边有许多小片水域,在基准图像中这些水域是不属于居民区内的,但是这些狭小的水域与居民建筑物一起共同构成纹理,其 Gabor 响应也很明显,因此检测出的区域中包含很多水域,提取结果的准确率偏低.

2) 设定方向波个数为 4,选定多个频率,在每个频率下依次变换尺度参数,观测不同尺度下的提取结果. 图 8 中显示了当方向波个数为 4,频率 $f=0.3$ 时不同尺度参数的提取结果.

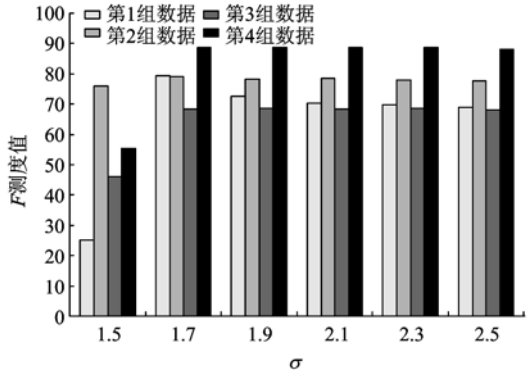


图 8 不同尺度提取结果比对

通过结果可以看出,第 1 组数据 F 测度值当 σ 为 1.7 时较大,而其他 3 组数据当 σ 在 1.7 ~ 2.5 之间 F 测度值大概相等. 随着尺度参数增大,算法计算量将为指数增长. 当方向波个数为 6,8,10 时,实验结果也满足上述规律. 综合各组数据,选择 $\sigma = 1.7$.

3) 设定方向波个数为 4,6,8,10,σ 为 1.5,1.7,2.5,3,5,在各组参数下改变频率值,观测频率的变化对提取结果的影响. 图 9 为方向波个数为 4,σ 为 1.7 时各频率下的提取结果.

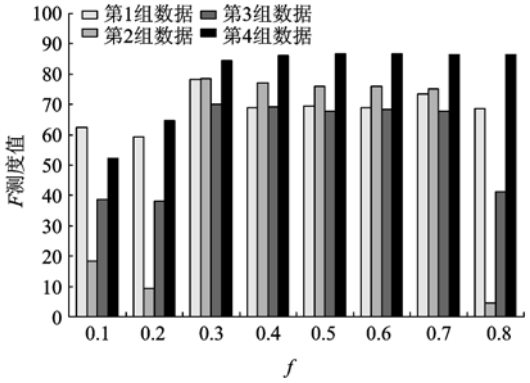


图 9 不同频率提取结果

当选择的频率与图像纹理频率接近时,其响应就会比较高. 图像分辨率较高时,建筑物单元或者建筑物边缘都可以视为纹理单元,故当 f 为 0.3 ~0.7 时,都有较好的纹理响应,其中当 f 为 0.3 时,各组数据提取结果最优.

综上分析,参数选择为:采用 4 个方向波,即 φ 分别为 0,π/4,π/2,3π/4,$\sigma = 1.7$,$f = 0.3$.

由于积分图像的能量平均及外溢效应,导致提取结果轮廓与标注轮廓有一定偏差,轮廓中细节有所丢失,但在视觉辅助导航中,需要的信息为区域的位置和轮廓走势,无需精确描述区域轮廓,本文中提取结果轮廓形状与标注结果接近,可以满足无人机视觉辅助导航中的需求.

3.2 对比实验

文献[6]于 2010 年提出了一种新的城市区域提取方法,利用 Gabor 滤波器分析区域结构纹理特性,提取局部特征点,然后将特征点空间投影后进行分割提取城市区域. 本文从算法效率及准确性两个方面与文献[6]中算法进行比较.

在前述实验条件下,采用文献[6]中所用的 Adana 及 Istanbul 区域图像数据及本文测试数据,根据给定的最佳参数设定滤波窗口大小为 5 × 5,滤波器尺度 $\sigma = 1.5$,$f = 0.65$,方向波个数为 10. 本文中算法参数选择为 $\sigma = 1.7$,$f = 0.3$,方向波个数为 4. 结果对比如图 10 所示.

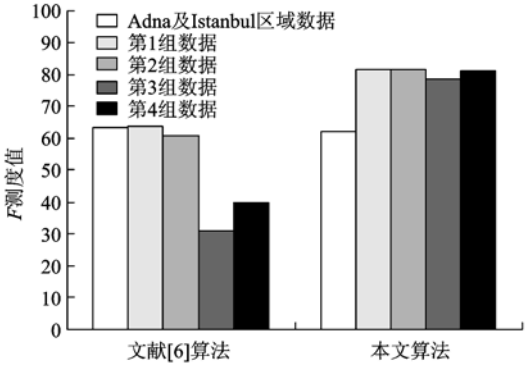


图 10 对比实验结果

本文所提算法平均 F 值测度大于文献[6]算法,在 Adana 及 Istanbul 区域测试数据中,因光照视角等因素影响,某些地质区域会呈现居民区域相似纹理,这部分区域会误检为居民区域,导致准确率下降,F 测度值较低. 按照文献[6]所设参数算法平均消耗时间为 2.45 s,将方向波参数设为 4,其算法时间消耗平均为 1.99 s,而本文中算法平均消耗时间为 0.42 s,有效地降低了计算成本.

4 结 论

通过以上分析和实验结果可以得到以下结论:①Gabor 滤波器有良好的纹理分析能力,且纹理响应与其参数有密切关系,分析各个参数的影响,选择合适参数以使区域纹理响应最大;②利用纹理特征和几何结构特征,可以稳定提取居民区域. 实验结果表明算法具有较好的准确率和召回率,且计算量较小,基本满足机载系统的实时处理要求.

参考文献 (References)

[1] Jolly M P D, Gupta A. Color and texture fusion: application to aerial image segmentation and GIS updating[J]. Image and Vision Computing, 2000, 18(10): 823 - 832

(下转第 122 页)

[J]. IEEE Comm Letters, 2002, 6: 440 – 442

[4] Aaron, Girod B. Compression with side information using turbo codes[C]//Proc of Data Compression Conference (DCC). USA: IEEE Computer Society, 2002: 252 – 261

[5] Pradhan S S, Ramchandran K. Distributed source coding using syndromes (DISCUS): design and construction[C]//Proceeding of the Data Compression Conf. USA: IEEE Computer Society, 1999: 626 – 643

[6] Tan P, Xie K, Li J. Slepian-wolf coding using parity approach and syndrome approach [C]//Proceeding of Information Sciences and Systems. Baltimore, MD: IEEE, 2007: 708 – 713

[7] Garcia-Frias J, Xiong Z. Distributed source and joint source-channel coding: from theory to practice[C]//Acoustics, Speech and Signal Processing. USA: IEEE, 2005, 5: 1093 – 1096

[8] Liveris A D, Xiong Z X, Georghiades C N. Joint source-channel coding of binary sources with side information at the decoder using IRA codes[C]//Proc IEEE Workshop Multimedia Signal Processing. Virgin Islands: IEEE, 2002: 53

[9] Garcia-Frias J, Zhao Y, Zhong W. Turbo-like codes for transmission of correlated sources over noisy channels[J]. Signal Processing Magazine, 2007, 24(5): 58 – 66

[10] Zhu X, Zhang L, Liu Y. A distributed joint source-channel coding scheme for multiple correlated sources[C]//Fourth International Conference of Communications and Networking. China: IEEE, 2009: 1 – 6

[11] Herzet C, Toto-Zarasoa V, Roumy A. Error resilient non-asymmetric slepian-wolf coding[C]//IEEE International Conference on Digital Object Identifier. Dresden: IEEE, 2009: 1 – 5

[12] Heidarzadeh A, Lahouti F. On robust syndrome-based distributed source coding over noisy channels using LDPC codes[C]//Signal Processing and Communications. Dubai: IEEE, 2007: 400 – 403

[13] Li J, Hu R. Slepian-Wolf cooperation: a practical and efficient compress-and-forward relay scheme[C]//Proc 43rd Annual Allerton Conf on Communications, Control and Computing. St Louis, MO: IEEE, 2005: 275 – 279

[14] Xue G, Zhang W, Hao C. Syndrome-based error resilient scheme of distributed joint source-channel coding[C]//Communications Technology and Applications. Beijing: IEEE, 2009: 555 – 559

[15] Barros J, Servetto S D. Network information flow with correlated sources[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2006, 52(1): 155 – 170

[16] Hu R, Viswanathan R, Li J. A new coding scheme for the noisy-channel slepian-wolf problem: separate design and joint decoding[C]//Global Telecommunications Conference. Dallas Texas: IEEE, 2004: 51

[17] Hua G, Cao L, Chen C. Distributed source coding under noisy transmission environments[C]//IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Beijing: IEEE, 2007: 320 – 323

[18] Mansour M M, Shanbhag N R. Turbo decoder architectures for low density parity check codes[C]//Global Telecommunications Conference. Taiwan: IEEE, 2002, 2: 1383 – 1388

(编 辑:赵海容)

(上接第 110 页)

[2] Unsalan C, Boyer K L. Classifying land development in high-resolution panchromatic satellite images using straight-line statistics [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2004, 42(4): 907 – 919

[3] Lorette A, Descombes X, Zerubia J. Texture analysis through a Markovian modelling and fuzzy classification: application to urban area extraction from satellite images[J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 36(3): 221 – 236

[4] 文贡坚,李德仁,叶芬. 从卫星遥感全色图像中自动提取城市目标[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2003, 28(2): 212 – 218

Wen Gongjian, Li Deren, Ye Fen. Automatic extraction of urban area from satellite panchromatic remote sensing images[J]. Journal of Wuhan University: Geomatics and Information Science, 2003, 28(2): 212 – 218(in Chinese)

[5] Zhong Ping, Wang Runsheng. Using combination of statistical models and multilevel structural information for detecting urban areas from a single gray-level image[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2007, 45(5): 1469 – 1482

[6] Sirmacek B, Unsalan C. Urban area detection using local feature points and spatial voting[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2010, 7(1): 146 – 150

[7] May S, Inglada J. Urban area detection and segmentation using OTB[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International. Cape Town, South Africa: [s. n.], 2009, 4: 928 – 931

[8] Wang Min. Influence of number of features on texture based residential area extraction from remotely sensed imagery[C]//Image and Signal Processing, 2nd International Congress on. Tianjin: [s. n.], 2009: 1 – 4

[9] Pesaresi M, Gerhardinger A, Kayitakire F. A robust built-up area presence index by anisotropic rotation-invariant textural measure [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2008, 1(3): 180 – 192

[10] Movellan J. Tutorial on gabor filters[R/OL]. (1996) http://mplab. ucsd. edu/wordpress/tutorials/gabor. pdf

[11] Viola P, Jones M J. Robust real-time face detection [J]. Int J Comput Vis, 2004, 57(2): 137 – 154

[12] Gonzalez Raphael, Woods Richard E. Digital image processing, second edition [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 598 – 600

[13] Lipton A J, Fujiyoshi H, Patil R S. Moving target classification and tracking from real-time video[C]//Applications of Computer Vision, Fourth IEEE Workshop on. Princeton, New Jersey: [s. n.], 1998: 8 – 14

(编 辑:赵海容)