

一种局部最佳阈值预测的自适应角点检测方法

吴 腾, 张志利, 赵军阳, 张海峰

(火箭军工程大学 二系, 西安 710025)

摘 要: 为解决图像角点检测阈值选取方法计算量大的问题, 提出一种新的自适应角点检测方法。分析能够反映图像灰度分布、对比度和相关性因素的 9 个基本统计特征, 通过提取 4 848 幅样本图像的基本统计特征, 并按主成分分析方法计算 4 项反映图像不同属性的综合指标。建立多元非线性局部最佳阈值预测模型, 由训练数据对模型参数进行优化估计, 得到指导角点检测自适应阈值选取的预测模型。实验结果表明, 预测模型的引入能够改善图像显著角点检测质量, 与原始检测算法相比, 复杂图像中显著角点检出率平均提高 45%, 非显著角点误检率平均降低 81%。

关键词: 样本图像; 统计特征; 角点检测; 自适应阈值; 预测模型

中文引用格式: 吴 腾, 张志利, 赵军阳, 等. 一种局部最佳阈值预测的自适应角点检测方法[J]. 计算机工程, 2018, 44(3): 270-274.

英文引用格式: WU Teng, ZHANG Zhili, ZHAO Junyang, et al. An Adaptive Corner Detection Method of Local Optimal Threshold Prediction[J]. Computer Engineering, 2018, 44(3): 270-274.

An Adaptive Corner Detection Method of Local Optimal Threshold Prediction

WU Teng, ZHANG Zhili, ZHAO Junyang, ZHANG Haifeng

(The 2nd Department, Rocket University of Engineering, Xi'an 710025, China)

【Abstract】 In order to solve the problem of large computational load of the corner detection threshold selection method, a new adaptive corner detection method is proposed. Nine basic statistical characteristics that can reflect the gray distribution, contrast and correlation of the images are analyzed. The basic statistical characteristics of 4 848 samples are extracted, and the principal components analysis is used to calculate 4 comprehensive indexes reflecting the different attributes of the images. The multivariate nonlinear local optimal threshold prediction model is established, and the model parameters are optimized and estimated by the training data. The prediction model of the guidance corner detection adaptive threshold selection is obtained. Experimental results show that the introduction of prediction model can improve the quality of detection of significant corners of the image, detection rate of significant corners in complex images is improved by 45% on average compared with the original detection algorithm, and the average false detection rate is reduced by 81% on average.

【Key words】 sample image; statistical feature; corner detection; adaptive threshold; prediction model

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2018.03.045

0 概述

角点特征的提取是数字图像处理任务的重要内容之一, 在视觉里程计、视觉目标识别、视觉测量和运动物体检测等智能视觉系统中起到简化运算和提高精度的作用。

一般认为图像的角点特征是指图像景物中亮度与周围环境反差剧烈的像素点^[1-3]。而定义区分角点与非角点的亮度反差阈值是影响角点检测结果的

重要因素。为克服固定阈值方法适应性不高的弊端, 各种自适应阈值角点检测方法被不断提出。常用的自适应阈值选取方法关注单因素影响^[4-7], 如由局部曲率变化或灰度梯度变化定义检测阈值, 这类方法能够较好分割图像前景与背景信息, 但缺乏对角点显著性判断, 局限性较大。另一种自适应阈值选取思路是按比例筛选最大响应角点集, 这种方法速度较快, 但易造成角点聚集^[8]。此外还有基于迭代运算的自适应阈值选取方法, 但由于计算量大导

基金项目: 国家自然科学基金(41174162)。

作者简介: 吴 腾(1992—), 男, 硕士研究生, 主研方向为视觉导航、基准传递技术; 张志利, 教授、博士; 赵军阳, 讲师、博士; 张海峰, 硕士研究生。

收稿日期: 2017-01-18 **修回日期:** 2017-04-06 **E-mail:** ttadd0828@163.com

致应用不够广泛^[9-10]。

现有自适应阈值角点检测方法大多仅针对某一幅孤立图像, 而对系列图像的统计规律关注和应用较少, 没有利用同类图像普遍存在的先验知识。本文在分析大量视觉里程计图像统计信息^[11-12]的基础上, 提出一种有先验知识的快速最佳阈值预测方法, 并通过实验验证图像显著角点检测质量。

1 图像统计特征分析与选取

灰度图像的统计特征是反映所有像素点灰度值总体信息、分布情况和相互联系的属性, 能够表征一幅图像区别于其他图像的特异性, 因而可以作为确定图像角点检测阈值的判别依据^[13]。

1.1 基本特征选取

选取图像的基本统计特征如下: 1) 灰度均值 *AVE*, 反映图像区域中所有像素点灰度值的平均值; 2) 灰度方差 *VAR*, 反映图像区域中像素点灰度与灰度均值的离散程度; 3) 图像熵值 *ENT*, 反映图像整体混乱程度和图像的平均信息量; 4) 灰度中值 *MED*, 反映图像中像素点灰度级中间值分布情况; 5) 灰度极差 *RAN*, 反映图像像素点灰度特征极限分布情况。

由于角点特征关注像素点灰度对比和相关分布情况, 因此提取图像的灰度共生矩阵若干参数作为图像基本统计特征的补充。考虑算法效率的提高, 灰度共生矩阵提取时以原图像尺寸 1/100 采样生成 16 灰度级图像, 如图 1 所示, 在保留基本灰度相关信息的同时, 有效减少了计算用时。灰度共生矩阵特征参数选取如下: 1) 共生能量 *ASM*, 反映图像纹理粗细程度; 2) 共生熵值 *CEN*, 反映图像纹理非均匀程度; 3) 共生惯性矩 *CON*, 反映图像灰度空间分布复杂度; 4) 共生相关性 *COR*, 反映图像局部纹理变化程度。



图 1 1/1 600 压缩的图像信息

以计算机视觉平台 KITTI 提供的 4 848 幅视觉里程计图像作为统计样本, 分别计算每幅图像基本统计信息和灰度共生矩阵共 9 个特征指标生成 4 848 × 9 统计信息矩阵。

1.2 主成分分析降维

计算上述 9 个特征指标的相关性如表 1 所示, 其中部分指标在一定程度上有相关关系。为降低指标变量维度, 提高运算效率, 采用主成分分析方法生成若干不相关的综合变量进行最佳阈值预测。

表 1 图像统计特征各指标相关性(取正)

参数	<i>ASM</i>	<i>CEN</i>	<i>CON</i>	<i>COR</i>	<i>AVE</i>	<i>VAR</i>	<i>ENT</i>	<i>MED</i>	<i>RAN</i>
<i>ASM</i>	1.0	0.9	0.6	1.0	0.1	0.5	0.9	0.1	0.7
<i>CEN</i>	0.9	1.0	0.8	0.9	0.1	0.7	1.0	0.1	0.9
<i>CON</i>	0.6	0.8	1.0	0.6	0.0	0.7	0.8	0.1	0.8
<i>COR</i>	1.0	0.9	0.6	1.0	0.1	0.5	0.9	0.1	0.7
<i>AVE</i>	0.1	0.1	0.0	0.1	1.0	0.0	0.0	1.0	0.1
<i>VAR</i>	0.5	0.7	0.7	0.5	0.0	1.0	0.7	0.0	0.8
<i>ENT</i>	0.9	1.0	0.8	0.9	0.0	0.7	1.0	0.0	0.8
<i>MED</i>	0.1	0.1	0.1	0.1	1.0	0.0	0.0	1.0	0.1
<i>RAN</i>	0.7	0.9	0.8	0.7	0.1	0.8	0.8	0.1	1.0

按照主成分分析方法, 首先采用 z-score 标准化方法, 将所有特征数据化为均值为 0、方差为 1 的标准数据, 计算标准数据的相关系数矩阵 *C* 并解其特征方程, 得到主成分变换矩阵和贡献度向量, 为尽可能保留完整的图像统计信息, 取累计贡献率达到 95% 以上的前 4 项主成分作为预测方程的变量, 其变换矩阵和累计贡献率如表 2 所示。

表 2 贡献率前 4 项主成分变换矩阵

参数	主成分			
	<i>U1</i>	<i>U2</i>	<i>U3</i>	<i>U4</i>
变换系数	-0.38	0.05	0.46	-0.08
	0.41	-0.04	-0.05	-0.13
	0.36	0.04	0.39	-0.62
	-0.38	0.06	0.48	-0.06
	-0.04	0.70	-0.08	0.00
	0.33	0.07	0.52	0.73
	0.41	0.08	-0.13	0.14
	-0.04	0.69	-0.11	-0.01
累计贡献	0.37	0.11	0.32	-0.20
	0.63	0.85	0.94	0.97

从变换矩阵中可以看出, 第一主成分 *U1* 受图像熵值和灰度共生矩阵熵值影响较大, 是反映图像信息量和非均匀程度的指标; 第二主成分 *U2* 受图像均值和灰度共生矩阵均值影响较大, 是反映图像整体明暗水平的指标; 第三主成分 *U3* 受灰度共生矩阵能量、惯性矩和图像灰度方差影响较大, 是反映图像灰度级离散程度的指标; 第四主成分 *U4* 受灰度共生矩阵惯性矩和图像灰度方差影响较大, 是反映图像灰度级聚集程度的指标。从上述分析可以看出, 4 项主成分指标能够互不相关且较为全面

地表示出图像的统计特征,可以用于图像的统计规律特异性描述。

2 最佳阈值预测方程的建立与验证

选择角点检测阈值,使得样本图像中提取到的角点具有较好显著性分布且角点数目合适,认为该阈值可以作为对应图像的最佳阈值用于角点检测,而后建立4个指标与最佳阈值的统计模型,进行图像角点检测算法最佳阈值的预测结果。

以Harris角点检测方法为例^[14],该算法定义角点响应函数为:

$$CRF = \det(M) - k \text{tr}ace^2(M) \quad (1)$$

其中, M 为图像的自相关矩阵:

$$M = \sum w(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_{xy} \\ I_{xy} & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

为增强预测显著性,在确定图像最佳阈值时采取图像分块策略。将每一幅图像分为 4×4 图像元。分别提取所有图像元的9个特征指标,组成特征指标空间:

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_9) \quad (3)$$

利用主成分变换矩阵,将特征指标空间转化为主成分空间:

$$\mathbf{U} = (U_1, U_2, U_3, U_4) = \mathbf{X} \cdot \mathbf{C} \quad (4)$$

计算样本图像 4×4 图像元所有像素点的角点响应。对每一幅图像元,认为角点响应最大的前10个~20个像素点为显著角点,构成角点集合:

$$\mathbf{P} = (p_1, p_2, \dots, p_n), n = 10 \sim 20 \quad (5)$$

对应角点响应集合为:

$$\mathbf{CR} = (cr_1, cr_2, \dots, cr_n), n = 10 \sim 20 \quad (6)$$

取显著角点集合中对应最小角点响应为该图像元区分角点与非角点的最佳阈值:

$$th = \min(\mathbf{CR}) \quad (7)$$

计算所有样本图像的最佳阈值,构成样本阈值向量:

$$\mathbf{TH} = (th_1, th_2, \dots, th_{4848})^T \quad (8)$$

由于每个图像元的统计特征和主成分能够反映图像灰度变化情况,而图像角点特征正是由图像灰度变化引起的,因此图像的统计特征与最佳阈值具有一定的相关性。构造最佳阈值二阶预测模型:

$$\hat{th} = [u_1, u_2, u_3, u_4] \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} + [a_1, a_2, a_3, a_4] \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} + a_0 \quad (9)$$

将训练样本的主成分空间 \mathbf{U} 和标准化后阈值向量 \mathbf{TH} 代入模型,构建最小二乘模型^[15],使预测方程具有最小偏差:

$$J = \min \sum (\hat{th}(u_1, u_2, u_3, u_4) - th)^2 \quad (10)$$

在95%置信水平下优化估计出预测方程中15个参数的取值,从而建立预测方程。得到的最佳阈值预测方程判定系数 R^2 统计量为0.87, F 统计量为464.4,对应概率 p 为0。再分别求单成分二阶预测模型和多成分线性预测模型,其模型统计量如表3所示,通过对比可知本文建立多元非线性预测模型 R^2 统计量和 F 统计量远高于其他模型,因而可以认为模型有效性较高。

表3 多种预测模型统计量

回归模型	R^2 统计量	F 统计量	概率 p
多元非线性	0.87	464.40	0
多元线性	0.51	155.22	0
第一主成分	0.45	143.26	0
单因素 第二主成分	0.03	65.52	8.37E-29
非线性 第三主成分	0.21	67.90	1.69E-253
第四主成分	0.06	159.46	8.52E-68

将样本的预测结果与原结果对比,如图2所示,可见预测最佳阈值与样本图像的实际最佳阈值在统计规律上趋于吻合。

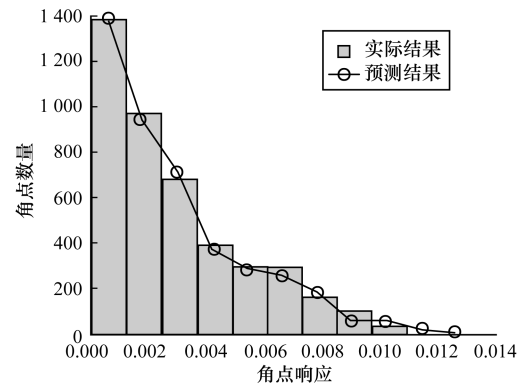


图2 样本的预测结果与实际结果对比

3 自适应角点检测方法实验分析

利用最佳阈值预测方程,可以优化图像角点特征检测自适应阈值的选取。对于一幅待检测图像,首先计算该图像的9个特征指标,根据主成分分析结论得到对应的4个主成分组成的向量 \mathbf{U} ,代入预测方程式(9),得到最佳阈值 \hat{th} ,作为角点检测算法判别像素点是否为角点的依据。

采用不同角点检测算法对图像进行检测以对比算法效果,本文实验用图来源于KITTI视觉实验图像集。选取其中一幅图像作为样例来对比算法效果,检测结果如图3所示。

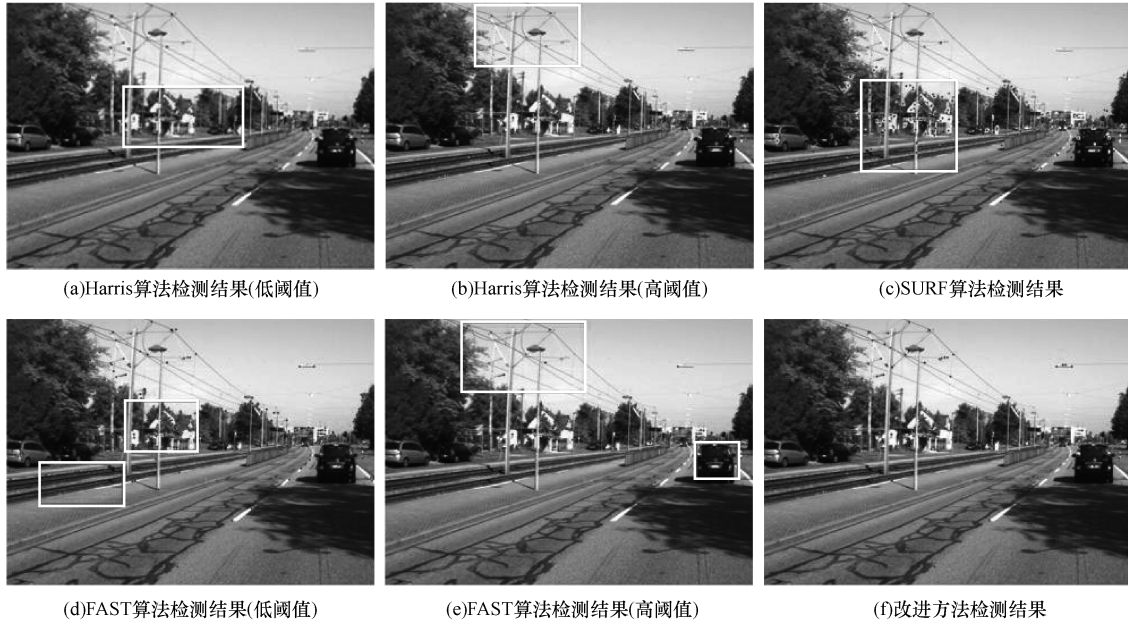


图 3 各算法角点检测结果

从图 3 结果可以看出: 1) Harris 算法对检测阈值较为敏感, 采用高阈值易造成角点聚集, 采用低阈值易造成部分显著角点由于对比相对较低而被漏检; 2) SURF 算法能检测到较多角点, 但部分角点显著性不高, 且对图像噪声敏感, 在图像对比明显区域易发生角点聚集现象; 3) FAST 算法具有较高检测效率, 但对边缘点辨识度不高, 阈值选取对角点检测结果会产生较大影响; 4) 本文改进算法在进行角点检测时引入局部最优阈值估计, 提高了显著角点的检出率, 且角点分布较为均匀, 在图中灰度变化剧烈的建筑和车辆区域只检测合理数量的显著角点, 在灰度变化平缓的电线和植物区域也有相当数量的角点被检测出来。

在英特尔 I7 4790 处理器的计算机和 2014 版 Matlab 软硬件条件下运行程序, 分别计算不同算法检测出的角点数量、用时、显著角点检出率和非显著角点误检率, 取平均值如表 4 所示, 其中, 改进算法用时表示最佳阈值预测为角点检测算法引入的附加时间。可以看出改进的最佳阈值预测虽然给算法引入了额外时间开销, 但对图像显著角点的检出率提高到 78%, 且较好地抑制了非角点的误检率, 使其降低到 10%, 相对于原始算法角点检测质量有了显著提高。

表 4 各种角点检测方法结果

算法	阈值	检出角点数量	用时	显著点检出率	非显著点误检率
Harris	高	114	0.11	0.54	0.17
	低	227	0.11	0.69	0.72
SURF	高	275	0.14	0.40	1.30
	低	493	0.18	0.50	2.54
FAST	高	153	0.03	0.53	0.41
	低	493	0.03	0.70	2.34
改进算法	—	143	0.04	0.78	0.10

为验证算法鲁棒性, 对原图像进行噪声和模糊处理, 原始算法和本文算法角点检测结果如图 4、图 5 所示。

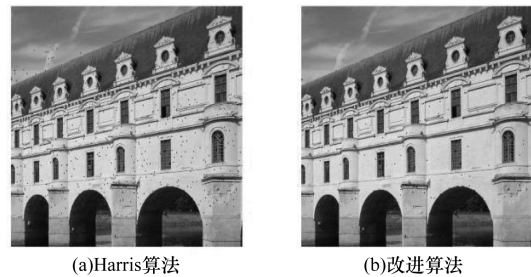


图 4 噪声图像角点检测结果

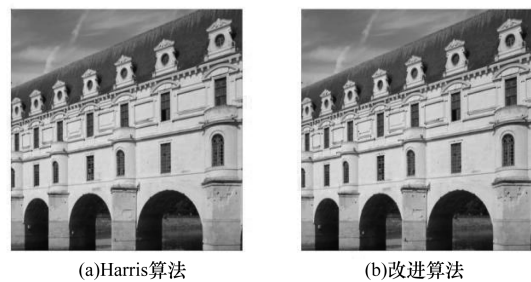


图 5 模糊图像角点检测结果

从图 4 可以看出, 椒盐噪声对 Harris 算法检测结果有较大影响, 大量噪声点被当做图像角点检测出来, 非显著点误检率较高, 而改进算法虽然也受噪声影响, 但由于自适应阈值的合理选取避免图像角点检测质量过低而无法达到要求。图 5 反映了图像模糊对图像角点检测的影响, Harris 算法在算法设计时就对图像进行了平滑处理, 导致在对模糊图像检测时忽略了部分显著角点, 如图中的墙面花纹部分, 而改进算法在图像整体灰度差异缩小的情况下自适应降低角点阈值, 得到更为优良的角点检测结果。

4 结束语

本文分析了数字图像的统计特征,得到能够较为全面反映图像灰度相关分布情况的4项综合指标。在此基础上提出图像角点检测时局部最佳阈值预测模型,通过4 848组样本数据对模型参数优化求解,得到多元非线性回归方程,用于指导角点检测算法自适应阈值的选取。实验结果表明,改进算法能够有效提高角点检测质量,对显著角点的检出率达78%,且非显著角点误检率降低10%。

参考文献

- [1] SONKA M, HLAVAC V, CENG R B D M. Image Processing, Analysis, and Machine Vision [M]. [S. l.]: CL-Engineering, 2008.
- [2] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] 赵 鹏. 机器视觉理论及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [4] HE X C, YUNG N H C. Curvature Scale Space Corner Detector with Adaptive Threshold and Dynamic Region of Support [C]//Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition. Washington D. C. , USA; IEEE Press, 2004: 791-794.
- [5] DENG X, HUANG Y, FENG S, et al. Adaptive Threshold Discriminating Algorithm for Remote Sensing Image Corner Detection [C]//Proceedings of the 3rd International Congress on Image and Signal Processing. Washington D. C. , USA; IEEE Press, 2010: 880-883.
- [6] HE W, DENG X. A Modified SUSAN Corner Detection Algorithm Based on Adaptive Gradient Threshold for Remote Sensing Image [C]//Proceedings of 2010 International Conference on Optoelectronics and Image Processing. Washington D. C. , USA; IEEE Press, 2010: 40-43.
- [7] HE L, ZHOU X. An Auto-adaptive Threshold Prediction SUSAN Corner Detection Algorithm [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Human-machine Systems and Cybernetics. Washington D. C. , USA; IEEE Press, 2013: 511-514.
- [8] 沈士喆, 张小龙, 衡 伟. 一种自适应阈值的预筛选 Harris 角点检测方法 [J]. 数据采集与处理, 2011, 26(2): 207-213.
- [9] YANG Xingfang, HUANG Yumei, LI Yan. An Improved SUSAN Corner Detection Algorithm Based on Adaptive Threshold [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Signal Processing Systems. Washington D. C. , USA; IEEE Press, 2010: 613-616.
- [10] 刘 伟, 孙劲光, 孙 宁. 一种自适应阈值的角点检测算法 [J]. 计算机与信息技术, 2007(9): 41-42, 68.
- [11] ABLA D, OKANOVA K. Visual Statistical Learning of Shape Sequences: An ERP Study [J]. Neuroscience Research, 2009, 64(2): 185-90.
- [12] FISER J, ASLIN R N. Statistical Learning of Higher-order Temporal Structure from Visual Shape Sequences [J]. Journal of Experimental Psychology Learning Memory & Cognition, 2002, 28(3): 458-467.
- [13] 樊晓婷. 基于统计特征的数字图像拼接检测技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [14] 王 民, 周兆镇, 李昌华, 等. 基于像素点灰度差的 Harris 角点检测算法 [J]. 计算机工程, 2015, 41(6): 227-230.
- [15] MIN D, CHOI S, LU J, et al. Fast Global Image Smoothing Based on Weighted Least Squares [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(12): 5638-5653.
- [11] SEDAGHAT A, MOKHTARZADE M, EBADI H. Uniform Robust Scale-invariant Feature Matching for Optical Remote Sensing Images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(11): 4516-4527.
- [12] RUBLEE E, RABAU D V, KONOLIGE K, et al. ORB: An Efficient Alternative to SIFT or SURF [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision. Barcelona, Spain; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. , 2011: 156-165.
- [13] ALCANTARILLA P F, BARTOLI A, DAVISON A J. KAZE Features [C]//Proceedings of International Conference on Computer Vision. Florence, Italy; Springer Verlag, 2012: 326-335.
- [14] CANTY M J, NIELSEN A A. Visualization and Unsupervised Classification of Changes in Multispectral Satellite Imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(18): 3961-3975.
- [15] 陈 晋, 何春阳, 史培军, 等. 基于变化向量分析的土地利用/覆盖变化动态监测 (I)——变化阈值的确定方法 [J]. 遥感学报, 2001, 5(4): 259-266.

编辑 索书志

编辑 索书志

(上接第 269 页)