

文章编号: 1001-2486(2006)04-0063-05

基于生物视觉原理的图像结构信息变化检测方法^{*}

陈涛, 郁文贤, 粟毅, 蒋咏梅

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 为克服多时相遥感图像变化检测中照度差异和配准误差的影响, 采用边缘结构信息进行变化检测。利用多方向 Gabor 函数从图像梯度强度图中提取边缘结构信息, 称之为边缘标记(Edge Tag, ET), 通过比较多时相遥感图像中 ET 的互相关系数实现变化检测。为减小差异较小的边缘对检测结果的影响, 在相关系数的计算中引入抑制因子。仿真图像和真实图像的实验结果表明, 该方法能克服图像照度差异和配准误差对变化检测的影响, 取得了较好的检测效果。

关键词: 变化检测; Gabor 函数; 边缘标记; 抑制因子

中图分类号: TP391 文献标识码: A

Structure Change Detection of Images Based on Biological Vision Principle

CHEN Tao, YU Wen-xian, SU Yi, JIANG Yong-mei

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Conventional methods to detect changes between temporal images are subject to the effect of illumination variance and registration noise. The edge structure information in image was employed in this paper to detect changes. A new conception based on biological vision principle, called Edge Tag, was introduced to describe the edge structure. After the correlation calculation between two Edge Tags, decision rule was made to locate the outline of changed area. The Edge Tag based change detection was robust to illumination variance and registration noise. Experiments on simulated data and real images verified its superiority.

Key words: change detection; Gabor function; Edge Tag; suppression factor

对于多时相遥感图像, 光照变化、传感器噪声、配准噪声等因素使得图像中产生无意义的变化, 克服无意义变化的影响是变化检测的难点。文献[1-2]对近年来出现的变化检测方法进行了详细论述, 大多数方法^[3-5]都可归入到 Bayes 检验理论框架之下, 即利用恒虚警检测的方法, 确定经过代数运算后图像 $D(x, y)$ 中的变化, 这些方法通常假设 $D(x, y)$ 中的元素是独立同分布的, 不能体现图像中固有的相关结构特性, 也无法克服照度变化的影响。Emrullah^[6-7]从相关的角度出发, 检验两幅图像中对应的滑动窗口中数据的线性相关程度, 对于无变化区域, 即使两个窗口内图像照度有一个常数的差异, 它们之间仍然是线性相关的, 因此克服了照度变化的影响, 但这种方法不能克服配准噪声的影响。

光照强弱变化、阴影变化、季节变化等因素使得图像之间产生差异, 这类差异主要表现为两幅图像中区域的边界不发生变化, 只是区域内部像素值不同。另一类差异由场景内物体位置、形状、尺度的变化造成, 这类变化的一个显著特征是图像中对应区域的边缘、纹理等结构信息发生了变化, 如物体的出现、消失、移动、结构变形等。^[8]和^[9]利用图像结构信息进行变化检测, 通过提取图像中与结构有关的纹理特征以及矩特征检测结构差异, 基于结构信息的检测方法优点是结构信息不受照度变化的影响, 对噪声具有鲁棒性。本文从生物视觉原理出发, 利用多方向 Gabor 函数提取图像的结构信息, 称之为边缘标记(Edge Tag, 简称 ET), 并将其用于结构信息变化的检测中, 检测过程为: 首先在两幅图中提取 ET 特征, 然后用带抑制因子的相关系数法, 检测 ET 之间的相似性, 最后依据相似性测度确定图像的变化。

^{*} 收稿日期: 2005-12-15

基金项目: 国家部委基金资助项目(413220201)

作者简介: 陈涛(1978-), 男, 博士生。

1 基于生物视觉原理的边缘信息描述(Edge Tag)

神经心理学的研究表明,视觉系统的神经元对光线的感知域模型呈环状结构^[10],当受到光线激励时,感知域的中心区域呈兴奋状态,边缘区域呈抑制状态。现实生活中,当人们注视某一区域时,区域的中心部分清晰而边缘部分模糊,这表明该模型符合人类的视觉心理学规律。二维 Gabor 函数能很好模拟神经元的感知域特性,偶对称的 Gabor 函数为

$$g_{0_i}(x, y) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x - \mu_x)^2}{\lambda^2 \sigma_x^2} + \frac{(y - \mu_y)^2}{\lambda^2 \sigma_y^2}\right]\right\} \cos[2\pi\nu(x \cos \theta_i - y \sin \theta_i)] \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: i 表示将圆周 n 等分时的第 i 个等分点; θ_i 表示 $g_{0_i}(x, y)$ 的波动方向; λ 表示尺度; μ_x, μ_y 表示高斯函数的均值,描述了 Gabor 函数的中心位置; σ_x^2, σ_y^2 表示高斯函数的方差,描述了函数主瓣在 x 和 y 方向上的大小; ν 表示波动的频率。当波动方向 θ_i 依次取圆周上 n 个等分点时,可得到 n 个不同方向的 Gabor 函数。

对哺乳动物视觉系统的研究表明,视觉神经元对光线的激励具有方向选择性^[11],视觉皮层上的一小块区域包含有许多视觉神经元,单个神经元对特定方向的光线激励有较强的响应,而对其它方向的响应较弱,可以用不同方向的 Gabor 函数描述这种方向选择性,第 i 个方向上神经元对图像的响应用 Gabor 函数描述如下:

$$T_i(x, y) = \langle g_{0_i}, f(x, y) \rangle \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

其中 n 表示将圆周等分的个数。神经元对图像的响应用内积表示,对于图像,二维离散内积为

$$T_i(x, y) = \sum_{j=-m}^{j=1} \sum_{k=-m}^{k=m} g_{0_i}(\mu_x + j, \mu_y + k) f(x + j, y + k) \quad (3)$$

其中 $g_{0_i}(\mu_x + j, \mu_y + k)$ 在以 (μ_x, μ_y) 为中心, $2 \times l$ 和 $2 \times m$ 为高度和宽度的矩形内取值。

具有不同方向选择性的神经元组合在一起形成了光线的接收场,视觉系统利用接收场对光线的响应来描述视场中的内容, Tsao^[11] 将接收场模型称为 Hypercolumn。综合单个神经元对光线的响应,包含 n 个神经元的接收场的数学模型为

$$T = (T_1, T_2, \dots, T_n) \quad (4)$$

T 表示用不同方向的神经元共同描述图像所形成的特征,称之为图像点 (x, y) 处的标记。

标记的概念不仅可以用于灰度图提取特征,而且可用于边缘的强度图中。图像中的边缘代表了灰度跃变的地方,包含了丰富的高频成分,边缘为识别系统提供了区别于背景的显著信息^[12]。设图像 $f(x, y)$, 用梯度的幅度描述点 (x, y) 处的边缘强度为 $p(x, y) = \left[\left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$, 求导运算处理使得边缘强度图中光滑区域的值趋于 0, 因此边缘强度图中只反映了灰度的变化,从而消除了两幅图像中整体照度差异的影响。利用生物系统提取特征的原理,在 $p(x, y)$ 中提取 Tag 信息为

$$ET_i(x, y) = \langle g_{0_i}, p(x, y) \rangle \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

上式表示用不同方向的 Gabor 函数 g_{0_i} 与同一个边缘强度图像区域进行内积。将 ET_i 组成的矢量 $ET = (ET_1, ET_2, \dots, ET_n)$ 称为边缘标记(Edge Tag, ET), 它描述了图像中点 (x, y) 处的边缘结构信息, ET 具有以下特性:

1) ET 中包含有边缘的方向和强度信息。在 $g_{0_i}(x, y)$ 中定义与二维 Gabor 函数波动方向垂直的方向为主导方向,若 Gabor 函数的中心位于边缘之上,由于 Gabor 函数的旋转,ET 矢量中最大值分量对应的主导方向必然与边缘的方向一致,即最大值分量在矢量中的位置代表了边缘的方向,分量的大小代表了相对强度。图 1 描述了不同方向边缘对应的 ET 矢量曲线,从图中可以看出,ET 矢量中的最大值所对应的角度代表了主边缘方向。

2) ET 对配准噪声具有鲁棒性。由于计算 ET 矢量时, Gabor 函数的波动方向只在圆周上等间隔划分的 n 个角度上离散取值,当边缘方向在 Gabor 函数的主导方向邻域 $[-\pi/n, \pi/n]$ 内变化时,产生的

ET_i 分量相对于其它分量仍是最大值, 最大值在矢量中的位置没有发生变化, 因此 ET 对失配造成的 $[-\pi/n, \pi/n]$ 范围内旋转误差具有鲁棒性, 其性能取决于 n 值的大小。图 2 描述了当两幅图中边缘方向有较小偏移时, ET 矢量最大值对应的角度不变。

3) ET 受照度差异影响较小。两幅图像照度的差异表现为灰度上相差一个常数, 经梯度求导运算得到的边缘图像中消除了常数项, 因此 ET 基本克服了照度变化的影响。图 3 描述了在两种不同照度条件下 ET 的变化, 当两幅图像照度变化较大时, 两个 ET 之间仍具有较强的相似性。

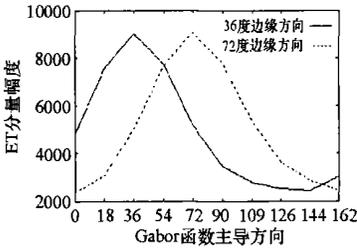
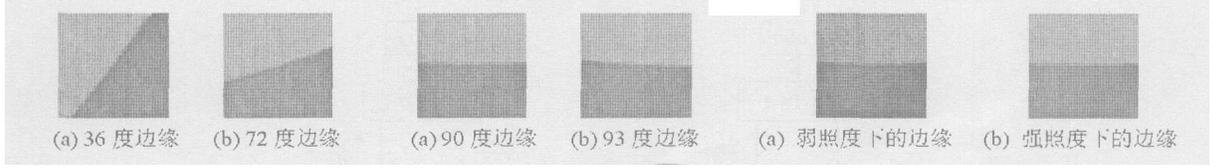


图 1 用 ET 描述边缘方向
Fig. 1 Representation of edge orientation by ET

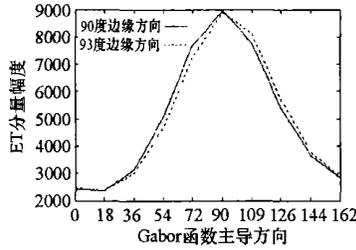


图 2 ET 抗配准噪声性能
Fig. 2 Anti-registration noise of ET

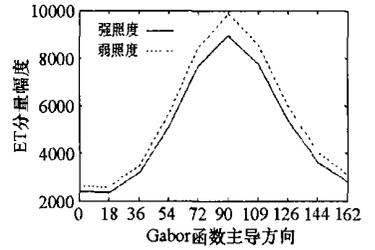


图 3 ET 抗照度变化性能
Fig. 3 Anti-illumination variance of ET

ET 的上述性能很好地解决了变化检测中存在的困难, 本文余下部分介绍如何利用 ET 进行变化检测。

2 基于边缘标记的图像变化检测

ET 是图像边缘结构信息的一种描述, 通过对比 ET 矢量之间的相似性, 可确定两幅图像中结构的变化, 设两幅图像中点 (x, y) 处的 ET 分别为 $ET^1(x, y)$, $ET^2(x, y)$, 其互相关系数为

$$\rho_{xy}(m) = \frac{C_{ET^1ET^2}(m)}{\sqrt{C_{ET^1ET^1}(0)C_{ET^2ET^2}(0)}} \quad (6)$$

其中 $C_{ET^1ET^1}$, $C_{ET^2ET^2}$ 表示自协方差函数, $C_{ET^1ET^2}$ 表示互协方差函数。当图像中对应点无结构变化时, 其梯度幅度之间具有线性关系, 两个 ET 矢量是线性相关的, 因此 $\rho_{xy}(0) = 1$; 当发生结构变化时, 梯度幅度有较大差异, 矢量间不具有线性相关性, 此时 $\rho_{xy}(0) = 0$ 。通过相关系数可确定是否发生结构上的变化, 因此有

$$1 - |\rho_{xy}(0)| = \begin{cases} 1 & \text{changed} \\ 0 & \text{no change} \end{cases} \quad (7)$$

在两幅边缘强度图像中, 对应点 (x, y) 处提取的 ET 矢量之间数值差异较小时, 应认为该点处没有变化, 但用相关检测时, 这两个 ET 之间有可能是非相关的, 从而会引起虚警, 为避免由小差异的 ET 矢量引起的变化检测结果的虚警, 必须抑制小差异矢量间的非相关特性, 定义带抑制因子的相关系数为

$$s\rho_{xy}(m) = A(1 - |\rho_{xy}(m)|) \quad (8)$$

其中 A 为抑制因子, 其选取应满足: 当 (x, y) 位于边缘强度差异较小处时 $A \rightarrow 0$; 当 (x, y) 位于边缘强度差异较大处时 $A \rightarrow 1$ 。本文中 A 取为

$$A = \frac{\Delta\mu_{ET}(x, y)}{\max(\Delta\mu_{ET}(x, y)) - \min(\Delta\mu_{ET}(x, y))} \quad (9)$$

其中 $\mu_{ET} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ET_i$, 表示点 (x, y) 处 ET 的均值; $\Delta\mu_{ET}(x, y) = |\mu_{ET^1}(x, y) - \mu_{ET^2}(x, y)|$, 表示两个

ET 均值差异的绝对值; A 表示归一化后的均值差。从 A 的形式可以看出, 只有均值强度差异较大的点, 其抑制因子才接近 1, 当两个 ET 均代表强边缘或弱边缘时, A 趋于 0, 抑制了差异较小的 ET 的非相关性。

通过 $s_{\Omega_{xy}}(m)$ 是否趋近于 1 可判断点 (x, y) 处是否发生了变化, 在实际应用中, 由于抑制因子的影响, 在有变化区域 $s_{\Omega_{xy}}(m)$ 通常小于 1, 因此文中门限值取经验值 0.5, 最终的判决结果为

$$s_{\Omega_{xy}}(0) \begin{cases} > 0.5 & \text{changed} \\ < 0.5 & \text{no change} \end{cases} \quad (10)$$

为克服噪声的影响, 本文选用 Sobel 算子计算梯度, 整个流程如图 4 所示。

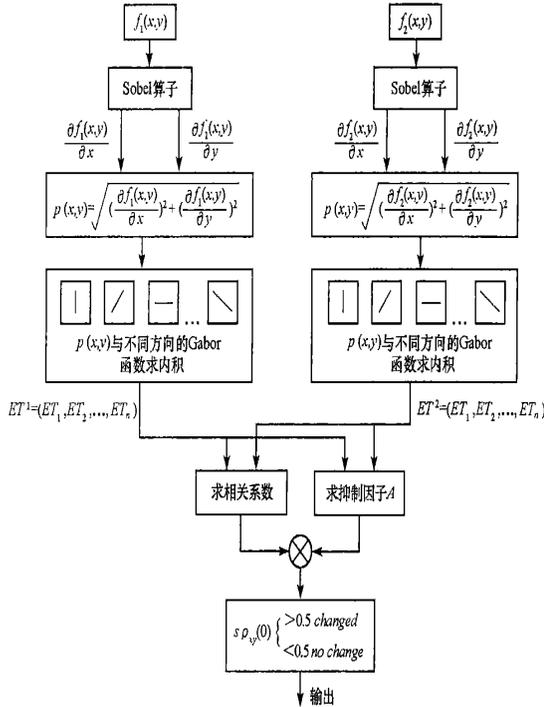


图 4 变化检测流程

Fig. 4 Procedure of change detection algorithm

3 实验结果与性能分析

本节使用模拟图像和真实图像, 对比几种方法的性能, 验证本文算法的有效性。所用到的方法分别是 CFAR 检测^[3]、线性依赖模型法 DD^[6]、Wronskian 模型法 WM^[6] 以及本文基于 ET 的方法。第一组实验使用模拟图像, 比较不同算法抗配准噪声的性能, 如图 5 所示。为模拟图像未配准情况, 将图 5(a) 旋转 2 度并平移 2 个像素得到图 5(b)。四种方法对模拟数据检测的结果如图 6 所示, 其中图 6(a) 为 CFAR 检测结果, 虚警率为 10%, 图 6(b) 为 DD 检测结果, 图 6(c) 为 WM 检测结果, 图 6(d) 为 ET 检测结果。由于图 5(a) 与图 5(b) 之间只有配准误差造成的差异, 而这种差异是一种无意义的变化, 理想的检测方法对这种变化具有较强的鲁棒性, 不检测无意义的变化, 因此可以通过比较对这种无意义变化检测的多少确定不同方法的优劣。从实验结果图 6 可知, ET 方法检测的无意义变化最少, 较其他三种方法具有更好的抗配准噪声性能。第 1 节的分析中已指出, ET 方法的这种性能是由于 ET 矢量中各个分量对应图像不同角度的特征, 而这些角度是圆周上的离散采样, 采样数目决定了对不同角度的分辨能力, 因此采样数目越多, 分辨能力越好, 但抗配准噪声的性能越差。

第二组实验采用真实遥感数据, 如图 7(a)、(b) 所示, 圆圈标识出建筑物的顶部有明显的结构和照度变化, 多边形标识出道路有结构变化, 四种方法的检测结果如图 8 所示, 其中图 8(a)、(b)、(c)、(d) 分别为 CFAR、DD、WM 和 ET 方法检测结果。比较四个结果图可知, ET 方法能克服照度变化的影响, 检测出了建筑物顶部和道路细微结构上的变化, 较其它三种方法取得了更好的检测结果。

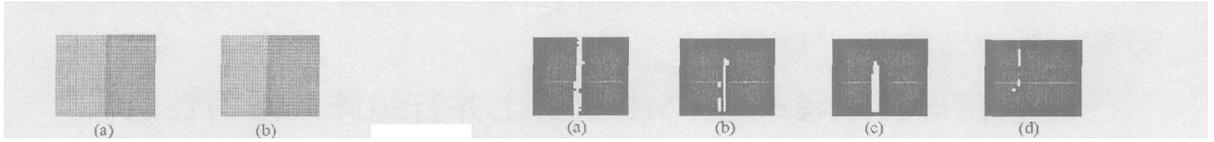


图 5 模拟数据
Fig. 5 Simulated data

图 6 四种方法对模拟数据检测的结果
Fig. 6 Detection results of simulated data with four algorithms

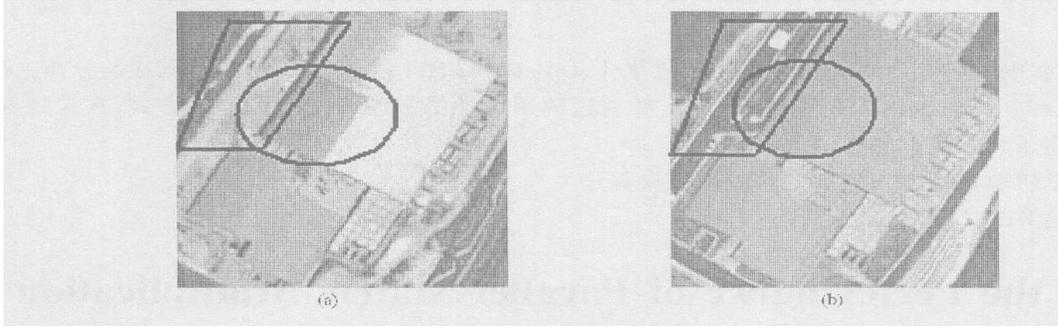


图 7 不同时相的建筑物
Fig. 7 Images of building of different temporal

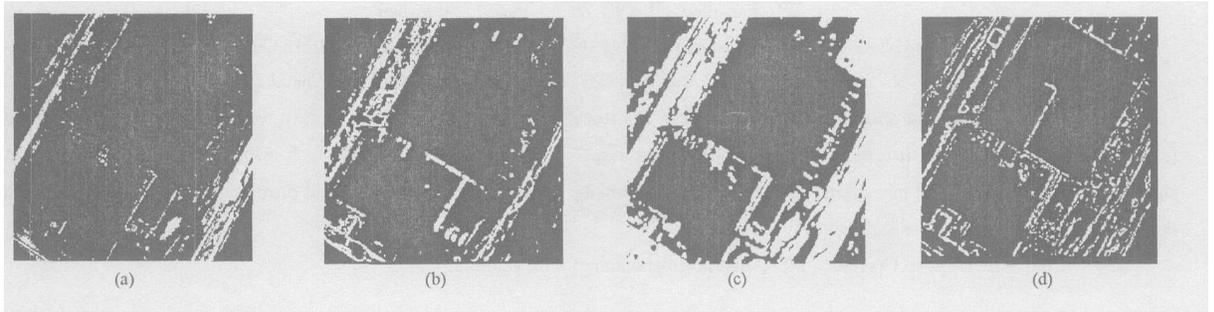


图 8 建筑物变化检测结果
Fig. 8 Results of change detection of buildings

表 1 检测方法性能比较

Tab. 1 Comparison of change detection algorithms

检测方法	运算量		抗噪声 (配准、传感器)	抗照度变化	虚警率
	加法次数	乘法次数			
CFAR	$2n^2 - 1$	3	差	差	设定值
DD	$2n^2(w^2 - 1)$	$n^2(w^2 + 3)$	中	中	32%
WM	$2n^2w^2$	$n^2(w^2 + 3)$	差	中	21%
ET	$n^2(2kw^2 + 7k - 7)$	$N^2(2kw^2 + 3k + 6)$	好	好	10%

通过大量测试数据比较四种方法的性能, 结果如表 1 所示, 其中 w 表示图像窗口的大小, k 表示 Gabor 函数的个数。从运算量可以看出, ET 方法速度取决于检测窗口的大小以及 Gabor 函数的个数, 文中对抗噪声和抗照度变化给出了定性比较结果, 虚警率由测试数据统计得出。

4 结束语

将边缘标记法用于变化检测时, 能有效减小照度变化和一定范围内的配准误差的影响。与其它检测方法相比, 具有较好检测效果, 适合于遥感图像中结构信息变化的检测。边缘标记法是图像结构信息的一种描述, 不仅可用于变化检测, 在边缘检测、角点检测方面也有一定的应用前景。

参考文献:

- [1] 桑怀胜, 李峥嵘. 智能天线的原理、自适应波束形成算法的研究进展与应用 [J]. 国防科技大学学报, 2001, 23 (6): 83- 89.
- [2] Wallace J W, Jensen M A. Mutual Coupling in MIMO Wireless Systems: A Rigorous Network Theory Analysis [J]. IEEE Trans. Commun., 2004, 3 (4): 1317- 1325.
- [3] Clerckx B, Vanhoacker-Janvier D, Oestges C, et al. Mutual Coupling Effects on the Channel Capacity and the Space-Time Processing of MIMO Communication Systems [A]. In: Proc. IEEE ICC' 03 [C], 2003, 4: 2638- 2642.
- [4] eifer M C. Signal Correlations in Coupled Cell and MIMO Antennas [A]. In: Proc. IEEE ISAPS' 02 [C]. San Antonio, TX, 2002, 3: 194- 197.
- [5] Ozdemir M K, Arvas E, Arslan H. Dynamics of Spatial Correlation and Implications on MIMO Systems [J]. IEEE Radio Commun., 2004: S14- S19.
- [6] i X, Nie Z-P. Mutual Coupling Effects on the Performance of MIMO Wireless Channels [J]. IEEE Antennas Wireless Propagat. ett., 2004, 3 (1): 344- 347.
- [7] Paulraj A J, Nabar R, Gore D. Introduction to Space-Time Wireless Communications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [8] Xu H, Chizhik D, Huang H, et al. A Generalized Space-Time Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Channel Model [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2004, 3 (3): 966- 975.
- [9] Kermoal J P, Schumacher, Pedersen K I, et al. A Stochastic MIMO Radio Channel Model with Experimental Validation [J]. IEEE J. Select. Areas Commun., 2002, 20 (6): 1211- 1226.
- [10] Stutzman W, Thiele G A. Antenna Theory and Design [M]. New York: John Wiley & Sons, 1981.
- [11] Balanis C A. Antenna Theory: Analysis and Design [M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [12] 张贤达. 矩阵分析与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

(上接第 67 页)

参考文献:

- [1] Andra S, Al-Kofahi O, Radke R J, et al. Image Change Detection Algorithm: A Systematic Survey [R]. Technical Report of Department of Electrical, Computer, and Systems Engineering Rensselaer Polytechnic Institute. July 4, 2003.
- [2] Cavallaro A, Ebrahimi T. Classification of Change Detection Algorithm for Object-based Applications [A]. Proc. of Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services [C], London, 9- 11, April 2003.
- [3] Aach T, Kaup A. Bayesian Algorithm for Adaptive Change Detection in Image Sequences using Markov Random Field [A]. ISAPCS [C], Sendai, Japan, October 1993: 56- 61.
- [4] Bruzzone, Prieto D F. Automatic Analysis of the Difference Image for Unsupervised Change Detection [J]. IEEE Transaction on Geoscience and remote sensing 2000, 38(3).
- [5] Bruzzone, Prieto D F. An Adaptive Semiparametric and Context-based Approach to Unsupervised Change Detection in Multitemporal Remote-sensing Images [J]. IEEE Transaction On image processing 2002, 11(4).
- [6] Durucan E, Ebrahimi T. Change Detection and Background Extraction by Linear Algebra [J]. Proceeding of the IEEE, 2001, 89(10).
- [7] Durucan E, Ebrahimi T. Improved Linear Dependence and Vector Model for Illumination-invariant Change Detection [A]. Proceedings of SPIE [C], 2001, 4303.
- [8] i, eung M K H. Integrating Intensity and Texture Differences for Robust Change Detection [J]. IEEE Transaction on Image Processing 2002, 11 (2).
- [9] iu S C, Fu C W, Chang S. Statistical Change Detection with Moments under Time-varying Illumination [J]. IEEE Transaction on Image Processing 1998, 7(9).
- [10] 王润生. 图像理解 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995: 51.
- [11] Tsao T, Wen Z. Image-based Target Tracking Through Rapid Sensor Orientation Change [J]. SPIE Optical Engineering, 2002, 41(3).
- [12] Itti, Kock, Niebur. A Model of Saliency-based Visual Attention for Rapid Scene Analysis [J]. IEEE PAMI November 1998, 20(11).