

一种基于视觉显著性的边缘检测算法

肖传民^{1,2}, 史泽林¹, 夏仁波¹, 武伟^{1,2}

1. 中国科学院沈阳自动化研究所光电信息处理重点实验室 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学 北京 100049

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005229)

通信作者: 肖传民, xiaochuanmin@sia.cn 收稿/录用/修回: 2012-12-11/2013-02-04/2013-09-25

摘要

提出了一种基于视觉显著性的边缘检测算法. 面向红外场景图像需求, 所提算法首先使用 Canny 进行边缘检测, 然后融合 3 种基本边缘特征: 边缘两侧对比度、边缘密度和边缘长度, 提取出红外图像中视觉显著性边缘. 所提算法有效地抑制了背景和纹理虚假边缘, 突出了目标边缘信息, 为自动目标识别系统提供质量较好的边缘图像. 实验结果证实了本文算法的有效性.

关键词

边缘检测
显著性
边缘对比度
边缘密度
边缘长度
中图分类号: TB39114
文献标识码: A

Edge-Detection Algorithm Based on Visual Saliency

XIAO Chuanmin^{1,2}, SHI Zelin¹, XIA Renbo¹, WU Wei^{1,2}

1. Key Laboratory of Optical-Electronics Information Processing, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

An edge-detection algorithm based on visual saliency is proposed. First, for an infrared-scene image, the proposed algorithm detects the edges using a Canny edge detector. Then, three basic edge features are integrated, including the edge contrast, edge density, and edge length. Finally, the visual salient edges are extracted from the infrared image. The proposed algorithm effectively suppresses false edges from the background and texture, highlights the information of the target edges, and provides good-quality edge images for automatic target recognition system. The experimental results verify the effectiveness of the algorithm.

Keywords

edge detection;
saliency;
edge contrast;
edge density;
edge length

1 引言

边缘是不同属性区域之间的分界线, 是图像最基本的特征, 被广泛应用于自动目标检测、识别及跟踪等领域. 边缘检测常见的方法有微分算子法、小波边缘检测方法、纹理边缘检测方法、神经网络边缘检测方法、基于概率密度的边缘检测方法、基于聚类的边缘检测方法等. 传统的微分检测算子, 如 Sobel、Roberts、Prewitt、Laplace、Kirsch 等算子对噪声较为敏感, 处理实际图像的效果并不理想. 红外图像边缘检测是自动目标识别的重要步骤, 也是众多学者的研究热点问题^[1-5], 但是, 时至今日, 这个问题仍然没有得到很好的解决. 一方面是由于红外图像普遍存在目标与背景对比度较差、图像边缘模糊、噪声较大等缺点; 另一方面, 目前所提出的各种算法都有一定的局限性, 多数算法没有考虑利

用红外图像中的先验信息辅助边缘检测, 而是直接对整幅输入红外图像进行各种处理, 不能有效地将感兴趣的目标从背景中检测出来. 近年来又有众多学者提出了各种边缘检测算法^[6-11], 虽然这些算法考虑了图像中的先验信息, 但是算法过于复杂, 不能满足红外自动目标识别的实时应用需求. 由于噪声和边缘都属于高频分量, 从而影响边缘检测的准确性, 如何平衡抗噪性和边缘检测的精度是边缘检测的一个难点. 基于概率密度的边缘检测方法^[12]将边缘点定义为在图像概率密度梯度场中满足散度大于零且最小积响应小于零的像素点, 该方法可以根据边缘的对比度与边缘的大小对边缘检测的结果进行筛选, 但是速度慢, 不能满足实时处理的要求. 文^[13]提出了一种基于集成聚类的多谱图像边缘检测方法, 但处理普通灰度图像时没有足够的信息可用, 效果并不明显, 且多次聚类也非常耗时. Canny

算法是一种非常有效的最优边缘检测器^[14],该算法虽然考虑了噪声的影响,但是它提取的细节过多,在某些情况下反而不利于后续自动目标识别的需要。

本文针对红外自动目标识别应用需求,尝试在 Canny 边缘检测的基础上,利用边缘两侧对比度、边缘密度和边缘长度等信息^[15-17],提取出红外图像中人眼认为显著的边缘,滤除目标轮廓内、外的细节及背景杂波等信息。本文提出的算法减少了非目标边缘的比例,可为自动目标识别提供质量较好的边缘图像。

2 特征提取

2.1 显著性边缘

显著性边缘描述了目标的主要轮廓特征^[18-20]。然而,对于场景图像,依然没有一种好的方法能够量化边缘的显著性。自动目标识别对象通常为机场、桥和建筑物等人造目标。人造目标与自然目标的主要区别在于:人造目标的边缘具有较好的分段一致性;人造目标的边缘两侧虽然材质不同,但通常各自分布均匀。基于上述假设条件,并考虑到人眼视觉特性,本文认为显著性边缘应该具备如下特性:

(1) 显著性边缘两侧应具有有一定灰度差异,并且每一侧灰度分布较为均匀;

(2) 显著性边缘通常较为稀疏,边缘密度不会非常稠密;

(3) 显著性边缘一般具有较好的连续性。

2.2 边缘显著性特征提取

为了提取显著性边缘,本文将边缘两侧对比度作为第 1 个显著性特征度量;为了抑制来自纹理和背景的杂乱边缘,将边缘密度作为另一个显著特征;在大多数情况下,杂乱边缘通常较短并且不够光滑,因此,可将边缘长度作为第 3 个显著性特征。下面的内容将围绕如何量化这些特征以及如何融合这些特征实现显著性边缘提取展开。

边缘两侧对比度

考虑到 Canny 算法的优良特性,本文首先利用 Canny 算子对图像 $I(x, y)$ 进行边缘检测,获取边缘图像:

$$E_0(x, y) = \text{Canny}(I(x, y)) \quad (1)$$

然后采用链码跟踪方法,找到所有的边缘,记为 $E = \{E_n | n = 1, \dots, N\}$ 。对于任意一个边缘 E_n ,沿着边缘法向找到它的左邻域带 $Q_L(E_n, w)$ 和右邻域带 $Q_R(E_n, w)$,其中 w 为邻域尺度或邻域带宽。于是,定义边缘两侧对比度为

$$C(E_n, w) = \frac{|M_{Q_R}(E_n) - M_{Q_L}(E_n)|}{M_{Q_R}(E_n) + M_{Q_L}(E_n)} \quad (2)$$

其中, $M_{Q_L}(E_n) = \frac{1}{|Q_L|} \sum_{(x, y) \in Q_L} I(x, y)$, $M_{Q_R}(E_n) = \frac{1}{|Q_R|} \sum_{(x, y) \in Q_R} I(x, y)$, 分别为 E_n 左邻域带 $Q_L(E_n, w)$ 和右邻域带 $Q_R(E_n, w)$ 的灰度均值, Q_L 和 Q_R 即为 $Q_L(E_n, w)$ 和 $Q_R(E_n, w)$, $|Q_L|$ 和 $|Q_R|$ 分别表示 $Q_L(E_n, w)$ 和 $Q_R(E_n, w)$ 的面积。式(2)中, w 的取值对于 $C(E_n, w)$ 具有重要的影响,为此,采用多尺度方法统计不同邻域带宽下的 $C(E_n, w)$, 并选择对比度最大的 $C(E_n, w)$, 于是,边缘两

侧对比度重新定义为

$$C(E_n) = \max\{C(E_n, w_t) | t = 1, \dots, T\} \quad (3)$$

边缘密度

边缘密度的概念最近被用于描述目标的显著性,本文定义边缘图像中任一点的密度 E_d 为

$$E_d(x, y, W) = \frac{1}{|W|} \sum_{(x, y) \in W} E_0(x, y) \quad (4)$$

其中, W 为邻域窗口, $|W|$ 为邻域窗口的面积。目标边缘的特点往往是在某一窗口尺度下密度相对较高,增大或减小窗口尺度都会降低密度。因此,应该采用多尺度窗口来计算边缘密度。本文中,实际边缘密度被定义多尺度窗口下的最小边缘密度,即:

$$E_d(x, y) = \min\{E(x, y, W_k) | k = 1, \dots, K\} \quad (5)$$

于是,将 E_n 的边缘密度定义为

$$E_d(E_n) = \frac{1}{L(E_n)} \sum_{(x, y) \in E_n} E_d(x, y) \quad (6)$$

这里, $L(E_n)$ 表示 E_n 的长度,见式(7)中的定义。

边缘长度

目标边缘点具有较好的一致性,连续性较好,通常不会太短。此外,人眼更容易注意到场景的总体轮廓信息。因此,边缘长度也是一个重要的显著特征。本文定义边缘长度为

$$L(E_n) = \sum_{(x, y) \in E_n} E_0(x, y) \quad (7)$$

3 算法描述

当目标边缘特征较弱时,尽管低阈值的 Canny 算子基本能够检测出目标边缘,但无法保证整个目标边缘的连续性,此时单独使用 $L(E_n)$ 值不能完全描述弱目标边缘的显著性。考虑到目标边缘两侧区域分布较为规则,并且存在一定的灰度差,根据韦伯定律(Weber's law),即视觉对灰度差的敏感程度随背景灰度而变化,式(2)定义的边缘两侧对比度可以增强弱目标边缘的显著性。因此, $L(E_n)$ 和 $C(E_n)$ 并不冗余,通过联合使用这两个特征,能够删除一些边缘较短、两侧对比度较弱的虚假边缘。而使用边缘密度特征 $E_d(E_n)$ 则可以大幅度删除背景和内部区域中的杂乱边缘,但是它也会删除那些间距比较密的长边缘,而边缘长度特征 $L(E_n)$ 恰好可以弥补这一缺点,形成互补。

因此,最终定义边缘的显著性 $S(E_n)$ 为

$$S(E_n) = \frac{L(E_n) \cdot C(E_n)}{E_d(E_n)} \quad (8)$$

上式中, $L(E_n)$ 、 $C(E_n)$ 和 $E_d(E_n)$ 具有不同的量纲,因此,在参与实际计算前,需要将每个特征量进行归一化处理。

如果 $S(E_n)$ 的值大于给定阈值 T_h ,则保留该边缘,否则删除该边缘。最后所得边缘为

$$E_{\text{final}} = \{E_n | S(E_n) > T_h, n = 1, 2, \dots, N\} \quad (9)$$

在实际应用中,不同图像不能采用相同的阈值。为此,本文采用与 Canny 算法相似的思想来确定阈值 T_h ,即预先设定非显著边缘所占总边缘的比例因子 P_{T_h} ,然后采用直方图统计的方法推算出阈值 T_h 。因此,本文实际需要设置的阈值为 P_{T_h} 。

总的算法流程可以描述为:

- (1) 采用 Canny 算子提取图像 I 的边缘, 得到边缘图像 $E_0(x, y)$;
- (2) 采用链码跟踪算法检测边缘图像中所有的边缘, 得到边缘集合 $E = \{E_n | n = 1, \dots, N\}$;
- (3) 对于任意边缘 E_n , 根据式 (3) 计算边缘 E_n 两侧对比度 $C(E_n)$;
- (4) 对于任意边缘 E_n , 根据式 (7) 计算边缘 E_n 的长度;
- (5) 对于任意边缘 E_n , 根据式 (6) 计算边缘 E_n 的密度;
- (6) 由式 (8) 得到 E_n 的综合显著性;
- (7) 最后, 根据式 (9) 得到显著边缘。

4 实验结果

为了验证本文的方法, 作了大量的实验, 限于篇幅, 这里仅仅给出其中几幅实验效果图, 并将本文方法与经典的 Canny 算法、基于概率密度梯度的方法^[9]、基于聚类的边缘检测方法^[10]进行比较。鉴于红外图像的弱边缘较多, 在本文实验中, 没有采用 Matlab 中 edge.m 函数默认的参数, 而是将 Canny 算法的高低阈值设为 $[0.6 \ 0.3]$, 从而让 Canny 算法检测出更多的弱边缘, 这些弱边缘中有的目标边缘, 但也有相当一部分属于背景杂波, 本文的目的就是在保留弱目标边缘的同时剔除背景杂波。本文所有实验中, 阈值 P_{th} 统一取为 0.5, 即认为 Canny 算子输出结果中存在 50% 的非显著边缘。

本文首先比较了边缘两侧对比度、边缘密度和长度等特征对检测结果的影响, 如图 1 所示。图 1(a) 为初始图像, 图 1(b) 为 Canny 算子检测结果, 图 1(c)、(d) 和 (e) 分别为边缘对比度、边缘密度和边缘长度单独使用后的结果, 图 1

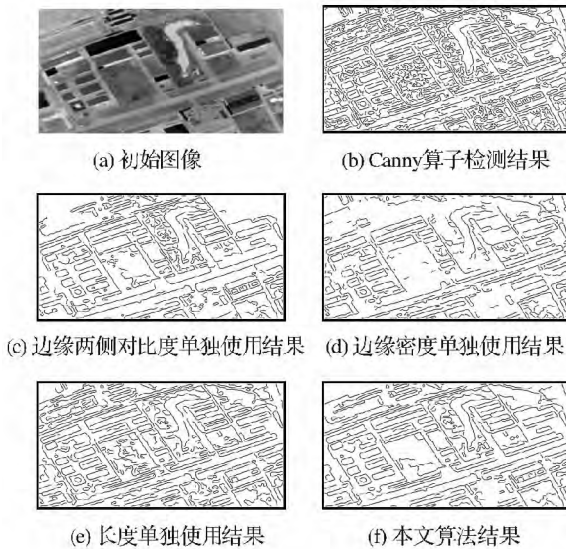
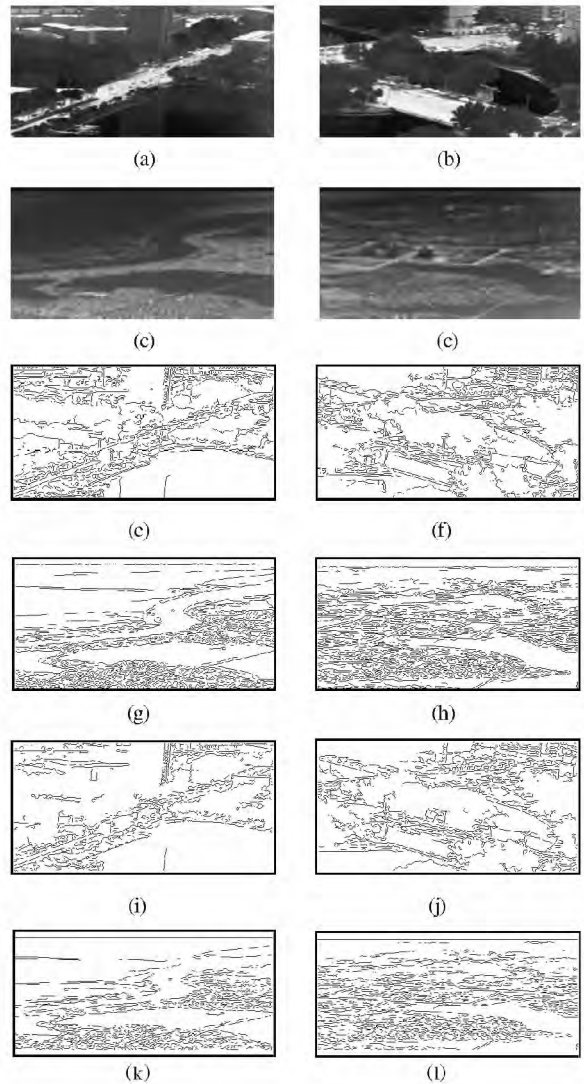


图 1 每种特征单独使用与本文算法结果比较

Fig. 1 Comparison of detection results between every feature used singly and our algorithm

(f) 为本文算法的结果。从图 1 可以看出, 使用边缘对比度特征可以保留对比度较弱的疑似目标边缘, 但同时也保留了一部分背景杂波, 而使用边缘密度特征则可以大幅度删除背景和内部区域中的杂乱边缘, 但是它也会删除那些间距比较密的长边缘, 而边缘长度特征恰好可以弥补这一缺点。因此, 在融合边缘对比度、边缘密度和边缘长度后, 本文算法取得了更优的检测结果。

在第 2 组实验中, 基于几幅真实的红外图像, 对本文算法与 Canny 算法、SEDMI 方法^[13]及基于概率密度的方法进行了比较, 如图 2 所示。图 2(a)~(d) 为原始红外图像, 图 2(e)~(h) 为 SEDMI 方法的检测结果, 图 2(i)~(l) 为基于概率密度的方法的检测结果, 图 2(m)~(p) 为 Canny 算法检测结果, 图 2(q)~(t) 为本文算法检测结果。从图 2 可知, 前面 3 种边缘检测算法检测出许多细微的边缘, 这些细微的边缘主要来自于背景区域和目标内部, 它们将目标边缘淹没在其中, 难以辨别。本文提出的算法有效地抑制了杂乱边缘的影响, 突出了目标信息, 这对降低自动目标识别系统的虚警率很有帮助。



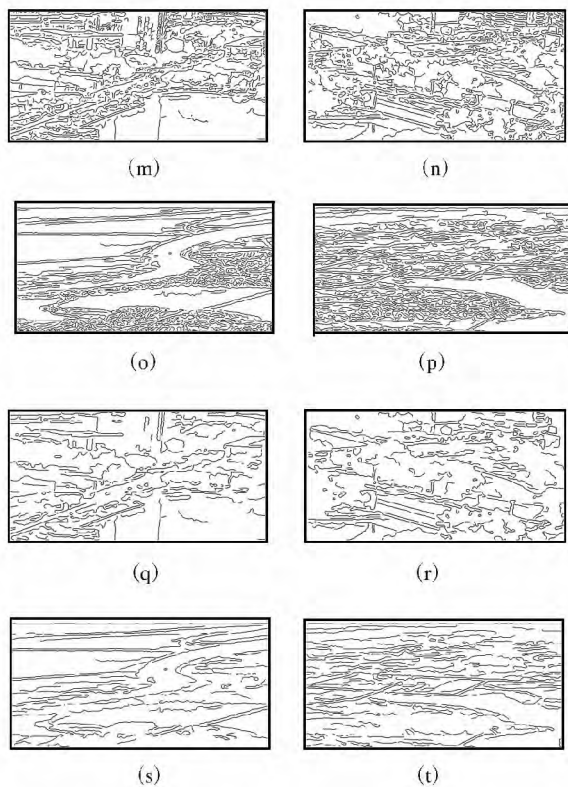


图2 本文算法与 Canny 算法比较

Fig.2 Comparison of detection results between Canny and our algorithms

在 Matlab R2009a 平台上运行程序,统计 4 种算法针对以上图像边缘检测的平均运行时间,如表 1 所示.其中 Canny 算法的计算速度是最快的,平均为 0.09 s;基于概率密度

梯度的方法平均时间为 6.3 s,而 SEDMI 算法的速度最慢,每幅图像的边缘检测时间都超过 30 min.本文算法平均运行时间约为 0.45 s.虽然本文算法与经典的 Canny 算法相比较慢,但是综合性能较好,并且可以通过算法优化达到实时实现的要求.

表 1 不同算法的计算花费比较

Tab.1 Comparison of computation cost among several algorithms

	SEDMI	基于概率密度方法	Canny 算法	本文算法
图 1(a)	-	6.583 6 s	0.096 4 s	0.494 1 s
图 2(a)	-	5.822 3 s	0.094 1 s	0.456 9 s
图 2(b)	-	5.791 4 s	0.091 8 s	0.407 1 s
图 2(c)	-	6.620 4 s	0.079 4 s	0.465 3 s
图 2(d)	-	6.588 9 s	0.095 1 s	0.423 6 s
平均时间	1 800 s	6.281 3 s	0.091 4 s	0.449 4 s

5 结论

针对面向红外自动目标识别等方面的工作需求,本文在 Canny 算法的基础上,基于人眼视觉特性,联合运用边缘两侧对比度、边缘密度和边缘长度等特征,提出了一种基于视觉显著性的红外图像边缘检测算法.本文算法能够有效地抑制背景杂波和目标内部的虚假边缘,突出目标真实边缘信息,能为自动目标识别系统提供有利的边缘图像.许多自动目标识别系统对实时性要求比较高,但是实验中发现本文方法在处理速度与 Canny 算法还有一定差距,今后将研究如何合理有效使用本文方法.

参考文献

- [1]周培德,付梦印,张长江. 红外图像边缘提取方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(8): 1061-1067.
Zhou P D, Fu M Y, Zhang C J. An approach to extract thermal image edge[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(8): 1061-1067.
- [2]高阳,张科,李言俊. 低信噪比红外图像的快速统计法边缘提取[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 459-463.
Gao Y, Zhang K, Li Y J. Edge detection investigation of low-SNR infrared image based on noise probability[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(4): 459-463.
- [3]侯北平,宋执环,李平. 模糊多尺度边缘检测算法应用研究[J]. 信息与控制, 2005, 34(3): 331-335.
Hou B P, Song Z H, Li P. Application study on fuzzy multiscale edge detection algorithm[J]. Information and Control, 2005, 34(3): 331-335.
- [4]何春,叶永强,姜斌,等. 一种基于分数阶微积分模板的新型边缘检测方法[J]. 自动化学报, 2012, 38(5): 776-787.
He C, Ye Y Q, Jiang B, et al. A novel edge detection method based on fractional-order calculus mask[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(5): 776-787.
- [5]Zhan C H, Duan X H. An improved moving object detection algorithm based on frame difference and edge detection[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 36(3): 520-523.
- [6]孙瑾,顾宏斌. 基于方向信息的抗干扰性边缘检测算法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2006, 27(7): 1359-1361.
Sun J, Gu H B. Improved insensitivity to noise image edge detecting method based on the direction information[J]. Mini-Microsystems, 2006, 27(7): 1359-1361.
- [7]向才兵,曾理. 综合 CV 和 Facet 模型的裂纹边缘检测[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(2): 153-155.
Xiang C B, Zeng L. Crack edge detection using comprehensive CV and facet model[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(2): 153-155.
- [8]Wang Y M, Han Q. Boundry finding with prior shape and smoothness models[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelli-

- gence, 2000, 22(7): 738 – 743.
- [9] Chan T, Zhu W. Level set based shape prior segmentation [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 1164 – 1170.
- [10] Sun J X, Gu D B. A multiscale edge detection algorithm based on wavelet domain vector hidden Markov tree model [J]. Pattern Recognition, 2004, 37(7): 1315 – 1324.
- [11] Sharifi M, Fathy M. A classified and comparative study of edge detection algorithms [J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 32(24): 225 – 228.
- [12] 孙达, 刘家锋, 唐降龙. 基于概率密度梯度的边缘检测 [J]. 计算机学报, 2009, 32(2): 299 – 307.
Sun D, Liu J F, Tang X L. Edge detection based on density gradient [J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(2): 299 – 307.
- [13] Cuong V, Pavel P, Marco L. SEDMI: Saliency based edge detection in multispectral images [J]. Image and Vision Computing, 2011, 29(8): 546 – 556.
- [14] Canny J. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 678 – 698.
- [15] 周绍光, 黎瑾慧. 高分辨率遥感影像中提取复杂道路的新方法 [J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(35): 190 – 193.
Zhou S G, Li J H. New method to extract complex roads in high-resolution RS images [J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(35): 190 – 193.
- [16] 张浩鹏, 王宗义. 基于灰度方差和边缘密度的车牌定位算法 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1095 – 1102.
Zhang H P, Wang Z Y. Car license plate location algorithm based on intensity variance and edge density [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(5): 1095 – 1102.
- [17] 毕晓君, 林宏彰. 序列图像的目标识别算法改进 [J]. 计算机工程, 2010, 36(3): 206 – 208.
Bi X J, Lin H Z. Improvement of target identification algorithm for sequence image [J]. Computer Engineering, 2010, 36(3): 206 – 208.
- [18] 韩辉. 基于显著性边缘特征的图像匹配 [J]. 遥感与航空摄影, 2013(1): 32 – 34.
Han H. Images matching based on marked edge feature [J]. Remote Sensing and Aerial Photography, 2013(1): 32 – 34.
- [19] 刘毅, 黄兵, 孙怀江, 等. 利用视觉显著性与图割的图像分割算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(3): 402 – 409.
Liu Y, Huang B, Sun H J, et al. Image segmentation based on visual saliency and graph cuts [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(3): 402 – 409.
- [20] 张国敏, 殷建平, 祝恩, 等. 遥感图像中基于视觉显著性的分层目标检测 [J]. 吉林大学学报, 2007, 37(3): 625 – 629.
Zhang G M, Yin J P, Zhu E, et al. Hierarchical object detection in remote sensing image based on vision saliency [J]. Journal of Jilin University, 2007, 37(3): 625 – 629.

作者简介

肖传民(1978 –) 男, 博士生. 研究领域为自动目标识别.

史泽林(1965 –) 男, 研究员, 博士生导师. 研究领域为精确制导, 图像处理.

夏仁波(1977 –) 男, 博士, 副研究员. 研究领域为计算机视觉, 图像处理.