

基于 9_7 提升小波和区域生长的目标检测算法

陈永飞¹ 崔艳鹏^{1,2} 胡建伟^{1,2}

(西安电子科技大学 西安 710071)¹ (西安胡门网络技术有限公司 西安 710000)²

摘要 针对图像中的快速移动目标检测,提出了一种 9_7 提升小波和区域生长相结合的检测算法。该算法首先对图像进行 9_7 提升小波变换,扩大目标与背景间的照度差异,对歧义目标进行筛选;然后利用区域生长算法找到图像中的可疑目标区进行目标粗判;最后根据目标几何特征,结合背景光强来确定单帧图像中的目标位置。该算法不仅简化了传统算法,减少了代码量,提高了检测准确率,而且留有大量图像处理接口,适用性强。

关键词 9_7 提升小波,区域生长,动目标检测

中图分类号 TN911 文献标识码 A

Target Detection Algorithm Based on 9_7 Lifting Wavelet and Region Growth

CHEN Yong-fei¹ CUI Yan-peng^{1,2} HU Jian-wei^{1,2}

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)¹

(Xi'an Humen Network Technology Co., Ltd., Xi'an 710000, China)²

Abstract For the fast moving target in the image, a target detection algorithm based on 9_7 lifting wavelet and regional growth was proposed. Firstly the algorithm performs 9_7 lifting wavelet transform on the image. This transform enlarge the difference of illumination between the target and the background. And then, it filters the ambiguity goal, uses region growing algorithm to find the suspicious target area in the image and judges the target coarsely. Finally, according to the target geometric features, combined with the background light intensity, it determines the target location in a single frame image. The proposed algorithm not only simplifies the traditional algorithm, reduces the amount of code, improves the detection accuracy, but also has a large number of image processing interface and has good applicability.

Keywords 9_7 lifting wavelet, Region growing, Moving target detection

1 引言

计算机视觉和数字图像处理已被广泛地应用于各行业,尤其是最近几年的航空、军事领域,而其中针对视频中运动目标的检测分析追踪是应用范围很广的一个方向^[1],但也是极其复杂的方向,既要实时采集视频信号,又要对采集的视频进行图像处理,因此需要采用一种“合理高效”的检测算法来实现目标的检测跟踪。

传统的信号分析主要依靠傅里叶分析作为分析工具,而傅里叶变换在信号分析中只能反映信号所包含的所有频率分量,并不能指明这些频率分量出现的时刻,也不能指明在任意时刻,信号包含哪些频率分量^[2],这一特点导致了傅里叶变换在分析信号的局部信息时的不足,因此需要寻找一种能够分析局部函数所包含的频谱的更好的变换算法。

本文提出一种基于 9_7 提升小波和区域生长的动目标检测算法。该算法首先对图像进行小波变换,增强目标和背景的对对比度,去除歧义目标,然后利用区域生长算法找到目标并输出。

2 离散化小波与多分辨率分析

由于在弱小目标检测的实际应用中,小目标可以被看作

背景中的瞬态信号,其在背景中占有的像素数很少,并且与背景之间有较为明显的变化,处于图像中的高频部分,因此可以将小目标检测问题看作图像中瞬态信号的检测问题。下面讨论将小波变换用于小目标检测的可能性。

小波算法满足^[3]以下条件:

- 1) 能够将信号的频率分量当作时间函数。
- 2) 这种变换描述不同时间的信号频谱的二维函数或二维数组。

小波变换的主要思想是将原始信号经过缩放和移位之后形成一系列小波^[4],再由这些小波来重构原始信号。基本小波伸缩平移后可以形成一组小波基函数:

$$\Phi_{\tau,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Phi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (1)$$

其中, s 为缩放参数,反映特定小波基函数的宽度,用来度量信号频率的大小,其关系可简单描述为: s 越小,小波越窄,表现的是信号的细节信息,频率越高;反之也成立。 τ 为平移参数,用于将小波函数定位到函数的某一区间,来度量此区间函数所包含的频谱信息,以此来分析信号的局部信息。

复杂背景下的小目标提取是一个难点^[5],对于天空中小目标的提取更是如此。由于实时天空背景中云层、山峰以及各种杂光及光斑的影响,加之目标的灰度有可能出现反转,使

得目标的提取十分困难。为此,充分利用小波变换的多分辨率分析特性,深入观察图像中的高频信号,精确检测小目标的位置,在小波变换的数值计算中将缩放参数和平移参数离散化,从而形成离散小波变换(DWT)^[6]。DWT的计算方法: DWT通过在不同的频段利用不同的分辨率来将信号分解为粗略的近似和详细信息。DWT使用了两组函数,即尺度函数和小波函数,分别对应低通滤波器和高通滤波器。将信号分解到不同的频段可简单地在时域将信号不断通过高通和低通滤波来实现。原始信号 $x[n]$ 首先通过一个半带高通滤波器 $g[n]$ 和一个半带低通滤波器 $h[n]$ 。滤波之后,由于信号现在的最高频率是 $\pi/2$ 而不是 π ,根据奈奎斯特规则,有一半的采样点可以丢弃。于是接下来进行 2 倍的下采样处理,即每隔一个点丢弃一个点。这就是一层的分解,可用数学公式表示如下:

$$y_h[k] = \sum x[n]g[2k-n] \tag{2}$$

$$y_l[k] = \sum x[n]h[2k-n] \tag{3}$$

其中, $y_h[k]$ 和 $y_l[k]$ 分别表示经过 2 倍下采样处理后的高通和低通滤波器输出。上述分解过程将时间分辨率变为一半,同时将频率分辨率变为原来的两倍,因为仅需用采样点即可表示原始信号的全部特征,信号的频带只有原始信号频带的一半,从而有效降低了频率不确定性。上述分解过程也即通常所说的子带编码,这一过程还可以重复执行并不断分解。在每一层的分解中,滤波和下采样会导致采样点数不断减半(时间分辨率减半)和频带减半(频率分辨率加倍)。整个的分解过程^[7]即子带编码过程如图 1 所示。其中, $x[n]$ 为待分解的原始信号, $h[n]$ 和 $g[n]$ 分别为低通和高通滤波器。每一层的信号带宽在图中用 f 来标识。

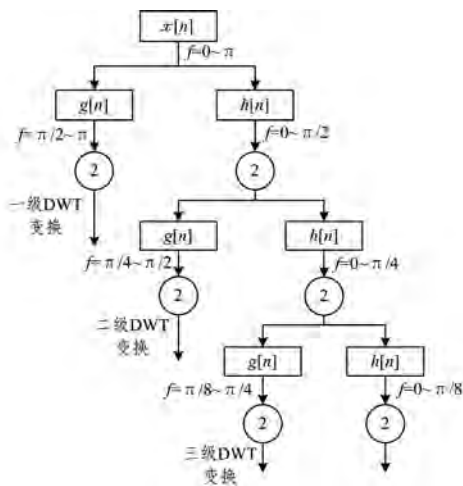


图 1 小波分解算法流程图

在 DWT 中,原始信号中主要的频率分量会出现在包含这些特定频率的信号中。与傅里叶变换不同的是,这种变换保留了信号的时间信息。当然,时间的分辨率与频率所处的层数有关。如果信息的频段在高频部分,那么时间分辨率就很高,因为此时信号的采样点数比较多;而如果信息的频段在低频部分,那么时间分辨率就很低,因为此时信号只有很少的几个采样点。DWT 在高频部分能获得很好的时间分辨率,在低频部分能获得很好的频率分辨率。许多实际的信号都需要进行这种处理。

对于一幅给定的图像,可以计算其 DWT,比如对每行计算 DWT;然后设定一个门限,凡是 DWT 系数低于该门限的

数据点全部被丢弃。于是对于每行来说,只保留高于门限的 DWT 系数。当需要重构时,被丢弃的系数用 0 来填充即可^[8]。通过逆 DWT 即可得到原始的图像。我们同样可以在不同的频段上对图像进行分析,并且仅用某一特定频段的系数来重构原始图像。上述过程被称为多分辨率分析过程,其示意图如图 2 所示。

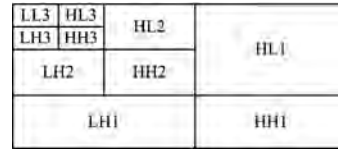


图 2 图像的多分辨率分解

3 9_7 小波变换的提升结构的实现

Mallat 算法为实现小波变换的最有效方法,然而这种基于卷积运算实现小波变换的方法计算量很大,计算复杂度高。鉴于此本文选用一种快速有效的实现方法——9_7 小波提升算法^[9]。

3.1 9_7 小波变换的提升结构

通过基本小波逐步构造一个具有良好性质的提升小波,其实现分 3 个步骤^[10]:分解、预测和更新。分解是将数据分为奇数列和偶数列两部分;预测是用分解的偶数列预测奇数列,将得到的预测误差作为变换的高频分量;更新是用预测误差来更新偶数序列,得到变换的低频分量。提升小波变换是一种构造紧支集双正交小波的新方法。

提升步骤:

(1)分裂。分裂(Split)是将原始信号 $s_j = \{s_j, k\}$ 分为两个互不相交的子集和。每个子集的长度是原子集的一半。通常是将一个数列分为偶数序列 e_{j-1} 和奇数序列 o_{j-1} 。

(2)预测。预测(Predict)是利用偶数序列和奇数序列之间的相关性,由其中一个序列(一般是偶序列 e_{j-1})来预测另一个序列(一般是奇序列 o_{j-1})。实际值 o_{j-1} 与预测值 $P(e_{j-1})$ 的差值 d_{j-1} 反映了两者之间的逼近程度,称之为细节系数或小波系数,对应于原信号 s_j 的高频部分。一般来说,数据的相关性越强,小波系数的幅值就越小。如果预测是合理的,则差值数据集 d_{j-1} 所包含的信息比原始子集 o_{j-1} 包含的信息要少得多。

(3)更新。经过分裂步骤产生子集的某些整体特征(如均值)可能与原始数据不一致,为了保持原始数据的这些整体特征,需要一个更新(Update)过程^[11]。

分解和重构:

经过小波提升,可将信号 s_j 分解为低频部分 s_{j-1} 和高频部分 d_{j-1} ^[12];对于低频数据集 s_{j-1} ,可以再进行相同的分裂、预测和更新,把 s_{j-1} 进一步分解成 d_{j-2} 和 s_{j-2} ;如此下去,经过 n 次分解后,原始数据 s_j 的小波表示为 $\{s_{j-n}, d_{j-n}, d_{j-n+1}, d_{j-1}\}$ 。其中 s_{j-n} 代表了信号的低频部分,而 $\{d_{j-n}, d_{j-n+1}, d_{j-1}\}$ 则是信号从低到高的部分系列。每次分解对应于上面的 3 个提升步骤——分裂、预测和更新:

$$split(s_j) = (e_{j-1}, o_{j-1}) \tag{4}$$

$$d_{j-1} = o_{j-1} - P(e_{j-1}) \tag{5}$$

$$s_{j-1} = e_{j-1} + U(d_{j-1}) \tag{6}$$

小波提升是一个完全可逆的过程,其反变换的步骤如下^[13]:

$$e_{j-1} = s_{j-1} - U(d_{j-1}) \quad (7)$$

$$o_{j-1} = d_{j-1} + P(e_{j-1}) \quad (8)$$

$$s_j = Merge(e_{j-1}, o_{j-1}) \quad (9)$$

3.2 9_7 小波变换的提升结构算法的实现

基于 9_7 小波的滤波器组的分解端与重构端的长度分别为 9 和 7,具有消失矩大、能量集中性好等特性^[14],定义长度为 9 的分解滤波器 $H_0(z)$ 的冲激响应为:

$$H_0(z) = h_0 + h_1(z + z^{-1}) + h_2(z^2 + z^{-2}) + h_3(z^3 + z^{-3}) + h_4(z^4 + z^{-4}) \quad (10)$$

采用文献[15]中的标记,将 9_7 小波的滤波器多项矩阵进行因式分解,结果为:

$$\tilde{P}(z) = \begin{bmatrix} 1 & \alpha(1+z^{-1}) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \beta(1+z) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \gamma(1+z^{-1}) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \delta(1+z) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & 1/k \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中,比例因子 k 和提升系数 α, β, γ 和 δ ^[12] 的公式如下:

$$\begin{aligned} \alpha &= h_4/h_3 \approx -1.586134342 \\ \beta &= h_3/\gamma_1 \approx -0.053980118 \\ \gamma &= r_1/s_0 \approx 0.882911075 \\ \delta &= s_0/t_0 \approx 0.443506852 \\ k &= t_0 \approx 1.230174105 \\ r_0 &= h_0 - \frac{2h_4h_1}{h_3} \\ r_1 &= h_2 - h_4 - \frac{h_4h_1}{h_3} \\ s_0 &= h_1 - h_3 - \frac{h_3r_0}{r_1} \\ t_0 &= r_0 - 2r_1 \end{aligned} \quad (12)$$

设输入信号为 $\{x_n\}$, 9_7 小波提升的公式为:

$$\text{奇偶分裂} \begin{cases} c_i^0 = x_{2i} \\ d_i^0 = x_{2i+1} \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{提升} \begin{cases} d_i^1 = d_i^0 + \alpha(c_i^0 + c_{i+1}^0) \\ c_i^1 = c_i^0 + \beta(d_i^1 + d_{i-1}^0) \\ d_i^2 = d_i^1 + \gamma(c_i^1 + c_{i+1}^1) \\ c_i^2 = c_i^1 + \delta(d_i^2 + d_{i-1}^1) \\ c_1 = \rho c_1^2 \\ d_1 = d_1^2 / \rho \end{cases} \quad (14)$$

其中,5 个系数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta, k$ 的值分别为 1.58613, 0.05298, 0.88291, 0.44351, 1.149604398。

由上式同样可得 9_7 小波变换的框图^[16],如图 3 所示。

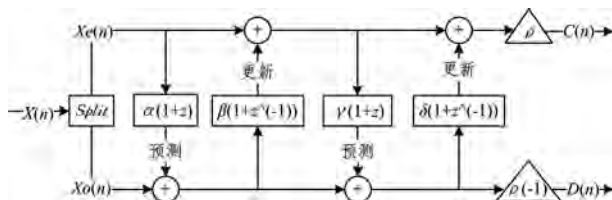


图 3 9_7 小波变换框图

4 区域生长准则及其算法实现

4.1 区域生长算法准则

区域生长是依据指定的准则将图像分割为相似的区域^[17]的过程。令 R 表示整幅图像区域,那么分割可以看作将区域 R 划分为 n 个子区域 R_1, R_2, \dots, R_n 的过程^[18],并需要满足以下条件:

- 1) $U(R_i) = R$;
- 2) R_i 是一个连通区域, $i=1, 2, 3, \dots, n$;
- 3) $R_i \cap R_j = \emptyset$, 对于任何的 i 和 j , 都有 $i \neq j$;
- 4) $P(R_i) = \text{True}, i=1, 2, 3, \dots, n$;
- 5) $R(P_i \cup R_j) = \text{False}, i \neq j$ 。

总的来说,区域生长就是根据一种事先定义的准则将像素或者子区域聚合成更大区域的过程,并且需要充分保证分割后的区域满足上述条件 1)–5)。

4.2 区域生长算法的流程

区域生长算法实现的要点有 3 个^[19]:种子点的选取、生长条件、停止条件。种子点的个数在应用环境中需要根据具体问题来选择,可以是一个或多个;生长条件就是根据像素灰度值间的连续性来定义的一些相似性准则;停止条件则定义了一个终止生长准则。区域生长算法的基本思想是首先定义一个最大像素灰度值距离 max_dis , 当下一个像素的灰度值和已分割好的区域像素平均值的差小于或等于这个距离时,则将这个像素放入此区域,否则停止生长,将此像素作为生长的新种子点,循环此过程^[20]。算法具体步骤如下:

- 1) 对图像顺序扫描,找到起始种子点,像素为 (x_0, y_0) ;
- 2) 以 (x_0, y_0) 为中心,扫描 8 邻域像素 (x_i, y_i) , 如果 (x_i, y_i) 满足生长准则,则将它与种子点合并,同时将 (x_i, y_i) 入栈;
- 3) 从堆栈中取出下一个像素,把它作为新的种子点 (x_0, y_0) , 并返回步骤 2);
- 4) 当堆栈为空时返回步骤 1), 寻找下一个区域;
- 5) 重复步骤 1)–步骤 4) 直到扫描完图像中的所有像素。

5 9_7 小波变换和区域生长结合检测动目标算法的实现

运用 MATLAB 2012 软件平台实现以上算法^[21], 具体的流程如图 4 所示。

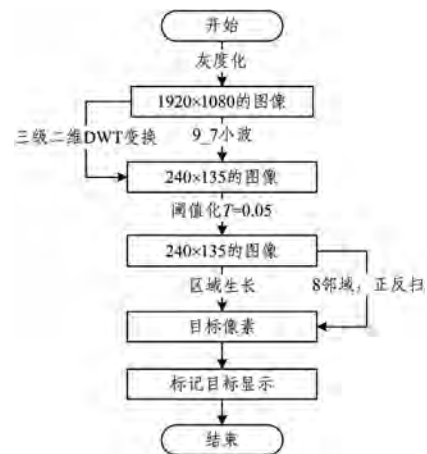


图 4 目标检测算法的 MATLAB 编程实现流程图

实验条件:硬件平台为海康威视最大分辨率 1920 * 1080 的高清摄像头;软件平台为 PC 机、MATLAB 2012a。

图 5 给出了动目标无人机距离摄像头 300 m 时所拍摄的视频流原图像,从中可以看到模糊目标。图 6 是原图像经过灰度化之后的处理结果,此过程是为了减小整个检测过程的数据量。图 7 是灰度图经过 3 次 9_7 小波变换之后的结果,从图中可以看到目标与天空背景近乎无法区别,因此需要进一步处理^[22]。图 8 是图像经二值化处理之后的结果,此过程

会加强目标与天空背景的对照度。图8中,目标与背景有了明显区别,但是该过程只是对目标进行粗判,为了精确定位到目标还需要下一步处理。图9是经过区域生长的图像,从图中可以清晰地看到很多疑似目标,接着就是整个检测识别过程中最重要的步骤——剔除非目标^[23]。剔除的原则有:1)目标像素面积是一个常规合理值,大于此值的区域是非目标;2)靠近边界的是非目标;3)靠近非目标的疑似目标为非目标;4)区域平均像素值太大的区域是非目标。图10是根据以上剔除原则对图像处理后的最后输出,显示了目标在图像中的位置。



图5 原始图像



图6 灰度图像



图7 9/7小波变换处理之后的图像



图8 二值化处理后的图像



图9 区域生长后的图像



图10 检测到目标后的图像

6 实现的关键技术

1)背景和目标灰度接近,设置合适的阈值进行种子提取;
2)外界环境的变化,尤其是光照条件的影响,会出现“亮光斑”导致背景的变化,在算法中对相邻像素进行平均来解决该问题;
3)兼顾实时性和鲁棒性。

结束语 本文首先指出傅里叶变换在分析图像信号的局部信息时存在的不足^[24],随之给出了对应的解决算法——小波变化,但是由于传统的小波变换计算复杂度高,因此选用快速有效的9_7提升小波。本文详细描述了9_7小波提升结构的设计和算法实现,把9_7小波变换运用在视频检测中来增强图像中目标与背景之间的高频、低频对比度,然后根据区域生长算法设计生长准则找到图像中的可疑目标区进行目标粗

判,最后根据目标几何特征确定单帧图像中的目标位置。

本文提出的结合9_7提升小波和区域生长检测动目标的算法,不仅实现简单,简化了传统算法,代码量小,检测准确率高,而且留有大量图像处理接口,适用性强,有较强的实用性和应用前景。

参考文献

- [1] 章毓晋. 图像处理(第三版)[M]. 北京:清华大学出版社,2012.
- [2] 冈萨雷斯. 数字图像处理(第三版)[M]. 北京:电子工业出版社,2011.
- [3] ZHANG Z W, SWEARINGEN J, BRACH J S, et al. Most suitable mother wavelet for the analysis of fractal properties of stride interval time series via the average wavelet coefficient method [J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2017, 80(1): 175-184.
- [4] BABAAGHAIE A, MALEKNEJAD K. Numerical solution of integro-differential equations of high order by wavelet basis, its algorithm and convergence analysis [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2016, 325(12): 125-133.
- [5] DOUCOURE B, AGBOSSOU K, CARDENAS A. Time series prediction using artificial wavelet neural network and multi-resolution analysis: Application to wind speed data [J]. *Renewable Energy*, 2016, 92(7): 201-211.
- [6] QIU Z, LEE C M, XU Z H, et al. A multi-resolution filtered-x LMS algorithm based on discrete wavelet transform for active noise control [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 66-67(1): 458-469.
- [7] WANG D. Dynamic Bayesian Wavelet Transform: New Methodology for Extraction of Repetitive Transients [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016.
- [8] 曹怀信. 小波分析基础[M]. 北京:科学出版社,2016.
- [9] BURRUS C S. Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms [M]. Prentice Hall, 2005.
- [10] IKUZAWA T. Reducing memory usage by the lifting-based discrete wavelet transform with a unified buffer on a GPU [J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2016, 93-94(C): 44-55.
- [11] SHADI Z X, NAVEEDETAL I, MAYSAM A. Multiresolution analysis using wavelet ridgelet, and curvelet transforms for medical image segmentation [J]. *International Journal of Biomedical Imaging*, 2011, 2011(4): 136034.
- [12] YANG X Q. Mesh Structure VLSI of 9/7 Lifting Wavelet Parallel Transform [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 971-973: 1647.
- [13] CHEN J Z, GAO W X, JU Z W, et al. A New Design Method of 9-7 Biorthogonal Filter Banks Based on Odd Harmonic Function [J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2012, 31(3): 1245-1255.
- [14] GAD S, RAEF A. Factor analysis approach for composited AS-TER band ratios and wavelet transform pixel-level image fusion [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(5): 1488-1506.
- [15] PANDE A, ZAMBRENO J. Polymorphic Wavelet Hardware Support for Dynamic Image Compression [J]. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 2012, 11(1): 1-26.
- [16] DAUBECHIES I, SWELDENS W. Factoring Wavelet Transforms into Lifting Steps [J]. *Fourier Annal Appl.* 1998, 4(30): 245-267.

- [17] YEN C C. Seeded Region Growing Based on Extension for Multispectral MR Images Classification[J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 1079-1080: 872.
- [18] MOHAMMED M A, GHANI M K A, HAMED R, et al. Automatic segmentation and automatic seed point selection of nasopharyngeal carcinoma from microscopy images using region growing based approach [J]. *Journal of Computational Science*, 2017, 20(5): 61-69.
- [19] CHAKRABORTY B K, BHUYAN M K, KUMAR S. Combining image and global pixel distribution model for skin colour segmentation[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2017, 88(3): 33-40.
- [20] WANG W C, YUAN X H, WU X J, et al. Dehazing for images with large sky region [J]. *Neurocomputing*, 2017, 238(5): 365-376.
- [21] KHALOO A, LATTANZI D. Robust normal estimation and region growing segmentation of infrastructure 3D point cloud models [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2016, 34(11): 1-16.
- [22] LENG X X, XIAO J, WANG Y. A multi-scale plane-detection method based on the Hough transform and region growing [J]. *The Photogrammetric Record*, 2016, 31(154): 166-192.
- [23] 吴琴琴. Mean Shift 算法在彩色图像滤波与分割中的应用[D]. 西安: 陕西师范大学, 2015: 31-36.
- [24] ZHANG J J. Lifting Wavelet Denoising Algorithm for Acoustic Emission Signal[J]. *International Conference on Robots & Intelligent System*, 2016(8): 234-237.
- (上接第 150 页)
- [6] ITTI L, SIHITE D N, BORJI A. Probabilistic Learning of Task-Specific Visual Attention[C]// *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2012: 470-477.
- [7] BORJI A. Exploiting Local and Global Patch Rarities for Saliency Detection[C]// *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2012: 478-485.
- [8] MEUR O L, CHEVET J C. Relevance of a Feed-Forward Model of Visual Attention for Goal-Oriented and Free-Viewing Tasks [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(11): 2801-2813.
- [9] WRIGHT J, PENG Y, MA Y, et al. Robust Principal Component Analysis: Exact Recovery of Corrupted Low-Rank Matrices by Convex Optimization[C]// *International Conference on Neural Information Processing Systems*. 2009: 2080-2088.
- [10] TANG C, WANG P, ZHANG C, et al. Salient Object Detection via Weighted Low Rank Matrix Recovery[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2017, 24(4): 490-494.
- [11] LIU G, LIN Z, YAN S, et al. Robust Recovery of Subspace Structures by Low-Rank Representation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(1): 171-184.
- [12] SHEN X, WU Y. A Unified Approach to Salient Object Detection via Low Rank Matrix Recovery[C]// *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2012: 853-860.
- [13] LANG C, LIU G, YU J, et al. Saliency Detection by Multitask Sparsity Pursuit[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(3): 1327-1338.
- [14] LI N, SUN B, YU J. A Weighted Sparse Coding Framework for Saliency Detection[C]// *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2015: 5216-5223.
- [15] ACHANTA R, SHAJI A, SMITH K, et al. SLIC Superpixels Compared to State-of-the-art Superpixel Methods [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(11): 2274-2282.
- [16] ZHU W, LIANG S, WEI Y, et al. Saliency Optimization from Robust Background Detection[C]// *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2014: 2814-2821.
- [17] CHEN M, LIN Z, MA Y, et al. The Augmented Lagrange Multiplier Method for Exact Recovery of Corrupted Low-Rank Matrices[J]. *Eprint Arxiv*, 2010: 1-23.
- [18] CAI J F, CANDÈS E J, SHEN Z. A Singular Value Thresholding Algorithm for Matrix Completion[J]. *Siam Journal on Optimization*, 2008, 20(4): 1956-1982.
- [19] LIU G, LIN Z, YU Y. Robust Subspace Segmentation by Low-Rank Representation[C]// *International Conference on Machine Learning*. 2010: 663-670.
- [20] BERTSEKAS D P. *Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods*[M]. New York: Academic Press, 1982.
- [21] AFONSO M V, BIOUCAS-DIAS J M, FIGUEIREDO M A T. An Augmented Lagrangian Approach to Linear Inverse Problems with Compound Regularization[C]// *IEEE Conference on Image Processing*. 2010: 4169-4172.
- [22] ECKSTEIN J, BERTSEKAS D P. On the Douglas-Rachford Splitting Method and the Proximal Point Algorithm for Maximal Monotone Operators [J]. *Mathematical Programming*, 1992, 55(1): 293-318.
- [23] CHENG M M, MITRA N J, HUANG X, et al. Global Contrast Based Salient Region Detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, 37(3): 569-582.
- [24] MOVAHEDI V, ELDER J H. Design and Perceptual Validation of Performance Measures for Salient Object Segmentation[C]// *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. 2010: 49-56.
- [25] YAN Q, XU L, SHI J, et al. Hierarchical Saliency Detection [C] // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2013: 1155-1162.
- [26] LI Y, HOU X, KOCH C, et al. The Secrets of Salient Object Segmentation[C]// *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2014: 280-287.
- [27] ZHAI Y, SHAH M. Visual Attention Detection in Video Sequences Using Spatiotemporal Cues [C] // *ACM International Conference on Multimedia*. 2006: 815-824.
- [28] ACHANTA R, HEMAMI S, ESTRADA F, et al. Frequency-Tuned Salient Region Detection[C]// *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2009: 1597-1604.
- [29] HOU X, ZHANG L. Saliency Detection: A Spectral Residual Approach[C]// *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2007: 1-8.
- [30] YANG C, ZHANG L, LU H, et al. Saliency Detection via Graph-Based Manifold Ranking[C]// *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2013: 3166-3173.
- [31] GONG C, TAO D, LIU W, et al. Saliency Propagation from Simple to Difficult[C]// *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2015: 2531-2539.