

基于改进 ViBe 算法的园林游客检测研究

刘瓊瑛¹ 程 顺¹ 丁绍刚² 陆 攀² 孙元昊¹

(江苏省智能化农业装备重点实验室(南京农业大学工学院) 南京 210031)¹

(南京农业大学园艺学院 南京 210031)²

摘要 传统的视觉背景提取算法中存在阴影敏感、前景点误判、前景空洞等问题。为了更好地提取园林游客的前景,在研究分析多种背景建模方法的基础上,提出一种 Lab 颜色空间下改进的 ViBe 游客检测算法,对算法的准确性和鲁棒性进行了测试。实验结果表明,该算法通过建立实时更新的背景模型,提高了游客检测的准确率,能够有效地适应光照变化并且能够去除阴影。针对园林内不同地点的复杂场景,改进的 ViBe 算法具有更好的检测效果。

关键词 图像处理,改进的 ViBe,游客检测,算法准确性,鲁棒性

中图分类号 TP391.41 文献标识码 A

Garden Tourist Detection Based on Improved ViBe Algorithm

LIU Ying-ying¹ CHENG Shun¹ DING Shao-gang² LU Pan² SUN Yuan-hao¹

(Jiangsu Provincial Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment(Institute of Technology,
Nanjing Agricultural University), Nanjing 210031, China)¹

(College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)²

Abstract There are several problems in traditional visual background extraction algorithm, such as sensitivity to shadow of light, the wrong judged points of prospect, the hole of prospect and so on. In order to better segment the prospects of garden tourists, based on the analysis of a variety of building background model methods, this paper presented an improved tourist detection algorithm ViBe in Lab color space, and also tested the accuracy and robustness of improved ViBe algorithm. The results showed that the algorithm built an updated background model to improve the accuracy of tourist detection, it adapted to the change of light effectively and removed the shadow. By the analysis of different locations' video of garden, the improved ViBe algorithm has better detection results.

Keywords Image processing, Improved ViBe, Tourists segmentation, Algorithm accuracy, Robustness

1 引言

运动目标检测是计算机视觉领域的一个重要分支,是目标识别、目标跟踪、目标统计的前提。前景检测的优劣将直接影响后续操作的准确度。目前前景检测的算法有背景差分法、帧差法、光流法,其中背景差分法快速简单,仍被广泛使用。背景建模法是背景差分法的一种,即是当当前帧同背景模型进行比较来检测运动目标的方法。建立实时更新背景模型的方法较多,例如单高斯模型算法、混合高斯模型算法、码本算法、基于颜色信息的背景建模算法、自组织背景建模算法、视觉背景提取算法等^[1-3]。其中,混合高斯模型算法(Gaussian Mixture Model, GMM)^[4]是使用最广泛的背景模型方法,其基于像素样本的统计信息,使用多个高斯模型表征图像上像素点的特征,新一帧出现后更新模型,然后使用统计差分对新一帧中像素点进行前景、背景隶属判断。由于混合高斯模型计算复杂,且高斯模型的个数、均值、方差、均值偏差、权重都在初始化时被设置为固定值,因此在很多情况下

(如光照的突变、游客的驻足等),该算法会出现前景部分判断为背景、人影误判为前景的误判。基于颜色信息的背景建模法(COLOR)^[5]是将像素点的差异分解成 Chromaticity 差异和 Brightness 差异,对光照具有较强的鲁棒性,计算速度也比较快,适用于背景简单的场景;Lucia M 等人提出的基于自组织神经网络的自组织背景减去算法(Self-Organization Background Subtraction, SOBS)^[6],将初始帧的每个像素映射到背景模型中,第二帧开始采用像素邻域空间相关的更新方式更新背景模型,该算法对光照具有较强的鲁棒性,但更新计算过程复杂,一定程度上影响了处理速度。采用基于样本训练的方法分割前景目标也是较为流行的^[7],Dalal 提出的 HOG (Histogram of Oriented Gradient) 算子^[8]是被广泛使用的特征描述,选择合适的分类器是游客检测的关键,常用的分类器方法有 Boosting 方法^[9]、Cascade 级联分类器方法^[10]和 SVM 方法^[11],通过大量的已知图像进行训练学习得到分类规律,从而对新的一帧进行目标判断。但这种方法适用于背景单一的视频图像,不适用于本文背景复杂的多场景环境。

本文受 2013 年国家自然科学基金项目:基于“驻点”分布规律的江南私家园林空间路径量化研究(0601602)资助。

刘瓊瑛(1978—),女,博士,副教授,主要研究方向为农业领域机器视觉技术;程 顺(1989—),男,硕士生,主要研究方向为图像处理与模式识别;丁绍刚(1966—),男,硕士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为风景园林规划设计, E-mail: dsg2009@njau.edu.cn;陆 攀(1991—),女,硕士生,主要研究方向为风景园林规划设计;孙元昊(1993—),硕士生,主要研究方向为模式识别。

视觉背景提取算法(Visual Background Extractor, ViBe)是 Olivier Barnich 和 Marc VanDroogenbroeck 于 2009 年提出的一种基于样本的背景建模方法^[12]。同 SOBS 算法类似,该算法利用像素邻域空间信息建立相应的像素信息传播机制。算法结构简明,运行效率高,在简单场景下检测效果优于其他算法,但难以解决复杂环境下前景完整提取的问题^[13]。

本文需要分割园林复杂背景下白天 8 小时内入园游览的游客目标,园林中室内室外场景转化、一天光照的变化、树叶的晃动、湖水波纹等因素造成检测画面背景复杂多变。多数的前景提取方法采用 RGB 颜色空间进行处理^[14-15],已难以满足园林复杂场景的要求,因此本文提出一种基于 Lab 颜色空间改进的 ViBe 运动目标检测算法。以苏州市留园视频为例进行算法验证,实验结果表明,该算法能有效地解决上述问题,并提高了运动目标检测的准确率。

2 Lab 颜色空间下改进的 ViBe 算法

2.1 原理分析

背景物体是指静止或规律性缓慢移动的物体,而前景则对应突然闯入的移动物体,本文的对象是留园内的游客,园林游客检测可以看成当前帧像素点的背景和前景分类问题,改进的 ViBe 算法通过建立背景模型,为每个像素点建立一个实时更新的样本集,将新的像素点同它的样本集进行比较从而判断该点的隶属。

ViBe 算法并没有限制在何种颜色空间下进行目标检测,相同的图像可以用不同的颜色空间进行描述,在各自通道描述的信息是不同的。因此,基于不同颜色空间的前景提取效果也是不同的。Lab 颜色空间以数字化的方式描绘人的视觉感应,最大的特点是视觉感知上的均匀性,它的明度和颜色是分开的,便于运动目标检测,具有抗干扰能力强、对阳光鲁棒性好的特性。基于以上分析,本文改进的 ViBe 算法采用 Lab 颜色空间进行游客检测。

2.2 改进的 ViBe 算法

为了更准确地提取留园内游客前景目标,以便后续统计留园内各个“驻点”(游客广泛驻留的景点)的游客驻留量,前景提取的效果至关重要。针对留园景区内明暗不一、假山遮挡、树叶枝条摆动、水面波纹等复杂场景,本文深入研究了各种前景提取算法^[16-18],发现视觉背景提取(ViBe)算法在简单

$$E(x_i - x_j) = \sqrt{m(L(x_i) - L(x_j))^2 + n[(a(x_i) - a(x_j))^2 + (b(x_i) - b(x_j))^2]} \quad (1)$$

种:基于集合模型的方法和基于阴影特征的方法。在观察分析阴影的特点后,通过设置亮度特征阈值去除阴影。通常情况下阴影区域的亮度值比背景区域的亮度值更低,表现为物体受光照在地面产生的阴影同实际背景相比,亮度较暗。一般情况下景区的地面在亮度上也是较暗的,即影子同背景地面在亮度上的差值较小^[21]。而游客穿着不同,反射光线的亮度比固定的背景强,即仅在 L 通道上存在较大差异,通过设置亮度阈值 T_{bright} 排除游客阴影,像素点的亮度距离 L_{dif} 为:

环境下前景提取的效果较好。利用该算法处理留园视频,当游客衣裤灰度值同背景灰度值相近时,会出现误判,导致前景的连通域出现空洞,如图 1 所示。ViBe 算法对光照敏感,当室外有光照时,会将人影检测为前景,如图 2 所示。



图 1 前景空洞图



图 2 光照敏感图

为了解决上述问题和更好地进行复杂环境下运动目标的检测,本文提出一种改进的 ViBe 算法建立背景模型,弥补了传统算法的不足,算法的基本步骤如下。

(1) 背景初始化

传统算法中灰度空间仅使用了单一的灰度信息,在复杂环境下将不再适用。针对该问题,本文将每一帧视频图像从 RGB 颜色空间转化到 Lab 颜色空间。背景初始化处理过程中,对前 20 帧没有游客的视频进行初始化,为每个像素点创建一个样本集,经程序验证,样本容量 $N=20$ 时最为合适,即分别在每一帧图像相同坐标位置和它周围邻域点(八邻域点,图 3 所示)的像素点中随机选一点,建立像素点 x 的样本集 $X(L, a, b) = \{x_1, x_2, \dots, x_{20}\}$,样本集中的数据不会重复选取,可以有效降低前景点的误判,且计算量小。

(2) 像素距离计算及阈值选择

传统的 ViBe 算法仅在灰度空间下采用灰度距离 $D(x_i - x_j) = |v(x_i) - v(x_j)|$ 进行匹配判断。 x_i 表示当前帧上的像素点; x_j 表示该像素点对应样本集中的一个样本; $v(x_i)$ 表示 Lab 颜色空间下点 x_i 的像素值,其为三通道值。

文献^[19-20]对 ViBe 算法做出了一定的优化,本文在 Lab 颜色空间下,提出带权重的颜色距离公式:

$$L_{dif} = |L_i - L_j| \quad (3)$$

设 M 表示当前像素点 x_i 与样本集中的样本点是否匹配,匹配过程如下:

$$M = \begin{cases} \text{true}, & C_{dif}(x_i - x_j) < T_c, L_{dif} < T_{bright} \\ \text{false}, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

判断 M 为 true 时,即当前帧的像素点色差距离小于设定

$$C_{dif}(x_i, x_j) = \sqrt{(a_i - a_j)^2 + (b_i - b_j)^2} \quad (2)$$

在亮度 L 通道下消除阴影,阴影检测方法大体上分为两

的色差阈值 T_c , 同时在亮度距离上小于亮度阈值 T_{bright} , 这时认为当前帧上像素点 x_i 与样本集中像素点 x_j 是匹配的。

统计样本集 J 中与当前像素点匹配的个数 N_m , 当 N_m 大于或等于设定的阈值 T_m 时, 判定 x_i 是背景点, 更新背景模型; 若这一个数值小于阈值 T_m , 则视为前景点, 可以有效地降低误检率, 表达式如下:

$$F = \begin{cases} 0, & N_m \geq T_m (T_m = 4) \\ 1, & N_m < T_m (T_m = 4) \end{cases} \quad (5)$$

N1	N2	N3
N4	x	N5
N6	N7	N8

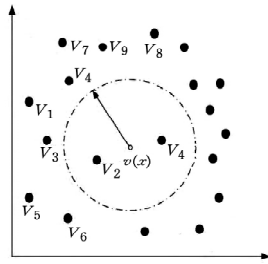


图3 像素 x 的八邻域

图4 像素点的判断

(3) 背景模型更新

受光照强度变化的影响, 拍摄到的场景中每个像素点的亮度值是随着时间缓慢变化的, 需要对背景模型进行更新。通过对连续的视频图像进行分析, 同一位置的像素点的变化是在一定范围内的。每个像素点的背景模型包含周围像素和自身信息, 它是不断更新的。当前像素判断为背景点时, 存在一定的概率 $1/\varphi$ 来更新背景模型 (φ 为时间采样因子)。同时也有 $1/\varphi$ 的概率更新八邻域像素点的背景模型。当像素点判断为更新背景模型时, 先计算样本集的中心点 $V_c(L_c, a_c, b_c)$, 表达式如下:

$$V_c(L_c, a_c, b_c) = \frac{1}{20} \left[\sum_{j=1}^{20} L_j, \sum_{j=1}^{20} a_j, \sum_{j=1}^{20} b_j \right] \quad (6)$$

其中, L_c, a_c, b_c 为样本中心点的各通道值。计算样本集中样本 L_i (共 20 个样本, i 为 1 至 20) 到样本中心的距离, 表达式如下:

$$D = \sqrt{(L_i - L_c)^2 + (a_i - a_c)^2 + (b_i - b_c)^2} \quad (7)$$

用当前的像素值替换样本集中距样本中心最远的样本, 更新样本集并重新计算样本中心, 这样改进 ViBe 算法保证了同一像素点样本集的稳定。

2.3 算法实现

在 Lab 颜色通道下运行改进的 ViBe 算法得到的前景, 在亮度通道下排除阴影, 得到满足颜色通道和亮度通道值的前景点, 二值化得到前景图像, 计算连通域的面积, 排除小面积干扰点, 最后进行空洞填充。

由于背景样本集更新较慢, 树叶晃动、水面波纹这类动态背景位置的像素点会被判断为前景。通常这种前景是零散的小面积噪音, 结合游客前景的特点, 单个游客的连通区域面积大小在一定的范围内, 为了消除这类噪音干扰, 本算法对二值化的前景图像进行连通域搜索, 通过设置面积阈值 S 排除这类噪音干扰。

现实中难免会出现游客的部分衣裤同背景点在颜色上相近而造成前景误判的情况, 导致前景中出现空洞。通过对前景的观察分析, 这些空洞很小, 这里采用形态学闭运算来处理, 先膨胀填充这些小的空洞, 再腐蚀消除周边多膨胀的部分。

改进的 ViBe 算法流程图如图 5 所示。

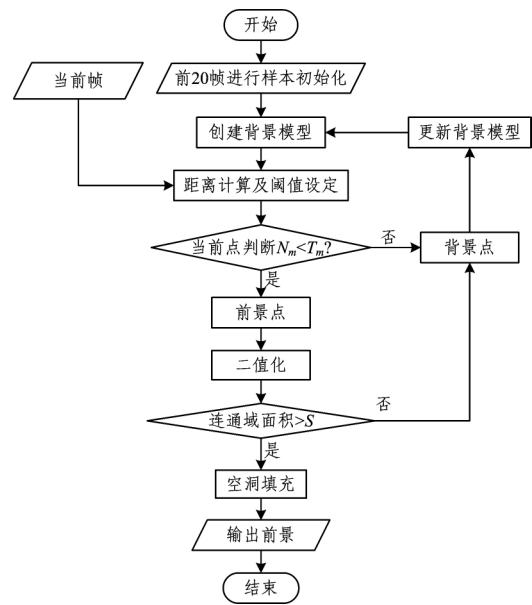


图5 算法流程图

3 实验和分析

为了验证本文提出的改进 ViBe 算法的优越性, 从运动目标提取的准确率和算法的鲁棒性进行测评^[22], 考察阴影处理的效果并计算前景提取的准确率, 以及算法对光照、小物体晃动的鲁棒性。本文对园林室内和室外多种复杂场景下的运动目标进行检测, 以下列举两个检测实例, 案例中的参数是根据本文编写的程序调试选取的, 样本容量 $N = 20$, 色差阈值 $T_c = 10$, 亮度阈值 $T_{bright} = 15$, 阈值 $T_m = 4$, 权重 $m = 0.75$, $n = 0.25$, 采样因子 $\varphi = 16$, 面积阈值 S (单个游客前景连通区域的像素点总数) 根据具体视频设定。

3.1 算法准确度验证

实验 1 选取室内拍摄的一段视频, 视频分辨率为 1280×720 , 这段视频是留园明瑟楼内固定高度拍摄的, 图 6 为截取视频的第 678 帧, 图 6 中列举了原图以及高斯混合模型、ViBe 算法、Lab 颜色空间下带权重的 ViBe 算法、改进的 ViBe 算法检测出的前景图。通过前景点的统计分析, 表 1 列出了 4 种算法的性能比较, 其中 TPR 为正确判断率 (实际为前景像素点被正确判断为前景点的比率), FPR 为错误判断率 (前景点中实际为背景点与总背景点的比率), ACC 为准确率 (所有像素点中被正确判断的比率)。由于拍摄的距离、高度、角度不同, 画面中不同位置的游客前景连通区域的面积也是不同的, 但一个固定角度和高度的摄像头所拍摄到的游客前景连通区域面积大小是在一定范围内变化的, 通过测试程序的多次测试, 确定当前面积阈值 $S = 4000$ 时效果最佳。

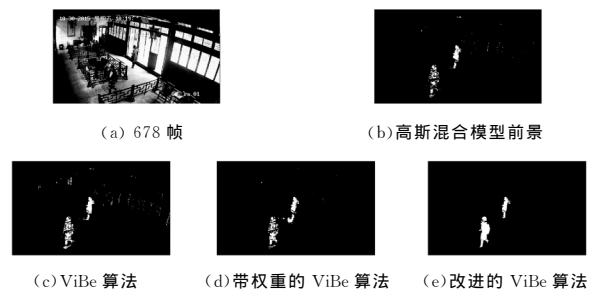


图6 实验 1 的前景检测效果

表 1 实验 1 中 4 种算法的性能比较/%

算法	TPR	FPR	ACC
高斯混合模型	80.24	6.38	93.27
ViBe 算法	90.62	6.91	93.03
带权重 ViBe	92.98	3.54	96.37
改进的 ViBe	97.06	1.42	98.54

从上述测试结果可以看出,高斯混合模型在园区复杂的背景环境下,受内部参数固定及计算复杂的影响,会出现前景分割不完整、人影误判等错误。其中内部参数影响较大,检测出来的前景不实,在室内较暗且游客穿着颜色较深的衣服时,会造成较多的前景点被检测出来。传统的 ViBe 算法是基于灰度特征的,检测出来的前景存在较多的空洞,而且有阴影存在。Lab 颜色空间下带权重的 ViBe 算法在一定程度上改善了上述情况,但空洞仍然存在。本文改进的 ViBe 算法的检测效果较好,它有效地区分了背景点和前景点,很大程度上消除了阴影,而且对前景区域进行了空洞填充,使检测结果最接近真实情况。

实验 2 选取正午时冠云峰前广场的一段视频。

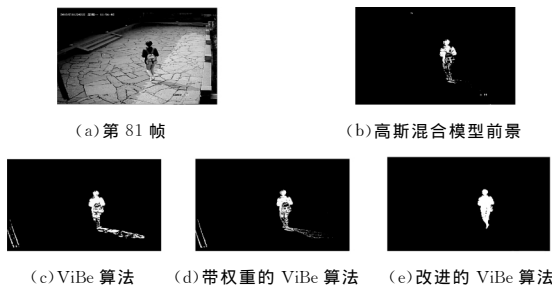


图 7 实验 2 的前景检测效果

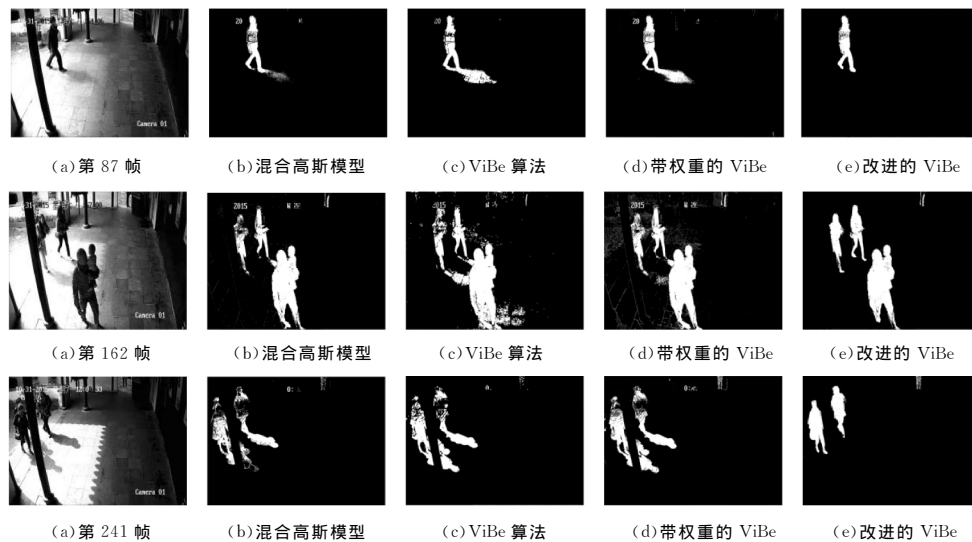


图 8 实验 3 的前景检测效果

结束语 本文针对传统 ViBe 算法前景提取中对光照敏感、存在阴影、前景不完整的问题,提出了基于 Lab 颜色空间下改进的 ViBe 算法。算法通过设置合适的阈值,提取满足颜色和亮度通道下的前景,并在亮度通道下排除阴影,然后对前景点二值化,设置前景连通区域面积阈值排除树叶晃动、水波纹等干扰,最后对前景中的空洞进行填充。该算法提高了对光照的鲁棒性,有效抑制了阴影,同时增强了抗噪性,使检测出的游客前景更加完整。针对留园园区内复杂背景下的视频,用不同检测算法进行实验对比分析,实验中室内的准确率为 98.54%,室外的准确率为 96.47%。结果表明该算法在室

图 7 列举了原图以及高斯混合模型、ViBe 算法、带权重的 Lab 颜色空间下 ViBe 算法、改进的 ViBe 算法检测出的前景图。

表 2 列出了 4 种算法的性能比较,TPR,FPR,ACC 的含义同表 1,S=5000(确定方法同上)。

表 2 实验 2 中 4 种算法的性能比较/%

算法	TPR	FPR	ACC
高斯混合模型	81.05	9.17	90.60
ViBe 算法	88.05	14.06	85.99
带权重 ViBe	94.38	8.58	91.49
改进的 ViBe	97.09	3.54	96.47

从上述测试结果可以看出,高斯混合模型检测出的前景不实;ViBe 算法和 Lab 颜色空间下带权重的 ViBe 算法检测出来的前景都不完整,检测出的游客前景轮廓部分缺失,而且存在游客阴影。本文改进的 ViBe 算法则较好地解决了这些问题,不仅去除了阴影,填充了目标区域的空洞,而且滤去了我们不感兴趣的目标(例如图 7 中左下角晃动的丝带)。

3.2 算法鲁棒性验证

为了验证改进的 ViBe 算法对光照、小物体晃动的鲁棒性,实验 3 截取了一段留园五峰仙馆前有阳光变化的视频(S=6000,确定方法同前),检测的结果如图 8 所示。由图 8 可知,在第 87 帧之后阳光逐渐变强,高斯混合模型、ViBe、带权重的 ViBe 或多或少地出现了人影,而改进的 ViBe 算法对光照鲁棒性强,能有效地应对光照的变化,并且得到的游客前景较充实。

内环境和室外环境的游客检测效果比其他算法好,充分验证了改进的 ViBe 算法的优越性。

参考文献

[1] 霍东海,杨丹,张小洪,等.一种基于主成分分析的 Codebook 背景建模算法[J].自动化学报,2012(4):591-600.
 [2] 解文华,易本顺,肖进胜,等.基于像素与子块的背景建模级联算法[J].通信学报,2013,34(4):194-200.
 [3] 张水发,丁欢,张文生.双模型背景建模与目标检测研究[J].计算机研究与发展,2011,48(11):1983-1990.

- [4] STAUFFER C, GRIMSON W E L. Adaptive background mixture models for real-time tracking[J]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1999, 22(8):747-757.
- [5] MADDALENA L, PETROSINO A. A self-organizing approach to background subtraction for visual surveillance applications [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(7): 1168-1177.
- [6] MADDALENA L, PETROSINO A. The SOBS algorithm: What are the limits [C]// Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, IEEE, 2012: 21-26.
- [7] 周俊, 王明军, 邵乔林. 农田图像绿色植物自适应分割方法[J]. 农业工程学报, 2013, 18: 163-170.
- [8] DALAL N, TRIGGS B. Histograms of oriented gradients for human detection[C]// IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005 (CVPR 2005). IEEE, 2005: 886-893.
- [9] JIANG H, TANG, OUYANG F. A New Method for the Prediction of the Gasoline Yield of the MIP Process[J]. Petroleum Science and Technology, 2015, 33(20): 1713-1720.
- [10] 蔡灿辉, 朱建清. 采用 Gentle AdaBoost 和嵌套级联结构的实时人脸检测[J]. 信号处理, 2013, 29(8): 956-963.
- [11] 肖永刚. 基于梯度特征和级联分类的快速行人检测[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [12] BARNICH O, DROOGENBROECK M V. ViBe: A universal background subtraction algorithm for video sequences[J]. IEEE Trans. Image Process, 2011, 20(6): 1709-1724.
- [13] 丁莹, 钱锋, 范静涛, 等. 基于不同颜色空间的运动目标检测算法分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2012, 35(4): 1-4.
- [14] 张志斌, 罗锡文, 臧英, 等. 基于颜色特征的绿色作物图像分割算法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 183-189.
- [15] 韩殿元, 黄心渊, 付慧. 基于彩色通道相似性图像分割方法的植物叶面积计算[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 179-183.
- [16] 刁智华, 王欢, 宋寅卯, 等. 复杂背景下棉花病叶害虫图像分割方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 147-152.
- [17] 胡小冉, 孙涵. 一种新的基于 ViBe 的运动目标检测方法[J]. 计算机科学, 2014, 41(2): 149-152.
- [18] 余焯, 曹明伟, 岳峰. EVibe: 一种改进的 Vibe 运动目标检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(4): 924-931.
- [19] 仇春春, 王恬, 程海粟, 等. 基于改进 Vibe 算法的行人目标检测[J]. 信息技术, 2016, 12(3): 6-9, 14.
- [20] KANG J M, COHEN I, MEDIONI G. Tracking Objects from Multiple Stationary and Moving Cameras[C]// The Institution of Electrical Engineers, England, 2004: 31-35.
- [21] 苏延召, 李艾华, 姜柯, 等. 改进视觉背景提取模型的运动目标检测算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014(2): 232-240.
- [22] 王辉, 宋建新. 一种基于阈值的自适应 Vibe 目标检测算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(S1): 154-157.

(上接第 215 页)

需要已知信号的稀疏度;改进的 SWOMP 算法对信号的重构效率有待提高。本文根据 STOMP 算法和 SWOMP 算法的特点提出了 DTOMP 算法,通过两次阈值的筛选能够更加准确地找到匹配的原子。本文通过实验,将参数设定在 $\alpha \in (0.4, 0.7)$, $\beta \in (1.6, 2.5)$ 的范围内,能够有效解决上述问题,在重构效果和重构效率方面都有明显优势。

参考文献

- [1] TSAIG Y, DONOHO D L. Compressed sensing[C]// IEEE Trans. Inform. Theory. . 2006: 1289-1306.
- [2] CANDÉS E, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2006, 52(2): 489-509.
- [3] QAISAR S, BILAL R M, IQBAL W, et al. Compressive sensing: From theory to applications, a survey[J]. Journal of Communications & Networks, 2013, 15(5): 443-456.
- [4] CANDES E J, WAKIN M B. An Introduction To Compressive Sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 21-30.
- [5] 朱明, 高文, 郭立强. 压缩感知理论在图像处理领域的应用[J]. 中国光学, 2011, 4(5): 441-447.
- [6] HERMAN M A, STROHMER T. High-Resolution Radar via Compressed Sensing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 57(6): 2275-2284.
- [7] ASHIR A M, ELEYAN A. Compressive sensing based facial expression recognition[C]// Signal Processing and Communication Application Conference, 2016.
- [8] 李坤, 马彩文, 李艳, 等. 压缩感知重构算法综述[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S1): 225-232.
- [9] 杨海蓉, 张成, 丁大为, 等. 压缩感知理论与重构算法[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 142-148.
- [10] MALLAT S G, ZHANG Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3397-3415.
- [11] TROPP J A, GILBERT A C. Signal Recovery From Random Measurements Via Orthogonal Matching Pursuit [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 53(12): 4655-4666.
- [12] NDDDELL D, VERSHYNIN R. Uniform Uncertainty Principle and Signal Recovery via Regularized Orthogonal Matching Pursuit[J]. Foundations of Computational Mathematics, 2009, 9(3): 317-334(18).
- [13] DONOHO D L, TSAIG Y, DRORI I, et al. Sparse Solution of Underdetermined Systems of Linear Equations by Stagewise Orthogonal Matching Pursuit[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(2): 1094-1121.
- [14] NEEDELL D, TROPP J A. CoSaMP: Iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples[J]. Applied & Computational Harmonic Analysis, 2008, 26(3): 301-321.
- [15] BLUMENSATH T, DAVIES, et al. Stagewise Weak Gradient Pursuits[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(11): 4333-4346.
- [16] DAI W, MILENKOVIC O. Subspace pursuit for compressive sensing signal reconstruction[M]// Introduction to Occupational Epidemiology. Lewis Publishers, 1992: 2230-2249.
- [17] 刘哲, 张鹤妮, 张永亮, 等. 基于弱选择正则化正交匹配追踪的图像重构算法[J]. 光子学报, 2012, 41(10): 1217-1221.
- [18] BARANIUK R G. Compressive Sensing [Lecture Notes][J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(4): 118-121.
- [19] CAANDÉS, EMMANUEL J. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing[J]. Comptes Rendus Mathématique, 2008, 346(9-10): 589-592.
- [20] ALLENZHU Z, GELASHVILI R, RAZENSHTEYN I. Restricted Isometry Property for General p-Norms [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 62(10): 5839-5854.
- [21] CHEN S S, DONOHO D L, SAUNDERS M A. Atomic Decomposition by Basis Pursuit[J]. Siam Review, 2001, 43(1): 33-61.