

# 一种针对抖动视频序列的运动目标检测算法

薛阳<sup>1</sup>, 张亚飞<sup>1\*</sup>, 杨天宇<sup>1</sup>, 徐云炯<sup>2</sup>, 孙伟<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海电力学院自动化工程学院, 上海 200090;

<sup>2</sup>国网绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000

**摘要** 针对自然环境中因摄像机抖动造成无法准确检测运动目标的问题, 提出一种结合分块灰度投影、背景差分与连续帧间差分法的运动目标检测算法。该算法通过将图像帧进行分块处理, 结合离散化决策机制去除灰度梯度变化低及存在局部运动的目标区域, 提高全局运动矢量估计精度。根据块区域灰度投影曲线进行互相关计算, 完成抖动序列校正。通过对校正后的序列帧提出使用背景差分与连续三帧差分法的融合策略处理, 增强运动目标区域。通过将融合差分图像平滑处理并使用 Otsu 法进行自适应阈值分割, 检测前景运动目标。用公共抖动视频序列实验, 并与不同算法对比验证后可得: 该算法可以准确检测出摄像机抖动场景中运动目标, 保证较好检测效果的同时检测速度较快。

**关键词** 机器视觉; 运动目标检测; 灰度投影; 抖动视频; 背景差分法; 帧间差分法

**中图分类号** TP391.4

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP55.091506

## A Moving Object Detection Algorithm Aiming at Jitter Video Sequence

Xue Yang<sup>1</sup>, Zhang Yafei<sup>1\*</sup>, Yang Tianyu<sup>1</sup>, Xu Yunjiong<sup>2</sup>, Sun Wei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

<sup>2</sup>State Grid Shaoxing Power Company, Shaoxing, Zhejiang 312000, China

**Abstract** To solve the problem that jitter video moving object detection is not accurate, we propose a moving object detection method based on block gray projection, background difference and continuous inter-frame difference. By dividing the image frames into block processing, the algorithm combines the discrete decision mechanism to remove the target regions with low gray gradient and the local motion, so as to improve the accuracy of global motion vector estimation. A cross correlation calculation is done for the gray projection of the block area and the image correction is completed. For the corrected sequence frames, we propose a fusion strategy based on background difference and continuous three frame difference method, which can deal with and enhance the moving target area. The selfadaptive thresholding segmentation for the differential image smoothing fusion processing and Otsu method is used to detect foreground moving targets. In jitter video sequence experiment, compared with different algorithms, the proposed algorithm can effectively detect moving targets in the jitter scene, and ensure better detection results and faster detecting speed.

**Key words** machine vision; moving object detection; gray projection; jitter video; background difference; interframe difference

**OCIS codes** 150.1135; 100.2000; 160.0106

## 1 引言

运动目标检测一直是机器视觉的研究基础, 是智能视频监控、人体检测、手势识别、运动目标跟踪

等应用的基本处理步骤<sup>[1]</sup>。运动目标检测方法主要有背景差分法、帧间差分法与光流法三种<sup>[2]</sup>。目前针对监控系统中运动目标的检测通常采用背景差分法, 通过建立场景中背景参考模型, 利用当前帧与背

**收稿日期:** 2018-03-20; **修回日期:** 2018-03-27; **录用日期:** 2018-04-02

**基金项目:** 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211HZ17000F)、国家自然科学基金(51405286)、上海市自然科学基金资助项目(13ZR1417800)、上海市电站自动化技术重点实验室(13DZ2273800)

\* **E-mail:** zyf826220734@163.com

景帧进行差分获取目标<sup>[3]</sup>。然而在自然环境中由于固定摄像机受地面震动、自然风等影响,采集的视频信号出现抖动现象,视频序列发生全局运动,大量背景区域易被误检为前景目标,使得检测准确度降低、正确目标无法获取<sup>[4]</sup>。

为解决该问题,有研究尝试模拟动态场景,例如混合高斯模型(MOG),使用高斯概率密度函数混合,根据图像帧中各像素点颜色强度的不同对动态背景元素构建模型。该方法对于荡漾的水波或移动树木有良好效果,但易受亮度变化或重复运动的影响,且计算复杂,制约了其应用范围<sup>[4]</sup>。视觉背景提取(ViBe)算法是另一种主要建模方式,算法为各像素点建立样本集,通过将新像素点值与样本集中的值进行匹配,来判断是否属于背景点<sup>[5]</sup>,计算速度快、占用资源少,有较好检测效果,但在背景变化频繁、阴影较多的恶劣环境中仍存在不足。结合样本一致性背景建模算法与ViBe算法的优势,在像素自适应分割(PBAS)算法中引入控制论思想与背景复杂程度度量方法,使前景判断阈值和背景模型的更新率跟随背景复杂程度自适应变化。该算法性能较优,但是计算量大,处理速度慢<sup>[6]</sup>。也有一些方法通过将深度学习应用于运动目标检测,利用深层神经网络充分学习图像中空间与时间显著性信息,经过大量数据训练与检测后,可获取准确的检测结果,该类方法性能优异但仍处于研究阶段<sup>[6]</sup>。

有部分学者提出其他方案,文献[7]根据抖动场景中背景信息与前景信息分布稳定性差异,提出以非参数估计方法模拟不稳定动态背景信息分布,完成前景运动目标的获取。文献[8]通过特征点匹配校正图像偏移量,以多分辨率金字塔模型的背景差分算法检测运动目标,但计算较复杂,摄像机监控过程对实时性要求较高,算法受硬件限制。

故本文提出一种较快检测抖动视频中运动目标(GDM)方案,在保证检测效果的同时降低计算量。该方案先将图像帧分块,剔除易造成误差的块区域,再依据分块灰度投影算法进行视频序列校正,进而结合背景差分与帧间差分融合策略增强运动目标区域,最后使用自适应阈值分割法检测出前景目标。

## 2 目标检测方案原理

因摄像机抖动引发图像帧全局运动,算法无法获取原有运动目标<sup>[4]</sup>,对此以分块灰度投影法估计全局运动矢量完成序列校正<sup>[9]</sup>。为提高运动矢量计

算精度,在去除图像部分边缘信息后将图像帧分块,并基于离散化判断机制剔除序列帧中灰度梯度变化低及存在局部运动的区域,减少偏移量估计误差,保证准确校正序列的同时降低算法计算量。对于校正后的图像,结合背景差分与连续帧间差分融合策略,提取运动目标,只增强存在运动目标区域,并提高提取完整度,最终以最大类间方差法进行阈值分割获取前景运动目标<sup>[5]</sup>。该算法具体检测流程如图1所示。

### 2.1 摄像机抖动特点

固定摄像机抖动通常为小范围内无规律晃动现象或存在一定旋转角度,但在景深方向无大幅度的运动,对此可使用刚性模型作为视频序列的运动模型<sup>[9]</sup>:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $x_0$ 、 $y_0$ 为 $t_0$ 时刻图像帧中某像素点坐标; $x_1$ 、 $y_1$ 为 $t_1$ 时刻该像素点新坐标; $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 为该像素点于两幅图像间的水平和垂直方向的偏移量; $k$ 为变焦系数; $\theta$ 为像素点在两幅图像间的偏转角。刚性模型能够描述物体平移、旋转及变焦运动<sup>[9]</sup>,固定摄像机抖动时无变焦情形,抖动旋转角度较小。使用分块处理后可进一步减小旋转角度对投影计算的影响,故变焦系数 $k$ 可取为1, $\cos \theta$ 为1, $\sin \theta$ 为 $\theta$ ,该模型线性化处理后可表示为

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \theta \\ -\theta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}. \quad (2)$$

由块区域计算局部运动矢量代入该模型后可得图像帧全局矢量,该矢量包含旋转运动分量。

### 2.2 分块灰度投影算法

灰度投影算法是以图像中像素点灰度值进行投影,根据投影曲线的互相关计算确定偏移矢量,算法分为灰度映射、投影滤波、矢量提取三部分,计算量小且运算速度快<sup>[10]</sup>。但传统灰度投影算法只能完成水平和垂直方向的平移计算,无法适用摄像机抖动时具有一定旋转角度的情形,这将造成序列运动矢量估计精度下降。为减小误差使用分块灰度投影法估计偏移量<sup>[9]</sup>。

根据固定摄像机性质选用清晰合适的固定帧作为参考帧<sup>[10]</sup>,并除去图像四周的少许边缘,避免抖动引入的边缘信息对投影计算产生较大误差。再将图像分成大小合适的块,考虑计算准确性与实时性,通常将块尺寸分成 $100 \text{ pixel} \times 100 \text{ pixel}$ <sup>[10-12]</sup>。对于灰度梯度变化低的区域,其像素点值变化小;存在局

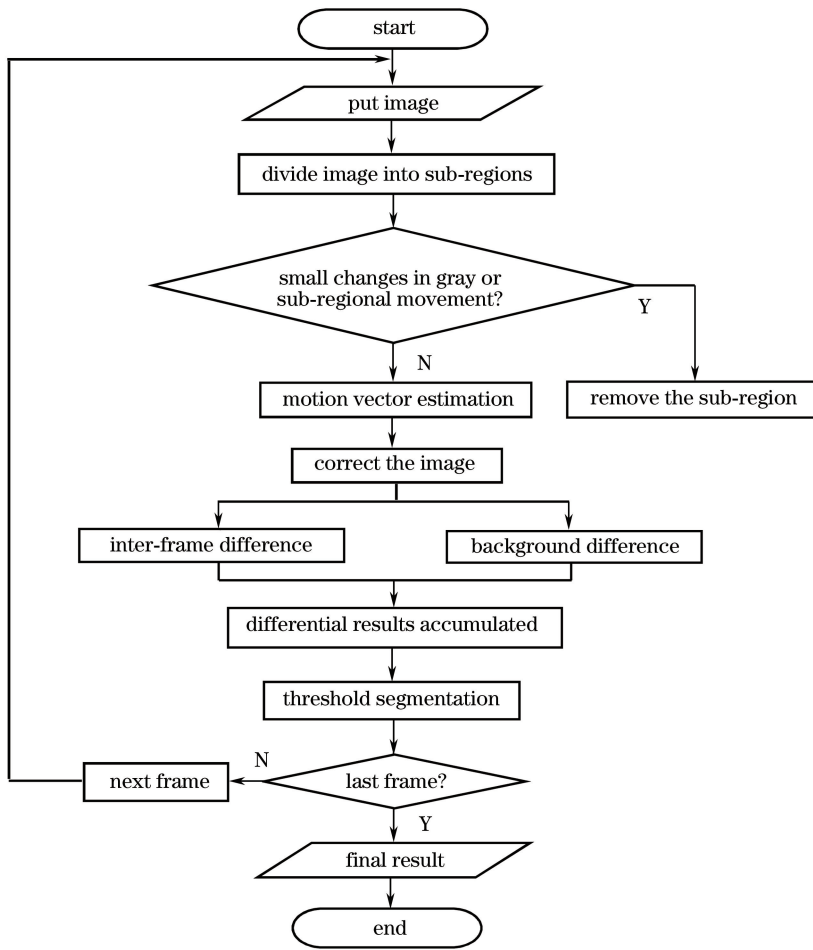


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flowchart

部运动的区域,其投影曲线显著区别于其他区域,使用离散化判断筛选。以分辨率为  $240 \times 352$  灰度图像为例,将当前帧分为 4 块区域,依次使用当前帧与背景帧相应区域的像素点值作差运算,根据所得矩阵的均方差  $\sigma$  判断离散程度,公式如下:

$$X_k(i, j) = G_k(i, j) - B_k(i, j),$$

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [X_k(i, j) - \mu_k]^2}, \quad (3)$$

式中:  $B_k(i, j)$  为背景帧中第  $k$  个区域块在点  $(i, j)$  处的像素值;  $G_k(i, j)$  为当前帧第  $k$  个区域块在点  $(i, j)$  处的像素值;  $X_k(i, j)$  为背景帧与当前帧在点

$(i, j)$  处的差值;  $N$  与  $M$  分别为块区域行数与列数;  $\mu_k$  为该区域块均值;  $\sigma_k$  为该区域块的均方差。将图像帧 4 个块区域所得均方差  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$  的值进行依次比较并判断,若块区域中存在局部运动,则其离散程度高、均方差最大;若该区域灰度梯度变化低则其均方差最小,通过决策比较剔除灰度变化最低与变化最高区域。如图 2 所示,从左到右依次为背景帧、当前帧、决策后背景帧、决策后当前帧。通过分块步骤增加了算法决策运行时间,但剔除区域块后减少了投影互相关计算量,相比于传统灰度投影法整体运行时间基本不变。

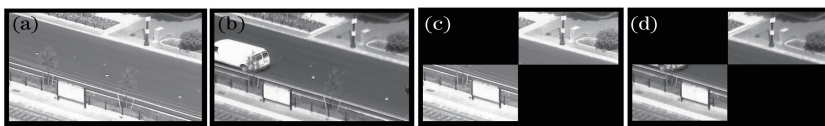


图 2 剔除区域块。(a)背景帧;(b)当前帧;(c)决策后背景帧;(d)决策后当前帧

Fig. 2 Remove the sub-region. (a) Background frame; (b) current frame; (c) background frame after decision; (d) current frame after decision

根据当前帧剩余块区域与背景帧对应区域进行分块灰度投影,估算全局运动矢量。固定摄像机监控过程中地点不变,选取固定帧为其参考帧,投影公式为

$$\begin{cases} G_k(j) = \sum_{i=1}^N G_k(i, j) \\ G_k(i) = \sum_{j=1}^M G_k(i, j) \end{cases}, \quad (4)$$

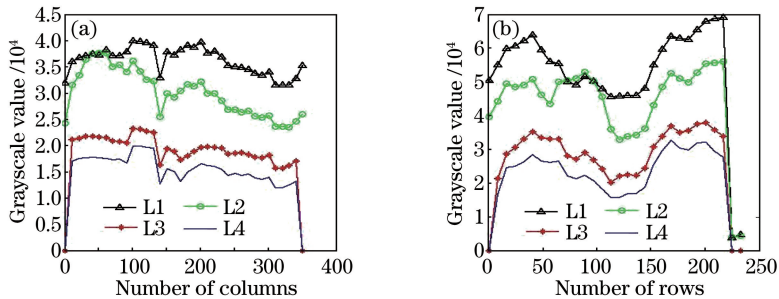


图3 灰度投影曲线。(a)列投影曲线;(b)行投影曲线

Fig. 3 Grayscale projection curve. (a) Projection curve of columns; (b) projection curve of rows

将分块投影曲线以中值滤波平滑曲线后进行互相关计算,估计运动矢量<sup>[10]</sup>,公式为

$$C(\omega) = \sum_{j=1}^M [G_k(j + \omega - 1) - G_r(m + j)]^2, \quad 1 \leq \omega \leq 2m + 1, \quad (5)$$

式中: $G_k(j)$ 和 $G_r(j)$ 分别为第 $k$ 帧和参考帧 $r$ 在第 $j$ 列的灰度投影值; $m$ 为位移矢量相对于参考帧一侧的搜索宽度<sup>[10]</sup>。 $\omega_{\min}$ 为 $C(\omega)$ 取最小值时对应 $\omega$ 的值,第 $k$ 帧图像相对于第 $r$ 帧在垂直方向的位移量为

$$d_y = m + 1 - \omega_{\min}, \quad (6)$$

式中: $d_y$ 为正时表示第 $k$ 帧图像相对于第 $r$ 帧向上移动 $|d_y|$ 个单位; $d_y$ 为负则表示向下移动了 $|d_y|$ 个单位。同理可得水平方向上偏移量 $d_x$ <sup>[11]</sup>。

### 2.3 运动目标提取

将校正后的视频序列使用背景差分与连续帧间差分法融合策略提取运动目标。两种方法原理相似,背景差分法以当前帧与背景帧进行差分来获取目标,能提取出较完整的前景目标,但易受光照与环境影响<sup>[11]</sup>。该方法的重点在于采用背景建模与背景更新机制<sup>[12]</sup>,算法原理为

$$D_k(x, y) = F_k(x, y) - B_r(x, y), \quad (7)$$

式中: $F_k(x, y)$ 为当前帧; $B_r(x, y)$ 为背景帧; $D_k(x, y)$ 为当前帧与背景帧的差分结果。

连续帧间差分法以当前帧与相邻帧进行差分,可较好地提取运动目标轮廓,且受光照环境的影响

式中: $G_k(i, j)$ 为第 $k$ 块区域在点 $(i, j)$ 处的图像灰度值; $G_k(j)$ 为第 $j$ 列像素点的列投影值; $G_k(i)$ 为第 $i$ 行像素的行投影值。图3为图2中4幅图像灰度投影曲线,L1为背景帧曲线,L2为当前帧,L3为决策后对应背景帧,L4为决策后当前帧。通过决策处理后所得图像帧的投影曲线干扰信息明显减少,有利于更准确计算视频序列偏移量。

小。传统帧间差分法使用两帧运算,目标运动较慢时会出现空洞现象而无法获取完整目标<sup>[13-14]</sup>。基于此,使用三帧差分与背景差分法结合提取运动目标。以连续三帧图像为例,运算步骤为:

1) 读取视频序列中连续相邻的三帧图像分别为 $F_k(x, y)$ 、 $F_{k-1}(x, y)$ 、 $F_{k-2}(x, y)$ ,将相邻两帧图像进行差分得到 $D_k(x, y)$ 、 $D_{k-1}(x, y)$ ,再获取三帧差分结果 $I_k(x, y)$ ,即

$$I_k(x, y) = \frac{D_k(x, y)}{2} + \frac{D_{k-1}(x, y)}{2}. \quad (8)$$

2) 使用当前帧 $F_k(x, y)$ 与背景帧 $B_r(x, y)$ 相减,获取背景差分图像 $I_r(x, y)$ 。

$$I_r(x, y) = F_k(x, y) - B_r(x, y). \quad (9)$$

3) 对三帧差分结果 $I_k(x, y)$ 与背景差分结果 $I_r(x, y)$ 融合得 $I_{kr}(x, y)$ ,融合公式为

$$I_{kr}(x, y) = \frac{I_k(x, y)}{2} + \frac{I_r(x, y)}{2}. \quad (10)$$

融合三帧差分与背景差分所得图像具有两种差分法优点,利用两种差分结果的累加,只增强运动目标区域,减弱了环境与光照因素对于目标检测的影响,提取的目标更完整。且该方法只进行加减运算,在不增加运算量的前提下可获得更好的检测效果。

对于三帧差分法与背景差分法结果融合所引入的噪声,通过中值滤波平滑处理后,使用Otsu法确定动态分割阈值<sup>[15]</sup>。本文算法只增强运动目标区域,增大前景目标与背景区域之间差值,确保Otsu

法取得更好的分割效果。在计算出最佳分割阈值  $T$  后,当像素点的值大于  $T$  时则为前景,否则为背景目标<sup>[16]</sup>,其公式为

$$R_k(x, y) = \begin{cases} 1, & I_{kr}(x, y) > T \\ 0, & I_{kr}(x, y) \leq T \end{cases} \quad (11)$$

本文所提融合差分策略效果验证使用 Change

detection 数据,集中 pedestrians 与 highway 序列<sup>[17]</sup>,分别使用三种方法处理图像帧后以 Otsu 法获取目标。观察图 4 可见,背景差分法受光照影响较大,易出现误检;三帧差分法拥有一定抗噪能力,但检测结果出现明显空洞现象;本文融合差分法在拥有一定抗噪能力的同时检测效果最佳,且不增加运算负担。

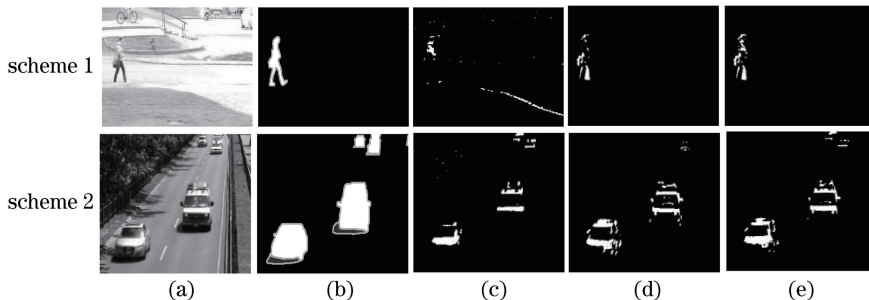


图 4 差分方法比较。(a)当前帧;(b)真实值;(c)背景差分;(d)帧间差分;(e)融合差分

Fig. 4 Difference method comparison. (a) Current frame; (b) ground truth; (c) background difference; (d) inter-frame difference; (e) fusion differences

### 3 实验结果与分析

本文算法实现的软件平台为 Matlab2014a,采用计算机配置为 Intel Core i5-4570 CPU、8.00G RAM。算法主要针对摄像机抖动情况,使用 Change detection 数据集的 camera jitter 类与动态背景下抖动视频序列进行测试<sup>[17]</sup>,并将检测效果与当前常用的 4 种算法作定性与定量对比。图 5 为实验效果图,从左到右依次为:当前帧、真实目标、MOG 算法、ViBe 算法、PBAS 算法、本文 GDM 算法。根据结果可见,MOG 算法受抖动影响较大,在动态背景下无法区分运动目标,易将背景误检为前景目标,当运动目标像素点分散时算法只能检测出部分轮廓,在序列 Sidewalk 中,由于运动目标较小,发生抖动时可能丢失运动目标;ViBe 与 PBAS 算法都为非参数模型,对静态背景下抖动场景适应性较强,动态背景下检测性能需提高;由序列 Badminton 可见,ViBe 算法检测易出现鬼影现象,且受一定的抖动影响,但该算法计算量小、检测速度最快;PBAS 算法基于像素点自适应更新,受抖动影响最小,同时运动目标检测效果较优,最能接近真实情况,但该算法计算量最大、对于硬件要求高。相比本文算法受抖动干扰最小,所检测目标轮廓优于 MOG 算法,误检点较少同时计算量远小于 PBAS 算法,综合效果较优。

为更详细描述算法性能,采用单位时间内处理

帧数与系统测评指标作对比,公式如下:

$$f_{\text{precision}} = \frac{Q_{\text{TP}}}{Q_{\text{TP}} + Q_{\text{FP}}}, f_{\text{recall}} = \frac{Q_{\text{TP}}}{Q_{\text{TP}} + Q_{\text{FN}}}, \quad (12)$$

$$\eta = 2 \times \frac{f_{\text{precision}} \times f_{\text{recall}}}{f_{\text{precision}} + f_{\text{recall}}}$$

式中:  $f_{\text{precision}}$  为精确率;  $Q_{\text{TP}}$  为检测到正确前景点数;  $Q_{\text{FP}}$  为检测错误前景数;  $f_{\text{recall}}$  为召回率;  $Q_{\text{FN}}$  为被误检为背景的前景数;  $\eta$  为精确率与召回率的调和均值,越接近 1 评价度越高<sup>[17]</sup>。表 1 为 4 种算法的评价结果,由表可知:本文算法综合评价指标  $\eta$  值优于 MOG 与 ViBe 算法,处理速度高于 PBAS 算法,算法计算量较小,运算处理速度较快,可适用于抖动视频中运动目标检测。

### 4 结 论

针对摄像机监控过程中因抖动造成像素点偏移而无法准确提取运动目标的情况,使用分块灰度处理方式进行运动矢量估计,通过离散化的决策机制有效剔除灰度变化低与存在局部运动的区域,提高了全局偏移量估计精度。对于校正后序列,通过使用背景差分与连续帧间差分法融合策略,减弱差分过程中环境与光照变化的影响,更全面地提取了运动目标。实验表明:本文算法在视频序列抖动场景综合检测性能评价较高,运算量较小,对硬件需求低,有实际应用价值。后续将从阈值分割方面研究,保证分割效果的同时进一步加快算法处理速度。

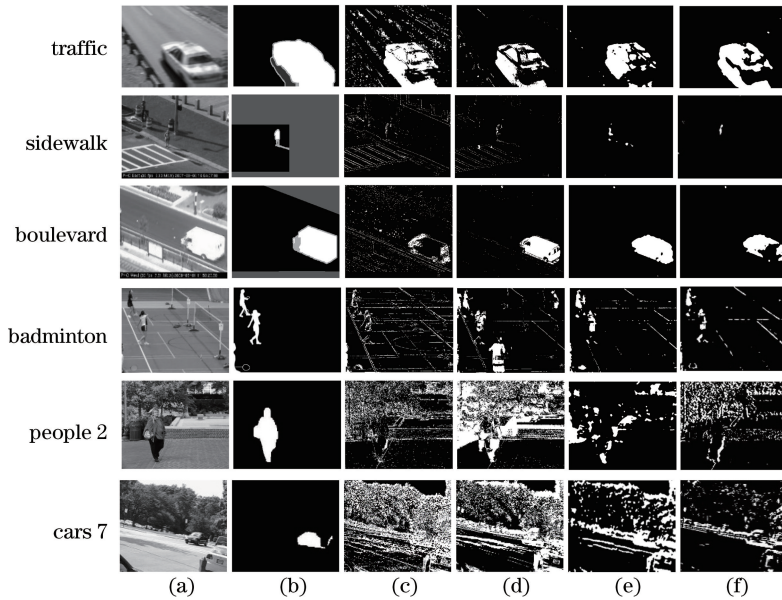


图5 Change detection 数据集测试结果。(a)当前帧;(b)真实值;(c) MOG 算法;(d) ViBe 算法;  
(e) PBAS 算法;(f)本文 GDM 算法

Fig. 5 Test results of the change detection dataset. (a) Current frame; (b) ground truth; (c) MOG;  
(d) ViBe; (e) PBAS; (f) proposed GDM

表1 4种算法评价结果

Table 1 Appraisal results of four algorithms

Video	Size	Speed / (frame · s <sup>-1</sup> )				$\eta$			
		MOG	VIBE	PBAS	GDM	MOG	VIBE	PBAS	GDM
Traffic	320×240	43.43	57.20	18.25	44.78	0.535	0.632	0.653	0.613
Sidewalk	352×240	41.26	55.82	17.34	41.96	0.246	0.308	0.432	0.386
Boulevard	352×240	40.15	54.54	17.20	41.50	0.514	0.712	0.700	0.526
Badminton	720×480	18.10	22.79	8.81	19.84	0.402	0.595	0.689	0.601
People 2	320×240	39.83	53.18	17.03	39.97	0.218	0.269	0.357	0.312
Cars 7	320×240	40.09	53.93	17.16	40.97	0.213	0.226	0.307	0.289

## 参 考 文 献

- [1] Sajid H, Cheung S. Universal multimode background subtraction[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 26(7): 3249-3260.
- [2] Celik T, Kusetogullari H. Solar-powered automated road surveillance system for speed violation detection [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 57(9): 3216-3227.
- [3] St-Charles P L, Bilodeau G A, Bergevin R. SuBSENSE: a universal change detection method with local adaptive sensitivity[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 24(1): 359-373.
- [4] Liao J, Dong R, Li B, *et al.* A non-parametric motion model for foreground detection in camera jitter scenes [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(6): 677-681.
- [5] Mo S W, Deng X P, Wang S, *et al.* Motion object detection algorithm based on improved visual background extractor[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0615001.
- [6] Zhang S P, Qi Y K, Jiang F, *et al.* Point-to-set distance metric learning on deep representations for visual tracking[J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 19(1): 187-198.
- [7] Huynh-The T, Banos O, Lee S, *et al.* NIC: a robust background extraction algorithm for foreground detection in dynamic scenes [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 27(7): 1478-1490.
- [8] Tu L F, Peng Q, Zhong S D. A moving object detection method adapted to camera jittering [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2013, 35(8): 1914-1920.

- 屠礼芬, 彭祺, 仲思东. 一种适应相机抖动的运动目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(8): 1914-1920.
- [9] Wu H, Deng H B. A video stabilization method based on sub-block gray projection [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(4): 406-411.  
吴浩, 邓宏彬. 一种基于分块灰度投影运动估计的视频稳像方法[J]. 兵工学报, 2013, 34(4): 406-411.
- [10] Tang Y C, Yang X D. A method of moving target detection based on scaling background [C] // International Conference on Intelligent and Interactive Systems and Applications. Cham: Springer, 2017: 337-344.
- [11] Chen Q, Sheng H X, Zhang Z, *et al.* Moving object detection under infrared light mutation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 111005.  
陈强, 盛惠兴, 张卓, 等. 红外光照突变下的运动目标检测[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 111005.
- [12] Xue Y, Jiang T B, Zhang X Y. Vision based extraction method for navigation line of substation inspection robot [J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(12): 13-18.  
薛阳, 江天博, 张晓宇. 基于视觉的变电站巡检机器人导航线提取方法[J]. 广东电力, 2015, 28(12): 13-18.
- [13] Barnich O, van Droogenbroeck M. ViBe: a universal background subtraction algorithm for video sequences [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 20(6): 1709-1724.
- [14] Gan M G, Chen J, Liu J, *et al.* Moving object detection algorithm based on three-frame-differencing and edge information[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 32(4): 894-897.  
甘明刚, 陈杰, 刘劲, 等. 一种基于三帧差分 and 边缘信息的运动目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(4): 894-897.
- [15] Wang Z H, Liao K, Xiong J L, *et al.* Moving object detection based on temporal information[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(11): 1403-1407.
- [16] Kirichuk V S, Kosykh V P, Popov S A, *et al.* Suppression of a quasi-stationary background in a sequence of images by means of interframe processing [J]. Optoelectronics Instrumentation and Data Processing, 2014, 50(2): 109-117.
- [17] Chen H Y, Qie L Z, Yang D D, *et al.* Visual background extraction algorithm based on superpixel information feedback[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0715001.  
陈海永, 郗丽忠, 杨德东, 等. 基于超像素信息反馈的视觉背景提取算法[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0715001.