

基于改进拉普拉斯-高斯算子的阴影消除方法

马永杰*, 陈梦利

西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃 兰州 730070

摘要 在复杂场景中, 阴影严重影响目标检测的准确度, 传统目标检测方法易将运动阴影误检为运动目标。针对这一问题, 提出了改进的拉普拉斯-高斯(log)算子与 ViBe 算法相结合的视频阴影消除算法。在 log 算子检测的基础上, 采用二维数字滤波器进行滤波检测; 将二维数字滤波器的系数矩阵旋转 180° 以创建卷积核; 利用二维卷积对创建的卷积核与输入的图像矩阵进行卷积, 实现对图像的边缘检测, 最后利用改进的 log 算子提取外轮廓边缘和前景目标边缘, 二者相减得到内部边缘, 即消除阴影的运动目标边缘。实验结果表明, 改进的算法可有效地消除阴影, 同时提高了算法的鲁棒性。

关键词 图像处理; 运动目标检测; 阴影消除; 改进的 log 算子; ViBe 算法

中图分类号 TP391.9

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.121004

Shadow Removal Method Based on Improved Laplace-Gaussian Operator

Ma Yongjie*, Chen Mengli

College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract Shadows seriously affect the target detection accuracy in a complex scene. A traditional target-detection method can easily misidentify moving shadows as moving targets. To solve this problem, this study proposes an improved video-shading removal algorithm combining the Laplace-Gaussian (log) operator with the ViBe algorithm. A two-dimensional (2D) digital filter based on the log operator was used for filter detection. The coefficient matrix of the 2D digital filter was rotated by 180° to create a convolution kernel, which was convoluted with the input image matrix to achieve image edge detection. Finally, the improved log operator was used to extract the outer contour and foreground target edges. The two edges were subtracted to obtain the inner edge, which was the moving target edge with the shadow eliminated. Experiment results reveal that the improved algorithm is robust and can effectively eliminate shadows.

Key words image processing; moving target detection; shadow elimination; improved log operator; ViBe algorithm

OCIS codes 100.2000; 150.1135; 330.4150

1 引言

运动目标检测技术需从视频序列中提取精确的前景目标, 阴影的存在导致检测得到的运动目标形状不准确, 影响后续分类、跟踪和识别等操作^[1-2]。当物体遮挡场景的光源时, 就会投射成阴影, 而阴影与运动目标有相同的运动规律, 检测运动目标时易发生目标误检、目标连接和目标丢失等问题, 因此阴影是运动目标检测必须解决的问题。

近年来, 阴影消除逐渐成为智能监控领域研究

的热点。目前常用的阴影消除方法有很多, 大致可分为两大类: 基于确定性方法和基于统计学方法^[3-5]。董月等^[6]采用深度学习的方法来检测阴影, 以分类网络 ResNeXt101 作为特征提取模块, 结合 U-Net 设计全新的单网络结构 Attention Res-Net, 该结构对于不同场景和不同光照条件下获取的阴影图像都有较好的阴影检测效果。陈嵘等^[7]提出在 RGB(Red, Green, Blue) 颜色空间下根据颜色一致性特征消除阴影, 再建立像素的光照模型, 计算阴影像素与背景像素的亮度比值, 根据区间的置信

收稿日期: 2019-09-17; 修回日期: 2019-10-09; 录用日期: 2019-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(41461078)

* E-mail: myjmyj@163.com

度剔除误检的前景像素。方岚等^[8]先利用 YCbCr 色彩空间得到阴影区域,再利用完全局部二值模式 (CLBP)算子提取阴影区域的详细纹理特征以进一步检测与去除阴影。武明虎等^[9-11]利用 HSV(Hue, Saturation, Value)颜色空间检测阴影,并与纹理特征相结合得到去除阴影后的运动目标。谢申汝等^[12]提出了一种改进的 YUV_Vibe 融合算法,将 YUV 颜色信息特征与 Vibe 相融合消除了阴影影响,该模型有效地减少了阴影误检测率。MacEdo 等^[13]将输入的图像转换到不同的颜色空间作为多通道二值化的基础,以检测图像中潜在的阴影区域。Khare 等^[14]提出了一种新的阴影检测和去除阈值,即变异系数,其中以 Daubechies 复小波变换系数作为目标特征,同时使用了 HSV 颜色空间进行阴影检测及去除。

基于确定性方法对先验知识的依赖性强,计算量大,因此目前大多数阴影消除方法多采用后者,即基于统计学方法,该方法多是利用颜色空间或纹理特征来消除阴影。本文采用的拉普拉斯(Laplace)-高斯(log)算子阴影消除法是基于纹理特征的方法,log 算子去噪性能优,边缘连续性好,可提取对比度较弱的边缘点,但在边缘定位精度和消除噪声间存在矛盾,不能很好地平衡这两者间的关系。

本文提出一种改进的 log 算子与 ViBe 算法相结合的阴影消除算法。先通过 ViBe 算法建立背景模型获取运动目标前景。再针对 ViBe 算法存在阴影前景的问题,采用改进的 log 算子进行边缘检测。在原来拉普拉斯-高斯算子检测的基础上,利用二维数字滤波器再次进行滤波检测;将二维数字滤波器的系数矩阵旋转 180° 以创建卷积核;利用二维卷积对卷积核与输入的图像矩阵进行卷积,以此对图像

进行边缘检测。最后利用改进的 log 算子提取外轮廓边缘和前景目标边缘,将外轮廓边缘减去前景目标边缘得到内部边缘,即没有阴影的运动目标边缘。

2 改进 log 算子的阴影消除

阴影消除过程主要包含阴影检测^[15-17]和阴影去除两个方面。算法的整体流程:通过 ViBe 算法进行背景建模,从而检测运动目标区域(包含阴影),利用改进的 log 算子实现边缘检测,最后消除阴影。消除阴影时对当前帧图像进行阴影评估,若评估结果未达到消除阴影的标准,则继续读取图像帧,反之进行阴影消除。

2.1 运动目标检测

对读入的视频帧采用 ViBe 算法^[18]进行背景建模以提取运动目标。ViBe 算法是一种基于像素的运动目标检测算法,基本思想是为每个像素存储一组过去在相同位置或邻近位置获取的值,再将该集合与当前像素值进行比较,以确定该像素是否属于背景,并从背景模型中随机选择要替换的值来适应模型。ViBe 算法的具体步骤如下。

1) 背景建模。利用第一帧图像 P 来构建 N 幅背景样本,即 $M(x, y) = \{m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_N\}$, 其中 m_i 为 (x, y) 的 8 邻域随机采样值, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

2) 前景检测。计算当前图像中像素到背景样本的距离,并设定半径阈值 R 。如果距离小于 R ,并且数量大于个数匹配阈值 T ,则像素为背景,反之为前景。

3) 背景更新。如果当前像素被判定为背景像素,则有 $1/\varphi$ 的概率更新背景模型,同时也有 $1/\varphi$ 的概率更新该像素邻域中的某一像素,其中 φ 为时间采样因子。

经 ViBe 算法得到的运动目标区域如图 1 所示。

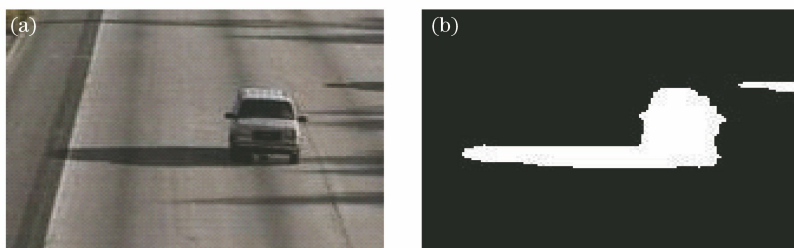


图 1 运动目标检测。(a)原始图;(b)前景目标区域

Fig. 1 Moving target detection. (a) Original image; (b) foreground target area

2.2 log 算子的改进

log 算子是基于 Laplace 算子的一种改进算子。log 算子先对图像进行高斯卷积滤波以降噪,再采用 Laplace 算子对处理后的图像进行边缘检测。其

中高斯卷积函数 $G(x, y)$ 的表达式为

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

式中: x 、 y 分别为像素点的列、行坐标; σ 为标

准差。

原始图像 $f(x, y)$ 先与高斯函数 $G(x, y)$ 进行卷积得到平滑图像 $g(x, y)$, 对 $g(x, y)$ 求解卷积的 Laplace 算子微分, 即

$$\begin{aligned} g(x, y) &= G(x, y) \otimes f(x, y), \\ \nabla^2 [f(x, y) \otimes G(x, y)] &= f(x, y) \otimes \nabla^2 G(x, y), \\ \nabla^2 G(x, y) &= \log(x, y) = \\ &= \left(\frac{x^2 + y^2 - 2\sigma^2}{\sigma^4} \right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

式中: \otimes 为卷积符号; ∇ 为微分符号; \log 为 \log 算子。

由于 \log 算子对图像进行边缘检测时, 检测得到的边缘不是很光滑且噪声较多, 因此在使用 \log 算子检测的基础上, 再次利用二维数字滤波器 (filter2) 进行滤波检测, 检测流程如下。

1) 经滤波后的信号 $y(n)$ 可表示为

$$y(n) = h(n) \times x(n) = \sum_{k=0}^{K-1} h(k) \times x(n-k), \quad (3)$$

式中: $h(n)$ 为非递归型 (FIR) 滤波系数, $h(k) = \log(x, y)$; $x(n)$ 为输入信号; K 为长度, 阶数为 $K-1$ 。将滤波器系数矩阵旋转 180° 以创建卷积核, 即

$$\mathbf{H}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{M}_i \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: \mathbf{H}_i 为 FIR 滤波系数矩阵旋转 180° 创建的卷积核; \mathbf{M}_i 为边缘算子, \mathbf{M}_i 可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{M}_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_4 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

2) 利用二维卷积来实现滤波操作, 表达式为

$$\mathbf{C}_i(s, t) = \sum_{m=0}^{M_r-1} \sum_{n=0}^{M_c-1} \mathbf{H}_i(m, n) \otimes \mathbf{B}(s-m, t-n), \quad (6)$$

式中: $\mathbf{C}_i(s, t)$ 为滤波操作后的结果, $i=1, 2, 3, 4$; M_r, M_c 分别为 \mathbf{H}_i 的行数、列数; s, t 满足 $0 \leq s < M_r + N_r - 1, 0 \leq t < M_c + N_c - 1, N_r, N_c$ 分别为输入图像矩阵 \mathbf{B} 的行数、列数。

3) 将滤波后的数据进行相加, 表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{S} &= \sum_{i=1}^4 \mathbf{C}_i(s, t) = \\ &= \sum_{i=1}^4 \sum_{m=0}^{M_r-1} \sum_{n=0}^{M_c-1} \mathbf{H}_i(m, n) \otimes \mathbf{B}(s-m, t-n), \end{aligned} \quad (7)$$

同时进行阈值分割, 得到 \mathbf{B} 的边缘轮廓, 式中, \mathbf{S} 为滤波后的数据相加的结果。

2.3 阴影判断

利用二值图像的前景面积进行阴影判断, 面积公式为

$$A = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^w [S_{ij}(x, y) = 1], \quad (8)$$

式中: A 为面积; $S_{ij}(x, y) = 1$ 为二值图像的前景图像点; l, w 分别为待检测图像的长、宽。

使用前景面积进行阴影判断的方法如下。

1) 经形态学操作后的图像与相除图像的前景图像相减得到图像 S 。利用 (8) 式得到 S 图像面积 A_s 、经形态学操作后的图像面积 A_1 及相除图像的前景图像面积 A_2 。

2) 计算两张图像的重叠区域面积: $A_o = A_2 - A_s$ 。

3) 计算经形态学操作后的图像面积与重叠区域面积的差值, $C_1 = A_1 - A_o$; 相除图像的前景图像面积与重叠区域面积的差值, $C_2 = A_2 - A_o$ 。

4) 若 $C_1 < C_2$, 则输出经形态学操作后的图像, 反之输出相除图像的前景图像。

2.4 阴影消除

2.4.1 提取外轮廓边缘

利用改进后的 \log 算子对前景目标区域进行边缘检测, 而不是对整个图像进行边缘检测。原始图像如图 2(a) 所示; 原始图像与背景相除得到图像 \mathbf{D}_m , 如图 2(b) 所示; 对 \mathbf{D}_m 进行二值化处理后, 对前景目标区域 \mathbf{C}_m 进行形态学闭合操作以填补空洞, 再进行中值滤波操作以去除孤立点得到 \mathbf{C}_m , 如图 2(c) 所示; 对 \mathbf{C}_m 使用改进后的 \log 算子进行边缘检测, 得到外部轮廓边缘 \mathbf{E}_m , 如图 2(d) 所示, 表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_m &= \sum_{i=1}^4 |\text{filter2}(\mathbf{M}_i, \mathbf{C}_m)|, \\ \mathbf{E}_m(x, y) &= \begin{cases} \mathbf{1}, & \mathbf{E}_m(x, y) = \mathbf{1} \ \& \ \mathbf{C}_m(x, y) = \mathbf{1} \\ \mathbf{0}, & \text{other} \end{cases}. \end{aligned} \quad (9)$$

为了得到 \mathbf{C}_m 滤波后的数据, 以此来进行边缘轮廓检测, 具体检测流程如 2.2 节所示。

2.4.2 提取前景目标边缘

图 2(e) 为原始图像与 \mathbf{E}_m 相减后经灰度化转换所得图像 \mathbf{S}_n 。采用改进的 \log 算子对 \mathbf{S}_n 进行边缘检测, 得到前景目标边缘 \mathbf{E}_n , 如图 2(f) 所示, 表达式为

$$\mathbf{E}_n = \sum_{i=1}^4 |\text{filter2}(\mathbf{M}_i, \mathbf{S}_n)|,$$

$$\mathbf{E}_n(x, y) = \begin{cases} \mathbf{1}, & \mathbf{E}_n(x, y) = \mathbf{1} \ \& \ \mathbf{S}_n(x, y) = \mathbf{1} \\ \mathbf{0}, & \text{other} \end{cases}.$$
(10)

为了得到 \mathbf{S}_n 滤波后的数据,以此来进行边缘轮廓检测,具体检测流程如 2.2 节所示。

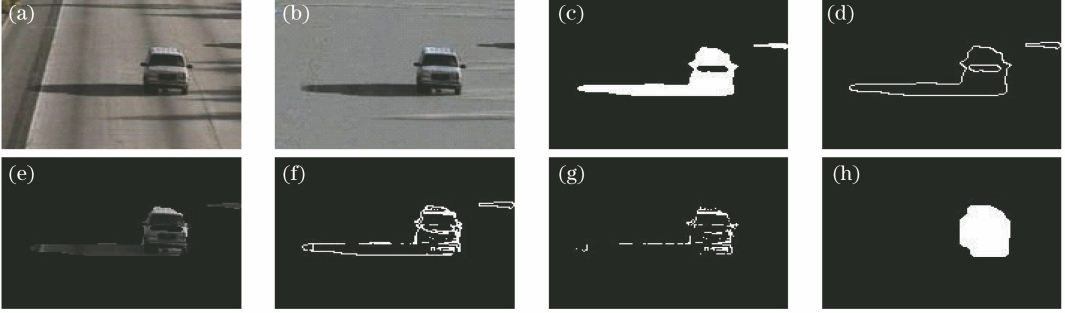


图 2 改进的 log 算子提取边缘轮廓。(a)原始图像;(b) \mathbf{D}_m ;(c) \mathbf{C}_m ;(d) \mathbf{E}_m ;(e) \mathbf{S}_n ;(f) \mathbf{E}_n ;(g) \mathbf{E}_t ;(h)经形态学操作后的图像
Fig. 2 Improved log operator to extract edge contour. (a) Original image; (b) \mathbf{D}_m ; (c) \mathbf{C}_m ; (d) \mathbf{E}_m ; (e) \mathbf{S}_n ;
(f) \mathbf{E}_n ; (g) \mathbf{E}_t ; (h) image after morphological operation

2.4.4 内部边缘填充

提取前景目标的内部边缘后,已基本消除前景区域的阴影边缘,再采用形态学操作的方法对车辆内部边缘进行填充。具体实现过程如下。

膨胀运算:对前景目标边缘 \mathbf{E}_t 进行膨胀操作得到结果 \mathbf{E} ,再进行中值滤波,表达式为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_t \oplus K_1,$$

$$\mathbf{E}_1 = \text{midfilter2}(\mathbf{E}),$$
(12)

式中: \oplus 为膨胀操作,膨胀操作的目的是扩大 \mathbf{E}_t 的边缘轮廓; K_1 为一个长为 5 pixel 的正方形结构元素; \mathbf{E}_1 为中值滤波后的结果;midfilter2 为一个中值滤波器,为了滤除一些孤立的噪声点,使得图像更加平滑。

闭运算:对 \mathbf{E}_1 先进行膨胀后,再进行腐蚀操作,表达式为

$$\mathbf{E}_2 = (\mathbf{E}_1 \oplus K_2) \ominus K_2,$$
(13)

可消除小的空洞,并填补轮廓线中的断裂,式中: \mathbf{E}_2 为对 \mathbf{E}_1 闭运算后的结果; \ominus 为腐蚀操作; K_2 为半径 r 的结构元,实验设置 $r=7$ 。

开运算:对 \mathbf{E}_2 先进行腐蚀后,再进行膨胀操作,表达式为

$$\mathbf{E}_3 = (\mathbf{E}_2 \ominus K_2) \oplus K_2,$$
(14)

可使操作对象的轮廓变得光滑,式中, \mathbf{E}_3 是对 \mathbf{E}_2 开运算后的结果。

最后,经形态学操作后的图像,如图 2(h)所示,

2.4.3 提取内部边缘

从 \mathbf{E}_n 中减去 \mathbf{E}_m 提取最终目标内部边缘 \mathbf{E}_t ,如图 2(g)所示,表达式为

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_n - \mathbf{E}_m,$$

$$\mathbf{E}_t(x, y) = \begin{cases} \mathbf{1}, & \mathbf{E}_n(x, y) = \mathbf{1} \ \& \ \mathbf{E}_m(x, y) = \mathbf{1} \\ \mathbf{0}, & \text{other} \end{cases}.$$
(11)

可以看到阴影被彻底消除。

然而,经过一系列的形态学操作后使得原始图像轮廓被扩大,很有可能在运动目标较多时会出现目标连接的情况。因此,利用 ViBe 算法得到的运动目标前景与改进的 log 算子消除阴影的前景并进行与操作,以此得到更为准确的前景目标。

3 改进 log 算子的阴影消除算法的实现步骤

所提算法的流程如图 3 所示,实现步骤如下。

1) 通过 ViBe 算法对视频帧第一帧图像 P 的每个像素 (x, y) 建立一个大小为 N 的背景模型,即 $M(x, y) = \{m_1, m_2, \dots, m_N\}$ 。

2) 从视频帧第一帧开始进行阴影判断,在相除图像中利用阈值分割及形态学操作得到 \mathbf{C}_m ,利用(7)式和(9)式进行边缘检测,得到 \mathbf{E}_m 。

3) 得到当前帧 I_i 与步骤 2) 得到的前景区域 \mathbf{E}_m 相减得到图像 \mathbf{S}_n 并进行灰度化转化,即 $\mathbf{S}_n = X_{\text{Gray}}(I_i - \mathbf{E}_m)$ 。利用(7)式和(10)式进行边缘检测,得到 \mathbf{E}_n 。

4) 将 \mathbf{E}_n 与 \mathbf{E}_m 相减得到内部边缘 \mathbf{E}_t 。

5) 采用形态学操作对内部边缘进行填充以消除阴影,得到完整的前景目标。

6) 检测为背景点的像素参与背景模型更新,有 $1/\varphi$ 的概率使用当前像素值随机更新该点或其邻域

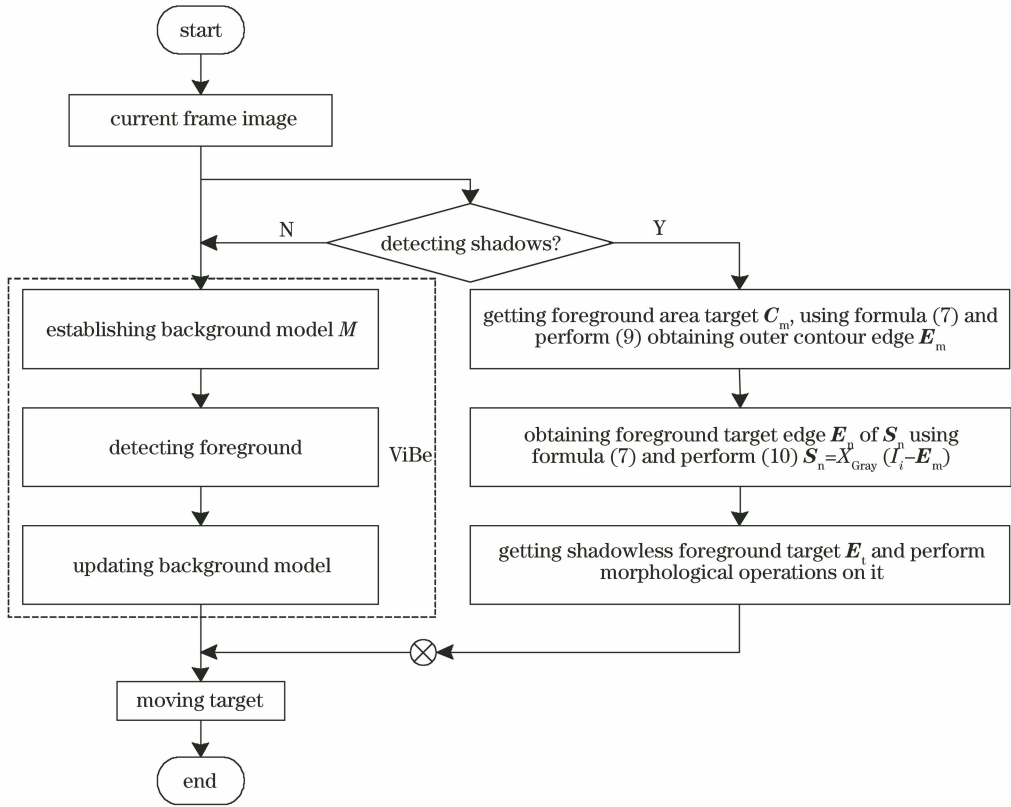


图3 所提算法的流程图

Fig. 3 Flow chart of proposed algorithm

中的一个样本值。

7) 将最终图像与 ViBe 算法检测的前景区域进行与操作, 得到去除阴影的前景目标后, 算法结束。

4 实验结果与分析

4.1 实验验证

采用 MATLAB R2016a 对算法进行编程, 实验环境为 Windows10 64 位操作系统、Inter(R) Core (TM) i5-7500 CPU 处理器、16 GB 内存。为了验证所提算法的实用性和鲁棒性, 选取两组含有阴影干扰的视频进行实验: 一组视频中的阴影并不明显, 即 Campus_raw 视频帧; 一组视频中的阴影非常明显, 即 Highway I 视频帧。将所提算法与直方图(Hist)阴影去除法、HSV 阴影去除法及 log 算子阴影去除法进行比较。实验中设置 $N = 20$, $R = 15$, $T = 2$, $\varphi = 5$ 。

所提算法的处理过程如图 4 所示。当仅用 ViBe 算法进行运动目标检测时, 从图 4(b) 可以看到明显的阴影前景。原始的 log 算子去除阴影效果如图 4(c) 所示, 可以清晰看到前景目标中仍残留阴影前景。改进后的 log 算子去除阴影效果好于原始 log 算子。从图 4(d) 可以看到, 前景目标比

图 4(b) 要膨胀得多, 因此将改进的 log 算子与 ViBe 算法相结合以得到所提算法, 其效果如 4(e) 所示, 可以看到所提算法可消除阴影, 前景目标没有发生膨胀。

第一组实验采用 Campus_raw 视频帧, 结果如图 5 所示, 其中 picture1 和 picture2 分别为视频帧的第 380 帧和第 410 帧。图 5(a) 为原始视频帧, 可以看到视频中的阴影并不明显, 这从图 5(b) 前景检测结果中可以看到, 因此对于这类视频帧的阴影消除的难度会变得比较大。图 5(c) 采用 Hist 阴影去除法, 虽将阴影去除, 但目标的内部空洞变得更大; 图 5(d) 采用 HSV 阴影去除法, 虽起到消除阴影的作用, 但去除效果有限; 图 5(e) 采用 log 算子阴影去除法, 可以看到阴影确实被消除但也存在噪声, 同时运动目标还有所连接。所提算法的检测效果如图 5(f) 所示, 不仅没有图 5(c) 的空洞, 也没有图 5(e) 将目标连接在一起的现象, 同时消除了阴影。

第二组实验采用 Highway I 视频帧, 结果如图 6 所示。图 6(a) 为原始视频帧, 其中 picture1、picture2 和 picture3 分别为第 100 帧、第 158 帧和第 309 帧。与 Campus_raw 视频帧明显不同的是, Highway I 视频帧中存在明显的阴影。

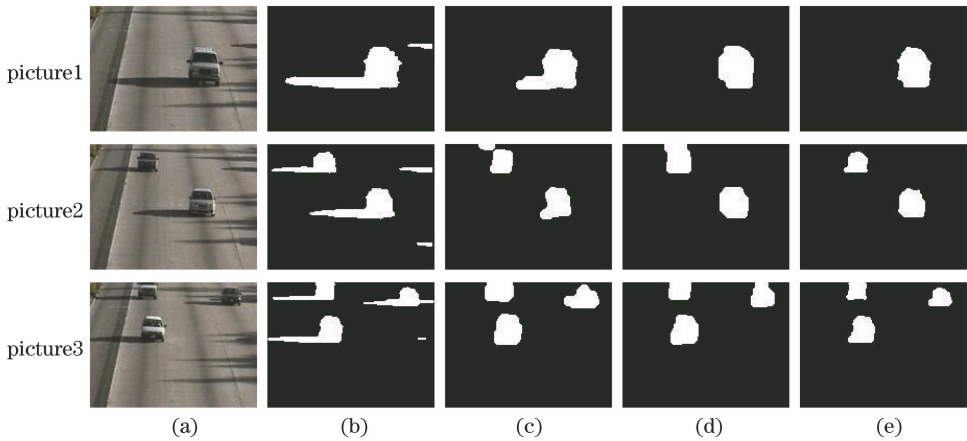


图 4 所提算法的处理过程。(a)原始视频帧;(b) ViBe 算法检测;(c) log 算子;(d)改进 log 算子;(e)所提算法
 Fig. 4 Process of proposed algorithm. (a) Original video frame; (b) ViBe algorithm detection; (c) log operator; (d) improved log operator; (e) proposed algorithm

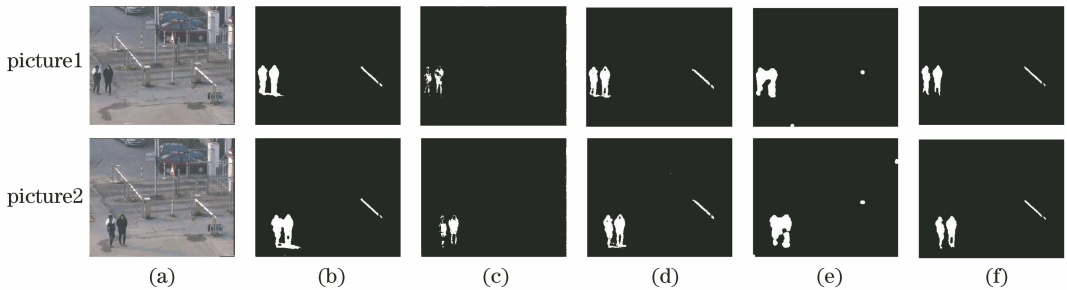


图 5 Campus_raw 视频帧的阴影消除结果对比。(a)原始视频帧;(b)前景检测;(c) Hist 阴影去除法;
 (d) HSV 阴影去除法;(e)所提算法

Fig. 5 Comparison of shadow removal results of Campus_raw video frames. (a) Original video frame; (b) foreground detection; (c) Hist shadow removal method; (d) HSV shadow removal method; (e) proposed algorithm

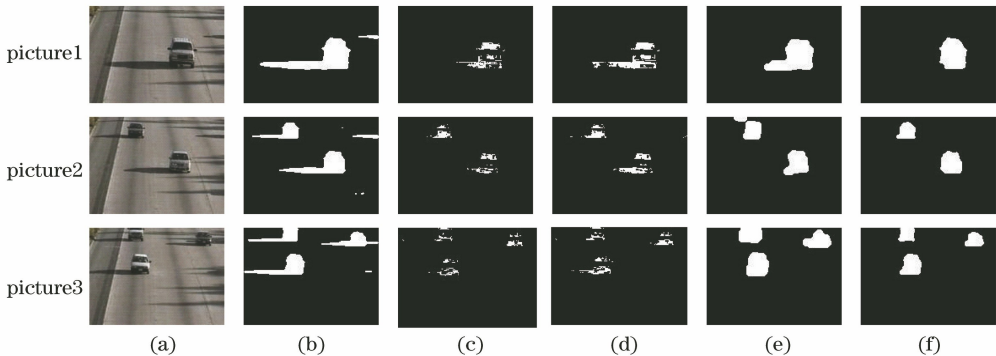


图 6 Highway I 视频帧的阴影消除结果对比。(a)原始视频帧;(b)前景检测;(c) Hist 阴影去除法;
 (d) HSV 阴影去除法;(e) log 阴影去除法;(f)所提算法

Fig. 6 Comparison of shadow removal results of Highway I video frames. (a) Original video frame; (b) foreground detection; (c) Hist shadow removal method; (d) HSV shadow removal method; (e) log shadow removal method; (f) proposed algorithm

从图 6(c)可以看到, Hist 阴影去除法的确将阴影去除,但也使得运动目标内部的空洞比较大,原因在于 Hist 阴影去除法中是固定选取阈值,因此,不能很好地适应不同场景。相较于 Hist 阴影去除法,

HSV 阴影去除法对于阴影去除的效果并不是很明显,如图 6(d)所示,但运动目标中并未存在大量空洞,这优于 Hist 阴影去除法。图 6(e)为 log 算子去除阴影的检测结果,可以看到对车辆进行检测时,阴

影前景问题只有很小改善,不能完全消除阴影,但没有出现噪声。图 6(f)为所提算法消除阴影的检测结果,与图 6(b)相比,所提算法可完全消除阴影;与图 6(c)相比,所提算法检测的前景目标并未存在空洞;与图 6(d)相比,所提算法很好地消除阴影;与图 6(e)对比,所提算法在轮廓上更为光滑,也使得检测结果更为准确,消除了噪声和阴影。

由以上两组实验可以得到,相比于前三种算法,所提算法兼顾了行人检测及车辆检测,具有较好的鲁棒性。

4.2 算法性能评估

为了验证所提算法对阴影去除的有效性与可行性,及实验结果的可靠性,采用文献[11]和文献[19]中的阴影检测率 η 、阴影判别率 ξ 、平衡错误率(BER)和正确率(ACC)作为评价算法性能的指标,具体定义分别为

$$\eta = \frac{T_{PS}}{T_{PS} + F_{NS}} \times 100\%,$$

$$\xi = \frac{T_{PFI}}{T_{PF} + F_{NF}} \times 100\%,$$

$$f_{BER} = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{T_{PS}}{T_{PS} + F_{NS}} + \frac{T_{PF}}{T_{PF} + F_{NF}} \right) \right],$$

$$f_{ACC} = \frac{T_{PS} + T_{PF}}{T_{PS} + F_{NS} + T_{PF} + F_{NF}}, \quad (15)$$

式中: S 为阴影; F 为前景; T_{PS} 为被正确识别为阴影的个数; F_{NS} 为阴影未被正确识别的个数; T_{PF} 为被正确识别为前景的个数; F_{NF} 为前景未被正确识别

的个数; T_{PFI} 为前景个数总和减去误检为阴影的个数。不同阴影消除算法结果比较,如表 1 所示,可以看到, η 和 ξ 值越大,说明阴影检测的正确率越高,分类效果越好。

表 1 不同阴影消除算法结果比较

Video	Index	elimination algorithms				unit: %
		Hist	HSV	log	Proposed	
Campus_raw	η	60.5	61.2	58.3	87.8	
	ξ	50.2	62.0	62.3	89.7	
Highway I	η	67.0	70.3	63.7	77.6	
	ξ	75.2	77.1	73.4	81.7	

从表 1 可以看到,在 Campus_raw 视频帧中,所提算法的阴影检测率和阴影判别率与其他三类对比算法相比均有极大提高。与 log 算子阴影去除法相比,所提算法的阴影检测率和阴影判别率提高幅度均超过 20 个百分点。所提算法在 Highway I 视频帧中的阴影检测率和阴影判别率也相应地有所提高,但却没有在 Campus_raw 视频帧中提高的多。从图 5(a)和图 6(a)就可看到,Campus_raw 视频帧中的阴影比 Highway I 中要浅显得多,所提算法却在 Campus_raw 视频帧中的阴影检测率和判别率都高于 Highway I,由此可见,所提算法对阴影不明显的视频帧的去除效果要优于阴影明显的视频帧。

从(15)式可以看到,BER 值越小且 ACC 值越大,说明算法性能越好。图 7 为两组视频帧下 4 种算法的 BER 和 ACC 柱状图。

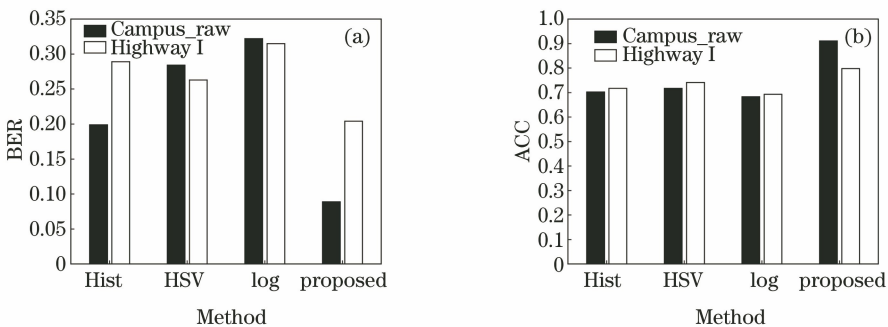


图 7 两组视频下 4 种算法的柱状图。(a) BER;(b) ACC

Fig. 7 Histograms of four algorithms in two groups of videos. (a) BER; (b) ACC

图 7 中实心柱状表示 Campus_raw 视频帧,空心柱状表示 Highway I 视频帧。图 7(a)为 BER 柱状图,图 7(b)为 ACC 柱状图,横坐标依次是 Hist 阴影去除法、HSV 阴影去除法、log 算子阴影去除法和所提算法。

为了验证所提算法的运算效率,以监控应用中的实时性,分别采用 4 种算法对两组视频进行多次

实验,统计每种算法对不同视频帧的处理速度,结果如表 2 所示。视频帧 Campus_raw 的分辨率为 $288 \text{ pixel} \times 352 \text{ pixel}$, Highway I 视频图像的分辨率为 $120 \text{ pixel} \times 160 \text{ pixel}$ 。从表 2 可以看到,所提算法的运算速度虽然比 Hist 阴影去除法和 log 算子阴影去除法低,但也能够保证实时性。

从图 7(a)可以看到,不管是在 Campus_raw 视

表2 两组视频的处理速度对比

Table 2 Comparison of processing speed of video between two groups unit: frame \cdot s $^{-1}$

Video	Hist	HSV	log	Proposed
Campus_raw	4.14	1.83	3.96	2.60
Highway I	11.34	6.92	9.05	6.98

视频帧中还是在 Highway I 视频帧中,所提算法的 BER 值低于其他三类算法。尤其是在 Campus_raw 视频帧中,所提算法的 BER 值比 log 算子阴影去除法低了近 20%。如图 7(b)所示,所提算法比其他三类算法均有所提高,尤其是在 Highway I 视频帧中的 ACC 比 log 算子阴影去除法提高了 40%,在视频 Campus_raw 中的正确率比 log 算子阴影去除法提高了近 20%。因此,相较于其他三类算法,所提算法的综合性能更高,鲁棒性更强。

5 结 论

为了有效地去除视频中运动目标的阴影被检测为前景的问题,提出了改进的 log 算子与 ViBe 算法相结合的阴影消除算法,并分别与 Hist 阴影去除法、HSV 阴影去除法和 log 算子阴影去除法进行实验对比,定量评估各自的实验结果。实验结果表明:与其他算法相比,所提算法可有效地消除复杂场景中行人及车辆的运动阴影,并能够改善弱阴影的检测效果,从而提高阴影消除方法的综合性能和鲁棒性。在未来工作中,需要寻找更高效的阴影消除方法,在消除阴影的同时也提高算法的速度,满足阴影消除实时性的要求。

参 考 文 献

- [1] Khare M, Srivastava R K, Khare A. Object tracking using combination of Daubechies complex wavelet transform and Zernike moment[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(1): 1247-1290.
- [2] Kaasalainen S, Ruotsalainen L, Kirkko-Jaakkola M, et al. Towards multispectral, multi-sensor indoor positioning and target identification[J]. Electronics Letters, 2017, 53(15): 1008-1011.
- [3] Vicente T F Y, Hoai M, Samaras D. Leave-one-out kernel optimization for shadow detection and removal [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2018, 40(3): 682-695.
- [4] Chen Q, Zhang G P, Yang X B, et al. Single image shadow detection and removal based on feature fusion and multiple dictionary learning [J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77 (14): 18601-

18624.

- [5] Sabri M A, Aqel S, Aarab A. A multiscale based approach for automatic shadow detection and removal in natural images [J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(9): 11263-11275.
- [6] Dong Y, Feng H J, Xu Z H, et al. Attention Res-UNet: an efficient shadow detection algorithm [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(2): 373-381, 406.
董月, 冯华君, 徐之海, 等. Attention Res-UNet: 一种高效阴影检测算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(2): 373-381, 406.
- [7] Chen R, Li P, Huang Y. Moving shadow removal algorithm based on multi-feature fusion [J]. Computer Science, 2018, 45(6): 291-295.
陈嵘, 李鹏, 黄勇. 基于多特征融合的运动阴影去除算法[J]. 计算机科学, 2018, 45(6): 291-295.
- [8] Fang L, Yu F Q. Moving object detection algorithm based on removed ghost and shadow visual background extractor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(13): 131002.
方岚, 于凤芹. 去除鬼影及阴影的视觉背景提取运动目标检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56 (13): 131002.
- [9] Wu M H, Song R R, Liu M. Video shadow elimination algorithm by combining HSV with texture features [J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(10): 1373-1380.
武明虎, 宋冉冉, 刘敏. 结合 HSV 与纹理特征的視頻阴影消除算法 [J]. 中国图象图形学报, 2017, 22 (10): 1373-1380.
- [10] Zhang D G, Chen C, Dong Y, et al. A new method for shadow detection of moving object based on machine learning [J]. Journal of Optoelectronics & Laser, 2018, 29(12): 1317-1324.
张德干, 陈晨, 董悦, 等. 一种基于机器学习的运动目标阴影检测新方法 [J]. 光电子·激光, 2018, 29 (12): 1317-1324.
- [11] Yang C D, Guo S. Improved shadow detection algorithm based on HSV color space [J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39(1): 255-259.
杨春德, 郭帅. 改进基于 HSV 空间的阴影检测算法 [J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(1): 255-259.
- [12] Xie S R, Ye S B, Yang B H, et al. Moving target detection based on improved YUV_Vibe fusion algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 111002.
谢申汝, 叶生波, 杨宝华, 等. 基于改进的 YUV_

- Vibe 融合算法的运动目标检测[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 111002.
- [13] MacEdo M C F, Nascimento V P, Souza A C S. Real-time shadow detection using multi-channel binarization and noise removal[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2018: 225.
- [14] Khare M, Srivastava R K, Jeon M. Shadow detection and removal for moving objects using Daubechies complex wavelet transform [J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(2): 2391-2421.
- [15] Chen H Y, Qie L Z, Liu K. Moving shadow detection based on regional radiation consistency[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0315003.
陈海永, 郗丽忠, 刘坤. 基于区域辐射一致性的移动阴影检测[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0315003.
- [16] Wei H S, Huang W J, Dong Q, et al. Detecting shadows from outdoor videos under moving viewpoints for augmented reality [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2019, 31(6): 997-1006.
- 魏后胜, 黄雯嘉, 董琦, 等. 面向增强现实的移动视点下室外视频的阴影检测[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(6): 997-1006.
- [17] Chen Z, Liu Y L, Yang H Y. Detecting shadows from a single outdoor image based on high order energy function [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2019, 31(7): 1102-1109.
陈卓, 刘艳丽, 杨红雨. 单幅室外图像的高阶能量方程阴影检测算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(7): 1102-1109.
- [18] Barnich O, van Droogenbroeck M. ViBe: a universal background subtraction algorithm for video sequences [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(6): 1709-1724.
- [19] Prati A, Mikic I, Trivedi M M, et al. Detecting moving shadows: algorithms and evaluation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(7): 918-923.