

去除鬼影及阴影的视觉背景提取运动目标检测算法

方岚*, 于凤芹

江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122

摘要 针对视觉背景提取(Vibe)运动目标检测算法存在的鬼影及阴影问题,利用鬼影与背景相似而运动目标与背景差异大的特点,提出了一种基于前景和邻域背景像素直方图相似度匹配的方法,快速检测鬼影并更新背景模型;利用阴影的颜色特性和纹理不变性,提出在亮度和色度分离的 YCbCr 色彩空间中先根据颜色特性得到候选阴影区域,再利用完全局部二值模式算子(CLBP)提取区域的详细纹理特征,进一步检测与去除阴影。在公开视频数据库 CDnet-2012 上进行仿真,仿真结果表明,该算法能够保证运动目标被完整检测的同时快速去除鬼影和阴影,其检测精度比原 Vibe 算法提高了 21.53%。

关键词 图像处理; 运动目标检测; Vibe 算法; 鬼影消除; 阴影检测

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.131002

Moving Object Detection Algorithm Based on Removed Ghost and Shadow Visual Background Extractor

Fang Lan*, Yu Fengqin

School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract Aiming at ghost and shadow problems in the visual background extraction (Vibe) of moving object detection algorithm, an improved algorithm is proposed herein based on the principle that a ghost is similar to the background, whereas a moving object differs from the background. To eliminate such ghosts, the improved algorithm uses pixel histogram similarity matching of the foreground and neighboring background to quickly detect ghosts and update the background model. Based on the color features and texture invariance of the shadow, the improved algorithm functions in the YCbCr color space, in which luminance and chrominance are separated. First, the improved algorithm obtains a candidate shadow region based on the color feature, and then extracts the region's detailed texture feature using a completed local binary pattern to further detect and remove shadows. Herein, a simulation is performed using the CDnet-2012 public video database. Results show that the proposed algorithm can completely detect moving objects in the sample videos while quickly removing ghosts and shadows. The proposed algorithm's detection accuracy is 21.53% higher than that of the existing Vibe algorithm.

Key words imaging proceeding; moving object detection; Vibe algorithm; ghost elimination; shadow detection

OCIS codes 100.2000; 100.2960; 100.3008

1 引言

运动目标检测技术是计算机视觉领域中的一项关键技术,是后续目标跟踪和目标识别等高级处理的基础。运动目标检测算法中最常用的方法是背景差分法,通过对视频图像建立背景模型,当前帧与背景模型作差得到前景图像。Vibe 算法是 Barnich

等^[1-2]提出的基于像素随机样本模型的运动目标检测算法,该算法采用邻域像素创建背景模型,通过对比背景模型和当前输入像素值检测前景。

Vibe 算法具有计算速度快、操作简单和检测效果好等特点,但容易出现鬼影且不能很好地抑制阴影,鬼影和阴影问题会对后续的目标跟踪、分类和识别等操作造成不利影响。针对鬼影检测的问题,文

收稿日期: 2018-11-14; 修回日期: 2019-01-07; 录用日期: 2019-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(61573168)、中央高校基本科研业务费专项资金(JUSRP51733B)

* E-mail: yufq@jiangnan.edu.cn

献[3]中结合帧间信息,加入二次判断策略,提出了一种与帧差法结合抑制鬼影的方法;文献[4]中通过固定较大的更新参数快速消除鬼影,但运动速度较慢的前景目标容易被同化到背景中;文献[5]中在像素点空间传播时进行二次匹配,衡量前景像素点的鬼影程度,并调整疑似鬼影区域的更新速率,以快速消除鬼影。以上方法都在一定程度上有效地抑制了鬼影的产生,但增加了算法复杂度,不利于在实际应用中实时检测。阴影检测方法主要有基于几何模型^[6]和基于阴影特征^[7-8]两类。基于几何模型的方法通常在特定环境条件下使用,且建模计算复杂;基于阴影特征的检测方法通常假设投射阴影亮度低且无显著色度变化,这些方法通常应用于容易进行色度比较的色彩空间中,如归一化的 RGB(red, green, blue)或 HSV(hue, saturation, value)。然而,基于色度恒定的假设通常仅适用于室内场景,当遇到彩色阴影时,这种算法的性能将会降低。

由于鬼影区域与邻近背景区域像素分布相似,而运动目标与背景像素分布差异较大,本文利用这一特性,在 Vibe 算法提取前景的基础上计算前景区域与邻近背景区域像素分布直方图,设立直方图相似度匹配阈值,可有效区分运动目标和鬼影。由于常用的 RGB 色彩空间各分量融合在一起且受亮度的影响较大,HSV 色彩空间转换计算复杂且 H 分量不稳定,本文利用 YCbCr 色彩空间中亮度与色度分离且转换计算简单的特点,在 YCbCr 空间中进行阴影去除。为解决色度信息在室外情况下检测性能降低的问题,本文利用阴影覆盖前后区域纹理不变性,结合纹理和颜色特征的优势,在满足亮度和色度范围内的阴影潜在区域中进一步提取区域的完全局部二值模式算子(CLBP)纹理特征,最终确定并去除阴影区域。

2 改进的 Vibe 算法原理

2.1 Vibe 背景模型

Vibe 算法为每个像素点建立一个背景样本集,样本数为 N ,随机选取邻域像素值填充背景样本。当前帧中新像素点与背景样本进行比较时,应该与最接近的某些样本值比较,而非所有值中的大多数样本值。由 N 个背景样本值的集合对每个背景像素 x 进行建模,背景模型 $M(x)$ 在形式上表示为

$$M(x) = \{V_1, V_2, \dots, V_N\}, \quad (1)$$

式中: V_i 为色彩空间里的像素,像素序号 $i = 1, 2, \dots, N$ 。为了根据背景模型 $M(x)$ 对像素值 $V(x)$

进行分类,定义一个以 $V(x)$ 为中心,半径为 R 的球体 $S_R[V(x)]$,将其与样本集合中的最接近的值进行比较,分类过程如图 1 所示。

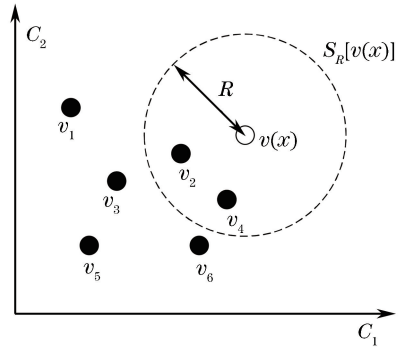


图 1 Vibe 背景模型像素分类示意图

Fig. 1 Schematic of pixel classification of Vibe background model

用 U 表示该球体 $S_R[V(x)]$ 与模型样本集合 $M(x)$ 的交集的样本个数,即

$$U = S_R[V(x)] \cap \{V_1, V_2, \dots, V_N\}. \quad (2)$$

当 U 大于或等于给定阈值 ξ_{\min} 时,将像素值 $V(x)$ 分类为背景。

Vibe 算法采用单帧初始化背景模型。由于视频单帧中没有时间信息,Vibe 算法基于邻近像素有相似的时空分布信息,从首帧中随机选取邻域像素的初始化背景模型。假设时间 $t = 0$ 为第 1 帧, $N_G(x)$ 为像素 x 的空间邻域,背景模型的初始化为

$$M_0(x) = \{v_0[y | y \in N_G(x)]\}, \quad (3)$$

式中: M_0 为背景样本集合; v_0 为像素点 x 在初始化时背景样本集中的采样元素; y 为根据统一性原则从 $N_G(x)$ 中随机选择的像素点。

Vibe 算法的更新策略具有随机子采样性和空间传播特性。根据(2)式划分背景,更新该点背景样本集及该点相邻像素的背景样本集中的某一元素的概率为 $1/\varphi$ (φ 为时间采样因子)。

2.2 基于直方图相似度匹配的鬼影消除

在 Vibe 算法前景提取结果的基础上,采用前景区域和邻近背景区域直方图相似度匹配的方法完成对鬼影的检测,匹配度较高的即为鬼影区域,具体方法为:利用(3)式对视频图像进行背景建模,然后利用(2)式获得前景目标,通过结构元素为圆盘半径为 3 pixel 的腐蚀操作将粘连的前景区域分离开,得到相应帧的前景区域,并对前景区域进行 8 连通标记,得到标记好的前景块 F_j ($j = 1, 2, \dots, n$), n 为连通区域个数, j 为序号。分别计算各连通区域在当前帧视频图像中的像素分布直方图 H_j ($j = 1, 2, \dots, n$)。

取各连通区域的最小外接矩形区域 C_j , 前景邻近的背景区域表示为

$$B_j = C_j - F_j, j = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

分别计算各前景对应的邻近背景区域 B_j 在当前帧视频图像的像素分布直方图, 记为 $N_j (j=1, 2, \dots, n)$ 。

选用余弦值和巴氏距离计算 2 个直方图的相似度。余弦相似性定理通过计算 2 个向量之间的夹角判断向量的相似程度, 余弦值越接近 1, 表明夹角越接近 0° , 代表这两个直方图越相似。在进行直方图距离相似度计算时, 巴氏距离计算效果最好。巴氏距离计算结果越大, 表示这两个直方图越不匹配, 其值为 0, 表示完全匹配, 其值为 1, 表示完全不匹配。将得到的前景直方图 H_j 和邻近背景区域直方图 N_j 划分为 64 个区, 每个区为连续的 4 个灰度等级, 分别对每个区域的像素进行求和, 可以得到一个 64 维的图像向量。对于两个直方图得到的 64 维向量 $\mathbf{a}(x_1, x_2, \dots, x_{64}), \mathbf{b}(x_1, x_2, \dots, x_{64})$, 其余弦夹角 $\cos \theta$ 和巴氏距离 D 分别表示为

$$\cos \theta = \frac{\sum_{j=1}^{64} |\mathbf{a}(x_j)| \times |\mathbf{b}(x_j)|}{\sqrt{\sum_{j=1}^{64} |\mathbf{a}^2(x_j)|} \times \sqrt{\sum_{j=1}^{64} |\mathbf{b}^2(x_j)|}}, \quad (5)$$

$$D = \sqrt{1 - \frac{\sum_{j=1}^{64} \frac{\sqrt{|\mathbf{a}(x_j)| \cdot |\mathbf{b}(x_j)|}}{\sum_{j=1}^{64} |\mathbf{a}(x_j)| \cdot \sum_{j=1}^{64} |\mathbf{b}(x_j)|}}{2}}, \quad (6)$$

式中: x_j 为向量 \mathbf{a} 和 \mathbf{b} 中下标 j 对应的元素。则前景区域 F_j 为鬼影的判决条件为

F_j is

$$\begin{cases} \text{ghost,} \\ M_{\cos \theta}(H_j, N_j) > T_1 \& M_D(H_j, N_j) < T_2, \\ \text{object, otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $M_{\cos \theta}(H_j, N_j)$ 为前景区域与邻近背景区域直方图的夹角余弦值; $M_D(H_j, N_j)$ 为前景区域和邻近背景区域直方图的巴氏距离; T_1 和 T_2 分别为角度阈值和距离阈值。在进行直方图相似度比较前, 分别对前景和邻近背景直方图进行归一化处理, 其值在 $[0, 1]$ 之间, 经多组实验验证, 当 $T_1 = 0.65$, $T_2 = 0.49$ 时, 实验效果最好。在判断出鬼影之后, 将鬼影点像素值置 0, 参与背景模型更新, 以快速消除鬼影像素区域。

2.3 基于 YCbCr 空间阴影前景的去除

YCbCr 色彩空间是由 YUV 色彩空间衍生出来的一种颜色空间, 亮度和色度分离且转换计算简单,

本研究在 YCbCr 色彩空间中结合颜色和纹理特征检测并消除阴影。利用亮度和色度信息在 YCbCr 色彩空间中初步判断阴影候选区域。RGB 色彩空间转换成 YCbCr 色彩空间的公式为

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} + \frac{1}{256} \times \begin{bmatrix} 65.738 & 129.057 & 25.064 \\ -37.945 & -74.494 & 112.439 \\ 112.439 & -94.154 & -18.285 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: Y 为亮度分量; C_b 为蓝色色度分量; C_r 为红色色度分量; R, G 和 B 分别为 RGB 空间红色、绿色和蓝色分量。阴影区域的特点是亮度较背景区域低, 但色度基本不变, 这满足基于阴影的色度不变性假设, 该假设已在很多算法中被验证^[7-8]。利用 Y, C_b 和 C_r 分量分别找出阴影区域的共同特性, 粗略检测出阴影。阴影每个像素的各分量满足

$$\begin{cases} |I_Y(x, y) - B_Y(x, y)| \leq T_Y \\ |I_{C_b}(x, y) - B_{C_b}(x, y)| \leq T_{C_b}, \\ |I_{C_r}(x, y) - B_{C_r}(x, y)| \leq T_{C_r} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $I_Y(x, y), I_{C_b}(x, y)$ 和 $I_{C_r}(x, y)$ 分别为当前像素在 YCbCr 色彩空间中的亮度 Y 分量和色度 C_b, C_r 分量; $B_Y(x, y), B_{C_b}(x, y)$ 和 $B_{C_r}(x, y)$ 分别为该点对应背景图像中的亮度 Y 分量和色度 C_b, C_r 分量; T_Y 为亮度阈值; T_{C_b} 和 T_{C_r} 分别为蓝色和红色色度分量阈值。根据文献[9], $T_Y = 50, T_{C_b} = 10$ 和 $T_{C_r} = 15$ 满足阴影在 YCbCr 色彩空间中的共性。因此, 本文选用以上 3 个值进行阴影判断, 确定候选阴影区域, 记为 $S_c(x, y)$ 。

(9)式粗检测的阴影区域中包含亮度较低且蓝色分量较大的非阴影区域, 因为阴影覆盖前后的区域纹理信息不变, 对候选阴影区域进一步提取区域的纹理特征^[10]。LBP 算子是一种描述图像局部纹理特征的算子, 传统的 LBP 算子只考虑中心像素与邻域像素的差值符号特征, 未考虑差值幅度, 丢失了部分信息。为使纹理特征的提取更加充分, 本研究采用 CLBP 算法^[11], 对于像素点 (x_c, y_c) , 其 CLBP 值可表示为

$$\begin{cases} S_{P,R}(x_c, y_c) = \sum_{p=0}^{P-1} S(g_p - g_c) 2^p \\ M_{P,R}(x_c, y_c) = \sum_{p=0}^{P-1} S(D_p - D_c) 2^p, \\ C_{P,R}(x_c, y_c) = S(g_c - g_{N'}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: P 为相邻像素的个数; R 为邻域半径; g_P 为相邻像素点的像素灰度值; g_c 为该点的像素灰度值, N' 为窗口数; $g_{N'} = \frac{1}{N'} \sum_{n=0}^{N'-1} g_n$; $D_P = g_P - g_c$;

$D_c = \frac{1}{P} \sum_{p=0}^{P-1} (g_c - g_P)$; $S_{P,R}(x_c, y_c)$ 为传统的 LBP 算子, 描述局部窗口的灰度差异特征; $M_{P,R}(x_c, y_c)$ 为局部窗口内灰度梯度差异特征; $C_{P,R}(x_c, y_c)$ 为中心像素点的灰度信息; $S(x')$ 为判别函数, 当自变量 $x' > 0$ 时, 取值为 1, 否则取值为 0。根据文献[11], 邻域大小影响纹理分类的准确性, 当 P 值增大时, 由于 $M_{P,R}$ 是通过两像素点的灰度差异幅值与局部窗口灰度差异幅值的均值比较而产生, 并且采用旋转不变的均匀模式, $M_{P,R}$ 容易产生不均匀模式, 可区分性降低, 且 $S_{P,R}$ 对局部窗口的模糊作用随 P 值的增大而增大, $S_{P,R}$ 的可区分性也会降低, 故本实验选取 $P=8, R=1$ 的邻域, 使纹理分类准确性最高, 可区分性最优。本文用串联方法融合以上 3 种特征的区域纹理特征直方图 $f_{SMC-P,R}$ 表示为

$$f_{SMC-P,R} = S_{P,R} \cup M_{P,R} \cup C_{P,R}。 \quad (11)$$

计算候选阴影区域像素点 $S_c(x, y)$ 在当前帧与背景图像之间的纹理相关性

$$c = \frac{\sum_{p=1}^{n'} H(T_\delta - \Delta_p)}{n'} \quad (12)$$

式中: n' 为候选阴影区域中的像素数; $H(\cdot)$ 为单位阶跃函数; T_δ 为阈值; Δ_p 为候选阴影区域像素点在当前帧与背景中的纹理特征直方图差异度。该异度由卡方距离计算

$$\Delta_p = \sum_{x=1}^X (C_x - B_x)^2 / (C_x + B_x), \quad (13)$$

式中: X 为直方图 bin 总数; C_x 和 B_x 分别为候选阴影区域在当前帧和背景图像第 x 个 bin 上的值。根据(12)式, 当纹理差异度 Δ_p 小于阈值 T_δ 时, c 值为 1, 否则为 0。实质上相关系数 c 为当前帧和背景中纹理相似区域中的相似度分数, 若 c 大于阈值 T_c , 则将候选区域视为阴影区域, 并将检测出来的阴影像素置 0, 划分为背景。

3 改进的 Vibe 算法实现步骤

1) 视频首帧利用 Vibe 算法建立一个样本数为 N 的背景模型, 用(3)式初始化背景模型;

2) 从视频第 2 帧开始, 在 RGB 空间利用(2)式进行前景提取, 并将图像转换到 YCbCr 空间中, 利

用(9)式和(12)式进行阴影检测与去除;

3) 对步骤 2) 提取的前景区域进行形态学处理, 得到各个连通的前景区域;

4) 计算前景像素直方图和邻域背景像素直方图, 比较直方图的相似度, 根据(7)式判断前景区域是否为鬼影, 若为鬼影将其像素值置 0, 改为背景像素;

5) 检测为背景点的像素参与背景模型更新, 用当前像素值随机更新该点与其邻域背景模型样本中的一个样本值的概率为 $1/\varphi$;

6) 将阴影检测后的二值图像与鬼影检测后的二值图像相与;

7) 得到去除鬼影和阴影的前景目标, 算法结束。

改进的 Vibe 算法实现流程如图 2 所示。

4 仿真结果与分析

4.1 鬼影去除

本实验运行环境为 Windows10 64 位操作系统, Inter Xeon E5 CPU 处理器, 16 GB 内存, MATLAB R2016a 仿真系统。利用本文算法在视频集 highwayII 进行仿真实验, highwayII 共有 500 帧。本实验中 Vibe 算法提取前景的参数取值参考文献[2], 背景样本大小 $N=20$, 初始化距离阈值 $R=20$, 匹配个数阈值 $\xi_{\min}=2$, 初始时间采样因子 $\varphi=16$ 。改进部分直方图相似性比较中余弦角度阈值 $T_1=0.65$, 巴氏距离阈值 $T_2=0.49$ 。

图 3 给出 highwayII 的仿真结果。图 3(a) 中视频序列 highwayII 首帧存在运动目标, 第 6 帧视频 Vibe 算法前景提取的结果如图 3(c) 所示, 其中存在鬼影区域。分别计算各连通区域的前景与邻近背景区域像素分布直方图, 如图 3(d)~(g) 所示。可以看出, 鬼影区域的像素分布直方图非常相似, 而运动目标的直方图有较大差异, 据此可以有效区分出鬼影与运动目标。在本实验中, 本文算法在该视频第 6 帧检测出全部将鬼影区域并更新背景模型, 原 Vibe 算法大于 70 帧后才开始识别鬼影区域。

与 Vibe 改进算法 PBAS^[12] 和 SBBS^[13] 在 CDnet-2012 数据集 highway 上比较鬼影抑制效果, highway 数据集共有 1700 帧, 首帧存在运动目标, 图 4 所示为本文算法与 PBAS 算法、SBBS 算法的鬼影抑制效果对比仿真实验结果。

由图 4 可以看出, 本文算法在第 60 帧时因首帧

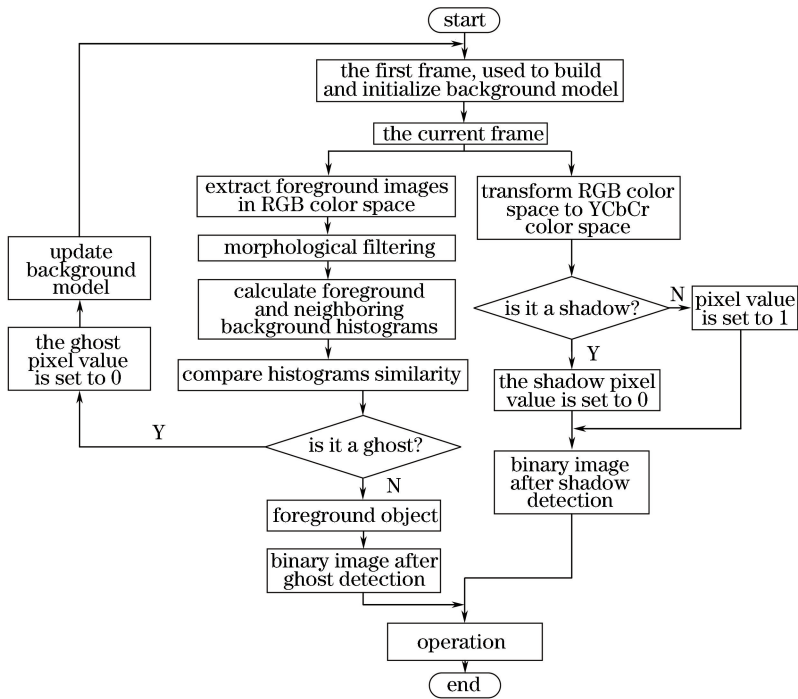


图 2 改进的 Vibe 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of improved Vibe algorithm

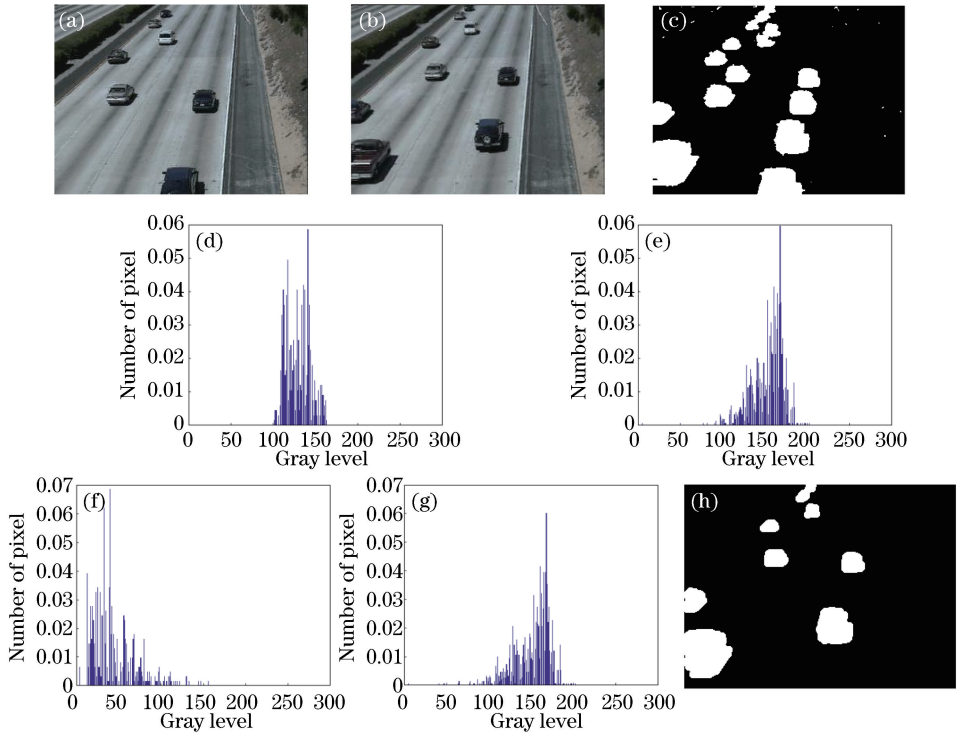


图 3 HighwayII 仿真结果。(a)第 1 帧视频原图;(b)第 6 帧视频原图;(c)第 6 帧 Vibe 算法前景检测结果;(d)鬼影块前景直方图;(e)邻域背景直方图;(f)运动目标前景直方图;(g)邻域背景直方图;(h)第 6 帧改进的 Vibe 算法检测结果

Fig. 3 Simulation results of highwayII. (a) First frame original image; (b) 6th frame original image; (c) 6th frame foreground detection result of Vibe algorithm; (d) foreground histogram of ghost; (e) background histogram of neighboring; (f) foreground histogram of moving object; (g) background histogram of neighboring; (h) 6th frame result of improved Vibe algorithm

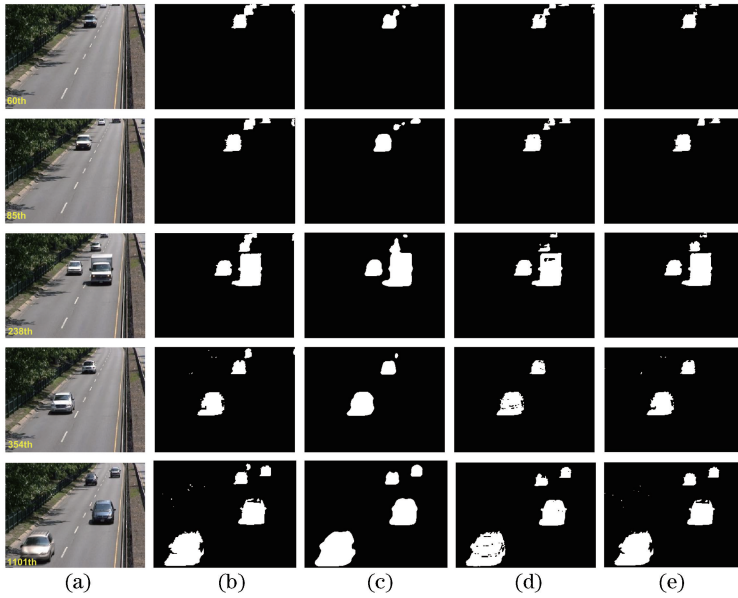


图4 CDnet-2012 highway 仿真结果比较。(a)视频原图;(b) Vibe 算法检测结果;(c) PBAS 算法检测结果;(d) SBBS 算法检测结果;(e)本文算法检测结果

Fig. 4 Comparison of simulation results of CDnet-2012 highway. (a) Original video images; (b) results of Vibe algorithm detection; (c) results of PBAS algorithm detection; (d) results of SBBS algorithm detection; (e) results of proposed algorithm detection

运动目标初始化产生的鬼影区域已明显缩小;第 85 帧时,本文算法已完全消除鬼影区域, PBAS 算法和 SBBS 算法中鬼影区域依然存在;第 238 帧时 SBBS 算法鬼影区域消除, PBAS 算法鬼影区域面积减少;第 354 帧时 PBAS 算法已消除大部分鬼影区域,原 Vibe 算法中鬼影区域依然大面积存在;第 1101 帧时原 Vibe 算法鬼影区域减少,直到 1600 帧以后鬼影区域完全消除。综上仿真结果,本文算法在保留完整的运动目标检测的同时,消除鬼影的速度最快。

4.2 阴影去除

本研究在 CDnet-2012 数据集中的 shadow 类别中进行阴影去除的仿真。该类别包含 2 个室内视频(copy machine and cubicle)和 4 个室外视频(backdoor, bungalows, bus station, and people in shade),共 14099 帧。阴影去除实验参数为亮度阈值 $T_y=50$,色度阈值 $T_{c_b}=10$ 、 $T_{c_r}=15$,纹理特征提取邻域数 $P=8$,邻域半径 $R=1$,纹理差异阈值 $T_o=0.2$,纹理相关性阈值 $T_c=0.75$ 。图 5 所示为本文算法在 cubicle、bus station 和 people in shade 的仿真结果。

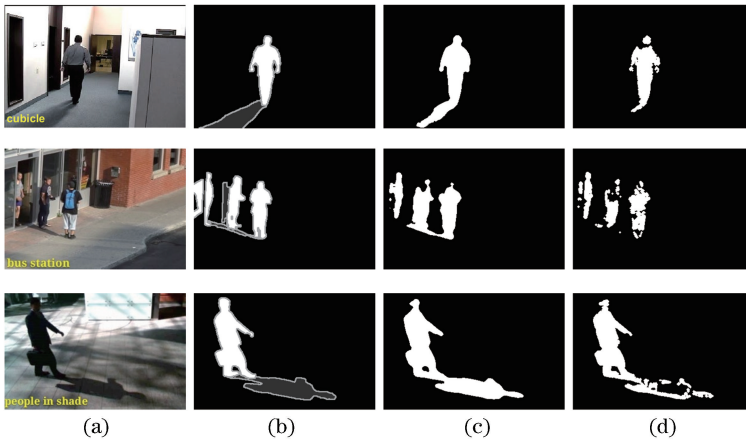


图5 CDnet-2012 shadow 仿真结果。(a)视频原图;(b)真实图像;(c)前景提取图像;(d)阴影去除图像

Fig. 5 Simulation results of CDnet-2012 shadow. (a) Original video images; (b) ground truth images; (c) images of foreground extraction; (d) images of shadow removal

室内序列 cubicle 和 people in shade 照明条件和视角不同, bus station 序列为嘈杂的室外序列。从图 5 可以看出, 本文算法在室内和室外环境中都有较好的阴影去除效果, 大部分的阴影已被去除。对于阴影检测性能评估, 文献[14]中定义了假阳性率阴影

表 1 CDnet-2012 shadow 类别 4 种算法阴影去除性能比较

Table 1 Comparison of shadow removal performance of four algorithms in CDnet-2012 shadow categories

| Method | Proposed | Method in Ref. [8] | Method in Ref. [13] | Method in Ref. [15] |
|-----------------------------------|----------|--------------------|---------------------|---------------------|
| FPR-S in backdoor | 0.3752 | 0.5884 | 0.1274 | 0.5789 |
| FPR-S in bungalows | 0.4019 | 0.6523 | 0.1293 | 0.5747 |
| FPR-S in bus station | 0.4123 | 0.6608 | 0.1361 | 0.5996 |
| FPR-S in copy machine | 0.3511 | 0.5718 | 0.1125 | 0.4363 |
| FPR-S in cubicle | 0.3416 | 0.5789 | 0.1002 | 0.4179 |
| FPR-S in people in shade | 0.4363 | 0.6360 | 0.1313 | 0.5552 |
| FPR-S in overall | 0.3864 | 0.6148 | 0.1228 | 0.5271 |
| Time / (s · frame ⁻¹) | 0.06627 | 0.00738 | 0.01312 | 0.04878 |

从表 1 可以看出, 文献[13]中基于像素级的阴影样本模型更适用于各种场景中的阴影检测, FPR-S 最低; 文献[8]中在 HSV 色彩空间中只基于色度模型检测阴影, 算法最快但在室外环境或当前景目标与阴影颜色相似存在较多误检, FPR-S 最高; 文献[15]中结合色度和梯度信息时对阴影的检测效果较优, 平均 FPR-S 较文献[8]算法降低了 14.26%, 但由于复杂室外场景中噪声对边缘梯度信息干扰大, 故室外场景的 FPR-S 较高; 本文算法在 YCbCr 空间中结合阴影颜色和区域纹理特征, 算法时间有所增加, 但平均帧率约为 15 frame/s, 满足实时性, 平均 FPR-S 较文献[8]算法和文献[15]算法分别下降了 37.15% 和 26.69%, 说明本文算法在满足实时性的同时有效降低了阴影误检率。

4.3 定量对比分析

为了更加精确地评估算法性能, 从定量的角度出发, 文献[14]中定义了多个性能评估指标: 召回率 (recall, Re)、特异率 (specificity, Sp)、虚警率 (false positive rate, FPR)、漏检率 (false negative rate, FNR)、精度 (precision, Pr)、错分率 (percentage of wrong, PWC) 和 F -Measure。其中 Re、Sp、Pr 和 F -Measure 指标越高, 表示算法性能越好; FPR、FNR 和 PWC 指标越低, 表示算法性能相对越好, F -Measure 指标为综合性评价指标。使用上述实验视频有真值的序列, 共 15336 帧。本文算法与 Vibe 算法及 2 种排名较好的 Vibe 改进算法 (PBAS 和 SBBS 算法) 性能进行比较, 4 种算法总体性能比较结果如表 2 所示。

(FPR-S), 即在 groundtruth 中被标记为阴影但被检测为前景的像素数量与被标记为阴影像素的总数的比率。本文算法与 3 种阴影去除算法^[8,13,15]在 CDnet-2012 数据库 shadow 类别(6 种)中定量分析比较结果如表 1 所示。

表 2 算法总体性能比较

Table 2 Comparison of overall performance of algorithms

| Method | Vibe ^[2] | PBAS ^[12] | SBBS ^[13] | Proposed |
|--------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------|
| Re | 0.6821 | 0.7840 | 0.7506 | 0.7699 |
| Sp | 0.9830 | 0.9898 | 0.9859 | 0.9981 |
| FPR | 0.0170 | 0.0102 | 0.0141 | 0.0019 |
| FNR | 0.3179 | 0.2160 | 0.2494 | 0.2301 |
| PWC | 3.1178 | 1.7693 | 2.1276 | 1.6997 |
| Pr | 0.7357 | 0.8160 | 0.8378 | 0.8941 |
| F -Measure | 0.6683 | 0.7532 | 0.7678 | 0.7588 |

从表 2 可以看出, 本文算法的特异率、虚警率、错分率和精度指标较 Vibe、PBAS 和 SBBS 算法优, 特异率分别提高了 1.53%、0.84% 和 1.24%, 虚警率分别降低了 88.82%、81.37% 和 86.52%, 错分率分别降低了 45.48%、3.93% 和 20.11%, 精度分别提高了 21.53%、9.57% 和 6.72%。本文算法的 F -Measure 较原 Vibe 算法提高了 13.54%。综上所述, 本文算法在改进传统 Vibe 算法效果性能方面表现较好, 且极大地提高了传统 Vibe 算法的精度, 降低了算法错分率。

5 结 论

针对 Vibe 算法存在鬼影及阴影前景的问题, 利用基于前景和邻域背景直方图相似度匹配的方法快速检测鬼影区域, 算法复杂性低、消除鬼影速度快; 在 YCbCr 空间中结合阴影颜色和纹理特征, 利用 CLBP 算子提取详细的区域纹理特征, 有效降低了阴影误检率。在 CDnet-2012 数据库中分别与其他几种改进算法进行了比较, 仿真结果表明: 该算法具

有鬼影消除速度快、错分率低和精度高等优点。笔者今后的主要研究方向为复杂室外背景中多光源情况下的阴影检测,使算法更有实用性。

参 考 文 献

- [1] Barnich O, van Droogenbroeck M. ViBe: a powerful random technique to estimate the background in video sequences[C] // 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, April 19-24, 2009, Taipei, Taiwan, China. New York: IEEE, 2009: 945-948.
- [2] 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.
- [3] Mao Z C, Shen X S. Improved Vibe algorithm integrated with multiscale transformation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 111501. 茅正冲, 沈雪松. 融合多尺度变换的改进 Vibe 算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 111501.
- [4] 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.
- [5] Wang X, Liu Y, Li G Y. Moving object detection algorithm based on improved visual background extractor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(1): 011007. 王旭, 刘毅, 李国燕. 基于改进视觉背景提取算法的运动目标检测方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(1): 011007.
- [6] Martel-Brisson N, Zaccarin A. Moving cast shadow detection from a Gaussian mixture shadow model [C] // 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 20-25, 2005, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 2005: 643-648.
- [7] Yuan J J, Wu J, Cheng Y H. Shadow detecting algorithms research for moving objects base on self-adaptive background [C] // 2019 Proceedings of International Conference on Modeling, Identification & Control, June 24-26, 2012, Wuhan, Hubei, China. New York: IEEE, 2012: 197-200.
- [8] Salvador E, Cavallaro A, Ebrahimi T. Cast shadow segmentation using invariant color features [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2004, 95(2): 238-259.
- [9] Deng Y L, Wu L F, Li Y T, *et al.* An effective shadow removal approach [J]. Signal Processing, 2011, 27(11): 1724-1728. 邓亚丽, 毋立芳, 李云腾, 等. 一种有效的图像阴影自动去除算法 [J]. 信号处理, 2011, 27(11): 1724-1728.
- [10] Yin B C, Liu Y, Wang Z F. Moving shadow detection by combining chromaticity and texture invariance [J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(6): 896-905. 殷保才, 刘羽, 汪增福. 结合色度和纹理不变性的运动阴影检测 [J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(6): 896-905.
- [11] Guo Z H, Zhang L, Zhang D. A completed modeling of local binary pattern operator for texture classification [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(6): 1657-1663.
- [12] Hofmann M, Tiefenbacher P, Rigoll G. Background segmentation with feedback: the pixel-based adaptive segmenter [C] // 2012 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, June 16-21, 2012, Providence, RI, USA. New York: IEEE, 2012: 38-43.
- [13] Varghese A, Sreelekha G. Sample-based integrated background subtraction and shadow detection [J]. IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 2017, 9: 25.
- [14] Goyette N, Jodoin P M, Porikli F, *et al.* Changedetection. net: a new change detection benchmark dataset [C] // 2012 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, June 16-21, 2012, Providence, RI, USA. New York: IEEE, 2012: 1-8.
- [15] Sanin A, Sanderson C, Lovell B C. Improved shadow removal for robust person tracking in surveillance scenarios [C] // 2010 20th International Conference on Pattern Recognition, August 23-26, 2010, Istanbul, Turkey. New York: IEEE, 2010: 141-144.