

基于光度特性和多梯度分析的运动阴影去除法

黄鑫娟,周洁敏

(南京航空航天大学 民航学院,南京 210016)

(huangxinjuanwzj@163.com)

摘要:提出了一种利用光度特性和多梯度分析去除运动阴影的算法。该算法是在准确地检测出运动目标的基础上,首先利用像素邻域内光度特性和连接成分分析法检测出候选阴影区域;其次比较分析候选阴影区域和背景中相应区域的梯度,并结合连接成分分析法去除阴影;最后使用边缘去除法进一步去除半影,并应用形态学运算完善结果。实验结果表明,同传统的阴影去除法相比,该算法有高检测率和高识别率。

关键词:背景差分;光度特性;梯度分析;连接成分分析;阴影去除

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Moving shadows removal algorithm based on photometric properties and multi-gradient analysis

HUANG Xin-juan, ZHOU Jie-min

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

Abstract: An algorithm based on photometric properties and multi-gradient analysis was proposed to remove the moving shadows. After detecting moving objects accurately, firstly, photometric properties and connected components analysis were used to detect potential shadow regions; secondly, multi-gradient in potential shadow regions was compared with that in the background, and connected components analysis was adopted in order to remove the shadow; lastly, edge removal was imposed to further remove penumbra, and morphological algorithm was used to improve the performance. Compared to the conventional method, the experimental results validate that the algorithm has a high detection rate and a high recognition rate.

Key words: background subtraction; photometric property; gradient analysis; connected components analysis; shadow removal

0 引言

运动目标检测是计算机视觉研究中的一个课题,它是后续目标跟踪、识别、交通参数提取的基础,现已广泛应用于视频监控、车辆跟踪等领域。运动目标检测法有:背景差分法、帧间差分法和光流法等,其中背景差分法是最常用的运动目标检测法,通过背景差分检测出的运动目标中,由于阴影的存在,严重影响了目标的跟踪、识别等后期工作。因此鲁棒性地检测阴影并消除阴影是视频跟踪系统中的重要工作。

目前关于阴影检测法的研究主要分为两类:一类是基于阴影模型^[1],一类是基于阴影属性^[2-6]。Prati等人^[1]又将阴影检测法分成四类:有参统计法、无参统计法、基于模型的确定法和基于模型的确定法,并在室内和室外对这四类算法做了定性和定量的评价:基于模型的确定法比不基于模型的确定法效果好但复杂耗时,在处理不同光线、不同运动物体和不同角度下的复杂场景时,需快速增加模型的数量和复杂性。统计法和基于模型的确定法都能鲁棒性地克服噪声,但有参统计法检测率低,无参统计法不稳定且在户外识别率降低。通过比较发现不基于模型的确定法是最稳定的算法。Cucchiara等人^[2-3]在HSV色彩空间中分析前景区域和背景区域相应像素点的色度、亮度和饱和度,通过阈值化这三个分量的变化值来检测阴影,该算法运用了4个经验阈值,需要手工调整阈值以适应场景变化,降低了其鲁棒性。Salvador等人^[4]在归一化的RGB空间中通过光度特性检测出候选阴影

区域,然后结合颜色不变特征和阴影的几何特征提取阴影。Kumar等人^[5]在RGB、XYZ、YCbCr、HSV、rgb五个色彩空间中比较阴影检测的结果,通过实验得出YCbCr色彩空间是最理想的阴影检测空间。YCbCr色彩空间能有效地去除阴影,但遇到深颜色车辆时失效,且运算量大。Leone等人^[6]提出基于纹理分析的阴影检测法,该算法通过二维Gabor滤波器获得纹理特征,并结合光度特性检测出阴影,虽然能有效地去除阴影,但运算量大。

为降低运算量和鲁棒性地去除深颜色车辆的阴影,本文提出了一种基于灰度空间的阴影去除法。该算法采用阴影点与对应背景点的灰度比值成线性和连接成分分析法检测出候选阴影区域,并在候选阴影区域中根据纹理特征和连接成分分析法去除阴影,最后结合边缘检测、噪声点去除等后处理工作完善结果。由光度特性检测出的候选阴影区域包含真正的阴影点和伪阴影点,对阴影点和伪阴影点分析梯度,最终去除了真正的阴影。按照文献[1]中提到的检测率和识别率,将本文算法与文献[3]算法进行比较,结果证明本文算法鲁棒性强。

1 前景区域检测

1.1 混合高斯背景模型的工作原理

Stauffer等人^[7]用 K 个高斯分布混合模拟像素点背景值,像素点 (x, y) 在 t 时刻属于背景的概率如式(1)所示,将 t 时刻像素值 $I_t(x, y)$ 与它历史的已按 $p_{i,t} = \frac{\omega_{i,t}}{\sigma_i}$ 大小排列的 K 个

收稿日期:2009-08-13;修回日期:2009-09-18。

作者简介:黄鑫娟(1983-),女,安徽池州人,硕士研究生,CCF会员,主要研究方向:数字图像处理、交通工程计算机测控技术;周洁敏(1965-),女,江苏宜兴人,研究员,主要研究方向:交通工程计算机测控技术、电力电子技术。

高斯分布按式(2)匹配,若都不匹配,则添加一均值为 $I_t(x, y)$ 、方差和权值自设定的高斯分布,用它替换历史中最不可能代表背景的高斯分布;若存在匹配的高斯分布,则第一个匹配的高斯分布的参数按式(3)更新,剩下高斯分布的均值和方差保持不变,权值按式(4)更新。

$$P(I_t(x, y)) = \sum_{i=1}^K \omega_{i,t} * \eta(I_t(x, y), \mu_{i,t}, \Sigma_{i,t}) \quad (1)$$

$$|I_t(x, y) - \mu_{i,t-1}| < 2.5\sigma_i \quad (2)$$

$$\begin{cases} \omega_{i,t} = (1 - \alpha)\omega_{i,t-1} + \alpha \\ \mu_{i,t} = (1 - \beta)\mu_{i,t-1} + \beta I_t(x, y) \\ \sigma_{i,t}^2 = (1 - \beta)\sigma_{i,t-1}^2 + \beta(I_t(x, y) - \mu_{i,t})^T \\ \quad (I_t(x, y) - \mu_{i,t}) \\ \beta = \alpha\eta(I_t(x, y) | \mu_{i,t}, \sigma_{i,t}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\omega_{i,t} = (1 - \alpha)\omega_{i,t-1} \quad (4)$$

其中: K 为混合高斯模型中高斯分布的个数(一般取3~5); $\omega_{i,t}$ 、 $\mu_{i,t}$ 和 $\Sigma_{i,t}$ 分别为 t 时刻混合高斯模型中第 i 个高斯分布的权重($\sum_{i=1}^K \omega_{i,t} = 1$)、均值和协方差矩阵; α 和 β 为学习率, η 为高斯分布的概率密度函数,且

$$\eta(I_t(x, y), \mu, \Sigma) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |\Sigma|^{1/2}} * e^{-1/2(I_t(x, y) - \mu)^T \Sigma^{-1} (I_t(x, y) - \mu)}$$

高斯分布中参数更新完成后,按 $\rho_{i,t} = \frac{\omega_{i,t}}{\sigma_i}$ 由大到小对所存高斯分布进行排列,最可能代表背景的高斯分布在序列的前面,故按式(5)取前 b 个高斯分布联机生成背景。

$$B = \arg \min_b \left(\sum_{k=1}^b \omega_k > T1 \right) \quad (5)$$

1.2 模型参数更新方程的改进

鉴于传统混合高斯背景模型的复杂性,本文将对模型的初始化和学习率加以改进。先初始化2个高斯分布,按式(2)将当前像素点与其现存的高斯分布匹配,若都不匹配,则新增一高斯分布,其均值为当前像素点的像素值,权重为0.001,方差为30,并观察该像素点高斯分布个数,若小于5,则直接添加新增的高斯分布;若等于5(最多为5个),则用新增的高斯分布替换最不可能代表背景的高斯分布,其余高斯分布的均值和方差保持不变,权值按式(4)更新。若存在匹配的高斯分布,采用四邻域思想在线更新参数,首先按式(6)估算当前帧 I 与参考背景帧 B 的相似度,其次按式(7)计算学习率,最后将学习率 α 代入式(3)更新第一个匹配的高斯分布的参数,其余高斯分布的均值和方差保持不变,权值按式(4)更新。

$$\begin{aligned} \Delta diff = & (I(x, y) + I(x-1, y) + I(x+1, y) + \\ & I(x, y-1) + I(x, y+1))/5 - \\ & (B(x, y) + B(x-1, y) + B(x+1, y) + \\ & B(x, y-1) + B(x, y+1))/5 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\alpha = 0.05(1 - e^{-(\Delta diff/5)^2}) \quad (7)$$

根据 Stauffer 思想,按式(5)重建背景后,将其与当前帧差分,大于一阈值的点即为目标点(如式(8)),阈值可由灰度拉伸大津法获得。检测结果如图1所示。

$$M(x, y) = \begin{cases} 1, & |I(x, y) - B(x, y)| > T2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

2 阴影分析

由背景差分提取出的前景区域中含有阴影点,它会导致目标形状的改变、目标遗漏、目标相连等,因此应去除此类阴影点。

影点。

一幅含有目标的场景可分成4块区域:目标区、背景区、自身阴影区、投射阴影区,如图2所示。自身阴影^[8]是目标的一部分,在阴影消除过程中应保留;投射阴影^[8]是指目标遮挡光源进行投影得到的区域,在阴影消除过程中应去除。投射阴影又可分为本影和半影。本影是运动目标完全遮挡了光线,半影是运动目标部分遮挡了光线。本文主要研究投射阴影的去除。

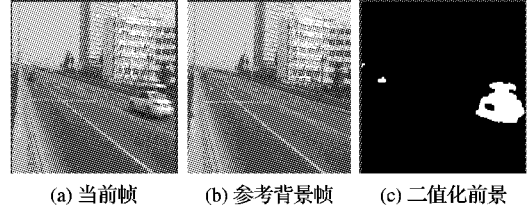


图1 前景检测

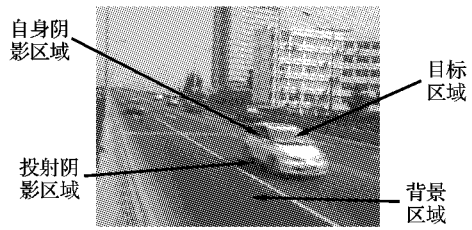


图2 场景区域划分图

阴影通常具备以下性质:1)像素在阴影区域比在背景区域灰度值小;2)阴影区域与背景区域有着相似的纹理信息;3)阴影与产生阴影的运动目标同步运动。

3 阴影去除

本文阴影去除法是对传统的光度特性和梯度差分加以改进。从邻域思想出发考察像素点的光度特性,并运用直方图阈值化当前帧像素点邻域灰度均值与背景帧相应像素点邻域灰度均值的比值;然后结合改进的 Sobel 算子求梯度以去除阴影;最后后处理以完善结果。程序流程如图3所示。

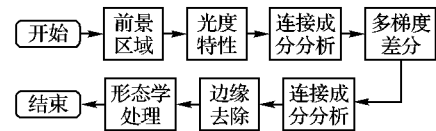


图3 阴影检测流程

3.1 光度特性检测候选阴影区域

阴影检测的第一步是基于上述阴影性质(1)检测出候选阴影区域。文献[9]将当前帧像素点灰度值与背景帧相应像素点灰度值相比,若比值在两常数之间即为候选阴影区域,这无疑欠准确性,因为仅考虑了单个像素点,且阈值固定。本文将对其加以改进,从邻域思想出发,考察当前帧和背景帧中相应像素点邻域内的灰度值,并通过直方图在线确定阈值。

实现步骤为:

1)计算像素点与其4邻域像素累计和(简称区域累计和)的平均值,有:

$$S(x, y) = (I(x, y) + I(x-1, y) + I(x+1, y) + I(x, y-1) + I(x, y+1))/5 \quad (9)$$

2)按式(10)计算当前帧与背景帧相应像素点的比值,其中 S_n^I 和 S_n^B 分别为当前帧和背景帧中像素点区域累计和的平均值:

$$D(x, y) = \frac{S_n^I(x, y)}{S_n^B(x, y)} \quad (10)$$

3)由于 $D(x, y)$ 很小,为了方便后期阈值化将其乘以100,

分析此时比值图像的直方图,如图4(a),确定分割阈值 $T3$;

4) 阈值化后的阴影区域(其灰度值为 100):

$$shadow(x,y) = \begin{cases} 100, & 100 * D(x,y) < T3 \\ 255, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

5) 用连接成分分析以去除面积小的伪阴影区域,其原理将在 3.3 节介绍。

实验结果如图 4,从图 4(b)中可看出阴影的存在严重影响了目标的形状,图 4(c)中由光度特性和连接成分分析法检测出的阴影区域中含有投射阴影和伪阴影,下节将在此阴影区域中根据纹理特征去除投射阴影。

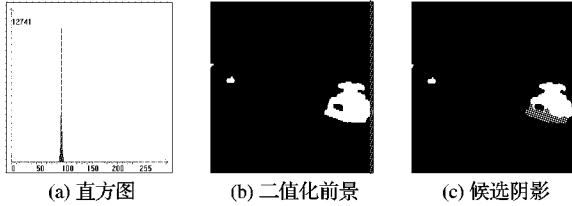


图4 检测候选阴影区域

3.2 梯度差分去除阴影

运动阴影保留了背景的纹理特征,然而运动目标会较大程度地改变背景的纹理特征^[10],图像梯度能够反映图像的纹理信息。由光度特性检测出的阴影中含有投射阴影、自身阴影和伪阴影,因此通过比较分析候选阴影区域和背景中相应区域的梯度可去除投射阴影。

本文将采用改进的 Sobel 算子对相应区域从垂直、对角、水平三个方向求梯度,其模板如图 5 所示。

$$\begin{array}{ccc} \begin{bmatrix} +1 & 0 & -1 \\ +2 & 0 & -2 \\ +1 & 0 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} +2 & +1 & 0 \\ +1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -2 \end{bmatrix} \\ A1 & A2 & A3 \\ \begin{bmatrix} 0 & +1 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \\ A4 & A5 & A6 \end{array}$$

图5 Sobel 模板

实现步骤为:

1) 按图 5 模板,对候选阴影区域中每点计算其与各模板的卷积和,类似计算背景中相应像素点;

2) 按模板提取边缘的方向,将图 5 模板分成垂直组(A1A2)、对角组(A3A4)他水平组(A5A6);

3) 按式(12)计算每组的梯度总值,即约等于每组中两分量卷积和的最大值;

$$|G_i(x,y)| \approx \max\{|g_1|, |g_2|\}; i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

4) 按式(13)计算每个像素点的梯度值;

$$Gra(x,y) = \begin{cases} \sum_{i=1}^3 |G_i(x,y)|, & \sum_{i=1}^3 |G_i(x,y)| \leq 255 \\ 255, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

5) 将候选阴影区域中每点梯度值与背景中相应像素点的梯度值差分,并根据直方图阈值化,有:

$$E(x,y) = \begin{cases} 0, & |Gra_1(x,y) - Gra_B(x,y)| < T4 \\ 255, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

$Gra_1(x,y)$ 为候选阴影区域中 (x,y) 点的梯度值,

$Gra_B(x,y)$ 为背景中 (x,y) 点的梯度值。

实验结果如图 6,候选阴影区域的梯度包含车轮部分梯

度和阴影的边界如图 6(a)所示,背景中相应区域的梯度包含整个候选阴影区域的外边界如图 6(b)所示,两者差分结果如图 6(c)所示,对差分后图像阈值化可去除阴影。

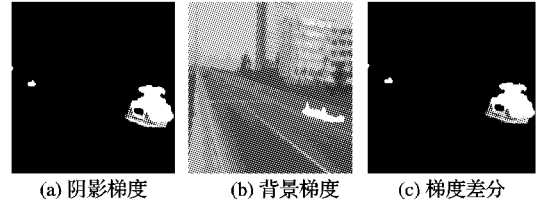


图6 梯度差分结果

3.3 连接成分分析

在剩下的前景区域中,根据 8 邻域像素标记法标记每个目标点,计算每个连通区域的面积,去除面积小的区域。此步骤相当于用一个含有 9 个点的结构元素对二值化图像进行膨胀,再与二值化图像相交。

实现思想:首先扫描二值化图像,遇到第一个没有被标记的目标点时添加一标记;其次 8 邻域分析该像素点,若同为目标点,则添加标记并分析其 8 邻域像素,若含目标点,则添加标记,直到连接在一起的像素都被标记完;最后继续扫描下一个连通域,直到扫描完整个图像。

3.4 阴影边界去除

去除阴影边界即为去除半影,首先通过 Canny 算子检测出边缘;其次以偏移边缘点为 1 个像素点的像素为中心,统计该像素偏移量为 1 个像素点的 8 邻域中同属于目标点的个数,若小于 4,则判断此边缘点为阴影点,去除该边缘点及其邻域;最后由于有些车身部分(如车窗和车轮等)已被当成阴影去除,运用膨胀运算弥补目标的缺失。

4 实验结果和定量评价

在国际通用的标准视频序列(Highway I 和 Campus)和作者拍摄的视频序列中将本文算法与文献[3]算法进行对比,其中 Highway I 中目标大、阴影尺寸大且车辆间有粘连,Campus 中目标中等且阴影尺寸大,作者拍摄视频中目标中等且阴影尺寸小,对比结果如图 7 所示。

Highway I 中,本文算法遗留的阴影点明显少于文献[3]算法,主要由于文献[3]算法需要手工调整阈值,不能适应场景变化,而本文用直方图调整阈值,较好地适应了场景的变化;Campus 中,文献[3]算法丢失了大量的目标点,因为车辆颜色较深,在去除过程中将其当成了阴影,针对此问题,本文在候选阴影区域内比较当前帧和背景帧的梯度,通过直方图阈值化去除阴影;作者拍摄视频中,两者算法都将阴影较完整地去除,但由于车轮颜色较深,具有与阴影相似的性质,本文将其部分当成阴影去除,而文献[3]则将其全部当成阴影进行去除。

为了进一步验证算法的鲁棒性,采用文献[1]中提到的检测率和识别率对算法进行定量评价。检测率高要求低概率误分类阴影点,识别率高要求低概率误分类目标点。检测率和识别率的计算公式如式(15):

$$\begin{cases} \eta = \frac{TP_s}{TP_s + FN_s} \\ \xi = \frac{TP_F}{TP_F + FN_F} \end{cases} \quad (15)$$

其中 S 表示阴影, F 表示前景, TP 表示正确分类的像素点数, FN 表示错误分类的像素点数, TP_F 表示目标像素点数减去属于目标但却误分类为阴影的像素点数。

验证过程为:首先从上述 3 个视频序列中分别提取 10 帧

图像,手工分割出背景、阴影和目标,并统计阴影点和目标点的平均个数;其次根据阴影去除算法统计阴影点和目标点的平均个数;最后根据式(15)计算文献[3]算法与本文算法的检测率和识别率,结果如表1所示,从表中结果发现本文算法明显优于文献[3]算法。

表1 定量评价结果

视频	阴影点数		目标点数		$\eta/\%$		$\xi/\%$	
	文献[3]	本文	文献[3]	本文	文献[3]	本文	文献[3]	本文
Highway I	8721	14215	7260	7658	62.39	87.01	57.61	86.06
Campus	8080	9382	1919	9084	90.72	92.90	55.71	94.81
作者视频	621	484	992	1616	80.43	89.22	80.94	95.72

5 结语

本文根据像素点的亮度属性和纹理属性,提出了一种基于光度特性和多梯度分析的运动阴影去除法。该算法利用阴影的性质去除阴影,并在处理过程中运用直方图在线确定光度特性和多梯度分析中涉及到的阈值。通过大量实验和性能评价结果表明,本文算法鲁棒性强,且不需要事先知道光源方向,具有良好的实际应用价值。

向,具有良好的实际应用价值。

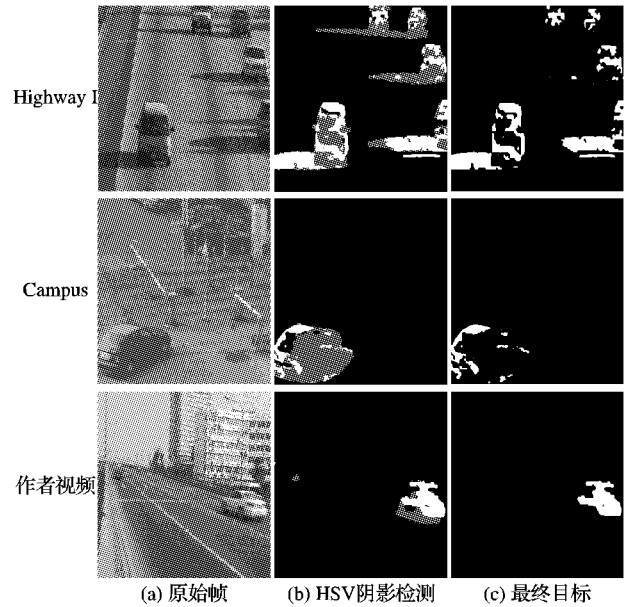


图7 文献[3]算法阴影检测结果

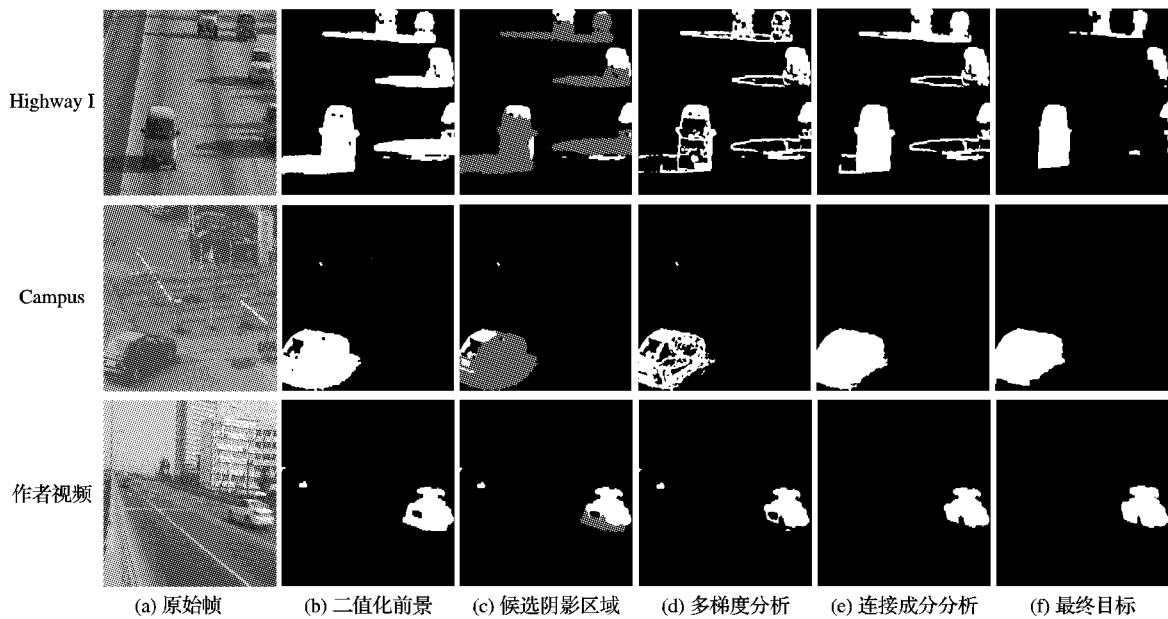


图8 本文算法阴影检测结果

参考文献:

- [1] 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.
- [2] CUCCHIARA R, GRANA C, NERI G, *et al.* The Sakbot system for moving object detection and tracking[C]// Video-based Surveillance Systems - Computer Vision and Distributed Processing. Boston: Kluwer, 2001: 145-157.
- [3] CUCCHIARA R, GRANA C, PICCARDI M, *et al.* Improving shadow suppression in moving object detection with HSV color information[C]// 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings. Oakland: IEEE, 2001: 334-339.
- [4] SALVADOR E, CAVALLARO A, EBRAHIMI T. Cast shadow segmentation using invariant color features[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2004, 95(2): 238-259.
- [5] KUMAR P, SENGUPTA K, LEE A, *et al.* A comparative study of different color spaces for foreground and shadow detection for traffic monitoring system[C]// Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Washington, DC: IEEE, 2002: 100-105.
- [6] LEONE A, DISTANTE C. Shadow detection for moving objects based on texture analysis[J]. Pattern Recognition, 2007, 40(4): 1222-1233.
- [7] STAUFFER C, GRIMSON W E L. Adaptive background mixture models for real-time tracking[C]// CVPR'99: 1999 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1999, 2: 246-252.
- [8] JIANG CAIXIA, WARD M O. Shadow identification[C]// Proceedings of CVPR'92. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1992: 606-612.
- [9] ROSIN P L, ELLIS T. Image difference threshold strategies and shadow detection[C]// Proceedings of the 1995 British Conference on Machine Vision. Surrey, UK: BMVA Press, 1995: 347-356.
- [10] JAVED O, SHAH M. Tracking and object classification for automated surveillance[C]// Computer Vision - ECCV 2002, LNCS 2353. London: Springer-Verlag, 2002: 343-357.