

基于多特征融合的运动阴影去除算法

陈 嵘 李 鹏 黄 勇

(湘潭大学信息工程学院 湖南 湘潭 411105)

摘 要 对视频监控中的运动阴影问题进行了研究,提出一种颜色特征、归一化向量距离、亮度比值相融合的阴影去除方法。首先,通过混合高斯模型建立背景图像,利用背景差分法分离运动区域。然后,采用串行处理方法检测运动区域中的阴影像素。在 RGB 颜色空间下根据颜色一致性特征消除阴影之后,根据运动区域的归一化向量距离分布直方图进一步检测阴影像素。最后,针对阴影检测过程中存在的误检问题,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,并根据置信区间排除误检的前景像素。实验结果表明,该方法能够克服单特征方法的局限性,在多个真实场景下能有效检测与去除阴影,适应性强,鲁棒性好,处理时间适中。

关键词 阴影去除,颜色特征,归一化向量距离,亮度模型,多特征融合

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.06.051

Moving Shadow Removal Algorithm Based on Multi-feature Fusion

CHEN Rong LI Peng HUANG Yong

(College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China)

Abstract Aiming at the problem of the moving cast shadow in the video surveillance, this paper proposed an shadow removal algorithm which combines color feature, normalized vector distance and intensity ratio. First, the background picture is built according to Gaussian mixture model, and motion region is acquired by background subtraction. Then, serial fusion method is adapted to detect and remove shadow pixels. Based on shadow detection according to the color consistent feature in RGB color space, the normalized vector distance distribution histogram is implemented to detect shadow pixels further. Finally, in view of the mistaken identification in the testing process, the illumination model of pixel is built and the intensity ratio of shadow pixel and background pixel is calculated to rule out the mistakenly identified foreground pixels according to the confidence interval. The results of experiment show that the proposed method can overcome the limitation of single feature method, and is able to detect and remove shadow under various circumstances efficiently. The adaptability and robustness of this algorithm are validated, and its processing time is moderate.

Keywords Shadow removal, Color feature, Normalized vector distance, Intensity model, Multi-feature fusion

运动目标检测是智能视频监控的重要环节,背景差分法是常用的运动目标检测方法。然而,由于运动阴影与运动目标具有相同的运动特征,利用背景差分法分离运动目标时,会将阴影判定为运动目标的组成部分,造成运动目标形状改变,甚至运动目标丢失等现象,从而影响后续视频处理环节的准确性。因此,阴影的检测与去除具有非常重要的现实意义。

常用的阴影检测与去除方法大致可以分为两类:模型法与特征法^[1]。基于模型的阴影检测方法,如文献[3]中基于高度的行人阴影去除方法和文献[4]中基于形状的车辆阴影检测方法,依赖于目标物体形状、背景环境光照等先验信息,仅适用于特定环境或特定目标,存在很大的局限性。

与模型法相比,特征法根据阴影区域、背景环境、运动目标在亮度、颜色、纹理、梯度、边缘等特征上的差异来检测与消除阴影,受背景环境与检测对象的制约较小,是检测与去除阴影的主流方法。文献[5]在 HSV 空间下根据亮度分量 V 检测阴影;文献[6]提出了一种基于阴影、运动目标、背景三者亮

度差异的阴影检测方法;文献[7]证明了阴影区域与背景颜色构成的一致性,提出了一种基于颜色特征的阴影去除方法;文献[8]提出了一种基于 LBP 纹理算子的车辆阴影去除方法。上述方法均属于单特征的阴影检测方法,都有不足之处。亮度法在光线较暗的环境下的阴影检测效果较差;颜色法容易将深色系目标误判为阴影;纹理法只适用于运动目标纹理特征明显的场景。

为了克服单特征阴影去除方法的局限性,文献[9]提出了一种结合区域颜色与纹理特征的方法,能在不同场景下有效地检测阴影;文献[10]结合纹理与亮度特征,建立了像素的亮度分布模型,根据亮度比值置信度区间检测误判的前景像素,提高了阴影检测率;文献[11-13]采用并行融合策略,结合颜色、亮度、梯度特征来检测阴影,消除阴影的效果好,鲁棒性强,但计算量大,实时性差;文献[14]提出了一种自适应的阴影检测方法,自适应性强,实时性好;文献[15]采用了串行处理结构,先根据颜色特征去除阴影,再基于纹理、亮度特征剔除

到稿日期:2017-06-24 返修日期:2017-09-03 本文受国家自然科学基金面上项目(61573298),湖南省教育厅优秀青年项目(14B167)资助。

陈 嵘(1993—),男,硕士生,主要研究方向为图像处理与模式识别,E-mail:1025909022@qq.com;李 鹏(1978—),男,副教授,主要研究方向为机器视觉与先进控制理论,E-mail:pengli@xtu.edu.cn(通信作者);黄 勇(1993—),男,硕士生,主要研究方向为图像处理与模式识别。

误检的阴影像素,提高了车辆阴影的检测率,减少了误检事件的发生。

综上所述,基于单特征的阴影检测方法难以在复杂的场景下有效地检测与去除阴影。因此,本文提出了一种基于串行结构的多特征融合的阴影去除方法。该方法根据颜色特征初步检测运动阴影,归一化处理后根据归一化向量距离(NVD)分布直方图进一步检测阴影像素,最后依据像素的光照模型,计算阴影像素与背景像素的亮度比值,根据区间的置信度剔除误检的前景像素。

1 背景建立与前景提取

运动区域的提取是阴影检测的第一步,本文采用背景差分法提取运动区域。首先根据文献[2]中自适应的混合高斯法建立背景模型,然后通过大津(otsu)算法设置阈值,利用差分运算得到运动区域的二值化图像。图1为基于背景差分的运动区域检测结果。



图1 前景区域的提取结果

Fig. 1 Extraction results of foreground area

2 多特征融合的阴影去除方法

通过背景差分可以得到包含阴影的运动区域,要分离出完整的前景目标就必须检测并去除运动阴影。本文融合了颜色特征、归一化向量距离、亮度特征,对运动阴影进行检测与消除,其流程如图2所示。

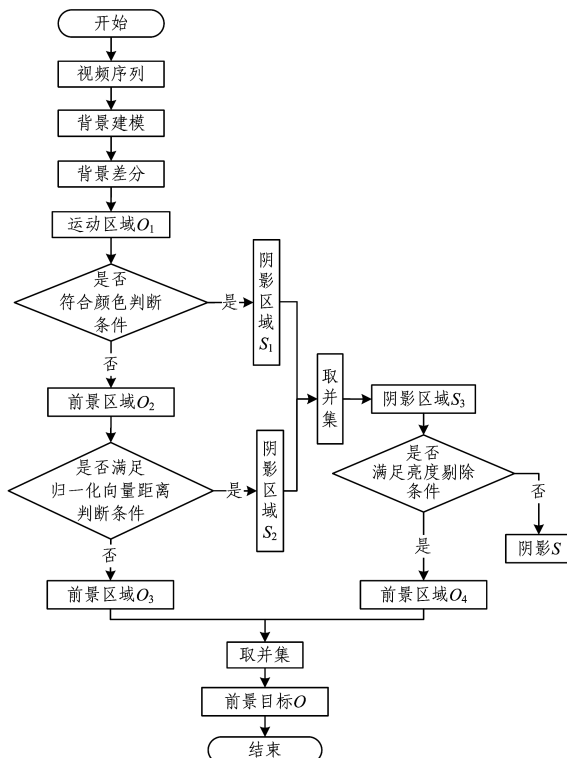


图2 阴影消除算法的流程图

Fig. 2 Flow chart of shadow removal algorithm

2.1 RGB颜色空间下的阴影检测

在光照环境下,背景区域被阴影覆盖后像素强度减小但颜色组成不变,即在RGB颜色空间下,阴影区域与背景区域相比,R,G,B颜色分量所占的比例相同但数值变小,该特征称为颜色的一致性[7]。颜色一致性原理的表述如下:

$$\frac{R_S}{R_S+G_S+B_S} = \frac{R_B}{R_B+G_B+B_B}$$
$$\frac{G_S}{R_S+G_S+B_S} = \frac{G_B}{R_B+G_B+B_B}$$
$$\frac{B_S}{R_S+G_S+B_S} = \frac{B_B}{R_B+G_B+B_B}$$
(1)

其中, R_S, G_S, B_S 分别表示阴影区域的R,G,B分量值, R_B, G_B, B_B 代表背景图像的R,G,B分量值。

运动目标在颜色构成上与背景图像具有较大差异,因此可以根据该差异初步检测运动区域中的阴影像素。本文根据颜色一致性原理对运动区域(x,y)处的像素进行阴影判定,具体方法如下:

$$\begin{cases} c_1(x,y) = \frac{R_F(x,y)}{R_F(x,y)+G_F(x,y)+B_F(x,y)} \\ c_2(x,y) = \frac{G_F(x,y)}{R_F(x,y)+G_F(x,y)+B_F(x,y)} \\ c_3(x,y) = \frac{B_F(x,y)}{R_F(x,y)+G_F(x,y)+B_F(x,y)} \end{cases}$$
(2)

$$\begin{cases} b_1(x,y) = \frac{R_B(x,y)}{R_B(x,y)+G_B(x,y)+B_B(x,y)} \\ b_2(x,y) = \frac{G_B(x,y)}{R_B(x,y)+G_B(x,y)+B_B(x,y)} \\ b_3(x,y) = \frac{B_B(x,y)}{R_B(x,y)+G_B(x,y)+B_B(x,y)} \end{cases}$$
(3)

$$S_1(x,y) = \begin{cases} 1, & \begin{cases} |c_1(x,y) - b_1(x,y)| > T_1 \\ |c_2(x,y) - b_2(x,y)| > T_1 \\ |c_3(x,y) - b_3(x,y)| > T_1 \end{cases} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$
(4)

其中, $c_1(x,y), c_2(x,y), c_3(x,y)$ 表示运动区域中(x,y)处R,G,B分量所占的颜色比重; $b_1(x,y), b_2(x,y), b_3(x,y)$ 为背景图像中(x,y)处R,G,B分量所占的颜色比重; S_1 为检测到的阴影区域; T_1 为设定的阈值,本文中 $T_1=0.08$ 。图3给出了根据上述方法对highway场景去除阴影的结果。可以看出,根据颜色特征只能检测出部分阴影,要完整地检测与消除阴影还需进一步分析与处理。



图3 基于颜色特征的阴影去除结果

Fig. 3 Shadow removal results based on color feature

2.2 基于归一化向量距离的阴影分析

归一化处理是图像处理中常用的特征提取方法。文献[15]提出了一种基于辐射照度的向量距离归一化方法(Normalized Vector Distance, NVD)用以描述阴影像素与背景图像的特征关系。该方法对光照变化具有良好的鲁棒性。本文根据NVD特征进一步检测前景区域中的阴影像素。

图像中 (x, y) 处像素的 NVD 特征定义如下:

$$NVD_{(x,y)} = \left| \frac{I_{(x,y)}}{|I_{(x,y)}|} - \frac{B_{(x,y)}}{|B_{(x,y)}|} \right|$$

$$|I_{(x,y)}| = \sqrt{\sum_{i=-N/2}^{N/2} \sum_{j=-N/2}^{N/2} |I_{(x-i,y-j)}|^2} \quad (5)$$

$$|B_{(x,y)}| = \sqrt{\sum_{i=-N/2}^{N/2} \sum_{j=-N/2}^{N/2} |B_{(x-i,y-j)}|^2} \quad (6)$$

其中, $I_{(x,y)}$, $B_{(x,y)}$ 分别表示前景区域与背景图像在 (x, y) 处的灰度; N 为像素区域宽度, 本文中取 $N=4$ 。

与阴影处像素相比, 前景目标像素的 NVD 值较小且分布集中, 因此可以根据此特征区别前景像素与阴影像素。图 4 给出了 2.1 节中前景区域的 NVD 分布直方图, 较为明显地体现了阴影与前景的 NVD 分布差异。

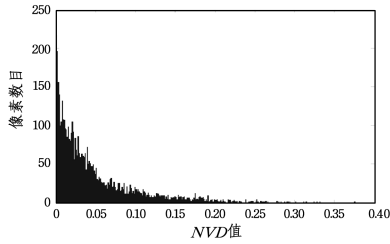


图 4 前景区域 O_2 的 NVD 分布直方图

Fig. 4 NVD distribution histogram of foreground region O_2

本文根据 NVD 的分布规律进一步检测与消除阴影像素, 具体方法如下:

$$E_{NVD} = \sum P_{(x,y)} NVD_{(x,y)} \quad (7)$$

$$S_2(x,y) = \begin{cases} 1, & NVD_{(x,y)} > E_{NVD} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中, E_{NVD} 为运动区域像素的 NVD 期望值, $P_{(x,y)}$ 为 (x, y) 处像素的 NVD 值出现的概率。对两次检测所得的阴影区域进行合并, 有:

$$S_3 = S_1 \cup S_2 \quad (9)$$

图 5 给出了根据 NVD 特征进一步消除阴影所得的结果, 可以看出, 本文的串行阴影去除方法可以较为完整地去除阴影, 但存在一定的误检情况, 下一步将针对误检情况进行处理。

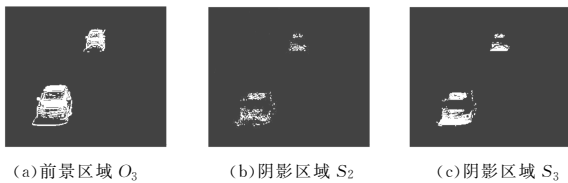


图 5 基于 NVD 特征的阴影去除结果

Fig. 5 Shadow removal results based on NVD feature

2.3 基于亮度的误检分析

图像中 (x, y) 处像素的亮度定义如下^[16]:

$$I(x,y) = \int_{\lambda} E(\lambda, x, y) R(\lambda, x, y) Q(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

其中, λ 为光的波长; $I(x, y)$ 表示 (x, y) 处像素的亮度; $E(\lambda, x, y)$ 为光照强度函数; $Q(\lambda)$ 为摄像机传感器的灵敏度; $R(\lambda, x, y)$ 为物体表面的反射系数, 与物体的材质有关。

在光照环境下, 图像中非阴影区域的亮度来源于环境光照与光源光照, 阴影区域的亮度则只与环境光照相关。设 E_g 为环境光强, E_l 为光源光强, 前景目标、背景图像、运动阴影

在 (x, y) 处的亮度可以表示为:

$$I_O(x,y) = (E_g + E_l) R_O(x,y) Q \quad (11)$$

$$I_B(x,y) = (E_g + E_l) R_B(x,y) Q \quad (12)$$

$$I_S(x,y) = E_g R_B(x,y) Q \quad (13)$$

其中, I_O 为前景目标亮度, I_B 为背景亮度, I_S 为阴影亮度, $R_O(x, y)$ 与 $R_B(x, y)$ 代表前景目标与背景在 (x, y) 处的反射系数。三者相除有:

$$\frac{I_O(x,y)}{I_B(x,y)} = \frac{(E_g + E_l) R_O(x,y) Q}{(E_g + E_l) R_B(x,y) Q} = \frac{R_O(x,y)}{R_B(x,y)} \quad (14)$$

$$\frac{I_S(x,y)}{I_B(x,y)} = \frac{E_g R_B(x,y) Q}{(E_g + E_l) R_B(x,y) Q} = \frac{E_g}{E_g + E_l} \quad (15)$$

由式(14)、式(15)可知, 在 (x, y) 处的前景目标亮度 I_O 与背景亮度 I_B 的比值只与二者的反射系数有关; 阴影亮度 I_S 与背景亮度 I_B 的比值则由环境光照与光源光照决定, 且为定值。实际上, 由于外界噪声的存在, $I_S(x, y)/I_B(x, y)$ 的值近似符合高斯分布, 且相互独立^[10,16], 因此可以根据置信区间剔除阴影区域 S_3 中误检的前景像素。

定义 μ 为 $I_S(x, y)/I_B(x, y)$ 的均值, σ 为 $I_S(x, y)/I_B(x, y)$ 的方差, 则有:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{p(x,y) \in S_3} \frac{I_S(x,y)}{I_B(x,y)} \quad (16)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{p(x,y) \in S_3} \left(\frac{I_S(x,y)}{I_B(x,y)} - \mu \right)^2 \quad (17)$$

根据亮度比值剔除误检的前景像素的方法为:

$$O_4(x,y) = \begin{cases} 1, & \left| \frac{I_S(x,y)}{I_B(x,y)} - \mu \right| < D\sigma \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

其中, O_4 表示从阴影区域 S_3 中还原的前景像素, 设置区间可信度为 85%, 则 $D=1.44$ 。

综上所述, 前景目标 O 与阴影区域 S 可以表示为:

$$O = O_3 \cup O_4 \quad (19)$$

$$S = S_3 - O_4$$

图 6 为最终的实验结果, 可以看出, 根据亮度比值置信区间可以较好地剔除误判的前景像素。



图 6 最终结果

Fig. 6 Final results

3 实验对比与分析

本文算法在 Opencv3.0 环境下采用 VC2010 编程实现, 实验平台配置为 Intel Pentium G3240 处理器, CPU 主频 3.1 GHz, 2GB RAM, Windows7(32 位)操作系统。为了对本文算法进行验证与评估, 取文献[6]中的亮度法、文献[7]中的颜色法、文献[11]中的并行的多特征融合方法, 在 pedestrians, PETS2006, bungalows 场景下分别进行对比实验。pedestrians 场景中运动阴影在形状尺寸上与运动目标十分相似; PETS2006 场景中室内存在多个光源, 地板反光现象明显, 前

景目标在地板上投射有多个阴影,通过背景差分提取的运动区域中存在运动目标合并的现象;bungalows 场景中阴影面积大,车身一侧被本影覆盖,背景差分所得的前景图像中前景目标形状畸变严重。上述场景中阴影的检测与去除是正确识别前景目标的关键。

引入文献[17]中的算法性能指标来对各算法进行评价:

$$\eta = \frac{TP_S}{TP_S + FN_S} \quad (20)$$

$$\xi = \frac{\overline{TP}_F}{\overline{TP}_F + FN_F}$$

其中, η 为阴影检测率; ξ 为目标识别率; TP_S 为被正确识别的阴影像素个数; FN_S 为未被识别的阴影像素个数; \overline{TP}_F 为前景目标像素个数与误检为阴影的前景目标像素个数之差; TP_F 为正确识别的前景目标像素个数; FN_F 为未被识别的前景目标像素个数。由式(20)可知,算法的 η 值与 ξ 值越大,阴影识别越准确,前景目标像素被误判的几率越小,算法的阴影检测与去除效果越好。

文中各算法的实验对比结果如图7所示,表1列出了各

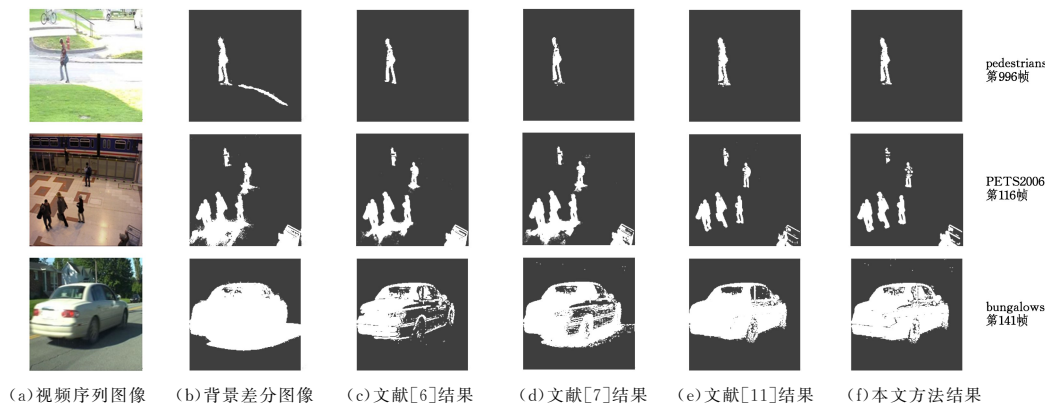


图7 各方法的实验结果

Fig. 7 Experimental results of each method

表1 不同场景下各算法的阴影检测率与目标识别率
Table 1 Shadow detection rate and target recognition rate of each algorithm in different scenarios

(单位:%)

方法	pedestrians		PETS2006		bungalows	
	η	ξ	η	ξ	η	ξ
文献[6]	92.3	82.3	47.4	64.5	40.5	62.1
文献[7]	91.7	85.2	45.9	63.4	42.3	63.5
文献[11]	93.9	87.7	88.2	94.6	86.9	83.4
本文	93.1	86.5	87.4	92.8	83.3	81.6

表2 不同场景下各算法的平均处理时间
Table 2 Average processing time of each algorithm in different scenarios

(单位:ms/帧)

方法	pedestrians	PETS2006	bungalows
文献[6]	10.3	13.6	15.7
文献[7]	18.5	21.4	24.9
文献[11]	207.2	274.8	304.3
本文	25.7	31.3	39.8

综上所述,虽然文献[6]中的亮度法与文献[7]中的颜色法处理速度快,实时性强,可以实现实时甚至高速处理,但单特征的阴影检测容易受环境因素的影响,鲁棒性与准确性差,

算法的阴影检测率与目标识别率,表2列出了各算法的平均处理时间。通过对比图7、表1和表2可以看出:pedestrians 场景下的光照条件良好,各算法均能有效地检测与消除阴影并分离前景目标。虽然亮度法^[6]、颜色法^[7]的阴影检测率与目标识别率略低于并行的多特征融合方法^[11]和本文所提方法,但其处理速度快,能够实现高速处理。PETS2006 场景下的光照条件复杂,室内光源发出的黄光也对图像中的前景目标与阴影的颜色组成造成了很大影响,因此亮度法^[6]与颜色法^[7]不能准确地检测与消除阴影。文献[11]中的方法根据多个特征进行阴影检测,有效地消除了光照环境对阴影检测的影响,本文方法引入的 NVD 特征对光照变化不敏感,可以有效地去除阴影并识别前景目标。在 bungalows 场景下,文献[6]中的亮度法无法区分本影与投影,阴影消除后的运动目标存在大面积的空洞;文献[7]中的颜色法虽然可以区分本影与投影,但阴影去除不完全,阴影检测率和目标识别率低;文献[11]中的方法与本文方法虽然存在一定的误检与漏检,但总体而言能够有效地区分阴影与运动目标,并还原前景目标的形状与尺寸信息。

具有较大的局限性。文献[11]中并行的多特征融合方法根据多个特征检测与去除阴影,有效地消除了环境因素对阴影检测的影响,鲁棒性强,准确性高,但并行的算法结构计算量大,无法满足实时性需求,另外该方法中多处阈值均靠经验选取,算法的自适应性差。本文所提方法结合了颜色与 NVD 特征检测,有效地克服了单特征阴影检测方法鲁棒性差的缺点,采用串行策略虽然一定程度上降低了多特征阴影检测的效果与目标识别率,但大幅减小了计算量,提高了算法的处理速度,基本满足了实时性需求,相对于其他算法,具有一定的优越性。

结束语 本文提出一种多特征融合的阴影去除算法。该算法根据颜色特征、归一化向量距离分布直方图来检测并消除阴影像素,利用亮度比值置信区间还原误判的前景像素。实验结果表明,该算法能在各场景下有效地去除阴影,阴影检测率与目标识别率高,处理时间相对较短,准确性与鲁棒性好。下一步工作将对算法进行进一步优化,以降低算法的处理时间,提高准确率,最终将其应用于多目标的移动追踪。

参考文献

- [1] SANIN A, SANDERSON C, LOVELL B C. Shadow detection:

- A survey and comparative evaluation of recent methods [J]. *Pattern Recognition*, 2012, 45(4):1684-1695.
- [2] ZIVKOVIC Z. Improved adaptive Gaussian mixture model for background subtraction[C]//The 17th International Conference on pattern Recognition. 2004:28-31.
- [3] ONOBUCHI K. Shadow elimination method for moving object detection[C]//Proceedings of International Conference on Pattern Recognition. 1998:583-587.
- [4] ZHAO L, YU H M. Vehicle detection based on shape priors and level set[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, 44(1):124-130. (in Chinese)
赵璐,于慧敏. 基于先验形状信息和水平集方法的车辆检测[J]. *浙江大学学报*, 2010, 44(1):124-130.
- [5] GAO X J, WAN Y C, YANG Y W, et al. Automatic Shadow Detection and Automatic Compensation in High Resolution Remote Sensing Images[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(8):1709-1720. (in Chinese)
高贤君,万幼川,杨元维,等. 高分辨率遥感影像的自动检测与自动补偿[J]. *自动化学报*, 2014, 40(8):1709-1720.
- [6] CHEN C T, SU C Y, KAO W C. An enhanced segmentation on vision-based shadow removal for vehicle detection[C]//Proceedings of the International Green Circuits and Systems. 2010:679-682.
- [7] SALVADOR E, CAVALLARO A, EBRAHIMI T. Cast shadow segmentation using invariant color features[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2004, 95(2):238-259.
- [8] HAN Y X, ZHANG Z S. Shadow detection based on texture feature in gray sequence images[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11):2931-2942. (in Chinese)
韩延祥,张志胜. 灰度序列图像中基于纹理特征的移动阴影检测[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11):2931-2942.
- [9] CAO J, CHEN H Q, ZHANG K, et al. Moving cast shadow detection based on region color and texture [J]. *Robot*, 2011, 33(5):638-633. (in Chinese)
曹健,陈红倩,张凯,等. 结合区域颜色和纹理的运动阴影检测方法[J]. *机器人*, 2011, 33(5):638-633.
- [10] QI M, DAI J Y, ZHANG Q, et al. Cascaded cast shadow detection method in surveillance scenes [J]. *Optik*, 2014, 125(3):1396-1400.
- [11] TANG C, AHMAD M O, WANG C Y. An efficient method of cast shadow removal using multiple features[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2013, 4(7):695-703.
- [12] NAKAGAMI K, NISHITANI T. The study on shadow removal on transform domain GMM foreground segmentation [C]//Proceedings of International Symposium on Communication and Information Technologies. 2010:867-872.
- [13] ZHANG L, ZHANG Q, XIA C X. Shadow Remover: Image Shadow Removal Based on Illumination Recovering Optimization [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(11):4623-4636.
- [14] CAO X J, WANG W T, SONG X L, et al. Vehicle shadow detection and Vehicle tracking algorithm based on multiple information fusion[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(11):4049-4055. (in Chinese)
曹晓娟,王文涛,宋晓琳,等. 基于多信息融合的车辆检测与车辆跟踪算法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(11):4049-4055.
- [15] HIGASHI K, FUKUI S, ADACHI Y, et al. New feature for shadow detection by combination of two features robust to illumination changes[C]//20th International Conference on Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems. 2016:896-903.
- [16] NADIMI S, BHANU B. Physical model for moving shadow and object detection in video [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(8):1079-1087.
- [17] 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.
- [18] YANG L, SU L H, WU B G, et al. Target Detection Algorithm of Hyperspectral Remote Sensing Imagery Combined with CEM [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2017, 31(12):146-150, 172. (in Chinese)
杨磊,苏令华,吴宝刚,等. 一种结合 CEM 的高光谱遥感影像目标检测算法[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2017, 31(12):146-150, 172.

(上接第 269 页)

- [7] ZHANG J, ZHENG C W, HU X H. Triangle mesh compression along the Hamiltonian cycle[J]. *The Visual Computer*, 2013, 29(6):717-727.
- [8] GANG M, JOHN C T, XU N X. A Generic Paradigm for Accelerating Laplacian-Based Mesh Smoothing on the GPU[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2014, 39(11):7907-7921.
- [9] ZHAN Y Z, LI Y T, WANG X Y, et al. A blind watermarking algorithm for 3D mesh models based on vertex curvature[J]. *Journal of Zhejiang University Science C*, 2014, 15(5):351-362.
- [10] SHARMA S, DEWAL M L, ANAND R S. Performance evaluation of 3D hybrid transforms and 2D-set partitioning methods for lossy hyperspectral data compression[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2015, 9(8):1881-1888.
- [11] LI B, LU C Y, LENG C C, et al. Robust Low Rank Subspace Clustering Based on Local Graph Laplace Constraint[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(11):1971-1980. (in Chinese)
- 李波,卢春园,冷成财,等. 基于局部图拉普拉斯约束的鲁棒低秩表示聚类方法[J]. *自动化学报*, 2015, 41(11):1971-1980.
- [12] NIU J W, DAI B, TONG C, et al. Complex network clustering algorithm based on Jordan-form of Laplace-matrix[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(3):11-21. (in Chinese)
牛建伟,戴彬,童超,等. 基于 Laplace 矩阵 Jordan 型的复杂网络聚类算法[J]. *通信学报*, 2014, 35(3):11-21.
- [13] TATSUMA A, AONO M. Multi-Fourier spectra descriptor and augmentation with spectral clustering for 3D shape retrieval[J]. *The Visual Computer*, 2009, 25(8):785-804.
- [14] WANG Y J, BENSON D J. Isogeometric analysis for parameterized LSM-based structural topology optimization[J]. *Computational Mechanics*, 2016, 57(1):19-35.
- [15] LEE M S, KIM H J, CHO H S, et al. Compressed-sensing (CS)-based 3D image reconstruction in cone-beam CT (CBCT) for low-dose, high-quality dental X-ray imaging[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2013, 63(5):1066-1071.