

文章编号 1004-924X(2013)11-2931-12

灰度序列图像中基于纹理特征的移动阴影检测

韩延祥, 张志胜*, 郝 飞, 陈 平

(东南大学 机械工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 实施移动目标检测时, 由于移动阴影与运动目标具有相似的运动特性, 常严重影响检测结果。本文假设视频序列中当前图像的阴影区域与对应的背景部分有相同的纹理特征, 提出一种新的基于纹理特征的移动阴影检测方法。为了实现纹理特征的表达, 在阴影检测过程中提出了几种纹理相似度测量方法, 并通过计算当前图像与背景图像的纹理相似度值来区分当前图像中阴影区域和前景目标。另外, 基于 Ostu 算法(大津算法)提出了一种自适应的阴影分割方法, 并分别对室内和室外环境下采集的视频进行了阴影检测。定性和定量分析表明, 在具有显著纹理结构的视频序列下, 所提出的方法对于阴影检测有很好的效果, 而对于图像模糊并伴有噪声的图像检测精度会有所降低。

关键词: 灰度序列图像; 阴影检测; Ostu 算法; 纹理相似度测量

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132111.2931

Shadow detection based on texture features in gray sequence images

HAN Yan-xiang, ZHANG Zhi-sheng*

(School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

* Corresponding author, E-mail: oldbc@seu.edu.cn

Abstract: Moving object detection is usually effected by moving shadows from the object and it is easy to produce serious problems because the object and the shadow have the same moving characteristic. This paper proposes a method for moving shadow detection based on texture feature under the assumption that shadow regions in the current image have the same texture feature with a corresponding background image. For the discrimination between shadows and foregrounds, several texture similarity measurements are used and the shadows and foregrounds in current image are distinguished by computing the similarity of current image and background image. Furthermore, an adaptive method for segmentation of shadows and foregrounds is presented based on Ostu algorithm. In the end, experiments are carried on the video extracted from indoor or outdoor environments. Analysis indicates that the method has a excellent detection result in a video sequence with outstanding texture features. However, detection accuracy will be reduced when the image suffers blurring or noising. The obtained results verify the efficiency of the proposed method by using both of subjective evaluation and objective evaluation.

Key words: gray sequence image; shadow detection; Ostu algorithm; texture similarity measurement

收稿日期: 2013-01-18; **修订日期:** 2013-03-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50805023); 江苏省“六大人才高峰”资助项目(No. 2008144); 东南大学优秀青年教师教学科研资助项目(No. 200902); 江苏省“青蓝工程”资助项目(No. 2008-30-1)

1 引言

视频序列移动目标检测通常采用背景差分法^[1-4],在多数情况下,这种方法可以达到很好的效果。然而,由于光照条件的变化会引起序列图像中像素强度的改变,从而使序列图像中移动目标的检测精度受到影响。因此,阴影的检测与消除已经是视频序列图像中重要的研究方向和课题。近年来,尽管彩色摄像机已经得到了广泛的应用,但目前仍有很多存档的灰度图像,另外,发展中国家普遍使用的廉价彩色摄像机仍采用灰度分辨率,因此,对于灰度图像处理算法的开发仍然是至关重要的。更重要的是,基于灰度信息的阴影检测方法可以与基于彩色信息的阴影检测方法相融合来提高阴影检测的鲁棒性。

通常情况下,阴影是由于光源点照射到背景的光线受到了目标物的阻挡而形成的,在这个过程中,场景中光照强度的变化并不会改变背景的表面纹理结构。因此,本文假定阴影区域的结构特征(即纹理或边缘)与背景图像中对应区域的结构特征一致,这种结构特征将导致序列图像中的阴影区域与对应的背景部分的局部相似,因此,可以通过寻找序列图像中具有相同视觉特征的区域来提取运动阴影。

2 相关工作

对于阴影的检测与消除,现有文献已经提出了很多的处理技术,其大致可以分为两类:基于模型的方法和基于属性的方法。基于模型的方法是利用先验知识建立基于场景、目标物及光照的几何关系;基于属性的方法是利用阴影的几何特点、亮度或颜色特征来识别阴影区域。

基于模型的方法主要是针对特定的应用场景,充分利用光源、目标形状等先验知识及阴影的方向、大小和形状等信息来实现阴影的检测^[5-7]。尽管上述方法在特定的应用场景中能够很好地实现阴影检测,然而,该技术受限于场景中目标物的类型,因此,很难达到通用性。

为克服上述局限性,通常采用一种基于阴影属性的方法。这种方法由于充分利用了图像中的梯度、颜色和纹理信息而更通用。文献^[8-11]根

据阴影边缘和移动目标边缘的不同,并通过融合一些复杂的填充算法来得到精度更高的检测结果。Cucchiara 等在 HSV 空间中利用阴影的颜色属性从移动目标中区分阴影点^[12-13]。类似地,Salvador 等^[14]认为在光照不变特征空间下,当前图像和背景图像中的对应像素值是相同的。尽管在不同空间下利用颜色特性来检测阴影简便快捷,然而,在实际应用中为了保证检测精度,这些不变特征需要取自高质量图像,且该类方法对噪声比较敏感,在室外环境下可能失效。

在灰度序列图像中,概率模型为实现阴影检测提供了一种有效的处理工具。基于马尔科夫随机场和贝叶斯理论,Wang 等^[15]在灰度序列图像中通过融合背景信息、强度、边缘特征来分割前景目标和移动阴影。类似地,Jung 等^[16]提出了一种单高斯模型与几何特征相融合的方法,并取得了很好的结果。上述方法在充分利用了像素强度、梯度等特征的基础上,建立了概率分布模型,实现了阴影的检测,因此,具有一定的通用性,但是在检测过程中要人为地设定一些分割阈值,这就降低了方法的能动性。此外,该类方法计算量大,很难融合到实时系统中。

通过上面的分析,可以看出,现有文献不仅利用像素值的分布特性,同时也考虑了像素值邻域内的局部相关性,取得了一定效果。然而,图像的局部结构特征作为图像的一种重要实现形式,在阴影检测中的应用并不多见。Lenoc 等^[17]认为阴影虽然降低了背景区域的强度值但是仍然保留了背景的表面结构模式和纹理特征,并利用小波变换提取了当前图像与对应背景图像的局部纹理结构,以此来区分阴影和前景目标。然而,该方法检测过程复杂、计算时间较长。Tian 等^[18]利用局部归一化交叉相关系数检测阴影。该方法简单有效,但是分割阈值需要根据人工经验来确定,对于情况各异的场景,不具有通用性。除局部归一化相关系数,经典的纹理表达方法——局部二值纹理模型,同样作为一种纹理相似度测量方法用于目标跟踪^[19-20]及阴影的检测中^[21]。杜友田等^[22]从阴影的物理特性出发,将每帧图像进行分块,对具有较强的结构相似性和色度近似性的像素点进行阴影分类。郭利生等^[23]综合考虑颜色信息、

空间信息和纹理信息,利用阴影的颜色、空间和纹理属性等约束条件对阴影和前景目标进行分类。基于判别随机场理论,查宇飞等^[24]利用阴影的颜色不变特征和纹理不变特征通过 Boosting 判别模型分别在两个特征空间内进行阴影的分割,获得候选阴影区,最后利用时空一致性提高了阴影检测的精度。该方法取得了很好的效果,但是该方法要经过几个不同的学习过程,因此需要消耗大量内存。

在本文中,假定阴影区域保留了背景中的纹理特征,通过测量图像中局部纹理的相似性来区分阴影区域和前景目标。文中介绍了几种纹理相似性测量方法以计算当前图像和背景图像的相似性。由于背景区域和阴影区域的测量值呈现不同的分布特性,本文又提出一种自适应的阴影区域分割方法,并比较各个相似性测量方法在阴影检测中的性能。

3 基于纹理的阴影相似性测量方法

在阴影检测过程中,假设图像的阴影区域与对应背景区域纹理结构相同,因此,可以通过计算图像的纹理相似性来区分移动区域的阴影部分与前景目标。本部分主要介绍 3 种纹理相似性测量方法。

3.1 互相关法

在背景图像和当前图像中,将图像分割成大小为 $M \times N$ 的图像块。其中, p_c 和 p_b 分别表示要计算的当前图像和背景图像中的图像块, $NCC(p_c; p_b)$ 表示计算得到的互相关值。该方法是由欧氏距离发展而来,定义如下:

$$NCC_1(p_c; p_b) = \sum_{(x,y) \in P_c} \sum_{(x,y) \in P_b} p_c(x,y) p_b(x,y). \quad (1)$$

在上式中,相似度测量值的大小与选择的矩形窗口的大小有关,并且对光照变化比较敏感。为了克服上述不足,通过施瓦茨不等式,研究者提出了改进公式:

$$\frac{\sum_{(x,y)} p_c(x,y) p_b(x,y)}{\left(\sum_{(x,y)} p_c^2(x,y) \sum_{(x,y)} p_b^2(x,y) \right)^{\frac{1}{2}}} \geq \frac{\sum_{(x,y)} p_c(x,y) p_b(x,y)}{\left(\sum_{(x,y)} p_c^2(x,y) \sum_{(x,y)} p_b^2(x,y) \right)^{\frac{1}{2}}}. \quad (2)$$

即得到如下的互相关公式:

$$NCC_2(p_c; p_b) = \frac{\sum_{(x,y)} p_c(x,y) p_b(x,y)}{\left(\sum_{(x,y)} p_c^2(x,y) \sum_{(x,y)} p_b^2(x,y) \right)^{\frac{1}{2}}}. \quad (3)$$

为了计算方便,本文采用如下的归一化互相关公式:

$$NCC(p_c; p_b) = \frac{\sum_{(x,y)} (p_c(x,y) - \bar{p}_c)(p_b(x,y) - \bar{p}_b)}{\left(\sum_{(x,y)} (p_c(x,y) - \bar{p}_c)^2 \sum_{(x,y)} (p_b(x,y) - \bar{p}_b)^2 \right)^{\frac{1}{2}}}. \quad (4)$$

其中, $NCC(p_c; p_b)$ 表示归一化的相关系数, \bar{p}_c 和 \bar{p}_b 分别指矩形区域 p_c 和 p_b 的均值。采用上式可以将相似度测量值归一化到 $[0, 1]$ 区间内,方便后面的数据处理。

3.2 相关比法

在统计学中,相关比是由 Pearson 提出,并用于不同种类之间的离散程度量化。相关比的定义如下:

$$CR^2 = \frac{(n_c(\bar{y}_c - \bar{y}) + n_b(\bar{y}_b - \bar{y}))}{\sum_{(x,y) \in P_c} (p_c(x,y) - \bar{y}) + \sum_{(x,y) \in P_b} (p_b(x,y) - \bar{y})}. \quad (5)$$

其中, \bar{y}_c 和 \bar{y}_b 分别表示图像块 p_c 和 p_b 的均值, \bar{y} 是 2 个图像块中所有像素的均值, n_c 和 n_b 分别表示 2 个对应图像块中的像素数目。

为了提高编程效率,本文采用另外一种表达方式^[25],即:

$$CR = 1 - \frac{1}{(n_c + n_b)\sigma^2} (n_c\sigma_c^2 + n_b\sigma_b^2). \quad (6)$$

其中:

$$\sigma^2 = \frac{1}{(n_c + n_b)} \left[\left(\sum_{(x,y) \in P_c} p_c^2(x,y) - \bar{y} \right) + \left(\sum_{(x,y) \in P_b} p_b^2(x,y) - \bar{y} \right) \right]$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{n_i} \left(\sum_{(x,y) \in P_i} p_i^2(x,y) - \bar{y}_i \right)$$

i 表示当前图像块或背景图像块 p_c, p_b 。同样,上式相关比也已经归一化到 $[0, 1]$ 区间内。

3.3 互信息法

互信息来源于信息论。在数学上,互信息依

赖于图像熵,用于度量 2 个数据集合的统计相关性,并以数据的概率密度函数为基础。并定义如下:

$$MI(p_c; p_b) = H(p_c) + H(p_b) - H(p_c; p_b). \quad (7)$$

其中, $H(p_c)$ 和 $H(p_b)$ 表示信息熵,即图像块的概率分布期望值。 $H(p_c; p_b)$ 表示图像块 p_c, p_b 的联合熵。

上述互信息的定义是非对称的,为了方便后面计算,本文采用归一化的互信息值,即

$$NMI(p_c; p_b) = \frac{2MI(p_c; p_b)}{H(p_c) + H(p_b)}. \quad (8)$$

本文将式(8)运用到当前图像和背景图像对应图像块的相似性测量中。依次计算对应图像块的直方图,并获得两者的互信息值。

4 阴影分割

为了实现阴影检测,首先采用背景差分法检测出运动目标(包括前景目标和阴影)。其中,最常用的方法是 Stauffe 等^[26]提出的混合高斯模型,该方法能够有效地检测视频中的移动目标,并获得背景模型。本文提出的阴影检测过程如图 1 所示。

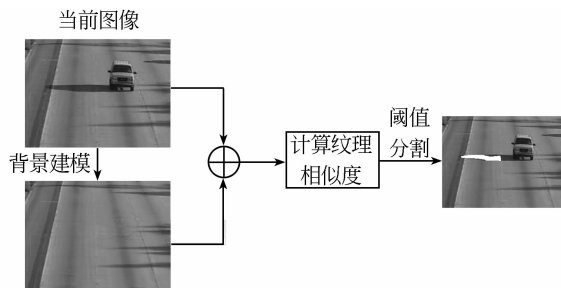


图 1 阴影检测过程

Fig. 1 Shadow detection process

对于阴影区域,假定当前图像的阴影区域与相应的背景区域的结构或纹理信息相同,并利用相似度测量方法计算当前图像与对应背景图像矩形区域(大小为 $M \times N$)内的局部纹理相似度。采用不同的相似度测量方法所获得的阴影和前景目标相似度值的分布特性是不同的。其中,互相关法和互信息法,获得的测量值越大,表明两个矩形

区域的相似性越大,则阴影区域的可能性也越大;相反,测量值越小,表明图像区域的相似性越小,两者之间纹理结构的差异性则越大,被检测区域为前景目标的可能性就越大,而相关比法则相反。

为有效地区分阴影区域和前景目标,本文对获得的一系列纹理相似性测量值进行分类,即阴影点和前景点。由于获得的这两类相似度测量值呈现双峰分布,如图 2 所示,本文将采用经典的 Otsu 算法进行分类,该算法是基于最大类间方差的阈值化方法,又称为大津法。该方法是由日本学者大津于 1979 年提出的一种自适应地确定阈值的方法^[27]。该方法根据图像的灰度特性将图像分为两部分。若两类像素的类间方差越大,说明两部分的差别越大,当其中一类错分为另一类时,就会导致两部分的差别变小,因此,使类间方差最大化的分类意味着错分概率最小。

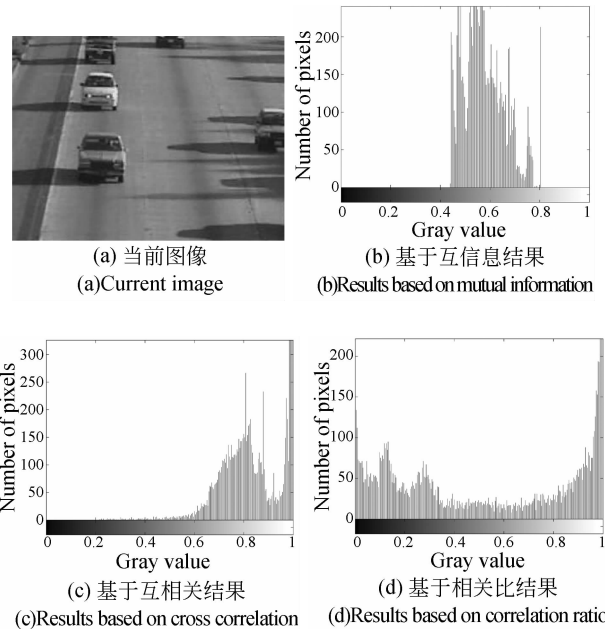


图 2 当前图像与背景图像的纹理相似度测量值柱状图

Fig. 2 Histogram of texture similarity measurement between current and background images

为方便计算,首先将获得的相似度测量值通过如下公式归一化到 $[0, 255]$ 区间内,即

$$M_c(x) = \frac{255M(x)}{M_{\max} - M_{\min}}, \quad (9)$$

其中: $M(x)$ 和 $M_c(x)$ 分别表示在 x 处的相似度测量值和归一化后的测量值, M_{\max} 和 M_{\min} 分别表示相似度测量值中的最大值和最小值。

经过上式处理后,得到一系列归一化后的相似度测量值,取值范围为 $[0, 255]$ 。假定测量值 i 的像素值数目为 n_i , n 表示相似度测量值的数目,测量值 i 发生的概率为:

$$p_i = \frac{n_i}{n}. \quad (10)$$

该系列测量值的平均值为:

$$\mu_T = \sum_{i=0}^{255} ip_i. \quad (11)$$

由于该系列测量值由两部分组成,因此通过单一阈值将测量值分为两类,即 $C_1 = \{0, 1, \dots, t\}$ 和 $C_2 = \{t+1, t+2, \dots, 255\}$, 其中, t 是分割阈值。两类分别对应阴影和前景目标,其概率分别为:

$$\omega_1(t) = \sum_{i=0}^t p_i \text{ 和 } \omega_2(t) = \sum_{i=t+1}^{255} p_i. \quad (12)$$

两类的平均值分别为:

$$\mu_1(t) = \sum_{i=1}^t ip_i / \omega_1(t) \text{ 和 } \mu_2(t) = \sum_{i=t+1}^{255} ip_i / \omega_2(t). \quad (13)$$

Ostu 最大化下式以获得最优分割阈值,即:

$$t^* = \text{ArgMax}_{0 \leq t \leq 255} \{\sigma_B^2(t)\}, \quad (14)$$

其中: $\sigma_B^2(t)$ 表示类间方差,定义如下:

$$\sigma_B^2(t) = \omega_1(t)(\mu_1(t) - \mu_T)^2 + \omega_2(t)(\mu_2(t) - \mu_T)^2. \quad (15)$$

为计算方便,本文采用更简化的表达式来获得最优阈值,即

$$\sigma_B^2(t) = \sigma^2 - \sigma_w^2(t) = \omega_1(t)\omega_2(t)[\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2. \quad (16)$$

在算法实现过程中,令 t 在 $0 \sim 255$ 内,每次加 1, $\sigma_B^2(t)$ 最大时对应的 t^* 即为最优阈值。同时利用获得的阈值对相似度测量值进行分类,分别对应阴影类和前景目标类。

5 实验结果

本部分将采用所提方法在不同环境(室内和室外)和不同光照变化(晴天,阴天等)条件下进行阴影检测,并通过定性和定量分析验证方法的有效性和鲁棒性。文中采用的是几种经典基准视频序列^[28]:“HighwayI”视频序列是在室外交通环境下拍摄的,视频中包含显著性阴影和光滑背景;“Seam”视频序列是在校园教学楼入口处拍摄

的,该视频中光照变化复杂,除阴影效应外,还包括反光效应和传感器的饱和效应;视频“Campus”和“Laboratory”分别在室外和室内环境下拍摄,视频中含有大量噪声,并伴有图像模糊现象。

5.1 窗口大小的选择

由于不同的窗口大小包含的纹理信息不同,在阴影检测中的效果会有所差异,因此,为检验不同纹理相似度测量方法在阴影检测中的性能,本文首先比较几种相似度测量方法在不同窗口大小下的检测效果,并考虑计算时间,从而选择合适大小的窗口。算法在 Matlab 环境下编写,在 CPU 为 AMD Athlon(tm)X2 Dual-core, 2.10 GHz, 内存为 2.00G 的计算机上运行,操作平台为 Microsoft Windows XP Professional SP3。



图 3 基于相关比方法在不同窗口大小下的检测效果
Fig. 3 Detection performance obtained by correlation ratio in different window sizes

由于未有文献表明窗口大小对阴影检测精度的影响,本文测试了不同窗口大小条件下的检测效果,如图 3-图 5 所示。图 3 是在“HighwayI”视频序列中对某帧图像采用相关比法的阴影检测效果,实验分别采用不同大小的矩形窗口(5×5 、 10×10 、 15×15)计算纹理的相似性。检测结果如图 3 所示,其中,图像中白色表示阴影区域。从实验结果可以看出,基于相关比的阴影检测效果比较差,而且结果中存在很多虚假的阴影点。

同样地,在不同窗口大小(25×25 、 45×45 、 65×65 、 85×85)下基于互信息和互相关方法的阴影检测结果如图 4、图 5 所示。图 4 显示了基于互信息的(MI)阴影检测结果,可以看出,当窗口较小时,检测结果中会出现很多的虚假阴影点,随着窗口的增大,虚假点减少,阴影检测的精度提高,该方法的检测效果较相关比法有了明显提高。其中,当窗口为 85×85 时,达到了较好的效果。图

5 为基于互相关的阴影检测结果,可以看出检测结果较上面两种方法都有了明显的提高,并且在

窗口大小为 25×25 和 45×45 时获得了较好的检测结果。

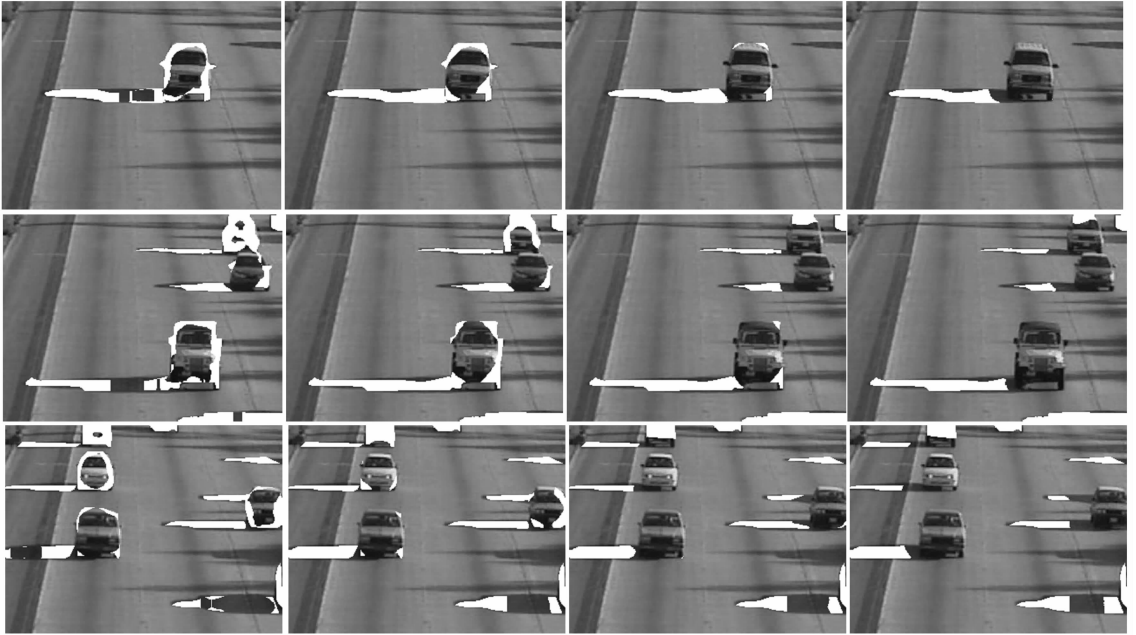


图 4 不同窗口大小下基于互信息的阴影检测结果,第一到第四列窗口大小分别为 25×25 、 45×45 、 65×65 、 85×85
Fig. 4 Shadow detection results based on mutual information with different window sizes in 25×25 , 45×45 , 65×65 , 85×85 from rows one to four

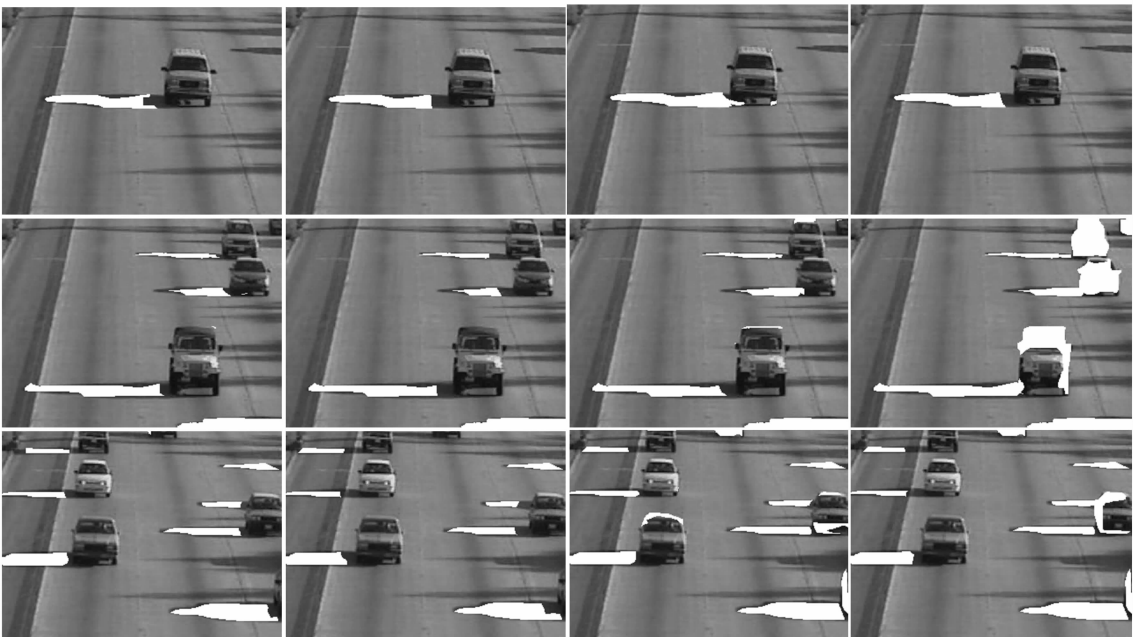


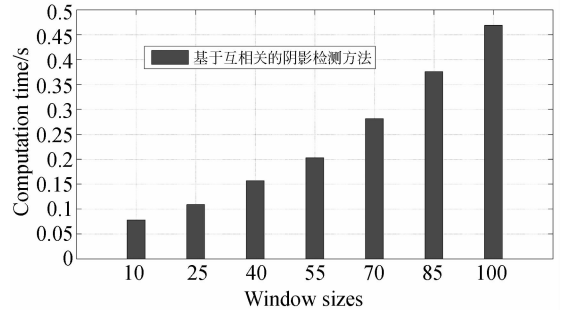
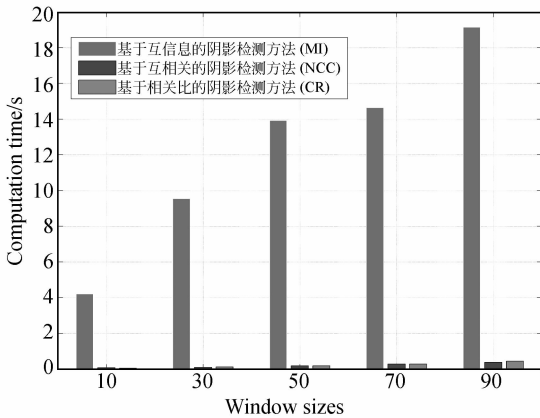
图 5 不同窗口大小下基于互相关的阴影检测结果,第一到第四列窗口大小分别为 25×25 、 45×45 、 65×65 、 85×85
Fig. 5 Shadow detection results based on cross correlation with different window sizes in 25×25 , 45×45 , 65×65 , 85×85 from rows one to four

从上面的分析可以看出,阴影的检测结果与窗口大小有关。基于互相关的方法随着窗口的增大,阴影的误检率增大;而基于互信息的方法随着窗口的增大,检测精度提高。这是由于采用基于互相关方法,在窗口较小时,文中假定 2 个图像块之间满足线性关系是合理的,这时,通过计算对应图像块的互相关系数可以准确地获得图像块间的相似性测量值,而当窗口变大时,2 个图像块之间并不一定满足线性关系,从而导致纹理相似度测量值的误差变大,使得阴影误检率增大。同样地,由于在计算互信息值时,假定 2 个图像块之间是可以满足任意函数关系的,当图像块的矩形窗口较小时,没有足够的纹理信息区分 2 个图像块,而随着图像块的增大,阴影的检测精度会有所提高。

窗口大小的选择会影响算法的计算时间,图 6

(a)显示了基于互信息、互相关、相关比方法在不同窗口大小下的计算时间。从图 6 可以看出,随着窗口的增大,计算时间逐渐增加,其中,基于互信息方法的计算时间要明显高于其他方法,这是由于计算互信息值时涉及的变量较多。图 6(b)显示了基于互相关方法的计算时间随着窗口大小的变化情况。

从上述几种方法在不同窗口大小下的计算时间和阴影检测结果可以看出,基于互相关的纹理相似度测量方法要明显优于基于相关比方法的阴影检测效果;另外,基于互相关的检测精度要高于基于互信息的检测结果,同时,基于互相关方法的计算时间要明显小于基于互信息的方法。因此,为了保证阴影检测精度,同时节约计算时间,本文将采用窗口大小为 45×45 的互相关相似度测量方法对阴影的检测结果进行分析。

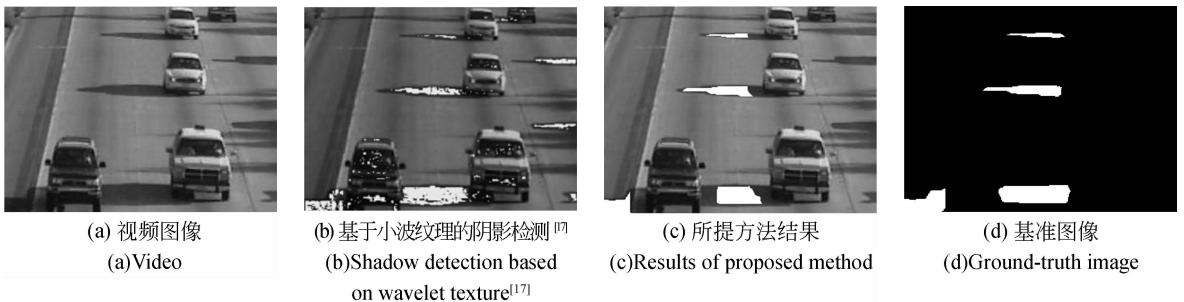


(a) 基于不同纹理测度的阴影检测计算时间比较
(a) Comparison of computation time of shadow detection by different methods based on different textures

(b) 在不同窗口大小下基于互相关的阴影检测时间
(b) Computation time for shadow detection based on cross correlation with different window sizes

图 6 计算时间

Fig. 6 Computation time



(a) 视频图像
(a) Video

(b) 基于小波纹理的阴影检测^[17]
(b) Shadow detection based on wavelet texture^[17]

(c) 所提方法结果
(c) Results of proposed method

(d) 基准图像
(d) Ground-truth image

图 7 阴影检测结果比较

Fig. 7 Comparison of shadow detection



图 8 室外视频序列下的阴影检测结果。第二列,第四列,第六列分别为视频“Seam”“HighwayI”和“Campus”的阴影检测结果

Fig. 8 Shadow detection in outdoor video. (Columns two, four and six show the shadow detection results videos “Seam”, “HighwayI” and “Campus”)

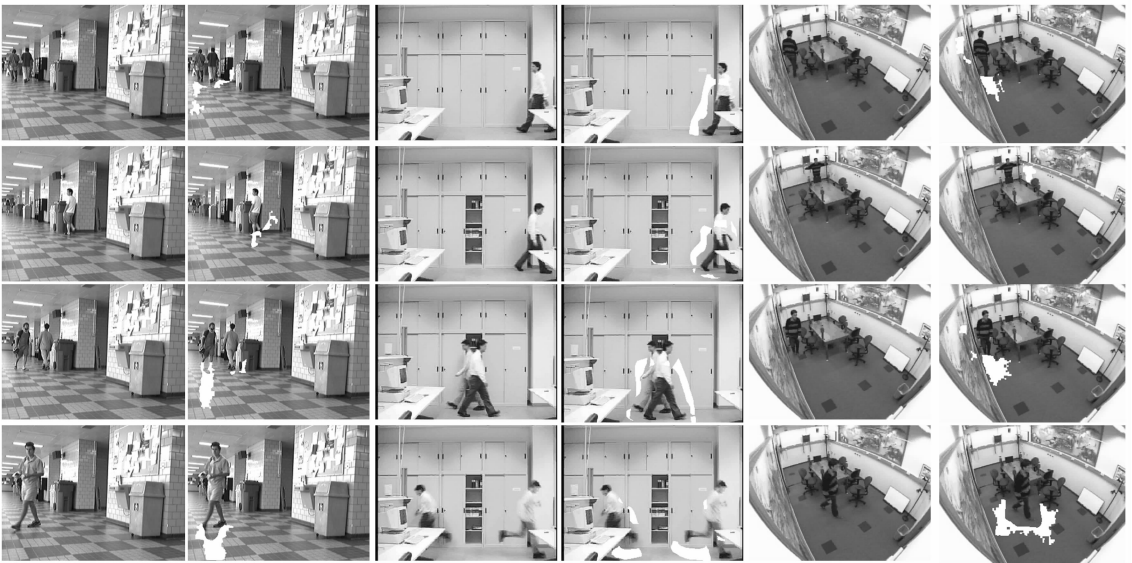


图 9 室内视频序列阴影检测结果,第二列,第四列,第六列分别为视频“Hallway”“Laboratory”和“Room”的阴影检测结果

Fig. 9 Shadow detection in indoor video. (Columns two, four and six show the shadow detection results for videos “Hallway”, “Laboratory” and “Room”)

5.2 定性分析

实验选择了 5 个具有代表性的视频序列图像 (HighwayI, Campus, Laboratory, Hallway 和 Intelligent Room) 验证本文算法的有效性,其中,视频包括室外环境下的显著性阴影和室内环境下的非显著性阴影。

图 7 显示了“HighwayI”视频中某一帧和其在不同算法下的阴影分割结果。为了方便比较,图中分别列出了基于小波纹理的方法^[17]和手工分割的图像。从图中可以看出,与文献[17]相比,本文算法的分割结果更准确和更平滑。

表 1 各种算法的性能比较

Tab. 1 Comparison of performance for different methods

(%)

Method	Performance									
	HighwayI		Campus		Laboratory		Hallway		Room	
	η	ξ	η	ξ	η	ξ	η	ξ	η	ξ
SP ^[28]	59.59	84.70	72.43	74.08	64.85	95.39	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>	76.27	90.74
SNP ^[28]	81.59	63.76	80.58	69.37	84.03	92.35	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>	72.82	88.90
DNM1 ^[28]	69.72	76.93	82.87	86.65	76.26	89.87	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>	78.61	90.29
DNM2 ^[28]	75.49	62.38	69.10	62.96	60.34	81.57	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>	62.00	93.89
ICF ^[29]	71.82	79.29	72.4	72.4	88.24	93.57	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>	73.45	86.52
GMSM ^[29]	75.43	74.67	66.2	73.2	76.62	75.14	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>	73.6	79.1
ER ^[30]	67.17	90.19	87.95	97.74	86.28	92.64	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>	88.63	88.91
LCD ^[30]	81.0	85.0	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>	84%	91%	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>
提出算法	73.80	97.28	74.62	94.23	51.37	93.81	85.50	89.85	89.98	92.50

图 8 显示了室外环境下视频的阴影检测结果。从图 8 可以看出,本文提出的方法在视频“Seam”和“HighwayI”中取得了很好的效果,而在视频“Campus”中阴影的误检率明显提高,这是由于视频“Campus”的分辨率低,图像模糊并伴有噪声,而图像互相关法在纹理相似度测量中对于像素值的非线性变化比较敏感,从而,影响了检测结果。

同样,本文验证了在室内环境下所提算法的有效性进行了验证,检测结果如图 9 所示。在视频“Hallway”中,阴影检测结果比较准确;在“Room”视频中,部分实现了阴影检测,但同时漏检率比较高;从视频“Laboratory”的检测结果中可以看出,检测效果比较差,图像中不仅有大量的阴影未检测到,而且视频中人体上半身跟背景相似的部分也被误认为阴影,这是由于在视频序列中,背景部分和人体上半身部分结构平滑,纹理相似度高,极易被误判为背景。在后面的研究中,可以通过采用将强度、纹理信息及统计理论相结合的方法来解决该问题以提高算法的精度。

通过对上述视频序列检测结果的分析可以看出,对于纹理结构比较明显的视频序列,所提算法有很好的检测效果,如视频“Seam”和“Hallway”,而对于纹理结构不明显的视频,由于前景目标与背

景部分相似度比较高,容易被误判为阴影。此外,对于平滑背景和噪声图像,需要更加深入的研究,如通过与统计理论相结合等,以提出更加鲁棒的方法。

5.3 定量比较

为了更直观地评价算法的性能,本文采用由文献[28]提出的评价指标,即阴影检测率 η 和阴影识别率 ξ :

$$\eta = \frac{TP_S}{TP_S + FN_S}, \quad (17)$$

$$\xi = \frac{\overline{TP_F}}{TP_F + FN_F}. \quad (18)$$

下标 S 代表移动阴影, F 代表前景目标。 TP_S 指被正确检测为阴影的像素点数目; FN_S 为被错误检测为其他类型的阴影像素点数目; TP_F 为被正确检测为前景目标的像素点数目; FN_F 为被错误检测为其他类型的前景像素点数目; $\overline{TP_F}$ 为真实前景像素数目减去检测为阴影的前景像素点数目。

在实际计算中,通过手工分割视频序列中的阴影区域和前景目标来获得参考模板,将其与所提算法检测得到的阴影和前景相比较,从而,获得阴影检测率和阴影识别率。表 1 显示了提出算法与现有算法的比较结果。

从表 1 可以看出,本文提出的算法在阴影识别

率 ξ 上优于绝大多数的方法;在视频“Hallway”和“Room”中,阴影检测率 η 要高于其他方法,在视频“Campus”中,由于图像模糊和噪声的存在,阴影检测率处于中等水平,如前面的分析,在视频“Laboratory”中阴影检测率要明显低于其他方法。

6 结 论

本文针对视频序列中出现的阴影,假定当前图像中的阴影区域与背景图像具有相同的纹理特征,提出一种基于纹理特征的阴影检测方法。针对纹

理的表达方式,提出了几种纹理相似度测量方法,并采用 Ostu 算法(大津算法)实现阴影区域和前景目标的自动分割。为验证方法的有效性,文中分别对室内和室外环境下采集的视频进行阴影检测。实验结果表明,基于互相关法的纹理相似度测量方法比相关比和互信息方法能更有效地检测阴影,并且节省了计算时间。定性和定量分析表明,在具有显著纹理结构的视频序列下,所提出的方法对于阴影检测有很好的效果,而对于图像模糊并伴有噪声的图像,其检测精度会有所降低,对于背景光滑的视频图像,阴影的漏检率会显著提高。

参考文献:

- [1] 丁雪梅,王维雅,黄向东. 基于差分 and 特征不变量的运动目标检测与跟踪 [J]. 光学精密工程, 2007,15(4): 570-576.
DING X M, WANG W Y, HUANG X D. New method for detecting and tracking of moving target based on difference and invariant[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(4): 570-576. (in Chinese)
- [2] 吴君钦,刘昊,罗勇. 静态背景下的运动目标检测算法[J]. 液晶与显示, 2012, 27(5): 682-686.
WU J Q, LIU H, LUO Y. Algorithm of moving object detection in static background[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012,27(6): 682-686. (in Chinese)
- [3] 李英,李静宇,徐正平. 结合 SURF 与聚类分析方法实现运动目标的快速跟踪[J]. 液晶与显示, 2011, 26(4): 544-550.
LI Y, LI J Y, XU ZH P. Moving target fast tracking using SURF and cluster analysis method[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011,26(4): 544-550. (in Chinese)
- [4] 吕国亮,赵曙光,赵俊. 基于三帧差分 and 连通性检验的图像运动目标检测新方法[J]. 液晶与显示, 2007,22(1): 87-92.
LV G L, ZHAO SH G, ZHAO J. Novel method of moving object detection based on three frame difference and connectivity checking [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007,22(1): 87-92. (in Chinese)
- [5] HSIEH J W, HU W F, CHANG C J, et al.. Shadow elimination for effective moving object detection by Gaussian shadow modeling [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(6): 505-516.
- [6] WANG Y. Real-time moving vehicle detection with cast shadow removal in video based on conditional random field [J]. *IEEE Transactions on Circuits Systems for Video Technology*, 2009, 19(3): 437-441.
- [7] FANG L Z, QIONG W Y, SHEND Y Z. A method to segment moving vehicle cast shadow based on wavelet transform [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2008, 29(16): 2182-2188.
- [8] STAUDER J, MECH R, OSTERMANN J. Detection of moving cast shadows for object segmentation [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 1999, 1(1): 65-76.
- [9] XU D, LI X L, LIU Z K, et al.. Cast shadow detection in video segmentation [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2005,26(1): 91-99.
- [10] XU D, LIU J Z, LI X L, et al.. Insignificant shadow detection for video segmentation [J]. *IEEE Transactions on Circuits System Video Technology*, 2005, 15(8): 1058-1064.
- [11] LI Z, JIANG P H, MA H, et al.. A model for dynamic object segmentation with kernel density estimation based on gradient features [J]. *Image and Vision Computing*, 2009, 27(6): 817-823.
- [12] 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 - Proceedings*, 2001, 334-339.
- [13] CUCCHIARA R, GRANA C, PICCARDI M, et al.. Detecting moving objects, ghosts, and shadows in video streams [J]. *IEEE Transactions on*

- Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003,25(10): 1337-1342.
- [14] SALVADOR E, CAVALLARO A, EBRAHIMI T. Cast shadow segmentation using invariant color features [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2004,95(2): 238-259.
- [15] WANG Y, TAN T, LOE K F, *et al.*. A probabilistic approach for foreground and shadow segmentation in monocular image sequences [J]. *Pattern Recognition*, 2005,38(11): 1937-1946.
- [16] JUNG C R. Efficient background subtraction and shadow removal for monochromatic video sequences [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2009,11(3): 571-577.
- [17] LEONE A, DISTANTE C. Shadow detection for moving objects based on texture analysis [J]. *Pattern Recognition*, 2007,40(4): 1222-1233.
- [18] TIAN Y L, LU M, HAMPAPUR A. Robust and efficient foreground analysis for real-time video surveillance [C]. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005,1: 1182-1187.
- [19] 陈晓钟, 孙华燕. 一种自然纹理背景下的图像目标检测方法[J]. *光学精密工程*, 2000,8(5): 421-424.
- CHEN X ZH, SUN H Y. Targets detection method for image under nature texture background [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,8(5): 421-424. (in Chinese)
- [20] 姜永林, 屈楨深, 王常虹. 基于纹理及统计特征的视频背景提取[J]. *光学精密工程*, 2008,16(1): 172-177.
- JIANG Y L, QU ZH SH, WANG CH H. Video background extraction based on textural and statistical features[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(1): 172-177. (in Chinese)
- [21] 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): 628-633.
- CAO J, CHEN H Q, ZHANG K, *et al.*. Moving cast shadow detection based on region color and texture [J]. *Robot*, 2011,33(5): 628-633. (in Chinese)
- [22] 杜友田, 陈峰, 徐文立. 基于区域的运动阴影检测方法[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2006,46(1): 141-144.
- DU Y T, CHEN F, XU W L. Region-based moving shadow detection approach [J]. *Journal of Tsinghua University: Science & Technology*, 2006,46(1): 141-144. (in Chinese)
- [23] 郭利生, 郭立, 焦荣惠, 等. 一种基于运动阴影的目标检测算法[J]. *模式识别与人工智能*, 2007,20(2): 180-184.
- GUO L SH, GUO L, JIAO R H, *et al.*. An object detection algorithm based on moving shadow [J]. *Pattern Recognition & Artificial Intelligence*, 2007,20(2): 180-184. (in Chinese)
- [24] 查宇飞, 楚瀛, 王勤, 等. 一种基于 Boosting 判别模型的运动阴影检测方法[J]. *计算机学报*, 2007,30(8):1295-1301.
- CHA Y F, CHU Y, WANG X, *et al.*. A boosting discriminative model for moving cast shadow detection [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2007,30(8):1295-1301. (in Chinese)
- [25] ROCHE A, MALANDAIN G, PENNEC X, *et al.*. The correlation ratio as a new similarity measure for multimodal image registration [C]. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - Miccai'98*, W M Wells, 1998: 1115-1124.
- [26] STAUFFER C, GRIMSON W E L. Learning patterns of activity using real-time tracking [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(8): 747-757.
- [27] OTSU N. A Threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979,9(1): 62-65.
- [28] 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.
- [29] ZHANG W, FANG X ZH, YANG X K, *et al.*. Moving cast shadows detection using ratio edge [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2007,9(6): 1202-1214.
- [30] AMATO A, MOZEROV M G, BAGDANOV A D, *et al.*. Accurate moving cast shadow suppression based on local color constancy detection [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(10): 2954-2966.

作者简介:



韩延祥(1984—),男,山东潍坊人,博士研究生,2009年于安徽工业大学获得硕士学位,主要研究方向为机器视觉图像处理。E-mail:hyx606@126.com



郝 飞(1982—),男,江苏滨海人,博士研究生,2004年、2007年于长安大学分别获得学士、硕士学位,主要从事图像处理、机械视觉测量、机械振动控制方面的研究。E-mail: hf_1982@njit.edu.cn



陈 平(1987—),男,安徽马鞍山人,博士研究生,2008年、2011年于安徽工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事模式识别和视觉测量方面的研究。E-mail:chenpingnote@sina.com

导师简介:



张志胜(1974—),男,江苏泰州人,博士,教授,1997年、2004年于东南大学分别获得硕士、博士学位,主要研究方向为机器视觉理论与应用,多工步制造过程质量保证等。E-mail:oldbc@seu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)