

# 面向移动增强现实的室外阴影实时检测技术

仇 栋<sup>1,2</sup>, 吴云超<sup>2</sup>, 李蔚清<sup>3</sup>, 苏智勇<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏南京 210094;  
2. 信息系统工程重点实验室, 江苏南京 210007;  
3. 南京理工大学计算机科学与工程学院, 江苏南京 210094)

**摘要:** 针对目前移动视点下视频阴影检测算法存在的误检测率高和边缘连续性差的问题, 提出了一种基于边跟踪、边检测框架的实时阴影检测算法。首先对前后 2 帧重叠的阴影部分进行 2 次光流跟踪, 并筛选掉前后向跟踪误差较大的点, 通过 Canny 边缘置信保证跟踪边缘的准确性; 然后通过基于光流的区域划分法得到待检测的新增区域; 其次, 针对纹理边缘误检测、软阴影检测和暗黑区域误检测等问题构建了七维特征向量, 且通过提取阴影边缘特征向量训练支持向量机(SVM)分类器, 以检测新增区域中的阴影; 最后对于检测结果中存在的断边, 提出一种基于 RGB 颜色空间梯度方向一致性算法对断边进行优化连接。实验结果表明与最新的研究成果相比该算法综合性能最高, 在检测准确性和边缘连续性方面优于现有方法。

**关 键 词:** 增强现实; 光流跟踪; 阴影检测; 移动视点; 阴影交互

**中图分类号:** TP 391

**DOI:** 10.11996/JG.J.2095-302X.2022010085

**文献标识码:** A

**文章编 号:** 2095-302X(2022)01-0085-08

## Real time outdoor shadow detection technology for mobile augmented reality

QIU Dong<sup>1,2</sup>, WU Yun-chao<sup>2</sup>, LI Wei-qing<sup>3</sup>, SU Zhi-yong<sup>1</sup>

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China;

2. The Information System Engineering Important Laboratory, Nanjing Jiangsu 210007, China;

3. School of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of high false detection rate and poor edge continuity in current video shadow detection algorithms in mobile view, a real-time shadow detection algorithm based on track and detection framework was proposed. Firstly, the overlapped shadow parts of the two frames were tracked twice, the tracking points with larger error were filtered by forward and backward tracking, and the accuracy of the tracking edge was ensured by Canny edge confidence. Then, the new region to be detected was obtained by the region division method based on optical flow. Secondly, seven-dimensional feature vectors were constructed for texture edge error detection, soft shadow detection, and dark area error detection. Then the support vector machine (SVM) classifier was trained by extracting feature vectors from shadow edge, and the trained classifier was employed to detect the shadow in the new area. Finally, for the broken edges in the detection results, an algorithm based on RGB color space gradient direction consistency was proposed to optimize the connection of the broken edge. Experimental results show that the proposed

---

收稿日期: 2020-06-17; 定稿日期: 2020-08-17

**Received:** 17 June, 2020; **Finalized:** 17 August, 2020

**基金项目:** 信息系统工程重点实验室省部级开放基金项目(05202005); 省部级装备技术基础科研项目(211ZQT41016)

**Foundation items:** Science and Technology on Information System Engineering Laboratory (05202005), Project of Equipment Technology Basis (211ZQT41016)

**第一作者:** 仇 栋(1997-), 男, 硕士研究生。主要研究方向为计算机图形学、增强现实。E-mail: qiu dong@njjust.edu.cn

**First author:** QIU Dong (1997-), master student. His main research interests cover computer graphics, augmented reality.

E-mail: qiu dong@njjust.edu.cn

**通信作者:** 苏智勇(1981-), 男, 副教授, 博士。主要研究方向为计算机图形学、机器学习等。E-mail: su@njjust.edu.cn

**Corresponding author:** SU Zhi-yong (1981-), associate professor, Ph.D. His main research interests cover computer graphics, machine learning, etc.

E-mail: su@njjust.edu.cn

algorithm exhibits the best comprehensive performance compared with the latest research results, and is superior to the existing methods in terms of detection accuracy and edge continuity.

**Keywords:** augmented reality; optical flow tracking; shadow detection; moving viewpoint; shadow interaction

阴影是生活中常见的自然现象，可为视觉场景的理解提供重要信息，如场景几何结构、物体重光照、场景照明分析等。在增强现实(augmented reality, AR)系统中，为了实现虚拟物体与真实场景的融合统一<sup>[1]</sup>，必须确保虚实物体之间的几何一致性<sup>[2]</sup>和光照一致性。对于光照一致性，不仅需要估计场景中的光源方向和光照强度，更要关注虚拟物体阴影<sup>[3]</sup>与真实物体阴影之间相互投射的影响。否则会影响虚实融合的真实感，甚至会造成视觉混乱。因此，虚拟物体与真实物体之间的阴影交互是虚实融合研究中值得探索的问题之一。当前，随着 AR 技术的发展，特别是以 AR 眼镜为代表的移动 AR 的兴起，其允许用户在场景中自由变换视点位置。所以为了实现移动 AR 下的虚实阴影交互，首先需要在移动视点下实时稳定地检测出真实场景中连续的阴影边缘。

对于移动 AR 系统，阴影检测需要采用基于视频的在线检测方式。在线检测无法像离线检测那样利用整个视频的时空信息来检测阴影，而只能利用当前获取的视频帧信息进行检测。所以在线阴影检测对检测的实时性、准确性和效率均有更高的要求。目前在线视频阴影检测可分为固定视点和移动视点的阴影检测。固定视点的在线阴影检测<sup>[4-9]</sup>算法通常先对背景图像进行建模形成参考图像，再利用其他视频帧与参考图像相减得到变化的前景，最后分离出前景中的阴影。移动视点在线阴影检测<sup>[10-12]</sup>算法主要基于边跟踪、边检测的框架进行设计，主要思想是先利用跟踪算法跟踪上一帧已经检测出的阴影，再利用阴影特征匹配和特征建模的方法对当前帧中新出现区域中的阴影进行检测。

当前移动视点在线阴影检测算法仍存在一些局限性。其因使用基于距离的特征向量匹配公式<sup>[10]</sup>和概率判别公式<sup>[11]</sup>对新增区域中的阴影边缘进行判别；又因构造的阴影特征向量相对单一，检测结果中仍有许多误检测现象，所以检测准确性有待提高。上述方法只能检测静态阴影而无法检测动态阴影。目前最新的研究成果<sup>[12]</sup>通过对阴影边缘强度进行建模实现了精确的阴影跟踪和检测，但未考虑阴影边缘优化的问题，检测结果中仍存

在一些断边，会降低后续阴影交互的真实感。

本文基于边跟踪、边检测的框架提出了一种移动视点下的实时阴影检测算法。为了能够准确地跟踪阴影，又提出了双向光流的跟踪算法。为了提高检测准确率，构建了针对纹理边缘误检测、软阴影检测和暗黑区域误检测等问题的七维特征向量；通过提取有效的阴影特征并用来训练机器学习的支持向量机(support vector machine, SVM)分类器获得更高的检测准确率。对于检测结果中存在的断边问题，提出了一种基于 RGB 颜色空间的梯度方向一致性算法对断边进行优化连接。

## 1 相关工作

### 1.1 图像阴影检测

在计算机视觉领域中图像阴影检测已经取得大量的研究成果。早期的阴影检测算法主要是基于阴影的光谱特性和几何属性<sup>[13-16]</sup>，如文献[14]描述了阴影与非阴影背景之间衰减关系的三色衰减模型，其在不需要先验知识的情况下，可检测出真实复杂场景中的阴影，但该算法只适用于单幅图像的阴影检测。后出现了基于机器学习的阴影检测算法<sup>[17-20]</sup>，其通过手工设置特性对阴影进行建模以表示阴影特性，并使用各种分类器区分阴影和非阴影区域。文献[20]提出了一种基于区域分割配对的阴影检测算法，该算法从分割区域中预测相对照度条件，并分类出阴影区域。最近基于深度学习的阴影检测方法获得很大地发展<sup>[21-24]</sup>，即使在复杂纹理背景和光照环境变化的情况下，仍能取得高精度的检测结果。文献[22]开发了一种用于阴影检测的多任务半监督神经网络，以解决小阴影检测和暗色区域误检测等问题。虽然基于深度学习的阴影检测算法检测精度很高，但需要大量不同场景条件下采集的数据集进行训练，目前还未有相关的阴影视频数据集。如果利用图像的阴影检测算法独立地检测视频中的每一帧，则无法满足检测实时性和边缘连贯性的要求。另外非阴影边缘的误检测<sup>[20]</sup>、软阴影的检测<sup>[25]</sup>和暗色区域的误检测<sup>[26]</sup>一直以来都是图像阴影检测的难题，且并未得到很好地解决。

## 1.2 视频阴影检测

视频阴影检测分为固定视点和移动视点的阴影检测。其中固定视点下的阴影检测的应用对象主要是监控视频<sup>[4-7]</sup>中人影、车影的检测去除和早期 AR 中的阴影交互<sup>[8-9]</sup>。而移动视点下的阴影检测的应用对象主要是移动 AR 中的阴影交互<sup>[10-12]</sup>。在监控视频领域, 文献[5]从纹理相似性的角度检测阴影, 利用亲和力传播机制进行基于区域的移动阴影检测; 文献[6]提出了一种基于联合训练的半监督学习规则, 用于非受控场景中的阴影检测和去除; 文献[7]采用基于梯度和颜色模型的运动阴影分离技术, 解决了同时检测和去除运动物体的本影和半影的问题。在 AR 领域, 文献[8]通过已知的场景几何形状和光源位置估计阴影区域, 并使用 Canny 边缘检测器获取精确的阴影边缘; 文献[9]为了解决前景阴影的遮挡问题, 首先对固定摄像机拍摄的视频进行前景分割, 并获得前景图像, 最后从中分离出阴影区域。

以上算法均是关于固定视点的阴影检测。随着 AR 领域的发展, 固定视点的阴影检测方法已无法满足移动 AR 应用的需求。目前针对移动视点下的阴影检测工作相对较少, 且均基于边跟踪、边检测的框架实现的。例如, 文献[10]利用稀疏光流对上一帧阴影进行跟踪。使用太阳光遮挡比、阴影两侧颜色通道的差值比等作为特性向量, 使用复杂的特征匹配公式判别新进入场景的阴影。其检测效率和准确率均有待提高, 且只能检测静态阴影。文献[11]同样使用稀疏光流对上一帧阴影进行跟踪, 利用太阳光与天窗之间的光照强度比和从跟踪的阴影中学习颜色特征作为判别线索, 使用基于距离的概率公式判别新进场景中的阴影边缘。该方法目前检测准确率较低且无法检测动态阴影。文献[12]提出了一种基于强度的阴影边缘模型, 通过拟合边缘强度特征实现了阴影跟踪。其使用边缘强度和梯度特征训练贝叶斯分类器, 然后对新进区域中的阴影进行检测。该方法既能检测静态阴影又能检测动态阴影, 不过其检测结果中仍存在断边问题。

## 2 算法流程

本文针对移动 AR 对阴影处理实时性、检测准确性和边缘连续性的要求, 提出了一种基于双向光流跟踪<sup>[27]</sup>的阴影检测算法。如图 1 所示, 本文算法包括: 误差减小、区域划分、检测和结果优化 4 个模块。算法流程如下: ①首先利用光流算法对上一

帧(第  $k-1$  帧)中已经检测出的阴影边缘进行跟踪, 在第  $k-1$  帧和第  $k$  帧之间做 2 次光流跟踪, 得到前后向跟踪误差; 然后再结合误差均值筛选跟踪点; 最后在误差较大点的邻域内进行 Canny 边缘置信, 得到第  $k$  帧中跟踪的阴影边缘; ②采集当前帧中光流基准点的运动向量, 根据光流信息确定视点的移动方向, 从而划分出新增待检测区域的范围; ③提取当前帧(第  $k$  帧)中已跟踪的阴影边缘的特征向量, 并构建反映阴影边缘特征的七维特征向量集; 然后将其嵌入 SVM 分类器进行训练; 最后用分类器检测当前帧的新增区域中的阴影边缘; ④使用基于 RGB 颜色空间梯度方向一致性的断边优化算法, 对跟踪的阴影边缘和新增区域中检测出的阴影边缘进行优化连接, 获得稳定连续的阴影检测结果。

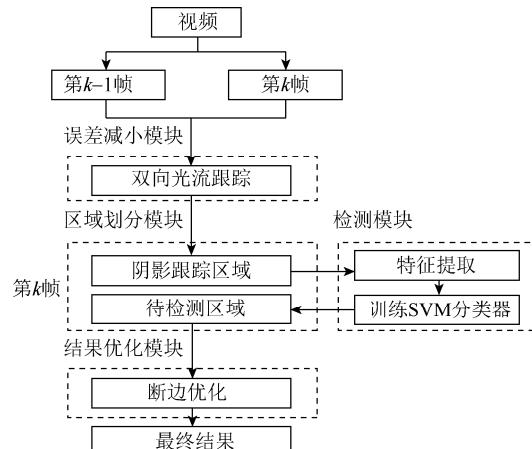


图 1 算法流程图  
Fig. 1 Pipeline of the algorithm

## 3 算法主要功能模块介绍

### 3.1 误差减小模块

为了避免对当前帧中大部分重叠阴影的重复检测, 使用光流跟踪算法将上一帧中的阴影边缘跟踪到当前帧中。这样既提高了检测效率又保证了阴影检测结果在帧间的稳定性和连贯性。如图 2(a)所示, 随着帧数的不断增加, 光流跟踪的误差会逐渐变大, 跟踪边缘会出现漂移现象。这将极大地影响阴影边缘跟踪的准确性。

为了减少光流跟踪误差, 本文算法对前一帧和当前帧进行双向光流跟踪。首先从前一帧的初始位置  $x_f$  正向跟踪到当前帧的位置  $x_b$ , 然后从  $x_b$  反向跟踪到前一帧的预测位置  $x'_f$ 。这样每进行一次双向光流跟踪就会产生前后向误差  $E$ , 选择误差  $E$  的平均值作为筛选阈值, 剔除误差大于平均值的跟踪点, 保留小于平均值的跟踪点。

为了确保跟踪边缘的完整性，在误差较大跟踪点的邻域内利用 Canny 边缘置信，得到跟踪之后的完整连续的阴影边缘。首先为了减少光照变化和噪声的影响，本文选用双边滤波算法对当前帧图像进行滤波处理；然后用 Canny 算子检测出当前帧的所有阴影和非阴影边缘；最后判断断点邻域内是否有 Canny 边缘。在误差较大的跟踪点  $(x_m, y_m)$  邻域内所有 Canny 边缘像素点构成校正候选集  $C_m(x)$ ，其与跟踪点  $(x_m, y_m)$  的距离为

$$D_{mk} = \sqrt{(x_{mk} - x_m)^2 + (y_{mk} - y_m)^2} \quad (1)$$

其中， $m$  为舍弃的跟踪点的编号； $(x_{mk}, y_{mk})$  为  $C_m(x)$  中的像素点。如果  $D_{mk}$  大于阈值  $\varphi$ ，则舍弃，并用 Canny 边缘点  $(x_{mk}, y_{mk})$  替代跟踪误差较大的阴影像素点。如图 2(a) 所示，只用光流跟踪后阴影边缘会随着帧数的增加而出现漂移。在光流基础上使用 Canny 边缘置信后，则可以准确地跟踪上一帧的阴影边缘，但仍会出现断点、断边现象，如图 2(b) 所示。

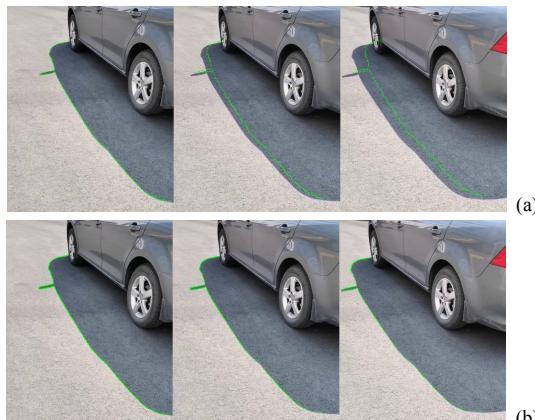


图 2 误差减小模块的实验结果((a)仅光流跟踪; (b)在光流基础上使用 Canny 边缘置信)

Fig. 2 Experimental results of error reduction module  
(a) Only optical flow track; (b) Canny edge confidence based on optical flow)

### 3.2 区域划分模块

为了提高检测效率和实时性，避免对上一帧重叠阴影的重复检测，本文利用光流基准点信息划分新增区域，为后续阴影检测划定范围。如图 3(a) 所示，在当前帧中自动选定 9 个点作为基准点，根据这些点的光流运动向量  $V_\lambda$  确定视点的移动方向。选取所有基准点向量的平均值  $\bar{V}$  代表摄像机的运动情况，即

$$\bar{V} = \frac{1}{9} \sum_{\lambda=0}^8 V_\lambda \quad (2)$$

图 3 中， $\bar{V}$  在水平和竖直方向的分量为  $\bar{V}_x$  和

$\bar{V}_y$ ，其直接提供了新增待检测区域在水平和竖直方向上的宽度。实验中检测区域的水平和竖直方向上的宽度分别为  $\mu|\bar{V}_x|$  和  $\mu|\bar{V}_y|$ ，其中  $\mu$  为扩增系数，取值范围一般为 1~2。通过扩大检测区域使部分跟踪区域被重复检测，以保持检测结果的连续性，防止出现新增区域与跟踪区域中阴影边缘连接处的断裂问题。

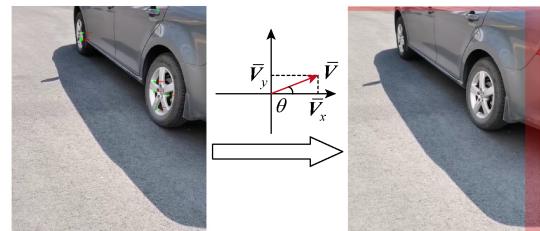


图 3 新增待检测区域的划分  
Fig. 3 Division of new areas to be detected

### 3.3 检测模块

为了检测出新增场景中的阴影，首先提取上一帧跟踪到当前帧的阴影边缘的特征向量，将其作为正样本；然后提取其他非阴影边缘的特征向量作为负样本；最后将这些正负样本放入 SVM 分类器中进行训练，用训练好的分类器对当前帧的新增区域中所有的边缘进行判断。

特征向量 1：该特征向量是测量太阳和天空的照度比。因为阴影边缘两侧的照度比有很大的差异。本文分别计算阴影边缘两侧各颜色通道的高斯加权平均值，其比值向量为

$$(\mathbf{I}_r, \mathbf{I}_g, \mathbf{I}_b) = \left( \frac{\mathbf{S}_r}{\mathbf{L}_r}, \frac{\mathbf{S}_g}{\mathbf{L}_g}, \frac{\mathbf{S}_b}{\mathbf{L}_b} \right) \quad (3)$$

其中， $(\mathbf{S}_r, \mathbf{S}_g, \mathbf{S}_b)$  和  $(\mathbf{L}_r, \mathbf{L}_g, \mathbf{L}_b)$  分别为阴影和非阴影侧的各颜色空间的均值向量。

本文构建了反映阴影边缘两侧光照强度的比值向量， $(\mathbf{u}, \mathbf{u}_{rg}, \mathbf{u}_{rb})$  是有效区分阴影边缘与纹理边缘的重要特征，即

$$(\mathbf{u}, \mathbf{u}_{rg}, \mathbf{u}_{rb}) = \left( \frac{\mathbf{I}_r + \mathbf{I}_g + \mathbf{I}_b}{3}, \frac{\mathbf{I}_r}{\mathbf{I}_g}, \frac{\mathbf{I}_r}{\mathbf{I}_b} \right) \quad (4)$$

特征向量 2：软阴影边缘通常具有一定宽度的渐变区域。为了解决软阴影检测问题，首先需要获取其宽度。根据文献[12]的研究成果，阴影边缘梯度方向两侧像素强度变化能够很好地拟合  $S$  函数，即

$$f(x) = \frac{a}{1 + e^{bx+c}} + d \quad (5)$$

另文献[12]还给出了室外阴影宽度为2~3个像素。当取 $f'(x)$ 的2个拐点 $x_l$ 和 $x_s$ , 可定义软阴影宽度为

$$\omega = |x_l - x_s| \quad (6)$$

因为随着阴影边缘宽度的增加其各颜色通道值将会随之减小, 所以可提取边缘梯度信息来表示其变化。并得到RGB各颜色通道值沿阴影边缘法线方向变化的速率特征向量为

$$(\mathbf{v}_r, \mathbf{v}_g, \mathbf{v}_b) = \left( \frac{|\mathbf{L}_r - \mathbf{S}_r|}{\omega}, \frac{|\mathbf{L}_g - \mathbf{S}_g|}{\omega}, \frac{|\mathbf{L}_b - \mathbf{S}_b|}{\omega} \right) \quad (7)$$

该速率变化特征只存在于一定宽度的软阴影中, 所以其可以有效防止一些不具备软阴影特性的边缘被误检测为阴影边缘。

**特征向量3:** 为了解决暗黑色素误检测问题, 本文计算阴影边缘梯度方向两侧的HSV颜色比值。在HSV颜色空间中, 阴影区域中的像素相较其他区域包括暗黑色区域中的像素总是有较低的亮度值和较高的色度值<sup>[26]</sup>。因此色度值与亮度值的比为

$$O(x, y) = \frac{H(x, y)}{V(x, y) + 0.01} \quad (8)$$

本文分别选取阴影边缘点 $(x, y)$ 的梯度方向上阴影内、外侧的点集 $p$ 和 $q$ , 求点集内各点比值之和, 实验中的点集分别由5个点组成。本文使用两侧点集比值之和的差值特征, 即

$$m(x, y) = \frac{|O(p) - O(q)|}{O(p) + O(q)} \quad (9)$$

因为暗色区域有着较高的亮度值和色度值, 所以该差值可以有效地区分阴影边缘和暗黑区域边缘。

为了解决阴影检测中存在的纹理边缘误检测、软阴影检测和暗黑像素误检测等问题, 本文构建了一个反映阴影边缘特性的七维特征向量 $\mathbf{v}(\mathbf{u}, \mathbf{u}_{rg}, \mathbf{u}_{rb}, \mathbf{v}_r, \mathbf{v}_g, \mathbf{v}_b, m)$ 。首先从当前帧中跟踪的阴影边缘上提取七维特征向量组成正样本, 从非阴影边缘上提取等量的负样本; 然后将这些数据样本放入SVM分类器中进行训练; 最后用Canny算子检测出新增区域中所有的边缘, 再用训练好的分类器去判断新增区域中的边缘是阴影边缘还是非阴影边缘, 即

$$\mathbf{w}^T + \mathbf{b} = \begin{cases} > 1, & \text{true} \\ < -1, & \text{false} \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $\mathbf{w}^T$ 和 $\mathbf{b}$ 是训练好的分类函数的参数。如果

判别结果大于1则为阴影边缘点; 小于-1则为非阴影边缘点。

### 3.4 结果优化模块

为了解决跟踪和检测阴影边缘的断边问题, 本文提出了基于RGB颜色空间梯度方向一致性的断边优化算法。对于反射率局部恒定的阴影边界处的任意像素点而言, 因为RGB颜色空间中的光照梯度均垂直于阴影边界, 其梯度在所有的颜色通道上具有相同的方向<sup>[16]</sup>, 而非阴影边缘则缺乏该特性。

计算每个边缘像素点的RGB各颜色通道的梯度方向 $(\gamma_r, \gamma_g, \gamma_b)$ 。本文通过测量每个颜色梯度方向上的差值来得到特征向量

$$\gamma_{rg} = \min(|\gamma_r - \gamma_g|, 2\pi - |\gamma_r - \gamma_g|) \quad (11)$$

$$\gamma = (\gamma_{rg}, \gamma_{gb}, \gamma_{br}) \quad (12)$$

使用梯度差向量 $(\gamma_{rg}, \gamma_{gb}, \gamma_{br})$ 比直接使用原始梯度向量 $(\gamma_r, \gamma_g, \gamma_b)$ 要好, 因为前者具有旋转不变性。实验证明, 不同颜色通道中非阴影边缘的梯度方向的方差平均比阴影边缘大十几倍。

假设断点是 $x_j$ , 且 $j$ 为断点的编号, 断点的邻域内阴影边缘点组成集合 $S_j(x)$ , 用 $C_j(x)$ 表示待判断的阴影候选集合, 其中 $C_j(x)$ 为 $S_j(x)$ 附近的Canny边缘像素点构成的集合。对于 $S_j(x)$ 中的每个像素 $a$ , 计算其梯度差向量 $\rho_a$ 。对于 $C_j(x)$ 中的每个像素点 $x_i$ , 计算其梯度差向量 $\rho_{x_i}$ 。将 $\rho_{x_i}$ 与 $\rho_a$ 进行比较, 记为

$$d(x_i) = \frac{|\rho_{x_i} - \rho_a|}{\rho_{x_i}} \quad (13)$$

当 $d(x_i)$ 小于阈值 $\tau$ , 则 $x_i$ 即为阴影边缘点; 否则为非阴影边缘点。断边修复前的效果如图4(a)所示, 图4(b)为断边修复后的效果, 其中红色边缘为基于RGB颜色空间的梯度方向一致性算法修复的边缘。

## 4 实验结果及分析

本文算法在一台配备Intel(R) Core(TM)i5-10400F CPU和16 GB RAM的计算机上运行。软件环境为Python3.6.10+Opencv3.4.2。实验中相关参数设置为 $\varphi=20$ ,  $\mu=1.5$ ,  $\omega=2$ ,  $\tau=4$ 。本文代码在540×960分辨率的视频上处理速率为7帧/秒。鉴于目前还未有基于深度学习的移动视点视频的阴影检测算法, 所以只将本文算法与目前最先进的文献[10-12]的3种算法进行对比, 并从定性和定量2个方面进行分析。

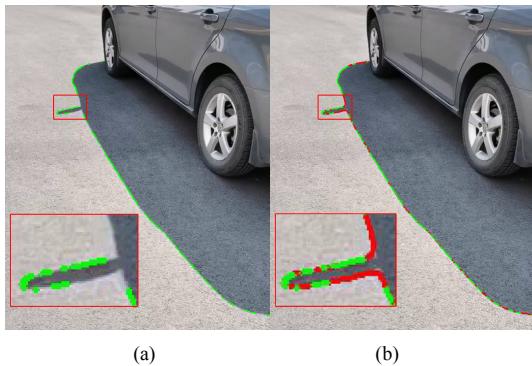


图 4 基于 RGB 梯度方向一致性的断边修复((a)边缘断点问题; (b)修复后的连续边缘)

**Fig. 4** Edge restoration based on RGB gradient direction consistency ((a) Edge breakpoint problem; (b) Continuous edge after repair)

#### 4.1 阴影检测效果定性分析

由于没有公开的数据集, 实验是在 2 个随机时段、随机地点拍摄的室外视频上进行的, 分别命名为“车辆”和“行人”。2 个视频包含了验证算法可行性的各种典型的问题包括软阴影、复杂纹理、暗色区域和动态静态阴影等, 具有一定的代表性。由于文献[10]和文献[11]的算法只能检测静态阴影, 所以在静态阴影视频“车辆”中 4 种算法全部参加实验对比, 而在动态阴影“行人”视频中只有本文算法与文献[12]的算法进行实验对比。

静态阴影对比实验视频包含暗色区域、地砖

纹理边缘和软阴影。如图 5 所示, 4 种算法均能检测出大部分阴影边缘。图 5(a)为文献[10]算法, 其能很好地检测静态物体的阴影, 由于考虑了断边问题所以结果中很少出现断边, 但在汽车车轮处有一些非阴影边缘被误检测为阴影边缘。图 5(b)为文献[11]的检测结果, 其很少出现断边问题, 因其考虑了断边优化。不过误检测出了很多与阴影边缘光照特征相似的非阴影边缘。图 5(c)为文献[12]结果, 其能很好地区分阴影边缘和非阴影边缘, 且很少检测出非阴影边缘。但由于该算法未考虑断点优化, 所以其检测结果中出现了一些断边现象。而本文算法针对非阴影边缘误检测、软阴影检测和暗黑区域误检测等问题, 构建了反映阴影边缘特性的七维特征向量, 如图 5(d)所示, 实验结果中几乎未见误检测的情况, 这表明了本文所构建阴影边缘特征向量的有效性。由于本文针对断边问题提出了一种基于 RGB 梯度方向一致性的优化算法, 所以其结果中断点问题较少。

动态阴影对比实验在“行人”视频中进行, 其阴影是非刚性的, 且摄像机也随着行人的移动而快速移动。本文算法与文献[12]算法均能很好地检测出非刚性物体投射的快速移动的阴影, 且很少检测出暗黑区域边缘和其他非阴影边缘。如图 6(a)和(b)中的红框所示, 相较于文献[12]的结果, 本文算法在阴影边缘连续性上更胜一筹。



图 5 本文与其他 3 种先进算法在“车辆”中的检测结果对比((a)文献[10]; (b)文献[11]; (c)文献[12]; (d)本文)

**Fig. 5** Comparison with the other three advanced algorithms in “vehicle” detection ((a) Literature [10]; (b) Literature [11]; (c) Literature [12]; (d) Ours)

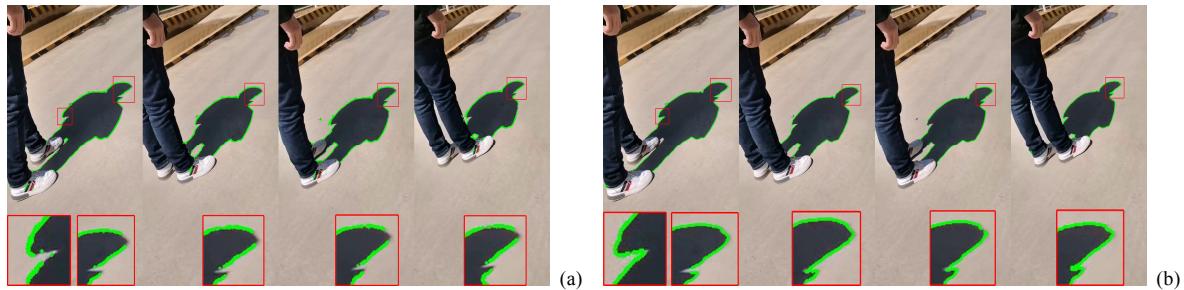


图 6 本文与文献[12]的算法在“行人”中的检测对比((a)文献[12]; (b)本文)

Fig. 6 Comparison with literature [12] algorithms in “pedestrian” detection ((a) Literature [12]; (b) Ours)

表 1 中本文算法相比其他算法综合性能最高,不仅能有效地区分阴影边缘和非阴影边缘,还可稳定跟踪和检测动态阴影,并且考虑了阴影边缘优化问题。实验结果也验证了本文算法的有效性。

表 1 各算法所能解决的问题

Table 1 The problems that each algorithm can solve

算法	非阴影边缘	静态阴影	动态阴影	断边优化
	误检测	检测	检测	
文献[10]	×	√	×	√
文献[11]	×	√	×	√
文献[12]	√	√	√	×
本文	√	√	√	√

#### 4.2 定量结果对比与分析

为了定量评估 4 种阴影检测算法的性能, 分别计算每种算法在实验视频中的平均准确率、召回率和 F 值。其中更高的准确率、召回率和 F 值表示更好的阴影检测结果。

从表 2 和表 3 中可以看出, 本文算法在静态和动态阴影检测实验中均具有最高的准确率和召回率。由于文献[10]和文献[11]算法在构造阴影特征时未考虑软阴影特征, 所以在检测结果中一些光照环境与阴影边缘类似, 但不具备软阴影强度变化特征的非阴影边缘就会被误检测为阴影边缘, 其导致检测召回率相对较低, 并且文献[10]和文献[11]的阴影检测算法是基于距离的特征向量匹配公式和概率判别公式。实验参数表明, 本文使用机器学习分类器进行阴影判别比用匹配公式和概率公式准确率更高。文献[12]的召回率很高, 表明其算法能够很好地区分阴影边缘和非阴影边缘。但由于存在断边问题, 导致其检测准确率相对较低。在表 3 中, 文献[12]的算法和本文算法均有很高的检测准确率和召回率, 但文献[12]的检测结果中存在阴影边缘断边的问题, 这是其阴影检测准确率和召回率不是最高的原因。

与当前 3 种最先进的室外移动视点下的阴影

检测算法相比, 本文算法不仅能够稳定跟踪和检测动态阴影, 还能有效区分非阴影边缘, 并且在检测准确率和阴影边缘连续性上优于其他算法。

表 2 各算法在“车辆”上的参数指标

Table 2 Parameter index of each algorithm on “vehicle”

车辆	Precision	Recall	F-measure
文献[10]	0.90	0.87	0.88
文献[11]	0.89	0.61	0.72
文献[12]	0.87	0.91	0.89
本文	<b>0.91</b>	<b>0.94</b>	<b>0.92</b>

注: 黑体为最优

表 3 各算法在“行人”上的参数指标

Table 3 Parameter index of each algorithm on “pedestrian”

行人	Precision	Recall	F-measure
文献[12]	0.91	0.93	0.92
本文	<b>0.92</b>	<b>0.95</b>	<b>0.94</b>

注: 黑体为最优

## 5 结束语

针对移动 AR 应用中对于处理实时性和边缘连续性的要求, 本文提出了一种基于边跟踪、边检测的室外移动视点阴影检测算法。为了能够准确地跟踪阴影, 提出了一种双向光流的跟踪算法。为了提高检测准确率, 构建了针对非阴影边缘误检测问题的七维特征向量。为了解决检测结果中出现的断边问题, 提出了一种基于 RGB 颜色空间的梯度方向一致性算法对断边进行优化连接。实验结果表明本文算法综合性能最高, 不仅能稳定地跟踪和检测移动视点下的动态和静态阴影, 而且在检测准确性和边缘连续性方面优于现有方法。

本文算法仍存在一些局限性: ①当阴影投射到不同材质的平面时, 该算法无法完整地检测出阴影边缘; ②对于较宽的软阴影, 由于边缘检测器的失效, 也无法正确识别这些阴影边缘。在未来的工作中, 将继续研究投射到不同材质上的阴影检测和软阴影检测等问题, 并考虑引入基于深度学习的阴影检测方法。

## 参考文献 (References)

- [1] NAEMURA T, NITTA T, MIMURA A, et al. Virtual shadows-enhanced interaction in mixed reality environment[C]//IEEE Virtual Reality 2002. New York: IEEE Press, 2002: 293-294.
- [2] 张岩, 何晓波, 管涛. 基于多视图几何的位置与遮挡一致性恢复方法研究[J]. 图学学报, 2011, 32(1): 111-118.
- ZHANG Y, HE X B, GUAN T. Resolving pose and occlusion consistency based on multiple view geometry for augmented reality systems[J]. Journal of Graphics, 2011, 32(1): 111-118 (in Chinese).
- [3] ZHANG S Y, LIANG R Z, WANG M. ShadowGAN: shadow synthesis for virtual objects with conditional adversarial networks[J]. Computational Visual Media, 2019, 5(1): 105-115.
- [4] BULLKICH E, ILAN I, MOSHE Y, et al. Moving shadow detection by nonlinear Tone-Mapping[C]//2012 19th International Conference on Systems, Signals and Image Processing. New York: IEEE Press, 2012: 146-149.
- [5] DAI J Y, HAN D Y. Region-based moving shadow detection using affinity propagation[J]. International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 2015, 8(3): 65-74.
- [6] JARRAYA S K, HAMMAMI M, BEN-ABDALLAH H. Adaptive moving shadow detection and removal by new semi-supervised learning technique[J]. Multimedia Tools and Applications, 2016, 75(18): 10949-10977.
- [7] HUERTA I, HOLTE M, MOESLUND T, et al. Detection and removal of chromatic moving shadows in surveillance scenarios[C]//2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision. New York: IEEE Press, 2009: 1499-1506.
- [8] JACOBS K, NAHMIAS J D, ANGUS C, et al. Automatic generation of consistent shadows for augmented reality[C]// Proceedings of Graphics Interface 2005. Waterloo: Canadian Human-Computer Communications Society Press, 2005: 113-120.
- [9] LU B V, KAKUTA T, KAWAKAMI R, et al. Foreground and shadow occlusion handling for outdoor augmented reality[C]// 2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. New York: IEEE Press, 2010: 109-119.
- [10] 刘艳丽, 吴彧, 陈祥祥, 等. 室外移动视点视频的在线阴影边缘检测[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(10): 1827-1834.
- LIU Y L, WU Y, Chen X X, et al. Online shadow edge detection for outdoor mobile video[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2018, 30(10): 1827-1834 (in Chinese).
- [11] WEI H S, LIU Y L, XING G Y, et al. Simulating shadow interactions for outdoor augmented reality with RGBD data[J]. IEEE Access, 2019, 7: 75292-75304.
- [12] LIU Y L, ZOU X M, XU S H, et al. Real-time shadow detection from live outdoor videos for augmented reality[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics
- (Early Access), 2020, PP(99): 1-1.
- [13] SALVADOR E, CAVALLARO A, EBRAHIMI T. Cast shadow segmentation using invariant color features[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2004, 95(2): 238-259.
- [14] TIAN J D, SUN J, TANG Y D. Tricolor attenuation model for shadow detection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(10): 2355-2363.
- [15] PANAGOPOULOS A, WANG C H, SAMARAS D, et al. Illumination estimation and cast shadow detection through a higher-order graphical model[C]//2011 IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. New York: IEEE Press, 2011: 673-680.
- [16] TIAN J D, QI X J, QU L Q, et al. New spectrum ratio properties and features for shadow detection[J]. Pattern Recognition, 2016, 51: 85-96.
- [17] HUANG X, HUA G, TUMBLIN J, et al. What characterizes a shadow boundary under the Sun and sky? [C]//2011 International Conference on Computer Vision. New York: IEEE Press, 2011: 898-905.
- [18] GUO R Q, DAI Q Y, HOIEM D. Single-image shadow detection and removal using paired regions[C]//2011 IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. New York: IEEE Press, 2011: 2033-2040.
- [19] LALONDE J F, EFROS A A, NARASIMHAN S G. Detecting ground shadows in outdoor consumer photographs[C]// European Conference on Computer Vision. Heidelberg: Springer, 2010: 322-335.
- [20] GUO R Q, DAI Q Y, HOIEM D. Paired regions for shadow detection and removal[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(12): 2956-2967.
- [21] VICENTE T F Y, HOU L, YU C P, et al. Large-scale training of shadow detectors with noisily-annotated shadow examples[C]//European Conference on Computer Vision. Cham: Springer International Publishing, 2016: 816-832.
- [22] CHEN Z H, ZHU L, WAN L, et al. A multi-task mean teacher for semi-supervised shadow detection[C]//2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE Press, 2020: 5610-5619.
- [23] NGUYEN V, VICENTE T F Y, ZHAO M Z, et al. Shadow detection with conditional generative adversarial networks[C]// 2017 IEEE International Conference on Computer Vision. New York: IEEE Press, 2017: 4520-4528.
- [24] HU X W, FU C W, ZHU L, et al. Direction-aware spatial context features for shadow detection and removal[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 42(11): 2795-2808.
- [25] DONG Q, LIU Y L, ZHAO Q J, et al. Detecting soft shadows in a single outdoor image: from local edge-based models to global constraints[J]. Computers & Graphics, 2014, 38: 310-319.
- [26] XIAO C X, XIAO D L, ZHANG L, et al. Efficient shadow removal using subregion matching illumination transfer[J]. Computer Graphics Forum, 2013, 32(7): 421-430.
- [27] FARNEBÄCK G. Two-frame motion estimation based on polynomial expansion[M]//Image Analysis. Heidelberg: Springer, 2003: 363-370.