

基于阴影检测的增强现实光照一致性实现

吴广运^{1*}, 周治平^{1,2}

¹江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122;

²江南大学物联网技术应用教育部工程研究中心, 江苏 无锡 214122

摘要 在增强现实领域, 实现虚拟对象光照一致性一直是个难题, 针对赋予虚拟对象阴影信息时阴影检测效率低的问题, 提出一种基于阴影区域构建阴影体实现虚拟对象光照一致性的方法。首先, 采用改进的超像素分割(I-SLIC)算法对图像进行处理得到更稳定的超像素集合, 并根据相邻超像素中心的颜色距离相似度进行超像素合并, 以降低后续处理复杂度。然后, 采用高斯混合背景模型对分割后的图像进行阴影检测, 利用阴影区域与光照参数构建阴影体。最后, 根据变换矩阵完成虚拟对象的注册并结合阴影体进行渲染。实验结果表明, 所提方法实现了对虚拟对象的阴影渲染, 大大提高了增强现实应用带来的真实感, 对比其他方法, 在时间效率上具有明显优势。

关键词 机器视觉; 增强现实; 光照一致性; 阴影检测; 超像素分割

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0215002

Realizing Illumination Consistency in Augmented Reality Based on Shadow Detection

Wu Guangyun^{1*}, Zhou Zhiping^{1,2}

¹School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

²Engineering Research Center of Internet of Things Engineering Technology Application, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract In the augmented reality field, it is a challenge to achieve the illumination consistency of virtual objects. To address the low shadow detection efficiency problem when virtual objects are endowed with shadow, a method based on the shadow area is proposed to construct a shadow volume to achieve the illumination consistency of virtual objects. The proposed method first performs superpixel merging based on the color distance similarity according to adjacent superpixel centers. Superpixel collection is obtained using an improved simple linear iterative clustering (I-SLIC) algorithm on the images. The number of superpixel collections and the subsequent processing complexity are reduced accordingly. Then, a Gaussian mixture background model is employed to detect the shadow of the segmented image, and the shadow body is constructed using the shadow region and illumination parameters. Finally, the registration of the virtual object is completed according to the transformation matrix combined with the shadow volume for rendering. Experimental results demonstrate that the proposed method realizes the shadow rendering of virtual objects and greatly improves the realism of augmented reality applications. Compared with existing methods, the proposed method demonstrates an obvious advantage in terms of time efficiency.

Key words machine vision; augmented reality; illumination consistency; shadow detection; super-pixel segmentation

收稿日期: 2021-01-05; 修回日期: 2021-02-16; 录用日期: 2021-03-10

通信作者: *616235675@qq.com

1 引言

增强现实(AR)是一种将虚拟世界和现实世界联系在一起的技术,它将虚拟对象嵌入到真实世界中,以提供在现实世界中难以直接实现的信息^[1]。作为多媒体领域中一项较新的技术,AR是未来多媒体发展的方向之一,在娱乐、教育、军事等领域具有广泛应用^[2]。在AR应用领域,虚拟对象的几何一致性一直是人们关注的焦点,并取得了很大的成功,但人们忽略了真实世界和虚拟对象之间的光照一致性问题。其中,光照一致性主要对叠加到真实场景中的虚拟对象添加光影效果,如果缺少光影效果,会极大地降低虚实融合的真实感。

在光照一致性的研究中,赋予虚拟对象阴影信息时必须首先要检测出真实场景的阴影,因此,能够稳定及时检测出真实场景阴影信息是实现光照一致性的前提^[3]。Jiddi等^[4]通过一系列镜面反射的图像来估计光源的位置,通过捕获图像序列中高亮点像素的位置计算入射光的方向,从而获取阴影信息。该方法可以获得更精确的阴影信息,但有一个场景限制,即真实场景必须存在镜面反射现象。方岚等^[5]在YCbCr空间中结合阴影颜色和纹理特征,利用完全局部二值模式(CLBPP)算子提取详细的区域纹理特征,有效降低了阴影误检率,但在户外复杂环境中阴影检测效率效果不佳,适用场景较局限。Hold-Geoffroy等^[6]利用大量的户外全景数据训练一个卷积神经网络(CNN),CNN通过单输入的低动态范围场景图像估计高动态范围(HDR)室外阴影信息,但需要大量数据进行训练,具有一定局限性。Liu等^[7]提出了一种基于基图像分解的室外场景光照参数实时估计算法,但该算法需要事先通过人工划定阴影区域与非阴影区域来得到阴影相关参数的初值。陈海永等^[8]提出了一种新的阴影检测与目标掩码增长框架,通过区分真实目标区域和阴影区域,实现了完整阴影区域的检测,但该方法相关参数不能自适应化,需要人工调整参数。陈卓等^[9]利用支持向量机构建的高阶能量方程进行阴影检测,通过最小化方程判断区域是否为阴影,该方法要求图像数据阴影区域和非阴影区域有明显区别且计算耗时较长。

为解决赋予虚拟对象阴影时阴影检测速率慢的问题,本文提出一种结合超像素分割实现虚拟对

象阴影交互的增强现实注册算法。首先,在超像素分割算法的基础上引入像素点邻域信息计算颜色距离,对图像进行分割得到新的超像素集合。接着,根据相邻超像素中心的颜色距离相似度进行超像素合并,减少了阴影检测单元,再设立阈值将图像分为阴影区和非阴影区,利用阴影区域计算光照参数并构建阴影体,构建的阴影体可以对插入的虚拟对象进行光影渲染。最后,通过实验论证,所提方法实现了对虚拟对象的阴影渲染,对比其他方法,在阴影检测时间效率上具有明显优势。

2 算法理论与实现

2.1 改进的超像素分割(I-SLIC)算法

超像素分割(SLIC)算法是基于相邻像素特征的相似性进行聚类的超像素分割算法^[10],分割后的超像素集合既保留了图像阴影、光照等有效信息,又降低了后续图像处理的复杂度。然而,在真实场景中得到的图像会有许多噪声,图像存在的噪声会对超像素分割结果产生影响。针对这一问题,提出改进的超像素分割算法。

设目标超像素数量参数 K ,根据 K 来初始化像素中心,使初始化像素中心在图像中均匀分布。若一幅图像的像素值为 N ,则分割后的各超像素间隔为 $S = \sqrt{N/K}$ 。然后根据图像子块确定超像素初始聚类中心位置 $C_k = \{l_k, a_k, b_k, x_k, y_k\}$,其中, (l_k, a_k, b_k) 表示超像素中心点在CIELAB颜色空间上的参数值, (x_k, y_k) 为中心点坐标参数。图像块中的每一个像素 p 与聚类中心 C_k 的相似性 $D(p, C_k)$ 为

$$D(p, C_k) = d_c(p, C_k) + \frac{m}{S} d_s(p, C_k), \quad (1)$$

$$d_c(p, C_k) = \sqrt{(l_k - l_p)^2 + (a_k - a_p)^2 + (b_k - b_p)^2}, \quad (2)$$

$$d_s(p, C_k) = \sqrt{(x_k - x_p)^2 + (y_k - y_p)^2}, \quad (3)$$

式中: $d_c(p, C_k)$ 表示像素点 p 与超像素聚类中心 C_k 的颜色距离; $d_s(p, C_k)$ 表示像素点 p 与超像素聚类中心 C_k 的空间距离; m 为权衡颜色距离和空间距离对 $D(p, C_k)$ 影响的一个常参数, m 值越小,空间距离对超像素分割结果的影响就越小。为了减小图像噪声对结果的影响,提高所提算法的鲁棒性,利用像素点 p 的邻域信息计算颜色距离:

$$d_c(p, \mathbf{C}_k)_{L(p)} = \sum_{q \in L(p)} \omega_{pq} \sqrt{(l_k - l_q)^2 + (a_k - a_q)^2 + (b_k - b_q)^2}, \quad (4)$$

式中: $L(p)$ 表示像素点 p 为中心, 大小为 3×3 的邻

域像素集; (l_q, a_q, b_q) 表示像素集中的像素点 q 在颜色空间的参数值; ω_{pq} 为权重因子, 满足

$$\sum_{q \in L(p)} \omega_{pq} = 1.$$

$$\omega_{pq} = \sqrt{(l_k - l_q)^2 + (a_k - a_q)^2 + (b_k - b_q)^2} / \sum_{q \in L(p)} \sqrt{(l_k - l_q)^2 + (a_k - a_q)^2 + (b_k - b_q)^2}. \quad (5)$$

像素 p 与聚类中心 C_k 的相似性计算方式为

$$D(p, \mathbf{C}_k)_{L(p)} = d_c(p, \mathbf{C}_k)_{L(p)} + \frac{m}{S} d_s(p, \mathbf{C}_k). \quad (6)$$

最后, 采用(6)式定义的相似性对图像像素进行迭代聚类, 更新得到新的聚类中心 $\overline{\mathbf{C}_k}$, 再使用 L_2 范数计算聚类中心位置残差函数 $E = \sum_{k=1}^K \| \mathbf{C}_k - \overline{\mathbf{C}_k} \|^2$, 重复迭代操作, 直至 E 收敛, 超像素分割结束。

2.2 超像素合并与阴影检测

在得到超像素分割结果之后, 采用高斯混合背景模型对图像进行阴影检测。因为图像的阴影区域具有较好的平滑性, 根据相邻超像素中心的颜色距离相似度进行超像素合并, 减少超像素集合数目, 提高阴影检测效率。

对于超像素聚类中心 C_k , 计算 C_k 与其周围超像素中心(记为 Ω_c)颜色距离, C_j 为最小距离对应的超像素中心。

$$d = \min_{C_j \in \Omega_c} \sqrt{(l_k - l_j)^2 + (a_k - a_j)^2 + (b_k - b_j)^2}. \quad (7)$$

若 d 小于预设阈值 d_s , 则认为超像素 C_k 和 C_j 的色彩和亮度十分接近, 应都属于阴影区域, 进行合并, d_s 取值为 11。经过合并后, 超像素集合数目变少, 因为非阴影区域像素要比阴影区域像素亮度更亮, 因此利用 HSV 颜色空间的亮度信息进行阴影检测。判定超像素区域是否为阴影区域的标准为

$$\begin{cases} \alpha \leq \sum_{j=1}^{N_c} \frac{F_j^v}{B_j^v N_c} \leq \beta \\ \frac{1}{N_c} \sum_{j=1}^{N_c} (F_j^s - B_j^s) \leq \gamma_s, \quad \frac{1}{N_c} \sum_{j=1}^{N_c} (F_j^h - B_j^h) \leq \gamma_h \end{cases}, \quad (8)$$

式中: N_c 为超像素集合 c 中像素点数量; F_j^h, F_j^s, F_j^v 分别为超像素集合 c 中第 j 个像素点的 H、S、V 分量; B_j^h, B_j^s, B_j^v 分别为背景图像中对应像素点的 H、S、V 分量; $\alpha, \beta, \gamma_h, \gamma_s$ 均为阈值, 目前的研究中大多根据经验进行选择^[11]。根据标准, 对图像的每个超像素集合进行阴影检测, 记阴影区域为 S_i , 非阴影区

域为 \overline{S}_i 。

2.3 虚拟对象的光照一致性实现

为实现虚拟对象的光照一致性, 需要计算真实场景中的天空光照参数 I_{sky} 和太阳光照参数 I_{sun} 。通过处在同样质地上的阴影区域和非阴影区域计算出 I_{sky} 和 I_{sun} :

$$I_{sky} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{I_{S_i}}{I_R}, \quad I_{sun} = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{I_{\overline{S}_i}}{I_R}, \quad (9)$$

式中: I_{S_i} 表示阴影部分像素点 i 的像素值; $I_{\overline{S}_i}$ 表示非阴影部分像素点 i 的像素值; I_R 表示初始天空光基像素值; n_1 和 n_2 分别为阴影部分像素点数量和非阴影部分像素点数量。

得到真实场景相关光照参数后, 利用处于真实阴影区域阴影边缘上的每个像素, 根据光照参数无限延伸, 直至被遮挡对象截断, 在虚拟空间中生成一个阴影体^[12]。构建了阴影体之后, 用户根据虚拟对象坐标变换公式^[13]可将虚拟对象插入到真实场景中, 阴影体会根据真实场景信息对虚拟对象进行阴影渲染。

根据成像原理, 阴影区域的像素点强度只受 I_{sky} 影响, 非阴影区域的像素点与 I_{sky} 和 I_{sun} 都有关系。因此, 将插入的虚拟对象分成 M_{obj} 和 M_{shadow} 两部分, M_{obj} 和 M_{shadow} 分别表示虚拟对象处于阴影体之外的部分及处于阴影体内的部分。再结合真实场景的光照参数, 可以得到虚拟对象的最终渲染结果 $I_{obj} = M_{obj} \cdot (I_{sun} + I_{sky}) + M_{shadow} \cdot I_{sky}$ 。

3 实验分析与讨论

为了测试所提阴影检测算法, 采用 UCF 数据集^[14]进行测试, 并对所提算法进行了定量和定性分析。实验验证是基于 Windows 系统和 Python 软件实现的。硬件配置为 Intel(R) Core(TM) i5-9300H CPU @2.4 GHz, 内存为 8G。

3.1 定量分析

定量评估实验是基于文献[15]提出的评估阴

影检测算法性能的度量标准的:阴影检测率 m_{rec} 和阴影识别率 m_{pre} 。两个标准分别定义为 $m_{rec} = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FP}}$, $m_{pre} = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FN}}$ 。其中, N_{TP} 表示阴影区域中检测为阴影的像素个数, N_{FN} 表示阴影区域中检测为非阴影的像素个数, N_{FP} 表示非阴影区域

中检测为阴影的像素个数。

表 1 为各算法在 UCF 数据集的 3 个子数据集中的平均阴影检测率和平均阴影识别率结果,其中每个子数据集都包含大约 1500 张图片。可以看出,对比文献[8]和文献[9]中算法的检测结果,所提算法在阴影检测率和阴影识别率上都有优势。

表 1 不同算法检测率和识别率对比

Table 1 Comparison of detection rate and recognition rate of different algorithms

Algorithm	m_{rec}			m_{pre}		
	UCF01	UCF02	UCF03	UCF01	UCF02	UCF03
Algorithm in Ref. [8]	0.898	0.904	0.858	0.926	0.924	0.928
Algorithm in Ref. [9]	0.905	0.915	0.887	0.925	0.935	0.937
Proposed algorithm	0.915	0.906	0.905	0.932	0.936	0.935

为了评价 4 种算法的时间效率,在 UCF01 数据集中选取了 20 张图片对 4 种算法进行阴影检测时间统计,均从读取原始图像开始到得到阴影检测结果为止记时,统计结果如图 1 所示。由图 1 可知,所提算法的最大检测时间和最小检测时间均明显低于其他算法。为了进一步体现所提算法优势,在 UCF 数据集的 3 个子数据集中,对 4 种算法处理图像的运行平均时间进行了统计,统计结果如图 2 所示,所提算法在检测时间效率上具有明显优势。

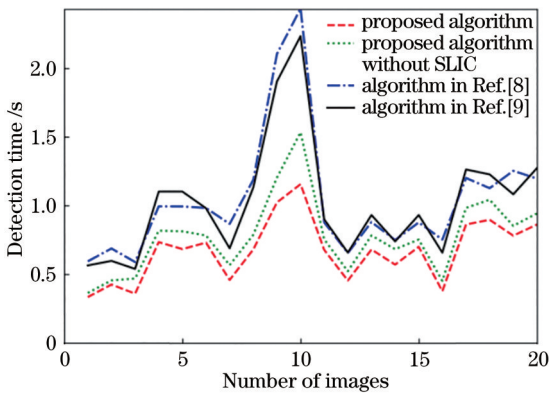


图 1 阴影检测时间对比

Fig. 1 Comparison of shadow detection time

综上所述,文献[8]中算法需要根据图像信息人工调整相关参数进行阴影检测,在个别图片上有较好检测效率,但整体检测效率不高;文献[9]中算法通过最小化高阶能量方程进行阴影检测,计算量较大,导致检测时间较长;所提算法对图像进行超像素分割并根据像素点邻域信息合并相邻超像素集合,减少了后续阴影检测单元,从而阴影检测耗时低于直接进行混合高斯背景阴影检测的算法,相比于文献[8]和文献[9]中算法更具有明显优势。

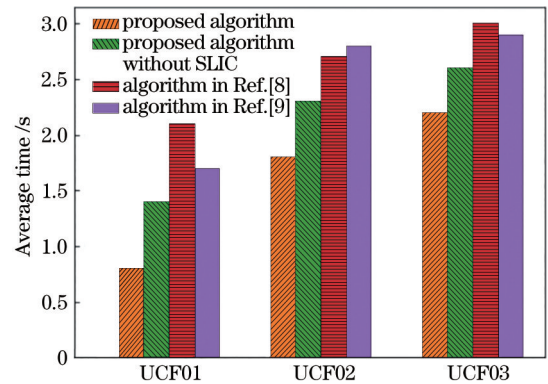


图 2 阴影检测平均时间对比

Fig. 2 Comparison of shadow detection average time

因此,所提算法的检测效率明显高于其他三种算法,具有应用到实时场景的前景。

3.2 定性分析

室外场景一般存在大量纹理,对这类图像进行阴影检测是个难点,因此选择了 3 幅现实室外真实场景图进行实验。图 3 给出了所提阴影检测算法的结果图。图 3(a)为待检测阴影图像,均为室外真实场景;图 3(b)为超像素初步分割结果,将图像分割成超像素集合,既保留了图像阴影、光照信息,又降低了后续图像处理的复杂度;图 3(c)中超像素集合变少,是对相邻超像素中心的颜色距离差值进行超像素合并后的结果,进一步减少了检测单元但图像信息并没有减少;图 3(d)是所提算法最终阴影检测结果。可以看出,所提算法在阴影检测前对图像进行超像素分割处理,在提高了时间效率的同时还可以得到较好的阴影检测结果。

最后,借助文献[12]的方法,根据检测到的阴影区域构建阴影体,对插入到真实场景中的虚拟对

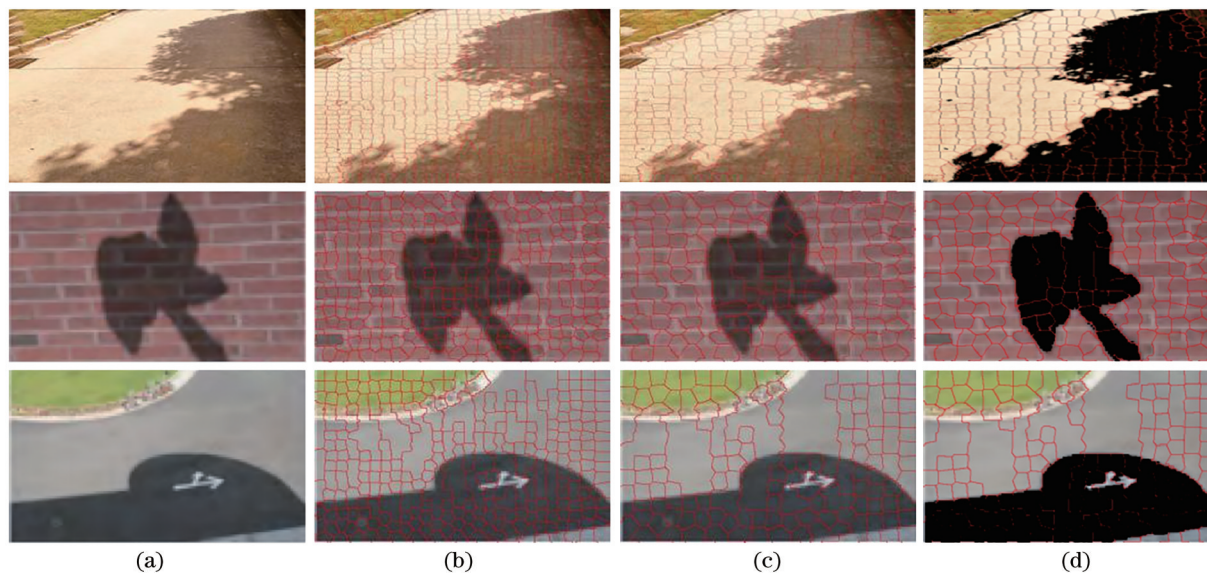


图3 超像素分割和阴影检测结果。(a)原始图像;(b)分割处理;(c)合并处理;(d)所提算法的检测结果

Fig. 3 Results of super pixel segmentation and shadow detection. (a) Original images; (b) after segmentation; (c) after merge; (d) detection results of the proposed algorithm

象进行阴影渲染。如图4所示,本文记录了在不同真实场景下虚拟对象注册效果,凳子、小车、长椅和椅子均为虚拟物体,原本真实场景地面没有此物

体。实验结果图表明,所提阴影检测算法构建阴影体时对虚拟对象进行渲染,赋予了虚拟对象阴影信息,实现了光照一致性。



图4 注册渲染效果

Fig. 4 Register and rendering results

4 结 论

提出一种基于检测真实场景阴影区域构建阴影体来赋予虚拟对象阴影信息的方法,实现了虚拟对象的光照一致性,提高了真实场景中的阴影检测效率。改进的超像素分割算法对图像进行分割处理,减少了阴影检测单元。然后,利用检测到的阴影区域结合光照信息构造阴影体。最后,利用阴影体对插入的虚拟对象进行阴影渲染。实验结果表明,所提方法能赋予虚拟对象阴影信息。这是在AR系统中实现虚拟物体和真实物体之间真实阴影交互的第一步,但本文仅使用了图像像素信息,使用深度相机可以得到图像深度信息来实现更复杂的阴影相互作用模拟,未来将继续朝着这个方向努力研究。

参 考 文 献

- [1] Yang J, Zhu F W, Yuan Z P, et al. OpenSURF algorithm improvement for augmented reality based on the natural features[C] // 2012 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, August 26-27, 2012, Nanchang, China. New York: IEEE Press, 2012: 62-65.
- [2] Zhang A J, Zhao Y, Wang S G. Illumination estimation for augmented reality based on a global illumination model[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(23): 33487-33503.
- [3] Liu W K, Liu Y. Review on illumination estimation in augmented reality[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(2): 197-207. 刘万奎, 刘越. 用于增强现实的光照估计研究综述

- [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(2): 197-207.
- [4] Jiddi S, Robert P, Marchand E. Reflectance and illumination estimation for realistic augmentations of real scenes[C]//2016 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR-Adjunct), September 19-23, 2016, Merida, Mexico. New York: IEEE Press, 2016: 244-249.
- [5] Fang L, Yu F Q. Moving object detection algorithm based on removed ghost and shadow visual background extractor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(13): 131002.
方岚, 于凤芹. 去除鬼影及阴影的视觉背景提取运动目标检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(13): 131002.
- [6] Hold-Geoffroy Y, Sunkavalli K, Hadap S, et al. Deep outdoor illumination estimation[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), July 21-26, 2017, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2017: 2373-2382.
- [7] Liu Y L, Qin X Y, Xu S H, et al. Light source estimation of outdoor scenes for mixed reality[J]. The Visual Computer, 2009, 25(5/6/7): 637-646.
- [8] Chen H Y, Qie L Z, Liu K. Moving shadow detection based on regional radiation consistency[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0315003.
陈海永, 郗丽忠, 刘坤. 基于区域辐射一致性的移动阴影检测[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0315003.
- [9] Chen Z, Liu Y L, Yang H Y. Detecting shadows from a single outdoor image based on high order energy function[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2019, 31(7): 1102-1109.
陈卓, 刘艳丽, 杨红雨. 单幅室外图像的高阶能量方
- 程阴影检测算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(7): 1102-1109.
- [10] Ren X L, Wang Y P. Super-pixel segmentation of remote sensing image based on improved simple linear iterative clustering algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(22): 222801.
任欣磊, 王阳萍. 基于改进简单线性迭代聚类算法的遥感影像超像素分割[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(22): 222801.
- [11] Xiao M, Han C Z, Zhang L. Moving shadow detection and removal for traffic sequences[J]. International Journal of Automation and Computing, 2007, 4(1): 38-46.
- [12] Xing G Y, Zhou X H, Peng Q S, et al. Lighting simulation of augmented outdoor scene based on a legacy photograph[J]. Computer Graphics Forum, 2013, 32(7): 101-110.
- [13] Li X T, Dang J W, Wang Y P, et al. Augmented reality recognition registration method based on text features[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(2): 021502.
李雪婷, 党建武, 王阳萍, 等. 基于文字特征的增强现实识别注册方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 021502.
- [14] Guo R Q, Dai Q Y, Hoiem D. Single-image shadow detection and removal using paired regions[C]//2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 20-25, 2011, Colorado Springs, CO, USA. New York: IEEE Press, 2011: 2033-2040.
- [15] Qu L Q, Tian J D, Fan H J, et al. Evaluation of shadow features[J]. IET Computer Vision, 2018, 12(1): 95-103.