

多特征驱动的虚拟点光源布局策略

吴玉莹¹
WU Yuying

摘要

针对三维场景中全局光照计算的复杂性和实时渲染的高效率要求,文章将渲染方程离散化,引入虚拟点光源作为离散化表征,提出了一种多特征驱动的虚拟点光源布局策略。该策略通过综合分析 G-Buffer 中的多种特征信息,如法线、颜色和深度等,采用多元线性回归方法对特征与亮度差异之间的映射关系建模,提取特征并量化其对光照计算的贡献权重。并基于预测结果,动态调整虚拟点光源的布局,以实现逼真的光照效果。实验结果表明,所提方法在光照逼真度取得了显著提升。

关键词

虚拟点光源;多特征驱动;实时渲染;全局光照

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.06.008

0 引言

在计算机图形学领域,如何快速渲染具有真实感的全局光照是一项重要而具有挑战性的任务。为模拟出逼真的光照效果,研究者们提出了各种方法,其中,虚拟点光源是一种被广泛采用的解决方案。这种技术通过模拟实际光源的反射,可以显著提升场景的视觉真实感。如何使用少量的产生较为真实的光照效果是这份方案的主攻方向。简言之,合理布局虚拟点光源是关键。传统的虚拟点光源布局策略往往只考虑单一的特征,例如光源的位置或反向,这种单维度的优化方式在处理具有复杂空间关系和材质特性的场景时往往难以达到预期效果。

为解决上述问题,本文提出了一种基于多特征驱动的布局策略。该策略综合考虑场景中的多种特征,包括物体的材质、表面的反射属性,以及光源和物体之间的空间关系等,来优化虚拟点光源的布局。通过多维度特征的指导,更准确地模拟光照在物体表面的弹射,从而实现更逼真的渲染效果。

1 光照渲染的离散化表征

渲染方程^[1]是计算机图形学中一个重要的积分方程,遵循真实的物理模型,能够描述光学现象中光线的分布与传输。渲染方程用于表面着色和光照计算,计算场景中的点在相机观察方向上的辐射度。在实际的应用中,渲染方程中的积分计算耗时较长,通过离散化处理,可以将复杂的积分计算转化为对有限数量虚拟点光源的求和运算,从而降低计算复杂度。渲染方程的离散化过程用公式表示为:

$$L_r(x, \omega_o) = \int_{\Omega^+} f_r(x, \omega_i, \omega_o) L_i(x, \omega_i) (\mathbf{n} \cdot \omega_i) d\omega_i \xrightarrow{\text{离散化}} \quad (1)$$

$$L_r(x, \omega_o) = \sum_{i=0}^n f_r(x, \omega_i, \omega_o) L_i(x, \omega_i) (\mathbf{n} \cdot \omega_i) d\omega_i \quad (2)$$

式中:函数 $f_r(x, \omega_i, \omega_o)$ 是双向反射分布函数(BRDF),表示任意点 x 从 ω_i 方向接收到的辐照度与该点在 ω_o 方向反射出的辐射亮度的比值,与物体表面材质相关; ω_i 是接收到辐射亮度的方向; ω_o 是辐射亮度反射出去的方向。反射出来的 x 点处的法向量 $\mathbf{n}$ 与入射方向向量 ω_i 的相似性决定了该点反射辐射度的有效性。

基于离散化的形式,又可以将其中的所有 L_i 分解为两大部分:

(1)显式光源(explicit),即场景中各种类型的光源对象,其产生的辐射能量使用 L_{ex} 来表示。

(2)隐式光源(implicit),对应从其他物体表面反射出来的光子能量形成,使用 L_{im} 表示。 L_{im} 即图形渲染中的间接光照部分,分布于场景中所有的物体表面,计算量大,因此直接使用全量的物体表面来进行计算是不可行的,故本文采用虚拟点光源的形式离散化光照。

$$L_r(x, \omega_o) = \sum_{i=0}^n f_r(x, \omega_i, \omega_o) (\sum_{i=1}^m L_i^{ex} + \sum_{i=1}^n L_i^{im}) (\mathbf{n} \cdot \omega_i) d\omega_i \quad (3)$$

2 虚拟点光源布局策略

2.1 虚拟点光源的生成

对于从场景表面生成虚拟点光源,Keller^[2]首次提出利用虚拟点光源来近似间接光照的全局光照,这种技术被称为立即辐射度算法。该方法的核心思想在于通过离散化间接光照分布,将场景点的间接光照计算转化为对虚拟点光源辐射度的累加,仅需计算虚拟点光源到场景的辐射度贡献。Dachs-

1. 南昌航空大学信息工程学院 江西南昌 330063

bacher 等人^[3]通过反射阴影贴图结合光栅化技术,在场景中快速部署大量虚拟点光源;Laine 等人^[4]使用梅特波利斯光照传输(metropolis light transport, MLT)方法的变体来放置虚拟点光源。Simon 等人^[5]采用双空间光子映射技术协同生成虚拟点光源。

接下来,如何在保证渲染效果的同时尽可能降低 VPL 的数量,以节省最终的计算量是进一步研究的重点。Georgiev 等人^[6]提出了一种基于拒绝采样的策略,根据虚拟点光源对最终图像的贡献程度来筛选光源,从而将更多的虚拟点光源集中在高亮度区域。Ritschel 等人^[7]则开发了一种视图自适应的虚拟点光源生成技术,通过重要性采样从视图样本和双向反射阴影贴图中筛选出关键光源。Babahenini 等人^[8]结合多重重要性采样和逆变换法,优先选择对光照贡献较大的虚拟点光源。陈胜等人^[9]针对间接光照计算精度不足的问题,提出了一种改进的可视区域敏感采样方法,通过聚类可视场景点并依据其位置和法向量信息,计算虚拟点光源对可视区域的间接光照贡献,从而优化光源分布。

上述方法大多数通过采样来分布虚拟点光源,但是采样方法在大规模场景中必然会带来较大的计算开销,无法满足实时性的要求。考虑利用多元线性回归模型进行三维场景的特征提取和亮度值差异预测,实现更精细的光照控制,从而提高光照的逼真度。

2.2 多特征驱动的虚拟点光源布局

本文提出一种基于多元线性回归模型的光源布局优化方法,通过量化间接光照贡献实现场景光照的高效计算。首先将场景均匀划分为若干网格单元,通过对比直接光照和全局光照两种光照模型下的亮度差异,量化间接光照对场景整体亮度的贡献度。为实现精确的特征分析,通过几何缓冲区渲染技术生成场景的 G-Buffer,该缓冲区存储了包含表面法线、颜色信息、深度信息等丰富的几何属性和材质参数,为后续建模提供多维特征空间。

基于此,将 G-Buffer 提取的法线方向、材质反射率、空间位置等特征参数作为自变量,对应区域的亮度差异值作为因变量,建立输入特征与间接光照强度之间的映射关系。通过最小二乘法拟合得到多元线性回归方程,解析各特征参数对亮度差异的显著性影响,计算得出法线夹角、材质反射率、表面深度等特征在间接光照计算中的权重系数。最终在传统均匀分布 VPL 的基础上,针对高权重特征区域实施光源密度增强,具体通过线性插值调整各网格单元的 VPL 分布密度。如图 1 所示,该方法在保持全局光照质量的前提下,显著提升重点区域的间接光照计算精度,同时通过特征指导的光源优化分布有效降低计算冗余。

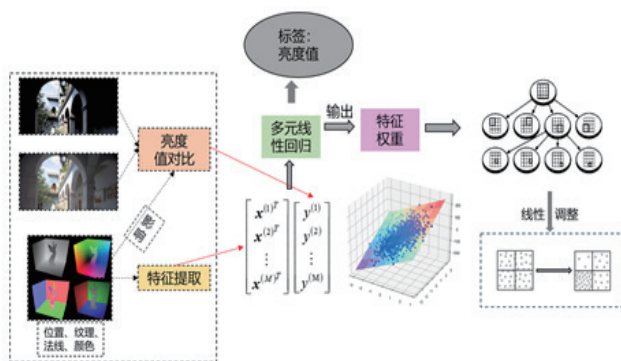


图 1 虚拟点光源布局流程

2.2.1 特征提取

几何缓冲(geometry buffer, G-Buffer)是延迟渲染技术的核心组件,用于存储场景中的几何体和表面信息。通过几何缓冲区渲染技术生成场景的 G-Buffer,从中提取包括位置、法线、颜色、纹理等多个通道的重要特征,探寻这些特征与亮度值差异之间的复杂映射关系。为确保模型的稳定性和预测性能,需要将提取的特征做归一化处理后组合成特征向量。每个特征向量都包含多个维度的信息,例如场景中某个像素点的法线向量、颜色信息、位置参数和深度值等。这些标准化后的特征向量将作为多元线性回归模型的输入数据。

在特征提取过程中,首先对提取的特征进行归一化处理,以消除不同特征之间的量纲差异。归一化的常用方法有 Min-Max 归一化、Z-score 归一化和 Decimal Scaling 归一化等。本文使用 Min-Max 归一化方法,将特征向量的每个维度都压缩在 0 到 1 之间,从而在多元线性回归模型中保证每个特征对模型的贡献具有可比性。

2.2.2 亮度值差异预测

亮度值差异 y 作为模型的标签,通过对比直接光照图和全局光照图获得。直接光照图是仅考虑光源直接照射到物体表面的光线,不考虑反射、折射等间接光照效果的图像。这种光照效果可以通过光线追踪或光栅化等渲染技术来生成,主要用于捕捉物体表面的环境光和直接反射。全局光照图则包含了场景中所有光线交互效果的总和,包括直接光照和间接光照,需要通过光线追踪算法模拟场景中所有光线的传播路径,从而生成更加真实的光照效果。

在生成的直接光照图和全局光照图中,首先通过颜色通道的加权和来计算提取每个像素的亮度值 L ,具体而言,对于每个像素的 RGB 值,按照特定的权重系数进行加权求和,得到该像素的亮度值。亮度值的计算公式为:

$$L = 0.212\ 6 \cdot R + 0.715\ 2 \cdot G + 0.072\ 2 \cdot B \quad (4)$$

式中: R 、 G 、 B 分别表示像素的红色、绿色和蓝色通道的值。

接下来,将图像均匀划分为若干区域,对于每个区域内的所有像素点,计算直接光照图亮度值与全局光照图亮度值的差值绝对值,再将这些差异值在区域内进行累加,得到该区域的亮度值差异总和 ΔL 。

$$\Delta L = \sum_{i=1}^N \Delta L_i \quad (5)$$

式中: N 为区域内像素数量; ΔL_i 为第 i 个像素的亮度值差异。

2.2.3 虚拟点光源布局策略优化

在多元线性回归模型中, 权重比表示各个特征对亮度值差异的贡献程度。假设有 n 个特征 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 亮度值差异为 ΔL , 则多元线性回归模型可以表示为:

$$\Delta L = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (6)$$

式中: β_0 是截距项; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 是各特征的权重; ε 是误差项。

通过最小二乘法拟合回归系数 β , 最小化预测值与实际亮度差异值之间的残差平方和。然后, 计算出法线夹角、材质反射率、表面深度等特征在间接光照计算中的权重系数, 计算方式为:

$$\omega_i = \frac{|\beta_i|}{\sum_{j=1}^n |\beta_j|} \quad (7)$$

式中: ω_i 表示第 i 个特征对亮度值差异的贡献程度, 且 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ 。

使用提取的特征和亮度值差异训练多元线性回归模型, 计算每个特征的权重比, 通过线性插值调整各网格单元的虚拟点光源分布密度。权重比越大的特征对应的区域对亮度值差异的贡献越大, 因此虚拟点光源的放置数量也更多。重复迭代, 直到虚拟点光源的分布达到最优, 即亮度值差异最小化或满足收敛条件。

3 实验结果

3.1 实验环境与配置

(1) 硬件配置: 一台搭载 AMD Ryzen 7 7840H 处理器和 NVIDIA GeForce RTX 4060 显卡的 PC, 同时使用 4K (3 840 px × 2 160 px) 的 HDR 显示器以精确呈现渲染结果。

(2) 软件配置: 基于 Windows 11 64 位操作系统, 采用 Unreal Engine 5.2 作为渲染引擎以支持 Lumen 全局光照和 Nanite 虚拟几何体技术, 核心算法使用 C++ 实现, 数据处理与模型训练基于 Python, 开发环境为 Visual Studio 2022 和 Jupyter Notebook, 分别用于 C++ 代码编写与 Python 脚本调试。

3.2 渲染结果对比

本文的测试场景分别是 Sponza 模型和 Sun Temple 模型, 模型的信息数据如表 1 所示。

表 1 测试场景信息数据

测试场景	模型面片数	纹理数量	模型大小 /MB
Sponza	103	43	153
Sun Temple	517	275	429

为验证本文方法的渲染效果, 在相同配置和相同数量虚拟点光源的情况下, 将其与 RSM 算法结果图进行对比。使用 SSIM (structural similarity index measure) 作为量化渲染图像与 Ground Truth 之间的评价指标。当 SSIM 值越趋近

于 1, 表示两幅图像在视觉感知上越相似, 渲染效果也更加理想; 相反, 当 SSIM 值接近 -1 时, 则表示两幅图像在视觉感知上有明显差异, 渲染效果较差。通过 SSIM 指标, 能够量化本文方法生成的渲染图像和 RSM 算法生成的渲染图像与 Ground-Truth 图的相似性, 从而更客观地评估本文方法的渲染质量。由图 2 可见, 本文算法的渲染效果显著优于 RSM 算法, 尤其是在复杂场景中仍保持较高的精确度, 说明其对复杂场景的适应性较强。

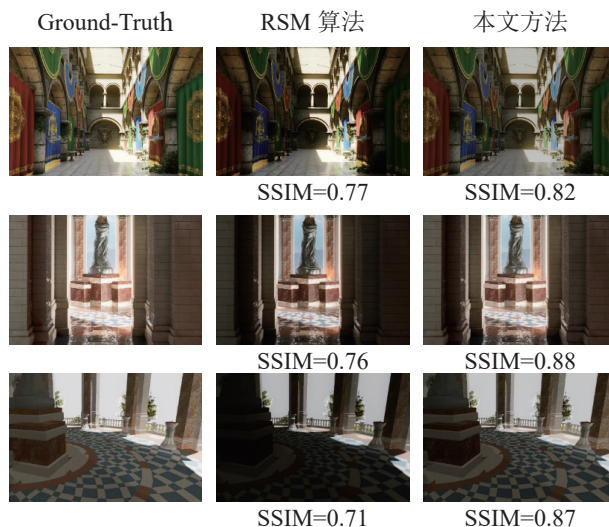


图 2 渲染测试结果对比

4 结语

本文针对快速且真实地渲染间接光照的问题, 提出了一种基于多特征驱动的虚拟点光源布局优化方法。该方法通过细致分析场景中的关键特征, 包括物体的材质属性、表面的反射特性以及光源与物体间的几何关系, 实现了对虚拟点光源位置和强度的精准调控。实验结果表明, 相较于传统的均匀布局方法, 本文在复杂场景中显著提升了渲染图像的真实感和视觉质量。但是, 在复杂场景中, 基于多特征权重比的虚拟点光源调整方法可能导致局部最优解, 无法全局优化光源分布。因此, 接下来将考虑引入遗传算法、粒子群优化方法等来调整虚拟点光源的分布, 避免陷入局部最优解。并且, 进一步探索深度学习与光照优化相结合的可能性, 推动虚拟光照技术在真实感渲染和实时渲染中的应用。

参考文献:

- [1] KAJIYA J T. The rendering equation[J].ACM SIGGRAPH computer graphics,1986,20(4): 143-150.
- [2] KELLER A. Instant radiosity[C]//SIGGRAPH '97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. NewYork: ACM, 1997: 49-56.

基于 ORB-BEBLID 的图像快速配准方法研究

赵柏山¹ 郭晋宇¹ 王庆祝²
ZHAO Baishan GUO Jinyu WANG Qingzhu

摘要

针对现有 ORB 算法配准误差较大,配准率较低且运算时间长以及 RANSAC 算法随机性强且不稳定的问题,提出一种基于改进 ORB 与改进 MAGSAC++ 结合的快速图像配准方法。首先构建多尺度金字塔提取征点,然后引入 BEBLID 描述符进行特征描述。通过 GMS 算法对所获得特征点进行粗匹配,最后采用 MAGSAC++ 算法对匹配结果进一步筛选,从而实现大视差图像快速配准。实验结果表明,相较于传统 ORB+RANSAC 算法和 SIFT+RANSAC 算法,特征点数量明显增加,且匹配准确率分别提升了 24.45% 和 34.3%,在图像尺度旋转,光照等多种变换场景中均能保持良好的鲁棒性。

关键词

特征匹配; ORB 算法; MAGSAC++ 算法; 图像配准

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.06.009

0 引言

随着计算机技术的发展,计算机视觉技术得到了飞速发展,图像配准技术是近几年发展迅速的图像处理技术^[1],目前已经广泛应用在医学影像、全景地图、遥感技术、智能驾驶等领域。在图像配准研究领域,目前的核心问题是如何平衡图像配准精度和计算效率。主要有两种图像配准方式:基于图像区域的配准方法和基于图像特征的配准方法。基于

图像特征的配准方法相对于其他非特征的方法有较强的鲁棒性。

基于图像特征的配准方法主要有 SIFT (scale-invariant feature transform) 算法、SURF (speeded up robust feature) 算法以及 ORB (oriented fast and rotated brief) 算法等。SIFT 算法采用梯度直方图进行描述,精度较高但计算量较大,耗时长。ORB 算法结合并改进了 FAST 特征点检测和 BRIEF 特征描述,在处理速度上得到显著的提升,匹配准确率有一定下降。文献 [1] 简化了图像金字塔,采用梯度方向改进了特征点主方向提取模式。文献 [2] 用阈值判断特征点,并使用自适应范围的非极大值抑制算法提高特征点分布均匀性,

1. 沈阳工业大学信息科学与工程学院 辽宁沈阳 110870

2. 中国人民解放军空军 93057 部队 吉林四平 136400

- [3] DACHSBACHER C, STAMMINGER M. Reflective shadow maps[C]//I3D'05: Proceedings of the 2005 symposium on Interactive 3D graphics and games. New York: ACM, 2005: 203-231.
- [4] LAINE S, SARANSAARI H, KONTKANEN J, et al. Incremental instant radiosity for real-time indirect illumination[C]//EGSR'07: Proceedings of the 18th Eurographics conference on Rendering Techniques. New York: ACM, 2007: 277-286.
- [5] SIMON F, HANIKA J, DACHSBACHER C. Rich - VPLs for improving the versatility of many-light methods[J]. Computer graphics forum. 2015, 34(2): 575-584.
- [6] GEORGIEV I, SLUSALLEK P. Simple and robust iterative importance sampling of virtual point lights[EB/OL].[2024-05-12].<https://www.iliyan.com/publications/ImportanceVPL>.
- [7] RITSCHER T, EISEMANN E, HA I, et al. Making imperfect

shadow maps view-adaptive: high-quality global illumination in large dynamic scenes[J]. Computer graphics forum, 2011, 30(8): 2258-2269.

- [8] BABAHENINI D, GRUSON A, CHAOUKI-BABAHENINI M, et al. Efficient inverse transform methods for VPL selection in global illumination[J]. Multimedia tools and applications, 2018, 77: 13571-13595.
- [9] 陈胜, 陈纯毅, 邢琦玮, 等. 基于可视区域间接光照聚类的虚拟点光源采样 [J]. 系统仿真学报, 2020, 32(6): 1085-1093.

【作者简介】

吴玉莹 (1999—), 女, 江西抚州人, 硕士研究生, 研究方向: 计算机图形学。

(收稿日期: 2025-02-15 修回日期: 2025-06-05)