

基于梯度图的微结构表面全局光照实时绘制^{*}

王莉莉⁺, 杨 峥, 马志强, 赵沁平

(北京航空航天大学 计算机学院 虚拟现实技术与系统国家重点实验室, 北京 100191)

Real-Time Global Illumination Rendering for Mesostructure Surface Based on Gradient Map

WANG Li-Li⁺, YANG Zheng, MA Zhi-Qiang, ZHAO Qin-Ping

(State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and System, School of Computer Science and Engineering, BeiHang University, Beijing 100191, China)

+ Corresponding author: E-mail: wanglily@buaa.edu.cn

Wang LL, Yang Z, Ma ZQ, Zhao QP. Real-Time global illumination rendering for mesostructure surface based on gradient map. *Journal of Software*, 2011, 22(10): 2454-2466. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3881.htm>

Abstract: Rendering global illumination for objects with mesostructure surfaces is a time-consuming task and cannot presently be applied to interactive graphics. This paper presents a real-time rendering method, based on a mesostructure height gradient map (MHGM), to exhibit lighting effects on meso-scale detail level in dynamic environments. This paper approximates global illumination by using a lighting model that includes specific characteristics: Incident ambient light, direct light, and a single bounce indirect light. In order to compute these three components in real time, this paper introduces the MHGM to create local apex sets, with which an adaptive method for calculating ambient occlusion is proposed. In direct lighting, the nearest local apex profile of the incident rays is to be found and presented as a mesostructure shadow algorithm, which can generate the shadow of meso-scale details. The color of the points enclosed by the local apexes is also sampled to estimate a single bounce indirect light. This approach runs entirely on the graphics hardware and uses deferred shading and the graphics pipeline to accelerate computation. High quality results, which can render meso-scale details with global illumination even for low-resolution geometric models, are achieved. Moreover, this approach fully supports dynamic scenes and deformable objects.

Key words: real-time rendering; realistic rendering; global illumination; image space; ambient occlusion

摘 要: 针对带有微结构表面的几何模型全局光照计算复杂、难以达到实时性要求的问题,提出一种基于高度梯度图分析的全局光照实时绘制方法.首先,定义微结构高度梯度图,并据此构建可见点的局部最高点集合.其次,给出面向微结构表面对象实时绘制的全局光照计算模型,将光照计算近似分解为环境光入射、光源直接光照和一次交互漫反射这3种分量的计算.在环境光计算过程中,提出一种自适应环境光遮挡计算,借助局部最高点集合计算遮挡角.在直接光照中,给出一种微结构阴影的修正方法,搜索入射光方向的最近局部最高点剖面;通过比较剖面内光线投影与局部最高点的遮挡角,近似确定由微结构造成的阴影区域.最后,根据可见点的局部最高点集合确定一次交互漫反射的采样范围,进行渗色处理.整个全局光照计算方法在图像空间完成,较好地利用了延迟着色的思想和 GPU 并行

* 基金项目: 国家自然科学基金(60842001); 北京市科技新星计划(2009B09); 澳门科学技术发展基金(043/2009/A2)

收稿时间: 2010-01-08; 定稿时间: 2010-05-14

计算的特点.算法可以在使用低精度几何模型时表现出带有微结构表面的高精度模型的全局光照效果,且适用于动态场景和可变形物体的全局光照计算.

关键词: 实时绘制;逼真绘制;全局光照;图像空间;环境光遮挡

中图法分类号: TP391 **文献标识码:** A

现实场景中存在大量具有不平滑表面的对象,这些微结构表面将对光线传播产生影响,会表现出细粒度的自阴影、环境光遮挡、渗色等全局光照效果.因此,描述局部微结构细节与光线的交互、真实再现这类对象的光照效果,可以使得图像细节更为丰富、细腻,极大地提高了绘制效果的逼真性.

微结构表面对象细节多、几何结构复杂,光线跟踪等传统的全局光照算法存在着计算量大、难以用于实时绘制等问题.双向纹理函数(bidirectional texture function,简称 BTF)^[1]、双尺度辐射度传递(bi-scale radiance transfer,简称 BRT)^[2]、壳纹理函数(shell texture function,简称 STF)^[3]和薄壳辐射度纹理函数(shell radiance texture function,简称 SRTF)^[4]等方法对微结构表面对象的光照计算方法进行了深入的研究.但是,由于大量预计算和纹理合成的存在,算法很难实时模拟动态可变形物体的光照效果.

本文提出一种基于微结构高度梯度图的全局光照实时绘制方法,实现可变形物体微结构表面的实时全局光照计算.在光照计算方面,针对物体表面几何细节特点给出一种全局光照分解计算方法,以分别近似计算环境光、反射和一次交互漫反射等光照分量.在光照采样方面,首先基于屏幕空间创建物体微结构表面的高度梯度图,然后根据梯度的方向及其大小的分布来搜索对局部细节光照影响最大的方向和遮挡点,并建立局部最高点集合以指导各个光照分量自适应地采样计算.环境光的影响主要表现在表面微结构的相互遮挡上,因此,可见点的亮度可以通过计算局部最高点对它的遮挡而得到的.高频光源最显著的效果是阴影和自阴影的绘制,但是,如果在绘制中采用低精度的网格模型,由于模型表面缺少实际微结构形变,无法用经典阴影图方法(shadow mapping)直接计算细节阴影.因此,我们给出一种微结构表面阴影修正方法,通过纹理坐标将微结构高度场绑定在低精度模型表面,将带有微结构表面的对象的阴影计算分为两步,利用 Shadow Mapping 计算低精度网格的阴影,采用梯度空间局部最高点集合遮挡计算来生成细节阴影.交互漫反射主要来源于周围细节点的漫射影响,综合可见点的双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function,简称 BRDF)和局部最高点的分布,计算渗色光照强度.图 1 给出采用本文方法对带有微结构表面的对象渲染效果.

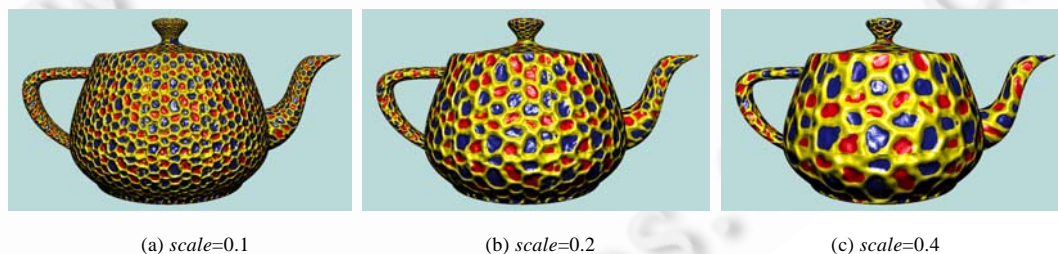


Fig.1 Global illumination for teapot with mesostructure surface of different scales rendered using our algorithm

图 1 本文算法绘制的茶壶表面不同微结构尺寸的全局光照效果

本文方法的主要贡献主要体现在如下 4 点:

第一,使用对象的低精度几何模型和微结构细节高度图,表现出带有微结构表面的高精度几何模型的全局光照效果;

第二,消除预计算,算法达到实时性能,适用于动态场景和可变形对象(微结构和低精度模型均可变形);

第三,给出一种微结构表面的全局光照近似方法,使用环境光、高频光源入射光和一次交互漫反射来模拟局部细节的光照度传递;

第四,提出屏幕空间微结构高度梯度图,并构建可见点的局部最高点集合,自适应地确定采样范围,消除人

工设定参数,更高效、更准确.

1 相关工作

物体表面微结构随视点、光照方向和空间位置变化的光照细节,可以更好地表现现实世界对象丰富的外观,提高模型绘制的真实感.Tong 等人^[1]提出使用表面纹理元来合成低精度模型表面 BTF 的方法,能够较好地表现表面微结构随视点和光源变化的光照效果.Sloan 等人^[2]提出了双尺度的辐射度传输算法,将辐射度分为全局和局部尺度.全局和局部尺度的传输分别采用预计算辐射度传输(precomputed radiance transfer,简称 PRT)和 BTF,使绘制后的 BTF 材质表面呈现全局辐射传输光照效果.但网格上的顶点分布稠密、计算量较大,而且只能处理低频光照.

为了计算非均匀半透明微结构模型光照,Chen 等人^[3]建立了一个包括薄壳层和均匀内核的模型,并引入 STF 计算薄壳层的表面辐射度,但运行阶段计算量较大,无法达到实时.为了能够实时渲染非均匀半透明物体,Song 等人^[4]提出的预计算基本量的 SRTF,在运行阶段直接用于计算模型表面辐射度,实现实时渲染.但不可作用于可变形物体.

环境光遮挡^[5]是一种快速的全局光照近似方法,它通过计算物体上某点与周围遮挡物之间的可见性关系来得到该点的光照强度,从而用来模拟场景中由环境光所产生的软阴影,使得场景逼真度大为提高.Kontkanen 等人^[6]提出了环境光遮挡场,并基于此来预计算物体间的环境光遮挡.Hegeman 等人^[7]提出了一种近似环境光遮挡的方法,可满足复杂动态场景的交互渲染需要,但渲染质量不是很高.为了提高绘制效率和渲染质量,Shanmugam 等人^[8]提出了硬件加速的环境光遮挡方法,将环境光遮挡分解为能够独立计算的高频和低频两部分,实现了复杂动态场景的高质量实时渲染.为了进一步提高绘制效率,Bavoil 等人^[9]提出了基于屏幕空间的环境光遮挡(screen space ambient occlusion,简称 SSAO)算法,通过比较当前点与周围点的深度来确定环境光被遮挡的比率.但该算法需要人工设置采样数目,并且在改变物体和视点的相对位置时会产生视觉上的跳跃现象.Bavoil 等人^[10]和 Dimitrov 等人^[11]在 Shanmugam 方法的基础上改进了遮挡关系的判断方法,提高了绘制效率.随后,Ritschel 等人^[12]提出了屏幕空间方向光遮挡(screen space directional occlusion,简称 SSDO)算法,在 SSAO 中加入方向光遮挡和一次交互漫反射,实现了全局光照在复杂动态场景中的实时绘制.

2 屏幕空间微结构表面高度梯度图

2.1 微结构高度梯度图

当光线入射到物体表面时,表面微结构的分布和形状将影响光线传播的路径,产生阴影、遮挡、交互漫射等光照效果.求取微结构高度的梯度,可以较好地描述局部高低起伏变化,方便遮挡关系的计算,提高遮挡点的搜索速度.因此,针对微结构表面,我们提出一种屏幕空间的微结构高度梯度图(mesostructure height gradient map,简称 MHGM),可以通过下述方法加以构造.

假定带有微结构表面的物体是由微结构高度场和内核模型所构成的,微结构高度场通过纹理合成和纹理映射方法与内核预先绑定(如图 2 所示).假设低精度模型 M 表面任一点 P 均有微结构高度场的纹理坐标为 $T_p=(U_p, V_p)$,当我们在视点 V_e 下绘制 M 时,可以得到该视点下的二维视图 V_e' .在 V_e' 中,微结构对象 M 的可见部分所占区域记为 M' ,根据微结构高度场的映射关系, M 的任一点 P 在 M' 中的投影点 P' 都能依据纹理坐标 T_p 取到 P 的微结构高度值.我们将由这些高度值所形成的二维图像称为屏幕空间微结构表面高度图(mesostructure height map,简称 MHM).对 MHM 求取梯度,我们把生成的矢量图像称为屏幕空间的 MHGM. MHGM 在图像空间近似给出了微结构表面起伏变化程度的描述.图 3 给出了 MHGM 的生成过程.

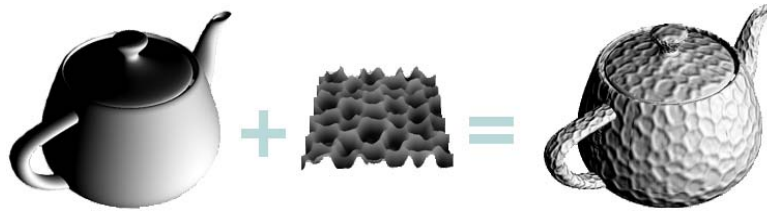


Fig.2 Construction for objects with mesostructure surfaces

图 2 微结构表面对象的构成

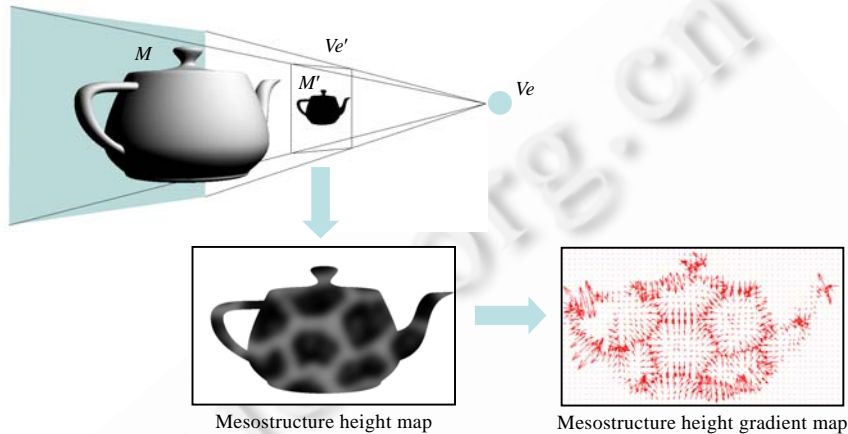


Fig.3 Process that how to generate MHGM

图 3 MHGM 生成过程示意图

2.2 局部最高点集合的构造

具有微结构表面的物体是由微结构高度场和内核模型所构成,假定微结构变化剧烈程度远大于内核模型结构,那么对于局部范围内的微结构来说,其所对应的内核模型区域可近似为平面.由于标量场的梯度是一个向量场,梯度的方向指向标量场增长最快的方向,因此我们可以将梯度分析应用到上面构造的 MHGM 中,近似计算局部微结构的辐射度传递.

在 MHGM 中存在着一些梯度为 0 的点,周围点的梯度都指向这些点.根据梯度的物理含义,这些点的高度值大于其周围点,在本文中,我们将其称为局部最高点(local apex).另外,我们将在 MHGM 上、位于物体可见区域 M' 边界上的点称为梯度图边界点(boundary point).为了计算微结构上的光照传播,我们需要根据局部最高点和梯度图边界点的分布,为每个可见点构造局部最高点集合.

在视点 V_e 下的二维视图 V_e' 中,给定任意一个可见点 P' (P' 是 P 在 V_e' 中的投影),根据如下方法我们构造 P 的局部最高点集合 $f(P)$,图 4 为构造过程的示意图.

在该视点下生成的 MHGM 中,以 P' 位置为起始点,沿着梯度方向,搜索到距离该点最近的局部最高点,我们把该点称为 P 的直接局部最高点,记作 H_p ,并将其加入到 $f(P)$ 中.由于 H_p 只是 P 在某一个方向上的局部最高点,其他方向也同样存在着局部最高点,对 P 点的光照计算会产生影响.为了得到这些局部最高点,我们在 P' 点周围采样,当某一方向的采样点为 P^i 时,把以 P^i 为起始点沿梯度方向搜索到的局部最高点 H_p^i 称为 P 的间接局部最高点,加入到 $f(P)$ 中.同理,我们可以搜索 P 点其他方向的局部最高点,使得 $f(P)$ 包含 P 的多方向局部最高点.另外,如果 P' 位于 M' 边界附近,沿梯度方向可能搜索到的点为边界点 B_p ,我们将这样的点也作为局部最高点,放入 $f(P)$ 中. $f(P)$ 中所有局部最高点将对微结构表面光照度传播起到较大的作用,应用于随后的光照分量计算之中.

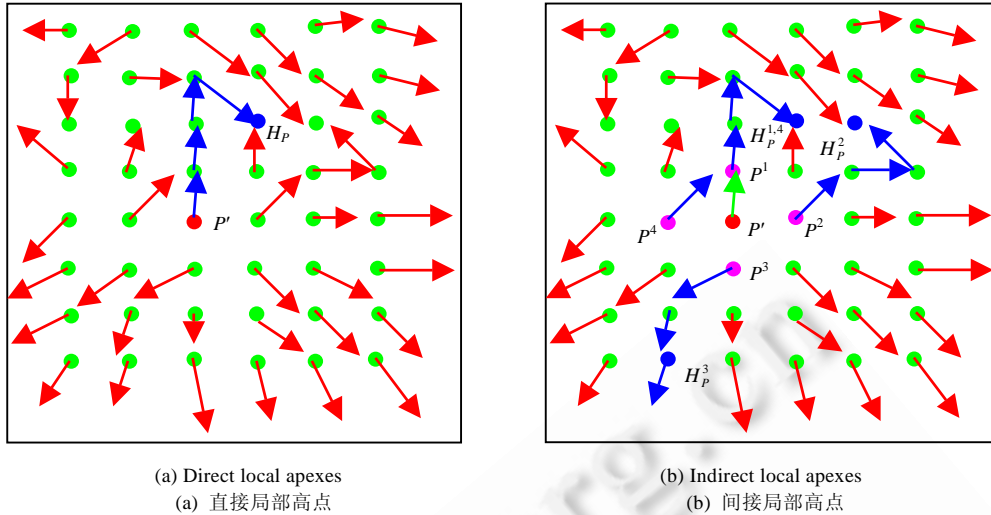


Fig.4 Extraction for local apices with MHGM
图4 MHGM 中局部最高点提取方法示意图

3 局部微结构光照计算方法

根据 Kajiya^[13]的渲染等式,几何对象上任意一个点 P 的在 $\bar{\omega}_0$ 方向的出射光照度 L_0 可以根据该点在各个方向上入射辐射度的积分求得,具体形式见公式(1):

$$L_0(P, \bar{\omega}_0) = \int_{\Omega} \rho(P, \bar{\omega}_0, \bar{\omega}_i) L_i(P, \bar{\omega}_i) (\bar{n} \cdot \bar{\omega}_i) d\omega_i \quad (1)$$

其中, L_i 是入射光强度, $\bar{\omega}_i$ 是入射方向, \bar{n} 是 P 点的法线方向, ρ 是对象表面的材质属性 BRDF, Ω 是以计算点为中心、以该点所在平面为底面的单位半球。

微结构表面对象几何细节丰富,局部区域就可能存在上万个微面.如果直接根据该渲染公式计算几何关系和求取积分,计算量过大,算法难以实时.针对这个问题,本文给出一种微结构表面光照计算模型,将微结构表面的入射光近似分解为 3 个分量:环境光 L_a 、高频光源光照度 L_s 和一次交互漫反射光照度 L_d .对于微结构表面,环境光 L_a 是周围环境对当前点的照亮程度,由于微结构表面细粒度的高度起伏较多, L_a 需要根据当前点与周围点的遮挡关系计算得到.高频光源光照度 L_s 是指方向光源或点光源对微结构表面点的照明,需要考虑其对局部自阴影的影响.一次交互漫反射光照度 L_d 主要描述了周围微结构区域对当前点的漫反射效果的影响.本文通过公式(2)将上述入射分量进行叠加,近似计算微结构表面的入射光.

$$L_i(P, \bar{\omega}_i) = (\lambda_a L_a(P, \bar{\omega}_i) + \lambda_s L_s(P, \bar{\omega}_i)) \cdot V(P, \bar{\omega}_i) + \lambda_d L_d(P, \bar{\omega}_i) \cdot (1 - V(P, \bar{\omega}_i)) \quad (2)$$

其中: λ_a, λ_s 和 λ_d 分别为环境光 L_a 、直接光照 L_s 和一次透色光照 L_d 的权重系数,具体与物体表面的材质属性相关; V 则表示 P 点在 $\bar{\omega}_i$ 方向是否被遮挡,它可以用一个二值函数来表示,当取值为 0 时,表示被遮挡,否则表示未被遮挡.根据微结构高度梯度分布情况,我们在图像空间给出各个分量的求解方法.

3.1 环境光遮挡计算方法

在 Bavoil^[10]算法的基础上,本文提出一种基于微结构高度梯度图的环境光遮挡计算方法.不同于其他屏幕空间算法沿着所有方向计算环境光遮挡值,我们的算法利用上一节所述的局部最高点集合来自适应地计算微结构模型的环境光遮挡.

对于给定的一点 P , P 点周围存在的点会对它产生遮挡. P 的点环境光遮挡计算公式如下:

$$A(P, \bar{n}) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega} V(P, \bar{\omega}) W(\bar{\omega}) d\omega \quad (3)$$

其中: n 是 P 点的法线方向; Ω 是以 P 为中心、以 n 为正方向的单位半球; V 是该半球上的光线的可见性函数,如果为 1,则表示该方向可见,为 0,则表示该方向被遮挡; $W(\bar{\omega})$ 为权重函数.

我们以 P 点所对应的内核的模型顶点法线方向作为极轴、以方位角 θ 和倾斜角 α 建立球面坐标系,则公式(3)可转化为

$$A(P, \bar{n}) = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta=-\pi}^{\pi} \int_{\alpha=0}^{\pi/2} V(P, \bar{\omega}) W(\bar{\omega}) d\alpha d\theta \quad (4)$$

对于每一方向 θ ,若我们找到一个最大遮挡角 $h(\theta)$,当 $\alpha > h(\theta)$ 时, $V(P, \bar{\omega}) = 1$, 则可以得到公式(5):

$$A(P, \bar{n}) = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta=-\pi}^{\pi} \int_{\alpha=h(\theta)}^{\pi/2} W(\bar{\omega}) d\alpha d\theta \quad (5)$$

权重函数 $W(\bar{\omega})$ 有很多种给法,如令 $W(\bar{\omega}) = \bar{n} \cdot \bar{\omega} = \cos(\alpha)$, 可得到公式(6).在环境光遮挡的计算中,我们采用了公式(6):

$$A(P, \bar{n}) = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta=-\pi}^{\pi} (\sin(\pi/2) - \sin(h(\theta))) d\theta \quad (6)$$

在微结构模型中,对于模型表面的顶点 P ,其对应的空间坐标值由公式(7)计算得出:

$$P = P_0 + \bar{n}_0 \cdot dis \cdot k \quad (7)$$

其中, P_0, \bar{n}_0 分别为模型主内核上点的空间坐标值和法向量, dis 为其对应的微结构高度场的高度值, k 为放缩量. 若其某方向范围内存在一个局部最高点 H_p^θ ,则可以近似地认为 H_p^θ 点对 P 点的遮挡角度 $h(\theta)$ 即是该方向范围内的最大遮挡角,用公式(6)计算环境光遮挡值:

$$h(\theta) = a \sin\left(\frac{\Delta h}{\text{length}(H_p^\theta - P)}\right),$$

其中, Δh 为两点的高度差.同时,如果点 P 的某一方方向范围内不存在局部最高点,则我们可以认为点 P 在该方向上基本不受遮挡.这样,微结构模型上顶点 P 的环境光遮挡计算就转化为了计算其局部最高点集合对它的遮挡.同时,我们用原始的 Bavoil^[10]算法,采用较少的采样方向、较少的采样点,来计算物体更大范围内的遮挡现象.利用每个顶点的局部最高点集可以自适应地确定采样步长.假设顶点 P 的局部最高点集中,与其距离最远的局部最高点的距离为 \max ,与其距离最近的局部最高点的距离为 \min ,则我们可以用 $(\min+\max)/2$ 作为采样步长.本文的方法借助微结构高度场梯度分布搜索遮挡点,遮挡计算是在微结构高度场所在的对象空间内完成的,因此不会随视点的变化而变化;方法是自适应的,不需要设定采样范围和间隔参数,并且搜索到的点均为对遮挡有影响的有效点.图 5 给出遮挡角计算示意图.

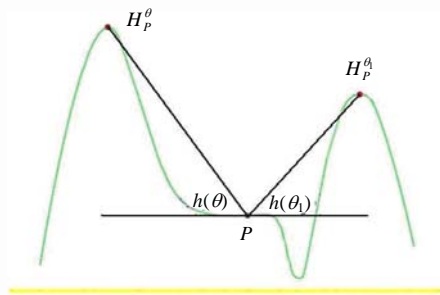


Fig.5 Calculation for blocked angles
图 5 遮挡点计算示意图

3.2 高频光源光照效果计算方法

我们采用 Phong 模型来计算微结构表面接受到的高频直接光照.在计算光照强度之前,需要判断模型上的点是否被照亮,即是否会因为遮挡关系而产生自阴影效果.由于本文中使用的带有微结构表面的几何模型是在内核模型上绑定微结构高度场映射信息,模型表面未发生微结构的形变,因此无法用 Shadow Mapping 方法直接

计算阴影位置.为了解决上述问题,本文给出一种基于梯度空间局部最高点的微结构表面阴影图修正方法,在采用经典 Shadow Mapping 方法对内核结构模型计算大尺度阴影的基础上,对由微结构高度场产生的局部表面细节进行遮挡计算,对原阴影区域进行修正.

如图 6 所示,对于 P 点周围的某一局部最高点 H_p^θ ,当点光源方向 \vec{L} 与 $\overline{PH_p^\theta}, \vec{N}_p$ 在同一平面内时,若 \vec{L} 与 \vec{N}_p 的夹角大于 $\overline{PH_p^\theta}$ 与 \vec{N}_p 的夹角,且 \vec{L} 与 $\overline{PH_p^\theta}$ 在 \vec{N}_p 的同一侧,则认为 P 点被周围微结构的局部最高点遮挡,在阴影中;反之被光源照亮.但在实际计算中, \vec{L} 往往不与 $\overline{PH_p^\theta}$ 和 \vec{N}_p 在同一平面内,因此我们采用一种近似的方法,通过搜索光源方向 \vec{L} 的最近局部最高点剖面来计算遮挡关系.如图 7 所示,对于第 2.2 节中所取得的局部最高点集合中的每一点 H_p^θ ,都存在着一个过该点和 P 点法线 \vec{N}_p 的平面,我们称该平面为 P 点关于其局部最高点 H_p^θ 的微结构局部剖面 F_p^θ . \vec{L} 以 \vec{N}_p 为轴,旋转角度 β 之后到达 P 点的某一个剖面,且 \vec{L} 与 H_p^θ 在 \vec{N}_p 的同一侧.我们称使 β 达到最小值 β_{min} 的剖面 F_p^θ 为光源方向 \vec{L} 的最近局部最高点剖面,记为 F_p^L . 将 \vec{L} 投影到 F_p^L 中,生成近似高频光源方向向量 \vec{L}' . 在剖面 F_p^L 中,采用上述方法计算 \vec{L}' 与该剖面内局部最高点的遮挡关系,判断 P 点是否在阴影内.若 β_{min} 仍大于某固定角度值(如 90°),则可以认为点光源可以照射到 P 点而不会受到遮挡.

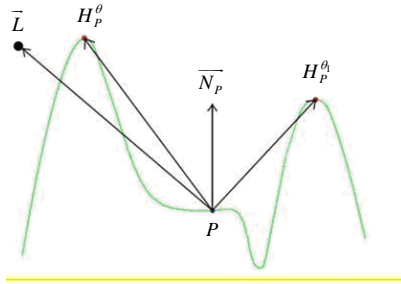


Fig.6 Modify shadow on mesostructure surface
图 6 微结构阴影修正示意图

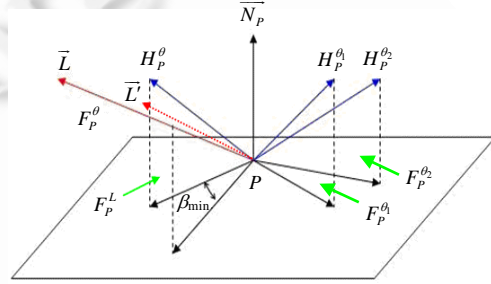


Fig.7 Search the nearest profile and get \vec{L}'
图 7 寻找最近剖面示意图生成 \vec{L}'

我们首先在内核模型上使用 Shadow Mapping 算法计算对象主阴影区域.如果表面微结构点在该区域内,不作处理,仅对那些不在内核模型阴影区域内的点进行上述的微结构遮挡检测.寻找使 β 达到最小值 β_{min} 的局部最高点,利用它来计算遮挡检测.该方法可以方便地与软阴影算法结合,还可以方便地扩展到有着多个高频光源的场景中.对于不处于阴影中的顶点,根据微结构模型顶点的空间坐标值和法向量以及光源和视点位置,利用 Phong 模型计算高频直接光照.

3.3 一次交互漫反射计算方法

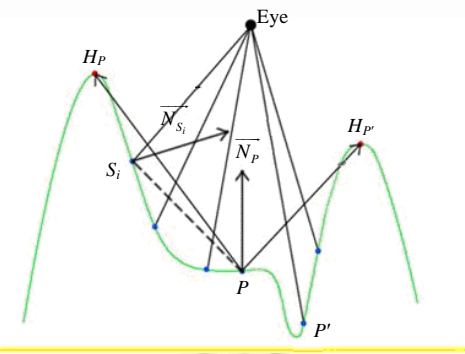


Fig.8 Sampling for one bounce of indirect illumination
图 8 一次交互漫反射采样示意图

Ritschel 等人^[12]在 SSDO 中给出在屏幕空间计算一次交互漫反射的方法.本文的方法仍基于在图像空间采样的思路,但与 SSDO 主要有两点区别:第一,SSDO 是在一个预定义半径的半球内进行采样,本文方法的采样以当前点的局部最高点集合为边界,是自适应的,无需手工设定;第二,SSDO 采样每个点后首先需要判断是否遮挡,之后才能进行计算.我们的方法则是在已知会被遮挡的范围内取点进行计算,减少了遮挡计算次数,提高了测试点的有效性比率.

对于 P 点周围的所有局部最高点, P 点都会被它们所遮挡.我们首先沿着 P 的梯度爬升方向进

行采样,直至 P 的直接局部最高点 H_p ,在此路径上进行一次交互漫反射入射光照度采样.之后,我们在 P 点附近寻找中介点 P' ,沿着 P' 的梯度爬升方向至其直接局部最高点 $H_{p'}$,同样也在此路径上进行交互漫反射入射光照度采样.如图 8 所示,我们可以沿着 P 点和中介点 P' 的梯度方向逐点采样,通过采样点的颜色,计算 P 点的一次交互漫反射.同时,为了避免采样点 S 无法渗色到 P 点的情况,还需考虑到 \overrightarrow{PS} 与 $\overrightarrow{N_p}$ 的夹角以及 \overrightarrow{SP} 与 $\overrightarrow{N_s}$ 的夹角是否小于 90° .如图 8 中所示的中介点 P' ,它显然无法渗色到 P 点.最后得到一次交互漫反射的计算公式如下:

$$L(P) = \sum_{i=1}^n \rho L_{color}(S_i) \frac{\max(0, \text{dot}(\overrightarrow{PS_i}, \overrightarrow{N_p})) \max(0, \text{dot}(\overrightarrow{S_iP}, \overrightarrow{N_{S_i}}))}{\text{pow}(\text{length}(\overrightarrow{PS_i}), 2)} \quad (8)$$

其中, ρ 为材质的 BSDF 参数, L_{color} 为采样点的颜色.

4 实验结果与分析

本文算法的实验环境为 Inter Core(TM)2 3.0GHz CPU、2G 内存、NVIDIA GeForce GTX 260 1G 显卡、运行 Windows XP 操作系统的 PC 机.实验程序基于 OpenGL 3.0 API,Shader 程序使用 Shader Model 3.0 方式编译.实验模型均来自于斯坦福大学三维模型库^[14].

为了验证微结构表面光照模型的有效性,我们首先使用了 Teapot 和 Torus 模型对各个分量计算的绘制效果进行对比分析,然后给出由本文方法绘制的带有微结构表面对象的全局光照效果,最后进行了性能测试实验.

4.1 微结构环境光遮挡绘制效果

环境光遮挡分量的绘制结果如图 9 所示.从图 9(a)可以看出,模型表面局部区域由于受到微结构几何细节形状高度起伏的影响,环境光入射变化明显,较好地表现了小尺度几何细节的环境光遮挡效果.通过图 9(b)或图 9(c)的对比可以看出:Bavoil 等人的方法由于使用了固定的采样范围和步长,且为了保证模型整体明暗效果,采样范围通常设置得较大,不能清晰地表现对象表面因受到局部微结构细节遮挡所引起的环境光入射强度的不同.我们的方法可以兼顾微小尺度几何结构和大尺度几何结构的遮挡关系计算,更为清晰地表现带有微结构表面对象在环境光下的明暗效果.

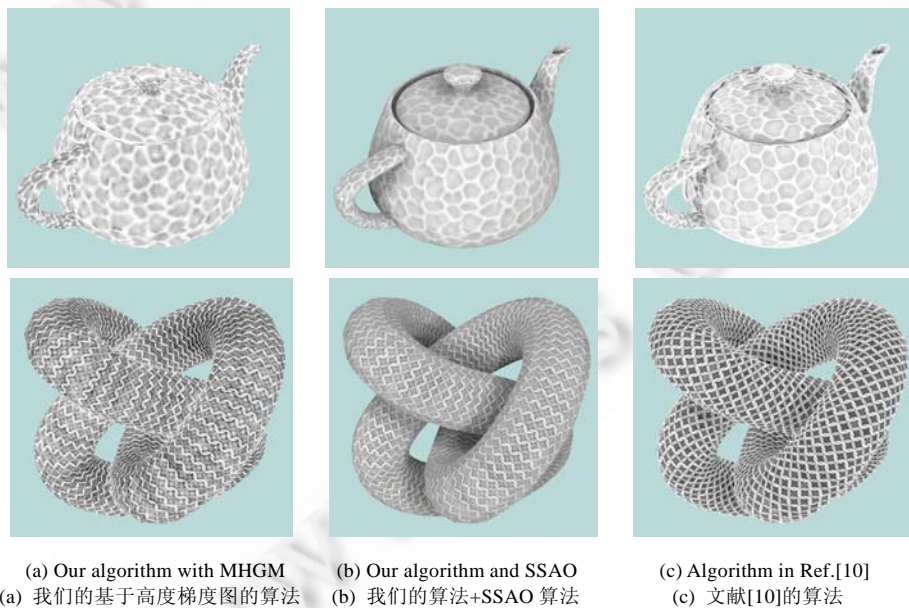


Fig.9 Comparison of rendering effects of ambient occlusion on mesostructure surface

图 9 微结构表面环境光遮挡绘制效果及对比

4.2 微结构阴影效果

图 10(a)、图 10(b)给出了我们在实验模型上直接使用经典的 Shadow Mapping 方法计算的阴影效果,只确定了内核模型的阴影区域,没有反映由于对象表面微结构高度起伏所造成的自阴影效果.图 10(c)、图 10(d)是使用了第 3.2 节给出的表面微结构阴影修正方法后的结果.它在 Shadow Mapping 方法计算出的非阴影区域进行微结构阴影的判定.由图 10(c)和图 10(d)的微结构阴影的分布情况,我们已经能够较为明显地看到对象表面微结构区域凹凸起伏的效果.

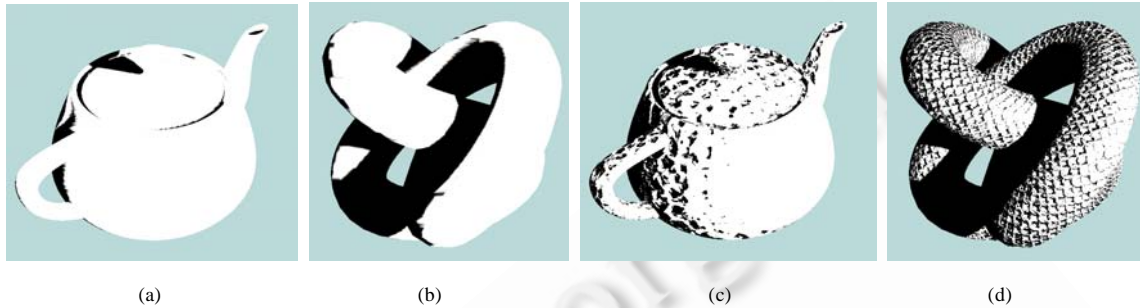
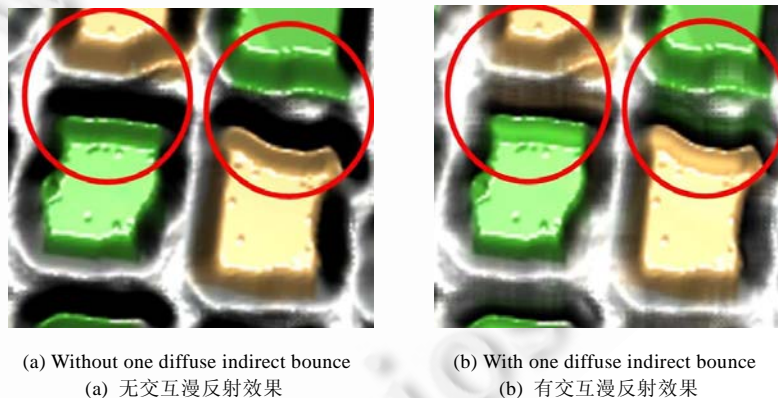


Fig.10 Comparison for rendering effects of shadow on mesostructure surface under point light source

图 10 微结构表面点光源阴影绘制效果及对比

4.3 一次交互漫反射效果

图 11 给出了本文一次交互漫反射的效果图.为了使一次渗色效果更为明显,两幅图在绘制时只计算了点光源阴影,忽略了环境光遮挡的影响.当物体受到高频光源直接照射时,会发生一次反射现象,将其自身的颜色“渗透”到周围物体中.尤其是处于阴影中未被高频光源直接照射的物体,渗透效果最为明显.从图 11 可以看出,增加一次渗色后,可以很清楚地看到,凸起部分受到高频光源直接照射后,将其颜色渗透到其下阴影处(圆圈标注处).



(a) Without one diffuse indirect bounce
(a) 无交互漫反射效果

(b) With one diffuse indirect bounce
(b) 有交互漫反射效果

Fig.11 Comparison for rendering effects of one diffuse indirect bounce

图 11 一次交互漫反射绘制效果及对比

4.4 全局光照效果

图 12 给出实验模型使用本文方法绘制出全局光照的效果,每个图的右侧给出的是与该实验模型相绑定的颜色纹理和微结构高度图.可以看出,本文方法由于考虑了微结构表面的几何细节的环境光遮挡、自阴影和交互漫反射等光照影响,可以较好地表现模型表面微结构的凹凸感.即使在使用低精度几何模型条件下,也能表现高精度带有小尺度几何细节模型的逼真光照效果.

图 13 给出了本文算法对可变形的微结构表面对象的全局光照绘制效果图.图 13(a)~图 13(d)所示为球变化为立方体过程中的 4 帧图像.由于本文算法所有的计算都是实时完成的,且各帧之间相互独立,所以算法可以直接应用于运动对象和变形对象.由图 13 可以看出,在对象变形过程中,高光点和阴影也都会随着模型的变形而发生改变,展现了不同的全局光照效果.

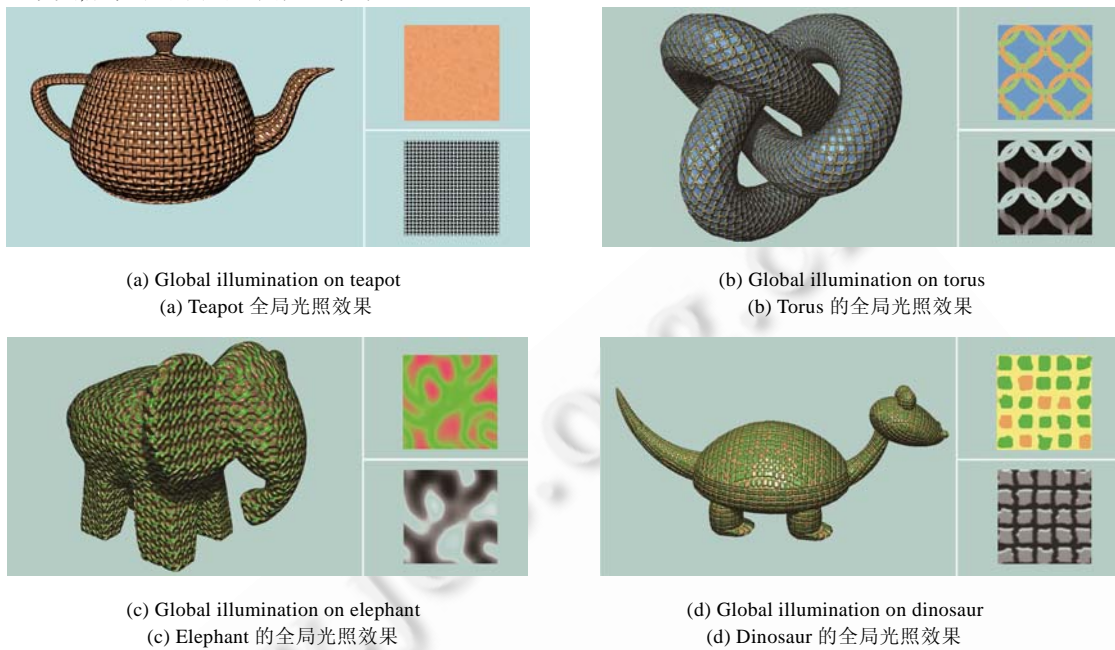


Fig.12 Rendering effects on static models using our algorithm

图 12 使用本文算法的静态模型绘制效果

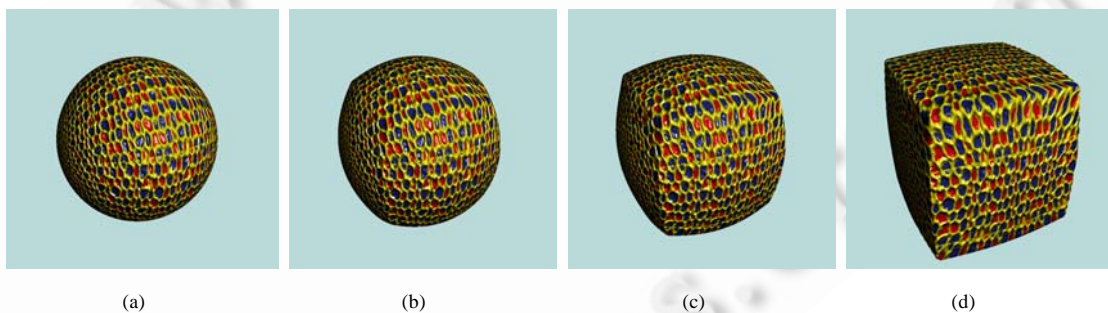


Fig.13 Rendering effects on dynamic models using our algorithm

图 13 使用本文算法的动态模型绘制效果

4.5 性能测试

本文算法属于图像空间算法,在进行直接光照分量的计算中,由于采用了传统的 Shadow Mapping,对整个场景绘制两遍,其余计算与绘制只是针对满屏矩形的填充,因此,几何模型的复杂度和计算中间过程所选用的纹理缓存的分辨率都对整个算法的效率有所影响.我们对更多的模型进行了测试,表 1 给出了对于不同复杂度的实验模型在 256×256 , 512×512 , 1024×1024 这 3 个不同分辨率纹理缓存下的计算速度,窗口大小设为 1024×1024 .从该图可以看出,对于 100 万面片数的复杂模型,在 256×256 和 512×512 分辨率下,绘制帧率可以达到 60 帧/秒以上.即使是在 1024×1024 分辨率下,其绘制帧率仍能达到 50 帧/秒,可以保证实绘制的需要.根据表 1 得到图 14,

对比图中 3 条折线可以发现,渲染纹理分辨率对本文算法影响较大.尤其是在模型面片数较少时,绘制帧率随着纹理分辨率的不同成倍地下降.随着模型面片数的增多,下降幅度逐渐减小.此外,从折线变换率可以看出,随着纹理分辨率的增大,算法受模型复杂度的影响越来越小.纹理分辨率对最终的图像绘制质量有较大的影响.图 15 给出了在不同纹理分辨率下同一模型的绘制效果.因此,我们可以根据实际需要,通过选择渲染纹理的分辨率来实现绘制效果与绘制质量的平衡.

Table 1 Date table for rendering speed test

表 1 绘制速度测试数据表

| Model | Triangles | Vertices | Resolution | Fps |
|--------------|-----------|----------|------------|-------|
| Torus | 2 880 | 2 922 | 256×256 | 1 018 |
| | | | 512×512 | 425 |
| | | | 1024×1024 | 125 |
| Dinosaur | 5 668 | 3 785 | 256×256 | 955 |
| | | | 512×512 | 379 |
| | | | 1024×1024 | 115 |
| Elephant | 13 714 | 11 156 | 256×256 | 837 |
| | | | 512×512 | 345 |
| | | | 1024×1024 | 102 |
| Teapot | 40 000 | 25 760 | 256×256 | 690 |
| | | | 512×512 | 294 |
| | | | 1024×1024 | 90 |
| Bunny | 69 451 | 36 743 | 256×256 | 484 |
| | | | 512×512 | 248 |
| | | | 1024×1024 | 82 |
| Kitten | 274 196 | 140 450 | 256×256 | 310 |
| | | | 512×512 | 175 |
| | | | 1024×1024 | 70 |
| Dragon | 871 414 | 476 462 | 256×256 | 160 |
| | | | 512×512 | 101 |
| | | | 1024×1024 | 59 |
| Happy buddha | 1 087 716 | 597 527 | 256×256 | 121 |
| | | | 512×512 | 80 |
| | | | 1024×1024 | 50 |

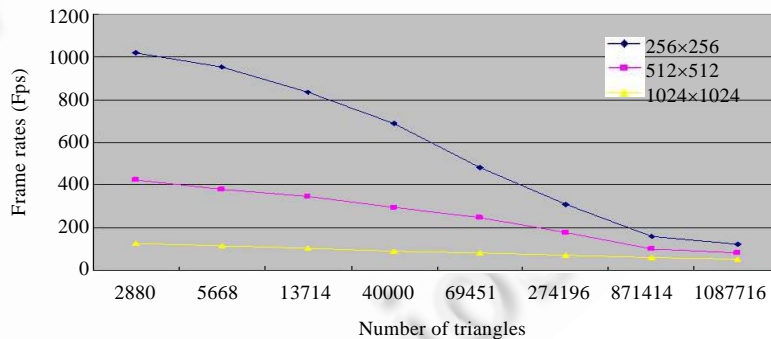


Fig.14 Plot of frame rate against triangle count for models in different resolutions of texture cache

图 14 不同面片数模型在不同纹理分辨率下的绘制帧率折线图

模型表面微结构的细微程度是影响计算速度的重要因素.通常,微结构越细密、顶点越多,算法处理的时间就越长.我们用 $scale$ 表示模型表面微结构的放大倍数, $scale$ 越小,微结构越细密.表 2 给出了 4 组模型在纹理分辨率为 1024×1024 时不同 $scale$ 下的绘制帧率.为了使绘制帧率更具可比性,我们修改了模型表面的纹理坐标.将模型投影到一个满屏的四边形上,取其在四边形上投影的二维坐标作为其纹理坐标.通过放缩这个四边形,即可达到改变 $scale$ 的效果.这样做的目的是可以保证所有模型在图像空间的微结构细微程度是一样的.从表 2 可以看出,本文算法处理的微结构越细密,绘制速度就越快.这是因为我们采用了基于微结构高度梯度图来搜索局

部最高点,几何细节越小,需要搜索的范围越小,搜索速度越快,而后期各个分量计算时采样范围就越小。 $scale$ 在 0.05 和 1 时帧率差了 20 帧。但当 $scale$ 小于 0.05 或大于 0.8 时,模型表面微结构已小于一个像素或大于整个对象,因此不在本文算法的处理范围之内。图 1 给出了不同 $scale$ 下同一模型的绘制效果图,可以看出,对于带有不同尺度微结构的对象表面,本文算法都可以绘制出较为明显的凹凸感和全局光照效果。

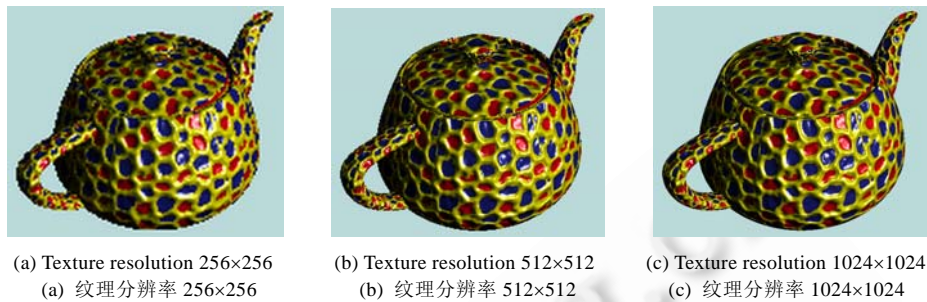


Fig.15 Compare for rendering effects of the same model in different texture resolutions

图 15 同一模型不同纹理分辨率下的绘制效果对比

Table 2 Frame rates (Fps) for different models in different scales

表 2 不同模型不同 $scale$ 下的绘制帧率

| Model | Triangles | Vertices | Fps | | | | | |
|----------|-----------|----------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| | | | $scale=0.05$ | $scale=0.1$ | $scale=0.2$ | $scale=0.4$ | $scale=0.8$ | $scale=1$ |
| Torus | 2 880 | 2 922 | 125 | 123 | 119 | 115 | 110 | 104 |
| Dinosaur | 5 668 | 3 785 | 112 | 110 | 107 | 103 | 97 | 91 |
| Elephant | 13 714 | 11 156 | 99 | 97 | 94 | 90 | 84 | 77 |
| Teapot | 40 000 | 25 760 | 91 | 89 | 86 | 81 | 76 | 69 |

5 结 论

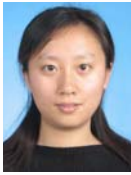
本文主要研究微结构表面对象的全局光照计算方法,给出微结构表面全局光照分解方法,在对微结构表面高度梯度场分析的基础上提出一种微结构高度梯度图,构建绘制点的局部最高点集合,自适应地计算环境光遮挡、微结构阴影和一次交互漫反射等入射分量,使得微结构表面对象的全局光照计算达到实时。本文方法的优点在于,可以在使用低精度模型时,表现出带有微结构表面的高精度模型的全局光照效果,且适用于动态场景和可变形对象模型全局光照的计算。方法在一定程度上克服了现有图像空间光照计算方法中需要手工设定采样范围的限制,根据微结构高度起伏自动搜索采样范围,消除对无效点的计算,进一步提高绘制效率。本文算法的局限性在于,算法属于图像空间算法,在建立局部最高点集合时,如果当前点在边界附近,则有可能在某些方向上取不到真正意义的局部最高点,而是取了边界点作为替代,这样会造成计算的不准确;其次,在几何计算时,假定局部微结构位于同一平面,因此不适合内核模型高频细节过多的情况。

本文虽然能够在使用低精度模型的情况下表现出带有表面微结构几何细节的全局光照效果,但是由于没有实际的顶点位移,在轮廓处与 Bump Mapping 的效果类似,没有微结构引起的几何形变。未来工作主要包括:解决本文算法的对象边界光照计算不准确的问题;以微结构表面高度梯度图为基础,将图像空间和几何空间相结合,提高遮挡等几何关系计算的精确性;采用更加复杂的 BRDF 计算,增强绘制的真实感;将本文方法扩展到存在多个微结构表面对象的场景中,实现全局光照效果。

References:

- [1] Tong X, Zhang JD, Liu LG, Wang X, Guo BN, Shum HY. Synthesis of bi-directional texture functions on arbitrary surfaces. ACM Trans. on Graphics, 2002,21(3):665-672. [doi: 10.1145/566570.566634]
- [2] Sloan PP, Liu XG, Shum HY, Snyder J. Bi-Scale radiance transfer. ACM Trans. on Graphics, 2003,22(3):370-375. [doi: 10.1145/1201775.882279]

- [3] Chen YY, Tong X, Wang JP, Lin S, Guo BN, Shum HY. Shell texture functions. *ACM Trans. on Graphics*, 2004,23(3):343–353. [doi: 10.1145/1186562.1015726]
- [4] Song Y, Chen YY, Tong X, Lin S, Shi JY, Guo BN, Shum HY. Shell radiance texture functions. *The Visual Computer*, 2005,21(10): 774–782. [doi: 10.1007/s00371-005-0320-4]
- [5] Zhukov S, Iones A, Kronin G. An ambient light illumination model. In: Drettakis G, Max NL, eds. *Proc. of the Eurographics Workshop on Rendering*. Lisbon: Springer-Verlag, 1998. 45–55.
- [6] Kontkanen J, Laine, S. Ambient occlusion fields. In: Lastra A, Olano M, Luebke DP, Pfister H, eds. *Proc. of the 2005 Symp. on Interactive 3D Graphics and Games*. New York: ACM Press, 2005. 41–48. [doi: 10.1145/1053427.1053434]
- [7] Hegeman K, Premoze S, Ashikhmin M, Drettakis G. Approximate ambient occlusion for trees. In: Olano M, Sequin CH, eds. *Proc. of the 2006 Symp. on Interactive 3D Graphics and Games*. New York: ACM Press, 2006. 87–92. [doi: 10.1145/1111411.1111427]
- [8] Shanmugam P, Arikan O. Hardware accelerated ambient occlusion techniques on GPUs. In: Gooch B, Sloan PPJ, eds. *Proc. of the 2007 Symp. on Interactive 3D Graphics and Games*. New York: ACM Press, 2007. 73–80. [doi: 10.1145/1230100.1230113]
- [9] Bavoil L, Sainz M. Screen space ambient occlusion. In: Engel W, ed. *ShaderX 7-Advanced Rendering Techniques*. NVIDIA Corporation, 2008.
- [10] Bavoil L, Sainz M, Dimitrov R. Image-Space horizon-based ambient occlusion. In: Moltenbrey K, ed. *Proc. of the Int'l Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York: ACM Press, 2008. 1. [doi: 10.1145/1401032.1401061]
- [11] Dimitrov R, Bavoil L, Sainz M. Horizon-Split ambient occlusion. In: Haines E, McGuire M, eds. *Proc. of the 2008 Symp. on Interactive 3D Graphics and Games*. New York: ACM Press, 2008. 1. [doi: 10.1145/1342250.1357017]
- [12] Ritschel T, Grosch T, Seidel HP. Approximating dynamic global illumination in image space. In: Haines E, McGuire M, Aliaga DG, Oliveira MM, Spencer SN, eds. *Proc. of the 2009 Symp. on Interactive 3D Graphics and Games*. Boston: ACM Press, 2009. 75–82. [doi: 10.1145/1507149.1507161]
- [13] Kajiya J. The rendering equation. *Computer Graphics*, 1986,20(4):143–149. [doi: 10.1145/15886.15902]
- [14] 3D model library of Stanford University. <http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>



王莉莉(1977—),女,陕西西安人,博士,副教授,CCF 高级会员,主要研究领域为计算机图形学,虚拟现实.



马志强(1982—),男,博士,CCF 学生会会员,主要研究领域为全局光照,实时真实感绘制.



杨峥(1987—),男,硕士,主要研究领域为全局光照,实时真实感绘制.



赵沁平(1948—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为计算机软件,虚拟环境.