

## 一种动态物体次表面散射实时绘制方法\*

赵沁平, 李帅<sup>+</sup>, 郝爱民, 高玉建

(北京航空航天大学 虚拟现实技术与系统国家重点实验室,北京 100191)

### Real-Time Subsurface Scattering Rendering Method for Dynamic Objects

ZHAO Qin-Ping, LI Shuai<sup>+</sup>, HAO Ai-Min, GAO Yu-Jian

(State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, BeiHang University, Beijing 100191, China)

+ Corresponding author: E-mail: lishuaiouc@126.com, http://vrlab.buaa.edu.cn

Zhao QP, Li S, Hao AM, Gao YJ. Real-Time subsurface scattering rendering method for dynamic objects. *Journal of Software*, 2010,21(11):2959-2970. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3697.htm>

**Abstract:** A method is set forth to model the heterogeneous translucent material. Image-space single scatter and multiple scatter methods are respectively proposed by decomposing the light propagation paths. It is also easy to deal with dynamic objects by applying deferred shading to the methods. Also, real-time subsurface scattering effects for layered heterogeneous translucent materials can also be obtained rather easily.

**Key words:** subsurface scattering; heterogeneous translucent material; dynamic objects; real-time rendering; image space

**摘要:** 在给出非均匀材质建模描述方法的基础上,通过对光线类型和光的次表面散射物理过程进行分解,分别给出了图像空间非均匀材质单次散射和多次散射的近似计算方法,延迟着色思想的融入,满足了动态物体实时绘制的需要,并可较好地适用于分层非均匀半透明材质。

**关键词:** 次表面散射;非均匀半透明材质;动态物体;实时绘制;图像空间

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

次表面散射(subsurface scattering)是指光从物体表面某点进入物体,经内部散射,最终从物体表面其他顶点出射的光线传递过程.具有次表面散射性质的物体一般具有较为圆润的外观色泽.这种现象在半透明材质上表现得更为明显,现实世界中的牛奶、玉石、大理石以及生物表皮等都具有这种性质。

半透明材质具有复杂的光学特性,基于双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function,简称 BRDF)的传统光照算法很难对该类材质进行逼真绘制.次表面散射一般需要采用双向表面散射反射分布函数(bidirectional surface scattering reflectance distribution function,简称 BSSRDF)来进行描述,并采用全局光照算法进行绘制.但是,现有的全局光照算法在处理动态物体时一般很难同时保证绘制的实时性和逼真性.此外,由于非均匀材质一般具有空间或时间上的可变性,其属性的建模描述更为复杂,因而这类材质的实时绘制也就更

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60533070, 60873159, 60842001 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant Nos.2009AA012103, 2007AA01Z337 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2009-01-05; Revised 2009-06-01; Accepted 2009-07-09

具挑战性.

针对半透明动态物体次表面散射实时绘制的难题,本文给出了具有分层结构的非均匀材质的描述和存储映射模型:(1) 给出了一种适用于非均匀材质的分层建模描述和存储映射方法;(2) 通过对光照物理传递过程的分解,给出了一种适用于半透明材质的光照计算模型及其基于图像空间的近似计算方法;(3) 在前两者的基础上,通过引入延迟着色的思想,给出了非均匀动态物体次表面散射的实时绘制方法.因此,本文的方法对提升虚拟现实实时应用系统的沉浸感具有重要意义.

## 1 相关工作

### 1.1 基于物理的次表面散射离线绘制方法

基于物理的次表面散射的研究历史并不长.Ishmaru 在文献[1]中详细给出了半透明材质的光学分析.后来,一些学者分别提出了有限元<sup>[2-4]</sup>、路径跟踪<sup>[5,6]</sup>、光子映射<sup>[7]</sup>等方法来进行光照积分计算和光路采样.Jensen 在 BSSRDF 模型的基础上,将光在半透明物体中的传递分解为多次散射和单次散射,并使用偶极子光源模型进行多次散射的近似计算,取得了较好的绘制效果<sup>[8]</sup>.之后,他又使用优化策略对文献[8]进行了改进,取得了显著的性能提升<sup>[9]</sup>.虽然文献[9]的算法性能有了大幅度提高,但绘制一个简单场景仍然需要数秒时间.在 Jensen 方法的基础上,Pellacini 给出了一种与蒙特卡路径跟踪混合的绘制方法,该方法的绘制效率提高了 4 倍,但绘制一个几十万面片的场景仍然需要 40 多分钟的时间.因此,这些方法虽然可以取得高逼真度的绘制质量,但都不能直接在实时绘制环境中应用.

### 1.2 基于预计算的次表面散射实时绘制方法

一些基于物理的算法也可实现高质量的次表面散射实时绘制,但一般都限定场景为静态的或局部可变的,如基于预计算辐射度传递的实时绘制方法<sup>[10-13]</sup>.这些方法一般都需要几小时甚至十几个小时的预处理,并且预处理结果对内存和显存的消耗较大,因此很难在动态场景或大规模场景中实际应用.

### 1.3 次表面散射近似模拟方法

在将主要目标定位于实时绘制的算法中,Green 的方法比较有代表性<sup>[14]</sup>.该算法首先修正了实时绘制时使用的漫反射函数,使其在光照方向与法线方向点积小于 0 的情况下,仍然能够得到大于 0 的结果.这样,背着光源的表面也能够得到一定的光照值,并以此表示从半透明物体内部透过的光照量.Bastioni 的方法与此类似,其使用了稍微复杂一些的非线性修正函数,也得到了不错的效果<sup>[15]</sup>.Borshukov 则在绘制时通过微小的颜色漂移来表现动物或人类的皮肤散射效果<sup>[16]</sup>.文献[14-16]的方法虽然完全没有物理真实性可言,但其廉价的计算以及在特定环境下相对较好的视觉效果为其赢得了一定的生存空间.此外,基于图像空间的方法<sup>[17]</sup>通过多遍绘制将光照度和物体的几何信息存储到纹理,并最终在 GPU(graphics processing units)上使用 Jensen 模型进行多次散射的近似计算.相对于文献[14-16],该方法虽然在物理真实性上能够更进一步,但也只能模拟低频散射的效果,并且一般只能处理均匀介质.

### 1.4 非均匀材质次表面散射的建模与绘制方法

在非均匀介质次表面散射绘制方面,现有的大部分工作都是围绕皮肤的模拟展开的.Weyrich 等人<sup>[18]</sup>通过对采集到的 149 个不同年龄、性别和种族的人的脸部数据进行分析,给出了一个统计分析模型.该模型使用一系列与人脸位置相关的 BRDF 模型,以及反射、散射率映射表来描述人脸的光照反射和散射特性.该模型更适合于离线的真实感图像合成和图像分析,而很难用于三维实时绘制系统.此外,Eugene d'Eon<sup>[19]</sup>通过对皮肤分层模型的分析,将皮肤光照分解为镜面反射和次表面反射两部分,通过使用高斯函数逼近的方法来近似 Jensen 的次表面散射模型,可较为精确地模拟 3 层皮肤模型的次表面散射效果,实现了皮肤的真实感实时绘制.但是,该方法对高斯函数参数以及个数的选择不具有普适性,一般需要预先确定.因此,该方法很难用于其他非均匀材质的次表面散射绘制.此外,Xin<sup>[20]</sup>提出的使用特制采样设备进行非均匀材质的建模、绘制方法以及孙鑫等人<sup>[21]</sup>提出

的动态可变材质交互式全局光照绘制方法也都具有一定的借鉴意义.

## 2 材质描述模型与光照分解模型

### 2.1 非均匀材质属性建模描述模型

光在非均匀材质内部传播时,随着进入物体内部深度的不同,其散射特性一般也不相同.非均匀材质散射属性的这种空间可变性一般与材质本身的物理结构有关,如皮肤从外往里一般由油脂层、表皮层、真皮层和组织层等构成.利用部分非均匀材质所具有的这种分层物理结构,可极大简化对其光照散射属性的建模描述.

如图 1 所示,通过借鉴材质分层模型<sup>[22]</sup>,我们给出了一个非均匀材质属性的分层描述模型,这个模型主要描述了每个分层的厚度、光照吸收系数和光照散射系数等属性信息.对三维几何模型表面上的任意一点  $v_i$ ,其所对应的表面法线方向为  $\bar{N}_i$ .该点所对应的物体内部各个分层的厚度,可用沿法线反方向的射线在每层内所经过的距离来表示.对于光照吸收系数和光照散射系数,一般可假设同一分层内这些系数都取相同的值,可用  $n \times 3$  个浮点数来进行描述,其中,  $n$  为层数,3 代表对 RGB 的 3 种光分量分别进行描述.对于空间高度可变的非均匀材质,则需要对模型表面每一点所对应的各个分层的吸收、散射系数进行分别描述.此时,一般需用  $N \times n \times 3$  个浮点数来描述,  $N$  代表模型表面的顶点数.

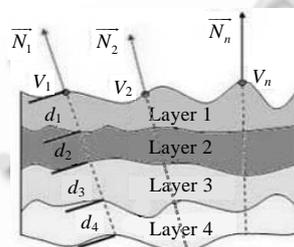


Fig.1 Multi-Layer description model of heterogeneous material property

图 1 非均匀材质属性的分层描述模型

为了便于在上述材质描述模型与三维几何模型间进行存储映射,我们通过扩展普通颜色纹理的含义给出材质浮点纹理的定义为:材质浮点纹理每个纹元用 4 个 32 位的浮点数表示,RGBA 通道的值分别代表模型内部 4 个不同分层的厚度,可直接使用三维模型的颜色纹理坐标来访问材质属性浮点纹理,一般需用  $n \times 4$  张浮点纹理来存储  $n$  层分层模型的各层厚度;对于空间高度可变的非均匀材质,材质的光照吸收系数和光照散射系数可用多张浮点纹理来进行存储映射,一张纹理只能存储一个分层的某一类系数,纹元的每个通道分别代表 RGB 的 3 个光照分量所对应的某类系数.此时,  $n$  层分层模型共需  $(n \times 4) \times 2$  张浮点纹理来存储光照吸收系数和光照散射系数.

### 2.2 光照分解计算模型

由半透明物体的任何位置入射的光线都可能对出射光产生影响.因此,对半透明材质的完整描述必须使用 BSSRDF. BSSRDF 与  $x_o$  位置、 $w_o$  方向的出射辐射亮度  $L_o(x_o, w_o)$  以及  $x_i$  位置、 $w_i$  方向的入射光通量  $\Phi_i(x_i, w_i)$  有关.给定一个 BSSRDF,出射的辐射亮度可根据下列公式<sup>[8]</sup>进行计算:

$$L_o(x_o, w_o) = \int_A \int_{2\pi} S(x_i, w_i, x_o, w_o) L_i(x_i, w_i) (n, w_i) d\omega_i dA(x_i) \quad (1)$$

公式(1)给出了物体表面入射、出射辐射亮度之间的关系,但在实际应用环境中,很难给出 BSSRDF 函数的解析表示.即使以近似公式的形式给出,并使用 Monte Carlo 方法进行积分计算,也需要消耗大量的计算时间.综合考虑光线与半透明物体的相互作用,并参考局部光照模型光照成分分解方法,本文给出一种适用于半透明材质的光照计算模型.如图 2 所示,该模型将光照分为 5 种分量,包括物体表面交互漫反射入射光( $L_{id}$ )、镜面反射入射光( $L_{is}$ )、折射入射光( $L_{it}$ )、局部高频光源在物体内部的单次散射入射光( $L_{iss}$ )以及低频环境光源在物体内部

的多次散射入射光( $L_{ims}$ ).

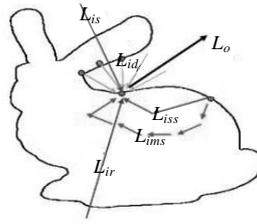


Fig.2 Decomposition of irradiance

图 2 入射光分解

对于在半透明物体表面被反射,从未进入半透明物体内部的光线,本文将其表示为漫反射入射光与镜面反射入射光两个部分.其中,表面漫反射入射光在各个方向均匀分布,而镜面反射入射光集中在出射光关于表面法线的对称区域.

对于半透明物体表面内侧的入射光,本文将其类似地分为 3 个类型:折射入射光、单次散射入射光以及多次散射入射光.与镜面反射入射光类似,折射入射光集中在出射光的折射方向所在的区域. $L_{iss}$  和  $L_{ims}$  与物体的材质属性密切相关,其计算过程将在后面详细介绍.

将以上 5 种辐射亮度分量叠加,即可近似表现原有入射光的效果,即

$$L_i(x_i, w_i) \approx \lambda_1 L_{id}(x_i, w_i) + \lambda_2 L_{is}(x_i, w_i) + \lambda_3 L_{ir}(x_i, w_i) + \lambda_4 L_{iss}(x_i, w_i) + \lambda_5 L_{ims}(x_i, w_i) \quad (2)$$

在对入射光进行分解之后,本文使用不同的方法处理不同类型的入射光分量.对于反射光与折射光,使用基于图像光照(image based lighting,简称 IBL)方法进行实时绘制;对于交互漫反射光,则采用基于屏幕空间(screen space ambient occlusion,简称 SSAO)的泛光遮挡近似计算方法来进行实时计算;对单多次表面散射光,采用延迟着色方法(deferred shading,简称 DS)在图像空间(image space)进行实时计算与绘制;而对于多次表面散射光,则通过引入像素光源(pixel light)在图像空间进行近似计算.上述光照计算模型可以充分利用 GPU 的并行计算能力,可以较好地满足实时绘制的需要.

### 3 算法概述

算法的整体处理流程如下:

- (1) 如图 3 所示,以立方图作为环境光源,从视点位置开始绘制,将三维模型在世界坐标下的顶点位置(EPosTex)、法向量(ENormTex)、纹理坐标(ETexcoordTex)、深度(EDepthTex)以及漫反射光照值(EDiffuseTex)分别绘制到 5 张浮点纹理.其中,漫反射光照值是以滤波处理后的立方图作为环境光源计算得到的,并且可采用多渲染对象(multi rendering target,简称 MRT)技术用一遍绘制来完成这些浮点纹理的生成.
- (2) 与第 1 步方法类似,从点光源位置开始绘制,将三维模型在世界坐标下顶点位置(LPosTex)、法向量(LNormTex)、纹理坐标(LTexcoordTex)、镜面反射光照度(LSpecTex)分别绘制到 4 张浮点纹理,也采用 MRT 方式用一遍绘制完成.
- (3) 基于延迟着色的思想,只绘制一个满屏的四边形,以 EposTex,EnormTex,EtexcoordTex 这 3 张浮点纹理以及第 2 步得到的 4 张浮点纹理作为输入,并使用材质浮点纹理,在图像空间进行单次散射的近似计算,将结果绘制到一张颜色纹理中,得到  $L_{iss}$ ;同时,采用 MRT 的方法,将镜面反射光照值和折射光照值分别绘制到另外 2 张颜色纹理,得到  $L_{is}$  和  $L_{ir}$ .
- (4) 绘制一个满屏的四边形,以 EDiffuseTex 浮点纹理作为像素光源,在对其进行重要性采样的基础上,使用 EPosTex 浮点纹理,在图像空间进行多次散射的近似计算,并将结果绘制到一张颜色纹理中,得到  $L_{ims}$ ;
- (5) 绘制一个满屏的四边形,使用 EDiffuseTex 和 EdepthTex 两张浮点纹理,采用 SSAO 方法进行交互漫反

射的近似计算,并将结果绘制到一张颜色纹理,得到  $L_{id}$ .

- (6) 绘制一个满屏的四边形,以算法第 3 步~第 5 步所得到的颜色纹理作为输入,并使用公式(2)将各类光照分量进行叠加,得到最终的绘制效果.

以上算法步骤一般在绘制循环的每一帧都要执行,因此可以满足动态物体的实时处理需要.虽然每帧需要执行 6 遍绘制,但其中的第 3 步~第 6 步充分融入了延迟着色的思想,每遍只需绘制一个四边形而无须重绘三维模型,并且每像素处理可通过 GPU 的并行计算来完成,因而算法可以较好地保证绘制的实时性.

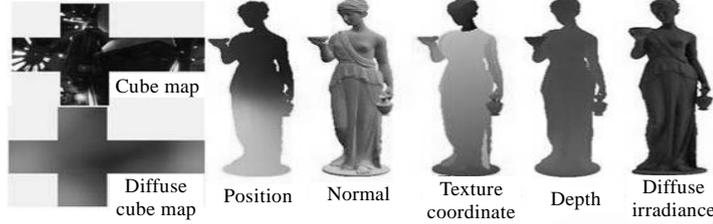


Fig.3 Illustration of float textures rendered from eye point

图 3 从视点绘制生成的浮点纹理

#### 4 单次散射计算

我们对文献[22]的均匀介质单次散射计算方法进行了改进,使其能够适用于具有分层结构的非均匀材质.如图 4 所示,对于模型表面的任意一点  $S$ ,设  $\vec{N}_S$  为其法向量,  $\vec{SE}$  为视线方向,则经物体内部  $M$  点发生单次散射的光线对  $S$  点的单次散射光照度均有贡献,并且  $M$  点的位置可用公式(3)计算得出.

$$M_i = S + d_{si} \times \vec{T}_S, \vec{T}_S = \text{Refract}(\vec{N}_S, \vec{SE}) \quad (3)$$

其中,  $\vec{T}_S$  为折射方向,  $d_{si}$  为物体内部第  $i$  个点的步长.对于特定的材质,我们设定一个发生单次的最大深度  $D_{\max}$ ,其表示在进行单次散射计算时,所需考虑的沿物体表面法线反方向进入物体内部的深度.所以,公式(3)中的步长  $d_{si}$  可由下面的公式(4)近似确定:

$$d_{si} = D_{\max} / \cos \beta = D_{\max} / (\vec{N}_S \cdot \vec{T}_S) \quad (4)$$

在计算得到采样点  $M_i$  后,通过累积所有  $M_i$  点的单次散射贡献,可得到  $S$  点的单次散射出射光照度,计算公式如下:

$$L(S, \omega_{out}) = \int_S^{M_{\max}} L_{ss}(M, \omega_{out}^{\vec{T}_S}) dM \approx \sum_S^{M_{\max}} L_{ss}(M, \omega_{out}^{\vec{T}_S}) \quad (5)$$

其中,  $\omega_{out} = \vec{SE}$ ;  $\omega_{out}^{\vec{T}_S} = \vec{T}_S$ ;  $L_{ss}(M, \omega_{out}^{\vec{T}_S})$  为采样点  $M$  对  $S$  点的单次散射贡献,其计算公式如下:

$$L_{ss}(M, \omega_{out}^{\vec{T}_S}) = Q(M, \omega_{out}^{\vec{T}_S}) e^{\int_S^M -\sigma_t(s) ds} \quad (6)$$

其中,  $e^{\int_S^M -\sigma_t(s) ds}$  表示从  $M$  点到  $S$  点光照度衰减量;  $\sigma_t(s)$  表示材质的光照吸收系数;  $Q(M, \omega_{out}^{\vec{T}_S})$  为  $M$  点沿  $\vec{T}_S$  方向的光照出射度,其计算公式如下:

$$Q(M, \omega_{out}^{\vec{T}_S}) = \sigma_s(M) p(M, \omega_{out}^{\vec{T}_S}, \omega_{in}^{\vec{T}_P}) L_{ia}(M, \omega_{in}^{\vec{T}_P}) \quad (7)$$

其中,  $\sigma_s(M)$  为  $M$  点的材质散射系数,它描述了到达  $M$  点的光照度有多少被散射出去.  $p(M, \omega_{out}^{\vec{T}_S}, \omega_{in}^{\vec{T}_P})$  为相位函数<sup>[8,12]</sup>,如图 4 所示,它描述了光从  $\omega_{in}$  方向到达  $M$  点的后,沿  $\omega_{out}^{\vec{T}_S}$  方向的散射比例,其计算公式为

$$p(M, \omega_{out}^{\vec{T}_S}, \omega_{in}^{\vec{T}_P}) \approx \frac{1-g^2}{4\pi(1+g \cos \theta)^2} = \frac{1-g^2}{4\pi(1+g(\vec{PM} \cdot \vec{MS}))^2} \quad (8)$$

其中,  $g$  为一个与材质相关的常量,  $L_{ia}(M, \omega_{in}^{\vec{T}_P})$  为光进入物体内部后,沿  $\omega_{in}$  方向经衰减到达  $M$  点的入射光照量,

其计算公式如下:

$$L_u(M, \omega_m^{\overline{P}}) = L_{is}(P, \omega_m) \prod_{j=1}^{MaxLayer} e^{-\sigma_j^i d_j} \approx L_{is}(P', \overline{LP'}) \prod_{j=1}^{MaxLayer} e^{-\sigma_j^i d_j} \quad (9)$$

如图 4 所示,在公式(9)中,  $\omega_m^{\overline{P}} = \overline{PM}, \omega_m = \overline{LP}, \overline{PM}$  为入射光线  $\overline{LP}$  的折射方向,  $\prod_{j=1}^{MaxLayer} e^{-\sigma_j^i d_j}$  表示入射光进入物体内部经不同材质分层吸收后所剩下的比率,  $\sigma_j^i$  表示第  $j$  层的材质散射系数,  $d_j$  表示光线在第  $j$  层所经过的传播距离,  $MaxLayer$  表示光线从  $P$  点传播到  $M$  点所经历的层数,  $L_{is}(P, \omega_m)$  表示局部高频光源在  $P$  点入射光照度, 在实际计算过程中,我们可用  $P'$  点来代替  $P$  点进行近似计算。

根据公式(3)~公式(9),在  $M_{max}$  范围内对  $M$  点进行采样,并将所有  $M$  点的单次散射贡献进行累加,即可得到  $S$  点的单次散射的出射光照度.上述计算都是针对每像素展开的,可完全在 GPU 上基于图像空间进行.因此,最终输出像素所对应的模型表面顶点的单次散射光照值,可在算法的第 3 步中通过一遍绘制并行地完成。

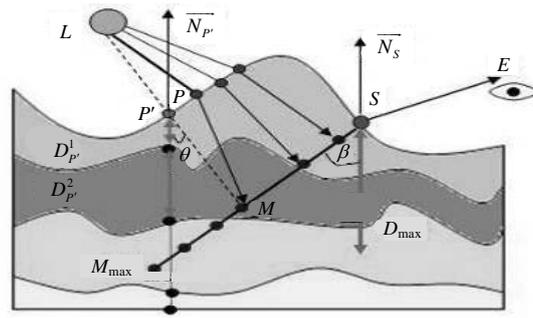


Fig.4 Illustration of approximate computing for single subsurface scattering  
图 4 单次散射近似计算示意图

### 5 多次散射近似计算

如图 5 所示, Jenson 等人在文献[8]中给出了一种偶极子光源模型来计算多次散射,物体表面任意位置的入射点光源被一对点光源所代替,物体表面之上的点光源称为虚光源,物体表面之下的光源称为实光源.在这种近似表示下,  $x_o$  位置的辐出度  $M_o(x_o)$  和  $x_i$  位置的入射光通量  $\Phi_i(x_i)$  之间可建立如下关系<sup>[8]</sup>:

$$dM_o(x_o) = d\Phi_i(x_i) \frac{\alpha'}{4\pi} \left( C_1 \frac{e^{-\sigma_r d_r}}{d_r^2} + C_2 \frac{e^{-\sigma_v d_v}}{d_v^2} \right), \quad C_1 = z_r \left( \sigma_{tr} + \frac{1}{d_r} \right), \quad C_2 = z_v \left( \sigma_{tr} + \frac{1}{d_v} \right) \quad (10)$$

其中,  $\alpha' = \sigma'_s / \sigma'_t$  为减弱的反射率,  $\sigma_{tr} = \sqrt{3\sigma_a \sigma'_t}$  为有效传输消失系数,  $d_r = \sqrt{r^2 + z_r^2}$  为出射点到实光源的距离,  $d_v = \sqrt{r^2 + z_v^2}$  为出射点到虚光源的距离,  $r = \|x_o - x_i\|$  为入射点到出射点之间的距离,  $z_r = l_u$  与  $z_v = l_u(1+4/3A)$  为两个光源分别到物体表面的距离.其中,  $\sigma'_s$  为减弱的散射系数,  $\sigma'_t$  为减弱的吸收系数,可在散射系数  $\sigma_s$  和吸收系数  $\sigma_a$  的基础上通过公式  $\sigma'_t = \sigma'_s + \sigma_a$ ,  $\sigma'_s = \sigma_s(1-g)$  计算得到.一般经过多次散射之后的光线将趋于各向同性( $g=0$ );  $l_u = 1/\sigma'_t$  称为平均自由行程(mean-free path),是光在减弱的吸收系数为  $\sigma'_t$  的媒介中的平均传播距离;  $A = (1+F_{dr}) / (1-F_{dr})$ , 它校正了介质边界处由于不同折射系数带来的误差,  $F_{dr}$  为漫反射 Fresnel 项,可以近似为折射系数  $\eta$  的函数  $F_{dr} = \frac{1.440}{\eta^2} + \frac{0.710}{\eta} + 0.668 + 0.0636\eta$ .

由于 Jenson 模型中的实光源到物体表面的距离等于平均自由程,因此对于非均匀材质的多次散射,我们只考虑材质属性的第 1 个分层,并采用基于图像空间的方法在 GPU 上进行近似计算.多次散射的计算需要以算法第 2 步得到的 EdiffuseTex 纹理作为处理对象,并绘制一个满屏的四边形来实现,具体步骤如下:

- (1) 将 EdiffuseTex 的每个像素都当作光源进行像素光源的重要性采样,如图 6 中方框中心点处的像素( $P$ ),

其周围的像素光源经多次散射后,都会对其的最终出射光照度有所贡献,但贡献量会随着距离的增大而迅速衰减,因此只对图 6 中用圆点标注的像素光源( $S_i$ )进行采样,得到采样像素光源的入射光照度为  $L(S_i)$ .

- (2) 通过访问 EPosTex 浮点纹理,得到  $P$  及每个  $S_i$  所对应的模型表面顶点的位置坐标,并计算采样顶点和当前顶点之间的距离  $r_i$ .
- (3) 基于  $r_i$  分别计算公式(10)中的相关参数,并累加所有采样像素的多次散射光照贡献,便得到像素  $P$  的多次散射出射光照值  $L(P)$ .

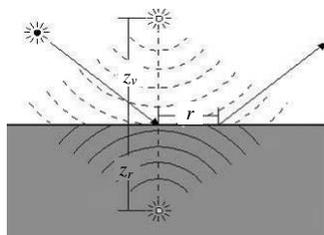


Fig.5 Jenson's dipole model for multiple scattering  
图 5 Jenson 的偶极子光源模型

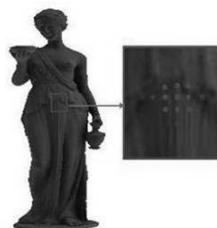


Fig.6 Sampling method of pixel lights for approximate multiple scattering  
图 6 多次散射近似计算中的像素光源采样

## 6 实验结果

本文使用一台具有 Pentium 4 3.0GHz CPU、1G 内存、NVIDIA GeForce 8800 GTS 512M 显示卡、运行 Windows XP 操作系统的 PC 机作为实验平台.实验程序基于 DirectX 9.0c API,Shader 程序使用 Shader Model 3.0 方式编译.实验中用到的三维模型主要来源于斯坦福大学图形学实验室网站和 Nvidia SDK.所有模型都考虑了材质的 3 层散射特性,其中,在绘制图 7、图 8 以及图 9(a)~图 9(i)时,第 1 层散射系数和吸收系数均来自文献[8](文献[8]只给出了均匀材质散射参数的物理测量结果);第 2 层和第 3 层的散射系数和吸收系数,是我们对第 1 层的系数进行人为微调得到的,目的是用来验证本文算法在处理分层非均匀半透明材质时的有效性.

图 7 给出了女神模型的实验效果图,图 7(a)、图 7(b)分别为单次射和多次散射的光照结果,图 7(c)为使用公式(2)合成各类光照成分后得到的效果图.其中,所使用的参数组合为  $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5) = (0.3, 0.3, 0.05, 0.05, 0.3)$ .绘制女神模型时使用的散射系数和吸收系数接近于苹果的材质参数.从图 7(c)可以看出,最终的绘制效果整体上较为圆润,并且雕像的碗、鼻子及耳朵等厚度较薄的区域具有明显的散射特性.

图 8 给出了本文实验中所使用的其他不可变形模型的最终绘制效果图,图 8(a)~图 8(f)的模型复杂程度依次递增,分别使用文献[8]中的 Skin 1,Chicken, Skin 2,Apple,Skimmilk, Skin 2 材质进行绘制.从绘制结果我们可以看出,图 8(a)~图 8(c)、图 8(f)中高频点光源的单次散射分量比重相对较大,都具有比较明显的玉质感,如茶壶的壶嘴和壶盖、兔子的耳朵和尾巴、弥勒佛的头部以及欢喜佛的裙摆等区域对玉材质的通透特性体现得较好,这种通透特性有着从模型边缘到模型中心递减的趋势,这也与半透明材质的视觉特性吻合得较好.而图 8(d)、图 8(f)则削弱了整体通透性,从材质视觉特性上看更接近于琉璃和瓷器,这主要是通过调整公式(2)中各种光照成分的权重值来实现的.经实验,可以通过简单地调整参数组合  $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5)$  的取值,模拟出多种具有不同次表面散射性质的半透明材质.一般认为,PRT 算法的绘制结果在物理意义上是正确的,因此我们也实现了 PRT 算法.图 10 给出了兔子和龙模型的 PRT 算法参考图像.通过与参考图像比较可以发现,本文方法可以实现近似于基于物理绘制的图像质量,具有较高的视觉逼真性.

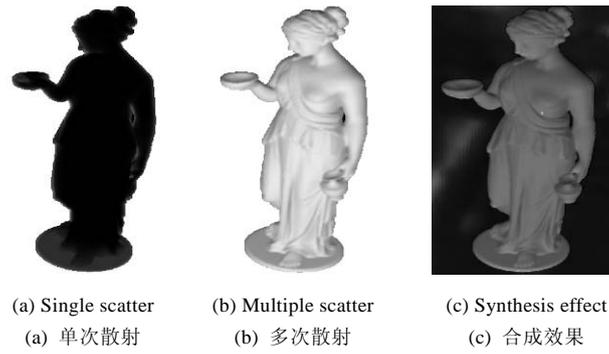


Fig.7 First experiment, using apple material

图7 实验结果 1,使用苹果材质

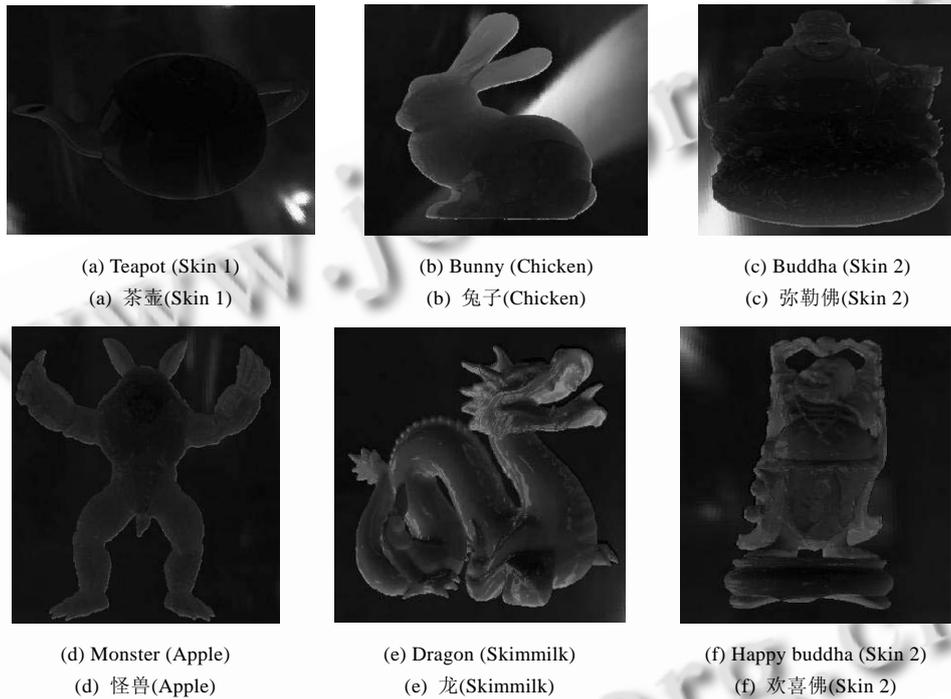


Fig.8 Rendering results for non-deformable objects

图8 不可变形模型实验效果图

图9给出了动态模型的实验效果图.其中,图9(a)、图9(b)是第1层使用Apple材质<sup>[8]</sup>散射参数,第2层、第3层是使用人为微调的Apple材质散射参数的青蛙模型绘制结果.图9(c)~图9(i)的对3层散射参数的处理方法与图9(a)、图9(b)类似,给出了Marble材质的机器人、Skimmilk材质的飞鸟以及分别使用Marble,Skimmilk和Potato材质绘制的怪物的效果图.

为了表现分层非均匀材质在绘制效果上的差异,图9(j)~图9(l)分别给出了怪物模型使用不同混合材质的绘制结果.其中,图9(j)为第1层使用Skimmilk材质、第2层、第3层使用Marble材质的绘制结果,图9(k)为第1层使用Skimmilk材质、第2层、第3层使用Potato材质的绘制结果,图9(l)为第1层使用Marble材质、第2层、第3层使用Potato材质的绘制结果.将图9(g)~图9(i)与图9(j)~图9(l)对比可以发现,图9(j)~图9(l)的混合材质绘制效果比较明显,较好地体现了各种材质的散射特性.



(a) Frog 1 (Apple)  
(a) 青蛙 1(Apple)

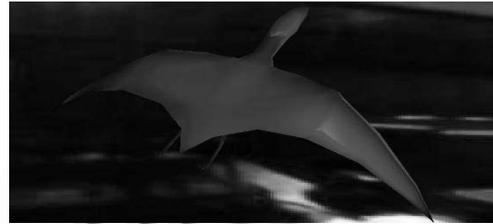
(b) Frog 2 (Apple)  
(b) 青蛙 2(Apple)

(c) Robot 1 (Marble)  
(c) 机器人 1(Marble)

(d) Robot 2 (Marble)  
(d) 机器人 2(Marble)



(e) Flying bird 1 (Skimilk)  
(e) 飞鸟 1(Skimilk)



(f) Flying bird 2 (Skimilk)  
(f) 飞鸟 2(Skimilk)



(g) Monster 1 (Marble)  
(g) 怪物 1(Marble)



(h) Monster 2 (Skimilk)  
(h) 怪物 2(Skimilk)



(i) Monster 3 (Potato)  
(i) 怪物 3(Potato)



(j) Monster 4 (Skimilk+Marble)  
(j) 怪物 4(Skimilk+Marble)



(k) Monster 5 (Skimilk+Potato)  
(k) 怪物 5(Skimilk+Potato)



(l) Monster 6 (Marble+Potato)  
(l) 怪物 6(Marble+Potato)

Fig.9 Rendering results for deformable objects

图9 动态模型实验效果图

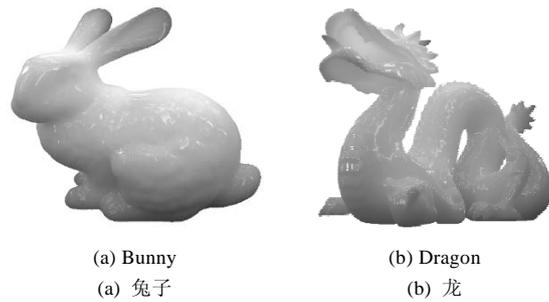


Fig.10 Reference results rendered using PRT method

图 10 采用预计算辐射度传递算法(PRT)绘制的参考图像

图 11(a)给出了本文算法在渲染对象分别采用  $512 \times 512$  和  $1024 \times 1024$  分辨率时的帧频折线图.从图 11(a)可以看出,在渲染对象为  $512 \times 512$  分辨率时,本文算法的绘制效率较高,对于 100 万面片的复杂模型,绘制帧频可达 60 帧/秒以上.而在渲染对象为  $1024 \times 1024$  分辨率时,本文算法效率下降较大,特别在模型面片数较少时,效率接近下降为原来的  $1/4$ ,这个比率基本上与渲染对象的尺寸比率( $512 \times 512 / 1024 \times 1024 = 1/4$ )相吻合;但是对于面片数达 108 万的欢喜佛模型,绘制帧频仍可达 40 帧左右,可以保证实时绘制的需要.此外,图 11(a)中处于下面的折线比较平稳,而处于上面的折线虽然平稳性要差一些,但绘制效率与模型面片数之间也远远构不成反比关系.这说明本文算法的效率受渲染对象分辨率的影响较大,而受模型的复杂程度的影响较小.当然,在渲染对象分辨率提高的情况下,最终的图像绘制质量也会相应有所提升.因此,可以根据具体应用的需要,通过选择渲染对象的分辨率来实现绘制效率与绘制质量的平衡.

图 11(b)给出了分别使用 CPU 和 GPU 进行 PRT 运行时计算的绘制帧频折线图.可以看出,无论使用 CPU 还是 GPU 进行 PRT 运行时计算,运行时的绘制帧频基本上都与 PRT 采样点的个数成反比.而 PRT 算法预计算阶段一般都将三维模型的顶点作为采样点.因此,PRT 算法的效率与模型的复杂程度关系较大,二者近似地成反比关系.从图 11(b)可以看出,在采样点个数达到 10 000 个时,使用 GPU 进行 PRT 运行时计算绘制帧率也只有 30 帧左右.因此,对于具有百万面片级的欢喜佛这类复杂模型,PRT 算法很难满足实时绘制的需要.此外,PRT 算法对于复杂模型的预处理时间往往长达几个小时,并且产生的预计算数据多达几百兆,对内存的消耗较大.此外,由于需要预计算,因此很难适用于动态物体.因此,从算法效率和算法适用范围上看,本文算法都具有明显的优势.

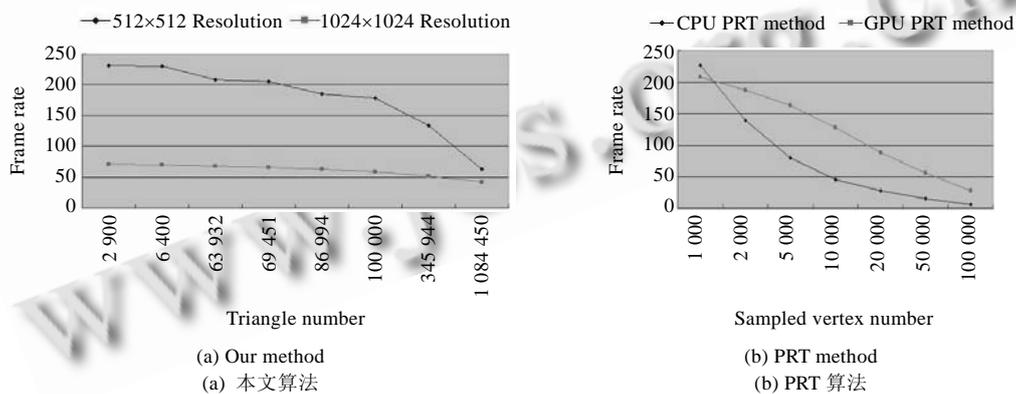


Fig.11 Illustration of the efficiency analysis for different methods

图 11 算法效率分析图

## 7 结束语

### 7.1 结论

针对现有的次表面散射实时绘制算法不能很好地处理动态物体和非均匀材质的问题,本文给出了具有分层结构的非均匀材质的描述和存储映射模型,并在将入射光传递分解为镜面反射、折射、交互漫反射、单次次表面散射和多次次表面散射 5 个主要过程的基础上,给出了可满足动态物体实时绘制要求的图像空间算法.实验表明,本文方法充分利用了 GPU 的并行计算能力,能够较好地平衡绘制的物理真实性与实时性之间的矛盾,在满足实时绘制要求的前提下,可取得近似于基于物理绘制的图像质量.

### 7.2 局限性讨论及后续工作

当纹理渲染对象的分辨率较低时,本文算法的绘制结果会出现走样现象.虽然提高纹理渲染对象的分辨率会极大地改善这种现象,但要付出相对较高的效率代价.因此在后续工作中,将首先考虑实现一种高效的反走样策略.

其次,经算法第 4 步、第 5 步处理得到单次散射和多次散射的颜色纹理后,若在算法第 6 步直接使用这些纹理进行最终效果合成,会出现光圈状瑕疵.目前,本文主要通过纹理的多采样滤波来抑制这种现象,但由于纹理访问操作较为耗时,纹理访问次数的增加会导致绘制效率的降低.所以,可通过进一步提高图像空间算法近似计算的精度来减少纹理访问次数.

最后,我们将考虑对公式(2)中的光照分量权重系数进行进一步的优化控制,拟通过真实材质或照片序列来获取所需的权重系数,使本文算法对某一特定材质的模拟更加真实可信.

### References:

- [1] Ishimaru A. Wave Propagation and Scattering in Random Media. New York: IEEE Press, 1978.
- [2] Blasi P, Le Saëc B, Schlick C. A rendering algorithm for discrete volume density objects. *Computer Graphics Forum*, 1993,12(3): 201–210. [doi: 10.1111/1467-8659.1230201]
- [3] Rushmeier HE, Torrance KE. Extending the radiosity method to include specularly reflecting and translucent materials. *ACM Trans. on Graphics*, 1990,9(1):1–27. [doi: 10.1145/77635.77636]
- [4] Sillion FX. A unified hierarchical algorithm for global illumination with scattering volumes and object clusters. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 1995,1(3):240–254. [doi: 10.1109/2945.466719]
- [5] Hanrahan P, Krueger W. Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering. In: Kajiya JT, ed. *Proc. of the ACM SIGGRAPH'93*. New York: ACM Press, 1993. 165–174.
- [6] Lafortune EP, Willems YD. Rendering participating media with bidirectional path tracing. In: Pueyo X, Schr P, eds. *Proc. of the Eurographics Rendering Workshop'96*. New York: Springer-Verlag, 1996. 91–100.
- [7] Jensen HW, Christensen P. Efficient simulation of light transport in scenes with participating media using photon maps. In: Cohen MF, ed. *Proc. of the ACM SIGGRAPH'98*. New York: ACM Press, 1998. 311–320.
- [8] Jensen HW, Marschner SR, Levoy M, Hanrahan P. A practical model for subsurface light transport. In: Fiume E, ed. *Proc. of the ACM SIGGRAPH 2001*. New York: ACM Press, 2001. 511–518.
- [9] Jensen HW, Buhler J. A rapid hierarchical rendering technique for translucent materials. In: Fiume E, ed. *Proc. of the ACM SIGGRAPH 2002*. New York: ACM Press, 2002. 576–581.
- [10] Hao XJ, Varshney A. Real-Time rendering of translucent meshes. *ACM Trans. on Graphics*, 2004,23(2):120–142. [doi: 10.1145/990002.990004]
- [11] Sloan PP, Kautz J, Snyder J. Precomputed radiance transfer for real-time rendering in dynamic, low-frequency lighting environments. In: Fiume E, ed. *Proc. of the ACM SIGGRAPH 2002*. New York: ACM Press, 2002. 527–536.
- [12] Wang R, Tran J, Luebke D. All-Frequency interactive relighting of translucent objects with single and multiple scattering. *ACM Trans. on Graphics*, 2005,24(3):1202–1207. [doi: 10.1145/1073204.1073333]

- [13] Sloan PP, Luna B, Snyder J. Local, deformable precomputed radiance transfer. *ACM Trans. on Graphics*, 2005,24(3):1216–1224. [doi: 10.1145/1073204.1073335]
- [14] Green S. Real-Time approximations to subsurface scattering. In: Fernando R, ed. *Proc. of the GPU Gems: Programming Techniques, Tips, and Tricks for Real-Time Graphics*. Addison Wesley Professional, 2004. 263–278.
- [15] Bastioni M. A simplified model for subsurface scattering applied to the vertex shader in blender. 2005. <http://www.dedalo-3d.com/>
- [16] Borshukov G, Lewis JP. Realistic human face rendering for “the matrix reloaded”. In: Rockwood AP, ed. *Proc. of the ACM SIGGRAPH 2003*. New York: ACM Press, 2003. <http://www.virtualcinematography.org/publications/acrobat/Face-s2003.pdf>
- [17] Gong Y, Chen W, Zhang L, Zeng Y, Peng QS. An approximate image-space approach for real-time rendering of deformable translucent objects. In: Seidel HP, Nishita T, Peng QS, eds. *Proc. of the 24th Computer Graphics Int’l Conf*. Springer-Verlag, 2006. 124–135.
- [18] Weyrich T, Matusik W, Pfister H. Analysis of human faces using a measurement-based skin reflectance model. *ACM Trans. on Graphics*, 2006,25(3):1013–1024. [doi: 10.1145/1141911.1141987]
- [19] d’Eon E, Luebke D. Advanced techniques for realistic real-time skin rendering. In: Nguyen H, ed. *Proc. of the GPU Gems 3*. Addison Wesley Professional, 2007.
- [20] Tong X, Wang JP, Lin S, Guo BN, Shum HY. Modeling and rendering of quasi-homogeneous materials. In: Beckmann-Wells P, ed. *Proc. of the ACM SIGGRAPH 2005*. New York: ACM Press, 2005. 1054–1061.
- [21] Sun X, Zhou K, Shi JY. Interactive global illumination rendering with spatial-variant dynamic materials. *Journal of Software*, 2008, 19(7):1783–1793 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1783.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.01783]
- [22] François G, Pattanaik S, Bouatouch K, Breton G. Subsurface texture mapping. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2008, 28(1):34–42. [doi: 10.1109/MCG.2008.16]

#### 附中文参考文献:

- [21] 孙鑫,周昆,石教英.空间动态可变材质的交互式全局光照明绘.软件学报,2008,19(7):1783–1793. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1783.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.01783]



赵沁平(1948—),男,山西太原人,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为虚拟现实,人工智能.



郝爱民(1968—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为虚拟环境仿真,分布式虚拟现实系统,数据库系统,多媒体系统.



李帅(1981—),男,博士,主要研究领域为三维图形真实感绘制,虚拟现实系统.



高玉建(1983—),男,博士生,主要研究领域为三维动画,虚拟现实系统.