**北京航空航天大学计算机学院**

**硕士学位论文开题报告**

**论文题目**：基于辐射度算法的次表面散射和参与介质的研究

**专 业**：计算机应用技术

**研究方向**：计算机图形学

**研 究 生**：石裕隆

**学 号**：SY1006205

**指导教师**：王莉莉

**北京航空航天大学计算机学院**

2011年11月20日

目 录

1 论文选题的背景与意义 1

2 国内外研究现状及发展动态 1

2.1 辐射度算法 1

2.2 次表面散射 2

2.3 微表面次表面散射 5

2.4 参与介质的绘制 5

3 论文的研究内容及拟采取的技术方案 6

3.1 研究目标 7

3.2 研究内容 7

3.3 拟采用的技术方案 7

3.3.1 基于dipole模型的能量传输矩阵的计算模型 7

3.3.2 凹凸贴图在能量传输计算模型的应用 8

3.3.3 改进辐射度缓存算法的参与介质绘制 9

4 关键技术或技术路线 10

4.1 GPU的快速稀疏矩阵计算 10

4.2 GPU的蒙特卡洛的光线跟踪 10

4.3 GPU的辐射度缓存粒子的数据结构 10

5 论文研究计划 10

5.1 时间安排 10

5.2 预期成果 11

6 主要参考文献 11

**基于辐射度思想的光照效果研究与实现**

# 论文选题的背景与意义

在真实感渲染中，基于辐射度理论在物理逼真渲染中占有很重要的地位，他将光的传播看成了一种能量的传播，将光解释成为离散的粒子态能量从而具有了很好的物理基础，通过各种改进手段可以逼真实现除了光的衍射和干涉之外的任意效果。

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的更为明显。目前的一些次表面散射算法无法真实模拟如碗这类模型的次表面散射效果，因为它存在着散射出来的光可能再次进入模型的因素。

参与介质的逼真渲染目前主要分为屏幕空间算法和几何空间算法，主流方法为使用光子映射以及结合体绘制的Ray casting算法以及marching cube算法来实现均匀或者非均匀介质的效果，虽然渲染效果很好，但是渲染效率上难以达到一个令人满意的结果。

# 国内外研究现状及发展动态

## 辐射度算法

辐射度算法最先由Cindy M. Goral[1]等在他的文章中最先将辐射度的概念应用于全局漫反射模型，基本的辐射度算法假定辐射能在对象表面直接的转移和能量守恒定律，从而准确地建立对象表面的漫反射模型。但是辐射度算法需要首先对场景计算所有面片的形状因子，通过形状因子来计算光的漫反射传播，这需要一个很大的计算量，针对这一点许多人提出了相应的改进措施。Michael F. Cohen[2]等在1988年提出了一种渐进的辐射度算法，这个算法首先由光源向场景发射能量并由每个场景中的每个面片接收能量，每次选择接收能量最多的那个面片计算他和场景中其他面片之间的形状因子，并进行下一次的能量传播，这样做避免了对场景所有面片都计算形状因子，提高了渲染速度。为解决漫反射物体的全局光照问题，常常利用辐射度算法从光源处对光线进行跟踪，但这种算法计算量大，难以实时应用，一般只能以预计算的方式使用。Keller[3]提出了即时辐射度算法，通过将辐射场用一系列的虚拟点光源挖表示，将计算间接光照的问题转化为一系列的计算直接光照的问题。此算法是一种多遍绘制算法，在第一遍算法中，虚拟点光源从光源处发出，当接触到漫反射表面时停止，并在接触点生成一个新的虚拟点光源，在之后的每一遍绘制中，都将新生成的虚拟点光源作为光源处理，如此迭代直到效果达到预定要求。这种算法与辐射度算法相比，计算量较小，可以实时应用，并可以自适应地达到合适的效果。

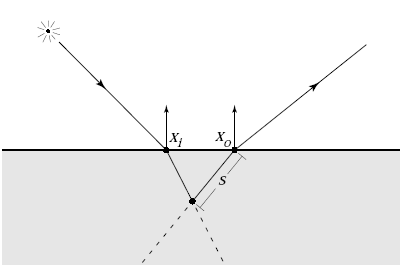
Georgiev[4]等提出了一种对虚拟点光源进行采样的简化算法，通过渐近地对采样点周围的虚拟点光源进行收集，可以在仅增加少量存储空间的前提下，对多遍绘制中的虚拟点光源属性进行自动采样。这种采样不仅可以改进原有虚拟点光源算法的效果，还能根据场景获得不同幅度的效率上的提升。

## 次表面散射

BSSRDF是用来描述光照下半透明材质物体外观的最普遍适用的表面分布函数。当光照射到半透明物体表面时，会发生次表面散射现象。BSSRDF是在几何光学模型下，对光照次表面散射的一种比较全面的参数化物理模拟。如下图所示，它的定义是物体表面上的任意一点从任意一个方向的入射的光线和另外的任意一点出射的光线强度之间的反射比率。其在数学表达上是一个八个维度的函数：[5]。其入射和出射方向角可以用参数和来表示，其入射位置和出射位置可以用参数和来表示，则其数学表达形式为：

 (1)

其中：表示BSSRDF的函数值，表示出射光线的强度强，表示入射光线的辐照度。

BSSRDF由于其维度比较高，在实际中难以实用，因此应用中会根据不同的需要做进一步的化简(如图1所示)。若在不考虑介质的均匀性的前提下，BSSRDF被降移为6维的BSSDF(Bidirectional Subsurface Scattering Distribution Function)问题；若在不考虑次表面散射的前提下，BSSRDF可以化简为BTF双向纹理函数（Bidirectional Texture Function）[6]。BRDF[3]是目前研究最为广泛和深入的表现形式。它是对BSSDF和BTF的进一步化简，它认为光线的入射点和出射点是一致的，并且光的几何交互只发生在物体表面，因此物体的外观只与入射光线的方向和视线的方向相关。

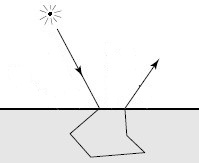
单次散射(a) 多次散射 (b)

图1 次表面散射

目前次表面散射通常分为单次散射和多次散射来分开考虑，因为当光在介质中进行了多次散射后光趋向于各向同性[7]。而单次散射计算，在基本所有基于物理渲染的算法都是基于Jensen于2002年的文章[7]中的计算方法。

采用反向跟踪的方法，从视点发出视线与表面求交后采用snell定律计算折射方向，并在该折射方向上以为步长设置采样点，为一个(0,1)的随机变量。并将采样点和光源连线，带入公式2.1中计算光照值。





(2.1)

xo指出射点的位置，指出射方向, xi指入射点的位置，指入射方向，入射光线在内部第一次散射前行进的距离，指光线在内部第一次散射后在出表面之前行走的距离。

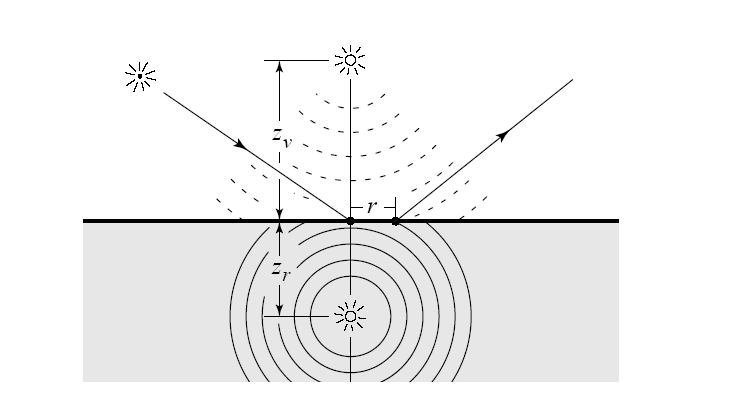
对于多次散射过程由于它的各向同性的性质，国内外有以下的实现和改进方法，最初的采用BSSRDF模型来实现半透明物体的次表面散射是由Ishmaru[5]于1978年提出 的。但由于BSSRDF仅仅描述了入射和出射半透明物体光线间的关系，并不直接对应于描述半透明效果的物理量(如物体对光线的散射度、吸收率和衰减率等)，因此在很长的一段时间内，对于半透明物体的绘制都需要通过复杂的计算来模拟光线在特定散射度和吸收率介质中的传输，而且绘制效率较为低下。2001年，Jensen等[7]提出了偶极光源(Dipole)近似的方法将BSSRDF中光照模型分解为单次次表面散射和多次次表面散射，并在多次次表面散射中首先使用了偶极光源的方法进行了近似，使绘制速度得到很大的提高。将模型近似的将BSSRDF表示为散射度、吸收率等物理参数所定义的解析形式，如图2所示：

图 2 ,偶极子模型

在多重散射占主导地位的材质中，光能的分布更倾向于各向同性，即使相位函数或者入射光是各向异性也是如此。从这个性质出发，多次次表面散射的行为可以由一个漫反射的过程来近似。即在经过大量的多次次表面散射之后，介质内部的光能分布可以等价于一个各向同性的点光源在材质内部形成的光能分布[1]。偶极光源近似模型就是在这个理论基础上发展起来的：在具有表面的无限大的材质中，其表面某点的辐射亮度可以等价于两个分别位于表面两侧的点光源的同时贡献。其中在物体表面之上的称之为虚光源，表面之下的称之为实光源。为了提高算法的绘制速度Jensen等[8]随后又提出一种两篇分级绘制方法。算法通过对半透明物体内部散射的两次划分估计，把物体表面光照计算和内部散射部分进行分离，来提高算法的绘制效率。第一遍用于计算半透明物体表面特定点的光照强度，第二遍则通过快速分级积分的方式获得物体多次次表面散射的近似估计。文章在第一遍中通过对半透明物体表面点采用重要性采样的方法进行采样，并预计算出其光照。第二遍在计算多次次面散射时以第一遍的结果作为输入，以进行第二遍的绘制。偶极子模型假定是半无限平面，但实际中也有很多模型达不到这样的要求，比如叶子等，基于这样的问题Craig Donner等[9]提出了dipole模型的修正模型multi-dipole模型，采用多个偶极子来逼近新的临界条件。Craig Donner等[28]在2009年提出了一种经验公式的 BSSRDF的多次散射计算模型，通过测量得到的大量的数据来模拟次表面散射的真实状况，实验证明可以获得很好的仿真效果。

## 微表面次表面散射

Torrance-Sparrow模型是计算机图形学中最早开发的微平面模型之一，它是由Torrance和Sparrow为了模拟金属表面而开发的。他们将表面模型化为完全光滑镜面的微平面集合。表面用一个统计分布函数D(ωh)来描述，它给出了镜面具有朝向ωh的概率。

Craig Donner 等[9]为了模拟皮肤表面的粗糙次表面散射特性，首次提出了将微平面模型用于次表面散射效果，他提出将次表面散射公式中fresnel出射和入射系数替换成Torrance-Sparrow模型推导出的BRDF公式，同时对于原来的dipole模型的公式参数进行相对应的修改获得一个基于微平面的次表面散射公式，修改后的计算模型根据粗糙度的提升，会产生更少的入射材质的光，而产生更多从表面散射的光。

## 参与介质的绘制

基于光线的传播、吸收、散射的过程，Blinn[18]提出了一种模拟光线传输过程中光照量变化的光照模型，通过设定吸收系数和散射系数，可以计算光线通过参与介质的过程中的变化。Biri等[19]在此基础上提出一种改进的光线传播方程，大大提高了渲染的效率，即使在一些复杂场景中仍然可以获得实时的效率。不过为了简化计算，此算法做了一些限定，要求介质必须是各向同性的均匀介质，并且只考虑了单次散射的情况，这一定程度降低了渲染效果的真实感。Sun等[20]提出了基于显式分解积分的算法，在渲染效率上更快，并可以与OpenGL的雾化效果很好的结合，可以方便地加以应用。un[21]等提出了一种基于线性空间收集的算法，将光源光线与视点光线用6D线性空间中的点和面来表示，把原先判断最接近线段的问题转化为最接近某个平面序列的点的问题。在考虑光线在参与介质中进行多次散射的情况下，普通的数值计算方法将带来极大的计算量，并因此导致渲染效率的大幅下降。Premoze等[22]提出了一种新的算法，通过利用空间传播计算的特性，避免了对多次散射直接进行数值模拟。与光栅化方法或光线跟踪算法不同，Imagire等[23]使用体绘制的方法来渲染场景，对从视点发出的每条光线，都在其采样路径上不断计算与介质的相交性，最终返回整合的结果。Dobashi[24]等提出了一种可以运行在图形硬件上的散射算法，将散射光的光强度作为一张二维纹理保存，在渲染过程中需要查找光强度时可以直接以对纹理采样的方式读取，以此可以做到超大复杂场景的实时渲染。不过出于图形硬件的限制，这种算法仍然被限制到只能做单次散射。基于辐射度缓存的参与介质算法是由WOJCIECH JAROSZ等[27]在2008年提出的，他利用辐射度缓存算法的特点，首先将光照信息和光照梯度信息打到介质上，再通过辐射度缓存插值计算方法以及介质的特性，计算单次散射的光照效果和多次散射的光照效果，可以达到一种比普通蒙特卡洛的光线跟踪算法更容易得到较平滑的光照效果。

# 论文的研究内容及拟采取的技术方案

## 研究目标

本课题首先将利用辐射度算法的形体参数矩阵的思想实现次表面散射效果，然后结合将本算法结合微平面实现皮肤的次表面渲染效果。并优化辐射度缓存的方法实现参与介质的绘制。

## 研究内容

课题的研究内容主要有下述几点：

1. 研究并实现一种GPU的快速辐射度形体参数构造，能快速的将场景中的形体参数矩阵给计算出来，方便后面的算法使用。此部分使用CUDA实现。
2. 研究并实现一种dipole模型的能量传输矩阵的半透明物质的渲染模型，能够将次表面散射过程转换为能量传输计算，通过一次预计算让半透明绘制达到实时，此部分拟用CUDA实现。
3. 研究并实现将凹凸贴图技术应用于我们的半透明物质的计算当中，利用我们的计算模型实现丰富表面细节的次表面散射。
4. 研究并实现一种基于光线的传播、吸收、散射模型的参与介质绘制算法，综合考虑光线在传播过程中经过散射后进入视线的部分，以及光线在经过参与介质的过程中被不断吸收衰减的过程。

## 拟采用的技术方案

### 基于dipole模型的能量传输矩阵的计算模型

传统的计算次表面散射的多次散射效果时大多都是首先预计算一些光辐射度值存储在物体表面，然后对于观察到的点采用dipole模型计算各个采样点对该点的光照贡献，本课题提出了一种基于dipole模型的能量传输矩阵的计算模型，该算法类似辐射度算法思想，以三角形面片为最小能量接收和发送单元，分为内部能量传输和外部能量传输。

首先在给定的模型基础上，以三角形为单元，分别计算每个三角形到其他所有三角形的内外能量传输矩阵。外部能量传输矩阵我们采用辐射度算法的计算方法，计算形体参数设为外部能量传输矩阵，内部传输矩阵也就是多次散射的传输方式，我们采用dipole模型计算每个三角形到任意三角形的能量传输参数。

在渲染阶段，我们分俩步进行。第一步，采用一种渲染方法给场景传入初始的光照能量分布在各个三角形上。第二步，利用我们预计算阶段得到的内部能量传输矩阵和外部能量传输矩阵，进入如图 3的的迭代计算阶段 ，直到光能量衰减到一定程度则停止。

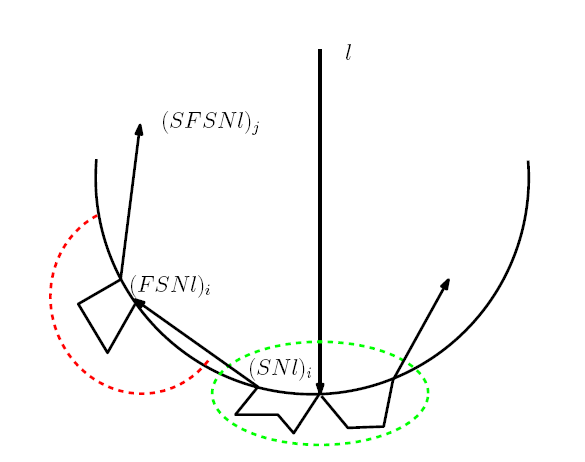
图 3 能量传输模型

图3中L为光能量，N为对角线为l的方向与各个三角形面片的夹角的余弦值，S为内部能量传输矩阵，F为外部能量传输矩阵。

在计算完每个三角形的能量值后，利用每个点的周围三角形的能量值计算通过角度权重计算该点的颜色，然后三角形内部通过颜色插值来实现颜色的平滑过渡而不必过度细分三角形，增加计算量。

### 凹凸贴图在能量传输计算模型的应用

基于能量传输的计算模型的效率与模型的面片数成正比的关系，面片数越多则计算效率越低，而对于一些表面细节较多的模型，不光在建模方面难度大，对于能量传输计算模型的计算难度也加大。对于表面细节较多的模型，可首先用简单模型进行计算能量传输，然后在利用凹凸贴图来替代表面细节，最后在能量传输的模型上对传输能量进行修正。

具体想法为，由于表面细节很多的模型必然不满足dipole模型的无限大平面的假设，所以这里我们使用替代的修正模型mult-dipole模型，他是由Craig Donner等[9]在2005年的多层次表面散射的文章中提出的。在初始计算能量传输矩阵时，对于采样点利用凹凸贴图的信息修改法线以及高度信息，并利用修改后的位置以及法线计算mult-dipole的能量传输模型。对于外部能量传输模型则需重新根据凹凸贴图来确定新的形状参数矩阵。

### 改进辐射度缓存算法的参与介质绘制

基于辐射度缓存的参与介质的绘制的大概思想就是利用预计算的光照信息散布在介质中，如光照强度，和梯度信息，这个和一般的光子映射求参与介质的方法不同点就在于光子不光具有光照信息，还有光照衰减的梯度信息。在渲染阶段分单次散射效果和多次散射效果分开采样计算光照信息来合成最终的视觉效果。

基于辐射度缓存的算法的缺点在于采样的盲目性以及它在记录梯度信息的时候没有考虑到可视的影响，需要人手工对场景设置一个错误容忍值，我的思路是通过在空间对点构建一个结构体，来通过较短时间得查询操作来自动完成这个需要手工设置的环节。

# 关键技术或技术路线

## GPU的快速稀疏矩阵计算

本课题中的能量传输的次表面散射模型一定程序上很依赖一个快速稀疏矩阵计算模块，目前使用的是intel的基于CPU单核的数学计算库mkl,但是还是达不到理想的效果，因为矩阵计算具有良好的可并行性，尝试在CUDA上自己实现一个快速的稀疏矩阵计算模块。

## GPU的蒙特卡洛的光线跟踪

本课题中的参与介质的绘制中需要用到蒙特卡洛的光线跟踪算法来对最后缓存在场景中的辐射度信息进行采集，这个直接影响到了最后的渲染时间和渲染效果。

## GPU的辐射度缓存粒子的数据结构

参与介质中对于最后渲染的点需要一个高效的缓存粒子查找操作，查找需要观察点附近满足要求的缓存粒子，需要构造一个如八叉树或者更高效一点的查找结构。

# 论文研究计划

## 时间安排

* 2011/11-2012/02 阅读相关论文和文献资料；
* 2012/03-2012/04 确立实现目标及主要实现方法；
* 2012/04-2012/06 搭建系统环境及实现GPU版的次表面散射
* 2012/07-2012/08 实现丰富表面细节的次表面散射并集成到系统环境；
* 2012/09-2012/10 实现参与介质绘制算法并集成到系统环境；
* 2012/11-2012/12 撰写硕士论文，准备答辩；
* 2011/12-2012/01 机动时间。

## 预期成果

1. 发表1-2篇文章
2. 实现基于能量传输的次表面散射效果
3. 实现一个效果较好的参与介质效果
4. 提交一篇硕士学位论文

# 主要参考文献

[1], Coral, Cindy M., Kenneth E. Torrance, Donald P. Greenberg,"Modeling the Interaction of Light Between DiffuseSurfaces," Computer Craphics(SIGGRAPH '8~ Proceedings), Vo1.18, No.3, July 1984, pp.213-222.

[2], Cohen, M. F., Chen, S. E., Wallace, J. R., Greenberg, D.P.(1988) A progressive refinement approach to fast radiosity image generation. Computer Gmphics 22(4), 75-84.

[3],Keller A.: Instant Radiosity [C]. SIGGRAPH ’97 (Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1997.

[4],Iliyan Georgiev, Philipp Slusallek. Simple and Robust Iterative Importance Sampling of Virtual Point Lights [C]. Eurographics 2010, Norrköping, May 2010

[5],Ishimaru A. Wave Propagation and Scattering in Random Media [M]. New York: Academic Press, 1978

[6],Kajiyaj T. The Rendering Equation[C]. Proceedings of ACM SIGGRAPH, 1986:143-150

[7], Jensen H W, Stephen R, Marc L, Pat H. A Practical Model for Subsurface Light Transport. ACM SIGGRAPH 2001

[8], Jensen H W, Buhler J. A Rapid Hierarchical Rendering Technique for Translucent Materials. ACM SIGGRAPH 2002

[9], DONNER, C., AND JENSEN, H. W. 2005. Light diffusion in multi-layered translucent materials. ACM Transactions on Graphics 24, 3, 1032–1039.

[10], DONNER C., JENSEN H. W.: Rendering translucent materials using photon diffusion. In Eurographics Symposium on Rendering (2007).

[11], Sloan P -P, Kautz J, Snyder J. Precomputed Radiance Transfer for Real-time Rendering in Dynamic, Low-frequency Lighting Environments[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002:527-536

[12], XJ Hao and Amitabh Varshney. Real-time Rendering of Translucent Meshes. ACM Transactions on Graphics, April 2004:120–142

[13], Cohen J, Varshney A, Manocha D, Turk G, Weber H, Agarwal P, Brooks F.P, Wright W, Simplification Envelopes. In proceedings of SIGGRAPH '96, ACM, New York, 119-128

[14], R Wang, John Tran, David Luebke. All-frequency Interactive Relighting of Translucent Objects with Single and Multiple Scattering. ACM Transactions on Graphics, August 2005:1202–1207

[15], R Wang, Ewen C.P, David L, W Hua, QS Peng, HJ Bao, Real-time Editing and Rendering of Translucent Materials with Homogeneous Diffuse BSSRDFS[J]. Journal of Computer-aided Design and Computer Graphics, 2008:993-1000

[16], Green S. Real-time Approximations to Subsurface Scattering[A]. GPU Gems: Programming Techniques, Tips, and Tricks for Real-Time Graphics[C]. Massachusetts: Addison-Wesley, 2004: 263-278

[17], Bastioni M. A Simplified Model for Subsurface Scattering Applied to The Vertex Shader in Blender[EB/OL]. <http://www.dedalo-3d.com/>, 2005

[18], Blinn J E. Light reflection functions for simulation of clouds and dusty surfaces [J. Computer Graphics 16(3), 1982: 21-29.

[19], Biri V, Arques D, Michelins. Real Time Rendering of Atmospheric Scattering and Volumetric Shadows [J]. Journal of WSCG,2006,14:65-72．

[20], Sun, B., Ramamoorthi, R., Narasimhan. G., et al. A practical analytic single scattering model for real time rendering [C]. ACM Trans. Graph. 24(3), 1040–1049.

[21], Imagire T,Johan H,Tamura N,et al.Anti-aliased and real-time rendering of scenes with light scattering effects [J]. The Visual Computer 23(9), 2007: 935-944．

[22], Dobashi Y,Yamamoto T,Nishita T.Interactive Rendering of Atmospheric Scattering Effects Using Graphics Hardware [J]. Graphics Hardware. Saarbrucken, Germany, 2002:99-107.

[23], Sun X, Zhou [K](http://www.kunzhou.net) , Lin [S](http://research.microsoft.com/en-us/people/stevelin), Guo [B](http://research.microsoft.com/en-us/press/bainguo.aspx) .Line Space Gathering for Single Scattering in Large Scenes [C].ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2010)

[24], Premoze S,Ashikhmin M,Tessendorf J,et al.Practical rendring of multiple scattering effects in Participating media[C]. Eurographics Symposium on Rendering, 2004:363-374．

[25], 郝爱民，朱磊，阎峻. 一种非均匀参与介质的实时光照方法[J].中国科技论文在线 4(2), 2009.

[26],WARD, G. J., RUBINSTEIN, F. M., AND CLEAR, R. D. 1988. A ray tracing solution for diffuse interreflection. In Proceedings of the 15th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH). ACM Press, 85–92.

[27], JAROSZ, W., DONNER, C., ZWICKER, M., AND JENSEN, H. W.2007. Radiance caching for participating media. In ACM SIG-GRAPH 2007 Sketches.

[28], DONNER, C., LAWRENCE, J., RAMAMOORTHI, R.,HACHISUKA, T., JENSEN, H. W., AND NAYAR, S. 2009. An Empirical BSSRDF Model. ACM Transactions on Graphics.