

物体表面质感模型与绘制综述

江海燕^{1,2} 周明全¹ 武仲科¹ 郭 迪¹ 张 旭¹

(北京师范大学信息科学与技术学院 北京 100875)¹ (齐鲁师范学院 济南 250013)²

摘 要 综合论述了真实感图形学的主要研究内容之一——物体表面质感。阐明了影响物体表面质感的两个因素：物体表面的光学特性和几何细节。根据光线在物体表面的反射、次表面散射、透射等情况，重点综述了表征物体表面质感的一般模型和具体模型分类。详细分析了具体的 BRDF 模型、SVBRDF 模型、BSSRDF 模型、TSVBRDF 模型和 BTF 模型，总结了这几种模型各自的特点、适用范围、绘制效果。展示了真实感表面质感绘制在影视制作、游戏产业、虚拟设计、文化遗产保护等领域的应用情况。最后对真实感表面质感绘制进行了总结和展望。

关键词 真实感图形学，表面质感，真实感绘制，双向反射分布函数，双向纹理函数

中图分类号 TP391

文献标识码 A

Survey of Appearance Models and Rendering

JIANG Hai-yan^{1,2} ZHOU Ming-quan¹ WU Zhong-ke¹ GUO Di¹ ZHANG Xu¹

(College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)¹

(Qi Lu Normal University, Jinan 250013, China)²

Abstract This paper summarized one of the main research contents of photorealistic graphics—the appearance models and rendering. It represented the two key factors that influence the appearance of different materials; the optical properties and geometric details of materials surfaces. And according to the interaction of light and materials' surfaces—reflection, subsurface scattering and transmission and so on, it described emphatically the appearance models and rendering, analyzed in detail the specific models; BRDF, SVBRDF, BSSRDF, TSVBRDF and BTF, and concluded the characteristics of the models, as well as gave the rendering results using different models. Then it exhibited the main application areas with different models used in appearance rendering, such as film and television production, games industry, virtual design and cultural heritage protection. In the end, it concluded and prospectd the research of appearance modeling and rendering.

Keywords Photorealistic graphics, Appearance, Photorealistic rendering, BRDF, BTF

1 引言

真实感图形学(Photorealistic Graphics)作为计算机图形学(Computer Graphics)的一个重要和前沿研究领域，自出现至今，得到了迅猛的发展。真实感图形学的3大主要研究内容^[1]是：光源在场景中的全局设定(如相对位置、形状等)；物体在场景中的全局设定；光线与物体发生的复杂交互过程，该过程只与物体表面的材料属性和分布有关，即表面质感(Appearance)。表面质感是场景中物体的本征属性，与场景的全局设定无关。本文旨在对物体表面质感进行综述；对影响物体表面质感的两个影响因素——物体表面的光学特性和几何细节进行分析总结；给出表征物体表面质感的一般模型，在该模型的基础上，重点分析了BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)^[2]模型、SVBRDF(Spatially Varying

BRDF)^[1]模型、BSSRDF(Bidirectional Surface Scattering Reflectance Distribution Function)^[1]模型、TSVBRDF(Time-Spatially Varying BRDF)^[1]模型和BTF(Bidirectional Texture Function)^[1]模型；给出了它们各自的分类、特点和使用范围；然后对真实感表面质感绘制的应用领域进行归纳总结并对其研究进行总结和展望。

2 物体表面质感的影响因素及表征模型

2.1 影响物体表面质感的两个因素^[2]

现实世界中的物体给人眼睛呈现的视觉效果主要是由物体表面的材料属性和物体表面的几何结构决定的。可以从3个层次：宏观结构层、亚宏观结构层^[4]和微观结构层对物体的表面质感进行考察^[3]。

在宏观结构层，物体给人的感觉是一个几何体。在亚宏

到稿日期：2013-07-27 返修日期：2013-12-27 本文受国家科技支撑计划(2012BAH33F04)资助。

江海燕(1979—)，女，博士，讲师，主要研究方向为虚拟现实、真实感绘制、人工智能等，E-mail: haiyanjiang@126.com；周明全(1954—)，男，教授，主要研究方向为虚拟现实、文化遗产数字化保护、三维医学可视化技术等；武仲科(1965—)，男，教授，主要研究方向为虚拟现实、三维医学可视化技术、三维动画等；郭 迪(1989—)，男，硕士，主要研究方向为虚拟现实、真实感绘制等；张 旭(1988—)，男，硕士，主要研究方向为人脸老化、三维可视化技术等。

观结构层,物体表面以相当细小但仍能察觉的几何细节为主。当靠近物体时,才会观察到物体表面的几何细节。亚宏观层决定了物体表面的细微结构。在微观结构层,人肉眼无法观察到物体表面的细节,但它和亚宏观结构层共同对物体表面的光学特性起决定性作用。

所以,要表征物体表面质感就要从亚宏观结构层和微观结构层进行分析,从表征物体表面质感的光学特性和几何细节两个角度进行研究。

(1) 物体表面的光学特性

物体表面的光学特性主要包括物体的颜色和光泽。其中,光泽^[5-7]是指不同的光照角度条件下,物体表面给人的不同的视觉效果。同理,从不同的视角观察同一个物体时,物体表面给人的视觉效果也是不同的。当物体表面绝对光滑时,入射光线被完全反射,只有在反射光方向才能看到物体表面,即镜面反射。但现实世界中的物体绝大多数都不是绝对光滑的,入射光将在物体表面发生漫反射,故人在各个方向上都能看到物体。物体表面的光学特性在各个方向上都相同时称为各向同性(isotropy);物体表面的光学特性在各个方向上各有不同时称为各向异性(anisotropy)。特殊的晶体结构会导致各向异性,材质表面上存在有组织的细小凹凸槽也会导致各向异性。特殊的晶体结构会导致各向异性,材质表面上存在有组织的细小凹凸槽也会导致各向异性。另外还存在高光的情况。图1是关于漫反射和镜面反射的光线示意图。图2^[8]是对毛线织物和油漆后的木头在不同光照角度和视角条件下的表面质感的采样。图3展示的是表面质感各向异性的光学效果。



图1 漫反射(左)镜面反射(右)光线示意图



(上)油漆后的木头(下)在不同光照角度和视角下的照片采样

图2 毛线织物



图3 各向异性的光学效果

(2) 物体表面的几何细节

物体表面的几何细节主要包括物体本身自带的纹路,如皮肤上的纹路、橘子皮上的纹路、毛线织物的纹路等,如图4所示;还包括自阴影,即光线照射到物体表面时在物体亚宏观结构层上形成的阴影;还包括自遮挡,即观察物体的视线与物体表面相交时物体表面的几何微结构形成的遮挡。自阴影、自遮挡的情况如图5、图6所示。



图4 自带纹路的物体



图5 物体自阴影、自遮挡效果



图6 光线在物体表面形成自阴影(左)、自遮挡(右)效果

所以,要在计算机中实现物体表面质感的真实感绘制,就要逼真地刻画和描述三维模型表面的光学特性和几何细节。

2.2 表征物体表面质感的模型

光线和物体表面交互作用的一般模型 GRF^[9],即描述表面质感的一般模型如式(1)所示。图7^[9]是表征物体表面质感一般模型 GRF 的示意图。

$$Y_r^{GRF} = GRF(\lambda_i, x_i, y_i, z_i, \theta_i, \varphi_i, \lambda_v, x_v, y_v, z_v, \theta_v, \varphi_v, \theta_{i,T}, \theta_{v,T}) \quad (1)$$

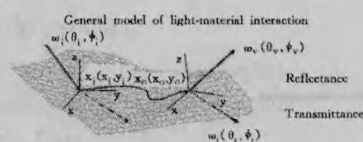


图7 表征物体表面质感一般模型 GRF 的示意图

表征物体表面质感的一般模型 GRF 是一个 16 维函数,用来描述光线和物体表面相互作用的效果。该模型能够表示物体的反射、次表面散射和透明的效果。 λ 表示波长参数, (x, y, z) 表示位置参数, (θ, φ) 表示角度参数, t 表示时间参数。但在实际应用中,往往不必采用 GRF 模型,而是根据具体的物体表面质感情况采用不同维度的简化模型。在表征表面齐次均匀物体时,具体的模型有 7 维的双向散射分布函数 BSDF(Bidirectional scattering distribution function)、5 维的双向反射分布函数 BRDF(Bidirectional reflectance distribution function)和双向透射分布函数 BTDF(Bidirectional transmittance distribution function)、4 维的 isotropic BRDF 函数。在表征表面有纹理的物体时,具体的模型有 9 维的双向表面散射反射分布函数 BSSRDF(Bidirectional surface scattering reflectance distribution function)、7 维的空间变化双向反射分布函数 SVBRDF(Spatially varying BRDF)和双向纹理函数 BTF(Bidirectional texture function)、5 维的面光场函数 SLF(Surface light field)和表面反射场函数 SRF(Surface reflectance field)、3 维的纹理函数和 bump-map 函数等。不同维度的函数模型用来绘制光线和不同物体表面相互作用的效果。具体模型分类及其相互间关系如图8^[9]所示。

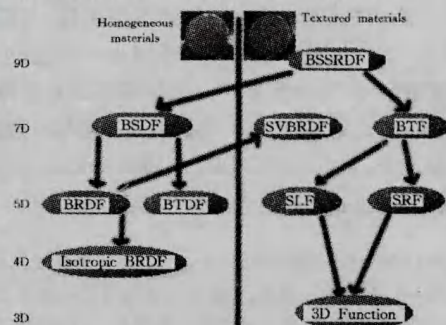


图8 表征物体表面质感的模型分类及其相互间关系

各种模型相互间的关系:对 GRF 模型,当不考虑时间维

度时,16 维的 GRF 模型就降维为 9 维的 BSSRDF 模型。对 BSSRDF 模型,如果不考虑次表面散射效果,就降维成 7 维的 SVBRDF 模型。对 BSSRDF 模型,如果假设物体表面是齐次均匀的,就降维成 6 维的 Homogeneous BSSRDF 模型。对 SVBRDF 模型,如果假定物体是均匀齐次的,就降维成 5 维的 BRDF 模型。对齐次的 BSSRDF 模型,如果不考虑次表面散射的情况,则同样也降维成 5 维的 BRDF 模型。对 BRDF 模型,假定物体表面是各向同性的,则降维成 4 维的 Isotropic BRDF 模型。

总之,根据所要表征的物体的表面光学属性和几何细节的不同,可以采用不同的函数模型。主要模型如下:

(1)BRDF 模型。BRDF 描述了物体表面某一点的光线反射情况,具体描述如式(2)^[10]所示。 f_r 的值是在某一视点下,物体表面某一点处的反射光的辐射亮度的微分量与入射光的辐射照度的微分量的比。 λ 表示光波参数, (θ, φ) 是物体表面一点处的光线的极地角。 θ_i 表示入射光向量与法线的夹角, φ_i 表示入射光向量在 xy 平面上的投影与 x 轴的夹角, θ_v 表示视线向量与法线的夹角, φ_v 表示视线向量在 xy 平面上的投影与 x 轴的夹角。请参看图 9 的 BRDF 模型示意图。图 10^[10] 示出在 BRDF 模型中,在两组不同入射光(如图中细线所示)条件下得到的所有可能的反射光的情况。

$$f_r(w_i \rightarrow w_o) = f_r(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_o, \varphi_o) = \frac{dL(w_o)}{dL(w_i)} \quad (2)$$

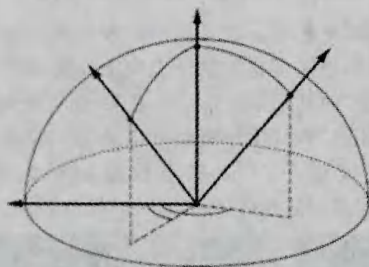


图 9 BRDF 模型示意图



图 10 BRDF 模型中不同入射光条件下的所有可能的反射光方向

绘制时可以用 BRDF 来计算反射光的强度。BRDF 的值可以通过测量得到^[11],也可以通过经验值得到。其中,BRDF 的测量过程可以被认为是物体表面光照参数的获取过程。根据绘制要求的不同可以采用不同的具体 BRDF 模型,它们可以被分为 4 类:

(i)经验模型(Empirical Models)。该模型源于设计者的直觉和实践经验,计算简单,实现了在低成本下得到逼真的物体表面质感的绘制效果。另外,其可以很好地模拟镜面高光的效果。具体的模型有 Lambertian BRDF(如图 11 所示)、Phong BRDF(如图 12 所示)、Modified Phong Model、Fast Phong Shading 和 Blinn-Phong BRDF。

其中,Lambertian BRDF 模型描述了理想漫反射的情况,可以表示为式(3):

$$f_r(w_i \rightarrow w_o) = \text{const.} = \rho / \pi \quad (3)$$

其中, ρ 表示漫反射系数,它是光线被物体表面反射的部分。

此时 f_r 是一个常数,即反射光的分布是一个函数。该模型的不足是不能表达复杂的表面质感,且该数学模型经常不能很精确地预测物体表面的反射情况。

Blinn-Phong BRDF 模型^[12]可以表示为式(4):

$$f_r = \frac{\rho}{\pi} + k_s (N \cdot H)^\alpha \quad (4)$$

它是由 Jim Blinn 于 1977 年^[12]对传统 Phong BRDF 模型进行修改而提出的。在该模型中,反射光的分布不是一个常数,对每一个入射角,在理想镜面反射方向上集中着高光。它混合了 Lambert BRDF 的漫反射部分和标准的镜面高光(由参数 k_s 和 α 控制)部分,用来绘制有光泽的物体,绘制效果更柔和、平滑。此外绘制速度比 Phong BRDF 快。

图 13 是不同的 BRDF 经验模型的绘制效果^[13]。

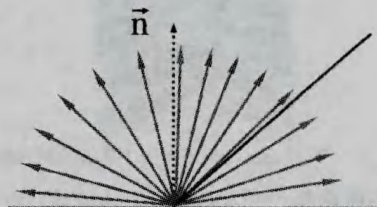


图 11 Lambertian BRDF 示意图

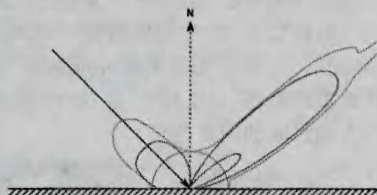


图 12 Phong BRDF 示意图



左:Lambertian 中:Phong 右:Blinn-Phong

图 13 BRDF 之经验模型绘制效果

(ii)基于物理的模型(Physical-based Models)。该模型是根据物体的几何和光学特性来描述反射比的模型,参数具有物理意义。具体的模型有 Torrance-Sparrow BRDF^[14,15]、Fresnel Term Model 和 Ward Model^[16]。

Torrance-Sparrow BRDF 是从亚宏观结构绘制物体表面质感,将物体表面看作由很多的微平面构成,每个微平面具有镜面反射效果,最终实现更具真实感的表面质感绘制效果。该模型可以表示为式(5):

$$f_r = \frac{DGF}{\pi \cos \theta_i \cos \theta_o} \quad (5)$$

其中, D 表示微平面分布函数(Beckmann distribution factor),返回的是“给定方向上的微平面的分布值”; G 是几何衰减系数(Geometric attenuation term),用来表示微平面对自遮挡的影响情况; F 是 Fresnel 反射系数(Fresnel reflect term),表示反射方向上的光强占原始光强的比率。表示微平面分布情况的

的 $D = \frac{e^{-\left(\frac{\tan \beta}{m}\right)^2}}{4m^2 \cos^4 \beta}$ 。其中的参数 m 用于度量表面的粗糙程度,较大的 m 值对应于粗糙表面,较小的 m 值对应较光滑的表面; β 是顶点法向量 N 和半角向量 H 的夹角。

微平面与光的交互可能有 3 种情况:入射光未被遮挡,此

时到达人眼睛的光强为 1; 入射光被部分遮挡; 反射光部分被遮挡。几何衰减系数 G 即为到达人眼睛的反射光的最小强度。 $G = \min(1, G_1, G_2)$, 其中 $G_1 = \frac{2(N \cdot H)(N \cdot L)}{V \cdot H}$, $G_2 = \frac{2(N \cdot H)(N \cdot V)}{V \cdot H}$ 。

F 描述的是理想光滑表面的反射情况。 F 的一个近似计算由 Schlick 给出, 其精度在 1% 范围内, 如式(6)所示:

$$F = f_0 + (1 - f_0)(1 - V \cdot H)^5 \quad (6)$$

f_0 为入射角度接近 0 度(入射方向无限靠近法向量)时的 Fresnel 反射系数。

图 14^[17]是采用 Torrance-Sparrow BRDF 进行绘制的效果。



图 14 Torrance-Sparrow BRDF 的绘制效果

(iii)数据驱动模型(Data-driven Models)^[18]。该模型是基于采集得到的数据来描述反射比的模型。该类模型的特点是需要 BRDF 数据采集设备(图 15^[19-21]是部分 BRDF 采集设备);采集得到的数据量大,常常需要数据压缩算法压缩大数据;容易丢失高光部分,需要插值数据完成绘制;需要采用降维的方法来计算低维流形。图 16^[22]是 Matusik 等利用采集设备获取的 100 种材质的图片效果。



图 15 部分 BRDF 采集设备

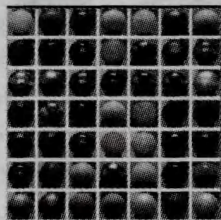


图 16 BRDF 采集得到的 100 种材质的图片效果

(iv)其它模型。其它模型有 Oren-Nayar Model^[23]、Poulin-Fournier Model^[24]、Wave optic related Model 和基于衍射理论的模型^[25]。Oren-Nayar Model 将微平面处理为 Lambertian 反射而不是镜面反射。Poulin-Fournier Model 用一组平行的柱面表示微平面的法向,能表现各向异性的效果。基于衍射理论的模型则计算复杂度太高,图 17^[25]是点光源下采用该模型得到的绘制效果。



图 17 基于衍射理论模型的绘制效果

无论哪种具体的 BRDF 模型都必须满足如下条件:

(i)满足能量守恒条件。能量守恒的数学化描述如式(7)所示:

$$Q_{incoming} = Q_{reflected} + Q_{absorb} + Q_{transmitted} \quad (7)$$

根据能量守恒,有式(8)的结果:

$$Q_{reflected} \leq Q_{incoming} \quad (8)$$

进一步可以得到式(9)的结果:

$$\int_{\Omega} f(\omega_i \rightarrow \omega_o) \cos \omega_o d\omega_o \leq 1 \quad (9)$$

所有的 BRDF 都要满足式(9)的条件。

(ii)满足可逆性。即当入射角度和出射角度交换时是不产生任何影响的,如式(10)所示:

$$\int_r f(\omega_i \rightarrow \omega_o) = \int_r f(\omega_o \rightarrow \omega_i) \quad (10)$$

这就是著名的 Helmholtz 相互作用。

(iii)满足绘制方程。绘制方程如式(11)所示:

$$L_r = \int_{\Omega} f(\omega_i \rightarrow \omega_o) L(\omega_i) \cos \omega_i d\omega_i \quad (11)$$

总之, BRDF 在绘制单材质表面的光照反射分布情况时效果较好,如图 18 所示^[10,26]。它可以较真实地反映材质在各种光照条件下的表面质感,并且可以绘制出现时世界中可能并不存在的材质的光照现象,但在表征物体表面质感方面还存在很多不足,不能表征现实存在的所有物体。

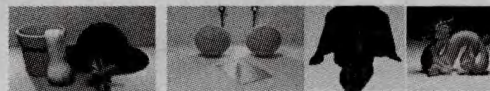


图 18 单材质物体的 BRDF 绘制效果

(2)SVBRDF 模型。该模型可以表示物体表面纹理的空间依赖性,可以描述多材质物体表面的反射属性。由于引入了空间变化量,使其采集设备变得复杂,采集得到的数据量更加庞大。具体的 SVBRDF 模型可以分为两类:(i)基于参数化解析式的模型^[27];(ii)基于数据驱动模型^[28]。图 19^[26,29,30]是对多材质物体的 SVBRDF 绘制效果。



图 19 多材质物体的 SVBRDF 绘制效果

但是 BRDF 的特性约束了 SVBRDF 的应用,使得 SVBRDF 只能表示接近平面和不透明的物体^[8]。而且怎样将其与现有的绘制系统整合在一起也是需要研究的问题之一^[31,32]。

(3)BSSRDF 模型。该模型可以表征物体次表面散射的情况,即表征了光线在物体表面一个点入射后却在不同点反射出去的现象,可以绘制半透明的表面质感效果。该模型如式(12)所示:

$$S(\lambda, x_i, y_i, \theta_i, \phi_i, x_o, y_o, \theta_o, \phi_o) = \frac{dL(x_o, y_o, \theta_o, \phi_o)}{dE(x_i, y_i, \theta_i, \phi_i)} \quad (12)$$

但是, BSSRDF 是一个 9 维函数,在直接使用 BSSRDF 进行数据采集时会带来巨大的困难。对 9 维空间数据进行稠密采样也是很复杂的过程。于是很多的逼近模型和算法被提出来, Jensen 等人提出了一个简单的关于齐次同质的 BSSRDF 分析模型^[33]。后来该分析模型被发展更新为可以绘制齐次同质的多层材料的物体表面质感^[34]。如何有效地采集数据和对数据进行压缩,以及 BSSRDF 采样时关于入射和出射方向的有限的解析度等都是研究的重要问题^[10]。图 20^[10,35]是利用 BSSRDF 绘制的效果。



图 20 BSSRDF 绘制效果

(4)TSVBRDF(Time-Spatially Varying BRDF)模型。该模型可以描述随时间变化而产生化学变化的材质表面例如金属氧化、果皮腐烂等的反射属性。TSVBRDF 的数据采集涉及到时间维度,要求采集设备能够快速地进行数据采集。Gu 等^[36]快速获取材质随时间变化的反射属性,提出了一种具有时间变化和空间变化特性的数据分析模型。图 21^[36]是 Gu 等提出方法的绘制效果。Sun 等^[37]对油漆颜料、潮湿粗糙的泥土、灰尘等随时间变化的材质进行获取、建模和绘制。图 22^[37]是随时间变化灰尘积累过程的绘制效果。Wang 等^[38]对单材质的木门的风化程度进行 BRDF 建模,通过对不同数据进行插值得到木门的 TSVBRDF 模型。图 23^[38]是对木门的风化过程进行绘制的效果(左侧为采集的图像,中间和右侧是根据模型推测出来的随时间风化的绘制效果)。



图 21 TSVBRDF 绘制效果



图 22 灰尘积累过程的绘制效果



图 23 木门风化过程的绘制效果

总之,随时间变化的材质,比如金属氧化、古建筑长期受风吹日晒雨淋带来的材质变化等都可以用 TSVBRDF 模型进行建模和绘制。

(5)BTF 模型。该模型针对物体表面的微小几何细节进行绘制,逼真再现表面质感绘制中的自阴影、自遮挡的效果。BTF 通过采集大量不同光照和不同视点下的图像,利用基于图像的绘制技术呈现物体表面的微观几何结构和光照特性。采集设备如图 24^[39-41]所示。Columbia 大学和 Utrecht 大学的研究人员在网上联合发布了一个 BTF 的采样样本库 CU-ReT^[14]。图 25^[9]是采用 BTF 进行绘制的效果。



图 24 BTF 模型的采集设备



图 25 BTF 绘制效果

关于 BTF 的主要研究内容包括:

(i)根据 BTF 建立数学模型描述物体表面^[42,43]。

(ii)根据 BTF 识别物体表面材质^[44]。

(iii)对 BTF 数据进行压缩^[45]。对于 BTF 的压缩处理方法,最早是通过统计模型(包括直方图模型^[42]和相关度模型^[43])进行绘制,但是绘制的速度很慢。后来用矩阵分解的方法进行压缩,如文献^[46]所提。文献^[47]则使用了张量分解的方法。

总之,BTF 能够逼真地绘制物体表面的纹理,成为了现阶段主要的高级纹理建模方法^[8],它既可以表征物体的几何结构又可以表征物体表面的光线传输特性^[8]。应用 BTF 这种高级纹理表示方法可以产生精确的具有照片真实感的物体表面,在可视化安全模拟、汽车航空等工业领域的内部设计、建筑、皮肤医学领域^[8]等得到了有效的应用。BTF 可以描述真实世界物体表面在各种条件下的复杂变化,可以表征大多数现实世界物体的表面质感。

以上是对 5 种从提出至今比较热门的表征物体表面质感的模型的介绍,它们有各自的特点和适用范围,需要根据具体的使用需求选择不同的模型。

3 表面质感绘制的主要应用领域

表面质感绘制的目标是生成高度逼真的真实感图形。在满足一定实时绘制的前提下,表面质感绘制的主要应用领域是影视制作等,具体如下所述:

(1)影视制作。人们对影视特效的需求是推进表面质感绘制发展的原动力。已有的成果如电影《泰坦尼克号》中沉船的场景^[48]。图 26^[49,50]所示的是在电影《Matrix》中实现的绘制效果。



图 26 电影《Matrix》中的表面质感绘制效果

(2)游戏产业。游戏的视觉沉浸感和真实感决定了游戏玩家对游戏的喜爱程度。图 27、图 28 所示的是在满足一定实时绘制的前提下,表面质感绘制在各种游戏中的应用效果。



图 27 球类游戏中的表面质感绘制效果



图 28 射击类游戏中的表面质感绘制效果

(3)虚拟设计。具有高度真实感的可交互的三维虚拟设计成为发展潮流。可以提供沉浸式的体验设计环境,在产品开发的各个阶段可以进行设计仿真,虚拟装配,有效地缩短了研发周期和降低了研发成本。比如可以真实感绘制不同灯光条件下对室内不同材质物体的照明效果等^[48]。图 29^[9]、图 30^[9]是虚拟设计的绘制效果。



图 29 室内虚拟设计效果图



图 30 使用不同材质进行汽车内部设计的绘制效果

(4) 文化遗产保护。法国卢浮宫、伦敦博物馆、国际奥委会奥林匹克博物馆、中国国家博物馆、中国故宫博物院等相应完成了数字化文化遗产保护工作,如图 31^[51,52]所示,表面质感绘制起了重要作用。



图 31 表面质感绘制在文化遗产保护方面的绘制应用

结束语 综上,关于物体表面质感的模型建立和绘制应用是计算机真实感图形学领域的重要研究方向,前人已经做了大量卓有成效的研究工作。表征物体表面质感的一般模型 GRF 虽然可以描述光线和物体表面相互作用的所有可能效果和情况,但是它的高维数决定了目前还没有可用的价值。简化的低维的具体模型在适用的范围得到了很好的绘制性能和效果。BRDF 模型在单材质物体表面质感的绘制上表现出良好的效果。SVBRDF 模型在绘制多材质物体表面质感上展示出了优势。BSSRDF 模型则更好地绘制了半透明物体的次表面散射效果。TSVBRDF 在绘制随时间变化会产生化学变化的物体表面质感中表现了很强的真实度。BTF 模型则能逼真绘制自阴影、自遮挡效果,是目前为止最流行的高级表面质感绘制算法。但是,无论采用何种具体的表面质感绘制模型,如何有效地采集数据,如何对数据进行压缩和采样,如何进行高效的逼真的绘制等都是研究的重点和热点。

而且,随着计算机硬件 GPU 等的发展,并行绘制成为主流,各种绘制引擎不断涌现:2005 年 Pixar 公司研制出利用 GPU 加速的电影重光照系统 Lpics^[53];2007 年 MIT 和工业光魔公司联合开发了基于 GPU 的 Lightspeed 重光照系统^[35];2009 年周昆等开发了完全基于 GPU 的 Reyes 绘制器 RenderAnts^[54];2010 年英伟达公司(NVIDIA)与 Weta Digital 联合开发了用于加速可见性计算机的外存并行光线跟踪器 PantaRay^[55];2010 年英伟达公司(NVIDIA)开发了基于 GPU 的通用光线跟踪引擎 OptiX^[56]。将表面质感绘制与实时绘制紧密有效地融合,将真实感表面质感绘制和现有的并行绘制引擎应用绑定,可把该领域的研究推向一个新的高峰。期待表面质感绘制研究在理论和实际应用领域得到更佳的发展。

参考文献

[1] 王嘉平. 基于数据驱动的表面质感建模与绘制[D]. 北京:中国科学院研究生院,2007
[2] 杨健. 真实感物体表面细节绘制方法[D]. 杭州:浙江大学,2006

[3] Liu Xin-guo, Yu Yi-zhou, Shum H-Y. Synthesizing bidirectional texture functions for real-world surfaces[C]// Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques-SIGGRAPH. 2001:97-106
[4] Dana K J, van Ginneken B, Nayar S K, et al. Reflectance and texture of real-world surfaces[J]. ACM Transactions on Graphics, 1999, 18(1): 1-34
[5] Xiao D H, Torrance K E, Sillion F X, et al. A comprehensive physical model for light reflection[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1991, 25(4): 175-186
[6] Koenderink J J, van Doorn A J, Stavridi M. Bidirectional reflection distribution function expressed in terms of surface scattering modes[C]// Computer Vision-ECCV 1996, Lecture Notes in Computer Science. Volume 1065, 1996: 28-39
[7] Cook R L, Torrance K E. A reflectance model for computer graphics[J]. ACM Transactions on Graphics, 1982, 1(1): 7-24
[8] JiriFilip, Haindl M. Bidirectional texture function modeling, as-tate of the art survey[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(11): 1921-1940
[9] Haindl M, Filip J. Advanced Textural Representation of Materials Appearance[C]// Proceeding SA'11 SIGGRAPH Asia 2011 Courses. New York, 2011
[10] Weyrich T, Lawrence J, Hendrik Lensch, et al. Principles of appearance acquisition and representation [J]. Foundations and trends® in Computer Graphics and Vision, 2009, 4(2): 75-191
[11] Dana K J. BRDF/BTF measurement device[C]// Computer Vision. Proceedings of the 8th IEEE International Conference. IC-CV 2001. (Volume 2), 2001: 460-466
[12] Blinn J F. Models of light reflection for computer synthesized pictures[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1997, 11(2): 192-198
[13] <http://www.cnblogs.com/cxrs/archive/2010/01/10/1643515.html>
[14] Cook R L, Torrance K E. A reflectance model for computer graphics[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1981, 15(3): 307-316
[15] http://blog.csdn.net/liu_lin_xm/article/details/4845977
[16] Ward G J. Measuring and modeling anisotropic reflection[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1992, 26(2): 265-272
[17] <http://f.hatena.ne.jp/frosten/20100411160639>
[18] Matusik W, Pfister H, Brand M, et al. A data-driven reflectance model[J]. ACM Transactions on Graphics-Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2003, 22(3): 759-769
[19] White D R, Saunders P, Bonsey S J, et al. Reflectometer for measuring the bidirectional reflectance of rough surfaces[J]. Applied Optics, 1998, 37(16): 3450-3454
[20] [http://nlcc.hust.edu.cn/%E5%8F%8C%E5%90%91%E5%8F%8D%E5%B0%84%E5%88%86%E5%B8%83%E5%87%BD%E6%95%B0\(BRDF\)%E6%B5%8B%E9%87%8F%E8%A3%85%E7%BD%AE/index.jhtml](http://nlcc.hust.edu.cn/%E5%8F%8C%E5%90%91%E5%8F%8D%E5%B0%84%E5%88%86%E5%B8%83%E5%87%BD%E6%95%B0(BRDF)%E6%B5%8B%E9%87%8F%E8%A3%85%E7%BD%AE/index.jhtml)[OL]
[21] Weyrich T, Matusik W, Pfister H, et al. Analysis of human faces using a measurement-based skin reflectance model[J]. ACM Transactions on Graphics-Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2006, 25(3): 1013-1024
[22] Matusik W. A data-driven reflectance model[D]. Massachusetts

- [23] Oren M, Nayar S K. Generalization of lambert's reflectance model[C]//Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH, 1994; 239-246
- [24] Poulin P, Fournier A. A model for anisotropic reflection [J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1990, 24(4); 273-282
- [25] Alias J S. Diffraction shaders[C]//Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH, 1999; 101-110
- [26] 胡勇, 沈旭坤. 真实感材质建模技术与新媒体艺术[C]//自主创新与持续增长第十一届中国科协年会论文集, 2009; 93-98
- [27] Goldman D B, Curless B, Hertmann A, et al. Shape and spatially-varying BRDFs from photometric stereo[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(6); 1060-1071
- [28] Lawrence J, AnerBen-artzi, Christopher DeCoro, et al. Inverse shade trees for non-parametric material representation and editing[J]. ACM Transactions on Graphics-Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2006, 25(3); 735-745
- [29] Wang Jia-ping, Zhao Shuang, Tong Xin, et al. Modeling anisotropic surface reflectance with example-based microfacet synthesis[J]. ACM Transactions on Graphics-Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2008, 27(3); 41
- [30] Ren Pei-ran, Wang Jia-ping, Snyder J, et al. Pocket reflectance [J]. ACM Transactions on Graphics-Proceedings of ACM SIGGRAPH 2011, 30(4); 45
- [31] Lawrence J, Rusinkiewicz S, Ramamoorthi R. Efficient BRDF importance sampling using a factored representation[J]. ACM Transactions on Graphics-Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2004, 23(3); 496-505
- [32] Clarberg P, Jarosz W, Akenine-Möller T, et al. Wavelet importance sampling; efficiently evaluating products of complex functions[J]. ACM Transactions on Graphics-Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2005, 24(3); 1166-1175
- [33] Jensen H W, Marschner S R, Levoy M, et al. A practical model for subsurface light transport[C]//Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2001; 511-518
- [34] Donner C, Jensen H W. Light diffusion in multi-layered translucent materials[J]. ACM Transactions on Graphics-Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2005, 24(3); 1032-1039
- [35] Ragan-Kelley J, Kilpatrick C, Smith B W, et al. The lightspeed automatic interactive lighting preview system[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3); 25
- [36] Gu Jin-wei, Tu C-I, Ramamoorthi R, et al. Time-varying surface appearance; acquisition, modeling and rendering [J]. ACM Transactions on Graphics-Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2006, 25(3); 762-771
- [37] Sun Bo, Sunkavalli K, Ramamoorthi R, et al. Time-varying BRDFs[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(3); 595-609
- [38] Wang Jia-ping, Tong Xin, Lin S, et al. Appearance manifolds for modeling time-variant appearance of materials[J]. ACM Transactions on Graphics-Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2006, 25(3); 754-761
- [39] Dana K J, Wang Jing. Device for convenient measurement of spatially varying bidirectional reflectance[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2004, 21(1); 1-12
- [40] Neubeck A, Alesny A, Van Gool L. 3D texture reconstruction from extensive BTF data[C]//Texture 2005 Workshop in conjunction with ICCV 2005. October 2005; 13-19
- [41] Muller G, Bendels G H, Klein R. Rapid synchronous acquisition of geometry and appearance of cultural heritage artefacts[C]//Proceedings of the 6th International conference on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage. VAST'05. 2005; 13-20
- [42] Dana K J, Nayar S K. Histogram model for 3D textures [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 1998; 618-624
- [43] Dana K J, Nayar S K. Correlation model for 3D texture [C]//Proceedings of 7th IEEE International Conference of Computer Vision (ICCV). 1999; 2; 1061-1066
- [44] Leung T, Malik J. Representing and recognizing the visual appearance of materials using three-dimensional textons[J]. International Journal of Computer Vision, 2001, 43(1); 29-44
- [45] Liu Xin-guo, Hu Yao-hua, Zhang Jing-dan, et al. Synthesis and rendering of bidirectional texture functions on arbitrary surfaces [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2004, 10(3); 278-289
- [46] Nishino K, Sato Y, Ikeuchi K. Eigen-texture method; appearance compression based on 3D model[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1999, 1; 618-624
- [47] Furukawa R, Kawasaki H, Ikeuchi K, et al. Appearance based object modeling using texture database; acquisition, compression and rendering[C]//Proceedings of the 13th Eurographics workshop on Rendering, 2002; 257-266
- [48] 赵沁平, 郝爱民, 王莉莉. 实时三维图形技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012
- [49] http://opus.aring365.com/picture_coputer/2005-11-07/1131297481d85874_1.html
- [50] <http://www.deathfall.com/forums/content.php?3237-Measured-BRDF-in-Film-Production>
- [51] <http://www.chnmuseum.cn/Default.aspx?TabId=138&InfoID=82318&frtid=40&AspxAutoDetectCookieSupport=1>
- [52] Malzbender O, Gelb D, Wolters H. Polynomial texturemaps [C]//SIGGRAPH'01 Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2001; 519-528
- [53] Pellacini F, Vidimce K, Lefohn A, et al. Lpicks: a hybrid hardware-accelerated relighting engine for computer cinematography [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3); 464-470
- [54] Zhou Kun, Hou Qi-ming, Ren Zhong, et al. RenderAnts; interactive REYES rendering on GPUs [J]. ACM Transactions on Graphics-Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia, 2009, 28(5); Article 155
- [55] Pantaleoni J, Fascione L, Hill M, et al. PantaRay; fast ray-traced occlusion caching of massive scenes[J]. ACM Transactions on Graphics-Proceedings of SIGGRAPH, 2010, 29(4); 37
- [56] Parker S G, Bigler J, Dietrich A, et al. OptiX: a general purpose ray tracing engine[J]. ACM Transactions on Graphics-Proceedings of SIGGRAPH, 2010, 29(4); 66