

· 综述 ·

基于BRDF的物体表面的外貌复现研究

宋凌南

(浙江大学光电信息工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要: 物体全外貌的测量和复现是目前颜色视觉领域的重要研究方向之一。主要讨论了对于反射性物体表面的外貌复现研究及其相关发展,介绍了基于BRDF测量和建模的全外貌描述手段,总结综述了近年来该领域取得的研究成果,并在最后对该领域的发展方向进行了展望。

关键词: 物体全外貌;颜色测量;BRDF模型;光泽度;纹理;计算机图形学;渲染语言

中图分类号:O432 文献标识码:A 文章编号:1673-1255(2013)-04-0010-06

Research on Appearance Reproduction of Object Surface Based on Bidirectional Reflectance Distribution Function

SONG Ling-nan

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Measurement and reproduction of object total appearance is one of the important research subjects color vision field. The appearance reproduction research and relative development of reflective object surfaces are discussed. Total appearance description methods are introduced based on bidirectional reflectance distribution function (BRDF) measurement and simulation. Research results of the field in recent years are summarized. Development trends of the field are forecasted finally.

Key words: object total appearance; color measurement; bidirectional reflectance distribution function (BRDF) model; gloss; texture; computer graphics; shading language

测量颜色是目前评估物体外貌的主要方法。研究表明,对于大部分具有金属光泽的材料,样品间颜色差异的视觉感知与三种不同几何测量条件下得到的颜色差异的加权平均有较大相关性^[1-2]。对于具有较强反射特性的表面而言,颜色随测量的几何条件变化而变化,故对于这类物体表面,若仅作颜色的测量显然不符合基于人眼视觉系统的评价标准,从而不足以评价其总体外貌。

物体总体外貌的概念最早由 Hutchings^[3]提出,将总体外貌概念与食物的颜色、香味、味觉和口感相关联,进而将其引入到描述物体和场景的外貌中。基于 Hutchings^[3]、Caivano^[4]和 Lozano^[5]工作的基础,

国际照明委员会(CIE, commission internationale de l'éclairage)规定了表征物体外貌的四个参量,即颜色、光泽度、透明度和纹理^[6]。英国国家物理实验室(NPL, national physical laboratory)对物体总体外貌的定义是:包含颜色、光泽度、透明度和纹理的统一,是由照明角度、颜色、照度水平和观察角度所组成的函数^[7]。获取完整的物体外貌信息,则需要以多种照明和探测条件下的测量为前提。

对于物体全外貌的测量和复现是目前颜色视觉领域的重要研究方向之一。其研究目标在于利用多角度测量获取的大量数据,结合计算机图形学中的光照模型及纹理映射方法等,在显示设备上完整的复现

收稿日期:2013-05-07

基金项目:浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)项目(2012R403003);浙江大学第十五期大学生科研训练计划(SRTP)校级项目

作者简介:宋凌南(1991-),女,湖北人,学士,主要研究方向为颜色科学。

具有反射特性的物体表面外貌,并尽可能的还原人眼视觉系统在观察相应真实物体时的视觉体验。

文中从实现全外貌测量和复现的一般方法出发,综述该领域的发展历史,以及几年的研究成果及有待解决的问题,并对这一领域的应用前景及未来研究方向进行展望。

1 理论基础

1.1 BRDF双向反射分布函数

描述物体全外貌,通常需要借助物体的双向反射分布函数(BRDF, bidirectional reflectance distribution function)^[8]。BRDF描述的是一个表面上入射和反射通量之间的关系,其定义为方向性入射辐射度与方向性反射辐射度的比值,如式(1)所示,相关参量列于表1中。

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i) / dE_i(\theta_i, \varphi_i)(sr^{-1}) \quad (1)$$

式中,下标*i*表示该量与入射的辐射通量有关,下标*r*表示该量与反射的辐射通量有关,*d*表示微分量;*L_r*表示反射方向辐射度,*E_i*表示入射方向辐亮度。明显的,*f_r*的量纲为球面度的倒数。BRDF在物理上表征了在规定的入射和出射方向上,单位角度对应的散射光量^[9]。

表1 BRDF相关参量的含义

符号	名称	单位
θ	轴向角	rad
φ	方位角	rad
<i>E</i>	辐照度	W/m ²
<i>L</i>	辐射度	W/sr·m ²
Θ	辐通量	W
<i>dω</i>	立体角	sr
<i>dA</i>	表面微元	m ²

如图1所示,BRDF与观察和照明角度有关。光线从 (θ_i, φ_i) 方向入射照明一个表面微元*dA*,照明立体角是*dω_i*,反射方向是 (θ_r, φ_r) ,反射立体角为*dω_r*。

根据式(1)对BRDF的定义,可以推导得到BRDF的表达式为

$$f_r = \frac{\Theta_r/d\omega_r/dA/\cos\theta_r}{\Theta_i/dA} = \frac{\Theta_r}{\Theta_i d\omega_r \cos\theta_r} \quad (2)$$

在实际的测量过程BRDF应该是波长的微分方程。为了简洁起见,上面的表述中省略了BRDF与波长的相关性^[10]。

此外,对于以朗伯体为参照的测量中,表面的BRDF特性也常以单位立体角待测表面与标准表面光辐射量之比,即双向反射因子(BRF, bidirectional reflection factor)的形式给出^[11]

$$e_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{d\Theta_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{d\Theta_r^{id}(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{f_r^{id}(\theta_i, \varphi_i)} = \pi f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \quad (3)$$

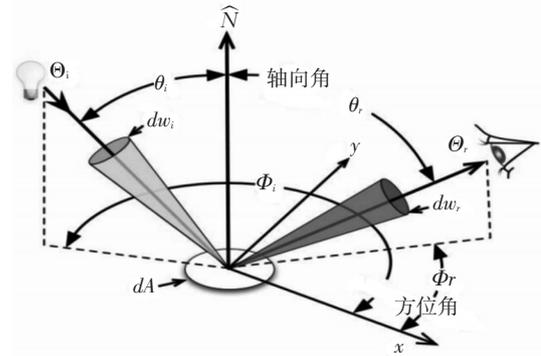


图1 BRDF与观察和照明角度之示意图

1.2 BRDF光照模型

在实际情况中,可以通过大量的测量数据并结合计算机图形学中用于表面渲染的光照模型拟合得到物体的BRDF。BRDF光照模型主要分为经验模型和物理模型两类。

经验模型也被称作现象模型,并不以建立光在物体表面的反射或散射的精确物理模型为目的,而是致力于用尽可能少的变量构造函数,将这些变量与具体的观察条件关联起来,对物体表面的BRDF特性,实现效果最优的拟合。不同于物理模型,经验模型中选择变量的原则是拟合效果最优化,不要求其具有一定的物理含义。Phong模型^[12]和Ward模型^[13]是从测量数据推导出来的两个常用经验模型。

物理模型是基于光学及电磁波学的理论,经过合理近似和复杂推证导出的模型,因此,模型中的变量表征着物体表面的光学特性,是具有具体物理含

义的。1967年,基于几何光学及微镜面假设(micro-facets assumption)的Torrance-Sparrow模型^[14]首次被提出,之后Blinn在此基础上通过改变镜面分布函数对其进行了优化^[15],该模型相对于经验模型的优势体现在其对于粗糙表面的模拟效果,但由于计算量的显著增加,其渲染速度较慢;20世纪90年代,随着硬件设备的性能提升,产生了一系列更为复杂的模型,其中1991年提出的He-Torrance-Sillion-Greenberg模型^[16]以及1997年将传统Phong模型一般化的Lafortune模型得到了比较广泛的应用^[17]。该模型基于物理光学理论,对不同复杂度和光泽度的表面均可获得较好的模拟效果。

1.3 纹理映射函数

纹理是物体表面的固有特征之一,也是图像的一种重要区域属性。一般将纹理的基本元素称为纹理基元(texture primitive)或纹元(texture element)。由于纹理基元及其分布形态复杂多样,因此很难对纹理的精确定义形成统一的认识,目前尚无一个被广泛接受的纹理定义。一般认为,纹理是图像灰度或色彩在空间上的变化或重复。总体来说,纹理有粒度、方向性、周期、纹理强度、密度等描述参量^[18],其中纹理的粒度、方向性、周期是人眼视觉感受最为强烈的几个特征。纹理是区域属性,与观察尺度相关。也就是说,纹理研究需要确定一定的观察尺度,如尺度不同,则所观察到的纹理也可能不同^[19]。

早期对于纹理的处理方法是仅仅利用一幅或几幅纹理图像进行简单的纹理贴图。1999年,Dana^[20]首次提出描述物体表面纹理特性的双向纹理函数(BTF,bidirectional texture function),类似于BRDF,双向纹理函数BTF是照明和观察角度的函数。2001年,惠普(HP,hewlett-packard development company,L.P.)实验室的Malzbender采用多项式纹理映射(PTM,polynomial texture mapping)来重建图像每个像素在不同照明条件下的亮度^[21]。然而,这些模型没有将镜面反射分量直接加入到模型中,而是将镜面分量提取出来进行单独处理后再与漫射分量叠加,将两个反射光分量过分孤立而无法得到完整的BRDF模型。

金属光泽颜料外貌评价方法的研究始于McCamy^[22-23],将带有金属光泽颜料的样本外貌特性分为

两类:一种是宏观特性,在评价该种特性时,样本被放置在距离观察者3 m远处;另一种是微观特性,在评价该种特性时,样本被放置在距观察者1 m远处。他的研究表明,样本在漫射光照条件下测量或观测到的颜色、镜面光泽度、光泽(luster)和色彩变化指数(goniochromism)可作为评价样本宏观特性的参量,而样本的微观特性则由其视觉纹理决定。2007年,Kirchner^[24]对金属光泽颜料微观特性进行了定量研究,肯定了McCamy关于样本微观特性由视觉纹理确定的结论,并把视觉纹理具体化到两个指标,即样本在漫射光照条件下的粗糙度和在定向光照条件下的闪耀度。他把粗糙度和闪耀度划分为8个等级,每一级分别用一块中性色的参考样本表示,并分别在漫射光照条件和定向光照条件下,由观察者通过幅值估计法得到了测试样本的粗糙度和闪耀度。

2 研究现状

实现包括光泽、纹理等的表面全外貌复现,一般根据如图2的步骤进行。在Munsell颜色科学实验室基于艺术品表面特性仿真的技术报告中对流程中的相关细节及用于建模的相关参数有具体阐述^[25-27]。下面将就不同环节中相应的理论和技术在近几年中的发展现状进行简要综述。

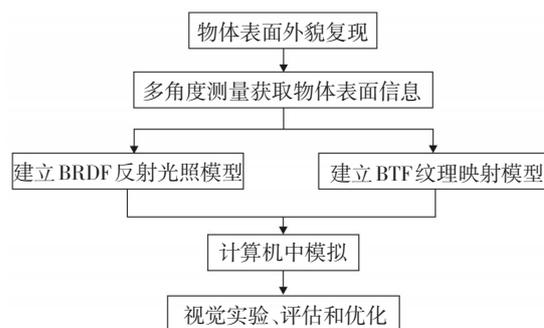


图2 物体表面全外貌复现流程

2.1 BRDF模型及其获取手段的发展

BRDF模型的研究和发展为更精确地复现物体外貌提供了理论基础。虽然早期提出的一些经典模型(如Phong模型)因其快速简单至今仍在图形图像及3D渲染领域得到广泛应用,然而仍有许多新提出的优化模型在模拟效果和适用范围上有了突出的进步。

2000年 Michael Ashikhmin 及 Peter Shirley 提出了新的 BRDF 经验模型^[28],该模型采用了经典的经验模型结构即漫反射与镜面反射两部分构成

$$\rho(k_1, k_2) = \rho_s(k_1, k_2) + \rho_d(k_1, k_2) \quad (4)$$

该模型主要由四个参数控制: R_s 用于描述垂直入射时反射比的镜面分量; R_d 用于描述材料表面镜面层以下“基底层”反射比漫射分量; n_u, n_v 类似于 Phong 中的高光指数,用于控制镜面反射高光的形状。

模型由下式描述

$$\rho_d(k_1, k_2) = \frac{28R_d}{23\pi}(1-R_s) \left(1 - \left(1 - \frac{(n \cdot k_1)}{2} \right)^5 \right) \quad (5)$$

$$(k_1, k_2) = \frac{\sqrt{(n_u + 1)(n_v + 1)}}{8\pi} \cdot \frac{(n \cdot k)^{n_u \cos^2 \varphi + n_v \sin^2 \varphi}}{(h \cdot k) \max((n \cdot k_1), (n \cdot k_2))} F((k \cdot h)) \quad (6)$$

其中,函数 F 为非涅尔公式的 Schlick^[29]近似式

$$F((k \cdot h)) = R_s + (1 - R_s)(1 - (k \cdot h))^5 \quad (7)$$

式中各参数的意义详见表2。

表2 Ashikhmin-Shirley 模型的相关参量

符号	意义
k_1	入射光方向的单位向量
k_2	观察者方向的单位向量
n	表面法线方向的单位向量
u, v	与法线垂直的一对正交的单位向量
h	角分线方向的单位矢量
$\rho(k_1, k_2)$	BRDF
$F(\cos \theta)$	对应于入射角 θ 的非涅尔反射比

该模型基于经典 Phong 模型,但却在许多方面具有其他经验模型不具备的优势:

- (1) 适用于各向异性材料表面的反射;
- (2) 遵循能量守恒定律及互反律;
- (3) 考虑了非涅尔现象,即视角靠近物体表面时反射明显增强的现象;

(4) 模型由少量参数控制,计算较为简单;

(5) 蒙特卡洛方法模拟可得到较令人满意结果。

全空间 BRDF (SVBRDF, spatial-varying BRDF) 的概念于 1977 年被首次提出^[30],即在原 BRDF 的基

础上增加了两个空间维度,构成描述材料表面空间各点对于各个人射出射角度的六维函数。由于测量和计算的复杂性,这一概念当时没有得到重视。21 世纪以来,计算机技术发展带来的计算水平的飞跃,使 SVBRDF 在图形学中的应用成为了可能,也推动了人们对于这一方向的研究探索。研究的目的在于尽可能地简化测量的复杂度使相关的测量设备能够在较短时间内获得所需要的数据,同时利用这些数据尽可能准确地复现材质表面外貌。Debevec^[31]和 Gardner^[32]等人尝试导出若干参数控制的全空间模型;Alldrind^[33], Goldman^[34]等人研究利用空间冗余进一步加速了测量过程;2010 年清华大学的董悦将流形上基于 bootstrapping 的半监督学习引入这一问题,在较少测量数据的基础上建立 SVBRDF 模型,实现了高分辨率的仿真^[35]。

虽然在测量和计算上都得到了一定的简化,这种方法仍是依赖于大规模的数据采集和数据处理,其成本和速度依然使其在工业上的大规模应用受到了局限。目前在如电影等追求较高精度且资金充足的产业中,多采用基于大规模数据采集的仿真手段,且通常需要辅助以高速度的计算设备。而在更广阔的艺术设计、游戏开发等领域,更多使用的仍是一些早期的模型,如 Phong 等。在 3DMax, Maya 等主流建模软件中,提供部分材质的高精度模型,方便设计者选择使用,但不能根据要求实时定制相应精度的模型。

2.2 渲染语言的发展

OpenGL 作为最广泛应用的硬件图形接口,是模拟物体表面外貌的常用工具。早期的 OpenGL 图形管线 (graphic pipeline)^[36]将图形硬件的底层编程能力封闭,图形硬件被设计成为以特定的顺序应用某些操作,且其中的许多处理环节,如对定点和片元的渲染等,都是统一按照流程操作不可编程的,从而大大限制了程序设计者的操作空间。在 OpenGL 2.0 之后的版本中,着色语言 (GLSL^[37], GL shading language) 被加入 OpenGL 的核心。GLSL 是专用于图形渲染的高级编程语言,其目的在于允许应用程序对在 OpenGL 处理管道中的关键点上发生的处理进行控制,从而管道中这些关键点被定义为可编程的。随着 GLSL 的出现,复杂的渲染手段将通过顶点着色器 (vertex shader) 和片元着色器 (fragment shader) 来实

现,从而模拟出细腻逼真的表面效果。

除了 GLSL,几乎同时产生的其他类 C 语法的着色语言还有 HLSL, Cg 等。HLSL^[38](high level shader language)是 Microsoft 开发的着色语言,仅供 Direct3D 使用,相应的标准为 Shader Model,其中包括可编程的顶点着色器(vertex shader)和像素着色器(pixel shader)。而 Cg^[39](C for Graphics)由 NVIDIA 开发,与 HLSL 极为相近。针对表面渲染的编程语言的发展为软件开发者提供了实用的设计工具。

2.3 应用与拓展

应用全外貌复现技术,并结合图像采集与识别、光学探测设备,可以构建出模拟真实表面的仿真视觉系统。2012年, Munsell 颜色科学实验室搭建了可模拟真实物体表面的视觉系统^[40],该系统能够实时捕获周围环境的变化,包括观察者观察角度的改变及包含系统与观察者的环境中光照条件的改变;并根据采集到的光照信息建立模拟真实环境的光源模型,并计算出该照明观察条件下的反射光强度;同时系统可以获取环境光中的光谱信息^[41],从而对显示器上的图像进行实时的多通道渲染。

所感觉到的“真实”或“虚假”,是基于身体上的感觉器官与周围环境的信息交换并对大脑产生相应的刺激而得以判断的。当人眼观察真实世界中的物体时,环境中的光源、物体的表面材质特性、观察者的位置三者构成彼此开放的视觉系统,而光则是三者之间传递信息的媒介。在该系统的作用下形成人眼观察到的图像。而当真实物体被显示器替代,即便上面显示的是原物体的图片,然而模拟的“物”与观察者、环境光源之间的交互被阻断,并不能带给观察者期望接收到的信息,故而不会有真实的感觉。而构建该视觉系统的目的则是将这种交互借助图像采集、识别及传感技术重新建立起来,给观察者“身临其境”的视觉体验。

3 总结与展望

随着计算机图形学中模型理论以及计算机运算速度的发展,可以预见人类的许多梦想在不久的将来都将成为现实。虽然目前在计算机中模拟三维场景已经不足为奇,但模拟场景的真实度和精确度却受到种种因素的制约。一方面普通计算机的运算速

度尚不能满足复杂的实时场景渲染,另一方面有关渲染真实物体表面的理论研究仍需要继续。从光学本质出发对物体表面的反射特性进行研究是获得真实复现效果的有效手段。相信在不断的钻研努力下,人类距离“虚拟现实”^[42]并不会很远。

参考文献

- [1] Saris H J A, Gottenbos R J B, van Houwelingen H. Correlation between visual and instrumental color differences of metallic paint films [J]. *Color Research and Application*, 1990, 15(4): 200-205.
- [2] ASTM E2194. Standard Practice for Multi-Angle Color measurement of Metal Flake Pigmented Materials[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2003.
- [3] Hutchings J B. Food Colour and Appearance[M]. London, UK: Blackie Academic & Professional, 1994.
- [4] Caivano J L. Cesia. A system of visual signs complementary color[J]. *Color Research and Application*, 1991, 16 (4): 258-267.
- [5] Lozano R D. A new approach to appearance characterization [J]. *Color Research and Application*, 2006, 31 (3): 164-167.
- [6] CIE Publ.175. A Framework for the Measurement of Visual Appearance[S]. Vienna: Central Bureau of the CIE, 2006.
- [7] Dekker N, Kirchner E J J, Super R, et al. Total appearance difference for metallic and pearlescent materials: contributions from color and texture[J]. *Color Research and Application*, 2011, 36(1): 4-14.
- [8] ASTM E1392-96. Standard Practice for Angle Resolved Optical Scatter Measurement on Specular or Diffuse Surfaces[S]. American Society for Testing and Materials, 1997.
- [9] Szymon R. A survey of BRDF representation for computer graphics[R/OL]. [2013-03-20]. <http://www.cs.princeton.edu/~smr/cs348c-97/surveypaper.html>.
- [11] Schaeppman-Strub G, Schaeppman M E, Painter T H, et al. Reflectance quantities in optical remote sensing: definitions and case studies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103 (1): 27-42.
- [12] Phong B T. Illumination for computer generated pictures[J]. *Communications of the ACM*, 1975, 18(6): 311-317.
- [13] Ward G J. Measuring and modeling anisotropic reflection [J]. *Computer Graphics (ACM)*, 1992, 26(2): 265-272.
- [14] Torrance K E, Sparrow E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces[J]. *Journal of Optical Society of America*, 1967, 57(9): 1105-1114.
- [15] Blinn J F. Model of light reflection for computer synthesized

- pictures[C]//Proceedings of ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics. New York: ACM, 1977: 192–198.
- [16] He X D, Torrance K E, Sillion F X, et al. A comprehensive physical model for light reflection[J]. *Computer Graphics*, 1991, 25(4): 175–186.
- [17] Lafortune Eric P F, Foo S, Torrance K E, et al. Non-linear approximation of reflectance functions[C]//Proceedings of ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics. New York: ACM, 1997:117–126.
- [18] Linnett L M, Carmicarl D R, Charke S J, et al. Texture analysis of sidescan sonar data[C]//Proceedings of IEE Seminar on Texture Analysis in Radar and Sonar. 1993: 1–6
- [19] LIU Xiao-ming. Summary of texture research[J]. *Application Research of Computers*, 2008, 25(8): 2284–2288.
- [20] Dana K J, Ginneken B V, Nayar S K, et al. Reflectance and texture of real-world surfaces[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1991,18(1): 1–34.
- [21] Malzbender T, Gelb D, Wolters H. Polynomial texture maps [C]//Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics. New York: ACM, 2001:519–528.
- [22] McCamy C S. Observation and measurement of the appearance of metallic materials. Part I. Macro appearance[J]. *Color Research and Application*, 1996, 21(4): 292–304.
- [23] McCamy C S. Observation and measurement of the appearance of metallic materials. Part II. Micro appearance[J]. *Color Research and Application*, 1998, 23(6): 362–373.
- [24] Dekker N, Kirchner E J J, Super R, et al. Total appearance difference for metallic and pearlescent materials: Contributions from color and texture[J]. *Color Research and Application*, 2011, 36(1):4–14.
- [25] Berns R S. Improving Artwork Reproduction Through 3D-Spectral Capture and Computer Graphics Rendering [R]. Rochester, New York, United States: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory, 2009.
- [26] Chen T, Taplin L A, Berns R S. Artist Material Database BRDF Fitting[R]. Rochester, New York, United States: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory, 2011.
- [27] Berns R S. Artist Material Database: prepared for Andrew W. Mellon Foundation[R]. Rochester, New York, United States: Rochester Institute of Technology, College of Science, Center for Imaging Science, Munsell Color Science Laboratory, 2012.
- [28] Ashikhmin M, Shirley P. An anisotropic PhongBRDF model [J]. *Journal of Graphics Tools*, 2000, 5(2):25–32.
- [29] Schlick C. An inexpensive BRDF model for physically-basedrendering[J]. *Computer Graphics Forum*,1994,13(3):233–246.
- [30] Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J, et al. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance[S]. Department Commerce, National Bureau of Standards, 1977.
- [31] Debevec P, Hawkins T, Tchou C, et al. Acquiring the reflectance field of a human face[C]//Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 2000:145156.
- [32] Gardner A, Tchou C, Hawkins T, et al. Linear light source reflectometry[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3):749–758.
- [33] Alldrin N, Zickle T, Kriegman D. Photometric stereo with non-parametric and spatially-varying reflectance[C]//Proceedings of the 26th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE, 2008:1–8.
- [34] Goldman D B, Curless B, Hertzmann A, et al. Shape and spatially-varying BRDFs from photometric stereo[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 341–348.
- [35] DONG Yue , WANG Jia-ping, TONG Xin, et al, Manifold bootstrapping for SVBRDF capture[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(4).
- [36] Rost R J. OpenGL Shading Language[M]. New York, USA: Addison Wesley Professional, 2006.
- [37] Fernandes A R. GLSL Tutorial[EB/OL]. (2003) [2013-03-20]<http://www.clockworkcoders.com/ogls/tutorials.html>.
- [38] Oneppo M. HLSL shading model 4.0: Proceedings of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques[C]. New York: ACM, 2007.
- [39] Mark W R, Glanville R S, Akeley K, et al. Cg: A system for programming graphics hardware in a C-like language [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3):896–907.
- [40] Darling B A, Ferwerda J A. Seeing virtual objects: Simulating reflective surfaces on emissive displays[C]//Proceedings of the 20th Color and Imaging Conference. L. A., California, USA:2012.
- [41] Darling B A, Ferwerda J A, Berns R S, et al. Real-time multi-spectral rendering with complex illumination[C]//Proceedings of the 19th Color and Imaging Conference. San Jose, California, USA:2011.
- [42] Virtual Reality Blog. Virtual Reality Concepts[EB/OL]. (2009) [2013-03-20]<http://www.vrs.org.uk/virtual-reality/concepts.html>.