

基于光谱的渲染技术及其在多光谱颜色再现中的应用

李宏宁 冯洁 杨卫平 白凤翔*

(云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650092)

摘要 多光谱成像技术是不同环境下高保真物体颜色再现的关键。在计算机图形学中,采用基于光谱的彩色渲染方法使成像的物理意义明确,比传统的红绿蓝(RGB)三通道彩色渲染方法在应用上有明显优势。讨论了多光谱成像的基本原理,分析了图形学中对成像模型所做的必要近似,并展示了光谱合成颜色的基本方法,介绍了所采用的多光谱渲染器实现方案以及实现上应该注意的问题。以4个实例,从不同方面分析了基于光谱的渲染技术在颜色评价、各种材料物体的外观再现、不同光源对物体表面颜色的影响以及材料反射率重建算法分析等的应用,展示了基于光谱的渲染技术广泛的应用前景。

关键词 光谱学;多光谱成像仿真;基于光谱的渲染;颜色再现;光谱反射率重建

中图分类号 O432.3

OCIS 100.0100 100.2960 300.0300

文献标识码 A

Spectral-Based Rendering Method and Its Application in Multispectral Color Reproduction

Li Hongning Feng Jie Yang Weiping Bai Fengxiang

(Department of Physics & Electronics, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650092, China)

Abstract Multispectral imaging technology is the key for high-fidelity reproduction of objects in various environments. In computer graphics, the rendering method based on multispectral has obvious advantages compared with those of the traditional three-channel red-green-blue (RGB) color rendering method because of the explicit physical meaning of imaging. The basic principle of multispectral imaging is discussed, and the necessary approximation in implementation of multispectral imaging model in computer graphics is analyzed, and a method to synthesize color from spectrum is provided. The multispectral imaging renderer and some problems of realization are simply introduced. Through four cases about color evaluation, object appearance reproduction with different materials, appearance effect of different illuminants and the algorithm of spectral reflectance reconstruction, and the applications of multispectral rendering method are presented.

Key words spectroscopy; multi-spectral imaging simulation; spectral-based rendering; color reproduction; reflectance reconstruction

1 引言

工业设计和产品开发中,物体的颜色和外观对于人们的感受非常重要,必须对产品的颜色和外观进行有效的控制和管理。在传统的产品开发过程中,颜色和外观主要是通过对试样或模型的观察而做出评价的。由于产品的颜色和外观严重依赖于照明条件、观察设备以及周边环境等因素,导致对产品模型和试样的评价主观性强,难于管理。另外,随着计算机图形学的发展,现在的产品开发可以通过制作虚拟的全数字化三维模型并在计算机屏幕上显示图像的方法来展示随着网络技术的发展,可以在不同地点同时进行产品的合作开发,即所谓的跨媒体颜色复制。这些因素都使得在计算机所提供的虚拟环境下精确的颜色及外观再现技

收稿日期: 2010-08-01; 收到修改稿日期: 2010-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(60968001, 60768002)和云南省自然科学基金(2009CD047)资助课题。

作者简介: 李宏宁(1975—),男,博士,讲师,主要从事多光谱成像模拟仿真技术和多光谱图像数据处理算法等方面的研究。E-mail: lihongning_ynnu@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: Baifx@ynnu.edu.cn

术的重要性凸显出来。现代色度学初步解决了颜色定量描述和测量的问题^[1]。在计算机图形学中,长期采用红绿蓝(RGB)颜色模式进行颜色的控制和展示,虽然能处理很多情况下的颜色问题,但是仅仅用3个控制量不足以重现各种照明条件以及多重反射下复杂的颜色变化情况^[2]。实际应用中,对颜色再现要求较高的场合,广泛采用5~7个不同波段滤光片组与单色CCD相机构成的多光谱设备^[3]对各种场景中的物体的光谱进行采集。近年来,研究者逐渐意识到以光谱信息进行场景渲染的必要性^[4],多光谱渲染技术逐渐成为了颜色研究的热点。

本文讨论了基于光谱的成像模型,以该模型为基础实现基于光谱的渲染器所做的必要的近似处理以及光谱/颜色的转换方法。通过具体的例子分析了该方法的有效性,同时也展现了多光谱渲染技术在成像模拟、表面反射率重建、光源光照效果和复杂物体颜色变化预测等方面的应用。

2 相关理论和系统实现

2.1 成像模型

场景中的物体反射周围环境(光源和其他物体)入射到其表面的辐射,被传感器(人眼或彩色成像系统)接收,传感器分辨出接收到的信号的光谱信息而得到物体的颜色。这个过程可以用图1表示。得到多光谱图像后,一方面依据相机光谱灵敏度和照明光源光谱信息可以重建出物体表面的光谱反射率;另一方面可以通过光谱/颜色合成算法得到该场景的彩色合成图像。

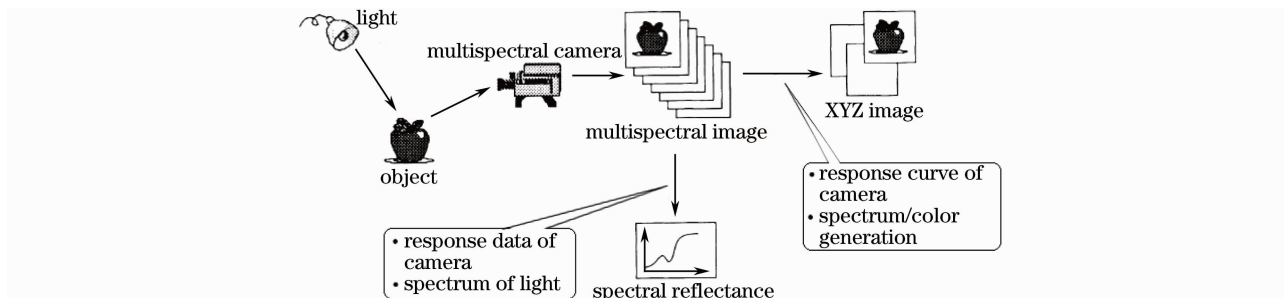


图1 多光谱成像方法的颜色的产生过程

Fig. 1 Schematic diagram of color production in multispectral imaging

一般情况下,以实验为基础的研究中,图1中光源、目标和相机是物理存在的,后续的反射率重建以及颜色生成过程通过计算完成。而多光谱成像模拟技术则将这三部分所涉及的设备 and 过程进行数字化建模,其光源、目标和相机模型的各种属性参数均可采用实验测量或理论计算的数据,通过计算模拟成像过程,生成最终的多光谱或彩色图像。这是一个基于物理原理的全数字化的过程,相对于传统方法在成像控制和成本上有明显优势。

对于被观测物体表面任意一点而言,周围环境辐射经过该点反射后进入探测器而使该点被“感知”到。在可见光与近红外波段,忽略大气作用时,该过程可表述^[5]为

$$L(x, \theta_v, \varphi_v, \lambda) = \int_{\Omega} f_r(x, \theta, \varphi, \theta_v, \varphi_v, \lambda) L_i(x, \theta, \varphi, \lambda) \cos \theta d\omega, \quad (1)$$

式中 $L(x, \theta_v, \varphi_v, \lambda)$ 是从 x 点发出的朝向观察方向 (θ_v, φ_v) 的辐射; $L_i(x, \theta, \varphi, \lambda)$ 是从方向 (θ, φ) 入射到 x 点的辐射; Ω 是 x 点所在表面的半球空间; $f_r(x, \theta, \varphi, \theta_v, \varphi_v, \lambda)$ 是双向反射率分布函数(BRDF),决定于材料 x 点的反射特性, $d\omega$ 为立体角元。以上各项均按波长 λ 分布。

(1)式从物理上描述场景中物体表面上任意一点反射了周围环境的辐射之后被探测器接收到的辐射光谱分布,由于表面半球空间的任意方向都可能影响物体表面,(1)式用双向反射率分布函数 f_r 来计算不同入射和出射对该点的影响。由于实验测量双向反射率分布的诸多限制,因而针对不同的应用提出了多种理论和半实验的双向反射率分布模型^[6],用于简化计算。

由于(1)式需要对材料表面半球空间 Ω 进行积分,需要知道材料的双向反射率分布函数,这在计算上比较困难。本文采用计算机图形学常采用的方法,将该积分分解为对环境分量、漫反射分量和镜面分量的求和^[7]。对于存在 n 个光源的场景,场景中的任意一点光谱能量分布为

$$L_{\text{tot}}(\lambda) = a_{\text{glob}}(\lambda)m_{\text{amb}}(\lambda) + \sum_{k=1}^n c_{\text{spot}}(\lambda) \{L_{\text{amb}}(\lambda) + d[L_{\text{diff}}^k(\lambda) + L_{\text{spec}}^k(\lambda)]\}, \quad (2)$$

式中 L_{tot} 为被观察点的光照强度, L_{amb} 为环境分量, L_{diff} 为漫反射分量, L_{spec} 为镜面分量, c_{spot} 为光源光照因子, 表示不同类型的光照效果; d 为衰减控制因子, 用于控制光照的范围; a_{glob} 为全局光源, m_{amb} 为环境材质参数, 这两项相乘用于模拟来自周围的恒定背光。

图形学中的渲染就是运用(2)式生成图像的过程。传统的渲染器通常采用将(2)式按 R,G 和 B 三个通道进行运算, 得到物体表面的 RGB 颜色值在屏幕上显示; 本文将渲染过程扩展为按指定的波段进行积分, 通过计算不同波段上光源光谱分布, 材料光谱反射率对最终成像结果的影响而实现分光, 得到场景的多光谱图像。

2.2 光谱/颜色生成方法

通过以上的计算, 可以得出场景中任何一点在探测器上的辐射光谱分布。虽然对成像过程进行了大量简化, 但是其基本原理与辐射传输的原理是一致的。这是预测各种情形下物体表面颜色的基础。为了能在屏幕上显示场景的彩色图像, 还需要计算物体表面的辐射光谱分布所对应的颜色。已知物体表面的光谱, 按照三刺激值的定义^[1,8], 可以得到任意光谱下的三刺激值

$$\begin{cases} X = \kappa \int_{\text{visible}} f_x(\lambda)L(\lambda)d\lambda \\ Y = \kappa \int_{\text{visible}} f_y(\lambda)L(\lambda)d\lambda, \\ Z = \kappa \int_{\text{visible}} f_z(\lambda)L(\lambda)d\lambda \end{cases} \quad (3)$$

式中 f_x , f_y 和 f_z 是经过颜色匹配实验得到的国际标准照明委员会(CIE)XYZ 颜色系统的 X,Y 和 Z 三基色的光谱权重, 可查表得到; L 是在观察方向上辐射的强度光谱分布; κ 是归一化系数, 保证各响应在 0 到 1 之间。需要注意的是, 所采用的 XYZ 颜色系统的计算方法是 CIE 标准测色环境的系数, 这里在应用上扩大了其使用的范围。这虽然会导致颜色上的偏差, 但由于目前只要求颜色特征相符, 不要求颜色的精确匹配, 因此这样处理是可以接受的。这点从后面的结果中也可以看到。

得到三刺激值之后, 应用 XYZ/RGB 颜色空间的转换公式, 可得到能在计算机屏幕上显示的 RGB 颜色值

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.910 & -0.532 & -0.288 \\ -0.985 & 1.999 & -0.028 \\ 0.058 & -0.118 & 0.898 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (4)$$

在不同的应用环境下以及不同的显示设备上, 由于显示特性的不一致, 存在着多种 XYZ/RGB 转换方法, 以适应不同的应用场合。这里所采用的 XYZ/RGB 矩阵转换方法在计算上比较方便, 文献[9]对不同方法进行了论述。

2.3 系统实现

本文在射线跟踪渲染算法的基础上进行了扩展, 将 RGB 渲染扩展为对指定光谱波段的渲染。通过逆向跟踪光线的传播过程, 同时计算该传播方向上各个波段上的辐射变化, 逐点扫描像面上的各个像素, 生成场景的多光谱图像。然后再通过光谱/颜色转换得到每一像素的 RGB 颜色值, 并在屏幕上显示。

多光谱渲染器在 .Net 平台上采用 C# 语言实现。运行时先设定场景参数, 然后渲染器会根据场景文件中的几何体、材料、光源和摄像机等的具体参数进行计算而得到各个波段上的光谱强度, 而后通过光谱分布合成对应颜色获得最终彩色图像。

3 实验结果和应用示例

3.1 标准色卡的颜色再现

在颜色测量和再现中, 色卡是进行颜色评价的重要工具。由于标准色卡的反射率经过标定, 其反射光谱分布已知, 所以可用于系统测试和校正。本例采用 Munsell 实验室公布的 Macbeth 色卡^[10] 反射率数据, 将可见光 380~780 nm 波段均匀细分为 20 个子波段, 在标准的 D65 光源下渲染生成色卡的多光谱图像, 各波

段的图像如图 2 所示。由这 20 个波段而生成的 RGB 彩色合成图像与实拍的色卡图像的对比结果如图 3 所示。后面各例子均采用相同的波段划分方法,在色卡上标上了相应的编号方便讨论。

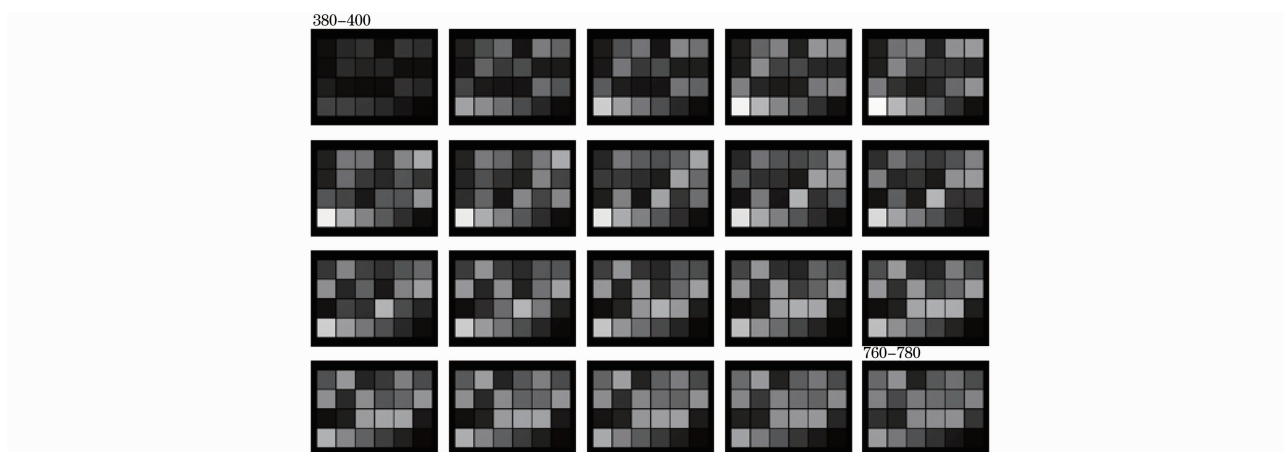


图 2 Macbeth 标准色卡在 D65 光源下各波段的强度图像

Fig. 2 Sub-band images of Macbeth color checker patches in D65 illuminant

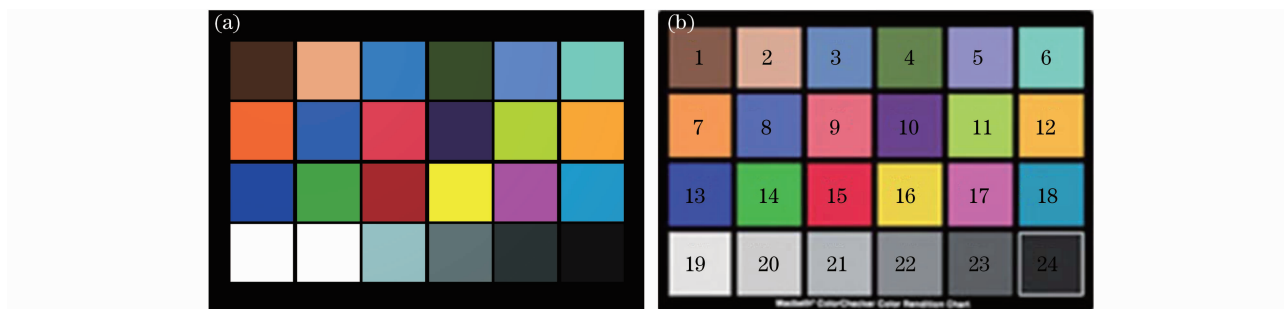


图 3 在 D65 光源下生成的 Macbeth 标准色卡图像(a)与实拍图像(b)的对比

Fig. 3 Synthetic color image (a) and measured image (b) of Macbeth color checker patches in D65 illuminant

从图 3 的对比可以看出,渲染图像与实拍图像的颜色特征基本吻合,这说明基于光谱的渲染方法以及 XYZ/RGB 转换方法是可行的。对图 3 中(a)和(b)中各个色块的色差进行比较,发现 # 21 色块稍微偏蓝,而 # 19 和 # 20 色块则都达到饱和而呈现出白色。据此可进一步分析光谱/颜色生成算法[(4)式]的精度并进行改进,也可以分析实拍相机彩色特性参数。

3.2 材料在复杂物体上的外观再现

在产品设计和开发阶段,试探性地采用各种材料制作的模型可以直观地进行材料的选择。而在计算机辅助设计(CAD)中,可以对相同的几何体尝试使用不同的材料进行渲染,观察不同材料应用到产品上的效果。随着计算机辅助设计技术的发展,对高精度的颜色再现方法的需求会越来越多,而基于光谱的渲染技术由于符合成像的物理规律和易于实现较真实的颜色复制而受到关注。本例对 Stanford 兔子模型采用了 Macbeth 色卡中编号为 19,14,7 和 5 的四个色块的反射率光谱分布数据,在固定位置的标准 D65 光源下进行渲染,所合成的彩色图像如图 4 所示。

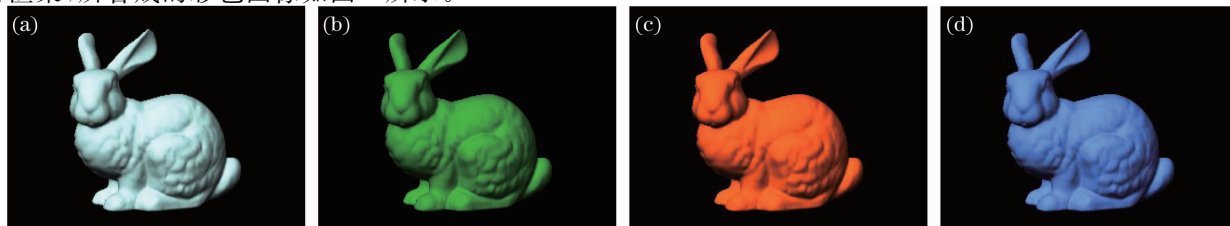


图 4 # 19(a), # 14(b), # 7(c)和 # 5(d)Macbeth 色块构成的 Stanford 兔子的多光谱彩色渲染结果

Fig. 4 Appearances of Stanford rabbit vested # 19(a), # 14(b), # 7(c) and # 5(d) Macbeth color patches

图 4 中各图像呈现对应色块的颜色,由于物体几何特征比较复杂,表面的光照情况不同而呈现不同的亮度变化。与 3.1 节中的灰色色块的偏色情况一样,图 4(a)中呈现出浅蓝色,说明所采用的光谱/颜色合成算法对于灰色的合成上尚可进一步改进。图 4(b)~(d)在外观颜色上基本能满足人眼观察的需求。

在计算机所提供的虚拟环境中,由于三维物体的几何参数与材料参数是独立的,因而可方便地给同一个几何模型应用不同的材质而观察其外观变化。相比传统的产品设计方法,该方法有显著优势。

3.3 不同光源下物体颜色再现

物体的颜色与表面的反射率及照明光源有密切关系。3.2 节已经介绍了物体表面光谱反射率对外观的影响,本例分析同一种材料在不同光源下的颜色再现结果。图 5 是在不同的光源下相同雕像所呈现的不同外观图像。渲染时光源分别为标准 A 光源、标准 D65 光源、实测蓝色 LED 光源和实测绿色 LED 光源。雕像采用 Macbeth 色卡中编号为 20 的色块的反射率光谱分布,开启了高光以模拟表面光滑的特性。

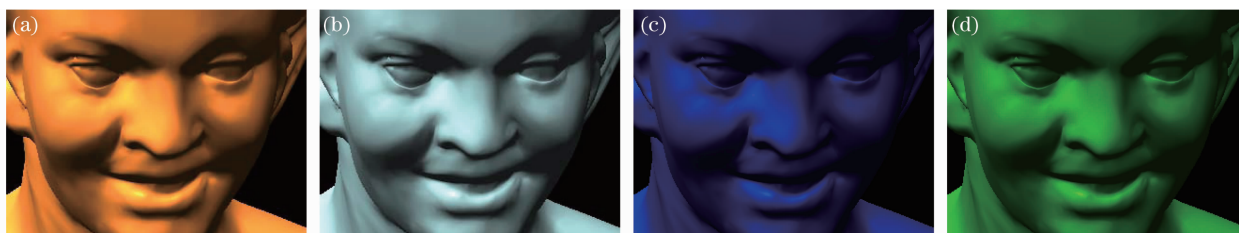


图 5 在标准 A(a),D65(b)和实测蓝色 LED(c),绿色 LED(d)光源下的白色雕像外观

Fig. 5 Appearances of a statuary in A(a), D65(b), blue LED(c) and green LED(d) illuminants

图 5 中由于开启了高光,使渲染结果中雕像在外观上呈现出明显的光滑材料反射的特点。从各图像中雕像嘴唇部位所呈现的高亮镜面反射可以明显看出各光源的光谱颜色。图 5(a)采用标准的 A 光源照明,雕像呈现明显的红色,这与 A 光源的照明特点相符;图 5(b)采用标准 D65 光源照明,比较接近日光下物体的颜色;图 5(c)和(d)采用蓝色和绿色 LED 光源照明而使雕像呈现出相应的光源颜色。以此为基础,可对多光源照明的情况进行成像模拟,分析不同的光源组合或空间分布的照明效果以及对成像的影响。

相比传统的 RGB 三通道渲染方法,该例子采用实测的光源光谱数据进行渲染,可以更全面地反映出光照对物体外观的影响。该方法可以应用到照明光源的设计,直观地评价各种照明条件下物体的颜色特性以及照明效果。

3.4 多光谱成像分析

由于基于光谱的渲染技术计算的是从光源发出的光线在传播过程中的光谱变化,因而到达探测器的光线是带光谱信息的,这提供了一种基于多光谱成像的分析方法。以 Stanford 兔子为例,分析常用的反射率重建算法的有效性。渲染时 Stanford 兔子的材料选择 Macbeth 色卡中编号为 14 的绿色色块,底板为理想的反射率光谱分布均为 1.0 的白板。光源为标准的 D65 光源。图 6 是渲染的结果以及各标注点的辐射能量光谱分布。

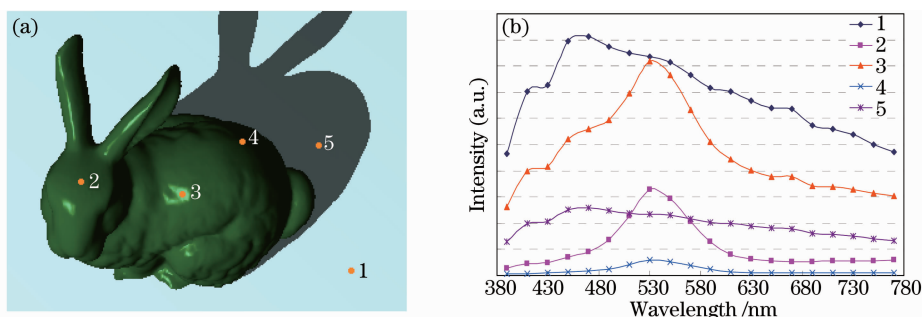


图 6 Stanford 兔子渲染结果(a)及其特征区域的光谱分布(b)

Fig. 6 (a) Rendering image of Stanford rabbit and (b) the spectra of the five labeled pixels

图 7 为以白板为参照对物体不同部位进行光谱反射率重建的结果。从图中可以看出,常用的以白板定标重建反射率光谱分布的算法应用在三维场景中时,对于物体的大部分区域(曲线 2)能较好地重建出原始

的反射率光谱分布(曲线 14),但是对于高光部位(曲线 3)以及背光面有阴影的区域(曲线 4)应用该方法会出现较大的差异。进一步计算发现,对于处于背光区域(曲线 4)中的像素,所重建出来的光谱反射率与原始光谱反射率基本上相差一个系数。若有办法预先得到该系数,则应该能对该算法所得的光谱反射率进行校正。对于处于高亮区域(曲线 3)的像素,可发现该区域实际上由于镜面反射而加强了光源的信息,如果要应用上面的反射率重建算法,则应该考虑预先除去这部分多余的光源信号。这个例子可以看出,基于光谱的渲染技术可得到每个像素的光谱曲线,提供更全面的物体表面和光源信息,为各种基于多光谱的分析和重建算法提供有效的测试数据。

4 结 论

在成像模型的基础上,讨论了在计算机中实现成像模型进行基于光谱的渲染而必须的近似处理。分析了在屏幕上以彩色方式显示多光谱图像的光谱/颜色转换一般方法。采用计算机图形学中的射线跟踪方法,构建了以光源和材料反射率的光谱数据为基础的多光谱渲染器。应用该程序,对标准色卡以及复杂的几何体的颜色和外观进行了计算,从合成的颜色变化上展示了光源以及材料反射特性对最终生成的图像的影响。进一步对多光谱反射率重建算法在复杂几何体不同区域的适用性进行了分析,展示了基于光谱的渲染技术在算法分析中的应用。可以看出,基于光谱的渲染技术可以预测成像结果并提供包含有光谱信息的模拟数据,在算法分析和测试中有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Tang Shunqing. Colorimetry[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1991
汤顺青. 色度学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1991
- 2 Johnson G. M., Fairchild M. D.. Full-spectral color calculations in realistic image synthesis[J]. *IEEE Comput. Graphics*, 1999, **19**(4): 47~53
- 3 Berns R. S., Imai F. H., Burns P. D. *et al.*. Multi-spectral-based color reproduction research at the munsell color science laboratory[C]. *SPIE*, 1998, **3409**: 14~25
- 4 Ward G., Elena E. V.. Picture perfect RGB rendering using spectral prefiltering and sharp color primaries[J]. *Thirteenth Eurographics Workshop on Rendering*, 2002
- 5 Sillion F. X., Peuch C.. Radiosity and Global Illumination[M]. San Francisco: Morgan Kaufman Publishers Inc, 1994
- 6 Aydin Ozturk, Murat Kurt, Ahmet Bilgili *et al.*. Linear approximation of bidirectional reflectance distribution functions[J]. *Computers & Graphics*, 2008, **32**(2): 149~158
- 7 Donald Hearn, M. Pauline Baker. Computer Graphics with Open GL[M]. 3rd edn. America: Pearson Education Inc, 2004
- 8 Liao Ningfan, Shi Junsheng, Wu Wenmin. An Introduction to Digital Color Management System[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009
廖宁放, 石俊生, 吴文敏. 数字图文图像颜色管理系统概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009
- 9 Brian Smits. An RGB to spectrum conversion for reflectances[J]. *J. Graphics Tools*, 1999, **4**(4): 11~22
- 10 Macbeth color checker patches data[D]. <http://www.cis.rit.edu/mcsl/online/cie.php>

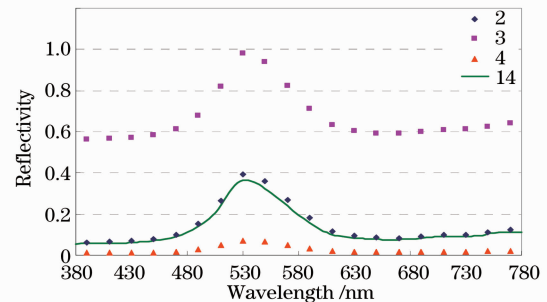


图 7 重建各标记点的反射率光谱分布曲线

Fig. 7 Reconstructed reflectance spectra of 4 pixels labeled in Fig. 6