

一种适用于涂层的双高斯偏振 BRDF 模型

张颖, 宋平, 赵慧洁

(北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要: 为了更精确地描述涂层类材料的偏振双向反射分布函数, 在微面元模型的基础上建立了双高斯偏振 BRDF 模型并对模型进行了仿真。相对于以往模型, 其耦合了强度分布非朗伯的且包含偏振成分的以 Rahman-Pinty-Verstraete 函数为基础的漫反射。利用基于 LCVR 的全偏振多谱段成像仪在 476 nm 波段对白色、哑光白和珍珠白的自喷漆以及普通光盘背面的漆进行了多组面内偏振 BRDF 测量实验。之后从部分实验数据出发利用最小二乘法对模型参数进行了分步反演, 反演结果在多组初值条件下都一致, 证明反演得到的参数为全局最小值。最后对获得的模型参数进行仿真, 结果表明模型对强度值和偏振度值符合都很好, 尤其是能够符合漫反射的偏振。该模型对物质分类及识别以及场景仿真具有一定的实用意义。

关键词: 偏振 BRDF; 偏振漫反射; 涂层; LCVR

中图分类号: O436.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1117002

Double-Gauss polarimetric BRDF model of painted surfaces

Zhang Ying, Song Ping, Zhao Huijie

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to describe the polarized bidirectional reflectance distribution function of the paint material more accurately, a double-Gauss polarized bidirectional reflectance distribution function (BRDF) was modeled and simulated which based on the micro-facet assumption. Relative to the previous models, it contained non-Lamb and polarized diffuse reflection based on Rahman-Pinty-Verstraete function. Several experiment groups of polarized BRDF in the plane of incidence of painted surfaces, such as white, matte white, pearl white paint, and the paint on the back of a cd, were measured by the polarization multi-spectral imagery based on Liquid Crystal Variable Retarders (LCVR) at 476 nm. Then, the parameters of model were inverted step by step using the least square method from some experimental data. The inversion results were consistent under many initial conditions, which indicated the obtained parameters were the global minimum. Finally, the model parameters obtained were simulated. The simulation results prove that the simulated intensity and DOP of reflection of painted surfaces fit in the measured appropriate values very well, especially for the polarized diffuse reflection. This model can be applied in classification and recognition of material and scene simulation.

Key words: pBRDF; polarized diffuse reflection; paint; LCVR

收稿日期: 2017-03-10; 修订日期: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(61571029)

作者简介: 张颖(1979-), 女, 讲师, 博士, 主要从事偏振光谱成像技术、光电探测技术等方面的研究。Email: yingzhang@buaa.edu.cn

通讯作者: 赵慧洁(1966-), 女, 教授, 博士, 主要从事偏高光谱遥感与系统仿真技术、光电探测技术等方面的研究。

Email: optoelectronicbuaa@126.com

0 引言

涂层覆盖了生活中从汽车到手机的广泛应用,无论是场景渲染还是伪装识别都需要涂层比较精确的表面反射模型。偏振作为光的基本属性之一,其影响在现实生活中无处不在,通过传统遥感中引入偏振度、偏振角等偏振信息,可以大大扩展遥感的信息层次,扩大模型的适用范围并提高模型精度。

长久以来,围绕着物体表面反射特性人们建立了很多模型,大概分为三种^[1]:一种是根据反射光强分布的大致现象建模;另一种是根据物理原理建模;还有一种是有数据驱动的,从数据中归纳出来的模型。对于涂层而言,使用物理模型或半经验模型是比较适合的。

在对涂层建立的很多模型中,有半经验的^[2],也有基于小面元的物理模型^[3]。Sergey Ershova 建立了一个能够仿真随机的光芒四射效果的模型^[4],其把涂层细致的分为 3 层,考虑了层与层之间的复杂传输,但模型是标量的,没有扩展到矢量区,在计算机仿真领域建立的大量模型大都如此。Gong Lei, Wu Zhensen 基于辐射传输理论建立了适用于电影胶片表面涂层的偏振 BRDF 模型^[5],但其实验结果中只讨论了偏振 BRDF 值,没有讨论反射辐射的偏振分布。David J. D 在微面元模型的基础上建立了一个偏振 BRDF 模型,考虑了非朗伯的漫反射,但其认为漫反射是无偏的^[6]。Ingmar G. E. Renhorn 建立了一个有效地能够模拟涂层和金属板的偏振 BRDF 模型,其漫反射也考虑了偏振但没有给出偏振的来源而是只给出了定义^[7]。对涂层进行的偏振 BRDF 测量表明部分涂层存在有偏的漫反射,而且其偏振度较大达到 10% 左右,遂建立了一个包含有偏漫反射的基于微面元的偏振 BRDF 模型,解释有偏漫反射的产生,对其进行仿真,并反演得到涂层的粗糙度、漫反射系数等参数,最后与实际结果对比,发现模型能够较好的模拟真实的偏振反射。

1 偏振 BRDF 模型的建立

1.1 BRDF 理论基础

双向反射分布函数 $f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 定义为某一方向的反射辐亮度 $L_r(\theta_r, \varphi_r)$ 和给定方向的入射辐照度 $H_i(\theta_i, \varphi_i)$ 的比值,如公式(1)所示:

$$f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = dL_r(\theta_r, \varphi_r) / dH_i(\theta_i, \varphi_i) \quad (1)$$

式中: θ_i 为入射角; θ_r 为反射角; φ_r 为反射辐射方位角; φ_i 为入射辐射方位角。BRDF 反映了反射光波能量在整个半球空间的分布,它和物体表面的粗糙度等结构信息和其成分信息密切相关。当粗糙度非常大的时候,整个表面成为朗伯表面,各种角度下的 $f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 成为相同的常数,当粗糙度为 0 的时候整个表面成为镜面, $f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 完全可由菲涅耳公式计算。相关角度定义见图 1。

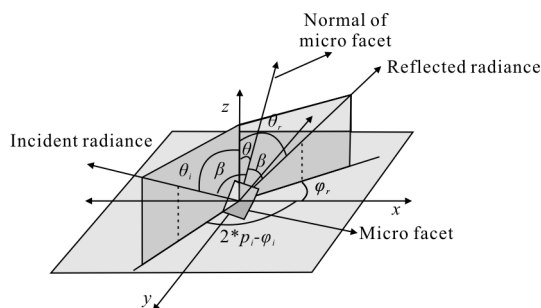


图 1 BRDF 相关角度定义

Fig.1 Angle definition of BRDF

1.2 偏振 BRDF 模型

涂层目标的反射辐射可分为镜面反射和漫反射两部分,镜面反射为常规的菲涅耳反射,漫反射源于入射辐射在相邻突起之间的多次反射和表面之下的体散射。涂层的反射与散射见图 2。

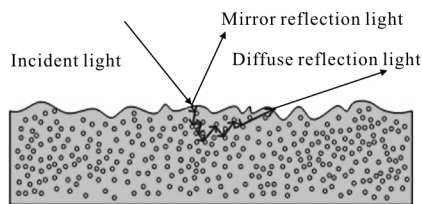


图 2 涂层表面反射图

Fig.2 Reflection of painted surface

1.2.1 镜面反射的偏振 BRDF 模型

首先,使用微面元模型来描述涂层目标的镜面反射部分。在微面元模型中,表面被等效为一系列的微小面元,每一个面元的反射都遵循菲涅耳反射原理,各个面元的法线方向是随机的,一般遵循高斯分布。根据参考文献[8],在此直接给出镜面反射的偏振 BRDF 模型。

$$f_{\text{microfacet}}(\theta_i, \theta_r, \varphi_i, \varphi_r) = \frac{PGM(-\alpha_2)M_r M(\alpha_1)}{4\cos\theta_i \cos(\theta_r) \cos(\theta_r)} \quad (2)$$

式中: P 为微面元法线的角分布,选为高斯分布; G

为阴影与遮挡因子; M 为目标坐标系和面元坐标系之间的坐标变换矩阵; M_r 为面元坐标系下的菲涅耳反射矩阵; θ 为微面元的法线方向和涂层表面的法线方向的夹角; α_1 、 α_2 分别为入射方向和目标表面法线组成的平面与入射方向和微面元表面法线组成的平面之间的夹角以及反射方向和目标表面法线组成的平面与反射方向和微面元表面法线组成的平面之间的夹角。对 P 、 G 、 M_r 、 M 有:

$$P = \frac{1}{2\pi\sigma^2 \cos^3 \theta} \exp\left(-\frac{\tan^2 \theta}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

$$G = \min(1, 2 \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\theta_r) / \cos(\beta), 2 \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\theta_r) / \cos(\beta)) \quad (4)$$

$$M(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\alpha) & -\sin(2\alpha) & 0 \\ 0 & \sin(2\alpha) & \cos(2\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M_r = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(|r_p|^2 + |r_s|^2) & \frac{1}{2}(|r_p|^2 - |r_s|^2) & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}(|r_p|^2 - |r_s|^2) & \frac{1}{2}(|r_p|^2 + |r_s|^2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}(r_p r_s^* + r_p^* r_s) & \frac{i}{2}(r_p r_s^* - r_p^* r_s) \\ 0 & 0 & -\frac{i}{2}(r_p r_s^* - r_p^* r_s) & \frac{1}{2}(r_p r_s^* + r_p^* r_s) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: σ 为微面元角分布的方差, 也即涂层表面的粗糙度; β 为入射辐射方向和微面元法线之间的夹角; r_s 和 r_p 为菲涅耳反射系数, * 代表复共轭, 对于 r_s 和 r_p 有:

$$r_p = \frac{n \cos(\beta) - \cos(\beta')}{n \cos(\beta) + \cos(\beta')} \quad (7)$$

$$r_s = \frac{\cos(\beta) - n \cos(\beta')}{\cos(\beta) + n \cos(\beta')} \quad (8)$$

式中: p 为电场中的平行分量; s 为垂直分量; β' 为与入射角 β 相对应的折射角; n 是复折射率。相关角度关系见参考文献[6]。

1.2.2 漫反射偏振 BRDF 模型

对于表面不透明的涂层, 漫反射部分主要由表面散射贡献, 其是无偏的, 而对于表面透明或者半透明的涂层, 则既有表面散射又有体散射, 表面散射依然是无偏的, 但是体散射在穿过表面的时候会经过菲涅耳透射, 进而导致其成为偏振光, 这是与传统漫反射模型最为不同的地方。

这里以 Rahman-Pinty-Verstraete 函数 f_{rpv} 为基础来表示涂层的漫反射辐射。根据参考文献[9], 对于 f_{rpv} 有:

$$f_{rpv} = \frac{a}{\pi} [(\mu_r + \mu_i) \mu_r \mu_i]^{k-1} \exp(b \cdot \cos(\omega)) \quad (9)$$

式中: 参数 a 是随波长改变的, 参数 k 、 b 是不随波长改变的, 对于朗伯表面, $k=1$, $b=0$; μ_r 和 μ_i 分别为 θ 和 θ_i 的余弦值; ω 为散射角。

$$\cos(\omega) = -\mu_r \mu_i + (1 - \mu_r^2)^{1/2} (1 - \mu_i^2)^{1/2} \cos(\varphi) \quad (10)$$

于是涂层的漫反射分量 $f_{volumetric}(\mu_r, \mu_i, \varphi_i, \varphi_r)$ 为:

$$f_{volumetric}(\mu_r, \mu_i, \varphi_i, \varphi_r) = f_{rpv} \cdot [(1-t) \cdot D_s + t \cdot D_v] \quad (11)$$

式中: t 为有偏漫反射占总的漫反射的比例 (下文称为漫偏系数); D_s 为退偏矩阵, 其左上元素为 1, 其他元素为 0。对于 D_v 有:

$$D_v = \int P \cdot f_{grpv}(\theta_i, \theta_r, \theta, \varphi_i, \varphi_r, \varphi) \cdot M_r(\theta, \theta_r, \varphi, \varphi_r) d\omega \quad (12)$$

式中: P 为微面元所对应的分布概率 (高斯分布); $f_{grpv}(\theta_i, \theta_r, \theta, \varphi_i, \varphi_r, \varphi)$ 为相对漫反射强度,

$$f_{grpv}(\theta_i, \theta_r, \theta, \varphi_i, \varphi_r, \varphi) =$$

$$f_{rpv}(\theta_i, \theta_r, \theta, \varphi_i, \varphi_r, \varphi) \int d\omega / \int f_{rpv}(\theta_i, \theta_r, \theta, \varphi_i, \varphi_r, \varphi) d\omega \quad (13)$$

式中: M_r 为菲涅耳透射矩阵, 其表达式只需将上面 M_r 中的 r_s 和 r_p 换成菲涅耳透射系数 t_s 和 t_p 即可得到, t_s 和 t_p 的定义见参考文献[10]。

涂层总的偏振 BRDF 为:

$$f = f_{microfacet} + f_{volumetric} \quad (14)$$

对自然光入射时的总反射偏振度进行了仿真, 结果如图 3 所示, 图中曲面上任一点到原点的距离代表从原点到这一点的方向上的偏振度大小。仿真条件为, θ_i 为 35° , φ_i 为 0° , 粗糙度 σ 为 0.1, 复折射率 $n=2-1.5*i$, a 为 3, k 为 2, b 为 1, t 为 0.5。从图中可见, 偏振度分布随着反射辐射远离入射辐射相对于涂层表面的镜面方向而不断变小, 减小到 0 后又

不断增大, 当然此时的偏振角已不是 0° 而是 90° 。

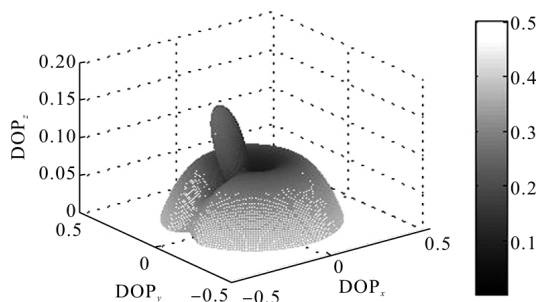


图 3 总反射的强度和偏振度仿真

Fig.3 Simulation of intensity and DOP of total reflection

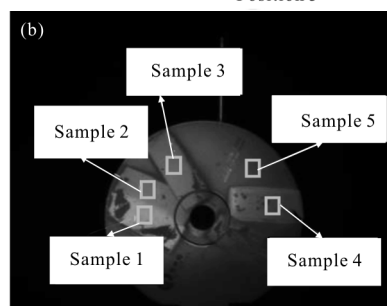
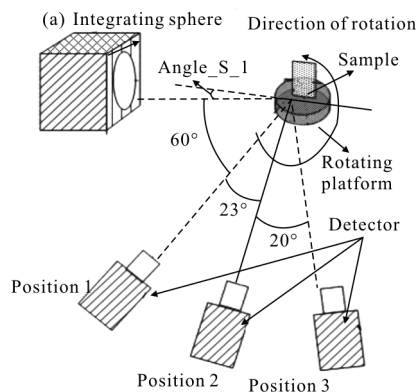


图 4 实验设备和样品示意

Fig.4 Sketch of experiment equipment and sample

2 实验结果分析

2.1 实验介绍

为了验证模型的有效性, 在实验室内进行了对涂层样品的偏振 BRDF 面内测量实验。

涂层采用三种自喷漆: 一种白光; 一种哑光白; 另一种珍珠白。另外哑光白还有一种喷涂较厚的涂层, 这四种涂层分别被喷于四张光盘的白色背面, 光盘本身的背面喷有白漆, 作为第五种涂层。目标涂层如图 4(b)所示。其中白色矩形小方框所示部分为实验所取部分。

在实验中, 光源采用 Electro Optical Industries 的 MODEL ISV410/HL 积分球, 其光源稳定度优于 0.001, 测量仪器采用实验室研制的基于 LCVR 的全偏振多谱段成像仪, 其线偏振测量精度达到 1%, 圆偏振测量精度达到 5%^[11], 在 476 nm 波段 (谱宽 10 nm) 进行测量。整个实验的设备摆放如图 4(a)所示。Angle_S_I 为目标表面和积分球中心法线之间的夹角。测量仪器在 3 个位置分别进行 21 个角度的测量。

2.2 涂层的 pBRDF 参数反演

采用最小二乘法对位置 1 和 2 的实验数据进行反演, 然后以位置 3 的实验数据来验证模型的准确性。首先利用镜面反射不明显的角度来反演漫反射参数, 之后再将其作为已知参数来反演镜面反射参数。反演时, 设置多种不同初值, 比较反演结果的一致性。考虑到涂层的成分都为电解质, 所以将折射率的虚部设为 0。

2.3 涂层的偏振 BRDF 测量值和理论值的对比与分析

对五种涂层目标的反演的参数值如表 1 所示。从不同初值出发的反演具有一致的结果 (由于结果

表 1 反演出的模型参数

Tab.1 Parameters by model inversion

Samples	σ	n	a	k	b	t
Sample 1 (white paint)	0.006 0	1.798 4	1.934 3	1.162 7	0.030 4	0.621 9
Sample 2 (matte white thin paint)	0.036 8	1.692 5	2.053 3	1.375 9	0.351 9	0.599 8
Sample 3 (matte white thick paint)	0.039 8	1.620 7	1.517 4	1.250 4	0.182 7	0.671 7
Sample 4 (pearl white paint)	0.038 0	1.722 7	4.772 3	2.639 5	2.416 7	0.410 3
Sample 5 (paint on the back of CD)	0.034 6	1.742 0	1.492 7	1.194 5	0.274 9	0.468 6

一致,表中只表示了一种反演结果),部分说明此模型只有一个局部最小值即全局最小值,且反演结果比较可信。

对于白色漆,由于其缺少消光颗粒,所以它的粗糙度最小,而对于哑光白漆,由于富含消光颗粒,它的粗糙度则大一些。对于喷涂较薄的哑光漆,可能由于喷漆的开始阶段涂料混合不均,导致消光颗粒较少,所以粗糙度相比喷涂较厚的哑光漆要小一些。

对于漫偏系数,目标 1 和目标 3 的结果要大于其他目标的结果。由于目标 1 的表面较光滑,比较透明,所以该系数较大。而目标 3 的漆层较厚,导致体散射较大,进而使得漫偏系数较大。

五种涂层目标的强度的测量值和模型值见于图 5。从图(a)~(e)依次为目标 1 到目标 5。

从图中可见,强度值的分布在镜面方向很强,在其他方向则迅速下降,表明涂层的粗糙度都不大。从位置 1 到位置 3,强度最大值对应的本地入射角越

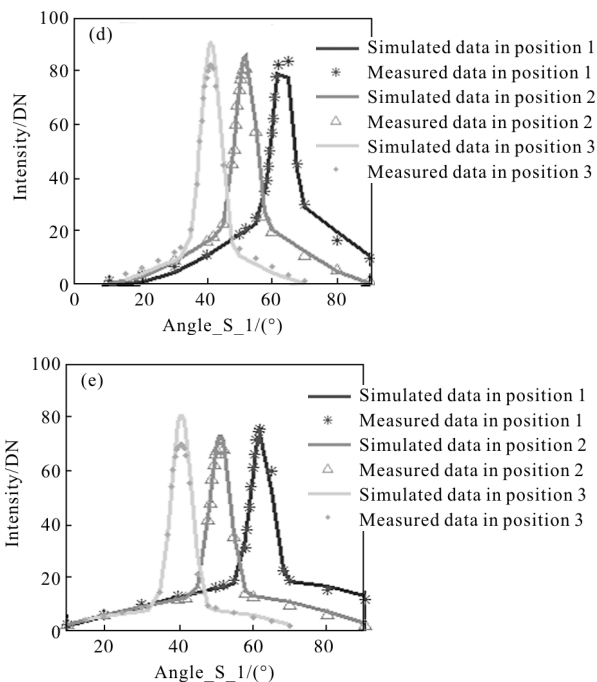
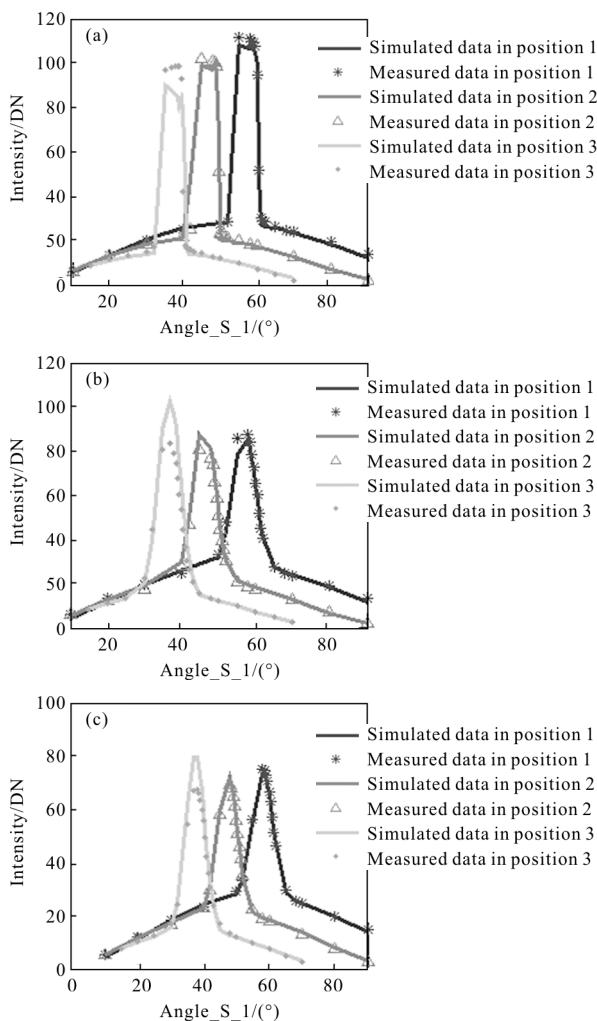


图 5 五种样品在全部 3 个位置的强度的测量值和模型值

Fig.5 Measured and simulated intensity of five samples in all 3 positions

来越大,导致对于一个确定大小的面元,入射能量的角度损失越来越大,但同时菲涅耳反射率也越来越大,所以强度最大值基本一致。在图中镜面峰的右侧,对于相同的目标摆放状态(即样品表面相对于光源中心的夹角相同),从位置 1 到位置 3 的漫反射值逐渐变小,这是由于当入射角一致时,漫反射的能量随着反射角偏离镜面方向逐渐变大会迅速下降。

对于强度值,建模结果与模型值基本相符。其中,每种目标的漫反射部分的建模结果与测量值的符合度都很高。但对于镜面反射部分,在最大值处则偏离较多(但也控制在 20 个 DN 值之内)这可能是由于角度误差的存在,导致强度图上陡升阶段或陡降阶段的某一个角度处的值偏离测量值较多,为了平衡误差,导致其他值出现偏离。除了第一个目标外,其他目标在位置 2 和位置 3 的模型值总是偏大,且位置 3 的值偏大更多,位置 1 的值总是偏小,所以这可能是由于模型中关于辐射量的角度余弦修正不足,导致估计偏大,也有可能是遮挡函数的效率过低。样品 3 的强度值的误差分布如图 6 所示。其中偏差的标准差为 4 个 DN 值,最大偏差出现在位置 3 的最大值处,误差大概为 17%。

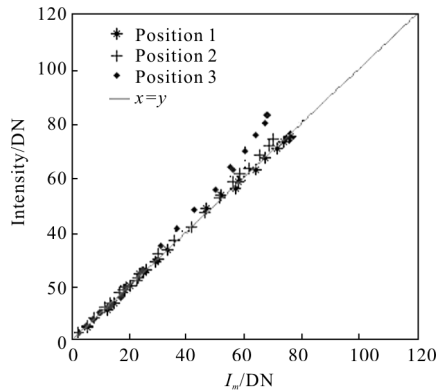


图 6 样品 3 在全部 3 个位置的强度模型值的误差分布

Fig.6 Error distribution of simulated intensity of Sample 3 in all 3 positions

五种涂层目标的偏振度的测量值和模型值见图 7。从图(a)~(e)依次为目标 1 到目标 5。

偏振度则呈现明显的镜面峰和漫反射坡分布。在镜面峰处,强烈的镜面反射导致偏振度很大,随着

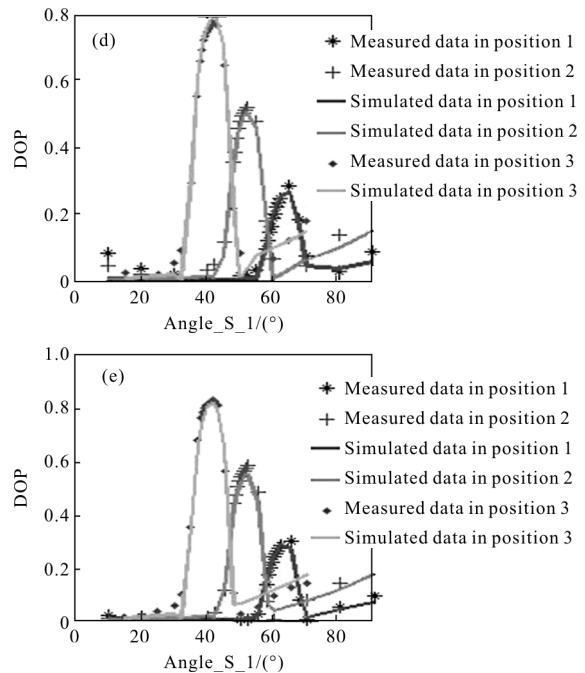
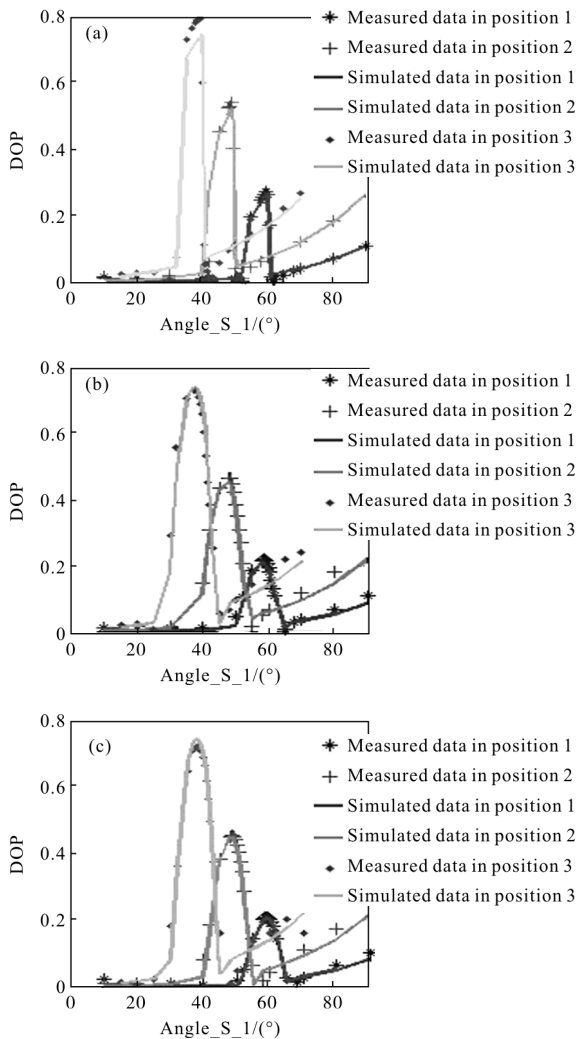


图 7 五种样品在全部 3 个位置的偏振度的测量值和模型值

Fig.7 Measured and simulated DOP of five samples in all 3 positions



角度偏离镜面方向,漫反射占比迅速扩大,偏振度迅速下降。由于从位置 1 到位置 3,微面元的本地入射角不断变大且没有超过布儒斯特角,所以偏振度的最大值也不断变大。对每一个目标,每一个位置,在较大反射角处的偏振度都不为 0,且偏振角为 90° (图中未显示),且随着反射角的增大而增大,这符合自然光入射时的透射辐射的偏振度变化规律。在镜面峰右侧,3 个位置的漫反射偏振度分布存在一定的平移不变性,且平移角度基本符合 3 个位置的相对夹角,也即相同反射角处的漫反射偏振度一致,这使得漫反射偏振部分来源于透射辐射的假设更加可信。

偏振度则呈现明显的镜面峰和漫反射坡分布。在镜面峰处,强烈的镜面反射导致偏振度很大,随着角度偏离镜面方向,漫反射占比迅速扩大,偏振度迅速下降。由于从位置 1 到位置 3,微面元的本地入射角不断变大且没有超过布儒斯特角,所以偏振度的最大值也不断变大。对每一个目标,每一个位置,在较大反射角处的偏振度都不为 0,且偏振角为 90° (图中未显示),且随着反射角的增大而增大,这符合自然光入射时的透射辐射的偏振度变化规律。在镜面峰右侧,3 个位置的漫反射偏振度分布存在一定的平移不变性,且平移角度基本符合 3 个位置的相

对夹角,也即相同反射角处的漫反射偏振度一致,这使得漫反射偏振部分来源于透射辐射的假设更加可信。

对于偏振度,建模结果与模型值符合相对更好。在镜面峰右侧,漫反射部分的偏振度模型值总是小于测量值,这可能是由于这些偏振度相对于镜面反射较强处的偏振度而言较小,在等权重最小二乘反演的情况下,导致反演误差在此处积累。第 4 个目标在 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 区间的偏振度值符合的不是很好,可能是由于在此区间,入射辐射的入射角很大,而珍珠白漆相对于其他目标又比较暗,导致目标的出射辐射很弱,量化噪声的影响比较大,所以测量值的误差相对较大。

样品 3 的偏振度值的误差分布如图 8 所示。偏差的标准差为 0.028,其中最大偏差出现在每个位置的偏振度分布拐点处,这些点处测量值接近 0,导致误差较大。从位置 1 到位置 3,漫反射最强点处的误差分别为 20%、13%、38%,镜面反射最强点处的误差分别为 0.1%、1.6%、3%。

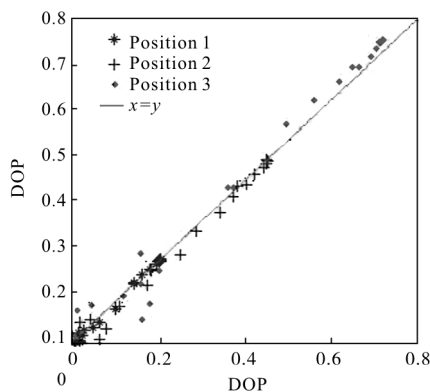


图 8 样品 3 在全部 3 个位置的偏振度模型值的误差分布

Fig.8 Error distributing of simulated DOP of Sample 3 in all 3 positions

3 结 论

建立的包含偏振化的漫反射的双高斯偏振 BRDF 模型对白色、哑光白、珍珠白的自喷漆以及普通光盘背面的漆具有较好的适用性,能够基本符合这些涂层的反射强度和偏振度分布,尤其是在漫反射部分符合的较好。对光滑的白漆以及在较大的本地入射角,误差有所增大,但整体的分布趋势则符合很好,说明模型基本正确。考虑到误差的来源,对模型在遮挡与阴影因子方面进一步改进以及进行更多的面外测量将有助于提高模型的精度。

参考文献:

- [1] Guarnera D, Guarnera G C, Ghosh A, et al. BRDF representation and acquisition [J]. *Computer Graphics Forum*, 2016, 35(2): 625-650.
- [2] Zhuansun Xiaobo, Wu Wenyuan, Huang Yanhua, et al. Establishment and simulation of simplified polarimetric BRDF model based on MB model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1098-1102. (in Chinese)
 顾孙晓博, 武文远, 黄雁华, 等. 基于 MB 模型的简化偏振 BRDF 模型建立与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(3): 1098-1102.
- [3] Xie Donghui, Wang Peijuan, Zhu Qijiang, et al. Modeling polarimetric BRDF of leaves surfaces [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(12): 3324-3328. (in Chinese)
 谢东辉, 王培娟, 朱启疆, 等. 单叶片偏振 BRDF 建模及参数反演[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(12): 3324-3328.
- [4] Sergey Ershova, Konstantin Kolchina. Rendering pearlescent appearance based on paint-composition modelling [J]. *Computer Graphics Forum*, 2001, 20(3): 227-238.
- [5] Gong Lei, Wu Zhensen. Polarized bidirectional reflectance distribution function for optical substrate and different films [C]//SPIE, 2012, 8417: 84170J1-84170J6.
- [6] David J D, Feng X, John V. Martonchik. Exploration of a polarized surface bidirectional reflectance model using the ground-based multiangle spectro polarimetric imager [J]. *Atmosphere*, 2012, 3(4): 591-619.
- [7] Boreman G D, Renhorn I G E, Hallbery T. Efficient polarimetric BRDF model [J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): 31253-31273.
- [8] Cook R L. A reflectance model for computer graphics [J]. *Acm Transactions on Graphics*, 1982, 1(1): 7-24.
- [9] Hafizur R, Bernard P, Michel M V. Coupled Surface-atmosphere reflectance (CSAR) model 2: Semiempirical surface model usable with NOAA advanced very high resolution radiometer data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(11): 20791-20801.
- [10] Liao Yanbiao. Polarization Optics [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [11] Ying Zhang, Huijie Zhao, Na Li. Polarization calibration with large apertures in full field of view for a full Stokes imaging polarimeter based on liquid-crystal variable retarders [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(6): 1284-1292.