

基于遗传 LM 算法的涂层目标光谱偏振 BRDF 建模分析

陈超, 赵永强, 罗丽, 潘泉, 程咏梅, 王凯

西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710072

摘要 通过比较测量方法测量得到绿漆涂层木板探测目标在 400~720 nm 的光谱偏振二向反射分布函数值, 从获得的户外试验测量数据入手, 分析与探测角、波长之间的关系, 通过有限探测条件得到的光谱偏振二向反射分布函数值(BRDF)建立光谱偏振 BRDF 模型, 来描述探测目标的偏振二向反射特性。其中利用基于小面元的模型建立光谱偏振 BRDF 模型, 利用遗传算法和 Levenberg-Marquardt(LM)算法相结合的优化算法来获得非线性模型参数。仿真实验结果表明采用的遗传 LM 优化算法具有较好的性能, 能较快较准确得到非线性的模型参数。真实实验数据证明了基于小面元模型的正确性, 表明光谱偏振二向反射分布函数建模方法结果的可靠性。最后与绿漆涂层铁板目标的模型反演参数进行比较得出: 2 种不同材质、相同颜色涂层的目标, 具有较为接近的折射率, 其较小差别可以理解为由涂层的厚度、均匀程度的不同导致, 而非不同的材质所引起。

关键词 涂层目标; 遗传 LM 算法; 光谱偏振 BRDF; 小面元模型

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)03-0729-06

引言

二向反射分布函数(BRDF)^[1]能够较为全面地描述探测目标的空间散射分布特性。偏振特性是探测目标本身所具有的较为稳定的特性, 不同性质的目标之间偏振特性差异较大, 特别是前景和背景之间的差异更为明显, 光谱偏振 BRDF 是研究在较高的波长分辨率下获得探测目标表现出的偏振二向反射特性, 不仅获得对应波长偏振二向反射分布函数的空间分布, 同时也获得任意入射角和散射角的光谱偏振二向反射分布函数随波长的变化规律, 研究目标的光谱偏振反射特性在地物遥感、计算机图像处理、目标识别、物质分类等领域都有广泛的应用^[2-5]。

涂层目标作为普遍的军事伪装目标, 因而研究其光谱偏振特性, 对于伪装目标的检测、识别及分类具有重要的现实意义^[6-8]。对探测目标进行每个角度及方位的测量, 显然是不切实际, 也是不必要的, 因而利用有限的测量实验值建立描述模型, 并推广到 2π 空间是非常必需的。目前采用的模型主要是针对单波段^[9,10], 同时也没有考虑目标的偏振特性^[11]。本文通过分析涂层目标光谱偏振二向反射特性与探

测几何位置关系、波长之间的关系, 建立基于小面元的非线性光谱偏振二向反射分布函数模型。考虑到遗传算法^[12]在非线性参数反演的优势及较难得到一致精确解, 提出遗传 LM 的优化算法, 将遗传算法得出优化解作为 LM^[13]算法的初值, 再得到精确的模型参数值。反演得到的模型参数包含了表达物质本质特征的折射率, 将其应用于物质分类具有良好的应用前景^[3]。利用实验仿真数据证明了所用算法的有效性。通过户外实验测量得到的真实数据验证了采用模型及模型反演方法的正确性与可靠性。进行户外实验时, 为了分析相同涂层颜色、不同材料目标之间的区别及联系, 同时测量了相同涂层颜色涂层不同材质目标的光谱偏振二向反射分布函数值。通过分析比较得出两种相同颜色的涂层目标具有较为接近的折射率参数, 表明两种不同材质、相同颜色涂层的目标, 其光谱偏振二向反射特性的相似性由涂层的厚度、均匀程度的不同导致, 而非不同的材质所引起。

1 光谱偏振 BRDF 及其户外测量

BRDF 能很好地将材料的反射特性和散射特性有机地统一于同一概念中, 它表示一个基本的光学特性, 是对于某一

收稿日期: 2009-03-22, 修订日期: 2009-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(60602056), 国家自然科学基金重点资助项目(60634030), 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060699032), 航空科学基金项目(2007ZC53037)和西北工业大学英才计划基金项目资助

作者简介: 陈超, 1985年生, 西北工业大学自动化学院硕士研究生 e-mail: chunchaonwpu@gmail.com

* 通讯联系人 e-mail: zhaoyq@gmail.com

入射方向光波在表面半球空间的反射能量的分布。它由反射介质的表面粗糙度、介电常数及辐射波长和偏振等因素决定,与入射辐射的空间分布无关。光谱偏振 BRDF 是标量 BRDF 的更一般形式,它除了能量化方向散射的大小之外,还可以给出散射的偏振特性,可以表示为

$$d\vec{L}_r(\theta_r, \phi_r, \lambda) = F_r(\theta_i, \theta_r, \phi_i, \lambda) d\vec{E}_i(\theta_i, \phi_i; \lambda) \quad (1)$$

其中 λ 为波长, $d\vec{L}_r(\theta_r, \phi_r, \lambda)$ 表示沿着 (θ_r, ϕ_r) 方向出射的辐射亮度, $d\vec{E}_i(\theta_i, \phi_i; \lambda)$ 表示沿着 (θ_i, ϕ_i) 方向入射到被测表面的辐照度。采用 Stokes 矢量来描述入射和反射偏振光,此时可将(1)写成 Stokes 矢量形式(忽略 V 分量)

$$\begin{bmatrix} L_0 \\ L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{00} & f_{01} & f_{02} \\ f_{10} & f_{11} & f_{12} \\ f_{20} & f_{21} & f_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \\ E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: L_0 , L_1 和 L_2 分别为反射辐射亮度的 Stokes 矢量参数, E_0 , E_1 和 E_2 分别为入射辐照度的 Stokes 矢量参数,矩阵 f_{00} 元素就等于标量 BRDF 值 f_r 。

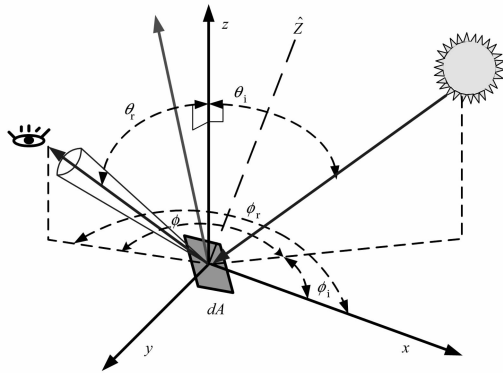


Fig. 1 Geometrical figure of BRDF

本文采用比较测量方法^[14]来得到探测目标的光谱偏振 BRDF。由于入射到物体表面的太阳光可以近似认为是非偏振的, \vec{E}_i 可以只用其第一个元素 E_i 表示,因此只能反演出 $F_r(\theta_i, \theta_r, \phi_i, \lambda)$ 的第一列元素,称这列元素为光谱偏振 BRDF 的 Stokes 矢量表示形式。且光谱偏振 BRDF 的辐射控制方程为^[15]

$$\begin{bmatrix} f_{00} \\ f_{10} \\ f_{20} \end{bmatrix}_{(\lambda)} = \frac{\vec{L}_r}{kE_i} \quad (3)$$

其中 k 和太阳高度角、大气情况等相关的量,一般在大气情况较为稳定时可以认为其值只与太阳高度角有关(参见 Jame R 的博士论文, Rochester Institute of Technology, 2005)。

光谱偏振 BRDF 的偏振度和偏振角为

$$DoP_{(\lambda)} = \frac{\sqrt{f_{10(\lambda)}^2 + f_{20(\lambda)}^2}}{f_{00(\lambda)}} \quad (4)$$

$$AoP_{(\lambda)} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{f_{20(\lambda)}}{f_{10(\lambda)}} \right) \quad (5)$$

自然背景的反射光中,与人工目标相比,由于探测器接收的光中多次散射光占主要成分^[16,17],因而背景 DoP 相对较小, DoP 参量能较好区分目标与背景,且能够清晰地表达

粗糙背景的纹理特征^[18];而 AoP 则描述了不同材料的表面取向,在不同材料的交界处变化较大,能够很好区分目标和背景材料及提取边缘信息,但 AoP 参数受噪声影响较为明显。

2 光谱偏振 BRDF 与探测角、波长关系

光谱偏振 BRDF 与波长、探测角之间存在较大的关系,由于 f_{00} 和 DoP 参数较为稳定且物理意义较为明确,本文通过户外测量不同探测及不同波长的涂层绿漆木板的偏振 BRDF 值,分析之间存在的定量关系,图 2 和图 3 所示为偏振 BRDF 的 f_{00} 和 DoP 参数值与探测角、波长之间的关系。

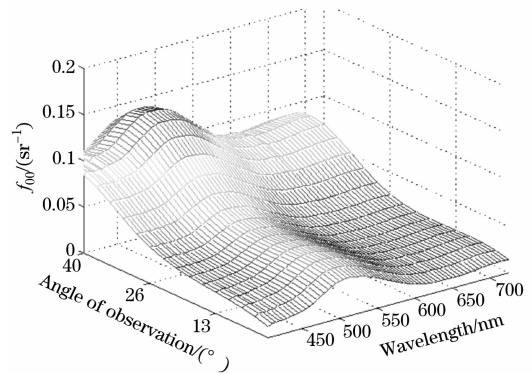


Fig. 2 f_{00} values of green-painted board depending on angle of view and wavelength

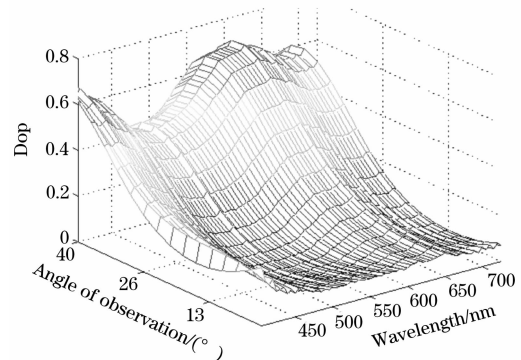


Fig. 3 DoP values of green-painted board depending on angle of view and wavelength

图 2 表示的是表面绿漆涂层木板光谱偏振 BRDF 的 f_{00} 参数随探测角、波长的变化关系,其中探测角范围为 $5^\circ \sim 40^\circ$,波长从 $400 \sim 720$ nm。从图中可以看出绿漆涂层木板的光谱偏振 BRDF 的 f_{00} 参数在波长 $400 \sim 600$ nm 范围内,随波长变化较为明显,且在波长为 530 nm 左右时达到最大值,也即绿光的波段,由此可知 f_{00} 参数是反映目标表面对入射光的反射情况,而其值是与目标表面反射率成正比的;当波长从 600 nm 变化到 720 nm, f_{00} 值基本保持不变。对于绿漆涂层木板,其 f_{00} 参数在观测角在 $5^\circ \sim 20^\circ$ 范围时,其随观测角的变化关系较不明显,表现为较强的朗伯体特性;但当观测角大于 20° 时,非朗伯性显著,从 20° 变化到 40° 时, f_{00} 值

急剧增大, 大约变化为原来的3倍。

图3显示绿漆涂层木板 DoP 值相对都较大, 最大值可达0.6。自然背景的偏振度普遍较小^[17], 一般不大于0.2, 这是可以根据人造目标的 DoP 值显著较自然背景大来进行目标、背景的分类的依据。 DoP 随波长变化的曲线与 f_{00} 随波长变化的曲线大致成相反关系, 一般在 f_{00} 小时 DoP 较大, 当波长为530 nm左右时, DoP 有较明显的极小值, 这说明反射率较大时, 其 DoP 往往较小。当探测角较小时, 其随波长变化的曲线特性与探测角较大时随波长变化曲线特性相差较为明显, 这是由于当探测角较小时, 测量得到的实验值较小, 受噪声影响较为明显所致。在实验探测角范围内, 当探测角较大时, DoP 随探测角为基本单调递增。

3 光谱偏振 BRDF 模型及其验证

粗糙涂层表面可看成是由一系列法向各不相同的微小面元构成, 因而整体的散射特性是由各个微小面元之间的散射特性决定^[18]。基于微小面元的偏振度模型理论及相应的公式推导在文献^[19]中有详细介绍, 这里只引用与本文相关的几个元素及公式

$$f_{\mu}(\theta_i, \theta_r, \phi) = \frac{1}{(2\pi)(4\sigma^2)(\cos\theta)^4} \cdot \frac{\exp\left[-\frac{\tan^2\theta}{2\sigma^2}\right]}{\cos(\theta_r)\cos(\theta_i)} \times m_{\mu}(\theta_i, \theta_r, \phi) \quad (6)$$

实验中只能得到3个元素及2个导出元素, 由于 AoP 参数是表示 Stokes 矢量第三个分量与第二个分量的比值, 受噪声影响较为明显, 在此不对其进行建模。文献^[3]给出了自然光照下的基于小面元的偏振度模型

$$DoP(n, k) = \frac{2A\sin^2(\beta)\cos(\beta)}{A^2\cos^2(\beta) + \sin^4(\beta) + B^2\cos^2(\beta)} \quad (7)$$

其中物理量的说明参考文献^[3]。

从表达式(6)中可以看出, 强度分量中包含很多较难确定的物理量, 如表面粗糙度、折射率等, 因而对其进行建模较为困难, 本文采用目前较为普遍且精度较高的半经验指数非线性模型^[20]

$$f_{00} = \frac{a \cdot \exp[-b(\theta_i - \theta_r)^2] + d \cdot \cos\theta_r}{\cos\theta_i \cos\theta_r} \quad (8)$$

由于选用 LM 非线性优化算法时, 模型参数反演结果很大程度上依赖于初值的选取^[13], 很容易陷入局部最优; 而选用遗传算法进行优化时, 由于遗传算法中种群数量、交叉、变异概率等的选择也较大地影响算法的性能^[12], 较难得到一致精确解。综合分析, 在进行非线性模型参数反演时, 先用遗传算法得到模型反演参数, 再将该值作为 LM 优化算法的初值。本文提出遗传算法和 LM 算法相结合的优化方法在各个波长上反演非线性模型参数, 进而得到光谱偏振 BRDF 模型。首先在各个波长上构建优化目标函数为

$$\begin{aligned} \min E(\mathbf{x}) &= A/B, \\ A &= \sum [s_p(\theta_i, \theta_r, \phi; \lambda) - s_p^0(\theta_i, \theta_r, \phi; \lambda)]^2, \\ B &= \sum [s_p^0(\theta_i, \theta_r, \phi; \lambda)]^2 \end{aligned} \quad (9)$$

其中 \mathbf{x} 为模型参数向量; $s_p(\theta_i, \theta_r, \phi; \lambda)$ 表示的是波长为 λ 的 f_{00} 和 DoP 的模型预测值; $s_p^0(\theta_i, \theta_r, \phi; \lambda)$ 表示的是波长为 λ 的 f_{00} 和 DoP 的实验测量值。通过在每个波长上利用已知几何位置条件的实验测量值最小化 $E(\mathbf{x})$ 来反演每个波长上的模型参数来实现 450~700 nm 波长上的光谱偏振 BRDF 模型。户外实验测量得到的数据库中包含户外不同探测几何条件的数据组为 20 组, 从中选取 5 组做为训练样本进行模型参数反演。

以下为遗传 LM 优化算法进行非线性模型参数反演的步骤(其中选择初始波长为 450 nm, 最终波长为 700 nm):

(1) 构造每一波长的目标函数, 如式(9)所示, 首先利用遗传算法求解 a, b, c, d, n, k 的初值(设置遗传算法的一些参数, 如种群数量初始选为 1 000、交叉概率 0.2、变异概率 0.8、迭代次数等);

(2) 设置 LM 迭代次数 50 次, 并将由第 1 步求得的值作为初始值进行参数反演;

(3) 若 2 满足终止条件, 则进入 4; 反之, 说明该波长上的初始值选择不合理, 此时增加 1 中遗传算法的种群数量, 进 4;

(4) 下一个波长, 重复 1, 2, 3 直至波长到达最终波长;

(5) 重复 2, 3 直至波长到达最终波长。

为了证明选用优化算法的可靠性及收敛性, 进行了仿真实验, 如图 4 所示。其中 Reference 曲线是已知折射率, 由小面元模型(7)式求得, Contaminated 曲线是在 Reference 曲线加入白噪声, 仿真实验中加入噪声的方差大小为 Reference 曲线最大值的 5%。Estimated 曲线是用本文提出的优化算法对模型参数进行估计得出。从图 4 中可以看出随着仿真次数的增加, Estimated 曲线与 Reference 曲线愈加接近, 反演的折射率也更加接近真实折射率; 仿真实验还表明当噪声方差较大时, 获得的 Estimated 曲线和 Reference 曲线相差都较大, 且当仿真次数增大, 效果并没有显著改变; 同时在进行模型参数反演时, 选取较为分散的数据点, 相对于较为集中的数据点能获得较好的结果。总的来说, 本文提出的优化算法具有较好的获取全局最优点的性能。从仿真实验中, 可以总结出在实验测量过程中, 应当尽量减少实验误差; 再者, 需要多次采集相同几何位置的数据点。

Table 1 Retrieved refraction index of different wavelength for two painted targets

Wavelength/nm	Painted board		Painted Fe	
	n	k	n	k
550	2.148 3	2.001 7	/	/
600	1.133 8	1.039 3	1.307 7	1.215 4
650	1.074 6	0.897 7	1.345 4	1.090 3
700	1.572 2	1.361 9	1.579 8	1.496 1

图 5 所示为其中一组涂层目标的模型预测值与户外实验测量值之间的比较。从图中可以看出, 采用模型较为准确地描述了涂层目标 f_{00} 随波长变化关系, 当波长小于 550 nm

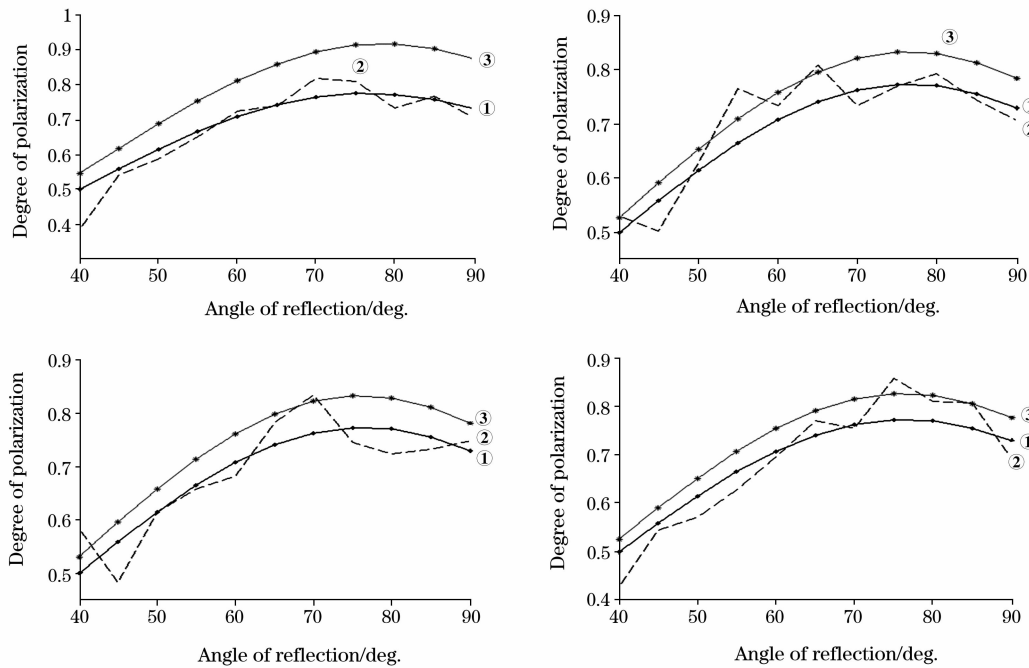


Fig. 4 Results of simulation

Simulated times 1: 10; 2: 50; 3: 100; 4: 200

①: Reference; ②: Contaminat; ③: Estimat

时,模型预测值与实验测量值相差较大,但模型预测值能很好的表述其随波长变化的关系,总体来说,模型预测值整体上都表现了较好的措度,表明采用模型可以准确地预测已知探测几何条件下各个波长的涂层目标 f_{00} 值。

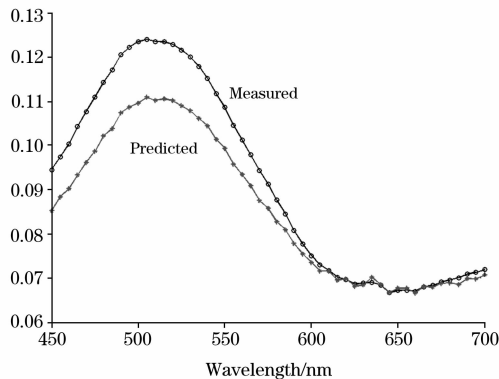


Fig. 5 Predicted and measured f_{00} values of green-painted board in the range of 450~700 nm

偏振度分量中包含的物理量只包含测量目标的折射率,可以对其进行建模,进而反演得到该模型参数,对于进一步的物质分类等具有积极意义。对于偏振度的建模过程中的参数反演,本文选用的优化算法是遗传 LM 优化算法来反演非线性模型参数,其中模型为基于小面元理论。反演出的模型参数为表达物体表面本质特征的折射率。图 6 所示为绿漆木板 4 个波长的 DoP 模型计算值与实验测量值之间的关系。从中可以看出,4 个波长的模型计算值和实验测量值吻合都较好。表明基于小面元的偏振度模型具有较好的精度,具有

良好的应用前景。

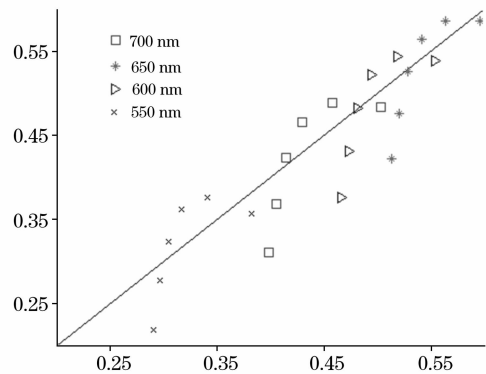


Fig. 6 Predicted and measured DoP values of green-painted board of several wavelengths

表 1 为模型反演得出的两种目标在不同波段的折射率。从表中可以得出相同涂层不同材质的两种目标,其折射率相差较小。折射率在不同的波长有所不同,但变化较小。波长为 550 nm 时,和其他几个波段相差较大,这是由于实验测量采用光谱仪(Ger2600)在波长小于 550 nm 时受噪声影响较大。从表 1 中还可以得出:比较 2 种相同涂层、不同材质的测量目标,可以发现模型反演得出的折射率较为接近,显然这不是木板和铁板所具有的。分析原因可能是由于测量目标表面的涂层比较厚,两种测量目标涂层又较为接近,已经较大程度上掩盖了目标的信息。当入射光进入涂层介质时,而其强度是以指数衰减,此时探测器接收到的大多数都为涂层

的反射、多次散射光。因而两种相同涂层、不同材质光谱偏振 BRDF 之间的差别可以理解为涂层厚度、涂层均匀程度等表面物理特性之间的差异。

4 结 论

本文从户外实验测量得到的光谱偏振 BRDF 数据出发,分析了涂层目标光谱偏振 BRDF 与探测角、波长之间的关系;由于实验测量得到的数据是有限的,不能完整描述涂层表面在 2π 空间范围内的光谱偏振二向反射特性,为此从得到的已知测量几何位置关系的实验数据入手建立了描述数学模型。在反演非线性模型中,综合了遗传算法和 LM 算法各自的优势,较好地满足了精度要求。从模型的预测值与户外

实验测量值的比较中,可以得出:所建立的光谱偏振 BRDF 模型具有较好的预测精度,能准确描述探测目标随探测角、波长的变化关系,同时根据建立的光谱偏振 BRDF 模型,可以预测任意探测几何条件下的光谱偏振 BRDF 值。由于描述偏振度模型中包含描述物质特性的折射率参量,最后与相同颜色涂层不同材质的目标反演之后的参数进行了分析比较。结果表明:两种涂层目标反演后的模型参量较为接近,也具有较为接近的折射率。在可见光范围内,利用光谱偏振特性进行分离相同涂层、不同材质的目标是较为困难的。此时,可以将波段范围拓展到红外波段来获得目标更丰富的信息,综合利用多波段、多时相及偏振特性等来实现分离的目的。

参 考 文 献

- [1] Nicodemus F E, Hsia J C. National Bureau of Standards (U. S.) Monograph, 1977.
- [2] Robert L Cook, Kenneth E Torrance. ACM Tansactions on Graphic, 1982, 1(1): 7.
- [3] Thilak V, Creusere C D, Voelz D G. Image Processing. ICIP. IEEE International Conference on, 2007, 4: 121.
- [4] Zallat J, Grabbling P, Takakura Y. Image Processing. ICIP. Proceedings. International Conference, 2003, 3: 327.
- [5] Wolff L B. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(11): 1059.
- [6] Hua Chen, Lawrence B Wolff. International Journal of Computer Vision 1998, 28(1): 73.
- [7] YU Fa-jun, ZHAO Yuan-li, LIU Wei, et al(余发军, 赵元黎, 刘 伟, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2008, 28(10): 2396.
- [8] ZHAO Yong-qiang, GONG Peng, PAN Quan. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(10): 3337.
- [9] CAO Yun-hua, WU Zhen-sen, ZHANG Han-lu, et al(曹运华, 吴振森, 张涵璐, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2008, 28(4): 792.
- [10] Feng Weiwei, Wei Qingnong. Infrared Physics & Technology, 2008, 51(6): 559.
- [11] LIU Jia, FAN Wen-yi (刘 佳, 范文义). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 2008, 23(1): 104.
- [12] XI Yu-geng, CHAI Tian-you, YUN Wei-min(席裕庚, 柴天佑, 恽为民). Control Theory and Application(控制理论与应用), 1996, 13(6): 697.
- [13] Madsen K, Nielsen H B, Tingleff O. Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, DTU, 2004, 24.
- [14] SONG Fang-ni, FAN Wen-jie, LIU Qiang, et al(宋芳妮, 范闻捷, 刘 强, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2007, 11(3): 296.
- [15] Shell James R, Schott John R. Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, 2005, 5811: 34.
- [16] SONG Kai-shan, ZHAO Yun-sheng, ZHANG Bai(宋开山, 赵云升, 张 柏). Chinese Journal of Soil Science(土壤通报), 2004, 35(4): 420.
- [17] CHEN Chao, ZHAO Yong-qiang, CHENG Yong-mei, et al(陈 超, 赵永强, 程咏梅, 等). Journal of Optoelectronics Laser(光电子激光), 2009, 20(3): 369.
- [18] YANG Tie-heng, ZHAO Yong-qiang, PAN Quan, et al(杨铁恒, 赵永强, 潘 泉, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2008, 39(12): 2520.
- [19] Richard G Priest, Steven R Meier. Optical Engineering, 2002, 41(5): 988.
- [20] Torrance K E, Sparrow E M. Journal of the Optical Society of America, 1967, 57(9): 1105.

Model and Analysis of Spectropolarimetric BRDF of Painted Target Based on GA-LM Method

CHEN Chao, ZHAO Yong-qiang, LUO Li, PAN Quan, CHENG Yong-mei, WANG Kai

College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract Models based on microfacet were used to describe spectropolarimetric BRDF (short for bidirectional reflectance distribution function) with experimental data. And the spectropolarimetric BRDF values of targets were measured with the comparison to the standard whiteboard, which was considered as Lambert and had a uniform reflectance rate up to 98% at arbitrary angle of view. And then the relationships between measured spectropolarimetric BRDF values and the angles of view, as well as wavelengths which were in a range of 400-720 nm were analyzed in details. The initial value needed to be input to the LM optimization method was difficult to get and greatly impacted the results. Therefore, optimization approach which combines genetic algorithm and Levenberg-Marquardt (LM) was utilized aiming to retrieve parameters of nonlinear models, and the initial values were obtained using GA approach. Simulated experiments were used to test the efficiency of the adopted optimization method. And the simulated experiment ensures the optimization method to have a good performance and be able to retrieve the parameters of nonlinear model efficiently. The correctness of the models was validated by real outdoor sampled data. The parameters of *DoP* model retrieved are the refraction index of measured targets. The refraction index of the same color painted target but with different materials was also obtained. Conclusion has been drawn that the refraction index from these two targets are very near and this slight difference could be understood by the difference in the conditions of paint targets' surface, not the material of the targets.

Keywords Painted target; GALM optimization algorithm; Spectropolarimetric BRDF; Microfacet model

(Received Mar. 22, 2009; accepted Jun. 26, 2009)