

文章编号: 0258-7025(2009)11-3011-04

基于半球空间光纤阵列的双向反射分布测量

任 驹 赵建林

(西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所 光信息技术陕西省重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 提出了一种基于半球空间光纤阵列的双向反射分布函数(BRDF)测量方法与系统。将多根光纤组成的阵列均匀分布于半球面上,使球心处物体表面反射的光在三维空间中的角分布转换为同一平面上的二维图像,经 CCD 采集及相应的数据处理,可实现对物体表面双向反射分布函数的快速测量。同时,利用光纤将照射激光束传输到物体表面待测点,并通过光纤的弯曲角度可改变光束的入射角。利用该测量系统对不同材质、不同加工工艺的物体表面的激光反射分布进行了初步的测量和分析。结果表明,相比传统的扫描式测量系统,该测量系统在提高测量速度的同时,避免了由于光源功率的起伏和探测器响应度的涨落所引起的测量误差,且结构简单,使用方便。

关键词 散射;双向反射分布函数;光纤;反射测量

中图分类号 O432.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20093611.3011

Measurement of Surface Bidirectional Reflectance Distribution Based on Optical Fiber Array in Hemispheric Space

Ren Ju Zhao Jianlin

(Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract A novel approach and system for measurement of bidirectional reflectance distribution function (BRDF) based on optical fiber array in hemispheric space are proposed. With a fiber array composed of numerous multimode fibers located uniformly in a hemisphere, the angular distribution of surface optical reflectance in tri-dimensional space is transformed into a two-dimensional planar image. By collecting the image using a CCD camera and going through a corresponding data processing, a fast measurement of BRDF can be realized. Furthermore, the laser beam is transmitted and guided by fibers to irradiate the sample surface in various incidence angles. Primary measurements and analysis of surface reflectance of varied substance along with various machining process are carried out with this system. The results indicate that, comparing with conventional measurement systems, this novel one can avoid the measuring errors generated by the fluctuation of laser power and the sensitivity of the detector, as well as dramatically shorten the acquisition time. In addition, a compact configuration eases the measurement procedure consumedly.

Key words scattering; bidirectional reflectance distribution function; optical fiber; reflectance measurement

1 引 言

对物体表面反射特性的测量在目标识别、表面检测、光学仪器中杂波削减、建筑采光设计、计算机图形学及机械、电子、汽车工业等大规模生产中的质量监测与控制等方面具有重要的意义^[1~6]。物体表面反射光场的空间分布可以用双向反射分布函

数^[7,8] (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) 来描述。BRDF 纪录了物体表面对不同角度入射光在表面上半球空间中各个方向的反射分布,其测量过程复杂,数据量大。现有测量 BRDF 的装置主要包括两类:一类是利用单个或多个光电探测器在待测样品表面上方作二维或一维扫

收稿日期: 2008-11-28; 收到修改稿日期: 2009-01-19

作者简介: 任 驹(1981—),男,博士研究生,主要从事表面光散射方面的研究。E-mail: renju1981@126.com

导师简介: 赵建林(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事光信息技术方面的研究。E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn
(通信联系人,中国光学学会会员号(S040420657S))

描,逐点探测表面沿各个角度的反射^[9~12];另一类是利用成像系统将各个反射方向的光辐射分布成像到阵列式探测器上,再通过图像处理得到双向反射分布函数^[13~15]。

第一类装置的特点是探测器响应范围较大,配合后续电路可以实现表面沿任意角度反射光辐射通量的精确测量,缺点是耗时多,虽然采用计算机控制自动扫描可以提高测量速度,但仍不能实现在线实时测量,且测量过程中容易因光源输出功率及探测器响应度变化而影响最终测量结果,重复性也较差。

第二类装置中,各个角度的反射光辐射通量由光学成像和图像采集方法获取,可以实现在短时间内同时测量空间各个角度的光强分布,因此测量结果比较稳定,重复性好。但 CCD 等图像采集器件多为平面阵列结构,要实现对反射到整个半球空间各个方向光辐射的采集,需要适当的系统对光线方向进行变换。J. D. Kristin^[13]采用离轴抛物面镜,将反射到不同方向的光线转换到同一方向,并通过 CCD 进行记录,但只能接收到半球空间中某一有限立体角范围内的反射光,且该方法只能对特定的样品进行测量,无法对固定的大型目标进行测量。

针对反射光场分布测量的复杂性及现有测量系统的不足,本文提出一种可以快速测量各种目标物体表面大角度范围 BRDF 的方法,并给出实验装置的设计及初步实验结果分析。

2 原 理

图 1 为 BRDF 的几何图示,物体表面 S 处于 xy 平面, z 轴正向为表面法线方向,假设一束单色光从 (θ_i, φ_i) 方向照射到表面 S 上的 O 点, (θ_r, φ_r) 为观测方向,则 BRDF 定义为^[8]

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)}, \quad (1)$$

式中 dE_i 为沿 (θ_i, φ_i) 方向的光在 O 点产生的辐射

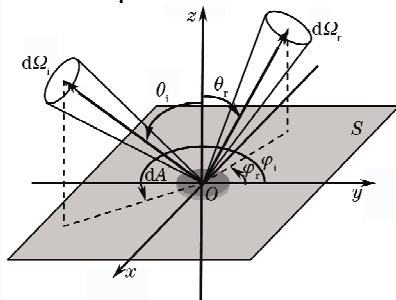


图 1 双向反射分布函数图示

Fig. 1 Geometry for the definition of BRDF

照度, dL_r 为在 (θ_r, φ_r) 方向观测到的 O 点的辐射亮度。由辐射度学的定义^[16,17],并考虑到实际测量中光束及探测器的有限尺度,可将 BRDF 写为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \approx \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\Phi_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i)}{\Phi_{r0}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i)}, \quad (2)$$

式中 $\Phi_{r0}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i)$ 为标准朗伯反射板的反射辐射通量分布。(2)式表明, BRDF 正比于相同条件下测得的样品和标准朗伯板反射的辐射通量之比,比例系数为 $1/\pi$ 。因此,在相同条件下测得样品及标准朗伯板反射的辐射通量分布,就可以计算出 BRDF。

3 测量装置及方法

图 2 所示为所提出的 BRDF 测量系统结构,其关键部分由均匀分布在直径 60 mm 的半球壳表面上的 825 根塑料光纤组成,光纤芯径 0.5 mm,包层直径 1 mm,损耗 0.3 dB/m。光纤的一端面法线指向球心 O ,另一端面位于同一垂轴平面上,并在该平面上按极坐标排列成一圆盘阵列。半球面上光纤端面法线的指向与系统主轴 OO' 的夹角(天顶角)正比于光纤另一端轴线到 OO' 的距离,以保证自球心处反射的光在整个半球空间中的分布被位于半球面上的光纤端面接收,并传输到位于圆盘平面上的另一端。圆盘面上贴一毛玻璃薄片,自光纤端面出射的光在毛玻璃上形成一幅二维图像,其每一个像素对应于反射的某一空间角度,故该图像完整地记录了由球心处向整个半球空间各个方向反射的辐射通量的相对分布。利用面阵 CCD 可以很方便地采集到这一幅图像。实验中光源采用波长为 650 nm 的半导体激光器,光束经透镜会聚和分束镜分束后分别聚焦于入射光纤端面处和光电二极管的光接受面上,光电二极管对光源的输出功率进行实时监测。半球底面为一薄片光阑,其底面与半球赤道面重合,光阑表面为黑色吸光涂层,在球心位置开一直径约 2 mm 的圆孔,用以限制入射光的照射方向和照射面积。入射光经光纤传输以一定的入射角照射到位于球心处的待测物体表面。3 根入射光纤分别以 $5^\circ, 45^\circ, 80^\circ$ 的入射角照射到待测表面的同一位置,光纤另一端排成平行的一列,这样使得在分束镜不动的情况下,激光器、会聚系统和光监测二极管进行垂直于系统主轴的整体平移就可以实现不同的入射天顶角,而入射方位角的变化则可以通过绕主轴旋转待测样品来实现。在测量比较小的平面样品时,将样品的待测面紧贴光阑底面放置,样品的待测区域

置于光阑开孔处,沿光阑底面平移样品可以测量样品不同区域的双向反射特征。对于各向异性的表面样品,绕系统主轴 OO' 旋转样品,可以实现不同的入射方位角以测量各向异性的表面反射分布。若待测表面为不可移动的大型物体表面,可将测试装置放置于该表面上,使得光阑底面紧贴物体的待测表面进行在线测量。

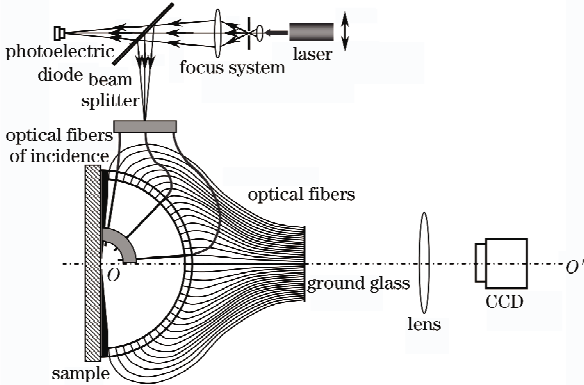


图 2 基于半球空间光纤阵列的 BRDF 测量装置

Fig. 2 Experimental setup for BRDF measurement based on optical fiber array in hemispheric space

假设该测量系统为一个线性系统,则样品反射

辐射通量分布的测量值可以表示为

$$\Phi'_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i) = A\Phi_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i) + \Phi_0, \quad (3)$$

式中 $\Phi_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i)$ 为样品反射辐射通量分布的真实值, A 和 Φ_0 表征了测量装置的误差, $A = A(\theta_r, \varphi_r)$ 是由不同角度处光纤通道的损耗以及透镜成像过程中的光程差异决定的二维数组, $\Phi_0 = \Phi_0(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i)$ 是由环境光及入射光在光阑处的衍射决定的二维数组。标准漫反射板反射辐射通量分布的测量值可以表示为

$$\Phi'_{r0}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i) = A\Phi_{r0}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i) + \Phi_0, \quad (4)$$

实际测量时,在一定入射角下,首先对一反射率为零的光陷进行测量,相应于(3)式中 $\Phi_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i) = 0$, 即可由 CCD 采集得到 Φ_0 的值。然后在相同条件下采集到标准漫反射板的反射分布测量值 $\Phi'_{r0}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i)$ 。标准漫反射板的反射辐射通量分布的标定值 $\Phi_{r0}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i)$ 已知,由式(4)对 CCD 采集得到的图像进行简单的处理便可得到 $A(\theta_r, \varphi_r)$ 。进而再对样品进行测量得到 $\Phi'_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i)$, 就可以由(3)式计算出 $\Phi_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i)$ 的值,利用(2)式便可以求得样品的 BRDF 值。

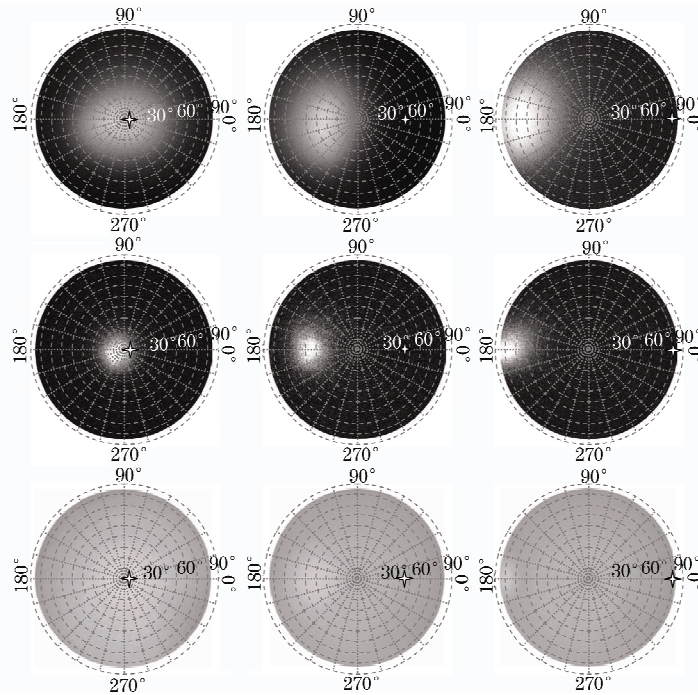


图 3 表面双向反射分布函数测量结果

Fig. 3 Measurement results of BRDF

4 测量结果及分析

图 3 为采用上述方法及装置对 3 种不同样品双向反射分布函数的初步测量结果。图中自上而下分

别对应粗磨铝板、抛光铝板和硫酸钡粉末压制板表面;从左到右分别对应光束入射角为 $5^\circ, 45^\circ$ 和 80° 。可以看出,抛光铝板的表面反射特性接近于镜面反

射,在镜向方向附近一个很小的立体角范围内具有较强的反射峰,远离镜向方向时反射迅速衰减至零。硫酸钡粉末压制板的表面反射特性接近于理想的朗伯反射,反射亮度在整个半球空间内变化很小,镜向方向附近的亮度略高于周围。粗磨铝板表面反射特性介于上述二者之间,其反射峰比较平缓,且在入射角比较大时,反射峰偏离镜向方向而向法线靠近,分析其原因是表面的凹凸不平对入射及反射光产生遮挡造成峰值偏离。

图3中每个样品的测量过程所需时间小于1 min,远小于采用计算机控制的机械式逐点扫描装置所需时间。在入射角固定情况下,获取一张表面反射分布图耗时小于1 s(CCD曝光时间+数据处理时间),此速度应该可以满足工业产品或目标实时监测的需求。测量装置的角分辨率由光纤的数量和直径及CCD的像素数决定。图3的测量结果角分辨率为 3° 。采用直径更小的光纤并增加光纤数量可以提高装置的测量角分辨率。装置可测量的天顶角范围为 $0\sim 85^\circ$,方位角范围为 $0\sim 360^\circ$ 。采用半导体激光器照明、光纤传输入射光与光阑限制入射方向结合的方式,便于通过光源的平移来改变入射角。整个装置封装后体积很小,便于手持进行移动测量(如直接置于物体表面进行测量)。此外,采用与标准漫反射板进行对比的测量方法,不仅有效避免了由于光纤长度和弯曲差异以及透镜成像过程中的光程差异所造成的系统误差,而且简化了数据处理过程。

5 结 论

通过光纤阵列接收半球空间的光场分布并利用面阵CCD采集图像,实现了在同一瞬时获得空间多个角度方向的反射光分布。该测量系统的主要优势在于:采用半球空间光纤阵列探测方式,避免了复杂的机械平移和旋转机构,使测量系统结构紧凑,便于大型物体表面的在线测量,同时提高了测量效率并方便数据的存储和后续处理;采用与标准反射板进行比照的相对测量方法,消除了由于环境和系统本身所造成的测量误差。利用该测量系统对不同材质、不同加工工艺的物体表面的双向反射分布测量结果表明,系统可以在短时间内获得接近整个半球空间范围内(天顶角范围为 $0\sim 85^\circ$,方位角范围为 $0\sim 360^\circ$)的双向反射分布函数,相比传统的逐点扫描式测量系统,在提高测量速度的同时,避免了由于

光源功率的起伏和探测器响应度的涨落所引起的测量误差。

参 考 文 献

- 1 Zhu Qunzhi. Modeling and Measurements of the Bidirectional Reflectance of Microrough Silicon Surfaces[D]. Georgia: School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, 2004, 1~12
- 2 James F. Blinn. Models of light reflection for computer synthesized pictures [J]. *Siggraph '77, California*, 1977, 11(2): 192~198
- 3 Xincheng Ren, Lixin Guo. Study on optical wave scattering from slightly Gaussian rough surface of layered medium [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, 5(10): 605~608
- 4 Lei Yang, Jiuqiang Han. A polynomial hybrid reflection model and measurement of its parameters based on images of sample [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, 5(12): 683~686
- 5 Wei Huajiang, Xing Da, Wu Guoyong *et al.*. Using spatially resolved reflectance to measure optical properties of stomach tissue [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, 34(4): 582~587
- 6 魏华江,邢 达,巫国勇等. 采样空间分辨漫反射测定胃组织光学特性 [J]. *中国激光*, 2007, 34(4): 582~587
- 7 Ye Jiaxiong, Xu Qiyang, Fu Xinyao. Detection of a sound of modulation signal in scattering laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, 34(4): 507~510
- 8 叶嘉雄,徐启阳,符鑫尧. 探测受声波调制的激光漫反射回波信号 [J]. *中国激光*, 2007, 34(4): 507~510
- 7 J. D. Kristin, V. G. Bram, K. N. Shree *et al.*. Reflectance and texture of real-world surfaces [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1999, 18(1): 1~34
- 8 F. E. Nicodemus, J. C. Richmon, J. J. Hsia *et al.*. Geometric Considerations and Nomenclature for Reflectance [S]. Washington: National Bureau of Standards, 1977, 1~67
- 9 M. Barilli, A. Mazzoni. An equipment for measuring 3D bi-directional scattering distribution function of black painted and differently machined surfaces [C]. *SPIE*, 2005, 5962: 59620L
- 10 Li Hongsong, Sing Choong Poo, Kenneth E. Torrance *et al.*. Automated three-axis gonioreflectometer for computer graphics applications [C]. *SPIE*, 2005, 5878: 58780S
- 11 Gu Zuhan, Wang Anting. Experimental reconstruction for inverse scattering of onedimensional surfaces [C]. *SPIE*, 2007, 6672: 66720H
- 12 Audrey Le Lay. New measurement tool to measure scattering of materials for 2D/3D scattered light measurements & BRDF/BTDF measurements [C]. *SPIE*, 2005, 5965: 596527
- 13 J. D. Kristin. Device for convenient measurement of spatially varying bidirectional reflectance [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, 21(1): 1~12
- 14 C. Hahlweg, H. Rothe. Classification of optical surface properties and material recognition using multi-spectral BRDF data measured with a semi-hemispherical spectro-radiometer in VIS and NIR [C]. *SPIE*, 2005, 5965: 59650G
- 15 C. Hahlweg, H. Rothe. Hemispherical radiometer for angle resolved measurement of IR scatter and radiation behaviour [C]. *SPIE*, 2006, 6396: 63960F
- 16 J. C. Stover. Scatter from optical components; an overview [C]. *SPIE*, 1989, 1165: 2~9
- 17 Jin Weiqi, Iiu Weijie. Radiometry, Photometry and Chroma Measurement [M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology Press, 2006. 3~33
- 金伟其,胡威捷. 辐射度,光度与色度及其测量 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 2006. 3~33