

光学学报

基于超广角成像的粗糙面反射光场测量方法

段宗涛¹, 张健^{1,2,3*}, 张国玉^{1,2,3}, 邹阳阳⁴, 牛政杰¹, 赵斌¹, 莫晓旭¹, 运志坤¹, 张建良⁵, 郭佳⁶

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022;

³光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;

⁴吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130012;

⁵空军航空大学, 吉林 长春 130022;

⁶长春市琬逸科技应用有限公司, 吉林 长春 130022

摘要 针对目前“扫描式”反射光场测量系统依赖复杂机械装置、测量效率低以及“照相式”反射光场测量系统测量角度范围小等问题,提出一种基于超广角成像的粗糙面反射光场测量方法。分析了粗糙面反射光场测量原理,优化设计了折反射超广角成像光学系统,实现了天顶角范围 $0\sim 54^\circ$ 的周视反射光场测量;校准了反射光场测量系统的空间关系与光场强度,校准后反射光场测量最大相对误差为 4.12% ,周视反射光场测量平均相对误差最大为 2.06% ;通过模拟 Labsphere Permafect-80 漫反射板、WhiteOptics-DF60 漫反射板和美国 ACA 镜面铝板 3 种粗糙面的反射光场测量结果,证明了所提表面反射光场测量方法的可行性,丰富了粗糙表面反射光场的测量手段,为对材料表面光学反射特性与损伤等的测量、模拟与重构提供了研究基础与技术支持。

关键词 双向反射分布函数;超广角成像;反射光场;粗糙表面

中图分类号 TH741 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222179

1 引言

粗糙表面的反射光场信息包含反射光角度和强度等,能够用于反演表面反射特性以及粗糙度^[1]、瑕疵和散斑^[2-3]等形貌特征^[4],在目标探测与识别^[5]、在轨辐射定标^[6]、材料特性分析^[7]、光学器件杂散光分析^[8]等研究领域有着重要的研究价值与实际应用意义。

粗糙表面的反射光场信息可以采用双向反射分布函数(BRDF)表征,由于粗糙表面具有各向异性的性质^[9],为了准确反演粗糙表面的反射特性与形貌特征,需要对其全空间角度的 BRDF 进行测量。自 1980 年美国亚利桑那大学充分论述 BRDF 测量原理并给出有效测量公式以来,国内外诸多学者运用机械装置(圆弧轨道、转台、悬臂机构、机械臂等)扫描测量 BRDF^[10]。2009 年加拿大国家研究委员会^[11]利用环形导轨和五轴机械臂对样品及光源移动定位实现了 BRDF 三维测量。2011 年德国弗朗霍夫应用光学与精密工程研究所^[12]利用照明系统和探测器的半球轨迹相对运动,实现了从超抛光透明基板到各类粗糙表面的 BRDF 测量。2018 年西安工业大学^[13]利用旋转台和位移台定

位实现了对整个半球空间的 BRDF 测量,但测量过程需依赖高性能机械运动设备。2022 年中国计量科学研究院^[14]研制了一套近红外波段的 BRDF 测量系统,将六轴机械臂作为变角装置,实现了 $1000\sim 3000\text{ nm}$ 近红外波段全半球空间的 BRDF 测量,测量结果相对不确定度为 1.5% 。

虽然“扫描式”测量的仪器性能得到了很大的提升,实验手段得到了很大的丰富,但这种测量方法获取表面反射光场信息时需多次重新定位,因此存在测量时效慢、测量误差环节多及重复性较差等问题;同时,扫描过程中入射光波长和能量波动对测量数据的影响权重随耗时增加而逐渐增大,可能会导致全空间 BRDF 融合信息失真。为此,国内外研究学者提出了多种更高效的 BRDF 测量方法,以期能够改变“扫描式”测量方式,实现“照相式”的多角度反射光场快速测量。其中,2001 年罗格斯大学^[15]利用抛物面反射镜实现了天顶角 $-36.9^\circ\sim 22.6^\circ$ 范围内目标表面不同角度 BRDF 快速测量,但方位测量范围限制在 90° 内。2014 年德国航空设计中心^[16]利用半椭球体成像实现了天顶角 $6.5^\circ\sim 40^\circ$ 入射光范围内的 BRDF 测量,仪器测量准

收稿日期: 2022-12-29; 修回日期: 2023-01-28; 录用日期: 2023-02-07; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20230201053GX)、国家自然科学基金重大项目(61890960)、长春理工大学科技创新基金(XJLJG-2018-02)

通信作者: *zhangjian_nr@126.com

确性依赖半椭球镜加工精度。同年,相关研究团队^[17]对该半椭球镜原型进行优化改进,提升了测量范围,但由于入射光瞳位置偏移及半椭球制造缺陷,实际测量视场限制在 64° 内。2018年西安理工大学^[18]基于同轴光显微成像实现了对不同粗糙度加工表面在 1° 法向偏角内的BRDF测量,但该方法仅局限于同轴光源测量且所测角度范围偏小,因此只适用于较光滑加工表面的BRDF测量。2021年东芝公司研发中心^[19]通过获取图像颜色分量比来推算表面BRDF分布,实现了天顶角 $0\sim 7^\circ$ 范围铝平板上圆脊的BRDF测量,但该系统只针对正入射光测量且存在测量范围小等问题。

针对目前“扫描式”反射光场测量系统测量效率低,“照相式”反射光场测量系统测量角度范围小等问题,本文提出了一种基于超广角成像的粗糙面反射光场测量方法,优化设计了超广角成像光学系统,实现了大角度范围的多方向角度反射光场信息测量。

2 反射光场测量原理

根据BRDF定义,在光源稳定和探测立体角足够小两个近似条件下,可得到BRDF非微分量原理表达式^[20],为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \approx \frac{L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{E_i(\theta_i, \varphi_i)}, \quad (1)$$

式中: $L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 为目标表面反射辐射亮度; $E_i(\theta_i, \varphi_i)$ 为光源入射辐照度; θ_r 为反射天顶角; φ_r 为反射方位角。

对于均匀性、稳定性和准直性较好的固定光源,可将 $E_i(\theta_i, \varphi_i)$ 视为常数 C ^[20]。此时,可根据光场强度分布 $I(x, y, z, \theta_r, \varphi_r)$ 进行推算实现对BRDF的测量,测量原理如图1所示,原理公式即式(1)可变换为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \approx \frac{I(x, y, z, \theta_r, \varphi_r)}{\cos \theta_r AC}, \quad (2)$$

式中: (x, y, z) 为样本表面上辐照面中心位置坐标; A 为入射光在目标表面上照亮区域内能够被探测的有效面积。

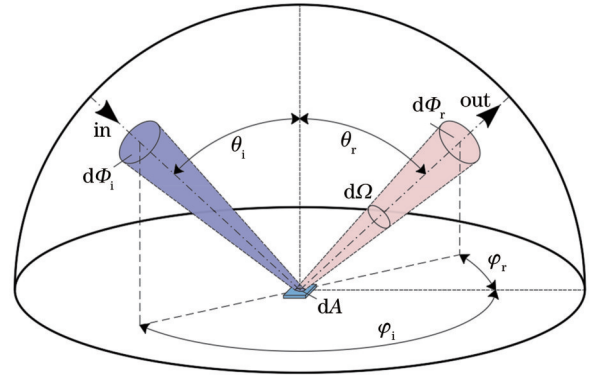


图1 BRDF测量原理

Fig. 1 BRDF measurement principle

据此,本文设计的反射光场测量系统如图2所示。其中系统主要由光源、待测样品板、半球反射球幕和折反射超广角成像光学系统(非球面反射镜和透射成像系统)等组成。

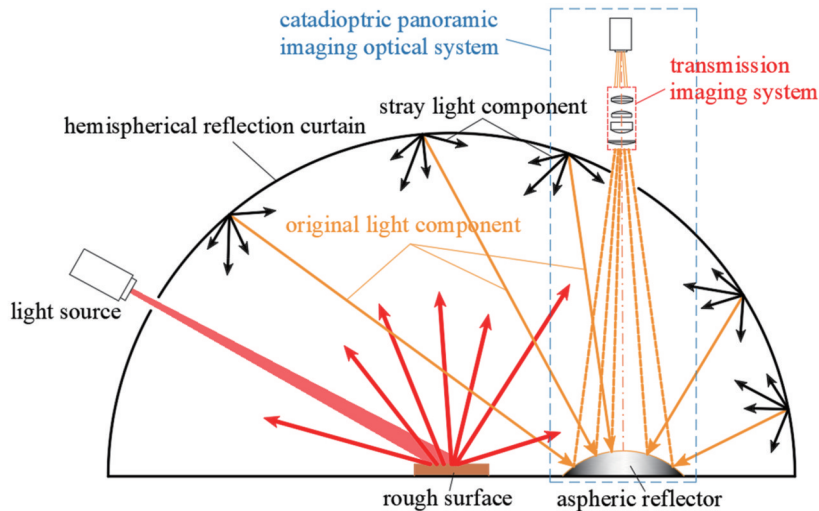


图2 反射光场测量系统总体结构示意图

Fig. 2 Overall structure diagram of reflective light field measurement system

光源发出的光束投射于目标表面待测区域,经待测目标表面反射至半球反射球幕内表面涂层上,再经涂层散射产生两个分量,即未受干扰的原始光和经涂层表面多次反射的杂散光。原始光分量被非球面反射镜捕捉反馈至透射成像系统前透镜,再由透射成像系统的透镜组校正系统整体像差,最终光束聚焦于CCD

传感器探测表面。经校正补偿后,计算表面BRDF得出测量结果。杂散光分量则被涂层吸收但也有少量杂散光在半球反射球幕内多次反射,导致背景噪声产生,为过滤背景噪声降低测量影响,半球反射球幕内表面涂层选用低反射率材料^[21]。

3 折反射超广角成像光学系统设计与仿真

3.1 折反射超广角成像光学系统设计

根据等距离投影的原理设计反射镜面型^[22],以反射镜地面中心 O_b 为坐标原点,设反射镜面在 XO_bZ 平面内的截线方程为 $z = F(x)$,此时,构建的非球面反射镜数学模型如图 3 所示。

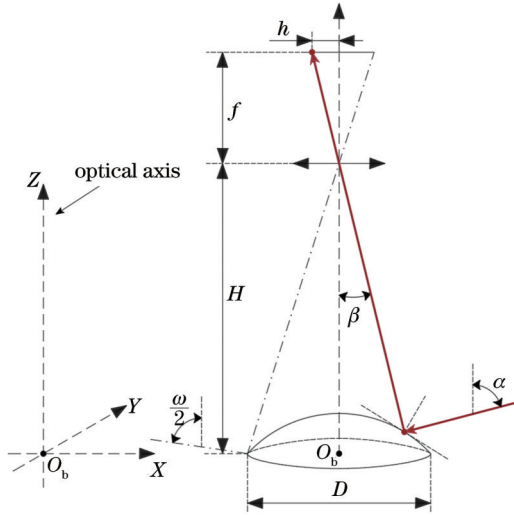


图 3 非球面反射镜数学模型
Fig. 3 Mathematical model of aspheric mirror

设折反射超广角成像光学系统像高 h 与入射夹角 α 存在线性比例关系:

$$\alpha = \kappa \cdot h = \kappa \cdot f \tan \beta, \quad (3)$$

式中: κ 为比例系数; f 为有效焦距; β 为反射光线与光轴的夹角。当系统测量天顶角为最大角度 $\omega/2$ 时,点 O_b 与光学系统主点之间的距离 H 可以表示为

$$H = \kappa \cdot \frac{Df}{\omega}, \quad (4)$$

式中: D 为非球面反射镜口径。根据式(4)及非球面反射镜面数学模型几何关系^[23],可得到非球面反射镜的微分方程:

$$\frac{2F'(x)}{1 - [F'(x)]^2} = \frac{Hx - 2xz}{x^2 + Hz - z^2} \quad (5)$$

根据式(5),可求解得非球面反射镜截面方程,再通过 Zernike 多项式拟合,得到非球面反射镜面型的高阶方程:

$$z = \frac{cx^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2x^2}} + a_1x^2 + a_2x^4 + a_3x^6 + a_4x^8. \quad (6)$$

为保证折反射超广角成像光学系统视场范围与所测量反射光场的天顶角范围一致,光学系统物面设计为半球面。选用的 CCD 传感器分辨率为 $1936 \text{ pixel} \times 1216 \text{ pixel}$,像素尺寸为 $5.86 \mu\text{m}$,CCD 的光谱响应峰

值波长应与拟采用的入射光源的中心波长相匹配,以保证入射光源中心波长处的响应灵敏度^[24]。考虑到反射镜对表面反射后光线的遮拦问题,折反射超广角成像光学系统的视场角定为 54° ,以双高斯透镜组和非球面反射镜组成的离轴折反射结构进行优化设计,优化后半球反射球幕半径为 300 mm ,超广角成像光学系统到半球反射球幕中心的距离为 100 mm ,透射成像系统焦距为 53.34 mm ,非球面反射镜口径为 42 mm 。折反射超广角成像光学系统结构光路如图 4 所示。

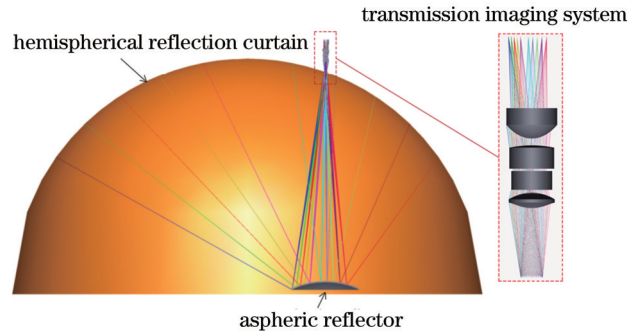


图 4 折反射超广角成像光学系统结构光路图
Fig. 4 Structural light path diagram of catadioptric panoramic imaging optical system

图 5 为优化后的调制传递函数(MTF)曲线,可以看出在奈奎斯特频率下,全视场范围内在 85 lp/mm 时的 MTF 值均大于 0.4 ,并在低频具有良好的反差,MTF 曲线相对集中平滑,对比度和成像质量较好,符合设计要求。

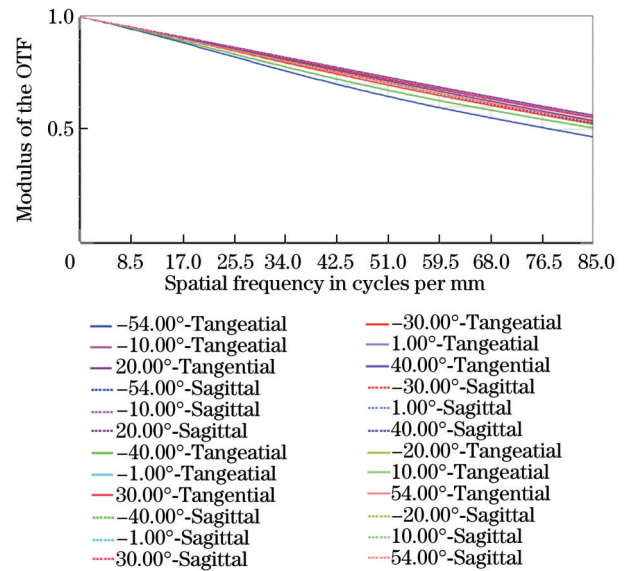


图 5 调制传递函数曲线
Fig. 5 Modulation transfer function curve

图 6 为优化后的点列图,图中 12 个视场的均方根半径均小于 $5.86 \mu\text{m}$,所有视场的光斑均在一个像元大小内,成像可以被传感器所接收。

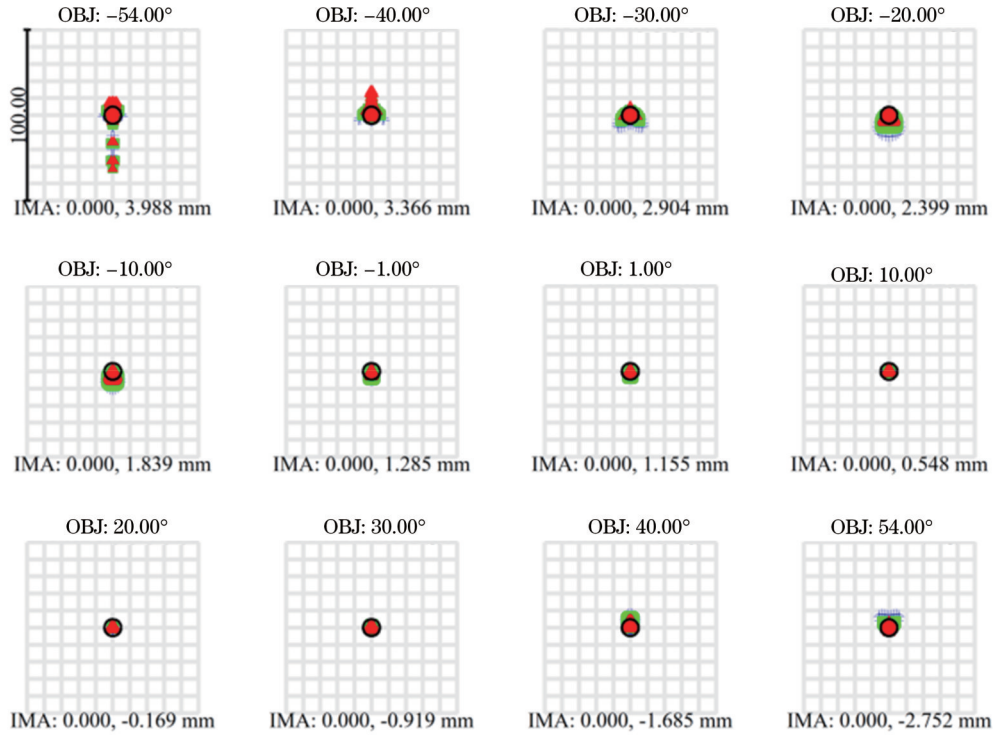


图 6 点列图

Fig. 6 Spot diagrams

3.2 折反射超广角成像光学系统仿真

为获知光学系统的实际视场范围和角度分辨率,在LightTools软件中以不同的间隔角度建立视场角度分辨率仿真灯阵,经对比发现,在0~54°天顶角范围内最佳分辨角度为2°,0~360°方位角范围内最佳分辨角度为15°。此时的视场角度分辨率仿真灯阵模型如图7所示,灯阵排列角度分布如图8所示,角度分辨率模拟像面照度分布如图9所示。

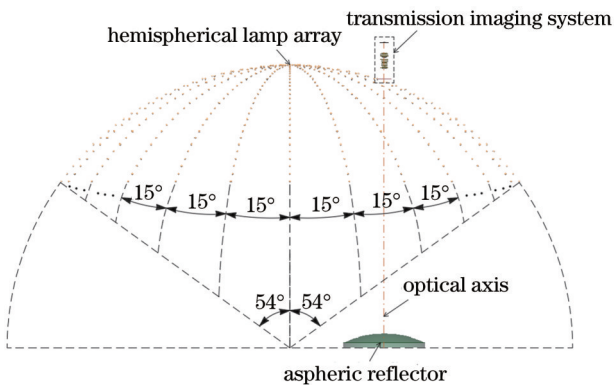


图 7 视场角度分辨率仿真灯阵模型

Fig. 7 Simulated light array model of field angle resolution

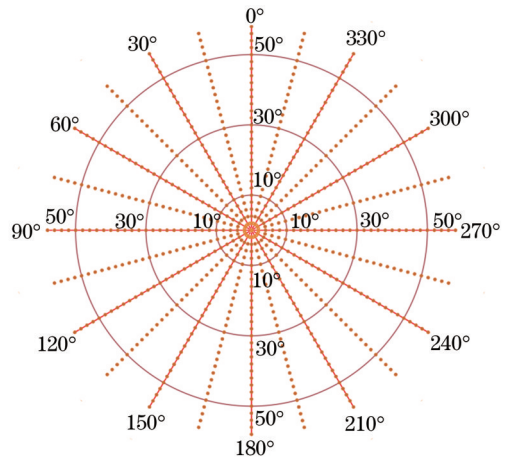


图 8 灯阵排列角度分布图

Fig. 8 Angle distribution diagram of lamp array arrangement

光学系统光轴存在离轴关系,同时考虑到折反射超广角成像光学系统自身桶形畸变等像差影响,需要对离轴空间位置进行校准。由于离轴空间位置校准实际为建立光学系统像面与半球反射球幕上空间位置的映射,因此,可将折反射超广角成像光学系统简化为理想光学系统^[25],建立的离轴空间位置映射模型如图10所示。

定义像面坐标系 $O_a(x_a, y_a)$ 、反射镜坐标系 $O_b(x_b, y_b, z_b)$ 、球幕坐标系 $O_c(x_c, y_c, z_c)$,由像面坐标系上像点 $A(x_i, y_i)$ 坐标逆向推导映射在球幕坐标系上对应点 $B(x_j, y_j, z_j)$ 的空间角度 (θ, ϕ) 。根据非球面反射镜等距投影设计条件和式(6),可以得到入射光线角

4 反射光场测量系统校准

4.1 离轴空间位置校准

由于待测样品置于半球反射球幕中心处,半球反射球幕所承载的反射光场信息与折反射超广角成像光

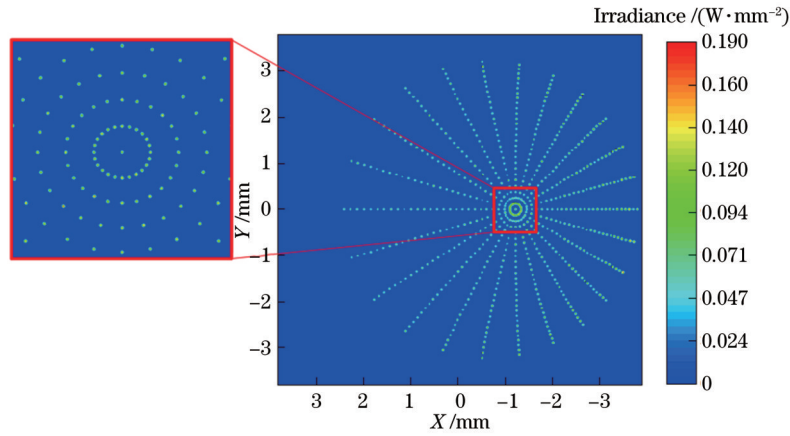


图 9 角度分辨率模拟像面照度分布图

Fig. 9 Illumination distribution map of angle resolution analogue image surface

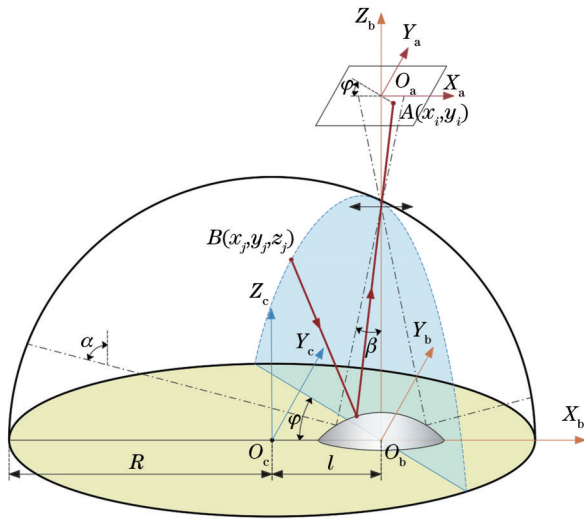


图 10 离轴空间位置映射模型

Fig. 10 Off-axis spatial position mapping model

α 与成像入射角 β 的转换关系:

$$\alpha = \frac{\omega H}{Df} \cdot h = \frac{\omega H}{D} \cdot \tan \beta. \quad (7)$$

在反射镜坐标系下,有入射光路方程和半球反射球幕与BOZ平面的截线方程,表达式分别为

$$z_j = x_j \tan \alpha (z_j > 0), \quad (8)$$

$$(x_j - l \cos \varphi)^2 + (l \sin \varphi)^2 + z_j^2 = R^2 (z_j > 0), \quad (9)$$

式中: φ 为 $X_b O Z$ 平面与BOZ平面的夹角; l 为非球面反射镜底部中心到半球反射球幕中心的距离; R 为半球反射球幕半径。联立非球面反射镜截线方程 $z = F(x)$ 和式(7)~(9),可求解特征点在球幕坐标系上对应的空间角度 (θ, ϕ) 。以图9中校准灯阵像点坐标为基础,利用离轴空间位置映射关系,得到校准后特征点像点坐标分布,如图11所示。

4.2 光场强度校准

半球反射球幕涂层的低反射率特性和光学系统成像传递会导致能量衰减,造成测量结果存在偏差,故利

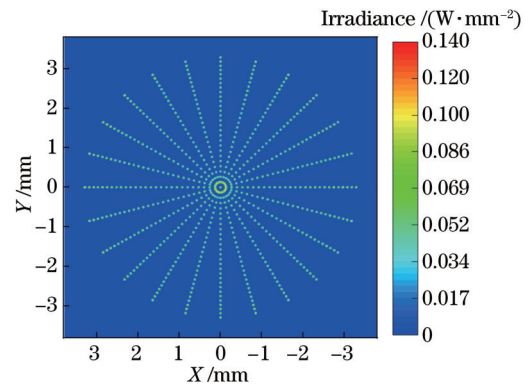


图 11 校准后特征点像点坐标分布

Fig. 11 Coordinate distribution of feature points after calibration

用积分球光源发出的朗伯光场替代反射光场作为参考标准光场进行能量标定,以此作为测量结果能量标定依据,从而实现测量光场标定。通过仿真模拟,测得积分球光源光场在像面的照度分布,如图12所示。

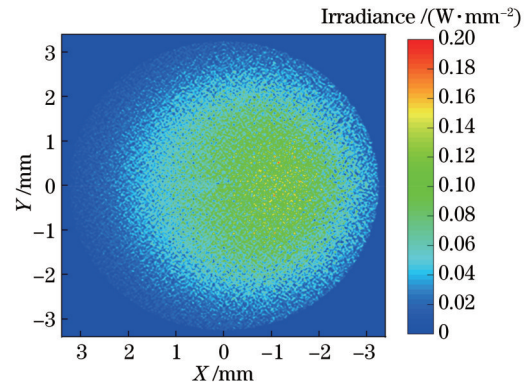


图 12 朗伯光场测量像面照度分布

Fig. 12 Illumination distribution of image surface measured by Lambert light field

根据朗伯散射原理,积分球光源发出的光场强度分布^[26]和等距投影关系,可推导理论朗伯像面照度分布公式,为

$$E(x, y) = E_0 \cos \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{t}, \quad (10)$$

式中: E_0 为光源正入射照度值; $E(x, y)$ 为像面上像素坐标 (x, y) 处的照度值。

以式(10)为修正目标值, 配合离轴空间位置映射关系, 得到校准后的朗伯光场像面照度分布, 如图 13 所示。

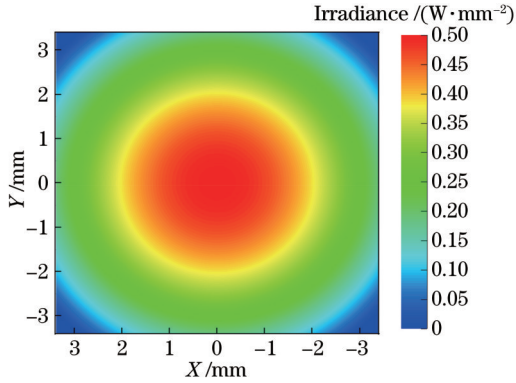


图 13 校准后的朗伯光场像面照度分布

Fig. 13 Illumination distribution of image plane of Lambert light field after calibration

在此基础上, 仿真模拟了反射光场测量系统对均匀反射光场测量的像面照度分布, 并对该照度分布进行了校正, 得到了范围内各空间角度的校正结果。为准确评价各方向的校准精度, 对于粗糙表面的各向异性和各向同性, 分别采用各天顶角下的最大相对误差和平均相对误差进行评价。在 $0 \sim 54^\circ$ 天顶角内, 圆周范围内最大相对误差和平均相对误差曲线如图 14 所示。

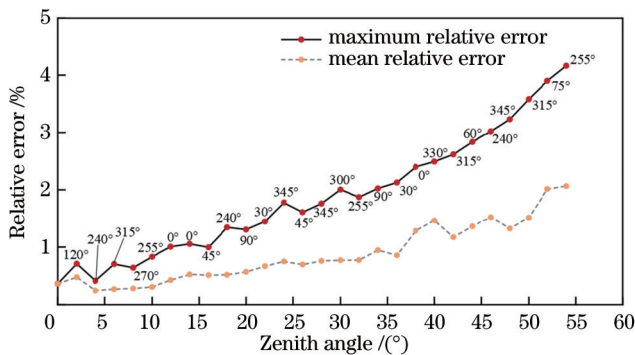


图 14 各天顶角下圆周范围相对误差

Fig. 14 Relative error of the circumference range under each zenith angle

由图 14 可知: 光场测量相对误差整体上随天顶角增加而增大, 在测量视场范围内的最大相对误差于天顶角 54° 、方位角 255° 处取得最大值, 为 4.12% ; 平均相对误差最大为 2.06% , 且在 $0 \sim 36^\circ$ 天顶角范围内, 平均相对误差小于 1% 。

5 反射光场测量分析

目前目标表面反射光场测量仪器的测量误差较大^[27-29], 会导致反射光场理论真值不准确; 同时半球反射球幕内壁的反射特性受自身材料特性与喷涂工艺^[30]等因素影响, 具体反射特性难以掌握, 因此利用 LightTools 软件进行建模仿真, 验证所提方法的准确性^[31]。具体设计为: 在半球内壁反射率为 20% 的朗伯散射条件下, 天顶角为 40° 、方位角为 270° 、波长为 550 nm 的入射光束均匀照射目标表面, 模拟反射光场测量系统对已知表面反射光场分布的 Labsphere Permafect-80 漫反射板、WhiteOptics-DF60 漫反射板和美国 ACA 镜面铝板 3 种粗糙面的多角度反射光场测量结果。粗糙面的多角度反射光场测量模型如图 15 所示, 3 种粗糙面反射光场的光强分布如图 16 所示。

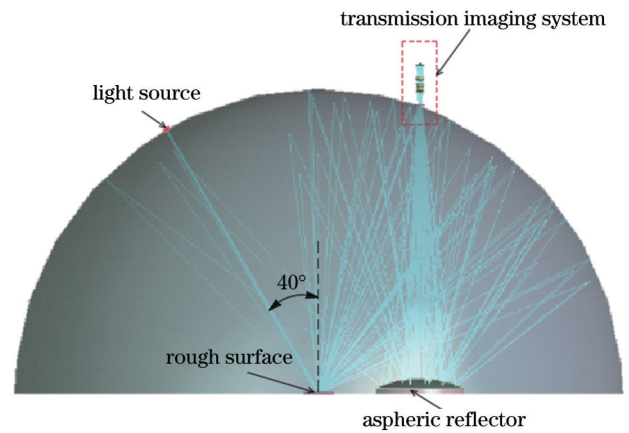


图 15 粗糙面的多角度反射光场测量模型

Fig. 15 Measurement model of multi-angle reflected light field on rough surface

根据图 16 可以看出, 反射光场测量系统能够实现方位角为 $0 \sim 360^\circ$ 、天顶角为 $0 \sim 54^\circ$ 的反射光场测量。三种表面在方位角为 270° 的光源入射平面内的 BRDF 随反射天顶角 θ_r 的变化曲线如图 17 所示。

根据图 17 可知: 由左至右三种表面在镜反射方向 (40°) 附近的 BRDF 峰形由平缓逐渐趋于陡峭, 说明随着 BRDF 值的增大, 镜反射能量占比增加, 漫反射特性减弱; 同时, 后两种粗糙面均存在较强的镜反射, 而漫反射相对较弱; 反射光均在入射平面内的镜反射方向 (40°) 出现了峰值, 表现出了明显的镜反射特征; 镜面铝材料表面在镜反射方向 (40°) 的峰值明显高于 WhiteOptics-DF60 漫反射板, 说明反射镜面铝表面更近似于镜面, 这与镜面铝材料本身的高反射率反射特性一致。

6 结 论

分析了粗糙表面反射光场测量原理, 提出了一种

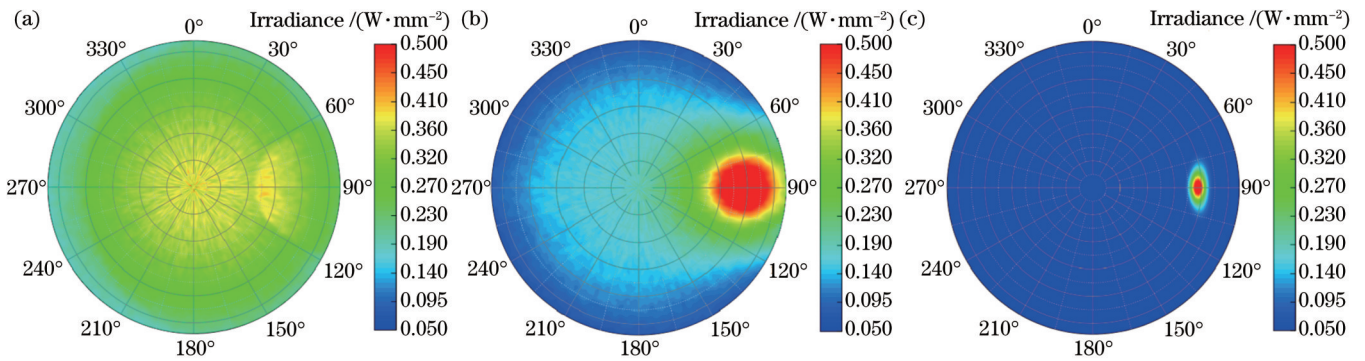


图 16 3 种粗糙面反射光场的光强分布。(a) Labsphere Permafect-80 漫反射板;(b) WhiteOptics-DF60 漫反射板;(c) 镜面铝板
Fig. 16 Light intensity distribution of reflected light field from three rough surfaces. (a) Labsphere Permafect-80 diffuse reflector;
(b) WhiteOptics-DF60 diffuse reflector; (c) mirror aluminum plate

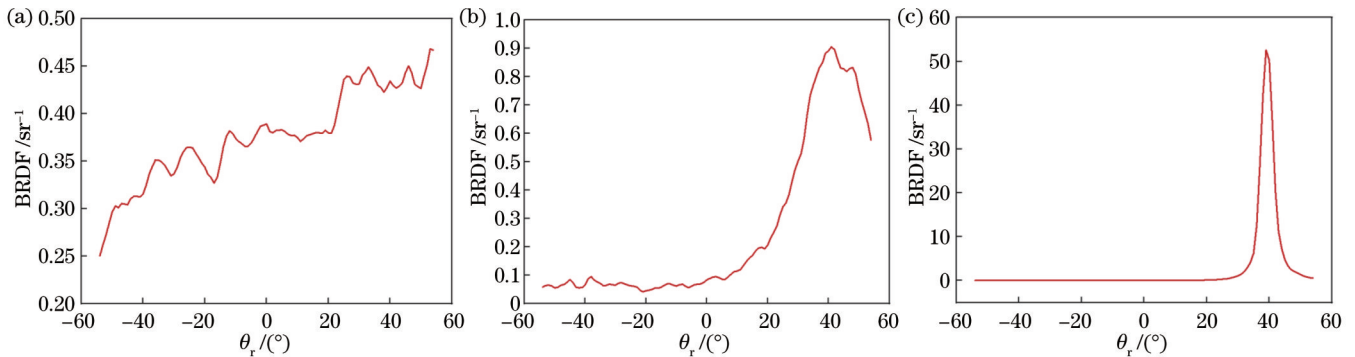


图 17 3 种粗糙面在入射平面内 BRDF 变化曲线。(a) Labsphere Permafect-80 漫反射板;(b) WhiteOptics-DF60 漫反射板;
(c) 镜面铝板
Fig. 17 BRDF curve of three kinds of rough surfaces in the incident plane. (a) Labsphere Permafect-80 diffuse reflector;
(b) WhiteOptics-DF60 diffuse reflector; (c) mirror aluminum plate

基于超广角成像的粗糙面反射光场测量方法。建立了非球面反射镜光路分析数学模型,优化设计了折反射超广角成像光学系统。利用光源灯阵模型,仿真得到了折反射超广角成像光学系统的视场范围和最佳角度分辨率,结果显示方位范围 $0\sim 360^\circ$ 内最佳角度分辨率为 15° ,天顶范围 $0\sim 54^\circ$ 内最佳角度分辨率为 2° 。分析得出,反射光场测量系统存在离轴关系和能量衰减问题,通过构建离轴空间位置映射模型,并建立积分球光源标准参考光场,对反射光场测量系统进行校准。校正后结果表明,最大相对误差为 4.12% ,平均相对误差最大为 2.06% 。以天顶角为 40° 、方位角为 270° 、波长为 550 nm 的入射光束均匀照射条件为例,模拟了反射光场测量系统对 Labsphere Permafect-80 漫反射板、WhiteOptics-DF60 漫反射板和美国 ACA 镜面铝板 3 种粗糙面的多角度反射光场测量结果,结果显示,相较于其他两种粗糙面,镜面铝材料表面表现出较强的镜面反射特性,与材料本身反射特性符合度较高,证明了 BRDF 测量系统的准确性和可靠性。

参 考 文 献

[1] 曹健渭, 卢荣胜, 雷丽巧, 等. 基于散斑纹理变差函数的平面表面粗糙度测量技术[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10): 2302-

2306.

Cao J W, Lu R S, Lei L Q, et al. Grinding surface roughness measurement based on the variogram of speckle pattern texture [J]. Chinese Journal of Scientific Instruments, 2010, 31(10): 2302-2306.

- [2] 邵魏柯, 杜小平, 王阳, 等. 微粗糙表面参数对激光散斑场的影响规律分析[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1103001.
Gao W K, Du X P, Wang Y, et al. Analysis of the influence of micro-rough surface parameters on the laser speckle field[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1103001.
- [3] Pan L, Deng C J, Yu C P, et al. The influence of the sparsity of random speckle illumination on ghost imaging in a noise environment[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(4): 041103.
- [4] 王金海, 李华, 魏力. 基于 C-T 模型的光学元件加工表面的光学特性研究[J]. 光学技术, 2021, 47(2): 172-177.
Wang J H, Li H, Wei L. Study on the optical properties of the machining surface of optical elements based on C-T model[J]. Optical Technique, 2021, 47(2): 172-177.
- [5] 徐灿, 张雅声, 李鹏, 等. 基于 OpenGL 拾取技术的空间目标光学横截面积计算[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0720001.
Xu C, Zhang Y S, Li P, et al. Calculation of optical cross section areas of spatial objects based on the OpenGL picking technique[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0720001.
- [6] 王付刚, 张伟, 汪洪源. 基于 BRDF 的在轨卫星反射特性[J]. 光电工程, 2011, 38(9): 6-12.
Wang F G, Zhang W, Wang H Y. Reflection characteristics of on-orbit satellites based on the bidirectional reflectance distribution function[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(9): 6-12.

- [7] 张磊, 杨鹏翎, 赵海川, 等. 铜铝材料粗糙表面的 BRDF 特性研究[J]. 现代应用物理, 2018, 9(4): 65-69.
Zhang L, Yang P L, Zhao H C, et al. Characteristics of the bidirectional reflectance distribution function on the roughness surface of copper and aluminium materials[J]. Modern Applied Physics, 2018, 9(4): 65-69.
- [8] 黄聪, 游兴海, 张彬. 光学元件表面洁净度对其表面散射特性的影响[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 0120002.
Huang C, You X H, Zhang B. The influence of surface cleanliness of optical elements on its surface scattering characteristics[J]. Infra-Red and Laser Engineering, 2019, 48(1): 0120002.
- [9] Pérez-Armenta C, Ortega-Moñux A, Luque-González J M, et al. Polarization-independent multimode interference coupler with anisotropy-engineered bricked metamaterial[J]. Photonics Research, 2022, 10(4): A57-A65.
- [10] 李俊麟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 双向反射分布函数绝对测量装置研制[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0528002.
Li J L, Zhang L M, Chen H Y, et al. The development of a BRDF absolute measuring device[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0528002.
- [11] Baribeau R, Neil W S, Côté É. The development of a robot-based gonireflectometer for spectral BRDF measurement[J]. Journal of Modern Optics, 2009, 56(13): 1497-1503.
- [12] von Finck A, Hauptvogel M, Duparré A. Instruments for close-to-process light scatter measurements of thin film coatings and substrates[J]. Applied Optics, 2011, 50(9): C321-C328.
- [13] 王璐璐. BRDF 测量系统优化设计及实验研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2018.
Wang L L. Optimisation design and experimental research of the BRDF measurement system[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2018.
- [14] 李卓然, 李雨霄, 刘子龙. 近红外波段高精度 BRDF 测量系统研究[J]. 光学学报, 2022, 42(12): 1212002.
Li Z R, Li Y X, Liu Z L. High-precision BRDF measurement system in the near-infra-red band[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(12): 1212002.
- [15] Dana K J. BRDF/BTF measurement device[C]//Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV, July 7-14, 2001, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE Press, 2002: 460-466.
- [16] Meyen S, Sutter F, Heller P, et al. A new instrument for measuring the reflectance distribution function of solar reflector materials[J]. Energy Procedia, 2014, 49: 2145-2153.
- [17] Meyen S, Sutter F, Heller P. Near specular scatter analysis method with a new goniophotometer[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9205: 92050B.
- [18] 史卫朝, 郑建明, 李言, 等. 加工表面双向反射分布函数的测量与建模[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1029001.
Shi W C, Zheng J M, Li Y, et al. Measurement and modelling of the bidirectional reflectance distribution function on the cutting surface[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1029001.
- [19] Ohno H. One-shot three-dimensional measurement method with the color mapping of the light direction[J]. OSA Continuum, 2021, 4(3): 840-848.
- [20] 刘彦磊. 双向反射分布函数测量技术与实验系统的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
Liu Y L. Measurement technology and experimental system of bidirectional reflectance distribution function[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.
- [21] Ward G J. Measuring and modelling of anisotropic reflection[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1992, 26(2): 265-272.
- [22] Hughes C, Denny P, Jones E, et al. The accuracy of fish-eye lens models[J]. Applied Optics, 2010, 49(17): 3338-3347.
- [23] 张少军, 徐熙平. 360° 高阶非球面反射式全景镜头设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1977-1984.
Zhang S J, Xu X P. The design of 360° high-order aspheric reflective panoramic lens[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(8): 1977-1984.
- [24] 程真, 司赶上, 李振钢, 等. 基于自适应差分进化算法的 LED 光谱匹配[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0930004.
Cheng Z, Si G S, Li Z G, et al. LED spectral matching based on an adaptive differential evolution algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9): 0930004.
- [25] 侯冠宇, 吴斌, 何荣芳, 等. 基于双目光栅重建和纹理映射的缺陷三维测量方法[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0712003.
Hou G Y, Wu B, He R F, et al. Three-dimensional measurement method for defects based on binocular grating reconstruction and texture mapping[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0712003.
- [26] 任明, 李琛, 王彬, 等. 基于朗伯散射原理的电晕放电光学定位方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 7277-7287.
Ren M, Li C, Wang B, et al. Corona discharge optical location method based on the lambert scattering principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7277-7287.
- [27] 李明, 宗肖颖. 定标漫反射板实验室系统级 BRDF 测量方法[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0117004.
Li M, Zong X Y. In-lab system-level BRDF measurement method of calibration diffuser[J]. Infra-Red and Laser Engineering, 2017, 46(1): 0117004.
- [28] 韩官, 林冠宇, 李博, 等. 星上定标漫射板远紫外 BRDF 测量方法[J]. 光子学报, 2017, 46(9): 0912005.
Han G, Lin G Y, Li B, et al. Measurement of far-ultraviolet BRDF for a solar diffuser[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(9): 0912005.
- [29] Patrick H J, Zarobila C J, Germer T A. The NIST Robotic Optical Scatter Instrument (ROSI) and its application to BRDF measurements of diffuse reflectance standards for remote sensing[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8866: 886615.
- [30] Liu T B, Zhu M P, Du W Y, et al. A nodule dome removal strategy to improve the laser-induced damage threshold of coatings[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2022, 10: e30.
- [31] 伦旭磊, 朱丹, 高志山, 等. 基于拒绝采样法的 BRDF 模型散射光线追迹方法[J]. 光学学报, 2023, 43(6): 0612002.
Lun X L, Zhu D, Gao Z S, et al. Scattering ray tracing method of the BRDF model based on the rejection sampling method[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(6): 0612002.

Measurement of Reflected Light Field of Rough Surfaces Using Ultrawide-angle Imaging

Duan Zongtao¹, Zhang Jian^{1,2,3*}, Zhang Guoyu^{1,2,3}, Zou Yangyang⁴, Niu Zhengjie¹, Zhao Bin¹, Mo Xiaoxu¹, Yun Zhikun¹, Zhang Jianliang⁵, Guo Jia⁶

¹*School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;*

²*Jilin Photoelectric Measurement and Control Instrument Engineering Technology Research Center, Changchun 130022, Jilin, China;*

³*Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Control and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, Changchun 130022, Jilin, China;*

⁴*College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China;*

⁵*Air Force Aviation University, Changchun 130022, Jilin, China;*

⁶*Changchun Wanyi Technology Application Co., Ltd., Changchun 130022, Jilin, China*

Abstract

Objective The reflected light field information of a rough surface includes the reflected light angle and intensity, which can be used to retrieve the reflection and morphology characteristics of the surface. Therefore, accurate measurement of the reflected light field has high research value and practical applications in the fields of target detection and recognition, in-orbit radiation calibration, material property analysis, optical device stray light analysis, etc. Presently, the traditional "scanning" method uses a mechanical mechanism to achieve point-by-point scanning measurement of the spatial reflected light field information of the target sample; however, there are problems such as slow measurement efficiency, numerous measurement error links, and poor repeatability. Furthermore, given the influence of incident light wavelength and energy fluctuation on the measured data during the scanning process, the weight gradually increases with increasing time, which may lead to distortion of full-space BRDF fusion information. In contrast, the emerging "photographic" measurement method based on optical imaging techniques only measures the reflected light field in a small angle range. In this study, to overcome the low efficiency of the "scanning" reflected light field measurement system and the small measuring angle range of the "photographic" reflected light field measurement system, a rough surface reflected light field measurement method based on ultrawide-angle imaging is proposed. This method realizes the measurement of multidirectional angle reflected light field information over a large angle range, enriches measurement means of rough surface reflected light fields and is suitable for measuring optical reflection characteristics and damage of material surface. Here, the simulation and reconstruction provide a research basis and technical support.

Methods Based on the principle of reflected light field measurement, this paper first determined the overall structure of the reflected light field measurement system, which comprises a light source, sample plate to be measured, a hemispherical reflecting ball screen, and a refractive reflecting ultrawide-angle imaging optical system. Next, the catadioptric ultrawide-angle imaging optical system was optimized and the best resolution angle in the optical system's field of view was simulated and analyzed. Subsequently, a calibration method for the reflected light field measurement system was studied to realize off-axis spatial position calibration and light field intensity calibration. Finally, the reflected light field measurement results were simulated and analyzed using a Labsphere Permaflect-80 diffuse reflector, WhiteOptics-DF60 diffuse reflector, and American ACA specular aluminum plate, proving the feasibility of the proposed surface reflected light field measurement method.

Results and Discussions The best resolution angle of the designed reflected light field measurement system is 2° in the range of 0° – 54° zenith angle and 15° in the range of 0° – 360° azimuth angle (Fig. 9). The coordinate distribution of the feature points after calibration was obtained using the off-axis spatial position mapping relationship (Fig. 11); the relative error of light field measurement increases with increasing zenith angle. The maximum relative error in the range of the measuring field of view is 4.12% at the zenith angle of 54° and azimuth angle of 255° . The maximum average relative error is 2.06% and the average relative error is less than 1% within the range of 0° – 36° zenith angle (Fig. 14). The measurement results were obtained using the Labsphere Permaflect-80 diffuse reflective plate, WhiteOptics-DF60 diffuse reflective plate, and ACA specular aluminum plate of the United States under conditions of uniform illumination using a 550-nm incident beam with a zenith angle of 40° and azimuth angle of 270° (Fig. 16). The results show that the surface of

specular aluminum material with rough surfaces have strong specular reflection characteristics, which is consistent with the reflection characteristics of the material itself (Fig. 17).

Conclusions Based on the principle of ultrawide-angle imaging, a reflective light field measurement system has been successfully designed here that achieves a best angle resolution of 15° in the azimuth range of $0^\circ - 360^\circ$ and a best angle resolution of 2° in the zenith range of $0^\circ - 54^\circ$. After calibration, the maximum average relative error of the circumference under each zenith angle is 2.06%. These results support that the "photographic" method of measuring a reflected light field can also be used to measure a reflected light field in a large angle range using a reasonable optical system design.

Key words bidirectional reflectance distribution function; ultra wide-angle imaging; reflected light field; rough surface