

文章编号 1004-924X(2014)11-2983-07

基于六轴串联机械手的双向反射分布函数测量装置

李俊麟*, 张黎明, 司孝龙, 陈洪耀, 王戟翔, 沈政国

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 由于现有的双向反射分布函数(BRDF)测量装置多为 3 轴系统, 不能完全实现样品表面上 2π 空间的全角度 BRDF 测量, 本文研制了新型 BRDF 测量装置。该新型装置采用高精度六轴串联机械手作为待测目标的定位机构, 使待测目标在测点进行三维转动; 采用竖转台作为探测器探头的定位机构, 使探头指向绕测点进行一维转动, 从而形成 4 维转动以构建 BRDF 测量所需的 4 角几何关系。研制的装置可测量的入射和反射光束角度为: 方位角 $0\sim 360^\circ$ 、天顶角 $0\sim 70^\circ$; 光谱可扫描区 $350\sim 2\ 500\text{ nm}$ 。BRDF 测量过程由测控软件控制, 可高精度、无遮挡、全自动、快速地构建 BRDF 测量几何关系, 一次待测目标和探测器定位以及光谱扫描、传输、显示、存储平均用时约 8 s, 测量不确定度优于 $2.5\%(k=2)$ 。

关键词: 定量遥感; 双向反射分布函数测量仪; 串联六轴机械手; 漫射板

中图分类号: TP73; TP241.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142211.2983

BRDF device based on six-axis robot

LI Jun-lin*, ZHANG Li-ming, SI Xiao-long, CHEN Hong-yao, WANG Ji-xiang, SHEN Zheng-guo

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization,
Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)
* Corresponding author, E-mail: lijunlin@aiofm.ac.cn

Abstract: As existing Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) measuring device is three-axis equipment, and it can not implement the whole angle BRDF measurement in a 2π space on the sample surface. Therefore, a new device was built for BRDF measurement in this paper. A six-axis robot was used as object positioning mechanism to implement three-dimensional rotating for changing the normal direction of the object at the measuring point, and a turntable was used as the detection positioning mechanism to implement one-dimensional rotating for changing the orientation of detector around the measuring point, so that four-dimensional rotation was constructed to form the four-angle geometry of BRDF measurement. The measuring geometry of incident and reflected beams of the device shows its azimuthal angle to be $0\sim 360^\circ$, zenith angle to be $0\sim 70^\circ$, and the spectral range is $350\sim 2\ 500\text{ nm}$. The process of BRDF measurement is controlled by software, and the BRDF measuring geometry is constructed with high-precision, non-blocking, fully automation and speediness. With an average measurement of about 8 s, the device completes the geometry of

收稿日期: 2014-01-20; 修订日期: 2014-03-14.

基金项目: 中国科学院科研装备研制项目 (No. YZ201125); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA12A3022)

construction and spectral scanning, transmission, display and the storage. The uncertainty budget of the device is less than 2.5% ($k=2$).

Key words: quantitative remote sensing; Bidirectional Reflective Distribution Function (BRDF) measuring device; six-axis robot; diffuse panel

1 引言

双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)反映了物体的固有属性,因此测量目标的 BRDF,建立目标的 BRDF 特征光谱数据库和遥感模型,在精准农业、环境监测、资源勘探和军事侦察等领域都有着重要的应用价值。遥感定量反演地表参数、遥感器多角度遥感数据输入获取地面目标三维结构信息本质上也是依赖于地物本身的 BRDF 特性^[1]。

随着科学研究的深入, BRDF 测量应用领域的拓宽,以及定量化遥感和多角度遥感的发展, BRDF 的测量要求物体在 2π 空间具有全角度的 BRDF 数据输入。现有的 BRDF 测量装置多为 3 轴系统,根据 BRDF 测量原理^[2], 3 轴系统装置不能在半球空间完全构建 BRDF 测量所需的 4 角几何关系;另外,这些装置采用激光光源,不能分析物体在整个可见-短波红外谱段(太阳反射波段)的光谱反射特性;再者,这些装置多为手动或半自动,测量速度慢且精度较低。

依据 BRDF 测量原理,待测目标应当保持静止以使光源和探测器在半球空间分别进行 2 维转动,从而改变入射、反射光束的方位角和天顶角,但研制具备这种样式的多轨道弧装置相当困难。由于可见-短波红外谱段的光源多为大型强电设备,而光谱仪为精密测量设备,因此多轨道弧转动装置必然有大型和精密设备挂载大量电缆进行频繁转动,使光谱扫描周期长,自动化测量困难,必然会降低 BRDF 测量精度。另外,如此设置轨道弧、光源和探测器之间易形成立体角干涉,照明和探测不能完全地覆盖样品表面上半球空间来进行全角度 BRDF 测量,而且不能有效地消除或减小杂散光的影响。另外,小立体角探测还会导致装置体型庞大。因此,为了提高 BRDF 测量的精度和速度、保障测试过程安全,应尽量减少或消除强电和精密设备的频繁运动。本文根据运动的相对性原理,提出以待测目标 3 维转动+探测设备

1 维转动共 4 维转动相对地构建 BRDF 测量所需的 4 角几何关系来完成全角度 BRDF 测量。

2 测量原理

2.1 BRDF 定义

BRDF 定义:物体表面反射方向 (φ_r, θ_r) 小立体角 $d\omega_r$ 内的反射辐亮度增量 $dL_r(\varphi_r, \theta_r; \varphi_i, \theta_i; \lambda)$ 与入射方向 (φ_i, θ_i) 小立体角 $d\omega_i$ 内入射辐照度增量 $dE_i(\varphi_i, \theta_i; \lambda)$ 的比值^[3],几何关系如图 1 所示,表达式为:

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

其中: φ, θ 分别为方位角和天顶角,下标 i, r 分别为入射和反射, λ 为波长。

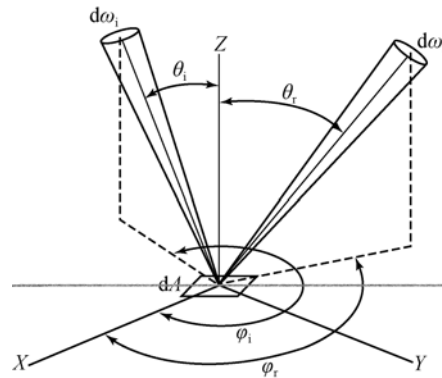


图 1 BRDF 测量几何关系

Fig. 1 Geometry of BRDF measurement

2.2 BRDF 测量原理

BRDF 测量一般有绝对测量和相对测量两种。绝对测量方式不引入任何参考标准直接测量光源入射和样品反射的辐照度或辐亮度,通过式(1)计算得到, BRDF 绝对测量精度高,但是绝对测量装置要求光源具有高均匀性、高亮度和高稳定性等特点,要求探测器具有大的动态范围和较高的光谱响应线性,且装置必须能同时测量入射和反射辐射量,造成研制困难,这些要求成本较高,一般用于标准漫射板定标,在光学测量中作为

传递标准。相对测量方式即引入参考标准,以标准传递的方式测量样品的 BRDF,本文以相对测量方式建立 BRDF 测量装置。

BRDF 相对测量指在相同辐照和探测条件下分别测量样品和标准漫射板小立体角内的反射辐射量 DN 值,其比值与标准板在相同条件下的 BRDF 定标系数积分即为样品的 BRDF^[4]。在 $(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r)$ 条件下样品漫射板的 BRDF 表示为 f_s :

$$f_s(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r) = f_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r) \cdot \frac{DN_s(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r)}{DN_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r)}, \quad (2)$$

其中: DN_s 和 DN_r 分别为样品和标准漫射板在相同辐照度条件 (φ_i, θ_i) 和探测条件 (φ_r, θ_r) 下光谱仪测得的 DN 值, f_r 为相同条件下标准漫射板的 BRDF 定标系数。

2.3 实现原理

BRDF 装置变角指借助运动机构改变照明方向、待测目标法向、探测方向,以构建 BRDF 测量所需的入射和反射几何条件 $(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r)$ 。利用当前工业和工艺的发展成果,根据光源、待测目标和探测器的特点,提出照明方向固定,待测目标法向 3 维+探测方向 1 维共 4 维转动的组合运动形式,相对地构建 BRDF 测量所需的 4 角几何关系,进而完成目标的全角度 BRDF 测量。

如图 2 所示,XYZ 为实验室坐标系,XY 为水平面。照明方向始终沿 -Z 方向,初始时探测方向为 Z 方向,探测方向可在 YZ 平面内绕 X 轴转动,转动角度记为 δ 。xyz 为 BRDF 测量坐标系,初始时 xyz 与 XYZ 重合,可任意转动,依次绕 x, y, z 轴转动,转动角度分别记为 α, β, γ 。未旋转时即 $(\alpha, \beta, \gamma, \delta) = 0$, 有 $(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r) = 0$ 。

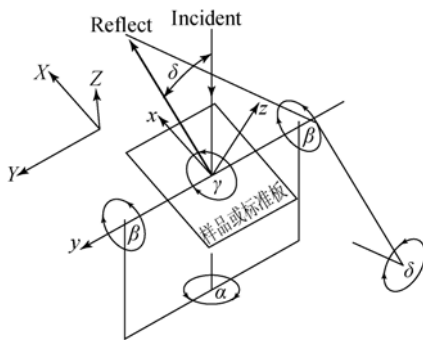


图 2 BRDF 测量装置四维转动示意图

Fig. 2 Schematic of four-dimensional rotation of BRDF measuring device

待测目标法向的转动是通过 6 轴串联机械手使 xyz 坐标系绕其各个坐标轴转动来完成的,转动顺序依次为 x, y, z。光谱仪扫描信号通过探头和光纤导入,以竖转台驱动旋转臂在 YZ 面内改变探头指向。经过理论推导可建立 BRDF 测量几何条件 $(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r)$ 与待测目标法向和探测方向转动角度 $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ 之间的关系,如式(3)~(6)所示。

$$\tan \alpha = \frac{\cos \theta_r - \cos \delta \cos \theta_i}{\sin \delta \cos \theta_i}, \quad (3)$$

$$\cos \beta = \frac{\cos \theta_i}{\cos \alpha}, \quad (4)$$

$$\tan \gamma = \frac{\sin \theta_i \cos \theta_r \cos \varphi_r - \sin \theta_i \cos \theta_r \cos \varphi_i}{\sin \theta_i \cos \theta_r \sin \varphi_r - \sin \theta_i \cos \theta_r \sin \varphi_i}, \quad (5)$$

$$\cos \delta = \cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\varphi_r - \varphi_i), \quad (6)$$

式(3)~(6)表明以待测目标法向 3 维+探测方向 1 维转动可以相对地构建 BRDF 测量所需几何条件。上位机测控软件根据 BRDF 测量的几何条件 $(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r)$ 通过式(3)~(6)直接解算出转动角度 $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$, 6 轴串联机械手和竖转台根据解算结果定位待测目标法向和探测方向,光谱仪进行光谱扫描即可完成该几何条件的 BRDF 测量。

3 BRDF 测量装置

BRDF 测量装置主要包括光源、变角组件和探测器,如图 3 所示,左图为空闲状态,右图为测试状态。其中,光源使用的是太阳模拟器,变角组件包括 6 轴串联机械手和竖转台,探测器为 SVC HR-1024 光谱仪。

3.2 光源

BRDF 测量装置使用的光源是 3A 级太阳模拟器,采用竖直向下方式照明,如图 3 所示。太阳模拟器在实验室模拟待测目标在野外的光谱反射特性,建立样品的特征光谱数据库和遥感模型。光源功率为 3 000 W,辐照面积为 300 mm×300 mm, 15 min 内快速达到稳定的工作状态,稳定性优于 1%。太阳模拟器部分参数如表 1 所示。



图 3 BRDF 测量装置

Fig. 3 Device of BRDF measurement

表 1 太阳模拟器参数

Tab. 1 Parameters of solar simulator

序号	项目	参数
1	准直角	$\pm 4^\circ$
2	光谱匹配性	AM1.5G
3	光谱非稳性	优于 1%

3.3 探测器

BRDF 测量装置探测组件包括探头、光纤和探测器 SVC HR-1024 光谱仪(如图 4 所示),待测目标反射辐射信号通过探头和光纤信号接入 SVC 光谱仪。

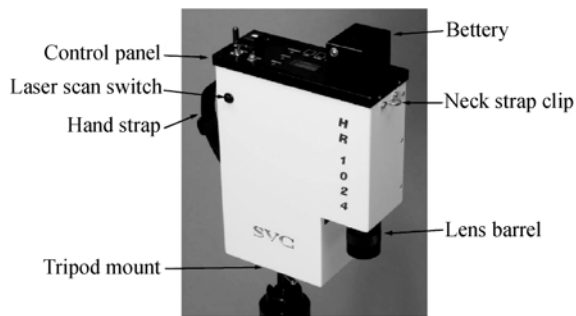
图 4 SVC HR-1024 光谱仪^[5]

Fig. 4 SVC HR-1024 spectrometer

SVC HR-1024 光谱仪测量可见-短波红外(350~2 500 nm)谱段光谱,使用 3 块衍射光栅和 3 种阵列式探测器,一次完整光谱扫描最快只需 1 s(5 次测量取平均),扫描完成后快速读取 1 024 个通道光谱 DN 值^[5]。SVC 主要参数如表 2 所示。

SVC 光谱仪供应商并未提供直接与仪器交

互的指令,提供的交互指令只能与 SVC 随机软件通信,因此每次 BRDF 测量时必须首先启动 SVC 随机软件,并且使其工作于服务器模式,然后以开发的测控软件与随机软件进行通信完成光谱扫描、传输、显示和存储。

表 2 SVC 光谱仪主要参数^[5]

Tab. 2 Main parameters of SVC spectrometer

序号	项目	参数	
1	采样间隔	350~1 000 nm	1.5 nm
		1 000~1 900 nm	3.5 nm
		1 900~2 500 nm	2.4 nm
2	探测器	Si-512 阵列	350~1 000 nm
		TE 制冷 InGaAs-256 阵列	1 000~1 900 nm
		扩展 TE 制冷 InGaAs-256 阵列	1 900~2 500 nm
3	波长精度	0.5 nm	
4	波长重复精度	0.1 nm	

3.5 变角组件

BRDF 测量装置变角部件包括 6 轴串联机械手、竖转台和旋转臂,其中 6 轴串联机械手是变角的关键部件,负责待测目标的空间三维转动定位。机械手本质上是对人上半身运动关节的一种模拟,包括腰部、肩部、肘部和腕部等,为完成空间三维姿态和位置定位,机械手配置了 6 维自由度,如图 5(左)所示。由于机械手的这种结构,利用机械手不仅可以完成平面内(入射光线、目标法线和反射光线在同一平面内)BRDF 测量待测目标的

定位,还可以实现入射和反射光束平面外 BRDF 测量几何关系的定位。

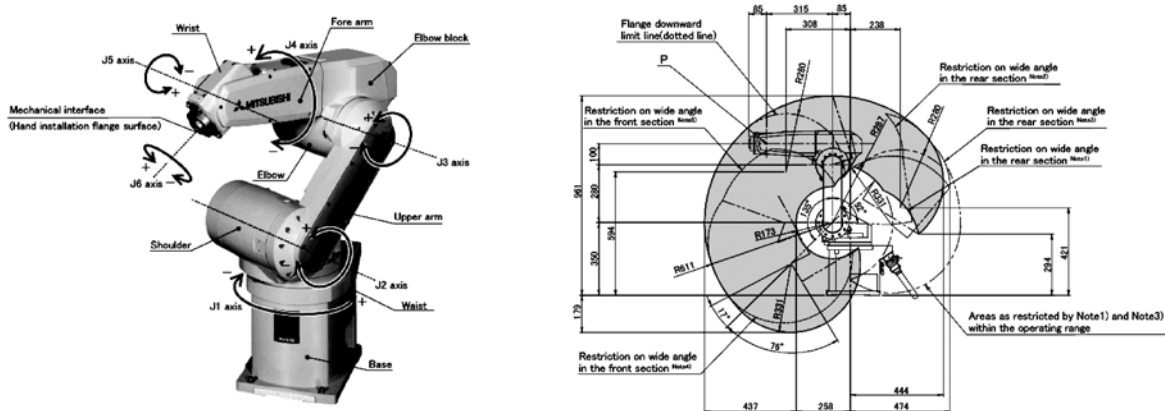


图 5 串联六轴机械手^[6]

Fig.5 Six-axis robot

图 5(右)灰色部分为机械手在竖直面内运动范围的包络,利用此包络根据 BRDF 测量角度范围选择合适的工作点。为应对不同的应用需求,机械手包含多个坐标系^[7],且各个坐标系之间可自由转换。通常使用机械手直角坐标系对待测目标进行位置定位,使用工具坐标系进行姿态定位,定位过程无需进行复杂的齐次坐标变换。然而,机械手在装配过程中可能存在间隙或非同轴因素,最终可能导致工具坐标系原点和坐标轴与标称值不一致,因此在使用前必须对机械手工具坐标系进行标校,根据标校结果修正机械手工具坐标系的原点和坐标轴。BRDF 测量过程中使待测目标绕修正后的坐标系转动以构建 BRDF 测量所需的几何关系。

机械手可负载 300 mm×300 mm 的样品,最高速度可达 9 300 mm/s,机械手位置精度为 ±0.02 mm,法向精度优于 0.01°。SVC 光谱仪探测信号利用探头和光纤导入,竖转台驱动旋臂改变探头指向。竖转台重复定位精度优于 0.005°,最高转速可达 25(°)/s,径向和轴向跳动 <10 μm。机械手和竖转台相互配合共同构建 BRDF 测量所需的几何关系,可实现入射、反射光束方位角 0~360°,天顶角 0~70°的 BRDF 测量。

4 实验及讨论

根据 BRDF 测量的特点,为新型 BRDF 测量装置开发了测控软件。利用新型 BRDF 测量装

置对聚四氟乙烯 (PTFE) 漫射板进行 BRDF 测量。

4.1 漫射板 BRDF 测量

PTFE 漫射板通常经过标定后被用作标准板,在光学测量中进行标准传递,对标准板标定主要进行如下几何关系的标定:垂直探测,照明方位角为 0°,天顶角 10~70°(5°间隔连续变化)。利用新型 BRDF 测量装置对 PTFE 漫射板进行上述几何条件的 BRDF 测量,抽取 500, 600, 800, 1 200, 1 500 和 1 700 nm 等波段,PTFE 漫射板 BRDF 测量结果如图 6 所示。

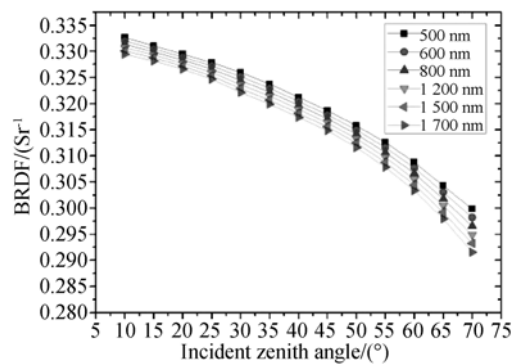


图 6 漫射板 BRDF

Fig. 6 BRDF of diffuse panel

多角度遥感的发展需要为光学测量提供更多方向漫反射特性参数的输入,即要求能为漫射板进行全角度 BRDF 测量。本文利用新型 BRDF 测量装置,在如下条件下对 PTFE 漫射板进行了

3 维 BRDF 测量。光源垂直照明 PTFE 漫射板, 探测方位角为 $0 \sim 360^\circ$ (30° 间隔连续变化), 天顶角为 $0 \sim 70^\circ$ (5° 间隔连续变化), 抽取 500 nm 谱段 PTFE 漫射板三维 BRDF, 如图 7 所示。

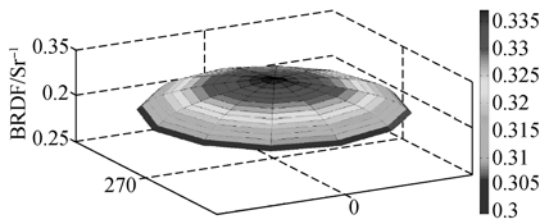


图 7 垂直照明 PTFE 漫射板 BRDF

Fig. 7 Measurement of lambertian of PTFE diffuser at 0° incidence

图 6 和图 7 测量结果与传统及国际上 BRDF 测量装置所获得的结果一致^[8,9]。

4.2 讨论

如式(1)所示, BRDF 是入射、反射光束方位角和天顶角的 4 角函数, 即 BRDF 测量装置至少需要 4 维转动才能完整地实现目标半球空间的 BRDF 测量。本 BRDF 测量装置摒弃了 BRDF 定义所采用的分别转动光源和探测器来构建 BRDF 测量所需几何关系的方式, 以待测目标 3 维转动+探测器探头 1 维转动的方式构建 BRDF 测量所需的几何关系。目标和探测器探头的转动分别采用 6 轴串联机械手和竖转台来实现。由于待测目标安装在机械手的前端法兰上, 机械手完全在目标后面运动; 光谱仪以探头和光纤导入反射辐射信号, BRDF 几何关系构建过程无大型和精密检测设备运动。因此, 采用机械手和竖转台分别定位待测目标和光谱仪探头的转动方式可高精度、无遮挡、快速地构建 BRDF 测量所需的几何关系, 实现全角度 BRDF 测量。另外, 特别为 BRDF 测量装置开发了测控软件, 装置可自动完成几何关系构建和光谱扫描、传输、显示、存储。

该装置采用了相对方式测量物体的 BRDF, 无须按照 BRDF 定义分别测量辐照度和辐亮度, 消除了不同种类探测器响应度不一致的影响。另外由于 BRDF 相对测量方式不要求探测器具有特别大的动态范围, 因此对反射辐射量的测量采用了线阵探测器组, 结合光栅分光快速完成光谱扫描, 最快 1 s 完成 1 条(5 次测量取平均)光谱扫描。BRDF 测量装置平均完成 1 次几何关系构建

和光谱扫描、传输、显示、存储用时约 8 s。

待测目标 BRDF 测量不确定度来源主要包括光源、变角组件、探测器、杂散光、以及标准板定标精度等。光源的不确定度主要来自其非稳性, 光源部分合成不确定度约为 1%。变角组件不确定度主要来自待测目标法向指向偏差, 探测镜头指向偏差, 以及综合装调偏差等, 根据仪器指标参数及旋转臂加工误差, 变角部分不确定度约为 0.1%。信号探测不确定度主要由信噪比和光谱仪非线性引起, 这部分不确定度约为 0.45%。杂散光主要来源于装置表面的漫射, 以及测试房间墙面的漫射, 这些表面都经过消光处理, 但仍有少量的影响, 这部分不确定度约为 0.15%。标准漫射板的定标不确定度约 2%^[3]。装置合成不确定度优于 2.5%, 装置各项不确定度如表 3 所示。

表 3 BRDF 测量装置各项不确定度

Tab. 3 Uncertainty budget of BRDF measurement device

序号	项目	不确定度/% ($k=2$)
1	光源部分	1
2	变角部分	0.1
3	探测器部分	0.45
4	杂散光	0.15
5	标准漫射板	2
6	合成	2.29

从表 3 可以看出, 待测目标 BRDF 测量不确定度主要来自标准漫射板的 BRDF 定标不确定度和光源的非稳性。目前, 标准漫射板的定标系数从计量院方向半球反射比因子传递而来, 精度不高。通过 BRDF 绝对测量可以大幅提高标准漫射板的 BRDF 定标精度, 从而提高测试目标的 BRDF 测量精度。

5 结论

基于 6 轴串联机械手的新型 BRDF 测量装置以待测目标法向 3 维转动+探测方向 1 维转动的组合转动方式高精度、无遮挡、全角度、快速地构建 BRDF 测量所需的 4 角几何关系。可测量的 BRDF 几何关系: 入射、反射光束方位角 $0 \sim 360^\circ$, 天顶角 $0 \sim 70^\circ$; 可测的光谱为 $350 \sim$

2 500 nm。BRDF 测量过程由测控软件控制自动进行, BRDF 测量平均完成一次几何关系构建和光谱扫描、传输、显示、存储用时约 8 s, 测量不确定度优于 2.5%。

将六轴串联机械手的运动灵活性和高精度定

位能力用于 BRDF 绝对测量装置待测目标的定位机构, 定位精度高且易退避探测光路实现入射辐射量测量。长臂机械手可用作野外 BRDF 装置光谱仪探头定位和定向机构, 实现了全自动、快速、高精度、无遮挡测量且运输方便、架设快捷。

参考文献:

- [1] 宋芳妮, 范闻捷, 刘强, 等. 一种获取野外实测目标 BRDF 的方法 [J]. 遥感学报, 2007, 11(3): 296-302.
SONG F N, FAN W J, LIU Q, *et al.*. A method of acquiring BRDF of objects in the field [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(3):296-302. (in Chinese)
- [2] NICODEMUS F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity [J]. *Applied Optics*, 1970, 9(6): 1474 - 1475.
- [3] 陈洪耀, 张黎明, 杨本永, 等. 漫反射参照体双向反射比因子绝对测量研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2010, 5(5): 366-372.
CHEN H Y, ZHANG L M, YANG B Y, *et al.*. Absolute bidirectional reflectance factor measurement for diffuse reflection standard [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 5(5): 366 - 372. (in Chinese)
- [4] 徐希孺. 遥感物理 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2006.
- XU X R. *Remote Physics* [M]. Beijing: Pekin University Press, 2006.
- [5] HR-1024/ HR-768 USER MANUAL Revision Spectra Vista Corporation[Z]. 2009
- [6] Mitsubishi Industrial Robot RV-6SD/6SDL Series Standard Specifications Manual.
- [7] Mitsubishi Industrial Robot CRnQ/CRnD Controller INSTRUCTION MANUAL Detailed explanations of functions and operations.
- [8] 杨本永, 张黎明, 沈政国, 等. 光学传感器星上定标漫射板的特性测量 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1851-1858.
YANG B Y, ZHANG L M, SHEN ZH G, *et al.*. Characteristic measurement of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1851 - 1858. (in Chinese)
- [9] ANDREAS H, KAIOLAF H. Three-dimensional appearance characterization of diffuse standard reflection materials [J]. *IOP Science*, 2010(47): 295-304.

作者简介:



李俊麟(1985—),男,四川中江人,博士研究生,2009年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事光学标准参照与标准传递测试技术方面的研究。
E-mail: lijunlin@aiofm.ac.cn