

宽视场航天相机像面测量技术

胡 凯, 丛海佳*, 陈凡胜, 金 钢*

(中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院智能红外感知重点实验室, 上海 200083)

摘要: 宽视场高质量的航天相机是未来有效载荷的发展方向, 基于宽视场航天相机的装调需求, 提出了一种干涉测量与几何量测量相结合的像面测量方法。搭建了宽视场航天相机像面测量平台, 利用激光干涉仪确定各视场的焦点位置, 激光跟踪仪获取各焦点位置坐标, 通过坐标换算和拟合完成像面的绘制, 像面测量误差可控制在 0.01 mm 内。通过该方法, 完成了一款离轴三反航天相机的像面绘制, 系统焦距 1200 mm, 相对孔径 1:2.4, 视场角 $10^\circ \times 1^\circ$ 。测试的像面与光学设计软件 ZEMAX 输出的理想像面进行对比, 像面形状及位置基本吻合, 平面度偏差 0.009 mm。测试结果表明光学系统装调到位, 为探测器配准工序的完成提供了重要依据。

关键词: 光学测量; 像面绘制; 干涉法; 离轴三反系统; 几何量测量

中图分类号: TN206 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200336

Measurement technology of image plane of wide-field space camera

Hu Kai, Cong Haijia*, Chen Fansheng, Jin Gang*

(Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Wide-field and high-quality space camera is the future development direction of payload. Based on the alignment requirements of the wide-field space camera, an image plane measurement method combining interferometry and geometric measurement was proposed. The image plane measurement platform of the wide-field space camera was built. A laser interferometer was used to determine the focal position of each field of view and a laser tracker was used to obtain the coordinates of each focal position in this method. Finally, the image plane was drawn through coordinate conversion and fitting. Image plane measurement error could be controlled within 0.01 mm. Through this method, the image plane drawing of off-axis three-mirror reflective space camera was completed, the system was with a focal length of 1200 mm, a F -number of 2.4, a linear field of view of $10^\circ \times 1^\circ$. The test image plane was compared with the ideal image plane output by the optical design software ZEMAX, the shape and position of the image plane were basically consistent, and the flatness deviation was at 0.009 mm. The test results show that the optical system is aligned in place, and it provides an important basis for the completion of the detector registration process.

Key words: optical measurement; image plane drawing; interferometry; off-axis three-mirror reflective system; geometric measurement

收稿日期:2020-09-07; 修订日期:2020-12-29

基金项目:国家自然科学基金(61975222, 11905281)

作者简介:胡凯,男,助理研究员,硕士,主要从事航空气间有效载荷光机系统装调与检测工作。

通讯作者:丛海佳,女,助理研究员,硕士,主要从事光学系统设计、光学精密测试技术等方面的研究。

金钢,男,高级工程师,硕士,主要从事航天红外有效载荷数字化总装与测试技术方面的工作。

0 引言

随着我国航天事业的发展, 航天遥感仪器的需求量越来越大, 而宽视场是航天相机的一个重要发展方向。在轨道高度一定的情况下增大视场可以增加图像幅宽, 在分辨率一定的情况下提高遥感器成像效率, 因此, 越来越多的航天相机向宽视场方向发展^[1]。

航天相机在研制过程中, 光学系统装调完成后所形成的像面即是航天相机的像面, 像面位置及其与航天相机的相对关系也随之确定。下一工序就是探测器配准, 将探测器组件调整到位, 实现探测器组件焦平面与像面准确匹配, 达到最佳成像质量^[2]。像面位置是影响光学系统成像质量的一个重要指标, 可以为探测器配准工序的完成提供重要依据, 通过实测的像面位置能够快速、准确地完成探测器配准, 从而获得较理想的成像质量。

在光学系统装调阶段, 对于小视场的光学系统来说, 可以通过经纬仪、干涉仪等手段准确地获得系统焦点位置, 从而间接获得系统的像面。而对于宽视场的光学系统来说, 如果继续采用经纬仪或者干涉仪等手段获取精确的单个视场焦点位置代替整个像面的位置, 就会因为视场大导致边缘视场离焦, 给探测器配准工作带来难度。

为了解决宽视场光学系统用单个视场焦点位置代替整个像面的位置会导致边缘视场离焦的问题, 文中提出了一种光学系统像面测量的方法, 搭建了宽视场航天相机像面测量平台, 快速、定量、有序地完成了一款宽视场离轴三反航天相机的像面测量。通过测试结果判断光学系统是否装调到位, 并为后续探测器配准提供了重要的装调方向。实践证明该方法具有较强的工程借鉴意义。

1 像面测量技术

在光学系统装调阶段, 使用波像差对光学系统成像质量进行全面的评价。当采用干涉检验法检测系统成像质量时, 通常使用自准直检测光路, 通过干涉条纹直接得到光波携带的波像差信息^[3-4]。图 1 为装调过程中的自准直光路示意图。

自准直检测光路中, 干涉仪焦点的位置即为当前视场下光学系统的焦点位置, 如果能精确获取全视场

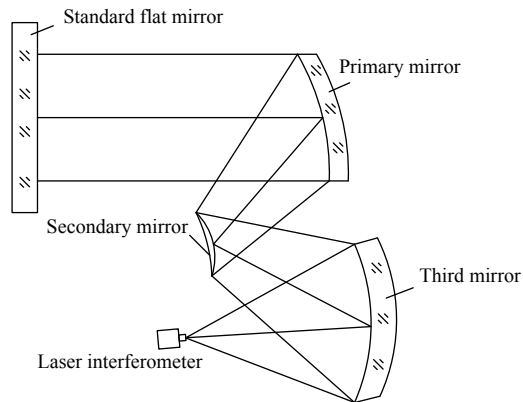


图 1 自准直光路示意图

Fig.1 Schematic diagram of self-collimating optical path

下焦点坐标, 就可以通过坐标换算得到光学系统像面分布情况。因此, 文中采用激光跟踪仪进行坐标测量, 运用干涉测量和几何量测量相结合的方法进行像面测量。

激光跟踪测量系统的基本原理是在目标点上安置目标球, 跟踪头发出的激光发射到目标球上, 又返回到跟踪头, 当目标移动时, 跟踪头调整方向来对准目标。同时, 返回光束为检测系统所接收, 用来测算目标的空间位置。激光跟踪测量系统本质上是一种球坐标测量系统。它测量目标点的距离、水平和竖直方向的偏转角, 从而得到以跟踪仪测量中心为原点的目标点空间三维坐标^[5-6]。

激光跟踪仪的目标球的圆度优于 0.003 mm, 目标球不锈钢表面经过抛光处理, 可以反射光, 像面测量时, 将激光跟踪仪的目标球放置在干涉仪焦点位置, 当目标球球心与干涉仪焦点位置重合时, 可以形成干涉条纹。调节目标球的位置使干涉图为零条纹且 Power 值为零, 将激光干涉仪焦点定位到目标球球心上, 从而获得焦点的坐标位置。目标球球心定位干涉测量示意图如图 2 所示。

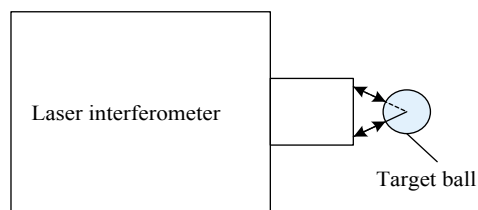


图 2 干涉测量示意图

Fig.2 Schematic diagram of interferometry measurement

2 像面测量总体方案

搭建光学系统装调测试自准直光路,在像面测试工作之前完成光学系统的装调,使系统成像质量满足指标要求。像面测量总体流程图如图 3 所示。

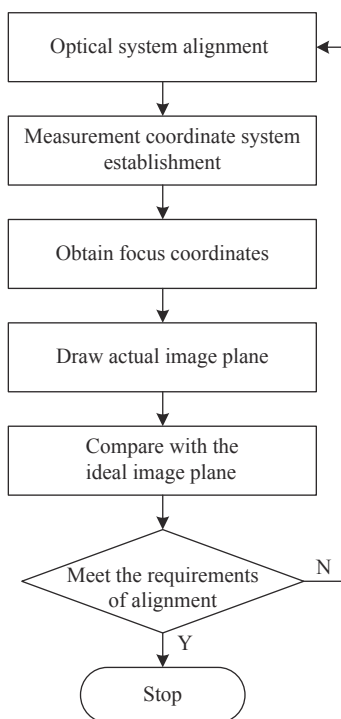


图 3 像面测量总体流程图

Fig.3 Overall flow chart of image plane measurement

步骤 1: 根据标准平面镜相对于光学系统的角度关系,调节标准平面镜至中心视场位置。调节激光干涉仪,使全孔径干涉图为零条纹且 Power 值为零,经过调节后,激光干涉仪焦点与光学系统的焦点重合;

步骤 2: 使用激光跟踪仪建立测量坐标系,定义坐标原点位置;

像面测量之前,首先要选定激光跟踪仪的安放位置,将激光跟踪仪的主体控制器固定放置在光学系统一侧,可同时探测到像面位置和光学系统,避免不必要的转站。像面测量时,通过测量相机机械基准面和基准点建立测量坐标系。

步骤 3: 利用干涉法将目标球的球心调至光学系统中心视场的焦点位置,激光跟踪仪记录该点坐标位置;

步骤 4: 调节标准平面镜和激光干涉仪确定光学系统各个视场的焦点位置,激光跟踪仪记录各个焦点位置的坐标;

步骤 5: 将获取的各个焦点的空间坐标绘制成像面;

步骤 6: 利用 ZEMAX 输出实际镜面面形下光学系统的理论像面。将测量得到的实际像面与理论像面对比,如满足装调要求,则测量结束,如不满足,则对光学系统重新装调,直至满足要求,测量结束。

3 测量平台搭建

宽视场航天相机属于大视场大口径光学系统,虽然光学设计像差已优化到最小,但由于视场大,轴外像差不可能完全被校正,必然会存在一定的剩余像差^[7]。

光学系统的成像质量由主镜、次镜和三镜保证,三块单镜组件最终的装调面形误差影响系统成像质量。另外,光学系统装调不到位也会引入像差。以上原因都会导致实际装调后的光学系统的最佳像面与光学设计的理想像面不完全重合,最佳像面位置是各视场成像质量综合评定的结果。

因此,在光学系统装调阶段搭建像面测量平台测量像面的分布情况,既可以判断光学系统装调是否到位,又可以获得像面相对航天相机的空间位置,为后续探测器组件配准提供装调方向。

航天相机像面测量平台包括激光干涉仪、三维平移台、标准平面镜以及激光跟踪仪,激光跟踪仪由主体控制器和目标球组成。激光干涉仪放置在光学系统像面一侧,标准平面镜放置在光学系统入瞳一侧,激光跟踪仪的主体控制器放置在光学系统一侧。航天相机像面测量平台如图 4 所示。

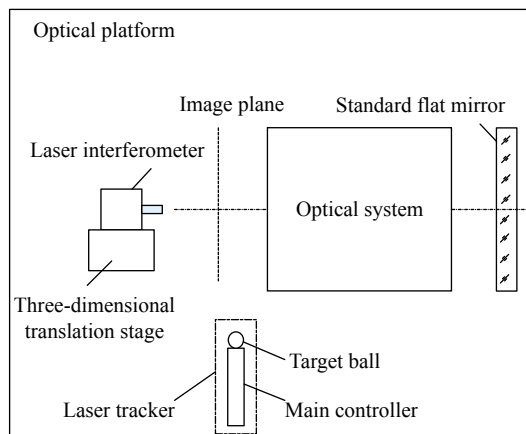


图 4 航天相机像面测量平台

Fig.4 Space camera image plane measurement platform

4 工程应用

4.1 测量实例

利用光学设计软件 ZEMAX 完成一款航天相机光学系统的设计, 图 5 为航天相机光学系统结构图, 光学系统是由主镜、次镜和三镜组成的离轴三反系统。相对孔径 1 : 2.4, 视场 $10^\circ \times 1^\circ$, 系统像面大小 $211.59 \text{ mm} \times 20.94 \text{ mm}$, 其中 X 、 Y 和 Z 为光学坐标系。

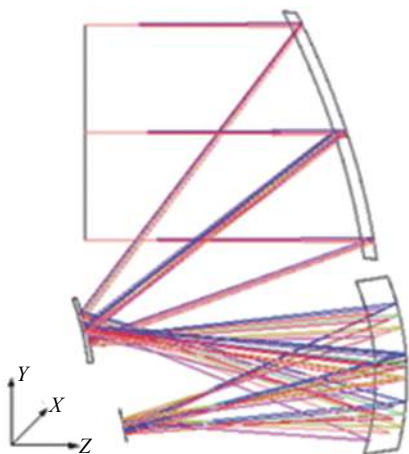


图 5 光学系统结构图

Fig.5 Structure diagram of optical system

首先对单镜组件进行装调, 主镜、次镜和三镜组件的面形精度误差 RMS 分别为: 0.061λ , 0.050λ , 0.059λ (λ 为 632.8 nm)。之后进行离轴三反光学系统的装调, 根据像差理论将光学系统的波像差调整到最小。

4.2 测量过程

对上述光学系统进行像面测量, 建立激光跟踪仪测量坐标系, 如图 6 所示。坐标原点 O 为相机的安装孔投影到安装面的点, 光轴指向探测器为 Y' 方向, 垂直安装面方向为 Z 方向, 右手定则得到 X' 方向。

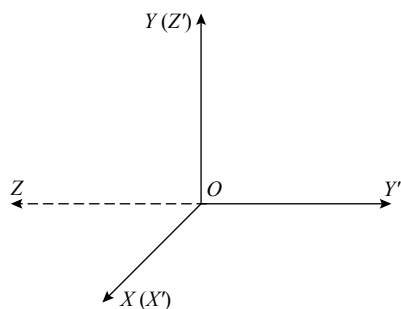


图 6 坐标系建立

Fig.6 Coordinate system establishment

利用激光干涉仪测试光学系统中心视场成像质量, 通过调节激光干涉仪, 使干涉图为零条纹且 Power 值为零。将激光跟踪仪目标球固定在高精度六维调节架上, 调节目标球, 使其球心与激光干涉仪的焦点重合, 干涉图为零条纹且 Power 值为零, 此时目标球球心位置为光学系统中心视场焦点, 激光跟踪仪记录该点坐标位置。焦点位置测试装置如图 7 所示。

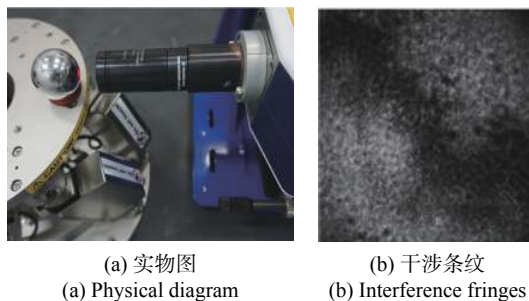


图 7 焦点位置测试装置

Fig.7 Focus position test device

通过调节标准平面镜和激光干涉仪确定光学系统各视场的焦点位置, 激光跟踪仪记录各焦点位置的坐标。激光跟踪仪获得各视场的焦点空间坐标如表 1 所示。其中中心视场焦点在测量坐标系下的坐标为 $X': -581.068 \text{ mm}$, $Y': -593.755 \text{ mm}$, $Z': 141.462 \text{ mm}$ 。

利用 MATLAB 软件将表 1 测试的焦点坐标进行像面拟合, 拟合出的像面分布情况如图 8 所示。

表 1 激光跟踪仪测试数据

Tab.1 Laser tracker test data

No.	X'/mm	Y'/mm	Z'/mm
1	-689.141	-593.635	141.747
2	-674.485	-592.964	143.519
3	-660.163	-593.858	141.097
4	-645.744	-593.183	143.007
5	-631.403	-593.99	140.678
6	-617.007	-593.297	142.705
7	-602.635	-594.105	140.465
8	-588.276	-593.318	142.597
9	-581.068	-593.755	141.462
10	-573.882	-594.154	140.392
11	-559.526	-593.317	142.560
12	-545.132	-594.073	140.517
13	-530.763	-593.272	142.803
14	-516.355	-593.936	140.829

续表 1

Continued Tab.1

No.	X/mm	Y/mm	Z/mm
15	-501.998	-593.131	143.232
16	-487.578	-593.757	141.337
17	-473.396	-592.911	143.850
18	-674.640	-596.212	134.667
19	-645.853	-596.368	134.144
20	-617.074	-596.505	133.839
21	-588.290	-596.565	133.739
22	-559.488	-596.564	133.716
23	-530.676	-596.466	133.942
24	-501.865	-596.297	134.307
25	-473.220	-596.122	134.966
26	-688.913	-590.404	150.618
27	-660.023	-590.641	149.963
28	-631.310	-590.844	149.527
29	-602.582	-590.903	149.315
30	-573.894	-590.906	149.234
31	-545.187	-590.897	149.417
32	-516.452	-590.792	149.710
33	-487.739	-590.576	150.215

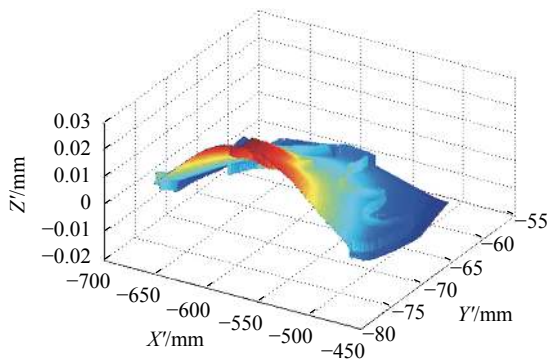


图 8 像面拟合分布图

Fig.8 Image plane fitting distribution

4.3 理论像面仿真

将主镜、次镜和三镜最后装调面形图.dat 文件代入光学系统 ZEMAX 设计文件中, 镜子曲率半径、厚度、离轴量等参数均为实测值, 图 9 为面形代入前后光学系统波前图。

代入镜子实际面形后的光学系统, 像面的分布情况会发生变化, 用 ZEMAX 分别对各个视场进行分析, 得出每个视场在光学坐标系下对应的焦点坐标,

如表 2 所示。

利用 MATLAB 软件将表 2 得到的焦点坐标进行像面拟合, 拟合出的像面分布情况如图 10 所示。



图 9 光学系统波前图

Fig.9 Wavefront diagram of optical system

表 2 ZEMAX 理论像面焦点坐标

Tab.2 Focus coordinates of ZEMAX ideal image plane

No.	X/mm	Y/mm	Z/mm
1	-104.986	0.000	-31.067
2	-83.912	0.000	-31.060
3	-62.889	0.000	-31.065
4	-41.905	0.000	-31.052
5	0.000	0.000	-31.050
6	41.905	0.000	-31.051
7	62.889	0.000	-31.062
8	83.912	0.000	-31.058
9	104.986	0.000	-31.063
10	-104.986	-10.472	-31.067
11	-83.912	-10.472	-31.068
12	-62.889	-10.472	-31.07
13	-41.905	-10.472	-31.064

续表 2

Continued Tab.2

No.	X/mm	Y/mm	Z/mm
14	0.000	-10.472	-31.061
15	41.905	-10.472	-31.063
16	62.889	-10.472	-31.066
17	83.912	-10.472	-31.065
18	104.986	-10.472	-31.065
19	-104.986	-5.236	-31.068
20	0.000	-5.236	-31.055
21	104.986	-5.236	-31.065
22	-104.986	5.236	-31.064
23	0.000	5.236	-31.038
24	104.986	5.236	-31.06
25	-104.986	10.472	-31.059
26	-83.912	10.472	-31.048
27	-62.889	10.472	-31.054
28	-41.905	10.472	-31.034
29	0.000	10.472	-31.024
30	41.905	10.472	-31.033
31	62.889	10.472	-31.052
32	83.912	10.472	-31.045
33	104.986	10.472	-31.056

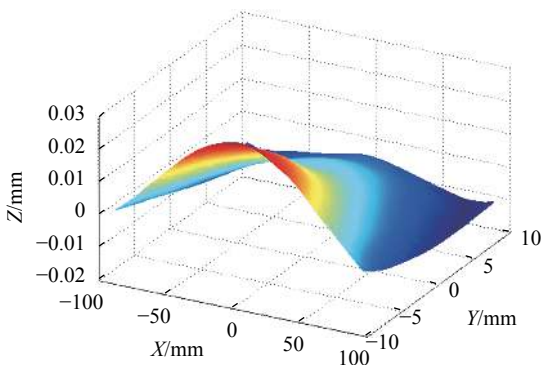


图 10 理论像面拟合分布图

Fig.10 Fitting distribution of the ideal image plane

4.4 测量结果分析

将图 8 所示的实际像面与图 10 所示的 ZEMAX 输出的理想像面进行对比分析。在测量坐标系下, 实测像面偏移量分别为 Δx : 0.12 mm、 Δy : 0.09 mm、 Δz : 0.10 mm, 实测像面平面度 0.049 mm, 理论像面平面度 0.040 mm, 偏差 0.009 mm, 两个像面形状吻合性较

好。根据获得的实测像面位置, 在相机总装模型上进行探测器模拟匹配, 仿真结果显示, 探测器达到最佳位置时, 机械接口完全可以匹配。以上测量和仿真结果说明光学系统已装调到位, 可开展后续工作。

5 精度分析

像面测量过程中结合了干涉测量和几何量测量, 影响像面测量精度的因素主要是激光干涉仪测量精度、激光跟踪仪的测量精度以及目标球获取焦点位置误差^[8-9]。

使用的测量设备有: 4D phasecam 6000 激光干涉仪, 在气流和温度有效控制下, 测量精度 $\leq 0.01\lambda$ (λ 为 632.8 nm), 测量误差 $\mu_1 \leq 6.328 \times 10^{-6}$ mm。Leica AT 960 激光跟踪仪, 利用激光干涉测距, 测距精度较高, 但激光本身受大气温度、压力、湿度及气流流动的影响, 在测试时对此设备进行了大气参数的补偿^[10]。在实验室环境相对稳定的情况下, 测量距离 2 m, 距离重复测量精度优于 0.007 mm。全量程坐标精度 $\mu_2 \leq 0.007$ mm。激光跟踪仪的目标球的圆度优于 0.003 mm, 球偏心 ≤ 0.003 mm, 干涉法获取焦点时, 干涉图调至零条纹且 Power 值为零, 调节引入的倾斜及轴向误差 ≤ 0.001 mm, 测量误差 $\mu_3 \leq 0.004$ mm。

综上, 采用该方法进行光学系统像面测量, 最终分析得到的综合测量精度 $\mu = \sqrt{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3} = 8 \mu\text{m}$, 根据探测器接口设计要求, 位移公差为 ± 0.5 mm, 测量精度为公差要求的 1.7%, 完全能满足测量要求。

6 结 论

文中提出了一种干涉测量与几何量测量相结合的像面测量方法, 该方法实现了光学系统在装调阶段的像面测量, 测量精度可以达到 0.008 mm。通过此方法, 完成了视场 10° 离轴三反航天相机的像面绘制, 并与 ZEMAX 输出的理论像面进行对比验证, 平面度偏差 0.009 mm, 两个像面形状及位置基本吻合, 由此判断出光学系统已装调到位。同时根据实测像面位置, 在相机总装模型上将探测器进行模拟配准, 指导实际探测器装调工作, 提高探测器配准精度和效率。

参考文献:

- [1] Meng Qingyu, Wang Hongyuan, Wang Yan, et al. Off-axis three-mirror freeform optical system with large linear field of view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1018002. (in Chinese)
- [2] Gong Dapeng. Research on focal plane technology of space remote-sensing camera[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [3] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2006. (in Chinese)
- [4] Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Geometrical Optics, Aberrations and Optical Design[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007. (in Chinese)
- [5] Wang Cong, Chen Jiayi, Li Mengjuan, et al. Centering of $\Phi 1.3\text{m}$ aspheric reflector based on interferometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0113001. (in Chinese)
- [6] Yang Zipeng, Liu Min, Zhou Youjun, et al. Study on processing scheme and precision measurement method of payload adapter with irregular shape [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S1): S117001. (in Chinese)
- [7] Zhong Xing, Jin Guang, Wang Dong, et al. Focal plane assembly and calibrating of CMOS star sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(9): 1-5. (in Chinese)
- [8] Zhang Jian. Uncertainty analysis for Super-accuracy Fizeau interferometer[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2011. (in Chinese)
- [9] Yu Chenghao, Ke Ming, Zhao Zhentang. The accuracy assessment for the measurement of laser tracker [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2006, 15(6): 39-42. (in Chinese)
- [10] Xu Yaming, Zheng Qi, Guan Xiao. Precision analysis of Leica AT960 absolute laser tracker [J]. *Journal of Geomatics*, 2020, 45(1): 8-12. (in Chinese)