

分段式空间光学系统机构位姿测量方法总结与展望

李禹辰 秦超 安其昌 徐振邦

Summary and prospect of mechanism position measurement methods for segmented space optics systems

LI Yuchen, QIN Chao, AN Qichang, XU Zhenbang

引用本文:

李禹辰, 秦超, 安其昌, 等. 分段式空间光学系统机构位姿测量方法总结与展望[J]. 应用光学, 2025, 46(1): 1-16. DOI: 10.5768/JAO202546.0109001

LI Yuchen, QIN Chao, AN Qichang, et al. Summary and prospect of mechanism position measurement methods for segmented space optics systems[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 1-16. DOI: 10.5768/JAO202546.0109001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0109001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超宽视场离轴光学系统畸变一致性校正技术

Distortion consistency correction technique for ultra-wide field of view off-axis optical system

应用光学. 2020, 41(5): 1032-1036 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0503005>

共轴三反光学系统卧式装调技术

Horizontal alignment technology of coaxial three-mirror optical system

应用光学. 2020, 41(5): 911-915 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0501006>

复眼式光学成像系统畸变测量与校正技术研究

Distortion measurement and correction method on compound-eye optical imaging system

应用光学. 2021, 42(4): 717-722 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403004>

一种双曲面光学系统中次镜装调设计与实现

Design and realization of secondary-mirror adjustment in hyper-boloid optical system

应用光学. 2022, 43(1): 131-136 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0105002>

基于偏振衍射色散共焦的光学元件轴向间距测量

Axial spacing measurement of optical elements based on polarization diffraction dispersion confocal method

应用光学. 2021, 42(4): 698-702 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403001>

测量大口径光学元件反射率用精密扫描系统误差分析

Error analysis of precision scanning system for measuring reflectivity of large-aperture optical elements

应用光学. 2023, 44(2): 380-385 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0203003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 01-0001-16

引用格式: 李禹辰, 秦超, 安其昌, 等. 分段式空间光学系统机构位姿测量方法总结与展望 [J]. 应用光学, 2025, 46(1): 1-16.

LI Yuchen, QIN Chao, AN Qichang, et al. Summary and prospect of mechanism position measurement methods for segmented space optics systems[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 1-16.



在线阅读

分段式空间光学系统机构位姿测量方法总结与展望

李禹辰^{1,2}, 秦 超¹, 安其昌¹, 徐振邦¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 构建大口径分段空间光学系统是一项同时涉及光学、材料学、机械、控制学等学科的综合任务, 为了达到观测目标, 人们对空间光学系统光机结构的运动精度提出了极高的要求。目前, 如何有效测量并修正空间复杂环境负荷变化导致的机构失调, 从而在位实现更高的位姿精度是有待解决的重要问题。依靠光学测量系统对空间机构实现高精度的在位测量是解决这一问题的关键, 本文从不同测量维度、不同精度水平、不同测量原理的角度综述了相关精密光学测量系统的关键技术和研究现状, 并对其发展趋势和在空间光学系统中的应用场景做了阐述和归纳。

关键词: 精密测量; 光学测量系统; 可展开分段式空间光学系统; 机构位姿校正; 辅助装调

中图分类号: TN202; V11

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0109001

Summary and prospect of mechanism position measurement methods for segmented space optics systems

LI Yuchen^{1,2}, QIN Chao¹, AN Qichang¹, XU Zhenbang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Building a large-aperture segmented space optical system is a comprehensive task involving disciplines such as optics, materials science, mechanics, and control theory. In order to achieve observation goals, high requirements have been placed on the motion accuracy of the opto-mechanical structure of space optical systems. Currently, how to effectively measure and correct the misalignment of mechanisms caused by complex environmental loads in space is an important problem that needs to be solved in order to achieve higher positional accuracy in situ. Relying on optical measurement systems to achieve high-precision in situ measurement of space mechanisms is the key to solve this problem. The key technologies and research status of precision optical measurement systems were reviewed from different measurement dimensions, different levels of accuracy, and different measurement principles, and their development trends and application scenarios in space optical systems were described and summarized.

Key words: precision measurement; optical measurement system; deployable segmented space optical system; mechanism attitude correction; auxiliary mounting

收稿日期: 2023-12-11; 修回日期: 2024-06-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (62235018); 国家自然科学基金面上项目 (12373090)

作者简介: 李禹辰 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事拼接式望远镜镜面共相研究。E-mail: lyc2017hfut@163.com

通信作者: 安其昌 (1988—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事大口径光机系统检测装调研究。E-mail: anjj@mail.ustc.edu.cn

徐振邦 (1982—), 男, 博士, 研究员, 主要从事振动主被动控制, 空间智能机器人等研究。

E-mail: xuzhenbang@ciomp.ac.cn

引言

出于对高分辨率图像的需求以及现有运载器的运载限制,可展开式大口径空间光学系统逐渐成为当前国际上许多航天型号任务的设计方案,在天文探测和对地观测中具有广阔的应用前景^[1]。例如由美国国防部负责开发的分块反射镜望远镜(segmented mirror telescope, SMT)采用了 6 块轻量化主动反射镜,拼接主镜等效面积为 3 m,探测谱段为 $0.4\ \mu\text{m}\sim 0.7\ \mu\text{m}$ ^[2,3],其任务主要为观测系外类地行星;NASA 于 2021 年成功发射的詹姆斯·韦伯空间望远镜(James Webb space telescope, JWST),18 块子镜展开后等效口径为 6.5 m,拥有 $25\ \text{m}^2$ 的聚光面积,探测谱段为 $0.6\ \mu\text{m}\sim 28.5\ \mu\text{m}$,在 $2\ \mu\text{m}$ 波段衍射极限可达 $0.1''$,主要用于研究恒星和行星系统以及星系的起源与演化^[4,5];法国 Thales Alenia 公司提出的可展开式主动光学系统(active optics in deployable systems, AODS),其主反射面由 6 块子镜拼接而成,等效口径接近 5 m,满足对地观测相关科学任务的需要。该项目旨在评估将主动光学技术应用于对地观测以及重要科学任务所需的大型可展开系统校正的可行性,其展开式主镜背部安装有校正系统,确保光学系统全局波前误差优于 $38\ \text{nm}$ (RMS)^[6]。

目前,已部署或筹备中的分段光学系统对其内部光机结构(一般涉及到拼接式主镜、展开式次镜、可展开遮光罩等)的定位精度都有着极高的要求。主镜由一定数量的较小尺寸子镜组成,其共焦共相需要子镜致动机构的位姿误差降低至 $1/10$ 波长以内,其他分系统从部署到运行期间所需的位姿精度也不尽相同,一般所需的位置精度水平取决于工作轨道、探测谱段和观测目标,可以说光机结构的位姿精度直接影响空间光学系统的性能。然而,未来的分段式空间光学系统必然向着规模更庞大的方向发展,随之也带来了子镜数目剧增、系统尺寸增大、机构复杂度增加等问题。另一方面,许多因素都会导致已部署的主镜部分出现位置误差,包括装配误差、部署精度以及环境负荷导致的形状变化。此外,不同于凯克天文望远镜(Keck telescope)和霍比·埃利伯望远镜(Hobby-Eberly telescope, HET)这类地基光学系统^[7,8],分段式空间光学系统无法通过在地面精确装调来减少指向与波前误差。这些因素为系统光机结构位姿的在位测量与调控带来了巨大困难。由此可见为

了最终确保分段光学系统理想工作状态的建立与保持,依靠测量系统实现对光机结构位姿失调量的在位测量是保证空间光学系统最终成像质量最关键的一环。过去 20 年间,研究人员借助不同的平台对分段式空间光学系统各个层级的光机结构运动控制与姿态感知进行了大量的论证与研究:2003 年,洛克希德·马丁公司开发并改进了一种高精度花瓣形机构的展开机制。研究人员在对其展开位姿稳定度与重复性的测试评估过程中提出:下一代空间光学系统在 $0.5\ \mu\text{m}\sim 30\ \mu\text{m}$ 的波段长期在轨运行过程中,分镜片展开机构的位姿误差必须稳定在 $20\ \text{nm}$ 以内^[9,10]。同年,在 NGST 的基础上,研究人员完成了对 SAFIR(single aperture far-infrared observatory)天文台的概念设计;2011 年,欧洲宇航局提出了高轨光学合成孔径监视成像卫星(high orbit optical aperture synthesis instrument for surveillance, HOASIS)项目^[11],探测谱段为 $0.45\ \mu\text{m}\sim 0.79\ \mu\text{m}$,HOASIS 的主镜采用了稀疏孔径结构,由 6 块直径为 2 m 的子镜组成,等效直径达到 7 m,可实现以 2 m 的分辨率于地球同步轨道对地观测。相较于当今较为先进的波前传感技术,HOASIS 采用了迈克尔逊干涉仪与菲佐干涉仪分别对主镜和二级、三级镜进行校正,将光机结构的位姿误差从部署时的接近 1 000 倍波长逐步降低至 $1/30$ 倍波长;2015 年,由美国空间望远镜研究所和 NASA 提出的国际空间站光学试验与集成实验台系统(optical testbed and integration on ISS experiment, OpTIIX)^[12,13]在国际空间站上成功组装,其主镜面为直径为 1.5 m 的分段式镜面。利用空间站机器人以及先进波前传感器,OpTIIX 主要试验并完成了空间结构在轨组装、光学系统精密装调、光学系统波前质量验证等重要研究任务。2018 年,起源望远镜(origins space telescope, OST)的主镜采用了扇形子镜拼接的构型,其口径达到了 5.9 m,集光能力与 JWST 相当,工作谱段覆盖 $5\ \mu\text{m}\sim 600\ \mu\text{m}$,旨在补充远红外谱段观测的空白^[14,15]。2020 年,NASA 喷气推进实验室提出在月球远端组建一台月球环形山射电望远镜(lunar crater radio telescope, LCRT),观测频率范围达到 $3\ \text{MHz}\sim 30\ \text{MHz}$ ^[16-19],波长范围为 $10\ \text{m}\sim 100\ \text{m}$,以观测目前在超长波长范围内可见的黑暗时代宇宙学特征。其最大的技术难点在于,例如其反射面直径达到 1 km,但反射面单元采用的网格单元直径却在 1 mm 左右,关键

部件尺寸跨度超过 6 个数量级。目前技术团队正在寻求解决系统精度问题方案, 以保证反射面 RMS 低于 0.2 m, 从而将信号损耗控制在 0.3 dB 以下。上述这些项目实例和其中的关键技术将推动未来大型光学系统的发展。

近年来, 国内外对利用光学系统测量空间机构位姿与定位精度的研究广泛而深入, 针对不同维度、不同精度、不同性质的几何量测量, 文中归纳和分析了光学测量系统国内外研究现状, 包括机器视觉、激光干涉、显微视觉和波前传感等在内的多个方向。同时, 对现有光学测量系统在工程实例中的应用及未来发展趋势进行了总结。

1 大范围、多自由度测量技术

在装配、运载及运行过程中, 诸如振动、重力变化、装配误差等不可控因素将导致分段式空间光学系统各个子镜机构以不同的空间位姿偏离其预定位置, 这种位姿误差一般具有多自由度、动态范围大的特征, 严重影响系统整体的成像效果。目前大多数可展开式空间光学系统都依靠光学测量系统对机构完成初步校正或引导, 从而纠正光机结构的随机失调状态^[11]。目前主流方法主要可分为机器视觉、激光跟踪等。

1.1 机器视觉系统

机器视觉系统是一种借助计算机对光学装置和非接触传感器采集到的特征图像进行分析处理, 进而实现检测、测量和控制的装置。常见的机器视觉类型分为单目视觉、双目视觉。

利用机器视觉对机构进行精度引导可以较早地追溯到阿姆斯特丹大学的研究者, 利用单摄像头和位于一定工作空间的已知参照物对机械臂进行校正的研究^[20], 校正后的机械臂精度可以达到 0.2 mm 的水平。蔡泽亮^[21]依靠 P4P 算法和对偶四元数绝对定向算法实现了利用单目视觉系统对机械臂末端执行机构定位, 对机械臂所持靶标的定位精度可达 0.02 mm。2022 年, WANG Q 等人^[22]提出了一种利用单目视觉系统和平面靶标实现六足机器人运动学校正的校准方法, 研究者基于 POE 模型提出了三自由度机器人的数值逆运动学解决方案。校准后, 位置和方向误差分别收敛到约 2 mm 和 0.01 rad。然而, 单目视觉只能获取二维图像, 损失了图像中的深度信息, 为了克服这一缺点, 研究者开发了在三维空间内更为精准的双目

视觉系统。

早在上世纪 90 年代, JANOCHA H 等人^[23]就开始尝试利用两台外置的摄像机辅助惯性测量系统来获取机械臂的精确三维位姿(inertial calibration of robot systems, ICAROS)。如今的双目视觉是一种模拟人类双眼的信息处理系统, 借助两台摄像机从客观环境采集若干幅不同视角的图像, 实现被测物体三维坐标的解算, 常常被用于解决如目标测量、目标定位、三维重建等问题^[24-26]。

在 BISOGNI L 等人^[27]关于扫描转台标定的研究中, 研究者设计了一套双目视觉标定系统并提出了一种新的标定效果评估方法, 通过计算平均重投影误差定义了标定质量, 确定了标定位姿的最佳数目和分布。采用这种策略的实验测量结果表明, 使用两幅校准图像时可达到的最差校准误差约为 8%, 接近于使用 50 幅图像可达到的最佳校准误差, 大幅缩短了校准所需时间。此外, 人们还基于单目与双目视觉技术开发了多目视觉技术。与单目或双目视觉相比, 多目视觉技术能够有效避免物体捕捉的盲区, 降低错误检测的机率。2016 年, 普林斯顿大学的研究者 ANDY Z 等人^[28]提出了一种基于多目视觉的机器人抓取技术, 依靠相关的迭代运算和自我学习, 将三维 CAD 模型与点云图匹配来实现在各种场景下可靠地估计物体的 6D 姿态。2020 年, SATO M 等人^[29]则提出了多目视觉手的概念, 如图 1 所示, 在机械臂末端布置多个高速摄像机, 基于出色的多目视觉伺服控制以及场外额外布置的摄像机, 实现接球的高难度快速反应动作。

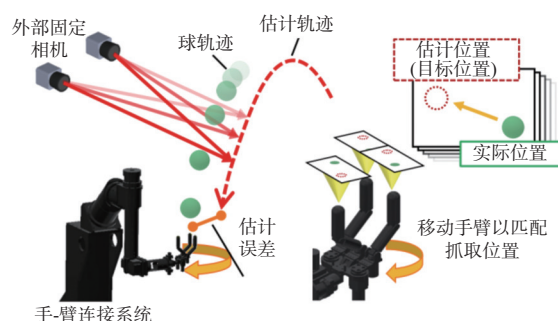


图 1 多目视觉手工作原理图^[29]

Fig. 1 Working principle diagram of multi-vision robot hand^[29]

核心舱机械臂是中国空间站工程的关键模块之一, 是空间站组装建造与运行维护的重要装备^[30]。优异的视觉系统使得其可在空间站系统中

承担舱段对接与转位、辅助航天员执行舱外任务、捕获悬停飞行器等八大类任务。核心舱机械臂的测量系统由分布在不同空间位置的多台可见光谱段视觉相机及若干视觉标记构建而成,是典型的多目视觉系统,其整体结构如图 2 所示。

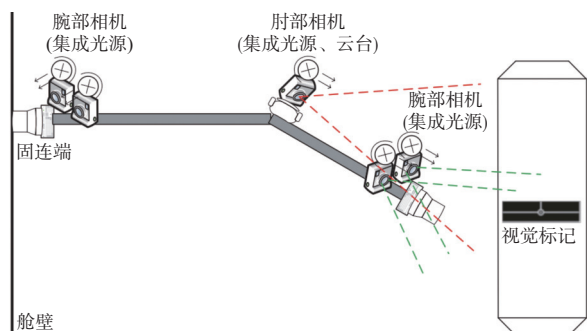


图 2 核心舱机械臂视觉系统组成示意图^[30]

Fig. 2 Composition diagram of vision system for core module manipulator^[30]

以多目视觉为基础的光学系统在整机控制中起到了关键作用: 1) 通过图像监视将目标位置信息引入整臂控制, 并配合逆运动学计算实时规划出机械臂运动的期望关节角度和角速度; 2) 通过肘部与腕部相机实时测量目标位置与末端执行器位置间距, 配合中央控制器判断何时转换机械臂控制策略; 3) 将视觉信息同时上传在轨操作平台与地面遥测操作平台, 进一步保证机械臂运转稳定可靠。通过对测试数据的分析可知, 核心舱机械臂末端定位精度优于 15.75 mm, 姿态精度优于 0.26°, 如表 1 所示。

表 1 中国空间站核心舱机械臂在轨测试与验证结果^[30]

Table 1 Results of in-orbit testing and validation of core module robotic arm of Chinese space station^[30]

关键性能	技术需求	在轨遥测	在轨辨识
绝对定位精度	45 mm/1°	15 mm/0.266°	15.75 mm/0.26°
重复定位精度	15 mm/0.5°	5 mm/0.163°	12.97 mm/0.13°
单关节运动学精度	0.05°	0.02°	0.02°
视觉伺服控制精度	20 mm/0.2°	10 mm/0.10°	—

总体而言, 虽然机器视觉系统对于复杂机构的适应性较好, 可以实现实时或近似实时的位姿测量与数据反馈。但其提供的精度无法满足类似拼接镜面在轨部署调整等高精度工作中, 需要结合多种传感器信息, 如深度传感器、红外传感器等, 提供更全面、多维度的机构位姿信息, 或

与其他测量方法结合使用, 以增强测量精度和鲁棒性。

1.2 激光跟踪测量

激光跟踪测量系统是一种高精度三维测量系统, 可对空间运动目标进行跟踪并实时测量目标的空间三维坐标。随着过去 20 年间激光跟踪测量技术的不断发展, 激光跟踪技术凭借其测量范围广(米级以上)、测试精度高(数十微米级)、测量参数多(角度、距离、位移)、便于携带(整机一般小于 10 kg)等优点成为实现动态跟踪及测量最有发展潜力的测量方法之一, 目前根据测量站的数量安排以及不同的位姿解算原理可以分为单站角度距离法和多站距离法。

1993 年, NEWMAN W S 等人^[31]提出了一种方法来进行机械臂运动学模型校准以及位置精度评估: 控制机器人的末端执行器沿固定的单束激光运动的同时, 收集关节角度数据, 将正运动学解与激光束方向进行比较来对机器人的位置精度进行评估。实验结果表明, 机器人可以在二维平面内沿激光束达到 0.5 mm 的定位精度。到本世纪初, NEWMAN W S 等人^[32]尝试使用一台 SMX 激光跟踪测量仪对六自由度机械臂进行校准, 即使用一套跟踪测量系统采用球坐标法通过长度量以及角度的测量来计算被测点的空间坐标。类似地, 许多国内学者也曾进行过相关研究^[33-35], 相较于文献^[31]中的校正效果, 任永杰等人^[36]利用激光跟踪测量系统成功地将工业机器人的平均定位误差从 0.877 6 mm 修正到 0.442 6 mm。在此基础上, NUBIOLA A 等人^[37]利用最小二乘优化法找到 29 个最适合激光跟踪测量的误差参数的同时, 利用单台激光跟踪测量仪对机械臂进行校准。2 000 次的重复实验数据表明, 经过激光跟踪测量仪的校正, 该机械臂在 50% 的负荷下, 整体工作空间内的平均定位误差由 0.968 mm 降低至 0.364 mm, 降幅达到了 63.4%; 其最大位置误差由 2.158 mm 降至 0.696 mm, 降幅达到了 67.7%。

从工程实践角度而言, 虽然单站角度距离法模型简单, 测量过程方便, 但由于数据来源单一, 缺少冗余的原因, 单站测量系统无法进行系统自标定或数据完整性校验。与前文所述的多目视觉类似, 利用多台测量站测量的多基站式的激光跟踪测量系统随着现代工业的需求逐步地发展起来。

1994 年, NAKAMURA O 等人^[38] 利用 4 台激光干涉仪给出的长度信息, 通过计算实现了对物体三维坐标的精确测量, 如图 3(a) 所示。这与后来的多站式激光跟踪测量系统的原理类似, 多站式激光跟踪测量系统进行动态跟踪测量时仅涉及到长度量的测量, 根据采集到的距离数据联立方程组并求解来确定目标的三维坐标, 且精度优于单站式的角度距离法^[39,40]。针对 GAIA 号科学卫星搭载的光学系统 (ASTRO) 角度稳定性问题, 欧洲航空局的研究人员 CANUTO E 等人^[41] 提出利用 12 条激光测量路径, 对内部光机结构的位姿进行在位测量的方案: 通过法布里-珀罗干涉法分别测量每对反射镜上参考点的距离变动, 最终计算得出光学系统的光轴相对被测恒星的基本角度变化, 通过上述测量方法和相应的调整技术, ASTRO 可以以 5 prad 以下的角误差对 10° 颗系内恒星进行观测。陈章位等人^[42] 提出了一种多基站位姿精度测试方案, 如图 3(b) 所示。实验证明了相对单基站测试, 三基站测试的定位误差降低了 38.5%, 定点重复误差降低了 42.2%。

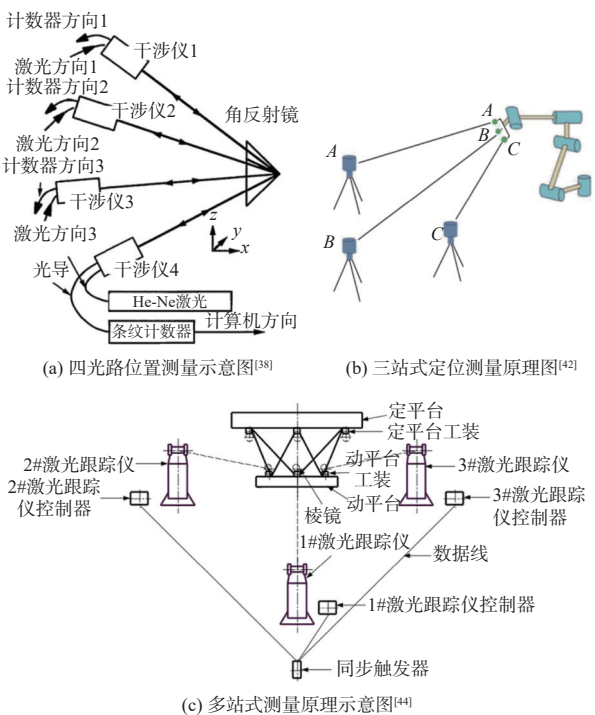


图 3 物体三维坐标的精确测量图

Fig. 3 Accurate measurement diagram of 3D coordinates of object

FAST (five hundred meters aperture spherical radio telescope) 是 500 m 口径球面射电望远镜的简称, 是

当今世界上最大的单口径射电望远镜^[43]。馈源舱是射电天文望远镜的关键部件之一, 为了实现馈源舱高精度的定位与跟踪, 程志峰^[44] 围绕各类位姿测量技术, 重点研究了对馈源舱内部 Stewart 平台的标定、位姿测量等理论与技术。由于 FAST 结构空间跨度较大, 主反射面与馈源舱之间的刚性连接精度较低, 不能实现馈源高精度的定位和指向跟踪。保证最终的位姿精度, 人们选择在馈源舱内部加装 Stewart 机构, 减少其他扰动对馈源舱的影响, 并实现对馈源接收机的进一步精调。面对 FAST 馈源舱高精度位姿测量的需求, 作者提出了 3 种不同的测量方法: 单台激光跟踪仪测量; 数字工业摄影测量 (digital photogrammetry system, DPM); 多台激光跟踪仪测量。其中, 多站式激光跟踪测量系统示意图如图 3(c) 所示。实验结果表明, 三站式激光跟踪测量系统位置测量重复精度优于 ± 0.005 mm, 姿态测量重复精度优于 4×10^{-5} rad, 且测量频率最高可达到 100 Hz。

综上所述, 激光跟踪测量系统的高精度、大量程、实时反馈等优秀性质在复杂机构位姿校正及测量领域展现出了卓越优势。但精度无法达到光学成像的波长级。然而, 对整个主镜校正流程而言, 激光跟踪测量可作为粗调环节实现对拼接镜系统的初步校正, 并为波前传感、色散条纹计量、色散哈特曼传感等更高精度测量方法提供前期过渡。另一方面, 参考 GAIA 的案例可知, 激光跟踪测量系统也可尝试集成于空间光学系统, 成为空间机构在位测量的有效选择。

2 小范围位移感知与测量技术

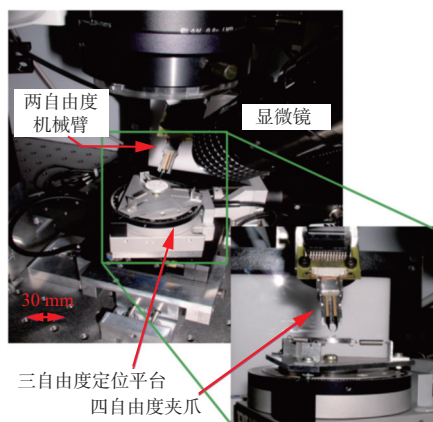
虽然前述测量方法对机构位姿失调量的初步校正效果显著, 但其校正后的残差依旧远超光学系统亚波长级的误差限制, 甚至超出了后续波长级测量系统的测量范围。为了衔接粗大误差以及波长级误差测量的进程, 需要进一步测量动态范围较小的位姿失调, 从而实现依靠不同类型的测量系统来覆盖不同的误差量级, 最终实现系统的分级校正。因此, 参考以下两种小范围位移测量技术对分段式光学系统的精度衔接有着重要意义。

2.1 计算机微视觉

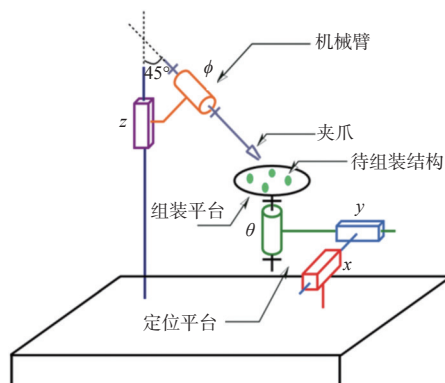
计算机微视觉的测量原理概括来说就是通过测量图像的位移来计算现实空间中的位移: 依靠

计算机对显微镜放大的目标图像或子图像进行处理与分析,最后转换成被测目标的几何特征或者形位参数。显微视觉系统具有可视化、非接触、高精度以及可测自由度等优点,目前已成为当下的研究热点^[45-47],利用显微视觉系统对精密机构位姿和几何参数进行测量^[48,49],其精度一般可达到微米级乃至亚微米级。

1959年,RICHARD P F在美国物理学会年会上的题为“*There is plenty of room at the bottom*”的报告中首次描述了微制造技术,被认为是微操作技术的起点。随着上世纪八、九十年代显微镜技术、精密定位技术、精密测量技术的快速发展,针对微观事物的处理与加工技术逐步受到了研究者的普遍关注。法国的TAMADAZTE B等人^[50]研制的一套基于显微视觉的精密装配系统对实时三维视觉跟踪与控制的相关性进行了论证,如图4所示。该系统在微小装配零件装配实验中实现自动对准和装配。该系统的装配精度高、效率高,姿态误差小于 0.2° ,定位精度可达 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 。2016年,哈尔滨工业大学的栾飞等人^[51]研制的多操作手精密微装配系统采用了提升小波算法,可在显微视觉景深较小,装配空间光照有限的条件下获得清晰的图像并进行相应图像的识别检测。在多尺度、多形状的锥壳靶精密装配实验中,通过将在线测量值与CT测量值进行比较,该系统装配误差最大值为 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 。2022年,ANDRÉ A N团队^[52]提出了一种基于高精度基准标记(high-precision fiducial marker)的测量方法。通过将标记集成到待测结构中,研究人员依靠视觉伺服即可实现相应位移的测量,在微流体芯片的装配实验中实现了 50 nm 的定位精度。



(a) 精密装配试验系统



(b) 试验系统原理简图^[50]

图4 精密装配试验系统

Fig. 4 Precision assembly and test system

2.2 散斑干涉计量技术

作为现代光学测量技术中一个新的重要分支,散斑干涉(speckle pattern interferometry, SPI)计量技术的特点是不接触测量物体、测量精度高、对环境的防震要求低、可在明光下操作、能进行全场测量等。通过采用不同的光学设置以及相移算法,其测量灵敏度可达数微米至几十纳米,目前已被广泛接受为工业中的位移和应变测量工具。

根据对被测面反射光线的预处理不同,散斑计量可分为散斑摄影技术、散斑干涉技术和剪切散斑干涉技术。LEKBERG O^[53]采用电子散斑干涉法对同一燃气轮机叶片的振动模式进行测量,叶片顶端的最大振幅为10.4倍波长,相当于 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 。2011年,BHADURI B等人^[54]同时采用散斑干涉与数字散斑摄影技术提出了一种全新的集成测量系统。其中散斑干涉用于测量面外位移,散斑摄影用于测量面内位移。实验结果显示,该方法可以测量较小的面外位移和较大的面内位移,该系统结合了两种光学测量方法的优点,具有广泛的应用前景。

按照被测对象分类,散斑计量系统可以分为面外系统和面内系统,前者测量面外位移 $w(z$ 坐标方向的位移),后者测量面内位移 $u(x$ 坐标方向的位移)或 $v(y$ 坐标方向的位移)。XIE X等人^[55]采用两束不同波长的激光光束照射被测对象,并同时记录两个剪切散斑干涉图样。通过对记录的剪切图的相位信息进行空间相移方法的评估,最终得到与面内应变相对应的相位信息。2020年,BIANCO G等人^[56]基于多相机数字散斑干涉和三维形状重建技术开发了一种四相机的数字散斑干涉测量系统,实现了对人眼角膜和巩膜三维形变

场的体外测量, 可以提供全场的三维机械变形。上述两种方法均实现了在外部加载下的全场面内应变测量, 符合实际工程中分析力学特性对全场形貌和微变形分布的双向需求。

由此可见, 散斑计量技术凭借其高灵敏度、高精度、高空间分辨率等特点, 目前广泛应用于各领域工程实践中。此外, 散斑干涉测量技术在航空、航天乃至空间光学系统中也具有潜在的应用价值。为了验证 JWST 在轨运行期间面对瞬时温度变化时的结构稳定性, 研究人员对 JWST 背板进行了详尽测试^[57]。利用散斑图样干涉法将连续曝光所得图像的相位与参考图像相位相比较, 可以测算出被测表面微小位移, 如图 5 所示。

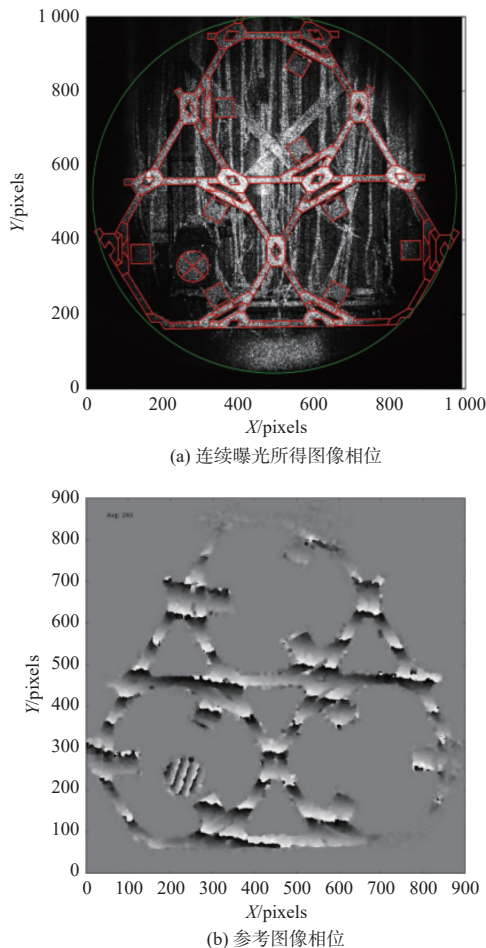


图 5 包含 BSTA 结构上像素化信息的原始曝光图像
Fig. 5 Raw exposure image containing pixelated information on BSTA structure

研究人员对文献^[57]中 60 K 温度环境下 4 h 内的背板变形数据进行处理, 推算出镜面可能会出现形变状态, 其随时间变化的第 3 项与第 35

项 Zernike 多项式函数图像如图 6 所示。文献^[58]中的结果表明, 当温度变化为 13.59 K (41.55 K~55.41 K) 时, 平均单个分镜片连接板的位移均方根为 25.82 nm/K。对于 Z3 项, 1 000 分选量的平均数据均方根值为 0.9 nm, Z35 项 1 000 分选量的平均数据均方根值为 14 pm。显然, 采用散斑图样干涉法可以测量亚纳米级的微小位移, 对于超过 30 的高阶 Zernike 项测量误差低于 50 pm。

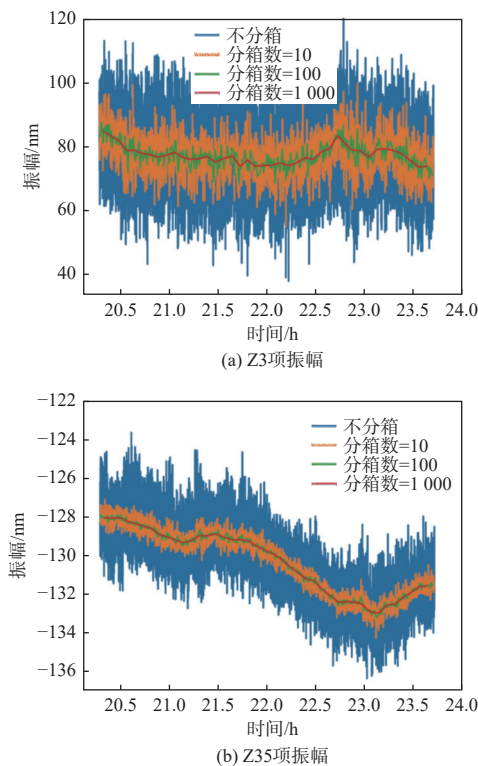


图 6 以时间为自变量的 Z3、Z35 项幅值(不同分箱尺寸的数据以颜色区分)^[58]

Fig. 6 Amplitudes of Z3 and Z35 terms with respect to time (data with different binsizes are distinguished by colors)^[58]

综上所述, 散斑计量技术可以实现对机械结构微小位移与变形的精准测量, 使得其在诸多工程实践中展现出巨大的潜力, 同时, 非接触、全场特性和高测量精度的特点使其得以应用于空间光学系统结构的监测与测量任务中。可以预见, 散斑干涉计量技术在分段式空间光学系统的位姿测量等工程问题中仍具有进一步探索和应用的潜力。然而, 散斑干涉计量技术仍然存在许多问题亟需解决, 例如其对反射面粗糙度的需求不适合直接测量镜面、包裹相位及三维位姿分量的解算过程较为复杂等。

3 波长级测量技术

分段式空间光学系统在轨运行期间,子镜的位姿误差将直接影响系统的成像质量,只有当子镜趋近于共焦共相时,主镜的分辨率才能接近其等效口径的理论衍射极限。能否精确、可靠、便捷地测量子镜微小尺度的位姿误差,并依靠控制系统将其校正到光学容限内,将直接影响到系统最终的成像性能。由此可见,波长级的共焦共相误差的测量及控制技术是保证分段式镜面中各个子镜实现并稳定保持共面状态的关键。

3.1 波前传感

在大口径分段式光学系统中,基于波前传感的校正技术是达成观测目标的关键^[5,12]。作为经典自适应光学的重要应用,波前传感技术^[59]目前是光机结构精密装调的主流辅助手段。目前一个重要的研究方向是通过算法加持与计算机辅助提高波前传感的效率与精度。

3.1.1 基于波前传感的面形测量

在过去20年间,国内外研究者基于波前传感与控制原理对分段式光学系统整体误差的校正做了大量研究^[60-62]。其主要步骤分为波前传感、波前控制、波前矫正三部分^[63],即通过波前传感器测出系统波前像差与机构失调量之间的关系,经由控制系统完成对致动器的实时校正,从而调整子镜位姿或主镜的曲率半径,使系统中心视场成像接近系统衍射极限。2007年, Ball Aerospace 公司开发了一款1 m 试验台望远镜(the one-meter testbed telescope, TBT),如图7所示。

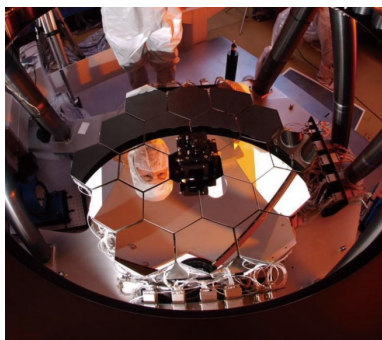


图7 用于 JWST 共相技术论证的试验台望远镜 TBT^[64]

Fig. 7 Experimental telescope TBT used for JWST coherent phase technique validation^[64]

作为 JWST 波前误差校正系统的试验台,研究人员通过 TBT 验证了 JWST 复杂的波前传感及控制算法的可行性,例如焦点扫描算法、全局校正算

法、分段识别算法和图像叠加算法等。实验结果表明,经过一系列校正过程, TBT 成像的活塞误差降低到 35 nm RMS, 检测精度可以达到 20 nm^[64]; 同年, KIM S 等人^[65]采用了一种反向优化算法,与传统灵敏度矩阵法不同的是研究者依靠价值函数来评估光学系统的失准程度并借此对光机结构进行校准。在口径为 900 mm 的卡塞格林型平行光管的准直实验中,系统波前误差 RMS 值在经过两次校准后从 0.283 倍波长减小到 0.194 倍波长,相较于当时的一阶灵敏度矩阵法,该方法具有更好的校准效果; 2018 年,赵东等人^[66]在其研究中提出了一种根据多视场的波前传感信息来计算次镜位置失调量的方法。通过获取不同视场的场依赖波前像差,研究者建立了次镜失调量检测的数学模型。其实验结果表明,当波前传感误差为 $1/40\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm) 时,次镜位置 X 、 Y 方向平移失调量的检测精度约为 30 nm, 倾斜约为 $15''$; 2020 年,中国科学院光电技术研究所的研究人员曹宇泽等人^[67]解决了传统灵敏度矩阵法的精度问题,根据灵敏度矩阵的特点加入了精调步骤,实现了将 300 mm 口径卡塞格林系统的整体波前误差调整至 RMS 优于 0.03 波长。

3.1.2 基于波前传感的平动和转动测量

除了可以针对光学自由曲面的测量外,波前传感与控制技术对于基础几何量的测量也具有高精度、强适应性等优势。2005 年,斯坦福大学的研究人员 MULLER H^[68]尝试依靠波前传感技术测量被测光与参考光间的相对角度,其原理如图8所示。利用四象限探测器对干涉信号进行探测,当测量光与参考光存在相对角度时,会在探测器表面形成波前干涉条纹。通过对探测器4个象限的电信号进行处理,计算得到俯仰角和偏摆角。如果该装置用于测量同向传播光束,则可以消除角锥棱镜的误差,达到 $2.1 \mu\text{rad}$ 的绝对精度。

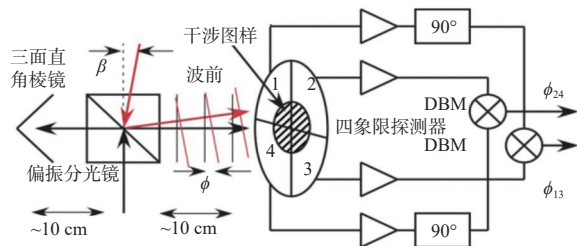


图8 基于四象限波前传感器的角度测量光路图^[68]

Fig. 8 Optical path diagram of angle measurement based on four-quadrant wavefront sensor^[68]

在此基础上, 2012 年, SCHULDT T 等人^[69]设计出一种结构较为紧凑的外差干涉仪, 利用偏振光学结合差分波前传感(DWS)的方法, 可以以 5 nm 的绝对精度测量物体在 X、Y 平面的平移。2015 年, YAN H 等人^[70]设计搭建了一套测试质量平动转动测量系统, 被测质量的平动转动信息既可以通过差分波前干涉仪获得, 也可以由双光束干涉仪进行测量, 在 1 Hz 处位移、角度灵敏度约为 $1 \text{ pm/Hz}^{1/2}$ 和 $0.5 \text{ nrad/Hz}^{1/2}$, 位移测量非线性误差低于 0.1 nm。2020 年, 张善婷等人^[71]设计了一种大行程、高精度、可溯源、四自由度同时测量的外差干涉测量系统, 如图 9 所示, 基于外差干涉和波前传感原理实现对位移、俯仰角、偏转角和直线度的同步检测, 在 6 m 的行程范围内, 位移分辨率和直线度分辨率分别为 0.13 nm 和 14.88 nm, 俯仰角和偏转角分辨率为 $0.026 \text{ } \mu\text{rad}$ 。

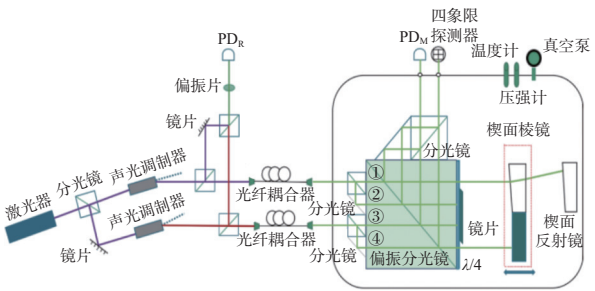


图 9 四自由度外差干涉测量系统^[71]

Fig. 9 Heterodyne interference measurement system for four degrees of freedom^[71]

总体而言, 波前传感技术在拼接镜面的辅助装调任务中具有显著优势。高精度测量能力和实时反馈的特性使其成为优秀的在位测量工具。此外, 非接触性和对复杂光路的适用性进一步增强了其在其他光学系统优化中的应用价值。

3.2 色散条纹传感技术

近年来, 针对其拼接主镜的共焦与共相误差检测能力随着光学测量技术的不断发展而趋于完善。其中, 色散条纹传感技术(dispersed fringe sensing, DFS)凭借其结构简单、量程大、抗干扰能力强等优点, 目前已成功应用到 Keck 天文望远镜和 JWST 的粗共相检测^[72,73]。

图 10 所示为色散条纹图案及 DFS 检测系统示意图, 色散条纹传感技术的核心在于以一定的方法处理携带共相误差信息的色散条纹图案, 并从中提取对应活塞误差的具体值。

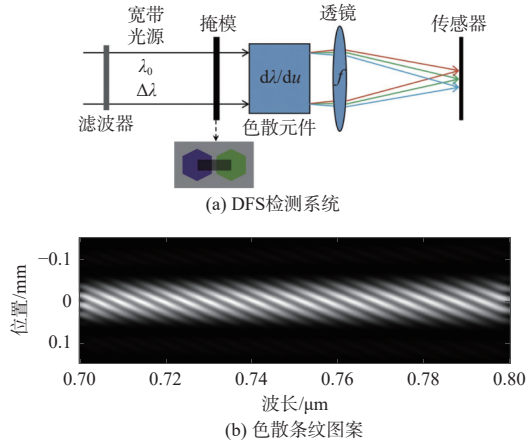


图 10 检测系统示意图

Fig. 10 Schematic diagram of DFS detection system

上世纪 90 年代, 针对色散干涉条纹信息提取的研究曾被用于天体测量和分光光度学联合还原算法的发展^[74]。如今, 色散条纹传感技术经过多年来的发展, 已趋于成熟并应用于多个拼接式望远镜的粗共相流程。例如, SHI F 等人^[72]将改进的 DFS 波长校准算法应用于 Keck 天文望远镜的拼接主镜, 在 $16 \text{ } \mu\text{m}$ 的偏差范围内, 子镜失调量的测量均方根误差由 142 nm 降低至 59 nm, 为大型分段式望远镜实际条件下 DFS 算法的有效性提供了强有力的验证; JWST 使用的宽带色散条纹传感器不仅检测范围大于 $100 \text{ } \mu\text{m}$, 其对 $40 \text{ } \mu\text{m}$ 以下的活塞失调的测量误差小于 $0.3 \text{ } \mu\text{m}$, 满足后续精共相的精度需求^[75,76]; 亚利桑那大学和 GMTO 公司的研究人员 HAFERT S Y 等人^[77]研制了一种全息色散条纹传感器(holographic dispersed fringe sensors, HDFS), 在实验室环境以及 GMT(giant Magellan telescope)望远镜上分别达到了 5 nm 和 50 nm 均方根误差的测量精度。SPECHLER J A 等人^[78]在原有研究基础上提出了改进色散条纹传感算法(advanced dispersed fringe sensing, ADFS), 实验结果显示借助 ADFS 算法, 系统对数 μm 级的活塞误差检测误差低于 1%。该方法通过在条纹强度拟合方程中增加相位项, 降低了整套方法对标定误差的敏感性, 显著提高了活塞误差的解算精度, 为 DFS 更广泛应用开辟了可能性。

由此可见, 色散条纹传感技术已经大量应用于分段式光学系统的共相进程中。然而, DFS 技术仍然存在诸如测算精度无法满足精共相需求、条纹图案受高阶像差影响较大、解算精度对采样误差和校准误差敏感等缺陷。该技术仍有较大发展

空间以进一步满足未来分段式空间光学系统共相精度的需求。

4 分段式空间光学系统机构位姿基准的建立、传递与保持

为了达到在轨工作性能要求,分段式空间光学系统需要依靠在位测量系统调整光机结构的位姿,最终实现拼接主镜的共焦共相。在此期间,分段式空间光学系统的机构位姿基准的建立、传递与保持,对于整个测量过程起到了决定性作用。以分段式光学系统的主镜共相为例,文中将对分段机构的基准问题进行讨论。

4.1 基准建立与传递

现有分段式空间光学系统的设计方案普遍包含几十、上百面分段子镜,如何确定相位基准是实现主镜共相的第一步。JWST在色散条纹传感的基础上采用了色散哈特曼传感器,实现了对两面子镜的相对活塞差测量,通过重复进行这样的测量可以解算出所有18个分段的相对活塞差;REDDING D C等人^[79]在其研究中为JWST拼接镜的基准传递提供了全新思路,如图11所示,首先通过色散条纹传感实现一系列共5面子镜的共相,并将其作为基准段,在2-4步中逐步将相位基准传递至整个镜面,最终使整个拼接镜面趋于共相。

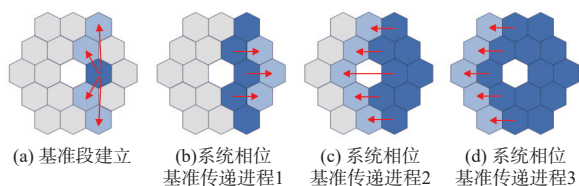


图11 基于色散条纹传感的主镜共相过程

Fig. 11 Primary mirror co-phasing process based on dispersive fringe sensing

4.2 应对环境变化的姿态保持

在温度变化、重力变动、机构微振动等空间复杂环境变化的影响下,保持已确定的全局位姿状态是确保光学系统稳定工作的关键。这一过程本质上是通过位姿测量以及机构致动器的相关反馈来维持系统的既定位姿,这种姿态保持可以以多种不同方式进行。Keck天文望远镜采用了边缘传感器来实时感知分段子镜之间的活塞差变动,结合波前感知校正大气湍流效应带来的影响,实现对主镜共相状态的保持与控制;由于没有集成实时的姿态感知系统,JWST为了克服环境变化对成

像质量的影响,只能通过定期进行机构测量与波前感知完成系统的波前校正。根据NASA已提供的信息,截止2023年7月,JWST已在轨完成11次主动镜面校正;在借鉴了JWST、SIM、TPF任务的相关研究后,ATLAS-T16空间望远镜的初步设计中包含多种姿态保持方案,例如其机构姿态感知主要依靠激光计量桁架系统,该系统由多台激光测距仪组成^[80]。与边缘传感器相比,该系统依靠激光计量可提供更直观的子镜失调量测量结果;与传统波前感知相比,激光计量桁架在光学系统在轨运行期间缺失导星时也可主动监测系统工作状态,保证成像质量。

综合而言,建立机构位姿基准并确保其准确传递与长期保持,对于分段式光学系统的成像质量和稳定工作具有关键性作用,是确保系统能够达到预期性能的基础。在实际应用中,一套有效的基准传递与保持机制将大大简化复杂光学系统的集成和维护过程,同时确保整个系统在长时间在轨运行中保持高性能,从而在实际观测应用中发挥出最佳效果。

5 发展趋势

近年来,将超高精度测量系统应用在空间光学系统的科学项目不断出现,我们可以根据未来空间光学系统的发展需求,对光学测量系统的发展趋势进行展望。

5.1 高精度跨度比测量

更大尺寸的空间光学系统意味着更强大的观测能力,未来针对大尺度空间光学系统的研究可能会促进空间光学技术的跨越式进步。NASA提出的下一代空间光学系统LUVOIR (large UV/optical/IR surveyor, LUVOIR),其主镜由120块边到边尺寸为1.223 m的子镜组成,等效口径达到15 m。覆盖 $0.1\ \mu\text{m}\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 的探测谱段,在紫外波段与JWST互补,目前研究者重点关注的问题依旧聚焦于分段主镜共焦、共相与姿态保持。LUVOIR的主镜大小相较于现有空间光学系统进一步增大,但为了满足其亚纳米级的波前稳定性需求,其搭载的测量系统需要在保证更大测量范围的同时兼顾更高的测量精度,理论精度跨度比需求达到了 $10^{10}\sim 10^{11}$ 。显然,为了推动空间光学载荷向规模更庞大、功能更全面、性能更强大的方向发展,关键在于实现测量系统在精度跨度比层面上的提升。另

一方面, 现有极高精度的测量系统大多依赖于实验室环境, 寻求空间环境下的实用性也极为关键。

5.2 从独立测量到融合测量

目前, 大多数测量系统根据时间尺度可划分为高频测量系统和低频测量系统, 按照空间尺度的不同可划分为高精度测量系统和低精度测量系统, 通过探索光学测量系统在时间尺度和空间尺度的融合策略以及不同测量系统间的数据协调与共享机制, 研发效率高、实时性好、测量范围大的集成测量系统以满足在位测量的需求是支持包括空间光学系统的在轨制造、装调和稳定工作以及其他前沿空间科学技术的发展的重中之重。例如: JWST 搭载的粗精共相集成系统通过将色散哈特曼传感器与色散条纹传感器集成于一体, 实现上百微米到数十纳米活塞误差的连续测量^[75]; HOASIS 的多级干涉系统, 通过迈克尔逊干涉仪与非佐干涉仪分别对主镜和二级、三级镜进行校正^[11]; Keck 天文望远镜结合边缘传感器与波前传感系统的协同测量机制等等。由此可见, 继续探索多光学测量系统的协同配合机制, 是满足当前空间光学系统发展和空间科学研究需求的重要研究方向, 精度衔接、数据融合、系统集成等问题依然有

待研究者进一步完善。

综上所述, 兼顾高精度与大量程的高精度跨度比集成式测量是未来高精度测量系统的主要发展趋势, 通过整合不同尺度、精度的测量方法, 使得测量系统的性能在尺度与精度水平上延拓, 最终满足分段式空间光学系统在位运行期间所需的大跨度、高精度、高实时性的位姿测算。图 12 展示了几种具有相同精度跨度比的测量系统, 虚线的斜率代表特定的精度跨度比, 常见的光学测量系统的测量性能如表 2 所示。

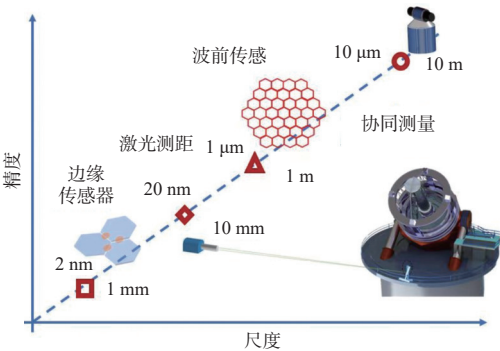


图 12 具有相同精度跨度比的测量系统
Fig. 12 Measurement systems with the same precision span ratio

表 2 常见光学测量系统的测量性能及原理

Table 2 Measurement performances and principles of common optical measurement systems

系统	性能			
	测量范围	测量精度	测量原理	精度跨度比
激光干涉	小	亚nm~pm	通过探测相位变化来计算位移	10 ⁹
显微视觉	小	nm~亚nm	基于目标在靶面上的投影关系解算待测对象位置信息	10 ⁸ ~10 ⁹
机器视觉	大	mm~亚mm		10 ³ ~10 ⁴
散斑计量	大	亚nm~pm	自散射介质表面提取散斑干涉图像, 通过相位提取与分析, 实现面型测量	10 ⁹ ~10 ¹⁰
激光跟踪	大	mm~亚μm	通过距离及角度测量, 解算单点位置信息	10 ⁶ ~10 ⁷
波前传感	大	nm~亚nm	基于相位测量获取光学系统状态	10 ⁹

6 结论

大口径的分段空间光学系统不断增大的集光面积克服了运载器的运力限制, 并顺应当今空间探测应用的需求, 但却导致了其机构复杂度和对精度把控的能力需求远超过常规空间光学系统, 同时对其在位测量系统提出了非常高的要求。文中综述了基于光学系统的复杂空间机构辅助测量装调的相关技术及其研究现状, 讨论了高精度光学测量系统的发展趋势, 包括高精度跨度比以及空间环境下实用性的研究需求、对融合测量技术及其集成方法、协同机制的研究趋势, 展示了光

学测量系统在未来空间光学领域的应用前景。总而言之, 基于光学测量系统的空间机构在位测量技术也可用于在轨装配、在轨维护、在轨制造等技术领域, 不断推动空间光学系统向更高层次发展。可以说, 针对高精度光学测量系统的研究, 将是未来一段时期发展超大规模空间光学设施的必经之路。

参考文献:

[1] 胡斌, 李创, 相萌, 等. 可展开空间光学望远镜技术发展及展望[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 347-362.

- HU Bin, LI Chuang, XIANG Meng, et al. Development and prospects of deployable space optical telescope technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 347-362.
- [2] ALLEN M R, KIM J J, AGRAWAL B N. Correction of an active space telescope mirror using a deformable mirror in a woofer-tweeter configuration[J]. *Journal of Astronomical Telescopes Instruments and Systems*, 2016, 2(2): 029001.
- [3] ALLEN M R, KIM J J, AGRAWAL B N. Correction of an active space telescope mirror using a gradient approach and an additional deformable mirror[C]//UV/Optical/IR Space Telescopes and Instruments: Innovative Technologies and Concepts VII. Bellingham: SPIE, 2015: 118-128.
- [4] CLAMPIN M. Overview of the James Webb space telescope observatory[C]//UV/Optical/IR Space Telescopes and Instruments: Innovative Technologies and Concepts V. Bellingham: SPIE, 2011: 55-64.
- [5] ACTON D S, KNIGHT J S, CONTOS A, et al. Wavefront sensing and controls for the James Webb Space Telescope[C]//Space Telescopes and Instrumentation 2012: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. Bellingham: SPIE, 2012: 877-887.
- [6] STEPHANIE B L. Active optics in deployable systems for future EO and science missions[R]. Cannes: Thales Alenia Space France SAS, 2020.
- [7] CHANAN G, OHARA C, TROY M. Phasing the mirror segments of the Keck telescopes II: the narrow-band phasing algorithm[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(25): 4706-4714.
- [8] CHANAN G, TROY M. Strehl ratio and modulation transfer function for segmented mirror telescopes as functions of segment phase error[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(31): 6642-6647.
- [9] CARRIER A, AUBURN J N, CHAMPAGNE P, et al. Development and demonstration of a precision latch for deployable optical systems[C]//IR Space Telescopes and Instruments. Bellingham: SPIE, 2003: 286-303.
- [10] CARRIER A, AUBURN J N, CLAPPIER R, et al. Development and microdynamics characterization of a deployable petal assembly at full scale[C]//IR Space Telescopes and Instruments. Bellingham: SPIE, 2003: 254-273.
- [11] MESRINE M, THOMAS E, GARIN S, et al. High resolution earth observation from geostationary orbit by optical aperture synthesis[C]//International Conference on Space Optics—ICSO 2006. Bellingham: SPIE, 2017: 71-77.
- [12] POSTMAN M, SPARKS W B, LIU F C, et al. Using the ISS as a testbed to prepare for the next generation of space-based telescopes[C]//Space Telescopes and Instrumentation 2012: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. Bellingham: SPIE, 2012: 644-653.
- [13] KRUEGER T, SWADE D. OpTIIX mission overview and education/public outreach[C]//Astronomical Data Analysis Software and Systems XXII, Proceedings of a Conference held at University of Illinois. Illinois: ASP, 2013, 475: 11-14.
- [14] BATTERSBY C, ARMUS L, BERGIN E, et al. The origins space telescope[J]. *Nature Astronomy*, 2018, 2(8): 596-599.
- [15] LEISAWITZ D, AMATUCCI E, ALLEN L, et al. Origins space telescope: trades and decisions leading to the baseline mission concept[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2021, 7(1): 011014.
- [16] GUPTA G, ARYA M, GOEL A, et al. Detector development for the lunar crater radio telescope[C]//2022 IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS). San Diego: IEEE, 2022: 1-5.
- [17] ARYA M, PISANTI D, VERNIANI A, et al. Kilometer-scale parabolic reflector for a radio telescope in a lunar crater[C]//AIAA SCITECH 2023 Forum. Reston: AIAA, 2023: 1-18.
- [18] BANDYOPADHYAY S, LAZIO J, STOICA A, et al. Conceptual ideas for radio telescope on the far side of the moon[C]//2018 IEEE Aerospace Conference. San Diego: IEEE, 2018: 1-10.
- [19] BANDYIPADHYAY S, MCGAREY P, GOEL A, et al. Conceptual design of the lunar crater radio telescope (LCRT) on the far side of the moon[C]//2021 IEEE Aerospace Conference. San Diego: IEEE, 2021: 1-25.
- [20] ALBADA G D V, LAGERBERG J M, HERTZBERGER L O, et al. A low-cost pose-measuring system for robot calibration[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2002, 15(3): 207-227.
- [21] 蔡泽亮. 基于单目视觉的工业机器人末端位姿测量方法研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2022.
- CAI Zeliang. Research on measurement method of end position of industrial robot based on machine vision[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2022.

- [22] WANG Q, JIN B, ZHANG C. Kinematic calibration of a hexapod robot based on monocular vision[J]. *Machine Vision and Applications*, 2022, 33(6): 1-11.
- [23] JANOSHA H, DIEWALD B. New methods of measuring and calibrating robots[C]//*Intelligent Robots and Computer Vision XIV: Algorithms, Techniques, Active Vision, and Materials Handling*. Philadelphia: IEEE, 1995: 688-699.
- [24] 王明吉, 陈秋梦, 任福深. 基于双目视觉的目标测距系统[J]. *自动化与仪器仪表*, 2022(7): 5-8.
WANG Mingji, CHEN Qiumeng, REN Fushen. Target ranging system based on binocular vision[J]. *Automation and Instrumentation*, 2022(7): 5-8.
- [25] 黄贤振, 彭淑萍. 基于双目视觉的目标识别与定位及机械臂的抓取研究[J]. *自动化与仪表*, 2022, 37(9): 32-35.
HUANG Xianzhen, PENG Shuping. Research on target recognition and location based on binocular vision and grasping of manipulator[J]. *Automation and Instrumentation*, 2022, 37(9): 32-35.
- [26] 赵珊珊, 米曾真, 陈韧. 基于双目视觉的运动目标检测与三维重建[J/OL]. *计算机集成制造系统*, (2022-11-03)[2023-12-7]. <http://www.cims-journal.cn/CN/abstract/abstract7810.shtml>
ZHAO Shanshan, MI Zengzhen, CHEN Ren. Moving target detection and 3D reconstruction based on binocular vision[J/OL]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*: (2022-11-03)[2023-12-7]. <http://www.cims-journal.cn/CN/abstract/abstract7810.shtml>.
- [27] BISOGNI L, MOLLAIYAN R, PETTINARI M, et al. Automatic calibration of a two-axis rotary table for 3D scanning purposes[J]. *Sensors*, 2020, 20(24): 7107.
- [28] ANDY Z, YU K T, SONG S R, et al. Multi-view self-supervised deep learning for 6D pose estimation in the amazon picking challenge[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). San Diego: IEEE, 2017: 1383-1386.
- [29] SATO M, TAKAHASHI A, NAMIKI A. High-speed catching by multi-vision robot hand[C]//2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). San Diego: IEEE, 2020: 9131-9136.
- [30] 胡成威, 高升, 熊明华, 等. 空间站核心舱机械臂关键技术[J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(9): 1299-1331.
HU Chengwei, GAO Sheng, XIONG Minghua, et al. Key technologies of the China space station core module manipulator[J]. *Sci Sin Tech*, 2022, 52(9): 1299-1331.
- [31] NEWMAN W S, OSBORN D W. A new method for kinematic parameter calibration via laser line tracking[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Diego: IEEE, 1993: 160-165.
- [32] NEWMAN W S, BIRKHIMER C E, HORNING R J, et al. Calibration of a motoman P8 robot based on laser tracking[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Diego: IEEE, 2000: 3597-3602.
- [33] 帅思远. 基于激光跟踪仪的工业机器人整机运动性能测试与评价[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
SHUAI Siyuan. Test and evaluation of the motion performance of industrial robot based on laser tracker[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [34] 于海莲, 夏仰球, 杨川贵. 激光跟踪仪测量工业机器人位置距离准确度的不确定度研究[J]. *机床与液压*, 2017, 45(11): 48-50.
YU Hailian, XIA Yangqiu, YANG Chuangui. Uncertainty evaluation of industrial robot's position distance accuracy by the laser tracker[J]. *Machine Tool and Hydraulics*, 2017, 45(11): 48-50.
- [35] 乔贵方, 孙大林, 温秀兰, 等. 面向机器人标定的单激光跟踪仪顺序多站式测量系统建模与分析[J]. *计量学报*, 2020, 41(11): 1313-1320.
QIAO Guifang, SUN Dalin, WEN Xiulan, et al. Modeling and analysis of sequential multi-lateration measurement system based on single laser tracker for robot calibration[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(11): 1313-1320.
- [36] 任永杰, 郝继贵, 杨学友, 等. 利用激光跟踪仪对机器人进行标定的方法[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(9): 195-200.
REN Yongjie, ZHU Jigui, YANG Xueyou, et al. Method of robot calibration based on laser tracker[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(9): 195-200.
- [37] NUBIOLA A, BONEV I A. Absolute calibration of an ABB IRB 1 600 robot using a laser tracker[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29(1): 236-245.
- [38] NAKAMURA O, GOTO M. Four-beam laser interferometry for three-dimensional microscopic coordinate measurement[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(1): 31-36.
- [39] CHEN H F, JIANG B, SHI Z Y, et al. Uncertainty modeling of the spatial coordinate error correction system of the CMM based on laser tracer multi-station measurement[J].

- Measurement Science and Technology, 2019, 30(2): 025007.
- [40] 刘旭东, 陈章位, 王直荣, 等. 基于三基站协同的工业机器人动态轨迹测量方法[J]. 计量与测试技术, 2022, 49(7): 62-65.
LIU Xudong, CHEN Zhangwei, WANG Zhirong, et al. Dynamic trajectory measurement method of industrial robot based on three base stations cooperation[J]. Metrology and Measurement Technique, 2022, 49(7): 62-65.
- [41] CANUTO E, MUSSO F. Active angular stabilization of the GAIA space telescope through laser interferometry[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2004, 37: 955-960.
- [42] 陈章位, 祖洪飞, 洪伟, 等. 基于多基站激光跟踪仪的机器人位姿精度测试方法[J]. 计测技术, 2021, 41(1): 10-16.
CHEN Zhangwei, ZU Hongfei, HONG Wei, et al. The accurate robot pose measurement based on multi base station laser tracker[J]. Metrology and Measurement Technology, 2021, 41(1): 10-16.
- [43] 南仁东, 姜鹏. 500 m 口径球面射电望远镜 (FAST)[J]. 机械工程学报, 2017, 53(17): 1-3.
NAN Rendong, JIANG Peng. The 500 m aperture spherical radio telescope[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(17): 1-3.
- [44] 程志峰. 基于激光跟踪仪的 FAST 馈源舱位姿测量技术研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2019.
CHENG Zhifeng. On position and orientation measurement technics of FAST's feed cabin by laser tracker[D]. Zhengzhou: PLA Strategic Support Force Information Engineering University, 2019.
- [45] 蔡旭明. 面向 MEMS 陀螺仪的显微视觉定位系统研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2023.
CAI Xuming. Research on micro-vision positioning system for MEMS gyroscope[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2023.
- [46] 范增华, 荣伟彬, 刘紫潇, 等. 基于显微视觉的毛细力动态检测方法[J]. 中国机械工程, 2020, 31(19): 2290-2294.
FAN Zenghua, RONG Weibin, LIU Zixiao, et al. A dynamic detection method of capillary forces based on microscopic vision[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(19): 2290-2294.
- [47] 卢桂章, 张建勋, 赵新. 面向生物工程实验的微操作机器人[J]. 南开大学学报 (自然科学版), 1999, 32(3): 42-46.
LU Guizhang, ZHANG Jianxun, ZHAO Xin. Micro operation robot system oriented to biological experiment[J]. Journal of Nankai University (Natural Science), 1999, 32(3): 42-46.
- [48] TAMADAZTE B, DEMBELE S, FORTIER G et al. VI micromanipulation using multiscale visual servoing[C]//4th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. Bellingham: SPIE, 2008: 977-982.
- [49] 费仁元, 管长乐, 李剑锋, 等. 3-PUU 并联微操作机器人系统[J]. 北京工业大学学报, 2005, 31(1): 1-5.
FEI Renyuan, GUAN Changle, LI Jianfeng, et al. 3-PUU parallel micro-manipulating robot system[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2005, 31(1): 1-5.
- [50] TAMADAZTE B, ARNOULD T, DEMBELE S, et al. Real-time vision-based microassembly of 3D MEMS[C]//2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. San Diego: IEEE, 2009: 88-93.
- [51] 栾飞, 蒋柏斌, 荣伟彬, 等. 锥壳靶自动精密微装配系统[J]. 机器人, 2016, 38(5): 563-568.
LUAN Fei, JIANG Bobin, RONG Weibin, et al. Cone-shell target automatic precision micro-assembly system[J]. ROBOT, 2016, 38(5): 563-568.
- [52] ANDRÉ A N, LEHMANN O, GOVILAS J, et al. Automating robotic micro-assembly of fluidic chips and single fiber compression tests based-on XY Θ visual measurement with high-precision fiducial markers[C]//2022 IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. San Diego: IEEE, 2024, 21(1): 353-366.
- [53] LEKBERG O. Electronic speckle pattern interferometry[J]. Physics in Technology, 1980, 11(1): 16.
- [54] BHADURI B, TAY C J, QUAN C, et al. Two wavelength simultaneous DSPI and DSP for 3D displacement field measurements[J]. Optics Communications, 2011, 284(10): 2437-2440.
- [55] XIE X, CHEN X, LI J R, et al. Measurement of in-plane strain with dual beam spatial phase-shift digital shearography[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(11): 115202.
- [56] BIANCO G, LUIGI B, CHRISTOPHER A G, et al. Full-field displacement measurement of corneal scleral shells by combining multi-camera speckle interferometry with 3D shape reconstruction[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2020, 103: 103560.
- [57] SAIF B, MARCEL B, PERRY G, et al. Measurement of large cryogenic structures using a spatially phase-shifted digital speckle pattern interferometer[J]. Applied Optics,

- 2008, 47(6): 737-745.
- [58] SAIF B, PERRY G, MARCEL B, et al. Tracking sub-nanometer thermal structural changes with speckle interferometry[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(22): 204-208.
- [59] 李自强, 李新阳, 高泽宇, 等. 基于深度学习的自适应光学波前传感技术研究综述[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(8): 5-17.
- LI Ziqiang, LI Xinyang, GAO Zeyu, et al. Review of wavefront sensing technology in adaptive optics based on deep learning[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33(8): 5-17.
- [60] SZEGEDY C, VANHOUCKE V, IOFFE S, et al. Rethinking the inception architecture for computer vision[C]// *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Diego: IEEE, 2016: 2818-2826.
- [61] NISHIZAKI Y, VALDIVIA M, HORISAKI R, et al. Deep learning wavefront sensing[J]. *Optics Express*, 2019, 27(1): 240-251.
- [62] WANG M H, GUO W, YUAN X H. Single-shot wavefront sensing with deep neural networks for free-space optical communications[J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 3465-3478.
- [63] PAINE S W, FIENUP J R. Machine learning for improved image-based wavefront sensing[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1235-1238.
- [64] SABATKE E, SCOTT A, JOHN S, et al. Using multifield measurements to eliminate alignment degeneracies in the JWST testbed telescope[C]// *UV/Optical/IR Space Telescopes: Innovative Technologies and Concepts III*. Bellingham: SPIE, 2007: 668707-1-668707-10.
- [65] KIM S, YANG H S, LEE Y W, et al. Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems[J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 5059-5068.
- [66] 赵东, 张晓芳, 陈蔚霖, 等. 基于多视场波前传感的次镜位置误差检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(8): 331-339.
- ZHAO Dong, ZHANG Xiaofang, CHEN Weilin, et al. Secondary mirror position error detection method based on multi-field wavefront sensing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 331-339.
- [67] 曹宇泽, 马文礼. 两步式灵敏度矩阵法在卡塞格林望远镜装调中的应用[J]. *光电工程*, 2020, 47(2): 5-12.
- CAO Yuze, MA Wenli. Application of two step sensitivity matrix method in Cassegrain telescope alignment[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, 47(2): 5-12.
- [68] MULLER H, CHIOU S W, LONG Q, et al. Active sub-Rayleigh alignment of parallel or antiparallel laser beams[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(24): 3323-3325.
- [69] SCHULDT T, GOHLKE M, KOGEL H, et al. Picometre and nanoradian heterodyne interferometry and its application in dilatometry and surface metrology[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(5): 1-7.
- [70] YAN H, DUAN H Z, LI L T, et al. A dual-heterodyne laser interferometer for simultaneous measurement of linear and angular displacements[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(12): 454-459.
- [71] 张善婷, 郭汉明. 四自由度同步外差干涉测量系统设计[J]. *光学仪器*, 2020, 42(4): 75-81.
- ZHANG Shanting, GUO Hanming. A heterodyne interferometry for simultaneous measurement of four degrees of freedom[J]. *Optical Instruments*, 2020, 42(4): 75-81.
- [72] SHI F, CATHERINE M O, GARY C, et al. Experimental verification of dispersed fringe sensing as a segment phasing technique using the Keck telescope[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(23): 4474-4481.
- [73] FEINBERG L D, BRUCE H D, DAVID L, et al. TRL-6 for JWST wavefront sensing and control[C]// *UV/Optical/IR Space Telescopes: Innovative Technologies and Concepts III*. Bellingham: SPIE, 2007: 67-90.
- [74] SCHOLZ R D, BASTIAN U. Simulated dispersed fringes of an astrometric interferometry mission[C]// *Hipparcos-Venice97*. Venice: ESA, 1997: 815-818.
- [75] SHI F, BASINGER S A, REDDING D C. Performance of dispersed fringe sensor in the presence of segmented mirror aberrations: modeling and simulation[C]// *Space Telescopes and Instrumentation I: Optical, Infrared, and Millimeter*. Orlando: SPIE, 2006: 284-295.
- [76] ALBANESE M, ALLAN W, ANDY J, et al. Verification of the James Webb space telescope coarse phase sensor using the Keck telescope[C]// *Space Telescopes and Instrumentation I: Optical, Infrared, and Millimeter*. Orlando: SPIE, 2006: 296-304.
- [77] HAFERT S Y, et al. The holographic dispersed fringe sensors (HDFS): phasing the Giant Magellan Telescope[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2022, 8(2): 021513.
- [78] SPECHLER J A, DANIEL J H, NORBERT S, et al. Advanced DFS: a dispersed fringe sensing algorithm insensitive

-
- itive to small calibration errors[C]//Space Telescopes and Instrumentation 2010: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. San Diego: SPIE, 2010: 1778-1787.
- [79] REDDING D C, SHI F, BASINGER S A, et al. Wavefront sensing and control for large space optics[C]//2003 IEEE Aerospace Conference. USA: 2003, 4: 1729-1744.
- [80] REDDING D C, GREGORY H, GREGORY S A, et al. Active optics for a 16-meter advanced technology large aperture space telescope[R]. California: California Institute of Technology, 2008.