



基于双光束数字散斑干涉的航天关节端面角位移测量

Measurement of Angular Displacements of Aerospace Joint End Faces Using Dual-Beam Digital Speckle Pattern Interferometry

期刊：	中国科学: 技术科学
稿件ID：	SST-2025-0454.R3
稿件栏目：	论文
作者提交日期：	2026-03-03
参与作者列表：	王亚可, 吴思进, 王浩威, 杨凤龙, 唐小军, 李浩, 闫洋, 李伟仙, 周勇, 刘冬, 牛海莎, 李仁豪, 司娟宁, 苏信晨, 张鹏嵩, 任海龙
关键词：	数字散斑干涉, 航天机械臂, 航天关节, 位姿检测, 角位移, 高低温试验
英文关键词：	
学科领域：	光学与光学工程
专题：	



论文

基于双光束数字散斑干涉的航天关节端面角位移测量

王亚可¹, 吴思进^{1*}, 王浩威², 杨凤龙³, 唐小军³, 李浩¹, 闫洋¹, 李伟仙¹, 周勇³, 刘冬², 牛海莎¹, 李仁豪¹, 司娟宁¹, 苏信晨¹, 张鹏嵩⁴, 任海龙³

1. 北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100192
2. 中国空间技术研究院北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094
3. 中国空间技术研究院北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094
4. 中国空间技术研究院北京卫星环境工程研究所, 北京 100094

*E-mail: swu@bistu.edu.cn

国家自然科学基金项目(编号: 52075045)资助

摘要 地面高低温模拟环境下航天关节端面相对角位移的精密测量一直缺乏有效的手段, 影响航天任务的顺利实施. 本文提出了一种基于数字散斑干涉技术的航天关节端面三维相对角位移测量方法, 通过建立俯仰、偏摆和滚转角位移的测量模型, 结合参数解耦与角度合成算法, 在升降温条件下对关节端面进行测量实验, 精确测量了航天关节两侧端面的俯仰角、偏摆角和滚转角的相对变化, 实验结果说明两侧关节端面合成三角位移与温度变化存在相对正相关关系. 结果显示, 该方法的俯仰和偏摆角位移测量分辨力为 $1.5 \mu\text{rad}$, 滚转角位移测量分辨力为 $4.0 \mu\text{rad}$, 验证了测量系统的有效性. 本研究为航天关节在热载荷下的运动特性评估提供了有效测量手段, 对关节性能验证与结构优化具有重要参考价值.

关键词 数字散斑干涉, 航天机械臂, 航天关节, 位姿检测, 角位移, 高低温试验

1 引言

航天领域工件制造精度评定的必要性, 随着深空探测与在轨服务等关键技术的飞速发展而日益凸显. 因此, 针对航天控制系统尤其是机械臂系统的精度问题开展深入研究, 具有重要的工程应用价值. 机械臂作为航天任务中的核心执行机构, 其可靠性直接关乎整体任务成败, 而其中关节作为机械臂的执行部件, 在太空高低温环境下的端面位姿稳定性尤为关键. 极端温度条件可能导致关节端面产生不可

忽略的相对角位移, 严重影响机械臂末端定位精度. 因此, 在地面高低温试验中实现对关节端面相对角位移的精密测量, 对评估其在轨性能和优化结构设计都具有重要意义.

多年来, 研究者在航天机械臂的系统设计、运动规划与控制等方面已取得较多进展^[1-4], 然而, 在面临高低温交变等极端工况时, 关节端面角位移的精确测量仍存在显著技术瓶颈. 在航天关节地面模拟试验中, 大范围温度变化引入的扰动以及由热胀冷缩引起的端面结构变形耦合效应, 严重影响了光学

测量方法的可靠性与精度。此外，航天关节通常要求角位移测量分辨力达到角秒级，这对测量系统的测量分辨力和抗干扰能力提出了极高要求。

航天关节两侧端面俯仰角、偏摆角及滚转角的测量属于多角度测量范畴，当前主流的角度测量方法包括多目视觉法^[5,6]、光电编码法^[7,8]、惯性测量法^[9-11]、激光自准直法与激光干涉法。其中，多目视觉法、光电编码法及惯性测量法受原理限制，测量精度较低，无法满足关节端面角秒级别的测量需求。激光自准直法通过将激光束投射至反射镜，利用反射光在位置敏感探测器上的光斑位移量实现角度解算。该技术具备结构紧凑、分辨率高等优势，并可借助分光与多探测器配置实现多自由度测量。然而，其测量依赖高质量的光学反射面，难以直接应用于粗糙或漫射表面，且易受环境气流与振动干扰^[12-14]。激光干涉法能够实现纳米级至亚纳米级线位移测量分辨力，部分方案可兼顾毫米级大范围测量，通过解析干涉信号相位或频率变化完成多维度参数测量。但该方法也存在局限，除复杂环境适应性不足外，靶镜的安装与校准会增加系统复杂度，需保证其与关节端面精准装配以规避附加误差，并确保高低温环境下的稳定性，进一步提升了应用难度^[15,16]。

在高低温试验舱内开展航天关节端面角位移测量时，激光自准直法与传统激光干涉法作为依赖靶镜的点测量方法，存在显著局限性。一方面，受点测量特性制约，二者通过靶镜单点反射信号解算角度，仅能获取靶镜安装点位的局部角位移信息。而航天关节端面在高低温环境下易因热应力产生非均匀角位移与局部变形，单点数据难以反映端面整体角位移分布规律，且缺乏全域面测量数据支撑，难以建立端面各点位的位移-变形关联模型，无法实现端面对刚体角位移与表面弹性变形的有效解耦，导致测量结果包含表面变形的干扰误差，不能准确表征关节实际运动状态。另一方面，高低温环境下靶镜安装存在天然困难，大范围温度交变会导致靶镜与关节端面发生不一致的热胀冷缩，易导致靶镜安装松动、定位偏差或贴合不紧密，同时高低温还可能影响靶镜安装结构的稳定性，这类由安装不可靠引发的误差会直接传递至测量结果，严重影响测量精度，难以满足航天关节高精度角位移检测的需求。

数字散斑干涉技术(digital speckle pattern interferometry, DSPI)^[17]由于其全场、非接触式以及高

精度的特性，广泛应用于航天航空、生物医学、无损检测和精密制造等领域。传统数字散斑干涉技术主要用于物体的变形和应变测量^[18]，少数文献提到了该技术对面内角运动的测量方法^[19-22]。我们则全面阐述了数字散斑干涉技术对微小角运动的敏感机制，分别提出了基于数字散斑干涉的滚转角测量方法^[23,24]、俯仰角、偏摆角同时测量^[25]，以及三维角位移同时测量方法^[26]。最近则逆向利用三维角位移测量原理，提出了数字散斑干涉技术的综合校准和精度评定方法，能有效评估并提高测量精度^[27]。

在我们先前的工作中，已从原理层面实现了基于三光束照明的三维空间载波数字散斑干涉技术，为三维角位移的同时测量提供了理论基础与可行性验证。但该技术若要应用于高低温环境下航天关节双端面角位移的实际测量，仍面临诸多现实挑战：比如原有方法测量面积较小，难以满足航天关节大尺寸端面的测量需求；高低温试验舱视窗尺寸较小，限制了光学路径的灵活布置，难以保证三束激光以对称角度入射至端面；关节双端面测量需进行两侧角位移的合成处理；在高低温环境下，关节端面变形存在弹性形变和刚体角位移，需要采取合适的解耦方法来分离这两类运动。因此，需发展新的数字散斑干涉三维角位移同时测量方法，设计新型光路，并提出有效的算法来实现上述功能。

本文提出了一种基于双光束数字散斑干涉的关节端面三维角位移测量方法。通过集成离面与面内测量光路，实现三维角位移的同时测量，同时保持了较大的测量视场。通过在关节双端面分别布置光路，提出角度合成以及参数分离方法，实现了高低温环境下关节双端面相对俯仰角、偏摆角和滚转角的精确测量。该方法可为航天关节的质量评估与结构改进提供可靠的实验依据与技术支撑。

2 关节端面角位移测量原理

基于数字散斑干涉的单侧关节端面角位移测量光路原理如图1所示。激光器出射光束经过直角棱镜1分为两束光，其中光束1经过扩束照射在被测关节端面形成物光。另一束光继续通过直角棱镜2形成新的两束光，分别为光束2和光束3，其中光束3与光束1照射夹角相同，两束光通过快门1和2来切换。

当打开光束 3 时, 该光束与光束 1 发生干涉并由相机接收信号, 形成滚转角测量光路; 当打开光束 2 时, 该光束扩束后照射在毛玻璃上, 产生的漫反射光经直角棱镜后由相机接收, 与光束 1 在相机靶面上发生干涉, 形成俯仰角与偏摆角测量光路. 也可以通过波分复用和频分复用等技术来实现两束光的同时记录^[24,28], 此时无需光路切换, 两路干涉信号可同时记录.

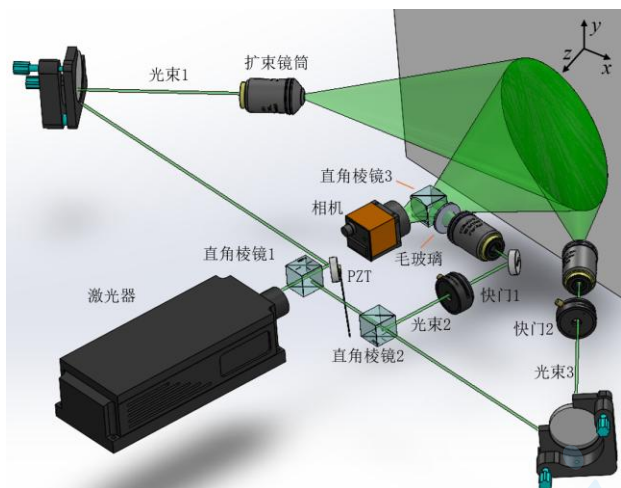


图 1 (网络版彩图) 用于关节端面角位移测量的 DSPI 光路

Figure 1 (Color online) DSPI Optical Setup for Joint End Face Angular Displacement Measurement

俯仰角和偏摆角分别对应于绕 x 轴和 y 轴的转动, 可视为物体端面的离面变形. 基于数字散斑干涉技术的基本原理^[17], 对物体在变形前后所对应的干涉相位图进行差分处理, 得到相位差分布 $\Delta\phi$, 单个点形变前后位移在离面方向的分量为 w , 二者之间的关系为:

$$w = \frac{\lambda \Delta\phi}{2\pi(1 + \cos\theta)}, \quad (1)$$

其中 λ 为激光波长, θ 为两侧扩束镜筒与激光器出射光线的夹角. 该关系源于双光束干涉的光程差模型, 反映了相位变化与法向位移之间的线性映射. 以俯仰角为例, 其引起的离面位移分布沿 y 方向呈现梯度特征. 如图 2(a)所示, 若被测表面两点间距在 y 方向投影为 Δy , 其相位差为 $\Delta\phi_1$, 则俯仰角 $\Delta\alpha$ 可表示为:

$$\Delta\alpha \approx \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\lambda \Delta\phi_1}{2\pi(1 + \cos\theta) \cdot \Delta y}, \quad (2)$$

该式本质上是离面位移梯度近似为局部转角, 适用于小角度变形假设.

同理, 根据测量构型的对称性, 偏摆角 $\Delta\beta$ 引起的离面位移沿 x 方向变化, 如图 2(b)所示, 其表达式为:

$$\Delta\beta \approx \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta\phi_2}{2\pi(1 + \cos\theta) \cdot \Delta x}, \quad (3)$$

其中 $\Delta\phi_2$ 为两点相位差, Δx 为两点间距在 x 方向的投影.

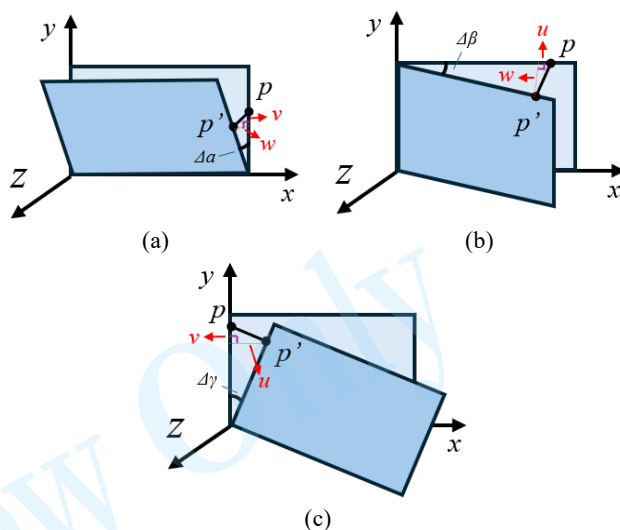


图 2 (网络版彩图) 角运动示意图: (a)俯仰; (b)偏摆; (c)滚转

Figure 2 (Color online) Schematic Diagram of Angular Motions: (a) Pitch; (b)Yaw; (c) Roll

当物体发生绕 z 轴的滚动运动时, 主要表现为图 2(c)所示的面内位移. 依据数字散斑干涉技术中的面内测量原理, 相位差分布 $\Delta\phi_3$ 与面内位移 u 之间的关系可表示为:

$$u = \frac{\lambda \Delta\phi_3}{4\pi \sin\theta}. \quad (4)$$

在此基础上, 滚动角 $\Delta\gamma$ 和所引起的变形可通过对位移场进行梯度运算得到:

$$\Delta\gamma \approx \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\lambda \Delta\phi_3}{4\pi \sin\theta \Delta y}, \quad (5)$$

其中 $\Delta\phi_3$ 为面内位移引起的相位差. 此处负号表示角度方向与坐标轴符合右手规则.

3 关节端面角位移数据处理方法

依据上一节所述的光路原理, 部署于关节端面两侧的测量系统连续采集相位图, 每组相位图中均包含离面相位图与面内相位图. 采集到的原始相位

图需要进行一系列图像预处理才能用于俯仰角、偏摆角和滚转角的计算, 包括计算相位差图、相位图滤波、感兴趣区域选取、相位解包裹几个流程, 然后进行参数分离和角度合成, 最终得到关节端面相对角位移. 图 3 展示了其中一个实例的相位图处理过程.

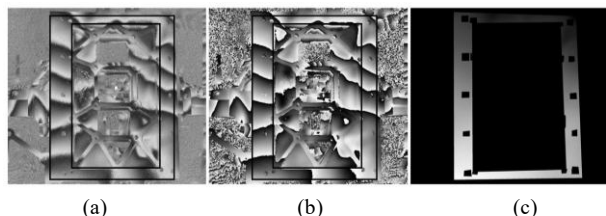


图 3 关节端面相位图预处理流程: (a)原始相位差图; (b)滤波后的相位差图; (c)感兴趣区域的解包裹相位差图

Figure 3 Preprocessing Flow of Joint End Surface Phase Map: (a) Raw Phase Difference Map; (b) Filtered Phase Difference Map; (c) Unwrapped Phase Difference Map of the Region of Interest

3.1 参数分离

经相位图预处理后, 得到两类核心相位差图: 离面原始相位差图 $\Delta\phi_{\text{raw_out}}$ 与面内原始相位差图 $\Delta\phi_{\text{raw_in}}$. 两类相位差图的三维立体分布形式一致, 图 4(a)展示了其中一幅相位差图的实例. $\Delta\phi_{\text{raw_out}}$ 为离面测量光路采集的原始干涉相位差图, 包含俯仰角、偏摆角对应的刚体角位移相关成分以及离面弹性变形带来的干扰成分; $\Delta\phi_{\text{raw_in}}$ 为面内测量光路采集的实测相位差图, 包含滚转角对应的刚体角位移相关成分与轴向热膨胀带来的干扰成分. 两类角位移相关成分均呈现空间线性分布特征, 离面弹性变形与轴向热膨胀则表现为局部非线性分布. 利用这一分布差异, 本文采用统一的最小二乘平面拟合方法, 从两类原始相位差图中分离线性角位移成分, 实现角位移与干扰成分的解耦.

具体拟合过程如下: 将角位移对应的线性相位分量等效为理想平面相位分布 $\Delta\phi_{\text{fit}}$, 离面场景下对应 $\Delta\phi_{\text{out}}$, 面内场景下对应 $\Delta\phi_{\text{in}}$, 其通用表达式:

$$\Delta\phi_{\text{fit}} = ax + by + c, \quad (6)$$

式中 (x, y) 为平面坐标. 对于离面原始相位图 $\Delta\phi_{\text{raw_out}}$, 通过最小二乘法拟合以最小化相位数据与拟合平面的误差平方和 $\sum_{i,j} (\Delta\phi_{\text{fit},i,j} - (ax_i + by_j + c))^2$ 为目标, 求

解得到平面参数 a, b, c , 拟合结果即为 $\Delta\phi_{\text{out}}$ 或 $\Delta\phi_{\text{in}}$. 将相位差图的感兴趣区域 (不包括中间镂空区域) 进行拟合, 得到如图 4(b) 所示的拟合平面, 其中 $\Delta\phi_{\text{out}}$

对应俯仰角/偏摆角合成线性相位分布, $\Delta\phi_{\text{in}}$ 对应滚转角线性相位分布.

从拟合后的两类相位图中分离三维角位移的具体方法如下: 针对离面拟合相位差图 $\Delta\phi_{\text{out}} = a_1x + b_1y + c_1$, 其中 a_1, b_1 分别对应公式(2)、(3)中的因子 $\Delta\phi/\Delta x, \Delta\phi/\Delta y$, 分别代入式(2)、(3)即可求解俯仰角 $\Delta\alpha$ 与偏摆角 $\Delta\beta$, 实现角位移与离面弹性变形的解耦; 针对面内拟合相位差图 $\Delta\phi_{\text{in}} = a_2x + b_2y + c_2$, 其中 b_2 对应公式(5)中的因子 $\Delta\phi/\Delta y$, 代入式(5)即可求解滚转角 $\Delta\gamma$, 实现角位移与轴向热膨胀的解耦.

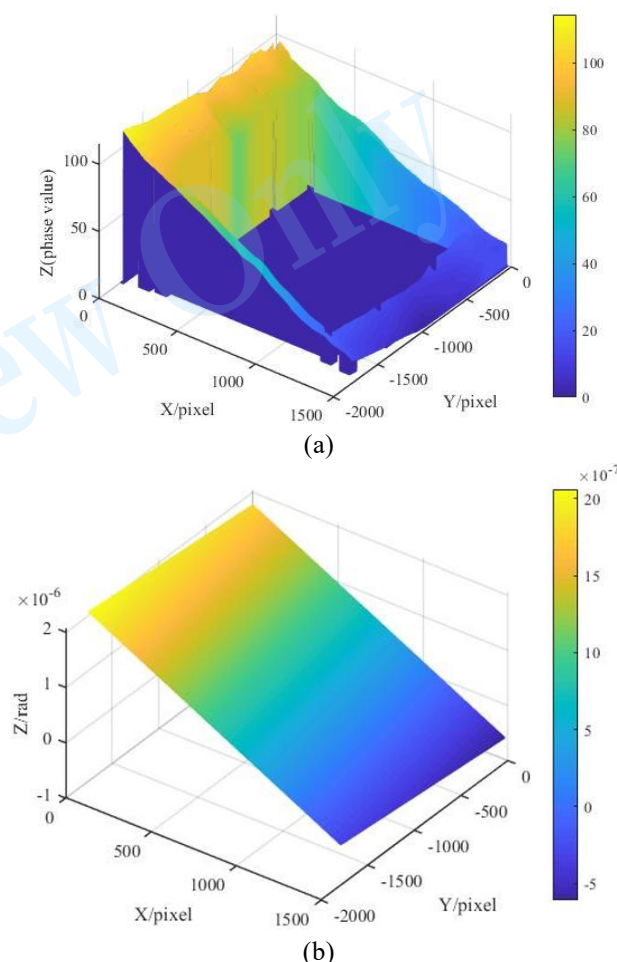


图 4 (网络版彩图) 离面相位差图的拟合过程: (a)原始相位差图三维展示; (b)最小二乘拟合结果

Figure 4 (Color online) Fitting Process of Out-of-Plane Phase Difference Map: (a) 3D Visualization of Raw Phase Difference Map; (b) Least Squares Fitting Results

3.2 测量布局及角度合成

为测量高低温环境下航天关节双端面角位移变化数据, 本文搭建了升降温角位移测量系统, 如图 5 所示. 该系统以气浮隔振平台为基础支撑, 有效抑制外界振动干扰, 保障测量的稳定性. 系统采用对称式光学布局, 左右两侧均配置 DSPI 测量系统, 搭配同步信号发生器形成双端面同步测量结构. 中间的高低温试验舱为被测产品提供可控温变环境, 舱体两端配备石英玻璃, 以满足光学通路的通透性要求. 被测产品置于试验舱内的支撑结构上, 左右两侧的 DSPI 系统可同时对其双端面的角位移信息进行光学

采集与运算分析, 实现高低温环境下关节双端面角位移的高精度测量.

在获得两侧端面的各自的三维角位移数据后, 对两侧的角位移进行合成, 可得到两侧端面三维相对角位移关系. 以四种典型的关节端面相对位姿为例, 分别为 180° 、 90° 、 202.62° 与 26.5° , 如图 6 所示, 其中带有圆形小孔的平面即为端面. 这些角度对应于不同的关节结构工况或装配关系, 为了计算得到两端面之间的相对角位移, 本文提出一种角度合成方法, 依据空间转动的坐标变换关系, 将双端面各自的俯仰、偏摆及滚转角映射至统一的关节坐标系下, 进而得到双端面之间的相对角位移.

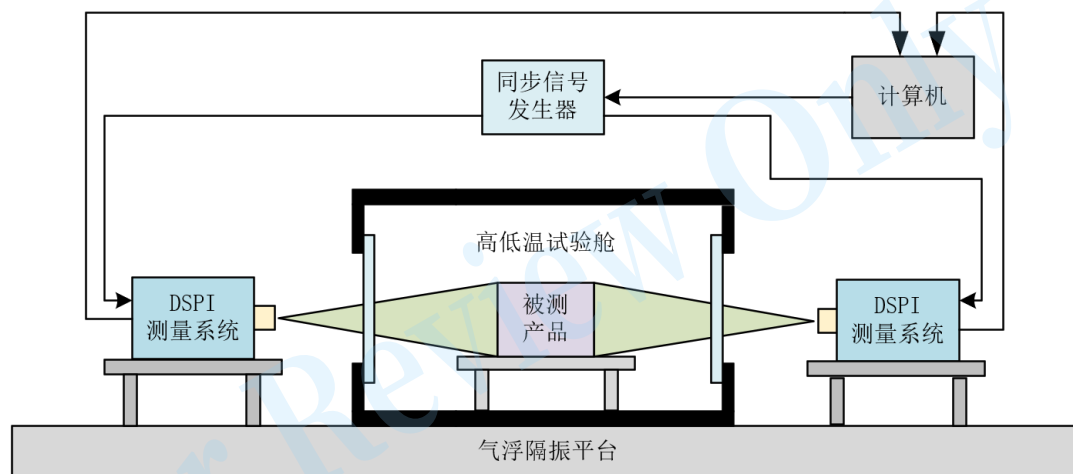


图 5 (网络版彩图) 关节端面角位移测量系统

Figure 5 (Color online) Angular Displacement Measurement System for Dual Joint End Faces

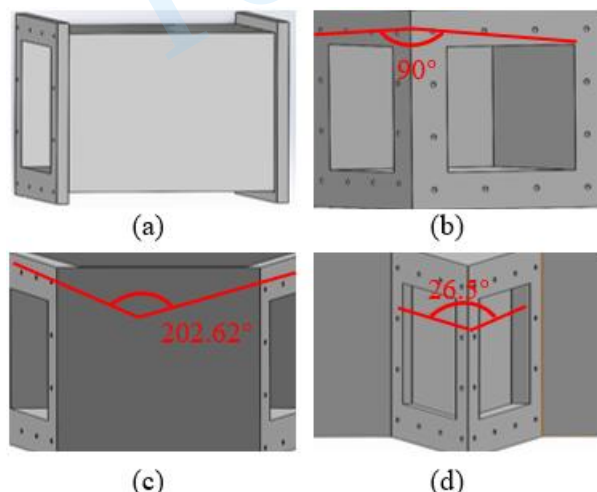


图 6 典型的关节端面位姿状态: (a)双端面位姿呈 180° ; (b)双端面位姿呈 90° ; (c)双端面位姿呈 202.62° ; (d)双端面

位姿呈 26.5°

Figure 6 Configurations of Dual Joint End Faces: (a) 180° orientation; (b) 90° orientation; (c) 202.62° orientation; (d) 26.5° orientation.

以常见的 180° 关节端面位姿状态为例, 根据 DSPI 的测量原理, 测量某一个关节端面的坐标系可按照如图 7 所示进行定义. 依据位姿转换原理, 进行两侧端面的角度合成. 关节端面发生位姿变化时, 主要产生六自由度运动, 即沿三个坐标轴方向的角度位移和线性位移, 因此可以通过旋转矩阵和平移向量来反映两侧端面位姿的变化. 假设两侧端面分别为 A 面和 B 面, 当关节端面产生角位移时, 端面位姿变化及坐标系定义如图 8 所示.

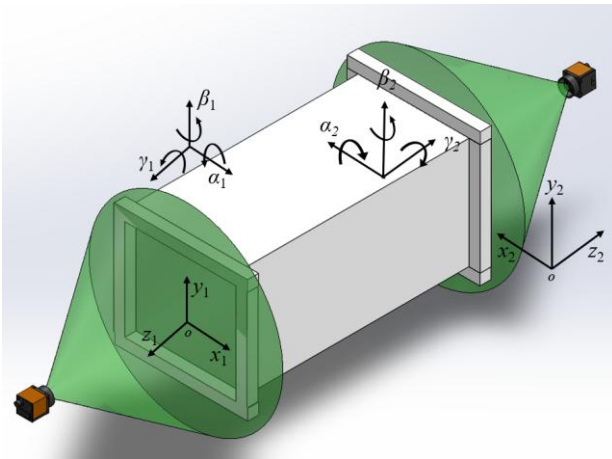


图7 (网络版彩图) 坐标轴定义

Figure 7 (Color online) Definition of Coordinate Axes

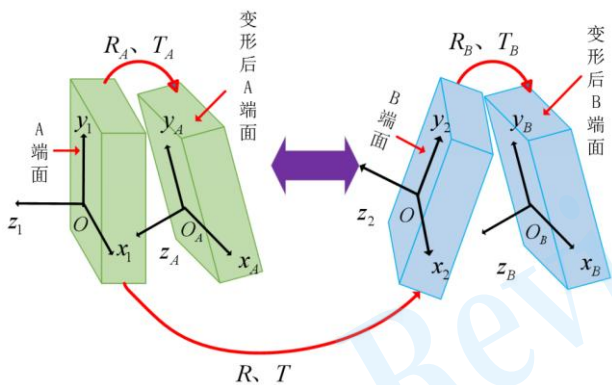


图8 (网络版彩图) 双端面位姿转换关系

Figure 8 (Color online) Transformation Relationship of the Dual End Faces Pose

初始状态下, 关节 B 端面相对 A 端面存在一定的位姿关系, 可以表示为:

$$\mathbf{P}_B = \mathbf{R}\mathbf{P}_A + \mathbf{T}, \quad (7)$$

其中 $\mathbf{P}_A$ 、 $\mathbf{P}_B$ 分别表示初始状态关节两侧端面的相对姿态, $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{T}$ 分别表示转换旋转矩阵和平移向量. 当 A、B 端面由于关节变形各自发生位姿变化时, 两侧端面相对坐标系同样改变, 分别用 $O_A\text{-}x_Ay_Az_A$ 和 $O_B\text{-}x_By_Bz_B$ 表示, 此时 A、B 端面相较于各自初始状态的位姿关系式可以表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}'_A &= \mathbf{R}_A\mathbf{P}_A + \mathbf{T}_A, \\ \mathbf{P}'_B &= \mathbf{R}_B\mathbf{P}_B + \mathbf{T}_B, \end{aligned} \quad (8)$$

此时 R_A 、 R_B 分别为实际测量所得 A、B 端面的俯仰角、偏摆角和滚转角变化值, 联立公式(7)、(8)计算可得:

$$\mathbf{P}'_B = \mathbf{R}_B\mathbf{R}_A^{-1}\mathbf{P}'_A + \mathbf{R}_B\mathbf{T} + \mathbf{T}_B - \mathbf{R}_B\mathbf{R}_A^{-1}\mathbf{T}_A, \quad (9)$$

上式中, $\mathbf{R}_B\mathbf{T} + \mathbf{T}_B - \mathbf{R}_B\mathbf{R}_A^{-1}\mathbf{T}_A$ 仅表示平移因子.

因此 B 端面相对于 A 端面的相对旋转矩阵为:

$$\mathbf{R}_{rel} = (\mathbf{R}_B\mathbf{R}_A^{-1})\mathbf{R}_A^T = \mathbf{R}_B\mathbf{R}_A^T. \quad (10)$$

A、B 端面的转换旋转矩阵 $\mathbf{R}_A$ 、 $\mathbf{R}_B$ 可以由两侧仪器测量所得的俯仰角、偏摆角和滚转角表示, 只需获取初始状态下 B 端面相对 A 端面的姿态旋转矩阵 $\mathbf{R}$, 对 $\mathbf{R}_{rel}$ 进行欧拉角分解即可求解异形关节变形后的相对角位移变化. 为此, 在关节端面角位移测量之前, 需获取两侧端面的相对位姿信息, 用于异形关节端面的角度转换合成.

4 实验与讨论

4.1 系统测量分辨力实验

基于式(2)、(3)和(5), 对俯仰角、偏摆角和滚转角的理论测量分辨力进行分析. 角位移测量分辨力的核心影响因素为相位测量分辨力, 数字散斑干涉系统的相位提取精度直接决定角位移测量的理论极限, 这一规律已在相关研究中得到验证^[23]. 因此, 理论分辨力的计算可通过将相位测量分辨力代入上述公式直接推导得出.

本系统的关键参数配置如下: 激光波长 λ 为 532 nm, 光路入射角 θ 为 30° , 测量点间距 Δx 与 Δy 均设为 50 mm, 与测量光路视场及像素分布相匹配. 通常情况下, 当采用普通的相位滤波和相位解包裹算法时, DSPI 系统的相位测量分辨力可以达到 0.1π . 将上述参数代入公式(2)、(3)计算可得, 俯仰角与偏摆角的理论测量分辨力均为 $0.285\ \mu\text{rad}$, 代入公式(5)计算可得, 滚转角的理论测量分辨力为 $0.53\ \mu\text{rad}$. 理论分析表明, 系统能够实现的角位移测量分辨力可达亚微弧级.

为评估测量系统对三自由度角位移的实际分辨力, 本文在温度 $20.0\ ^\circ\text{C}$ 、湿度 $55.0\%\ \text{RH}$ 的恒温恒湿实验环境下, 采用不确定度为 $1.5\ \mu\text{rad}$ 的六轴压电偏摆台作为标准角位移发生器, 开展测量分辨力验证实验. 针对俯仰角和偏摆角, 通过偏摆台施加 $1.5\ \mu\text{rad}$ 标准角位移; 针对滚转角, 施加 $4\ \mu\text{rad}$ 标准角位移, 每组参数测量均进行 20 次角位移加载并同时测量的重复实验. 实验核心目的为验证系统测量分辨力是否满足任务需求, 而非评估最高分辨力极限.

实验结果如图 9 所示. 其中图 9(a)显示, 俯仰角单次测量值分布于 1.3-1.5 μrad 区间, 偏摆角单次测量值分布于 1.4-1.6 μrad 区间, 二者与 1.5 μrad 加载值整体吻合; 图 9(b)中, 滚转角单次测量值稳定在 3.7-4.0 μrad 范围, 与 4 μrad 的加载值高度一致. 计算各自由度测量数据的标准差可得: 俯仰角约 0.0557 μrad 、偏摆角约 0.0622 μrad 、滚转角约 0.0766 μrad . 结合数据分布特征与标准差分析, 可得出结论: 系统俯仰角、偏摆角的测量分辨力优于 1.5 μrad , 滚转角的测量分辨力优于 4 μrad , 满足航天关节端面角位移测量的需求. 实际测量分辨力更高, 需采用更高精度的角位移发生器进行进一步评估.

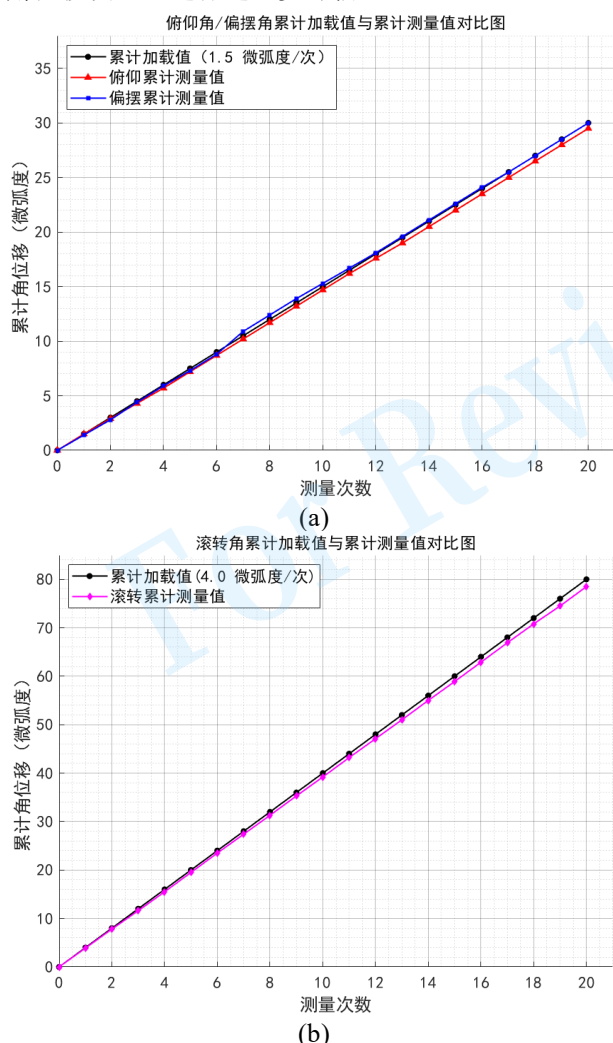


图 9 (网络版彩图) 测量分辨力评估: (a)俯仰角/偏摆角测量结果与加载值对比; (b)滚转角测量结果与加载值对比

Figure 9 (Color online) Measurement Resolution Testing: (a) Pitch/Yaw Angles, and (b) Roll Angle, Compared With the Reference Values.

4.2 升降温实验设计

本文选择两侧端面呈 180° 位姿的航天关节作为被测物, 两侧关节端面长宽分别是 205 mm × 205 mm 和 210 mm × 210 mm. 两侧干涉测量光路选用长春新产业公司的 MLL-U-532-400mW 激光器作为照明光源, 其中心波长为 532 nm, 输出功率为 400 mw; 相机采用凯视佳科技有限公司生产的型号为 MU3HS500M 的黑白工业相机, 传感器像素尺寸为 1.26 μm × 1.26 μm , 像素数量为 500 万. 航天关节两侧光路照明角度分别为 20° 和 17.5°, 实验系统如图 10 所示.

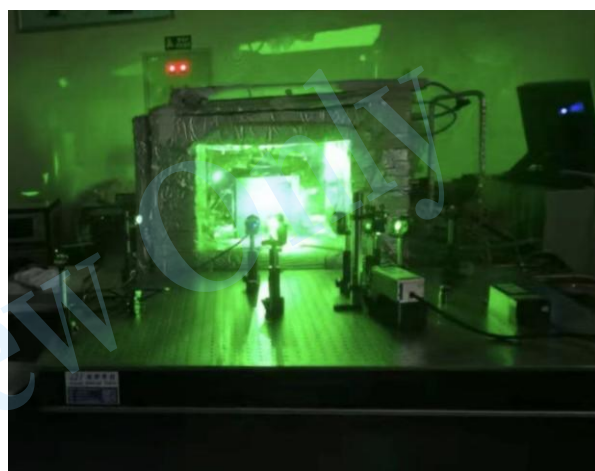


图 10 (网络版彩图) 实验系统

Figure 10 (Color online) Experimental System

本文设计了温度控制系统来对关节端面进行温度加载. 在升温过程中使用 PID(proportion integration differentiation)算法实时调控内部温度, 在每个采样温度点进行保温并进行采图操作, 具体的测量采集步骤如下所示.

(1)在室温环境下开启缓慢加热, 对于关节端面俯仰角/偏摆角测量而言, 升温过程中温度每上升 0.5 °C 进行保温并使两侧光路同步测量采集, 而对于关节端面滚转角测量而言, 由于滚转角相位条纹受温度影响较小, 设置温度每上升 2 °C 进行保温并使两侧光路同步采集.

(2) 当温度达到最高温采样点时, 保温半小时以消除热惯性的影响: 一方面确保关节内部温度与设定温度完全一致, 避免出现环境温度达标但关节内部温度未达预期的情况; 另一方面, 由于结构变形与温度变化存在滞后性, 保温可预留充足时间让关节完成稳定变形, 保证测量时结构处于该温度下的稳

态状态. 完成保温后转为缓慢降温操作, 降温过程中每下降 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 测量关节两侧端面的俯仰 / 偏摆角变化, 每下降 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 测量滚转角变化.

(3)按照角度参数分离和转换合成的方法对采集数据进行计算, 得到最终的数据处理结果.

4.3 实验数据与结果分析

在升降温实验中, 尽量保持温度匀速变化, 在共计 $25\text{--}55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的升降温范围内, 设置温度间隔 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 采集一张俯仰/偏摆角相位图, 温度间隔 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 采集一张滚转角相位图. 关节受温度影响导致的相位条纹变化较为显著, 以右侧端面为例, 不同温度点下的俯仰/偏摆角, 滚转角相位图如图 11 和 12 所示.

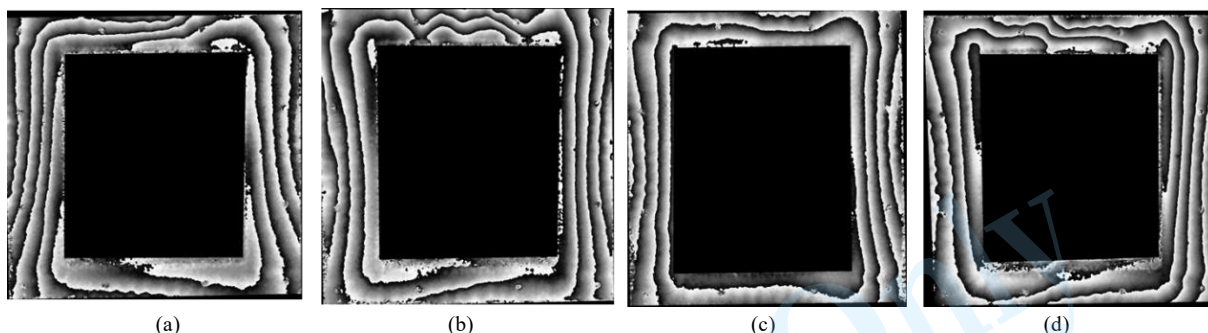


图 11 关节端面在 4 个温度点下的俯仰/偏摆角相位差图: (a) $27.5\text{--}28\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $41.5\text{--}42\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $42.5\text{--}42\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $28.5\text{--}28\text{ }^{\circ}\text{C}$

Figure 12 Phase Difference Maps of Joint End Faces for Pitch/Yaw Angles at Four Temperature Points: (a) $27.5\text{--}28\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $41.5\text{--}42\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $42.5\text{--}42\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $28.5\text{--}28\text{ }^{\circ}\text{C}$

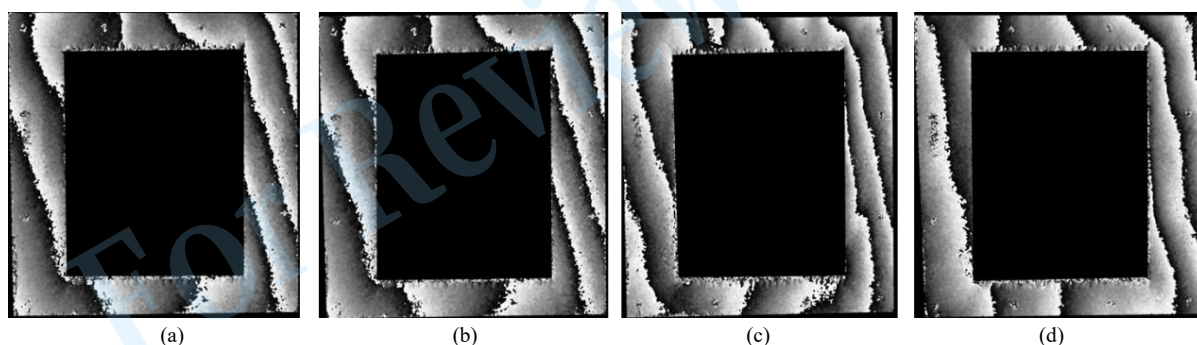


图 12 关节端面在 4 个温度点下的滚转角相位差图: (a) $25\text{--}27\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $41\text{--}43\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $45\text{--}43\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $29\text{--}27\text{ }^{\circ}\text{C}$

Figure 13 Phase Difference Maps of Joint End Faces for Roll Angles at Four Temperature Point: (a) $25\text{--}27\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $41\text{--}43\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $45\text{--}43\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $29\text{--}27\text{ }^{\circ}\text{C}$

从图中可直观看出, 不同温度点下的相位图整体清晰度高、条纹对比度良好, 且同一温度点下, 升温与降温过程的条纹形态一致性优异. 由此可见, 本测量系统能够获取高质量的相位图像, 且系统稳定性强, 可适用于复杂现场的关节端面角位移测量实验.

对相位图进行处理时, 手动选取关节端面的感兴趣区域, 选用枝切法^[29]进行解包裹操作. 对全部温度点的图像数据进行计算分析后, 单一轮次升降温的关节双端面合成角位移测量结果如图 13 所示. 整

体变化曲线表明, 关节两侧端面的合成角位移(包括俯仰角、偏摆角与滚转角)与温度变化呈现出明显的正相关趋势. 具体表现为: 随着温度升高, 累计角位移逐步增大, 在达到最高温度时角位移达到峰值; 而在降温阶段, 角位移随之逐渐回落.

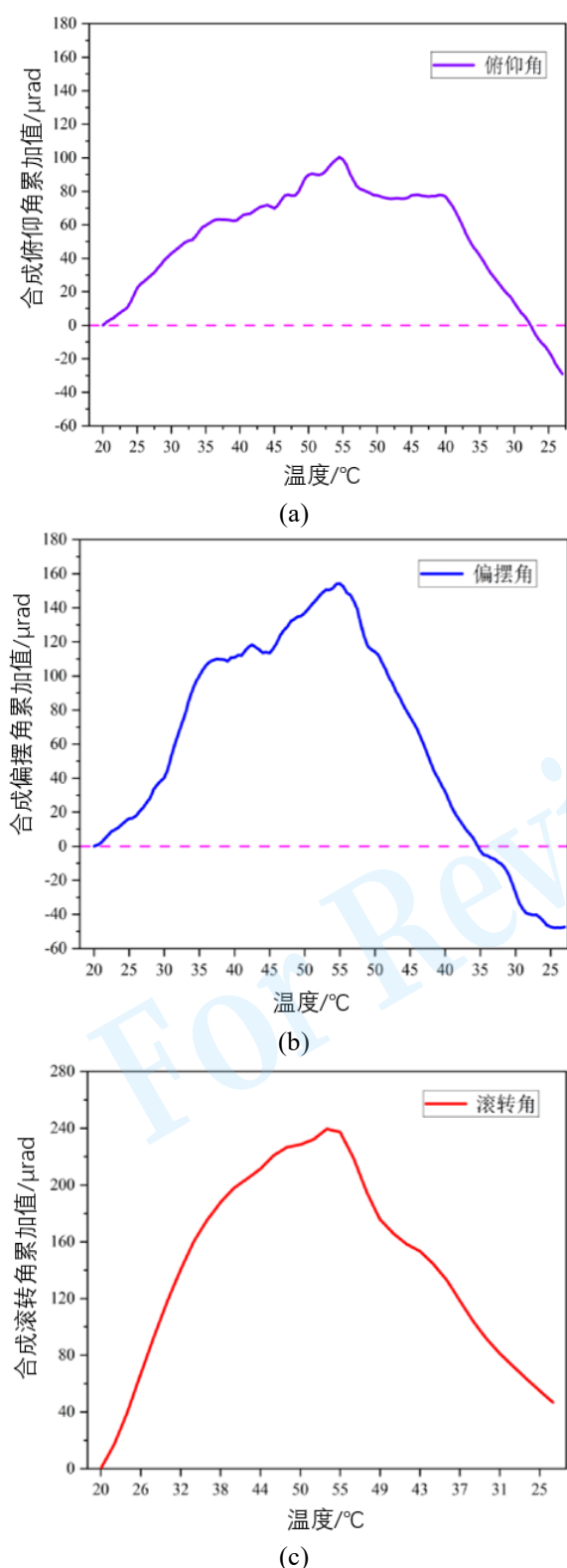
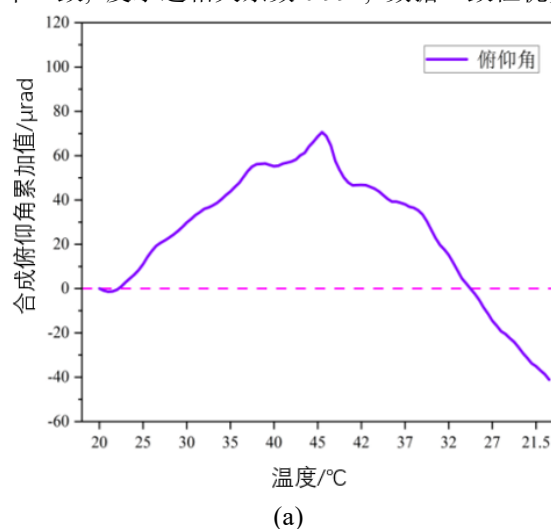


图 13 (网络版彩图) 20-55 °C 升降温关节双端面合成角位移测量结果: (a)俯仰角; (b)偏摆角; (c)滚转角

Figure 13 (Color online) Measurement Results of Relative Angular Displacement of Joint Dual End Faces During 20 - 55 °C: (a) Pitch Angle; (b) Yaw Angle; (c) Roll Angle

从数据规律来看, 角位移随温度的变化具有较强的稳定性. 以升温过程为例, 每升温 1°C 对应的合成俯仰角平均值为 2.85 μrad , 最终合成俯仰角最大值达到约 100 μrad . 合成偏摆角方面, 每升温 1°C 对应的合成偏摆角为 4.40 μrad , 最终峰值约为 154 μrad . 滚转角通过两端面相位差图中约 3 级条纹数计算得出, 每升温 1°C 对应的合成俯仰角平均值约为 6.80 μrad , 最终滚转角峰值达到 240 μrad . 降温过程中, 三类角位移均呈现下降趋势, 进一步印证了角位移与温度变化之间的耦合关系.

为验证测量系统的可靠性与重复性, 开展了另一轮次的关节双端面 20-45°C 升降温对比实验, 实验流程、测量参数与第一组实验保持完全一致, 确保实验条件的统一性与数据的可比性, 实验结果如图 14 所示. 该轮次实验中角位移随温度变化的整体趋势与图 13 完全一致, 均呈现出与温度变化正相关的规律. 具体数据来看, 升温过程中, 每升温 1°C 对应的合成俯仰角平均值约为 2.88 μrad , 最终合成俯仰角最大值达到约 72 μrad . 合成偏摆角方面, 每升温 1°C 对应的合成偏摆角为 4.00 μrad , 最终峰值约为 100 μrad . 滚转角通过两端面相位差图中约 3 级条纹数计算得出, 每升温 1°C 对应的合成俯仰角平均值约为 6.88 μrad , 最终滚转角峰值达到 172 μrad . 在这两组升降温实验中, 每升高 1°C, 三类合成角位移变化基本一致, 皮尔逊相关系数 0.992, 数据一致性优异.



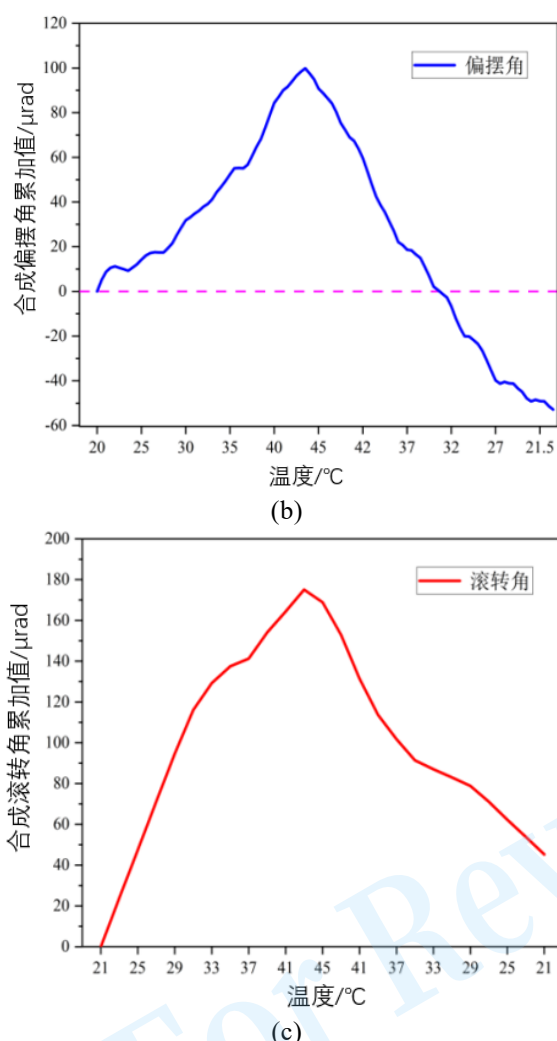


图 14 (网络版彩图) 20-45 $^{\circ}\text{C}$ 升降温关节双端面相对角位移测量结果: (a) 俯仰角; (b) 偏摆角; (c) 滚转角

Figure 13 (Color online) Measurement Results of Relative Angular Displacement of Joint Dual End Faces During 20 - 45 $^{\circ}\text{C}$ Thermal Cycling: (a) Pitch Angle; (b) Yaw Angle; (c) Roll Angle

然而, 当温度回归初始值时, 角位移并未完全恢复至零位, 存在一定残余位移。该现象可能源于两方面因素: 一是降温过程中保温时间不足, 热传导存在延迟效应, 导致温度与变形响应不同步; 二是实验系统中存在的系统误差影响, 对测量系统进行精密标

定可以降低该影响。

5 结论

为精准测量航天关节双端面在温度变化时产生的角位移, 本文提出了基于数字散斑干涉技术的关节端面角位移测量方法。该方法具有显著技术优势: 采用双光束 DSPI 技术实现三维角位移的无靶镜测量, 避免了传统方法由于靶镜安装所带来额外误差; 通过全场测量和最小二乘平面拟合方法有效分离出耦合变形中的刚体角位移, 解决了温度场下变形与角位移耦合的测量难题; 使用关节双侧端面角位移合成方法, 进一步提升了三自由度角位移的测量准确性。

系统测量分辨力实验、温度升降实验结果表明, 本文方法有效可行, 能够精确测量航天关节两侧端面的相对角位移变化, 测量功能与精度均满足航天机械臂关节双端面角位移的测量要求。需要说明的是, 为进一步提升测量精度, 未来可引入我们最近提出的标定方法^[27]对系统进行精准标定, 减小测量误差; 此外, 针对实验中出现的残余位移问题, 后续可通过优化保温时间参数、建立观察窗温度变形补偿模型、规范数据采集流程等措施持续改进; 后续将通过仪器化, 集成自动化控制与实时数据处理功能, 提升工程实用性, 以提高环境适应能力; 本文实验温度范围较窄, 未来可拓展至 -80 $^{\circ}\text{C}$ ~ +100 $^{\circ}\text{C}$ 的太空级宽温域, 甚至更宽的范围, 验证方法在大温变下的稳定性与可靠性。

综上, 本文提出的测量方法兼具无需靶镜、非接触和高精度特点, 适用于温度变化环境下的航天关节角位移测量场景, 为航天机械臂关节的热变形特性研究与可靠性评估提供了有效的技术支撑。同时也为其他类似应用提供了参考方法。

致谢 实验在孙子杰、辛亮、方俊文等人的通力协助下得以顺利实施, 在此深表谢忱。

参考文献

- 1 Flores-Abad A, Ma O, Pham K, et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing. *Prog Aerosp Sci*, 2014, 68: 1–26
- 2 Branz F, Francesconi A. Experimental evaluation of a Dielectric Elastomer robotic arm for space applications. *Acta Astronaut*, 2017, 133: 324–333
- 3 Wu Y H, Yu Z C, Li C Y, et al. Reinforcement learning in dual-arm trajectory planning for a free-floating space robot. *Aerosp Sci Technol*, 2020, 98: 105657
- 4 Mayorova V I, Shcheglov G A, Stognii M V, et al. Analysis of the space debris objects nozzle capture dynamic processed by a telescopic robotic arm. *Acta Astronaut*, 2021, 187: 259–270
- 5 Shao Y, Li L, Li J, et al. Monocular vision based 3D vibration displacement measurement for civil engineering structures. *Eng Struct*, 2023, 293: 116661
- 6 Li Z, Wang S, Liu C, et al. Visual vibration displacement measurement of rotating body based on angle-category mapping. *Mech. Syst. Signal Process*, 2025, 236: 113017
- 7 Kadhim A H, Babu T K M, O'Kelly D, et al. Measurement of steady-state and transient load-angle, angular velocity, and acceleration using an optical encode. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2002, 41: 486–489
- 8 Thielemans Y, Kayedpour N, Coene A, et al. Speed and position measurement of rotating machinery with a triangular pattern vision encode. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2025, 74: 1–13
- 9 Chen H, Schall Jr M C, Fethke N, et al. Accuracy of angular displacements and velocities from inertial-based inclinometers. *Appl Ergon*, 2018, 67: 151–161
- 10 Vatanparvar D, Wang D, Shkel A M, et al. Direct angle measurement using dynamically-amplified gyroscopes. *IEEE Sens J*, 2021, 22: 6336–6344
- 11 Le N T, Truong C T, Nguyen H H, et al. Yaw angle determination of a mobile robot operating on an inclined plane using accelerometer and gyroscope. *Measurement*, 2025, 247: 116806
- 12 Chen Y L, Shimizu Y, Tamada J, et al. Laser autocollimation based on an optical frequency comb for absolute angular position measurement. *Precis Eng*, 2018, 54: 284–293
- 13 Matsukuma H, Asumi Y, Nagaoka M, et al. An autocollimator with a mid-infrared laser for angular measurement of rough surfaces. *Precis Eng*, 2021, 67: 89–99
- 14 Shimizu Y, Tan S L, Murata D, et al. Ultra-sensitive angle sensor based on laser autocollimation for measurement of stage tilt motions. *Opt Express*, 2016, 24: 2788–2805
- 15 Lee J Y, Jiang G A. Displacement measurement using a wavelength-phase-shifting grating interferometer. *Opt Express*, 2013, 21: 25553–25564
- 16 Liu Q, Wang M, Tao Y, et al. Implementation of real-time displacement precision measurement technology for the sinusoidal phase-shifting laser self-mixing interferometer. In: *Ninth International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation, Zhangjiajie*, 2015. 33–40
- 17 Yang L X, Steinchen W, Schuth M, et al. Precision measurement and nondestructive testing by means of digital phase shifting speckle pattern and speckle pattern shearing interferometry. *Measurement*, 1995, 16: 149–160
- 18 Yang L, Xie X, Zhu L, et al. Review of electronic speckle pattern interferometry for three dimensional displacement measurement. *CJME*, 2014, 27: 1–13
- 19 Abedin K M, Wahadoszamen M, Haider A, et al. Measurement of in-plane motions and rotations using a simple electronic speckle pattern interferometer. *Opt Laser Technol*, 2002, 34: 293–298
- 20 Arikawa S, Yoneyama S. Bi-directional displacement measurement by speckle interferometry immune to random vibratio. In: *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*, 2014: 89–95
- 21 Lu M, Wang S, Aulbach L, et al. Non-phase unwrapping interferometric approach for a real-time in-plane rotation measurement. *Opt Lett*, 2017, 42: 1986–1989
- 22 Wang S, Lu M, Bilgeri L M, et al. Temporal electronic speckle pattern interferometry for real-time in-plane rotation analysis. *Opt Express*, 2018, 26: 8744–8755
- 23 Wu S, Yang J, Li W, et al. Precision roll angle measurement based on digital speckle pattern interferometry. *Meas Sci Technol*, 2019, 30: 045005
- 24 Wu S, Li X, Li W, et al. Non-contact and fast measurement of small roll angle using digital shearography. *Opt Lasers Eng*, 2022, 150: 106846
- 25 Wu F, Wu S, Li W, et al. Simultaneous and precision measurement of yaw and pitch using digital speckle pattern interferometry. *Opt Eng*, 2021, 60: 034103–034103
- 26 Shi L, Wu S, Yan M, et al. A targetless method for simultaneously measuring three-degree-of freedom angular motion errors with digital speckle pattern interferometry. *Sensors–Basel*, 2023, 23: 3393
- 27 Li R, Yan Y, Wu S, et al. Comprehensive calibration and accuracy evaluation method for digital speckle pattern interferometry based on three-axis angular motion measurement theory. *Opt Eng*, 2025, 64: 074105–074105

- 28 Wu M Y, Ma Y H, Cheng H, et al. Color-Camera-Based Dual-Wavelength Shearography for Simultaneously Measuring in-Plane and out-of-Plane Displacement Derivatives(in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2020, 40: 134–139 [吴敏杨,马银行,程昊,等.基于彩色相机的双波长剪切散斑干涉法同步测量面内外位移导数. *光学学报*, 2020, 40:134–139]
- 29 De Souza J C, Oliveira M E, Dos Santos P A M. Branch-cut algorithm for optical phase unwrapping. *Opt Lett*, 2015, 40: 3456–3459

Measurement of Angular Displacements of Aerospace Joint End Faces Using Dual-Beam Digital Speckle Pattern Interferometry

WANG YaKe¹, WU SiJin¹, WANG HaoWei², YANG FengLong³, TANG XiaoJun³, LI Hao¹, YAN Yang¹, LI WeiXian¹, ZHOU Yong³, LIU Dong², NIU HaiSha¹, LI RenHao¹, SI JuanNing¹, SU XinChen¹, Zhang PengSong⁴, Ren HaiLong³

¹ College of Instrumentation & Optoelectronic Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China

² Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

³ Beijing Spacecrafts, China Academy of Space Technology, Beijing, 100094, China

⁴ Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

The precise measurement of relative angular displacements of aerospace joint end-faces under ground-based high-low temperature simulation environments has long lacked effective solutions, adversely impacting the success of aerospace missions. In this article, a three-dimensional relative angular displacement measurement method for aerospace joint end-faces based on digital speckle pattern interferometry is proposed. By establishing measurement models for pitch, yaw, and roll angular displacements, and incorporating parameter decoupling and angle synthesis algorithms, experiments were conducted on joint end-faces under varying temperature conditions. The method accurately measured the relative variations of pitch, yaw, and roll angles between the two end-faces of the joint. Experimental results indicate a positive correlation between the synthesized tri-angular displacements of the joint end-faces and temperature changes. Precision evaluation demonstrated that the proposed method achieves resolutions of 1.5 μrad for pitch and yaw angular displacements and 4.0 μrad for roll angular displacement, validating the effectiveness and reliability of the measurement system. This study provides an effective approach for evaluating the motion characteristics of aerospace joints under thermal loads, offering valuable insights for joint performance verification and structural optimization.

digital speckle pattern interferometry, space robotic arm, aerospace joint, pose detection, augular displacement, high-low temperature testing