光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250628001

双光路结构面三维姿态角测量方法研究

崔曦文[1]，李　红[1,2]，邢宇航[2]，任　琪[1]，祝连庆[1,2]*

（北京信息科技大学 1. 光电测试技术及仪器教育部重点实验室，北京 100192；
2. 光纤传感与系统北京实验室，北京 100016）

摘　要： 文章基于双自准直光路建立了一种结构面三维倾角测量模型，通过分析反射镜空间角度分量变换，推导滚转角的测量理论模型，并结合旋转矩阵构建了自准直仪读数与结构面三维倾角的解算模型，分析了测量系统中元件装调引入的误差。搭建了基于双自准直光路的实验系统，针对反射镜安装角度θ对测量精度的影响，设计不同θ值（6°～15°）的性能验证实验，分析了测量系统在不同夹角下的误差分布特性，获得最优θ区间。实验结果表明，当θ=10°时，系统表现出最优的综合性能：α，β和γ角的最大误差分别为0.31″、0.18″和0.23″。该测量系统在重复性试验中可实现优于0.24″的均方根误差，表现出较好的重复性和可行性，为结构面的姿态监测提供了一种可供参考的测量方法。

关键词： 自准直仪；三维姿态角；误差分析；角度测量

中图分类号： TH741；TN249　**文章编号：** 1001－5868(2025)05－0928－08

Three-Dimensional Angle Measurement Method for Structural Planes Based on Dual Optical Paths

CUI Xiwen[1], LI Hong[1,2], XING Yuhang[2], REN Qi[1], ZHU Lianqing[1,2]

（1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing 100192, CHN;
2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, CHN）

Abstract: In this study, a three-dimensional inclination measurement model was established for a structural surface based on dual-autocollimation optical paths. A theoretical roll-angle-measurement model was constructed based on the analysis of the spatial angular component transformation of the reflector. The autocollimator reading solution model and the three-dimensional inclination model of the structural surface were constructed by combining a rotational matrix. The error due to component mounting in the measurement system was also evaluated. An experimental system based on dual-autocollimation optical path was constructed, and performance verification experiments were performed with different θ values (6° to 15°) to analyze the effect of the mirror mounting angle on the measurement accuracy and to determine the optimal θ interval. Evidently, the system exhibits optimal performance at θ = 10°, and the maximum errors in the α, β, and γ angles are 0.31″, 0.18″, and 0.23″, respectively. Repeatability tests reveal that the measurement system achieves a root-mean-square error accuracy better than 0.24″, which confirms its good repeatability and feasibility. Therefore, the proposed system provides a reference measurement method for attitude monitoring of structural surfaces.

Key words: autocollimator; three-dimensional attitude angle; error analysis; angle measurement

收稿日期：2025－06－28.

* **通信作者：**祝连庆

0　引言

近年来，空间光学系统对观测能力的需求日益提升，推动着系统分辨率不断提高，有效口径也相应增大[1-3]。尽管通过优化设计显著增强了光学系统中结构面的稳定性，但在实际装调与在轨运行过程中，其姿态仍易受外界环境因素扰动[4]。例如，在轨运行期间系统经历周期性高低温交替，结构面下方的支撑杆系在温变载荷作用下产生变形，导致结构面发生姿态变化，进而影响光学系统成像质量[5-6]。为有效抑制此类环境扰动对成像质量的影响，需对结构面角度变化实施监测，为后续姿态变化的反馈补偿提供依据[7]。

当前结构面角度测量方法主要分为接触式与非接触式两大类。其中，接触式测量（如应力传感器法[8]、光纤光栅传感阵列法[9-10]等）虽技术成熟且精度较高，但存在自动化程度低、维护成本高及测量效率受限的缺点。非接触式测量方法则包括摄影测量法[11]、干涉法[12]、自准直法[13-14]等。摄影测量法基于多相机协同定位，实时性强但易受环境光照制约，例如，2023年长春理工大学研究团队提出的一种针对定日镜的子镜倾斜角度误差的摄影测量方法[15]，利用子镜4个角点的空间位置坐标进行检测，测量误差为±6′；干涉测量法精度优势显著，但系统结构复杂且对环境振动敏感，2022年天津科技大学研究团队报道的基于光纤激光器自混干涉的旋转角度测量方法在10°测量范围内的角位移误差小于1%[16]；自准直法则因其原理与结构简单、测量稳定性优异而被广泛应用于在轨测量领域，尤其适用于高稳定性支撑结构面的微小角度测量，例如，2019年哈尔滨理工大学研究团队基于嵌入式系统实现了对星敏感器延长杆三维弯曲小角度的高精度测量，完成了复杂的数据采集与处理工作，工作精度达0.23″[17]。

鉴于结构面的姿态变化表现为三维空间运动，而单台自准直仪仅能测量二维角度信息，难以满足实际三维姿态监测需求[18]。因此，实现结构面三维旋转角度的同步高精度测量仍是一项亟待解决的关键技术问题。同时，在现有的自准直仪三维角度测量方法中，通常针对单点局部坐标系的姿态角度变化进行测量；而在基于双光路的测量方法体系中，众多研究围绕着设置固定的θ角来开展三维角度测量工作。然而，目前该领域鲜有研究对θ角的取值进行深入探索，以确定能实现更高精度测量的最优值。针对此问题，本文提出一种基于双自准直光路的结构面三维角度同步测量系统，并依据空间角度分量投影关系建立了三维旋转角度的解算模型。通过欧拉角旋转矩阵拟合求解结构面姿态变化的最优值，搭建了相应的实验系统进行性能验证。实验结果表明该系统方案可行，并进一步分析了测量系统中关键参数θ角的最优取值范围。

1　角度测量原理与模型

在基于双自准直光路的结构面三维旋转角度测量系统中，共面安装的两面反射镜同时发生三维姿态变化。通过分析角度分量及其投影关系，构建结构面三维旋转角度的解算模型。选取三个测量点对结构面三维姿态变化量进行拟合，以提高测量数据解算精度。

1.1　角度测量模型

当待测结构面发生三维角度旋转时，共面安装的两反射镜呈现不同的旋转姿态。利用两台自准直仪分别获取两反射镜的俯仰角与偏航角信息，基于空间角度分量计算出滚转角，进而拟合得到待测结构面的三维倾角。

图1展示了测量系统的主要组成部分示意图，包含自准直仪1和2，以及固定于同一平面上的反射镜1和2。其中，自准直仪1和2的主光轴分别与中心参考轴（X轴）成θ夹角；反射镜1和2分别与对应自准直仪的光轴垂直安装，且反射镜法线方向与Z轴夹角均为θ。以自准直仪1的光学中心为坐标原点O，建立一个新的三维直角坐标系O-$X_1Y_1Z_1$。其中，X_1轴沿反射镜1的法线方向竖直向上，Y_1轴垂直于仪器安装平面（即图示纸面）向外延伸，Z_1轴与X_1轴正交并水平向右。类似地，可建立以自准直仪2光学中心为原点的坐标系O-$X_2Y_2Z_2$。

测量系统中的核心设备——自准直仪，其基本原理[19]是利用准直光束入射至平面反射镜，经反射后成像于面阵探测器。通过探测反射光斑中心在探测器上的位移量Δs，即可计算反射光束与入射光束之间的夹角，进而获得待测反射部件的偏转角ω。当偏转角ω为小角度时，将满足公式（1）所示的近似关系。

$$\omega=\frac{1}{2}\arctan\left(\frac{\Delta s}{f}\right)\approx\frac{\Delta s}{2f} \tag{1}$$

式中，f为准直物镜焦距，ω为被测反射镜的偏转角度，Δs为像点位移。

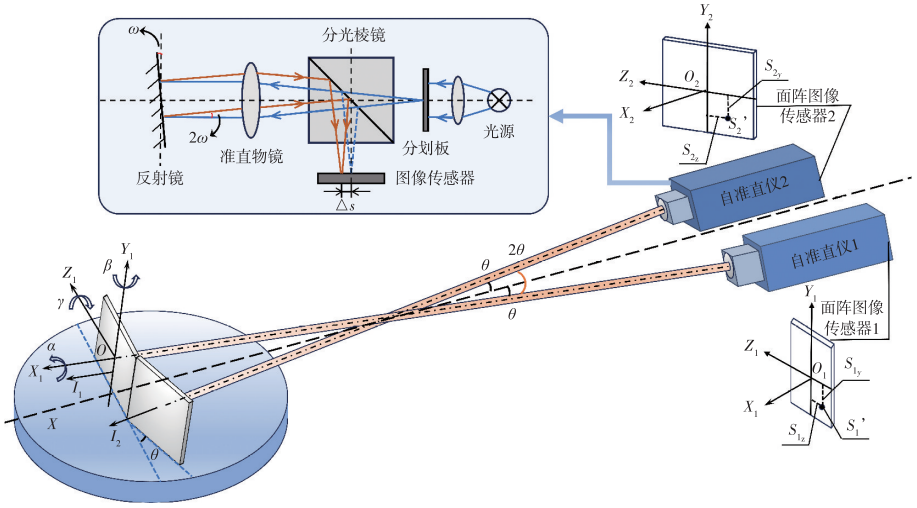
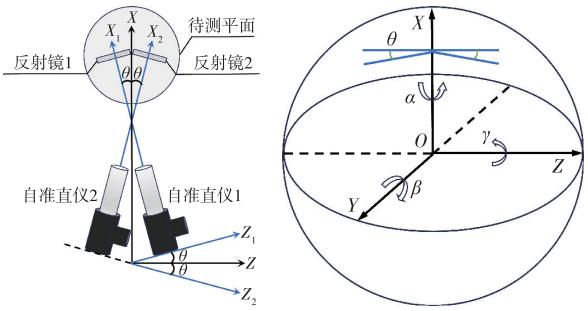


图1 双自准直光路角度测量系统组成示意图

图2(a)展示了测量系统的俯视示意图。图中定义了空间直角坐标系的各轴方向:竖直向上为X轴正方向,垂直图平面向外为Y轴正方向,水平向右为Z轴正方向。自准直仪1和2的角度测量值分别记为A_x,A_y和B_x,B_y。图2(b)展示了结构面三维姿态变化的示意图。图中定义了绕空间直角坐标系各轴的旋转角:绕X轴旋转的角度为α,绕Y轴旋转的角度为β,绕Z轴旋转的角度为γ。



(a)角度测量系统俯视图 (b)空间三维角度旋转示意图

图2 三维角度测量示意图

1.2 角度测量原理

图3展示了反射镜绕坐标系X轴旋转一定角度时的法线投影示意图。A表示向量$\boldsymbol{h}$到平面XOZ的距离。根据三角函数定理,可推导出公式(2)。其中,C为向量$\boldsymbol{h}$在平面XOZ上的投影。

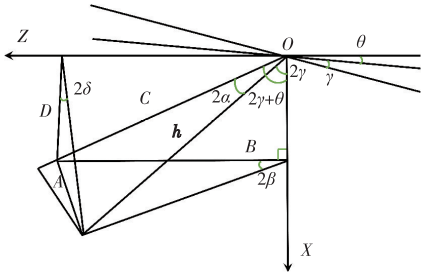


图3 三维角度分解示意图

$$B=C\cdot\sin(2\gamma+\theta)=\boldsymbol{h}\cdot\cos(2\alpha)\cdot\sin(2\gamma+\theta) \quad (2)$$

在X_1轴方向,自准直仪1的测量结果A_x可表示为角度参数α与β的组合关系。而Y轴、Y_1轴与Y_2轴的方向在空间中均垂直于纸面并指向外侧。同时,在Z_2轴方向,自准直仪2的读数B_x是由围绕X轴产生的角度分量α与围绕Z轴产生的角度分量γ综合作用的结果。

因此,可以推导出待测平面中反射镜所在点的局部坐标系在三个轴向上的微小旋转角度,具体如下:

$$\begin{cases}\alpha=\dfrac{B_x-A_x}{2\sin\theta}\\ \beta=\dfrac{A_y+B_y}{2}\\ \gamma=\dfrac{A_x+B_x}{2\cos\theta}\end{cases} \quad (3)$$

基于前述角度计算模型,利用由两台自准直仪构成的测量系统能够实现对反射镜在三维空间中旋转角度的测量,但单点位的测量结果仍易受局部误差影响,难以保证其测量精度。为获得更高精度的结构面姿态角参数,需综合多个点位的测量结果,通过最小二乘拟合等方法构建反映整体旋转特征的最优平面姿态角变换,从而显著提升测量系统的精度与稳定性。

1.3 欧拉角旋转矩阵转换

当使用欧拉角转换矩阵进行姿态角拟合时,在被测平面上设定三个测量点$P_i(i=1,2,3)$,并分别

获取其局部坐标系的姿态角信息$(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i)$。每组姿态角反映了该点在局部坐标系中相对于参考坐标系的旋转状态。通过建立对应的欧拉旋转矩阵，并结合各点的姿态信息，可实现对整个结构面的三维空间姿态的反演与拟合，其坐标转换关系与旋转映射如图 4 所示。

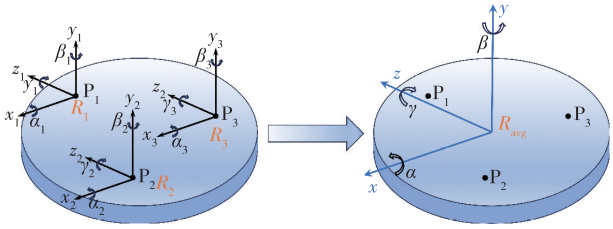


图 4　欧拉角旋转矩阵转换示意图

对于每个测量点的三维姿态角$(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i)$，采用外旋顺序进行描述：即先绕全局坐标系的 X 轴旋转 α_i，再绕 Y 轴旋转 β_i，最后绕 Z 轴旋转 γ_i。其对应的旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_i$ 可表示为三个基本旋转矩阵的依次乘积，即：

$$\boldsymbol{R}_i=\boldsymbol{R}_z(\gamma_i)\boldsymbol{R}_y(\beta_i)\boldsymbol{R}_x(\alpha_i) \tag{4}$$

将三个测量点所对应的旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_i(i=1,2,3)$ 分别求和，并对矩阵中每一元素取算术平均，得到平均旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_{\text{avg}}$。由 $\boldsymbol{R}_{\text{avg}}$ 可通过逆转换关系求解出反映平面整体姿态的合成三维姿态角(α,β,γ)，其转换关系为：

$$\begin{cases}\alpha=\arctan 2(\boldsymbol{r}_{32},\boldsymbol{r}_{33})\\ \beta=\arctan 2\left(-\boldsymbol{r}_{31},\sqrt{\boldsymbol{r}_{32}^2+\boldsymbol{r}_{33}^2}\right)\\ \gamma=\arctan 2(\boldsymbol{r}_{21},\boldsymbol{r}_{11})\end{cases} \tag{5}$$

式中，$\boldsymbol{r}_{ij}$ 表示旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 中第 i 行第 j 列的元素。

2　θ 角安装偏差的影响分析

设定反射镜 1 在安装过程中严格按照预设角度 θ 进行固定，其镜面垂直于待测结构平面，并使其法线方向与 X 轴之间保持夹角为 θ。而反射镜 2 由于安装过程中的微小误差，其实际法线方向与 X 轴之间的夹角为 $\theta+\delta_\theta$，其中 δ_θ 表示极小的角度偏差。该几何关系的空间示意图如图 5 所示。

在引入角度偏差 δ_θ 后，反射镜 2 对应的自准直仪 2 的实际读数记为 B_x'，该读数反映了由于反射镜法向偏差所引起的姿态变化，将读数 B_x' 与其理想状态下的读数 B_x 进行对比，可得该点的读数偏差 ΔB_x 为：

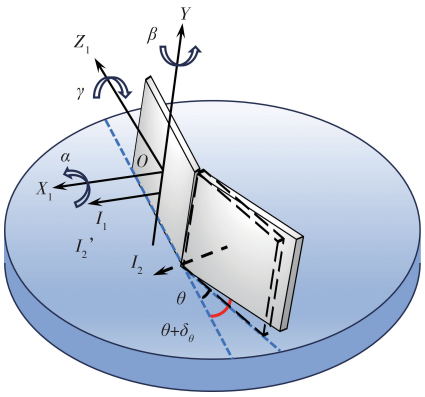


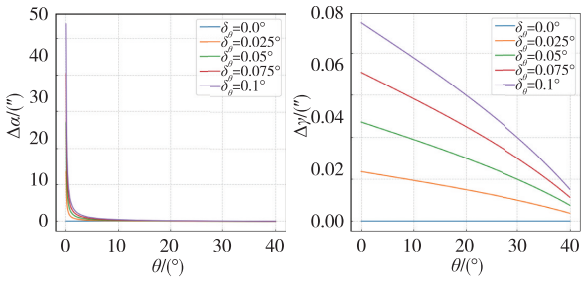
图 5　反射镜法线与 X 轴偏转 δ_θ

$$\Delta B_x=B_x'-B_x=\delta_\theta(\alpha\cos\theta-\gamma\sin\theta) \tag{6}$$

由于反射镜 2 的法线方向相较于中心线存在偏离预设夹角 θ 的微小偏差 δ_θ，将导致姿态解算中所获得的欧拉角参数产生相应误差。其中，绕 X 轴的旋转角 α 与绕 Z 轴的旋转角 γ 分别出现误差 $\Delta\alpha$ 与 $\Delta\gamma$，其表达式为：

$$\begin{aligned}\Delta\alpha&=\alpha'-\alpha=\frac{\delta_\theta}{2}(\alpha-\gamma\tan\theta)\\ \Delta\gamma&=\gamma'-\gamma=\frac{\delta_\theta}{2}(\alpha\cot\theta-\gamma)\end{aligned} \tag{7}$$

设定欧拉角参数 α 与 γ 的初始值均为 108″，考虑夹角 θ 的变化范围为 0～40°，其中微小偏差 δ_θ 的取值范围设定为 0～0.1°。由于误差项 $\Delta\alpha$ 的解析表达中包含 $\cot\theta$ 函数项，当 θ 接近零时，$\cot\theta$ 将趋于发散。因此，在绘制 $\Delta\alpha$ 误差曲线时，θ 的取值从一个极小的正值开始递增，最终得到的误差变化曲线如图 6 所示。



（a）$\Delta\alpha$　　（b）$\Delta\gamma$

图 6　不同 θ 值时反射镜安装偏差引入的误差曲线图

在一定范围内，随着夹角 θ 的增大，反射镜安装偏差 δ_θ 对 α 角和 γ 角测量结果的影响逐渐减弱。由于 $\cot\theta$ 函数在低 θ 区间变化剧烈，当 θ 接近较小值（如 0.1°）时，误差项 $\Delta\alpha$ 呈现明显的陡升特性；而随着 θ 的进一步增大，误差曲线迅速趋于平缓。这一趋势表明，当夹角 θ 较小时，α 角对反射镜安装偏差

δ_θ的敏感性显著增强，即系统在小夹角条件下对角度误差的容忍度较低。因此，在实际系统设计与安装过程中，应尽量避免反射镜法线与参考方向形成过小夹角，以降低因误差放大效应对姿态解算精度造成的不利影响。

3 角度测量实验

为验证所提出测量系统的性能，基于图7所示的双自准直仪光学测量模型，搭建了一套结构面三维旋转角度测量实验平台。该系统主要由两台二维自准直仪（型号为AcroBeam Collapex C300，分辨率0.01″，测量精度0.5″，视场角为0.66° × 0.49°）、两面平面反射镜以及一台三维旋转位移台（型号为THORLABS TTR001SP1，角度分辨率为0.03°，即108″）组成。该平台可实现对结构面在空间中绕X，Y，Z轴的微小旋转角度的精确测量，旨在评估所提测量方法在实际应用中的精度与稳定性。

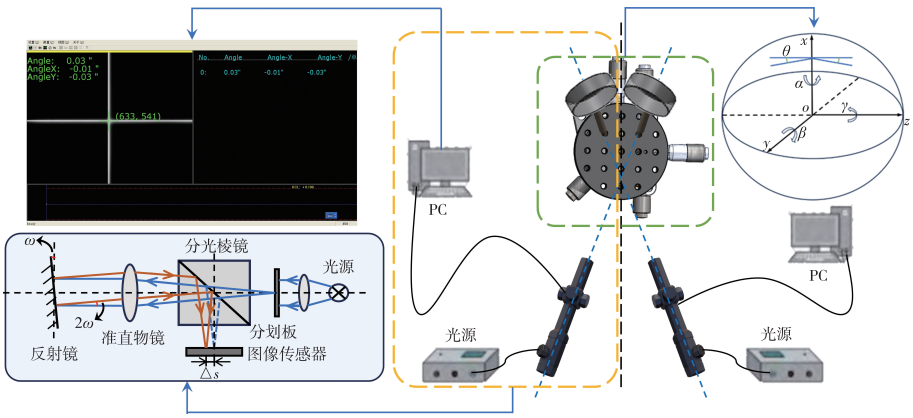


图7 测量系统模型示意图

3.1 实验设置

在开展测量实验前，需对自准直仪进行初始校准操作。具体方法为：将一块平面反射镜固定于三轴旋转位移台上，通过精细调节转台姿态，使自准直仪的两个轴向读数均归零，确保其主光轴与反射镜法线精确对准；随后将转台锁定，以保持校准状态稳定。

完成校准后，搭建双自准直仪光路系统，并开展角度测量实验。测试系统如图8所示：自准直仪1与自准直仪2的主光轴分别与中心轴线（Z轴）成固定夹角θ，反射镜1与反射镜2垂直安装于对应自准直仪的主光轴方向，并固定于三维旋转位移台上，以实现整体结构面的空间姿态调整与测量。

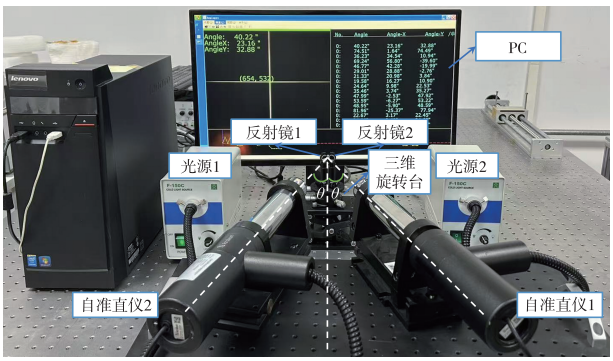


图8 测试系统实物图

在测量实验过程中，保持自准直仪主光轴与系统中心轴线之间的夹角θ不变。设置旋转角度步长为0.03°，最大旋转范围不超过1 000″。针对不同空间姿态，设置共7组不同的欧拉角组合(α,β,γ)，并分别进行测量。为获得更高精度的结构面三维旋转角度测量结果，在待测平面上选取三个空间位置不同的测量点位。针对每组设定的(α,β,γ)值，分别在这三个点位进行角度测量，进而通过姿态拟合获取整体平面姿态角。为降低偶然误差的影响，每个测量点位均进行三次重复性实验。

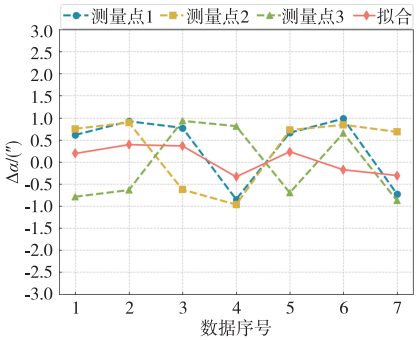
此外，为分析不同夹角θ对测量精度的影响，基于前述三维角度反演模型中的误差传播因子开展数值仿真研究，确定系统误差与夹角之间的变化规律，从而推导出最优θ范围。基于该分析结果，进一步设计并实施了θ范围为6°～15°共10组对比实验，以系统评估不同夹角条件下的测量性能。

3.2 结果分析

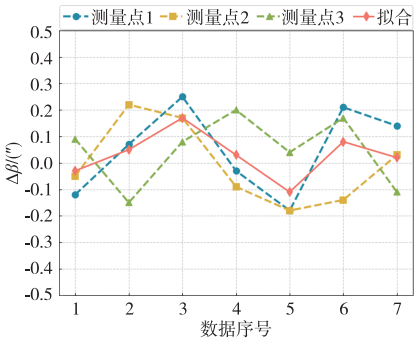
根据上述实验步骤，实验过程中首先确保两台自准直仪与反射镜均处于同一等高面，且三维旋转位移台保持在零位初始状态。随后，通过精密调节将系统各部件对准至预定测量位置，确保光学路径稳定和测量基准一致。

在实验过程中，通过逐步改变自准直仪主光轴与系统中心线之间的夹角θ，可获取在不同θ值条件下的待测平面三维姿态角(α,β,γ)。通过将测量所得姿态角与理论设定值$(\alpha_0,\beta_0,\gamma_0)$进行差值计算，获得相应的误差值，用于评估测量系统的准确性。

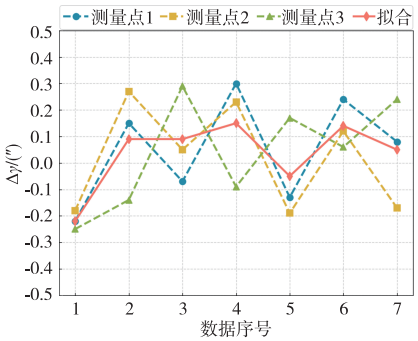
首次实验设定θ=6°，在不超过 1 000″的控制范围内，令三维旋转位移台分别绕X,Y,Z三轴进行旋转，每步旋转角度为 108″，保持旋转方向一致。每步旋转后依次采集待测平面上三个测量点P_1,P_2,P_3的姿态角数据，并利用所提出的姿态解算方法对整体平面姿态进行拟合计算。最终，将每个点位的直接测量结果与拟合后的解算结果进行误差对比，分析结果如图 9 所示。



（a）绕X轴旋转



（b）绕Y轴旋转



（c）绕Z轴旋转

图 9　绕不同轴旋转情况下的误差比较图

通过初始夹角θ=6°时的测量结果可确认，基于公式(4)～(5)的平面姿态角拟合方法能够有效降低测量误差。随后将θ值依次设置为 7°～15°，重复实验流程与解算步骤，得到如图 10 所示的误差曲线。

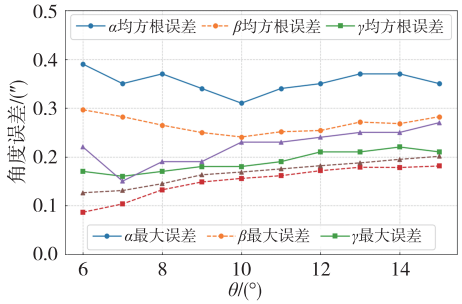


图 10　不同θ值下α、β和γ角误差曲线图

由图中结果可分析得出，当夹角θ位于约 10°附近时，三维姿态角误差分布最为均衡。在θ=10°条件下，α,β,γ三个方向的最大误差分别为 0.31″，0.18″和 0.23″，对应的均方根误差分别为 0.24″，0.16″和 0.17″。因此，在θ=10°的工作条件下，该测量系统可实现优于±0.31″的角度测量精度，以及 0.24″水平的均方根误差，满足高精度三维姿态测量的需求。

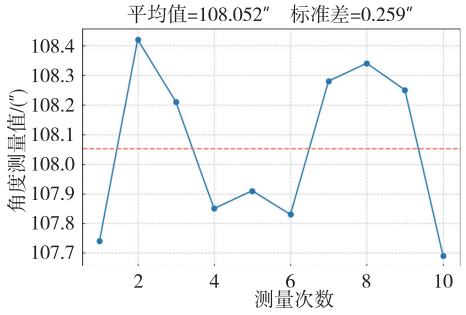
综上所述，适当增大自准直仪主光轴与系统中心线之间的夹角θ有助于提升在α角方向上的测量精度。然而，随着θ的增大，系统的横向尺寸也将呈线性增长，可能导致整体结构尺寸过大。因此，在实际测量中，θ的取值需综合考虑测量精度与设备装调空间的约束，确保在提升测量性能的同时，实现系统尺寸与布设空间之间的最优平衡，使自准直仪及其对应反射镜的布置尺寸控制在合理范围之内。

3.3　重复性测试

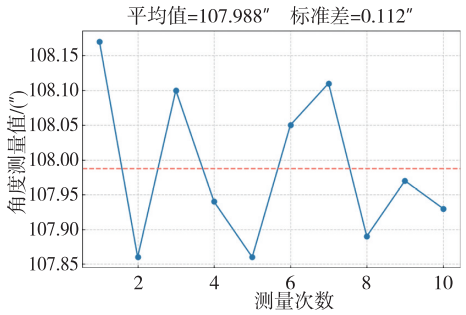
重复性测试所采用的实验环境与三维角度精度测量实验保持一致。设定θ = 10°，并将三维姿态角(α,β,γ)固定为 108″，216″和 324″。分别对每一姿态角进行 10 次独立测量，测量间隔为 5 s。基于 10 组旋转角度测量数据，采用公式(8)所示的贝塞尔公式进行重复性标准差计算，其数学表达式为：

$$\sigma_\alpha=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\alpha_i-\overline{\alpha}\right)^2}{n-1}},\quad \sigma_\beta=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\beta_i-\overline{\beta}\right)^2}{n-1}},\quad \sigma_\gamma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\gamma_i-\overline{\gamma}\right)^2}{n-1}} \tag{8}$$

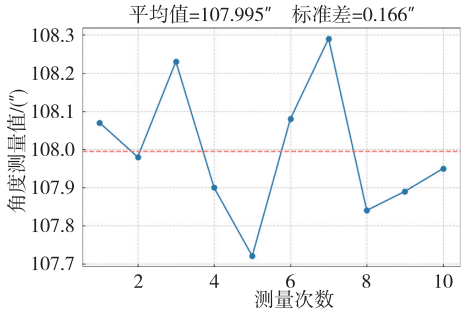
将每个测量点位的10次测量结果取算术平均，作为该点位的最终角度测量值。其中，标准差用于表征测量结果的离散程度，反映系统的稳定性；平均值则代表该点位最可信的角度估计值，相关统计结果如图11所示。



（a）滚转角 α



（b）滚转角 β



（c）滚转角 γ

图11 三维旋转角度重复性测试结果

由图中数据可知，滚转角 α 的测量平均值为108.052″，标准差为0.259″；偏航角 β 的平均值为107.988″，标准差为0.112″；俯仰角 γ 的平均值为107.995″，标准差为0.166″。上述结果表明，该测量系统在多次重复性测量中表现出良好的稳定性与较高的精度，具备较强的重复性，能够满足对三维旋转角度测量的一致性要求。

3.4 性能对比

将所提出的基于双自准直光路的三维角度测量系统与表1所列常见光学测角系统进行对比可知，该系统在测量精度方面实现了一定幅的提升。同时，本文还对系统结构进行了优化设计，并系统分析了关键参数对测量性能的影响，体现出较强的实用性与工程适应性。

表1 性能对比

文献	结构	是否为接触式	测量精度
[20]	电容式角度传感器	是	±10″
[21]	电感式角度传感器	是	±20.6″
[22]	自混频干涉传感系统	否	±0.41″
[23]	组合式反射器自准直系统	否	±0.74″
本文	双自准直光路	否	±0.26″

4 结论

本文提出一种基于双自准直光路的三维姿态角测量方法。该方法通过两台自准直仪的协同测量，结合空间角度分量变换与旋转矩阵转换以及对系统装调误差的分析，实现了待测结构面三维姿态角的精确获取。实验结果表明，反射镜安装角度 θ 显著影响测量精度，当最优性能出现在 $\theta=10^{\circ}$ 时：此时三个方向的最大误差均小于±0.31″，均方根误差均小于±0.24″。在该最优角度下的重复性测试进一步验证了系统的优异性能，其均方根误差优于0.26″，展现出良好的测量重复性与系统稳定性。

参考文献：

[1] 李 斌，高思思，王海超，等. 大口径反射镜Bipod支撑结构的装调与检测方法[J]. 红外与激光工程，2024，53(4)：146-156.
Li Bin, Gao Sisi, Wang Haichao, et al. Adjustment and testing method of large aperture mirror Bipod support structure [J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(4): 146-156.

[2] Gudmundsson J E, Gallardo P A, Puddu R, et al. The Simons Observatory: modeling optical systematics in the Large Aperture Telescope [J]. Applied Optics, 2021, 60(4): 823-837.

[3] Mao S, Lai T, Yuan P, et al. Design of a refractive-metasurface hybrid annular aperture folded optical system [J]. Optics Express, 2024, 32(7): 10948-10961.

[4] 王浩然，董明利，孙广开，等. 遥感卫星结构在轨热应变光纤光栅监测方法[J]. 红外与激光工程，2022，51(12)：20220202.
Wang Haoran, Dong Mingli, Sun Guangkai, et al. Remote sensing satellite structure in-orbit thermal strain Bragg fiber grating monitoring method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(12): 20220202.

[5] Zhang L, Zheng X, Lv X, et al. Optimization method of the thermal control index of space remote sensors based on force-thermal coupling algorithm [J]. Applied Thermal Engineering,

2022, 216: 119058.

[6] Wahballah W A, Eltohamy F, Bazan T M. Influence of attitude parameters on image quality of very high-resolution satellite telescopes[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(2): 1177-1183.

[7] Xing Y, Li H, Niu T, et al. Error compensation method for 3-D postural transformation monitoring using cooperative goniometers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 1006311.

[8] Zhang Q, Fu X, Ren L. Deflection estimation of beam structures based on the measured strain mode shape[J]. Smart Materials and Structures, 2021, 30(10): 105003.

[9] Lee Z K, Bonopera M, Hsu C C, et al. Long-term deflection monitoring of a box girder bridge with an optical-fiber, liquid-level system[J]. Structures, 2022, 44: 904-919.

[10] Bonopera M, Chang K C, Chen C C, et al. Fiber Bragg grating-differential settlement measurement system for bridge displacement monitoring: case study[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(10): 05019011.

[11] Liu Y, Ge Z, Yuan Y, et al. Study of the error caused by camera movement for the stereo-vision system[J]. Applied Sciences, 2021, 11(20): 9384.

[12] Zhao Y, Zha C, Liu B, et al. High-precision rotation angle measurement method based on polarization self-mixing interference[J]. Applied Optics, 2023, 62(27): 7248-7253.

[13] 赵文赫, 白杨杨, 王劲凯, 等. 基于双PSD的三维测角传感器精度分析[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(2): 20230543.
Zhao Wenhe, Bai Yangyang, Wang Jinkai, et al. Accuracy analysis of a three-dimensional angle measurement sensor based on dual PSDs[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(2): 20230543.

[14] Ren W, Cui J, Tan J. A three-dimensional small angle measurement system based on autocollimation method[J]. The Review of Scientific Instruments, 2022, 93(5): 055102.

[15] 魏秀东, 张　凡, 许英朝. 基于摄影测量的定日镜面形误差检测方法研究[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(2): 425-433.
Wei Xiudong, Zhang Fan, Xu Yingchao. The measurement method of heliostat surface shape error based on photogrammetry[J]. Chinese Optics, 2023, 16(2): 425-433.

[16] Zhao Y, Zhang Y, Zhang H, et al. Rotation angle measurement method based on self-mixing interference of a fiber laser[J]. Applied Optics, 2022, 61(11): 3174-3181.

[17] Liu B, Li J, Ma W. Precision three-dimensional small angle measurement system under small space conditions[J]. Proc. SPIE, 2019, 11334: 113340A.

[18] Ren W, Cui J, Tan J. Precision roll angle measurement system based on autocollimation[J]. Applied Optics, 2022, 61(13): 3811-3818.

[19] Xing Y, Li H, Cui X, et al. Delayed-focus micro-angle measurement optical system based on structural segregation[J]. Applied Optics, 2024, 63(21): 5569-5577.

[20] Wang H, Peng K, Liu X, et al. Design and realization of a compact high-precision capacitive absolute angular position sensor based on time grating[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(4): 3548-3557.

[21] Gao W, Shi H, Tang Q. A contactless planar inductive sensor for absolute angular displacement measurement[J]. IEEE Access, 2021, 9: 160878-160886.

[22] Zhao Y, Fan X, Wang C, et al. An improved intersection feedback micro-radian angle-measurement system based on the Laser self-mixing interferometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 126: 105866.

[23] Guo Y, Cheng H, Wen Y, et al. Three-degree-of-freedom autocollimator based on a combined target reflector[J]. Applied Optics, 2020, 59(8): 2262-2269.

作者简介：

崔曦文(2000—),女,硕士研究生,主要从事自准直光路角度测量方面的研究;

祝连庆(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术和光学测量等方面的研究。