

文章编号 1004-924X(2025)07-1007-12

激光跟踪仪主动对准式复合传感高精度姿态测量

程 智^{1,2}, 董登峰^{1,2}, 李 洋^{1*}, 邱启帆^{1,3}, 王建国^{1,2},
霍汉林¹, 黄云鹏^{1,2}, 周维虎^{1,2}

(1. 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 101408;

3. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 211106)

摘要:为满足大型高端装备制造质量检测与装配过程的控制需求,设计了面向激光跟踪仪的主动对准式姿态测量靶标,建立了姿态测量数学模型以及相应的模型参数标定与非线性误差校正方法。首先,介绍了主动对准式姿态测量靶标的结构组成、工作原理、坐标系定义以及测量数据获取和预处理方法,然后基于光束矢量约束和重力矢量约束条件,分别建立了靶标姿态解算模型,并进一步采用神经网络算法对模型解算得到的姿态数据进行非线性误差校正,分析并提出了姿态求解过程涉及的模型参数矩阵标定方法和神经网络训练方法,最后应用主动靶标开展参数标定与姿态测量实验。实验结果表明:在 15 m 范围内,主动对准式姿态测量靶标与 Leica T-MAC 传感器的姿态测量均方根偏差为 0.030°,可满足工业大尺寸姿态参数精密测量的应用需求。

关键词:姿态测量;激光跟踪仪;参数融合;主动对准;惯性传感

中图分类号:TH721;TH744 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253307.1007

CSTR:32169.14.OPE.20253307.1007

High-precision attitude measurement with active aiming composite sensing for laser tracker

CHENG Zhi^{1,2}, DONG Dengfeng^{1,2}, LI Yang^{1*}, QIU Qifan^{1,3}, WANG Jianguo^{1,2},
HUO Hanlin¹, HUANG Yunpeng^{1,2}, ZHOU Weihu^{1,2}

(1. Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;

3. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 211106, China)

* Corresponding author, E-mail: liyang@ime.ac.cn

Abstract: To address the requirements of quality inspection and assembly process control in large-scale high-end equipment manufacturing, an active aiming-based attitude measurement target for laser trackers was developed. A comprehensive mathematical model for attitude measurement was established, accompanied by parameter calibration procedures and nonlinear error compensation methods. The structural composition, operational principles, coordinate system definitions, and data acquisition and preprocessing tech-

收稿日期:2025-02-04;修订日期:2025-02-27.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2023YFB4706700)

niques of the active aiming target were systematically presented. Attitude-solving models were constructed based on constraints derived from laser beam vectors and gravitational vectors. Furthermore, a feedforward neural network was employed to compensate for nonlinear errors inherent in the model-derived attitude data. Calibration strategies for parameter matrices and neural network training were formulated and evaluated. Experimental validation, including parameter calibration and attitude measurement, was performed using the active aiming target. The results indicate that within a 15 m range, the root-mean-square deviation between the proposed target and a Leica T-MAC sensor is 0.030° , satisfying the precision requirements for typical industrial large-scale attitude measurements.

Key words: attitude measurement; laser tracker; parameter fusion; active aiming; inertial sensing

1 引 言

随着大型高端装备制造朝着质量控制精细化、制造过程自动化方向发展,传统的三自由度激光跟踪测量技术已经难以满足大尺寸部件的制造检测需求^[1-2],特别是在飞行器大型部件装配位姿引导、自动焊接/钻铆/车削机器人末端执行机构精确定位、重型燃气轮机部件装配参数现场测量、高铁转向架部件制造与装配质量检验、大型多轴机床空间误差补偿等高性能检测场景中,迫切需要采用具备高精度三维坐标和三维姿态测量能力的六自由度测量技术^[3-6],对被测目标的位姿状态进行完整表征。经过数十年发展,基于激光测距与二轴光栅测角的球坐标模型已成为通行的激光跟踪测量系统三维坐标测量方案^[7],而目标姿态测量技术目前仍处于发展阶段,是近年来工业大尺寸精密测量领域的研究热点。

在基于激光跟踪测量系统的高精度姿态测量领域,通常采用视觉测量、惯性测量和准直测量等手段,结合特定形式的合作靶标解算得到目标姿态参数。基于视觉的姿态测量方案需要在合作目标上布置一系列特征点,根据仪器内置单目相机测得的特征点图像信息解算目标姿态^[8]。周道德等^[9]提出了一种基于深度学习和PnP模型的激光跟踪姿态测量方法,利用深度学习算法实现特征点自动匹配,以此提高姿态测量效率。熊芝等^[10]提出了一种加速正交迭代算法,在保证姿态测量精度的同时大幅提升迭代求解速度。高豆豆等^[11]提出了改进的姿态解算方法,在结合EPnP和SoftPOSIT算法特点的同时加入自动纠错机制,实现了特征点自动匹配与姿态高精度解算。在目标距离大范围变化时,图像特征点的定

位精度不可避免地受到影响,易导致姿态解算精度降低、特征点辨识错误等问题,限制了该类方法的有效测量距离^[12]。基于惯性的姿态测量技术通常采用惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)内置的加速度计和陀螺仪等传感器数据融合滤波,解算得到被测对象的姿态信息。宗意凯等^[13]提出了一种基于多元IMU和粒子滤波优化的姿态融合算法,通过不同噪声特性的IMU数据融合滤波提高姿态解算精度。程为彬等^[14]提出了一种IMU姿态误差均衡校正模型,通过设计校正矩阵降低姿态解算误差。由于姿态测量过程中缺少方位参考基准,采用单一IMU的方案难以补偿传感器漂移引入的误差,三维姿态测量精度较低,通常仅能达到 0.5° 量级。为进一步提升姿态测量精度,一种行之有效的方式是在测量系统中引入准直测量技术。Lin等^[15]通过光学准直子模块建立方位基准,利用FKF算法对IMU测量数据进行融合解算,提高了姿态测量精度。伍楚奇等^[16]提出了一种基于单目视觉与激光准直相结合的激光跟踪姿态测量方案,通过建立光束向量约束条件结合改进的视觉正交迭代算法完成高精度姿态求解。邱启帆等^[17]研究了基于准直激光的合作目标二维姿态测量方法,基于光束向量建立了合作目标二维姿态测量模型。此类技术方案的主要优势是姿态解算精度相较于单一的视觉、惯性测量方案有所提升^[18],但受到反射器件光学结构和准直探测器件自身性能的限制,在目标姿态大范围变化时易发生断光导致测量中断,并且姿态精度提升效果有限,难以适应高性能制造领域对姿态参数的高精度自动化测量需求。

本文针对现有姿态测量手段不足,提出了一

种面向激光跟踪仪的主动对准式高精度三维姿态测量方案,由光束主动对准、IMU倾角测量、光栅精密测角等精密测量技术出发,利用激光跟踪仪光束向量以及重力向量空间几何约束关系建立合作目标姿态解算模型,并设计了测量靶标原型系统。该方案具备测量精度高、测量距离远和姿态范围大等特点,具有良好的应用前景。

2 工作原理

2.1 姿态测量系统结构

主动对准式复合传感高精度姿态测量系统主要由激光跟踪仪、主动对准式合作靶标及相应数据采集与处理模块组成。在测量过程中,主动对准靶标在自动对准控制系统的作用下始终正对激光跟踪仪测量光束,根据靶标内置的六轴IMU、光栅编码器以及激光跟踪仪主机输出的测量数据,建立复合传感姿态测量模型,解算得到靶标基座相对激光跟踪仪坐标系的三维姿态。其中,主动对准靶标是实现姿态测量功能的关键组件。

图1所示为激光跟踪仪主动对准靶标的总体结构,靶标主要由基座、方位轴系、俯仰轴系、位置敏感探测器(Position Sensitive Detector, PSD)单元和反射棱镜组成。其中,方位轴系和俯仰轴系均包含相应的驱动电机和光栅编码器,PSD探测单元和反射棱镜位于二维转台轴系中心;参数标定时,将靶标基座安装在一刚性标定平板上,并在标定平面上通过磁性球座固定3个1.5英寸的反射球(Spherical Mounted Retro-reflector, SMR),标定完成后即可拆除该标定平面。

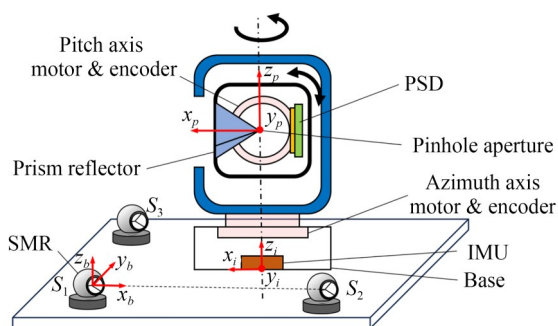


图1 主动对准靶标的总体结构

Fig. 1 Overall structure of active aiming target

姿态测量系统的工作原理如图2所示,来自激光跟踪仪的测量光束入射至靶标反射棱镜,绝大部分被反射回激光跟踪仪主机,少部分通过反射棱镜中心小孔进入PSD探测器的光敏面。当入射光与反射棱镜光轴方向存在图2所示的夹角时,投射在PSD光敏面的光斑位置会产生与该夹角相关的偏移量,以该偏移量作为反馈控制的输入参数,与二维电控转台组成闭环控制系统,实现反射棱镜对测量激光的主动对准。在此基础上,首先将激光跟踪仪主机通过内置精密电子水平仪调平,使仪器坐标系的基准平面与水平面重合。当靶标主动对准激光跟踪仪测量光束时,通过安装在轴系内部的光栅编码器读取转台二维转角,得到靶标基准系相对激光跟踪仪测量光束的二维姿态参量;同时,使用固定于靶标底座的IMU模块测量靶标姿态基准系相对大地水平面的二维倾角并确定相应的二维姿态参量,由于激光跟踪仪的坐标系已调至水平,该组二维姿态参量即为靶标姿态基准系在激光跟踪仪坐标系下

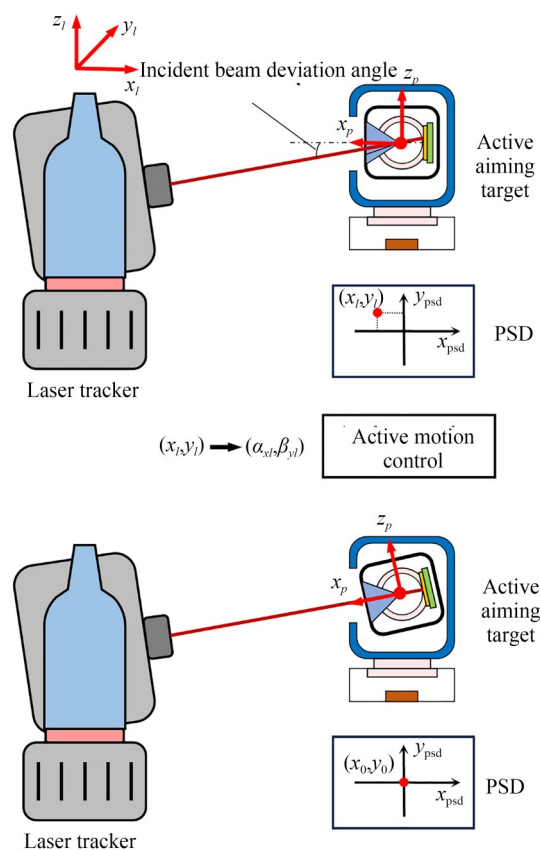


图2 主动对准靶标工作原理

Fig. 2 Working principle of active aiming target

的姿态参量;最后根据仪器结构参数,对上述两组二维姿态参量进行融合,得到靶标基准系完整的三维姿态参量。

2.2 坐标系定义

按照图 1、图 2 所示,定义测量系统坐标系如下:

激光跟踪仪坐标系 l : 仪器指向零位时激光光束与 x_l 轴重合, 根据仪器内置的电子水平仪(精度 $1''$) 调节固定地脚, 使仪器 z_l 轴负方向与当地重力矢量 g 方向精确重合, y_l 轴方向由右手定则确定, 以此坐标系作为全局参考系。

主动靶标标定平面坐标系 b : 由固定在靶标底座平面上的 3 个 SMR 球心点 S_1, S_2, S_3 建立的坐标系, 以 S_1 为原点 o_b , S_1, S_2 确定的矢量 S_1S_2 方向为 x_b 轴正方向, S_1, S_2, S_3 确定的平面为 $x_b o_b y_b$ 平面, 主动靶标正立安装时 z_b 轴正方向向上, y_b 轴方向通过右手定则确定, 坐标系 b 仅用于靶标参数标定, 不参与靶标姿态解算。

IMU 坐标系 i : 坐标轴 x_i, y_i, z_i 与 IMU 模块内置的加速度计、陀螺仪敏感轴方向定义一致, 模块制造并标定完成后即确定。IMU 固定安装在靶标底座内部, 在靶标姿态变化过程中 i 系、靶标底座与底座固连的被测对象相对姿态保持不变, 本文使用 i 系的姿态来表示靶标姿态。

靶标反射棱镜坐标系 p : 以反射棱镜顶点为原点 o_p , x_p 轴沿 PSD 传感器零位与棱镜顶点连线指向棱镜外部, y_p 轴与靶标转台俯仰轴线重合, z_p 轴由右手定则确定, 在靶标主动对准入射激光时, x_p 轴与激光光束重合。特别地, 定义靶标二维转台转角均位于零位时的靶标反射棱镜坐标系为 p_0 。

根据以上坐标系定义可知, 最终待求的主动靶标姿态即为全局参考系 l 到靶标姿态系 i 的旋转矩阵 R_i^l 。

2.3 测量数据获取

在主动靶标姿态测量系统中, 参与姿态解算的测量数据包括激光跟踪仪二维转角、靶标二维转角和 IMU 姿态(欧拉角)。

2.3.1 激光跟踪仪的二维转角

激光跟踪仪属于球坐标测量系统, 通过测量合作目标位置相对仪器自身坐标系的二维偏角和距离来确定球坐标参数, 但在机械结构几何误

差影响下, 仪器二维转台直接输出的角度与目标实际位置对应的二维偏角存在误差。因此, 本文基于几何误差补偿后仪器输出的直角坐标值 $\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}$, 按照激光跟踪仪坐标系 l 的定义解算得到误差校正后的方位角测量值 $\tilde{\alpha}$ 和俯仰角测量值 $\tilde{\epsilon}$:

$$\tilde{\alpha} = \arctan\left(\frac{\tilde{y}}{\tilde{x}}\right), \quad (1)$$

$$\tilde{\epsilon} = \arcsin\left(\frac{\tilde{z}}{\sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2 + \tilde{z}^2}}\right). \quad (2)$$

本文采用课题组自研的 LT6D 型激光跟踪仪, 校准后的二维转角误差为 $0.7''$ (0.00019°), 内置电子水平仪精度为 $1''$ (0.00028°), 与典型的姿态测量精度 (0.03° 量级) 相比, 激光跟踪仪引入的误差可忽略不计。

2.3.2 靶标二维转角

主动对准靶标的二维转角测量值直接通过读取靶标内置的光栅编码器输出值获取, 靶标二维转角测量误差包括主动对准偏差和靶标结构误差引入的角度误差。其中, 在主动对准状态下靶标对准偏差引入的角度误差如图 3 所示, 峰值误差小于 0.003° , 对最终的姿态测量影响较小; 靶标结构误差通过姿态解算过程予以补偿。

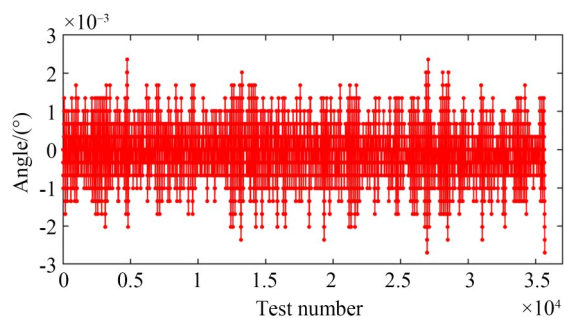


图 3 主动对准状态下靶标对准偏差引入的角度误差
Fig. 3 Angular error induced by target aiming error during active aiming

2.3.3 IMU 姿态融合解算

本文使用的六轴 MEMS-IMU 器件内置有三轴陀螺仪和三轴加速度计, 出厂前已完成正交度、温漂和标度因数误差的校正。受限于传感器自身特性, 陀螺仪经积分得到的角度数据存在低频漂移, 加速度计输出的加速度数据存在高频抖动, 使用上述数据直接求解 IMU 姿态会引入较

大误差。本文采用自适应互补滤波方法,对响应频谱特性存在互补性的陀螺仪和加速度计传感器输出数据通过不同频域特性的滤波器进行滤波处理,以重力矢量作为参考基准进行融合解算,得到最终的IMU姿态估计结果,其中俯仰、滚转维度姿态信息经重力校正可以达到较高的精度,算法流程如图4所示。

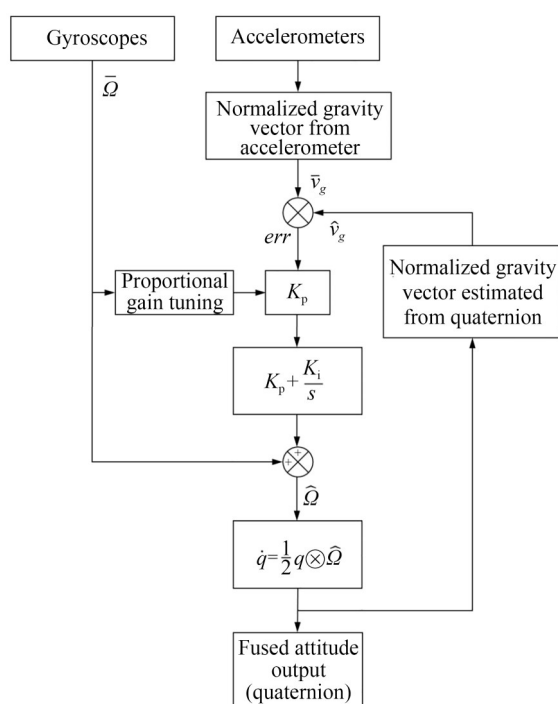


图4 基于重力参考基准的自适应互补滤波姿态融合算法
Fig. 4 Flowchart of adaptive gravity-reference-based complementary filtering attitude fusion algorithm

该算法的核心思路是利用姿态估计结果和IMU三维加速度数据,分别求出重力矢量估计值 $\hat{v}_g$ 和测量值 $\bar{v}_g$,根据二者叉乘结果得到加速度计的测量误差,再通过PI调节器计算姿态补偿量,对陀螺仪输出的角速度 $\bar{\Omega}$ 进行补偿,得到准确的角速度 $\hat{\Omega}$ 。在PI校正环节,根据加速度计输出数据对比例增益系数 K_p 进行自适应调整,能够降低外部加速度对姿态输出的影响,具体调整策略如下:

$$K_p = \begin{cases} K_{p0} & 0 \leq \Delta a \leq a_1 \\ K_{p0} - \frac{K_{p0} - K_{p1}}{\Delta a_{\max}} \Delta a & a_1 < \Delta a \leq a_2 \\ K_{p1} & a_2 < \Delta a \leq \Delta a_{\max} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: K_p 为自适应调节后的比例环节增益, Δa 为

三轴加速度计输出与重力加速度之差的绝对值, $\Delta a_{\max}$ 为IMU加速度计输出范围达到上限时 Δa 的取值, a_1, a_2 为设定的动态判定阈值, K_{p0} 和 K_{p1} 分别为比例环节增益自适应调节的上、下限值。当 Δa 较小时,外部加速度较低,通过加速度计求得的重力矢量相对准确,比例环节增益取上限 K_{p0} ,此时加速度计输出数据对应的权重最大;当 $\Delta a > a_1$ 时,对 K_p 进行自适应调整,直至 $\Delta a > a_2$ 时,比例环节增益取下限值 K_{p1} ,此时陀螺仪输出数据在姿态解算过程中所占权重最大。

3 姿态测量模型与关键算法

3.1 姿态测量模型

3.1.1 基于光束矢量约束的靶标姿态解算

使用靶标主动对准激光跟踪仪发出的测量光束并进行测量时,测量光束经靶标棱镜顶点投射至PSD探测器光敏面的零位处。根据光的直线传播定理,在激光跟踪仪坐标系 l 下,激光跟踪仪出射光束单位矢量 $\boldsymbol{v}_l^{(l)}$ 和靶标反射棱镜入射光束单位矢量 $\boldsymbol{v}_l^{(p)}$ 存在以下关系:

$$\boldsymbol{v}_l^{(l)} = \boldsymbol{v}_l^{(p)}. \quad (4)$$

对于激光跟踪仪的出射光束,设测量状态下激光跟踪仪主机的方位角为 a ,俯仰角为 e ,则单位化光束矢量 $\boldsymbol{v}_l^{(l)}$ 可表示为:

$$\boldsymbol{v}_l^{(l)} = \boldsymbol{R}_z(a) \cdot \boldsymbol{R}_y(e) \cdot \boldsymbol{v}_0^{(l)}, \quad (5)$$

其中: $\boldsymbol{R}_z(a), \boldsymbol{R}_y(e)$ 分别为激光跟踪仪二维转台转角对应的基本旋转矩阵, $\boldsymbol{v}_0^{(l)} = [1 \ 0 \ 0]^T$ 为激光跟踪仪坐标系 x_l 轴的单位矢量,即仪器指向零位时的光束矢量。

将基本旋转矩阵表达式代入式(5),整理可得:

$$\boldsymbol{v}_l^{(l)} = \begin{bmatrix} \cos a \cdot \cos e \\ \sin a \cdot \cos e \\ -\sin e \end{bmatrix}. \quad (6)$$

在反射棱镜坐标系 p 下,当靶标处于主动对准状态时,入射至反射棱镜的测量光束经棱镜中心孔投射至PSD光敏面零位,根据 p 系坐标轴定义,入射光束在 p 系下的单位化矢量始终与 x_p 轴单位矢量重合且方向相反,令 x_p 轴的单位矢量为 $\boldsymbol{i}_p$, l 系到 p 系的变换矩阵为 $\boldsymbol{R}_p^l$,则 $\boldsymbol{v}_l^{(p)}$ 可表示为:

$$\boldsymbol{v}_l^{(p)} = \boldsymbol{R}_p^l \cdot (-\boldsymbol{i}_p), \quad (7)$$

式中: $i_p = [1 \ 0 \ 0]^T$; l 系到 p 系的坐标系变换矩阵 R_p^l 可分解为自 l 系依次到 i 系、 p_0 系、 p 系顺序的坐标系变换。由此式(7)改写为:

$$v_i^{(p)} = {}^{(l)}R_i^l \cdot R_{p_0}^i \cdot R_p^{p_0} \cdot \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: ${}^{(l)}R_i^l$ 为待求的靶标姿态矩阵; $R_{p_0}^i$ 为固定的参数矩阵,可事先通过标定求解得到; $R_p^{p_0}$ 可利用靶标光栅实时测得的二维转角数据来构建。

设靶标二维转台的方位角读数为 α , 俯仰角读数为 β , 由 α, β 构建基本旋转矩阵 $R_z(\alpha)$, $R_y(\beta)$, 则矩阵 $R_p^{p_0}$ 可表示为:

$$R_p^{p_0} = R_z(\alpha) R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cdot \cos \beta & -\sin \alpha & \cos \alpha \cdot \sin \beta \\ \sin \alpha \cdot \cos \beta & \cos \alpha & \sin \alpha \cdot \sin \beta \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (9)$$

将式(6)、式(8)和式(9)代入式(4), 可得:

$${}^{(l)}R_i^l \cdot R_{p_0}^i \cdot \begin{bmatrix} -\cos \alpha \cdot \cos \beta \\ -\sin \alpha \cdot \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cdot \cos e \\ \sin \alpha \cdot \cos e \\ -\sin e \end{bmatrix}. \quad (10)$$

在主动靶标对准测量过程中, 将激光跟踪仪的二维转角、靶标二维转台转角代入式(10), 结合事先标定得到的参数阵 $R_{p_0}^i$ 以及姿态矩阵的正交性约束, 可解得基于光束向量约束的靶标姿态矩阵估计值 ${}^{(l)}\hat{R}_i^l$ 。据此, 以绕 Z - Y - X 轴内旋的旋转顺序计算靶标方位角、俯仰角和滚转角的估计值, 分别为 ${}^{(l)}\hat{\psi}$, ${}^{(l)}\hat{\theta}$, ${}^{(l)}\hat{\phi}$ 。

3.1.2 基于重力矢量约束的靶标姿态解算

设 IMU 坐标系 i 在全局参考系 l 下的三维姿态角分别为 ψ, θ, φ (即方位角、俯仰角、滚转角), 按照绕 i 系自身 z - y - x 轴的旋转顺序, 可得到 IMU 传感器的姿态测量矩阵 $\tilde{R}_i^l$:

$$\tilde{R}_i^l = \tilde{R}_z(\psi) \tilde{R}_y(\theta) \tilde{R}_x(\varphi). \quad (11)$$

在使用激光跟踪仪测量前, 通过仪器内置精密电子水平仪对激光跟踪仪进行调平, 此时 l 系下的归一化重力矢量为 $g_l = [0 \ 0 \ -1]^T$ 。在由 IMU 互补滤波输出欧拉角所确定的坐标系

下, 归一化重力矢量测量值 $\tilde{g}_i$ 为:

$$\tilde{g}_i = (\tilde{R}_i^l)^{-1} g_l. \quad (12)$$

据此根据重力矢量建立关于待求姿态矩阵 R_i^l 的关系式:

$$({}^{(g)}R_i^l) \tilde{g}_i = g_l. \quad (13)$$

将式(12)与 $g_l = [0 \ 0 \ -1]^T$ 代入式(13)得:

$$({}^{(g)}R_i^l) \begin{bmatrix} \sin \theta \\ -\sin \phi \cos \theta \\ -\cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

经过对 IMU 原始数据的互补滤波融合, 输出的滚转角 φ 和俯仰角 θ 均经过重力矢量修正, 具有较高的精度。结合姿态矩阵正交性质, 可根据式(14)求得基于重力向量约束的靶标姿态矩阵估计值 ${}^{(g)}\hat{R}_i^l$ 和相应的欧拉角估计值 ${}^{(g)}\hat{\psi}$, ${}^{(g)}\hat{\theta}$, ${}^{(g)}\hat{\phi}$ 。

由此可以看出, 3.1.1 节和本节方法均能独立地求出一组靶标三维姿态估计值, 但由于光束矢量约束和重力矢量约束求解模型中分别缺少滚转角和方位角基准, 解得的 ${}^{(l)}\hat{\phi}$ 和 ${}^{(g)}\hat{\psi}$ 是不准确的; 另一方面, 经精确调平后, 激光跟踪仪定义的全局姿态坐标系已与重力对齐, 而 IMU 互补滤波输出的俯仰角 ${}^{(g)}\hat{\theta}$ 、滚转角 ${}^{(g)}\hat{\phi}$ 同样基于重力进行校正, 与全局坐标系具有相同的参考基准, 并且参数的传递链路较短, 所以取 ${}^{(g)}\hat{\theta}$, ${}^{(g)}\hat{\phi}$ 作为最终姿态解算模型输出的俯仰角和滚转角, 以光束矢量约束模型解得的方位角 ${}^{(l)}\hat{\psi}$ 作为最终姿态解算模型输出的方位角。

3.1.3 基于欧拉角的非线性误差校正

在求解靶标姿态的过程中, 通过参数阵 $R_{p_0}^i$ 校正 IMU 器件坐标系和靶标二维转台零位坐标系的相对姿态, 但由于靶标结构中存在棱镜位置误差、光栅装配偏心误差、二维轴系相交度误差等一系列相互耦合的几何误差源, 参数阵标定结果和姿态阵解算结果中存在难以通过解析式表达的非线性误差。

针对该问题, 本文采用前馈神经网络 (Feed-forward Neural Network, FNN) 校正基于光束向量和重力向量约束求得的姿态估计值的非线性误差, 该网络包含输入层、隐藏层和输出层, 结构如图 5 所示。其中, 神经网络输入层包含 3 个节

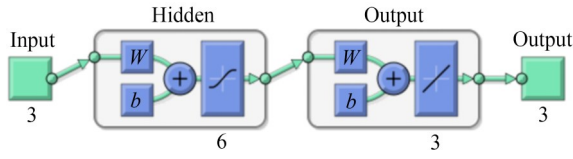


图5 三层前馈神经网络结构

Fig. 5 Structure of three-layer feedforward neural network

点,相应的输入参数向量由解算模型输出的欧拉角 $^{(l)}\hat{\phi}, ^{(g)}\hat{\theta}, ^{(g)}\hat{\phi}$ 组成,即:

$$X_k = \begin{bmatrix} ^{(l)}\phi_k \\ ^{(g)}\theta_k \\ ^{(g)}\phi_k \end{bmatrix}. \quad (15)$$

神经网络隐藏层输出为:

$$H_k = f(W_1 X_k + b_1), \quad (16)$$

其中: W_1 为输入层到隐藏层的权重矩阵; b_1 为隐藏层的偏置向量; $f(\cdot)$ 为双曲正切激活函数,确保网络具备良好的非线性误差拟合能力。隐藏层节点数通常在5~10之间,可在参数训练过程中根据训练数据损失函数值与节点数的关系合理确定。

输出层包含3个节点,分别对应误差校正后的靶标欧拉角:

$$Y_k = \begin{bmatrix} ^{(F)}\phi_k \\ ^{(F)}\theta_k \\ ^{(F)}\phi_k \end{bmatrix} = W_2 H_k + b_2, \quad (17)$$

其中: W_2 为隐藏层到输出层的权重矩阵; b_2 为输出层的偏置向量。

以非线性误差校正神经网络修正后的靶标欧拉角对应的姿态矩阵 $^{(F)}R_i^l$ 为靶标姿态的最终输出。

3.2 靶标参数矩阵标定与误差校正网络训练

为标定靶标参数矩阵 $R_{p_0}^i$,在靶标基座上安装标定辅助平面并构建标定平面坐标系 b ,通过激光跟踪仪测量坐标系 b 在跟踪仪坐标系 i 下的姿态,依次完成 b 系到 i 系变换矩阵 R_i^b 的标定、 b 系到 p_0 系变换矩阵 $R_{p_0}^b$ 的标定,再解算得到参数矩阵 $R_{p_0}^i$,即:

$$R_{p_0}^i = (R_i^b)^{-1} \cdot R_{p_0}^b. \quad (18)$$

3.2.1 参数矩阵标定

首先,根据坐标系 b 的定义和 S_1, S_2, S_3 点坐标 s_1, s_2, s_3 ,分别求出 b 系在3个坐标轴方向的单

位向量 x_b, y_b, z_b :

$$\begin{cases} x_b = \frac{s_2 - s_1}{\|s_2 - s_1\|} \\ z_b = \frac{x_b \times (s_3 - s_1)}{\|x_b \times (s_3 - s_1)\|} \\ y_b = z_b \times x_b \end{cases}. \quad (19)$$

由此得到激光跟踪仪坐标系 l 到靶标标定平面坐标系 b 的姿态变换矩阵 R_b^l :

$$R_b^l = \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{bx} & x_{by} & x_{bz} \\ y_{bx} & y_{by} & y_{bz} \\ z_{bx} & z_{by} & z_{bz} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

将 $R_i^l = R_b^l \cdot R_i^b$ 以及式(20)带入式(14),整理可得:

$$R_i^b \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{bx} \\ z_{by} \\ z_{bz} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

通过改变靶标姿态,在 $m(m \geq 3)$ 个不同姿态下取得IMU融合得到的欧拉角 θ, ϕ 数据以及坐标系 b 的 z_b 轴矢量 $[z_{bx} \ z_{by} \ z_{bz}]^T$,构造以下方程:

$$R_i^b \begin{bmatrix} -\sin \theta_{(1)} & \cdots & -\sin \theta_{(m)} \\ \sin \phi_{(1)} \cos \theta_{(1)} & \cdots & \sin \phi_{(m)} \cos \theta_{(m)} \\ \cos \phi_{(1)} \cos \theta_{(1)} & \cdots & \cos \phi_{(m)} \cos \theta_{(m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{bx(1)} & \cdots & z_{bx(m)} \\ z_{by(1)} & \cdots & z_{by(m)} \\ z_{bz(1)} & \cdots & z_{bz(m)} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

根据上述超定方程组,结合旋转矩阵正交性质,求得参数矩阵 R_i^b 的最小二乘解 $\hat{R}_i^b$ 。

3.2.2 靶标参数矩阵标定

由于标定平面与靶标基座之间为刚性连接,二者的相对姿态保持不变,设二者姿态变换矩阵为 $R_{p_0}^b$,则激光跟踪仪坐标系 l 到反射棱镜坐标系 p 的变换矩阵 R_p^l 可表示为:

$$R_p^l = R_{p_0}^l \cdot R_{p_0}^b = R_b^l \cdot R_{p_0}^b \cdot R_{p_0}^b. \quad (23)$$

将式(23)代入靶标入射光束矢量表达式(7),可得:

$$v_i^{(p)} = R_p^l \cdot (-i_p) = R_b^l \cdot R_{p_0}^b \cdot R_{p_0}^b \cdot \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

再将式(20)、式(9)代入式(24),可得:

$$\mathbf{v}_l^{(p)} = \begin{bmatrix} x_{bx} & x_{by} & x_{bz} \\ y_{bx} & y_{by} & y_{bz} \\ z_{bx} & z_{by} & z_{bz} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{R}_{p_0}^b \cdot \begin{bmatrix} -\cos \alpha \cdot \cos \beta \\ -\sin \alpha \cdot \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix}. \quad (25)$$

最后,将式(25)、式(6)代入式(4),可以得到关于 $\mathbf{R}_{p_0}^b$ 的关系式:

$$\mathbf{R}_{p_0}^b \cdot \begin{bmatrix} -\cos \alpha \cdot \cos \beta \\ -\sin \alpha \cdot \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{bx} & y_{bx} & z_{bx} \\ x_{by} & y_{by} & z_{by} \\ x_{bz} & y_{bz} & z_{bz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos a \cdot \cos e \\ \sin a \cdot \cos e \\ -\sin e \end{bmatrix}. \quad (26)$$

为简化表示,将式(26)改写为:

$$\mathbf{R}_{p_0}^b \cdot \mathbf{w} = \mathbf{q}, \quad (27)$$

其中:

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} -\cos \alpha \cdot \cos \beta \\ -\sin \alpha \cdot \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix} \quad \mathbf{q} = \begin{bmatrix} x_{bx} & y_{bx} & z_{bx} \\ x_{by} & y_{by} & z_{by} \\ x_{bz} & y_{bz} & z_{bz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos a \cdot \cos e \\ \sin a \cdot \cos e \\ -\sin e \end{bmatrix}. \quad (28)$$

通过改变主动靶标姿态,测量得到 n 组激光跟踪仪主机的方位角 a 和俯仰角 e 、主动靶标的方位角 α 和俯仰角 β ,以及坐标系 b 的坐标轴单位向量 x_b, y_b, z_b ,可构造下列方程:

$$\mathbf{R}_{p_0}^b \cdot [\mathbf{w}_{(1)} \cdots \mathbf{w}_{(n)}] = [\mathbf{q}_{(1)} \cdots \mathbf{q}_{(n)}]. \quad (29)$$

当 $n \geq 3$ 时,通过建立此超定方程组即可求得参数阵 $\mathbf{R}_{p_0}^b$ 的最小二乘解 $\hat{\mathbf{R}}_{p_0}^b$.

最后,根据式(18)可得到参数矩阵 $\mathbf{R}_{p_0}^i$ 的最优估计:

$$\hat{\mathbf{R}}_{p_0}^i = (\hat{\mathbf{R}}_i^b)^{-1} \cdot \hat{\mathbf{R}}_{p_0}^b. \quad (30)$$

3.2.3 非线性误差校正神经网络训练

为获得准确的神经网络权重矩阵 $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2$ 和偏置向量 $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2$,以标定参考平面坐标系姿态作为参考,对于全部标定数据构建式(31)所示的损失函数,采用LM算法对神经网络参数进行优化,使损失函数达到最小,完成神经网络训练。

$$E = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|Y_k - Y_{\text{ref}, k}\|^2, \quad (31)$$

N 为标定数据量;对于第 k 组标定数据, Y_k 为神经网络输出的靶标姿态相应欧拉角预测值, $Y_{\text{ref}, k}$ 为靶标标定平面姿态 $\mathbf{R}_b^i$ 与标定所得的参数阵 $\mathbf{R}_i^b$ 联立得到的参考姿态矩阵 ${}^{(b)}\mathbf{R}_i^i = \mathbf{R}_b^i \cdot \mathbf{R}_i^b$ 所确定的参考欧拉角。

4 实验与结果分析

4.1 姿态测量参数阵标定与误差校正网络训练

本文搭建的标定装置如图6所示,用于标定靶标姿态测量参数阵 $\mathbf{R}_{p_0}^i$ 和训练非线性误差校正网络。标定装置由激光跟踪仪、主动对准靶标、三轴角度调节台、标定平板、SMR反射球和测控软件组成。标定前,首先将装有主动对准靶标和3个SMR反射球的标定平板通过三轴角度调节台固定在光学平台上,使得靶标与标定平板的姿态在标定过程中能够任意调整;然后,将激光跟踪仪置于距靶标约3 m处,完成精确调平后固定;运行上位机测控软件,同时读取激光跟踪仪、主动对准靶标和IMU测量数据。

标定过程中,依次调整三轴角度调节台的方位角、滚转角和俯仰角,共采集31组靶标处于不同姿态时的测量数据。对于第 $k(k=1, 2, \dots, 31)$ 组数据,首先控制靶标对激光跟踪仪进行主动对准,记录此时通过激光跟踪仪测得的靶标棱镜方位角 a_k 和俯仰角 e_k 、靶标方位轴与俯仰轴光栅编码器读数 α_k 和 β_k 、六轴IMU数据经互补滤波后输出的欧拉角 $\psi_k, \theta_k, \varphi_k$,再控制激光跟踪仪分别指向标定平面上的3个SMR反射球,记录各反射球的球心点 S_1, S_2, S_3 的坐标。

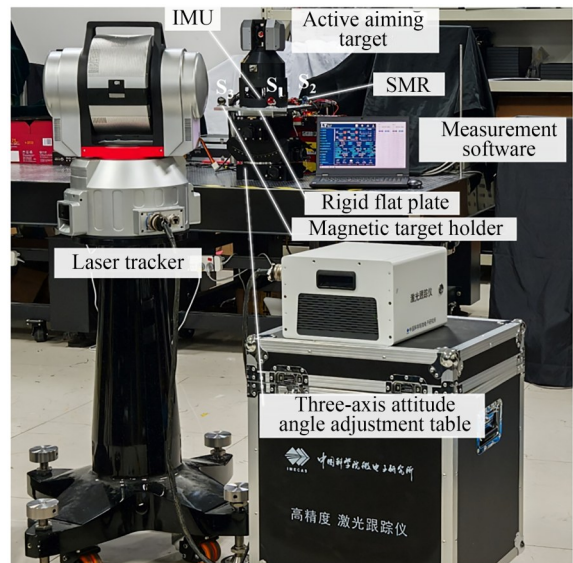


图6 姿态测量参数阵标定实验

Fig.6 Calibration experiment of attitude measurement parameter matrix

在完成上述标定数据采集后,通过3.2.1, 3.2.2节方法求解得到靶标参数矩阵 $R_{p_0}^i$, 通过3.1, 3.2.3节方法对非线性误差校正神经网络进行训练。

靶标参数矩阵 $R_{p_0}^i$ 的标定结果为:

$$R_{p_0}^i = \begin{bmatrix} 0.3016 & 0.9492 & -0.0901 \\ 0.9532 & -0.2981 & 0.0506 \\ 0.0211 & -0.1012 & -0.9946 \end{bmatrix}. \quad (32)$$

基于训练数据,神经网络隐藏层节点数与残差的关系如图7所示。可见节点数大于5时,训练数据残差不再随节点数增加而减小,为提高算法效率、避免过拟合等问题,确定隐藏层节点数为6。

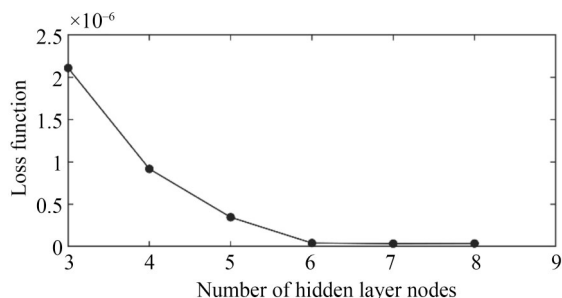


图7 神经网络损失函数与隐藏层节点数的关系

Fig. 7 Relationship between neural network loss function and number of hidden layer nodes

应用3.1节方法,代入标定所得的参数矩阵 $R_{p_0}^i$ 和神经网络训练结果,计算各组标定数据的姿态变化量 ${}^{(F)}R_{i|k}^{j|k-1}$, 并以参考平面坐标系 b 的姿态变化量作为参考,评价基于上述测量模型求解靶标姿态的残余误差。为准确反映姿态的综合变化量,在残余误差评价过程中,依据式(33),采用各组姿态变化矩阵 ${}^{(F)}R_{i|k}^{j|k-1}$ 对应的等效旋转矢量模长,即等效旋转轴轴角 φ_k^{k-1} 来表征综合姿态变化量。标定数据对应的姿态测量结果与残余误差绝对值如图8所示。

$$\varphi_k^{k-1} = \arccos \frac{\text{tr}({}^{(F)}R_{i|k}^{j|k-1}) - 1}{2}. \quad (33)$$

由实验结果可知,通过本文方法标定靶标参数并训练误差校正神经网络后,基于标定数据组的姿态测量结果残余误差的均方根值为 0.020° , 绝对误差极值为 0.047° 。

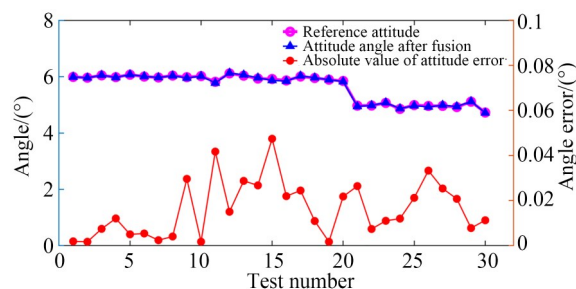


图8 标定数据姿态测量结果与残余误差

Fig. 8 Attitude measurement result and residual error from calibration data

4.2 姿态精度验证

为验证靶标姿态测量精度,搭建图9所示的姿态精度验证装置,通过三轴角度调节台改变靶标姿态,使用本文主动对准靶标与姿态测量精度为 0.01° 的 Leica T-MAC 传感器同时测量三轴角度调节台的姿态变化量,进行精度比对验证。测试时依次将激光跟踪仪置于距靶标约 3 m, 15 m 的位置,各位置处先后改变靶标的方位、滚转和俯仰姿态,采集 33 组姿态数据。根据式(33)求得主动对准靶标和 T-MAC 输出的旋转角度并进行比对,评价主动对准靶标的姿态测量精度,实验结果如图10所示。

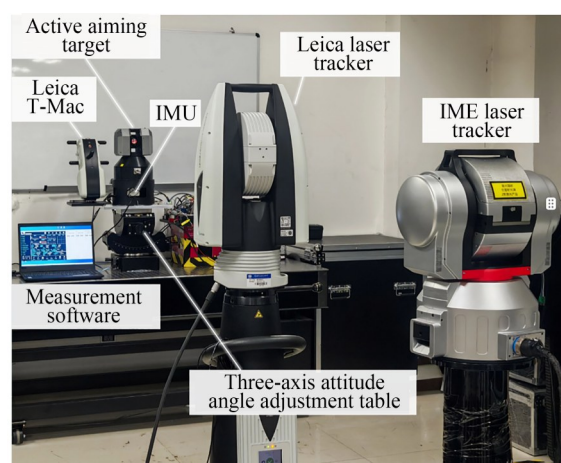


图9 姿态测量精度验证实验

Fig. 9 Experimental validation of attitude accuracy

通过分析姿态测量精度的比对结果可知,应用主动对准靶标和相应的标定及解算方法进行姿态测量,在 3 m 处和 15 m 处与 Leica T-MAC 姿态角测量的绝对偏差最大值分别为 0.061° 和 0.083° , 均方根值分别为 0.027° 和 0.030° 。

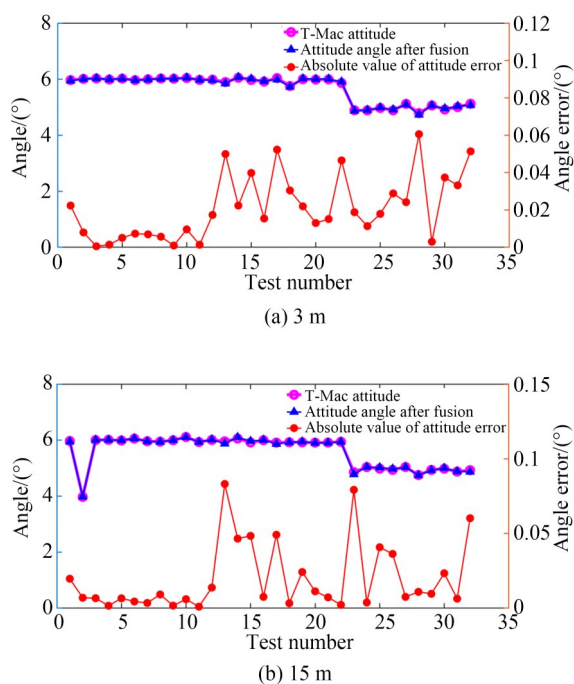


图10 姿态测量精度实验结果对比

Fig. 10 Comparison of attitude measurement results

从上述测试结果可以看出,姿态测量偏差较大的点主要位于测量过程中后段,即滚转、俯仰运动阶段。在本文姿态测量模型中,俯仰角、滚转角主要与IMU的测量数据有关,后续考虑进一步校正IMU器件误差参数,并采用优化姿态融合滤波算法等方式进一步改善姿态测量精度。

在上述姿态精度比对实验过程中,主动对准靶标在被测对象姿态多维度、大范围调节时始终保持对激光跟踪仪主机的连续跟踪测量状态,测量过程无需人工介入进行断光续接等操作。这一特性使得该系统可以更好地适应工业

现场自动测量的应用需求,具有良好的应用前景。

5 结 论

本文从大尺寸高端装备制造质量控制对于高精度、大范围的姿态测量应用需求出发,设计了面向激光跟踪仪的主动对准姿态测量靶标,根据光束矢量和重力矢量约束,提出了融合激光跟踪仪、IMU传感器和光栅编码器测量数据的靶标姿态解算模型,分析了用于姿态求解的参数矩阵、误差校正神经网络参数标定方法,开展了参数标定和精度比对实验。实验结果表明,主动式姿态测量靶标在3 m和15 m处与Leica T-MAC传感器的姿态测量结果绝对偏差极值分别为 0.061° 和 0.083° ,均方根值分别为 0.027° 和 0.030° 。该系统姿态测量精度能够满足典型的大尺寸部件装配应用需要,并且具备测量范围大、测量过程不易断光等特点,能够有效提升工业现场的测量效率与自动化水平。

作者贡献声明:

程智:方法研究,实验数据分析,论文构思和撰写;

董登峰:方法设计指导,论文审核;

李洋:模型分析与实验设计,论文审核;

邱启帆:数据采集程序设计;

王建国:实验验证;

霍汉林:实验装置设计;

黄云鹏:方法调研;

周维虎:方案可行性分析,论文审核。

参考文献:

- [1] 唐晓,阮少伟,高捷,等. 激光跟踪仪测量系统主动靶球装置设计及测试[J]. 轻工机械, 2024, 42(1): 21-26, 35.
TANG X, RUAN SH W, GAO J, *et al.* Design and test of active spherically mounted retroreflector device of laser tracker measuring system[J]. *Light Industry Machinery*, 2024, 42(1): 21-26, 35. (in Chinese)

- [2] 高凯. 基于激光跟踪仪的六自由度动态测量方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
GAO K. *Research on 6-DOF Dynamic Measurement Method Based on the Laser Tracker*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese)
- [3] 魏振忠,冯广堃,周丹雅,等. 位姿视觉测量方法及应用综述[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 0312010.
WEI ZH ZH, FENG G K, ZHOU D Y, *et al.* A review of position and orientation visual measure-

- ment methods and applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(3): 0312010. (in Chinese)
- [4] 高扬. 面向大型精密工程的六自由度测量技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
GAO Y. *Research on 6-DOF Measurement in Large-Scale Precision Engineering* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese)
- [5] 石照耀, 张白, 林家春, 等. 特大型齿轮激光跟踪在位测量原理及关键技术[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(9): 2340-2347.
SHI ZH Y, ZHANG B, LIN J CH, *et al.* Principle and critical technology of in-site measurement system with laser tracker for mega gear[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2340-2347. (in Chinese)
- [6] 江权. 机械手末端位姿视觉跟踪测量方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
JIANG Q. *Research on Vision Tracking and Measurement Method for End Position and Pose of Manipulator* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [7] 王珊, 张滋黎, 董登峰, 等. 激光跟踪仪几何结构误差标定及修正[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(11): 1639-1652.
WANG SH, ZHANG Z L, DONG D F, *et al.* Calibration and correction of geometric errors in laser tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(11): 1639-1652. (in Chinese)
- [8] 许航, 熊芝, 张刘港, 等. 基于加权最小二乘的激光跟踪姿态角测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(6): 353-358.
XU H, XIONG ZH, ZHANG L G, *et al.* Laser tracking attitude angle measurement method based on weighted least squares [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(6): 353-358. (in Chinese)
- [9] 周道德, 高豆豆, 董登峰, 等. 基于深度学习和PnP模型的激光跟踪仪自动姿态测量[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(9): 1047-1057.
ZHOU D D, GAO D D, DONG D F, *et al.* Automatic attitude measurement of laser tracker based on deep learning and PnP model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(9): 1047-1057. (in Chinese)
- [10] 熊芝, 许航, 张刘港, 等. 基于加权加速正交迭代算法的相机位姿估计[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(10): 183-191.
XIONG ZH, XU H, ZHANG L G, *et al.* Pose estimation of camera based on weighted accelerated orthogonal iterative algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(10): 183-191. (in Chinese)
- [11] 高豆豆, 董登峰, 邱启帆, 等. 面向激光跟踪测量的大范围高精度姿态测量[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(7): 976-986.
GAO D D, DONG D F, QIU Q F, *et al.* Large range automatic attitude measurement method for laser tracking measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(7): 976-986. (in Chinese)
- [12] ZHAO Z X, ZHU Y C, LI Y H, *et al.* Multi-camera-based universal measurement method for 6-DOF of rigid bodies in world coordinate system [J]. *Sensors*, 2020, 20(19): 5547.
- [13] 宗意凯, 苏淑靖, 高瑜宏. 基于多源IMU和粒子滤波优化的姿态融合算法[J]. *仪表技术与传感器*, 2023(8): 88-95.
ZONG Y K, SU SH J, GAO Y H. Attitude fusion algorithm based on multi-source IMU and particle filter optimization [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2023(8): 88-95. (in Chinese)
- [14] 程为彬, 陈焯姣, 张夷非, 等. IMU姿态误差均衡校正模型与验证[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(9): 202-213.
CHENG W B, CHEN ZH J, ZHANG Y F, *et al.* Balance correction and verification of IMU posture error [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(9): 202-213. (in Chinese)
- [15] LIN J R, XIN R K, SHI S D, *et al.* An accurate 6-DOF dynamic measurement system with laser tracker for large-scale metrology [J]. *Measurement*, 2022, 204: 112052.
- [16] 伍楚奇, 熊芝, 许航, 等. 基于视觉正交迭代法改进的激光跟踪姿态测量[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(7): 63-71.
WU CH Q, XIONG ZH, XU H, *et al.* Laser tracking attitude measurement based on improved visual orthogonal iterative method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(7): 63-71. (in Chinese)
- [17] 邱启帆, 程智, 高豆豆, 等. 基于准直激光的跟踪合作目标小范围二维姿态测量方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(5): 188-196.

QIU Q F, CHENG ZH, GAO D D, *et al.* Research on the small-range two-dimensional attitude measurement method of tracked cooperative target based on collimating laser[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(5): 188-196. (in

Chinese)

[18] XIN R K, LIN J R, SHI S D, *et al.* Study on dynamic and accurate 6-DOF measurement system and approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(6): 6356-6365.

作者简介:



程 智(1991—),女,江苏淮安人,博士研究生,助理研究员,2013年于吉林大学获得学士学位,2016年于中国科学院大学获得硕士学位,主要从事精密测量及自动控制方面的研究。E-mail: chengzhi@ime.ac.cn

导师简介:



周维虎(1962—),男,安徽无为,人,博士,研究员,博士生导师,1983年、2000年于合肥工业大学分别获得学士和博士学位,主要从事光电检测、光电系统总体设计与集成测试、光电精密测量技术与仪器等方面的研究。E-mail: zhouweihu@ime.ac.cn