

多线结构光传感器组合的空间位姿测量方法

谭志林 马国鹭 补晨熹 林静

Spatial pose measurement method with combined multi-line structured light sensors

TAN Zhilin, MA Guolu, BU Chenxi, LIN jing

引用本文:

谭志林, 马国鹭, 补晨熹, 等. 多线结构光传感器组合的空间位姿测量方法[J]. 应用光学, 2026, 47(1): 196–201. DOI: 10.5768/JAO202647.0103003

TAN Zhilin, MA Guolu, BU Chenxi, et al. Spatial pose measurement method with combined multi-line structured light sensors[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 196–201. DOI: 10.5768/JAO202647.0103003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202647.0103003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于机械式拼接的结构光扫描测量方法

Structured light scanning measurement method based on mechanical splicing

应用光学. 2021, 42(5): 884–890 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0503002>

基于平面互补靶标的线结构光标定系统

Line structured light calibration system based on planar complementary target

应用光学. 2023, 44(2): 371–379 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0203002>

玻璃影响下的线结构光测量系统模型

Model of line structured light measurement system under influence of glass

应用光学. 2025, 46(5): 1097–1103 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0503005>

大尺度阻隔空间姿态组合测量方法研究

Attitude combined measurement method in large-scale obstructed space

应用光学. 2022, 43(1): 95–99 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0103004>

基于事件相机传感器的时序编码结构光系统设计

Design of temporal coded structured light system based on event-based camera sensor

应用光学. 2024, 45(5): 885–895 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501002>

高分辨率微线结构光测量系统设计

Design of high-resolution thin line structured light measurement system

应用光学. 2023, 44(5): 1073–1079 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0503003>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2026) 01-0196-06

引用格式: 谭志林, 马国鹭, 补晨熹, 等. 多线结构光传感器组合的空间位姿测量方法 [J]. 应用光学, 2026, 47(1): 196-201.

TAN Zhilin, MA Guolu, BU Chenxi, et al. Spatial pose measurement method with combined multi-line structured light sensors[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 196-201.



在线阅读

多线结构光传感器组合的空间位姿测量方法

谭志林, 马国鹭, 补晨熹, 林 静

(西南科技大学 制造过程测试技术教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010)

摘要: 针对非合作目标空间位姿和关键几何量的综合测量需求, 采用多线结构光传感器组合方法, 结合传感器轴向对称布局特征, 构建组合测量系统的坐标映射方程, 建立姿态转换关系, 实现对三个线结构光传感器测量的二维信息融合。搭建五自由度测试验证平台, 基于 Levenberg-Marquardt (L-M) 算法完成组合测量系统标定, 获得组合测量系统的刚性变换关系。开展圆柱型被测目标的验证对比试验, 实验结果表明: 在线结构光传感器的量程范围内, 所搭建组合测量系统的位置测量精度优于 ± 0.1 mm, 姿态测量精度优于 $\pm 0.05^\circ$, 被测关键几何量偏差小于 0.5 mm。该组合测量方法可适配被测对象为非合作目标的场景, 为类似场景的综合测量任务提供了一种可借鉴的解决方法。

关键词: 组合测量; 空间位姿测量; 线结构光传感器; 非合作目标

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202647.0103003

Spatial pose measurement method with combined multi-line structured light sensors

TAN Zhilin, MA Guolu, BU Chenxi, LIN jing

(Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process (Ministry of Education), Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Addressing the demand for comprehensive measurement of spatial pose and key geometric quantities of non-cooperative targets, a multi-line structured light sensor configuration was adopted. Leveraging the sensors' axial symmetry layout, coordinate mapping equations for the combined measurement system were constructed, and pose transformation relationships were established to fuse 2D measurement data from the three line structured light sensors. A five-degree-of-freedom test platform was built, and the system was calibrated via the Levenberg-Marquardt (L-M) algorithm to obtain its rigid transformation relationships. Verification experiments were conducted on cylindrical targets. Results demonstrated that within the measurement range of the sensors, the combined system achieved a position measurement accuracy better than ± 0.1 mm, a pose measurement accuracy better than $\pm 0.05^\circ$, and deviations in key geometric quantities were below 0.5 mm. This scheme is adaptable to scenarios involving non-cooperative targets and provides a referential solution for similar comprehensive measurement tasks.

Key words: combined measurement; spatial pose measurement; line structured light sensors; non-cooperative targets

收稿日期: 2025-07-22; 修回日期: 2025-09-05

基金项目: 国家自然科学基金 (61505169)

第一作者: 谭志林, E-mail: 1012628237@qq.com

通信作者: 马国鹭, E-mail: maguolu999@163.com

引言

对空间相对位姿的高精、高效、高可靠测量,在现代工业的装配定位、质量检测 and 状态监测等环节中至关重要^[1],特别是在智能装配^[2]、增强现实^[3]、数字孪生^[4]和编队飞行^[5]等领域中需求极为广泛。

目前,空间相对位姿感知的方式主要为基于光学的激光雷达、3D相机、2D轮廓仪等^[6],以及基于电磁波的室内全球定位系统(indoor global positioning system, iGPS)、超宽带(ultra-wide band, UWB)等^[7]单一传感类别的经典测量方式。在特定场景下单一传感器在场景适应、覆盖范围和精度等方面存在局限性。因此,多类别、多传感器融合成为解决特定场景下空间相对位姿测量问题的有效方式。对航空工业发动机部件自适应装配^[8],船舶分段高精度吊装对接^[9]等场景下相对位置的精准、可靠测量意义重大。

在单个传感器进行空间位姿测量方面,孙典奇等^[10]针对空间非合作目标的位姿测量,基于TOF(time-of-flight)相机利用灰度图光强的特征信息实现了标定精度的提高;李志宇等^[11]基于线结构光传感器原理,建立了对空间圆位姿针对性的解算方法,获得了较好的测量鲁棒性。在多传感器组合测量方面,ZUO X X等^[12]通过对激光雷达、惯导和视觉信息的深度融合,解决了空间测量范围和精度的矛盾;刘士蕊等^[13]针对管路法兰特定场景需求,通过多激光测距传感器组合,基于SQPNP算法实现了对管路法兰的高精度位姿实时评估;陆野等^[14]针对空间阻隔场景中的非合作目标,融合线结构光、激光测距传感和倾角仪等多种传感信息,实现了狭窄遮挡场景下目标空间位姿的精准测量。上述测量方法,无论是采用单个传感器还是进行组合测量,均较好地实现了特定场景下的空间相对位姿测量,但测量信息中未涵盖被测目标物的几何结构尺寸。

在航空发动机转子、机匣等类圆柱部件的精密装配过程中,实现精准装配与自适应调控的关键在于同步获取部件的空间位姿与外形尺寸信息。目前工业上常采用3D相机来完成该测量任务,但该方法依然存在测量精度有限、鲁棒性不高及环境抗干扰能力不足等问题。因此,本文针对典型圆柱结构的位姿和几何尺寸测量问题,采用同一类别的线结构光传感器进行空间布局,通过基于空间布局的数据融合,构建传感器坐标

系与组合测量系统坐标系的对应关系,最终实现对目标空间位姿和尺寸信息的高精度实时测量,为此类场景提供了一种解决方法。

1 基于多线结构光传感器的位姿测量原理

三个线结构光传感器按照轴向对称布局装夹在刚性工装上,如图1所示。其中, $o_0x_0y_0z_0$ 为笛卡尔参考坐标系,组合测量系统坐标系为 $o_Lx_Ly_Lz_L$,被测对象的坐标系为 $o_x x_y z_x$,建立的各线结构光传感器自身的局部坐标系分别为 $o_1x_1y_1z_1$ 、 $o_2x_2y_2z_2$ 和 $o_3x_3y_3z_3$ 。

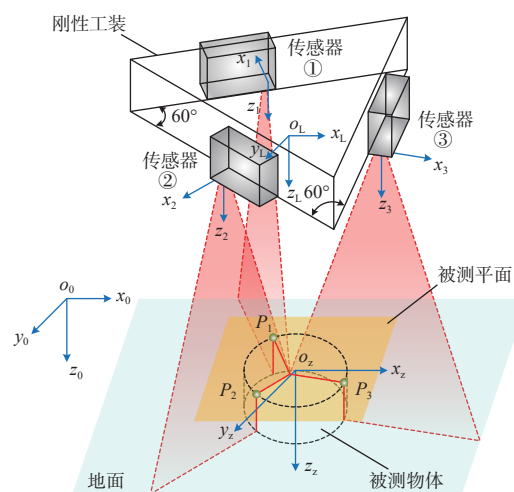


图1 多线结构光传感器组合的空间圆位姿测量系统

Fig. 1 Spatial pose measurement system with combined multi-line structured light sensors

被测对象置于组合测量系统下方,各线结构光传感器发射的激光线与被测圆外轮廓相交,形成三个边缘点 P_1 、 P_2 、 P_3 。通过三个线结构光传感器可获取三个边缘点在各线结构光传感器坐标系下的空间坐标 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $P_3(x_3, y_3, z_3)$,其中 y_1 、 y_2 和 y_3 为定值。根据坐标变换,建立 P_1 、 P_2 、 P_3 在组合测量系统下的坐标对应关系,如式(1)所示:

$$\begin{cases} x_i^L = \cos\beta_i \cos\gamma_i \cdot x_i + \cos\beta_i \sin\gamma_i \cdot y_i - \sin\beta_i \cdot z_i + x_{d,i} \\ y_i^L = (\sin\varphi_i \sin\beta_i \cos\gamma_i - \cos\varphi_i \sin\gamma_i) x_i + \\ \quad (\sin\varphi_i \sin\beta_i \sin\gamma_i + \cos\varphi_i \cos\gamma_i) y_i + \\ \quad \sin\varphi_i \cos\beta_i \cdot z_i + y_{d,i} \\ z_i^L = (\cos\varphi_i \sin\beta_i \cos\gamma_i + \sin\varphi_i \sin\gamma_i) x_i + \\ \quad (\cos\varphi_i \sin\beta_i \sin\gamma_i - \sin\varphi_i \cos\gamma_i) y_i + \\ \quad \cos\varphi_i \cos\beta_i \cdot z_i + z_{d,i} \end{cases} \quad (1)$$

式中： φ_i 、 β_i 与 γ_i 分别为各线结构光传感器坐标系变换到组合测量系统坐标系时 x 、 y 、 z 轴的旋转量； x_i 、 y_i 、 z_i 为边缘点相对于各线结构光传感器下的坐标； $x_{d,i}$ 、 $y_{d,i}$ 、 $z_{d,i}$ 为各线结构光传感器坐标系原点在组合测量系统坐标系下的空间坐标； x_i^L 、 y_i^L 、 z_i^L 为边缘点相对于组合测量系统坐标系下的坐标；上标L用于标识该坐标值定义于组合测量坐标系 $o_Lx_Ly_Lz_L$ ，下标 i 则表征其源自第 i 个线结构光传感器，相应地 $i=1, 2, 3$ 。

被测圆圆心在组合测量系统局部坐标系下的空间坐标为 $O(x, y, z)$ ，通过空间圆的约束条件（空间圆上任意一点到圆心的距离均等于该圆的半径，且空间圆上所有点和圆心都位于同一平面内）获得被测圆心坐标的对应关系如式(2)所示：

$$\begin{cases} (x-x_1^L)^2+(y-y_1^L)^2+(z-z_1^L)^2=r^2 \\ (x-x_2^L)^2+(y-y_2^L)^2+(z-z_2^L)^2=r^2 \\ (x-x_3^L)^2+(y-y_3^L)^2+(z-z_3^L)^2=r^2 \\ [(y_2^L-y_1^L)(z_3^L-z_1^L)-(z_2^L-z_1^L)(y_3^L-y_1^L)](x-x_1^L)+ \\ [(z_2^L-z_1^L)(x_3^L-x_1^L)-(x_2^L-x_1^L)(z_3^L-z_1^L)](y-y_1^L)+ \\ [(x_2^L-x_1^L)(y_3^L-y_1^L)-(y_2^L-y_1^L)(x_3^L-x_1^L)](z-z_1^L)=0 \end{cases} \quad (2)$$

通过球面方程，可获得被测圆圆心在组合测量系统局部坐标系下的空间位置 $O(x, y, z)$ 和被测圆的几何结构尺寸半径 r 。

针对被测圆的两个角度，在被测物体坐标系 $o_zx_zy_zz_z$ 中，将法向量 \mathbf{n} 绕 x 轴顺时针旋转角度定义为俯仰角 α_z ，绕 y 轴顺时针旋转角度定义为滚动角 θ_z 。由 P_1 、 P_2 、 P_3 在测量系统坐标系下的坐标 P_1^L 、 P_2^L 、 P_3^L 可得三点构成平面的单位法向量 \mathbf{n} ：

$$\mathbf{n} = \frac{(P_2^L - P_1^L) \times (P_3^L - P_1^L)}{|(P_2^L - P_1^L) \times (P_3^L - P_1^L)|} = (n_x, n_y, n_z) \quad (3)$$

式中： n_x 、 n_y 、 n_z 分别为平面法向量 \mathbf{n} 在 x 、 y 、 z 轴方向的分量。

在 $y_zo_zz_z$ 平面内，被测平面的单位法向量 \mathbf{n} 从原点 o_z 指向点 A ， B 为 A 在 z_z 轴上的投影，如图2(a)所示。 $o_zA=1$ ， $AB=|n_y|$ ，由几何关系得到俯仰角 α_z 的表达式：

$$\alpha_z = \arcsin\left(\frac{AB}{o_zA}\right) = \arcsin(|n_y|) \quad (4)$$

如图2(b)所示，被测平面单位法向量 \mathbf{n}' 从原点 o_z 指向点 C ， D 为 C 在 $x_zo_zz_z$ 平面上的投影，投影向量 o_zD 为 $\mathbf{n}_{xz} = (n_x, n_z)$ ，可得：

$$|n_{xz}| = \sqrt{|n_x|^2 + |n_z|^2} = \sqrt{1 - |n_y|^2} \quad (5)$$

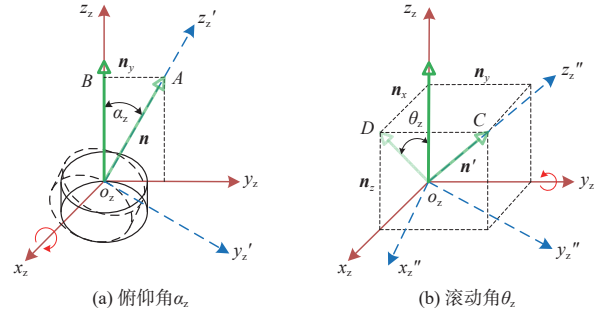


图2 被测圆姿态角空间几何关系

Fig. 2 Spatial geometric relationship of pose angles of the measured circle

在 $x_zo_zz_z$ 平面上，投影向量 \mathbf{n}_{xz} 与 z_z 轴正方向的夹角即为滚动角 θ_z ，考虑到旋转方向， $\sin\theta_z$ 等于 \mathbf{n}_{xz} 模长与投影向量 \mathbf{n}_{xz} 模长的比值，结合式(5)可得：

$$\theta_z = \arcsin\left(-\frac{|n_x|}{\sqrt{1 - |n_y|^2}}\right) \quad (6)$$

2 实验验证

选用三台测量线性度为 $26 \mu\text{m}$ 的LLT30x2-200型线结构光传感器，构成组合测量系统，搭建行程为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 的五轴标定平台，标定平台的三个轴向的移动精度均为 $10 \mu\text{m}$ ，标定平台角度测量采用测量精度为 0.001° 的北微BW-VG500C型二维倾角传感器。对比实验采用迈尔威视M4 Pro型3D相机与本文方法进行对比。测试验证对象为铝合金圆柱，其半径为 80 mm ，高度为 80 mm ，搭建的实验平台如图3所示。

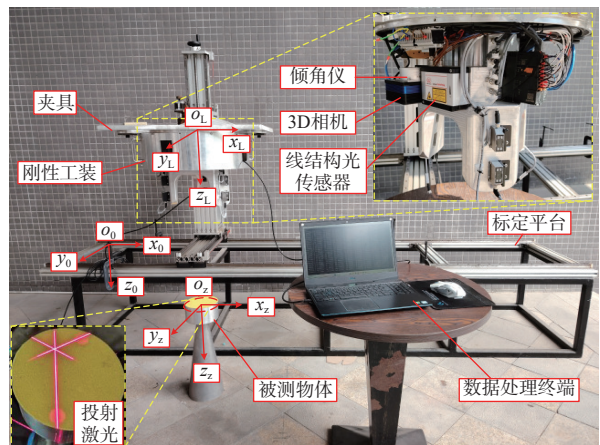


图3 搭建的实验平台

Fig. 3 Established experimental platform

为了实现对测量系统与参考坐标系间旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 的求解, 建立测量系统坐标系 (L 系, C_L) 到笛卡尔参考坐标系 (O 系, C_0) 的刚性变换关系, 如式(7)所示:

$$C_0 = RC_L + T \quad (7)$$

通过夹具刚性连接标定平台与测量工装, 利用倾角仪调平, 确保基准面法向量一致。移动测量装置至 9 个不共线的预设点位, 经 8 次重复测量取均值获取圆心坐标数据。将标定平台的示数和测量的坐标数据代入式(7), 采用 L-M 算法求解该超定方程组^[15], 获得标定的平移矩阵 $T = \begin{bmatrix} -13.529 & 3.440 & 162.845 \end{bmatrix}^T$, 旋转矩阵 R 为

$$R = \begin{bmatrix} -0.852 & 0.518 & 0.039 \\ -0.519 & -0.855 & -0.025 \\ 0.021 & -0.041 & 0.999 \end{bmatrix} \quad (8)$$

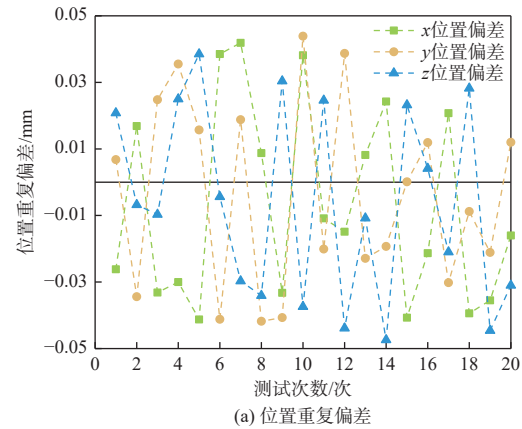
基于组合测量系统的标定旋转矩阵 R 和平移矩阵 T , 结合三台线结构光传感器的数据组, 通过建立的坐标变换关系式(2)、式(4)、式(6), 获得组合测量系统与五自由度标定平台的代表性测量结果, 如表 1 所示。

表 1 组合测量系统位姿及几何量偏差

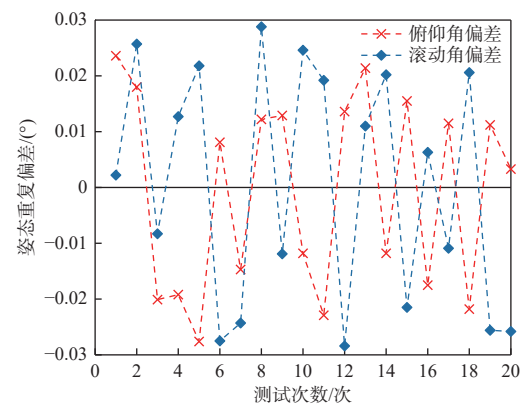
Table 1 Pose and geometric quantity deviation of combined measurement system

位置偏差/mm			姿态偏差/(°)		几何量偏差/mm
x	y	z	俯仰角 α_z	滚动角 θ_z	半径 r
0.032	-0.055	0.027	0.023	-0.021	0.448
-0.018	-0.009	-0.031	-0.018	-0.038	-0.123
-0.035	-0.023	0.078	-0.042	0.007	0.235
-0.042	0.015	-0.067	-0.009	-0.045	-0.149
0.029	-0.053	0.036	0.041	0.013	0.368
-0.011	0.038	-0.025	-0.048	0.029	-0.317
0.058	-0.069	-0.072	0.015	-0.043	0.226
-0.035	0.021	-0.079	-0.027	-0.005	-0.411
0.017	0.086	0.041	0.023	0.018	-0.218

组合测量系统圆心位置坐标偏差量优于 ± 0.1 mm (3σ , σ 为标准差), 其中最大偏差和平均偏差分别为 0.086 mm 和 0.041 mm。姿态偏差量优于 $\pm 0.05^\circ$ (3σ), 最大偏差和平均偏差分别为 0.048° 和 0.026° 。几何量偏差优于 0.5 mm (3σ), 最大偏差和平均偏差分别为 0.448 mm 和 0.277 mm。通过 20 次重复测量, 空间位置和姿态标准差分别为 0.028 mm 和 0.017° , 结果如图 4 所示。



(a) 位置重复偏差



(b) 姿态重复偏差

图 4 组合测量系统重复试验位姿偏差曲线

Fig. 4 Pose deviation curve of repeat test on combined measurement system

为进一步验证本文方法的有效性, 将其与基于 3D 相机的传统测量方法进行对比。在两者重叠的有效测量区域中, 选择多个空间已知点位对目标圆柱进行测量。用测得的半径值作为测量精度的评价标准, 实验结果如图 5 所示。结果表明, 本文方法相较于传统方法, 测量精度有较大的提升, 且测量频率更高。

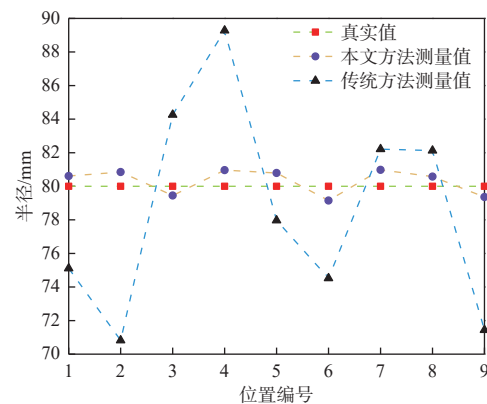


图 5 对比实验结果

Fig. 5 Comparative experimental results

3 结论

为满足典型结构件空间位姿和关键几何量的综合测量需求,本文提出了一种基于多线结构光传感器的测量方法。采用同一类别多个传感器进行空间布局的方式,基于坐标映射模型进行数据融合,实现了对非合作目标综合信息高精度、高效率、高鲁棒性的测量。在此基础上,对传感器外参进行了标定。通过圆柱型被测目标的验证对比试验,得到组合测量系统的位置与姿态测量精度分别优于 0.1 mm 和 0.05°,被测几何量偏差优于 0.5 mm。重复性实验证明该方法具有较高的鲁棒性。该组合测量方法可很好地适应被测量对象为非合作目标的场景,能为类似场景的综合测量提供一种可借鉴的解决方法。未来研究将拓展至非规则结构件的位姿测量领域。

参考文献:

- [1] ZHU J G, YE S H, YANG X Y, et al. On-line industrial 3D measurement techniques for large volume objects[J]. *Key Engineering Materials*, 2005, 295: 423-430.
- [2] CHEN T, LI C H, XIAO H, et al. A review of digital twin intelligent assembly technology and application for complex mechanical products[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 127(9): 4013-4033.
- [3] 韩玉仁, 李铁军, 杨冬, 等. 增强现实中三维跟踪注册技术概述[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(21): 25-34.
HAN Yuren, LI Tiejun, YANG Dong, et al. Overview of 3D tracking registration technology in augmented reality[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(21): 25-34.
- [4] 侯正航, 何卫平. 基于数字孪生的飞机装配状态巡检机器人的建模与控制[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(4): 981-989.
HOU Zhenghang, HE Weiping. Modeling and control of digital twin-based aircraft assembly state inspection robot[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(4): 981-989.
- [5] CAI Y K, LI Y C, WANG Z K. Real-time high-precision baseline measurement of satellite formation flying based on GNSS[J]. *Advances in Space Research*, 2024, 73(10): 5171-5187.
- [6] 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): 135-167.
WEI Zhenzhong, FENG Guangkun, ZHOU Danya, et al. A review of position and orientation visual measurement methods and applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(3): 135-167.
- [7] STEFANONI M, KOVÁCS I, SARCEVIC P, et al. A survey on the main techniques adopted in indoor and outdoor localization[J]. *Electronics*, 2025, 14(10): 2069.
- [8] YANG R Z, HUANG J Z, CHEN Z, et al. Measurement and optimization method for aero-engine rotors based on binocular multi-line laser sensing and virtual assembly[J]. *Measurement*, 2025, 242: 115808.
- [9] 李瑞, 张帆, 刘玉君, 等. 计算机辅助船舶分段吊装方案设计系统[J]. *计算机集成制造系统*, 2013, 19(8): 1942-1947.
LI Rui, ZHANG Fan, LIU Yujun, et al. Design system for ship block lifting with computer aided[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2013, 19(8): 1942-1947.
- [10] 孙典奇, 段慧仙, 裴浩东, 等. 基于 TOF 相机的空间非合作目标位姿测量方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(22): 2212003.
SUN Dianqi, DUAN Huixian, PEI Haodong, et al. Pose measurement method of space non-cooperative targets based on TOF camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(22): 2212003.
- [11] 李志宇, 林嘉睿, 孙岩标, 等. 一种基于线结构光传感器的圆位姿测量方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(15): 99-108.
LI Zhiyu, LIN Jiarui, SUN Yanbiao, et al. A method for measuring circular pose based on line structured light sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 99-108.
- [12] ZUO X X, YANG Y L, GENEVA P, et al. LIC-fusion 2.0: LiDAR-inertial-camera odometry with sliding-window plane-feature tracking[C]//2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2020: 5112-5119.
- [13] 刘士蕊, 任永杰, 牛志远, 等. 基于三点定心的管路法兰高精度位姿测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2025, 62(6): 145-154.
LIU Shirui, REN Yongjie, NIU Zhiyuan, et al. High-precision pose measurement method for pipeline flanges based on three-point centering[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2025, 62(6): 145-154.
- [14] 陆野, 马国鹭, 曾国英, 等. 遮挡区域空间位姿的多传感组合测量方法研究[J]. *应用光学*, 2020, 41(3): 565-570.
LU Ye, MA Guolu, ZENG Guoying, et al. Research on

- multi-sensor combination method for estimating relative pose[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(3): 565-570.
- [15] 张淑敏, 周文祥, 张明远, 等. 基于 L-M 算法的五连杆车轮外形测量仪参数标定[J]. *工具技术*, 2016, 50(7): 103-106.
- ZHANG Shumin, ZHOU Wenxiang, ZHANG Mingyuan, et al. Parameter calibration of five-bar wheel profile measuring instrument based on L-M algorithm[J]. *Tool Engineering*, 2016, 50(7): 103-106.