

基于移动机器人场景规划的动态位姿测量精度评估技术

李宁宁 胡丙华 陈海洋

Dynamic pose measurement accuracy evaluation technology based on mobile robot scene planning

LI Ningning, HU Binghua, CHEN Haiyang

引用本文:

李宁宁, 胡丙华, 陈海洋. 基于移动机器人场景规划的动态位姿测量精度评估技术[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1063–1072. DOI: 10.5768/JAO202546.0503001

LI Ningning, HU Binghua, CHEN Haiyang. Dynamic pose measurement accuracy evaluation technology based on mobile robot scene planning[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1063–1072. DOI: 10.5768/JAO202546.0503001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0503001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于语义先验和几何约束的动态场景SLAM算法

SLAM algorithm of dynamic environment based on semantic prior and geometric constraints

应用光学. 2022, 43(2): 269–277 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0202005>

基于动态目标检测的视觉SLAM优化算法

Visual SLAM optimization algorithm based on dynamic object detection

应用光学. 2025, 46(1): 102–111 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0102002>

基于视觉SLAM和目标检测的语义地图构建

Semantic SLAM based on visual SLAM and object detection

应用光学. 2021, 42(1): 57–64 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0102002>

基于注意力残差编解码网络的动态场景图像去模糊

Image deblurring of dynamic scene based on attention residual CODEC network

应用光学. 2021, 42(4): 685–690 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0402008>

指向精度对光学姿态测量精度的影响分析

Influence of optical axis pointing error on optical pose measurement accuracy

应用光学. 2023, 44(2): 365–370 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0203001>

基于双目视觉的大型高反光构件测量系统

Measurement system of large-scale high reflective component based on binocular vision

应用光学. 2021, 42(4): 577–585 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 05-1063-10

引用格式: 李宁宁, 胡丙华, 陈海洋. 基于移动机器人场景规划的动态位姿测量精度评估技术 [J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1063-1072.

LI Ningning, HU Binghua, CHEN Haiyang. Dynamic pose measurement accuracy evaluation technology based on mobile robot scene planning[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1063-1072.



在线阅读

基于移动机器人场景规划的动态位姿 测量精度评估技术

李宁宁, 胡丙华, 陈海洋

(中国飞行试验研究院 技术中心, 陕西 西安 710089)

摘 要: 目前, 在动态视觉测量任务执行过程中, 主要采用理论分析与静态验证的方法进行视觉测量数据的精度评估, 该方法难以克服动态视觉测量任务执行过程中, 误差因素对测量结果的影响。因此, 设计构建了影像动态位姿测量精度评估系统。基于视觉测量原理和典型目标运动规律, 全面分析误差影响因子, 规划设计多种试验验证场景。基于移动机器人运动可控、实时动态位姿可获取以及高精度重复定位/定姿的特性, 完成目标运动的地面仿真。将移动机器人生成的基准数据与视觉测量获取的位姿数据进行对比, 实现误差溯源与定量分析, 为具体任务实施方案的优化设计、可行性论证与精度分析评估提供有效技术支撑。

关键词: 移动机器人; 动态位姿; 精度评估; 动态测试

中图分类号: TN94; TP242.6

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0503001

Dynamic pose measurement accuracy evaluation technology based on mobile robot scene planning

LI Ningning, HU Binghua, CHEN Haiyang

(Technology Center, Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: Currently, the method of theoretical analysis and static verification is mainly used to evaluate the accuracy of visual measurement data in dynamic visual measurement tasks, which is inadequate for assessing the impact of error factors on measurement results during dynamic visual measurement processes. To address the limitation, this study designed and constructed an image dynamic pose measurement accuracy evaluation system. Based on the visual measurement principle and typical target motion patterns, the system comprehensively analyzed the error influence factors, planned and designed diverse experimental scenarios. Leveraging the mobile robot's advantages, including controllable motion, real-time dynamic pose acquisition and high-precision repeated positioning/posing, a ground simulation of target motion was conducted. By comparing the benchmark data generated by the mobile robot with the pose data obtained through visual measurement, error tracing and quantitative analysis were achieved, which provided effective technical support for the optimization design, feasibility demonstration and accuracy evaluation of specific taskthe implementation plan.

Key words: mobile robot; dynamic pose; accuracy evaluation; dynamic test

引言

近年来, 动态视觉测量^[1]的应用越来越广泛,

通过对拍摄目标的影像数据进行识别、判读与计算, 获取运动目标的 6D 参数等测量数据^[2-3], 为被

收稿日期: 2025-01-24; 修回日期: 2025-05-07

基金项目: 国家自然科学基金 (52127809)

第一作者: 李宁宁, E-mail: 741708356@qq.com

测对象的设计定型提供直观有效的参考信息。

随着测试对象、测试环境、测试场景越来越复杂,试验对测量数据的精度、可靠性等要求越来越高。以标准长度和标准平面为基准的精度评估方法适用于静态与动态的距离评估,以全站仪测量为基准的精度评估方法适用于静态的距离以及位置评估,但均无法同时满足位置、姿态的动态精度评估。因此,本文提出基于移动机器人^[4]场景规划的动态位姿测量精度评估方法,利用“机械臂运动可控”的特性,控制机械臂模拟目标运动,搭建动态试验验证场景。利用“机械臂实时动态位姿可获取”的特性,实时采集机械臂末端动态位姿数据,提供动态基准数据。利用“机械臂重复定位精度优于0.02 mm,重复定姿精度优于0.15°”的高精度重复定位/定姿”的特性,完成目标的重复运动,最终实现测量方案的迭代优化。

1 方案设计

基于移动机器人场景规划的动态位姿测量精度评估总体的研究思路是:以目标的运动特性为依据,规划设计移动机器人的路径^[5],控制机器人完成预设轨迹运动,以机器人的实时运动位姿数据为基准数据,同时采集机器人末端运动目标的影像并进行解算,将解算结果与基准数据进行对比分析,根据评估准则^[6]完成精度评估。

主要包含如图1所示的设计、实施和处理分析三个阶段。在设计阶段,需要对被测对象的运动特性进行分析,根据其运动规律建立精度评估准则^[7],并结合测量环境和视觉测量误差影响因素^[8]进行场景规划设计。在实施阶段,首先,需要完成基于移动机器人场景规划的动态位姿测量精度评估系统搭建,机器人工具坐标系标定与运动学参数修正^[9],视觉测量系统内、外参数标定^[10],使视觉测量数据与机器人数据空间统一^[11-12]。然后,采用外部输入同步脉冲信号^[13],如图2所示,一路脉冲信号控制机械臂的运动与相机的触发,一路脉冲信号控制机械臂的采样频率,机械臂采样频率与高速相机帧率保持一致,实现机械臂位姿数据与高速相机数据的对准,再通过机器人编程,控制驱动机器人进行预定轨迹的运动^[14-15],采集机器人末端目标运动过程视频与位姿数据。在数据处理与分析阶段,首先,基于视觉测量原理计算运动目标位姿作为实测数据^[16-17],根据移动机器人运动学修正参数,计算与视觉测量数据空间统一的位姿数据作为基准数据。然后,将基于视觉测量设备获得的运动轨迹与基准数据进行对比分析,基于精度评估准则实现不同场景下的视觉测量精度评估。最后,根据不同场景下的视觉测量精度水平,验证不同影响因素对测量精度的影响和变化规律,获得满足测量精度需求的最优测量方案。

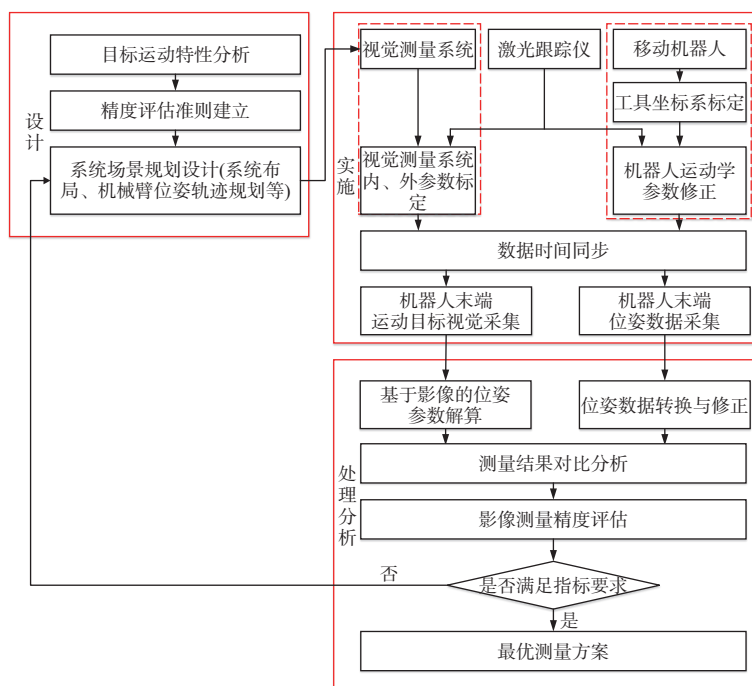


图1 基于移动机器人场景规划的动态位姿测量精度评估技术方案

Fig. 1 A technical scheme for dynamic pose measurement accuracy evaluation based on mobile robot scene planning

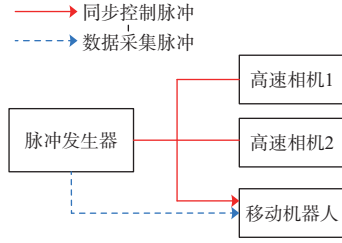


图2 机器人与高速摄像机的数据对准

Fig. 2 The robot aligns data with the high-speed camera

2 关键技术

2.1 移动机器人连续运动轨迹规划

为了模拟目标的连续运动,以目标关键点的位姿数据作为示教点,通过控制移动机器人末端的平移和旋转,实现位置与姿态的连续规划。

1) 位置路径规划。采用机器人直线运动模式,根据起始三维位置数据通过示教控制生成末端路径,图3为位置路径规划仿真效果。

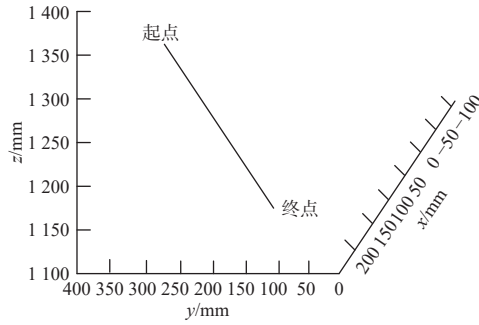


图3 位置路径规划仿真结果

Fig. 3 Simulation results of location and path planning

2) 姿态路径规划。基于单位四元数的姿态线性插值方法,拟合位姿示教点,获取机器人末端姿态轨迹参数,其轨迹生成过程如图4所示。

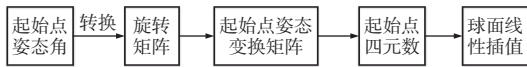


图4 姿态轨迹生成过程

Fig. 4 Pose trajectory generation process

设 q_1 和 q_2 为起始四元数和终点四元数:

$$q_1 = [s, [u, b, c]] = \left[\cos\left(\frac{\lambda}{2}\right), \sin\left(\frac{\lambda}{2}\right)\vec{v}_x, \sin\left(\frac{\lambda}{2}\right)\vec{v}_y, \sin\left(\frac{\lambda}{2}\right)\vec{v}_z \right]$$

$$q_2 = [w, [x, y, z]] = \left[\cos\left(\frac{\beta}{2}\right), \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\vec{v}_x, \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\vec{v}_y, \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\vec{v}_z \right] \quad (1)$$

式中: α 和 λ 为起始点和终点姿态沿着单位向量轴($\vec{v}_x, \vec{v}_y, \vec{v}_z$)旋转的角度; s 为 q_1 的标量部分; u, b, c 为

q_1 的矢量部分; w 为 q_2 的标量部分; x, y, z 为 q_2 的矢量部分。

将四元数表示为向量形式,由四元数乘法可得:

$$q_1 \otimes q_2 = \begin{bmatrix} s & -u & -b & -c \\ u & s & -c & b \\ b & c & s & -u \\ c & -b & u & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sw - ux - by - cz \\ uw + sx - cy + bz \\ bw + cx + sy - uz \\ cw - bx + uy + sz \end{bmatrix} \quad (2)$$

且 $P_{q_1} \cdot q_2 \triangleq q_1 \otimes q_2$, $P_{q_2} \cdot q_1 \triangleq q_2 \otimes q_1$, 其中, P_{q_1} 、 P_{q_2} 为线性变换矩阵:

$$P_{q_1} = \begin{bmatrix} s & -c & b & u \\ c & s & -u & b \\ -b & u & s & c \\ -u & -b & -c & s \end{bmatrix},$$

$$P_{q_2} = \begin{bmatrix} w & z & -y & x \\ -z & w & x & y \\ y & -x & w & z \\ -x & -y & -z & w \end{bmatrix} \quad (3)$$

因此,由姿态矩阵和单位四元数对三维矢量旋转的等效性,可求出与单位四元数 $q_1 = [s, [a, b, c]]$ 对应的姿态矩阵:

$$P = P_{q_1} P_{q_2} = \begin{bmatrix} 1 - 2(b^2 + u^2) & 2ub - 2sc & 2sb + 2uc & 0 \\ 2ub + 2sc & 1 - 2(u^2 + c^2) & -2su + 2bc & 0 \\ -2sb + 2uc & 2cu + 2bc & 1 - 2(u^2 + b^2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

采用球面插值方法进行姿态规划。将平面的插值推广到球面后点的姿态表示:

$$r = e(t)q_1 + f(t)q_2 \quad (5)$$

式中: r 为将平面插值推广到球面后点的姿态; e 和 f 分别为随着时间变化的插值系数;时间 t 的范围为 $(0, 1)$,插值系数表达式如下:

$$\begin{cases} e(t) = \frac{\sin((1-t)\gamma)}{\sin \gamma} \\ f(t) = \frac{\sin(t\gamma)}{\sin \gamma} \end{cases} \quad (6)$$

式中 γ 为旋转角度。

根据四元数基础知识,基于球面线性插值(spherical linear interpolation, Slerp)的计算如下:

$$f_{\text{Slerp}}(q_1, q_2, t) = \sin((1-t)\gamma) \cdot q_1 / \sin(\gamma) + \sin(t\gamma) / \sin(\gamma) \quad (7)$$

图5为姿态球面线性插值仿真效果。

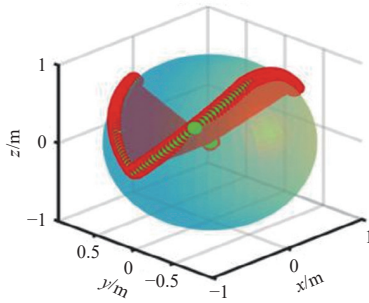


图5 姿态球面线性插值仿真结果

Fig. 5 The result of pose spherical linear interpolation simulation

2.2 基于激光跟踪仪测量的移动机器人标定

由于机械加工的精度、传动误差等的影响,移动机器人理论位姿与实际位姿之间存在误差,因此需要对其进行识别与补偿,以获取精确的动态基准数据。

1) 基于 DH(denavit-hartenberg)4 参数模型建立运动模型

在机器人位姿描述中,常用欧拉角表示运动姿态。设欧拉角为 η , φ , κ , 则两坐标之间的姿态关系旋转矩阵 $R(\eta, \varphi, \kappa)$ 为

$$R(\eta, \varphi, \kappa) = R(z, \varphi)R(y, \kappa)R(x, \eta) = \begin{bmatrix} n_x & o_x & g_x \\ n_y & o_y & g_y \\ n_z & o_z & g_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\varphi c\kappa & c\varphi s\kappa\eta - s\varphi c\eta & c\varphi s\kappa\eta + s\varphi s\eta \\ s\varphi c\kappa & s\varphi s\kappa\eta + c\varphi c\eta & s\varphi s\kappa\eta - c\varphi s\eta \\ -s\kappa & c\kappa\eta & c\kappa\eta \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $(n_x, n_y, n_z)^T, (o_x, o_y, o_z)^T, (g_x, g_y, g_z)^T$ 分别为机器人末端坐标系 x 轴、 y 轴和 z 轴在机器人基坐标系下的单位方向向量, 因此:

$$\begin{cases} \eta = \arctan 2(o_z, g_z) \\ \varphi = \arctan 2(-n_z, \sqrt{n_x^2 + n_y^2}) \\ \kappa = \arctan 2(n_y, n_x) \end{cases} \quad (9)$$

空间机械臂由杆件长度 a_i , 杆件扭转角 α_i , 杆件偏移量 d_i , 杆件回转角 θ_i , 建立空间机械臂 DH 坐标系, 如图 6 所示。相邻连杆间的变换矩阵为

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i \sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

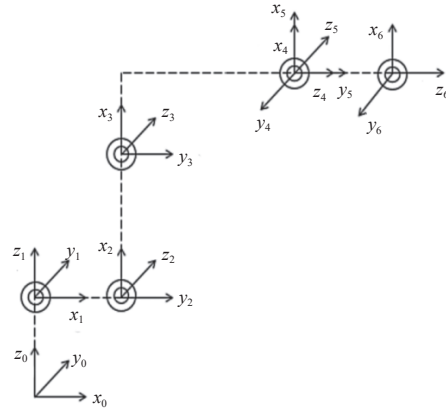


图6 空间机械臂 DH 坐标系

Fig. 6 DH coordinate of space manipulator

因此, 末端坐标系相对于基座坐标系的齐次变换矩阵如下:

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 T \quad (11)$$

2) 参数辨识

以 $\Delta\alpha_{i-1}$, $\Delta\alpha_{i-1}$, Δd_i , $\Delta\theta_i$ 表示连杆几何参数误差, 则相邻连杆之间的微分变换齐次矩阵为

$$d_i^{i-1}T = \frac{\partial {}^{i-1}T}{\partial \alpha_{i-1}} \Delta\alpha_{i-1} + \frac{\partial {}^{i-1}T}{\partial a_{i-1}} \Delta a_{i-1} + \frac{\partial {}^{i-1}T}{\partial d_i} \Delta d_i + \frac{\partial {}^{i-1}T}{\partial \theta_i} \Delta\theta_i \quad (12)$$

考虑变换 $\frac{\partial {}^{i-1}T}{\partial \alpha_{i-1}} = {}^{i-1}T Q_{\alpha_{i-1}}$, $Q_{\alpha_{i-1}}$ 为 DH 模型下坐标系 i 的微分位置误差, 则可得:

$$Q_{\alpha_{i-1}} = {}^{i-1}T^{-1} \frac{\partial {}^{i-1}T}{\partial \alpha} = \begin{bmatrix} 0 & -c\theta_i & -s\theta_i & -d_i s\theta_i \\ c\theta_i & 0 & -c\theta_i & -d_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & -d_i s\theta_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

同理可得 $Q_{a_{i-1}}, Q_{d_i}, Q_{\theta_i}$ 。从而有:

$$d_i^{i-1}T = {}^{i-1}T (Q_{\alpha_{i-1}} \Delta\alpha_{i-1} + Q_{a_{i-1}} \Delta a_{i-1} + Q_{d_i} \Delta d_i + Q_{\theta_i} \Delta\theta_i) {}^{i-1}T \Delta_i \quad (14)$$

式中, $\Delta_i = Q_{\alpha_{i-1}} \Delta\alpha_{i-1} + Q_{a_{i-1}} \Delta a_{i-1} + Q_{d_i} \Delta d_i + Q_{\theta_i} \Delta\theta_i$ 。

机器人运动学方程变为

$${}^0T_n + d_n^0T = \prod_{i=1}^n ({}^{i-1}T + d_i^{i-1}T) = \prod_{i=1}^n ({}^{i-1}T + {}^{i-1}T \Delta_i) \quad (15)$$

将式(15)展开并化简可得:

$$d_n^0T = \sum_{i=1}^n ({}^0T Q_{\alpha_{i-1}} {}^i T \Delta\alpha_{i-1} + {}^0T Q_{a_{i-1}} {}^i T \Delta a_{i-1} + {}^0T Q_{d_i} {}^i T \Delta d_i + {}^0T Q_{\theta_i} {}^i T \Delta\theta_i) \quad (16)$$

在式(16)中仅考虑位置误差分量并整理, 可得基于位置误差的标定方程:

$$\Delta_n^0 p = H \Delta l \quad (17)$$

式中: $\Delta_n^0 p$ 为末端位置误差; Δl 为模型参数; H 为系数矩阵, 且:

$$\begin{aligned} \Delta l &= (\Delta\alpha_0 \quad \Delta a_0 \quad \Delta d_1 \quad \Delta\theta_1 \quad \cdots \quad \Delta\alpha_{n-1} \quad \Delta a_{n-1} \quad \Delta d_n \quad \Delta\theta_n)^T \\ H &= \begin{pmatrix} {}^0TQ_{\alpha_0}(1:3,4) & {}^0TQ_{a_0}(1:3,4) & {}^0TQ_{d_1}(1:3,4) & {}^0TQ_{\theta_1}(1:3,4) & \cdots \\ {}^0TQ_{\alpha_{i-1}}(1:3,4) & {}^0TQ_{a_{i-1}}(1:3,4) & {}^0TQ_{d_{i-1}}(1:3,4) & {}^0TQ_{\theta_{i-1}}(1:3,4) & \cdots \\ {}^0TQ_{\alpha_{n-1}}(1:3,4) & {}^0TQ_{a_{n-1}}(1:3,4) & {}^0TQ_{d_n}(1:3,4) & {}^0TQ_{\theta_n}(1:3,4) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

式中: $i=2, \cdots, n-1$; ${}^0TQ_{\alpha_0}(1:3,4)$ 和 ${}^0TQ_{\alpha_{i-1}}(1:3,4)$ 分别表示矩阵 ${}^0TQ_{\alpha_0}$ 和 ${}^0TQ_{\alpha_{i-1}}$ 的第 4 列的前 3 行。

利用激光跟踪仪测量机器人末端多点位姿数据, 通过矩阵广义逆解算出移动机器人运动学模型参数误差向量。

3) 基于激光跟踪仪测量的误差补偿

本文主要采用激光跟踪仪来获取移动机器人末端的点位数据, 通过坐标转换得到末端在基坐标系下的位姿。机器人工具坐标系 L 、激光跟踪仪坐标系 M 以及基坐标系 B 之间的关系如图 7 所示。计算过程如下:

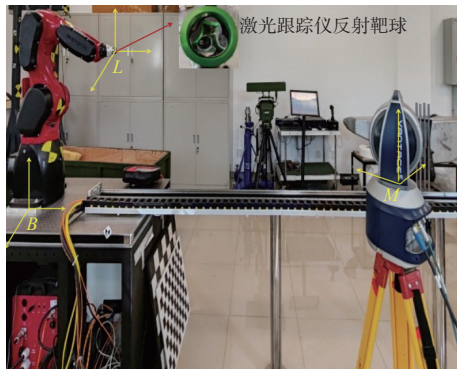


图 7 移动机器人坐标系和激光跟踪仪测量坐标系之间的关系

Fig. 7 The relationship between mobile robot coordinate and laser tracker coordinate

a) 激光跟踪仪反射靶球中心位置标定

采用基于距离约束的 TCP(tool center point) 标定方法, 获取靶球中心在法兰末端坐标系中的位置, 其计算步骤为

首先, 计算靶球中心在基坐标系中的坐标, 计算公式如下:

$${}^B_L G = {}^B_E G \cdot {}^E_L G \quad (19)$$

式中: E 为机器人法兰盘坐标系, B 为机器人基坐标系, L 为工具坐标系。

其次, 依据不同空间坐标系下两点间距离一致

原则构建等量关系:

$$\|({}^B_E T_j - {}^B_E T_k) \bullet {}^E_L G\|_2 = \|T_M^j - T_M^k\|_2 \quad (20)$$

式中: $\|({}^B_E T_j - {}^B_E T_k) \bullet {}^E_L G\|_2$ 为两点靶球中心在基坐标系下的位置偏差; $\|T_M^j - T_M^k\|_2$ 为两点靶球中心在激光跟踪仪坐标系下的位置偏差; M 为激光跟踪仪坐标系。

最后, 采用最小二乘法解算靶球中心在法兰末端坐标系下的位置。

b) 基坐标系与激光跟踪仪坐标系的转换参数标定

基于罗德里格矩阵的最小二乘迭代法实现激光跟踪仪坐标系与基坐标系的转换, 其计算过程如图 8 所示。

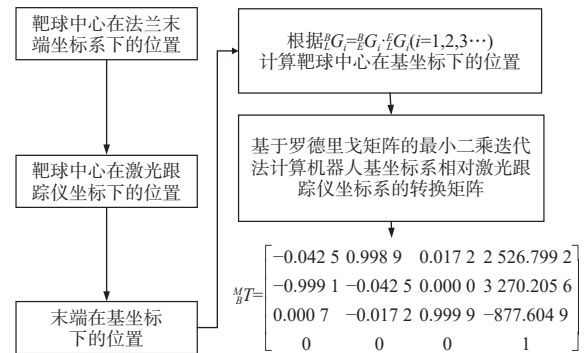


图 8 基坐标系与激光跟踪仪坐标系的转换参数标定计算过程与结果

Fig. 8 Calibration process and results of the transformation parameters between the base coordinate and the laser tracker coordinate

在获得激光跟踪仪坐标系与基坐标系转换矩阵的基础上, 基于 DH 四参数模型的参数辨识结果如表 1 所示。

用辨识出的参数误差补偿运动模型, 对比分析机械臂的实际运动位姿数据与预设位姿数据的误差, 结果如表 2 所示。修正后平均位置误差达到 0.37 mm, 平均姿态误差达到 0.05°。

表 1 基于 DH 四参数模型的参数辨识结果

Table 1 Parameter identification results based on DH four-parameter model

关节 <i>i</i>	<i>a</i> /(°)	理论DH参数值			DH参数辨识结果		
		<i>a</i> /mm	<i>d</i> /mm	θ /(°)	<i>a</i> /mm	<i>d</i> /mm	θ /(°)
1	0	0	0	0	0	0	0.007
2	-90	170	0	-90	169.308 7	0	-89.959 2
3	0	560	0	0	560.795 1	0	-0.006 3
4	-90	155	640	0	155.341 8	640.229 8	0.201 9
5	90	0	0	0	0	0	0.178 7
6	-90	0	110	0	0	109.920 5	0.027 4

表 2 修正前和修正后误差对比

Table 2 Comparison of errors before and after correction

	位置误差/mm			姿态误差/(°)		
	最大误差	平均误差	标准差	最大误差	平均误差	标准差
修正前	4.906	3.408	0.632	0.284	0.222	0.524
修正后	0.706	0.378	0.280	0.057	0.051	0.198

3 试验演示验证

3.1 验证摄像机标定精度对测量精度的影响

1) 场景规划 1: 验证标定模型误差对摄像机标定与测量精度的影响

采用 G2 摄像机构建双目视觉测量系统, 选用 25 mm 镜头, 平均标定距离约 3 m, 物面分辨率约 0.76 mm。在典型的 4 参数畸变模型框架下, 通过以下三种方法实现双目内参标定: 基于棋盘格/类棋盘格的张正友标定法、基于标尺约束的多片光束平差法, 以及基于三维空间标定场的单片后方

交会法。之后, 通过同一的外参标定控制场进行外参标定, 获得与移动机器人数据在同一坐标系下的外参。再以 7 参数畸变模型, 基于采集的内外参标定影像进行摄像机标定解算。如表 3 所示, 对于使用 25 mm 镜头的 G2 摄像机, 采用基于标尺约束的多片光束平差法标定效果最佳, 由于采用的是工业镜头, 焦距较大, 镜头畸变相对较小, 4 参数标定和 7 参数标定的精度很接近, 因此, 在工程应用中使用该系统进行测量时, 基于标尺约束的 4 参数多片光束平差法为最优。

表 3 不同摄像机模型与标定方法的精度分析与比较

Table 3 Precision analysis and comparison of different camera models and calibration methods

序号	方法	模型	参数不确定度/%	单点测量均方根误差/mm
1	基于棋盘格/类棋盘格的张正友式标定方法	2参数	0.42	0.379
2		4参数	0.28	0.192
3		7参数	0.26	0.188
4	基于标尺约束的多片光束平差方法	2参数	0.37	0.283
5		4参数	0.21	0.136
6		7参数	0.20	0.134
7	基于三维空间标定场的单片后方交会方法	2参数	0.58	0.553
8		4参数	0.41	0.297
9		7参数	0.39	0.276

2) 场景规划 2: 验证控制点空间分布对摄像机标定与测量精度的影响

为了验证测量空间对标定精度的影响, 首先需

要保证标定控制点的坐标测量精度和图像定位精度。在 20 m 范围内激光跟踪仪的单点测量精度可达到 0.01 mm, 能够满足控制点空间坐标的测量精

度要求。基于 Canny 算子对含有靶点的图像进行边缘检测, 并通过标志轮廓检测、模式识别、最小二乘拟合椭圆中心的方法得到标志中心坐标。该图像特征提取方法可以保证图像定位的精度。

在标定控制点的坐标测量精度和图像定位精度能够满足测量精度要求, 且其他标定条件一致的情况下, 在合焦平面、前后景深三个平面内各布置 30 个测量控制点, 每个平面进行三次标定, 采用平均法获取最终的标定结果。

基于 4 种标定结果参数, 进行单点测量验证, 选取空间中的 15 个点进行单点测量, 将视觉测量数据与激光跟踪仪测量数据进行对比, 15 个测量点的具体误差如图 9 所示。可以看出, 在合焦平面内进行标定的重建精度基本在 0.1 mm 左右, 满足小视场的精度要求, 而在前景深和后景深两个平面内的标定精度相对较差, 测量误差最高达到 0.25 mm, 基于全场标定的重建误差在 0.05 mm 以内。因此, 控制点布设应覆盖前后景深以及合焦平面, 这样才能保证高精度测量。

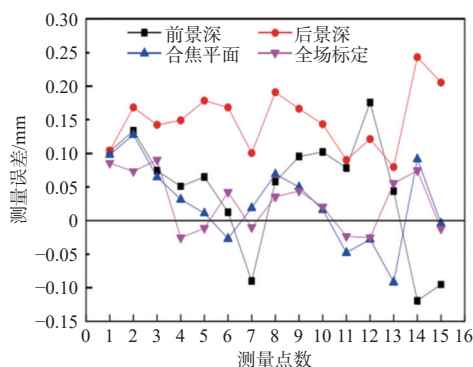


图 9 基于不同标定控制场的单点测量偏差

Fig. 9 Single point measurement deviation based on different calibration control fields

3) 场景规划 3: 验证控制点数量对摄像机标定与测量精度的影响

在进行双目相机标定的过程中, 特征点的数目将影响标定结果的精度。因此, 以 10 个特征点为一组, 分别对视场内均匀分布的 6, 10, 20, 30, 40, 50 个标定点进行相机标定, 以绝对值平均偏差作为测量误差的评估准则。由图 10 可以看出, 特征点数越多, 测量误差越小, 当特征点数为 30 时, 测量精度达到最高, 在 0.1 mm 以内。特征点数在 50 以上时, 测量误差趋于稳定。

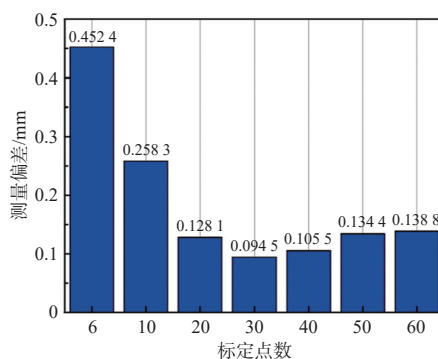


图 10 不同标定点数的单点测量偏差

Fig. 10 Single point measurement deviation with different calibration points

3.2 验证图像离散误差对测量精度的影响

离散误差包括空间离散误差和灰度离散误差。空间离散误差由图像采样引起, 由分辨率大小决定。灰度离散误差由灰度量化引起。本文选用 IDT 摄像机和 G2 摄像机进行对比试验, 其中, IDT 摄像机分辨率为 2560×1440 像素, 像元大小为 $8 \mu\text{m}$, 帧率为 500 帧/s, G2 摄像机分辨率为 2048×2048 像素, 像元大小为 $6.3 \mu\text{m}$, 帧率为 500 帧/s。两相机的灰度位数均为 8 位, 均采用 25 mm 焦距, 拍摄距离和拍摄交会角一致。

按场景规划, 驱动移动机器人进行目标运动演示与测量, 两款摄像机的测量结果与运动节点基准坐标数据的对比如图 11 所示。

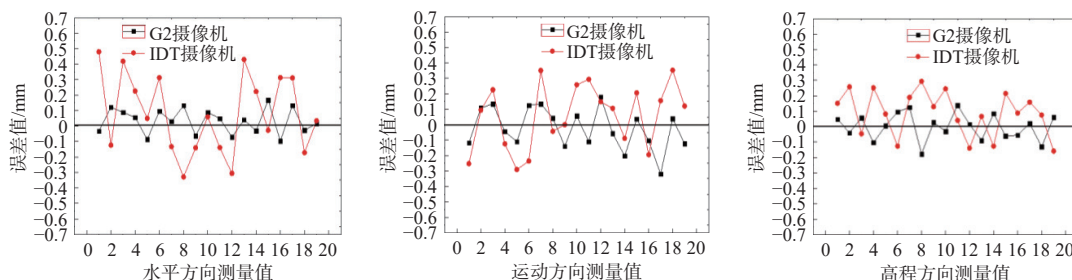


图 11 不同摄像机构成的双目视觉测量系统的单点测量对比情况

Fig. 11 Comparison of single point measurement of binocular vision measurement system composed of different cameras

在摄影距离、焦距、灰度量化位数等条件一致的情况下, G2 摄像机在水平、运动和高程 (X 、 Y 和 Z) 三个方向上的误差值分别为 0.2 mm、0.1 mm 和 0.5 mm, IDT 摄像机在三个方向上的误差值分别为 0.5 mm、0.4 mm 和 0.7 mm, 说明分辨率高、像元尺寸小更有利于精确测量。

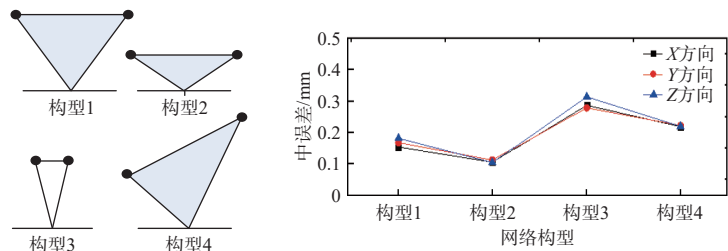


图 12 摄像机与被测物体间的网络构型及不同构型下的测量精度水平

Fig. 12 The network configuration between the camera and the measured object and the measurement accuracy levels under different configurations

4 任务应用

以某目标视觉测量方案为例, 根据实际的安装条件, 如图 13 所示, 仅有 4 个安装点可进行高速相机的安装。调整每个相机的拍摄角度, 保证视场内目标完全覆盖, 根据第 3 章试验结果, 选择分辨率为 2048×2048 像素, 像元大小为 $6.3 \mu\text{m}$ 的 G2 高速相机, 采用基于标尺约束的多片光束平差方法, 布设 30 个控制点进行标定, 并构建 1 号和 4 号进行双目交会, 1 号和 2 号进行双目交会, 2 号和 3 号进行双目交会的 3 种构型进行测量, 获得不同构型的动态测量精度评估, 图 14 为地面试验中两个不同摄影视角的成像效果。

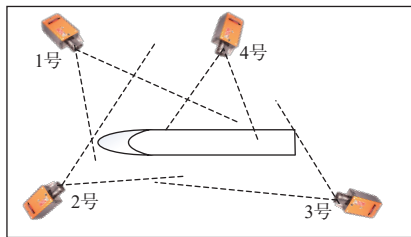


图 13 摄像机安装点位

Fig. 13 Camera installation point

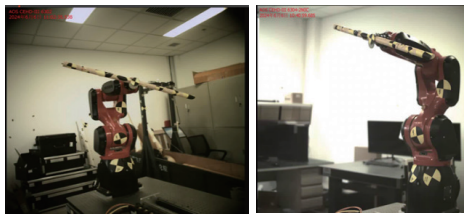


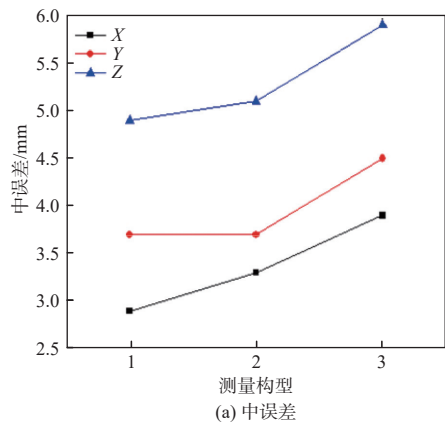
图 14 两个不同视角的成像效果

Fig. 14 Imaging results from two different perspectives

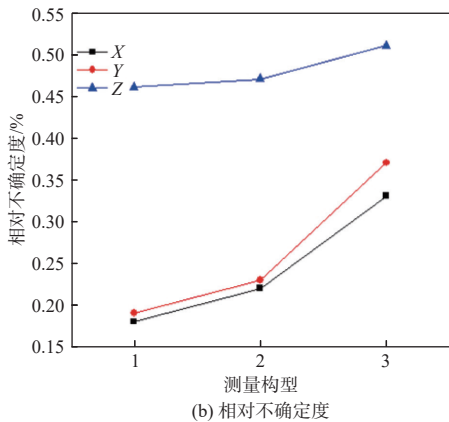
3.3 验证摄像机与被测物体的相对姿态对测量精度的影响

以 G2 摄像机作为视频采集设备, 构建 4 种不同交会构型的视觉测量系统并进行地面试验。4 种构型试验结果如图 12 所示。可以看出, 第 2 种构型的测量精度最优。

经数据处理与分析, 3 种构型的测量精度评估情况如图 15 和图 16 所示。可以看出, 1、2 种构型测量精度较高, 其中第 1 种构型测量结果最优, 动态定位测量精度优于 5 mm, 偏航、俯仰角精度优



(a) 中误差



(b) 相对不确定度

图 15 位置测量精度评估

Fig. 15 Position measurement accuracy evaluation

于 0.2° , 横滚角优于 0.8° 。对比目标测量精度需求, 这两种构型均满足任务需求, 实施过程中可根据目标尺寸和摄像机视场覆盖情况选择构型 1 或构型 2 实现目标位姿参数测量。

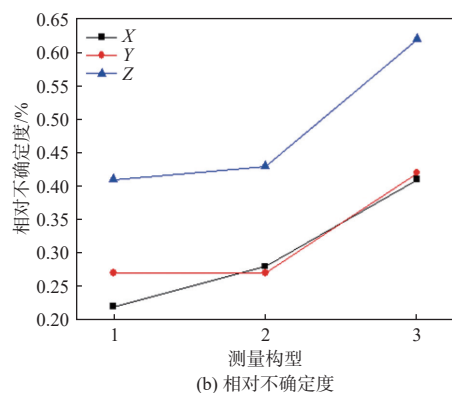
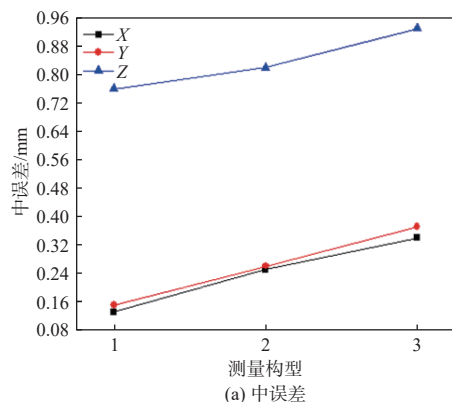
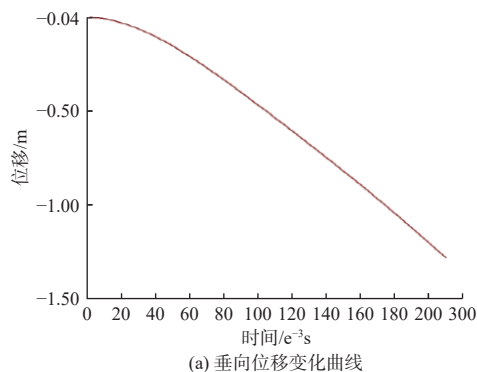


图 16 姿态测量精度评估

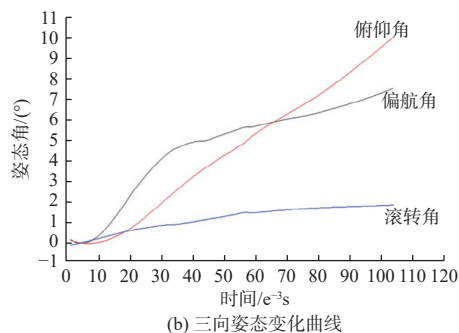
Fig. 16 Pose measurement accuracy evaluation

图 17 为利用 G2 高速摄像机, 采用第 2 种构型安装后获得的目标位姿测量结果, 其数据稳定可靠。对比目标惯导测量数据曲线, 其变化趋势一致性强, 且分离时刻的位姿符合设计指标, 说明采用本文提出的动态位姿测量精度评估方法可以很好地反映工程实施情况。

通过上述各种试验场景演示与测量, 实现了基于视觉的目标位姿测量精度主要影响因素的定性或定量分析, 也为具体任务的地面仿真验证、测量方案优化、测量数据准确可靠性论证提供了重要依据。



(a) 垂向位移变化曲线



(b) 三向姿态变化曲线

图 17 被测目标位姿测量结果

Fig. 17 Position and pose measurement results of the measured target

5 结论

本文针对动态视觉测量精度无法有效实现准确可靠评估的问题, 开展了基于移动机器人场景规划的动态位姿测量精度评估技术的研究与验证。深入研究了移动机器人的精密运动控制与连续轨迹生成方法, 提供了不同测量场景下的模拟与测量方案的验证策略, 研制了动态视觉测量精度评估系统, 为目标视觉测量技术方案优化设计与验证提供了有力支撑。本研究实现了静态评估到高精度动态评估的技术突破, 提升了测试数据质量, 增强了测量数据的可信度。本研究可应用于货物投放、起落架载荷、阻力伞、机翼结构变形等实际任务中, 为动态视觉测量方案的设计、优化、验证和测量数据评价等提供了重要参考依据, 促进动态视觉测量精度评估工作步入规范化和流程化发展。

参考文献:

- [1] 刘美莲, 蔡慧敏. 目标落点的视觉测量方法研究[J]. 应用光学, 2011, 32(5): 949-954.
LIU Meilian, CAI Huimin. Vision measurement for impact point[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(5): 949-954.
- [2] 李勤文, 王志乾, 杨文昌, 等. 双目视觉测量系统位姿解算方法研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(5): 214-218.
LI Qinwen, WANG Zhiqian, YANG Wenchang, et al. Research on pose calculation method of binocular vision measurement system[J]. Computer Simulation, 2021, 38(5): 214-218.
- [3] 袁媛, 刘柯, 孙增玉, 等. 单目视觉三维运动位姿测量方法研究[J]. 宇航计测技术, 2019, 39(6): 1-6.

- YUAN Yuan, LIU Ke, SUN Zengyu, et al. Study on three-dimensional pose measurement method with monocular vision[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2019, 39(6): 1-6.
- [4] 马淑华, 王锦华, 马贤春, 等. 移动机器人自适应轨迹跟踪控制[J]. *火力与指挥控制*, 2022, 47(8): 13-17.
- MA Shuhua, WANG Jinhua, MA Xianchun, et al. Adaptive trajectory tracking control of mobile robot[J]. *Fire Control & Command Control*, 2022, 47(8): 13-17.
- [5] 谭红, 雷沛, 李现坤, 等. 一种机器人末端执行器的姿态控制算法[J]. *机床与液压*, 2021, 49(15): 62-66.
- TAN Hong, LEI Pei, LI Xiankun, et al. A posture control algorithm for robot end-effector[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2021, 49(15): 62-66.
- [6] 陈杰春, 赵丽萍, 张恒. 立体视觉测量中的摄像机优化布局[J]. *机床与液压*, 2012, 40(15): 34-37.
- CHEN Jiechun, ZHAO Liping, ZHANG Heng. Optimal placement of cameras for stereo-vision metrology[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2012, 40(15): 34-37.
- [7] 杨昭利. 工程测量教学中误差基本概念的应用[J]. *东北测绘*, 2003, 26(2): 63-64.
- YANG Zhaoli. Application of basic error concepts in engineering survey teaching[J]. *Northeast Surveying and Mapping*, 2003, 26(2): 63-64.
- [8] 余慧杰, 韩平畴. 双目视觉系统的测量误差分析[J]. *光学技术*, 2007, 33(增刊 1): 157-159.
- YU Huijie, HAN Pingchou. Measuring errors analysis of binocular vision system[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(S1): 157-159.
- [9] 吴清锋, 胡伟健. 基于激光跟踪仪的机器人参数标定方法[J]. *机床与液压*, 2021, 49(11): 61-64.
- WU Qingfeng, HU Weijian. Calibration methods of robot parameters based on laser tracker[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2021, 49(11): 61-64.
- [10] 孙鹏. 大尺寸动态摄影测量关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- SUN Peng. Research on key techniques of large scale dynamic photogrammetry[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [11] 马丽霞, 王凤艳, 陈晓. 工业测量中三维坐标系统的转换[J]. *测绘与空间地理信息*, 2018, 41(6): 56-57.
- MA Lixia, WANG Fengyan, CHEN Xiao. Three dimensional coordinate system transformation in industrial measuring[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2018, 41(6): 56-57.
- [12] 黄鹏, 王青, 李江雄, 等. 激光跟踪仪三维坐标转换综合优化方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(11): 2912-2920.
- HUANG Peng, WANG Qing, LI Jiangxiong, et al. Comprehensive optimization for three-dimensional coordinate transformation of laser tracker[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(11): 2912-2920.
- [13] 王树才, 张阳, 刘国政. 多目交会摄像测量时间同步系统设计[J]. *电脑与信息技术*, 2016, 24(3): 14-17.
- WANG Shucai, ZHANG Yang, LIU Guozheng. A time synchronization system design for cross-view photogrammetry[J]. *Computer and Information Technology*, 2016, 24(3): 14-17.
- [14] 周俊, 赵涛. 基于广义二型模糊神经网络的移动机器人轨迹跟踪控制[J]. *计算机应用与软件*, 2023, 40(4): 68-74.
- ZHOU Jun, ZHAO Tao. Trajectory tracking control of mobile robot based on generalized type II fuzzy neural network[J]. *Computer Applications and Software*, 2023, 40(4): 68-74.
- [15] 梁丽娟, 董春. 基于数据驱动算法的移动机器人跟踪控制[J]. *机械与电子*, 2010, 28(7): 53-56.
- LIANG Lijuan, DONG Chun. The trajectory tracking control problem of the mobile robot based on data-driven control algorithm[J]. *Machinery & Electronics*, 2010, 28(7): 53-56.
- [16] 庄靖延. 舱段位姿测量系统相机视觉测量技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- ZHUANG Jingyan. Research on the camera vision measurement technology for a cabin posture measurement system. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [17] 张建花, 高帅华. 基于影像实时处理的加油对接段辅助对准技术[J]. *应用光学*, 2022, 43(2): 234-239.
- ZHANG Jianhua, GAO Shuaihua. Auxiliary alignment technology for aerial refueling based on real-time image processing[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(2): 234-239.