

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.019



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 变电站二次电缆敷设中四轮牵缆机器人的 ArUco 码定位方法

宋晓帆<sup>1</sup>, 张金凤<sup>1</sup>, 黄海波<sup>2</sup>, 李凯<sup>1</sup>, 陈晨<sup>1</sup>, 周怡<sup>3</sup>, 武东亚<sup>3</sup>, 李帅<sup>2</sup>

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 郑州 450052; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;  
3. 国网河南省电力公司, 郑州 450018)

**摘要:** 二次电缆敷设是变电工程二次安装施工过程中的重要环节。目前二次电缆敷设依然以人工施工为主, 缺乏有效的机械化施工手段, 存在工作量大、工艺流程复杂、效率低、人力需求量大和成本高等问题。以牵缆机器人在二次电缆敷设中的应用为背景, 针对四轮牵缆机器人在电缆敷设中的定位问题, 提出利用相机观测固定于电缆沟墙面的 ArUco 码来矫正惯性导航位姿的定位方案, 以解决基于视觉和激光传感器建图定位、实时差分定位等定位方式不能实现牵缆机器人在电缆沟环境中较高精度定位的问题。该方法在四轮牵缆机器人运动过程中识别预先布置在电缆沟墙面上的 ArUco 码, 并根据其在相机平面中的位姿筛选特定帧, 通过识别 ArUco 码计算位姿信息来修正惯性导航位姿, 实现对四轮牵缆机器人的位姿修正。结果表明, 该方法能实现四轮牵缆机器人在电缆沟中的实时准确定位, 提升变电站二次电缆敷设施工过程中的智能化程度, 提高变电站施工效率和质量。

**关键词:** 变电站施工; 牵缆机器人; 电缆敷设; ArUco 码; 位姿估计; 惯性导航

**中图分类号:** TP242; TM63 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)05-0056-11

## The ArUco marker-based localization method for a four-wheel cable-pulling robot in substation secondary cable laying

SONG Xiaofan<sup>1</sup>, ZHANG Jinfeng<sup>1</sup>, HUANG Haibo<sup>2</sup>, LI Kai<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>1</sup>,  
ZHOU Yi<sup>3</sup>, WU Dongya<sup>3</sup>, LI Shuai<sup>2</sup>

(1. Economic and Technical Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 3. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450018, P. R. China)

**Abstract:** Laying of secondary cables is an important step in the secondary installation construction process of power transformer projects. Presently, the installation of secondary cables is predominantly executed manually, lacking effective mechanized construction means. Consequently, there are problems such as large workload,

**收稿日期:** 2024-09-30

**基金项目:** 国网河南省电力公司科技项目(5217L0240002)

**作者简介:** 宋晓帆(1989-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统及其自动化研究, E-mail: sxf810118@sina.com。

李帅(通信作者), 男, 博士生, E-mail: li\_shuai@cqu.edu.cn。

**Received:** 2024-09-30

**Foundation item:** State Grid Henan Electric Power Company Science and Technology Project (No. 5217L0240002)

**Author brief:** SONG Xiaofan (1989-), senior engineer, main research interests: power system and its automation research, E-mail: sxf810118@sina.com.

LI Shuai (corresponding author), PhD candidate, E-mail: li\_shuai@cqu.edu.cn.

complex processes, low efficiency, high labor demand and high cost. Based on the application of cable-pulling robot in the laying of secondary cables, aiming at the localization problem of four-wheel cable-pulling robot during cable laying, this paper proposes a localization scheme of correcting inertial navigation posture by observing an ArUco marker fixed on the wall of the cable trench with a camera. This method solves the problem that localization methods based on vision and laser sensors and GPS-RTK cannot achieve high precision localization of cable-pulling robot in cable trench environment. The method is to identify the ArUco markers pre-arranged on the wall of cable trench during the movement of a four-wheel cable-pulling robot. It will select specific frames based on its pose in the camera plane. The pose information of the inertial navigation is modified by recognizing ArUco markers to realize the pose correction of four-wheel cable-pulling robot. The experimental results show that the method can enable the four-wheel cable-pulling robot to achieve real-time and accurate localization in the cable trenches. This further enhances the intelligence of the secondary cable laying process in power transformer substations, and enhances construction efficiency and quality.

**Keywords:** transformer substation construction; cable-pulling robot; cable laying; ArUco markers; pose estimation; inertial navigation

数字化、机械化和智能化已成为电力系统基建转型的技术发展方向,而传统变电站二次电缆敷设施工依然以人工为主,由工人从电缆盘上拉出电缆后,在电缆沟中人工牵引电缆,将其按规则敷设在电缆支架上,然后进行绑扎固定。缺乏有效的机械化施工手段,存在工作量大、工艺流程复杂、效率低、人力需求量大和成本高等问题。这种施工方式已无法满足电力系统建设的要求,需要更智能化的牵缆机器人代替传统人工敷设。

目前广泛使用的机器人定位方法是基于全球定位系统(global positioning system, GPS)和实时差分定位(real-time kinematic, RTK)的定位方法。Triputra等<sup>[1]</sup>将低成本GPS-RTK用在自动导引车(automated guided vehicle, AGV)上,实现室外定位和导航。Lobazev等<sup>[2]</sup>提出用GPS-RTK来修正机器人平台轮式里程计的定位数据,提高机器人导航的准确性。Wang等<sup>[3]</sup>提出基于卫星导航系统和RTK的高精度无人机差分定位技术,实现无人机巡检过程中的高精度定位。然而,四轮牵缆机器人的工作环境通常为狭窄的电缆沟,部分电缆沟可能在室内,室内环境会对GPS信号产生遮挡,因此,采用GPS无法实现四轮牵缆机器人在室内的精确定位。基于激光雷达或者视觉的即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)方法是近年来的研究热点,在变电站巡检<sup>[4-7]</sup>、工厂巡检<sup>[8]</sup>、矿井巡检<sup>[9]</sup>等领域都得到了一定的研究和应用。在变电站巡检领域,不少研究者通过激光SLAM或视觉SLAM建立可供导航的地图,实现了机器人的定位和导航。然而电缆沟中特征点稀少、几何特征单一、地形狭长、环境对称,基于SLAM的方法会产生退化,且在电缆敷设过程中,机器人需要在一段路

程上往复运动拉取电缆,基于激光雷达或者相机的SLAM算法容易产生运动跟踪误差,难以建立可供导航的地图,难以获取准确的位置信息。因此,在有类似挑战的场景中,在机器人的定位任务中,基于augmented reality university of cordoba marker (ArUco码)的位姿估计得到了广泛研究。目前,ArUco码主要用于无人机引导、定位以及机械臂位姿估计。Li等<sup>[10]</sup>通过在蒸压轻质混凝土(autoclaved lightweight aerated concrete, ALC)墙板上张贴ArUco码,然后通过相机识别ArUco码,计算墙板与机械臂的相对位姿,实现ALC墙板的抓取。Khazetdinov等<sup>[11]</sup>使用嵌入式ArUco引导无人机精确降落。De Corso等<sup>[12]</sup>提出了一种基于ArUco基准标记的无人机多相机定位系统。随着ArUco应用领域的扩展,张文等<sup>[13]</sup>提出利用机载鱼眼相机观测一张固定于地面的ArUco码,实现了工厂内大型钢制构件上爬壁机器人的位姿估计。王岚颢<sup>[14]</sup>提出了一种基于随机抽样一致性与最小二乘的改进AprilTag算法,减少了传统AprilTag算法误识别的问题。Roos-Hoefgeest等<sup>[15]</sup>提出了基于ArUco码的建图方法,该方法使用8个相机组成环,实现了在室内建图。尽管ArUco码在无人机和室内场景机器人位姿估计方面的应用已经越来越多,但针对移动机器人在电缆沟场景的定位研究仍然较少。

轮式里程计是移动机器人短时间作业中较为有效的定位方式,其结构简单,易于安装和操作,在平滑且无打滑的条件下,能提供高分辨率的位移测量。但轮式里程计对打滑敏感,且随着时间的推移,传感器误差会累积,导致定位精度下降。惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)通过测量加速度和角速度来估计物体的位姿,但由于陀螺仪

的漂移和加速度计的噪声,IMU 的位姿估计也会产生误差。轮式里程计和 IMU 融合能有效地结合里程计和 IMU 的数据,缓解误差的积累,但由于传感器自身误差和模型不准确等原因,融合后的系统依然会有一定的误差,因此需要结合其他传感器进行更高精度的定位。笔者在电缆沟墙面一侧沿四轮牵缆机器人运动路线固定若干张 ArUco 码,并将 ArUco 码的世界坐标信息作为先验信息,通过四轮牵缆机器人上搭载相机 RGB 摄像头拍摄沿途的 ArUco 码进行位姿估计,然后对里程计和 IMU 融合后的系统进行修正,以实现四轮牵缆机器人在电缆沟中的定位和导航。该方法能解决 GPS-RTK 在信号差的情况下精度不足甚至无法定位的问题,也不会出现 SLAM 方法在特征点不足的情况下退化的问题。传感器会出现漂移或误差,机器人会有模型的误差,如车轮滑移、轮廓估计不准确等,通常会导致位置推算上的偏差。通过 ArUco 码进行定位修正能减轻这些影响,从而实现四轮牵缆机器人在电缆沟这类狭窄且特征稀少的场景中较高精度的定位。

## 1 惯性导航融合视觉的位姿估计方法

### 1.1 牵缆机器人硬件结构

四轮牵缆机器人需要在宽度约 60 cm、高度约 1.1 m 的电缆沟中运行,同时需要至少 20 N 的牵引力牵引电缆前进,且需要实现在电缆沟中的定位以及沿着规划路径自主导航。机器人底盘和机械臂如图 1 所示,底盘为阿克曼底盘,底盘宽度约 60 cm,长度约 70 cm,机械臂为三轴机械臂。

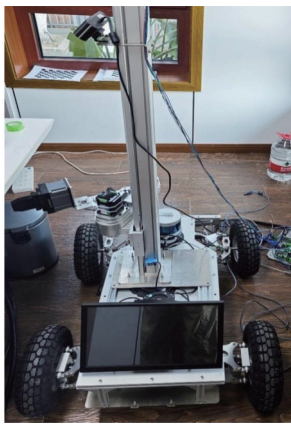


图 1 四轮牵缆机器人底盘选型和机械臂

Fig. 1 Chassis selection and manipulator of four-wheel cable-pulling robot

传感器选择奥比中光 Astra S 单目结构光相机,该相机具有高精度、低功耗、响应迅速、稳定可靠的优点,能覆盖多种场景。计算控制单元由主控计算

机(Intel® Core™ i5-1240P CPU, 16 GB RAM)和单片机(STM32F407VET6)组成。上位机主要处理图像、订阅传感器发布的数据、实现定位、发布运动控制指令。微控制器主要接收来自上位机的指令,实现对电机的控制。奥比中光 Astra S 相机如图 2 所示。



图 2 奥比中光 Astra S 相机

Fig. 2 Orbbec Astra S camera

### 1.2 方法概述

使用 ArUco 码通过视觉的方法修正轮式里程计和 IMU 融合数据,将 ArUco 码按照一定规律固定在电缆沟一侧电缆支架的间隙,记录每张 ArUco 码在世界坐标系下的坐标,作为定位和运动控制的先验信息。四轮牵缆机器人上搭载 RGB 相机、轮式里程计和 IMU。坐标系定义如下:机器人坐标系  $o_r x_r y_r z_r$ 、ArUco 坐标系  $o_A x_A y_A z_A$ 、世界坐标系  $o_w x_w y_w z_w$ 、相机坐标系  $o_c x_c y_c z_c$ ,定义世界坐标系与机器人初始状态的机器人坐标系重合,机器人位置定义为机器人运动过程中在世界坐标系中的位置。可以通过 PnP 算法算出 ArUco 码相对于相机的平移和旋转向量,然后将旋转向量转换为旋转矩阵,可以得到 ArUco 码坐标系到相机坐标系的平移和旋转矩阵  $R_{A,c}$ 、 $T_{A,c}$ ,从而计算出相机相对于 ArUco 码的位姿。通过机器人和传感器标定可以得到相机坐标系和机器人坐标系的平移和旋转矩阵  $R_{c,r}$ 、 $T_{c,r}$ 。坐标系转换示意图如图 3 所示。

另外,用于表示机器人姿态的欧拉角包括俯仰角、偏航角、翻滚角,分别定义为绕机器人坐标系  $y$

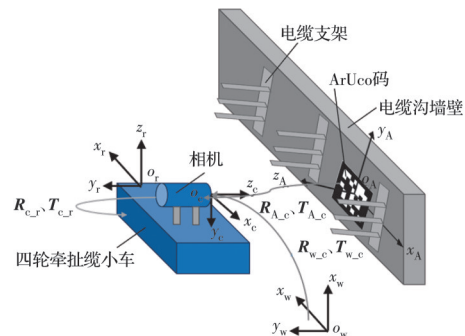


图 3 坐标系转换示意图

Fig. 3 Coordinate system transformation diagram



轴旋转、 $z$ 轴旋转、 $x$ 轴旋转的角度。整个运行过程中四轮牵缆机器人都在二维平面中运动。

该方法首先从传感器获取数据,能获取到的数据为相机拍摄到的图像画面和轮式里程计输出的位置改变以及IMU的角速度和线加速度。首先将轮式里程计和IMU的数据通过扩展卡尔曼滤波融合,减少传感器在机器人运行过程中的累积误差。在四轮牵缆机器人运动过程中,主控计算机根据采集的图像实时检测ArUco码,如果ArUco码出现在相机视野中,则实时检测相机在ArUco码坐标系中

的位置和姿态。当相机中心点与ArUco码坐标系的 $z$ 轴夹角小于一定阈值时,选取在该阈值内获取到的第1帧ArUco图像的检测结果,采用 $1^\circ$ 作为阈值。通过坐标系变换矩阵,先计算得到机器人在ArUco码坐标系下的位姿,再根据先验信息,即ArUco码在世界坐标系下的坐标,计算得到机器人在世界坐标系中的位置,以此修正惯性导航在世界坐标系中的估计位置。然后根据该位置与预期位置的偏差,修正机器人的运动轨迹。该方法总体框架如图4所示。

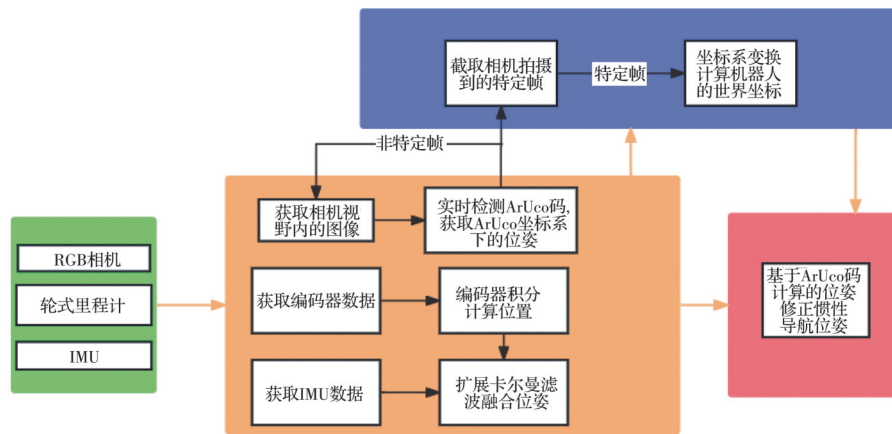


图4 方法总体框架

Fig. 4 Overall framework of the method

该方法基于机器人操作系统(robot operating system, ROS)实现,实现该方法的功能包被部署在上位机的ROS上,通过ROS实现不同ROS节点之间的通信。从上位机ROS话题中读取传感器的图像和轮式里程计以及IMU数据,通过惯性导航节点/robot\_pose\_ekf计算出惯性导航融合位姿,发布到/robot\_pose\_ekf/odom\_combined话题。在ROS节点/detect\_aruco下检测并计算出相机在ArUco坐标系下的位姿,然后通过先验信息计算出机器人该时刻在世界坐标系中的位置。通过位姿融合节

点/calculate\_pose,将该位置和惯性导航话题/robot\_pose\_ekf/odom\_combined中的位姿计算偏差修正实时位姿,得到机器人在世界坐标系下修正的位姿,并将该位姿发布到/odomAdjust话题。通过校正后的位姿在控制节点/line\_following\_controller中计算运动控制信息,发布四轮牵缆机器人控制命令至cmd\_vel话题,通过/wheeltec\_robot节点实现机器人的定位和运动控制。ROS节点计算图如图5所示。

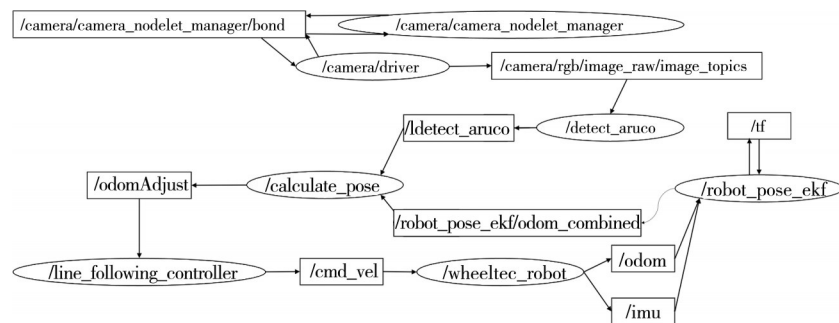


图5 ROS节点计算图

Fig. 5 ROS node calculation diagram

### 1.3 里程计融合IMU估计位姿

#### 1.3.1 轮式里程计

轮式里程计是一种通过测量轮子转动来估计

机器人或车辆位移的传感设备。通过安装在轮子上的编码器记录轮子的转动角度和次数,结合轮子的半径和转动角度计算行驶的距离。轮式里程计

硬件如图 6 所示,阿克曼底盘运动学模型如图 7 所示,通过编码器和阿克曼底盘的运动学模型可以估计出四轮牵引机器人在二维平面的位姿,估计方程的离散形式如式(1)所示。式(1)中  $v_t$  为前一个时间步长底盘的线速度,  $d_t$  为时间步长,  $\delta$  为两个前轮转向角的平均值,  $L$  为前轮轴距,  $x_t, x_{t+1}$  分别为前一个时间状态和当前时间状态的  $x$  坐标位置,  $y_t, y_{t+1}$  分别为前一个时间状态和当前时间状态的  $y$  坐标位置,  $\theta_t, \theta_{t+1}$  分别为前一个时间状态和当前时间状态的航向角。

$$\begin{cases} x_{t+1} = x_t + v_t \cos(\theta_t) d_t \\ y_{t+1} = y_t + v_t \sin(\theta_t) d_t \\ \theta_{t+1} = \theta_t + v_t \frac{\tan(\delta)}{L} d_t \end{cases} \quad (1)$$

式中部分变量定义如式(2)所示,其中  $\alpha, \beta$  分别为左前轮和右前轮与运动方向的夹角,  $r$  为轮胎半径。

$$\begin{cases} \delta = \frac{\alpha + \beta}{2} \\ v_t = r \cdot \frac{v_{\text{front}} + v_{\text{rear}}}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $v_{\text{front}}$  和  $v_{\text{rear}}$  分别为前轮线速度和后轮线速度。

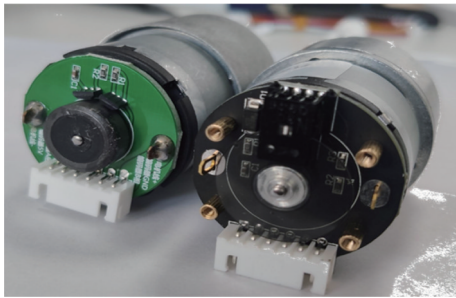


图 6 轮式里程计硬件

Fig. 6 Wheeled odometer hardware

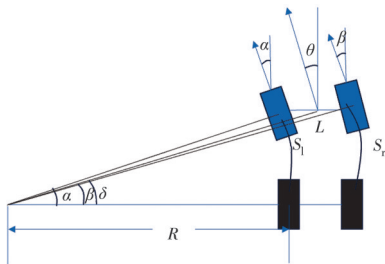


图 7 阿克曼底盘运动学模型

Fig. 7 Ackermann chassis kinematics model

### 1.3.2 IMU

IMU 通过测量物体的线性加速度和角速度来估计物体的位姿,其通常由加速度计和陀螺仪组成。加速度计可以测量机器人在三轴方向上的线性加速度,陀螺仪可以测量机器人绕三轴的角速度,通过对加速度第 1 次积分可以得到机器人的速度,第 2 次积分可以得到位移,对角速度积分可以得

到机器人在三轴方向上的旋转角度,通过位移和角度以及机器人起始位置的位姿可以确定机器人在任意时刻的位姿。图 8 所示为 IMU 硬件图。



图 8 IMU 硬件

Fig. 8 IMU hardware

### 1.3.3 扩展卡尔曼滤波融合位姿数据

扩展卡尔曼滤波可以融合多种传感器,提高系统状态估计的精度和鲁棒性,减少单一传感器带来的累积误差和漂移,其主要包括两个过程:预测和更新。预测主要通过系统模型和速度控制向量来预测下一时刻的机器人状态,更新步骤主要使用里程计数据、IMU 数据和预测状态对状态进行修正。

定义机器人状态向量为式(3),其中各分量分别为机器人在  $x$  轴坐标、 $y$  轴坐标、航向角、线速度、角速度。

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \\ v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过速度控制向量和系统模型来预测下一时刻的状态,状态转移模型见式(4),  $\mathbf{x}_{k-1}$  为上一个时刻的状态向量,  $\mathbf{u}_k$  为当前时刻的控制输入,包括加速度、角速度。

$$\mathbf{x}'_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_k) \quad (4)$$

根据运动学模型式(1)和状态转移模型式(4)可以得到机器人的状态转移方程

$$\begin{cases} x_k = x_{k-1} + v_{k-1} \cdot \cos(\theta_{k-1}) \cdot \Delta t \\ y_k = y_{k-1} + v_{k-1} \cdot \sin(\theta_{k-1}) \cdot \Delta t \\ \theta_k = \theta_{k-1} + \omega_{k-1} \cdot \Delta t \\ v_k = v_{k-1} + a_k \cdot \Delta t \\ \omega_k = \omega_{k-1} + \omega_{\text{IMU}} \cdot \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

状态转移方程式(式(5))的雅可比矩阵为  $F_k$ 。

$$F_k =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -v_{k-1} \sin(\theta_{k-1}) \Delta t & \cos(\theta_{k-1}) \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & v_{k-1} \cos(\theta_{k-1}) \Delta t & \sin(\theta_{k-1}) \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

预测协方差为

$$P'_k = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k \quad (7)$$

式中: $P_{k-1}$ 为上一个时刻的协方差矩阵; $Q_k$ 为过程噪声协方差矩阵。

$P_0$ 初值被设置为一个 $6 \times 6$ 的对角矩阵

$$P_0 = \begin{bmatrix} 0.001^2 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & 0.001^2 & & \end{bmatrix} \quad (8)$$

过程噪声协方差矩阵 $Q$ 被设置为一个 $6 \times 6$ 的对角矩阵

$$Q = \begin{bmatrix} 1\ 000^2 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & 1\ 000^2 & & \end{bmatrix} \quad (9)$$

轮式里程计和IMU直接提供对机器人位姿的观测,扩展卡尔曼滤波使用观测状态和预测状态以及卡尔曼增益更新状态向量。

里程计的观测模型通常可以定义为 $z_k = h(x_k) + v_k$ ,其中 $h(x)$ 为状态模型的机器人状态向量到观测数据的非线性映射, $v_k$ 为测量噪声, $z_k$ 为里程计数据, $z_k$ 各分量通常表示为

$$\begin{cases} z_x = x_k \\ z_y = y_k \\ z_\theta = \theta_k \end{cases} \quad (10)$$

该观测向量的雅可比矩阵

$$H_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

卡尔曼增益为

$$K_k = P'_k H_k^T (H_k P'_k H_k^T + R_k)^{-1} \quad (12)$$

式中: $R_k$ 为测量噪声的协方差矩阵。

轮式里程计的测量噪声协方差矩阵为 $6 \times 6$ 的单位阵,如式(13)所示。

$$R_{odom} = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

IMU的测量噪声协方差矩阵为 $3 \times 3$ 的单位阵,如式(14)所示。

$$R_{imu} = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

使用卡尔曼增益、里程计观测噪声、预测阶段

的机器人预测状态可以更新为

$$x_k = x'_k + K_k(z_k - h(x'_k)) \quad (15)$$

协方差更新为

$$P_k = (I - K_k H_k) P'_k \quad (16)$$

通过robot\_pose\_ekf功能包可以实现对里程计信息和IMU信息的融合,在二维平面中实现机器人位姿更加精确的估计。

#### 1.4 相机标定

通过ArUco码获取相机在ArUco码坐标系下的位姿信息时,需用到相机的内参和畸变参数,这两个参数需通过标定RGB相机来获得。相机标定可以通过使用数学方法来确定相机的内部参数,从而确定图像与真实世界的关系。

四轮牵缆机器人中相机相平面内图像投影和真实世界中物体坐标的关系可以通过式(17)投影方程来描述,其中 $(u, v)$ 为ArUco码在像平面投影的坐标, $(X, Y, Z)$ 为物体(即ArUco码)在真实世界中的坐标。其中 $K$ 、 $R$ 、 $t$ 需要通过相机标定得到。 $K$ 为内参矩阵, $R$ 为外参矩阵中的旋转部分, $t$ 为平移向量。

$$s \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \cdot [R|t] \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

相机内参矩阵通常表示为 $K$ ,见式(18),其中 $f_x$ 为水平焦距, $f_y$ 为垂直焦距, $(c_x, c_y)$ 为光轴和图像平面的交点。

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

此外,相机镜头也会导致图像产生畸变,从而影响ArUco码的识别结果,畸变有径向畸变和切向畸变,畸变点 $(x', y')$ 是由径向畸变和切向畸变合成作用在未畸变点 $(x, y)$ 的结果。径向畸变可以描述为

$$\begin{cases} x' = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y' = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{cases} \quad (19)$$

式中: $r^2 = x^2 + y^2$ ,是点到图像中心的距离, $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 为径向畸变系数。

切向畸变可以描述为式(20),式中 $p_1$ 、 $p_2$ 为切向畸变系数。

$$\begin{cases} x' = x + [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \\ y' = y + [2p_2 xy + p_1(r^2 + 2y^2)] \end{cases} \quad (20)$$

ROS官方提供了camera\_calibration,可以通过该ROS功能包和棋盘标定板对单目相机进行标定。

使用  $11 \times 13$  的棋盘标定板,通过订阅相机话题,启动 camera\_calibration 功能包,在标定过程中将标定板在画面中上下移动、使标定板在相机视野中移动到远处和近处、使标定板在相机视野中旋转。标定过程如图 9 所示,当评价条形变成绿色时进行标定计算。

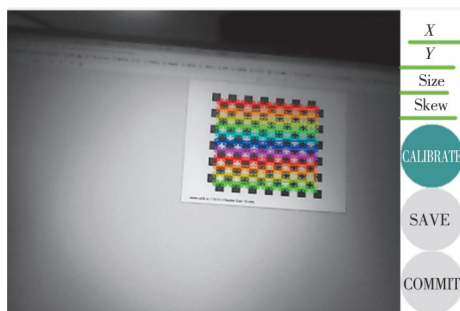


图 9 camera\_calibration 标定过程

Fig. 9 Camera\_calibration procedure

标定完成后得到相机内参为

$$\begin{bmatrix} 778.7091 & 0 & 423.54506 \\ 0 & 786.51707 & 215.38159 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

畸变参数为

$$\begin{bmatrix} 0.001745 & 0.207672 & 0.000850 & 0.012558 \\ 0.000000 \end{bmatrix} \quad (22)$$

### 1.5 惯性导航融合视觉传感器估计位姿

ArUco 码是一种广泛应用于计算机视觉领域的二值化标记,由一个宽的黑边和一个内部的二进制矩阵组成,在 ArUco 码中黑色方块表示 0,白色方块表示 1,可以用于相机姿态估计、机器人定位等场景。一张  $7 \times 7_{100}$ 、边长为 100 mm, ID 为 1 的 ArUco 码图案如图 10 所示。



图 10 ArUco 码图形

Fig. 10 ArUco marker pattern

采用 OpenCV 生成若干张 ArUco 码,将这些码固定在电缆沟一侧墙上,生成 ArUco 码的字典列表采用  $7 \times 7_{100}$ ,边长设置为 100 mm。

方法流程如下:

1)初始化惯性传感器和相机。

2)订阅惯性传感器话题,订阅 RGB 相机发布的 ROS 话题,通过话题得到四轮牵缆机器人在运动过程中相机拍摄到的每一帧图像,将每一帧图像转换成灰度图,以便更容易识别出 ArUco 码的黑白格式。

3)判断相机视野内是否存在 ArUco 码,若没有就回到步骤 2),继续检测是否存在 ArUco 码。

4)当 ArUco 码出现在相机视野内时,获取每张 ArUco 码 4 个角点的坐标和 ArUco 码自身的 ID。然后通过标记的位置、标记的实际物理尺寸、相机标定得到的内参矩阵和相机的畸变系数,使用 PnP 算法可以计算得到 ArUco 码在相机坐标系下的旋转向量和平移向量,旋转向量转换为旋转矩阵,可以计算出相机在 ArUco 码坐标系下的位姿。通过相机坐标系、机器人坐标系之间的转换,可以计算得到四轮牵缆机器人在每个 ArUco 坐标系下的位姿。

5)随着机器人的运动,当相机中心与 ArUco 码中心在  $z$  轴方向夹角小于一定阈值时(采用  $1^\circ$  作为阈值),通过先验信息,即预先测定的每张 ArUco 码在世界坐标系下的坐标,可以计算出在检测到 ArUco 码且符合角度阈值的这一时刻机器人在世界坐标系下的位置以及四轮牵缆机器人相对于每个 ArUco 码中心点处的距离,可以使用该位姿来校正机器人位姿。当有多个二维码同时出现在相机视野内时,距离最近的 ArUco 码将被用来修正位姿。

6)该时刻通过 ArUco 码计算得到的基准位姿与惯性导航传感器得到的位姿会有偏差,记录这个偏差。由于 ArUco 码校正位姿是一个离散的过程,在没有 ArUco 码校正的一段运动过程中,该偏差被用来实时校正惯性传感器位姿数据,直到下一张 ArUco 码出现更新这个偏差值。

图 11 所示为该校正位姿算法的流程图。该流程图包含了校正过程的处理逻辑,流程图中没有包含运动控制部分的逻辑。

### 1.6 控制器设计

在 ArUco 码对四轮牵缆机器人的位置进行校正后,需使用校正后的位姿对四轮牵缆机器人的运动进行控制。电缆沟中供四轮牵缆机器人运行的路面不平整、路面的起伏以及各种可能出现的障碍会导致其在运行过程中打滑或者在运动方向的垂直方向出现位置的偏差,因此,需根据校正后的位置与预期位置的偏差,使用比例积分微分控制(proportional-integral-derivative control, PID)控制器,使四轮牵缆机器人能够回到预期轨迹上。在电



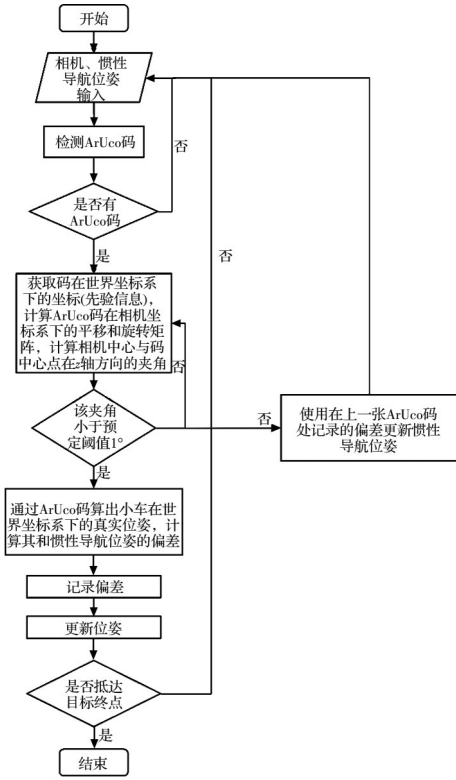


图11 位姿修正流程

Fig. 11 Pose correction process

缆敷设场景中,主要是对四轮牵缆机器人在前进方向上的运动距离和入弯时的转弯进行控制。

对于转弯的情况,由于电缆沟中的转弯通常为直角,因此在弯道的入弯口和出弯口分别固定一张ArUco码,用作入弯和出弯的判定。直角转弯中入弯处和出弯处的二维坐标先验信息有一个轴的坐标值相等,因此,根据先验信息可以判定入弯处ArUco码的ID,当检测到该ID,且在ArUco码坐标系下,相机与码中心点的夹角在一定角度阈值范围内时,将角度判定阈值设为 $1^\circ$ 。通过该码的ID和存储在参数服务器里先验信息中的下一张码的位置,可以判定转弯方向,计算转向角速度。经过多次试验发现,在电缆沟场景下,通常可以将机器人角速度设置为 $0.21 \text{ rad/s}$ 、线速度设置为 $0.05 \text{ m/s}$ ,使机器人朝预定方向转弯,当相机与出弯处ArUco码中心点夹角在 $1^\circ$ 范围内时,判定转弯结束。

当四轮牵缆机器人沿直线运动时,在电缆沟中前进方向的垂直方向上,其校正后的坐标值为 $y'$ ,预期坐标值为 $y$ 。因此在某一时刻 $t$ ,四轮牵缆机器人在该轴上坐标值的偏差为 $e(t)$ ,其中 $e(t) = y - y'$ 。在离散系统中,取上一次PID控制器采样点的时间戳为 $t'$ ,取本次PID控制器采样点的时间戳为 $t$ ,两次PID控制之间的时间微分项 $dt = t - t'$ 。设比例增益为 $K_p$ ,积分增益为 $K_i$ ,微分增益为 $K_d$ ,可以得到PID控制器的最终输出为

$$O = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (23)$$

式中:第1项为比例控制项;第2项为积分控制项;第3项为微分控制项。通过调整 $K_p$ 可以加快系统响应,调整 $K_i$ 可以减少稳态误差,调整 $K_d$ 可以减小振荡。最终四轮牵缆机器人的PID控制器参数为 $K_p=0.1$ 、 $K_i=0$ 、 $K_d=0.7$ 。通过PID控制器的输出,给下位机发布绕 $z$ 轴的角速度,使四轮牵缆机器人能回到预期位置,实验结果表明,该参数可以控制四轮牵缆机器人较为稳定地在电缆沟中行驶。

## 2 实验与讨论

### 2.1 实验环境

搭建如图12所示的实验环境,仿照真实电缆沟环境,按照一定间隔安装电缆支架,在电缆支架间隙固定若干张ArUco码,对机器人作位置修正。



图12 实验环境

Fig. 12 Experimental environment

实验过程中主要关注机器人在电缆沟环境运动过程中的位置误差以及机器人在一段路程中往返运动之后的位置误差。

### 2.2 ArUco码检测试验

在四轮牵缆机器人上实时检测ArUco码,获取相机位姿信息,如图13所示。可以获得码编号和码的位姿信息,在位姿信息中可以解析出ArUco码在相机坐标系下 $z$ 轴的坐标值,即码到相机平面的垂直距离,该距离被用作PID控制器控制机器人运动的重要参数,对该距离的准确性进行实验。

在测试中,ArUco码能准确识别码编号。由于在电缆沟工作环境中相机到ArUco码的距离通常不超过 $1 \text{ m}$ ,因此,在 $1 \text{ m}$ 范围内测得了15组距离,如表1所示。将该距离与实际距离比较,平均误差约为 $0.02344 \text{ m}$ ,相机距离ArUco码越近,测量误差越小。由于电缆沟很窄,机器人在实际电缆沟施工环境中运行时,相机通常距离ArUco码 $20 \sim 40 \text{ cm}$ ,在该范围内,通过ArUco码计算的距离和位姿估计可以达到较高精度。



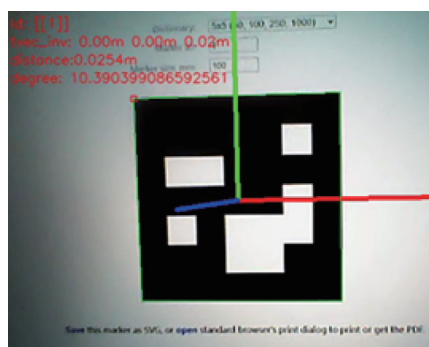


图 13 实时检测 ArUco 码获取相机位姿

Fig. 13 Real-time detection of ArUco markers to obtain the camera pose

表 1 真实距离与 ArUco 码识别得到的距离对比

Table 1 Comparison between actual distance and distance obtained by ArUco markers recognition

组数	相机测得距离/m	真实距离/m
1	0.200 7	0.2
2	0.253 7	0.25
3	0.314 2	0.3
4	0.366 7	0.35
5	0.421 5	0.4
6	0.477 6	0.45
7	0.536 0	0.5
8	0.579 6	0.55
9	0.637 2	0.6
10	0.675 6	0.65
11	0.723 1	0.7
12	0.763 8	0.75
13	0.831 2	0.8
14	0.872 3	0.85
15	0.947 4	0.9

### 2.3 四轮牵缆机器人位置估计实验

位置估计实验主要验证两项内容:

1) 机器人在电缆沟模拟环境中根据修正的位置按照规划路径行驶;

2) 在电缆敷设过程中往返运动多次后机器人位置估计的误差。

图 14 展示了在里程计、惯性导航、惯性导航融合视觉传感器 3 种位置估计方法下四轮牵缆机器人在电缆沟模拟环境中的运动轨迹,该轨迹包含电缆沟运行场景中的直线和弯道。在运动开始位置会有一张 ArUco 码,通过视觉来修正惯性导航位置,之后每运行 100 s 左右(实际运行距离为 2.5 m)会有一张 ArUco 码修正惯性导航位置。弯道最窄处宽度为 1 m,最宽处宽度为 1.5 m,机器人根据规划路径完成直线和弯道运动后来目标地点。

图 15~图 17 展示了 3 种方法在运动的每个采样点的均方根误差,以此验证机器人在电缆沟模拟

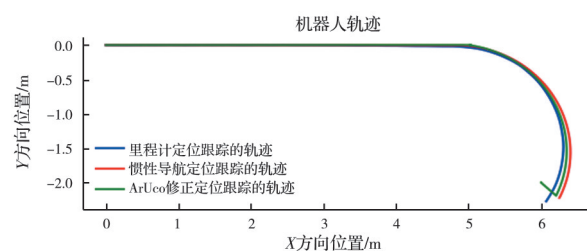


图 14 四轮牵缆机器人在电缆沟模拟环境中不同位姿修正方法的运动轨迹

Fig. 14 Motion trajectories of four-wheel cable-pulling robot under different pose correction methods in cable trench simulation environment

环境中的定位效果。

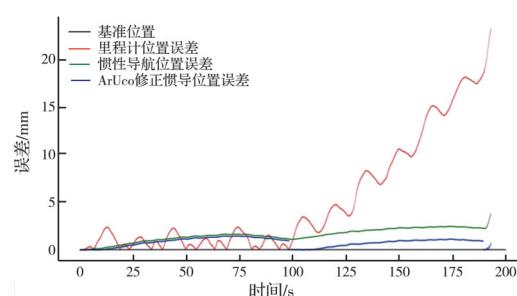


图 15 单次运行中里程计、惯性导航、惯性导航融合视觉的位置估计误差比较

Fig. 15 Comparison of position estimation errors between odometer, inertial navigation, and the fusion of inertial navigation and vision in a single run

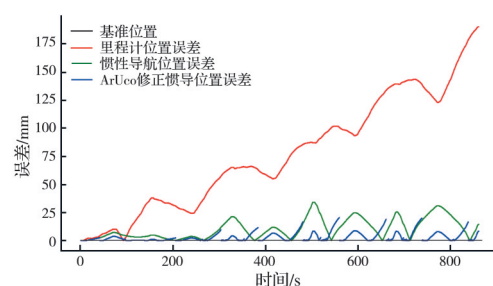


图 16 2 m 长实验环境中里程计、惯性导航、惯性导航融合视觉的位置估计误差比较

Fig. 16 Comparison of position estimation errors between odometer, inertial navigation, and the fusion of inertial navigation and vision in a 2-meter long experimental environment

在图 15~图 17 中,红色曲线为里程计轨迹和误差,绿色曲线为惯性导航轨迹和误差,蓝色曲线为惯性导航融合视觉修正后的轨迹和误差。

图 15 中,在单次运行 5 m 距离之后,机器人轮式里程计位置误差出现较大变化,且误差会随时间快速积累,实验中最大误差可以达到 20 mm;惯性导航融合 IMU 的数据可以对里程计数据进行修正,但由于 IMU 自身也有误差,位置估计误差也会随时间积累,但误差较小,实验中最大误差约为 3 mm;

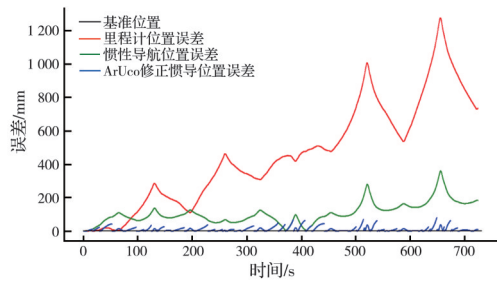


图17 6 m环境中里程计、惯性导航、惯性导航融合视觉的位置估计误差比较

Fig. 17 Comparison of position estimation errors between odometer, inertial navigation, and the fusion of inertial navigation and vision in a 6-meter-long experimental environment

惯性导航融合视觉修正方法利用先验信息修正惯性导航传感器融合的误差,使得实验过程中机器人误差最大约为1.5 mm,与真实轨迹拟合度最高。

由于二次电缆敷设是一个反复的过程,机器人需要在电缆沟内起点和终点之间反复运动,以抓取和牵引不同的电缆,因此,实验考虑了机器人往复运动引起传感器误差的情况:

1)图16展示了机器人在2 m长的范围内往复运动5次之后3种方案的误差,机器人速度为0.05 m/s。里程计定位位置平均均方根误差为77.474 2 mm,惯性导航定位位置平均均方根误差为10.396 3 mm,基于ArUco码,通过视觉修正惯性导航定位的位置平均均方根误差为3.412 1 mm。

2)图17展示了机器人在6 m长的范围内往复运动5次之后3种方案的误差,将机器人速度改为了0.2 m/s。里程计定位得到的位置平均均方根误差为461.667 3 mm,惯性导航定位得到的位置平均均方根误差为106.406 8 mm,基于ArUco码,通过视觉修正惯性导航定位的位置平均均方根误差为11.364 5 mm。

图中修正惯性导航位置误差发生突变的点为机器人在ArUco码张贴点修正位置的点。

### 3 结论

针对现有移动机器人定位技术在相对封闭且特征不明显或特征单一环境中的不足,提出一种基于ArUco码通过视觉修正惯性导航位姿的方法,实现了四轮牵缆机器人在变电站二次电缆敷设施工过程中的精准定位。首先将轮式里程计和IMU数据通过扩展卡尔曼滤波融合,以减小定位误差,然后根据ArUco码识别计算出的位姿修正惯性导航得到的机器人定位数据。实验表明,在二次电缆敷

设这种需要牵缆机器人往复运动的施工场景中,基于ArUco码,通过视觉方法修正惯性导航误差的方法能有效修正传感器误差,得到更高精度的机器人定位信息。在一段路程上往复运动的任务中,相比惯性导航方案,位置误差约减少了67.17%。

### 参考文献

- [1] TRIPUTRA F R, IRAWAN B B, GIYANA R F, et al. Performance of low-cost GPS-RTK for navigating AGV outdoors [C]//2022 6th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE). December 13-14, 2022, Yogyakarta, Indonesia. IEEE, 2022: 740-745.
- [2] LOBAZEV N, MASLENNIKOVA E, KLOKOV A. Correction of the odometry system of a robotic wheeled platform using GPS RTK technology [C]//2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon). January 29-31, 2024, Saint Petersburg, Russian Federation. IEEE, 2024: 219-225.
- [3] WANG T J, XIAO J F, WANG X, et al. Research on the application of RTK high-precision UAV differential positioning technology in power transmission lines [C]//2024 3rd International Conference on Energy and Power Engineering, Control Engineering (EPECE). February 23-25, 2024, Chengdu, China. IEEE, 2024: 182-186.
- [4] 熊晨曦. 多传感器融合的变电站巡检机器人SLAM研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.  
XIONG C X. Multisensordata-fusion based SLAM for substation inspection robot [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [5] 经韬. 基于视觉和IMU融合的变电站巡检机器人SLAM技术研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2023.  
JING T. Research on SLAM technology for substation inspection robots based on vision and IMU fusion [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2023.
- [6] 姜志雷. 基于2D激光SLAM的变电站巡检机器人导航技术研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.  
JIANG Z L. Research on navigation technology of substation inspection robot based on 2D laser SLAM [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.
- [7] 张伟. 基于3D激光雷达的变电站巡检机器人定位与建图方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.  
ZHANG W. Research on localization and mapping of substation inspection robot based on 3D lidar [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [8] 叶泳骏. 车间巡检机器人SLAM导航系统研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.

- YE Y J. Research on SLAM navigation system of the inspection robot for workshop [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021.
- [9] 邢晓龙. 矿井下巡检机器人自定位和环境建图算法研究 [D]. 北京: 北京石油化工学院, 2024.
- XING X L. Research on self-positioning and environment mapping algorithm of inspection robot under mine [D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2024.
- [10] LI S, ZHOU X H, CHENG G Z, et al. A scheme of installing ALC wall panels based on autonomous mobile robot [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 94: 109991.
- [11] KHAZETDINOV A, ZAKIEV A, TSOY T, et al. Embedded ArUco: A novel approach for high precision UAV landing [C]//2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). May 13-15, 2021. Kazan, Russia. IEEE, 2021: 1-6.
- [12] DE CORSO T, DE VITO L, PICARIELLO F, et al. Optical multi-camera UAV positioning system via ArUco fiducial markers [C]//2023 IEEE 10th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). June 19-21, 2023, Milan, Italy. IEEE, 2023: 352-357.
- [13] 张文, 杨耀鑫, 黄天帆, 等. ArUco 辅助的爬壁机器人自主定位方法[J]. 机器人, 2024, 46(1): 27-35, 44.
- ZHANG W, YANG Y X, HUANG T Z, et al. ArUco-assisted autonomous localization method for wall climbing robots [J]. Robot, 2024, 46(1): 27-35, 44. (in Chinese)
- [14] 王岚颖. 基于混合导航方式的 AGV 室外导航系统研究 [D]. 济南: 山东大学, 2023.
- WANG L H. Research on AGV outdoor navigation system based on hybrid navigation mode [D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [15] ROOS-HOEFGEEST S, GARCIA I A, GONZALEZ R C. Mobile robot localization in industrial environments using a ring of cameras and ArUco markers [C]//IECON 2021-47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. October 13-16, 2021. Toronto, ON, Canada. IEEE, 2021: 1-6.

(编辑 胡英奎)