

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.049

厂区电力巡检机器人综合位姿误差反馈控制方法

宁雪峰, 韦薇, 秦立斌

(广东电网有限责任公司 东莞供电局, 广东 东莞 523120)

摘要: 由于受微小扰动和位姿偏差影响, 厂区内的电力巡检机器人容易出现位姿偏移。提出一种综合位姿误差反馈控制方法。从全局坐标系和局部坐标系两方面对机器人的运动学展开分析, 得到实际位姿与目标位姿之间偏差; 对机器人的关节建立杆件坐标系, 得到机器人末端执行器的误差, 构建综合位姿误差反馈控制目标函数; 利用输入运动规划法, 将输入附加误差修正运动控制结果添加到机器人的各个关节中, 约束关节位姿发生位移; 通过将末端执行器微小扰动和位姿偏差相互补偿, 完成对机器人综合位姿误差的反馈控制。实验结果表明: 有效降低了机器人的位姿误差, 满足电力巡检机器人使用需求, 且反馈控制效率较高。

关键词: 电力巡检机器人; 综合位姿误差反馈控制; 输入运动规划法; 位姿偏移量; 微小扰动

中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)01-0240-05

Integrated Position and Attitude Error Feedback Control Method for Power Inspection Robot in Plant Area

NING Xuefeng, WEI Wei, QIN Libin

(Dongguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Dongguan 523120, China)

Abstract: In order to cope with the pose deviation of power inspection robot in factory due to minor disturbances and pose deviations, a comprehensive posture error feedback control method is proposed. The kinematics of the robot is analyzed from both global and local coordinate systems, and the deviation between the actual posture and the target posture is obtained. A rod coordinate system for the robot's joints are established, and a comprehensive posture error feedback control objective function is constructed. Using the input motion planning method, input additional error correction motion control results are added to each joint of the robot to constrain the position and posture displacement of the joint. The feedback control of the robot's comprehensive posture error is completed by compensating each other for the small perturbation and posture deviation of the end effector. The experimental results show that the proposed method can effectively reduce the posture error of the robot, meet the use requirements of the power inspection robot, and have high feedback control efficiency.

Keywords: power inspection robot; integrated position and attitude error feedback control; input motion planning method; posture offset; minor disturbance

0 引言

目前, 电力巡检机器人的研究已经取得了较大进展。一些大型电力企业已经开始使用巡检机器人进行设备巡检。其中, 厂区巡检工作由人工巡检转换为机器人巡检, 在提高巡检效率的同时大大降低了漏检和误检的概率。当电力巡检机器人运行时, 受到厂区温度、湿度、照明等因素以及不可预测障碍物的影响, 导致机器人行进方向在一定程度上偏离预先规划好的轨道, 产生综合位姿误差。因此, 如何消除或降低机器人末端执行器的位姿误差, 成为电力企业需要重点考虑的问题。周旭等^[1]针对机器人末端位姿误差, 利用全

梯度标准粒子群优化反馈神经网络构建末端位姿补偿模型。田志程等^[2]利用超限学习机神经网络针对机器人提出一种位姿补偿方法。

本文针对厂区电力巡检机器人提出一种综合位姿误差反馈控制方法。首先, 对巡检机器人运动学方程进行分析, 通过建立杆件坐标系判断实际位姿与理想位姿之间的偏差; 其次, 建立巡检机器人综合位姿误差反馈控制目标函数, 在机器人的每个关节上添加一个位姿偏移量, 使其与末端执行器的微小扰动相互抵消, 从而实现电力巡检机器人的综合位姿误差反馈控制; 最后, 将此方法应用在实验测试中, 通过验证该方法实现了综合位姿误差的有效反馈控制。

基金项目: 南方电网公司科技资助项目 (031900KK52220003)

第一作者简介: 宁雪峰 (1982—), 男, 安徽马鞍山人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力智能运维, cj5454545@yeah.net。

1 综合位姿误差目标函数构建

1.1 基于运动学分析的位姿偏差计算

厂内电力巡检机器人运动学分析^[3]可通过向量法和矩阵法来实现。在综合考虑之下,选择矩阵法建立机器人运动学函数,如图1所示。

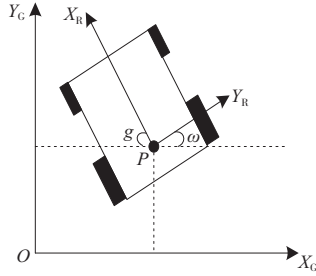


图1 机器人运动坐标系

如图1所示, X_G-Y_G 、 X_R-Y_R 分别为机器人运动的全局坐标系和局部坐标系。点 P 作为两个驱动轮之间的中点,坐标为 (x, y) 。 g 代表机器人的航向角^[4]。机器人运动学方程表达式如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos g \\ \sin g \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \omega \quad (1)$$

式中: v 表示局部坐标系下 P 点的速度值,可由机器人编码器中的位移数据推理得到; ω 表示局部坐标系中点 P 的角速度,由机器人前端的倾角传感器实际测量确定。

电力巡检机器人实际运行方向 (x_d, y_d) 表达式为

$$\begin{cases} x_d = v_d \cdot \cos g_d \\ y_d = v_d \cdot \sin g_d \\ g_d = w_d \end{cases} \quad (2)$$

受厂区复杂环境的影响,电力巡检机器人实际位姿与理想位姿之间存在一定的偏差,获取位姿偏差计算公式为

$$\Delta X_d = \begin{cases} \Delta x_d = x - x_d \\ \Delta y_d = y - y_d \\ \Delta g_d = g - g_d \end{cases} \quad (3)$$

1.2 综合位姿误差反馈控制目标函数构建

通过分析电力巡检机器人的运动学函数,对相邻杆件之间的误差进行转移,建立巡检机器人末端执行器综合位姿误差反馈控制目标函数。与此同时,将齐次变换矩阵引入到位姿误差函数中,

分析两个相邻杆件之间的坐标位姿关系,完成杆件坐标系的建立,如图2所示。

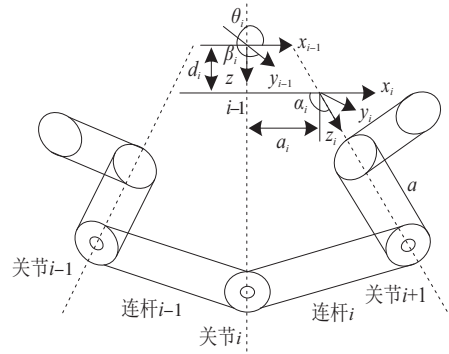


图2 杆件坐标系

由图2可知,齐次变换矩阵 T_i^{i-1} 对任意两个相邻杆件 $i-1$ 和 i 之间的坐标关系起着决定性作用。

假设关节和关节轴线处于理想的平行状态,杆件坐标系^[5]就建立在操作器的延伸线上。在机器人综合位姿误差反馈控制目标函数中,主要对连杆偏移 d_i 、关节轴线扭角 α_i 、连杆长度 a_i 、扭角 β_i 和关节转角 θ_i 进行分析。当机器人两个关节连杆之间不为平行状态时, $\beta_i = 0$; 当两个关节连杆为平行状态时, $d_i = 0$, β_i 是否为0取决于杆件建造时是否存在误差。由参数得到的齐次变换矩阵为 $T_i^{i-1} = R(z, \theta_i) T(z, d_i) T(z, a_i) R(x, \alpha_i) R(y, \beta_i)$

(4)

式中: R 表示旋转矩阵; T 表示转置矩阵。

利用齐次变换矩阵 T_i^{i-1} ,对机器人杆件之间的几何关系和瞬间位姿作出描述。假设巡检机器人共有 n 个关节,那么在误差约束下,则有

$$T_n^0 = \Delta X \prod_{i=1}^n T_i^{i-1} \quad (5)$$

通常情况下,机器人参数的实际值^[6]与真实值之间始终存在着误差,本文利用 δ_{d_i} 、 δ_{α_i} 、 δ_{a_i} 、 δ_{β_i} 、 δ_{θ_i} 来表示杆件参数偏差值。通过分析各项杆件参数偏差值,就可得到机器人末端执行器的综合位姿误差为^[7]

$$dT_n^0 = \sum_{i=1}^n (T_1^0 T_2^1 \cdots T_i^{i-1} \Delta_i T_{i+1}^i \cdots T_n^{n-1}) \quad (6)$$

机器人末端执行器的综合位姿误差包括微转动 γ_i^i 、微移动 d_i^i ,表达式分别为:

$$d_i^i = M_1 \delta_{\theta_i} + M_2 \delta_{d_i} + M_3 \delta_{\alpha_i} + M_4 \delta_{a_i} + M_5 \delta_{\beta_i} \quad (7)$$

$$\gamma_i^i = M_2 \delta_{\theta_i} + M_3 \delta_{\alpha_i} + M_6 \delta_{\beta_i} \quad (8)$$

式中 M_i 表示一个 $3 \times n$ 的经验约束矩阵。将机器

$$\delta_n^0 = \mathbf{T}_n^0 \delta_n^n [\mathrm{d}\mathbf{T}_n^0]^{-1} \quad (9)$$
$$\varepsilon = \frac{A \times \delta_n^0}{X} \quad (10)$$
$$\Delta \mathbf{D} \approx \Delta \theta_i \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial d_i^i}{\partial \gamma_i} \right) \boldsymbol{\varepsilon} \quad (11)$$

位姿误差反馈控制的目的是利用末端执行器产生的微小扰动与位姿误差二者之间做抵消。如果机器人关节具有一定的冗余度,就不需要对所有关节进行控制,只需选取其中几个即可。由于电力巡检机器人的综合位姿误差具有多种不确定性因素,尤其是当机器人关节和连杆具有柔性时,就需要利用逐步逼近的方法来求解 $\Delta\theta$,如图3所示。

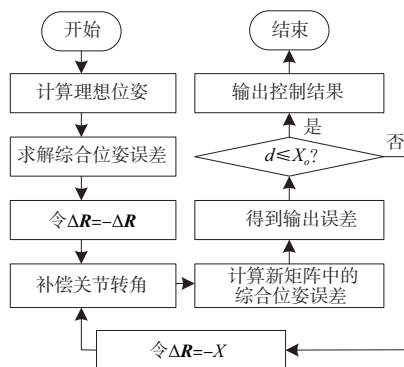


图4所示的电力巡检机器人主要应用于10kV变电站开关室等环境。该机器人具备自主导航、末端作业工具精准定位、设备状态智能识别等功能。机器人所处10kV变电站开关室相关参数为电压等级10kV;电流1000A;功率小于

1 000 kVA;额定电压 11 kV;短路电流 30 kA;电源稳定性为电压波动量不大于 $\pm 5\%$ 。环境参数为 1 500 lx光照、28℃温度、2.4 m/s 风速。



图 4 电力巡检机器人测试

设置所提厂区电力巡检机器人综合位姿误差反馈控制方法的参数为补偿角 θ_{Wi} 为 3° ; x 、 y 、 z 在各个方向上的综合位姿误差要求小于 10 mm;采样周期为每 50 ms 采样一次,共采集 700 ms 的数据。

为了真实地还原厂区环境电力巡检过程的同时,可以实时监测和修正电力巡检机器人综合位姿误差,在实验过程中设计了包含厂区电力巡检机器人综合位姿误差测量系统,并将其安装在了机器人平台上。该系统软技术参数如表 1 所示。

表 1 机器人综合位姿误差测量系统技术参数

技术参数	数值
轨迹误差/mm	0.1
轨迹重复性误差/mm	0.3
拐角偏差/ $^\circ$	0.003

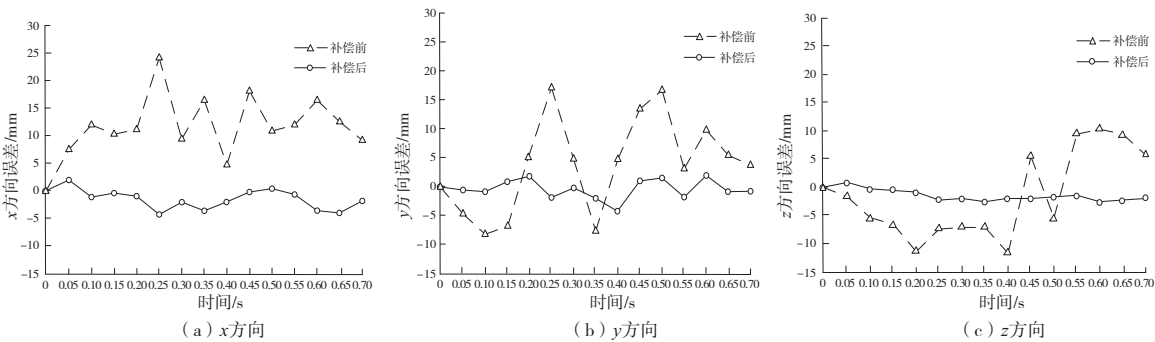


图 5 位姿误差反馈控制前后 x 、 y 、 z 方向误差值对比

从图 5 中可以很明显地看出,经过所提方法进行位姿误差反馈控制后, x 、 y 、 z 3 个方向上的误差均保持在 ± 5 mm 以内,得到了有效控制,满足大多数电力巡检机器人的使用要求。

接下来将所提方法与文献[1]全梯度标准粒

根据上述参数设定设计测试系统,并将所提方法应用于设计系统中进行测试,具体测试过程如下。

步骤 1:初始化设计系统。

步骤 2:初始化控制方法。

根据所提方法参数设置情况,初始化所提厂区电力巡检机器人综合位姿误差反馈控制方法。

步骤 3:编写控制程序。

根据初始化后的所提方法编写电力巡检机器人控制程序。该程序能够读取传感器数据,计算控制输入,并发送控制指令来实现机器人的运动控制。

步骤 4:进行实验。

设定巡检机器人的行进速度为 1 m/s,只做直线运动,期间没有任何误差控制措施。机器人偏离预先设定好的轨道,然后引入所提方法、文献[1]全梯度标准粒子群优化反馈神经网络算法和文献[2]ELM 神经网络算法,分别对机器人的各个关节进行补偿,进而完成行进过程中的位姿误差反馈控制实验。

步骤 5:数据处理和结果分析。

对步骤 4 获取的实验数据利用 Matlab 软件进行处理和分析,从所提方法位姿误差反馈控制前后 x 、 y 、 z 方向误差、3 种方法位姿误差反馈控制效率、3 种方法补偿角控制效果三方面的评估控制方法的效果。

3.2 结果分析

对比所提方法综合位姿误差反馈控制前后,机器人在 x 、 y 、 z 3 个方向上的误差值,具体如图 5 所示。

子群优化反馈神经网络算法、文献[2]ELM 神经网络算法在位姿误差反馈控制效率方面进行实验对比。设定巡检机器人的巡检路线长度为 50 m,利用 3 种算法分别对机器人进行位姿误差反馈控制,所用时间如图 6 所示。

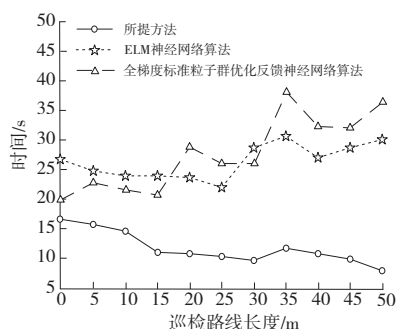


图6 3种算法位姿误差反馈控制效率对比

通过观察图6可以看出,在相同的巡检路线长度下,所提方法完成位姿误差反馈控制所用的时间最少,且变化曲线整体较为平稳。而其他两种方法均花费了较多的控制时间,且曲线变化幅度较大。由此得出结论,所提方法在实现位姿误差有效控制的前提下,可保证最高的控制效率。

最后,以角度偏移量为指标,设置初始偏移为 5° ,对比3种方法的补偿角控制效果,结果如图7所示。

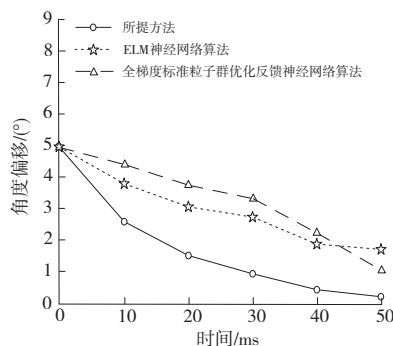


图7 3种算法的补偿角控制效果对比

通过图7可以看出,在同一控制时间下,所提方法的角度偏移控制量大于其他两种对比方法,在控制50ms后,角度偏差降低至 0° 左右,未出现失控状态。而其他两种方法还存在 2° 和 1° 的误差,虽然不会出现失控,但是相较于所提方法而言其控制能力较低。由此得出结论,所提方法在实现位姿误差有效控制的前提下,可保证补偿角控制效果较好。

4 结语

本文针对厂区电力巡检机器人提出一种综合位姿误差反馈控制方法。利用矩阵法建立巡检机器人运动学函数,分析得到实际位姿与理想位姿

之间的偏差值;在此基础上,建立了机器人运动杆件坐标系,并采用齐次转换矩阵求出机器人末端执行器与杆件坐标系之间的误差矢量,进而建立机器人综合位姿误差反馈控制目标函数;通过输入运动规划法,将位姿偏移量添加到机器人的每个关节上,抵消掉其与末端执行器的微小扰动,实现对机器人综合位姿误差的反馈控制。在实验测试中,将所提方法应用在机器人行进过程中。结果表明,所提方法对巡检机器人的综合位姿误差实现了有效控制,且具有更为理想的控制效率。

参考文献:

- [1] 周旭,鲁墨武,姜春英,等. 改进的 PSO-BP 算法在工业机器人末端位姿误差补偿中的应用[J]. 信息与控制, 2021, 50(4): 505-512.
- [2] 田志程,古华光,宋汉文. 基于视觉测量与神经网络的工业机器人位姿补偿[J]. 力学季刊, 2022, 43(2): 281-288.
- [3] 包亚杰,张伟社. 改进神经网络的汽车车身结构动力学建模分析[J]. 计算机仿真, 2022, 39(11): 189-192, 471.
- [4] 廖昭洋,胡睿晗,周雪峰,等. 基于时空混合图卷积网络的机器人定位误差预测及补偿方法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(5): 1539-1547.
- [5] 董大钊,徐冠华,高继良,等. 基于机器视觉的机器人装配位姿在线校正算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(1): 145-152.
- [6] 何德峰,徐晨辉,朱威,等. 基于滚动时域优化的移动舞台机器人位姿估计[J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49(6): 608-613, 622.
- [7] 刘志,陈恳,徐静. 基于模型和数据驱动的机器人 6D 位姿估计方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(3): 391-399.
- [8] 张磊,徐孝彬,曹晨飞,等. 基于动态特征剔除的图像与点云融合的机器人位姿估计方法[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 0610001.
- [9] 唐溪,姚锡凡,董艺,等. 基于改进 CenterNet 的焊缝起始向量检测与机器人位姿估计方法[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(9): 2865-2880.
- [10] 李志鹏,程兰,王志飞,等. 卡尔曼滤波框架下基于最大相关熵的移动机器人位姿估计[J]. 太原理工大学学报, 2021, 52(6): 936-944.
- [11] 周荣亚,刘刚. 基于卷积神经网络的柔性关节机械臂控制率设计[J]. 机械设计与制造工程, 2022, 51(10): 47-51.

收稿日期: 2023-05-18