

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2024.04.009

基于主动容错控制策略的物流机器人故障检测研究

吴永林¹, 李晓然²

(1.六安职业技术学院信息与电子工程学院信息技术系,安徽六安 237158;2.皖西学院金融与数学学院,安徽六安 237012)

摘要:以基于主动容错控制策略的物流机器人故障检测为研究对象,探索通过主动式控制策略,实现对物流机器人的故障预防、故障诊断和即时修复。提出了基于多传感器数据融合的故障诊断方法,并开发了具有主动干预能力的容错控制算法。通过仿真验证,评估了该策略对物流机器人故障检测和容错控制的有效性和可行性。结果表明,基于主动容错控制策略的物流机器人故障检测具有较高的准确率和稳定性,可以有效避免或减少故障的发生,提高物流运营效率和质量。

关键词:主动容错;控制策略;故障诊断;数据融合

中图分类号:TP242.6 文献标志码:A 文章编号:1673-1891(2024)04-0068-05

Research on Fault Detection of Logistics Robots Based on Active Fault-tolerant Control Strategies

WU Yonglin¹, LI Xiaoran²

(1.Department of Information Technology, School of Information and Electronic Engineering, Lu'an Vocational and Technical College, Lu'an 237158, Anhui, China; 2. School of Finance and Mathematics, West Anhui University, Lu'an 237012, Anhui, China)

Abstract: This paper focuses on the fault detection of logistics robots based on active fault-tolerant control strategies, and explores the realization of fault prevention, fault diagnosis, and instant repair of logistics robots through active control strategies. We propose a fault diagnosis method based on multi-sensor data fusion, and develop a fault-tolerant control algorithm with active intervention capability. The effectiveness and feasibility of this strategy for fault detection and fault-tolerant control of logistics robots are evaluated through simulation verification. The results show that the fault detection of logistics robots based on active fault-tolerant control strategies has relatively higher accuracy and stability, which can effectively avoid or reduce the occurrence of faults and improve the efficiency and quality of logistics operations.

Keywords: active fault tolerance; control strategy; fault diagnosis; data fusion

0 引言

随着物流行业的不断发展,物流机器人的应用

已经成为提高物流效率和降低人工成本的重要手段之一^[1-3]。然而由于物流场景复杂多变,物流机器人在执行任务时容易受到环境影响,机器系统自身

收稿日期:2024-09-08

基金项目:安徽省职业与成人教育学会教育科研规划课题(Azcyj128);2021年安徽省自然科学基金项目(KJ2021A1352);2023年安徽省教育厅高校人文社科重点项目(2023AH053246)。

作者简介:吴永林(1977—),男,安徽霍邱人,实验师,硕士,研究方向:大数据技术、云计算和人工智能,e-mail:rmyun808@126.com。

也存在一些不确定性,进而可能会引发机器人行进轨迹偏差、停机、碰撞等故障问题。这些故障问题不仅会导致生产效率下降,还会对物品搬运、存储等任务造成影响,甚至可能导致安全事故。因此,如何提高物流机器人的故障检测能力和容错能力,成为当前研究的焦点之一。

针对物流机器人故障检测问题,国内外已有大量相关研究,主要集中在故障诊断和容错控制2个方向。其中,有基于故障树分析法的机器人故障诊断系统设计^[4],有基于专家系统的机器人故障诊断系统^[5];同时,也有基于神经网络的主动容错控制策略设计^[6]。故障诊断主要是通过对机器人状态信息进行分析和诊断来确定故障原因和位置,从而为容错控制提供依据;容错控制则是在检测到故障后,根据具体情况采取相应的措施,保证机器人在出现故障的情况下仍能完成任务。但现有的故障检测和容错控制方法大都属于被动式控制,即在出现故障时才采取措施,无法预先避免故障的发生,也无法在故障出现前及时发现和诊断。

针对现有研究的不足,本研究提出基于主动容错的机器人控制策略,旨在针对物流机器人的故障检测和容错控制问题进行深入研究。主动容错控制策略是一种预防性控制策略,其核心思想是在机器人执行任务之前,通过对环境和系统状态的预测和分析,主动发现可能导致故障的因素,并采取相应措施进行干预和调整,从而避免或减少故障的发生。这种策略不仅可以提高机器人的自适应性和智能化程度,还可以降低故障修复的成本和时间,提高物流运营效率和质量。本文以基于主动容错控制策略的物流机器人故障检测为研究对象,探索通过主动式控制策略,实现对物流机器人的故障预防、故障诊断和即时修复。具体而言,本文提出基于环境和机器人状态的故障预测模型,设计基于多传感器数据融合的故障诊断方法^[7-8],并开发具有主动干预能力的容错控制算法。通过仿真实验,评估

该策略对物流机器人故障检测和容错控制的有效性和可行性,为进一步提高物流机器人的故障检测和容错控制能力提供参考和指导。

1 故障检测系统框架设计

为实现物流机器人在出现故障情况下的主动容错控制能力,确保其在复杂环境中持续稳定运行和高效完成任务,首要步骤是对机器人进行全面的监测和健康管理。为此,在设计物流机器人软件系统时,构建一个基于多传感器数据融合的智能故障诊断子系统至关重要,故障检测系统的框架设计如图1所示。

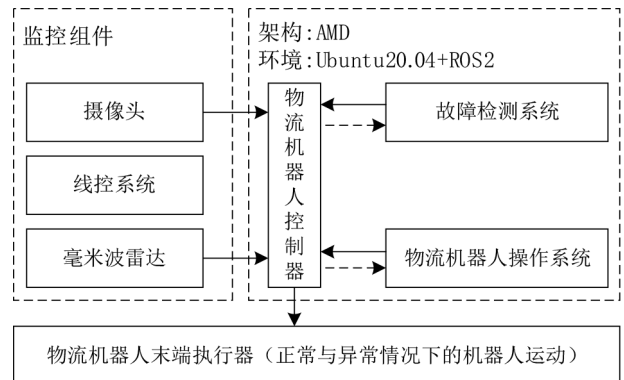


图1 物流机器人故障检测系统框架设计

本文采用的是基于多传感器融合的物流机器人故障检测系统,其中摄像头与毫米波雷达对物流机器人实时运行状况进行检测,当机器人故障或其他机器人故障轨迹重叠时可通过故障检测系统控制物流机器人进行绕行;对于物流机器人的线控系统同样采用布置于控制器中的故障检测系统进行故障监控,当某一执行器发生故障时,其CAN报文丢失或掉线,故障检测系统根据执行器对物流机器人影响程度的大小选择进入不同的故障分级。

2 主动容错控制系统

2.1 系统的硬件设计

多传感器融合:物流机器人的摄像头选择海康威视的MV-CS200型(通过集成高分辨率摄像头,并

应用图像处理和计算机视觉算法,实时监测机器人作业环境,识别潜在障碍物、路径偏差或其他异常状况)、毫米波雷达(与摄像头相辅相成,提供独立且互补的信息源,用于探测距离、速度以及物体形状,尤其是在低光照或恶劣天气条件下,提高环境感知的鲁棒性)、线控系统(涵盖物流机器人的各个关键动作部件,如电机驱动状态、转向机构精确度、制动系统的响应性能等)。

物流机器人的容错控制器选择 TRICONEX-ML093290424 型控制器,其中容错控制器是主动容错控制系统的核心组件,负责在机器人出现故障后,依据运动学模型和状态误差模型提供的信息,生成适当的控制指令以纠正机器人运动偏差,维持系统稳定。TRICONEX-ML093290424 型控制器通过三冗余架构提供容错功能,可以提供高集成度、无单点故障的容错操作,容错控制器采用 3 个相同的通道,但各通道保持独立,任何一个单点故障都不会传递到其他通道。具体设计时,可能采用冗余设计、故障隔离、动态重构、自适应控制等多种方法,保证即使在部分传感器失效、执行器故障或其他不可预见的问题发生时,机器人仍能按照预期的方式继续执行任务,最大程度地降低故障对整体任务执行的影响。主动容错控制器采用的是基于线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)设计完成。

2.2 物流机器人软件系统和主动容错模型

软件平台操作系统(采用 Ubuntu 20.04 LTS 版本,以其稳定性、安全性及良好的开源生态支持机器人软件开发)、中间件(ROS2.0(Robot Operating System),利用其消息传递机制整合多传感器数据流,实现不同传感器数据的同步、融合和处理,并通过 ROS2 的扩展功能设计故障诊断服务和节点,使得整个系统能够快速反应并适应各种故障场景)。物流机器人的状态误差模型是衡量机器人实际运动轨迹与其规划路径之间偏差的重要工具。在物

流机器人容错系统控制流程方面采用了一种动态化流程控制方案,根据传感器采集到的机器人位置、位姿等信息构建运动学模型和误差控制动态方程,通过制定决策任务和轨迹规划动态调整机器人轨迹路径。传感器同时还可以采集物流机器人的工作信息,进而判定物流机器人当前的工作状态和系统状态,最后根据故障等级控制机器人进行动作,容错控制系统的工作流程设计如图 2 所示。

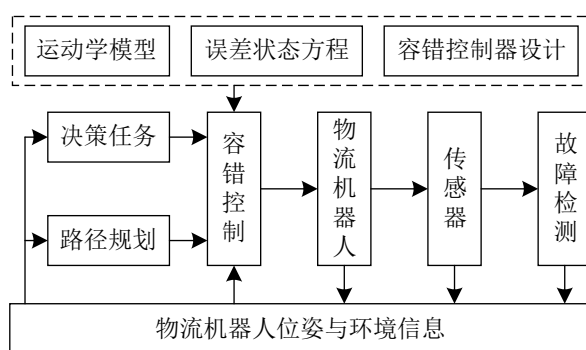


图 2 主动容错控制系统工作流程

通过实时监测和计算机器人的位置、速度、加速度等状态参数,并将其与规划路径要求进行对比,可以得到状态误差信号。对于主动容错控制而言,状态误差模型能够快速定位故障产生的影响范围和程度,进而指导控制器采取针对性的补偿措施,确保机器人尽可能贴近规划路径行驶。物流机器人为差速运动,可假设机器人存在一个导向轮,该导向轮的转动角度与物流机器人的差速量成正比^[9-10],如(1)式所示。

$$\delta = k \times \Delta n = k(n_r - n_l) \quad (1)$$

式中: δ 为虚拟导向轮转动角度; k 为虚拟导向轮与物流机器人差速量之间的线性系数; $\Delta n = n_r - n_l$, n_r 为物流机器人右侧履带转速, n_l 为其左侧转速。

依据式(1)所示虚拟导向轮原理可建立履带式物流机器人运动学模型如图 3 所示。

图 3 中, C 为机器人质心^[11-12];车辆质心到机器人前后轴的距离分别为 l_f 与 l_r ; ψ 用于描述机器人航向; v 表示机器人速度; β 表示机器人侧偏角; R 表示机器人旋转半径。基于虚拟导向轮的物流机器人

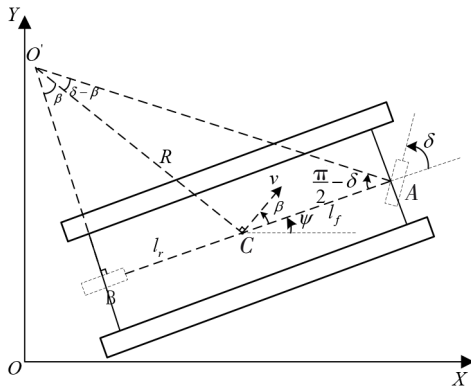


图3 物流机器人主动容错模型示意图

运动学模型是描述三维向量 V 各个分量随时间变化的微分方程组。假设很短的一段时间 dt 内, 三维向量 V 的变化量为 $dV = (dx, dy, d\psi)$ 。当 dt 非常小时, 根据运动学定律将速度 v 分解到 x 与 y 方向, 可得式(2)。

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v \cos(\psi + \beta) \\ \frac{dy}{dt} = v \sin(\psi + \beta) \end{cases} \quad (2)$$

图3中的 $\triangle O'CA$ 和 $\triangle O'CB$ 上分别使用正弦定理得式(3)。

$$\begin{cases} \frac{\sin(\delta - \beta)}{l_f} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} - \delta)}{R} \\ \frac{\sin(\beta)}{l_r} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2})}{R} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可得式(4)。

$$\begin{cases} \tan(\delta) \cos(\beta) - \sin(\beta) = \frac{l_f}{R} \\ \sin(\beta) = \frac{l_r}{R} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可得式(5)。

$$\tan(\delta) \cos(\beta) = \frac{l_f + l_r}{R} \quad (5)$$

如果假设车道半径由于低速而缓慢变化, 那么车辆方向的变化率 $\frac{d\psi}{dt}$ 必将等于车辆的角速度, 如式(6)所示。

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{v}{R} \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)可得式(7)。

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{v \cos(\beta) \tan(\delta)}{l_f + l_r} \quad (7)$$

综合式(2)与式(7)可得式(8)。

$$\begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \\ \frac{d\psi}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cos(\psi + \beta) \\ v \sin(\psi + \beta) \\ \frac{v \cos(\beta) \tan(\delta)}{l_f + l_r} \end{pmatrix} \quad (8)$$

由式(4)可得式(9)。

$$\begin{cases} l_r \sin(\beta) + \frac{l_f l_r}{R} = l_r \tan(\delta) \cos(\beta) \\ -l_r \sin(\beta) + \frac{l_f l_r}{R} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可得主动控制器的容错对象的状态量为 $X = [dx \quad dy \quad d\psi]^T$ 构建线性二次型调节器的最优性能代价函数, 同步提升和改善算法模型的容错效果。

3 仿真实验

3.1 机器人运动轨迹容错控制

对本文提出的基于主动容错控制策略的物流机器人故障检测方法进行仿真实验(重点测试主动容错控制器的有效性)。初始时设置机器人与目标路径横向误差为 3.0 m, 观测物流机器人的主动容错能力, 机器人实际路径与目标路径的跟踪路径, 具体如图4所示。

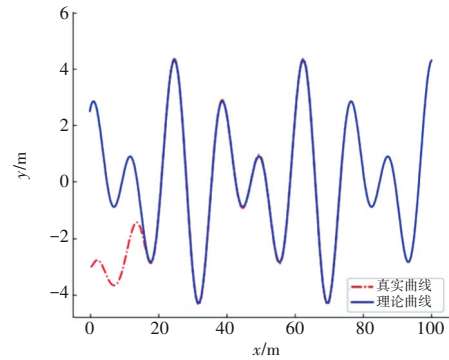


图4 基于主动容错的物流机器人路径跟踪

实验仿真时设置的条件具体参数如下: 迭代范围为 100; 迭代精度为 0.000 1; 时间间隔为 0.1 s; 物流机器人轴距为 0.7 m; 初始车速为 2 m/s。由仿真

结果可知,在初始阶段这是路径与理论路径存在一定偏差,随着容错算法的介入从 20 m 开始两者的路径基本重合,由此证明本文提出的主动容错控制器有效,在物流机器人故障的情况下可根据状态误差量提高机器人的容错性,且容错范围较大,在容错范围内当机器人行驶路径出现错误时可有效控制机器人利用状态误差量来使其收敛于目标路径附近。

为了使测试结果更加真实有效和直观,引入了传统的故障树容错算法(以下简称故障树)、专家系统容错算法(以下简称专家系统)和神经网络容错算法(以下简称神经网络)参与对比。各传统算法的最大迭代次数为 200,学习率为 0.01,分别进行物流机器人的直向运动和转向运动,若算法模型主动容错性能越好,在机器人轨迹控制过程的误差偏差就会越小。

3.2 机器人直线运动和转向运动容错控制

随机采集到了 20 个数据点(机器人直线运动和转向运动各 10 个),分别是机器人直线移动过程中位置偏差和转向过程中的角度偏差,引入传统的故障树、专家系统和神经网络等传统方法参与数据对比,结果如图 5 和表 1 所示。

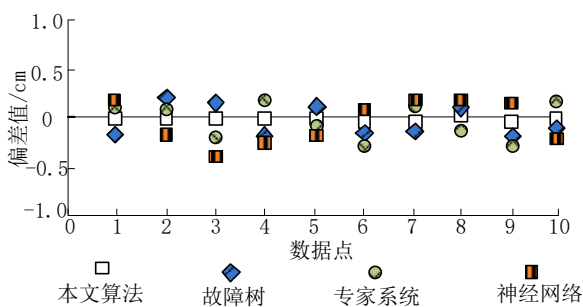


图 5 各算法直线移动中容错误差对比

从对各随机采样点的容错效果偏差对比结果(图 5)分析,本文算法控制下的误差偏差值更小。

表 1 中的数据显示,在本文算法控制下机器人移动过程中角度控制效果也要优于传统的控制算法。

表 1 各容错算法下角度偏差控制

采样点	角度偏差/(°)			
	本文算法	故障树	专家系统	神经网络
1	0.5	1.5	2.3	1.8
2	0.4	1.4	2.2	1.9
3	-0.3	-2.3	-2.5	2.3
4	0	3.6	1.7	-2.5
5	0.2	3.5	-1.8	-2.4
6	-0.3	2.4	3.4	-2.3
7	0.2	-1.7	3.5	1.4
8	0.1	-2.4	-1.9	1.8
9	0.1	2.5	-2.0	-2.2
10	0.3	-1.6	1.5	-2.1

4 结束语

本文聚焦物流机器人系统的高可靠性和连续运作能力,以创新的主动容错控制策略为核心,展开了关于物流机器人故障预防、检测、诊断及修复机制的探讨。结合先进的控制理论与实践应用,本文首先对现有的物流机器人故障诊断系统进行了剖析,同时针对其潜在弱点与挑战,设计了一套全面而高效的容错控制系统架构。环境与机器人状态故障预测模型方面,本文提出了一种新颖的基于环境感知与机器人自身状态相结合的故障预测模型。该模型充分利用各类传感器获取的数据,结合机器学习和大数据分析手段,提前识别可能导致机器人性能下降或功能丧失的潜在故障源,从而实现从被动维修向主动维护的转变,显著提升物流机器人的可用性和寿命。(1)多传感器数据融合的故障诊断方法方面:在诊断阶段,本文设计了一种利用多传感器数据融合技术来增强故障检测精度和可靠性的方法。通过融合来自多个传感器的信息,采用优化的融合算法减少噪声干扰,提高故障特征的提取准确度,使得系统能够在早期阶段迅速准确地定位故障部位和类型,及时触发相应的容错措施。

(下转第 80 页)