

控制与决策

Control and Decision

移动机器人分段式安全自重构组合控制

郑志, 江涛, 王健翔, 于忠良, 王大涛

引用本文:

郑志, 江涛, 王健翔, 等. 移动机器人分段式安全自重构组合控制[J]. *控制与决策*, 2025, 40(3): 996–1004.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0304>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

移动机器人运动规划中的深度强化学习方法

Deep reinforcement learning for motion planning of mobile robots

控制与决策. 2021, 36(6): 1281–1292 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0470>

基于未知系统动态估计的机器人预设性能控制

Unknown system dynamics estimator for prescribed performance control of robotic systems

控制与决策. 2021, 36(5): 1040–1048 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1219>

基于虚拟结构法的多移动机器人分布式预测控制

Distributed predictive control of multiple mobile robots based on virtual structure method

控制与决策. 2021, 36(5): 1273–1280 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1136>

空间机器人捕获航天器操作的避撞柔顺复合自抗扰控制

Collision avoidance and compliant composite active disturbance rejection control of space robot capture spacecraft

控制与决策. 2021, 36(2): 355–362 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0507>

气动人工肌肉驱动的机器人控制方法研究现状概述

Overview of control methods for pneumatic artificial muscle-actuated robots

控制与决策. 2021, 36(1): 27–41 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0793>

移动机器人分段式安全自重构组合控制

郑志¹, 江涛^{1†}, 王健翔¹, 于忠良¹, 王大涛²

(1. 重庆大学自动化学院, 重庆 401121; 2. 重庆市测绘科学技术研究院, 重庆 401121)

摘要: 自重构是促进移动机器人能力升级和涌现的重要手段, 但是, 面向工程开放场景存在定位基准与感知特性差异、环境障碍威胁、感知范围约束以及嵌套运动饱和等应用性挑战. 基于组合任务分解和不同基准感知特性, 提出惯性系定位下远距集结和载体系感知下近距对接的分段式通用控制框架: 在远距范围, 设计分层安全约束机制和自适应抗饱和策略, 实现移动机器人在障碍环境中的平滑、安全集结; 在近距阶段, 引入基于安全视线的轨迹修正策略和复合非线性收敛控制形式, 确保移动机器人在视线范围内快速、平稳地完成与待对接目标的锁紧组合. 最后, 通过物理实验验证所提出方案的有效性和可行性, 方法通用成果也为无人系统充电、水下运载器回收等工程对接场景提供了新的解决思路.

关键词: 移动机器人自重构; 分段控制; 自适应抗饱和; 分层安全约束; 自适应轨迹修正; 复合非线性反馈

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0304

引用格式: 郑志, 江涛, 王健翔, 等. 移动机器人分段式安全自重构组合控制 [J]. 控制与决策, 2025, 40(3): 996-1004.

Segmented secure self-reconfiguration control for mobile robots

ZHENG Zhi¹, JIANG Tao^{1†}, WANG Jian-xiang¹, YU Zhong-liang¹, WANG Da-tao²

(1. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 401121, China; 2. Chongqing Institute of Surveying and Mapping Science and Technology, Chongqing 401121, China)

Abstract: Self-reconfiguration is a critical means to promote the upgrading and emergence of capabilities in mobile robots. However, engineering open scenarios present challenges such as differences in positioning benchmarks and perception characteristics, environmental obstacles, perception range constraints, and nested motion windups. This paper proposes a segmented universal control framework based on composite task decomposition and different benchmark perception characteristics, focusing on long-distance assembly under inertial localization and short-distance docking under carrier-based perception. In the long-distance range, a hierarchical safety constraint mechanism and an adaptive anti-windup strategy are designed to achieve smooth and safe assembly of mobile robots in obstacle environments. In the short-distance phase, adaptive trajectory correction strategies based on safety line of sight and composite nonlinear feedback convergence control forms are introduced to ensure rapid and stable locking combinations with the docked target within the line of sight range. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed approach are validated through physical experiments, and the universal nature of the method provides new solutions for engineering docking scenarios such as unmanned system charging and underwater carrier recovery.

Keywords: mobile robot self-reconfiguration; segmented control; adaptive windup; hierarchical safety constraint; adaptive trajectory correction; composite nonlinear feedback

0 引言

自重构是移动机器人原有能力跃升或新质能力生成的重要方式, 通过具有标准接口的多移动机器人动态组合重构, 可显著提升机器人系统形态柔性和任务弹性, 实现地形适应和边界扩展^[1]. STORM^[2]、

R-track^[3] 和 Sambot II^[4] 等移动机器人利用多机的对接组合, 强化机器人系统在沟壑、楼梯等障碍地形的跨越能力, SMORES-EP^[1] 和 Roombots^[5] 等机器人则更专注研究机器人间的复杂连接拓扑, 延展机器人系统新的任务种类和执行边界.

收稿日期: 2024-03-24; 录用日期: 2024-08-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62106027); 中国博士后科学基金项目 (2023M731913); 重庆市自然科学基金面上项目 (CSTB2022NSCQ-MSX1615).

责任编委: 张文安.

[†]通讯作者. E-mail: jiangtao_1992@outlook.com.

现有移动机器人自重构组合控制多依赖封闭的实验室场景, 在单一定位基准(惯性系或载体系)下依靠高精度传感器定位, 感知机器人和周围环境, 并驱动多移动单元完成组合. Huang等^[6]利用轮式机器人装配的红外收发器采集近距离单元的侧向距离信息, 调整距离误差发布速度指令实现了重构; 何成林等^[7]基于红外强度定位解算的机器人位姿设计了搜索-接近-对接分阶段对接策略来完成两移动机器人重构组合; Tan等^[4]采用视觉和激光传感器感知邻近环境, 设计了徘徊-位姿调整-对接三阶段组合策略, 平稳实现了多机重构; Li等^[8]依靠视觉和红外复合感知, 设计了远-近-中三阶段对接策略, 实现了多移动机器人系统自重构; 周游等^[9]结合采集的对接目标视觉信息, 采用搜索-逼近-对准的策略生成了多机自重构系统; Quiñonez等^[10]根据视觉和声纳采集的环境信息, 引入了人工神经网络设计搜索-避障-自对准的对接过程, 触发了机器人单元的行为决策; Wei等^[11]设计了基于高精度全局定位设计的远距点位集结-近距直线导引双阶段轨迹规划, 激励了移动机器人完成双单元对接; Liu等^[12]基于运动学误差反馈控制框架, 设计了惯性坐标系下的导航-姿态调整-逼近的三阶段对接策略, 并在导航阶段引入了轨迹重规划处理局部避障. 目前, 重构对接方法多采用分段式行为策略, 搜寻感知目标和提高对接成功率. 其他面向工程的组合对接场景, 如运载器对接^[13]、航天器交会^[14]和电动车自动充电^[15]等, 也多采用分段式流程降解任务复杂度, 提高对接成功率.

相对于实验室封闭场景, 实际工程开放场景通常存在作业区域大范围覆盖、环境因素复杂多变和功能模块灵活定制等特点. 因此, 当前实验室场景依靠小范围内高精度感知基准(全局视觉定位或机载传感器)组合控制方法, 在实际应用时存在如下限制: 1) 工程实用性惯性系基准(卫导或室内建图)虽然适用大多数机器人大范围导航任务, 但是复杂环境下精度和稳定度不足, 难以保证不同单元在近距离范围内成功对接导引; 2) 实际载体系感知(视觉或红外)适合高精度精细操作, 但是感知范围较小, 且难以高效地提供大范围全面环境信息, 影响场景任务执行效率; 3) 控制策略单一, 多为开环或简单闭环形式, 面对不可预测的环境威胁(障碍物)及其机器人感知和性能约束(视野受限和输入饱和), 难以快速优化调整, 环境适应性较差. 综上, 可通过分阶段感知和控制策略, 融合不同感知基准优势特征, 应对感知、环境、性能等多维约束, 实现大范围开放场景下移动机器人组合重构, 包括: 1) 在工程开放场景中移

动机器人组合任务, 远距阶段可采用全局定位方式, 实现不同移动机器人集结导航; 近距阶段则采用载体系感知被动对接目标位姿, 完成精细对接操作. 2) 定制不同阶段多维约束下控制功能模块, 灵活嵌入移动机器人任务框架和调度系统, 实现移动机器人高成功率精准组合对接.

本文在远距和近距阶段不同定位基准下, 结合组合过程中存在的嵌套输入饱和、感知范围受限、环境障碍威胁、近距行程有限等约束, 定制设计面向自主重构的移动机器人控制功能模块, 具体内容如下.

1) 面向实际工程开放场景, 设计不同定位基准下分阶段组合控制策略及其远端集结和近距对接的控制器框架, 并搭建物理实验场景验证所提出方案的有效性.

2) 针对远距阶段嵌套饱和以及环境障碍约束, 采用上层避障导引和底层抗饱和跟踪的分层控制框架, 利用安全围栏和虚拟弹簧, 分层完备实现集结过程的平滑避障.

3) 针对近距阶段感知视野和近距行程有限, 设计自适应导引期望轨迹修正策略和复合快速收敛的非线性反馈轨迹控制器, 驱动主动对接单元在感知视线内运载锁紧器精准送入定位孔, 完成锁紧重构.

1 机器人系统和重构策略设计

具备组合重构机构的机器人系统如图1所示. 其组合模态由差速驱动力的每个轮式移动单元组成, 力矩电机、WiFi组网模块和集成主控板共同组成单元的运动控制系统; 对接机构由定位孔和内嵌式凸轮锁紧器构成, 当锁紧器被送入定位孔后, 通过舵机带动完成旋紧操作, 可实现多单元的重构组合.

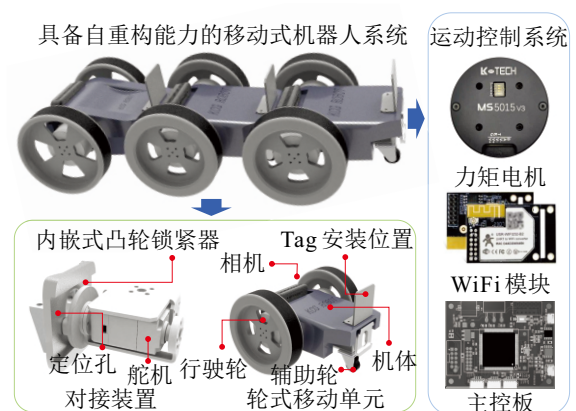


图1 具备自重构能力的移动机器人系统

1.1 分段式容错自重构组合策略设计

具有自重构能力的移动机器人具有集群和组合两种任务模态, 移动机器人编组可构建分布式或集中式网络来实现状态监测和集群控制, 并可通过卫

导或已知全局地图来获取各编组单元的全局惯性系点位信息. 当某个移动机器人遭遇复杂地形或其他任务需要重构为组合构型时, 难以保证机载传感器感知范围内其他移动机器人的存在, 而采用实验室场景下前期随机搜索^[7,11]的作业效率较低. 因此, 可通过集中式组网下有组合需求的移动机器人直接发送自身点位和对接请求给指控平台, 指控平台调度适合的机器人来完成组合重构; 而分布式组网下有组合需求的移动机器人则可直接向邻接通信的机器人发送自身点位. 在获取对接点位后, 考虑实际工程开放场景限制和其他工程对接场景, 采用分段式对接流程. 在远距阶段, 主动对接单元根据自身起始点位先运动至集结点, 即对接目标点位正后方; 在近距阶段, 机载传感器感知的静止对接目标位姿可转换为对接目标系下主动对接机器人的点位, 直接采用直线轨迹引导, 并以对接目标为原点的坐标基准设计控制器, 驱动主动对接单元运送锁紧器进入定位孔, 完成锁紧重构. 若最终发生重构失败, 则触发如图2所示的重对接流程.

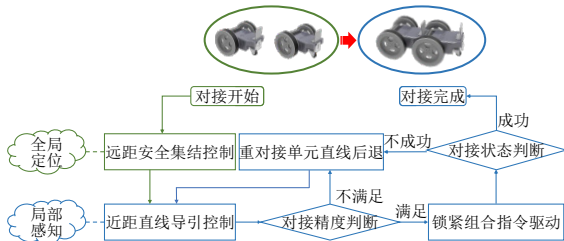


图2 分段式容错对接策略

工程开放场景下, 移动式机器人系统在分段式对接远距阶段的集结过程中大概率会遭遇障碍物, 在考虑机器人控制输入饱和的情况下, 控制器设计必须涉及自适应抗饱和平滑反应式避障, 以保证集结安全性. 在近距阶段, 由于远距阶段存在定位误差和控制误差, 集结后的单元相对于对接目标的正后方可能存在位姿偏离, 易触发后续的饱和振荡和感知视线偏离安全范围. 同时, 由于对接的近距行程有限, 若对接轨迹收敛到导引轨迹上过慢, 则很可能会导致重构失败, 近距控制器设计需要结合自适应抗饱和与视线安全保持, 并达成主动对接单元视线感知范围内安全重构.

1.2 机器人运动模型和控制目标

移动机器人采用差速驱动方式, 设定协同任务中第*i*个机器人作为主动对接单元, 第*k*个机器人作为静止的被动对接单元, 主动对接单元在全局惯性系和被动对接目标基准下非完整约束运动学模型^[16]分别为

$$\begin{aligned} \dot{x}_{il} &= v_i \cos(\theta_i) - l_i w_i \sin(\theta_i), \\ \dot{y}_{il} &= v_i \sin(\theta_i) + l_i w_i \cos(\theta_i), \\ \dot{\theta}_{il} &= w_i; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{il}^k &= v_i^k \cos(\theta_i^k) - l_i^k w_i^k \sin(\theta_i^k), \\ \dot{y}_{il}^k &= v_i^k \sin(\theta_i^k) + l_i^k w_i^k \cos(\theta_i^k), \\ \dot{\theta}_{il}^k &= w_i^k. \end{aligned} \quad (2)$$

其中: l_i 为主动对接单元重心位置和远距阶段测量点中心位置的轴线偏移; $x_{il} = x_i + l_i \cos(\theta_{il})$ 、 $y_{il} = y_i + l_i \sin(\theta_{il})$ 和 $\theta_{il} = \theta_i$ 为考虑偏移的远距阶段主动对接单元位姿, x_i 、 y_i 和 θ_i 为无偏移的惯性系下主动对接单元位姿; l_i^k 为主动对接单元重心位置和近距阶段测量点中心位置的轴线偏移; 同样地, $x_{il}^k = x_i^k + l_i^k \cos(\theta_{il}^k)$ 、 $y_{il}^k = y_i^k + l_i^k \sin(\theta_{il}^k)$ 和 $\theta_{il}^k = \theta_i^k$ 为近距阶段考虑偏移的主动对接单元位姿, x_i^k 、 y_i^k 和 θ_i^k 为以对接目标为原点新静止坐标系下无偏移的主动对接单元位姿; v_i 和 w_i 分别为近距阶段主动对接单元线速度和角速度; v_i^k 和 w_i^k 分别为远距阶段对应线速度和角速度.

考虑到安全性和能量效率等因素, 两阶段速度指令的速度/加速度嵌套运动饱和模型^[17]分别为

$$\begin{aligned} \dot{v}_{is} &= \text{sat}(-\bar{a}, (\text{sat}(-\bar{v}, v_i, \bar{v}) - v_{is})/\tau_v, \bar{a}), \\ \dot{w}_{is} &= \text{sat}(-\bar{\omega}, (\text{sat}(-\bar{w}, w_i, \bar{w}) - w_{is})/\tau_w, \bar{\omega}), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{v}_{is}^k &= \text{sat}(-\bar{a}, (\text{sat}(-\bar{v}, v_i^k, \bar{v}) - v_{is}^k)/\tau_v, \bar{a}), \\ \dot{w}_{is}^k &= \text{sat}(-\bar{\omega}, (\text{sat}(-\bar{w}, w_i^k, \bar{w}) - w_{is}^k)/\tau_w, \bar{\omega}). \end{aligned} \quad (4)$$

其中: \bar{v} 、 \bar{a} 、 \bar{w} 、 $\bar{\omega}$ 为速度和加速度饱和阈值; τ_v 、 τ_w 为正时间常数; v_{is} 、 w_{is} 、 v_{is}^k 、 w_{is}^k 为饱和下远距和近距阶段速度; 饱和函数 $\text{sat}(c, x, b) = \max\{c, \min\{b, x\}\}$, $c = -b$, 触发阈值易引起轨迹振荡.

结合 Chang 等^[16]非完整约束处置策略、远近距阶段控制模型(1)和(2)、嵌套饱和模型(3)和(4), 可得到

$$\begin{aligned} \dot{x}_{il} &= v_i \cos(\theta_i) - l_i w_i \sin(\theta_i) + \Delta_{ix}, \\ \dot{y}_{il} &= v_i \sin(\theta_i) + l_i w_i \cos(\theta_i) + \Delta_{iy}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{il}^k &= v_i^k \cos(\theta_i^k) - l_i^k w_i^k \sin(\theta_i^k) + \Delta_{ix}^k, \\ \dot{y}_{il}^k &= v_i^k \sin(\theta_i^k) + l_i^k w_i^k \cos(\theta_i^k) + \Delta_{iy}^k, \end{aligned} \quad (6)$$

且

$$\begin{aligned} \Delta_{ix} &= (v_{is} - v_i) \cos(\theta_i) - l_i (w_{is} - w_i) \sin(\theta_i), \\ \Delta_{iy} &= (v_{is} - v_i) \sin(\theta_i) + l_i (w_{is} - w_i) \cos(\theta_i), \\ \Delta_{ix}^k &= (v_{is}^k - v_i^k) \cos(\theta_i^k) - l_i^k (w_{is}^k - w_i^k) \sin(\theta_i^k), \\ \Delta_{iy}^k &= (v_{is}^k - v_i^k) \sin(\theta_i^k) + l_i^k (w_{is}^k - w_i^k) \cos(\theta_i^k), \end{aligned}$$

故远距和近距阶段纵向和侧向速度控制指令为

$$\begin{aligned} u_{ix} &= v_i \cos(\theta_i) - l_i w_i \sin(\theta_i), \\ u_{iy} &= v_i \sin(\theta_i) + l_i w_i \cos(\theta_i), \\ u_{ix}^k &= v_i^k \cos(\theta_i^k) - l_i^k w_i^k \sin(\theta_i^k), \\ u_{iy}^k &= v_i^k \sin(\theta_i^k) + l_i^k w_i^k \cos(\theta_i^k). \end{aligned}$$

机器人控制器设计分析如图3所示. 根据不同定位基准分为远距集结和近距对接阶段, 分析不同阶段下多维约束、给定控制要素和控制目标, 具体如下.

1) 远距阶段集结轨迹 x_d 和 y_d 及其一阶、二阶导数有界, 考虑在嵌套饱和(3)约束下控制模型(1), 设计集结轨迹控制指令 u_{ix} 和 u_{iy} , 使得主动对接单元可以绕开障碍物 (x_o, y_o) , 平滑安全地运动至集结点位.

2) 近距阶段对接轨迹 x_d^k 和 y_d^k 及其一阶、二阶导数有界, 考虑嵌套饱和(4)约束下模型(2), 设计控制指令 u_{ix}^k 和 u_{iy}^k , 使得主动对接单元在视线安全范围内 $[\theta_{sr}, \theta_{sl}]$, 平稳快速地收敛至导引轨迹, 完成重构.

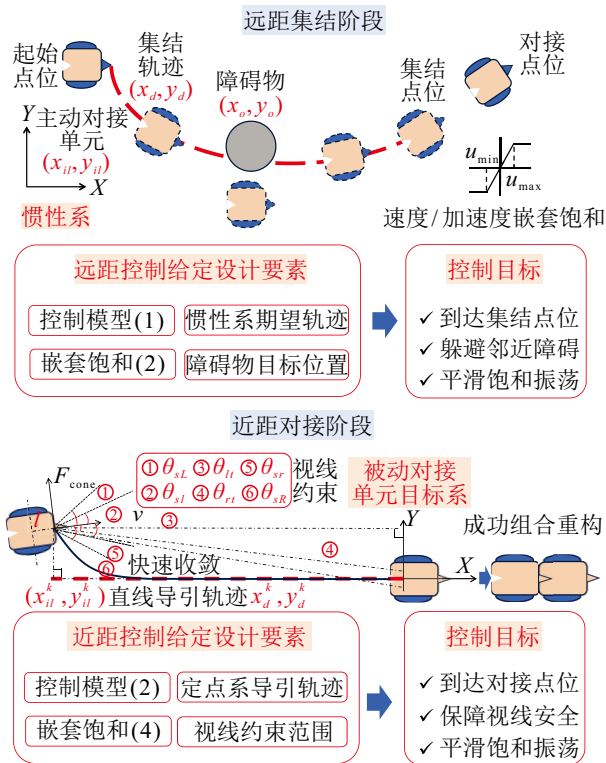


图3 分段式安全自重构组合控制框图

引理1 考虑存在如下双积分系统、障碍函数、安全加速度包络和控制律:

$$\dot{\eta}_1 = \eta_2, \quad \dot{\eta}_2 = u, \quad (7)$$

$$\mathcal{B}(\eta_1, \eta_2) = \eta_2 - \mathcal{F}(\eta_1), \quad (8)$$

$$u_s(\eta_1, \eta_2) = -\alpha \mathcal{B}(\eta_1, \eta_2) + \mathcal{H}(\eta_1) \eta_2, \quad (9)$$

$$u = \text{sat}(-\bar{u}, \min\{u_r(\eta, \eta_r), u_s(\eta_1, \eta_2)\}, \bar{u}). \quad (10)$$

其中

$$h(x) = \begin{cases} 1, & |x| \geq 0; \\ 0, & |x| < 0; \end{cases}$$

$$\beta(x) = \left[2\gamma \rho \ln \left(\cosh \left(\frac{x}{\rho} \right) \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad x \leq 0;$$

$$\mathcal{H}(x) = h(-x) \frac{\gamma \tanh \left(\frac{x}{\rho} \right)}{\beta(x)} \sqrt{\frac{\gamma}{\rho}};$$

$$\mathcal{F}(x) = -h(-x)\beta(x) + (1 - h(-x))\sqrt{\frac{\gamma}{\rho}}x.$$

则设计增益 γ 、 ρ 和 α 满足 $0 < \gamma < \bar{u}$, $\rho > 0$ 和 $\alpha > 0$, $\bar{u} > 0$ 为饱和阈值. 待设计控制律 $u_r(\eta, \eta_r)$ 在安全加速度包络(9)下生成实际的控制律(10), 可确保系统位置状态 η_1 始终在设定的安全边界内^[18].

引理2 考虑如下扰动时变系统:

$$\dot{\xi}(t) = \frac{1}{\epsilon} \mathcal{K}(t) \xi(t) + \delta(t), \quad t \geq t_0, \quad t_0 \in \mathbb{R}_+. \quad (11)$$

其中: $\mathcal{K} \in \mathcal{C}(\mathbb{R}_{\geq t_0})$, $\delta(t)$ 为扰动项, 且初始条件 $\xi(t_0)$ 属于 \mathbb{R} 的一个紧子集. 假设线性时变系统 $\dot{\xi}_0(t) = \mathcal{M}(t)\xi_0(t)$ 是一致指数稳定, 且 $|\delta(t)| \leq \bar{\delta}/(\epsilon^m)$. 这里: $\bar{\delta}$ 为与 ϵ 无关的正常数, $m \geq 0$ 为整数. 则对于任意 $\sigma > 0$ 和 $T > 0$, 存在 $\epsilon_0 > 0$, 使得对于任意 $\epsilon \in (0, \epsilon_0)$ 和 $t \in [t_0 + T, \infty)$, 方程(11)的解满足^[19].

2 嵌套运动饱和和远距安全集结控制

考虑远距阶段主动对接单元集结存在的环境障碍和嵌套饱和约束, 提出上层虚拟运动学和底层实际非完整运动学分层控制框架, 上层闭环控制下虚拟状态作为底层轨迹跟踪的期望, 并分别引入上层安全围栏和底层虚拟弹簧避障, 从上层虚拟轨迹生成和底层实际轨迹跟踪两方面完备保障集结安全性, 且设计自适应辅助系统, 平滑抑制饱和和激发的轨迹振荡.

2.1 上层完整模型的自适应避障导引模块设计

出于设计简单性和任务可实现性考虑, 上层导引模块采用如下虚拟的完整运动学模型^[20]:

$$\dot{\varphi}_1 = \varphi_2, \quad \dot{\varphi}_2 = a^\varphi. \quad (12)$$

其中: $\varphi_1 = [x^\varphi, y^\varphi]^\top \in \mathbf{R}^2$ 和 $\varphi_2 = [v_x^\varphi, v_y^\varphi]^\top \in \mathbf{R}^2$ 为虚拟运动学动态的位置和速度; $a^\varphi = [a_x^\varphi, a_y^\varphi]^\top \in \mathbf{R}^2$ 为虚拟运动学加速度, 初值满足 $\varphi_1(0) = [x_{il}(0), y_{il}(0)]^\top$, $\varphi_2(0) = [\dot{x}_{il}(0), \dot{y}_{il}(0)]^\top$; x^φ 、 y^φ 、 v_x^φ 、 v_y^φ 、 a_x^φ 和 a_y^φ 分别为虚拟动态系统在惯性系下纵向和侧向位置、速度和加速度.

参考刹车机制^[18], 对接远距阶段行进过程中障碍物附近的纵向和侧向安全加速度包络设计如下所示:

$$\begin{aligned} a_{xs}^{\varphi t} &= -\alpha \mathcal{B}(\bar{x}_t^{\varphi}, \dot{\bar{x}}_t^{\varphi}) + \mathcal{H}(\bar{x}_t^{\varphi}) \dot{\bar{x}}_t^{\varphi}, \\ a_{ys}^{\varphi t} &= -\alpha \mathcal{B}(\bar{y}_t^{\varphi}, \dot{\bar{y}}_t^{\varphi}) + \mathcal{H}(\bar{y}_t^{\varphi}) \dot{\bar{y}}_t^{\varphi}, \quad t = u, l. \end{aligned} \quad (13)$$

其中: $\bar{x}_u^{\varphi} = x^{\varphi} - x_o^u$, $\bar{x}_l^{\varphi} = x_o^l - x^{\varphi}$, $\bar{y}_u^{\varphi} = y^{\varphi} - y_o^u$, $\bar{y}_l^{\varphi} = y_o^l - y^{\varphi}$, x_o^u 、 x_o^l 、 y_o^u 和 y_o^l 是根据障碍物坐标 (x_o, y_o) 设定的安全围栏。

以上的安全加速度包络用来约束虚拟动态控制输入, 即 $a_x^{\varphi} = \text{sat}(-\bar{\alpha}, \text{sat}(-a_{xs}^{\varphi l}, u_x^{\varphi}, a_{xs}^{\varphi u}), \bar{\alpha})$ 和 $a_y^{\varphi} = \text{sat}(-\bar{\alpha}, \text{sat}(-a_{ys}^{\varphi l}, u_y^{\varphi}, a_{ys}^{\varphi u}), \bar{\alpha})$, $\bar{\alpha} < \bar{a} \in \mathbb{R}_+$. 由引理 1, 对约束后的虚拟动态系统控制输入双重积分后得到的位置轨迹运动在限定安全区域内, 可作为底层模块的参考轨迹来避免与障碍物碰撞。

通过反步法设计控制输入 u_x^{φ} 和 u_y^{φ} , 位置误差设置为 $z_{1x} = x^{\varphi} - x_d$, $z_{1y} = y^{\varphi} - y_d$, 选定李雅普诺夫函数为

$$V_{1\varphi} = \frac{1}{2} z_{1x}^2 + \frac{1}{2} z_{1y}^2. \quad (14)$$

对其求导, 可得到

$$\dot{V}_{1\varphi} = z_{1x}(v_x^{\varphi} - \dot{x}_d) + z_{1y}(v_y^{\varphi} - \dot{y}_d). \quad (15)$$

进一步设计纵/侧向虚拟速度指令 v_{xr}^{φ} 、 v_{yr}^{φ} 为

$$v_{xr}^{\varphi} = \dot{x}_d - c_1 z_{1x}, \quad v_{yr}^{\varphi} = \dot{y}_d - c_1 z_{1y}, \quad (16)$$

其中 $c_1 > 0$ 为控制增益。

虚拟动态系统的速度误差设为 $z_{2x} = v_x^{\varphi} - v_{xr}^{\varphi}$ 和 $z_{2y} = v_y^{\varphi} - v_{yr}^{\varphi}$, 选定李雅普诺夫函数为

$$V_{2\varphi} = V_{1\varphi} + \frac{1}{2} z_{2x}^2 + \frac{1}{2} z_{2y}^2. \quad (17)$$

纵向和侧向的虚拟加速度指令设计如下所示:

$$\begin{aligned} u_x^{\varphi} &= -c_2 z_{2x} + \ddot{x}_d - z_{1x} - c_1(z_{2x} + c_1 z_{1x}), \\ u_y^{\varphi} &= -c_2 z_{2y} + \ddot{y}_d - z_{1y} - c_1(z_{2y} + c_1 z_{1y}), \end{aligned} \quad (18)$$

其中 $c_2 > 0$ 为控制增益. 结合式(16)和(18), $\dot{V}_{2\varphi}$ 满足

$$\dot{V}_{2\varphi} = -c_1 z_{1x}^2 - c_1 z_{1y}^2 - c_2 z_{2x}^2 - c_2 z_{2y}^2 \leq -c_{\varphi} V_{2\varphi}, \quad (19)$$

这里 $c_{\varphi} = 2 \min \{c_1, c_2\} \in \mathbb{R}_+$.

综上, $V_{2\varphi}$ 正定, $\dot{V}_{2\varphi}$ 负定, 因此, 所设计虚拟系统控制律(18)可使得 z_{1x} 、 z_{2x} 、 z_{1y} 和 z_{2y} 渐近收敛, 同时, 由引理 1 可知, 虚拟动态在安全加速度包络约束下, 可始终保障机器人的虚拟动态位置处于安全区域。

2.2 底层非完整约束模型的自适应抗饱和和轨迹控制器设计

融合自适应抗饱和和改进弹簧避障策略^[21], 与上层导引形成双层约束机制, 设计速度/加速度嵌套饱和和约束下导引生成轨迹跟踪控制方案。

结合运动学模型(1)和嵌套饱和模型(3), 设计自适应抗饱和的辅助动态系统为

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_{ix} &= \cosh^2(\lambda_{ix})(-k_{ix}\lambda_{ix} + \Delta_{ix})/\gamma_{ix}, \\ \dot{\lambda}_{iy} &= \cosh^2(\lambda_{iy})(-k_{iy}\lambda_{iy} + \Delta_{iy})/\gamma_{iy}. \end{aligned} \quad (20)$$

其中: λ_{ix} 、 λ_{iy} 为纵向和侧向的辅助动态变量, k_{ix} 、 k_{iy} 、 γ_{ix} 和 γ_{iy} 为正自适应增益。

障碍物 (x_o, y_o) 给模块单元的斥力表示为

$$F_{ro} = \begin{cases} k_r \left| \tanh \left(\tan \left(\frac{\pi}{2} \frac{\rho_{sr} - \rho_{ro}}{\rho_{sr} - \rho_{sr}} \right) \right) \right|, & \rho_{ro} \leq \rho_{sr}; \\ 0, & \rho_{ro} > \rho_{sr}. \end{cases} \quad (21)$$

其中: $\rho_{ro} = \|[x_l, y_l]^T - [x_o, y_o]^T\|$ 为机器人与障碍物间的距离, ρ_{sr} 、 ρ_{sr} 分别为避障距离的上边界和下边界, k_r 为弹性系数, $k_r \tanh(\cdot)$ 设计和参数选择与能量的有界性和加速度饱和阈值有关. 整个斥力函数反映机器人距离障碍物的动态调节机制, 可引入辅助动态系统嵌入控制器来保证系统安全性能, 具体设计如下所示:

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_{sx} &= \cosh^2(\lambda_{sx})(-k_{sx}\lambda_{sx} + \Delta_{sx})/\gamma_{sx}, \\ \dot{\lambda}_{sy} &= \cosh^2(\lambda_{sy})(-k_{sy}\lambda_{sy} + \Delta_{sy})/\gamma_{sy}. \end{aligned} \quad (22)$$

这里: λ_{sx} 和 λ_{sy} 为修正速度的辅助动态变量; k_{sx} 、 k_{sy} 、 γ_{sx} 和 γ_{sy} 为正自适应增益; Δ_{sx} 和 Δ_{sy} 参考姚瀚晨等^[21]提出的力矩分配方法被设计为

$$\Delta_{sx} = F_{ro} \cos(\theta_{ro}), \quad \Delta_{sy} = F_{ro} \sin(\theta_{ro}),$$

其中 θ_{ro} 为机器人坐标系斥力视线与小车轴线的夹角。

纵向和侧向的底层跟踪误差分别为 $e_{ix} = x_{il} - x_{\varphi} - \gamma_{ix} \tanh(\lambda_{ix})$ 和 $e_{iy} = y_{il} - y_{\varphi} - \gamma_{iy} \tanh(\lambda_{iy})$. 结合控制模型(1)、自适应抗饱和(20)以及底层避障(21)和(22), 镇定底层误差的纵/侧向控制指令 u_{ix} 和 u_{iy} 设计为

$$\begin{aligned} u_{ix} &= -c_3 e_{iy} + v_x^{\varphi} - k_{ix}\lambda_{ix} - \gamma_{sx} \tanh(\lambda_{sx}), \\ u_{iy} &= -c_3 e_{ix} + v_y^{\varphi} - k_{iy}\lambda_{iy} - \gamma_{sy} \tanh(\lambda_{sy}), \end{aligned} \quad (23)$$

其中 $c_3 > 0$ 为控制增益。

令远距阶段整体纵向和侧向误差分别为 $\bar{e}_{ix} = x_{il} - x_d - \gamma_{ix} \tanh(\lambda_{ix})$ 和 $\bar{e}_{iy} = y_{il} - y_d - \gamma_{iy} \tanh(\lambda_{iy})$. 为了验证远距阶段整体稳定性, 选定李雅普诺夫函数为

$$V_{3i} = \frac{1}{2} \bar{e}_{ix}^2 + \frac{1}{2} \bar{e}_{iy}^2. \quad (24)$$

结合控制指令(23), \dot{V}_{3i} 满足

$$\dot{V}_{3i} \leq -\bar{c}_3 V_{3i} + \Delta_S. \quad (25)$$

其中: $\bar{c}_3 > 2(c_3 - 1) \in \mathbb{R}_+$, $\Delta_S > \gamma_{sx}^2 \tanh^2(\lambda_{sx}) + \gamma_{sy}^2 \tanh^2(\lambda_{sy}) + \frac{1}{2} c_3 \bar{\delta}_{x\varphi}^2 + \frac{1}{2} c_3 \bar{\delta}_{y\varphi}^2 + \bar{\delta}_{v\varphi}^2 + \bar{\delta}_{vy\varphi}^2 \in \mathbb{R}_+$.

注 1 结合式(25)可知, \bar{e}_{ix} 和 \bar{e}_{iy} 的最终误差边界受控制增益和有界项 Δ_S 影响. 由引理 2 可知, Δ_S

中的 $\gamma_{sx}^2 \tanh^2(\lambda_{sx})$ 和 $\gamma_{sy}^2 \tanh^2(\lambda_{sy})$ 有界信号在避障完成后会快速收敛至 0, $\frac{1}{2}c_3\bar{\delta}_{x\varphi}^2 + \frac{1}{2}c_3\bar{\delta}_{y\varphi}^2 + \bar{\delta}_{vx\varphi}^2 + \bar{\delta}_{vy\varphi}^2$ 与上层虚拟动态系统的控制误差上确界相关, 通过调节上层控制增益使其快速收敛至 0.

3 视线约束内近距快速对接控制

考虑近距阶段主动对接单元感知视线范围和近距行程有限, 提出视线内快速收敛控制框架, 基于视线锥和辅助动态系统设计自适应导引参考轨迹修正策略, 并在自适应辅助动态系统和轨迹控制器设计中引入加速瞬态收敛的复合非线性反馈, 使得主动对接单元在视线范围内快速收敛至导引轨迹上, 精准运送锁紧器进入定位孔, 完成不同单元的锁紧重构.

3.1 基于视线锥的期望轨迹自适应补偿项设计

期望轨迹自适应补偿项设计思路与 APF 调整期望轨迹类似, 但是, 考虑 APF 在机器人临近视线锥的剧烈反应, 很容易触发饱和, 从而在实际实验中并无法保证视线保持的安全性, 故此处采用上节弹簧避障策略设计自适应补偿项 Δ_{x_d} 和 Δ_{y_d} , 而新的参考轨迹为

$$\bar{x}_d^k = x_d^k + \Delta_{x_d}, \quad \bar{y}_d^k = y_d^k + \Delta_{y_d}. \quad (26)$$

视线锥内、外边界给可重构机器人单元在测量位置处的斥力簇可表示为

$$F_{\text{cone}}^{lR} = \begin{cases} k_{\text{cone}} \left| \tanh \left(\tan \left(\frac{\pi}{2} \frac{\theta_{sR} - \theta_{lt}}{\theta_{sR} - \theta_{sr}} \right) \right) \right|, & \theta_{lt} \geq \theta_{sr}; \\ 0, & \theta_{lt} < \theta_{sr}; \end{cases}$$

$$F_{\text{cone}}^{rR} = \begin{cases} k_{\text{cone}} \left| \tanh \left(\tan \left(\frac{\pi}{2} \frac{\theta_{sR} - \theta_{rt}}{\theta_{sR} - \theta_{sr}} \right) \right) \right|, & \theta_{rt} \geq \theta_{sR}; \\ 0, & \theta_{rt} < \theta_{sR}; \end{cases}$$

$$F_{\text{cone}}^{lL} = \begin{cases} k_{\text{cone}} \left| \tanh \left(\tan \left(\frac{\pi}{2} \frac{\theta_{sL} - \theta_{lt}}{\theta_{sL} - \theta_{sl}} \right) \right) \right|, & \theta_{lt} \geq \theta_{sL}; \\ 0, & \theta_{lt} < \theta_{sL}; \end{cases}$$

$$F_{\text{cone}}^{rL} = \begin{cases} k_{\text{cone}} \left| \tanh \left(\tan \left(\frac{\pi}{2} \frac{\theta_{sL} - \theta_{rt}}{\theta_{sL} - \theta_{sl}} \right) \right) \right|, & \theta_{rt} \geq \theta_{sR}; \\ 0, & \theta_{rt} < \theta_{sR}. \end{cases} \quad (27)$$

其中: $k_{\text{cone}} > 0$ 为弹性系数; θ_{sl} 、 θ_{sL} 、 θ_{sr} 和 θ_{sR} 如图 3 所示, 为视线锥左右侧的内、外安全边界; θ_{lt} 和 θ_{rt} 在机器人坐标系上相对于目标左右侧的视线角, 当 θ_{lt} 或 θ_{rt} 开始进入 $[\theta_{sl}, \theta_{sL}]$ 或 $[\theta_{sR}, \theta_{sr}]$ 范围时, 斥力开始作用, 迫使机器人的两侧视线角再次进入 $[\theta_{sr}, \theta_{sl}]$ 安全范围内.

引入力作用来激励参考姿态的调整, 参考姚瀚晨等^[21]的力分配方法, 纵向、侧向排斥力被设计为

$$\Delta_{cx} = (F_{\text{cone}}^{lR} + F_{\text{cone}}^{lL}) \cos \theta_{lt} + (F_{\text{cone}}^{rR} + F_{\text{cone}}^{rL}) \cos \theta_{rt},$$

$$\Delta_{cy} = (F_{\text{cone}}^{lR} + F_{\text{cone}}^{lL}) \sin \theta_{lt} + (F_{\text{cone}}^{rR} + F_{\text{cone}}^{rL}) \sin \theta_{rt}. \quad (28)$$

其中: Δ_{cx} 为纵向斥力, Δ_{cy} 为侧向斥力.

通过辅助动态系统生成自适应补偿项修正参考轨迹来实时生成新的安全导引轨迹, 具体如下所示:

$$\dot{\lambda}_{1cx} = -k_{1cx}\lambda_{1cx} + \lambda_{2cx}, \quad \dot{\lambda}_{2cx} = -k_{2cx}\lambda_{2cx} + \Delta_{cx},$$

$$\dot{\lambda}_{1cy} = -k_{1cy}\lambda_{1cy} + \lambda_{2cy}, \quad \dot{\lambda}_{2cy} = -k_{2cy}\lambda_{2cy} + \Delta_{cy}. \quad (29)$$

其中: k_{1cx} 、 k_{2cx} 、 k_{1cy} 和 k_{2cy} 为正自适应增益, λ_{1cx} 、 λ_{2cx} 、 λ_{1cy} 和 λ_{2cy} 为自适应辅助信号. λ_{1cx} 和 λ_{1cy} 相当于位置修正信号, 其有界性和收敛可由引理 2 得到, 故自适应补偿项被设计为 $\Delta_{x_d} = \lambda_{1cx}$ 和 $\Delta_{y_d} = \lambda_{1cy}$.

3.2 复合非线性反馈的轨迹控制器设计

基于控制模型 (2) 和嵌套饱和约束 (4), 设计复合非线性反馈自适应辅助动态系统为

$$\dot{\lambda}_{ix}^k = \cosh^2(\lambda_{ix}^k) \times \left(-k_{ix}\lambda_{ix}^k - \frac{e^{|\lambda_{ix}^k|^{-\alpha_\lambda}} \text{sig}(\lambda_{ix}^k)^{1-\alpha_\lambda} + \Delta_{ix}^k}{\alpha_\lambda T_\lambda} \right) / \gamma_{ix},$$

$$\dot{\lambda}_{iy}^k = \cosh^2(\lambda_{iy}^k) \times \left(-k_{iy}\lambda_{iy}^k - \frac{e^{|\lambda_{iy}^k|^{-\alpha_\lambda}} \text{sig}(\lambda_{iy}^k)^{1-\alpha_\lambda} + \Delta_{iy}^k}{\alpha_\lambda T_\lambda} \right) / \gamma_{iy}. \quad (30)$$

其中: λ_{ix}^k 和 λ_{iy}^k 为抑制嵌套运动饱和和振荡的自适应辅助动态变量, Δ_{ix}^k 和 Δ_{iy}^k 为近距阶段控制输入饱和和偏差, k_{ix} 、 $k_{iy} > 0$ 为线性控制增益, $T_\lambda > 0$ 、 $0 < \alpha_\lambda < 1$ 为非线性控制增益, γ_{ix} 、 $\gamma_{iy} > 0$ 为调节增益, $\text{sig}(\cdot) = |\cdot|^{\alpha_\lambda} \text{sign}(\cdot)$. 由 Huang 等^[22]的瞬态和稳态分段收敛策略可知, $\frac{1}{T_\lambda} e^{|\cdot|^{-\alpha_\lambda}} \text{sig}(\cdot)^{1-\alpha_\lambda}$ 非线性项在定时快速收敛上起主导作用, 复合线性项可在保证稳态收敛精度的同时, 加快瞬态收敛速度.

近距阶段跟踪误差 e_{ix}^k 和 e_{iy}^k 设定为

$$e_{ix}^k = x_i^k - \bar{x}_d^k - \gamma_{ix} \tanh(\lambda_{ix}^k),$$

$$e_{iy}^k = y_i^k - \bar{y}_d^k - \gamma_{iy} \tanh(\lambda_{iy}^k). \quad (31)$$

误差 e_{ix}^k 和 e_{iy}^k 的导数可写为

$$\dot{e}_{ix}^k = u_{ix}^k - \dot{\bar{x}}_d^k + k_{ix}\lambda_{ix}^k + \frac{1}{\alpha_\lambda T_\lambda} e^{|\lambda_{ix}^k|^{-\alpha_\lambda}} \text{sig}(\lambda_{ix}^k)^{1-\alpha_\lambda},$$

$$\dot{e}_{iy}^k = u_{iy}^k - \dot{\bar{y}}_d^k + k_{iy}\lambda_{iy}^k + \frac{1}{\alpha_\lambda T_\lambda} e^{|\lambda_{iy}^k|^{-\alpha_\lambda}} \text{sig}(\lambda_{iy}^k)^{1-\alpha_\lambda}, \quad (32)$$

其中 u_{ix}^k 和 u_{iy}^k 分别为纵向和侧向速度控制指令.

设计复合非线性控制器实现误差快速收敛为

$$\begin{aligned}
u_{ix}^k &= -c_4 e_{ix}^k - \frac{1}{\alpha_x T_x} e^{|e_{ix}^k|^{-\alpha_x}} \text{sig}(e_{ix}^k)^{1-\alpha_x} + \dot{x}_d^k - \\
&\quad k_{ix} \lambda_{ix}^k - \frac{1}{\alpha_x T_\lambda} e^{|\lambda_{ix}^k|^{-\alpha_x}} \text{sig}(\lambda_{ix}^k)^{1-\alpha_x}, \\
u_{iy}^k &= -c_4 e_{iy}^k - \frac{1}{\alpha_y T_y} e^{|e_{iy}^k|^{-\alpha_y}} \text{sig}(e_{iy}^k)^{1-\alpha_y} + \dot{y}_d^k - \\
&\quad k_{iy} \lambda_{iy}^k - \frac{1}{\alpha_y T_\lambda} e^{|\lambda_{iy}^k|^{-\alpha_y}} \text{sig}(\lambda_{iy}^k)^{1-\alpha_y}. \quad (33)
\end{aligned}$$

其中: $c_4 > 0$ 为线性控制增益, $0 < \alpha_x < 1$ 、 $0 < \alpha_y < 1$ 、 $T_x > 0$ 和 $T_y > 0$ 为快速收敛相关的非线性增益。

选定李雅普诺夫函数为

$$V_{4i} = |e_{ix}^k| + |e_{iy}^k|. \quad (34)$$

结合式 (32) 和 (33), 对其求导, 易得到

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{4ix} &\leq -\frac{1}{\alpha_x T_x} e^{|e_{ix}^k|^{-\alpha_x}} |e_{ix}^k|^{1-\alpha_x} - \\
&\quad \frac{1}{\alpha_y T_y} e^{|e_{iy}^k|^{-\alpha_y}} |e_{iy}^k|^{1-\alpha_y}. \quad (35)
\end{aligned}$$

由式 (34) 和 (35) 可知, 近距离阶段控制系统满足快速收敛的稳定性条件。

注 2 本节在近距离阶段引入基于视线锥的斥力簇和自适应辅助动态生成平滑的导引轨迹自适应修正项, 缓和地驱动机器人视线始终在感知安全范围内。在复合非线性反馈框架下, 利用定时收敛的非线性项加快瞬态收敛速度, 确保机器人能够在有限行程内收敛至直线导引轨迹上, 再结合线性项进一步保证导引轨迹上的对接控制稳态性能, 确保精准重构。

4 实验验证

移动机器人重构组合的实验平台如图 4 所示。各机器人位姿通过上置相机采集和识别 Tag 获得, 并基于 WiFi 模块和路由器搭建上位机和各机器人局域网通信网络, 实现各机器人的信息共享、上位机 ROS 的实时状态监视和运动控制。机器人本体受速度和加速度嵌套饱和和约束, 饱和阈值设置为 $\bar{v} = 1.5 \text{ m/s}$ 、 $\bar{a} = 1 \text{ m/s}^2$ 、 $\bar{\omega} = 1.5 \text{ rad/s}$ 和 $\bar{\dot{\omega}} = 1 \text{ rad/s}^2$ 。对接装置锁紧器和定位孔成功重构最大控制误差上

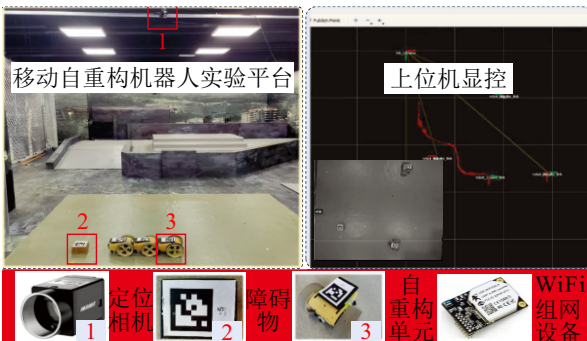


图4 移动式自重构机器人实验平台

限为 3 cm。

本文面向工程开放场景提出不同定位基准下分阶段组合重构方案, 并针对远/近阶段过程中的多维约束, 定制控制器来实现适应性远距集结和近距对接, 并在实验设计方面: 1) 利用全局视觉定位信息分别构建惯性坐标系和以对接目标为原点的静止坐标系; 2) 通过对接目标系下主动单元视线角和机器人尺寸特征模拟视线约束; 3) 引入嵌套运动饱和和约束机器人运动性能; 4) 置入环境障碍威胁机器人运动安全, 以便在有限的实验场地和设备中充分模拟工程开放场景特点和支撑所提出分阶段重构算法的实物验证。移动机器人自重构组合本质上为多维约束下安全控制问题, 故采用 Sharma 等^[20]提出的轨迹控制和安全策略部署在主动对接单元近距和远距阶段控制中, 与所提出算法分别标记为 C_1 和 C_2 进行对比验证。

4.1 远端阶段集结验证

远端阶段设计全局坐标系下圆形轨迹, 使得移动机器人运动至待对接机器人正后方位置。同时, 在期望轨迹上设置如图 4 所示的障碍物 $p_o = [x_o, y_o]^T$, 以验证所提出集结轨迹跟踪方法的安全性和平滑性。

为了确保远端阶段两种方法实验对比的公平性, 两次实验的期望轨迹、移动机器人初始位置、避碰距离和控制增益均设置相同。集结控制器增益分别设计为 $c_1 = c_2 = c_3 = 1$, 自适应增益分别设计为 $k_{ix} = k_{ix}^v = k_{iy} = k_{iy}^v = 10$ 、 $k_{sx} = k_{sy} = 30$ 。安全围栏增益分别设计为 $\alpha = 20$ 、 $\gamma = 0.4$ 和 $\rho = 0.5$, 避碰距离设置为 0.6 m, 虚拟弹簧的内外边界为 $\rho_{sr} = 0.15 \text{ m}$ 和 $\rho_{sR} = 0.15 \text{ m}$, 增益 $k_r = 0.5$, 避障前后切换的安全约束边界分别为 $x_o^u = y_o^u = 3 \text{ m}$ 、 $x_o^l = y_o^l = 0 \text{ m}$ 和 $x_o^u = y_o^u = 3 \text{ m}$ 、 $y_o^l = 0 \text{ m}$ 、 $x_o^l = 0.84 \text{ m}$ 。

本文基于安全围栏生成融合嵌套饱和的上层避障导引轨迹在躲避障碍物过程中起主导作用, 并通过底层的虚拟弹簧机制确保障碍物近处范围内完全的安全性。该分层安全约束机制相对于 Sharma 等^[20]的 APF 反应式避障方法在易触发振荡控制输入饱和情况下具有明显的平稳优势。图 5 为两种方法在集结轨迹的瞬态响应和稳态精度。在跟踪精度上, 所提出方法 ($C_1 : 0.029 \text{ m}$) 与对比方法 ($C_2 : 0.031 \text{ m}$) 基本一致, 但是, 其躲避障碍物的振荡幅度和恢复时间分别为 0.3 m 和 3 s, 相对于 C_2 的振荡幅度和恢复时间 (0.5 m 和 6 s) 具有更优的平滑特性。图 6 为对接远距集结过程的平面轨迹。 C_1 的实际跟踪轨迹相对于 C_2 避障行程更短, 反应更平和。

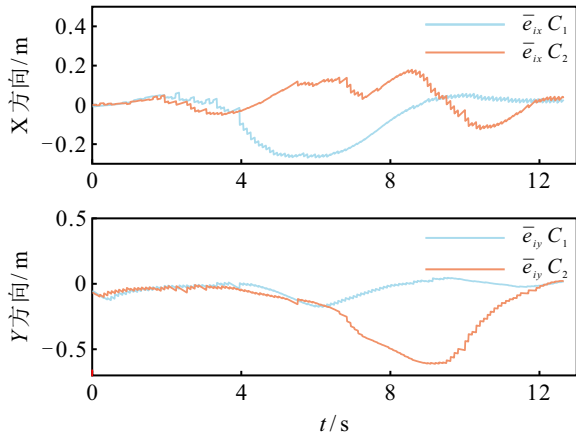


图5 远距阶段轨迹跟踪误差

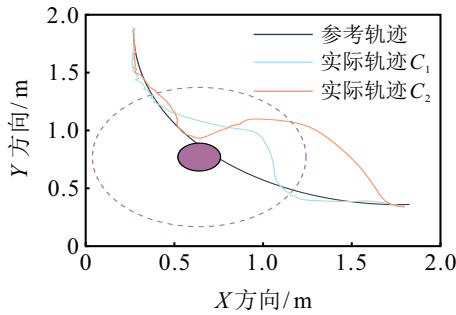


图6 远距阶段平面集结轨迹

4.2 近端阶段对接验证

近距阶段基于待对接目标设计直线导引轨迹, 通过轨迹跟踪运动至目标处. 本节基于移动机器人和待对接目标的全局位姿和坐标变换来构建模拟局部感知反馈的位姿和视线. 为了确保对比公平性, 两次实验的控制增益均设置为 $c_4 = 0.5$, 所提出方法还包含非线性增益 $\alpha_x = \alpha_y = 0.4$ 、 $T_x = T_y = 4$ 以及自适应增益 $k_{ix} = k_{iy} = 10$ 、 $\alpha_\lambda = 0.4$ 和 $T_\lambda = 4$. 视线约束参数为 $k_{cone} = 0.5$ 、 $k_{1cx} = k_{1cy} = k_{2cx} = k_{2cy} = 30$.

图7为近距阶段轨迹跟踪误差. 以0.03 m对接精度要求为准, C_1 到达对接精度范围的时间为4 s, 最终目标处控制精度为0.007 m; 而 C_2 则处于失控

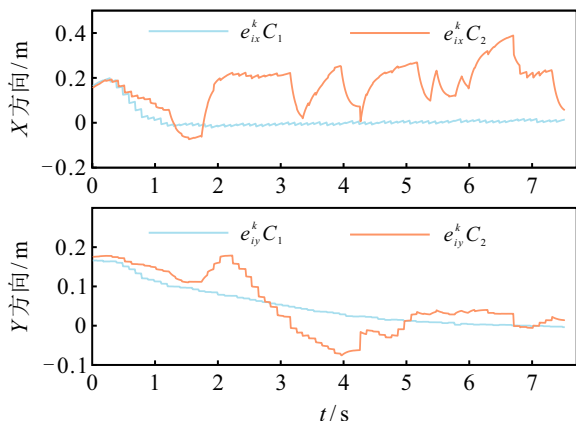


图7 近距阶段对接导引轨迹跟踪误差

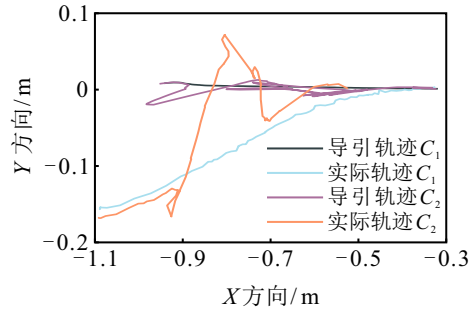


图8 近距阶段平面对接轨迹

状态, 最终目标处控制精度为0.34 m. 图8为组合对接导引过程平面轨迹效果. 在初始阶段, 由于位置误差会引起姿态的突然变化触发视线安全机制, 修正参考轨迹, 复合非线性反馈的控制策略促使对接轨迹精准快速收敛至导引轨迹以确保定位孔送入锁紧器内. 但是, C_2 由于没有引入自适应抗饱和, 在触发视线安全机制时控制输入易触发饱和和阈值, 从而导致近距导引轨迹跟踪过程的完全失控.

5 结论

移动机器人利用多机重构组合可显著提升系统任务和地形适应能力, 但是, 在实际开放环境面临定位基准与感知特性差异、障碍威胁、感知视线安全和嵌套运动饱和等难点. 鉴于此, 本文提出了一种基于远距惯性定位和近距局部感知的分段式安全对接控制框架, 在远距范围引入了分层安全约束机制和自适应抗饱和和来保证集结的平滑性和安全性; 在近距范围, 设计了基于视线的自适应轨迹补偿项和复合非线性反馈控制器来实现视线范围内平稳快速的组合对接. 最后, 在移动机器人自重构实验平台上完成了所提出算法的有效性验证.

参考文献 (References)

- [1] Liu C, Whitzer M, Yim M. A distributed reconfiguration planning algorithm for modular robots[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(4): 4231-4238.
- [2] Sohal S S, Sebastian B, Ben-Tzvi P. Autonomous docking of hybrid-wheeled modular robots with an integrated active genderless docking mechanism[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2022, 14(1): 011010.
- [3] Park C, Bae J, Ryu S, et al. R-track: Separable modular climbing robot design for wall-to-wall transition[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 1036-1042.
- [4] Tan W S, Wei H X, Yang B. Sambot II: A new self-assembly modular robot platform based on sambot[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(10): 1719.
- [5] Hauser S, Mutlu M, Léziart P A, et al. Roombots extended: Challenges in the next generation of self-

- reconfigurable modular robots and their application in adaptive and assistive furniture[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2020, 127: 103467.
- [6] Huang B, Zhou B L, Pang H S, et al. A reliable docking mechanism and close-range docking algorithm for modular reconfigurable robots[C]. Proceedings of the 9th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering, Shenzhen, 2023: 78-83.
- [7] 何成林, 钟鸣, 姚玉峰. 基于红外定位的微型自重构移动机器人[J]. *机械与电子*, 2016, 34(9): 69-72. (He C L, Zhong M, Yao Y F. Miniature self reconfigurable mobile robot based on infrared positioning[J]. *Machinery & Electronics*, 2016, 34(9): 69-72.)
- [8] Li H Y, Wang H Y, Cui L L, et al. Design and experiments of a compact self-assembling mobile modular robot with joint actuation and onboard visual-based perception[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(6): 3050.
- [9] 周游, 双丰, 李金科, 等. 基于视觉反馈的多机器人自重构系统研究[J]. *控制与决策*, 2022, 37(8): 2127-2133. (Zhou Y, Shuang F, Li J K, et al. Multi-robot self-reconfigurable systems based on visual feedback[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(8): 2127-2133.)
- [10] Quiñonez Y, Baca J, de Lope J, et al. Self-alignment approach based on cooperative behaviors for the docking process of modular mobile robots[C]. IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference. Cuernavaca, 2010: 445-450.
- [11] Wei H X, Li H Y, Guan Y, et al. A dynamics based two-stage path model for the docking navigation of a self-assembly modular robot (Sambot)[J]. *Robotica*, 2016, 34(7): 1517-1528.
- [12] Liu C, Lin Q, Kim H, et al. SMORES-EP, a modular robot with parallel self-assembly[J]. *Autonomous Robots*, 2023, 47(2): 211-228.
- [13] 岳伟, 季嘉诚, 刘中常, 等. 基于准最大最小模型预测控制的AUV视觉对接[J]. *控制与决策*, 2023, 38(7): 1887-1894. (Yue W, Ji J C, Liu Z C, et al. Quasi-min-max MPC algorithm for visual docking of an autonomous underwater vehicle[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(7): 1887-1894.)
- [14] 谭天乐. 航天器交会对接的模型预测与反演制导控制[J]. *控制与决策*, 2019, 34(4): 793-798. (Tan T L. Model predictive and inversive guidance and control for spacecraft rendezvous and docking[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(4): 793-798.)
- [15] 孙秉珍, 杨佳楠, 白军成, 等. 充电中断情景下电动汽车充电站两阶段多目标区间选址优化决策[J]. *控制与决策*, 2022, 37(4): 1005-1014. (Sun B Z, Yang J N, Bai J C, et al. A two-stage multi-objective interval location optimization decision of electric vehicle charging station under charging interruption scenario[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(4): 1005-1014.)
- [16] Chang S P, Wang Y J, Zuo Z Q, et al. Fixed-time formation control for wheeled mobile robots with prescribed performance[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2022, 30(2): 844-851.
- [17] Xia G Q, Xia X M, Zheng Z. Formation tracking control for underactuated surface vehicles with actuator magnitude and rate saturations[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 260: 111935.
- [18] Ghaffari A. Analytical design and experimental verification of geofencing control for aerial applications[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, 26(2): 1106-1117.
- [19] Ran M P, Li J C, Xie L H. A new extended state observer for uncertain nonlinear systems[J]. *Automatica*, 2021, 131: 109772.
- [20] Sharma R S, Mondal A, Behera L. Tracking control of mobile robots in formation in the presence of disturbances[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(1): 110-123.
- [21] 姚瀚晨, 彭建伟, 戴厚德, 等. 基于改进弹簧模型的移动机器人柔顺跟随行人方法[J]. *机器人*, 2021, 43(6): 684-693. (Yao H C, Peng J W, Dai H D, et al. A compliant human following method for mobile robot based on an improved spring model[J]. *Robot*, 2021, 43(6): 684-693.)
- [22] Huang S H, Xiong L Y, Zhou Y, et al. A novel distributed predefined-time sliding mode controller for performance enhancement of power system under input saturation[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2022, 69(10): 4284-4297.

作者简介

郑志 (1994-), 男, 博士生, 主要研究方向为控制理论与应用、机器人建模与辨识、多机器人协同控制, E-mail: zhizheng@cqu.edu.cn;

江涛 (1992-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为控制理论与应用、自适应鲁棒控制、机器人定位与规划, E-mail: jiangtao_1992@outlook.com;

王健翔 (2002-), 男, 硕士生, 主要研究方向为控制理论与应用、多智能体系统的分布式协同控制, E-mail: wangjianxiang@stu.cqu.edu.cn;

于忠良 (1992-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为计算机视觉与应用、多模态目标识别、跨模态情感分析, E-mail: zlyu@cqu.edu.cn;

王大涛 (1988-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为结构智能监测传感器、物联网智能采集终端、智能控制, E-mail: wangtao8067227@sina.com.