

doi: 10.7690/bgzd.2026.06.019

移动机器人自主开门技术

吴昊, 陶卫军

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为提高机器人在人类环境作业中具备打开并通过门的操作安全性, 提出一种基于模型预测控制和导纳控制的移动机器人自主开门方法。对移动机器人进行运动学建模, 求解移动底盘上搭载的机械手末端的笛卡尔位姿和速度, 并离线规划开门运动轨迹; 对移动机器人添加自身和环境的约束, 构建最优化控制问题; 由导纳控制器对规划轨迹进行修正, 将修正后的轨迹传入模型预测控制器进行跟踪。仿真实验结果证明: 该方法在移动机器人全身协同控制、柔顺控制方面具备有效性, 应用前景广阔。

关键词: 移动机器人; 自主开门; 导纳控制; 模型预测控制; 全身控制

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

Autonomous Door-opening Techniques of Mobile Robots

Wu Hao, Tao Weijun

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to improve the operational safety of opening and passing a door in human environment, a method based on model predictive control and admittance control is proposed for a mobile robot to open the door autonomously. The kinematics model of the mobile robot is established, and the Cartesian pose and velocity of the end of the manipulator mounted on the mobile chassis are solved, and the door opening trajectory is planned offline. The constraints of the mobile robot itself and the environment are added, and the optimization control problem is constructed. The planned trajectory is corrected by the admittance controller, and the corrected trajectory is transferred to the model predictive controller for tracking. The simulation results show that the method has effective in the whole body cooperative control and compliance control of mobile robots, and has broad application prospects.

Keywords: mobile robot; autonomous door opening; admittance control; model predictive control; whole body control

0 引言

随着机器人技术的发展, 移动机器人被广泛应用于各种行业中^[1]。对于在人类环境中工作的移动机器人来说, 搭载机械手并具备自主开门功能是其完成许多复杂任务的前提^[2]。考虑到自主开门过程中需要对门把手进行精确识别与定位, 否则可能会导致开门过程中较大的机械手抓取门把手误差从而导致开门失败, 或产生较大干涉力而损坏机器人自身; 因此, 研究移动机器人如何自主识别、定位并准确抓住门把手从而实现自主开门非常必要^[3-4]。

在已有研究成果中, Adiwahono 等^[5-6]控制机器人手臂推动门把手旋转来实现解锁的同时, 附加推动门的动作来实现开门功能。由于整个过程中没有机械手抓握门把手这一过程, 不需要对门把手进行精确定位, 从而简化了开门过程, 但也给操作过程带来了更多的不确定性。Karayiannidis 等^[7-8]基于机械手末端搭载的 6 轴力/力矩传感器, 通过柔顺控制方法使机器人在开门过程中呈现出质量-阻尼-弹簧

的二阶系统动态特性, 能够稳定安全地完成自主开门任务。但他们在处理机器人自身约束限制方面的讨论不多, 还有必要进一步对机械臂关节的速度、加速度限制^[9]和避免机器人与环境发生碰撞等^[10]方面进行讨论。基于上述研究中, 采用柔顺控制的方法可以有效减少移动机器人开门时可能产生的干涉作用力, 但其本身并不能为机器人系统添加自身或环境的约束限制以避免碰撞。为了使移动机器人在自主开门的同时避免与自身或环境产生机械干涉或碰撞, 笔者提出了一种融合模型预测控制(model predictive control, MPC)与导纳控制(admittance control, AC)的新方法来实现移动机器人自主开门任务。其中, AC 主要用来减小开门过程中由机械干涉产生的干涉力以实现柔顺控制效果, 而 MPC 用来对机器人施加约束以避免碰撞。

1 机器人自主开门流程与控制原理

考虑移动机器人自主开门的实现策略, 得到其自主开门流程如图 1 所示。

收稿日期: 2024-12-04; 修回日期: 2025-01-20

第一作者: 吴昊(1999—), 男, 浙江人, 硕士。

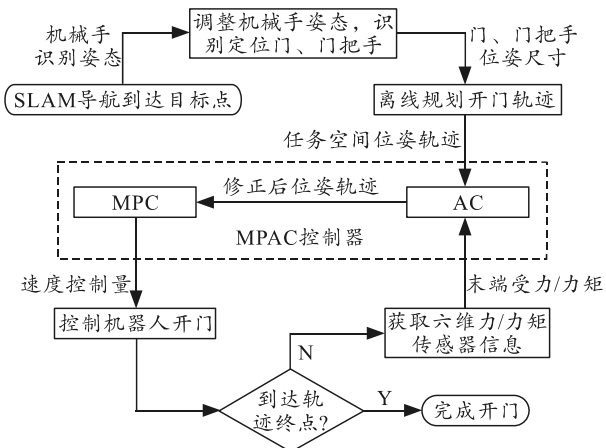


图 1 移动机器人自主开门流程

首先，机器人基于 SLAM 技术导航到达目标点处，控制机械手识别和定位门与门把手；其次，根据门与门把手的位姿和尺寸在笛卡尔空间中规划一条移动机器人上搭载的机械手的目标轨迹，其包含所有路径点所处的位置和姿态；在此基础上，由机器人系统模型、约束和期望的导纳特性构建模型预测导纳控制 (model predictive admittance control, MPAC) 的控制器，结合机器人末端所受外力/力矩反馈来控制机器人实时修正并跟踪设定的目标轨迹，实现自主开门并通过门这一功能。

为了同时处理机器人开门时的干涉力和约束，所提出的融合模型预测控制和导纳控制的 MPAC 原理如图 2 所示。

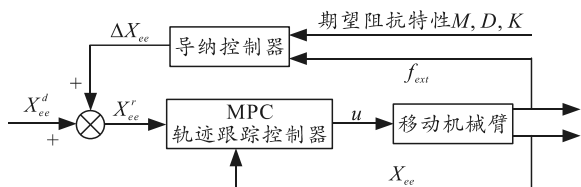


图 2 模型预测导纳控制原理

采用导纳控制来获取机械手外力/力矩反馈后得到的目标位置与姿态的修正量，由修正量对设定的目标位置与姿态进行修正后给到 MPC 来实现机械手对目标位置与姿态的跟踪。

2 移动机器人自主开门方法

2.1 移动机器人运动学建模

移动机器人由一个 2 轮差速移动底盘和一个 6 自由度的机械臂组成，如图 3 所示。

为了实现对移动机器人自主开门的控制，需要建立机器人的运动学模型。用向量 \mathbf{x} 表示机器人的状态变量：

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_{\text{base}}, \mathbf{x}_{\text{arm}}]^T \in R^9. \quad (1)$$

式中向量 \mathbf{x}_{base} 和 \mathbf{x}_{arm} 分别表示机器人移动底盘和机械手的状态变量。

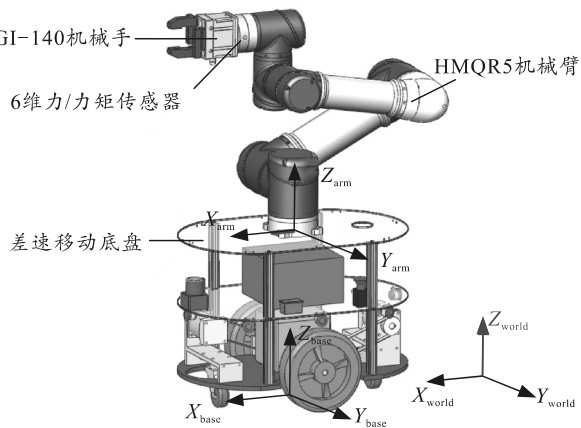


图 3 移动机械臂机器人

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{\text{base}} &= [x_{\text{base}}, y_{\text{base}}, \theta_{\text{base}}]^T \in R^3 \\ \mathbf{x}_{\text{arm}} &= [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6]^T \in R^6 \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

式中： x_{base} 、 y_{base} 、 θ_{base} 分别为底盘在 xy 平面上的位置和偏航角； $q_1 \sim q_6$ 为机械手 6 个关节的转角。用向量 \mathbf{u} 表示机器人的控制变量：

$$\mathbf{u} = [\mathbf{u}_{\text{base}}, \mathbf{u}_{\text{arm}}]^T \in R^8. \quad (3)$$

式中向量 \mathbf{u}_{base} 和 \mathbf{u}_{arm} 分别为机器人移动底盘和机械手的控制变量。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u}_{\text{base}} &= [v, \omega]^T \in R^2 \\ \mathbf{u}_{\text{arm}} &= [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dot{q}_4, \dot{q}_5, \dot{q}_6]^T \in R^6 \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

式中： v 和 ω 分别为底盘的线速度和角速度； $\dot{q}_1 \sim \dot{q}_6$ 为机械手 6 个关节的角速度。则系统的运动学模型为：

$$\dot{\mathbf{x}} = [v \cos \theta_{\text{base}}, v \sin \theta_{\text{base}}, \omega, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dot{q}_4, \dot{q}_5, \dot{q}_6]. \quad (5)$$

离散状态空间方程为：

$$\mathbf{x}_{k+1} = f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k). \quad (6)$$

2.1.1 移动机器人运动学分析

由机械手正向运动学可以获得机械手相对于其基座的位姿变换矩阵 ${}^0T \in R^{4 \times 4}$ ，则结合底盘的位姿，可计算机械手在世界坐标系中的位姿变换矩阵 wT 为：

$$\begin{aligned} {}^wT &= {}^wT_0^0 T = \begin{bmatrix} {}^wR & {}^wP \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^0R & {}^0P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} {}^wR & {}^wP \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \in R^{4 \times 4}. \end{aligned} \quad (7)$$

式中矩阵 wR 和向量 wP 分别为移动底盘在世界坐标系中的姿态矩阵和位置向量。

$${}^w_0\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{\text{base}} & -\sin\theta_{\text{base}} & 0 \\ \sin\theta_{\text{base}} & \cos\theta_{\text{base}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{3 \times 3},$$

$${}^w_0\mathbf{P} = \begin{bmatrix} x_{\text{base}} \\ y_{\text{base}} \\ z_{\text{base}} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}. \quad (8)$$

式中 $z_{\text{base}}=0.44 \text{ m}$ 为机械手基座距地面高度。

2.1.2 机械手末端速度求解

在 MPAC 算法中, 导纳控制需要获取机械手末端在笛卡尔空间中的速度, 可通过雅克比矩阵和机械手的关节角速度来求解:

$${}^0\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}. \quad (9)$$

式中: $\mathbf{J}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 为机械手在此关节角状态下的雅克比矩阵; $\mathbf{q} \in \mathbf{R}^6$ 为机械手 6 个关节的转角。向量 ${}^0\mathbf{p}$ 表示机械手在基座坐标系下的位姿:

$${}^0\mathbf{p} = [{}^0x, {}^0y, {}^0z, {}^0\alpha, {}^0\beta, {}^0\gamma] \in \mathbf{R}^6. \quad (10)$$

式中 ${}^0\alpha$ 、 ${}^0\beta$ 和 ${}^0\gamma$ 为姿态以欧拉角。

机器人移动底盘只在平面上运动, 所以在笛卡尔空间中, 底盘的运动只会对机械手末端的 x 方向速度、 y 方向速度和绕 z 轴的转动速度产生影响, 如图 4 所示。

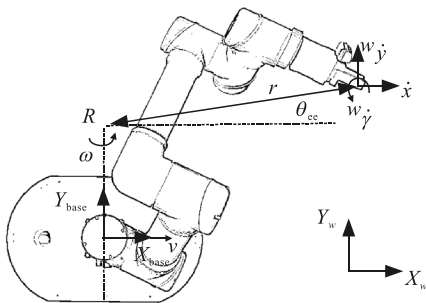


图 4 xy 平面移动机械臂末端笛卡尔速度

计算可得机械手末端在世界坐标系下的速度 ${}^w\dot{\mathbf{p}}$:

$${}^w\dot{\mathbf{p}} = [{}^w\dot{x}, {}^w\dot{y}, {}^0\dot{z}, {}^0\dot{\alpha}, {}^0\dot{\beta}, {}^w\dot{\gamma}]. \quad (11)$$

式中: ${}^w\dot{x}$ 、 ${}^w\dot{y}$ 为 x 、 y 方向的速度; ${}^w\dot{\gamma}$ 为绕 z 轴的转动速度。

$$\left. \begin{aligned} {}^w\dot{x} &= {}^0\dot{x}\cos\theta_{\text{base}} - {}^0\dot{y}\sin\theta_{\text{base}} + v\cos\theta_{\text{base}} - \omega r\sin\theta_{\text{cc}} \\ {}^w\dot{y} &= {}^0\dot{x}\sin\theta_{\text{base}} + {}^0\dot{y}\cos\theta_{\text{base}} + v\sin\theta_{\text{base}} + \omega r\cos\theta_{\text{cc}} \\ {}^w\dot{\gamma} &= {}^0\dot{\gamma} + \omega \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

式中 r 和 θ_{cc} 分别为在 xy 平面上机械手末端投影点与底盘旋转中心点 R 的距离, 和两点连线与世界坐标系 x 轴正方向的夹角。

2.2 机器人开门离线轨迹规划

已知门和门把手的位姿与尺寸, 笔者采用离线轨迹规划生成机械手将要跟随的笛卡尔空间目标轨迹。机器人开门可分为: 准备抓握门把手、抓握门把手、拧转门把手、推门 4 个阶段, 各阶段所对应的目标轨迹均采用线性插值规划获得, 如图 5 所示。

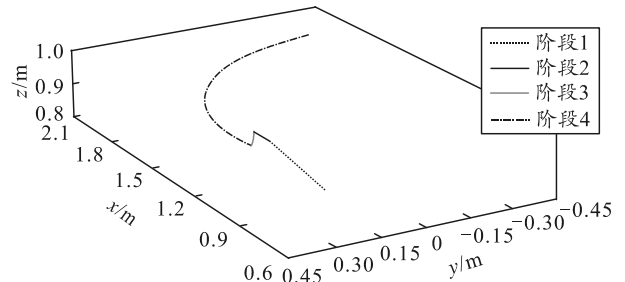


图 5 机器人开门离线轨迹规划

第 1 阶段, 机械手由初始位姿运动到预备抓握门把手的位姿; 第 2 阶段, 为避免机械手与门把手发生碰撞, 机械手以垂直于门平面的姿态运动至抓握门把手位姿, 闭合夹爪抓握门把手; 第 3 阶段, 以门把手转轴为圆心, 以抓握点到圆心距离为半径, 在 yz 平面做圆弧运动, 拧转门把手以解锁; 第 4 阶段, 以门转轴为圆心, 以抓握点到圆心距离为半径, 在 xy 平面做圆弧运动推开门。

3 基于 MPAC 的机器人运动控制

获得机器人开门的目标轨迹后, 需要控制机器人跟随此条轨迹来开门。在 MAPC 中, 由 AC 根据期望的导纳特性结合所受外力对目标轨迹进行修正, 由 MPC 来跟踪修正后的目标轨迹, 同时满足约束。

3.1 基于导纳控制的目标轨迹修正

在导纳控制中, 机器人将表现为试图到达期望状态(期望加速度 $\ddot{\mathbf{p}}^d$, 期望速度 $\dot{\mathbf{p}}^d$, 期望位置 \mathbf{p}^d) 的弹簧-质量-阻尼系统, 可以表示为:

$$\mathbf{M}(\ddot{\mathbf{p}}^r - \ddot{\mathbf{p}}^d) + \mathbf{D}(\dot{\mathbf{p}}^r - \dot{\mathbf{p}}^d) + \mathbf{K}(\mathbf{p}^r - \mathbf{p}^d) = \mathbf{f}_{\text{ext}}. \quad (13)$$

式中: 正定矩阵 $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 、 $\mathbf{D} \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 和 $\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 分别为导纳系统的虚拟质量对角矩阵、虚拟阻尼对角矩阵和虚拟刚度对角矩阵; 向量 $\ddot{\mathbf{p}}^r \in \mathbf{R}^6$ 、 $\dot{\mathbf{p}}^r \in \mathbf{R}^6$ 、 $\mathbf{p}^r \in \mathbf{R}^6$ 分别为经导纳控制器修正过的机械手在笛卡尔空间中的参考加速度、参考速度和参考位姿; 向量 $\mathbf{f}_{\text{ext}} \in \mathbf{R}^6$ 为机械手所受的外力/力矩。

机器人系统模型是离散的, 在采样周期 Δt 内, 可由 k 时刻机械手的位姿、速度和加速度, 结合机

械手所受外力, 计算得到 $k+1$ 时刻机械手的参考加速度 \ddot{p}_{k+1}^r , 进而计算出由加速度产生的参考速度 \dot{p}_{k+1}^r , 和由速度产生的参考位姿 p_{k+1}^r :

$$\ddot{p}_{k+1}^r = \ddot{p}_{k+1}^d + M^{-1}(f_{\text{ext}} - D(\dot{p}_k^r - \dot{p}_{k+1}^d) - K(p_k^r - p_{k+1}^d)); \quad (14)$$

$$\dot{p}_{k+1}^r = \dot{p}_k^r + \ddot{p}_{k+1}^r \Delta t; \quad (15)$$

$$p_{k+1}^r = p_k^r + \dot{p}_{k+1}^r \Delta t. \quad (16)$$

3.2 基于模型预测控制的轨迹跟随

3.2.1 代价函数

代价函数中首先定义了系统的控制目标, 即要求机械手能够平稳地跟踪修正后的目标轨迹。其次, 添加惩罚函数可以防止开门过程中碰撞的发生。代价函数 J 由 H 步预测时域内末端位姿误差项 $C_{\text{ee_error}}$ 、防碰撞惩罚项和输入控制权重项 $u^T R u$ 组成:

$$J(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{X}_{\text{ce}}^r) = \sum_{i=k}^{k+H-1} L(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{X}_{\text{ce}}^r),$$

$$L(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{X}_{\text{ce}}^r) = C_{\text{ee_error}}(\mathbf{x}_i, \mathbf{X}_{\text{ce}}^r) + \sum_{j=0}^{12} P_j + \mathbf{u}_i^T R \mathbf{u}_i. \quad (17)$$

式中: 矩阵 $\mathbf{X}_{\text{ce}}^r \in \mathbf{R}^{7 \times H}$ 为 H 组机械手的参考位姿, 由导纳控制器修正目标轨迹得到; 向量 \mathbf{x}_i 为 H 步中每一步的状态量, 向量 \mathbf{u}_i 为除最后一步外 $H-1$ 步中每一步的控制量; P_j 为约束障碍惩罚函数, 表示机器人与自身或环境的碰撞成本; 对角正定阵 $R \in \mathbf{R}^{8 \times 8}$ 为输入权重矩阵。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i \in \mathcal{X}_H &= \{\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{k+1}, \dots, \mathbf{x}_{k+H}\}, \\ \mathbf{u}_i \in \mathcal{U}_{H-1} &= \{\mathbf{u}_k, \mathbf{u}_{k+1}, \dots, \mathbf{u}_{k+H-1}\}. \end{aligned} \quad (18)$$

1) 轨迹跟随代价。

可以用 \mathbf{X}_{ce} 表示机械手在世界坐标系中的空间位姿:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_{\text{ce}} &= [p_{\text{ce}}, q_{\text{ce}}] \in \mathbf{R}^7 \\ p_{\text{ce}} &= [x_{\text{ce}}, y_{\text{ce}}, z_{\text{ce}}] \in \mathbf{R}^3 \\ q_{\text{ce}} &= [q_x, q_y, q_z, q_w] \in \mathbf{R}^4 \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

式中: 向量 p_{ce} 为机械手末端的空间位置, 由式(8)中的位置向量 ${}^w P$ 得到; 向量 q_{ce} 为其姿态, 由式(8)中的姿态矩阵 ${}^w R$ 转换为四元数获得。

可以通过在代价函数中添加实际位姿与参考位姿的偏差来达到轨迹跟随的效果, $C_{\text{ee_error}}$ 为位置偏差与姿态偏差的加权和。对于给定的一组参考位姿 $[p_{\text{ce}}^r, q_{\text{ce}}^r] \in \mathbf{R}^7$, 轨迹跟随代价函数为:

$$C_{\text{ee_error}}(\mathbf{x}_i, p_{\text{ce}}^r, q_{\text{ce}}^r) = \frac{1}{2} e_{\text{pos}}^T Q_{\text{pos}} e_{\text{pos}} + \frac{1}{2} e_{\text{ori}}^T Q_{\text{ori}} e_{\text{ori}}. \quad (20)$$

式中: e_{pos} 和 e_{ori} 分别为在世界坐标系下机械手当前位姿与参考位姿的位置误差和四元数姿态误差^[11]; $Q_{\text{pos}}, Q_{\text{ori}} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 分别为位置和姿态的误差惩罚权重矩阵, 为对角正定阵。

2) 机器人防碰撞代价。

机器人在跟随参考轨迹时, 还要求不与自身或环境发生碰撞。近些年的研究中多采取将机器人结构近似为虚拟碰撞体的方法, 并向约束优化问题的代价函数中添加松弛障碍函数 (relaxed barrier functions, RBF) 的惩罚项来防止碰撞, 实现了较好的防碰撞效果^[12-14]。其原理是, RBF 惩罚项会在一对碰撞体间距离超过设定阈值时增大代价函数的值, 使最优化问题的解倾向于满足约束条件。代价函数中机器人防碰撞惩罚项为:

$$\sum_{j=0}^{12} P_j = \sum_{j=0}^{12} (P_j^{\text{self}}(d_j^{\text{self}}) + P_j^{\text{env}}(d_j^{\text{env}})). \quad (21)$$

式中: P_j^{self} 为自身碰撞代价; P_j^{env} 为环境碰撞代价; $j \in \{0, \dots, 12\}$ 表示机器人结构近似的 13 个虚拟碰撞体, $j=0$ 表示移动机械臂底盘虚拟碰撞体, 其他 12 个碰撞体分布在机械臂上, 如图 7 所示。

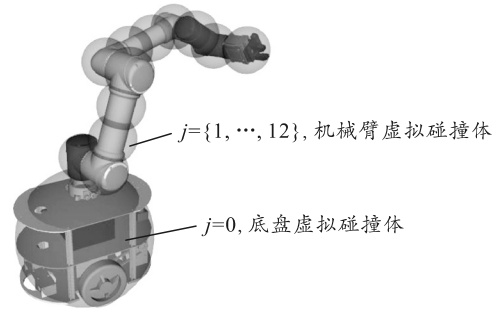


图6 机器人虚拟碰撞体

2 种碰撞代价均采用对数形式的松弛障碍惩罚函数:

$$\left. \begin{aligned} P_j(d_j) &= \begin{cases} -\mu \ln(d_j) & d_j > \delta \\ \mu \beta(d_j, \delta) & d_j \leq \delta \end{cases} \\ \beta(d_j, \delta) &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{d_j}{\delta} - 2 \right)^2 - 1 \right] - \ln(\delta) \end{aligned} \right\}. \quad (22)$$

式中 $\beta(d_j, \delta)$ 为可以使 P_j 二阶连续可微的二次函数。

对于机器人防自碰撞, 可以通过灵活碰撞库 (FCL)^[15] 使用 GJK 算法进行距离查询来实现。式(21)中的 d_j^{self} 表示第 j 个虚拟碰撞体与所有可能与其发生碰撞的虚拟碰撞体间距离的最小值。

对于机器人防环境碰撞，笔者针对机器人开门任务，考虑机器人与左右门框、门三者的碰撞，式(21)中的 d_j^{env} 表示第 j 个虚拟碰撞体与环境距离的最小值：

$$d_j^{env} = \min_j(d_j^1 - r_j - r_f, d_j^2 - r_j - r_f, d_j^3 - r_j)。 \quad (23)$$

式中： r_j 为第 j 个虚拟碰撞体的半径； r_f 为门框以厚度为直径近似成圆柱后投影至 xy 平面的半径； d_j^1 、 d_j^2 分别为在 xy 平面上第 j 个虚拟碰撞体到左右门框中心的距离； d_j^3 为其到门平面的垂直距离。

3.2.2 机器人系统约束

针对系统状态变量和控制变量的限制，MPAC 采取硬约束的方式。其中，对机器人底盘的状态变量没有约束，只包括对机械手关节角的不等式约束：

$$\mathcal{X} := \{q_i^{lb} \leq q_i \leq q_i^{ub}, i = \{1, \dots, 6\}\}。 \quad (24)$$

式中 q_i^{lb} 和 q_i^{ub} 为第 i 个关节转动角度的下限和上限。系统控制变量的约束为：

$$\mathcal{U} = \mathcal{U}_{base} \times \mathcal{U}_{arm}。 \quad (25)$$

式中 \mathcal{U}_{base} 和 \mathcal{U}_{arm} 分别为底盘和机械手的控制变量约束：

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{U}_{base} &:= \{v^{lb} \leq v \leq v^{ub}, \omega^{lb} \leq \omega \leq \omega^{ub}\} \\ \mathcal{U}_{arm} &:= \{\dot{q}_i^{lb} \leq \dot{q}_i \leq \dot{q}_i^{ub}, i = \{1, \dots, 6\}\} \end{aligned} \right\}。 \quad (26)$$

3.2.3 MPAC 最优化问题构建与求解

通过迭代式(5)的系统运动学模型，来最小化式(17)的代价函数。同时考虑式(24)与(27)的系统约束，可构建 MPAC 最优控制问题为：

$$\begin{aligned} \min_u & J(x_k, u, X_{cc}^r) \\ \text{s.t.} & \dot{x}_k = f(x_k, u_k), x_0 = x_k, x_k \in \mathcal{X}, u_k \in \mathcal{U}。 \end{aligned} \quad (27)$$

式中 x_0 为移动机器人的初始状态量。使用直接多重打靶法^[16]将 MPAC 最优控制问题转化为非线性规划问题，并使用开源库 CasADi^[17]进行求解。

4 仿真实验及结果分析

4.1 仿真环境与实验平台

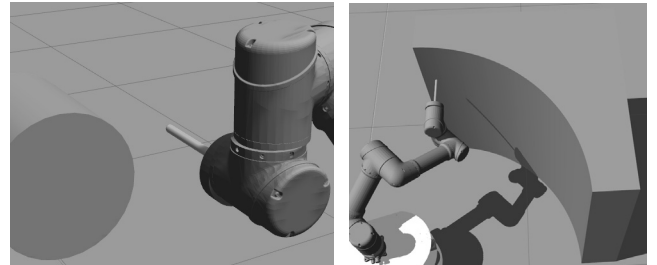
在 ROS 中的 gazebo 环境下进行仿真实验，使用自行搭建的移动机器人，如图 3 所示。该机器人由具有前后 2 个支撑万向轮的差速驱动底盘和 6 自由度机械臂 HMQR5 组成。机械臂末端安装有 PGI-140 夹爪，在机械臂末端和夹爪之间安装有 6 维力/力矩传感器。

4.2 移动机器人 MPAC 开门实验

gazebo 仿真环境接触动力学误差较大且不稳定，而机器人在开门过程中与门把手的接触情况复杂，因此为了保证实验结果良好的可复现性，本实验只考虑笛卡尔空间中沿 x 、 y 和 z 方向的力，而不考虑由此产生的力矩。在实验中，设定 MPAC 控制器的参数为： $M = \text{diag}[5, 5, 5] \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ ， $D = \text{diag}[220, 220, 220] \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ ， $K = \text{diag}[32, 32, 32] \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ ；预测时域 $H=20$ ，输入权重矩阵 $\mathbf{R} = [10, 10, 1_6]$ ，位置误差权重矩阵 $\mathbf{Q}_{pos} = [200, 200, 200]$ ，姿态误差权重矩阵 $\mathbf{Q}_{ori} = [100, 100, 100]$ ；底盘控制约束为： $v^{lb} = -0.05$ m/s， $v^{ub} = 0.05$ m/s， $\omega^{lb} = -0.1$ rad/s， $\omega^{ub} = 0.1$ rad/s；机械臂控制约束为： $\dot{q}_i^{lb} = -0.2$ rad/s， $\dot{q}_i^{ub} = 0.2$ rad/s；机械臂状态约束为： $q_i^{lb} = -180^\circ$ ， $q_i^{ub} = 180^\circ$ 。

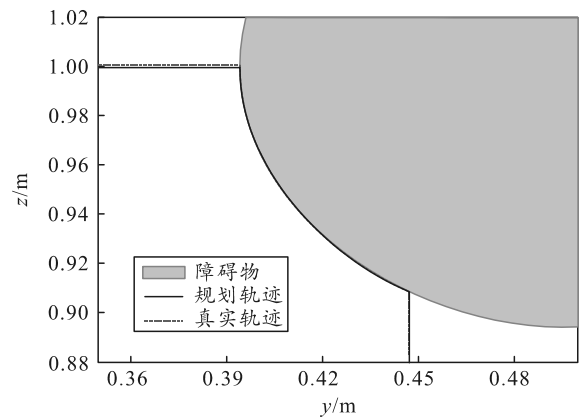
4.2.1 移动机器人轨迹跟踪分析

为检验 MPAC 在遇到外界干涉力时的柔顺能力，将移动机器人开门问题简化为跟踪目标轨迹时轨迹上存在障碍物的问题，如图 7 所示。并将机械爪简化为一细圆柱体，则机器人与环境的多点复杂接触可被简化为单点接触。图 8 为 MPAC 轨迹跟踪分析。



(a) 拧门把手 (b) 推门

图 7 实验场景



(a) 拧门把手规划无误差轨迹

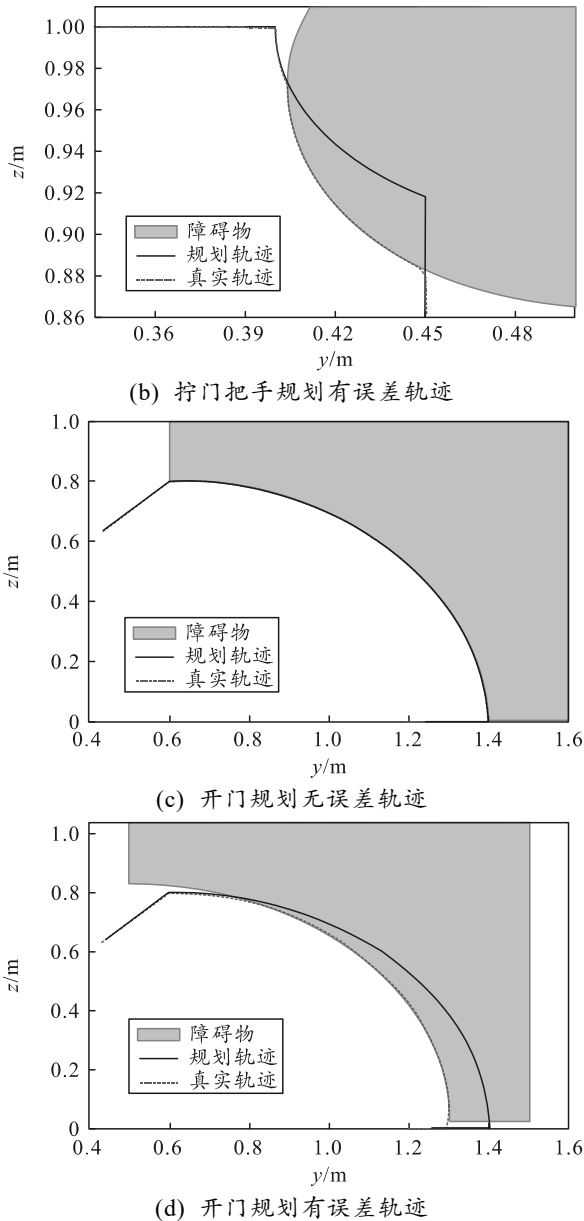


图 8 MPAC 轨迹跟踪分析

如图 8(a)和(c)所示，当机器人规划轨迹与真实轨迹相同时，MPAC 能够严格跟踪规划轨迹。如图 8(b)和(d)所示，当存在误差时，机器人末端在规划路径上接触到障碍物，MPAC 由期望的导纳特性根据机器人所受外力能够使其沿着障碍物的轮廓运动，而不会再跟踪原来的轨迹，以避免机器人和障碍物发生过大干涉而损坏机器人。当规划的轨迹上不存在障碍物时，此时机器人末端又会严格跟随规划轨迹。

图 9 为模拟拧门把手和开门的 2 个实验中机械手末端的受力情况，每个实验都采取 2 种控制方式，即机器人仅使用 MPC 进行轨迹跟踪而不对障碍物进行柔顺规避，和使用 MPAC 对障碍物进行柔顺规

避。具体数据如表 1 所示。

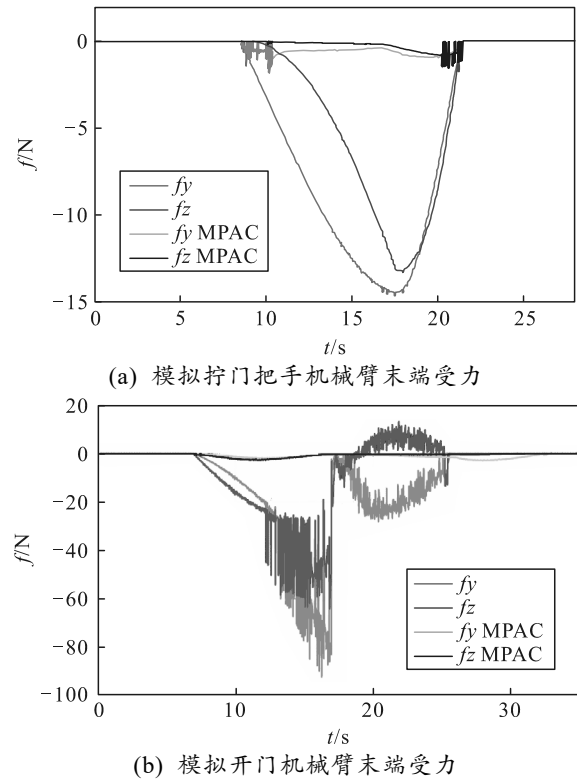


图 9 MPAC 轨迹跟踪机器人末端受力情况

表 1 MPAC 轨迹跟踪机器人末端受力对比

模拟实验	是否采用 MPAC	平均受力/N	最大受力/N
拧门把手	否	10.804	19.702
拧门把手	是	0.676	2.111
开门	否	28.302	108.567
开门	是	1.681	3.465

在模拟拧门把手实验中，不对障碍物柔顺规避时，机器人末端平均受力为 10.804 N，最大受力为 19.702 N。使用 MPAC 对障碍物柔顺规避，机器人末端平均受力为 0.676 N，减小 93.7%，最大受力为 2.111 N，减小 89.3%。在模拟开门实验中，不对障碍物柔顺规避时，机器人末端平均受力为 28.302 N，最大受力为 108.567 N。使用 MPAC 对障碍物柔顺规避，机器人末端平均受力为 1.681 N，减小 94.1%，最大受力为 3.465 N，减小 96.8%。

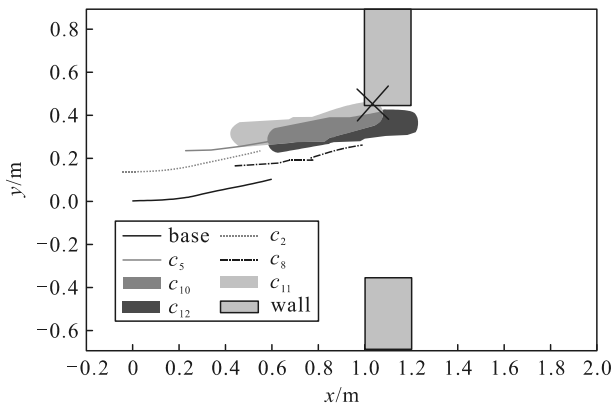
由此可见，使用 MPAC 控制机器人跟随预先规划的有障碍物存在的目标轨迹，能够使机器人对障碍物产生柔顺行为，同时大大减小机器人与环境接触时产生的干涉力。

4.2.2 移动机器人防碰撞分析

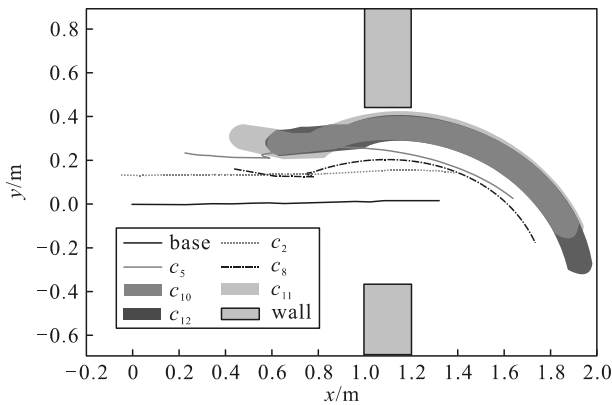
为验证 MPAC 算法在机器人开门过程中的防碰撞性能，分别采用 MPAC 不防碰撞和防碰撞(即 MPAC 最优化问题的代价函数式(17)中是否包含防

碰撞惩罚项 $\sum_{j=0}^{12} P_j$) 2 种方法进行开门实验。

由正向运动学可以计算得到机器人虚拟碰撞体在 xy 平面的投影轨迹, 图 10 为开门过程中底盘和机械臂 6 个关节处的 xy 轨迹, 其中加粗轨迹为关节 4、5 和 6 的虚拟碰撞体在开门过程中所经过空间在 xy 平面的投影。



(a) MPAC 不防碰撞时虚拟碰撞体轨迹



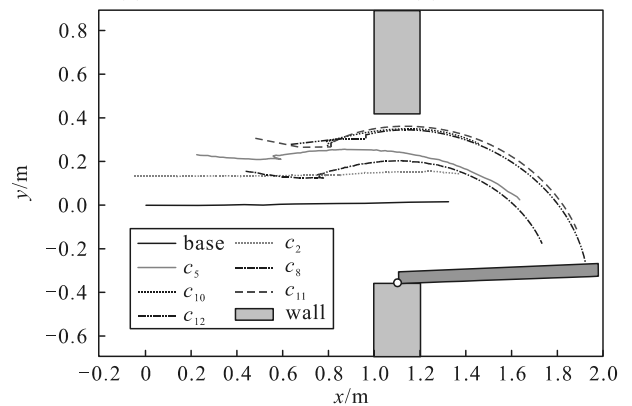
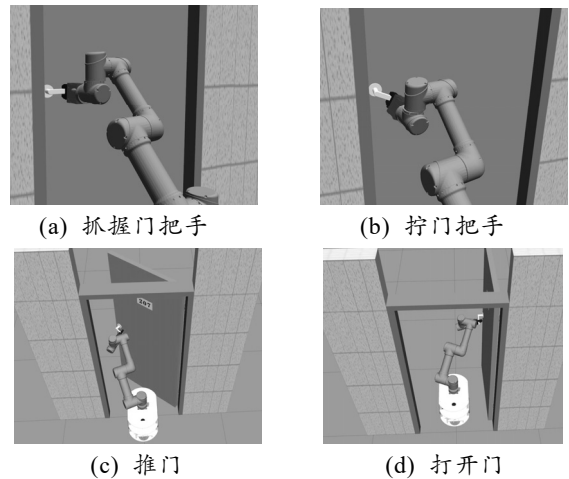
(b) MPAC 防碰撞时虚拟碰撞体轨迹

图 10 MPAC 防碰撞实验

如图 10(a)所示, MPAC 不防碰撞时, 机械手的关节 4 和关节 5, 在开门过程中与门框发生碰撞。如图 10(b)所示, 当 MPAC 防碰撞时, 机器人全身能够在不发生任何碰撞的情况下安全打开并通过门。由此可见, 在 MPAC 代价函数中加入机器人与自身各部分或环境之间距离的惩罚项, 能够有效避免机器人在开门过程中与自身或环境发生碰撞。

4.2.3 移动机器人 MPAC 开门

为验证 MPAC 算法开门的有效性, MPAC 在考虑系统约束和防碰撞的前提下, 跟踪离线规划的目标轨迹, 最终控制机器人完成自主开门的任务。在移动机器人自主开门实验中, 机器人自主开门过程和 7 个虚拟碰撞体在 xy 平面的投影轨迹如图 11 所示。



(e) 开门过程中虚拟碰撞体轨迹

图 11 移动机器人 MPAC 开门

通过移动机器人 MPAC 开门实验可知: 机器人能够严格跟随规划的目标轨迹, 在交互过程中呈现出一定的柔顺效果, 且不与自身或环境发生碰撞, 安全地打开并通过门。此实验验证了 MPAC 算法用于移动机器人开门场景时, 在轨迹跟随、防碰撞、机器人与环境柔顺接触方面的有效性。

5 结论

机器人开门实验结果表明: 该方法可以大幅度降低机器人在跟踪轨迹时与环境交互产生的干涉力, 同时满足系统和环境约束, 确保过程中机器人不会与自身或环境发生任何碰撞, 具有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] THAKAR S, SRINIVASAN S, AL-HUSSAINI S, et al. A Survey of Wheeled Mobile Manipulation: A Decision-Making Perspective[J]. Mechanisms and Robotics, 2022, 15: 020801.

[2] CHUNG W, RHEE C, SHIM Y, et al. Door-Opening Control of a Service Robot Using the Multifingered Robot Hand[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10): 3975-3984.

- [3] ARDUENGO M, TORRAS C, SENTIS L. Robust and adaptive door operation with a mobile robot[J]. *Intelligent Service Robotics*, 2021, 14(3): 409-425.
- [4] MEEUSSEN W, WISE M, GLASER S, et al. Autonomous door opening and plugging in with a personal robot[C]. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. USA: Anchorage, AK, 2010: 729-736.
- [5] ADIWAHONO A H, CHUA Y, TEE K P, et al. Automated door opening scheme for non-holonomic mobile manipulator[C]//2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). Korea: Gwangju, 2013: 839-844.
- [6] 吴若鸿. 基于视觉信息与方位角的移动机械臂开门控制系统研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
- [7] KARAYIANNIDIS Y, SMITH C, VIÑA F E, et al. An Adaptive Control Approach for Opening Doors and Drawers Under Uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, 32(1): 161-175.
- [8] WINIARSKI T, BANACHOWICZ K, STEFAŃCZYK M. Safe strategy of door opening with impedance controlled manipulator[J]. *Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 2013, 7(4): 21-26.
- [9] LASOTA P A, FONG T, SHAH J A. A Survey of Methods for Safe Human-Robot Interaction[J]. *Foundations and Trends in Robotics*, 2017, 5(4): 261-349.
- [10] KIM K, YOON I, SONG J B. Collision Avoidance Based on Null Space Projection for a Nonholonomic Mobile Manipulator[J]. *Korea Robotics Society*, 2022, 17(1): 2241-2246.
- [11] SICILIANO B, SCIAVICCO L, VILLANI L, et al. *Robotics: Modelling, Planning and Control*[M]. London: Springer, 2009.
- [12] FELLER C, EBENBAUER C. Relaxed Logarithmic Barrier Function Based Model Predictive Control of Linear Systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(3): 1223-1238.
- [13] PANKERT J, HUTTER M. Perceptive Model Predictive Control for Continuous Mobile Manipulation[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(4): 6177-6184.
- [14] MITTAL M, HOELLER D, FARSHIDIAN F, et al. Articulated Object Interaction in Unknown Scenes with Whole-Body Mobile Manipulation[C]//IEEE/RSS International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Japan: Kyoto, 2022: 1647-1654.
- [15] PAN J, CHITTA S, MANOCHA D. FCL: A general purpose library for collision and proximity queries[C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. USA: Saint Paul, MN, 2012: 3859-3866.
- [16] DIEHL M, MOMBAUR K. *Fast Motions in Biomechanics and Robotics: Optimization and Feedback Control*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006: 65-93.
- [17] ANDERSSON J A E, GILLIS J, HORN G, et al. CasADi: a software framework for nonlinear optimization and optimal control[J]. *Mathematical Programming Computation*, 2019, 11(1): 1-36.
- *****
- (上接第 99 页)
- [7] GALAL M, MIKHAIL N G, ELNASHAR G. Fuzzy logic controller of gun-turret systems[C]// 13th International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology. Egypt: Cairo, 2009: 1-12.
- [8] IDRIS A M, HUDHA K, KADIR Z A, et al. Development of target tracking control of gun turret system[C]// 2015 10th Asian Control Conference (ASCC). Malaysia: Kota Kinabalu, 2015: 1-5.
- [9] 雷昱, 巫亚强, 周畅, 等. 随动系统的参考模型自适应模糊控制器设计[J]. *火炮发射与控制学报*, 2017, 38(1): 57-62.
- [10] 华洪良, 廖振强, 宋杰, 等. 喷管气流反推技术在改善机枪射击精度中的应用[J]. *兵工学报*, 2015, 36(12): 2241-2246.
- [11] 郭俊瑞, 姚养无. 导气孔对导气式步枪射击精度的影响分析[J]. *科技创新与生产力*, 2015, 12: 86-88.
- [12] 化斌斌, 王瑞林, 张军挪, 等. 不同射频对车载转管机枪射击精度的影响[J]. *火力与指挥控制*, 2017, 42(4): 181-184.
- [13] 李猛. 某火炮动态特性与射击频率的匹配性分析[J]. *兵器装备工程学报*, 2017, 38(1): 44-46.
- [14] 谈乐斌, 张相炎, 管红根, 等. *火炮概论*[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 262-264.
- [15] UMENO T, HORI Y. Robust speed control of DC servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design[J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 1991, 38(5): 363-368.