

关节锁定空间机械臂负载操作能力评估与轨迹规划

贾庆轩, 袁博楠, 陈钢, 符颖卓

引用本文:

贾庆轩, 袁博楠, 陈钢, 等. 关节锁定空间机械臂负载操作能力评估与轨迹规划[J]. 控制与决策, 2020, 35(1): 243–249.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0563>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多路径段平滑过渡的自适应前瞻位姿插补算法

An adaptive look-ahead position and orientation interpolation algorithm for multi-path segments smooth transition
控制与决策. 2019, 34(6): 1211–1218 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1594>

伺服电机驱动的连铸结晶器振动系统受限状态下预设性能控制

The prescribed performance control for the mold vibration displacement system driven by sever motor with constrained states
控制与决策. 2019, 34(3): 661–667 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1346>

液压驱动单元基于力的阻抗控制方法控制参数灵敏度分析

Control parameters sensitivity analysis of force-based impedance control for hydraulic drive unit
控制与决策. 2019, 34(10): 2125–2133 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0083>

基于共轭增强策略的差分进化算法

Differential evolution algorithm with conjugate enhancement strategy
控制与决策. 2017, 32(7): 1313–1318 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0697>

非线性耦合动态互联系统分布式协作负载均衡控制

Distributed cooperative load-sharing control for coupled inter-connected dynamical systems with nonlinear dynamics
控制与决策. 2017, 32(10): 1894–1899 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1223>

基于收缩理论的一类非线性系统自适应动态面控制

Contraction theory-based adaptive dynamic surface control for a class of nonlinear systems
控制与决策. 2016, 31(5): 769–775 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0428>

基于腿部关节控制的仿人机器人偏摆力矩控制方法

Yaw moment control method for humanoid robot based on leg joints control
控制与决策. 2016, 31(1): 79–83 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1367>

基于模型退化的平面四连杆欠驱动机械系统位置控制

Position control for planar four-link underactuated mechanical system based on model degeneration
控制与决策. 2015(7): 1277–1283 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0516>

关节锁定空间机械臂负载操作能力评估与轨迹规划

贾庆轩, 袁博楠, 陈 钢[†], 符颖卓

(北京邮电大学 自动化学院, 北京 100876)

摘 要: 为了使单关节锁定空间机械臂继续执行负载任务, 提出关节锁定空间机械臂负载操作能力评估方法及轨迹规划策略。首先, 将动态负载能力分析方法与蒙特卡洛法相结合建立动态负载能力容错工作空间, 该空间可以直观反映关节锁定空间机械臂负载操作能力及可达性; 然后, 栅格化该空间, 并在代价函数中加入负载能力项以改进 A* 算法进行搜索轨迹; 最后, 通过仿真验证关节锁定空间机械臂负载操作能力评估及轨迹规划方法的正确性, 所得轨迹平均带载能力比任务要求高 42.5%。

关键词: 空间机械臂; 关节锁定; 大负载操作任务; 负载操作能力; 工作空间; 轨迹规划

中图分类号: TP242

文献标志码: A

Load carrying capacity evaluation and task trajectory planning of space manipulator with the locked joint

JIA Qing-xuan, YUAN Bo-nan, CHEN Gang[†], FU Ying-zhuo

(School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: To make space manipulators with locked joint be able to carry large load, a load carrying capacity evaluation method and a load carrying task trajectory planning strategy are proposed. First of all, the dynamic load carrying capacity analytical method and the Monte Carlo method are combined to establish the failure tolerance workspace with load carrying capacity, and it is further rasterized into a series of cubes. Then the classic A* algorithm is improved to search the executable task trajectory; Finally, numerical simulation is carried out to clarify the effectiveness of the proposed method. The simulation results show that the failure tolerance workspace with load carrying capacity can illustrate the load carrying capacity and reachability of the space manipulator with the locked joint intuitively, and the average load carrying capacity of the obtained trajectory is 42.5% larger than the task requirement.

Keywords: space manipulator; joint locking; large load carrying task; load carrying capacity; workspace; trajectory planning

0 引 言

空间机械臂具有跨度大、灵活性高、操作能力强等优点, 常被用于执行大负载操作任务(如空间站在轨组装、航天器转位等^[1])。关节作为核心驱动部件, 是集机械、控制、通信和传感器为一体的复杂精密单元, 任一元器件失效都将引起关节故障。空间机械臂长期执行大负载操作任务, 关节磨损严重且易故障。由于太空环境恶劣, 故障关节无法及时维修, 往往将其锁定以隔离故障。

锁定关节无法输出运动和力, 导致机械臂性能(如末端可达性、负载操作能力等^[2])退化。负载操作能力是负载操作任务可完成性表征指标, 其定义为可重复操作最大负载质量/惯量, 但关节锁定引发的性

能退化可能导致负载操作任务失败。为保证任务顺利完成, 需准确评估关节锁定空间机械臂负载操作能力, 并重新规划任务轨迹。单关节故障概率远高于多关节同时故障, 多关节故障机械臂性能严重退化, 因此本文研究单关节故障空间机械臂。

负载操作能力受多方面因素限制。地面机械臂负载操作能力主要受结构因素影响^[3], 而空间机械臂搬运负载时关节力矩大且基座扰动明显^[4-5], 负载操作能力受限于基座扰动和关节输出能力。考虑基座姿态扰动和关节运行参数约束, Korayem 等^[6]分析了空间机械臂负载操作能力变化规律; 以基座扰动力和关节峰值力矩为约束条件, Jia 等^[7]提出了最大化负载操作能力的空间机械臂轨迹优化算法。

收稿日期: 2018-05-02; 修回日期: 2018-11-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61403038, 61573066, 61327806).

责任编辑: 牛玉刚.

[†]通讯作者. E-mail: buptcg@163.com.

基于负载操作能力影响因素分析,建立负载操作能力表征手段. Wang等^[8]提出了动态负载能力概念,其为在一定约束条件及当前运动状态下,机械臂所能搬运的最大负载. Yao等^[9]定义机械臂全任务周期内动态负载能力最小值为当前任务最大负载能力. 动态负载能力表征机械臂某一状态下负载操作能力,最大负载能力则针对具体任务,动态负载能力更具代表性. 但上述研究均围绕常态地面机械臂展开,并未考虑空间机械臂特点及关节故障因素.

本文以基座扰动力/力矩及关节峰值力矩为约束,建立关节锁定空间机械臂动态负载能力计算模型,进而将容错工作空间与动态负载能力分析相结合,建立动态负载能力容错工作空间,实现关节锁定空间机械臂末端可达性和负载操作能力同时评估. 进而栅格化处理由散点组成的动态负载能力容错工作空间,同时在代价函数中加入负载能力代价项改进传统A*算法^[10],搜索可达且满足负载操作能力要求的直线任务轨迹,使负载能够快速到位,实现单关节锁定空间机械臂负载操作任务轨迹规划.

1 关节锁定空间机械臂动态负载能力评估

本节建立关节锁定空间机械臂动态负载能力计算模型,并建立动态负载能力容错工作空间.

1.1 负载操作下空间机械臂动力学建模

空间机械臂模型如图1所示. 文中带左上标角标矢量或矩阵相对于对应坐标系,不带角标则相对于当前关节坐标系.

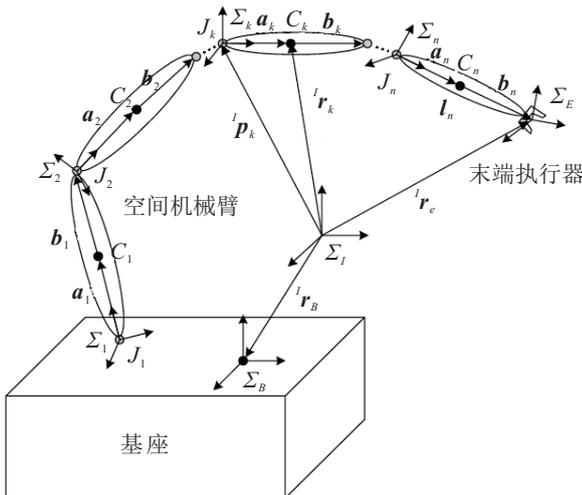


图1 空间机械臂模型图

图1中, Σ_I 为惯性系, Σ_B 为基座质心系, Σ_E 为末端执行器坐标系, Σ_k 为 k 关节坐标系, C_k 为 k 杆质心, J_k 为 k 关节, a_k 为 J_k 到 C_k 向量, b_k 为 C_k 到 J_{k+1} 向量, l_n 为 J_n 到 Σ_E 原点向量, l_p_k 为 J_k 位置向量, l_r_e 为末端位置向量, l_r_B 为基座质心位置向量, l_r_k 为 k 杆

心位置向量. 各连杆位姿递推分别为

$$\begin{aligned} {}^I r_k &= {}^I r_{k-1} + {}^I R_{k-1} b_{k-1} + {}^I R_k a_k, \\ {}^I R_k &= {}^I R_{k-1} {}^{k-1} R_k. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: ${}^I R_k$ 为 Σ_k 相对于 Σ_I 姿态变换矩阵, ${}^{k-1} R_k$ 为 Σ_k 相对于 Σ_{k-1} 姿态变换矩阵. 各连杆角速度 ${}^I \omega_k$ 、速度 ${}^I v_k$ 分别为

$$\begin{aligned} {}^I \omega_k &= {}^I \omega_{k-1} + {}^I z_k \dot{q}_k, \\ {}^I v_k &= {}^I v_{k-1} + {}^I \omega_{k-1} \times {}^I R_{k-1} b_{k-1} + \\ & \quad {}^I \omega_k \times {}^I R_k a_k. \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T \in \mathbf{R}^{n \times 1}$, $\dot{q} = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n]^T \in \mathbf{R}^{n \times 1}$, $\ddot{q} = [\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \dots, \ddot{q}_n]^T \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 分别为关节角度、角速度和角加速度; ${}^I z_k$ 为 k 关节轴线单位向量. 各连杆角加速度 ${}^I \dot{\omega}_k$ 、加速度 ${}^I \dot{v}_k$ 分别为

$$\begin{aligned} {}^I \dot{\omega}_k &= {}^I \dot{\omega}_{k-1} + {}^I \omega_k \times ({}^I z_k \dot{q}_k) + {}^I z_k \ddot{q}_k, \\ {}^I \dot{v}_k &= {}^I \dot{v}_{k-1} + {}^I \dot{\omega}_{k-1} \times {}^I R_{k-1} b_{k-1} + \\ & \quad {}^I \omega_{k-1} \times ({}^I \omega_{k-1} \times {}^I R_{k-1} b_{k-1}) + \\ & \quad {}^I \dot{\omega}_k \times {}^I R_k a_k + {}^I \omega_k \times ({}^I \omega_k \times {}^I R_k a_k). \end{aligned} \quad (3)$$

各连杆质心惯性力 ${}^I F_k$ 、惯性力矩 ${}^I N_k$ 分别为

$$\begin{aligned} {}^I F_k &= m_k {}^I \dot{v}_k, \\ {}^I N_k &= {}^I R_k I_k {}^I \dot{\omega}_k + {}^I \omega_k \times ({}^I R_k I_k {}^I \omega_k). \end{aligned} \quad (4)$$

其中: m_k 为 k 杆质量, I_k 为 k 杆相对于其质心的惯性张量. 各关节受力 ${}^I f_k$ 和力矩 ${}^I n_k$ 分别为

$$\begin{aligned} {}^I f_k &= {}^I F_k + {}^I f_e, \quad k = n; \\ {}^I f_k &= {}^I F_k + {}^I f_{k+1}, \quad k < n; \\ {}^I n_k &= {}^I N_k + ({}^I r_e \times {}^I f_e + {}^I n_e) + \\ & \quad ({}^I R_k a_k \times {}^I F_k), \quad k = n; \\ {}^I n_k &= {}^I N_k + ({}^I R_k l_k \times {}^I f_{k+1} + {}^I n_{k+1}) + \\ & \quad ({}^I R_k a_k \times {}^I F_k), \quad k < n. \end{aligned} \quad (5)$$

其中: ${}^I f_e$ 和 ${}^I n_e$ 为末端操作力和操作力矩, 各关节力矩 $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n] \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 为

$$\tau_k = {}^I n_k^T \cdot {}^I z_k. \quad (7)$$

负载与空间机械臂末端常视为刚性连接, 这将改变末端连杆动力学参数. 对于已知质量负载, 其惯量取值有无穷多种情况, 现有研究引入已知末端等效负载, 通过等效负载系数表征机械臂负载操作能力^[7,11]. 本文将负载等效为质点, 相对于引入质点等效负载, 末端连杆动力学参数为

$$m_{n-\text{new}} = m_n + m_f, \quad (8)$$

$$I_{n-\text{new}} = I_n + I_f, \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_{cn-new} = \frac{m_n \mathbf{a}_n + m_f (\mathbf{a}_n + \mathbf{b}_n)}{m_n + m_f}. \quad (10)$$

其中: m_f 为负载质量, m_{n-new} 为组合体质量, \mathbf{I}_f 为负载相对于末端连杆坐标系原点惯量张量, \mathbf{I}_{n-new} 为组合体惯性张量, \mathbf{P}_{cn-new} 为组合体质心坐标. 式(1)~(10)为带负载空间机械臂动力学建模.

1.2 关节锁定空间机械臂动态负载能力分析

以关节峰值力矩和基座扰动力不超限为约束, 建立关节锁定空间机械臂动态负载能力求解模型. 当空间机械臂执行负载操作任务时, 其末端和关节运动关系由雅可比矩阵 $\mathbf{J} \in \mathbf{R}^{6 \times n}$ 表征, 即

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} = [\dot{j}_1, \dot{j}_2, \dots, \dot{j}_n] = \sum_{i=1}^n \dot{j}_i \dot{q}_i, \\ \dot{\mathbf{q}} &= \mathbf{J}^\dagger \dot{\mathbf{X}}. \end{aligned} \quad (11)$$

其中: $\dot{j}_1, \dot{j}_2, \dots, \dot{j}_n$ 为雅可比矩阵列向量, \dot{j}_i 为关节角速度 \dot{q}_i 对末端速度的 $\dot{\mathbf{X}}$ 贡献, \mathbf{J}^\dagger 为雅可比矩阵伪逆. 设 l 关节锁定, 末端与关节运动关系为

$$\begin{aligned} {}^l \dot{\mathbf{q}} &= {}^l \mathbf{J}^\dagger \dot{\mathbf{X}}, \\ {}^l \ddot{\mathbf{q}} &= {}^l \mathbf{J}^{\dagger'} \dot{\mathbf{X}} + {}^l \mathbf{J}^\dagger \ddot{\mathbf{X}}, \\ {}^l \mathbf{q}_{next} &= {}^l \mathbf{q} + {}^l \dot{\mathbf{q}} \Delta t. \end{aligned} \quad (12)$$

其中: $\dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}} \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$ 为末端速度及加速度, Δt 为控制周期, ${}^l \mathbf{q}, {}^l \mathbf{q}_{next} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 为当前时刻和下一时刻的关节角度, ${}^l \dot{\mathbf{q}}, {}^l \ddot{\mathbf{q}} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 为关节速度和加速度, ${}^l \mathbf{J} \in \mathbf{R}^{6 \times n}$ 为退化雅可比矩阵, ${}^l \mathbf{J}^\dagger$ 表示其伪逆.

将式(12)代入(1)~(10), 得到故障机械臂关节力矩

$${}^l \boldsymbol{\tau} = {}^l \boldsymbol{\tau}(m_f, {}^l \mathbf{q}, {}^l \dot{\mathbf{q}}({}^l \mathbf{q}, \dot{\mathbf{X}}), {}^l \ddot{\mathbf{q}}({}^l \mathbf{q}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}})) = {}^l \mathbf{g}_1, \quad (13)$$

其中 ${}^l \mathbf{g}_1 \in \mathbf{R}^{(n-1) \times 1}$ 为关节力矩约束. 基座扰动力由 1 关节受力 $[{}^I \mathbf{f}_1^T, {}^I \mathbf{n}_1^T]^T$ 决定, 将 ${}^I \mathbf{f}_1^T$ 和 ${}^I \mathbf{n}_1^T$ 转换至 Σ_B 下, 有

$$\begin{aligned} {}^B \mathbf{f}_1 &= {}^B \mathbf{R}_I {}^I \mathbf{f}_1 = ({}^I \mathbf{R}_B)^T \cdot {}^I \mathbf{f}_1, \\ {}^B \mathbf{n}_1 &= {}^B \mathbf{R}_I {}^I \mathbf{n}_1 = ({}^I \mathbf{R}_B)^T \cdot {}^I \mathbf{n}_1. \end{aligned} \quad (14)$$

将 ${}^B \mathbf{f}_1$ 及 ${}^B \mathbf{n}_1$ 向基座质心等效, 得到基座扰动力 \mathbf{F}_d 及基座扰动力矩为

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_d &= {}^B \mathbf{f}_1, \\ \mathbf{M}_d &= {}^B \mathbf{n}_1 + {}^B \mathbf{p}_0 \times {}^B \mathbf{f}_1. \end{aligned} \quad (15)$$

进而由式(2)~(6)有

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_d &= \mathbf{F}_d(m_f, {}^l \mathbf{q}, {}^l \dot{\mathbf{q}}({}^l \mathbf{q}, \dot{\mathbf{X}}), {}^l \ddot{\mathbf{q}}({}^l \mathbf{q}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}})) = {}^l \mathbf{g}_2, \\ \mathbf{M}_d &= \mathbf{M}_d(m_f, {}^l \mathbf{q}, {}^l \dot{\mathbf{q}}({}^l \mathbf{q}, \dot{\mathbf{X}}), {}^l \ddot{\mathbf{q}}({}^l \mathbf{q}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}})) = {}^l \mathbf{g}_3, \end{aligned} \quad (16)$$

其中 ${}^l \mathbf{g}_2 \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 和 ${}^l \mathbf{g}_3 \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 为基座扰动力和扰动力矩约束. 关节锁定空间机械臂动态负载能力为

$$\begin{aligned} \max \quad & m_f. \\ \text{s.t.} \quad & \tau_{\min}^i \leq {}^l g_{1i} \leq \tau_{\max}^i, \\ & i = 1, 2, \dots, l-1, l+1, \dots, n; \\ & F_{d\min}^j \leq {}^l g_{2j} \leq F_{d\max}^j, \quad j = 1, 2, 3; \\ & M_{d\min}^k \leq {}^l g_{3k} \leq M_{d\max}^k, \quad k = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (17)$$

可见, 若已知 $\dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}$ 及 \mathbf{q} , 结合式(12), 可通过优化模型(17)求解关节锁定空间机械臂动态负载能力.

1.3 动态负载能力容错工作空间

以图2所示 SSRMS 型 7 自由度空间机械臂为对象. 对于 l 关节锁定在 q_l^t 的空间机械臂, 基于蒙特卡洛法建立其容错工作空间. 在关节运行范围内随机遍历构型并进行运动学正解, 得到末端位置样本点集合, 构成容错工作空间, 如下所示:

$$\begin{aligned} W_l &= \{\mathbf{X} = \mathbf{P}({}^l \mathbf{q}) | {}^l \mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_{l-1}, q_l^t, \\ & \quad q_{l+1}, \dots, q_7]^T, q_i^{\min} \leq q_i \leq q_i^{\max}, \\ & \quad i = 1, 2, \dots, 7\} \in \mathbf{R}^6. \end{aligned} \quad (18)$$

其中: q_i^{\min} 和 q_i^{\max} 分别为第 i 个正常关节运动下限和上限, \mathbf{P} 为机械臂正向运动学函数, 所取关节角服从均匀分布. 使空间机械臂以全部可能末端极限运动及构型通过 W_l 中某点 \mathbf{X} , 可得运动状态集

$$\text{MoSta} = \{(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{X}}_1, \ddot{\mathbf{X}}_1), \dots, (\mathbf{q}_r, \dot{\mathbf{X}}_s, \ddot{\mathbf{X}}_s)\}. \quad (19)$$

其中: $\|\dot{\mathbf{X}}_1\| = \dots = \|\dot{\mathbf{X}}_s\| = \dot{X}_{\max}$, $\|\ddot{\mathbf{X}}_1\| = \dots = \|\ddot{\mathbf{X}}_s\| = \ddot{X}_{\max}$; $\dot{X}_{\max}, \ddot{X}_{\max}$ 为末端允许最大速度和加速度, 且 $\mathbf{X}(\mathbf{q}_1) = \dots = \mathbf{X}(\mathbf{q}_r) = \mathbf{X}$. 根据式(12)得到关节运动, 代入式(17)可得动态负载能力集合

$$\text{MP} = \{m_1, m_2, \dots, m_{r \times s}\}. \quad (20)$$

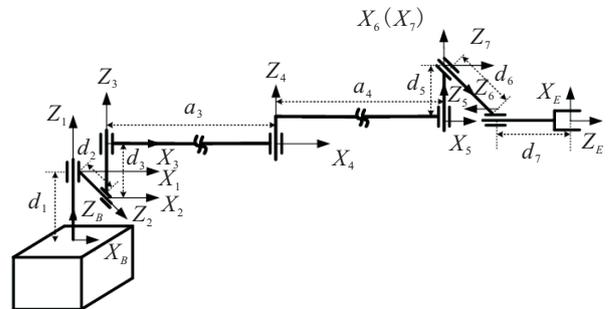


图2 SSRMS型7自由度空间机械臂构型图

取集合MP中最小元素为 \mathbf{X} 负载操作能力. 遍历求解 W_l 内所有散点负载操作能力, 可得动态负载能力容错工作空间. 由式(19)可知, 引入构型和末端运动是建立动态负载能力容错工作空间的关键.

1.3.1 基于位置级逆解的构型集合求解

对于单关节锁定空间7自由度机械臂,当末端位于某空间散点时,可通过位置级逆解得到对应的关节构型集合.而对于SSRMS型空间机械臂,锁定不同关节位置级逆解过程不同^[12],如图3所示.

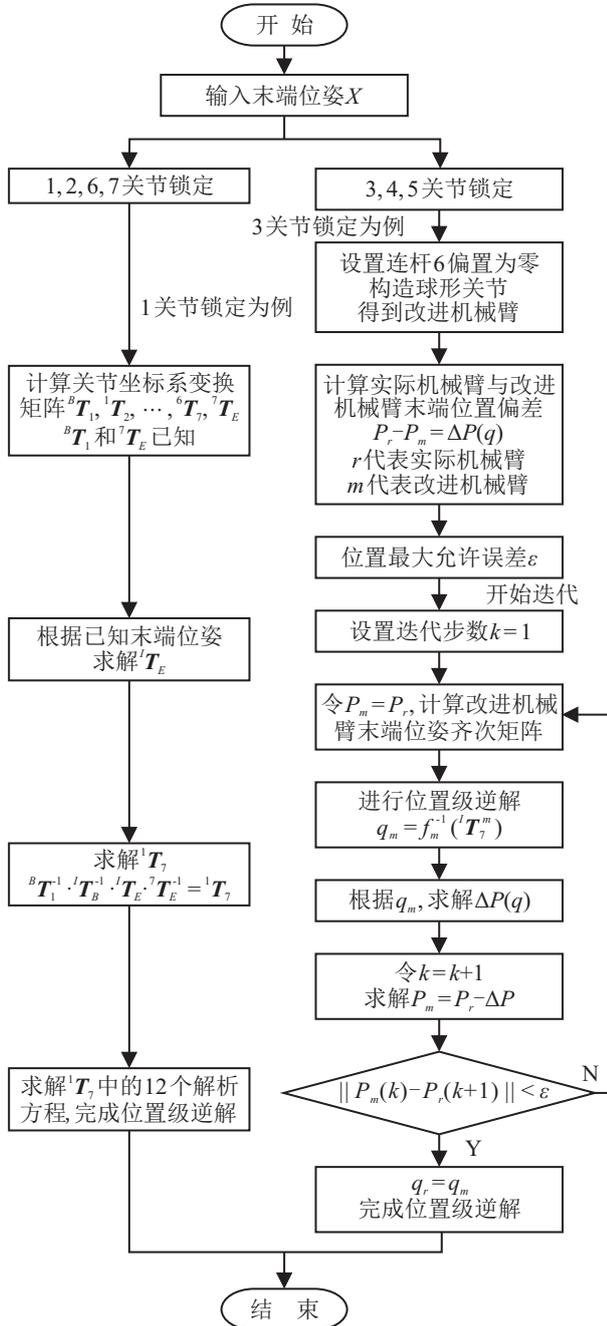


图3 位置级逆解流程

1.3.2 末端极限运动信息建立

由于无法预知轨迹规划结果,机械臂末端可能以任意方向通过空间某点,且速度及加速度最大时,其负载操作能力最低,对应空间散点负载能力最低,如此构造的动态负载能力容错工作空间用于轨迹规划将具有极高的安全裕度.

本文仅讨论机械臂跟踪直线轨迹执行负载操作

任务的情况,因此末端速度和加速度方向相同.在球坐标系中引入机械臂末端运动

$$\begin{aligned} v_x &= v_{\max} \sin \beta \cos \alpha, & a_x &= a_{\max} \sin \beta \cos \alpha, \\ v_y &= v_{\max} \sin \beta \sin \alpha, & a_y &= a_{\max} \sin \beta \sin \alpha, \\ v_z &= v_{\max} \cos \beta, & a_z &= a_{\max} \cos \beta. \end{aligned} \quad (21)$$

其中: v_{\max} 和 a_{\max} 为末端允许最大速度和加速度, $\alpha, \beta \in [0, 360^\circ]$ 为运动方向角.在由末端位置点组成的工作空间中规划轨迹,仅规划末端位置,且保持末端姿态不变,令末端角速度和角加速度为零.

遍历求解 W_l 中所有散点的动态负载能力,可得到动态负载能力容错工作空间

$$MW_l = \{MP_1, MP_2, \dots, MP_p\}. \quad (22)$$

其中: p 为 W_l 散点总数, $MP_i = (x_i, y_i, z_i, m_i)$ 为包含负载操作能力的空间散点.

2 动态负载能力容错工作空间轨迹规划

本节将动态负载能力容错工作空间处理为均匀分布的空间栅格,同时在代价函数中增加负载能力项改进A*算法,利用改进A*算法在栅格化动态负载能力容错工作空间中搜索轨迹.

2.1 动态负载能力容错工作空间栅格化处理

将动态负载能力容错工作空间标准化处理为规律分布的空间栅格,为A*算法轨迹搜索提供结构化环境.栅格化处理即利用均匀分布的三维空间栅格包络动态负载能力容错工作空间,留下包含散点的空间栅格,并以所含散点的最小动态负载能力作为栅格动态负载能力.具体流程如下.

Step 1: 利用长 a 、宽 b 及高 c 的长方体包络动态负载能力容错工作空间,该长方体前后表面与 X 轴垂直且交点为 $(x^+, 0, 0)$ 和 $(x^-, 0, 0)$;左右表面与 Y 轴垂直且交点为 $(y^+, 0, 0)$ 和 $(y^-, 0, 0)$;上下表面与 Z 轴垂直且交点为 $(z^+, 0, 0)$ 和 $(z^-, 0, 0)$.

Step 2: 设置栅格边长为 c_w ,则栅格总数为

$$p_{\text{grid}} = \lceil a/c_w \rceil \lceil b/c_w \rceil \lceil c/c_w \rceil.$$

Step 3: 采用三维矩阵对动态负载能力容错工作空间进行栅格化处理,初始化栅格化三维矩阵为 $M_{\text{grid}} = \mathbf{0}^{\lceil a/c_w \rceil \times \lceil b/c_w \rceil \times \lceil c/c_w \rceil}$,其每个元素都对应一个空间栅格. $M_{\text{grid}}(i, j, k)$ 对应栅格中心点为

$$\left(\frac{2x^- + (2i - 1)c_w}{2}, \frac{2y^- + (2j - 1)c_w}{2}, \frac{2z^- + (2k - 1)c_w}{2} \right). \quad (23)$$

Step 4: 对于某空间散点 $\mathbf{X} = (x, y, z)$, M_{grid} 中

对应元素的行列页编号为

$$\begin{cases} i = \min \left(\left\lfloor \frac{x - x^-}{c_w} \right\rfloor + 1, \left\lfloor \frac{a}{c_w} \right\rfloor + 1 \right), \\ j = \min \left(\left\lfloor \frac{y - y^-}{c_w} \right\rfloor + 1, \left\lfloor \frac{b}{c_w} \right\rfloor + 1 \right), \\ k = \min \left(\left\lfloor \frac{z - z^-}{c_w} \right\rfloor + 1, \left\lfloor \frac{c}{c_w} \right\rfloor + 1 \right). \end{cases} \quad (24)$$

$M_{\text{grid}}(i, j, k)$ 值为含散点负载操作能力最小值, 即

$$M_{\text{grid}}(i, j, k) = \min^{(i,j,k)} M_1, \dots, {}^{(i,j,k)} M_u. \quad (25)$$

其中: u 、 ${}^{(i,j,k)} M$ 为当前栅格所含散点总数和对应的负载操作能力。

Step 5: 遍历容错工作空间所有散点, 求解其对应栅格元素编号、中心点坐标及负载操作能力值, 完成动态负载能力容错工作空间栅格化处理。

2.2 基于改进A*算法的负载操作任务轨迹规划

为降低能源消耗, 空间机械臂往往沿直线轨迹搬运负载。A*算法可搜索得到直线轨迹, 通过代价函数 $f(\text{grid}_{ijk}) = g(\text{grid}_{ijk}) + h(\text{grid}_{ijk})$ 作为 grid_{ijk} 选点指标, $g(\text{grid}_{ijk})$ 为从起始栅格到 grid_{ijk} 的代价值, $h(\text{grid}_{ijk})$ 为从 grid_{ijk} 到目标栅格的代价值。轨迹搜索时需求解当前栅格周围栅格代价值, 找到代价值最小的栅格, 选择其中心点作为任务轨迹中间点, 循环此过程直至搜索到目标点栅格, 生成可达路径, 完成轨迹规划。

由于代价函数中仅考虑了可达位置信息, 传统A*算法仅能搜索得到满足可达性要求的任务轨迹。为使A*算法搜索所得轨迹同时满足可达性和负载操作能力要求, 本文通过在代价函数中加入栅格负载操作能力代价项对A*算法进行改进, 有

$$f(\text{grid}_{ijk}) = g(\text{grid}_{ijk}) + h(\text{grid}_{ijk}) + C(M_{\text{grid}}(i, j, k)). \quad (26)$$

其中 $C(M_{\text{grid}}(i, j, k))$ 为由栅格 grid_{ijk} 负载操作能力相关的代价项, 取值如下:

$$\begin{cases} C(M_{\text{grid}}(i, j, k)) = 0, & M_{\text{grid}}(i, j, k) \geq M_{\text{task}}; \\ C(M_{\text{grid}}(i, j, k)) \rightarrow \infty, & M_{\text{grid}}(i, j, k) < M_{\text{task}}. \end{cases} \quad (27)$$

M_{task} 为任务所要求的负载质量。当 grid_{ijk} 负载操作能力大于任务要求, 栅格负载能力代价项为零时, 代表栅格满足可达且满足负载操作能力要求; 而当 grid_{ijk} 负载操作能力小于任务要求, 栅格负载能力代价项为无穷大时, 代表该栅格不满足负载能力要求或不可达。基于改进A*算法, 可在栅格化动态负载能力容错工作空间中搜索负载操作任务轨迹。跟踪所得轨迹, 使关节锁定空间机械臂完成负载操作任务。

3 仿真校验

3.1 仿真实验设计

以图2所示7自由度空间机械臂为对象, 开展仿真验证, 验证本文所提出的动态负载能力容错工作空间及轨迹规划策略的正确性。空间机械臂的DH参数和动力学参数分别如表1和表2所示。

表1 机械臂DH参数

关节 i	$\alpha_{i-1} / (^\circ)$	a_{i-1} / m	$\theta_i / (^\circ)$	d_i / m
1	0	0	0	0.6
2	90	0	0	0.5
3	-90	0	0	0
4	0	5	0	0.5
5	0	0	0	0.5
6	90	0	90	0.5
7	90	5	90	0

表2 机械臂动力学参数

关节 i	m_i / kg	$I_i / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	r_i / m
1	42.5	[0.89, 0.05, 0.89]	[0, -0.25, 0.6] ^T
2	42.5	[0.05, 0.89, 0.89]	[-0.25, 0, 0.5] ^T
3	70	[0.088, 145.83, 145.83]	[-0.25, 0, 0.5] ^T
4	70	[0.088, 145.83, 145.83]	[-0.25, 0, 0.5] ^T
5	42.5	[0.89, 0.89, 0.05]	[0, 0, 0.25] ^T
6	42.5	[0.89, 0.89, 0.05]	[0, 0, 0.25] ^T
7	42.5	[1.28, 1.28, 0.05]	[0, 0, 0.3] ^T

设 $v_{\text{max}} = 0.15 \text{ m/s}$, $a_{\text{max}} = 0.03 \text{ m/s}^2$, 关节力矩限制为 $[\tau_{\text{min}}^i, \tau_{\text{max}}^i] = [-700, 700] \text{ N} \cdot \text{m}$, 基座扰动限制为

$$\begin{aligned} [\min, \max](F_{dx}, F_{dy}, F_{dz}) &= [-200, 200] \text{ N}, \\ [\min, \max](M_{dx}, M_{dy}, M_{dz}) &= [-500, 500] \text{ N} \cdot \text{m}. \end{aligned} \quad (28)$$

3.2 仿真结果分析

3.2.1 动态负载能力容错工作空间

构造1关节锁定在100°时的动态负载能力容错工作空间 MW_1 。 MW_1 通过遍历空间散点及所有运动状态建立, 为缩短计算时间并保证足够的空间散点密度, 仅生成第一卦限 MW_1 , 如图4所示。

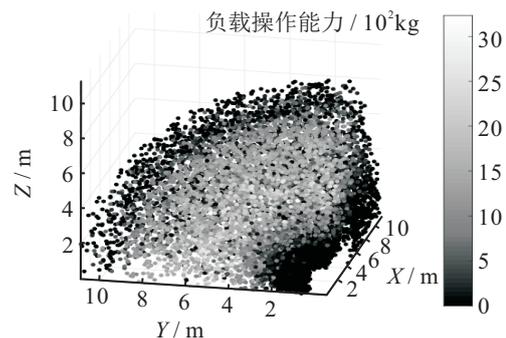


图4 空间机械臂动态负载能力容错工作空间

黑色点至白色点渐变表示散点负载操作能力增大.可见MW₁中部负载能力较大,而边界负载能力较小.在工作空间边界机械臂接近奇异状态,因此边界处负载能力差.MW₁反映了关节锁定空间机械臂负载操作能力和可达性,为轨迹搜索提供参考.

3.2.2 基于改进A*算法的任务轨迹规划

设机械臂初始构型为 $q_{ini} = [100^\circ, 124^\circ, 98^\circ, 130^\circ, 146^\circ, 174^\circ, 57^\circ]^T$, 对应初始末端位姿为 $X_{ini} = [0.3790\text{ m}, 4.8432\text{ m}, 1.8878\text{ m}, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ]^T$, 期望末端位姿为 $X_{des} = [2.6250\text{ m}, 1.8750\text{ m}, 4.8750\text{ m}, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ]^T$, 任务要求负载质量为1500kg. 利用传统A*算法得到初始和期望点直连轨迹,若利用梯形规划插值末端运动,则机械臂跟踪直连轨迹搬运负载时,空间机械臂跟踪始末点直连轨迹时可操作最大负载质量仅为1260kg. 当机械臂末端带1500kg负载跟踪该轨迹时,其关节力矩变化曲线如图5所示.

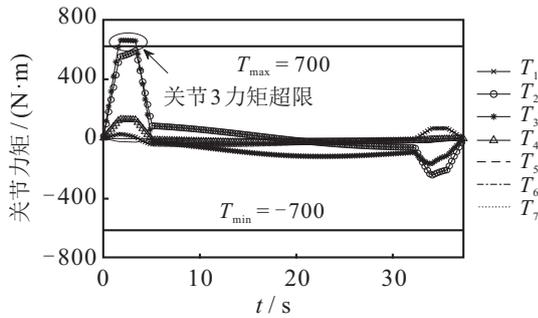


图5 跟踪始末点直连轨迹时机械臂关节力矩变化曲线

由图5可见,机械臂3关节力矩及基座扰动力矩超限,关节锁定空间机械臂无法跟踪直连轨迹直接搬运1500kg负载.在栅格化动态负载能力容错工作空间中,利用改进A*算法进行负载操作任务轨迹搜索,得到可达且负载操作能力满足任务要求的任务轨迹中间点如表3所示.

表3 规划所得任务轨迹中间点

中间点编号	轨迹中间点坐标
P_1	$[0.3790\text{ m}, 4.8432\text{ m}, 1.8878\text{ m}, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$
P_2	$[1.1250\text{ m}, 4.1250\text{ m}, 2.6250\text{ m}, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$
P_3	$[1.8750\text{ m}, 3.3750\text{ m}, 3.3750\text{ m}, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$
P_4	$[2.6250\text{ m}, 2.6250\text{ m}, 4.1250\text{ m}, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$
P_5	$[2.6250\text{ m}, 1.8750\text{ m}, 4.8750\text{ m}, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$

任务轨迹由4段路径组成,最大负载能力为 $m_{P_1-P_2} = 2980\text{ kg}$, $m_{P_2-P_3} = 2090\text{ kg}$, $m_{P_3-P_4} = 1800\text{ kg}$ 及 $m_{P_4-P_5} = 1680\text{ kg}$, 平均负载能力2137.5kg,比任务要求1500kg高42.5%.带1500kg负载跟踪轨迹时,关节力矩及基座扰动力/力矩如图6~图8所

示.由图6~图8可见,关节锁定空间机械臂跟踪所得轨迹时,关节力矩及基座扰动力/力矩均不超限,表示负载操作任务能被顺利完成.仿真结果不仅验证了动态负载能力容错工作空间分析方法的正确性,同时验证了基于改进A*算法进行负载操作任务轨迹搜索的有效性.本文虽仅以直线任务轨迹为例进行仿真验证,但动态负载能力容错工作空间反映了负载操作能力在容错工作空间内分布情况,同样能作为各种形状轨迹的规划域,从而顺利实现轨迹规划.由仿真结果可知,本文所提出的动态负载能力容错工作空间实现了关节锁定空间机械臂负载操作能力与末端可达性同时评估,且可为负载操作任务轨迹规划提供直接参考指标,对空间机械臂负载操作关节故障处理问题具有较深的理论和实用价值.

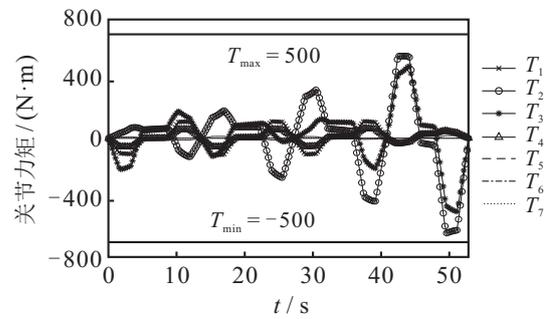


图6 关节力矩

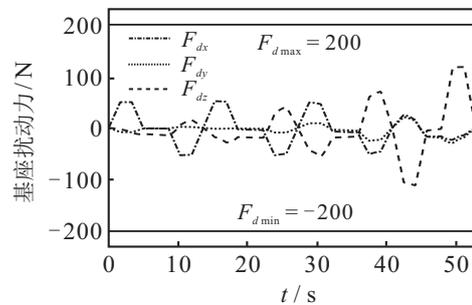


图7 基座扰动力

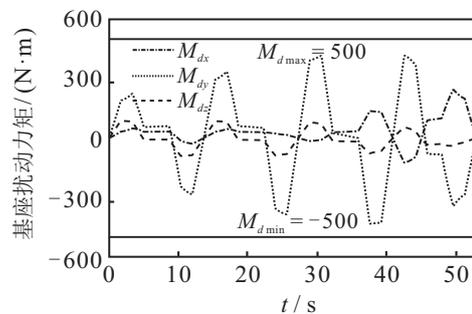


图8 基座扰动力矩

4 结论

本文针对空间机械臂执行大负载操作任务时发生单关节锁定故障的情况,以负载操作任务顺利完成任务为目标建立动态负载能力容错工作空间,实现了关节

锁定空间机械臂末端可达性和负载操作能力同时评估,且为后续负载操作任务轨迹规划提供了直接参考指标.通过在代价函数中加入负载能力项改进A*算法,实现了关节锁定空间机械臂负载操作任务轨迹搜索.本文所提出方法为执行负载操作任务空间机械臂的关节故障处理问题提供了重要理论指导,其独立于具体机械臂参数与故障信息,可应用于任意关节故障及其他类型串联机械臂,如工业机器人、水下机器人等,方法具有普适性.

参考文献(References)

- [1] 刘宏, 蒋再男, 刘业超. 空间机械臂技术发展综述[J]. 载人航天, 2015, 21(5): 435-443.
(Liu H, Jiang Z N, Liu Y C. Review of space manipulator technology[J]. Manned Spaceflight, 2015, 21(5): 435-443.)
- [2] 陈钢, 郭雯, 贾庆轩, 等. 基于运动学模型重构的单关节故障机械臂容错路径规划[J]. 控制与决策, 2018, 33(8): 1436-1442.
(Chen G, Guo W, Jia Q X, et al. A fault tolerant path planning method for manipulator with single joint failure based on kinematics model reconstruction[J]. Control and Decision, 2018, 33(8): 1436-1442.)
- [3] 单以才, 韩满林, 周骥平, 等. 采用有限元法的一种超冗余操作臂承载能力的研究[J]. 现代制造工程, 2009, 5: 64-67.
(Shan Y C, Han M L, Zhou J P, et al. Study on a highly redundant manipulator's load absorption based on FEA[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009, 5: 64-67.)
- [4] 徐文福, 刘宇, 强文义, 等. 自由漂浮空间机器人的笛卡尔连续路径规划[J]. 控制与决策, 2008, 23(3): 278-282.
(Xu W F, Liu Y, Qiang W Y, et al. Cartesian continuous-path planning for free-floating space robot[J]. Control and Decision, 2008, 23(3): 278-282.)
- [5] 马保离, 霍伟. 载体姿态可控的空间机器人系统关节角轨迹的自适应算法[J]. 控制与决策, 1995, 10(6): 514-518.
(Ma L B, Huo W. Adaptive joint trajectory generation algorithms of space robot system with and attitude controlled base[J]. Control and Decision, 1995, 10(6): 514-518.)
- [6] Korayem M H, Ghariblu H, Basu A. Dynamic load-carrying capacity of mobile-base flexible joint manipulators[J]. Int J of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 25(1/2): 62-70.
- [7] Jia Q X, Liu Y, Chen G, et al. Analysis of load-carrying capacity for redundant free-floating space manipulators in trajectory tracking task[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 3: 101-104.
- [8] Wang L, Ravani B. Dynamic load carrying capacity of mechanical manipulators, Part I: Problem formulation[J]. J of Dynamic Systems Measurement and Control, 1998, 110(1): 46-52.
- [9] Yao Y, Korayem M H, Basu A. Maximum allowable load of flexible manipulators for given dynamic trajectory[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1993, 10(4): 301-309.
- [10] 贾庆轩, 陈钢, 孙汉旭, 等. 基于A*算法的空间机械臂避障路径规划[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 109-115.
(Jia Q X, Chen G, Sun H X, et al. Path planning for space manipulator to avoid obstacle based on A* algorithm[J]. J of Mechanical Engineering, 2010, 46(13): 109-115.)
- [11] 刘勇. 面向大负载在轨操作任务的空间机械臂轨迹优化研究[D]. 北京: 北京邮电大学自动化学院, 2016: 27-28.
(Liu Y. Research on trajectory optimization of space manipulator for on-orbit tasks when carrying a heavy payload[D]. Beijing: School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016: 27-28.)
- [12] Xu W F, She Y, Xu Y S. Analytical and semi-analytical inverse kinematics of SSRMS-type manipulators with single joint locked failure[J]. Acta Astronautica, 2014, 105(1): 201-207.

作者简介

贾庆轩(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事空间机器人、先进机器人、模式识别及虚拟现实等研究, E-mail: spacerobot@163.com;

袁博楠(1993—), 男, 博士生, 从事空间机器人、先进机器人的研究, E-mail: yuanbonan@126.com;

陈钢(1982—), 男, 副教授, 博士, 从事空间机器人、先进机器人等研究, E-mail: buptcg@163.com;

符颖卓(1996—), 男, 博士生, 从事空间机器人、先进机器人的研究, E-mail: fuyingzhuo_bupt@163.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)