

农业物料移运机器人协同作业时间最优轨迹规划方法

郭万金¹ 李 儒¹ 郝钦磊¹ 曹维清^{2,3} 赵立军^{3,4}

(1. 长安大学道路施工技术与装备教育部重点实验室, 西安 710064;

2. 芜湖哈特机器人产业技术研究有限公司博士后工作站, 芜湖 241007;

3. 长三角哈特机器人产业技术研究院, 芜湖 241007;

4. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 为了解决机器人将农产品从收获场所转移到仓库或运输车辆存在的移动轨迹和作业轨迹相对独立且耗时长的问题, 本文设计一种物料移运机器人, 并提出一种物料移运机器人协同作业时间最优轨迹规划方法, 获得机器人作业系统和行驶系统协同作业的时间最优轨迹。该方法建立机器人协同作业的运动学模型和动力学模型, 对物料移运机器人开展时间最优轨迹规划, 并基于 Lyapunov 理论设计控制律减少跟踪误差, 最后通过 Matlab/Simulink 和 ADAMS 联合仿真验证方法的有效性。结果表明, 提出的轨迹规划方法可使机器人在抓放料协同作业和避障协同作业中取得平滑且时间最优的运动轨迹, 机器人各关节的位移、速度、加速度、力/力矩曲线变化平缓, 两履带牵引力满足机器人的要求且可快速稳定跟踪时间最优路径。

关键词: 物料移运机器人; 轨迹规划; 时间最优; 协同作业; A* 算法

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)01-0022-17

OSID:



Time-optimal Trajectory Planning Method for Cooperative Working of Agriculture Material Handling Robot

GUO Wanjin¹ LI Ru¹ HAO Qinlei¹ CAO Chuqing^{2,3} ZHAO Lijun^{3,4}

(1. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China

2. Post-doctoral Research Center, Wuhu HIT Robot Technology Research Institute Co., Ltd., Wuhu 241007, China

3. Yangtze River Delta HIT Robot Technology Research Institute, Wuhu 241007, China

4. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To address the issues of high labor intensity and low work efficiency for the transfer of agricultural products from harvesting place to warehouse or transportation vehicle in the agricultural field, a material handling robot was designed, which enabled the robot to perform tasks such as grabbing, transporting, and placing materials. Aiming at the problem that the moving track and the working track were relatively independent and time-consuming when the material handling robot moved and grabbed simultaneously, a time-optimal trajectory planning methodology for the cooperative working of the designed material handling robot was proposed, which can obtain the time-optimal trajectory for the simultaneous performance of the robot driving and grasping operation. This methodology was used to conduct the time-optimal trajectory planning for the material handling robot, which allowed to take into account the robot's kinematic and dynamic constraints of both the operation system and the driving system. Additionally, a control law was designed based on Lyapunov theory to reduce the error for the robot's path tracking and improve the accuracy and stability of the robot's trajectory tracking. Finally, the effectiveness of the time-optimal trajectory planning method for collaborative operation was verified through joint simulation by the co-simulation in Matlab/Simulink and ADAMS. The results showed that

收稿日期: 2023-06-26 修回日期: 2023-08-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52275005)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102253201)、长安大学高等教育教学改革研究项目(JY202354)、安徽省博士后研究人员科研活动经费项目(2023B675)、中国博士后科学基金项目(2022M722435)、安徽省教育厅科学研究重点项目(KJ2020A0364)和高校优秀青年人才支持计划项目(2019YQQ023)

作者简介: 郭万金(1983—),男,副教授,博士生导师,主要从事机器人轨迹规划研究,E-mail: guowanjin@chd.edu.cn

the proposed methodology can enable the robot to obtain a smooth and time-optimal motion trajectory during the material handling process, the displacement, velocity, acceleration, and force/torque of the operation system, and the tractive force curves of each joint of the robot changed gently, and the two-track tractive force met the requirements of the robot which can quickly and stably track the time-optimal path. The designed material handling robot and the proposed time-optimal trajectory planning methodology can provide an effective technical solution for the transfer of agricultural products in the agricultural field.

Key words: material handling robot; trajectory planning; time optimization; cooperative working; A* algorithm

0 引言

物料移运机器人在农业领域常用来抓取甘蔗等农产品或秸秆等物料,并将其转移至规定位置,一定程度上可降低田间劳动的工作强度,有着广泛的应用前景^[1-2],合理的轨迹规划是该类机器人作业有效性与工作效率的重要影响因素^[3-4],其通常包括作业系统和行驶系统的轨迹规划。

为提高工作效率,时间最优是作业系统轨迹规划的一项重要评价指标^[5-7],国内外学者开展了大量研究。文献[8]提出一种改进松鼠搜索算法对多项式轨迹优化,通过估算优化变量的搜索空间,提高算法的收敛速度并获得稳定的时间优化结果。文献[9]利用遗传算法进行时间最优轨迹规划,提高光伏阵列清洁效率,并为机器人提供了时间最优控制依据。文献[10]提出一种基于双种群遗传混沌优化算法,以各关节的运动学特性为约束条件,获取平滑且时间最优的机器人末端轨迹。文献[11]结合麻雀搜索算法和退火算法,利用 Tent 混沌映射优化初始种群的生成方式,得到高度平滑的轨迹曲线。文献[12]综合鲸鱼算法和遗传算法对轨迹优化,最小化整个轨迹的急动度和时间,使轨迹曲线耗时更短且运行平稳。文献[13]利用遗传算法改进的粒子群优化算法对机器人的运行轨迹进行优化处理,可使机器人运行时间更短。文献[8,11,13]可以获得稳定的时间优化结果,但算法计算量较大,一定程度上影响轨迹规划求解速度,实时性受局限;文献[10,12]中不同的参数对求解结果有较大影响,在如何选择适宜参数方面存在不足。

行驶系统的路径规划通常包括路径生成与路径跟踪。路径生成是指生成时间最短或能耗最少的路径^[14-15],主要求解算法包括粒子群优化算法^[16]、蚁群算法^[17]、萤火虫算法^[18]和遗传算法^[19]等。文献[20]通过设置约束条件和碰撞模型,并对变量进行等距时间离散,可在复杂区域生成运动路径。文献[21]提出基于障碍物代价势场的路径生成算法动态调整路径,使机器人的运动路径平滑且与障碍

物保持安全距离。文献[22]提出一种双优化蚁群算法自适应调整概率转移函数并对路径再优化,以解决路径规划中收敛路径质量低的问题。文献[23]提出一种改进势场蚁群算法,并通过算法的收敛次数构建负反馈通道,动态调整参数的更新速度以获得最优路径。文献[24]采用蚁群算法和几何方式优化路径,将信息素扩散和几何局部优化相结合,可生成全局最优路径。路径跟踪是指控制机器人按照规定的路径行驶^[25-27]。文献[28]基于球-面接触原理建立履带车辆的动力学模型,并利用深度强化学习设计跟踪控制器,可对路径进行精确跟踪。文献[29]提出一种基于启发式动态规划的路径跟踪方法,综合路径的跟踪误差和跟随稳定性设计回报函数,增强路径跟踪的环境适应性。文献[30]提出一种结合机器人动力学特性的模糊预测控制算法跟踪路径,以解决高速轨迹跟踪控制的高时延问题。文献[23,25]采用多种算法结合,可以在目标空间中生成较好路径,但计算量较大,一定程度上降低了路径生成效率和实时性;文献[29-30]跟踪控制律较为复杂,存在最佳控制律参数不易确定的不足。

面向农业机器人高效作业需求,研究机器人作业系统和行驶系统的协调工作问题是农业机器人的重要发展机遇和挑战^[31]。现有研究^[32-36]存在机器人的运动轨迹需事先确定、行驶系统和作业系统协同作业完成的动作较为简单等问题,难以实现复杂场景的实时轨迹规划。

现有研究对移运机器人作业系统和行驶系统分别进行时间最优轨迹规划,存在计算量大、参数选择困难和控制律复杂等不足,且移运机器人作业系统和行驶系统协同作业存在运动轨迹需事先给定、难以实现复杂场景的轨迹规划等问题。针对农业领域中将甘蔗等农产品从收获场所转移到仓库或运输车辆具有物料移运任务灵活多样性和作业环境未知复杂性的特点,且存在劳动强度大、工作效率低的问题,本文设计一种物料移运机器人结构,并提出一种物料移运机器人协同作业时间最优轨迹规划方法,

以获得机器人同时进行移动和抓取作业时的时间最优轨迹,实现物料移运机器人的高效协同作业。

1 物料移运机器人设计及运动学与动力学建模

在农业领域,将甘蔗等农产品从收获场所转移到仓库或运输车辆是一个重要而重复繁琐的作业任务,且具有物料移运任务灵活多样性和作业环境未知复杂性的特点,人工搬运需要大量的劳动力和时间,且通常工作效率低下。本文设计一种物料移运机器人结构,并开展机器人工作流程规划和运动学建模与动力学建模,为后续轨迹规划提供理论基础。

1.1 物料移运机器人设计及工作流程规划

机器人结构如图 1 所示,主要由作业系统(零部件 1~7)、行驶系统(零部件 8、10、11)和检测系统(零部件 9)组成。作业系统下端通过回转装置与行驶系统连接,上端的末端设有具有抓取功能的液压抓斗作为工作装置,并可通过更换工作装置,实现其他如起重机、叉车等作业功能。作业系统包括两个平动自由度和两个转动自由度。回转装置实现作业系统的回转及其与行驶系统的支承,其采用的中央回转接头可实现作业系统和行驶系统两者间的液压油路连接导通,避免因使用油管方式扭曲而折裂。上臂液压缸和基本臂液压缸分别实现上臂和伸缩臂的转动;伸缩臂内置的伸缩液压缸实现伸缩臂带动抓斗平移。与其他类型的移动机器人相比,该机器人可通过回转装置实现多圈回转,使其在狭小工作空间具有更高的灵活性和适应性,且可更换工作装置,实现其他作业功能,可拓展性强。行驶系统采用组合式履带底盘,具有使用寿命长、旋转性能好、在复杂环境中行驶性能优良、制造成本和维修成本低廉的优点,且通过两条履带并联驱动或差速驱动可使机器人达到任意位置。机器人采用激光雷达作为检测系统,可以精确测量障碍物等位置和形状信息,且激光雷达能够在复杂地形和低光照环境中正常工作,具有精度高、适应性强和稳定性好的优点,通过激光雷达作为检测系统可以实时对周围环境进行检测,在每次协同作业任务开始时,机器人检测抓料作业位置和放料作业位置,然后根据两者位置自动计算抓料准备位置和放料准备位置;当环境中存在未知的障碍物时,机器人先通过激光雷达检测出障碍物的位置,然后进行避障协同作业。因此机器人能够在不同的仓库布局或运输车辆和未知障碍物存在的情况下进行高效移运,从而提高机器人物料移运的智能化和自动化程度。液压控制系统主要由负载敏感控制系统、行走基本回路及各液压缸基本回路

组成,其中液压控制系统为行驶系统提供的最大牵引力为 17 kN,各液压缸型号和最大负载如表 1 所示。

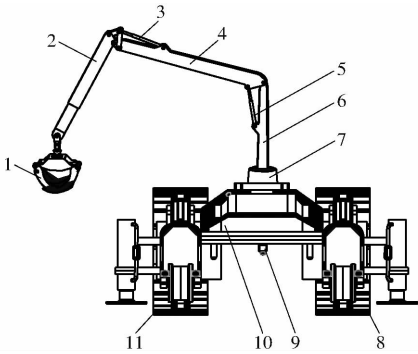


图 1 物料移运机器人结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of material handling robot

1. 抓斗 2. 伸缩臂及其液压缸 3. 基本臂液压缸 4. 上臂
5. 上臂液压缸 6. 转柱 7. 回转装置 8. 右履带 9. 激光雷达
10. 行走架 11. 左履带

表 1 液压缸选型
Tab. 1 Hydraulic cylinder selection

液压缸名称	型号	最大负载/kN
上臂液压缸	HSGF01-63/45E-800	49.87
基本臂液压缸	HSGF01-50/32E-600	25.40
伸缩臂液压缸	HSGF01-100/70E-1200	64.06

为了解决机器人移运作业过程中抓取和移运操作相对独立而导致总用时过长的问题,机器人作业系统和行驶系统以协同工作代替依次工作,以减少机器人作业过程的总用时时长,提升工作效率。本文设计的机器人协同作业主要流程为:由物料移运机器人的激光雷达检测机器人的抓料作业位置和放料作业位置,并记录位置数据;机器人移动到抓料作业位置并抓取物料,准备进行作业系统和行驶系统协同作业的时间最优轨迹规划;在抓料和放料操作中,物料移运机器人进行考虑多个目标点的协同作业时间最优轨迹规划,在抓料和放料之间的移运操作中,物料移运机器人利用激光雷达实时检测障碍物,进行考虑两目标点的避障协同作业时间最优路径规划。该协同作业方案能够实现物料移运机器人在复杂环境中的高效协同作业和避免与环境中未知障碍物发生碰撞,进而提高机器人协同作业的可控性和安全性。

机器人的工作流程示意图如图 2 所示,其中, $A_1 \sim F_1$ 表示行驶系统中心的位置,相邻位置间的轨迹分别记为轨迹 1~5; $A_2 \sim F_2$ 表示作业系统末端相对行驶系统中心的位置,各位置对应的关节取值分别为 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 和 Q_6 ,其中 Q_3 和 Q_4 取值相同。具体机器人协同作业过程如下:

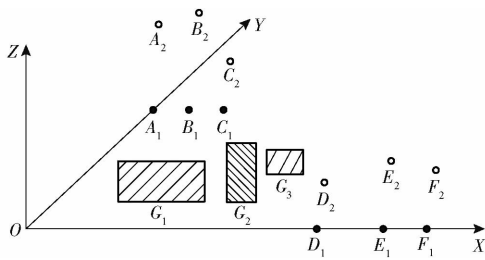


图 2 机器人工作流程示意图

Fig. 2 Schematic of robot workflow

A_1 . 抓料作业位置 B_1 . 抓料准备位置 C_1 . 位姿变换位置 1
 D_1 . 位姿变换位置 2 E_1 . 放料准备位置 F_1 . 放料作业位置
 G_1 . 障碍物 1 G_2 . 障碍物 2 G_3 . 障碍物 3

(1) 物料移运机器人利用激光雷达检测机器人的抓料作业位置和放料作业位置, 并记录位置数据。

(2) 物料移运机器人移动至点 A_1 处并抓取到物料。

(3) 在轨迹 1 之间, 作业系统各关节的位置由 Q_1 变为 Q_2 , 以避免物料与环境发生碰撞, 行驶系统水平移动。

(4) 在轨迹 2 之间, 作业系统各关节的位置由 Q_2 变为 Q_3 , 即各关节的位置变为最小值, 以减少移动过程中物料对机器人的倾覆力矩, 行驶系统水平移动。

(5) 在轨迹 3 之间, 物料移运机器人进行考虑障碍物的时间最短路径规划, 作业系统各关节位置保持 Q_3 不变, 在轨迹结束时将各关节位置记为 Q_4 。

(6) 在轨迹 4 之间, 作业系统各关节的位置由 Q_4 变为 Q_5 , 进行放料操作的准备, 行驶系统水平移动。

(7) 在轨迹 5 之间, 作业系统各关节的位置由 Q_5 变为 Q_6 , 进行放料操作, 行驶系统水平移动。

(8) 机器人完成放料操作后, 快速移至下一抓料作业位置, 开始下一作业循环, 工作过程同步骤 (1) ~ (7)。

1.2 物料移运机器人运动学建模

抓斗仅进行开合动作, 不影响作业系统的运动学性能, 在运动学模型中不予考虑。记过转柱中心线和上臂中心线的平面为 Σ 平面, 左履带轴线为 J_1 , 右履带轴线为 J_2 , 回转装置转动轴为 J_3 , 上臂液压缸轴线为 J_4 , 基本臂液压缸轴线为 J_5 , 伸缩臂液压缸轴线为 J_6 , 建立机器人的 D-H 连杆参考坐标系, 如图 3 所示。基坐标系 O_0 固联在机器人未运动时 J_1 轴与地面的交点处, Z_0 轴竖直向上, X_0 轴指向激光雷达所在方向; 坐标系 O_1 位于 J_1 轴与回转装置最下端平面的交点处, Z_1 轴竖直向上, X_1 轴指向激光雷达所在方向; 坐标系 O_2 位于转柱和上臂的交点处, Z_2 轴竖直向上, X_2 轴指向抓斗所在方向; 坐标系 O_3 位于转柱和上臂的交点处, Z_3 轴垂直 Σ 平面向

外, X_3 轴沿上臂指向上臂和伸缩臂的交点处; 坐标系 O_4 位于上臂和伸缩臂的交点处, Z_4 轴垂直 Σ 平面向外, X_4 轴垂直伸缩臂并指向远离回转装置方向; 坐标系 O_5 位于伸缩臂与抓斗连接处, Z_5 轴沿伸缩臂方向向下, X_5 轴垂直伸缩臂并指向远离回转装置方向。

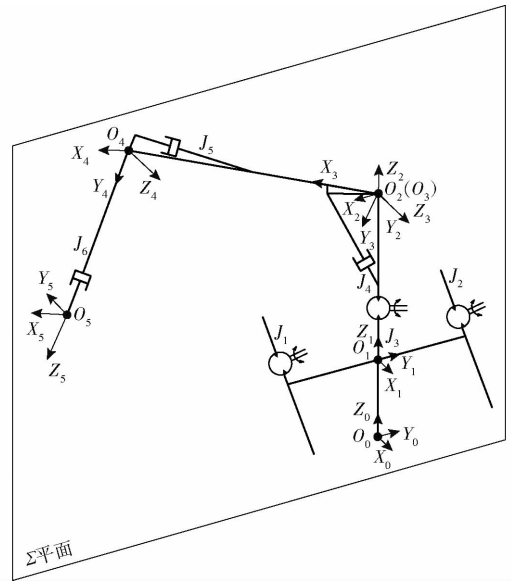


图 3 机器人 D-H 参考坐标系

Fig. 3 D-H reference frames for robot

由物料移运机器人构型可知, 连杆 1 由左履带和右履带并联驱动, 当左履带和右履带行程相等时, 连杆 1 在坐标系 O_0 的 X_0 轴方向上移动, 而当左履带和右履带存在行程差时, 行走架将绕着轴 Z_1 转动, 同时, 还会沿坐标系 O_0 的 X_0 轴、 Y_0 轴方向移动, 形成耦合运动。参考耦合运动杆件的运动学建模^[37], 可直接给出坐标系 O_1 相对于基坐标系 O_0 的齐次变换矩阵

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos((X_1 - X_2)/B) & -\sin((X_1 - X_2)/B) & 0 & \cos((X_1 - X_2)/B)(X_1 + X_2)/2 \\ \sin((X_1 - X_2)/B) & \cos((X_1 - X_2)/B) & 0 & \sin((X_1 - X_2)/B)(X_1 + X_2)/2 \\ 0 & 0 & 1 & L_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 X_1, X_2 ——左、右履带位移

B ——两履带轨距

L_0 ——回转装置最下端平面至地面的距离

物料移运机器人连杆 2 ~ 5 的改进 DH 参数如表 2 所示, 其中, L_1 为转柱长度, 取 1.5 m, L_2 为上臂长度, 取 2.1 m, L_3 为伸缩臂初始长度, 取 1.8 m, φ_1 为回转装置绕 Z_1 轴的转动角度, 因回转装置采用中央回转接头实现作业系统和行驶系统两者间液压油路连接导通, 可有效保证正反连续多圈回转, φ_2 为上臂绕 Z_2 轴的转动角, 取值范围为 $[0, \pi/6]$, φ_3 为伸缩臂绕 Z_3 轴转动角, 取值范围为 $[0, \pi/3]$, X_3 为

伸缩臂液压缸伸缩长度,取值范围为 $[0, 1.2 \text{ m}]$,机器人末端最大负载为 350 kg。

表 2 机器人作业系统杆件参数

Tab. 2 Geometric parameters of robot operation system links

连杆 i	连杆扭转角 $\alpha_{i-1} \text{ (rad)}$	连杆长度 $a_{i-1} \text{ (m)}$	连杆回转角 $\theta_i \text{ (rad)}$	连杆偏移量 $d_i \text{ (m)}$
2	0	0	$-\pi/2 + \varphi_1$	L_1
3	$-\pi/2$	0	$-\pi/6 - \varphi_2$	0
4	0	L_2	$-\pi/6 + \varphi_3$	0
5	$-\pi/2$	0	0	$L_3 + X_3$

根据连杆变换矩阵 ${}^{i-1}T_i$ 的通用表达式

$${}^{i-1}T_i =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i\cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i\cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i\sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i\sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i\sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i\cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

可得机器人正向运动学位姿变换矩阵为

$${}^0T_5 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} n_x &= \sin((X_1 - X_2)/B + \varphi_1) \cos(\varphi_2 - \varphi_3 + \pi/3) \\ n_y &= -\cos((X_1 - X_2)/B + \varphi_1) \cos(\varphi_2 - \varphi_3 + \pi/3) \\ n_z &= \sin(\varphi_2 - \varphi_3 + \pi/3) \\ o_x &= -\cos((X_1 - X_2)/B + \varphi_1) \\ o_y &= -\sin((X_1 - X_2)/B + \varphi_1) \\ o_z &= 0 \\ a_x &= \sin((X_1 - X_2)/B + \varphi_1) \sin(\varphi_2 - \varphi_3 + \pi/3) \\ a_y &= -\cos((X_1 - X_2)/B + \varphi_1) \sin(\varphi_2 - \varphi_3 + \pi/3) \\ a_z &= -\cos(\varphi_2 - \varphi_3 + \pi/3) \\ p_x &= [(L_3 + X_3) \sin(\varphi_2 - \varphi_3 + \pi/3) + \\ &L_2 \cos(\varphi_2 + \pi/6)] \sin((X_1 - X_2)/B + \varphi_1) + \\ &\cos((X_1 - X_2)/B) (X_1 + X_2)/2 \\ p_y &= -[(L_3 + X_3) \sin(\varphi_2 - \varphi_3 + \pi/3) + \\ &L_2 \cos(\varphi_2 + \pi/6)] \cos((X_1 - X_2)/B + \varphi_1) + \\ &\sin((X_1 - X_2)/B) (X_1 + X_2)/2 \\ p_z &= L_0 + L_1 - (L_3 + X_3) \cos(\varphi_2 - \varphi_3 + \pi/3) + \\ &L_2 \sin(\varphi_2 + \pi/6) \end{aligned}$$

因物料移运机器人对于某一目标位置会有无数个逆解,考虑机器人实际工作情况,一般根据目标位置指定 X_1 和 X_2 的值分别为 b_1 和 b_2 ,然后采用反变换法进行逆向运动学求解,可得其余各关节转角和平

移距离为

$$\begin{cases} \varphi_1 = (b_1 + b_2)/B - \arctan 2(-o_y, -o_x) \\ \varphi_3 = \arccos((p_x n_x + p_y n_y + (p_z - L_0 - L_1) n_z + \\ \sin\varphi_1 a_z (b_1 + b_2)/2)/L_2) + \pi/6 \\ \varphi_2 = \arctan 2(n_z, -a_z) + \varphi_3 - \pi/3 \\ X_3 = p_x a_x + p_y a_y + (p_z - L_0 - L_1) a_z - \\ \sin\varphi_1 n_z (b_1 + b_2)/2 + L_2 \sin(\varphi_3 - \pi/6) - L_3 \end{cases} \quad (4)$$

1.3 物料移运机器人动力学建模

由图 1 可知,作业的物料移运机器人由行驶系统、作业系统和末端抓取物体 3 部分构成。在物料移运机器人工作时,行驶系统两履带所受的压力主要由作业系统相对行驶系统的位置和机器人末端抓取物体的质量所决定,当作业系统与行驶系统处于不同的位置或机器人末端抓取不同质量的物体均会导致两履带所受的压力不同。此外,两履带与不同地面接触或两履带分别接触不同的地面对机器人的运动产生不同的影响。本文建立的物料移运机器人动力学模型为

$$\begin{cases} (m_1 + m_2 + m_3) \dot{v}_p = F_L + F_R - f_L - f_R \\ (I_1 + I_2 + I_3) \dot{\omega}_p = (F_L - f_L) \frac{B}{2} - (F_R - f_R) \frac{B}{2} \\ f_L = \mu_1 w_1 (m_1 + m_2 + m_3) g \\ f_R = \mu_2 w_2 (m_1 + m_2 + m_3) g \\ w_1 + w_2 = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中 m_1, m_2, m_3 ——行驶系统、作业系统、末端抓取物体质量

F_L, F_R ——行驶系统左、右履带牵引力

f_L, f_R ——行驶系统左、右履带摩擦力

I_1, I_2, I_3 ——行驶系统、作业系统、末端抓取物体绕转柱轴线的转动惯量

μ_1, μ_2 ——行驶系统左、右履带与地面的摩擦因数

w_1, w_2 ——压力系数,根据作业系统相对行驶系统行驶的不同位置取不同的值

g ——重力加速度

$\dot{\omega}_p$ ——行驶系统中心角加速度

$\dot{v}_p$ ——行驶系统中心加速度

2 物料移运机器人协同作业轨迹规划

在物料移运机器人工作过程中,为了解决机器人抓取作业和整机行驶移动相对独立而导致总用时过长的问题,本文提出一种物料移运机器人协同作业时间最优轨迹规划方法,其包括机器人抓放料协

同作业轨迹规划、机器人避障协同作业路径规划和机器人协同作业跟踪控制 3 部分,以物料移运机器人作业系统和行驶系统两者的协同作业代替顺次工作。物料移运机器人的协同作业主要包括以作业系统为主导的在轨迹 1、轨迹 2、轨迹 4、轨迹 5 中的抓放料协同作业和以行驶系统为主导的在轨迹 3 之间的避障协同作业:在机器人抓放料操作中,机器人的 6 个关节相互配合完成抓料或放料操作;在机器人避障操作中,作业系统各关节保持不变,仅通过控制机器人的关节 1 和关节 2 进行避障。因此,需针对物料移运机器人抓放料协同作业和避障协同作业分别开展轨迹规划。

2.1 抓放料协同作业轨迹规划

为了解决物料移运机器人在多目标点间运动时间过长的问题,构造各关节轨迹多项式插值函数,并利用粒子群优化(PSO)算法对物料移运机器人各关节的插值函数进行约束优化求解,使其获得时间最优运动轨迹,提高其工作效率。多项式插值轨迹因具有计算速度快和准确性高的优点而被广泛采用。本文采用 4 次多项式插值,其既可以保证加速度的连续,也不容易产生过拟合的现象,所采用的各关节轨迹表达式为

$$q_{ij}(t_{ij}) = a_{ij4}t_{ij}^4 + a_{ij3}t_{ij}^3 + a_{ij2}t_{ij}^2 + a_{ij1}t_{ij} + a_{ij0} \quad (i=1,2,3,4,5,6;j=1,2,4,5) \quad (6)$$

式中 q_{ij} ——第 i 个关节在第 j 段轨迹的表达式

t_{ij} ——第 i 个关节在第 j 段轨迹的运行时间

a_{ijk} ——第 i 个关节在第 j 段轨迹的第 k 个数, $k=0,1,2,3,4$

物料移运机器人在运动时,需要考虑各个关节位置、速度和加速度的限制,还需要考虑在多个目标点处轨迹的连续性,基于上述运动学限制,可得轨迹各系数矩阵 A 的表达式为

$$A = [A_1 \ A_2 \ A_3 \ A_4]^T = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & 0 \\ 0 & 0 & B_{21} & B_{22} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & B_{34} \end{bmatrix} [C_1 \ C_2]^T \quad (7)$$

其中

$$A_1 = [a_{i14} \ a_{i13} \ a_{i12} \ a_{i11} \ a_{i10}]$$

$$A_2 = [a_{i24} \ a_{i23} \ a_{i22} \ a_{i21} \ a_{i20}]$$

$$A_3 = [a_{i34} \ a_{i33} \ a_{i32} \ a_{i31} \ a_{i30}]$$

$$A_4 = [a_{i44} \ a_{i43} \ a_{i42} \ a_{i41} \ a_{i40}]$$

$$B_{11} = \begin{bmatrix} t_{1f}^4 & t_{1f}^3 & t_{1f}^2 & t_{1f} & 1 \\ 4t_{1f}^3 & 3t_{1f}^2 & 2t_{1f} & 1 & 0 \\ 12t_{1f}^2 & 6t_{1f} & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 & 0 \\ t_{2f}^4 & t_{2f}^3 & t_{2f}^2 & t_{2f} & 1 \\ 4t_{2f}^3 & 3t_{2f}^2 & 2t_{2f} & 1 & 0 \\ 12t_{2f}^2 & 6t_{2f} & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{13} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{21} = \begin{bmatrix} t_{4f}^4 & t_{4f}^3 & t_{4f}^2 & t_{4f} & 1 \\ 4t_{4f}^3 & 3t_{4f}^2 & 2t_{4f} & 1 & 0 \\ 12t_{4f}^2 & 6t_{4f} & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 & 0 \\ t_{5f}^4 & t_{5f}^3 & t_{5f}^2 & t_{5f} & 1 \\ 4t_{5f}^3 & 3t_{5f}^2 & 2t_{5f} & 1 & 0 \\ 12t_{5f}^2 & 6t_{5f} & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{31} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_{32} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{33} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_{34} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ Q_5]$$

$$C_2 = [0 \ 0 \ Q_4 \ Q_3 \ Q_2 \ Q_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

式中 $t_{1f}, t_{2f}, t_{4f}, t_{5f}$ ——物料移运机器人在各段轨迹中运行的总时间

适应度函数 1 定义为物料移运机器人在轨迹 1、轨迹 2、轨迹 4 和轨迹 5 进行抓放料协同作业的时间 $t_{if}(i=1,2,4,5)$ 之和最短,约束条件为机器人转动关节 $(\varphi_1、\varphi_2、\varphi_3)$ 和移动关节 $(X_1、X_2、X_3)$ 的位置、速度和加速度限制,可得机器人的时间最优轨迹规划模型为

$$\begin{cases} f_1 = \min(t_{1f} + t_{2f} + t_{4f} + t_{5f}) \\ \text{s. t.} \begin{cases} \varphi_{j\min} \leq \varphi_j \leq \varphi_{j\max} \\ |\dot{\varphi}_j| \leq \dot{\varphi}_{j\max} \\ |\ddot{\varphi}_j| \leq \ddot{\varphi}_{j\max} & (j=1,2,3) \\ X_{k\min} \leq X_k \leq X_{k\max} & (k=1,2,3) \\ |\dot{X}_k| \leq \dot{X}_{k\max} \\ |\ddot{X}_k| \leq \ddot{X}_{k\max} \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\varphi_{j\min}$ ——最小关节值
 $\varphi_{j\max}$ ——最大关节值
 $\dot{\varphi}_{j\max}$ ——转动关节最大角速度
 $\ddot{\varphi}_{j\max}$ ——转动关节最大角加速度
 $X_{k\min}$ ——平移距离最小值
 $X_{k\max}$ ——平移距离最大值
 $\dot{X}_k$ ——平移速度
 $\dot{X}_{k\max}$ ——平移速度最大值
 $\ddot{X}_k$ ——平移加速度
 $\ddot{X}_{k\max}$ ——平移加速度最大值

利用 PSO 算法对物料移运机器人在抓放料协同作业各段轨迹参数同时进行优化,即通过设置一组随机解,不断迭代搜寻最优解^[38]。

采用 PSO 算法对物料移运机器人抓放料协同作业操作进行时间最优轨迹规划的主要流程如图 4 所示,步骤如下:

- (1)确定种群规模和粒子维度,并随机生成粒子。
- (2)初始化种群的速度和位置,将当前位置设为粒子的历史最优位置。
- (3)根据式(7)求取多项式系数,并根据运动学限制条件判断所求轨迹是否满足速度和加速度要求,如果满足要求,进入步骤(4),如果不满足要求,返回步骤(2)。
- (4)利用式(8)计算每个粒子的适应度,并更新粒子历史最优位置和全局最优位置。
- (5)判断是否达到最终迭代次数,如果达到,将所求的全局最优位置作为 4 段轨迹的最短时间,进入步骤(6);如果没有到达最终迭代次数,则更新粒子位置和速度,返回步骤(3)。
- (6)比较 4 个关节在同一段轨迹中运行时间的

大小,选择最长的运行时间作为物料移运机器人在该段轨迹的运行时间,通过式(6)求取物料移运机器人进行抓放料协同作业的轨迹规划方程,求解结束。

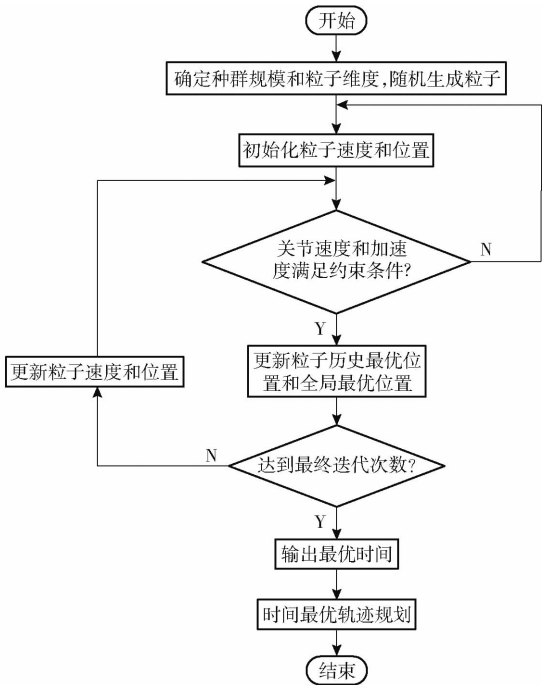


图 4 机器人抓放料协同作业轨迹规划流程图
Fig.4 Flowchart of robot grasping and unloading collaborative operation trajectory planning

2.2 避障协同作业路径规划

在物料移运机器人协同作业过程中,机器人工作区域内可能存在较大的障碍物,该类障碍物将影响机器人的平稳运动和正常行驶。为了解决在有障碍物工作区域内的路径规划问题,通过考虑障碍物及运动学约束,设置约束优化模型,在两目标点间规划物料移运机器人避开障碍物的时间最优路径。

适应度函数 f_2 定义为物料移运机器人在两位姿变换位置间的最短路径,约束条件为左、右履带的速度和加速度限制及行驶系统不进入障碍物 G 的危险范围 ε 内,物料移运机器人关节 3~6 的关节值均取 0,可得物料移运机器人避障协同作业的时间最优路径规划模型为

$$\begin{cases} f_2 = \min \sum (\Delta p_x^2 + \Delta p_y^2) \\ \text{s. t.} \begin{cases} |\dot{X}_1| \leq \dot{X}_{1\max} \\ |\dot{X}_2| \leq \dot{X}_{2\max} \\ |\ddot{X}_1| \leq \ddot{X}_{1\max} \\ |\ddot{X}_2| \leq \ddot{X}_{2\max} \\ d_{\min} \geq \varepsilon \\ \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 0 \\ X_3 = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

式中 $\Delta p_x, \Delta p_y$ ——机器人在每个采样周期沿 X_0 轴和 Y_0 轴的行驶距离

$\dot{X}_1, \dot{X}_2$ ——左、右履带速度

$\ddot{X}_1, \ddot{X}_2$ ——左、右履带加速度

$\dot{X}_{1\max}, \dot{X}_{2\max}$ ——左、右履带速度最大值

$\ddot{X}_{1\max}, \ddot{X}_{2\max}$ ——左、右履带加速度最大值

$d_{\min}$ ——激光雷达所检测的物料移运机器人到障碍物最近点的距离

在使用式(9)生成物料移运机器人避障的时间最优运动路径时,机器人利用激光雷达实时检测周围障碍物,并根据激光雷达的反馈信息,规划出机器人安全范围内均不存在障碍物的运动路径。本文采用 A* 算法对物料移运机器人进行考虑障碍物的时间最优路径规划,主要流程如图 5 所示,步骤如下:

(1) 初始化物料移运机器人的起点位置和终点位置,并获取当前位置的信息。

(2) 使用激光雷达实时扫描环境,获取障碍物的位置和距离信息。

(3) 构建地图,将激光雷达检测到的障碍物信息融合到地图中。

(4) 考虑障碍物及其危险范围的位置,使用 A* 算法在地图中搜索从当前位置到目标位置的最短路径。

(5) 判断路径是否可行,如果路径可行,进入步骤(6),如果路径不可行,选择次短路径并判断可行性,重复该过程直到找到可行的路径。

(6) 物料移运机器人执行移动,更新当前位置。

(7) 判断当前位置是否是终点位置,如果是终点位置,则求解结束,所得路径即为最短路径,如果不是终点位置,返回步骤(2)。

3 物料移运机器人协同作业跟踪控制

物料移运机器人进行抓放料协同作业的过程中,由机器人 1、2 关节(即行驶系统的左、右履带)确定机器人在基坐标系中的大致位置,由机器人 3、4、5、6 关节(即作业系统的各关节)确定机器人末端在基坐标系中的精确位置;物料移运机器人进行避障协同作业的过程中,主要由机器人的行驶系统进行路径规划,作业系统为了减小运行过程中的倾覆力矩而保持不变。行驶系统运动的准确性对物料移运机器人能否完成协同作业有着重要的影响,因此需对行驶系统在协同作业过程中的路径进行跟踪控制。

3.1 机器人(行驶系统)运动误差建模

假设行驶系统只在二维平面内运动且履带不

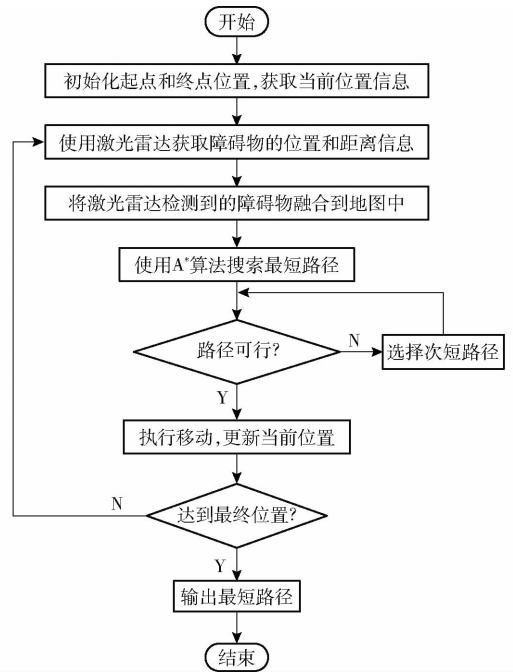


图5 机器人避障协同作业路径规划流程图

Fig. 5 Flowchart of path planning for robot obstacle avoidance cooperative operation

发生侧滑,行驶系统的运动简图如图 6 所示,其中 O_p 为行驶系统的中心, C 为行驶系统的转动瞬心, R 为理论转动半径, v_L 和 v_R 分别为两条履带瞬时行驶速度, v_p 为行驶系统中心瞬时移动速度, θ_p 为行驶系统前进方向与水平方向的夹角, ω_p 为行驶系统的瞬时转动角速度。

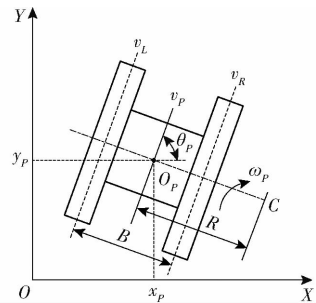


图6 机器人行驶系统运动简图

Fig. 6 Motion diagram of robot driving system

行驶系统在转向时,各部分的角速度相同,可得行驶系统的运动学模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_p = v_p \cos \theta_p \\ \dot{y}_p = v_p \sin \theta_p \\ \dot{\theta}_p = \omega_p \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$v_p = (v_L + v_R) / 2 \quad (11)$$

$$\omega_p = (v_L - v_R) / B \quad (12)$$

为了在物料移运机器人抓放料或避障协同作业过程中实时检测行驶系统实际路径与目标路径间的误差和障碍物的位置信息,建立如图 7 所示的行驶系统路径误差模型,其中, (x_B, y_B) 为期望路径点处

的坐标, θ_B 为期望路径点处的朝向, (x_p, y_p) 为实际路径点处的坐标, θ_p 为实际路径点处的朝向。在全局坐标系下误差可表示为

$$\begin{cases} e_{x_0} = x_B - x_p \\ e_{y_0} = y_B - y_p \\ e_{\theta_0} = \theta_B - \theta_p \end{cases} \quad (13)$$

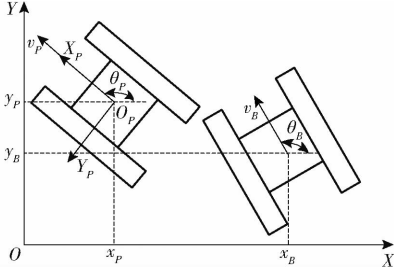


图7 机器人行驶系统路径误差模型

Fig.7 Path error model of robot driving system

根据行驶系统自身坐标系与全局坐标系的关系,由式(13)可得行驶系统自身坐标系下误差为

$$\begin{cases} e_x = e_{x_0} \cos \theta_p + e_{y_0} \sin \theta_p = (x_B - x_p) \cos \theta_p + (y_B - y_p) \sin \theta_p \\ e_y = -e_{x_0} \sin \theta_p + e_{y_0} \cos \theta_p = -(x_B - x_p) \sin \theta_p + (y_B - y_p) \cos \theta_p \\ e_\theta = e_{\theta_0} = \theta_B - \theta_p \end{cases} \quad (14)$$

对式(14)微分得到行驶系统动态误差模型为

$$\begin{cases} \dot{e}_x = e_y \omega_p + v_B \cos e_\theta - v_p \\ \dot{e}_y = -e_x \omega_p + v_B \sin e_\theta \\ \dot{e}_\theta = \omega_B - \omega_p \end{cases} \quad (15)$$

在行驶系统工作过程中,通过控制其速度和角速度使动态误差为0,以实现行驶系统的路径跟踪。

3.2 机器人(行驶系统)跟踪控制律设计

当路径误差较大或机器人将要进入障碍物的危险范围内时,重新规划最短路径;当路径误差较小时,通过式(15)所建立的动态误差模型设计跟踪控制律,控制行驶系统的输入,使得实际路径能够跟踪目标路径,以提高机器人的行驶路径准确性和工作效率。

基于 Lyapunov 第二方法(直接法)设计行驶系统的跟踪控制律。针对行驶系统的动态跟踪误差模型(式(15)),构造 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} K_1 (e_x^2 + e_y^2) + 2 \sin^2 \frac{e_\theta}{2} \quad (16)$$

式中 K_1 ——正常数

当且仅当 $e_x = 0$ 、 $e_y = 0$ 和 $e_\theta = 0$ 同时成立时, $V = 0$ 成立,其他情况下, $V > 0$ 恒成立,故该 Lyapunov 函数正定。

对式(16)进行微分,可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= K_1 (e_x \dot{e}_x + e_y \dot{e}_y) + \sin e_\theta \dot{e}_\theta = \\ &K_1 (e_x v_B \cos e_\theta + e_y v_B \sin e_\theta - e_x v_p) + \sin e_\theta (\omega_B - \omega_p) \end{aligned} \quad (17)$$

设计控制输入为

$$\begin{cases} v_p = v_B \cos e_\theta + K_2 e_x \\ \omega_p = \omega_B + K_1 e_y v_B + K_3 \sin e_\theta \end{cases} \quad (18)$$

式中 K_2, K_3 ——正常数

将式(18)代入式(17)中,可进一步得到 $\dot{V}$ 的表达式为

$$\dot{V} = -K_1 K_2 e_x^2 - K_3 \sin^2 e_\theta \quad (19)$$

由式(19)可知,当 $e_x = 0$ 和 $e_\theta = 0$ 同时成立时, $\dot{V} = 0$ 成立,其他情况下, $\dot{V} \leq 0$ 成立,故 $\dot{V}$ 半负定。

由式(16)和式(19)可知,所构造的 Lyapunov 函数 V 满足: V 为正定函数,且对于所有 (e_x, e_y, e_θ) 具有连续的一阶偏导数; $\dot{V}$ 为半负定函数,且在非零状态时不恒为0;当 $\|(e_x, e_y, e_\theta)\|_2 \rightarrow \infty$ 时, $V \rightarrow \infty$ 。根据 Lyapunov 第二方法(直接法)可知,所构造的 Lyapunov 函数 V 为全局渐进稳定。

4 仿真实验

分别开展物料移运机器人协同作业轨迹规划仿真、机器人协同作业动力学仿真、行驶系统路径跟踪仿真分析,验证所提出的物料移运机器人协同作业时间最优轨迹规划方法的有效性。

4.1 物料移运机器人协同作业轨迹规划仿真

物料移运机器人在轨迹1、轨迹2、轨迹4和轨迹5之间进行抓放料协同作业,行驶系统仅进行水平移动,故在仿真实验中将抓料作业位置、抓料准备位置、位姿变换位置1、位姿变换位置2、放料准备位置和放料作业位置处关节1和关节2的值设置为相同值,分别为0、1.5、3、45、47、50 m,又因为在位姿变换位置1和位姿变换位置2处的机器人状态相同,因此可将关节1和关节2对应的 Q_4 值视为与 Q_3 值相等,即将45、47、50 m 分别视为3、5、8 m。选取作业系统末端相对行驶系统中心位置分别为(1.515 5 m, 1.515 5 m, 0.071 1 m)、(1.331 0 m, 1.331 0 m, 0.656 9 m)、(3.377 5 m, 0 m, 1.650 0 m)、(3.377 5 m, 0 m, 1.650 0 m)、(3.034 3 m, -2.204 6 m, 3.317 2 m)和(2.787 6 m, -2.025 2 m, 1.809 4 m),根据式(4)可得每个位置对应的各关节值 $Q_1 \sim Q_6$ 如表3所示。

物料移运机器人进行抓放料协同作业的仿真条件设置为:种群数量为20;粒子维度为4;初始位置为[0, 5]中的任意数;初始速度为[-2, 2]中的任

表 3 机器人各关节值
Tab.3 Joint values of robot

关节序号	关节值					
	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
1	0 m	1.500 0 m	3.000 0 m	3.000 0 m	5.000 0 m	8.000 0 m
2	0 m	1.500 0 m	3.000 0 m	3.000 0 m	5.000 0 m	8.000 0 m
3	0.785 4 rad	0.785 4 rad	0 rad	0 rad	-0.628 3 rad	-0.628 3 rad
4	0 rad	0.050 6 rad	0 rad	0 rad	0.523 2 rad	0.254 4 rad
5	0.917 2 rad	1.037 8 rad	0 rad	0 rad	0 rad	0.269 2 rad
6	0.700 0 m	0.187 3 m	0 m	0 m	0.900 0 m	0.471 0 m

意数;学习因子 $c_1 = 2, c_2 = 2$; 初始惯性因子 $w_{\min} = 0.4$, 最终惯性因子 $w_{\max} = 0.9$; 最大迭代次数 $k_{\max} = 50$; 作业系统转动关节允许最大角速度为 $\pi/3$ rad/s, 角加速度为 π rad/s², 移动关节允许最大速度为 0.5 m/s, 加速度为 1.1 m/s², 两履带轨距 B 为 1.2 m, 行驶系统最大允许速度为 2.5 m/s, 最大允许加速度为 2.5 m/s², 抓料作业位置和放料作业位置处速度均为 0 m/s, 加速度均为 0 m/s²。

分别对抓放料协同作业中各个关节的运行轨迹进行优化,可求出每个关节在 4 段轨迹中的最短运行时间如表 4 所示,其中 $t_{ijf}(i = 3, 4, 5, 6; j = 1, 2, 4, 5)$ 表示关节 i 在第 j 段轨迹中的运行时间(运行时间为 0 s 表示该关节在此段轨迹中未运动),关节 1 和关节 2 的运行时间由作业系统的运行时间所确定。

表 4 机器人各关节在每段轨迹的运行时间 t_{ijf}

robot joints t_{ijf}		s			
i	j				
	1	2	4	5	
3	0	1.730 3	1.528 9	0	
4	0.574 5	0.342 0	1.299 3	1.112 3	
5	0.524 1	1.969 7	0	1.010 4	
6	1.873 4	0.832 5	3.418 1	2.120 5	

由于作业系统 4 个关节在机器人的同一段轨迹中运动,故每段插值时间取各关节运行时间的最大值,即 $t_{1f} = 1.873\ 4\ \text{s}$, $t_{2f} = 1.969\ 7\ \text{s}$, $t_{4f} = 3.418\ 1\ \text{s}$, $t_{5f} = 2.120\ 5\ \text{s}$ 。

对抓放料协同作业进行时间最优轨迹规划后,所得的机器人各个关节的位置、速度和加速度如图 8~10 所示,关节速度和关节加速度如表 5、6 所示。因省略掉轨迹 3 不会影响轨迹 2 和轨迹 4 之间的运动关系,在研究机器人抓放料协同作业的运动特性时可不考虑轨迹 3 的运动状态,在此将轨迹 2 和轨迹 4 之间的运动状态视为连续。

由图 8~10 可知,物料移运机器人各个关节的

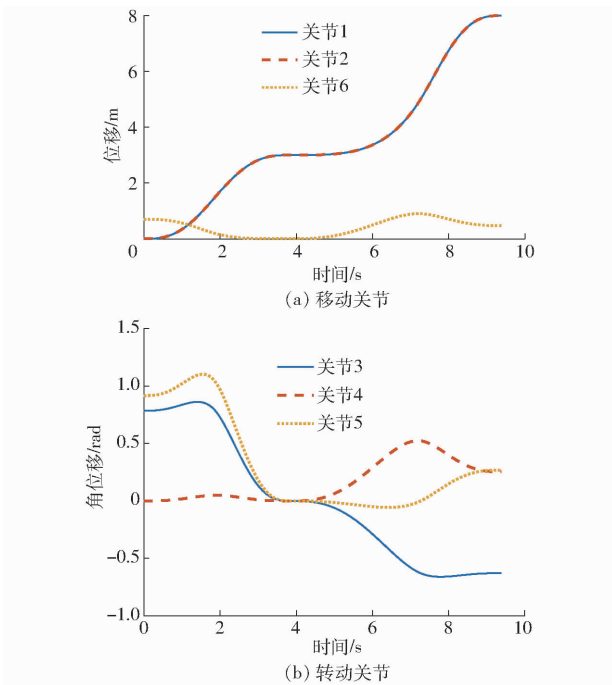


图 8 机器人关节位移曲线

Fig.8 Joint displacement curves of robot

位移、速度和加速度均未超出各关节的限制,且各个关节的位移、速度和加速度曲线均连续,没有突变现象的发生,避免了作业系统在运动过程中颤振现象的出现,从而提高其稳定性,平滑的运动轨迹还可减少作业系统的功率消耗,验证了所提出的物料移运机器人协同作业时间最优轨迹规划方法的有效性。

由表 5 和表 6 可知,作业系统各关节速度和加速度均满足约束要求,关节角速度最大均值和方差分别为 $-0.150\ 7\ \text{rad/s}$ 和 $0.084\ 1\ \text{rad}^2/\text{s}^2$, 关节 6 速度均值和方差分别为 $-0.024\ 4\ \text{m/s}$ 和 $0.071\ 9\ \text{m}^2/\text{s}^2$, 关节角加速度均值和方差最大值分别为 $0\ \text{rad/s}^2$ 和 $0.221\ 2\ \text{rad}^2/\text{s}^4$, 关节 6 加速度均值和方差分别为 $0\ \text{m/s}^2$ 和 $0.115\ 9\ \text{m}^2/\text{s}^4$, 表明作业系统在运动过程中速度和加速度波动较小。行驶系统的速度和加速度均满足要求,两履带的不稳定运动使得速度和加速度方差较大,但对机器人的运动稳定性影响较小。

物料移运机器人进行避障协同作业的仿真条件设置为:抓料作业位置、位姿变换位置 1、位姿变换

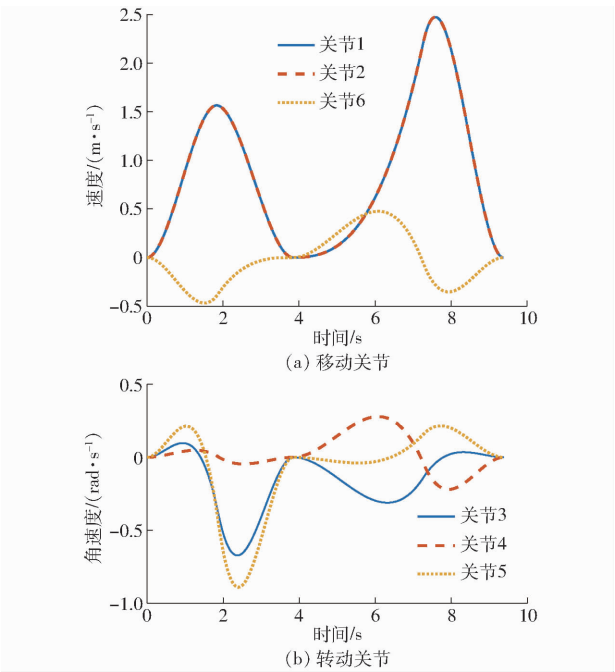


图 9 机器人关节速度曲线

Fig. 9 Joint velocity displacement curves of robot

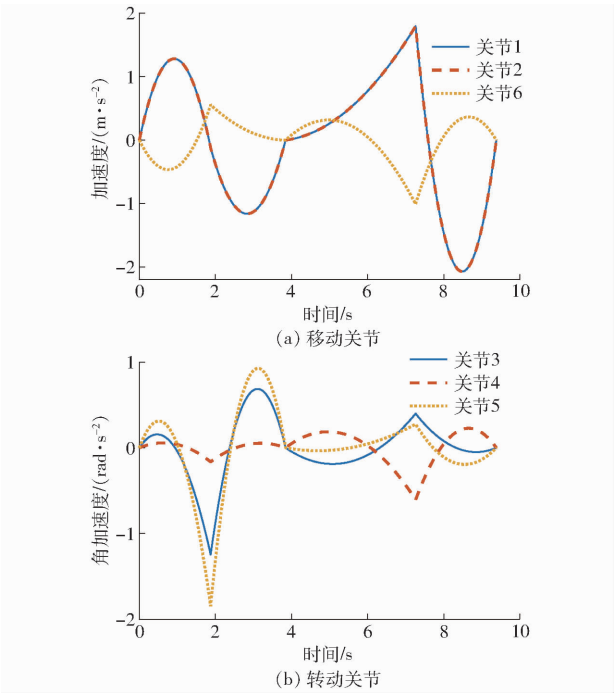


图 10 机器人关节加速度曲线

Fig. 10 Joint acceleration displacement curves of robot

位置 2 和放料作业位置的坐标分别为 (0 m, 30 m)、(3 m, 30 m)、(45 m, 1 m) 和 (50 m, 1 m), 机器人在抓料作业位置至位姿变换位置 1、位姿变换位置 2 至放料位置之间只沿水平方向运动, 在两个位姿变换位置之间进行最短路径规划, 机器人位置采样周期 T 为 0.01 s, 障碍物危险范围 ε 为 2 m。采用 A* 算法对机器人避障协同作业进行路径规划, 结果如图 11 所示, 规划的最短路径为 66.698 5 m。为了对比 A* 算法对机器人避障协同作业最短路径规划

表 5 机器人关节速度

Tab. 5 Joint velocity of robot

关节序号	最大速度	最小速度	速度均值	速度方差
1	2.474 3 m/s	0 m/s	0.852 7 m/s	0.545 6 m ² /s ²
2	2.474 3 m/s	0 m/s	0.852 7 m/s	0.545 6 m ² /s ²
3	0.097 2 rad/s	-0.672 9 rad/s	-0.150 7 rad/s	0.041 5 rad ² /s ²
4	0.278 5 rad/s	-0.220 4 rad/s	0.027 1 rad/s	0.016 6 rad ² /s ²
5	0.215 4 rad/s	-0.890 7 rad/s	-0.069 1 rad/s	0.084 1 rad ² /s ²
6	0.475 5 m/s	-0.468 2 m/s	-0.024 4 m/s	0.071 9 m ² /s ²

表 6 机器人关节加速度

Tab. 6 Joint acceleration of robot

关节序号	最大加速度	最小加速度	加速度均值	加速度方差
1	1.797 5 m/s ²	-2.071 2 m/s ²	0 m/s ²	1.051 3 m ² /s ⁴
2	1.797 5 m/s ²	-2.071 2 m/s ²	0 m/s ²	1.051 3 m ² /s ⁴
3	0.686 1 rad/s ²	-1.245 1 rad/s ²	0 rad/s ²	0.119 2 rad ² /s ⁴
4	0.227 3 rad/s ²	-0.606 9 rad/s ²	0 rad/s ²	0.030 6 rad ² /s ⁴
5	0.925 9 rad/s ²	-1.846 2 rad/s ²	0 rad/s ²	0.221 2 rad ² /s ⁴
6	0.557 6 m/s ²	-1.008 8 m/s ²	0 m/s ²	0.115 9 m ² /s ⁴

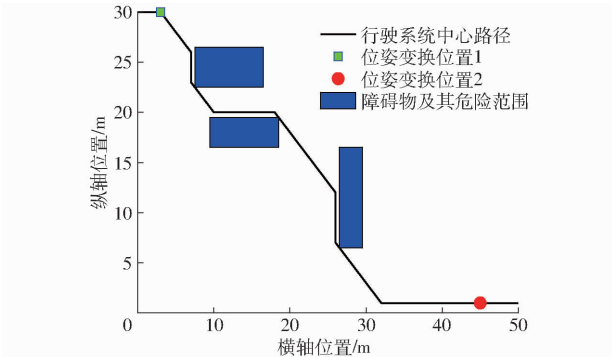


图 11 机器人 A* 算法避障协同作业路径规划结果

Fig. 11 Path planning results of robot A* algorithm for obstacle avoidance collaborative work

的有效性, 在相同仿真环境下采用 Rapidly Exploring Random Tree (RRT) 算法进行对比仿真, 结果如图 12 所示, 所得最短路径为 72.103 8 m。对比结果表明, A* 算法比 RRT 算法生成的路径更短。这是由于

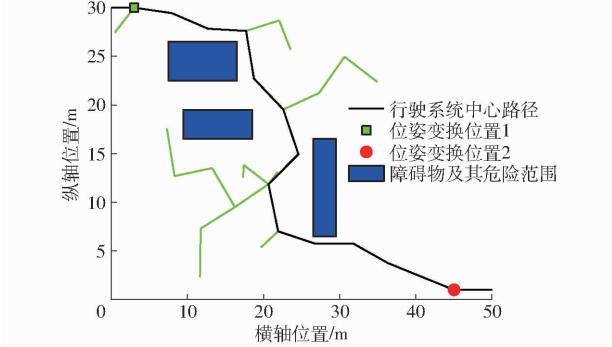


图 12 机器人 RRT 算法避障协同作业路径规划结果

Fig. 12 Path planning results of robot RRT algorithm for obstacle avoidance collaborative work

A* 算法利用启发式函数评估节点并选择更优节点进行搜索,而 RRT 算法通过随机采样生成节点,局部会选取次优的节点导致生成的路径比较长。

综合上述对物料移运机器人进行的抓放料协同作业和避障协同作业的仿真内容,可得机器人在整个物料移运协同作业过程中的轨迹规划结果如图 13 所示,其中,采用 A* 算法对机器人避障协同作业进行路径规划。

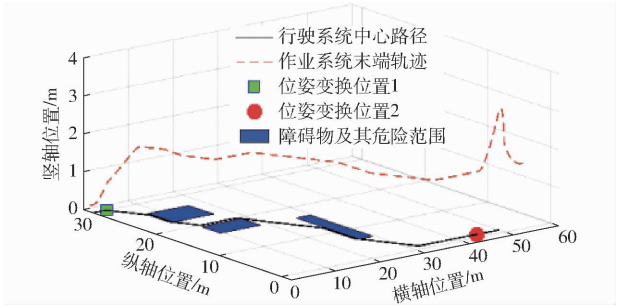


图 13 物料移运机器人协同作业轨迹

Fig. 13 Material handling robot collaborative work track

4.2 物料移运机器人协同作业动力学仿真

在 ADAMS 中建立物料移运机器人的虚拟样机模型,如图 14 所示,并依据实际运动关系在机器人各部件间添加相应的约束和驱动,开展作业系统和行驶系统协同作业时的动力学仿真,验证所提出物料移运机器人协同作业时间最优轨迹规划方法的有效性。

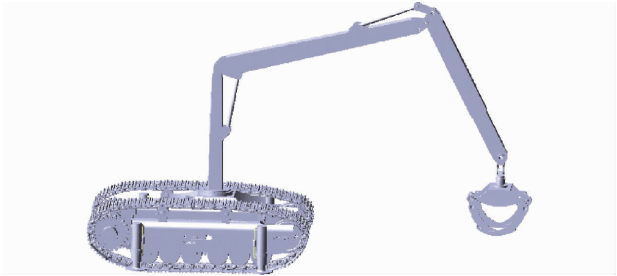


图 14 物料移运机器人虚拟样机模型

Fig. 14 Virtual prototype model of material handling robot

将在 ADAMS 中建立的物料移运机器人模型导入 Matlab/Simulink,得到联合仿真模型如图 15 所示,其中 joint1 ~ joint6 模块分别表示物料移运机器人关节 1 ~ 6 的位移曲线,通过各示波器模块观察获得机器人协同作业时作业系统各关节的力/力矩和行驶系统左、右履带牵引力。该联合仿真控制框图如图 16 所示,由机器人末端期望轨迹在 Matlab/Simulink 中通过式(4)进行机器人逆向运动学求解,得到机器人 6 个关节位移($X_1, X_2, X_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$),将其和行驶系统与地面的摩擦因数(μ_1, μ_2)输入到 ADAMS 软件机器人虚拟样机模型,并经过动力学求解,由 ADAMS 输出交互数据到 Matlab/Simulink 中,

进而获得机器人各关节所受的力/力矩($F_1, F_2, M_3, M_4, M_5, F_6$)和机器人末端实际轨迹。通过 ADAMS 和 Matlab/Simulink 两者联合仿真的数据交互,可以较好地实现控制参数输入与机器人虚拟样机模型仿真数据交互,使得仿真结果更为准确。

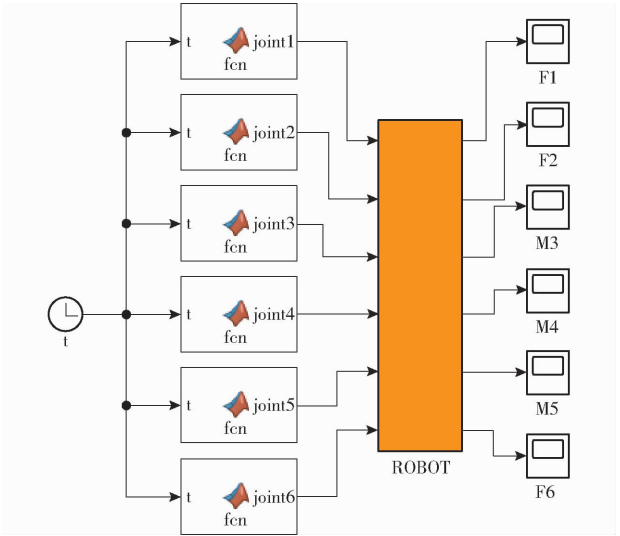


图 15 联合仿真模型

Fig. 15 Co-simulation model diagram

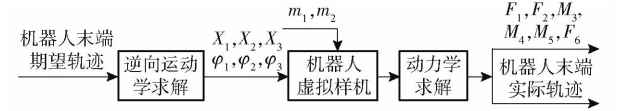


图 16 联合仿真控制框图

Fig. 16 Co-simulation control block diagram

将 4.1 节所规划的物料移运机器人抓放料协同作业时各关节的位移曲线输入到联合仿真的各个关节中,设机器人末端负载为 500 N,方向始终竖直向下,得到机器人各关节在整个运动过程中所受的力和力矩如图 17 所示。

由图 17 可以看出,机器人各关节所受力/力矩变化平缓,无冲击现象的发生,可以提高机器人的控制精度和定位精度,提高机器人在运动过程中的稳定性,为机器人协同作业轨迹规划奠定了动力学基础。

针对物料移运机器人作业系统相对行驶系统处于不同位置、末端抓取不同质量的物体和两履带与不同地面接触以及两履带分别接触不同的地面等协同作业情况,分别进行仿真分析,进一步验证所提出方法的有效性。在此,保持作业系统的位置不变(第 1 种仿真情况除外),以正弦曲线作为行驶系统的速度曲线,余弦曲线作为行驶系统的角速度曲线。

作业系统相对行驶系统处在不同位置对两履带压力的影响主要由关节 1 的不同角度决定,其他关节取值对两履带的压力影响较小。以末端物体质量为 50 kg、两履带与地面的摩擦因数为 0.5,关节 1 角

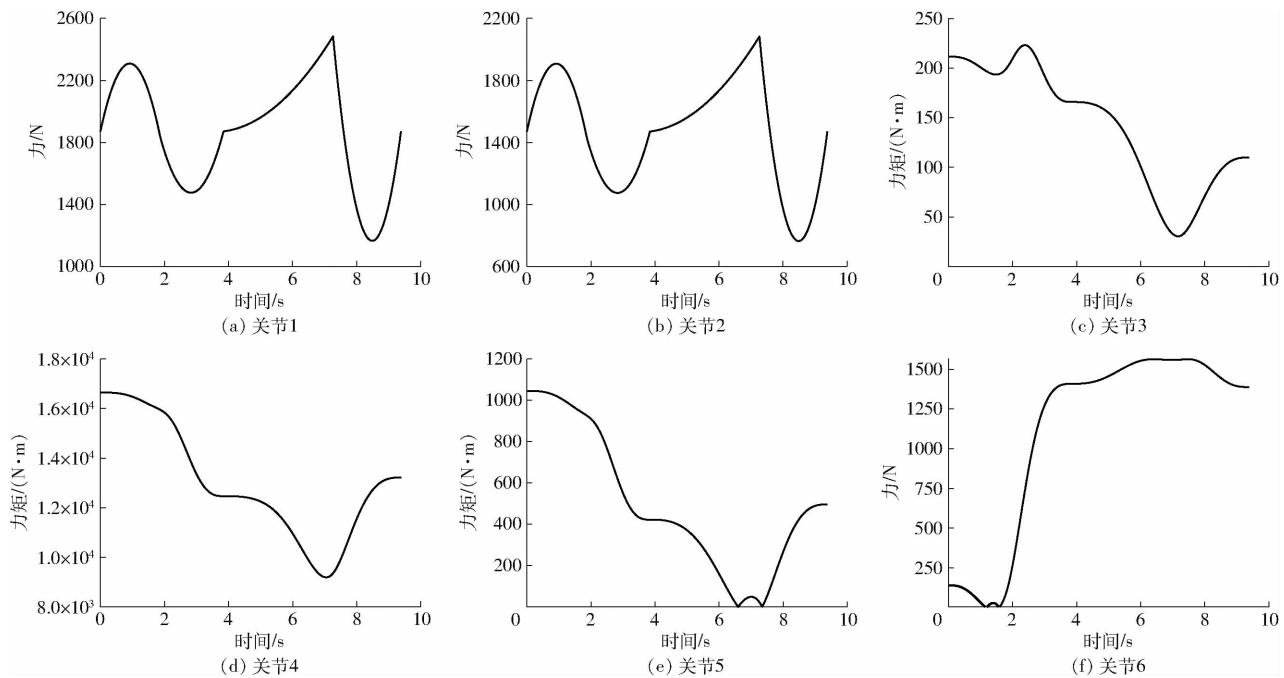


图 17 机器人各关节所受力/力矩变化曲线
Fig. 17 Joint force/moment change curves of robot

度 φ_1 分别取 0 、 $\pi/4$ 、 $\pi/3$ 和 $\pi/2$ 进行仿真分析, 所得两履带的牵引力如图 18 所示。由图 18 可知, 随着关节 1 转动角度的增大, 左履带牵引力逐渐增大、右履带牵引力逐渐减小, 其主要是因为随着关节 1 转动角度的增大, 使得左履带承受的压力增大、右履带承受的压力减小。由物料移运机器人工作空间的对称性可知, 当关节 1 取其他转动角度时, 也具有类似变化结果。

以关节 1 的转动角为 0 , 两履带与地面的摩擦因数为 0.5 , 末端重物质量 m_3 分别取 0 、 100 、 200 、 350 kg 进行仿真分析, 所得两履带牵引力如图 19 所示。由图 19 可知, 随着物料移运机器人末端抓取重物质量的增大, 两个履带牵引力均会增大, 其主要是因为质量增大后, 若要机器人的运动特性保持不变, 需要增大施加在履带上的牵引力, 以抵消质量增大的影响。

以关节 1 转动角为 0 , 末端物体质量为 50 kg, 针对履带与地面的摩擦因数分别为 0.2 、 0.5 、 0.8 和 1.0 进行仿真分析, 可得两履带牵引力如图 20 所示。针对左、右履带与地面的摩擦因数分别为 0.2 、 0.5 和 0.8 的不同取值组合进行仿真分析, 所得两履带的牵引力如图 21 所示。

由图 20 可知, 随着物料移运机器人与地面摩擦因数的增大, 两履带牵引力均会增大, 其主要是因为当摩擦因数增大时, 履带与地面之间的摩擦力增大, 若要机器人的运动特性保持不变, 需要增大施加在履带上的牵引力, 以使得物料移运机器人克服地面阻力进行运动。由图 21 可知, 较高摩擦因数的履带

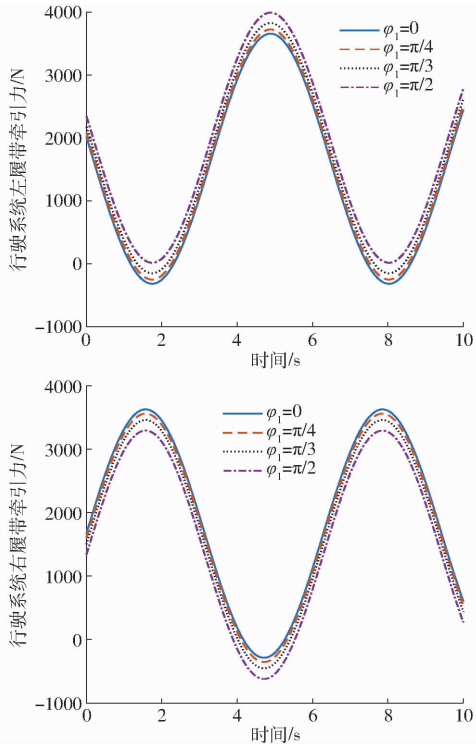


图 18 作业系统处于不同位置时两履带牵引力变化曲线
Fig. 18 Traction force change curves of two tracks for operating system in different positions

需要更大的牵引力, 而较低摩擦因数的履带则需要较小的牵引力; 单个履带与地面的摩擦因数取值组合相同时, 所需的牵引力大小相同; 当两履带与地面的摩擦因数相差过大时, 两履带所需的牵引力也有较大差异。为了保证物料移运机器人平稳运行, 应尽量让两履带在摩擦因数接近的地面上行驶。

由图 18 ~ 21 可知, 针对作业系统相对行驶系统

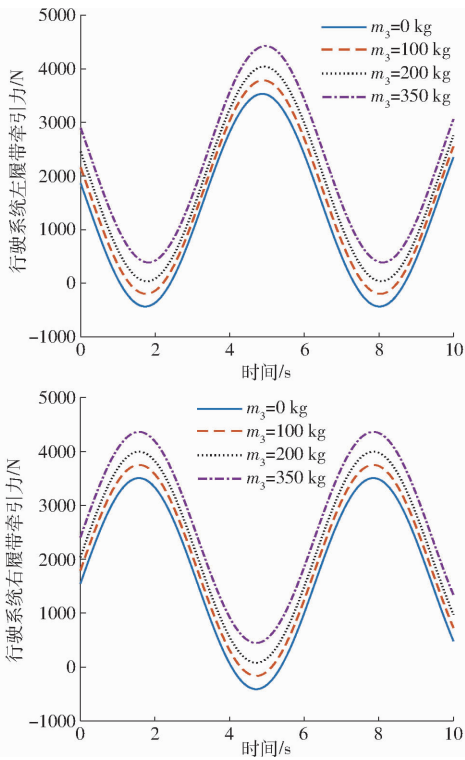


图 19 末端不同质量物体时两履带牵引力变化曲线
Fig. 19 Traction force change curves of two tracks with different mass at end

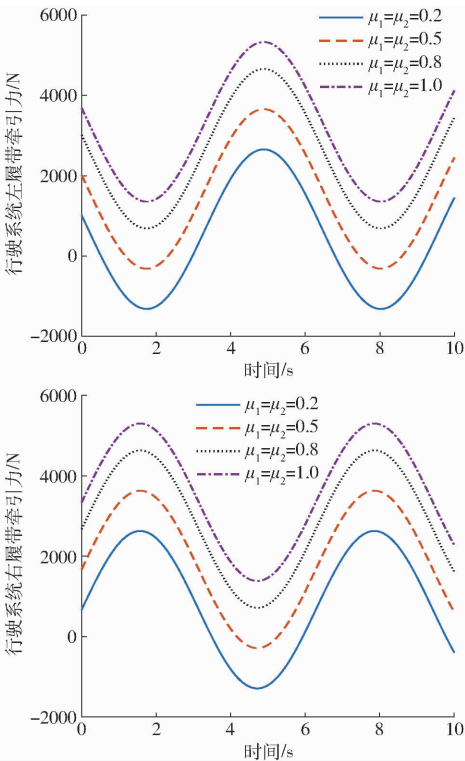


图 20 不同摩擦因数时两履带牵引力变化曲线
Fig. 20 Traction force change curves of two tracks with different friction coefficients

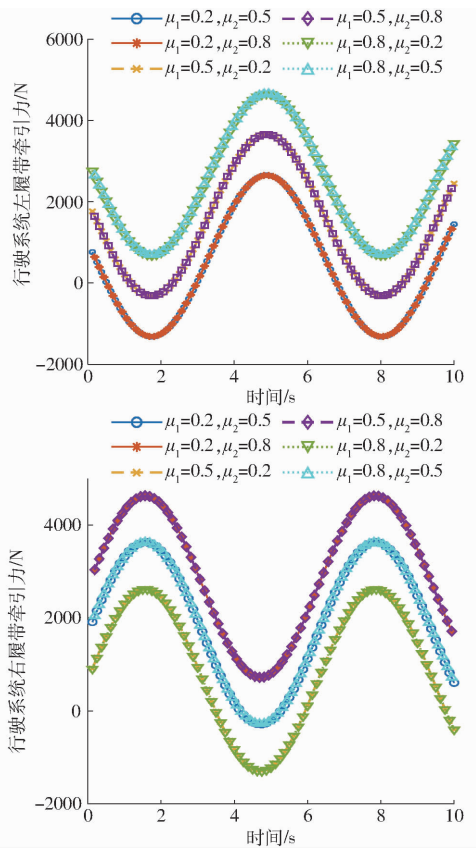


图 21 两履带不同摩擦因数组合时牵引力变化曲线
Fig. 21 Traction force change curves when friction coefficients of two tracks were different

控制系统所能提供的最大牵引力 17 kN,进一步验证了本文所提出的物料移运机器人协同作业时间最优轨迹规划方法的有效性。

4.3 行驶系统路径跟踪仿真

为了验证所设计跟踪控制律的有效性,利用 Matlab/Simulink 搭建路径跟踪模型进行仿真实验。设置行驶系统理想初始位置为 (0 m, 30 m),理想初始姿态角为 0,理想速度和角速度依据路径中的不同位置设置为不同的值;设置行驶系统实际初始位置为 (1 m, 29 m),实际初始姿态角为 0.35π ,实际初始速度为 0 m/s,实际初始角速度为 0 rad/s;路径跟踪器控制参数为 $K_1 = 2.112$, $K_2 = 1.268$, $K_3 = 1.613$,仿真时间为 67 s。所得路径跟踪结果和路径跟踪误差分别如图 22 和图 23 所示,路径误差跟踪结果如表 7 所示。

从图 22 和图 23 可知,行驶系统在仿真刚开始时实际路径与目标路径存在较大跟踪误差,以及在路径转折处也会产生跟踪误差,而经过所设计的跟踪控制律作用后,实际路径逐渐与期望路径趋于重合,在跟踪误差较大的路径转折处,经过跟踪控制律的作用后迅速减小,验证了所提出方法和路径误差模型及跟踪控制律的有效性。

处于不同位置、末端抓取不同质量的物体和两履带与不同地面接触或两履带分别接触不同的地面等协同作业情况下,两履带所需的牵引力均远小于液压

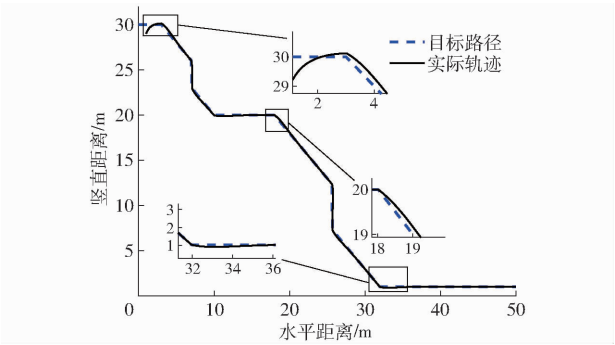


图 22 机器人行驶系统路径跟踪曲线

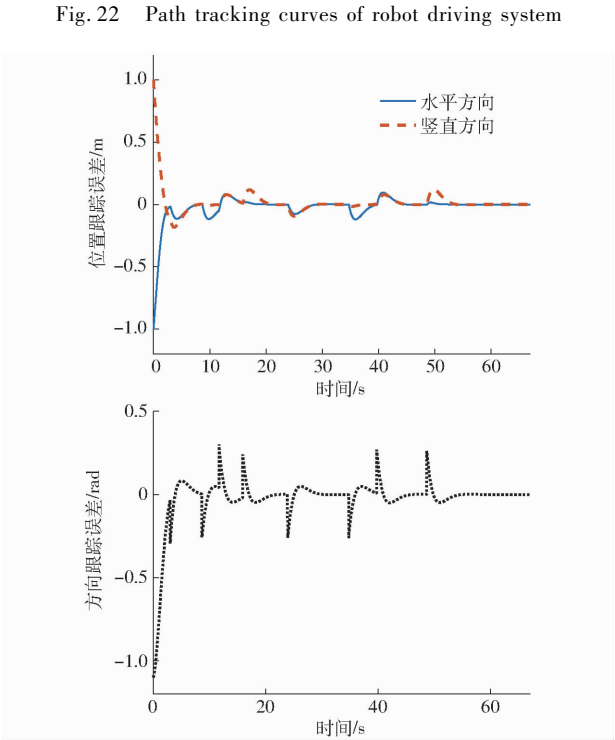


图 23 机器人行驶系统路径跟踪误差变化曲线

Fig. 23 Path tracking error change curves of robot driving system

表 7 机器人行驶系统路径跟踪误差

Tab.7 Path tracking error of robot driving system				
类型	最大误差	最小误差	误差均值	误差方差
水平跟踪	0.095 7 m	-1 m	-0.022 6 m	0.009 9 m ²
竖直跟踪	1 m	-0.183 4 m	0.016 1 m	0.009 9 m ²
方向跟踪	0.301 4 rad	-1.099 6 rad	-0.022 9 rad	0.021 1 rad ²

由表 7 可以看出,行驶系统最大位置跟踪误差和方向跟踪误差均为初始设置误差,位置最大误差均值和方差分别为 0.016 1 m 和 0.009 9 m²,方向误差均值和方差分别为 -0.022 9 rad 和 0.021 1 rad²,表明所设计的跟踪控制律可使路径跟踪误差保持在较小的范围内,验证了所设计的路径跟踪控制律的有效性。

本文提出的物料移运机器人协同作业时间最优

轨迹规划方法,同时考虑机器人作业系统和行驶系统协同工作的运动学和动力学约束,对机器人的各关节进行优化以获得时间最优轨迹,可为同类型移动作业机器人的轨迹规划提供参考。

5 结论

(1)设计了一种物料移运机器人结构,该机器人能够实现多圈回转,具有工作空间大、抓取灵活性和控制方便的优点,并可通过更换末端工作装置,实现起重机、叉车等作业功能。

(2)针对物料移运机器人抓放料协同作业和避障协同作业中抓取轨迹和移动轨迹相对独立且耗时较长的问题,提出了一种物料移运机器人协同作业时间最优轨迹规划方法。通过 Matlab/Simulink 和 ADAMS 对抓放料协同作业约束优化模型进行联合仿真,结果表明,作业系统关节最大角速度和角加速度均值分别为 -0.150 7 rad/s 和 0 rad/s²,关节最大速度和加速度均值分别为 -0.024 4 m/s 和 0 m/s²,各关节变化平缓、无碰撞冲击,机器人可在协同作业时取得平滑且时间最优的运动轨迹;避障协同作业中,利用 A* 算法避障和激光雷达实时检测障碍物生成最短路径,并在 Matlab 中分别对 A* 算法和 RRT 算法路径规划进行仿真实验,结果表明,两种算法均可以避开障碍物,生成的最短路径分别为 66.698 5 m 和 72.103 8 m。抓放料协同作业和避障协同作业的仿真结果验证了所提出轨迹规划方法的有效性。

(3)针对物料移运机器人作业系统相对行驶系统处于不同位置、末端抓取不同质量的物体和两履带与不同地面接触以及两履带分别接触不同的地面等多种协同作业情况,通过 Matlab/Simulink 和 ADAMS 开展了联合仿真分析,结果表明,作业系统和行驶系统在协同作业过程中所需的关节力/力矩和履带牵引力远小于液压控制系统所能提供的最大输出力,验证了本文所提出的物料移运机器人协同作业时间最优轨迹规划方法的有效性。

(4)针对物料移运机器人跟踪误差大的问题,设计了跟踪控制律,并在 Matlab/Simulink 中进行了仿真实验,结果表明,最大位置跟踪误差和方向跟踪误差均值分别为 0.016 1 m 和 -0.022 9 rad,即使在初始状态存在较大误差的前提下,通过跟踪控制律的作用,行驶系统仍能快速稳定跟踪目标路径,验证了所设计跟踪控制律的有效性。

参 考 文 献

[1] 傅雷扬,李绍稳,张乐,等. 田间除草机器人研究进展综述[J]. 机器人, 2021, 43(6):751-768.

- FU Leiyang, LI Shaowen, ZHANG Le, et al. Research progress on field weeding robots: a review[J]. Robot, 2021, 43(6): 751 – 768. (in Chinese)
- [2] 殷建军, 董文龙, 梁利华, 等. 复杂环境下农业机器人路径规划优化方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 17 – 22.
YIN Jianjun, DONG Wenlong, LIANG Lihua, et al. Optimization method of agricultural robot path planning in complex environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 17 – 22. (in Chinese)
- [3] 王宁, 韩雨晓, 王雅萱, 等. 农业机器人全覆盖作业规划研究进展[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 1): 1 – 19.
WANG Ning, HAN Yuxiao, WANG Yaxuan, et al. Research progress of agricultural robot full coverage operation planning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 1 – 19. (in Chinese)
- [4] 陈凯, 解印山, 李彦明, 等. 多约束情形下的农机全覆盖路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 17 – 26.
CHEN Kai, XIE Yinshan, LI Yanming, et al. Full coverage path planning method of agricultural machinery under multiple constraints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 17 – 26. (in Chinese)
- [5] LIU Cheng, CAO Guohua, QU Yongyin, et al. An improved PSO algorithm for time-optimal trajectory planning of Delta robot in intelligent packaging[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(3 – 4): 1091 – 1099.
- [6] 孙志毅, 张韵悦, 李虹, 等. 挖掘机的最优时间轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 166 – 174.
SUN Zhiyi, ZHANG Yunyue, LI Hong, et al. Time optimal trajectory planning of excavator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(5): 166 – 174. (in Chinese)
- [7] 滕儒民, 李玉鑫, 王欣, 等. 基于凸优化的举高消防车时间最优轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 138 – 144.
TENG Rumin, LI Yuxin, WANG Xin, et al. Time optimal trajectory planning of elevating fire truck based on convex optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(6): 138 – 144. (in Chinese)
- [8] 赵业和, 刘达新, 刘振宇, 等. 基于多种群竞争松鼠搜索算法的机械臂时间最优轨迹规划[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(12): 2321 – 2329.
ZHAO Yehe, LIU Daxin, LIU Zhenyu, et al. Time-optimal trajectory planning of manipulator based on multi-group competition squirrel search algorithm[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(12): 2321 – 2329. (in Chinese)
- [9] 芮宏斌, 曹伟, 孙宁宁. 基于 BP 神经网络的光伏阵列清洁机械臂逆运动学分析与时间最短运动规划[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 43 – 51.
RUI Hongbin, CAO Wei, SUN Ningning. Inverse kinematics analysis and time optimal motion planning of photovoltaic array cleaning manipulator based on BP neural network[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2022, 43(10): 43 – 51. (in Chinese)
- [10] 邓伟, 张其万, 刘平, 等. 基于双种群遗传混沌优化算法的最优时间轨迹规划[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 101 – 106.
DENG Wei, ZHANG Qiwan, LIU Ping, et al. Optimal time trajectory planning based on dual population genetic and chaotic optimization algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 101 – 106. (in Chinese)
- [11] ZHANG Xiaofeng, XIAO Fan, TONG Xiliang, et al. Time optimal trajectory planing based on improved sparrow search algorithm[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022, 10: 852408.
- [12] WANG Fang, WU Zhijun, BAO Tingting. Time-jerk optimal trajectory planning of industrial robots based on a hybrid WOA – GA algorithm[J]. Processes, 2022, 10(5): 1014.
- [13] MIAO Xinghua, FU Huansen, SONG Xiangqian. Research on motion trajectory planning of the robotic arm of a robot[J]. Artificial Life and Robotics, 2022, 27(3): 561 – 567.
- [14] 向红标, 杨大虎, 杨璐, 等. 复杂环境下磁弹性微型游泳机器人的路径规划与识别跟踪[J]. 机械工程学报, 2023, 59(5): 89 – 99.
XIANG Hongbiao, YANG Dahu, YANG Lu, et al. Path planning and recognition tracking of a magnetoelastic miniature swimmer in complex environment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(5): 89 – 99. (in Chinese)
- [15] 沈跃, 刘子涵, 刘慧, 等. 基于多约束条件的果园喷雾机器人路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 56 – 67.
SHEN Yue, LIU Zihan, LIU Hui, et al. Orchard spray robot planning algorithm based on multiple constraints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 56 – 67. (in Chinese)
- [16] 贾会群, 魏仲慧, 何昕, 等. 基于改进粒子群算法的路径规划[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 371 – 377.
JIA Huiqun, WEI Zhonghui, HE Xin, et al. Path planning based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 371 – 377. (in Chinese)
- [17] 李涛, 赵宏生. 基于进化蚁群算法的移动机器人路径优化[J]. 控制与决策, 2023, 38(3): 612 – 620.
LI Tao, ZHAO Hongsheng. Path optimization for mobile robot based on evolutionary antcolony algorithm[J]. Control and Decision, 2023, 38(3): 612 – 620. (in Chinese)
- [18] XU Guanghui, ZHANG Tingwei, LAI Qiang, et al. A new path planning method of mobile robot based on adaptive dynamic firefly algorithm[J]. Modern Physics Letters B, 2020, 34(29): 2050322.
- [19] CHEN Zhongzhe, XIAO Jianzhang, WANG Guifeng. An effective path planning of intelligent mobile robot using improved genetic algorithm[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2022, 2022: 9590367.
- [20] 张泮虹, 倪涛, 赵亚辉, 等. 基于最优控制策略的复杂环境移动机器人轨迹规划[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 414 – 421.
ZHANG Panhong, NI Tao, ZHAO Yahui, et al. Optimal control-based trajectory planning method of mobile robot in complex environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 414 – 421. (in Chinese)

- [21] 迟胜凯, 谢永芳, 陈晓方, 等. 基于障碍物代价势场的移动机器人避障算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(11):2289–2303.
CHI Shengkai, XIE Yongfang, CHEN Xiaofang, et al. Obstacle avoidance method of mobile robot based on obstacle cost potential field[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(11):2289–2303. (in Chinese)
- [22] 郝琨, 张慧杰, 李志圣, 等. 基于改进避障策略和双优化蚁群算法的机器人路径规划[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8):303–312.
HAO Kun, ZHANG Huijie, LI Zhisheng, et al. Path planning of mobile robot based on improved obstacle avoidance strategy and double optimization ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8):303–312. (in Chinese)
- [23] 张强, 陈兵奎, 刘小雍, 等. 基于改进势场蚁群算法的移动机器人最优路径规划[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5):23–32.
ZHANG Qiang, CHEN Bingkui, LIU Xiaoyong, et al. Ant colony optimization with improved potential field heuristic for robot path planning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):23–32. (in Chinese)
- [24] LIU Jianhua, YANG Jianguo, LIU Huaping, et al. An improved ant colony algorithm for robot path planning[J]. Soft Computing, 2017, 21(19):5829–5839.
- [25] 张丹凤. 基于路径边沿引导策略的蛇形机器人路径跟踪方法[J]. 机器人, 2021, 43(1):36–43.
ZHANG Danfeng. A path tracking method for the snake robot based on the path edge guidance strategy[J]. Robot, 2021, 43(1):36–43. (in Chinese)
- [26] 白国星, 刘丽, 孟宇, 等. 基于非线性模型预测控制的移动机器人实时路径跟踪[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9):47–52.
BAI Guoxing, LIU Li, MENG Yu, et al. Real-time path tracking of mobile robot based on nonlinear model predictive control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9):47–52. (in Chinese)
- [27] 沈跃, 张亚飞, 刘慧, 等. 农业装备自动控制技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8):1–18.
SHEN Yue, ZHANG Yafei, LIU Hui, et al. Research review of agricultural equipment automatic control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8):1–18. (in Chinese)
- [28] 康翌婷, 张煜, 曾日芽. 地面不平条件下考虑滑动转向特性的履带车辆路径跟踪控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(2):491–501.
KANG Yiting, ZHANG Yu, ZENG Riya. Path tracking control of tracked vehicles considering skid-steer characteristics on uneven terrain[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(2):491–501. (in Chinese)
- [29] 宋彦, 张羊阳, 姚琦, 等. 基于启发式动态规划的履带机器人路径跟随控制方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11):24–33.
SONG Yan, ZHANG Yangyang, YAO Qi, et al. Path following control method of tracked mobile robot based on heuristic dynamic programming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11):24–33. (in Chinese)
- [30] LIU Xinxin, WANG Wei, LI Xuelong, et al. MPC-based high-speed trajectory tracking for 4WIS robot[J]. ISA Transactions, 2022, 123:413–424.
- [31] 刘成良, 贡亮, 苑进, 等. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7):1–22.
LIU Chengliang, GONG Liang, YUAN Jin, et al. Current status and development trends of agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7):1–22. (in Chinese)
- [32] KORAYEM M H, NAZEMIZADEH M, RAHIMI H N. Dynamic optimal payload path planning of mobile manipulators among moving obstacle[J]. Advanced Robotics, 2014, 28(20):1389–1402.
- [33] SUN Zeyuan, YANG Hong, MA Yifan, et al. BIT-DMR: a humanoid dual-arm mobile robot for complex rescue operations[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(2):802–809.
- [34] LI Enbo, FENG Haiho, ZHAI Yanwu, et al. Target dynamic grasping during mobile robot movement based on learning methods[J]. Industrial Robot-the International Journal of Robotics Research and Application, 2021, 48(1):6–16.
- [35] 张勤, 任海林, 胡嘉辉. 基于信息融合的智能推料机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6):78–84.
ZHANG Qin, REN Hailin, HU Jiahui. Design and experiment of intelligent feed-pushing robot based on information fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6):78–84. (in Chinese)
- [36] 宁会峰, 鄢志彬, 李晓, 等. 移动式光伏组件清扫机械臂 D-H 模型与运动规划[J]. 太阳能学报, 2019, 40(12):3541–3547.
NING Huifeng, YAN Zhibin, LI Xiao, et al. D-H model and motion planning of mobile cleaning manipulator for photovoltaic module[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2019, 40(12):3541–3547. (in Chinese)
- [37] 郭万金. 复杂形状零部件打磨作业机器人研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
GUO Wanjin. Research on robot manipulatorfor complex shaped parts deburring[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [38] 康玉祥, 姜春英, 秦运海, 等. 基于改进 PSO 算法的机器人路径规划及实验[J]. 机器人, 2020, 42(1):71–78.
KANG Yuxiang, JIANG Chunying, QIN Yunhai, et al. Robot path planning and experiment with an improved PSO algorithm[J]. Robot, 2020, 42(1):71–78. (in Chinese)