高技术通讯 2024 年 第 34 卷 第 9 期:972-979

doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2024.09.006

基于 A * 改进的推耙机路径规划与模糊跟踪方法①

金建新②* 石大川③** 郭 伟** 张 彪**

(* 浙江浙能嘉华发电有限公司 嘉兴 314201)

(** 杭州登元科技有限公司 杭州 311215)

摘 要 推耙机属于工程机械设备,常用在大中型货运码头、矿山、电厂等场所的货运船舱清理囤积的散货,对提高生产活动的效率有着重要的作用。然而,传统的人工推耙机作业时存在强度大和环境恶劣等问题。为了解决这些问题并实现自动清舱作业,本文通过共轭梯度算法平滑路径解决 A * 算法规划出的路径转折点过多的问题,并结合杜宾曲线减少规划时间。针对推耙机模型不完备的问题和自动作业的需求,采用模糊横向跟踪控制器来减小推耙机跟踪的误差。在实际环境中对自动清舱系统进行了测试,本文路径规划算法相对于 A * 算法速度平均提升 35% 以上,控制误差满足实际需求。

关键词 推耙机; 工程机械设备; 运动控制; 路径跟踪; 货运码头

推耙机是船舶散货进行清舱作业、提高船舶周转率所必需的设备,广泛应用于大中型货运码头的清舱以及矿山、电厂清理整修等作业中,是船舶散货清舱作业用途最广泛的作业机械之一[1]。传统的清舱作业主要依赖于推耙机工程车辆的操作人员进入船舱进行推、耙、挖等作业,这种方式不仅效率低下,而且存在着诸多弊端。人工操作往往受到操作人员技能和经验的限制,难以实现精确、高效的作业;同时,船舱内部环境恶劣,高温、高湿、高粉尘等条件对作业人员的健康和安全带来了极大的威胁。

当前无人驾驶技术蓬勃发展给实现全自动无人推耙机带来了希望。大量学者在无人化工程机械技术研发方面作了大量研究,如电液比例控制技术、状态监测及故障诊断技术、自动变速技术、遥控和无人驾驶技术以及局部自主控制技术等[2]。文献[3]采用图像处理和环境感知算法可以实时感知工程机械作业时环境信息。文献[4]采用路径规划算法可以生成到达指定区域的路径或者生成作业路径网来帮助工程机械合理选择工作路线、避开障碍物和提高工作效率。文献[5]采用运动控制算法为智能工程机械输出合适的电机速度并控制方向盘的角速度,使车辆能准确、快速地跟踪期望轨迹。文献[6]采用决策算法并基于规则引导无人工程机械车完成特定的业务需求,并在复杂的环境中保证生产安全。路径规划算法目的是为了找到以最优效率到达目标点的离散路径,最优效率的离散路径通常与评价函数有关,组成评价函数的指标可以包含每搜索一步的代价值[7]、地形变化程度[8]、距离抑制向量[9]、引力势和斥力势[10]等。

路径规划与跟踪是无人推耙机的基础,许多学者针对路径规划与跟踪作了大量工作。路径跟踪算法划分为基于几何原理、基于经典控制理论和基于预测控制方法 3 类横向控制方法[11-12]。文献[13]提出了一种利用预瞄控制理论解决延迟和滞后的轨迹跟踪问题,以实现车辆准确、平滑和计算高效的轨迹跟踪。文献[14]设计了一种将车辆横向动力学模型表达为传递函数形式的地面车辆轨迹跟踪比例积分微分(proportional integral derivative, PID)控制

① 国家重点研发计划(2023YFB4302200)资助项目。
② 男,1971 年生,硕士,高级工程师;研究方向:火力发电设备智能运维技术;E-mail: jinjianxin@zjenergy.com.cn。
③ 通信作者,E-mail: shidachuanx@126.com。
(收稿日期:2023-12-24)

器,避免控制器参数转动繁琐和耗时问题。文献[15]提出了一种基于线性二次调节器(linear quadratic regulator,LQR)的智能驾驶避撞轨迹跟踪控制器,通过增加扰动设计避免跟踪时发生碰撞。文献[16]设计了基于神经网络数据学习的自适应权重控制,同时动态调整模型预测(model predictive control,MPC)控制器的横向误差权重和前馈系数,实现了更精确的轨迹跟踪效果。文献[17]针对在高速时路面曲率扰动、反馈抑制不确定性的问题,基于传统 MPC 加入偏航率反馈控制和车辆侧滑补偿,利用基于侧滑与横摆角速度关系设计的运动学模型对预测过程进行修正,并将其化为横摆角速度与当前车速的表达式。近年来一些学者将现有路径规划与机器人结合,如文献[18]结合 A * 算法进行四面体机器人规划,文献[19]结合粒子群算法进行机械臂路径规划研究,文献[20]结合蚁群算法进行自动引导车(automated guided vehicle,AGV)路径导航。

目前大多数运动路径规划、控制算法都基于轮式机器人,且多数运用于汽车的无人驾驶,但推耙机模型并不完备,故以上路径控制算法并不适用。本文针对推耙机模型不完备以及 A * 算法规划出的划路径转折点导致推耙机不能流畅运行的问题,设计了一种智能推耙机的路径规划、控制方法。该方法通过共轭梯度算法平滑路径,结合杜宾(Dubins)曲线减少规划时间,采用模糊横向跟踪控制器减小推耙机跟踪的误差。

1 系统需求及总体框架设计

本文主要解决当前封闭船舱和推耙机清舱存在的缺陷,即封闭煤场和船舱导致高温闷热、空气流动性差,推耙机大功率柴油发动机排出大量的废气和噪声不易扩散;粉尘浓度高,长期在这种恶劣环境下工作会对操作人员的身心健康造成严重伤害,故提出推耙机路径规划、控制方法来解决此问题。从系统软件和硬件结构对系统进行总体方案设计,系统总体框架图如图 1 所示。该系统由感知系统、中控系统、自动清舱系统等多个子系统构成。在路径规划问题中,需要建立环境地图,本系统的感知系统由激光雷达、惯性导航测量仪器和相机为系统提供实时的感知输入从而实时更新路径规划所需要的导航地图,并采用栅格法来建立环境地图。

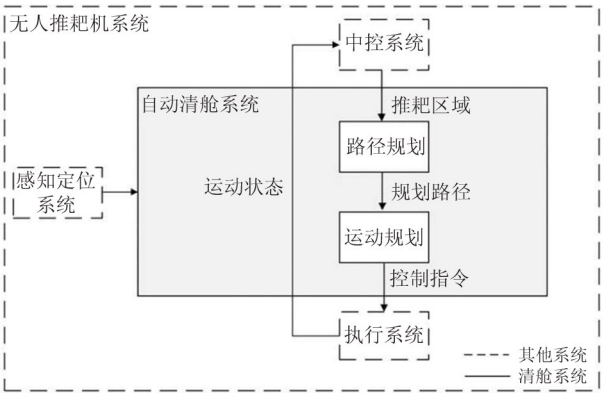

图 1 推耙机控制系统

本系统将油动工程机械改为推耙机,采用工控机作为实时控制的计算单元,可编程逻辑控制器(programmable logic controller,PLC)作为内部执行系统的控制单元,在图 2 搭建的系统中验证无人推耙机规划控制算法。

图 2 无人推耙机

2 系统软件方法

2.1 改进 A * 算法的路径规划

推耙机的路径规划算法不仅要规划出推耙路径中子路径间的行走路径,还要负责规划导航模式下单个目标的轨迹。自动清舱系统将基于传统 A * 算法在栅格地图上搜索路径,并使用共轭梯度法平滑 A * 搜索出的路径,最后用 Dubins 曲线试探到达终点的路径,以尽可能地减少 A * 搜索路径所消耗的时间。

2.1.1 平滑路径的方法

A * 算法是常用的路径规划算法,但是由于栅

格地图是离散的格子,而在执行 A * 算法时会从当前节点向 4 个或 8 个方向来拓展节点,并未考虑到车辆的基本运动学约束,所以最终规划出的路径可能会出现曲率不连续。为了解决传统 A * 算法规划的路径存在转折点而给路径跟踪带来困难的问题,自动清舱系统通过设计共轭梯度下降法来优化 A * 算法生成的离散点路径。共轭梯度下降法是一种常用的优化算法,与传统的梯度下降法相比,共轭梯度法可以更快地收敛到最小值或最大值,同时可避免梯度下降法的振荡和抖动问题。根据共轭梯度下降法的思想,本文设计以下步骤推导平滑路径的算法。

(1) x_i 代表时间步长为 i 的未平滑坐标, y_i 代表时间步长为 i 的平滑坐标,该路径可表示为

$$\begin{cases} x_i = [x, y]_i \\ y_i = [x, y]_i \end{cases} \tag{1}$$

(2)最小化未平滑路径坐标 x_i 和平滑路径坐标 y_i 之间的距离,最小化函数 $G(x, y)$ 的公式为

$$G(x, y) = \| x_i - y_i \|^2 \tag{2}$$

(3)最小化时间步长为时的平滑路径坐标和相邻时间步长下对应坐标的差值,因为终点坐标时的时间步长不连续,最小化函数 $H(x, y)$ 的公式为

$$H(x, y) = \| y_{i+1} + y_{i-1} - 2y_i \|^2 \tag{3}$$

(4) $F(x, y)$ 为总的最小化平滑路径坐标和非平滑路径坐标之间的函数:

$$F(x, y) = \alpha G(x, y) + \beta H(x, y) \tag{4}$$

其中 α、β 为平滑权重、调节路径本身和路径相邻之间的平滑权重。

2.1.2　减少路径规划时间的策略

A * 算法在拓展节点时,若栅格分辨率高,则在搜索阶段将会花费大量的时间,因此,在路径搜索阶段对 A * 算法进行加速是必要的。由于 Dubins 曲线契合在清舱作业时前向路径多的情况,自动清舱系统将基 Dubins 曲线在 A * 算法的节点拓展阶段进行一步到达终点的试探。图 3 是 A * 和 Dubins 相结合在煤舱栅格地图上进行路径规划的流程图。与 A * 算法相比,区别在于本算法在探索节点到达目标点附近时,会用 Dubins 曲线试探从探索节点能否一步到达终点,如果可以一步到达目标点且曲线上无障碍物,则停止 A * 搜索的过程,将已探索的节点和 Dubins 曲线相连接形成一条完整的路径。

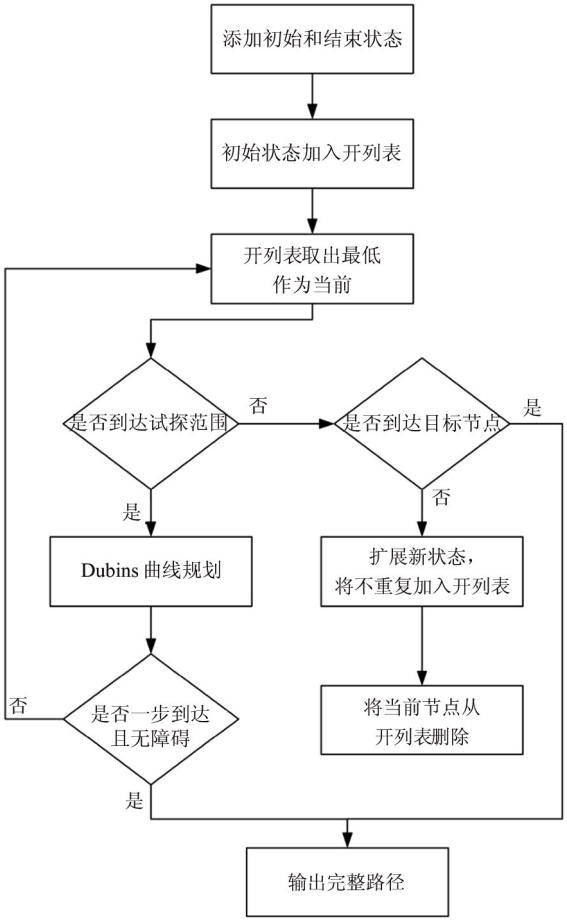

图 3　基于 Dubins 曲线的改进 A * 算法

2.2　推耙机轨迹跟踪方法

在自动清舱系统的路径规划层规划出路径后,推耙机将实时调整控制量以沿着规划的路径进行推耙(推耙机的耙煤作业)或到达目标点。从宏观来看,路径跟踪算法要基于控制对象和业务需求进行针对性的改进;从微观来看,清舱作业要求推耙机尽量保持直线避碰运动,可容许实际跟踪路径与规划路径有一定范围内的误差。另外,在清舱作业时推耙机的停车条件并不一定是到达目标点结束,还可能是达指定坡度就结束跟踪,而且跟踪算法需要控制推耙机进行适当的加减速,以减少推耙作业的总时间并确保安全。为了防止推耙机堆放的散煤过于集中在船舱开口处的某个位置造成推耙作业后退时推耙机由于堆拢散煤形成的煤堆坡障碍从而影响后续推耙作业的问题,结合实际推耙作业的经验对耙铲进行控制,以使散煤形成从甲板到船舱开口方向

的缓坡。对于无人驾驶车辆的控制部分可以归纳为纵向控制和横向控制,设计基于梯形速度纵向控制和基于模糊跟踪的横向控制进行轨迹跟踪。

2.2.1　基于梯形速度的纵向控制设计

推耙机在规划出的路径上进行推耙作业时,路径跟踪算法要实时计算向推耙机输出的控制指令,其中包含对推耙机速度的控制。当推耙机通过路径跟踪算法靠近路径终点时,要尽量减慢速度以减少推耙机惯性带来的误差;另外在距离路径终点较远时适当地提高速度,以缩短推耙作业所需的总时间,提高效率。反之,如果在推耙机行进的过程中保持同一速度,首要问题就是如果速度设置过大,当推耙机在靠进推耙路径终点在调整方向时容易因为速度过大带来的惯性而超调,从而出现大的误差;另外速度设置太小也会增加推耙作业的时间。所以,针对上述分析,对推耙机进行纵向控制是非常必要的。

常见的纵向控制算法有 PID 控制算法、模型预测控制算法、梯形速度规划等算法。在自动清舱系统中,将采用梯形速度规划算法向规划路径加入速度信息,进行路径跟踪时在不同位置取出对应路径点的速度并转换到档位发布给推耙机执行系统,最终完成对推耙机跟踪环节的纵向控制。梯形速度规划的基本思想是在一定时间内,使控制对象从当前速度加速到期望速度,然后再维持一段时间的匀速行驶或直接减速,直到速度为 0 后停车。

为了实现梯形速度规划,自动清舱系统根据推耙机当前跟踪的路径序列、最高速度和加速度通过物理学公式进行计算,得到规划路径上对应路径点的速度,并将速度信息加入到路径点中。具体步骤如以下 4 步。

(1)获取规划路径长度、最高速度 、加速度和推耙机控制时间,因为作业时推耙机起始和结束速度都为 0。

(2)计算加速段距离 S_1、匀速距离 S_2、减速距离 S_3,其计算公式为

$$S_1 = (V_n^2 - V_0^2)/2a \tag{5}$$

$$S_3 = (V_n^2 - V_t^2)/2a \tag{6}$$

$$S_2 = S - S_1 - S_3 \tag{7}$$

其中,V_0 为初始速度、V_n 为期望速度、a 为加速度。

(3)在不存在匀速段的情况下,重新计算加速段距离 S_1 和减速段距离 S_3,计算公式为

$$\begin{cases} S_1 = (2aS - V_0^2 + V_t^2)/4a \\ S_3 = S - S_1 \end{cases} \tag{8}$$

(4)为了对路径点加入速度信息,获取当前路径点到路径起点距离,再计算该点速度,并将增加到该路径点的速度信息中,速度计算公式为

$$V_t = \sqrt{2ad + V_0^2} \tag{9}$$

其中 d 表示距离。

通过上述步骤,就已经将速度信息加入到路径点序列中,但推耙机是档位控制,由 3 挡组成,所以要建立符合推耙机的控制逻辑。当推耙机运动到路径上的某点附近时,取出对应路径点上的速度,假设推耙机的 3 档分别是 M_1、M_2、M_3;在实际作业场景下,测得各档位对应的速度分别为 V_1、V_2、V_3,则可按如图 4所示的映射关系进行档位选择。在路径跟踪时在各个路径点向推耙机发布相应的控制档位,完成推耙机的纵向控制。

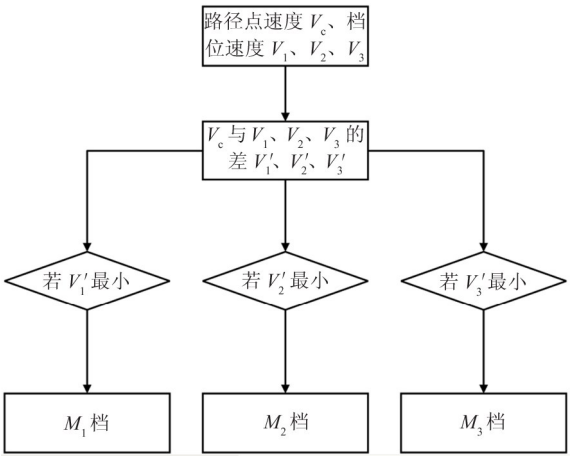

图 4　档位选择

2.2.2　基于模糊跟踪的横向控制设计

当推耙机沿着推耙路径进行推耙作业时,自动清舱系统应当向执行系统发布左、右或直行信号控制推耙机,来减小实际运动路径与规划路径的横向偏差。常用的横向控制算法有 PID 控制算法、模糊控制算法、MPC 预测控制算法。对于结构为双履带轮的推耙机而言,其转向方式为单轨制动转向,即在转向时一侧履带制动,另一侧履带运动来带动车辆旋转。在这种转向方式下,推耙机存在着转向半径,

其运动学模型既不符合单车模型,也不符合差速模型,并且推耙机的控制是离散的左、右和直行信号。针对这种模型不完备且有离散控制特点的推耙机,采用基于模型的 MPC 或 PID 横向控制算法都不太符合推耙机的特性,所以自动清舱系统采用模糊控制算法对推耙机进行横向控制,以人工驾驶经验数据作为专家数据为推耙机计算离散的转向信号。

模糊控制算法是一种基于模糊逻辑理论的控制方法,它将人类经验和知识进行数学建模,并使用模糊后的规则来指导控制系统的行为。与传统横向控制算法相比,模糊控制算法可以处理不确定性和模糊性的问题。推耙机由于实际清舱时存在履带滑移等问题,控制层发布转向指令后,推耙机并不会立即执行该指令,且清舱作业时并不要求跟踪误差很小,即当跟踪器存在横向偏差时还可以继续直行。针对这些不确定性和模糊性的问题,可以将人工经验作为模糊规则来控制推耙机。采用模糊控制算法对转向信号模糊化实现对推耙机的路径跟踪。

基于模糊控制器设计思想的第 1 步,首先分析推耙机的输入和输出变量,人工驾驶推耙机前往目标位置时,在距离目标远且航向偏差小时继续直行,当距离靠近目标或航向偏差大时开始控制推耙机左右转向减小误差,最终到达目标位置。

在推耙机的模糊控制器中输入变量采用如图 5 所示的推耙机与目标点的距离和航向偏差作为输入的模糊语言变量,输出变量是左、右和直行 3 个控制信号。要说明的是推耙机在前往目标点的过程中不需要倒车,所以输出变量的控制信号中没有倒车信号。

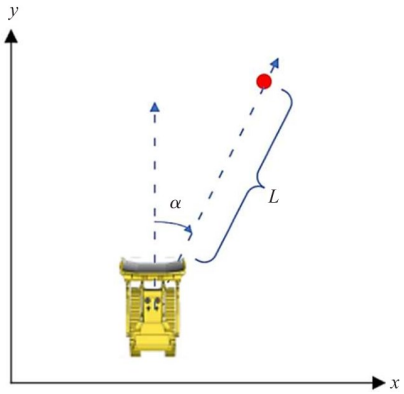

图 5　航向偏差和距离偏差

对于模糊控制器设计思想中第 2 步的隶属度,它是用于表示一个元素或变量对于某个模糊集合的归属程度或可信程度。与之相联系的是模糊集合,模糊集合是一种能够容纳不同程度归属的集合,其对于某个模糊集合的隶属度可以是介于 0 和 1 之间的任意实数,值的大小表示了模糊程度,即对于集合的归属程度。通常,可以用隶属度函数来定义模糊集合中每个元素的隶属度,它将元素映射到一个隶属度值,以此描述元素与模糊集合之间的关系。

自动清舱系统中的模糊控制器采用梯形隶属度和三角形隶属度函数,具体来说模糊语言变量 L 包含 3 个混合的隶属度函数, α 也包含 3 个混合的隶属度函数,转向只包含一个三角形隶属度函数。基于模糊控制器设计思想的第 3 步,如表 1 将输入和输出的模糊变量分别用 3 种状态表示,其中 ND、MD、FD 分别表示近、中、远距离; α 为模糊变量偏差,LH、CH、RH 分别表示偏差为负、偏差不多、偏差为正;转向(turn)的左转、直行、右转分别为 TL、TS、TR。

表 1　推耙机模糊控制规则表

航向偏差	距离偏差		
	ND	MD	FD
LH	TL	TL	TL
CH	TS	TS	TS
RH	TR	TR	TR

3　实　验

本节基于推耙机测试场地对推耙机自动清舱系统中的运动控制算法进行验证。图 6 是推耙机测试基地,该场地由四面围栏模拟出船舱的封闭环境,并且场地内松软的土地也可近似模拟出船舱内散煤的效果。由于在测试时场地内淤泥比较松软,会对运动控制算法产生较大的影响,相比于散煤堆,该实验条件更加苛刻,所以在该场地可以得到实际工作场景下的极限工作条件,也比较容易测试打滑等异常情况下对应的处理策略。在该场景下,下文将对无人推耙机的算法进行验证。该推耙机的能量由可持续作业约 6 h 的磷酸铁锂电池供应,并经永磁电机

向推耙机的履带轮提供动力;经电驱液压控制耙铲升降和倾斜,该推耙机的转向机构为单轨制动转向,即转向时一侧履带轮制动,另一侧履带轮运动来带动推耙机旋转;推耙机的速度由 1 ~3 档的电机档位来进行调节,前进和后退通过电机的前进档和倒退档切换。

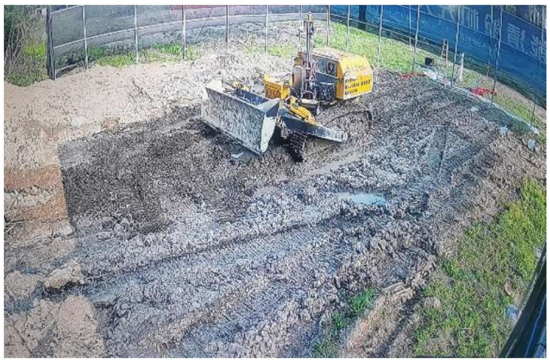

图 6　测试场地

在算力和控制器方面,该推耙机包含一个英伟达 jetson 工控机和 PLC 可编程逻辑控制器模块,PLC 主要用于直接控制推耙机的电机等电器设备。工控机环境为 ubuntu20,在机器人操作系统(robot operating system,ROS)中进行实验数据处理,并采用 rviz 绘制图表及分析数据。表 2 是测试时推耙机的一些实验参数。

表 2　推耙机参数关系

参数	数值
履带轴距离/mm	1 925
最小转弯半径/m	2.7
带推耙铲长度/mm	5 855
带推耙铲宽度/mm	3 020
作业重量/kg	17 600
最大 3 档速度/(km · h^{-1})	9
栅格地图尺寸/m	0.1

3.1　路径规划转折点实验证

本小节实验用围栏搭建的 20 m × 20 m 模拟船舱,在装载机上安装 Ouster 32 线雷达、WHEELTECN100L 惯性导航传感器,分别用来感知;采用 fast-lio2[21] 的算法进行地图构建,图 7 是测试场地生成点云地图。利用点云地图向下投影生成栅格地图,栅格大小的尺寸为 20 × 20 像素,分辨率为 0.1。

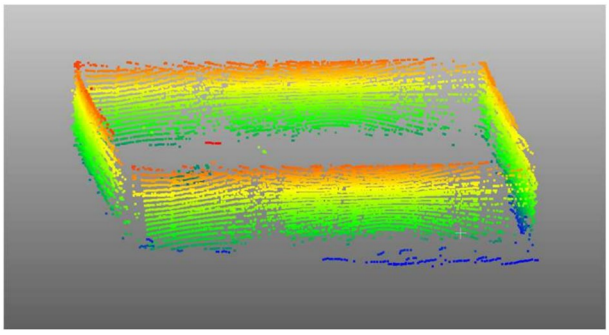

图 7　测试场地点云图

在栅格地图中,设计相同的始发点和终点,并比较不同算法的转折点情况。图 8 所示的曲线是传统 A * 算法搜索出的路径,图 9 中的曲线是有共轭梯度优化的 A * 算法搜索出的路径。图中虚线框为路径的细节放大展示。可以看出,图 8 中的路径中段的转折点明显比图 9 中路径规划算法转折点多,频繁转向不利于机器的实际运行。从实验结果看,基

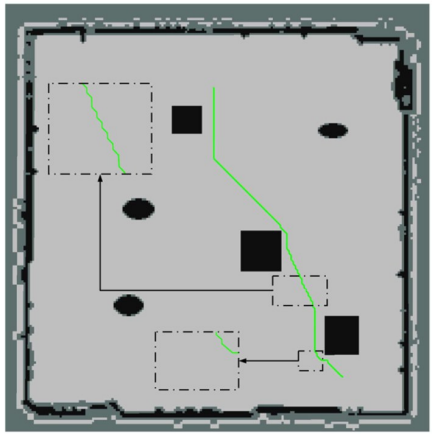

图 8　A * 算法

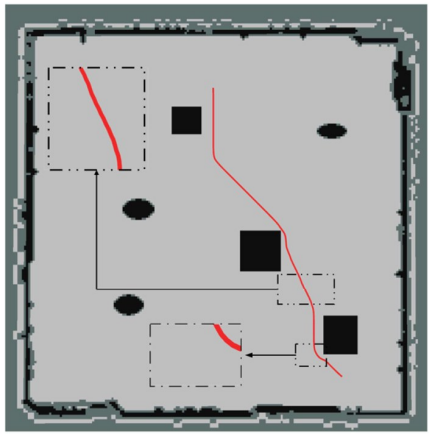

图 9　基于共轭梯度改进的 A * 算法

于共轭梯度改进的 A * 算法路径整体平滑度具有较大提升。

3.2　路径规划时间实验验证

本节采用与 3.1 节同样的实验场景，为了量化 Dubins 算法在 A * 路径规划时减少路径搜索时间的效果，在障碍物地图中选取多个不同的目标点，并分别记录传统 A * 路径规划算法和加入 Dubins 曲线后的改进 A * 路径规划算法在同一起始位置到终点位置情况下进行路径规划所需的时间，以此来验证 Dubins 算法可以减少规划时间的效果。图 10、11 是进行上述实验后 2 种算法对比结果。

从图 10、11 可以看出结合 Dubins 曲线算法的 A * 算法比原有算法路径长度变短了，同时计算速度平均提升 35% 以上，性能大幅提升。

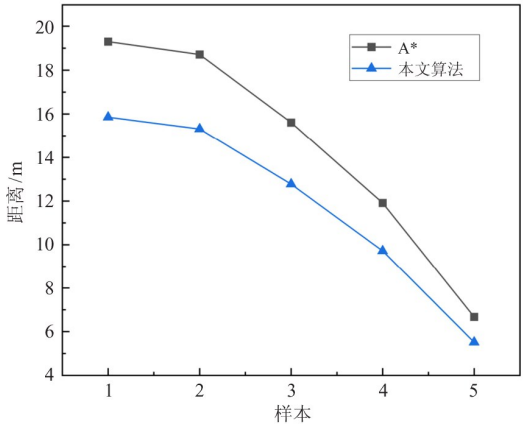

图 10　路径规划长度对比

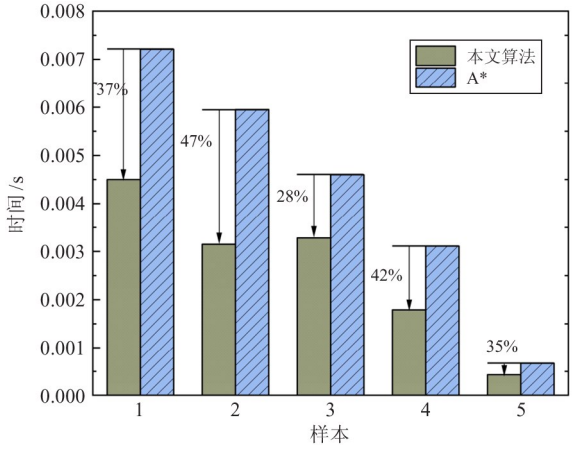

图 11　路径规划时间对比

3.3　轨迹跟踪实验验证

本节利用 3.2 节得到的路径进行路径跟踪实验，根据模糊控制器输出控制变量，将变量的输出给 PLC，从而驱动推耙机运行。结合实际作业时的人工经验和在清舱测试时对模糊控制器参数的调整试探，表 3 展示了本次实验输入变量和输出变量的取值区间以及隶属度函数的关系。

表 3　隶属度函数控制关系

变量	变量	隶属度函数	范围
距离偏差/m	ND	梯形	[0,0,10]
	MD	三角形	[6,12,18]
	FD	梯形	[12,26,40,40]
航向偏差/°	LH	三角形	[-180, -180, -45,5]
	CH	三角形	[-10,0,10]
	RH	梯形	[5,45,180,180]
转向	TL	三角形	[-1.0, -0.5,0.0]
	TS	三角形	[-0.5,0.0,0.5]
	TR	三角形	[0.0,0.5,1.0]

将模糊控制器设置为表 3 所示的隶属度函数，并在推耙机测试场地中运行路径跟踪实验，验证模糊控制器的跟踪效果。图 12 是在地图中不同方向和位置下设定目标点后路径规划和模糊跟踪的效果。由于在实际推耙作业时，对跟踪误差精度的要求并不严格，所以从实际工程角度而言，跟踪路径是符合要求的。

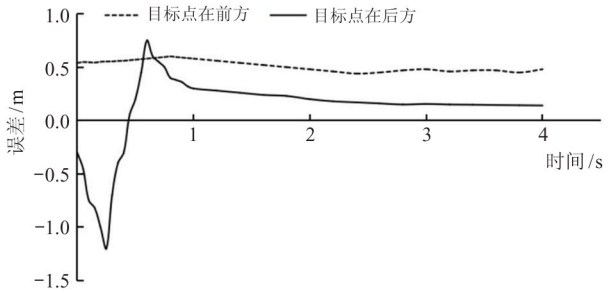

图 12　模糊控制器路径跟踪效果

4　结　论

本文设计并实现了基于 A * 改进的推耙机路径规划与模糊跟踪方法，并在系统设计中进行调试。本文采用共轭梯度算法平滑路径，减少转折点，并结合 Dubins 曲线减少规划时间，实现自动清理船舱内散煤的需求。针对推耙机模型不完备的问题和自动

作业的需求,采用模糊横向跟踪控制器减小推耙机跟踪的误差,并采用梯形速度规划,对推耙机进行平滑的加减速。实验结果表明,所设计的方法速度比 A * 算法平均提升 35% ,路径长度也大幅减少,规划的路径更利于推耙机运行。

参考文献

[1] 金丹, 季有昌, 金山. 推耙机的设计研究[J]. 工程机械, 2013, 44(11): 9-12.

[2] 郭英训. 工程机械装备智能化系统研究[J]. 建设机械技术与管理, 2014, 27(3): 124-129.

[3] 李志国. 我国无人驾驶矿用自卸车发展现状和未来展望[J]. 铜业工程, 2019(2): 5-11.

[4] 史春雪. 海底钴结壳采矿车路径规划主要技术研究[D]. 长沙:中南大学, 2011.

[5] 陈佳怡. 基于自适应 MPC 的无人矿卡轨迹跟踪控制[D]. 徐州:中国矿业大学, 2022.

[6] 高睿. 露天矿区无人驾驶矿车的安全通行辅助决策研究[D]. 重庆:西南大学, 2021.

[7] 吕太之, 赵春霞, 夏平平. 基于同步可视图构造和 A* 算法的全局路径规划[J]. 南京理工大学学报, 2017, 41(3):313-321.

[8] 齐立哲, 苏昊, 华中伟, 等. 一种适用于荒漠复杂地形的全覆盖路径规划方法: 113867355A[P]. 2021-12-31.

[9] 孙嘉明, 刘卫朋, 巩祥瑞, 等. 基于距离抑制向量的机器人动态路径规划方法[J]. 燕山大学学报,2022, 46(5):408-416.

[10] 施杨洋, 杨家富, 布升强, 等. 基于 RRT 改进的智能车辆路径规划算法[J]. 计算技术与自动化, 2019,38(4):81-86.

[11] 高琳琳, 戎辉, 唐风敏,等. 自动驾驶汽车横向运动控制方法综述[J]. 汽车电器, 2019,373(9):1-4.

[12] 缪宝睿. 智能车辆轨迹跟踪控制算法研究[D]. 芜湖:安徽工程大学, 2023.

[13] XU S, PENG H, TANG Y. Preview path tracking control with delay compensation for autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021,22(5):2979-2989.

[14] ZHAO B, WANG H, LI Q, etc. PID trajectory tracking control of autonomous ground vehicle based on genetic algorithm[C]//2019 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Nanchang, China: IEEE, 2019:3677-3682.

[15] JOND H, PLATOS J. A disturbance activation approach to collision avoidance autonomous driving[C]//The 5th Iranian Conference on Signal Processing and Intelligent Systems(ICSPIS). Semnan, Iran: IEEE, 2019:1-6.

[16] WANG H, LIU B, PING X, et al. Path tracking control for autonomous vehicles based on an improved MPC[J]. IEEE Access, 2019,7:161064-161073.

[17] TANG L, YAN F, ZOU B, et al. An improved kinematic model predictive control for high-speed path tracking of autonomous vehicles[J]. IEEE Access, 2020,8:51400-51413.

[18] 王宇斌,沈振军,王昱宸,等. 基于 A * 算法的四面体机器人路径规划研究[J]. 机械传动, 2024,48(2):42-47.

[19] 周振,耿晨晨,崔若庚,等. 基于改进融合蚁群算法的 AGV 路径规划[J]. 计算机仿真, 2024, 41(4): 441-445.

[20] 周伟. 基于粒子群算法的机械臂轨迹规划研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2022.

[21] XU W, CAI Y, HE D, et al. Fast-lio2: fast direct lidar-inertial odometry[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2022, 38: 2053-2073.

Improved bulldozers path planning based on A * algorithm and fuzzy tracking method

JIN Jianxin*, SHI Dachuan**, GUO Wei**, ZHANG Biao**

(*Zhejiang Zheneng Jiahua Power Generation Co. Ltd., Jiaxing 314201)

(**Hangzhou Dengyuan Technology Co, Ltd., Hangzhou 311215)

Abstract

The bulldozer is a part of construction machinery and equipment, commonly used in large and medium-sized freight terminals, mines, power plants, and other locations to clean up bulk cargo. It plays a crucial role in improving the efficiency of production activities. However, traditional manual operations face challenges such as high physical exertion and harsh working environments. To tackle these challenges and accomplish automated operations, this paper utilizes the conjugate gradient algorithm to smooth the path for solving the problem of excessive turning points in the A * algorithm-planned path, resulting in smoother operation. Additionally, the Dubins curve is incorporated to reduce planning time. To address incomplete modeling and meet the requirement for automatic operation, a fuzzy tracking controller is employed to minimize tracking errors. The automatic system has been tested in real-world environments with promising results: compared with the A * algorithm, there is an average increase of over 35% in path planning speed while maintaining control error within acceptable limits.

Key words: bulldozer, engineering machinery equipment, motion control, path tracking, cargo terminal