

基于RRT*算法和多姿态碰撞检测的无人工地 多机协同路径规划研究

王希云¹, 黄鹏¹, 李鲧², 罗如平², 罗文俊²

(1. 国能包神铁路集团有限责任公司, 内蒙古 包头 014040; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:针对现有无人工地路径规划技术对施工设备几何与运动特征考虑不足,且缺乏多机协同机制的问题,提出一种基于改进RRT*算法的多机协同路径规划方法。首先,将行走设备在俯视平面内设定为具有普遍性的矩形,利用分离轴定理和向量叉积等手段提出了矩形设备在直线行进和旋转过程中与障碍物的碰撞检测方法;其次,引入时间窗机制与时空域协同规划框架,设计了“行进-行进”与“行进-旋转”两类动态冲突检测流程,解决了多设备协同作业中的即时避碰问题;最后,将该算法应用于隧道及梁场等复杂场景中进行仿真验证。结果表明:所提算法规划的路径考虑了真实设备的形状、尺寸、转向角约束以及障碍物的形状、尺寸、分布,相比传统算法,有效解决了大长宽比设备在狭长空间内的避障难题,显著提升了复杂受限环境下的路径搜索成功率与鲁棒性;另外构建的时空域协同规划框架确保了多设备在复杂工地环境中安全、有序、高效地行驶或作业;该研究不仅验证了算法在隧道、梁场等真实工程场景中的适用性,也为未来实现无人工地机群的智能化、高效化协同作业提供了重要的理论依据与技术支持。

关键词:无人工地;路径规划;快速扩展随机树;碰撞检测;多机协同

中图分类号:U455

文献标志码:A

Research on Multi-Machine Collaborative Path Planning for Unmanned Construction Sites Based on RRT* algorithm and Multi-Posture Collision Detection

Wang Xiyun¹, Huang Peng¹, Li Jie², Luo Ruping², Luo Wenjun²

(1. Guoneng Baoshen Railway Group Co., Ltd., Baotou 014040, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To address the limitations of existing path-planning methods applied to unmanned construction site, particularly their insufficient consideration of equipment geometry and kinematic characteristics, as well as the absence of effective multi-machine coordination, this study proposes a cooperative path-planning approach based on an improved RRT* algorithm. First, mobile construction equipment is modeled as the generalized rectangle in the top-down plan, and collision-detection strategies for both linear motion and rotational motion are developed using the separating axis theorem and vector cross-product operations. Second, a time-window mechanism and a spatiotemporal coordination framework are introduced to design two types of dynamic conflict-detection

收稿日期:2025-10-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB2603900);江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2400506);江西省职业早期青年科技人才培养项目(20244BCE52140)

tion procedures, namely “straight-line-straight-line motion” and “straight-line-rotation motion”, enabling real-time collision avoidance among multiple machines. Finally, the proposed algorithm is validated through simulations in complex scenarios such as tunnels and beam fabrication yards. The results demonstrate that the planned paths fully account for the actual equipment geometry, dimensions, rotation constraints, and obstacle characteristics (shape, size, and distribution). Compared with conventional algorithms, the proposed method effectively resolves the challenge of obstacle avoidance for large length-width ratio equipment operating in narrow spaces, significantly improving path-search success rates and robustness in complex environments. Furthermore, the constructed spatiotemporal collaborative planning framework ensures that multiple machines can safely, orderly, and efficiently move or operate in complex construction site environments. This research not only verifies the applicability of the algorithm in real engineering contexts, such as tunnels and beam yards, but also provides essential theoretical and technical support for future intelligent and efficient multi-machine collaboration in unmanned construction sites.

Key words: unmanned construction site; path planning; rapidly-exploring random tree; collision detection; multi-machine collaboration

随着智能建造与无人化施工技术的快速发展,无人工地成为工程建设领域的重要发展方向。多台自主作业设备协同运行是实现无人化施工的关键环节,其核心问题之一是如何在复杂、动态的约束条件下实现多机系统的高效、安全路径规划^[1]。与传统工业机器人不同,无人工地中的设备体型大、运动惯量大、作业空间受限,同时需考虑施工安全与设备间的交互协同,因而对路径规划算法的精度、实时性和安全性提出了更高要求。因此在存在多障碍物和多车辆协同的场景中,建立高精度碰撞模型与时空域避碰机制,对提升无人施工系统的自主作业能力与运行安全具有重要的理论意义和工程价值。

近年来,面向复杂环境下的路径规划研究呈现出两类主要的发展脉络。一类是基于采样的随机规划方法及其改进,例如快速扩展随机树(RRT)算法^[2-4]、概率路线图(PRM)算法^[5-7]等,因为其概率完备性和对高维及复杂约束的良好适应性而被广泛采用^[8],在此方向上,通过双向生长、启发式采样、局部加速采样等技术来提升搜索效率与路径质量,例如Wang等^[9]提出起点和目标点同时生长两棵树的Bi-RRT算法以提高寻路速度,Wang等^[10]针对行驶设备穿越狭窄困难区域的特定场景,在信息增强快速随

机树(Inform-RRT)算法基础上引入局部环境信息加速策略以减少无效采样。另一类是将经典网格/图搜索或最短路径方法与工程约束结合的混合方法,例如Zhang等^[11]针对考虑平纵断面设计的道路选线问题将二维A*算法扩展到三维以同时纳入纵断面、坡度等工程约束,或将规划算法与风险代价模型结合,用于具有安全风险考量的场景^[12-14]。

在路径规划算法的应用层面,针对工程场景的研究也较为丰富。早期PRM或专用优化算法被应用于起重机、吊装规划时空路径^[5,15],进一步有学者采用并行遗传、主从并行等方法以提高复杂起吊场景的规划速度^[16]。近年来,路径规划模块也逐渐被纳入工程信息化建模(BIM)或逆向工程建模领域^[17],例如Zhu等^[18]利用非支配排序遗传算法(NSGA-II)为BIM建模时的数据采集需求规划了三维激光扫描路径,该算法兼顾了路径可行性与扫描完整性的需求,Chen、Dashti等^[19-20]则利用BIM模型信息通过路径规划算法为无人车辆规划行驶路径,并由物理引擎仿真模拟检验了路径效果,提高了施工的安全性与管理效率。尽管上述路径规划工作在算法效率、工程约束优化集成上取得了诸多进展,但仍有若干共性短板制约其在“无人工地”场景下的直接工程化应用。首先,现有大部分方法在俯视平面仍

以点、圆来近似设备几何形状,忽略了常规矩形设备长宽及转向过程中的扫掠空间;从算法层面看,如何在RRT*随机扩展的每一次迭代中,高效地解算转向角限制下矩形刚体的直线行进和连续旋转包络与非结构化环境的几何相交关系,是平衡搜索速度与避障精度的关键难点。其次,将高精度几何占据模型与时间轴耦合的研究仍较少,多机协同并非简单的路径叠加,其本质是一个多主体、动态约束满足问题,解决高密度作业区内“行进-旋转”复合动作下的时变冲突检测是实现多机协同路径规划的核心。

针对上述问题,本文提出一种基于高精度碰撞模型的无人工地多机协同路径规划方法。该方法以改进的RRT*算法为核心,融合车辆几何参数与转向角约束,建立可真实反映设备运动特性的高精

度碰撞模型;通过引入分离轴定理判定与向量叉积判定机制,实现车辆直行与旋转阶段的精确避碰;进一步结合时间序列同步与动态避障判断,构建多机系统的时空域协同规划框架。最后,通过仿真实验验证该方法在复杂工地环境中实现多设备安全、协同、高效作业的可行性与优越性。

1 问题描述与技术路线

本文主要解决无人工地场景下多台自主移动施工设备的路径规划问题,在传统RRT*路径规划算法的基础上,通过引入考虑设备形状尺寸的静态高精度碰撞检测和多机协同时间窗机制作为其空间域和时间域的约束模块,形成“全局搜索-局部精细判定-时空协同约束”三位一体的技术框架。研究思路如图1所示。

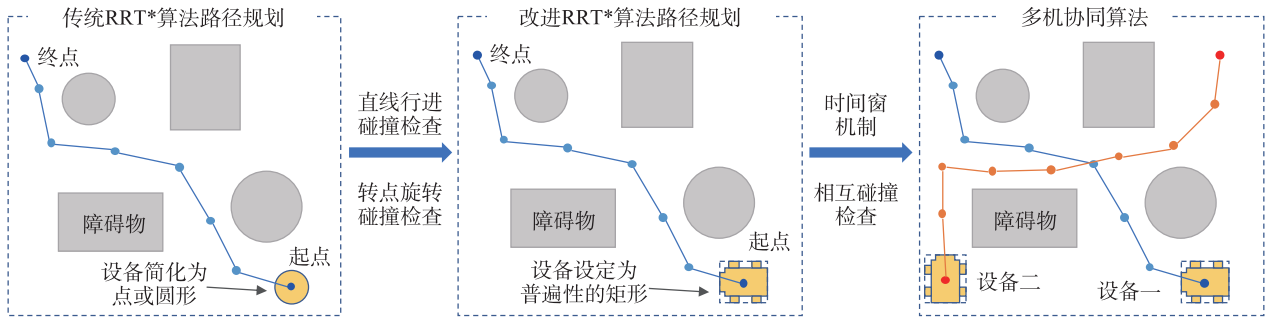


图1 研究技术路线图

Fig. 1 Research technology roadmap

2 工地场景单设备全局最优路径规划算法

本文基于RRT*随机采样算法的原理,为单台移动设备规划最优行走路径。整个算法的执行过程可概括为以下几个阶段:“路径树初始化-随机点生成-最近节点搜索-路径扩展尝试-避障检测-节点更新-父节点重新选择-局部重连优化-目标判定与终止条件”。其具体步骤如下所述:

1) 路径树初始化:为单台设备定义起点 $P_{initial}$ 、终点 P_{final} 、单次行走距离 D 以及障碍物区域。在起点处建立路径树的根节点,作为后续搜索的起始基础。

2) 随机点生成:在允许的行走空间中随机生成采样点 P_{rand} 。该点的位置由设备的可达区域和障碍物约束共同决定,用以引导路径树向未探索区域扩展。

3) 最近节点搜索:计算 $P_{nearest}$ 与现有路径树中所有节点的距离,并选择距离最小的节点 $P_{nearest}$ 作为潜在的父节点。

4) 路径扩展尝试:从 $P_{nearest}$ 出发,沿着指向 P_{rand} 的方向延伸一段预设长度 D ,得到一个候选的新节点 P_{new} ,形成新的路径段 $P_{nearest} \rightarrow P_{new}$ 。

5) 避障检测:对新生成的路径段进行障碍物碰撞检测,包括直线行进过程碰撞检查、旋转过程碰撞检查,将路径与障碍物的最小距离与设备尺寸进行比较,以判断该路径是否存在碰撞风险。

6) 节点更新:若检测结果显示路径安全无碰撞,则将 P_{new} 加入路径树,并将其父节点设为 $P_{nearest}$,如图2(a)所示。

7) 父节点重新选择:在 P_{new} 周围半径为 R 的邻域内搜索已有节点,计算各节点经由不同父节点到达 P_{new} 的总代价。若某一节点 P_{short} 能使路径更短且

利用步骤5判断新路径段($P_{\text{short}} \rightarrow P_{\text{new}}$)无碰撞风险,则确定 P_{short} 为 P_{new} 的新父节点,如图2(b)所示。

8) 局部重连优化:以 P_{new} 为中心,将其作为父节点对其邻域内的其他节点 P_k 进行扩展尝试,若某节点通过与 P_{new} 连接后能使整体路径距离缩短,且无碰撞风险,则更新 P_k 的父节点为 P_{new} ,从而进一步优化路径结构,如图2(c)所示。

9) 目标判定与终止条件:在路径树逐步扩展的过程中,持续判断当前新节点 P_{new} 与终点 P_{final} 之间的距离,若大于设定阈值 D_s ,则重复步骤2)~步骤8)。当该距离小于设定阈值 D_s 时,认为设备已接近目标点,算法停止迭代,并将终点与最近节点相连,形成最终路径,如图2(d)所示。

根据工地场景的实际情况,本文考虑了规划区间内障碍物的形状、大小、分布,在如图2所示的俯视平面内,障碍物的形状有圆形和矩形两类,其中圆形障碍物的分布和大小由其圆心位置 O_c 和半径

R_c 决定,矩形障碍物的分布和大小由其中心位置 O_r 、长 L_r 、宽 W_r 决定。

另外,还考虑了行走设备的形状与运动姿态,其中俯视二维平面内设备形状设定为矩形,其几何参数由长 L_v 、宽 W_v 决定,运动姿态则主要包括行进和旋转两种姿态,前者是指设备由父节点向子节点直线行走过程,而后者是指设备在途经点由前一段行进方向 n_1 转至后一段行进方向 n_2 的旋转过程,根据真实车辆的旋转情况, n_1 转至 n_2 的夹角需小于 180° ,以此作为行走设备的转向角约束。设备行进过程与障碍物的碰撞检查如图3所示,设备由 P_{pk} 点行进至 P_{new} 点,其外轮廓线扫略形成一个矩形包络线,若该包络线与障碍物无交集,则判定行进过程无碰撞。设备旋转过程与障碍物的碰撞检查如图4所示,设备由 n_1 转至 n_2 时,其外接矩形角点会形成圆弧段,若该圆弧段与障碍物无交集,则判定旋转过程无碰撞。

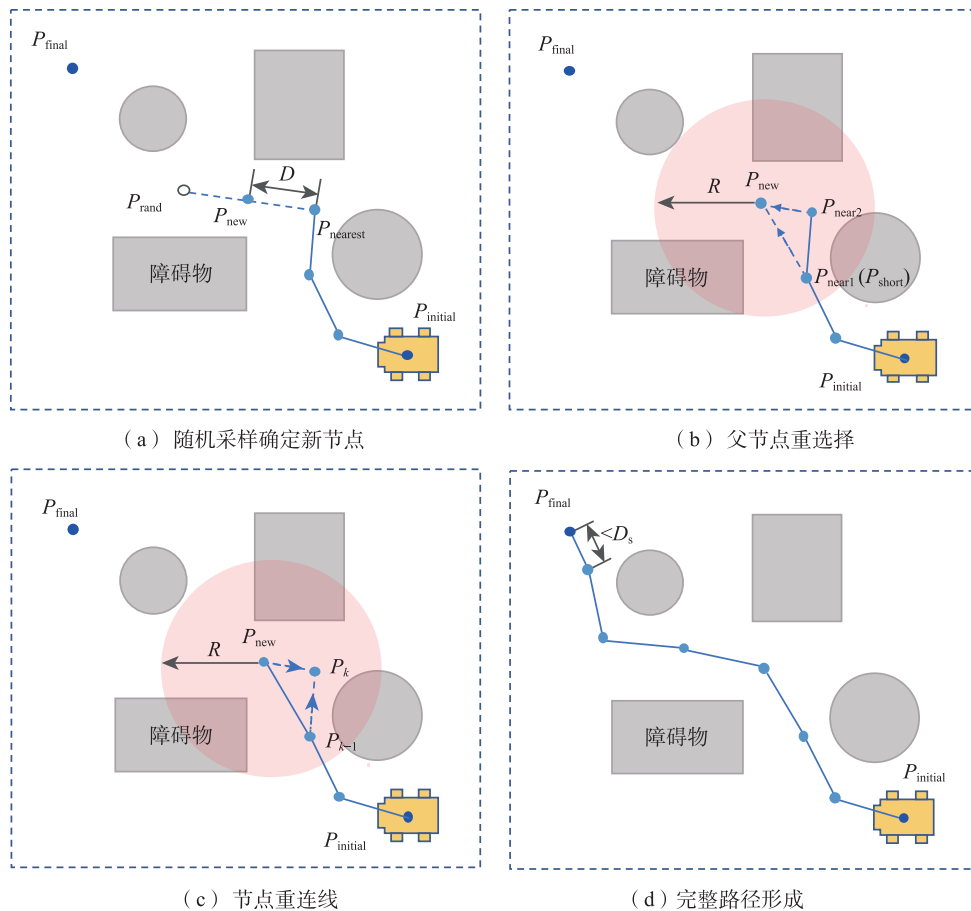


图2 单设备行走最短路径搜索流程

Fig. 2 Search process of shortest path for single equipment movement

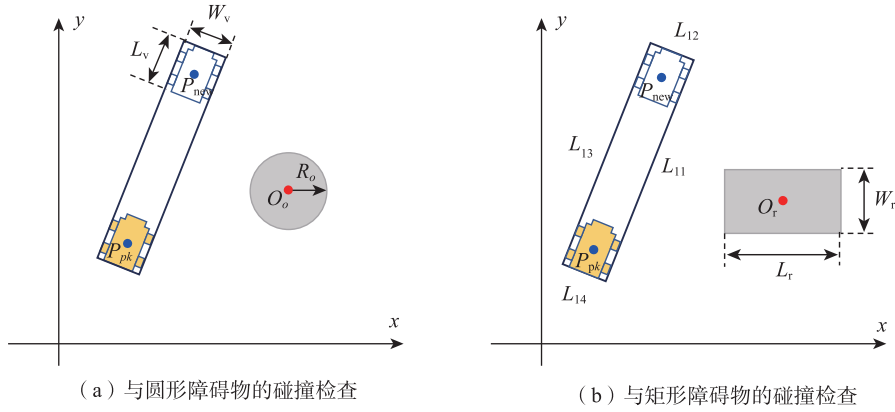


图3 设备行进过程与工地场景内障碍物的位置关系

Fig. 3 Relationship between equipment's straight-line motion and obstacles in the construction site

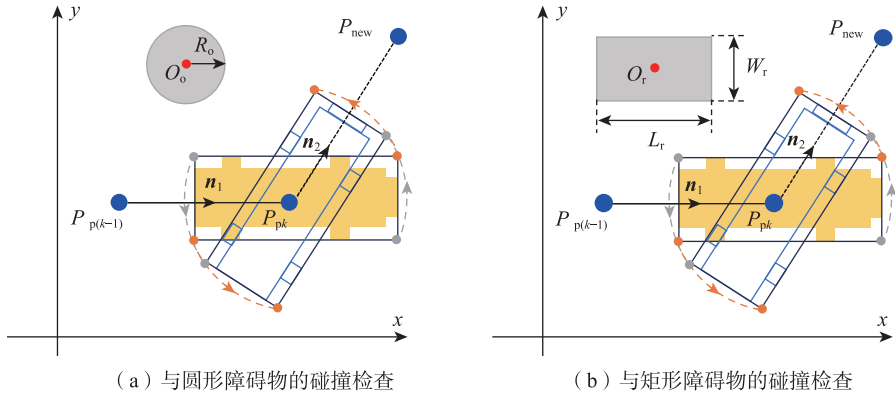


图4 设备旋转过程与工地场景内障碍物的位置关系

Fig. 4 Relationship between equipment rotation and obstacles in the construction site

3 静态碰撞检查方法

3.1 行进过程与圆形障碍物碰撞检查

为实现如图3(a)所示的碰撞检查,需要提出圆形与矩形相交的判定方法。首先确定行进矩形框内与长边平行且经过矩形中心的对称长轴线段,然后在该线段上找出距离障碍物圆心 O_o 最近的点 P_v ,当 O_o 与 P_v 的距离大于 $R_o+W_v/2$ 时,可判定两者无相交,即判定公式如式(1)所示

$$|O_o P_v| > R_o + W_v / 2 \quad (1)$$

根据圆形障碍物圆心到矩形框对称长轴的垂直点的位置不同, P_v 的取点有3种情况,如图5所示。当垂直点在对称长轴线段上时, P_v 点即为垂直点,如图5(a)所示;当垂直点在长轴线段范围外且位于行进方向前方时, P_v 点为矩形框前沿宽边中点,如图5(b)所示;当垂直点在长轴线段范围外且位于行进方向后方时, P_v 点为矩形框后沿宽边中

点,如图5(c)所示。

3.2 行进过程与矩形障碍物碰撞检查

为实现如图3(b)所示的碰撞检查,需要提出矩形与矩形的相交判定方法,本文采用分离轴定理作为判定机制。首先选取任意一个矩形的任意一条边,确定与该边垂直且经过原点的轴作为分离轴,然后确定两个矩形在该轴上的投影,若两个投影区间没有交集,则可以判定两个矩形没有相交,如图6所示。在该图中,分离轴 x_{11} 垂直于行进矩形框的 L_{11} 边,而两个矩形在该轴上的投影分别为投影区间1和投影区间2,两者没有交集则说明两个矩形未相交。若在 x_{11} 轴上的两个投影区间存在交集,则更换分离轴,当两个矩形在针对所有边(L_{11} 、 L_{12} 、 L_{13} 、 L_{14} 、 L_{21} 、 L_{22} 、 L_{23} 、 L_{24})的分离轴上的投影均存在交集时,则说明两个矩形相交,否则不相交。

3.3 旋转过程与圆形障碍物碰撞检查

为实现如图3(c)所示的碰撞检查,需要提出圆

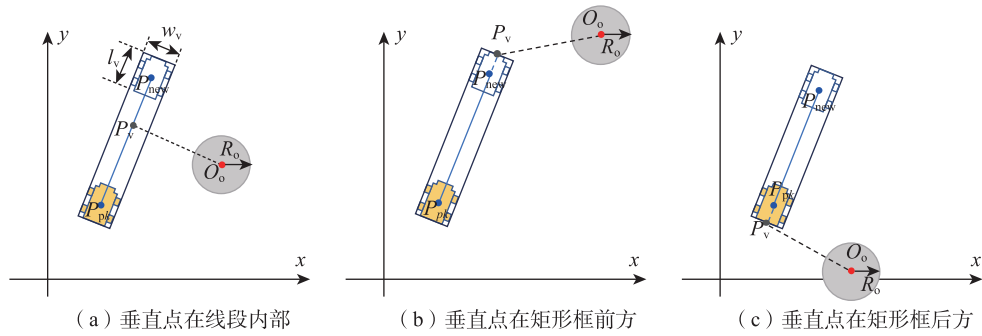


图5 圆形障碍物与设备行进矩形框不同位置关系下P点的确定

Fig. 5 Determination of point P, for circular obstacles at different positions relative to the equipment's straight-line motion rectangle

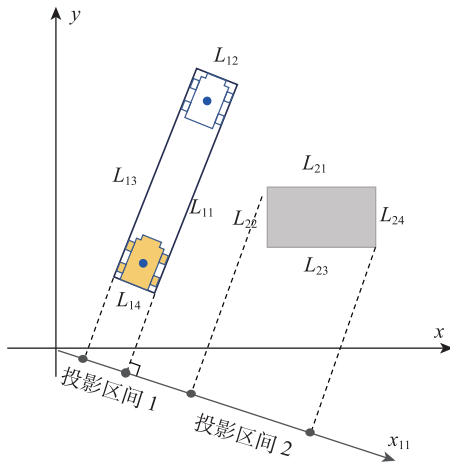


图6 分离轴定理示意图

Fig. 6 Diagram of the separating axis theorem

弧与圆形的相交判定方法,其具体执行步骤如图7所示,描述如下。

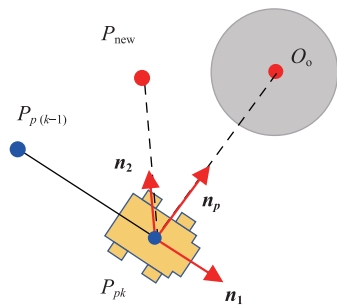
1) 碰撞范围的初步判断:首先判断圆形障碍物与设备的“旋转碰撞圆”是否存在重叠区域。若两者无交集,则认为设备旋转过程中不存在碰撞风

险;反之,则需进入下一阶段进行圆弧碰撞分析。旋转碰撞圆的半径 r 定义为设备旋转中心至外轮廓最远点的距离。以矩形设备为例,该半径即为旋转中心至设备角点的长度,如式(2)所示

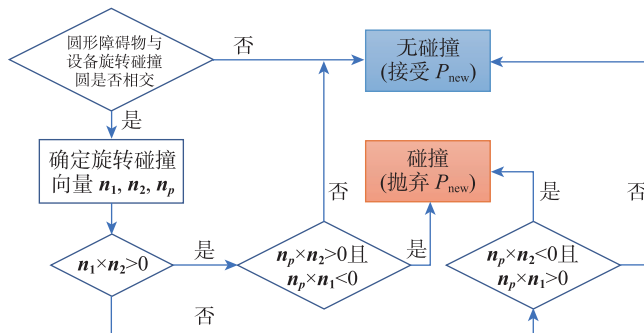
$$r = \frac{\sqrt{W_v^2 + L_v^2}}{2} \quad (2)$$

2) 旋转碰撞向量集的确定:依据设备当前节点、父节点、新节点以及障碍物中心的位置,分别计算出旋转前方向向量 n_1 、旋转后方向向量 n_2 ,以及设备中心到障碍物中心的连线向量 n_p ,如图7(a)所示。其中, P_{pk} 为当前节点, $P_{p(k-1)}$ 为 P_{pk} 的父节点, P_{new} 为采样点, O_o 为障碍物中心点,所以 n_1 由 $P_{p(k-1)}$ 指向 P_{pk} , n_2 由 P_{pk} 指向 P_{new} , n_p 由 P_{pk} 指向 O_o 。

3) 判断旋转方向与旋转碰撞:利用向量叉积方法,分别对顺时针与逆时针旋转过程进行碰撞判断。以图7为例,若 $n_1 \times n_2 > 0$,则说明设备在 P_{pk} 点由 n_1 转至 n_2 需要逆时针旋转,此时如果 $n_p \times n_2 > 0$ 与 $n_p \times n_1 < 0$ 同时成立,说明设备在逆时针旋转过程中将与障碍物相交,此时抛弃采样点 P_{new} 。同理,若 $n_1 \times n_2 < 0$,则



(a) 旋转碰撞向量集中各向量示意图



(b) 旋转碰撞检测流程

图7 设备旋转避障原理

Fig. 7 Obstacle avoidance principle for equipment rotation

说明设备在 P_{pk} 点由 n_1 转至 n_2 需要顺时针旋转,此时如果 $n_p \times n_2 < 0$ 与 $n_p \times n_1 > 0$ 同时成立,则同样存在碰撞风险,此时抛弃采样点 P_{new} 。顺/逆时针判定逻辑与向量叉积检测转向碰撞流程如图7(b)所示。

4) 旋转方向的碰撞结果:设备按照步骤1)~步骤3)遍历与所有圆形障碍物的检测,若可通过旋转碰撞检测,则认为该新节点 P_{new} 可安全加入路径树。

3.4 旋转过程与矩形障碍物碰撞检查

为实现如图3(d)所示的碰撞检查,需要提出圆弧与矩形的相交判定方法。该方法的实施与图7基本类似,唯一的区别在于步骤1)中需确定矩形障碍物与设备的“旋转碰撞圆”是否存在重叠区域,相应的判定的方法可以采用与3.1节中所述的圆形与矩形的相交判定方法。

4 多机协同碰撞检查方法

在无人化施工场景中,多个作业设备通常会同时执行任务,因此路径规划不仅要避免与静态障碍物的碰撞,还需考虑设备之间的动态交互,以确保多设备在共享作业空间中能够安全运行而不发生相互干扰。由于施工任务往往存在前后工序的时序差异,本文假设先行设备的运行路径已确定,在此基础上,通过优化后续设备的路径规划来实现整体的无碰撞协同作业。多机协同避障的具体实现步骤如下所述。

1) 生成路径时间序列:为每个路径点引入时间维度,如图8所示,以点 P_{pk} 为例,该点的时间维度表示为时间对 $(t_{1(2k-1)}, t_{1(2k)})$ 的形式,其中 $t_{1(2k-1)}$ 为设备一由 $P_{p(k-1)}$ 点行走至 P_{pk} 点的时刻,其表达如式(3)

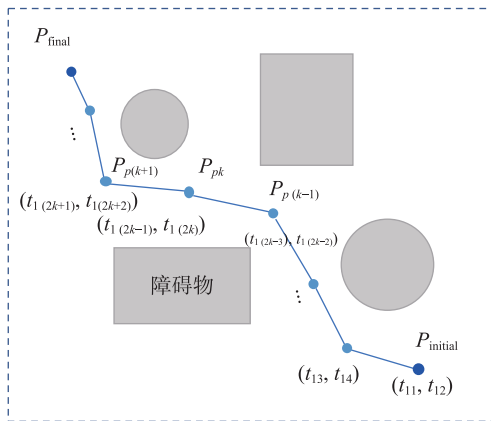


图8 路径时间序列

Fig. 8 Time sequence along the path

所示,其中 v 为设备的行进线速度, $t_{1(2k)}$ 为设备一在 P_{pk} 点方向由 n_1 转至 n_2 的时刻,其表达式如式(4)所示,其中 w 为设备的旋转角速度。其中 $t_{1(2k-1)}$ 的大小由 P_{pk} 点的父节点决定, $t_{1(2k)}$ 的大小由子节点的位置决定。每个路径点的时间对组成整条路径的时间序列。

$$t_{1(2k-1)} = t_{1(2k-2)} + |P_{p(k-1)}P_{pk}|/v \quad (3)$$

$$t_{1(2k)} = t_{1(2k-1)} + \arccos \frac{n_1 \cdot n_2}{|n_1| |n_2|} \cdot \frac{1}{w} \quad (4)$$

2) 行进路径碰撞检查:在前置设备的行进路径已确定的条件下,后置设备在规划自身路径时可能会出现与已存在路径局部交叉的情况,如图9所示。此时,为避免路径重叠引发的潜在冲突,需要判断后置设备在交叉区域内是否与前置设备在时间维度上存在重叠。假定设备一(前置设备)在该交叉段上的运动时间区间为 $[t_{11}, t_{12}]$,设备二(后置设备)的时间区间为 $[t_{21}, t_{22}]$ 。若两时间段存在交集,则认为设备二存在与设备一发生碰撞的风险。因此,在多机协同路径规划的流程中,首先需检测后置设备的路径是否与前置设备路径发生空间交叉。若两路径在空间上互不重叠,则路径树可按常规扩展;若检测到空间交叉,则进一步判断两设备在该区域内的时间窗口是否重叠;若时间区间互不重叠,亦可视为安全;但若空间与时间交集同时存在,则意味着潜在的路径碰撞,应舍弃后置设备在该处生成的节点。

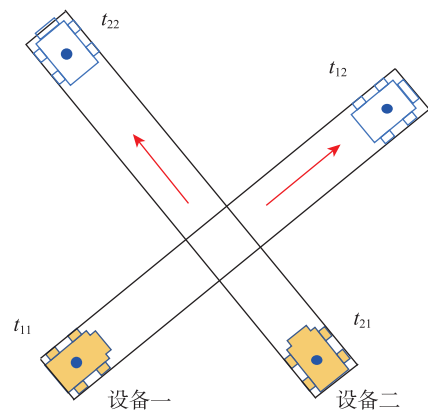


图9 前后设备行进路径交叉情况

Fig. 9 Intersection of the straight-line motion paths of the front and rear equipment

3) 行进-旋转碰撞检查:在前置设备路径已规划的前提下,后置设备在当前节点处旋转时可能会出现刚好位于前置设备路径途中的情况,如图10所

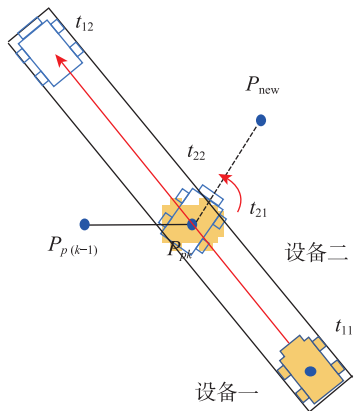


图10 前后设备行进-旋转交叉情况

Fig. 10 Intersection between the straight-line motion path of the front equipment and the rotation of the rear equipment

示,此时需分析后置设备的旋转过程与前置设备的运动过程在空间位置与时间分布上是否产生重叠。设前置设备经过该路段的时间区间为 $[t_{11}, t_{12}]$,后置设备在该节点旋转的时间区间为 $[t_{21}, t_{22}]$,若两区间存在时间重叠,则说明两设备在此阶段存在碰撞风险。在多机协同路径规划中,为避免这种行进-旋转干涉,首先判断后置设备因新节点 P_{new} 的选取而引发的旋转,其旋转覆盖空间是否与前置设备路径发生交叠。若空间上相互独立,则路径树正常扩展;若存在空间重叠,则继续判定两者在该位置上的时间区间是否存在重合;若时间无交集,则仍可安全通过;但若空间与时间重叠并存,则视为存在碰撞可能,应舍弃该后置设备的新节点 P_{new} 。

4) 旋转-行进碰撞检查:前置设备的运行路径已确定的前提下,后置设备的行进路径可能会

途经前置设备的旋转处,这类情况与图10类似,因此采用与步骤3)相同的判定方法决定新节点 P_{new} 的取舍。

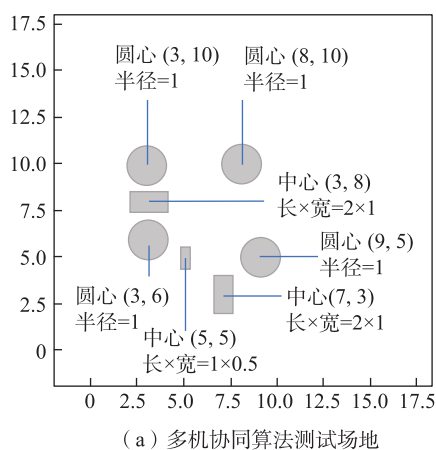
5) 多机协同碰撞结果:后置设备按照步骤2)~4)方法检测在 P_{new} 的影响下,新行进段与当前节点的旋转是否与所有前置设备所规划的路径发生碰撞,若通过检测,则 P_{new} 可添加到路径树中。

值得注意的是,本节所述的多设备协同路径规划的动态避障检查需放置于第3节所述路径规划算法的步骤5)与步骤6)之间作为后置设备是否添加新节点的判定依据补充,此时,判定依据包括行进避障、旋转避障、多机协同动态避障三部分。另外,前述路径规划算法的步骤7)与步骤8)中的碰撞检查同样也需补充多机碰撞风险检查。

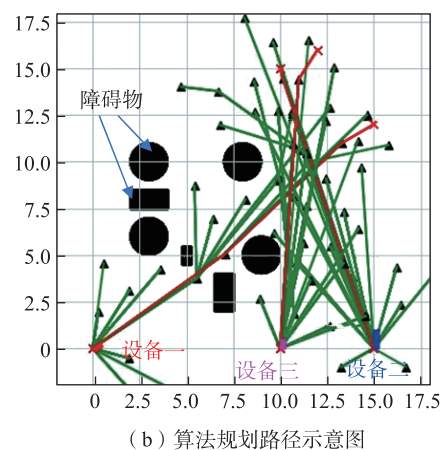
5 算法效果检验

5.1 多机协同路径规划效果

此处设定采样区间为 $x \in [-2, 18]$ 、 $y \in [-2, 18]$,场地内障碍物有圆形和矩形两种,障碍物的尺寸如图11(a)所示。行走设备个数设为3个,其长宽分别为 $1.0 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 、 $2.0 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 、 $1.0 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$,出发起始时间分别设定为0、5、10 s,起点分别为 $[0, 0]$ 、 $[15, 0]$ 、 $[10, 0]$,终点分别为 $[15, 12]$ 、 $[10, 15]$ 、 $[12, 16]$,设备的行进线速度 v 设为 1 m/s ,旋转角速度 w 设为 $18^\circ/\text{s}$,考虑场地范围此处将 D_s 与 D 均设定为 2 m ,父节点搜索半径 R 设定为采样点个数 N 的函数,如式(5)所示^[2]。本文在python环境下对所提算法进行代码编写,依照算法思想通过不断迭代采样与碰撞检查,最终规划的路线如图11(b)所示。可以看出3台设



(a) 多机协同算法测试场地



(b) 算法规划路径示意图

图11 多机协同路径规划代码测试效果

Fig. 11 Multi-machine collaborative path planning code test results

备均以较短的行程行至终点,并有效地避免了与既有障碍物以及设备彼此之间的碰撞,证明了算法的有效性。另外,值得注意的是,图11中设备3在靠近终点处存在一个“多余”的采样点,这导致路径长度与理想中的长度(设备三的起点与终点直接连线长度)稍长,实际上,这是由于在RRT*算法的最后一步“目标判定与终止条件”设定当采样点 P_{new} 与终点 P_{final} 之间的距离小于 D_s 且通过碰撞检查,则迭代结束并直接连线 P_{new} 与 P_{final} 。因此设备3终点附近的“多余”采样点是判定路径接近终点并得到最终路径的必要一步,虽然这可能造成设备在终点附近出现稍许多余的路途,但RRT*算法中“父节点重新选择”和“局部重连优化”两个步骤仍能保证路径长度整体较短,另外,通过设置合适的 D_s 可以使规划路径趋近于最优路径。

$$R = 50 \times \sqrt{\frac{\ln N}{N}} \quad (5)$$

5.2 隧道场景下的算法应用

本文将前述路径搜索算法应用于钻爆法隧道场景,并着重针对掌子面后方50 m范围内带栈桥的区段进行路径规划,其中栈桥段长度设定为5 m,隧道内路面宽度为12 m,并建立如图12(a)所示的坐标域。因此在该场景下,栈桥的特殊结构和隧道内的障碍物则是影响其路径的关键因素。其中,隧道内的障碍物可能是其他设备、固定设施或者临时构建的障碍物,而栈桥的设计和结构要求设备沿着指



图12 掌子面附近栈桥区段
Fig. 12 Stack bridge segment near the tunnel face

定路径行驶。

针对该场景中栈桥特点,为保证设备能顺利通过栈桥,此处将整个路径划分为三段。第一段:从设备起点至栈桥后端;第二段:从栈桥后端至栈桥前端;第三段:从栈桥前端至路径终点,如图13(a)所示。对于第一段路径和第三段路径,可以采用所提的改进RRT*算法进行路径搜索,而第二段路径通过栈桥前后端点位约束,保证设备由栈桥后端点位 $[0, 30]$ 沿着栈桥方向朝栈桥前端点位 $[0, 35]$ 准确行进。所以第一段路径由设备的起点、障碍物的位置、栈桥后端点位决定,采样区间为 $x \in [-6, 6], y \in [0, 30]$,第三段由栈桥前端点位及设备的终点位置决定,采样区间为 $x \in [-6, 6], y \in [35, 50]$,将第一段路径点位与第三段路径点位直接前后衔接便可形成全局路径。设备的行进线速度 v 设为1 m/s,旋转角速

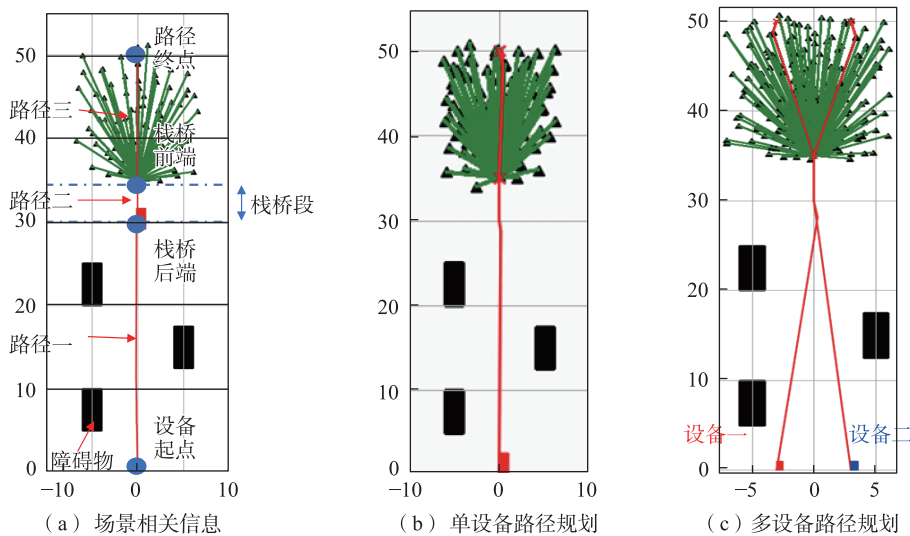


图13 路径规划算法在隧道场景栈桥的应用

Fig. 13 Application of path planning algorithm in the stack bridge segment of tunnel

度 w 设为 $18\text{ }^\circ/\text{s}$, D_s 与 D 均设定为 2 m , R 同样根据式(5)动态变化。图13(b)和图13(c)分别展示了该场景下单设备规划路径与多设备协同规划路径,可以看出无论是单设备还是多设备,所规划的全局路径均能同时满足避障与通过栈桥的需求,证明了所提路径规划算法的可靠性。

5.3 梁场场景下的算法应用

本文将前述路径搜索算法应用于梁场内运梁场景,梁场通常具有多个台座,梁体需在这些台座间进行运输。因此在该场景下,台座被视为障碍物,运梁设备需要在这些障碍物之间灵活穿行,执行从起点行至终点的运梁任务,同时避免与底座发生碰撞。

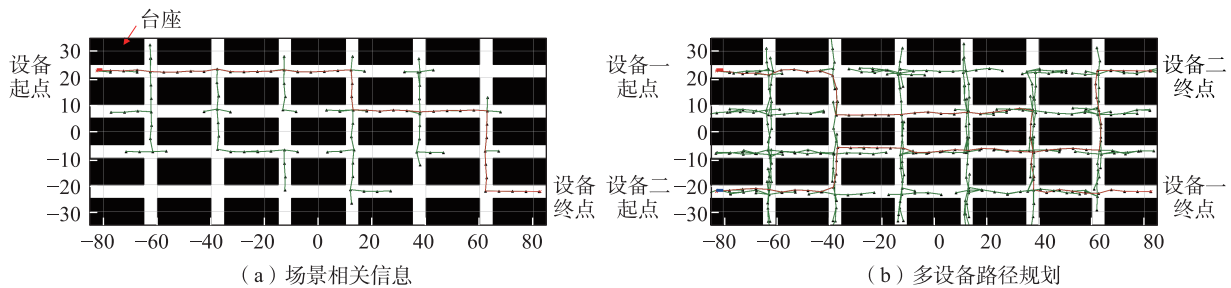


图14 路径规划算法在梁场运梁场景的应用

Fig. 14 Application of path planning algorithm for beam transportation in the beam yard scene

5.4 算法优越性对比

为了证明本文所提改进RRT*算法相较于传统RRT*算法的优势,本文将两类算法在梁场场景的不同工况进行应用对比。场景下的采样范围、障碍物布置、设备的起点与终点均与5.3节一致,而不同工况之间的区别在于行走设备的尺寸。在改进RRT*算法中,分别设置了长宽($L \times W$)为 $1.25\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 、 $2.5\text{ m} \times 1\text{ m}$ 、 $3.75\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 、 $5\text{ m} \times 2\text{ m}$ 、 $6.25\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ 这5种尺寸工况;而传统RRT*算法考虑行走设备形状的报道较少,大部分均将设备简化为圆形,因此取设备轮廓到中心的最大距离 r 作为简化圆形的半径,因此在传统RRT*算法中,5种工况分别对应于 $r=0.67, 1.34, 2.01, 2.68, 3.35\text{ m}$ 。

传统RRT*算法和改进RRT*算法在各自工况下的路径规划情况如图15所示,其中图15(a)、图15(b)、图15(c)为传统RRT*算法的路径搜索图;图15(d)、图15(e)、图15(f)、图15(g)、图15(h)为改进RRT*算法的路径搜索图。前者缺少 $r=2.68, 3.35\text{ m}$ 工况的结果,这主要由于设备的直径大于相邻台座

建立如图14(a)所示的场地及坐标系,场地采样区间为 $x \in [-85, 85]$ 、 $y \in [-35, 35]$,每个台座尺寸为 $20\text{ m} \times 5\text{ m}$,相邻台座间隔 5 m 。场地内行走设备个数设为2个,其长宽均为 $5\text{ m} \times 2\text{ m}$,出发起始时间分别设定为 $0, 510\text{ s}$,起点分别为 $[-82.5, 22.5]$ 、 $[-82.5, -22.5]$,终点分别为 $[82.5, -22.5]$ 、 $[82.5, 22.5]$,设备的行进线速度 v 设为 1 m/s ,旋转角速度 w 设为 $18\text{ }^\circ/\text{s}$,考虑场地范围此处将 D_s 与 D 均设定为 5 m , R 同样根据式(5)动态变化。图14(b)也展示了多设备在该场景下的协同规划路径,可以看出设备机群均能顺利找到各自的运输路径,进一步证明了所提算法的适用性。

间距(5 m),导致在初期就因碰撞检查而失效,而后者在5种工况下均能完成路径规划任务。另外,从图15可以看出,无论是传统算法还是改进算法,在通过碰撞检查的前提下,算法均能搜索出一条由起点至终点较为合理的路径,证明了RRT*算法的可行性。

记录图15中各工况的路径搜索时间,且每种工况重复10次,图16归纳了各工况下重复试验的算法运算时间分布。可以看出改进RRT*算法的平均花费时间与传统RRT*算法相近,但极个别工况的运算时间要远大于平均水平,这是由于RRT*算法本质上是基于随机采样的路径规划算法,具有一定波动性,另一方面,改进RRT*算法在传统算法的基础上,添加了考虑了设备形状与运动姿态的碰撞检查功能,每次迭代所花费的时间会稍大于传统算法。表1统计了在设定最大迭代次数(5 000次)下,每种工况10次重复试验中传统RRT*算法和改进RRT*算法的路径搜索成功率,可以看出,在前三种工况下,两者均能有不错的鲁棒性,但随着设备的

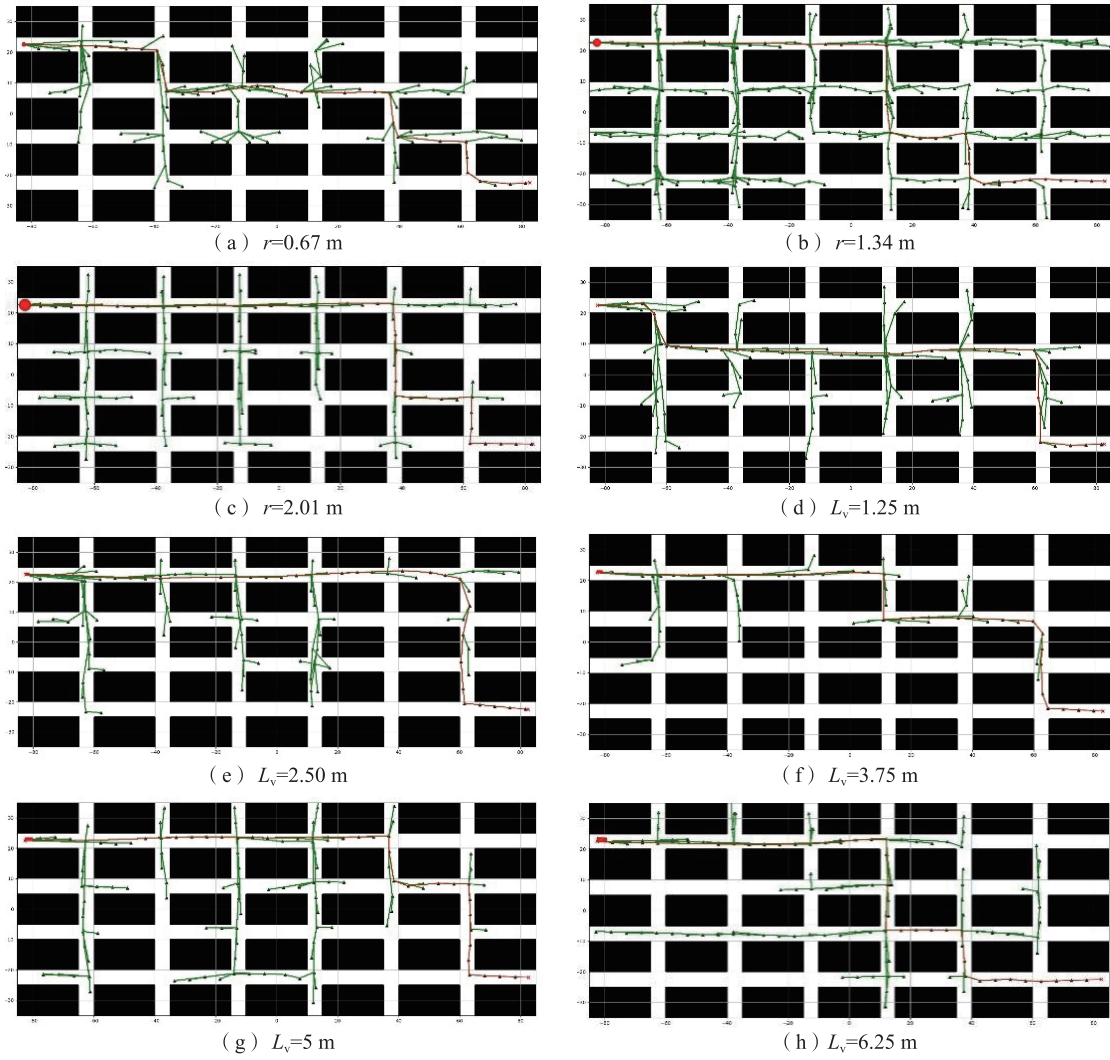


图 15 梁场场景下不同RRT*算法单设备路径结果

Fig. 15 Single equipment path results for different RRT* algorithms in the beam yard scene

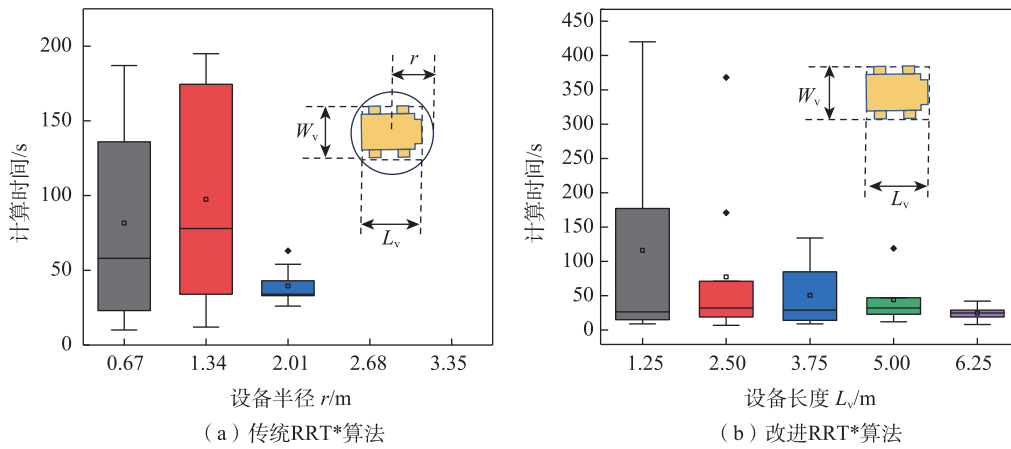


图 16 梁场场景下不同RRT*算法运算时间

Fig. 16 Computation time of different RRT* algorithms in beam yard scenario

表1 不同RRT*算法梁场场景下搜索路径成功率
Tab.1 Path search success rate of different RRT* algorithms in beam yard scenario

算法	传统RRT*	改进RRT*
$L_v=1.25\text{ m}$ ($r=0.67\text{ m}$)	90%	100%
$L_v=2.50\text{ m}$ ($r=1.34\text{ m}$)	80%	100%
$L_v=3.25\text{ m}$ ($r=2.01\text{ m}$)	90%	70%
$L_v=5.00\text{ m}$ ($r=2.68\text{ m}$)	0	70%
$L_v=6.25\text{ m}$ ($r=3.35\text{ m}$)	0	60%

尺寸增大,设备的碰撞判定概率也增大,从而降低了在最大迭代次数中的运算成功率,其中,传统算法的路径搜索成功率锐减至0,而改进算法仍能保持60%以上的成功率。

综上所述,相比于传统算法,改进的RRT*算法进一步考虑矩形行走设备的尺寸与姿态,避免了因将设备粗略视为外包圆而造成的空间浪费,提高了碰撞检查精度,使得大长宽比设备在狭长的空间也能顺利完成路径规划,这对于隧道这类场景是必不可少的优化;另一方面,改进RRT*算法还拓展了传统算法的设备规划能力,通过引入时间窗实现由传统单设备路径规划到多机协同规划的跨越。

6 结论

为了实现无人工地中施工机群的动态路径规划,本文在RRT*算法的基础上,考虑了真实行走设备的几何尺寸与运动姿态,并将其扩展至多机协同路径规划,将改进的算法应用于多个施工场景,验证了算法的可靠性,得到主要结论如下:

1) 在单设备路径规划方面,提出了考虑矩形设备行进过程和旋转过程的静态碰撞检查方法。其中,临近点位距离与分离轴定理有助于设备在行进过程中快速判断是否与圆形障碍物与矩形障碍物存在碰撞。另外,创新设计了“旋转碰撞圆”并通过向量叉积判定机制检测设备转向过程中的潜在碰撞,进而引入矩形设备在节点处的旋转避障检查。

2) 在多设备协同路径规划方面,提出了“行进-行进”与“行进-旋转”两类动态碰撞检测流程,并结合时间窗分析对各机节点访问时序进行统一调度,实现了在保证全局路径尽可能短的前提下,多台施工机械在高密度障碍环境中的高效、安全协同行驶。

3) 通过一系列仿真实验,检验了所提的多机协

同路径规划算法在不同施工场景下的适用性,结果表明该算法能够为设备机群在同时考虑静态避障与多机协同动态避障的条件下规划出尽可能短的全局路径,该算法可为未来无人工地的实现提供不可或缺的技术支持。

4) 与传统RRT*算法进行对比试验表明,所提改进RRT*算法在面对大长宽比设备穿越狭长通道时具有显著优势,当设备旋转碰撞圆的半径 r 大于通道宽度时,传统算法的路径搜索成功率为0,而本文改进算法仍能保持60%以上的成功率。另外,改进RRT*算法还拓展了传统算法在多机协同方面的应用能力。

参考文献:

- [1] 包丹文,姚馨宇,刘建荣,等.基于动态优先级的机坪车辆避冲突运行规划方法[J].华东交通大学学报,2024,41(4):99-107.
BAO D W, YAO X Y, LIU J R, et al. Operation planning method for airport support vehicle collision avoidance based on dynamic priority[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(4): 99-107.
- [2] WEI K, REN B Y. A method on dynamic path planning for robotic manipulator autonomous obstacle avoidance based on an improved RRT algorithm[J]. Sensors, 2018, 18(2): 571.
- [3] 杨瑞刚,王宇琦,苗琦,等.基于A-RRT*算法的机械臂轨迹规划研究[J].组合机床与自动化加工技术,2025(9):28-33.
YANG R G, WANG Y Q, MIAO Q, et al. Research on robot arm trajectory planning based on A-RRT* algorithm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2025(9): 28-33.
- [4] 王晓燕,董金明,刘上.融合RW-RRT与IAFT的矿区巡检机器人路径规划模型[J].金属矿山,2025(9):184-191.
WANG X Y, DONG J M, LIU S. Path planning model of mine inspection robot integrating RW-RRT and IAFT[J]. Metal Mine, 2025(9): 184-191.
- [5] CHANG Y C, HUNG W H, KANG S C. A fast path planning method for single and dual crane erections[J]. Automation in Construction, 2012, 22: 468-480.
- [6] 薛光辉,刘爽,王梓杰,等.基于改进概率路线图算法的煤矿机器人路径规划方法[J].工矿自动化,2023,49(6):175-181.
XUE G H, LIU S, WANG Z J, et al. A path-planning method for coal mine robot based on improved probabili-

- ty road map algorithm[J]. Industry and Mine Automation, 2023, 49(6): 175-181.
- [7] 周相坡, 周依尔, 徐立军, 等. 一种基于概率路线图的月球巡航车路径规划算法[J]. 空间控制技术与应用, 2020, 46(6): 43-49.
ZHOU X P, ZHOU Y E, XU L J, et al. A path planning algorithm for lunar cover based on probabilistic roadmap[J]. Aerospace Control and Application, 2020, 46(6): 43-49.
- [8] MUHSEN D K, RAHEEM F A, SADIQ A T. A systematic review of rapidly exploring random tree RRT algorithm for single and multiple robots[J]. Cybernetics and Information Technologies, 2024, 24(3): 78-101.
- [9] WANG B P, JU D Y, XU F Z, et al. Bi-RRT*: an improved bidirectional RRT* path planner for robot in two-dimensional space[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2023, 18(10): 1639-1652.
- [10] WANG Y Z, YANG Q, QU W W. A collision-free transition path planning method for placement robots in complex environments[J]. Complex & Intelligent Systems, 2024, 10(6): 8481-8500.
- [11] ZHANG T L, XU S T, GAO Y, et al. 3D constrained Hybrid A*: improved vehicle path planning algorithm for cost-effective road alignment design[J]. Automation in Construction, 2024, 166: 105645.
- [12] ZHANG X C, CHEN L J, JIANG J H, et al. Risk analysis of people evacuation and its path optimization during tunnel fires using virtual reality experiments[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 137: 105133.
- [13] LIN P F, QUAN Y S, YANG J H, et al. Safety tunnel-based model predictive path-planning controller with potential functions for emergency navigation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(4): 3974-3985.
- [14] 许卫卫, 张启钱, 邹依原, 等. 改进A*算法的物流无人机运输路径规划[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(6): 39-46.
XU W W, ZHANG Q Q, ZOU Y Y, et al. Research on transportation path planning for logistics UAV based on improved A* algorithm[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36(6): 39-46.
- [15] HUNG W H, LIU C W, LIANG C J, et al. Strategies to accelerate the computation of erection paths for construction cranes[J]. Automation in Construction, 2016, 62: 1-13.
- [16] CAI P P, CAI Y Y, CHANDRASEKARAN I, et al. Parallel genetic algorithm based automatic path planning for crane lifting in complex environments[J]. Automation in Construction, 2016, 62: 133-147.
- [17] LEE I D, SEO J H, YOO B. Autonomous view planning methods for 3D scanning[J]. Automation in Construction, 2024, 160: 105291.
- [18] ZHU J S, WANG D W, FU Z Q, et al. BIM-based terrestrial laser scanning path planning for large-scale civil infrastructure[J]. Automation in Construction, 2025, 178: 106439.
- [19] CHEN Z Y, CHEN K Y, SONG C H, et al. Global path planning based on BIM and physics engine for UGVs in indoor environments[J]. Automation in Construction, 2022, 139: 104263.
- [20] DASHTI M S, REZAZADEH M, KHANZADI M, et al. Integrated BIM-based simulation for automated time-space conflict management in construction projects[J]. Automation in Construction, 2021, 132: 103957.



第一作者:王希云(1969—),男,正高级工程师。国家能源集团铁道工程专业卓越工程师。研究方向为重载铁路工务智能运维。



通信作者:李鲇(1994—),男,讲师,博士,硕士生导师,研究方向为隧道智能建造、岩爆、突涌水等。