

基于非均匀环境建模与三阶 Bezier 曲线的平滑路径规划

卜新苹¹ 苏虎¹ 邹伟¹ 王鹏¹ 周海²

摘要 针对工作于复杂环境下的大型工装, 本文提出了一种基于非均匀环境建模与三阶 Bezier 曲线的平滑路径规划算法, 以指导工装的运动. 在环境建模方面, 利用二叉树建立环境的非均匀模型, 能够有效压缩环境信息, 提高搜索效率; 在路径搜索方面, 以非均匀环境模型为基础, 提出一种距离启发搜索和信息素混合更新的蚁群算法, 能够得到工装的安全可行路径点; 在路径平滑方面, 基于三阶 Bezier 曲线, 提出能够连接任意位置和任意方向两点的转弯单元的设计方法, 利用转弯单元连接路径搜索算法得到的路径点, 能够获得满足工装非完整性约束的平滑路径. 最后, 以大型激光驱动器的靶场环境为对象, 对本文算法的有效性和可靠性进行验证, 并利用 DELMIA 平台进一步验证了规划路径的运动平滑性和安全性.

关键词 平滑路径规划, 非均匀建模, 蚁群算法, Minkowski 和, Bezier 曲线

引用格式 卜新苹, 苏虎, 邹伟, 王鹏, 周海. 基于非均匀环境建模与三阶 Bezier 曲线的平滑路径规划. 自动化学报, 2017, 43(5): 710–724

DOI 10.16383/j.aas.2017.c160262

Smooth Path Planning Based on Non-uniformly Modeling and Cubic Bezier Curves

BU Xin-Ping¹ SU Hu¹ ZOU Wei¹ WANG Peng¹ ZHOU Hai²

Abstract In this paper, a path planning algorithm is proposed to search feasible paths for an auxiliary robot working in complex environment. The movement of the robot could thus be guided by the planned result of the algorithm in assembly practice. In the process of environmental modeling, a quad tree method is employed to construct the non-uniform environmental model, which decreases the amount of environmental information to a minimum as needed. As a result, the searching efficiency is improved. In the process of path searching, on the basis of the predefined non-uniform environmental model, an improved ant colony algorithm is presented to search the path points for the robot, which adopts distance-based heuristic search method and fusion of two different pheromone updating mechanisms. In the process of path smoothing, Bezier turn is designed based on cubic Bezier curves to connect two arbitrary configurations. Bezier turns are used to fit a sequence of objective points offered by the improved ant colony algorithm, so that a smooth path satisfying the robot's nonholonomic constraints can be obtained. Finally, the method is experimentally demonstrated in target area with large laser facility. Furthermore, the feasibility and security of the planned path is verified based on the platform of DELMIA.

Key words Smooth path planning, non-uniform environmental model, ant colony algorithm, Minkowski sum, Bezier curves

Citation Bu Xin-Ping, Su Hu, Zou Wei, Wang Peng, Zhou Hai. Smooth path planning based on non-uniformly modeling and cubic Bezier curves. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(5): 710–724

路径规划^[1] 是在多个不规则障碍物存在的复杂

环境中规划机器人的无碰撞最优路径, 是机器人领域的重要基础问题, 也是机器人控制的难点和重点.

在一些大型科学装置中, 由于这些装置规模庞大, 结构复杂, 涉及元件类型与种类众多, 利用工装辅助装配时, 如何利用路径规划算法提高装配效率就显得尤为重要. 以我国目前在建的大型激光驱动器为例, 仅其靶场实验区, 就涉及数百乃至上千个类型各异的光学元件, 由于靶场内部空间狭小, 装配环境复杂, 辅助工装体型庞大, 装配任务繁重, 仅仅依靠工作人员规划工装的运动, 往往导致人员和工装的重复劳动, 造成装配效率低下, 加大了人员和工装的劳动负担. 因此, 结合靶场环境的布局特点和装配

收稿日期 2016-03-11 录用日期 2016-08-23
Manuscript received March 11, 2016; accepted August 23, 2016
国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2015AA042307), 国家自然科学基金 (61573347, 61403382, 61379097) 资助
Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2015AA042307), and National Natural Science Foundation of China (61573347, 61403382, 61379097)
本文责任编辑 王红卫
Recommended by Associate Editor WANG Hong-Wei
1. 中国科学院自动化研究所精密感知与控制研究中心 北京 100190
2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心 绵阳 621900
1. Research Center of Precision Sensing and Control, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190
2. Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900

(维护) 任务需求, 利用移动机器人相关技术, 实现大型辅助工装在复杂环境下的安全、可靠自动路径规划, 能够在很大程度上提高装置的安装维护效率, 对于装置从建设到运行再到维护的全生命周期均具有重要意义。

本文以大型激光驱动器的靶场环境为研究对象, 对工作于该复杂环境的大型工装的路径规划问题进行研究。对于这种环境完全已知的全局路径规划, 一般涉及环境建模、路径搜索和路径平滑三个基本问题^[2-3]。环境建模是将工装的工作空间离散为便于在计算机中表示的连通图。常用的环境建模^[4]的方法主要有可视图法^[5]、自由空间法^[6]、栅格法^[7]等。可视图法和自由空间法复杂度与空间内障碍物数量成正比。因此, 在有较多障碍物存在的复杂环境内, 这两类算法的运行效率较低。栅格法将环境分割成一系列二值化的栅格, 以记录环境中障碍物的信息。基于均匀划分的栅格法规划效率低, 且要求计算机有较高的存储能力。文献 [8] 利用 Voronoi 图进行环境建模, 使规划的路径尽可能的远离障碍物。文献 [9] 基于 Delaunay 图建立环境模型, 并获取最短可行路径, 提高了算法的运算效率。文献 [8] 和文献 [9] 中的算法与文献 [5-7] 中的算法相比, 在计算复杂度和存储效率等方面有了一些改进, 然而, 对于一些复杂环境的建模, 计算效率依然较低。另外, 在一些路径规划问题中, 需要考虑多方面的因素, 例如路径的安全性、转弯次数、路径长度等, 文献 [8] 和文献 [9] 中的算法无法综合考虑这些因素, 因此规划所得路径的综合适应性较差。

在已建立的环境模型中, 使用图搜索算法查找无碰撞路径即为路径搜索。路径搜寻可得到一系列离散的关键路径点。常用的传统全局路径规划算法包括 D* 算法^[10]、A* 算法^[11]、Dijkstra 算法^[12]等。由于这些算法随环境复杂度增加效率降低严重, 许多并行仿生算法被提出并应用至路径搜索中, 例如遗传算法^[7, 13]、蚁群算法^[14]、模拟退火^[2]等, 这些算法能够同时实现规划路径的质量与耗时的相对优化。

与其他的仿生算法相比, 蚁群算法特有的信息素正反馈机制和跳出局部最优解的策略, 使其不但能够有效利用已获取的经验信息, 同时又能不断探索新的路径, 因此具有较快的收敛速度和较高的求解质量。但是蚁群算法在解决大规模问题时仍然存在求解质量低、收敛速度慢、易停滞等问题。针对这些问题, 一些学者对传统蚁群算法进行改进^[15-18]。其中最具代表性的是 Dorigo 等提出的蚁群系统 (Ant colony system, ACS) 算法^[16] 和 Stützle 等提出的最大最小蚁群 (Max-min ant system, MMAS) 算法^[17]。ACS 算法改进了路径点的选择策略, 并且将信息素更新分为局部和全局两种。MMAS 算法设

定信息素的上下阈值, 并以平滑信息素的方式跳出局部最优。

在路径平滑过程中, 利用平滑算法拟合这些离散的路径点, 以得到满足工装非完整性约束的平滑路径。起初, 许多学者利用圆弧和直线相接获得长度最短的平滑路径, 例如 Dubin^[19]、Reeds 和 Shepp^[20]、Boissonnat^[21]。但是这类路径的曲率不连续, 导致工装在运动时需要时常停下调整前轮转向。为解决这个问题, Scheuer 和 Fraichard^[22-23] 使用螺旋曲线 (Clothoid curves) 代替 Dubin 曲线中的圆弧, 由于螺旋曲线的曲率与弧长呈线性关系, 因此能够和直线平滑连接。后来, 两人进一步改进算法, 使用螺旋曲线将圆弧和直线平滑连接^[24-25], 保证路径曲率的连续性。文献 [2] 中, Maekawa 等以工作在矿场环境中的工装为研究对象, 提出了一种基于三阶 B-样条曲线的路径平滑算法。在文献 [26] 中, 对于曲率最大值给定的情况下, 利用三阶 Bezier 曲线^[27] 拟合一系列路径点。文献 [28] 研究了多机器人系统的路径规划问题, 利用四阶 Bezier 曲线规划多个机器人从初始状态到目标状态的无碰撞平滑路径。另外, 七阶多项式曲线^[29-30]、极多项式曲线^[31] 等, 也分别被用于路径规划。

然而, 针对于本文特有的应用背景和问题特点, 已有算法难以直接应用。例如, 文献 [2] 需要通过两次搜索才能确定满足最大曲率约束的路径点位置, 不但算法效率较低, 且不能从根本上解决路径曲率的整体可控性问题; 文献 [24] 和文献 [25] 中采用的螺旋曲线没有解析表达式, 导致计算效率低下; 文献 [26] 中基于 Bezier 曲线的路径平滑算法, 没有考虑到起点和目标点的方向问题, 这将导致产生不合理的路径; 而文献 [28] 则对曲率约束问题未予考虑。另外, 由于本文工装的工作环境十分复杂, 不规则障碍物众多, 避障过程中必须合理使用倒车操作, 否则, 很可能造成规划失败。上述文献均没有考虑到如何使用倒车操作, 以提高规划路径的实用性、灵活性。尽管文献 [25] 利用倒车操作缩短路径长度, 但如何使用倒车操作完成避障, 以提高路径规划的成功率, 在文中没有被提及。

针对以上三个问题, 本文提出了一种基于非均匀性环境模型与三阶 Bezier 曲线的路径规划算法。1) 在环境建模方面, 首先利用凸投影实现障碍物由三维空间至二维平面的映射, 然后利用 Minkowski 和对其进行拓展, 最后利用四叉树法实现环境的非均匀栅格建模。2) 在路径搜索方面, 提出一种基于距离启发搜索和信息素混合更新的蚁群算法, 搜索路径关键点, 并设计了移动算子和删除算子对路径点做进一步的修正。3) 在路径平滑方面, 充分考虑工装非完整型约束, 基于三阶 Bezier 曲线, 设计连

接任意方向、位置两点的转弯单元, 以此为基础, 获得一条曲率连续且满足曲率约束的路径.

本文的内容安排如下: 第 1 节介绍本文提出的路径规划算法的总体流程; 第 2 节对研究问题进行介绍和分析; 第 3 节基于四叉树方法建立工装工作环境的非均匀模型; 第 4 节引入改进的蚁群算法, 使用该算法搜索工装安全运动的路径关键点, 并且设计移动算子和删除算子对路径加以修正; 第 5 节设计路径平滑算法拟合路径点; 第 6 节实验验证本文算法的有效性及其可行性; 第 7 节对本文工作进行总结.

1 路径规划算法流程介绍

本文的路径规划算法包括环境建模、路径搜索和路径平滑三个步骤, 如图 1 所示.

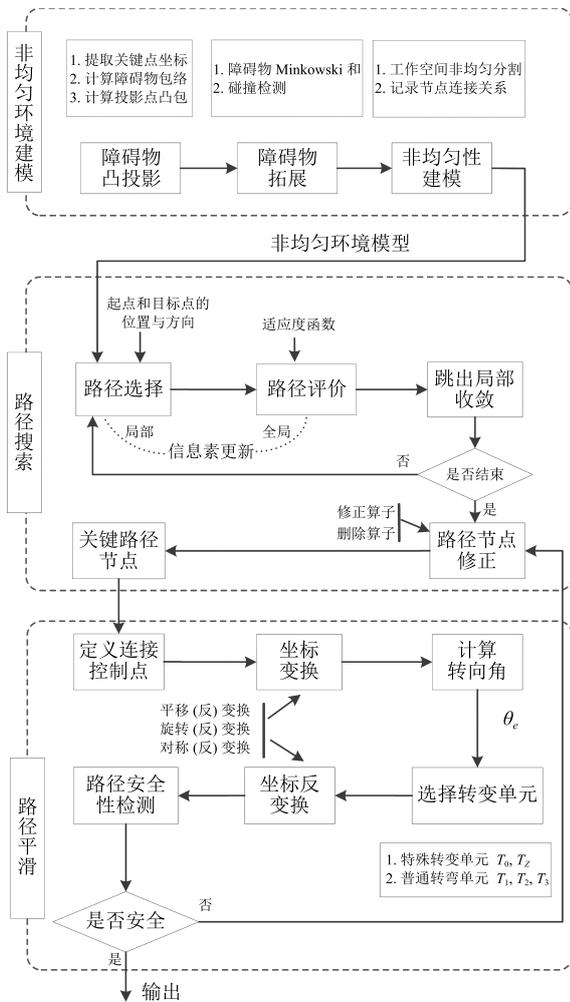


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the proposed algorithm

在环境建模方面, 考虑到靶场环境复杂, 障碍物众多且形状不规则, 本文提出了一种基于四叉

树结构的非均匀建模方法. 首先利用凸投影实现障碍物由三维空间至二维平面的映射, 然后利用 Minkowski 和对其进行拓展, 最后利用四叉树法实现环境的非均匀栅格建模. 与均匀栅格法相比, 基于这种非均匀建模方法建立的环境模型, 能够有效地减少栅格数目, 降低路径搜索的复杂度.

在路径搜索方面, 本文提出一种基于距离启发搜索和信息素混合更新的蚁群算法, 与传统蚁群算法相比, 该算法采取了以下策略提高性能: 融合了 MMAS 算法与 ACS 算法的信息素更新方式; 在栅格选择策略中引入了目标距离和障碍物距离等启发式信息; 设计了与已建立的环境模型相符合的适应度函数. 为了进一步提高路径点整体质量, 设计修正算子和删除算子修正路径节点, 获得工装无碰撞运动的路径关键点.

在路径平滑方面, 基于蚁群算法搜索的路径关键点, 其起点和目标点的方向给定, 本文以三阶 Bezier 曲线为基础设计了满足二阶几何连续的路径平滑算法. 该算法充分考虑了大型工装的非完整性约束 (例如大小、速度、转弯半径等), 灵活地运用了倒车操作, 设计了转弯单元连接任意方向、任意位置的两点. 通过定义路径点之间的连接控制点, 将路径分解, 从而利用转弯单元连接所有相邻的连接控制点, 获得工装运动的平滑路径, 该路径的曲率连续且满足曲率上界的约束. 为保证工装的安全性, 路径需通过安全性检测, 否则需要做进一步调整.

2 基本数学模型

2.1 工装运动学建模

图 2(a) 为大型辅助工装. 工装体型庞大, 长、宽、高分别为 3 733 mm、1 461 mm、1 960 mm, 需要较大的运动空间, 在路径规划中不能被当成一个质点来处理. 图 2(b) 为靶场装配环境的局部. 靶场环境存在多个形状不规则的障碍物, 装配环境十分复杂, 而且装配位置多位于不同障碍物之间, 进一步加大了路径规划的难度.



(a) 大型辅助工装
(a) The auxiliary robot



(b) 靶场装配场景
(b) Assembly environment in the target area

图 2 应用场景

Fig. 2 Background

为了描述工装在靶场环境中的运动轨迹, 首先将靶场环境中有可能阻碍工装运动的不规则障碍物投影至工装运动平面, 如图 3 所示. 然后在图中建立坐标系 O , 坐标系的原点位于靶球中心, X 轴水平向右, Y 轴垂直向上. 将工装后轮的中心定义为参考点, 则工装的运动可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = v(t) \cos \theta(t) \\ \dot{y}(t) = v(t) \sin \theta(t) \\ \dot{\theta}(t) = \omega(t) = v(t)k \end{cases} \quad (1)$$

其中, x, y 为参考点的坐标, θ 为工装的方向角, k 为曲率, v 和 ω 为表示工装运动的线速度和角速度. 引入四元组 (x, y, θ, k) 表示工装在某一位置的具体状态.

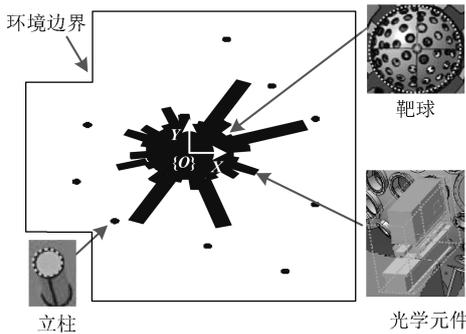


图 3 坐标系定义和障碍物包络示意图

Fig. 3 The schematic of the envelopes of obstacles and coordinate system

工装的体型和重量较大导致运动时的加速度和速度较小. 为了简化问题, 将 v 视为一个常数^[6, 25]. 考虑到工装可以倒退, v 取两个值. 工装前进时, $v = 1$; 后退时, $v = -1$. 在这种情况下, 路径允许尖点存在. 另外, 由于工装的转弯半径 r 受机械限制, $r \geq r_{\min}$, 则曲率上界 $|k| = 1/r_{\min}$. 综合以上分析, 工装的可行路径需要满足曲率连续和曲率上界的约束.

2.2 G^2 连续的路径模型

如何定义路径的连续性在路径规划过程中十分重要. 参数连续和几何连续是两种较为常用的连续性类型. 本文采用与参数无关的几何连续^[26].

定义 1. 如果参数曲线 $p(u)$ 是正则的, 且满足一阶微分连续, 则称为一阶几何连续曲线, 记作 G^1 -曲线. 如果一阶几何连续曲线 $p(u)$ 二阶微分连续, 且曲率连续, 则该曲线是二阶几何连续曲线, 记作 G^2 -曲线. 如果二阶几何连续曲线 $p(u)$ 三阶微分连续, 且曲率关于弧长的导数连续, 则该曲线是三阶几何连续曲线, 记作 G^3 -曲线.

利用式 (1), 曲率和曲率关于弧长的导数可以表

示为

$$k = \frac{\omega}{v}, \quad \dot{k} = \frac{\dot{\omega}v - v\dot{\omega}}{v^2} \quad (2)$$

从式 (2) 可以看出, 当线速度和角速度均是连续的, 则曲率也是连续的. 由于线速度 $|v| = 1$, 线速度的导数不连续, 则曲率的导数 \dot{k} 也不连续. 因此, 本文规划的路径需满足 G^2 连续.

本文采用 Bezier 曲线拟合蚁群算法搜索得到的路径点. 考虑到计算复杂度, 在满足 G^2 连续条件下, Bezier 曲线的阶次越低越好. 本文采用的三阶 Bezier 曲线, 如图 4(a) 所示. 三阶 Bezier 曲线有 4 个控制点, B_0, B_1, B_2, B_3 . α 和 γ 分别表示向量 $\overrightarrow{B_0B_1}$ 和 $\overrightarrow{B_1B_2}$, $\overrightarrow{B_1B_2}$ 和 $\overrightarrow{B_2B_3}$ 之间的夹角. 三阶 Bezier 曲线定义^[26] 如下:

$$Q(t) = B_0(1-t)^3 + 3B_1(1-t)^2t + 3B_2(1-t)t^2 + B_3t^3, \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (3)$$

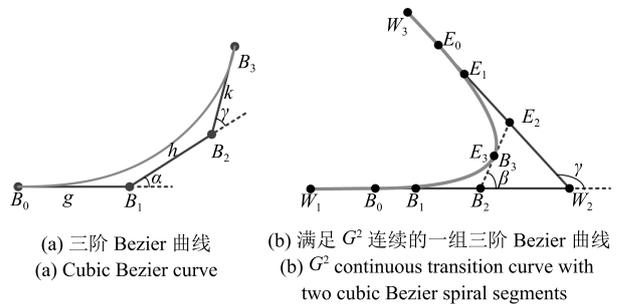


图 4 Bezier 曲线

Fig. 4 Bezier curves

图 4(b) 为利用三阶 Bezier 曲线拟合路径点 W_1, W_2, W_3 的结果. 拟合后的路径由两条形状相同的三阶 Bezier 曲线 (控制点分别为 B_0, B_1, B_2, B_3 和 E_0, E_1, E_2, E_3) 及两条线段 W_1B_0 和 W_3E_0 组成. 三阶 Bezier 曲线成对出现能够保证曲率的连续性^[26-27] (从 0 单调递增到 k_{\max} , 再单调递减到 0). 记成对的三阶 Bezier 曲线为 B_c , 线段为 L , 则图 4(b) 的路径可表示为 LB_cL . 根据文献 [26], 点 B_0 与 W_2 之间的距离为

$$d_k = \left(\frac{(c_2 + 4)^2}{54c_3} \right) \frac{\sin \beta}{k_{\max} \cos^2 \beta} \quad (4)$$

其中, $c_1 = 7.2364, c_2 = 0.5798, c_3 = (c_2 + 4)/(c_1 + 6), \beta = \gamma/2$. 从式 (4) 可以看出, 给定最大曲率 k_{\max} , d_k 仅与变量 β 有关, 因此, d_k 也可以记作 $d_k(\cdot)$.

3 非均匀环境建模

3.1 不规则障碍物的凸投影

为准确表示障碍物在给定平面上形成的障碍区域, 本文提出了凸投影的概念, 用障碍物在平面上的凸投影表示此障碍区域. 假设在三维坐标系 R 中, 已知平面的方程为

$$\pi : Ax + By + Cz + D = 0$$

则定义空间中任意点 (x, y, z) 在平面 π 的投影为

$$\kappa_{\pi} : (x, y, z) \rightarrow (x + \varsigma A, y + \varsigma B, z + \varsigma C) \quad (5)$$

其中,

$$\varsigma = \frac{Ax + By + Cz + D}{A^2 + B^2 + C^2}$$

令 M 为环境中的障碍物, \bar{M} 为 M 的包络, 对于形状不规则的障碍物, 包络用规则六面体表示, 对于圆柱或球形等形状规则的障碍物, 包络可用圆心 (或球心) 和半径表示. \bar{M} 的顶点记为 $p'_1 \sim p'_8$, 则障碍物 M 在平面 π 的凸投影为 $CP_{\pi} = Conv(\kappa_{\pi}(p'_i), i = 1, \dots, 8)$, 其中 $Conv(\phi)$ 表示点集 ϕ 的凸包形成的凸多边形, $\kappa_{\pi}(p'_i), i = 1, \dots, 8$ 表示 \bar{M} 的顶点在平面 π 的投影点的集合. 障碍物 M 在平面 π 的凸投影表示了 M 在平面 π 上形成的障碍区域. 例如, 在图 5 中, 障碍物在平面 $z = 0$ 上的凸投影为凸多边形 $(p_1, p_2, p_4, p_6, p_7, p_8)$. 为便于说明, 下文中提到的障碍物均为障碍物在二维空间中的凸投影.

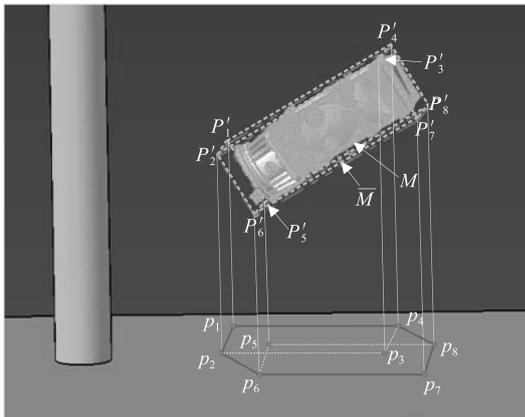


图 5 不规则障碍物的凸投影

Fig. 5 The convex projection of irregular obstacle

3.2 C-空间构建

在路径规划前, 根据工装的实际尺寸, 对环境中的障碍物进行膨胀, 相应地, 在规划工装的运动路径时, 可将工装看作一个质点.

对环境中的障碍物进行膨胀时, 以工装宽度的一半为基准, 拓展障碍物的边界, 缩小工作空间.

建立以原点为圆心, 以工装宽度一半为半径的圆 C_0 , 将 C_0 的圆弧离散化^[2], 做 C_0 与障碍物 M 的 Minkowski 和^[4], 以和的边界作为障碍物拓展的边界. 计算公式如下:

$$M \oplus C_0 = \{\vec{m} + \vec{n} | \vec{m} \in M, \vec{n} \in C_0\} \quad (6)$$

其中, $\vec{m} + \vec{n}$ 表示两个向量 \vec{m} 与 \vec{n} 的向量和. 与直接拓展边界的方法相比, Minkowski 和的方法减少了自由空间的浪费, 增大了可行路径存在的可能性, 如图 6 所示. 在二维平面中, 靶场障碍物的拓展结果如图 7(a) 所示.

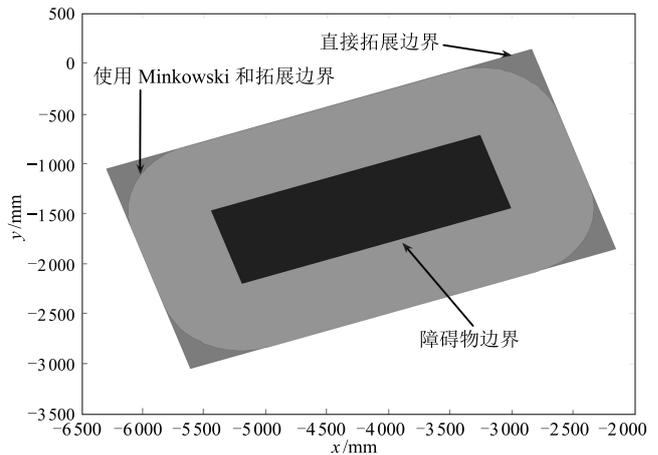


图 6 利用 Minkowski 和膨胀与直接边界拓展对比
Fig. 6 Comparison of the extended result by using the Minkowski sum with that of extending the boundary directly

3.3 四叉树建模

为便于环境数据在计算机中的表示, 在靶场左上方和左下方分别增加两个长方形障碍物, 使靶场环境成为一个 $33.4\text{ m} \times 24.14\text{ m}$ 长方形. 应用四叉树法非均匀分割二维环境, 以减少栅格数目, 提高路径搜索效率. 综合考虑算法的计算效率, 计算时需要的存储空间以及环境分割时靶场空间的浪费等因素, 确定四叉树最小分割尺度是 0.197 m . 与均匀栅格环境模型不同, 非均匀分割的四叉树模型丢失了栅格之间的连接关系, 而这种连接关系对于蚁群算法的搜索十分重要, 因此, 在路径规划前, 需要重新确定栅格之间的连接关系, 即确定每个自由栅格的邻域. 四叉树非均匀分割与邻域栅格搜索步骤如算法 1 所示, 建立的环境模型结果如图 7(b) 所示.

算法 1. 四叉树分割与栅格邻域搜索算法

输入. 工装运动的 C -空间.

输出. 非均匀环境模型, 任意自由栅格 v 的邻域 $H(v)$.

步骤 1. 将整个靶场环境视为一个栅格.

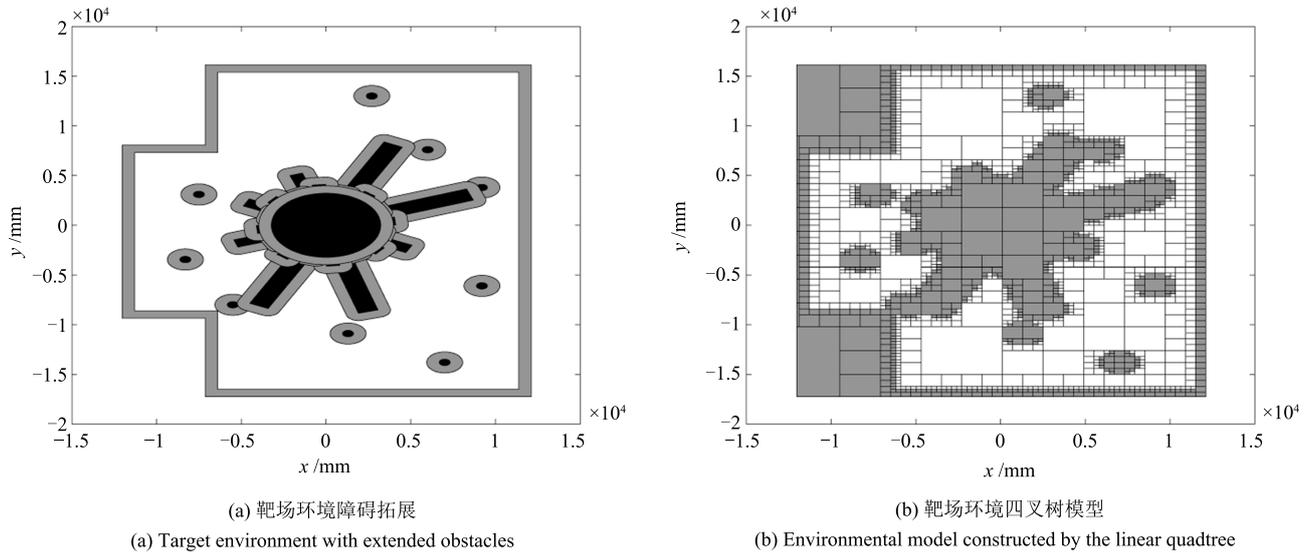


图 7 非均匀环境建模

Fig. 7 Non-uniform environmental model

步骤 2. 将栅格区域沿 X, Y 方向分别二等分, 得到 4 个子栅格, 子栅格分为障碍栅格、自由栅格和混合栅格. 栅格区域内全是障碍物则为障碍栅格, 没有任何障碍物则为自由栅格, 部分位置有障碍物则为混合栅格.

步骤 3. 若存在混合栅格, 且尺度小于等于 0.197 m 的混合栅格直接定义为障碍栅格, 若混合栅格尺度大于 0.197 m , 则转到步骤 2 继续分割, 直到所有栅格均为自由栅格或者障碍栅格. 若不存在, 则转步骤 4, 进行栅格邻域搜索.

步骤 4. 将靶场环境第 1 次划分得到的 4 个子栅格压入队列 G 中.

步骤 5. 将所有自由栅格压入栈 V 中.

步骤 6. 弹出 V 的栈顶元素 v .

步骤 7. 取出 G 的队首栅格 g , 并与 v 进行碰撞检测, 若发生碰撞, 则进一步判断 g 是否为混合栅格, 若为混合栅格, 则将 g 的所有子栅格压入队列 G 中, 若为自由栅格且 $g \neq v$ 则保存到为 v 的邻域 $H(v)$; 若没有发生碰撞则转步骤 8.

步骤 8. 判断队列 G 是否为空, 若不空, 则转步骤 7; 若空, 则判断栈 V 是否为空, 若不空, 则转步骤 6, 否则结束.

4 路径搜索

基于上述构建的非均匀环境模型, 本节提出了一种新的改进蚁群算法, 以适应本文特有的应用背景和问题特点. 该算法融合了 MMAS 算法的信息素范围限制策略与 ACS 算法的全局与局部信息素相结合的信息素更新方式, 设计了有效合理的适应度函数, 综合评价蚂蚁生成的路径, 引导蚂蚁向最优

路径收敛. 并且, 针对传统蚁群算法没有考虑到栅格与目标点的距离信息所导致的路径选择盲目性问题, 设计了一种距离启发式路径点选择策略.

4.1 基本蚁群算法

4.1.1 路径点选择策略

基本 ACS 算法和 MMAS 算法采用的是伪随机选择规则, 对于位于栅格 i 的蚂蚁 k , 按照式 (7) 下一个栅格 j 为

$$j = \begin{cases} \arg \max_{u \in J_k(i)} \{ \tau_{iu}^\alpha(t) \times \eta_{iu}^\beta \}, & q < q_0 \\ s, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其中, q 是 $[0, 1]$ 区间内产生的随机数. q_0 是 $[0, 1]$ 区间内的一个常数. 变量 s 是一个随机变量, 根据下式选择得到

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \times \eta_{ij}^\beta}{\sum_{s \in J_k(i)} \tau_{is}^\alpha(t) \times \eta_{is}^\beta}, & j \in J_k(i) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\tau_{ij}(t)$ 表示在 t 时刻栅格 i 与栅格 j 之间分布的信息素, η_{ij} 表示启发式信息, 是栅格 j 与目标点的欧氏距离的倒数, α 和 β 决定启发式信息相对于信息素的重要程度 ($\alpha, \beta > 0$). $J_k(i)$ 为栅格 i 的未被蚂蚁 k 访问的相邻栅格的集合.

4.1.2 信息素更新

在基本 MMAS 算法中, 只有当代最优或者全局最优的蚂蚁参与信息素更新, 且被限制在 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$, ACS 算法全局信息素更新则没有范围限制.

另外, ACS 算法还引入了局部信息素更新. 局部信息更新发生在每一只蚂蚁的行动之后, 仅让被访问栅格上的信息素以一定的比率挥发, 使得后来的蚂蚁以更大的概率选择其他栅格, 从而扩大搜索空间.

4.2 改进型蚁群算法

为适应本文特有的应用背景和问题特点, 提出了距离启发搜索和混合信息素更新的蚁群路径规划算法, 与基本蚁群算法相比, 主要做了以下改进:

1) 距离启发式路径点选择策略

在原伪随机选择规则中, 直接使用欧氏距离作为启发式信息, 忽略了环境中的障碍物, 极易引导蚂蚁走弯路. 本文引入传播算法^[32] 计算自由栅格与目标点之间的有效距离, 即两点之间最短无碰撞路径的长度. 使用有效距离替代欧氏距离, 能够有效快速地引导蚂蚁向目标点运动.

另外, 伪随机选择规则也没有考虑栅格与障碍物之间的距离信息. 在搜索过程中, 考虑栅格与障碍物之间的距离能够有效地引导蚂蚁远离障碍物, 获取安全路径. 因此, 将以上两种距离信息加入伪随机选择规则中, 改进路径点选择计算概率为

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \times \xi_{ij}^\beta D_j}{\sum_{s \in J_k(i)} \tau_{is}^\alpha(t) \times \xi_{is}^\beta D_0}, & j \in J_k(i) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

其中,

$$D_j = \max_{u \in O_b} \{d(j, u)\} \quad (10)$$

在式 (9) 中, ξ_{ij} 表示新的启发式信息, 替代式 (7) 中的 η_{ij} , 是栅格 i 和目标栅格之间有效距离的倒数, D_0 是一正常数, D_j 表示栅格 j 距离最近障碍物的距离, 计算方法如式 (10). 其中, $d(j, u)$ 为栅格 j 和障碍栅格 u 的欧氏距离, O_b 为靶场环境模型中障碍栅格的集合, $J_k(i) = H(i) - H(i) \cap Tabu(k)$, $H(i)$ 表示栅格 i 的所有邻域, $Tabu(k)$ 表示蚂蚁 k 问过的栅格集合.

2) 混合信息素更新方式

本文信息素的更新方式融合了基本 MMAS 算法有范围限制的全局信息素更新以及 ACS 算法的局部信息素更新, 即在每一只蚂蚁行动之后, 采用局部信息素更新, 使得信息素以一定的比例挥发, 以使已走过的栅格对后来的蚂蚁具有较少的吸引力, 从而增强蚂蚁对其他栅格的搜索能力. 当所有的蚂蚁到达目标点, 采用 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ 范围内的全局信息素更新, 这样能够有效地避免某条路径上的信息素远大于其他路径, 从而阻止蚂蚁陷入局部收敛.

3) 适应度函数设计

适应度函数用于评价路径的质量, 决定了算法的收敛速度以及计算效率. 一条有效的工装路径 w 应具备安全、可操作等特点, 因此, 规划工装路径时需要考虑的因素包括路径的长度 L_w , 转弯的次数 B_w , 离障碍物的危险度 E_w 等. 路径的危险度与路径点和障碍物之间的距离成反比, 距离越小, 危险性越高. 路径的危险度计算方法如式 (11) 所示, 以所有路径点与障碍物最近距离的倒数的平均值来评价路径的危险度. 综合考虑以上因素, 路径的适应度函数设计如 (12) 所示.

$$E_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i^{-1} \quad (11)$$

$$F_w = a \times e^{-\lambda_1 L_w} + b \times e^{-\lambda_2 B_w} + c \times e^{-\lambda_3 E_w} \quad (12)$$

在式 (12) 中, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, a, b, c$ 均为正常数. a, b, c 为比例系数, 决定 L_w, B_w 和 E_w 的相对重要程度, 且和为 1.

4.3 局部收敛和全局收敛

蚁群算法的信息素正反馈机制, 使蚂蚁的搜索易收敛到局部最优解. 当未进化代数 n_1 (若经本次迭代, 最优路径未得显著改进, 则称该代未进化) 大于某一常数 N_l 时, 则认为蚂蚁陷入了局部最优路径, 可采用平滑信息素和增大接受随机解的概率两种方法摆脱局部最优.

当蚂蚁陷入局部最优时, 收敛的路径上信息素的值高于其他栅格的值. 此时, 采用平滑信息素的方法削弱所有栅格上的信息素的差异性, 增大蚂蚁选择信息素较低栅格的概率, 以摆脱局部最优. 平滑信息素如式 (13) 所示.

$$\tau_t^*(r, u) = \tau_t(r, u) + \delta \times (\tau_{\max} - \tau_t(r, u)) \quad (13)$$

其中, δ 是介于 0 和 1 之间的正常数, $\tau_t(r, u)$ 和 $\tau_t^*(r, u)$ 分别表示平滑前后的信息素.

另外, 在式 (7) 中的 q_0 大小直接影响了蚂蚁接受随机解的概率. 利用式 (14) 减小 q_0 , 增大接受随机解的概率, 跳出局部最优.

$$q_0 = q_0 \times e^{-c_q n_1} \quad (14)$$

其中, c_q 是正常数.

4.4 路径修正

改进的蚁群算法规划出的路径关键点位于被选定栅格的中心, 然而就整体路径而言, 在选定栅格内栅格中心并不一定是最合适的. 因此, 可以根据前后路径点的位置, 对当前路径点在栅格内进行调整, 以实现路径的整体优化. 另外有些路径点之间转角非常小, 甚至没有转角, 对于这些路径点可能需要删减, 以便于下一步路径平滑. 因此, 本节设计了移动

算子和删除算子, 分别实现对路径点的调整和删除操作.

考虑到路径的转向角对于下一步路径平滑的影响最大, 并且转向角越小, 路径越易于平滑. 因此, 移动算子以转向角为优化目标调整路径点的位置. 如图 8 所示, 任何一个路径点 p_i 位置的调整将影响三个转向角 ($\theta_{i-1}, \theta_i, \theta_{i+1}$) 的大小, 则调整 p_i 使三个转角之和最小, 即使得 ϑ_i ($\vartheta_i = \theta_{i-1} + \theta_i + \theta_{i+1}$) 最小. 在图 8 中, 以一定的分辨率划分 p_i 所在的栅格, 利用各细分小栅格的中心取代 p_i , 计算角 ϑ_i , 最后将路径点 p_i 调整为使路径转角 ϑ_i 最小的位置. 从第一个路径点开始, 顺序调整所有路径点. 在调整完成之后, 利用删除算子删除所有转向角小于 θ_0 的中间点, 减少路径点的冗余. 在使用移动算子和删除算子修正路径点时有可能导致路径与障碍物发生碰撞, 因此在路径修正时需要对路径进行碰撞检测.

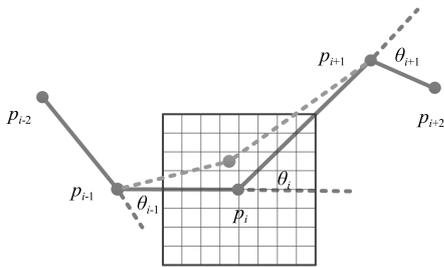


图 8 使用移动算子调整路径点
Fig. 8 Adjustment of path points using the move operator

5 路径平滑

5.1 特殊转弯单元

本节提出了一种新的路径平滑算法拟合已有的离散路径点. 在该算法中, 实现工装在两个相邻的路径点之间的位姿转换, 设计了转弯单元, 将两个或多个转弯单元相连接即得到一条平滑路径. 假设起点和目标点分别为 $q_s = (x_s, y_s, \theta_s, 0)$, $q_e = (x_e, y_e, \theta_e, 0)$. 为了便于计算, 建立新的坐标系 O' , 坐标系的原点位于起点 q_s 处, x 轴的方向与起点的方向一致, 坐标系 $O \sim O'$ 的转换矩阵记为 $T(\cdot)$. 在新坐标 O' 中, 起点和目标点的坐标分别是 $q'_s = (0, 0, 0, 0)$ 和 $q'_e = (x'_e, y'_e, \theta'_e, 0)$. 为处理起点和目标点之间方向共线的情况, 定义了特殊转弯单元. 以此为基础, 定义了普通转弯单元, 处理起点和目标点之间方向不共线的情况.

1) 特殊转弯单元 T_0 , 这是针对 $\theta'_e = 0$ 的情况. 其中, 当向量 $\vec{q'_s q'_e}$ 平行于 x 轴时, q'_s 和 q'_e 之间仅需一条线段连接. 考虑到一对 Bezier 曲线的转角范围 $(0, \pi)$, 转弯单元 T_0 至少需要两对 Bezier 曲线进行

方向转变. 如图 9 (a) 所示, 线段 $q_2 q_4$ 用于辅助两对 Bezier 曲线之间的平滑连接. 记向量 $\vec{q_2 q_4}$ 与 x 轴夹角为 γ , γ 的大小由起点与目标点的相对位置决定: 当 $y'_e \geq 2d_k(\pi/4)$ 时, 如图 9 (a) 中的虚线所示, $\gamma = \pi/2$. 控制点 q_3, q'_3, q_1 的坐标可由式 (15)~(17) 确定:

$$q_3 = \left(x'_e - d_k \left(\frac{\pi}{4} \right), y'_e - d_k \left(\frac{\pi}{4} \right) \right) \quad (15)$$

$$q'_3 = \left(x'_e - d_k \left(\frac{\pi}{4} \right), d_k \left(\frac{\pi}{4} \right) \right) \quad (16)$$

$$q_1 = \left(x'_e - 2d_k \left(\frac{\pi}{4} \right), 0 \right) \quad (17)$$

当 $y'_e < 2d_k(\pi/4)$ 时, 根据式 (18), γ 的值如式 (19) 所示.

$$\frac{|y'_e|}{\sin \gamma} = 2d_k \left(\frac{\gamma}{2} \right) \quad (18)$$

$$\gamma = 2 \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{c_k^2 + 4} - c_k}{2} \right) \quad (19)$$

其中,

$$c_k = \frac{27c_3 \|y'_e\| k_{\max}}{2(c_2 + 4)^2}$$

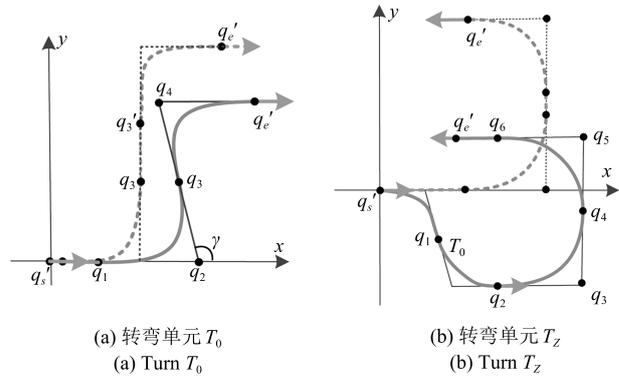


图 9 特殊转弯单元

Fig. 9 Special turns dealing with collinear conditions

基于转向角, 点 q_3 和 q_1 可由式 (20) 和式 (21) 计算.

$$q_3 = \left(x'_e - d_k \left(\frac{\gamma}{2} \right) \times (1 + \cos \gamma), y'_e - d_k \left(\frac{\gamma}{2} \right) \times \sin \gamma \right) \quad (20)$$

$$q_1 = \left(x'_e - d_k \left(\frac{\gamma}{2} \right) \times \sin \gamma, 0 \right) \quad (21)$$

若 $x_1 \neq 0$, 工装需从起点 q'_3 前进 ($x_1 > 0$) 或后退 ($x_1 < 0$) 至点 q_1 . 因此, 转弯单元 T_0 以线段开始, 两对 Bezier 曲线紧接其后, 可表示为 $LB_c B_c$ 或者 $LB_c LB_c$.

2) 特殊转弯单元 T_Z , 这是针对 $\theta'_e = \pi$ 的情况. 与转弯单元 T_0 类似, 转弯单元 T_Z 也至少需要两对 Bezier 曲线进行位姿转换. 如图 9(b) 所示, 设计辅助 Bezier 曲线之间平滑连接的直线垂直于 x 轴, 即 $\gamma = \pi/2$. 当 $y'_e \geq 2d_k(\pi/4)$ 时, 两对 Bezier 曲线之间需要使用线段连接, 如图 9(b) 中的虚线所示. 因此, 这种情况下, 转弯单元 T_Z 有两条线段及两对 Bezier 曲线组成, 可表示为 B_cLB_cL 或者 LB_cLB_c . 当 $y'_e < 2d_k(\pi/4)$ 时, 首先利用不改变工装方向的转弯单元 T_0 增加垂直距离, 如图 9(b) 中的实线所示. 根据转弯单元 T_0 的几何约束, T_0 的目标点 q_2 的坐标计算公式为

$$q_2 = \left(-2d_k \left(\frac{\pi}{4} \right) \times \left(1 + \sin \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) \right), y'_e - 2d_k \left(\frac{\pi}{4} \right) \right) \quad (22)$$

其中, φ 利用式 (19) 计算得到, 则点 q_6 的坐标为 $(x_6, y_6) = (x_2, y'_e)$. 若 $x_6 \neq x'_e$, 则需在点 q'_s 和 q_6 这段路径的前面 ($x_6 < x'_e$) 或者后端 ($x_6 > x'_e$) 增加一条线段以完成连接. 因此, 在这种情况下, 转弯单元 T_Z 由转弯单元 T_0 , 两对 Bezier 曲线和一条线段组成, 可以表示为 $LT_0B_cB_c$ 或者 $T_0B_cB_cL$.

5.2 普通转弯单元

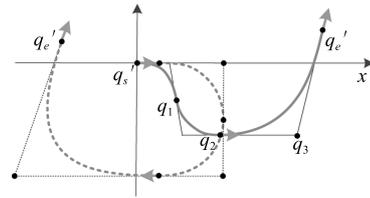
为了处理起点和目标点方向不共线的情况, 以上述设计的特殊转弯单元为基础, 设计了三种普通转弯单元. 与特殊转弯单元相比, 普通单元更加常用, 也更加复杂. 如图 10 所示, 在水平线的辅助下, 普通转弯单元的构成包括两部分, 一部分是特殊转弯单元 T_0, T_Z 或者直线段, 用以连接起点和水平辅助点, 另一部分是一对三阶 Bezier 曲线, 用以连接水平辅助点和目标点.

1) 转弯单元 T_1 , 这是针对 $0 < \theta'_e < \pi$ 的情况. 如图 10(a) 所示, 若 $x'_e > 0$, 水平辅助点 q_2 的方向与起点 x'_s 处方向相同, 则使用转弯单元 T_0 或直线段 L 连接点 x'_s 和点 q_2 . 因此, 转弯单元 T_1 包含转弯单元 T_0 或直线段 L 以及一对 Bezier 曲线, 可以表示为 T_0B_c 或 LB_c . 另一方面, 若 $x'_e \leq 0$, 水平辅助点 q_2 的方向与起点 x'_s 处方向相反, 则使用转弯单元 T_Z 或直线段 L 连接点 x'_s 和点 q_2 . 因此, 转弯单元 T_1 包含转弯单元 T_Z 以及一对 Bezier 曲线, 可以表示为 T_ZB_c .

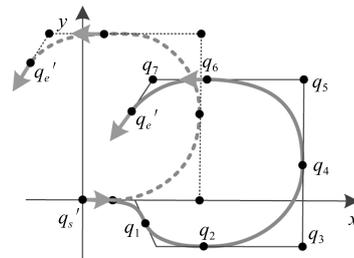
2) 转弯单元 T_2 , 这是针对 $\pi < \theta'_e < 1.5\pi$ 的情况. 如图 10(b) 所示, 由于水平辅助点 q_6 的方向与起点处方向相反, 因此, 转弯单元 T_2 包含转弯单元 T_Z 以及一对 Bezier 曲线, 可以表示为 T_ZB_c .

3) 转弯单元 T_3 , 这是针对 $1.5\pi \leq \theta'_e < 2\pi$ 的情况. 如图 10(c) 所示, 转弯单元 T_3 由转弯单元 T_0

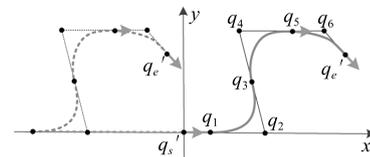
或直线段 L 以及一对 Bezier 曲线构成, 可以表示为 T_0B_c 或 LB_c .



(a) 转弯单元 T_1
(a) Turn T_1



(b) 转弯单元 T_2
(b) Turn T_2



(c) 转弯单元 T_3
(c) Turn T_3

图 10 普通转弯单元

Fig. 10 General Bezier turns dealing with non-collinear conditions

5.3 转弯单元的扩展

上述转弯单元的设计以目标点位于 x 轴上及 x 轴上方为前提, 即不能直接适用于位于 x 轴下方的目标点, 利用式 (23) 将其映射到 x 轴上方, 即可应用上述设计的转弯单元拟合路径, 然后将拟合的路径对称到 x 轴下方, 就可以解决这一问题. 例如, 如图 11 所示, 点 q''_e 与 q'_e 关于 x 轴对称, 起点 $q'_s \sim q'_e$ 的路径可以通过对称起点 $q'_s \sim q''_e$ 的路径得到, 而起点 q'_s 和点 q''_e 之间的路径利用转弯单元 T_2 拟合. 因此, 经过扩展后的转弯单元能够平滑连接任何方向、任何位置的两点.

$$S(q'_e) = (x'_e, -y'_e, \theta'_e, 0) \quad (23)$$

5.4 利用转弯单元拟合路径点

总的来说, 利用转弯单元连接两点时包括三步,

如图 12 所示. 首先通过平移、旋转等将两点转换到坐标系 O' 下, 若目标点位于 x 轴下方, 还需要利用式 (23) 进行映射操作; 然后计算两点方向之间的夹角, 根据夹角的大小, 选择对应的转弯单元拟合两点之间的路径; 最后将此路径坐标反变换至坐标系 O 下, 得到工装平滑运动路径.

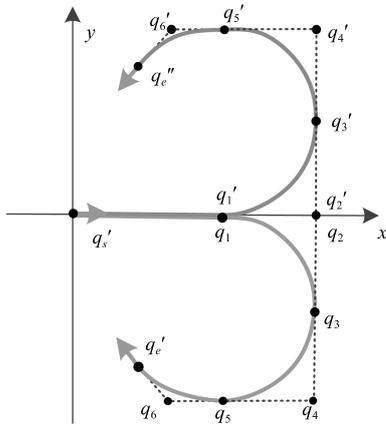


图 11 转弯单元的对称
Fig. 11 Symmetrical Bezier turns

利用上述设计的转弯单元拟合蚁群算法搜索到的一系列路径点, 能够获得一条安全可行的平滑路径. 例如, 在图 13 中, 点 (p_1, p_2, \dots, p_6) 是蚁群算法搜索的路径点. 为了利用转弯单元拟合这些路径点, 首先, 定义路径点之间的连接控制点 (q_1, q_2, \dots, q_7) , 其中, q_1 和 q_7 是给定的起点和目标点, 其他点 $q_i (i = 2, \dots, 6)$ 的方向是从点 p_{i-1} 指向点 p_i , 根据相邻控制点方向的夹角 γ , 利用式 (24) 计算 q_i 的位置. 然后, 利用转弯单元连接所有相邻的控制点, 即可得到平滑路径, 如图 13 中的实线所示.

$$q_i = q_{i-1} + d_k(\gamma) \times \frac{\vec{p_1 p_2}}{|\vec{p_1 p_2}|}, \quad i = 2, \dots, 6 \quad (24)$$

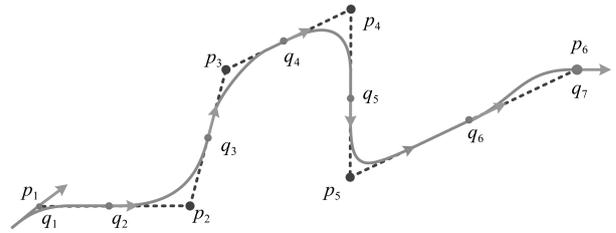
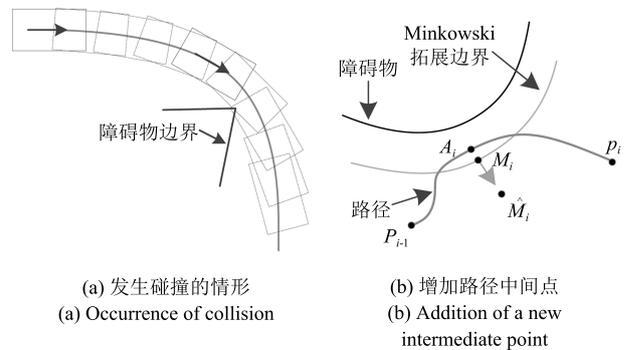


图 13 基于 Bezier 曲线的平滑路径
Fig. 13 A Bezier path

5.5 碰撞检测

在第 4.4 节, 通过移动算子和删除算子修正路径的中间点, 改善路径形状, 降低与障碍物发生碰撞的风险. 然而, 平滑后的路径仍然可能与障碍物发生碰撞, 因此, 为保障路径的安全性, 碰撞检测必不可少. 以一定的采样间隔对平滑后的路径进行采样, 将工装放置在采样点处, 工装后轮的中心与采样点重合, 方向与路径的切线方向一致, 如图 14 (a) 所示. 然后检验工装的四条边是否与障碍物的边界发生



(a) 发生碰撞的情形
(a) Occurrence of collision
(b) 增加路径中间点
(b) Addition of a new intermediate point

图 14 碰撞检测
Fig. 14 Detection of collision

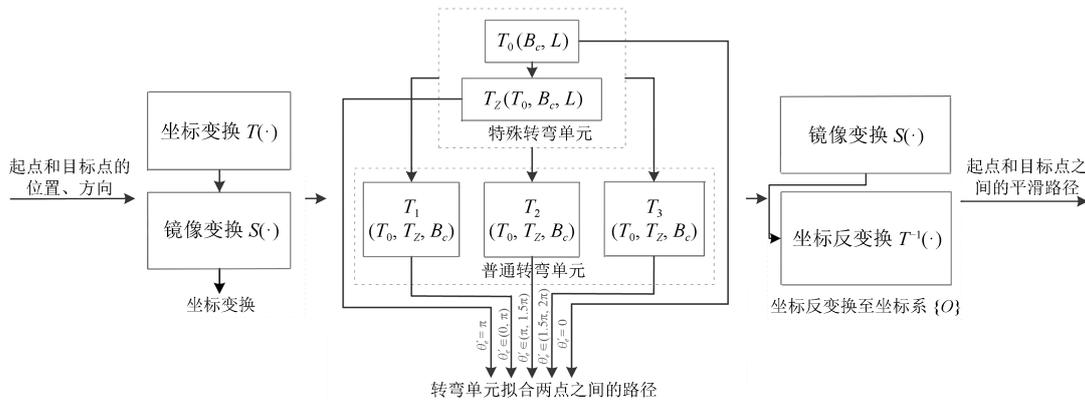


图 12 转弯单元算法流程图
Fig. 12 Flowchart of the Bezier turns

碰撞. 若发生碰撞, 求取发生碰撞路段的平均值 A_i , Minkowski 拓展边界与 A_i 的最近的点及对应的法向量分别记为 M_i 和 V_i , A_i 和 M_i 之间的距离记为 d_{am} , 将点 M_i 沿着向量 V_i 的方向移动 $1.5d_{am}$, 记为 \hat{M}_i , 在路径点 p_{i-1} 和 p_i 中间增加点 \hat{M}_i , 以避免工装运动发生碰撞, 如图 14(b) 所示.

6 实验与结果

6.1 非均匀模型与改进蚁群算法仿真验证

本节中, 在一台运行 Windows 7 操作系统的电脑上, 以 Visual Studio 2010 为平台利用 C++ 语言验证本文算法. 根据文献 [33] 并经过多次实验测试, 相关算法参数确定为: $\alpha = 1$, $\beta = 2$, $q_0 = 0.6$, $\xi = 0.2$, $\rho = 0.1$, $\lambda_1 = 0.2$, $\lambda_2 = 0.4$, $\lambda_3 = 0.4$, $Q = 10$, $\delta = 0.01$, $\Delta\tau(r, u) = 0$, $t = 0.004$, $N_l = 10$, $\tau_{\max} = 0.5$, $\tau_{\min} = 0.001$, 蚂蚁数量为 20, 最大迭代次数为 50 次.

为了验证本文非均匀环境建模与改进蚁群算法, 利用改进蚁群算法和基本 MMAS 算法分别在基于二叉树结构的非均匀环境模型和均匀栅格模型中进行路径规划. 在实验中, 栅格尺度与非均匀环境模型最小尺度相同, 基本 MMAS 算法采用的参数与改进蚁群算法相同. 设定起点坐标为 $(-944 \text{ mm}, -9715 \text{ mm})$, 随机选取 10 处终点, 分别应用两种算法在两种环境模型中规划工装的运动路径多次.

表 1 为均匀栅格法和二叉树法对靶场环境建模的结果. 由表 1 可知, 二叉树法建立环境模型的栅格数远小于栅格法, 有效地压缩了环境信息, 降低搜索复杂度. 路径规划结果如表 2 所示. 表 2 中, F_w , L_w , E_w , B_w , T_w 分别表示路径的适应度值、长度、危

表 1 两种建模方法对比

Table 1 Comparison of the two modeling methods

	自由栅格	障碍栅格	总数
二叉树法	1 219	1 377	2 596
均匀栅格法	11 839	9 071	20 910

险度、转弯次数和耗时. 表 2 中的路径是按照长度由短到长排列的, 并且每项指标对应的最优值已加粗表示. 从表中可以看出, 改进蚁群算法和基本 MMAS 算法在非均匀环境模型中规划的路径与其在均匀栅格模型中规划的路径相比, 适应度值较高、路径长度较短、危险性较低、转弯次数较少、耗时较短, 说明利用二叉树结构建立的非均匀环境模型能够有效提高搜索效率与路径规划质量. 在非均匀环境模型中, 与基本 MMAS 算法相比, 改进蚁群算法规划的路径的各项指标均优于基本 MMAS 算法, 而且随着路径长度的增长, 搜索复杂程度的升高, 改进算法优势更加明显. 在第一个终点处, 路径长度较短, 两种算法获得路径相同. 而在最后一个终点处, 路径较长, 改进算法获得的路径适应度值比基本 MMAS 算法高出 17.12%, 路径长度、危险性、转弯次数和耗时分别降低了 37.15%、47.37%、68.89% 和 52.93%, 这表明改进蚁群算法能够有效地提高工装的安全性与可操作性. 表 3 为在非均匀模型中本文算法和基本 MMAS 算法性能的对比. 由表 3 可以看出, 本文算法耗时约 6.51 s, 基本 MMAS 算法耗时约 12.98 s. 与 MMAS 算法相比, 本文算法效率提高约 50%, 这是由于基本 MMAS 算法限制各条路径信息素浓度的 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$, 避免算法过早收敛于局部最优解, 同时也增加了规划路径的耗时. 图 15

表 2(a) 本文算法与基本 MMAS 在不同环境模型下对比 (a)

Table 2(a) Comparison of the proposed algorithm with the MMAS in different environmental models (a)

序号	终点	改进算法 + 非均匀模型					改进算法 + 均匀栅格模型				
		F_w	L_w	E_w	B_w	T_w	F_w	L_w	E_w	B_w	T_w
1	(-353, -7548)	8.63	1 897	0.77	2	0.93	8.61	2 444	0.83	3.3	1.01
2	(4572, -5381)	8.63	22 717	0.54	6	1.21	8.04	15 082	1.03	24.7	2.99
3	(5 754, -259)	8.46	25 634	0.63	9.7	1.71	7.91	21 730	0.99	36.7	4.51
4	(5 557, 6 242)	8.15	41 289	1.00	16.8	4.32	7.50	44 339	1.26	89.3	13.15
5	(632, 10 182)	8.15	41 954	0.83	15.5	4.33	7.36	50 922	1.12	105.8	15.31
6	(2 602, 11 167)	8.26	43 852	0.82	16.7	4.70	7.33	51 068	1.26	108.3	14.69
7	(-3 899, 5 848)	8.26	53 701	0.79	18.4	5.34	6.98	65 284	1.24	147	2 185
8	(-6 066, 726)	8.18	65 815	0.78	24.8	6.53	6.75	74 028	1.12	175.1	32.27
9	(-10 203, -6 563)	8.21	70 886	0.77	22.8	7.73	6.32	93 157	1.27	240.2	49.75
10	(-5 278, -4 593)	8.14	71 386	0.80	27.1	7.72	6.40	90 830	1.44	227.4	51.42

表 2 (b) 本文算法与基本 MMAS 在不同环境模型下对比 (b)

Table 2 (b) Comparison of the proposed algorithm with the MMAS in different environmental models (b)

序号	基本 MMAS 算法 + 非均匀模型					基本 MMAS 算法 + 均匀栅格模型				
	F_w	L_w	E_w	B_w	T_w	F_w	L_w	E_w	B_w	T_w
1	8.63	1897	0.77	2	0.57	8.61	2411	0.90	2.3	0.31
2	8.56	20341	0.55	6	1.66	7.65	12711	1.67	27.5	2.09
3	8.46	25320	0.65	9.2	1.77	7.23	23016	1.70	61.2	3.93
4	8.04	38956	1.15	18.4	6.62	6.14	50406	2.09	152.5	13.14
5	8.13	46588	0.98	19	7.47	5.36	85489	2.01	266.8	20.03
6	8.17	44814	0.93	17.8	6.53	5.67	65877	2.21	204.4	16.22
7	7.76	66983	1.26	36	10.46	4.02	200854	2.38	672.7	38.22
8	7.36	83167	1.58	56.1	12.96	3.82	1151948	2.36	3925	51.51
9	7.03	116137	1.63	83.05	15.72	3.88	1304770	2.49	4450	61.40
10	6.95	113584	1.71	87.1	16.40	3.87	1418617	2.61	4835.9	60.16

表 3 多次独立实验中本文算法和基本 MMAS 算法的对比
Table 3 Comparison of the planned results of the proposed algorithm and the MMAS algorithm in several independent experiments

	本文算法	基本 MMAS 算法
适应度	8.21	7.33
路径长度 (mm)	63453	86501
危险度	0.77	1.65
转弯次数 (次)	23.1	56.3
耗时 (s)	6.51	12.98

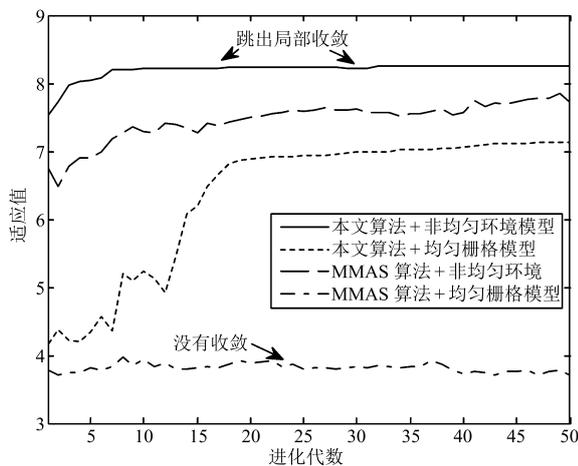


图 15 两种算法适应度值随进化代数的变化

Fig. 15 Plot of the fitness values obtained by the two algorithms versus iterations

为两种算法在两种环境模型中的适应度值随着进化代数的变化情况. 从图 15 可以看出, 非均匀环境模

型下的改进蚁群算法收敛速度较快, 且具有跳出局部收敛的能力. 基本 MMAS 算法收敛速度较慢, 在进化代数 50 次结束时, 仍没有收敛. 图 16 为一次试验中, 利用本文算法和 MMAS 算法在均匀环境模型下和非均匀环境模型下分别进行路径规划的结果. 从图 16 可以看出, 非均匀环境模型下的改进蚁群算法规划的路径不仅充分考虑了起点和终点的方向, 且通过修正算子有效地减少了路径转弯次数, 提高路径平滑性. 均匀栅格模型下的基本 MMAS 算法由于启发式信息中缺乏有效的距离信息指导, 而陷入半封闭的障碍区域. 从以上实验结果可以看出, 在靶场系统的复杂环境下规划大型辅助工装的可行路径, 与基本 MMAS 算法相比, 改进算法收敛速度快, 具有较强的跳出局部收敛的能力, 规划出的路径安全性和可行性高, 且随着搜索空间复杂程度的提高, 本文算法的优越性将进一步凸显.

6.2 路径平滑算法仿真实验

本节中, 通过多组实验验证上述设计的路径平滑算法的可行性与有效性. 在实验中, 工装的最小转弯半径是 2482 mm, 路径的最大曲率是 $4.029 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$. 利用路径平滑算法拟合蚁群算法搜索的路径点, 结果如图 17 所示. 在图 17(a) 中, 由于起点和终点给定的方向与路径点之间的方向不一致, 且与相邻的控制点之间的距离较近, 因此, 均使用了倒车操作. 拟合得到的路径紧紧围绕在路径点周围, 能够保证工装运动的安全性. 从图 17(b) 可以看出, 路径曲率连续, 且小于最大值 $4.029 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$. 因此, 利用本文提出的路径平滑算法能够获得一条曲率连续且曲率满足上界要求的路径.

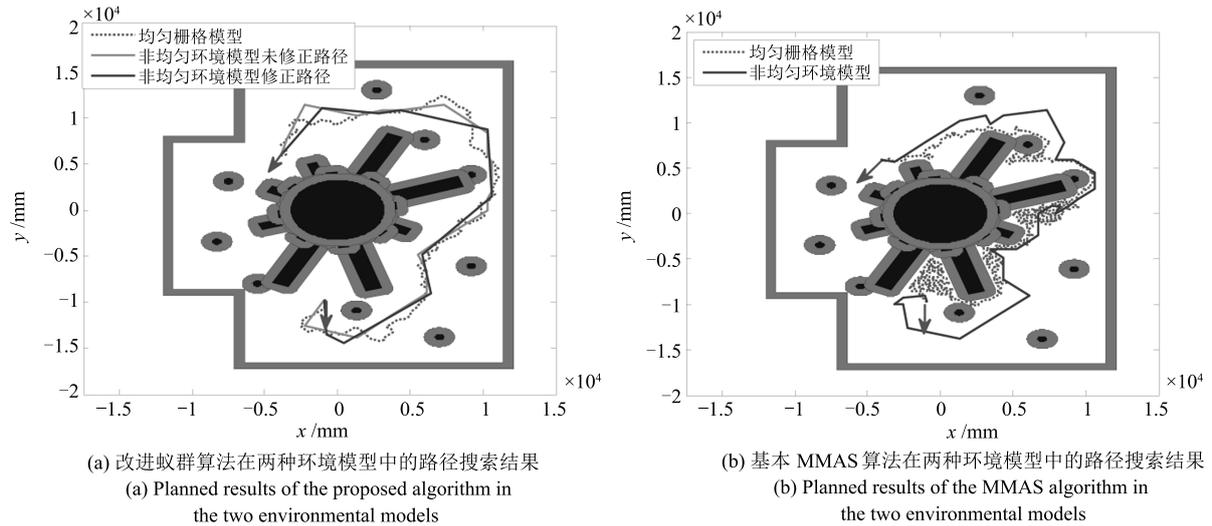


图 16 本文算法和基本 MMAS 算法的对比

Fig. 16 Comparison of the proposed algorithm and the MMAS algorithm

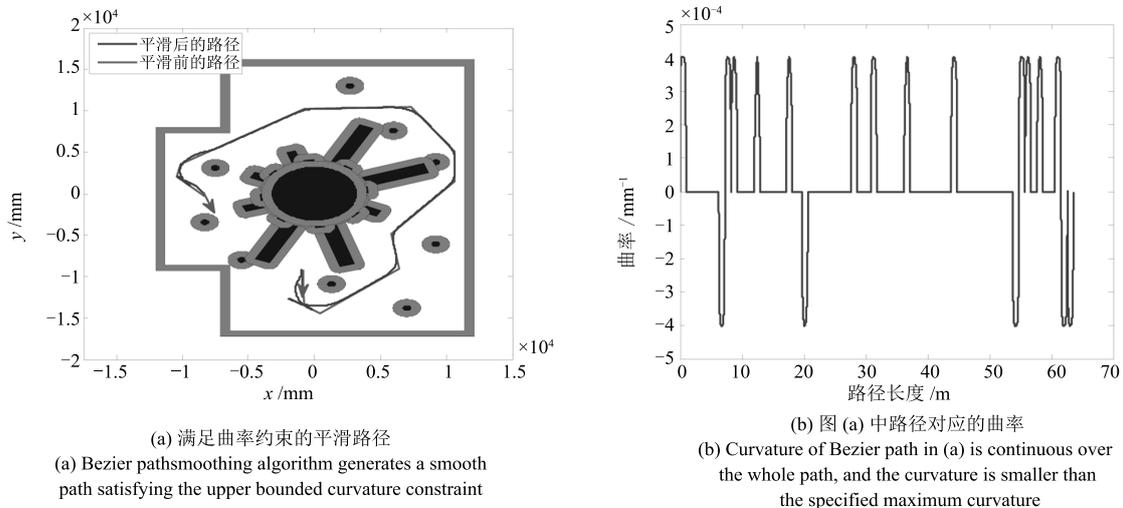


图 17 基于本文路径平滑算法获取平滑路径

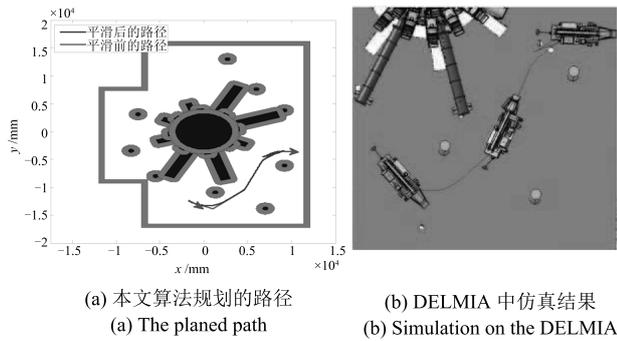
Fig. 17 Planned results of the proposed Bezier-based path smoothing algorithm

为了进一步验证路径平滑算法的可行性,在 DELMIA 平台上对两组利用本文路径规划算法获得的路径进行仿真. 第 1 组仿真实验结果如图 18 所示. 起点和目标点分别为 $q_s = (-1\ 400\ \text{mm}, -12\ 715\ \text{mm}, 5.4978\ \text{rad}, 0)$ 和 $q_e = (9\ 200\ \text{mm}, -3\ 500\ \text{mm}, 0\ \text{rad}, 0)$. 第 2 组仿真结果如图 19 所示, 其起点和目标点分别为 $q_s = (8\ 000\ \text{mm}, -2\ 000\ \text{mm}, 0.7854\ \text{rad}, 0)$ 和 $q_e = (2\ 500\ \text{mm}, 11\ 000\ \text{mm}, 2.6779\ \text{rad}, 0)$. 图 18(a) 和图 19(a) 分别给出了两组实验规划的路径, 其中折线表示改进蚁群算法搜索到的路径, 平滑曲线表示利用路径平滑算法平滑后的路径. 两组实验的仿真结果分别如图 18(b) 和图 19(b) 所示, 工装仿真实际路径如图中曲线所示, 由图 18 和图 19 可以看出, 工装能够

在平滑后的路径上安全, 顺利运行. 在 DELMIA 平台上的仿真实验表明, 本文提出的路径规划算法能够在复杂环境中规划出工装的安全可行路径.

7 结论

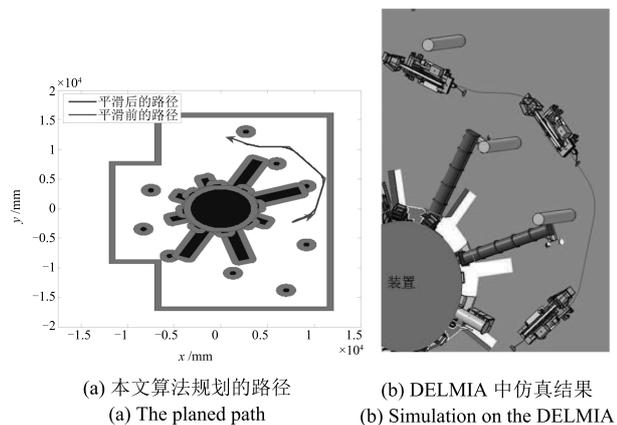
本文主要研究了复杂环境下大型辅助工装的路径规划问题, 主要包括环境建模、路径搜索和路径平滑三个步骤. 在环境建模过程中, 对于环境中的不规则障碍物, 利用凸投影表示其在已知平面上形成的障碍区域. 然后, 利用 Minkowski 和对障碍物进行膨胀, 建立工装的 C -空间. 与直接拓展边界的方法相比, 这种方式可有效减少自由空间的浪费, 增大了可行路径存在的可能性. 最后, 采用线性二叉树结构以非均匀划分的方式建立环境模型.



(a) 本文算法规划的路径 (a) The planned path
(b) DELMIA 中仿真结果 (b) Simulation on the DELMIA

图 18 第 1 组仿真实验结果

Fig. 18 The first simulation experiment



(a) 本文算法规划的路径 (a) The planned path
(b) DELMIA 中仿真结果 (b) Simulation on the DELMIA

图 19 第 2 组仿真实验结果

Fig. 19 The second simulation experiment

在路径搜索过程中, 利用改进蚁群系统算法规划工装的运动路径. 该算法综合考虑了多方面的因素, 如栅格到目标点的有效距离、栅格到障碍物的距离、路径的转弯次数、路径长度、安全性等, 以有效地引导蚂蚁搜寻安全无碰撞路径, 并且设计了路径修正算子进一步优化整体路径.

在路径平滑过程中, 充分考虑工装的非完整性约束及起点和目标之间的相对位置, 基于二阶连续的三阶 Bezier 曲线设计了能够连接任意位置和方向的两点的转弯单元, 然后通过转弯单元连接蚁群算法搜索路径点, 获得一条曲率连续且满足曲率上界的可行路径. 实验证明, 该算法规划出的路径能够有效引导工装在复杂环境下安全平滑运动.

References

- 1 Elbanhawi M, Simic M. Sampling-based robot motion planning: a review. *IEEE Access*, 2014, **2**: 56–77
- 2 Maekawa T, Noda T, Tamura S, Ozaki T, Machida K. Curvature continuous path generation for autonomous vehicle using B-spline curves. *Computer-Aided Design*, 2010, **42**(4): 350–359
- 3 Jung D, Tsiotras P. On-line path generation for unmanned aerial vehicles using B-spline path templates. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2013, **36**(6): 1642–1653
- 4 O'Rourke J. *Computational Geometry in C*. London: Cambridge University Press, 1997.
- 5 Neus M, Maouche S. Motion planning using the modified visibility graph. In: *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. Tokyo, Japan: IEEE, 1999. 651–655
- 6 Brooks R A. Solving the find-path problem by good representation of free space. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1983, **SMC-13**(2): 190–197
- 7 Alajlan M, Koubaa A, Chaari I, Bennaceur H, Ammar A. Global path planning for mobile robots in large-scale grid environments using genetic algorithms. In: *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Individual and Collective Behaviors in Robotics (ICBR)*. Sousse, Tunisia: IEEE, 2013. 1–8
- 8 Takahashi O, Schilling R J. Motion planning in a plane using generalized voronoi diagrams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, **5**(2): 143–150
- 9 Jan G E, Sun C C, Tsai W C, Lin T H. An $O(n \log n)$ shortest path algorithm based on Delaunay triangulation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, **19**(2): 660–666
- 10 Stentz A. Optimal and efficient path planning for unknown and dynamic environments. *International Journal of Robotics and Automation*, 1995, **10**(3): 89–100
- 11 Alexopoulos C, Griffin P M. Path planning for a mobile robot. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1992, **22**(2): 318–322
- 12 Fan D K, Shi P. Improvement of Dijkstra's algorithm and its application in route planning. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*. Yantai, China: IEEE, 2010. 1901–1904
- 13 Hu Y R, Yang S X, Xu L Z, Meng M Q H. A knowledge based genetic algorithm for path planning in unstructured mobile robot environments. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. Shenyang, China: IEEE, 2004. 767–772
- 14 Dorigo M, Maniezzo V, Coloni A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 1996, **26**(1): 29–41
- 15 Juang C F, Hsu C H. Reinforcement ant optimized fuzzy controller for mobile-robot wall-following control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(10): 3931–3940
- 16 Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997, **1**(1): 53–66
- 17 Stützle T, Hoos H H. MAX-MIN ant system. *Future Generation Computer Systems*, 2000, **16**(8): 889–914
- 18 Zeng D W, He Q, Leng B, Zheng W M, Xu H W, Wang Y Y, Guan G. An improved ant colony optimization algorithm based on dynamically adjusting ant number. In: *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. Guangzhou, China: IEEE, 2012. 2039–2043
- 19 Dubins L E. On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents. *American Journal of Mathematics*, 1957, **79**(3): 497–516
- 20 Reeds J A, Shepp L A. Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards. *Pacific Journal of Mathematics*, 1990, **145**(2): 367–393

- 21 Boissonnat J D, Cerezo A, Leblond J. Shortest paths of bounded curvature in the plane. In: Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nice, France: IEEE, 1992. 2315–2320
- 22 Scheuer A, Fraichard T. Collision-free and continuous-curvature path planning for car-like robots. In: Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Albuquerque, New Mexico, USA: IEEE, 1997. 867–873
- 23 Scheuer A, Fraichard T. Planning continuous-curvature paths for car-like robots. In: Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Osaka, Japan: IEEE, 1996. 1304–1311
- 24 Scheuer A, Fraichard T. Continuous-curvature path planning for car-like vehicles. In: Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Grenoble, France: IEEE, 1997. 997–1003
- 25 Fraichard T, Scheuer A. From Reeds and Shepp's to continuous-curvature paths. *IEEE Transactions on Robotics*, 2004, **20**(6): 1025–1035
- 26 Yang K, Sukkarieh S. An analytical continuous-curvature path-smoothing algorithm. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, **26**(3): 561–568
- 27 Walton D J, Meek D S, Ali J M. Planar G^2 transition curves composed of cubic Bézier spiral segments. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2003, **157**(2): 453–476
- 28 Škrjanc I, Klančar G. Optimal cooperative collision avoidance between multiple robots based on Bernstein-Bézier curves. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, **58**(1): 1–9
- 29 Lo Bianco C G, Piazzzi A, Romano M. Smooth motion generation for unicycle mobile robots via dynamic path inversion. *IEEE Transactions on Robotics*, 2004, **20**(5): 884–891
- 30 Piazzzi A, Lo Bianco C G, Romano M. η^3 -spline for the smooth path generation of wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, **23**(5): 1089–1095
- 31 Lai X C, Al Mamun A, Ge S S. Polar polynomial curve for smooth, collision-free path generation between two arbitrary configurations for nonholonomic robots. In: Proceedings of the 22nd International Symposium on Intelligent Control. Singapore, Singapore: IEEE, 2007. 59–64
- 32 Sahni S. *Data Structures, Algorithms, and Applications in C++*. Boston: McGraw Hill, 1998.
- 33 Duan H B, Ma G J, Liu S Q. Experimental study of the adjustable parameters in basic ant colony optimization algorithm. In: Proceedings of the 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Singapore, Singapore: IEEE, 2007. 149–156



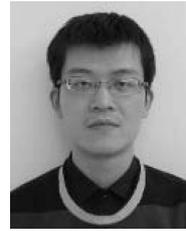
卜新苹 中国科学院自动化研究所硕士研究生. 2013 年获得中国海洋大学学士学位. 主要研究方向为机器人运动优化与建模. 本文通信作者.

E-mail: xinpings102@126.com

(**BU Xin-Ping** Master student at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. She received her

bachelor degree from the College of Information Science

and Engineering, Ocean University of China in 2013. Her research interest covers optimization and modeling of motions of robots. Corresponding author of this paper.)



苏 虎 中国科学院自动化研究所助理研究员. 2013 年获得中国科学院自动化研究所博士学位. 主要研究方向为机器人控制, 系统建模与仿真.

E-mail: hu.su@ia.ac.cn

(**SU Hu** Assistant professor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his

Ph.D. degree from the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2013. His research interest covers robot control, system modeling and simulation.)



邹 伟 中国科学院自动化研究所研究员. 2003 年获得中国科学院自动化研究所博士学位. 主要研究方向为智能机器人, 视觉伺服, 机器视觉以及模式识别.

E-mail: wei.zou@ia.ac.cn

(**ZOU Wei** Professor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his Ph.D. de-

gree from the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2003. His research interest covers intelligent robot, visual serving, machine vision, and pattern recognition.)



王 鹏 中国科学院自动化研究所副研究员. 2010 年获得中国科学院自动化研究所博士学位. 主要研究方向为机器视觉, 机器人系统及应用, 系统建模与仿真.

E-mail: peng_wang@ia.ac.cn

(**WANG Peng** Associate professor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his

Ph.D. degree from the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2010. His research interest covers machine vision, robot system and application, and system modeling and simulation.)



周 海 中国工程物理研究院激光聚变研究中心研究员. 2004 年获得四川大学机械工程硕士学位. 主要研究方向为高功率激光技术研究.

E-mail: a687097@163.com

(**ZHOU Hai** Professor at the Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics. He

received his master degree in mechanical engineering from Sichuan University in 2004. His main research interest is high-power laser technology.)