

doi: 10.7690/bgzd.2025.07.001

一种基于改进 RRT 的起重机路径规划算法

卢德俊¹, 孟庆国²

(1. 江苏省特种设备安全监督检验研究院泰州分院, 江苏 泰州 225300;

2. 江苏华澄重工有限公司技术部, 江苏 泰州 214521)

摘要: 针对现有起重机路径规划效率低的问题, 提出一种基于改进快速探索随机树 (rapidly-exploring random tree, RRT) 的起重机路径规划算法。将广义距离替代经典 RRT 中欧氏距离, 解决多自由度 (degree of freedom, DOF) 下 RRT 中距离的定义不明确的问题。基于降维概念的胞元法, 将 C 构型空间 (configuration space, C 空间) 划分为大小相等的单元格, 解决经典 RRT 中最近邻搜索 (nearest neighbor search, NNS) 在计算时间和资源方面效率低的问题。实验结果表明: 在相同实验条件下, 改进的 RRT 算法比双向 RRT 算法计算时间减少 89.5%, 能提高计算时间效率和提升搜寻路径质量, 具有一定的参考价值。

关键词: 起重机; 路径规划; 快速探索随机树; 广义距离; 自由度; 最近邻搜索

中图分类号: TH21 **文献标志码:** A

A Crane Path Planning Algorithm Based on Improved RRT

Lu Dejun¹, Meng Qingguo²

(1. Taizhou Branch, Jiangsu Institute of Special Equipment Safety Supervision and Inspection, Taizhou 225300, China;

2. Technical Department, Jiangsu Huacheng Heavy Industry Co., Ltd., Taizhou 214521, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of crane path planning, a crane path planning algorithm based on improved rapidly-exploring random tree (RRT) is proposed. The generalized distance is used to replace the Euclidean distance in classical RRT, which solves the problem of unclear definition of distance in RRT with multiple degrees of freedom (DOF). Based on the concept of dimensionality reduction, the cell method divides the configuration space (C space) into equal-sized cells, which solves the problem of low efficiency in computing time and resources of the nearest neighbor search (NNS) in the classical RRT. The experimental results show that under the same experimental conditions, the improved RRT algorithm reduces the computing time by 89.5% compared with the two-way RRT algorithm, which can improve the efficiency of computing time and the quality of searching path, and has a certain reference value.

Keywords: crane; path planning; fast exploration random tree; generalized distance; degrees of freedom; nearest neighbor search

0 引言

起重机^[1-2]起重作业是建筑工地中最基础的任务之一。起重机路径规划对于缩短施工时间、提高生产质量和提供更安全的施工环境等具有重要意义^[3]。如果将起重机视为多自由度 (DOF) 机械手, 那么路径规划问题实际上就是起重机的运动规划。通过采用机器人中常用的 C 构型空间 (C 空间) 概念, 任何时间点及任何可能的起重机构型都可以简单地表示为 C 空间中的一个点。起重机吊装路径规划的问题可以定义为: 确定装载物的拾取和放置位置, 并找到一个可行且最佳的起重机配置序列, 将装载物从拾取位置运送到放置位置。对于起重机, 基本的自由度包括吊臂回转、俯仰和升降等; 因此, 给定起始 (拾取) 点和目标 (放置) 点, 可以使用路径查找算法来确定移动式起重机在 C 空间中的构型顺

序, 并可基于计算时间和路径长度等指标评估算法的性能。

目前, 大量学者对机器人典型路径规划问题进行了研究, 提出了许多有效的解决方案, 如图搜索算法、自然启发算法和基于采样算法。文献[4]针对水果采摘机械臂, 探讨了图搜索的 A* 算法的机械避障运动规划算法。基于图搜索或图遍历的算法通常包括图构建和图搜索 2 个步骤。图构建描述了环境几何, 包括障碍物和边界; 而图搜索则采用图论中的搜索算法来寻找最优路径。图搜索容易实现, 然而算法的效率取决于高质量的图构造, 这可能导致较大的收敛时间。

为提高搜索质量, 受自然启发的算法影响, 部分学者将如蚁群优化^[5] (ant colony optimization, ACO)、粒子群^[6] (particle swarm optimization,

PSO)、遗传算法^[7](genetic algorithm, GA)等引入机器人路径规划领域。然而,自然启发算法的收敛速度很低,使得这类算法在计算效率方面与其他算法相比没有明显的优势。

考虑到起重机工作环境的随机性,基于采样的算法在空间探测中具有很强的能力。通过采样点的碰撞检测,基于采样的方法避免了环境空间的显式建模,大大减少了计算时间和资源,这使得这类算法能够有效地解决高自由度的路径规划问题。快速探索随机树^[8](RRT)是最为经典的基于采样的路径规划算法。目前许多学者对其进行改进,如文献[9]提出了一种双向 RRT* 的移动机器人路径规划算法,提升算法的整体收敛效率。目前,主流方法主要通过增加树的数量、先进的采样点或改进的扩展策略,在一定程度上提高了 RRT 的效率。然而, RRT 算法的固有策略(即寻找最近的节点)没有得到改进,这将消耗大量计算时间。

为改善上述问题,笔者提出一种改进 RRT 的起重机路径规划算法。通过改变遍历策略,提高了算法的效率和性能,确保了高效的提升路径规划过程,从而得到了最优的规划路径。

1 改进的 RRT 算法

RRT 是一种基于采样的算法,通过随机构建空间填充树来有效地搜索非凸高维空间。通过从搜索空间中随机选择样本节点, RRT 向空间中的未搜索区域递增地生长树,直到树到达目标节点。RRT 不需要空间的先验知识,可有效应用于动态环境中的高维规划问题。尽管 RRT 算法具有许多优点,但由于其搜索策略的固有限制,存在规划中并不总是生成最优路径的问题。查找最近邻居是 RRT 中树扩展的基本策略,但这一过程占用了大部分计算时间。具体地说, RRT 通过计算每个树节点与随机采样点之间的距离来找到最近的邻居。这就产生了 2 个问题:

1) RRT 中距离的定义不明确。与其他传统的路径规划算法类似, RRT 使用欧几里得距离或几何距离。然而,在起重机升降路径规划中并不适用。不同 DOF 的单位可能彼此不同,例如长度和角度。此外,由于欧几里得距离的物理意义尚不清楚,该值无法准确描述序列中起重机构型之间的“短”。

2) 搜索最近邻居效率较低。RRT 算法采用遍历方法,计算随机采样点和现有树上每个节点之间的距离。随着树的扩展,遍历所有树节点的计算时

间急剧增加。此外,随着自由度增加,计算时间将呈几何倍数剧增。

为改善传统 RRT 算法效率低的缺陷,该研究对 RRT 算法进行改进:首先,使用广义距离代替欧几里得距离,提升解的质量;其次,提出了层基于胞元法的最近邻居遍历方法,提升模型搜索效率。

1.1 广义距离法

在大多数路径规划问题中,初始节点和目标节点之间的变化主要基于实际距离;然而,对于起重机路径规划问题,每个 DOF 包括吊臂回转、俯仰和升降,而节点代表起重机的不同构型。这意味着起重机的构型可能会发生变化,而其位置保持不变;因此,欧氏距离将不适合起重机路径规划问题。

在吊装过程中,起重机的运动轨迹不会改变,但内部状态会不断变化;因此,对于起重机吊装路径规划问题,可基于距离测量反映不同起重机构型状态之间的转换成本。

基于物理学含义,起重机构型变化所消耗的总能量(ΔE)定义为 3 个自由度变化所消耗能量的总和:

$$\Delta E = E(f(t_j)) - E(f(t_i)) = \Delta E(\Phi) + \Delta E(\theta) + \Delta E(h); \quad (1)$$

$$f(t_j) = \{\Phi_j, \theta_j, h_j\}; \quad (2)$$

$$f(t_i) = \{\Phi_i, \theta_i, h_i\}. \quad (3)$$

式中: $f(t_j)$ 和 $f(t_i)$ 分别为起重机在时间 t_j 和 t_i 时的构型; $E(\bullet)$ 为起重机消耗的瞬时能量; Φ , θ 以及 h 分别为起重机的俯仰和升降自由度。

为了进一步梳理计算过程,给出了以下定义:

1) 起重机回转(rad)、俯仰(rad)和升降(m)的单位能耗分别定义为 ε_Φ 、 ε_θ 和 ε_h ; 2) 回转、俯仰和升降 3 个自由度的增量定义为 Δr_Φ 、 Δr_θ 和 Δr_h ; 3) 起重机圆弧轨迹回转(m)、俯仰(m)和升降(m)的单位能耗分别定义为 μ_Φ 、 μ_θ 和 μ_h ; 4) 起重机回转、俯仰和升降 3 个自由度的圆弧轨迹增量定义为 Δl_Φ 、 Δl_θ 和 Δl_h ; 5) ΔE_c 和 ΔE_l 分别表示起重机和起重物体所做的功。基于以上定义,可以得出以下结论:

$$\Delta E_c(\Phi) = \varepsilon_\Phi \cdot \Delta r_\Phi; \quad (4)$$

$$\Delta E_l(\Phi) = \mu_\Phi \cdot \Delta l_\Phi; \quad (5)$$

$$\Delta E_c(\theta) = \varepsilon_\theta \cdot \Delta r_\theta; \quad (6)$$

$$\Delta E_l(\theta) = \mu_\theta \cdot \Delta l_\theta; \quad (7)$$

$$\Delta E_c(h) = \varepsilon_h \cdot \Delta r_h; \quad (8)$$

$$\Delta E_l(h) = \mu_h \cdot \Delta l_h. \quad (9)$$

因此

$$\Delta E_c = \varepsilon_\Phi \cdot \Delta r_\Phi + \varepsilon_\theta \cdot \Delta r_\theta + \varepsilon_h \cdot \Delta r_h; \quad (10)$$

$$\Delta E_l = \mu_\Phi \cdot \Delta l_\Phi + \mu_\theta \cdot \Delta l_\theta + \mu_h \cdot \Delta l_h; \quad (11)$$

$$\Delta E_c = \tau \Delta E_l. \quad (12)$$

式中 τ 为起重机的功率转换效率，主要与起重机不同部件的摩擦程度和起重机的使用寿命有关。

考虑到提升载荷时每个自由度的增量能耗是一个常数，笔者提出了一个广义距离的概念，即用距离的变化来表示各个自由度的能耗。所提出的广义距离在本质上代表了起重机内部状态变化时的能量消耗。具体而言，对于上述 3 个自由度，吊臂回转和俯仰可以看作是半球上的一段圆弧，其半径为吊臂长度，中心位于吊臂下端；升降运动可以用起重钢丝绳的长度来表示；因此，起重机构型变化的能耗相当于每个自由度中距离的变化。

具有能量消耗的广义距离定义为：

$$D = L_m \cdot |\Phi_j - \Phi_i| + L_m \cdot |\theta_j - \theta_i| + |h_j - h_i|. \quad (13)$$

式中： L_m 为吊臂长度； Φ_j 和 Φ_i 为相邻构型的回转角度； θ_j 和 θ_i 为相邻构型的俯仰角； h_j 和 h_i 为相邻构型中的钢丝绳的长度。

1.2 胞元法

搜索问题本质上是最近邻搜索(NNS)问题。在起重机吊装路径规划问题中使用 NNS 方法在计算时间和资源方面存在效率太低问题。

笔者提出了基于降维概念的胞元法。胞元法将 C 空间划分为大小相等的单元格。在单元中创建新的采样节点，从相应的单元开始搜索最近的相邻节点。如在同一胞元中成功找到最近的相邻节点，则可以节省大量时间，因只需遍历相应胞元中的节点；如没有，则根据胞元中心点与相邻胞元中心点之间的距离逐个搜索其余胞元。通过使用胞元方法，将搜索最近相邻节点的问题简化为遍历同一胞元中的所有节点，而不是遍历整个 C 空间，从而在很大程度上提高搜索效率。

2 实验和结果

2.1 实验设置

为了验证所提起重机吊装路径规划算法的有效性和准确性，设计了建筑工程中吊装仿真实验。仿真实验场景如图 1 所示。实验环境在一个 10 m×10 m 的施工现场，包括建筑物、道路和临时设施(用方块描述)，将目标预制板从初始节点(90.0, 0, 50.0)吊装到目标节点(10.0, 100.0, 50.0)。吊装任务为将施工材料吊装到 2 层，此时已安装的建筑材料将视为障碍物。仿真实验时，以计算时间、路径长度、节点总数、碰撞频率和有效节点数量为指标，将改进的 RRT 算法与双向 RRT 算法进行比较。仿真环境

设置为：16 GB 内存的 Intel Core i7-7700HQ@2.80 GHz 四核浪潮服务器。

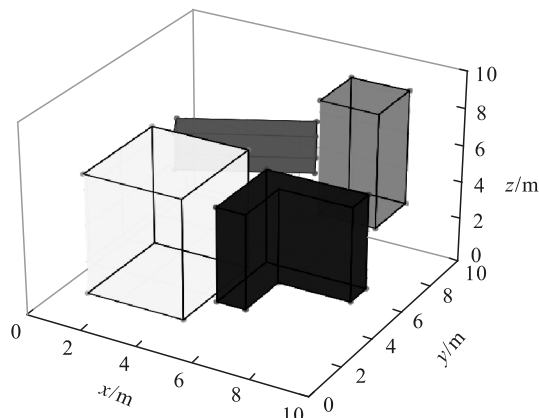


图 1 仿真实验场景

为了控制变量并准确评估不同算法的性能，每次实验中只有一个变量同时发生变化。此外，为消除随机干扰，每个实验在同一场景中进行 50 个测试，并将平均值作为最终结果。

实验中的评估参数包括：计算时间、路径长度、节点总数、碰撞频率和有效节点数量。节点总数代表 C 空间中 RRT 探索过程中所有节点的数量；碰撞频率表示当算法迭代时碰撞发生的频率；有效节点数目表示规划路径上的节点的数目。计算时间和节点总数反映了算法的效率，路径长度和有效节点数则反映了路径规划的质量。碰撞的频率反映了场景中障碍物的密度。

2.2 结果与分析

2.2.1 综合性能分析

将双向 RRT 算法与笔者改进的 RRT 算法进行综合对比。不同算法综合指标对比结果如表 1 所示。

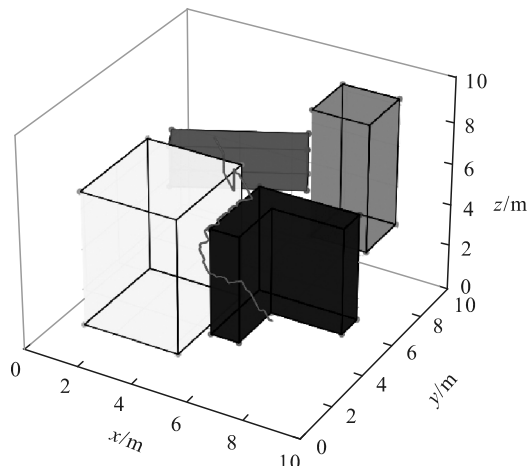
表 1 不同算法综合指标对比结果

算法	计算时间/ms	路径长度/m	节点总个数	碰撞频次	有效节点个数
双向 RRT	124	14 850.40	63 371	11 949	10
改进 RRT	13	7 955.86	49 226	9 676	9

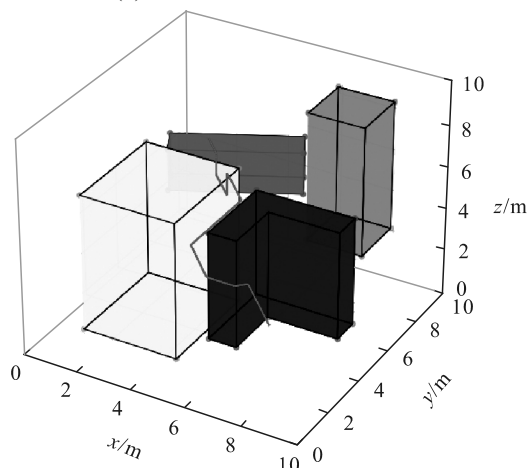
由表 1 可以看出：改进 RRT 中所提广义距离能够将计算时间减少 89.5%；同时，有效节点的数量减少了 10%，并在一定程度上减少了总节点的数量和碰撞频率。分析原因：由于欧氏距离的计算涉及平方运算，因此欧几里得距离的计算在算法复杂度高于广义距离。实验结果表明，在 RRT 中搜索最近节点时，胞元法和广义距离能够提高计算时间的效率和提升搜寻路径的质量。

2.2.2 路径规划结果

同算法路径规划结果如图 2 所示。灰线代表最终的操作路径。图 2(a)中可以看出,双向 RRT 路径存在冗余(部分抖动使得路径长度过大)。



(a) 双向 RRT 算法规划结果



(b) 改进 RRT 算法规划结果

图 2 不同算法路径规划结果对比

综合以上分析,改进的 RRT 算法优于双向 RRT 算法,所提广义距离法和胞元法能够有效提升规划

效率及规划解的质量。

3 结论

笔者考虑了起重机运动规划的独特性要求,以吊臂回转、俯仰和升降三自由度建立起重机运动规划模型,提出利用改进的 RRT 算法求解最优路径规划方案。通过实验仿真分析可知:所提改进 RRT 算法中的广义距离法和胞元法能够有效提升规划效率及规划解的质量。未来工作可对多自由度方案进行分析,进一步提升算法应用范围。

参考文献:

- [1] 王杰琮,战蓉洁,沈艳祥.核电站起重机数字化设计方法[J].机械工程与自动化,2023(3):200-201,204.
- [2] 路艺.塔式起重机在建筑工程施工中的安全性分析[J].工程机械与维修,2022(6):29-31.
- [3] 康玉伟,陈鹏宇,王馨,等.面向吊装路径规划的履带起重机运动学建模方法[J].机电工程,2023,40(2):307-316.
- [4] 官金炫,林桂潮,张世昂,等.水果采摘机械臂避障运动规划优化算法[J].现代农业装备,2021,42(3):49-55.
- [5] 徐万福,孙渊.基于多步长蚁群算法的移动机器人路径规划[J].组合机床与自动化加工技术,2023,592(6):18-21,26.
- [6] 赵迪,何克勤,赵祖高.基于改进粒子群优化算法的移动机器人路径规划[J].传感器与微系统,2023,42(6):150-153.
- [7] 常见,任雁.基于改进遗传算法的机器人路径规划[J].组合机床与自动化加工技术,2023,588(2):23-27.
- [8] 黄恒一.改进 RRT 机器人路径规划技术研究[J].物联网技术,2023,13(5):92-94.
- [9] 王海芳,张瑶,朱亚锐,等.基于改进双向 RRT~*的移动机器人路径规划算法[J].东北大学学报(自然科学版),2021,42(8):1065-1070,1142.