

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.06.008

基于改进 RRT 算法的四足机器人路径规划

周枫林, 赵家澳, 龙厚云, 李光

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对四足机器人使用 RRT 算法进行路径规划存在地图探索能力弱、转向角度大且不连续、不满足四足机器人运动学模型的问题, 提出一种结合四足机器人自身模型约束的 RRT 路径规划算法: 考虑四足机器人自身运动学约束与自身体积, 使用局部贝塞尔曲线化对转折处进行优化; 利用全局自适应步长、节点自我更新、增加目标偏置, 提升算法搜索效率。四足机器人的仿真实验结果表明, 改进 RRT 算法生成的路径可行性强、运行效率高, 满足四足机器人在实际工程中对路径的要求, 到达目的地的时间大幅降低。

关键词: 四足机器人; 快速搜索随机树算法; 路径规划; 体积碰撞检测; 局部贝塞尔曲线

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2024)06-0055-08

引文格式: 周枫林, 赵家澳, 龙厚云, 等. 基于改进 RRT 算法的四足机器人路径规划 [J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(6): 55-62.

Path Planning of Quadruped Robots Based on Improved RRT Algorithm

ZHOU Fenglin, ZHAO Jiaao, LONG Houyun, LI Guang

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of such flaws as poor map exploration ability, large and discontinuous turning angles, and inability to meet the kinematic model found in quadruped robots using the RRT (rapidly-exploring random tree) algorithm for path planning, an RRT path planning algorithm has thus been proposed with a combination of the constraints of the quadruped robot's own model. With the kinematic constraints and volume of quadruped robots taken into consideration, an optimization can be achieved of the turning point by using local Bessel curve transformation. The search efficiency of the algorithm can be improved by utilizing global adaptive step size, node self updating, and increasing target bias. The simulation experiment results of quadruped robots show that the improved RRT algorithm generates paths with strong feasibility and high operational efficiency, meeting the requirements of quadruped robots for paths in practical engineering, thus significantly reducing the time to reach the destination.

Keywords: quadruped robot; rapidly-exploring random tree; path planning; volume collision detection; local Bessel curve

1 研究背景

自 BigDog^[1] 问世以来, 四足机器人的室内路径规划获得普遍应用。四足机器人将来可能会在没人指

导的情况下, 在任意工作空间中自主行动。

在路径规划算法方面, A* 算法^[2] 倾向于在尝试其他节点之前扩展到目标直接路径上的节点。然而, 如果最终路径包含远离目标方向, 会导致搜索速度

收稿日期: 2023-09-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11602082); 湖南省自然科学基金资助项目 (2021JJ30211, 2021JJ50043)

作者简介: 周枫林, 男, 湖南工业大学副教授, 博士(后), 硕士生导师, 主要研究方向为数值方法, 先进设计方法与智能控制, E-mail: zhoufl@hun.edu.cn

降低。Dijkstra 算法^[3] 计算复杂度较高且搜索时间较长；人工势场法^[4] 在避障方面有优势，但会出现目标点不可达、易陷入局部最优等问题^[5]。遗传算法^[6] 效率不足以解决大规模路径规划问题。四叉树方法^[7] 提高了搜索效率，但牺牲了效率最优性。基于标准 RRT (rapidly-exploring random tree) 算法^[8] 也有诸多改进，如谭薪兴等^[9] 提出了一种全局自适应步长与节点拒绝的 RRT 路径规划算法，改善了 RRT 算法环境探索能力不足、收敛速度慢、路径质量差等缺点。陈静杰等^[10] 基于启发式 Bi-RRT 算法，对虚拟手臂运动进行规划，发现该算法对于路径规划效率提高有良好效果。李伟等^[11] 利用人工势场法和启发式采样，找到了一条可行的路径。唐陈诚等^[12] 提出的 Ab-RRTIt 引入了本地树生长策略，在简单环境和复杂环境下均有呈均匀生长趋势。刘想德等^[13] 提出的 OIS-RRT 基于方向决策的快速扩展随机树路径规划，虽然运行收敛速度快，但基于 3 次 B 样条曲线拟合后，在狭窄地区易与障碍物发生碰撞。

四足机器人有避让障碍物行走的能力。国内对于四足机器人的路径规划中，于飞等^[14] 提出的基于改进蚁群算法的四足机器人全局路径规划方法，能准确约束四足机器人的运动行为。樊国根等^[15] 得到的气动肌肉四足机器人的路径规划适应度较好，空间避障能力较强，能快速确定最优路径。谢瑞蒙^[16] 提出了一种改进的 A* 算法，可为四足机器人从搜索出的轨迹簇中选择能耗最小的路径。余溢^[17] 利用 A* 路径搜索算法，从四足机器人过崎岖路面的多条备选路径中，选出最优路径。胡平志等^[18] 将步态规划问题转换为在四维空间里求取最长路径问题。刘宇飞等^[19] 利用 Dijkstra 算法，基于人工势场理论，对四足机器人自主避障策略的路径进行了规划。

现有研究成果虽提升了四足机器人室内路径规划的路径最优能力和探索能力，但仍存在路径质量差、实际应用能力弱、收敛速度慢、未充分考虑四足机器人自身运动学约束与自身体积等问题，与现实人们认为的最优路径有很大差距。因此，本文提出一种适用四足机器人室内路径规划的改进 RRT 算法，并将其与四足机器人的模型预测控制相结合，进行仿真实验，验证改进算法的实际可行性，实现更加快速高效的四足机器人路径规划算法，以期对四足机器人在实际工程应用中的路径规划提供参考。

2 标准 RRT 算法原理

RRT 算法为机器人找到一条从起点到目标点的可行路径。本文给出如下路径规划定义：

$$\forall t \in [0, T], x(t) \in X_{\text{free}} : x(0) \rightarrow X_{\text{start}} \rightarrow x(T) \in X_{\text{goal}} \circ \quad (1)$$

式中： X 为路径规划空间； X_{free} 为四足机器人可行走区域，且 $X_{\text{free}} = X \setminus X_{\text{obj}}$ ，其中 X_{obj} 为障碍区域； $x(0) = X_{\text{start}}$ 为起始位置节点； $x(T)$ 为目标节点，且 $x(T) \in X_{\text{goal}}$ 。

式 (1) 表示在路径规划空间 X 中，需要规划出一条从 X_{start} 到 X_{goal} 的可行路径。

以 X_{start} 为起点， X_{goal} 为目标点， T 为搜索树，其搜索过程如下：首先，确定路径起点 X_{start} 属于 T ，为随机树的根节点。每次循环通过随机采样产生随机点 X_{rand} ；在随机树中，计算所有节点与当次循环生成的随机点 X_{rand} 之间的距离，随机点距离最小的节点为 X_{near} ；定义固定步长 $Length_limit$ ，找到 X_{near} 后，继续向 X_{near} 与 X_{rand} 连线方向扩展 $Length_limit$ 长度后得到新的节点 X_{new} ；在拓展新节点 X_{new} 的路径中，如果 X_{near} 、 X_{new} 和 X_{near} 到 X_{new} 之间的点在障碍物空间 X_{obj} 中或者与 X_{obj} 相交，即判为无效拓展点。在下次循环中重新生成新的随机点 X_{new} ，通过碰撞检测，将新节点添加进随机树 T ；迭代至随机树 T 内新增节点 X_{new} 和等于目标点 X_{goal} 时，即搜索到一条自 X_{start} 到 X_{goal} 的可行无碰撞路径。

标准 RRT 算法是一种比较常用的、基于采样的静态路径规划算法，得到的路径仅仅是可行而已，很大程度上不会是最优，故需要对 RRT 算法进行优化改进，以便能更好地应用于四足机器人室内移动。

3 改进 RRT 算法

本文提出的改进 RRT 算法主要包括以下改进措施：1) 采用全局自适应步长机制与直线生长策略，避免不同环境导致的效率低下问题。2) 增加判断函数，进行四足机器人碰撞检测，改善初始路径生成效率。3) 通过贪心策略删除冗余节点，实现节点自我移动更新，提升算法搜索效率。4) 使用局部贝塞尔曲线化对转折处进行优化，提高路径平滑度与四足机器人运动的连续稳定性和工作效率。

3.1 全局自适应步长

步长值为四足机器人的运动轨迹丈量，对步长值指标适当取值，一方面，避免机器人出现步长过大的运动行为；另一方面，可实现对实际巡检轨迹与预设运动轨迹间偏离程度的有效控制。对于标准 RRT 算法中由于新节点 X_{new} 与 X_{near} 保持固定步长，导致搜索效率低的问题，采用全局自适应随机步长，不同地图中，步长与环境复杂系数和初始点到目标点距离有

关, 环境复杂系数为计算地图中障碍物面积与整体面积之比。通过式 (2) 计算得到初始适应全局步长。

$$Length_limit = Length_limit_{initial} = M_{size} w_1 \quad (2)$$

式中: $Length_limit_{initial}$ 为初始适应全局步长; M_{size} 为初始点与目标点之间的距离; w_1 为环境复杂系数。

检测节点附近的障碍物, 得到局部复杂度系数 w_2 后, 以式 (3) 进行扩展, 即每个节点都有对应的自适应步长, 以新步长扩展得到新节点。

$$X_{new} = |X_{near} - X_{rand}| / |X_{near} - X_{rand}| w_2 + X_{near} \quad (3)$$

利用该原理实现全局自适应步长, 避免了步长过大时不能进入障碍物密集区域, 而步长过小时在无障碍物地区进行无用搜索等问题。

3.2 增加判断函数

标准 RRT 算法是在整个搜索空间内均匀采样, 这样会产生大量无用节点, 耗费计算资源, 故增加目标偏置, 具体如下: 1) 以一定概率 p , 将目标点 X_{goal} 作为采样点, 对随机树进行拓展, 可加快迭代, 减少到达目标点时间。2) 以一定概率 q , 在整个采样空间内均匀采样, 生成随机采样点, 其中 $p+q=1$ 。

3.3 四足机器人碰撞检测

为使规划路径可行性更高, 根据机器人实际尺寸, 生成新节点 X_{new} 进行体积碰撞检测。通过生成与四足机器人大小相等的矩形包裹四足机器人。从几何学角度考虑四足机器人转向问题, 矩形方向与 X_{new} 和 X_{near} 两点连线方向相等, 并在矩形内生成大小均匀的点, 通过矩形范围内均匀点进行障碍物判断。四足机器人体积碰撞检测原理见图 1, 当生成的随机采样点 X_{new} 的矩形内均匀点与障碍物重合时, 即判断四足机器人碰撞障碍物, 舍弃该点并重新生成新点。

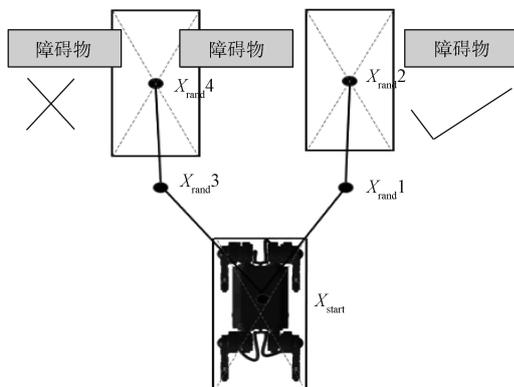


图 1 四足机器人体积碰撞检测原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of quadruped robot volume collision detection principle

连接 X_{near} 与 X_{new} 进行障碍物碰撞检测, 当检测步长大于四足机器人矩形尺寸时, 在两点间生成多个点, 其数量取决于两点间距离, 且每两点距离小于四

足机器人实际尺寸。对这些点与四足机器人大小相等的矩形进行碰撞检测。通过增加碰撞检测, 生成路径更加适合四足机器人移动。规划算法结合碰撞检测的目的是让规划后路径更易于追踪, 提高算法可行性。

3.4 直线生长策略

针对标准 RRT 生成随机节点往往每步都是不同的方向, 而保持一定速度的四足机器人更加适合直线行走的问题, 增加直线生长策略: 在标准 RRT 算法 X_{near} 与 X_{new} 连线方向上, 进行连续搜索新节点 X_{new} , 在检测到障碍物时停止搜索。这样可在 X_{near} 与 X_{new} 连线方向上得出一系列的直线点, 如此生成的路线不仅更加适合四足机器人的运动特性, 且在空旷地形时可减少搜索时间, 在地形狭窄时也不影响搜索效率。

3.5 重复贪心策略去除多余路径节点

因 RRT 算法规划中, 搜索空间随机生成点后所得路径为连续折线段, 且路径质量较差、冗余节点较多。通过贪心策略删除冗余节点^[20], 具体步骤如下:

1) 对所有路径节点中起始点 T_j 和目标点 T_k 之间的路径进行检测, 其中 $j, k \in [1, 2, \dots, n]$, 且 $j > k + 1$, 如果 $k=1$, 连接 T_k 和 T_j , 检测是否发生碰撞;

2) 若未发生碰撞, 起始点到该点间的所有节点均舍弃, 目标点 T_k 更新为 $k=k+1$, 继续步骤 1; 若发生碰撞, 表明从起始点到该点中间不能被省略, 将目标点父节点 T_{k-1} 保留; 父节点更新为新的目标点, $T_j = T_{k-1}$ 。

为避免路径不能一次删减成最优, 仍会出现多余节点, 对以上步骤进行重复, 直至路径没有节点删除时停止删减操作, 保留最终结果。

3.6 节点自我更新

原始 RRT 算法自首次迭代直至随机树 T 内新增节点 X_{new} 和等于目标点 X_{goal} 时, 结束搜索路径。为了获得相对初始路径更优的规划路径, 特对原始路径规划进行改进, 其原理如图 2 所示。

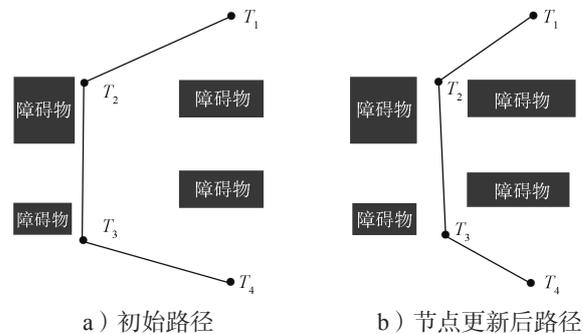


图 2 节点自我移动更新原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of self mobile update principle

对已生成的路径节点, 在不与障碍物产生碰撞的情况下, 令节点在附近范围内自由移动。通过该节点

的父节点与子节点可判断与障碍物之间的距离，之后比较节点移动前后与障碍物之间的距离大小，若移动后与障碍物之间的距离更小，则保留移动后的节点。

3.7 自适应局部贝塞尔路径优化

针对传统路径出现节点转弯角度大、不满足四足机器人自身运动学的约束条件问题，传统贝塞尔曲线化^[21]时容易出现路径离节点过远、与障碍物发生碰撞、整个路径生成插值点^[22]、影响算法运行效率等缺点^[23]，提出一种适合四足机器人的自适应局部贝塞尔路径优化方法。

在贝塞尔曲线化时，曲率半径与四足机器人需要旋转的角度尤为重要，通过旋转角度可以确定合适的移动速度与角速度。两局部点的角度由式(4)确定。因为四足机器人重心较高，当四足机器人角速度过大时，容易因重心偏移引发侧翻；角速度过小时，会造成转动不到所需角度而降低线速度，使移动效率大大降低。本算法中，判断旋转角度大于30°时角速度取1.2 rad/s，小于30°时取0.8 rad/s。

$$\theta = \arccos\left(\frac{d_{i+2,i}^2 + d_{i+1,i}^2 - d_{i+1,i+2}^2}{d_{i+2,i} \cdot d_{i+1,i}}\right) + \arccos\left(\frac{d_{i+2,i+1}^2 + d_{i+2,i}^2 - d_{i+1,i}^2}{d_{i+2,i+1} \cdot d_{i+2,i}}\right), \quad (4)$$

式中： θ 为两局部点间角度； $d_{i+1,i}$ 为*i*+1和*i*点距离。

曲率半径与选取局部点有关，局部点距离越大，曲率半径越大，运动越平稳。通过两点间角度，选择两个转折点相连前后一定距离的两个点作为局部点，距离由式(5)确定。并利用该3点进行二阶贝塞尔曲线化。转折节点间的局部点距离*l*由式(5)求得。这样的局部优化只在路径节点转角位置使用插值多项式，实现路径轨迹在拐角位置平滑过渡，其示意图见图3。

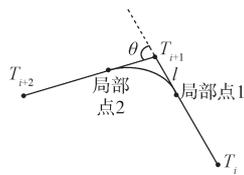


图3 局部贝塞尔路径平滑示意图

Fig. 3 Schematic diagram of local Bessel path smoothin

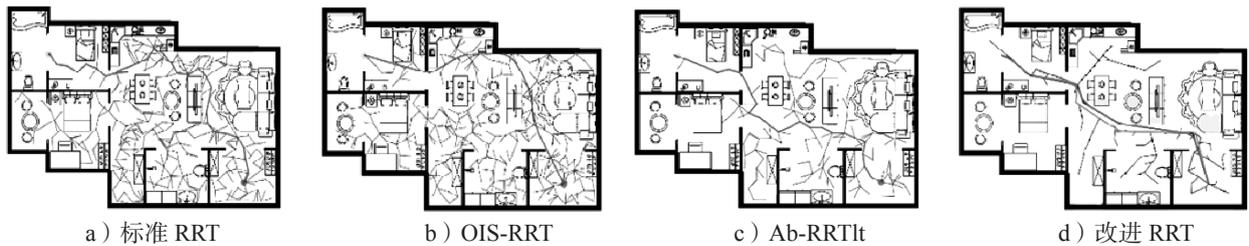


图5 4种RRT算法路径规划对比

Fig. 5 Comparison of path planning of four RRT algorithms

为了保证RRT算法能够有效地探索地图，步长

$$l = d \times (0.2 + \theta/6\pi). \quad (5)$$

对比图3中直线段——初始路径和曲线段——平滑化后的路径，可知路径优化符合四足机器人的运动学约束规律，提高了路径平滑度，从而提高了四足机器人运动的连续稳定性和工作效率。

改进算法的流程见图4。算法改进后，能提高路径搜索时的目标导向性、提升收敛速度、缩短路径长度、减少路径弯折，更加适合四足机器人运动。

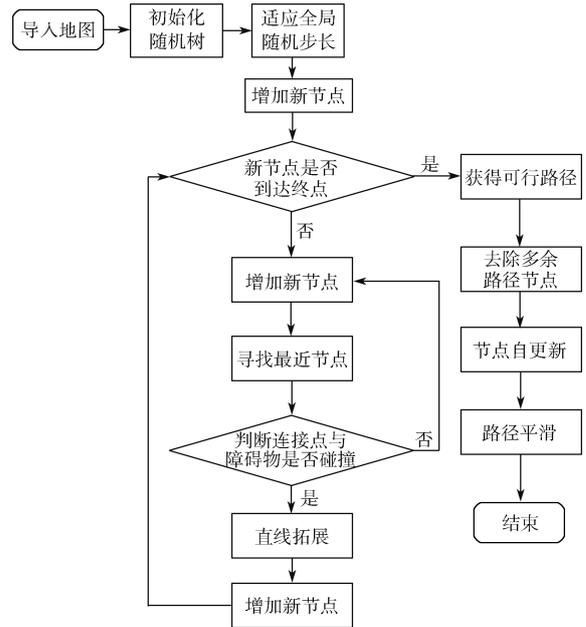


图4 改进RRT算法流程图

Fig. 4 Improved RRT algorithm flowchart

4 算法对比与分析

4种算法中，对应的参数相同。实验场景为普通房屋平面图，两个仿真地图分别为室内场景1和场景2，大小为10.0 m × 12.6 m和10.14 m × 7.27 m，算法识别像素点个数分别为1 000 × 1 260和1 014 × 727。起始点、终点均为[860.0, 599.0], [165.0, 180.0]。4种RRT算法路径规划结果对比如图5所示，场景中设有床、沙发和桌子等日常生活用品作为障碍物。

Length_limit 设为40。利用pycharm软件进行仿真实

验, 计算机的配置如下: 64 位 Windows 10 专业版操作系统、AMD Ryzen 5 2600×3.60 GHz 处理器。为保证仿真结果的真实有效性, 两个场景地图均进行 20 次重复实验, 并取所有数据的平均值为结果进行对比。标准 RRT 算法、Ab-RRTIt、S-RRT 和改进 RRT 算法在两地图中到达目标点的搜索时间、所产生节点数量、路径长度对比见表 1。

表 1 RRT 路径规划结果对比

Table 1 Comparison of RRT algorithms for path planning

算法类型	路径距离 /m	路径节点数	时间 /s
标准 RRT	180.26	47	2.30
OIS-RRT	128.29	22	1.88
Ab-RRTIt	110.77	29	1.21
改进 RRT	106.68	13	1.43

由表 1 可知, 在室内地图存在障碍物的情况下, 改进 RRT 算法的表现明显优于其余 RRT 算法。两个地图得出的路径长度均减少, 其多项指标表现比其余 RRT 算法的好。由图 5 可知, 改进 RRT 探索范围远大于 RRT 算法, 地图探索更加充分。OIS-RRT 和 Ab-RRTIt 各项性能均明显优于标准 RRT, 而改进 RRT 不仅搜索效率优于标准 RRT, 产生的路径更适合四足机器人移动。搜索时间、节点数量、路径距离分别减少了 37%, 72%, 40.26%, 多项指标也优于直线拓展 RRT 和目标偏置 RRT。对于 OIS-RRT, 由于采用 3 次 B 样条拟合曲线, 拟合曲线与原有路线偏差较大, 碰撞到障碍物的概率增加, 而改进 RRT 的局部贝塞尔曲线可以解决该问题。

5 四足机器人运动规划实验

5.1 四足机器人模型与 MPC 运动控制

5.1.1 四足机器人模型与碰撞检测

本研究基于如图 6 所示宇树 A1 机器人进行。A1 机器人运动关节包括: 连接机身、控制髋关节侧向运动的机身关节 (hip joint); 控制髋关节俯仰运动的大腿关节 (thigh joint); 和控制膝关节运动的小腿关节 (calf joint)。4 条腿表示为 FL (左前腿)、RL (左后腿)、FR (右前腿) 和 RR (右后腿)。建立了包括足端坐标系和质心坐标系等一共 17 个坐标系, 以 RR (右后腿) 坐标系为例。四足机器人主要参数见表 2。



图 6 宇树科技 A1 机器人
Fig. 6 Yushu technology A1 robots

表 2 A1 机器人主要参数

Table 2 A1 robot main parameters

技术参数	取值	技术参数	取值
正常站立尺寸 /mm	500×300×400	整机质量 /kg	12
机身关节活动角度 / (°)	-46~46	关节自由度	12
大腿关节活动角度 / (°)	-60~240	关节最大扭矩 / (N·m)	35.5
小腿关节活动角度 / (°)	154.5~-52.5		

根据宇树 A1 四足机器人实际尺寸, 建立 1:1 的体积碰撞模型, 包括四足机器人自身各零部件的碰撞检测及其与周围障碍物的碰撞。

5.1.2 MPC 控制模型

路径规划的四足机器人模型选用模型预测控制 (model predictive control, MPC) [24], 模型预测方法对模型精度要求不高, 系统鲁棒性和稳定性较好。通过凸面模型预测控制实现四足机器人的动态运动, 利用离散有限预测时域控制实现机器人足端期望接触力计算 [25]。模型预测控制器每次迭代时从当前状态开始, 基于控制输入和状态轨迹的约束条件, 在有限预测时域中, 寻找控制输入的最优序列和对应状态轨迹 (即最优足底力)。上述过程在每次迭代重复进行过程中, 能稳定大量步态, 包括那些具有复杂方向动态的步态, MPC 运动控制模型原理见图 7。

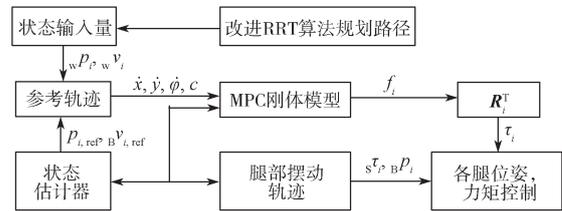


图 7 MPC 运动控制模型原理

Fig. 7 MPC motion control model principle

MPC 控制器在每一次迭代时, 利用有限时域开环最优控制, 得到当前控制动作的一个解, 因此不需要建立复杂的非线性机器人模型。

5.2 四足机器人追踪路径

地图是分析、描绘空间的一个重要手段, 因此利用地图作为指导并进行路径规划。将图像二值化, 并将灰度图像的 256 个亮度等级进行划分。地图中纯白色为可规划区域, 其他亮度像素点为障碍物空间。地图与实际场景的比例因子关系式如下:

$$s_{\dot{}}/s_{Actual} = i, \quad (6)$$

式中: $s_{\dot{}}$ 为算法能识别的虚拟地图像素点的大小; s_{Actual} 为真实场景中的实际距离; i 为算法预测路径距离与实际距离的比例系数。

改进 RRT 算法返回的结果为地图的坐标点、直行线速度、旋转角速度与时间, 通过式 (6) 换算为实际场地需要行走距离。为求两个坐标点之间所需要

的时间和线速度，由式(7)计算两点之间的方位角、转向角度所需的时间和角速度。

$$wt_i = \Delta\alpha_i / \omega_i \quad (7)$$

式中： ω_i 为当前的转向角速度； $\Delta\alpha_i$ 为两点之间的方位角，实际所需旋转角度不能大于 180° ； w 为两点之间的线速度； t_i 为通过两点所需时间。

5.3 路径规划静态避障实验

为验证改进算法在指导四足机器人进行室内路径规划的优势与稳定性，在Python 3.7版本下以pybullet仿真平台搭建一个与地图1:1的四足机器人仿真场景，并且进行路径规划运动实验，结果见图8。考虑四足机器人与障碍物进行碰撞检测，将RRT算法在不同场景进行仿真对比。因标准RRT算法会与地图障碍物产生碰撞导致运动崩坏，故采用OIS-RRT算法进行修改，增加自身体积，防止发生碰撞。并在三维仿真环境下，对OIS-RRT算法与改进RRT算法进行四足机器人到达目标地点进行仿真对比，结果见图9。

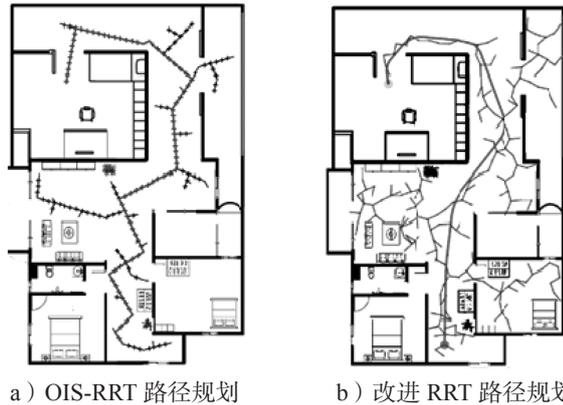


图8 两种RRT算法路径规划结果对比

Fig. 8 Comparison of path planning of two RRT algorithms

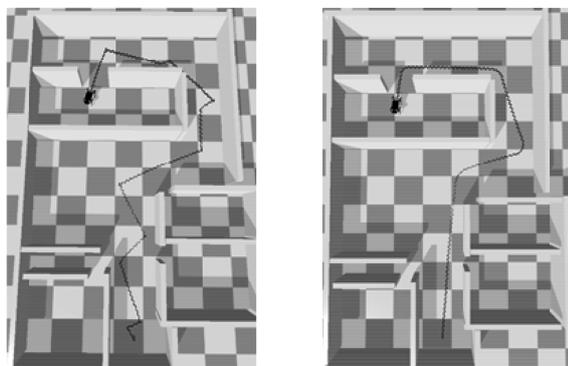


图9 两种RRT算法的四足机器人路径规划仿真结果对比

Fig. 9 Comparison of simulation results for path planning of quadruped robots using two RRT algorithms

图10和11分别为标准RRT算法与改进RRT算法进行路径移动实验过程的四足机器人运动pitch角

与运动速度。

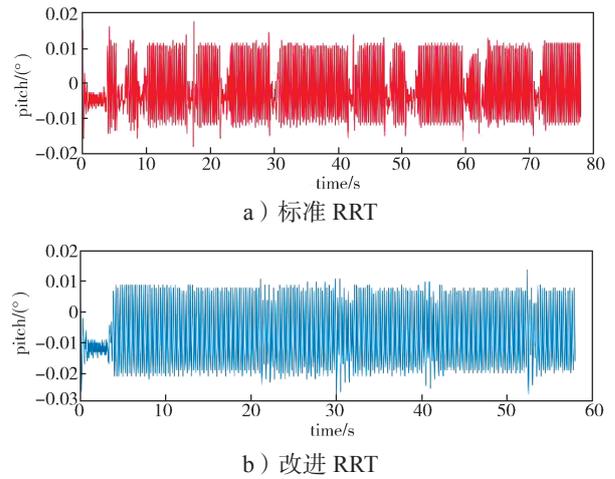


图10 四足机器人运动pitch角对比

Fig. 10 Quadruped robot motion pitch angle comparison

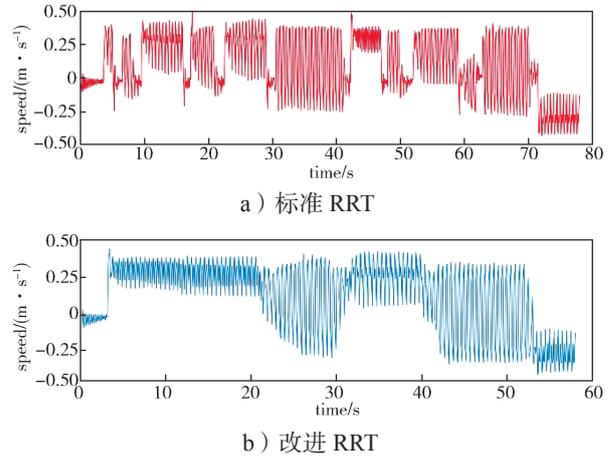


图11 四足机器人运动速度对比

Fig. 11 Quadruped robot motion speed comparison

表3给出了对四足机器人使用OIS-RRT和改进RRT两种算法进行仿真的结果。

表3 两种算法的四足机器人仿真结果对比

Table 3 Comparison of simulation results for quadruped robots using two RRT algorithms

算法类型	转弯次数	行走时间/s	行走距离/m
OIS-RRT	12	80.2	191.64
改进RRT	5	58.0	156.73

图8所示场景仿真中，改进RRT算法的探索效率大于OIS-RRT算法的对应值，地图探索更充分，所得最短路径更优。在图9所示pybullet可视化三维仿真场景中，四足机器人在多墙壁障碍物情况下，根据路径移动均可顺利避障，并到达目标点，但根据对比产生的路径可知，OIS-RRT算法产生的路径无用节点较多、路径转折较多、转折角度较大、无效距离较长。而改进RRT算法产生的路径，从起始点到达目标点过程中路径简洁、路径转折少、转折角度柔、

几乎没有无效距离。根据四足机器人行走的 pitch 角度对比可知, OIS-RRT 规划的路径行走过程中 pitch 角连续性差、不稳定。同时, 结果证实改进 RRT 算法能减少规划时间, 移动的时间同比减少 27.6%。相对 OIS-RRT 算法, 改进 RRT 算法路径对于四足机器人行走距离更短、稳定性更强。通过在障碍物环境中的仿真实验, 验证了算法的适应能力和有效性。

6 结语

针对四足机器人的路径规划, 以标准 RRT 算法为基础, 提出一种改进 RRT 算法, 解决了标准 RRT 算法场景适应性较差、搜索效率较低、路径质量难以达到实际应用水平的问题, 算法改进如下:

1) 采用全局自适应步长方法, 开局收集地图信息并采集路径点周围的环境信息, 从而在路径规划过程中自动调节步长大小, 提高了算法的收敛效率。

2) 改进采样方式, 增加了到达目标点的概率。

3) 引入四足机器人的体积, 可以避免与墙体等障碍物发生碰撞。避免产生大量无用节点、耗费计算资源, 从而加快算法收敛速度。

4) 增加直线拓展策略, 更适合四足机器人运动。

5) 重复贪心算法可去除冗余节点。

6) 提出节点自我更新, 在得到修剪路径的基础上使各节点运动, 进一步获得最优路径。

7) 利用自适应局部贝塞尔对转折处进行曲线优化, 使得四足机器人运动平稳。

通过多组仿真实验对比验证了改进 RRT 算法的实用性、有效性和可靠性, 并有效减少了路径规划时间和四足机器人移动距离, 相比其他 RRT 算法, 该算法考虑了四足机器人的稳定性。同时在四足机器人的路径规划仿真实验中, 四足机器人在充分避开障碍物的情况下可稳定平滑地到达终点, 满足四足机器人在实际工程中对路径的要求, 也可应用于其他四足机器人。在平衡算法搜索效率和考虑四足机器人路径质量下, 仿真实验证明了改进算法的实际可行性。

参考文献:

- [1] RAIBERT M, BLANKESPOOR K, NELSON G, et al. BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 10822-10825.
- [2] 刘生伟, 马 钺, 孟树峰, 等. 改进 A* 算法的 AGV 路径规划 [J]. 计算机应用, 2019, 39(增刊 2): 41-44. LIU Shengwei, MA Yue, MENG Shufeng, et al. Improved A* Algorithm for AGV Path Planning[J]. Computer Applications, 2019, 39(S2): 41-44.
- [3] ARAIN M A, HAVOUTIS I, SEMINI C, et al. A Comparison of Search-Based Planners for a Legged Robot[C]//9th International Workshop on Robot Motion and Control. Kuslin: IEEE, 2013: 104-109.
- [4] 徐小强, 王明勇, 冒 燕. 基于改进人工势场法的移动机器人路径规划 [J]. 计算机应用, 2020, 40(12): 3508-3512. XU Xiaoqiang, WANG Mingyong, MAO Yan. Path Planning of Mobile Robot Based on Improved Artificial Potential Field Method[J]. Journal of Computer Applications, 2020, 40(12): 3508-3512.
- [5] 敖海跃, 刘燕斌, 李 瑜. 一种多火星飞行器路径规划方法 [J]. 航天控制, 2021, 39(6): 27-33. AO Haiyue, LIU Yanbin, LI Yu. A Path Planning Method for Multi-Mars Aircraft[J]. Aerospace Control, 2021, 39(6): 27-33.
- [6] 周艳聪, 孙晓晨, 余伟翔. 基于改进遗传算法的物流配送路径优化研究 [J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(10): 118-122. ZHOU Yancong, SUN Xiaochen, YU Weixiang. Research on Optimization of Logistics Distribution Route Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Computer Engineering & Science, 2012, 34(10): 118-122.
- [7] NOBORIO H, NANIWA T, ARIMOTO S. A Quadtree-Based Path-Planning Algorithm for a Mobile Robot[J]. Journal of Robotic Systems, 1990, 7(4): 555-574.
- [8] LAVALLE S M, KUFFNER J J. Rapidly-Exploring Random Trees: Progress and Prospects[J]. Algorithmic and Computational Robotics: New Directions, 2001, 5: 293-308.
- [9] 谭薪兴, 李 光, 易 静, 等. 改进 RRT 算法的机械臂路径规划 [J/OL]. (2022-09-06)[2023-12-06]. 计算机集成制造系统, 2022: 1-18. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220906.1011.002.html>. TAN Xinxing, LI Guang, YI Jing, et al. Path Planning of Manipulator Based on Improved RRT Algorithm[J/OL]. (2022-09-06)[2023-12-06]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022: 1-18. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220906.1011.002.html>.
- [10] 陈静杰, 耿丽琴. 基于启发式 Bi-RRT 算法的虚拟手臂运动规划 [J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(3): 531-537. CHEN Jingjie, GENG Liqin. Virtual Arm Motion Planning Based on Heuristic Bi-RRT Algorithm[J]. Computer Engineering & Science, 2019, 41(3): 531-537.
- [11] 李 伟, 金世俊. 基于人工势场法和启发式采样的最优路径收敛方法 [J]. 计算机应用, 2021, 41(10): 2912-2918. LI Wei, JIN Shijun. Optimal Path Convergence Method Based on Artificial Potential Field Method and Informed Sampling[J]. Journal of Computer Applications, 2021,

- 41(10): 2912-2918.
- [12] 唐陈诚, 张恒, 盛鑫军, 等. 引入本地树的适应偏置机器人路径规划算法[J]. 机电一体化, 2018, 24(6): 10-16, 50.
TANG Chencheng, ZHANG Heng, SHENG Xinjun, et al. Adaptive Biased RRT Algorithm with Local Tree for Path Planning[J]. Mechatronics, 2018, 24(6): 10-16, 50.
- [13] 刘想德, 何翔鹏, 胡勇, 等. 基于方向决策 RRT 算法的移动机器人路径规划[J]. 计算机仿真, 2022, 39(6): 444-448, 495.
LIU Xiangde, HE Xiangpeng, HU Yong, et al. Mobile Robot Path Planning Based on Orientation-Information Strategy RRT Algorithm[J]. Computer Simulation, 2022, 39(6): 444-448, 495.
- [14] 于飞, 卢朝霞. 基于改进蚁群算法的四足巡检机器人全局路径规划方法[J]. 制造业自动化, 2022, 44(7): 154-157.
YU Fei, LU Zhaoxia. Global Path Planning Method of Quadruped Inspection Robot Based on Improved Ant Colony Algorithm[J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(7): 154-157.
- [15] 樊国根, 蒙芳. 基于粒子群智能优化的机器人路径全局规划算法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(7): 41-45.
FAN Guogen, MENG Fang. Global Path Planning Algorithm for Robot Based on Intelligent Optimization of Particle Swarm Optimization[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(7): 41-45.
- [16] 谢瑞蒙. 地形敏感的四足机器人能耗最优规划研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
XIE Ruimeng. Research on Optimal Energy Consumption Planning of Terrain Sensitive Quadruped Robot[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [17] 余溢. 四足机器人在崎岖路面的路径规划和稳定行走研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
YU Yi. Research on Path Planning and Stable Walking of the Quadruped Robot on Rough Terrain[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [18] 胡平志, 李泽滔. 基于改进蚁群算法的四足机器人步态规划[J]. 计算机工程与科学, 2021, 43(12): 2253-2262.
HU Pingzhi, LI Zetao. Gait Planning of Quadruped Robots Based on an Improved Ant Colony Algorithm[J]. Computer Engineering & Science, 2021, 43(12): 2253-2262.
- [19] 刘宇飞, 江磊, 邢伯阳, 等. 基于全局 SLAM 的四足机器人路径规划研究[J]. 无人系统技术, 2021, 4(6): 57-64.
LIU Yufei, JIANG Lei, XING Boyang, et al. Research on Path Planning of Quadruped Robot Based on Globally SLAM[J]. Unmanned Systems Technology, 2021, 4(6): 57-64.
- [20] 黄志锋, 刘媛华. 基于四阶贝塞尔曲线和改进狮群优化算法求解路径规划问题[J]. 信息与控制, 2023, 52(2): 176-189.
HUANG Zhifeng, LIU Yuanhua. Solving Path Planning Problems Based on Fourth-Order Bessel Curves and Improved Lion Swarm Algorithms[J]. Information and Control, 2023, 52(2): 176-189.
- [21] YANG J, LI D D, WANG J, et al. Design, Optimization, and Application of Multiplex RRT-PCR in the Detection of Respiratory Viruses[J]. Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences, 2022, 59(8): 555-572.
- [22] 杨玉来, 王玉玫. 手绘线矢量化技术的研究与实现[J]. 计算机工程与科学, 2011, 33(8): 128-131.
YANG Yulai, WANG Yumei. Investigation and Implementation of Freehand a Vectorization Technology[J]. Computer Engineering & Science, 2011, 33(8): 128-131.
- [23] 许万, 杨晔, 余磊涛, 等. 一种基于改进 RRT* 的全局路径规划算法[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 829-838.
XU Wan, YANG Ye, YU Leitao, et al. A Global Path Planning Algorithm Based on Improved RRT*[J]. Control and Decision, 2022, 37(4): 829-838.
- [24] HORVAT T, MELO K, IJSPEERT A J. Model Predictive Control Based Framework for CoM Control of a Quadruped Robot[C]//2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver: IEEE, 2017: 3372-3378.
- [25] 梁启星, 李彬, 李志, 等. 基于模型预测控制的四足机器人斜坡自适应调整算法与实现[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(3): 37-44, 51.
LIANG Qixing, LI Bin, LI Zhi, et al. Algorithm of Adaptive Slope Adjustment of Quadruped Robot Based on Model Predictive Control and Its Application[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(3): 37-44, 51.

(责任编辑: 廖友媛)