

# 基于改进 A\* 算法的无人机路径规划研究

张丽丽, 黄辰, 杜宇飞

(沈阳航空航天大学 民用航空学院, 辽宁沈阳, 110136)

**基金项目:** 辽宁省教育厅科学研究项目 (LJKZ0214)、沈阳航空航天大学创新创业训练计划 (X202110143103)。

**摘要:** 传统的 A\* 算法存在搜索范围少、扩展方向盲目等缺点, 导致原 A\* 算法在计算量、存储量、效率、搜索量等方面存在很多缺陷。针对 A\* 算法规划的运行路径问题, 综合考虑空间环境中障碍物对路径点的选择的影响、路径中特殊地形对移动机器人影响等因素, 通过把搜索节点数扩大到 16 方向 24 邻域, 结合向量夹角的思想来缩短路径转折点和减少总转折角度, 可以同时缩短路径长度, 从而有效地规划静态环境下的最优无碰撞路径; 保证无人机在运行时的路径安全。最后通过行仿真实验验证该算法可以快速规划出高效、安全、连续平稳的避障运行路径, 从而提高路径搜索效率与安全性。

**关键词:** 移动机器人; 路径规划; 16 方向 24 邻域; A\* 算法

DOI:10.16589/j.cnki.cn11-3571/tn.2023.05.020

## 0 引言

随着科技和经济的蓬勃发展, 移动机器人作为我国新兴科技的重要产业被各行各业所大量应用。目前, 用途不同、型号不同的移动机器人正在不同的应用领域中有着越来越广阔的应用, 我国移动机器人市场也呈现出了迅速发展的势头。随着移动机器人技术的不断发展, 移动机器人在导航和外卖物流等领域得到了迅速的发展, 人们渴望更高效、运营成本更低廉、更省时省事的方式。移动机器人具有交付效率高、灵活性强、实用性强、环境污染小等特点, 并且移动机器人可以通过自主执行任务来降低人工成本。因此, 掀起了移动机器人物流时代的攻势。

由于政府的大力推进, 使移动机器人的导航技术取得了阶段性的研究成果, 降低了人工成本, 但也带来了以下挑战:

(1) 移动机器人运行时移动的安全仍然面临着严峻的挑战。虽然移动机器人的运行在企业中的应用越来越广泛, 但是复杂环境中物体的移动受到的空间、各种障碍物的混合的制约, 给移动机器人的运行安全带来了很大风险, 如移动机器人与障碍物碰撞、移动机器人在复杂地形运行等问题。

(2) 移动机器人运行的效率。各类设备的采购成本仍然很高, 导致了采购成本的居高不下, 缺乏合格的设备。因此, 为了平衡移动机器人本身的费用, 需要规划出更快速、更高效的运行路径。但目前规划的生成路径可能在移动中有很多转折点、路线不够平滑, 在大规模搜索的情况下, 大量计算会降低因操作效率等问题导致的低运营效率。

(3) 地形状况对移动机器人移动姿态的影响。移动机器人的体积较小, 因此, 地形因素对移动机器人的使用的更大, 例如, 路面不平不仅会影响到移动机器人灵活性与机动性, 还会影响移动机器人的承载能力, 使运动状态造成威胁。

综合上述几种情况, 为了有序、安全、高效、平稳地运行, 移动机器人的运行路线需要独立规划, 从合理避障的角度切入, 针对突破路径优化过程中的技术难题, 在保障安全运行

的前提下尽量提高效率, 达到最大程度利用移动机器人, 降低运输成本。本文在传统的 A\* 算法规划路径的基础上进行一些改进, 提高运行效率、减少转折点、尽量使路线更加平滑、降低移动机器人运行风险, 也减少了能源损耗。

## 1 构建运行环境模型

在复杂的环境中, 移动机器人的路径规划的第一要素是安全, 安全的移动才是实现一切行动的前提, 第二则考虑规划出更短的移动路径, 更短的路径会让移动机器人的能耗和运行时间变少。移动机器人的障碍区域主要包括桌椅板凳、特殊地形等, 根据障碍物的特点进行简化, 构建适合移动机器人运行的环境模型地图。移动机器人在运行时, 可能会遇到因道路不平等地形威胁, 需要考虑不同地形情况对规划移动机器人路径的影响并保障其移动安全。

规划路径的第一步是规划运行环境模型, 通常使用的环境图形的构建方法有栅格法<sup>[1]</sup>、可视图法<sup>[2]</sup>、拓扑图法。根据移动时的地形障碍物等特征构建运行环境模型, 采用可视图法模拟移动机器人的移动条件, 可视图法建立的环境模型简单, 易于使用和维护, 路线观测较为直观, 因此建立适合移动机器人运行环境的三维地形图。

(1) 设置坐标轴范围为 1 到 MAX\_X, 1 到 MAX\_Y, 1 到 MAX\_Z, 创建一个曲面图, 并将 Z 中元素的列索引和行索引用作 x 坐标和 y 坐标, 以 10 为单位长度对 x 轴和 y 轴进行划分, 2000 为单位长度对 z 轴进行划分, 同时对坐标系中文字的字体规定为宋体, 方向节点也进行了限定。

(2) 绘制异常地形区, 将地面中不平的低洼地区用球体进行模拟, 确定球体自变量, 对异常地形区域进行限制, 并将绿色地区设定为异常地形区, 确定出异常地形区进行模拟。对异常数据设置限制进行封顶处理。

(3) 设置障碍物, 用 0 标记的节点代表可以通过的节点, 用 1 标记的节点代表不能通过的节点, 绘制符合规划路径的不同方位的障碍物地形图。

## 2 A\* 算法

### ■ 2.1 A\* 算法

A\* 算法是 N.J.Nilsson、B.Raphael 和 P.E.Hart 在 1968 年提出的一种启发式搜索算法<sup>[3]</sup>。这种方法将 Dijkstra 和 BFS 两种方法的优势相融合,并且 Dijkstra 算法与 BFS 算法的距离代价同时被 A\* 算法考虑到,摒弃了部分劣势构造了新的代价函数用来搜索路径。从规划路径的起始点出发,根据节点的扩展方向,通过栅格图继续搜索目标点的最优搜索方向,获得最优路径,保证搜索效率。其基本思想是利用启发式函数计算栅格周围 8 个节点的估计值,选择生成最低成本的节点作为下一个搜索步骤的父节点,继续不断搜索该父节点周围相邻的节点,直到找到目标节点为止来确定搜索方向<sup>[4]</sup>。因此搜索算法的效率不仅被提高了,还优化了规划的路径以至保证路径最优,代价函数的计算方式可表示为:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad \text{式 (1)}$$

式中:  $g(n)$  是指从起始点到待扩展点  $n$  的实际路程的代价,一般是固定数值;启发函数是 A\* 算法的关键,具有一致性和可接受性的启发函数可使 A\* 算法收敛到既满足局部最优的解又满足全局最优的解<sup>[5]</sup>,  $h(n)$  是待扩展点  $n$  到终止点的预估路程,为了减少该算法的计算量,选用欧式距离来近似代替启发函数,启发式函数如下式:

$$hn = \sqrt{(x_n - x_{end})^2 + (y_n - y_{end})^2 + (z_n - z_{end})^2} \quad \text{式 (2)}$$

从式 (2) 可以看出,  $h(n)$  函数表示待扩展路径点  $n$  到目标节点的  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴的相对距离的绝对值的和。

### ■ 2.2 A\* 算法存在的问题

A\* 算法作为最常用的全局算法之一,该算法可以快速确定静态环境下的最优路径<sup>[6]</sup>,但传统的 A\* 算法仍然存在搜索范围少、扩展方向盲目等一些缺点。

使用传统的 A\* 算法搜索移动机器人路径时,会存在以下问题:

(1) 当传统 A\* 算法扩展路径点时,计算量会随着地图增大而增加,从而导致搜索效率降低、规划路线不平滑等问题。

(2) 传统的 A\* 算法搜索出来的算法只有躲避障碍物的路径,没有考虑在复杂的地形条件下执行运行任务的路径。为了解决上述在移动机器人运行中存在的问题,对 A\* 算法进行如下改进。

## 3 改进 A\* 算法

### ■ 3.1 扩展搜索节点

在传统 A\* 算法中,简化了移动机器人在移动运输中与

周围障碍物碰撞的问题,将移动机器人在三维坐标系中的投影视为一个质点,提出了一种扩大搜索范围、拓展节点的方法。传统 A\* 算法在当前目标点扩展领域节点时,扩展的路径通常使用八向区域扩展,也就是八个搜索方向的搜索方式,八向领域扩展偏向于存储搜索模式,扩展节点如图 1 所示,每次当前路径点临近的 8 个邻域可以被算法搜索到,每一个转角都为  $45^\circ$ ,导致有效搜索方向是有限的。

为准确确定 A\* 算法的搜索范围,将物流无人机的搜索方向扩展到 16 个,如图 2 所示,移动机器人可以从当前路径点直接搜索到邻近区域的 8+16 个节点中是否存在障碍物,因此移动机器人的最小转角减小到  $22.5^\circ$ ,有效地扩展了搜索范围。在选择下一个扩展节点之前,长远的搜索范围可以更好地规划路径来搜索下一路径点,为了更快地到达终止路径点,更快速地完成运行任务打下基础。

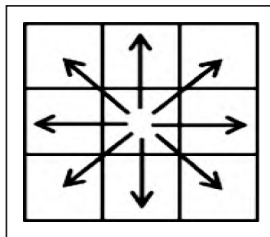


图 1 八向扩展图

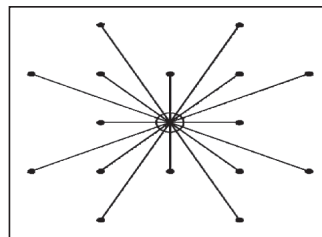


图 2 16 个搜索方向

### ■ 3.2 特殊地形威胁

移动机器人的体积更小,对地面威胁的感知更加敏感。因此,移动机器人的路径规划要考虑地形对运行姿态的威胁。

在路径规划中,以移动机器人的安全为主要目标,考虑到地面不平整有凹陷问题,使规划的路线满足运行需求,因此首先对安全方面进行优化,其次考虑优化时间消耗。为了规划出高安全度和高效率的移动机器人运行路径,对搜索路径进行约束。

本文主要研究地面凹陷对移动机器人运行时规划路径的影响,将凹陷区域表示为一个球体,球体半径就是凹陷的范围,因此,凹陷的最大半径记为  $R_{max}$ 。凹陷的危险度  $W$  如下式:

$$W = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2} \quad \text{式 (3)}$$

式中:  $x_s$ 、 $y_s$  为与当前点相邻的点的立方体周围坐标。

当  $T_w \geq R_{max}$  时,即当移动机器人在凹陷地区外时,危险度  $W = 0$ ,当  $T_w < R_{max}$  时,即当移动机器人在凹陷地区内时,危险度  $W = \frac{1}{T_w^4}$ 。

式中,  $T_w$  为移动机器人到凹陷区域中心的距离。

## 4 仿真实验

### 4.1 仿真实验分析及初始化

仿真采用的计算机型号为 CPUi5-8265U, 4G 内存, 1.6GHz 的主频, 使用 MATLAB R2018b 版本软件进行仿真实验。规划环境长度、宽度和高度分别为  $100 \times 100 \times 6000$  的空间区域为运行的环境地图, 在此基础上输入起始点、终止点、障碍物特性、特殊地形区域、启发式函数、实际成本函数等限制条件, 并从生成的三种不同地图环境中的规划路径地面投影长度、规划路径长度、路线形状与传统 A\* 算法进行对比, 再使用通过 MATLAB 程序得到的数据进行计算, 从而验证改进 A\* 算法在移动机器人路径规划中的可行性。

### 4.2 实现步骤

Step1: 输入移动机器人寻路程序、路径起始坐标和结束坐标;

Step2: 绘制改进 A\* 算法路径规划的不同方位的地图, 包括: 三维环境地图, 垂直剖面视图, 水平剖面视图;

Step3: 创建 OPEN 集数据结构和 CLOSE 集数据结构, 设置起点为第一个点, Node 为当前点, FNode 为父节点;

Step4: 设置  $g(n)$  起点到指定方格和  $h(n)$  指定方格到终点。判断是否有可行路径, 并且把 1 设置为可行路径, 把 0 设置为不可行路径;

Step5: 判断搜索到的路径点是否为目标点, 选择最小  $f(n)$  值的点为下一路径点;

Step6: 当路径点已经到终止路径点所在的节点, 或未

扩展到终止巡航点但 OPEN 列表为空时搜索完成。

Step7: 移动机器人的运行轨迹从终止路径点, 经过每个路径点的父节点, 反向回溯直到达起始点, 算法可以停止。

### 4.3 结果分析

采用传统 A\* 算法与改进 A\* 算法得到移动机器人路径结果, 3D 仿真结果如图 3、图 4 所示, 垂直剖面视图如图 5 和图 6 所示, 水平剖面视图如图 7 和图 8 所示。在起始路径点 start 坐标为 (20, 20, 7), 终止路径点 end 坐标为 (90, 70, 5) 时, 利用改进的 A\* 算法在三维地图和垂直水平两个剖面地图下得到的路径规划图。

由图可以直观地看出, 改进 A\* 算法在三种表示方式不同的地图上, 比传统的 A\* 算法规划的路径拥有更小的转弯角度、更大的路径平滑度、更短的运行路径长度, 安全性和效率都得到了明显的提高, 移动机器人从起始点通过新规划的路径到终止点所经的路径更短, 且能够适应不同方位表达的空域环境地图, 同时和障碍物保持一定的距离, 避免与障碍物发生碰撞, 保障了移动机器人在运行时候的安全。改进 A\* 算法的扩展搜索节点通过减少路径折角使路径变得更加平滑, 以此高效、平稳地避开了对环境中的障碍物。同时考虑环境中的特殊的地形凹陷对移动机器人的威胁, 对运行路径进行约束, 提高了移动机器人运行时的安全性。

表1 路径规划对比结果

算法	规划路径长度 (m)	地面投影长度 (m)
传统 A* 算法	13091.44	12266.90
改进 A* 算法	11813.24	10959.80

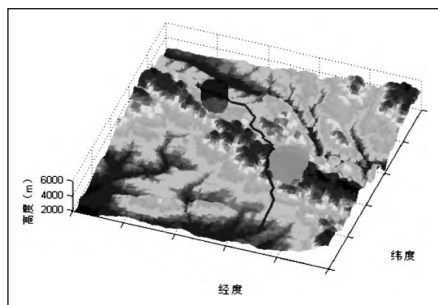


图3 传统 A\* 算法的 3D 仿真结果

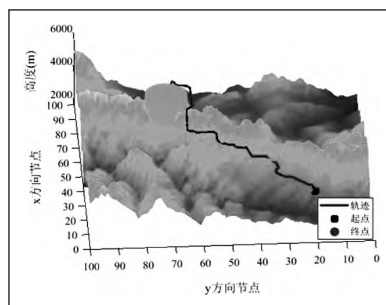


图4 改进 A\* 算法的 3D 仿真结果

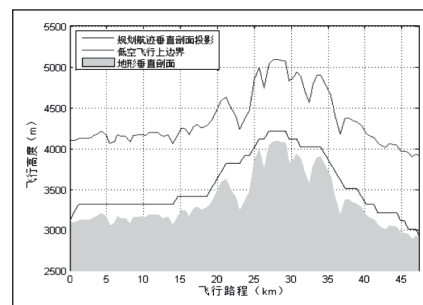


图5 传统 A\* 算法的垂直剖面视图

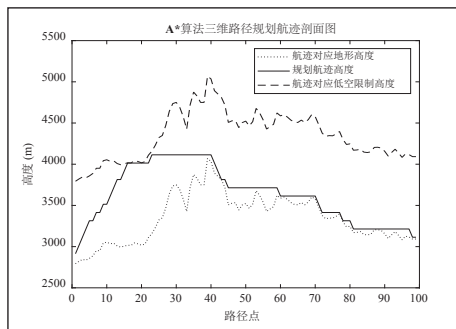


图6 改进 A\* 算法的垂直剖面视图

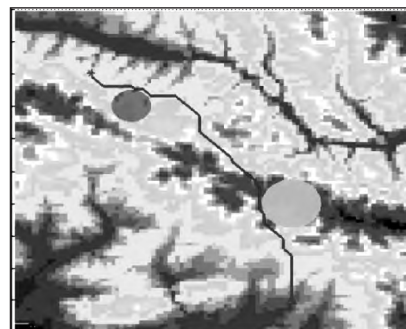


图7 传统 A\* 算法的水平剖面视图

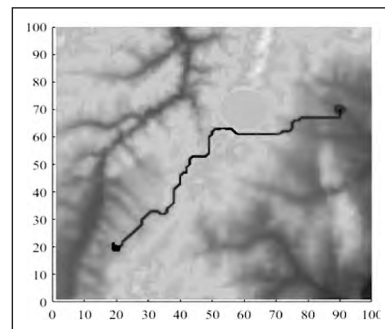


图8 改进 A\* 算法的水平剖面视图

(下转第 15 页)

www.ele169.com | 83



弦加权、升余弦加权、blackman 加权、Kaiser 加权、汉明窗加权、比切雪夫加权以及泰勒加权等 8 种模式可供选择。从而更好地适应音频相控阵扬声器的测量。

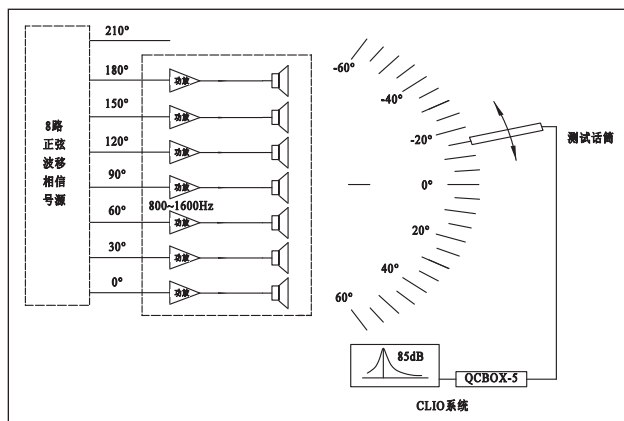


图 16 多路移相信号源在测试中的连接图

本信号源在音频相控阵扬声器的实际测量中的表现良好，图 16 为测试中的具体应用连接图，图中显示信号源连接相控阵扬声器阵列，在有一定隔音和吸音空间里绘制一个一定半径圆弧，并标注上刻度，在刻度线上放置 CLIO 系统的标准测试话筒，便可对相控阵扬声器阵列的声场偏转情况进行测试，大大提高了测量效率和准确度，同时也减轻了测量的劳动强度，因此本装置是具有一定的应用前景的。

.....  
(上接第 83 页)

由表 1 可知，传统 A\* 算法规划路径长度为 13091.44 m，改进后的 A\* 算法规划路径长度为 11813.24 m，传统 A\* 算法规划路径地面投影长度为 12266.90 m，改进后的 A\* 算法规划路径地面投影长度为 10959.80m。通过计算可知，改进后的 A\* 算法比传统 A\* 算法规划路径长度缩短了 9.8%，地面投影长度缩短了 10.7%，也表明了上文对扩展搜索节点和考虑运行时特殊地形威胁的合理性，改进后的 A\* 算法在移动机器人运行时能够规划出更短的路径。

## 5 结论

A\* 算法在路径规划方面具有一定的优势，可以为最优安全运行路径提供快速求解方法。因此，本文在传统 A\* 算法的基础上提出了一种改进算法，通过把搜索节点数扩大搜索范围，搜索方向扩展成 16 个，邻域则扩展为 24 个，解决了路径拐点个数多、路径不平滑、搜索范围有限等问题，可以快速有效地规划在静态环境下的一条最优路径来避免碰撞保障运行安全，同时也提高了搜索精度，缩短了移动机器人的运行路径；仿真实验结果表明，基于该算法的移动机器人在保证安全避障的前提下，改进后的 A\* 算法在规划路

## 参考文献

- \* [1] 张羽霓. 扬声器阵列定向声源的声波聚束研究与主动控制应用 [D]. 天津: 天津大学, 2019
- \* [2] ENGERETSON M. Directional radiation characteristics of articulating line array loudspeaker systems[C]. 111th Convention of the Audio Eng. Soc. New York: [s. n], 2011: 1-11.
- \* [3] PUEO B. Precise control of beam direction and beamwidth of linear loudspeaker arrays[C]. // Proceedings of IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Work-shop. [S. l.]: IEEE Press, 2004: 538-541.
- \* [4] 宋一凡. 扬声器阵列声场形态控制方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- \* [5] 王佳欢. 相控阵扬声器的声场分析与控制 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- \* [6] 韩斌. 基于扬声器阵列的声音定向传播研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- \* [7] 张珂, 俞国华. 基于 AD9959 的四通道高频信号源研制 [J]. 现代电子技术, 2012, 35(7): 187-189, 194.
- \* [8] 王海滨, 申连洋. 基于 AD9959 的多体制雷达信号源的设计 [J]. 现代电子技术, 2007, 30(19): 107-109.

通信作者: 温怀疆。

径长度和规划路径地面投影长度等方面都优于原算法，更加符合移动机器人的运行状态，为后续移动机器人的研究提供思路。

## 参考文献

- \* [1] 陈超, 唐坚, 靳祖光, 等. 一种基于可视图法导盲机器人路径规划的研究 [J]. 机械科学与技术, 2014, 33 (4): 490-495.
- \* [2] 欧阳鑫玉, 杨曙光. 基于势场栅格法的移动机器人避障路径规划 [J]. 控制工程, 2014, 21(1): 134-137.
- \* [3] 赵振国. 向量空间中 A\* 算法的优化及应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- \* [4] PETE R E, NILSSON J, R AHEAL B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths [J]. ACM SIGA R T Bulletin, 1972, 4(37): 28-29.
- \* [5] Nils J N. Artificial intelligence—a new synthesis[M]. San Mateo: Morgan Kaufmann Publisher Inc, 1998.
- \* [6] 王维, 裴东, 冯璋. 改进 A\* 算法的移动机器人最短路径规划 [J]. 计算机应用, 2018, 38(5): 1523-1526.

通信作者: 黄辰。