

基于 ROS 与融合算法的室内无人机路径规划研究^{*}

李峻林¹ 熊兴中^{1,2} 杨开来³ 严月浩¹ 梁涛¹ 刘纪龙¹

(1. 四川轻化工大学自动化与信息工程学院 宜宾 644000; 2. 四川轻化工大学人工智能四川省重点实验室
宜宾 644000; 3. 四川轻化工大学机械工程学院 宜宾 644000)

摘要:针对四旋翼无人机在室内环境下路径规划效率低、缺乏实用性等问题,提出一种基于融合改进算法的路径规划方法。首先引入室内混合约束,使用动态加权对传统 A* 算法的评价函数进行重构;其次根据不同地图区域方位角自适应调整邻域搜索方式;然后考虑无人机实际尺寸影响,设定安全半径,并用 Floyd 算法对路径做拐点冗余处理;最后融合改进 A* 算法与改进 DWA 算法,实现了四旋翼无人机的室内自主路径规划和避障。MATLAB 不同仿真环境下的结果表明,改进后算法搜索节点数和转弯角度分别平均减少 63.1% 和 58.9%,保证全局路径最优的同时,提升了搜索效率与路径安全性。经 ROS 操作系统的实验结果验证,融合算法在避障效果与运动平稳性等方面具备明显优势,可应用于室内复杂场景下无人机的路径规划。

关键词:无人机;路径规划;改进 A* 算法;改进 DWA;ROS

中图分类号: TP18; V249; V279 文献标识码:A 国家标准学科分类代码: 510.8050

Research on indoor UAV path planning based on fusion algorithm

Li Junlin¹ Xiong Xingzhong^{1,2} Yang Kailai³ Yan Yuehao¹ Liang Tao¹ Liu Jilong¹

(1. School of Automation and Information Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Yibin 644000, China; 2. Artificial Intelligence Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan University of Science and Engineering, Yibin 644000, China; 3. School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Yibin 644000, China)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency and lack of practicality of path planning for quadcopter UAV in indoor environments, a path planning method based on the fusion improvement algorithm is proposed. Firstly, indoor mixing constraints are introduced and dynamic weighting is used to reconstruct the evaluation function of the traditional A* algorithm. Secondly, the neighborhood search method is adaptively adjusted according to the azimuthal angle of different map areas; then the safety radius is set considering the influence of the actual size of the UAV and the path is redundantly processed at the inflection points using Floyd's algorithm. Finally, indoor autonomous path planning and obstacle avoidance are realized by integrating the improved A* algorithm and the improved DWA algorithm. The results in different simulation environments of MATLAB show that the number of search nodes and the turning angle of the improved algorithm are reduced by an average of 63.1% and 58.9%, respectively, which ensures the optimization of the global path and improves the searching efficiency and the path safety at the same time. As verified by the experimental results of ROS operating system, the fusion algorithm has obvious advantages in obstacle avoidance effect and smoothness of movement, and can be applied to the path planning of UAVs in indoor complex scenes.

Keywords: UAV; path planning; improved A* algorithm; improved DWA; ROS

收稿日期:2023-07-25

* 基金项目:四川省科技厅项目(2023NSFSC1987)、四川省科技厅重点研发项目(2021YFG0056)、中国高校创新基金项目(2021ZYA09002)、四川轻化工大学研究生创新基金项目(Y2022110)资助

0 引言

民用无人机正在迎来极具前景的发展空间,其中旋翼无人机因结构简单、体型小巧、灵活性高等特点,更是广泛用于室内侦查、紧急救援、快递运送^[1]等领域。这些领域对飞行路径的时效性及可靠性要求更高,因此在真实环境中的最优路径规划成为无人机在民用领域拓展的关键前提。目前已有大量国内外研究人员针对无人机路径规划问题展开科研工作。

刘庆健等^[2]按照原理将无人机路径规划算法分为图搜索、线性规划、智能优化、强化学习4大类算法。其中,全局路径规划常使用RRT、蚁群算法、A*^[3-5]等算法,局部路径规划常使用人工势场法、DWA、TEB^[6-8]等算法。而应用广泛的A*算法由于其启发特性,可以去除无谓的搜索路径,成为在静态连通图中寻找最优路径的经典图搜索算法。但其存在占用存储空间大、搜索效率低、路径拐点多等问题,规划出的路径不利于无人机室内飞行,且未考虑突发情况,缺乏实用性。Ju等^[9]提出一种改进的A*算法用于解决生成的路径不是最短的问题。石英托等^[10]针对A*算法存在缺陷改进了评价函数,提高了规划效率,但所规划路径仍紧贴障碍物。韩忠华等^[11]提出了一种基于高度降维模型的改进A*算法,降低了环境模型的复杂度,在指定环境下规划时间和路径长度更短。Li等^[12]改进了A*算法,解决了圆形、多边形禁飞区的避障规划问题,但没有考虑实时避障规划。Kuang等^[13]提出了基于拓扑图的A*算法改进,实验表明,改进算法可以在室内大场景下快速规划路径。张飞等^[14]通过二维码阵列构建室内定位系统,使用同样具有启发式特性的改进D*算法实现了无人机室内路径规划,但此方法受限于光照条件,无法在黑暗环境发挥作用。Hu等^[15]将速度感知策略和碰撞预测引入到A*算法中,进行无人机编队路径规划。Su等^[16]提出了协同搜索A*算法,在约束模型中引入了合作机制,解决了具有时空约束的多机编队路径规划问题。Lan等^[17]提出了一种基于A*算法和蚁群算法融合的改进路径规划算法,改进算法收敛速度更快,具有更好的全局寻优能力。为解决高层室内消防救援任务,陈锦涛等^[18]提出RRT森林算法,通过随机选取根节点等措施,提高了复杂室内环境下的路径搜索效率及鲁棒性,但协同能力仍待提升。Zhou等^[19]结合A*算法和RRT-star算法,通过改变选点概率、动态调整选点范围等方式为无人机提供最优路径。Wu等^[20]将应用JPS策略的改进A*算法与DWA算法融合,提升了搜索效率,实现了实时避障,但运行不够平稳。

针对以上问题,本文提出改进A*算法,并对规划出的路径做冗余点处理,提高了规划效率与路径平滑性,为局部规划提供良好的路径初始值参考;同时,融合改进DWA局部规划算法,提升无人机室内实际飞行时的灵活性,并对改进前后的算法进行对比实验,搭建ROS室内环境进

行验证,最终实际运行的路径更为安全平滑,可应用于室内复杂场景下无人机的路径规划。

1 A*算法

1.1 传统A*算法

A*算法是一种经典启发式搜索算法,可在全局信息已知条件下,搜索出最短路径。通过评价函数引导,找到代价值最小点作为当前节点,并始终循环这一过程,直到抵达目标节点,获得最短路径。传统A*算法评价函数为:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

式中: $g(n)$ 表示从初始节点到当前节点 $c(n)$ 的实际代价; $h(n)$ 是启发函数,表示从当前节点 $c(n)$ 到目标节点的估计代价。采用栅格地图进行路径规划时,由于只有横向、纵向和斜向3种规划方向,不会出现过小角度转折的情况,对于室内低速无人机,可以考虑将路径进行平滑处理,以增强安全性。如图1所示,本文构建栅格地图进行无人机路径规划研究。

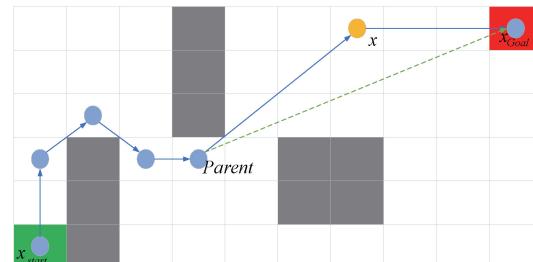


图1 A*算法栅格原理

1.2 室内混合约束模型

大部分研究将飞行环境理想化,没有考虑室内环境因素给飞行造成的影响,导致最终规划出的路径缺乏实用性和安全性。本文综合室内环境、无人机自身能耗等性能约束,以及飞行安全威胁,构建以总飞行代价最低为目标的室内无人机路径规划混合约束模型。设总的飞行代价为 P ,则 P 可以表示为:

$$P = \lambda_1 E + \lambda_2 R_1 + \lambda_3 R_2 \quad (2)$$

式中: E 、 R_1 、 R_2 分别代表飞行能耗代价、飞行风险代价、人员碰撞代价; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别代表上述代价的权重系数,且应满足 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ 。

1) 飞行能耗代价

室内飞行过程中,无人机需要长时间悬停,因此能耗是限制无人机飞行的重要因素,随着有效载荷的增加,能耗也会随之增加,引入能耗惩罚系数 ϕ_E 。假设无人机的能耗随着载荷质量的增加而线性增加,载荷为空时,能耗惩罚系数 ϕ_E 取值为 1;故无人机在执行室内飞行任务时,能耗惩罚系数 ϕ_E 与装载量 Z 之间也呈正比例线性关系,则 ϕ_E 可以表示为:

$$\phi_E = \frac{\phi_{E(\max)} - 1}{Z_{\max}} Z + 1 \quad (3)$$

式中: $\phi_{E(\max)}$ 代表能耗惩罚系数的最大值; Z_{\max} 代表室内无人机所能承受的最大载荷量。因此室内飞行能耗代价 E 可以表示为:

$$E = \phi_E (E_v + E_l) \quad (4)$$

式中: E_v 和 E_l 分别代表垂直方向上产生的能耗和在水平方向上产生的能耗。

2) 飞行风险代价

飞行风险代价考虑两部分,分别是飞行稳定性和飞行碰撞风险。首先需要控制无人机的加速度,保障无人机在室内飞行过程中不会出现急加速现象,从而增加飞行稳定性。加速度惩罚系数可表示为:

$$\Gamma_{R1} = \sum_{i=1}^{N-1} \|A_i\|_2^2 + \sum_{i=1}^{N-2} \|\partial_i\|_2^2 \quad (5)$$

式中: N 代表控制点的个数; V_i 代表第 i 个控制点的速度; A_i 代表第 i 个控制点的加速度; ∂_i 代表第 i 个控制点的加加速度。

然后考虑飞行碰撞风险,按照栅格地图[0,1]赋值法,将包含障碍物的栅格区域赋值为1,安全栅格区域赋值为0。并将路径规划途中的可选栅格按照如下规则进行碰撞风险判断:

$$p(i) = \frac{N_{obs}}{N_{aro}} \quad (6)$$

式中: N_{obs} 和 N_{aro} 分别表示无人机在室内飞行过程中所处第 i 个栅格时,周围障碍物栅格数量和周围栅格数量总数; $p(i)$ 代表碰撞风险,且每次寻路过程中,都选择 $p(i)$ 值最小的栅格进行路径规划,从而降低碰撞风险。因此,飞行风险代价可以表示为:

$$R_1 = \sum_{i=1}^n \Gamma_{R1} p(i) \quad (7)$$

3) 人员碰撞代价

尽管四旋翼无人机在室内飞行过程中的速度较慢,但仍然需要考虑当无人机出现失控等紧急情况导致的人员伤亡风险,人员碰撞代价可以表示为:

$$R_2 = P_j D \quad (8)$$

式中: P_j 代表无人机碰撞到的人员数量; D 代表人员伤亡率。

2 改进 A* 算法

2.1 改进评价函数

分析传统 A* 算法评价函数可知, $g(n)$ 与 $h(n)$ 权重比不同时,对评价函数结果、算法规划速度、路径效果影响都不同。针对该问题,本文提出动态加权的方法对 $h(n)$ 相比 $g(n)$ 的权重比值进行改进。判定原则为当 $c(n)$ 为起点时,应优先考虑快速往目标区域搜索,规定权重比 $h(n) > g(n)$; $c(n)$ 处于障碍物较多区域或搜索至 1/2 路程时,恢复正常权重比 $h(n) = g(n)$; $c(n)$ 接近目标点时,应优先考虑规划路径更优,规定权重比 $h(n) < g(n)$ 。并且将混合约束中的总飞行代价 P 引入评价函数,增强规划路径的实用性和安全性。因此改进后的评价

函数公式为:

$$f(n) = a[g(n) + P] + (1-a)e^{\frac{d(c)}{d(s)}}h(n) \quad (9)$$

式中: a 表示取值在[0,1]的常量; $d(c)$ 表示 $c(n)$ 到目标节点的距离; $d(s)$ 表示初始点到目标点的距离; P 代表上述无人机室内飞行的总代价; $h(n)$ 使用对角线距离表示。

$$d(c_x) = |c_x - g_x| \quad (10)$$

$$d(c_y) = |c_y - g_y| \quad (11)$$

$$h(n) = d(c_x) + d(c_y) + (\sqrt{2} - 2) \times \min[d(c_x), d(c_y)] \quad (12)$$

式中: $d(c_x), d(c_y)$ 分别表示 $c(n)$ 到目标点 x, y 方向的距离; c_x, c_y 分别表示 $c(n)$ 的 x, y 坐标; g_x, g_y 分别表示目标节点的 x, y 坐标。

2.2 改进搜索邻域

传统 A* 算法广泛使用 8 邻域搜索策略进行节点扩展,该种搜索策略会出现搜索“背离”目标节点方向的情况,导致占用不必要的系统内存。为解决上述问题,本文通过方位角对搜索方向进行判定和选择,实现对搜索邻域的约束。如图 2 所示,其中橘黄色两节点分别代表起始节点和目标节点。计算出其方位角后,根据八邻域构成的象限判断起始节点到目标节点所在的“前进”象限(图 3 中①象限);依据方位角所在的象限筛除“背离”目标节点的搜索方向(图 3 中④⑤⑥象限),从而缩减改进后 A* 算法的搜索方向,并且在前期采用改进邻域搜索法,快速搜索到目标区域;路程过半或障碍物较多时,切换回 8 邻域搜索,从而找到最优路径。

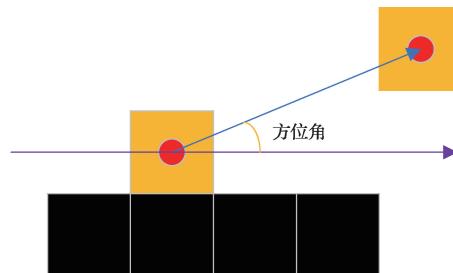


图 2 方位角示意图

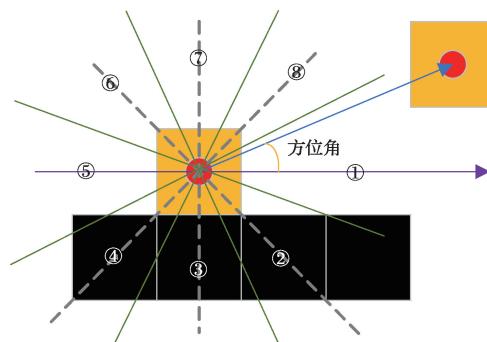


图 3 搜索邻域示意图

2.3 设定安全半径

视当前节点 $c(n)$ 为无人机坐标中心, 规定安全半径 r 始终大于等于无人机中心到无人机轮廓顶点的长度, 同时大于无人机中心到障碍物顶点的长度。如图 4 所示, 假设 C_1 为当前节点, C_2 为即将搜索的节点, 考虑实际无人机尺寸大小, 规定 $r_1 = r_2 = 2.0$, 若 C_2 符合要求, 则将 C_2 加入 Closelist 中; 若不符合则删除 C_2 , 继续搜索判断 C_3 节点, 若 C_3 符合要求, 则将 C_3 加入 Closelist 中, 重复上述操作, 直到从起始点到目标点的所有路径点均符合上述条件为止。

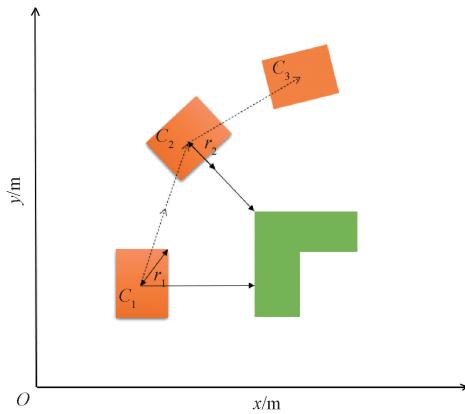


图 4 安全半径示意图

2.4 Floyd 算法优化路径

改进后的 A* 算法路径由不同路径点连接而成, 形成多个拐点, 不利于无人机移动。为了更好的控制无人机, 采用 Floyd 算法对生成的路径拐点做冗余处理。Floyd 算法利用动态规划思想来求解两点间的最优距离问题, 原理如图 5 所示。

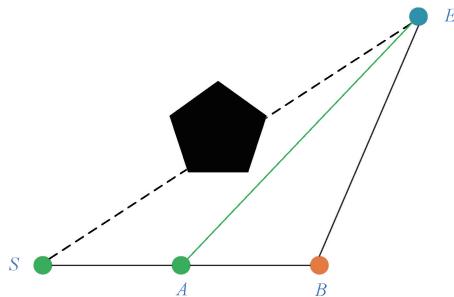


图 5 Floyd 算法原理

设 $D(S, E)$ 为起点 S 到终点 E 之间的距离, $P(S, E)$ 为起点 S 到终点 E 之间的线路, 图 5 中, 由于 S 和 E 之间存在障碍物, 导致两节点无法直接连通。

若点 B 是 S 与 E 之间的临近节点之一, 则 $D(S, E) = D(S, B) + D(B, E)$, $P(S, E) = S \rightarrow B \rightarrow E$; 若点 A 是 S 与 E 之间的临近节点之一, 则 $D(S, E) = D(S, A) + D(A, E)$, $P(S, E) = S \rightarrow A \rightarrow E$; 若 $D(S, A) + D(A, E) < D(S, B) + D(B, E)$, 则 $P(S, E) = S \rightarrow A \rightarrow E$, 删除节点 B , 优化后线路为从点 S 出发到点 A 再到 E ; 反之删除节点 A , $P(S, E) = S \rightarrow B \rightarrow E$ 。利用此算法原理, 可以删除冗余节点, 获得更优路径。

$E) < D(S, B) + D(B, E)$, 则 $P(S, E) = S \rightarrow A \rightarrow E$, 删除节点 B , 优化后线路为从点 S 出发到点 A 再到 E ; 反之删除节点 A , $P(S, E) = S \rightarrow B \rightarrow E$ 。利用此算法原理, 可以删除冗余节点, 获得更优路径。

3 融合算法

3.1 动态窗口法

在路径规划时, 需要考虑未知障碍物和动态障碍物产生的影响, 这就要求无人机能够局部实时避障, 由于动态窗口法具有符合四旋翼无人机的运动特征、强灵活性等优点, 因此本文采用动态窗口法来解决这个问题。

1) 运动学模型

动态窗口法的思路是在由线速度和角速度组成的集合 $\{(v, \omega)\}$ 中采样多组速度, 并分别模拟这些速度在下一个周期内的轨迹, 然后通过评价函数在各组轨迹中选取最优轨迹。因此, 其运动模型可以表示为:

$$\begin{cases} x_{t+1} = x_t + v_x \Delta t \cos \theta_t - v_y \Delta t \sin \theta_t \\ y_{t+1} = y_t + v_x \Delta t \sin \theta_t + v_y \Delta t \cos \theta_t \\ \theta_{t+1} = \theta_t + \omega \Delta t \end{cases} \quad (13)$$

式中: v 和 ω 分别表示线速度和角速度, 分解到 x 和 y 轴方向, 记为 v_x 和 v_y ; x_{t+1} 是 $t+1$ 时刻的运动坐标; θ 表示无人机运动方向与水平方向的夹角。

2) 速度采样

通过速度采样操作即可预估无人机的运动轨迹。由于无人机自身性能及环境等制约因素, 考虑如下 3 方面限制条件将采样速度限制在合理范围内。

(1) 无人机速度范围限制

$$V_m = \{(v, \omega) \mid v = [v_{\min}, v_{\max}] \wedge \omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]\} \quad (14)$$

式中: v_{\min}, v_{\max} 为无人机的最小和最大线速度; $\omega_{\min}, \omega_{\max}$ 为无人机的最小和最大角速度。

(2) 无人机自身性能限制

受到硬件性能的影响, 无人机存在最大加速度, 这是限制采样速度范围的一大因素。其加减速度为:

$$\begin{cases} v_d = (v, \omega) \mid v \in [v_c - \dot{v}_b \Delta t, v_c + \dot{v}_a \Delta t] \\ \omega \in [\omega_c - \dot{\omega}_b \Delta t, \omega_c + \dot{\omega}_a \Delta t] \end{cases} \quad (15)$$

式中: v_c, ω_c 为无人机当前的线速度和角速度; \dot{v}_a, \dot{v}_b 为无人机最大线加速度和减速度; $\dot{\omega}_a, \dot{\omega}_b$ 为无人机最大角加速度和减速度。

(3) 无人机安全距离限制

为避免与障碍物碰撞, 则需要预留足够的安全距离, 能够安全制动的速度为:

$$v_a = (v, \omega) \mid v \leq [2 \text{dist}(v, \omega) \dot{v}_b]^{1/2}, \quad \omega \leq [2 \text{dist}(v, \omega) \dot{\omega}_b]^{1/2} \quad (16)$$

综上所述, 机器人的速度区间应满足如下条件:

$$v_r = v_m \cap v_d \cap v_a \quad (17)$$

3)改进评价函数

在利用采样速度模拟出若干路径轨迹后,就需要评价函数来选择最优轨迹。传统的动态窗口法评价函数如下:

$$G(v, w) = \alpha \cdot head(v, w) + \beta \cdot vel(v, w) + \gamma \cdot dis(v, w) \quad (18)$$

式中: $head(v, w)$ 为偏转角的评价函数; $vel(v, w)$ 为速度评价函数; $dis(v, w)$ 为对应轨迹与障碍物间的评价函数; α, β, γ 为 3 项函数的加权系数。轨迹评判的准则为能避开障碍物,向目的地快速前进。为克服动态窗口法在障碍物多时,易陷入局部最优的缺陷,提出优化评价函数。

设计了融合路径节点的方位角评价函数 $heading(v, w)$,将传统算法中的评价子函数改进为模拟轨迹末端方向与改进 A* 算法规划所提取的关键点之间方向偏差角,大大提高路径搜索的有效性;并对动态和静态障碍物区别对待,设计了两个不同类别的障碍物评价函数,定义 $dis_{sta}(v, w)$ 为预测轨迹终点与全局已知障碍物最近距离的评价函数,定义 $dis_{dyn}(v, w)$ 为预测轨迹终点与全局未知障碍物最近距离的评价函数。改进后的评价函数如下:

$$G(v, w) = \alpha \cdot heading(v, w) + \beta \cdot vel(v, w) + \gamma \cdot dis_{sta}(v, w) + \phi \cdot dis_{dyn}(v, w) \quad (19)$$

3.2 融合改进 A* 和改进 DWA 算法

DWA 算法虽然可以进行局部动态避障,但如果我没有先进行全局路径规划,则容易陷入局部最优解。因此本文将改进 A* 算法与改进动态窗口法进行融合,先用改进 A* 算法规划出一条全局最优路径,再使用改进动态窗口法进行局部避障,以解决动态环境下的路径规划问题。充分发挥两算法的优点,实现路径长度、平滑度和安全性的全方面优化。

综上所述,融合算法的实现步骤如图 6 所示。

4 仿真实验

4.1 改进 A* 算法仿真实验

为对比改进前后 A* 算法的效果,基于栅格地图进行仿真测试。实验环境为 16 G 运行内存和 Win10 操作系统。实验平台使用 MATLAB 分别建立两个障碍物随机分布的 30×30 环境地图。蓝色三角形代表起点,绿色圆圈代表目标点,灰色栅格代表算法搜索区域,黑色栅格代表障碍物区域,白色栅格代表可行区域。

在实验地图 1 中,传统 A* 算法存在许多无效搜索节点,且路径拐点较多,生成路径离障碍物近。本文改进算法所规划路径相较于传统 A* 算法,搜索节点数量平均减少 56.0%,转弯角度平均减少 57.2%,路径转折次数平均减少 40.0%,路径代价增加 1.6%;相较于文献[10]所提算法搜索节点数量平均减少 8.8%,转弯角度平均减少 69.4%,路径转折次数平均减少 57.1%,路径代价减少 0.6%。前期加快收敛到目标区域,动态调整权重并切换

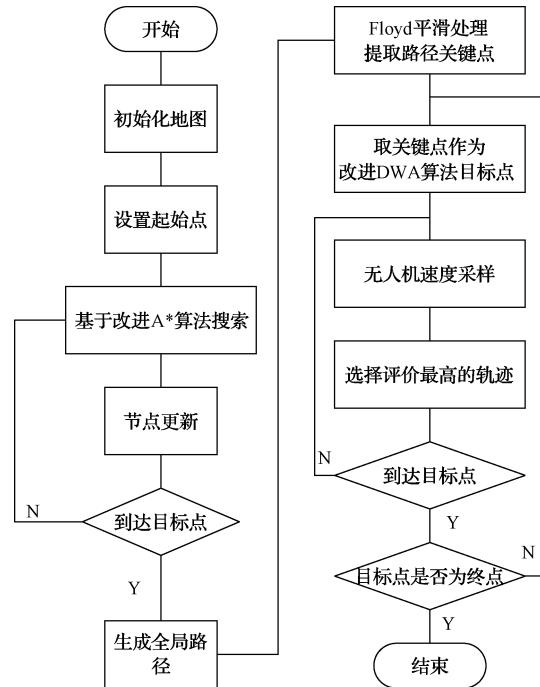
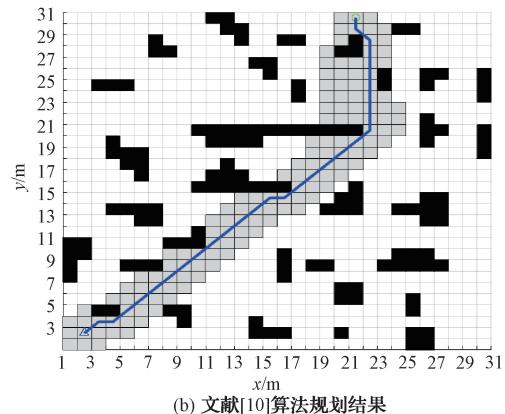
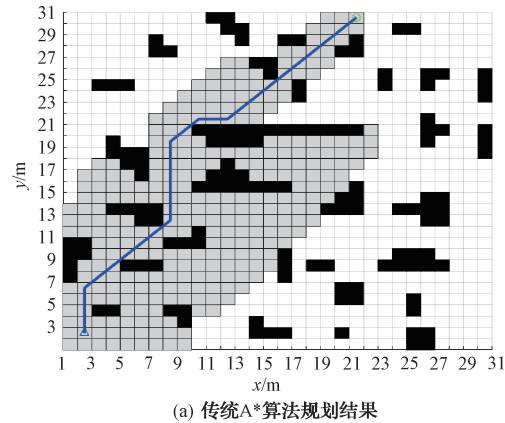


图 6 算法融合流程

邻域搜索方式,不仅提高规划效率,且与障碍物保持一定距离,使所得路径更加平滑安全。算法改进前后性能对比效果如图 7 和表 1 所示。



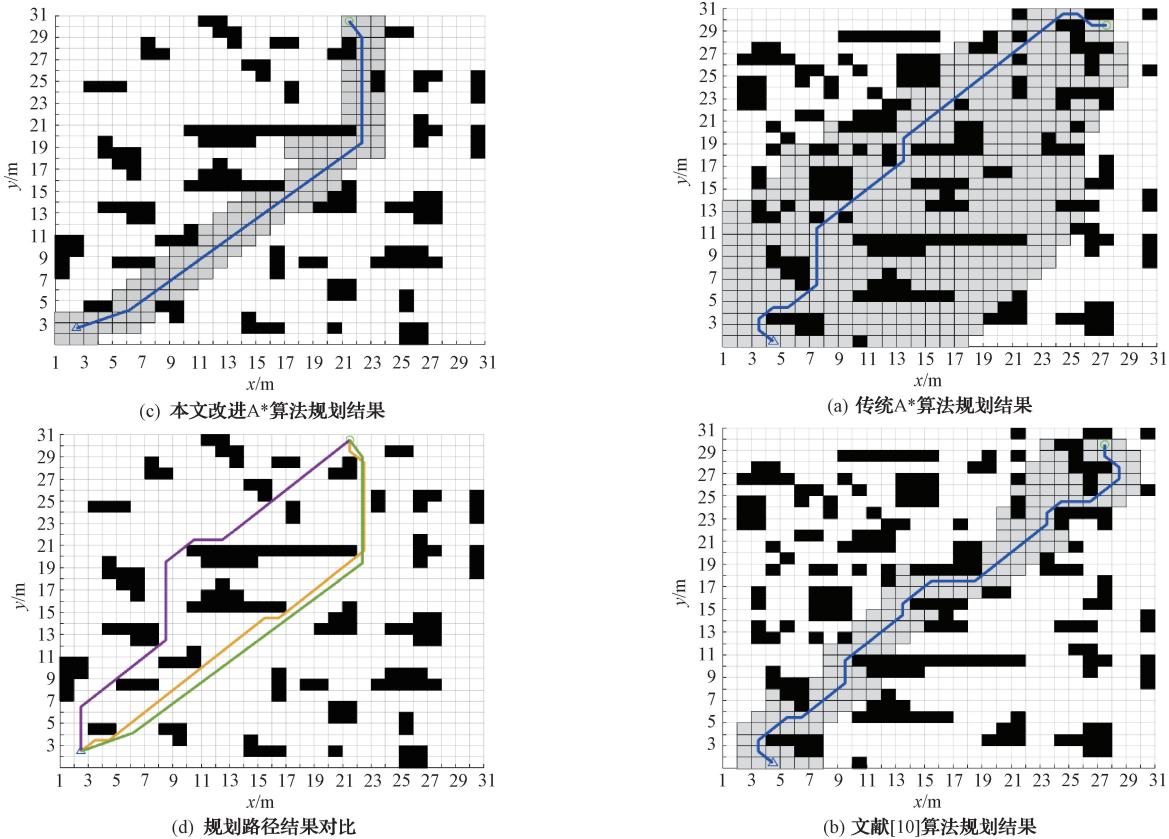


图 7 算法改进前后对比效果 1

表 1 A* 算法改进前后对比实验 1

算法	搜索节点数量	路径代价/m	转折次数	转弯角度/°
传统 A*	282	37.04	5	225
文献[10]	136	37.87	7	315
改进 A*	124	37.64	3	96.30

在实验地图 2 中,本文改进算法相较于传统 A* 算法搜索节点数量平均减少 70.2%,转弯角度平均减少 60.6%,路径转折次数平均减少 27.3%,路径长度增加 0.6%;相较于文献[10]所提算法搜索节点数量平均减少 11.2%,转弯角度平均减少 71.1%,路径转折次数平均减少 52.9%,路径代价减少 0.8%。且在更为复杂的环境中,传统 A* 算法出现穿越障碍物规划路径的情况;文献[10]所规划路径虽然搜索节点数大幅减少,提高了搜索效率,但转折较多,且离障碍物近,无法满足实际稳定性需求。而本文改进算法能够找到一条较为平滑且始终保持障碍物安全距离的最优路径,无论规划效率还是安全程度,本文改进 A* 算法都有更大的实际应用价值。算法改进前后对比效果如图 8 和表 2 所示。

4.2 融合算法仿真实验

成功验证改进 A* 算法的路径规划效果后,在实验地图一中验证融合改进算法的动态避障规划能力。

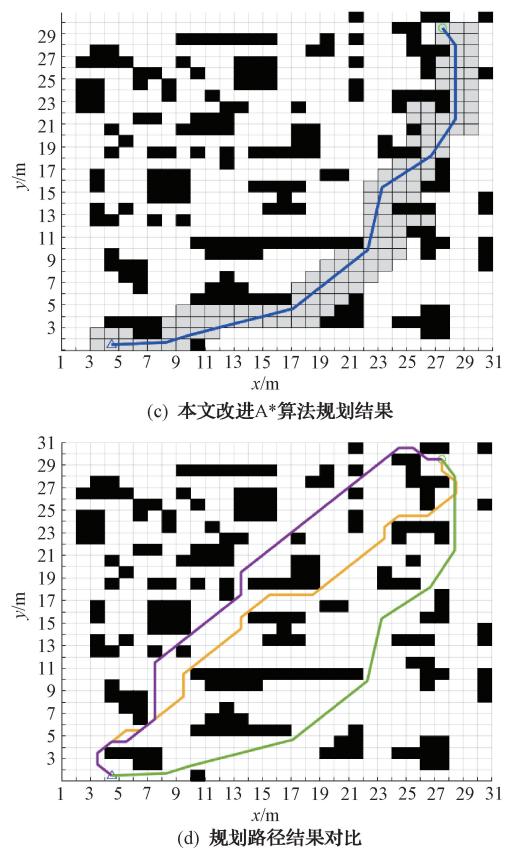


图 8 算法改进前后对比效果 2

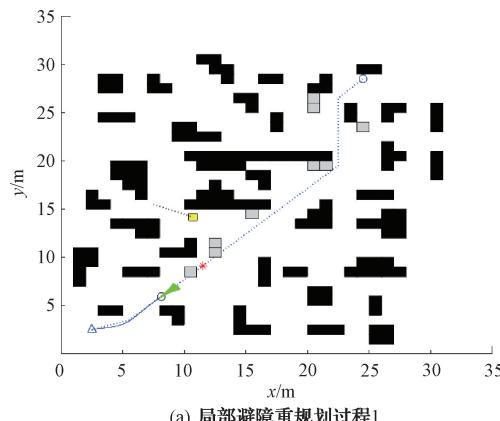
表2 A* 算法改进前后对比实验2

算法	搜索节点数量	路径代价/m	转折次数	转弯角度/(°)
传统 A*	423	42.11	11	495
文献[10]	142	42.69	17	675
改进 A*	126	42.35	8	195.18

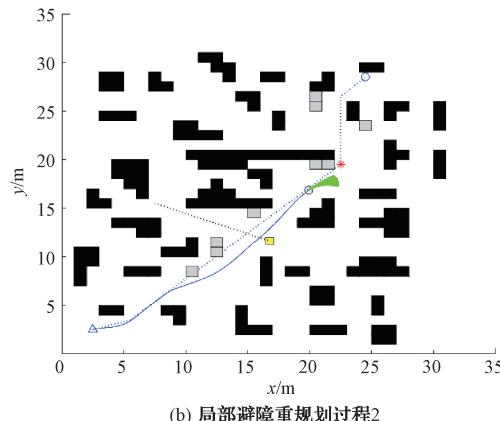
静态全局规划运行结束的前提下,随机添加灰色未知障碍物以及黄色动态障碍物。为充分体现仿真效果,DWA 算法参数设置如下:最大线速度为 2 m/s,最大角速度为 30 rad/s,最大线加速度为 0.5 m/s,最大角加速度为 80 rad/s,线速度分辨率为 0.01 m/s,角速度分辨率为 1 rad/s,周期为 3.5 s。

无人机动态环境下的局部规划过程如图 9 所示。算法前期无人机跟随改进 A* 算法规划出的全局路径开始运动,随着未知障碍物和动态障碍物的加入,融合改进算法执行避障和路径重规划任务,导致规划路径及时间都有所增长,最终成功完成避障规划任务,得到一条平滑安全的最优路径。

无人机避障过程中的参数变化如图 10 所示,由于在局部路径上需要躲避障碍物并重规划路径,使得线速度和角速度均有减小过程出现,无人机姿态也做出相应改变,成功验证了算法有效性及可行性。融合规划实验改进算法前后性能对比结果如表 3 所示。利用传统 A* 算法规划全局路径所花时间为 0.45 s,路径代价为 36.28 m;文



(a) 局部避障重规划过程1



(b) 局部避障重规划过程2

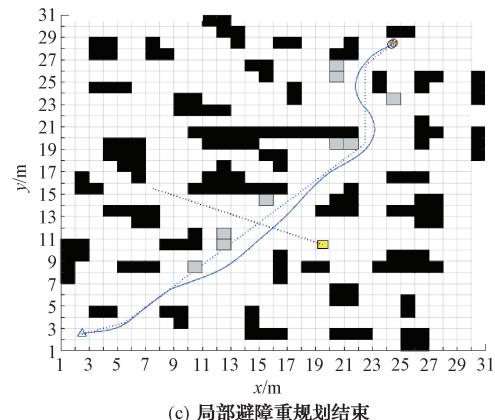
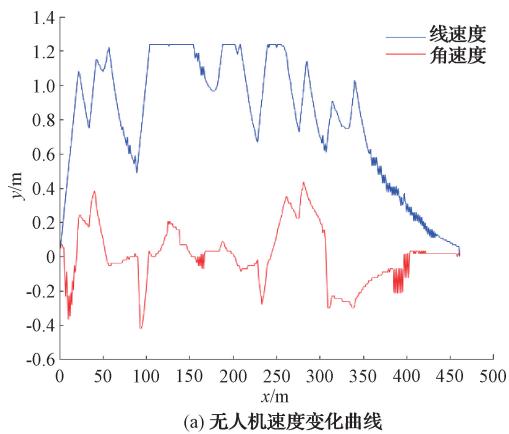
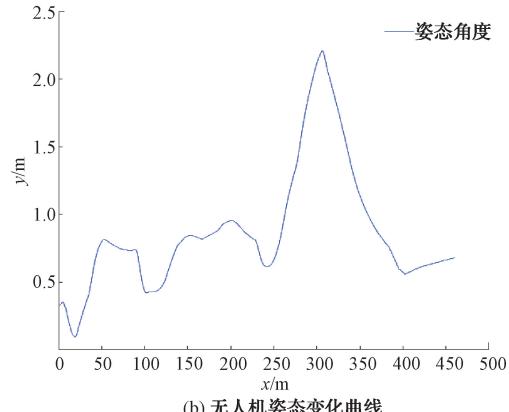


图9 无人机融合算法避障重规划过程



(a) 无人机速度变化曲线



(b) 无人机姿态变化曲线

图10 无人机参数变化曲线

献[10]所需时间为 0.41 s,路径代价为 36.35 m;改进后 A* 算法所需时间为 0.62 s,路径代价为 35.76 m。相比之下,改进后 A* 算法虽然规划时间分别增加 0.17 和 0.21 s,但所规划路径转折点更少,路径代价更低,平滑性更好,且始终保持与障碍物的安全距离,更具实际应用价值。

融合算法结合改进 A* 算法和改进 DWA 算法的优点,实现了复杂环境下的动态避障和路径重规划功能,可以得到一条平滑安全的最优室内飞行路径。

表3 各算法性能参数对比

算法	搜索时长/s	路径代价/m
传统 A*	0.45	36.28
文献[10]	0.41	36.35
改进 A*	0.62	35.76
融合改进	29.68	37.53

5 实验验证

5.1 ROS 实验描述

在 ROS 环境下,将改进后的 A* 算法应用为全局规划器,改进 DWA 算法应用为局部规划器,接收局部代价地图信息与全局路径信息,分析处理后发送速度与转向控制消息给飞控,进行实时避障规划。实验平台 CPU 选用 AMD R7 5800U, RAM 为 16 GB, 在 Ubuntu20.04 下安装 ROS 操作系统 Noetic 版本,对 MAVROS 和 PX4 进行配置,通过 Gazebo 搭建室内无人机仿真环境,采用 Gmapping 算法对室内环境建图,无人机路径规划结果由 Rviz 显示。

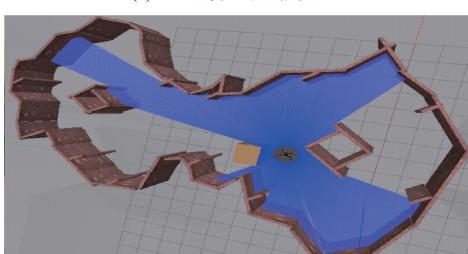
5.2 ROS 实验验证

改进 A* 算法首先规划出一条全局路径,无人机遵循路径开始飞行;飞行过程中加入未知纸箱,无人机检测到障碍物后,改进 DWA 算法进行局部路径重规划,无人机成功避开障碍物继续向着目标点飞行;飞行途中又加入走动的行人,改进 DWA 算法重新进行路径规划和避障,最终无人机成功避开静态纸箱和动态行人障碍物,沿着重规划路径成功到达目标点。完整飞行避障过程如图 11 所示。

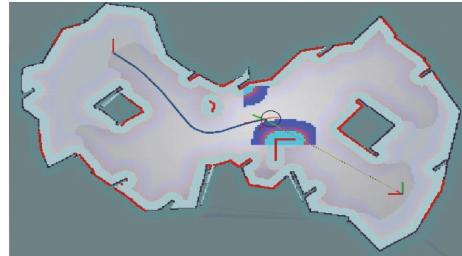
实验表明,本文所提融合改进算法在避障效果与路径平滑性等方面具备良好效果,可应用于室内场景下无人机的路径规划和避障。



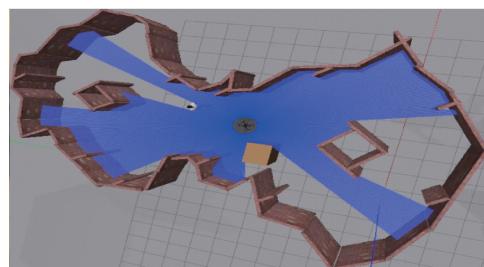
(a) Rviz避障重规划过程1



(b) 无人机避障未知纸箱过程



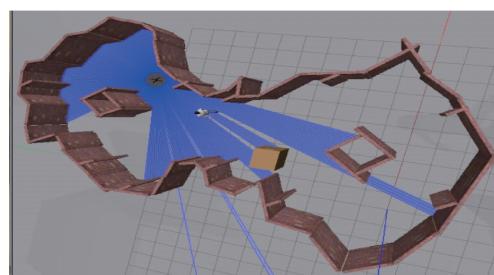
(c) Rviz避障重规划过程2



(d) 无人机避障动态行人过程



(e) Rviz动态避障成功过程



(f) 无人机成功到达目标点

图 11 无人机室内完整飞行避障过程

6 结 论

本文针对 A* 算法搜索效率低、生成路径与障碍物距离近、缺乏实用性等问题。首先构建室内混合约束模型,并将目标函数作为参数引入改进后的动态评价函数中;其次,利用起始节点到目标节点的方位角对搜索邻域进行定向筛选和切换;然后,考虑到无人机实际尺寸问题,设定安全半径方法以提高飞行安全性;最后,结合 Floyd 算法对路径进行冗余转折点处理,并将改进后 A* 算法与改进 DWA 算法融合,提高了路径规划效率,实现了算法静态和动态避障功能。此外,本文在 ROS 环境下搭建了无人机室内仿真环境,并将所提改进算法部署其中,实验结果表明,本文所提改进融合算法,使无人机能够成功避开不

同类别障碍物,以较小的转弯成本,安全、平稳、快速的到达目标点,验证了该算法的有效性和可行性。

参考文献

- [1] LI J L, XIONG X Z, YAN Y H, et al. A survey of indoor UAV obstacle avoidance research [J]. IEEE Access, 2023, 11: 51861-51891.
- [2] 刘庆健,疏利生,刘刚,等.低空无人机路径规划算法综述[J].航空工程进展,2023,14(2):24-34.
- [3] 侯宇翔,高焕兵,汪子健,等.改进RRT的移动机器人路径规划算法[J].电子测量技术,2022,45(16):47-52.
- [4] 肖金壮,余雪乐,周刚,等.一种面向室内AGV路径规划的改进蚁群算法[J].仪器仪表学报,2022,43(3):277-285.
- [5] 姜媛媛,张阳阳.改进8邻域节点搜索策略A*算法的路径规划[J].电子测量与仪器学报,2022,36(5):234-241.
- [6] 林俊志,席万强,周俊,等.基于改进PRM和APF的移动机器人路径规划[J].国外电子测量技术,2022,41(12):1-6.
- [7] LI X X, HU X G, WANG Z Q, et al. Path planning based on combinaion of improved A-STAR algorithm and DWA algorithm [J]. 2020 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture (AIAM), 2020:99-103.
- [8] 栾添添,王皓,尤波,等.狭窄空间的位姿辅助点TEB无人车导航方法[J].仪器仪表学报,2023,44(4):121-128.
- [9] JU C, LUO Q, YAN X. Path planning using an improved A* algorithm[J]. 2020 11th International Conference on Prognostics and System Health Management, 2020:23-26.
- [10] 石英托,陈华,张连新,等.基于改进A*算法的AGV转运机器人路径规划研究[J].制造技术与机床,2022(5):19-22.
- [11] 韩忠华,毕开元,杨丽英,等.室内复杂环境下多旋翼无人机动态路径规划[J].中国惯性技术学报,2019,27(3):366-372,377.
- [12] LI X H, MIAO M, RAN B J, et al. Obstacle avoidance path planning for UAV based on improved A* algorithm[J]. Computer Systems & Applications, 2021, 30(2): 255-259.
- [13] KUANG H, LI Y, ZHANG Y, et al. Improved a-star algorithm based on topological maps for indoor mobile robot path planning [C]. 2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), 2022: 1236-1240.
- [14] 张飞,白伟,乔耀华,等.基于改进D*算法的无人机室内路径规划[J].智能系统学报,2019,14(4):662-669.
- [15] HU Y, YAN Y, REN Q, et al. 3D multi-UAV cooperative velocity-aware motion planning [J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 102: 762-774.
- [16] SU H, YUN H, HE J, et al. Multi-aircraft path planning method based on cooperative search A* algorithm[C]. 2019 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS), 2019: 267-272.
- [17] LAN X, LV X, LIU W, et al. Research on robot global path planning based on improved A* ant colony algorithm[C]. 2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), 2021: 613-617.
- [18] 陈锦涛,李鸿一,任鸿儒,等.基于RRT森林算法的高层消防无人机室内协同路径规划[J/OL].自动化学报,1-12[2023-11-30]<https://doi.org/10.16383/j.aas.c210368>.
- [19] ZHOU Q, LIU G. UAV path planning based on the combination of a-star algorithm and RRT* algorithm[C]. 2022 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS), 2022: 146-151.
- [20] WU F L, GUO S Y. Dynamic path planning of AGV based on fusion of improved A* and dynamic window approach algorithms [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(30): 12452-12459.

作者简介

李峻林,硕士研究生,主要研究方向为无人机路径规划、视觉避障等。

E-mail:ljl2668@163.com

熊兴中,博士,教授,主要研究方向为人工智能、多源信息融合、无线通信、智能信号处理等。

E-mail:xzxiang@suse.edu.cn

杨开来,硕士研究生,主要研究方向为智能装备与制造过程信息化、神经网络优化、设备故障预测等。

E-mail:ykl595@163.com

严月浩,博士,教授,主要研究方向为无人机地面站、无人机导航与规划、无人机编队飞行等。

E-mail:yanyuehao@126.com

梁涛,硕士研究生,主要研究方向为无人机姿态估计、姿态控制等。

E-mail:liangtao0505@126.com

刘纪龙,硕士研究生,主要研究方向为无人机路径规划避障等。

E-mail:jilongliu0622@163.com