

DOI: 10.12382/bgxb.2021.0800



考虑平台特性的多层建筑物内履带式无人平台运动规划

熊光明, 于全富, 胡秀中, 周子杰, 许佳慧

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 针对在多层建筑物内无人平台的自主导航问题, 提出一种考虑平台特性的运动规划框架。根据履带式平台的特点, 采用零半径转向运动基元方案, 并引入维诺路径, 提高了全局规划在狭窄环境中的灵活性与安全性。经过分段三次 Hermite 插值得到平滑的全局路径。基于履带式平台运动模型, 在轨迹预测的基础上, 利用波阵值来提高局部规划算法在障碍物信息失准情况下的鲁棒性, 并结合有限状态机决策模型, 实现多楼层间的自主导航任务。对算法进行了仿真与实车实验验证。研究结果表明, 新算法能够更好地适应室内环境空间狭窄的特点, 同时也证明了在实际环境中的可行性。

关键词: 地面无人平台; 多层建筑物; 运动规划; 自主导航

中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2023)03-0841-10

A Motion Planner for Unmanned Tracked Vehicles in Multi-storey Buildings Considering the Characteristics of Vehicles

XIONG Guangming, YU Quanfu, HU Xiuzhong, ZHOU Zijie, XU Jiahui

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To solve the navigation problem of the unmanned vehicles in multi-storey buildings, a motion planning framework considering the characteristics of vehicles is proposed. Based on the characteristics of tracked vehicles, the primitive scheme of zero-radius steering is adopted and the Voronoi Path is introduced, which improves the flexibility and safety of the global planner in a narrow environment. Then, the smooth global path is obtained through piecewise cubic Hermite interpolation. Based on model prediction with respecting to the kinematic model of tracked vehicles, the Wavefront Value is introduced to improve the robustness of the local planning algorithm in the case of inaccurate obstacle positioning, and combined with the Finite State Machine to implement the autonomous navigation task between multiple floors. Finally, the simulation and real vehicle experiment are performed. The results show that the proposed algorithm can better adapt to the characteristics of narrow indoor space and also prove its feasibility in the actual environment.

Keywords: unmanned ground vehicles; multi-storey buildings; motion plan; autonomous navigation

0 引言

在美国国防高级计划研究局(DARPA)的 SUBT 挑战赛^[1]和我国的跨越险阻 2021 地面无人系统挑战赛^[2]中, 都首次要求无人平台在多层建筑物内完

成自主任务。不同于一般单层环境, 多层建筑具有多个相互连接的离散平面的空间特征。虽然许多应用于单层连续平面环境的二维和三维运动规划算法已经被提出, 但是无人平台在多个离散平面之间的运动规划问题仍有待解决。

运动规划算法一般分为 2D、2.5D 和 3D 共 3 种类型。2D 算法是在平面地图上进行规划的传统方法。2.5D 算法在 2D 算法的基础上将 3D 地图映射到 2D 平面上并进行规划，考虑到更多环境信息的同时保证了算法的计算效率。Carsten 等^[3]将 3D 环境投影到平面进行栅格化，在每一个栅格上存储一个地形对应的高度值，在全局规划算法中融合障碍物的高度信息进行路径规划。Ishigami 等^[4]将路径长度、俯仰和侧倾程度等 4 项指标加权和作为 Dijkstra 算法生成多条候选路径，但是没有考虑运动学约束。Lacroix 等^[5]利用 A* 算法在搜索路径时，采用圆弧路径连接节点，得到相对平滑的路径，但是无法保证路径的曲率连续。Howard 等^[6]利用运动学模型前向仿真生成基元路径来进一步提高路径的连续性。在单层连续平面环境下，2D 和 2.5D 规划算法可以减少计算的复杂度，并同时保证规划结果具有一定的准确性。然而，2D 和 2.5D 规划算法并不能直接应用在多层建筑物环境中。

相对于 2D 和 2.5D 算法，3D 规划算法可以在单层连续曲面上进行规划，但是由于实际三维环境的空间复杂性，难以应用在多层建筑物等大规模场景。Colas 等^[7]和 Menna 等^[8]将室内环境使用三维栅格地图建模，考虑到距离、坡度、凸起度作为代价值，最终在仿真环境下得到了楼梯处的一段可通行路径。但是仿真环境只是一段楼梯区域，没有包括各楼层环境信息，空间复杂度比较小。由于 3D 规划算法的复杂度大于 $n \log(n)$ ， n 为算法处理的节点数量，随着地图空间的增大，节点数量的增多会引起路径搜索时间的非线性激增^[9]。此外，三维规划常用的地图表示方式主要为多边形网格化曲面和三维栅格地图。多边形网格化曲面要经过复杂的拟合重构步骤，难以用于大规模地图，而三维栅格地图需要对大量的稠密点云信息进行二次重构才能用于规划。加之，3D 规划算法本身的复杂度以及需要在整个路径长度上进行三维碰撞检测。因此，3D 规划算法在多层建筑物环境中需要占用大量的计算资源，难以实际应用。

除此之外，对多层建筑物内运动规划问题进行降维处理的方案也被提出。Zhang 等^[10]和 Baltashov 等^[11]将多层建筑内 3D 环境表示为多个 2D 环境的组合来实现多楼层间的自主导航任务。但是，他们一方面没有考虑到环境高度信息，另一方面全局规划算法没有考虑平台特性，局部规划算法无法很好地适应多层建筑物环境空间狭小等特

点，容易陷入局部最小。

针对上述情况，考虑到多层建筑物环境空间狭小特点，本文利用地图的分层表示方法将多层建筑内 3D 运动规划问题降解为 2.5D，利用维诺路径作为 A* 算法代价项，引入运动基元来实现路径的运动学可行。通过履带平台运动学模型在动力学窗口内对其轨迹进行预测，引入波阵值评估方法，避免陷入局部最小。利用有限状态机建立起无人平台模式之间的关联关系，实现多楼层建筑物内的自主导航任务。

1 多层建筑物内运动规划框架

考虑到无人平台在多楼层建筑物内进行自主导航任务时需要完成上、下楼梯等操作，本文在履带式差速底盘的基础上进行研究工作。

根据多楼层建筑物内环境的特点可以将自主导航任务分为 3 种类型，同楼层内的运动规划、上楼与下楼的运动规划。针对于不同工况的特点，本文为无人平台设计了 3 种不同的工作模式，并利用有限状态机决策模型(见图 1)实现多楼层间的运动规划。多楼层间的运动规划算法首先进入同楼层规划模式，导航平台到达同层目标点。若满足条件 1，即当前楼层小于目标楼层，则切换到上楼规划模式。若满足条件 2，即当前楼层大于目标楼层，则切换到下楼模式。若满足条件 3，即当前楼层等于目标楼层，则再次进入同层规划模式，最终到达目标点。

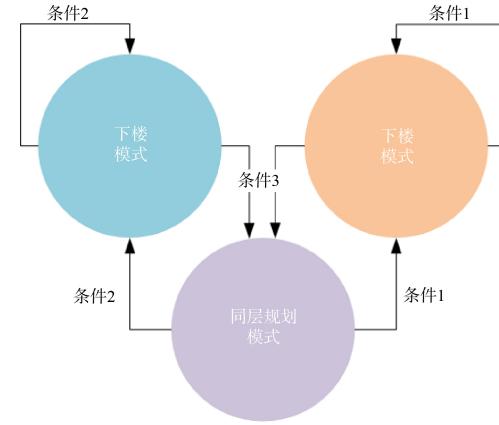


图 1 有限状态机决策模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Finite State Machine decision model

同楼层运动规划算法如图 2 所示，由全局与局部规划组成。全局规划在全局地图、维诺路径、运动基元和定位信息的基础上得到一条平滑、无碰撞

的全局路径发送到局部规划。局部规划结合全局路径、局部地图、波阵值、平台运动学模型和定位信息得到最优局部路径和控制量，并发送到无人平台。上、下楼模式在同层模式的基础上对楼梯环境下进行适配，并在局部地图中滤除了楼梯台阶作为障碍物的环境信息。在上楼模式中，首先需要对地图进行处理，利用高度差值算法过滤掉台阶信息来实现在楼梯上的规划，同时，需要增大转向动作的惩罚，避免在楼梯上进行转向操作，增大目标速度来克服爬楼梯时的坡道阻力。与上楼模式相同，首先也需要过滤掉台阶的障碍物信息，增大转向动作的惩罚，减小目标速度提高下楼梯时无人平台姿态的稳定性。

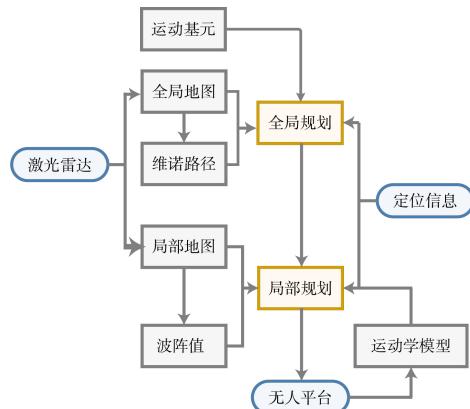


图2 同楼层运动规划框架示意图

Fig. 2 Schematic diagram of motion planning framework

对于多层建筑物内环境信息，本文采用基于分层的地图表示方法，将问题进行降解求解。分层地图将多层建筑物室内环境信息表示为多个 2.5D 地图和关键点，其中，2.5D 地图是基于高度差信息建立的建筑物单层的栅格地图，保存了楼层序号、单层内的可通行区域和障碍物信息；关键点是保存在相应地图下的全局坐标，为楼梯或建筑物入口的坐标信息，代表着各个地图之间的拓扑关系。关键点又分为两种，一种是记录进入当前层的入口信息，记作 I_n ， n 为楼层数；另一种是出口信息，记作 O_n 。

图3展示了一个3层建筑物环境地图的表示方法的例子，图中左侧展示的是一个3层建筑物的3D结构示意图，利用分层表示方法可以表示为图中右侧的形式。其中，Map1、Map2 和 Map3 分别表示建筑物1层、2层和3层环境对应的栅格地图，绿色点表示进入该层的关键点，红色点表示离

开该层的关键点。因此，利用栅格地图和关键点信息就可以表示出一个多层建筑物内的环境信息，为跨楼层的无人平台运动规划提供基础。

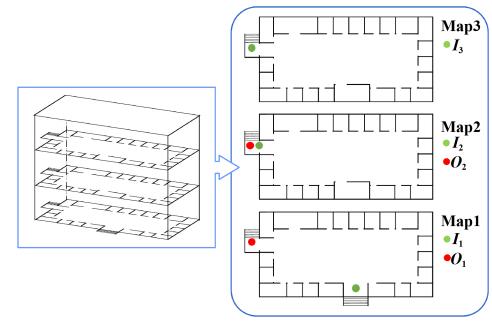


图3 多层建筑物环境地图示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the multi-storey building hierarchical map

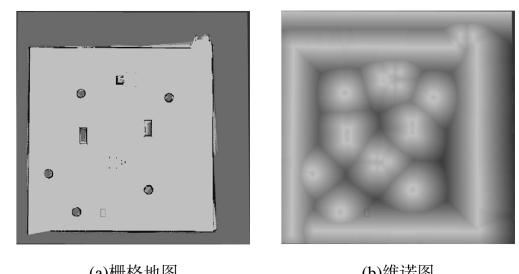
2 基于维诺路径和运动基元的全局规划算法

本节主要讨论用于多层建筑物中的全局规划算法。考虑到多层建筑物环境具有空间狭小的特点，本文基于 A^* 算法，考虑无人平台运动学约束，并引入维诺路径作为参考项，实现了在多层建筑物环境中规划出平滑、无碰撞和运动学可行的全局路径。

2.1 维诺路径

传统 A^* 算法^[12-14]在搜索路径时，只考虑路径的长度代价值，本文利用维诺图中的维诺路径来为 A^* 算法提供新的代价项，从而规划出远离障碍物的全局路径，为平台提供更安全的全局引导。

维诺图^[15-16]是由一组连接两邻近障碍物直线的垂直平分线组成的连续多边形，这些多边形的边界称做维诺路径。典型室内环境栅格地图如图4(a)所示，其对应的维诺图如图4(b)所示，黑色线段即为维诺路径。



(a)栅格地图
(a) Grid map

(b)维诺图
(b) Voronoi map

图4 室内环境栅格地图及其维诺图

Fig. 4 Grid map of an indoor environment and its Voronoi map

传统 A* 算法利用节点的代价值来进行搜索，总代价值 $F(k)$ 可以表示为

$$F(k)=G(k)+H(k) \quad (1)$$

$$G(k)=G(k-1)+S_{k-1,k} \quad (2)$$

式中： $G(k)$ 为从起点到节点 k 的路径代价值； $H(k)$ 为节点 k 到目标点的启发值，用来估计当前节点到目标点的距离，为两者之间的欧氏距离； $S_{k-1,k}$ 为节点 $k-1$ 与节点 k 之间的路程。

根据维诺路径的特点，假设 A* 算法中一待扩展节点 $p(k)$ 以及维诺路径 $V(x, y)$ ，则其维诺路径代价项可以表示为

$$D(k)=\|p(k)-v_{\text{nearest}}\| \quad (3)$$

式中： v_{nearest} 为维诺路径上距离 $p(k)$ 最近的点。因此，搜索过程中总的代价值可以表示为

$$G(k)=G(k-1)+\alpha D(k)+\beta S_{k-1,k} \quad (4)$$

式中： α 和 β 为路程代价与维诺路径代价项权重系数。

2.2 运动基元

由于 A* 算法得到的路径是没有考虑到无人平台运动学约束的，不利于对路径进行跟踪，本文引入运动基元来求解运动学可行的全局路径。

运动基元是路径规划问题中基本运动单元的简称。常用的基元是固定无人平台纵向速度，给定角速度预测无人平台在有限时间内行驶过的轨迹，通常给定不同的角速度生成多条轨迹。

根据传统的基元设计思路，只通过增加运动基元数量来减少非直接可达区域的范围，如图 5 所示，由于没有充分利用履带式平台零半径转向的特点，导致规划出的路径更加复杂，同时也极大地增加了计算量。

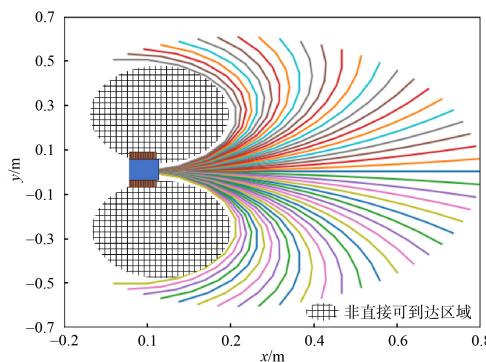


图 5 传统运动基元方案示意图

Fig. 5 Schematic diagram of traditional motion primitives

本文将无人平台前向运动基元简化为 7 个，如图 6 中彩色轨迹，并提出零半径转向基元的概念，如图中箭头，通过零半径转向基元与普通前向基元的组合可以实现更加灵活的全局路径搜索。

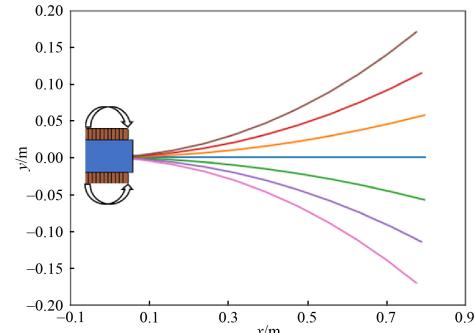


图 6 零半径运动基元方案示意图

Fig. 6 Schematic diagram of zero-radius motion primitives

全局路径搜索如算法 1 所示。算法输入为起始点、目标点和栅格地图。首先，算法初始化两个集合，分别用来存放待扩展和已扩展节点。在每次扩展节点过程中，开集合中代价值最小的节点会被移入闭集合，而该节点的子节点会被添加到开集合当中，如此迭代，直到扩展到目标节点，返回由节点构成的全局路径。

算法 1：全局路径搜索

输入：目标点坐标 n_{goal} ，起始点坐标 n_{start} ，全局栅格地图 Map

输出：由节点构成的全局路径

```

1.  $S_{\text{open}} \leftarrow n_{\text{start}}$ 
2.  $S_{\text{closed}} \leftarrow \emptyset$ 
3. While  $S_{\text{open}} \neq \emptyset$ 
4.   Sort( $S_{\text{open}}$ )
5.    $n_i \leftarrow S_{\text{open}}.\text{PopTop}()$ 
6.   if IsObstacles( $n_i, \text{Map}$ )
7.     continue
8.   else if Overlap( $n_i, n_{\text{goal}}$ )
9.     return {  $n_{\text{start}}, \dots, n_{\text{goal}}$  }
10.  else
11.     $S_{\text{children}} \leftarrow \text{ExpandNode}(n_i, \text{primitives})$ 
12.    for child in  $S_{\text{children}}$ 
13.       $F(\text{child}) \leftarrow H(\text{each}) + G(n_i) + \alpha D(\text{child}) + \beta S(n_i, \text{child})$ 
14.      if child  $\notin S_{\text{open}}$ 
15.         $S_{\text{open}} \leftarrow S_{\text{open}} \cup \{ \text{child} \}$ 
16.      else if  $F(\text{child}) < F(S_{\text{open}}(\text{child}))$ 
17.        UpdateF(child,  $F(\text{child})$ )
18.      end
19.     $S_{\text{closed}} \leftarrow S_{\text{closed}} \cup \{ n_i \}$ 
20.  end
21. end
22. return  $\emptyset$ 
```

2.3 路径平滑

通过改进基元 A* 算法直接得到的路径仍然存在两个问题，如图 7 所示，一方面是路径上的路点为稀疏状态，如红色圆点所示；另一方面是由于零

半径基元的存在，路径存在不光滑区段，如图中间的路点处发生了零半径转向，不利于无人平台实现平顺的路径跟踪。

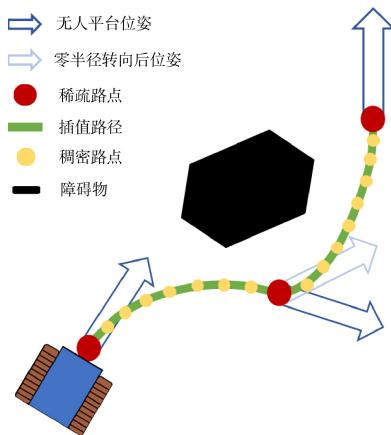


图 7 路径平滑示意图

Fig. 7 Schematic diagram of path smoothing

基于以上两点，本文首先过滤掉零半径转向后的位姿，再利用路径平滑算法从稀疏路点来得到平滑路径，如图 7 中绿色曲线所示，在平滑路径的基础上进行插值，得到稠密路点，如黄色点所示。

考虑到全局路径的导数与曲率连续，同时避免龙格现象，本文采用分段三次 Hermite 插值^[17-18]来对稀疏路点进行处理。

给定稀疏路点集合 $P(x, y, \theta)$ ， x 和 y 为位置坐标， θ 为航向角，把节点两两分段，在每一个小段上作三次 Hermite 插值，就可以得到一个分段三次 Hermite 插值函数 $H(x)$ 。

首先，构造两组基函数 $h_i(x)$ ， $H_i(x)$ ($i=0, 1, \dots, n$)：

$$h_i(x) = [1 - 2(x - x_i)l'_i(x_i)]l_i^2(x) \quad (5)$$

$$H_i(x) = (x - x_i)l_i^2(x) \quad (6)$$

式中： $l_i(x)$ 为拉格朗日插值基函数，

$$l_i(x) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}, i = 0, 1, \dots, n \quad (7)$$

因此，结合式(5)、式(6)和式(7)，可以得到分段三次 Hermite 插值函数为

$$H(x) = \sum_{i=0}^n [y_i h_i(x) + y'_i H_i(x)] \quad (8)$$

3 基于模型预测与波阵值的局部规划算法

在全局路径的基础上，本文利用履带式无人平

台运动学模型在动力学窗口内对其轨迹进行预测与评估，并引入波阵值优化距离评估方法，避免陷入局部最小。

3.1 运动学模型与轨迹预测

履带式无人平台两侧的独立驱动的履带以不同速度进行运转，由于两侧履带的速率不同，此时在履带平台右侧会形成一个转动中心，平台模型会以图 8 所示的转向半径 R ，绕着转动中心 O 以 ω 的角速度进行转向。图 8 中， v_1 、 v_2 为左侧和右侧履带速度， B 为履带中心距。

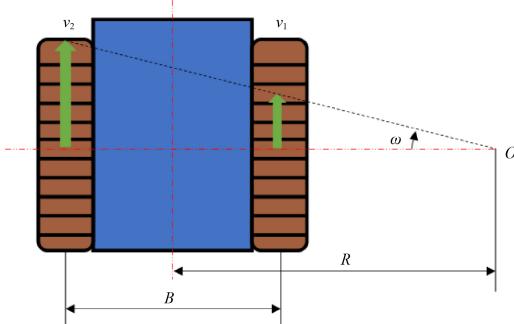


图 8 履带式无人平台运动几何关系示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the kinematic geometric relationship of the tracked unmanned platform

根据几何关系，可以计算出转向半径 R ：

$$R = \frac{(v_1 + v_2)B}{2(v_2 - v_1)} \quad (9)$$

同时，低速状态下忽略滑转与滑移，履带式无人平台运动学模型为

$$\begin{cases} v_x = \frac{v_1 + v_2}{2} \cos \theta \\ v_y = \frac{v_1 + v_2}{2} \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega = \frac{v_1 + v_2}{2R} \end{cases} \quad (10)$$

式中： v_x 和 v_y 为平台在 x 轴和 y 轴方向的速度； θ 为平台航向角。

由刚体运动学可以得知轨迹传播方程：

$$\begin{cases} x_{t+1} = x_t + v_x \Delta t \\ y_{t+1} = y_t + v_y \Delta t \\ \theta_{t+1} = \theta_t + \omega_t \Delta t \end{cases} \quad (11)$$

式中： x_t 、 y_t 、 θ_t 为 t 时刻平台位姿； ω_t 为 t 时刻角速度。

基于运动学模型，结合式(9)、式(10)和

式(11), 可以得到轨迹预测方程:

$$\begin{cases} x_{t+1} = x_t + \frac{(v_1 + v_2) \cos \theta_t}{2} \Delta t \\ y_{t+1} = y_t + \frac{(v_1 + v_2) \sin \theta_t}{2} \Delta t \\ \theta_{t+1} = \theta_t + \frac{v_1 + v_2}{2R} \Delta t \end{cases} \quad (12)$$

在轨迹预测方程的基础上, 本文引用模型预测控制^[19]的思想, 如图 9 所示, 根据当前时刻 t_0 无人平台的运动状态, 在控制空间内采样得到一组控制量, 以 Δt 时间为步长, 来预测未来一段时间内无人平台的状态, 然后执行最优路径对应的控制量来驱动无人平台运动 Δt 的时间长度, 来到 t_1 时刻的状态。以此类推, 不断进行预测与执行控制量, 直到到达目标点。

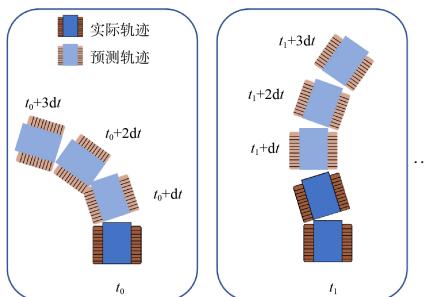


图 9 轨迹预测示意图

Fig. 9 Schematic diagram of trajectory prediction

3.2 基于动力学窗口的控制空间采样

在无人平台运动学的基础上进行轨迹预测之前, 需要对无人平台的控制空间进行采样, 由于无人平台动力学的约束, 其采样区间也被限制在动力学窗口^[20]之内。

1) 最大加速度与最大减速度约束

在无人平台实际运动过程中, 由于驱动电机转矩等的限制, 其具有最大的加速度和减速度。假设最大加速度和减速度为 a_a 和 a_d , 最大角加速度和角减速度为 α_a 和 α_d 。

$$\begin{cases} v_{t+1} \in [v_t - a_d \Delta t, v_t + a_a \Delta t] \\ \omega_{t+1} \in [\omega_t - \alpha_d \Delta t, \omega_t + \alpha_a \Delta t] \end{cases} \quad (13)$$

式中: v_t 为 t 时刻的平台速度。

2) 最大与最小速度约束

$$\begin{cases} v_{t+1} \in [v_{\min}, v_{\max}] \\ \omega_{t+1} \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}] \end{cases} \quad (14)$$

式中: v_{\min} 和 v_{\max} 分别为平台最小速度与最大速度; ω_{\min} 与 ω_{\max} 分别为平台最小角速度与最大角速度。

3) 安全距离约束

在无人平台当前位置处, 为避免与障碍物发生碰撞, 无人平台当前速度对应的刹车距离应该小于距离最近障碍物的距离。因此可以得到

$$v_{t+1} \leq \sqrt{2 \cdot dist \cdot a_d} \quad (15)$$

式中: $dist$ 为 t 时刻最近障碍物的距离。

3.3 基于波阵值的轨迹评估

履带无人平台在进行轨迹预测之后, 如图 10 中紫色轨迹, 可以得到轨迹的终点, 如黄色圆点。由于定位误差以及环境噪声等的干扰, 全局地图中障碍物(灰色)会与实际障碍物(黑色)位置存在偏差。如果根据传统轨迹评估的原则, 中间轨迹距离局部目标点(红色圆点)最近, 会成为最优路径。然而, 中间路径会导致无人平台陷入局部最小。

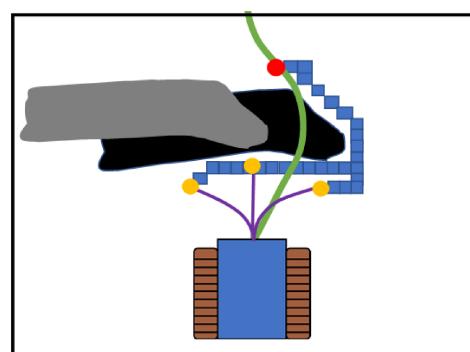


图 10 波阵值避免局部最小示意图

Fig. 10 Schematic diagram of Wavefront Value avoiding local minimum

本文引入混合 A* 算法^[21]中的波阵值(Wavefront Value)来提高算法应对障碍物信息偏差时的鲁棒性。波阵值是一种考虑到障碍物信息后地图上一点到目标点的距离度量, 可以利用算法 2 计算得到。算法 2 的输入为局部目标点和预测轨迹的端点集合, 然后从目标点出发, 向邻近的 8 个栅格方向进行反向搜索, 若为障碍物则跳过, 则直到搜索到所有预测轨迹端点时, 过程中搜索路程长度即为波阵值最为算法的输出。

当利用波阵值对轨迹进行评估时, 由于其具有考虑到环境中障碍物的特性, 右侧轨迹终点到达局部目标点的波阵值最小, 即蓝色方块的数量最小, 为最优轨迹, 因此可以绕过障碍物, 避免局部最小。

算法2：计算波阵值

输入：局部目标点坐标 $g[x, y]$ ，预测轨迹终点集合 $T[\text{traj1}, \text{traj2}, \dots, \text{trajn}]$ ，局部栅格地图 Map

输出：预测轨迹对应波阵值集合 W

```

1.  $Goal \leftarrow [g[0], g[1], 0]$ 
2.  $S.\text{Push}(Goal)$ 
3.  $W \leftarrow [\text{Finite}]$ 
4. While  $S \neq \emptyset$ 
5.    $Current \leftarrow S.\text{PopTop}()$ 
6.   for each in ExpandTable
7.      $Next \leftarrow Current + \text{each}$ 
8.      $Next\_Position \leftarrow [Next[0], Next[1]]$ 
9.      $Next\_Wave \leftarrow Next[2]$ 
10.    If IsObstacles(Map, Next_Position) | IsExpanded(Next_Position)
11.      continue
12.    end
13.     $S.\text{Push}(Next)$ 
14.    for traj in T
15.      if traj == Next_Position
16.         $W[\text{GetIndex}(traj)] \leftarrow Next\_Wave$ 
17.      end
18.    end
19.    if IsAllFinite(W)
20.      break
21.    end
22.  end
23. end
24. return W

```

4 实验与结果分析

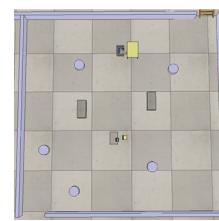
为评价本文提出的多层建筑物内运动规划框架的性能，针对全局与局部规划模块，在仿真环境中，采用本文方案和传统运动规划方法进行对比实验，进而通过实车实验来证明本文方案的可行性。

4.1 仿真实验

为测试全局和局部规划算法的性能，本文在 Vrep 中搭建图 11(a)所示虚拟环境作为算法的输入，搭建图 11(b)所示无人履带平台模型作为算法的被控对象，配备有激光雷达和定位模块。算法在 Linux 环境和 ROS 平台下运行，对虚拟环境的输入信息进行处理后，将得到的路径下发给无人平台模型，最后对结果进行统计分析，实现对算法的仿真实验。

全局规划仿真结果如图 12 所示，绿色箭头为目标点，红色扇形为算法扩展结点集合。如表 1 所示，从中可以看到，在扩展节点数量增加 3%、平均耗时增加 6% 的条件下，全局路径长度减少了

31%，且距离障碍物更远、路径更加安全。



(a) 仿真场景
(a) Simulation scenario



(b) 仿真无人平台
(b) Simulated unmanned vehicle

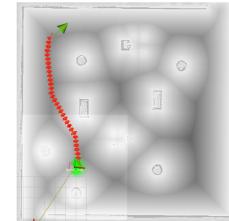
图 11 仿真环境示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the simulation environment

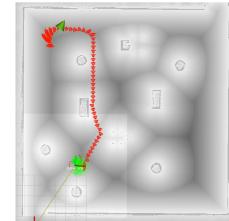
表 1 全局规划仿真结果

Table 1 Simulation results of the global planner

算法	扩展基元数量/个	路径长度/m	搜索耗时/ms
传统基元 A*	452	18.0	36.8
本文算法	466	12.4	39.2



(a) 本文方法
(a) The proposed method



(b) 传统方法
(b) Traditional method

图 12 全局规划仿真结果对比图

Fig. 12 Comparison of the global planner's simulation results

局部规划仿真实验通过偏移障碍物的位置来模拟障碍物位置偏差的情形。圆形障碍物在全局地图中位置如图 13 所示，由于定位和建图误差，实际障碍物在圆形障碍物右侧，激光雷达扫描到其前部，在地图中为半圆形。图 13 中，蓝色曲线为全局路径，红色矩形为无人平台地面投影，绿色曲线为局部规划的待选轨迹，红色曲线为最优轨迹。图 13(a) 展示的是本文的局部规划算法筛选出最优轨迹并成功绕过了障碍物，图 13(b) 中的传统局部规划算法在障碍物面前陷入局部最小。

4.2 实车实验

本文真实场景实验所使用的是履带式无人平台，如图 14 所示。本文依赖的传感器有安装于无人平台顶部的 16 线激光雷达和前部的 32 线补盲雷达，承担着感知与定位的任务。除传感器外，无人平台还配备有一台主频为 3.6 Hz 的工控机，感知、定位与规划程序都在该计算平台上运行。本文

实验中感知模块使用的是基于激光雷达的概率栅格地图程序，定位模块使用的是激光 SLAM 程序，规划模块使用的是本文提出的多层建筑物运动规划框架。

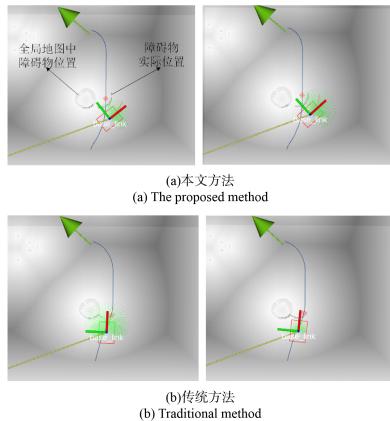


图 13 局部规划仿真对比图(左为遇到障碍物，右为绕过障碍物)

Fig. 13 Comparison of the local planner's simulation results (left picture shows encountering obstacles, right picture shows bypassing obstacles)



图 14 实验无人平台外观

Fig. 14 Appearance of the unmanned platform in the experiment

首先，通过遥控无人平台在多层建筑物内进行建图，获取建筑物的三维点云信息并以分层地图的方式存储下来。在此基础上设置建筑物一层大厅内一点为起点，3 层长走廊内一点为终点，如图 15 所示，开始自主导航任务。



图 15 实验起始点与目标点

Fig. 15 Starting point and target point in the experiment

在1层环境中规划结果如图16所示，其中蓝色曲线为全局路径，绿色曲线为局部路径，绿色箭头为目标点，可以看出，规划出的全局路径平滑连接到目标点，且远离障碍物，无人平台顺利进入狭长走廊，如图16(a)所示。由于室内狭长走廊的对称性以及墙壁瓷砖反射效应的影响，激光SLAM定位在此区域误差增大，如图16(b)红色圆圈部分，这段直角转弯区域墙壁发生了弯曲且长度缩短，导致地图中转弯入口处相比实际的1.0 m宽度变大。在这种狭窄区域障碍物位置出现较大偏差的情形下，无人平台避免了陷入局部最小值，成功通过该区域如图16(b)所示。

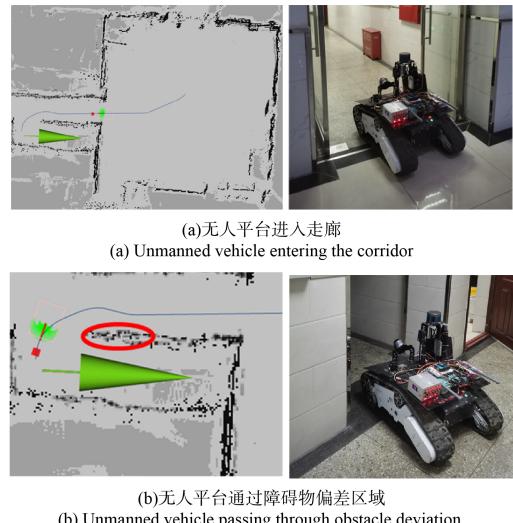


图 16 1层楼内实验结果(左为规划路径，右为实景)

Fig. 16 Experimental results of the first floor (the left is the planned path, and the right is the real scene)

在此基础上，无人平台开始在楼梯上进行自主导航任务。图 17 和图 18 所示为无人平台在楼梯和转台上规划出的路径与实验场景，从中可以看出通过高度差将楼梯信息过滤后，无人平台在楼梯模式中可以规划出更加平直的路径。

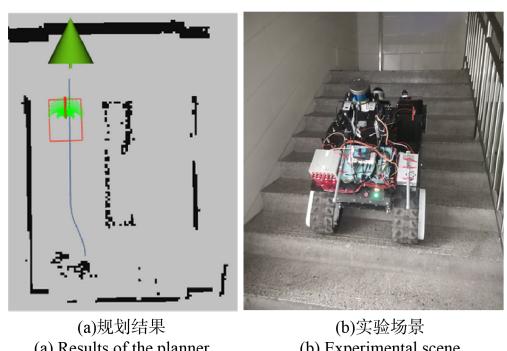


图 17 楼梯区域实验结果

Fig. 17 Experimental results of the stair area

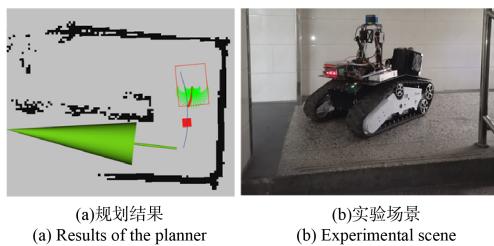


图 18 转台区域实验结果

Fig. 18 Experimental results of the platform area

图19为在3层时的实验结果。图19(a)中无人平台跟踪全局路径成功通过1 m宽的直角转弯，进入狭长走廊。在走廊中有一扇打开的门，可通行空间宽度为0.90 m，而平台宽度为0.80 m，剩余空间狭窄。如图19(b)所示，无人平台成功穿越狭窄区域。最后，如图19(c)所示，无人平台到达目标点。

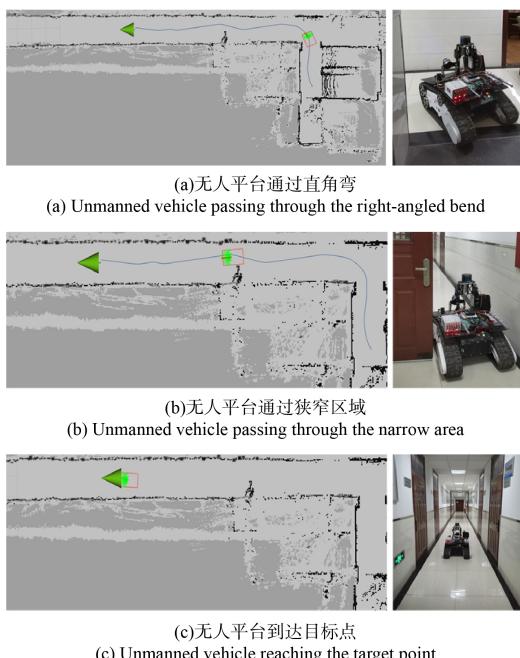


图 19 第 3 层楼实验结果(左为规划路径，右为实景)

Fig. 19 Experimental results on the third floor (the left is the planned path, right is the real scene)

实车实验结果见表2，无人平台经过第1层区域、楼梯区域和第3层区域3个阶段，其中第1层起始区域空间相对宽阔，平均速度也最高；楼梯区域由两层共6段楼梯组成，路径长度最长，同时为保证楼梯上平台运行的安全，最大速度也最小，导致花费时间最长；第3层区域空间狭窄，平台处于低速状态更多，因此平均速度下降。在实验过程中，算法的频率能够稳定在10 Hz，并完成多层建筑物内的自主导航任务。

表 2 实车实验结果

Table 2 Results of the experiment

阶段	路径长度 /m	实际运动时间/s	平均速度 /(m·s⁻¹)	最大速度 /(m·s⁻¹)
第1层区域	15.2	77	0.20	0.4
楼梯区域	40.6	463	0.10	0.2
第3层区域	23.7	152	0.16	0.4

应用本文运动规划框架的北理精灵队在跨越险阻 2021 地面无人系统挑战赛中取得了第 4 名的成绩。

5 结论

本文针对多层建筑物内无人平台的自主导航问题，提出了一个针对于多层建筑环境优化的运动规划框架。通过仿真与实车实验验证，得到以下主要结论：

- 1) 在全局规划层面，提出零半径转向基元并引入维诺路径，全局规划算法在扩展节点数量增加3%、平均耗时增加6%的条件下，全局路径长度减少了31%，且距离障碍物更远，路径更加安全，提高了在狭窄区域规划路径的灵活性。
- 2) 在局部规划层面，引入波阵值作为评估项，局部规划算法相比于传统算法避免了陷入局部最小值，提高了算法的鲁棒性。
- 3) 经过实车实验，基于本文运动规划框架的无人平台在多层建筑物内完成了自主导航任务，证明了方案的可行性。

参考文献(References)

- [1] DARPA. DARPA Announces subterranean (SubT) challenge final event site and date [EB/OL]. [2021-07-01]. <https://www.darpa.mil/news-events/2020-01-07>.
- [2] 全军武器信息采购网. “跨越险阻 2021”第四届陆上无人系统挑战赛赛事通知 [EB/OL]. [2021-06-03]. <http://www.weain.mil.cn/cgg/jdgg/1400087198603255810.shtml>. All army weapon information procurement network. Notice of the fourth "Crossing Obstacles 2021" land unmanned system challenge [EB/OL]. [2021-06-03]. [\(in Chinese\)](http://www.weain.mil.cn/cgg/jdgg/1400087198603255810.shtml)
- [3] CARSTEN J, RANKIN A, FERGUSON D, et al. Global path planning on board the mars exploration rovers[C]//Proceedings of 2007 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, US:IEEE, 2007:1-11.
- [4] ISHIGAMI G, OTSUKI M, KUBOTA T. Range-dependent terrain mapping and multipath planning using cylindrical coordinates for a planetary exploration rover[J]. Journal of Field Robotics, 2013,

- 30(4):536-551.
- [5] LACROIX S, MALLET A, BONNAFOUS D, et al. Autonomous rover navigation on unknown terrains functions and integration[J]. International Journal of Robotics Research, 2000, 21:917-942.
- [6] HOWARD T M, KELLY A. Optimal rough terrain trajectory generation for wheeled mobile robots[J]. The International Journal of Robotics Research, 2007, 26(2):141-166.
- [7] COLAS F, MAHESH S, POMERLEAU F, et al. 3D path planning and execution for search and rescue ground robots[C]//Proceedings of 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo, Japan:IEEE, 2013:722-727.
- [8] MENNA M, GIANNI M, FERRI F, et al. Real-time autonomous 3D navigation for tracked vehicles in rescue environments[C]//Proceedings of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago, IL, US:IEEE, 2014: 696-702.
- [9] ARDIYANTO I, MIURA J. 3D time-space path planning algorithm in dynamic environment utilizing Arrival Time Field and Heuristically Randomized Tree[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saint Paul, MN, US:IEEE, 2012:187-192.
- [10] ZHANG Q, WU X J, LIU B B, et al. A hierachic-al topological planner for multi-storey building navigation[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics(AIM). Busan, Korea:IEEE, 2015: 731-736.
- [11] BALTASHOV I, SEMAKOVA A. Path planning inside multi-storey buildings: an algorithm for autonomous mobile robot[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(22):518-523.
- [12] LIU Z H, LIU H B, LU Z G, et al. A dynamic fusion pathfinding algorithm using delaunay triangulation and Improved A-star for mobile robots[J]. IEEE Access, 2021, 99:1-1.
- [13] HU J M, HU Y H, LU C, et al. Integrated path planning for unmanned differential steering vehicles in off-road environment with 3D terrains and obstacles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 23(6): 5562-5572.
- [14] ERKE S, DAI B, NIE Y M, et al. An improved A-star based path planning algorithm for autonomous and vehicles[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(5):1729881420962263.
- [15] 夏娜, 束强, 赵青, 等. 基于维诺图和二分图的水面移动基站路径规划方法[J]. 自动化学报, 2016, 42(8):1185-1197.
XIA N, SHU Q, ZHAO Q, et al. A path planning method for water surface mobile sink based on voronoi diagram and bipartite graph[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(8):1185-1197. (in Chinese)
- [16] JENSEN-NAU K R, HERMANS T, LEANG K K. Near-optimal area-coverage path planning of energy-constrained aerial robots with application in autonomous environmental monitoring[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020, 18(3):1453-1468.
- [17] PINZI M, GALVAN S, BAENA F R. The adaptive hermite fractal tree (AHFT):a novel surgical 3D path planning approach with curvature and heading constraints[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2019, 14(4):659-670.
- [18] SIDDIQI M R, MILANI S, JAZAR R N, et al. Ergonomic path planning for autonomous vehicles-an investigation on the effect of transition curves on motion sickness[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 99:1-12.
- [19] 王威, 陈慧岩, 马建昊, 等. 基于 Frenet 坐标系和控制延时补偿的智能车辆路径跟踪[J]. 兵工学报, 2019, 40(11):2336-2351.
WANG W, CHEN H Y, MA J H, et al. Path tracking for intelligent vehicles based on frenet coordinates and delayed control[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(11):2336-2351. (in Chinese)
- [20] XU X L, WANG C L. Indoor navigation based on global and local path planning for wheeled mobile robot in airport[C]//Proceedings of the 2018 13rd World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Changsha, China:IEEE, 2018:1002-1007.
- [21] DOLGOV D. Practical search techniques in path planning for autonomous driving[J]. Ann Arbor, 2008, 1001(48105):18-80.

作者简介:



熊光明(1975—), 通信作者, 男, 副教授, 硕士生导师。

E-mail: xiongguangming@bit.edu.cn



于全富(1997—), 男, 硕士研究生。

E-mail: 3120200424@bit.edu.cn



胡秀中(1997—), 男, 硕士研究生。

E-mail: 3120210302@bit.edu.cn



周子杰(2000—), 男, 硕士研究生。

E-mail: a121884344@qq.com



许佳慧(2000—), 女, 硕士研究生。

E-mail: 3120220416@bit.edu.cn