

# 消防机器人城区内自主导航系统<sup>①</sup>

邱钟毓<sup>1</sup>, 尹小恰<sup>1</sup>, 陈凯<sup>1</sup>, 施晨炜<sup>2</sup>, 陈泽华<sup>1</sup>, 刘爽<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(华东理工大学 机械与动力工程学院, 上海 200237)

<sup>2</sup>(华东理工大学 信息科学与工程学院, 上海 200237)

通信作者: 刘爽, E-mail: [shuangliu@ecust.edu.cn](mailto:shuangliu@ecust.edu.cn)



**摘要:** 针对现有消防机器人在城区内中远程环境执行火灾救援应急任务时, 难以提前获取全局先验地图, 需人工遥控机器人至灭火地点, 操作繁琐, 影响灭火效率的问题, 设计了一种消防机器人城区内自主导航系统, 系统基于商业电子地图(如高德地图、百度地图等 2D 电子地图), 有效整合了全球定位系统 (GNSS) 和局部激光环境感知技术. 首先借助商业电子地图来规划粗略的全局子目标点, 将全局目标点序列与真实定位信息进行数据配准, 然后将序列发送至局部规划器. 之后在激光感知建立的局部栅格地图中, 按照子目标点的顺序执行局部规划任务, 改进型局部规划器在运动过程根据实时环境变化更新子目标点. 在仿真环境中多次模拟并使用履带式小车在实际场景进行验证, 结果表明设计系统可以在事先未建立环境先验地图的情况下, 准确进行室外远距离的导航任务, 可作为消防机器人高效安全户外导航的方案.

**关键词:** 室外导航; 移动机器人; 全局规划; 局部运动规划; 激光感知

引用格式: 邱钟毓, 尹小恰, 陈凯, 施晨炜, 陈泽华, 刘爽. 消防机器人城区内自主导航系统. 计算机系统应用. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/9725.html>

## Autonomous Navigation System for Firefighting Robots in Urban Areas

QIU Zhong-Yu<sup>1</sup>, YIN Xiao-Qia<sup>1</sup>, CHEN Kai<sup>1</sup>, SHI Chen-Wei<sup>2</sup>, CHEN Ze-Hua<sup>1</sup>, LIU Shuang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

<sup>2</sup>(School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** When firefighting robots are deployed for medium to long-distance emergency tasks in urban areas, they often struggle with the inability to obtain a global prior map of the environment in advance. Consequently, they require manual remote control to reach the fire location, which involves cumbersome operations and significantly reduces firefighting efficiency. To address these issues, this study designs a new autonomous navigation system for firefighting robots in urban areas. This system is based on commercial electronic maps (such as Amap, Baidu Maps, and other 2D electronic maps) and effectively integrates the global navigation satellite system (GNSS) with local laser-based environmental sensing technologies. Firstly, commercial electronic maps are used to plan rough global sub-goal points. The sequence of global goal points is then registered with the actual positioning information and sent to the local planner. Subsequently, local planning tasks are performed within the local grid map established by laser sensing, following the sequence of sub-goal points. The improved local planner updates the sub-goal points dynamically based on real-time environmental changes during movement. Multiple simulations are conducted in a simulated environment, and validation is performed using a tracked vehicle in real-world scenarios. The results indicate that the designed system can accurately execute long-distance outdoor navigation tasks without a global prior map of the environment, providing an efficient and safe solution for the outdoor navigation of firefighting robots.

① 基金项目: 国家自然科学基金 (51975214); 上海市大学生创新创业训练计划 (S202310251138); 华东理工大学大学生创新项目 (X202310251218)

收稿时间: 2024-06-07; 修改时间: 2024-07-03; 采用时间: 2024-07-11; csa 在线出版时间: 2024-11-15

**Key words:** outdoor navigation; mobile robot; global planning; local motion planning; laser perception

## 1 引言

随着人工智能和机器人技术的迅猛发展,移动机器人在复杂城市环境中的自主导航技术已经成为研究和应用的热点.特别是在消防领域,消防机器人能够在火灾现场自主导航,准确地穿越复杂的城区环境,迅速到达火源位置,对于提高救援效率和保障消防人员安全具有重要意义.全球范围内的研究者们已开展了大量关于移动机器人在室外环境下的定位、规划和控制的研究<sup>[1-4]</sup>.目前,消防机器人在执行应急任务时,由于时间限制,通常无法建立环境先验地图.因此,当前大多数的消防机器人都是由人类远程控制到目标位置的.然而,依靠人类远程控制不仅效率较低,还可能因通讯延迟等问题影响救援效果.为了提升消防机器人在紧急情况下的自主导航能力,亟需开发能够在无先验地图条件下实现高效导航的系统.

一些研究以全球高精度地图作为规划的基础.全局高精度地图主要有城市高清地图(HD)与传感器建立的SLAM环境地图两类.城市高清地图通常通过专业道路测量设备绘制而成,通过多种融合算法进行地图的绘制,涉及车道语义分割<sup>[5,6]</sup>,基于神经网络的道路检测<sup>[7]</sup>以及实时路线图生成系统<sup>[8]</sup>等技术,主要用于自动驾驶领域,对应用提前部署要求较高.基于传感器建立的先验地图主要采用多种传感器事先进行环境感知,建立起高精度的环境先验地图,利用各种环境感知传感器创建的环境先验图,如户外三维点云构建技术<sup>[9,10]</sup>、基于雷达、视觉或惯性测量单元(IMU)等单独或融合传感器信息的SLAM建图技术<sup>[11,12]</sup>,以及建立在这些技术上的各类改进算法,都可以较好的建立起高精度的环境地图作为全局先验地图进行导航,但耗时长,地图占用内存大,并且随着环境变化,高精度地图需及时更新,导致更新维护成本较高.

局部地图也是一种广泛的选择,特别适用于小范围内的规划.在缺乏环境先验地图的情况下,这类方法主要用于小范围导航或空间探索.例如Brand等<sup>[13]</sup>提出了基于立体视觉的SLAM建图方法,Vivet等<sup>[14]</sup>利用旋转雷达进行室外实时定位与测绘建图,Yan等<sup>[15]</sup>在室外复杂环境下提出了利用局部导航的子目标寻优方法,然而,这些方法的实际应用场景主要集中在矿洞、隧

道等封闭环境中.此外,还可以在没有预先构建地图的情况下,利用深度学习技术通过不断与环境进行交互和试错来进行导航规划,主要有基于视觉的深度学习导航方法<sup>[16,17]</sup>基于雷达的强化学习方法<sup>[18-20]</sup>,但其主要用于算法鲁棒性低、硬件成本高、计算量大的仿真环境中.

综上,在城区内执行紧急导航任务时,因全局高精度地图难以获得,而局部地图规划在执行中长距离任务时耗时且低效,故实际任务中消防机器人常被人工遥控至目标位置.为了解决这一问题,结合商业电子地图和实时传感器数据的导航方法成为一种有效的替代方案.借助现有的全局地图,例如高德地图、百度地图等商业电子地图进行全局路径规划,但这类全局地图信息数据通常并不准确,需要在后续机器人运动过程中根据实时定位信息进行全局地图数据配准,并对全局规划器规划出来的子目标点进行校准.为此,本文设计了一种基于商业电子地图的消防机器人导航系统,该系统使用商业电子地图接口来规划粗略的子目标点,并与全球定位系统(GNSS)的定位信息对齐,以指导局部运动规划.随后,局部规划器利用激光雷达等传感器收集的实时环境信息修正每个分段的子目标点,并重新与全局规划器进行交互.

本文的主要贡献如下.

(1) 提出了一种基于商业电子地图的全局规划方案.首先,该方案可以加载各种类型的商业电子地图根据需要,根据起点和目标点,调用商业电子地图API来规划一系列粗略的全局目标点.之后,将全局目标点数据与实际的定位信息进行对齐.最后,通过智能划分策略,将稠密的全局目标点智能分割成子目标点序列,并发送给局部规划器执行.

(2) 在局部规划器中基于A\*算法在由传感器建立的局部网格图中进行实时局部路径规划和轨迹生成.由于全局规划器生成的子目标点没有考虑到真实的环境信息,相对粗糙.因此提出了子目标点修正方法,根据实际环境信息对局部子目标点进行修正.修正后的子目标点将被反馈给远程全局规划器.

实验搭建了仿真平台,对全局规划器和局部规划器的算法进行了仿真实验.同时,在校园室外环境中,对设计的消防机器人自主导航系统进行了实车测试,

使用履带式消防机器人执行任务. 结果表明, 本系统具有较强的鲁棒性, 能够有效承担城区间长距离导航的消防任务.

## 2 系统整体方案设计

本文提出的自主导航系统主要由全局规划器、定位模块、局部规划器和轨迹跟踪控制器 4 个部分组成, 如图 1 所示. 全局规划模块在远程 PC 端的上位机软件上进行开发实现, 上位机软件根据商业电子地图内容进行数据解析、根据接收到的起点 GPS 经纬度坐标和定位信息进行地图数据实车配准, 而后根据用户手动拾取的终点经纬度坐标, 进行全局路径规划获取一系列子目标点供移动机器人局部规划器使用. 定位模块由多传感器进行融合得到精确的移动机器人实时位置信息, 供全局规划器和局部规划模块使用, 同时雷达、相机等模块提供实时的周边环境信息, 为构建局部地图使用. 局部规划器包括局部栅格地图、A\*算法规划单元和 minimum snap 轨迹优化算法单元, 规划算法在实时更新的局部栅格地图中运行, 进行局部的轨迹规划. 轨迹跟踪控制器采用 MPC 控制器, 根据局部规划器规划的轨迹进行跟踪预测, 控制机器人运动.

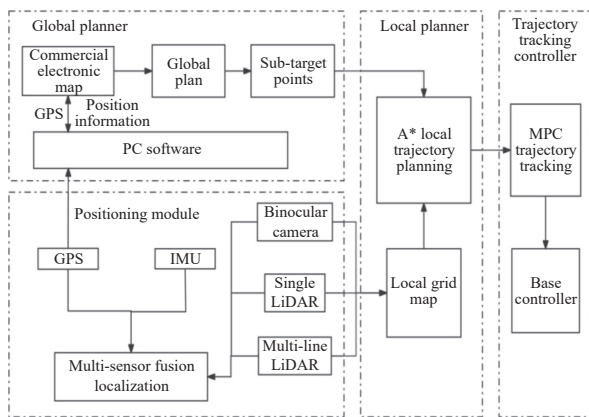


图 1 导航系统框架

## 3 全局规划器

本文基于商业电子地图来实现全局规划器的功能. 为了远程指导移动机器人的运动, 并实时可视化移动机器人数据, 设计了基于 Qt 的上位机软件<sup>[21]</sup>, 全局规划器的所有功能在 PC 上位机软件上实现. 全局规划器由地图规划模块、配准模块和子目标点分割模块组成, 其执行流程图如图 2 所示.

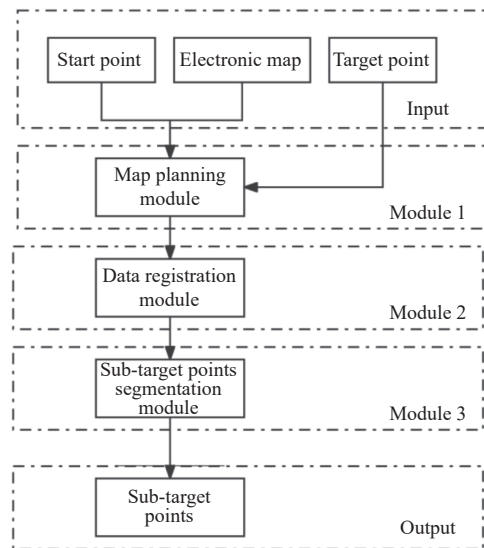


图 2 全局规划器构成

### 3.1 坐标系及转换关系

移动机器人配备了 GNSS RTK 传感器, 可以实时获取室外移动机器人所在位置的经纬度数据. 但 RTK 传感器的经纬度基于 WGS-84 系统, 而大多数商业电子地图使用 GCJ-02 系统. 因此, 我们需要编写一种坐标转换函数使坐标相互转换.

GCJ-02 坐标系和 WGS-84 坐标系之间进行相互转换的思路如下. 假设 WGS-84 坐标经纬度使用  $(Lat, Log)$  来表示, 转换后的 GCJ-02 坐标系纬度  $Lat_c$  和经度  $Log_c$  用式 (1)、式 (2) 表示:

$$\begin{aligned}
 Lat_c = & -100 + 2x + 3y + 0.2y^2 + 0.1xy + 0.2\sqrt{|x|} \\
 & + \frac{2}{3} \left\{ [20 \sin 6\pi x + 20 \sin 2\pi x] + \left[ 20 \sin y\pi + 40 \sin \left( \frac{\pi y}{3} \right) \right] \right. \\
 & \left. + \left[ 160 \sin \left( \frac{\pi y}{12} \right) + 300 \sin \left( \frac{\pi y}{30} \right) \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 Log_c = & 300 + x + 2y + 0.1(x^2 + xy) + 0.1\sqrt{|x|} \\
 & + \frac{2}{3} \left\{ [20 \sin 6\pi x + 20 \sin 2\pi x] + \left[ 20 \sin y\pi + 40 \sin \left( \frac{\pi x}{3} \right) \right] \right. \\
 & \left. + \left[ 150 \sin \left( \frac{\pi x}{12} \right) + 300 \sin \left( \frac{\pi x}{30} \right) \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{2}$$

其中,  $x$  和  $y$  可由经纬度坐标  $(Lat, Log)$  按照式 (3) 计算得来.

$$\begin{cases} x = Log - 105.0 \\ y = Lat - 35.0 \end{cases} \tag{3}$$

随后可以根据式 (4) 获得修正的偏差值( $F_{Lat}, F_{Log}$ ).

$$\begin{cases} F_{Lat} = \frac{180Lat_c}{\left(\frac{\alpha(1-e_e)\pi}{\frac{3}{2}\sqrt{m}}\right)} \\ F_{Log} = \frac{180Log_c}{\left(\frac{\alpha\pi}{\sqrt{m}\cos(R_{ad})}\right)} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\alpha$ 指的是地球长轴的长度,  $e_e$ 指 GCG-02 坐标系下地球椭球偏心率平方,  $m$ 和 $R_{ad}$ 是中间参数, 其值由式 (5) 确定:

$$\begin{cases} R_{ad} = \pi Lat_c / 180 \\ m = 1 - e_e \sin^2(R_{ad}) \\ \alpha = 6378245.0 \\ e_e = 0.00669342162296594323 \end{cases} \quad (5)$$

最后, 使用( $F_{Lat}, F_{Log}$ )按照式 (6) 来修正( $Lat, Log$ ), 就此可以完成两个坐标系之间的相互转换.

$$\begin{cases} (P_{Lat}, P_{Log}) = \\ \left( Lat + F_{Lat}, Log + F_{Log} \right), \text{ WGS-84 to GCG-02} \\ \left( Lat - F_{Lat}, Log - F_{Log} \right), \text{ GCG-02 to WGS-84} \end{cases} \quad (6)$$

### 3.2 地图规划模块

地图规划模块输入移动机器人导航的起点和终点经纬度数据, 输出坐标基于 GCG-02 坐标系全局目标点序列. 流程包括: 机器人使用 RTK 传感器获取起点, 通过第 2.1 节所述的坐标转换方法转换为商业电子地图适用的 GCG-02 坐标; 用户通过上位机界面选择终点, 终点已是 GCG-02 坐标. 路径规划通过调用高德地图接口, 输入起终点信息, 解析处理后获得一系列全局目标点在 GCG-02 坐标系下的经纬度坐标, 其他商业电子地图只需要更改对应的接口即可实现. 但这些目标点信息未与实车定位配准, 且精度不足, 不能直接用于导航. 完整的地图规划模块流程图如图 3 所示.

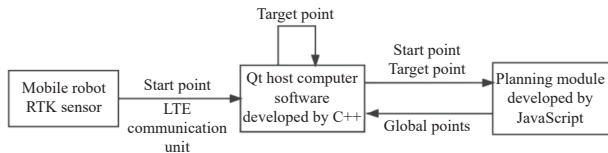


图 3 地图规划模块流程图

### 3.3 数据配准模块

地图规划模块生成的全局目标点序列在 GCG-02 坐标系下, 需转换为 WGS-84 坐标系并与实车定位信息配准. 转换方法见第 2.1 节的 GCG-02 与 WGS-84 互

转算法.

配准涉及 3 个坐标系: 大地、ECEF 和 ENU. 大地坐标转 ENU 坐标需两步: 先将一点的大地坐标( $Lon, Lat, h$ )转换成 ECEF 坐标( $X, Y, Z$ ), 然后将 ECEF 坐标( $X, Y, Z$ )转换成 ENU 坐标( $x, y, z$ ).

以图 4 中  $A, B$  两点为例, 假设它们的大地坐标分别为( $Lon_A, Lat_A, h_A$ ), ( $Lon_B, Lat_B, h_B$ ).

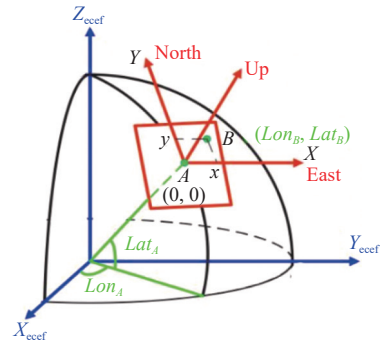


图 4 坐标系转换示意图

将大地坐标系( $Lon, Lat, h$ )转换为 ECEF 坐标系( $X, Y, Z$ )的方程式<sup>[22]</sup>:

$$\begin{cases} X = (R + h) \cos Lat \cos Lon \\ Y = (R + h) \cos Lat \sin Lon \\ Z = [R(1 - e^2) + h] \sin Lat \\ R = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 Lat} \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $e$ 是椭球的偏心率 (WGS-84 坐标系下,  $e^2 = 0.00669437999$ ),  $a$ 为椭球的长半径 (WGS-84 坐标系下  $a = 6378137$  m).

由式 (7) 计算得  $A, B$  两点的 ECEF 坐标为: ( $X_A, Y_A, Z_A$ ), ( $X_B, Y_B, Z_B$ ). 将  $A$  点 ECEF 坐标设为 ENU 坐标系原点, 正北为  $Y$  轴, 正东为  $X$  轴. 将  $A$  点的 ECEF 坐标( $X_A, Y_A, Z_A$ )作为 ENU 坐标系原点, 那么  $B$  点的 ECEF 坐标( $X_B, Y_B, Z_B$ )转换为相对于  $A$  点的 ENU 坐标( $x, y, z$ )如式 (8) 所示:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin Lon_A & \cos Lon_A & 0 \\ -\sin Lat_A \cos Lon_A & -\sin Lat_A \sin Lon_A & \cos Lat_A \\ -\cos Lat_A \cos Lon_A & -\cos Lat_A \sin Lon_A & \sin Lat_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} \quad (8)$$

使用式 (7) 和式 (8) 可以计算出 WGS-84 坐标系



下任意一点相对于移动机器人起点的 $(x, y, z)$ 坐标值, 经过以上步骤便实现了数据的实车配准。

### 3.4 子目标点分割模块

原始全局目标点序列是十分稠密的, 为了更好地指导移动机器人运动, 需要将全局目标点序列进行智能划分, 分割核心的子目标点序列。智能划分的策略是综合考虑全程距离和路口数目。设 $i$ 为核心子目标点的索引, 则起点索引为0, 终点索引为 $n$ , 每个路口都是一个核心子目标点, 按顺序排列。两个路口之间是否设置子目标点由比例系数 $k$ 决定, 如式(2)–式(9)所示。根据比例系数 $k$ , 算法划分出中间子目标点, 并与核心子目标点按顺序排序, 得到最终的子目标点序列, 按顺序发送给局部规划器执行。

$$k = \frac{dis(i, i+1)}{dis_{set}}, i \in 0, 1, \dots, n \quad (9)$$

其中,  $dis(i, i+1)$ 代表第 $i$ 个核心子目标点与第 $i+1$ 个核心子目标点之间的距离,  $dis_{set}$ 代表局部最大规划距离。

## 4 局部规划器

由第3.4节方法获得的全局子目标点序列可以按顺序作为每一段子导航任务的终点, 传递给局部规划器分段执行。局部规划器根据传感器感知到的真实环境所构建出来的局部栅格地图进行规划, 获得符合移动机器人实际可以运行的平滑轨迹。

### 4.1 局部环境地图构建

环境地图构建对局部规划器至关重要。本文采用16线激光雷达感知环境信息, 并利用其数据进行环境地图构建, 而地图构建的核心是清晰绘制障碍物信息, 以供规划器使用。点云分割可用于区分障碍物点云和非障碍物点云。本文利用PCL (point cloud library) 点云库, 采用该3D点云处理库中基于渐进形态学的点云分割方法。首先, 对原始点云进行降采样处理, 可以将原始的密集点云进行降采样处理, 简化计算量。然后创建`pcl::ProgressiveMorphologicalFilter`过滤器, 对处理后的点云数据过滤, 在相应变量中存储输出的地面点云数据。最后, 在`pcl::ExtractIndices`过滤器中传入地面点云指数索引并取反, 实际分割效果如图5所示。

本文选择栅格地图表示环境, 栅格地图是Ubuntu下ROS算法里常用的导航栅格地图, 其优点在于每个栅格的信息明确, 对于规划器可操作的空间较大, 便于编程和按需调整地图的数据。栅格地图尺寸在构建中

具关键作用。过小的栅格会增加数据量, 延长规划时间; 过大的栅格可能降低规划精度。因此, 合理设置好栅格的尺寸, 对规划的效率和质量至关重要。本文设计的栅格大小可通过以下方法计算得出:

$$\begin{cases} l = \max(l_s, l_{\min}) \\ l_s = \frac{S_{\text{obs}}}{S} \times l_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $l_{\min} = \min(l_{\text{obsmin}}, 2R)$ ,  $l_{\text{obsmin}}$ 为障碍物边长最小值,  $S$ 表示地图总面积,  $S_{\text{obs}}$ 表示障碍物的面积,  $l_{\max}$ 表示障碍物边长的最大值。本文使用16线激光雷达, 其理论最大探测半径为200 m, 但为保证建图质量和计算机计算效率, 实际建图半径取6 m, 栅格尺寸为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 。局部栅格地图的坐标系是以机器人坐标系为中心进行建立的, 由于移动机器人本身具有一定的外形和尺寸, 在规划路线时需要对自身的形状加以考虑, 本文为此对地图中障碍物进行0.5 m的膨胀处理, 按照此方法构建的栅格地图如图6所示。

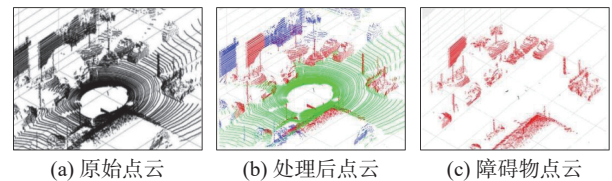


图5 环境点云分割



图6 局部栅格地图

### 4.2 结合 minimum snap 的 A\* 路径规划方法

本文的局部路径规划方法以A\*算法为基础, A\*算法很好地结合了Dijkstra算法和BFS算法的优点, 该算法的评价函数中既包含从起始点到当前节点的实际代价值, 也考虑了当前节点到目标点的启发式函数, 综合的评价机制使得在规划时可以用尽量短的时间搜索到一条最短路径。A\*算法的估值函数如下:

$$F(S) = G(S) + H(S) \quad (11)$$

其中,  $F(S)$  为规划起始点到目标点的总生成值.  $G(S)$  为规划起点到中间节点  $S$  的累计生成值.  $H(S)$  表示中间节点  $S$  到规划目标点的启发式代价. 本文用欧几里得距离作为  $H(S)$ .

基于 A\* 算法规划得到的路径是由离散点连成的线段构成, 不能直接用于轨迹跟踪, 需要对离散点连成的线段构成的路径使用 minimum snap 的轨迹优化方法, 将路径优化成形如式 (12) 的关于时间  $t$  的平滑轨迹:

$$\begin{cases} x_r = x(t) \\ y_r = y(t) \end{cases} \quad (12)$$

其基本思想是将整条规划后的路径分成若干段, 每段之间以路径点作为分割, 然后对每条线段  $x$  在轴上的轨迹和  $y$  轴上的轨迹分别用一个关于时间  $t$  的高阶多项式去拟合, 最终使得线段变得平滑<sup>[23]</sup>.

### 4.3 局部规划策略与子目标点动态更新方法

局部规划场景如图 7 所示, 移动机器人接收全局规划器的子目标点序列, 按顺序将每个点作为局部终点进行规划. 由于没有事先建立全局环境先验地图, 只有局部栅格地图, 规划算法将局部地图以外设为可通行, 以进行局部路径规划. 运动轨迹包括两部分, 如图 7 所示: 局部地图内的避障轨迹 (如 Trajectory 1, 经 A\* 规划并优化) 和局部地图以外至目标点部分, 由于是未知区域, 故 A\* 规划轨迹是一条直线 (如 Trajectory 2). 实时构建的栅格地图是以机器人为中心的正方形区域, 根据传感器实时采集到的数据生成, 轨迹随障碍物变化而重新生成, 实现动态规划避障.

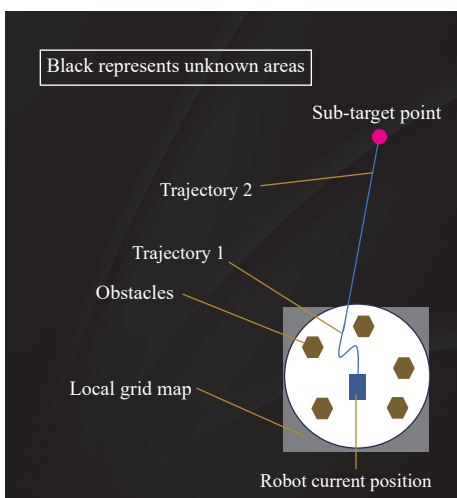


图 7 局部规划场景示意图

如果子目标点不在局部栅格地图中, 则按图 7 方法进行局部路径规划. 随着消防机器人逐渐接近局部子目标点, 会有一个时刻局部子目标点出现在实时构建的局部地图中, 此时, 可能会出现局部子目标点处于障碍物中或无法到达的情况. 为解决此问题, 设计了动态更新子目标点的算法, 该算法能在局部栅格地图中内遍历, 搜索可行子目标点, 并将信息反馈至全局规划器进行轨迹重规划, 确保全局路径能更好应真实环境. 相关场景如图 8 所示.

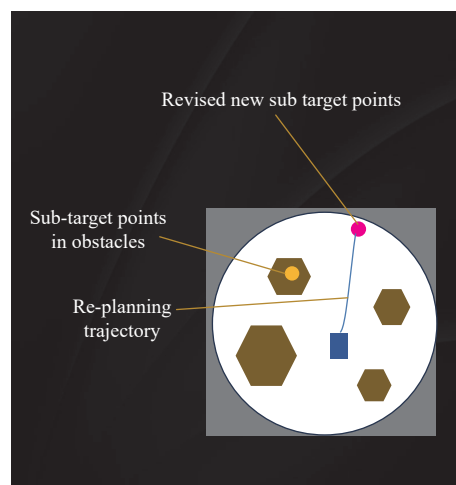


图 8 局部子目标点更新场景示意图

## 5 仿真验证和移动机器人实车实验

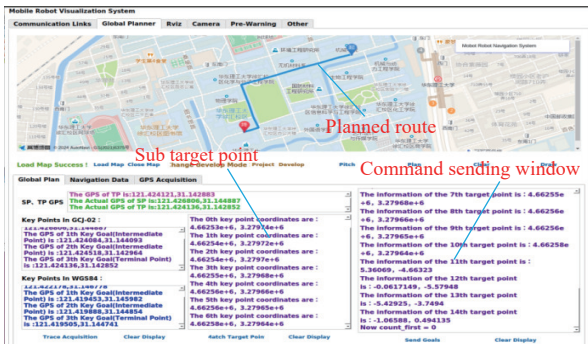
### 5.1 全局规划仿真

全局规划器的仿真验证在本研究自主设计由 C++ 语言开发的一款基于 Qt 的移动机器人导航控制数据可视化上位机软件上运行. 通过拾取起点和终点, 软件能规划出可行路径. 经过数据配准和智能选取算法处理, 得到子目标点序列. 在发送指令窗口, 将子目标点信息发送至局部规划器和控制器模块, 并接收机器人端的反馈信息. 图 9(a) 和图 9(b) 是拾取的不同起点和终点得到的数据信息, 以验证设计的全局规划器模块的可行性. 为充分验证全局规划器性能, 除了图 9(a)、图 9(b) 所展示的数据外, 针对不同道路随机进行了 8 次规划, 并将这 10 次规划后的数据进行了统计分析, 重点统计分析了规划距离、原始的商业电子地图路径点数、智能分割后生成的子目标点数目.

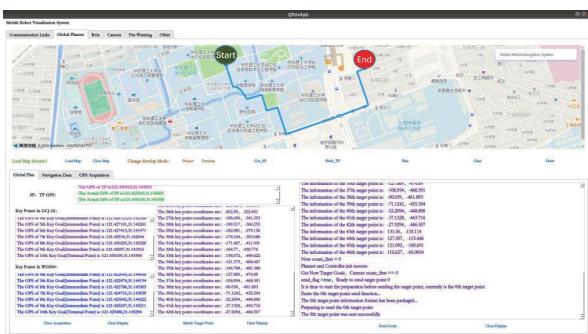
数据如表 1 所示. 从表 1 中数据可知, 针对远距离环境下的室外移动机器人导航任务, 全局规划器可以很灵活的对商业电子地图规划出来的数据进行实车配

准以及智能子目标点分割,生成可以指导移动机器人导航的局部子目标点序列。

而是根据移动过程中的障碍物信息不断调整规划路线,直至到达目标位置,位置3处也是同理。



(a) 示例 1



(b) 示例 2

图 9 全局规划器仿真实验验证示例

表 1 全局规划器规划结果相关参数

参数名称	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
距离 (m)	459	821	998	856	716	842	1075	1107	1129	1989
原始地图	28	53	62	56	49	55	83	79	75	116
路径点数目	23	47	50	48	45	46	72	59	62	97
智能划分										
子目标点数目										

## 5.2 局部规划仿真

为验证局部规划算法性能,利用 ROS 下的 Gazebo 和 Rviz 组件搭建了仿真平台。图 10 展示了 Gazebo 环境中的场景,以模拟社区内的真实环境和路况。实验没有事先建立全局先验地图,仅有以移动机器人为中心的实时栅格地图,机器人通过本文算法感知环境及障碍物,并实时重新规划路径,成功避障。

图 11 截取了移动机器人在仿真环境中的 3 段代表性行驶过程,以移动机器人为中心构建了局部栅格地图,白色区域模拟机器人周围可探测范围,蓝线表示规划的轨迹。位置 1 是从起点规划到目标点的初始轨迹,但随着机器人对周边障碍物的探测,会重新规划路径。位置 2 处是行驶过程中的一段场景,可以观察到位置 2 处所处的位置并非按照位置 1 处规划的路径行走,

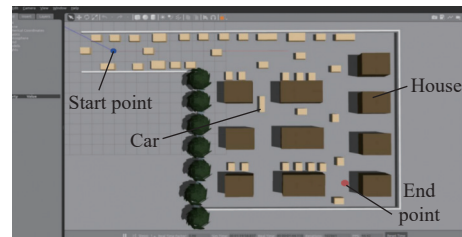


图 10 仿真环境

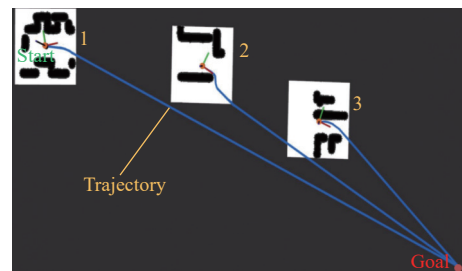


图 11 局部规划器仿真实验

为全面评估局部规划器性能,我们模拟了多种道路环境,进行了 10 次实验模拟,并进行了统计分析。我们重点统计了路径总长度、规划时间、跟踪误差(最大、平均和最小值)、和子目标点更新成功率等指标,并将数据整理成表 2 展示。由表 2 数据可知,对于 20–60 m 范围的室外移动机器人导航,移动机器人的最大运动速度为 0.6 m/s,平均规划时间约为 0.6 s,平均跟踪误差在 4–8 cm 范围内,具有较高的规划速度和跟踪精度。统计分析轨迹跟踪数据,得到跟踪误差的最大、平均和最小值。在拐弯处局部避障时,跟踪误差最大为 22 cm,平均跟踪误差在 4–8 cm 范围内,符合本移动机器人实验平台对轨迹跟踪控制的精度要求,能适应不同环境下的避障需求。

表 2 局部规划器实验结果相关参数

编号	局部规划长度 (m)	规划时间平均值 (s)	跟踪耗时 (s)	跟踪误差最大、平均、最小值 (cm)	子目标点更新
1	58	0.68	128	0.13、0.06、0.03	0
2	35	0.36	79	0.21、0.07、0.04	1
3	42	0.55	93	0.14、0.04、0.02	0
4	23	0.23	51	0.11、0.05、0.03	0
5	55	0.67	119	0.18、0.08、0.04	1
6	61	0.71	135	0.22、0.07、0.01	0
7	29	0.33	65	0.10、0.06、0.02	0
8	48	0.61	107	0.21、0.08、0.05	1
9	37	0.34	88	0.09、0.04、0.01	1
10	21	0.22	49	0.14、0.07、0.03	0



同时,为了验证全局规划器在障碍物中的子目标点不可达的情况,我们特别设置了4次此类场景的仿真实验,以测试我们设计的局部子目标点更新算法的实用性,0表示不需要更新,1表示更新成功,结果显示,移动机器人及时在子目标点附近区域更换了新的目标点,完成了局部子目标点的更新任务。

### 5.3 移动机器人实车实验

系统硬件设计采用人机交互层、数据处理层和控制执行层3层结构。人机交互层由远程PC上位机软件和LTE无线通信模块等组成,实现完成基于商业电子地图的全局规划器功能和数据可视化功能。数据处理层在移动机器人本体上,包含智能算法处理单元、多线激光雷达、单线激光雷达、主视角摄像头、GNSS RTK模块和IMU等,负责移动机器人系统多传感器数据的处理,实现环境感知和定位功能,并具体执行导航任务,与人机交互层和控制执行层的桥梁;控制执行层由履带底盘、电源管理单元等构成,负责硬件系统的供电、执行数据处理层发送的速度指令,完成移动机器人的底层运动,如图12所示。

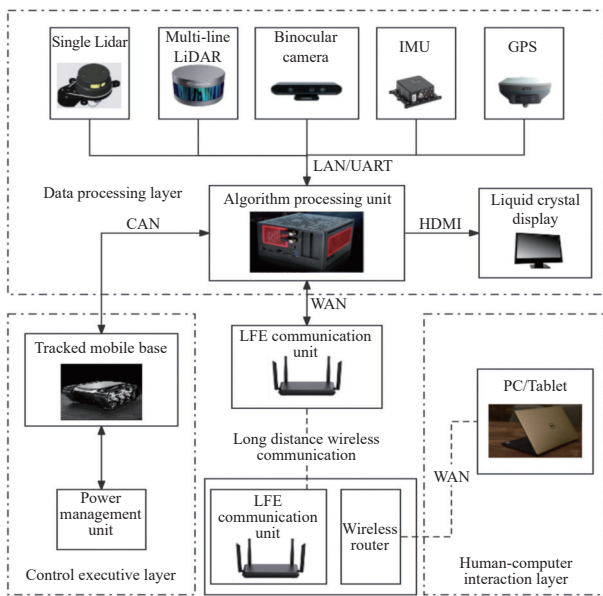


图 12 系统硬件连接图

为了验证该方法的有效性,我们在校园内进行了实验。导航起点设置在华东理工大学第十实验室楼入口处,目标点设置在华东理工大学第二教学楼入口处。为增加导航的复杂度,设置了导航必经点,为图13中A点,全距离约为540 m。导航实验事先未建立全局先验地图,仅使用本文提出的基于商业电子地图的导航

方法进行实验,实验采用的商业电子地图以高德地图为例,实现全局规划器功能。

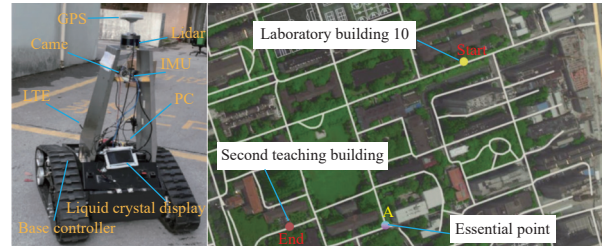


图 13 移动机器人实验过程

移动机器人按照实验内容完成导航任务后,全程记录下了实验数据。为直观显示移动机器人实际运动轨迹,通过实时获取移动机器人GPS信息,将其经过本文第3.1节中公式转换成GCJ-02系统坐标,通过上位机软件绘制在了地图中,显示经过全局规划器智能分割出来的子目标点序列,如图14所示。根据式(9),可得到12个子目标点序列(共计13段导航任务),局部规划器分段执行,并实时更新子目标点。

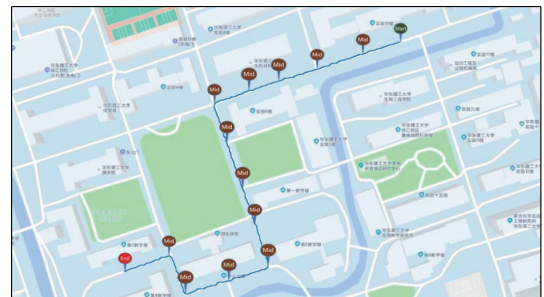


图 14 全局规划路线

设计的Qt上位机软件利用嵌入的ROS框架的Rviz功能实时记录和绘制移动机器人行驶过程中的周边环境 and 行驶轨迹,显示结果如图15所示。

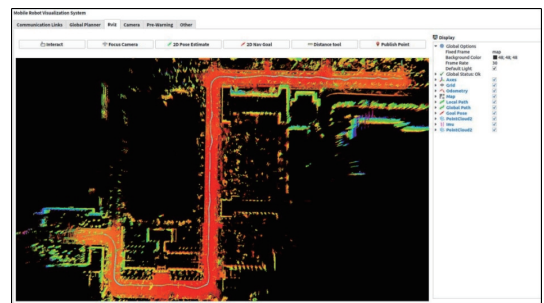


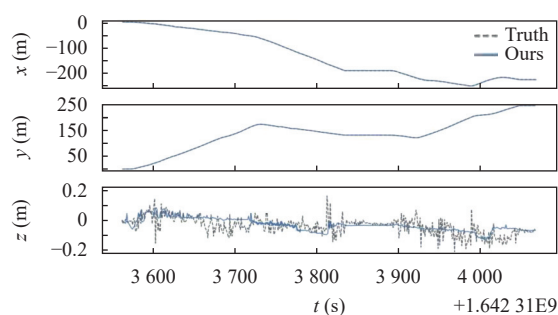
图 15 SLAM和行驶路径显示

同时机器人导航系统采用一种基于激光雷达、IMU和RTK的多传感器融合的SLAM方法,用于在室外远

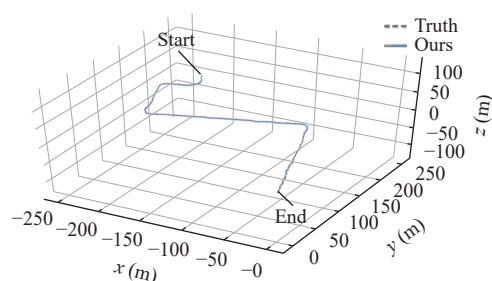


距离环境中实现移动机器人的高精度定位. 我们首先对地面进行分割和识别, 然后在后端优化中加入地面约束, 以限制高度方向上的漂移误差. 其次, 我们考虑到初始状态的定位误差对导航的影响, 设计了一种基于运动和信息量的关键帧选取策略, 有效地提高了定位的平滑性和准确性, 并提高了回环检测的效率.

最后, 为了验证我们的方法在室外 GNSS RTK 信号较弱时, 地面约束对高度方向上定位精度的提升作用, 我们在融合算法中未使用 RTK 数据, 而是将其作为真值进行对比. 全程各轴方向上的位移误差如图 16(a) 所示, SLAM 算法轨迹如图 16(b) 所示. 从实验结果可知, 定位方法与真值进行对比, 显著地减小了各轴方向上的位移误差, 有效地提高了定位精度.



(a) 各坐标轴定位精度



(b) 定位轨迹

图 16 定位精度

## 6 结论与展望

本文探讨了室外远距离环境下移动机器人的导航方法, 尤其关注了在城市消防背景下的应用场景. 我们提出了一种新颖的全局规划方法, 利用商业电子地图信息作为先验知识, 从而实现无需预先建图即可规划路径的目标. 同时, 我们还设计了一种基于 A\* 算法的局部规划方法, 能够生成平滑且安全的 minimum snap 轨迹, 有效避免与障碍物碰撞, 为消防机器人在城区环境中的安全行驶提供了可靠保障.

为了实现对导航过程的监控与控制, 我们开发了上位机软件实时显示机器人的运动信息, 在真实和仿真平台对机器人平台的地图构建和运动控制进行了全面测试, 结果验证了我们方法的有效性和鲁棒性. 未来的工作方向可以考虑拓展全局地图的使用场景, 除了商业电子地图, 还可以利用场景的示意图等资源进行合理设计和应用转化, 以满足更加复杂的环境下消防机器人的导航需求.

## 参考文献

- Nam DV, Gon-Woo K. Robust stereo visual inertial navigation system based on multi-stage outlier removal in dynamic environments. *Sensors*, 2020, 20(10): 2922. [doi: 10.3390/s20102922]
- Wu XQ, Park Y, Li A, *et al.* Smart detection of fire source in tunnel based on the numerical database and artificial intelligence. *Fire Technology*, 2021, 57(2): 657–682. [doi: 10.1007/s10694-020-00985-z]
- 宋薇, 梁晶, 张海桥, 等. 基于楼宇场景分类的激光导航与地图构建. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(14): 1404001.
- Chiang KW, Noureldin A, El-Sheimy N. Multisensor integration using neuron computing for land-vehicle navigation. *GPS Solutions*, 2003, 6(4): 209–218. [doi: 10.1007/s10291-002-0024-4]
- Li JY, Jiang FL, Yang J, *et al.* Lane-DeepLab: Lane semantic segmentation in automatic driving scenarios for high-definition maps. *Neurocomputing*, 2021, 465: 15–25. [doi: 10.1016/j.neucom.2021.08.105]
- 徐国晟, 张伟伟, 吴训成, 等. 基于卷积神经网络的车道线语义分割算法. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(7): 89–94.
- 李琳辉, 伦智梅, 连静, 等. 基于卷积神经网络的道路车辆检测方法. *吉林大学学报(工学版)*, 2017, 47(2): 384–391.
- Azimi SM, Fischer P, Korner M, *et al.* Aerial LaneNet: Lane-marking semantic segmentation in aerial imagery using wavelet-enhanced cost-sensitive symmetric fully convolutional neural networks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(5): 2920–2938. [doi: 10.1109/TGRS.2018.2878510]
- 李勇, 佟国峰, 杨景超, 等. 三维点云场景数据获取及其场景理解关键技术综述. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 040002.
- 彭玉旭, 董胜超. 基于注意力机制的三维点云车辆目标检测. *计算机系统应用*, 2021, 30(12): 211–217. [doi: 10.15888/j.cnki.csa.008249]
- Liu YT, Xu MM, Jiang GZ, *et al.* Target localization in local

- dense mapping using RGBD SLAM and object detection. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2022, 34(4): e6655. [doi: [10.1002/cpe.6655](https://doi.org/10.1002/cpe.6655)]
- 12 樊宏丽, 李郁峰, 郭荣, 等. 基于 IMU 与激光雷达融合的无人弹药补给车 SLAM 系统研究. *兵器装备工程学报*, 2024, 45(5): 196–201. [doi: [10.11809/bqzbgcxb2024.05.028](https://doi.org/10.11809/bqzbgcxb2024.05.028)]
- 13 Brand C, Schuster MJ, Hirschmüller H, *et al.* Stereo-vision based obstacle mapping for indoor/outdoor SLAM. *Proceedings of the 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*. Chicago: IEEE, 2014. 1846–1853.
- 14 Vivet D, Checchin P, Chapuis R. Localization and mapping using only a rotating FMCW radar sensor. *Sensors*, 2013, 13(4): 4527–4552. [doi: [10.3390/s130404527](https://doi.org/10.3390/s130404527)]
- 15 Yan K, Ma BL. Mapless navigation based on 2D LiDAR in complex unknown environments. *Sensors*, 2020, 20(20): 5802. [doi: [10.3390/s20205802](https://doi.org/10.3390/s20205802)]
- 16 Kanayama H, Ueda T, Ito H, *et al.* Two-mode mapless visual navigation of indoor autonomous mobile robot using deep convolutional neural network. *Proceedings of the 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. Honolulu: IEEE, 2020. 536–541. [doi: [10.1109/SII46433.2020.9025851](https://doi.org/10.1109/SII46433.2020.9025851)]
- 17 Zhu YK, Mottaghi R, Kolve E, *et al.* Target-driven visual navigation in indoor scenes using deep reinforcement learning. *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Singapore: IEEE, 2017. 3357–3364. [doi: [10.1109/ICRA.2017.7989381](https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989381)]
- 18 Ort T, Paull L, Rus D. Autonomous vehicle navigation in rural environments without detailed prior maps. *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Brisbane: IEEE, 2018. 2040–2047.
- 19 Tai L, Paolo G, Liu M. Virtual-to-real deep reinforcement learning: Continuous control of mobile robots for mapless navigation. *Proceedings of the 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Vancouver: IEEE, 2017. 31–36.
- 20 Zhang YH, Wang J, Wang XN, *et al.* Road-segmentation-based curb detection method for self-driving via a 3D-LiDAR sensor. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(12): 3981–3991. [doi: [10.1109/TITS.2018.2789462](https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2789462)]
- 21 崔奇, 夏浩, 滕游, 等. 移动机器人自主导航系统及上位机软件设计与实现. *计算机测量与控制*, 2022, 30(1): 141–146.
- 22 Zhu XR, Qiu CX, Minor MA. Terrain inclination aided three-dimensional localization and mapping for an outdoor mobile robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, 10(1): 76.
- 23 Mellinger D, Kumar V. Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors. *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Shanghai: IEEE, 2011. 2520–2525.

(校对责编: 孙君艳)