

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211358

基于概率 A^* 的智能车路径规划算法*徐 淦¹ 李文超^{1,2} 刘美如¹

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院 镇江 212013; 2. 江苏大学京江学院 镇江 212013)

摘要: 为保证智能车辆能够按照规划的路径安全行驶,且满足车辆动力学特性,针对混合 A^* 算法中没有引导性策略所产生较多不必要的搜索问题,提出概率 A^* 算法先得到搜索粗路径,提高在随后搜索过程中搜索效率。然后利用概率 A^* 算法得到的路径点引导节点走向,避免节点向障碍物等搜寻。最后对节点的代价函数进行优化。仿真实验结果表明,与混合 A^* 算法相比,本文所提出的算法平均减少搜索时间 10.8%,且得到的路径相对规整平滑。该算法可以在较短时间为智能车辆规划一条安全可行平滑的路径。

关键词: 路径规划;智能车;概率 A^* 算法;混合 A^* 算法

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.20

Intelligent vehicle path planning algorithm based on probability A^* Xu Gan¹ Li Wenchao^{1,2} Liu Meiru¹

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Jiangsu University Jingjiang College, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to ensure that the intelligent vehicle can run safely according to the planned path and meet the vehicle dynamics characteristics, and solve the unnecessary search problems caused by the lack of guidance strategy in the hybrid A^* algorithm, a probabilistic A^* algorithm is proposed to obtain the search rough path firstly, which improves the search efficiency in the subsequent search process. Secondly the path points obtained by the probabilistic A^* algorithm are used to guide the search direction to avoid colliding with obstacles. Finally, optimize the cost function of nodes. Simulation results show that, compared with the hybrid A^* algorithm, the proposed algorithm reduces the search time by 10.8% on average, and the resulting path is relatively regular and smooth. The algorithm can plan a safe, feasible and smooth path for intelligent vehicles in a short time.

Keywords: path planning; intelligent car; probabilistic A^* algorithm; hybrid A^* algorithm

0 引言

近年来,随着人工智能的快速发展,智能驾驶进展很快。路径规划作为智能车辆的重要组成部分,要求能够根据感知到的静态与动态环境及时准确地规划车辆行驶的路径。与机器人的路径规划不同,智能车不但要考虑复杂的障碍物还要加入车辆动力学特性等的一系列约束条件,从而确保所规划路径的可行性。另外,还要达到实时性的条件,因此规划时间短也是一个重要因素^[1]。

车辆路径规划方法按算法特性可分为传统规划、智能规划和基于概率采样搜索^[2] 3类。比较常用的传统规划和智能规划方法有 Dijkstra、 A^* ^[3-4]、人工势场法^[5]以及蚁群算法^[6]等。基于概率采样搜索方法的主要思想是通过随机

取点的方式获得起始点到目标点的多种路径,并择优选取最终路径。常用的方法有概率路线图(probabilistic roadmap, PRM)^[7]、快速探索随机数(rapidly-exploring random tree, RRT)^[8]等。这些规划方法大都以点为单位,有的虽结合车辆相关约束但规划结果达不到预期的效果。

针对车辆动力学约束这一问题, Dolgov 等^[9]和 Ferguson 等^[10]基于 A^* 算法,提出了一种满足车辆动力学特性的混合 A^* 算法,混合 A^* 算法结合了 A^* 算法和随机采样法的优点,但搜索得到的路径不够平滑,效率也得不到保障;文献[11]则提出一种基于路径距离、规划耗时和平滑度的改进 A^* 算法,将搜索范围增加到两层 24 个,但在大地图效率得不到较大提高;文献[12]提出了一种考虑车辆动

收稿日期:2022-09-12

* 基金项目:汽车仿真与控制国家重点实验室开放基金(20171109)、江苏省道路载运工具新技术应用重点实验室开放课题(BM20082061702)、江苏大学高级人才科研启动项目(5501120008)资助

力传动系统和燃油经济性的改进 A* 寻路算法,综合考虑规划路径长度、车辆平顺性和油耗的综合成本函数,但是搜索效率没有显著提高;文献[13]将 A* 算法与 Reeds-Shepp 曲线的启发值结合作为最终的启发数值,并利用 Reeds-Shepp 曲线进行拓展,加快了搜索的效率,但是由于节点拓展的原因会产生不必要的倒车与转弯行为,导致路径的平滑性受损;文献[14]提出了混合 A* 在非结构化户外环境中自主移动机器人路径规划中的应用,考虑了车辆的运动学约束和地面条件;文献[15]提出一种自适应式的节点拓展方式和代价函数设计,减少了节点数量和不必要的转弯;文献[16]对 Reeds-Shepp 曲线进行惩罚,减少可能出现的必要的转弯与倒车行为,并基于多目标约束的处理方法生成可行驶路径,但是搜索效率得不到保证;文献[17]利用 JPS 算法为混合 A* 算法提供了参考方向,但 JPS 算法中的关键点没有考虑车辆约束,且时间成本较高。

以上文献对 A* 算法以及混合 A* 算法中的节点拓展等进行优化,但是面对复杂环境,少有通过合理的规划方式找到一条粗路径,为节点的拓展提供较为明确的方向。因此,本文针对混合 A* 算法中出现的没有粗路径导致效率不足以及频繁倒车、转向等问题,提出了一种概率混合 A* 算法,节点采用自适应搜索步长,并加入双向搜索提高搜索效率。常规的概率采样算法通过随机采样确定路径关键节点和最短路径,而概率 A* 算法则是通过概率采样加快搜索和碰撞检测的速度,算法既结合 A* 算法能够搜到最优路径优点,又通过概率采样提高 A* 算法搜索效率,与通常随机路径规划算法不同。首先通过概率 A* 算法找出一系列路径点,形成粗路径,为后续节点的拓展引导方向,避免节点向不必要的区域搜索,并改进节点拓展的代价函数,以此来提高算法的搜索效率以及轨迹平滑性。

1 混合 A* 算法

将环境地图分割成栅格地图,栅格中的数值表示是否存在障碍物。A* 算法是启发式算法,在建立的 open 列表与 closed 列表中分别加入未搜索的节点和已搜索的节点并排序,则 A* 算法的代价函数可以表示为:

$$F(i) = g(i) + h(i) \quad (1)$$

式中: $g(i)$ 为初始栅格到下一个栅格的距离; $h(i)$ 表示节点 i 距离终点的最短路径的启发函数。通过起始点一步步地拓展到达目标点,从而形成一条搜索路径,最后通过路径回溯,即可获得一条最优路径。混合 A* 算法则在传统的 A* 算法的基础上加入了车辆动力学约束,其子节点位置不受栅格限制,可到达栅格内任意位置,从而形成符合车辆动力学约束的路径点。

1.1 节点拓展方式

A* 算法以栅格地图为基准,每一步拓展都以一个栅格为单位,因此其子节点的拓展方向,只能向父节点周围的 8 个栅格拓展,如图 1(a)所示。而混合 A* 算法为了保证得

到的路径能够满足车辆动力学要求,其通过车辆参数包括车长、车宽、最小转弯半径及前轮转角离散数量等,使用车辆运动学生成的轨迹替代 A* 算法中的节点,从而使得生成的路径符合车辆动力学约束,其节点拓展方式如图 1(b)所示。

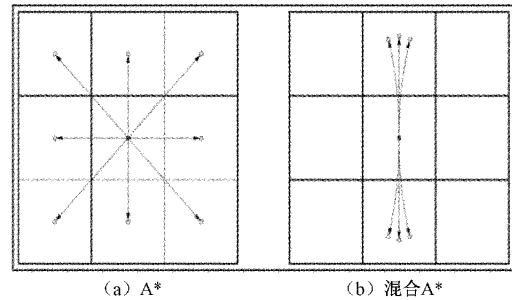


图 1 A* 算法节点拓展方式与混合 A* 算法节点拓展方式

1.2 Reeds-Shepp 曲线

在混合 A* 算法中,为满足车辆动力学约束和环境约束,采用了传统 A* 算法的欧氏距离和 Reeds-Shepp 曲线作为函数启发值,并取其中的较大值作为最终的节点启发值,引导节点的拓展^[15]:

$$h(s, sgoal) = \max(h_1(s, sgoal), h_2(s, sgoal)) \quad (2)$$

式中: h_1 为在忽略环境障碍、考虑车辆非完整性约束的条件下得到的启发式数值; h_2 为在忽略车辆非完整性约束、考虑环境约束的条件下得到的启发式数值。

Reeds-Shepp 曲线是在不考虑障碍物,只考虑车辆动力学约束条件下所得到的曲线,由圆和直线构成。以车辆后轴中心为基准,建立车辆坐标系,任意 $A(x_1, y_1, \phi_1)$ 、 $B(x_2, y_2, \phi_2)$ 两点坐标从世界坐标系转换至车辆坐标系,将 A、B 点的车辆坐标系坐标做归一化处理。Reeds-Shepp 曲线包含多种曲线类型,各个曲线类型的具体计算都来自以下公式:

$$L_i(x, y, \phi) = (x + \sin(\phi + t) - \sin\phi, y - \cos(\phi + t) + \cos\phi, \phi + t) \quad (3)$$

$$R_i(x, y, \phi) = (x - \sin(\phi - t) + \sin\phi, y + \cos(\phi - t) - \cos\phi, \phi - t) \quad (4)$$

$$S_i(x, y, \phi) = (x + t\cos\phi, y + t\sin\phi, \phi) \quad (5)$$

式中: L_i 、 R_i 、 S_i 为不同曲线类型; x 为节点横坐标; y 为节点纵坐标; ϕ 为车辆航向角; t 为运动弧长。

通过三维向量旋转和平移得到从 A 点到 B 点即目标位置的启发函数值,保证了节点达到目标点时的位姿与目标点相一致。

2 概率混合 A* 算法

现在所用的混合 A* 算法,比如文献[9]所提算法,采用节点间的距离函数进行规划,从起始点不断向目标点搜寻,但是面对复杂环境,如“U”型障碍物等可能会产生无用的探索并且会产生不必要的转弯与掉头行为。为了解决这

些问题,本文提出了一种采用概率采样的搜索方法即概率混合 A* 算法,通过自适应调整节点拓展步长和碰撞检测,生成粗路径,为混合 A* 算法节点的拓展提供了方向与目标,避免了节点向不必要的区域搜索;然后利用 Reeds-Shepp 等曲线拟合目标点位姿到达目标点,并采用双向搜索来提高搜索效率。同时改进了混合 A* 算法的节点拓展代价,优化了搜索路径的平滑性与安全性。

2.1 环境模型

本文对车辆在平面空间的表示为 (x, y, ϕ, d, r) , 其中 (x, y) 为车辆坐标位置, ϕ 为车辆航向角, d 为车辆行驶状态 ($d=0$ 为前进, $d=1$ 为后退), r 为节点使用曲线状态 ($r=0$ 为 Dubins 曲线, $r=1$ 为 Reeds-Shepp 曲线)。

2.2 概率 A* 算法

由于 A* 算法是仅在相邻点逐步拓展逼近目标点,在地图较大,环境较复杂的情况下,open 列表中会储存大量的点,无法实现快速逼近目标点和产生引导式路径点的目的,因此本文所提出的概率 A* 算法以 A* 算法的启发函数为基础,在栅格地图中,通过概率取样的方法减少节点的搜索步骤,从而提高算法的搜索效率。

1) 拓展步长

在栅格地图中,根据不同地图大小,对节点拓展步长以及地图分辨率进行适当处理。步骤如下:

步骤(1)父节点的拓展步长 n 设定为奇数,其大小依据地图边长 l 大小,不超过地图边长的 $1/10$,即 $n \leq \frac{l}{10}$;

步骤(2)随机选取某一方向进行拓展,若初次拓展的节点发生碰撞即子节点为障碍物或概率取样检测到障碍物,删除该子节点,自适应调整步长即减少拓展步长重新拓展,不发生碰撞则转步骤(3)。节点减少的步长为 x ,即拓展步长为 $n-x$,再次进行碰撞检测,若还是发生碰撞则随机取另一方向拓展,不发生碰撞则转步骤(3)。

步骤(3)将起始点以及目标点周围的栅格进行压缩处理,以拓展步长 n 的子节点为原点,以上下左右 4 个方位延长 n 个栅格所形成的边长为 $2n$ 的矩形为大栅格。

2) 概率采样取点及碰撞检测

从起始点向目标点寻找路径的过程中,由于节点拓展步长的原因,并不能保证所选取的节点周围或节点行走的路径不存在障碍物,即车辆能够安全、无碰撞地通过障碍物,因此为了得到一条安全无碰撞的路线及算法的可行性,采用象限采样的方法对子节点所在大栅格中进行碰撞检测。步骤如下:

步骤(1)若拓展的子节点为障碍物则切换方向,重新拓展子节点;否则以该子节点为坐标原点,在子节点的 4 个象限上随机选取一定量的栅格进行碰撞检测;同时对父节点与子节点之间相邻的象限进行重点采样,多选取一到两个点。

步骤(2)若随机选取的点都不存在障碍物则认为该子

节点为合格的子节点,更新并计算子节点的节点代价值;否则转步骤(3)。

步骤(3)删除含障碍物子节点,减少拓展步长重新拓展。将该点作为车辆中心点,将以包裹车辆大小的矩形栅格为大栅格进行碰撞检测,如图 2 所示,若不发生碰撞则说明该子节点可以作为路径点,否则随机选取方向重新拓展。

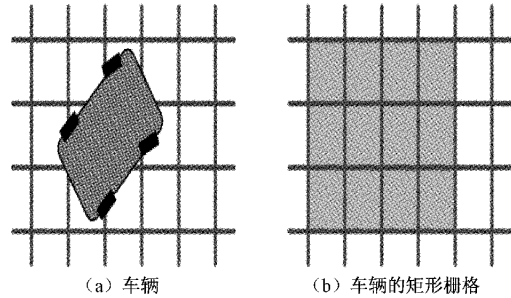


图 2 包裹车辆的矩形栅格地图大小

3) 概率 A* 算法实现

本文所提的概率 A* 算法具体实施步骤如下,对应流程如图 3 所示。

步骤(1)确定起始点,目标点、开放列表和副表等,将起始点所在栅格加入开放列表中并标记为 open,目标点则加入副表中;

步骤(2)从 open 集中取出离目标点代价值最低的点,检查是否拓展过,若拓展过则换下一节点,否则将该点标记为 closed 并判断该点是否为目标点或该节点与目标点在同一个大栅格当中,是则进行筛选,不是则继续寻找;

步骤(3)筛选得到的路径点,将节点之间沿横轴或纵轴方向连续增长的节点删除,只保留增长的第 1 个节点与最后一个节点,减少节点数量,最后结束并返回路径点;

步骤(4)若没有达到目标点,则从父节点开始向 8 个方向进行拓展,同时目标点也向起始点搜寻;

步骤(5)若拓展的子节点为障碍物则删除该点,换另一方向的作为子节点,否则进行随机取点;若随机选取的点中发生碰撞,则以包裹车辆大小的栅格为大栅格进行碰撞检测,不发生碰撞则认为是合格的节点;若包裹车辆大小的栅格依然发生碰撞则删除该点并切换方向,否则转到步骤(6);

步骤(6)判断生成好的子节点是否在 open 集中,或者节点与目标点的代价值较之前的节点是否减少,若不在 open 集合中或代价值减少则视为可行的节点,将这些节点记录下来并加入 open 集中,转到步骤(2),不是合格的节点则删去。

2.3 代价函数设计

A* 算法规划得出的路径不满足车辆动力学约束,混合 A* 算法则加入了这一约束,但是仍然存在不足比如会出现的不必要的倒车与转弯问题。本文考虑在节点拓展的代价函数中加入惩罚,让节点的搜索路径尽量保持直线行驶以解决该问题。在文献[15]的基础上,本文对节点增加了

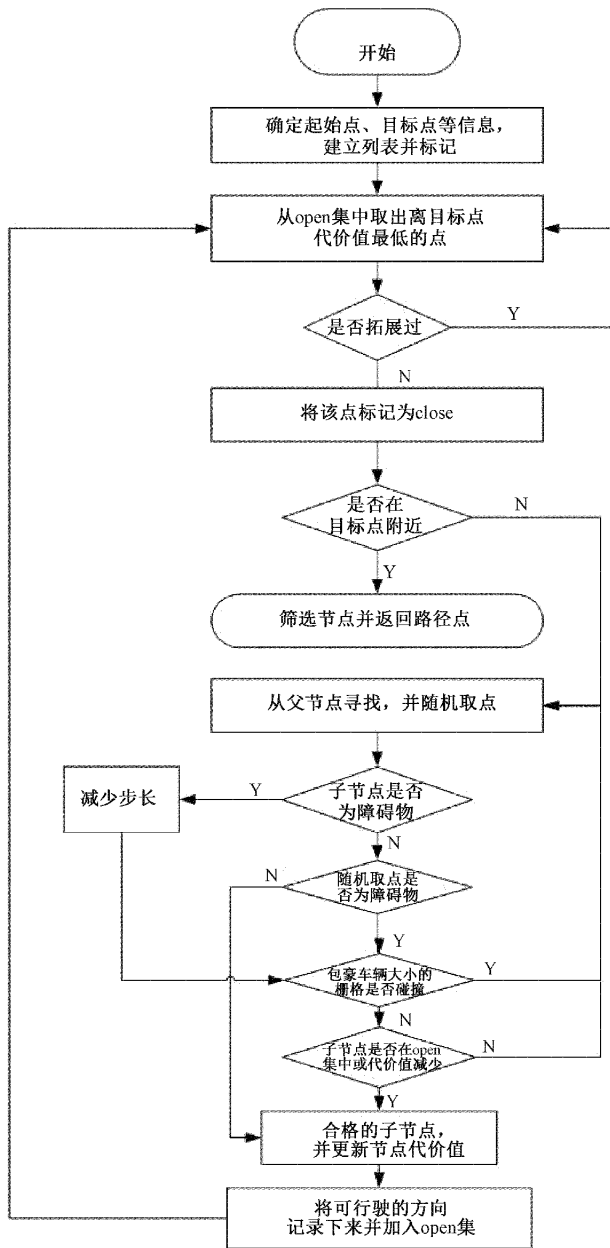


图 3 概率 A* 算法流程

Reeds-Shepp 与 Dubins 曲线切换的惩罚,并适当减少车辆前进的代价值。各子节点的实际代价值计算公式如下:

$$G_i = G_p + \lambda_1 \times g_{1,i} + \lambda_2 \times g_{2,i} + \lambda_3 \times g_{3,i} + \lambda_4 \times g_{4,i} - \lambda_5 \times g_{5,i} \quad (6)$$

$$g_{1,i} = L \times (d_i + 1) \quad (7)$$

$$g_{2,i} = |\phi_i - \phi_p| \quad (8)$$

$$g_{3,i} = |d_i - d_p| \quad (9)$$

$$g_{4,i} = |r_i - r_p| \quad (10)$$

$$g_{5,i} = L \times d_i \quad (11)$$

式中: G_p 为父节点代价值; G_i 为子节点代价值; $g_{1,i}$ 为对节点后退的惩罚; $g_{2,i}$ 为对节点航向角切换的惩罚; $g_{3,i}$ 为对节点前进与后退切换的惩罚; $g_{4,i}$ 为对曲线切换的惩罚;

$g_{5,i}$ 为对节点前进的惩罚; L 为拓展步长; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ 为权重系数,可通过多次实验后选取; d_i 为子节点行驶状态,前进 $d_i=1$,后退则 $d_i=0$ 。

3 仿真分析

为了验证算法与所生成路径的可行性,以机器人操作系统(robot operating system, ROS)为平台,用 C++ 对所提算法编程实现。并对本文所提出的算法与混合 A* 算法进行对比分析。本文在地图中随机选择起始点与目标点,并在这两个点之间进行超过 10 次的反复地路径搜索。所用车辆参数如表 1 所示。

表 1 实验参数

参数	数值
车体朝向离散数量/ N	72
朝向离散步长/ $(^\circ)$	5
最大前轮转向角/ $(^\circ)$	30
最小转弯半径/m	6

3.1 概率 A* 算法仿真实验及分析

分别在在 30×30 、 50×50 、 70×70 的栅格地图对本文所提出的概率 A* 算法与 A* 算法进行仿真对比分析,搜索结果如图 4 所示,其中图 4(a)为 A* 算法搜索到路径,图 4(b)为概率 A* 算法,实验结果如表 2 所示。

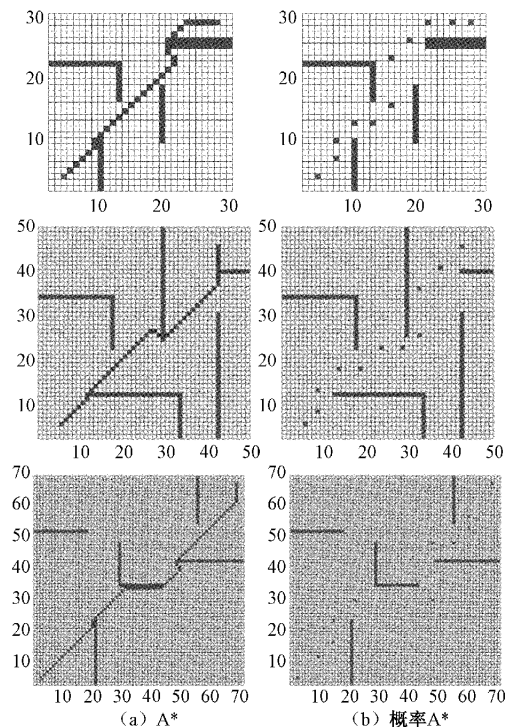


图 4 路径搜索对比

结合图表可知,在相同的非结构化环境中,相比于 A* 算法,概率 A* 算法由于分辨率和步长,大大减少了启发式

表 2 概率 A* 数据对比

地图大小	算法	搜索时间/s	拓展节点数量/N	关闭集节点数量/N
30×30	A* 算法	0.007	234	73
	概率 A* 算法	0.008	49	23
50×50	A* 算法	0.018	356	86
	概率 A* 算法	0.013 23	74	31
70×70	A* 算法	0.023	564	187
	概率 A* 算法	0.019	93	38

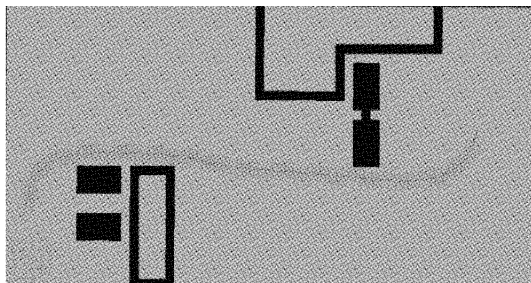
搜索中需要计算的栅格数量,并通过筛选节点的方式,减少了路径中冗余的路径点,避免了不必要的搜索区域,虽无法形成完整的行驶路径,但是为后续的概率混合 A* 算法的计算减少了计算量,引导节点拓展,提高计算效率,使算法具备更好的实时性。

3.2 概率混合 A* 算法仿真实验及分析

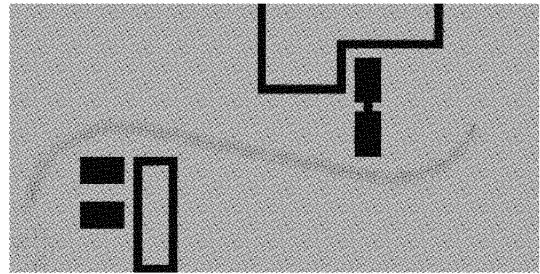
根据非结构化环境的特性,分别在 50×50、80×80 以及 180×60 大小的栅格地图中,针对混合 A* 算法(HA*)、文献[13]算法即实时混合 A* 算法(RHA*)以及本文所提出的概率混合 A* 算法(PHA*)进行对比分析,各个不同大小的地图仿真结果如表 3 所示。在 80×30 的栅格地图中,混合 A* 算法规划结果与本文的规划结果如图 5 所示。

表 3 不同大小地图算法性能对比

地图大小	算法	搜索时间/ms	路径长度/m	拓展节点数量	关闭集节点数量	变换方向次数
50×50	HA*	61.2	62	379	182	9
	RHA*	53.9	61	319	147	9
	PHA*	56.1	59	286	121	4
80×80	HA*	71.0	92	496	235	19
	RHA*	68.3	89	421	198	14
	PHA*	63.2	83	398	165	11
180×60	HA*	498.3	147	1 623	712	29
	RHA*	433.2	145	1 553	681	23
	PHA*	387.4	137	1 253	592	15



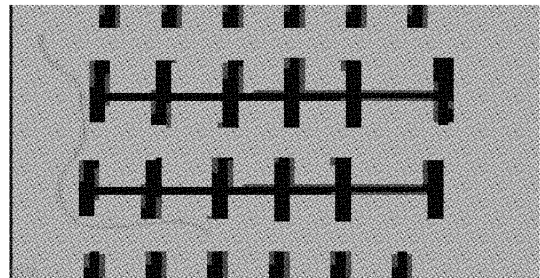
(a) 混合 A* 算法



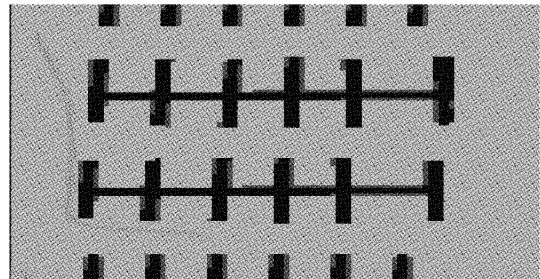
(b) 概率混合 A* 算法

图 5 混合 A* 算法对比

由表 3 可知,当地图规格逐渐变大,各项性能指标优化效果更加明显,特别是搜索时间大大减少,平均减少了 10.5%,变换方向次数的减少则表明去掉了一些不必要的转弯行为。同时针对停车场等存在多个“U”型口的复杂环境,将混合 A* 算法、文献[17]算法(DHA*)与本文算法进行对比分析,地图大小为 105×105,规划结果如图 6 与表 4 所示。



(a) DHA* 算法



(b) PHA* 算法

图 6 复杂环境算法对比

表 4 不同大小地图算法性能对比

地图大小	算法	搜索时间/ms	路径长度/m	拓展节点数量	关闭集节点数量	变换方向次数
105×105	HA*	501	129	1 429	608	12
	DHA*	357	121	893	381	7
	PHA*	294	113	636	318	6

结合图表,本文的算法比一般的混合 A* 算法具有更好的性能,在地图越大、栅格数量越多且障碍物较多的复杂场景下,越适合运用概率混合 A* 算法。图 7 给出了概率混

合 A* 算法在不同大小栅格地图中对混合 A* 算法在搜索时间上的优化效果。

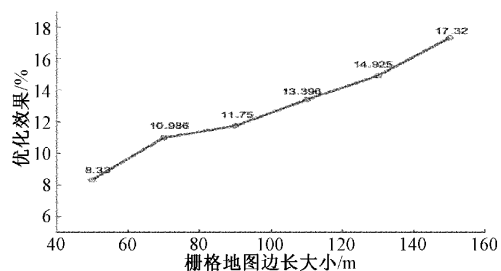


图 7 概率混合 A* 算法在不同地图大小的表现

为了进一步验证算法的可靠性,本文针对实际的非结构化道路场景进行了激光雷达扫描,得到了停车场类型的点云图,并在该图中进行路径规划。图 8 为搜索得到的路径结果,用时为 1.864 s。实验结果证明本文所提出的方法能够在非结构化道路场景中如停车场等,在较短的时间内搜索得到一条安全、平顺且满足车辆运动学约束的供车辆行驶的路径。

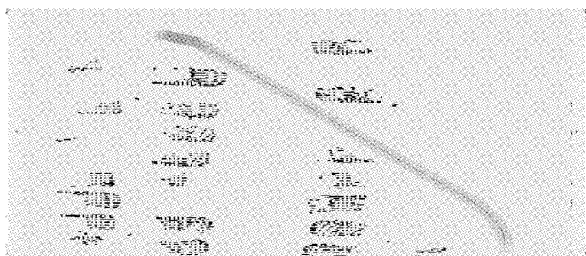


图 8 实际场景搜索验证

4 结 论

本文对停车场等非结构化道路的智能车路径规划算法进行了研究,提出了一种基于概率的混合 A* 算法的路径规划方法。首先采用概率 A* 算法得到一系列的路径点,形成粗路径,然后通过节点的不断探索,利用 Reeds-Shepp 曲线或 Dubins 曲线等拟合满足车辆转向特性的行驶路径,沿着粗路径寻找最终的可行路径;通过合理的节点拓展和惩罚,提高路径的平滑性和安全性。仿真与实验结果表明,本文所提出的算法有效提高了算法效率,解决智能车路径规划问题,但未对结构化道路下的场景进行合理路径规划,未来会对此展开研究。

参考文献

- [1] LIU L, LIN J, YAO J, et al. Path planning for smart car based on Dijkstra algorithm and dynamic window approach[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, DOI:10.1155/2021/8881684.
- [2] 李晓旭,马兴录,王先鹏. 移动机器人路径规划算法综述[J]. *计算机测量与控制*, 2022, 30(7): 9-19.

- [3] SZCZEPANSKI R, TARCZEWSKI T. Global path planning for mobile robot based on artificial bee colony and Dijkstra's algorithms [C]. 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), IEEE, 2021: 724-730.
- [4] 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.
- [5] 王刚,张方,严大亮,等. 基于改进蚁群算法的机器人三维路径规划[J]. *国外电子测量技术*, 2020, 39(11): 1-6.
- [6] MIAO C, CHEN G, YAN C, et al. Path planning optimization of indoor mobile robot based on adaptive ant colony algorithm [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 156: 107230.
- [7] XU Z, DENG D, SHIMADA K. Autonomous UAV exploration of dynamic environments via incremental sampling and probabilistic roadmap[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 2729-2736.
- [8] 林依凡,陈彦杰,何炳蔚,等. 无碰撞检测 RRT* 的移动机器人运动规划方法[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(10): 257-267.
- [9] DOLGOV D, THRUN S, MONTEMERLO M, et al. Path planning for autonomous vehicles in unknown semi-structured environments [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2010, 29(5): 485-501.
- [10] FERGUSON D, HOWARD T M, LIKHACHEV M. Motion planning in urban environments [J]. *Journal of Field Robotics*, 2008, 25(11/12): 939-960.
- [11] JIANG H, SUN Y. Research on global path planning of electric disinfection vehicle based on improved A* algorithm [J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 1270-1279.
- [12] LIU Q, ZHAO L, TAN Z, et al. Global path planning for autonomous vehicles in off-road environment via an A-star algorithm [J]. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*, 2017, 13(4): 330-339.
- [13] KURZER K. Path planning in unstructured environments: A real-time hybrid A* implementation for fast and deterministic path generation for the KTH research concept vehicle [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2016, 29(5): 485-501.
- [14] PETEREIT J, EMTER T, FREY C W, et al. Application of hybrid A* to an autonomous mobile robot for path planning in unstructured outdoor environments [C]. *ROBOTIK 2012, 7th German Conference on Robotics*, VDE, 2012: 1-6.
- [15] 陈鑫鹏,徐彪,胡满江,等. 一种基于等步长分层拓展的混合 A* 路径规划方法[J]. *控制与信息技术*, 2021(1):

17-22,29.

- [16] 齐尧,徐友春,李华,等.一种基于改进混合 A* 的智能车路径规划算法[J].军事交通学院学报,2018,20(8):85-90.
- [17] QIN Z, CHEN X, HU M, et al. A novel path planning methodology for automated valet parking based on directional graph search and geometry curve[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 132: 103606.

作者简介

徐淦(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为车辆路径规划算法。

E-mail:X_xugan@163.com

李文超,副教授,主要研究方向为车辆规划与控制算法。

E-mail:1000002146@ujst.edu.cn

刘美如,硕士研究生,主要研究方向为车辆控制算法。

E-mail:1790005360@qq.com