

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205947

无人靶车在不同车速下的路径规划方法*

谢高杨 房立清 苏续军 李亚男

(陆军工程大学石家庄校区火炮工程系 石家庄 050003)

摘要:无人靶车是各类精确制导武器在实验和测试阶段的打击目标,为测试制导武器对不同速度车辆的打击能力,无人靶车应具有在不同车速下完成路径选择和路径规划的能力。针对这一问题,提出一种可以适用于不同车速条件的无人靶车路径规划算法。该算法在传统A*搜索算法的基础上进行了改进,将航向角约束与圆弧搜索方法相结合,同时将车辆的速度特性与搜索步长建立对应关系,得到一种更符合车辆行驶规律的A*搜索算法。为验证该算法优化的有效性,使用MATLAB进行仿真验证,结果表明,本文改进的A*算法,能够解决不同速度(30、45、60 km/h)要求下的路径规划问题,并在某地区遥感地图上进行了验证,最后证明能够为无人靶车不同车速下的路径规划问题提供一种新的解决方案。

关键词:无人靶车;路径规划;A*算法;扇形搜索;速度差异

中图分类号: U48 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Path planning method of unmanned target vehicle under different speed conditions

Xie Gaoyang Fang Liqing Su Xujun Li Yanan

(Department of Artillery Engineering, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The unmanned target vehicle is the target of all kinds of guided weapons in the experiment and test stage. In order to test the hitting accuracy of guided weapons under the conditions of different driving speeds, the unmanned target vehicle should be able to complete path selection and path planning under the conditions of different speeds. In order to solve this problem, this paper proposes a path planning algorithm for unmanned target vehicle which can be applied to different speed conditions. This algorithm is improved on the basis of the traditional A* search algorithm. Combining the heading angle constraint and arc search method, and establishing the corresponding relationship between vehicle speed characteristics and search step length. This improved A* algorithm is more in line with the characteristics of vehicle driving. In order to verify the effectiveness of the algorithm optimization, MATLAB was used for simulation verification. The results showed that: The improved A* algorithm in this paper meets the steering limit of unmanned target vehicle, it can solve the problem of path planning at different speeds (30, 45, 60 km/h). The experiment on remote sensing map proves that it can provide a new solution for the path planning problem of unmanned military target vehicle at different speed.

Keywords: unmanned target vehicle; path planning algorithm; A* algorithm; sector search; different driving speeds

0 引言

各类精确制导武器在现代低强度战争和反恐行动中,通常需要执行类似于“斩首”行动的精确打击任务。主要攻击目标为敌方重要的车载武器装备和重要人物乘坐的机动车辆。在制导武器的试验、验证和训练过程中,

需要使用更加符合真实汽车运动规律的靶车来作为靶靶^[1-2]。因此,无人驾驶军用靶车技术的应用能够为实战化训练提供重要保障。为满足实战化的需求,面向无人驾驶靶车的研究对武器测试工作具有非常重要的实战意义和应用价值^[3]。

在无人靶车执行任务的过程中,路径规划是非常重要的一个环节。与传统车辆路径规划的要求不同,为了

检验精确制导武器打击移动目标的能力,无人靶车必须能够在不同速度下完成起点到终点的路径规划任务。从而能够检验武器在打击不同移速车辆时的精确制导能力。在此任务要求下,无人驾驶军用靶车的路径规划不单是两点之间的可通行路径,而是结合轨迹的曲率、靶车的移动速度、装备的能效、各类环境威胁等诸多条件,综合分析后得到的行进路线。现阶段针对无人驾驶车辆的路径规划方法主要有 Dijkstra 算法^[4]、A* 算法^[5]、蚁群算法^[6]、粒子群算法^[7]等。其中 A* 算法的搜索节点数量少,鲁棒性好,算法逻辑简单容易实现,具有很强的实用性并且具有很好的拓展性,广泛应用于无人驾驶车辆的全局路径规划。

为满足不同的应用场景,很多研究人员对 A* 算法进行改进升级,其中包括使用跳点搜索的方法^[8-10]减少了路径节点数量,和路径的转向次数。另外还有,采用灵活搜索角度的方法^[11-13],减少了搜索的距离。目前对于无人靶车这一应用场景涉猎较少,现阶段的算法优化还不能满足无人靶车的路径规划要求。

综上所述,针对无人靶车特殊任务的应用需求,本文对传统的 A* 算法进行优化和改进。首先,采用像素点栅格构图法使地图中的障碍物的表述更加精准。另外采用不同车速下的多方向圆弧搜索方法,使车速与搜索步长和搜索角度相对应,满足了无人靶车的速度特性和转弯特性。最后使用改进后的 A* 算法,完成了在不同速度条件下,无人靶车的路径规划仿真。并结合实际应用,在某地区的地图上进行了验证。

1 靶车的运动学模型分析

本文中的无人靶车是在原有轮式军用卡车上加装能够模仿人类驾驶行为的智能驾驶结构。该智能驾驶结构由战场环境感知、行驶路径规划、驾驶行为决策等系统组成。本文所用无人靶车的车辆主体结构由某型军用轮式卡车改装得到。该型军用卡车车速较低,为方便计算,默认车轮后轮与地面之间始终保持纯滚动约束。以经典的二自由度模型为基础,左右前轮转向角相同,以后轴中心为参考点建立车辆的运动学模型^[14-15]如图 1 所示。

根据车辆前后轴的位置关系可得:

$$\begin{cases} x_f = x_r + L \cos(\phi) \\ y_f = y_r + L \sin(\phi) \end{cases} \quad (1)$$

式中: (x_f, y_f) 为前轴中点的坐标, (x_r, y_r) 为后轴中点的坐标, ϕ 为车辆的航向角, L 为车辆的轴距。 v_f, v_r 分别为前轴中点和后轴中点的速度,其中 $\Delta x_r, \Delta y_r$ 与 v_r 满足关系式:

$$\begin{cases} \Delta x_r = v_r \cos(\phi) \\ \Delta y_r = v_r \sin(\phi) \end{cases} \quad (2)$$

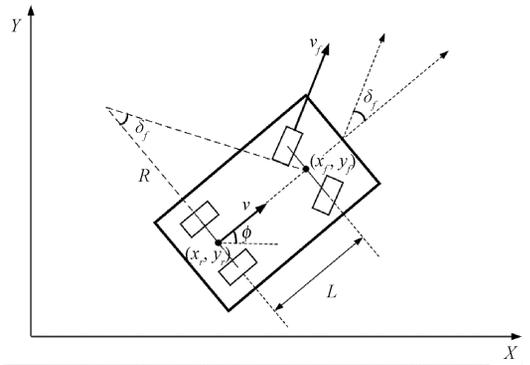


图 1 车辆二自由度模型

Fig. 1 Two degrees of freedom model of vehicle

在车辆不发生侧向滑移的情况下,根据阿克曼数学几何关系,车辆的前轴、后轴的运动约束分别为:

$$\begin{cases} \Delta x_f \sin(\phi + \delta_f) - \Delta y_f \cos(\phi + \delta_f) = 0 \\ \Delta x_r \sin(\phi) - \Delta y_r \cos(\phi) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: δ_f 为车辆前轮的转弯角度。对式(3)进行求导可得:

$$\begin{cases} \Delta x_f' = \Delta x_r' - L\phi' \sin(\phi) \\ \Delta y_f' = \Delta y_r' - L\phi' \cos(\phi) \end{cases} \quad (4)$$

将式(1)、(4)代入式(2),可以解得车辆的航向角速度 ω 为:

$$\omega = \phi' = \frac{v_r}{L} \tan \delta_f \quad (5)$$

在二自由度模型中,车辆进行转向时,一般认为车辆轨迹的曲率半径和车辆开始转向的瞬时转向半径一致,车辆的转弯半径和航向角的数学关系式为:

$$\begin{cases} R = \frac{v_r}{\omega} \\ \delta_f = \arctan \frac{L}{R} \end{cases} \quad (6)$$

其中, R 为车辆的转弯半径。最后根据式(1)、(6)可以得到车辆运动学模型为:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \\ \phi' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \\ \frac{\tan \delta_f}{L} \end{bmatrix} v_r \quad (7)$$

根据该军用车辆的技术指标,车辆在行驶过程中,侧向加速度不能过大,一般不超过 $0.6g$,所以车辆前轮转角应满足:

$$\delta_f \leq 0.6g \cdot \frac{L}{v_r^2} \quad (8)$$

本文中的无人靶车为某型军用卡车改装得到,根据车身长度、前后轴距长度以及车辆的方向控制器最大转向角,结合上述车辆的运动学约束分析,可以得到车辆在

不同车速下的航向角。具体参数如表 1 所示。

表 1 不同车速下的航向角

Table 1 Front wheel Angle at different speeds

车辆速度/(km·h ⁻¹)	航向角度/(°)
15	45
30	42.3
45	19.3
60	10.8

2 A* 算法优化

2.1 A* 算法的原理

A* 算法是一种经典的启发式搜索算法^[16], 以 Dijkstra 算法为基础, 并结合启发式算法的启发规则。因此, 在能够保证所得路径为最短路径的同时还能有很快的计算速度。A* 算法的核心计算表达式为:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (9)$$

式中: $g(n)$ 为起点运动到当前所在点的代价值, 表示已走过路径的代价之和。 $h(n)$ 为当前点到终点的代价预估值, $f(n)$ 为起点到目标点的总代价值。从起点的栅格开始搜索, 依次计算与它相邻栅格的 $g(n)$ 、 $h(n)$ 和 $f(n)$, 然后选取 $f(n)$ 值最小的栅格作为新的搜索起点继续向四周扩展, 直到找到终点栅格, 并保存路径。如图 2 所示。其中 $h(n)$ 是 A* 算法的核心, 也称为启发函数, 能够引导路径不断接近目标点。

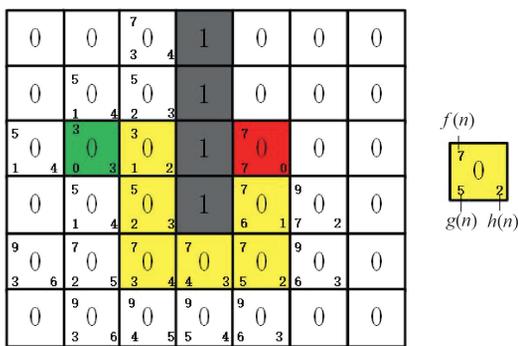


图 2 传统 A* 算法原理

Fig. 2 Schematic of the traditional A* algorithm

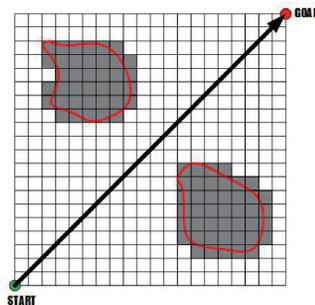
2.2 多方向搜索设计

1) 像素点栅格构图法

传统 A* 算法在栅格地图中运行, 栅格地图就是用一个个栅格组成的网格来代表地图, 每一个栅格可以代表该位置所属区域的实际通行条件。栅格地图的本质是对真实环境的离散化, 实际环境被划分为栅格后, 可能出现 3 种栅格状态: 栅格内不存在障碍物、栅格内部分为障碍物、栅格内完全为障碍物。一般情况下栅格内部分为障

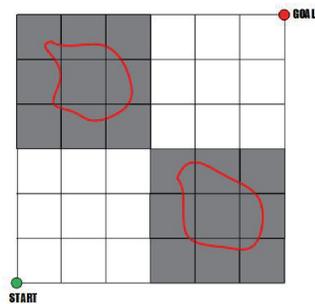
碍物和栅格内完全为障碍物两种情况都会认定为障碍物栅格。当栅格内部分为障碍物时, 整个栅格被定义为障碍物区域会使障碍物的范围扩大, 进而影响路径规划。

因此, 栅格的尺寸是地图栅格化最重要的指标, 栅格的尺寸越小, 栅格越精细, 对地图的描述也越准确, 同一障碍物区域使用不同大小的栅格来表示, 会有不同的通过性, 如图 3 所示。



(a) 小尺寸栅格地图

(a) A map represented by a small size raster



(b) 大尺寸栅格地图

(b) A map represented by a large size raster

图 3 不同栅格尺寸下的地图

Fig. 3 A map represented by different size raster

为了尽可能地减小栅格尺寸^[17], 本文使用一种像素点栅格构图法。首先利用特定地图像分割算法将遥感地图分割为可通行区域和不可通行区域。然后将可通行区域设置为白色, 将障碍物区域设置为黑色。以图像的像素点作为栅格单元对遥感地图进行离散化, 得到地黑白二值图像作为路径规划使用地栅格地图。这种利用二值图像像素点作为栅格的构图方式, 构图精度主要受遥感地图的图像分辨率影响。在确定地图像素与真实地图的比例以后, 便可以确定每个像素点代表的长度。构图效果如图 4 所示。

2) 多方向圆弧型搜索方法

传统 A* 算法中, 搜索方向固定, 一般为 4 方向或者 8 方向, 对应的转向角度为 90° 或者 45°, 如图 5 所示, 这不符合车辆行进过程中实际的转向条件。另外, 8 方向搜索方法中斜向与坐标轴方向相比, 搜索步长不相等。

为此本文进行改进, 结合车辆自身的转向特性, 并保



(a) 遥感地图图像
(a) Remote sensing maps



(b) 二值栅格地图
(b) Binarized map image

图 4 遥感地图与二值栅格地图

Fig. 4 Remote sensing maps and binary raster maps

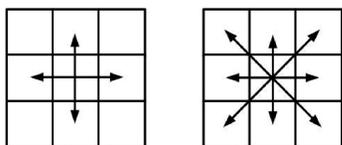


图 5 传统 4 向和 8 向搜索方法

Fig. 5 Direction search method and 8 direction search method

证每个方向的步长保持一致,设计了多方向圆形搜索方法。以父节点为圆心,以搜索步长 r 为半径,以车辆航向角 θ 为扇形角度,搜索圆弧上的像素点^[18],如图 6 所示。

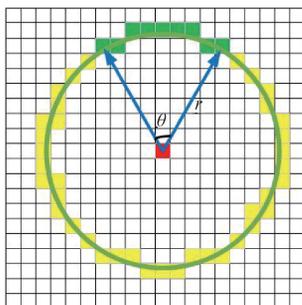


图 6 圆弧形搜索方法

Fig. 6 Circular arc search method

小与车辆尺寸、路径尺寸存在数量级上的差距,因此,搜索路径时,步长终点即使没有落在像素点的中心,选取最近的像素点作为搜索步长的终点,单个像素内的位置差异对路径规划的精度的影响可以忽略不计。另外,随着车辆速度的增加,搜索的步长也会增加,搜索圆形内全部的像素点会是计算量过大,综合搜索精度和计算量的多方面因素,最终确定圆形搜索的节点数为 120 个,两个搜索点间相隔 3° 。

3) 不同车速下的搜索方法

由第 1 部分分析可知,不同车速下车辆的航向角不同。车辆转向动作的时间间隔由改装的无人驾驶结构决定。本文所使用的智能驾驶结构,其转向部分结构中伺服电机的动作频率与人类驾驶习惯相似,转向动作频率为 2 Hz。两次转向动作的时间间隔乘以当前车辆的行驶速度,可以计算出两次转向动作的时间间隔内车辆行驶的距离。该距离为路径规划时的搜索步长 r 。

$$r = v \cdot \Delta t \tag{10}$$

将转弯角度规律与车速条件结合,可以得到无人靶车在不同速度条件下的可行区域。将可行域表示为半径 r 、角度 θ 的圆弧区域,不同车速下圆弧的尺寸也不同,低速时搜索圆弧的半径小航向角大,高速时搜索圆弧的半径大航向角小,如图 7 所示。

搜索的过程中对扇形区域内的点进行判断,如果存在障碍物,则扇形区域的边界改为以起点和障碍物边界的连线为新的扇形边界,如图 7(a) 所示。当搜索的过程中扇形区域内的点包含终点,且该像素点与终点的连线上没有障碍物,此时算法结束,如图 7(b) 所示。

无人靶车在不同车速下的搜索步长和航向角度如表 2 所示。

表 2 不同车速下的搜索步长和搜索角度

Table 2 Search step length and heading angle at different vehicle speeds

速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	步长 r/m	角度 $\theta/(\circ)$
30	4.17	42.3~42.3
45	6.26	-19.3~19.3
60	8.34	-10.8~10.8

传统 A* 算法中启发函数 $h(n)$ 一般有两种计算方式分别为曼哈顿距离和欧几里得距离。其中,曼哈顿距离为两点间横向距离与纵向距离之和,适用于栅格尺寸较大,搜索方向为四向的 A* 算法。欧几里得距离为两点间的直线距离^[19]。由于本文算法是以像素点为栅格点,栅格单元尺寸较小,并且搜索方向也更灵活,所以采用欧几里得距离作为启发函数 $h(n)$,计算当前像素点到终点的直线距离。

地图的精度由遥感图像的像素分辨率决定,像素大

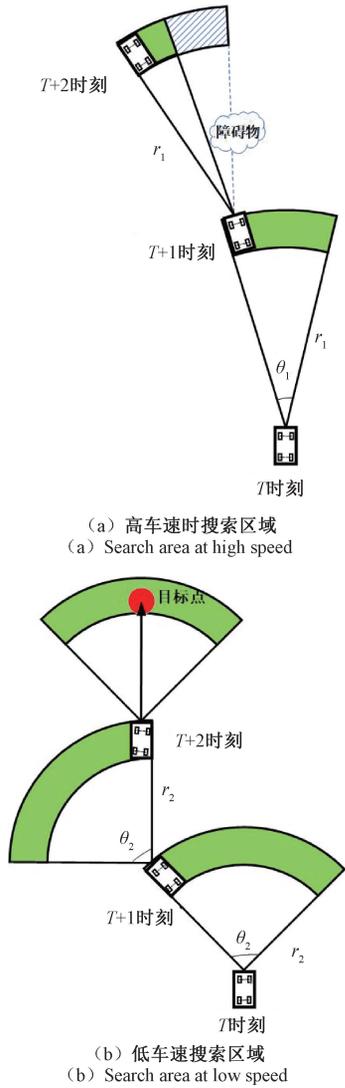


图7 不同车速下的搜索区域
Fig. 7 Search area at different speed

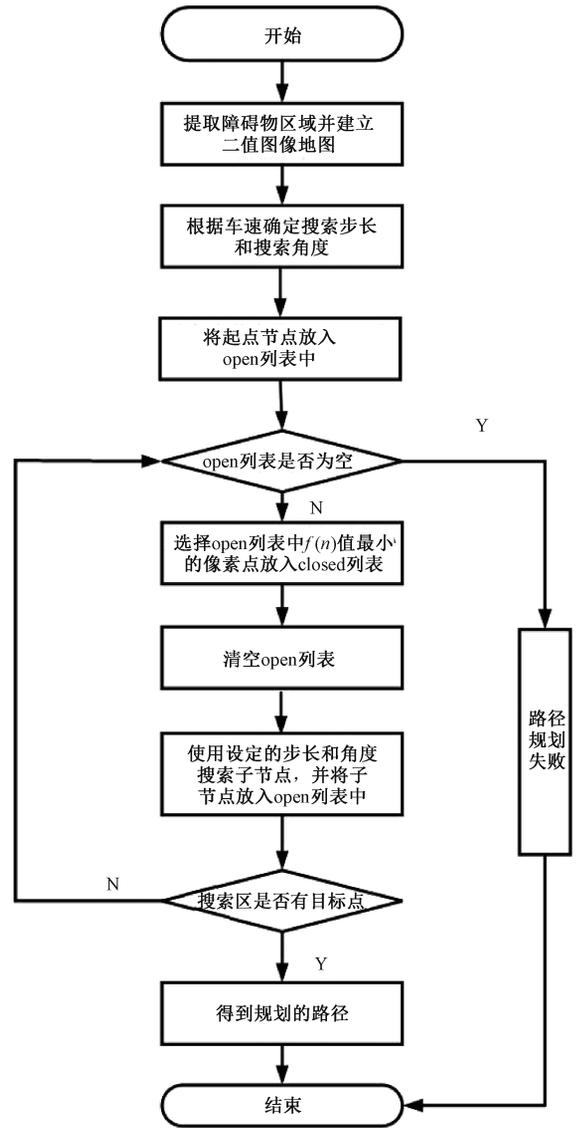


图8 改进A*算法流程
Fig. 8 Flow chart of improved A* algorithm

$$h(n) = \sqrt{(n.x - goal.x)^2 + (n.y - goal.y)^2} \quad (11)$$

2.3 算法流程

结合多方向圆弧形搜索方法和不同车速的搜索方法,改进的A*算法实现流程如图8所示。

具体步骤如下:

步骤1) 基于遥感地图图像,分割提取出可通行区域和障碍物区域,将分割的地图用二值图像表示,得到一张详细描述路径环境的搜索地图。并确定地图中每个像素点代表的长度。

步骤2) 根据车辆期望速度来确定搜索步长和搜索角度。

步骤3) 确定起点位置和终点位置,初始化closed列表,将起点节点放入open列表中。

步骤4) 判断open列表是否为空,如果open列表不

为空,则执行步骤5),若open列表为空,则路径搜索结束。

步骤5) 寻找open列表中f值最小的节点,记作f-min,将这一节点放入closed列表,然后将open列表清空。

步骤6) 使用本文中如图7所示的多方向搜索算法搜索周围节点,将这些节点存入open列表中,并计算这些节点的f值。

步骤7) 判断当前搜索的节点中是否包含目的地节点。如果包含终点节点则执行步骤8),若不包含终点节点则返回步骤4)操作。

步骤8) 将closed列表中的点链接起来,得到并保存规划的路径。

3 仿真分析

对改进的 A* 算法进行仿真验证。设置障碍地图,如图 10 所示,地图的像素尺寸为 512×512,对应的实际地图尺寸为 71.25 m×71.25 m,每一个像素代表的地图长度为 0.139 m。白色区域表示可通行区域,黑色区域表示障碍物区域,使用 MATLAB2021a 进行仿真分析。

首先选择合适尺寸的栅格表示,并使用传统四向搜索 A* 算法进行路径规划,得到结果如图 9 所示。

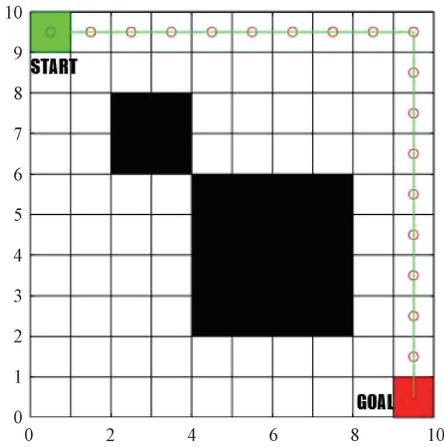


图 9 传统 A* 算法结果

Fig. 9 Path planning results of traditional A* algorithm

设置期望车速分别为 30、45、60 km/h,通过本文算法可得到路径规划。如图 10 所示。

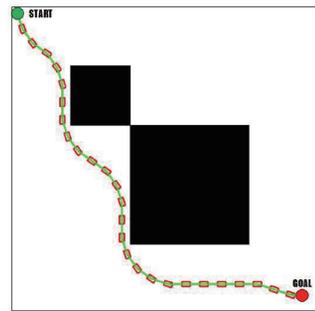
由仿真结果可以看出,传统 A* 算法虽然可以完成路径规划,但是不符合无人靶车的实际行驶条件。使用本文中的改进 A* 算法,可以得到车速在 30、45 和 60 km/h 时,对应的行驶路径。可以看出,随着车速的增大,搜索步长按照相应的比例增大,路径中的转弯角度则会随着速度的增大而减小。最终可以解决无人靶车在不同期望速度下的行进路线规划问题。

为了更加准确地表达不同车速下路径规划的差异,对规划结果的路径长度和最大转弯角度做了如下对比,如表 3 所示。

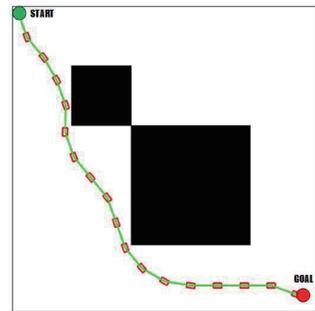
表 3 不同算法参数对比

Table 3 Material parameters of rotating band

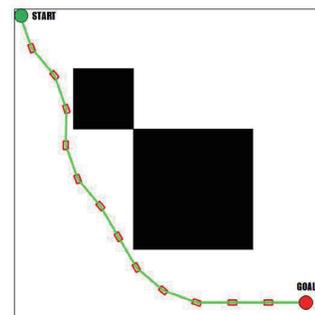
算法	路径长度/m	最大角度/(°)
传统 A* 算法	180	90
30 km/h 改进算法	111.58	36
45 km/h 改进算法	109.49	30
60 km/h 改进算法	112.66	18



(a) 车速 30 km/h 路径规划结果
(a) Path planning results at a speed of 30 km/h



(b) 车速 45 km/h 路径规划结果
(b) Path planning results at a speed of 45 km/h



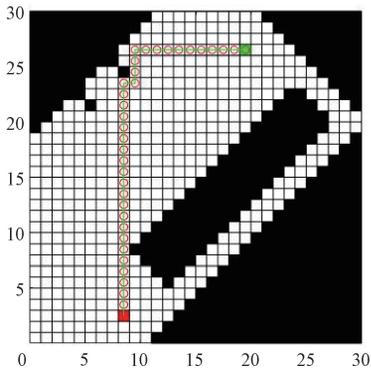
(c) 车速 60 km/h 路径规划结果
(c) Path planning results at a speed of 60 km/h

图 10 不同车速下的路径规划结果

Fig. 10 Path planning results at different speed

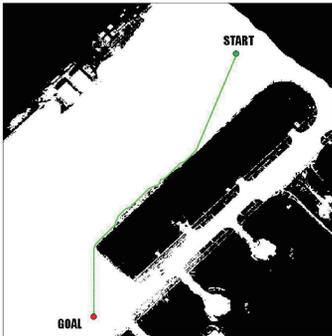
4 实验验证

为验证本文算法的应用性,选取某地区的卫星地图,划分出可通行区域和障碍物区域,并生成路径规划地图。如图所示,选取的地图尺寸为 640 m×640 m,对应的像素尺寸为 512×512。在地图中标记起点和终点的位置。利用本文的算法进行实验验证,分别得到速度为 30、45、60 km/h 时的行驶路径。同时将地图进行 30×30 的栅格化,并在栅格地图上进行传统四向 A* 算法的仿真。如图 11 所示。所得结果参数对比如表 4 所示。



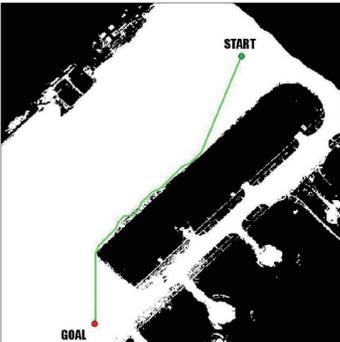
(a) 传统A*算法路径规划结果

(a) Path planning results of traditional A* algorithm



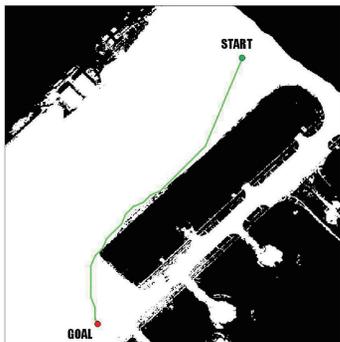
(b) 车速30 km/h路径规划结果

(b) Path planning results at a speed of 30 km/h



(c) 车速45 km/h路径规划结果

(c) Path planning results at a speed of 45 km/h



(d) 车速60 km/h路径规划结果

(d) Path planning results at a speed of 60 km/h

图 11 不同算法路径规划结果

Fig. 11 Path planning results at different method

表 4 不同算法参数对比

Table 4 Material parameters of rotating band

算法	路径长度/m	最大角度/(°)
传统 A* 算法	775	90
30 km/h 改进算法	611.8	36
45 km/h 改进算法	613.3	30
60 km/h 改进算法	616.2	18

本文的配置环境为: Intel Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20 GHz, 16 G 内存。在该环境下, 本次实验算法的平均的运行时间为 1 639 ms, 经后期算法的改进和集成, 可以应用于军用无人靶车的实时路径搜索工作。

5 结 论

为解决军用无人靶车在不同行驶速度下的路径规划问题, 本文在传统 A* 算法的基础上设计了一种改进的路径规划算法。首先, 利用无人靶车的二值模型分析了不同速度下的转向角度限制。另外, 在二值障碍地图上, 设计了一种圆弧型多方向搜索方法, 将无人靶车的速度与搜索步长相对应, 将转向角度与搜索角度相对应, 使不同速度对应不同的搜索区域, 该方法既能满足车辆的速度要求又能够符合车辆的转向角度限制。最后, 对该算法进行了仿真分析和实验验证。结果表明, 本文改进的算法能够根据无人靶车的行驶速度来进行相应的路径规划, 在低速(30 km/h)、中速(45 km/h)和高速(60 km/h)条件下, 均能够规划出符合车速要求的行驶路线。由于本文算法在局部多个复杂障碍的环境中求解效率不高, 容易出现局部无解的现象。所以, 在后续工作中, 还要对局部障碍物判定算法进行进一步优化, 以便于提高路径规划的效率和准确性。

参考文献

[1] 魏武臣, 徐硕, 何晓夫, 等. 基于作战仿真推演的空地制导弹药效能评估[J]. 兵工学报, 2022, 43(S1): 107-114.
WEI W CH, XU SH, HE X F, et al. Effectiveness evaluation of air-ground guided ammunition based on combat simulation [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(S1): 107-114.

[2] 孙韬, 张国伟, 王一鸣, 等. 单兵火箭弹炸高优化的数值模拟与试验研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(4): 681-687.
SUN T, ZHANG G W, WANG Y M, et al. Numerical simulation and experimental study on optimization of individual rocket burst height [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(4): 681-687.

[3] 李强, 夏群利, 崔莹莹, 温求道. 空地制导炸弹可攻击

- 区的快速解算方法[J]. 兵工学报, 2012, 33(4): 390-394.
- LI Q, XIA Q L, CUI Y Y, et al. A fast-solving method of allowable attack area of air-to-surface guided bombs [J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(4): 390-394.
- [4] 郑弈, 谢亚琴. 基于 Dijkstra 算法改进的飞行器航迹快速规划算法 [J]. 电子测量技术, 2022, 45(12): 73-79.
- ZHENG Y, XIE Y Q. Improved fast aircraft path planning algorithm based on Dijkstra algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(12): 73-79.
- [5] 迟旭, 李花, 费继友. 基于改进 A* 算法与动态窗口法融合的机器人随机避障方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 132-140.
- CHI X, LI H, FEI J Y. Research on robot random obstacle avoidance method based on fusion of improved A* algorithm and dynamic window method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3): 132-140.
- [6] 徐玉琼. 改进自适应蚁群算法的移动机器人路径规划 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 89-95.
- XU Y Q. Path planning of mobile robot based on improved adaptive ant colony algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 89-95.
- [7] 李志崑. 改进变步长蚁群算法的移动机器人路径规划 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 15-21.
- LI ZH K. Path planning of mobile robot based on improved variable [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 15-21.
- [8] 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.
- JIANG Y Y, ZHANG Y Y. Improved path planning of A* algorithm of domain node search strategy 8 [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 35(5): 234-241.
- [9] 赵晓, 王铮, 黄程侃. 基于改进 A* 算法的移动机器人路径规划 [J]. 机器人, 2018, 40(6): 903-910.
- ZHAO X, WANG ZH, HUANG CH K. Mobile robot path planning based on an improved A* algorithm [J]. Robot, 2018, 40(6): 903-910.
- [10] 刘子豪, 赵津, 刘畅. 基于改进 A* 算法室内移动机器人路径规划 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(2): 186-190.
- LIU Z H, ZHAO J, LIU CH. Path planning of indoor mobile robot based on improved A* algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2021 57(2): 186-190.
- [11] 张丹红, 陈文文, 张华军. A* 算法与蚁群算法相结合的无人艇巡逻路径规划 [J]. 华中科技大学学报, 2020, 48(6): 13-18.
- ZHANG D H, CHEN W W, ZHANG H J. Patrol path planning of unmanned surface-vehicle based on A* algorithm and ant colony algorithm [J]. Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(6): 13-18.
- [12] 辛煜, 梁华为, 杜明博. 一种可搜索无限个邻域的改进 A* 算法 [J]. 机器人, 2014, 36(5): 627-633.
- XIN Y, LIANG H W, DU M B. An improved A* algorithm for searching infinite neighborhoods [J]. Robot, 2014, 36(5): 627-633.
- [13] 赵丽华, 万晓东. 基于改进 A* 算法的多无人机协同路径规划 [J]. 电子测量技术, 2020, 43(7): 72-75.
- ZHAO L H, WAN X D. Multi-UAV collaborative path planning based on improved A* algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(7): 72-75.
- [14] LI H L, LUO Y T. Integrated coordination control for distributed drive electric vehicle trajectory tracking [J]. International Journal of Automotive Technology, 2015, 12(124): 2169-3536.
- [15] 卢梦. 面向无人驾驶的车辆局部路径规划研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
- LU M. Research on local path planning of driverless vehicle [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2021.
- [16] 张鹏. 基于改进 A* 算法的全局动态路径规划研究 [D]. 太原: 中北大学, 2021.
- ZHANG P. Research on global dynamic path planning based on improved A* algorithm [J]. Taiyuan: North University of China, 2021.
- [17] 牛国臣, 冯宁, 王瑜. 基于图优化的室外无人车多图层地图构建 [J]. 汽车工程, 2022, 44(2): 199-207.
- NIU G CH, FENG N, WANG Y. Multi-layer map construction for outdoor unmanned vehicles based on graph optimization [J]. Acta Armamentarii, 2022, 44(2): 199-207.
- [18] XIE L, XUE S F, ZHANG M Y, et al. A path planning approach based on multi-direction A* algorithm for ships navigating within wind farm waters [J]. Ocean Engineering, 2019, 184: 311-322.
- [19] 薛双飞. 基于改进 A* 算法的近海船舶路径规划 [D].

武汉:武汉理工大学, 2018.

XUE SH F. Route planning of offshore ships based on improved A* algorithm[J]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2018.

作者简介



谢高杨, 2015 年于武汉理工大学获得学士学位, 2018 年于南昌工程学院获得硕士学位, 现为陆军工程大学博士生, 主要研究方向为军用车辆的路径规划。

E-mail: 632980562@qq.com

Xie Gaoyang received his B. Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2015, M. Sc. degree from Nanchang Institute of Technology in 2018 respectively. Now he is a Ph. D. candidate in Army Engineering University of PLA. His main research interests include military vehicles and path planning.



房立清 (通信作者), 2005 年于北京理工大学获得博士学位, 现为陆军工程大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为装备故障诊断。

E-mail: fanglqhuopao@163.com

Fang Liqing (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2005. Now he is a professor with Army Engineering University.

His main research interest includes equipment fault diagnosis.



苏续军, 2000 年于合肥炮兵学院获得学士学位, 2003 年于合肥炮兵学院获得硕士学位, 现为陆军工程大学讲师, 主要研究方向为军用无人车。

E-mail: suxujun2022@163.com

Su Xujun received his B. Sc. degree from PLA Army Academy of Artillery and Air Defense in 2000, M. Sc. degree from PLA Army Academy of Artillery and Air Defense in 2003 respectively. Now he is a lecturer with Army Engineering University. His main research interest includes unmanned military vehicle.



李亚男, 2016 年于河北科技大学理工学院获得学士学位, 2019 年于河北科技大学获得硕士学位, 现为陆军工程大学博士生, 主要研究方向为兵器性能检测与故障诊断技术。

E-mail: yn_li112@126.com

Li Yanan received her B. Sc. degree from Polytechnic College of Hebei University of Science and Technology in 2016, M. Sc. degree from Hebei University of Science and Technology in 2019. Now she is a Ph. D. candidate in Army Engineering University of PLA. Her main research interests include weapon performance test and fault diagnosis technology