文章编号:1674-2974(2024)08-0176-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024188

融合模式决策的4WIS车辆路径规划方法

秦洪懋[1,2],金英杰[1],杨泽宇[1,2†],胡满江[1,2],崔庆佳[1,2],徐彪[1,2]
(1. 湖南大学 机械与运载工程学院,湖南 长沙 410082;
2. 湖南大学 无锡智能控制研究院,江苏 无锡 214115)

摘 要:针对四轮独立转向(four-wheel independent steering,4WIS)车辆的路径规划问题,提出了一种融合模式决策的图搜索算法.首先,对4WIS车辆三种运动模式进行建模,并分析其运动模式的运动特性,据此设计多模式节点拓展策略,实现了4WIS车辆多运动模式与路径规划的融合.然后,针对最优节点选取和运动模式决策问题,设计了多目标代价函数,引导4WIS车辆合理切换运动模式,并生成平滑路径.最后,在MATLAB软件上进行仿真实验,在多种场景中测试所提出算法,验证其可行性与有效性.结果表明:提出的算法在路径规划中考虑了三种运动模式的优化组合与模式切换问题,能实现最优运动模式序列和最短路径规划.且该算法求解效率高,所规划路径优异,能充分发挥4WIS车辆的高灵活性与高通过性,有效解决其路径规划问题.

关键词:汽车工程;路径规划;图搜索算法;四轮独立转向;运动模式
中图分类号:U469.79 **文献标志码**:A

Path Planning Method Integrated with Mode Decision for 4WIS Vehicles

QIN Hongmao[1,2],JIN Yingjie[1],YANG Zeyu[1,2†],HU Manjiang[1,2],CUI Qingjia[1,2],XU Biao[1,2]
(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Wuxi Intelligent Control Research Institute, Hunan University, Wuxi 214115, China)

Abstract: Aiming at the path planning problem of four-wheel independent steering (4WIS) vehicles, a graph search algorithm integrated with mode decision is proposed. Firstly, three motion modes of 4WIS vehicle are modeled, and the motion characteristics of each motion mode are analyzed. Based on this, a multi-mode node expansion strategy is designed to realize the integration of 4WIS vehicle multiple motion modes and path planning. Then, a multi-objective cost function is designed to guide 4WIS vehicles to switch motion modes reasonably and generate a smooth path for optimal node selection and motion mode decision-making. Finally, the simulation experiment is carried out on MATLAB software, and the proposed algorithm is tested in various scenarios to verify the feasibility and effectiveness. The results show that the proposed algorithm considers the optimization combination and mode switching of three motion modes in path planning, and can achieve the optimal motion mode sequence and the shortest path planning. This algorithm has high solving efficiency and excellent planned path, and can fully

* **收稿日期**:2023-05-24
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52222216,52202493), National Natural Science Foundation of China(52222216,52202493);湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ40095),Natural Science Foundation of Hunan Province(2021JJ40095)
作者简介:秦洪懋(1984—),男,江苏盐城人,湖南大学研究员,博士
† 通信联系人,E-mail: yangzeyu@wicri.org

utilize the high flexibility and trafficability of 4WIS vehicles, effectively solving their path planning problem.

Key words: vehicle engineering; path planning; graph search algorithm; four-wheel independent steering; motion modes

随着电子技术和控制技术的发展,车辆4WIS系统作为一种有效的车辆机动技术,可以提高车辆在低速时的机动性及高速时的稳定性[1].与传统前轮转向车辆相比,4WIS车辆四个车轮均可独立控制,具有传统车辆无法实现的斜向移动和原地旋转等特殊运动模式[2],其智能驾驶技术得到了人们的积极研究[3-4].目前智能驾驶车辆相关研究主要集中在环境感知、行为决策、运动规划和车辆控制等方面[5],而路径规划作为运动规划最重要的部分,是智能驾驶技术的关键模块之一.现有4WIS车辆的相关研究主要集中在运动控制方面,其路径规划技术相关研究较少.由于4WIS车辆具有多种运动模式,在不同工况如何合理组合各运动模式是其路径规划的最大挑战.

目前,常用车辆路径规划方法主要分为四类[6-8]:基于图搜索的方法[9-12]、基于采样的方法[13-17]、基于优化的方法[18-19]、曲线插值方法[20-21].其中,基于图搜索的方法主要包含Dijkstra、A*、混合A*[9]、D*以及相应的变种.通过结合A*算法和前轮转向车辆运动学特性,文献[9]提出了经典的混合A*图搜索算法.在将搜索空间离散化后,混合A*算法使用节点拓展来遍历离散地图空间,找到全局路径.此外,算法还包含了启发式函数和终点曲线拟合方法,提高了算法的求解效率.文献[10]提出一种多级混合A*算法,首先通过混合A*算法搜索出初始路径并识别出路径所通过的狭窄通道,然后再次使用混合A*算法单独搜索通过狭窄通道的路径,最后将路径拼接形成全局路径,该方法在具有狭窄通道的场景效果较好.然而,尽管图搜索类算法具有广泛的适用性和灵活性,但现有的图搜索类算法研究中,几乎没有针对4WIS车辆的路径规划方法研究.基于采样的方法主要包含快速探索随机树法(Rapidly-Exploring Random Tree, RRT)和概率路线图法(Probabilistic Roadmaps, PRM)以及相应的变种.文献[13]提出了一种双向RRT的高效算法,通过将后向树作为启发来引导前向树生长,避免了前后两树连接过程中的两点边值问题.文献[14]提出了一种针对4WIS机器人的混合空间运动学内外单元探索方法(Hybrid-Space Kinodynamic Interior - Exterior Cell Exploration Planning, HS-KIECEP),该方法通过采样来生长一颗搜索树,并在每一轮节点选择后随机选择一种运动模式进行树的生长,直到找到目标节点.基于优化的方法是从数值优化的角度考虑路径规划,将其构造成一个凸优化问题,然后求解得到最优路径.文献[18]针对自动泊车情况,通过构造安全走廊的方法简化了最优控制问题中的避碰约束,提高了求解效率.文献[19]综合考虑了线控4WIS车辆运动学非完整约束,建立了平行泊车路径规划约束最优化问题,并采用改进的粒子群优化算法对其进行求解来获得最优平行泊车路径.曲线插值方法通过直线、圆弧、回旋曲线等不同线型的组合来找到无碰撞路径.文献[20]基于4WIS车辆运动学模型,提出了一种采用七次多项式的避障路径规划算法.文献[21]基于b样条曲线变化灵活、实现简单、曲率连续的优点,采用b样条理论规划4WIS救援车的平滑车辆路径.

上述路径规划方法中,基于优化的方法与曲线插值方法虽然有对4WIS车辆规划方法的研究,但其都只考虑了车辆的单一运动模式,没有将4WIS车辆的多种运动模式同时考虑到路径规划算法中.虽然基于采样的HS-KIECEP方法考虑了4WIS的多种运动模式,但由于其运动模式的随机选择,无法保证模式切换的合理性与路径的最优性.为了发挥出4WIS车辆多种运动模式的高灵活性,需要研究一种更适用于4WIS车辆的路径规划算法.

本文研究了4WIS车辆的路径规划问题,受图搜索类算法的启发,提出了一种融合模式决策的图搜索算法.对应于4WIS车辆的多种运动模式,该算法具有多模式节点拓展策略,在搜索路径时,可以采用多种运动模式来拓展路径节点.且算法充分考虑各运动模式特性与运动模式切换这一影响路径品质的关键因素,设计了一种多目标代价函数,避免车辆频繁切换运动模式.并使用MATLAB进行路径规划仿真实验,与经典混合A*图搜索算法进行了对比,验

证本文提出方法的有效性和优异性.

1 4WIS车辆运动特性分析

本文研究对象为4WIS车辆,它具备多种运动模式,本研究主要集中于四轮阿克曼转向、斜向移动、原地旋转三种最具代表性的运动模式.四轮阿克曼转向模式为4WIS车辆的基本运动模式,斜向移动模式和原地旋转模式为车辆的特殊运动模式.为保证所规划路径的可行性,需保证其满足车辆各运动模式下的运动学约束.构建4WIS车辆三种运动模式的简化车辆模型,如图1~图3所示,由车辆的中心点(x,y)及车辆横摆角φ确定车辆在全局坐标系下的位姿(x,y,φ).

4WIS车辆四轮阿克曼转向运动模式的简化单轨模型如图1所示,假设该模式下车辆前后车轮转向角度大小相同、方向相反.此运动模式下车辆进行带曲率约束的曲线运动,运动时同时改变车辆的全局位置(x,y)和车辆横摆角φ.

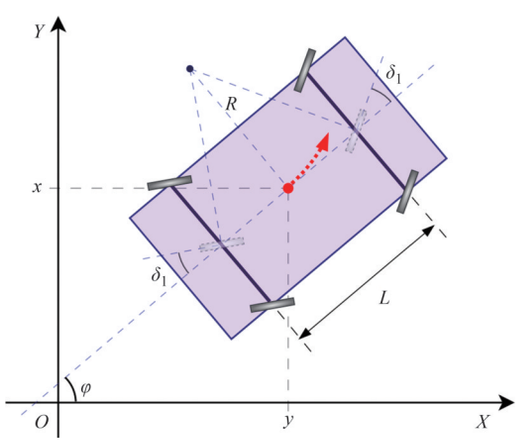


图1 四轮阿克曼转向运动模式

Fig.1 Four-wheel Ackerman steering motion mode

车辆处于四轮阿克曼转向模式时,其转向半径可表示为

$$R=\frac{L}{2\tan\delta_1} \tag{1}$$

式中:L为车辆轴距;δ_1为车辆在四轮阿克曼转向模式下的前轮转角.

车辆运动的行程为l_1时,车辆的偏航角为

$$\Delta\varphi_1=\frac{180l_1}{\pi R} \tag{2}$$

4WIS车辆斜向移动运动模式的车辆模型如图2所示,此运动模式下车辆的四个车轮转角一致,车辆进行斜向平移.当车轮转角为δ_2,且车轮不产生横向偏移时,车辆朝$(\varphi+\delta_2)$方向直线行驶,运动过程中车辆横摆角φ保持不变.

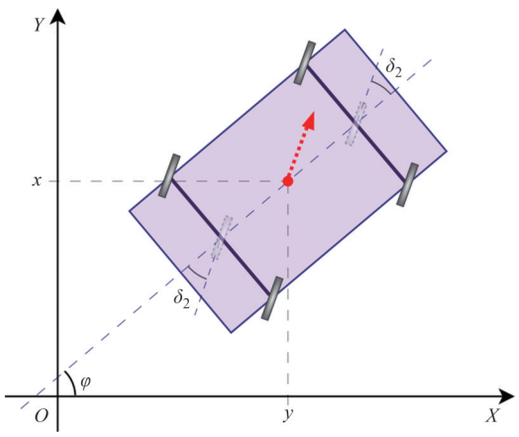


图2 斜向移动运动模式

Fig.2 Oblique movement motion mode

4WIS车辆原地旋转运动模式的车辆模型如图3所示,此时车辆绕中心点进行原地转向.该运动模式下车辆在全局坐标系下的位置(x,y)不变,横摆角φ发生改变.

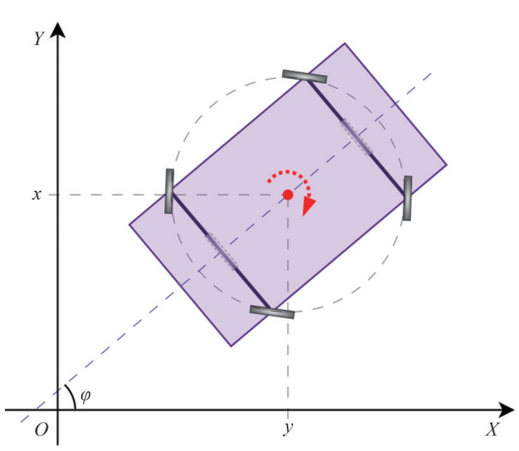


图3 原地旋转运动模式

Fig.3 Spin in place motion mode

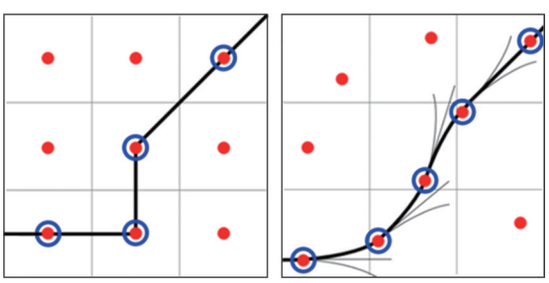
2 融合模式决策的图搜索算法

在经典图搜索算法的基础上,融合模式决策的图搜索算法融入了4WIS车辆三种运动模式的车辆运动学,考虑了运动模式切换决策这一影响路径品质的关键因素.算法在与车辆位姿(x,y,φ)对应的离散三维搜索空间(X,Y,θ)中搜索路径,并从起始节点开始迭代搜索,在每一轮迭代中,选择代价值最小的节点,通过多模式节点拓展策略来拓展多个子节点,并通过尝试搜索当前节点与目标节点之间可行的

Reeds-Shepp曲线[22]来完成路径规划.

2.1　多模式节点拓展策略

图搜索算法通过节点拓展探索离散地图,在搜索到目标节点后通过路径回溯完成路径规划.经典图搜索算法节点拓展方式如图4所示.图4(a)为A*算法的节点拓展方式,其拓展节点为栅格的中点,生成的路径不符合车辆的运动学.图4(b)为混合A*图搜索算法[9]的节点拓展方式,其根据车辆运动学约束来拓展节点,规划出了符合车辆运动学的路径,但其只适用于前轮转向车辆.针对4WIS车辆的三种不同运动模式,需要设计新的节点拓展策略.



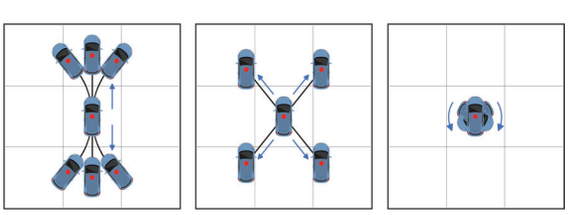
(a)A*算法节点拓展方式　(b)混合A*算法节点拓展方式

图4　经典图搜索算法节点拓展方式

Fig.4　Node expansion method of typical graph search algorithm

本文提出的多模式节点拓展策略包含多种节点拓展方式,如图5所示,图5(a)~(c)分别为四轮阿克曼转向模式、斜向移动模式、原地旋转模式的节点拓展方式示意图.图中每个车辆位姿表示为一个节点构型(x,y,φ).中心点处的前向构型为父节点位姿,其他构型表示子节点位姿.算法在每一次迭代过程中,父节点n_i在离散空间中可拓展出图示的三种类型的子节点n_{i+1},并将拓展子节点时所使用的运动模式信息p_{i+1}、车辆控制方向信息v_{i+1}、车轮转角信息$\delta_{1,i+1}$和$\delta_{2,i+1}$记录到节点信息之中.p_{i+1}=1为四轮阿克曼转向模式,p_{i+1}=2为斜向移动模式,p_{i+1}=3为原地旋转模式,v_{i+1}=1为车辆正向行驶状态,v_{i+1}=−1为车辆倒车状态.父节点位姿为(x_i,y_i,φ_i),生成的各运动模式子节点位姿为$(x_{i+1},y_{i+1},\varphi_{i+1})$.

四轮阿克曼转向模式为车辆基础运动模式,其



(a)四轮阿克曼转向　(b)斜向移动　(c)原地旋转

图5　多模式节点拓展策略

Fig.5　Multi-mode node expansion strategy

节点拓展方式如图5(a)所示,生成满足四轮阿克曼转向模式运动学约束的直行子节点和转弯子节点.对车辆前轮转向范围离散化,其拓展直行子节点时的前轮转角为0,拓展转弯子节点时的前轮转角为

$$\delta_{1,i+1}=\pm\frac{4\delta_{\max}j}{N_1-2},j\in\left[1,\frac{N_1-2}{4}\right] \tag{3}$$

式中,$\delta_{\max}$为非原地旋转模式下的最大前轮转角;N_1为四轮阿克曼转向模式拓展的子节点数量.

当四轮阿克曼转向模式节点拓展步长为l_1时,根据图1的车辆模型及其分析可知,其所生成的各直行子节点位姿为

$$x_{i+1}=x_i+v_{i+1}l_1\cos\varphi_i \tag{4}$$

$$y_{i+1}=y_i+v_{i+1}l_1\sin\varphi_i \tag{5}$$

$$\varphi_{i+1}=\varphi_i \tag{6}$$

生成的各转弯子节点位姿为

$$x_{i+1}=x_i+v_{i+1}R[\cos(\varphi_i+\Delta\varphi_1)-\cos\varphi_i] \tag{7}$$

$$y_{i+1}=y_i-v_{i+1}R[\sin(\varphi_i+\Delta\varphi_1)-\sin\varphi_i] \tag{8}$$

$$\varphi_{i+1}=\varphi_i+\Delta\varphi_1 \tag{9}$$

式中,转向半径R和偏航角$\Delta\varphi_1$通过将前轮转角$\delta_{1,i+1}$和步长l_1代入式(1)~式(2)求得.

斜向移动模式为特殊运动模式,其节点拓展方式如图5(b)所示,当斜向移动模式节点拓展步长为l_2时,根据图2的车辆模型及其分析可知,所生成的斜向移动子节点位姿分别为

$$x_{i+1}=x_i+v_{i+1}l_2\cos(\varphi_i+\delta_{2,i+1}) \tag{10}$$

$$y_{i+1}=y_i+v_{i+1}l_2\sin(\varphi_i+\delta_{2,i+1}) \tag{11}$$

$$\varphi_{i+1}=\varphi_i \tag{12}$$

式中,$\delta_{2,i+1}$为斜向移动模式的车轮转角,其大小为

$$\delta_{2,i+1}=\pm\frac{4\delta_{\max}}{N_2-2}\left(j-\frac{1}{2}\right),j\in\left[1,\frac{N_2}{4}\right] \tag{13}$$

式中,N_2为斜向移动模式拓展的子节点数量.

原地旋转运动模式为特殊运动模式,其节点拓展方式如图5(c)所示,在同一位置生成横摆角不同的子节点.当每次原地旋转的角度变换为$\Delta\varphi_2$时,根据图3中原地旋转运动模式的车辆模型及其分析可知,所生成的子节点位姿分别为

$$x_{i+1}=x_i \tag{14}$$

$$y_{i+1}=y_i \tag{15}$$

$$\varphi_{i+1}=\varphi_i+j\Delta\varphi_2,j\in[1,N_3] \tag{16}$$

式中,N_3为原地旋转运动模式拓展的子节点数量,且满足$\Delta\varphi_2=\dfrac{2\pi}{N_3+1}$.

2.2　多目标代价函数

代价函数对图搜索类算法规划性能影响较大,

为了实现规划过程中车辆运动模式的最优决策,本文提出一种多目标代价函数.算法在每次进行子节点拓展时同步计算各子节点的代价函数,当父节点为n_i时,子节点n_{i+1}的多目标代价函数为

$$F(n_{i+1})=\begin{cases}G(n_{i+1})+H(n_{i+1}), p_{i+1}=p_i;\\ G(n_{i+1})+P(n_{i+1})+H(n_{i+1}), p_{i+1}\neq p_i\end{cases} \tag{17}$$

式中:p_i和p_{i+1}分别为拓展节点n_i和n_{i+1}时使用的运动模式,$G(n_{i+1})$为多模式路径代价函数,$P(n_{i+1})$为模式切换代价函数,$H(n_{i+1})$为启发式代价函数.

2.2.1 多模式路径代价函数

针对三种节点拓展方式所生成的各模式子节点n_{i+1},分别设计不同的路径代价函数,即

$$G(n_{i+1})\begin{cases}G_1(n_{i+1}), & p_{i+1}=1\\ G_2(n_{i+1}), & p_{i+1}=2\\ G_3(n_{i+1}), & p_{i+1}=3\end{cases} \tag{18}$$

式中:$G_1(n_{i+1})$、$G_2(n_{i+1})$和$G_3(n_{i+1})$分别为四轮阿克曼转向模式、斜向移动模式和原地旋转模式拓展子节点对应的路径代价函数.

当拓展四轮阿克曼转向模式的子节点时,产生的路径代价函数$G_1(n_{i+1})$为

$$G_1(n_{i+1})=l_1\left(1+\frac{1-\nu_{i+1}}{2}\omega_{b1}+|\delta_{1,i+1}|\omega_c\right)+\frac{|\nu_{i+1}-\nu_i|}{2}\omega_{r1}+|\delta_{1,i+1}-\delta_{1,i}|\omega_{t1} \tag{19}$$

式中:ω_{b1}、ω_c、ω_{r1}和ω_{t1}分别为四轮阿克曼转向模式下的车辆倒车惩罚系数、转弯惩罚系数、控制方向改变惩罚系数和车轮转角改变惩罚系数.

当拓展斜向移动模式的子节点时,产生的路径代价函数$G_2(n_{i+1})$为

$$G_2(n_{i+1})=l_2\left(1+\frac{1-\nu_{i+1}}{2}\omega_{b2}+|\delta_{2,i+1}|\omega_o\right)+\frac{|\nu_{i+1}-\nu_i|}{2}\omega_{r2}+|\delta_{2,i+1}-\delta_{2,i}|\omega_{t2} \tag{20}$$

式中:ω_{b2}、ω_o、ω_{r2}和ω_{t2}分别为斜向移动模式下的车辆倒车惩罚系数、斜向移动惩罚系数、控制方向改变惩罚系数和车轮转角改变惩罚系数.

当拓展原地旋转运动模式的子节点时,产生的路径代价函数$G_3(n_{i+1})$为

$$G_3(n_{i+1})=|\varphi_{i+1}-\varphi_i|\omega_a \tag{21}$$

式中:ω_a为原地旋转模式下的车辆横摆角改变惩罚系数.

2.2.2 模式切换代价函数

算法考虑了4WIS车辆进行运动模式切换时产生的一系列的模式切换损耗,当进行了模式切换操作后,在生成的子节点代价值中增加模式切换代价,避免运动模式频繁切换,实现路径规划过程中的运动模式决策.

当车辆进行运动模式切换时,车辆首先切换到初始状态,即四个车轮转角都为零的状态,然后切换至下一运动模式状态.当车辆切换运动模式时,所产生的模式切换代价包括从上一运动模式转换到车辆初始状态所产生的恢复代价函数与转换到下一运动模式状态所产生的模式切换惩罚代价函数,具体公式如下:

$$P(n_{i+1})=P_r(n_{i+1})+P_p(n_{i+1}) \tag{22}$$

式中,$P_r(n_{i+1})$为恢复代价函数,$P_p(n_{i+1})$为模式切换惩罚代价函数.

恢复代价函数$P_r(n_{i+1})$的计算与路径代价值的计算方法类似,上一运动状态转换到车辆初始状态时产生的恢复代价函数为

$$P_r(n_{i+1})=\begin{cases}\delta_{1,i}\omega_{t1}, & p_i=1;\\ \delta_{2,i}\omega_{t2}, & p_i=2;\\ \omega_s, & p_i=3\end{cases} \tag{23}$$

式中:惩罚系数ω_{t1}和ω_{t2}同路径代价函数的惩罚系数,ω_s为原地旋转车轮转角改变惩罚系数.

模式切换惩罚代价函数$P_p(n_{i+1})$为

$$P_p(n_{i+1})=\begin{cases}\delta_{1,i+1}\omega_{t1}+\omega_{p1}, & p_{i+1}=1;\\ \delta_{2,i+1}\omega_{t2}+\omega_{p2}, & p_{i+1}=2;\\ \omega_s+\omega_{p3}, & p_{i+1}=3\end{cases} \tag{24}$$

式中:ω_{p1}、ω_{p2}和ω_{p3}分别为切换到四轮阿克曼转向模式、斜向移动模式和原地旋转模式的模式切换惩罚系数;惩罚系数ω_{t1}、ω_{t2}和ω_s同式(23).

2.2.3 启发式代价函数

启发式代价函数是影响图搜索算法搜索效率、路径品质的关键因素之一.本文算法的启发式代价函数采用两种启发式并行,并选取其较大值来计算启发式代价值.

第一种启发式是不考虑障碍物的非完整约束启发代价$h_1(n_{i+1})$,其数值通过车辆最小转弯半径生成节点$(x_{i+1},y_{i+1},\varphi_{i+1})$到目标节点$(x_{goal},y_{goal},\varphi_{goal})$的RS曲线进行获取.该项代价值不考虑环境中障碍物的影响,可以离线生成.

第二种启发式是考虑障碍物的完整性启发式代价$h_2(n_{i+1})$,其数值是二维空间中使用Dijkstra算法计

算得到的节点到目标点的最近距离.

综上可知启发式代价函数$H(n_{i+1})$计算公式为

$$H(n_{i+1})=\omega_e\cdot\max(h_1(n_{i+1}),h_2(n_{i+1})) \tag{25}$$

式中,ω_e为启发式代价系数,ω_e较大时算法搜索效率更高,ω_e较小时规划路径质量更优.

2.3 算法总流程

综上所述,本文提出的融合模式决策的图搜索算法总流程如图6所示.

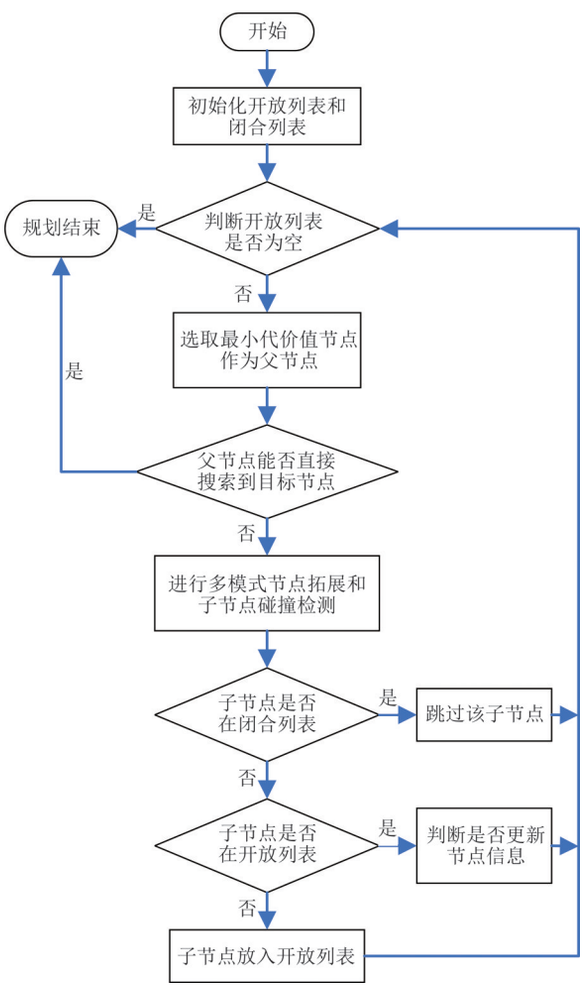


图6　算法总流程图

Fig.6　General flow-chart of algorithm

1) 建立开放列表和闭合列表,且两个列表都初始化为空列表,然后将搜索起始点n_{start}放入开放列表.

2) 检索开放列表中是否还有节点.若此时开放列表为空,则路径规划失败.如开放列表不为空,则进入下一步.

3) 选取开放列表中多目标代价函数$F(n)$最小的节点n_i作为父节点,将节点n_i从开放列表中弹出,并放入闭合列表.

4) 判断上述步骤3)中的节点n_i能否拓展到目标节点n_{goal}或者生成与目标节点n_{goal}之间无障碍物碰撞的RS曲线.若能,则路径规划结束,且成功搜索到可行路径;若不能,则进入下一步.

5) 对上述步骤3)中的节点n_i,使用多模式节点拓展策略进行节点拓展,得到若干个候选子节点n_{i+1}.先对候选子节点进行碰撞检测,剔除掉有障碍物碰撞的不可行子节点.再计算所有可行候选子节点的位姿信息$(x_{i+1},y_{i+1},\varphi_{i+1})$、多模式路径代价函数值$G(n_{i+1})$、模式切换代价值$P(n_{i+1})$、启发代价值$H(n_{i+1})$、候选多目标代价值$F(n_{i+1})$、节点拓展方式$p_{i+1}$等信息.

6) 判断上述步骤5)中的可行的候选子节点是否已经在开放列表或闭合列表中,根据判断结果进行以下步骤.

7) 若候选子节点n_{i+1}不在开放列表和闭合列表中,则将该候选子节点n_{i+1}的父节点信息设为n_i,并将子节点放入开放列表.

8) 若子节点n_{i+1}在闭合列表,则跳过该子节点.

9) 若子节点在开放列表中,则该子节点已经遍历过.获取子节点n_{i+1}在开放列表中的当前总代价值$F(n_{i+1})'$,与步骤5)中以n_i为父节点时计算得到的候选总代价值$F(n_{i+1})$比较,若$F(n_{i+1})'$小于或等于$F(n_{i+1})$,则保留该子节点在开放列表中的信息.若$F(n_{i+1})'$大于$F(n_{i+1})$,则表示以n_i为父节点时能得到更好的路径,此时更替子节点n_{i+1}在开放列表中的信息.判断完所有可行候选子节点后,循环步骤2)到步骤6),直到满足结束路径规划的条件,则算法结束.

3　仿真实验与分析

在MATLAB 2022b软件上搭建仿真平台,并在内存为16 GB、CPU为R5-5600H的电脑上执行仿真验证.为了充分验证本文提出的融合模式决策的图搜索算法的有效性与优异性,与经典混合A*图搜索算法[9]进行了对比.仿真实验中,使用矩形框模拟车辆几何模型,并设计三种场景进行仿真实验,场景a、b和c分别为障碍物密布场景、狭窄通道场景和简单场景,环境大小为25 m×25 m,表1为车辆参数表.通过参考图搜索算法相关论文的实验设置,得到了算法仿真参数的初值,并通过多次仿真调试,得到如表2所示的仿真参数表.此外,在实际应用中,还可以根据对各运动模式的偏好,来适当调整相关的惩罚系数.仿真结果见图7~图9及表3~表5,图中深色

多边形块为障碍物,箭头和深蓝色矩形框表示起点和终点的车辆位姿,浅蓝色矩形框表示路径点处的车辆位姿,黑色实线表示四轮阿克曼转向模式的前行路径,蓝色实线表示四轮阿克曼转向模式的倒车路径,粉色圆表示车辆在此位置进行了原地旋转操作,红色实线为斜向移动路径.

表1 车辆参数

Tab.1 Vehicle parameters

参数	数值
车辆轴距L/m	2.6
车辆前后悬/m	0.7
车辆长度/m	4.0
车辆宽度/m	2.0
最大前轮转角δ_{max}/rad	π/4

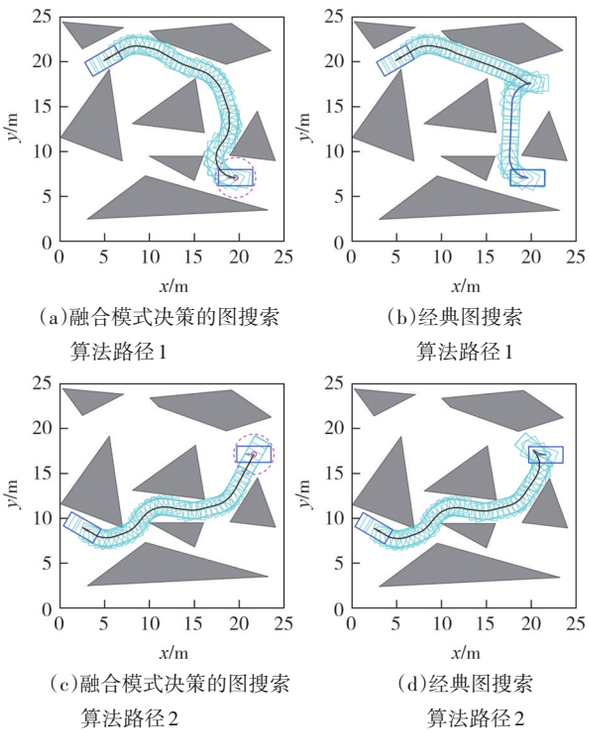
表2 仿真参数

Tab.2 Simulation parameters

参数	数值
四轮阿克曼转向模式拓展步长l_1/m	0.5
斜向移动模式拓展步长l_2/m	0.3
四轮阿克曼转向模式子节点拓展数量N_1	10
斜向移动模式子节点拓展数量N_2	8
原地旋转模式子节点拓展数量N_3	7
四轮阿克曼转向倒车惩罚系数ω_{b1}	1.0
四轮阿克曼转向转弯惩罚系数ω_c	0.2
四轮阿克曼转向控制方向改变惩罚系数ω_{r1}	2.0
四轮阿克曼转向车轮转角改变惩罚系数ω_{t1}	0.2
斜向移动倒车惩罚系数ω_{b2}	1.0
斜向移动惩罚系数ω_o	0.2
斜向移动控制方向改变惩罚系数ω_{r2}	2.0
斜向移动车轮转角改变惩罚系数ω_{t2}	0.2
原地旋转横摆角改变惩罚系数ω_a	0.2
原地旋转车轮转角改变惩罚系数ω_s	0.2
模式切换惩罚系数ω_{p1}	0.4
模式切换惩罚系数ω_{p2}	0.6
模式切换惩罚系数ω_{p3}	0.6
启发式代价系数ω_e	1

3.1 障碍物密布场景

提出的算法应具有处理各种复杂非结构化场景的能力,因此构建了不规则障碍物密布的场景a并进行了五次对比仿真实验,图7展示了其中两次对比仿真结果,五次实验结果的数据平均值如表3所示.从图中可以看出,在障碍物密布环境中,本文算法可以通过原地旋转操作调整车辆位姿,避免倒车行为,并规划出更短更平滑的路径.而经典图搜索算法多次变换行驶方向,生成数条倒车路径,导致路径较长且质量较低.根据表3的仿真结果,在障碍物密布场景中,本文算法通过特殊运动模式调整车辆位姿,相比经典图搜索算法具有更高的搜索效率、更短的规划路径以及更少的节点拓展次数.此外,算法还避免了倒车路径,充分发挥了4WIS车辆的高机动性.



(a)融合模式决策的图搜索算法路径1 (b)经典图搜索算法路径1

(c)融合模式决策的图搜索算法路径2 (d)经典图搜索算法路径2

图7 场景a仿真结果

Fig.7 Simulation results of scenario a

表3 场景a仿真结果表

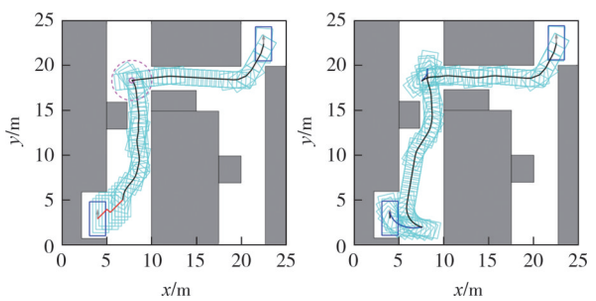
Tab.3 Simulation results of scenario a

算法	搜索时间/s	路径长度/m	节点拓展次数	倒车次数	倒车路径长度/m
本文算法	2.020 3	19.165 7	84	0	0
经典算法	4.829 0	21.508 0	1347	1	7.847 9

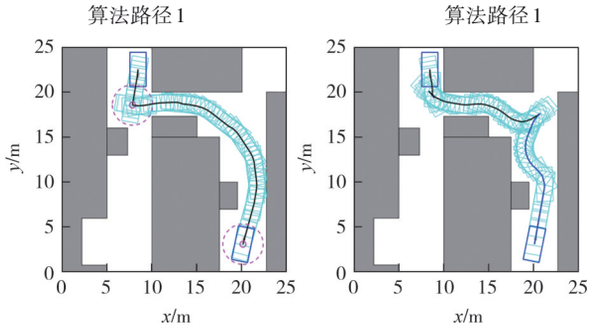
3.2 狭窄通道场景

通道场景是行车的典型场景之一,构建包含狭窄平行泊车位的狭窄通道场景b进行仿真实验,其通道的正常宽度为5 m,在有障碍物处较为狭窄.在此场景也进行五次仿真实验,结果如图8及表4所示,表4为五次仿真结果的数据平均值.在狭窄通道场景中,本文算法通过结合三种运动模式,能够在起始点的狭窄平行泊车位使用斜向移动模式驶出泊车位,在狭窄弯道处使用原地旋转模式调整车辆位姿,提高了规划效率与路径质量.而经典图搜索算法在

上述两个区域都需要花费大量的路径搜索成本才能成功找到一条正确的路径,规划效率较低.根据表4的仿真结果,相比于经典图搜索算法,在狭窄通道场景中,本文算法亦具有更高的求解效率、更短的规划路径和更少的节点拓展次数,且无倒车路径.结合场景a的仿真结果可知,在较为狭窄的环境下,本文算法能合理分配多种运动模式,提高规划求解效率和路径质量,更具优异性.



(a)融合模式决策的图搜索算法路径1　(b)经典图搜索算法路径1



(c)融合模式决策的图搜索算法路径2　(d)经典图搜索算法路径2

图8　场景b仿真结果

Fig.8　Simulation results of sceneario b

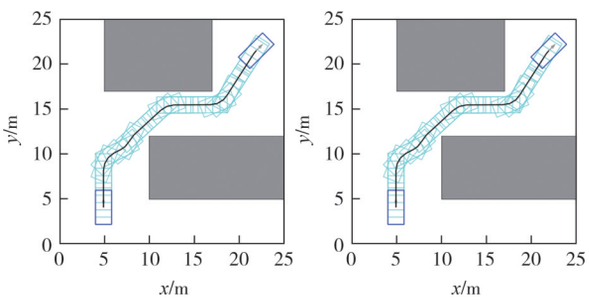
表4　场景b仿真结果表

Tab.4　Simulation results of scenario b

算法	搜索时间/s	路径长度/m	节点拓展次数	倒车次数	倒车路径长度/m
本文算法	4.592 3	24.872 6	1 108	0	0
经典算法	5.973 1	26.866 6	1 654	1.5	12.114 1

3.3　简单场景

场景c为开阔的简单场景,在此场景中进行了一次对比实验,仿真实验结果如图9及表5所示.在简单场景中,由于不存在狭窄环境,4WIS车辆只需使用单一的四轮阿克曼转向运动模式即可轻松规划出到达目标位姿的安全路径,无须使用特殊运动模式.此时本文算法与经典图搜索算法规划出的路径品质一致.如表5所示,本文算法的规划路径长度和节点拓展次数与经典图搜索算法相近,但求解所用时间略有增加.这是因为每一轮迭代中,两种算法选择了相似的最优节点,而本文算法仍会进行少量特殊运动模式的子节点拓展,稍微增加了搜索时间.可知在简单的场景中,本文算法相比经典图搜索算法虽然求解效率略低,但总体性能相近.



(a)融合模式决策的图搜索算法路径　(b)经典图搜索算法路径

图9　场景c仿真结果

Fig.9　Simulation results of sceneario c

表5　场景c仿真结果表

Tab.5　Simulation results of scenario c

算法	搜索时间/s	路径长度/m	节点拓展次数	倒车次数	倒车路径长度/m
本文算法	1.683 2	27.425 0	31	0	0
经典算法	1.306 8	27.425 0	31	0	0

4　结 论

1)本文针对4WIS车辆的路径规划问题,提出了融合模式决策的图搜索算法.设计了多模式节点拓展策略,并综合考虑各运动模式特性以及运动模式切换,设计了多目标代价函数,引导车辆在不同场景下灵活切换运动模式,实现了路径规划与模式决策过程的巧妙融合,适用于4WIS车辆的路径规划.

2)通过在三种场景下进行仿真实验,表明了本文所提出的算法能有效解决4WIS车辆的路径规划问题,在障碍物密布或狭窄通道场景下皆具有较高求解效率,且所规划路径的品质具有明显优异性.而在简单场景中,算法亦保证了较好的规划性能.

3)后续研究可以建立在本文提出的图搜索算法基础上,对其规划的路径进行进一步的优化,以获得更高质量的路径.此外,还可以进行速度规划的研究,将该算法应用于实际工程实践中.

参考文献

[1] HANG P, CHEN X B, FANG S D, et al. Robust control for four-wheel-independent-steering electric vehicle with steer-by-wire system [J]. International Journal of Automotive Technology, 2017, 18(5): 785-797.

[2] YE Y X, HE L, ZHANG Q. Steering control strategies for a four-wheel-independent-steering Bin managing robot [J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(16): 39-44.

[3] HANG P, CHEN X B. Towards autonomous driving: review and perspectives on configuration and control of four-wheel independent drive/steering electric vehicles[J]. Actuators, 2021, 10(8): 184.

[4] YIN G D, CHEN N, WANG J X, et al. Robust control for 4WS vehicles considering a varying tire-road friction coefficient [J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(1): 33-40.

[5] ZHU M, CHEN H Y, XIONG G M. A model predictive speed tracking control approach for autonomous ground vehicles [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 87: 138-152.

[6] 任秉韬,王淅淅,邓伟文,等. 基于混合A*和可变半径RS曲线的自动泊车路径优化方法[J]. 中国公路学报,2022,35(7): 317-327.
REN B T, WANG X X, DENG W W, et al. Path optimization algorithm for automatic parking based on hybrid A* and Reeds-Shepp curve with variable radius[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(7): 317-327. (in Chinese)

[7] GONZÁLEZ D, PÉREZ J, MILANÉS V, et al. A review of motion planning techniques for automated vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(4): 1135-1145.

[8] PADEN B, ČÁP M, YONG S Z, et al. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2016, 1(1): 33-55.

[9] DOLGOV D, THRUN S, MONTEMERLO M, et al. Path planning for autonomous vehicles in unknown semi-structured environments [J]. International Journal of Robotics Research, 2010, 29(5): 485-501.

[10] SHENG W T, LI B, ZHONG X. Autonomous parking trajectory planning with tiny passages: a combination of multistage hybrid A-star algorithm and numerical optimal control[J]. IEEE Access, 2021, 9: 102801-102810.

[11] 孙炜,吕云峰,唐宏伟,等. 基于一种改进A*算法的移动机器人路径规划[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2017,44(4): 94-101.
SUN W, LÜ Y F, TANG H W, et al. Mobile robot path planning based on an improved A* algorithm [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(4): 94-101. (in Chinese)

[12] ZHANG S Y, JIAN Z Q, DENG X D, et al. Hierarchical motion planning for autonomous driving in large-scale complex scenarios [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8): 13291-13305.

[13] WANG J K, CHI W Z, LI C M, et al. Efficient robot motion planning using bidirectional-unidirectional RRT extend function [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2022, 19(3): 1859-1868.

[14] ZHANG X L, HUANG Y, WANG S T, et al. Motion planning and tracking control of a four-wheel independently driven steered mobile robot with multiple maneuvering modes [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2021, 16(3): 504-527.

[15] KARAMAN S, FRAZZOLI E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning[J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(7): 846-894.

[16] 张卫波,肖继亮. 改进RRT算法在复杂环境下智能车路径规划中的应用[J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 225-234.
ZHANG W B, XIAO J L. Application of improved RRT algorithm in intelligent vehicle path planning under complicated environment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(3): 225-234. (in Chinese)

[17] TAZAKI Y, OKUDA H, SUZUKI T. Parking trajectory planning using multiresolution state roadmaps [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2017, 2(4): 298-307.

[18] LI B, ACARMAN T, ZHANG Y M, et al. Optimization-based trajectory planning for autonomous parking with irregularly placed obstacles: a lightweight iterative framework[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8): 11970-11981.

[19] 张家旭,卜纯研,王晨,等. 线控四轮转向汽车平行泊车路径规划与跟踪控制[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2021,48(8): 44-50.
ZHANG J X, BU C Y, WANG C, et al. Parallel parking path planning and tracking control for wire-four-wheel steering vehicle [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(8): 44-50. (in Chinese)

[20] 杭鹏,陈辛波,张榜,等. 四轮独立转向-独立驱动电动车主动避障路径规划与跟踪控制[J]. 汽车工程,2019,41(2): 170-176.
HANG P, CHEN X B, ZHANG B, et al. Path planning and tracking control for collision avoidance of a 4WIS-4WID electric vehicle[J]. Automotive Engineering, 2019, 41(2): 170-176. (in Chinese)

[21] XU F X, LIU X H, CHEN W, et al. Dynamic switch control of steering modes for four wheel independent steering rescue vehicle [J]. IEEE Access, 1914, 7: 135595-135605.

[22] REEDS J, SHEPP L. Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards [J]. Pacific Journal of Mathematics, 1990, 145(2): 367-393.