

融合动力学约束的自主平行泊车轨迹生成方法

宋金泽, 戴 斌, 单恩忠, 孙振平, 贺汉根

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙, 410073)

摘 要: 着眼于实际应用, 提出一种基于多段弧长的平滑轨迹生成方法。首先给出最短泊车空间、泊车起始点范围以及避碰约束空间的生成方法, 在此基础上, 考虑动力学约束条件, 采用 B 样条对基于多段弧长的初步轨迹进行平滑优化, 最终实现连续曲率的轨迹规划。研究结果表明: 采用这种方法不仅能够有效地实现避障, 而且解决了在泊车过程中的停车转向问题, 满足自主泊车的连续性要求。

关键词: 自主泊车; 轨迹规划; 避碰约束

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2009)S1-0135-07

Trajectory planning approach of autonomous parallel parking with kinodynamic constraints

SONG Jin-ze, DAI Bin, SHAN En-zhong, SUN Zhen-ping, HE Han-gen

(College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defence Technology,
Changsha 410073, China)

Abstract: For the application of auto-parking project, a smooth trajectory planning approach was proposed based on some arcs of circumference. The minimum parking place, the bound of start point and collision-free space for a collision-free parallel parking were presented. Spline B was used to smooth the trajectory which was generated on multi arcs of circumference, and finally the generation of continuous curvature path was realized. The efficiency of the proposed method was demonstrated using the autonomous car. The results show that the car can not only avoid the obstacles effectively in real-time, but also settle the problem of shutting down to turn the wheel in parking and meet the demand of continuity of auto-parking.

Key words: autonomous parking; trajectory planning; collision-free restriction

近年来, 随着汽车的普及, 交通压力越来越大, 尤其在城市中, 路边泊车位的空间越来越小。对于驾驶初学者而言, 泊车是一件困难的事情, 即使熟练的驾驶员也会厌烦泊车过程, 这正是自动泊车技术(APS, Auto-parking system)的生长点。其直接目的是辅助甚至替代驾驶员完成泊车动作。目前, 世界上只有少数汽车公司如大众、丰田、雷诺等报道已经开发出相关应用产品, 但仅仅是个别装备到高档轿车中, 如丰田的 Lexus LS460 等。我国的汽车厂商目前还没有自主知识产权的自主泊车系统, 因此, 进行这方面的研究

具有实际意义。自主泊车技术在环境感知、路径规划和控制方面还不尽完善, 我国在这方面的研究刚刚起步, 目前, 主要集中在理论仿真阶段, 多采用模糊控制、神经网络等方法进行泊车控制。国外的相关研究工作开展较早, 如 Mukherjee 等^[1-2]对泊车系统的非完整约束路径规划问题进行了研究; Chang 等^[3-5]对基于模糊逻辑的自动泊车控制进行了研究, Paromtchik 等^[6-7]对平行泊车的连续控制问题进行了研究。在城市道路中, 平行泊车是最常见的情况, 在此, 本文作者着眼于实际工程应用, 就自主泊车系统中的轨迹规划问

收稿日期: 2009-06-09; 修回日期: 2009-07-10

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(90820302)

通信作者: 宋金泽(1979-), 男, 陕西西安人, 博士研究生, 从事智能控制无人驾驶车辆控制研究; 电话: 13574841568; E-mail: nwsac97@gmail.com

题进行研究。

1 系统工作流程

启动自动泊车系统泊车过程如图 1 所示。待泊车车辆沿道路缓慢行驶,首先,依据车载传感器(超声、视觉、里程计)感知环境信息,检测是否存在满足最短泊车约束的停车空间;第 2 步,在找到满足约束的泊车空间后,建立环境地图,根据感知和定位信息计算泊车起始位置的范围;第 3 步,根据当前位置和环境定位信息生成避碰约束空间,依据车辆的最小转弯半径、方向转速、运动轨迹连续等约束条件进行路径规划;第 4 步,控制车辆沿规划路径驶入目标停车区,驾驶员确认完成后,最终停止车辆。在整个自主泊车过程中,驾驶员可随时干预,接管车辆。

自主平行泊车的轨迹规划问题可描述如下:从车辆停止的起始位置点开始,首先确定无碰撞区域,然后,在此区域内寻找 1 条光滑的路径,使车辆沿着规划轨迹运动时不会发生与周围物体碰撞,最终使车辆能够准确地抵达停车点并保持车身方向与设定方向一致。当泊车空间相对于车辆尺寸非常狭小时,需要车辆进行多次往返的后退与前进运动才能完成泊车操作,这种情况不在本文讨论之内。这里仅研究泊车空间能够保障车辆一次性倒车入位的情况。

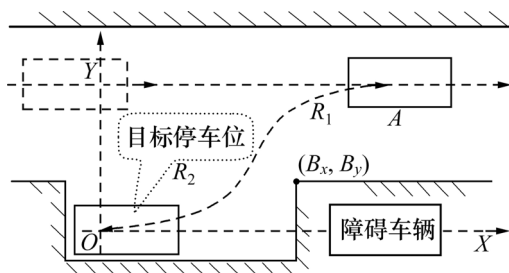
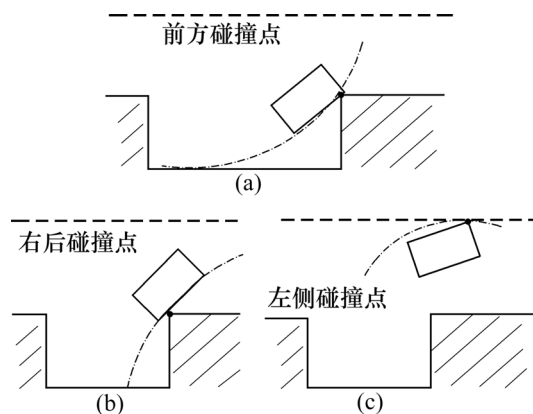


图 1 平行泊车过程示意图

Fig.1 Sketch map of parallel parking process

2 平行泊车避碰约束空间生成

避碰空间的生成是考虑车辆在自主泊车过程中,根据车体边缘与各种障碍相切时临界碰撞条件生成的无碰撞区域。轨迹规划的前提是确定无碰撞区域。在车辆从停车点自主倒车最终停止于泊车位的过程中,车辆与周围障碍有可能发生碰撞的位置一共有 3 处,如图 2 所示。下面按照泊车避碰约束空间的生成步骤



(a) 前方碰撞点; (b) 右后碰撞点; (c) 左侧碰撞点

图 2 平行泊车可能的碰撞点示意图

Fig.2 Possible collision points in parallel parking

来分析这些碰撞情况。

2.1 车辆性能约束表达

车辆性能的约束表达主要体现在 2 个方面:

- (1) 当车辆前轮摆角工作在最大值时,所得到的最小转向半径;
- (2) 在路径曲率改变较大时,方向转角角速度受约束,即 $|\dot{\delta}(t)| \leq \omega$ 。

下面将转弯半径的定义予以精确化,在进行避障路径规划时,需要考虑如图 3 所示的 6 个转弯半径:

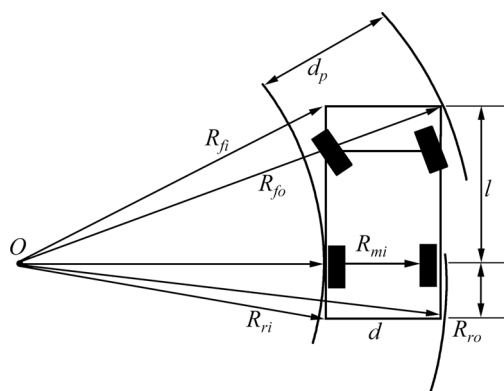


图 3 车辆转弯半径示意图

Fig.3 Turning radius of vehicle

- (1) R , 即车辆后轴内侧转弯半径。最小转弯半径是汽车的重要参数,文中将车辆后轴内侧最小转弯半径 R_{\min} 定义为车辆最小转弯半径;
- (2) R_{mo} , 即车辆后轴外侧转弯半径;
- (3) R_{fi} , 即车辆头部内侧转弯半径;
- (4) R_{fo} , 即车辆头部外侧转弯半径;
- (5) R_{ri} , 即车辆尾部内侧转弯半径;

(6) R_{ro} , 即车辆尾部外侧转弯半径。

图 3 中: d 为车宽; l 为后轴到车头的距离; r 为后轴到车尾的距离。

汽车的极限通过宽度为最小转弯状态下, 头部外侧转弯半径与后轴内侧转弯半径之差, 即

$$d_p = R_{fo} - R_{min}$$

如上所述, 6 个转弯半径之间的关系为:

$$\begin{aligned} R_{mo} &= R + d; \\ R_{fi} &= \sqrt{R^2 + l^2}; \\ R_{fo} &= \sqrt{(R + d)^2 + l^2}; \\ R_{ri} &= \sqrt{R^2 + r^2}; \\ R_{ro} &= \sqrt{(R + d)^2 + r^2} \end{aligned} \quad (1)$$

2.2 最短泊车空间的判定

如图 4 所示, 无碰撞且轨迹连续的最短泊车空间 L_{min} 为:

$$L_{min} = r + \sqrt{2(R_{min} + d)B_y + l^2 - B_y^2} \quad (2)$$

由于不同型号车辆参数不同, 最短泊车空间为车身长度的 1.4~1.7 倍。

在泊车过程中, 将此转向过程半径定义为 R_2 , 由环境感知得到泊车空间 L 的长度和 (B_x, B_y) 的位置坐标后, 可知 R_2 的无碰撞范围为 $[R_{min}, R_{2max}]$, 其中:

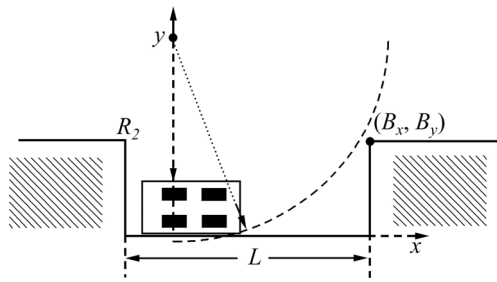


图 4 前方避碰示意图

Fig.4 Sketch map of front collision avoiding

$$R_{2max} = [(L + r)^2 + B_y^2 - l^2] / (2B_y) - d \quad (3)$$

2.3 泊车起始点范围的判定

要避免图 2(b)和图 2(c)所示碰撞情况, 则需确定平行泊车起始点的范围。图 5 所示为考虑侧向障碍时最近泊车点示意图, 图 6 所示为无碰撞最远泊车点示意图。可得:

$$\begin{cases} P_{xmin} = \sqrt{2(R_{1min} + R_{min} + d) \cdot P_y - P_y^2} \\ P_{xmax} = \sqrt{2(R_{1max} + R_{min} + d) \cdot P_y - P_y^2} \end{cases} \quad (4)$$

$$R_{1min} = \frac{d^2 + l^2 - (H - P_y)^2}{2(H - P_y - d)} \quad (5)$$

$$R_{1max} = \frac{\xi}{B_y} (\eta + \Gamma^{1/2}) + h - \rho \quad (6)$$

其中:

$$\mu = B_y \cdot h; \kappa = h + B_y; \lambda = B_x^2 + B_y^2;$$

$$\xi = B_x / B_y; \eta = h \cdot B_x;$$

$$\Gamma = \eta^2 + \mu^2 - \mu \cdot [2(R_{min} + d) \cdot \kappa - \lambda];$$

$$\mu = B_y \cdot h; \kappa = h + B_y; \lambda = B_x^2 + B_y^2;$$

$$\rho = [2(R_{min} + d) \cdot h + \lambda] / (2B_y);$$

$$\mu = B_y \cdot h; \kappa = h + B_y; \lambda = B_x^2 + B_y^2$$

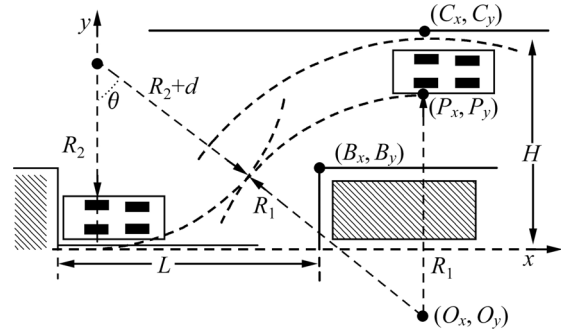


图 5 侧向临界碰撞示意图

Fig.5 Sketch map of lateral critical collision

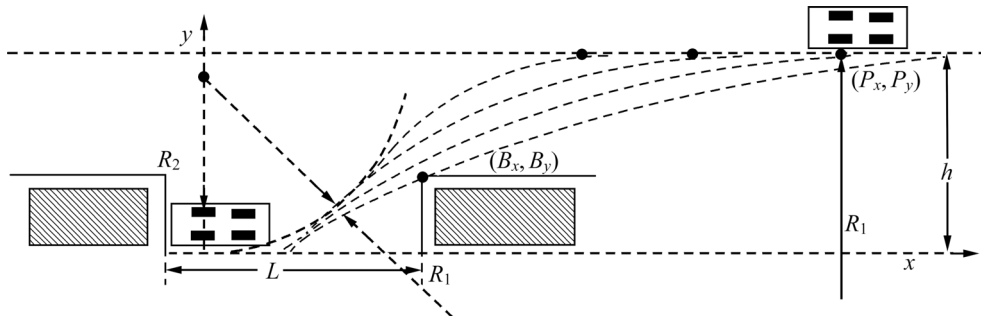


图 6 起始泊车最远点示意图

Fig.6 Sketch map of furthest parking start point

2.4 基于多段圆弧的避碰约束空间生成

基于多段弧长的避碰约束空间生成的基本思想是：首先根据环境检测信息判断泊车位是否够长，停车点是否在泊车起始点范围内，然后，根据车辆一系列最小转弯半径约束以及障碍点和车辆起始点、终止点的位置关系，用 4 段(两对相切)弧长形成一个泊车无碰撞路径区域，为下一步轨迹规划做好准备。

如图 7 所示，假定车辆起始泊车点 P 点的坐标为 (P_x, P_y) ，障碍点 B 坐标为 (B_x, B_y) 。首先，过 P 点作半径为 R_a 的圆弧，过原点 O 作半径为 $R_c(R_c=R_{\min}+d)$ 的圆弧，使 R_a 和 R_c 相切于 M_1 点。其中： R_a 为保证车辆不会与侧向发生碰撞的最大半径； R_c 为车辆的最小转弯半径。其次，过原点 O 作半径为 R_d 的圆弧，过 P 点作与 R_d 相切的半径为 R_b 的圆弧，切点为 M_2 ， M_2 与障碍点 B 的距离 $-2V_d \geq R_f - R$ 。

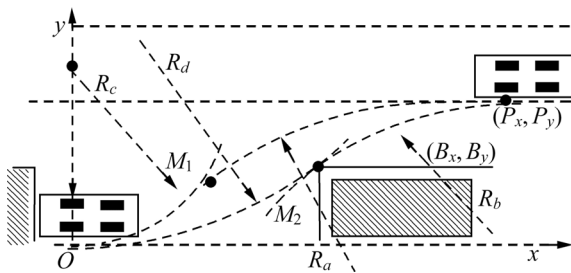


图 7 避碰约束空间示意图

Fig.7 Collision-free space for parking

4 段圆弧的方程分别如下。

对 PM_1 段：

$$f_1(x) = \sqrt{R_a^2 - [x - (P_x - R_a)]^2} + (P_y - R_a) \quad (7)$$

对 PM_2 段：

$$f_2(x) = \sqrt{R_b^2 - [x - (P_x - R_b)]^2} + (P_y - R_b) \quad (8)$$

对 M_1O 段：

$$f_3(x) = \sqrt{R_c^2 - x^2} + R_c \quad (9)$$

对 M_2O 段：

$$f_4(x) = \sqrt{R_d^2 - x^2} + R_d \quad (10)$$

由以上 4 段相切圆弧构成的封闭区域为平行泊车轨迹规划的候选区域。当车辆后轴内侧点位于该区域内且方向不大于底边圆弧对应点处的斜率时，车辆就不会与周围障碍发生碰撞。避碰约束空间生成后，下一步可在此区域内进行轨迹规划。

3 基于动力学约束的轨迹生成

确定了满足转向约束的无碰撞区域后，下一步任务就是在此区域内规划 1 条可执行的路径。基于 4 段相切的圆弧可以构造出 1 个基本轨迹。假设切点 M_1 和 M_2 的坐标分别为 (x_{M_1}, y_{M_1}) 和 (x_{M_2}, y_{M_2}) ，则基本轨迹函数 $f(x)$ 可表示如下：

$$f(x) = \begin{cases} k \cdot f_1(x) + (1-k)f_2(x), & x \in [0, x_{M_1}] \\ k \cdot f_3(x) + (1-k)f_2(x), & x \in [x_{M_1}, x_{M_2}] \\ k \cdot f_3(x) + (1-k)f_4(x), & x \in [x_{M_2}, P_x] \end{cases} \quad (11)$$

$f(x)$ 轨迹的一阶导数是连续的，但是，由于二阶导数在切点 M_1 和 M_2 处是不连续的，这就使得该轨迹的曲率在切点处不连续，如图 8 所示。这种情况意味着车辆在连续运动过程中方向盘要出现跳变，这对于车辆运动来说是要避免的。为此，对生成的曲线进行平滑优化处理。本文采用 B 样条拟合方法生成 1 条可执行的曲率连续曲线。

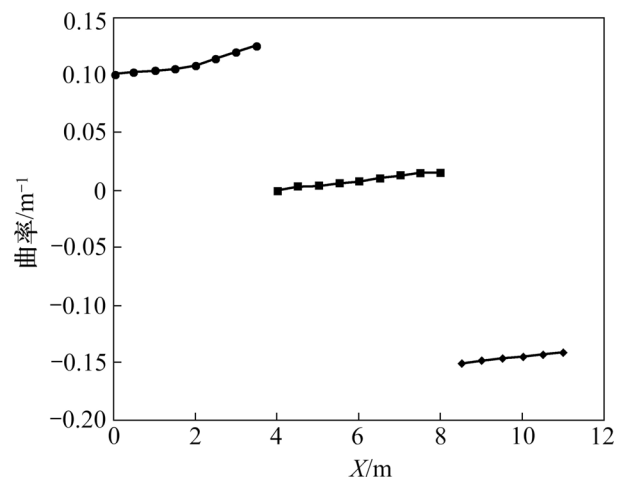


图 8 基本轨迹的曲率曲线

Fig.8 Curvature curves of basic trajectory

3.1 B 样条曲线

如图 1 所示自主泊车过程，可定义为 1 种车辆的侧向运动，其动力学模型传递函数可近似表示为^[8]：

$$G(s) = \frac{b_1 s^2 + b_2 s + b_3}{s^3 (s + a_1)(s + a_2)} \quad (12)$$

进一步，可以将动力学约束动力系统改为 $1/s^3$ ，将此简化结果作为规划轨迹。而将 $G(s)$ 中的剩余部分交由自主车辆底层侧向跟踪控制模块进行补偿。

根据 Kano 等^[9]给出的关于 B 样条性质的 1 个结

论: $K+1$ 阶 B 样条曲线是形如 $\frac{d^k}{dt^k} y(t) = \mu(t)$ 的线性系统的一条轨迹, 对系统 $1/s^3$, 可选定 4 阶 B 样条基函数作为规划路径的基函数。由 B 样条曲线性质可知, 4 阶 B 样条拟合曲线具有曲率连续的特性, 可满足车辆性能约束。

对于 4 阶 B 样条曲线, 假设其控制多边形由一系列控制点 $[P_0, P_1, \dots, P_m]$ 构成, 则曲线由 $m-2$ 段 B 样条曲线片段构成, 而第 i 段 B 曲线段由 4 个控制点 V_{i+r} ($r=-2, -1, 0, 1$) 确定, 并且曲线段上的任何 1 个点都是这个控制向量的加权, 可表示为:

$$Q_{i,4}(u) = \sum_{r=-2}^1 b_{r,4}(u) P_{i+r}$$

其中: $0 \leq u \leq 1$; 权值因数 b_r 可定义如下:

$$\begin{bmatrix} b_{-2}(u) \\ b_{-1}(u) \\ b_0(u) \\ b_1(u) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/6 & -1/2 & 1/2 & -1/6 \\ 2/3 & 0 & -1 & 1/2 \\ 1/6 & 1/2 & 1/2 & -1/2 \\ 0 & 0 & 0 & 1/6 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ u \\ u^2 \\ u^3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

下面对具体约束条件进行分析, 并研究如何在生成的基本轨迹上选取控制点, 以确保生成满足要求的 B 样条曲线。

3.2 基于动力学特性的约束满足

若得到期望的 B 样条曲线, 必须满足以下约束条件:

- (1) 曲线必须是 1 条避碰的路径;
- (2) 路径的曲率由生成的 B 样条曲线限制;
- (3) 曲线必须包含起始点和目标点, 且满足方向要求;

- (4) 曲率的变化必须满足转向速度的约束。

3.2.1 避碰条件的满足

满足式(7)~(10), 就可以满足无碰撞约束。

3.2.2 曲率约束

当函数 $f(x)$ 为式(11)时, 该函数的曲率半径满足下列不等式:

$$R(x) = \frac{(f^g(x)^2 + 1)^{\frac{3}{2}}}{f^{gg}(x)} \geq \min(R_i) \quad (14)$$

其中: $i=a, \dots, d$ 。

3.2.3 起始点和目标点约束

要产生 1 条可以跟踪的路径, 不但起始点和终点都要在曲线上, 而且曲线要与车体方向相切。所以, 需要通过增加辅助控制点来解决这个问题, 辅助控制点可称为虚控制点。若第 1 个控制点为 P_0 , \dot{q}_s 和 \ddot{q}_s 分

别为其一阶和二阶向量规范形式, 则 3 个虚控制点为:

$$\begin{aligned} p_{-1} &= p_0 + \dot{q}_s + 1/3\ddot{q}_s \\ p_{-2} &= p_0 - 1/6\ddot{q}_s \\ p_{-3} &= p_0 - \dot{q}_s + 1/3\ddot{q}_s \end{aligned} \quad (15)$$

若 p_m 为最后 1 个控制点, 则另外 3 个虚控制点与上述定义相似, 分别为: p_{m+1} , p_{m+2} 和 p_{m+3} , 本文取 $\ddot{q}_s = 0$ 。

3.2.4 转向速度约束

由 B 样条拟合出的曲线具有连续曲率的性质, 生成的曲线要满足车辆最小转弯半径的约束。

由 $R(t) = \frac{1}{\rho(t)} = \frac{l}{\tan \phi}$ 可得, 曲率的变化率与转向系统的关系为:

$$\dot{\rho}(\phi) = \frac{1 + \tan^2 \phi}{l} \dot{\phi}$$

其中: $R(t)$ 为车辆的瞬时转向半径; ϕ 为车辆前轮摆角。必须对车辆的速度进行约束。由于转向角速度的限制, 车速过快会导致车辆转向轨迹曲率小于期望轨迹曲率:

$$\dot{\rho}_v(\phi) = \left| k \cdot \frac{\phi_{\max}}{l} \right| \leq |\dot{\rho}_s| \quad (16)$$

其中: ρ_v 为实际行驶轨迹曲率; ρ_s 为规划期望曲率。这是需要避免的。因此, 当曲线的曲率变化率满足 $|\dot{\rho}_s| \leq \dot{\rho}_m$ 时, 可以控制车体跟踪路径, 此时, 车速应满足:

$$v \leq \frac{k_m \cdot \phi_{\max} \cdot l}{|\rho_s|} \quad (17)$$

3.3 控制点生成策略

在选择 B 样条的控制点前已经具备以下 2 个基本条件:

(1) 建立规划坐标系, 由环境知传感器得知障碍物、泊车位长度、停车点等坐标信息。

(2) 获得了车体的当前状态, 并已转化为在规划坐标系中的状态: (p_x, p_y, θ_p) 。

3.3.1 起始点及目标控制点的选择

由起始点和目标点约束条件可知, 为了保证规划路径与车体的当前状态位置上的连续性, 选择第 0 个控制点为车体的当前位置, 即

$$(x_0, y_0) = (p_x, p_y)$$

将其作为三重节点, 这样, 规划路径将经过车体当前位置; 为了满足规划轨迹与车体当前状态在方向上的一致性, 在车体当前运动方向上选择控制点 $(x_1,$

$y_1)$:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon \times x_{M_2} \times \cos \theta_p \\ \varepsilon \times y_{M_2} \times \sin \theta_p \end{bmatrix} \quad (18)$$

为了使 B 样条曲线与基本轨迹函数 $f(x)$ 误差较小, 经大量实验得出, $\varepsilon=0.2$ 较合适。

3.3.2 B 样条其他控制点的选择

为了使控制点分布均匀, 控制点的间隔基数 ζ 分别选取 $|p_x - x_{M_2}|/2$, $|p_x - x_{M_2}|/2$ 和 $|x_{M_1}|/2$ 。

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \zeta \times [f(x_i) - y_i] \times \cos \theta' \\ \zeta \times [f(x_i) - y_i] \times \sin \theta' \end{bmatrix} \quad (19)$$

至此, 已完成控制点的构造。利用 B 样条曲线计算公式, 就可以获得 1 条满足相关约束条件的轨迹。

4 实验结果

以上所提出的自主泊车轨迹生成方法已成功应用于作者所在课题组自行研制的自主车辆驾驶系统。自主车辆通过超声和摄像机感知环境, 通过码盘、陀螺等传感器信息融合实现定位定向。整个自主泊车过程如图 9 所示。

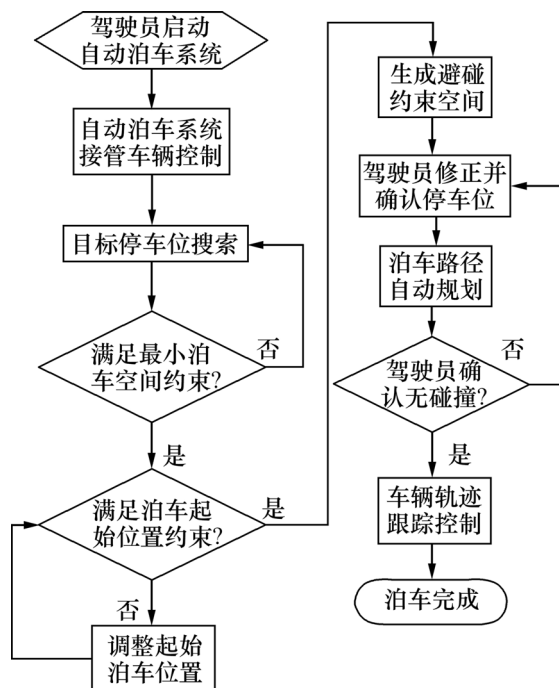


图 9 平行泊车过程流程图

Fig.9 Flow chart of parallel parking process

实验的自主车辆车体尺寸 d 取 1.85 m, l 取 3.8 m, r 取 1.2 m, R_{\min} 取 3 m, 泊车空间长度 L 及障碍物坐标均为实验环境实测值, 为了使泊车入位后与后车留

有一定间隙, 多加 0.5 m 的裕量算入泊车空间长度。

图 10~12 所示为某次实验结果。其中: 图 10 所示为在 Matlab 环境下的仿真图, 图 11 所示为连续曲

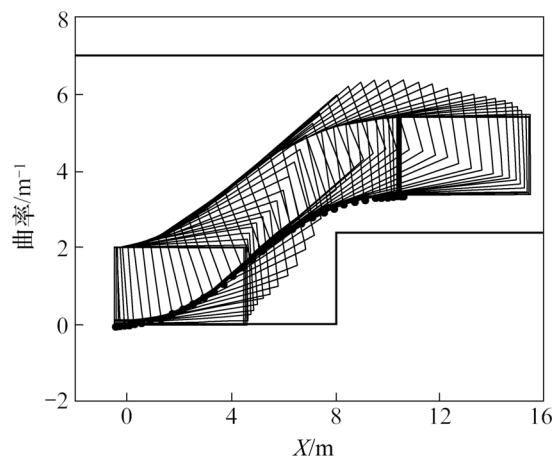


图 10 仿真实验

Fig.10 Simulation experiments

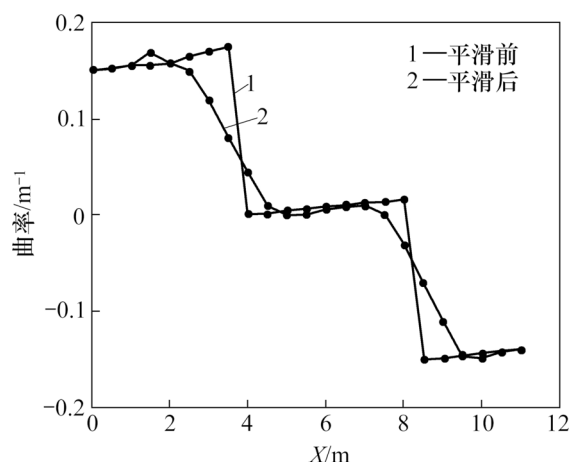


图 11 平滑前后的曲率对比

Fig.11 Comparison of original discontinuous curvature and continuous curvature for spline B

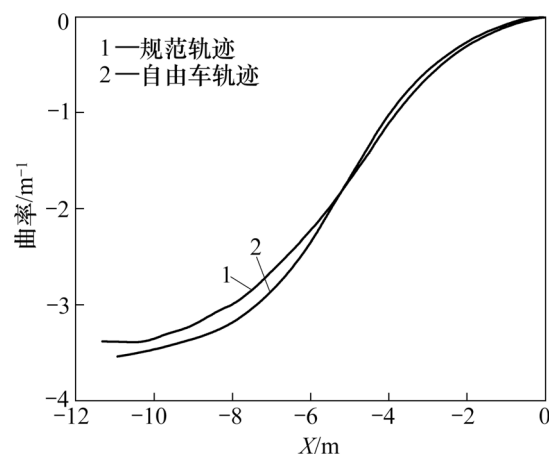


图 12 实际轨迹跟踪结果

Fig.12 Actual trajectory following results

率平滑效果图, 图 12 所示为规划轨迹与自主车轨迹跟踪对比图。传感器测得停车位长度为 8 m, 障碍点坐标(B_x, B_y)为(7.5 m, 2.2 m), 车辆起始点坐标为(10.5 m, 3.3 m)。

5 结 论

(1) 针对自主平行泊车实际工程问题, 在考虑动力学约束的前提下, 提出了一种基于多段弧长的平滑轨迹生成方法。进行轨迹规划的首要条件是要判定无碰撞区域, 文中首先给出一种基于多段相切圆弧的避碰约束空间生成方法。在此基础上, 生成 1 条泊车初步轨迹。针对轨迹曲率不连续的特点, 采用 B 样条对基于多段弧长的初步轨迹进行平滑优化, 最终生成满足动力学约束的泊车轨迹。

(2) 实验表明, 这种方法不仅能够有效地实现避障, 而且解决了在泊车过程中停车打方向盘转向问题, 满足自主泊车的连贯性要求。

参考文献:

- [1] Mukherjee R, Anderson D P. A surface integral approach to the motion planning of nonholonomic systems[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1994, 116(9): 315–325.
- [2] Lamiraux F, Laumond J P. Smooth motion planning for car-like vehicles[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(4): 498–502.
- [3] Chang S J, Li T H S. Design and implementation of fuzzy parallel-parking control for a car-type mobile robot[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2004, 34(2): 175–194.
- [4] ZHAO Ya-nan, Emmanuel, Collins G Jr. Robust automatic parallel parking in tight spaces via fuzz logic[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2005, 51: 111–127.
- [5] Li T H S, Chang S J. Autonomous fuzzy parking of a car-like mobile robot[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2003, 33(4): 451–465.
- [6] Paromtchik I. Steering and velocity commands for parking assistance[C]//Proceedings of the 10th IASTED International Conference on Robotics and Applications. Honolulu, HI, USA, 2004: 178–183.
- [7] Florencio M, Agostinho P, Sequeira J S. Automatic parallel parking of a car-like robots[C]//37th International Symposium on Robotics ISR 2006. Germany, 2006.
- [8] 孙振平. 自动驾驶汽车智能驾驶系统[D]. 长沙: 国防科技大学机电工程与自动化学院, 2006.
SUN Zhen-ping. An intelligent control system for autonomous land vehicle[D]. Changsha: College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defence Technology, 2006.
- [9] Kano H, et al. B-splines and control theory[J]. Applied Mathematics and Computation, 2003(2/3): 265–288.