

基于动态识别区和 B 样条曲线的智能叉车避障路径规划

吕恩利^{1,2} 阮清松^{1,2} 刘妍华³ 王飞仁^{1,2} 林伟加^{1,2} 董冰^{1,2}

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642; 3. 华南农业大学工程基础教学与训练中心, 广州 510642)

摘要: 为降低干果仓储智能叉车自主避障误警率, 提高仓储空间有效利用率, 结合叉车运行环境特点, 基于激光传感器, 设立探测范围随车速、等效转向角变化的动态识别区, 有效探测叉车行进方向上的障碍物; 将获得的障碍物特征控制点作为分割点, 采用四次五阶准均匀 B 样条曲线, 分前后段合并生成满足叉车最小转弯半径、曲率连续、最大转向轮角速度等多约束条件下的避障路径; 对仓库中的直行路段和转弯路段进行避障路径规划试验, 结果表明所得避障路径满足各项约束, 曲率不大于 $1.06 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$, 等效转向角不大于 60° , 等效转向轮角速度不大于 1.05 rad/s , 验证了算法的可行性。

关键词: 智能叉车; 仓储环境; 避障路径规划; 动态识别区; 准均匀 B 样条曲线

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)01-0359-08

Obstacle Avoidance Path Planning for Intelligent Forklift Truck Based on Dynamic Identification Zone and B-spline Curve

LÜ Enli^{1,2} RUAN Qingsong^{1,2} LIU Yanhua³ WANG Feiren^{1,2} LIN Weijia^{1,2} DONG Bing^{1,2}

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

3. Engineering Fundamental Teaching and Training Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to reduce the false alarm rate of autonomous obstacle avoidance for intelligent forklift trucks in dried fruit warehouse and improve the utilization rate of warehouse space, combining with the characteristics of the operating environment of forklift truck, and basing on the laser sensor SICK - LMS111 and SICK - NAV350, a dynamic identification zone that the detection range was changed along with the speed and equivalent steering angle was set up to effectively detect obstacles in the direction of travel. Then, feature control point obtained by obstacles was taken as the segmentation point, and the quartic five-order quasi-uniform B-spline curves were used to generate the obstacle avoidance path by combining front and rear segments of curve, which met the multi-constraint conditions such as the minimum turning radius, the continuous curvature and the maximum angular velocity of steering wheel. By carrying out the obstacle avoidance path planning tests on the straight road section and the turning in the warehouse, the results showed that the obstacle avoidance paths satisfied various constraints, the curvature was not more than $1.06 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$, equivalent steering angle was not more than 60° , angular velocity of equivalent steering wheel was not greater than 1.05 rad/s , which effectively verified the feasibility of the algorithm. It can be used as a reference for obstacle avoidance technology of similar large warehouse intelligent vehicles.

Key words: intelligent forklift truck; warehouse environment; obstacle avoidance path planning; dynamic identification zone; quasi-uniform B-spline curve

收稿日期: 2018-10-15 修回日期: 2018-11-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0701002)、国家自然科学基金项目(51108194)、广东省基础研究及应用研究重大项目(2016KZDXM028)和广东省科技计划项目(2017B020206005)

作者简介: 吕恩利(1979—),男,副教授,博士生导师,主要从事冷链物流技术与装备和智能车辆技术研究,E-mail: enlily@scau.edu.cn

通信作者: 刘妍华(1979—),女,副教授,博士,主要从事农业装备节能技术研究,E-mail: cynthial@scau.edu.cn

0 引言

干果品类多、价值高,在仓储中多采用货架摆放等堆码方式存放,利用智能叉车存取干果,可有效提高仓储效率,促进干果仓储管理规范化、智能化。然而,智能叉车在跟踪全局路径时,会遇到环境发生改变的情况,若出现新的障碍物,此时的全局路径将暂时性失去作用,需要借助传感器的实时信息进行局部避障路径规划,使叉车绕开新出现的障碍物后能够回到原全局路径上继续执行任务。

为解决避障路径规划相关问题,部分学者将参数化曲线应用于路径规划^[1-11]。然而,以往学者对智能仓储物流的研究主要集中在高自由度的小型车辆,对大吨位的低自由度叉车研究较少^[12-17]。同时,当考虑到车辆起止点位姿约束、避障约束、曲率约束等多项约束条件时,需确保所规划的路径可跟踪,而以往方法所规划的路径多存在不足^[18-20]。另外,当考虑起止点位姿约束,以往学者采用的均匀 B 样条曲线相对准均匀 B 样条曲线需要在起止点处增设控制点,且多是基于型值点并利用反求控制点的方式求取控制点,增加了计算量。

综上所述,考虑到准均匀 B 样条曲线的优越性,本文将对适用于仓储环境中大型叉车的避障路径规划方法进行研究,并以干果仓储智能叉车的倒车为例,实现干果仓储智能叉车的避障路径规划。

1 基本概念与模型

1.1 动态识别区

为避免不必要的计算负担,需考虑到避障路径规划算法的触发机制,故设立传感器实时识别区,即当设定的传感器识别区中出现障碍物时,触发路径规划算法;当没有障碍物时,仅保持判断识别区中是否出现障碍物的部分程序实时运行,而路径规划程序不运行,由此减轻系统运行负担。

本研究对象是仓储环境下的大型堆垛叉车,体形相对较大,受最小转弯半径约束^[21],需要对探测范围内的障碍物做出一定的判断——动态识别区,以避免在非直行路段误触发避障路径规划程序,这也有利于空间资源的有效利用。其中,动态识别区在直行路段的范围如图 1a 所示,在转弯路段的范围如图 1b 所示。

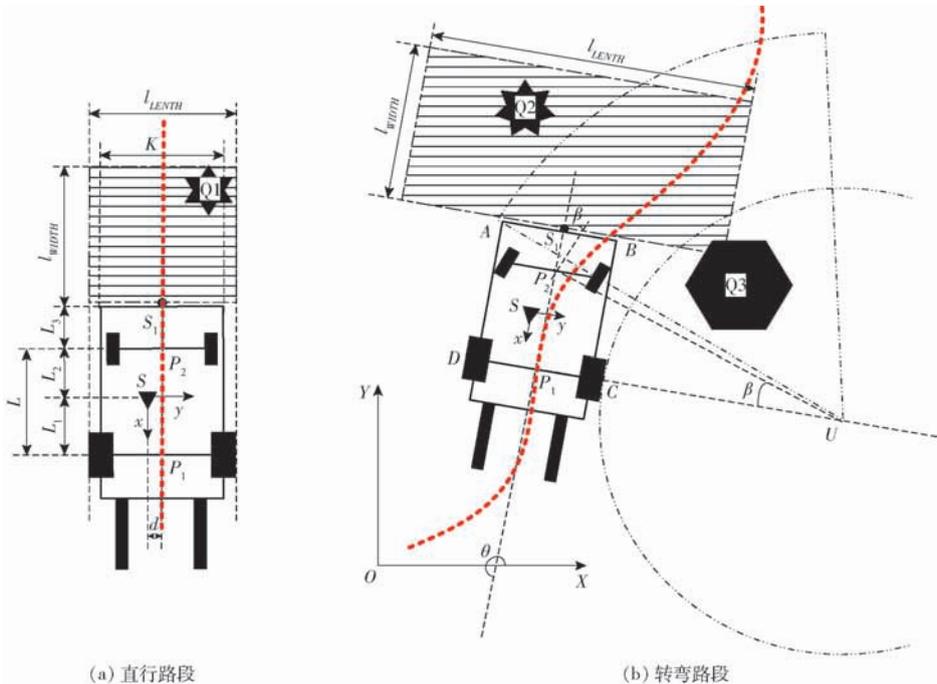


图 1 动态识别区范围

Fig.1 Ranges of dynamic identification zone

图 1 中,坐标系 XOY 为仓库全局笛卡尔坐标系,坐标系 xSy 为车载导航传感器的笛卡尔坐标系; S 为导航传感器在叉车上的投影位置,其全局笛卡尔坐标为 (X, Y, θ) , θ 为传感器坐标系 x 轴正向与全局笛卡尔坐标系 X 轴正向的夹角, S_1 为叉车尾部的测距传感器位置,其全局笛卡尔坐标为 (X_1, Y_1, θ) ;

A, B 为整车尾部最大宽度处的两端点, C, D 为整车最大宽度处的两端点(即前轴上最外层点), P_1, P_2 分别为前、后轴中心点, U 为叉车瞬时旋转中心所在位置,其全局笛卡尔坐标为 (X_u, Y_u) ; K 为整车尾部最大宽度, L 为叉车前后轴距, L_1 为导航传感器距前轴距离, L_2 为导航传感器距后轴距离, L_3 为叉车后

悬距, d 为导航传感器距叉车中心轴的偏移距离; β 为转向轴中心点处转向轮的等效转向角, 即 Ackermann 转向角, 转向轮回正时 $\beta = 0^\circ$, 本文规定, 所有逆时针旋转的角为正值, 顺时针旋转的角为负值; Q1、Q2、Q3 代表环境中突然出现的障碍物, l_{WIDTH} 为识别区宽度, l_{LENTH} 为识别区长度, 红色粗虚线代表全局路径。易知

$$l_{p_1 p_2} = L_1 + L_2 = L \quad (1)$$

式中 $l_{p_1 p_2}$ ——前、后轴中心点距离

驱动轴中点瞬时转弯半径为

$$l_{UP_1} = \frac{L}{\tan|\beta|} \quad (2)$$

叉车最外侧 A 点瞬时转弯半径为

$$l_{UA} = \sqrt{(L + L_3)^2 + \left(\frac{L}{\tan|\beta|} + \frac{K}{2}\right)^2} \quad (3)$$

叉车瞬时转轴中心点所在位置的全局笛卡尔坐标值为

$$X_u = X + \frac{L_1}{\cos\theta} + \left(\frac{L}{\tan\beta} - L_1 \tan\theta - d\right) \sin\theta \quad (4)$$

$$Y_u = Y - \left(\frac{L}{\tan\beta} - L_1 \tan\theta - d\right) \cos\theta \quad (5)$$

测距传感器瞬时全局笛卡尔坐标值为

$$X_1 = X - (L_2 + l_{s_1 p_2}) \cos\theta - d \sin\theta \quad (6)$$

$$Y_1 = Y - (L_2 + l_{s_1 p_2}) \sin\theta + d \cos\theta \quad (7)$$

式中 $l_{s_1 p_2}$ ——测距传感器到后轴中心点距离

当叉车运行于直行路段时, 如图 1a 所示, 识别区为矩形, 则

$$l_{\text{LENTH}} = l_{\text{LENTH}_s} \quad (8)$$

$$l_{\text{WIDTH}} = |V| \frac{l_{\text{WIDTH}_{\max}} - l_{\text{WIDTH}_s}}{|V_{\max}|} + l_{\text{WIDTH}_s} \quad (9)$$

式中 l_{LENTH_s} ——识别区初始长度

l_{WIDTH_s} ——识别区初始宽度

$l_{\text{WIDTH}_{\max}}$ ——识别区最大宽度

V ——车速 V_{\max} ——最大车速

当叉车运行于非直行路段时, 如图 1b 所示, 识别区为不规则多边形, 则

$$l_{\text{LENTH}} = |V| \frac{l_{\text{LENTH}_{\max}} - l_{\text{LENTH}_s}}{|V_{\max}|} + l_{\text{LENTH}_s} \quad (10)$$

$$l_{\text{WIDTH}} = |V| \frac{l_{\text{WIDTH}_{\max}} - l_{\text{WIDTH}_s}}{|V_{\max}|} + l_{\text{WIDTH}_s} \quad (11)$$

式中 $l_{\text{LENTH}_{\max}}$ ——识别区最大长度

且识别区内各点到瞬时转轴 U 的距离小于 l_{UA} , 而考虑到内轮差, 需同时大于 l_{UC} (叉车内侧 C 点瞬时转弯半径), 这样可避免因 Q2、Q3 类的无关障碍物误触发避障路径规划程序。

其中, 出于生产安全考虑, 给于果仓储智能叉车

设定最大行驶速度 V_{\max} , 而 V 代表叉车实时车速, 同时, 规定倒车时车速 V 为负值, 前进时车速 V 为正值。

1.2 B 样条曲线

B 样条曲线在保留 Bezier 曲线优点的同时进行了改进, 虽然仍采用了多边形及权函数来定义曲线, 但是 B 样条曲线舍弃了 Bezier 曲线的 Bernstein 函数, 设计了 B 样条曲线基函数, n 次 B 样条曲线基函数^[22]为

$$F_{k,n}(u) = \frac{1}{n!} \sum_{j=0}^{n-k} [(-1)^j C_{n+1}^j (u+n-k-j)^n] \quad (k=0, 1, \dots, n) \quad (12)$$

$$\text{其中 } C_{n+1}^j = \frac{(n+1)!}{j! (n+1-j)!} \quad (13)$$

可得第 i 段 n 次 B 样条曲线的表达式为

$$H_{i,n}(u) = \sum_{k=0}^n G_{i+k} F_{k,n}(u) \quad (i=1, 2, \dots, m-n) \quad (14)$$

其中 $u \in [0, 1]$

式中 n ——样条曲线的阶次

m ——控制点个数, 整条曲线由 $m-n$ 段 B 样条曲线平滑连接而成

G_{i+k} ——第 $i+k$ 个控制点的坐标值

由此可知, n 次 B 样条曲线是由 $n+1$ 个控制点根据 B 样条基函数加权生成; $n+m$ 个控制点能够生成一条由 m 段 B 样条曲线平滑连接构成的经过 n 次平滑的曲线; 由多个控制点产生的多段平滑连接的 B 样条曲线可通过调整局部控制点的坐标来改变曲线的局部形状。

然而, 以往学者采用的均匀 B 样条曲线缺陷是没有保留 Bezier 曲线的端点几何性质, 即样条曲线的首末端点处与控制多边形不相切。故而, 为满足起止点位姿约束, 本文采用易实现多阶平滑和局部形状修改且保留 Bezier 曲线的端点几何性质的准均匀 B 样条曲线实现路径规划, 其不同在于 n 次准均匀 B 样条曲线的节点矢量中两端节点具有重复度 $n+1$, 所有内节点呈均匀分布。

在 B 样条曲线的形成方法上, 部分学者以已知的一些点为型值点, 为使生成的 B 样条曲线能通过这些点, 通过反求控制点的方式求出过型值点的 B 样条曲线所对应的控制点, 再以求得的控制点生成参数化的 B 样条曲线路径^[23]。本文鉴于 B 样条曲线的强凸包性, 将依托障碍物选出的特征控制点为分割点, 分段生成 B 样条曲线, 并利用其性质, 最后合并生成过某些型值点的 B 样条曲线路径, 保证整条曲线连续性的同时省去了反求控制点的步骤。

另外,本文曲率和转向轮角速度的求取方式参照文献[11],计算公式为

$$\kappa = \frac{X''Y' - X'Y''}{(X'^2 + Y'^2)^{1.5}} \quad (15)$$

$$\omega = \frac{VL\kappa'}{\sqrt{X'^2 + Y'^2}(1 + L^2\kappa^2)} \quad (16)$$

式中 X', Y' ——横、纵坐标一阶导数

X'', Y'' ——横、纵坐标二阶导数

2 避障路径规划

假设叉车满足非完整性约束,在仓库中以中低速行驶,且过程中不发生打滑现象,同时算法考虑叉车避障约束、最小转弯半径约束、曲率连续约束、最大转向角及最大转向轮角速度约束、起止点位姿约束等。

2.1 算法流程

算法流程如图2所示,具体步骤为:

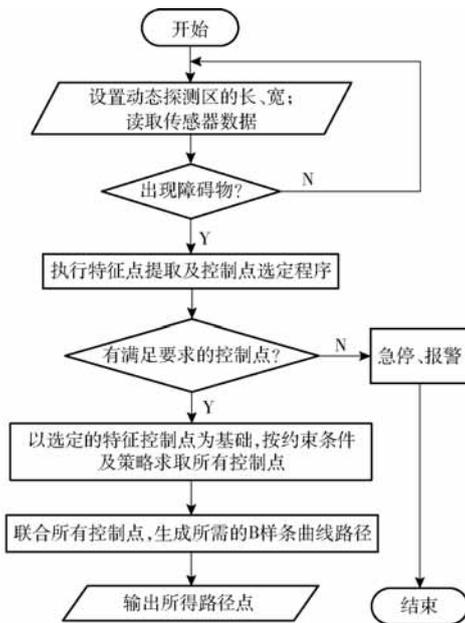


图2 算法流程图

Fig.2 Algorithm flow chart

(1)通过读取测距传感器数据,判断动态识别区中是否出现障碍物,若没有则持续探测。

(2)当发现障碍物时,提取障碍物所有特征角点,选出特征控制点,若没有满足要求的控制点,则说明前方已无法通行,叉车执行急停并发出警报,待障碍解除继续运行。

(3)当存在满足要求的特征控制点时,以其为基础,结合叉车当前位姿信息及准均匀B样条曲线性质和约束条件,求取剩余所需控制点,并联合生成B样条曲线路径。

(4)将所有路径点传输给路径跟踪程序,并保持实时探测状态。

2.2 控制点选取策略

叉车行驶于已知的全局路径通道中,遇到突然出现的障碍物,则触发避障路径规划。

(1)考虑起始位姿约束,以叉车当前驱动轴中点为第1个控制点;以 C_r 为比例调节因子,在当前位姿方向上,在距离第1个控制点 C_r 个车宽处选一点为第3个控制点,第2个控制点取第1个与第3个控制点的中点。

(2)考虑避障约束,针对动态识别区中的避障传感器数据,提取障碍物边界直线端点^[24-26],将各直线端点按顺序组成特征角点点集,并记录其在传感器数据集中的序号,再选出序号最大和最小的两点,两点中以偏向车体正前方的特征角点优先,以该特征角点为圆心,车宽的 C_{r1} 倍为半径作圆,并过测距传感器位置点作该圆的切线,得两个切点;考虑到避障约束,分别以两个切点为圆心,取微大于半个车宽的距离为半径作圆,判断圆内是否有传感器数据点,若两个圆内都有,转而考虑剩余的另一个特征角点,若还是两个圆内都有,则说明通道前方受阻无法通行;否则,选出远离障碍物的切点为第5个控制点。

(3)考虑终止位姿约束,再选出全局路径上距离第2步中被选出的特征角点最近的点,以之为圆心,取 T_L ($T_L \geq l_{UA}$) 为半径,搜寻全局路径上与该圆相交或在圆内且序号大于该点在全局路径点集中序号的点为目标点,即第9个控制点;并在全局路径上选出序号小于目标点序号且与之相距车宽 C_r 倍距离的点为第7个控制点,第8个控制点取第7个控制点与第9个控制点的中点。

(4)兼顾最小转弯半径约束、最大转向角及最大转向轮角速度约束,过特征控制点作平行于第3个控制点与第7个控制点连线的直线,求得第3个控制点在该直线上的垂足点,以该点与特征控制点的中点为第4个控制点;而第6个控制点求法相同。

由此,共获得9个控制点,联合即可生成满足曲率连续约束的准均匀B样条曲线路径,其中, $0 < C_r \leq \frac{l_{UA}}{K}$, $0 < C_{r1} \leq \frac{l_{UA}}{K}$ 。

3 试验与结果分析

3.1 试验设计

3.1.1 试验平台

试验以改装的电动A30型杭州叉车作为干果仓储智能叉车试验平台,如图3所示。

3.1.2 主要传感器及辅助器具

主要传感器的安装位置如图3所示,投影示意



图 3 干果仓储智能叉车

Fig. 3 Intelligent forklift truck in dried fruit warehouse

1. 导航传感器 2. 测距传感器

图如图 1 所示。

导航传感器选用 SICK - NAV350 型导航激光扫描传感器,测量范围 0.5 ~ 70 m,扫描角度为 360°,测量频率 8 Hz,当反光标贴在距导航传感器 30 m 内时,测距精度为 15 mm,测角精度为 ±0.15°。通过扫描布置在环境中的反光标贴建立笛卡尔全局坐标系 XOY,之后利用其获取叉车在全局坐标系中的当前位置信息,即(X, Y, θ)。

测距传感器选用 SICK - LMS111 型测距激光扫描传感器,测量范围 0.5 ~ 20 m,扫描角度为 270°,因传感器安装于叉车尾部中间位置,两侧部分角度激光被车身阻挡,因此,试验中只取 0° ~ 180° 范围内的有效数据,测量频率 25 Hz,角度分辨率 0.25°,主要用于测量车体到障碍物的距离及所在方位,数据点共 721 个。

为保证试验结果的可靠性,对叉车主要结构及各主要部件相对位置进行了测量,角度尺精度为 ±0.30°,手持激光测距仪精度为 ±1 mm,12 线 3D



(a) 实景图

激光水平仪精度为 1.43×10^{-4} ,所用辅助测量工具还包括铅垂线等。经测量所得参数如表 1 所示。

表 1 相关参数

Tab. 1 Related parameters

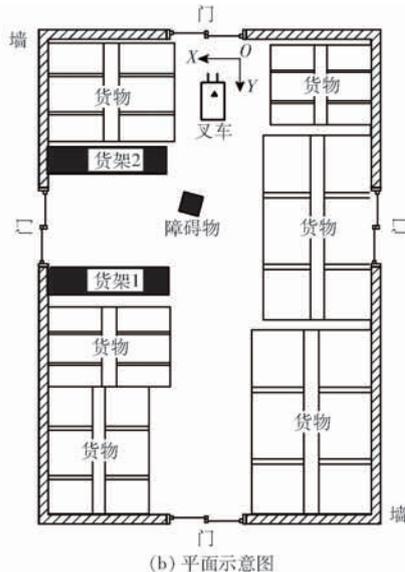
参数	数值
数据点总数/个	721
最大车速 $V_{max}/(mm \cdot s^{-1})$	1 000
测距传感器角度分辨率 $R_{angle}/(^{\circ})$	0.25
叉车最大等效转向角 $\beta_{max}/(^{\circ})$	60
叉车最大等效转向角轮速度 $\omega_{max}/(rad \cdot s^{-1})$	1.05
叉车前后轴距 L/mm	1 629
叉车驱动轴中点最大曲率/ mm^{-1}	1.06×10^{-3}
叉车最外点最小转弯半径 l_{UA}/mm	2 637
导航传感器与前轴距离 L_1/mm	975
导航传感器与后轴距离 L_2/mm	654
车辆后悬距 L_3/mm	402
整车最大宽度 K/mm	1 483
导航传感器与车辆中心轴偏距 d/mm	21
测距传感器与后轴中心距离 l_{S1P2}/mm	500
识别区初始长度 l_{LENTH_s}/mm	1 800
识别区初始宽度 l_{WIDTH_s}/mm	2 637
识别区最大长度 $l_{LENTH_{max}}/mm$	2 000
识别区最大宽度 $l_{WIDTH_{max}}/mm$	4 500

3.1.3 试验场地

试验在某公司的干果仓库中进行,仓库中堆放大量箱装干果;以 50 cm × 51 cm × 70 cm 纸箱为潜在障碍物,试验现场如图 4a 所示,仓库布局平面示意图如图 4b 所示,其中,坐标系 XOY 为导航传感器所建全局坐标系,试验中 $C_{r1} = 0.53, C_r = 1.21$ 。

3.2 结果分析

仓库多为结构化环境,地面平坦,全局路径由直线和圆弧组成,即由直行路段和转弯路段组成,因而



(b) 平面示意图

图 4 试验现场

Fig. 4 Test scene

障碍物突现情形也分两种,即直行路段遇到障碍物和转弯路段遇到障碍物,若解决以上两种情形的规划问题,智能叉车便可以顺利绕过障碍物继续工作;如若仓库通道中出现大量或过大的障碍物,可供通过的通道狭窄,则停车并报警。

当叉车在初始位置时,距障碍物较远,不影响正常工作,不触发避障路径规划,此刻导航传感器的位置点坐标为(958 mm, 1 368 mm, 271.99°),测距传感器扫描结果如图5所示。

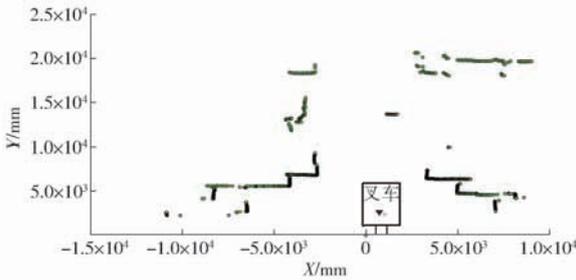


图5 初始位置处测距传感器扫描结果

Fig. 5 Results of ranging-sensor scan at beginning

3.2.1 直行路段避障路径规划

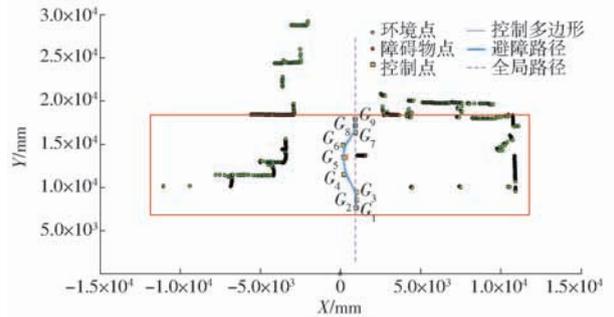
叉车直行时,等效转向角 $\beta = 0^\circ$;当叉车离障碍物越来越近,车速 $V = -681 \text{ mm/s}$ 时,识别区 $l_{LENTH} = 1\ 800 \text{ mm}$, $l_{WIDTH} = 3\ 906 \text{ mm}$,当导航传感器的位置点坐标为(1 048 mm, 8 616 mm, 268.56°)时,探测到前方障碍物,触发避障路径规划,产生的路径控制点见表2,路径规划结果如图6所示,路径曲率变化如图7a所示,叉车等效转向轮角速度变化如图7b所示。

表2 路径控制点

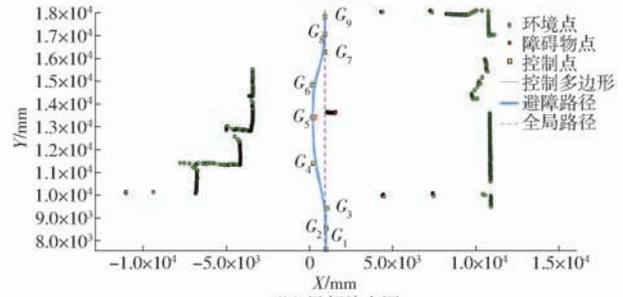
Tab. 2 Control vertices of path mm

控制点	X	Y
G_1	1 003	7 641
G_2	1 025	8 541
G_3	1 048	9 441
G_4	247	11 439
G_5	218	13 448
G_6	198	14 878
G_7	950	16 318
G_8	950	17 098
G_9	950	17 878

由图6可见,所得路径满足起止位姿约束;图7中曲线端点横坐标约1 000 mm的点为变化曲线起点,曲线端点横坐标约950 mm的点为变化曲线终点,由图7a可知,路径曲率最小值约为 $-2.76 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$,最大值约为 $2.31 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$,均满足最小转弯半径约束、曲率连续约束;由图7b可知,等效转向轮角速度最小值约为 -0.34 rad/s ,最大值约为 0.37 rad/s ,均满足最大转向轮角速度约束;其



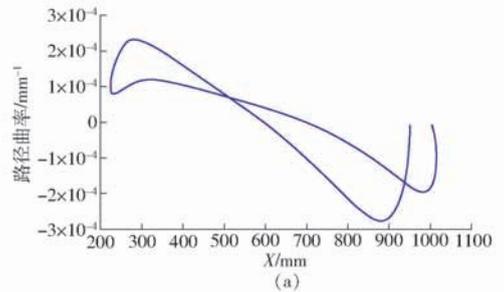
(a) 原图



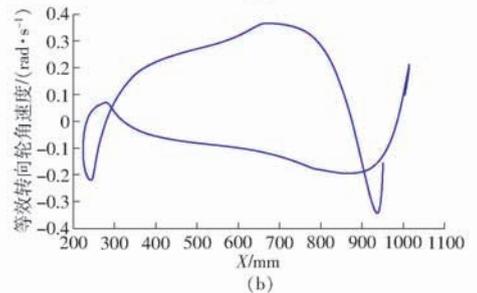
(b) 局部放大图

图6 直行路段路径规划

Fig. 6 Path planning on straight road section



(a)



(b)

图7 直行路段规划结果分析

Fig. 7 Analysis of planning result on straight road section

中,路径曲率的正负仅表示路径的凹凸性,等效转向轮角速度正负仅表示左右转向。

3.2.2 转弯路段避障路径规划

叉车行驶至转弯路段某时刻时,等效转向角 $\beta = -4.58^\circ$,车速 $V = -479 \text{ mm/s}$,识别区 $l_{LENTH} = 1\ 896 \text{ mm}$, $l_{WIDTH} = 3\ 529 \text{ mm}$, $X_u = 21\ 378 \text{ mm}$, $Y_u = 7\ 590 \text{ mm}$, $l_{UA} = 21\ 174 \text{ mm}$, $l_{UC} = 19\ 435 \text{ mm}$,导航传感器的位置点坐标为(1 048 mm, 9 006 mm, 268.76°),此刻探测到前方存在障碍物,触发避障路径规划,产生的路径控制点见表3,路径曲率变化如图8a所示,叉车等效转向轮角速度变化如图8b所

示, 路径规划结果如图 9 所示。

表 3 路径控制点

Tab. 3 Control vertices of path

控制点	X	Y
G_1	1 006	8 031
G_2	1 025	8 931
G_3	1 045	9 831
G_4	1 517	11 686
G_5	2 042	13 316
G_6	2 888	14 210
G_7	3 788	14 880
G_8	4 568	14 880
G_9	5 348	14 880

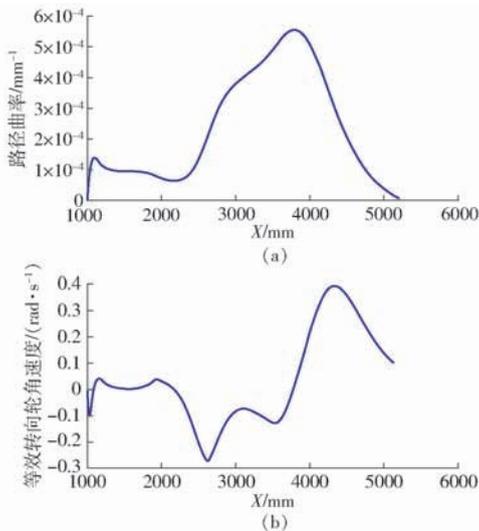


图 8 转弯路段规划结果分析

Fig. 8 Analysis of planning result on turning road section

由图 9 可见, 所得路径满足起止位姿约束; 由图 8a 可知, 曲率最小值约为 $3.41 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$, 最大值约为 $5.55 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$, 均满足最小转弯半径约束、曲率连续约束; 由图 8b 可知, 等效转向轮角速度最小值约为 -0.27 rad/s , 最大值约为 0.39 rad/s , 均满足最大转向轮角速度约束; 其中, 曲率的正负仅表示路径的凹凸性, 等效转向轮角速度正负仅表示左右转向。

对获得的路径还需注意, 由于车载测距传感器只能检测到物体的前面, 因此在某一时刻或某一角

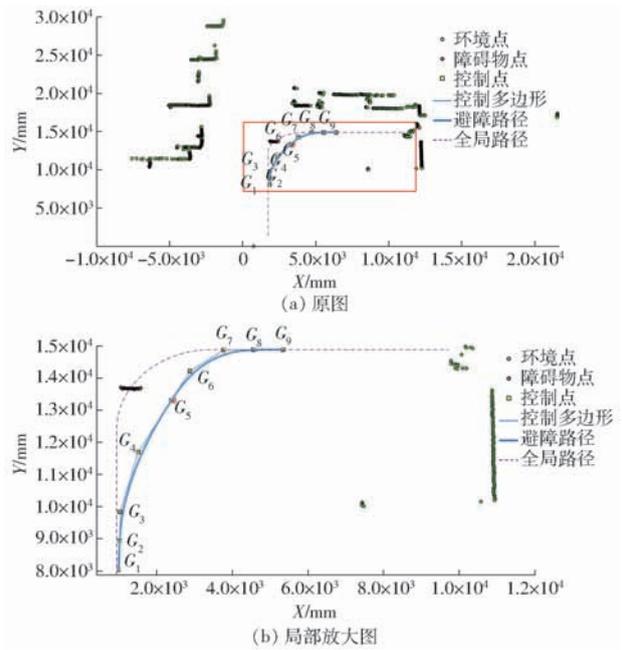


图 9 转弯路段路径规划

Fig. 9 Path planning on turning road section

度均无法获得障碍物的具体尺寸及形状, 所得路径若是经过障碍物后侧, 未必满足避障约束。因此, 本研究采取以特征控制点为分割点将路径分为前后两段, 以前段为主, 后段为辅, 借助避障路径规划的实时性, 在确保规划所得路径曲率连续的同时, 有效解决这一潜在碰撞隐患。

4 结束语

受仓库通道宽度限制, 为降低干果仓储智能叉车自主避障误警率, 提高仓储空间有效利用率, 选用激光导航传感器和测距传感器检测环境, 并基于动态识别区获得的障碍物信息, 以选出的特征控制点为分割点, 采用四次五阶准均匀 B 样条曲线, 分段生成 B 样条曲线, 再依据 B 样条曲线性质, 最后合并生成过某些型值点的 B 样条路径, 保证整条曲线连续性的同时省去了反求控制点的麻烦, 获得了满足叉车避障约束、最小转弯半径约束、曲率连续约束、最大转向角及最大转向轮角速度约束、起止点位姿约束的干果仓储智能叉车避障路径。直行路段和转弯路段的试验验证了算法的可行性。

参 考 文 献

[1] GALLINA P, GASPARETTO A. A technique to analytically formulate and to solve the 2-dimensional constrained trajectory planning problem for a mobile robot[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2000, 27(3): 237 - 262.

[2] COSTANZI R, FANELLI F, MELI E, et al. Generic path planning algorithm for mobile robots based on Bézier curves[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(15): 145 - 150.

[3] 卜新萃, 苏虎, 邹伟, 等. 基于非均匀环境建模与三阶 Bezier 曲线的平滑路径规划[J]. 自动化学报, 2017, 43(5): 710 - 724. BU Xinping, SU Hu, ZOU Wei, et al. Smooth path planning based on non-uniformly modeling and cubic Bezier curves[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(5): 710 - 724. (in Chinese)

[4] 宋金泽, 戴斌, 单恩忠, 等. 一种改进的 RRT 路径规划算法[J]. 电子学报, 2010, 38(2A): 225 - 228.

- SONG Jinze, DAI Bin, SHAN Enzhong, et al. An improved RRT path planning algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(2A): 225 – 228. (in Chinese)
- [5] 李爱娟. 智能车辆运动轨迹规划方法的研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.
LI Aijuan. Research on motion trajectory planning method for intelligent vehicles [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [6] 李晔, 姜言清, 张国成, 等. 考虑几何约束的 AUV 回收路径规划[J]. *机器人*, 2015, 37(4): 478 – 485.
LI Ye, JIANG Yanqing, ZHANG Guocheng, et al. AUV recovery path planning method considering geometrical constraints[J]. *Robot*, 2015, 37(4): 478 – 485. (in Chinese)
- [7] 陈东. 智能车辆局部避障路径规划及横向运动控制研究[D]. 长沙:湖南大学, 2016.
CHEN Dong. Research on the path planning for local obstacle avoidance and lateral motion control of intelligent vehicle[D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)
- [8] 张文, 刘勇, 张超凡, 等. 基于方向 A* 算法的温室机器人实时路径规划[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(7): 22 – 28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170703&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.003.
ZHANG Wen, LIU Yong, ZHANG Chaofan, et al. Real-time path planning of greenhouse robot based on directional A* algorithm[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(7): 22 – 28. (in Chinese)
- [9] 贾全, 张小超, 苑严伟, 等. 拖拉机自动驾驶系统上线轨迹规划方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(4): 36 – 44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180404&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.004.
JIA Quan, ZHANG Xiaochao, YUAN Yanwei, et al. Guided trajectory planning method for tractor autopilot system[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4): 36 – 44. (in Chinese)
- [10] 孟珠李, 焦俊, 李郑涛, 等. 基于 A* 与 B 样条算法的农用机器人路径规划系统[J]. *安徽大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(1): 45 – 53.
MENG Zhuli, JIAO Jun, LI Zhengtao, et al. Agricultural robot path planning system based on A* and B-spline algorithm[J]. *Journal of Anhui University (Natural Science Edition)*, 2018, 42(1): 45 – 53. (in Chinese)
- [11] 李红, 王文军, 李克强. 基于 B 样条理论的平行泊车路径规划[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(9): 143 – 151.
LI Hong, WANG Wenjun, LI Keqiang. Path planning for parallel parking based on B-spline theory[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(9): 143 – 151. (in Chinese)
- [12] HENTSCH M, LECKING D, WAGNER B. Deterministic path planning and navigation for an autonomous fork lift truck [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2007, 40(15): 102 – 107.
- [13] TAMBA T A, HONG B, HONG K. A path following control of an unmanned autonomous forklift[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2009, 7(1): 113 – 122.
- [14] VIVALDINI K C T, GALDAMES J P M, BUENO T S, et al. Robotic forklifts for intelligent warehouses: routing, path planning, and auto-localization[C]// *International Conference on Industrial Technology*, 2010: 1463 – 1468.
- [15] WIDYOTRIATMO A, HONG K. Navigation function-based control of multiple wheeled vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(5): 1896 – 1906.
- [16] HERRERO D, VILLAGRA J, MARTINEZ H. Self-configuration of waypoints for docking maneuvers of flexible automated guided vehicles[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(2): 470 – 475.
- [17] MOHAMMADI A, MAREELS I, OETOMO D. Model predictive motion control of autonomous forklift vehicles with dynamics balance constraint[C]// *14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, IEEE, 2016: 1 – 6.
- [18] 李一波, 张庆涛. 室内未知环境遍历路径规划算法综述[J]. *计算机科学*, 2012, 39(11A): 334 – 338.
LI Yibo, ZHANG Qingtao. Review of coverage path planning arithmetic in unknown indoor environment [J]. *Computer Science*, 2012, 39(11A): 334 – 338. (in Chinese)
- [19] 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.
- [20] MAC T T, COPOT C, TRAN D T, et al. Heuristic approaches in robot path planning: a survey[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, 86: 13 – 28.
- [21] GB/T 6104—2005 机动工业车辆 术语[S]. 2006.
- [22] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [23] 江本赤, 韩江, 田晓青, 等. 基于轮廓约束点的 B 样条曲面拟合算法[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(15): 2016 – 2021.
JIANG Benchu, HAN Jiang, TIAN Xiaqing, et al. B-spline surface fitting algorithm based on contour's constraint points[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(15): 2016 – 2021. (in Chinese)
- [24] JUNG H G, CHO Y H, YOON P J, et al. Scanning laser radar-based target position designation for parking aid system[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2008, 9(3): 406 – 424.
- [25] TAYLOR R M, PROBERT P J. Range finding and feature extraction by segmentation of images for mobile robot navigation[C]// *IEEE International Conference about Robotics and Automation*, 1996: 95 – 100.
- [26] MARTINEZ-CANTIN R, CASTELLANOS J A, TARDOS J D, et al. Adaptive scale robust segmentation for 2D laser scanner [C]// *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006: 796 – 801.