

# 基于 B 样条曲线的智能叉车托盘拾取路径规划研究

吕恩利<sup>1,2</sup> 林伟加<sup>1,2</sup> 刘妍华<sup>3</sup> 王飞仁<sup>1,2</sup> 赵俊宏<sup>1,2</sup> 吴鹏<sup>1,2</sup>

(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:** 干果仓储中托盘摆放的位姿具有不确定性,应用路径规划技术可实现智能叉车托盘自主拾取,提高叉车在仓储作业中的灵活性。以具有非完整性约束特性的堆垛叉车为研究对象,提出基于三次均匀 B 样条曲线的托盘拾取路径规划方法。综合考虑最小转弯半径、首末端点约束、曲率连续等多约束条件,建立路径曲率最小化的目标函数,并通过 Matlab 优化工具箱求解待优化的曲线参数。仿真结果表明,针对不同位姿的托盘拾取场景,该方法能得到曲率连续、转向轮转角不超过叉车最大转角的可行路径。在仓库中进行路径规划及跟踪试验,试验表明,在前进距离为 6 500 mm、托盘横向偏移距离 1 500 mm、偏移角 15° 的场景下,终点横向偏移误差 4.71 cm,终点航向角误差为  $9.6 \times 10^{-3}$  rad,验证了算法的可行性。

**关键词:** 智能叉车; 托盘拾取; 路径规划; 三次均匀 B 样条曲线; 多约束条件; 曲率最小

**中图分类号:** U294.27<sup>+</sup>2; TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)05-0394-09

## Pallet Picking Path Planning of Intelligent Forklift Based on B-spline Curve

LÜ Enli<sup>1,2</sup> LIN Weijia<sup>1,2</sup> LIU Yanhua<sup>3</sup> WANG Feiren<sup>1,2</sup> ZHAO Junhong<sup>1,2</sup> WU Peng<sup>1,2</sup>

(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 the structured operation environment, the application of warehouse automation equipment can greatly improve the operation efficiency. But in general, there is a lot of uncertainty in the warehouse. For example, the position and pose of the pallets in the warehouse have large uncertainty. Applying the RGB-D sensor and lidar sensor, the pallet pose and position can be estimated. After pallet recognition, forklift utilizing path planning technology can achieve picking up the pallet independently in dried fruit workspace, which improves the flexibility of the forklift. Taking the forklift with non-integrity constraint characteristics as the research object, a pallet picking path planning method was proposed based on uniform cubic B-spline curve. Considering the multiple constraints in pallet picking process, such as minimum turning radius of the forklift, start-point and endpoint constraints and the curvature continuity constraint, the objective function of path curvature minimization was established. The related curve parameters needed to be optimized were solved by the optimization toolbox in Matlab. The simulation results showed that for different pallet picking scenarios, the proposed method can obtain a feasible path with continuous curvature. The steering wheel angle of the planning path did not exceed the maximum of the forklift. In the warehouse, the path planning and tracking test were carried out. In the scenario where the driving distance was 6 500 mm, the lateral offset distance was 1 500 mm, and the angle offset was 15°, the results showed that at the end point of path, the transverse offset error of the path tracking was 4.71 cm and the heading angle error was  $9.6 \times 10^{-3}$  rad. The feasibility of the

收稿日期: 2019-01-24 修回日期: 2019-03-17

**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、智能车辆技术研究,E-mail: enlilv@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

algorithm was verified, and it can be applied in similar large warehouse intelligent vehicles. The research can provide reference for the path planning of forklift in automated warehousing operation.

**Key words:** intelligent forklift; pallet picking; path planning; uniform cubic B-spline curve; multiple constraints; minimum curvature

## 0 引言

干果品类多、价值较高,仓储运输中多采用托盘码放的方式,利用智能叉车进行运输作业,能提高仓储效率<sup>[1]</sup>。然而货物托盘摆放位姿存在不确定性,应用路径规划技术可实现智能叉车托盘自主拾取,从而提高叉车作业的自主性和灵活性。

路径规划是智能装备的关键技术,一直以来都是国内外学者的研究热点<sup>[2-7]</sup>。传统的规划方法有人工势场法、栅格法等<sup>[8]</sup>,基于生物智能的算法有遗传算法、蚁群算法等<sup>[9-10]</sup>。有学者提出结合多种方法实现路径规划,如通过神经网络-模糊理论进行规划<sup>[11]</sup>,其不足之处是需要依赖大量试验来构建控制器模型。另外,参数化曲线的方法也多被应用于路径规划领域<sup>[12-13]</sup>,但主要的应用对象是自由度较高的小型移动平台,对于大型非完整性约束装备的路径规划研究较少。此外,也有学者提出智能车辆的路径规划以及参数优化方法<sup>[14-15]</sup>,并通过仿真分析规划跟踪的过程,但暂未实现车应用。

本文以托盘拾取路径规划过程中首末端点约束、叉车参数约束,以及路径曲率最小为目标,建立多约束条件下的B样条路径曲线,并利用Matlab对不同托盘拾取场景进行参数求解,最后通过试验验证规划算法的可行性。

## 1 托盘拾取

### 1.1 作业过程

研究的作业环境为半结构化仓储环境。仓库中设置货物缓冲区,货物托盘在缓冲区中的具体摆放位姿具有不确定性,采用传感感知系统,进行托盘位姿识别<sup>[16-17]</sup>,通过规划的路径调整叉车位姿,完成托盘拾取作业任务。

整个托盘拾取的作业过程如图1所示。叉车通过车载激光定位传感器获得仓库全局坐标下的定位信息,在距离货物缓冲区一定距离时,启动托盘位姿识别算法,通过货叉前端的RGB-D传感器以及激光测距传感器,获得托盘孔中心在全局参考坐标系中的坐标。其中,RGB-D传感器获取的图像具有较为丰富的纹理和色彩信息,但其深度探测距离有限,主要用于近距离的托盘位姿识别;激光传感器具有稳定、抗干扰能力强的特点,主要用于大偏移角

度、远距离的托盘位姿识别。两者结合,可提高托盘位姿识别的准确性。

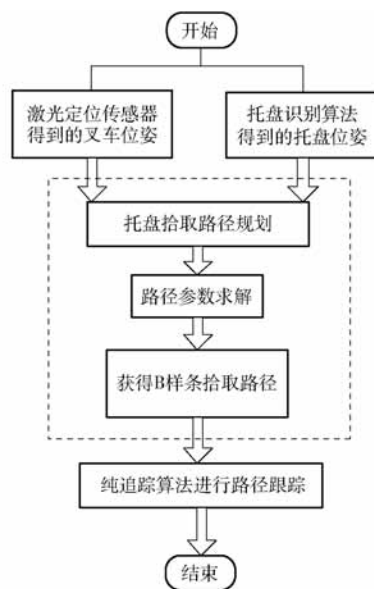


图1 叉车托盘拾取作业过程

Fig. 1 Pallet picking operation process of forklift

托盘位姿识别成功之后,进行路径规划,智能叉车按照规划的曲线,通过纯追踪算法进行路径跟踪,最终完成托盘拾取的任务。图1虚线框为实现智能叉车托盘拾取的重要环节<sup>[18]</sup>。

### 1.2 路径规划问题

基于托盘位姿识别系统已经准确识别出托盘孔中心的全局坐标,并且通过激光定位传感器已获得叉车在仓库中实时位姿为前提,研究托盘拾取路径规划问题。根据规划的方向,可分为前进式和进退式路径规划,本文研究前进式托盘拾取路径规划。

托盘拾取路径规划模型示意图如图2所示。研究的智能叉车属于前轮驱动、后轮转向的非完整约束车辆,以前轴中心点为车辆坐标系原点建立右手坐标系,并将货叉底端中点作为路径参考点。规划过程如下:在仓库全局坐标系下,托盘位姿识别系统启动时将货叉的中心坐标作为全局路径起始点,将识别到的托盘孔中心位姿作为全局路径目标点,在二维平面内规划一条从起始点到目标点、符合叉车运动学的全局可行路径。路径离散点序列为 $\{P_{\text{start}}, P_1, P_2, \dots, P_n, P_{\text{destination}}\}$ ,其中 $P_i(x_i, y_i, \psi_i)$ 为路径上的一个点, $\{x_i, y_i\}$ 为路径点的全局坐标, $\psi_i$ 为叉车此时的航向角。

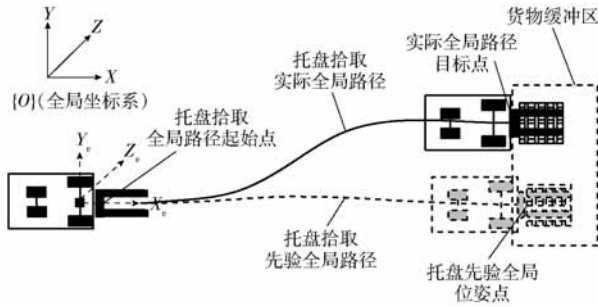


图2 托盘拾取路径规划模型

Fig. 2 Path planning model of pallet picking

## 2 托盘拾取路径规划算法

托盘拾取路径规划的目的:规划符合叉车运动学、叉车自身参数、曲率连续约束的可行路径,使得智能叉车对托盘进行自主拾取。托盘拾取路径规划算法基于三次均匀 B 样条曲线,根据托盘拾取的相关约束条件,建立多约束方程以及曲率最小化的目标函数,通过求解曲线的相关参数,从而得到拾取路径。

### 2.1 叉车运动学模型建立

由于仓库作业过程中叉车的运动速度比较低,在低速行驶时所受侧向力较小,假设在行驶过程中不发生侧滑现象,所以路径规划时只考虑叉车的运动学模型。

假设叉车车体为刚性,车轮形变可忽略不计,且轮子和地面的每个接触点仅产生纯滚动,不发生滑动,叉车的运动学模型如图 3 所示<sup>[19]</sup>。

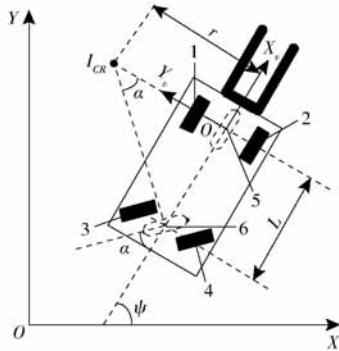


图3 叉车运动学模型

Fig. 3 Kinematics model of forklift

1,2. 前轮驱动轮 3,4. 后轮转向轮 5. 等效驱动轮 6. 等效转向轮

图 3 中全局坐标系为  $OXY$ , 叉车坐标系为  $Ox_v Y_v$ ;  $I_{CR}$  为叉车瞬时旋转中心。

由图 3 可知,叉车航向角为

$$\psi = \arctan \frac{dy}{dx} \quad (1)$$

式中  $(x, y)$ ——路径全局坐标值

由文献[20]可知,路径曲率  $\kappa$  和瞬时旋转半径  $r$ 、前后轮的轴距  $L$  以及等效转向轮转角  $\alpha$  的关系为

$$\kappa = \frac{1}{r} = \frac{\tan \alpha}{L} = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \dot{y}\ddot{x}}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

由式(2)可得等效转向轮转角为

$$\alpha = \arctan(L\kappa) \quad (3)$$

### 2.2 托盘拾取路径曲线约束

#### 2.2.1 端点状态约束

路径规划算法输出的路径曲线在起止点满足以下约束:①起始点是叉车开始进行托盘位姿识别时货叉底端中心点的全局坐标点;路径在起始点处的切向角等于叉车的初始航向角;路径起点曲率为 0 或者尽量小,以降低车轮的初始转向角。②终点是托盘位姿识别系统所获得的托盘孔中心全局坐标点;路径在目标点的切向角等于托盘在全局坐标中的夹角,即叉车的目标航向角;路径终点曲率为 0 或者尽量小,使托盘拾取终点处的车轮转向角接近于 0。

#### 2.2.2 叉车参数约束

路径规划过程中曲率过大或者曲率不连续,将导致叉车无法对所规划的路径进行准确地跟踪。而拾取过程中最终点的跟踪误差一旦过大可能导致托盘拾取失败。故托盘拾取路径规划时需考虑叉车的自身参数约束。

(1)最小转弯半径约束。曲线曲率不大于叉车前轴中心点最大曲率,即每个路径点上曲率应满足叉车最小转弯半径约束;即,  $\kappa \leq 1/R_{\min}$ ,  $R_{\min}$  为叉车的最小转弯半径。

(2)曲率连续约束。为避免路径跟踪过程中出现原地转向的现象,对轮胎造成过度磨损,故路径应保证曲率连续。因为采用三次 B 样条曲线,所以满足 C2 连续的性质<sup>[21-22]</sup>。

由于托盘位姿识别系统识别距离最大约 7 m,货叉宽度 15 cm、托盘孔宽度 40.5 cm,故叉车行驶距离较短,对最终点的精度要求较高。为保证路径跟踪精度,实际拾取过程中叉车速度不超过 800 mm/s。在该最大速度下,符合以上约束的路径,转向系统可进行较好地跟踪。因此不考虑后轮转向角速度约束。

### 2.3 三次 B 样条曲线

根据文献[23],三次均匀 B 样条曲线表达式为

$$P_i(u) = \sum_{j=0}^3 N_{j,3}(u) V_{i+j} \quad (4)$$

式中  $u$ ——参数,取值为 $[0, 1]$

$N_{j,3}(u)$ ——三次 B 样条基函数

三次 B 样条曲线写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} u^3 & u^2 & u & 1 \end{bmatrix} \mathbf{G} \mathbf{V} \quad (5)$$

三次 B 样条曲线的一阶导数、二阶导数为

$$\begin{bmatrix} \frac{dx}{du} & \frac{dy}{du} \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 3u^2 & 2u & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{G} \mathbf{V} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{d^2x}{du^2} & \frac{d^2y}{du^2} \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 6u & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{G} \mathbf{V} \quad (7)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_i \\ \mathbf{V}_{i+1} \\ \mathbf{V}_{i+2} \\ \mathbf{V}_{i+3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{1,i,x} & V_{1,i,y} \\ V_{2,i,x} & V_{2,i,y} \\ V_{3,i,x} & V_{3,i,y} \\ V_{4,i,x} & V_{4,i,y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中  $\mathbf{G}$ ——三次B样条曲线的参数矩阵

$\mathbf{V}$ ——控制点坐标值矩阵

$V_{1,i,x}, V_{2,i,x}, V_{3,i,x}, V_{4,i,x}$ ——第*i*段B样条曲线4个控制点横坐标值

$V_{1,i,y}, V_{2,i,y}, V_{3,i,y}, V_{4,i,y}$ ——第*i*段B样条曲线4个控制点纵坐标值

由于三次均匀B样条曲线的端点一般不通过特征多边形的首、末顶点,也不直接与特征多边形的首、末边有关联。构造符合规划要求的三次均匀样条曲线的方法如下<sup>[24]</sup>:如图4所示,分别以托盘拾取的初始位置点和目标位置点  $P_{\text{start}}(x_s, y_s, \psi_s)$ 、 $P_{\text{destination}}(x_d, y_d, \psi_d)$  为中点,增加  $P_0, P_1, P_2, P_3$  4个控制点。其中  $P_0P_1, P_2P_3$  的斜率是初始航向角  $\psi_s$  和目标航向角  $\psi_d$ 。这样能保证曲线的起点和终点以及相应的切线方向是叉车的初始位姿点、目标位姿点及相对应的航向角。

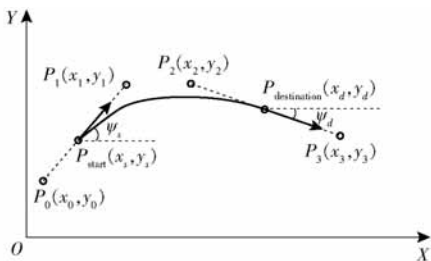


图4 B样条曲线中控制点与曲线的关系

Fig. 4 Relationship between control points and B-spline curve

### 2.4 多约束条件下托盘拾取路径曲线

由于B样条曲线形状完全由控制点的位置确定,对托盘拾取路径参数化的过程就是求出控制点的过程。参照文献<sup>[24]</sup>,已知路径起始点、托盘孔中心目标点坐标的条件下,设图4中  $P_0P_1$  和  $P_2P_3$  的长度分别为  $2L_1, 2L_2$ ,通过求解多约束条件下参数

$L_1, L_2$ ,可得到最优的托盘拾取路径。

#### 2.4.1 基于三次B样条曲线的多约束条件

如图4所示,路径规划的初始已知条件为:货叉全局起始位姿  $P_{\text{start}}(x_s, y_s, \psi_s)$ 、托盘孔中心的全局目标位姿为  $P_{\text{destination}}(x_d, y_d, \psi_d)$ ,  $P_0P_1$  的距离为  $2L_1, P_2P_3$  的距离为  $2L_2$ ,可得  $P_0, P_1, P_2, P_3$  控制点的坐标为

$$P_0 = \begin{bmatrix} P_{\text{start},x} \\ P_{\text{start},y} \end{bmatrix} - [\cos\psi_s \quad \sin\psi_s] \begin{bmatrix} L_1 \\ L_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} P_{\text{start},x} \\ P_{\text{start},y} \end{bmatrix} + [\cos\psi_s \quad \sin\psi_s] \begin{bmatrix} L_1 \\ L_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} P_{\text{destination},x} \\ P_{\text{destination},y} \end{bmatrix} - [\cos\psi_d \quad \sin\psi_d] \begin{bmatrix} L_2 \\ L_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} P_{\text{destination},x} \\ P_{\text{destination},y} \end{bmatrix} + [\cos\psi_d \quad \sin\psi_d] \begin{bmatrix} L_2 \\ L_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

结合文献<sup>[23]</sup>所述的B样条曲线的性质以及上述路径规划的约束条件,可以得到三次B样条路径曲线的首末端点位置为

$$P_{(0)} = \frac{P_0 + 4P_{\text{start}} + P_1}{6} = P_{\text{start}} \quad (14)$$

$$P_{(1)} = \frac{P_3 + 4P_{\text{destination}} + P_2}{6} = P_{\text{destination}} \quad (15)$$

三次B样条曲线首末端点处的一阶导数、二阶导数分别为

$$P'_{(0)} = \frac{1}{2}(P_1 - P_0) \quad (16)$$

$$P'_{(1)} = \frac{1}{2}(P_3 - P_2) \quad (17)$$

$$P''_{(0)} = P_1 - 2P_{\text{start}} + P_0 = 0 \quad (18)$$

$$P''_{(1)} = P_3 - 2P_{\text{destination}} + P_2 = 0 \quad (19)$$

由三次B样条曲线上任一点的曲率不大于最小转弯半径的倒数,有约束

$$\kappa = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}\dot{y}}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{\frac{3}{2}}} \leq \frac{1}{R_{\text{min}}} \quad (20)$$

叉车在跟踪三次B样条路径曲线时,等效转向轮转角为

$$\alpha = \arctan(\kappa R) = \arctan \frac{L(\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}\dot{y})}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (21)$$

当待优化的参数  $L_1, L_2$  过小时,在首末端点附近,路径曲率变化较大,不利于跟踪。经过多次试验之后,选取经验值  $L_1, L_2$  的最小值为 1 500 mm,此约束条件下所规划的路径较适合叉车运动跟踪。

#### 2.4.2 参数最优化求解

假设路径曲线在任意一点曲率为  $\kappa(u)$ 。采用最优化的方法来求解满足多约束条件的曲线参数。



本文的优化目标为

$$\min \kappa_{\max}(P_{\text{start}}, P_1, P_2, \dots, P_n, P_{\text{destination}}) \quad (22)$$

通过  $L_1$ 、 $L_2$  两个变量可以确定控制点的位置,从而确定了路径曲线上的所有离散序列点  $\{P_{\text{start}}, P_1, P_2, \dots, P_n, P_{\text{destination}}\}$ ,故该优化目标是优化参数  $L_1$ 、 $L_2$ ,使得路径的最大曲率最小,从而得到较为光滑的路径。

非等式约束条件为

$$\begin{cases} \kappa = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \dot{y}\ddot{x}}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}} \leq \frac{1}{R_{\min}} \\ \alpha = \arctan(L\kappa) \leq \alpha_{\max} \\ L_1 \geq 1500 \text{ mm} \\ L_2 \geq 1500 \text{ mm} \end{cases} \quad (23)$$

等式约束条件为

$$\begin{cases} [x \ y] = [u^3 \ u^2 \ u \ 1] \mathbf{G} \mathbf{V} / 6 \\ [\dot{x} \ \dot{y}] = [3u^2 \ 2u \ 1 \ 0] \mathbf{G} \mathbf{V} / 6 \\ [\ddot{x} \ \ddot{y}] = [6u \ 2 \ 0 \ 0] \mathbf{G} \mathbf{V} / 6 \\ \psi = \arctan \frac{dy}{dx} \\ \kappa = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \dot{y}\ddot{x}}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}} \\ \alpha = \arctan(L\kappa) \\ \mathbf{G} = \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{V}_1 = [P_0 \ P_{\text{start}} \ P_1 \ P_2 \ P_{\text{destination}} \ P_3] \end{cases} \quad (24)$$

### 3 典型场景选取及仿真分析

GA 函数是 Matlab 遗传算法工具箱中用于求解多约束条件模型的优化函数<sup>[25]</sup>。建立托盘拾取路径规划数学模型后,以式(22)曲率最小为优化目标,以  $L_1$ 、 $L_2$  为待优化的变量,以式(23)、(24)为约束条件,调用 GA 函数,可求得典型场景下托盘拾取路径的 B 样条曲线参数  $L_1$ 、 $L_2$ 。

#### 3.1 托盘拾取典型场景选取及曲线参数求解

如图 5 所示,假定货物缓冲区边框形成的坐标系与全局坐标系只存在平移关系、不存在旋转关系,叉车通过全局路径行驶至货物缓冲区附近停下。由于 B 样条曲线具有仿射不变的特性,即对控制点坐标进行旋转平移都不会改变曲线的形状,故仿真时假设路径的全局起始坐标点为  $(0 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 90^\circ)$ 。随后叉车启动托盘位姿识别系统,获得托盘中心实际位姿  $P_{\text{destination}}(x_d, y_d, \psi_d)$ ,并进行托盘拾取路径规划。

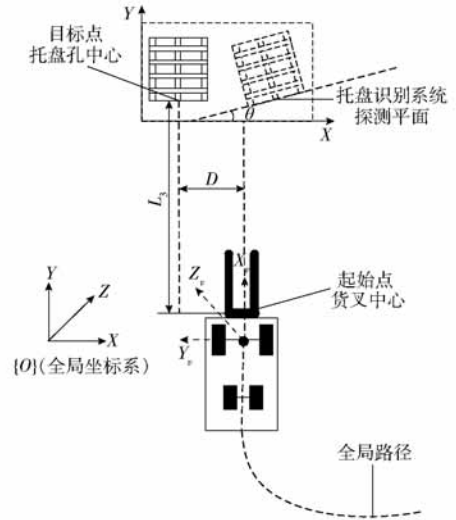


图 5 典型托盘拾取场景示意图

Fig. 5 Typical pallet picking scene

图 5 中托盘孔中心点至货叉底端中心点的纵向距离定义为拾取距离  $L_3$ 、托盘孔中心点与货叉底端中心点的横向距离定义为横向偏移距离  $D$ 、探测平面上托盘孔中心所在直线与缓冲区水平轴  $X$  轴夹角定义为偏移角  $\theta$ ,  $\theta$  的正负表示偏移方向,沿着  $X$  轴逆时针方向为正,顺时针方向为负。

智能叉车系统实际工作中,拾取距离  $L_3$  约为 6 500 mm 时,托盘位姿识别系统便能准确获得托盘孔中心的位姿。仿真时,将拾取距离  $L_3$  作为固定参数,只考虑横向偏移距离  $D$  和偏移角  $\theta$  两个参数。

仿真时所用相关参数见表 1。根据横向偏移距离和偏移角不同,选取横向偏移距离分别为 500、1 000、1 500 mm,偏移角分别为  $-5^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $-10^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $-15^\circ$ 、 $15^\circ$  等 18 个典型的托盘摆放位姿场景,利用 Matlab 中 GA 函数求解各个场景下路径曲线的优化参数  $L_1$ 、 $L_2$ ,结果见表 2。

表 1 仿真相关参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值
叉车前后轴距 $L/\text{mm}$	1 629
叉车最大转向角 $\alpha_{\max}/\text{rad}$	1.047 1
叉车驱动轴中点最大曲率 $\kappa_{\max}/\text{mm}^{-1}$	$1.06 \times 10^{-3}$
叉车托盘拾取距离/mm	6 500
托盘尺寸/(mm × mm)	1 000 × 1 000
托盘最大横向偏移距离/mm	1 500
托盘最大偏移角/ $^\circ$	15
货物缓冲区大小/(mm × mm)	1 500 × 2 500
路径起始点坐标/(mm, mm, $^\circ$ )	(0, 0, 90)
叉车车身宽度/mm	1 200
叉车车身长度/mm	2 450

#### 3.2 托盘拾取路径规划仿真结果分析

选取表 2 中场景 1、场景 18 两个典型的仿真场

景, 仿真结果如图6、7所示。

表2 不同典型场景下所得到的曲线参数  $L_1, L_2$

Tab.2 Curve parameters  $L_1, L_2$  under different typical scenarios

场景	横向偏移 距离/mm	偏移角/ (°)	$L_1$ /mm	$L_2$ /mm
1	500	-5	1 883.8	1 500.0
2	500	5	1 500.0	1 895.2
3	500	-10	2 576.5	1 533.0
4	500	10	1 526.8	1 895.4
5	500	-15	1 628.3	1 844.8
6	500	15	1 500.0	1 916.8
7	1 000	-5	1 901.1	1 539.9
8	1 000	5	1 504.5	1 923.6
9	1 000	-10	1 909.9	1 500.0
10	1 000	10	1 500.0	1 956.0
11	1 000	-15	1 500.0	1 979.8
12	1 000	15	1 500.0	2 890.2
13	1 500	-5	1 939.5	1 500.0
14	1 500	5	1 500.0	1 500.0
15	1 500	-10	1 961.7	1 500.0
16	1 500	10	1 500.0	2 028.3
17	1 500	-15	1 945.4	1 500.0
18	1 500	15	1 500.0	2 058.0

由图6a可知, 叉车从起点出发沿着规划路径到达托盘目标位置; 由图6b可知, 在路径起始点和目标点处, 等效转向轮转角为零, 转向轮最大转角为  $-0.0761 \text{ rad}$ , 小于  $\alpha_{\max}$ , 符合规划要求; 由图6c可

知, 叉车航向角从  $1.5708 \text{ rad}$  到  $1.4835 \text{ rad}$  平稳变化, 符合托盘拾取的位姿要求; 由图6d可知, 路径曲率连续, 最大值为  $-4.68 \times 10^{-5} \text{ mm}^{-1}$ , 不超过叉车的最大曲率  $\kappa_{\max}$ , 满足规划要求。其中, 曲率的正负仅表示路径的凹凸性不同, 等效转向轮转角正负仅表示转向不同。

对比图6, 由图7可知, 在路径起始点和目标点处, 等效转向轮转角为零, 前进过程中转向轮最大转角为  $0.5255 \text{ rad}$ , 比图6b中最大转角大; 由图7c可知, 叉车的航向角变化量符合端点约束及托盘拾取位姿要求, 但航向角变化量比图6c大; 由图7d可知, 路径曲率连续, 最大不超过  $3.5596 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$ , 符合叉车的最大曲率  $\kappa_{\max}$  的要求。

故小横向偏移距离、小偏移角场景(场景1)下, 所规划的路径总体平缓, 有利于跟踪阶段的有效跟踪。而相同的起始位姿下, 目标托盘的横向偏移距离、偏移角越大(场景18), 路径的曲率越大, 拾取难度越高。

## 4 试验

### 4.1 试验平台

以改装后的杭州叉车 A30 作为干果叉车试验平台<sup>[1]</sup>, 车辆总质量  $4.85 \text{ t}$ 。叉车采用前轮驱动、后轮转向的结构。车的长、宽、高尺寸为  $2.502 \text{ m} \times 1.265 \text{ m} \times 2.100 \text{ m}$ , 货叉长度  $1.6 \text{ m}$ , 货叉宽度  $15 \text{ cm}$ 。平台及硬件组成如图8所示。

叉车通过 Sick 公司的 NAV350 型室内激光定

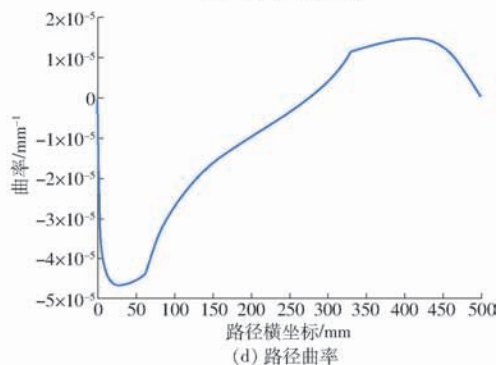
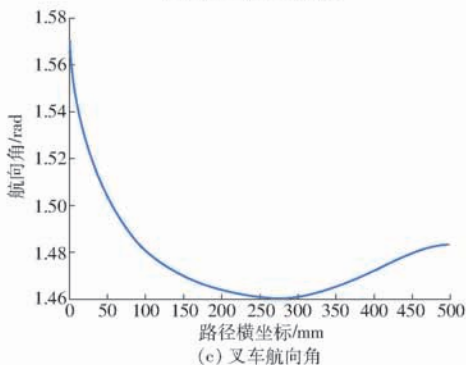
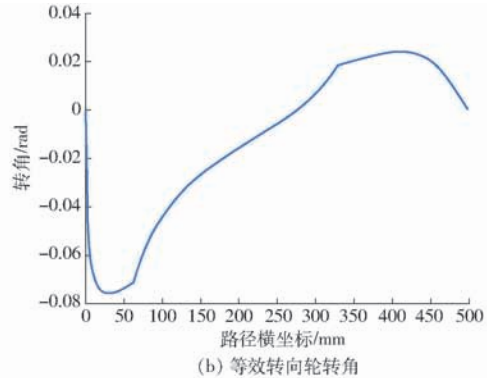
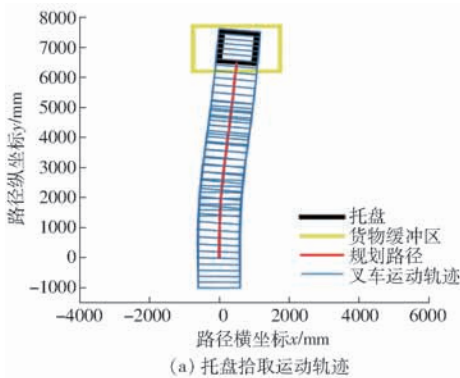


图6 托盘拾取场景1的仿真结果

Fig.6 Simulation results of path planning in pallet picking scenario 1

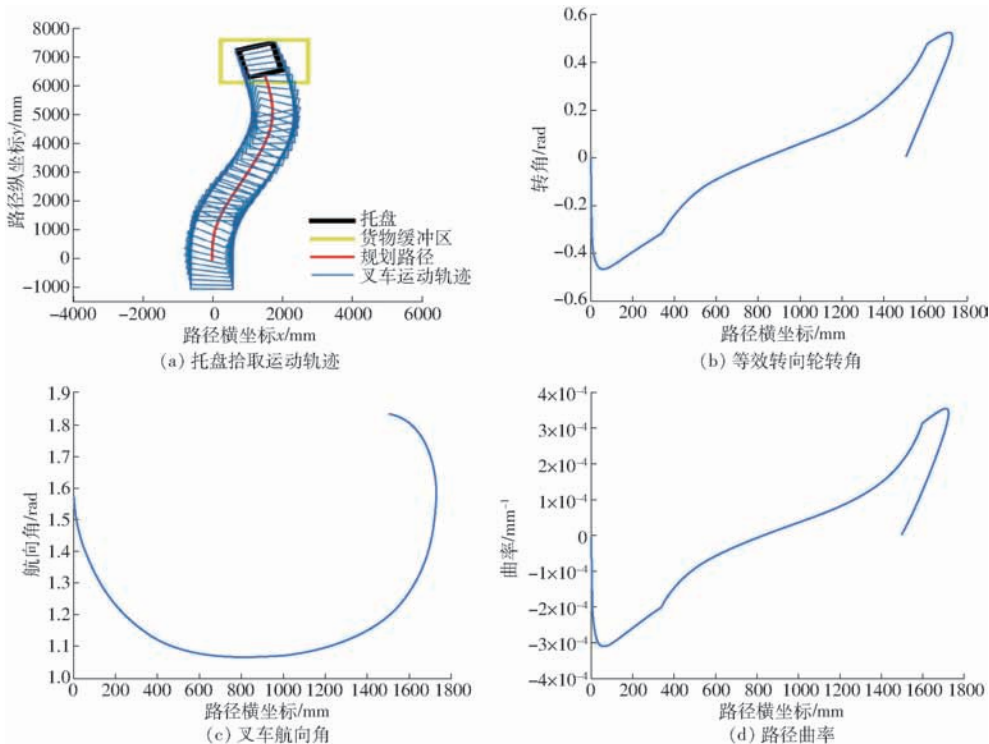


图7 托盘拾取场景18的仿真结果

Fig.7 Simulation results of path planning in pallet picking scenario 18



图8 托盘拾取试验场景

Fig.8 Test scenario of pallet picking

- 1. Tim310 型激光避障传感器
- 2. Beckhoff 型车载控制器
- 3. 定位反光标贴
- 4. NAV350 型激光定位传感器
- 5. 转向步进电机
- 6. 电子加速踏板
- 7. Kinect2 型 RGB-D 传感器
- 8. Tim561 型激光测距传感器
- 9. 目标托盘

位传感器扫描环境中的反光标贴进行全局定位,可得到全局坐标系下的坐标 $(x, y, \psi)$ 。NAV350 型传感器的位姿角度测量范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ ,测量频率 8 Hz,测量精度 $\pm 0.15^\circ$ ,定位精度为 $\pm 4$  mm。

智能叉车利用 Kinect2 型 RGB-D 传感器、Tim561 型激光测距传感器进行托盘位姿估计<sup>[17]</sup>。在托盘位姿识别系统探测距离为 6 500 mm、横向偏移距离为 1 500 mm、偏移角 $15^\circ$ 情况下,托盘位置估计精度为 $\pm 60$  mm,角度估计精度为 $\pm 6^\circ$ 。

#### 4.2 试验设计

在某仓库进行托盘拾取路径规划与跟踪试验(图8)。选用的托盘尺寸为 $1\ 200\text{ mm} \times 1\ 200\text{ mm} \times$

140 mm,托盘孔宽度为 405 mm。

选取仿真场景 18 作为试验场景。试验时路径起始点位姿为 $(505.353\text{ mm}, 6\ 627.26\text{ mm}, 87.802^\circ)$ ,最终点托盘孔中心位姿为 $(2\ 253.54\text{ mm}, 13\ 065\text{ mm}, 102.802^\circ)$ 。

路径跟踪采用纯追踪方法<sup>[26-27]</sup>,纯追踪前视距离为 700 mm。由于托盘拾取过程中前进距离短、路径曲率较大,拾取精度要求较高,试验时,叉车的最大速度不超 800 mm/s。

#### 4.3 试验结果分析

通过 Beckhoff 型车载控制器采集试验数据,并导入到 Matlab 中,试验结果如图 9~11 所示。

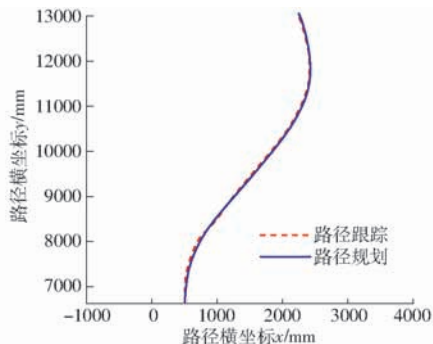


图9 托盘拾取路径规划与路径跟踪曲线

Fig.9 Path planning and path tracking curves of pallet picking process

由图 9 可知,规划的拾取路径整体可较好地跟踪,两条曲线的重合度较高。起始点附近由于转

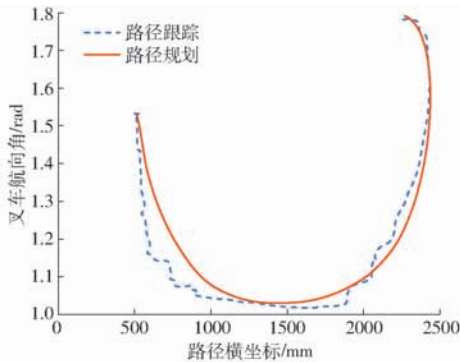


图10 路径规划与路径跟踪航向角曲线

Fig. 10 Path planning and path tracking heading angle curves of pallet picking process

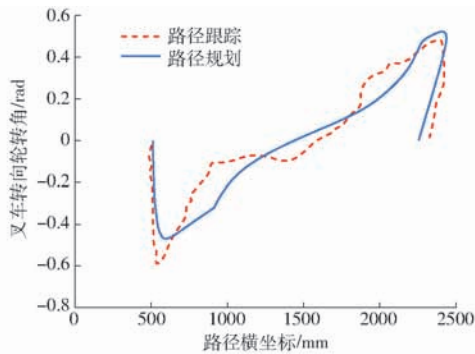


图11 路径规划等效转向轮转角与路径跟踪转角曲线

Fig. 11 Path planning equivalent steering wheel angle curve and path tracking angle curve of pallet picking process

角较大,出现跟踪偏差,之后误差收敛,最终目标点的横向偏移距离误差为 4.71 cm,满足托盘拾取的精度要求。

由图 10 可知,两条航向角曲线的起始点和终点

基本重合,首末端点航向满足位姿约束条件。路径起始点附近,由于航向变化较大,出现跟踪偏差,之后误差收敛。路径终点航向角误差为  $9.6 \times 10^{-3}$  rad,满足托盘拾取精度要求。

由图 11 可知,叉车行进拾取过程中,由于初始位置附近转向角变化较大,出现偏差,造成起始点附近的跟踪偏差(图 9),但之后误差收敛。整个过程中转向轮转角最大为  $-0.592$  rad,不超过叉车最大转向轮转角  $1.0471$  rad,满足叉车的运动参数要求。

针对大横向偏移距离和大偏移角度的拾取场景,拾取难度较大,但路径跟踪的最终点误差基本能满足托盘拾取的要求。经过试验,其他拾取场景下,托盘拾取路径规划算法所规划的路径可达到智能叉车托盘拾取的要求。

## 5 结论

(1) 针对干果仓储中智能叉车托盘自主拾取过程,提出了一种基于三次均匀 B 样条曲线的托盘拾取路径规划方法。综合考虑叉车最小转弯半径、首末端点约束、叉车自身参数等约束,建立托盘拾取多约束条件、曲率最小优化目标的数学模型。

(2) 根据托盘初始摆放位姿不同,设计了 18 种典型的托盘拾取场景。通过 Matlab 优化工具箱 GA 函数对优化变量进行求解。

(3) 托盘拾取试验结果表明,智能叉车对托盘拾取规划算法生成的路径可较好地进行跟踪,终点横向偏移误差 4.71 cm,终点航向角误差为  $9.6 \times 10^{-3}$  rad,基本满足托盘拾取的精度要求。

## 参 考 文 献

- [1] 吕恩利,阮清松,刘妍华,等. 基于动态识别区和 B 样条曲线的智能叉车避障路径规划[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(1):359-366.  
LÜ Enli, RUAN Qingsong, LIU Yanhua, et al. Obstacle avoidance path planning for intelligent forklift truck based on dynamic identification zone and B-spline curve[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(1):359-366. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190141&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190141&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.041. (in Chinese)
- [2] ZHU Zhijie, SCHMERLING E, PAVONE M. A convex optimization approach to smooth trajectories for motion planning with car-like robots[C]//IEEE Conference on Decision and Control, 2015:835-842.
- [3] 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.
- [4] GAO Fei, WU W, LIN Yi, et al. Online safe trajectory generation for quadrotors using fast marching method and Bernstein basis polynomial[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2018:344-351.
- [5] 陈成,何玉庆,卜春光,等. 基于四阶贝塞尔曲线的无人车可行轨迹规划[J]. 自动化学报,2015,41(3):486-496.  
CHEN Cheng, HE Yuqing, BU Chunguang, et al. Feasible trajectory generation for autonomous vehicles based on quartic Bezier curve[J]. Acta Automatica Sinica, 2015,41(3):486-496. (in Chinese)
- [6] 艾长胜,林洪川,武德林,等. 葡萄园植保机器人路径规划算法[J]. 农业工程学报,2018,34(13):77-85.  
AI Changsheng, LIN Hongchuan, WU Delin, et al. Path planning algorithm for plant protection robots in vineyard[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(13):77-85. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 赵晓, 王铮, 黄程侃, 等. 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 Xiao, WANG Zheng, HUANG Chengkan, et al. Mobile robot path planning based on an improved A\* algorithm[J]. Robot, 2018, 40(6): 903-910. (in Chinese)
- [9] BAKDI A, HENTOUT A, BOUTAMI H, et al. Optimal path planning and execution for mobile robots using genetic algorithm and adaptive fuzzy-logic control[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2017, 89: 95-109.
- [10] 刘建华, 杨建国, 刘华平, 等. 基于势场蚁群算法的移动机器人全局路径规划方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 18-27.  
LIU Jianhua, YANG Jianguo, LIU Huaping, et al. Robot global path planning based on ant colony optimization with artificial potential field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 18-27. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150903&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150903&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.003. (in Chinese)
- [11] DEMIRLI K, KHOSHNEJAD M. Autonomous parallel parking of a car-like mobile robot by a neuro-fuzzy sensor-based controller[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2009, 160(19): 2876-2891.
- [12] OLEJNIKOVA H, BURRI M, TAYLOR Z, et al. Continuous-time trajectory optimization for online UAV replanning[C]// IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, 2016: 5332-5339.
- [13] 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.
- [14] BU Xingping, SU Hu, ZOU Wei, et al. Curvature continuous path smoothing based on cubic Bezier curves for car-like vehicles[C]// IEEE Conference on Robotics and Biomimetics, 2015: 1453-1458.
- [15] 赵海兰, 高松, 孙宾宾, 等. 全自动平行泊车路径规划方法研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(7): 263-269.  
ZHAO Hailan, GAO Song, SUN Binbin, et al. Research on path planning method for fully-automatic parallel parking system[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(7): 263-269. (in Chinese)
- [16] XIAO Junhao, LU Huimin, ZHANG Lilian, et al. Pallet recognition and localization using an RGB-D camera[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, 14: 1-10.
- [17] 赵俊宏, 吕恩利, 陆华忠, 等. 基于激光雷达的托盘位姿识别算法及验证[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2469-2476.  
ZHAO Junhong, LÜ Enli, LU Huazhong, et al. Pallet localization detecting algorithm based on laser scanning[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 2469-2476. (in Chinese)
- [18] SETH T, MATTHEW R, WALTER A, et al. A voice-commandable robotic forklift working alongside humans in minimally-prepared outdoor environments[C]// International Conference on Robotics and Automation, 2010: 526-533.
- [19] 孟庆宽, 仇瑞承, 张漫, 等. 基于改进粒子群优化模糊控制的农业车辆导航系统[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 29-36.  
MENG Qingkuan, QIU Ruicheng, ZHANG Man, et al. Navigation system of agricultural vehicle based on fuzzy logic controller with improved particle swarm optimization algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 29-36. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150305&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150305&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.005. (in Chinese)
- [20] 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)
- [21] HAN L, YASHIRO H, NEJAD H T N, et al. Bezier curve based path planning for autonomous vehicle in urban environment[C]// IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2010: 1036-1042.
- [22] ELBANHAWI M, SIMIC M, JAZAR R N. Continuous path smoothing for car-like robots using B-spline curves[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2015, 801(Supp.): S23-S56.
- [23] 方忆湘, 刘文学. 基于几何特性的三次均匀 B 样条曲线构造描述[J]. 工程图学学报, 2006, 27(2): 96-102.  
FANG Yixiang, LIU Wenxue. Description of cubic uniform B-spline curve construction based on the geometric properties[J]. Journal of Graphics, 2006, 27(2): 96-102. (in Chinese)
- [24] 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.  
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. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180404&journal\\_id=jcsam](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. (in Chinese)
- [25] 龚纯, 王正林, 肖静, 等. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [26] ANIBAL O, GUILLERMO H. Stability analysis of mobile robot path tracking[C]// International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots, 1995: 461-466.
- [27] ZHANG Quanyi, QIU H. A dynamic path search algorithm for tractor automatic navigation[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(2): 639-646.