

基于 Bezier 曲线优化的农机自动驾驶避障控制方法

奚小波¹, 史扬杰¹, 单翔¹, 张琦¹, 金亦富¹, 龚俊杰¹,
张剑峰¹, 张瑞宏^{1,2*}

(1. 扬州大学机械工程学院/扬州大学江苏省现代农机农艺融合技术工程中心, 扬州 225127;
2. 南京沃杨机械科技有限公司, 南京 211200)

摘要:动力换挡拖拉机的产生促进农机自动驾驶向着无人化方向发展, 农机的自动避障成为需要解决的关键问题。该文针对最短切线路径曲线曲率不连续、跟踪控制精度差及农机运动模型精度低等缺点, 采用三阶 Bezier 曲线优化法形成连续平滑农机避障路径, 通过链式控制理论建立农机运动线性控制模型, 利用 PI 控制器进行转角补偿, 并进行了控制方法的仿真和犁耕作业试验。仿真结果表明: 农机行驶的航向误差角在 $-0.06 \sim 0.06$ rad, 横向位置误差小于 13 cm, 前轮转向角变化平缓, 没有显著突变, 说明该方法控制精度较高, 农机能够按预设轨迹行驶。犁耕作业试验结果表明: Bezier 曲线部分的避障精度为 5.21 cm, 曲线路径的跟踪控制效果较好; 避障后农机继续沿直线行驶的精度为 1.98 cm, 说明该方法可保证农机在避障后恢复直线自动驾驶。研究结果表明, 该避障路径控制方法在不平整犁耕地中具有较好的鲁棒性和适应性, 可满足拖拉机作业的避障要求。

关键词:农业机械; 运动规划; 避障; 自动驾驶; Bezier 曲线

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.010

中图分类号: S24 文献标志码: A 文章编号: 1002-6819(2019)-19-0082-07

奚小波, 史扬杰, 单翔, 张琦, 金亦富, 龚俊杰, 张剑峰, 张瑞宏. 基于 Bezier 曲线优化的农机自动驾驶避障控制方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 82–88. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.010 <http://www.tcsae.org>
Xi Xiaobo, Shi Yangjie, Shan Xiang, Zhang Qi, Jin Yifu, Gong Junjie, Zhang Jianfeng, Zhang Ruihong. Obstacle avoidance path control method for agricultural machinery automatic driving based on optimized Bezier [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19): 82–88. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.010 <http://www.tcsae.org>

0 引言

农机自动驾驶技术是精准农业实施的关键与基础^[1-3], 目前农机自动驾驶仪已得到大规模推广使用, 尤其在新疆、黑龙江、内蒙等地, 农机自动驾驶已广泛应用于耕作、播种、施肥、喷药、收获等农业生产过程^[4-7]。现阶段的农机自动驾驶主要以直线驾驶为主, 这主要受制于拖拉机动力换挡技术, 目前中国一拖集团已成功开发了动力换挡拖拉机, 使得农机无人自动驾驶成为新的研究热点^[8-9]。

农机在田间作业时可能遇到电线杆、电塔桩、树木等障碍物, 需要农机能自动绕过障碍物并迅速回到原有作业路线, 因此自动避障是农机无人驾驶的必要技术条件。对于农机自动驾驶过程中的主动避障, 一般采取局部路

径规划方法, 农机在行驶过程中利用传感器获取自身状态信息及周围环境信息, 系统监测行驶路径上存在障碍物时, 将在短时内提前规划避障路径, 并控制农机沿规划路径避障^[10-11]。因此, 避障路径的规划与控制将直接关系到农机能否安全避障、避障精度及避障后直线行驶精度。

现有避障路径规划多采用最短切线法, 其具有路径生成快速简单、轨迹短等优点^[12-13], 但其路径曲线的曲率不连续且存在折角拐点, 易使拖拉机前轮转角骤变, 影响农机避障行驶精度。Bezier 曲线是一种连续的平滑曲线, 广泛应用于移动机器人轨迹规划、机构运动规划、结构造型等领域, 具有曲率连续、控制简单等特点^[14-18]。本文以最短切线法为基础, 利用 Bezier 曲线优化避障路径, 通过 Matlab 仿真研究路径跟踪控制的可行性, 并以犁耕作业为例, 采用配有动力换挡系统及农机自动驾驶仪的东方红 LF954-C 型拖拉机研究系统的避障行驶精度。

1 农机运动避障路径规划

1.1 最短切线农机避障路径

在设计农机避障路径前, 首先要确认农机前方障碍物特征圆大小及农机与障碍物的距离。为使避障路径容易控制, 采用最短切线法规划农机避障路径, 如图 1 所示, 理论避障路径由圆弧段 AB、直线段 BC、圆弧段 CE、直线段 EF 和圆弧段 FG 组成, 其中相邻的圆弧段与直线段

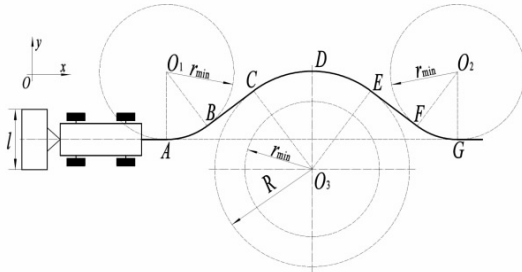
收稿日期: 2019-05-08 修订日期: 2019-08-08

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0700903); 江苏省科技项目(BE2018302); 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(17)3013); 江苏省农机三新工程项目(NJ2018-15); 南京市科技计划项目(201716059)

作者简介: 奚小波, 博士, 讲师, 主要从事农业机械设计与制造研究。
Email: xxbctg@126.com

*通信作者: 张瑞宏, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业工程及装备研究。Email: zhang-rh@163.com

相切。根据实际农机作业情况,一般障碍物(电线杆、树木等)轮廓半径小于农机最小转弯半径,因此障碍物特征圆半径 $R=r_{\min}+0.5l$ 。该避障路径是基于最短切线建立的,通过农机运动几何关系确定各拐点坐标,从而完成避障路径规划,具有快速简单等优点。虽然这种路径在位置和方向上是连续的,但路径曲线的曲率不连续,致使农机运动角速度不连续,农机在由圆弧段转直线段(或直线段转圆弧段)时其前轮转角骤变且变幅较大,难以实现快速调节,从而无法保证农机沿既定路径行驶,影响农机避障的行驶精度。



注: l 为农机具作业幅宽,cm; r_{\min} 为农机最小转弯半径,cm; O_3 为障碍物特征圆圆心; R 为障碍物特征圆半径,cm; O_1 、 O_2 为避障转弯圆心; A 为避障起始点; G 为避障目标点; B 、 C 、 E 、 F 为最短切线路径上直线与圆弧的切点; D 为避障路径中点。

Note: l is the agricultural machinery operation width, mm; r_{\min} is the minimum turning radius of the tractor, cm; O_3 is the center of the obstacle characteristic circle; R is the radius of the obstacle characteristic circle, cm; O_1 and O_2 are centers of the obstacle avoidance circle; A is the starting point of the obstacle avoidance; G is the target point of the obstacle avoidance; B , C , E and F are the tangent points between the straight line and the arc on the shortest tangent path; D is the halfway point of obstacle avoidance path.

图1 最短切线避障轨迹图

Fig.1 Trace of shortest tangent obstacle avoidance path

1.2 Bezier曲线避障路径优化

给定空间 $n+1$ 个控制点 $P_i(i=0,1,\dots,n)$,则Bezier曲线方程可表示为^[19-20]:

$$Q(t) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(t) \cdot P_i \quad (t \in [0,1]) \quad (1)$$

式中 t 为位置参数, $B_{i,n}(t)$ 是 n 次Bernstein基函数。对Bezier曲线方程求导得:

$$Q'(t) = n \sum_{i=0}^{n-1} B_{i,n-1}(t) \cdot (P_i - P_{i-1}) \quad (2)$$

将 $t=0$ 与 $t=1$ 带入公式(2),则有:

$$Q'(0) = Q'(1) = n \cdot (P_n - P_0) \quad (3)$$

式(3)说明,Bezier曲线在起点和终点处的切线方向与控制多边形第一条边和最后一条边的走向一致。因此,通过规划Bezier曲线起点和终点的切线方向,即可实现对农机初始位姿和目标位姿的确定,有利于农机避障完成后继续沿初始姿态行驶。

本文采用Bezier曲线对最短切线规划路径作进一步优化,以期形成曲率连续的光滑路径。依据最短切线避障路径可知,农机在避障过程中有 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 、 G 共计7个控制点,理论上可采用六阶Bezier曲线,为降低Bezier曲线复杂性,且基于原避障路径的对称性,采用2段三阶Bezier曲线,即 A 、 B 、 C 、 D 为前半段, D 、 E 、 F 、 G 为后半段。同时采用2段三阶Bezier曲线替代六阶Bezier曲线,可有效避免因Bezier曲线凸包性^[21]造成的避障曲

线与实际控制点的相对偏差过大造成避障任务失败。三阶Bezier曲线为三次多项式,其矩阵为^[22]:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (4)$$

则有

$$\begin{cases} \dot{x} = 3(x_3 - 3x_2 + 3x_1 - x_0)t^2 + 2(3x_2 - 6x_1 + 3x_0)t + (3x_1 - 3x_0) \\ \dot{y} = 3(y_3 - 3y_2 + 3y_1 - y_0)t^2 + 2(3y_2 - 6y_1 + 3y_0)t + (3y_1 - 3y_0) \end{cases} \quad (5)$$

式中 x_0, x_1, x_2, x_3 分别为 P_0, P_1, P_2, P_3 的横坐标,cm; y_0, y_1, y_2, y_3 分别为 P_0, P_1, P_2, P_3 的纵坐标,cm。

以东方红LF954-C拖拉机为例,农具以250 cm幅宽犁为例(与下文试验一致),根据该型拖拉机技术参数得出控制点的相对坐标(单位:cm): $A(333.28, 0)$ 、 $B(501.47, 56.22)$ 、 $C(694.94, 201.43)$ 、 $D(938.50, 282.85)$ 、 $E(1182.06, 201.43)$ 、 $F(1375.52, 56.22)$ 、 $G(1543.71, 0)$ 。在Matlab中对上述坐标进行2段Bezier曲线创建,如图2所示,可以看出,该路径存在显著拐点,如点 A 、 D 、 G ,且起始点 A 与目标点 G 的走向并不一致。造成上述现象的原因是,控制点分布的离散性较小,致使拟合成的Bezier曲线过于线性,为此需要作进一步优化调整。

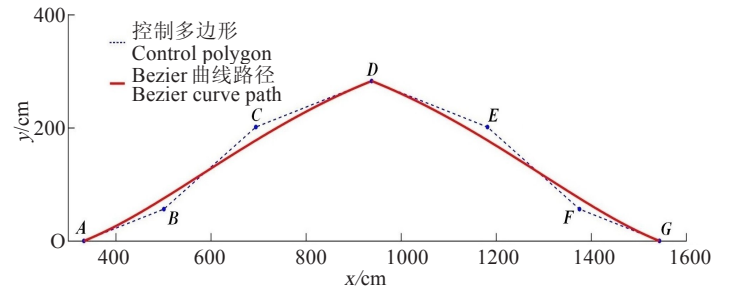


图2 最短切线避障路径控制点生成的Bezier曲线

Fig.2 Bezier curve generated by control points on shortest tangent obstacle avoidance path

为增大控制点的离散性且不改变Bezier曲线的走势,将控制点 B 、 C 、 E 、 F 分别向曲线两侧拉伸。为保证整段曲线起点与终点的走向一致,需使前段曲线终点与后段曲线起点的走向一致,优化调整后控制点的相对坐标(单位:cm): $A(333.28, 0)$ 、 $B_1(635.89, 0)$ 、 $C_1(635.89, 282.85)$ 、 $D(938.50, 282.85)$ 、 $E_1(1241.105, 282.85)$ 、 $F_1(1241.105, 0)$ 、 $G(1543.71, 0)$,新生成的Bezier曲线如图3所示。通过上述方法可提高整段曲线对称性,其每段曲线呈中心对称,整段曲线呈轴对称。

一般参数方程曲线的曲率 c 为^[23]

$$c = \frac{|\dot{x} \cdot \ddot{y} - \ddot{x} \cdot \dot{y}|}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}} \quad (6)$$

对式(5)进一步求导并将各点坐标值代入式(6),求得前段曲线 AD 的终点曲率与后端曲线 DG 的起点曲率一致,说明上述整段避障路径 AG 的曲率连续,农机沿着该曲线行走容易控制。

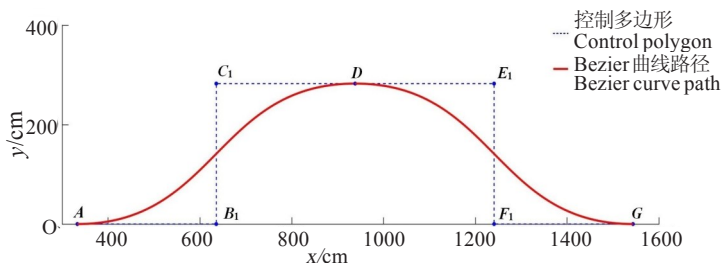


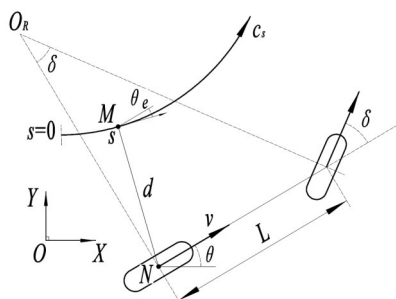
图3 优化控制点生成的Bezier曲线

Fig.3 Bezier curve generated by optimized control points

2 农机运动控制方法

2.1 农机运动模型

本文研究的避障控制方法主要针对轮式拖拉机,鉴于农机作业的低速性,将四轮拖拉机简化成二轮车模型进行运动学分析^[24],如图4所示。规定当农机控制点 N 沿曲线顺时针运动时的曲率 c 为负,逆时针运动时 c 为正;当控制点 N 在曲线外侧时的横向位置误差 d 为正,在曲线内侧时 d 为负。



注: N 为农机控制点; v 为农机后轴中心速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; θ 为农机航向角; δ 为农机前轮转向角; L 为农机轴距, cm ; O_R 为农机瞬时旋转中心; c_s 为农机运动路径; M 为路径上距 N 点最近的点; s 为路径的弧长参数; θ_e 是农机相对于路径的航向误差角; d 为农机相对于路径的横向位置误差, cm 。

Note: N is the control point of the tractor; v is the rear axle center speed of the tractor, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; θ is the heading angle of the tractor; δ is the front wheel steering angle of the tractor; L is the axle distance of the tractor, cm ; O_R is the instantaneous rotation center of the tractor; c_s is the motion path of the tractor; M is the point closest to N on the motion path; s is the arc length parameter of the motion path; θ_e is the heading error angle of the tractor relative to the motion path; d is the lateral position error of the tractor relative to the motion path, cm .

图4 农机运动学模型

Fig.4 Kinematics model of agricultural machinery

为简化农机运动模型建立过程,需作如下假设^[25]:一、农机与农具是一个独立刚体,即农机运动时只有一个瞬时旋转中心;二、农机运动为纯滚动而非滑动,即农机的运动速度方向沿着车身中心线方向。一般农具与农机的连接为三点悬挂连接,该连接方式基本不会滑移窜动,符合刚性连接条件。同时,农机作业工况相对平坦,符合滚动运动条件。基于上述假设,则有^[26-27]:

$$\begin{cases} \dot{s} = v \frac{\cos\theta_e}{1 - c(s)d} \\ \dot{d} = v \sin\theta_e \\ \dot{\theta}_e = v \left(\frac{\tan\delta}{L} - \frac{c(s)\cos\theta_e}{1 - c(s)d} \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中 $c(s)$ 为 M 点处的路径曲率。有2种情况使方程(7)不成立,一是当 $d=1/c(s)$ 时,即农机与路径间的位置误差等于路径曲线的半径,依据农机自动驾驶仪的相关标准规定,导航作业精度为 $\pm 2.5\text{ cm}$,说明农机与路径间的位置误差为厘米级,而拖拉机的转弯半径一般为米级,因此

$d=1/c(s)$ 的情况不会发生;二是 θ_e 为直角的倍数,即农机行驶方向与路径方向垂直,这显然不符实际。因此,方程(7)的农机运动模型成立。

2.2 农机运动控制

通过上述方法建立的农机运动模型是一种高度的非线性模型,为了应用线性系统控制方法,采用链式控制理论将非线性模型转化成近似线性模型,通用链式系统一般为三状态两输出系统,其表达式如下^[28]:

$$\begin{cases} \dot{a}_1 = m_1 \\ \dot{a}_2 = a_3 m_1 \\ \dot{a}_3 = m_2 \end{cases} \quad (8)$$

设 $Q=(a_1, a_2, a_3)^T$ 表示系统状态变量, $U=(m_1, m_2)^T$ 表示系统控制变量,为使方程(8)线性化,只需用状态变量 a_1 的导数替换时间导数,令:

$$\begin{cases} \frac{da_i}{da_1} = a'_i \\ m_3 = \frac{m_2}{m_1} \end{cases} \quad (9)$$

则方程(9)可以表达成:

$$\begin{cases} a'_1 = 1 \\ a'_2 = a_3 \\ a'_3 = m_3 \end{cases} \quad (10)$$

显然,方程(10)为线性方程。令 $a_1=s, a_2=d$,则变量 m_1, m_2 与 a_3 可表达成:

$$\begin{cases} m_1 = \dot{a}_1 = v \frac{\cos\theta_e}{1 - c(s)d} \\ a_3 = \frac{\dot{a}_2}{m_1} = [1 - c(s)d] \tan\theta_e \\ m_2 = \dot{a}_3 = \frac{d\{[1 - c(s)d] \tan\theta_e\}}{dt} \\ = v \frac{1 - c(s)d}{\cos^2\theta_e} \left[\frac{\tan\delta}{L} - \frac{c(s)\cos\theta_e}{1 - c(s)d} \right] \\ - \frac{c(s)v \sin^2\theta_e}{\cos\theta_e} - \frac{v d \sin\theta_e}{1 - c(s)d} \frac{dc(s)}{ds} \end{cases} \quad (11)$$

因为方程(10)是线性系统,可采用状态反馈控制方法对系统进行控制^[29],令:

$$m_3 = -K_1 a_2 - K_2 a_3 \quad (12)$$

式中控制参数 $(K_1, K_2) \in \mathbb{R}^+$ 。将方程(12)代入方程(10)中得控制律:

$$a_2'' + K_2 a_2' + K_1 a_2 = 0 \quad (13)$$

上述控制律是为了控制 a_2 和 a_3 趋近于0,同样可用来控制 d 和 θ_e 趋近于0,从而达到农机路径曲线的跟踪控制。联立方程(13)与(11)可以得到实际的农机前轮转角控制律 $\delta(d, \theta_e)$ 为:

$$\delta(d, \theta_e) = \arctan \left(\frac{\frac{L \cos^3\theta_e}{(1 - c(s)d)^2} + \left(\frac{dc(s)}{ds} d \tan\theta_e - K_2 (1 - c(s)d) \tan\theta_e \right)}{-K_1 d + c(s)(1 - c(s)d) \tan^2\theta_e} \right) + \frac{\frac{L c(s) \cos\theta_e}{1 - c(s)d}}{\tan\theta_e} \quad (14)$$

由于农机运动模型的精确度直接影响路径跟踪的控制质量,且随着路径曲率的增大,运动模型的精确度也会下降,控制性能将会降低。本文采用链式控制器得到理论前轮转向角 $\delta(d, \theta_e)$ 后,利用PI控制器解算出期望转向补偿角 δ_c ,将 $\delta(d, \theta_e)$ 与 δ_c 相加后得到农机实际转向角 δ_i ,并输出给农机模型,控制农机沿路径行走。

传统PI控制器的控制律^[30]:

$$u(k)=K_p e(k)+K_i \sum_{i=1}^k e(i) \quad (15)$$

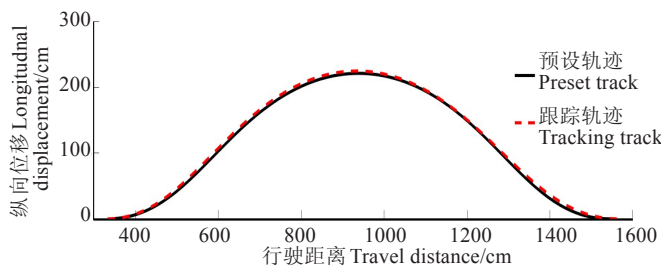
式中, $u(k)$ 为PI控制的输出, K_p 为比例增益, K_i 为积分增益, $e(i)$ 为*i*时间对应误差输入, k 为总采样时间点数。计算时,将农机航向误差角 θ_e 作为PI的误差输入,则当前期望转向补偿角 δ_c 即为 $u(k)$ 。

3 仿真分析

采用Matlab对农机运动的航向误差角、横向位置误差及前轮转向角情况进行了仿真分析。农机选用东方红LF954-C,轴距231.4 cm,前轮转角范围 $(-\pi/6, \pi/6)$,最小转弯半径5.6 m,配套农机具幅宽250 cm。依据Bezier曲线优化的路径建立轨迹约束模型(图3),按照仿真设计描述在Matlab软件编程实现预设轨迹并建立路径跟踪

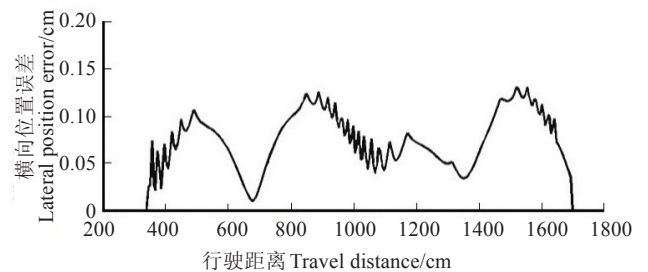
仿真模型,设定农机起始位置坐标为(333.28, 0)(单位:cm),初始前轮转角为0,农机运动速度1 m/s,选取理论前轮转向角控制参数 $K_1=0.09, K_2=0.6$,选取期望转向补偿角控制参数 $K_p=2, K_i=0.01$ 。

图5为农机避障运动仿真结果。由图5a可知,农机的跟踪轨迹与预设轨迹基本重合,说明本控制方法具有较高的路径跟踪精度。由图5c可以看出,农机行驶的航向误差角在 $-0.06 \sim 0.06$ rad范围内,其数值较大点主要分布于路径轨迹曲线斜率较大位置处,这是由于此处采样点比较稀疏,导致M点相对较少,但在实际运行时采样点比较密集。从图5b可以看出,农机行驶的横向位置误差在13 cm内,能符合农机曲线避障行驶要求。从图5d可以看出,前轮转向角 δ 变化平缓,总体上由0逐渐增大,后又减小至0,然后变为负值继续增大(δ 负值表示农机沿顺时针转弯行驶、 δ 正值表示农机沿逆时针转弯行驶),呈周期变化,与农机实际转弯过程相符,整个运动曲线中过程 δ 没有显著突变,这有利于控制器对期望角度的跟踪。上述结果显示,通过本控制方法进行的农机避障路径跟踪控制,其控制精度高,农机基本按照预设轨迹行驶。



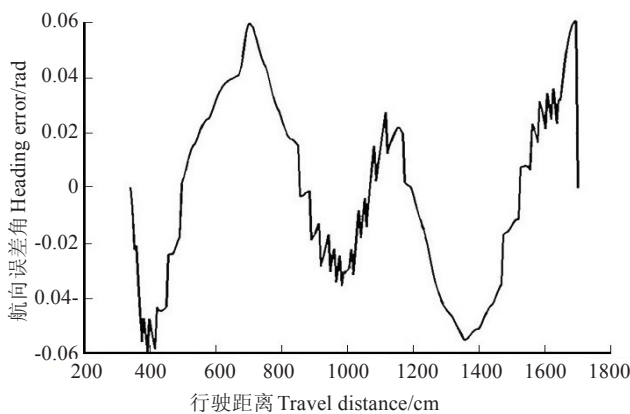
a. 农机预设轨迹与跟踪轨迹的仿真结果

a. Simulation results of preset track and tracking track of agricultural machinery



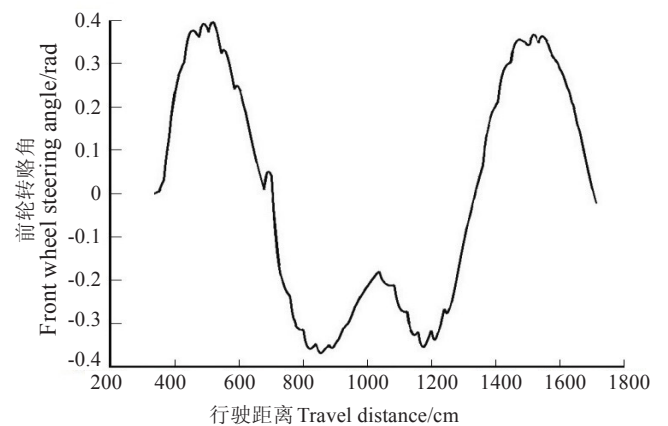
b. 横向位置误差仿真结果

b. Simulation results of lateral position error



c. 航向误差角仿真结果

c. Simulation results of heading error angle



d. 前轮转向角仿真结果

d. Simulation results of front wheel steering angle

图5 农机避障运动仿真结果

Fig.5 Simulation results of tractor obstacle avoidance movement

4 避障精度试验

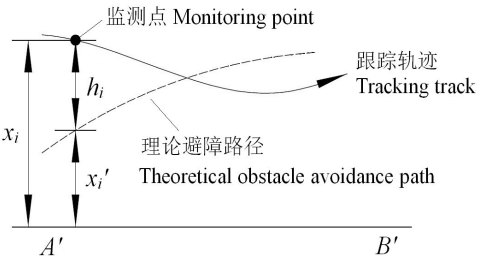
4.1 试验过程

拖拉机选用东方红LF954-C型,农具选用250 cm幅宽犁。拖拉机安装北斗农机自动驾驶仪(南京沃杨KM-502,直线行驶精度 ± 2.5 cm),并通过超声波雷达、图像识别技术实现作业环境的障碍物感知。该型拖拉机配有动

力换挡装置,可进行自动启停、换挡、农具升降操作。试验在无锡卡尔曼导航技术公司的导航试验基地进行,场地平坦,设置草堆障碍物,其轮廓半径约3 m(小于拖拉机最小转弯半径),障碍物特征圆半径 $R=r_{min}+0.5l=6.85$ m。拖拉机一档行进(约3.6 km/h),犁耕深度25 cm,整机工作时,通过超声波雷达与视觉机器识别障碍物信息,通

过拖拉机位置传感器计算避障安全距离,并规划避障路径轨迹,拖拉机在北斗农机自动驾驶仪的控制下按照预设轨迹路径完成自动避障过程。

对机具避障精度进行了试验,在拖拉机车身中心线上安装高精度卫星接收机,即 RTK 测量仪,测量精度 0.01 cm。由于 RTK 测量仪系统内难以设置 Bezier 曲线,设置测量基准线为直线 A'B',通过卫星接收机记录的 RTK 位置数据 x_i (监测点至 A'B' 的距离)减去理论避障路径至 A'B' 的距离,得到监测点与理论避障曲线的误差值 h_i (取正),如图 6 所示。



注:A'B'为测量基准线; x_i 为监测点至A'B'线的距离,cm; x_i' 为理论避障路径至A'B'线的距离,cm; h_i 为监测点与理论避障路径的误差值,cm。
Note: A'B' is the measuring baseline; x_i is the distance from the monitoring point to the A'B' line, cm; x_i' is the distance from the theoretical obstacle avoidance path to the A'B' line, cm; h_i is the error value of monitoring point and theoretical obstacle avoidance path, cm.

图 6 避障精度测试示意图

Fig.6 Schematic diagram of obstacle avoidance accuracy test

通过公式(16)计算得出跟踪轨迹与理论避障曲线的标准差,该标准差即为避障精度,标准差越大,表示该避障跟踪精度越差^[31]。

$$S=\sqrt{\sum_{i=1}^N(h_i-\bar{h})^2/(N-1)}$$

(16)

式中 h_i 为监测点到理论避障曲线的距离,cm; \bar{h} 为 h_i 的平均值,cm; N 为监测点数; S 为避障精度,cm。

4.2 试验结果与分析

避障精度测试分 2 个部分,第一部分为避障曲线部分(Bezier 曲线起点至终点),第二部分为避障后继续沿直线行驶部分。每监测点相距 100 cm,由于障碍物特征圆半径为 6.85 m,因此前 13 个监测点为避障曲线位置点,直线行驶部分亦取 13 点,共计 26 个监测点,结果见表 1。

表 1 监测点到理论避障曲线的距离

Table1 Distance from monitoring point to theoretical obstacle avoidance curve

Bezier 曲线部分监测点 Monitoring point in Bezier curve	h_i /cm	直线部分监测点 Monitoring point in straight line	h_i /cm
1	21.53	14	8.19
2	18.82	15	6.56
3	20.25	16	6.87
4	17.26	17	6.04
5	13.98	18	3.23
6	14.24	19	2.21
7	9.17	20	5.86
8	10.21	21	1.38
9	8.23	22	5.33
10	18.49	23	4.43
11	10.25	24	5.52
12	8.93	25	4.11
13	5.82	26	3.05

根据表 1 数据,通过公式(16)求得曲线部分的监测点到理论避障曲线的误差平均值为 13.63 cm,标准差为 5.21 cm,曲线起始部分的误差较大,最大误差达 21.53 cm,主要是因为犁耕作业时拖拉机前进方向的左侧轮胎置于耕地中行驶,拖拉机处于一边倾斜状态,避障时拖拉机则又驶入平地,行驶工况的变化导致避障精度的稳定性有波动,同样从平地进入耕地时,直线行驶精度的稳定性也会有所波动。上述结果显示,曲线部分的避障精度为 5.21 cm,说明本文设计的避障曲线及控制方法具有较高的避障精度,曲线路径的跟踪控制效果较好,在不平整的犁耕地中表现出较好的鲁棒性和适应性,可满足拖拉机作业的避障要求。同时,避障后农机继续沿直线行驶的监测点到理论轨迹的误差平均值为 4.83 cm,标准差为 1.98 cm,即避障后农机继续沿直线行驶的精度为 1.98 cm,说明本文设计的路径跟踪控制方法可保证农机在避障后恢复直线自动驾驶。

本文设计的避障路径规划与控制方法也可适用于拖拉机田间调头作业,可为农机全程无人化自动驾驶提供技术依据。

5 结论

1) 本文通过 2 段三阶 Bezier 曲线优化了农机避障路径,优化后的曲线曲率连续,避障路径平滑无拐点,利于农机行走控制。针对农机运动模型精度低的问题,通过链式控制理论建立农机运动的线性控制模型,利用 PI 控制器进行转角补偿,提高农机避障行驶精度。

2) 仿真结果显示,农机行驶的航向误差角在 -0.06~0.06 rad 范围内,横向位置误差小于 13 cm,前轮转向角变化平缓,没有显著突变,说明该避障路径控制方法的控制精度高,农机能按预设轨迹行驶。

3) 犁耕作业试验结果显示:Bezier 曲线部分的避障精度为 5.21 cm,曲线路径的跟踪控制效果较好;避障后农机继续沿直线行驶的精度为 1.98 cm,说明该路径跟踪控制方法可保证农机在避障后恢复直线自动驾驶。上述结果表明,该避障路径及控制方法在不平整的犁耕地中表现出较好的鲁棒性和适应性,可满足拖拉机作业的避障要求。

[参考文献]

[1] Li Shichao, Xu Hongzhen, Ji Yuhao, et al. Development of a following agricultural machinery automatic navigation system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 158: 335—344.

[2] J. Kaivosoja, R. Linkolehto. GNSS error simulator for farm machinery navigation development[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 119: 166—177.

[3] John F. Reid, Qin Zhang, Noboru Noguchi, et al. Agricultural automatic guidance research in North America[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1-2): 155—167.

[4] 王辉,王桂民,罗锡文,等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 11—19.

Wang Hui, Wang Guimin, Luo Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engi-

- neering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(4): 11—19. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘兆朋, 张智刚, 罗锡文, 等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动导航作业系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 15—21. Liu Zhaopeng, Zhang Zhigang, Luo Xiwen, et al. Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(1): 15—21. (in Chinese with English abstract)
- [6] 胡静涛, 高雷, 白晓平, 等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 1—10. Hu Jingtao, Gao Lei, Bai Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(10): 1—10. (in Chinese with English abstract)
- [7] 姬长英, 周俊. 农业机械导航技术发展分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 44—54. Ji Changying, Zhou Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 44—54. (in Chinese with English abstract)
- [8] 夏木. 东方红无人驾驶拖拉机技术国内领先[J]. 农机市场, 2019 (02): 42.
- [9] 唐宇, 骆少明, 黄伟锋, 等. 无人驾驶农用拖拉机行驶状态信息远程采集系统[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(09): 168—172.
- [10] 刘美辰. 农机作业障碍物检测与避障方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018. Liu Meichen. Research on Inspection and Obstacle Avoidance Methods of Agro-machinery Obstructions[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘博, 罗霞, 朱健. 无人驾驶车辆自动避障路径规划仿真研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(02): 105—110. Liu Bo, Luo Xia, Zhu Jian. Research on simulation of planning obstacle avoidance path for automated vehicles[J]. Computer Simulation, 2018, 35(02): 105—110. (in Chinese with English abstract)
- [12] 凌巍炜. 静态场景中机器人避障规划问题的模型和算法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015. Ling Weiwei. The Research on Models and Algorithms of Robot Obstacle Avoidance and Path Planning in Static Scenes[D]. Changsha: Hunan University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘向锋. 面向 GPS 导航拖拉机的最优全局覆盖路径规划研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011. Liu Xiangfeng. Research on Optimal Global Path Planning for Complete Coverage With GPS Guidance on Tractor[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [14] Wang Aizeng, Zhao Gang, Hou Fei. Constructing bézier curves with monotone curvature[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2019, 355: 1—10.
- [15] L. Fernández-Jambrina. Bézier developable surfaces[J]. Computer Aided Geometric Design, 2017, 55: 15—28.
- [16] 咎杰, 蔡宗琰, 梁虎, 等. 基于 Bezier 曲线的自主移动机器人最优路径规划[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2013, 49(02): 249—254. Zan Jie, Cai Zongyan, Liang Hu, et al. An optimal path planning algorithm for autonomous mobile robot based on bezier curves model[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2013, 49(02): 249—254. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘春香, 王金武, 唐汉, 等. 基于贝塞尔曲线的液肥穴扎机构动力学分析与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(05): 115—122. Liu Chunxiang, Wang Jinwu, Tang Han, et al. Dynamics analysis and test on picking hole mechanism of liquid fertilizer based on bezier curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(05): 115—122. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘城, 闫清东, 魏巍. 基于贝塞尔曲线的液力变矩器三维叶片造型方法[J]. 机械工程学报, 2017, 53(10): 201—208. Liu Cheng, Yan Qingdong, Wei Wei. Three dimensional torque converter blade modelling based on bezier curves[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(10): 201—208. (in Chinese with English abstract)
- [19] 孙雷, 张丽爽, 周璐, 等. 一种基于 Bezier 曲线的移动机器人轨迹规划新方法[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(03): 962—968. Sun Lei, Zhang Lishuang, Zhou Lu, et al. A new method on trajectory planning for mobile robots using bezier curves[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(03): 962—968. (in Chinese with English abstract)
- [20] 朱东伟, 毛晓波, 陈铁军. 基于改进粒子群三次 Bezier 曲线优化的路径规划[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(05): 1710—1712. Zhu Dongwei, Mao Xiaobo, Chen Tiejun. Path planning algorithm based on improved particle swarm optimization of bezier curves [J]. Application Research of Computers, 2012, 29(05): 1710—1712. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张美燕, 蔡文郁, 周莉萍. 基于二次 Bezier 曲线的无线传感网避障路径规划研究[J]. 传感技术学报, 2017, 30(10): 1596—1601. Zhang Meiyan, Cai Wenyu, Zhou Liping. Obstacles avoidance based quadratic bezier curve path planning for wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(10): 1596—1601. (in Chinese with English abstract)
- [22] 孔建寿, 乔飞, 刘斯怡. 基于 Bezier 曲线的焊缝成形计算机仿真技术[J]. 焊接学报, 2018, 39(05): 37—42, 130. Kong Jianshou, Qiao Fei, Liu Siyi. Computer simulation of weld formation based on bezier curve[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(05): 37—42, 130. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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]. 农业机械学报, 2018, 49(04): 36—44. Jia Quan, Zhang Xiaochao, Yuan Yanwei, et al. Guided trajectory planning method for tractor autopilot system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(04): 36—44. (in Chinese with English abstract)
- [24] 贾全. 拖拉机自动驾驶系统自适应控制方法研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2018. Jia Quan. Adaptive Control Method for Tractor Auto-guidance System[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [25] B. Thuilot, C. Cariou, L. Cordesses, et al. Automatic guidance of a farm tractor along curved paths, using a unique CP-DGPS[C]//Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2001, 2: 674—679.
- [26] 李逃昌, 胡静涛, 高雷, 等. 一种与行驶速度无关的农机路径跟踪方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(02): 59—65. Li Taochang, Hu Jingtao, Gao Lei, et al. Agricultural machine path tracking method irrelevant to travel speeds[J]. Transactions of the

- Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(02): 59—65. (in Chinese with English abstract)
- [27] C. Canudas de Wit, B. Siciliano, G. Bastineds. Theory of Robot control[M]. Springer-Verlag, 1996.
- [28] C. Samson. Control of chained systems. Application to path following and time-varying point stabilization of mobile robots[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1995, 40(1): 64—77.
- [29] 曹建荣, 虞烈, 谢友柏. 磁悬浮电动机的状态反馈线性化控制[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(09): 23—27, 74. Cao Jianrong, Yu Lie, Xie Youbai. Dynamic feedback linearization control for induction-type bearingless motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(09): 23—27, 74. (in Chinese with English abstract)
- [30] 刘峰, 沈安文, 罗欣, 等. 结合PI自调整与模糊逻辑补偿的控制方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(03): 127—132. Liu Feng, Shen Anwen, Luo Xin, et al. Control method using auto-tuning PI and fuzzy logic compensator[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2016, 44(03): 127—132. (in Chinese with English abstract)
- [31] 史扬杰, 奚小波, 吴飞, 等. 电机式北斗农机自动驾驶系统设计与试验[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(4): 88—96. Shi Yangjie, Xi Xiaobo, Wu Fei, et al. Design and experimental study on automatic driving system of motor type agricultural machinery based on Beidou navigation[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, 50(4): 88—96. (in Chinese with English abstract)

Obstacle avoidance path control method for agricultural machinery automatic driving based on optimized Bezier

Xi Xiaobo¹, Shi Yangjie¹, Shan Xiang¹, Zhang Qi¹, Jin Yifu¹, Gong Junjie¹, Zhang Jianfeng¹, Zhang Ruihong^{1,2*}

(1. School of Mechanical Engineering/Jiangsu Engineering Center for Modern Agricultural Machinery and Agronomy Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;
2. Nanjing Woyang Machinery Technology Co., Ltd., Nanjing 211200, China)

Abstract: The generation of power shift tractor promotes the automatic driving of agricultural machinery to the direction of unmanned, and the automatic obstacle avoidance of agricultural machinery has become a key issue to be solved. Most of the existing obstacle avoidance path planning adopts the shortest tangent method, which has the advantages of fast and simple path generation and short track, but the curvature of the path curve is discontinuous and there are corner inflection points, which make the tractor front wheel angle suddenly change and affect the obstacle avoidance accuracy. In this paper, for the curvature discontinuity of the shortest tangent path curve, poor tracking control accuracy and low precision of agricultural machinery model, the third-order bezier curve optimization method was used to form a continuous smooth agricultural machine obstacle avoidance path. The optimized curve curvature was continuous and the obstacle avoidance path was smooth with no turning points, which was conducive to the control of agricultural machinery driving. The linear control model of agricultural machinery movement was established by chain control theory, and the PI controller was used for corner compensation to improve the accuracy of agricultural machinery obstacle avoidance. The simulation of the path tracking control method was completed. The simulation results showed that the heading error angle of the agricultural machinery was mostly in the range of -0.06-0.06 rad, the lateral position error was less than 13 cm, and the front wheel steering angle changed gently with no significant mutation, indicating that the control method of the obstacle avoidance path control method had a high precision, and the agricultural machinery can drive according to the preset trajectory. The ploughing operation test was carried out, and the Dongfanghong LF954-C power shift tractor was used, which can automatically start, stop, shift, and implement the lifting operation of the farm. The tractor was equipped with the Beidou agricultural autopilot with the straight running accuracy of ± 2.5 cm. Ultrasonic radar and image recognition technology were used to perceive obstacles in the working environment. The farm implement was a 250 cm wide plow. A haystack obstacle was set on the machine working path with a contour radius smaller than the minimum turning radius of the tractor. The results of the plowing operation test showed that the machine can automatically complete the straight-line driving, farm implement lifting, automatic obstacle avoidance, farm implement falling, and continuous straight-line operation. The obstacle avoidance accuracy of the bezier curve was 5.21 cm, and the tracking control effect of the curve path was well. The accuracy of the agricultural machine continuing to travel in a straight line after obstacle avoidance was 1.98 cm, which indicated that the path tracking control method can ensure the tractor straight-line automatic driving after obstacle avoidance. The above results showed that the obstacle avoidance path and control method showed good robustness and adaptability in uneven ploughing land and can meet the obstacle avoidance requirements of tractor operation.

Keywords: agricultural machinery; motion planning; obstacle avoidance; automatic drive; bezier curve