



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106681335 A

(43)申请公布日 2017.05.17

(21)申请号 201710156019.9

(22)申请日 2017.03.16

(66)本国优先权数据

201710046310.0 2017.01.22 CN

(71)申请人 无锡卡尔曼导航技术有限公司

地址 214000 江苏省无锡市滨湖区锦溪路
50号K-PARK商务中心3号楼15楼

(72)发明人 程方 林德相 袁洪良 王烁
徐涛 王浩 吴飞

(74)专利代理机构 南京苏科专利代理有限责任
公司 32102

代理人 沈良菊

(51)Int.Cl.

G05D 1/02(2006.01)

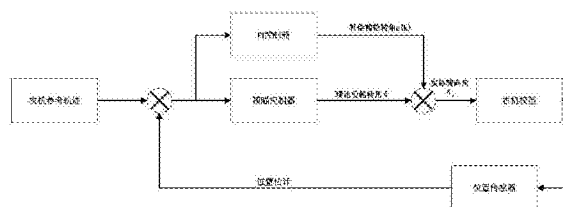
权利要求书3页 说明书9页 附图6页

(54)发明名称

用于农机无人驾驶的避障路径规划及其控制方法

(57)摘要

本发明提供了农业无人驾驶控制技术领域内的一种用于农机无人驾驶的避障路径规划及其控制方法,农机自动绕开障碍物的具体步骤为,步骤1:通过传感器获取农机环境信息做出避障决策;步骤2:使用改进的最短切线法离线计算出一条理论避障路径;步骤3:利用基于Bezier曲线的路径优化方法优化步骤2中的理论避障路径得到实际避障路径,使用预瞄和PI控制器组合起来控制农机的前轮转角使农机沿着实际避障路径行走绕开障碍物;本发明中规划的避障路径容易控制且行走的路程短,控制精度高。



1. 一种用于农机无人驾驶的避障路径规划及其控制方法, 其特征在于, 农机自动绕开障碍物的具体步骤为,

步骤1: 通过传感器获取农机环境信息做出避障决策;

步骤2: 使用改进的最短切线法离线计算出一条理论避障路径;

步骤3: 利用基于Bezier曲线的路径优化方法优化步骤2中的理论避障路径得到实际避障路径, 使用预瞄和PI控制器组合起来控制农机的前轮转角使农机沿着实际避障路径行走绕开障碍物。

2. 根据权利要求1所述的用于农机无人驾驶的避障路径规划及其控制方法, 其特征在于, 步骤2中, 计算理论避障路径具体地为, 计算农机前方障碍物的特征圆的大小、农机与障碍物的距离, 根据特征圆的大小设定安全距离, 根据农机的犁具宽度和农机最小转弯半径, 设定一条理论避障路径。

3. 根据权利要求2所述的用于农机无人驾驶的避障路径规划及其控制方法, 其特征在于, 步骤2中, 最短切线法具体的为, 以障碍物的中心为圆心做特征圆, 特征圆的半径为 $r_{\min} + w/2$, 理论避障路径由圆弧段一、直线段一、圆弧段二、直线段二和圆弧段三组成, 圆弧段一的一端与农机原始的直线路径相切, 圆弧段一的另一端与直线段一的一端相切, 直线段一的另一端和直线段二的一端分别与圆弧段二相切, 直线段二的另一端与圆弧段三相切, 圆弧段二为特征圆上的一段, 圆弧段一和圆弧段三关于圆弧段二的中心线对称设置, 农机依次经过圆弧段一、直线段一、圆弧段二、直线段二和圆弧段三绕过障碍物, 其中, r_{\min} 为农机的最小转弯半径, w 为农机的作业宽度, 障碍物的外接圆半径小于最小转弯半径。

4. 根据权利要求3所述的用于农机无人驾驶的避障路径规划及其控制方法, 其特征在于, 所述圆弧段一的半径为 r_{\min} , 所述圆弧段三的半径为 r_{\min} , 圆弧段一的起点记为H点, 圆弧段一的圆心记为 O_1 点, 直线段一与农机原始的直线路径的相交点记为J, 直线段一与圆弧段二的相切点记为D, 农机原始路径与特征圆的相交点分别记为K和K', $JK = w/2$, 圆弧段二的圆心记为O点, O的坐标设为(a, b), 圆弧段二的中心点记为B点, J点的坐标记为(x1, y1), JD的方程可以写成:

$$y = k(x - x_1) + y_1 \quad (1-1);$$

特征圆的方程可以写成:

$$\begin{aligned} (x-a)^2 + (y-b)^2 &= r^2 \\ r &= \frac{|kx_1 - ky_1 - b + y_1|}{\sqrt{k^2 + 1}} \\ r &= r_{\min} + w/2 \end{aligned} \quad (1-2)$$

通过(1-1)和(1-2)可以求出k, D点为JD和特征圆的相交点, 以此解出D点坐标;

设点 O_1 的坐标为(x2, y2), 则点 O_1 到直线JD的距离为:

$$r_{\min} = \frac{|kx_2 - ky_2 - b + y_1|}{\sqrt{k^2 + 1}} \quad (1-3), \quad y_2 = y_1 + r_{\min} \quad (1-4)$$

根据公式(1-3)和(1-4)求出 O_1 的坐标; 则H点的坐标为(x2, y1), B点的坐标为(a, b+r)。

5. 根据权利要求4所述的用于农机无人驾驶的避障路径规划及其控制方法, 其特征在于, 步骤3中, 利用基于Bezier曲线的路径优化方法优化步骤2中的理论避障路径, 具体的为, 建立Bezier方程,

(1) 给定空间 $n+1$ 个点的位置矢量 $p_i (i=0,1,2,\dots,n)$, 则参数曲线上各点坐标的插值公式为:

$$Q(t) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(t) \cdot p_i \quad (t \in [0,1]) \quad (2-1)$$

其中 P_i 构成该曲线的特征点, $B_{i,n}(t)$ 是 n 次Bernstein基函数:

$$B_{i,n}(t) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i} = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i} \quad (i=0,1,\dots,n) \quad (2-2)$$

由上述公式, 可以得出三次和二次Bezier曲线的数学表达式, 当 $n=3$ 时, $Q(t)$ 为三次多项式, 有四个控制点, 其矩阵形式表达为:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = T \cdot M_1 \cdot P^T \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (2-3)$$

当 $n=2$, $Q(t)$ 为二次多项式, 有三个控制点, 矩阵表达式为:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (2-4)$$

(2) Bezier曲线的曲率表达式为:

$$k = \frac{\left| \frac{y}{1+y'^2} \frac{dx}{dx} \right|}{\left| \frac{y''}{(1+y'^2)^{\frac{3}{2}}} \right|} \quad (2-5)$$

其中, $y=f(x)$ 表示曲线的方程, y' 为曲线的一阶导数, y'' 为二阶导数;

曲率半径为:

$$\rho = 1/k \quad (2-6)。$$

6. 根据权利要求5所述的用于农机无人驾驶的避障路径规划及其控制方法, 其特征在于, 选取三次Bezier曲线, 针对三次Bezier曲线:

$$Q(t) = \sum_{i=0}^3 B_{i,3}(t) \cdot p_i = (p_3 - 2p_2 + 3p_1 - p_0)t^3 + (3p_2 - 6p_1 + 3p_0)t^2 + (3p_1 - 3p_0)t + p_0 \quad (2-7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= 3(Y_3 - 3Y_2 + 3Y_1 - Y_0)t^2 + 2(3Y_2 - 6Y_1 + 3Y_0)t + (3Y_1 - 3Y_0) \\ \frac{dx}{dt} &= 3(X_3 - 3X_2 + 3X_1 - X_0)t^2 + 2(3X_2 - 6X_1 + 3X_0)t + (3X_1 - 3X_0) \end{aligned} \quad (2-8)$$

其中, X_0, X_1, X_2, X_3 分别为 P_0 点、 P_1 点、 P_2 点和 P_3 点处的横向坐标, Y_0, Y_1, Y_2 和 Y_3 分别为 P_0 点、 P_1 点、 P_2 点和 P_3 处的纵向坐标;

P_0 点对应圆弧段一的起点 $H(x_2, y_1)$, P_3 点对应圆弧段二的中心点 $B(a, b+r)$, P_1 点 $((x_2+a)/2, y_1)$, P_2 点 $((x_2+a)/2, b+r)$, 则实际故障路径对应的曲线的曲率半径计算公式为:

$$\rho_c = \frac{\left| \left[\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \right|}{\left| \left(\frac{dy}{dt} \right) \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right) - \left(\frac{dy}{dt} \right) \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right) \right|} \quad (2-9)。$$

7. 根据权利要求6所述的用于农机无人驾驶的避障路径规划及其控制方法, 其特征在

于,步骤3中,利用预瞄控制器计算出理论前轮转角,具体的为,确定农机的前视距离 l ,取路径上的一点为预瞄点 (x_0, y_0) , R 为前视距离对应的圆弧段的半径, l 、 R 和 x 之间的关系式为:

$$R = l^2 / 2x_0 \quad (3-1)$$

将农机简化为二轮车,建立农机的运动学模型:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos(\theta) \\ \dot{y} &= v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} &= v \frac{\tan(\delta)}{L} \end{aligned} \quad (3-2)$$

根据阿克曼转向几何关系,农机的转弯半径和前轮转角、轴距的关系式为:

$$R = \frac{L}{\tan \delta} \quad (3-3)$$

将(3-2)和(3-3)结合起来得到理论转角的计算公式为:

$$\delta = \arctan\left(\frac{2Lx}{l^2}\right) \quad (3-4)$$

其中, θ 为农机的航向偏差角,农机后轴中心记为点A,农机后轴中心A和预瞄点P连线记为AP,航向偏差角为农机航向与AP之间的夹角, δ 为农机的理论前轮转角, L 为农机的轴距, v 为农机的行驶速度,设定的曲线路径上距离农机中心最近的点即为M。

8. 根据权利要求7所述的用于农机无人驾驶的避障路径规划及其控制方法,其特征在于,步骤3中,使用PI控制方法计算出补偿前轮转角,具体的包括以下步骤:

(301) 根据农机的位置和预瞄点得到的农机的航向偏差角 θ 作为PI的误差输入 $e(k)$;

(302) 计算出当前的积分累计误差 $\sum_{i=1}^{k-1} e(i)$;

(303) PI控制输出补偿前轮转角,补偿前轮转角的计算公式为:

$$u(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \cdot \sum_{i=1}^{k-1} e(i) \quad (4)$$

其中, K_p 为比例增益, K_i 为积分增益, $e(i)$ i 时间点下对应的误差输入, k 为总采样时间点,数, $u(k)$ 为PI控制的输出,具体的为当前的补偿前轮转角;

将预瞄控制器输出的理论前轮转角和PI控制器输出的补偿前轮转角相加后为实际前轮转角,实际前轮转角实时输出给农机模型,控制农机的前轮转角实现农机自动避障。

9. 根据权利要求1~8任一项所述的用于农机无人驾驶的避障路径规划及其控制方法,其特征在于,所述传感器包括位置传感器、角度传感器和机器视觉相机,所述角度传感器检测农机的转向角,所述位置传感器获得农机的位置信息;所述视觉机器相机设有2个并分别设置在农机的前后侧,视觉机器相机获取农机所处环境的地理信息。

用于农机无人驾驶的避障路径规划及其控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种自动掉头路径规划及其控制方法,特别涉及一种用于农机无人驾驶的避障路径规划及其控制方法。

背景技术

[0002] 农机在自动导航作业时多在环境部分未知的情况下运行,实现对人进行安全保护和对农作物的伤害程度减到最低,同时又能最大的发挥自主导航农业车辆的生产效率,将是一个重要的研究问题,同时农机可能会遇到电线杆、小石块等相对较小的障碍物,需要农机能自动绕过这些障碍物并迅速回到作业的路线。

[0003] 现有技术中,针对比较小的障碍物,采用最短切线法设置避障路径,最短切线法形成的避障路径由两段直线段和一段圆弧段组成,直线段分别与圆弧段相切,这种避障路径虽然简单快捷,对于具有最小转弯半径的拖拉机很难按照折角进行转弯且很难控制,若控制农机按照这种避障路径行走,农机的控制精度很低;另外,控制农机按照设定好的避障路径行走的控制方法有多种,如BUG算法、人工势场法、VFH算法、模糊逻辑算法、模糊神经网络算法等,这些算法的应用场景均是复杂的作业环境,算法的逻辑复杂,应用于农机作业不复杂的作业环境下,反应速度较慢,反而降低其控制精度;总而言之,无论是路径规划还是避障路径的控制方法,控制农机按照设定好的路径行走的精度很低,偏离设定的避障路径,导致农机绕过障碍物行走的路程远,从开始进入避障路径至回到农机原始直线行走路径的时间长。

发明内容

[0004] 针对现有技术中的缺陷,本发明的目的在于克服上述现有技术中的不足之处,解决现有技术中避障路径难控制且控制精度低的技术问题,提供一种用于农机无人驾驶的避障路径规划及其控制方法,本发明中的避障路径容易控制且行走的路程短,控制精度高。

[0005] 本发明的目的是这样实现的:一种用于农机无人驾驶的避障路径规划及其控制方法,农机自动绕开障碍物的具体步骤为,

步骤1:通过传感器获取农机环境信息做出避障决策;

步骤2:使用改进的最短切线法离线计算出一条理论避障路径;

步骤3:利用基于Bezier曲线的路径优化方法优化步骤2中的理论避障路径得到实际避障路径,使得优化后的路径更加容易控制,使用预瞄和PI控制器组合起来控制农机的前轮转角使农机沿着实际避障路径行走绕开障碍物。

[0006] 本发明工作时,农机在行走过程中安装在农机上的传感器感应农机周围的环境信息,当农机前方有障碍物时,做出避障决策,使用改进的最短切线法计算出一条理论避障路径,对理论避障路径进行优化得到一条更加容易控制的实际避障路径,使用预瞄控制器和PI控制器相结合起来实时计算出农机的前轮转角,农机在行走过程中通过实时调整农机的前轮转角使农机沿着设定的实际避障路径行走,从而实现农机的自动避障;本发明通过改

进后的最短切线法计算出一条理论避障路径,使用基于Bezier曲线的路径优化方法对理论避障路径进行优化,使避障路径更加容易控制,通过预瞄控制器和PI控制器的结合控制农机的前轮转向角使农机沿着设定好的避障曲线行走,控制精度高;可应用于无人驾驶的农机在田间作业时自动避障的工作中。

[0007] 为了进一步提高获得理论避障路径的可靠性,步骤2中,计算理论避障路径具体地为,计算农机前方障碍物的特征圆的大小、农机与障碍物的距离,根据特征圆的大小设定安全距离,根据农机的犁具宽度和农机最小转弯半径,设定一条理论避障路径。

[0008] 为了使避障路径更加容易控制,步骤2中,最短切线法具体的为,以障碍物的中心为圆心做特征圆,特征圆的半径为 $r_{\min}+w/2$,理论避障路径由圆弧段一、直线段一、圆弧段二、直线段二和圆弧段三组成,圆弧段一的一端与农机原始的直线路径相切,圆弧段一的另一端与直线段一的一端相切,直线段一的另一端和直线段二的一端分别与圆弧段二相切,直线段二的另一端与圆弧段三相切,圆弧段二为特征圆上的一段,圆弧段一和圆弧段三关于圆弧段二的中心线对称设置,农机依次经过圆弧段一、直线段一、圆弧段二、直线段二和圆弧段三绕过障碍物,其中, r_{\min} 为农机的最小转弯半径, w 为农机的作业宽度,障碍物的外接圆半径小于最小转弯半径。

[0009] 为了进一步提高农机掉头路径的精度,所述圆弧段一的半径为 r_{\min} ,所述圆弧段三的半径为 r_{\min} ,圆弧段一的起点记为H点,圆弧段一的圆心记为 O_1 点,直线段一与农机原始的直线路径的相交点记为J,直线段一与圆弧段二的相切点记为D,农机原始路径与特征圆的相交点分别记为K和K', $JK=w/2$,圆弧段二的圆心记为O点,O的坐标设为(a,b),圆弧段二的中心点记为B点,J点的坐标记为(x_1, y_1),JD的方程可以写成:

$$y = k(x - x_1) + y_1 \quad (1-1);$$

特征圆的方程可以写成:

$$\begin{aligned} (x-a)^2 + (y-b)^2 &= r^2 \\ r &= \frac{|ka - kx_1 - b + y_1|}{\sqrt{k^2 + 1}} \quad (1-2) \\ r &= r_{\min} + w/2 \end{aligned}$$

通过(1-1)和(1-2)可以求出k,D点为JD和特征圆的相交点,以此解出D点坐标;

设点 O_1 的坐标为(x_2, y_2),则点 O_1 到直线JD的距离为:

$$r_{\min} = \frac{|kx_2 - y_2 + b|}{\sqrt{k^2 + 1}} \quad (1-3), \quad y_2 = y_1 + r_{\min} \quad (1-4)$$

根据公式(1-3)和(1-4)求出 O_1 的坐标;则H点的坐标为(x_2, y_1),B点的坐标为(a,b+r);

此设计对构成理论避障路径的各个线段建立数学关系的联系,明确曲线的具体形状,求出弯折点处坐标,方便下一步对理论避障路径的优化。

[0010] 为了优化本发明中利用改进的最短切线法设计的理论避障路径,步骤3中,利用基于Bezier曲线的路径优化方法优化步骤2中的理论避障路径,具体的为,建立Bezier方程,

(1) 给定空间n+1个点的位置矢量 $p_i (i=0,1,2,\dots,n)$,则参数曲线上各点坐标的插值公式为:

$$Q(t) = \sum_{i=0}^n B_{n,i}(t) \cdot p_i \quad (t \in [0,1]) \quad (2-1)$$

其中 p_i 构成该曲线的特征点, $B_{n,i}(t)$ 是n次Bernstein基函数:

$$B_{n,i}(t) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i} = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i} \quad (i=0,1,\dots,n) \quad (2-2)$$

由上述公式,可以得出三次和二次Bezier曲线的数学表达式,当 $n=3$ 时, $Q(t)$ 为三次多项式,有四个控制点,其矩阵形式表达为:

$$Q(t) = [t^3 \ t^2 \ t \ 1] \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = T \cdot M \cdot P^T \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (2-3)$$

当 $n=2$, $Q(t)$ 为二次多项式,有三个控制点,矩阵表达式为:

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

(2)Bezier曲线的曲率表达式为:

$$k = \left| \frac{\frac{y}{1+y'^2} dx}{\sqrt{1+y'^2} dx} \right| = \left| \frac{y''}{(1+y'^2)^{\frac{3}{2}}} \right| \quad (2-5)$$

其中, $y=f(x)$ 表示曲线的方程, y' 为曲线的一阶导数, y'' 为二阶导数;
曲率半径为:

$$\rho = 1/k \quad (2-6);$$

此设计中,提出Bezier曲线优化方法对理论避障路径进行优化,具体的将曲率不连续的理论避障路径优化成曲率连续的实际避障路径,实际避障路径更加容易控制。

[0011] 为了提高Bezier曲线的可控性,选取三次Bezier曲线,针对三次Bezier曲线:

$$Q(t) = \sum_{i=0}^3 B_{3,i}(t) P_i = (P_3 - 2P_2 + 3P_1 - P_0)t^3 + (3P_2 - 6P_1 + 3P_0)t^2 + (3P_1 - 3P_0)t + P_0 \quad (2-7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= 3(Y_1 - 3Y_0 + 3Y_2 - Y_0)t^2 + 2(3Y_2 - 6Y_1 + 3Y_0)t + (3Y_1 - 3Y_0) \\ \frac{dy}{dt} &= 3(X_1 - 3X_0 + 3X_2 - X_0)t^2 + 2(3X_2 - 6X_1 + 3X_0)t + (3X_1 - 3X_0) \end{aligned} \quad (2-8)$$

其中, X_0 、 X_1 、 X_2 、 X_3 分别为 P_0 点、 P_1 点、 P_2 点和 P_3 点处的横向坐标, Y_0 、 Y_1 、 Y_2 和 Y_3 分别为 P_0 点、 P_1 点、 P_2 点和 P_3 处的纵向坐标;

P_0 点对应圆弧段一的起点 $H(x_2, y_1)$, P_3 点对应圆弧段二的中心点 $B(a, b+r)$, P_1 点 $((x_2+a)/2, y_1)$, P_2 点 $((x_2+a)/2, b+r)$, 则实际故障路径对应的曲线的曲率半径计算公式为:

$$\rho_e = \left| \frac{[(\frac{dx}{dt})^2 + (\frac{dy}{dt})^2]^{\frac{3}{2}}}{(\frac{dy}{dt}) \cdot (\frac{dx}{dt}) - (\frac{dy}{dt}) \cdot (\frac{dx}{dt})} \right| \quad (2-9);$$

此设计中,选择理论避障路径上的弯折点作为Bezier曲线优化方法中的优化点,优化后的路径更加简单,曲率连续,易于控制。

[0012] 为了提高跟踪曲线的控制精度,步骤3中,利用预瞄控制器计算出理论前轮转角,具体的为,确定农机的前视距离 l ,取路径上的一点为预瞄点 (x_0, y_0) , R 为前视距离对应的圆

弧段的半径, l 、 R 和 x 之间的关系式为:

$$R = l^2 / 2x_g \quad (3-1)$$

将农机简化为二轮车, 建立农机的运动学模型:

$$\dot{x} = v \cos(\theta), \dot{y} = v \sin(\theta), \dot{\theta} = v \frac{\tan(\delta)}{L} \quad (3-2)$$

根据阿克曼转向几何关系, 农机的转弯半径和前轮转角、轴距的关系式为:

$$R = \frac{L}{\tan \delta} \quad (3-3)$$

将 (3-2) 和 (3-3) 结合起来得到理论转角的计算公式为:

$$\delta = \arctan\left(\frac{2Lx}{l^2}\right) \quad (3-4)$$

其中, θ 为农机的航向偏差角, 农机后轴中心记为点A, 农机后轴中心A和预瞄点P连线记为AP, 航向偏差角为农机航向与AP之间的夹角, δ 为农机的理论前轮转角, L 为农机的轴距, v 为农机的行驶速度, 设定的曲线路径上距离农机中心最近的点即为M。

[0013] 为了进一步提高跟踪曲线的控制精度, 步骤3中, 使用PI控制方法计算出补偿前轮转角, 具体的包括以下步骤:

(301) 根据农机的位置和预瞄点计算出农机的航向偏差角 θ 作为PI的误差输入 $e(k)$;

(302) 计算出当前的积分累计误差 $\sum_{i=1}^{k-1} e(i)$;

(303) PI控制输出补偿前轮转角, 补偿前轮转角的计算公式为:

$$u(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \cdot \sum_{i=1}^{k-1} e(i) \quad (4)$$

其中, K_p 为比例增益, K_i 为积分增益, $e(i)$ 为 i 时间点下对应的误差输入, k 为总采样时间点数, $u(k)$ 为PI控制的输出, 具体的为当前的补偿前轮转角;

将预瞄控制器输出的理论前轮转角和PI控制器输出的补偿前轮转角相加后为实际前轮转角, 实际前轮转角实时输出给农机模型, 控制农机的前轮转角实现农机自动避障; 此设计中, 农机在实际运行中, 转向关系并不是完全满足预瞄控制器中的阿克曼转向原理, 会存在一定的控制误差, 将PI控制方法和预瞄控制方法相结合来消除预瞄控制器带来的误差, 进一步提高控制精度。

[0014] 作为本发明的进一步改进, 所述传感器包括位置传感器、角度传感器和机器视觉相机, 所述角度传感器检测农机的转向角, 所述位置传感器获得农机的位置信息; 所述视觉相机设有2个并分别设置在农机的前后侧, 视觉相机获取农机所处环境的地理信息。

附图说明

[0015] 图1为本发明中的理论避障路径轨迹图。

[0016] 图2为本发明中三次Bezier曲线的特性图一。

[0017] 图3为本发明中三次Bezier曲线的特性图二。

[0018] 图4为本发明中的实际避障路径轨迹图。

[0019] 图5为本发明中实际避障路径的曲率图。

- [0020] 图6为本发明的控制框图。
 [0021] 图7为本发明中的预瞄算法跟踪示意图。
 [0022] 图8为本发明中的曲线跟踪示意图。
 [0023] 图9为本发明中设定曲线与跟踪曲线的仿真模拟曲线跟踪对比图。
 [0024] 图10为本发明中的航向偏差模拟图。
 [0025] 图11为本发明中的横向偏差模拟图。
 [0026] 图12为本发明中的前轮转向角曲线图。

具体实施方式

[0027] 下面结合附图对本发明作进一步的说明。

[0028] 如图1~12所示的一种用于农机无人驾驶的避障路径规划及其控制方法, 农机自动绕开障碍物的具体步骤为,

步骤1: 通过传感器获取农机环境信息做出避障决策;

步骤2: 使用改进的最短切线法离线计算出一条理论避障路径;

步骤3: 利用基于Bezier曲线的路径优化方法优化步骤2中的理论避障路径得到实际避障路径, 使得优化后的路径更加容易控制, 使用预瞄和PI控制器组合起来控制农机的前轮转角使农机沿着实际避障路径行走绕开障碍物;

本发明的步骤1中, 传感器包括位置传感器、角度传感器和机器视觉相机, 角度传感器检测农机的转向角, 位置传感器获得农机的位置信息; 视觉机器相机设有2个并分别设置在农机的前后侧, 视觉机器相机获取农机所处环境的地理信息;

步骤2中, 计算理论避障路径具体地为, 计算农机前方障碍物的特征圆的大小、农机与障碍物的距离, 根据特征圆的大小设定安全距离, 根据农机的犁具宽度和农机最小转弯半径, 设定一条理论避障路径。

[0029] 为了使避障路径更加容易控制, 步骤2中, 最短切线法具体的为, 以障碍物的中心为圆心做特征圆, 特征圆的半径为 $r_{\min}+w/2$, 如图1所示, 理论避障路径由圆弧段一、直线段一、圆弧段二、直线段二和圆弧段三组成, 圆弧段一的一端与农机原始的直线路径相切, 圆弧段一的另一端与直线段一的一端相切, 直线段一的另一端和直线段二的一端分别与圆弧段二相切, 直线段二的另一端与圆弧段三相切, 圆弧段二为特征圆上的一段, 圆弧段一和圆弧段三关于圆弧段二的中心线对称设置, 农机依次经过圆弧段一、直线段一、圆弧段二、直线段二和圆弧段三绕过障碍物, 其中, r_{\min} 为农机的最小转弯半径, w 为农机的作业宽度, 障碍物的外接圆半径小于最小转弯半径;

圆弧段一的半径为 r_{\min} , 所述圆弧段三的半径为 r_{\min} , 圆弧段一的起点记为H点, 圆弧段一的圆心记为 O_1 点, 直线段一与农机原始的直线路径的相交点记为J, 直线段一与圆弧段二的相切点记为D, 农机原始路径与特征圆的相交点分别记为K和K', $JK=w/2$, 圆弧段二的圆心记为O点, O的坐标设为(a, b), 圆弧段二的中心点记为B点, J点的坐标记为(x1, y1), JD的方程可以写成:

$$y = k(x - x_1) + y_1 \quad (1-1);$$

特征圆的方程可以写成:

$$\begin{aligned} (x-a)^2 + (y-b)^2 &= r^2 \\ r &= \frac{|kx_2 - y_2 + b|}{\sqrt{k^2 + 1}} \quad (1-2) \\ r &= r_{\min} + w/2 \end{aligned}$$

通过(1-1)和(1-2)可以求出k,D点为JD和特征圆的相交点,以此解出D点坐标;

设点O₁的坐标为(x₂,y₂),则点O₁到直线JD的距离为:

$$r_{\min} = \frac{|kx_2 - y_2 + b|}{\sqrt{k^2 + 1}} \quad (1-3), \quad y_2 = y_1 + r_{\min} \quad (1-4)$$

根据公式(1-3)和(1-4)求出O₁的坐标;则H点的坐标为(x₂,y₁),B点的坐标为(a,b+r);

为了优化本发明中利用改进的最短切线法设计的理论避障路径,步骤3中,利用基于Bezier曲线的路径优化方法优化步骤2中的理论避障路径,具体的为,建立Bezier方程,

(1) 给定空间n+1个点的位置矢量 $p_i (i=0,1,2,\dots,n)$,则参数曲线上各点坐标的插值公式为:

$$Q(t) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(t) \cdot p_i \quad (t \in [0,1]) \quad (2-1)$$

其中 p_i 构成该曲线的特征点, $B_{i,n}(t)$ 是n次Bernstein基函数:

$$B_{i,n}(t) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i} = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i} \quad (i=0,1,\dots,n) \quad (2-2)$$

由上述公式,可以得出三次和二次Bezier曲线的数学表达式,当n=3时,Q(t)为三次多项式,有四个控制点,其矩阵形式表达为:

$$Q(t) = [t^3 \ t^2 \ t \ 1] \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = T \cdot M \cdot P^T \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (2-3)$$

当n=2,Q(t)为二次多项式,有三个控制点,矩阵表达式为:

$$Q(t) = [t^2 \ t \ 1] \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (2-4)$$

(2) Bezier曲线的性质

由公式(2-1)得到Bezier曲线两端点的值:

当t=0时,

$$Q(0) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(0) \cdot p_i = B_{0,n}(0) \cdot p_0 + B_{1,n}(0) \cdot p_1 + \dots + B_{n,n}(0) \cdot p_n = p_0 \quad (2-10)$$

当t=1时,

$$Q(1) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(1) \cdot p_i = B_{0,n}(1) \cdot p_0 + B_{1,n}(1) \cdot p_1 + \dots + B_{n,n}(1) \cdot p_n = p_n \quad (2-11)$$

对公式(2-1)求出Bezier曲线的导函数为:

$$Q'(t) = n \cdot \sum_{i=0}^{n-1} (p_i - p_{i+1}) \cdot B_{i,n-1}(t) \quad (2-12)$$

在起点t=0时,

$$Q'(0) = n \cdot (p_n - p_0) \quad (2-13)$$

在起点t=1时,

$$Q'(1)=n \cdot (p_n - p_{n-1}) \quad (2-14)$$

二次Bezier曲线端点性质:

$$Q'(0)=2 \cdot (p_1 - p_0) \quad Q'(1)=2 \cdot (p_2 - p_1) \quad (2-15)$$

三次Bezier曲线端点性质为:

$$Q'(0)=3 \cdot (p_1 - p_0) \quad Q'(1)=3 \cdot (p_3 - p_2) \quad (2-16)$$

从分析Bezier曲线的性质可以看出,在起点和终点处的切线方向和特征多边形的第一条边和最后一条边的走向一致,则通过规划Bezier曲线起始点和终点的切线方向,实现了对车辆初始位姿和目标位姿的确定;从图2和图3中可以看出,三次Bezier曲线都落在了特征多边形P0P1P2P3内,增加了Bezier曲线的可控性;

(3)Bezier曲线的曲率表达式为:

$$k = \frac{\left| \frac{y'}{1+y'^2} dx \right|}{\left| \frac{y''}{(1+y'^2)^{\frac{3}{2}}} \right|} \quad (2-5)$$

其中, $y=f(x)$ 表示曲线的方程, y' 为曲线的一阶导数, y'' 为二阶导数;

曲率半径为:

$$\rho = 1/k \quad (2-6);$$

针对以上分析,为了提高Bezier曲线的可控性,本发明选取三次Bezier曲线,针对三次Bezier曲线:

$$Q(t) = \sum_{i=0}^3 A_i(t) \cdot p_i = (p_3 - 2p_2 + 3p_1 - p_0)t^3 + (3p_2 - 6p_1 + 3p_0)t^2 + (3p_1 - 3p_0)t + p_0 \quad (2-7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= 3(Y_3 - 3Y_2 + 3Y_1 - Y_0)t^2 + 2(3Y_2 - 6Y_1 + 3Y_0)t + (3Y_1 - 3Y_0) \\ \frac{dx}{dt} &= 3(X_3 - 3X_2 + 3X_1 - X_0)t^2 + 2(3X_2 - 6X_1 + 3X_0)t + (3X_1 - 3X_0) \end{aligned} \quad (2-8)$$

其中, X_0, X_1, X_2, X_3 分别为P0点、P1点、P2点和P3点处的横向坐标, Y_0, Y_1, Y_2 和 Y_3 分别为P0点、P1点、P2点和P3处的纵向坐标;

P0点对应圆弧段一的起点H(x_2, y_1),P3点对应圆弧段二的中心点B($a, b+r$),P1点($(x_2+a)/2, y_1$),P2点($(x_2+a)/2, b+r$),则实际故障路径对应的曲线的曲率半径计算公式为:

$$\rho_s = \frac{\left| \left[\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \right|}{\left| \left(\frac{dy}{dt} \right)' \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right) - \left(\frac{dy}{dt} \right) \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right)' \right|} \quad (2-9);$$

用三次Bezier曲线优化理论避障路径形成的实际避障路径由两条关于圆弧段二的中心对称设置的实际避障曲线 ρ_0 组成(如图6所示);

为了提高跟踪曲线的控制精度,步骤3中,利用预瞄控制器计算出理论前轮转角,具体的为,确定农机的前视距离 l ,取路径上的一点为预瞄点(x_0, y_0), R 为前视距离对应的圆弧段的半径, l 、 R 和 x 之间的关系式为:

$$D+x=R, D^2+y^2=R^2, x^2+y^2=l^2 \quad (3-5)$$

由 (3-5) 可以得到:

$$R=l^2/2x_0 \quad (3-1)$$

将农机简化为二轮车, 建立农机的运动学模型:

$$\dot{x}=v\cos(\theta), \dot{y}=v\sin(\theta), \dot{\theta}=v\frac{\tan(\delta)}{L} \quad (3-2)$$

根据阿克曼转向几何关系, 农机的转弯半径和前轮转角、轴距的关系式为:

$$R=\frac{L}{\tan\delta} \quad (3-3)$$

将 (3-2) 和 (3-3) 结合起来得到理论转角的计算公式为:

$$\delta=\arctan\left(\frac{2Lx}{l^2}\right) \quad (3-4)$$

其中, θ 为农机的航向偏差角, 农机后轴中心记为点 A, 农机后轴中心 A 和预瞄点 P 连线记为 AP, 航向偏差角为农机航向与 AP 之间的夹角, δ 为农机的理论前轮转角, L 为农机的轴距, v 为农机的行驶速度, 设定的曲线路径上距离农机中心最近的点即为 M;

步骤 3 中, 使用 PI 控制方法计算出补偿前轮转角, 具体的包括以下步骤:

(301) 根据农机的位置和预瞄点计算出农机的航向偏差角 θ 作为 PI 的误差输入 $e(k)$;

(302) 计算出当前的积分累计误差 $\sum_{i=1}^k e(i)$;

(303) PI 控制输出补偿前轮转角, 补偿前轮转角的计算公式为:

$$u(k)=K_p \cdot e(k)+K_i \sum_{i=1}^k e(i) \quad (4)$$

其中, K_p 为比例增益, K_i 为积分增益, $e(i)$ 为 i 时间点下对应的误差输入, k 为总采样时间点数, $u(k)$ 为 PI 控制的输出, 具体的为当前的补偿前轮转角;

将预瞄控制器输出的理论前轮转角和 PI 控制器输出的补偿前轮转角相加后为实际前轮转角, 实际前轮转角实时输出给农机模型, 控制农机的前轮转角使农机沿着规划好的实际避障路径行走, 实现农机的自动避障。

[0030] 使用 matlab 对实际避障曲线曲率进行仿真, 如图 5 可以看出, 实际避障曲线曲率连续; 使用 matlab 软件针对本发明中提出的 PI 控制和预瞄控制算法对设定曲线进行仿真, 给定农机的起始位置为 $(-13, 1)$, 初始航向角度为 0rad , K_p 取为 2, K_i 取为 0.01; 图 9~图 12 的横坐标均为农机的行驶距离, 从图 9 中可以看出, 跟踪曲线与设定曲线基本重合; 从图 10 中可以看出, 航向偏差大概在 0.08rad 左右; 从图 11 中可以看出, 横向偏差在 10cm 左右; 从图 12 中可以看出, 前轮转向角为 1 阶惯性环节, 没有突变, 和实际相符; 通过以上分析, 使用本发明中的控制方法进行农机的掉头路径控制, 控制精度高, 农机基本按照设定的曲线路径行走。

[0031] 本发明工作时, 视觉相机采集农机周围的环境信息, 根据周围环境信息确认农机是否进入避障, 若检测到农机前方有小障碍物时, 农机进入避障导航状态, 农机通过传感器检测获得农机的位置信息, 计算农机前方障碍物的特征圆的大小、农机与障碍物的距离, 根据农机的犁具宽度和农机最小转弯半径确定特征圆的大小以设定安全距离, 使用改进的最短切线法设定理论避障路径, 但是由于理论避障路径的曲率不连续, 使农机避障的

控制精度降低,使用Bezier曲线优化方法优化理论避障路径生成新的实际避障路径,通过预瞄控制器得到理论前轮转角,PI控制器补偿预瞄控制器产生的控制误差输出补偿前轮转角,将理论前轮转向角和期望补偿转向角相加后得到实际前轮转角并将前轮转角输出给农机模型,位置传感器实时检测农机所在位置并将位置信息发送给预瞄控制器和PI控制器,通过控制农机的前轮转角使农机沿着设定的曲线行走,从而使农机自动绕开障碍物;本发明通过改进后的最短切线法计算出一条理论避障路径,使用基于Bezier曲线的路径优化方法对理论避障路径进行优化,使避障路径更加容易控制,通过预瞄控制器和PI控制器的结合控制农机的前轮转向角使农机沿着设定好的避障曲线行走,控制精度高;可应用于无人驾驶的农机在田间作业时自动避开小障碍物的工作中。

[0032] 本发明并不局限于上述实施例,在本发明公开的技术方案的基础上,本领域的技术人员根据所公开的技术内容,不需要创造性的劳动就可以对其中的一些技术特征作出一些替换和变形,这些替换和变形均在本发明保护范围内。

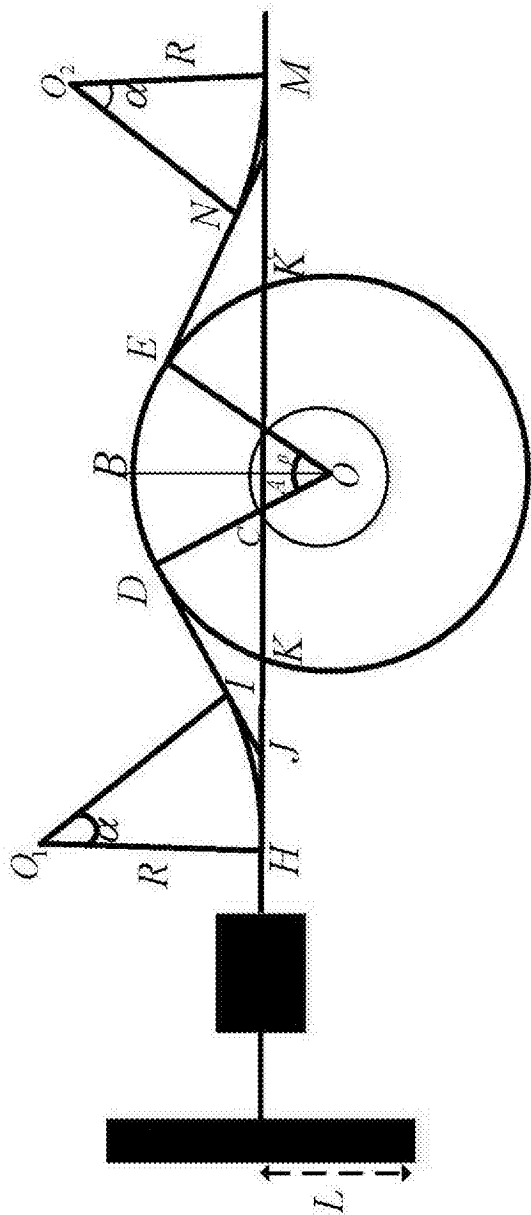


图 1

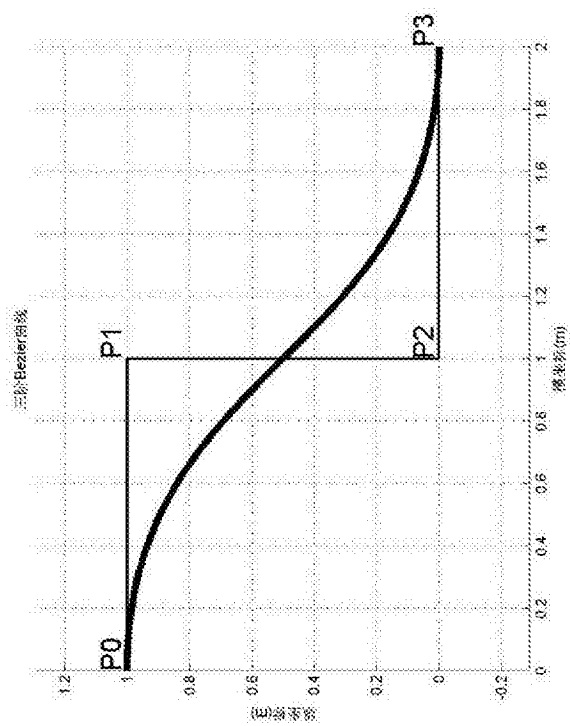


图2

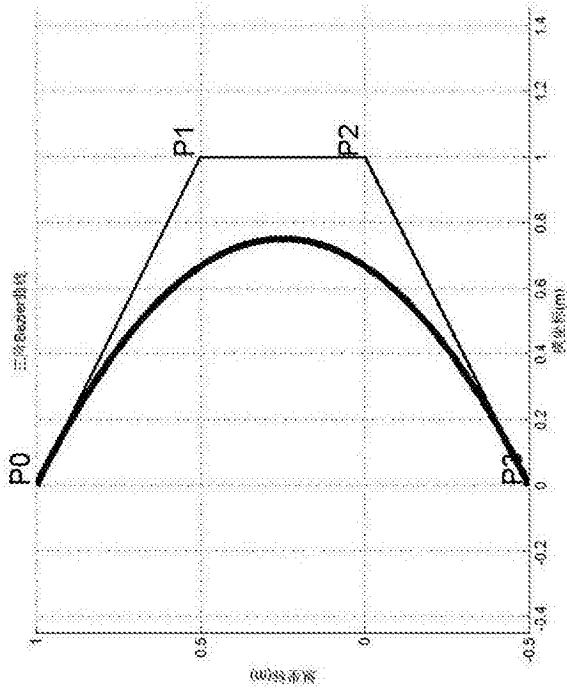


图3

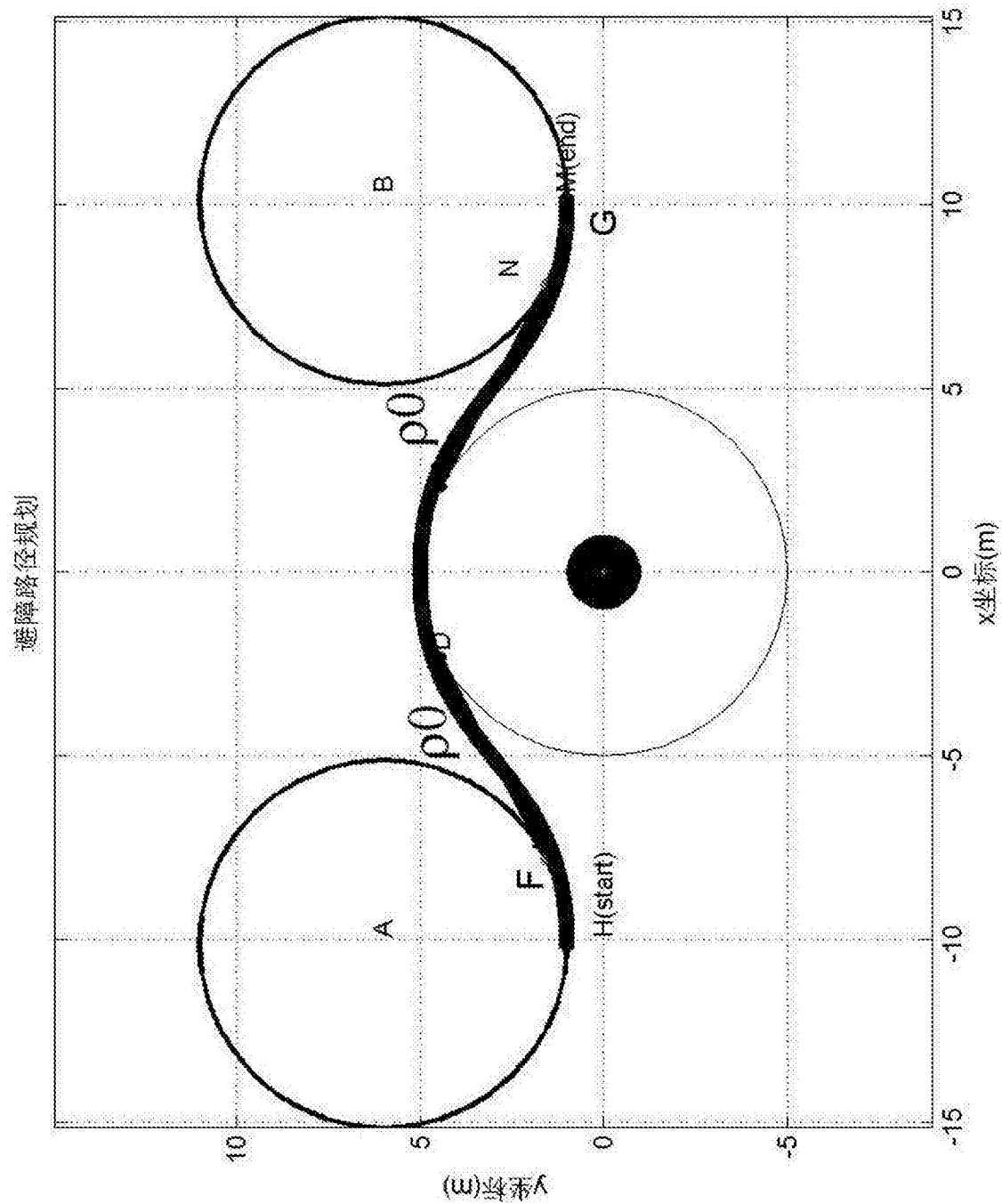


图4

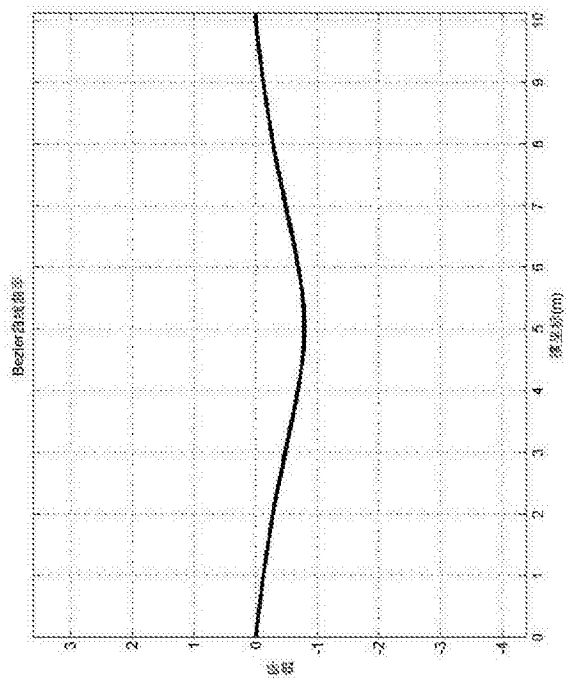


图5

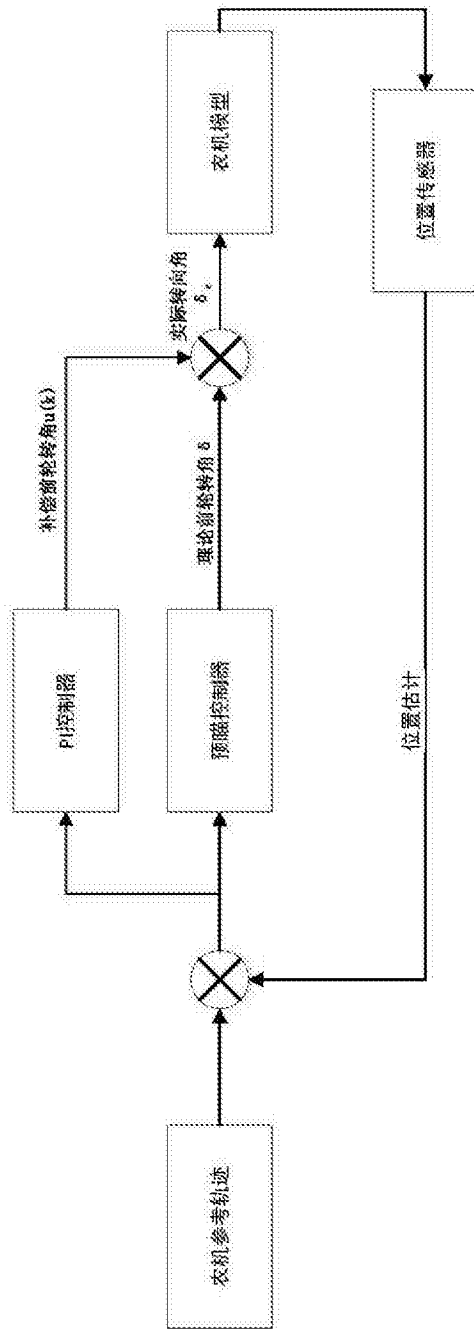


图6

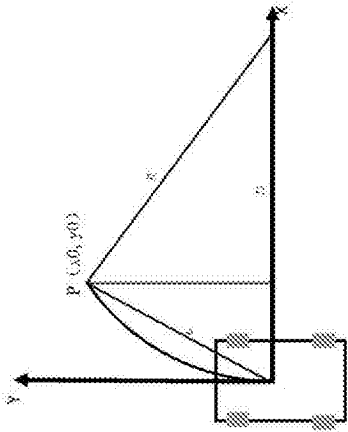


图7

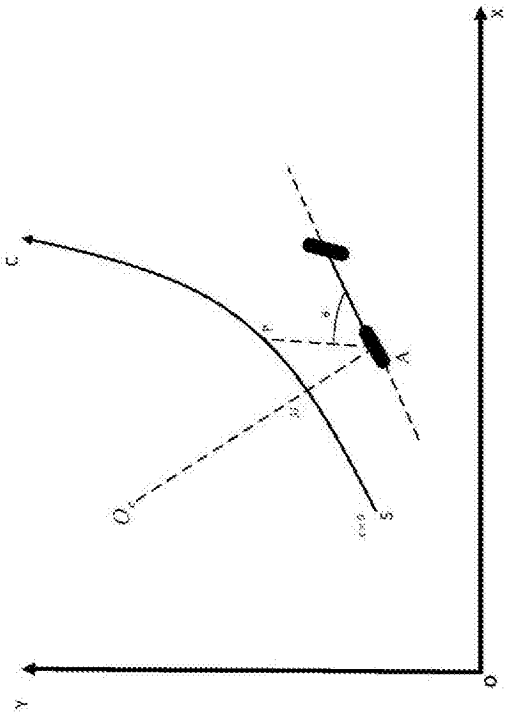


图8

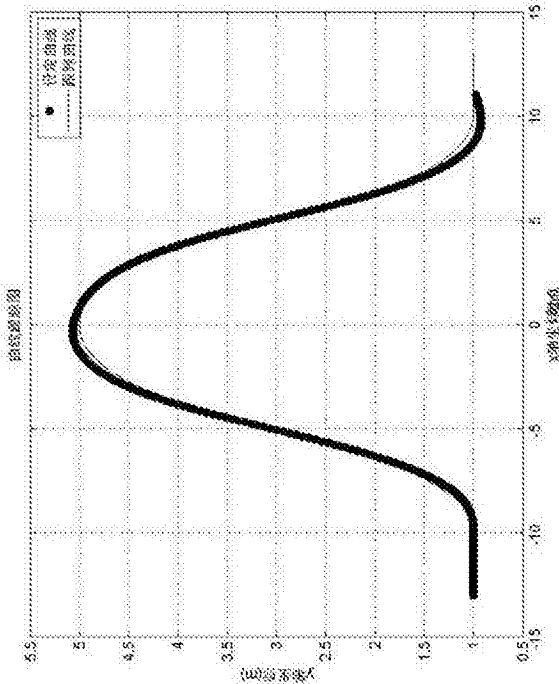


图9

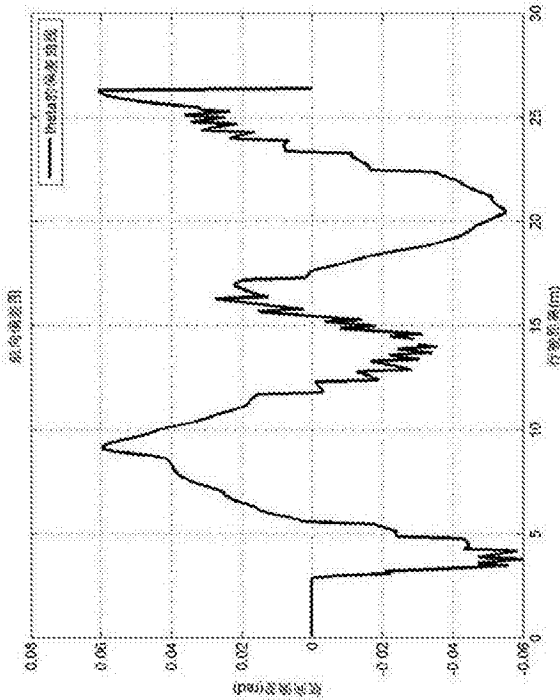


图10

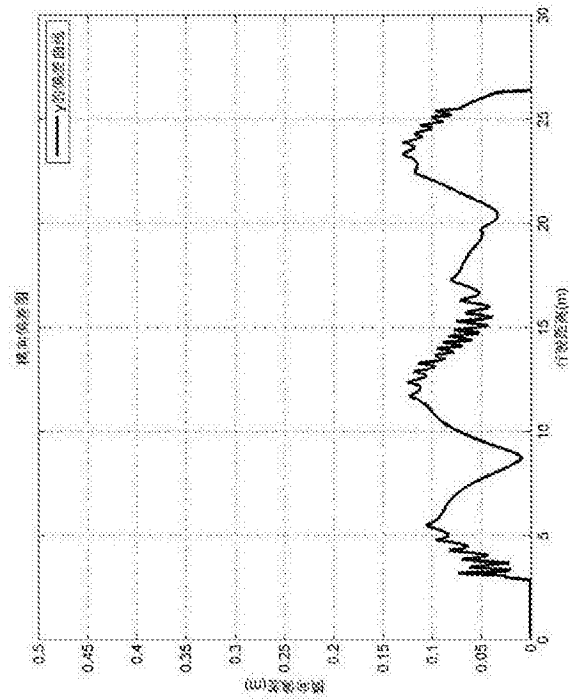


图11

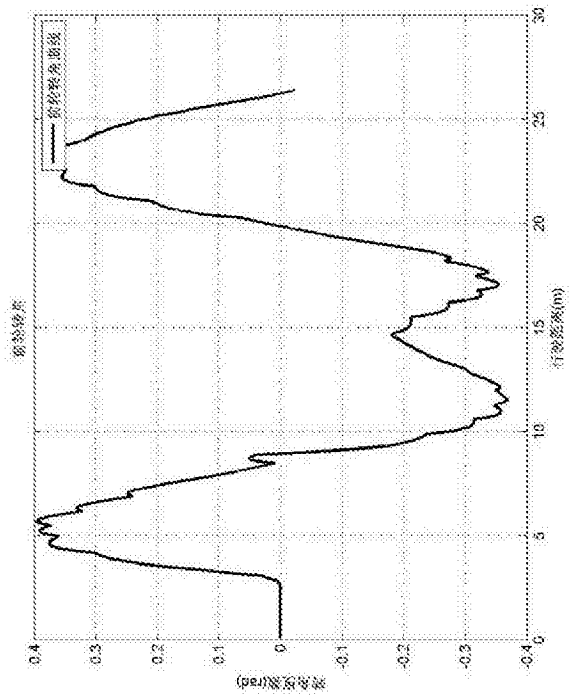


图12