

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.04.046

基于两阶段纯追踪模型的农用车路径跟踪算法研究

肖世德 江海锋 杜金兰 王逸涵 孟祥印 熊 鹰

(西南交通大学机械工程学院, 成都 610031)

摘要: 针对车辆自身加工、装配误差及轮胎侧滑等因素导致理论转向运动模型与实际转向运动模型不一致的情况, 基于最小二乘法对车辆进行了转向运动模型辨识, 得到了不同设定线速度下的转向运动模型。同时, 为解决常规纯追踪算法计算得出的部分控制量无法使车辆转向系统作出响应, 造成路径跟踪精度下降问题, 提出了一种考虑横向偏差和横偏角的两阶段纯追踪算法, 并针对两个阶段的切换提出了设置过渡区滞后切换策略。模拟环境 S 形路径跟踪实验表明, 在行驶速度为 0.6 m/s 时, 固定前视距离的纯追踪算法平均横向偏差为 0.523 8 m, 两阶段纯追踪算法为 0.361 6 m, 其跟踪精度提高 30.9%, 较固定前视距离的纯追踪算法具有更好的路径跟踪性能。采用滞后切换策略将两阶段的切换跳变率从 2.18% 减至 1.16%, 抑制效果提升 46.8%。

关键词: 农用车; 纯追踪算法; 路径跟踪; 滞后切换; 转向控制

中图分类号: S22; TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)04-0439-08

OSID:



Path Tracking Algorithm of Agricultural Vehicle Based on Two Stages Pure Tracking Model

XIAO Shide JIANG Haifeng DU Jinlan WANG Yihan MENG Xiangyin XIONG Ying

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to realize the automatic navigation of agricultural vehicles, ultra wide band (UWB) wireless positioning technology was used to obtain the current position of the vehicle in real time, and the path tracking research was carried out. In view of the inconsistency between the theoretical steering motion model and the actual steering motion model caused by factors such as the vehicle's own processing, assembly errors and tire sideslip, in order to improve the control accuracy, the vehicle's steering motion model was identified based on the least squares method, and the turning motion models at different linear speeds were obtained. At the same time, in order to solve the problem that some of the control variables calculated by the conventional pure tracking algorithm cannot make the vehicle steering system respond, resulting in the decline of the path tracking accuracy, a two-stage pure tracking algorithm considering lateral deviation and lateral deflection angle was proposed. And the strategy of hysteresis switching of setting transition lag was proposed for how to switch between the two stages. The "S" type path tracking test in the simulation environment showed that when the driving speed was 0.6 m/s, the average lateral deviation of the pure tracking algorithm with a fixed look-ahead distance was 0.523 8 m, and the two-stage pure tracking algorithm was 0.361 6 m, and its tracking accuracy was improved by 30.9%, which had better path tracking performance than that of the pure tracking algorithm with fixed look-ahead distance. The hysteresis switching stratege was adopted to reduce the two stages mutation rate from 2.18% to 1.16%, and the suppression effect was improved by 46.8%.

Key words: agricultural vehicle; pure pursuit algorithm; path tracking; hysteresis switching; steering control

0 引言

为实现农业移动机械和农田作业车辆(简称农

机)自动驾驶和无人驾驶,首先需要获取农机准确的定位信息,对于室外露天作业环境,可以采用差分 GPS/北斗卫星导航系统来完成农机的定位^[1-6]。

收稿日期: 2022-08-30 修回日期: 2022-11-01

基金项目: 四川省科技计划项目(2021YFN0020)

作者简介: 肖世德(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事机器视觉与机器人运动控制研究, E-mail: sdxiao@swjtu.cn

对于蔬菜大棚等室内农业场景,不宜使用卫星导航,可采用超带宽(Ultra wide band,UWB)室内定位设备来获取农机的位置信息^[7-9]。在农机位置姿态信息精度足够的情况下,路径跟踪控制方法的选择和参数整定是提高农机自动驾驶系统精度和稳定性的关键^[10]。

纯追踪控制是一种纯几何路径跟踪控制方法,因其控制参数少、控制简单、稳定性强,被广泛应用于路径跟踪控制^[11-14]。WANG等^[15]在纯追踪算法中引入了樽海鞘优化算法来生成最优前视距离,同时根据预瞄点与当前车辆位置之间的距离和时间间隔设计了一个速度控制器,提高了纯追踪算法的跟踪准确性。YANG等^[16]提出了一种基于最小化横向误差和航向误差,以实现目标点的自适应优化的农机路径跟踪算法,与纯追踪算法相比,跟踪误差降低20%以上。AHN等^[17]提出考虑车辆和路径之间的关系,启发式的选择前视点,车辆可以比纯追踪方法更准确地跟踪各种曲率的路径。WANG等^[18]设计了一种基于改进双圆弧路径规划的路径跟踪控制策略,并将大角度转向控制方法与纯追踪算法相结合,增强了跟踪收敛性能。李革等^[19]研究得出前视距离与速度呈正相关,与路径弯度呈负相关的关系,从而动态调整前视距离来实现路径跟踪。姚立健等^[20]根据车体航向与前视直线的夹角界定车体偏差程度,并提出基于动态前视距离的改进型纯追踪模型。文献[21-26]结合农机运动学模型引入模糊控制来动态调整前视距离,从而提高路径跟踪精度。上述对纯追踪算法的改进主要集中在前视距离上,均未考虑移动车辆因自身加工误差、与地面的摩擦等各种不确定因素影响。从而使得移动车辆理论运动模型与实际运动模型存在较大的差别。

本文采用UWB定位技术实时准确获取移动车辆高精度的位置信息,并采用实验分析对移动车辆的运动模型进行参数辨识,从而获得较为真实的运动关系模型,在此基础上,设计一种结合横向误差和横偏角的两阶段纯追踪路径跟踪算法,并采用有作物行特点的S形路径进行实车路径跟踪实验验证。

1 路径跟踪控制系统结构

选购轮趣公司的阿克曼移动小车为研究对象,该移动小车以MD60型直流有刷电机作为驱动电机。内置STM32F103控制电机、舵机驱动,还采集MPU6050模块的角度信息,陀螺仪量程为±500(°)/s,分辨率为131LSB(Least significant bit)/(°)/s;以Jetson TX1为上位机部署ROS操作系统进行复杂算法处理。同时移动小车搭载UWB

定位标签,通过与提前布置的UWB基站互发脉冲信号,基站型号为D-DWM-PG2.5,移动小车UWB定位方案示意图如图1所示。

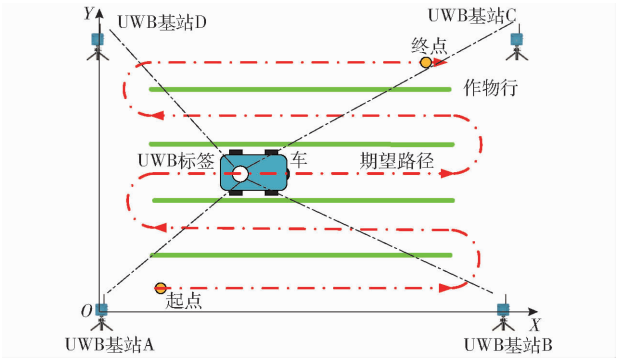


图1 UWB定位方案示意图
Fig.1 Schematic of UWB positioning scheme

在获得车辆角度信息、位置信息和路径信息后,将其输入路径跟踪控制算法,得到运动控制信息,从而驱动车辆完成路径跟踪。路径跟踪系统控制原理如图2所示。

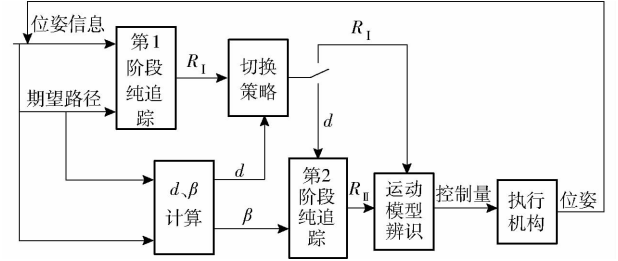


图2 路径跟踪系统控制原理
Fig.2 Path tracking system control principle

由图2可知,路径跟踪控制器由2个阶段的纯追踪算法模块、切换策略模块、运动模型辨识模块组成,其中 R_I 、 R_{II} 分别为第1阶段纯追踪计算出的转弯半径和第2阶段纯追踪计算出的转弯半径; d 为横向偏差, β 为横偏角。

2 车辆运动学模型与纯追踪算法

2.1 运动学建模

农机在路径跟踪的农田作业过程中,符合低速行驶、小转向角度微调行驶路径特点,假设轮胎与地面不产生横向力,轮胎不产生横偏角,则车辆遵循阿克曼转向模型^[27-28]。阿克曼转向模型如图3a所示。

由图3a可知,在确定转弯半径 R 和驱动速度 v 后,即可确定后轮驱动速度和前轮转角。假设农机在平滑路面上行驶,轮胎与地面只产生纵向压力,可将四轮运动模型简化为二轮模型,模型如图3b所示。

在时间 dt 内,车辆从 O_1 运动到 O_2 ,可得

$$R = \frac{vdt}{\omega dt} = \frac{v}{\omega}$$

(1)

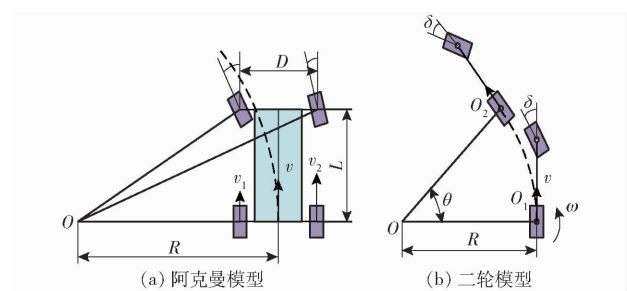


图 3 车辆运动模型

Fig. 3 Vehicle motion model

式中 ω ——车辆角速度

2.2 纯追踪模型

纯追踪模型是一种几何追踪模型,原理如图 4 所示。图中 α 为偏航角, O 为车辆转向时瞬时圆心,当前视距离 l_d 确定时,沿着前进方向可以在期望路径上找到唯一一点作为预瞄位置。根据当前车身位置(车辆后轴中心)的坐标、当前车身航向角以及预瞄位置的坐标 3 个信息可以确定一个圆弧轨迹,计算圆弧轨迹半径并得出车辆控制量,完成路径跟踪^[24,29]。

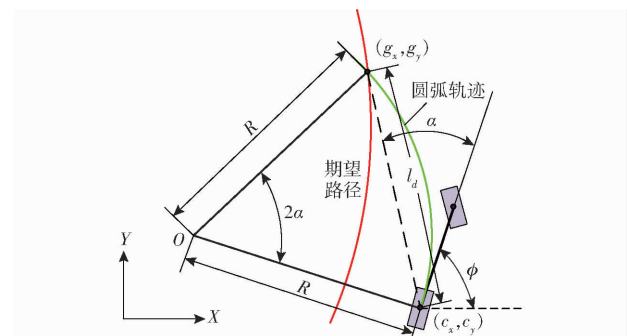


图 4 传统纯追踪模型

Fig. 4 Traditional pure pursuit model

纯追踪控制转弯半径计算式为^[29]

$$R = \frac{l_d}{2\sin(\text{atan2}(g_y - c_y, g_x - c_x) - \phi)} \quad (2)$$

式中 (g_x, g_y) ——预瞄点坐标

(c_x, c_y) ——当前位置坐标

ϕ ——航向角, rad

3 两阶段纯追踪算法

3.1 第 2 阶段纯追踪

当计算的 R 过大或过小时,不在车辆实际的转弯半径范围内,导致理论转弯半径与实际转弯半径不符的情况。如图 5 所示,存在横向误差 d 的情况下,计算出的转弯半径过大,车辆前轮须做出很小的转弯响应才能满足该半径的转弯,而实际上由于转向机构的各种加工、装配误差,无法做出灵敏精细的响应,造成车辆从状态 I 直动到状态 II,没有按照规划路径运动。

本文提出一种两阶段纯追踪算法。整个路径跟

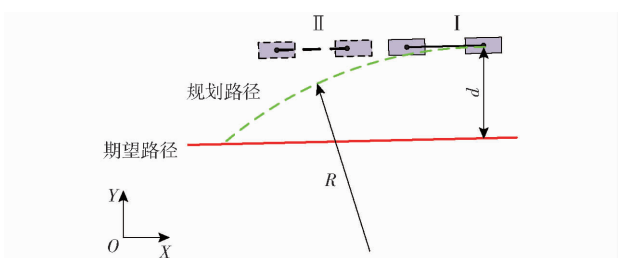


图 5 转向系统未响应情况

Fig. 5 Situation of steering system not responding

踪过程采用 2 次纯追踪算法,第 1 阶段采用固定前视距离的纯追踪算法,快速运动到期望路径附近,并实时计算横向偏差 d ,当第 1 阶段计算得出的转弯半径和横向偏差分别大于一定阈值后,可判断出车辆将一直维持在这个横向偏差左右做直行运动。此时进入第 2 阶段的纯追踪,第 2 阶段的纯追踪是在第 1 阶段纯追踪的基础上选择新的前视点来做路径跟踪。其原理如图 6 所示。

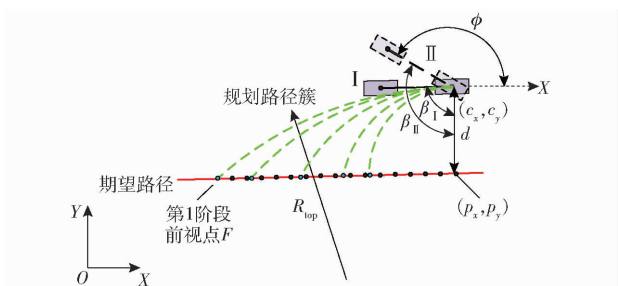


图 6 两阶段纯追踪算法原理图

Fig. 6 Pure pursuit algorithm of two stage

为了使车辆做出灵敏的转弯响应,可减小转弯半径。在小于 R_{top} 的 R 中,有一系列 R 满足使车辆做出转弯响应,构成路径簇,可依据 d 和 β 值确定唯一的 R ,由驾驶经验可知, d 较大时,可以适当减小 R ,使车辆快速地运动到期望路径上; β 较大时,也可适当减小 R ,使车辆快速运动到期望路径上。设计计算式为

$$\frac{R - R_{bottom}}{R_{top} - R_{bottom}} = 1 - \left(\frac{d - d_{min}}{d_{max} - d_{min}} + \frac{\beta}{\beta_{max}} \right) / 2 \quad (3)$$

$$\text{其中 } \beta = \text{atan2}(p_y - c_y, p_x - c_x) - \phi \quad (4)$$

式中 R_{top} ——上临界半径,取 5 m

R_{bottom} ——下临界半径,取 2 m

d_{min} ——最小横向误差,取 0.1 m

d_{max} ——最大横向误差,取 1.0 m

β ——横偏角,车辆纵轴与后轴中心和最近路径点连线的夹角

β_{max} ——最大横偏角,取 3.14 rad

遍历距离车辆后轴中点最近的路径点 (p_x, p_y) 与第 1 阶段纯追踪所选择的前视点之间的路径序列点,依次按照纯追踪原理计算每个路径序列点所对应的转弯半径 R ,保留 $[R_{bottom}, R_{top}]$ 范围内的 R ,得

到 R 序列数组;将此 R 序列数组依次与式(3)计算出的 R 进行比较,选择最接近式(3)计算出的 R 作为第2阶段纯追踪的转弯半径 R 。

3.2 两阶段纯追踪切换策略

两阶段纯追踪算法的一个关键点在于第1、2阶段纯追踪的切换逻辑,主要切换逻辑有:状态切换、滞留时间切换、滞后切换^[30-32]。依据制定的切换策略来判定该采用哪段追踪控制。

根据上述关于第2阶段纯追踪的分析并结合实验情况,本文提出关于第1、2阶段纯追踪算法的切换控制策略为:①以当前时刻车辆的横向偏差 d 和第1阶段纯追踪算法计算的转弯半径 R 作为切换控制策略的条件指标。②当条件 $R > R_{top}$ 且 $d_{min} < d < d_{max}$ 首次成立时,切换到第2阶段纯追踪,否则就使用第1阶段纯追踪计算的 R 。③为了避免切换过程中发生振荡,如发生扰动时而不反复切换。在 $R > R_{top}$ 且 $d_{min} < d < d_{max}$ 基础上,本文将在控制方式切换时设置过渡区进行滞后切换^[32]。针对 R 指标定义 $R_1 = 4.8\text{ m}$ 至 $R_2 = 5.2\text{ m}$ 为切换过渡区;针对 d 指标分别定义 $d_1 = 0$ 至 $d_2 = 0.2\text{ m}$ 和 $d_3 = 0.9\text{ m}$ 至 $d_4 = 1.1\text{ m}$ 为切换过渡区,切换策略如图7所示。

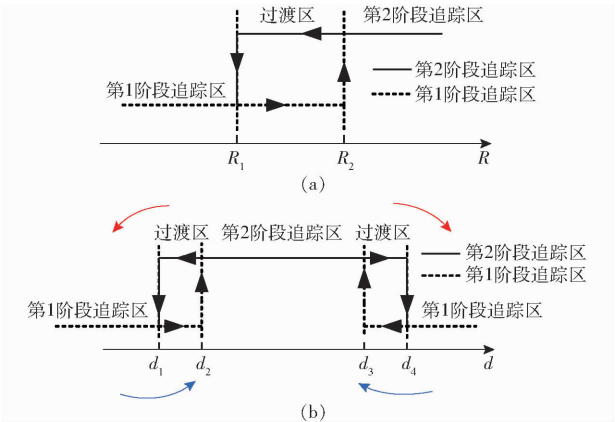


图7 过渡区滞后切换原理
Fig.7 Transition zone hysteresis switching principle

由图7a可知,当系统由第1阶段控制方式切换至第2阶段控制方式时,在过渡区采用第1阶段控制方式;当系统由第2阶段控制方式切换至第1阶段控制方式时,在过渡区采用第2阶段控制方式。由图7b可知,当系统从第2阶段追踪区左侧或右侧切换到第1阶段追踪区时,在过渡区采用第2阶段追踪控制方式;当系统从左侧或右侧的第1阶段追踪区切换到第2阶段追踪区时,在过渡区采用第1阶段追踪控制方式。只有当指标 R 满足第2阶段追踪控制方式且指标 d 也满足第2阶段追踪控制方式,才进入第2阶段纯追踪控制,故两阶段纯追踪切

换条件描述如表1所示。其中 R_{old} 为上一个流程计算的转弯半径, d_{old} 为上一个流程计算的横向偏差。表1中的切换条件满足其中一个即触发相应的切换。首次切换采用 $R > R_{top}$ 且 $d_{min} < d < d_{max}$ 作为切换的条件,后续采用表1的策略切换。两阶段纯追踪算法的程序流程图如图8所示。

表1 带有滞后切换的切换条件
Tab.1 Switch condition with hysteretic

继续第1阶段追踪	进入第2阶段追踪
(1) $R < R_1$	(1) $R > R_2$ 且 $d_2 < d \leq d_3$
(2) $R_1 \leq R < R_2$ 且 $R_{old} \in$ 第1阶段追踪区	(2) $R_1 < R \leq R_2$ 且 $R_{old} \in$ 第2阶段追踪区且 $d_2 < d \leq d_3$
(3) $d < d_1$ 或 $d_4 \leq d$	(3) $R > R_2$ 且 $d_1 < d \leq d_2$ 或 $d_3 < d \leq d_4$ 且 $d_{old} \in$ 第2阶段
(4) $d_1 \leq d < d_2$ 且 $d_{old} \in$ 第1阶段	(4) $R_1 < R \leq R_2$ 且 $R_{old} \in$ 第2阶段或 $d_3 \leq d < d_4$ 且 $d_{old} \in$ 第1阶段

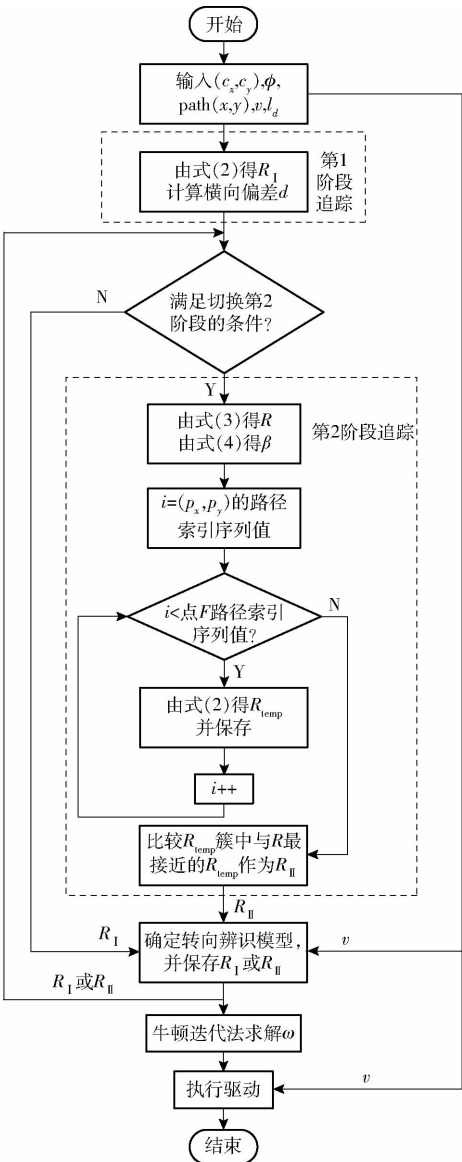


图8 两阶段纯追踪算法程序流程图
Fig.8 Program flow chart of two stage pure pursuit algorithm

4 车辆运动模型辨识

上述车辆运动学模型均是在理想、抽象下简化得出的运动模型,考虑到车辆实际尺寸测量误差、零部件加工装配误差、轮胎侧滑、传感器系统误差等因素影响,直接使用上述运动学模型难以根据指定的运动输入量使其按照指定的转弯半径 R 进行运动。因此需要对车辆运动学模型进行实验辨识,通过实验得出车辆转弯半径 R 与线速度 v 和角速度 ω

的运动关系。然后根据纯追踪模型计算的 R 代入辨识出的运动关系,确定出车辆运动控制量,完成路径跟踪。

移动小车上布置 UWB 定位模块,同时记录输入的线速度 v 、角速度 ω 和 UWB 模块采集的位置数据,再将其拟合成圆弧,得出 v 、 ω 对应下的圆弧半径 R 。线速度 v 测试范围为 $0.3 \sim 1.2 \text{ m/s}$, 间隔 0.1 m/s ;角速度 ω 测试范围为 $0.1 \sim 0.8 \text{ rad/s}$, 间隔 0.1 rad/s 。测试结果如表 2 所示。

表 2 不同 v 、 ω 下的转弯半径 R

Tab.2 Turning radius R under different v and ω conditions

$\omega/$ ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$									
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
0.1	3.25	4.18	5.20	6.15	7.12	7.54	8.83	10.09	11.08	11.82
0.2	1.72	2.20	2.68	3.20	3.72	4.20	4.70	5.18	5.71	5.73
0.3	1.48	1.55	1.87	2.22	2.54	2.86	3.18	3.54	3.87	4.21
0.4	1.48	1.46	1.48	1.72	1.98	2.20	2.43	2.71	2.96	3.22
0.5	1.48	1.46	1.46	1.46	1.61	1.82	2.00	2.22	2.42	2.59
0.6	1.48	1.47	1.45	1.46	1.46	1.51	1.68	1.90	2.05	2.22
0.7	1.48	1.47	1.45	1.46	1.46	1.45	1.44	1.65	1.80	1.94
0.8	1.48	1.46	1.45	1.46	1.46	1.45	1.44	1.46	1.58	1.73

由式(1)可知,转弯半径 R 与线速度成正比、与角速度成反比。在此基础上,假设此系统中,由于机械加工、装配等各种客观存在的误差所引起的转向运动模型函数关系为

$$R = \frac{f(v)}{g(\omega)} \tag{5}$$

式(5)中的 $f(v)$ 、 $g(\omega)$ 的具体形式无法准确确定,因为农机在作业过程中常以中低挡的速度定速行驶,即在自动行驶中,预先设定好固定的行进速度 $v^{[10,20]}$ 。此时 $f(v)$ 便成为一个常数,式(5)转换为

$$R = \frac{1}{G(\omega)} \tag{6}$$

其中 $G(\omega) = g(\omega)/f(v)$

只需通过控制 ω 即可调节 R 。其中 $f(v)$ 在 v 固定时,是一个常数。在 ω 属于 $0.1 \sim 0.8 \text{ rad/s}$ 区间内, $G(\omega)$ 选择常用的多项式形式,即

$$G(\omega) = a_0\omega^n + a_1\omega^{n-1} + \cdots + a_n \tag{7}$$

由上述分析可知, v 是预先设定的,在转向运动模型辨识中,只需要辨识出不同的设定 v 值下, R 与 ω 的函数关系即可,故引入常值 v ,式(5)最终形式为

$$R = \frac{v}{a_0\omega^n + a_1\omega^{n-1} + \cdots + a_{n-1}\omega + a_n} \tag{8}$$

其中, v 是常数,农机作业时预先设定,结合实验情况, n 选为 3。简化的车辆运动学模型与实际运动模型存在各种随机不确定误差,假设这些误差符合正态分布,采用最小二乘思想,可得

$$\min \sum_i^N (R_i - R)^2 =$$
$$\min \sum_i^N \left(R_i - \frac{v}{a_0\omega^n + a_1\omega^{n-1} + \cdots + a_n} \right) \tag{9}$$

选定 3 次多项式,计算出相应的拟合系数。拟合参数如表 3 所示,拟合结果如图 9 所示。

表 3 不同设定速度 v 下拟合系数

Tab.3 Fitting coefficients at different v values

$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	a_0	a_1	a_2	a_3
0.3	-5.314	-8.764	4.530	-0.047
0.4	4.405	-7.868	4.514	-0.145
0.5	1.987	-4.611	3.418	-0.118
0.6	-0.399	-1.133	2.052	-0.039
0.7	-1.657	0.965	1.110	0.021
0.8	-2.100	2.018	0.510	0.067
0.9	-1.442	1.514	0.528	0.052
1.0	0.214	-0.429	1.067	-0.004
1.1	0.163	-0.340	0.961	-0.003
1.2	0.081	-0.240	0.858	0.004

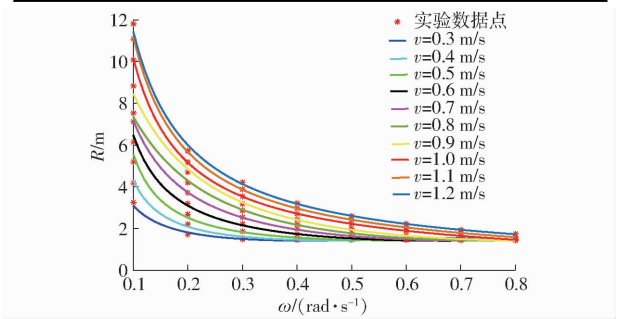


图 9 R 与 ω 拟合曲线

Fig.9 $R - \omega$ fitting curves

显然均方误差 MSE 越接近 0 越好,拟合优度 R^2 越接近 1 越好,由表 4 可知,拟合效果良好,能够用来确定车辆的转弯运动关系。农机线速度属于中低

恒速运动,预先设定好线速度后,根据纯追踪模型计算出转弯半径,再结合上述辨识的实际转弯运动模型,可以较为准确地计算出实际所需的角速度。

表 4 不同速度下转弯半径与角速度拟合曲线指标

参数	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$									
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
MSE	0.005	0.004	0.021	0.017	0.000	0.006	0.021	0.001	0.001	0.028
R^2	0.983	0.994	0.985	0.992	0.999	0.998	0.996	0.999	0.999	0.997

5 实验验证

5.1 路径跟踪实验

为了验证本文所提算法的有效性,在校园空旷区域进行了 UWB——阿克曼转向车辆模拟定位导航实验,如图 10 所示。为了便于后续在真实的农业环境下进行导航,本次实验考虑有作物的情况,将期望路径设定为如图 1 所示的 S 形路径。将本文提出的考虑横向偏差和横偏角的两阶段纯追踪算法与固定前视距离的纯追踪进行 S 形路径跟踪对比实验^[22]。车辆前进速度设定为 0.6 m/s,角速度的控制选择上述辨识的 $v=0.6\text{ m/s}$ 下的 $R-\omega$ 拟合关系式。经反复仿真与实际实验,将纯追踪的前视距离和第 1 阶段的纯追踪前视距离均设定为 1.5 m,采样频率设定为 10 Hz。车辆初始出发位置均为 (3.8,2.0) m,初始航向与当前跟踪路径方向一致,故初始航向角为 0°。S 形路径跟踪实验如图 11、12 所示,实验对比结果如表 5 所示。

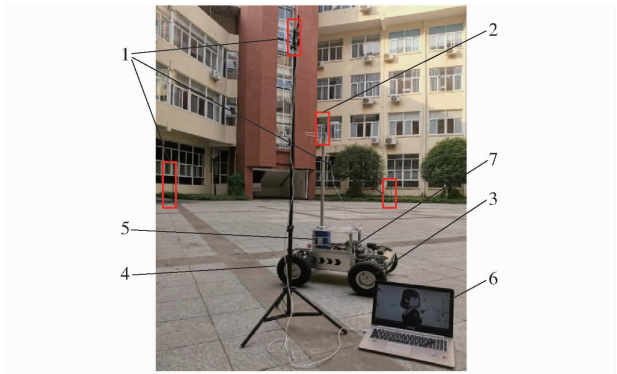


图 10 实验系统及场地
Fig. 10 Test system and site

1. UWB 定位基站 2. UWB 标签 3. 前轮 4. 后轮 5. 锂电池
6. UWB 主基站所连计算机 7. 旷视 Jetson TX1

实验结果表明,由于车辆制造、装配、传感器、尺寸测量等误差因素存在,导致路径跟踪过程车辆存在跟踪误差。在行进速度 0.6 m/s 下,采用两阶段纯追踪算法的平均横向偏差是 0.361 6 m,相较于固定前视距离 1.5 m 纯追踪算法的平均横向偏差 0.523 8 m,其跟踪精度提高 30.9%。在横坐标 6 ~

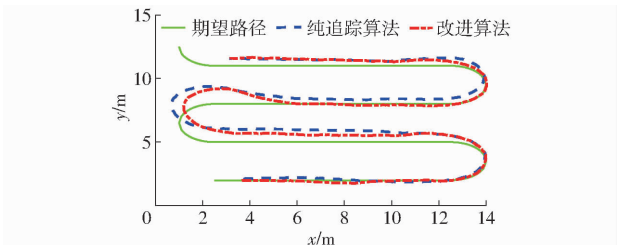


图 11 S 形路径跟踪实验
Fig. 11 S type path tracking test

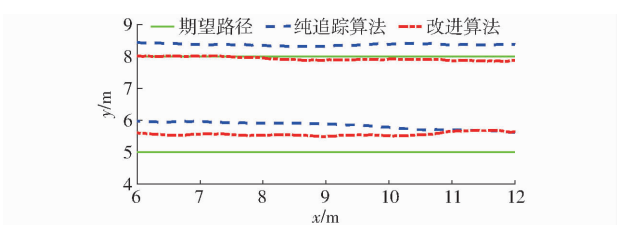


图 12 6 ~ 12 m 段局部放大图
Fig. 12 Partial enlarged view of test of 6 ~ 12 m

表 5 S 形路径跟踪实验结果对比

Tab. 5 Comparison of S type path tracking test results				
控制方法	实验序号	m		
		平均横向偏差	最大横向偏差	6 ~ 12 m 平均偏差
纯追踪算法	1	0.520 5	1.402	0.447 6
	2	0.502 4	1.436	0.435 4
	3	0.548 6	1.418	0.462 7
	平均值	0.523 8	1.419	0.448 6
改进算法	1	0.361 4	1.210	0.299 4
	2	0.370 8	1.192	0.301 2
	3	0.352 6	1.234	0.287 6
	平均值	0.361 6	1.212	0.296 1

12 m 段,改进算法平均横向偏差为 0.296 1 m,纯追踪平均横向偏差为 0.448 6 m,降低 0.152 5 m。

5.2 切换策略实验

利用本文所提的两阶段纯追踪算法,在第 1、2 阶段切换时,车辆可能出现因外部扰动导致两个阶段的状态频繁切换的情况,进行实验分析。同时对本文提出的设置过渡区滞后切换的有效性进行验证。未采用设置过渡区滞后切换策略,以 $R > R_{top}$ 且 $d_{min} < d < d_{max}$ 作为条件切换至第 2 阶段,其中 $R_{top} =$

5.0 m, $d_{\min}$ 、 $d_{\max}$ 分别为 0.1、1.0 m。状态切换如图 13a 所示。采用设置过渡区滞后切换策略,以表 1 作为切换条件。状态切换如图 13b 所示。

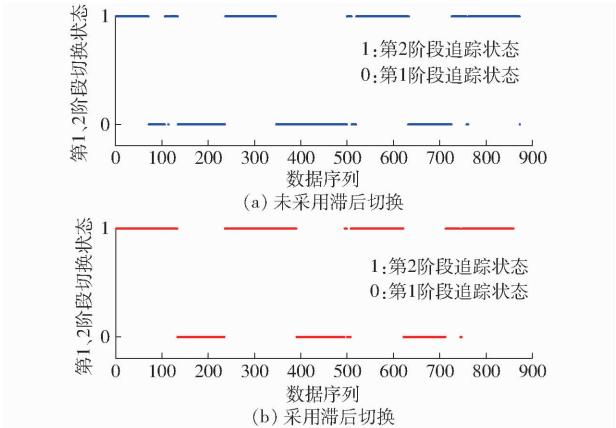


图 13 切换状态图
Fig. 13 Switching state diagrams

为衡量两个阶段切换的频繁程度,定义相邻数据序列切换的次数占数据序列总数的比值为第 1、2 阶段的跳变率。未采用设置过渡区滞后切换策略的跳变率为 2.18%,而采用了的跳变率为 1.16%。两个阶段切换数据如表 6 所示。

表 6 两阶段切换状态结果统计

Tab. 6 Two-stage switching status statistics %			
切换策略	第 1 阶段占比	第 2 阶段占比	两阶段跳变率
未采用滞后切换	54.4	45.6	2.18
采用滞后切换	63.1	36.9	1.16

由表 6 可知,即使不采用设置过渡区滞后切换策略,两阶段的切换跳变率仅为 2.18%,在可接受范围内;采用设置过渡区滞后切换策略的跳变率从 2.18% 降至 1.16%,能够抑制频繁切换,其抑制效果提升 46.8%

6 结论

(1) 针对大棚类农田作业场景 GPS/北斗卫星无法使用的情况,采用 UWB 无线定位技术方法来实时获取车辆的相对位置。同时为了较为精确地控制车辆运动,对车辆进行了转向运动模型的辨识,得到了不同速度下的转弯半径 R 与角速度 ω 关系曲线。

(2) 针对纯追踪控制模型计算得到部分控制量,使车辆转向系统响应失误情况,提出了一种考虑横向偏差和横偏角的两阶段纯追踪算法,模拟 S 形路径跟踪实验表明,两阶段纯追踪算法的平均绝对横向偏差为 0.361 6 m,相较于 1.5 m 的固定前视距离的纯追踪算法的 0.523 8 m,其跟踪精度提高 30.9%。

(3) 针对两阶段在切换过程中可能出现因扰动而频繁切换的情况,提出了一种设置过渡区滞后切换策略。实验表明,未采用滞后切换策略,两个阶段在切换过程中的跳变率仅为 2.18%,在可接受范围内;所提的设置过渡区滞后切换策略的跳变率为 1.16%,能够抑制频繁切换,其抑制效果提升 46.8%。

参 考 文 献

[1] ORTIZ B V, BALKCOM K B, DUZY L, et al. Evaluation of agronomic and economic benefits of using RTK-GPS-based auto-steer guidance systems for peanut digging operations[J]. Precision Agriculture, 2013, 14(4): 357–375.

[2] PEZZEMENTI Z, TABOR T, HU P, et al. Comparing apples and oranges: off-road pedestrian detection on the National Robotics Engineering Center agricultural person-detection dataset[J]. Journal of Field Robotics, 2018, 35(4): 545–563.

[3] 钟银,薛梦琦,袁洪良. 智能农机 GNSS/INS 组合导航系统设计[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 40–46.

ZHONG Yin, XUE Mengqi, YUAN Hongliang. Design of the GNSS/INS integrated navigation system for intelligent agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 40–46. (in Chinese)

[4] 刘成良,林洪振,李彦明,等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 1–18.

LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 1–18. (in Chinese)

[5] 魏爽,李世超,张漫,等. 基于 GNSS 的农机自动驾驶路径搜索及转向控制[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊 1): 70–77.

WEI Shuang, LI Shichao, ZHANG Man, et al. Automatic navigation path search and turning control of agricultural machinery based on GNSS[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 70–77. (in Chinese)

[6] 熊斌,张俊雄,曲峰,等. 基于 BDS 的果园施药机自动驾驶控制系统[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 45–50.

XIONG Bin, ZHANG Junxiong, QU Feng, et al. Navigation control system for orchard spraying machine based on Beidou navigation satellite system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 45–50. (in Chinese)

[7] 林相泽,王祥,林彩鑫,等. 基于超宽带的温室农车辆定位信息采集与优化[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 23–29.

LIN Xiangze, WANG Xiang, LIN Caixin, et al. Location information collection and optimization for agricultural vehicle based on UWB[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 23–29. (in Chinese)

[8] 孙小文,张小超,赵博,等. 农资仓储脉冲超宽带室内定位系统设计与试验及误差分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增

刊 1): 23 – 29.

SUN Xiaowen, ZHANG Xiaochao, ZHAO Bo, et al. Design, experiment and error analysis of impulse radio-ultra wide band indoor positioning system used in agricultural warehousing[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 23 – 29. (in Chinese)

- [9] 王慧强,高凯旋,吕宏武. 高精度室内定位研究评述及未来演进展望[J]. 通信学报, 2021, 42(7): 198 – 210.
WANG Huiqiang, GAO Kaixuan, LÜ Hongwu. Survey of high-precision localization and the prospect of future evolution[J]. Journal on Communications, 2021, 42(7): 198 – 210. (in Chinese)
- [10] 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. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 11 – 19. (in Chinese)
- [11] 郭成洋,范雨杭,张硕,等. 果园车辆自动导航技术研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(8): 87 – 96.
GUO Chengyang, FAN Yuhang, ZHANG Shuo, et al. Progress on vehicle automatic navigation in orchard[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, 50(8): 87 – 96. (in Chinese)
- [12] 张漫,季宇寒,李世超,等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 1 – 18.
ZHANG Man, JI Yuhan, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1 – 18. (in Chinese)
- [13] 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 CSAE, 2015, 31(10): 1 – 10. (in Chinese)
- [14] 熊璐,杨兴,卓桂荣,等. 无人驾驶车辆的运动控制发展现状综述[J]. 机械工程学报, 2020, 56(10): 127 – 143.
XIONG Lu, YANG Xing, ZHUO Guirong, et al. Review on motion control of autonomous vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(10): 127 – 143. (in Chinese)
- [15] WANG R, LI Y, FAN J, et al. A novel pure pursuit algorithm for autonomous vehicles based on salp swarm algorithm and velocity controller[J]. IEEE Access, 2020, 8: 166525 – 166540.
- [16] YANG Y, LI Y, WEN X, et al. An optimal goal point determination algorithm for automatic navigation of agricultural machinery: improving the tracking accuracy of the pure pursuit algorithm [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194: 106760.
- [17] AHN J, SHIN S, KIM M, et al. Accurate path tracking by adjusting look-ahead point in pure pursuit method[J]. International Journal of Automotive Technology, 2021, 22(1): 119 – 129.
- [18] WANG L, LIU M. Path tracking control for autonomous harvesting robots based on improved double arc path planning algorithm[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2020, 100(3 – 4): 899 – 909.
- [19] 李革,王宇,郭刘粉,等. 插秧机导航路径跟踪改进纯追踪算法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 21 – 26.
LI Ge, WANG Yu, GUO Liufen, et al. Improved pure pursuit algorithm for rice transplanter path tracking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 21 – 26. (in Chinese)
- [20] 姚立健, KPITLA Santosh, 杨自栋, 等. 基于超宽带无线定位的农业设施内移动平台路径跟踪研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 17 – 24.
YAO Lijian, KPITLA Santosh, YANG Zidong, et al. Path tracking of mobile platform in agricultural facilities based on ultra wideband wireless positioning[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(2): 17 – 24. (in Chinese)
- [21] 李逃昌,胡静涛,高雷,等. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 205 – 210.
LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 205 – 210. (in Chinese)
- [22] 张朝宇,董万静,熊子庆,等. 履带式油菜播种机模糊自适应纯追踪控制器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 105 – 114.
ZHANG Chaoyu, DONG Wanjing, XIONG Ziqing, et al. Design and experiment of fuzzy adaptive pure pursuit control of crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 105 – 114. (in Chinese)
- [23] 汪小昆,鲁伟,陈满,等. 基于改进纯追踪模型的温室采摘运输自动跟随系统[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 8 – 13.
WANG Xiaochan, LU Wei, CHEN Man, et al. Automatic following system for greenhouse harvesting transportation based on adaptive pure pursuit model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 8 – 13. (in Chinese)
- [24] 唐小涛,陶建峰,李志腾,等. 自动导航插秧机路径跟踪系统稳定性模糊控制优化方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 29 – 34.
TANG Xiaotao, TAO Jianfeng, LI Zhiteng, et al. Fuzzy control optimization method for stability of path tracking system of automatic transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 29 – 34. (in Chinese)

451 – 458.

LIU Wei, LIU Hongzhao, HU Xuyu. Type synthesis of 3T1R parallel machine with fixed rotation axis and variable rotation axis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 451 – 458. (in Chinese)

[18] 王学雷,赵栋杰,张宾,等. 新型四自由度并联机构运动学分析及其优化设计[J]. 东北大学学报(自然科学版),2018, 39(4):532 – 537.

WANG Xuelei, ZHAO Dongjie, ZHANG Bin, et al. Kinematic analysis and optimization design of noval 4-dof parallel mechanism[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018,39(4): 532 – 537. (in Chinese)

[19] 贾竣臣,薄瑞峰,郭鑫鑫,等. 一种 2T2R 并联机构的位置逆解和工作空间分析[J]. 机械传动,2021,45(6):22 – 27.

JIA Junchen, BO Ruifeng, GUO Xinxin, et al. Inverse position solution and workspace analysis of a 2T2R parallel mechanism [J]. Mechanical Transmission, 2021, 45(6): 22 – 27. (in Chinese)

[20] 郭雨. 空间被动过约束 4 – RPTR 并联机构尺寸优化及力学分析[D]. 秦皇岛:燕山大学,2020.

GUO Yu. Size optimization and mechanical analysis of spatial passive overconstrained 4 – RPTR parallel mechanism[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020. (in Chinese)

[21] XIE Fugui, LIU Xinjun, WANG Jinsong. Performance evaluation of redundant parallel manipulators assimilating motion/force transmissibility[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems,2011,8(5):113 – 124.

~~~~~

(上接第 446 页)

[25] ZHANG S, GUO C, GAO Z, et al. Research on 2D laser automatic navigation control for standardized orchard[J]. Applied Sciences, 2020, 10(8): 2763.

[26] YU L, YAN X, KUANG Z, et al. Driverless bus path tracking based on fuzzy pure pursuit control with a front axle reference [J]. Applied Sciences, 2020, 10(1): 230.

[27] 唐应时,朱位宇,朱彪,等. 基于轮胎磨损的悬架与转向系统硬点优化[J]. 汽车工程, 2013, 35(7): 640 – 644.

TANG Yingshi, ZHU Weiyu, ZHU Biao, et al. Hard-points optimization of suspension and steering systems based on tire wear [J]. Automotive Engineering, 2013, 35(7): 640 – 644. (in Chinese)

[28] 张华强,王国栋,吕云飞,等. 基于改进纯追踪模型的农机路径跟踪算法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 18 – 25.

ZHANG Huaqiang, WANG Guodong, LÜ Yunfei, et al. Agricultural machinery automatic navigation control system based on improved pure tracking model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 18 – 25. (in Chinese)

[29] SNIDER J M. Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking[R]. Carnegie Mellon University Robotics Institute, 2009.

[30] 陈杰,陈伟,孙健. 多模型自适应控制研究概述[J]. 系统科学与数学, 2014, 34(12): 1421 – 1437.

CHEN Jie, CHEN Wei, SUN Jian. A survey of multiple model adaptive control [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences,2014, 34(12): 1421 – 1437. (in Chinese)

[31] LI X R, ZHAO Z, LI X. General model-set design methods for multiple-model approach[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(9): 1260 – 1276.

[32] 陈鹏展,刘曦. 基于模型切换策略的无刷直流电动机调速研究[J]. 微特电机, 2016, 44(7): 56 – 58.

CHEN Pengzhan, LIU Xi. Research on speed control of brushless DC motor based on model switching strategy[J]. Small & Special Electrical Machines,2016, 44(7): 56 – 58. (in Chinese)