

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

姚立健¹, Santosh K Pitla², 杨自栋¹, 夏坡坡¹, 赵辰彦¹

(1. 浙江农林大学工程学院, 杭州 311300;

2. Department of Biological Systems Engineering, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, 68583)

摘要:为实现农业设施内车辆自动导航,提出了一种基于超宽带(ultra wideband, UWB)无线定位的路径跟踪方法。运用 4 个基站组建 UWB 无线定位系统,采用加权最小二乘法(weighted least squares, WLS)法解超静定方程组,提高了移动标签的定位精度。重新定义前视距离,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。在 MATLAB 2016a 软件环境下的仿真说明该文算法优于采用固定视距的传统纯追踪算法,并进行实车试验。结果显示,在 UWB 定位系统的引导下,车体在不同初始状态下均能很好地收敛到期望直线,当速度为 0.5 m/s 时,在 4 种初始状态下进行直线跟踪,稳态偏差为 5.4~8.4 cm,稳态偏差均值为 6.3 cm。在矩形路径跟踪时,当横向偏差和航向偏差均为 0 的初始状态下,全程平均偏差为 20.6 cm,跟踪偏差主要出现在 90°转向处,最大偏差为 85.5 cm,说明改进后的纯追踪算法的路径跟踪质量均优于采用固定视距的传统纯追踪模型,能满足农业设施内移动平台自动导航的需求。该方法可为农业设施内车辆导航提供新思路。

关键词:农业机械;控制;模型;超宽带;纯追踪;动态前视距离;路径跟踪

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.003

中图分类号: S224.3; TP242.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-02-0017-08

姚立健, Santosh K Pitla, 杨自栋, 夏坡坡, 赵辰彦. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.003 http://www.tcsae.org

Yao Lijian, Santosh K Pitla, Yang Zidong, Xia Popo, Zhao Chenyan. Path tracking of mobile platform in agricultural facilities based on ultra wideband wireless positioning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(2): 17—24. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.003 http://www.tcsae.org

0 引言

农业设施内自动导航的作业平台能承担自主移动作业及农资自动运输等功能,是智能农业装备研究的热点之一。设施环境空间狭小,因此移动平台需要有精准的路径跟踪能力。纯追踪(pure pursuit)^[1]是一种纯几何路径跟踪控制方法,能模拟人驾驶车辆的行为,具有控制参数少、预见性强等优点,在车辆导航中得到广泛运用^[2-5]。其中动态前视距离(lookahead distance)被认为是提升传统纯追踪模型路径跟踪精度的有效手段, Park 等^[6-7]采用一组分段线性比例函数来描述不同速度状态下前视距离的取值。熊中刚等^[8-9]根据路径曲率和车辆行驶速度动态确定前视距离,速度越大前视距离越大,弯度越大则前视距离越小。段建民等^[10]认为前视距离与车速为二次函数关系,该二次函数的 3 个系数分别为制动距离、反应距离和最小转弯半径。还有学者将神经网络^[11]、模糊控制^[12-15]等智能算法引入到动态视距的确定中,以便获得更好的跟踪精度。上述关于动态前视距离的研究主要集中在与车体速度、路径曲率等相关性上,未充分考虑车

体偏差程度对前视距离取值的影响,研究成果也主要应用在田间直线跟踪,对于设施温室内部需要进行频繁直角转向的矩形路径跟踪研究较少。

实现车辆自动导航的另一个关键技术是获取定位信息, GPS(global position system)^[3-11,13]常被用来获取移动目标的位置坐标,但主要应用于室外农田环境。农业设施内无法接收清晰的 GPS 信号,因此必须寻找一种可靠、精准的室内定位技术取代 GPS。机器视觉^[16-17]、超声波^[18]、激光^[19]和无线传感技术^[20-22]常被用于室内定位。机器视觉能获取场地丰富的信息,但定位的实时性不高,而超声波和激光测距一般适用于结构化的工厂环境,且信息采集速度慢,导航精度不高。与上述室内定位技术相比,超宽带(ultra wideband, UWB)是利用纳秒级或亚纳秒级脉宽进行短距离内高速传输数据的无线通信技术,具有很高的时间分辨率,理论上能获得厘米级的定位精度。同时 UWB 具有发送功率小、抗干扰性能强、消耗电能小等诸多优势,因此越来越多地被运用到室内高精度定位当中^[23-26]。本研究采用 UWB 无线定位技术获取移动平台高精度的位置信息,并对传统纯追踪算法进行改进,提出一种基于偏差程度的动态前视距离确定方法,以适应空间狭小、移动平台需要频繁改变行驶方向的矩形路径跟踪工况,最终得到一种适合农业设施环境内的作业平台自动导航方法,并利用自制的试验样机在室内场地中进行导航试验来分析验证。

收稿日期: 2018-08-10 修订日期: 2018-12-26

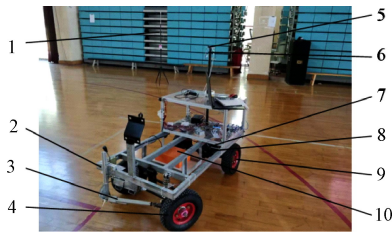
基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目(LGN18F030001); 浙江省科技厅重大专项(2016C02G2100540); 浙江省教育厅项目(Y201636110)

作者简介: 姚立健,副教授,博士,主要从事智能农业装备与农业机器人等方向研究。Email: ljyao@zafu.edu.cn

中国农业工程学会高级会员: 姚立健(E041200722S)

1 试验样机结构

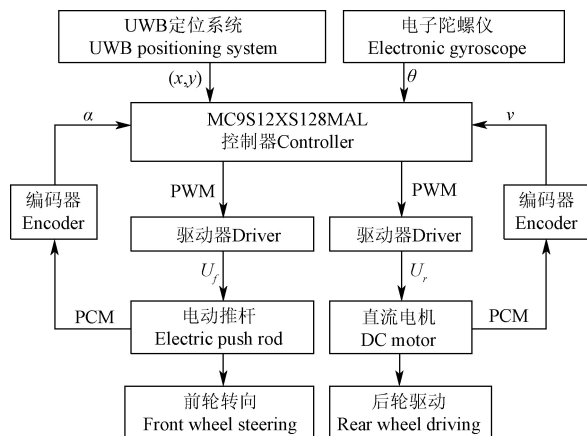
本文试验样机采用纯电动 2SW-2DW 四轮机构, 由锂电池 (48 V、20 Ah) 供电, 如图 1 所示。样机轴距为 0.84 m, 轮距为 0.55 m, 前后轮径均为 32 cm。为满足 Ackermann 转向定理, 采用电动推杆 (BXTL150) 推动梯形四杆机构实现前轮转向, 最大转向角为 32° , 后轮的最小转向半径为 R_{\min} 为 1.34 m。推杆由 L298N 驱动器驱动。样机后轮由直流电机 (AQMD6020BLS) 驱动, 通过减速器和差速器来实现左、右轮差速行驶, 并通过光电增量式编码器 (E40S8-200-3-T-24) 将位移量转换成脉冲数, 据此来检测后轮的转速。由若干个 UWB 无线传感器 (I-UWB LPS PA) 组建的定位系统为样机提供相对位置坐标, 该系统的数据刷新频率为 1~50 Hz, 测距精度可达 10 cm 以内。样机的姿态信息是由电子陀螺仪 (WT901C) 提供, 测量范围为 $0^\circ \sim \pm 180^\circ$, 精度为 0.1° 。主控制器 (MC9S12XS128MAL) 接收 UWB 定位系统和电子陀螺仪传来的位姿信息, 换算成车体相对于期望路径的偏差信息并输入路径跟踪模型, 计算样机转向所需的脉宽, 再由驱动器驱动电动推杆执行转向动作, 完成路径跟踪过程。2 个编码器与控制器、电动机等组成闭环系统, 保证控制精度。控制系统框图如图 2 所示。



1.UWB 基站 2.车体 3.电动推杆 4.前轮 5.电子陀螺仪 6.移动标签
7.差速器 8.直流电机 9.后轮 10.锂电池
1.Ultra wideband anchor 2.Vehicle 3.Electric push rod 4.Front wheel
5.Electronic gyroscope 6.Mobile tag 7.Differential mechanism 8. DC motor
9.Rear wheel 10.Lithium battery

图 1 研究样机及试验场地

Fig.1 Research prototype and test site



注: (x, y) 为移动标签坐标; θ 为航向偏差, $(^\circ)$; PWM 为脉宽调制, U_f 为电动推杆控制电压, V; U_r 为直流电机控制电压, V; PCM 为脉冲编码调制; α 为前轮转向角, $(^\circ)$; v 为后轮速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。下同。
Note: (x, y) is coordinates of mobile tag; θ is heading deviation, $(^\circ)$; PWM means pulse width modulation; U_f is control voltage of electric push rod, V; U_r is control voltage of DC motor, V; PCM means pulse code modulation; α is steering angle of front wheel, $(^\circ)$; v is rear wheel speed, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. The same as below.

图 2 路径跟踪控制系统框图

Fig.2 Block diagram of path tracking control system

2 基于 UWB 的车体定位

2.1 定位原理

UWB 定位系统由若干固定基站和移动标签通过一定的通信方式组成^[24]。获取 3 维空间中某点坐标 (x, y, z) 一般至少需要 4 个基站, 增加基站数量不但可以提高定位精度, 同时也可以作为通信质量欠佳时的冗余备份。本文默认移动样机行驶的路面呈水平状态, 因此忽略高程 z 方向的参数计算。UWB 定位系统的定位精度与基站的分布、标签的位置、障碍物等密切相关, 因此需通过反复调整才能布设最优的定位环境。根据文献[25]定位试验方法, 由 4 个基站组成一个平面定位坐标系 OXY 如图 3 所示, 小矩形为模拟温室环境的矩形路径跟踪的试验区域。

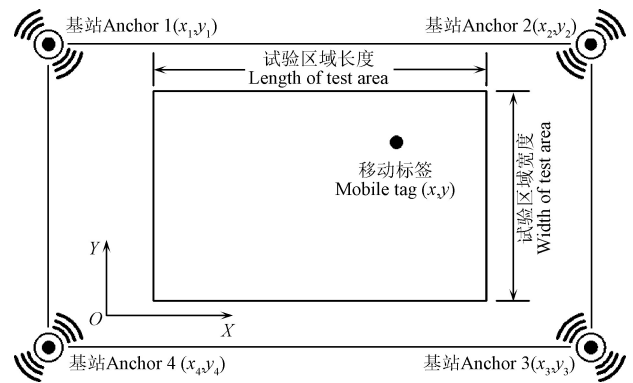


图 3 试验场地布置

Fig.3 Layout of test site

2.2 TOA 定位算法

考虑到 UWB 是在极窄脉冲下进行通信, 具有很高的时间分辨率, 因此本文采用基于测量信号到达时间 (TOA, time of arrival) 的定位方法来获取移动标签的实时位置信息^[27]。如图 3, 在平面直角坐标系 OXY 中, 移动标签坐标为 (x, y) , 4 个基站的坐标分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 和 (x_4, y_4) 。根据 TOA 定位原理, 移动标签到各基站的距离 r_i 为

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = r_1 \\ \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} = r_2 \\ \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} = r_3 \\ \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2} = r_4 \\ r_i = c\tau_i \end{cases} \quad (1)$$

式中 c 为光速, $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, τ_i 为信号在移动标签到第 i 个基站之间的传输时间, s , $i=1, 2, \dots, 4$ 。

将式 (1) 中方程 2、3、4 分别与方程 1 相减可得

$$MI = b \quad (2)$$

$$\text{式中 } M = 2 \begin{bmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 \\ x_1 - x_3 & y_1 - y_3 \\ x_1 - x_4 & y_1 - y_4 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} r_2^2 - r_1^2 + x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2 \\ r_3^2 - r_1^2 + x_1^2 + y_1^2 - x_3^2 - y_3^2 \\ r_4^2 - r_1^2 + x_1^2 + y_1^2 - x_4^2 - y_4^2 \end{bmatrix}$$

$I=[x,y]^T$ 。

因为在 OXY 坐标系中, 各基站的坐标 (x_i, y_i) 及 M 、 b 中的数据均可由 UWB 定位系统获得, 将这些数据带入式 (2), 即可求得移动标签的坐标 I , 即 (x, y) 。式 (2) 中的方程数多于变量数, 属于超静定方程组。本文采用加权最小二乘法^[21] (WLS, weighted least squares) 解式 (2), 得到移动标签坐标 I 的最优解见式 (3)。

$$I=(M^T M)^{-1} M^T b \quad (3)$$

根据上述定位算法, 经过反复调试, 当 4 个基站组成 $20\text{ m} \times 15\text{ m}$ 的矩形时, 此区域内能获得较好的定位精度, 其中该矩形内 $16\text{ m} \times 11\text{ m}$ 小矩形试验区域内中心的定位误差在 7 cm 以内, 矩形边缘定位误差在 12 cm 以内, 基本满足试验要求。

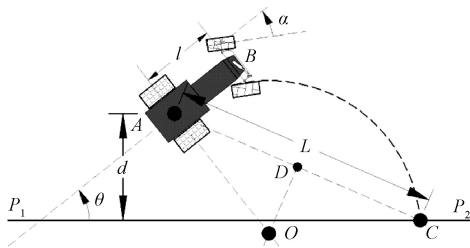
3 路径跟踪算法

3.1 传统纯追踪模型及其改进

传统纯追踪模型是一种直观、简单的纯几何算法, 忽略了轮胎与地面的侧向滑动, 通过合适的固定前视距离来确定位于期望路径上的预瞄点^[12], 规划出从车体到预瞄点所经过的圆弧线并确定前轮的转角。如图 4 所示, P_1P_2 为车体当前需跟踪的路线, 即期望路径, 以车体后轴中心点 A 为基准点、车体中心线 AB 为基准线, 定义车体当前的横向偏差 d 和航向偏差 θ 分别如图所示, 在 P_1P_2 上找到一点 C , 使得 AC 等于固定前视距离 L , 则 C 点即为预瞄点, AC 为前视直线。 AC 的垂直平分线 DO 与 AB 的垂线 AO 交于点 O , 根据传统纯追踪模型思想, 可规划一段以 O 为圆心从 A 点到预瞄点 C 的圆弧, 该圆弧半径 OA 为车体的转向半径, 车体将在当前状态下沿着这段圆弧行驶直至位姿信息被刷新。根据几何运算^[12]可得当前前轮转向角 α 为

$$\alpha = \arctan\left[\frac{2l(d \cos \theta + \sqrt{L^2 - d^2} \sin \theta)}{L^2}\right] \quad (4)$$

式中 L 为前视距离, m; d 为横向偏差, m; θ 为航向偏差, ($^\circ$); l 为轴距, m。



注: P_1P_2 为期望路径; A 为后轴中心点; B 为前轴中心点; l 为轴距, m; AB 为车体方向; C 为预瞄点; AC 为前视直线; O 为车体转向中心; L 为前视距离, m; d 为横向偏差, m。下同。
Note: P_1P_2 is the desired path; A is the center of the rear axle; B is the center of the front axle; l is the wheelbase, m; AB is vehicle direction; C is the preview point; AC is the lookahead straight line; O is the steering center of the vehicle; L is the lookahead distance, m; d is the lateral deviation, m. The same as below.

图 4 传统纯追踪模型
Fig.4 Traditional pure pursuit model

由式 (4) 可以看出, 传统纯追踪模型要求 $L \geq d$, 由于有这个约束, 因此该模型仅适合于横向偏差 d 不太大

的工况。在设施温室内, 移动作业平台行驶的路线多为矩形, 需频繁更改当前跟踪路线, 时常会出现较大横向偏差, 因此需对该模型进行改进。如图 5 所示, 从 A 点向 P_1P_2 作垂线, 垂足为 E , 沿着 P_1P_2 方向找到一点 F , 使得 $EF=L$ (前视距离), 则 F 点为改进后纯追踪模型的预瞄点, EF 为前视直线, 车体方向 AB 与前视直线 AF 间的夹角为 $\Delta\theta$ 。同样可规划一段以 O' 为圆心从 A 点到 F 点的圆弧, 方法同上。此时前轮的转向角 α 调整为

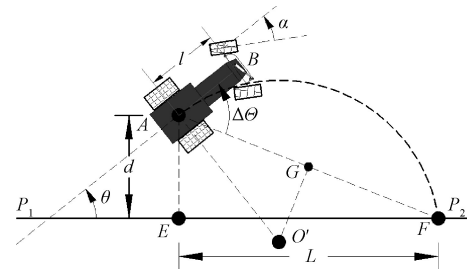
$$\alpha = -\arctan\left[\frac{2l(d \cos \theta + L \sin \theta)}{L^2 + d^2}\right] \quad (5)$$

式 (5) 中各变量定义与式 (4) 相同。

由图 5 还可得

$$|\Delta\theta| = |\theta + \arctan(d/L)| \quad (6)$$

式中 θ 和 d 正负号分别表示车体在跟踪路径左侧横向偏差 d 为正、右侧为负, 航向偏差 θ 逆时针为正、顺时针为负, 下同。



注: AF 为改进后模型的前视直线; $\Delta\theta$ 为车体方向 AB 与前视直线间 AF 的夹角, ($^\circ$); O' 为改进后模型的车体转向中心。
Note: AF is lookahead straight line of improved model; $\Delta\theta$ is the angle between vehicle direction AB and lookahead straight line AF , ($^\circ$); O' is the steering center of the vehicle of improved model.

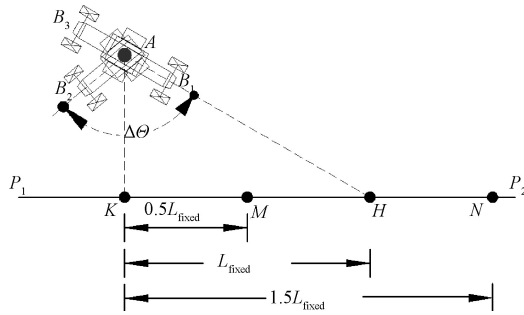
图 5 改进型纯追踪模型

Fig.5 Improved pure pursuit model

因为在计算过程中不考虑车辆的动力学模型, 车体当前的转向角 α 仅与 L 、 d 和 θ 这 3 个参数有关。 d 和 θ 可由仪器硬件客观获取, 因此前视距离 L 则成为决定转向角的关键参数, 一般通过计算机仿真可获得最优的固定前视距离 L_{fixed} 。

3.2 偏差程度分析

由式 (5) 可知, 前视距离 L 与转向角 α 为负相关, 根据驾车者经验, 当车体偏离期望路线较大时, 驾驶人会采用较大的前轮转向角 α (较小的前视距离) 来快速修正车体位姿, 反之则会采用较小的转向角 α (较大的前视距离) 以保证行驶平稳, 因此实际驾车时前视距离会随车体偏差程度动态调整。但车体偏差程度的界定主要依赖个人经验, 缺少定量分析方法。因此本文介绍一种定量分析偏差程度的方法。由图 6 可知, 当车体方向 AB_1 与前视直线 AH 重合 (即 $\Delta\theta=0^\circ$) 时, 车体的转向角 $\alpha=0^\circ$, 即无需通过转向来调整车体姿态, 可认为该状态为最小偏差状态。当 $|\Delta\theta|$ 逐步增大, 车体偏差状态也在逐步增大, 当 $|\Delta\theta|=180^\circ$ (即 AB_3 状态) 时, 可认为此时车体的状态为最大偏差状态。因此可用 $|\Delta\theta|$ 的大小来定量描述偏差程度, $|\Delta\theta|$ 的值可由 3.1 节式 (6) 求得, 其取值范围在 $[0, 180^\circ]$ 。 $|\Delta\theta|$ 越接近 0° , 偏差程度越小, 反之越大。



注: AH 为前视直线; AB_1 表示车体最小偏差状态; AB_3 表示车体最大偏差状态; AB_2 表示车体瞬时状态; KH 为最佳固定前视距离, m; KM 为最小前视距离, m; KN 为最大前视距离, m。

Note: AH is lookahead straight line; AB_1 means the minimum deviation state of vehicle; AB_3 means the maximum deviation state of vehicle; AB_2 means the instantaneous state of vehicle; KH is the optimal fixed lookahead distance, m; KM is the minimum lookahead distance, m; KN is the maximum lookahead distance, m.

图 6 动态前视距离分析示意图

Fig.6 Analysis diagram of dynamic lookahead distance

3.3 动态前视距离

根据上节讨论的车体偏差程度可动态确定前视距离。首先通过最优的固定前视距离 L_{fixed} 初选预瞄点 H , 如图 6 所示。当车体处于 AB_3 状态时, 此时偏差最大, 可适当缩小前视距离 (即图 6 中预瞄点由 H 向左移动) 以增大前轮转向角度, 从而提高修正车体位姿的速度^[1]。同理当车体处于 AB_1 状态时, 适度将预瞄点 H 右移可提高车体收敛的平顺性^[1]。经反复仿真, 确定最大和最小偏差状态时的前视距离分别为 $0.5L_{fixed}$ 和 $1.5L_{fixed}$, 即预瞄点分别在 M 和 N 点。通过归一化线性关系可求出 $|\Delta\theta|$ 在 $[0, 180^\circ]$ 任意值时动态前视距离 $L_{dynamic}$ 。

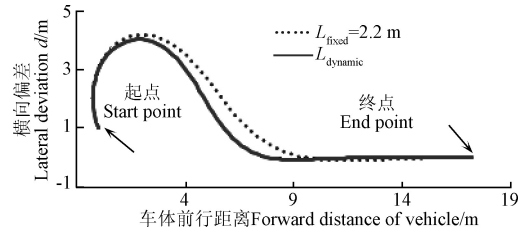
$$L_{dynamic} = [1.5 - \frac{\Delta\theta(1.5 - 0.5)}{180^\circ}]L_{fixed} \quad (7)$$

本文的动态前视距离的思想本质上是在最优固定前视距离 L_{fixed} 的基础上, 根据当前车体的偏差程度 $|\Delta\theta|$ 再动态增减 L_{fixed} , 实现更精细的路径跟踪控制。

3.4 路径跟踪仿真

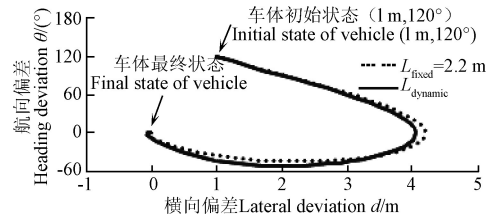
为验证本文改进型纯追踪算法的有效性, 选择车体在较大偏差的初始状态 (d, θ) 为 $(1 \text{ m}, 120^\circ)$ 时进行直线跟踪仿真试验, 正负号定义与式 (6) 一致。仿真试验在 MATLAB R2016b 环境下完成, 仿真时车体轴距与真车一致。仿真速度为 0.5 m/s , 采样周期为 0.5 s 。图 7 显示了传统的固定视距 L_{fixed} 纯追踪模型和本文改进后的动态视距 $L_{dynamic}$ 纯追踪模型的仿真对比。

以控制工程理论中的平均偏差、稳态偏差、稳定距离和调整时间等指标综合衡量路径跟踪的质量。平均偏差是从仿真开始到结束所有横向偏差的均值; 稳定距离是指移动车体从初始状态第 1 次收敛到横向偏差为 0 的稳定点所走过的水平距离; 调整时间是指从初始状态行驶到稳定点所需的时间; 稳态偏差是指从稳定点向后的横向偏差均值; 最大偏差是指整个仿真过程中最大的横向偏差。平均偏差与稳态偏差是反映路径跟踪精度的重要指标。稳定距离和调整时间则反映路径跟踪的收敛速度。对图 7 数据进行统计可得表 1。



a. 车体移动轨迹

a. Platform moving trajectory



b. 偏差收敛效果

b. Effect diagram of deviation convergence

注: 传统纯追踪模型最佳固定视距 L_{fixed} 为 2.2 m , 是经过计算机反复仿真而得; 车体在跟踪路径左侧横向偏差 d 为正、右侧为负; 航向偏差 θ 逆时针为正、顺时针为负。下同。

Note: The optimum fixed lookahead distance in traditional pure pursuit model is 2.2 m , which is obtained by repeated computer simulation; The lateral deviation d is positive when the vehicle is on the left side of the tracking path, otherwise, it is negative; The heading deviation θ is positive when the vehicle heading is counter clockwise, otherwise, it is negative. The same as below.

图 7 固定视距和动态视距路径跟踪仿真试验对比

Fig.7 Comparison of path tracking simulation test between fixed and dynamic lookahead distance

表 1 仿真结果统计

Table 1 Simulation results statistics

前视距离 Lookahead distance	平均偏差 Average deviation/cm	稳态偏差 Steady-state deviation/cm	稳定距离 Stable distance/cm	调整时间 Adjustment time/s	最大偏差 Maximum deviation/cm
$L_{fixed}=2.2 \text{ m}$	147.5	4.6	960.5	27.5	419.9
$L_{dynamic}$	123.3	2.1	803.6	24.5	404.9

由表 1 可以看出, 采用动态视距 $L_{dynamic}$ 模型的稳态偏差为 2.1 cm , 而固定视距 L_{fixed} 模型为 4.6 cm , 前者的跟踪精度远高于后者。在收敛速度方面, 采用动态视距模型的稳定距离和调整时间分别为 803.6 cm 和 24.5 s , 而固定视距模型的这 2 个指标分别为 960.5 cm 和 27.5 s , 说明采用动态视距模型收敛速度更快。图 7b 为偏差收敛效果 ($d-\theta$) 图, 该图能清晰反映车体偏差逐步收敛的细节: 先是航向偏差快速减小而横向偏差在增大; 接着是横向偏差减小而航向偏差增大; 最后阶段是横向偏差和航向偏差同时减小直至收敛到原点附近。在这收敛过程中, 受车体机械结构和算法所限, 横向和航向偏差不可能同时减少, 但整体偏差状态的趋势就像“螺线”一样逐步向原点收敛。综合图 7 和表 1 可知, 采用动态视距 $L_{dynamic}$ 模型性能指标也优于固定视距 L_{fixed} 模型的仿真效果。

4 试验与结果分析

4.1 试验过程

为检验本文算法有效性, 笔者在浙江农林大学体育馆内选定一块试验场地 (图 1), 场地布置如图 3 所示。试验时间为 2018 年 5—7 月, 场地气温 $20 \sim 32^\circ \text{C}$ 。试验样机前进速度与仿真时速度同为 0.5 m/s , 采样频率

10 Hz。试验分为直线跟踪和矩形路线跟踪 2 类。同一初始状态的试验重复 5 次，各指标求平均值。

试验 1：为检验本文算法对于不同偏差程度的适应性，设计 4 种偏差初始状态来测试样机直线跟踪效果。

分别按传统的固定视距 L_{fixed} 纯追踪模型和改进后动态视距 L_{dynamic} 纯追踪模型进行对比试验。各初始状态下的固定视距 L_{fixed} 值分别由计算机反复仿真获取。跟踪轨迹如图 8 所示，对图 8 数据进行统计可得表 2。

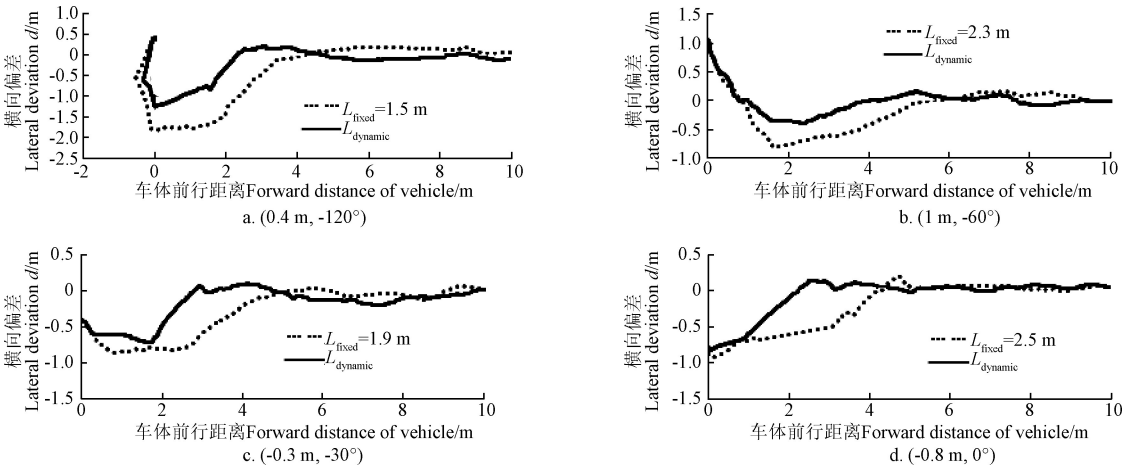


图 8 不同初始状态下直线跟踪轨迹

Fig.8 Linear tracking trajectory in different initial states

表 2 直线跟踪试验结果统计

初始状态 Initial states	纯追踪模型 Pure pursuit model	平均偏差 Average deviation/cm	稳态偏差 Steady-state deviation/cm	稳定距离 Stable distance/cm	调整时间 Adjustment time/s	最大偏差 Maximum deviation/cm
(0.4 m, -120°)	$L_{\text{fixed}}=1.5\text{ m}$	49.9	14.2	410.9	21.2	185.5
	L_{dynamic}	31.6	5.6	229.4	13.5	124.6
(1 m, -60°)	$L_{\text{fixed}}=2.3\text{ m}$	54.8	8.1	86.0	12.3	81.5
	L_{dynamic}	35.0	5.4	80.3	6.6	39.0
(-0.3 m, -30°)	$L_{\text{fixed}}=1.9\text{ m}$	31.1	4.4	504.0	12.0	86.7
	L_{dynamic}	23.3	8.4	283.0	10.1	72.5
(-0.8 m, 0°)	$L_{\text{fixed}}=2.5\text{ m}$	34.9	4.5	426.1	8.7	79.6
	L_{dynamic}	30.5	5.9	221.7	7.7	78.9

试验 2：为检验试验样机在农业设施内常见的矩形路径跟踪的能力，设计了 16 m×11 m 的矩形路线。如图 9，样机出发的初始位置为 (10,13)，初始航向与当前跟踪路径方向一致，因此初始状态为 (0,0°)。经计算机反复仿真，本试验的固定视距 L_{fixed} 取 1.8 m。综合考虑车体的路径跟踪精度和最小转向半径为 R_{min} ，程序中设定在距离下一条跟踪直线不足 1 m 时更换当前跟踪直线。矩形路径顺时针跟踪 1 周的轨迹见图 9，跟踪数据统计结果见表 3 所示。

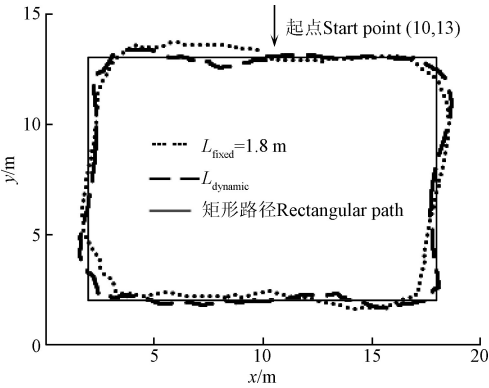


图 9 矩形跟踪轨迹

Fig.9 Rectangle tracking trajectory

表 3 矩形跟踪试验结果统计

初始状态 Initial states	平均偏差 Average deviation/cm	最大偏差 Maximum deviation/cm	跟踪时间 Tracking time/s
$L_{\text{fixed}}=1.8\text{ m}$	30.5	117.7	76.3
L_{dynamic}	20.6	85.5	80.8

4.2 试验结果分析

4.2.1 路径跟踪精度

在试验 1 中，4 种初始状态下动态可变视距纯追踪模型路径追踪平均偏差分别为 31.6、35.0、23.3、30.5 cm，平均偏差均值为 30.1 cm，而传统固定视距纯追踪模型平均偏差为 49.9、54.8、31.1、34.9 cm，均值为 42.7 cm。当车体达到稳定状态后，动态可变视距模型的稳态偏差分别为 5.6、5.4、8.4、5.9 cm，稳态偏差均值为 6.3 cm，而传统的固定视距模型则为 14.2、8.1、4.4、4.5 cm，均值为 7.8 cm。在试验 2 中，动态可变视距和传统固定视距这 2 种模型的平均偏差分别为 20.6 和 30.5 cm。上述分析表明采用动态可变视距纯追踪模型能提升路径跟踪的精度。

4.2.2 路径跟踪稳定性

由统计学知识得，标准差能反映样本数据集的离散

程度,标准差越大则数据集离散程度越高,数据集的稳定性越差,因此动态可变视距和传统固定视距这 2 种模型平均偏差与稳态偏差的标准差能反映路径跟踪的稳定性。动态可变视距模型在 4 种初始状态下,其平均偏差值与稳态偏差值的标准差分别为 4.3 与 1.2 cm,而采用固定视距模型的标准差分别为 9.9 和 4.0 cm。前者的标准差明显小于后者,说明在各初始状态下动态可变视距模型中的平均偏差值与稳态偏差值的离散程度较低,即路径跟踪的稳定性较固定视距模型高。

4.2.3 收敛快速性

在试验 1 中,4 种初始状态下动态可变视距模型调整时间分别为 13.5、6.6、10.1、7.7 s,其对应的稳定距离分别为 229.4、80.3、283.0、221.7 cm,而固定视距模型的调整时间为 21.2、12.3、12.0、8.7 s,其对应的稳定距离分别为 410.9、86.0、504.0、426.1 cm。前者的各项数据值均优于后者,说明采用动态可变视距模型跟踪收敛的快速性优于固定视距模型。

4.2.4 初始偏差程度对最大偏差的影响

由式(6)可得,在试验 1 中 4 种初始状态下的偏差程度 $|\Delta\theta|$ 值分别为 105.1°、36.5°、39.0°、17.7°。其中偏差程度最大为 105.1°,此状态下(图 8a)的初始横向偏差虽然只有 0.4 m,但初始航向偏差高达-120°,车体要经过类似“掉头”的较大幅度转向,才能收敛到期望跟踪的直线,此时的转向半径不低于 R_{\min} (134 cm),因此在该状态下,出现了最大偏差 124.6 cm,此状态下的调整时间也最长(13.5 s)。在图 8b~8d 中,车体初始偏差程度相对较小,因此最大偏差与调整时间也明显变小。在试验 2 中,动态可变视距和传统固定视距这 2 种模型下车体的初始状态一致,最大偏差分别为 85.5 和 117.7 cm,最大偏差出现在 90°转向处,这是因为在该处需更换当前追踪路线所致。2 种模型对应的最大偏差均在 1 m 左右,相差并不明显。综上可得车体最大偏差与初始偏差程度相关,初始偏差程度越大,各指标值也相应越大。

5 结 论

1) 利用 UWB 技术组建的无线定位系统,在 16 m×11 m 矩形试验区域内中心的定位误差在 7 cm 以内,矩形边缘定位误差在 12 cm 以内,基本满足农业设施内路径跟踪试验要求;

2) 基于动态前视距离的改进型纯追踪模型,在仿真试验中的稳态偏差为 2.1 cm、稳定距离为 803.6 cm、调整时间为 24.5 s,而固定视距 L_{fixed} 模型的稳态偏差、稳定距离、调整时间分别为 4.6 cm、960.5 cm 和 27.5 s,说明前者的跟踪精度和收敛速度这 2 个指标要优于后者;

3) 利用实车进行了直线和矩形 2 类路径跟踪试验,试验表明,在 UWB 定位系统引导下,采用改进型纯追踪算法,使试验样机的直线跟踪稳态偏差在 5.4~8.4 cm 之间,稳态偏差均值为 6.3 cm,矩形跟踪平均偏差为 20.6 cm,能满足农业设施内移动平台的作业需求;

系统的硬件制造误差、UWB 定位误差会造成跟踪精度的下降。在后续研究中,还应考虑遮挡物、现场温度、

路面侧滑等真实设施环境对路径跟踪造成的影响。还可引进模糊控制等智能算法,以进一步减少跟踪的横向偏差,改善路径跟踪的质量,提高其鲁棒性。另外,关于车体偏差程度的数学界定还有细化提升的空间。

[参 考 文 献]

- [1] Coulter R C. Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm[R]. Carnegie-Mellon UNIV Pittsburgh PA Robotics INST, 1992.
- [2] 胡静涛,高雷,白晓平,等.农业机械自动驾驶技术研究进展[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)
- [3] Rains G C, Faircloth A G, Thai C, et al. Technical note: evaluation of a simple pure pursuit path-following algorithm for an autonomous, articulated-steer vehicle[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2014, 30(3): 367—374.
- [4] Ye Y, He L, Zhang Q. A robotic platform “bin-dog” for bin management in orchard environment[C/OL]//2016 ASABE Annual International Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2016:1 [2018-08-10] doi:10.13031/aim.20162462088
- [5] 刘兆朋,张智刚,罗锡文,等.雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动驾驶作业系统设计[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] Park M W, Lee S W, Han W Y. Development of lateral control system for autonomous vehicle based on adaptive pure pursuit algorithm[C]//International Conference on Control, Automation and Systems. IEEE, 2014: 1443—1447.
- [7] 张闻宇,丁幼春,王雪玲,等.基于 SVR 逆向模型的拖拉机导航纯追踪控制方法[J].农业机械学报,2016,47(1):29—36.
Zhang Wenyu, Ding Youchun, Wang Xueling, et al. Pure pursuit control method based on SVR inverse-model for tractor navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 29—36. (in Chinese with English abstract)
- [8] 熊中刚,叶振环,贺娟,等.基于免疫模糊 PID 的小型农业机械路径智能跟踪控制[J].机器人,2015,37(2):212—223.
Xiong Zhonggang, Ye Zhenhuan, He Juan, et al. Small agricultural machinery path intelligent tracking control based on fuzzy immune PID[J]. Robot, 2015, 37(2): 212—223. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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 with English abstract)
- [10] 段建民, 杨晨, 石慧. 基于 Pure Pursuit 算法的智能车路径跟踪[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(9): 1301—1306.
Duan Jianmin, Yang Chen, Shi Hui. Path tracking based on pure pursuit algorithm for intelligent vehicles[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(9): 1301—1306. (in Chinese with English abstract)
- [11] 黄沛琛, 罗锡文, 张智刚. 改进纯追踪模型的农业机械地头转向控制方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(21): 216—219.
Huang Peichen, Luo Xiwen, Zhang Zhigang. Control method of headland turning based on improved pure pursuit model for agricultural machine[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(21): 216—219. (in Chinese with English abstract)
- [12] 汪小岳, 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 with English abstract)
- [13] 李逃昌, 胡静涛, 高雷. 基于级联式控制策略的农业机械鲁棒自适应路径跟踪控制[J]. 机器人, 2014, 36(2): 241—249.
Li Taochang, Hu Jingtao, Gao Lei. Robust adaptive path tracking control of agricultural machines based on cascaded control strategy[J]. Robot, 2014, 36(2): 241—249. (in Chinese with English abstract)
- [14] Urrea C, Muñoz J. Path Tracking of mobile robot in crops[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2015, 80(2): 193—205.
- [15] Lacevic B, Velagic J. Evolutionary design of fuzzy logic based position controller for mobile robot[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2011, 63(3/4): 595—614.
- [16] 翟志强, 朱忠祥, 杜岳峰, 等. 基于虚拟现实的拖拉机双目视觉导航试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 56—65.
Zhai Zhiqiang, Zhu Zhongxiang, Du Yuefeng, et al. Test of binocular vision-based guidance for tractor based on virtual reality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(23): 56—65. (in Chinese with English abstract)
- [17] 武星, 沈伟良, 楼佩煌, 等. 视觉导引 AGV 鲁棒特征识别与精确路径跟踪研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 48—56.
Wu Xing, Shen Weiliang, Lou Peihuang, et al. Robust feature recognition and precise path tracking for vision-guided AGV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 48—56. (in Chinese with English abstract)
- [18] González R, Rodríguez F, Sánchezhermosilla J, et al. Navigation techniques for mobile robots in greenhouses[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(2): 153—165.
- [19] Lee I N, Lee K H, Lee J H, et al. Autonomous greenhouse sprayer navigation using automatic tracking algorithm[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2015, 31(1): 17—21.
- [20] 魏振春, 吕增威, 杨成, 等. 基于 RSS 正确性判定的矿井机车无线定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(1): 178—184.
Wei Zhenchun, Lv Zengwei, Yang Cheng, et al. Wireless positioning method based on correctness judgment of received signal strength for mine locomotive[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(1): 178—184. (in Chinese with English abstract)
- [21] 刘书静, 罗海勇, 吴彬, 等. 基于最小二乘测距定位算法信标最优部署模型[J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 546—556.
Liu Shujing, Luo Haiyong, Wu Bin, et al. Optimal landmark deployment patterns for range-based least squares localization[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(3): 546—556. (in Chinese with English abstract)
- [22] 周树帆, 刘芳, 汤泽云, 等. 基因表达式编程辅助的室内无线定位方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(增刊 1): 198—203.
Zhou Shufan, Liu Fang, Tang Zeyun, et al. Wireless indoor position method assisted with gene expression programming[J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(Supp.1): 198—203. (in Chinese with English abstract)
- [23] 符世琛, 李一鸣, 杨健健, 等. 基于超宽带技术的掘进机自主定位定向方法研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2603—2610.
Fu Shichen, Li Yiming, Yang Jianjian, et al. Research on autonomous positioning and orientation method of roadheader based on ultra wide-band technology[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2603—2610. (in Chinese with English abstract)
- [24] 马永涛, 侯振寰, 姜启登, 等. 基于超宽带信号到达时间的室内人员被动式定位算法及仿真[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2017, 50(8): 843—849.
Ma Yongtao, Hou Zhenhuan, Jiang Qideng, et al. Device-free indoor person localization algorithm and simulation based on time of arrival for UWB signal[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2017, 50(8): 843—849. (in Chinese with English abstract)
- [25] 戴波, 吕昕, 刘学君, 等. 基于改进的超宽带危化品仓储堆垛定位技术[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(6): 963—967.
Dai Bo, Lv Xin, Liu Xuejun, et al. Improved UWB-based location technology applied to hazardous chemicals five-distances stacking storage[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(6): 963—967. in Chinese with English abstract)
- [26] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017,

33(Supp.1): 23—29. (in Chinese with English abstract)

- [27] Irahauten Z, Nikookar H, Klepper M. 2D UWB localization in indoor multipath environment using a joint ToA/DoA technique[C]//IEEE Wireless Communications and NETWORKING Conference. IEEE, 2012: 2253—2257.

Path tracking of mobile platform in agricultural facilities based on ultra wideband wireless positioning

Yao Lijian¹, Santosh K Pitla², Yang Zidong¹, Xia Popo¹, Zhao Chenyan¹

(1. College of Engineering, Zhejiang A&F University, Hangzhou, 311300, China;

2. Department of Biological Systems Engineering, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, Nebraska, 68583, USA)

Abstract: In order to realize automatic vehicle navigation in agricultural facilities without GPS (global position system) signal, a path tracking method based on UWB (ultra wideband) positioning was proposed in this study. The test prototype uses a pure electric and four wheels mechanism with 2SW-2DW (2 steering wheels and 2 drive wheels) structure. The closed-loop system with the controller, driver, motor and encoder ensures the accuracy of the control. The indoor UWB wireless positioning system based on the TOA (time of arrival) principle was built by using 4 anchor nodes, and a WLS (weighted least squares) method was used to solve the statically indeterminate equations, which improved the positioning accuracy of mobile tags. The positioning error of the UWB positioning system in the 16 m×11 m rectangular center area is within 7 cm, and the positioning error of the rectangular edge is less than 12 cm, which meets the positioning requirements of path tracking test in agricultural facilities. In view of the limitation that the lookahead distance must be greater than the lateral deviation in the traditional pure pursuit model, the lookahead distance was redefined in this paper. So the scope of application of the pure pursuit model had been widened. The deviation degree of vehicle was defined quantitatively according to the angle between the heading of the vehicle and the lookahead line. The traditional pure pursuit model was improved, and a new pure pursuit model algorithm based on dynamic lookahead distance was proposed to further improve the quality of path tracking. The algorithm of path tracking was simulated and verified using MATLAB 2016a. The results showed that the average error, the maximum deviation and the stability distance of the improved algorithm with dynamic lookahead distance were better than those of the traditional pure pursuit algorithm with fixed lookahead distance, indicating that the proposed improved algorithm is effective theoretically. The real vehicle test results showed that in the guidance of UWB positioning system, the vehicle could converge to the desired path in different initial states. Linear tracking were carried out in 4 initial states. When the test prototype speed is 0.5 m/s and the signal sampling period is 10 Hz, the average deviation, maximum deviation, stable distance and adjustment time are 23.3-35.0 cm, 39.0-124.6 cm, 80.3-283.0 cm, and 6.6-13.5 s, respectively. It was also observed that the above corresponding index increased with the initial deviation of the prototype. When the prototype reaches a stable state, the steady-state deviation is 5.4-8.4 cm, and its average steady-state deviation is 6.3 cm. In the rectangular path tracking, the overall mean deviation is 20.6 cm when the initial lateral deviation and heading deviation are 0. The lateral deviation mainly occurs at 90° turning, and the maximum deviation is 85.5 cm. The path tracking quality of the improved pure tracking algorithm with dynamic lookahead distance is better than the traditional pure tracking model with fixed lookahead distance, and it can meet the requirements of mobile platforms in frequent steering for automatic navigation in the agricultural facilities. This method could provide a new idea for vehicle navigation in agricultural facilities.

Keywords: agricultural machinery; control; models; ultra wideband; pure pursuit; dynamic lookahead distance; path tracking