

基于平行轨迹导航的采棉机自动对行控制方法

何创新¹ 巩 蕾¹ 苗中华¹ 韩科立^{2,3} 郝付平^{2,3} 韩增德^{2,3}

(1. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444; 2. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083;
3. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为解决传统人工操作采棉机长距离对行作业时存在劳动强度大、作业速度受限和效率较低的问题, 利用棉花采用卫星导航平行精准播种的特性, 提出了一种基于平行轨迹导航的采棉机自动对行控制方法。首先, 人工驾驶采棉机完成首行对行作业, 记录 RTK 定位轨迹数据, 并进行线性拟合, 得到参考导航线斜率; 然后, 对后续各行收获时, 在任意起点对齐待收获的棉花行, 由起点坐标和参考斜率计算得到平行导航基准线; 最后, 采用速度自适应纯追踪算法, 实现采棉机自动对行。田间试验表明, 该方法能够从任意行起始位置开始自动对行, 不同速度下, 平均绝对横向偏差为 2.91 cm, 最大绝对横向偏差为 9.22 cm, 平均标准差为 1.80 cm, 控制性能均优于手动对行, 满足采棉机对行精度要求。相对机械触碰式自动对行方法, 该方法不受缺株歪株影响, 并且在较高速 7 km/h 行驶时仍能保持良好的对行精度。

关键词: 采棉机; 辅助驾驶; 平行轨迹导航; 自动对行

中图分类号: S225 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)06-0034-08

OSID:



Automatic Row-follow Control Method for Cotton Picker Based on Parallel Trajectory Navigation

HE Chuangxin¹ GONG Lei¹ MIAO Zhonghua¹ HAN Keli^{2,3} HAO Fuping^{2,3} HAN Zengde^{2,3}

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

3. State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: To address the problems of high labor intensity, limited operating speed, and low efficiency in long-distance row-follow operation of traditional manually operated cotton pickers, based on the prior characteristics of parallel precision sowing of cotton using satellite navigation, an automatic row-follow control method of cotton picker based on parallel trajectory navigation was proposed. Firstly, the cotton picker was manually driven to complete the first row alignment operation, the RTK positioning trajectory data was recorded, and the linear fitting was carried out to obtain the slope of the reference navigation line. Then, when harvesting the subsequent rows, the cotton rows to be harvested were aligned at any starting point, and the parallel navigation baseline was calculated by the starting point coordinates and the reference slope. Finally, a speed-adaptive pure tracking algorithm was adopted to realize automatic row-follow control of the cotton picker. Field experiments demonstrated that this method could automatically align rows from the starting position of any row. At different speeds, the average absolute lateral deviation was 2.91 cm, and the maximum absolute lateral deviation was 9.22 cm, and the standard deviation was 1.80 cm, which met the requirements of the alignment accuracy of cotton picker. Compared with the mechanical touch-based automatic row-follow methods, this method was not affected by missing or broken plants and maintained good alignment accuracy at high speed of 7 km/h.

Key words: cotton picker; assisted driving; parallel trajectory navigation; automatic row-follow

收稿日期: 2024-01-30 修回日期: 2024-03-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2002402)和山东省重点研发计划项目(2022CXGC020705)

作者简介: 何创新(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事智能装备与机器人技术研究, E-mail: chuangxinhe@shu.edu.cn

通信作者: 苗中华(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能装备与机器人技术研究, E-mail: zhhmiao@shu.edu.cn

0 引言

棉花是我国重要经济作物之一,国产采棉机的发展为我国棉花产业高质量发展提供了重要装备支撑。采棉机需要长距离长时间对行作业,不仅劳动强度大,而且限制了采棉机作业速度和效率,研发采棉机自动对行辅助驾驶系统具有重要意义和实用价值。

目前,针对各类农机装备对行作业需求,相关自动对行技术主要采用机械触碰^[1-6]或机器视觉^[7-14]两种方式。机械触碰方式需要设计左右触碰机构,在农机行进过程中根据与植株左右触碰情况,动态调整农机转向,实现自动对行,该方式在部分采棉机上得到了研究和应用^[15-16],由于只能感知最近处的棉株位置,当遇到缺株断行或个别棉株长歪的情况,会导致采棉机严重跑偏,且跑偏后无法修正,使自动对行功能失效;另外,当行驶速度较大时(如大于 5 km/h),稍有超调也容易跑偏失控,因此主要应用于低速场合。机器视觉对行方式,主要通过相机和图像处理、识别算法检测作物行,生成导航线,其性能受到光照、阴影、遮挡等环境因素的影响,由于成熟期的棉花长势茂密,反光强烈,难以通过视觉区分作物行位置,因此,视觉对行难以适用于采棉机。

近年来,基于高精度 RTK 卫星定位技术的农机装备和农业机器人自动驾驶技术得到越来越广泛的研究和应用^[17-18],卫星导航主要应用于农作物播种、耕地等不需要对行的田间作业^[19-23];而针对需要对行作业的场景,一些学者将卫星导航和视觉对行相结合^[24-26],卫星定位信息主要用于全局路径规划和作物行末端定位与换行。文献[27-29]研究了基于 RTK-GPS 的播种位置图构建方法,文献[30-31]研究了基于先验播种位置图的机器人导航和行内机械除草。

目前,机采棉播种时已经普遍采用卫星导航自动驾驶精准播种,同一地块一般沿着相同的方向平行播种,具有直线度高、交接行准确等特点。然而,由于播种位置图构建和管理成本很高,且未形成标准,国内外都尚无法获取棉花播种位置图。利用棉花平行播种的特性,本文提出一种基于平行轨迹导航的采棉机自动对行控制方法,将 RTK 卫星定位技术应用到自动对行作业中。

1 基于平行轨迹导航的自动对行方法

1.1 方法原理

利用棉花平行精准播种的特性,基于此先验信

息,可以假设采棉机对行导航线为平行直线。本文所提基于平行轨迹导航的自动对行方法主要流程如下:

(1)在一个待采收的新地块,人工驾驶采棉机完成一遍从一端到另一端的对行收获,采棉机上安装 RTK 卫星定位模块,采集记录上述人工对行轨迹,对经纬度数据点,采用结合分段中位值滤波和最小二乘法在线快速直线拟合算法,拟合出参考导航线,得到棉花行斜率。

(2)后续各行收获时,人工驾驶采棉机掉头,并对齐待收获的作物行;以此为起点,过起点与参考导航线平行(斜率相等),计算得到自动对行导航基准线。

(3)实时采集采棉机 RTK 卫星定位信息、航向信息、行驶速度、后轮转角,采用速度自适应纯追踪算法,沿着步骤(2)得到的导航基准线,实现采棉机自动对行。

(4)行驶速度通过自动或者手动控制,直到一行收获完毕,停止自动对行,再切换为人工驾驶回到步骤(2),直到完成整个地块收获。

1.2 参考导航线在线快速拟合算法

机器记录的人工对行轨迹为一系列经纬度离散点,从这些离散点拟合出棉花行直线斜率是平行轨迹对行方法的关键。最小二乘法是最常用的散点直线拟合算法,其缺点在于对离群的异常点非常敏感,离群越大权重也越大,导致拟合结果偏离真实情况;此外,当记录的数据较多时,需要较大的缓存空间和计算时间。为克服传统最小二乘法在实际应用中存在的不足,本文提出一种结合分段中位值滤波的在线快速直线拟合算法。

首先对连续实时记录的经纬度数据,设为 $(x_{i,j}, y_{i,j})$,其中 $i=1,2,\cdots,N; j=1,2,\cdots,M$ 。 x 为经度, y 为纬度,进行分段二维中位值滤波,每缓存 M 点数据,计算得到一个中位值点 $(\bar{x}_i, \bar{y}_i)$,依此循环,从入行开始记录,到行尾停止记录,共记录 N 组数据,得到 N 个中位值点。

参考导航线在经纬度世界坐标系 XOY 的直线方程为

$$y = kx + b \tag{1}$$

式中 k ——参考导航线斜率

b ——截距

根据最小二乘法,基于 N 个中位值点,斜率 k 计算式为

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{x}_i - \bar{x}_m)(\bar{y}_i - \bar{y}_m)}{\sum_{i=1}^N (\bar{x}_i - \bar{x}_m)^2} \tag{2}$$

式中 $(\bar{x}_m, \bar{y}_m)$ —— N 个中位值点平均值

采用在线分段中位值滤波可以剔除异常点,在线计算时,不需要缓存所有原始经纬度数据,只需要缓存 M 组实时经纬度和 N 组中位值,显著减小对缓存空间的需求,并且显著减小数据量和最小二乘法直线拟合的计算量。

1.3 平行导航基准线计算

导航线拟合结束后,人工驾驶采棉机掉头,并对齐待收获的作物行,以此为起点,设起点 A 的经纬度坐标为 (x_0, y_0) ,如图 1 所示,基于前述平行导航假设,待收获的导航基准线为过起点 A ,斜率为 k 的直线,平行导航基准线直线方程为

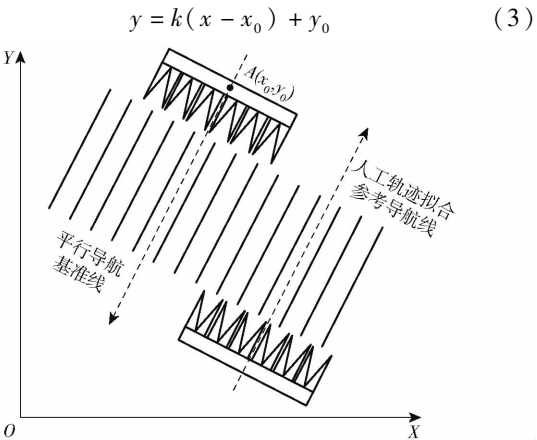


图 1 平行轨迹导航示意图
Fig.1 Sketch of parallel trajectory navigation

1.4 采棉机后轮转向运动学模型

采棉机为重载农业机械,一般都是采用后轮转向方式,左右后轮通过平行连杆驱动转动,可认为左右后轮转速和转向角一致;采棉作业时,速度较低,且土壤坚实度较大,侧滑影响可忽略不计;作业地块较为平坦,可认为只是在二维平面运动。因此,采棉机运动学模型可抽象为一个后轮转向的二轮车模型,如图 2 所示。

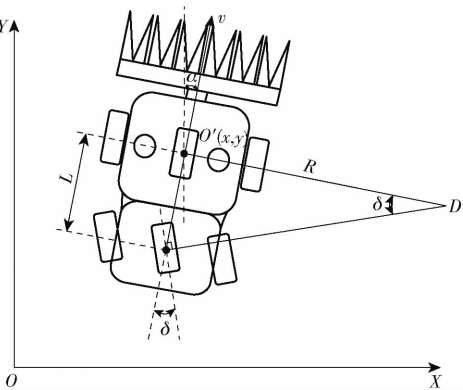


图 2 采棉机运动学模型
Fig.2 Kinematic model of cotton picker

设采棉机前轮中心 O' 在 XOY 平面坐标系内的

坐标为 (x, y) ,前后轴距为 L ,后轮转角为 δ ,航向角为 α ,行驶速度为 v ,转弯半径为 R 。几何分析可得

$$\delta = \arctan(L/R)$$
 (4)

根据前后轮几何约束可得采棉机运动学模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\alpha \\ \cos\alpha \\ \tan(\delta/L) \end{bmatrix} v$$
 (5)

式中 $\dot{x}$ —— X 轴方向速度分量
 $\dot{y}$ —— Y 轴方向速度分量
 $\dot{\alpha}$ ——航向角变化率

1.5 速度自适应纯追踪算法

得到导航基准线后,采棉机自动对行控制问题可转化为路径跟踪问题。基于几何运动学的纯追踪算法由于理论简单、参数少、抗干扰性好,成为农业装备路径跟踪控制的最常用算法^[17],主要适用于直线路径跟踪和单一曲率的路径跟踪。

纯追踪模型示意图如图 3 所示。 XOY 为世界坐标系; $X'O'Y'$ 为采棉机坐标系,点 G 为导航基准线上的预瞄点, (x'_G, y'_G) 为点 G 在 $X'O'Y'$ 坐标系的坐标,点 O' 与点 G 的连线 $O'G$ 长度为预瞄距离 L_d ; θ 为航向偏差; d 为点 O' 相对导航线的横向偏差。

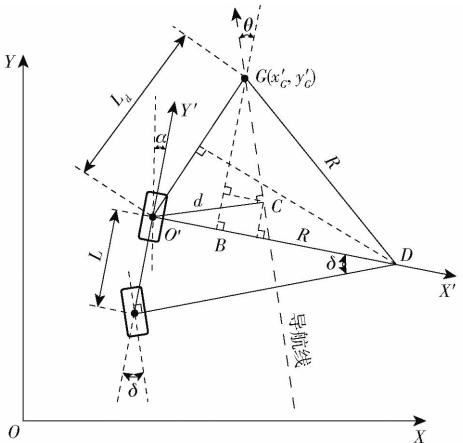


图 3 纯追踪模型几何示意图
Fig.3 Geometric diagram of pure pursuit model

由图 3 的几何关系得

$$\frac{L_d}{x'_G} = \frac{2R}{L_d}$$
 (6)

其中 $x'_G = d\cos\theta - \sqrt{L_d^2 - d^2}\sin\theta$ (7)

联立式(4)、(6)、(7)计算可得采棉机后轮期望转向角为

$$\delta = \arctan \frac{2L(d\cos\theta - \sqrt{L_d^2 - d^2}\sin\theta)}{L_d^2}$$
 (8)

式(8)中,只有预瞄距离 L_d 未知。由于自动对行导航路径为直线,不需要考虑转弯、掉头等复杂情况,因此,本文采用计算量小、方便实现的速度自适

应预瞄距离计算方法,兼顾响应快速性和控制稳定性,计算公式为

$$L_d = \begin{cases} L_{d0} v / v_0 & (v > v_0) \\ L_{d0} & (v \leq v_0) \end{cases} \quad (9)$$

式中 L_{d0} ——最小预瞄距离

v_0 ——速度下限

速度不大于 v_0 时,采用固定预瞄距离 L_{d0} ;速度大于 v_0 时,随着行驶速度增大,预瞄距离也线性增加,以确保采棉机有足够的时间进行转向调整。本文方法为人工入行后再进行自动对行控制,不需要考虑上线时间,而优先考虑控制稳定性,因此预瞄距离取值略大,其中, v_0 取为 3.6 km/h (即 1 m/s), L_{d0} 取为 10 m。

2 自动对行控制系统设计

2.1 系统组成

所提出的自动对行控制系统采用上下位机结构,如图 4 所示,主要包含高性能车载触摸显示器(上位机)和自动对行控制器(下位机),通过车载 CAN 总线网络连接在一起。触摸显示器可用于人机交互,其内置高精度 RTK 定位模块,通过安装在采棉机驾驶室顶上的 RTK 双天线,接收定位与定向信息,并可利用其处理性能,进行导航线拟合、自动对行等算法计算,输出目标速度和目标后轮转角等信息。控制器输出 2 路 PWM 信号,控制行走比例阀和转向比例阀,进而控制行驶速度和后轮转角,采集速度传感器信号和后轮角度传感器信号,实现速度闭环控制和后轮转角闭环控制。当需要退出自动对行时,从触摸显示界面点击退出按钮,车辆可交由方向盘控制。

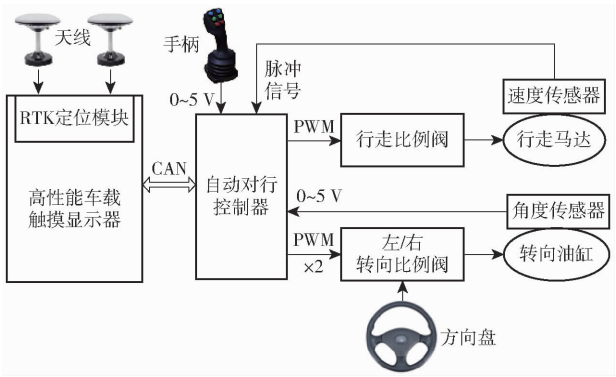


图 4 自动对行控制系统组成

Fig. 4 Composition of automatic row-follow control system

采棉机自动对行控制时,车辆行驶速度可以由程序自动控制,但考虑到棉地可能存在障碍物,或者采棉机可能出现堵塞报警等异常情况,本文设计的自动对行控制系统行驶速度仍由人工操作手柄控

制,由驾驶员根据实际情况判断进行加减速或者刹车操作,更符合实际作业需求,具有更高灵活性。由于操纵手柄具有位置锁定功能,在大部分时间匀速行驶过程中,不需要进行操作,因此,保留人工速度控制并不会增加驾驶员工作强度。

2.2 自动对行控制器设计

自动对行控制器硬件框图如图 5 所示,主处理器选用 STMF107VCT6,电源转换电路将 24 V 车载电源转换为 5 V 和 3.3 V;模拟量采集电路可采集 0~5 V 或 4~20 mA 模拟量信号,用于采集角度传感器和电控手柄信号等;脉冲信号采集电路用于采集行驶速度、风机转速等脉冲信号;PWM 驱动电路用于驱动行走/转向等比例阀,内置 EEPROM 用于存储需要掉电保存的可配置参数。

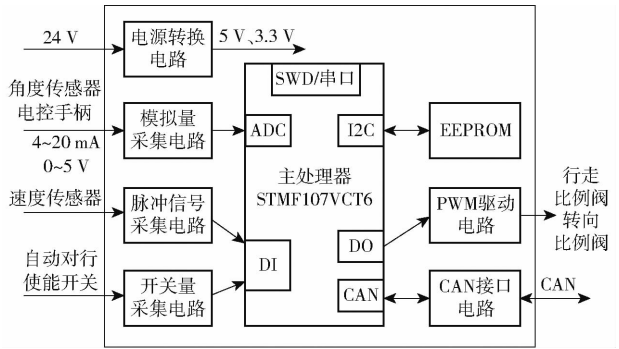


图 5 自动对行控制器硬件结构框图

Fig. 5 Hardware diagram of automatic row-follow controller

2.3 自动对行控制流程

自动对行控制流程分为上位机和下位机两部分,如图 6 所示。上位机记录人工对行轨迹数据,并拟合参考导航线;然后人工驾驶对齐待收获行,启动自动对行,以此为起点,计算平行导航基准线。在自动对行过程中,以频率 5 Hz 不断获取 RTK 实时定位定向信息;根据实时行驶速度计算预瞄距离,并根据预瞄距离和实时经纬度、航向角,通过纯追踪算法,计算得到目标后轮转角,并通过 CAN 总线发送给下位机。下位机主要完成行驶速度控制、实时行驶速度采集,以及后轮转角闭环控制。行驶速度通过手柄进行开环控制。后轮转角采用比例闭环控制,根据上位机下发的目标后轮转角与采集的实时后轮转角之间的偏差,通过比例控制,输出左/右转向占空比,进而通过左/右转向比例阀控制转向油缸伸/缩,实现后轮转角闭环控制。

设期望后轮转角为 δ_g ,实时后轮转角为 δ_r ,右转时角度变大,左转时角度变小,比例系数为 k_p 。则左转 PWM 占空比 d_l 计算公式为

$$d_l = \begin{cases} 0 & (\delta_g \geq \delta_r) \\ k_p (\delta_r - \delta_g) + d_0 & (\delta_g < \delta_r) \end{cases} \quad (10)$$

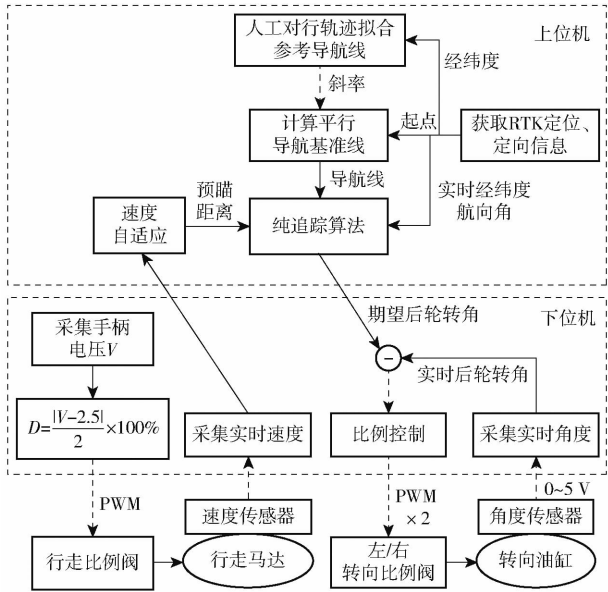


图 6 自动对行控制流程图

Fig. 6 Automatic row-follow control process

右转 PWM 占空比 d_r 计算公式为

$$d_r = \begin{cases} k_p(\delta_g - \delta_r) + d_0 & (\delta_g > \delta_r) \\ 0 & (\delta_g \leq \delta_r) \end{cases} \quad (11)$$

由于 PWM 驱动比例阀动作存在死区,式中 d_0 为使转向比例阀能动作的最小占空比略大的常数,例如 35%。

3 田间试验

3.1 试验平台

2023 年 11 月,以中农机 4MY-6A 型 6 行圆包式采棉机为试验平台,如图 7 所示,在新疆维吾尔自治区喀什巴楚县色利布亚镇进行了田间试验。高性能车载触摸显示器选用深圳从平技术有限公司的 SPRING 10PRO 型车载平板显示器,主频 2 GHz,内置 UM982 高精度定位模块和 4G 移动通信模块,安装在驾驶室;外置 RTK 双天线左右对称安装在驾驶室车顶上;通过连接“千寻知寸”厘米级高精度定位服务,实现水平 2 cm 定位精度;自动对行控制器为自研控制器,安装在控制柜中;后轮角度传感器为液压转向桥系统自带的角度传感器。中农机 4MY-6A 型 6 行圆包式采棉机为自走式结构,采用四轮驱动,额定功率为 563 kW,外形尺寸(长×宽×高)为 10 250 mm×5 050 mm×5 200 mm,作业行数为 6 行,轴距为 4 320 mm。

3.2 直线拟合算法对比分析

在试验地块,人工驾驶采棉机完成 5 遍对行收获,单程距离约 200 m,以频率 5 条/s 记录人工对行收获过程的实时经纬度、航向角、行驶速度、后轮转角等信息。去掉两端掉头转弯的数据,共得到 5 组

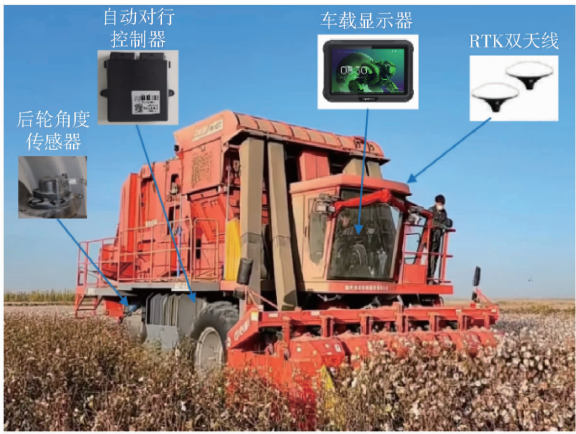


图 7 采棉机自动对行系统试验平台

Fig. 7 Test platform for automatic row-follow system of cotton picker

人工对行轨迹数据。

对 5 组人工对行轨迹的经纬度数据,采用本文 1.2 节分段中位值滤波最小二乘法进行直线拟合,其中分段中位值滤波数据长度 M 取 100;并且与常用的直线拟合算法——传统最小二乘法和随机抽样一致算法(Random sample consensus, RANSAC)进行对比分析。不同方法的直线拟合结果如表 1 所示。

表 1 不同方法的直线拟合结果

Tab. 1 Line fitting results using different methods

序号	拟合斜率			相对极差/%
	本文方法	最小二乘	RANSAC 算法	
人工对行 1	90.893 9	91.156 8	89.515 3	1.81
人工对行 2	89.238 5	88.301 7	90.027 4	1.93
人工对行 3	91.394 8	90.039 4	91.581 4	1.69
人工对行 4	87.532 4	87.418 6	87.954 0	0.61
人工对行 5	91.457 7	91.388 7	91.964 5	0.63
相对极差/%	4.36	4.43	4.46	

从表 1 可见,对同一组数据,不同方法的拟合斜率很接近,相对极差很小,均不到 2%,其中第 1 组数据的轨迹线和拟合结果见图 8,可见,3 种方法的拟合线基本重叠,即本文方法可以得到与最小二乘法或者 RANSAC 算法相当的结果,验证了本文方法的有效性。在便携式计算机上完成数据分析,CPU 主频 3.2 GHz,分析语言为 Python。对每组数据,本文方法与最小二乘法用时都很少,用时小于 0.001 s, RANSAC 算法用时较长,为 2~3 s。本文方法采用分段中值滤波后,数据量显著减小,需要更少的缓存空间,计算量也大大减少,更适合在嵌入式系统中在线使用。

虽然作物行平行,但同一种方法对不同组数据的拟合斜率略有不同,本文方法相对极差为 4.36%,这是因为人工对行时,由于各种因素影响,

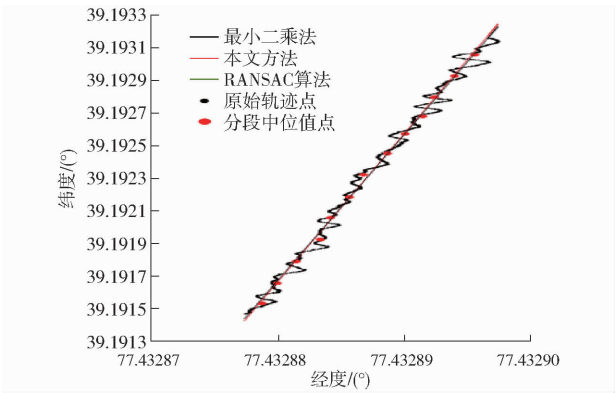


图8 人工对行数据直线拟合效果

Fig.8 Line fitting effect of manual driving row-follow data

行驶轨迹或多或少会相对偏左或偏右。

假设从同一个起始点 $A(x_0, y_0)$ ，如图 9 所示，分别采用最大斜率 91.457 7 和最小斜率 87.532 4 拟合导航线，在 200 m 末端，两者偏差 Δ 为 10.46 cm，相对棉花种植行距 76 cm，此误差影响在可接受的范围内。

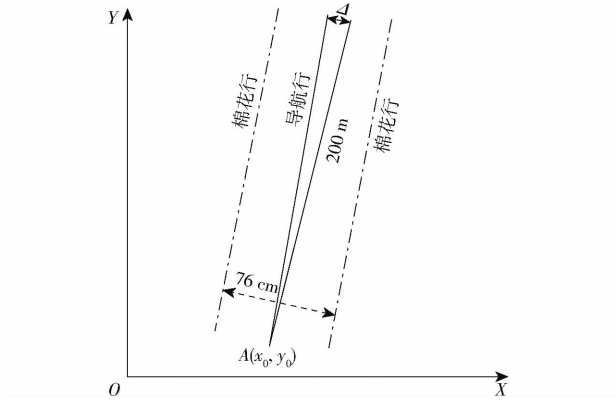


图9 不同斜率导航线的偏差影响分析示意图

Fig.9 Impact analysis of deviation on navigation lines with different slopes

3.3 平行轨迹导航自动对行试验

3.3.1 试验方法

以人工对行的第 1 组轨迹数据，基于本文方法拟合的直线斜率 90.893 9 作为平行导航基准线的斜率，从 4 个不同起始点，生成 4 条平行导航基准线，分别以行驶速度 3、5、7 km/h，以及变化的行驶速度进行自动对行试验。

3.3.2 试验结果

如表 2 所示，分别对 5 组人工对行数据和 4 组不同速度下的自动对行数据，统计分析平均绝对横向偏差、最大绝对横向偏差和横向标准差。偏差绝对值极值和偏差绝对值均值反映导航控制精度，标准差反映导航控制稳定性。其中人工对行横向偏差为轨迹点到拟合直线的距离，自动对行横向偏差为轨迹点到导航线的距离。图 10 给出了部分人工对行和自动对行情况下的横向偏差变化曲线。

表 2 横向偏差统计结果				
Tab.2 Statistics results of lateral deviation				
试验序号	行驶速度/ (km·h ⁻¹)	平均绝对横 向偏差/cm	最大绝对横 向偏差/cm	横向标 准差/cm
人工对行 1	3.0	2.27	8.63	1.79
人工对行 2	3.5	3.13	11.49	2.39
人工对行 3	3.6	3.02	11.56	2.23
人工对行 4	4.0	3.37	16.10	2.82
人工对行 5	5.0	4.28	16.86	3.09
平均值		3.21	12.93	2.46
自动对行 1	3.0	2.62	7.70	1.73
自动对行 2	5.0	3.13	8.95	1.85
自动对行 3	7.0	3.22	7.29	1.79
自动对行 4	(变速度)	2.68	9.22	1.84
平均值		2.91	8.29	1.80

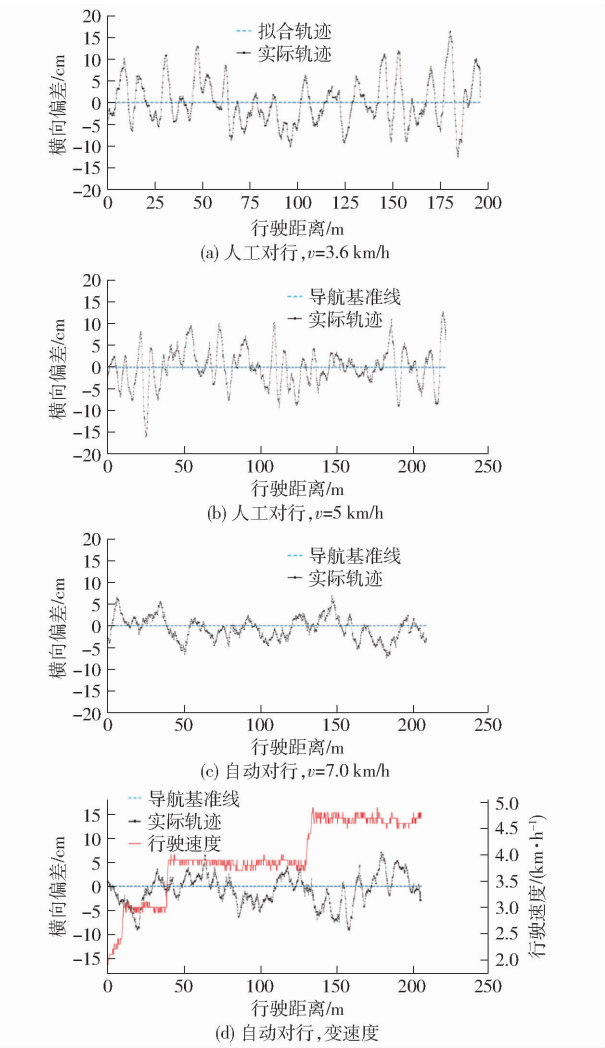


图10 横向偏差变化曲线

Fig.10 Lateral deviation variation curves

从表 2 和图 10 可见，人工对行平均绝对横向偏差为 3.21 cm，最大绝对横向偏差为 16.86 cm，平均标准差为 2.46 cm；自动对行平均绝对横向偏差为 2.91 cm，最大绝对横向偏差为 9.22 cm，平均标准差为 1.80 cm。与人工对行情况相比，自动对行的各项偏差平均值都相对更小，说明自动对行控制具有

更高的横向控制精度和更优的控制稳定性。此外，人工对行的横向偏差随着速度的增大，有明显的增大趋势，而由于速度自适应预瞄距离的作用，自动对行横向偏差随着行驶速度的增大变化不明显，以较高速度 7 km/h 前进时，仍能保持很高的对行精度，满足采棉机自动对行作业的要求。

3.3.3 与其它自动对行方法对比

分析采用机械触碰式自动对行的相关文献研究成果，玉米收获机^[1]自动对行行驶速度不大于 5 km/h，最大绝对横向偏差约 20 cm；根茎类作物收获机自动对行行驶速度不大于 1.5 m/s^[2] (5.4 km/h)；水田底盘自动对行进速度不大于 1.5 m/s^[4]，最大绝对横向偏差为 7.97 cm；甜菜收获机取自动对行行驶速度 1.2 m/s^[6]，速度 v 为 1.6 m/s 时，破损率快速增加；采棉机自动对行行驶速度不大于 5 km/h^[16]。大部分基于机器视觉的作物行识别与对行相关研究成果侧重作物行识别算法，自动对行控制效果的分析较少，大田甘蓝植保机器人基于作物行识别自动对行，最大速度为 0.74 m/s，偏差均值为 2.71 cm^[9]。机器视觉自动对行方法的性能除了与作物行识别准确性有关，还受计算平台性能约束，需要较高成本的计算平台来保证图像处理帧率；此外，当车辆行驶速

度较快时，画面抖动影响作物行识别效果，因此通常应用于低速作业场景。

对比可见，本文方法利用作物行相互平行的先验信息，相较机械触碰或者机器视觉自动对行方法，可以以更高的作业速度行驶，提高了作业效率。本文方法对计算平台没有高的要求，具有更好的实时性；并且不受缺株断行影响，也不受光照影响，可以全天候使用，具有更好的适应性。

4 结束语

利用机采棉卫星定位平行播种的特性，提出平行轨迹导航的采棉机自动对行控制方法，田间试验表明，不需要人工打点，也不需要获取棉花行实际经纬度坐标位置，可从任意行进入实现采棉机自动对行作业。不同速度下，平均绝对横向偏差为 2.91 cm，最大绝对横向偏差为 9.22 cm，平均标准差为 1.80 cm，相对人工对行，本文自动对行方法具有更小的横向偏差和更优的控制稳定性，相对机械触碰式自动对行方法，本文方法不受缺株歪株影响，在较高速 7 km/h 行驶下，可保持良好的对行精度，满足采棉机自动对行作业的要求，可有效减轻采棉机操作人员劳动强度，提高作业精度和作业效率。

参 考 文 献

[1] 张凯良,胡勇,杨丽,等. 玉米收获机自动对行系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 103 – 114.
ZHANG Kailiang, HU Yong, YANG Li, et al. Design and experiment of auto-follow row system for corn harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 103 – 114. (in Chineses)

[2] 李涛,周进,徐文艺,等. 根茎类作物收获机自动对行系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 102 – 110.
LI Tao, ZHOU Jin, XU Wenyi, et al. Design and test of auto-follow row system employed in root and stem crops harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 102 – 110. (in Chineses)

[3] 张晋国,郑超,赵金,等. 棉花打顶机自动对行装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 93 – 101.
ZHANG Jinguo, ZHENG Chao, ZHAO Jin, et al. Design and experiment of auto-follow row device for cotton topping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 93 – 101. (in Chineses)

[4] 陈学深,熊悦淞,齐龙,等. 基于触感引导的小型水田行进底盘自动对行方法[J]. 农业工程学报, 2022, 38(21): 8 – 15.
CHEN Xueshen, XIONG Yuesong, QI Long, et al. Design and experiment of the tactile guidance system for the automatic alignment of small paddy moving chassis[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(21): 8 – 15. (in Chineses)

[5] 王方艳,张东兴. 圆盘式甜菜收获机自动导向装置的参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 27 – 33.
WANG Fangyan, ZHANG Dongxing. Parameter optimization and test on auto guide device for disc type sugar beet harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 27 – 33. (in Chineses)

[6] 王申莹,胡志超,CHEN Charles,等. 牵引式甜菜联合收获机自动对行系统设计与台架试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 103 – 112, 163.
WANG Shenying, HU Zhichao, CHEN Charles, et al. Bench test and analysis on performance of autofollow row for traction sugar beet combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 103 – 112, 163. (in Chineses)

[7] RAJITHADE S, GRIEGORI C, GAO Junfeng, et al. Vision based crop row navigation under varying field conditions in arable fields[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108581.

[8] 王侨,孟志军,付卫强,等. 基于机器视觉的玉米苗期多条作物行线检测算法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 208 – 220.
WANG Qiao, MENG Zhijun, FU Weiqiang, et al. Detection algorithm of multiple crop row lines based on machine vision in maize seedling stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 208 – 220. (in Chineses)

[9] 韩长杰,郑康,赵学观,等. 大田甘蓝作物行识别与对行喷雾控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 89 – 101.
HAN Changjie, ZHENG Kang, ZHAO Xueguan, et al. Design and experiment of row identification and row-oriented spray control

system for field cabbage crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 89 – 101. (in Chinses)

[10] YANG Y, ZHOU Y, CHEN L. Real-time detection of crop rows in maize fields based on autonomous extraction of ROI[J]. Expert Systems with Applications, 2023(213): 118826.

[11] 陈学深,方根杜,熊悦淞,等. 基于稻田除草部件横向偏距视觉感知的对行控制系统设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(5): 83 – 91.
CHEN Xueshen,FANG Gendu,XIONG Yuesong,et al. Design and test of row-follow control system based on visual perception of lateral-offset of weeding component in paddy field[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(5): 83 – 91. (in Chinses)

[12] LIN S, JIANG Y, CHEN X, et al. Automatic detection of plant rows for a transplanter in paddy field using Faster R – CNN [J]. IEEE Access, 2020, 8: 147231 – 147240.

[13] BAI Y, ZHANG B, XU N, et al. Vision-based navigation and guidance for agricultural autonomous vehicles and robots: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 205: 107584.

[14] RUANGURAI P, DAILEY M N, EKPANYAPONG M, et al. Optimal vision-based guidance row locating for autonomous agricultural machines[J]. Precision Agriculture, 2022, 23: 1205 – 1225.

[15] 李文春,王剑,高振康,等. 基于单片机的采棉机自动对行系统的设计[J]. 新疆农机化, 2022(2): 19 – 21.
LI Wenchun,WANG Jian,GAO Zhenkang,et al. Design of automatic alignment system of cotton picker based on micro control unit[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2022(2): 19 – 21. (in Chinses)

[16] 苗中华,田大庆,何创新,等. 智能采棉机自动对行辅助驾驶控制技术研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(10): 72 – 76.
MIAO Zhonghua,TIAN Daqing,HE Chuangxin,et al. Research on automatic line-to-line auxiliary driving control technology of intelligent cotton picker[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(10): 72 – 76. (in Chinses)

[17] 孟志军,王昊,付卫强,等. 农业装备自动驾驶技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 1 – 24.
MENG Zhijun,WANG Hao,FU Weiqiang,et al. Research status and prospects of agricultural machinery autonomous driving [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 1 – 24. (in Chinses)

[18] 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 Chinses)

[19] 黎永键,赵祚喜,黄培奎,等. 基于 DGPS 与双闭环控制的拖拉机自动导航系统[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 11 – 19.
LI Yongjian,ZHAO Zuoxi,HUANG Peikui,et al. Automatic navigation system of tractor based on DGPS and double closed-loop steering control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 11 – 19. (in Chinses)

[20] 吴才聪,王东旭,陈智博,等. SF2104 拖拉机自主行驶与作业控制方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 42 – 48.
WU Caicong,WANG Dongxu,CHEN Zhibo,et al. Autonomous driving and operation control method for SF2104 tractors[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(18): 42 – 48. (in Chinses)

[21] 姜帆,张三强,杨光友. 水田插秧机自动驾驶控制系统设计[J]. 农机化研究, 2023, 45(7): 47 – 52.
JIANG Fan,ZHANG Sanqiang,YANG Guangyou. Design of automatic driving control system for rice transplanter based on RTK – GNSS navigation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(7): 47 – 52. (in Chinses)

[22] LI S, ZHANG M, JI Y, et al. Agricultural machinery GNSS/IMU-integrated navigation based on fuzzy adaptive finite impulse response Kalman filtering algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 191: 106524.

[23] DOS SANTOS A F, DA SILVA R P, ZERBATO C, et al. Use of real-time extend GNSS for planting and inverting peanuts [J]. Precision Agriculture, 2018, 20: 840 – 856.

[24] MA Z, YIN C, DU X, et al. Rice row tracking control of crawler tractor based on the satellite and visual integrated navigation [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 197: 106935.

[25] BENGOCHEA-GUEVARA J M, CONESA-MUÑOZ J, ANDÚJAR D, et al. Merge fuzzy visual servoing and GPS-based planning to obtain a proper navigation behavior for a small crop-inspection robot[J]. Sensors, 2016, 16(3): 276.

[26] KANAGASINGHAM S, EKPANYAPONG M, CHAIHAN R. Integrating machine vision-based row guidance with GPS and compass-based routing to achieve autonomous navigation for a rice field weeding robot[J]. Precision Agriculture, 2020, 21: 831 – 855.

[27] SUN H, SLAUGHTER D C, PÉREZ RUIZ M, et al. RTK GPS mapping of transplanted row crops[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71: 32 – 37.

[28] YAN B, WU G, XIAO Y, et al. Development and evaluation of a seed position mapping system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 190: 106446.

[29] UPADHYAYA S K, MATTSO M L, EHSANI M R. Seed location mapping using RTK GPS[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(3): 909 – 914.

[30] PÉREZ-RUIZ M, SLAUGHTER D C, GLIEVER C J, et al. Automatic GPS-based intra-row weed knife control system for transplanted row crops[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 80: 41 – 49.

[31] NØRMARK M, GRIEPENTROG H W, NIELSEN J, et al. The development and assessment of the accuracy of an autonomous GPS-based system for intra-row mechanical weed control in row crops[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(4): 396 – 410.