

棚架果园自主导航机器人快速上线方法与试验

刘继展^{1,2}, 何 蒙¹, 解彬彬¹, 彭 赞¹, 单海勇¹

(1. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013; 2. 现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘 要: 棚架果园是一种适用于葡萄、梨和猕猴桃等水果的枝蔓布于架上的果树种植方式, 棚架果园环境对卫星信号遮挡严重, 现有研究多通过分析果园局部环境特征实现农机的自主导航作业。自主导航的行头上线性能影响生产作业的质量和效率。为了实现棚架果园环境下基于相对定位导航方式机器人的快速上线, 该研究提出了一种基于电子罗盘与激光雷达航向信息融合的位姿检测方法, 依据精准位姿信息规划上线轨迹和最优上线角以实现快速的上线。该系统作业时, 通过触控串口屏人机界面向控制器输入先验棚架朝向信息, 融合电子罗盘和激光雷达航向信息获得机器人相对于果树行的精准位姿, 按照位姿偏差指标的不同阈值进行车体位姿状态归类并触发相应上线轨迹程序, 并以求解的最优上线角度实现快速上线。在模拟棚架葡萄园环境中以自主研发的葡萄生产机器人为试验平台开展快速上线性能试验。试验结果表明: 在恒定速度 0.3 m/s、初始横向偏差 1.4 m 和航向偏差 $-\pi/4$, $-\pi/18$, 0 , $\pi/18$, $\pi/4$ 的条件下, 上线时间分别为 6.11、7.15、7.46、7.74、8.90 s, 上线距离分别为 1.357、1.367、1.387、1.383、1.403 m。该研究以最优上线角完成自主导航系统快速上线, 可为棚架果园无人化作业技术研究提供参考。

关键词: 机器人; 自主导航; 棚架果园; 快速上线; 航向信息融合; 最优上线角

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.002

中图分类号: S220; S24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-09-0012-10

刘继展, 何蒙, 解彬彬, 等. 棚架果园自主导航机器人快速上线方法与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 12-21.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.002 <http://www.tcsae.org>

Liu Jizhan, He Meng, Xie Binbin, et al. Fast online method and experiments of autonomous navigation robots for trellis orchard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(9): 12-21. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.002 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

果园棚架栽培模式具有受光面积大、抗逆性强、单位效益高及田间管理方便等优点, 在国内外广泛应用于鲜食葡萄、猕猴桃等生产^[1]。自主导航是果园机器人的核心技术之一^[2], 机器人进入果树行间、途中恢复作业时均需要自主快速行驶至作业行, 即自主上线。所以自主上线对于机器人的自主导航能力和性能至关重要。

国内外专家学者对大田中农业机械的自主上线开展了研究, 贾全^[3]针对 RTK-GNSS 定位导航提出将最大曲率约束、起止点航向约束和最大转向角约束综合考虑的农机运动学模型, 使用量子遗传算法规划距离最短的可行驶上线轨迹, 初始位置到目标点距离 6.5 m, 上线距离为 23.7 m, 最大跟踪误差为 0.10 m。Samson^[4]对于机器人运动稳定性问题, 提出横向绝对控制的上线控制方法, 稳定减小目标点相对于目标轨迹的横向距离。陈军等^[5]和 Bayar 等^[6]对曲线路径跟踪问题, 提出拖拉机遵循正弦曲线路径和圆形路径的跟踪方法, 但是并没考虑轮角决

策量范围的影响。王辉等^[7]对拖拉机导航中轮角决策量范围固定, 提出一种预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法, 田间试验结果显示, 初始航向偏差 0° 和初始位置偏差 1.5 m 条件下, 上线时间为 9.4 s、上线距离 9.33 m、超调量为 8.5 cm。以上研究是基于卫星定位的导航上线研究, 是基于导航上线点不动的上线方法。棚架果园环境中浓密树冠形成一张天然的卫星信号干扰层, 棚架中无法使用卫星定位的方式导航。所以基于上线点不动的上线方法不适用于棚架果园。文献[8-12]提出通过传感器感知周围环境并获得机器人相对树行的位置和姿态信息, 对这种环境的定位方式提出路径跟踪方法, 其中包括 PID 控制方法^[8-9]、模糊控制方法^[10]、纯追踪模型^[11-12]等。试验表明, 这些方法在机器人位姿偏差较小时具有较好的路径跟踪效果, 但应用在田头上线存在上线时间长、上线距离长的问题^[13-14]。所以, 棚架果园的机器人自主上线需要解决机器人相对于茎秆纤细、稀疏种植的果树位姿识别和大位姿偏差下的快速上线方法。

针对上述研究的不足和棚架果园行头自主上线的实际要求, 本文提出一种相对树行定位导航的快速上线方法。利用激光雷达和电子罗盘航向信息融合得到精准位姿信息触发相应上线轨迹程序, 并以求解的最优上线角度实现快速上线, 在搭建的模拟棚架果园环境下进行试验, 试验验证该算法的有效性。

收稿日期: 2021-03-05 修订日期: 2021-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31971795), 江苏大学农业装备学部项目 (4111680002), 江苏省优势学科项目 (PAPD-2018-87)

作者简介: 刘继展, 研究员, 博士生导师, 研究方向为农业机器人研究、无人农机与智能导航技术。Email: liujizhan@163.com

中国农业工程学会会员: 刘继展 (E041100022M)

1 棚架环境自主上线的技术难点

1.1 棚架果园的场景特征

棚架栽培模式是棚架底部用支撑柱支撑, 顶部以横杆或铅丝牵引, 形成网状架面, 枝蔓布于架上的果树种植方式。葡萄、梨、猕猴桃等均适合棚架模式种植, 本文以棚架葡萄园为对象开展研究。棚架葡萄园的场景特征如下:

- 1) 枝蔓布置于网状架面之上, 形成类似“天花板”的状态。
- 2) 棚架内为行距、株距 3~4 m 的纤细葡萄树干和立柱, 树干与立柱分别单独成行或间隔排列成行;
- 3) 行间为疏松土壤路面, 存在低矮杂草(高度低于 40 cm)、沟坎(竖直高度变化小于 15 cm)等。
- 4) 葡萄树茎部直径在 2.13~4.76 cm 之间, 棚架高度为 1.8~2.1 m。

1.2 棚架环境下的自主导航特殊性

依据棚架果园场景特征, 自主导航系统要求如下:

- 1) 自主环境感知, 机器人自主感知果园周围环境信息, 从而确定作业树行。
- 2) 自主位姿判定, 依据传感器信息确定机器人在果园中的位置和姿态信息。

棚架果园枝蔓布置与架上浓密树冠形成的卫星信号遮挡层, 使得卫星定位的导航方式不稳定, 基于卫星定位的绝对定位方式不适用。机器人要自主感知环境信息并确定位姿信息, 棚架中茎杆纤细、稀疏种植的果园环境为机器人自主感知带来困难。

1.3 棚架环境下的自主上线的技术要求

基于卫星定位方式的上线研究中, 机器人初始位姿和上线点的位置均为固定值。在速度恒定、运动控制不变的情况下, 影响上线性能因素只有上线轨迹。所以卫星定位的上线研究主要是完成初始点与上线点之间上线轨迹规划。

棚架果园中无法使用卫星定位, 所以棚架环境下的自主上线是获得机器人位姿后规划上线轨迹, 具体技术包括: 首先提取果树行线; 在得到果树行线后机器人通过控制器处理传感器数据判断机器人精准位姿; 最后规划机器人上线轨迹完成上线。棚架果园自主上线过程如图 1 所示。

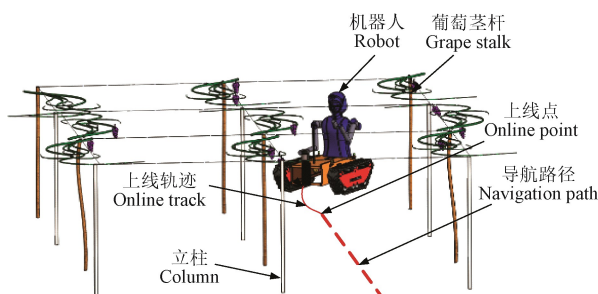


图 1 机器人上线过程示意图

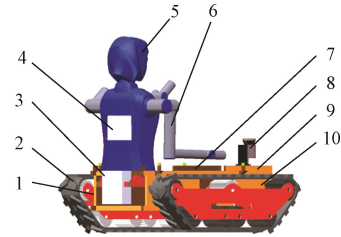
Fig.1 Schematic diagram of robot online process

2 棚架果园快速上线方法

2.1 棚架果园自主导航系统

履带式行走机构对路况具有很强的适应能力, 果园

环境土壤疏松、路面颠簸不平。本研究以常州桑普履带式果园管理机(3GPY-300)为机器人行走机构硬件, 整机结构如图 2 所示。



1.无刷直流电机 2.橡胶履带 3.控制箱 4.触摸屏 5.机器人模型 6.六轴机械臂 7.三维电子罗盘 8.SickLMS111 激光雷达 9.机架 10.24 V 铅酸电池
1.Brushless DC motor 2.Rubber track 3.Control box 4.Touch screen 5.Robot model 6.Six-axis robotic arm 7.Three-dimensional electronic compass 8.SickLMS111 lidar 9.Frame 10.24 V lead-acid battery

图 2 机器人整机结构

Fig.2 Overall structure of robot

激光雷达水平安装于机器人车体前端, 距离地面高度 540 mm, 电子罗盘水平安装于车体后部, 为避免受到电机等磁性物体影响, 布置远离直流电机。在其上安装自主研发的棚架果园自主导航控制平台, 该平台由导航控制器、运动控制器、位姿感知模块和人机交互模块构成, 如图 3 所示。

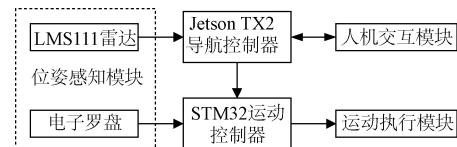


图 3 导航系统组成

Fig.3 Structure of navigation parameter detection system

其中, 位姿感知模块由激光雷达和电子罗盘组成。激光雷达采用德国 SICK 公司生产的 LMS111, 测距量程 20 m, 角度扫描范围 270°, 角度分辨率 0.25°, 每组扫描点云数据为 541 个测距值, 最大扫描频率 50 Hz, 电子罗盘选择慧联公司生产的 SEC335 倾角补偿型三维电子罗盘, 航向精度为 1°, 分辨率为 0.3°, 俯仰和横滚精度为 0.15°, 分辨率为 0.01°, 最大采样频率 50 Hz。根据处理器运算性能差异, 以英伟达 Jetson TX2 开发板作为导航控制器; STM32F103RCT6 为运动控制器。导航控制器负责对获取的棚架环境信息数据进行处理, 计算出导航路径, 并将电机速度信息通过 USB 串口通信发送至运动控制器。运动控制器负责接收解析上位机发送的信息并输出 PWM 调制脉冲分别驱动左右驱动器, 驱动器控制直流电机转动的速度和转角。

2.2 棚架果园快速上线技术构成

本文提出电子罗盘与激光雷达航向信息融合的位姿检测和履带机器人快速上线控制方法, 技术流程如下:

- 1) 棚架果园中果树行线提取;
- 2) 获取机器人相对果园树行的精准位姿;
- 3) 快速上线轨迹规划。

快速上线控制方法流程图如图 4 所示。

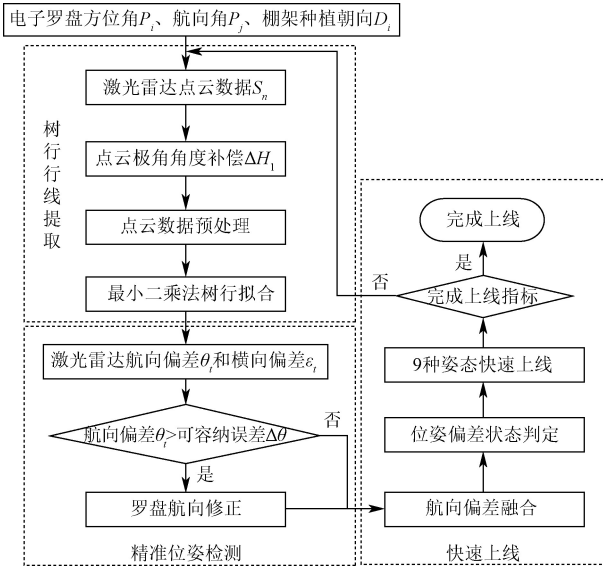


图4 快速上线控制方法流程图

Fig.4 Flow chart of fast online control method

如图4所示,棚架果园果树种植朝向与农艺密切相关,棚架种植朝向 D_i 不随时间的变化而变化,通过人机交互界面设定棚架方向后便可长久使用,但局部果树树行朝向与种植朝向 D_i 会有部分偏差。激光雷达在局部果树行线识别上具有出色性能,所以融合两者航向信息实现两传感器性能互补。

初始电子罗盘的航向角 P_j (rad)与棚架种植朝向 D_i (rad)一致。方位角 P_i 与航向角 P_j 差值即此时电子罗盘获得的航向偏差,电子罗盘航向偏差作为极角补偿对激光雷达点云补偿,具体如式(1)~(2)所示

$$P_j = D_i \quad (1)$$

$$\Delta H_i = P_j - P_i \quad (2)$$

式中 ΔH_i 为极角角度补偿值,rad; P_i 为电子罗盘方位角,rad。

补偿后的树行点云数据对电子罗盘航向进行修正,修正后的电子罗盘航向角与激光雷达航向角融合得到精确位姿,如图5所示。融合后横向偏差和航向偏差为上线判定的2个指标,设计2个指标的不同阈值进行车体位姿状态归类,机器人根据检测位姿判定所属状态并触发相应上线轨迹程序。若未完成,将再次进行位姿检测,重新检测机器人的姿态,直至完成上线。

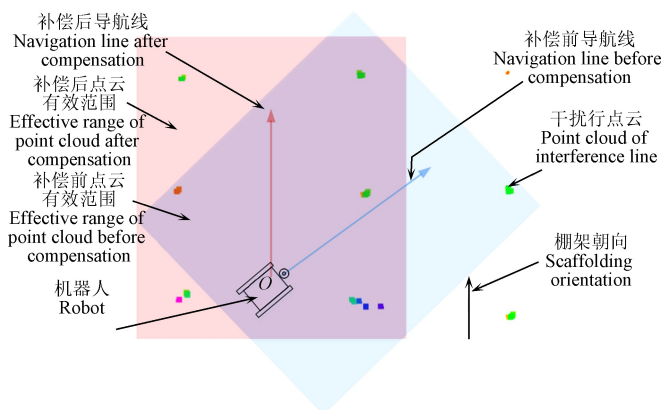


图5 航向信息融合前后点云变化

Fig.5 Point cloud changes before and after heading information fusion

2.3 航向信息融合的精准位姿获取

2.3.1 最小二乘法提取果树行线

棚架果园为半结构化设施农业环境,地面没有高茎秆杂草且激光雷达安装位置高于低矮杂草,杂草对获取树干点云信息无干扰。因此,本文假设获取的树干点云信息无干扰点,可直接用于果树行线拟合。行线拟合方法如下:

1) 激光雷达点云将极坐标下的位置点云信息 $S_n(\rho_i, \sigma_i^\wedge)$ 转化到笛卡尔坐标 XOY 下:

$$X = \rho_i \cos \sigma_i^\wedge \quad (3)$$

$$Y = \rho_i \sin \sigma_i^\wedge \quad (4)$$

式中 ρ_i 为点云极坐标极径,m; σ_i^\wedge 为点云极坐标极角,rad; X 为笛卡尔坐标系横轴,m; Y 为笛卡尔坐标系纵轴,m。

2) X 轴正方向与果园导航航向一致,然后以象限区分左右侧树行,通过设置 Y 轴距离阈值剔除干扰树行并得到左右侧树行点云,纵轴阈值分割获得左右树干点云坐标 $S_{li}(X_{li}, Y_{li})$, $S_{ri}(X_{ri}, Y_{ri})$,阈值选择如式(5)和式(6)所示:

$$0 < Y_{li} < \Delta Y \quad (5)$$

$$-\Delta Y < Y_{ri} < 0 \quad (6)$$

式中 ΔY 为纵轴阈值,m。

3) 果树行点云具有较好的线性关系,设左侧果树行直线方程为 $Y_l = a_l X_l + b_l$,右侧果树行直线方程为 $Y_r = a_r X_r + b_r$,根据最小二乘法的基本原理,要使误差平方取最小值,对参数 a_l 和 b_l 分别求偏导:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=1}^k (Y_i - aX_i - b)^2 = 0 \\ \frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^k (Y_i - aX_i - b)^2 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)可得参数 a_l 和 b_l 的最优估计值为

$$\begin{cases} a_l = \frac{(\sum_{i=1}^k X_{li} Y_{li}) - \sum_{i=1}^k X_{li} \sum_{i=1}^k Y_{li}}{\sum_{i=1}^k X_{li}^2 - (\sum_{i=1}^k X_{li})^2} \\ b_l = \frac{(\sum_{i=1}^k X_{li}^2 Y_{li}) - \sum_{i=1}^k X_{li} (\sum_{i=1}^k X_{li} Y_{li})}{\sum_{i=1}^k X_{li}^2 - (\sum_{i=1}^k X_{li})^2} \end{cases} \quad (8)$$

同理可求得右侧树行直线方程参数 a_r 、 b_r 的值。

4) 树行中心线即是树行行间导航线。

机器人与导航路径之间位姿关系通过横向偏差 ε_i 和航向偏差 θ_i 表示,其计算公式如下:

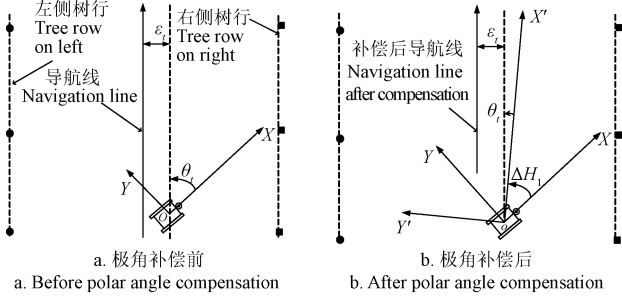
$$\begin{cases} \theta_i = \frac{\arctan a_l + \arctan a_r}{2} \\ \varepsilon_i = (b_l + b_r) \cos \theta_i \end{cases} \quad (9)$$

5) 为避免因机器人航向偏差过大造成干扰树行点云

错误剔除, 导致果树行线错误识别的问题, 提出对激光雷达扫描点云极角补偿, 用补偿后的点云拟合果树行线。由式(2)得极角角度补偿值 ΔH_1 , 补偿后激光雷达点云坐标为 $S_n(\rho_i, \sigma_i^\Lambda)$, 其中

$$\sigma_i^\Lambda = \sigma_i + \Delta H_1 \quad (10)$$

按照步骤 1)~4) 得到极角补偿后的位姿, 极角补偿过程如图 6 所示。



注: X' , Y' 为补偿后坐标。

Note: X' , Y' are coordinates after compensation.

图 6 机器人姿态的极角补偿过程

Fig.6 Polar angle compensation process of robot pose

2.3.2 位姿检测

融合激光雷达和电子罗盘航向偏差, 使自主上线系统能够实时稳定采集航向偏差。由 2.3.1 节计算得到机器人补偿后相对于导航线的航向偏差 θ_i , 如式(11):

$$L_j = P_j + \theta_i \quad (11)$$

式中 L_j 激光雷达航向角, rad。

自主导航需要根据硬件的精度和导航精度设定一个可容纳误差 $\Delta\theta$ 。若航向偏差 θ_i 大于可容纳误差 $\Delta\theta$, 则需要对电子罗盘航向角进行修正, 以获得精确电子罗盘航向角 P_j^Λ , 如式(12)所示:

$$\begin{cases} P_j^\Lambda = P_j + \theta_i, & \theta_i > \Delta\theta \\ P_j^\Lambda = P_j, & \theta_i \leq \Delta\theta \end{cases} \quad (12)$$

组合信息融合航向偏差 θ_F 如式(13)所示:

$$\theta_F = \frac{L_j + P_j^\Lambda}{2} - P_i \quad (13)$$

车体相对树行横向偏差 ε_F 如式(14)所示:

$$\varepsilon_F = \varepsilon_i \quad (14)$$

获得准确横向偏差和航向偏差后, 控制器根据 2 个指标的阈值进行车体位姿状态归类, 机器人根据检测位姿判定所属状态并触发相应上线轨迹程序。

2.4 双指标快速上线轨迹规划

为了实现自主导航机器人在树行头快速到达导航线附近, 以机器人位姿的横向偏差和航向偏差作为航位偏差检测指标, 先消除横向偏差再消除航向偏差, 解决以往横向偏差和航向偏差同步消除带来的上线距离长的问题。按照生产作业所需上线距离尽可能较短, 将机器人位姿调整至满足导航线可容纳横向偏差 $(-\varepsilon_0, +\varepsilon_0)$ 、可容纳航向偏差 $(-\theta_0, +\theta_0)$ 范围内。

机器人航向偏差阈值为 $(-\pi/4, \pi/4)$: 当 $\theta_i > \pi/4$ 或

$\theta_i < -\pi/4$ 时, 机器人相对于树行已经严重倾斜, 在实际机器人自主导航时并不会出现如此大的航向偏差。所以, 果树行种植行距为 3 m, 在任何情况下横向偏差均在 -1.5 和 1.5 之间, 超出此范围说明拟合错误树行, 导航处于失效的状态。所以横向偏差阈值为 $(-1.5, 1.5)$ 。

如表 1 所示, 是基于横向偏差和航向偏差 2 个指标的位姿状态分类, 在导航可行域范围内, 将机器人位姿分为 9 种状态, 机器人在航线左侧横向偏差为正。机器人左偏航向偏差为正, A_2B_2 为完成上线位姿状态 (机器人与导航线的横向偏差 $|\varepsilon_F| < |\varepsilon_0|$ 且航向偏差 $|\theta_F| < |\theta_0|$ 时, 称机器人完成上线行间导航状态), 同理 A_2B_2 为机器人位于导航线右侧且航向为左偏即右侧左偏, 其他状态以此类推。处于其他状态时即启动对应的调控程序向理想的位姿状态调整^[15-16]。

表 1 基于横向偏差和航向偏差的机器人位姿状态分类

Table 1 Robot pose state classification based on lateral deviation and heading deviation

参数 Parameters	$-1.5 < \varepsilon_F < -\varepsilon_0$	$-\varepsilon_0 \leq \varepsilon_F \leq \varepsilon_0$	$\varepsilon_0 < \varepsilon_F \leq 1.5$
$\theta_0 < \theta_F \leq \pi/4$	正位左偏(A_1B_1)	正位左偏(A_2B_1)	左侧左偏(A_3B_1)
$-\theta_0 \leq \theta_F \leq \theta_0$	右侧不偏(A_1B_2)	正位不偏(A_2B_2)	左侧不偏(A_3B_2)
$-\pi/4 \leq \theta_F < -\theta_0$	右侧右偏(A_1B_3)	正位右偏(A_2B_3)	左侧右偏(A_3B_3)

注: θ_F 为航向偏差, rad; ε_F 为横向偏差, m; ε_0 为可容纳横向偏差, m; θ_0 为可容纳航向偏差, rad; A_1 、 A_2 、 A_3 分别表示机器人车体位于导航线右侧、正位、左侧; B_1 、 B_2 、 B_3 分别表示机器人车头方向相对航向左偏、不偏、右偏。下同。

Note: θ_F is the heading deviation, rad; ε_F is the lateral deviation, m; ε_0 is the lateral deviation that can be accommodated, m; θ_0 is the tolerable heading deviation, rad; A_1 , A_2 , A_3 indicate the robot body located on the right, front and left side of the navigation line respectively; B_1 , B_2 , B_3 indicate the direction of the robot head is offset to the left, not offset and to the right relative to the heading respectively. The same below.

机器相对导航线左右侧状态调整方法一致、路径对称, 针对左侧 5 种状态的机器人展开详细叙述。 A_3B_1 、 A_3B_2 、 A_3B_3 状态下, 机器人车体中心位于导航线左侧, 横向偏差 $\varepsilon_F > 0$, 车体处于较安全的状态, 其中 A_3B_1 状态下车头偏向导航线外侧, 控制车体原地调整航向至 A_3B_3 状态, 沿着最优上线角行驶至 A_2B_3 状态, 控制车体原地调整航向至 A_2B_2 状态。 A_3B_2 、 A_3B_3 状态下履带车横向偏离导航线, 先将车身调整至与导航线成最优上线角的 A_2B_3 状态, 再按照 A_2B_3 状态进行调节。控制履带车快速调整到上线的行间导航各种状态, 如图 7 所示。

2.5 上线系统性能指标

根据最优控制理论, 性能指标的内容和形式取决于最终的目标^[17-19]。由于机器人相对导航线左右侧状态调整方法一致、路径对称, 因此本文针对左侧状态的机器人展开详细叙述。选择上线时间 t_0 和上线距离 s_0 为衡量上线性能指标, 其中上线距离 s_0 为

$$s_0 = \frac{\varepsilon_F - \varepsilon_0}{\sin(\theta_s)} \quad (15)$$

由式(15)可知, 快速上线方法的上线距离与横向偏差、可容纳横向偏差和上线角度 θ_s 有关, 但在机器人位姿确定后横向偏差和可容纳横向偏差均为定值, 上线距离的长短只与上线角度有关。

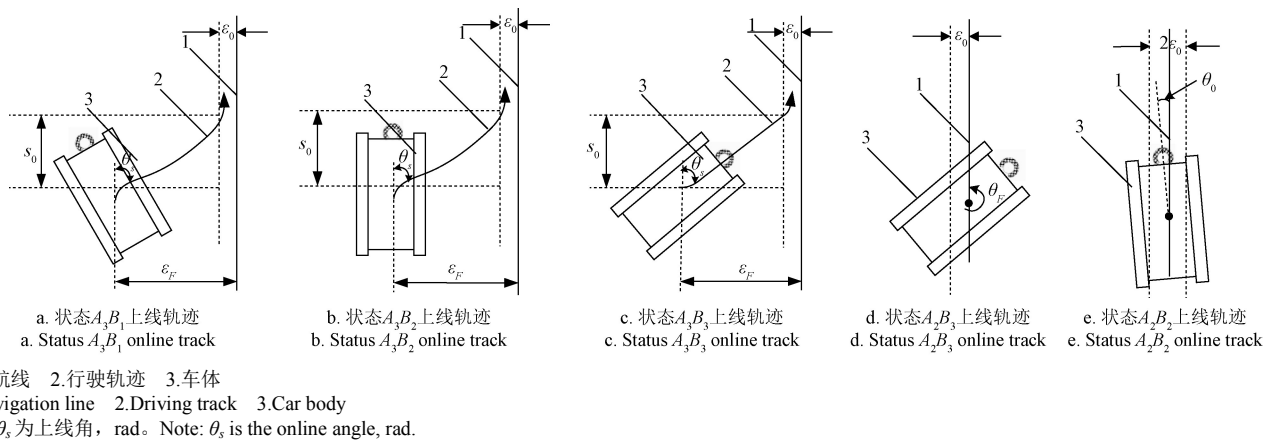


图7 不同车体位姿状态下果树行头机器人上线轨迹调过程整示意图

Fig.7 Schematic diagram of online track adjustment process of robot under different body posture states at end of fruit tree row

上线时间与机器人运动部件的运动模型相关, 本文研究采用履带底盘, 是一种典型的差速转向车辆, 通过调节左右侧主动轮的转速来控制航向和速度。本研究将履带车体视为刚体, 其任意时刻的瞬时运动均可认为是绕某一瞬时转动中心的转动, 由瞬心法^[20-23]机器人运动学模型如式(16)和(17)所示:

$$v = \frac{v_l + v_r}{2} \quad (16)$$

$$\omega = \frac{v_l - v_r}{B} \quad (17)$$

式中 v_l 为左侧履带速度, m/s; v_r 为右侧履带速度, m/s; B 为履带轨距, m; v 为车体速度, m/s; ω 为车体角速度, rad/s。

不同航向偏差的上线时间如式(18)所示:

$$t_0 = \begin{cases} \frac{\theta_F + 2\theta_s}{\omega} + \frac{\varepsilon_F - \varepsilon_0}{v \sin(\theta_s)}, & A_3B_1, A_3B_2, A_3B_3 \text{ 状态} \\ \frac{\theta_F}{\omega}, & A_2B_3 \text{ 状态} \end{cases} \quad (18)$$

将式(16)~(17)代入式(18)得:

$$t_0 = \begin{cases} \frac{(\theta_F + 2\theta_s)B}{v_l - v_r} + \frac{2(\varepsilon_F - \varepsilon_0)}{(v_l + v_r) \sin(\theta_s)}, & A_3B_1, A_3B_2, A_3B_3 \text{ 状态} \\ \frac{\theta_F B}{v_l - v_r}, & A_2B_3 \text{ 状态} \end{cases} \quad (19)$$

由式(19)可知, 机器人驶进果园后初始横向偏差、初始航向偏差、履带轨距和可容纳横向偏差等参数均为定值, 机器人在 A_2B_3 状态下时, 上线时间为固定值, A_3B_1 、 A_3B_2 、 A_3B_3 状态下, 快速上线方法的上线时间仅与上线角度有关, 所以耗时最短时的上线角度尤为重要, 即最优上线角。

2.6 最优上线角

由上文分析可知, 上线角度直接决定上线时间的长短, 依据机器人作业速度和自主导航精度要求, 本文在机器人履带轨距、车体速度、角速度、可容纳位姿偏差均恒定为 0.8 m、0.3 m/s、0.75 rad/s、0.1 m 的条件下研究机器人初始位姿与最优上线角度关系。根据式(19), 以上线角为自变量, 上线时间为因变量, 使用 MATLAB

工具箱生成机器人在 $\varepsilon_F=1.4$ m、 $\theta_F=\pi/4$ 位姿下上线时间与上线角的变化趋势, 如图8所示。

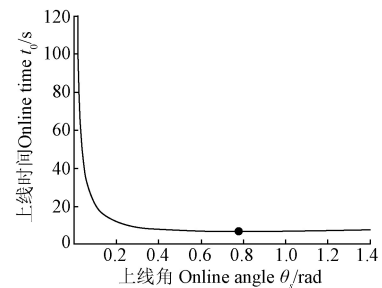


图8 上线时间随上线角变化趋势

Fig.8 Change trend of online time with online angle

由图8可知, 按照 0.78 rad 的上线角上线时, 上线时间最短为 7.81 s。

为了得到其他位姿的最优上线角, 分别求解不同初始横向偏差和航向偏差下的最优上线角。根据文献[6], 选取横向偏差 1.4、1.1、0.8、0.5、0.2 m, 航向偏差 $-\pi/4$ 、 $-\pi/6$ 、0、 $\pi/6$ 、 $\pi/4$, 开展试验, 求解 $\varepsilon_F=1.4$ m 时不同航向偏差下最优上线角和 $\theta_F=\pi/4$ 时不同横向偏差下最优上线角, 结果如表2所示。

表2 初始横向偏差 1.4 m 和航向偏差 $\pi/4$ 下最优上线角计算结果

序号 Serial No.	$\theta_F=\pi/4$		$\varepsilon_F=1.4$ m	
	横向偏差 Lateral deviation/m	最优上线角 Optimal online angle/rad	航向偏差 Heading deviation/rad	最优上线角 Optimal online angle/rad
1	0.2	0.31	$-\pi/4$	0.78
2	0.5	0.49	$-\pi/6$	
3	0.8	0.61	0	
4	1.1	0.70	$\pi/6$	
5	1.4	0.78	$\pi/4$	

由表2可知, 在初始航向偏差不变下, 最优上线角随横向偏差增大而增大。在初始横向偏差不变下, 最优上线角不随航向偏差改变而改变。

综上所述, 只有初始横向偏差对最优上线角有影响,

所以最优上线时间仅与初始横向偏差有关。为了得到各位姿下最优上线角度值,在 MATLAB 中对不同横向偏差下最优上线角数据拟合,得到最优上线角与横向偏差函数关系,如图 9 所示。

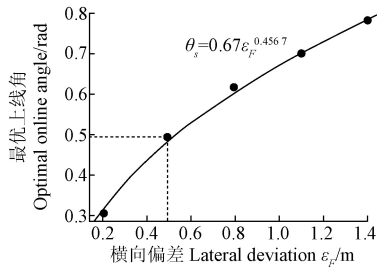


图 9 最优上线角拟合结果

Fig.9 Optimal online angle fitting result

拟合结果的 $R^2=0.999\ 1$, $RMSE=0.006\ 3$ rad, 方程对测量值拟合程度较高。

2.7 快速上线仿真试验

为了验证快速上线方法具体性能,在 Matlab 仿真环境下进行仿真试验^[24-25]。

依据生产机器人作业速度和自主导航精度要求,设定原地转向履带底盘左右轮速度分别为 $v_l=0.3$ m/s、 $v_r=0.3$ m/s,履带轨距 $B=0.8$ m,可容纳横向偏差 $\varepsilon_0=0.1$ m,可容纳航向偏差 $\theta_0=3^\circ$ 。根据 2.5 节方法,对左侧状态的机器人上线距离和时间进行计算,结果如表 3 所示。

表 3 行驶速度为 0.3 m/s 时上线性能仿真结果

Table 3 Online performance simulation results when the driving speed is 0.3 m/s

横向偏差 Lateral deviation/m	航向偏差 Course deviation	上线距离 Online distance/m	上线时间 Online time/s
0.5	$-\pi/4$	0.4	2.75
	$-\pi/18$		3.53
	0		3.76
	$\pi/18$		3.99
	$\pi/4$		4.81
1.0	$-\pi/4$	0.9	4.34
	$-\pi/18$		5.19
	0		5.43
	$\pi/18$		5.66
	$\pi/4$		6.47
1.4	$-\pi/4$	1.3	5.71
	$-\pi/18$		6.53
	0		6.76
	$\pi/18$		6.99
	$\pi/4$		7.81

由表 3 可知,在航向偏差固定情况下,随着横向偏差增大,上线距离增加;在横向偏差不变的情况下,航向偏差变化,上线距离不变,上线距离最大值为 1.3 m。

在航向偏差固定情况下,随着横向偏差增大,上线时间增加;在横向偏差固定情况下,随着航向偏差变大,上线时间变大;上线时间最大值为 7.81 s。文献[26]使用快速纠偏方法,在初始航向偏差 5° 、横向偏差 0.01 m、

速度 0.3 m/s 时稳定跟踪路径时间在 0.8~1.2 s,,总体上,本文棚架葡萄园下快速上线方法能够快速消除偏差完成上线。

3 棚架果园试验与结果分析

3.1 试验材料与设备

为了验证快速上线方法和检测上线性能,按照本文方法研制了棚架果园自主导航机器人试验平台,如图 10a 所示。



a. 机器人试验平台
a. Robot test platform



b. 模拟葡萄棚架试验环境
b. Simulated grape trellis test environment

图 10 试验平台与环境

Fig.10 Test platform and environment

由于新冠疫情的影响,试验在江苏大学农业工程学院内空旷的草地进行,依据棚架葡萄园场景特征,搭建帐篷支架模拟棚架葡萄园环境,4 组 $3\text{ m}\times 6\text{ m}$ 规格帐篷支架按照行距 3 m、株距 3 m 的标准布置,形成长度 15 m 宽度 9 m 的试验场地,如图 10b 所示。以机器人中心投影到地面的点为定位点,通过在机器人中心安装滴水挂瓶记录下机器人定位点,测量仪器选择量程 200 m、精度 1 mm 皮尺^[25]。

3.2 试验方法

将机器人遥控至树行行头,通过人机交互界面输入棚架行朝向 D_i 并启动机器人上线作业,系统初始化控制器获取传感器数据:首先提取棚架中果树行线,然后融合航向信息获取机器人相对果园树行的精准位姿,最后规划机器人快速上线轨迹并完成上线。依据本文方法的技术构成,试验分为果树行线提取和快速上线性能验证 2 个部分:

果树行线提取试验:为了判断航向信息融合后的精准位姿对果树行线提取准确性的影响,采用标准最小二乘法行线提取算法设置对照组。依据机器人在棚架下位姿偏差可行域将试验分成 5 组,横向偏差 1.4 m,分别在航向偏差 $-\pi/4$, $-\pi/18$, 0, $\pi/18$, $\pi/4$ 下进行果树行线提取精度试验。每组进行 20 次,通过运行 ROS 中行线拟合节点并在 RVIZ 中显示提取结果,判断人工分析算法提取的果树航线是否与真实果树行线重合,若提取的果树行线与实际作业行树行重合,即果树行线提取成功,否则果树行线提取失败。

快速上线性能试验:为检验机器人在位姿偏差下快速上线性能,横向偏差设为最大值 1.4 m,航向偏差为 $-\pi/4$, $-\pi/18$, 0, $\pi/18$, $\pi/4$, 共 5 组,每组做 3 次试验,统计每组试验条件下快速上线的距离和时间。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 果树行线提取结果与分析

试验结果如图 11, 从左至右分别是机器人在横向偏差 1.4 m、航向偏差 $\pi/4$ 的大位姿偏差下, 航向信息融合的果树行线提取图像和标准最小二乘法所得行线提取图像。

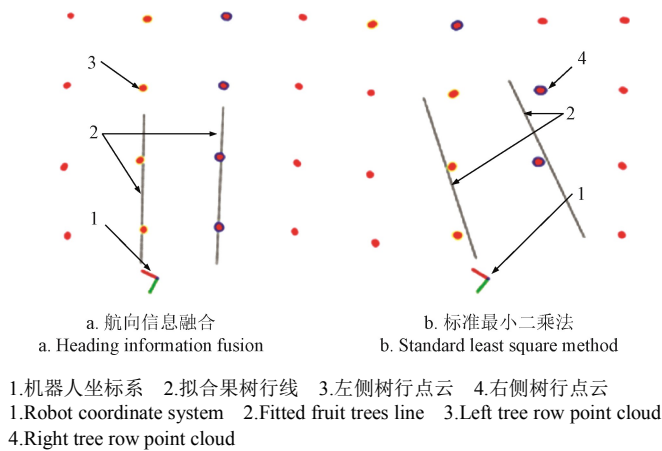


图 11 横向偏差 1.4 m、航向偏差 $\pi/4$ 时不同方法的果树行提取试验结果

Fig.11 Results of fruit tree row line extraction test with different methods at lateral deviation 1.4 m and heading deviation $\pi/4$

由图 11 可知, 同样的位置偏差时, 航向信息融合的果树行线提取算法能够准确地拟合出果树行线, 但标准最小二乘法行线无法正确提取出果树行线。

为了得到 2 种行线提取算法行线识别平均精度, 分别对试验数据进行统计, 如表 4 所示, 融合航向的果树行线检测算法识别平均精度达到 94%, 比标准最小二乘法行线提取算法平均精度提升 40 个百分点。机器人相对果树行线确定位姿, 果树行线平均识别精度的提高使得机器人获得更精准的位姿。精准位姿是实现快速上线的前提, 所以航向信息融合的果树行线提取为棚架果园下机器人快速上线奠定基础。

表 4 不同行线提取算法性能对比 ($\varepsilon_F=1.4$ m)

Table 4 Performance comparison of different row extraction algorithms ($\varepsilon_F=1.4$ m)

算法 Algorithms	航向偏差 Heading deviation/rad					平均精度 Average accuracy/%
	$-\pi/4$	$-\pi/18$	0	$\pi/18$	$\pi/4$	
航向信息融合 Heading information fusion	9	10	10	10	8	94
标准最小二乘法 Standard least squares	0	8	10	9	0	54

3.3.2 快速上线性能试验结果与分析

上线性能包括上线时间和上线距离, 上线性能试验结果如表 5 所示。

从表 5 中可以看出, 在初始横向偏差 1.4 m 下, 平均上线时间在 6.11~8.9 s 之间、平均上线距离在 1.357~1.403 m 之间; 在初始航向偏差 $\pi/4$ 下, 上线时间的试验结果比理论结果多 1.09 s、上线距离的试验结果比理论结果大 0.103 m。由于路面颠簸不平、运动执行滞后等原因, 试验效果稍差于理论结果。

表 5 不同初始航向偏差上线性能试验结果 ($\varepsilon_F=1.4$ m)

Table 5 Online performance test results with different initial heading deviations ($\varepsilon_F=1.4$ m)

初始航向偏差 Initial heading deviation	试验号 Test No.	上线时间 Online time/s	上线距离 Online distance/m
$\pi/4$	1	8.91	1.41
	2	9.23	1.46
	3	8.56	1.34
	平均	8.90	1.403
$\pi/18$	1	7.99	1.38
	2	7.63	1.34
	3	7.59	1.43
	平均	7.74	1.383
0	1	6.96	1.33
	2	7.83	1.45
	3	7.59	1.38
	平均	7.46	1.387
$-\pi/18$	1	7.45	1.35
	2	7.12	1.39
	3	6.89	1.36
	平均	7.15	1.367
$-\pi/4$	1	6.11	1.36
	2	5.85	1.32
	3	6.37	1.39
	平均	6.11	1.357

从总体上来看, 模拟棚架葡萄园上线平均时间随着初始航向偏差增大而增加, 上线距离随初始航向偏差变化不大, 上线时间和上线距离总体变化趋势与理论结果一致。

初始横向偏差 1.4 m、航向偏差 $\pi/4$ 的快速上线过程如图 12 所示。

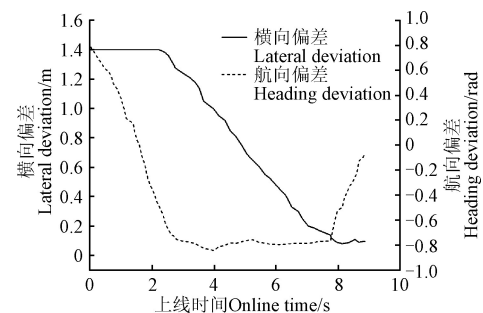


图 12 快速上线过程 ($\theta_F=\pi/4$, $\varepsilon_F=1.4$ m)

Fig.12 Fast online process ($\theta_F=\pi/4$, $\varepsilon_F=1.4$ m)

结合图 7, 机器人在初始横向偏差为 1.4 m、航向偏差为 $\pi/4$ 时, 机器人处于 A_3B_1 状态, 机器人快速上线状态变化过程为 $A_3B_1 \rightarrow A_3B_3 \rightarrow A_2B_3 \rightarrow A_2B_2$ 。图 12 中 0~2.3 s 机器人原地旋转将车体航向角调整至 $-\pi/4$ 即 A_3B_3 状态, 此时机器人横向偏差不变航向偏差转至 $-\pi/4$ 左右。2.3~6.86 s 横向偏差线性减小至可容纳横向偏差 ε_0 以内, 机器人航向偏差震荡调整、横向偏差逐渐减小直至机器人处于状态 A_2B_3 。6.86~8.91 s 阶段横向偏差在 ε_0 附近震荡、航向偏差逐渐减小至可容纳航向偏差 θ_0 附近, 此时机器

人处于 A_2B_2 状态, 即机器人完成上线。试验结果表明机器人按照快速上线方法完成上线, 但试验效果稍差于仿真结果, 上线时间误差不超过 1.42 s, 上线距离误差不超过 0.16 m, 相比于传统路径跟踪的上线方法, 提高了棚架果园自主导航系统的上线性能, 上线时间减少, 上线距离缩短, 误差在许用范围内^[27-29]。

4 结 论

针对目前果园田头对行上线存在上线时间长、上线距离长问题, 提出了一种基于电子罗盘与激光雷达航向信息融合的位姿检测方法, 通过在模拟棚架葡萄园环境下的试验, 证明该方法可以在大初始横向偏差和航向偏差条件下, 快速稳定获得机器人位姿并按照规划路径上线, 相比于传统路径跟踪的上线方法, 提高了棚架果园自主导航系统的上线性能, 其中包括减少上线时间和缩短上线距离。

1) 本文从理论上分析了机器人依照最优上线角的快速上线方法在位姿可行域范围内的上线时间和上线距离。在初始横向偏差为 0~1.4 m、初始航向偏差 $-\pi/4 \sim \pi/4$ 范围内, 在航向偏差一定的情况下, 上线时间随着横向偏差的增大而增加; 在横向偏差一定的情况下, 随着航向偏差增大, 上线时间也随之增加; 上线时间最大值为 7.81 s, 上线距离最大值为 1.3 m。总体上, 快速上线方法能够在棚架葡萄园环境下快速消除位姿偏差完成上线。

2) 初始横向偏差 1.4 m、航向偏差 $\pi/4$ 的快速上线试验, 结果表明机器人能够按照快速上线方法完成上线。

3) 为了验证快速上线方法的性能, 进行了模拟棚架葡萄园环境下的快速上线试验, 在初始横向偏差 1.4 m 的条件下, 初始航向偏差 $-\pi/4, -\pi/18, 0, \pi/18, \pi/4$ 条件下, 上线时间分别为 6.11、7.15、7.46、7.74、8.9 s, 上线距离分别为 1.357、1.367、1.387、1.383、1.403 m。本文提出的最优上线角快速上线方法具有较好的上线性能, 可为棚架果园无人化作业技术研究提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] 芮东明, 张锐方, 汪智明, 等. 葡萄水平棚架式栽培技术规程[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(4): 167-168.
Rui Dongming, Zhang Ruifang, Wang Zhiming, et al. Technical regulations for grape horizontal shelf cultivation[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2011, 39(4): 167-168. (in Chinese with English abstract)
- [2] 胡静涛, 高雷, 白晓平, 等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 1-10.
Hu Jingtao, Gao Lei, Bai Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(10): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [3] 贾全. 拖拉机自动导航系统自适应控制方法研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2018.
Ja Quan. Adaptive Control Method for Tractor Auto-guidance System[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [4] Samson C. Control of chained systems application to path following and time-varying point-stabilization of mobile robots[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1995, 40(1): 64-77.
- [5] 陈军, 朱忠祥, 鸟巢谅, 等. 拖拉机沿曲线路径的跟踪控制[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 108-111.
Chen Jun, Zhu Zhongxiang, Torisu Ryo, et al. On-tracking control of tractor running along curved paths[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(11): 108-111. (in Chinese with English abstract)
- [6] Bayar G, Bergerman M, Koku A, et al. Localization and control of an autonomous orchard vehicle[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015(115): 118-128.
- [7] 王辉, 王桂民, 罗锡文, 等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 11-19.
Wang Hui, Wang Guimin, Luo Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(4): 11-19. (in Chinese with English abstract)
- [8] Bochtis D, Griepentrog H W, Vougioukas S, et al. Route planning for orchard operations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 113: 51-60.
- [9] Kurashiki K, Fukao T, Nagata J, et al. Laser-based vehicle control in orchard[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(26): 127-132.
- [10] Mogensen L V, Hansen S, Andersen J C, et al. Kalmttool used for laser scanner aided navigation in orchard[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2009, 42(10): 764-769.
- [11] Subramanian V, Burks T F, Arroyo A A. Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 53(2): 130-143.
- [12] Thamrin N M, Arshad N H M, Adnan R, et al. Inter-row tree detection and tracking schemes for structural plantation area[J]. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, 2017, 7(3): 1083-1088.
- [13] Thanpattranon P, Ahamed T, Takigawa T. Navigation of an autonomous tractor for a row-type tree plantation using a

- laser range finder: Development of a point-to-go algorithm[J]. Robotics, 2015, 4(3): 341-364.
- [14] Thanpattranon P, Ahamed T, Takigawa T. Navigation of autonomous tractor for orchards and plantations using a laser range finder: Automatic control of trailer position with tractor[J]. Biosystems Engineering, 2016(147): 90-103.
- [15] 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.
- [16] 居锦, 刘继展, 李男, 等. 基于侧向光电圆弧阵列的温室路沿检测与导航方法[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 180-187.
- Ju Jing, Liu Jizhan, Li Nan, et al. Curb-following detection and navigation of greenhouse vehicle based on arc array of photoelectric switches[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(18): 180-187. (in Chinese with English abstract)
- [17] 胡寿松, 王执铨, 胡维礼. 最优控制理论与系统[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 362.
- [18] 胡家铭, 胡宇辉, 陈慧岩, 等. 基于模型预测控制的无人驾驶履带车辆轨迹跟踪方法研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(3): 456-463.
- Hu Jiaming, Hu Yuhui, Chen Huiyan, et al. Research on trajectory tracking of unmanned tracked vehicles based on model predictive control[J]. Acta Armamentarius, 2019, 40(3): 456-463. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘正铎, 张万枝, 吕钊钦, 等. 扰动下农用运输车辆路径跟踪控制器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 378-386.
- Liu Zhengduo, Zhang Wanzhi, Lü Zhaoqin, et al. Design on trajectory tracking controller of agricultural vehicles under disturbances[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 378-386. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈黎卿, 解彬彬, 李兆东, 等. 基于双闭环 PID 模糊算法的玉米精量排种控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 33-41.
- Chen Liqing, Xie Binbin, Li Zhaodong, et al. Design of control system of maize precision seeding based on double closed loop PID fuzzy algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(9): 33-41. (in Chinese with English abstract)
- [21] 姬长英, 周俊. 农业机械导航技术发展分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 44-54.
- Ji Changying, Zhou Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 44-54. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李道亮, 李震. 无人农场系统分析与发展展望[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 1-12.
- Li Daoliang, Li Zhen. System analysis and development prospect of unmanned farming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- [23] 田海清, 应义斌, 张方明. 农业车辆导航系统中自动控制技术的研究进展[J]. 农业机械学报, 2005, 36 (7): 148-152.
- Tian Haiqing, Ying Yibin, Zhang Fangming. Development of automatic control technique for agricultural vehicle guidance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36 (7): 148-152. (in Chinese with English abstract)
- [24] Yang X, Zhao F, Chen T. NLOS identification for UWB localization based on import vector machine[J]. AEU-Int J Electron Commun, 2018, 87: 128-133.
- [25] Fu S C, Li Y M, Wu M, et al. Ultra-wideband pose detection method for based on TDOA positioning model boom-type roadheader[J]. International Journal of Electronics and Communications, 2019, 99: 70-80.
- [26] 钱晓明, 朱立群, 楼佩煌, 等. 基于位姿状态的全向运行型 AGV 路径跟踪优化控制方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 20-26.
- Qian Xiaoming, Zhu Liqun, Lou Peihuang, et al. Optimal path tracking control method of omni-directional mobile AGV based on pose state[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 20-26. (in Chinese with English abstract)
- [27] 中国机械工业联合会. 自走式农业机械导航系统作业性能要求及评价方法: GB/T 37164-2018[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会.
- [28] 李俊霞, 孔德政. 自主行走葡萄收获机器人视觉导航信息处理技术研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5): 157-162.
- Li Junxia, Kong Dezheng. Research on visual navigation information processing technology of autonomous[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(5): 157-162. (in Chinese with English abstract)
- [29] 封永, 张欣欣, 黄林青, 等. 激光雷达机器人车辆地头转向路径规划[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(2): 28-31, 34.
- Feng Yong, Zhang Xinxin, Huang Linqing, et al. Path planning of end-of-row turning for robot vehicle based on laser radar[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(2): 28-31, 34. (in Chinese with English abstract)

Fast online method and experiments of autonomous navigation robots for trellis orchard

Liu Jizhan^{1,2}, He Meng¹, Xie Binbin¹, Peng Yun¹, Shan Haiyong¹

(1. School of Agricultural Equipment Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Trellis cultivation is a typical fruit tree planting, where a net-like shelf cover is formed on the top using a cross bar or lead wire with a support column to the bottom of a trellis, and the branches and vines are spread on the shelf. Grapes, pears, and kiwis are all suitable for planting in a trellis. In this study, taking a trellised vineyard as a research object, a fast online system of autonomous navigation was established to serve as one of the core technologies for orchard robots. The robots needed to drive autonomously and quickly when entering the rows of fruit trees or resuming operations on the way. It was therefore highly demanded to return independently the job line or online. Autonomous launching was widely utilized to evaluate the capabilities and performance of robot navigation. Nevertheless, the environment of the trellised orchard was seriously obstructing satellite signals. A natural shielding layer of satellite signals was also found under the dense tree canopy, as well as the arrangement of branches and vines in the trellised orchard. The shielding has made the navigation of satellite positioning unstable. An absolute satellite positioning was not suitable for the shed orchard. As such, the robots needed to autonomously perceive the actual environment, and then determine the subsequent pose. But there were most slender stems and sparsely planted stalks in the scaffolding in trellis structured orchard. Most autonomous navigation of agricultural machinery at present focused mainly on the local environmental characteristics of orchards. A great challenge still remained on the online performance of autonomous navigation, particularly on high quality and efficiency of operations. In this study, pose detection was proposed to realize the rapid launch of robots in the environment of scaffolding orchard using the relative positioning navigation, with emphasis on the fusion of electronic compass and LiAR heading. A priori scaffold orientation was input to the controller at the human-machine interface of the touch-sensitive serial screen, and then the electronic compass and LiDAR heading were combined to capture the precise pose of robots relative to the tree row, according to the dual indicators of pose deviation. The thresholds of body pose and state were classified to trigger the online trajectory program. Fast online was thus achieved with an optimal online angle. A self-developed grape robot was used as a test platform to carry out fast-on-line performance tests in a simulated trellised vineyard. The test results showed that the online time was 6.11, 7.15, 7.46, 7.74, and 8.9 s, respectively, while the online distance was 1.357, 1.367, 1.387, 1.383, and 1.403 m, respectively, under the constant speed of 0.3 m/s, the initial lateral deviation of 1.4 m, and the initial heading deviation of $-\pi/4$, $-\pi/18$, 0 , $\pi/18$, and $\pi/4$. The optimal online crawler robot was achieved for short online time and distance in the field-to-row online positioning of an orchard. Angular implementation was also to quickly go online. Consequently, the robot can pose and go online quickly and stably using the planned path under the conditions of large initial lateral and heading deviation. Compared with the traditional path tracking, the online performance of the autonomous navigation system was improved significantly for the scaffold orchard, including the less online time and shorter online distance. The finding can provide a potential reference to the unmanned operation in scaffold orchards.

Keywords: robots; autonomous navigation; trellis orchards; rapid online; heading information fusion; optimal online angle