

双导航模式果园运输机器人设计与试验

毛文菊^{1,2} 刘恒^{1,2} 王小乐^{1,2} 杨福增^{1,2} 刘志杰^{1,2} 汪宗阳³

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 农业农村部苹果全程机械化科研基地, 陕西杨凌 712100; 3. 上海一坤电气工程有限公司, 上海 200233)

摘要: 为解决果园苹果采后运输设备自主导航模式单一、无法在任意点起步或停车等问题,设计了一种双导航模式小型果园运输机器人,可根据需求选择行人引领导航或定点导航。根据选择的导航模式,采用基于 OpenPose 人体姿态识别的目标跟踪控制方法或基于 RTK-GNSS (Real time kinematic-global navigation satellite system) 的距离-方向控制方法,实现果园环境下的行人引领导航和定点导航。该运输机器人以额定负载为 200 kg、速度为 0.5 m/s 的条件参数在果园自主作业时,行人引领导航模式下目标跟踪误差平均值小于 9 cm,其标准差小于 4 cm;定点导航模式下到达目标点的相对误差小于 13 cm,其标准差小于 1.5 cm,绝对误差小于 7 cm,其标准差小于 0.5 cm;定点导航模式下机器人急停避障的行驶路径与理想行驶路径间的横向偏差小于 56 cm,航向偏差小于 8°。试验结果表明,该机器人能满足果园自主运输和安全避障的需求。

关键词: 果园运输机器人; 自主运输; 双导航模式; 行人引领导航; 定点导航

中图分类号: S24; TP242.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)03-0027-13

OSID:



Design and Experiment of Dual Navigation Mode Orchard Transport Robot

MAO Wenju^{1,2} LIU Heng^{1,2} WANG Xiaole^{1,2} YANG Fuzeng^{1,2} LIU Zhijie^{1,2} WANG Zongyang³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Apple's Full Mechanized Research Base, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Shanghai Yikun Electric Engineering Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: To solve the problems of the existing orchard apple post-harvest transportation equipment with a single autonomous navigation mode and the inability to start or stop at any point, a dual navigation mode small orchard transportation robot was developed and designed, whose hardware system mainly included five modules, such as pedestrian led navigation, fixed-point navigation, control, motion and power, and the software system included three modules, such as command interaction layer, information processing layer and execution layer. The user selected the navigation mode under the command interaction layer according to the demand. In the selected navigation mode, the information processing layer processed the target point pose information provided by the pedestrian led navigation or fixed-point navigation module and then used OpenPose human pose recognition-based target tracking control or Real time kinematic-global navigation satellite system (RTK-GNSS)-based distance-angle control methods to output the next moment of motion velocity information to the execution layer. And then the motion and power module realized the pedestrian led navigation and fixed-point navigation in the orchard environment based on the velocity information. When the transport robot operated in the orchard with a rated load of 200 kg and speed of 0.5 m/s, the average value of target tracking error was less than 9 cm and the standard deviation was less than 4 cm in the pedestrian led navigation mode; the relative error of reaching the target point was less than 13 cm and the standard deviation was less than 1.5 cm in the fixed-point navigation mode, and the absolute error was less than 7 cm and the standard deviation was less than 0.5 cm. The test results showed that the robot can meet the requirements of autonomous transportation and safe obstacle avoidance in orchards.

Key words: orchard transport robots; autonomous transport; dual navigation mode; pedestrian led navigation; fixed-point navigation

收稿日期: 2021-03-31 修回日期: 2021-06-12

基金项目: 陕西省科技重大专项(2020zdzz03-04-01)

作者简介: 毛文菊(1987—),女,博士生,主要从事农业机器人导航技术研究,E-mail: vincentblack@nwafu.edu.cn

通信作者: 杨福增(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事农业智能装备与技术研究,E-mail: yangfzkm@nwafu.edu.cn

0 引言

苹果收获是一种季节性很强且劳动密集型的作业,该环节的作业量约占苹果生产所有作业量的40%^[1-2],但收获过程的采后运输作业仍采用传统的人和运输车互相配合的方式^[3]。果园生产逐步向现代化和智能化方向转变,研发适用于果园的运输机器人是果园现代化、智能化发展的必然趋势^[4-5]。

自主导航技术是果园运输机器人智能化作业的关键。在果园运输机器人导航技术研究方面,MARK 等^[6]采用多层激光识别猕猴桃果树行的方法,实现了机器人行内直线行驶,但未体现地头自主转弯这一技术难点;MARCEL 等^[7]开发了轮式自主移动果园运输设备,该设备通过 2D 激光检测果树行两端设定的固定点获得果树行地头转弯信息,并根据这些信息规划固定路径实现自动导航,但在行间起步、停车时仍需要人工按键完成;国内学

者^[8-13]优化和改善了果园运输设备的机械性能,但对该类设备自主导航技术的相关研究未见报道。

本研究针对现有果园运输机器人导航模式单一,自主作业时无法实现任意点的起步、停车,智能化程度偏低等问题,设计一种双导航模式果园运输机器人,以实现行人引领导航和定点导航。以果农的安全为前提,机器人可以跟随果农在果园任意点起步、停车实现运输作业,一旦满载则可以自主行驶至目标点,由地头的果农卸果后再自主返回至果园内果农所在位置,开始下一轮的跟随运输作业,提高果园运输作业的智能化程度。

1 系统设计

1.1 硬件系统设计

双导航模式果园运输机器人的整体硬件由行人引领导航模块、定点导航模块、控制模块、运动模块和动力模块等 5 个模块组成,其结构如图 1 所示。

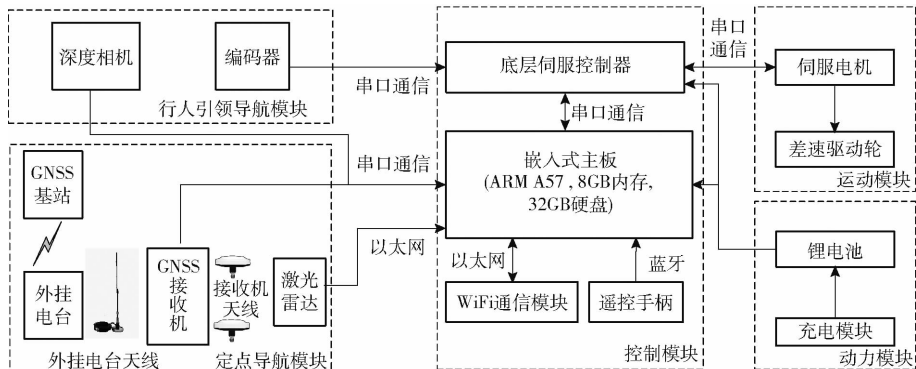


图 1 机器人整体硬件结构图

Fig. 1 Overall hardware of robot

(1) 行人引领导航模块

双导航模式果园运输机器人的行人引领导航模块由 Intel RealSense D435i 型深度相机和编码器构成。D435i 型深度相机由 1 个红外点阵投射器、1 个 RGB 相机和 2 个红外相机组成,其中红外点阵投射器补齐灯光,RGB 相机采集彩色图像的信息,两个红外 (Infra-Red) 相机测量图像距离相机的深度信息,为机器人提供相机前方的图像信息和图像像素点距离机器人的深度信息。D435i 深度相机架设在机器人中心正前方,激光雷达的下方。

编码器安装在机器人底盘驱动电机上,根据电机转速为行人引领导航模块提供机器人当前时刻的速度信息。

(2) 定点导航模块

双导航模式果园运输机器人的 CGI-410 型定点导航模块 (华测) 由实时动态全球导航卫星定位系统 (Real time kinematic-global navigation satellite system, RTK-GNSS) 和 RS_Lidar-16 激光雷达 (速

腾) 两部分构成。RTK-GNSS 导航基于差分定位的原理,即基站通过电台和天线将定位经纬度定位坐标信息传递给移动站,移动站接收到 RTK-GNSS 的载波相位以及基准站的信息后进行及时处理,最后得到高精度的定位结果。其中移动站包括移动站接收机、RTK-GNSS 双天线和外挂电台,移动站接收机安装在运输机器人装载箱下方,RTK-GNSS 双天线分别架设在机器人正中心前后端,双天线连线的基线与真北方向的夹角为机器人当前航向角 (方向)。所采用的 CGI-410 型 RTK-GNSS 接收机内置 MEMS (Micro-electro-mechanical system) 陀螺仪与加速度计,可进行 RTK-GNSS 和惯性组合导航。即当移动站在苹果园中受果树等遮挡物影响丢失信号时,可采用惯性导航提供的姿态和位置信息,适用于运输机器人在果园自主导航。为保证该定位导航模块能进行组合导航,需要在空旷位置处对该定位导航模块进行“绕 8 字”校准后再使用。

激光雷达安装在机器人正中心前方,具有水平

方向 $\pm 180^{\circ}$, 垂直方向 $\pm 5^{\circ}$ 的扫描范围, 0.38° 水平角分辨率, 150 m 测距量程和 20 Hz 的扫描频率, 可实现对果园障碍物信息的高效获取, 保证运输机器人定点导航的安全性。

(3) 控制模块

双导航模式果园运输机器人的控制模块如图 1 所示, 整个机器人由嵌入式主板进行控制, 嵌入式主板采用 ARM A57 处理器, 8 GB 内存, 32 GB 硬盘。远程监控平台借助 WiFi 通信模块与嵌入式主板连接, 可远程操纵运输机器人并监控其工作状态。此外, 遥控手柄采用蓝牙与嵌入式主板通信, 根据遥控按钮的方向和力度, 向嵌入式主板发布调整底盘的转向和行驶速度指令。嵌入式主板通过串口向底层伺服控制器发送速度控制信息, 底层伺服控制器通过串口通信的方式向嵌入式主板反馈底盘实时速度信息。

(4) 运动及动力模块

双导航模式果园运输机器人的履带式底盘具有较好的地形适应性和越障能力以及转向灵活等优点。苹果园运输机器人采用履带式差速驱动的运动模式, 左右驱动轮由独立的伺服电机进行控制, 驱动轮与伺服电机之间连接有减速器, 最大行驶速度为 1.2 m/s。运输机器人工作时底层伺服控制器通过控制伺服电机的转速使运输机器人运动。

采用 48 V 锂电池为运输机器人提供动力, 充电电源电压为 220 V。

双导航模式机器人各模块硬件安装的 3D 示意图和实物图如图 2 所示, 改装后运输机器人车身长 1.175 m, 宽 0.835 m, 高 0.470 m, 额定负载 200 kg。

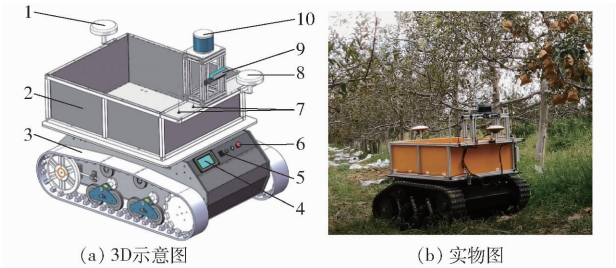


图 2 双导航模式果园运输机器人整体结构图
Fig. 2 Overall structure of dual navigation mode orchard transport robot

1. RTK-GNSS 定向天线 2. 装载箱 3. 履带底盘 4. 屏幕 5. 充电口 6. 急停按钮 7. WiFi 天线 8. RTK-GNSS 定位天线 9. D435i 深度相机 10. 激光雷达

1.2 软件系统设计

双导航模式果园运输机器人的软件系统由命令交互层、信息处理层和执行层共 3 个模块构成, 软件系统结构如图 3 所示。

命令交互层是基于 Linux 系统的模式选择程

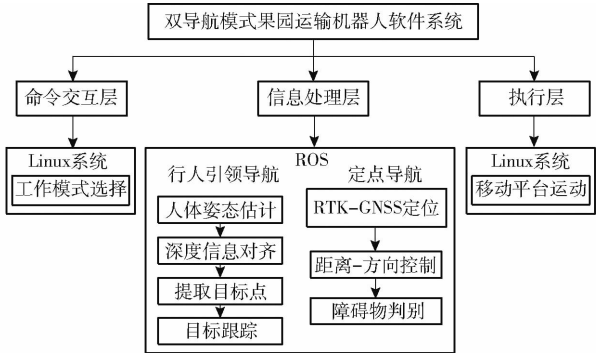


图 3 双导航模式果园运输机器人软件系统结构图
Fig. 3 Dual navigation mode orchard transport robot software system structure diagram

序, 可根据不同的需求选择运输机器人的工作模式, 目前可选择的工作模式有两种: 行人引领导航模式, 根据设定的领航员手势命令, 启动行人引领导航功能, 即机器人会在视觉范围内跟随第一个向相机挥右手的行人行走; 定点导航模式, 机器人根据用户输入的目标点到达果园内任意位置。信息处理层为基于 ROS (Robot operating system) 的行人引领导航及定点导航程序, 在行人引领导航模式下实时获取领航员目标点的信息并调整跟踪运动的速度, 在定点导航模式下实时获取机器人位姿、障碍物信息并调整自主运动的速度。执行层为基于 Linux 系统的移动平台控制, 将信息处理层向底层伺服控制器输出的速度信息, 转换为电机转速信息, 实现采后果实的自主运输。

2 自主导航功能实现原理

双导航模式果园运输机器人的自主导航功能主要通过软件系统的信息处理层模块来实现, 该信息处理层模块的软件运行如图 4 所示。

在行人引领导航运输模式中有人体姿态估计、深度信息对齐、提取目标点和目标跟踪 4 个步骤, 人体姿态估计借助了 OpenPose^[14] 开源算法包获取人体实时运动姿态的骨骼关键点信息, 缩短软件开发周期, 节省开发成本; 再通过骨骼关键点计算得到人体中心点, 匹配中心点图像信息和深度信息, 获取带有深度信息的目标点; 最后利用比例-积分 (Proportional integral, PI) 控制实现目标跟踪功能。定点导航自主运输模式有 D-A 控制和障碍物判别 2 个步骤, 机器人匀速朝目标点方向前进时, 根据 RTK-GNSS 提供位姿信息不断调整到达目标点的方向, 且根据有无障碍物时判别是否急停, 最终输出机器人下一时刻的速度信息, 直至到达目标点。

2.1 行人引领导航

在行人引领导航运输模式中, 实时定位目标

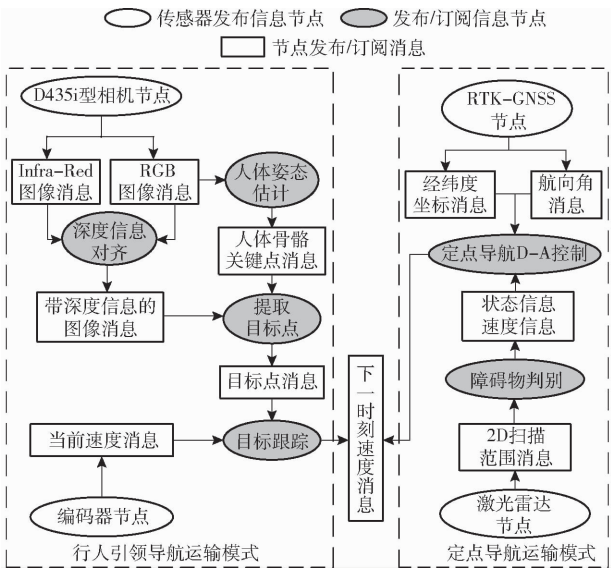


图4 信息处理层软件运行流程示意图

Fig.4 Information processing layer software operation flow diagram

是顺利实现导航的核心难点,尤其在果园多人采摘场景下,机器人需要辨认出领航员。目前基于视觉的方法在领航员的定位以及多人环境中分辨领航人员方面具有很大的潜力^[15],与其他视觉识别人体姿态算法相比,OpenPose^[16]是基于深度学习的实时多人二维姿态估计算法,并以卷积神经网络为框架开发了开源库,能为实现运输机器人行人引领导航节省大量的开发时间。因此,本文行人引领导航模式的开发是将相机采集的RGB图像先通过OpenPose算法获得多人2D人体姿态估计后,利用深度信息对齐获取多人2D人体姿态图像的深度信息,再根据特征手势(挥动右手)在多人场景中提取出领航员姿态的中心点,最后根据该中心点的位置信息进行目标跟踪控制实现行人引领导航。

(1) 人体姿态估计

OpenPose 先通过卷积神经网络得到人体特征图,分别通过 CMP (Part detection confidence maps) 得到 25 个关节点 (如颈、肩、腕、腰、膝、踝等) 的置信度,PAFs(Part affinity fields)得到 25 个关节点在骨架中的走向(关节点位置和方向的 2D 矢量),即肢体的置信度。为减少计算量,利用贪婪分析算法 (Greedy parsing algorithm),对置信度信息进行编码和存储,再采用图论法对关节点和肢体的置信度信息进行二分法匹配 (Bipartite matching),并使用匈牙利算法 (Hungarian algorithm) 得到关节点和肢体最优化的匹配,即将同一个人的关节点连接起来,最终将每个人都拼接成由 25 个关节点组合而成的人体骨架。详细的实施步骤参见文献[14,16]。

(2) 深度信息对齐

通过人体姿态估计输出的是多个人的 RGB 彩色图像信息,由于 D435i 相机采集 RGB 彩色图像与 Infra-Red 红外图像的镜头位置不同,所以这两者数据的空间坐标系是不同的,需要将 RGB 的图像彩色视频流与 Infra-Red 图像的深度流对齐得到 RGB 彩色图像像素点的深度信息。即通过颜色流和深度流不同的分辨率,获取深度信息的深度比例单位,删除图像中深度距离超过最大值的像素,根据颜色和深度的框架集,将深度框与颜色框对齐,获取对齐的帧并验证两帧是否有效,最后用该信息渲染图像。

(3) 提取目标点

通过在人体姿态估计中得到的多个由 25 个关节点组合而成的人体骨架,经过深度信息对齐后,多个 25 个关节点组成的人体骨架 RGB 图像具备了深度信息。如图 5a 所示,其中第 2、3、4 个骨架关键点分别为人体的右肩、右肘和右手腕,第 1、5、6 骨架关键点分别为人体的脖颈、右髋和左髋。当在图像中出现多个人时,设置第 1 个在视觉相机识别范围内并抬起右手挥动的人为运输机器人跟踪目标。然后提取该组人体骨骼的重心关键点 1、5、6,并在 1、5、6 这个三角形中寻找重心点作为目标点,最后输出目标点的当前位置信息

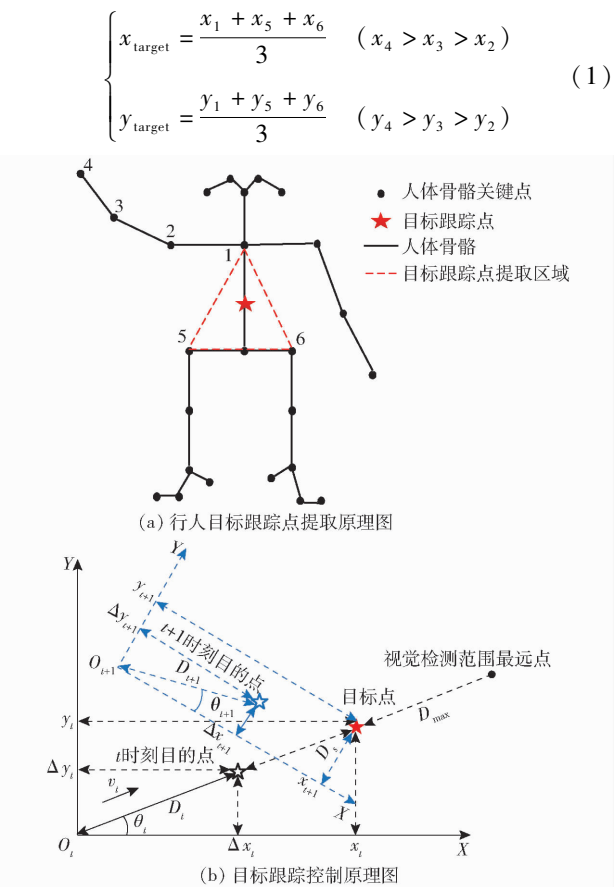


图5 行人引领导航原理图

Fig.5 Pedestrian led navigation schematic

式中 x_{target} ——机器人实时观测到的目标点横坐标
 y_{target} ——机器人实时观测到的目标点纵坐标
 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ ——人体骨架关键点 1、2、3、4、5、6 的横坐标
 $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6$ ——人体骨架关键点 1、2、3、4、5、6 的纵坐标

(4) 距离-方向 (Distance - angle, D - A) 目标跟踪控制

根据提取的目标点位置信息,采用距离-方向的方法对目标点进行跟踪。行人引领导航目标跟踪控制原理如图 5b 所示,以机器人相机为原点建立 t 时刻目标跟踪坐标系 XO_tY , $t+1$ 时刻目标跟踪坐标系 $XO_{t+1}Y$, $x_{\text{target}}, y_{\text{target}}$ 为机器人实时观测到的目标点坐标,目标跟踪的安全距离为 D_s 。在 t 时刻时,相机观测到目标点横纵坐标值分别等于 x_t 和 y_t ,即目标点与机器人的直线距离为 $(x_t^2 + y_t^2)^{1/2}$,机器人的运动方向为目标点所在方向 θ_t ,机器人 t 时刻的实际目的点横纵坐标为 Δx_t 和 Δy_t (可由目的点与 t 时刻机器人的距离 D_t 与 θ_t 计算得到)。 $t+1$ 时刻时,相机观测到目标点 $x_{\text{target}}, y_{\text{target}}$ 横纵坐标值分别等于 x_{t+1} 和 y_{t+1} ,目标点与机器人的直线距离为 $(x_{t+1}^2 + y_{t+1}^2)^{1/2}$,机器人 $t+1$ 时刻目的点横纵坐标为 Δx_{t+1} 和 Δy_{t+1} ,机器人沿着目标点 θ_{t+1} 方向跟踪目标,并根据当前时刻运动速度与初设运动速度的差值,来调整下一时刻运输机器人的直行线速度 v_{t+1} 和旋转角速度 ω_{t+1} ,实现机器人行驶速度随着领航员速度的变化而变化。根据运动学可得出, t 时刻机器人当前目的点与观测到的目标点的距离、方向以及线加速度、角加速度的计算式为

$$\begin{cases} D_t = \sqrt{x_t^2 + y_t^2} - D_s \\ \theta_t = \arctan \frac{y_t}{x_t} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{v} = \frac{v_t - v_o}{\Delta t} \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_t - \omega_o}{\Delta t} \end{cases} \quad (3)$$

式中 v_t ——编码器测量的机器人 t 时刻线速度
 ω_t ——编码器测量的机器人 t 时刻角速度
 v_o ——机器人行驶时设置的初始线速度
 ω_o ——机器人行驶时设置的初始角速度
 Δt ——时间差

领航员匀速行驶时, $\dot{v}$ 和 $\dot{\omega}$ 为 0。当满足 $D_s < D_t < D_{\text{max}}$ 条件时,机器人对行人前方的目的点进行目标追踪。不满足条件时, $t+1$ 时刻的线速度 v_{t+1} 和角速度 ω_{t+1} 为 0。其中机器人顺时针旋转 ω_{t+1} 为正,反之为负。其详细计算式为

$$\begin{cases} r_{\min} = \min(D_{\max}, D_t) \\ v_{t+1} = k_{pv} \dot{r}_{\min} \cos \theta_t + v \Delta t & (\theta_t = 0) \\ \omega_{t+1} = k_{p\omega} \omega_t + k_{i\omega} \sum_{j=1}^t \theta_j + \dot{\omega} \Delta t & (\theta_t \neq 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中 $r_{\min}$ ——目标跟随距离
 θ_j ——从开始到时刻 t 机器人旋转角度
 k_{pv} ——运输机器人 PI 控制器的线速度比例增益
 $k_{p\omega}$ ——运输机器人 PI 控制器的角速度比例增益
 $k_{i\omega}$ ——运输机器人积分控制参数

运输机器人 $t+1$ 时刻目标跟踪的运动距离和角度计算式为

$$\begin{cases} \Delta x_{t+1} = \Delta x_t + v_{t+1} \cos \theta_{t+1} \Delta t \\ \Delta y_{t+1} = \Delta y_t + v_{t+1} \sin \theta_{t+1} \Delta t \\ \theta_{t+1} = \theta_t + \omega_{t+1} \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

式中 Δx_{t+1} —— $t+1$ 时刻目的点的横坐标
 Δy_{t+1} —— $t+1$ 时刻目的点的纵坐标
 上述行人引领导航功能算法的实现流程如图 6 所示。

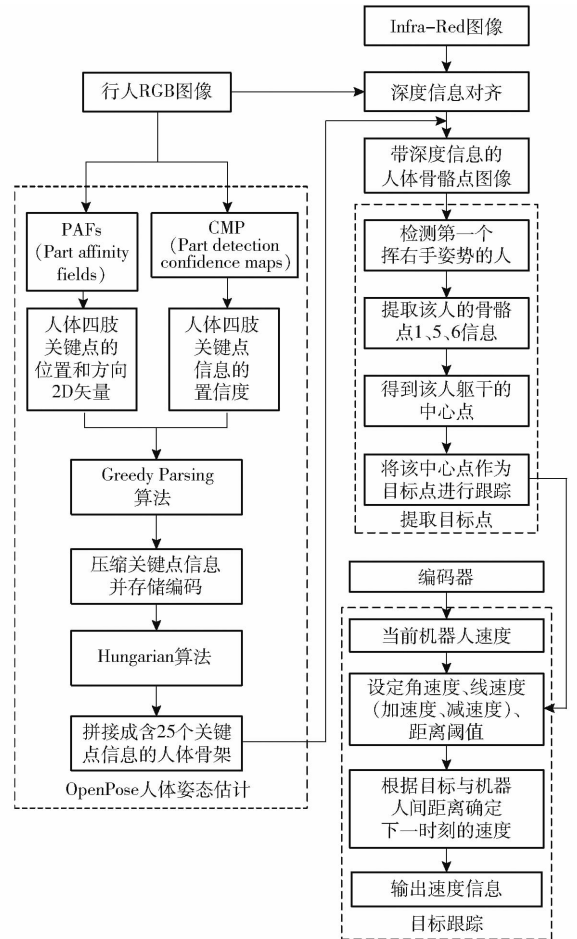


图6 行人引领导航功能实现流程图
 Fig.6 Implementation flow of pedestrian led navigation function

2.2 定点导航

目前 RTK-GNSS 导航定位技术在大田中的应用已经基本成熟^[17-18],实现了复杂农田环境下农业机械自动导航^[19],田间试验作业精度可达到厘米级^[20]。随着卫星定位精度的不断提高,有学者尝试将该技术应用在果园环境中,如熊斌等^[21]研制的 BDS 果园施药机,ZACHARY 等^[22]研制的果园自动收获作业,试验结果表明基于 RTK-GNSS 的机器人能满足果园作业要求。考虑到果园遮挡对 RTK-GNSS 定位精度有一定的影响,从而影响运输机器

人定点导航的精度,本文根据 JJF 1118—2019《全球定位系统(GPS)接收机(测地型和导航型)校准规范》,在果园中对运输机器人 CGI-410 型定位导航模块的精度进行测量,在机器人距离基站 5~50 m 的试验区内,每间隔 5 m 选取差分定位点测量点,每次测量时间间隔 30 min,如图 7 所示,测试结果表明:在果园试验区基于 CGI-410 型定位导航模块的果园运输机器人静态定位漂移不明显。因此,本文设计运输机器人在果园定点导航的位姿信息由 CGI-410 型定位导航模块直接提供。

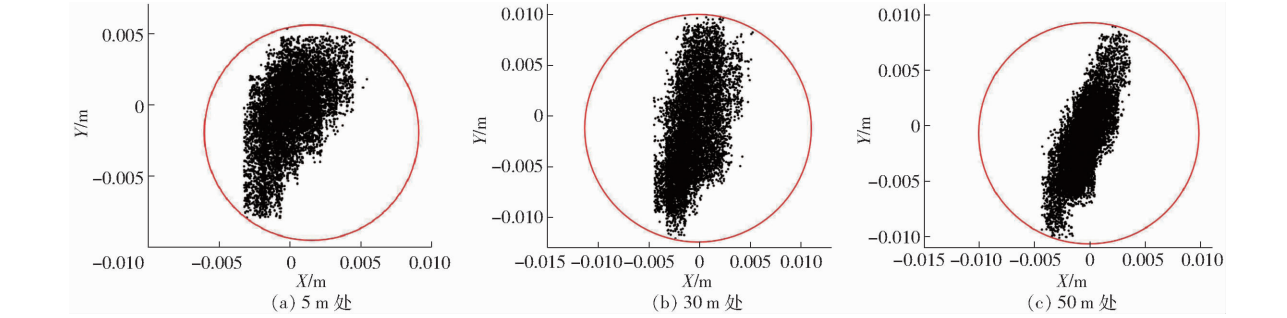


图 7 基于 CGI-410 型定位导航模块的果园运输机器人静态定位漂移测试结果
Fig. 7 Static positioning drift test results of RTK-GNSS-based orchard transport robot

目前基于 RTK-GNSS 的割草机器人^[23]、喷药机器人^[24]、巡检机器人^[25]导航时,其作业路径通常是固定的,即机器人以作业轨迹为追踪对象,沿着设定好的路径行走,并在路径两端停车。但机器人的位置会根据果园内果农实际作业情况发生变化,从而导致运输机器人作业时的停驶点不同,作业路径无法固定。如图 8 所示,果园内有多个不同的停驶点,果园内果农可随意按照箭头运动,机器人根据果园内果农运动的方向,停驶在不同停驶点上(如 3、5、7、10),再从这些不同的停驶点返回至地头 1 时,会使机器人有 4 种不同长度的行驶路径(如行驶路径 1、2、3、4)。而果园环境无法大规模铺设类似于植物工厂物流搬运机器人^[26]行走的轨道。因此,为保证运输机器人作业时到达给定的任意目标点,本文以目标点为追踪对象,运输机器人基于 RTK-GNSS 导航采用距离-方向(Distance-angle, D-A)跟踪控制的方法,输入由 RTK-GNSS 静态时测得的目标点经纬度信息后,先后计算当前点和位置点的方

向差和距离,并以该方向差和距离与设定阈值的关系为判断条件,使机器人到达给定的任意目标点,并在导航过程中加入障碍物判别的步骤,避免碰撞行人。

(1) 距离-方向(Distance-angle, D-A)控制

如图 9 所示,用 RTK-GNSS 测量提供的世界大地坐标建立坐标系 BOL,运输机器人在该坐标系上的位置点坐标唯一,点坐标由经度坐标 B 和纬度坐标 L 组成。先通过经纬度坐标计算目标点和机器人当前位置点连线与正北方向的夹角 θ_{target} ,并根据 θ_{target} 与当前位置点在正北方向夹角 θ_{current} (由 RTK-GNSS 根据机器人实际情况测量得到)角度差的绝对值 θ ,调整机器人的角速度(设定机器人逆时针旋转方向为正),使机器人当前位置点方向与目标点所在方向一致。其中目标点与当前位置点连线与正北方向的夹角 θ_{target} 的计算式为

$$\theta_{\text{target}} = \begin{cases} \arctan\left(\frac{B_{\text{target}} - B_{\text{current}}}{L_{\text{target}} - L_{\text{current}}}\right) \frac{180}{\pi} & (B_{\text{target}} - B_{\text{current}} \geq 0, L_{\text{target}} - L_{\text{current}} \geq 0) \\ \arctan\left(\frac{-(L_{\text{target}} - L_{\text{current}})}{B_{\text{target}} - B_{\text{current}}}\right) \frac{180}{\pi} + 90 & (B_{\text{target}} - B_{\text{current}} \geq 0, L_{\text{target}} - L_{\text{current}} < 0) \\ \arctan\left(\frac{-(B_{\text{target}} - B_{\text{current}})}{-(L_{\text{target}} - L_{\text{current}})}\right) \frac{180}{\pi} + 180 & (B_{\text{target}} - B_{\text{current}} < 0, L_{\text{target}} - L_{\text{current}} < 0) \\ \arctan\left(\frac{L_{\text{target}} - L_{\text{current}}}{-(B_{\text{target}} - B_{\text{current}})}\right) \frac{180}{\pi} + 270 & (B_{\text{target}} - B_{\text{current}} < 0, L_{\text{target}} - L_{\text{current}} \geq 0) \end{cases} \quad (6)$$

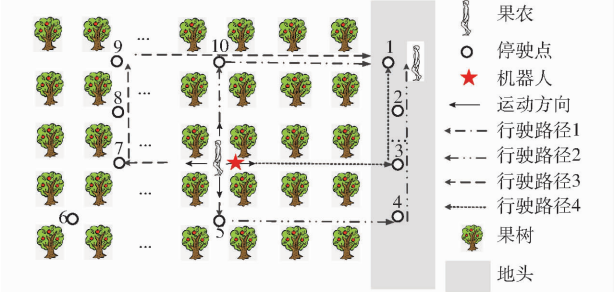


图 8 运输机器人在果园作业场景示意图
Fig. 8 Schematic of transport robot operating in orchard

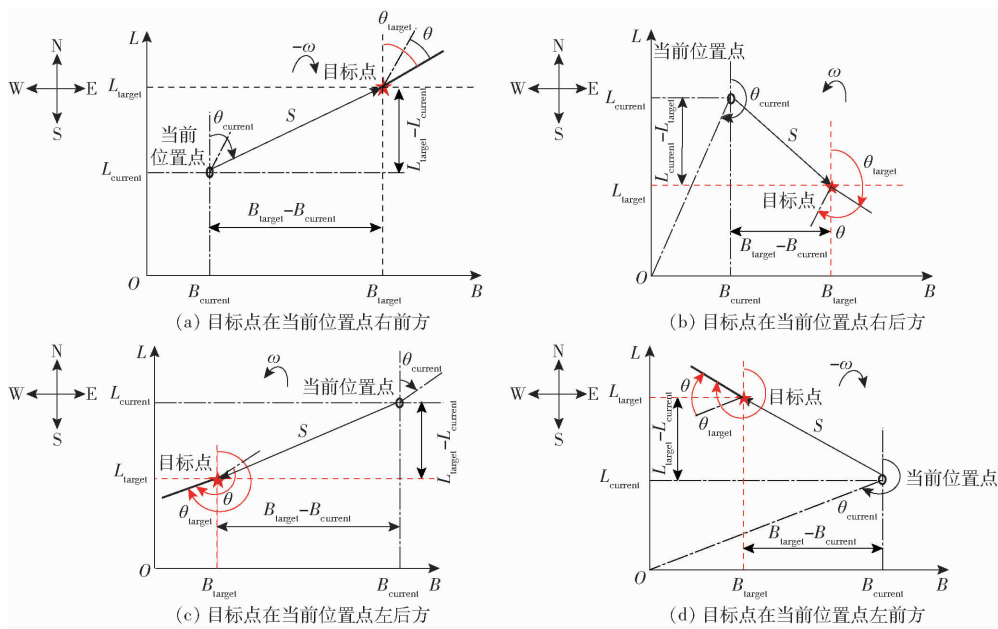


图 9 定点导航距离-方向 (Distance - angel, D - A) 控制原理图

Fig. 9 Distance - angel (D - A) control schematic for fixed-point navigation

式中 B_{target} ——目标点的经度坐标
 L_{target} ——目标点的纬度坐标
 B_{current} ——当前位置点的经度坐标
 L_{current} ——当前位置点的纬度坐标

式(6)的 4 个方程分别对应图 9a、9b、9c、9d。

$$S = \left\lceil 6\,378\,137 \left(2 \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{(L_{\text{current}} - L_{\text{target}}) \pi}{180} \right)} + \cos \left(L_{\text{current}} \frac{\pi}{180} \right) \cos \left(L_{\text{target}} \frac{\pi}{180} \right) \sin^2 \left(\frac{(B_{\text{current}} - B_{\text{target}}) \pi}{180} \right) \right) \right) \right\rceil \quad (7)$$

式中 $\lceil \cdot \rceil$ ——取整函数

式中 6 378 137 为地球半径,单位 m。为减少 UTM 坐标转换的计算量,提高程序运行速度,在计算机机器人的距离和方向差信息时均采用 RTK - GNSS 提供的经纬度信息直接计算。

定点导航时分别以目标点方向 θ_{target} 与当前位置方向 θ_{current} 差值绝对值 θ ,当前位置点与目标点之间的距离 S (以机器人车身长度为参考,设定 S 判断阈值为 1 m),先后作为定点导航时输出角速度和线速度的判定条件。根据表 1 执行定点导航参数设定规则,当角速度 ω 为正时,机器人逆时针旋转,角速度 ω 为负时,机器人顺时针旋转。

如表 1 所示,先计算目标点方向 θ_{target} 与当前位置方向 θ_{current} 的角度差绝对值 θ ,当 $|\theta_{\text{target}} - \theta_{\text{current}}| \leq 1^\circ$ 时,角速度 ω 为 0 rad/s,当 $|\theta_{\text{target}} - \theta_{\text{current}}| > 1^\circ$ 时,判断机器人转动的方向,机器人按照设定的角速度参数行驶,使机器人当前位置点与目标点方向的角度差 $|\theta_{\text{target}} - \theta_{\text{current}}| \leq 1^\circ$ 。再计算位置点与目标点之间的距离 S ,当 $S \leq 1$ m 时,机器人线速度 v 为 0 m/s,当机器人 $S > 1$ m 时,机器人按照设定的线速

再参考文献[27]中的两点经纬度坐标间距离求解公式(该公式将地球视为一个正球体,多用于无法进行大运算量的场合中),计算机器人当前位置点与目标点之间取整后的距离 S

表 1 定点导航参数设定规则

Tab. 1 Fixed-point navigation parameter setting rules

条件 1	角速度参数
$ \theta_{\text{target}} - \theta_{\text{current}} \leq 1^\circ$	0 rad/s
$ \theta_{\text{target}} - \theta_{\text{current}} > 1^\circ$	$-\omega; \theta_{\text{target}} - \theta_{\text{current}} < 180^\circ, \theta_{\text{target}} > \theta_{\text{current}}$
	$\omega; \theta_{\text{current}} - \theta_{\text{target}} < 180^\circ, \theta_{\text{target}} < \theta_{\text{current}}$
	$\omega; \theta_{\text{target}} - \theta_{\text{current}} \geq 180^\circ, \theta_{\text{target}} > \theta_{\text{current}}$
	$-\omega; \theta_{\text{current}} - \theta_{\text{target}} \geq 180^\circ, \theta_{\text{target}} < \theta_{\text{current}}$
条件 2	线速度参数
$S \leq 1$ m	0
$S > 1$ m	v

度 v 开始行驶。若在运输机器人追踪目标点的过程中,出现 $|\theta_{\text{target}} - \theta_{\text{current}}| > 1^\circ$ 时,则采用角速度参数修正方向,直至运输机器人到达目的点。

(2) 避障

为减少安全隐患的发生,获取激光雷达垂直方向 $\pm 3^\circ$,水平方向 $\pm 90^\circ$,扫描距离在[0.15 m, 50 m]的信息,并将该范围划分为多个等分区域。如图 10 所示,当等分区域中任何一个区域内有物体(红色星号)遮挡,则雷达扫描距离小于 1 m 即判定存在障碍

物,输出速度为 0 m/s,机器人急停;反之机器人继续行走。

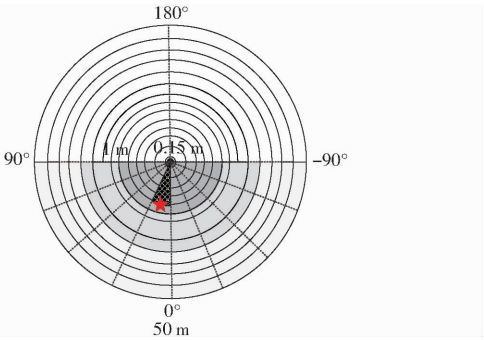


图 10 避障原理图

Fig. 10 Obstacle avoidance schematic

3 果园运输试验

3.1 果园环境

选取位于陕西省渭南市白水县杜康镇西北农林科技大学白水苹果实验站西 400 m 处非标准果园,该果园的面积约 1 hm²,果园内种植了 14 行生长 15 年左右的红富士苹果树,苹果树行间距为 4 m 左右,苹果树株距为 3 m 左右,高约为 3 m,苹果树单行长 178.1 m。如图 11 所示,部分果树树干的周围地面上长有杂草。试验时间为 2020 年 8 月 24 日—9 月 5 日,此时为果实成熟期,果园内果树枝干交叉,部分结果的果树枝干因受重力影响距离地面较近,尚未摘取苹果的果树,树下沿着果树行方向的地面铺设反光薄膜,用于苹果上色。为保证运输机器人顺利通行,选择园内枝干距离地面约为 1.2 m 的果树行进行试验。



图 11 果园试验环境

Fig. 11 Orchard test environment

3.2 行人引领导航试验

运输机器人在果园中的行人引领导航试验分为两步,先对运输机器人在多个目标场景下顺利跟踪领航员进行测试,再对运输机器人跟随领航员行间作业时的目标跟踪误差进行测试。试验参考 ISO 15623—2013《运输信息和控制系统标准》和果园行株距,将目标跟踪的安全距离 D_s 设为 1 m,目标距机

器人最大距离的阈值 $D_{\max}$ 设为 5 m。且在测试行人引领导航时,发现机器人目标跟踪效果最好的行驶速度为 0.5 m/s,因此设定机器人在跟随领航员的初始速度为 0.5 m/s。

为测试在果园多目标场景下能准确识别出领航员,参考文献[28–29]对运输机器人在多目标场景下识别领航员设计试验,如图 12a 所示,分别在果园天晴、多云、傍晚 3 组不同光线条件下,运输机器人目标跟踪范围内(5 m)出现多个行人时,领航员在距离机器人 1 m 处向相机挥动右手后,机器人识别出挥动右手的领航员(红色星号)并跟随其行走,直至机器人跟随领航员走完一行跨行进入下一行结束,其中机器人跟随领航员行走时其他行人的位置和运动状态为随机选择。每组试验重复测试 3 次,试验视频由架设在机器人深度相机上方的摄像头进行第一视角录制,最后参考文献[30]计算目标识别准确度和目标识别精度。

$$T_a = \frac{T_{tp} + T_{tn}}{T_{tp} + T_{tn} + T_{fp} + T_{fn}} \times 100\% \tag{8}$$

$$T_{precision} = \frac{T_{tp}}{T_{tp} + T_{fp}} \times 100\% \tag{9}$$

式中 T_{tp} ——实际为领航员并识别出领航员的样本
 T_{tn} ——实际为行人并识别出行人的样本
 T_{fn} ——错误识别出行人的样本
 T_{fp} ——错误识别领航员的样本

参考文献[31–32]对运输机器人跟随领航员行间作业时的目标跟踪误差设计试验。如图 12b 所示,在行人引领导航模式中,分别在果园晴天、多云、傍晚 3 组光线条件下,测试在果园环境中领航员非匀速地运动结束后,运输机器人与领航员之间 D_t 的变化过程。每间隔 5 m 领航员停驶后,测量一次机器人前方相机与领航员当前位置的直线距离 D_{target} ,最后根据 D_{target} 和 D_s 得到 D_t ,根据设计的试验步骤重复 3 组记录 D_t 值。机器人跨行跟随行人作业时,行人沿着固定轨迹行驶,机器人以 0.5 m/s 跟随,行人每移动 1 步(约 0.8 m)测量 1 次 D_{target} ,行人共计移动 10 步,试验步骤重复 3 次记录 D_t 值。

运输机器人在果园作业时的行人引领导航试验场景如图 13 所示(①~⑧为目标动态识别与跟踪的顺序,橘色虚线框为领航员,黄色点划线框为其他行人),在不同光线条件下机器人能够在多个行人中识别出视觉范围内的领航员(向相机挥右手示意的行人),并跟踪领航员向前行走,且不受旁边突然经过的行人干扰,先后经过旁边的行人,顺利进入下一个视觉识别范围,继续跟踪领航员行走,直至完成测试。

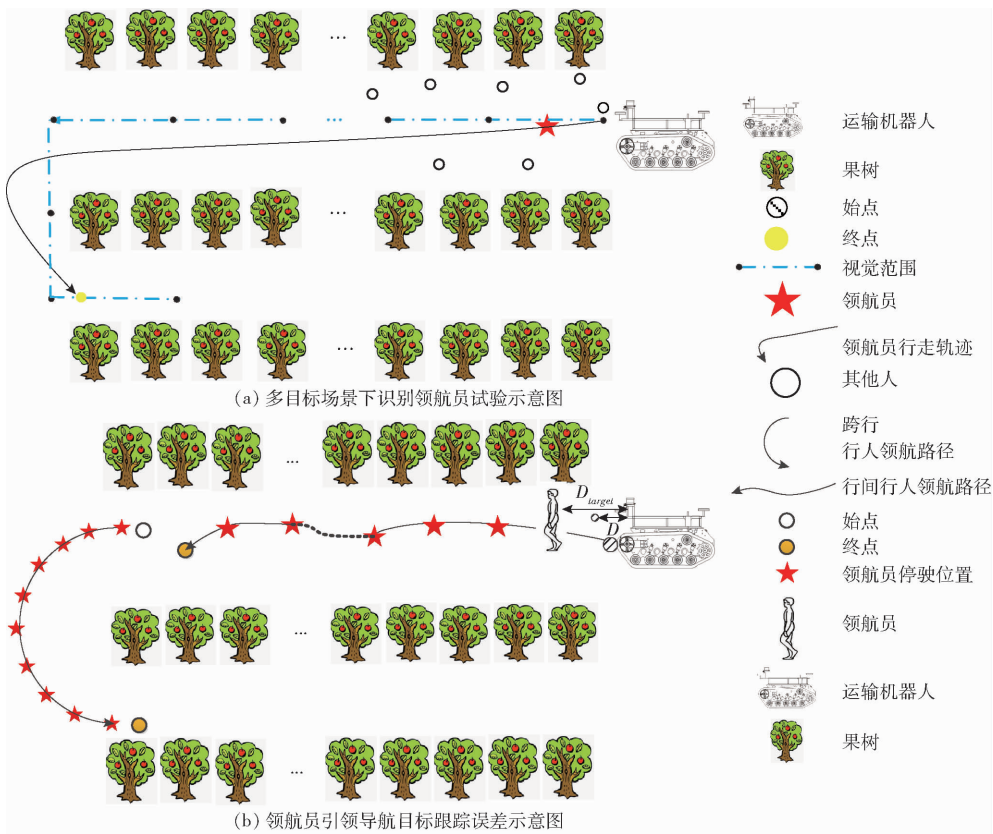


图 12 果园运输机器人行人引领导航试验示意图

Fig. 12 Schematics of transport robot orchard pedestrian led navigation experiment

(1)多目标场景下领航员识别

果园多目标场景下识别领航员的试验结果如表 2 所示,对比不同环境条件下的跟踪准确度和跟踪精度,发现机器人在视觉范围内的目标跟踪准确度和跟踪精度都能达到 100%,但晴天时机器人目标跟踪反应较慢,会出现停顿现象,导致运行的时间较长。这是因为晴天时光线过强,强光导致深度相机投影图像较差,从而使图像处理的速度变慢,但在多云或傍晚时,相机受强光影响小,特别是在傍晚光线较弱时,机器人反应速度最快。

(2)机器人目标跟踪误差

运输机器人跟随领航员果园作业时的目标跟踪误差结果如表 3、4 所示。从表 3 中可以看出,机器人以 0.5 m/s 速度行驶时,行人停驶后机器人的目标跟踪误差平均值及标准差均小于 9 cm 和 4 cm。从表 4 中可以看出,机器人以 0.5 m/s 速度行驶时,行人停驶目标跟踪误差的平均值及标准差均小于 6 cm 和 3 cm。即能够在安全的基础上,满足行人引领导航机器人运输的需求。横向对比表 3、4 相同速度下不同距离的停驶点,发现采样距离越短跟踪误差越小。纵向对比表 3、4 中相同速度下多次目标跟踪误差及其标准差,跟踪误差会随着试验次数增多而增大,这可能是因为行人运动速度不同,而在目标跟踪控制中对编码器提供的数值进行了积分,导致

累积误差增大。

3.3 定点导航试验

定点导航试验主要是用于测试在果园内,当果农随机输入指定目标点后,采用 D - A 控制方法机器人能顺利到达指定目标点。且在定点导航过程中存在障碍物时,依然能正常到达目标点。该试验分为两部分,先测试定点导航的目标跟踪功能,再测试避障功能。参考文献[32 - 33]对运输机器人的定点导航运输功能设计了试验,果园试验场景如图 14a 所示,试验步骤示意图如图 14b。设定机器人在定点导航模式下以 0.5 m/s 自主行驶,根据果园内果树生长情况,随机地选择多个目标点,使机器人实时计算当前位置点到目标点的位姿信息,利用 D - A 控制到达给定目标点,机器人到达目标点的先后顺序为 A1、B1、B2、A2、A3、B3、B1、A1,重复试验 3 组,记录运输机器人到达给定目标点的位置信息。

为保证机器人自主运输时避免与行人等障碍物发生碰撞,参考文献[31]设计了定点导航避障试验,果园试验场景如图 14c 所示,试验步骤示意图如图 14d。试验选取在机器人行驶路径上每隔 5 m 出现一次行人(常见障碍物),共设置 4 次,当机器人检测到障碍物停驶后再移开障碍物使机器人继续行走,直至到达目标点。在相同路径上重复进行3组



图 13 不同光线条件下行人引领导航试验场景

Fig. 13 Pedestrian led navigation test scenarios under different lighting conditions

表 2 多目标场景下的领航员识别试验结果
Tab.2 Experimental results of navigator identification
in multi-target scenarios

组号	相机 视点	行人 状态	机器人 运行时 长/s	T_{ip}	T_{in}	$T_a /$ %	$T_{precision} /$ %
1	水平	移动/静止	438	13 127	39 381	100	100
			387	11 598	34 795	100	100
			386	11 568	34 705	100	100
2	水平	移动/静止	244	7 313	21 938	100	100
			265	7 942	23 826	100	100
			270	8 092	24 276	100	100
3	水平	移动/静止	119	5 964	17 892	100	100
			242	7 253	21 758	100	100
			223	6 683	20 050	100	100

试验,每组试验机器人共停驶 5 次。

(1) 多个目标定点导航试验结果

选用绝对误差和相对误差来评价多点导航的试验结果^[30],先计算 3 组试验每次试验之间的绝对误差均值和标准差,结果如表 5 所示,再计算 3 组试验

相对误差的平均值和标准差,结果如表 6 所示。

由表 5、6 可知,机器人果园定点导航的绝对误差及其标准差分别小于 7 cm 和 0.5 cm。相对误差及其标准差分别小于 13 cm 和 1.5 cm,能够满足果园采后运输的需求。分析 8 个定位点 3 组试验的绝对误差的平均值和标准差以及相对误差的平均值和标准差,纵向对比 8 个定位点的相对误差和绝对误差,发现当两定位点之间距离较远时,导航误差变化明显。对照图 15 中机器人实际行走的轨迹,认为出现这种现象的原因可能是没有考虑机器人在果园中出现的滑移,缺少对过大横向偏差的限制,从而导致机器人长距离行驶的横向偏离较大,而机器人在果园跨行行驶转向时再次加大了这种横向偏差。

(2) 定点导航避障试验结果

试验结果如图 15 所示,机器人在设有障碍物的路段上能安全避障,即停在原地不同,当移走障碍物后机器人继续驶向目标点,且在机器人行驶时横向偏差会随着航向不断变化逐渐减少,直至到达目标点。其中机器人行驶在路径中间时的横向偏差最

表 3 行间作业时目标跟踪误差

Tab.3 Target tracking error in inter-row transportation

组号	采样距离/m										平均值	标准差
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50		
1	0.12	0.11	0.07	0.01	0.08	0.09	0.07	0.09	0.04	0.03	0.071	0.035
	0.14	0.09	0.03	0.07	0.08	0.03	0.03	0.12	0.09	0.05	0.073	0.039
	0.05	0.09	0.09	0.1	0.06	0.12	0.02	0.13	0.11	0.04	0.081	0.037
2	0.07	0.08	0.01	0.08	0.04	0	0.05	0.02	0.02	0.01	0.038	0.030
	0.04	0	0.08	0.04	0.01	0.03	0.07	0.03	0.08	0.07	0.045	0.029
	0.09	0.03	0.07	0	0.07	0.05	0.06	0	0.07	0.02	0.046	0.032
3	0.05	0.03	0.06	0.01	0.07	0.01	0.07	0	0.01	0.01	0.032	0.028
	0.09	0.04	0.02	0.06	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.03	0.034	0.024
	0.08	0.03	0.05	0.01	0.03	0.06	0.06	0.04	0.04	0	0.040	0.024

表 4 跨行作业时目标跟踪误差

Tab.4 Target tracking error in interline turn transportation

组号	采样距离/m										平均值	标准差
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	0.05	0.01	0.04	0.07	0.05	0.06	0.02	0.01	0.08	0.07	0.046	0.025
	0.02	0	0.07	0.06	0.03	0.07	0.07	0.07	0.08	0.04	0.051	0.027
	0.04	0.05	0.05	0.05	0.07	0.03	0.08	0.07	0.07	0.04	0.055	0.016
2	0.02	0	0.01	0	0.03	0.02	0.02	0.02	0	0.04	0.016	0.013
	0.05	0.01	0.05	0.02	0.01	0.03	0.01	0	0.02	0.03	0.023	0.017
	0.03	0	0.07	0.02	0.03	0	0.02	0.01	0.02	0.01	0.021	0.020
3	0.01	0.02	0.03	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.014	0.008
	0.02	0.03	0	0.02	0.01	0.05	0	0.01	0.02	0	0.016	0.016
	0.05	0.02	0.02	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.017	0.013

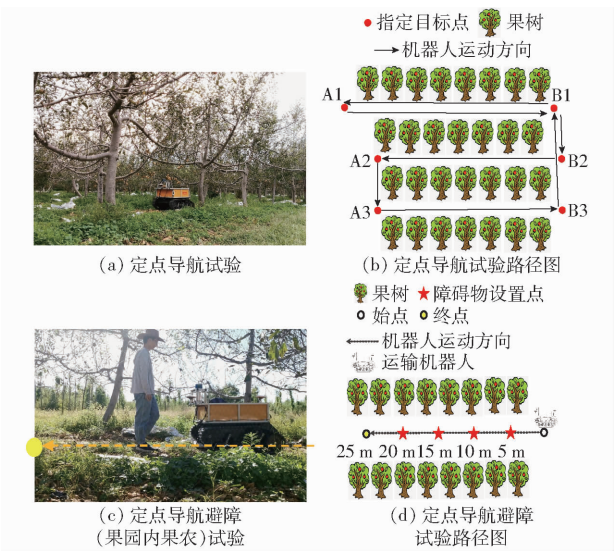


图 14 运输机器人果园定点导航试验

Fig. 14 Transport robot orchard spot navigation experiment

大,停驶在目标点的航向偏差变化最大。分别计算 3 组试验中机器人行驶路径与理想路径的横向航向偏差均值、标准差,结果如表 7 所示。

从表 7 可以看到,机器人行驶路径与理想行驶路径间的横向偏差的均值、标准差分别小于 56 cm 和 0.54 cm,航向偏差均值和标准差分别小于 8°和 1.6°。这表明机器人能够在有障碍物的环境中,采

用 D - A 控制和急停避障的方法安全地到达给定目标点,满足运输机器人果园自主运输的需求。纵向对比 3 组试验在相同停驶点的横向和航向偏差,发现最后一组的数据最小,这可能是因为重复行驶过的道路较为平顺,利于机器人依赖 D - A 控制到达目标点。

4 结论

- (1)针对现有果园采后运输设备智能化程度偏低的问题,设计了一种行人引领导航和定点导航的双模式小型果园运输机器人。
- (2)果园行人引领导航试验表明,该运输机器人在苹果园中根据设定手势执行行人引领导航功能时,在多人场景下能正常识别领航员,跟踪领航员的误差平均值及标准差均小于 9 cm 和 4 cm,可以满足机器人在果园跟随行人运输果实或物资的需求。
- (3)果园定点导航试验表明,该运输机器人采用 D - A 控制方法在苹果园中进行定点导航时,到达不同目标点的绝对误差及标准差分别小于 7 cm 和 0.5 cm,相对误差及标准差分别小于 13 cm 和 1.5 cm,可以满足机器人在果园自主运输果实或物资定点导航的需求。

表 5 定点导航绝对误差

Tab.5 Absolute error of fixed-point navigation

m

组号	参数	A1	B1	B2	A2	A3	B3	B1	A1
1	平均值	0.045 5	0.014 5	0.016 9	0.048 6	0.042 3	0.019 1	0.011 3	0.040 3
	标准差	0.001 1	0.002 6	0.001 6	0.001 9	0.002 5	0.002 3	0.002 0	0.003 1
2	平均值	0.034 2	0.034 7	0.028 0	0.065 3	0.055 4	0.029 5	0.026 8	0.043 0
	标准差	0.002 8	0.002 0	0.002 2	0.001 6	0.004 4	0.003 3	0.001 6	0.002 2
3	平均值	0.042 7	0.031 2	0.010 1	0.048 9	0.055 8	0.014 4	0.051 9	0.022 6
	标准差	0.001 1	0.002 8	0.001 9	0.002 7	0.002 7	0.001 4	0.001 7	0.001 7

表 6 定点导航相对误差

Tab.6 Relative error in fixed-point navigation

m

组号	参数	A1	B1	B2	A2	A3	B3	B1	A1
1	平均值	0.090 7	0.073 2	0.130 2	0.070 4	0.041 4	0.102 8	0.049 0	0.017 6
	标准差	0.009 4	0.012 5	0.014 7	0.013 5	0.014 3	0.013 0	0.012 2	0.014 1
2	平均值	0.016 1	0.055 5	0.059 5	0.067 2	0.032 8	0.064 2	0.067 9	0.022 6
	标准差	0.013 0	0.013 0	0.011 6	0.015 5	0.012 4	0.012 7	0.012 6	0.014 3
3	平均值	0.012 9	0.059 0	0.058 3	0.048 5	0.033 6	0.051 4	0.089 4	0.015 2
	标准差	0.010 4	0.012 7	0.011 0	0.015 0	0.014 6	0.010 5	0.013 1	0.010 1

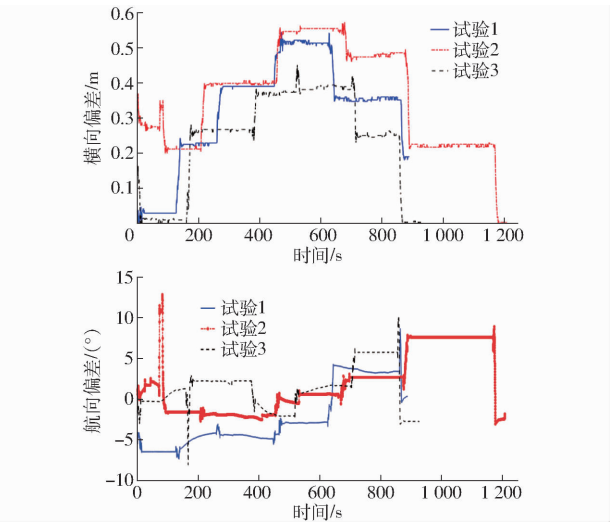


图 15 避障试验结果

Fig. 15 Obstacle avoidance experiment results

(4)果园定点导航避障试验表明,该运输机器人在苹果园行内行驶时,能及时停驶实现安全避障(常见障碍物——行人),且行驶路径与理想路径间

表 7 位姿偏差

Tab.7 Position deviation

组 号	参数	停驶次数					
		1	2	3	4	5	
1	横向偏差/m	平均值	0.029 8	0.227 3	0.391 1	0.516 1	0.354 7
		标准差	0.005 0	0.003 2	0.052 0	0.004 9	0.004 8
	航向偏差/(°)	平均值	6.323 5	4.770 4	4.589 3	2.918 9	3.425 0
		标准差	0.485 5	0.463 1	0.175 0	0.141 3	0.171 2
2	横向偏差/m	平均值	0.213 2	0.399 1	0.554 0	0.478 0	0.222 4
		标准差	0.001 1	0.001 9	0.003 9	0.005 3	0.004 2
	航向偏差/(°)	平均值	1.626 3	1.970 1	0.346 7	2.688 7	7.600 7
		标准差	0.007 1	0.074 2	0.420 3	0.003 5	0.008 8
3	横向偏差/m	平均值	0.011 1	0.268 0	0.482 5	0.252 3	0.005 0
		标准差	0.003 4	0.001 4	0.053 8	0.005 1	0.001 8
	航向偏差/(°)	平均值	0.070 2	2.158 3	0.259 9	5.768 8	2.757 8
		标准差	0.501 3	0.117 5	1.536 6	0.003 9	0.021 1

的横向偏差和航向偏差均小于 56 cm 和 8°,可以满足机器人在果园自主运输果实或物资安全避障的需求。

参 考 文 献

[1] NGUYEN T T,KAYACAN E,DE BAEDEMAEKER J,et al. Task and motion planning for apple harvesting robot[C]//4th IFAC Conference on Modelling and Control in Agriculture, Finland, 2013.

[2] 宋健,张铁中,徐丽明,等. 果蔬采摘机器人研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2006,37(5): 158 – 162.
SONG Jian,ZHANG Tiezhong,XU Liming,et al. Research actuality and prospect of picking robot for fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(5): 158 – 162. (in Chinese)

[3] SEYYEDHASANI H,PENG C, JANG W,et al. Collaboration of human pickers and crop-transporting robots during harvesting—part I: model and simulator development[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 172:105324.

[4] 秦福,樊桂菊,张昊,等. 果园运输装备发展现状与趋势[J]. 中国农机化学报,2019,40(2):113 – 118.
QIN Fu,FAN Guiju,ZHANG Hao,et al. Development status and trend of orchard transport equipment[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019,40(2):113 – 118. (in Chinese)

[5] 赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究[J]. 智慧农业,2019,1(1):1 – 7.
ZHAO Chunjiang. State-of-the-art and recommended developmental strategic objectives of smart agriculture [J]. Smart

- Agriculture, 2019, 1(1): 1–7. (in Chinese)
- [6] JONES M H, BELL J, DREDGE D, et al. Design and testing of a heavy-duty platform for autonomous navigation in kiwifruit orchards[J]. Biosystems Engineering, 2019, 187: 129–146.
- [7] BERGERMAN M, MAETA S M, ZHANG Ji, et al. Robot farmers autonomous orchard vehicles help tree fruit production[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2015, 22(1): 54–63.
- [8] 杨贞, 王亚龙, 韩冰, 等. 牵引式果园采摘作业平台果实输送系统的研究设计[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(7): 24–28.
YANG Zhen, WANG Yalong, HAN Bing, et al. Research and design on conveying system for tractive orchard picking platform[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(7): 24–28. (in Chinese)
- [9] 李强, 范国强, 王学良, 等. 履带自走式果园采摘作业平台果实输送装置的研制[J]. 农机化研究, 2019, 41(10): 116–119, 152.
LI Qiang, FAN Guoqiang, WANG Xueliang, et al. Development of a fruit conveying device for self-propelled orchard picking platform[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(10): 116–119, 152. (in Chinese)
- [10] 买合木江·巴吐尔, 李忠新, 杨莉玲, 等. 多功能自走式果园作业平台的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(11): 32–35.
MAIHEMUJIANG Batuer, LI Zhongxin, YANG Liling, et al. Design and experiment on multifunctional self-propelled orchard working platform[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(11): 32–35. (in Chinese)
- [11] BAI Zongchun, LV Xiaolan, XIA Liru. Development of a small self-propelled multi-functional work platform in orchard[J]. Boletin Tecnico/Technical Bulletin, 2017, 55(12): 387–398.
- [12] 解福祥, 徐萌萌, 张训林, 等. 果园运输机器人的结构设计 with 试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5): 170–175.
XIE Fuxiang, XU Mengmeng, ZHANG Xunlin, et al. Structural design and simulation analysis of shrimp orchard transport robot[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(5): 170–175. (in Chinese)
- [13] 郑永军, 江世界, 陈炳太, 等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 1–20.
ZHENG Yongjun, JIANG Shijie, CHEN Bingtai, et al. Research progress of mechanized technology and equipment for orchards in hilly mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 1–20. (in Chinese)
- [14] CAO Z, SIMON T, WEI S E, et al. Real time multi-person 2D pose estimation using part affinity fields[C]//Proceedings-30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017, 2017: 1302–1310.
- [15] 庞磊, 曹志强, 喻俊志. 基于视觉的行人引领移动机器人导航方法研究[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(4): 26–32.
PANG Lei, CAO Zhiqiang, YU Junzhi. A vision-based leader-guided navigation method to mobile robots[J]. Navigation Positioning and Timing, 2019, 6(4): 26–32. (in Chinese)
- [16] CAO Z, HIDALGO G, SIMON T, et al. OpenPose: realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 43(1): 172–186.
- [17] 郭成洋, 范雨杭, 张硕, 等. 果园车辆自动驾驶技术研究进展[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)
- [18] 谭晨佼, 李铁林, 王东飞, 等. 农业机械自动驾驶技术研究进展[J]. 农机化研究, 2020, 42(5): 7–14, 32.
TAN Chenjiao, LI Yilin, WANG Dongfei, et al. Review on automatic navigation technologies of agricultural machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(5): 7–14, 32. (in Chinese)
- [19] 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 Yuhang, 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)
- [20] BAKKER T, VAN ASSELT K, BONTSEMA J, et al. Autonomous navigation using a robot platform in a sugar beet field[J]. Biosystems Engineering, 2011, 109(4): 357–368.
- [21] 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)
- [22] PEZZEMENTI Z, TABOR T, HU Peiyun, 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.
- [23] BOCHTIS D, GRIEPENTROG H W, VOUGIOUKA S, et al. Route planning for orchard operations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 113: 51–60.
- [24] GAO Guandong, XIAO Ke, JIA Yuchen. A spraying path planning algorithm based on colour-depth fusion segmentation in peach orchards[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173: 1–9.
- [25] BENGGOCHEA-GUEVARA J M, CONESA-MUNOZ J, ANDUJAR 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): 1–23.
- [26] 权龙哲, 申静朝, 奚德君, 等. 狭闭空间内苗盘物流化搬运机器人运动规划与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 51–59.
QUAN Longzhe, SHEN Jingchao, XI Dejun, et al. Motion planning and test of robot for seedling tray handling in narrow space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 51–59. (in Chinese)

ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of combined tillage implement of reverse-rotary and subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 61–71. (in Chinese)

[26] JOHNSON K L, ROBERTS K. Surface energy and the contact of elastic solid[J]. Proc. R. Soc. Lond, 1971, 324(1558): 301–313.

[27] 邢洁洁,张锐,吴鹏,等. 海南热区砖红壤颗粒离散元仿真模型参数标定[J]. 农业工程学报,2020,36(5):158–166.
XING Jiejie, ZHANG Rui, WU Peng, et al. Parameter calibration of discrete element simulation model for latosol particles in hot areas of Hainan Province[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(5): 158–166. (in Chinese)

[28] XU Aolin, HAO Yanhui, WANG Ziqiang, et al. Simulation of bionic subsoiler using discrete element method[J]. IAEJ, 2018, 27(2): 250–257.

[29] 赵淑红,王加一,陈君执,等. 保护性耕作拟合曲线型深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(2):82–92.
ZHAO Shuhong, WANG Jiayi, CHEN Junzhi, et al. Design and experiment of fitting curve subsoiler of conservation tillage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(2): 82–92. (in Chinese)

[30] 王燕. 基于离散元法的深松铲结构与松土效果研究[D]. 长春:吉林农业大学,2014.
WANG Yan. Simulation analysis of structure and effect of the subsoiler based on DEM[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[31] 袁军,于建群. 基于 DEM–MBD 耦合算法的自激振动深松机仿真分析[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):17–24.
YUAN Jun, YU Jianqun. Analysis on operational process of self-excited vibrating subsoiler based on DEM–MBD coupling algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp.1): 17–24. (in Chinese)

[32] 郑侃,何进,李洪文,等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J]. 农业机械学报,2016,47(9):62–72.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil-breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(9):62–72. (in Chinese)

[33] 丁启朔,李杨,BELAL Eisa Adam,等. 基于田间摄像的多参数水稻土深松扰动行为与效应研究[J]. 农业机械学报, 2019,50(10):44–55.
DING Qishuo, LI Yang, BELAL E A, et al. Subsoiler-induced paddy soil disturbance and effects based on video-assisted multi-index quantification[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(10):44–55. (in Chinese)

(上接第 39 页)

[27] 卫宇. 考虑地球曲率情况下两点距离问题的求解[J]. 航空兵器,2008(3):7–12.
WEI Yu. Solution of distance between two points considering curvature of the earth[J]. Aero Weaponry,2008(3):7–12. (in Chinese)

[28] 徐涛,马克,刘才华. 基于深度学习的行人多目标跟踪方法[J]. 吉林大学学报(工学版),2021,51(1):27–38.
XU Tao, MA Ke, LIU Caihua. Multi object pedestrian tracking based on deep learning[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021,51(1):27–38. (in Chinese)

[29] BERNARDIN K,STIEFELHAGEN R. Evaluating multiple object tracking performance: the clear mot metrics[J]. Eurasip Journal on Image and Video Processing, 2008(1):1–10.

[30] 李晓飞. 基于深度学习的行人及骑车人车载图像识别方法[D]. 北京:清华大学,2016.
LI Xiaofei. On-board pedestrian and cyclist recognition using deep learning methods [D]. Beijing: Tsinghua University,2016. (in Chinese)

[31] 杜玉红,刘贤超,刘大维,等. 基于高置信度更新 KCF 的移动机器人行人跟随[J]. 天津工业大学学报,2020, 39(5): 67–74.
DU Yuhong, LIU Xianchao, LIU Dawei, et al. Mobile robot following pedestrian based on high confidence update KCF [J]. Journal of Tiangong University,2020,39(5):67–74. (in Chinese)

[32] 侯加林,蒲文洋,李天华,等. 双激光雷达温室运输机器人导航系统研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 80–88.
HOU Jialin,PU Wenyang,LI Tianhua,et al. Development of dual-lidar navigation system for gree house transportation robot [J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(14): 80–88. (in Chinese)

[33] 孙意凡,孙建桐,赵然,等. 果实采摘机器人设计与导航系统性能分析[J]. 农业机械学报,2019,50(增刊):8–14.
SUN Yifan,SUN Jiantong,ZHAO Ran, et al. Design and system performance analysis of fruit picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(Supp.):8–14. (in Chinese)