中国农业信息 China Agricultural Informatics
第 31 卷第 4 期 2019 年 8 月 2019，31（4）：51–64 Vol.31，No.4 Aug.，2019

果园作业机器人的自主行间导航系统研究*

李会宾，韩　伟，史　云※
（中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 农业农村部农业信息技术重点实验室，北京 100081）

摘要：【目的】挂载多种农机具的果园作业机器人能减少果园劳动力投入、降低水果生产成本并提高果园生产效率，其中自主导航系统是果园作业机器人应用研究的重点和难点。**【方法】**文章针对果园作业机器人 GPS 导航过程中定位信号易受树叶遮挡及多路径效应干扰等问题，以果园作业机器人初始位置为原点建立世界坐标系，采用拓展卡尔曼滤波算法对通过三维激光雷达结合 RANSAC 算法获取的果园行直线进行优化，设计结合差速模型和纯跟踪算法的果园自主行间导航算法，并以该算法为基础开发果园作业机器人自主行间导航系统，驱动果园作业机器人沿树行中心行驶并完成自主调头进入下一行的工作。**【结果】**（1）根据现代化矮化密植果园的环境，果园自主行间导航算法能根据两侧果树行的三维点云，自主生成稳定的导航位置；（2）果园作业机器人能够沿果园行中心位置匀速行驶，并能够实时根据果园行的变化来修正自身的位姿。当速度在 0.4 m/s 时候，机器人运动的横向平均偏差为 0.1 m，航向平均偏差为 1.04°；（3）基于果园行宽相等的条件，果园作业机器人能够在行尾自主调头进入下一行，之后沿行内中心位置继续行驶。**【结论】**该文果园自主行间导航系统设计合理，算法稳定性高，导航精度高，不受驾驶路况的影响，能够满足现代化矮化密植果园作业的自主行驶需求。

关键词：果园行；自主导航；激光雷达；果园作业机器人
DOI：10.12105/j.issn.1672–0423.20190406

0　引言

我国作为水果生产大国，果树种植、管理和果实采收等工序存在自动化程度低、设备单一、劳动强度大和生产成本高等问题。针对这一现状，研究符合我国国情的果园机器人相关理论、开发适合于果园作业的机器人势在必行[1]。现代化矮化密植果园是机器人非常具有应用前景的领域。此类果园中，果树以平行直线为行的标准方式进行种植，果树密度和果树行宽度也满足作业机器人自主行走的空间需求和激光雷达等多传感器的应用条件[2–3]。果园作业机器人自动作业的关键是具备自主导航能力，即可以按照优化的作业路径自主行走并完成多类生产任务，如挖沟、施肥、喷洒杀菌剂和杀虫剂、割草、

收稿日期：2019–07–19
第一作者简介：李会宾（1992—），硕士。研究方向：智慧农业机器人。Email：mrlihuibin@163.com
※ **通信作者简介：**史云（1979—），博士、研究员。研究方向：农业遥感与智慧农业。Email：shiyun@caas.cn
* **基金项目：**国家重点研发计划子课题“基于无人机的玉米生长参数实时检测”（2016YFD0300602–01）；中国农业科学院基本科研业务费专项“农业智能机器人技术与装备研发”（Y2018YJ14）

采摘、运输等任务。高精度高性能的自主导航系统能减少重复作业区和遗漏作业区的面积，提高机器人的作业质量和效率[4]。

目前国内外关于果园作业机器人的自主导航研究取得了众多成果。根据导航使用的传感器不同，可以将导航方式分为激光导航、GPS 导航、SLAM 导航、图像导航和基于多传感器融合的导航等。戚树藤等使用激光雷达采集果树位置信息并采用霍夫变换算法获取导航路径，根据机器人的航向偏差和横向偏差控制机器人沿导航路径自动行走，但是单纯采用霍夫变换算法获取导航路径，难以保证导航路径的精度和稳定性[5]。Underwood 等首先制作果园地图，然后结合隐马尔科夫模型实现机器人的导航控制，但是该方法需要地图数据库实时更新，才能解决果树外观随时间变化对定位精度影响的问题[6]。Bargoti 等采用 SLAM 方法识别果园内的人工路标和粗壮的树木进行导航，该方法对果园树干要求较高，树干和周围环境要有明显的特征差异。由于果树特征四季变化明显，若实现多场景和多季节的导航需要多个地图支撑，而地图的生产需要大量的采集工作[7]。一些学者还采用 RTK-BDS 或 RTK-DGPS 的方式为果园机器人导航，该类导航方式严重依赖定位信息的质量，在宽阔的大田环境中能满足接收多卫星信号的需求，但是在果园环境中，存在卫星信号遮挡、多路径效应和射频干扰等问题，因而 GPS 导航设备无法有效地用于导航[8-10]。图像导航方式依靠机器人上的摄像头实时获取图像，通过特征聚类、阈值分割或者路径直线提取等方法获取机器人相对于果树行的位置和姿态，最后生成机器人运动和转向的控制信号，该类方法需要果树和地面背景特征对比明显，但是果树底部普遍生长着高密的杂草，使得树木和地面的交界产生偏移甚至无法检测，同时该类方法对光照变化适应性差，计算工作量大，不适用多时段下不同光照环境，也严重影响了导航的实时性和鲁棒性[11-12]。一些学者将视觉和激光传感器作为自主导航的主要传感器，两者结合使用使机器人自主导航和目标检测的鲁棒性得到提升。Subramanian 等研制了一种基于机器视觉和激光雷达引导的自主导航系统，并采用旋转编码器提供机器人转向角度的反馈，导航系统可以引导机器人自动通过直线和曲线路径，然而单纯依靠编码器来获取机器人的角度会存在累计误差，是一个固有难题，难以为机器人提供精准的角度控制[13]。

针对以上难题和现代矮化密植果园的导航需求，文章提出了基于激光雷达和编码器融合的果园行间导航系统。该系统以中国农业科学院自主研发的果园作业机器人装备为验证平台进行实验研究，首先通过 VLP16 激光雷达设备实时获取果园行场景的点云，然后分割出左右果树行点云，之后通过随机抽样一致（RANSAC）算法、拓展卡尔曼滤波（EKF）算法设计直线优化算法并逐步获取准确稳定的果树行直线，进而获取果园作业机器人相对于果园行中心位置的方向和位置偏移，最后采用基于差速运动学模型和纯跟踪控制方法设计果园自主导航算法及系统，控制机器人沿果园行中心位置自主行驶，当行驶到果园行尾时，能够按照调头策略准确进入下一行继续工作。

1 果园作业机器人行间自主导航方法

1.1 果园作业机器人架构

1.1.1 硬件架构

果园作业机器人如图 1 和图 2 所示，由动力系统、传感器供电系统、计算系统、传感系统、通信系统以及灯光系统等硬件系统组成。（1）动力系统包括 2 kW 的双伺服电机和具有 PID 调节能力的驱动器，具有 5 h 续航能力的动力电池以及具有强通过性能差速履带底盘，支持 ROS 速度控制模式，支持遥控器控制模式。（2）传感器供电系统提供 5~48 V 多种电压供电，保证多类型传感器正常工作，物理支持所有设备一键启动和紧急停止。（3）计算系统包括提供导航计算的工控机、显示一体机等，支持导航数据实时计算。（4）传感系统包括定位相机，双目相机，变焦识别相机，2 个 16 线的 VLP-16 激光雷达，双 GPS 天线，超声波模组和碰撞检测开关。（5）通信系统支持 4G、Wi-Fi、数传通信，支持大数据网络交换。（6）灯光系统包括左右转弯灯、大灯、工作指示灯等。

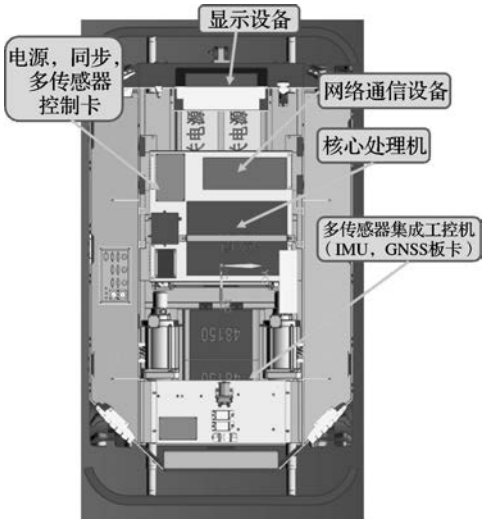

图 1 果园作业机器人内视图
Fig.1 Inside view of orchard operation robot

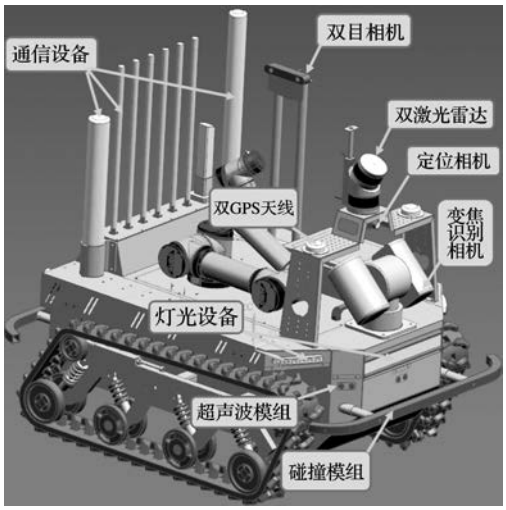

图 2 果园作业机器人侧视图
Fig.2 Side view of orchard operation robot

1.1.2 硬件工作原理

果园作业机器人硬件工作原理如图 3 所示。果园作业机器人目前支持 2 种工作模式，分别是遥控模式和自主导航模式。遥控模式和自主导航模式都能够通过数传天线将控制信号下发给工控机，经由工控机将控制信号转化为电机转速信号，并将其通过串口下发给左右电机驱动器实现驱动左右电机运动。将左右电机上的编码器读数和差速模型结合，计算出果园作业机器人的里程信息。传感器供电系统中配置了紧急停止按钮，用于实现果园作业机器人的安全驾驶控制。为了实现通信避障功能，与计算系统工控机相连的网

络交换机连接了双碰撞条和超声波。传感系统的水平和倾斜雷达主要用于建图和导航，定位相机和识别相机则用于获取周围的图像信息。所有的数据都实时下发到网络交换机，工控机可以根据 IP 地址获取需要的数据。网络交换机也连接在 Wi-Fi 端，用于数据的传输和通信。

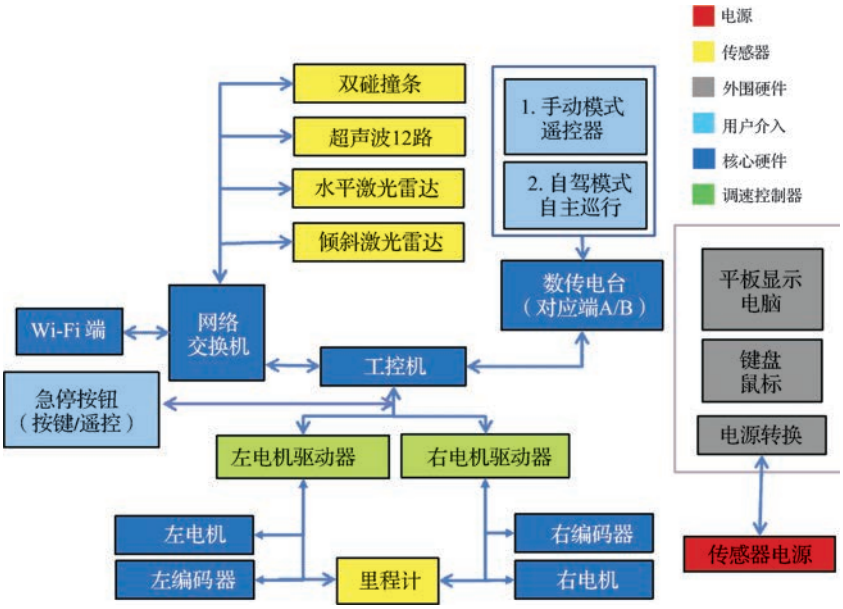

图 3　果园机器人硬件工作原理

Fig.3　Hardware working principle of orchard operation robot

1.2　行间自主导航系统软件架构

果园作业机器人上安装了多个传感器，在行间自主导航过程中，主要采用 3D 水平激光雷达来获取果园行内的点云，在具有两侧分布特征的果园行点云中，首先分割左右树行的点云，然后采用 RNSANC 算法获取代表两侧树木的直线[14]，并通过里程计的瞬时变化信息和 EKF 算法对获取的直线进行滤波，以获取波动较小、较为准确的两侧直线。获取果树行直线后，根据里程计实时计算果园作业机器人的运动方向和两侧直线的航向偏差和横向偏差，并参照两个偏差通过纯跟踪控制算法修正其位姿，使其向果园行尾直行。果园机器人在导航过程中，通过检测自身前方的点云数量，根据调头判断阈值判断其位置是否到达了行尾，当机器人判断出到达行尾时，系统根据计算出的果园行平均宽度确定拐弯半径，并根据拐弯行驶的长度和当前的运行速度计算拐弯所需的时间。自主导航系统采用该调头策略使果园作业机器人进入下一行，果园作业机器再重新通过激光雷达数据检测下一行数据并进行导航，重复执行直至完成整个果园作业。果园行间自主导航流程如图 4 所示。

1.2.1　RANSAC 直线拟合算法

果园行直线获取方法通常是在获取当前帧的果园行点云后，将该帧点云投影到世界坐标系中，然后将该帧点云分割成左右树行的点云集，再从左右树行点云集中拟合出两

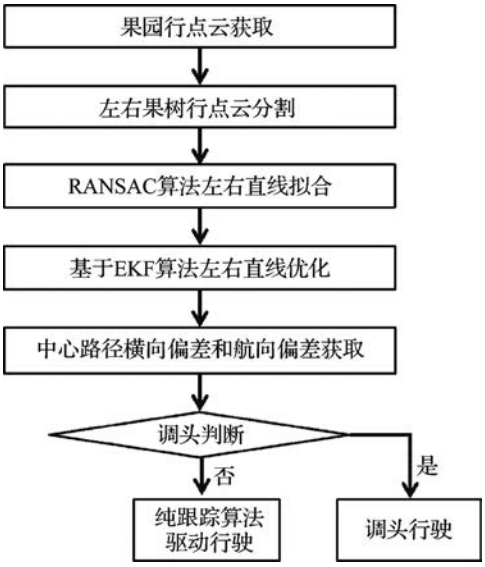

图 4　果园行间自主导航流程

Fig.4　Inter-row autonomous navigation process of orchard

侧果树的直线。常用的获取方法有 RANSAC 算法和霍夫变化算法，从横向偏差、航向偏差和算法耗时等方面对 2 个算法进行比较，RANSAC 直线提取算法相比较霍夫变化算法虽然具有细微的横向偏差，但是在较大行距的果园中导航精度更高且算法实时性也具有绝对优势[15]。

如图 5 所示，RANSAC 算法执行步骤如下。

（1）将果园行激光点云当前帧 PtC_i，根据左右阈值进行分割，获取左右 2 个果树行点云，分别为左边行点云集合 PtC_{il} 和右边行点云 PtC_{ir}。

（2）由于矮化密植果园一般按照平行直线种植，该文中设定 2 条默认的左右平行线 L_l 和 L_r，分别为：

$$L_l:\ y = k_l x + b_l \tag{1}$$

$$L_r:\ y = k_r x + b_r \tag{2}$$

式（1）~（2）中，k 指果园行直线的斜率，b_l 和 b_r 分别指 L_l 和 L_r 的截距。

（3）从 PtC_{il} 和 PtC_{ir} 随机选择 2 点，由这 2 个点确定构成直线的参数。

（4）根据阈值 T，确定与直线 L 的几何距离小于 T 的点云集 $D(L)$，即为 L 的一致集。

（5）重复 n 次随机选择，得到直线 L_1，L_2，…，L_n 和相应的一致集 $D(L_1)$，$D(L_2)$，…，$D(L_n)$。

（6）确定最大一致集，最后将最大一致集里的点利用最小二乘法拟合成一条直线即为最佳直线 L，利用 PtC_{il} 和 PtC_{ir} 获取的最佳直线分别为 L_l 和 L_r，即获取到最佳的 k_l，k_r，b_l 和 b_r。

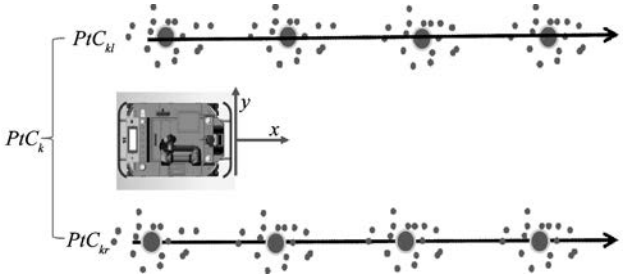

图 5　RANSAC 直线拟合算法示意图

Fig.5　Algorithm diagram of RANSAC straight line fitting

1.2.2　EKF 直线滤波算法

为了减少噪声对 L_r 和 L_l 结果准确性的影响，该文借助 EKF 算法对已经获取的直线进行滤波，生成较为稳定的左右行直线结果。在算法实现中将里程计的瞬时信息应用到预测和更新直线参数的计算中[2]。由于左右直线的获取方法相同，该文对右直线的获取过程进行详细介绍。在 EKF 算法中需要右直线的两种结果，分别是第 n 次已经预测的状态 $L_{r(n|n)}$ 和已经更新的状态 $L_{r(n|n-1)}$。已经预测的直线状态关键在于直线的斜率和截距，计算公式为：

$$L_{r(n|n)} = k_{r(n|n)}x + b_{r(n|n)} \tag{3}$$

$$k_{n|n-1} = \tan(\tan^{-1}a_{n|n-1} \mid a_{n|n-1} - \Delta tha) \tag{4}$$

$$b_{r(n|n-1)} = b_{r(n-1|n-1)} + \Delta x\sin\tan^{-1}k_{r(n-1|n-1)} - \Delta y\cos\tan^{-1}k_{r(n-1|n-1)} \tag{5}$$

$$[k_{r(n|n)},\ b_{r(n|n)}]^T = [k_{r(n|n-1)},\ b_{r(n|n-1)}]^T + \mathrm{K}[k_r - k_{r(n|n-1)},\ b_r - b_{r(n|n-1)}]^T \tag{6}$$

式（3）~（6）中，Δx，Δy，Δtha 分别是果园作业机器人根据里程计确定的位置移动和角度旋转，K 代表卡尔曼的增益系数，$k_{r(n|n)}$，$k_{r(n|n-1)}$ 和 $k_{r(n-1|n-1)}$ 分别是 $L_{r(n|n)}$，$L_{r(n|n-1)}$ 和 $L_{r(n-1|n-1)}$ 直线的斜率，$b_{r(n|n)}$，$b_{r(n|n-1)}$ 和 $b_{r(n-1|n-1)}$ 分别是 $L_{r(n|n)}$，$L_{r(n|n-1)}$ 和 $L_{r(n-1|n-1)}$ 直线的截距，k_r 和 b_r 是当前的直线测量结果。

为了缩小预测结果和实际结果之间的差异，设定一个协方差矩阵 $\Sigma_{k|k-1}$，这个协方差矩阵通过 EKF 算法得到。利用 Mahalanobis 平方距离 d 作为评估指标，该距离的计算公式为：

$$d = [k_r - k_{r(k|k-1)},\ b_r - b_{r(k|k-1)}]^T \sum_{n|n-1}^{-1} [k_r - k_{n|n-1},\ b_r - b_{n|n-1}]^T \tag{7}$$

如果 d 大于阈值，判断 $L_{r(n|n)}$ 是错误的计算结果，相应的 EKF 更新结果也会被忽略。

1.2.3　行间自主导航和行尾调头策略

果园作业机器人自主导航的 2 个重要任务是行间引导和行尾转向[16]。果园作业机器人在通过 EKF 算法获取到树行两侧较为精准稳定的直线，其目的在于自动识别树行。在左右路径直线拟合后，可以获取 2 条直线的中心位置和履带车中心的方向角 tha 和距离 d，根据这 2 个变量实现对果园作业机器人方向和运动的控制。果园作业机器人沿果树行直行和调头方式如图 6 所示。

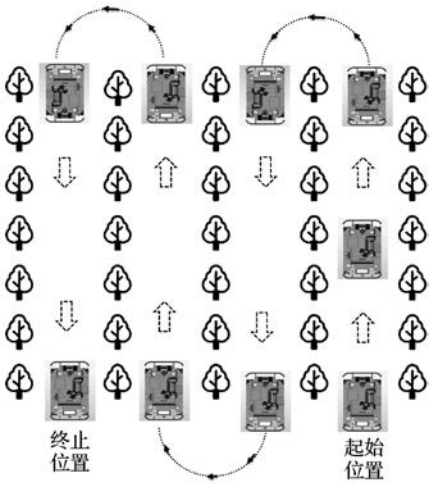

图 6　果园作业机器人自主导航直行和调头过程

Fig.6　Direct and head-adjusting processes in autonomous navigation of orchard operation robot

果园作业机器人在果树行间自主导航的方式，表现为做“弓字型”运动。在自主导航过程中，果园作业机器人会根据 EKF 算法检测到的左右直线，通过对比机器人位姿和果树行中心位置的横向和航向偏差，实时调整自身的运动角度和位移，并且进行调头判断和调头操作。机器人根据横向偏移量 l 和偏移角度 tha 实时调整自身的位姿，该过程如图 7 所示，其中 tha 和 l 的计算公式为：

$$l \approx \left| \frac{2b_{l_ekf}}{(1 - a_{l_ekf}^2)} \right| \tag{8}$$

$$tha = \arctan(a_{l_ekf}) - \frac{\mathrm{PI}}{2} \tag{9}$$

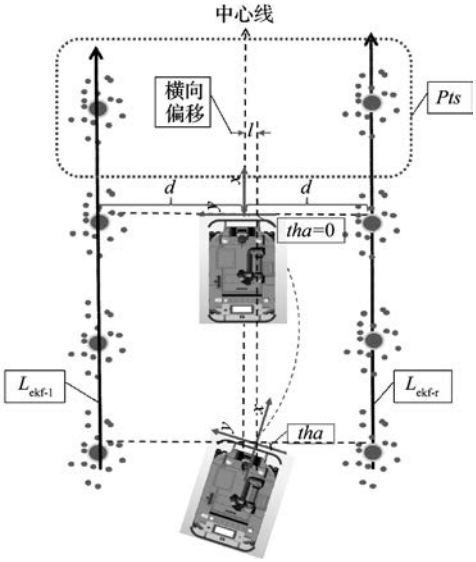

图 7　果园作业机器人沿行中心位置直行

Fig.7　Warking straight along the row center of orchard operation robot

果园作业机器人通过改进纯追踪算法来确定前视距离，最终将车体的位姿转化为左右轮的速度，驱动果园作业机器人沿果树行中心位置行驶，这样保障了果园作业机器人导航的准确性，并为机器人的运动提供了较大且合理的运动空间。

果园作业机器人在自主导航过程中，存在 2 种运动状态，沿着果树行中心位置行走（行跟踪）和到达行尾转弯到下一行继续行跟踪。一般果园的树行两端的特征很明显，即行头和行尾都不存在果树，因此在行头和行尾存在一定的调头空间，所以当激光雷达检测到树行突然出现大块空缺信息且稳定存在的时候，可以判断机器人确实在行两端附近，需要执行转弯的动作。果树行尾调头策略如下，首先果园作业机器人在果树行内行走的过程中，左右两侧存在较大数量的点云，且位于果园作业机器人的正前方；同时果园作业机器人会计算出果树行的平均宽度和调头半径，当果园作业机器人行进到果园行尾后，果园作业机器人两侧和前方的点云数量将急剧减少，出现这一现象时，果园作业机器人会根据所需的调头行走的距离和角速度确定调头需要的时间并完成进入下一行的操作。当果园作业机器人调头完毕后，会向前继续行进一段时间，保证其深入进入下一行，然后继续执行行跟踪。

2 实验结果及分析

2.1 实验场景及配置

为验证果园作业机器人自主导航系统的实际工作效果，在中国农业大学工学院附近树林区域模拟果园导航实验。由于该树林树木较为稀疏，不能满足果园行的实际场景，所以需增强该片树林区域的果园密集特征，即在树与树之间添加了交通锥桶代替树木，如图 8 所示。树林种植行间距为 3 m，垄长 15 m，机器人整体宽度为 0.9 m，长度为 1.6 m。由于该区域调头空间有限，只能选取图中单树行，以 0.4 m/s 的速度，进行 20 次实验验证自主导航中的直行功能，并记录实验数据。果园作业机器人在自主导航实验中，采用了 1 个 16 线 VLP 水平激光雷达，左右轮的 1024 线编码器，Nvidia jetson tx2 工控机，2 个 2 kW 伺服电机和对应的驱动器。

图 8 果园作业机器人导航实验区域

Fig.8 Navigation experiment area of orchard operation robot

2.2 行间自主导航结果及分析

2.2.1 果园行间原始数据

树行中地面杂草丛生，两侧是树木和交通锥桶，由于该场景树木稀疏，交通锥桶用于模拟果园中的树干。该场景的两侧树木具备了类墙的特征，如图 9 所示。图 10 是在该场景下获取的点云场景，其中红色和白色的点表示果园作业机器人左右两侧的果树点云和交通锥桶点云。根据图 10 中点云的分布可以看出，这些点云在宏观上保持了果树和交通锥桶按一条直线排列的特征。根据点云所隐含的直线特征可以通过 RANSAC 算法提取出左右的果树行直线，然后通过两条果树行直线计算出果园作业机器人的中心导航位置，引导果园作业机器人在果树行内行驶。

图 9 果园实验区域
Fig.9 Experiment area of orchard rows

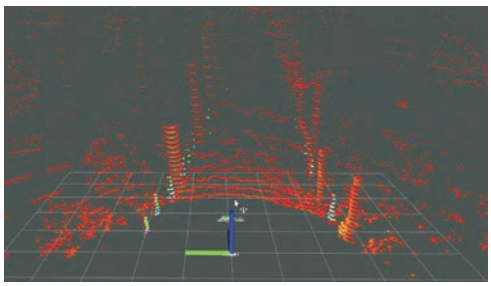

图 10 实验区域点云
Fig.10 Pointcloud of experiment area

2.2.2 果园行间直线拟合

该文采取 RANSANC 算法进行两侧果树行直线提取实验，在通过 RANSAC 算法拟合直线前，首先通过直通滤波算法去除地面，然后将左右行点云进行分割，在获取的左右树木点云中，使用 RANSAC 算法分别进行直线提取，算法提取结果如图 11 所示，2 条绿色直线代表果树行的两侧。RANSAC 算法的实时性能满足导航需求，但直线拟合结果在航向和横向方向存在一定的偏差且波动比较大，这主要是由于周围树林环境的复杂性导致的。

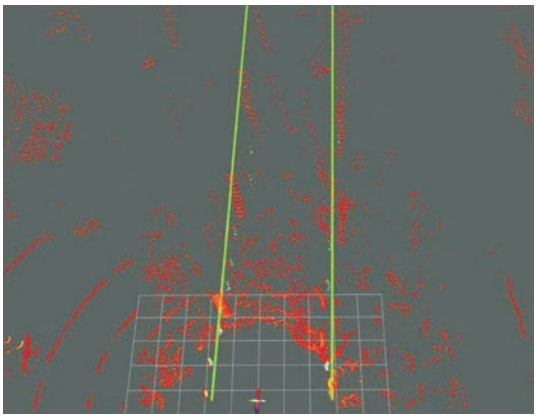

图 11 RANSAC 直线拟合
Fig.11 Straight line fitting by RANSAC

2.2.3 果园行间直线 EKF 滤波

为了减少 RANSAC 算法拟合的直线存在的横向和航向偏差，提升左右行直线检测的稳定性，该文采取 EKF 算法对拟合结果进行优化，结果如图 12 所示，红色双直线代表 EKF 算法优化直线后的结果，该结果的稳定性更好，拟合直线精度更高。将 EKF 算法直线优化的结果和 RANSAC 直线拟合结果在横向偏差和航向偏差方向进行对比实验，实验过程中，两个算法存在结果相似的情况，如图 13 所示，也存在 RANSCAC 算法结果较差的情况，如图 14、图 15 所示。实验中通过人工标定出蓝色真值结果，进行对比，如表 1 所示。

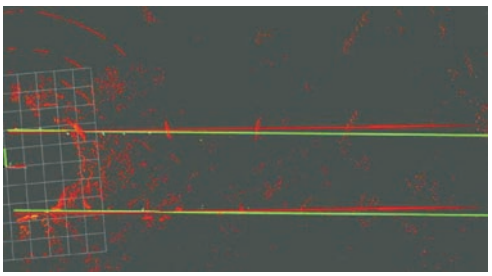

图 12 果园行实验区域
Fig.12 Experiment area of orchard rows

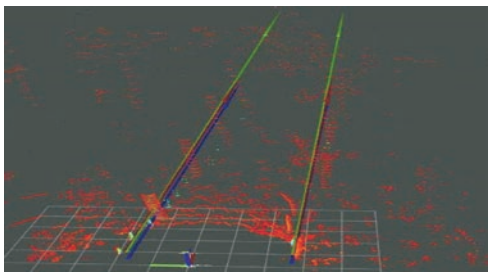

图 13 实验区域点云
Fig.13 Pointcloud of experiment area

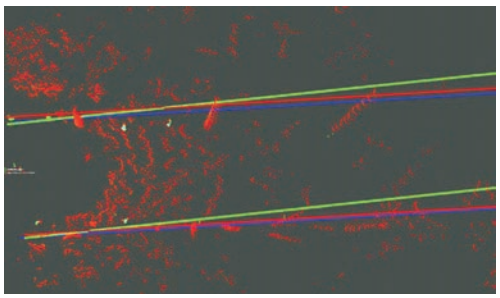

图 14 果园行实验区域
Fig.14 Experiment area of orchard rows

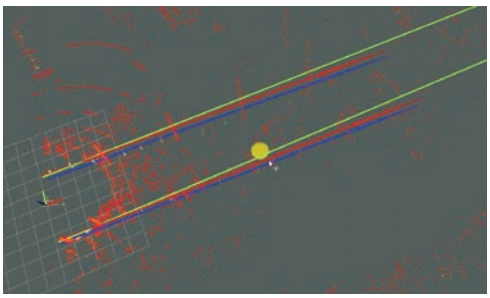

图 15 实验区域点云
Fig.15 Pointcloud of experiment area

表 1 直线拟合精度对比
Table 1 Accuracy comparison of linear fitting

实验序号	RANSAC 航向偏差（°）	RANSAC 横向偏差（m）	EKF 航向偏差（°）	EKF 横向偏差（m）
1	3.52	0.23	1.26	0.08
2	3.40	0.28	0.56	0.19
3	1.56	0.35	1.25	0.13
4	3.10	0.36	1.65	0.18
5	2.68	0.15	1.12	0.10
6	5.21	0.20	2.21	0.06
7	−1.25	0.12	−1.02	0.05
8	2.78	0.14	1.36	0.06
9	5.82	0.08	2.54	0.05
10	4.32	0.19	1.95	0.19

续表 1

实验序号	RANSAC 航向偏差（°）	RANSAC 横向偏差（m）	EKF 航向偏差（°）	EKF 横向偏差（m）
11	3.65	0.14	0.62	0.08
12	2.15	0.09	0.57	0.05
13	–1.68	0.26	–0.95	0.10
14	2.86	0.17	1.29	0.12
15	1.25	0.22	0.23	0.10
16	1.02	0.09	1.00	0.06
17	3.79	0.15	1.36	0.16
18	2.81	0.07	1.58	0.04
19	1.23	0.28	0.94	0.16
20	1.54	0.20	1.21	0.10
标准差	1.817	0.086 6	0.83	0.048
均值	2.488	0.188 5	1.036 5	0.103

为了更直观地表示 2 种算法的差异性，分别从横向偏差、航向偏差 2 个方面作图比较。

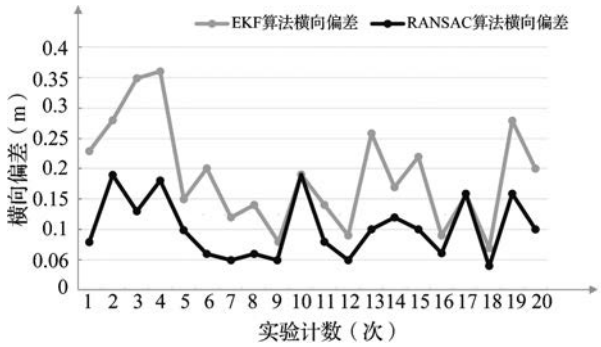

图 16　横向偏差对比图

Fig.16　Contradistinction of lateral deviation

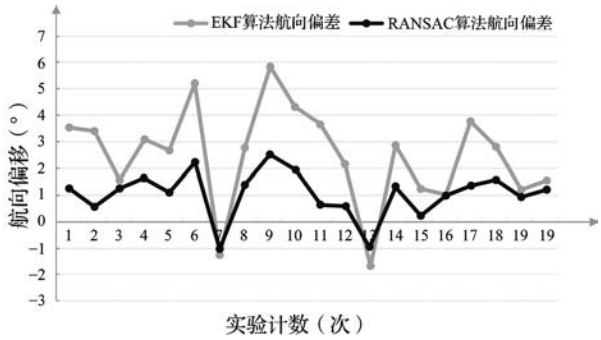

图 17　航向偏差对比图

Fig.17　Contradistinction of course deviation

从表 1 与图 16 和图 17 中可以得知：（1）RANSAC 拟合直线算法与 EKF 滤波算法在横向偏差均值分别为 0.188 5 m 与 0.103 m，标准差分别为 0.086 6 m 与 0.048 m；（2）RANSAC 拟合直线算法与 EKF 滤波算法在航向偏差均值分别为 2.488° 与 1.036 5°，

标准差分别为 1.817° 与 0.83 °。

由对比结果可知，EKF 算法相比较 RANSAC 算法在航向偏差均值上提升了 58.34%，在航向标准差方面提升 54.32%，在横向偏差均值上提升 45.36%，在横向标准差方面提升 44.57%。EKF 算法相比较 RANSAC 算法在结果的精度上大幅提升，并且能够获取的横向和航向偏差结果更加平滑，鲁棒性更强。该精度在 3~5 m 行距的果园中，能够满足自主导航的需求。

2.2.4　果园作业机器人行尾调头

由于树林的实验场景不具备调头的特征，所以通过交通锥桶围成类果园行的场景，在该场景中进行调头实验。图 18 为果园作业机器人的导航起点，图 19 为果园作业机器人自动导航进入交通锥桶行，图 20 为果园作业机器人进行出行操作，图 21 为果园作业机器人检测到出行特征后根据行半径和调头时间进调头操作，如图 22~23 为果园机器人进入下一行开始下一行工作，依次循环直至完成果园遍历，结束导航。该调头模拟的过程中，果园作业机器人能够准确地获取调头的行尾位置，并顺利完成调头操作。

图 18　机器人起始位置
Fig.18　Start position of the robot

图 19　机器人进入行
Fig.19　Moving in rows

图 20　机器人出行
Fig.20　Moving out of the row

图 21　机器人开始调头
Fig.21　Turning

图 22　机器人进入下一行
Fig.22　Entering the next row

图 23　机器人继续在下一行行驶
Fig.23　Running in next row

3 结论

现代化矮化密植的果园中，果园作业机器人自主导航能力是在果园中完成多类任务的关键。果树的标准化种植，使得果园形成一道道“果树墙”，该特征能够被三维激光雷达获取。针对这种场景，该文提出了一种果园机器人行间自主导航系统，依靠 RANSAC 算法对激光雷达数据进行直线拟合、通过 EKF 算法优化检测到的两侧树行直线，然后根据果园作业机器人距离果树行中心的横向偏差和航向偏差，通过纯跟踪算法驱动机器人自主行驶并能够完成自主调头工作。该系统通过真实的树行数据验证表明，在具备现代矮化密植果园的环境中，获取的引导直线的精度和调头策略能够满足果园作业机器人在果园行中的导航需求。未来的工作将侧重于在现代化果园中存在缺树或者其它不规则场景，提出更加精准和普适的算法辅助果园作业机器人自主导航，进而提升果园作业机器人自动化果园生产作业的能力。

参考文献

[1] 蒋浩然 , 陈军 , 王虎 , 等. 移动机器人自动导航技术研究进展西北农林科技大学学报 : 自然科学版 , 2011, 39(12): 207~213.
[2] Zhang J., Chambers A., Maeta S., et al. 3D perception for accurate row following: methodology and results. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems*, 2013: 5306~5313.
[3] Hansen S., Bayramoglu E., Andersen J. C., et al. Orchard navigation using derivative free Kalman filtering. *American Control Conference (ACC)* , 2011: 4679~4684.
[4] 周建军 , 周文彬 , 刘建东 , 等 . 果园机器人自动导航技术研究进展 . 计算机与数字工程 , 2019, 47(3): 571~575.
[5] 戚树腾 , 聂森 , 陈军 , 等 . 基于激光导航的果园移动机器人自动控制系统 . 农机化研究 , 2015(10): 8~12.
[6] Underwood J. P., Jagbrant G., Nieto J. I., et al. Lidar–based tree recognition and platform localization in orchards. *Journal of Field Robotics*, 2015, 32(8): 1056~1074.
[7] Bargoti S., Underwood J. P., Nieto J. I., et al. A pipeline for trunk localisation using LiDAR in trellis structured orchards. *Field and Service Robotics*: *Results of the 8th International Conference*, 2015: 455~468.
[8] Auat Cheein F., Steiner G., Perez Paina G., et al. Optimized EIF–SLAM algorithm for precision agriculture mapping based on stems detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 78(2): 195~207.
[9] 熊斌 , 张俊雄 , 曲峰 , 等 . 基于 BDS 的果园施药机自动导航控制系统 . 农业机械学报 , 2017(2): 50~55.
[10] Hellström T.. Autonomous navigation for forest machines. *A Project Pre*, 2002: 652~660.
[11] Sharifi M., Chen X. Q.. A novel vision based row guidance approach for navigation of agricultural mobile robots in orchards. *2015 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications*, 2015: 251~255.
[12] 冯娟 , 刘刚 , 司永胜 . 果园视觉导航基准线生成算法 . 农业机械学报 , 2012, 43(7): 185~189.
[13] Subramanian V., Burks T. F., Dixon W. E.. Sensor fusion using fuzzy logic enhanced kalman filter for autonomous vehicle guidance in citrus groves. *Transactions of the ASABE*, 2009, 52(5): 1411~1422.
[14] Fischler M. A., Bolles R. C.. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Reading in Computer Vision*, 1987: 726~740.
[15] 张哲远 . 果园机器人自主导航关键技术研究 . 武汉 : 华中科技大学 , 2016: 14~20.
[16] 封永 . 基于激光雷达传感器的农业机器人车辆地头转向研究 . 南京 : 南京农业大学 , 2016: 48~50.

Autonomous inter-line navigation system for orchard robots

Li Huibin，Han Wei，Shi Yun※

（Institute of Agricultural Resources and Regional Planning，Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agricultural Information Technology，Ministry of Agriculture and Rural Affairs，Beijing 100081，China）

Abstract：[**Purpose**] There are a large number of tasks that are repeated and labor intensive in the production process of the orchard. Nowadays，the labor cost of orchard is rising rapidly and the quantity is gradually decreasing. In order to reduce the labor input of the orchard and the cost of fruit production，the orchard operation robot is used to assist the production operation by mounting a variety of agricultural machinery and autonomous navigation，which is an important production choice with low-cost and high-efficiency. [**Method**] The basis of orchard operation robot is the ability to navigate autonomously in the orchard. Given the positioning signal is easily interfered by leaf occlusion or multi-path effect during the process of GPS-based navigation，this reserch builds the world coordinate system whose origin is the initial position of the orchard robot before entering the fruit tree row. Then it combines the 3D Lidar data with the RANSAC algorithm to obtain the orchard line and record it in the world coordinate system. Next，the EKF algorithm is used to obtain a more robust orchard line. Finally，the differential model of the orchard operation robot is combined with the pure tracking algorithm to drive the orchard operation robot along the center of the row at a speed of 0.4 m/s，and it can turn to the next row and continue to work. [**Result**]（1）According to the environment of modern dwarf dense orchard，the algorithm in the article can independently generate stable navigation position according to the three-dimensional point cloud of fruit trees on both sides；（2）Orchard operation robot can drive along the center of orchard and is able to correct its pose in real time based on changes in the orchard rows. When the speed is 0.4 m/s，the lateral average deviation of the robot motion is 0.1 m，and the average heading deviation is 1.04°；（3）Based on the condition that the orchard row width is equal，the orchard operation robot can automatically turn to the next row at the end of the current row. Then continue driving along the center of the row. [**Conclusion**] The autonomous navigation system of the orchard operation robot in the article is reasonable in design，moreover，it has high stability in algorithm，high accuracy in navigation，and is not affected by driving road conditions，which can meet the autonomous driving demand of dwarf dense planting orchard operation.

Key words：orchard row；autonomous navigation；lidar；orchard operation robot