

基于 ROS2 的稻麦轮作农田智能路径规划与自动导航系统

陈立邦^{1,3}, 杜歆桐², 张 波², 吴春笃^{1,3}

(1. 江苏大学 农业工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013;

3. 江苏省现代农业装备与技术协同创新中心, 江苏 镇江 212013)

摘要: 针对稻麦轮作农田中农机自动导航系统稳定性与智能化水平亟待提升的现状, 集成传感数据融合技术、经过优化的智能路径规划算法和自动化的导航控制模块, 开发了一套智能农用导航系统。该系统的核心架构基于第二代机器人操作系统(ROS2), 利用其强大的通信能力和丰富的软件包支持, 构建了高精度实时动态定位系统(RTK-GNSS), 通过扩展卡尔曼滤波器(EKF)对GPS信号、惯性测量单元(IMU)数据和里程计信息进行深度融合, 实现了同步定位与建图(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)功能, 为农业机械提供实时、准确的位置信息, 集成至ROS2的Navigation2堆栈以执行导航任务。同时, 配套研发了适配ROS2的农田路径规划算法(Farmland path planning, FPP), 以优化路径规划方案, 并结合Mapviz接入天地地图实现导航过程可视化操作。依托3WPZ-500K型喷雾机作为试验平台, 进行了农机调度和现场作业导航试验, 结果显示: 平均横向偏移误差为7.68 cm、作业导航点平均误差为2.25 cm、速度平均误差为0.026 m/s、航向角平均误差为0.036 rad。整个导航系统能长时间稳定运行, 可满足农机调度和田间作业导航需求。

关键词: 稻麦轮作; ROS2; 路径规划; SLAM; RTK; Navigation2; EKF

中图分类号: S24; TN967.1

文献标识码: A

文章编号: 1003-188X(0000)00-0000-00

陈立邦, 杜歆桐, 张波, 等. 基于 ROS2 的稻麦轮作农田智能路径规划与自动导航系统[J]. 农机化研究

CHEN Libang, DU Xintong, ZHANG Bo, et al. Intelligent path planning and autonomous navigation system of rice-wheat rotation farmland based on ROS2[J]. Journal of agricultural mechanization research

0 引言

无人农场是实现智慧农业的重要途径^[1-3]。在探索无人农场在现代农业中的作用中, 罗锡文团队提出了大田无人农场系统架构的四大核心关键技术“数字化感知、智能化决策、精准化作业、智能化管理”^[4]。其中, 精准化作业包括农机自动导航技术和农机精准作业技术, 是提升农业生产效率、降低成本、促进可持续发展的关键途径^[5]。在现代农业生产中, 精确导航技术对于实现作物精准管理、减少资源浪费具有重要意义^[6]。传统农业作业依赖人工操作, 不仅效率低, 还难以保证作业精度与一致性。近年来, 基于全球导航卫星系统(GNSS)和惯性导航系统的导航技术虽有进步, 但在复杂农田环境下的定位精度与可靠性仍面临挑战^[7]。因此, 开发集成高级感知、智能规划与自主控制能力的农业导航系统成为迫切需求。ROS2(Robot

Operating System 2)是一个用于开发机器人应用程序的开源框架, 是新一代机器人软件框架, 通过提供丰富的中间件支持、改进的安全性和实时性, 为开发复杂机器人系统提供了更加稳健的平台^[8]。Navigation2^[9]是ROS2中专为移动机器人设计的导航解决方案^[10], 集成了SLAM、路径规划、轨迹跟踪和避障等功能模块^[11], 适用于动态复杂的作业环境^[12]。

Hong团队^[13]利用ROS2框架处理和融合传感器数据, 通过SOME/IP协议实现了与AUTOSAR平台的融合。Ngoc等^[14]基于ROS2的框架, 实现YOLOv8对信号灯的识别, 基于端到端卷积神经网络(CNN)的转向角预测实现了控制器对汽车转向的控制。Ngoc等^[15]结合Gazebo和Cartographer实现了室内SLAM。Macenski团队^[16]验证了Navigation2的集成算法, 包括控制算法A*、Dijkstra算法和DWA(Dynamic Window Approach)算法等。江航等^[17]在ROS2的基础上设计了AMR的硬件和软件系统架构, 描述了基于AMR的多传感器数据融合与地图构建技术。李舰飞等^[18]基于ROS2操作系统, 采用树莓派4B为中枢, 搭载了Astra深度相机、镭神N10激光雷达、蓝牙和W-Fi等模块, 开发了一款搭载建图、导航和视觉检测功能的移动小车。上述研究小组利用ROS2实现了传感器数据处理、基于深度学习的目标识别与车辆控制、SLAM技术、导

收稿日期: 2024-08-30

基金项目: 江苏省科技项目(BE2022338); 现代农业装备与技术协同创新中心项目(XTCX1004)

作者简介: 陈立邦(1999-), 男, 四川绵阳人, 硕士研究生, (E-mail) clibang2022@163.com。

通信作者: 吴春笃(1962-), 男, 浙江温州人, 博士, 教授, 博士生导师, (E-mail) wucd@ujs.edu.cn。

航算法的系统验证、AMR 的系统架构优化,以及集成了建图、导航与视觉检测的多功能无人车的开发,证明了 ROS2 在自动驾驶技术革新与实际应用部署上的深远影响。由此可知 ROS2 作为自动驾驶技术发展的关键技术,支持复杂传感器融合、精准物体识别、高效 SLAM 导航乃至自主移动机器人的系统设计。但 ROS2 框架目前的运用主要集中在汽车和移动小车上,在农业机器导航的实例很少,基于 ROS2 框架的农业作业路径规划算法也很少。

针对以上问题和需求,创新地提出了基于 ROS2 强大的生态系统下,结合先进控制算法和自定义 FPP (Farmland Path Planning) 的导航系统,通过 Navigation2 融合多种传感器数据,利用其模块化设计与灵活配置能力,完成农机的定位与感知,以实现在复杂农田环境中的精确导航。

1 导航系统设计方案

在 ROS2 humble 版本的框架下,基于精确的位姿和实时更新的地图,结合 Mapviz 调用天地地图接口,发布田块边界坐标/polygon_GPS 话题消息,FPP 接受边界点坐标,进行导航的航点规划,发布导航点/path_list 话题。Navigation2 模块接受传感器数据实现定位,根据已经规划的导航点进行路线规划,发布/cmd_vel 话题(速度和角度控制参数),控制农机移动,实现导航,整个导航系统框架如图 1 所示。

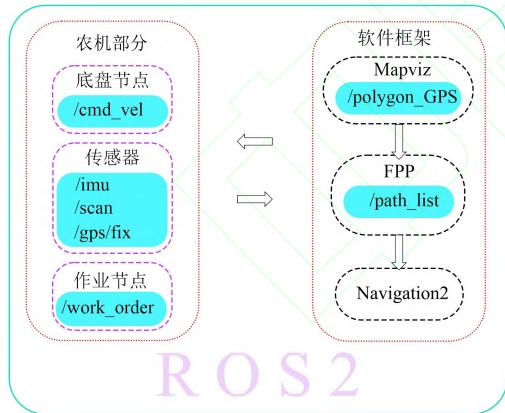


Fig.1 Navigation system frame diagram

1.1 姿态与定位

要实现导航首先需要确定农机的姿态和位置,在基于 Nav2 的导航系统中,为机器人构造一个 map \rightarrow odom \rightarrow base_link \rightarrow [sensor_frames] 的完整的坐标转换以确定机器的姿态^[8]。

坐标转换树如图 2 所示,map 为全局坐标系,odom 为里程计坐标系,base_link 为农机的坐标,sensor_frames 包含传感器的坐标和轮子坐标系,base_footprint

为农机在 odom 上的投影。全局定位系统的实现至少要提供 map \rightarrow odom 的坐标转换。本研究使用 RTK 技术构建了一个接收 GPS 信号的自定义模块,完成 map \rightarrow odom 的坐标转换,以提供全局定位,使用里程计系统提供 odom \rightarrow base_link 的坐标转化。

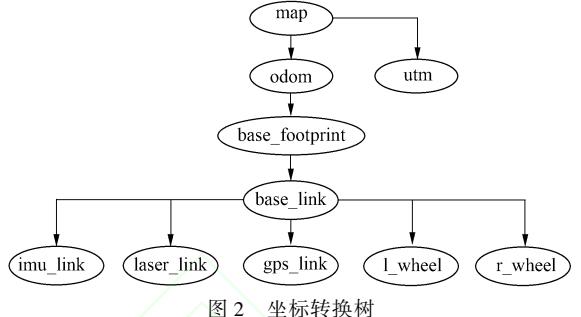


Fig.2 Coordinate transformation tree

由于 RTK 系统会因为天气、路段的原因无法完全消除 GPS 信号的离散性,因此设置了两个扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman Filter)将 GPS 数据融合到位姿估计中。一个 ekf_node_odom 节点将轮子里程(odom)和惯性测量单元(IMU)的数据融合,使用连续数据源来估计机器人的状态,并将 odom_frame 作为世界坐标系,实现 odom \rightarrow base_link 的坐标转化,得到里程计的坐标变换,用于局部路径计划和运动执行。基于全局定位设置了第二个卡尔曼滤波器 ekf_node_map 节点,融合了 IMU、里程计数据和 GPS 数据,将 map_frame 作为世界坐标系,实现了 map \rightarrow odom 的坐标转化,用于全局定位。

1.2 扩展卡尔曼滤波器设置

基于 ROS2 中 ekf_node 节点设置了两个扩展卡尔曼滤波器,即 ekf_node_odom 和 ekf_node_map。滤波器的状态向量包含位置(x, y, z)单位 m、姿态角($roll, pitch, yaw$)单位 rad、速度(vx, vy, vz)单位 m/s、姿态角速度($vroll, vpitch, vyaw$)单位 rad/s 和加速度(ax, ay, az)单位 m^2/s ,共 15 个变量。基于 2D 平面的导航,很多变量不需考虑,所以要对状态向量进行筛选。关于里程计和 IMU 的筛选器 imu_1,odom_1 和用于筛选需要进行融合的状态变量如图 3 所示。其中,true 为使用该变量,flase 为不使用该变量。

状态变量		
x	y	z
$roll$	$pitch$	yaw
vx	vy	vz
$vroll$	$vpitch$	$vyaw$
ax	ay	az

imu_1	odom_1
flase	flase
flase	flase
true	true
flase	flase
flase	flase
flase	flase

Fig.3 局部状态变量筛选结果

Fig.3 Screening results of local state variables

在 ekf_node_odom 设置中,我们只选择了速度

(vx, vy, vz) 和姿态角速度 ($vyaw$) , 而 IMU 只选择了姿态角 (yaw)。其噪声协方差矩阵是一个 15×15 的除对角线外其余部分为 0 的对角矩阵, 对角线数据根据传感器本身的误差值设定为 $Q_k = [10^{-3}, 10^{-3}, 10^{-3}, 0.3, 0.3, 0.01, 0.5, 0.5, 0.1, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3]$ 。

ekf_node_map 滤波器添加了 GPS 数据的融合, 但只用于 2D 的全局定位, 所以只需考虑其位置 (x, y), 筛选结果 $odom_2$ 、 imu_2 和 gps 如图 4 所示。其噪声协方差矩阵对角线数据为: $Q_k = [1.0, 1.0, 10^{-3}, 0.3, 0.3, 0.01, 0.5, 0.5, 0.1, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3]$ 。导入 $odom_1$ 和 imu_1 或者 $odom_2$ 、 gps 和 imu_2 矩阵, 对于需要更新的状态元素, 该矩阵根据筛选器的结果中 $true$ 设置为 1, $flase$ 为 0, 得到观测矩阵 H_k 。

$$V_x = [cy * cp * \delta, (cy * sp * sr - sy * cr) \delta, (cy * sp * sr + sy * sr) \delta] \quad (1)$$

$$V_y = [sy * cp * \delta, (sy * sp * sr + cy * cr) \delta, (sy * sp * sr - cy * sr) \delta] \quad (2)$$

$$V_z = [-sp * \delta, cp * sr * \delta, cp * cr * \delta] \quad (3)$$

$$A_x = 0.5 [(cy * cp * \delta) \delta, (cy * sp * sr - sy * cr) \delta^2, (cy * sp * sr + sy * sr) \delta^2] \quad (4)$$

$$A_y = 0.5 [sy * cp * \delta^2, (sy * sp * sr + cy * cr) \delta^2, (sy * sp * sr - cy * sr) \delta^2] \quad (5)$$

$$A_z = 0.5 [(-sp * \delta) \delta, cp * sr * \delta^2, cp * cr * \delta] \quad (6)$$

2) 姿态角 ($roll, pitch, yaw$): 受到角速度分量 ($vroll, vpitch, vyaw$) 的影响, 需体现姿态角随时间的微小变化记为 (V_{ro}, V_{pi}, V_{ya}); 线速度 (vx, vy, vz) 受加速度分量 (ax, ay, az) 影响, 要体现速度随时间的线性累加, 记为 (A_{vx}, A_{vy}, A_{vz}), 即

$$V_{ro} = [\delta, sr * tp * \delta, cr * tp * \delta] \quad (7)$$

$$V_{pi} = [0, cr * \delta, -sr * \delta] \quad (8)$$

$$V_{ya} = [0, sr * cpi * \delta, cr * cpi * \delta] \quad (9)$$

$$A_{vx} = [\delta, 0, 0] \quad (10)$$

$$A_{vy} = [0, \delta, 0] \quad (11)$$

$$A_{vz} = [0, 0, \delta] \quad (12)$$

式中: δ 为间隔时间, $cy, cp, sr, cr, sy, sp, tp, cpi$ 为 $\cos(yaw), \cos(pitch), \sin(roll), \cos(roll), \sin(yaw), \sin(pitch), \tan(pitch), 1/\cos(pitch)$ 的缩写。

将式(1)~式(12)带入 A_k 中得

状态矩阵 A_k 中的元素确定。

imu_2	odom_2	gps
flase flase flase	flase flase flase	true true flase
flase flase flase	flase flase true	flase flase flase
true true true	flase flase flase	flase flase flase
flase flase flase	flase flase flase	flase flase flase
flase flase flase	flase flase flase	flase flase flase

图 4 全局状态变量筛选结果

Fig.4 Global state variable filtering results

1) 位置 (x, y, z): 需要涉及到速度分量 (vx, vy, vz) 在当前姿态下的积分效果, 以及加速度 (ax, ay, az) 引起的位移变化, 即式(1)为 x 相对于速度的积分效果元素, 式(4)为 x 相对于加速度引起的位移变化元素。同理, 得到 V_y 式(2)、 V_z 式(3)、 A_y 式(5) 和 A_z 式(6)。

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} 100\ 000\ V_x\ 000\ A_x \\ 010\ 000\ V_y\ 000\ A_y \\ 001\ 000\ V_z\ 000\ A_z \\ 000\ 100\ 000\ V_{ro}\ 000 \\ 000\ 010\ 000\ V_{pi}\ 000 \\ 000\ 001\ 000\ V_{ya}\ 000 \\ 000\ 000\ 100\ 000\ A_{vx} \\ 000\ 000\ 010\ 000\ A_{vy} \\ 000\ 000\ 001\ 000\ A_{vz} \\ 000\ 000\ 000\ 100 \\ 000\ 000\ 000\ 010 \\ 000\ 000\ 000\ 001 \\ 000\ 000\ 000\ 000 \end{bmatrix} \quad (13)$$

由于各状态向量影响,利用三角函数关系和给定的时间步长 δ ,计算每个状态量随时间的线性变化率,其余部分置0,得到状态转移矩阵 A_k 。由于系统是非线性的,先用非线性函数预测状态,再利用这个函数在当前估计状态点的泰勒级数展开,其中一阶导数组成了雅可比矩阵 F_k ,如(14)所示,表示在当前状态点附近进行线性化,所以矩阵发生变化的元素为

$$F_k = \begin{bmatrix} 100 X_{rpy} V_x 000 A_x \\ 010 Y_{rpy} V_y 000 A_y \\ 001 Z_{rpy} V_z 000 A_z \\ 000 r_{rpy} 000 V_{ro} 000 \\ 000 p_{rpy} 000 V_{pi} 000 \\ 000 y_{rpy} 000 V_{ya} 000 \\ 000 000 100 000 A_{vx} \\ 000 000 010 000 A_{vy} \\ 000 000 001 000 A_{vz} \\ 000 000 000 100 000 \\ 000 000 000 010 000 \\ 000 000 000 001 000 \\ 000 000 000 000 100 \\ 000 000 000 000 010 \\ 000 000 000 000 001 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$X_{rpy} = [X_r, X_p, X_y] \quad (15)$$

$$Y_{rpy} = [Y_r, Y_p, Y_y] \quad (16)$$

$$Z_{rpy} = [Z_r, Z_p, 0] \quad (17)$$

$$r_{rpy} = [r_r, r_p, 0] \quad (18)$$

$$p_{rpy} = [p_r, 1, 0] \quad (19)$$

$$y_{rpy} = [y_r, y_p, 1] \quad (20)$$

式中: X_r 表示状态转移函数关于状态变量 $roll$ 的变化率的偏导数,影响 x 位置的预测; r_r 是状态转移函数关于 $roll$ 变化率的偏导数,影响 $roll$ 角自身的预测; $X_p, X_y, Y_r, Y_p, Y_y, Z_r, Z_p, r_p, y_r$ 和 y_p 分别对应于 $pitch$ 和 yaw 的变化对于 x, y, z 位置及 $roll, pitch, yaw$ 角度自身预测的偏导数; $X_{rpy}, Y_{rpy}, Z_{rpy}, r_{rpy}, p_{rpy}$ 和 y_{rpy} 是包含3个参数集合。最后得到状态转移雅可比矩阵 F_k [见式(14)]。

3) 状态预测:因为不使用控制矩阵,所以 $x_{k|k-1}$ 是第 k 时刻基于第 $k-1$ 时刻预测的状态,即

$$x_{k|k-1} = A_k x_{k-1|k-1} \quad (21)$$

4) 预测协方差更新:上一时刻的协方差矩阵 $P_{k-1|k-1}$ 、状态转移雅可比矩阵 F_k 和过程噪声协方差矩阵 Q_k ,得到预测协方差矩阵 $P_{k|k-1}$ 为

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k \quad (22)$$

卡尔曼增益计算,观测噪声的协方差矩阵 R_k 从测

量数据的协方差矩阵提取所得,观测矩阵为 H_k ,由此得卡尔曼增益 K_k 为

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (23)$$

更新状态估计,基于预测的状态如式(19)所示,测量值 z_k ,卡尔曼增益 K_k 更新状态估计为

$$x_{k|k} = x_{k|k-1} + K_k (z_k - H_k x_{k|k-1}) \quad (24)$$

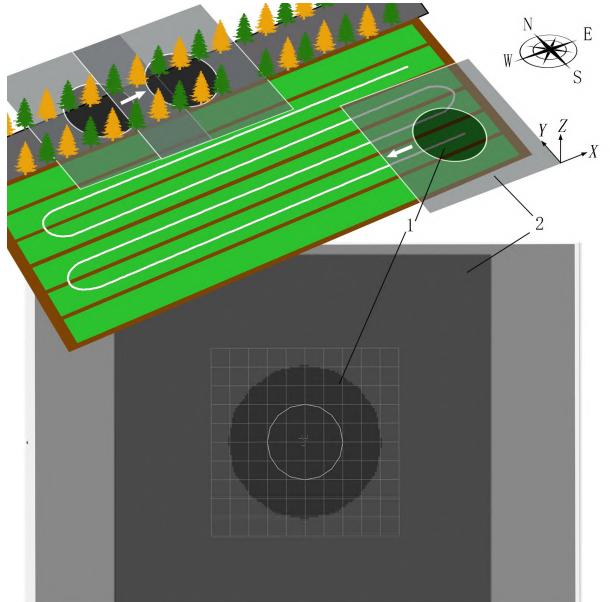
最后,根据卡尔曼增益 K_k 和观测残差更新协方差矩阵,其中 I 为单位矩阵,则

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (25)$$

两个扩展卡尔曼滤波器节点,接受 $odom$ 、 imu 和GPS的数据输入,通过式(21)-式(25)不断迭代并将其融合到状态估计中,输出机器人的 $odom$ 、 $base_link$ 等坐标系的变换,为后续导航规划等模块提供一个准确的机器人位置和姿态估计。

1.3 同步定位与地图构建

要实现导航还需构建两种地图,全局代价地图(Global Costmap)和局部代价地图(Local Costmap),如图5所示。传统的全局代价地图包含静态地图层(Static Map Layer)、障碍地图层(Obstacle Map Layer)和膨胀层(Inflation Layer);局部代价地图用于局部路径规划,包含障碍地图层和膨胀层^[11]。图5中,设定全局代价地图坐标系的 X 轴与正东方向一致, Y 轴与正北方一致, Z 轴垂直于 XY 平面向上。根据田块的面积、导航点的分布、农机传感器的感知能力和控制系统的计算能力设置了滚动全局代价地图为 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$,根据农机的尺寸和农机感知能力设定了半径为4 m的滚动局部代价地图。



1.局部代价地图; 2.全局代价地图。

图5 全局地图和局部地图

Fig.5 Global map and local map

在田间导航中,因为地域辽阔,会出现构建的地图较大、加载缓慢、内存占用大的情况^[19]。于是删除了静态地图层和膨胀层,自定义了滚动的代价地图,如图 5 上半部分为农机随着移动方向向前更新地图,图 5 下半部分为本次试验构建的滚动地图。随着农机的移动不仅局部地图会及时更新,全局地图也会不断地更新,以到达更远的目标点。

1.4 路径规划算法(FPP 算法)

Mier 等^[20]研发了一种用于农用车辆路径规划的算法并融入到了 ROS 和 ROS2 框架里。但该算法计算的路径只能满足单一的 S 型覆盖路径,杨丽丽团队^[21]提出了一种基于二次规划的局部路径规划方法,比采用静态状态栅格法平均耗时减少 38 ms,算法效率提升 44%。侯晓晓等^[22]提出了混合整数线性规划模型,以解决农用运输车田间多车路径规划问题。姜龙腾等^[23]设计了基于神经元激励网络法的全覆盖路径规划方法,该方法覆盖完成率均为 100%,路径重复率 5.49%。故在此基础上研发了 FPP 算法,可根据传入的田块 4 个顶点的坐标值、定义的作业宽度生成田间转弯点,然后将按一定顺序排好的路径转弯点传递给导航系统的规划器。目前设计了两种路径航点提取方法如图 6 所示。首先,传入农田的 4 点坐标 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 ,生成一个与田块匹配的四边形,再进行坐标平移与旋转,让 $P_1(0,0)$, P_2 落在 X 轴上,再根据新的 4 点函数关系,分别生成 4 条直线方程 L_1 、 L_2 、 L_3 和 L_4 ,并得到其斜率和截距记为 α 和 β ,后续流程如图 6 所示。

路径 A 型算法:如图 6 中第 2 步,根据作业宽度 d 和四条边的方程,求缩小后的四条边的直线方程斜率和截距,因为斜率没有改变,只需求 4 条边的截距,即

$$\tau = d / \cos\theta \quad (26)$$

$$\theta = 90^\circ - \arctan\alpha \quad (27)$$

$$\eta = \beta + \tau \quad (28)$$

$$L = Nd \quad (29)$$

式中: θ 为直线与 y 轴夹角, τ 为相对于原直线的截距变化量, η 为缩小四边形直线的截距, L 为每次求转弯点的指标方程, N 为农机的转弯次数。

依次求得 4 条线的斜率和截距。选择 L 作为路径规划动态变化的指标线(与路径平行的边)如图 6 第 3 步,传入作业宽度计算坐标偏移量。 L 分别与 L_1 、 L_2 、 L_3 和 L_4 求交点,得到的点即为转弯点,随着转弯次数增加依次求出所有点储存于 A_list 列表中。

路径 B 型算法:如图 6 中第 2 步,基于已知的 L_1 、 L_2 、 L_3 和 L_4 的斜率和截距求得四条线的交点 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 即为转弯点;但还需换行求得一个换行点 P_5 ,

计算式为

$$D = d / \sin(\arctan\alpha) \quad (30)$$

$$P5 = (\varepsilon + D, Nd) \quad (31)$$

式中: D 为 $P5$ 点相对于 $P1$ 点的距离, ε 为 $P1$ 点在 x 轴的坐标值。重复此操作直到完全覆盖田块并把所求的全部点储存于 B_list 列表中。

根据农机的需求从 A_list 和 B_list 中提取可用的转弯点储存于 $path_list$ 列表中,最后把算法计算过程封装成 $path_planning_node$ 节点,实现接受/ $polygon_GPS$ 话题(包含田块 4 个定点的坐标),发布 $path_list$ 功能。包含原始坐标 $path_list$ 会被发送给导航系统,用于后续导航。

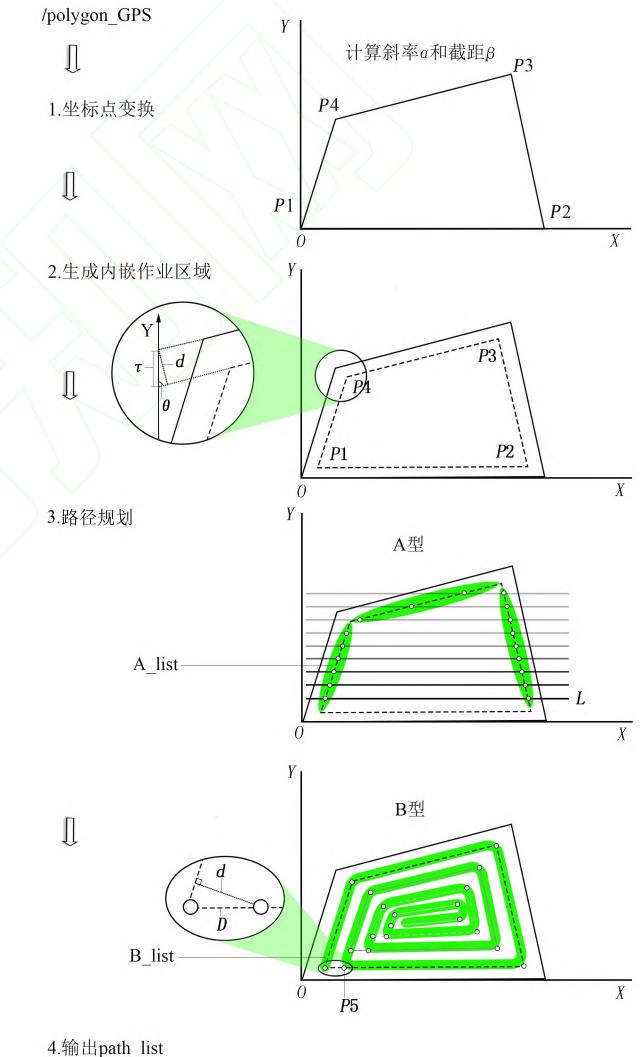


图 6 FPP 算法步骤

Fig.6 FPP algorithm steps

1.5 导航设计

在基于 ROS2 的导航堆栈 Navigation2 的基础上,通过融合 Mapviz 的可视化操作和 FPP 路径规划算法,重构出了一种基于 Navigation2 的专门为农机提供导航服务的系统。整个导航系统通过行为树(BT

Navigator Server) 组织和调用恢复器、规划器和控制器以实现导航。

规划器会根据传入的目标点生成路径，并把路径传递给控制器^[8]，控制器再发布速度角度控制命令控制农机依照规划器传递的路径前往目标点，当出现故障时，恢复器会启动让农机摆脱困境，并重新规划路径。

基于上述导航结构，使用 State Lattice 规划器内置的 A* 算法来生成路径，如图 7 所示。图 7 中 wp1, wp2 和 wp3 为导航点。选择 DWB 控制器里内置的 DWA 算法，控制农机的移动与避障。

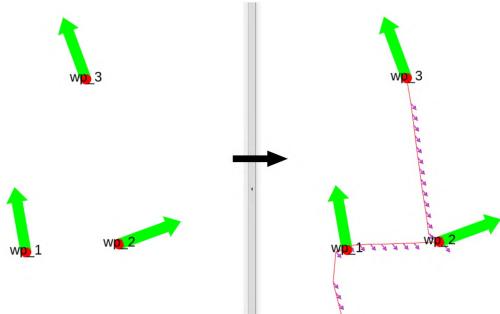


图 7 规划器生路径

Fig.7 Planner generates path

首先，通过接受 TF 转换、map 和传感器数据获得农机自身的姿态与定位，在此基础上接受 path_list 并从中依次提取出 2 个点作为起点和终点，使用 State Lattice 进行全局路径规划，生成由当前位置到目标位置的最优路径，输出两点间的路径/PointStamped 话题。对于局部路径规划，DWB 控制器接受/PointStamped 话题，基于局部地图上的激光雷达数据，标识出环境中的障碍物位置和大小，调整农机的速度和方向，在避免障碍物的同时，高效、平稳地跟踪全局路径。

在到达目标点后，以当前点为起点，下个点为终点继续行驶，直到完成/path_list 里最后一个点结束。这样多条点与点的路径/PointStamped 的组合就合成了农田作业的整体路径。当农机定位失效时，会触发定义的恢复器，重新启动发布/gps/fix 话题的相关节点，重新获取 GPS 信号。

1.6 硬件设计

1) 姿态 imu 标定。本研究设置的 X 轴指向正东方，Y 轴指向正北方，Z 轴垂直于 XY 轴垂直向上，与 map 坐标系一致，IMU 坐标的 X 轴方向与农机前进方向齐平，这样可以通过 imu 的四元数变化，不需经过坐标转换就可用于农机相对于 map 坐标的变化和农机姿态估计。

2) 激光雷达。激光雷达使用 Unitree 4D LiDAR L1

倾斜放置，扫描农机前方和上方，取用高度 1.0 m 的点云数据用于构建 2D 滚动的障碍地图层。

3) 试验农机设计。自动导航作业系统由 3WPZ-500K 高地隙喷雾机进行验证，植保机的控制板作为底层控制提供了 can 和 rs485 的通信接口^[24-26]，香橙派作为上层控制核心只需要输出速度和转向的命令就可以控制植保机的运行，喷雾机导航测试平台如图 8 所示。



1.RTK 差分定位板；2.IMU；3.香橙派；4.植保机控制板；

5.GNSS 天线；6.激光雷达；7.控制箱。

图 8 喷雾机导航测试平台

Fig.8 Navigation test platform of sprayer

其中，3WPZ-500K 高地隙植保机转向形式为四轮差速转向，车轮大小一致。为前-后双转向轴的 4WID 驱动底盘结构，最大转向角度为 25°。根据植保机的结构和传感器位置构建 3D 模型，设置最大转向角度为 0.4363 rad(约为 25°)，并转换成 URDF 文件，用于描述各个传感器与植保机底盘 base_link 的坐标关系和发布各个传感器和车轮的坐标变化。

2 导航实现

试验地为江苏省镇江市句容市后白镇后白良种场，试验选取了一块长 170 m、68 m 的稻麦轮作农田，进行农机导航系统的验证。整个试验过程分为农机从仓库门口导航到田块入口和在田间进行作业导航两部分，试验地的土壤为新近耕翻的细碎土层。田间试验如图 9 所示。



图 9 植保机田间试验

Fig.9 Field experiment of plant protection machine

2.1 转场导航

在转场导航过程中,发布一个(clicked_point 话题,包含目标点经纬度、海拔等数据,定义的插件 transform_gps 节点接受(clicked_point 话题经过转换后发布/PointStamped 话题包含映射到 map 坐标系下的坐标点,导航模块接受目标点坐标值,调用 BT navigator 服务,启动导航系统,控制农机前往目标点。测试的转场导航如图 10 所示,实现了农机从仓库导航到田块入口。

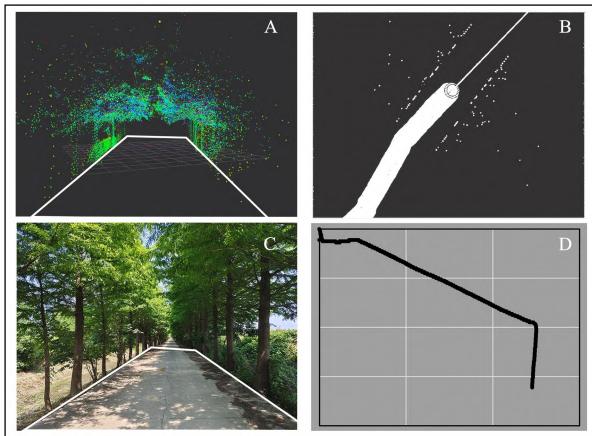


图 10 道路导航行驶

Fig.10 Road navigation driving

图 10 中,A 为 3D 激光雷达点云图;B 为构建的 2D 滚动代价地图用于导航,白点为取高度为 1 m 的激光雷达数据作为的障碍物地图层,根据其控制农机避障;C 为道路真实环境,由于路边均种植了高大且密集的树木,所以可以很好的利用激光雷达进行建图导航,其中白色框为可行驶的路面参考边界;D 为农机在道路上行驶的整个的路线轨迹。

2.2 田间导航

要实现农田作业,首先要农机导航到田块入口附近,之后需要结合 Mapviz 点击目标田块的边界点,勾选作业区域后,发布/polygon_GPS 包含田块 4 个边界点坐标的话题,内含 FPP 算法的 rote_node 节点会接受/polygon_GPS 话题,规划好整个田块的作业航点并发布到/path_list 话题给规划器,规划器则成路线,控制器发布控制命令,控制农机导航,导航试验结果如图 11 所示。

图 11(a)中,白线为规划路线,黑点为农机在田间进行自动导航的实际行驶路线,其平均横向偏移误差为 7.68 cm, P_1 到 P_{10} 为目标航点,航点平均误差为 2.25 cm、最大误差为 5.48 cm,实际轨迹与规划路径基本重合。图 11(b)为目标偏航角弧度 A_a 和实际偏航角弧度 A_b ;图 11(c)为行驶过程记录的目标速度 V_b 和实际速度 V_a ,实际运行速度和转角与控制指令基本一

致。由图 11(a)可知,农机进行了 4 次掉头,分别对应了图 11(b)、11(c)中 4 次大的速度和角度波动,但在运行约 200 s 时出现了不正常的速度大幅度下降和角度轻微变化,这可能是由于 GPS 信号丢失的影响,调用了恢复器重启 GPS 节点。当农机运行速度为 1 m/s 时,速度平均误差为 0.026 m/s、最大为 0.098 m/s,角度平均误差为 0.036 rad(约为 2°)、最大误差为 0.290 rad(约为 16°)。

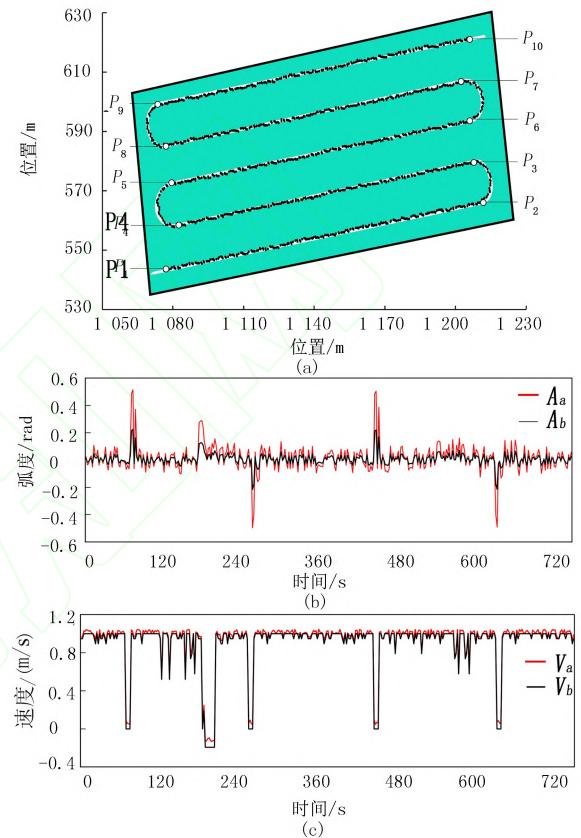


图 11 导航试验结果

Fig.11 Navigation test results

3 结 论

提出了一种用于稻麦田的农机自动导航系统和可嵌入到 ROS2 系统的路径规划算法(FPP)。系统结合 Mapviz 实现地图交互,点击地图发布目标航点,勾选作业区域,调用 FPP 算法路径规划作业路径,发布作业路线航点,基于 ROS2 的导航堆栈 Navigation2 作为导航核心,接受目标航点和作业路线航点控制农机行走。

以 3WPZ-500K 高地隙植保机为试验对象,结果表明:当以 Navigation2 作为导航核心时,会自行根据设定的速度和最小转弯半径进行掉头和转弯,验证了 Navigation2 的高度模块化和可扩展性。当期望行驶速度为 1.0 m/s 时,速度平均误差为 0.026 m/s、角度平

均误差为 0.036 rad、平均横向偏移误差为 7.68 cm、航点平均误差为 2.25 cm, 算法可在低功耗和低成本的 arm 架构上长时间(采样时间 720 s)平稳运行, 运行过程中其使用内存约为 3.2 GB, 缓冲/缓存占用内存保持在 4.3 GB 左右, 完全满足 orangepi5B 的内存配置。证明了提出的基于 ROS2 的农机导航系统在田间导航中的稳定性和可靠性, 可以满足田间导航的需求。

参考文献:

- [1] 徐尤华,熊传玉.智慧农业下的水肥一体机精准化作业研究[J].农机化研究,2024,46(8):231-234,239.
- [2] 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.
- [3] 郭建军,曹彦,梅雪,等.自动驾驶技术在农业机械中应用[J].农业工程,2023,13(11):32-36.
- [4] 罗锡文,胡炼,何杰,等.中国大田无人农场关键技术研究与建设实践[J].农业工程学报,2024,40(1):1-16.
- [5] 万欢,欧媛珍,管宪鲁,等.无人机作业环境感知技术综述[J].农业工程学报,2024,40(8):1-18.
- [6] 卢彩云,罗锡文,李洪文,等.我国保护性耕作的发展与政策建议[J].中国工程科学,2024,26(2):103-112.
- [7] 张天,张智刚,罗锡文,等.低功耗 BDS-SPP/INS 融合定位系统的设计与试验[J].华南农业大学学报,2024,45(3):437-445.
- [8] MACENSKI S, MARTIN F, WHITE R, et al. The marathon 2: A navigation system[C]//2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Las Vegas, 2020.
- [9] HORELI ČAN T, ŽALUD L. Deployment & evaluation of modern Ros2 navigation algorithms for high autonomy in complex environments[J]. Robotics and autonomous, 2024.
- [10] SÁNCHEZ-IBÁÑEZ J R, PÉREZ-DEL-PULGAR C J, GARCÍA - CEREZO A. Path planning for autonomous mobile robots: A review [J]. Sensors, 2021, 21 (23):7898.
- [11] MACENSKI S, SINGH S, MARTÍN F, et al. Regulated pure pursuit for robot path tracking [J]. Autonomous robots, 2023, 47(6):685-694.
- [12] MERZLYAKOV A, MACENSKI S. A comparison of modern general-purpose visual SLAM approaches [C]//2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2021.
- [13] HONG D, MOON C. Autonomous driving system architecture with integrated ROS2 and adaptive AUTOSAR[J]. Electronics, 2024, 13(7):1303.
- [14] NGOC H T, NGUYEN K H, HUA H K, et al. Optimizing YOLO performance for traffic light detection and end-to-end steering control for autonomous vehicles in gazebo-ROS2 [J]. International journal of advanced computer science and applications, 2023, 14(7):475-484.
- [15] NGOC H T, VINH N N, NGUYEN N T, et al. Efficient evaluation of SLAM methods and integration of human detection with YOLO based on multiple optimization in ROS2 [J]. International journal of advanced computer science and applications, 2023, 14(11):300-310.
- [16] MACENSKI S, MOORE T, LU D V, et al. From the desks of ROS maintainers: A survey of modern & capable mobile robotics algorithms in the robot operating system 2 [J]. Robotics and autonomous systems, 2023, 168:104493.
- [17] 江航,邱胜海,孙小肖,等.ROS2 环境下移动机器人导航及路径规划研究[J].物联网技术,2023,13(12):125-127.
- [18] 李舰飞,孙合力,吕泽龙.基于 ROS2 的无人安全巡逻车设计[J].无线互联科技,2023,20(20):37-39.
- [19] MACENSKI S, FOOTE T, GERKEY B, et al. Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild [J]. Science robotics, 2022, 7(66):eabm6074.
- [20] MIER G, VALENTE J, DE BRUIN S. Fields2Cover: An open-source coverage path planning library for unmanned agricultural vehicles[J]. IEEE robotics and automation letters, 2023, 8(4): 2166-2172.
- [21] 杨丽丽,唐晓宇,吴思贤,等.机耕道自动驾驶农机局部路径规划[J].农业工程学报,2024,40(1):27-36.
- [22] 侯晓晓,涂亚楠,王蒙.农业收获运输车多车路径规划的优化研究[J].农机化研究,2024,46(8):259-263.
- [23] 姜龙腾,迟瑞娟,马悦琦,等.基于栅格法的农业机器人路径规划方法研究[J].农机化研究,2024,46(6):19-24.
- [24] 刘九庆,丁鹏,于文吉.基于模糊 PID 控制的拖拉机遥控转向系统研究[J/OL].农机化研究,2025,47(3):234-241.
- [25] 张智刚,黄海翔,罗锡文,等.基于电动方向盘的拖拉机自动导航转向控制方法[J].农业工程学报,2024,40(1):48-57.
- [26] 王全,陈学海,杨光友,等.田间轮式机器人的导航控制系统设计[J].农机化研究,2024,46(8):115-119.

Intelligent Path Planning and Autonomous Navigation System of Rice-wheat Rotation Farmland Based on ROS2

Chen Libang^{1,3}, Du Xintong², Zhang Bo², Wu Chundu^{1,3}

(1.School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2.School of Environmental and Safety Engineering ,Zhenjiang 212013, China; 3 Jiangsu Modern Agricultural Equipment and Technology Collaborative Innovation Center, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In view of the current situation that the stability and intelligence level of agricultural machinery automatic navigation system in rice-wheat rotation farmland need to be improved urgently, integrated sensor data fusion technology, optimized intelligent path planning algorithm and automatic navigation control module to develop an intelligent agricultural navigation system. The core architecture of the system was based on the second-generation robot operating system ROS2. With its powerful communication ability and rich software package support, a high-precision Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System (RTK-GNSS) was built. By deeply integrating GPS signals, Inertial Measurement Unit (IMU) data and odometer information through Extended Kalman Filter (EKF), the function of Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) was realized, which provided real-time and accurate position information for agricultural machinery. At the same time, the Farmland path planning algorithm adapted to ROS2 was developed to optimize the path planning scheme, and the navigation process was visualized by connecting Mapviz to the map of heaven and earth. Based on the 3WPZ-500K sprayer as the test platform, the agricultural machinery dispatching and field operation navigation experiments were carried out. The measured data showed that the average error of operation navigation point was 2.25 cm, the average error of speed was 0.026 m/s and the average error of heading angle was 0.036 rad. The whole navigation system can run stably for a long time, indicating that the navigation system can meet the requirements of agricultural machinery dispatching and field operation navigation.

Key words: rice-wheat rotation; ROS2; path planning; SLAM; RTK; Navigation2; EKF

