2026 年 3 月 农 业 机 械 学 报 第 57 卷 第 6 期

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.06.023

基于多源信息融合的猪舍内车辆自主导航系统

龙长江[1,2] 朱仕俊[1] 谭鹤群[1,2] 黎 煊[1,2] 刘子扬[1] 孟 岩[1]

(1.华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2.农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对智能化无人生猪养殖车辆自主巡检问题,本研究提出基于多源信息融合的猪舍自主导航系统。基于三维激光雷达的激光-惯性紧耦合算法 Fast-LIO2 获取里程计信息,通过基于因子图优化的回环建图算法构建猪舍环境地图,研究基于地图配准的定位算法和基于反光柱匹配的定位算法实现导航平台的定位,利用迪杰斯特拉算法和时间弹性带算法分别规划全局路径和局部路径,最终实现猪舍场景下的自主导航。试验结果表明,基于因子图优化的回环建图算法构建的猪舍地图最大绝对误差为 0.077 m,最大相对误差为 3.79%,精度高于不含回环检测的建图算法。基于地图配准的定位算法 x 和 y 方向平均偏差分别为 0.066 m 和 0.052 m,基于反光柱匹配的定位算法 x 和 y 方向平均偏差分别为 0.046、0.042 m,2 种定位算法精度均高于自适应蒙特卡洛定位算法,二者配合使用,同时保证了自主导航系统定位精度和鲁棒性。当移动平台速度为 0.3 m/s 时,实际导航点与设定目标点之间的横向偏差最大值为 0.09 m,纵向偏差最大值为 0.089 m,航向角平均偏差为 7.06°。自主导航系统各项性能指标满足猪舍场景高精度建图、定位和导航要求,为无人化生猪养殖提供了技术支撑。

关键词: 猪舍; 激光-惯性紧耦合算法; 激光雷达; 定位; 导航

中图分类号: TP391.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-1298(2026)06-0249-09 **OSID**:

Multi-source Information Fusion-based Autonomous Navigation System for Vehicles in Swine House

LONG Changjiang[1,2] ZHU Shijun[1] TAN Hequn[1,2] LI Xuan[1,2] LIU Ziyang[1] MENG Yan[1]

(1. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River*,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: This paper presents an autonomous navigation system for unmanned pig farming, using multi-source information fusion. It integrates LiDAR and IMU data via the Fast-LIO2 algorithm for odometry, constructs maps with a factor graph-optimized loop closure method, and localizes using both map registration and reflective pole matching, outperforming Adaptive Monte Carlo Localization. Path planning is handled by Dijkstra's algorithm for global paths and the Time-Elastic Band for local paths, ultimately realizing autonomous navigation in pig house scenarios. Experimental results show that the system achieves mapping with a maximum absolute error of 0.077 m and relative error of 3.79%, with higher accuracy compared to mapping algorithms without loop closure detection. Localization accuracy averages 0.066 m in X and 0.052 m in Y for map registration, and 0.046 m in X and 0.042 m in Y for reflective pole matching. When the mobile platform navigates at a speed of 0.3 m/s, the maximum lateral deviation between the actual navigation points and the target points is 0.09 m, the maximum longitudinal deviation is 0.089 m, and the average heading angle deviation is 7.06°. The system meets high-precision requirements for mapping, localization, and navigation in swine houses, supporting unmanned pig farming operations.

Key words: swine house; laser-inertia tightly-coupled algorithm; LiDAR; localization; navigation

0 引言

自主定位和导航是智能化养殖实现无人化操作的前提。养殖舍场景具有可行驶空间狭小、光照条件复杂、GPS 信号弱、存在随机动态物体等特点,这些因素对导航精度有较大影响,也限制了导航方案的选择[1]。

收稿日期: 2024-12-20 修回日期: 2025-01-20

基金项目: 科技创新 2030—重大项目课题(2022ZD0401802)和中央高校自主科技创新基金项目(2662023DKPY003)

作者简介: 龙长江(1975—),男,副教授,博士,主要从事自动控制和无损检测研究,E-mail: lcjflow@163.com

在目前的自动定位和导航领域中，主要有基于激光雷达或摄像头的同步定位与建图技术[2-3]（Simultaneous localization and mapping，SLAM）、基于全球定位系统（Global positioning system，GPS）或北斗的卫星定位技术[4-5]以及基于磁条[6]、二维码[7]和无线射频识别[8]（Radio frequency identification，RFID）的近距离定位导航技术。其中，基于GPS或北斗的定位技术仅适合在室外大范围无遮挡的环境使用[9]。针对半结构化、半开放式的农业应用场景，邱权等[10]搭建了一种基于多传感器的农业机器人系统，通过GPS和惯性测量单元实现组合定位导航，当卫星导航系统无法进行差分定位或定位数据产生跳变时，通过自适应卡尔曼滤波算法切换到惯导定位，从而实现位姿的最优估计，与GNSS单通道定位、INS单通道定位、常规卡尔曼滤波融合定位相比，自适应系数卡尔曼滤波组合定位方法的定位精度分别提升62.1%、48.5%、47.7%。但是在猪舍全封闭场景下，长时间依靠惯性测量单元无法得到准确的定位结果。李天华等[11]设计了一种基于二维码定位的喷雾机器人，通过二维码融合陀螺仪和光电传感器实现路面关键点定位，其直线行走与对轨误差平均值分别为4.8、5.8 mm。万畅等[12]提出了一种基于磁导航的饲料推送机器人自动充电系统，通过磁传感器检测地面磁条结合模糊PID控制算法实现循迹导航，三轴最大对接偏差绝对值分别为4.1、1.9、0.7 cm。基于二维码的导航技术需要定期维护二维码，且对光照条件有一定要求，不适用于猪舍场景中，基于磁条和RFID的导航只能设置固定行驶路径，无法适应较为复杂的动态环境。

基于激光雷达或相机的SLAM定位导航技术有着较强的环境感知能力，定位导航精度较高，可以构建详细的环境地图，适用于需要高度自主性和适应性复杂环境。孙国祥等[13]提出了一种基于SLAM激光-视觉融合温室导航算法，采用紧耦合雷达-惯性里程计算法建立温室地图，采用基于轮式里程计和视觉里程计的定位算法用于局部定位，融合激光点云配准算法和自适应蒙特卡洛定位算法实现全局定位，最终实现温室场景的自主导航，该算法构建的温室地图最大相对误差和最大绝对误差分别为9.9%、0.081 m；定位算法横向偏差小于0.020 m，纵向偏差小于0.090 m；导航时横向偏差、纵向偏差和航向角偏差平均值小于0.120、0.100 m和8.5°。JIANG等[14]设计了一种基于三维激光雷达的果园喷雾机器人，通过三维激光雷达SLAM算法建立果园地图，利用机器人操作系统实现了果园中避障和导航功能，最大横向定位误差7.04 cm，平均横向导航误差不超过16 cm，平均航向偏差小于8°。

针对猪舍复杂且固定的场景，本研究提出一种基于多源信息融合的自主导航系统，基于半固态三维激光雷达，在Fast-LIO2（Fast-LiDAR Inertial Odometry）里程计算法基础上，添加回环检测和因子图优化构建猪舍地图，并研究基于地图配准的定位算法和基于反光柱匹配的定位算法实现自主导航平台的定位。在导航阶段使用迪杰斯特拉（Dijkstra）算法进行全局路径规划，使用时间弹性带（Time-Elastic-Band，TEB）算法进行局部路径规划，实现猪舍场景的精准定位与导航。

1 自主导航系统组成与硬件架构

1.1 自主导航系统总体组成

猪舍自主导航系统的总体结构如图1所示，采用履带式底盘，相比于轮式底盘能够更好地适应猪舍内复杂地面条件，并且具有更好的载重能力和稳定性[15]。由于猪舍环境内可能存在的潮湿、腐蚀性气体等，采用不锈钢材质的底盘外壳并做填缝处理，电路板做防腐涂层处理，履带采用化学稳定性出色的合成橡胶以及多层复合材料设计保证了耐腐蚀性和耐磨性。

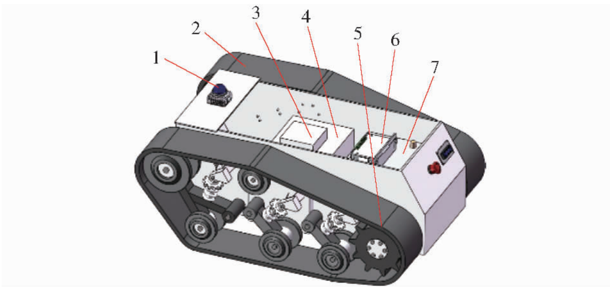

图1 自主导航系统总体结构图

Fig. 1 Schematic of autonomous navigation system

1. MID-360型激光雷达 2. 履带底盘 3. 计算机 4. 系统电源 5. 三相直流无刷电机 6. 三相直流无刷电机驱动器 7. 底盘电源

1.2 自主导航系统硬件设计

自主导航系统硬件主要包括环境感知模块、运算控制模块、底盘驱动模块和电源模块。自主导航平台的工作环境和实物如图2所示，硬件架构如图3所示。

(a) 猪舍环境 (b) 自主导航平台

图2 猪舍自主导航系统工作环境

Fig. 2 Working environment of autonomous navigation system in swine house

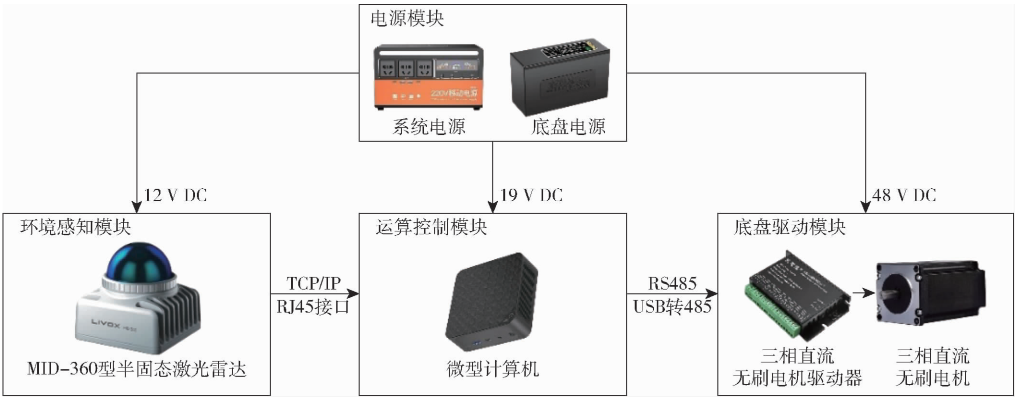

图 3　自主导航系统硬件架构

Fig. 3　Hardware architecture diagram for autonomous navigation system

1.2.1　环境感知模块

自主导航系统搭载了览沃 MID-360 型半固态激光雷达，内置 ICM40609 惯性测量单元，可用于检测平台实时姿态，相较于单独搭载惯性测量单元，集成 IMU 稳定性更好，并且不需要标定，降低了误差。半固态激光雷达综合了机械式激光雷达和固态激光雷达优点，相比机械式激光雷达可靠性和耐久性更高，且相比于固态激光雷达具有更大的视场角，测量范围更广[16]。综上所述，半固态激光雷达凭借其高精度、高可靠性、宽视场覆盖以及低功耗等特性保证了在猪舍场景具有较好的测量效果。

1.2.2　运算控制模块

自主导航系统的运算控制模块为零刻 SER5 型微型计算机，搭载锐龙 R7-5800H 处理器。计算机运行 Ubuntu 20.04 操作系统，并且安装了机器人操作系统(Robot operating system, ROS)，ROS 作为通信框架提供了一套标准化消息传递机制，可在自主导航系统的各个模块间传递消息，简化了系统架构，提高了系统稳定性[17]。导航系统点云预处理、激光雷达里程计、环境地图构建、移动平台定位、路径规划、导航以及运动控制等计算过程均由该模块执行。

1.2.3　其他模块

电源模块包含系统电源和底盘电源，系统电源为 220 V 移动电源，通过电源适配器向激光雷达和微型计算机供电，底盘电源为电压 48 V 容量 80 A·h 的锂电池，底盘电源向三相直流无刷电机和电机驱动器供电。

2　自主导航系统软件与算法设计

自主导航系统软件架构主要分为人机交互层、运算控制层和底盘驱动层，如图 4 所示。人机交互层可通过计算机发布导航任务、查看建图效果和监测平台位置。运算控制层包括里程计模块、建图模块、定位模块和路径规划模块。底盘驱动层接收来自运算控制层的电机控制命令，控制电机按控制指令运行，最终实现养猪场场景的导航。

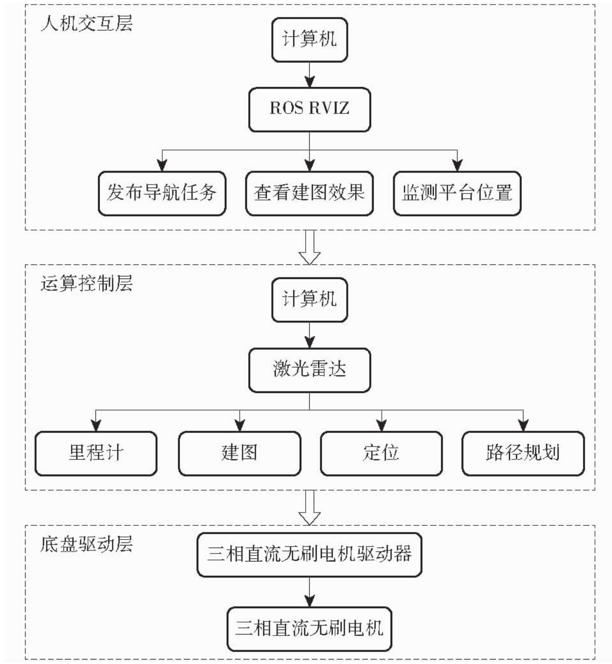

图 4　自主导航系统软件架构

Fig. 4　Software architecture diagram for autonomous navigation system

2.1　激光-惯性紧耦合里程计算法

激光雷达相比摄像头有更高的精度和抗干扰性，且猪舍内有限的光照条件会对基于视觉导航效果产生较大的影响，故选用激光雷达作为环境感知传感器实现养猪场内定位和导航。文献[18-19]基于二维激光雷达的传统 SLAM 算法获得环境信息有限，在复杂、动态环境下具有较大的局限性，且对地图回环构建处理能力较差，在猪舍环境下无法实现高精度、高鲁棒性导航。

自主导航系统采用基于三维激光雷达的激光-惯性紧耦合算法 Fast-LIO2 计算里程计信息，相较于 Fast-LIO 算法和 LIO-SAM 算法，不再提取点云特征，而是直接将原始点云存入地图，从而能够利用

环境细微特征，提高位姿估计精度；相较于更注重实时性的 Point－Lio 算法，Fast－LIO2 算法具有更高精度和更强动态环境适应性[20－21]；与包含后端优化的 LIO－SAM 算法相比，Fast－LIO2 通过引入 iKD－Tree 优化了计算过程，明显降低了对计算资源的需求，提高了计算效率，减少了硬件成本。

Fast－LIO2 里程计算法是整个自主导航系统的基础，里程计信息在建图环节作为里程计因子提供初始位姿估计，基于里程计变换激光雷达点云坐标系得到局部地图和位姿信息也是定位环节关键。

2.2 基于因子图优化的回环建图算法

在得到里程计估计的位姿后，可将激光雷达扫描数据由激光雷达坐标系变换到里程计坐标系，从而形成环境地图，但是由于里程计存在一定的累计误差，随着移动平台运行，累积误差会越来越大，在构建地图时会将这部分误差引入到地图中，使地图出现偏移、不连贯等现象，导致无法构建全局一致的地图。Gmapping 算法采用 Rao－blackwellized 粒子滤波器，根据运动模型和观测模型更新粒子，粒子收敛时将所有粒子生成的地图加权平均合并为最终地图[22]。为了提高地图精度，在里程计基础上添加回环检测和因子图优化方法消除误差，优化位姿估计，算法流程如图5所示。

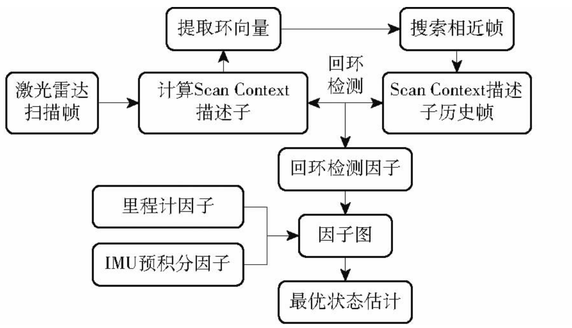

图5 基于因子图优化的回环建图算法流程图

Fig. 5 Flowchart for loop closure correction in SLAM using factor graph optimization

回环检测是一种识别已经访问过的场景，并进行针对性优化从而使得地图连续的方法[23]。在自主导航系统中，采用 Scan Context 方法实现回环检测。Scan Context 是一种基于3D激光点云的特征描述子，包含了关于环境的结构化信息，用于识别和匹配环境[24]。记录所有描述子，对新增的描述子，将其与已有的描述子进行相似性判断，若满足阈值条件则认为检测到回环。相似性通过计算欧氏距离判断，阈值根据地图点云数据设定合理初始值，并经多次试验不断调整，尽量在保证准确率的同时兼顾计算效率。通过帧间距离搜索，计算所有历史帧与查询帧之间距离并选出最短距离，对最短距离对应的历史帧和当前帧进行距离判定，符合阈值要求则认为检测到回环，计算式为

$$d(I^q,I^c)=\frac{1}{N_s}\sum_{j=1}^{N_s}\left(1-\frac{c_j^q c_j^c}{\|c_j^q\|\ \|c_j^c\|}\right) \tag{1}$$

$$c^*=\arg\min_{c_k\in C}\left(\min_{n\in N_s} d(I^q,I_n^c)\right) \tag{2}$$

式中 I^q——查询帧描述子
I^c——历史帧描述子
c_j——第j列点云描述子
C——历史帧指标
c^*——与查询帧最近邻历史帧指标
d——历史帧与查询帧之间距离
N_s——总帧数

在建图过程中，如果对每一帧激光雷达点云都计算 Scan Context 描述子，会增加计算资源消耗和影响计算效率，降低实时性，因此根据里程计数据，当移动平台平移一定距离或旋转一定角度时，设置关键帧，仅对关键帧进行回环检测计算，减少计算资源消耗。在检测到回环后，使用增量式稀疏逆方差滤波算法（Incremental sparse inverse square matrix，ISAM2）对2帧位姿进行优化，ISAM2 是一种高效的因子图优化算法，利用因子图的条件独立性简化计算[25]。因子图是一种用于表示传感器测量和运动模型之间关系的图形化框架，其中节点表示状态变量，边表示约束或测量关系，因子图优化尽可能满足所有因子节点所表示的约束，从而得到位姿和地图的最优估计[26]。在建图算法中，采用回环检测因子、IMU 预积分因子和里程计因子生成因子图并进行优化，里程计因子提供初始位姿估计；IMU 预积分因子提供位姿和速度变化；回环检测因子能够综合提高全局位姿估计精度和计算效率，最终得到位姿和地图最优估计。基于因子图优化的回环建图算法提供了完整精确的猪舍全局地图，是定位和导航算法基础。

2.3 基于地图配准的定位算法

为了保证在猪舍场景定位的准确性和鲁棒性，提出一种基于 Map to Map 地图配准的定位算法，算法流程图如图6所示。分别获取基于里程计建立的局部地图和基于因子图优化的回环建图算法建立的全局地图，对地图点云按高度降采样，在猪舍环境中，高度较低的点云可能存在工作人员和猪等动态物体，对这部分点云设置较大的降采样系数，而对高度较高的点云如天花板、照明灯以及喂食装置等固定设施，则设置较低的降采样系数，较多地保留点云数量和点云特征，从而提高配准精度。

使用正态分布变换（Normal distribution

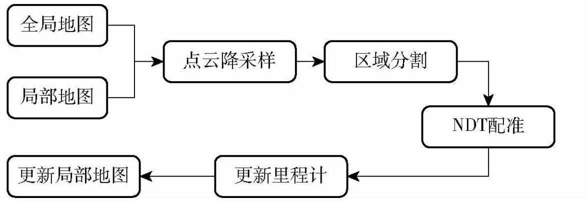

图 6　基于地图配准的定位算法流程图

Fig. 6　Flowchart of localization algorithm based on map registration

transform，NDT)算法实现局部地图到全局地图之间的配准,NDT 算法将点云分割成多个体素(Voxel),建立点云数据基于概率密度的表达,从而将匹配问题转换为对连续函数的极值优化问题[27]。概率密度计算式为

$$p(x) \sim \exp\left(-\frac{(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{q})}{2}\right) \tag{3}$$

$$\mathrm{score}(p) = \sum \exp\left(-\frac{(\boldsymbol{x}_i'-\boldsymbol{q}_i)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\boldsymbol{x}_i'-\boldsymbol{q}_i)}{2}\right) \tag{4}$$

其中

$$\boldsymbol{q} = \frac{1}{n}\sum \boldsymbol{x}_i \tag{5}$$

$$\boldsymbol{\Sigma} = \frac{1}{n}\sum (\boldsymbol{x}_i-\boldsymbol{q})(\boldsymbol{x}_i-\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

式中　p——概率密度函数

$\boldsymbol{q}$——体素均值

$\boldsymbol{\Sigma}$——协方差矩阵

n——体素中点数量

$\boldsymbol{x}$——体素中点

score(p)——目标函数,由每个体素概率密度相加得到

配准完成后,根据配准得分判断配准质量,NDT 算法使用概率密度函数(PDF)计算配准得分,配准得分表示源点云和目标点云之间正态分布的匹配度,配准得分越低,表示配准效果越好。当得分高于得分阈值时,认为此次配准质量较差,忽略此次配准结果。当得分低于得分阈值时配准效果较好,根据配准结果更新里程计,使里程计坐标系和地图坐标系重合,同时更新局部地图,此时里程计位姿即为自主导航平台在全局地图的位姿。

2.4　基于反光柱配准的定位算法

猪舍一般具有规则的布局和结构化的环境,如猪栏、走廊等,且猪舍建筑结构一般不会发生变化,因此可通过安装反光柱辅助定位,提高定位准确性和鲁棒性。基于 GPS、北斗卫星定位仅适用于卫星信号良好的室外环境[28],WiFi 定位[29]、超宽带(UWB)定位[30]等室内定位技术需要配置发射器和信号接收器,带来了额外硬件成本。而低成本反光柱配合最大量程 70 m 激光雷达既可覆盖猪舍场景,又可经济高效地实现猪舍内定位功能。本研究提出一种基于反光柱匹配的定位算法,算法流程如图 7 所示。

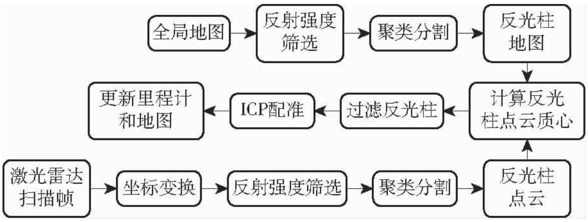

图 7　基于反光柱匹配的定位算法流程图

Fig. 7　Flowchart of localization algorithm based on reflective pole matching

2.4.1　创建反光柱地图

反光柱是一种表面贴有高反光材料的圆柱体,以 MID-360 型激光雷达为例,点云中每个点的反射强度在 0~256 之间,而照射在反光柱上的点反射强度一般大于 150。因此可根据点云中每个点的反射强度进行阈值分割,从而分割出反光柱点云。

在建图时根据反射强度分割点云后,还需要按距离进行聚类分割,目的是将场景中存在的多个反光柱点云分离,从而实现对单个反光柱点云进行处理。欧氏聚类算法是一种将点云数据按照距离分割成多个堆的算法[31],通过欧氏聚类算法,将一帧激光雷达点云中的所有高反点分割成多个点云,其中每个点云都可能表示 1 个反光柱。将点云分割完毕以后,根据每个点云中点的数量进一步判断是否为反光柱点云,最终将所有点云融合,形成反光柱地图。

2.4.2　基于分割配准的反光柱定位

在定位时,将激光雷达扫描帧中的点变换到里程计坐标系下,通过反射强度筛选和聚类分割判断形成反光柱点云。计算各反光柱的质心坐标,并进行 KD 树遍历搜索,若反光柱地图中存在与反光柱点云质心相近的点,说明二者为同一个反光柱,以此在反光柱地图中筛选出当前扫描到的反光柱。通过迭代最近点(Iterative closest point，ICP)算法对扫描反光柱点云和筛选后的反光柱地图点云进行配准,ICP 算法是一种用于点云配准的迭代算法[32],基本原理是通过迭代不断地将源点云中的点与目标点云中的最近邻点对齐,根据变换矩阵,将源点云变换到目标点云的坐标系下,直到变换后 2 个点云之间的误差达到最小值,配准得到的变换矩阵即为里程计坐标系到地图坐标系之间的变换矩阵,计算式为

$$E(\boldsymbol{R},\boldsymbol{t}) = \frac{1}{N_p}\sum_{i=1}^{N_p} \| x_i - \boldsymbol{R}p_i - \boldsymbol{t} \|^2 \tag{7}$$

式中　$E(\boldsymbol{R},\boldsymbol{t})$——目标函数

N_p——点云中点数量

x_i——源点云中点

p_i——目标点云中点

$\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{t}$——变换矩阵，即配准结果

与前面的地图配准类似，通过配准得分判断配准质量，ICP算法使用均方根误差表示配准得分，得分越低表示误差越小，配准质量越高，当配准得分不满足要求时，认为此次配准无效。2种定位算法提供的精准定位数据是实现自主导航关键。

2.5 基于 Move_base 的导航

自主导航系统的路径规划和导航功能通过 Move_base 功能包实现，功能包接收全局地图、TF变换以及激光雷达扫描信息，根据设定目标点实时解算底盘电机转速，实现从起始点到目标点导航功能，Move_base 导航框架如图8所示。

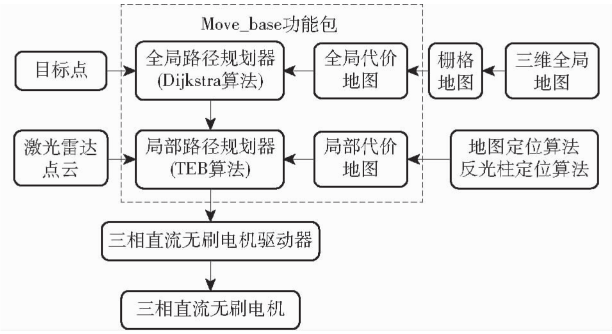

图8 基于 Move_base 的导航框架

Fig. 8 Navigation framework based on Move_base package

导航框架选用 Dijkstra 算法作为全局路径规划器，选用 TEB 算法作为局部路径规划器。Dijkstra 算法是一种简洁、基于贪心策略计算最短路径的算法[33]，在猪舍场景结构中具有良好的表现，TEB 算法利用时间弹性模型优化轨迹，能够生成更加平滑的路径[34]，适合部署在履带底盘上。全局路径规划器根据当前位姿和目标位姿规划一条最佳路径，局部路径规划器实时接收激光雷达扫描信息，在全局路径基础上进行调整避障，并实时解算并输出底盘电机转速，最后将转速转换为电机控制命令通过串口发送给底盘电机驱动模块，实现自主导航系统自主导航功能。

3 自主导航系统性能试验

自主导航系统的性能指标主要包括建图精度、定位精度和导航精度。建图精度是建图算法建立的环境地图与实际环境之间相似程度，建图精度高意味着地图能够准确反映真实环境。定位精度是自主导航系统确定自身位置的能力，即估计位置与真实位置之间偏差，直接影响移动平台导航能力。导航精度是设定目标点与实际目标点之间偏离程度，导航精度高意味着机器人能准确到达目的地，而不会产生较大偏离。这3个性能指标相互关联，建图精度影响定位精度，而定位精度又直接影响导航精度，一般来说，建图精度和定位精度越高，导航精度越好。

3.1 猪舍地图构建精度试验

建图试验以遥控方式控制移动底盘以速度 0.3 m/s 行驶，分别使用 Fast-LIO2 算法、Gmapping 算法以及基于因子图优化的回环建图算法构建环境地图。参照文献[13,17]选取猪舍有代表性的固定特征如猪舍整体大小、猪栏长度以及料槽长度等，分别测量实际尺寸，并与构建地图中点云特征进行比较，得到不同建图算法的建图精度。不同算法构建的三维环境地图如图9所示，地图构建精度结果如表1所示。

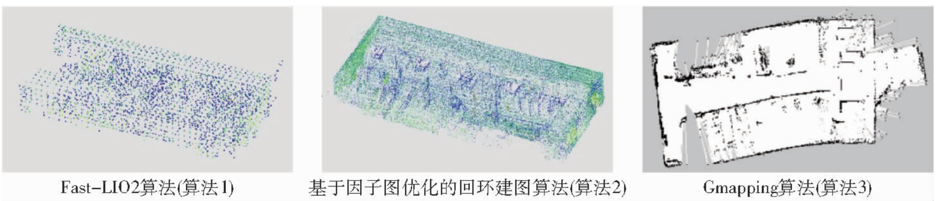

图9 不同算法构建的猪舍地图

Fig. 9 Maps of swine house constructed by different algorithms

表1 猪舍场景建图精度结果

Tab. 1 Comparison of mapping results in swine house environment

算法	参数	特征1	特征2	特征3	特征4	特征5	特征6	均方根误差/m
算法1	绝对误差/m	0.105	0.278	0.136	0.052	1.025	0.065	0.441
	相对误差/%	4.42	10.27	5.30	16.40	6.89	1.84	
算法2	绝对误差/m	0.071	0.089	0.108	0.054	0.113	0.091	0.090
	相对误差/%	2.99	3.29	4.21	17.03	0.76	2.58	
算法3	绝对误差/m	0.052	0.060	0.026	0.012	0.077	0.026	0.048
	相对误差/%	2.19	2.22	1.01	3.79	0.52	0.74	

由表 1 可知，添加了回环检测和因子图优化的建图算法的建图误差明显小于不含回环检测的 Gmapping 算法和 Fast－LIO2 算法。Gmapping 算法构建的地图均方根误差达 0.441 m，最大绝对误差和最大相对误差分别为 1.025 m 和 16.40%；Fast－LIO2 算法构建的地图均方根误差为 0.090 m，最大绝对误差和最大相对误差分别为 0.113 m 和 17.03%；基于因子图优化的回环建图算法构建的地图均方根误差仅为 0.048 m，最大绝对误差 0.077 m，最大相对误差 3.79%，表明在猪舍固定场景下，回环检测能够有效降低建图误差，基于因子图优化的回环建图算法在猪舍场景具有优秀建图性能，能够建立高准确度的环境地图。

3.2　自主导航系统定位精度试验

定位试验采取手动控制底盘移动到猪舍不同位置，并使用激光测距仪和皮尺测量当前位置在真实场景坐标（x，y），即猪舍地图长和宽 2 个方向到地图边缘距离，与定位算法得到的位置坐标（x'，y'）进行比较，评价指标包括 x 方向偏差 d_x 和 y 方向偏差 d_y，计算式为

$$d_x = |x - x'| \tag{8}$$

$$d_y = |y - y'| \tag{9}$$

使用基于反光柱匹配的定位算法、基于地图匹配的定位算法和自适应蒙特卡洛定位（Adaptive Monte Carlo localization，AMCL）算法进行对比试验。试验时将 4 根反光柱呈梯形摆放在猪舍主干道两边，按非中心对称图形摆放，目的是使反光柱位置基准存在差异，避免配准出现错误，试验场景如图 10 所示。选取猪舍中的 8 个不同位置进行试验，每次测量均为 3 次取平均值，试验结果如表 2 所示。

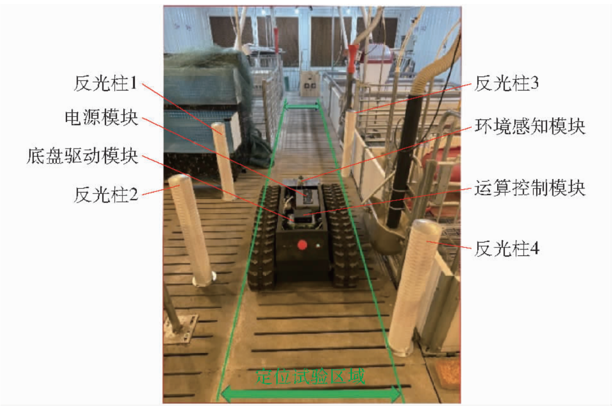

图 10　定位试验场景

Fig. 10　Scenario for localization experiment

由表 2 可以看出，AMCL 算法在猪舍场景定位误差较大，x 和 y 方向上最大偏差为 0.586、0.290 m，平均偏差为 0.281、0.100 m，均方根误差为 0.196、0.081 m，AMCL 算法在动态环境中会出现偏差，存

表 2　不同定位算法试验结果

Tab. 2　Results of experiments on deference localization algorithms

m

位置	x 方向偏差			y 方向偏差		
	算法 1	算法 2	算法 3	算法 1	算法 2	算法 3
1	0.114	0.020	0.039	0.290	0.055	0.057
2	0.113	0.024	0.030	0.072	0.046	0.040
3	0.130	0.053	0.058	0.062	0.045	0.044
4	0.096	0.018	0.012	0.058	0.048	0.051
5	0.586	0.085	0.132	0.047	0.043	0.064
6	0.474	0.035	0.038	0.131	0.016	0.016
7	0.437	0.065	0.124	0.050	0.040	0.051
8	0.299	0.067	0.097	0.092	0.041	0.089
平均偏差	0.281	0.046	0.066	0.100	0.042	0.052
均方根误差	0.196	0.025	0.045	0.081	0.011	0.021

注：算法 1 为自适应蒙特卡洛定位算法；算法 2 为基于反光柱匹配的定位算法；算法 3 基于地图配准的定位算法。

在多个相似性区域时，粒子会分布在多个区域，无法快速收敛到唯一解，难以应对猪舍环境。基于地图配准的定位算法 x 和 y 方向最大偏差为 0.132、0.089 m，平均偏差为 0.066、0.052 m，均方根误差为 0.045、0.021 m。基于反光柱匹配的定位算法 x 和 y 方向最大偏差为 0.085、0.055 m，平均偏差为 0.046、0.042 m，均方根误差为 0.025、0.011 m，2 种定位算法精度均优于 AMCL 算法。尽管反光柱定位算法精度高于地图定位算法，但反光柱定位需要激光雷达同时扫描到至少 3 根反光柱才能输出定位结果，而地图定位算法没有这种限制，在地图任意位置均可得到较为可靠的定位结果，故反光柱定位算法应和地图定位算法配合使用，当 2 种算法均得到较好结果时，选用反光柱匹配定位算法结果，当反光柱匹配定位算法无法给出定位结果或定位结果不满足阈值条件时，则选用地图配准定位算法输出结果。

3.3　自主导航系统导航精度试验

将基于因子图优化的回环建图算法建立的猪舍三维点云地图转化为二维栅格地图用于导航，如图 11 所示。

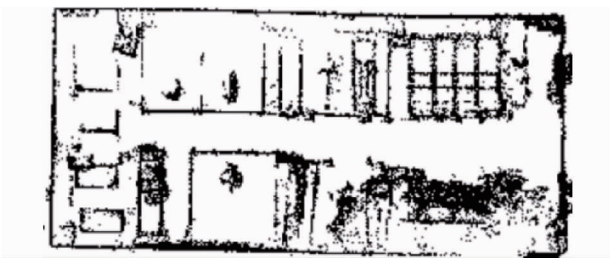

图 11　猪舍二维栅格地图

Fig. 11　2D grid map of swine house

基于地图配准的定位算法和基于反光柱匹配的定位算法提供定位数据，通过 ROS 人机交互界面在地图中设定导航目标点，设置移动平台最大速度为 0.3 m/s，由全局路径规划器和局部路径规划器规划行驶路径并输出控制电机转速，控制移动底盘自主导航到目标点，抵达目标位置后，使用激光测距仪和陀螺仪测量当前位置与设定目标位置之间偏差，包括 x、y 方向偏差和航向角偏差，试验结果如表 3 所示。

表 3 导航精度试验结果

Tab. 3 Results on navigation precision

试验序号	x 方向偏差/m	y 方向偏差/m	航向角偏差/(°)
1	0.042	0.062	5.665
2	0.062	0.017	6.909
3	0.083	0.019	8.091
4	0.027	0.052	7.105
5	0.090	0.089	7.531
平均值	0.061	0.048	7.060

由表 3 可知，实际导航点与设定目标点之间横向偏差最大值为 0.09 m，纵向偏差最大值为 0.089 m，航向角偏差最大值为 8.091°，航向角平均偏差为 7.06°。结果表明，基于回环建图算法、地图配准定位算法和反光柱匹配定位算法的自主导航系统能够以较高的精度完成猪舍场景自主导航任务。

4 结论

（1）设计了一种基于多源信息融合的猪舍自主导航系统，在 Fast - LIO2 里程计算法的基础上，采用基于因子图优化的回环建图算法构建猪舍地图，提出了基于地图配准的定位算法和基于反光柱匹配的定位算法，并利用 Move_base 功能包实现了路径规划和导航控制。

（2）自主导航系统使用基于因子图优化的回环建图算法建立猪舍环境地图，最大绝对误差为 0.077 m，最大相对误差为 3.79%，均方根误差为 0.048 m，建图精度优于 Gmapping 算法和 Fast - LIO2 算法。

（3）基于地图配准的定位算法 x 和 y 方向最大偏差为 0.132、0.089 m，平均偏差为 0.066、0.052 m。基于反光柱匹配的定位算法在 x 和 y 方向上最大偏差为 0.085、0.055 m，平均偏差为 0.046、0.042 m。2 种定位算法在猪舍复杂场景均有着良好的表现，保证了猪舍导航系统定位精度和鲁棒性。

（4）导航精度试验结果表明，运用回环建图算法、地图配准定位算法以及反光柱匹配定位算法进行导航时，横向偏差最大值、纵向偏差最大值和航向角偏差最大值分别为 0.09 m、0.089 m、8.091°，导航精度满足猪舍内自主导航要求。

参 考 文 献

[1] 岳健民，朱君. 猪舍智能作业机器人导航技术研究进展[J]. 中国猪业，2024，19(3)：15 - 23.
YUE Jianmin, ZHU Jun. Research progress on navigation technology for intelligent operation robots in pig houses[J]. China Swine Industry, 2024, 19(3): 15 - 23. (in Chinese)

[2] 王杰，陈正伟，徐照胜，等. 基于相机与激光雷达融合的温室机器人行间导航方法[J]. 农业机械学报，2023，54(3)：32 - 40.
WANG Jie, CHEN Zhengwei, XU Zhaosheng, et al. Inter-rows navigation method of greenhouse robot based on fusion of camera and LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 32 - 40. (in Chinese)

[3] SUKVICHAI K, THONGTON N, YAJAI K. Implementation of a monocular orb SLAM for an indoor agricultural drone[C]//2023 Third International Symposium on Instrumentation, Control, Artificial Intelligence, and Robotics (ICA - SYMP). IEEE, 2023: 45 - 48.

[4] 吴子岳，高亚东，王董测，等. 基于北斗系统的履带移动机器人定位设计与实现[J]. 全球定位系统，2016，41(5)：71 - 74.
WU Ziyue, GAO Yadong, WANG Dongce, et al. Design and implementation of positioning for tracked mobile robots based on BeiDou system[J]. GNSS World of China, 2016, 41(5): 71 - 74. (in Chinese)

[5] 阮国奇，何伦保. GPS/BDS 组合导航系统的精密单点定位模型[J]. 导航定位学报，2024，12(1)：124 - 129.
RUAN Guoqi, HE Lunbao. Precise single-point positioning model for GPS/BDS combined navigation system[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2024, 12(1): 124 - 129. (in Chinese)

[6] 董秋伟，潘振永，马明江，等. 基于磁导航的猪场环境 AGV 控制器设计[J]. 工业控制计算机，2019，32(6)：93 - 95.
DONG Qiuwei, PAN Zhenyong, MA Mingjiang, et al. Design of AGV controller based on magnetic navigation for pig farm environment[J]. Industrial Control Computer, 2019, 32(6): 93 - 95. (in Chinese)

[7] BACH S H, KHOI P B, YI S Y. Application of QR code for localization and navigation of indoor mobile robot[J]. IEEE Access, 2023, 11: 28384 - 28390.

[8] SAVOCHKIN A, TIMOSHENKO A, IVANOV M. Directed antennas for RFID-based navigation for agricultural unmanned vehicles[C]//2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE, 2019: 2046 - 2050.

[9] DU Y, SAHA S S, SANDHA S S, et al. Neural-Kalman GNSS/INS navigation for precision agriculture[C]//2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2023: 9622 - 9629.

[10] 邱权,胡青含,樊正强,等.基于自适应系数卡尔曼滤波的农业移动机器人组合定位[J].农业机械学报,2022,53(增刊1):36－43.
QIU Quan, HU Qinghan, FAN Zhengqiang, et al. Adaptive-coefficient Kalman filter based combined positioning algorithm for agricultural mobile robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(Supp.1):36－43. (in Chinese)
[11] 李天华,董广胜,姚玉康,等.连栋温室分段变距喷雾机器人设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(2):170－179.
LI Tianhua, DONG Guangsheng, YAO Yukang, et al. Design and experiment of segmented and variable distance spraying robot for multi-span greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(2):170－179. (in Chinese)
[12] 万畅,谭彧,郑永军,等.饲草推送机器人磁条导航自动充电研究[J].农业机械学报,2018,49(增刊):1－7,41.
WAN Chang, TAN Yu, ZHENG Yongjun, et al. Automatic charging of forage pushing robot by magnetic stripe navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):1－7,41. (in Chinese)
[13] 孙国祥, 黄银锋, 汪小昂, 等. 基于 LIO－SAM 建图和激光视觉融合定位的温室自主行走系统[J]. 农业工程学报, 2024, 40(3): 227－239.
SUN Guoxiang, HUANG Yinfeng, WANG Xiaochan, et al. Autonomous navigation system in a greenhouse using LIO－SAM mapping and laser vision fusion localization[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(3): 227－239. (in Chinese)
[14] JIANG S, QI P, HAN L, et al. Navigation system for orchard spraying robot based on 3D LiDAR SLAM with NDT_ICP point cloud registration[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 220: 108870.
[15] 孙景彬,曾令坤,应婧,等.农业履带底盘关键技术研究现状与展望[J].农业机械学报,2024,55(11):202－220.
SUN Jingbin, ZENG Lingkun, YING Jing, et al. Research status and prospect of key technologies of agricultural track chassis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(11):202－220. (in Chinese)
[16] 张帆, 蒋婉玥. 适用于半固态激光雷达的 LiDAR－IMU 紧耦合 SLAM 算法[J]. 激光与光电子学进展,2025,62(10): 1－16.
ZHANG Fan, JIANG Wanyue. LiDAR－IMU tight-coupled SLAM algorithm suitable for semi-solid-state LiDAR[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025,62(10): 1－16. (in Chinese)
[17] 宋怀波,段援朝,李嵘,等.基于激光 SLAM 的牛场智能推翻草机器人自主导航系统[J].农业机械学报,2023,54(2): 293－301.
SONG Huaibo, DUAN Yuanchao, LI Rong, et al. Autonomous navigation system for pasture intelligent overthrowing grass robot based on laser SLAM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(2):293－301. (in Chinese)
[18] 张文翔, 卢鑫羽, 张兵园, 等. 基于激光 SLAM 和 AprilTag 融合的温室移动机器人自主导航方法[J]. 农业机械学报, 2025,56(1): 123－132.
ZHANG Wenxiang, LU Xinyu, ZHANG Bingyuan, et al. Autonomous navigation method of greenhouse mobile robot based on laser SLAM and AprilTag[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(1):123－132. (in Chinese)
[19] 黄禹翔, 吴国新, 左云波. 基于改进 Cartographer 的激光 SLAM 算法[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2023, 38(2): 47－52.
HUANG Yuxiang, WU Guoxin, ZUO Yunbo. Laser SLAM algorithm based on improved Cartographer[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University (Science Technology Edition), 2023, 38(2): 47－52. (in Chinese)
[20] 张喜, 张鹏, 刘鹏. 基于垂直约束的紧耦合激光惯性 SLAM 方法[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(9): 1－7.
ZHANG Xi, ZHANG Peng, LIU Peng. Tight coupling laser-inertial SLAM method with vertical constraints[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(9): 1－7. (in Chinese)
[21] 罗钒睿, 刘振宇, 任佳辉, 等. 基于改进卡尔曼滤波的轻量级激光惯性里程计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(11): 2280－2289.
LUO Fanrui, LIU Zhenyu, REN Jiahui, et al. Lightweight laser-inertial odometry based on improved Kalman filter[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(11): 2280－2289. (in Chinese)
[22] 李晨阳, 彭程, 张振乾, 等. 融合里程计信息的农业机器人定位与地图构建方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 16－23.
LI Chenyang, PENG Cheng, ZHANG Zhenqian, et al. Positioning and map construction for agricultural robots integrating odometer information[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(21): 16－23. (in Chinese)
[23] 虞沈豪, 魏国亮, 张顺, 等. 融合多元信息的激光 SLAM 回环检测方法[J]. 信息与控制, 2024, 53(5): 594－602.
YU Shenhao, WEI Guoliang, ZHANG Shun, et al. Loop closure detection method for laser SLAM based on multi-source information[J]. Information and Control, 2024, 53(5): 594－602. (in Chinese)
[24] 耿丽杰,顾健,别晓婷,等.基于 Scan Context 与 NDT－ICP 相融合的果园建图方法研究[J].中国农机化学报,2022, 43(7):44－50.
GENG Lijie, GU Jian, BIE Xiaoting, et al. Research on orchard SLAM method based on Scan Context and NDT－ICP fusion [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(7): 44－50. (in Chinese)

(下转第 270 页)

GENG Yanli, JI Yankai, YUE Xiaodong, et al. Pigs body size measurement based on point cloud semantic segmentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 332 - 338,380. (in Chinese)

[26] 沈维政,张哲,戴百生,等. 基于 Cow - DETR 与深度图像的非接触式奶牛体质量评估[J]. 农业机械学报,2023,54(8): 277 - 285,319.

SHEN Weizheng, ZHANG Zhe, DAI Baisheng, et al. Non-contact predicting method of dairy cow weight based on Cow - DETR and deep image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 277 - 285,319. (in Chinese)

[27] 滕光辉,申志杰,张建龙,等. 基于 Kinect 传感器的无接触式母猪体况评分方法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 211 - 217.

TENG Guanghui, SHEN Zhijie, ZHANG Jianlong, et al. Non-contact sow body condition scoring method based on Kinect sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 211 - 217. (in Chinese)

[28] 王继英,韩丽娟,王诚,等. 大约克体型性状的相关、聚类与主成分分析[J]. 养猪,2019(1): 65 - 67.

WANG Jiying, HAN Lijuan, WANG Cheng, et al. Correlation, clustering and principal component analysis of the body type related traits of Yorkshire[J]. Swine Production,2019(1): 65 - 67. (in Chinese)

[29] CHEN T, GUESTRIN C. XGBoost: a scalable tree boosting system[C]// Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2016: 785 - 794.

[30] RAN H, LIU J, WANG C. Surface representation for point clouds[C]// Proceedings of the Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2022: 18942 - 18952.

[31] THOMAS H, QI C R, DESCHAUD J E, et al. Kpconv: flexible and deformable convolution for point clouds[C]// Proceedings of the Proceedings of the IEEE/CVF international Conference on Computer Vision, 2019: 6411 - 6420.

[32] 周红. 基于深度视觉的母猪体况评估方法研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2024.

ZHOU Hong. Research on the method of sow body condition evaluation based on deep vision[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University,2024. (in Chinese)

(上接第 257 页)

[25] 戴海发,卞鸿巍,杜红松,等. 基于自适应因子图优化的导航系统信息融合方法[J]. 中国惯性技术学报,2023,31(1): 45 - 52,60.

DAI Haifa, BIAN Hongwei, DU Hongsong, et al. Navigation system information fusion method based on adaptive factor graph optimization[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 31(1): 45 - 52, 60. (in Chinese)

[26] 丛佩超,崔利营,万现全,等. 基于改进 ORB - SLAM2 的果园喷药机器人定位与稠密建图算法[J]. 农业机械学报,2023, 54(7):45 - 55.

CONG Peichao, CUI Liying, WAN Xianquan, et al. Localization and dense mapping algorithm for orchard spraying robot based on improved ORB - SLAM2[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(7):45 - 55. (in Chinese)

[27] 杨奇峰, 曲道奎, 徐方. 基于 3D - NDT 的移动机器人定位算法研究[J]. 控制工程, 2020, 27(4): 613 - 619.

YANG Qifeng, QU Daokui, XU Fang. Research on mobile robot positioning algorithm based on 3D - NDT[J]. Control Engineering, 2020, 27(4): 613 - 619. (in Chinese)

[28] XIE B, JIN Y, FAHEEM M, et al. Research progress of autonomous navigation technology for multi-agricultural scenes[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 107963.

[29] DRENJANAC D, TOMIC S, AGUERA J, et al. WiFi and Satellite-based location techniques for intelligent agricultural machinery controlled by a human operator[J]. Sensors, 2014, 14(10): 19767 - 19784.

[30] 刘诚,李金阳,贾娜,等. 农林环境下 RTK - UWB 多传感器融合定位方法[J]. 林业工程学报,2024,9(6):142 - 151.

LIU Cheng, LI Jinyang, JIA Na, et al. Multisensor fusion positioning method for forest and agricultural environments[J]. Journal of Forest Engineering, 2024, 9(6): 142 - 151. (in Chinese)

[31] 喻俊楠,吴学群,赵辉友. 基于改进欧式距离聚类中心的 ICP 点云配准方法[J]. 激光与红外,2024,54(10):1541 - 1546.

YU Junnan, WU Xuequn, ZHAO Huiyou. ICP point cloud registration with enhanced Euclidean distance based cluster centers [J]. Laser & Infrared,2024,54(10):1541 - 1546. (in Chinese)

[32] 许哲,董林啸,吴家跃. 改进 ICP 算法的激光雷达点云配准[J]. 测绘通报,2024(4):1 - 5.

XU Zhe, DONG Linxiao, WU Jiayue. Point cloud registration of LiDAR based on improved ICP algorithm[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024(4): 1 - 5. (in Chinese)

[33] XING X, DING H, LIANG Z, et al. Robot path planner based on deep reinforcement learning and the seeker optimization algorithm[J]. Mechatronics, 2022, 88: 102918.

[34] ZHANG J, SALAM M S B H J, YI L, et al. Design and implementation of SLAM technology and navigation technology in smart mobile device based on ROS system[C]// International Conference on Image Processing and Artificial Intelligence, 2024: 929 - 933.