

基于激光 SLAM 的牛场智能推翻草机器人自主导航系统

宋怀波^{1,2} 段援朝^{1,2} 李 嵘^{1,2} 焦义涛^{1,2} 王 政^{1,2}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;
2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为解决牛场人工推翻饲料劳动强度大、工作时间长等问题,设计了一种基于激光雷达同步定位与建图(Simultaneous localization and mapping, SLAM)的牛场智能推翻草机器人自主导航系统,以期实现机器人在牛场环境中自主导航完成推翻草任务。自主导航系统通过激光雷达感知牛场环境,使用加载里程计信息的 Cartographer 算法构建牛场环境地图,采用未加载里程计信息的自适应蒙特卡洛定位(Adaptive Monte Carlo localization, AMCL)算法实现机器人的定位,并采用迪杰斯特拉算法(Dijkstra)规划机器人推翻草工作路径。试验表明,在构建牛场环境地图时采用机器人加载里程计信息的方式,横纵向偏差最大值低于未加载里程计信息时构建的地图,分别为 0.02 m 和 0.14 m;在实现机器人的定位与导航时采用未加载里程计信息的方式,横纵向偏差最大值及航向偏角最大值分别小于 0.04 m、0.10 m 和 11°,且导航精度高于加载里程计信息时的数值,满足牛场环境中推翻草作业时的导航精度要求。

关键词: 智能牛场;推翻草机器人;激光 SLAM;里程计;自主导航

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)02-0293-09 OSID: 

Autonomous Navigation System for Pasture Intelligent
Overthrowing Grass Robot Based on Laser SLAM

SONG Huaibo^{1,2} DUAN Yuanchao^{1,2} LI Rong^{1,2} JIAO Yitao^{1,2} WANG Zheng^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To solve the problems of high labor intensity and long working time of artificial overthrowing of feed in the pasture, an autonomous navigation system based on LiDAR for synchronous positioning and map building was designed to realize robot navigation and grass turning in pasture environment. The autonomous navigation system platform perceived the pasture environment through LiDAR, a ranch environment map was constructed by using Cartographer algorithm loaded with odometer information, the AMCL algorithm was used which did not load the odometer information to achieve robot positioning, and Dijkstra algorithm was used to plan the robot to overthrow the grass work path. The experiment showed that when constructing the ranch environment map, the maximum deviation of the robot loading odometer information was lower than that of the map when the odometer information was loaded, which was 0.02 m and 0.14 m, respectively, and the maximum value of the horizontal and vertical deviation and the maximum heading declination angle were less than 0.04 m, 0.10 m and 11° when the positioning and navigation of the robot were realized, and the navigation accuracy was higher than the value when loading the odometer information. All the results showed that the navigation accuracy can meet the requirements of overthrowing grass operations in a pasture environment.

Key words: smart pasture; overthrowing grass robot; laser SLAM; odometer; autonomous navigation

0 引言

近年来,奶牛养殖的现代化、规模化、标准化以及产业整体效率和素质水平显著提高,已经从家养等小规模养殖向农场化的现代新型养殖模式转型^[1-2]。但是多数养殖场在奶牛饲养方面,仍然依赖传统机械设备,导致养殖场产能低下、奶牛发病率上升^[3-4]。因此,研发一款适用于牛场的智能推翻草机器人,对牛场向现代化、智能化转型具有重要的意义^[5-6]。自主导航技术是推翻草机器人的核心,现有导航如导轨式、磁条引导式或视觉导航方式等难以适用于复杂牛场环境,尚需进一步研究一款适用于牛场推翻草机器人的导航系统。

目前应用于农业半开放式环境的导航机器人的导航方式可分为依赖外界信息辅助型导航与自主探索型导航^[7-9]。依赖外界信息辅助型导航方式主要有磁条导航、二维编码导航等。万畅等^[10]提出了一种基于磁条导航方式的饲料推送机器人,机器人通过传感器检测地面预先铺设的磁条信号来引导机器人移动作业。ZHANG 等^[11]基于双磁条导航机器人设计了双输入单输出型模糊控制器,提高了磁条导航机器人在移动过程中的位姿精度。磁条导航具有精确度高、成本低等特点,但后期维护繁琐,路径改变困难,无法满足任务实时变化的应用场景。二维编码导航通过机器人视觉系统扫描地面二维编码,通过二维编码信息获取机器人当前位置信息^[12-13]。KRAJNIK 等^[14]提出了一种基于单目视觉识别二维编码的机器人定位导航算法,根据二维编码信息建立环境地图从而实现机器人定位导航。该方式在大场景环境中精确度较高,路径改变容易,但对于牛场复杂环境,二维编码易覆盖,需要定期维护,维护成本较高。

自主探索型导航通过激光雷达、视觉传感器、北斗卫星导航系统或其他卫星导航系统等多源数据融合,对外界环境精准感知进行导航定位^[15-18]。徐波等^[19]基于北斗卫星定位系统,提出了一种与惯性测量单元等多传感器融合定位算法,实现了机器人在室外空旷环境中导航。毛文菊等^[20]提出了一种基于激光雷达与导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)相融合的果园运输机器人,有效提高了运输机器人在果园工作的效率。CIOFFI 等^[21]提出了一种基于紧密耦合的非线性优化估计器,将全球定位系统(Global positioning system, GPS)与视觉和惯性导航测量信息融合,有效解决了视觉与惯性导航在长期导航中积累的漂移问题。但北斗导航系统、GNSS 或 GPS 传感器在牛场半开放

式环境中信号弱且易丢失,不适用于牛场环境机器人导航。张振乾等^[22]提出了一种基于双目视觉导航的香蕉园巡检机器人,但视觉传感器受光线变化影响较大,在复杂牛场环境中的导航效果尚需验证。激光雷达作为新型传感器,具有分辨率高、抗干扰能力强、响应速度快等优点,因此在牛场环境中,使用激光雷达作为机器人感知环境的主要传感器,可以实现推翻草机器人在牛场环境中精准导航^[23]。

针对牛场半开放式复杂环境,本研究研发一种基于激光同步定位与建图(Simultaneous localization and mapping, SLAM)的牛场智能推翻草机器人导航系统。该机器人在创建牛场环境地图过程中采用 Cartographer 算法,利用自适应蒙特卡洛定位(Adaptive Monte Carlo localization, AMCL)算法将激光雷达、姿态惯性传感器(Inertial measurement unit, IMU)和编码器三者信息融合进行定位,提高牛场环境地图的创建精度。机器人在导航过程中使用迪杰斯特拉算法(Dijkstra)算法,利用 AMCL 算法将激光雷达与 IMU 两者信息融合进行定位,以解决机器人在推翻草过程中由轮胎打滑造成的编码器数据误差问题,从而实现机器人在牛场复杂环境中精准导航,进而完成推翻牧草任务。

1 智能推翻草机器人导航系统设计

1.1 工作环境

奶牛在饲喂过程中,首先需要将牧草与精饲料按照一定的比例混合均匀^[24-25],投置于围栏底部进行饲喂。但奶牛在进食过程中会因挑食精饲料出现“打窝”现象^[26],如图 1 所示,这一现象将导致饲料被推向远离围栏的位置,使奶牛无法正常进食,造成食物浪费及奶牛摄食不足。牛场智能推翻草机器人的主要功能是实现牧草与精饲料的再次充分混合,并推、翻至围栏底部奶牛饲喂区域,保证奶牛及时地摄入饲料。



图 1 奶牛饲喂环境

Fig. 1 Dairy cow feeding environment

机器人在推翻草过程中,需沿着饲喂区域边界进行运动。但基于饲喂区域外部饲料外疏内密的分

牛场推翻草机器人导航软件系统如图 4 所示, 主要包括控制层、数据处理层及驱动层。控制层基于 Linux 系统实现推翻草任务下发及机器人工作状态监控, 推翻草任务下发即 PC 或手机向机器人依次发送目标点坐标, 通过多点导航方式实现推翻草任务。工作状态监控可查看机器人当前位置。数据处理层基于 Ubuntu 18.04 LTS 微型计算机开发, 搭载机器人操作系统 (Robot operating system,

ROS)^[27],并安装 Cartographer、AMCL 和 Dijkstra 算法^[28-29]。Cartographer 算法根据激光雷达传感器数据、IMU 传感器和里程计信息创建牧场环境地图,AMCL 算法根据里程计数据和 IMU 信息确定机器人在当前地图中位置,Dijkstra 算法规划机器人工作路径。

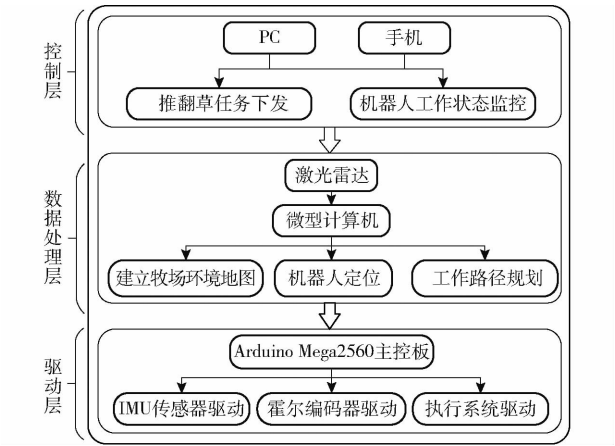


图4 机器人软件结构

Fig.4 Robot software architecture

下位机 Arduino 主控板使用 ROS Arduino Bridge 算法,实现驱动直流编码减速电机、编码器 4 倍频测速、比例积分微分 (Proportion integration differentiation, PID) 控制及与微型计算机通信等功能^[30]。ROS Arduino Bridge 算法中的 PID 控制器根据机器人实际运行速度与目标线速度和角速度,进行闭环控制驱动轮电机旋转,达到对自主导航移动平台的精准控制。

2 机器人导航功能实现原理

2.1 牧场环境地图构建

在推翻草机器人导航系统设计中,基于谷歌公司发布的 Cartographer 2D SLAM 算法构建牧场环境地图^[31]。Cartographer 算法流程如图 5 所示,主要分为局部 SLAM 和全局 SLAM 两部分。局部 SALM 主要根据激光雷达数据建立一系列子地图 Submap,全局 SLAM 中结合传感器数据,通过扫描匹配将一系列 Submap 连接生成全局地图。

Cartographer 算法中数据来源包括激光雷达、里程计数据和 IMU 数据。激光雷达数据首先通过 Voxel 滤波器消除测量误差及噪点,但由于激光雷达数据具有远密近疏特点,使用自适应体素滤波器 (Adaptive voxel filter) 进行自适应计算合适的采样间隔,获取一定的点云数量。又因为机器人在运动过程中,激光雷达数据会产生运动畸变,需要使用里程计数据和 IMU 数据矫正激光畸变。

局部 SLAM 中,每次得到一帧激光点 Scan 数据

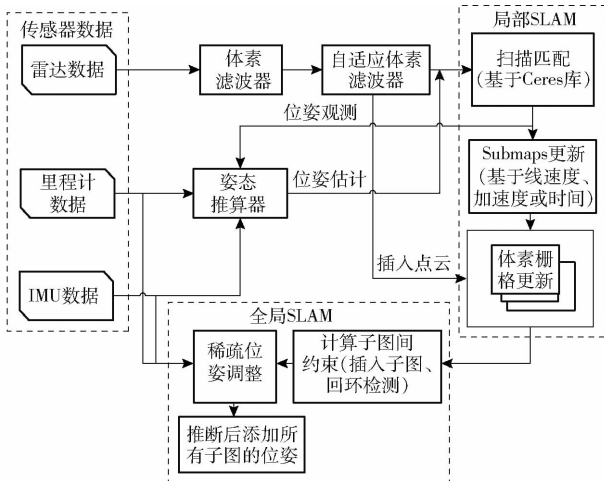


图5 Cartographer 算法流程图

Fig.5 Cartographer algorithm flowchart

之后,与其最近的 Submap 进行匹配,找到最佳位姿,用以构建 Submap。激光点 Scan 插入到 Submap 中需进行坐标转换,其转换公式为

$$T_{\xi}p = \begin{bmatrix} \cos\xi_{\theta} & -\sin\xi_{\theta} \\ \sin\xi_{\theta} & \cos\xi_{\theta} \end{bmatrix} p + \begin{bmatrix} \xi_x \\ \xi_y \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中 ξ_x ——激光点横坐标
 ξ_y ——激光点纵坐标
 ξ_{θ} ——激光点束击中点的观察夹角
 T_{ξ} ——激光点在 Submap 坐标系下位姿
 p ——栅格存在障碍物的概率

一定数量的激光点束构建一个栅格地图 Submap,当有一个新的 Laser Scan 插入 Submap 时,将对其栅格概率进行更新。

在将激光点云插入 Submap 之前,使用基于 Ceres 的扫描匹配器对激光点云相对于当前 Submap 位姿 $(\xi_x, \xi_y, \xi_{\theta})$ 进行优化,找到一个激光点云对应最优的位姿,使 Submap 中栅格概率最大化。最优位姿是通过计算激光点云与当前 Submap 匹配程度的误差,使用 Ceres 扫描匹配器进行迭代位姿使其误差最小。本文使用残差函数来计算匹配程度,残差函数为

$$f = \operatorname{argmin}_{\xi} \sum_{k=1}^{1 \sim k} (1 - M_{smooth}(T_{\xi}h_k))^2 \tag{2}$$

式中 M_{smooth} ——平滑函数
 h_k ——激光点云数量

全局 SLAM 中,通过回环检测和回环优化将 Submap 形成一幅完整地图,消除 Submap 之间的累计误差,具体实现过程可参考文献[32]。检测回环过程中,如果当前的 Scan 和已创建完成的 Submap 中的某个激光点 Scan 的位姿相似,则认为检测出回环。为了降低检测的计算量,提高回环检测的效率, Cartographer 算法应用分支定界的方法进行优化搜

索策略。回环优化过程中,使用稀疏位姿的方法来优化激光点云和子图的位姿。回环优化过程与激光点云插入 Submap 过程类似,仍使用残差函数计算其误差。

2.2 机器人自主导航实现原理

机器人自主导航分为机器人定位和路径规划两部分。机器人定位采用 AMCL 算法,实现机器人在二维地图中定位,机器人采用 Dijkstra 实现路径规划^[33-34]。

AMCL 定位算法基于粒子滤波,确定机器人在当前已知牛场环境地图中的位置。AMCL 算法结构如图 6 所示,AMCL 算法首先将代表机器人位姿的粒子随机分布于已知环境地图中,其次通过 IMU 数

据或使用扩展卡尔曼滤波融合 IMU 传感器与里程计数据,建立运动模型预测所有随机粒子的位姿,其中运动模型为

$$x_t = f_t(x_{t-1}, u_{t-1}) \tag{3}$$

式中 x_t ——机器人 t 时刻的运动状态

x_{t-1} ——机器人 $t-1$ 时刻的运动状态

u_{t-1} ——控制噪声

最终根据激光雷达数据建立测量模型来更新所有随机粒子的权重,粒子最终的收敛位置即为机器人在地图中的实际位置。若机器人初始位姿未知或有误,此时全局将注入更多随机粒子,随机器人的移动粒子再次更新,重新定位机器人在牛场地图中的位置。

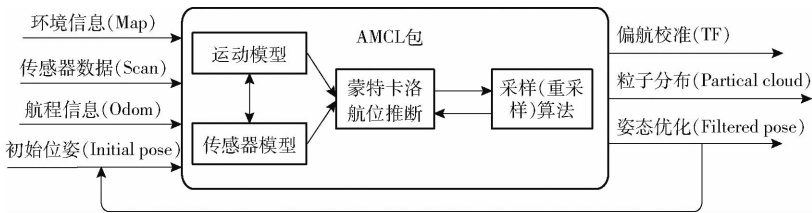


图 6 AMCL 算法结构图
Fig. 6 AMCL algorithm structure diagram

Dijkstra 路径规划算法基于单源最短路径算法计算从机器人起始位置到目标位置的最短路径。该算法采用广度优先搜索策略,从起始位置开始遍历到起始点最近且未访问顶点的邻接节点,遍历过程中不断迭代当前距离起始位置最近的点,直至遍历到目标位置。

图 7 为机器人导航框架,使用 ROS 中所提供的 AMCL 与 Move_base 功能包来实现定位和路径规划^[35] 功能。首先控制机器人在牛场环境中运动,使用 Cartographer 算法建立牛场环境地图,作为全局代价地图。其次机器人根据主机 PC 或手机 APP 下发目标点,使用 Dijkstra 算法进行全局路径规划,计算机器人到目标位置的最佳路线,作为机器人的全局路线。最后在实际机器人推翻草作业时,为了避免机器人与可能出现的动态障碍物发生碰撞,根据激光雷达实时数据引入本地代价地图,由 local_planner 模块通过 Dynamic Windows Approaches 算法计算躲避的多条轨迹,对于每条模拟的运动轨迹分

别计算轨迹上是否存在障碍物以及与障碍物的距离的分值 $Costs_{Obstacle}$ 、轨迹上点与局部参考路径最近距离的分值 $Costs_{path}$ 和轨迹上点与局部参考路径终点最近距离分值 $Costs_{Goal}$,综合评分计算公式为

$$Score = \alpha Costs_{Obstacle} + \beta Costs_{path} + \Gamma Costs_{Goal} \tag{4}$$

式中 α, β, Γ ——各评分标准的权重

其权重取决于机器人所侧重的性能,通过试验, α, β, Γ 分别取值为 0.02、0.1 和 2。通过比较,选择综合评分最小的轨迹作为机器人下一时刻的运动轨迹,并计算该轨迹上机器人前进的线速度与角速度,通过 USB 串口发送至下位机 Arduino 主控板,从而实现自主导航移动平台的精准控制。

若机器人在导航过程中出现了障碍物,根据栅格代价地图进行检测障碍物与机器人能否发生碰撞。机器人与障碍物距离关系如图 8 所示。

在代价地图中,根据机器人与障碍物之间距离关系计算其栅格灰度,若栅格灰度大于 253,表示机

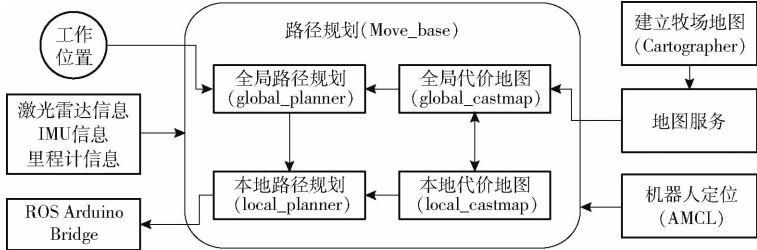


图 7 机器人导航框架
Fig. 7 Robot navigation frame

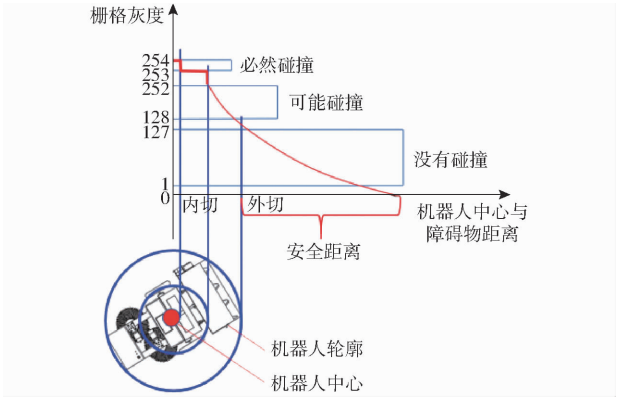


图 8 代价地图栅格分类图

Fig. 8 Costmap grid classification diagram

器人与障碍物必然发生碰撞;若栅格灰度处于 $[128, 252]$,则表示机器人处于碰撞临界,可能发生碰撞;若栅格灰度处于 $(0, 127]$,表示机器人此时处于危险警戒区,未来可能发生碰撞;若栅格灰度为 0,表示机器人可以自由越过障碍物。

3 性能测试试验

牛场智能推翻草机器人可靠性取决于机器人导航系统的精度,高精度的导航系统是推翻草机器人能否可靠稳定地完成推翻草作业的前提。推翻草机器人导航性能测试试验地点在西北农林科技大学畜牧实验基地,牛场试验区域纵向尺寸为 72.0 m,横向尺寸为 8.7 m。图 9a 为手机 APP 控制推翻草机器人建立牛场环境地图过程,图 9b 为机器人进行推翻草任务场景。



图 9 机器人建图及推翻草试验

Fig. 9 Robot creating maps and overthrowing grass test

推翻草机器人性能的评价指标包括建图准确度和导航精度。建图准确度衡量标准为所建平面地图与牛场实际环境之间纵向与横向的几何偏差;导航精度的衡量标准为测量机器人预规划的导航路径与机器人实际运动路径的偏差,研究该导航系统精度能否满足机器人推翻草作业的需求。

3.1 牛场环境地图精度对比

机器人在推翻草作业时,由于不同区域的牧草料分布不均匀,造成了机器人在行驶过程中负载不稳定,出现机器人轮胎与地面打滑现象,最终将导致里程计数据误差。因此在本试验设计中,使用 Cartographer 算法,分别加载里程计信息与未加载里

程计信息构建牛场环境地图。为避免机器人搭载的硬件误差、地面不平整等不可控因素干扰,机器人选择直线行驶方式,以速度 0.25 m/s 创建环境地图。

创建的环境地图如图 10 所示,其中红色实线部分为牛场围墙参考线,绿色虚线部分为围栏参考线,红色箭头为机器人运动方向。在所建的两幅环境地图中,分别取 8 个相对应的关键点 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 和 A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 ,利用 Rviz 软件中 Measure 标尺工具测量两幅地图每两个关键点之间距离,与实际建图区域尺寸进行对比,结果如表 1 所示。

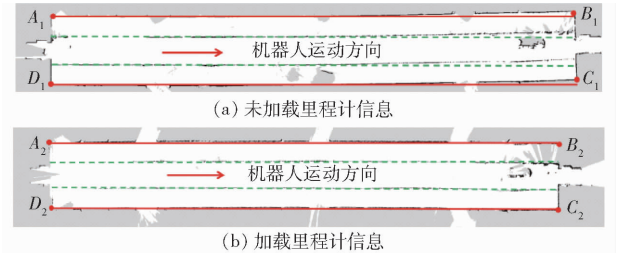


图 10 Cartographer 算法建图精度对比

Fig. 10 Cartographer algorithm built map precision comparison

表 1 牛场环境地图相对误差

Tab.1 Relative error of pasture environment map m

参数	未加载里程计信息				加载里程计信息			
	A_1B_1	B_1C_1	C_1D_1	A_1D_1	A_2B_2	B_2C_2	C_2D_2	A_2D_2
地图尺寸	70.78	8.64	69.82	8.67	71.89	8.68	71.86	8.71
偏差	1.22	0.06	2.18	0.03	0.11	0.02	0.14	-0.01

图 10 表明,机器人在未加载里程计信息时,所建的牛场环境地图在横向上出现明显的弯曲,并且随着机器人移动距离的增加,地图横向弯曲越明显。而加载里程计信息进行创建地图时,横向未出现弯曲情况。

由表 1 可知,机器人使用 Cartographer 算法在未加载里程计信息情况下,仅使用激光雷达与 IMU 传感器建立牛场环境地图,与实际环境纵向尺寸偏差最大为 2.18 m,横向尺寸偏差最大为 0.06 m。使用 Cartographer 算法在加载里程计信息时,所建地图与实际环境纵向尺寸偏差最大为 0.14 m,横向尺寸偏差最大为 0.02 m,横纵向尺寸偏差均小于未加载里程计信息时的横纵向尺寸偏差。

上述偏差结果表明,加载里程计数据与 IMU 传感器辅助激光雷达创建的环境地图,横纵向尺寸偏差均小于仅使用 IMU 传感器数据辅助激光雷达创建的环境地图。

3.2 机器人导航精度测试试验

推翻草机器人在牛场进行推翻草作业时,需要沿着待推翻草区域进行直线行驶。路径规划如图 11a 所示,其中灰色部分为奶牛的饲喂区域,红色

部分表示机器人工作时运动轨迹,机器人将沿着 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow H$ 路线进行行驶。考虑到机器人在推翻草作业时,前进方向上会受到牧草阻力,机器人轮胎与地面可能会存在打滑现象,因此在试验设计上,使用 AMCL 定位算法及 Dijkstra 路径规划算法,将有无加载里程计信息设置为对照组试验,探究两种情况下推翻草机器人推翻草过程中的导航精度。

评价机器人导航精度指标包括横向偏差、纵向偏差、航向偏角^[36]。机器人导航精度测量方法如图 11b 所示,设置机器人起点为坐标原点,以牛场纵向设为 y 轴正方向,遵循右手直角坐标系。将机器人导航至目标位置的坐标设置为 (x_0, y_0) ,以机器人激光雷达安装位置为测量基准点,以机器人前进方向为 y 轴正方向,以机器人正右方为 x 轴正方向建立直角坐标系。机器人行驶至目标位置,记录其基准点坐标位置为 (x_1, y_1) ,其中横向偏差 X 计算公式为

$$X = |x_1 - x_0|$$

(5)

纵向偏差 Y 计算公式为

$$Y = |y_1 - y_0|$$

(6)

航向偏角为机器人正方向与 y 轴之间的夹角。试验中分别以加载里程计信息与未加载里程计信息

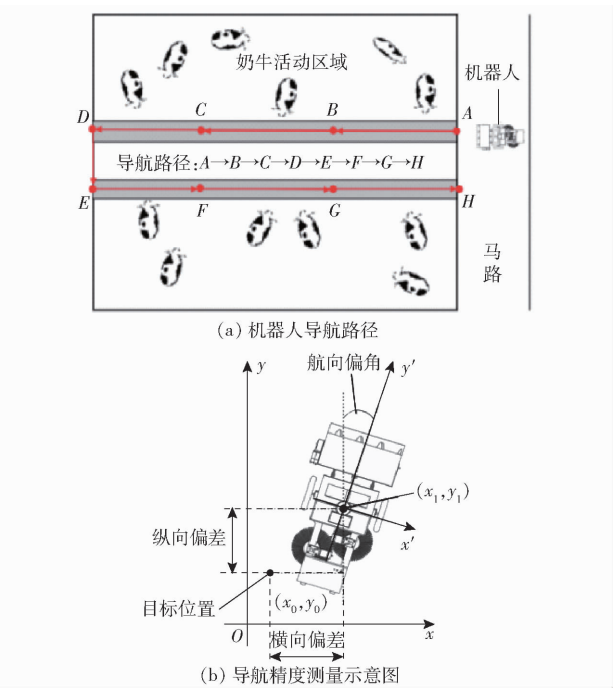


图 11 推翻草机器人导航路径及导航精度测量示意图
Fig. 11 Overthrowing grass robot navigation path and navigation accuracy measurement diagram

设为对照组试验,第 1 组为加载里程计信息进行导航,第 2 组为未加载里程计信息进行导航,每组分别试验 15 次。试验结果如表 2 所示,根据试验数据分别计算各评价指标的平均值与标准差。

表 2 导航精度试验结果									
Tab.2 Navigation accuracy test results									
试验序号	评价指标	目标位置点							
		A	B	C	D	E	F	G	H
1	横向偏差/m	平均值	0.031	0.038	0.046	0.047	0.056	0.052	0.049
		标准差	0.029	0.032	0.031	0.029	0.035	0.032	0.025
	纵向偏差/m	平均值	0.043	0.076	0.089	0.108	0.125	0.140	0.155
		标准差	0.026	0.035	0.042	0.035	0.036	0.044	0.050
	航向偏角/(°)	平均值	5.720	8.930	9.240	9.750	6.410	9.520	7.430
		标准差	2.430	2.570	2.190	2.250	2.640	2.280	2.150
2	横向偏差/m	平均值	0.028	0.022	0.029	0.031	0.033	0.023	0.029
		标准差	0.021	0.017	0.024	0.023	0.025	0.019	0.024
	纵向偏差/m	平均值	0.036	0.048	0.056	0.062	0.069	0.084	0.092
		标准差	0.018	0.015	0.021	0.019	0.023	0.026	0.025
	航向偏角/(°)	平均值	4.690	7.630	9.150	8.690	6.480	10.620	9.130
		标准差	2.240	2.410	2.360	2.320	2.440	2.250	2.390

表 2 表明,机器人在推翻草作业时,加载里程计信息导航,横向偏差最大值、纵向偏差最大值及航向偏角最大值分别小于 0.600 m、0.160 m 和 11.0°,标准差分别小于 0.040 m、0.050 m 和 3.0°;未加载里程计信息时,横向偏差最大值、纵向偏差最大值及航向偏角最大值分别小于 0.040 m、0.100 m 和 11.0°,标准差分别小于 0.030 m、0.025 m 和 3.0°。表明机

器人在未加载里程计信息进行导航时,精度明显高于加载里程计信息进行导航,满足牛场复杂环境中推翻草作业自主导航的需求。

未加载里程计信息导航时,横向与纵向偏差平均值均小于加载里程计信息时的横向和纵向偏差平均值,航向偏角误差基本相同。出现这种现象的原因因为机器人在推翻草作业时,由于推翻草负载的存

在,轮胎会与地面出现轻微打滑现象,导致里程计数据误差随着机器人移动距离的增加而累计增加,进而影响导航过程中纵向偏差。而机器人未加载里程计信息进行推翻草时,机器人导航精度明显增高。

4 结论

(1)针对牛场奶牛推送饲料机械设备智能化低、人工劳动强度大等问题,设计了一款基于激光SLAM的自主导航推翻草机器人。试验表明该机器人建图及导航精度能够实现在牛场环境中推翻草作业,提高了牛场饲养奶牛的智能化水平。

(2)牛场环境地图精度对比试验结果表明,机器人使用 Cartographer 算法加载里程计信息,以速度 0.25 m/s 创建地图时,所创建的地图与实际环境的纵向尺寸偏差最大为 0.14 m,横向尺寸偏差最大为 0.02 m,地图精度明显高于使用 Cartographer 算法未加载里程计信息情况。

(3)机器人导航精度测试试验结果表明,机器人未加载里程计信息进行导航时,横向偏差最大值、纵向偏差最大值及航向偏角最大值分别小于 0.040 m、0.100 m 和 11.0°,标准差分别小于 0.030 m、0.025 m 和 3.0°,导航精度高于加载里程计信息时的导航精度,满足机器人推翻草作业时的导航精度要求。

参 考 文 献

[1] 张南,张旭光.我国奶牛养殖业现状及发展建议[J].黑龙江畜牧兽医,2020(16):7-10,20.
ZHANG Nan, ZHANG Xuguang. Present situation and development suggestions of dairy cattle breeding industry in China[J]. Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinarian, 2020(16):7-10,20. (in Chinese)

[2] 马健宁,张明国,武志英,等.浅析凉山州奶牛养殖业的现状与发展[J].四川畜牧兽医,2021,48(5):19-21.
MA Jianning, ZHANG Mingguo, WU Zhiying, et al. Analysis of the status quo and development of dairy cattle breeding in Liangshan prefecture[J]. Sichuan Animal Husbandry and Veterinarian, 2021,48(5):19-21. (in Chinese)

[3] 王莎莎,杨世红,李培培,等.青岛市奶牛养殖机械化情况分析[J].山东畜牧兽医,2021,42(4):11-13.
WANG Shasha, YANG Shihong, LI Peipei, et al. Analysis on mechanization of dairy cattle breeding in Qingdao[J]. Shandong Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2021,42(4):11-13. (in Chinese)

[4] 王波,梁丽平.我国规模化奶牛场智能饲喂设备的应用及发展趋势[J].中国乳业,2019(11):58-61.
WANG Bo, LIANG Liping. Application and development trend of intelligent feeding equipment for large-scale dairy farms in China[J]. China Dairy, 2019(11):58-61. (in Chinese)

[5] 沈治.自适应PID控制的自动推料机器人的设计[J].机械设计与制造,2020(10):261-264,269.
SHEN Zhi. Design of automatic material pushing robot based on adaptive PID control[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(10):261-264,269. (in Chinese)

[6] 焦盼德,贺成柱,杨军平.奶牛智能推料机器人的研制[J].中国农机化学报,2018,39(1):74-77.
JIAO Pande, HE Chengzhu, YANG Junping. Development of intelligent feeding robot for dairy cows[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018,39(1):74-77. (in Chinese)

[7] 徐京邦,刘洋,李计星,等.AGV激光导航定位技术综述与发展趋势[J].物流技术与应用,2020,25(6):124-125.
XU Jingbang, LIU Yang, LI Jixing, et al. Review and development trend of AGV laser navigation and positioning technology [J]. Logistics Technology and Application, 2020,25(6):124-125. (in Chinese)

[8] 周晓杰.AGV系统及引导方式发展趋势综述[J].南方农机,2017,48(4):80.
ZHOU Xiaojie. Review on the development trend of AGV system and guidance methods[J]. The Southern Farm Machinery, 2017,48(4):80. (in Chinese)

[9] 李伟娟.浅析AGV小车的引导方式及其发展趋势[J].中小企业管理与科技(中旬刊),2015(4):235.
LI Weijuan. Analysis of AGV car guidance and development trend[J]. SME Management and Technology, 2015(4):235. (in Chinese)

[10] 万畅,谭戔,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. Research on automatic charging of forage pushing robot based on magnetic strip navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(Supp.):1-7,41. (in Chinese)

[11] ZHANG Baixing, SUN Xuan, LIU Minghao, et al. Research on trajectory correction model of dual magetic navigation differential mobile robot[J]. Journal of Physics Conference Series, 2022,12(1):1-5.

[12] 付强,项远城,王子强,等.基于磁导引和2维码定位的机器人自动导航[J].兵工自动化,2019,38(6):92-96.
FU Qiang, XIANG Yuancheng, WANG Ziqiang, et al. Robot automatic navigation based on magnetic guidance and 2D code positioning[J]. Ordnance Automation, 2019,38(6):92-96. (in Chinese)

[13] 周宗锟,姜卫平,唐健,等.LiDAR地图匹配与二维码融合的AGV室内定位与导航[J].测绘通报,2021(1):9-12,52.
ZHOU Zongkun, JIANG Weiping, TANG Jian, et al. LiDAR map matching and QR code fusion for AGV indoor positioning and navigation[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(1):9-12,52. (in Chinese)

[14] KRAJNÍK T, NITSCHÉ M, FAIGL J, et al. External localization system for mobile robotics[C]//International Conference on Advanced Robotics. IEEE, 2013.

- [15] 侯秀丽,徐宝国,周颖,等. 基于GPS/INS/磁力计多传感器融合连续定位[J]. 传感技术学报,2020,33(9):1320-1326.
HOU Xiuli, XU Baoguo, ZHOU Ying, et al. Continuous positioning based on GPS/INS/ magnetometer fusion[J]. Journal of Sensor Technology, 2020,33(9):1320-1326. (in Chinese)
- [16] 袁千贺,田昕,沈斯杰. 基于多传感器融合的移动机器人定位[J]. 计算机系统应用,2022,31(3):136-142.
YUAN Qianhe, TIAN Xin, SHEN Sijie. Mobile robot localization based on multi-sensor fusion[J]. Computer System Application,2022,31(3):136-142. (in Chinese)
- [17] ALLERTON D J, JIA H. A review of multi sensor fusion methodologies for aircraft navigation systems[J]. Journal of Navigation, 2005, 58(3):405-417.
- [18] 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 performance analysis of navigation system for fruit picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(Supp.):8-14. (in Chinese)
- [19] 徐波,林谋,左桐舟,等. 基于北斗的多传感器融合机器人定位算法[J]. 供用电,2022,39(4):45-51.
XU Bo, LIN Mou, ZUO Tongzhou, et al. Localization algorithm based on BEIDOU multi-sensor fusion robot[J]. Power Supply,2022,39(4):45-51. (in Chinese)
- [20] 毛文菊,刘恒,王小乐,等. 双导航模式果园运输机器人设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(3):27-39,49.
MAO Wenju, LIU Heng, WANG Xiaole, et al. Design and experiment of orchard transportation robot with dual navigation mode[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(3):27-39,49. (in Chinese)
- [21] CIOFFI G, SCARAMUZZA D. Tightly-coupled fusion of global positional measurements in optimization-based visual-inertial odometry:10.1109/IROS45743.2020.9341697[P]. 2020-03-09.
- [22] 张振乾,李世超,李晨阳,等. 基于双目视觉的香蕉园巡检机器人导航路径提取方法[J]. 农业工程学报,2021, 37(21):9-15.
ZHANG Zhenqian, LI Shichao, LI Chenyang, et al. Navigation path extraction method of inspection robot in banana garden based on binocular vision[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(21):9-15. (in Chinese)
- [23] 李润夺,崔旭晶,石征锦,等. 激光雷达SLAM导航的智能巡检机器人[J]. 信息技术与信息化,2021(8):229-231.
LI Runduo, CUN Xujing, SHI Zhengjin, et al. Intelligent inspection robot for LiDAR SLAM navigation[J]. Information Technology and Informatization, 2021(8):229-231. (in Chinese)
- [24] 刘婷婷,孙全文,岳春旺,等. 张杂谷草和玉米秸秆不同配比对奶牛生产性能的影响[J]. 中国奶牛,2017(5):8-11.
LIU Tingting, SUN Quanwen, YUE Chunwang, et al. Effects of different ratios of millet straw and corn straw on performance of dairy cows[J]. Chinese Dairy Cows, 2017(5):8-11. (in Chinese)
- [25] 臧洪波. 奶牛粗饲料的种类及加工方法[J]. 畜牧兽医科技信息,2020(10):196.
ZANG Hongbo. Types and processing methods of roughage for dairy cows[J]. Animal Husbandry Veterinary Science and Technology Information, 2020(10):196. (in Chinese)
- [26] 袁玉昊,田玉辉,李澳,等. 牛场精料撒料及推草机器人设计[J]. 机电工程技术,2020,49(12):101-103.
YUAN Yuhao, TIAN Yuhui, LI Ao, et al. Design of robot of concentrate spreading and pushing grass in cattle farm[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology,2020,49(12):101-103. (in Chinese)
- [27] QUIGLEY M. ICRA workshop on open source software[C]//ROS: An Open-source Robot Operating System, 2009.
- [28] SHOU Jiaxin, ZHANG Zhiming, SU Yongqing, et al. Design and implementation of indoor positioning and navigation system of mobile robot based on ROS and LiDAR[J]. Machinery & Electronics, 2018, 36(11):76-80.
- [29] 季宇寒,李寒,张漫,等. 基于激光雷达的巡检机器人导航系统研究[J]. 农业机械学报,2018,49(2):14-21.
JI Yuhan, LI Han, ZHANG Man, et al. Research on navigation system of inspection robot based on LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(2):14-21. (in Chinese)
- [30] IBANEZ A L, QIU R, LI D. An implementation of SLAM using ROS and Arduino[C]//2017 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO). IEEE, 2017.
- [31] HESS W, KOHLER D, RAPP H, et al. Real-time loop closure in 2D LiDAR SLAM[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2016.
- [32] OLSON E B. Real-time correlative scan matching[C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 2009.
- [33] 曹红玉,谭志,史晓霞,等. 概率机器人[M]. 北京:机械工业出版社,2017:187-203.
- [34] 贾文友,魏文涛,朱良恒,等. 移动机器人改进Dijkstra算法下路径规划及可视化研究[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版),2021,36(2):34-38.
JIA Wenyou, WEI Wentao, ZHU Liangheng, et al. Path planning and visualization research under the improved Dijkstra algorithm of mobile robots[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Science Edition), 2021,36(2):34-38. (in Chinese)
- [35] 胡春旭. ROS机器人开发实践[M]. 北京:机械工业出版社,2019.
- [36] 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 navigation system for greenhouse transportation robot with dual LiDAR[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(14):80-88. (in Chinese)