

基于激光雷达的巡检机器人导航系统研究

季宇寒¹ 李 寒¹ 张 漫¹ 王 琪² 贾 稼² 王 库²

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 北京兴汇同维电力科技有限公司, 北京 100083)

摘要: 智能巡检机器人能够高效、可靠地完成巡检任务,降低工作人员的劳动强度,准确、稳定的导航定位是巡检机器人执行巡检任务的基础。本文研究了基于激光雷达的巡检机器人导航系统,可实现机器人在室内外环境下的地图建立、路径规划和导航定位。导航系统由远程监控平台与巡检机器人组成,远程监控平台发布巡检任务、监控机器人状态、查询与存储检测数据,巡检机器人可实现自主导航定位、遍历检测点、执行数据采集等巡检任务,二者通过无线网络实现远程数据交互。融合激光雷达与编码器信息,使用高鲁棒性 Gmapping 算法建立二维环境地图。根据地图与检测点信息,采用分支界定算法搜索最优巡检路线,以减少巡检时间和能源消耗。使用自适应蒙特卡罗定位 (AMCL) 算法估计机器人位置和姿态,结合巡检路线,进行导航定位。根据横向偏差与航向偏差,通过经典的 PID 算法完成机器人驱动控制。机器人搭载可见光相机与红外相机,可对目标进行可见光通道与红外通道的融合图像检测。对巡检机器人进行了室内导航定位试验,试验结果表明,在 1 m/s 的速度下,位置与航向偏差的平均绝对误差 (MAE) 分别小于 5 cm 和 1.1°,标准差 (SD) 分别小于 5 cm 和 1.5°,能够满足巡检导航定位的要求。

关键词: 巡检机器人; 导航; 激光雷达

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)02-0014-08

Navigation System for Inspection Robot Based on LiDAR

Ji Yuhan¹ LI Han¹ ZHANG Man¹ WANG Qi² JIA Jia² WANG Ku²

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China 2. Beijing Xinghuitongwei Power Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: The intelligent inspection robots can complete the inspection task efficiently and reliably, and reduce the labor intensity of staff. Accurate and stable navigation positioning is the basis for inspection tasks of inspection robots. A navigation system based on light detection and ranging (LiDAR) was developed to achieve mapping, path planning and navigation positioning of the robot in both indoor and outdoor environments. The navigation system was composed of remote monitoring platform and inspection robot. The remote monitoring platform can issue inspection tasks, monitor robot status, query and store detection data, while the inspection robot can conduct navigation and positioning autonomously, traverse detection point, complete data acquisition and other inspection tasks. The platform and inspection robot exchanged remote data through wireless network. To build the 2D environment map, the information from LiDAR and encoder was combined by using a robust Gmapping algorithm. Based on the information of the map and detection points, the branch-and-bound algorithm was applied to search the optimal inspection route in order to reduce inspection time and energy consumption. Adaptive Monte Carlo localization (AMCL) algorithm was used to estimate the position and posture of the robot. The navigation and positioning was achieved by combining the position, posture and the inspection route calculated previously. Robot driver control was completed based on classic PID algorithm with the input of lateral deviation and heading deviation. The robot was equipped with RGB camera and IR camera, and targets can be detected more efficiently using the fusion information of visible and infrared images. In order to

收稿日期: 2017-11-10 修回日期: 2017-12-06

基金项目: 北京市科技计划项目 (D161100001416002)、国家国际科技合作专项 (2015DFG12280)、国家自然科学基金项目 (31571570) 和国家重点研发计划项目 (2017YFD0700400-2017YFD0700403)

作者简介: 季宇寒 (1992—), 男, 博士生, 主要从事农机激光避障系统研究, E-mail: jyh1009845844@163.com

通信作者: 张漫 (1975—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事精细农业及其支持技术研究, E-mail: cauzm@cau.edu.cn

verify the accuracy of the navigation system, the indoor navigation positioning experiment was carried out in this research. With the speed of 1 m/s, the mean absolute error (MAE) of the position and heading deviation was less than 5 cm and 1.1° and the standard deviation (SD) was less than 5 cm and 1.5°, which can meet the requirements of inspection navigation and positioning.

Key words: inspection robot; navigation; light detection and ranging

0 引言

巡回检验是在产品生产、运行中进行的定期或随机检验,旨在及时发现设备质量问题或运行故障。人工巡检耗费大量劳动力,智能巡检机器人能够保证巡检任务高效、可靠执行^[1-3],并将巡检人员从单调重复的巡检任务中解放出来,在农业生产^[4-5]、变电站维护^[6-7]、桥梁隧道检修^[8-9]、线缆异常排查^[10-11]等方面均有应用。高精度的导航定位是巡检机器人完成巡检任务的核心技术,直接影响巡检的效率与可靠性。

针对农业应用,CONESA-MUÑOZ 等^[12]提出一种无人机检测与地面机器人执行相结合的复合农药变量喷洒系统,融合了 RTK-GPS、机器视觉、激光雷达等多种传感器,但成本较高;BENGOCHEA-GUEVARA 等^[13]开发了基于机器视觉与 GPS 融合的农田作物检测机器人,通过图像处理完成作物行跟踪,使用模糊控制实现导航,但只能用于低矮作物;MAHMUD 等^[14]搭建了温室环境下的作物信息自动检测机器人,通过 2 个摄像头分别完成导航线识别与作物信息采集,采用 PID 算法实现导航控制,但需要铺设导航轨道板。

目前,国内外巡检机器人的传统导航方案都有一定的局限性。磁轨与 RFID 标签方案需要预埋,对地面有较大破坏,且具有较高的维护成本^[15]。GNSS 方案在遮挡较多的场景下易丢失卫星信号,且不能用于室内^[16-18]。惯导与编码器方案的导航误差会累积,长时间使用有较大误差^[19]。视觉方案对光线要求较高,对阴影敏感,室外应用效果不佳^[20-21]。激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR)作为导航定位的新型传感器,以其高精度、高实时性、全天候等优点逐渐成为巡检机器人导航的主流设备^[22-26]。

本文旨在搭建基于激光雷达的巡检机器人导航平台,融合激光雷达与编码器信息,建立环境地图,规划最优路径,从而实现巡检导航定位。

1 巡检导航系统开发

1.1 系统整体设计

巡检导航系统由远程监控平台与巡检机器人两

部分组成,如图 1 所示。其中,远程监控平台是任务分配与数据管理中心,巡检机器人是数据采集与任务执行终端。二者通过无线网络(2.4 GHz 电台或 4 G LTE 基站)进行实时通信,分工协作完成巡检任务。本研究以巡检机器人为研究对象。

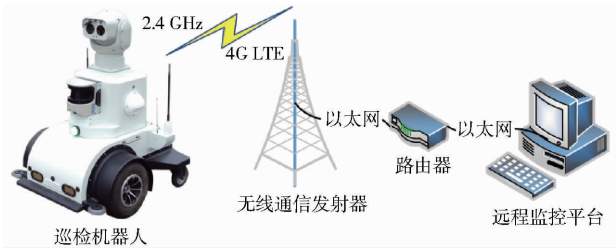


图 1 巡检导航系统整体结构

Fig. 1 Overall framework of inspection navigation system

1.2 巡检机器人设计

1.2.1 硬件设计

巡检机器人硬件由环境感知模块、数据处理模块、车体控制模块和无线通信模块 4 部分组成,如图 2 所示。

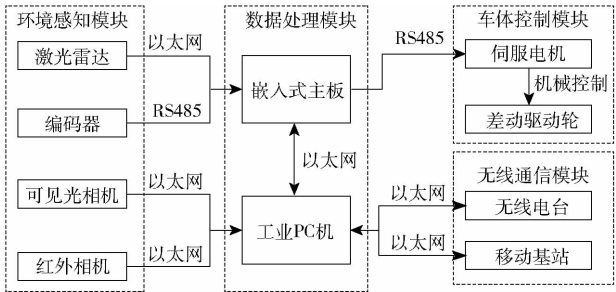


图 2 巡检机器人硬件结构图

Fig. 2 Hardware structure diagram of inspection robot

(1) 环境感知模块

准确、快速的环境感知是导航系统可靠工作的前提,巡检机器人通过环境感知模块实现对外界环境与自身状态的信息获取。机器人搭载的 SICK LMS511 二维激光雷达,具有 190°水平扫描角度范围,0.167°水平分辨率,80 m 测距量程和 25 Hz 的扫描频率,可实现室内外环境信息的高效获取。机器人的差动驱动轮配备编码器,能实时反馈机器人位姿信息。机器人搭载可见光相机与红外相机,分别提供可见光图像和红外图像,以基于多通道图像的信息融合对巡检目标进行可靠的检测。

(2) 数据处理模块

实时、可靠的数据处理是巡检任务顺利执行的

关键,巡检机器人通过数据处理模块完成目标检测、导航定位、移动控制等核心功能。机器人搭载工业 PC 机作为顶层控制器,安装 Windows 操作系统,便于应用程序的设计开发,可扩展多种巡检应用;搭载 Cortex A9 核心的嵌入式主板作为底层控制器,该主板具有丰富的外设接口,可扩展不同的传感器和执行机构。顶层与底层控制器通过以太网进行高效、稳定的数据交互。

(3)车体控制模块

平稳、安全的车体控制是机器人到达目标位置的保证,巡检机器人通过车体控制模块驱动车体移动。机器人的差动轮式底座由 2 个差动驱动轮和 2 个万向从动轮组成,具有控制简单、转向灵活等优点,能实现机器人的完整运动控制。为保证对机器人底座的精确控制,选择伺服电机驱动差动轮,通过伺服反馈提高控制精度。

(4)无线通信模块

高速、广域的数据交互是实现智能巡检的基础,巡检机器人通过无线通信模块与远程监控平台进行巡检数据与控制指令的通信。机器人搭载 2.4 GHz 无线电台通信模块与 4 G LTE 移动通信模块,可根据工作环境切换通信模式,具有良好的通用性。

1.2.2 软件设计

巡检机器人软件由应用层、控制层和驱动层 3 个层次构成,如图 3 所示。其中,应用层为基于 Windows 的巡检任务调度程序,可根据不同的应用场景,调整机器人的任务模式。控制层为基于 ROS (Robot operating system) 的地图建立、路径规划、导航定位程序,是导航软件系统的核心,也是实现机器人自主导航的关键。驱动层为基于 Ubuntu 的移动平台控制程序,以经典的 PID 算法为控制核心,实现移动机器人平稳、安全移动。

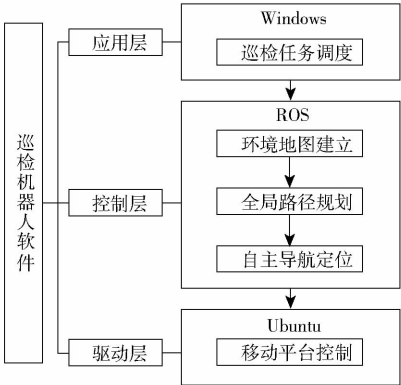


图 3 巡检机器人软件结构图

Fig. 3 Software structure diagram of inspection robot

1.3 巡检导航软件设计

导航软件是巡检机器人软件系统控制层的核

心,主要由环境地图建立、全局路径规划和自主导航定位 3 个部分构成。

1.3.1 环境地图建立

环境地图是机器人通过传感器对周围环境进行理解后形成的先验知识,准确的环境地图是机器人实现导航定位的前提。巡检机器人将激光雷达与编码器信息相融合,构建二维环境栅格地图,为机器人提供导航定位信息。

二维地图建立算法基本都依赖于概率估计,如: Gmapping、HectorSLAM、KartoSLAM 等^[27]。Gmapping 是基于粒子滤波的二维 SLAM 算法,其融合激光雷达和里程计信息,具有较强的鲁棒性。为平衡算法的精度与复杂度,采用 Rao-Blackwellized 随机模型对粒子数进行初始化,并通过自适应重采样技术,可有效防止粒子退化。采用离线数据建图,相比 SLAM 方式,传感器的完整离线数据可节约重复采集数据的时间。同时,通过复用离线数据也能调整算法经验参数,提高建图精度。

使用 ROS 系统实现 Gmapping 算法过程如图 4 所示。其中:数据包重放节点发布激光扫描数据、里程计数据、坐标变换数据。Gmapping 节点订阅以上消息,结合机器人模型的静态坐标变换树数据,建立二维栅格地图,并发布地图消息。

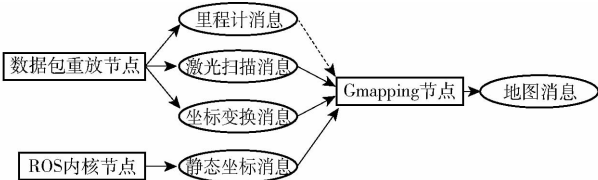


图 4 Gmapping 算法 ROS 节点关系图

Fig. 4 ROS node relationship of Gmapping algorithm

选择具有闭合路径的室内环境建立二维地图,通过检验地图的结构特征与闭合情况来评估建图效果。机器人通过对激光雷达和编码器的数据采集,记录环境与自身信息的完整观测数据。为检验地图的路径闭合情况,机器人返回出发点后继续采集一段数据,保证数据完整闭合。

1.3.2 全局路径规划

巡检机器人的任务具有高重复性,通过路径规划算法,获得全局最优的巡检路径,能够显著提高巡检效率、减少能源消耗。

全局路径规划的流程包括地图关键点标记、候选路径计算和最优路径筛选 3 个步骤。

(1)地图关键点标记

地图关键点是机器人执行巡检任务时需要进行停车检查的点(停车点)或进行转向的点(转向点)。明确巡检任务中各个关键点的位置、方向、类型等属

性是路径规划的基础。

机器人使用 MySQL 数据库以数据表的形式管理关键点信息,设计如表 1 所示。

表 1 关键点数据表设计
Tab.1 Design of key point

字段名称	数据类型	说明
id	VARCHAR	关键点的唯一编号
fname	VARCHAR	关键点的名称
lasemapX	FLOAT	关键点在地图的坐标 x
lasemapY	FLOAT	关键点在地图的坐标 y
lasemapTh	FLOAT	关键点在地图的角度
direction	VARCHAR	关键点的方向
fun	VARCHAR	转向类型

(2) 候选路径计算

候选路径是地图关键点间的有向通路,是巡检路线的基本组成部分。通过计算候选路径的距离,能够为最优路径的筛选提供数据支持。

以两关键点间的实际路径长度为权重,采用 Dijkstra 最短路径算法计算全部候选路径的距离。考虑到候选路径起止点方向不一致引起的转向,根据转向角度按比例对候选路径附加权值增益。采用数据表的形式管理候选路径,设计如表 2 所示。

表 2 候选路径数据表设计

Tab.2 Design of potential route

字段名称	数据类型	说明
id	VARCHAR	路径的唯一编号
point1	VARCHAR	起始关键点
point2	VARCHAR	终止关键点
distance	FLOAT	两关键点之间距离
turnangle	FLOAT	转向角度

(3) 最优路径筛选

最优路径是遍历巡检点并返回初始位置的最短候选路径序列,是全局路径规划的最终结果。因此,最优路径的筛选是典型的旅行商问题 (Traveling salesman problem, TSP)。考虑巡检任务的高重复性与路径规划的非实时性,采用分支界定方法离线筛选最优路线,获取全局最短路径。

分支界定是以广度优先搜索 (Breadth first search, BFS) 算法为原型进行优化的一种解空间搜索算法。通过对解空间搜索树的分支进行扩展与剪裁,不断调整搜索方向,加快找到全局最优解的速度。分支界定算法的流程图如图 5 所示。

分支拓展与剪裁是分支界定的核心:若当前分支下界 C_{branch} 小于解空间上界 C_{HB} ,则进行拓展;否则,进行剪裁。对节点进行逐层搜索操作,直至到达叶子节点,最小代价解即为全局最优路径。算法求

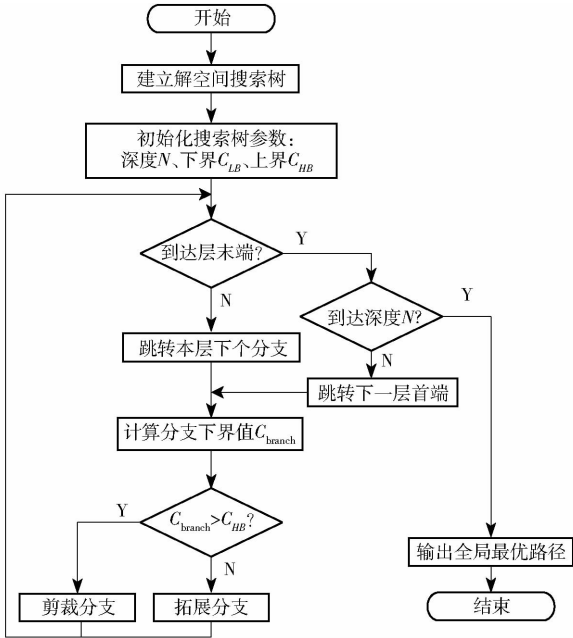


图 5 分支界定算法流程图

Fig.5 Flow chart of branch-and-bound algorithm

解过程中的主要参数为

$$C = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$C_{closed} = s_{(start, open)}^{(1)} + s_{(closed, open)}^{(2)} + s_{(closed, open)}^{(3)} + \cdots + s_{(closed, open)}^{(m)} \tag{2}$$

$$C_{open} = \sum_{i \in open} \frac{\min_{(1,2)}(s_{i1}, s_{i2}, \cdots, s_{in})}{2} \tag{3}$$

$$C_{LB} = \sum_{i=1}^n \frac{\min_{(1,2)}(s_{i1}, s_{i2}, \cdots, s_{in})}{2} \tag{4}$$

$$C_{HB} = s_{(start, open)}^{(1)} + \min_{(1)}(s_{(closed, open)}^{(2)}) + \min_{(1)}(s_{(closed, open)}^{(3)}) + \cdots + \min_{(1)}(s_{(closed, open)}^{(n-1)}) + s_{(closed, end)}^{(n)} \tag{5}$$

$$C_{branch} = C_{closed} + \frac{\min_{(1)}(s_{(start, open)}) + \min_{(1)}(s_{(open, end)})}{2} + C_{open} \tag{6}$$

- 式中 n ——地图关键点总数
 m ——已搜索地图关键点数
 C ——候选路径权值矩阵
 s_{ij} ——候选路径 $i \rightarrow j$ 的权值
 C_{closed} ——已搜索候选路径权重
 C_{open} ——未搜索候选路径权重下界值
 C_{LB} ——解空间权重下界值
 C_{HB} ——解空间权重上界值
 C_{branch} ——当前分支权重下界值
全局最优路径以拓扑图的形式显示在用户界面

过基于粒子滤波的状态估计,发布概率最大的位姿消息。

导航控制节点是导航控制服务的关键。导航控制节点根据机器人当前位姿消息和目标点位姿,发布车体控制消息。驱动控制节点订阅消息,将其解析为差动轮转速,传递给伺服电机驱动。编码器节点采集编码器反馈数据并发布到导航控制节点实现闭环控制。

机器人模拟器节点是虚拟机器人,计算并发布理想状态下机器人移动产生的里程计信息,为蒙特卡罗定位节点提供航迹推测的数据。

2.1 导航试验设计

巡检导航定位试验,旨在检验巡检机器人导航系统的精度与可靠性。试验地点选择中国农业大学信息与电气工程学院试验中心室内环境。为准确测量机器人停车位置与姿态,随机抽取机器人巡检路线的4个关键点粘贴定位坐标纸。巡检导航定位试验场景如图8所示。选定机器人车体上的6个边界点作为相对参考位置,机器人到达目标关键点停稳后,将边界点位置标记到坐标纸上。



图 8 巡检导航定位试验场景

Fig. 8 Scene of inspection navigation positioning experiment

试验共进行 10 次完整的巡检导航,每次试验后将机器人初始位置复位,避免误差累积影响试验结果,保证试验独立性。试验中设置机器人移动速度为 1 m/s 。

2.2 试验数据

图9是机器人边界点的位置分布图,可直观反映巡检机器人导航系统具有较高的导航精度。

进一步对巡检机器人导航精度进行定量分析,在 4 个关键点处,分别计算机器人的 6 个边界点位置偏差和绝对航向偏差(即导航偏差),如图 10 所示。图中实线表示不同边界点的位置偏差,虚线表示航向偏差。

4个关键点位置的数据对比分析如表3所示。由表3可知,在1 m/s的速度下,巡检机器人的位置与航向偏差的平均绝对误差(MAE)分别小于5 cm

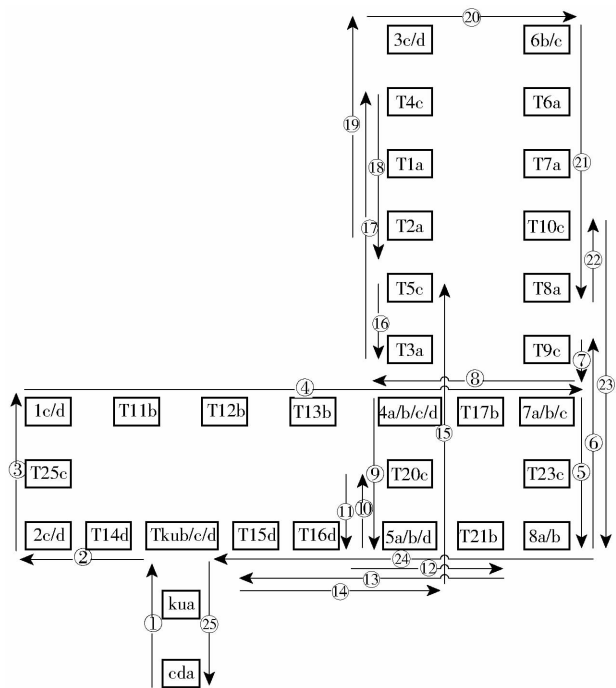


图 6 最优巡检路径拓扑图

Fig. 6 Topology map of optimal inspection path

1.3.3 自主导航定位

巡检机器人在准确的环境地图与明确的巡检路径的基础上,通过导航定位算法计算到达目标位置。

采用自适应蒙特卡罗定位 (Adaptive Monte Carlo localization, AMCL) 算法实现机器人定位。AMCL 算法以蒙特卡罗定位 (Monte Carlo localization, MCL) 算法为基础, 增加自适应的 KLD (Kullback-Leibler distance) 方法更新粒子, 可有效防止粒子退化。

ROS 系统实现 AMCL 导航定位的过程如图 7 所示。

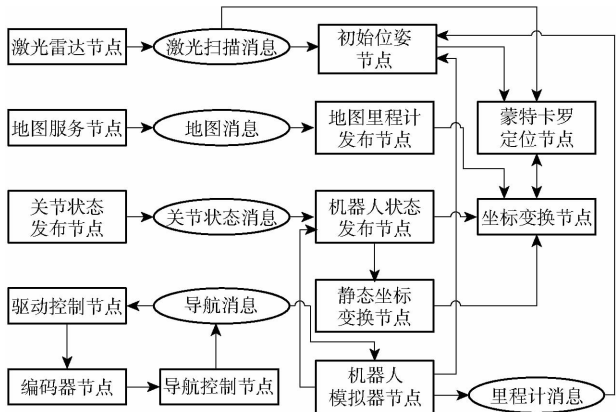


图 7 导航定位 ROS 节点关系图

Fig. 7 ROS node relationship of navigation

蒙特卡罗定位节点是整个导航定位算法的核心。蒙特卡罗定位节点订阅激光扫描消息、地图消息、坐标变换消息、里程计消息和初始位姿消息,通

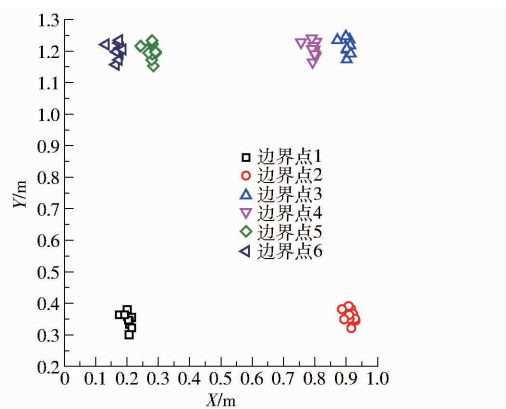


图 9 机器人边界点位置分布图

Fig. 9 Position map of robot boundary points

和 1.1° , 标准差 (SD) 分别小于 5 cm 和 1.5° 。综上, 巡检机器人导航系统具有较高的导航定位精度与稳定性, 而且激光导航过程中无需 GNSS 等绝对定位设备的辅助, 能够满足室内外各类巡检任务的导航

定位要求。

巡检导航系统可进行的改进:

(1) 全局最优路径通过离线方式计算获取, 可考虑开发机器人自主路径规划策略。

(2) 机器人未针对巡检中可能存在的障碍物提出检测避障方法, 安全性有待加强。

(3) 可以将机器视觉或惯性测量单元与机器人系统融合进一步提高定位精度。

3 结论

(1) 搭建了基于激光雷达的巡检机器人导航系统硬件平台。该平台采用模块化的硬件结构设计、分层式的软件结构设计。其中, 数据量大、实时性低的数据运算由工业 PC 机实现, 数据量小、实时性高的数据由嵌入式主板实现, 合理利用了硬件资源, 兼顾了巡检机器人对数据通量与响应速度的要求。结

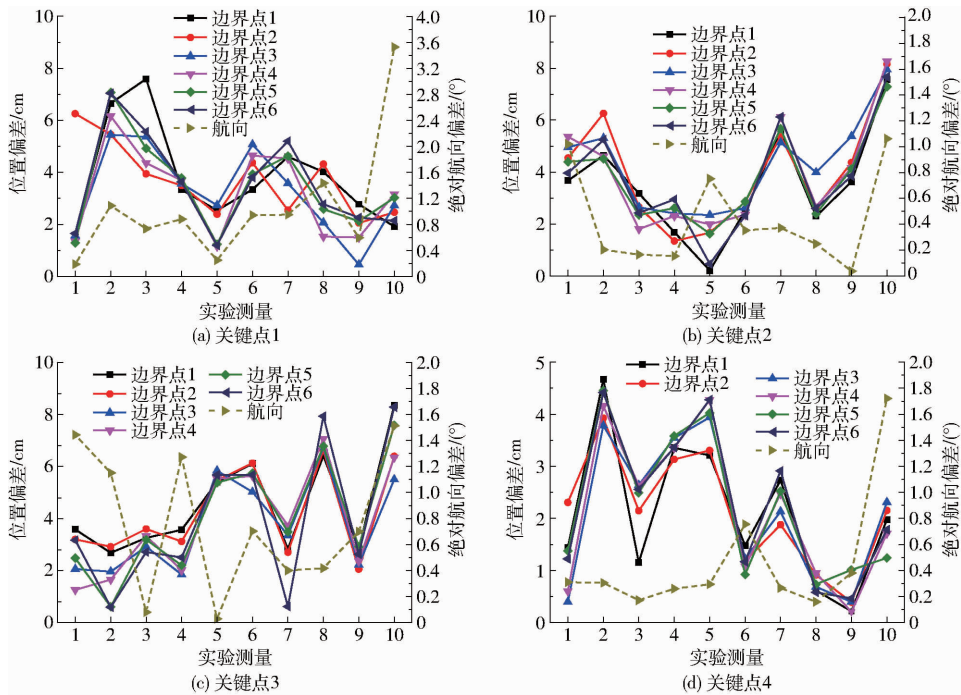


图 10 各关键点位置的导航偏差

Fig. 10 Deviation of navigation at each key point

表 3 关键点导航定位数据评价

Tab. 3 Evaluation of navigation data for key points

关键点	评价指标	位置偏差/cm						航向偏差/ ($^{\circ}$)
		边界点 1	边界点 2	边界点 3	边界点 4	边界点 5	边界点 6	
1	平均绝对误差	3.83	3.73	3.25	3.20	3.46	3.52	1.058 5
	标准差	4.26	3.96	3.62	3.61	3.86	3.95	1.461 8
2	平均绝对误差	3.49	3.98	4.27	3.96	3.78	3.75	0.436 0
	标准差	4.01	4.48	4.60	4.45	4.13	4.25	0.591 3
3	平均绝对误差	4.50	4.21	3.74	3.88	4.03	3.97	0.770 6
	标准差	4.86	4.52	4.13	4.37	4.55	4.76	0.979 5
4	平均绝对误差	2.08	2.13	2.10	2.14	2.23	2.27	0.462 1
	标准差	2.46	2.37	2.48	2.55	2.59	2.65	0.678 6

合远程监控平台,实现巡检机器人的远程管控,完成了巡检机器人导航系统开发。

(2)巡检机器人软件的核心部分控制层基于ROS操作系统实现,采用分布式的节点发布/订阅方式,使各功能算法模块间解耦,便于后续对软件算

法的进一步完善开发。

(3)经巡检导航定位试验测试,巡检机器人导航系统的位置与航向偏差的平均绝对误差分别小于5 cm和1.1°,标准差分别小于5 cm和1.5°,能够满足各类巡检任务中的导航定位需求。

参 考 文 献

- 1 杨旭东, 黄玉柱, 李继刚, 等. 变电站巡检机器人研究现状综述[J]. 山东电力技术, 2015, 42(1): 30-34.
YANG Xudong, HUANG Yuzhu, LI Jigang, et al. Research status review of robots applied in substations for equipment inspection[J]. Shandong Electric Power, 2015, 42(1): 30-34. (in Chinese)
- 2 SHUKLA A, KARKI H. Application of robotics in onshore oil and gas industry—a review part I[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 75(B): 490-507.
- 3 SHUKLA A, KARKI H. Application of robotics in offshore oil and gas industry—a review part II[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 75(B): 508-524.
- 4 PRAVEENA R, SRIMEENA R. Agricultural robot for automatic ploughing and seeding[C]//2015 IEEE Technological Innovation in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR), IEEE, 2015: 17-23.
- 5 KOMASILOVS V, STALIDZANS E, OSADCUKS V, et al. Specification development of robotic system for pesticide spraying in greenhouse[C]//2013 IEEE 14th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI) IEEE, 2013: 453-457.
- 6 向光海. 变电站巡检机器人路径规划系统设计与实现[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
XIANG Guanghai. Design and implementation of route planning system of a substation inspection robot[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- 7 史思总. 基于ROS的室内变电站设备巡检机器人定位技术[D]. 成都:西南科技大学, 2016.
SHI Sizong. Positioning technology of indoor substation equipment inspection robot based on ROS[D]. Chengdu: Southwest University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- 8 YUN H B, KIM S H, WU L, et al. Development of inspection robots for bridge cables[J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013(4): 967508.
- 9 MONTERO R, VICTORES J G, MARTINEZ S, et al. Past, present and future of robotic tunnel inspection[J]. Automation in Construction, 2015, 59: 99-112.
- 10 MIAO R, PANG S. Development of a low-cost remotely operated vehicle for ocean exploration[C]//OCEANS'15 MTS/IEEE, 2015: 1-7.
- 11 KHADHRAOUI A, BEJI L, OTMANE S, et al. Stabilizing control and human scale simulation of a submarine ROV navigation[J]. Ocean Engineering, 2016, 114: 66-78.
- 12 CONESA-MUÑOZ J, VALENTE J, CERRO J D, et al. Integrating autonomous aerial scouting with autonomous ground actuation to reduce chemical pollution on crop soil[C]//Robot 2015; Second Iberian Robotics Conference. Springer International Publishing, 2016: 41-53.
- 13 BENGOCHEA-GUEVARA J M, CONESA-MUÑOZ J, ANDÚJAR 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): 276.
- 14 MAHMUD M S A, ABIDIN M S Z, MOHAMED Z. Development of an autonomous crop inspection mobile robot system[C]//2015 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOREd), 2015: 105-110.
- 15 王金钗. 变电站巡检机器人磁导航系统设计与实现[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
WANG Jinchai. The design of magnetic navigation system for substation inspection robot[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- 16 谢德胜, 徐友春, 万剑, 等. 基于RTK-GPS的轮式移动机器人轨迹跟随控制[J]. 机器人, 2017, 39(2): 221-229.
XIE Desheng, XU Youchun, WAN Jian, et al. Trajectory tracking control of wheeled mobile robots based on RTK-GPS[J]. Robot, 2017, 39(2): 221-229. (in Chinese)
- 17 刘军, 袁俊, 蔡骏宇, 等. 基于GPS/INS和线控转向的农业机械自动驾驶系统[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 46-53.
LIU Jun, YUAN Jun, CAI Junyu, et al. Autopilot system of agricultural vehicles based on GPS/INS and steer-by-wire[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 46-53. (in Chinese)
- 18 魏苇. 基于差分GPS的变电站巡检机器人定位导航系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
WEI Wei. The location and navigation system of substation inspecting robot based on RTK GPS[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- 19 陈新伟, 孟祥刚, 阙雅静, 等. 基于IMU的移动机器人精确角度获取方法[J]. 闽江学院学报, 2017, 38(2): 20-27.
CHEN Xinwei, MENG Xianggang, QUE Yajing, et al. Precise angle acquisition method for mobile robot based on IMU[J]. Journal of Minjiang University, 2017, 38(2): 20-27. (in Chinese)
- 20 薛阳, 江天博, 张晓宇. 基于视觉的变电站巡检机器人航线提取方法[J]. 广东电力, 2015, 28(12): 13-18.
XUE Yang, JIANG Tianbo, ZHANG Xiaoyu. Vision based extraction method for navigation line of substation inspection robot[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(12): 13-18. (in Chinese)
- 21 赵坤. 变电站智能巡检机器人视觉导航方法研究[D]. 保定:华北电力大学, 2014.
ZHAO Kun. Research on visual navigation of intelligent patrol robot in the substation[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014. (in Chinese)

- 22 张浩. 基于激光点云数据的变电站巡检机器人导航方法研究[D]. 保定:华北电力大学, 2015.
ZHANG Hao. Research on navigation method of substation inspection robot based on the lase point cloud[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015. (in Chinese)
- 23 薛金林, 张顺顺. 基于激光雷达的农业机器人导航控制研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 55 – 60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140909&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j. issn. 1000-1298. 2014. 09. 009.
XUE Jinlin, ZHANG Shunshun. Navigation of an agricultural robot based on laser radar[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 55 – 60. (in Chinese)
- 24 贾士伟, 李军民, 邱权, 等. 基于激光测距仪的温室机器人道路边缘检测与路径导航[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 39 – 45.
JIA Shiwei, LI Junmin, QIU Quan, et al. New corridor edge detection and navigation for greenhouse mobile robots based on laser scanner[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(13): 39 – 45. (in Chinese)
- 25 钱晓明, 张浩, 王晓勇, 等. 基于激光扫描匹配的移动机器人相对定位技术研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 14 – 21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160303&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 03. 003.
QIAN Xiaoming, ZHANG Hao, WANG Xiaoyong, et al. Relative localization technology for mobile robot based on laser scan matching[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 14 – 21. (in Chinese)
- 26 周俊, 胡晨. 密植果园作业机器人行间定位方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 22 – 28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20151104&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 11. 004.
ZHOU Jun, HU Chen. Inter-row localization method for agricultural robot working in close planting orchard[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 22 – 28. (in Chinese)
- 27 SANTOS J M, PORTUGAL D, RUI P R. An evaluation of 2D SLAM techniques available in robot operating system[C]//IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. IEEE, 2014: 1 – 6.
-

(上接第 33 页)

- 9 TORRES M, PELTA D A, VERDEGAY J L, et al. Coverage path planning with unmanned aerial vehicles for 3D terrain reconstruction[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 55: 441 – 451.
- 10 CONESA-MUÑOZ J, PAJARES G, RIBEIRO A. Mix-opt: a new route operator for optimal coverage path planning for a fleet in an agricultural environment[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 54: 364 – 378.
- 11 HAMEED I A, COUR-HARBO A L, OSEN O L. Side-to-side 3D coverage path planning approach for agricultural robots to minimize skip/overlap areas between swaths[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2016, 76: 36 – 45.
- 12 徐博, 陈立平, 谭彧, 等. 多架次作业植保无人机最小能耗航迹规划算法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 36 – 42. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20151106&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 11. 006.
XU Bo, CHEN Liping, TAN Yu, et al. Path planning based on minimum energy consumption for plant protection UAVs in sorties [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 36 – 42. (in Chinese)
- 13 王宇, 陈海涛, 李煜, 等. 基于 Grid – GSA 算法的植保无人机路径规划方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 29 – 37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170704&flag=1. DOI: 10.6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 07. 004.
WANG Yu, CHEN Haitao, LI Yu, et al. A path planning method based on Grid – GSA for plant protection UAV [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 29 – 37. (in Chinese)
- 14 GU J, CAO Q. Path planning for mobile robot in a 2.5 dimensional grid based map[J]. Industrial Robot, 2011, 38(3): 315 – 321.
- 15 王宇, 黄胜, 廖全蜜, 等. 基于引力搜索算法的船舶舱室布置方法[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(1): 131 – 139.
WANG Yu, HUANG Sheng, LIAO Quanmi, et al. A method for ship compartment layout design based on gravitational search algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(1): 131 – 139. (in Chinese)
- 16 王宇, 黄胜, 廖全蜜, 等. 基于引力搜索算法的舱室分布方案设计方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(1): 48 – 52.
WANG Yu, HUANG Sheng, LIAO Quanmi, et al. Method for the layout design of ship cabins based on gravitational search algorithm[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(1): 48 – 52. (in Chinese)
- 17 MAC T T, COPOT C, TRAN D T, et al. Heuristic approaches in robot path planning: a survey[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2016, 86: 13 – 28.
- 18 DAS P K, BEHERA H S, DAS S, et al. A hybrid improved PSO – DV algorithm for multi-robot path planning in a clutter environment[J]. Neurocomputing, 2016, 207: 735 – 753.
- 19 BEHNCK L P, DOERING D, PEREIRA C E, et al. A modified simulated annealing algorithm for UAVs path planning[J]. IFAC-Papers Online, 2015, 48(10): 63 – 68.
- 20 RASHEDI E, NEZAMABADI-POUR H, SARYAZDI S. GSA: a gravitational search algorithm[J]. Information Sciences, 2009, 179(13): 2232 – 2248.