基于自动导航融合 SLAM 的多传感器蓝莓温室巡检车控制系统

祝金辉 张富健 董纹嘉 胡戴丽 沈硕越 夏卫海
湖州学院智能制造学院，中国·浙江 湖州 313000

摘 要：论文中提出了一种基于自动导航融合 SLAM 的多传感器蓝莓温室巡检车控制系统，旨在解决一些相较于传统人工巡检效率低、成本高、巡检不准确等问题。自动导航作为农业移动机器人的一个重要组成部分，是集计算机、电子通信、自动控制为一体的综合性技术 [1]。自动导航也是实现精细化果园管理的核心。为了能够有效解决单一传感器同时定位与地图构建（simuhaneous localization and mapping，SLAM）定位精度低、障碍物识别不全问题，提出一种多传感器融合的 SLAM 方法 [2]。蓝莓温室巡检车配置自动导航和多传感器，能够根据环境参数的变化自动调整巡检路线，能够极大的提高巡检效率，进一步提高数据融合的性能和实用性。为此文中介绍了自动导航、SLAM 多传感器融合成一个系统的重要组成部分。

关键词：自动导航；SLAM 多传感器融合；蓝莓温室；巡检车控制系统

Multi-sensor Blueberry Greenhouse Inspection Vehicle Control System based on Automatic Navigation Fusion SLAM

Jinhui Zhu Fujian Zhang Wenjia Dong Daili Hu Shuoyue Shen Weihai Xia
School of Intelligent Manufacturing, Huzhou College, Huzhou, Zhejiang, 313000, China

Abstract: In this paper, a multi-sensor blueberry greenhouse inspection vehicle control system based on automatic navigation fusion SLAM is proposed, which aims to solve some problems such as low efficiency, high cost and inaccurate inspection compared with traditional manual inspection. As an important part of agricultural mobile robots, automatic navigation is a comprehensive technology integrating computers, electronic communications, and automatic control[1]. Automatic navigation is also at the heart of refined orchard management. In order to effectively solve the problems of low positioning accuracy and incomplete obstacle recognition of simuhaneous localization and mapping (SLAM) with a single sensor, a multi-sensor fusion SLAM method was proposed[2]. The blueberry greenhouse inspection vehicle is equipped with automatic navigation and multi-sensor, which can automatically adjust the inspection route according to the changes of environmental parameters, which can greatly improve the inspection efficiency and further improve the performance and practicability of data fusion. To this end, this paper introduces the important components of automatic navigation and SLAM multi-sensor fusion into one system.

Keywords: automatic navigation; SLAM multi-sensor fusion; blueberry greenhouse; inspection vehicle control system

0 前言

蓝莓作为一种营养价值极高的浆果且广受欢迎，已经在一些地区广为种植。为了提高蓝莓的产量，中国温室蓝莓种植技术已经取得一定进展，但在温室蓝莓智能控制系统方面尚有较大空白 [3]。随着物联网、传感器及自动化控制技术的飞速发展，多传感器融合的智能设备在农业领域展现出巨大应用潜力。本研究聚焦于蓝莓温室种植场景，以自动导航为技术基础，利用激光 SALM、视觉 SLAM 进行数据采集，建模等，将温湿度传感器等多种传感器有机融合，构建了一套以自动导航为基础的蓝莓温室巡检车控制系统。该系统旨在实现对蓝莓生长环境的全方位、动态化监测，及时发现并解决环境异常问题，为蓝莓生长营造长期稳定适宜的温室环境，从而有效节省人力成本，显著提高蓝莓生产效率，推动蓝莓种植产业向智能化、精细化方向转型升级。

1 自动导航技术基础

自动导航技术是指利用各种传感器、算法和控制系统，使设备能够在无人干预或较少人工干预的情况下，按照预定的路径或目标自主行驶、移动或操作的技术。该蓝莓温室巡检车自动导航技术基础包含三种不同的技术（见图 1）。

图 1 自动导航技术基础框架图

定位技术包含多种不同的定位技术，常见的有基于传感器的定位技术等，其中组合定位技术更有优势。随着卫星定位技术的发展，利用全球卫星定位系统（Global Navigation Satellite System，GNSS）可以解决大多数未知场景下的自主定位问题。但是 GNSS 的定位精度严重依赖卫星信号的质量 [4]。那么将 SLAM 技术和 GNSS 定位技术结合后与无线节点技术相融合，将会大大实现高精度定位。自动定位导航系统是基础，无线节点定位技术可以为导航系统提供自动化导航技术支持 [5]。

激光导航是基于激光雷达凭借光的反射扫描四周环境，具有较高的测距精度，可以精准可靠地提供四周物体方位与深度信息 [6]。在蓝莓温室环境中，激光雷达具有极强的适应性，可以根据不同的环境和任务需求，不断的变更行驶路线，以达到任务。在一些工作空间中，能够实时检测周围的动态情况，确保与周围的人和物保持安全距离，实现安全、高效的协同工作。

误差修正不仅能够提高定位的精度，还能提升作业效率和质量，因此在任何导航控制过程都不可避免地与理论状态存在误差，必须及时进行误差修正，以免误差持续扩大 [7]。一方面是考虑到信号遮挡，不可避免的有一些信号检测会出现问题，因此当出现信号偏差的时候，自动导航系统自身会根据信号的强弱自动进行调整。另一方面是数据采集的过程中难免会出现误差，因此需要确保不同传感器数据在时间上同步，使自动导航技术在各个传感器之间能够进行数据准确整合。

应用价值在农业机械作业中的应用价值主要体现在以下 5 个方面：一是作业精确性显著提高。农业机械的作业过程不再依赖于人的主观判断，利用智慧导航精确控制便可保证行驶速度与农机功能达到最佳匹配。二是劳动强度显著降低。农业机械更容易实现自主作业，生产管理者仅需参与生产决策，大量工作能通过设备自主完成 [7]。三是降低人力成本。自动导航系统可使农机连续，集中稳定的作业，进而减少人力操作的疲劳。四是保证作业质量统一性。自动导航作业保证了作业速度等作业策略的高度统一，消除了人为操作中的误差和不确定性，避免不同地块的产出品质存在差异 [8]。五是助力精准农业发展，自动导航技术与农业物联网、大数据等技术融合，其能够实现精准农业，进而实现农业可持续的发展。

2 SLAM 多传感器融合技术基础

随着传感器技术的发展以及计算机算力的进步，同步定位与建图（SLAM）已广泛应用于各个领域 [9]。SLAM 是一种机器人技术中的关键技术，主要用于解决一些移动设备在未知环境中同时进行自身定位和构建环境地图的问题。其搭载了传感器（如激光雷达、摄像头等）的移动设备在未知环境中移动，传感器不断收集周围环境的数据。SLAM 算法通过对这些数据的处理和分析，实时估计设备在环境中的位置和姿态，同时根据这些信息构建出环境的地图，地图可以是几何地图、拓扑地图等不同形式。当前主流的 SLAM 技术有激光 SLAM 和视觉 SLAM[10]。在蓝莓温室复杂的环境条件下，单一传感器的 SLAM 算法（ORB-SLAM2、LOAM 等）受到纹理条件、光照强度、结构特征等条件的限制，导致建图效果差、定位不准确。

激光 SLAM 是 SLAM 传感器融合领域的关键技术 [9]，其通过提前安装固定的激光雷达发射激光束，激光遇到物体后反射回来，被激光雷达接收，从而获取周围环境中物体的距离信息，形成点云数据。基于采集到的点云数据，激光 SLAM 算法通过对比当前点云与已构建地图中的点云特征，将不同位置采集到的点云数据进行融合和处理，逐步构建出环境的地图。

视觉 SLAM 是另一种重要的同步定位与地图构建技术 [11]。经典的视觉 SLAM 算法主要包括 5 个相互关联的主要模块：信息预处理、视觉里程计、后端优化、回环检测和建图（见图 2）。

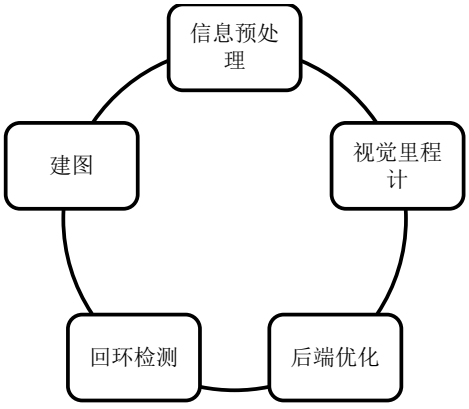

图 2 视觉 SLAM 算法模块图

信息预处理是指在对视觉传感器获取的图像等原始信息进行核心的定位与地图构建算法处理之前，所进行的一系列初步处理操作，目的是提高数据质量、降低噪声干扰、提取关键特征等，为后续的 SLAM 算法运行提供更好的数据基础。主要包括以下几个方面：

①常采用高斯滤波、中值滤波等方法进行图像去噪。

②采用直方图均衡化进行图像增强。

③从图像中提取具有代表性和稳定性的特征点或特征区域进行特征提取。

视觉里程计是一种利用视觉信息来计算机器人或相机在运动过程中位移和姿态变化的技术。针对基于描述子匹配的视觉 SLAM 中描述子仅在当前帧选为关键帧时才能重用的问题，提出了一种基于光流追踪与位姿预测模型的视觉里程计算法（Optical Flow and Pose Prediction Visual Odometry，OFPP-VO）[12]。其会从三个角度进行处理数据。①特征跟踪：在相邻的图像帧中，通过特征提取算法（如

ORB 等）找到一些具有代表性的特征点，然后利用特征匹配算法，确定这些特征点在不同帧之间的对应关系，以此来跟踪特征点的运动。②运动估计：根据不同的特征点在图像中的运动情况，结合相机的成像模型和几何关系，使用如对极几何等方法，计算出相机在相邻帧之间的旋转和平移变化。③位姿计算：将相邻帧之间的运动姿态进行积分，逐步推算出相机在整个运动过程中的位姿轨迹。

在 SLAM 系统中的后端优化是为了解决系统长时间运行中积累的误差，提高地图精度以及行动轨迹的准确性。SLAM 后端一般采用两种普遍做法：一是基于滤波器的后端优化：通过预测和更新步骤，利用测量信息不断修正状态估计，能实时处理数据，但在大规模场景中计算量会增加。二是基于图优化的后端优化：将视觉 SLAM 问题构建为一个图模型，节点表示相机位置和地图点，边表示它们之间的约束关系 [13]。回环检测又被称为位置识别，是“同步定位与建图”（Simultaneous Localization And Mapping，SLAM）系统中根据图像间的相似度判断运动轨迹是否经过重复地点（即存在回环）的功能，起到阶段性消除累积误差的作用 [14]。建图是根据应用需求的不同，重建出具有相应特点的地图，是对整体处理结果的具体化 [14]。根据地图的类型不同，建图方法也有所差异。对于点云地图，通常是通过特征提取和匹配算法，获取不同图像帧中特征点的对应关系，再利用三角测量等方法计算出特征点的三维坐标，逐步构建出点云地图。网格地图则是将环境划分为一个个小网格，通过对每个网格的状态进行估计和更新来构建地图。拓扑地图主要关注环境中的关键节点和它们之间的连接关系，通过识别和记录这些信息来构建地图。

3 蓝莓温室培养技术

由于蓝莓温室种植技术普及时间相对较短，特别是温室种植蓝莓时间并不长，这也使得在蓝莓种植时期极易出现各种技术问题，对于蓝莓产量以及蓝莓健康生长会带来不利影响。近年来温室蓝莓种植面积不断扩大，通过温室可以极大增强蓝莓对种植区域、环境的适应性，实现蓝莓高效、高产以及全面优质种植 [15]。在蓝莓温室的设计与建造过程中，需着重考虑了光照、温度、湿度等关键环境因素，并致力于打造一个稳定、高效且可持续的生产环境。温室的结构设计是整个温室培养技术的基石。应选择高强度、耐腐蚀的材料进行建造，如镀锌钢管和耐候性强的塑料薄膜等。光照是蓝莓生长的重要因素，因此温室顶部的覆盖材料应选择具有高透光性的玻璃或透明塑料板。为了更精准地控制温室内的环境，温室四周还设置了可调节的通风窗和侧帘。这些设施可以根据天气和蓝莓生长需求进行灵活调整，以确保温室内的温度和湿度处于最佳状态。

蓝莓各个生长时间段的温度往往会处于一个抛物线状态，一是植株见光初期温度控制在 8℃ ~30℃ , 二是蓝莓花期温度要控制在 12℃ ~28℃，在花芽休眠还有分化阶段，适合蓝莓生长的温度为 23℃，温度最高要小于 29℃ , 不能够低于 11℃，高丛蓝莓需要在温度为 6.2℃的低温状态下，时间大约为 1000h[15]。蓝莓作为一种对水分管理极为敏感的果树，其灌溉与排水系统的科学设计显得尤为重要。在温室培养环境中，合理的灌溉方式不仅能确保蓝莓正常生长所需的水分，还能有效避免水资源的浪费。滴灌和微喷灌作为现代农业中广泛应用的灌溉技术，其优势在于能够精准控制水量，将水分直接输送到蓝莓根系附近，从而大幅度减少地表径流和深层渗漏，提高水分利用效率。在实施灌溉时，应根据蓝莓的生长阶段、温室内的气候条件以及土壤湿度等因素来灵活调整灌溉量和灌溉频率。

排水系统的设计同样不容忽视。温室内的排水系统主要包括排水沟和排水管道两部分。排水沟应设置在温室地势较低的一侧，以便于汇集多余的雨水或灌溉水；而排水管道则负责将水分迅速排出温室，防止土壤长时间积水。为了避免土壤板结和根系窒息等问题，排水沟和排水管道应保持畅通无阻，并定期进行清理和维护。蓝莓温室的灌溉与排水系统设计是一项系统性工程，需要综合考虑多方面因素。通过采用先进的灌溉技术和合理的排水方案，我们不仅可以为蓝莓生长创造一个良好的水分环境，还能有效提高水资源利用效率，共同推动蓝莓温室培养的可持续发展 [16]。

4 巡检车控制系统的设计和应用

4.1 巡检装置系统总体方案

为了实现蓝莓温室全面智能化、无人化检测和识别，设计了一款能够在温室环境下进行巡检装置的系统，该巡检系统主要包含了以下子系统：中控系统、信息采集系统、定位系统、巡检系统、遥控系统以及多传感器融合系统 [17]（见图 3）。

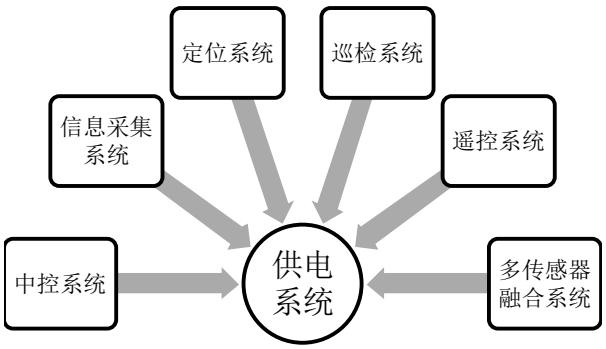

图 3 控制系统总体框图

智能巡检车控制系统主要有以下几部分功能：

①导航定位功能：可根据巡检任务和环境地图，规划出最优或较优的巡检路径，能避开障碍物和危险区域，提高巡检效率。

②环境感知功能：通过激光雷达、SLAM 融合多传感器、摄像头等，实时感知周围环境，检测并识别障碍物的位置、

形状、大小等信息，以便及时避让。

③数据采集与处理功能：利用车载摄像头拍摄巡检区域的图像和视频，可进行实时监控和事后分析，以便发现设备故障、异常情况等。对采集到的各种数据进行滤波、降噪、特征提取等预处理，运用数据分析算法和模型，挖掘数据中的潜在信息。

④运动控制功能：根据巡检任务和环境状况，精确控制巡检车的行驶速度，可实现加速、减速、匀速行驶等功能。通过智能控制转向机构，实现巡检车的直线行驶、转弯、掉头等动作，确保其按照预定路径行驶。

⑤通信功能：通过无线通信网络，如 4G、5G、Wi-Fi 等，将采集到的数据、图像、视频等信息实时传输到监控中心，同时接收监控中心发送的指令和任务。

⑥安全防护功能：配备机械防护装置，如保险杠、防护栏等，以及电气防护装置，如过流保护、过压保护等，提高巡检车的安全性。

4.2 智能巡检车控制系统软件及算法

蓝莓温室巡检车控制系统软件设计主要包含主控制器任务执行流程的模块化设计、驱动系统软件设计等 , 算法为 SLAM 建图算法。蓝莓温室巡检车控制系统软件中，主控制器任务执行流程模块化设计如下：初始化模块负责开启硬件设备并设置初始参数；环境感知模块利用激光雷达、摄像头等收集数据，处理后用于环境判断；激光 SLAM 建图模块依据感知数据实时构建与更新温室地图，为路径规划提供基础；路径规划模块结合任务与地图规划最优巡检路线；视觉 SLAM 建图模块根据规划结果控制车辆行驶。

驱动系统软件设计涵盖电机驱动初始化，设置硬件接口与驱动参数。通过 PID 算法实现速度精确控制，依据转向角度控制左右电机转速差完成转向，同时实时监测电机电流、温度，保障安全运行。

5 结语

在本次针对一种多传感器的蓝莓巡检车控制系统的研究中，我们深度融合了激光雷达导航、激光 SLAM、视觉 SLAM 以及温湿度传感器等多种类型的传感器，构建起一个全方位、多层次的环境感知体系。凭借 SLAM 建图算法的强大支持，系统能够快速且精准地构建出蓝莓温室的高精度地图，为巡检车的自主导航与路径规划提供坚实基础。通过优化算法和硬件配置，巡检车不仅可以在复杂的蓝莓温室环境中灵活穿梭，还能依据实时采集的数据，智能规划出最优巡检路径，极大地提高了巡检效率。

经过在不同规模、不同环境条件的蓝莓温室中进行大量的实地测试，该系统展现出了卓越的稳定性和可靠性。系统能对温室内的温湿度、光照强度等关键环境参数进行精确调控，为蓝莓的生长创造最为适宜的环境条件。可以说，这一系统的成功研发，为蓝莓种植产业提供了一套全面、高效的数据采集与分析解决方案，有效提升了蓝莓种植管理的智能化与精细化水平。相信随着该系统的广泛应用，必将推动蓝莓产业朝着高产、优质、高效的方向大步迈进，为农业现代化发展注入新的活力。

参考文献：

[1] 慕军营,戚树腾,陈军,等.自动导航系统在农业中的应用及果园适用性分析[J].农机化研究,2014,36(7):6-12.

[2] 彭真,伞红军,李春磊,等.基于多传感器融合的室内SLAM[J].计算机工程与设计,2024,45(10):3136-3142.

[3] 吴亚榕,陈绍基,李键红.多传感器环境下的温室蓝莓智能控制系统研究[J].安徽农业科学,2019,47(14):228-230+241.

[4] 尹艺杰,李宁,王超.基于多传感器融合的同步定位与建图方法研究[J].传感器与微系统,2023,42(8):54-57.

[5] 付锐,郑宗华.基于大数据技术的播种机无线自动导航定位系统研究[J].农机化研究,2023,45(1):239-242+249.

[6] 王红鹃.农业机械自动导航技术[J].山东农机化,2023(6):45-47.

[7] 王晓勇.基于自动导航技术的农机化适配与功能设计[J].农机使用与维修,2024(6):77-79.

[8] 刘慧.农机自动驾驶装备研发及路径规划算法研究[D/OL].中北大学,2023.https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=fAsipVvIRrjIWSvwxcNorAHqgrrg6O6j2ZuyswDy_PttCYTYnlgvRa3vpFRwJ0avwegAIt6gvc1gq4fKfgD-8fn3vw5hz-6fUuGh2Zf1Z569YaWNHcyTfd6VLQfqmf5O1bRCcqbyhzEVVs3VOv7Oy32jWiumunXPUkflgLUwEPcN8dtduuEFszYxdArc9QvexFVd7-2-alg=&uniplatform=NZKPT&language=CHS

[9] 柳运昌,韩军宇,冯灵霄,等.多传感器融合的SLAM算法在林业智能化的应用与改进[J].东北林业大学学报,2025,53(1):97-104.

[10] 陈明方,黄良恩,王森,等.移动机器人视觉里程计技术研究综述[J].农业机械学报,2024,55(3):1-20.

[11] 王凌云.深度学习在视觉SLAM前端的应用分析[J].电脑与信息技术,2024,32(6):18-21.

[12] 田锴,魏国亮,艾玉华,等.考虑偏置下初始位姿预测和光流追踪的高效视觉里程计[J].控制工程:1-10.

[13] 程亮,罗洲,何赟泽,等.视觉和激光SLAM发展综述与展望[J].中国测试:1-27.

[14] 苏子旸,张策,张茹,等.视觉同步定位与建图系统中回环检测研究进展[J].计算机技术与发展,2023,33(4):1-8.

[15] 王培峰.北方蓝莓温室高产种植技术[J].河北农机,2024(14):69-71.

[16] 黄韬.大连地区日光温室蓝莓全基质栽培技术[J].农业科技通信,2024(7):205-207.

[17] 黄鹤松,任伟,高书通,等.基于激光SLAM的矿用巡检装置控制系统设计[J].煤矿安全,2024,55(11):210-216.

作者简介：祝金辉，男，中国河南信阳人，本科，从事智能装备设计及理论研究。