DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2023.03.004

基于ROS和PX4的无人机编队协同飞行模型的仿真研究

路梦源[1], 王天一[1, 2*], 陈新昌[3], 张宇卓[1], 宫泽奇[4], 张星山[1]

(1. 中国农业大学工学院,北京市,100083; 2. 中国农业大学农业无人机系统研究院,北京市,100193;
3. 河南农业大学机电工程学院,河南郑州,450053; 4. 中国科学院空天信息创新研究院,北京市,100094)

摘要:随着信息和智能制造技术的不断发展,农业生产进入自动化和智能化的时代。无人化智慧农场作为现代农业发展的重要方向,正面临机遇与挑战。无人机编队飞行控制技术作为无人农场重要支撑技术之一,在农田巡查、畜群管理、灌溉控制等领域为农业生产提供关键技术支持。本研究旨在分析无人机编队仿真飞行控制中各组成部分的数据交互方式,搭建并优化多旋翼无人机编队飞行仿真环境,以满足无人机编队的飞行控制在无人化智慧农场中的应用需求。通过分析无人机编队仿真飞行控制中ROS系统、PX4飞控,MAVROS通讯模块,以及Gazebo仿真环境之间的交互逻辑,搭建了基于XTDone开源仿真平台的多旋翼无人机编队飞行仿真环境,并实现了基于ROS系统、PX4飞控和Gazebo无人机编队的模型构建与飞行控制。在此基础上,利用激光雷达采集环境信息,在ROS分布式框架下进行软件算法的优化,实现了基于扫描匹配算法的SLAM功能和基于最优路径规划算法的导航功能。理论仿真及试验结果表明,该平台具有开源、低成本、可扩展、模块化等优点,所搭建的仿真环境可实现无人机的编队飞行控制、封闭环境二维地图的构建和自主导航飞行,并分析得出该仿真平台下无人机编队的单位飞行精度约为76%,累计飞行距离和飞行误差所构建回归模型的R^2为0.830 9。研究结果证明了利用无人机编队协同飞行作业满足无人化智慧农场中常见农田作业需求的可行性,展示了无人机编队在无人化智慧农场中的应用效果和优势,为深层优化仿真飞行环境及拓展现代农业生产应用场景提供技术思路,在相关领域的研究和实践中也具有一定的借鉴和参考价值。

关键词:无人农场;无人机编队;数据交互;飞行控制;激光SLAM;导航

中图分类号:S24; S252+.9 **文献标识码**:A **文章编号**:2096-7217(2023)03-0032-10

路梦源, 王天一, 陈新昌, 张宇卓, 宫泽奇, 张星山. 基于ROS和PX4的无人机编队协同飞行模型的仿真研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2023, 4(3): 32-41

LU Mengyuan, WANG Tianyi, CHEN Xinchang, ZHANG Yuzhuo, GONG Zeqi, ZHANG Xingshan. Simulation research on cooperative flight model of UAV formation based on ROS and PX4 [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4(3): 32-41

0 引言

近年来,无人机应用价值日益凸显,其研究潜力也被广泛认可[1-2]。无人机编队概念的提出及其相关技术的发展不仅有效解决了单体无人机信息感知处理能力弱的不足,更是将无人机的应用领域进一步扩大[3-4]。常用的无人机开发研究工具有PIXHAWK(PX4)与Gazebo;技术有即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)。作为领域内常用的开源飞控软件,PX4具有高性能和低成本的特点;而Gazebo是用于机器人仿真的开源三维动力学仿真软件,以Ubuntu操作系统为平台,集成在ROS开发环境中;SLAM作为真正实现全自主移动机器人的关键技术,也被引入到无人机编队的飞行导航中,基于激光雷达的Hector SLAM算法,凭借着在动态小场景下具有稳定的测距性能、受光强的影响小、操作简单、鲁棒性强等优点逐渐成为研究热点[5]。LIU等[6]提出一种分布式编队控制算法,让无人机在二维和三维空间中以逐渐稳定的方式确定编队的形状;成成[7]设计一种虚拟长机状态估计算法,编队个体从通

收稿日期:2023-05-12 修回日期:2023-07-24

基金项目:国家重点研发计划课题(2022YFD2202102);内蒙古自治区科技计划项目(2022YFSJ0039);中国农业大学2115人才培育发展支持计划

第一作者:路梦源,男,2001年生,河南汝州人;研究方向为无人机遥感。E-mail: 1648148239@qq.com

*通信作者:王天一,男,1990年生,北京人,博士,副教授;研究方向为精准农业、智慧草业、草原巡检机器人、无人机遥感。E-mail: tianyi.wang@cau.edu.cn

信拓扑中获取虚拟长机状态并作为飞行导引，提供速度、航向和高度指令，提升了编队队形的精确度；赵伟伟[8]针对无人机编队在复杂环境中避障时存在一致性差、决策困难等问题，提出共享障碍物信息的无人机编队协同避障算法，并将编队避障算法和智能体强化学习算法相结合，同时提升了避障性能和一致性性能；张迪等[9]针对执行器故障时对无人机编队飞行所产生的影响，提出基于动态规划的最优容错控制率，并利用RBF神经网络逼近最优性能指标函数，最终实现对无人机编队的高精度飞行控制。

无人化智慧农场作为无人机编队的重要应用场景之一，对无人机编队的作业方式、能力有定制化需求。但使用真实无人机进行编队飞行控制、定点导航算法的调试成本较大，且常见仿真平台的接口适配度不高[10-11]，如JMavSim平台无法添加传感器、X-Plane和FlightGear平台均无法进行深层次的飞行调控。因此，亟需一种通用性较高且机器人操作系统（robot operating system，ROS）接口统一的无人机编队飞行仿真开发环境，以便高效可靠地模拟无人机的农田作业状况，优化无人机的编队控制算法[12-14]。

在此背景下，肖昆[15]团队基于ROS系统、PX4飞控和Gazebo仿真软件通讯模块开发了XTDone无人机通用开源仿真平台，并内置多种类型的无人机、传感器模型，封装部分控制和状态评估算法。胡新雨等[16]介绍XTDrone平台的基本概况、体系架构和主要功能，并阐述无人机集群协同搜寻系统的设计细节和部分关键技术。为进一步探究该平台中无人机编队的飞行控制和自主导航仿真试验的可行性，本文首先梳理各软件和功能包在ROS中的通信方式和交互逻辑，并以此为基础搭建基于XTDone开源平台的无人机编队飞行控制的仿真环境，建立无人机个体及编队模型。通过MAVROS（micro air vehicle Link ROS interface）协议实现各机与ROS、飞控系统的通信，进而对接收无人机多种位姿信息的关键脚本文件进行结构重置和参数优化，最后通过基于二维激光SLAM建图的自主导航试验模拟无人化智慧农场中的生产作业任务。

1　仿真环境内部的交互

1.1　ROS与PX4飞控之间的交互

在SITL平台中，MAVROS节点通过MAVLink协议与PX4飞控软件实现通信连接，并通过发布、订阅话题或服务的方式将期望的位置、速度和姿态信息传输至PX4飞控，而后者根据这些信息控制仿真无人机的运动状态，并将实际的状态信息通过/mavros/state话题发布出来，供ROS系统中的其他节点接收使用，从而实现ROS与PX4飞控之间的数据传输和控制命令的传递，如图1所示。

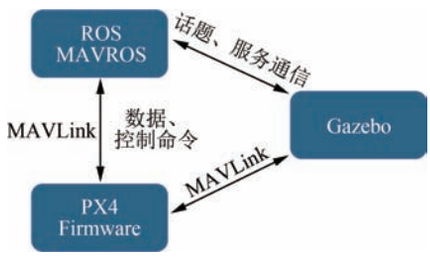


图1　ROS、PX4和Gazebo之间的信息交互

Figure 1　Information exchange between ROS, PX4, and Gazebo

1.2　ROS与Gazebo之间的交互

由ROS系统启动并加载Gazebo仿真环境中的无人机编队和传感器等模型，当PX4飞控成功连接到MAVROS节点实现数据传输后，便可通过ROS的基本通信方式结合Gazebo提供的ROS API与仿真环境进行交互：在仿真环境中发布、获取模型的状态信息，以及暂停、恢复仿真环境中的物理运算等。例如：话题通信由“/gazebo_msgs/ModelStates”指令发布所有模型的状态信息，包括位置、速度、角度、角速度等；由“gazebo/get_model_state”指令获取模型状态信息，包括坐标、姿态、线速度、角速度等；服务通信由“gazebo/pause_physics”指令用于暂停仿真环境的物理运算，可以调试和预设场景；由“/gazebo/unpause_physics”指令恢复仿真环境的物理运算[17]。

2　无人机编队飞行试验工作准备

2.1　模型构建

ROS中已预设多种描述机器人模型的标签，如robot根标签、link连杆标签、joint关节标签、sensor标签及其他子级标签[18]。在模型建立时，需遵循URDF（unified robot description format）语言格式、XML（extensible markup language）语法完整性、机器人模型规范等要求[19]。分别在多个URDF文件中使用link标签于描述无人机的基础坐标系、外壳、前后旋翼、电机、支撑轴及其他传感器，再由joint标签描述各个组成部分间关节连接的旋转、平移、限位和父子级等关系信息，并通过sensor标签对IMU（inertial measurement unit）、相机、激光雷达、GNSS（global navigation satellite system）等传感器的名称、类型、位置、方向等信息进行描述。由Gazebo将集成的URDF文件解析并生三维无人机模型，并设定蓝色旋翼所在的一侧为无人机的前进正方向，如图2（a）所示，方便对无人机的位姿变化进行实时观察。在验证单一模型能够成功被

解析后,使用Xacro文件用宏的方式来对多个URDF文件及文件中robot标签元素进行组合调用,以创建无人机编队,如图2(b)所示。



(a) 多旋翼无人机模型



(b) 无人机编队模型

图2 多旋翼无人机个体和编队三维模型

Figure 2 Multi-rotary-wing UAV individual and formation 3D-model

2.2 多机通信及飞行控制逻辑

编队中每一个无人机模型均具有独立的MAVROS节点和PX4节点。其中MAVROS节点会提供ROS接口,用于该节点与无人机的通信和控制;而PX4 SITL节点则模拟无人机的硬件和软件环境,包括传感器、控制器和飞行控制算法等[18]。

由键盘接收用户的控制指令,并通过预设定的话题节点(例如"/keyboard")将指令信息传输至编队各无人机的MAVROS节点,再由控制算法将指令信息分析并转换为对应的飞行姿态控制指令,并依靠MAVLink协议传递至各自的PX4 SITL节点,最终无人机各执行机构遵循分配的指令,在Gazebo中执行相应的动作,实现无人机编队的飞行控制。此外,各机在执行指令后,也需要将自身的飞行位置、速度、姿态角等状态信息反馈发布到ROS话题中,以供其他节点进行处理和分析。

编队中各机均有独立的数据交互模块,处理无人机飞行时自身位置、目标位置、飞行速度等数据信息,并通过自身的MAVROS功能包和全局的TF(Transformation)库实现多机飞行控制信息的交互。0号机内部及其与其他无人机整体的的数据交互如图3所示。1~4号机、5~8号机内部的数据信息在分析处理后均汇总至0号机处进行数据交换,以便进行下一环节的指令分配和数据分发。

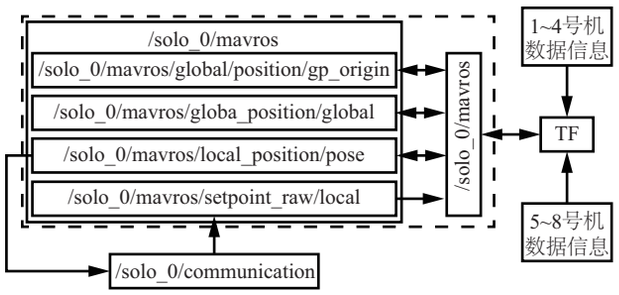


图3 无人机编队中各机飞行控制信息交互关系

Figure 3 Flight control information exchange among drones in a swarm

2.3 通信优化

XTDone平台中无人机编队的通信连接通过"multi_UAV_communication. sh"编译脚本和"multi_UAV_communication. py"的执行脚本实现。前者是对生成的无人载具的类型、数量和队列进行保存记录。后者则分别实现机器类型和ID的获取;建立ROS订阅者、发布者和服务通信,定义飞行的基础参数,实现飞行参数的获取和输出;通过ROS主要线程节点构建和发布目标运动信息;由多个定义的回调函数接收不同坐标系和运动类型的控制指令,并通过悬浮状态转换函数判断和切换飞行模式,各模块间位姿信息的传输如图4所示。

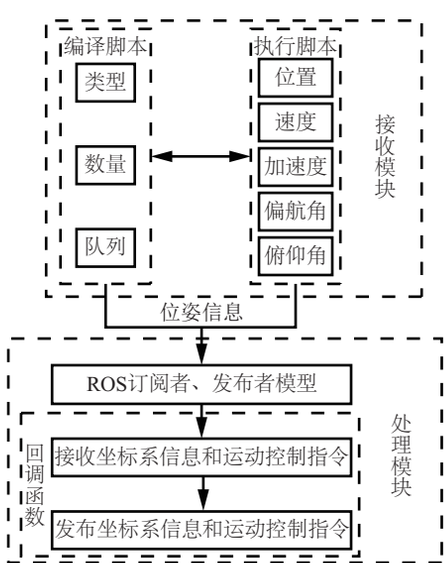


图4 接收、处理模块间的位姿信息传输

Figure 4 Transmission of pose information between receiving and processing modules

2.3.1 编译脚本优化

在"multi_UAV_communication. sh"文件中,源代码通过常量定义的方式来确定无人载具的类型和数量,并通过9个单独的while循环来判断和调用多个Python脚本并行生成对应的模型,由于资源占用过多,

易引发系统运行缓慢甚至崩溃等问题；代码结构分配不够明晰，则容易导致数据混淆的问题，不利于后期系统维护。将类型和数量信息储存进预设数组，重复的代码封装成名为“start_vehicle_communication”的函数调用，并使用嵌套循环来遍历数组以逐步生成编队模型，以减少代码的复用性，提高稳定性。

2.3.2　执行脚本优化

在“multi_UAV_communication.py”文件中，由定义的construct_target的函数接收PositionTarget传输的位置、速度、加速度或力、偏航角和偏航角速率等信息用于构造无人机的目标位姿信息。该函数中多PositionTarget变量的重复性高，且未对异常信息进行检测处理，不符合规范的参数输入，易导致程序出错。因此，通过更为简洁的Vector三维向量消息类型，将接收储存位姿信息中的每个元素都封装成独立对象，并添加数据异常处理函数。以此提高代码的可读性和可维护性，减少错误发生的可能性。例如，当motion_type参数不是有效的MotionType枚举值或当位置、速度或加速度的元素数量不等于3时，程序可捕获并处理输入参数错误等异常情况，忽略错误的目标位姿信息。

通过调用多维数组，封装循环函数，简化数据类型，增添过滤机制等方法对无人机编队通信连接中的部分脚本进行结构重置和局部优化（图5），提升代码的易读性、稳定性和可维护性。

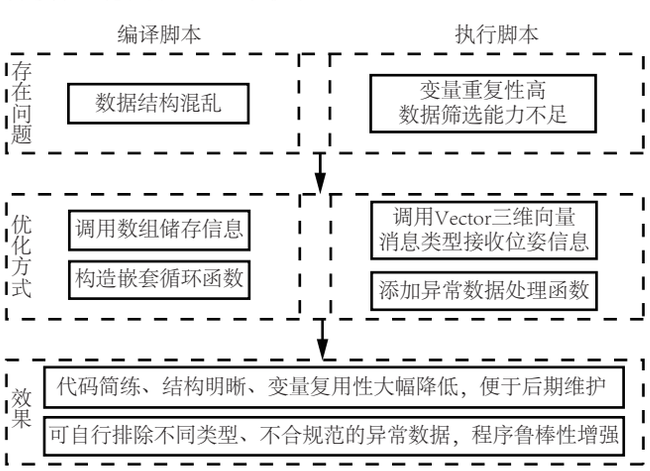


图5　通信脚本优化逻辑

Figure 5　Communication script optimization logic

3　编队控制与导航仿真试验

编队协同飞行控制是指多架无人机之间通过通信协议和算法实现协同飞行的过程。在无人化智慧农场中，无人机编队可通过协同飞行控制实现对农田的精准施药、施肥与灌溉等近地作业。在无人机编队中，编队飞行控制可以实现无人机之间的位置、速度、姿态等信息的传递和共享，从而实现编队内部的协同飞行和任务分配。另外，为实现对农田进行精准作业，无人机编队需具备良好的自主导航能力。自主导航是指无人机通过搭载各类传感器和导航设备，如GNSS模块、IMU装置、激光雷达等，对周围环境进行感知和识别，进一步通过算法和控制策略，实现无人机的路径规划和自主飞行。自主导航技术可以帮助无人机实现避障、定位、优化路径等行为，从而实现高效、安全、精准的田间作业。编队控制与自主导航的融合为无人机编队实现复杂的编队内、编队间协同近地作业任务提供可能性，为无人机在农业生产领域的应用提供了更大的灵活性和扩展性。因此，除验证编队飞行控制的正常运行外，还加入了自主导航测试的环节，以便更加精准地模拟无人机编队在无人化智慧农场中的作业情况。

3.1　编队飞行控制

在“multirotor_keyboard_control.py”脚本文件中声明无人机的飞行参数：最大线速度（MAX_LINEAR）=1、最大角速度（MAX_ANG_VEL）=0.3、线速度步长（LINEAR_STEP_SIZE）=0.01、角速度的步长（ANG_VEL_STEP_SIZE）=0.01，以保证飞行的平稳性。定义速度控制（cmd_vel_mask）和领航控制（ctrl_leader）两个布尔变量的初始值为False，为无人机起飞前速度信息的修正和飞行时队形的保持提供基准信息。

将无人机手柄式遥控器的功能分配和操作逻辑映射至键盘按键。其中，左手控制w、x、a、d键，控制无人机的前后左右飞行移动；右手控制i、“，”、j、l键，控制无人机的升降转向；r、v、n键为自定义功能按钮，分别实现返航、起飞、降落；s和k键分别是左右和右手的悬停待命按钮；t、b、g键为模式切换按钮，分别管控进入/退出任务、离线/在线控制、全部/个体连接等模式间的切换。

对基于ROS/Gazebo仿真环境和PX4飞控的无人机编队开展的XTdone平台仿真试验流程如下。

1）通过在ubuntu系统的Terminal中运行generator脚本文件，生成可由Gazebo编译的3×3队列的0～8号多旋翼无人机编队模型文件，设定各无人机的间距均为3个标准单位，编队个体的编号及相对位置信息如图6所示。

2）在新的命令窗口分别通过launch文件一键启动ROS core、PX4飞控、Gazebo、MAVROS节点，实现编队模型类型和数量的校验，各话题、服务通信节点的启动，预设数据（飞行速度、俯仰—横翻角度、传感器位

置、广播频率、GPS经纬度等)的核对,初始位置、速度数据与GPS信息的重置融合,以及地面站、航点任务接收模块的预连接,最终打印输出编队内各机的通信连接结果,如图7所示。

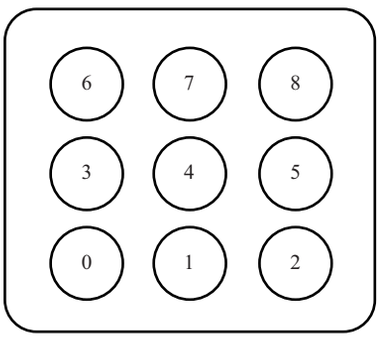


图6 无人机编队的编号顺序及相对位置

Figure 6 The numbering sequence and relative positions of the UAV formation

3)编译并运行XTDone环境下的0~8号机通信连接和键盘控制脚本。通过预设的键盘按钮控制整个无人机编队分别向x、y、z坐标轴正方向飞行移动1 m,如图8所示。

4)通过ROS指令,将无人机编队中的个体起飞及悬停位置信息打印输出(表1)。

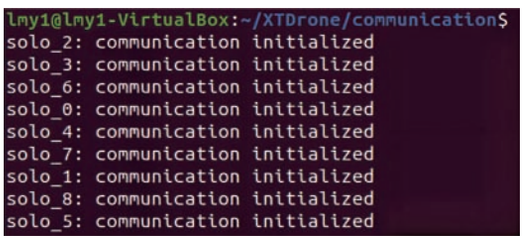


图7 编队内各无人机通信连接结果

Figure 7 Communication connection results between unmanned aerial vehicles within the formation

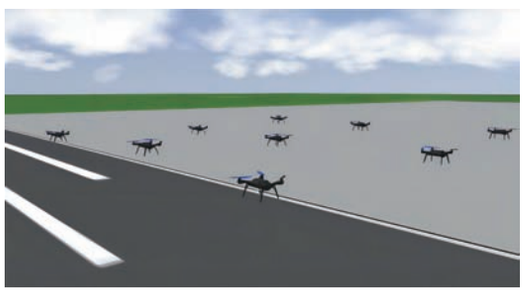


图8 无人机编队的空中悬停

Figure 8 Autonomous formation flight and hovering of UAVs

由飞行前后坐标的散点图(图9)可知,飞行前后无人机编队个体间的相对位置未发生大幅变化,队形仍可保持为正方形。由表1中分析期望坐标和悬停坐标之间的相对误差数据可知,误差值均在0.73~0.89 m间波动,且波动幅度较小。

表1 无人机编队飞行前后队形坐标对比

Table 1 Experimental results and comparison of autonomous navigation

无人机序号	起飞坐标/(m,m,m)		悬停坐标/(m,m,m)		相对误差/m
	理论	实际	理论	实际	
0	(0,3,0)	(−0.060 392,2.977 764,−0.013 842)	(1,4,1)	(0.942 345,3.817 296,1.003 825)	0.728 7
1	(3,3,0)	(2.939 607 8,2.975 464 2,−0.016 522)	(4,4,1)	(3.942 397,3.817 322,1.004 061)	0.881 6
2	(6,3,0)	(5.939 607 8,2.977 634 2,−0.010 212)	(7,4,1)	(6.942 307,3.817 346,1.004 202)	0.728 4
3	(0,6,0)	(−0.060 392,5.977 764,−0.022 335)	(1,7,1)	(0.942 635,6.817 450,1.004 241)	0.728 9
4	(3,6,0)	(2.947 156 8,5.977 764 1,−0.018 215)	(4,7,1)	(3.943 414,6.817 608,1.004 388)	0.881 3
5	(6,6,0)	(5.947 156 8,5.988 882 0,−0.014 615)	(7,7,1)	(6.943 964,6.817 801,1.004 354)	0.728 2
6	(0,9,0)	(−0.052 843,8.988 882,−0.020 038)	(1,10,1)	(0.944 340,9.818 012,1.004 124 3)	0.729 7
7	(3,9,0)	(2.947 156 8,8.988 882,−0.014 728)	(4,10,1)	(3.944 579,9.818 174,1.003 569)	0.881 3
8	(6,9,0)	(5.947 156 8,8.988 882,−0.014 638)	(7,10,1)	(6.944 666,9.818 325,1.002 841)	0.728 2

为进一步描述无人机在执行定点导航任务时所能达到的准确程度,在此引入飞行精度的这一评估标准。其主要评估要素分别为位置偏差(position deviation)和姿态偏差(attitude deviation),但该部分试验并未出现大幅度无人机姿态变化,因此将位置偏差作为主要偏差进行分析计算,飞行精度

$$CEP=\frac{D-|\triangle E|}{D}\times 100\% \tag{1}$$

式中:CEP——飞行精度,%;

$\triangle E$——预期位置与实际位置的空间距离,m;

D——总预期飞行路径长度,m。

由计算结果可知,无人机编队单位飞行距离内的飞行精度约为76%。由2018年1月1日实施《农用植保无人机技术要求及测试方法》(T/JSAMIA 2—2017)行业标准可知:无人机最大飞行速度为30~60 km/h时,水平航迹与预设航线误差、垂直航迹与预设航线误差均应不大于10 m。等比换算可知:该无人

机编队飞行速度为30 km/h时，本次试验的平均航点误差约为6.5 m，飞行精度高于行业标准要求。考虑到无人机编队间数据传输的延迟和丢失的不可避免性，可推断本次试验中各通信节点的数据传输精度以及领航控制信息的发布精度处于正常水平，这进一步证明了无人机编队飞行作业在无人化智慧农场投入应用的可行性。

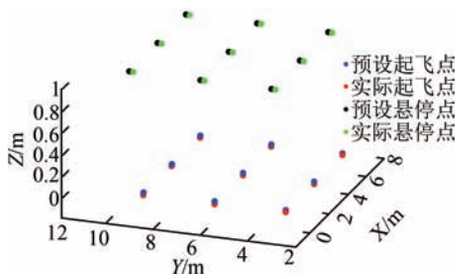


图9　无人机编队飞行前后的目标与实际位置示意图

Figure 9　Illustration of targets and actual positions before and after drone formation flight

3.2　基于二维激光SLAM的封闭空间地图构建

基于激光雷达的Hector SLAM建图算法使用激光数据进行栅格地图构建和无人载具定位。通过高斯牛顿方法直接估算无人载具姿态信息，并使用占据栅格地图（occupancy grid map，OGM）表示环境，将无人载具所处的环境划分为空闲、占据或未知3种状态的栅格，通过激光雷达扫描数据对栅格地图一一进行标记和状态更新，并将区域的坐标信息映射到全局地图中保存整合，生成全局地图[20]。

基于无人机编队模型实现飞行控制，操控无人机对二维激光SLAM建图和自主导航仿真试验进行研究。QGroundControl（QGC）作为一种用于控制无人机开源的地面站软件，为用户提供了一个图形界面，可实时显示飞行器的状态、传感器数据和遥控器信息，并提供一些基本的飞行模式（如手动、自稳、定点悬停、航线追踪等）。启动QGC并等待其与9架无人机完成通信连接，在Gazebo中构建“8”字形三维封闭地图，并由地图中部的正方形空心支柱和地图边缘的不规则凹凸结构模拟无人化农场中的飞行障碍。控制无人机在地图中飞行和激光扫描，将二维激光SLAM（Hector SLAM）输出的2D位姿和高度值通过优化后的通信脚本（multi_communication. py）转化为MAVROS话题，以此在ROS Visualization（RViz）中构建出完整二维地图，如图10所示。

将生成的二维线性地图与3D地图的俯视图进行比对（图11），随机选取7个特征检验点，并利用平行等长的参考线进行距离进行特征和距离对比。观察发现，除第2处特征点外其余全部特征点均较大程度的吻合原地图的结构特征和位置距离。分析结果可初步证明该仿真平台下的激光SLAM工具能构建具有一定参考价值的二维地图。

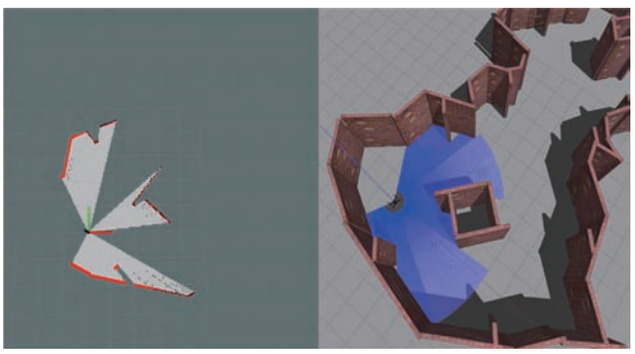


图10　基于二维激光SLAM的地图构建

Figure 10　Map construction based on 2D laser SLAM

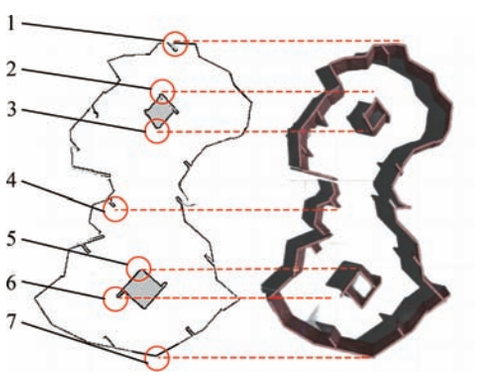


图11　二维线性地图与3D地图俯视图的比对

Figure 11　Comparison between 2D linear maps and 3D top view maps

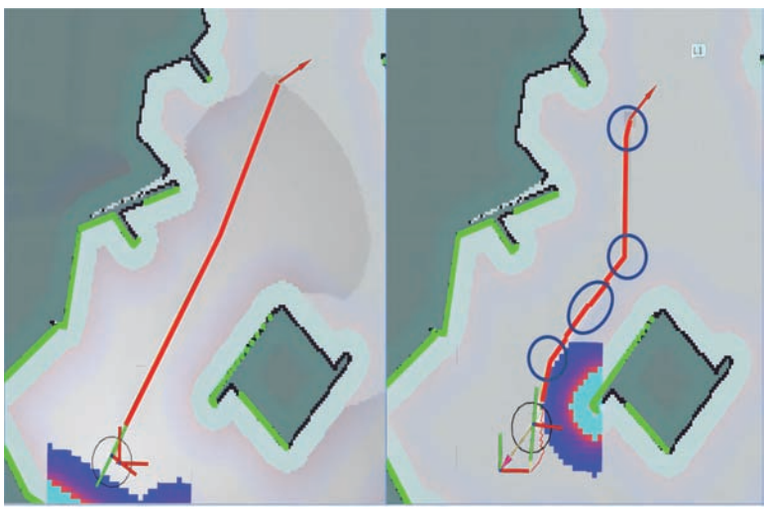
3.3　基于全局地图的无人机自主飞行导航

全局路径规划的本质是在特定场景中，以多个条件为基准获得一条最优路径。Dijkstra、A*、人工势场法、快速探索随机树等均为路径规划领域经典算法[21]。在本次仿真试验中，global_planner模块支持Dijkstra和A*两种算法，理论上两种算法效果应近似，且A*算法计算复杂度更低。而对比结果表明，ROS global_planner模块中的A*算法在寻求可行解进行路径规划时，其路线顺滑程度方面不如Dijkstra算法的求解结果如图12所示。

图12（b）中所规划的路线多次出现大幅度拐点和小范围连续断点（蓝色圆圈标示），而图12（a）中所呈现的路线较为平直顺滑。因此，本次试验最终选用Dijkstra算法作为导航试验的路径规划算法[22]。

在RViz中重新读取二维激光SLAM生成的pgm格式地图文件，并将该地图作为自主导航系统中的全局地图。利用脚本文件启动ROS自身的move_base功能包和封装Dijkstra路径规划算法，在RViz中使用2D Nav Goal功能在地图上随机、连续标定10个目标航

点,通过话题节点间的数据传输发布飞行位姿信息指令,控制无人机按照航点坐标顺序飞往目标位置,如图13所示,记录无人机到达各目标航点时的x、y、z坐标,并将其与预定航点坐标进行对比分析,结果如表2。



(a)Dijkstra算法所规划的路线 (b)A*算法所规划的路线

图12 Dijkstra、A*算法求解路径对比图

Figure 12 Comparison of Dijkstra and A* algorithms for pathfinding

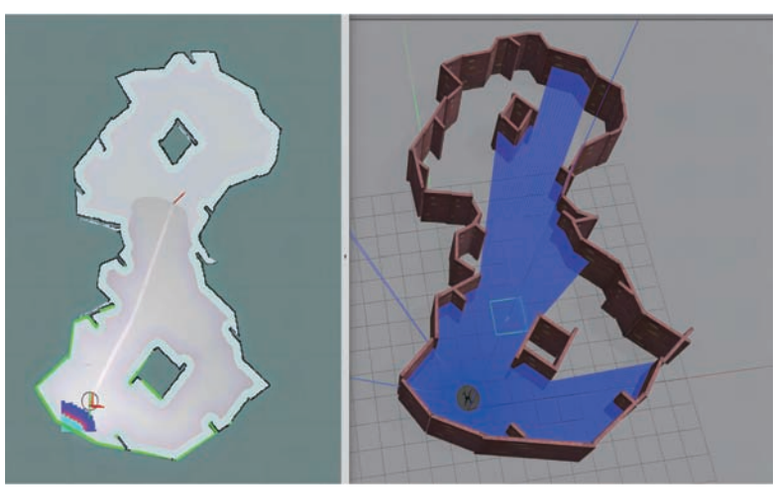


图13 基于全局地图的自主飞行导航

Figure 13 Autonomous flight navigation based on global map

表2 自主导航试验结果

Table 2 Dominant navigation experiment results

目标航点序号	目标位置坐标/m	实际位置坐标/m	预期累计飞行距离/m	累计飞行误差/m
1	(3.5,4,1)	(3.455 083,4.321 457,0.917 043)	5.32	0.335 004
2	(3.5,8,1)	(3.376 038,7.255 361,1.267 812)	9.32	0.513 196
3	(5,9,1)	(4.503 481,9.331 964,0.827 435)	11.05	0.827 949
4	(3,6,1)	(2.502 856,6.342 934,0.829 316)	14.79	0.829 532
5	(3,9,1)	(2.502 680,9.365 054,0.833 430)	17.79	0.832 552
6	(2,12,1)	(1.942 875,12.825 011,1.325 381)	20.95	0.884 961
7	(4,11,1)	(4.302 737,11.348 236,0.960 427)	23.19	0.960 230
8	(9,13,1)	(8.186 833,13.675 290,1.191 437)	28.58	0.977 177
9	(6,10,1)	(5.791 630,10.293 263,1.877 684)	32.82	1.017 770
10	(6,15,1)	(4.581 583,14.006 248,0.978 429)	37.82	1.432 636

由表2中的误差分析和图14的二维飞行路线对比可知：随着累计飞行距离的增加，累计飞行误差也不断增加。累计飞行距离和累计飞行误差的线性回归方程为，$y=0.025\ 3x+0.351\ 2$，其中 R^2（R-squared）为0.830 9（图15）。表明累计飞行距离和累计飞行误差存在较强的线性关系，而累计飞行误差会随着飞行距离的增加而平稳增长。试验结果证明：该仿真环境下无人机编队飞行控制的稳定度和自主导航定位的精准度均处在较高水准，可为无人化智慧农场中农田巡查、作物施肥等生产工作提供技术支撑。

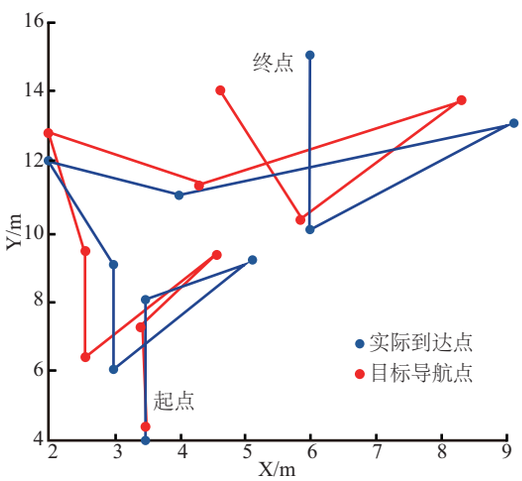


图14　目标点与实际到达的二维路线对比图

Figure 14　Comparison graph of the desired and actual two-dimensional routes to the target point

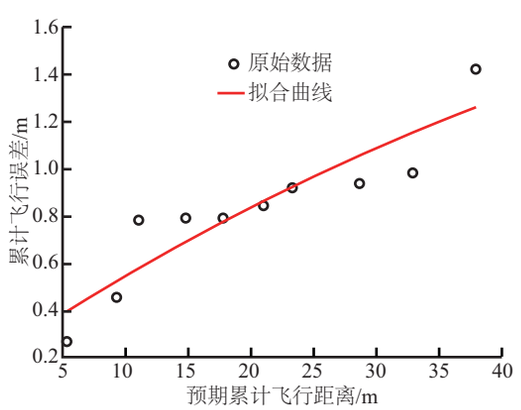


图15　累计飞行距离与累计误差的散点—拟合直线图

Figure 15　Scatter plot of accumulated flight distance and accumulated error with a fitted line

无人机在“8”字形封闭空间内激光建图和自主导航功能的实现，证明了其在复杂环境中具备基本的作业能力，也表现出对于其在无人化智慧农场实际应用中的重要意义。在大尺度作业场景中，可利用无人机编队快速进行全局地图的建立，并配合其他无人载具实现高通量田间作业，提升农田生产效率和作业质量，减少资源浪费和环境污染。

4　结论

本研究搭建了基于XTDone开源仿真平台的多旋翼无人机编队飞行仿真环境，并在进行通信代码的优化后，通过ROS系统与PX4飞控在Gazebo仿真软件中完成了无人机编队模型的飞行控制；根据农田近地作业场景需求，利用基于激光雷达的Hector SLAM算法实现无人机编队自主飞行定位与二维地图实时构建；同时，基于全局地图的Dijkstra路径规划算法实现无人机编队的定点飞行导航。在编队仿真飞行试验中，无人机编队单位飞行距离内的平均飞行误差为0.257 2 m、飞行精度约为76%，累计飞行距离和飞行误差间的变异程度 R^2 约为0.830 9。试验结果表明无人机编队在该仿真环境下表现出较为可靠的飞行精度和稳定性，能够为进一步开展无人机编队技术在无人化智慧农场领域的研究和应用提供技术支撑与参考依据。

本研究搭建了仿真环境并实现无人机编队飞行控制和自主导航，但并未进行无人机编队个体间的任务分配与复杂任务下的协同作业探究，而无人编队协同飞行、任务分配及自主导航技术正逐步为农、牧生产提供日益精准的近低空感知与作业服务。在今后的探索中，将进一步研究无人机编队的任务决策与协同工作，以推动无人机编队在农田的自动化监测与管理方面的应用。

参　考　文　献

[1] 谷旭平，唐大全，唐管政．无人机编队协同导航研究现状及进展[J]．舰船电子工程，2021，41(7)：28－33.
GU Xuping, TANG Daquan, TANG Guanzheng. Research status and progress of UAV formation cooperative navigation [J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(7): 28－33.

[2] 李鹏举，毛鹏军，耿乾，等．无人机集群技术研究现状与趋势[J]．航空兵器，2020，27(4)：25－32.
LI Pengju, MAO Pengjun, GENG Qian, et al. Research status and trend of UAV swarm technology [J]. Aero Weaponry, 2020, 27(4): 25－32.

[3] 戴大伟，龙海英．无人机发展与应用[J]．指挥信息系统与技术，2013，4(4)：7－10.
DAI Dawei, LONG Haiying. Development and application of unmanned aerial vehicle [J]. Command Information System and Technology, 2013, 4(4): 7－10.

[4] 宗群，王丹丹，邵士凯，等．多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展[J]．哈尔滨工业大学报，2017，49(3)：1－14.
ZONG Qun, WANG Dandan, SHAO Shikai, et al.

Research status and development of multi UAV coordinated formation flight control [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(3): 1－14.

[5] 夏天. 基于激光2D－SLAM的地图构建算法研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2020.
XIA Tian. Research on mapping algorithm based on laser 2D－SLAM [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2020.

[6] LIU Y Y, MONTENBRUCK J M, ZELAZO D, et al. A distributed control approach to formation balancing and maneuvering of multiple multirotor UAVs [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34(4): 870－882.

[7] 成成. 多无人机协同编队飞行控制关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
CHENG Cheng. Research on key technologies for collaborative formation flight control of multiple unmanned aerial vehicles [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018.

[8] 赵伟伟. 无人机集群编队及其避障控制关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.
ZHAO Weiwei. Research on key technologies of UAV flocking formation and obstacle avoidance control [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020.

[9] 张迪, 刘婷婷, 宋家友. 基于动态规划的无人机编队最优协同容错控制[J]. 电光与控制, 2023, 30(4): 34－39.
ZHANG Di, LIU Tingting, SONG Jiayou. Optimal cooperative fault-tolerant control of UAV formation based on dynamic programming [J]. Electronics Optics & Control, 2023, 30(4): 34－39.

[10] 贾永楠, 田似营, 李擎. 无人机集群研究进展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(S1): 4－14.
JIA Yongnan, TIAN Siying, LI Qing. Development of unmanned aerial vehicle swarms [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(S1): 4－14.

[11] 刘钢, 汤俊, 刘陈, 等. 无人飞行器集群协同行为建模技术综述[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(8): 2221－2231.
LI Gang, TANG Jun, LIU Chen, et al. Survey of cooperative behavior modeling technology for unmanned aerial vehicles clusters [J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(8): 2221－2231.

[12] 邹立岩, 张明智, 柏俊汝, 等. 无人机集群作战建模与仿真研究综述[J]. 战术导弹技术, 2021(3): 98－108.
ZOU Liyan. ZHANG Mingzhi. BAI Junru, et al. A survey of modeling and simulation of UAS swarm operation [J]. Tactical Missile Technology, 2021(3): 98－108.

[13] ALÁEZ D, OLAZ X, PRIETO M, et al. HIL flight simulator for VTOL-UAV pilot training using X-Plane [J]. Information, 2022, 13(12): 585.

[14] 丁中涛. 基于ROS的无人机自主降落技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
DING Zhongtao. Research on autonomous landing of UAV based on ROS [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.

[15] XIAO K, MA L, TAN S, et al. Implementation of UAV coordination based on a hierarchical multi-UAV simulation platform [C]//Advances in Guidance, Navigation and Control: Proceedings of 2020 International Conference on Guidance, Navigation and Control, ICGNC 2020, Tianjin, China, October 23—25, 2020. Springer Singapore, 2022: 5131－5143.

[16] 胡新雨, 马澜, 肖昆, 等. 基于XTDrone的无人机集群协同搜索仿真系统[J]. 机器人技术与应用, 2022(5): 25－28.
HU Xinyu, MA Lan, XIAO Kun, et al. A UAV cluster collaborative search simulation system based on XTDrone [J]. Robot Technique and Application, 2022(5): 25－28.

[17] 孙翔龙, 梁彦刚. 基于Gazebo和PX4的强化学习训练仿真环境接口设计与实现[J]. 电子技术与软件工程, 2022(5): 68－71.
SUN Xianglong. LIANG Yangang. Design and implementation of reinforcement learning training simulation environment interface based on Gazebo and PX4 [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2022(5): 68－71.

[18] 刘书林. 四旋翼无人机编队飞行的控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
LIU Shulin. Study on formation control strategy for quad rotors [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[19] 王超. 基于ROS的移动机器人全遍历路径规划研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
WANG Chao. Research on full traversal path planning of mobile robot based on ROS [D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.

[20] 王岸雄. 基于ROS的自主移动机器人环境建模和路径规划研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
WANG Anxiong. Research on environment modeling and path planning of autonomous mobile robot based on ROS [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.

[21] 王洪斌, 郝策, 张平, 等. 基于A*算法和人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 中国机械工程, 2019, 30(20): 2489－2496.
WANG Hongbin, HAO Ce, ZHANG Ping, et al. Path planning of mobile robots based on A* algorithm and artificial potential field algorithm [J]. China Mechanical

Engineering, 2019, 30(20): 2489－2496.
[22] 李晓旭, 马兴录, 王先鹏. 移动机器人路径规划算法综述[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(7): 9－19.
LI Xiaoxu, MA Xinglu, WANG Xianpeng. A survey of path planning algorithms for mobile robots [J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(7): 9－19.

Simulation research on cooperative flight model of UAV formation based on ROS and PX4

LU Mengyuan[1], WANG Tianyi[1, 2*], CHEN Xinchang[3], ZHANG Yuzhuo[1], GONG Zeqi[4], ZHANG Xingshan[1]

(1. *College of Engineering, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*;
2. *College of Agricultural Unmanned System, China Agricultural University, Beijing* 100193, *China*;
3. *College of Mechanical & Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou* 450053, *China*;
4. *Aerospace Information research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100094, *China*)

Abstract: With the continuous development of information and intelligent manufacturing technology, agriculture has entered the era of intelligent and automated production. Unmanned smart farms, as an important direction of modern agricultural development, are facing opportunities and challenges. As one of the key supporting technologies for unmanned farms, unmanned aerial vehicle (UAV) swarm flight control technology provides crucial technical support for agricultural production in fields such as field inspection, livestock management, and irrigation control. This study aimed to analyze the data interaction methods of various components in UAV swarm simulation flight control, establish and optimize a multi-rotor UAV swarm flight simulation environment to meet the application requirements of UAV swarm flight control in unmanned smart farms. In this paper, by analyzing the interaction logic among the ROS system, PX4 flight controller, MAVROS communication module, and Gazebo simulation environment in UAV swarm simulation flight control, we built a multi-rotor UAV swarm flight simulation environment based on the open-source XTDone simulation platform. We also realized model construction and flight control of UAV swarm based on the ROS system, PX4 flight controller, and Gazebo. Furthermore, using a laser radar to collect environmental information, we optimized software algorithms in the ROS distributed framework, achieving simultaneous localization and mapping (SLAM) based on scan matching algorithm and navigation based on optimal path planning algorithm. Theoretical simulation and experimental results demonstrated that the platform had advantages such as open-source, low cost, scalability, and modularity. The constructed simulation environment can achieve UAV swarm flight control, construction of 2D maps in enclosed environments, and autonomous navigation flight. Analysis revealed that the unit flight accuracy of the UAV swarm under this simulation platform was approximately 76%, and the regression model constructed from cumulative flight distance and flight error had an R^2 of 0.830 9. The research results demonstrated the feasibility of using UAV formation collaborative flight operations to meet the common agricultural operation needs in unmanned smart farms, demonstrated the application effect and advantages of UAV formation in unmanned smart farms, and provided technical ideas for deep optimization of simulation flight environments and expansion of modern agricultural production application scenarios. It also showed certain reference value and reference value in research and practice in related fields.

Keywords: unmanned farm; drone formation; data exchange; flight control; laser SLAM; navigation