基于分层化多无人机仿真平台的无人机协同方案

摘要

本文针对无人机集群设计了一个层次化多无人机仿真平台XTDrone，该平台是完全开源的。共有六层：通信层、模拟器层、低级控制层、高级控制层、协调层和人机交互层。XTDrone有三个优点：首先，基于锁步模式，可以调整仿真速度以匹配计算机性能。因此，出于不同的目的，可以在工作站或个人笔记本电脑上进行模拟。其次，还开发了一个简化的模拟器，可以快速设计算法，以便提前观察无人机群的近似行为。第三，XTDrone基于机器人操作系统、Gazebo和PX4，因此仿真中的代码可以很容易地移植到嵌入式系统。请注意，XTDrone可以支持各种类型的多无人机任务，本文提供了两个重要演示：一个是基于地面站的多无人机合作搜索，另一个是分布式无人机编队飞行，包括一致的的编队控制、任务分配和避障。

介绍

无人机由于其在灾难救援、侦察和监视等民用和军事用途方面的巨大潜力而迅速发展。随着任务变得越来越复杂，多无人机合作的重要性与日俱增。因此，近年来，大量研究人员关注多无人机合作或无人机集群。

如果没有可靠的仿真平台，算法的设计和验证会浪费时间和精力，因此仿真受到了广泛的关注。然而，很少有平台是开源和对用户友好的。根据我们的调查，Aerostack5是从[1] 发展而来的，是最流行的多无人机仿真平台。然而，与GAAS6和RotorS7等单无人机仿真平台相比，其在github中的收藏的数量要少得多。对于研究人员和工程师来说，仍然迫切需要一个对于用户友好、面向用户的多无人机仿真平台。基于这一动机，开发了一个层次化、模块化的多无人机仿真平台，命名为XTDrone。

考虑到可用性、开发效率和开源社区三个方面，系统选择ROS、Gazebo、PX4和QGroundControl作为XTDrone的四个基础。Python是主要的开发语言，连带一些优秀的C++开源项目，都被集成在一起。该平台分为六层：通信层、模拟器层、底层控制层、高层控制层、协调层和人机交互层。在每一层中，都有不同的模块，比如任务分配、同时定位与建图、目标检测、轨迹生成、位置控制器等。所有这些模块都可以方便地替换，因为系统对输入和输出的消息做了清晰且方便更改的定义。基于这个特点，平台开发人员可以方便地实现和测试自己的算法。由于ROS和PX4最初是为嵌入式系统设计的，开发人员可以在仿真平台上测试和调试后，方便地将其算法部署到真实的无人机上。

计算量大是多无人机仿真的一个重要问题；笔记本电脑普遍不能满足这一要求；但与笔记本电脑相比，功能强大的工作站电脑不仅价格昂贵，而且不方便；而台式机也十分不方便携带。因此本系统作了特殊设计，可以锁步模式运行，这意味着使用不同的数值解算器保持同步的时间，这使得可以进行比实时更快或更慢地仿真，也可以暂停仿真来单步执行代码。功能强大的计算机运行速度更快，功能较弱的计算机运行速度较慢。因此，此功能使具有不同性能的计算机可以用于模拟。此外，本系统还提供了一个简化的模拟器，因此开发人员可以首先使用大规模无人机集群在简化的模拟器上测试和调试他们的算法。然后，在完整的模拟器上进行模拟时，他们可以选择使用功能强大的工作站进行大规模集群，或者减少无人机的数量。

XTDrone首先研究的是单无人机仿真平台，然后是多无人机仿真平台，由单机向多机逐渐过渡。参考文献[2] 提供了关于单无人机仿真的详细信息，本文重点研究了多无人机仿真。

架构

图1显示了XTDrone的体系结构。五层通过通信层相互通信。该体系结构的灵感来源于[3] ，这是一种针对真实无人机群的多层分布式体系结构。在某种程度上，XTDrone的架构是[3] 中的模拟仿真版本。在本节中，从下到上分别介绍了六个层。

通信层负责所有无人机和地面控制站之间的消息传输，地面控制站是所有其他层的基础。ROS、MAVLink和MAVROS在通信层提供消息传递。为了便于用户使用，XTDrone封装了复杂的协议和通信，并标准化了主题名称。开发人员可以方便地在其设计的模块中订阅和发布所需的主题。

模拟器层提供无人机动态模型、传感器、场景和其他类型的机器人，所有这些都是可定制的，因此开发人员可以修改空气动力学模型，或根据需要向无人机添加多个摄像头。此外，为了在早期开发快速算法，提供了一个基于Matplotlib的简化模拟器。参考文献[2] 提供了有关该层的更多详细信息。

底层控制层完全基于PX4软件在环，包含状态估计和底层控制，如位置控制、姿态控制和飞行模式。XTDrone更多地关注高级控制层和协调层，开发人员只需使用这一层，无需额外修改。但如果要在底层控制层开发算法，开发人员则需要熟悉PX4软件。

高级控制层包含感知和运动规划。它是单架无人机实现智能化的关键层。目标检测与跟踪、避障等都在这一层。一些仿真实验已经在XTDrone中实现，开发人员可以根据需要进行修改或重写。对于无人机群，该层负责接收协调层分配的任务，然后指示每个无人机完成各自的任务。

协调层负责无人机之间的任务协调协商（如任务分配）等相关任务。它将整个任务划分为不同的小任务，然后将它们发送到高级控制层。该层非常灵活，根据不同的任务和协调策略，可能包含不同的模块。例如，在编队演示（第4节和第5节）中，任务分配和一致性控制器位于该层。

人机交互层是开发人员控制和监视无人机群的界面。对于无人机，典型的人机界面是地面控制站；具体而言，XTDrone使用QGroundControl，如图2（a）所示，除此之外，还有Mission Planner等。QGroundControl通过MAVLink与PX4 SITL通信，开发人员可以监控和调整底层控制层的参数和目标。除了底层之外，协调层和高层还通过一套基于ROS的工具进行控制和监控，例如可定制的键盘控制器，如图2（b）、rviz和rqt所示。此外，日志记录也可以用于分析算法和调试。

协同搜索仿真

本节实现了多无人机协同搜索。我们通过QGroundControl规划了六架无人机的轨迹，每架无人机的低级控制器负责跟踪期望的轨迹，高级控制器则负责检测目标物体。

任务的目标是在一个大的区域内搜索一个人。YoloV3网络[4] 事先经过培训，并部署在高级控制器层中。为了在较宽的区域内进行搜索，一种简单而有效的方法是将该区域划分为六个不重叠的区域。每个UAV搜索一个区域并检测目标物体。通过在QGroundControl中设置和上传航路点，如图2（a）所示，每个UAV的低层控制器跟踪所需的飞行轨迹，同时，YoloV3开始工作，如图3所示。最后，5号无人机检测到人类，任务完成。

分布式无人机编队设计

本节介绍了分布式无人机编队控制的设计。设计了一致性控制器、任务分配策略和避障算法。编队使用集中式策略，设置领队。首先，领队将任务分配给所有子无人机。然后，对于每个子无人机，一致控制器和避障模块的输出速度被合成为高级控制层中的期望速度。然后将所需的速度发送到低层控制层。最后，实现了所需的编队。

我们将编队重构视为一种任务分配的模式，在改变编队队形时，将不同的无人机置于不同的编队位置，以获得最短的总距离。我们采用Kuhn-Munkres（K-M）算法进行任务分配。由于每个无人机都可以获得当前编队偏移和目标编队偏移，因此我们将其设置为一个二部图。图形的每个权重是当前编队偏移和目标编队偏移之间的距离（实际上变为负值）。用KM算法求解的分配以最短的总距离获得最佳的总体性能[5] 。例如，对于从“T”到“diamond”的编队重构，KM算法的设置和结果如图6所示

图7显示了避障策略。当另一架UAV在b米范围内时，UAV将避开。r是距离向量，指向障碍UAV。a是UAV1的回避向量，a0是UAV3的回避向量。a和a0的方向相反，并且垂直于r。因为有无穷多个向量垂直于r，所以设计了一种简单的方法，如算法1所示，用于识别唯一的解。使用两个辅助向量n1和n2避免交叉积结果接近零向量。是一个比例因子。如果b米范围内有多个无人机，则回避向量a将被修改数次。最终a将被添加到所需速度，然后所需速度将被发送到低层控制层。

另一个问题是如何获得其他无人机的相对位置。由于分布式通信，无人机无法获得所有其他无人机的绝对位置[6] 。有很多研究集中在协作相对定位算法上。在本演示中，为了简化，将相对位置地面实况发送给每个UAV。开发人员只需添加一个相对的本地化模块，就可以用模块输出来替换地面真值。

分布式无人机编队仿真

XTDrone包含两个python类，一个用于leader，另一个用于follower。开发人员可以继承这两个类来修改通信和控制方案。通过启动多个ROS节点，模拟多个无人机控制器。

图8显示了在简化模拟器中实现的9架无人机的编队，图9显示了在Gazebo中实现的编队。从左到右的三种配置是立方体、金字塔和三角形。

为了验证一致性控制算法，在从原点到“立方体”的配置过程中记录了光照日志，位置响应曲线如图10所示。虽然在响应曲线上可以看到一些超调，但所有无人机都达到了稳定性。

结论及未来工作

本研究开发了一个层次化的多无人机仿真平台。设计了六层：通信层、模拟器层、底层控制层、高层控制层、协调层和人机交互层。本文提供了两个演示来演示该平台的工作原理。第一个是合作搜索任务。各无人机的低级控制器跟踪地面控制站规划的期望轨迹，高级控制器检测目标物体。另一种是分布式无人机编队，包括共识控制、任务分配和避障。仿真验证包括简化模拟器和Gazebo中的9个无人机仿真，这验证了一致性控制算法。

该平台是完全开源的，并且正在不断开发中。现在它只支持多旋翼无人机，固定翼无人机和垂直起降无人机的支持正在开发中。此外，另一个模拟器AirSim正在集成到该平台中。此外，计划基于仿真平台举办多无人机比赛。

参考文献

1. Sanchez-Lopez, J.L., Pestana, J., de la Puente, P. *et al.* A Reliable Open-Source System Architecture for the Fast Designing and Prototyping of Autonomous Multi-UAV Systems: Simulation and Experimentation. *J Intell Robot Syst* **84,**779–797 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10846-015-0288-x>
2. Xiao, K., Tan, S., Wang, G., An, X., Wang, X., Wang, X.: Xtdrone: A customizable multi-rotor uavs simulation platform. arXiv preprint arXiv:2003.09700 (2020)
3. Liu, Z., Wang, X., Shen, L., Zhao, S., Cong, Y., Li, J., Yin, D., Jia, S., Xiang, X.: Mission oriented miniature fixed-wing uav swarms: A multi-layered and distributed architecture. arXiv preprint arXiv:1912.06285 (2019)
4. Redmon, J., Farhadi, A.: Yolov3: An incremental improvement. arXiv preprint arXiv:1804.02767 (2018)
5. Zhu, H., Zhou, M., Alkins, R.: Group role assignment via a kuhn–munkres algorithm-based solution. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans 42(3), 739–750 (2012)
6. Saska, M., Baca, T., Thomas, J., Chudoba, J., Preucil, L., Krajnik, T., Faigl, J., Loianno, G., Kumar, V.: System for deployment of groups of unmanned micro aerial vehicles in gps-denied environments using onboard visual relative localization. Autonomous Robots 41(4), 919–944 (2018)