

# CoUAS:实现无人机系统合作

黄子耀、吴薇薇、山锋、卞宇新, 东南大学陆克杰, 波多黎各大学 Mayagüez  
李镇江, 王建平, 香港城市大学  
王金, 苏州大学

近十年来, 无人机系统(UASs)被广泛应用于各种民用应用中, 而这些应用大多只涉及单一的无人机(UAV)。在不久的将来, 多架无人机的合作将促进越来越多的无人机应用。在这种应用中, 利用通用的控制平台对协同无人机进行控制是可取的。但现有的开源控制平台无法满足这一需求, 原因包括:(1)仅支持 leader-follower 模式, 限制了机群控制的设计选择;(2)现有平台只能支持特定类型的无人机, 缺乏兼容性;(3)无法准确模拟飞行任务, 可能导致仿真与真实飞行存在较大差距。针对这些问题, 我们提出了一种协同无人机的通用控制与监控平台——CoUAS, 该平台为无人机提供一套核心的协同服务, 包括同步、连通性管理、路径规划、能量仿真等。为了验证 CoUAS 的适用性, 我们设计并开发了一个原型, 其中提供了一个嵌入式路径规划服务, 在考虑网络连通性和覆盖范围的情况下, 以最小的飞行时间完成任何任务。仿真和现场试验结果表明, 该系统是可行的。

•网络→移动网络;•计算机系统组织→机器人;•计算理论→算法设计与分析;

无人机编队, 协同, 仿真, 试验台, 路径规划, 开源

## ACM 参考格式:

黄子耀, 吴薇薇, 单峰, 卞玉新, 卢克杰, 李镇江, 王建平, 王金. 2020. CoUAS:实现无人机系统合作. *ACM 反式. 参议员 Netw. 16, 3, 第 24 条(2020 年 5 月), 19 页*.

<https://doi.org/10.1145/3388323>

国家重点研发计划项目(No. 2019YFB2102200)、深圳市科技创新委员会项目(No. JCYJ20170818095109386)、国家自然科学基金(No. 61672154、61672370、61972086)、中国航空科学基金(No. 2017ZC69011)、国家科学基金(No. CNS-1730325)及香港研究资助局研究基金编号 11216618。

作者地址:黄哲、吴伟、单飞(通讯作者)、边勇, 东南大学四牌楼 2 号, 南京, 210096;邮箱:{ziyaohuang, weiweiwu, shanfang, bianyuxin}@seu.edu.cn;陆凯, 波多黎各大学 Mayagüez, 259 Norte Alfonso Valdez Cobian Mayaguez, PR 00680, 波多黎各;电子邮件:kejie.lu@upr.edu;中华人民共和国香港九龙达之道 83 号李振和王杰;电子邮件:{镇江.李.jianwang}@cityu.edu.hk;苏州大学王杰, 苏州市子街 1 号, 215006;电子邮件:wjin1985@suda.edu.cn。

允许制作本作品的全部或部分的数字或硬拷贝用于个人或课堂使用, 但前提是该拷贝不是为了盈利或商业利益而制作或分发, 并且该拷贝在第一页上带有本通知和完整引用。本作品的组成部分必须由 ACM 以外的其他人拥有版权。信用文摘是允许的。以其他方式复制, 或重新发布, 在服务器上发布或重新分发到列表, 需要事先的特定许可和/或费用。从 [permissions@acm.org](https://permissions.acm.org) 请求权限。

©2020 计算机协会。

1550 - 4859/2020/05 art24 15.00 美元

<https://doi.org/10.1145/3388323>

美国计算机学会传感网络学报, Vol. 16, No. 3, 第 24 条。发布日期:2020 年 5 月。

1 介绍

无人机系统(UAS)由一架或多架无人机(uav)、地面控制站(GCS)和它们之间的通信系统组成。近年来,无人机系统,尤其是基于多旋翼的无人机,引起了联邦机构、工业界和学术界的极大关注。协同无人机可以促进许多应用[9,14 - 16,21]。例如,在视频监控应用中,多架无人机可以借助先进的视频处理技术[18]对给定区域进行快速扫描。然而,要成功部署多无人机应用,实现无人机之间的协作,必须解决许多具有挑战性的问题,如飞行控制、可靠性、安全性等。

显然,为了方便多无人机应用,需要利用一个通用的平台来控制 and 监控无人机,如图 1 所示。在文献中,有一些比较流行的无人机控制平台,即:gcs,包括任务计划[20]、QGroundControl[7]和大疆 FlightHub[6]。虽然这些卫星导航系统都支持通过编辑航路点进行飞行规划、与无人机通信、用户界面友好、地图显示飞行轨迹、实时监控飞行器状态等基本飞行控制功能,但其作为协同无人机通用控制和监控平台的适用性受到以下几个方面的限制。

- 现有 gcs 仅启用“leader-follower”模式。虽然 leader-follower 模式使得路径规划更加容易,但不能充分利用机群中的所有无人机在最短时间内或最短飞行距离完成复杂任务。
- 每个 GCS 只支持特定的一组无人机或无人机飞行控制器。例如, Mission Planner 主要是为 ArduPilot 硬件和固件设计的;qgroundcontrol -仅支持使用 MAVLink 协议进行通信的无人机;大疆 FlightHub 只与大疆自己的产品互动。
- 现有的 gcs 缺乏能量模拟模块。由于没有能源仿真模块,现有的 gcs 无法通过仿真预测能源消耗。因此,飞行的可行性不能在无人机起飞前进行测试。因此,由于早期能量耗尽,一些飞行可能不得不在任务完成前中止。

为此,我们提出了 couas,这是一个控制和监控平台,能够轻松实现无人机合作,以解决上述限制。具体而言,为了解决第一个限制,让无人机在编队中实现效率最大化,我们提出了一个更通用的路径规划框架,通过群函数(如同步、连通性维护)进行协同路径规划,以及一个嵌入式的多无人机协同路径规划服务,该服务同时考虑了无人机网络的连通性和覆盖范围。

为了解决第二个限制,我们通过引入一个配套的 linux 内核设备来为每个无人机提供硬件独立性,该设备作为一个中间件来与无人机自动驾驶仪进行交互。由于几乎每个商品供应商和开源社区都提供基于 linux 的无人机飞控 SDK,这种无人机同伴设备隐藏了不同厂商的无人机软硬件差异。因此,我们的 CoUAS 平台足够通用,可以与各种无人机工作,无论其硬件、固件和通信协议。

为了解决第三个限制,我们在 CoUAS 平台上添加了一个能量模拟模块。为了使仿真结果更加可靠,更接近真实飞行情况,在能量预测方面做了努力,避免了现场任务流产。在异构无人机编队中,不同的无人机在飞行速度/飞行距离相同的情况下,消耗的能量也不同。我们的平台为不同类型的无人机提供精确的能量模型,确保在规划路径下真实飞行的可行性。

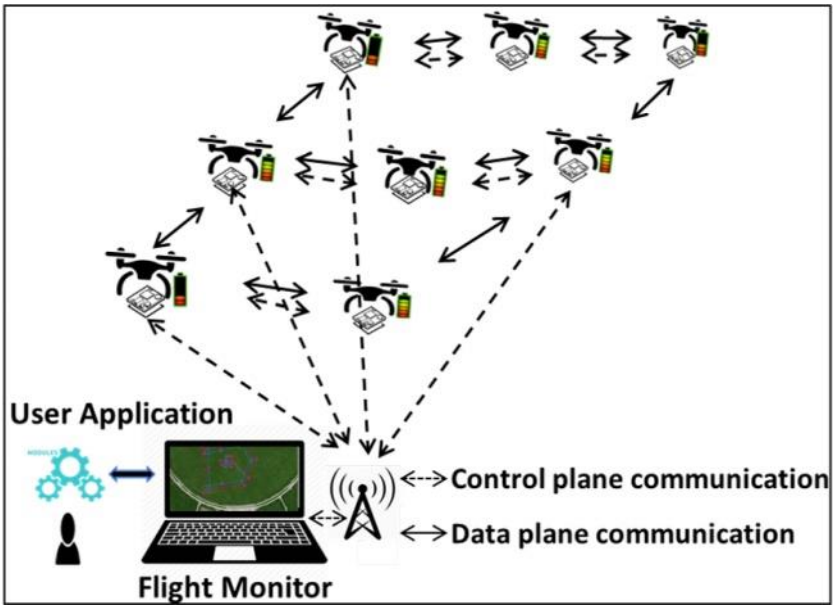


图 1 所示。无人机编队平台架构。

表 1。CoUAS 与通用 gcs 的功能比较

	任务计划	飞行器代理	收飞行中心	QGround 控制	APM 规划师 2	CoUAS
G UI	吗 ?	×	吗 ?	吗 ?	吗 ?	吗 ?
Single-UAV 模拟	吗 ?	吗 ?	吗 ?	吗 ?	吗 ?	吗 ?
无人机 api <sup>1</sup>	吗 ?	吗 ?	×	×	×	吗 ?
GUI api <sup>2</sup>	×	×	×	×	×	吗 ?
Multi-UAV 模拟	×	×	×	×	×	吗 ?
群 api <sup>3</sup>	×	×	×	×	×	吗 ?
Hardware-independent	×	×	×	×	×	吗 ?
能源消耗模型	×	×	×	×	×	吗 ?

<sup>1</sup>接口，使开发人员能够与无人机和平台通信。  
<sup>2</sup>帮助开发人员创建和控制 GUI 以与用户交互并处理输入的函数。  
<sup>3</sup>促进无人机合作的功能。

表 1 总结了 CoUAS 和流行 GCSs 之间的主要功能差异。除了上述功能外，CoUAS 还提供了连接机队的路径规划、GUI api、UAV api、多无人机仿真等功能，并在此基础上实现了代理管理器、应急监视器、消息中心等基本模块，以方便应用程序开发。开发人员可以使用我们的平台来实现快速开发，而不必实现底层模块。

我们的贡献可概括如下：

- 提供有效的合作服务，管理复杂的网络协议。在 CoUAS 开发的无人机代理包括一个独立的

- 可以运行在通用操作系统上的中间件。这意味着，CoUAS 不仅可以支持现有的主流协议，还可以支持未来提出和开发的任何专门的机载通信协议。
- 除了主要的合作服务外，CoUAS 还为机队提供路径规划服务，例如飞行期间的连通性维护和同步。路径规划服务以待访问点和无人机数量为输入，生成初始路径规划，在保持无人机之间连通性的前提下，尽早完成任务。规划的路径信息然后转换为一系列的控制命令，并分发给单个无人机。当路径因环境因素(如风扰动)而受损时，可以对规划的路径进行修订和更新。
  - CoUAS 提供接口，将训练过的能量模型和模块结合起来，为不同类型的无人机训练能量模型。通过收集历史飞行任务的能量数据，我们学习了 Pixhawk-Hexa 无人机的能量模型。将模拟结果与现场试验结果进行比较，训练出的能量模型精度达到 94.26%。
  - CoUAS 可以准确模拟飞行任务。此外，CoUAS 支持在任务执行期间在模拟和现场测试之间轻松切换。这些优点来自于系统设计，UAV 代理作为一个中间件来隐藏 UAV 硬件差异。因此，我们可以在不影响平台其他部分的情况下替换任何无人机型号，也可以在部署前使用无人机模拟器进行仿真。公众可以在 <https://github.com/whxru/CoUAS> 上访问该平台的演示和源代码。

本文其余部分的组织方式如下:在第 2 节中，我们详细介绍了原型的设计和实现。在第 3 节中，我们介绍了嵌入式路径规划服务的主要算法。为了验证所提系统的适用性，我们分别在仿真和现实环境中运行算法，结果见第 4 节。最后，我们在第 5 节讨论相关工作，然后在第 6 节结束文章。

2.couas 系统的设计与实现

CoUAS 平台由两类组件组成:安装在每架无人机上的无人机代理和运行在地面站上的飞行监视器，如图 2 所示。在本节中，我们介绍了无人机代理和飞行监视器在 CoUAS 平台上的实现细节。

2.1 无人机 Agent

一个典型的无人机或无人机系统包括电机、飞行控制系统、陀螺仪、罗盘、GPS、遥控器和电池。飞行控制系统的主要任务是根据陀螺仪、罗盘和 GPS 的信息，通过电机的控制来稳定飞行器，控制飞行器的运动。飞行控制系统也通过预定义协议向外部设备提供无人机信息和控制接口。如图 3 所示，我们目前平台上的飞行控制器是 APM2.8 板和 Pixhawk HEXA 板。我们进一步安装 Raspberry Pi 3 主板(RPi)作为挂载的 linux 内核设备来运行无人机代理程序。UAV 代理负责处理三种重要类型的信息或消息，包括车辆状态、设备控制和异常。提供了飞行控制板与监视器之间通信的无人机 api。无人机智能体及其与无人机飞行控制器交互的详细示意图如图 4 所示。

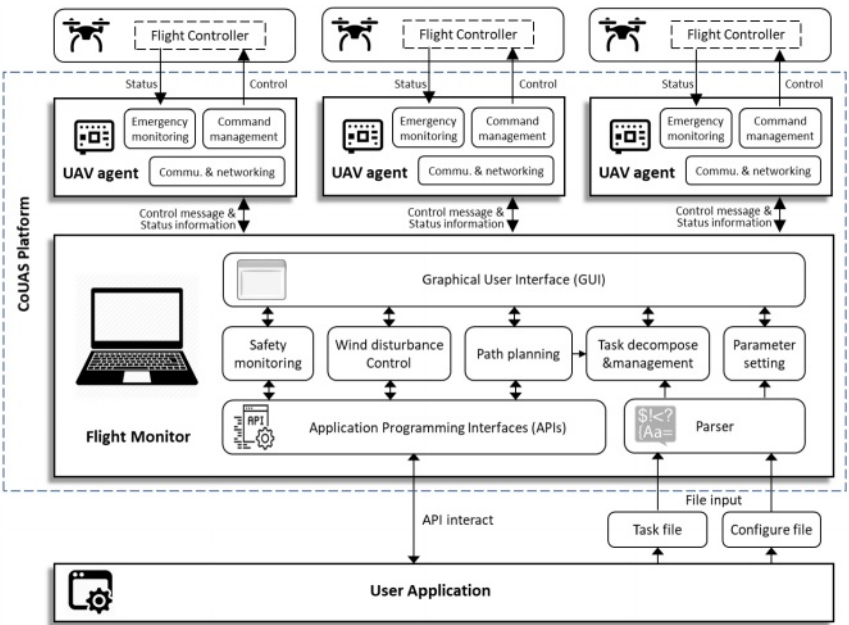


图 2 所示。我们提议的 CoUAS 平台的说明。

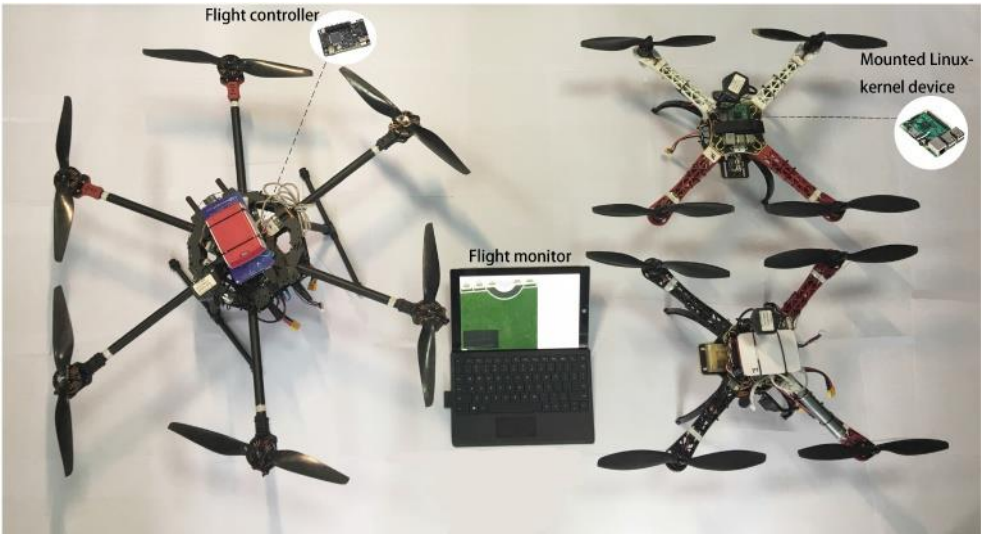


图 3 所示。介绍 CoUAS 平台的硬件组成。

2.1.1 状态信息处理。为了兼容各种底层有硬件差异的飞控板，我们通过 sdk 访问和更新飞控模块和无人机代理程序之间的飞行状态信息。无人机的状态信息需要传输到地面的飞行监视器。在传输之前，UAV 代理定期将飞行状态(来自 sdk)解析为异常监视器所需的格式



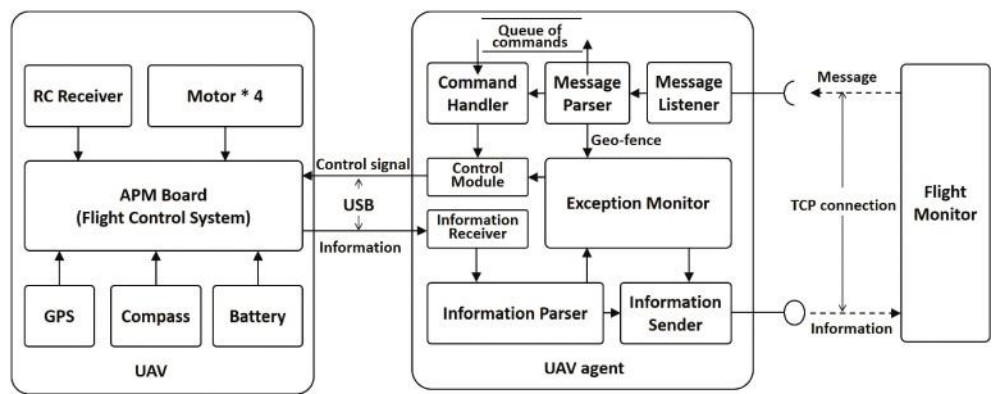


图 4 所示。详细说明了无人机智能体及其与无人机飞行控制器的交互。

以及信息发送者。信息发送方进一步将其转换为用于传输的字符流。

虽然目前的 CoUAS 实现使用 APM2.8 板和 Pixhawk HEXA 板作为飞行控制，但我们的无人机代理设计基本上可以与任何主流的无人机飞行控制器工作，因为无人机代理程序作为中间件，对平台的其他部分(包括飞行监视器)隐藏无人机的差异。因此，对于利用其他飞行控制器的无人机，我们的无人机代理可以将它们连接到飞行监视器，因为几乎每个商品供应商和开源社区都提供了基于 linux 的无人机飞行控制 SDK。

**2.1.2 控制消息处理。**来自飞行监视器(地面)的控制消息以字符流的格式传输，流到 RPi 上无人机代理的消息侦听器。在 CoUAS 中有两种类型的控制消息:控制命令和参数设置。对于前一种类型，命令将被追加到先进先出队列。UAV 代理具有一个命令处理程序，该命令处理程序可以将每个命令转换为飞行控制模块可执行的格式。对于后一种类型，参数设置消息可以处理地理围栏边界、通信范围和电池寿命等参数。

**2.1.3 异常监测。**无人机代理还具有异常监控模块，定期将飞行状态信息发送到该模块进行检查。因此，异常监视器可以跟踪车辆的状态变化，监控紧急情况。在发生紧急情况时，异常监视器要么向飞行控制器发送高优先级命令，要么通过信息发送器向飞行监视器报告。CoUAS 中的异常包括低电量、跨越 geo-fence 边界、到监视器应用程序的连接运行状况不佳，等等。

2.2 飞行监视器

飞行监测仪的主要任务是与每一架无人机进行通信，并为它们的合作提供一系列必要的服务。此外，飞行监视器还提供了与上层应用程序和最终用户交互的接口，分别通过 api 和 GUI。图 5 展示了来自 CoUAS 平台中的飞行监视器的 GUI。

**2.2.1 合作服务。**根据从每架无人机接收到的信息，如图 6 所示，飞行监视器中的业务控制器可以生成控制消息来启用

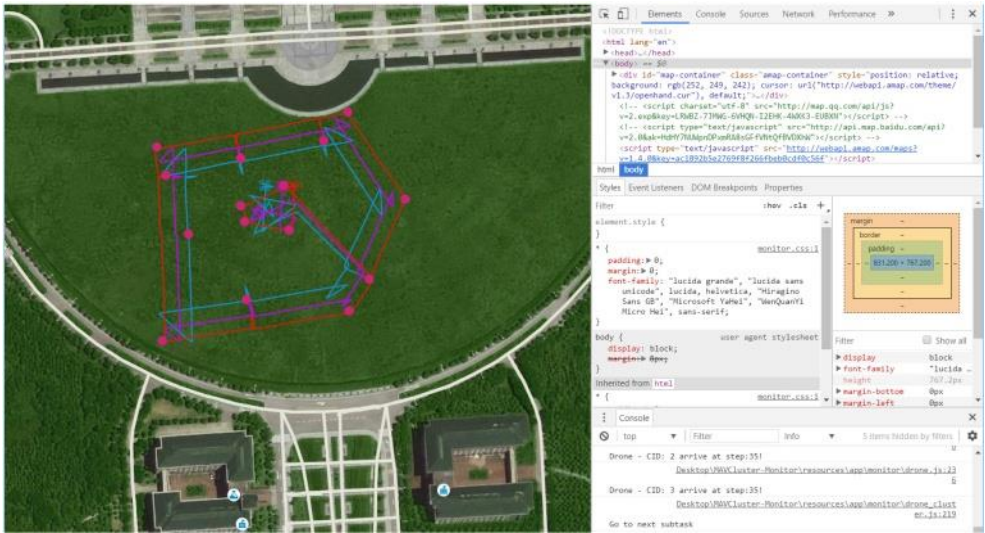


图 5 所示。飞行监视器的 GUI 示例。

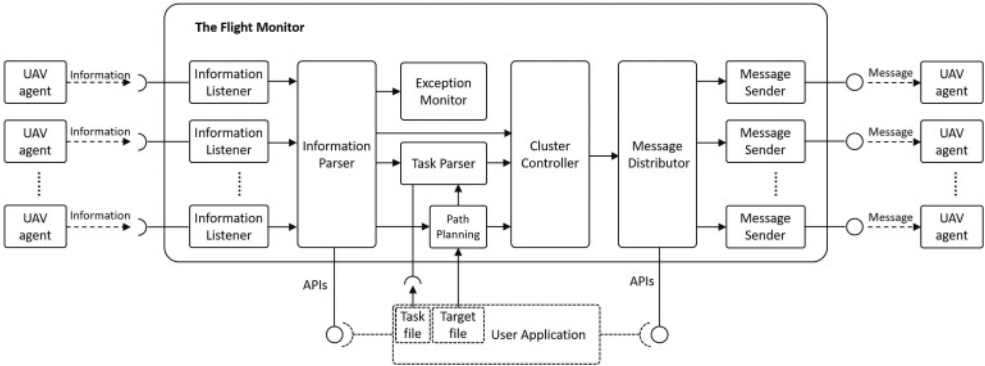


图 6 所示。详细说明了飞行监视器及其与无人机代理和应用程序的交互。

以下合作服务。控制消息是由消息发送方通过消息分发器发送的高优先级命令。

- 连通性维护:通过配置网络服务(如 OLSR), CoUAS 可以将所有无人机和飞行监视器连接起来,所有连接的无人机由代理管理器管理。如果某些无人机之间的连接质量较弱或传输错误,这些异常将被抛出并返回给飞行监视器,以调整无人机的位置。
- 路径规划:多无人机编队通常需要协同访问目标区域。路径规划服务可以很好地规划每架无人机的轨迹,使机队可以连接移动,并在更早的时间从应用程序完成任务。通常,要覆盖的一组目标将通过 GUI 或 API 传递给该服务进行处理。一旦路径规划完成,生成的路径将被转换成任务/行动的序列,由每个无人机执行。路径规划算法将在第 3 节详细介绍。

- 同步:我们还需要一系列的同步值来表示每架无人机的状态，支持连通性维护和合作。因此，每个同步值都是布尔型的，其中“true”表示无人机在完成当前任务时需要与其他无人机同步。
- 避免偏离:由于环境影响(如风)，无人机在空中盘旋时可能偏离其计划轨迹或原始位置。通过实时轨迹与规划结果的比较，可以捕获散度并进一步标定。
- 避碰:GPS 被广泛用于获取无人机的位置。虽然 GPS 的精度不足以精确判断两架无人机是否碰撞，但可以通过检查任意两架无人机的速度矢量并计算它们之间的距离来避免碰撞，这应该有足够的避碰裕度。

2.2.2 API 交互。上层用户应用可以选择使用群 api 来实现上述服务。群 api 主要由信息中心实现，实现信息和消息的双向处理和传递。如图 6 所示，Information Parser 模块处理来自无人机的每个状态信息，Message Distributor 模块负责处理所有发送给无人机的控制消息。因此，提供无人机状态信息的状态 api 集成到信息解析器中，提供控制功能的控制 api 集成到消息分发器中。为了满足与不同任务的用户交互的特定需求，还提供了 GUI api 帮助开发人员快速创建可视化界面。

2.2.3 文件交互。上层用户应用程序还可以选择通过任务文件或目标文件与飞行监视器进行交互。任务文件是操作的有序列表，而操作由一组键值对组成。有两种配对，如强制配对和可选配对。强制对出现在每个动作中，它规定了动作的基本动作。强制配对的例子包括:基本动作及其类型、连接 ID 及其值、同步及其布尔值。可选配对是强制性配对的重要补充，但不一定出现在每个动作中。可选对的例子包括:相对距离及其值、绝对目的地及其值。目标文件实际上是嵌入式路径规划服务的输入，该服务定义了用户希望用无人机舰队扫描的一组目标。该文件包含目标位置列表和其他配置，如每对无人机的最大距离。

2.2.4 无人机通信。CoUAS 使得无人机和飞行监视器可以通过高性能 Wi-Fi 连接到数据平面和控制平面。通过 Wi-Fi 网络建立 TCP 连接，实现数据和控制的传输。每个信息包由报头和正文组成。为了在 CoUAS 中区分不同类型的数据包，我们在数据包头部指定一个字段，并定义了七种类型的数据包，如表 2 所示。包体包含重要的信息，如子任务中的动作、中心位置和地理围栏的半径。为了将来支持更多的功能，可以定义和添加新的报文类型。由于无人机代理运行在 linux 内核设备上，因此 CoUAS 还支持其他组网方案，例如优化的 OLSR (link state routing protocol)[4]，这是无线网状网络设置中非常常见的一种组网方案。

2.2.5 同步。为了支持无人机间的合作和任务的顺利执行，不同的无人机之间定期进行同步，以应对异步情况(如位置偏差、连接质量低)。同步机制的基本思想是迫使无人机同时开始剩余任务，并进行同步



表 2。类型的数据包

价值	描述
0	连接 ID 的请求
1	响应连接 ID 的请求
2	报告无人机状态
3.	设置 geo-fence
4	执行行动(年代)
5	同步信号
6	关闭连接信号

定期运动。期望校准自上次同步以来的累计偏差。例如，当一支无人机编队以相同的速度和方向移动时，它们的相对位置可能会受到风的干扰而发生变化。因此，我们需要定期调整自己的头寸。为了实现同步，分配给每个无人机的任务被分成一系列小的子任务，称为步骤，其中每个步骤最多包含一个动作。当同步索引设置为 `true` 时，无人机将在当前步骤结束时(进入下一步之前)同步。在当前步骤完成之后，UAV 代理发送一个同步消息来通知飞行监控器它已经准备好进行下一步，并等待直到它收到来自监控器的确认消息。从飞行监控器的角度来看，在收集到所有的同步消息后，飞行监控器向所有的无人机发送确认信息，所有等待确认的无人机就可以开始下一步的操作。因此，可以实现同步。

2.2.6 款能源仿真。在能量模拟中，模拟模式下的飞行能耗预测必须能够反映真实飞行的情况。为了校准模拟器和真实飞行之间的差距，我们通过开发一个两步学习框架来训练一个模型。学习的第一步是学习一个模型，该模型可以将真实飞行的时间和距离映射到能源消耗。该模型是通过广泛的现场试验使用非线性核脊回归训练。在模拟中产生的飞行时间和距离可能与真实飞行的飞行时间和距离有所不同。为了校准这种差距，我们进一步学习了另一个模型来映射仿真中的飞行时间和距离到真实飞行中的飞行时间和距离。为此，我们应用了一个简单的线性回归，并学习了反映模拟和真实飞行时间/距离各自权重/重要性的参数。通过这样的两步学习模型，我们可以高精度地将模拟中的飞行时间和距离映射到预期的能量消耗上。

3、具有连通性和覆盖约束的路径规划

在本节中，我们将结合无人机网络的连通性和覆盖情况，详细介绍上述多无人机协同路径规划服务的算法。我们将首先介绍这个问题，然后给出一个近似最优解及其性能界。

3.1 目标点访问问题的制定

假设在二维区域内，某编队任意无人机需要访问/覆盖一组目标点。设点集为  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ,  $p_i = (x_i, y_i)$  为第  $i$  个目标点的位置。设  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$  是一套无人机。我们假设这些无人机可以自由移动，我们不考虑垂直运动。在时间槽  $t$ ,  $u$  的位置  $j$  用  $u$  表示  $j, t, x = (x_{j,t}, y_{j,t})$ ,  $t \in [0, t)$ 。如果一个无人机  $u_j$  通过目标点  $p_i$ ，我们说

表 3。符号

象征	语义
$P$	目标点集
$\pi$	$i$ 目标点
$西$	$p$ 的水平位置 $i$
$西$	$p$ 的垂直位置 $i$
$U$	的无人机
$用$	$i$ 无人机
$界面$	
$u_j t$	你的位置 $j$ 在时间 $t$
$x_j, t$	$u$ 的水平位置 $j$ 在时间 $t$
$y_j t$	$u$ 的垂直位置 $j$ 在时间 $t$
$d$	无人机在飞行过程中可以移动的距离
$\omega$	无人机的传动范围
	$u$ 和 $u$ 之间的距离 $i$ 和你 $j$ 在 $t$ 时刻小于 $\omega$
$喂, j, t$	目标点 $p$ 是否 $i$ 被 $u$ 扫描 $j$ 在时间 $t$
$L_j$	$u$ 的总移动距离 $j$

$p_i u$  是否覆盖(或扫描) $j$ 。表 3 总结了这些符号。注意，我们假设所有无人机在规划阶段都以匀速运动。如果无人机在飞行过程中由于风的干扰而改变速度，监测模块可以捕捉到速度的变化，从而触发重新规划。

由于无人机的飞行速度有限，无人机在一个时间单位内的移动距离应满足速度约束，

$$d(u_{j,t}, u_{j,t+1}) \leq d_{max}, \quad \forall u_j \in U, \forall t \in [0, T),$$

(1)

在维<sub>max</sub>是无人机在一个时间段内可以移动的最大距离。

在飞行过程中，无人机需要与机群中至少一架无人机或地面控制人员保持连接。这保证了无人机捕捉到的信息能够快速传回地面控制器，无人机能够协同完成任务。这个约束被称为连通性约束。也就是说，无人机之间的距离应该在无人机的传输距离内，用  $w$  表示，我们用  $x$  表示  $i, j, t$  表示  $u$  与  $u$  之间的距离  $i$  和你  $j$  (我吗?) 在  $t$  时刻小于  $w$ ，即，

$$x_{i,j,t} = \begin{cases} 1, & \text{if } d(u_{i,t}, u_{j,t}) \leq w \\ 0, & \text{if } d(u_{i,t}, u_{j,t}) > w \end{cases}.$$

(2)

那么连通约束可以用以下不等式表示:?

$$d(u_{i,t}, u_{j,t}) \cdot x_{i,j,t} > 0, \quad \forall u_i \in U, \forall t \in [0, T).$$

(3)

$$j: \overline{u_j \in U}, j \neq i$$

每个目标点必须被至少一架 UAV 扫描，这是覆盖约束。我们使用  $y_{i,j,t}$  表示目标点  $p_i$  被  $u$  扫描  $j$  在时刻  $t$ ，也就是，

$$y_{i,j,t} = \begin{cases} 1, & \text{if } u_{j,t} = p_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}.$$

(4)

那么覆盖约束可以用吗?

$$y_{i,j,t} \geq 1, \quad \forall p_i \in P.$$

(5)

$$j: \overline{u_j \in U} \ t: \overline{t \in [0, T)}$$

对于飞行过程中不充电的无人机来说，尽快完成飞行任务至关重要。但是，考虑到无人机的电池供应有限，尽量减少无人机之间的最长飞行路线也至关重要。因此，我们将我们的目标定义为

$$L_{fleet} = \max_{u_j \in U} L_j, \tag{6}$$

其中  $L_j$  为  $u_j$  的总移动距离，可以计算为  $L_j = \sum_{t=T}^{T+1} d(u_j, T, u_j, T+1)$

我们将多无人机目标点访问问题正式定义为：

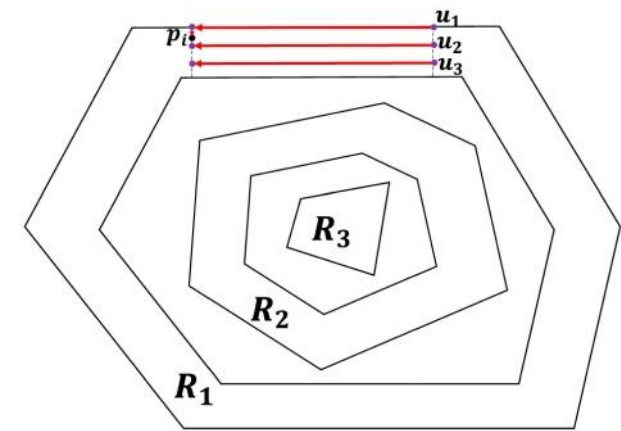
**定义 1.** 给定一定数量的无人机和分布在某一区域内的一组目标点，多无人机目标点访问问题是规划每架无人机在每次飞行时的飞行轨迹，以最小化最长路线，

$$\begin{aligned} & \text{最小最大 } L_j, u_j \\ & \quad \in U \\ & \text{服从式(1)(3)(5)。} \end{aligned}$$

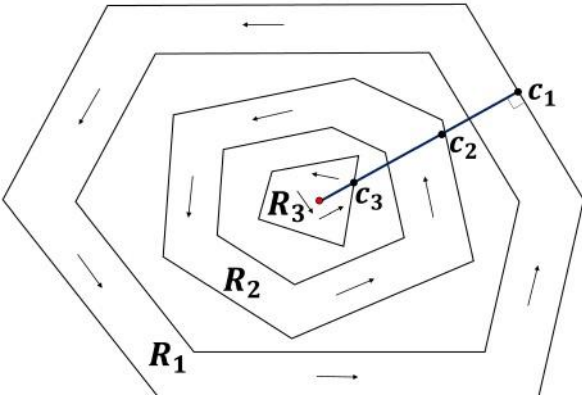
3.2 多边形引导扫描算法

在本节中，我们提出了一种无人机编队规划算法，称为多边形引导扫描算法(PSA)，以协作尽快访问目标点。我们注意到，无论采用哪种规划方法，都需要扫描构成所有目标点凸包的点集。因此，我们的高层思路是让无人机编队沿着目标点的凸包移动，并在通信连通性约束下覆盖尽可能大的范围。由于可能存在第一轮扫描无法覆盖的目标点，舰队将逐轮迭代扫描剩余的目标点。这种扫描过程通过迭代将区域划分为子区域。观察到最优解需要产生至少是凸多边形周长的旅行距离，我们将设计一种分区方法，确保每一次迭代/轮的扫描区域是最大可能的区域，使车队的旅行距离接近最优解的旅行距离。下面我们将首先介绍无人机编队的区域划分和总体扫描方案，然后介绍一轮扫描的详细方案。最后，我们将给出所提算法的性能分析。

**3.2.1 总体扫描方案。** 给定当前所有的非扫描目标点，我们可以计算出相应的凸包，即包含所有待扫描目标点的最小凸集。让  $V_k = \{v_{k,1}, v_{k,2}, \dots, v_{k,h_k}\}$  为第  $K$  轮扫描计算出的凸包，其中  $h_k$  是凸包的顶点数。凸包  $V_k$  称为外边界。使无人机编队沿外边界移动，在通信连通性约束下覆盖最大可能范围(保持编队在长度为  $w$  的直线上均匀间隔) $_{max} = (m - 1) \times w$ ，这将产生一个环形区域，用  $R$  表示  $k$ ，如图 7(a)所示，即为第  $k$  轮扫描的区域。让  $V_k = \{v_{k,1}, v_{k,2}, \dots, v_{k,h_k}\}$  是构成环  $R_k$  内边界的点。显然，内边界平行于外边界，位于外边界内。让  $P_k$  为  $R$  区域内目标点的集合  $k$  (例如，对于  $k = 1, P_1 = p \cap r_1$ )。针对目标点  $P_k$  的具体扫描方案将在后面详细介绍。边界扫描后的  $R_k$ 。我们继续设置  $P_k$ ，扫描剩余的目标处理点  $P \setminus P_i = P_k \setminus P_{k-1}$  作为  $P_{new}$  全部给定定位目标内点的内点，并再次计算这些点的凸包来确定扫描区域  $R_{k+1}$  在下一轮扫描中。我们重复这个操作，直到所有的目标点被扫描。让总



(a) The partition of the area where  $K = 3$



(b) The transfer of UAV fleet from one scanning area to the next scanning area when  $K = 3$

图 7 所示。无人机编队区域划分与转移实例。

轮数为  $k$ ，那么  $P = \{P_k\}$ 。图 7(a)为  $K = 3$  时的示意图。整体扫描方案的详细描述如算法 1 所示。

3.2.2 相邻两轮转移方案。现在，我们介绍无人机舰队将如何从扫描区域  $R$  移动的转移方案  $k$  到下一个区域  $R_{k+1}$  进行下一轮扫描，如图 7(b)所示。在我们的方案中，无人机编队从  $R$  出发  $k$  到  $R_{k+1}$  在整个过程中，所有无人机从最外侧的扫描区域  $R$  移动到最里面的  $R$  次方  $K$ ， $R$  的外边界之间的最短距离  $l$  和  $R$  的外边界  $K$  被视为最短的转移距离。不难看出，这个值是到  $V$  中各点的最短距离  $K$  到  $R$  的外边界  $l$ 。设转移距离最短的直线与  $R$  的外边界的交点  $k$ ， $k = 1, 2, \dots, K$  为  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_K\}$ 。图 7(b)展示了  $C$  的一个片段  $l_{CK}$  达到最短传输距离的，记为  $L_{trans}$ 。在第  $k$  轮扫描中，舰队从

$c_k$ 。扫描  $R$  区域后  $k$ ，舰队返回  $c_k$ 。然后沿着  $c$  移动  $c_{k+1}$  然后开始下一轮扫描。

备注 1。虽然当所有无人机进入下一个扫描区域时需要调整编队，但考虑到沿扫描区域外侧的飞行长度通常比沿扫描区域内侧的飞行长度要长得多，因此这种调整引起的移动距离可以忽略不计，这意味着在我们的规划下，无人机编队的最长路线是由沿着每个区域  $R$  外边界移动的无人机决定的  $i$ ， $i = 1, 2, \dots, K$ 。

算法 1:多边形引导扫描算法(又称 PSA)

输入:目标点集合  $P$ ，无人机集合  $U$ ，最大通信距离  $w$  输出:飞行计划和相应的无人机编队飞行成本  $L_{fleet}$

1 设最大扫描宽度为  $w_{max} \leftarrow (m-1) \times w$ ，让  $k \leftarrow 1$ ，让  $L_{fleet} \leftarrow 0$ ;

2 当  $P$  不为空时做

计算点  $V$  的集合  $k$  构成  $P$  的凸包(如采用 Graham 扫描法);

计算点  $V$  的集合  $k$ ，构成本轮扫描区域的内边界，基于  $V_k$  和  $w_{max}$ ;

4

5   得到子区域  $R_k$  和目标点  $P_k$  基于  $V$  的整数  $k_k$ ， $V_k$  和  $P$ ;调用算法扫描子区域  $R_k$  得到相应的飞行成本  $L_k$ ;

6

7    $L_{fleet} \leftarrow L_{fleet} + L_k$ ;

8    $P \leftarrow P \setminus P_k$ ;

9    $k \leftarrow k + 1$ ;

10 结

11 计算传输距离  $L_{trans}$ ;

12  $l = 1 + L_{trans}$ ;

如果你回来;

3.2.3 单轮扫描规划现在，我们引入了单轮扫描目标点的详细规划，具体的环形区域  $R_k$ 。

如前所述，在扫描目标点的过程中，我们会将所有无人机保持在一条线上。我们称这些由无人机编队组成的线为扫描线。我们将使扫描线垂直于区域  $R$  的内外边界的平行线  $k$  在任何时间。扫描过程可以看作是扫描行的遍历。图 8(a)说明了扫描过程中的扫描线(虚线)。一般情况下，编队无人机会沿外边界平行飞行，但飞行过程中部分目标点被编队扫描线覆盖的情况除外。在这种情况下，无人机应该调整并沿着扫描线移动，以覆盖落在扫描线上的目标点。此外，在我们的规划中，相邻的任意两架无人机之间的距离一直保持不变，但当它们遇到扫描区域的一个顶点时，无人机需要调整方向。

我们首先确定扫描线之间的穿越所造成的飞行成本。假设区域  $R$  的外边界(凸多边形)的周长  $k$  是  $L_k$ 。如图 8(a)所示，在  $R$  区域的扫描线之间进行遍历时  $k$ ，最外层的无人机  $u_1$  沿凸多边形移动，并贡献最大飞行距离。因此，机队在扫描线之间穿越所造成的飞行成本为  $L_k$ 。



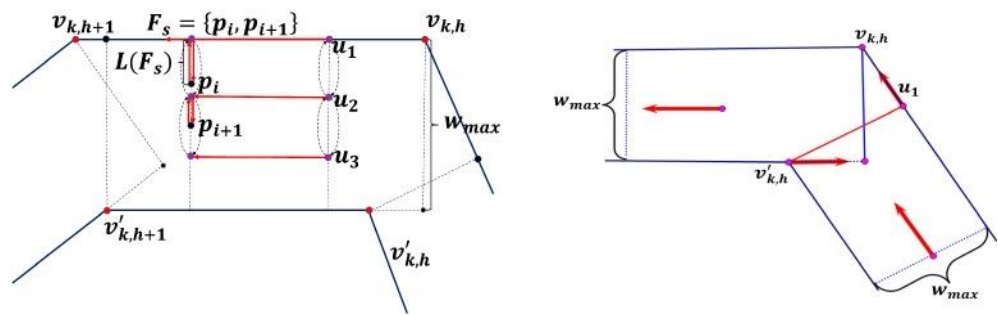


图 8 所示。(a)单轮扫描办法;(b)角区调整。

然后，确定调整机队沿扫描线行进的飞行成本，以访问位于同一扫描线上的目标点。由于目标点必须通过扫描线，我们可以划分目标点集合  $P_k$  在  $R_k$  分成若干子集。用  $F_s$  包含位于同一扫描线上的目标点的 STH 子集。图 8(a)说明了一个集合，那么， $f$  与  $P_k$  2 =?target  $Ss=1$   $F_s$  points where  $F_i \cap lie F_j$  on = $\varnothing$ (i same ?j)。扫描行。假设有  $S$  个这样的子集。

**算法 2:多边形引导扫描单转弯算法(PSTA)**

输入:无人机的集合 $U$ ，扫描区域 $R_k$ ，目标点集合 $P_k$ ，最大通信距离 $w$
输出:无人机编队 $L$ 的飞行计划及相应的飞行成本 $k$ 第 $KTH$ 轮扫描
1 计算点 $F$ 的子集 $s$ ( $s = 1, 2, \dots, S$ )，其中每个子集包含位于两边界同一垂线上的所有目标点;
2 计算长度 $L(b_k)$ 为 $R$ 的外边界 $k$ ;
3 让我 $k \leftarrow L(b_k)$ ;
4 从 $s = 1$ 到 $s$
5 让无人机机队移动到经过 $F$ 的扫描线处 $s$ ;
6 让舰队沿扫描线向内边界飞行，直至 $F$ 点上所有目标点 $s$ 被扫描，然后返回;
7 设沿扫描线飞行造成的飞行成本为 $L(F_s)$ ;
8 $L_k \leftarrow L_k + 2 \cdot L(F_s)$ ;
9 日结束
10 $L$ 返回 $k$ ;

为了遵守所有无人机的连通性约束，整个机队将进行小调整，向  $R$  的内边界飞行  $k$  同时到达当前扫描线所覆盖的目标点。如果扫描线上有多个目标点，则通过最小移动距离来确定扫描所有目标点的飞行成本，易于测量。让  $L(F_s)$  是在扫描线上产生的成本  $F_s$ 。当当前扫描线上的所有目标点都被扫描完后，舰队将返回到这条扫描线上的起点，并移动到下一条扫描线，如图 8(a)中的红线所示。

因此，调整的飞行费用为  $2 \cdot L(F_s)$ 。我们使用信用证  $adjust =$  表示在整个飞行过程中由微小调整产生的总行程距离。

吗?  $F_s \subseteq P \ 2L(f)$  到

注意，在完成沿外界某边的扫描后，我们需要进一步调整舰队编队，使其沿外界下一边平行扫描，如图 8(b)所示。这样的调整不会增加机队的飞行成本，因为最外层的无人机沿外层边界的飞行距离仍然最长。

算法 2 给出了对特定子区域的详细扫描过程。第一行构造了子集  $F_s$ 。线路 2 计算当机队穿越扫描线路时的总飞行成本。4-9 行引导舰队扫描目标  $F$  点，落在扫描线上并计算相应的飞行成本。

**3.2.4 理论分析。**我们进一步从理论上分析了该算法的最坏情况性能。直观地说，根据 PSA 的划分方案，PSA 每轮生成的凸多边形都是包含剩余未访问目标点的最小凸集，因此最优解每轮需要移动等于凸多边形周长的距离。这使得我们能够限制无人机编队飞行距离与 PSA 之间的差值，从而得到最优解。设  $L(PSA)$  和  $L(OPT)$  分别为算法 PSA 引起的无人机机队飞行距离和最优解。需要注意的是，在沿凸多边形移动或更准确地在扫描线之间穿越时，无人机机队需要沿扫描线调整和移动，以覆盖扫描线上的目标点。在下面的定理中，我们证明了相对于最优解，PSA 产生的额外旅行距离是  $L$  的上界  $adjust$ ，这通常是在沿凸多边形遍历时，由于微小的调整而引起的较短的移动距离。

**定理 1.** *PSA 与最优解之间的飞行距离差满足要求*  
 $L(PSA) - L(OPT) \leq L_{adjust}$ .

证明。在目标点访问问题中存在三个约束条件。覆盖约束要求我们扫描目标点集  $P$  中的所有目标点，这意味着我们必须扫描目标点凸包上的顶点。但由于连通性约束要求无人机实时连通性，无人机最大扫描宽度为  $w_{max}$ 。根据 PSA 的划分方案，每个子区域  $R_k$  为无人机编队沿凸多边形扫描的最大区域。因此，在最优解中，无人机编队需要在每个子区域  $R$  内飞行的距离  $k$  至少为  $L_k$ 。此外，正如  $L_{trans}$  为最外层边界到最内层边界的最短距离时，最优解还需要另一个旅行距离  $L_{trans}$  来将车队从最外层区域移动到最内层区域  $K_{area}$ 。由此，我们可以得到最优解  $L(OPT) \geq L_{trans} + \sum_{k=1}^K L_k$  的下界。

需要注意的是，PSA 算法生成的无人机编队飞行距离包含三个部分：距离  $L_k$  沿着凸多边形(这是最外面的无人机旅行的距离)，距离  $L_{trans}$  以及覆盖扫描线上目标点  $F_s$  所产生的距离  $2L(F_s)$ 。那么，总数是多少呢?  $K$  吗?

PSA 的运行距离为  $\sum_{k=1}^K L_k + L_{trans} + L_{adjust}$   $L$  在哪里  $adjust = \sum_{F_s \subseteq P} 2L(F_s)$ 。因此，相对于最优解，PSA 产生的额外行驶距离最多为  $L_{adjust}$ 。?

**4.实验结果与分析**

在本节中，我们进行了现场测试和模拟，以证明我们的 CoUAS 平台在模拟无人机合作和真实飞行方面的有效性。我们将在模拟器环境和现场测试中执行任务，证明我们的模拟器可以作为一个可靠的测试平台。



图 9 所示。三架无人机在现场测试(左)和模拟环境(右)完成 30 分任务时的轨迹。

4.0.5 单任务模拟器生成轨迹与现场测试轨迹的比较。我们首先设定了一个由 30 个目标点和 3 架无人机组成的机队组成的目标点访问任务。场地的长、宽设置为 120 米。所有的目标点都是在这个区域中随机生成的。缺省情况下，任务执行速度为 4m /s。通过提供的同步机制，当无人机移动到需要改变方向的地方时，它会检查与其他无人机的距离，并在必要时等待其他无人机，以保持全球连接。首先在模拟器中运行该任务，根据无人机训练的预测模型生成飞行轨迹并预测飞行能耗。然后，我们使用 Pixhawk 控制的带帧 QUAD 或 HEXA 的直升机和 APM 控制的带帧 QUAD 的直升机两种无人机进行了现场测试。根据 GPS 实时坐标计算飞行距离。飞行时间根据无人机上树莓派 3b 的系统时钟计算。通过计算从电源模块读取的电池的实时电压和电流来测量能耗。

图 9 显示了在我们的 CoUAS 模拟器中生成的轨迹(左)和现场测试(右)。从图中可以看出，在模拟器中生成的轨迹与现场测试的轨迹相似。现场试验中两个拐点之间的轨迹较为不规则，这是由于实际环境条件不稳定造成的。尽管如此，在检查了来自 CoUAS 的连通性管理和同步模块的日志数据后，我们发现车队在满足电池容量的同时，设法保持了连通性并访问了所有目标点。

4.0.6 单任务模拟与现场试验飞行距离和能耗比较对于同一任务，我们记录了模拟和现场试验中整个飞行过程的飞行距离和能耗。图 10 为其中一架无人机的飞行距离和能耗，该无人机为 Pixhawk 控制的框架 HEXA 直升机。从图中我们可以看出，在整个飞行过程中，在任何给定的时间，模拟和现场试验的飞行距离和消耗的能量都是一致接近的。

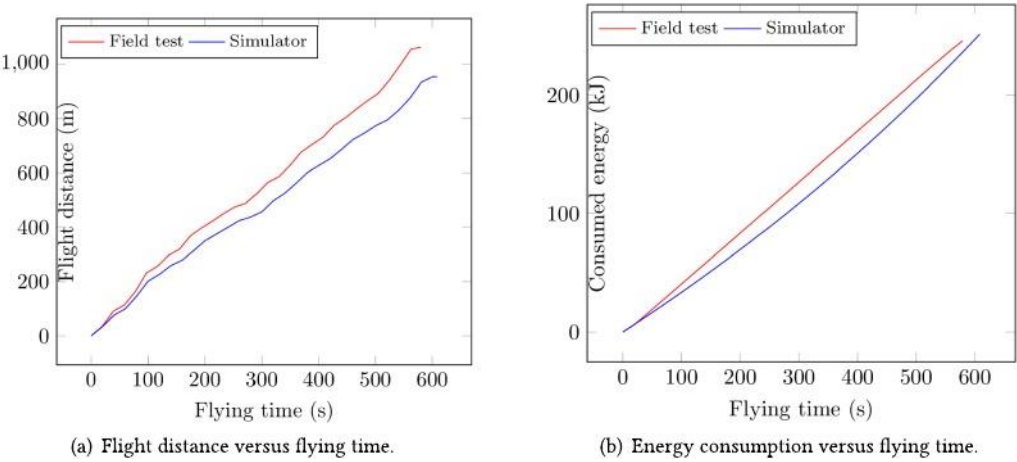


图 10 所示。单任务模拟和现场试验的飞行距离和能耗。

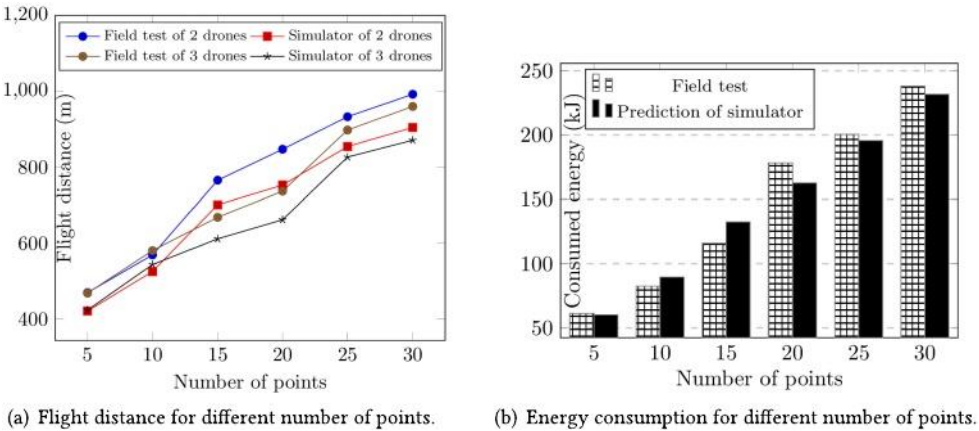


图 11 所示。目标点数量对飞行距离和飞行时间的影响。

4.0.7 多任务模拟与现场试验飞行距离、飞行时间、能耗比较 我们通过将目标点的数量从 5 个更改为 30 个来生成几个不同的任务。针对每个任务，生成路径规划并进行模拟和现场测试。每个任务记录飞行距离和能耗。

从图 11 可以看出，模拟飞行距离和能耗与多任务现场测试飞行距离和能耗非常接近。在能耗方面，现场试验与模拟装置平均相差 5.74%。这些都验证了模拟器能够可靠地反映真实的飞行情况。

5 相关工作

本文的重点是开发一个易于使用的统一框架，以方便多无人机应用程序的设计、部署和测试。本节主要回顾了相关的多无人机协同试验台和现有的路径规划工作。

多年来，针对多架无人机的试验平台设计[2,5,10,19]进行了一些研究工作。这种无人机的试验平台主要集中在固定翼无人机的控制上

不容易扩展到多旋翼无人机。近年来，多旋翼消费型无人机越来越受欢迎。多旋翼无人机试验台是最近才出现的。例如，集团移动系统自主(GAMS)[8]项目旨在为一架或多架无人机的精确控制提供分布式操作环境。OpenUAV 项目[26]提供了一个云支持的测试平台，包括标准化的 UAV 硬件和一个端到端仿真栈。Itkin 等人[11]提出了一种基于云的 web 应用程序，为四旋翼无人机提供实时飞行监控和管理，以检测和预防潜在的碰撞。Gazebo[13]和 AirSim[23]旨在提供包含真实场景的三维仿真环境，以支持航空三维重建和目标跟踪等研究。然而，很少有研究能够提供一个通用的平台来简化多无人机协同应用的设计和开发。此外，利用多架无人机之间的连接特性的研究较少。

在过去的几年里，许多研究工作[1,12,17,24]都研究了带覆盖约束的路径规划问题。但没有考虑多架无人机在飞行过程中的连通性需求。目前，仅有少数研究成果能够满足本文所考虑的无人机编队飞行过程中相同的连通性需求。Yanmaz 等人[27]和 Schleich 等人[22]开发和设计了分布式启发式路径规划算法，以覆盖给定区域并保持无人机的连通性。然而，它们既不能保证该地区的全面覆盖，也不能硬约束连接。最近，Tateo et al.[25]和 Charrier et al.[3]研究了多智能体连通寻路问题，为协作连通智能体访问给定的一组点。然而，该问题建立在离散环境的有限图上，而现实环境是连续的，并且没有考虑无人机在飞行过程中的在线同步和调整。

总之，据作者所知，目前缺乏可行的解决方案，无法提供一个通用框架/测试平台，以支持协同无人机机群控制/监控，并促进多无人机应用的部署。

6 结论

在本文中，我们开发了一个名为 CoUAS 的开源系统，使多架无人机能够在机队中进行协作。该系统提供通用接口，隐藏无人机硬件差异，便于无人机协同开发;提供同步与连通性管理、能量仿真、协同路径规划等一系列协同服务，为上层用户应用设计提供支持。我们进一步细化了在我们的 CoUAS 平台上提供的路径规划服务的主要算法，并通过仿真和现场测试评估了系统的性能，以验证所提出的系统的可行性。在 <https://github.com/whxru/CoUAS> 上发布了一个演示和源代码，供开放访问。

参考文献

[1] Antonio Barrientos, Julian Colorado, Jaime del Cerro, Alexander Martinez, Claudio Rossi, David Sanz, 和 João Valente. 2011。农业中的航空遥感:小型航空机器人舰队的区域覆盖和路径规划的一种实用方法。《野战机器人》。28,5(2011), 667-689。

[2] Jeremy W. Baxter, Graham S. Horn 和 Daniel P. Leivers. 2007。飞行代理:通过多代理系统控制一组无人机。《人工智能创新技术与应用国际会议论文集》。施普林格,219 - 230。

Tristan Charrier, Arthur Queffelec, Ocan Sankur 和 François Schwarzenruber。2019 年。连接代理的可达性和覆盖规划。第 18 届自主智能体与多智能体系统国际会议论文集。国际自治代理和多代理系统基金会, 1874-1876。

Thomas Clausen 和 Philippe Jacquet, 2003。优化的 OLSR (Link State Routing protocol)。RFC 编辑器。 <http://tools.ietf.org/html/rfc3626>。



[5] Michael A. Day, Michael R. Clement, John D. Russo, Duane Davis, Timothy H. Chung. 2015. 多无人机软件系统及仿真体系结构。国际无人机系统会议论文集(ICUAS' 15)。IEEE 426 - 435。

[6]收。2019.收 FlightHub。来自:<https://www.dji.com/flighthub>。

[7] Dronecode》2019。QGroundControl。来自:<http://qgroundcontrol.com/>。

詹姆斯·埃德蒙森, 2019 年。移动系统的群自治。检索来自:<https://github.com/jredmondson/gams>。

Lav Gupta, Raj Jain 和 Gabor Vaszkun. 2015. 无人机通信网络重要问题综述。IEEE Commun. 测量员导师, 18,2(2015), 1123-1152。

Jonathan How, Kuwata Yoshiaki, Ellis King. 2004. 无人机团队协同控制飞行演示。美国航空工业协会第三届无人无限技术会议论文集, Workshop and Exhibit. 6490。

Mason Itkin, Mihui Kim 和 Younghee Park. 2016. 基于云的无人机监控管理系统开发。传感器 16,11(2016), 1913。

Asif Khan, Evsen Yanmaz, Bernhard Rinner. 2015. 协同搜索的微型飞行器网络信息交换与决策。IEEE 反式。来讲,Netw. 系统 2,4(2015), 335-347。

内森·凯尼格和安德鲁·霍华德, 2004 年。设计和使用 Gazebo 的范例, 一个开源的多机器人模拟器。IEEE/RSJ 智能机器人与系统国际会议论文集(IROS' 04)(IEEE Cat. 第 3 卷 04CH37566 号。IEEE 2149 - 2154。

[14]李良智, 太田薰, 董绵雄。2018. 仿人驾驶:自动驾驶汽车经验决策系统。IEEE 反式。Vehic. 技术学报 67,8(2018), 6814-6823。

李婷, 太田薰, 王田, 李雄, 蔡志平, 刘安峰。2019. 通过无人机以更低的成本优化以信息为中心的物联网的覆盖范围。IEEE 通信学报, 2019,32(3):393 - 393。

卢克杰, 谢俊飞, 万燕, 傅胜利。2019. 面向基于无人机的机载计算。IEEE Wirel. 通讯. 26,6(2019), 172-179。

伊凡·马扎和阿尼巴尔·奥列罗。2007. 基于多边形区域分解和高效覆盖算法的多无人机协同搜索操作。在分布式自主机器人系统中施普林格,221 - 230。

[18] Xiangyun 孟, Wei Wang, Ben Leong. 2015. Skystitch:一种基于多无人机的基于拼接的协同实时视频监控系統。第 23 届美国计算机学会多媒体国际会议论文集 261-270。

[19] Nathan Michael, Daniel Mellinger, Quentin Lindsey 和 Vijay Kumar, 2010. 抓斗多微型无人机试验台。IEEE 机器人。奥特曼。杂志 17,3(2010), 56-65。

迈克尔·奥伯恩, 2019 年。任务计划。来自:<http://ardupilot.org/planner/>。

[21] Alena Otto, Niels Agatz, James Campbell, Bruce Golden, Erwin Pesch. 2018. 无人机(uav)民用应用的优化方法:综述。网络 72,4(2018), 411-458。

Julien Schleich, Athithyaa Panchapakesan, Grégoire Danoy 和 Pascal Bouvry. 2013. 具有网络连通性约束的无人机机队区域覆盖。第 11 届美国计算机学会移动管理与无线接入国际研讨会论文集 131-138。

2018 年, Shital Shah, Debadepta Dey, Chris Lovett 和 Ashish Kapoor. AirSim:为自动驾驶汽车提供高保真的视觉和物理模拟。领域和服务机器人。施普林格,621 - 635。

[24] P. B. Sujit 和 Randy Beard. 2007. 多无人机协同探索未知区域的路径规划。美国控制会议论文集。IEEE 347 - 352。

[25] Davide Tateo, Jacopo Banfi, Alessandro Riva, Francesco Amigoni 和 Andrea Bonarini. 2018. 多智能体连接路径规划:pspace 完备性及其处理方法。第 32 届 AAAI 人工智能会议论文集, 4735-4742。

开启无人机队, 2018。OpenUAV 项目。来自:<https://openuav.us/>。

[27] Evşen Yanmaz. 2012. 无人机网络的连通性与区域覆盖。IEEE 国际通信会议论文集(ICC' 12)。IEEE 719 - 723。

收到了 2019 年 10 月;修订后的 2020 年 1 月;2020 年 3 月接受