

空中运输系统的遥操作接口

通过

郑和, CHENLI

MSc 研究计划

布里斯托尔大学工程系

1 介绍

该研究期望利用Unity游戏引擎为航空运输系统开发一个定制的遥操作界面。遥操作界面将结合硬件(输入设备)和软件,创建人机界面(HCI);它将包括一个3D虚拟环境、模拟传感器和控制算法,以有效发挥地面控制站(GCS)的作用。该接口将允许用户远程控制一组无人机执行协同有效载荷运输任务。提案将介绍该项目的目的和详细目标,然后在支持的背景研究下详细阐述该项目的动机;风险和影响也将被考虑。

2 目的和目的

2.1 目标

该项目将使用Unity开发远程操作接口,并将其连接到多无人机运输系统,在单独的c++程序中运行,使用共享内存或其他技术,如机器人操作系统(ROS)通过TCP连接。这三个子系统:人机界面、无人机群和它们之间的链接将作为远程操作框架的本地站点、远程站点和通信通道。该项目将寻求和开发合适的图形用户界面(GUI)系统和人机交互方法(如键盘和手柄),以找到合适的方式来控制多无人机合作系统,为研究人员和用户提供更好的直观交互,增加态势感知。此外,Unity游戏引擎负责人机界面,构建逼真的户外环境和完整的用户界面,提供丰富的实验数据展示。然后,游戏引擎将帮助研究人员使用键盘、操纵杆甚至力反馈控制器构建更好的交互体验;遥控器也会进行模拟。这项研究还将与其他正在进行的调查合作,以协助和评估研究的算法和遥操作方法[1]。监督员将提供一个外部方案;它将模拟无人机、绳索和有效载荷的逼真动态模型,以及对每个飞行器的底层控制(基于pid的速度控制)。该程序将从远程操作界面启动,并在没有GUI的情况下运行。图2.1展示了整个项目的预期结构。

2.2 目标

1. 使用高效和通用的游戏引擎构建交互系统

本项目将选择Unity引擎进行开发。界面将作为一个基于Unity的地面控制站进行设计。我们还将使用unity构建一个高水平的控制系统,以确保同时控制多架无人机是可行的。然后,Unity将使用共享内存和ROS与无人机组(将在单独的c++程序中进行模拟)进行通信。

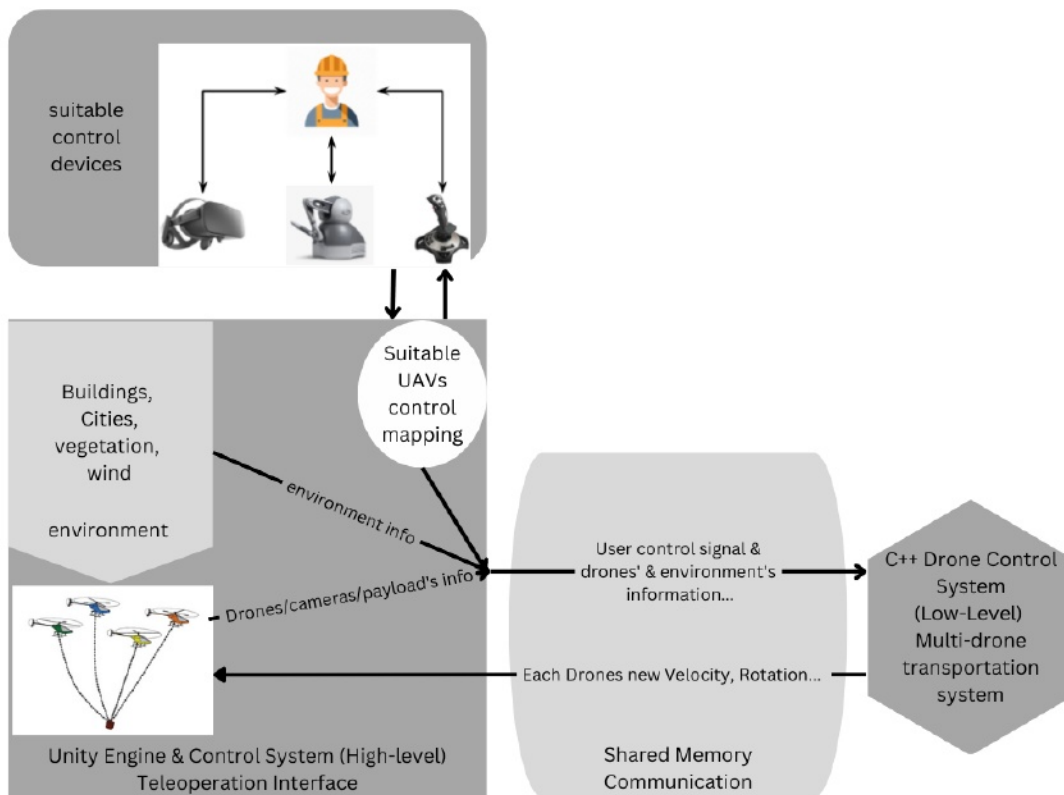


图2.1:项目结构

2. 搭建多架无人机运输测试的户外虚拟环境

Unity会获取环境信息(障碍物、风、建筑物和任何障碍物),然后将这些信息发送给c++控制程序,让无人机做出反应。这些任务需要在游戏引擎中灵活地找到/使用各种组件和资产。还需要实现算法来模拟风和其他可能的环境变量。

3. 构建用于详细数据显示的示例用户界面

- (a)用户应该能够直观地访问模拟的所有关键信息(多摄像头、高度、速度、轨迹、位置),并在屏幕上逻辑地组织它。
- (b)用户界面应该简单高效, windows文本布局整齐清晰(如果能支持各种语言会更好)。

Unity的UI组件将是实现这一目标的主要工具[2]。然而,他们也将依赖于其他已建立的组件来实现和细化。软件包可能需要多语言本地化。

4. 高级控制算法

- (a)遥操作控制,对用户输入进行处理(结合键盘、手柄、触觉设备等多种输入;过滤、映射功能)获得正确的轨迹/路径参考,以控制无人机的编队。
- (b)探索和评估当前的编队算法[1]。它将需要开发和研究运动控制、负载均衡和车辆定向,编队算法将被适应、测试

并随着项目的推进进行修改。

(c)开发合适的算法、接口和逻辑来表示实验数据。

以上这些需要c++、c#、编程、Unity引擎和共享内存知识，他们还需要更多的算法和机器人控制基础知识。

5. 实时数据共享

(a)该软件可能需要使用共享内存或其他技术进行读写，以便在游戏引擎软件和无人机的控制程序之间交换数据(可能需要在现实生活中模拟遥控命令，例如延迟)。

Read/write将使用共享内存进行独立协作;在Unity中将c++程序更改和修改为c#可能是最好的实用方法。可以使用机器人操作系统(ROS2)使用的数据分发服务(DDS)，从而与飞行控制程序(c++)[3]互操作。

6. 提供更好的工作体验。

(a)用户应能够通过键盘和鼠标在虚拟3D环境中控制多无人机系统。

(b)本研究将研究设计用户命令并将其映射到远程侧空中运输系统实际控制输入的最佳方式。用户应该能够快速有效地控制飞机，并实时接收有意义的反馈。

为了更好地控制和信息获取，将至少有一个操纵杆/手柄或力反馈/触觉设备(例如，3DOF Novint Falcon translational)来控制多无人机系统。Unity拥有丰富的经过验证的设备支持解决方案。然而，要找到正确的方法将控制信号与控制程序映射，还需要大量的研究和实践。

7. 可移植性

(a)该方案应适应其他类似的研究项目，并进行表面修改。

Unity支持多个平台，所以更多的技术要求将来自良好的代码开发、管理，以及适当的项目规划[2]。最终版本可以是一个构建软件或者一个可迁移的Unity项目文件来考虑。

8. 附加功能:尝试通过射线或射线追踪实现雷达探测;时滞;可以添加VR设备，以获得更身临其境的360度体验

通过游戏引擎实现类似雷达的效果会更简单。不过，该项目预计将实现更逼真的激光雷达扫描原理，需要更复杂的技术来实现和模拟雷达、激光雷达和点云可能会被开发。VR设备可能会提供更直观的控制反馈，所以执行VR功能将完成项目。该项目可能需要并考虑现实生活中的远程控制中的时间延迟情况。

3 动机

1. 测试平台要求

本项目进行了一些相关的研究。在[4]中，作者开发并模拟了一种无载荷的单无人机双边遥操作任务。在[5]中，提出了一种使用两架无人机自主协作的有效载荷运输方法。在[1]中，类似的控制技术被扩展并适应于n个无人机在向前飞行中运输有效载荷。这项研究是基于c++程序或MATLAB(Simulink)。这些研究方法在一定程度上帮助了研究。尽管如此，他们发现构建一个良好、高效的沉浸式户外3D环境(城市和其他充足的空间)具有挑战性，不能正确地模拟基于这些平台的研究的遥操作任务。类似的情况也发生在其他机器人仿真软件上，如Gazebo、Webots、CoppeliaSim和其他流行的仿真平台[6]。在这些情况下，更好的户外虚拟环境和物理系统对于更好的算法测试是必要的。

此外，早期项目不兼容多个平台(目前仅限于Windows)，对更繁荣、更灵活的工具/界面有很大的需求。研究团队可能需要大量的时间来开发传统模拟器上缺乏的功能。然而，大多数功能已经在游戏引擎上，因此集成和更快的测试方法是急需[7]。因为游戏引擎拥有更丰富的功能和可扩展性，所以它可能是一个理想的解决方案。

2. 遥操作系统需求

目前，控制蜂群无人机的方法仍在[8]探索中。本次研究将会找到一些合适的方法来同时控制几架无人机。更多的控制硬件支持和高度灵活的UI开发可以帮助我们找到控制蜂群机器人的可能方法。其他领域与无人机的人机交互研究值得借鉴和改进[9]。

使用便宜、标准的硬件很容易从控制器入手。手柄是一个很好的选择，因为它们合理、熟悉、高度可探索且准确。其他更昂贵的设备，如触觉反馈、智能控制器和飞机操纵杆，也值得考虑。

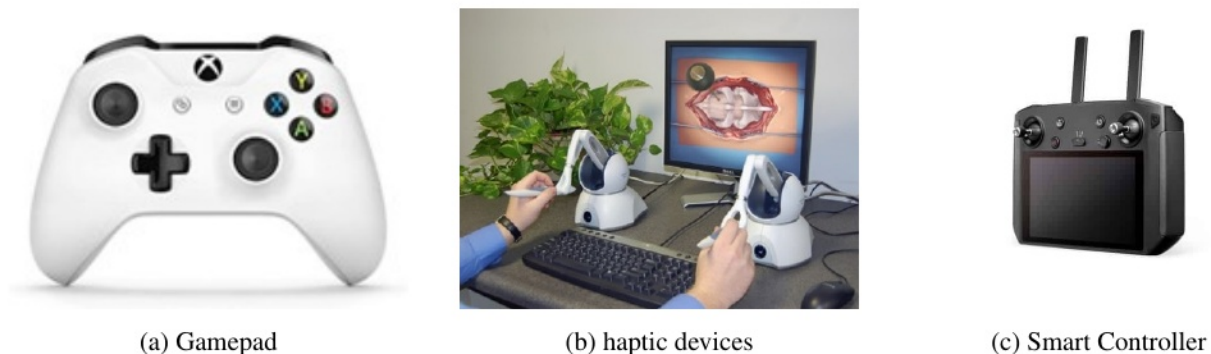


图3.1:一些无人机控制类型的设备

3. 用于运输的多无人机隐形传送

无人机在运输方面有着巨大的潜力，因为它们对空间的影响很小，可以更高效地运输货物[10]。单架多旋翼无人机在特定情况下(长距离、高重量货物)在功率和航程方面存在困难[11]。因此，协同的多无人机运输已经成为一个必不可少的研究领域[12][11][13][14]。但目前对于多无人机协同载荷运输和仿真的遥操作接口的研究仍然很少，因此本项目将丰富和探索这一领域，并给出更可靠和经过验证的解决方案。

与蜂群控制一样，多无人机飞行器更加复杂，需要解决的问题也更多。比如如何保持无人机之间的距离;如何协同工作，在克服障碍和风速的同时，保证货物的位置和轨迹稳定;如何克服高度差异，以及如何克服货物振荡。采用电缆连接可以缓解这些问题，更适合多无人机协同运输[1][12]。

虽然这个项目的重点不在算法的开发上，但是在开发测试环境之后仍然需要对算法进行部署和优化，因为这个项目之前的研究更多的是基于理想状态下的理论和仿真，所以在添加更多的环境变量之后很可能会出现新的问题，所以仍然需要对被测试的算法进行分析和评估甚至改进。

该项目将结合之前的研究[5][1]对遥操作和编队控制算法进行测试，使其适应于多升降机遥操作框架。之前的这些研究更多的是基于理论，环境仿真接近理想;相比之下，在这个项目中，在添加了更多的环境特征之后，很可能会出现新的问题，所以控制算法会随着项目的发展进行测试、分析和改进。

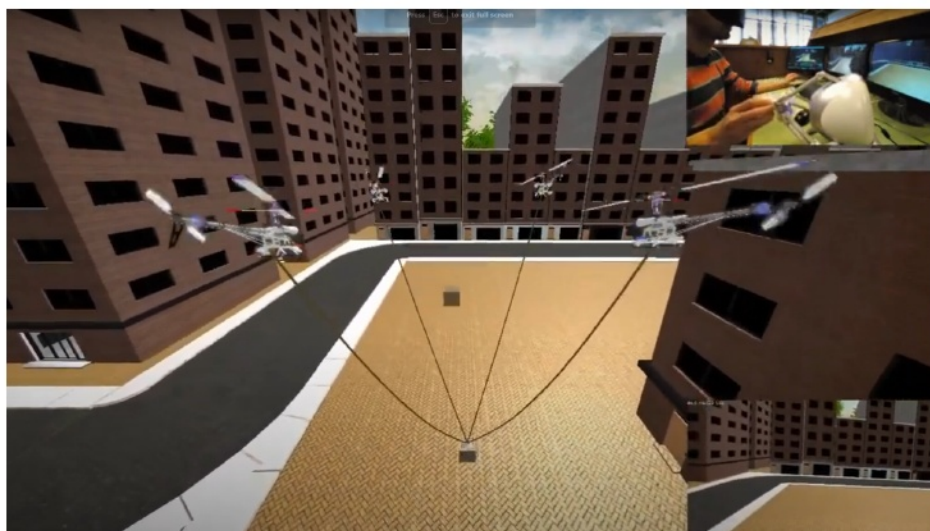


图3.2:多无人机遥操作任务展示[15]

4 文献综述

与无人机相关的和基于游戏引擎的项目已经在一定程度上模拟了现实环境和任务场景，值得借鉴和研究。[16][17]。尽管如此，遗憾的是，他们还没有进行任何或开发合作多无人机运输的仿真，或缺乏广阔的户外环境，也没有探索合作多无人机控制的场景。因此，这个项目仍然值得实施。

· 旋翼无人机和多无人机系统

-(多)旋翼无人机

无人机在今天已经非常流行，不同类型的无人机帮助世界各个角落的人们以更环保和高效的方式完成各种任务，特别是在运输、军事和侦察任务[10]。旋翼无人机的大部分能量都用于克服重力，因此其功率效率通常很低，有效载荷较少[18]。但必须承认的是，由于旋翼无人机可以悬停，易于控制，对空间的要求也比较小，而且精度高，活动多，非常适合低空和具有挑战性的地形；此外，固定/旋翼无人机的组合对于两种类型无人机的特性[19]也逐渐成熟。

-多无人机协同运输

如前所述，由于旋翼的出色机动性，无人机有望在中短程运输[12]中发挥更好的作用。由于单个无人机的范围和负载能力是最小的，多无人机合作(超过两个)可能是将负载很好地分散到多个无人机上的唯一解决方案[11][1]。

群无人机的控制算法一直是一个非常具有挑战性的课题[8]。解决方案包括但不限于并行控制、分布式控制、集中控制、神经网络控制和多方案协同控制，它们都能在一定程度上控制无人机群[8]。然而，它们都没有一个完美成熟的解决方案，空中多无人机运输领域也非常稀缺。本研究试图在集中控制的前提下，探索一种更加高效稳定的控制方案[1]，利用地面站结合特定的通信方式，对远处的无人机群进行集中远程操作，利用人工控制干预无人机群协同工作，当人工和协同控制系统成熟后，未来自动驾驶也将成为可能。

对多架携带悬浮载荷飞行的飞行器进行协调控制是一项具有挑战性和危险性的任务，因为悬浮载荷是一个摆动的摆锤，因此载荷可以显著改变飞行器的飞行特性。这种系统的编队结构是一个挑战，也是研究的目的，因为需要协调控制多架无人机，确保它们不碰撞，货物和无人机遵循规定的路线并避开障碍物。虽然几项研究提供了可靠的多无人机运输解决方案，但它们或多或少都没有考虑环境因素(风和障碍物)[4]的影响，因此本项目及其前身需要纳入生态元素，以更好地研究更可靠的多无人机控制机制。

· 遥操作系统

多无人机运输的遥控系统不会像消费级无人机遥控那样简单;它将需要能够控制远处的无人机,有时无人机处于危险区域或人类难以到达的区域,如4.1所示。通信以及如何管理和绘制无人机的状态成为非人机远程操作[20]中的关键因素。控制和通信的方法将是本节需要考虑的问题。

传统的无人机控制通常是通过专用的无线电控制(RC)遥控设备,这些设备通常具有较高的操作门槛。一些新兴和简化的无人机控制器允许较低的控制阈值,按钮更少,并且可以通过图3.1中的手机等移动设备充当显示器。然而,这些设备在设计之初并不能控制多架无人机。遥操作控制意味着有机会从地面集中控制和管理多架无人机。它们不像传统遥控器那样直接,但在距离、安全性和多终端管理[20][21]方面有更显著的优势。该项目将寻求和测试一些解决方案,使一些更便宜,更直接,更平易近人的控制方法用于复杂的UAV群控制。

远程是该项目的最终目标,因为UAV运输通常是远程的,并且在精度方面有特定的要求。Wi-Fi、9000MHz/2.1GHz/2.4GHz/5.8GHz长波信号等常用的控制方式,不足以实现远程控制。5G网络是可行的,但覆盖范围太小,4G覆盖范围更广,但其延迟太高,所以4G+5G甚至是添加特定技术可能是未来考虑的一个选项[22][21][20]。这个项目目前还不需要建设实际的地面基站。但是,有必要考虑和模拟控制程序中与远程通信相关的问题:延迟和丢包,当要传输大量信息[5]时,这些问题更加明显和关键。

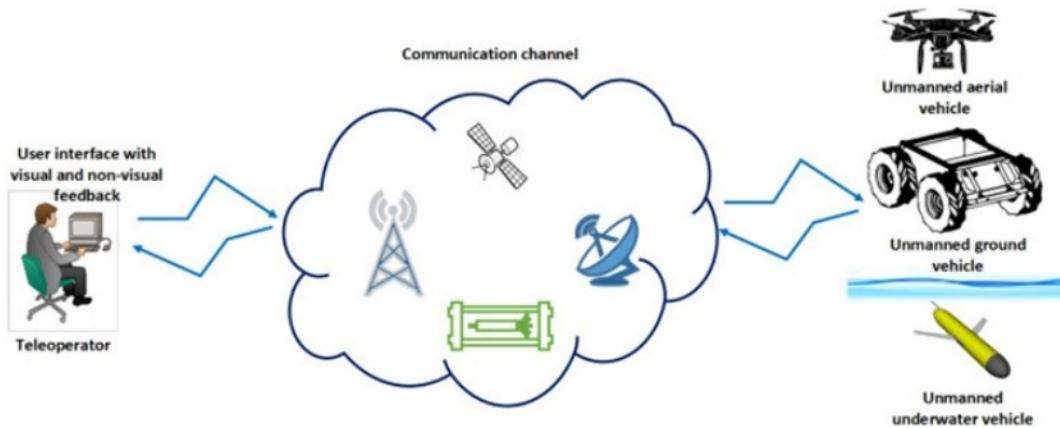


图4.1:遥操作结构

· 传统机器人仿真平台不足

在以往的研究活动中，尝试了CoppeliaSim、Gazebo、MAT-LAB (Simulink)等各种机器人仿真软件。然而，研究发现，许多期望的功能(如性能、户外3D、多平台、仿真场景、真实感和交互性)都被阻碍了[23][24][25]。市面上也有很多不同种类的机器人仿真平台，都有自己的定位，所以针对不同类型机器人的平台可能会非常其他的[6]。机器人模拟器确实已经发展得很好了。它们可以帮助测试和模拟早期的机器人开发过程，节省时间和成本，因此它们主要促进了研究和商业活动[26]。

然而，也许是因为它们更侧重于模拟，它们往往缺乏合适的用户界面和图形渲染能力或可扩展性和单一功能，以满足一些需要更全面和复杂环境的实验条件。一些较新的机器人模拟器已经发现了这些问题，并尝试将机器人模拟器与游戏引擎[6]集成。另一个可靠的解决方案是直接使用游戏引擎，因为它们也具有完整的m-simulation功能。试图构建一个有针对性的模拟引擎可能非常耗时且成本高昂。与此同时，一些预期开发的功能可能已经在主流游戏引擎中可用，因此直接从现有技术中创建新技术可能是一个很好的选择。

· 游戏引擎

-游戏行业在过去的几十年里不断发展，直接推动了专业3D引擎的不断迭代-游戏引擎变得越来越高效和高质量，达到了完全能够处理机器人模拟和研究[7]的地步。大多数游戏引擎包含以下系统:渲染引擎(包括2D和3D图形)、物理引擎、碰撞检测系统、音效、脚本引擎、计算机动画、人工智能、网络引擎和场景管理[27]。游戏引擎使游戏开发的效率大大提高。它还使机器人模拟和其他研究项目的效率大大提高，使开发人员能够更多地关注项目本身的实现，而不是底层的功能。许多研究和实验碎片的证据表明，用于机器人研究的游戏引擎已经成功应用[23][28][16][17]。

和大多数游戏引擎一样，Unity拥有游戏引擎的所有特性和功能。但是，Unity有突出的优势，比如坚实的开发者支持、最大的社区、多平台支持、资产存储等[2]。所以这个项目使用Unity作为主要工具是可行的。

· 机器人操作系统

机器人操作系统(robot Operating System, ROS)是一种专门为机器人软件开发设计的计算机操作系统体系结构。它是一个开源的元操作系统(后操作系统)，提供类似操作系统的服务，包括硬件抽象、底层驱动管理、标准函数执行、跨编程消息传递、包管理以及用于获取、构建、编写和执行多计算机融合程序[29]的工具和库。Unity引擎和ROS已经有了更成熟的互操作性解决方案，这使得Unity能够更好地执行机器人仿真任务[24][3][7]。ROS可能会在这个项目的实施阶段使用，以帮助程序之间的通信，也可能使用一些功能来改进无人机的现实行为，所以ROS也是一个值得考虑的工具

5 影响评估

· 社会/文化

首先，该项目最有可能促进多无人机协同运输。对于多旋翼无人机可以带来[8][5]的额外潜力存在巨大的潜在需求。

该项目也有望为一些残疾人士提供帮助。由于该项目设想了丰富的视觉界面和体感控制(振动或力/触觉反馈)，有听力障碍和残疾的人可以通过视觉或肝脏以更直接的控制方式获取必要信息。该项目希望将机器人产业带给更广泛的受众，并激发非研究人员的兴趣。由于该项目旨在实现多平台，并基于游戏引擎，预计更广泛的人群可以在更广泛的设备上使用相关扩展。科学机器人和运动学在游戏行业的发展可以显著增加游戏的真实感和趣味性，这一方面可以让游戏开发变得更好，另一方面也可能激发特定人群对科学[7]的兴趣。

· 技术

正如前一篇文章和前一节所述，该项目无疑首先对无人机行业做出了贡献。此外，该项目有望丰富和多样化研究活动。所使用的场景仍然基于物理世界，数据的呈现方式几乎相同。所以，它在一定程度上可以应用到其他机器人项目中。它还应该有助于一些研究人员更好地验证他们的程序和设计，同时在可扩展性和可变性方面具有丰富的灵活性。研究实验可以更专注于项目的前期开发，让他们在虚拟世界中实验想法和解决方案，而不用担心现实生活中的因素(安全、环保、成本)[26]。而且，科学家可以快速地进行更多的实验和迭代，处理/收集更多的实验数据。也许这对未来AI或大数据相关的研究也有帮助。然而，必须考虑的一个问题是，游戏引擎/机器人模拟器并不能完全模拟现实世界的因素(如复杂的空气动力学和更具体和严格的力学)[26]。和其他机器人仿真平台一样，它们只是对算法和基础物理的参考;它们不能作为实验后期的绝对参考。研究人员必须意识到这一点，这可能在某种程度上具有误导性。

· 环境

该项目预计将对环境非常友好。该项目只需要以网络和计算机为基础，需要非常少的电力、网络和存储消耗。因此，环境问题更多的是内置于计算机本身[30]。该项目没有使用很多材料和环境来建造无人机和任务场景，从而在很大程度上避免了必须在现实世界中模拟实验的问题。实验人员必须在虚拟场景中尝试各种系统。因此，目前项目本身是非常安全环保的。然而，在项目后期部署多架无人机时，问题变得更加复杂。虽然无人机确实一定程度上减少了二氧化碳和其他空气污染物，但它们造成了其他问题[31]。无人机的噪音、螺旋桨和碰撞

很可能对植物、鸟类和其他动物(包括人类)造成严重伤害,并可能危及其他飞机。无人机上的零件和货物也可能被空投,导致安全事故和财产损失。此外,无人机电池等部件仍存在环境问题[32][31]。不过,该项目旨在协同使用小型无人机,小型无人机比大型无人机更环保[1]。这些因素并不是该项目目前需要考虑的问题,而是未来需要考虑和解决的问题,主要是在大规模实施时。

· 道德

由于该项目目前是在虚拟环境中构建的,不太可能收集现实生活中的数据,因此不存在隐私或其他人的数据安全问题。这个项目唯一需要的信息是收集和使用潜在的逼真的城市建筑综合体的建模和地图,以及将从多个测试用户收集的关于他们的经验的反馈(性别和残疾,不提供姓名)。真实世界的地图信息将来自公开许可的资源(谷歌, Bing Maps)。值得注意的是,这个项目的后续工作将在现实生活中的进行。噪音、安全、隐私等问题一直是无人机[33][31]的伦理问题。虽然该项目目前不会有针对这些问题设计的实际实验,但在未来的研究中仍然有必要考虑这些问题,以便在未来研究的项目模拟场景中适当考虑这些问题。

· 经济

项目的整体经济效益应该非常显著。首先,它不需要来自早期项目或研究开发的各种场景的真实验证,因此不需要购买大量的实验设备(如计算机、3D模型、材料文件、文献和算法)。因此,有显著的研究成本(设备、维护、实验空间)节省。此外,研究人员可以基于模拟环境更快更高效地尝试更多的解决方案,从而加快整体项目的进度。项目软件可以重用和迭代,创建更通用的仿真软件,更好地促进研究活动,从而形成良性循环。此外,多架无人机协同工作意味着可以使用大量的、相对较多的小型无人机,而较小的无人机往往是更便宜的[1]。同时,它们的备件也更实惠,更容易获得,更换和维修也更灵活。

· 政治

政府更倾向于投资低成本、高回报的项目。正因为这些优势,该项目不会遭到国家或政府的反对,因为它会在一定程度上促进技术发展。

· 法律

由于数字形式的信息更容易被抄袭和复制,这个项目涉及的问题更有可能与版权有关。该项目将确保使用的资源是合法的(来自正规和允许的来源)。项目将不会公开,版本控制平台(GitHub)将是私有的,未来的任何商业活动都将是合法和合规的。此外,由于涉及到无人机,需要遵守关于无人机[34]的法律法规,这将需要体现在这个项目中(例如禁飞区、高度限制)。

6 风险登记

数值越高，意味着更有可能发生或产生更严重的影响。风险得分越高，意味着需要对该风险给予更多关注。

Risk	Mitigation	Likelihood	Impact	Risk score
Software (game engine) fail/corrupts, loose unsaved progress	Save the project frequently. A version control platform should be used (GitHub, Plastic SCM) to continually update.	4	3	12
losing project files	Frequent Backup is mandatory	1	4	4
Late Support from Supervisor	Take the initiative to follow up and communicate with the supervisor regularly.	2	3	6
Control devices' late support	At least one of the control hardware should be available (Gamepad, keyboard & mouse); use the existing devices first.	2	4	8
The computer broke/lost	Backup project files to cloud/disk every day (GitHub, OneDrive/hard disk)	1	4	4
Combination of ROS & Unity failed	More research and self-study on ROS and Unity. ask the supervisor for help(permitted)	1	4	4

表6.1:风险登记表，风险评分=可能性(1 ~ 4)x影响(1 ~ 4)

7 项目时间线

时间管理将分为三个部分，详细信息如图7.1所示

1. 第一部分是项目分配，通过了。
2. 第二部分是项目的发展。软件开发和与硬件的集成将在这一部分实施和完善;一些任务是重叠的，这意味着这些任务应该同步执行;这些任务是不相互依赖的，但可以同时完成，以提高效率，并确保项目保持在正轨上，因为项目的每个元素都有相似和正确的进展。
3. 最后一部分是论文写作，一旦基本和核心的项目目标已经实现，就可以开始论文写作。

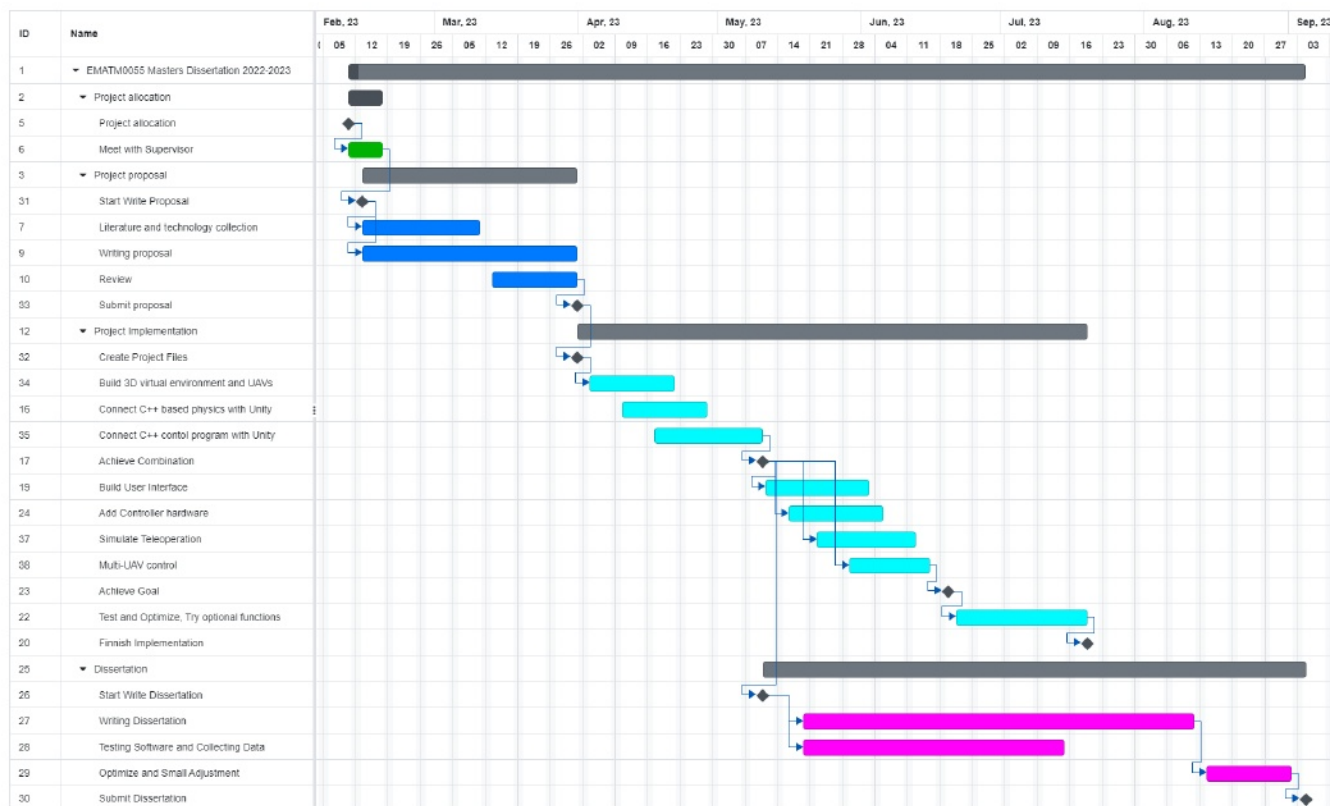


图7.1:项目时间线甘特图

参考文献。

- [1] L. R. Salinas, J. Gimenez, D. C. Gandolfo, C. D. Rosales, and R. Carelli, Unified motion control for multilift unmanned rotorcraft systems in forward flight, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* [online] 2023, pp. 1–15, 2023. DOI: 10.1109/TCST.2023.3240541.
- [2] U. Technologies, *Unity user manual 2021.3 (lts)*. available from: <https://docs.unity3d.com/Manual/index.html>.
- [3] M. Pinol, *Simulating robots with ros and unity*, Oct. 2022. available from: <https://resources.unity.com/unitenow/onlinesessions/simulating-robots-with-ros-and-unity>.
- [4] J. Gimenez, D. C. Gandolfo, L. R. Salinas, C. Rosales, and R. Carelli, Multi-objective control for cooperative payload transport with rotorcraft uavs, *ISA transactions*, vol. 80 2018, pp. 491–502, 2018.
- [5] L. R. Salinas, E. Slawiński, and V. A. Mut, Complete bilateral teleoperation system for a rotorcraft uav with time-varying delay, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015 2015, 2015.
- [6] J. Collins, S. Chand, A. Vanderkop, and D. Howard, A review of physics simulators for robotic applications, *IEEE Access*, vol. 9 2021, pp. 51 416–51 431, 2021.
- [7] J. Linnell, *Robots are hard, game engines are not: Why we built our own simulator using unity*, Oct. 2022. available from: <https://resources.unity.com/ai-ml-content/robots-are-hard-game-engines-are-not-why-we-built-our-own-simulator-using-unity>.
- [8] Y. Tan and Z.-y. Zheng, Research advance in swarm robotics, *Defence Technology*, vol. 9, no. 1 2013, pp. 18– 39, 2013.
- [9] J. Irizarry, M. Gheisari, and B. N. Walker, Usability assessment of drone technology as safety inspection tools, *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, vol. 17, no. 12 2012, pp. 194–212, 2012.
- [10] M. Hassanalain and A. Abdelkefi, Classifications, applications, and design challenges of drones: A review, *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 91 2017, pp. 99–131, 2017.
- [11] K. Mohammadi, M. Jafarinasab, S. Sirouspour, and E. Dyer, “Decentralized motion control in a cabled-based multi-drone load transport system,” in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2018, pp. 4198–4203. DOI: 10.1109/IROS.2018.8593952.
- [12] D. K. Villa, A. S. Brandao, and M. Sarcinelli-Filho, A survey on load transportation using multirotor uavs, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 98 2020, pp. 267–296, 2020.
- [13] S. Barawkar and M. Kumar, Force-torque (ft) based multi-drone cooperative transport using fuzzy logic and low-cost and imprecise ft sensor, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 2023, p. 09 544 100 231 153 686, 2023.
- [14] T. R. R. Staff, *Small drones team up to carry heavy packages*, Mar. 2021. available from: <https://www.therobotreport.com/drones-team-up-to-carry-heavy-packages/>.
- [15] *Teleoperation of unmanned rotorcrafts transporting a cable-suspended load - Unity with Oculus Rift*. YouTube, Feb. 2019. available from: https://www.youtube.com/watch?v=keUsXU_zHGw.

- [16] S. Shah, D. Dey, C. Lovett, and A. Kapoor, “Airsim: High-fidelity visual and physical simulation for au-tonomous vehicles,” in *Field and Service Robotics: Results of the 11th International Conference*, Springer, 2018, pp. 621–635.
- [17] Y. Song, S. Naji, E. Kaufmann, A. Loquercio, and D. Scaramuzza, “Flightmare: A flexible quadrotor simu-lator,” in *Proceedings of the 2020 Conference on Robot Learning*, 2021, pp. 1147–1157.
- [18] R. Andrade, G. V. Raffo, and J. E. Normey-Rico, “Model predictive control of a tilt-rotor uav for load transportation,” in *2016 European Control Conference (ECC)*, IEEE, 2016, pp. 2165–2170.
- [19] K. N. Tahar and A. Ahmad, An evaluation on fixed wing and multi-rotor uav images using photogrammetric image processing, *International journal of computer and information engineering*, vol. 7, no. 1 2013, pp. 48– 52, 2013.
- [20] A. Y. Mersha, S. Stramigioli, and R. Carloni, On bilateral teleoperation of aerial robots, *IEEE Transactions on Robotics* [online], vol. 30, no. 1 2014, pp. 258–274, 2014. DOI: 10.1109/TRO.2013.2281563.
- [21] A. Franchi, C. Secchi, H. I. Son, H. H. Bulthoff, and P. R. Giordano, Bilateral teleoperation of groups of mobile robots with time-varying topology, *IEEE Transactions on Robotics* [online], vol. 28, no. 5 2012, pp. 1019–1033, 2012. DOI: 10.1109/TRO.2012.2196304.
- [22] M. Moniruzzaman, A. Rassau, D. Chai, and S. M. S. Islam, Teleoperation methods and enhancement tech-niques for mobile robots: A comprehensive survey, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 150 2022, p. 103 973, 2022.
- [23] C. Bartneck, M. Soucy, K. Fleuret, and E. B. Sandoval, “The robot engine —making the unity 3d game engine work for hri,” in *2015 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Com-munication (RO-MAN)*, 2015, pp. 431–437. DOI: 10.1109/ROMAN.2015.7333561.
- [24] U. Technologies, *Robotics simulation*. available from: <https://unity.com/solutions/automotive-transportation-manufacturing/robotics>.
- [25] A. Juliani, V.-P. Berges, E. Vckay, *et al.*, Unity: A general platform for intelligent agents Sep. 2018, Sep. 2018.
- [26] H. Choi, C. Crump, C. Duriez, *et al.*, On the use of simulation in robotics: Opportunities, challenges, and suggestions for moving forward, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118, no. 1 2021, e1907856118, 2021.
- [27] J. Gregory, *Game engine architecture*. crc Press, 2018.
- [28] A. Salomão, F. Andaló, and M. L. H. Vieira, “How popular game engine is helping improving academic research: The designlab case,” in *Advances in Human Factors in Wearable Technologies and Game Design: Proceedings of the AHFE 2018 International Conferences on Human Factors and Wearable Technologies, and Human Factors in Game Design and Virtual Environments, Held on July 21–25, 2018, in Loews Sapphire Falls Resort at Universal Studios, Orlando, Florida, USA 9*, Springer, 2019, pp. 416–424.
- [29] M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, *et al.*, “Ros: An open-source robot operating system,” in *ICRA workshop on open source software*, Kobe, Japan, vol. 3, 2009, p. 5.
- [30] B. V. Kasulaitis, C. W. Babbitt, R. Kahhat, E. Williams, and E. G. Ryen, Evolving materials, attributes, and functionality in consumer electronics: Case study of laptop computers, *Resources, conservation and recycling*, vol. 100 2015, pp. 1–10, 2015.

- [31] *Delivery drones and the environment*, Mar. 2021. available from: <https://www.eea.europa.eu/publications/delivery-drones-and-the-environment>.
- [32] J. Koiwanit, Analysis of environmental impacts of drone delivery on an online shopping system, *Advances in Climate Change Research* [online], vol. 9, no. 3 2018, pp. 201–207, 2018, ISSN: 1674-9278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.accres.2018.09.001>. available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674927818300261>.
- [33] R. Luppigini and A. So, A technoethical review of commercial drone use in the context of governance, ethics, and privacy, *Technology in Society* [online], vol. 46 2016, pp. 109–119, 2016, ISSN: 0160-791X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2016.03.003>. available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160791X16300033>.
- [34] *Flying drones and model aircraft*. available from: <https://register-drones.caa.co.uk/>.