空间邻近性对无人机服务的影响

Vejaykarthy Srithar 悉尼大学 悉尼，新南威尔士州，澳大利亚
vsri6304@uni.sydney.edu.au

Syeda Amna Rizvi 悉尼大学 悉尼，新南威尔士州，澳大利亚
amna.rizvi@sydney.edu.au

Amani Abusafia 悉尼大学 悉尼，新南威尔士州，澳大利亚
amani.abusafia@sydney.edu.au

Athman Bouguettaya 悉尼大学 悉尼，新南威尔士州，澳大利亚
athman.bouguettaya@sydney.edu.au

Balsam Alkouz
悉尼大学 澳大利亚新南威尔士州悉尼
balsam.alkouz@sydney.edu.au

arXiv:2601.02210v1 [cs.ET] 5 Jan 2026

摘要
我们展示了近距离飞行的无人机之间的点对点影响。了解这些影响对于规划高效的无人机配送服务至关重要。为此，我们在不同风况下，使用无人机在三维空间中的不同位置开展了一系列实验。我们收集了无人机在空中航道区段内飞行时的能耗数据。我们开发了一种图形用户界面（GUI），用于绘制无人机在某一区段内的轨迹。该图形用户界面便于分析无人机之间相互影响对其能耗的作用。分析内容包括无人机的位置、分离距离以及风的影响。

CCS 概念
• **以人为中心的计算 → 普适与移动计算**。

关键词
无人机、无人机服务、物联网、无人机配送、无人机编队、无人机效率、空中航道网络

ACM 引用格式：
VejaykarthySrithar、Syeda Amna Rizvi、AmaniAbusafia、Athman Bouguet-taya 和 Balsam Alkouz。2024。《空间邻近性对无人机服务的影响》。载于*2024*年 *ACM* 普适与泛在计算国际联合会议伴会（*UbiComp Companion '24*），*2024*年*10*月*5*日至*9*日，澳大利亚维多利亚州墨尔本。ACM，纽约州纽约，美国，4页。https://doi.org/10.1145/3675094.3677555

1 引言
无人机配送服务的迅速普及，反映出无人机在城市地区中的日益广泛应用。SESAR 于 2016 年开展的一项研究预测，到 2050 [5] 年，欧洲将有 100,000 架无人机。近期研究借助服务范式对无人机即服务进行建模 [4]。这些无人机服务通常运行于空中航路网络中，即由相互连接的一组节点构成的网络。节点是建筑屋顶，可作为充电站或配送目的地。由于电池容量有限，在长距离配送中，无人机可能会在节点处充电。这些节点通过空中航路段相互连接。空中航道区段是延伸于两个相邻屋顶建筑之间的空中空间，为无人机从一栋屋顶建筑飞往另一栋建筑提供视距（LoS）通道。

近期研究主要致力于确定无人机在空中航路网络中的最优路径 [4]。该最优路径由能够实现高效包裹配送的区段集合定义。然而，对无人机配送日益增长的需求给空中航道区段有限的空域带来了压力 [3]。因此，近距离运行的无人机可能会相互影响。例如，较高位置无人机产生的下洗力可能会影响较低位置无人机的能耗 [1]。因此，无人机可能偏离其最优路径，从而显著增加碰撞风险。此外，由于螺旋桨和电池承受的额外负荷增加了充电需求，包裹配送也可能因此延迟。因此，研究无人机之间相互影响的能耗至关重要。

现有研究从能耗角度研究了无人机群之间的相互影响 [1]。研究人员展示了不同编队（V形、梯队形、纵列、横列）中每架无人机的能耗。然而，他们没有考虑无人机在三维空间中的相对位置，即垂直、水平和对角位置。据我们所知，目前尚无研究分析处于不同相对位置的无人机之间对彼此能耗的影响。本文首次分析空间邻近性对无人机能耗的影响。我们开展了实验，记录无人机在以下情况下飞行时的电池消耗：（1）单独在一个区段内飞行；（2）在同一区段内有其他无人机存在时飞行，并设置不同距离和不同风况。最后，我们提供了一个图形用户界面（GUI），用于绘制无人机在某一区段内的轨迹。该GUI有助于分析在另一架无人机存在的情况下，不同空间距离对无人机电池消耗的影响。

2 概述
本节介绍我们的实验设置、数据收集流程和平台界面。

2.1 室内无人机测试平台
出于安全考虑，室外环境不适合用于实验。政府法规限制无人机在某些区域飞行 [2]。实验采用室内测试平台。该测试平台是一个小比例模型，尺寸为 4m x 5m x 1.7m，仿照悉尼中央商务区建造。为简化问题，我们仅考虑两个节点，分别作为源节点和目的节点

特此授权，可免费出于个人或课堂用途制作本作品的全部或部分数字副本或纸质副本，但不得为营利或商业利益而制作或分发副本，且副本首页须附上本声明及完整引文。本作品中第三方组件的版权必须得到尊重。如需用于其他用途，请联系所有者/作者。*UbiComp Companion '24*，*2024*年*10*月*5*日至*9*日，澳大利亚维多利亚州墨尔本© 2024 版权所有者/作者所有。ACM ISBN 979-8-4007-1058-2/24/10 https://doi.org/10.1145/3675094.3677555

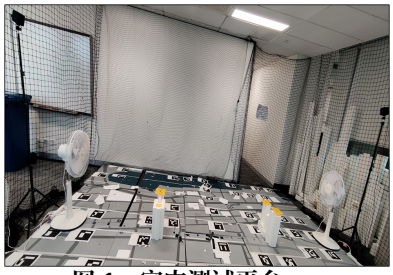


图 1：室内测试平台

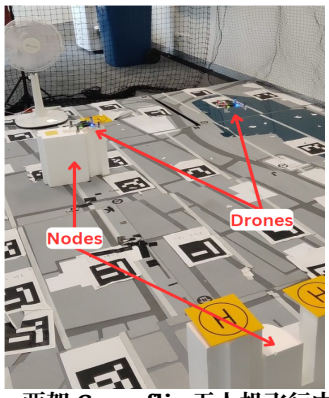


图 2：两架 Crazyflie 无人机飞行中

节点。这些节点是建筑物的 3D打印模型，每个模型都配备了两个充电垫。源节点与目的节点之间的空中航道区段长度为 1.4 米（见图 1）。我们使用了两架 Crazyflie 2.1 纳米四旋翼无人机[1]。我们使用了两个 HTC Vive V1 基站，它们会发射红外激光。这些激光由安装在无人机上的 Lighthouse 定位系统扩展板接收，从而在实验环境中实现精确定位。风由一台型号为 PPFC40DCWH 的 FANCO 直流落地扇产生。

2.2 实验与数据收集

我们在室内无人机测试平台上进行了多项实验，以了解无人机之间相互影响的程度。实验在设置、位置以及与其他无人机的距离方面有所不同。我们使用 Python 脚本收集了各种无人机参数，以评估其对电池消耗率的影响。为此，我们收集无人机单独运行以及与其他无人机处于同一航段时的电池电量。此外，我们还记录其 X、Y、Z 坐标、横滚、俯仰和偏航，以追踪无人机轨迹的稳定性。在不同风况和分离距离下，我们采集了不同点对点空间位置的数据。对于空间位置，我们考察了沿 x、y 和 z 轴的多个分离距离（即 0.3 米、0.4 米、0.5 米、0.6 米、0.7 米、0.8 米和 1 米）。无人机的初始电池电压约为 4.1 伏。我们共进行了 224 次无人机飞行。

我们使用 Crazyflie 的 Python API 与无人机通信。无人机根据输入坐标和速度，以不同距离从源节点飞往目的节点。

随后，我们记录无人机在不同空间距离下运行时对电池消耗产生的点对点影响。我们还在受控条件（即不同风速和风向）以及非受控条件（即无风）下进行了实验。

[1]https://www .bitcraze .io/products/crazyflie -2-1/

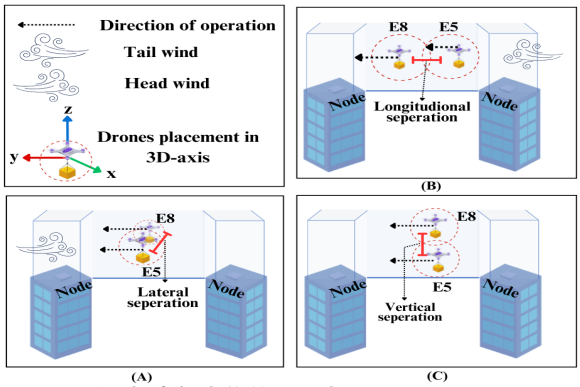


图3：无人机空间定位的不同类型*2.2.1* 非受控条件下的空间位置。我们在非受控风况（即无风）下进行这组实验。在每次实验中，我们记录无人机从源节点飞往目的节点时的电池消耗。首先，我们记录无人机单独从源节点飞往目的节点的情况。随后，我们让两架无人机处于五种不同的空间位置，重复进行实验。这样，我们便能分析点对点位置对无人机电池消耗的影响。此外，我们还重复了相同的五组实验，同时增大两架无人机之间的间距。下文将介绍空中航道区段中所有可能的无人机点对点空间位置。

(1)并排： 无人机在相同高度（即 z轴）上沿 y轴运行，但在 x轴方向上存在横向间隔 （见图 3(A)，其中 E5 无人机位于 E8 无人机左侧）。**(2)前后排列：** 两架无人机在相同的 z轴高度上沿 y轴运行，并在 x轴方向上保持纵向分离距离 （见图 3(B)，其中 E5 无人机在前，E8 无人机在后）。**(3)上下排列：** 一架无人机沿相同的 y轴在比另一架更高的高度（即 z轴）运行（见图 3(C)，其中 E5 无人机在下方运行，E8 无人机在上方运行）。

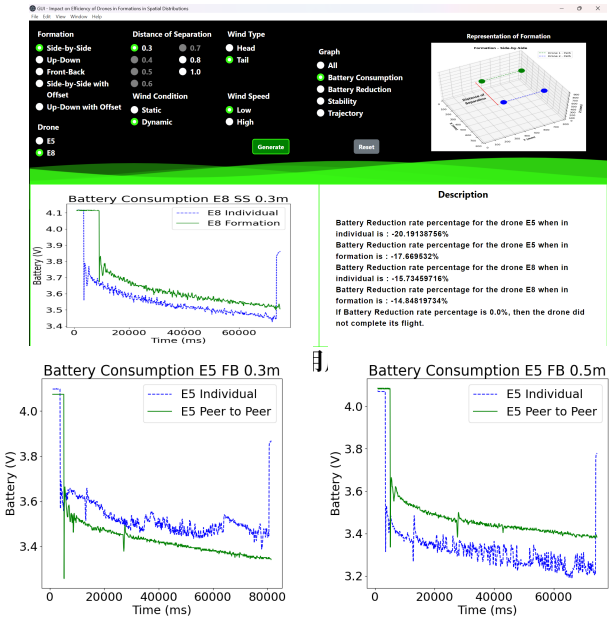
(4)错位并排： 无人机以相同高度飞行，并沿 x轴 分开。一架无人机沿 x轴 领先飞行。另一架无人机与领航无人机保持固定横向偏移（即沿 y轴 偏移），且位于领航无人机后方。

(5)错位上下排列： 一架无人机位于上方，另一架位于下方。无人机沿 y轴 同一直线飞行，但在 z轴 方向上分开，并沿 y轴 保持固定偏移。

2.2.2 受控条件下的空间位置。在这组实验中，我们分析了受控条件（即不同风况）下，无人机间点对点电池消耗的影响。为此，我们考察了上述空间位置在四种外部风况下的表现：高速逆风、低速逆风、高速顺风和低速顺风。逆风时，风扇放置在目的节点后方并朝向源节点；顺风时，风扇放置在源节点后方并朝向目的节点。高速和低速的风速设置分别为 7.6 km/hr 和 6.1 km/hr，因为更高的风速会导致无人机变得非常不稳定。

2.3 图形用户界面

我们使用 ElectronJS 开发了一个图形用户界面，用于显示无人机单独运行以及有其他无人机在场时的电池消耗曲线（见图 4 ）。用户可以输入点对点空间位置、间距、风向和



(a) 分离距离 - 0.3m **(b) 分离距离 - 0.5m**

图5：无风条件下前后空间位置中，E5在不同分离距离下的电池消耗

风速。该图形用户界面省去了手动解析大量 CSV 文件的工作，起到了辅助作用。它还会根据用户的选择，简要总结不同条件下点对点影响对无人机电池消耗的影响。

3 结果

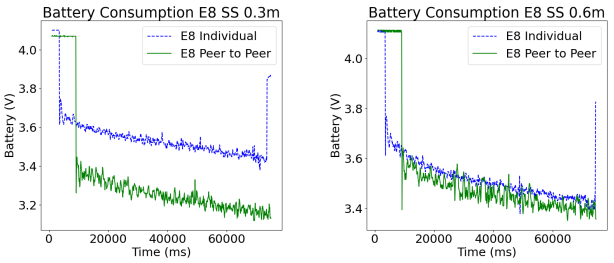
对收集到的数据进行分析时，我们绘制了电池消耗百分比、电池消耗、轨迹、横滚、俯仰和偏航图。我们重点关注无人机在不同空间位置飞行时的电池消耗。结果表明，在大多数情况下，无人机近距离运行时，点对点影响会增加其电池消耗。下文将结合不同风况，详细分析各空间位置下的点对点影响。

3.1 非受控条件下的影响

在非受控条件下（即无风），所有空间位置和分离距离下，两架无人机的电池消耗都受到负面影响。对于并排和错位并排这两种空间位置，当无人机之间的距离小于约 0.5 米时，影响便开始显现。对于前后排列和错位上下排列，随着分离距离增加，影响会减弱。如图 5a 所示，E5 无人机在 E8 无人机附近运行时，比单独运行时消耗更多电池。然而，随着 E8 无人机与 E5 无人机之间的纵向分离距离增大，后方无人机的电池消耗会减少（见图 5b）。这主要是因为前方飞行的 E8 无人机产生的上洗力提供了升力。

3.2 受控条件下的影响

在受控条件下（即不同的风速和风向），无人机的电池消耗同时受到空间邻近性和外部风的影响。我们讨论每种空间位置下最显著的观察结果。

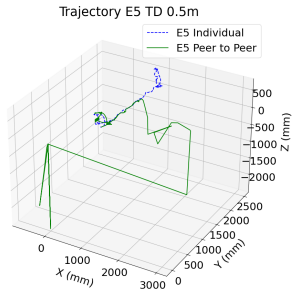


(a) 分离距离-0.3m **(b) 分离距离-0.6m**

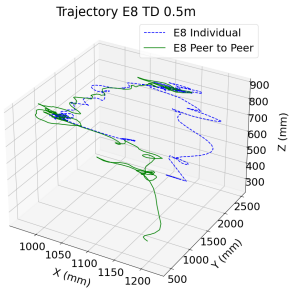
图6：高速逆风条件下并排飞行的 E8 无人机电池消耗

在无人机并排空间位置下，E5 和 E8 无人机在高速逆风中近距离运行时会消耗更多能量。如图 6a 所示，E8 无人机有邻近无人机（即 E5）时比单独运行时消耗更多能量。然而，当 E8 无人机与邻近无人机之间的横向间隔为 0.6m 时，其能量消耗与单独运行时大致相同（见图 6b）。

在上下空间位置中，较低高度飞行的无人机（即 E5）经常偏离其计划轨迹（见图 7a）。飞行不稳定主要是由风况和相邻无人机的影响造成的。然而，增大无人机间垂直间隔后，飞行变得稳定（见图 7b）。在高速逆风条件下，与单独飞行相比，较低高度飞行的无人机在有同伴无人机时电池消耗更少（见图 8a）。这是因为外部风会吹散上方无人机（即 E8）产生的尾流，从而减小下洗力对较低高度飞行的无人机（即 E5）的影响

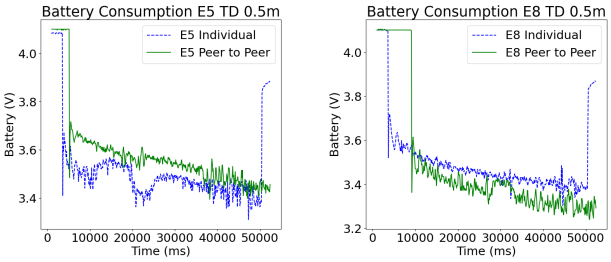


(a) E5 无人机 - 不稳定



(b) E8 无人机 - 稳定

图 7：高速顺风条件下无人机上下空间位置的轨迹

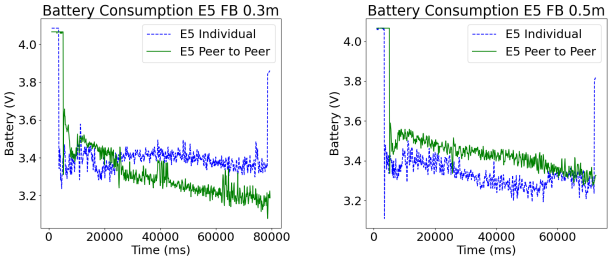


(a) E5 无人机 **(b) E8 无人机**

图 8：高速逆风条件下，E5 和 E8 无人机以自上而下方式运行时的电池消耗

。然而，对于在较高高度飞行的 E8 无人机，其电池消耗受到轻微的负面影响（见图 8b）。

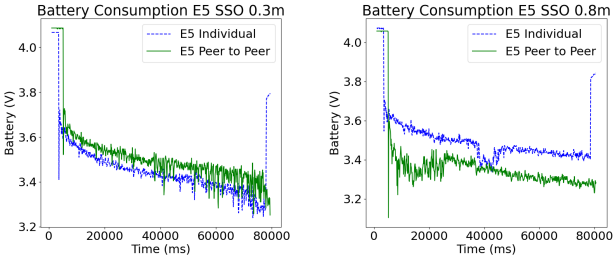
在前后式点对点空间定位中，随着与同伴无人机（即 E8）的分离距离增加，对 E5 无人机（即位于后方的无人机）电池消耗的影响会减小（见图 9a、9b）。该结果与受控风况（即无风条件）下的结果一致（见图 5a、5b）。



(a) 分离距离-0.3m **(b) 分离距离-0.5m**

图9：高速逆风条件下 E5 无人机前后排列时的电池消耗

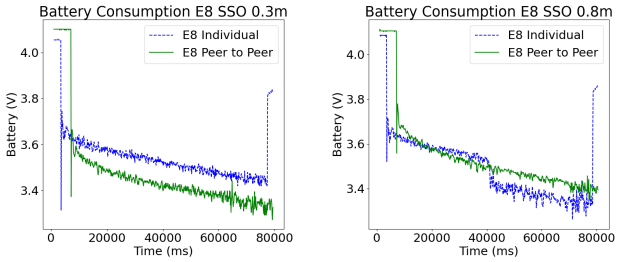
在并列错位空间位置下，低速逆风条件时，后随无人机（即 E5）与领航无人机（即 E8）之间的横向间隔随着沿 y轴方向的错位增大，其能耗也随之增加（见图11a、11b）。在这种情况下，随着分离距离增大，上洗力对 E5 无人机的升力作用减弱。这导致能耗增加，这与[1], 的研究发现一致：以梯队形和 V形编队飞行的无人机能够受益于领航无人机产生的上洗后随气动力。



(a) 分离距离–0.3m **(b) 分离距离–0.8m**

图10：E8 无人机在侧向偏移状态下以低速逆风运行时的电池消耗

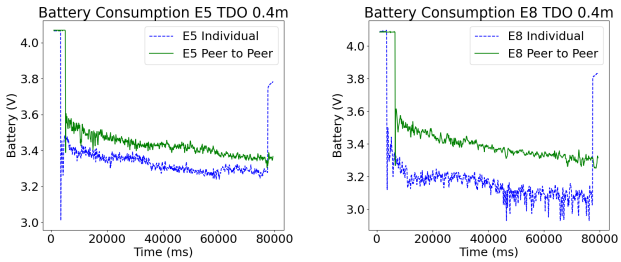
在上下错位空间位置中，在较低高度运行的无人机（即 E5）在顺风和



(a) 分离距离–0.3米 **(b) 分离距离–0.8米**

图11：E5 无人机在低速逆风下以侧向偏移状态运行时的电池消耗

逆风条件下均受到积极影响（见图 12a）。这是因为外部风减弱了在较高高度运行的 E8 无人机所产生的下洗力。E8 无人机受到逆风的轻微负面影响（见图 8b），受到顺风的轻微正面影响（见图 12b）。



(a) E5 无人机 **(b) E8 无人机**

图 12：上下错位排列和低速顺风条件下 E5 和 E8 的电池消耗

4 结论

我们展示了在不同风况下，空间邻近性对无人机电池消耗的影响。我们针对无人机对在三维空间中运行时的不同空间位置安排开展了一系列实验。我们设计了一个图形用户界面，以便在不同风况下可视化和分析对等影响图。分析表明，与单独运行相比，无人机与邻近无人机近距离运行时，其电池消耗会受到影响。此外，这种影响取决于风况以及无人机与邻近无人机的相对位置。

致谢

本研究部分得益于澳大利亚研究委员会提供的 DP160103595 和 LE180100158 资助。本文所述观点完全由作者负责。

参考文献

[1] Balsam Alkouz 和 Athman Bouguettaya。2020。基于编队的无人机群服务选择。载于*MobiQuitous*。386–394。[2] Therese Jones。2017。国际商业无人机监管与无人机配送服务。技术报告。RAND，美国加利福尼亚州圣莫尼卡。[3] Nader S Labib 等。2021。物联网中无人机的兴起：无人驾驶飞行器的演进、前景与挑战综述。*IEEE Access* 9（2021），115466–115487。[4] Babar Shahzaad 等。2019。用于配送的无人机即服务（daas）组合。载于*ICWS*。IEEE，28–32。[5] SESAR联合事业 等。2017。欧洲无人机展望研究：释放欧洲的价值。（2017）。