农场中的5G：评估农业机器人技术的无线网络能力*

TsvetanZhivkov[a], *, 1（博士后研究员）, Elizabeth I Sklar[a]（教授）

[a]林肯农业食品技术研究所，林肯大学，赖斯霍尔姆公园校区，林肯，*LN2 2LG*，*UK*

文章信息

关键词：5G、农业技术、机器人技术、农业机器人技术

摘要

全球粮食安全正迅速成为当今世界的一项重大议题。全球变暖、气候变化，以及人类活动造成的其他种种影响，例如碳排放、社会政治和经济挑战（如战争）、传统劳动力的减少和人口增长，都在加大全球粮食安全面临的压力。在农业领域，对高速、可靠的无线通信的需求日益迫切，其重要性已不再只是技术演示或展示领域优势。世界各地的政府和产业界越来越迫切地意识到，必须建立通信基础设施，通过采用自主农业机器人技术和农业科技来扩大农业活动规模并提升可持续性。本文评估了 5G 在农业机器人技术应用中的物理性能，并将结果与 4G 和 WiFi 6（一种新兴的无线通信标准）进行了比较；这两种技术通常用于农业环境。此外，本文还开展了一系列仿真实验，以评估关键任务中的“实时”运行延迟；此类任务可能需要人在回路中参与，以支持决策。结果表明，对于需要高吞吐量以及机器人与用户之间可靠通信的应用，4G 无法用于农业领域。此外，农业领域并不存在单一的无线解决方案，而是可以结合多种方案，以满足必要的电信需求。最后，结果显示，5G 在所有性能指标上都远胜于 4G，平均速度仅比 WiFi 6 慢 18.2 毫秒，因此非常可靠。

arXiv:2301.01600v1 [cs.NI] 9 Dec 2022

1. 引言

农业领域目前日益关注新兴技术和机器人应用，这主要是出于对粮食安全的担忧以及应对气候变化的需要。因此，农业机器人技术（或农业机器人技术）及其支撑技术（如电信）的交叉领域，已引起各国政府和产业界的广泛关注（gov.uk，2022年；英国环境、食品与乡村事务部，2022年；Duckett 等人，2018；Zhivkov 等人，2021年；Tang 等人，2021年）。

近期农业机器人技术蓬勃发展的几个关键原因之一，是一系列社会政治和环境因素对全球粮食安全造成的负面影响日益加剧。俄罗斯与乌克兰之间当前的战争就是一个例子，社会政治事件给食品供应链带来了压力。据估计，乌克兰和俄罗斯合计占全球小麦供应量的30%（Lang 和 McKee，2022年；Rae，2022年）。另一个例子是英国脱欧：英国退出单一市场后，进入英国的季节性工人减少；这些工人传统上来自东欧，为水果和蔬菜的收获提供支持（Partridgeand Partington，2021年）。新冠疫情凸显了劳动力短缺对多个国家农业生产力的影响（Washburn，2020年；Naik，2020年）。环境因素对农业的影响是双向的。气候变化会导致降雨量、平均气温、热浪发生频率、杂草蔓延、害虫侵袭等出现不可预测的变化，所有这些都会给作物带来压力并造成损害（Raza et al.，2019年；Webb et al.，2020年）。气候变化带来的另一个对农业产生显著负面影响的问题是土壤侵蚀。虽然环境因素会自然造成一定程度的土壤侵蚀，但气候变化使其更难以预测，也更容易发生（Borrelli etal.，2020年）。另一方面，农业也会以多种方式对环境造成负面影响。例如，当前高强度的耕作方式会导致土壤压实（Shaheb etal.，2021年；Millard et al.，2019年），原因是农用车辆持续在农田上行驶。根据联合国粮食及农业组织的数据，牲畜造成的人为温室气体（GHG）排放占有相当大的比例（联合国粮食及农业组织，2022年）。

这项关于可持续农业的研究计划，主要动因之一是人口增长（Webb 等人，2020年）：当前的农业实践并不可持续，也无法扩大规模，以保障到 2050 年满足预期的 102 亿人口的粮食需求（Borsellino 等人，2020年）。精准农业（V.Stafford，2000；Gebbers 和 Adamchuk，2010）涵盖了各种智能技术，使种植者能够针对单株植物或相邻的一组植物，而非整块田地进行决策。这意味着，肥料和水等资源，以及除草剂和农药，都可以精准施用于特定植物或种植区域，而不是

*本文介绍的是由英国研究与创新署（UKRI）研究英格兰通过林肯农业机器人项目资助，以及由 Ceres农业科技资助的研究项目成果。

*通讯作者tzhivkov@lincoln.ac.uk (T. Zhivkov)；esklar@lincoln.ac.uk (E.I. Sklar) ORCID 编号：XXXX-XXXX-XXXX-XXXX(T. Zhivkov)；0000-0002-6383-9407 (E.I. Sklar)

应用于整块田地——如果只有部分田地需要处理，这样做可能造成浪费，还会带来不必要的高昂成本，并可能损害环境。智能传感器可以安装在田地周围的固定位置，也可以装载在地面或空中移动设备（无人机）等机器人上，向农民提供有关植物生长（如大小、颜色、形状）和环境（如温度、水分、湿度）的精确位置信息，农民可利用这些数据安排工作时间，例如决定何时（或是否）喷洒、何时收获等。此外，还可以在机器人上安装专用执行器，使位置信息能够用于实时决策，并触发喷洒、机械除草或收获等作业，由田地中的机器人执行。

从智能机器人技术的角度来看，这些类型的任务需要具备多项能力：（a）精确定位传感信息；（b）精确定位执行动作；（c）为地面机器人进行路径规划，以尽量减少土壤压实和能源消耗，或为飞行机器人进行飞行规划，以尽量减少能源消耗；（d）准确分析传感数据。人们既希望获得高度精准的位置信息，又希望能够将田地中的传感器数据传输给农民（或自动化决策支持系统），这凸显了对通信网络的需求：网络必须能够可靠、稳健地提供这两项能力。预计5G电信相较于现有4G能力将带来三项关键技术优势（Durisi等人，2016年）：高频宽的增强型移动宽带（*eMBB*）、超可靠低时延通信（*URLLC*）以及低带宽、高规模的海量机器类通信（*mMTC*），并采用切片网络架构（Popovski等人，2018）。总体而言，eMBB和URLLC有望提升精准及时定位、更快速传输传感器数据等应用的性能。然而，5G并非处处可用，而且在许多国家，公共网络部署并非优先事项，尤其是在农村地区，那里人口稀少（即付费客户群体较小）。因此，我们关注的是了解5G在农业应用领域中的具体实际优势。

本文探讨了三种无线网络技术（WiFi 6、5G 和 4G），并评估它们在农业机器人技术环境中的性能。由于 5G 和 WiFi 6 是新兴的通信网络，因此本文着重研究这两者，并以 4G 作为基准。本文开展了两项独立实验：物理实验和仿真实验。物理实验测试了双向通信的应用：田间机器人将实时视频流传输至远程服务器，服务器根据接收到的视频检测作物和杂草。接收到的视频流会转换为图像流，再传送至人工智能驱动的检测系统。本文比较了无线网络在吞吐量和延迟方面的结果。仿真实验采用物理实验得出的平均延迟结果，以比较“实时”运行性能。

本文其余部分包括文献综述（第2节），探讨当前研究与最先进水平；方法论和测试环境（第3节），介绍开展实验的三种无线网络及其位置；物理实验（第4节），分析网络吞吐量和延迟；仿真实验（第5节），考察“实时”运行与控制的性能；最后是结论（第6节）。

2. 相关工作

农业环境给无线网络带来了诸多挑战，因为其缺乏结构，且存在自然障碍物，大多数电信形式都无法穿透。另一方面，在农场周围铺设有线基础设施更具挑战性，成本也更高（Rendon Schneir 和 Xiong，2016年）。由于农场面积广大且位置偏远，挖掘沟渠或搭建架空结构，并永久铺设线路或光缆以实现田地间的通信并不现实。此外，农民有时会挖掘土地，这可能会挪动或损坏地下电缆，也可能引入害虫（例如白蚁）；最后，重型车辆会导致土壤压实，尤其是在潮湿条件下，压实深度可达25至50厘米，这可能使电缆移位或受损。光纤电缆通常铺设在地下15至20厘米处，但也可以埋得更深，不过成本会大幅增加。作为替代方案，可以使用较小的5G小区，为农村地区提供高速、可靠的无线通信（Tang 等人，2021年）。当然，5G运营商网络和用户设备的成本仍然很高，而且农村地区尚未普及如此广泛的5G网络。

考虑到有线基础设施带来的种种挑战，农业通信与网络领域的文献主要聚焦于无线网络、物联网（IoT）、低成本和低功耗传感器（Adami 等人，2020年；Kagan 等人，2022年；Tao 等人，2021年）。相关研究关注的要么是单个设备（片上系统）上执行特定功能的多个传感器，要么是用于数据收集的云端/雾计算（Karthikkumar 等人，2021年；Bodunde 等人，2019年；Tsipis 等人，2020年）。研究人员考察了基于 WiFi（Karthikkumar 等人，2021年）以及混合 WiFi/Zigbee（Tsipis 等人，2020年）的通信基础设施，但其功能和设备支持受到严重限制，可通信设备的数量也有限。对于更实用、持久的通信基础设施，人们关注甚少，而此类基础设施应能支持农业环境中的多种设备、功能和机器人作业。然而，5G 不仅有望支持大量联网设备，还能支持多种不同类型的设备（Zhivkov 等人，2021年）。此外，鉴于 3G 和 4G 用例的增长与普及，随着技术日趋成熟，支持 5G 的设备数量也将持续增加，

从而让市场上出现更便宜、功耗更低的设备。随着 5G 的兴起，人们也注意到了这方面研究的缺乏（Tang 等人，2021年；Maraveas 和 Bartzanas，2021年）。

农业机器人技术领域的文献表明，研究者提出的问题方向正确，但进展远比预期缓慢，尤其是在农业机器人技术方面。其他领域的新兴机器人应用，例如仓储机器人技术、人机交互（HRI）和自动驾驶车辆，在规划、导航、环境交互和机器视觉方面采用了最先进的研究方法，与之形成了鲜明对比。相比之下，农业机器人技术领域的研究进展较慢；例如，目前配备实时动态差分全球定位系统（RTK-GPS）（实时动态定位全球定位系统）、基本自动驾驶系统和任务规划软件功能的高端工业拖拉机（Batte 和 Ehsani，2006）已能够支持农业机器人技术领域展示的许多新兴研究（Panfilov 和 Mann，2018）。农业机器人技术在采用新兴的深度学习和机器学习技术方面落后于其他领域，也未利用尖端的规划、导航和机器视觉系统来实现完全自主运行。

人们对5G通信技术的兴趣日益浓厚，加之前文提到的负面社会政治和环境挑战（如战争和英国脱欧）增加了农业领域的政府资助，这些因素已开始推动农业机器人技术和农业技术的发展走上正轨。近期农业研究正不断向前沿迈进，在农业机器人技术应用中融入新颖的图像检测和机器学习（Gomez 等人，2021年；Choi 等人，2021年），在农业机器人中实现创新的车队管理和导航（Ponnambalam 等人，2020年），并采用5G网络（Zhivkov 等人，2021年）。这些活动推动并加速了农村环境对更先进的电信基础设施和创新的需求。

Tang 等人（2021年）列举了用例及相关研究，提出在农业中应用5G的假设性论证，并根据预期评述其成果。然而，目前尚未展示5G独立组网（独立组网）在农业应用中的实际结果，这正是本文研究的动机。据我们所知，农业领域尚无研究评估和讨论5G的实际性能，并以详细的性能指标比较农村环境中的通用无线技术。本文展示了在两块不同田地中开展的物理实验所得的实际结果，详见第4节。此外，我们根据采集的数据得出模拟结果，进一步展示5G在农村环境中的优势，相关内容见第5节。

3. 实验设计

本节介绍作为本文所述实验基础的农业机器人技术应用场景（第 3.1节）、我们为杂草识别实现的图像检测方法（第 3.2节），以及实验开展的位置（第 3.3节）、部署的设备（第 3.4节）、评估的无线网络系统（第 3.5节），最后介绍如何利用隧道化来支持双向 5G通信（第 3.6节）。

3.1. 农业机器人技术应用案例

我们在此介绍的实验所采用的农业机器人技术应用案例有两个总体目标：(1)开发一种喷洒机器人，使其能够在农田中自主行驶，进行实时杂草检测和定点喷洒（Salazar-Gomez等，2022年）；以及(2)实时传输检测到的杂草视频，以便支持人类（例如农民或农学家）参与决策。

第4节中的实验结果和讨论评估了三种无线网络技术对目标(1)的支持性能。此外，第5节开展了一项概念验证理论实验，以支持实现目标(1)和(2)所需的实时数据传输要求。该理论实验（第5节）使用了从第4节获得的延迟数据。此基本设置还可用于多种其他应用，不仅适用于杂草定点喷洒，也适用于农药喷洒、定点灌溉和收获。

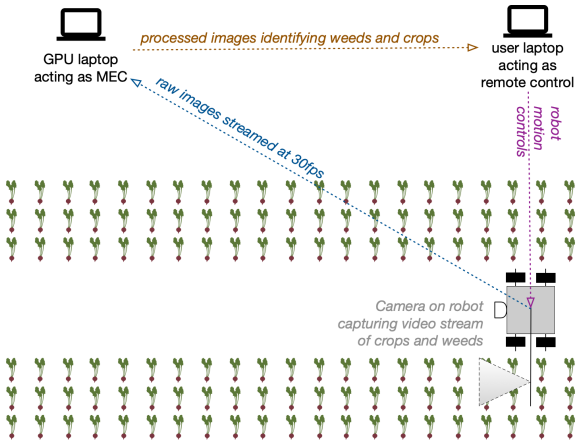


图 1：田地中的农业应用场景：检测杂草和作物

系统的设置如图1所示。在田地中行驶的遥控机器人与一台配备专用图形处理器的远程笔记本电脑之间建立了无线通信，该笔记本电脑充当伪移动边缘计算机（*MEC*）（见第3.4节），并实时执行图像分析，将结果显示在屏幕上。示例结果见图2。远程笔记本电脑放置在固定位置，具体位置取决于所测试的无线网络类型，详见第3.5节。如前所述，本实验旨在评估实时杂草检测是否可行，从而让农民直观了解检测器的性能，并辅助其决策。我们通过评估以下三种不同无线通信网络的性能来实现这一目标。



图 2: 杂草和作物的示例检测结果。红色框表示作物（生菜），蓝色框表示杂草。使用训练好的 Yolov5m 模型获得这些结果，详见第3.2节。

3.2. 图像检测

在相关研究中（Salazar-Gomez等，2022年），我们开发了一种机器学习（*ML*）模型，旨在满足特定的图像分辨率、处理速度和检测准确率要求：

- 要使用此模型准确检测杂草，图像必须清晰对焦，分辨率至少为640 × 360 像素（$width \times height$）。分辨率越高，保留的细节越多，机器学习模型的效果也越好。
- 要实现“实时”性能，图像处理流水线（包括图像采集和目标检测）的运行速度必须快于每秒 30 帧或更高帧率的视频流（帧每秒（*FPS*）），即 ~33.3 毫秒。这样才能使视频片段以 30帧/秒 不间断播放，并为丢帧留出处理余量。
- 为了使该模型能切实用于当前的定点喷洒任务，其作物与杂草检测准确率需要达到 >80%。

在该研究中，比较了七种不同的机器学习模型，其中 Yolov5m（Jocher等，2021年）在所有要求中表现最佳。Yolov5m 的准确率超过 87%，并且能够以 ~69帧/秒（Salazar-Gomez等，2022年）的速率进行图像推理。

Yolov5m 模型部署在 MEC 上，遥控机器人以 30帧/秒的速率将田地的视频图像流传输至 MEC。随后，MEC 分析传入的视频流，使用训练好的模型进行图像推理，在每张图像中创建标出作物和杂草的边界框，最后向用户显示包含检测到的杂草和作物的实时视频流。图 2展示了该模型在田地中生菜及其周围杂草图像上的运行结果示例。

3.3. 实验地点

实验在两块田地中进行，我们将其分别称为蔬菜塑料大棚和围墙花园。

与围墙花园相比，我们的5G网络在蔬菜塑料大棚中具有地理优势。蔬菜塑料大棚区域属于视觉视距（*VLoS*），几乎没有障碍物阻挡信号；该区域与天线的距离约为46至80米，分别为测得的最近点和最远点。相比之下，围墙花园包含*NVLoS*（无视觉视距）区域，这些区域受到高大树线和环绕田地的墙壁的轻度或重度遮挡，因此对于测试5G网络的局限性非常重要。围墙花园中的数据采集点距离约为122至154米，分别为测得的最近点和最远点。用于实验的两个区域如第7和8节的图4所示。运行区域以及数据采集点之间的确切距离，即网络接入点（伪MEC）到远程控制机器人的距离，见第4节。

3.4. 设备

本文详细介绍了所比较的三种通信网络各自的配置。我们的 5G 系统是一个独立组网（SA）网络，采用新兴的 6 GHz 以下频段 N77，并由我们的研究机构私有，因此更便于开展受控实验，且比公共网络受到的限制更少。在许可协议允许的范围内，我们可以调整某些系统参数，以支持不同类型的实验。WiFi 以及由此衍生的 WiFi 6，既可以设置为私有网络，也可以设置为公共网络，因为它们不受要求取得运营许可的监管机构管辖[1]。本文报告的实验中，部署了采用 802.11ax 标准的 WiFi 6，并将其设置为私有网络。这些实验中使用的 4G 网络是常见的商用公共电信系统，终端用户无法控制其任何参数。无线网络的配置详情及常用参数将在第 3.5 节进一步讨论。

我们的5G独立组网系统目前尚未安装永久性的移动边缘计算（MEC）节点[2],；这类节点通常是功能强大的服务器级系统，用于快速计算，并在“边缘”（即本地环境）处理数据，而不是将数据发送到“云端”。在我们的设置中，服务器级MEC功能由一种临时方案近似实现：一台性能强大的GPU 驱动笔记本电脑，我们称之为伪*MEC*。

所有实验均使用两台硬件配置相同、计算能力充足的笔记本电脑进行。若笔记本电脑配备至少 4GB 显存的独立图形处理器，则视为具有“充足”的处理能力。每台笔记本电脑均为 ASUS TUF Dash F15[3]，配备 i7 11370H @4.8GHz（4 核、8 线程）中央处理器、带 6GB GDDR6 的 RTX 3060 图形处理器，以及 8GB DDR4 内存。一台笔记本电脑用作远程服务器，记为伪*MEC*，

[1]WiFi 6的频段范围因国家而略有不同。[2]供应链问题导致完整系统所需的所有组件延迟采购和部署，预计于2023年完成。[3] https://www.asus.com/uk/Laptops/For-Gaming/TUF-Gaming/

另一台则作为移动客户端，集成在田地中一台远程控制的机器人上。

3.5. 无线网络

网络设备（包括用于通信实验的两台笔记本电脑）会根据所测试网络的类型采用不同的设置。我们尽可能使这些设置保持一致，以确保实验结果的比较有效。本节介绍了三种不同的网络设置及其配置。

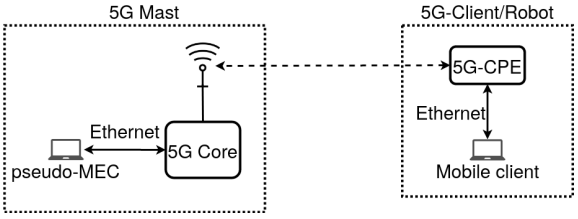


图3： 我们的5G独立组网连接示意图。

- **5G网络**：图3展示了连接示意图。在5G网络实验中，伪MEC通过以太网线（六类网线）直接连接到接收端5G基站。此外，除非另有说明，所有以太网有线连接均使用六类网线。移动客户端通过以太网线连接到外部5G 客户终端设备（*Customer Premises Equipment*），以便与5G网络通信。5G客户终端设备是一台路由器，使用由BT提供的预配置5G SIM卡[4] 和诺基亚[5]。

*5G*网络（*N77*）配置：专用5G网络系统及相关参数列于表 1中。我们的5G系统存在一定的配置限制；表 1 中列出的配置说明了系统目前能够实现的性能。例如，目前时分双工（TDD）和载波带宽是固定的，而这本身受到Ofcom[6] 许可限制。 下行和 上行 分别表示下载 和 上传，通常用于表示吞吐速率或指代调制。

- **Wi-Fi 6网络**：连接示意图如图4所示。用于Wi-Fi 6网络实验的伪MEC通过以太网线（六类网线）连接到支持Wi-Fi 6的路由器。遥控机器人上的移动客户端内置了Wi-Fi 6网卡，可与支持Wi-Fi 6的路由器通信。

[4]https://www.bt.com/[5] https://www.nokia.com/[6] https://www.ofcom.org.uk/home

规格	描述
5G频段 N77	3800MHz-4100MHz
载波带宽	100MHz
调制	256（下行）/64（上行）正交振幅调制
发射功率	5W 每个发射通道（4Tx路径）
MIMO层	4×2 闭环MIMO
时分双工（上行：下行）比率	3/7

表15G-SA N77 网络配置

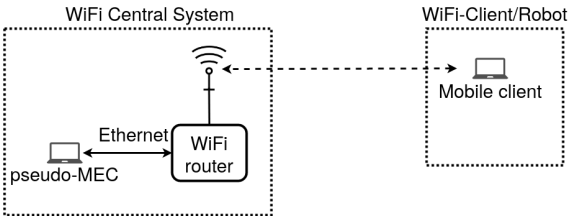


图4： Wi-Fi 6网络连接示意图。

规格	描述
5GHz 频段 Band (802.11ax)	5160-5895MHz
载波带宽	40–160 MHz
调制	(up to) 1024（下行/上行）QAM
发射功率	1W
时分双工（上行：下行）比例	N/A

表 2 WiFi 6 中央路由器配置

*Wi-Fi 6*配置：WiFi 6 网络系统及相关参数列于表2中。有关所用WiFi 6路由器的更多信息，请访问制造商的网站[7]。需要注意的是，时分双工（TDD）并非WiFi通信网络中使用的功能，服务质量（*QoS*）组已禁用（未分配）。对于理想情况（吞吐量最高、延迟最低），服务质量功能保持禁用。

- **4G 网络：**由于我们使用的是公共4G网络，伪MEC无法直接连接到接收信号的4G基站。因此，4G实验中伪MEC与移动客户端的类比改为客户端到客户端类比，如图5所示。用于4G网络实验的两个移动客户端均通过外接USB适配器设备连接到网络。用于4G联网的外接设备是 D-Link DWM-222[8]。

[7]WiFi 6路由器 - https://static.tp-link.com/2021/202103/20210311/ArcherAX6000(EU&US)2.0_Datasheet.pdf[8]D-Link（4G dongle）- https://www.dlink.com/en/products/ dwm-222-4g-lte-usb-adapter

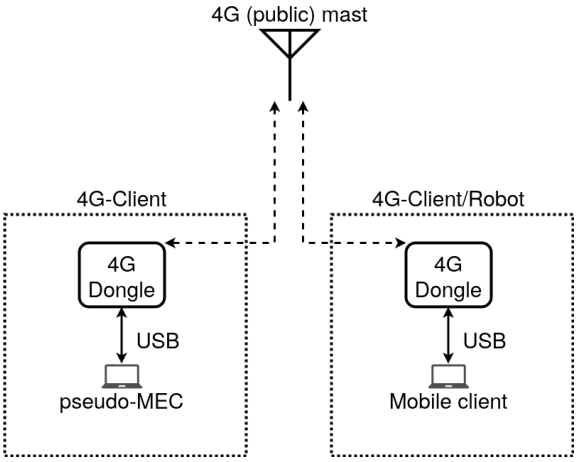


图5：4G 网络连接示意图。

规格	描述
LTE频段	800MHz-2600MHz
载波带宽	1-20MHz
调制	256（下行）/64（上行）正交振幅调制
发射功率	0.2W
上行：下行（Mbps）	150:300（理论值） 20:100（实际值）

表 34G D-Link配置（D-Link，2020年）

4G 配置：D-Link DWM-222 支持英国任意网络运营商的商用SIM卡，并可通过 USB2.0 连接到任何设备。USB2.0 的最大数据速率为480Mbps，足以测试4G通信的理论最高速度，即下行300Mbps、上行150Mbps。然而，4G商用网络的实际下载和上传速度分别约为理论最高速度的6%（18.4Mbps）和10%（14.7Mbps）（由 EE[9]测得）。英国超过210,000部移动电话的上行/下行数据汇总如下（Ofcom，2014）。为展示在 VLoS 条件下、距离4G基站约10米范围内所能达到的4G实际最高速度，我们在伦敦（英国）使用 Ookla[10],进行了测量。该测速应用程序通过下载和上传短时突发数据来测量吞吐量；测得结果为下行100Mbps、上行20Mbps。在正常使用场景中，极不可能达到这样的4G速度，因为这要求用户距离基站很近、处于 VLoS 条件下，并能预判特定公共4G基站的网络流量负载较低；此外，还需知道所用服务的服务器在地理位置上距离较近（到达服务器所需经过的网络节点较少），且该服务采用最先进的网络能力。表3列出了4G网络所有已知参数。需要注意的是，实际TDD比率未知，通常会根据4G网络运营商而动态变化。不过，4G的理论最高速度和实际可达到的速度已有充分记录，列于表3。

3.6. 隧道化5G通信

隧道化是一种网络协议，允许通过公共网络安全传输私有数据。它是一种让公共网络用户能够访问原本无法到达的网络资源的方式[11]。在少数情况下，隧道化用于启用不受支持的网络协议以及绕过防火墙。专用5G网络和公共4G网络实验的性质要求我们为此使用隧道化。当前的5G网络设置采用网络地址转换（NAT）层，该层会隐藏任何已连接设备的IP地址，以提高安全性。对于研究用例和实验而言，NAT层带来了问题，因为它使已连接设备之间无法直接通信。规避这一问题的方法是在直接通信的设备之间建立私有隧道连接，这正是第4节所述实验中采用的方法。未来，专用5G网络将启用NAT转发功能，以便在无需隧道化的情况下实现直接通信。然而，对于公共4G网络实验，移除NAT层并不可行，因为它由网络运营商控制，而安全性在公共网络中是一个非常重要且令人担忧的问题。因此，始终有必要绕过公共网络所采取的安全措施，并启用某些网络协议，使其能够在伪MEC（服务器）与遥控机器人（客户端）之间运行。第4 节和第5 节所呈现的公共4G网络结果，用于展示当前商业技术在农村地区所能实现的最佳通信效果，而许多农民目前正面临这样的通信条件[12]。4G被用作5G的“超越基准”，而WiFi 6尽管在农业中的用例受到限制，但被用于展示5G距离最先进的无线局域网（WLAN）水平有多近。图6 中的简化网络图展示了NAT在4G和5G网络中的工作方式。

与 3G、4G、5G 等移动网络不同，WiFi 及其扩展 WiFi 6 路由器无需隐藏无线局域网设备的 IP 地址。通常只有当设备连接到互联网（在线）时才需要使用 NAT 功能，而农民并非总是需要联网。如果需要通过支持 WiFi 的网络将数据上传到云端或在线服务器，可以在不对本地 无线局域网引入 NAT 的情况下完成。不过，向 WLAN 引入在线组件可能会导致瓶颈，

[9]https://ee.co.uk/[10]Ookla 互联网速度测试 - https://www.speedtest.net/

[11]https://www.cisco.com/c/en/us/products/ios-nx-os-software/tunneling/index.html[12]具体情况取决于农田的位置以及可用的移动网络类型。

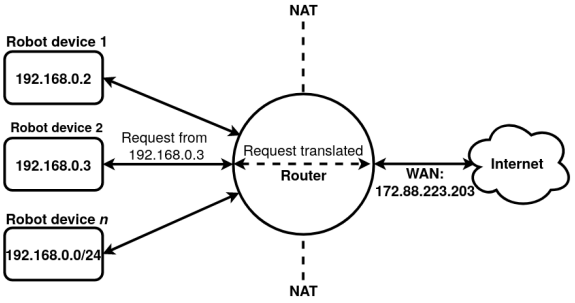


图6： 展示路由器如何使用 NAT 处理消息的简化示意图。

这是由于特定互联网服务提供商（ISP）或地理区域的吞吐量能力较低所致。

为实现4G和5G的双向通信，我们使用 WireGuard（隧道化）创建了一种点对点Donenfeld, 2020年）。如果通信设备之间采用的网络路径并非直接路径，即请求必须经过虚拟专用网络（VPN）或隧道服务，网络隧道可能会增加延迟；此外，通信路径可能会经过未知的多个节点才能到达目的地。不过，专用5G网络的隧道网络仅由两台端点笔记本电脑组成，因此系统延迟极低。例如，Donenfeld（Donenfeld, 2020年）在理想条件下进行了测试（两台端点设备通过以太网线连接），结果显示，与所有其他受测应用相比，WireGuard 的 Ping时间最低，延迟为~0.403 毫秒。由于动态环境条件以及到5G基站的距离（离地14.5米）难以精确测量且变化很大，因此无法准确开展 WireGuard 的无线实验。不过，根据第4.2节所示的延迟结果，WireGuard 引入的任何延迟都可视为微不足道。

为了让两台设备能够通过公共网络直接通信，需要使用另一种类型的 WireGuard 服务，即客户端-服务器隧道网络。例如，公共4G网络实验采用 WireGuard 客户端-服务器隧道网络进行配置，以绕过标准公共无线通信所带来的互联网服务提供商网关（匿名性）。不过，这意味着 WireGuard 延迟路径路由有所增加，而且计算真实的往返时间 *(RTT)* 延迟也更加复杂。

4. 实地实验：网络吞吐量与延迟

无线网络实验在两个测试环境的四个角落进行，详见第3.3节：蔬菜塑料大棚和围墙花园。实验总共在 8 个地理位置不同的点进行，每个点的实验持续 30 秒，并重复 5 次。这样可以通过两种方式解读结果：第一，分别考察每次持续 30 秒的实验结果；第二，

蔬菜塑料大棚		
W3W位置	距离（米）	
	5G	WiFi
P.R.L.	49.1	8.3
M.V.F.	61.5	8.6
R.W.P.	72.0	32.6
D.L.F.	81.4	32.9

表4蔬菜塑料大棚中5G/WiFi接入点与数据采集点之间的距离。

围墙花园		
W3W位置	距离（米）	
	5G	WiFi
A.C.D.	143.4	14.0
A.C.J.	119.5	32.2
O.L.D.	154.8	14.4
L.V.C.	132.3	33.2

表 5围墙花园中 5G/WiFi接入点与数据采集点之间的距离。

将 5 次持续 30 秒的实验结果合并，每个位置共获得 2 分 30 秒的数据。第4.2 节所呈现的结果采用第一种方法得出。研究使用商业制图工具*What3Words (W3W)*[13] 来识别并标记进行实验的 8 个数据采集点，如图7 和 8所示。为便于直观呈现第4.2节的结果，数据采集点以各自 W3W 规格中每个单词的首字母标记，并标出了 5G 和 WiFi 6 的核心网络（接入点）。各数据采集点与接入点（5G 和 WiFi 6）之间的大致距离列于表4 和 5。最后，第4.3节简要讨论了实地实验和结果。

4.1. 性能指标

为测试网络稳定性和性能，我们采用了不同的视频流设置，即 1-RGB、4-RGB 和 1-RGBD 视频流[14]。RGB 前面的数字表示视频流的数量，例如，1-RGB 表示一路RGB 视频流。田间机器人将视频数据流传回伪 MEC。1-RGB 视频流实验用于测试可视为典型或中等网络负载下的实际延迟情况。4-RGB 视频流实验用于测试 4G、5G 和 WiFi 6 如何处理多个数据流同时通信的情况。此外，四路视频流可视为较重的网络负载，预计会增加所有网络类型的延迟。最后，1路RGBD流实验用于分析不同网络如何应对单一来源持续产生的较重网络

[13] https://what3words.com [14] 实验中的所有视频流数据均经过压缩。



图7： 卫星图像显示了蔬菜大棚中的四个实验位置，这些位置使用缩写形式的 What3Words 标识。

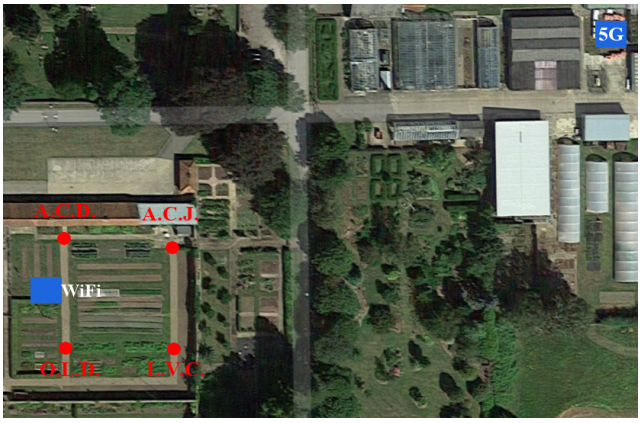


图8： 卫星图像显示了围墙花园中的四个实验位置，这些位置使用缩写形式的 What3Words 标识。

负载。不过，需要强调的是，作者从未打算分析最大吞吐量或最低延迟，而是旨在展示实际结果，并评估最先进的网络系统（即 5G 和 WiFi 6）以及常用的商用网络系统（即 4G）的性能。

网络实验有三个自变量：位置、网络类型和视频流编号。有两个因变量，即用于评估性能的原始数据：以微秒（*ms*）为单位测量的延迟，以及以兆比特每秒（*Mbps*）为单位测量的吞吐量。接下来将介绍结果。

4.2. 结果

尽管本文所述实验期间收集了更大范围的性能指标，但此处仅报告了其中一部分精选结果，以最能体现我们的研究目标。针对这两项性能指标，给出了三项统计数据：平均值、标准差和最小延迟（毫秒），以及平均值、标准差和最大吞吐量（*Mbps*）。

吞吐量[15] 结果是从田地中的移动机器人（即发送数据）的角度进行解读的。发送数据指标远高于从伪*MEC*接收的数据，后者可以忽略不计。这是因为移动机器人接收的是基本网络遥测数据、用于启动和停止视频流的视频流控制消息，以及用于标识图像中杂草位置的坐标信息。因此，本研究不对其进行考察。

针对两种环境，分别选取延迟（平均延迟最低、最小延迟最小）和吞吐量（平均吞吐量最高、最大吞吐量最大）表现最佳的数据采集点（地理位置），并在表 6[16]中展示。图9 和图10以可视化方式展示了表6中两种环境（围墙花园和蔬菜塑料大棚）的数据。图9所示的无线网络延迟结果排名，在两个测试环境的所有数据采集点均保持一致：WiFi 6的延迟始终最低，其次是5G，而4G的延迟最高，是5G的十倍。图10所示的吞吐量排名也大致相同。在所有情况下，WiFi 6的表现均优于5G，且远优于4G；而在所有环境中，5G的表现均优于4G。最后，计算两个环境中各自与接入点之间的平均距离，并对5G和WiFi 6进行比较。5G基站与蔬菜塑料大棚和围墙花园的平均距离分别为66.0米和137.5米；而WiFi 6路由器与蔬菜塑料大棚和围墙花园的平均距离分别为20.6米和23.5米。相应环境与无线网络之间的距离差分别为45.4米和114.0米。

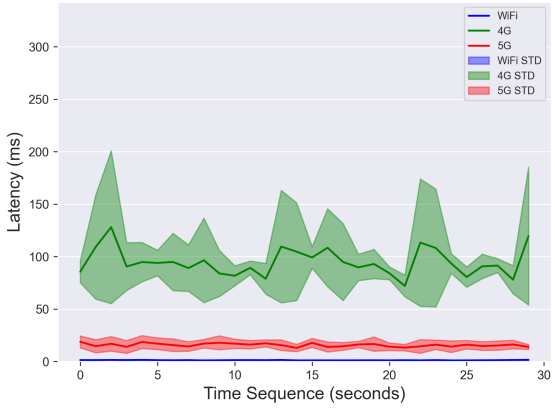
第4.3节 讨论

我们表明，在农村环境中，商用公共 4G 不适合用于高数据速率、低延迟的操作，很少能实现低于 100 毫秒的延迟，也从未达到超过 20 Mbps 的数据吞吐量。不过，令人鼓舞的是，公共 4G 网络的平均数据速率接近 Ofcom（2014 年）公布的实际商用上传速度 14.7 Mbps。需要注意的是，为取得这些结果，我们对周边区域进行了全面评估，以找到 4G 信号和网络服务提供商表现最佳的位置。然而，低吞吐量和高延迟会导致田间机器人性能不佳，可能造成植物识别或标注错误，甚至误认机器人，从而损坏植物。公共 4G 网络用于农业的一项优势是，如果农村地区有网络覆盖，就

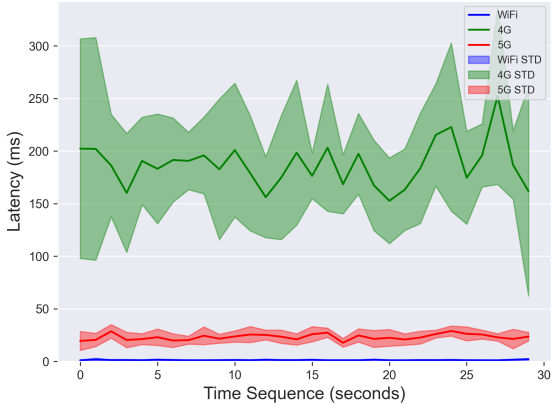
[15]凡是展示或讨论“吞吐量”结果之处，所呈现的都是“发送数据”性能指标。[16]如需查看涵盖六项关键性能指标的所有数据采集点的完整概览，请参阅附录A

蔬菜塑料大棚						
网络 Type	延迟（毫秒）			吞吐量（Mbps）		
	Mean	Min	Loc-化	Mean	Max	Loc-ation
4G	94.9	72.0	DLF	12.5	16.5	DLF
WiFi 6	1.2	1.0	RWP	144.2	145.0	PRL
5G	15.7	10.9	DLF	57.1	65.1	PRL
围墙花园						
网络 Type	延迟（毫秒）			吞吐量（Mbps）		
	Mean	Min	Loc-化	Mean	Max	Loc-化
4G	187.2	137.6	LVC	15.4	17.8	ACJ
WiFi 6	1.3	1.0	OLD	144.2	149.5	ACD
5G	23.1	1.0	OLD	31.0	33.8	OLD

表6不同网络类型在各类环境中取得的最佳结果。



(a) 蔬菜塑料大棚



(b) 围墙花园

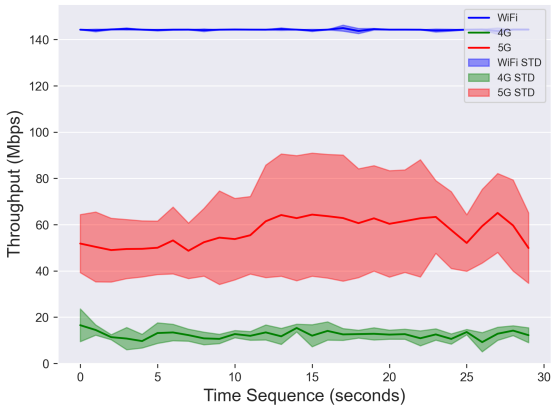
图 9： 最佳网络延迟结果，取自单个“最佳”位置收集的 5 次实验运行的平均值（请参阅表 6）。阴影区域中央的实线表示平均值，阴影区域表示 ± 1 标准差。

易于快速部署，所需配置也很少。然而，这项优势也伴随着一个弱点。网络的控制权和可用性完全由网络运营商（互联网服务提供商）决定。此外，互联网服务提供商若发生全网故障，农场的网络就会立即中断，正常运营也将完全受阻。

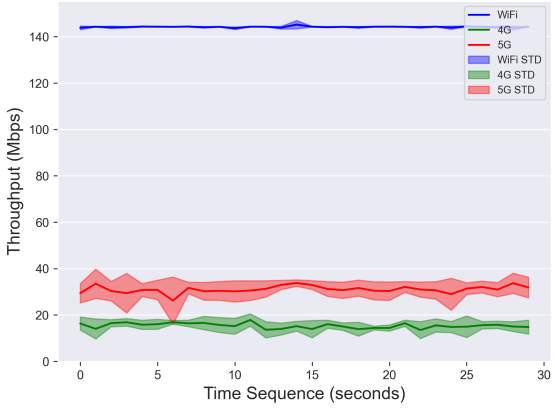
本文未评估公共5G，但其预期延迟会低于公共4G，数据速率则会更高。因此，可以认为公共5G能够支持高数据速率、低延迟的农业机器人技术以及未来的智慧农场。然而，目前情况并非如此；在公共5G完全成熟之前，这种情况仍将持续。即使其成熟，也有可能像公共4G一样，仍不切实际。需要注意的是，商用网络不会采用均衡的时分双工（TDD），而是更加注重下载速度和服务交付。私人网络则不同，它可以配置为提供更均衡的上传和下载速度，并将网络覆盖范围扩展到更多农村地区。根据Ookla发布的2021年第一至第二季度实际数据（Fomon，2021年），韩国的5G最高上行数据速率达到41.79Mbps。自20世纪90年代末至21世纪初以来，韩国一直是网络技术和互联网基础设施领域的领先者（Lee等人，2003），在5G领域也处于世界领先地位（Massaro和Kim，2022年）。不过，公共5G剩下的瓶颈似乎是上传速度。即使克服了成熟度和配置方面的障碍，缺乏对网络的控制权、依赖互联网服务提供商的问题仍然存在，4G也是如此。

林肯大学提供的专用5G网络通过展示其优于公共5G网络的优势，证明了这一点：在真实环境实验中，VLoS下实现了57.1Mbps的上传速度，NVLoS下实现了31.0Mbps，见表6。根据Fomon(2021年)，最慢的平均上传速度约为英国平均水平的两倍。超过30Mbps的上传速度至少可支持一路实时视频流和双向通信，而60Mbps可支持两路实时视频流和双向通信。此外，后一种情况还可支持多路实时视频流，但视频流传输不会是实时的，也无法以30帧/秒运行。专用5G的4路RGB流传输实验显示，视频流质量和速度显著下降，部分视频流在恢复播放前缓冲了几秒钟。由于四路视频流共享带宽，系统必须平衡资源，因此四路视频流的运行速度并不一致，也就是说，有些比其他视频流更流畅。而1路RGBD流实验出现了迟缓或卡顿，运行速度未达到30帧/秒。实时RGBD视频流传输的预期带宽需求为 ~145.0Mbps，5G只能提供约一半的所需带宽。

对专用WiFi 6（本地）网络进行了评估，因为该网络最近已投入商用，在网络功能和性能方面处于先进水平，提供更高的网络速度和极低的延迟。预计WiFi 6的数据吞吐量将超过5G，事实上，其上传数据速度是5G的 ~2.5倍。出乎意料的是，WiFi 6的延迟时间也优于5G，低至后者的 ~13倍。不过，



(a) 蔬菜塑料大棚



(b) 围墙花园

图10： 网络吞吐量结果，取自同一“最佳”位置采集的5次实验运行的平均值（请参阅表 6）。阴影区域中央的实线表示平均值，阴影区域显示 ± 1 标准差。

获得这些结果时的距离与5G测试时的距离并不相同，而且5G所经历的NVLoS现象在WiFi 6中并未出现。

WiFi 6的最远距离为33.2米，而5G为154.8米，后者超过前者的4.5倍。WiFi信号的衰减呈指数级，在距离超过100米时将完全没有信号（通信）。可以使用高增益天线增强WiFi信号，但目前市面上没有适用于WiFi 6的此类天线。此外，使用此类天线必须获得WiFi标准的许可，因此WiFi 6也很可能需要获得许可才能使用信号增强天线。

WiFi 6 的结果明显优于 5G，与 4G 相比更是完全不在一个级别；然而，在农业领域，WiFi 6 并非总是最佳选择。例如，本研究中的实验仅 使用了 WiFi 6 标准，并禁用了对旧版 WiFi 标准的支持。这迫使所有设备都使用最新标准进行消息传输，从而确保尽可能低的延迟和尽可能高的吞吐量。然而，在实际环境中（即农场），启用多 WiFi 支持可能更有益处，使某些传感器能够使用旧版标准，从而提高兼容性、扩大覆盖范围，并使信号强度随距离增加而衰减的情况更加平缓（在较远距离下衰减更小）。此外，市面上并没有多少小型、低功耗的 WiFi 6 网络设备。农学家或农民用于监测降雨量、土壤湿度、光照强度等的多数传感器都不支持 WiFi 6。因此，WiFi 6 的普及度较低，目前也没有多少真实世界的用例和数据。

5. 仿真实验：实时操作与控制

5G 即将引入的一项未来技术是超可靠低时延通信（*URLLC*），它将确保 ~99.999% 的通信可靠性和实时低延迟。该功能原本应于 2021 年初在频段1（频段范围1，即 5G N77频段）推出，但大多数系统供应商都推迟了发布，其中包括林肯大学的专用5G网络。URLLC（Sachs等人，2018年）是 5G 的一项功能，旨在实现多种技术，其中之一是车联网（Vehicle-to-Everything，车联网），旨在提供实时可靠的通信，以辅助全自动驾驶车辆的导航、交通控制和道路安全协议（Chen等人，2017年；Ali等人，2021年）。Sachs等人（2018年）指出，理论最坏情况下的传输延迟因网络配置而异；往返时延可低至~0.8 毫秒，也可高达 ~6.3 毫秒，具体取决于配置。然而，根据第三代合作伙伴计划的官方技术规范（第三代合作伙伴计划，2017年），URLLC 预期的理论往返时延目标为 1 毫秒。

为避免模拟实验结果受到混淆，本文假设采用 第三代合作伙伴计划 (2017年) 报告中给出的 URLLC 理论值（1 毫秒）进行比较和评估。此外，我们不评估无线网络的可靠性，因为包括当前专用5G网络在内的这些网络都不具备 URLLC 功能。4G 或 WiFi 6 不具备 URLLC 功能，正如前文所述，大多数 5G 系统也不支持该功能。本文的结果**并非**旨在直接挑战或证明 5G URLLC；此外，我们确实承认，该功能有特定的目标用例是 4G 和 WiFi 6 无法支持的，例如 V2X，这是由于网络和基础设施的限制。本模拟严格比较三种无线网络的往返时延与 URLLC 理论规范，主要用于研究田地中机器人作业的实时提速效果及性能提升。

5.1. 实验设计

本实验旨在分析不同网络类型的位置精度“实时”延迟。为了开展这些模拟实验，我们采用了蔬菜塑料大棚中两个任意选定的数据采集点的真实往返时延均值结果，*P.R.L.* 和 *R.W.P.*，如表 7所示。

位置	平均值延迟（毫秒）		
	5G	WiFi 6	4G
P.R.L.	29.5	1.2	216.7
R.W.P	22.9	1.3	294.0

表7P.R.L. 和 R.W.P. 两点在三种无线网络中的平均延迟结果。

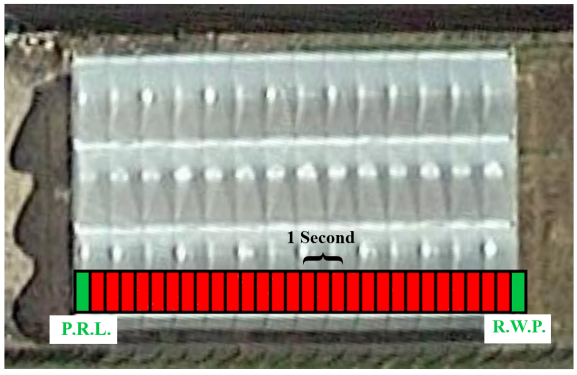
蔬菜塑料大棚中的 5G 和 WiFi 6 网络大多处于轻度遮挡的 VLoS 环境，例如有金属脚手架。相比之下，4G 网络存在一些中度遮挡的 VLoS 环境，例如树带、金属脚手架，以及长距离通信中可能出现的普遍射频干扰。

点 *P.R.L.* 与*R.W.P.* 之间的距离约为 ~30 米。总体而言，进行了两项独立的模拟实验。在每项实验中，取其中一个点（即*P.R.L.*/*R.W.P.*）的往返时延均值结果，用于模拟遥控机器人每行进一米所经历的累计延迟。

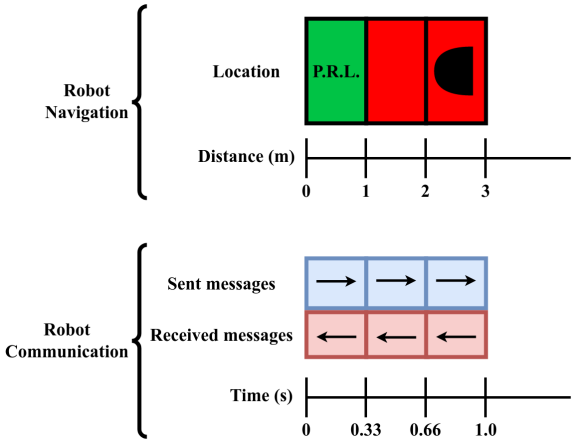
为展示实时定位精度，模拟的遥控机器人每移动一米，其位置都会更新并发送至伪MEC（远程服务器），随后会收到一条已处理的回复消息。假设点 *P.R.L.* 和 *R.W.P.* 相距30米，因此会生成30个位置步进，如图 11（a）所示。机器人设定的移动速度为3 $m.s^{-1}$，这意味着每秒经过3个位置空间。同时，模拟机器人每秒向伪MEC发送3条位置消息，并接收3条命令消息（例如喷洒、避碰、GPS 数据等）。位置消息和命令消息的有效载荷（大小）可以完全忽略，因为它们小得可以忽略不计。此外，我们将假定伪MEC已存储机器人沿途每个位置的最新图像数据，这意味着这些实验期间不会传输开销较大的图像数据。因此，实验中最重要的环节是消息传输。机器人每移动一米，就会发送一条位置更新消息，并接收一条杂草位置消息（边界框），如图 11（b）及附表 8。

第3.2节所述的图像处理流水线处理图像的速度可快至 ~14.5毫秒/张。不过，在这项模拟实验中，为了更清楚地说明我们的观点，我们假设伪MEC处理的是更复杂的图像。因此，伪MEC的处理速度设定为人类实时应对屏幕上突发变化所需的平均时间。采用这种处理（反应）速度，模拟在概念上会更容易理解。假设该值固定且不受其他因素影响

任务类型，并设为273毫秒，即人类手眼反应时间的中位数（humanbenchmark.com，2021年）。为进一步简化模拟实验，假设机器人速度固定，并忽略其他导致延迟的外部因素。要证明无线网络能够支持实时运行与控制，田地中的机器人必须在尚未进入新的位置空间前收到杂草位置消息。这对于杂草喷洒机器人的正确运行至关重要，因为它需要在保持速度的同时，准确喷洒杂草。下一节将介绍用于确定机器人是否仍处于该位置空间内的计算方法和性能指标。



(a) 蔬菜塑料大棚的卫星图像（逆时针旋转 90°）。



(b) 机器人导航的放大概览及（瞬时）在 1秒 内的通信。

图11： 图像 (a) 显示了 30 个位置空间，每个空间代表 1 米，位于数据点 *P.R.L.* 和 *R.W.P.*之间，表示机器人的模拟路径。图像 (b) 展示了模拟机器人在具备瞬时（理想）通信时的放大运行情况。

5.2. 性能指标及其依据

如前所述，发送的消息将是位置消息，形式为二维坐标数据。而接收的消息可以是各种不同类型的数据，我们假设它是用于标识图像中检测到的杂草的边界框像素位置数据。这两种类型的

固定机器人速度	3 $m.s^{-1}$
每米位置更新时间	0.333 秒
每秒发送/接收的消息数	3 $msg.s^{-1}$
每秒消息总数	6 $msg.s^{-1}$

表8机器人导航与通信参数

消息均以浮点数的形式发送，但其数据量极小，与实验第4节中发送的图像数据相比，在数据吞吐量方面可以忽略不计。这样做是可取的，因为我们希望尽可能减轻网络负载，以便仅分析延迟。

从实验起点 *P.R.L.*到实验终点 *R.W.P*，共发送30条位置消息，并接收30条边界框消息，总计60条消息。下文将一条发送消息及其已处理的回复消息称为一对。由于我们对处理时间作了固定假设，并忽略不确定性，因此计算得出的一对消息的累积延迟时间仅为给定位置处网络的RTT时延与处理时间之和，如图12所示。该总累积延迟时间 包括：(i) 将位置消息从田间遥控机器人发送到远程服务器（伪MEC）所需的时间；(ii) 加上服务器处理该消息并据此准备命令消息所需的时间；(iii) 加上将命令消息从服务器发回田间机器人所需的时间（记为累积延迟时间）；(iv) 最后，总累积延迟时间 是将累积延迟时间 减去 位置更新时间后，再乘以发送消息的数量所得。因此，总累积延迟时间 反映了整个行程期间接收消息所经历的延迟。

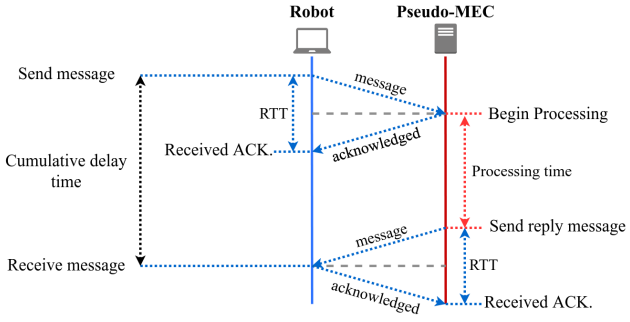


图12： 累积延迟时间指标。

5.3. 结果

我们有以下点的往返时延*P.R.L.* 和 *R.W.P.*，但这些点之间没有真实世界数据，因此无法准确评估机器人模拟导航期间的累积延迟时间 。不过，我们认为图13a) 中的趋势线可以很好地近似往返延迟时间，因此我们可以使用往返时间

P.R.L.				
网络	发送 & 接收 (ms)	Proc (ms)	Cumu (ms)	累计 Δ (ms)
使用与人类反应时间相近的处理延迟得出的结果 时间humanbenchmark.com (2021年)				
WiFi 6	1.2	273.0	274.2	+0.0 (-58.8)
5G	29.5	273.0	302.5	+0.0 (-30.5)
4G	216.7	273.0	489.7	+4701.0（+156.7）

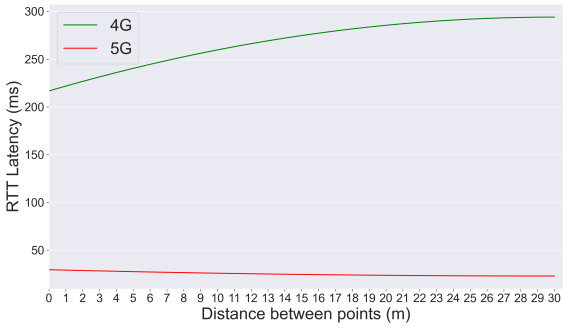
表9

累积延迟时间 消息传输在每个步骤中的延迟以及总体累计 Δ 时间，展示了各条消息的处理时间（处理）、累计延迟时间（累计）以及累计超前/滞后时间差，即 Δ，单位为毫秒（ms）。

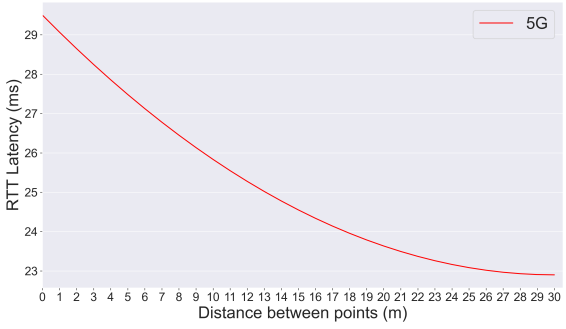
每个网络的两种极端情况下的延迟*P.R.L.* 和*R.W.P.*，表7，以分析累积延迟时间受到的影响。

要说明为何超可靠低时延通信是5G的一项重要特性，就需要在某些用例中准确应用该技术。由于处理时间在许多用例中未知，因此本研究所得结果必须展示超可靠低时延通信如何影响定位和实时控制。为证明5G正朝着提供实时控制的目标迈进，即使目前尚未具备超可靠低时延通信这一特性，机器人每行进一米就会发送3次位置更新，并要求在0.333秒（333.3毫秒）内收到响应，以便在位置尚未改变时执行操作，也就是实现实时运行。计算所需响应时间与累积延迟时间之间的差值，可得出WiFi和5G的提前时间，以及4G的滞后时间，如表5.3 和5.3所示，并由配套的图14 和15加以说明。结果表明，如果使用4G进行通信，机器人仅行进10秒，就会因网络滞后而累积4.7至7.0秒的延迟，因此无法实现实时运行。

为了进一步评估实验结果，我们进行了简单的顶点式二次计算，以绘制趋势线并观察遥控机器人沿 30 米路径移动时的预期往返时延，如图13所示。由于 WiFi 6 在 30 米路径上的变化几乎无法观察到，因此仅对 4G 和 5G 进行了评估。此外，将 WiFi 6 纳入图13a）会大幅降低结果的参考价值，使结果变得难以解读，因为这会使 y 轴偏向 WiFi 6。尽管与接入点的距离增加，5G 的趋势线仍在点*P.R.L.* 与*R.W.P.* 之间下降。这是因为点*R.W.P.* 能更直接、开阔地接收到中央接入点天线的信号；该天线正对着该点，信号无需越过附近建筑物的屋顶。



(a) 4G 和 5G 的趋势线（越低越好）。



(b) 5G 的趋势线。

图13： 图像 (a) 显示了机器人从数据点 *P.R.L.*移动到 *R.W.P.*时往返时延的趋势线。图像 (b) 则更仔细地展示了 5G 网络的往返时延趋势线。

R.W.P.				
网络	发送 & 接收 (ms)	Proc (ms)	Cumu (ms)	累计 Δ (ms)
使用处理延迟的结果与人类反应时间相似时间humanbenchmark.com (2021年)				
WiFi 6	1.3	273.0	274.3	+0.0 (-58.7)
5G	22.9	273.0	295.9	+0.0 (-37.1)
4G	294.0	273.0	567.0	+7020.0（+234.0）

表10

累积延迟时间消息传输各步骤的延迟及总体累计 Δ 时间，显示各条消息的处理时间（处理）、累计延迟时间（累计）以及累计超前/滞后时间差（即 Δ），单位为毫秒（ms）。

5.4. 讨论

对于 5G网络，到*P.R.L.* 的距离为 49.1 m，平均往返时延为 22.9 ms；到*R.W.P* 的距离为 72.0 m，平均往返时延为 63.9 ms。这意味着单向通信延迟分别为 11.5 ms 和 32.0 ms。延迟足够低，可以实现实时 30 帧/秒视频流传输，但还不足以支持实时跟踪和控制。

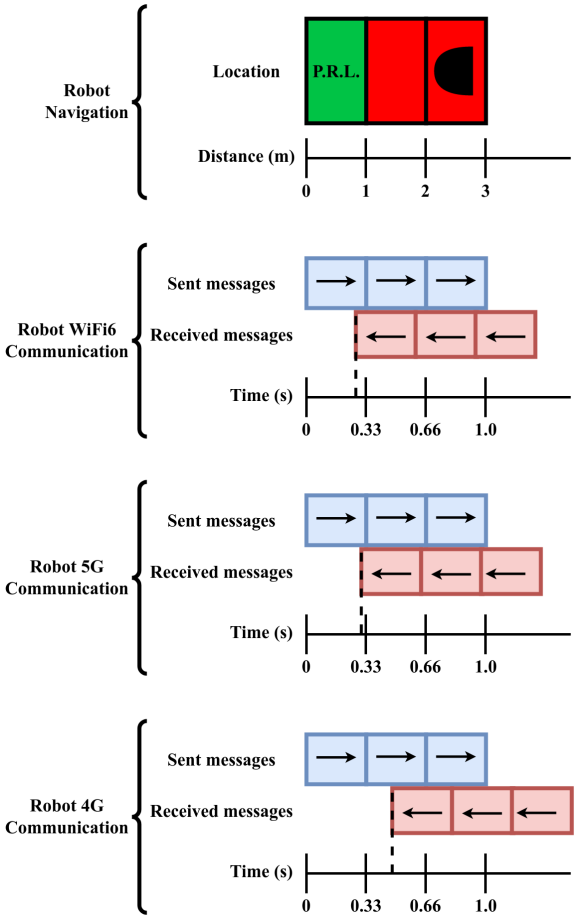


图14： 1秒时间线，展示了机器人使用不同无线网络时发送的位置消息流，以及数据点*P.R.L.* 在接收命令中经历的累积延迟时间 。虚线表示命令消息返回的时间——经过的总时间包括：(i) 发送位置消息所需的时间，(ii) 加上处理消息并准备响应命令消息所需的时间，(iii) 再加上发送命令消息所需的时间。如果竖直虚线出现在下一条命令（蓝色方框）发送之前（时间为0.333秒），则定位不会滞后。WiFi 6和5G符合这一情况，但4G不符合。

6. 结论

本研究得出了两项重要结论。首先，本研究评估了专用5G独立组网、专用WiFi 6网络和公共4G电信网络在高吞吐量、低延迟作业场景下的性能。第4 节中的实验以农业应用场景为背景：机器人在田地里采集图像，将视频流传输至机载外边缘计算机以识别杂草，再将执行命令发送回机器人，或发送给另一台计算机上的人类用户。结果表明，公共4G无法用于农业，以支持高吞吐量、低延迟作业。此外，在受控环境中，我们发现WiFi 6的表现优于5G

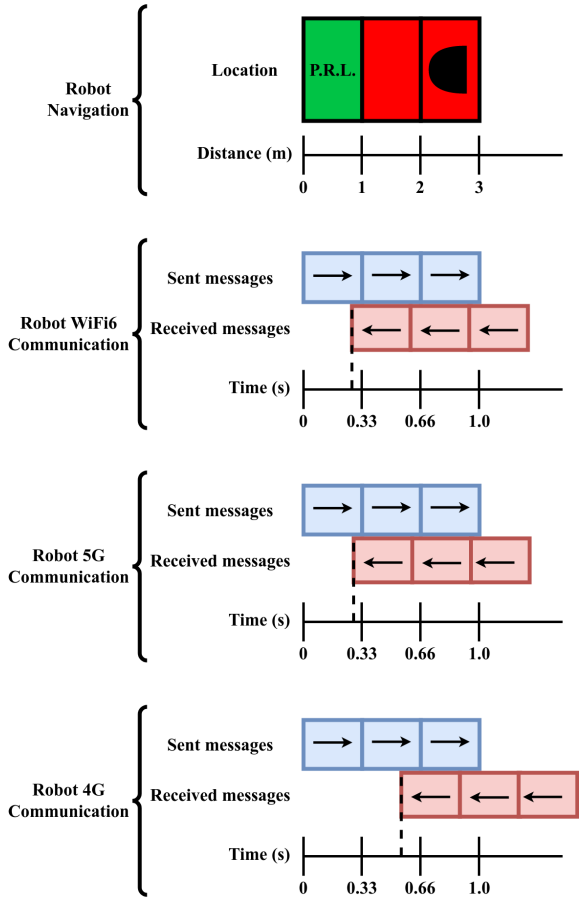


图15： 1秒时间线，展示了机器人使用不同无线网络时，已发送的位置消息流以及数据点*R.W.P.* 在接收命令中经历的累积延迟时间 。竖直虚线表示命令消息返回的时间——经过的总时间包括：(i)发送位置消息所需的时间，(ii)加上处理该消息并准备响应命令消息所需的时间，(iii)再加上发送命令消息所需的时间。如果竖直虚线出现在下一个命令（蓝色方框）于0.333秒发送之前，则定位不会出现滞后。WiFi 6和5G符合这一情况，但4G不符合。

。吞吐量测试期间，WiFi 6从未达到饱和，而在测试1-RGBD视频流传输时，5G在约60Mbps时达到饱和。根据（Fomon，2021年），实现的吞吐量高于根据2021年第一至第二季度收集的数据得出的领先国家公共5G结果。不过，整体而言，这些结果显示5G表现良好，因为这表明该技术仍在不断成熟。WiFi 6的平均延迟为18.2毫秒，低于5G。与WiFi 6路由器相比，5G基站在蔬菜塑料大棚和围墙花园中分别远45.4米和114.0米。接入点距离较远，也进一步导致5G网络在围墙花园中的性能较差。不过，这凸显了5G网络的覆盖范围更广；此外，研究中未测试的一项特性是，它支持连接更多设备数量。WiFi/WiFi6路由器只能支持少量设备，设备数量一旦增加，复杂度就会大幅上升。相比之下，5G网络能够天然支持更多设备，且复杂度逐步增加。值得注意的是，所得结果仅反映了数据收集时专用5G性能的一个快照。5G网络持续更新和改进，使其更加稳健，并针对不同用例平衡上传与下载比率。

其次，为了评估使用三种网络设置分别执行农业应用场景的更复杂假设变体是否可行，我们进行了仿真实验。具体而言，这些实验分析了延迟。正如先前所观察到的，这些结果再次证实，4G速度太慢，无法完成当前任务。WiFi 6和5G的速度足以胜任这项工作。此外，结果表明，只有在处理时间较长或机器人速度较快等极端情况下，WiFi 6才比5G更有优势。

总之，这项工作的结果对农业领域具有重要意义。它们清晰地指出了农村环境中当前及最先进水平的无线网络基础设施的优缺点。此外，结果还明确了未来智慧农场对电信行业的基本需求。显然，4G无法支持农业活动；而WiFi 6覆盖范围较小、衰减较大，且商业普及速度慢得多，因此并非切实可行的解决方案。最后，本研究指出，没有一种无线网络最适合农业技术和农业机器人技术，但结合多种最先进水平的技术能够提供更好的解决方案。例如，可以使用专用5G在较长距离内更快速地传输数据，并连接到WiFi 6（或多WiFi）无线回传网络，再由该网络延伸至农田中本地连接的机器人和传感器。

这项研究的后续工作包括在物理环境中测试更复杂的场景。其中包括第 5 节中模拟的假设设置，以及在田地中部署多台机器人、使用面积更大的田地（此时与网络基站的距离更远），并向机器人发送更复杂的控制消息，从而使发送和接收传输量比本文所述实验中更加均衡。随着公共 5G 部署在全球持续推进，深入了解其在农业中的益处，将有助于农民为在农村部署此类网络提供依据。本文分享的研究成果有助于证明，5G 无线基础设施对于实现哪怕是最基础的精准农业应用场景也不可或缺。

A. 附录

为了完整直观地呈现我们在第 4 节实验中的发现和数据收集结果，我们汇总并绘制了所有数据，制作成简单易读的图表。数据分为两个主要图表，分别呈现所分析的两项主要性能指标：图 16 中的延迟，以及图17中的网络吞吐量。每个图表包含 3 个子图，每个子图分别代表一种无线网络，即 4G、5G 和 WiFi 6。最后，每个子图由一条垂直线划分为三个部分，用于突出显示数据流网络参数；柱形颜色则代表开展实验的两个位置之一。

图中公共4G的延迟表现16 在所有流媒体实验和所有环境中都很差。与WiFi 6和专用5G不同，对于4G而言，很难分析延迟增加究竟是由环境还是不同的流媒体实验造成的，这是因为无法预测较远距离上的射频干扰。不过可以确认的是，无论进行哪种类型的流媒体实验，其延迟都远远高于实时视频流传输所能接受的水平。

图16中的5G延迟极低，在蔬菜塑料大棚环境中（橙色柱）与WiFi 6接近。然而，在距离较远且受到树木覆盖和墙壁阻挡的环境中，5G性能会大幅下降，在环境的某些区域，延迟甚至与公共4G（ACJ-4）一样差，或更差。

图16 中WiFi 6的延迟结果显示其标准差为负值，这是不可能的。这是因为延迟极低，偶尔出现的峰值会导致标准差的负向部分低于零。由此，WiFi 6的标准差可以忽略不计，但为便于说明仍予以保留。WiFi 6的延迟主要在RGB-D数据流传输实验期间，以及在围墙花园的开阔地作业时有所增加。这符合预期，因为WiFi 6在开阔地的信号损耗远大于室内空间或墙壁和障碍物较多的区域。不过，延迟仍然极低。

图 17 中的公共4G吞吐量结果很有意思，因为无论进行哪种流媒体实验，吞吐量都会达到某个上限。正如预期的那样，根据我们对公共4G网络进行的实验以及从 Ofcom (2014)获得的数据，最大吞吐量和平均吞吐量（上传速度）应分别在 20Mbps 和 14.7Mbps 左右，这与我们的观测结果一致。尽管如此，一些实验地点的吞吐量要低得多，这可能由多种因素造成，例如射频干扰、流量负载增加、流量负载优化等。因此，我们可以认为，公共4G网络的上传速度已达到饱和，不能期待更高的吞吐量。

5G吞吐量结果令人印象深刻，显然远高于4G。不过，如果我们比较WiFi 6和5G之间的吞吐量结果，尤其是RGB-D流媒体实验的结果，就会发现，5G网络在上传速度方面也已经达到饱和。我们可以认为，5G网络的最大上传速度接近65Mbps。本项工作从未旨在找出林肯大学5G网络配置的最大上传速度。因为5G网络在不断改进，例如，未来上行/下行比例可能可以进行配置。就当前版本的5G独立组网N77而言，这一点目前还无法实现（至少据我们所知是如此）。此外，不同的5G 网络技术以及5G的不同迭代版本，其性能可能完全不同；专门找出我们特定系统的极限并不能为田地领域作出贡献，而该系统本身也在不断演进。

WiFi 6 的吞吐量结果几乎与理论预期完全吻合。RGB 数据流经过压缩，只有在检测到移动，且摄像机前方快速连续出现许多不同颜色变化时，吞吐量才会增加；而我们的绿色和棕色图像中并未出现这种情况，因此吞吐量变化不定、难以预测。不过，在 RGB-D 实验中，数据流仍经过压缩，但压缩率固定。这意味着，无论摄像机前方场景变化得多快，也无论颜色如何变化，传输的数据都应完全相同。理论上，该数值应为 144Mbps（或 18MBps），而 WiFi 6 在 RGB-D 实验中达到的吞吐量大致如此。显然，WiFi 6 能够传输预期的数据量，而且上传或下载都尚未达到饱和上限。不过，延迟结果虽然非常出色，却也揭示了 WiFi 6 的一个弱点：在室外开阔地环境中，信号损耗将呈指数级增长。

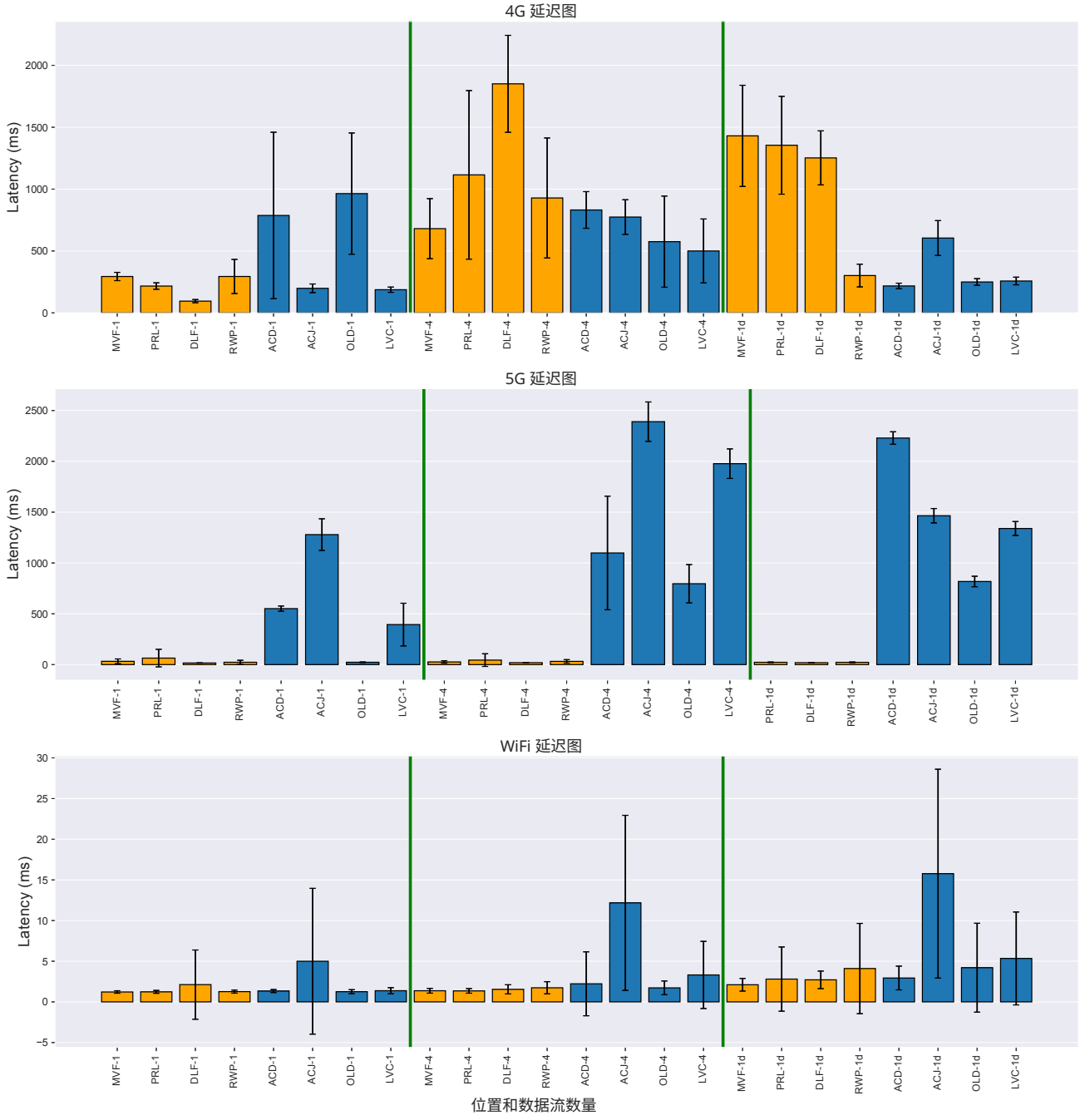


图 16：所有性能指标和参数的延迟结果。竖线用于分隔数据流类型，橙色柱表示蔬菜塑料大棚，蓝色柱表示围墙花园。

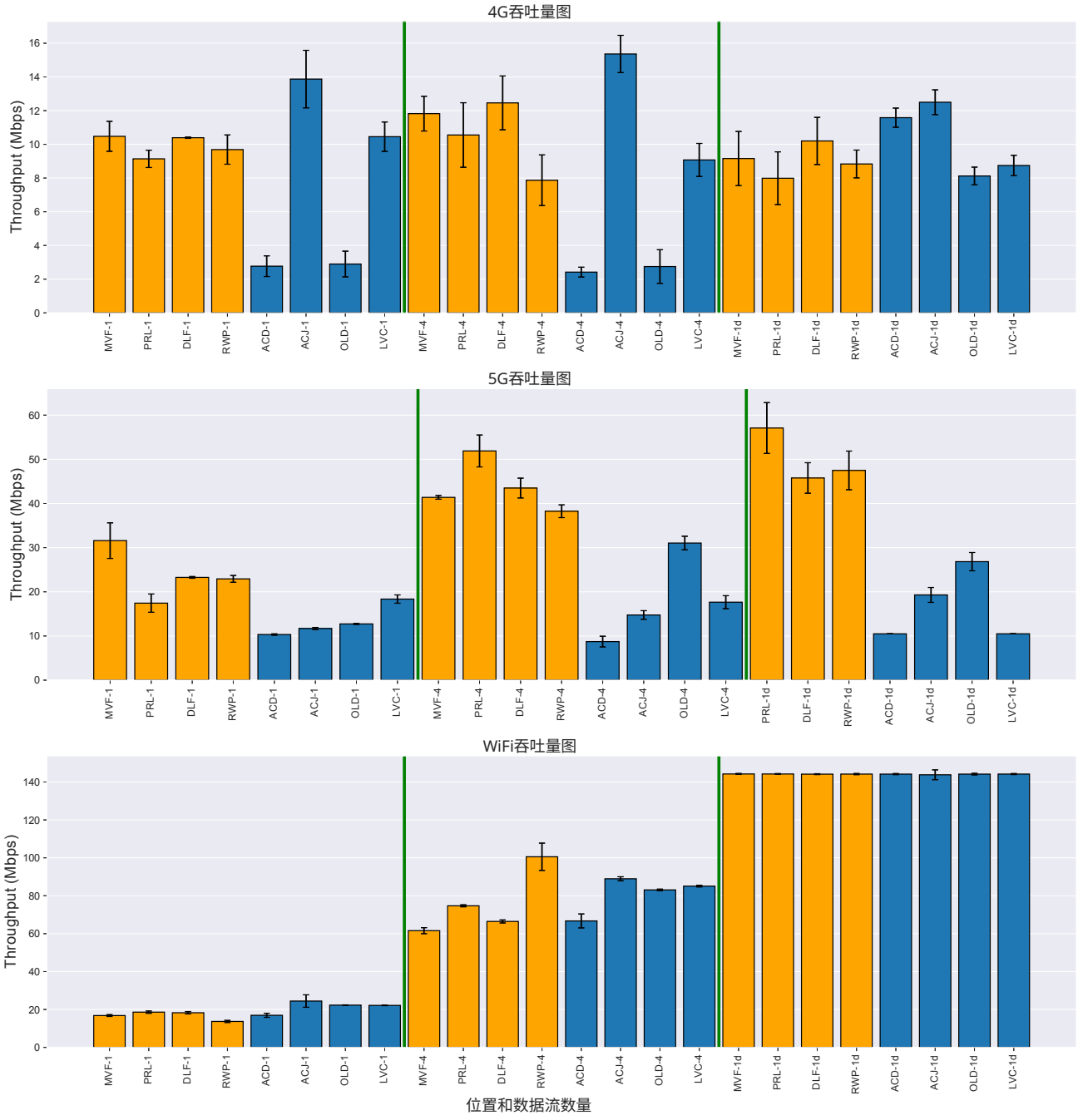


图17： 所有性能指标和参数的吞吐量结果。竖线用于分隔数据流类型，橙色柱表示蔬菜塑料大棚，蓝色柱表示围墙花园。

参考文献

gov.uk，农场高科技机械专项资金2500万英镑，2022年。网址：https://www.gov.uk/government/news/25-million-funding-for-high-tech-machinery-on-farms。英国环境、食品与乡村事务部，植树造林，2022年。网址：https://committees.parliament.uk/ publications/9364/documents/160849/default/。T. Duckett、S. Pearson、S. Blackmore、B. Grieve、W.-H. Chen、G. Cielniak、J. Cleaversmith、J. Dai、S. Davis、C. Fox、P. From、I. Georgilas、R. Gill、I. Gould、M. Hanheide、A. Hunter、F. Iida、L. Mihalyova、S. Nefti- Meziani、G. Neumann、P. Paoletti、T. Pridmore、D. Ross、M. Smith、M. Stoelen、M. Swainson、S. Wane、P. Wilson、I. Wright、G.-Z. Yang，农业机器人技术：机器人农业的未来，2018年。URL：https://arxiv.org/abs/1806.06762。doi：10.48550/ARXIV.1806.06762。T. Zhivkov、A. Gomez、J. Gao、E. Sklar、S. Parsons，《速度至关重要：5G通信如何支持田间人工智能》，载于：UKRAS21会议论文集：居家机器人技术，英国机器人与自主系统网络，2021年。doi：10.31256/On8Hj9U。Y. Tang、S. Dananjayan、C. Hou、Q. Guo、S. Luo、Y. He，《5G网络及其对农业的影响综述：挑战与机遇》，《农业中的计算机与电子学》180（2021）105895。T. Lang、M. McKee，《俄乌战争威胁全球粮食供应》，《英国医学杂志》376（2022）。M. Rae，《俄乌战争的经济影响》，载于：SAGE商业案例，SAGE出版公司：SAGE商业案例原创系列，2022年。J. Partridge、R. Partington，《“焦虑已达到顶点”：英国农业部门担忧劳动力短缺》，《卫报》（2021年）。K. Washburn，《在加利福尼亚州农业区，种植者苦于劳动力短缺》，《今日美国》（2020年）。G. Naik，《病毒蔓延之际，全球农业遭遇价格下跌和劳动力短缺》，标普全球市场财智（2020年）。A. Raza、A. Razzaq、S. S. Mehmood、X. Zou、X. Zhang、Y. Lv、J. Xu，《气候变化对作物的影响、作物适应及应对策略：综述》，《植物》8（2019）。P. Webb、T. G. Benton、J. Beddington、D. Flynn、N. M. Kelly、S. M. Thomas，《粮食系统转型的紧迫性已毋庸置疑》，《自然·食品》1（2020）。P. Borrelli、D. A. Robinson、P. Panagos、E. Lugato、J. E. Yang、C. Alewell、D. Wuepper、L. Montanarella、C. Ballabio，《土地利用和气候变化对全球水蚀土壤的影响（2015—2070年）》，《美国国家科学院院刊》117（2020）21994–22001。M. R. Shaheb、R. Venkatesh、S. A. Shearer，《土壤压实及其管理对可持续作物生产影响的综述》，《生物系统工程杂志》46（2021）417–439。A. G. Millard、R. Ravikanna、R. Groß、D. Chesmore，《面向自主谷物收割的群体机器人系统》，载于：K. Althoefer、J. Konstantinova、K. Zhang（编），《迈向自主机器人系统》，施普林格国际出版公司，查姆，2019年，第458–461页。联合国粮食及农业组织，《全球畜牧业环境评估模型（GLEAM）》，联合国粮食及农业组织，https://www.fao. org/gleam/results/en，2022年。V. Borsellino、E. Schimmenti、H. El Bilali，《农食市场迈向可持续模式》，《可持续性》12（2020）。J. V.Stafford，《在21世纪实施精准农业》，《农业工程研究杂志》76（2000）267–275。R. Gebbers、V. I. Adamchuk，《精准农业与粮食安全》，《科学》327（2010）828–831。G. Durisi、T. Koch、P. Popovski，《面向海量、超可靠、低时延的短数据包无线通信》，《IEEE会议录》104（2016）。P. Popovski、K. F. Trillingsgaard、O. Simeone、G. Durisi，《面向增强型移动宽带、超可靠低时延通信和海量机器类通信的5G无线网络切片：通信理论视角》，IEEE Access 6（2018）55765–55779。J. Rendon Schneir、Y. Xiong，《农村地区固定宽带接入网络成本研究》，《电信政策》40（2016）755–773。《技术变革与服务的提供、消费及监管：欧洲ITS区域会议论文集》。D. Adami、S. Giordano、M. Tamburello，《智慧农业中动物驱避装置的监测应用》，载于：2020年IEEE第25届计算机辅助通信链路与网络建模和设计国际研讨会（CAMAD），2020年，第1–6页。doi：10.1109/CAMAD50429.2020.9209316。C. R. Kagan、D. P. Arnold、D. J. Cappelleri、C. M. Keske、K. T. Turner，《特别报告：用于精准农业的物联网（iot4ag）》，《农业中的计算机与电子学》196（2022）106742。W. Tao、L. Zhao、G. Wang、R. Liang，《智慧农业物联网通信技术及挑战综述》，《农业中的计算机与电子学》189（2021）106352。

M. Karthikkumar、V. Premchandran、E. Sathish，《基于物联网和MQTT协议的农业灌溉管理系统》，《IOP材料科学与工程会议系列》1084（2021）012118。O. Bodunde、U. Adie、O. Ikumapayi、J. Akinyoola、A. Aderoba，《基于Zigbee技术的自适应喷灌机器人的架构设计与性能评估》，《农业中的计算机与电子学》160（2019）168–178。A. Tsipis、A. Papamichail、G. Koufoudakis、G. Tsoumanis、S. E. Polykalas、K. Oikonomou，《用于橄榄园时效敏感环境监测的可调延迟云/雾计算架构》，《农业工程》2（2020）175–205。C. Maraveas、T. Bartzanas，《物联网（IoT）在优化温室环境中的应用》，《农业工程》3（2021）954–970。M. T. Batte、M. R. Ehsani，《农民自有农业喷雾机采用自动喷杆控制进行精准导航的经济学》，《农业中的计算机与电子学》53（2006）28–44。I. Panfilov、D. D. Mann，《实时视觉信息对自主农业机械远程监控的重要性》，《加拿大生物系统工程》60（2018）2.11–2.18。A. S. Gomez、E. Aptoula、S. Parsons、P. Bosilj，《机器人表型分析中用于计数的深度回归与目标检测》，《IEEE机器人与自动化快报》6（2021）2902–2907。T. Choi、O. Would、A. S. Gomez、G. Cielniak，《用于可靠机器人监测水果异常的自监督表征学习》，CoRR abs/2109.10135（2021）。V. R. Ponnambalam、J. P. Fentanes、G. Das、G. Cielniak、J. G. O. Gjevestad、P. J. From，《农业成本地图：将环境约束纳入农业机器人的导航系统》，载于：2020年第六届控制、自动化与机器人国际会议（ICCAR），2020年，第214–220页。doi：10.1109/ICCAR49639.2020.9108030。A. Salazar-Gomez、M. Darbyshire、J. Gao、E. I. Sklar、S. Parsons，《超越mAP：面向精准农业杂草喷洒的实用目标检测》，载于：IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议（IROS）论文集，2022年。G. Jocher、A. Stoken、J. Borovec、NanoCode012、A. Chaurasia、TaoXie、L. Changyu、A. V、Laughing、tkianai、yxNONG、A. Hogan、lorenzomammana、AlexWang1900、J. Hajek、L. Diaconu、Marc、Y. Kwon、oleg、wanghaoyang0106、Y. Defretin、A. Lohia、ml5ah、B. Milanko、B. Fineran、D. Khromov、D. Yiwei、Doug、Durgesh、F. Ingham，《ultralytics/yolov5：v5.0——YOLOv5-P6 1280模型、AWS、Supervise.ly和YouTube集成》（2021）。Ofcom，《Ofcom发布4G和3G移动宽带速度研究》，2014年。URL：https://www.ofcom.org.uk/about-ofcom/latest/media/media-releases/2014/3g-4g-bb-speeds。D-Link，《DWM-222 4G LTE USB适配器》，2020年。URL：https://eu.dlink.com/uk/en/-/media/consumer_products/dwm/dwm-222/datasheet/dwm_222_a2_datasheet_en_eu.pdf。J. A. Donenfeld，《WireGuard：新一代内核网络隧道》，2020年。URL：https://www.wireguard.com/papers/wireguard.pdf。J. Fomon，《英国的5G领先于欧洲贸易伙伴，但仍不及韩国和中国》，2021年。URL：https://www.ookla.com/articles/5g-united-kingdom-q1-q2-2021。H. Lee、R. M. O'Keefe、K. Yun，《韩国宽带和电子商务的发展：促成因素》，《信息社会》19（2003）81–93。M. Massaro、S. Kim，《韩国为何处于5G前沿？来自技术系统理论的见解》，《电信政策》46（2022）102290。J. Sachs、G. Wikstrom、T. Dudda、R. Baldemair、K. Kittichokechai，《面向超可靠低时延通信的5G无线电网络设计》，IEEE Network 32（2018）24–31。S. Chen、J. Hu、Y. Shi、Y. Peng、J. Fang、R. Zhao、L. Zhao，《基于LTE的系统和5G支持的车联网（V2X）服务》，IEEE Communications Standards Magazine 1（2017）70–76。R. Ali、Y. B. Zikria、A. K. Bashir、S. Garg、H. S. Kim，《面向5G及以后的超可靠低时延通信：需求、使能技术与网络智能，IEEE Access 9（2021年）67064–67095。第三代合作伙伴计划，5G；关于下一代接入技术的场景与要求研究，技术规范（TS）38.913，第三代合作伙伴计划（3GPP），2017年。网址：https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138913/14.03.00_60/tr_138913v140300p.pdf，版本14.3.0。humanbenchmark.com，Human benchmark：反应时间测试，2021年。网址：https://humanbenchmark.com/tests/reactiontime。