arXiv:2304.00781v1 [cs.RO] 3 Apr 2023

事件驱动型 Fabric 区块链 - ROS 2 接口：迈向移动机器人的安全且可审计的远程操作

Lei Fu[1], Salma Salimi[1],Jorge Pe˜ña Queralta[1],Tomi Westerlund[1]

[1]图尔库智能嵌入式与机器人系统实验室（TIERS），图尔库大学，芬兰。电子邮箱：[1]{leifu、salmas、jopequ、tovewe}@utu.fi

摘要——区块链技术在机器人系统中的应用，引起了学界既追捧又质疑的反响。现有文献表明，区块链确实有潜力构建更安全、更值得信赖的分布式机器人系统。然而，除高层决策之外，区块链技术究竟能够在哪些机器人学领域得到实际应用，仍不明确。本文探讨了许可型区块链框架 Hyperledger Fabric 在远程操作方面的局限性。移动机器人的远程操作可以受益于区块链的可审计性和安全性。我们研究了这种方法的潜在优势及其主要局限性。我们提出并实现了一种新的事件驱动型 Fabric-ROS 2 桥接器，与以往方案相比，该桥接器能够在更高网络负载下维持更低的延迟。我们还展示了这一方案如何为更具现实性的用例和应用打开大门。我们在小型空中机器人上的实验表明，延迟处于数百毫秒范围内，并且能够同时控制单个机器人系统和多机器人系统。最后，我们分析了面向现实世界近实时远程遥操作的主要权衡与局限性。

索引词——**Hyperledger Fabric；ROS 2；移动机器人学；远程操作；远程控制；**

I. 引言

随着机器人日益普及、互联程度不断提高，并开始大规模部署，将分布式网络化系统领域的技术与方法集成到机器人中，具有巨大潜力 [1], [2]。事实上，已有大量研究致力于将区块链技术集成到机器人系统中 [3], [4], [5]。然而，机器人领域自然会对这些系统的可扩展性及其在真实场景中的适用性持审慎态度。近期研究正在揭示实际应用的可能性，包括线性区块链之外的新型分布式账本技术（DLT） [6], , 以及展现出更贴近现实应用场景的许可型区块链 [7]。

基于区块链的自主机器人系统的一项关键特性，是能够凭借区块链中存储数据的不可篡改性，事后审计自主决策 [8]。这一优势同样适用于远程操作机器人。然而，现有方案无法满足实时远程操作或共享自主性的需求 [9]。

目前，区块链和机器人领域的大多数工作都依赖于无需许可且开放的以太坊网络。运行在以太坊虚拟机上的智能合约已支持多种应用，例如安全联邦学习 [10]和可信车联网 [11]。然而，即使采用权益证明共识 [12]，以太坊在可扩展性方面仍面临挑战，且难以适应工业机器人应用的需求。

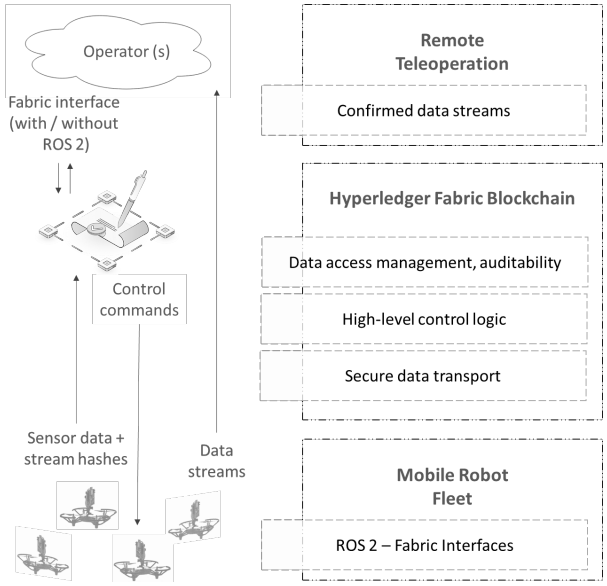


图 1：所提方法的概念示意图，其中 Hyperledger Fabric 区块链网络将机器人与远程遥操作应用连接起来。Fabric 网络能够以数百毫秒的低延迟传输数据。实时数据流（例如实时视频）可通过区块链中的哈希值进行确认。Fabric 网络支持控制访问管理和可审计性。

尽管可以部署私有以太坊网络，但该框架并未原生支持身份管理和数据访问权限，因此未必适用于工业应用。另一方面，Hyperledger Fabric 区块链框架基于一系列旨在推动其在机器人领域应用的原则进行设计，其中包括通过证书颁发机构进行身份管理、数据访问控制策略以及私有数据通道等。我们此前已展示了 Fabric - ROS 2 接口在多机器人协作数据记录 [13],以及 [7], 协同决策过程 [14]中的潜力。然而，在此前的工作中，ROS 2 与区块链的集成方式尚不支持通用数据传输（例如，可配置的 ROS 主题）、高级数据访问管理逻辑或近实时双向数据

传输。因此，本文旨在提供一种更加通用、性能更高的事件驱动接口。

本文的主要目标是推动区块链技术在现实世界机器人应用中的集成。为此，本文的创新主要体现在两个方面。首先，我们重新设计并重新实现了此前关于 Fabric 与 ROS 2 集成的工作 [13], ，采用事件驱动的方法，使其能够更无缝地连接 ROS，同时更好地将逻辑与区块链之外的数据确认相分离。其次，我们研究了需要近实时操作和双向数据传输的应用潜力，并将其与文献中以往仅通过区块链进行非时间关键型决策的工作进行比较 [7], [15]。我们的目标是在不同 ROS 2 网络之间实现 ROS 数据的安全、可审计传输。文献中最接近的示例是 [15], ，其中作者使用 Hyperledger Fabric 探索一种新的多机器人系统路径规划方法，以实现安全、可扩展的分布式控制系统。然而，在 [15] 中，实时因子的要求相当宽松，计算和确认时间超过 5 秒。此外，目前没有用于将此类方法与 ROS 或 ROS 2 集成的标准方法，作者提供的实现方案则非常具体，难以推广至其他机器人应用场景或应用领域。总而言之，本文的主要贡献如下：

1）通过事件驱动设计和可参数化的数据传输设置，提出一种将 ROS 2 系统与 Hyperledger Fabric 区块链网络桥接并对接的新方法；2）设计、实现并评估一个概念验证系统，通过 Fabric 实现近实时的机器人远程操作，适用于从单机器人到多机器人系统的场景。

我们通过仿真和真实世界实验获得了实验结果。我们的平台旨在为人类操作员提供控制接口。然而，在实际实验中，由自动化脚本控制机器人，以开展对比实验和定量分析。实验使用一组微型飞行器（MAV），真实世界实验中使用一架和两架无人机，并在仿真环境中使用多达 16 架无人机，以展示所提出的系统如何扩展。我们使用的 MAV 是 DJI Tello 无人机，它们在动作捕捉（MOCAP）系统中运行，以实现外部定位。

本文其余部分的结构如下。第二节考察了此前关于区块链技术在机器人领域的应用，以及 Hyperledger Fabric 与 ROS 集成的研究。第三节介绍系统的高层设计，第四节则详细说明实验设置和方法。第五节展示实验结果，第六节总结全文。

II. 背景

本节将讨论区块链与机器人学交叉领域的现有文献，并指出本文所应对的一些主要挑战。我们还将简要介绍 Hyperledger Fabric 区块链框架背后的关键概念。

A. 区块链在机器人领域的应用

区块链系统具有若干可用于分布式多机器人系统的特征。首先，内置的安全性有助于促进网络化系统中的数据共享 [3], [16], [17]。其次，不可篡改性使数据能够得到审计和追踪 [8]。第三，共识协议通过使用智能合约支持协同决策 [6], [18]。

Strobel 等人提出了一种早期的概念验证方案，用于应对群体机器人系统中的安全挑战 [4]。作者使用以太坊和去中心化智能合约，创建了安全的协调机制，以识别并清除群体中的故障成员。他们旨在通过所提出的方案证明实现这一目标的可能性。

显然，区块链可以为在多机器人系统或机器人群体中实现共识提供底层框架。文献中一个常见的应用场景是检测系统中的拜占庭智能体或恶意智能体 [3], [4], [19]。为了实现安全性、有限内存占用以及抵御欺骗的能力，Ferrer 等人在 [5] 中使用区块链作为异步注册表，用于记录领导者与具有群居属性的机器人之间传输的消息。

从分布式网络化系统的角度来看，在 [20] 作者提出了一种面向多机器人系统的网络解决方案，可增强空中无人机（UAVs）和地面机器人的能力、改善连接性、提高服务可用性，并实现高能效。该方案还采用服务组合方法，根据用户需求提供定制服务，并利用共识算法和区块链技术，通过检查本地训练的模型，确保敏感服务的完整性和真实性。

B. Hyperledger Fabric

Hyperledger Fabric 是一个专为企业系统设计的区块链平台，具备若干适用于分布式机器人系统的特性。这些特性包括：识别参与者，以实现安全的身份管理和证书生成；采用许可型网络，增强数据安全性；支持高性能的机器人数据实时处理；可配置的低延迟交易确认，以实现实时共识；以及划分数据通道并维护交易隐私和保密性的能力，能够与 ROS 2 的发布/订阅系统无缝集成。

文献 [13] 和 [7]研究了一种利用区块链技术控制机器人并采集、处理数据的框架，该框架集成了 ROS 2 和 Hyperledger Fabric 区块链。在一项演示中，机器人被用于检测库存管理中的感兴趣目标，结果发现区块链层并未显著影响机器人性能。 [7] 在此框架的基础上

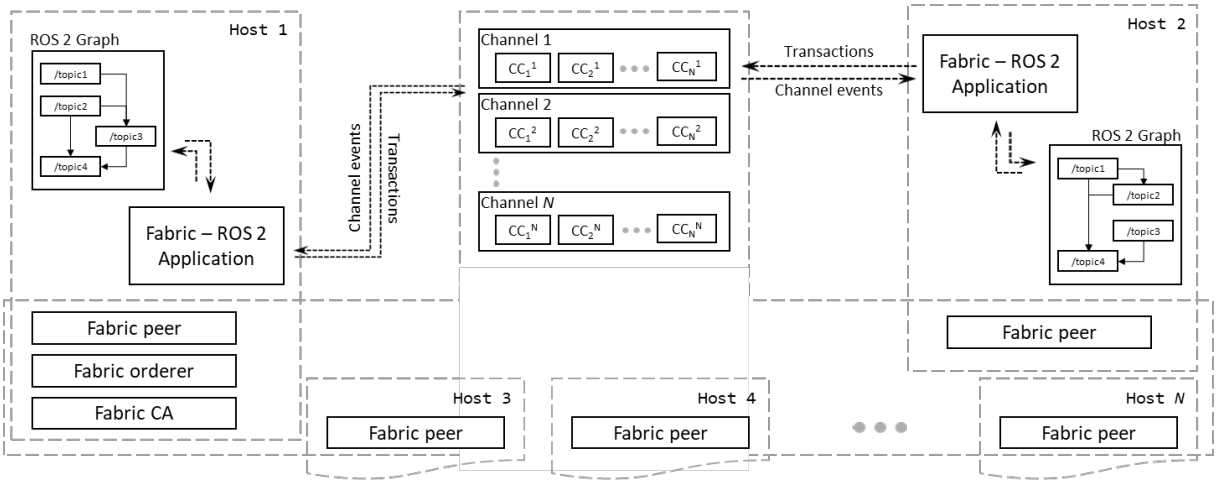


图 2：系统架构概览，展示了 ROS 2 和 Fabric 区块链接口。

引入超宽带（UWB）定位，以实现自主导航和机器人协作，具体应用于类似仓库环境中的库存管理。 [14] 提出了一种借助集成到 Fabric 智能合约中的动态 UWB角色分配算法，在多个移动机器人组成的系统中实现分布式决策的方法。该方法在提供相同功能的同时，还增强了身份与数据访问管理的安全性和可信度。

III. 系统架构

现在，我们将介绍采用事件驱动架构集成 Fabric 和 ROS 2 的方法。我们彻底重新设计了以往的方案，提出了一种全新设计，使其具有更强的参数化能力、更高的可扩展性，并能更灵活地确认链上或链下数据。

A. Fabric 网络配置

一组组织托管 Fabric 网络，该网络由一系列对等节点构成。它们通常是证书颁发机构（CA）和对等节点的容器，用于验证其在网络中的成员身份，也称为网络成员。CA 为 Hyperledger Fabric 中执行的所有操作提供密码学签名。除了为节点生成必要的证书外，CA 还定义组织的定义和应用程序。作为特定组织所属组件的可信标识，CA 在网络中至关重要。

Fabric 网络与其他区块链解决方案的区别在于其私有数据通道，通过这些通道，网络可以进行分区，并在分区的同时维护全局账本。通道是私有子网，允许两个或多个网络成员安全地通信。智能合约由部署在通道中的链码支持。组织使用链码定义，在链码用于某个通道之前就其参数达成一致。要使用链码，每个通道成员都必须批准其定义。获得足够多的通道成员批准后，链码定义便可提交到通道；随后，当链码首次被调用时，其状态将提交到相应的通道。

最后，智能合约定义了一组函数，不同组织的对等节点必须先实现这些函数才能进行交易；智能合约还包含协议，用于规定共同条款、数据、规则、概念定义和流程。区块链之外的应用程序通常会调用智能合约，并提供与账本交互的接口。编写应用程序和智能合约时，可以使用 Go、Java 或 NodeJS 等通用编程语言。

B. 架构概述

整体系统架构如图 2 所示。Fabric 网络实际上充当各个 ROS 2 子系统之间的数据传输层。ROS 2 正逐渐成为新一代机器人系统的事实标准。这一新版本的机器人操作系统（ROS）中间件基于以下关键原则设计：(i) 分布式、(ii) 抽象、(iii) 异步性和 (iv) 模块化 [21]。因此，ROS 2 被设计为一个内在的分布式框架，但在实际部署方面仍面临诸多挑战 [2]。ROS 2 通信层利用了多种可用的 DDS 协议实现。即使只有少量机器人，开箱即用的 DDS 配置也难以良好扩展；文献表明，机器人间通信需要采用 Zenoh 等性能更高的解决方案 [22]。尽管如此，ROS 2 仍是首选方案，因为即使在单机器人场景下，它也消除了 ROS1 中 ROS 主节点这一单点故障，同时在某些方面提供了更现代的应用程序接口和功能。DDS 确实针对低延迟、高吞吐量数据交换进行了优化，但迄今为止，大多数应用场景都局限于单个组织或网络。另一方面，Fabric 网络针对跨组织数据交换以及安全、防篡改的数据存储与共享进行了优化。

总的来说，我们并不打算让本文提出的 Fabric 桥接器取代 DDS，即使是在跨组织网络中也是如此；但我们认为，对于设备不处于同一网络中的远程操作，它在可审计性、安全性和

甚至稳定性方面也能带来显著优势。无论是在我们先前的工作 [13]、[7], [14]，中，还是在本文中，实验均表明 Fabric 网络每秒能够处理数百条消息，这足以满足许多关键数据应用场景的需求，包括机器人状态（例如移动机器人的里程计数据和定位数据，或机械臂的关节状态）以及控制输入，尤其是在对关键资产进行远程操作时。

与以往工作的主要区别在于引入了事件驱动架构，其中 ROS 2-Fabric 应用程序会执行来自其所连接的 ROS 2 和 Fabric 网络的回调。例如，当有新消息发布到指定主题时，就会触发 ROS2 事件。根据桥接应用的配置，这些消息可以以交易的形式转发至 Fabric 网络，例如，在不同的通道链码中创建或修改资产。当区块链中的新交易得到确认时，就会触发 Fabric 通道事件。

由于交易要得到确认，区块链中必须先通过共识生成新区块，因此数据传输存在固有延迟。在我们此前的工作 [13]中，我们研究了不同 Fabric 网络配置下的延迟和计算负载。本文展示了事件驱动方法如何在网络容量较高时显著降低数据传输延迟，即使在网络负载较低时，确认时间仍大致相同。图 3 展示了消息时序的一个示例，其中仅呈现一个简单的双主机系统，里程计数据、电池状态和速度控制数据均通过区块链传输。值得注意的是，传输延迟并非确定性的；由于两台主机上的应用程序都会在 Fabric 网络中发起交易，因此无法预先确定哪些交易会被纳入区块链中的某个区块。

图 2 中的架构图还显示，区块链层中的逻辑可以组织在不同的通道和链码中。有关这些概念的详细说明，请参阅我们先前的工作 [13]。

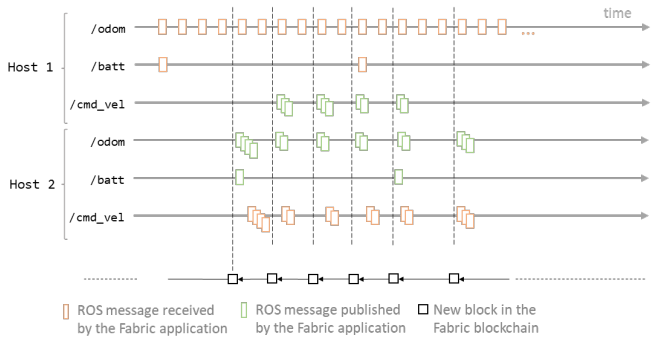


图 3：简化用例中的数据传输延迟概览。为便于说明，时间上重叠的消息以堆叠方式显示。

IV. 方法

本节介绍实验环境和实现细节。

A. *Fabric* 与 *ROS 2* 集成

在我们先前的工作中， [13], 我们展示了一个 ROS 2 与 Fabric 集成的概念验证，使用 *rclgo* 构建 Go 应用，使其能够同时与 Fabric 区块链和 ROS2 计算图交互。然而，先前的设计和实现存在若干局限性。首先，从 ROS2 的角度来看，Go 的特性要求应用预先了解数据消息类型，而这些应用需要部署在网络中的各个节点上。这限制了应用的参数化能力，也增加了采用难度。其次，fabric-sdk-go 与 Fabric 的接口不如其他 Fabric SDK 实现成熟，例如 NodeJS，尽管它在某些方面表现更好 [23]。例如，这会导致集成通道事件时出现问题。因此，先前工作中的实现依赖轮询区块链状态，以监测网络中其他节点的变更和交易，进而造成性能瓶颈。

为了解决上述问题，我们从头开始重新设计了 Fabric-ROS2 接口，重点关注模块化、参数化和通用化，并通过事件驱动方法实现可扩展性。我们使用了 NodeJS，这是一种后端 JavaScript 运行时环境，可用于开发 Fabric 区块链上的应用程序。借助 Fabric Node SDK，我们能够与区块链网络交互，从而提交交易并执行查询。

在本文提出的系统中，我们采用基于对等节点通道的事件服务，接收由成功提交的交易生成的链码事件。NodeJS 作为一种事件驱动编程语言，可与链码事件轻松结合，从而在账本更新时触发外部进程。客户端 API 提供了一种使用 NodeJS 处理这些事件的机制。在我们的案例中，每当有 ROS 2 消息发布到某个预配置主题时，Fabric 应用程序便会通过 *rclnodejs*（ROS 2 NodeJS 客户端库）接收数据。随后可以验证数据来源（例如，确保只有特定机器人中的 Fabric 对等节点才能发送关于该机器人的状态估计数据），并将其作为交易转发至区块链网络。Fabric 与 ROS 2 的集成可实现跨不同 ROS 2 网络传输 ROS2 数据，从而实现可行且安全的远程控制。

B. *Fabric* 智能合约

本文中的智能合约（即链码）使用 Golang 实现。与我们此前的工作相比，我们提供了一种通用且精简的智能合约，其通用数据结构可以容纳任意类型的 ROS 消息。智能合约函数也经过简化并精简至最低限度：通过单个 *set* 方法创建或编辑资产，通过单个 *get*方法查询单个或全部资产，并可删除资产。与先前实现的主要区别在于，现在这些方法会注册通道事件，其中包含交易的类型和有效载荷。这使应用程序能够

算法 1： Fabric 订阅者

数据： 参数

包含：
  资产 ID：/ros 消息 ID
  资产数据：
    // ROS 2 消息示例
    主题：/ros 主题名称
    消息类型：ROS 2 消息类型
    消息数据：{header: std_msgs/Header, . . . }

应用 1：ROS 订阅者 +Fabric 发布器
  // 初始化 Hyperledger Fabric 客户端
Fabric 客户端 ←initFabricClient();
  // 订阅所需的 ROS 主题
订阅者 ←subscribeToTopics(parameters);
当 为真**时执行**
    // 接收来自 ROS 2 主题的消息
    ROS 消息 ← subscriber.receive();
    // 在 Hyperledger Fabric 中创建资产
    fabric_client.createAsset(ROS 消息.ID, 资产数据);
    // 监听通道事件
    事件 ←fabric_client.listenToChannelEvents();
结束

算法 2: Fabric 订阅者

应用 2：Fabric 订阅者 + ROS 发布者
  // 初始化 Hyperledger Fabric 客户端 Fabric 客户端 ← initFabricClient(); 订阅者 ← subscribeToTopics(parameter); **如果** *event.isRelevant(parameters)* **则** // 从事件中获取资产数据 资产数据 ← fabric_client.getAssetData(event.asset_id); **如果** *asset_data.topic_name* != 订阅者 **则** // 将资产数据作为 ROS 2 消息发布 publisher.publish(asset_data.topic_name, asset_data.msg_type,asset_data.msg_data); **结束** **结束**

监听不同链码中的事件，而无需预先了解其结构或可用方法。

C. ROS 客户端应用程序

Fabric ROS 2 客户端应用程序专为与 Hyperledger Fabric 区块链网络以及系统的 ROS 2 计算图交互而设计。每台主机至少部署了两个应用程序，即 *Fabric* 发布器 和 *Fabric* 订阅者，用于处理资产。*Fabric* 发布器 将数据从 ROS 2 转发到 Fabric，而 *Fabric* 订阅者 则执行相反方向的操作。这两个应用程序可以合并为一个，但我们决定将逻辑拆分，以便于参数化和配置。

为详细说明应用程序的功能，我们在算法 1 和算法 2 中总结了关键操作。

D. 实验环境

为了评估所提出方法的性能，我们进行了一系列仿真和真实世界实验。实验旨在展示：(i) 相较于以往方案的优越性能；(ii) 事件驱动接口所带来的新型远程操作应用场景的可行性。

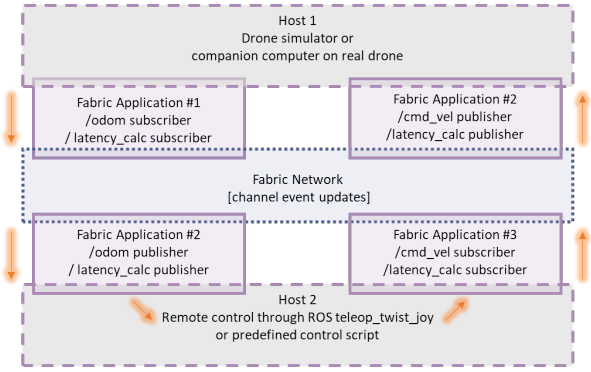


图 4：实现概览。

1) 硬件：Fabric 网络由三台硬件配置各异的计算机组成。在所有情况下，运行 Fabric 区块链的计算负载都微乎其微，这一点已在我们之前的工作 [13] 中得到证明。三台主机分别搭载 Intel i7-9750H、i7-12700 和 Intel i3-1215U 处理器，内存容量分别为 64GB、32 GB 和 16 GB。

在真实世界实验中，我们使用商用 Ryze Tello 微型航空器。无人机配备了 Optitrack 标记以进行定位，如图 5 所示。

2) 仿真环境：除了使用 Tello 微型航空器进行实验外，我们还仿真了更大规模的环境，以评估所提出方法的可扩展性。我们使用 ROS 2 Gazebo 仿真，并在其中配置了多架无人机。

3) 软件：机器人控制和定位在主机 1 上运行。Optitrack MOCAP 系统的数据由 VRPN 客户端 ROS 节点接收，并用于准确获取机器人的位置和姿态。远程操作应用程序和基本运动控制器在主机 2 上运行。两台主机均运行 Ubuntu 20.04 和 ROS 2 Galactic。随后，在每台主机上部署两个 Fabric 应用程序，以连接 ROS 2 系统。实现的基本结构如图 4 所示。在两台主机上，这些应用程序分别充当 ROS 订阅者和 Fabric 发布器，反之亦然。完整实现将发布在我们的 GitHub 上。

E. 指标

本文旨在评估通过所提出的 Fabric 桥接器实现近实时机器人控制的可行性。

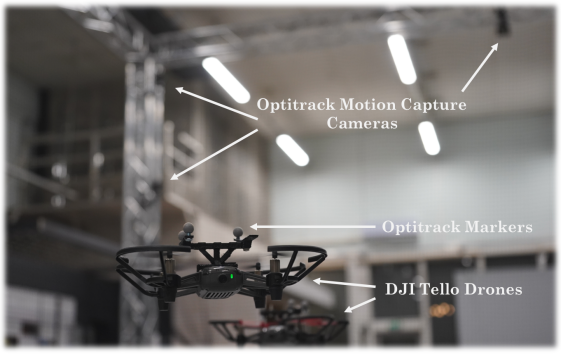
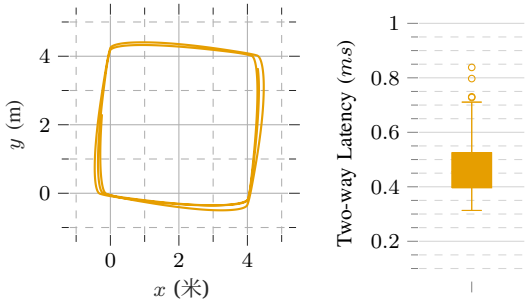
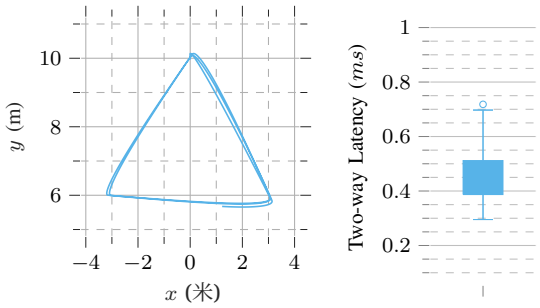


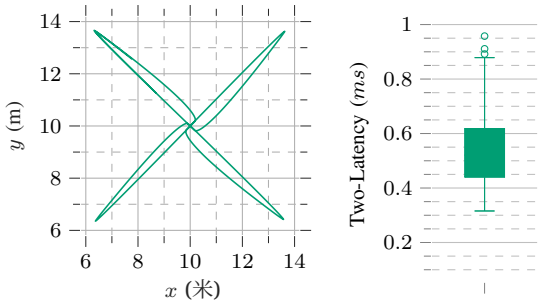
图 5：Optitrack 动作捕捉系统中的 Tello无人机。



(a) 正方形轨迹



(b) 三角形轨迹



(c) X形轨迹

图 6：仿真结果：三个不同控制器的轨迹和双向延迟。延迟的计算方式为：从一台主机生成里程计消息开始，到另一台主机收到匹配的速度控制消息为止，其中包括物理网络和 Fabric 网络的延迟。

为分析所提出的系统的性能，我们收集并分析了不同的指标。首先，我们测量双向延迟，并将其与基线进行比较：在该基线中，区块链中的数据按照先前研究中的实现方式定期轮询。其次，我们展示了所提出的系统可用于仿真和真实世界实验，并使用不同的控制器测量双向数据传输延迟。第三，我们对标准轨迹控制器进行极限测试，以研究 Fabric 节点之间的传输延迟达到何种程度时会过大，从而无法实现有效控制。

五、实验结果

本节展示仿真器和真实世界实验的实验结果，以说明所提出的接口通过 Fabric 区块链远程控制 ROS 2 机器人的适用性，以及相较于以往方案的改进。

表 I：新事件驱动方法与此前轮询桥接器在正方形轨迹下的性能比较 [13]。

状态频率 (Hz)	Load (消息/秒)	桥接方法	平均延迟 (s)	最大速度 (米/秒)	CPU (%)
30	70	事件	**0.55**	0.3	**0.2 - 0.4百分比**
		轮询	**0.55**	0.3	3 - 7百分比
50	110	事件	**0.55**	**0.35**	2 - 2.5百分比
		轮询	N/A	N/A	N/A

A. 仿真结果

为初步评估所提方法的可行性并研究数据传输延迟，我们针对远程控制无人机测试了不同类型的轨迹。我们使用了第 IV 节所述的三主机 Fabric 网络，其中一台主机运行 Gazebo 仿真器，另一台主机运行控制器。图 6 展示了三种不同控制器记录的轨迹和双向延迟。不同控制器的延迟表现一致，差异极小，且均低于 1 秒。

双向延迟的测量方法是：在控制器系统中保留消息副本里的原始 ROS 2 时间戳，并将这些消息转发回仿真器系统。随后，我们可以在仿真器中比较 ROS 2 消息中存储的原始时间戳与当前仿真时间。此延迟包括无线网络双向传输产生的传输延迟，以及 Fabric 区块链中两个交易的确认时间，每个方向各一个。因此，我们可以得出结论：单向传输延迟加上区块链确认延迟始终介于 350 ms 和 400ms 之间。然而，如前文所述，该指标具有非确定性，这是因为它取决于区块链创建新区块并确认其中数据之前需要累积的交易数量。

此外，我们将我们的方法与先前基于轮询的实现进行了比较。我们优化了 [13] 中介绍的先前方案，并用 NodeJS 重写，以便进行更公平的比较。性能结果如表 I 所示。尽管先前论文报告的单向延迟接近 1 秒，但当前优化后的方案已达到与事件驱动桥接相当的水平。主要的实现差异在于，在应用层保留了交易元数据的缓存。这样可以提高轮询过程的效率，只需轮询最近的交易。值得注意的是，缓存的并非实际交易数据，而仅仅是元数据。尽管延迟相近，但一旦提高机器人状态消息的发布频率，轮询桥接器就会显露不足。如表 I 最后一行所示，

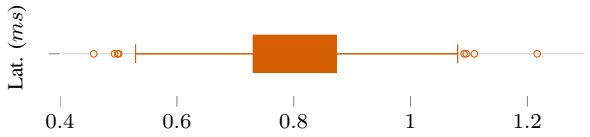
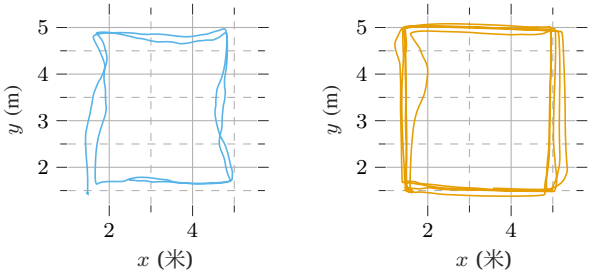


图 7：三架无人机沿图 6 所示的三条轨迹飞行时的仿真延迟分布。



(a) 参考。 (b) 使用 Fabric 的恒定速度。

图 8：真实世界实验的实验结果。子图 (a) 显示了未接入 Fabric 网络时 Tello无人机以恒定的 0.5 米/秒速度飞行的参考轨迹。子图 (b) 显示了接入 Fabric 后以相同恒定速度飞行的轨迹。

当消息总量超过 100 消息/秒时，轮询会彻底失效，导致控制延迟不断增大。

最后，为了确保桥接在无人机数量增加时仍能保持良好性能，我们在图 7 中展示了一个仿真场景下的延迟分布：图 6 中的三条无人机轨迹同时受到控制，且机器人状态发布频率有所提高。在此仿真中，总网络负载超过 250 消息/秒（推送至网络）。这表明该系统具有可扩展性，可通过将链码分配到不同通道来进一步扩展，并让网络节点的不同子集参与其中。

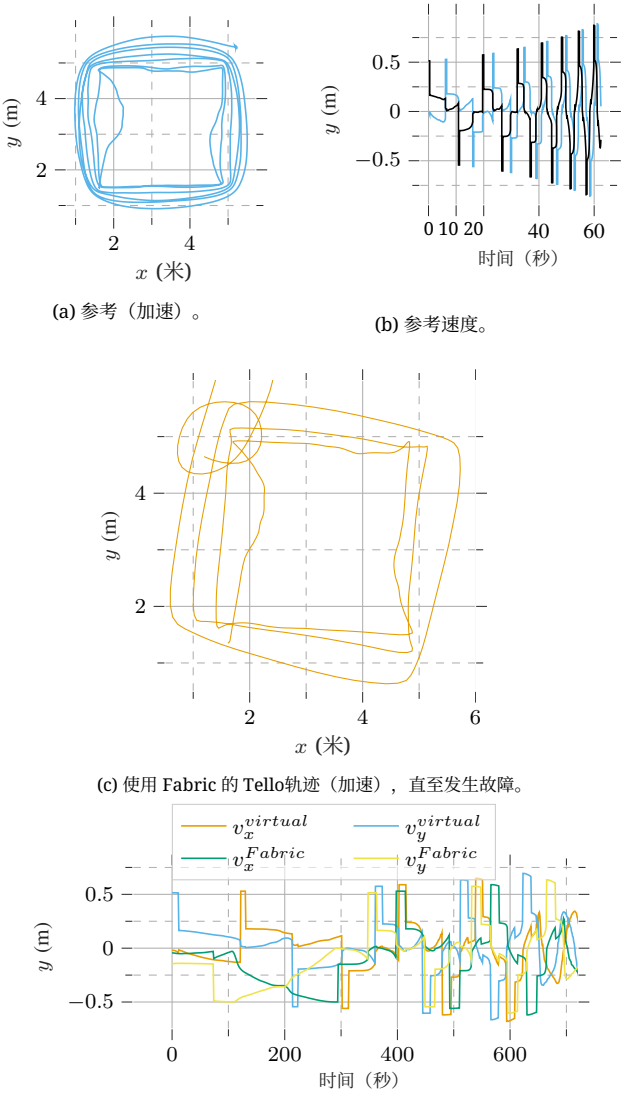
B. 真实环境结果

在 Tello无人机的实验中，我们研究了桥接器适应更真实条件的能力：无人机本身通过无线接口由此前运行仿真器的主机控制。此外，状态估计改为由 Optitrack 动作捕捉系统在外部完成。这两项变化增加了不确定性，也带来了额外的非确定性网络延迟。

为展示所提出的系统开箱即用即可运行，图 8 展示了在动作捕捉场地中，使用和不使用 Fabric 桥接器时 Tello无人机的参考轨迹。随后，我们尝试进一步考验桥接器的极限，以展示由于固有的网络延迟，控制器复杂度与系统性能之间存在内在权衡。图 9 展示了我们对不断提高速度所做的实验。虽然简单的控制器在线速度达到 1米/秒时仍能在仿真中良好运行，但我们观察到，加入 Fabric 桥接器后会导致控制器失效：应用相应控制时，用于生成控制输入的机器人状态数据在空间上已偏离实际机器人位置太远。

C. 讨论

通过本节，我们展示了所提出的 ROS2 - Fabric 桥接器在移动机器人远程遥操作中的实际适用性。我们还将所提出的方法与先前的实现进行了比较 [13]，结果表明，采用新的事件驱动设计和实现后，延迟显著降低。



(a) 参考（加速）。 (b) 参考速度。

(c) 使用 Fabric 的 Tello轨迹（加速），直至发生故障。

(d) 逐渐提高 Tello 的线速度，直至控制器发生故障。

图 9：突破极限。当双向桥接延迟对于基本控制器而言过大时，控制器发生故障的示例。子图 (b) 再次展示了不使用 Fabric 的参考情况，但这次在每次转弯时都提高线速度。子图 (c) 展示了线速度随时间变化的 x（黑色）和 y（蓝色）分量。子图 (c) 展示了速度增加时的真实世界轨迹，而子图 (d) 展示了控制器发生故障前的速度曲线。虚拟 速度表示控制器与 Tello驱动程序运行在同一主机上时所产生的控制输入。

1) 局限性:: 当前工作假设使用的是一个非常简单的控制器，它不了解 Fabric 桥接器的影响，例如，新区块链区块生成后，消息随即以突发形式发布。与此同时，我们针对更多机器人所进行的桥接优化，假设控制器不需要所有话题消息，并且能够以相同方式处理经过优化后发布的消息子集。从机器人系统的角度来看，更优化且具备网络感知能力的控制器，即使在网络拥塞时也可能保持良好性能。类似地，当前优化并不一定适用于任何控制算法。不过，我们的重点是研究和分析所提出的 ROS 2-Fabric 的潜力

接口，并展示其在现实世界中的适用性。因此，控制的具体执行方式不在本文讨论范围之内。我们也希望该系统可供人类操作员使用，但为了能够在不同实验环境下定量评估其性能，我们采用了预先定义且可重复执行的控制程序。

2）未来工作的潜力： 迄今为止，这项概念验证主要致力于探索 Fabric 区块链在近实时远程操作方面的极限。除了在后续提供更安全、可审计的数据传输外，从功能角度来看，我们还可以利用 Fabric 的其他特性来增强机器人系统。首先，我们计划将 Fabric 桥接器与现有的 ROS2 系统安全解决方案相结合，尤其是 SROS 2 [24]，[25]。这将使我们能够实现更去中心化、跨组织的身份管理，在通道而非单个话题中进行私有数据隔离，并将高层逻辑（例如访问控制或远程操作员之间的冲突）与机器人现有的底层逻辑分离。其次，我们可以利用实时网络延迟监测，以及对 Fabric 区块链中区块数据验证过程的了解，估算机器人状态，从而增强远程操作应用。这需要预先了解区块链中共享的状态（例如，我们实验中的里程计数据），并建立系统模型（例如，在本文所示的用例中，单积分器模型或许就足够了）。理论上，这种对远程操作的增强可以让操作员根据控制数据送达时机器人可能的状态来生成控制命令，而非依据生成状态描述数据时的状态。

VI. 结论

本文提出了一种新的事件驱动型 Fabric–ROS 2 桥接，用于在 ROS 2 系统之间转发数据。我们特别关注远程操作；在跨组织数据传输方面，Fabric 网络比 ROS 2 更具优势。所提出系统的当前实现，在将 ROS 2 与 Fabric 区块链集成方面，性能显著优于以往工作。在仿真和真实场景中的实验结果表明，即使网络负载相对较高（机器人状态和控制输入的传输速率超过每秒 100 条消息），双向网络延迟也始终低于 0.5 秒。尽管这些数值无法与单一系统内 DDS 的性能相提并论，但该方案在安全性和数据可靠性方面具有诸多优势。

致谢

本研究由芬兰科学院 RoboMesh（资助编号 336061）和 AeroPolis 项目（资助编号 348480）。

[1] Pieter Simoens、Mauro Dragone 和 Alessandro Saffiotti。机器人物联网：概念、附加价值与应用综述。《国际先进机器人系统期刊》，15(1)，2018年。

[2] Jiaqiang Zhang 等人。边缘云连续体中的 ROS 2 分布式机器人系统：关于新型架构和技术成熟度的综述。发表于 FMEC。IEEE，2022年。[3] Eduardo Castell´o Ferrer。《区块链：群体机器人系统的新框架》。发表于未来技术会议论文集。Springer，2018年。[4] Volker Strobel、Eduardo Castell´o Ferrer 和 Marco Dorigo。利用区块链技术在群体机器人集体决策场景中管理拜占庭机器人。发表于第 17 届 AAMAS，2018年。[5] Ferrer、Eduardo Castell´o 等人。利用区块链技术在拜占庭多机器人系统中跟随领导者。IEEE T-Ro，2021年。[6] Farhad Keramat、Jorge Pe˜na Queralta 和 Tomi Westerlund。借助 IOTA 和 ROS 2 实现分布式机器人系统的分区容错与拜占庭容错决策。arXiv:2208.13467，2022。[7] Salma Salimi、Paola Torrico Mor´on、Jorge Pena Queralta 和 To mi Westerlund。利用 Hyperledger Fabric 区块链实现安全异构多机器人协作与对接。发表于 WF-IoT。IEEE，2022。[8] Ruffin White、Gianluca Caiazza、Agostino Cortesi、Young Im Cho 和 Henrik I Christensen。《Black block recorder：通过区块链为机器人实现不可篡改的黑匣子日志记录》。IEEE RA-L，4(4)，2019年。[9] USP Aditya 等人。《区块链在机器人领域的应用综述：问题、机遇、挑战与未来方向》。《网络与计算机应用杂志》，196，2021年。[10] E. C. Ferrer 等人。Robochain：面向人机交互的安全数据共享框架。arXiv 预印本 arXiv:1802.04480，2018年。[11] X. Yu 等人。面向机器人与自主系统的边缘联邦学习和分布式账本技术概述。发表于《计算机科学进展》。Elsevier，2021年。第 18 届 MobiSPC-2021。[12] J. Pe˜na Queralta 等人。移动边缘计算中的区块链：共识机制与可扩展性。发表于《移动边缘计算》。Springer，2021年。[13] Salma Salimi、Jorge Pe˜na Queralta 和 Tomi Westerlund。Hyperledger Fabric 区块链与 ROS 2 的集成，面向自主移动机器人。发表于 IEEE/SICE SII。IEEE，2023年。[14] Paola Torrico Mor´on、Salma Salimi、Jorge Pe˜na Queralta 和 Tomi Westerlund。利用分布式账本技术进行 UWB 角色分配，以实现多机器人系统中的可扩展相对定位。发表于 IEEE ROSE。IEEE，2022年。[15] Amr Mokhtar、Noel Murphy 和 Jennifer Bruton。基于区块链的多机器人路径规划。发表于第 5 届 WF-IoT。IEEE，2019年。[16] Wenbo Wang 等人。区块链网络中共识机制与挖矿策略管理综述。IEEE Access，7，2019年。[17] Pramod Abichandani、Deepan Lobo、Smit Kabrawala 和 William McIntyre。使用以太坊区块链实现多四旋翼网络的安全通信。IEEE物联网期刊，8(3)，2020年。[18] Trung T Nguyen、Amartya Hatua 和 Andrew H Sung。利用区块链解决群体机器人集体决策问题。发表于区块链与应用大会。Springer，2019年。[19] Sahar Salimpour 等人。利用 IOTA 智能合约在多机器人系统中进行基于视觉的去中心化拜占庭代理检测。发表于 FPS。Springer，2022年。[20] Moayad Aloqaily、Ismaeel Al Ridhawi 和 Mohsen Guizani。面向车辆网络的能效区块链与联邦学习支持。IEEE智能交通系统汇刊，2021年。[21] Steven Macenski、Tully Foote、Brian Gerkey、Chris Lalancette 和 William Woodall。机器人操作系统2：设计、架构及实际应用。《科学·机器人学》，7(66)，2022年。[22] Xianjia Yu、Paola Torrico Mor´on、Sahar Salimpour、Jorge Pe˜na Quer-alta 和 Tomi Westerlund。用于多机器人相对蒙特卡洛定位的松耦合里程计、UWB测距与协作式空间检测。arXiv，2023年。[23] Luca Foschini、Andrea Gavagna、Giuseppe Martuscelli 和 Rebecca Montanari。Hyperledger Fabric 区块链：链码性能分析。发表于 ICC。IEEE，2020年。[24] Victor Mayoral-Vilches、Ruffin White、Gianluca Caiazza 和 Mikael Arguedas。SROS2：适用于 ROS 2 的易用网络安全工具。发表于 IEEE/RSJ IROS。IEEE，2022 年。[25] Kaiyuan Chen 、 Jiachen Yuan 、Nikhil Jha、Jeffrey Ichnowski、John Kubiatowicz 和 Ken Goldberg。FogROS G：通过全局可寻址性实现安全、互联和移动雾计算机器人。arXiv 预印本 arXiv:2210.11691，2022。