

雾计算赋能机器人同步定位与地图构建

杨旻, 李凯, 徐海东, 王华俊, 王昆仑, 李剑, 周明拓

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘要: 机器人探索预先未知的环境时通常需要同步定位和地图构建 (SLAM), 例如, 在救援场景中, 可以利用雾计算这种新兴的计算模式来实现更快、更精确、更节能的机器人 SLAM。基于此, 提出了雾计算赋能机器人 SLAM 的框架设计, 并分析了其面临的挑战, 最后通过真实试验床演示了该框架设计。

关键词: 雾计算; 机器人; 同步定位和地图构建

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2018.00050

Fog computing-enabled robot simultaneous localization and mapping

YANG Yang, LI Kai, XU Haidong, WANG Huajun, WANG Kunlun, LI Jian, ZHOU Mingtuo

Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

Abstract: Robot simultaneous localization and mapping (SLAM) is often required when robots are used to explore prior-unknown environment, e.g., in rescue scenarios. Fog computing, an emerging computing mode could be used to enable faster, more accurate, speedier, and energy-saved robot SLAM. The framework of fog-enabled robot SLAM addressing was proposed, and challenges it faced were analyzed. Finally, technologies by real implementation of testbed were demonstrated.

Key words: fog computing, robot, simultaneous location and mapping

1 引言

机器人已进入人们生产生活的许多领域, 它能够给人们的日常生活带来很多便利, 节省大量的人力, 完成人类不可能完成的任务等。在现实世界中, 往往需要机器人来探索未知的环境。例如, 地震中当有人被埋在倒塌的建筑物时, 并且空间或环境状况不允许救援人员或动物进入时, 先进的方法是派送适当尺寸和形状的机器人去实施搜救, 收集环境的生存条件 (如氧气水平和温度等) 信息。测绘环境的信息对制定救援计划至关重要, 这需要搜救机器人构建环境的地图。同时, 机器人也需要知道自己的位置和方向。机器人定位和地图构建 (SLAM, simultaneous localization and mapping) 技术被用来执行环境地图的并行构建及机器人方向和位置估计^[1]。

一般来说, 在上述救援案例中, 要求机器人 SLAM 具有低成本、低功耗、准确和快速的特点。但是, 这些要求相互制约。首先, 一次救援活动可能需要使用数十个甚至数百个机器人, 因此, 机器人成本是一个大问题, 常见的 SLAM 传感器包括激光雷达和相机, 虽然激光雷达的精确度通常比普通相机更高, 但它们比相机昂贵得多, 所以后者更适于大型救援机器人。其次, 精确构建地图和定位对于救援路径规划非常重要, 因此需要高性能计算单元 (特别是在涉及许多先进算法的优化步骤中), 这当然与低成本需求相矛盾。第三, 救援机器人使用电池供电, 因此电池寿命是一个关键因素。为了减少机器人的计算任务, 可以考虑使用低性能算法, 从而节省机器人的能量消耗, 但是这可能导致 SLAM 不准确。第四, 众所周知, 时间在救援过程

中至关重要,这就要求机器人尽可能地移动,并快速执行 SLAM,给机载计算单元带来很大压力。此时,虽然可以使用低复杂度算法来节省 SLAM 时间,但这样做的一个后果是 SLAM 精度可能受到影响。第五,在使用多个机器人的大面积地区,需要 SLAM 中的机器人之间进行合作并最终合并地图,这就要求有可以正常工作的网络,但是,在灾难情况下网络通常都受到了损害,无法正常工作。另外,需要一个机器人成为 SLAM 中的领导者并且主导地图合并,这个领导者必然会消耗额外的能量。

雾计算能够为机器人 SLAM 问题提供有效的解决方案,它是近年来新兴的计算模式。根据 OpenFog 联盟^[2-3]的定义,雾计算利用从云到物(垂直方向)和横跨不同网络(水平方向)的所有可能的资源来执行计算、存储、控制和通信以及在需要的地方部署服务。在雾计算中,路由器、交换机、文件服务器、网关和基站等都可以作为雾计算节点(FN)^[4-5]。通过雾计算,如果机器人能够连接到网络,那么一部分繁重的计算任务就可以卸载到一个或一组具有更高计算能力的雾节点上,从而节省机器人计算单元成本、计算时间和能耗以及提高准确性和构建地图的速度。此外,如果多个机器人通过雾计算网络相互连接,使用机器学习算法并且训练数据相互共享,那么很多机器人可以一起协作绘制地图并提高性能。如果机器人能够连接到互联网,云也可以卸载 SLAM 计算任务^[6]。但是,SLAM 可能会遭遇间歇性云连接,同时云卸载也会造成更多的时延,消耗更多通信资源。

本文旨在提出雾计算赋能机器人 SLAM 的框架并讨论相关技术,开发试验床验证技术可行性。

2 雾计算赋能机器人 SLAM

本节首先介绍雾计算技术、机器人 SLAM,然后提出雾计算赋能机器人 SLAM 的框架,并分析该框架及其面临的挑战和要求以及其功能视图。

2.1 雾计算

从商业运营模式到工作生活方式,智能物联网技术正深刻改变着人类社会。要使物联网拥有无处不在的智能,就必须充分利用网络环境中分散存在的计算、存储、通信和控制等能力,通过资源共享机制和协同服务架构来有效提升生产效率或用户体验,这就是雾计算技术。

云计算是对海量的全局物联网数据实施集中式、系统性的全面分析和理解的技术;雾计算是对有限的本地物联网数据实施分布式、实时性的智能处理和决策的技术,其主要优势是更短的服务响应时间、更强的本地化计算能力、更少的数据传输负载、更安全的分散式服务架构以及更快更精准的分析、决策和控制机制。以上 2 种计算技术各有所长,可以互为补充,实现协作共赢。

如果把雾计算技术的智能物联网应用类比为人们的工作单位,其组织管理架构也包含若干层级,处于不同层级的人员具有不同的数据分析、任务处理和决策控制的能力和权限:一线工作人员擅长收集数据,负责完成本地数据压缩、信息提取和异常事件监测;各级中层干部不仅负责上传下达的信息通信管道,也能够分析和处理更大区域范围内的复杂相关数据,做出及时而准确的决策;最高管理者拥有最广控制范围、最多信息来源、最强分析智能、最大存储空间和最高决策权力,负责全局核心数据的统筹分析和处理、异常诊断和溯源、隐患预测和搜寻、知识发现和创造、长期规划和战略决策等重要任务。

显然,雾计算模式积极利用了所有网络节点(接入点、基站、路由器、交换机和网关等)的计算、通信和存储资源,充分发挥不同位置、不同层次节点的能力和作用,更加符合人类社会的资源分布情况、能力权限分级和决策控制机制,从而能够充分保障广泛物联网应用、服务的智能化和高效率,显著提升用户体验。

具体而言,雾计算的应用领域包括:对服务响应的端到端时延性能有上限要求(10 ms)的网联汽车和无人机遥控,对实时数据的网络传输速率有下限要求(1 Gbit/s)的 3D 虚拟现实游戏和自动驾驶汽车,对连接可靠性和服务安全性有严苛要求(99.999%)的工业控制系统和智慧城市管理。

当前,雾计算技术的研究和标准化工作刚刚起步。面临的主要技术挑战和研究热点为:如何在雾计算节点间建立信任关系;如何在雾计算节点间推动资源充分共享;如何在云—雾—边缘等多层次之间实现高效通信和紧密协作;如何在异构节点之间完成复杂任务的公平按需分配等^[7-8]。

可以预见,随着雾计算技术的不断发展成熟和普及应用,智能物联网将越来越便捷、越来越真实地借鉴和映射人类社会的组织架构和决策机制,从

而能用更自然和更熟悉的方式为每个人提供触手可及、无处不在的智能服务。

2.2 机器人 SLAM

SLAM 是一个过程, 包括同步构建环境地图和估算机器人的位置和方向。首先, SLAM 在支持路径规划和可视化等许多任务方面非常重要, 其次, 它需要减少估算机器人状态时的误差。机器人 SLAM 涉及许多步骤, 包括通过传感器收集数据、前端测距、后端优化、环路闭合和构建地图^[2]。传感器用于收集环境信息, 里程计根据传感数据来估算机器人的运动, 并且优化前 2 个步骤中的噪声和失真以提高准确性。环路闭合步骤先是识别运动的相交点, 然后估计真实的环境拓扑。在这些步骤中, 优化具有最繁重的计算任务。

2.3 机器人 SLAM 的雾计算框架

机器人 SLAM 的雾计算框架如图 1 所示。

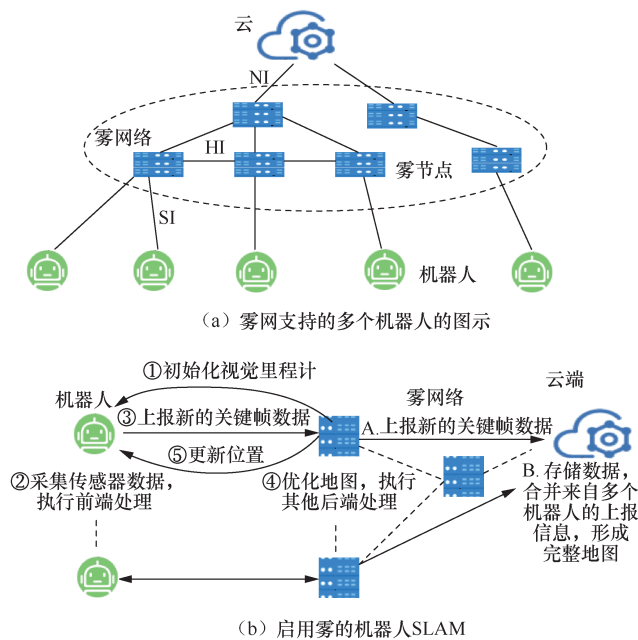


图 1 机器人 SLAM 的雾计算框架

图 1(a)显示了多个机器人连接到一个雾网络, 通过该网络, 每个机器人的 SLAM 可以卸载到雾网络。由于机器人是移动的, 因此它们通过无线方式 (Wi-Fi 或 4G/5G) 连接到雾网络。雾网络可能连接到云, 但这不是必需的, 特别是在灾难中云不可用的情况下。计算卸载可以由一个雾节点或多个雾节点联合完成。请注意, 雾网络可能由同质或异质网络 (无论是有线网络还是无线网络) 组成。

机器人和雾节点之间的功能接口称为南向接口 (SI), 南向接口用于定义数据平面和控制平面的信息。数据平面承载关键帧并提供由机器人或雾节点处理的信息。控制平面带有管理整个工作流程的程序, 例如, 初始化、停止、获得关键帧和设置姿势等。雾节点可以通过水平接口 (HI) 相互通信。多雾节点可协作并实现 CoMP (多点协调)、分布式存储系统或分布式计算系统, 以获得更强大的通信、存储和计算能力。水平接口携带支持协调功能的控制和数据信息。当机器人非常接近雾节点或雾网络时, 机器人处理的时延可缩短到毫秒级别。雾节点可以通过北向接口 (NI) 与云端通信。

在机器人 SLAM 中, 除了收集传感数据外, 其他计算步骤可以卸载到雾网。在使用相机的情况下, 视频流需要高数据速率无线传输, 例如几到几十 Mbit/s。另一方面, 前端测距需要 (相对) 比其他步骤低得多的计算容量, 并且前端处理的输出数据速率可能低至几十 kbit/s。因此, 建议将测量之后的步骤卸载到雾网。

图 1(b)给出了雾计算赋能机器人 SLAM 的方案。它假设机器人出于成本考虑而使用相机, 并支持多个机器人 SLAM 的协作。首先, 雾节点初始化机器人的里程计过程, 然后, 机器人开始进行前端处理, 比如抽象关键帧并自行定位。机器人将关键帧流 (这是代表环境的主要视觉捕捉) 报告给雾网络以优化地图。雾网络向每个机器人发送位置信息, 机器人将纠正累积的位置漂移。当云可用时, 它可以合并来自不同机器人的地图。如果无法连接到云, 则一个主雾节点可能合并来自不同机器人的地图。

2.4 挑战和要求

OpenFog 联盟已经确定了雾计算需要考虑的八大支柱^[9], 它们也是雾计算赋能机器人 SLAM 面临的挑战和要求。

1) 安全性: 由雾计算支持的机器人 SLAM 可能涉及关键甚至具有生命危险的任务, 特别是在救援应用中。将机器人连接到雾网络和云将会使机器人 SLAM 过程暴露在可能的黑客攻击之下, 从而可能会导致丢失地图数据和/或 SLAM 过程被篡改。

2) 可扩展性: 在应用中可能需要动态调整部署机器人 SLAM 雾网络后的技术和业务, 这意味着雾

网络的性能、容量、安全性、可靠性、硬件和软件应该可扩展。雾节点可能通过增加硬件和软件来扩展其容量，并且如果计算任务过重，雾网络可能通过添加新节点来扩大规模。

3) 开放性: 开放性对于成功部署无处不在的雾网络至关重要。它需要不同的供应商考虑成本、质量和创新。借助互操作性和软件技术，可以在任何地方部署或定义雾计算。机器人可以连接附近网络执行 SLAM。

4) 自治: 它要求雾网络可以在其外部服务或连接丢失时完成 SLAM，这样即可消除集中处理的需要（如部署在云里）。在云连接通常不可用的灾难情况下，它也需要雾网络支持机器人 SLAM。如果有雾节点失效，则剩余的其他雾节点需要接管任务并继续 SLAM 过程。

5) RAS: RAS 包括可靠性 (reliability)、可用性 (availability) 和服务性 (serviceability)。对于使用雾计算赋能机器人 SLAM 来说，可靠性至关重要。网络、软件和硬件都必须可靠。救援机器人通常部署在地震、火灾和风暴等恶劣环境中，需要非常稳健的通信。另外，必须持续支持机器人 SLAM 随时可用和可提供服务，这意味着雾机器人 SLAM 可以自我修复、自主配置等。

6) 敏捷性: 当机器人在环境中移动时，或环境动态变化很快时，需要快速响应雾网络。救援机器人挽救生命的时间至关重要，因此雾网络需要尽可能快地构建地图并进行定位。

7) 层级架构: 当多个机器人共同用于构建地图时，主雾节点合并来自不同机器人的地图。主雾节点是与其他雾节点相比更高层的节点，并可协调其他雾节点的行为。此外，如果还有其他与 SLAM 相关的应用程序（如救援），则 SLAM 功能可能需要与路径规划、监控、业务运营等更高层的服务进行交互。

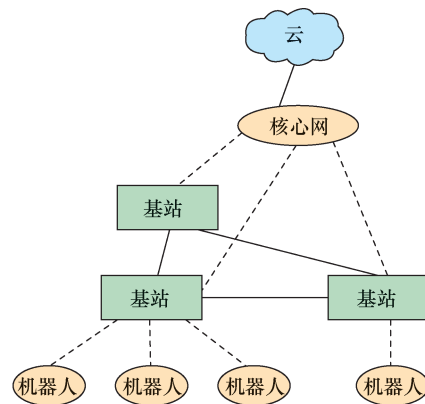
8) 可编程性: SLAM 可能随着环境、网络拓扑等动态变化，所以雾网络和节点需要在硬件和软件层高度自适应编程。雾节点需要自动重新分配以适应这些变化。

2.5 架构和功能视图

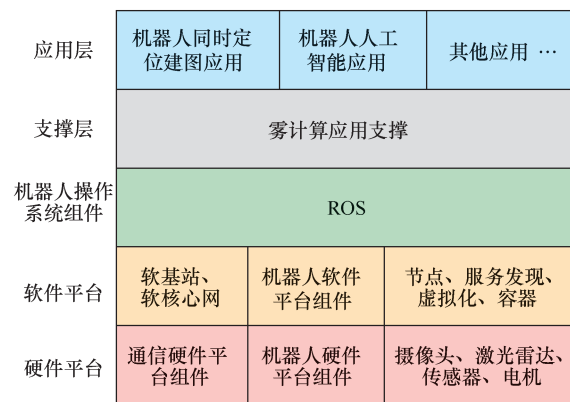
2.5.1 架构

为了更直观地说明雾计算赋能机器人 SLAM，使用 OpenLTE 作为机器人和雾网络通信的手段^[10]。雾机器人 SLAM 架构视图如图 2 所示。

OpenLTE 是软件定义的 LTE 系统，运行在通用处理器 (GPP) 平台上，包括软件定义的基站 eNode B (SDN-eNode B) 和软件定义的演进分组核心网 (EPC, evolved packet core)。eNode B 和 EPC 都可以是笔记本或服务器，并且可以充当雾节点来执行机器人 SLAM 的计算卸载。



(a) OpenLTE雾网络支持机器人SLAM示例



(b) 支持OpenLTE的雾计算赋能机器人SLAM的体系结构

图 2 雾机器人 SLAM 架构视图

在雾计算赋能机器人 SLAM 架构视图中，雾机器人 SLAM 系统由硬件层、骨干软件层、雾应用程序支持层和应用层组成。

1) 硬件层: 以 OpenLTE 支持的雾网络为例，硬件包括 eNode B 及 EPC 硬件，机器人硬件和摄像头、激光雷达、其他传感器和执行器等。

2) 骨干软件层: 用于管理雾节点硬件和雾节点应用软件，因此它们包括 Linux 和 Android 操作系统、通信软件、雾节点和服务发现等。使用 OpenLTE 时，通信软件包括 eNode B 和 EPC 功能。雾节点发现是雾网络的基本要求，通过雾网络发现邻居雾节点，然后可以执行资源共享和分布式

计算^[9]。该层可能包含硬件虚拟化和容器。借助虚拟化技术，雾节点上的计算和存储资源可针对具有良好隔离的不同应用进行分割。骨干软件层的另一个重要组成部分是机器人操作系统 (ROS)，它是一种为异类计算集群提供服务的机器人中间件，能够完成如硬件抽象、低级设备控制，常用功能如实现进程之间的消息传递以及数据分组管理等任务。它采用模块化设计，每个模块可以分布式部署在不同的雾节点上。功能模块可以发布其他人可以订阅的消息，然后数据在不同节点之间流动。ROS 可以轻松地在机器人和雾节点之间进行数据交换。

3) 雾应用程序支持层: 此层支持雾应用程序的安全性、存储、消息和运行引擎等。

4) 应用层: 雾网络可能支持的一系列应用包括机器人 SLAM、人工智能等。

2.5.2 功能视图

雾机器人 SLAM 的功能视图如图 3 所示。

由图 3 可知，功能模块包括任务进程、通信、存储、部署、安全和接口。考虑到低时延需求和面向流的处理，它可以应用实时流处理框架，如 Storm 和 Spark。以 Storm 为例，任务过程可以由

应用程序、任务调度程序、集群协调、主管程序和工作程序组成。为了与传统机制兼容，部署管理也可以采用 ROS。存储管理器可以支持分布式存储系统和集中数据库分布式存储系统，以适用于对时延不敏感的应用，同时要求大容量存储。集中式数据库适用于时延敏感系统。通过部署管理器可以选择不同的存储方案。安全管理员可以管理不同的安全功能，如认证、加密、隐私保护等。南向接口提供雾节点与机器人之间的控制平面、数据平面和管理平面的信息交换。水平界面提供雾节点之间的信息交换，实现基于雾网络的协同功能。北向接口提供雾节点和云端之间的信息交换，以支持时延不敏感、计算密集和大存储任务。

满足雾机器人 SLAM 的挑战和要求所需要的功能如表 1 所示。

2.6 能源效率分析

由于机器人的计算能力有限，移动机器人可能会将任务卸载到雾节点。电池一直是一个关键问题，是移动设备的关键瓶颈^[11-12]，如何尽最大努力降低任务执行的总能量消耗是任务卸载的主要目标。当卸载任务时，移动机器人将承担额外的能量

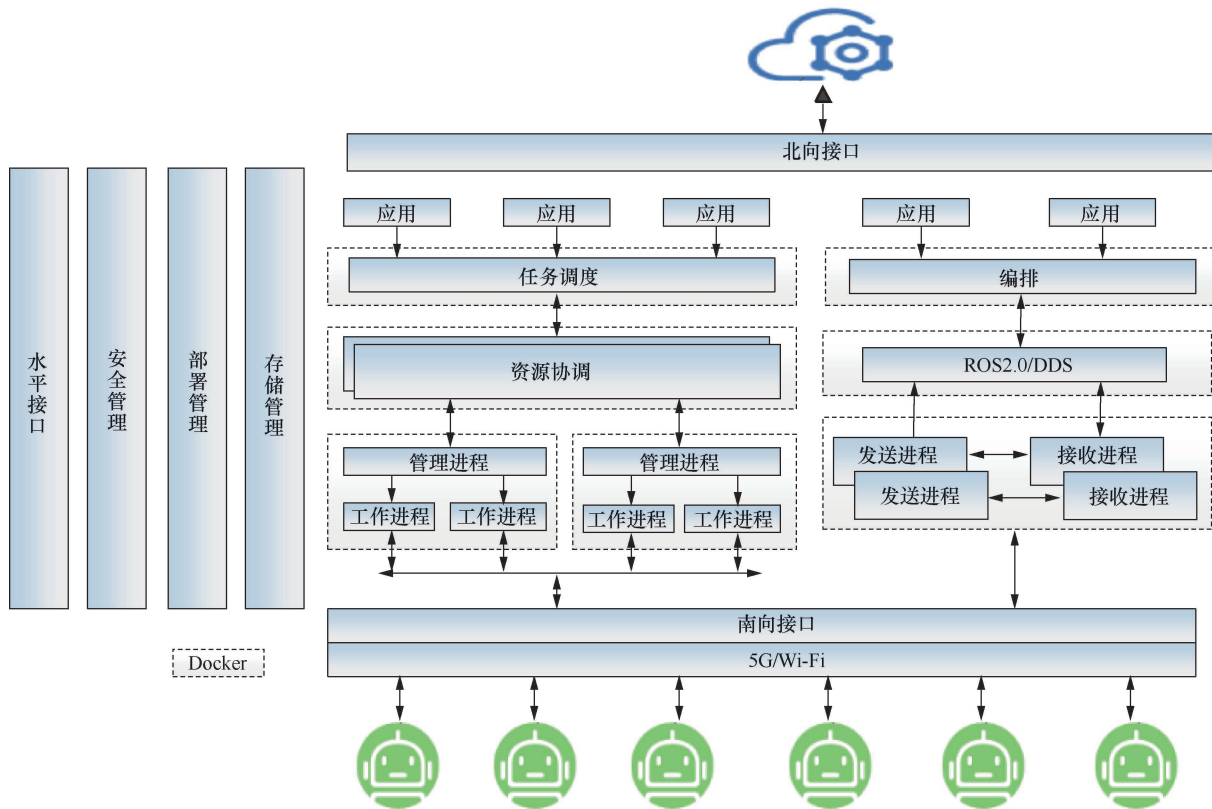


图 3 雾机器人 SLAM 的功能视图

表 1 满足雾机器人 SLAM 的挑战和要求所需要的功能

挑战和要求	功能
安全	机器人身份验证应在南向接口上支持 南向接口、北向接口和水平接口应支持数据信息加密 关键帧和地图数据中包含的敏感信息在存入数据库之前应加密或删除
扩展性	任务调度器可以根据任务的 QoS 需求、机器人的状态、雾节点和云端协调计算、存储、通信资源 对于时延敏感的任务，任务调度程序可以将它们分配给机器人或邻近的雾节点；对于时延不敏感的任务，任务调度程序可以将它们分配给云 任务调度器在决定任务调度时应考虑计算与通信之间消耗资源的平衡 雾节点可以形成协作网络，以支持更强大的通信、计算和存储系统
开放	南向接口、北向接口和水平接口应用层的信息模型、消息原语和协议栈应基于常见的机器人应用进行标准化 任务调度、资源编排和模块部署的策略可以由用户开放和定义 各种资源应通过图形化界面进行可视化操作
自治	网络拓扑结构应该灵活支持不同的应用场景，如独立机器人、机器人和雾网络、机器人网络、雾节点和云端网络等 机器人和雾节点都可以独立完成任务
RAS	机器人可独立工作，不需要与雾节点和云端连接 雾节点可以完成工作，不需要与云端连接 雾节点可以组织一个协作网络来支持更可靠的通信和巨大的存储空间
敏捷性	机器学习功能可以部署在雾端或云端，提供更智能的任务调度方案 机器人可以通过雾节点或云端的历史大数据获得更多的经验和知识
层级架构	解决方案可以是一个（仅机器人）、2 个（机器人和雾节点）或 3 个（机器人、雾节点和云端）层 每个级别都可以独立工作 雾节点可以为更高 QoS 应用提供分布式计算、存储解决方案
可编程	应用程序的工作流程可以通过编程满足不同的 QoS 要求 任务调度策略、资源分配策略、信息处理机制可以由用户编程

消耗用于将计算任务传送到雾节点。此外，传输回机器人的任务计算结果也会导致能量消耗。因此，雾网络的传输能量和计算能量需要共同优化，以实现最大的节能效果。

引入雾计算赋能机器人 SLAM 的能耗模型。假设移动机器人 n 有一个计算任务 u_n ，需要通过计算卸载在雾节点上的远程计算，令 b_n 表示机器人 n 的卸载传输调制， $f(b_n)$ 表示移动机器人卸载时的功耗， $f(b_n) \frac{u_n}{b_n}$ 表示卸载能量， $\sum_{n=1}^K f(b_n) \frac{u_n}{b_n}$ 表示移动机器人的总卸载能量。 N_c 表示在雾节点计算 1 bit 所需的 CPU 周期数， E_f 表示雾节点计算每周期的能量消耗。 $u_n N_c E_f$ 为移动机器人 n 卸载任务的计算能耗， $\sum_{n=1}^K u_n N_c E_f$ 为雾节点总计算能量。接下来，假设 O_n 是移动机器人 n 的任务分析结果，可以获得用于分析结果反馈的总传输能量为 $\sum_{n=1}^K f(b_n) \frac{u_n}{b_n}$ 。

根据能效定义，移动机器人雾网络需要以尽可能

最小的能量来处理任务。在此基础上，可以将此问题等效为寻求最优的卸载计算任务数的能效优化问题，其数学表达式为

$$\max_{u_n} \frac{\sum_{n=1}^K u_n}{\sum_{n=1}^K \left(f(b_n) \frac{u_n}{b_n} + u_n N_c E_f + f(b_n) \frac{O_n}{b_n} \right)}$$

在设立系统模型和能效问题方面，分析了统一传输和计算后能量消耗降低的问题，为处理任务卸载的移动机器人网络决定卸载数据中的任务大小提供了一种新的方法。

为了评估所提节能卸载的优越性，展示最优任务卸载和随机任务卸载之间的性能比较。首先，随着移动机器人数量的增长，总能量效率先增加后减小。这是因为计算能量占据了移动机器人数量较大区域的总能量消耗以及雾节点的计算能力有限。最优任务卸载策略在能效表现上优于随机任务卸载，随机卸载和节能卸载之间的能效比较如图 4 所示。

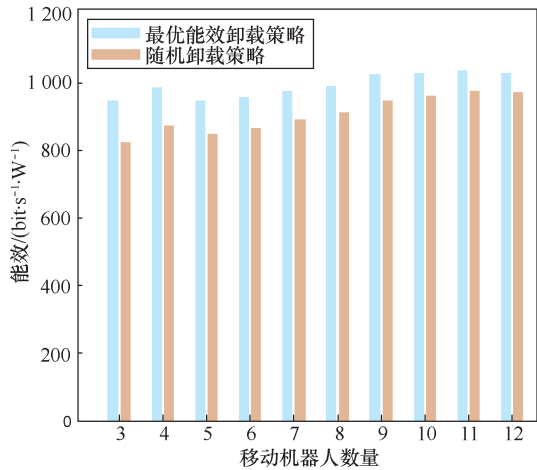
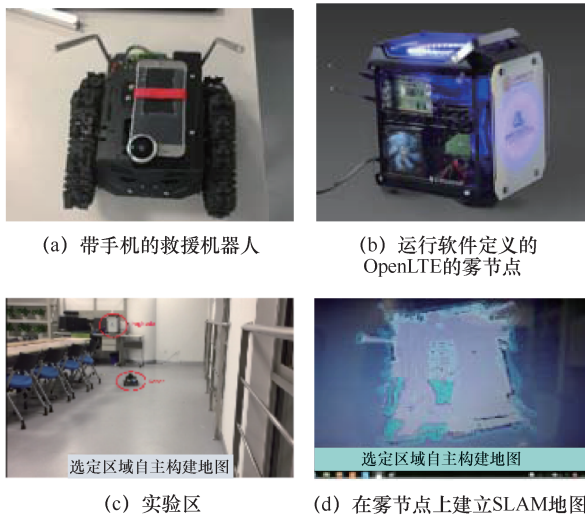


图 4 随机卸载和节能卸载之间的能效比较

3 试验床开发和演示

雾机器人 SLAM 的测试床如图 5 所示。采用价格相对较低的救援机器人 (如图 5(a)所示) 装备了一部手机, 并在手机上安装了鱼眼摄像头以捕捉环境视频流。当没有雾网络连接时, 由机器人上的手机完成 SLAM 计算。但是手机的运算能力相对较慢。

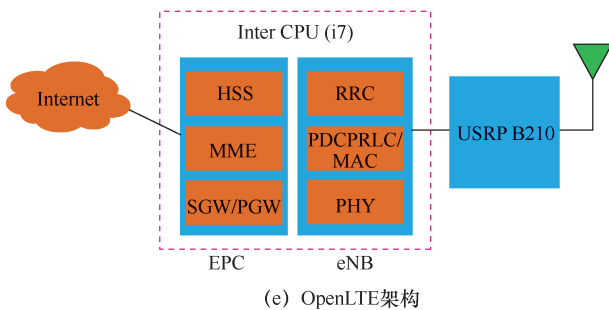


(a) 带手机的救援机器人

(b) 运行软件定义的 OpenLTE 的雾节点

(c) 实验区

(d) 在雾节点上建立 SLAM 地图



(e) OpenLTE 架构

图 5 利用 OpenLTE 开发的雾机器人 SLAM 的测试床

雾节点是安装了软件定义 OpenLTE 组件的服务器, 软件包括 eNode B 和 EPC。使用了 USRP B210 将 LTE RF 信号转换为基带信号。雾节点处理基带信号, 实现 eNode B 和 EPC 功能。LTE 下行链路和上行链路带宽分别为 10 MHz 和 5 MHz, 速度分别为 35 Mbit/s 和 15 Mbit/s。由于雾节点本质上是计算机, 因此很容易进行 SLAM 计算卸载等信息处理。本文在机器人手机上安装了定制的 SIM 卡, 以便通过 LTE 信号与雾节点进行通信。与 Wi-Fi 相比, LTE 具有支持切换和更好的 QoS 等优点。当机器人移动到另一个小区时, 需要平滑切换。

本文开发了 2 个具有 OpenLTE 协议的雾节点, 然后在测试床中使用了 2 个机器人, 并形成了一个没有云连接的本地 LTE 网络。机器人和雾节点都安装了 ROS。机器人执行前 2 个 SLAM 步骤模块, 雾节点运行其他 SLAM 步骤模块。一个雾节点充当 ROS 主节点, 协调不同节点上的 ROS 模块。在雾网侧, 2 个雾节点监视其资源的实时利用并互相交换这些信息。运行 ROS 的雾节点上的编排器协调资源使用情况, 如果一个雾节点缺乏计算资源, 则可以借助 ROS 将 SLAM 计算任务转移到其他雾节点。

对应雾计算视图架构, 测试床包括以下项目。

硬件层: 带手机和鱼眼相机的机器人, 雾节点硬件包括 i7 CPU、USRP、RF HW 和用于加速的 FPGA, 用于数据存储的硬盘、天线等。

骨干软件层: ROS, 手机上的 Android, 雾节点上的 Linux Ubuntu、编排器、资源监视器、任务调度程序等。

雾应用程序支持层: 地图存储、地图查看。

应用层: 机器人 SLAM。

图 5(d)展示了雾网络 SLAM 构建地图。与没有启用雾网络的 SLAM 相比, 具有雾网络赋能的机器人 SLAM 过程更流畅。

4 结束语

雾计算采用网络中所有可能的资源进行计算、存储、控制和联网, 并可实现更高速、更精确和多主机机器人 SLAM。本文提出了一个雾计算赋能机器人 SLAM 的框架, 包括架构、雾网络功能, 以解决与雾机器人 SLAM 相关的挑战和要求。所研发的试验床显示了此框架的可行性。

参考文献:

- [1] CADENA C, CARLONE L, CARRILLO H, et al. Simultaneous localization and mapping: present, future, and the robust-perception age[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(6): 1309-1332.
- [2] OpenFog. OpenFog reference architecture for fog computing[R]. 2017.
- [3] DASTJERDI A V, GUPTA H, CALHEIROS R N, et al. Fog computing: principles, architectures, and applications[J]. arXiv Preprint, arXiv: 1601.02752, 2016.
- [4] HOU X S, LI Y, CHEN M, et al. Vehicular fog computing: a viewpoint of vehicles as the infrastructures[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6): 3860-3873.
- [5] DEY S, MUKHERJEE A. Robotic slam: a review from fog computing and mobile edge computing perspective[C]//The 13th International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing Networking and Services. 2016: 153-158.
- [6] DEY S, MUKHERJEE A. Robotic SLAM - a review from fog computing and mobile edge computing perspective[C]// MOBIQUITOUS '16 Adjunct Proceedings. 2016: 153-158.
- [7] YANG Y, ZHAO S, ZHANG W, et al. DEBTS: delay energy balanced task scheduling in homogeneous fog networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, PP (99): 1.
- [8] ZHAO S, YANG Y, SHAO Z, et al. FEMOS: fog-enabled multi-tier operations scheduling in dynamic wireless networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 1169-1183.
- [9] DINH T Q, TANG J, LA Q D, et al. Offloading in mobile edge computing: task allocation and computational frequency scaling[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(8): 3571-3584.
- [10] WANG J, XU J, YANG Y, et al. GPP based open cellular network towards 5G[J]. China Communications, 2017, 14 (6): 189-198.
- [11] CHEN X, JIAO L, LI W, et al. Efficient multi-user computation offloading for mobile-edge cloud computing[J]. IEEE Transactions on Networking, 2016, 24(5): 2795-2808.
- [12] PU L, CHEN X, XU J, et al. D2D fogging: an energy-efficient and incentive-aware task offloading framework via network-assisted D2D collaboration[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(12): 3887-3901.

[作者简介]



杨旸 (1974-), 男, 博士, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所教授、博士生导师, IEEE Fellow, 主要研究方向为无线传感器网络(物联网)、新一代移动通信系统(5G)、雾计算与网络技术、开放无线测试验证平台等。



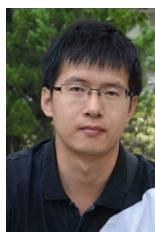
李凯 (1973-), 男, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所高级工程师, 主要研究方向为雾计算试验床、5G 系统仿真。



徐海东 (1973-), 男, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所工程师, 主要研究方向为软件定义无线网络。



王华俊 (1987-), 女, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所工程师, 主要研究方向为 5G 通信系统仿真。



王昆仑 (1987-), 男, 博士, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所助理研究员, 主要研究方向为雾计算和 5G 通信系统。



李剑 (1976-), 男, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所工程师, 主要研究方向为雾计算试验床。



周明拓 (1977-), 男, 博士, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员, 主要研究方向为雾计算架构、工业互联网和无线传感网。