

基于 ROS 的服务机器人云端协同计算框架^①

张继鑫^{1,2}, 武延军¹

¹(中国科学院软件研究所 基础软件国家工程研究中心, 北京 100190)

²(中国科学院大学, 北京 100190)

摘 要: 随着机器人应用技术的发展, 服务机器人走进人们的生活日渐成为可能. 但机器人本身计算能力有限, 同时仅靠自身的传感器接收的信息也有一定的局限性. 现有的机器人还不足以胜任面对复杂场景的应对能力, 也不能够满足人们对服务机器人的期待. 本文设计的云机器人计算框架(cloud robot computing framework, CRCF)通过云端, 将智能家居以及其他智能硬件与机器人相结合, 为机器人提供更多更广的信息. 同时, CRCF 通过互联网结合了其它第三方的云端应用 API, 为机器人提供更多的服务功能. CRCF 框架旨在利用云端的大数据处理能力提升机器人的计算和存储能力, 并结合第三方云端应用服务和智能硬件设备来拓展机器人的信息来源和服务功能. 最后, 本文通过远程语音控制机器人的实验, 验证了 CRCF 系统平台在结合硬件设备以及第三方云端应用的功能和性能.

关键词: 服务机器人; 云机器人; 机器人操作系统; 面向服务的框架; 机器人即服务模型

Cloud Collaborative Computing Framework for a Service Robot Based on ROS

ZHANG Ji-Xin^{1,2}, WU Yan-Jun¹

¹(National Engineering Research Center of Fundamental Software, Institute of Software, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

²(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: With the development of robotic applications, service robots get into people's lives. But the robots themselves have limited computing capability, especially in processing the complex information received from different sensors. Thus it is not enough for a single robot to be competent to deal with the complex scenes. This paper proposes a cloud robot computing framework (CRCF), which combines the smart home facilities nearby and powerful hardware servers in the clouds. CRCF system platform is designed to take advantage of cloud's computing large data capability to extend the computing power and storage capacity of the robot. At the same time, CRCF system combines with third-party services and hardware to extend the sources of information and service functions of robots. Finally, through a remote control robot experiment, it verifies the CRCF system platform's capabilities and performance in combination with intelligent hardware and third-party cloud applications.

Key words: services robots; cloud robotics; robot operating system; service oriented architecture; robot as a service

服务机器人, 作为人工智能直接的实体产物, 虽然在软件应用技术上, 如地图构建、自主导航等, 有了很好的积累. 但还是不能满足人们在家居服务方面的期待. 迄今为止, 人工智能相关领域的技术有一定的积累和进步. 机器学习、自然语言理解、模式识别等人工智能技术的分支领域, 在近近年来已逐步在互联

网的众多领域中得到应用, 但在实体机器人上的应用仍然在探索之中, 究其原因, 一是机器人本身的运算能力有限, 而更多的人工智能相关算法需要大数据以及分布式运算的支持; 二是人工智能也在进步和发展之中, 算法每年都会有一定的更新, 这需要机器人本身能够有一个好的系统框架使用和更新这些算法.

① 基金项目: 中国科学院先导专项(XDA06010600)

收稿时间: 2016-01-07; 收到修改稿时间: 2016-02-25 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005337]

在服务机器人发展的同时,智能家居类的智能硬件也逐步走向市场,成为人们改善家居服务质量的工具.与服务机器人相比,智能家居类的硬件设备分布更加广泛,但信息数据比较分散.如智能家居设备中的摄像头设备可以为服务机器人提供额外的视角信息,空气质量监测传感器设备可以为服务机器人提供更多位置的空气质量信息等.而服务机器人的传感器设备集中在机器人身上,分布密集,信息采集受到机器人物理位置的制约.如机器人的摄像头只能采集机器人周围的视角信息等.所以将智能家居类的硬件设备与服务机器人相结合,就能够充分利用智能硬件分布广泛的特点以及服务机器人处理数据的能力,从而拓展服务机器人能够获得的数据信息,提供服务质量.

此外,一些优秀的第三方云端应用服务也可以用来拓展机器人的服务功能和提高机器人的服务质量.如谷歌,百度,微软等公司的图像识别相关服务,微软,百度,讯飞等公司的语音相关服务等.这些算法需要大规模数据和复杂算法的支持,可以为服务机器人提供更加精确的结果.

云机器人的概念是由 James Kuffner 博士在 2010 年第一次提出^[1].云机器人是将机器人与云计算技术相结合的概念,将云计算技术应用在服务机器人身上,可以拓展服务机器人的存储空间,增强服务机器人的运算性能以及拓展服务机器人可用资源.

本文设计的云机器人计算框架(cloud robot computing framework, CRCF)将智能硬件设备、第三方云端应用服务以及服务机器人结合在一起.一方面, CRCF 框架作为信息共享中心,将智能硬件设备的数据和第三方云端应用的数据集成起来,统一管理,解决了机器人采集信息过于集中,受机器人物理位置限制的不足;同时,利用第三方云端应用,扩展了服务机器人的可用资源.另一方面, CRCF 框架作为服务机器人存储和运算的拓展,服务机器人的传感器数据、图像数据等存储在 CRCF 框架的存储单元中,可供其它硬件设备使用;同时, CRCF 框架中的 Hadoop 集群,可以为服务机器人提供并行计算能力.

1 相关工作

1.1 云机器人系统架构

机器人与云端相结合的系统架构中比较典型的有 M2M/M2C(machine to machine/machine to cloud)模型

架构^[2]以及 UNR-PF(Ubiquitous Networked Robot Platform)架构^[3,4].在服务的模式方面,有面向服务的架构(Service Oriented Architecture, SOA)^[5,6]和机器人即服务(Robot as a Service, RaaS)^[7]等典型的模式.

基于 M2M/M2C 系统架构的机器人与云端结合主要有三种典型的弹性计算模型结构:对等模型,代理模型以及克隆模型^[2].

对等模型中,每个机器人以及云中的虚拟主机都被认为是一个计算单元.机器人与虚拟主机一起构成了一个分布式计算网络.该分布式网络中的多个结点可分别构成该网络的一个子集,这样每个任务可以分成不同的模块在不同的子集中执行.

代理模型中,在所有的机器人中有一个机器人作为领导者和云端中一个代理虚拟主机进行通信,通过这种方式将机器人网络与云端网络连接起来.云端中虚拟主机网络与机器人网络构成双层模型,机器人中的领导者和云端中的代理虚拟主机构成这个双层模型相互联系的桥梁.

克隆模型中,每个机器人在云端的虚拟主机都有一个对等的系统级的克隆单元,这样每个任务即可以在机器人中执行,也可以在云端的克隆单元中执行.每组机器人与克隆虚拟主机的集合构成一个 p2p 网络,与代理模型中的 ad-hoc 云相比,有更好的连通性.并且这种结构允许实体机器人的 M2M 网络中有网络中断行为发生.

UNR-PF 系统架构对机器人的硬件进行抽象,并提供统一的接口来供应用开发人员调用.这样应用开发人员可以写出与硬件无关的机器人应用. UNR-PF 系统架构拓展了多机器人系统的概念,该系统架构可以由机器人、传感器以及智能手机等联网设备共同组成.

UNR-PF 系统架构中,机器人与服务端的应用都连接并注册到 UNR-PF 网络当中.服务端的应用与机器人通过 UNR-PF 网络相互连接到一起.

SOA 是一种在云计算中广泛使用的架构,它有三个主要组成部分,分别是服务注册端(Server Register),服务提供者(Server Provider)和服务请求者(Server Requestor). SOA 针对不同的功能模块实现不同的服务,服务之间通过标准的接口和协议来实现通信,这样就将实现部分和服务接口分离开来,两者相互独立,提

高了软件开发的灵活性. 采用 SOA 构建的系统能够使得硬件设备采用统一的接口, 提供与设备无关的服务, 增加了系统的易用性, 使得系统进行功能拓展以及设备的管理更加灵活.

RaaS 是 SOA 模型在机器人以及硬件设备上的一种增强版的设计及实现. Raas 将执行功能的服务, 服务代理的发现及发布的服务, 客户端直接访问应用程序的服务等, 集成到一个 RaaS 单元中. 每一个 RaaS 单元都包含了服务注册端, 服务提供者, 服务请求者, 即包含了一套完整的 SOA 架构. 因为所有的服务都包含在同一个单元, 所以 RaaS 比 SOA 更加灵活和方便, 是 SOA 的一种增强实现. 当把一个应用 RaaS 模型的机器人放到云计算的环境当中时, 每个机器人都可以看做是一个自我满足的云单元.

1.2 机器人操作系统

机器人操作系统(robot operating system, ROS)^[8]是一个开源的机器人操作系统, 使用 BSD 许可证. ROS 是一个机器人软件平台, 提供了类似于操作系统的服务, 如硬件的抽象、底层驱动程序的管理、程序间消息的传递、程序的发行包管理等. ROS 应用层面提供很多不同功能的软件包, 包括导航, 视觉, 地图构建等方面. 这些软件包跟随 ROS 一起升级, 基本是目前最新最高效算法的实现.

ROS 为机器人程序的编写提供了一个统一接口的软件开发平台, 可以使开发和研究人员专注于应用的功能开发, 而不需要关心底层硬件的驱动以及控制技术的具体实现. TurtleBot^[9]机器人是一个基于 ROS 的入门级的开源硬件平台, 可以使应用此平台的开发和研究人员专注于应用程序的开发. 本文的研究以及实验结果的验证是基于 TurtleBot 机器人硬件平台.

1.3 云机器人系统实例

Robot-Cloud^[11]是为基于机器人操作系统 ROS 的机器人提供利用云平台来扩展服务功能的框架. 该云平台的系统核心包括云端控制节点, ROS 的 master 节点, 存储单元, Map-reduce 计算节点和机器人服务. 整个系统中的每个机器人都装备机器人操作系统 ROS. 机器人通过连接云端控制节点和 master 节点来与其他机器人以及云端提供的其他服务来建立联系. Robot-Cloud 系统符合 SOA 架构, 支持三种基本的服务模型: 软件即服务(Software as a Server, SaaS), 平台即服务(Platform as a Service, PaaS), 和基础设施即服

务(Infrastructure as a Service, IaaS).

DAvinCi^[12]是一个用在服务机器人上的基于机器人操作系统 ROS 的云计算框架. DAvinCi 系统利用云计算的性能以及云计算并行处理的能力来增强机器人处理大规模数据的能力. DAvinCi 在云端用 Hadoop 将机器人操作系统 ROS 中的算法分解为 Map-reduce 任务来重新实现, 相当于将 ROS 中算法的 Map-reduce 版本放在了云端来运行. 以构建地图的 SLAM 算法为例, DAvinCi 在云端基于 Map-reduce 实现了 FastSLAM 算法. 论文^[12]已证明在地图构建等需要大规模计算的算法上 DAvinCi 相比于单机的机器人算法具有很大的时间优势.

Robot Cloud Center(RCC)^[13]结合了 SOA 架构和云计算模型. 在 RCC 中, 机器人作为一个服务的提供者, 每个可以访问 RCC 平台的人都可以使用机器人提供的服务. RCC 中实现异种机器人资源调度算法, 当有用户提出服务需求时, RCC 在云端对所有机器人资源进行调度分配, 使任务以最大效率, 耗费最少资源完成.

2 CRCF 框架

现有的系统架构 Robot-Cloud, DAvinCi 以及 RCC 等都在特定的方面充分利用了云端的优势, 但也存在一定的设计缺点. 如 Robot-Cloud 系统中控制节点和机器人操作系统 ROS 的 master 节点都是在云端平台上, 所以机器人就必须与云端先连接在一起. 如果机器人与 Robot-Cloud 平台的连接网络断开, 机器人不仅不能享受 Robot-Cloud 平台提供的云端服务, 而且机器人也因为没有 master 节点而不能运行. DAvinCi 系统在云端借助于云计算的并行优势, 提升了算法运行效率. 但 DAvinCi 只是在效率上增强了机器人运算功能, 没有在资源和功能上拓展机器人的服务. RCC 专注于云端资源的调度, 没有充分考虑利用云端的集成优势来加强机器人与智能硬件间的信息共享和交流.

CRCF 框架, 吸取了现有系统在云端设计方面的优点, 同时弥补了各系统在设计方面的不足. CRCF 框架不仅利用云端增强了服务机器人的运算, 拓展了服务机器人的存储, 还利用云端将智能硬件以及云端的服务于机器人结合起来, 拓展了机器人的功能. 此外, CRCF 框架结合了 ROS 在机器人算法以及硬件设备管理上的优点, 使机器人本身的算法和硬件管理与云端

相互分离,从而带来更加灵活与便利的管理。

2.1 CRCF 架构

CRCF 框架借鉴了 UNR-PF 系统架构中将硬件抽象成统一的接口的想法,以及 M2M/M2C 系统架构中代理模型的双层结构,在 CRCF 框架的云端平台,有一个总代理的云端虚拟主机。不同点是在 CRCF 框架中,每个机器人都作为独立体,通过统一的接口连接到云端,机器人通过云端来相互联系起来。如果网络断开,每个机器人又将作为相互单独的运行与计算单元而存在。

CRCF 框架将智能硬件设备封装成 SOA 模块中的服务提供者,基于 ROS 的机器人是一个完全的 RaaS 单元。当机器人连接到 CRCF 时,除了机器人作为一个完全的 RaaS 单元,机器人还将作为整个 CRCF 平台的服务提供者以及服务使用者。此时,整个 CRCF 平台成为了一个完全的 RaaS 模型。当机器人脱离 CRCF 平台,独立存在时,机器人基于自身的机器人操作系统 ROS 可自我满足,完成基本的功能,并提供服务。

CRCF 框架如图 1 所示。系统主要包括机器人,云端平台,web 界面,通用接口四个部分。

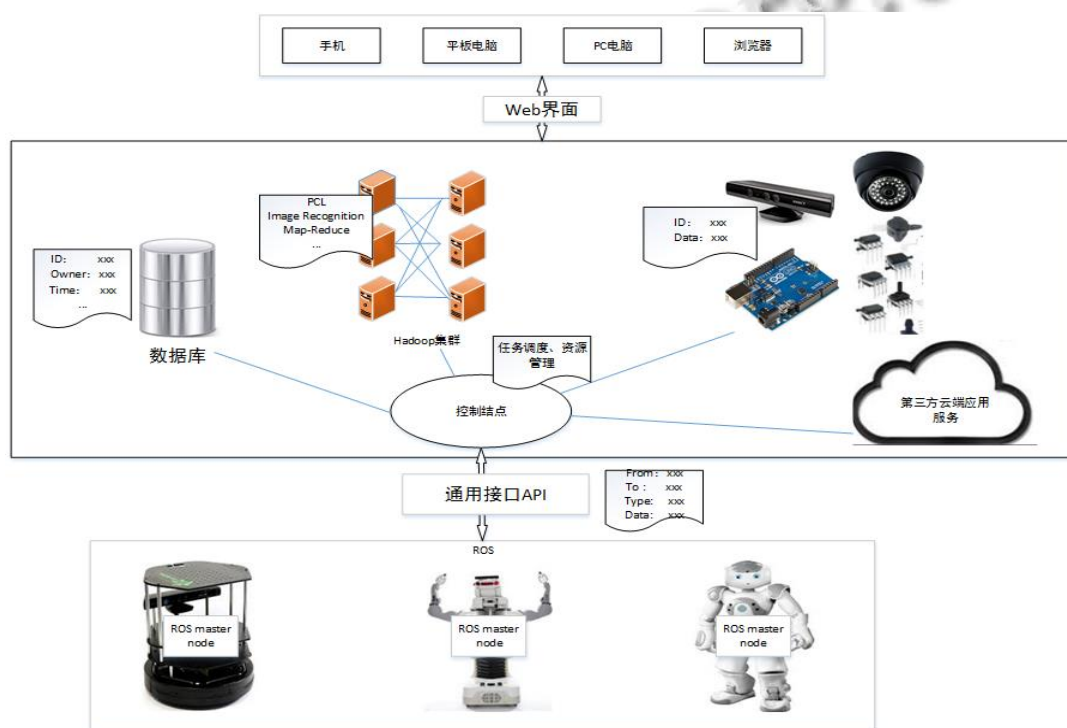


图 1 CRCF 框架示意图

CRCF 云端部分: 控制节点用来处理与机器人的信息交流。对于机器人的请求,控制节点需要决定哪些服务及信息是需要作为应答。对于云端处理完机器人请求之后的动作指令或数据结果也将通过控制节点下发到机器人,控制节点需要指定特定的 ROS 中的 Topic 来执行该指令或存储云端运算的数据结果。在机器人之外,云端也将智能家居传感器以及其它第三方的云端应用服务包括在内。这些服务的信息都整合在 CRCF 的云端,然后通过控制节点来决定是否需要机器人参与行动或是否响应服务请求。此外,CRCF 云端平台与 Hadoop 集群相连接,可用于并行处理机器人的

计算请求。

机器人部分: 基于 ROS 的机器人将 master 节点开启在机器人本身,并通过 CRCF 的通用接口 API 与云端相互建立联系。当网络出现故障的时候,也不会影响机器人独立运作。机器人本身即是服务的提供者,也是服务的请求者。当使用多个机器人的时候,机器人与机器人之间通过 CRCF 框架来通过信息共享的方式建立联系。

Web 界面部分: 提供给能够访问 web 的终端设备,如手机,电脑,平板等,通过浏览器查看和控制机器人的功能。在后面的实验部分,本文将通过 web 端,对

机器人的状态进行查看以及语音控制。

通用接口部分：主要是将信息表示成 JSON 格式，标注信息的发出者，接收者，接收的节点，信息的类型等。接口用于终端设备以及机器人与 CRCF 云端平台建立连接，用于传输数据和指令。接口部分的设计主要考虑简单通用性。

2.2 系统特点

易拓展性：硬件设备在 CRCF 框架中被封装成符合 SOA 的模块，同时 CRCF 框架将硬件设备产生的数据信息保存在 CRCF 的存储单元中，并由控制节点统一调度使用。

易升级性：机器人与 CRCF 的云端平台通过统一的通用接口相互连接，属于宽泛的耦合性。保持接口不变，即可独立升级和变更内部算法。所以机器人端，可根据机器人操作系统 ROS 自行升级，云端内部的算法也可以根据需要升级还不影响整体的使用。

可视化：CRCF 将一些服务以及计算的结果以 web 网页形式展示出来，用户可实时查看可视化的结果。

此外，CRCF 框架还有其他特点，如可靠性，实用性，易管理等。

2.3 系统验证

本文将通过一个远程语音控制机器人的实验，验证 CRCF 框架利用其它硬件数据和第三方云端应用来拓展和增强机器人的服务功能的性能和效果，并通过 CRCF 云端平台远程控制机器人，验证机器人与 CRCF 框架连接的性能和效果。

远程语音控制机器人的实验包括语音录入，音字转换，自然语言文字到机器人指令的翻译以及指令下发到机器人并让机器人执行几个部分。

语音录入：通过 web 界面进行语音的录制，所有能够访问 web 的终端设备都可以进行语音录制，提高了远程控制机器人的灵活性和方便性。语音录入的 web 页面 PC 端界面如图 2 所示，手机端如图 3 所示。

Web 页面中的 Turtlebot 机器人图像是 CRCF 平台结合了室内摄像头，将摄像头的视频信息展示在 web 界面的结果。通过观察机器人的状态，更加方便进行远程控制机器人。

音字转换：语音录入结束，会通过 web 端上传到 CRCF 的云端平台。CRCF 的云端平台结合第三方云端应用 API 将语音翻译成文字。这里，我们采用的是百度语音识别在线 API。

文字到指令的翻译：通过提取文字中的关键指令词，再根据具体的指令词翻译成机器人指令。如“向左走五米”，将翻译成 {angle:90, distance:5}，“向右转三十度”，将翻译成 {angle:-30, distance:0}。

指令下发以及机器人执行指令：CRCF 的云端平台将 JSON 格式的指令下发到 ROS 的指定 Topic。因为实验中 ROS 的 Topic 接收的是 Twist 类型的信息，所以有一个 JSON 到 Twist 转换的过程。

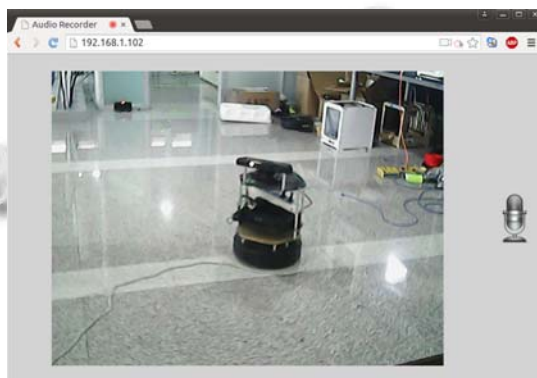


图 2 语音录入界面, PC 端界面



图 3 语音录入界面, 手机端界面

2.4 实验结果及分析

本文将从终端设备与 CRCF 框架的连接，云端内部进程间的通信，CRCF 云端平台对文本到机器人指令的翻译，以及 CRCF 与 Turtlebot 机器人间的通信几

个方面来分析 CRCF 框架的性能和效果。由于第三方云端应用服务的计算与网络传输时间不在可控范围内,所以不在数据分析的范围之中。

实验的网络环境是 CRCF 的云端平台、机器人以及终端设备都属于同一个局域网。该环境也符合家庭真实使用场景。

终端设备将语音上传到服务的数据如图 4 所示。在连续的十次测试中,终端设备与 CRCF 系统平台平均通信时间在 100 毫秒以下。图中明显的时间波动点是由实验室网络拥塞情况引起的,但也是属于毫秒级别的误差范围。

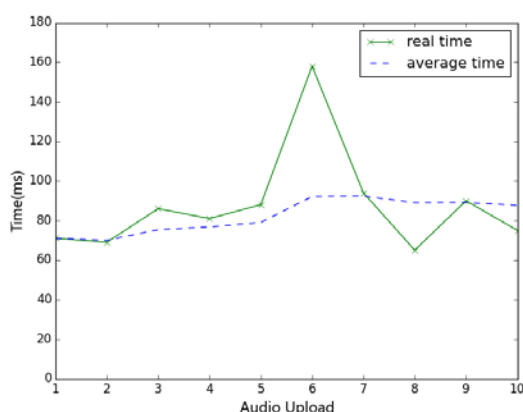


图4 语音上传的时间数据

CRCF 框架内部进程间的通信时间如图 5 所示。在连续的十次测试中, CRCF 框架内部的进程间通信耗时平均在 0.1 毫秒左右,整体耗时比较稳定。

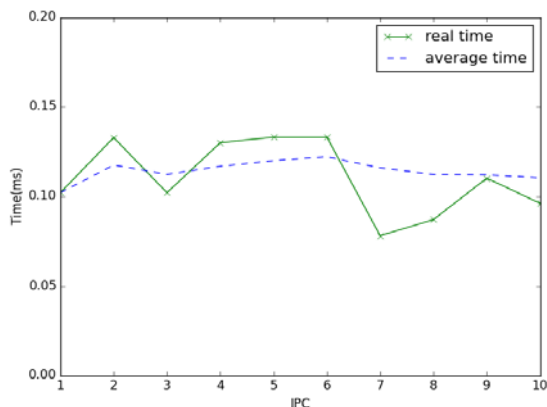


图5 CRCF 框架内进程间通信的时间数据

CRCF 框架的云端平台在对文字翻译成机器人指令的时间数据如图 6 所示。在连续的十次测试中,文字翻译成机器人指令的耗时在 0.15 毫秒左右。

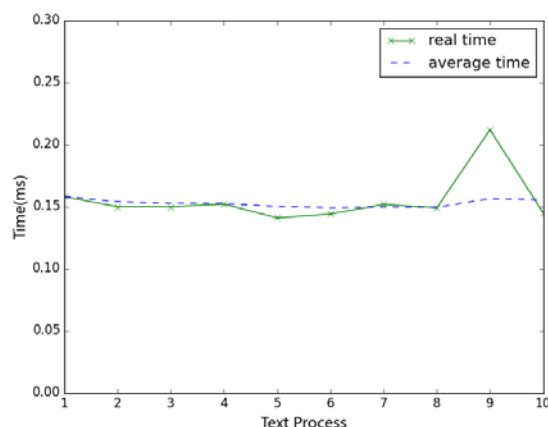


图6 文字翻译成机器人指令的时间数据

CRCF 与 Turtlebot 机器人之间的通信时间数据如图 7 所示。在连续的十次测试中, CRCF 与机器人之间的通信平均耗时 4 毫秒左右。波动的原因与语音上传相同,是由实验室网络拥塞情况引起的。

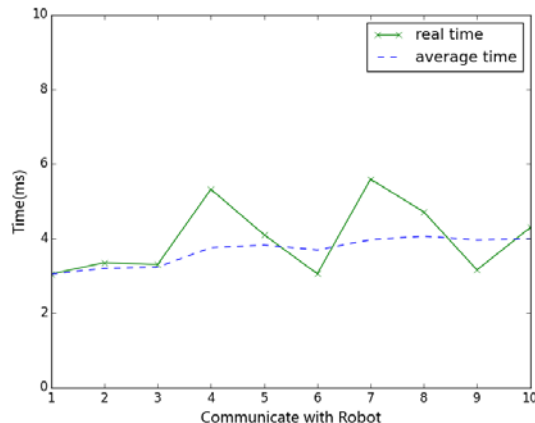


图7 CRCF 与机器人通信的时间数据

通过图 4-图 7 的数据,可以看出在 CRCF 框架中,硬件设备信息的使用,第三方云端应用的使用,以及云端与机器人的连接部分,数据处理时间维持在毫秒级别,且时间波动处于一个稳定的范围。该实验验证了 CRCF 框架的有效性。

CRCF 框架借鉴了 UNR-PF 系统架构的云端融合信息的特点,但 CRCF 服务于家庭服务机器人,所以资源集中于同一个网络当中,所以相对来说 CRCF 框架内部的数据交流带来的时间损耗更低。与此同时, CRCF 框架更加充分的利用了云端平台,相对于 DAVinci 系统, CRCF 不仅仅增强了机器人的运算能力,还通过结合智能硬件与第三方云端应用服务拓展了机

机器人的功能; 相对于 Robot-Cloud, CRCF 框架将云端与机器人分离开来, 机器人可脱离云端独立运行, 带来了更加灵活的管理; 相对于 RCC, CRCF 框架增加了机器人与智能硬件以及第三方应用的信息交流, 丰富了服务机器人的功能。

3 结语

本文设计的 CRCF 框架, 将机器人、硬件设备以及第三方云端应用结合起来, 拓展了机器人的数据信息来源, 增强了服务机器人自身的服务功能质量。同时通过 CRCF 的云端平台, 拓展了服务机器人的信息存储能力, 以及增强了服务机器人的运算性能。通过将 CRCF 的云端平台设计成硬件设备无关的特性, 使得云端平台的各项服务, 升级更加便利。在 CRCF 框架中硬件设备被封装成 SOA 模块, 使得硬件设备的管理上更加灵活。机器人本身应用 ROS, 机器人本身的资源管理与云端资源管理相互分离, 使得对机器人的管理更加便利。

参考文献

- 1 Kuffner JJ. Cloud-enabled robots. IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robotics. Nashville, TN. 2010.
- 2 Hu G, Tay W P, Wen Y. Cloud robotics: architecture, challenges and applications. Network, IEEE, 2012, 26(3): 21–28.
- 3 Tenorth M, Kamei K, Satake S, et al. Building knowledge-enabled cloud robotics applications using the ubiquitous network robot platform. 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE. 2013. 5716–5721.
- 4 Kamei K, Nishio S, Hagita N, et al. Cloud networked robotics. Network, IEEE, 2012, 26(3): 28–34.
- 5 Papazoglou MP. Service-oriented computing: Concepts, characteristics and directions. Proc. of the Fourth International Conference on Web Information Systems Engineering, 2003. WISE 2003. IEEE. 2003.
- 6 Huhns MN, Munindar PS. Service-oriented computing: Key concepts and principles. Internet Computing, IEEE 9.1 (2005): 75–81.
- 7 Chen YN, Du ZH, Marcos GA. Robot as a service in cloud computing. 2010 Fifth IEEE International Symposium on Service Oriented System Engineering (SOSE). IEEE. 2010.
- 8 Quigley M, et al. ROS: An open-source robot operating system. ICRA Workshop on Open Source Software. 2009, 3(2).
- 9 Garage W. TurtleBot Going Open Source Hardware. <http://www.willowgarage.com/blog/2011/05/20/turtlebot-going-open-source>.
- 10 Yang HC, et al. Map-reduce-merge: Simplified relational data processing on large clusters. Proc. of the 2007 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. ACM. 2007.
- 11 Doriya R, Chakraborty P, Nandi G C. 'Robot-cloud': A framework to assist heterogeneous low cost robots. 2012 International Conference on Communication, Information & Computing Technology (ICCICT). IEEE. 2012. 1–5.
- 12 Arumugam R, Enti VR, Bingbing L, et al. DAVinci: A cloud computing framework for service robots. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE. 2010. 3084–3089.
- 13 Du Z, Yang W, Chen Y, et al. Design of a robot cloud center. 2011 10th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS). IEEE. 2011. 269–275.
- 14 Mouradian C, et al. An infrastructure for robotic applications as cloud computing services. 2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT). IEEE. 2014.
- 15 Goldberg K, Kehoe B. Cloud robotics and automation: A survey of related work. EECS Department, University of California, Berkeley, Tech. Rep. UCB/EECS-2013, 5.
- 16 Kehoe B, et al. A survey of research on cloud robotics and automation. IEEE Trans. on Automation Science and Engineering, 2015, 12(2): 398–409.
- 17 Agostinho L, et al. A cloud computing environment for supporting networked robotics applications. 2011 IEEE Ninth International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC). IEEE. 2011.
- 18 Lorencik D, Sincak P. Cloud Robotics: Current trends and possible use as a service. 2013 IEEE 11th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII). IEEE. 2013.
- 19 Lee SG. Real-time Face Recognition for Cloud Robot. International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, 2014, 10(9): 251–260.
- 20 Kamei K, et al. Cloud networked robotics. Network, IEEE 2012, 26(3): 28–34.