

传感云研究综述

曾建电<sup>1</sup> 王 田<sup>1</sup> 贾维嘉<sup>2</sup> 彭绍亮<sup>3</sup> 王国军<sup>4</sup>

<sup>1</sup>(华侨大学计算机科学与技术学院 福建厦门 361021)  
<sup>2</sup>(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)  
<sup>3</sup>(国防科学技术大学计算机学院 长沙 410073)  
<sup>4</sup>(广州大学计算机科学与教育软件学院 广州 510006)  
(zengjiandian@foxmail.com)

A Survey on Sensor-Cloud

Zeng Jiandian<sup>1</sup>, Wang Tian<sup>1</sup>, Jia Weijia<sup>2</sup>, Peng Shaoliang<sup>3</sup>, and Wang Guojun<sup>4</sup>

<sup>1</sup>(College of Computer Science, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021)  
<sup>2</sup>(School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)  
<sup>3</sup>(College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073)  
<sup>4</sup>(School of Computer Science and Educational Software, Guangzhou University, Guangzhou 510006)

**Abstract** Wireless sensor network (WSN) has extended people’s ability of gathering information and integrated physical world with information world. In recent years, the emerging cloud computing has made remarkable development, which has injected new vitality into WSN. It leads to new applications and services, expands the ability of data processing and storage in WSN and even produces the sensor-cloud system. Sensor-cloud can deal with the information generated by underlying sensor network, and provide remote services for upper users, which enables users to gather, process, analyze, store and share sensed data according to their demands. In this paper, we investigate the existing sensor-cloud system in detail. We firstly introduce the background, system architecture and applications of the sensor-cloud, then summarize the characteristics of the existing sensor-cloud systems. We reveal the main problems of the existing sensor-cloud systems, such as poor bandwidth, high latency and high failure rate, et al. Moreover, we study the sensor-cloud structure based on fog computing, design the basic methods of solving the before-mentioned problems and discuss the future research directions.

**Key words** sensor-cloud; wireless sensor network (WSN); cloud computing; fog computing; on-demand service

**摘 要** 无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)扩展了人们收集外界信息的能力,实现了信息世界与物理世界的融合.近年来云计算技术的快速发展,给传感器网络注入了新的活力,催生了新的应用和服务,也拓展了传感器网络在数据处理和存储方面的能力,在此基础上产生了传感云系统.传感云可以利用云端处理底层传感器网络产生的数据,并为上层用户提供远程服务,使用户能按需收集、处理、分析、存储和分享传感数据.在充分调研了目前的传感云系统的基础上,主要介绍了传感云的产生背

收稿日期:2016-06-28;修回日期:2016-12-28  
基金项目:国家“九七三”重点基础研究发展计划基金项目(2015CB352401);国家自然科学基金项目(61532013,61672441,61572206);华侨大学研究生科研创新培育项目(1511414002)  
This work was supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (2015CB352401), the National Natural Science Foundation of China (61532013,61672441,61572206), and the Foster Project for Graduate Student in Research and Innovation of Huaqiao University (1511414002).  
通信作者:王田(cs\_tianwang@163.com)

景、体系结构和应用领域,归纳了传感云系统的特点,揭示了现有的传感云系统存在通信带宽不足、实时性差、故障率高和隐私数据易泄露等一系列问题,给出了基于雾计算的传感云框架,设计了解决问题的基本思路,探讨了未来的研究方向。

**关键词** 传感云;无线传感器网络;云计算;雾计算;按需服务

**中图法分类号** TP393

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)具有部署迅速、实时性强等优势,它扩展了人们收集外界信息的能力<sup>[1-2]</sup>。通过在不同环境中部署传感器节点,人们可以便捷地收集各种需要的数据,实时掌握监测区域的状态信息,实现信息世界与物理世界的融合。因此,无线传感器网络被广泛地应用于国防军事、环境监测和建筑体监测等诸多领域<sup>[3-5]</sup>。而由于传感器节点在计算、存储、能量等诸多方面的限制,如何有效管理大规模无线传感器网络以充分发挥其性能仍然是一个极具挑战性的问题。

近年来,随着云计算的快速发展,传感器网络与云计算技术的结合也越来越紧密,云计算技术极大地拓展了传感器网络的应用空间,也为解决传感器网络的诸多限制问题提供了新的思路,如满足传感器网络在数据处理和存储能力等方面的需求<sup>[6]</sup>。云计算能提供用户可用的、便捷的、按需的网络访问,使得服务资源能被有效访问,如平台即服务(platform as a service, PaaS)、基础设施即服务(infrastructure as a service, IaaS)、软件即服务(software as a service, SaaS)等。传感云(sensor-cloud)正是无线传感器网络与云计算融合的产物<sup>[7-8]</sup>,通过云端控制传感器网络进行信息采集,利用云计算平台进行信息处理与存储,能够为不同类型的应用提供开放、灵活、可配置的服务平台。例如在森林险情监测应用中<sup>[9]</sup>,森林

中采集的各种数据如温度、湿度等,统一上传到云平台进行分析,监测者足不出户即可掌握整个森林的情况,一旦发现火灾等险情就能及时知晓。

笔者通过大量调研发现,传感器网络在结合云计算服务的同时也出现了一些新的问题。目前传感云的发展刚在起步阶段,仅有国外少量学者进行过研究,而国内的相关研究更少,在此背景下,本文对传感云系统进行了大量调研,整理得到了国内关于传感云的第一手介绍性资料,为相关领域的学者深入研究提供参考性材料。

1 相关背景

随着电子技术和通信技术的发展,无线传感器网络的发展取得了令人瞩目的成就。典型的无线传感器网络由大量传感器节点组成,这些传感器节点体积小、造价低廉,同时装备有传感器装置、微型处理器、供电电池、无线收发器和其他微型电子设备<sup>[10]</sup>。另一方面,云计算技术飞速发展,已经有许多大公司建立了云计算平台,并提供多种多样的云计算服务<sup>[11-12]</sup>。

笔者对近年的传感器网络及云计算技术进行了大量的调研,图1(a)为近3年来Google上WSN与Cloud搜索量的趋势图,可见人们对云计算的关注

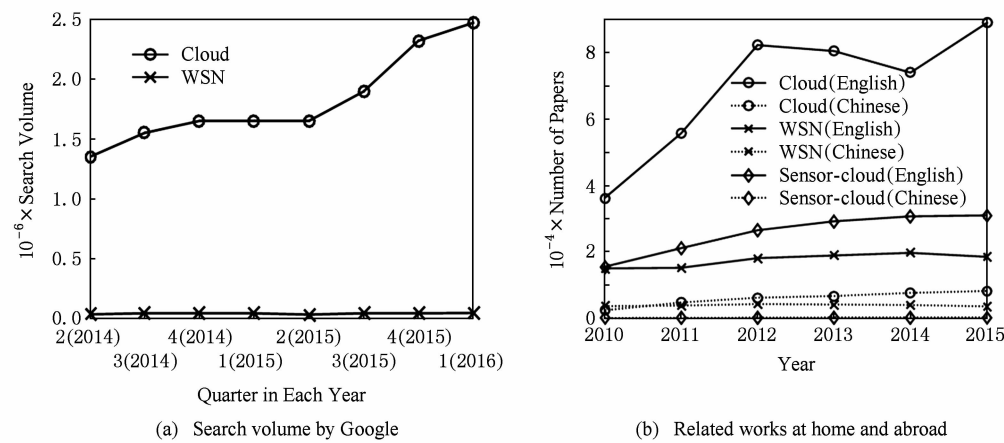


Fig. 1 Tendency of WSN and cloud computing

图1 WSN与云计算研究趋势图

仍然居高不下,而无线传感器网络多年来已存在大量的研究<sup>[13-15]</sup>,则保持一个较为平稳的态势,已经被广泛地应用在国防军事、远程医疗和环境监测等诸多领域.图 1(b)为国内外已发表的相关文献数量趋势图,其中虚线为国内科技期刊数据库检索的文献趋势图,实线为 Google 学术检索的文献趋势图.显然,云计算近年来搜索量持续上升,一直为研究的热点.由于传感器节点在计算、存储、能量等诸多方面的限制,如在环境监测的情景中,一旦实际环境过于大而复杂,传感器节点间的通信能力和能量消耗将成为影响监测结果的重要因素.云计算作为一种能提供海量计算能力、可扩展、存储灵活的新兴技术,将很好地弥补传感网络的不足,继而产生了传感云系统<sup>[16-17]</sup>.如表 1 所示,传感云具有了云计算的优点,极大地拓展了传统无线传感器网络的计算能力、存储能力、扩展性和通信能力.底层的传感器网络只需收集数据,而对于数据的分析、处理等操作则可以交付给云端,这样既减少了传感器网络的负担,又加快了数据的处理速率.

Table 1 Comparisons of WSN, Cloud Computing and Sensor-Cloud

表 1 无线传感器网络、云计算和传感云的比较

| Property      | WSN         | Cloud Computing | Sensor-Cloud |
|---------------|-------------|-----------------|--------------|
| Topology      | Distributed | Centralized     | Both         |
| Storage       | Weak        | Strong          | Strong       |
| Existence     | Physics     | Virtual         | Both         |
| Computing     | Weak        | Strong          | Strong       |
| Scalability   | Weak        | Strong          | Strong       |
| Communication | Weak        | Strong          | Strong       |

如图 1(b)所示,国外对传感云的研究呈现逐步上升的态势,而国内对传感云的研究则较少.以检索到的文献趋势图而言,传感云的研究基本处于起步阶段.正是在此背景下,本文拟对传感云的体系结构、应用、挑战和研究方向进行介绍,为相关研究者后续深入研究提供参考.

2 传感网与云计算结合的必然趋势

传感器网络产生的数据具有五大特性:数据量大、数据种类多、数据产生率快、数据真实性强、数据价值高<sup>[18-19]</sup>.而传统无线传感器网络本身的存储能力、处理能力、能量均有限,因此,云计算强大的数据处理、存储能力能够为传感器网络提供数据远程管

理平台,为第三方用户和传感器网络构建通信渠道,使传感器网络无处、无时不在的物理世界感知能力得到更深层次的应用.

仅仅对于 WSNs 而言,传感器节点的故障修复、错误传感数据和混合噪声的检测代价很高.一般的 WSNs 都是面向单个用户的,如果用户没有配备特定的传感器设备,将无法使用这些应用.其次,网络中的传感器节点往往存在自身能力的限制,这些限制包括计算能力、内存空间、通信范围等,比如在目标跟踪中<sup>[20-21]</sup>,WSNs 面临着更多的问题.首先,对于在同一片区域内尝试进行监控的不同用户而言,他们都需要部署各自的网络,这将造成资源的大量浪费;其次,在这些不同的传感器网络之间数据没有相互共享,并且用户需要时刻关心节点部署中与目标跟踪无关的许多实际问题,这将耗费大量时间和精力.例如,用户需要时刻关注传感器节点的工作状况,不断调整节点的工作能耗,这将极大限制 WSNs 的实际应用.而传感云结构的出现为解决这些问题提供了新的方案:传感云将传感器资源虚拟化成可以按需提供的服务资源.这种模式称为“传感器即服务”(sensors as a service):用户不需要持有实际的传感器设备,也不用关心具体的传感器网络,只需要将他们的应用需求发送给传感云,传感云便会自动分配和调度部分传感器网络来提供服务.对于具体的应用而言,网络中的节点能够为不同的用户重复使用.根据不同的用户需求,传感云将为用户分配特定的传感器节点,并提供最优的解决方案,即通过选取节点的最优集合来减少成本并保证服务质量(quality of service, QoS).

云计算的分布式存储、并行计算框架在数据的存储、访问、处理上占有绝对优势,无线传感器网络与云计算相结合后,传感器所收集的数据能够得到实时共享和分析<sup>[22]</sup>.传感器可以灵活配置,有效地被不同用户和应用程序共享;再者,传感云所提供的服务对用户而言是透明的,用户不需要关心具体的细节操作,只需侧重于管理方面的操作<sup>[23]</sup>.

3 传感云系统概述

3.1 传感云定义

当前,物联网被定义为:通过二维码识读设备、射频识别(RFID)装置、红外感应器、全球定位系统和激光扫描器等信息传感设备,按约定的协议,把任何物品与互联网相连接,进行信息交换和通信,以实

现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络<sup>[24]</sup>. 在以“云端”为中心的物联网 (cloud-centric IoT) 应用系统中, 物理实体服务主要实现基本的物理信息采集、本地的信息处理和向云端传输信息的功能<sup>[25-26]</sup>. 与之类似, 传感云系统通过底层传感器网络采集信息并交由上层云端分析处理. 然而, 在 cloud-centric IoT 的应用系统中, 由于“物”或对象之间需要相互通信, 一旦“云端”所提供的接口发生改变, 底层的物理组件也需要随之改变<sup>[27]</sup>, 因而在物理介质与“云端”中存在高度的依赖性和耦合性. 与之不同的是, 传感云系统引入了虚拟节点 (virtual sensor) 这一概念, 在虚拟节点层处理物理组件之间的依赖关系, 并提供管理分配底层的传感节点的方案, 因而在物理介质与“云端”之间存在一定的独立性. 此外, 相较于传感云系统, 通过互联网互连物联网 (Web of things, WoT) 则是物联网进一步的设想, 它使用 Web 的接入标准来连接设备并整合到互联网中, 用以简化物联网应用程序的创建<sup>[28]</sup>.

因此, 传感云具有如下定义: 文献[29]中, Kurschl 等人提出了一个将云计算与无线传感网结合的模型, 并且指出了两者结合能为传统传感网的数据存储和处理能力带来质的飞跃; Tan<sup>[30]</sup> 定义传感云是一个传感网云端服务平台, 它集成多种网络、多个传感应用与云端的结合, 提供传感网络的远程上网、监测、控制等云端服务; 此外, 文献[7]中定义的传感云是将物理传感节点虚拟化为云计算的虚拟传感节点, 并且当用户请求服务时, 这些成群的虚拟节点自动地响应服务需求; 依据 Madria 等人<sup>[8]</sup> 的定义, 传感云是由建立于传感网络顶端的虚拟节点组成, 向用户动态提供按需服务. 总而言之, 传感云继承了云计算的运作模式, 它将传感器网络和云计算进行整合, 共享两者资源, 具有 5 点特性: 1) 用户可以随时使用传感器而不需要考虑自身位置以及一些详尽规范 (如接入规则)<sup>[7]</sup>; 2) 用户不需要担心不同的传感设备之间的兼容性; 3) 多用户或组织之间可以共享同一个基础设施<sup>[8]</sup> (如传感节点); 4) 传感节点等资源可以按需使用或者弃用; 5) 通过云端虚拟节点来操控管理底层传感节点.

### 3.2 传感云体系结构

文献[6]提出了一种传感云的体系结构, 如图 2 所示, 它自下向上依次包含物理节点层、虚拟节点层和用户层. 在物理节点层, 每个传感器节点有各自的控制与数据收集机制, 不同应用中的传感器节点具有不同的功能. 如森林监测中的传感器节点侧重于

监测温度、湿度等必要信息; 而目标跟踪中的传感器节点则要求实时返回目标的地理位置、移动轨迹等信息. 这一层主要负责收集数据与上层云端对接. 虚拟节点层由虚拟节点和云端组成, 它主要负责云端资源的处理以及物理节点的调度管理. 在使用一些基于传感器的云端服务时, 由于虚拟节点的存在, 终端用户不需要担心传感节点的具体位置<sup>[31]</sup>. 云端不仅能为用户提供存储服务, 当存在紧急请求时, 还能及时对用户响应, 并提供相应的服务. 最上层为用户层, 不同的用户可以访问传感云中的资源, 由于资源共享于云端, 如果获得相应的权限, 用户还能访问其他用户资源. 用户层面向用户提供一些远程需求服务并兼容不同的平台系统, 如某些用户向传感云请求服务, 这些服务可能来自不同的网络 (3G, 4G, WIFI)、不同的终端 (手机、平板、电脑) 或不同操作系统 (Windows, Linux, Mac).

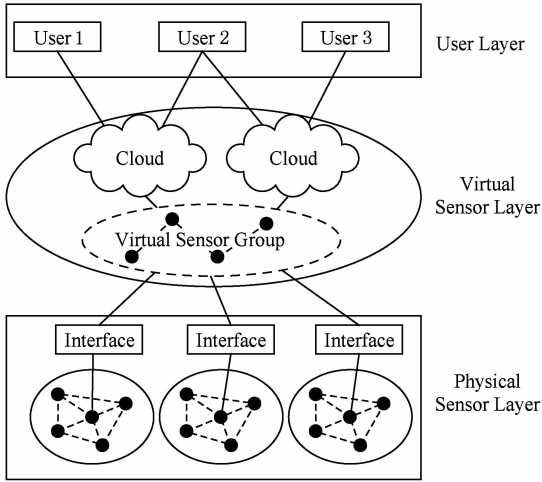


Fig. 2 Sensor-cloud architecture

图 2 传感云体系结构

## 4 已存在的传感云系统

目前已有的传感云系统, 如商业化的 Xively、开源的 Nimbits 以及国内的 YeeLink 等, 均为用户提供云存储服务. 针对不同的传感云系统, 其提供的服务也不尽相同, 下面逐条说明.

1) Xively. 提供连接产品管理的解决方案<sup>[32]</sup>. 通过 Xively 云平台, 可以将应用、设备、数据和用户连接在一起, 从而实现与物理世界的交互. Xively 所使用的表述性状态转移 (representational state transfer, REST) 服务是一种针对网络应用的设计架构和开发方式, 用以降低开发的复杂性, 进而提升

系统的可扩展性. REST 服务从资源的角度来观察整个网络,将数据关系转化为可操作的新业务,使用户更加专注于业务管理而不是业务实现,对用户而言是透明的. Xively 主要为了解决 3 个主要问题:1) 安全性. 管理用户、供应服务、保护数据的接入. 2) 可扩展性. 处理百万数量级的邮件及数据. 3) 服务支持. 提供各种实时业务. 其业务示意图如图 3 所示,用户只需在手机中安装产品对应的 App,便能与产品应用建立连接,通过手机发送各种命令,获取对应的权限后,实现远程操控服务.

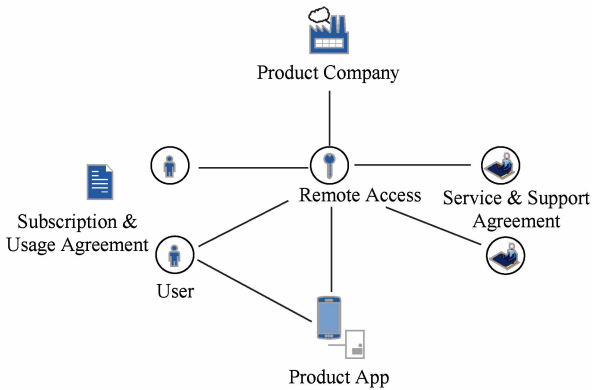


Fig. 3 A view of Xively business process  
图 3 Xively 业务示意图

2) Nimbits. 与 Xively 不同的是, Nimbits 是一个开放的传感云平台,用以在云端记录和处理时间序列数据<sup>[33]</sup>. Nimbits 为传感器和设备提供数据采集以及 M2M(machine to machine)服务. M2M 是以机器终端智能交互为核心的网络化的应用性服务,支持机器与机器之间、人与机器之间的通信. Nimbits 为用户提供 PaaS 服务,其 REST 服务可以将文本、JSON 或 XML 数据转化为 Nimbits 数据类型上传至云端. 数据上传云端后,用户可以把 Nimbits 服务作为后台程序,通过 Javascript 生成图表等数据进行可视化操作<sup>[34]</sup>.

3) ThingSpeak. 与 Nimbits 类似, ThingSpeak 也是一个开源的 PaaS 云平台,并提供 M2M 服务. ThingSpeak 的 REST 服务是以一个 API key 来制定一个特定的设备. 设备自身可以通过 Post 或 Get 方式将 JSON 或 XML 格式的数据提交给平台,用以完成各种各样的应用<sup>[35]</sup>. ThingSpeak 为用户提供开放式 API、实时的数据收集、数据处理可视化等功能.

4) Arrayent. 作为非开源的 Arrayent,它采用低成本、可扩展、双向通信的服务技术以及 Zigbee, Z-wave 等多种局域网技术支持,提供 SaaS 的解决

方案<sup>[36]</sup>. 对于已连接的设备, Arrayent 使用户不必担心细节的具体实现,为其提供实时的远程操控管理. Arrayent 在应用程序开发支持方面,提供 REST 服务、API 接口以及实时后端通道,也提供需求响应系统的连接.

5) Fluidinfo. 相较于 Xively, Nimbits 等 M2M 服务平台, Fluidinfo 是基于“中心属性值”(attribute-value centric)数据模型构建的在线数据云存储服务,更倾向于数据的存储管理操作<sup>[37]</sup>. Fluidinfo 结合了现有的系统、内部数据库和公共网络平台数据,并整合为单一可寻址地址与相应的 API 接口,让用户不必与多个系统进行交互,只需使用应用界面就能管理组织数据. Fluidinfo 提供的服务不仅能应用于一个共享的实例(公共数据),还能为用户提供一些敏感内容的专用实例(私人数据). Fluidinfo 的数据存储等操作对用户透明,它将传统的数据库或其他零散数据改造、整合后存储到云平台,用以共享及使用.

6) iDigi. 与 Fluidinfo 不同, iDigi 作为一个 M2M 的服务平台,提供 PaaS 服务<sup>[38]</sup>. iDigi 服务具体的实现细节对用户透明,向用户提供简明的设备接入解决方案,无论用户身处何处、持有何种设备. 并且在无线链接传输方面, iDigi 提供无间断的可靠性与安全性<sup>[39]</sup>. iDigi 使用户能够执行重要的设备管理操作,如固件升级、软件下载、设置警报和预定管理任务等. 无论位于何处网络, iDigi 服务平台都为用户提供可靠的远程操作管理.

7) YeeLink. 作为国内的传感云平台, YeeLink 提供的高并发接入服务器和云存储方案,能够同时完成海量的传感器数据接入和存储任务,确保用户保存在云端数据安全<sup>[40]</sup>. 借助 YeeLink 平台,用户不仅可以上传和监测传感器数据,还能通过可视化操作控制管理接入的设备. 在 YeeLink 上,数据不再是孤立的节点,而是可以简单地被 API 取回,并放置到用户的个人博客上,或者根据喜好需求转发到微博或 Facebook 上.

以上的云平台均提供存储服务,并保障安全的数据管理以及认证操作. 再者,现有云平台已高度整合化并提供相应的 API 接口,对用户而言透明,用户不需要担心如何实现设备的对接,只需专注于应用与服务的管理. 然而各平台的服务侧重点也有所不同,由于 Fluidinfo 是基于数据的云服务平台,更倾向于提供 SaaS 服务,具体情况如表 2 所示(√: 提供, ×: 不提供).

Table 2 Comparison of Different Sensor-Cloud Platform

表 2 不同类型传感云平台服务比较

| Platform   | PaaS | Open Source | Cloud Storage | M2M | REST | Safety | Transparency |
|------------|------|-------------|---------------|-----|------|--------|--------------|
| Xively     | ✓    | ×           | ✓             | ✓   | ✓    | ✓      | ✓            |
| Nimbits    | ✓    | ✓           | ✓             | ✓   | ✓    | ✓      | ✓            |
| ThingSpeak | ✓    | ✓           | ✓             | ✓   | ✓    | ✓      | ✓            |
| Arrayent   | ×    | ×           | ✓             | ✓   | ✓    | ✓      | ✓            |
| Fluidinfo  | ×    | ×           | ✓             | ×   | ✓    | ✓      | ✓            |
| iDigi      | ✓    | ×           | ✓             | ✓   | ✓    | ✓      | ✓            |
| YeeLink    | ✓    | ×           | ✓             | ✓   | ✓    | ✓      | ✓            |

✓: Available    ×: Not available

5 典型应用

传感云平台具有快速接入、数据云存储、随时随地访问、按需服务等优点,在各行各业有着广泛的应用,如远程医疗、环境监测、智能交通等.相较于传统的WSN,基于传感云的新型应用均提供数据的云存储处理、移动访问和传感网络的远程控制等服务<sup>[41-42]</sup>.

5.1 远程医疗

在医疗领域里,传感器被用来监测患者的生理数据、监管药物的使用情况等<sup>[43]</sup>.例如患者可以佩戴一些可穿戴传感器设备或者在体内植入一些传感器设备来收集心率、血糖和体温等数据.对于患者而

言,传感器收集到的生理数据非常重要,并且对这些数据的实时性和精确性要求较高.医生依据这些数据来对患者进行诊断和治疗,因此需要规范的管理维护数据.在传统的医疗方式中,患者的病历数据库通常都设立在当地的疗养院中,医生需要去特定的疗养院才能访问这些数据.对于某些特殊的疾病,可能需要其他更有经验和名望的医生参与治疗,但是由于距离、时间等因素使得患者无法得到有效治疗.通过建立传感云平台,将很好地解决这一问题:患者的数据将存储在云端,医生可以通过终端设备对数据进行访问,使患者不受地域的限制而获得更好的治疗.

如图 4 所示,文献[44]提出的 SC-iPaaS 平台用以监控住家的病患,即普适医疗服务.患者在身上或

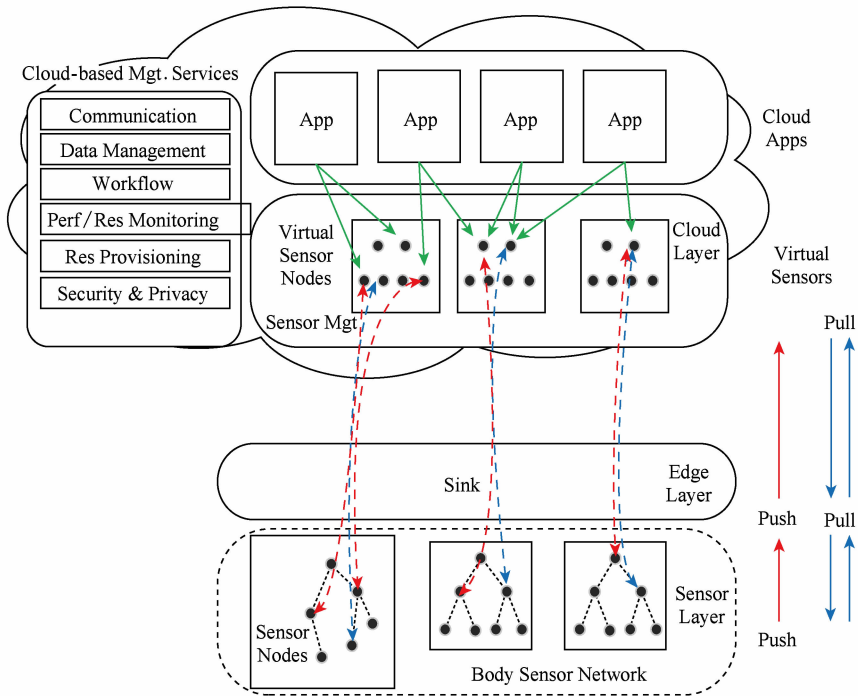


Fig. 4 Sensor-cloud implementation in telemedicine

图 4 基于传感云的远程医疗结构图

者体内安装无线传感器用于监测心跳速率、血压、体温、呼吸速率、血液凝固度、皮肤电反应以及跌落检测等生理活动数据. 患者的一些如手机、平板、电脑等电子设备可以充当汇聚节点,从而与这些传感器进行单跳或多跳通信. 传感器的数据将周期性地发送给云端的虚拟节点. 当传感器数据中存在生理活动异常时,治疗人员可以主动从传感器获取相应的数据作进一步分析,甚至可以提前通知患者家人、派遣救护车或者进行医疗诊断等操作.

5.2 军事领域

传感器网络应用于军事监测友军、装备、弹药、战场监视、反对势力的侦察和攻击监测侦察等<sup>[45]</sup>. 在以往远程监测无人区域方面,无线传感器网络的节点部署通常被限制在很小的区域,其带来的收益微乎其微. 随着云计算的优势越发凸显,无线传感器网络与云计算的结合是必然趋势,利用云端的计算和数据存储资源,由传感器所收集的数据能够得到很好的处理、分析和保存. 比如在某一时刻,在某块很小的区域可能发生了异常,操控者只需运行特定的应用程序来从部分传感器节点中获取所需数据,真正做到按需管理,消耗较少的资源实现远程服务. 如图 5 所示<sup>[46]</sup>,传感器网络收集的数据经传感网络控制中心传输到云端. 当用户需要访问传感网数据时,首先向传感云调度中心发送请求;当请求得到响应后,资源分配集群为其指定相应的传感网控制器,进而获取底层对应的传感器网络的信息.

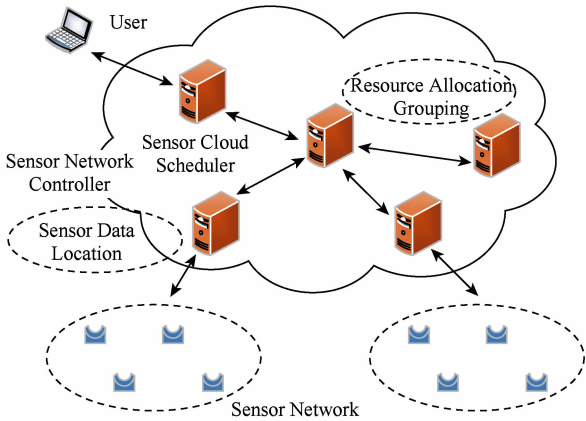


Fig. 5 Mills-cloud architecture  
图 5 军事云架构

5.3 目标跟踪

已有的 WSNs 中的目标跟踪应用通常是面向单用户、单应用的<sup>[47]</sup>. 对于没有配备传感器设备的用户而言,他们将无法使用已有的传感器网络应用. 传感云的出现可以为用户解决在不同的应用下传感器设备的管理问题. 利用虚拟化技术,传感云将实际的物理传感器动态地划分到不同的虚拟簇中. 用户只需要请求特定的服务,而不需要关心传感器节点的位置. 传感器的数据将通过云平台收集后发送给特定的应用,用户只需从应用中得到反馈并进行相应的操作.

图 6 显示了基于传感云的目标跟踪体系结构<sup>[48]</sup>: 底层传感器网络收集的数据首先上传到云端进行聚合、处理,然后将经过处理后的数据发送给终

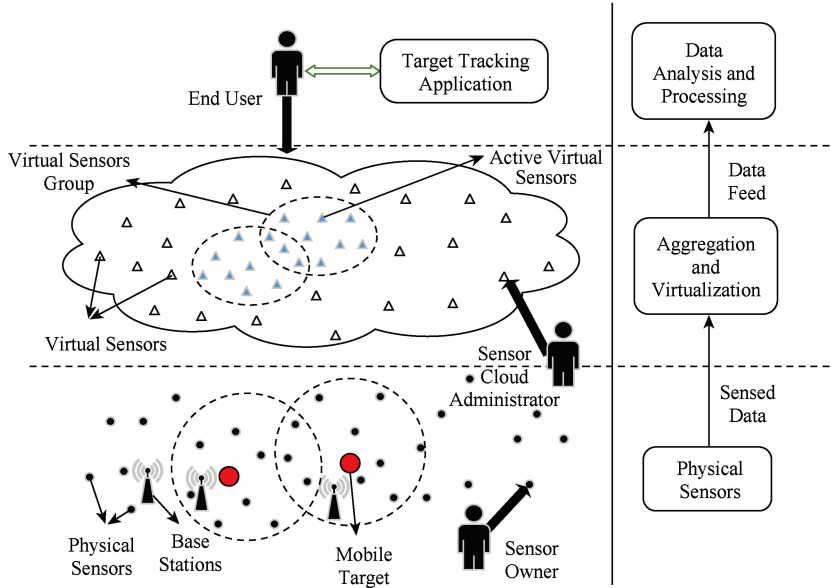


Fig. 6 Sensor-cloud implementation in target tracking  
图 6 基于传感云的目标跟踪体系结构

端用户. 在虚拟节点层中, 虚拟节点之间不仅能进行复用, 不同用户还能使用不同的虚拟节点集合, 从而实现对不同的目标同时跟踪, 提高了节点利用率.

### 5.4 环境监测

传统的 WSN 仅仅是将传感器布置在特定的区域采集数据, 缺乏进一步的分析处理, 而像地震、火山爆发等监测需要提前作出预测, 这对数据的处理能力有着一定的要求. 比如在气象预报中<sup>[49]</sup>, 需要对某个地区未来一段时间内的大气情况进行预测. 气象监测和预测系统通常包括数据收集、数据同化、数值天气预报和预报展示. 针对气象站部署的传感器可以监测风速、风向、相对温度、空气(水和土壤)、温度、气压、降水量、土壤湿度、能见度、云量和光照强度等数据. 这些收集到的数据总量庞大, 很难通过传统的数据库方法进行维护. 而且, 数据在被收集以后, 需要对其进行同化处理, 这将消耗巨大的计算资源. 而有了传感云平台, 数据的存储在云端, 不必担心存储空间不足等问题. 同时, 借助云计算技术, 通过强大的计算集群可以快速地完成对气象情况的分析和预测. 再比如在森林险情监测应用中, 森林中采

集的各种数据如温度、湿度等信息, 统一上传到云平台进行分析, 监测者足不出户即可掌握整个森林的情况, 一旦发现火灾等险情就能及时知晓.

### 5.5 智能交通

在交通运输系统中, 通常人们对路况信息的精确度与实时性的要求较高, 而实际的交通分布及其地理范围极其广泛, 传统的无线传感采集方式或多或少存在一些延迟<sup>[50]</sup>. 如图 7 所示, 传感云系统则可以很好解决这一问题: 传感器可以用来监测来往车辆并控制交通信号, 监控设备也能监视不同路段的交通状况并把实时画面传输给指挥中心. 这些传感器节点之间能够相互通信, 最终描绘出全局的交通状况图, 帮助用户以及相关部门了解实时的交通状况并作出相应调整. 对于数据指挥中心和和其他相关应用系统而言, 这对数据的大量存储与分析能力有着较为苛刻的要求. 因此, 运用传感云平台可以简化传感器数据的管理, 降低计算成本, 并对数据进行分析 and 预测. 对于用户而言, 传感云系统不仅可以用来实时获取当前位置, 还能预测到达目的地的时间及总路程等.

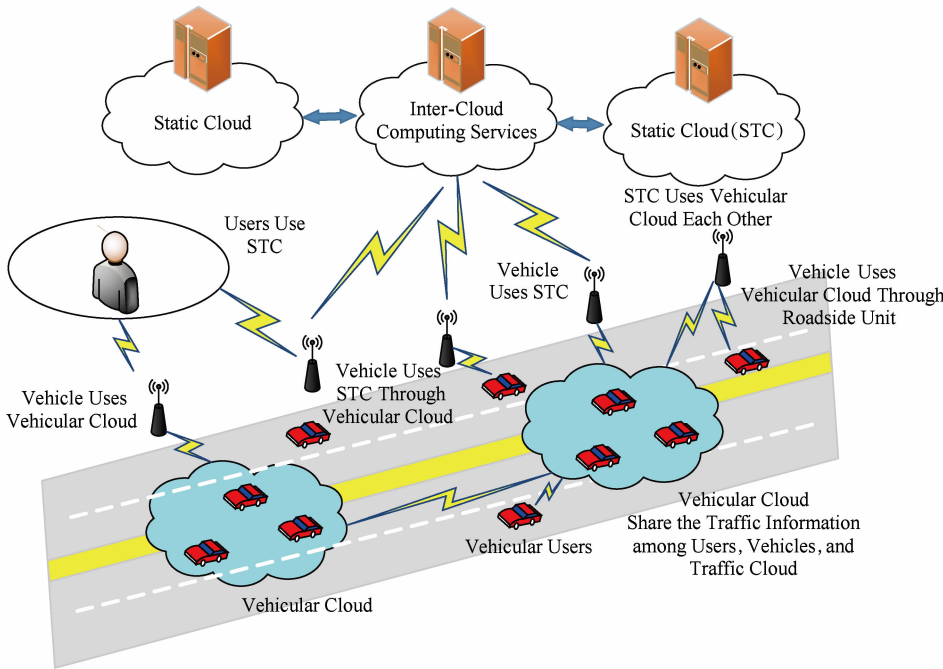


Fig. 7 Sensor-cloud implementation in smart traffic  
图 7 基于传感云的智能交通示意图

## 6 存在的问题与挑战

综合传感云在各行各业的应用分析, 其存在的一些问题愈发明显. 主要集中在系统的通信问题、服

务的实时性、系统的容错性和数据的可用性等方面, 下面逐条说明:

1) 传感器网络与云端网络之间存在通信瓶颈问题. 对于传感器网络而言, 传感器节点一般由廉价电子设备组成, 本身无线通信的带宽有限<sup>[51]</sup>. 与云

计算相结合的新型应用往往会产生大量数据,例如视频传感数据<sup>[52-53]</sup>。这些数据若传输到云端,对传感器网络的通信能力是一个挑战,对能量极为有限的传感器节点也提出了更高的要求。

2) 云计算模式缺乏对底层终端传感节点的直接管理,并存在实时性差的问题。云端服务器与底层传感网络分离得太远,云计算模式缺乏对底层终端传感节点的直接管理,并且由于网络带宽、传输错误等因素会导致延迟<sup>[54]</sup>。如在上述森林火灾的例子中,云计算平台能快速判断出火灾险情,但除了通知用户外,并不能及时采取实质性措施(如扑救)。而现代物联网技术的发展,使得人们对传感网的需求不再局限于感知环境,还要能对环境作出响应<sup>[55]</sup>,比如系统能自动调度移动灭火装置进行扑救。现有的云计算平台虽然计算和存储功能强大,却不足以支撑这一类型的服务。

3) 网络易产生故障和错误,且风险高。传感器节点大都部署于苛刻的复杂环境中,由于资源不足(如能量有限、元器件精度有限)等问题,网络易产生故障和错误,且风险高<sup>[56-57]</sup>。与云计算服务相结合后,系统的不确定因素增加(如由于网络延迟等原因),此问题将更为突出和严重。无线传感器网络若向云端所提供的信息是不准确或者不充分的,这可能导致云端得到错误的信息甚至执行错误的决策和操作,造成灾难性的后果。

4) 安全与隐私问题。传感器网络若将数据存储在云端(如谷歌云、百度云等公有云),这虽然扩展了存储空间、方便了用户对数据的访问,但用户会因此失去对数据可靠和安全的物理控制,机密或者私有数据信息容易被泄露<sup>[58]</sup>。此外,传感云存在容易受到恶意攻击或者用户数据泄露等问题<sup>[59]</sup>,如DDOS攻击、非授权访问等。因此,如何有效监控传感云安全、审计用户行为和过滤病毒将成为保护数据安全和用户隐私的关键因素。

5) 可用性问题。由于用户所处的时间、所在地点、所需要的服务等不同,用户的服务需求也随之不同<sup>[60]</sup>。在传感云体系结构中,数据是先从WSNs上传到云端,再由云端呈现给用户。用户可能不需要所有数据,而是部分有效数据。保障数据的可用性,避免数据的冗余,为用户提供准确、有效的信息,将带给用户更好的用户体验。

6) 异构性问题。随着科学技术的发展,新的网络与设备也在不断更新迭代,在接入传感云系统时可能存在设备不兼容、未知数据类型等问题<sup>[61]</sup>。如

何将新老设备整合,如何在不同的网络(3G, 4G, WIFI)中接入不同的终端设备(手机、平板)并保持高度的兼容性将是传感云面临的挑战之一。

7) 事件管理问题。当用户数较多,同一时间内的服务请求激增时,传感云将面临非常复杂的事件处理和管理问题<sup>[49]</sup>:①如何同步处理不同时延导致的异步服务请求?②如何有效处理服务请求而不影响系统稳定性?③如何最优化处理大量的服务请求?若处理不当,则可能导致响应不及时、系统崩溃等问题。

## 7 基于雾计算的传感云系统

雾计算(fog computing)模式是云计算模式的延伸,于2011年由思科(Cisco)首次提出<sup>[62]</sup>。相比云计算模式而言,雾计算的特点是更贴近末端节点、具有一定的本地计算能力、更广的地理分布和支持移动性<sup>[63-65]</sup>。因而能更好地直接管理和控制传感器网络节点,并作为联系云计算服务的桥梁和纽带,该新型计算模式正好可以弥补云计算模式的部分缺点。

### 7.1 基于雾计算的传感云框架

鉴于雾计算的诸多优点,本文探讨了基于雾计算的传感云系统框架,与文献<sup>[66-67]</sup>中所提的边际层(cloud-edge-beneath)架构类似。如图8所示,最上层是云计算层,提供强大的计算服务和存储服务。第2层是由少量移动节点组成的雾节点层,雾节点层作为联系传感器网络与云端网络的纽带,为上下2层提供服务。其主要任务是进行移动节点之间的协作与配合、桥接传感器网络与云、管理机密性数据的存储。一些本地化的、实时性要求高的计算任务将放在雾节点层处理,同时雾节点也能存储少量数据<sup>[68]</sup>。雾节点之间构成一个虚拟的网络,相互之间的通信可能是直接的(对于通信能力较强的节点),也可能是借助普通传感器节点进行信息传递<sup>[69]</sup>。底层是由普通传感节点所组成的传感器网络层,为上下两层网络提供数据,并在雾节点层提供的服务下实现容错性管理。该模式基于传统的、固定节点组成的传感网,引入的少量移动式节点不会造成太大的成本开销<sup>[70]</sup>。

### 7.2 基于雾计算的最大化数据传输模式

传感器网络的传输能力较弱,传统传感器节点将数据传到一个基站(sink),再由基站传送至云端。但一方面单个基站的通信能力有限,可能不足以支持整个网络的大量数据传输;另一方面,当大量数据

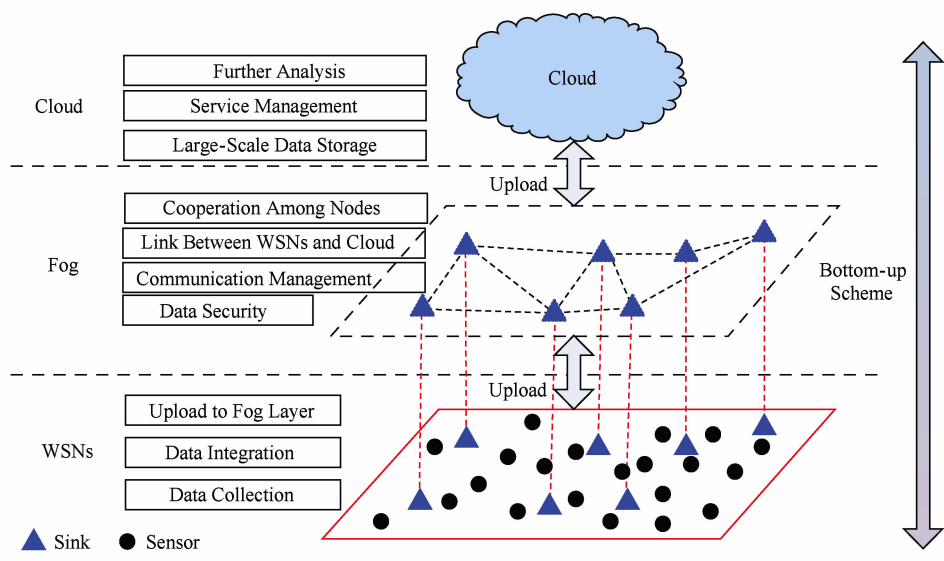


Fig. 8 Fog computing framework based on sensor-cloud

图 8 基于雾计算的传感云框架

同时到达基站时,会导致数据上传的延时(超过应用所规定的传输时间限制)<sup>[71]</sup>.在雾计算的框架下,可以从 2 个方面来解决问题:1)每个雾节点可以作为移动的基站<sup>[72-73]</sup>,传感器中的数据传送到雾节点时,依靠雾计算的本地计算能力先对数据进行融合和压缩,这在一定程度上减少需要上传的数据量;2)通过多个雾节点的相互协作,组成一个移动式的 MIMO (multi-input multi-output) 网络结构(与已有的 MIMO 方法不同之处在于该结构由移动节点组成),充分利用多个节点的“空间多样性”(spatial diversity)<sup>[74-75]</sup>.

当某个移动基站数据量过大发生阻塞时,该基站可以将数据转发至其它负载较轻的基站,从而最大化整个网络的数据传输量并减少数据传输延迟.而为了满足实时性要求,雾节点层之间的转发根据

实际需要不能超过一定的跳数.图 9 是该方法思想的示意图,A 与 B 两个节点分别需要同时上传 7 个和 3 个资源到云端.此时可在 A 与 B 之间进行调度,如从 A 中调度 2 个资源至 B,接着 A 与 B 节点均上传 5 个资源至云端,这样有效减少了总调度时间,并提高了吞吐量.雾节点之间的连接线之所以在图 9 中用虚线,指这种转发可以通过多跳路由,也可以是该雾节点移动一段距离再借助多跳路由传输(如移动时间在可容忍的数据延时之内).

7.3 基于雾计算的移动性容错方法

传感网中的故障或错误的产生主要源头分为 3 个方面:节点错误、事件监测错误及数据传输错误.1)从节点错误方面看,传感节点可能由于故障或者能量耗尽而失效,在雾节点框架下移动节点可以及时移动过来填补空缺,从连通和覆盖 2 个方面实现网络拓扑的完整性<sup>[76]</sup>.2)从事件监测错误方面看,传统监测方法一般由事件周围的多个节点进行信息融合和决策,但是,由于事件周围的节点所捕获的事件信息的精度不一样,可能会导致最终的决策错误.分析其原因是因为距离事件较近的节点数量较少,从而导致得出正确判断的概率不高.在雾计算模式下,可以使用移动节点来配合固定节点进行事件监测,并将监测数据进行局部决策<sup>[77]</sup>.由于移动节点可以近距离靠近事件,从而能以较高的概率作出正确判断,提高监测的准确度;此外由于雾节点的计算能力较强,能运行普通传感器节点不能完成的、复杂的决策算法,进一步提高监测准确性.3)从数据传输错误方面看,数据传输错误的原因在于无线链路的

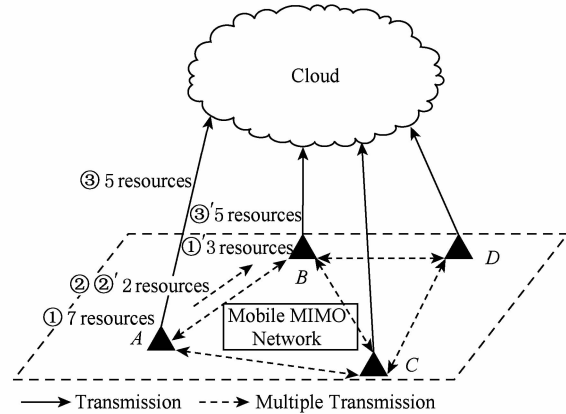


Fig. 9 Data transmission maximization

图 9 最大化数据传输示意图

不稳定性,解决的基本思路是减少无线传输的机会(跳数).可从2个方面解决:①在数据的时延允许的条件下,尽量用移动节点来帮助数据收集,减少无线多跳传输;②受社交网络中的小世界原理启发,雾节点层中的移动节点可组成一个小世界网络<sup>[78-79]</sup>,利用小世界原理的特征——“通信的平均路径长度是简短的”,来构建具有最少转发节点的多跳通信路径.

7.4 基于雾计算的数据私密性存储方案

对于云端数据容易泄露而导致用户隐私遭到侵犯等问题<sup>[80]</sup>,可以充分利用雾节点的本地存储能力如图10所示,按一定的规则,将数据划分为2部分:存储在雾节点层和传输至云端存储,使得使用者只有完全拥有这2部分数据才可以还原出原始数据.其中,存储在雾节点层的数据量远小于存储在云端的数据量,即便是云端数据和密钥都被泄露,由于缺失了雾节点层的部分数据,窃取者仍然不能还原出原始数据,从而保证数据的私密性.当用户需要调取数据时,只需要分别从雾节点层和云端调取数据即可完全还原出原始数据,由于从雾节点层所需要传输的数据量较小,基本不会带来延迟.

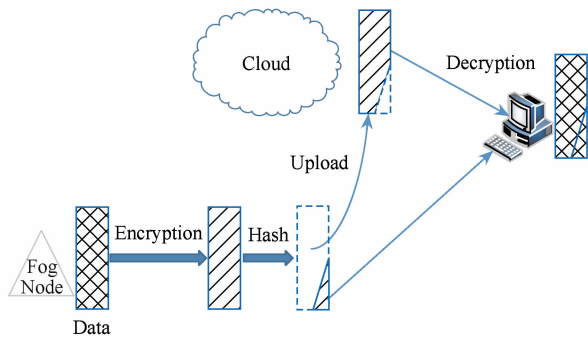


Fig. 10 Privacy data storage based on fog  
图10 基于雾节点的私密性数据存储示意图

8 未来的研究方向

1) 雾计算.如第7节所介绍的,传感器网络技术与云计算技术相结合是发展的必然趋势.对于传感器网络而言,引入功能较强的移动节点是扫除其利用云计算服务障碍的根本途径,而这些移动节点天然具有成为雾节点的基因:具有一定的本地计算和存储能力、通信能力较普通传感节点强、贴近末端网络、地理上分布广泛.因此充分发挥移动节点(雾节点)的本地计算能力,将能以一种新型的计算模式,桥接其与云计算服务的联系,具有重大的理论与应用价值,值得深入开展研究,这既是对现有的传感

器网络和云计算技术的重要补充和改进,也是对雾计算这一新型计算模式的实践和验证.

2) 服务质量.对用户而言,好的用户体验是选择一个传感云平台必备的条件.当存在大量并发用户服务请求时,如何满足不同用户对不同应用的服务质量要求?这就需要传感云平台能对不同的数据流进行处理,对实时性强且重要的数据优先响应,并使用各种转发策略、拥塞避免等机制为这些数据流提供优先传输服务.此外,在保证响应速度的同时,确保数据的可用性也是提高服务质量的一项关键指标.

3) 标准统一化.如第4节所言,如今已存在多种传感云系统,尽管这些传感云平台能为用户提供各种各样的服务,但其提供的API却不相同.如Xively云平台的信息总线支持Rest和Socket等协议;而Nimbits的接入设备需要把json或xml数据转换成特定的Nimbits数据点才能传输信息.因此,设计一个统一的协议标准,规范化各传感云平台的接入方式也将是未来研究方向之一.

4) IP分配.未来随着接入设备的数量增加,IP资源终将耗尽.IPv6作为下一代IP协议,将取代IPv4,提供更多的地址.IPv6的广泛部署依赖于未来网络的发展情况,目前基于IPv4的网络由于IP资源不够,难以为每个接入用户配对.因此对于IPv6的研究需要不断完善,从长远上看,IPv6将有利于传感云乃至互联网的可持续发展<sup>[81]</sup>.

5) 安全与隐私.保护网络安全与用户隐私是一个亘古不变的话题,加强不同应用场景下的认证和加密机制,有助于提高传感云的安全级别<sup>[82]</sup>.网络安全包含系统安全、网络自身安全、信息传播安全以及信息内容安全,其中保护信息内容安全的本质即保护用户的隐私和利益.在不影响网络与应用平台的同时,如何建立一个全面、安全、高效的传感平台是未来研究需要考虑的重点之一.

9 结束语

随着无线传感器网络与云计算的发展,两者的结合已成为必然趋势,传感云便是两者结合的产物.传感云作为一种新型体系结构,不仅能满足传感器网络在数据处理和存储能力等方面的需求,还能为用户提供可用的、便捷的、按需的远程网络访问服务.本文主要介绍了传感云的产生背景、体系结构和应用领域,在目前传感云系统的基础上指出了现有

的传感云系统存在的一些挑战与不足,并提出了基于雾计算的传感云框架和解决问题的基本思路,最后探讨了未来亟待解决问题的研究方向。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Zhao. Survey of approximation algorithm on virtual backbone of wireless sensor network [J]. Journal of Computer Research and Development, 2016, 53 (1): 15 - 25 (in Chinese)  
(张昭. 无线传感器网络虚拟骨干近似算法综述[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(1): 15-25)
- [2] Rawat P, Singh K D, Chaouchi H, et al. Wireless sensor networks: A survey on recent developments and potential synergies [J]. The Journal of Supercomputing, 2014, 68 (1): 1-48
- [3] Đurišić M P, Tafa Z, Dimić G, et al. A survey of military applications of wireless sensor networks [C] //Proc of Mediterranean Conf on Embedded Computing. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 196-199
- [4] Lazarescu M T. Design of a WSN platform for long-term environmental monitoring for IoT applications [J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2013, 3(1): 45-54
- [5] Wang Tian, Peng Zhen, Liang Junbin, et al. Detecting targets based on a realistic detection and decision model in wireless sensor networks [G] //Proc of the 10th Conf on Wireless Algorithms, Systems, and Applications. Berlin: Springer, 2015: 836-844
- [6] Dash S K, Sahoo J P, Mohapatra S, et al. Sensor-cloud: Assimilation of wireless sensor network and the cloud [C] //Proc of the 5th Int Conf on Computer Science and Information Technology. Berlin: Springer, 2012: 455-464
- [7] Yuriyama M, Kushida T. Sensor-cloud infrastructure-physical sensor management with virtualized sensors on cloud computing [C] //Proc of the 13th Int Conf on Network-Based Information Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 1-8
- [8] Madria S, Kumar V, Dalvi R. Sensor cloud: A cloud of virtual sensors [J]. IEEE Software, 2014, 31(2): 70-77
- [9] Trivedi K, Srivastava A K. An energy efficient framework for detection and monitoring of forest fire using mobile agent in wireless sensor networks [C] //Proc of Int Conf on Computational Intelligence and Computing Research. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 1-4
- [10] Yan Ruqiang, Sun Hanghang, Qian Yuning. Energy-aware sensor node design with its application in wireless sensor networks [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(5): 1183-1191
- [11] Dinh H T, Lee C, Niyato D, et al. A survey of mobile cloud computing: Architecture, applications, and approaches [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2013, 13 (18): 1587-1611
- [12] Coady Y, Hohlfeld O, Kempf J, et al. Distributed cloud computing: Applications, status quo, and challenges [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2015, 45(2): 38-43
- [13] Wang Tian, Jia Weijia, Xing Guoliang, et al. Exploiting statistical mobility models for efficient Wi-Fi deployment [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2013, 62(1): 360-373
- [14] Wang Tian, Peng Zhen, Chen Yonghong, et al. Continuous tracking for mobile targets with mobility nodes in wsns [C] //Proc of Int Conf on Smart Computing. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 261-268
- [15] Wang Wenhua, Wang Tian, Wu Qun, et al. Survey of delay-constrained data collection with mobile elements in WSNs [J]. Journal of Computer Research and Development, 2017, 54(3): 474-492 (in Chinese)  
(王文华, 王田, 吴群, 等. 传感网中时延受限的移动数据收集研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(3): 474-492)
- [16] Misra S, Chatterjee S, Obaidat M S. On theoretical modeling of sensor cloud: A paradigm shift from wireless sensor network [J/OL]. IEEE Systems Journal, 2014, PP(99): 1-10
- [17] Zhu Chunsheng, Leung V C M, Yang L T, et al. Trust assistance in sensor-cloud [C] //Proc of the 24th Int Conf on Computer Communications Workshops. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 342-347
- [18] Yang Chi, Liu Chang, Zhang Xuyun, et al. A time efficient approach for detecting errors in big sensor data on cloud [J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2015, 26 (2): 329-339
- [19] Abbasi A Z, Islam N, Shaikh Z A. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture [J]. Computer Standards & Interfaces, 2014, 36(2): 263-270
- [20] Misra S, Singh A, Chatterjee S, et al. QoS-aware sensor allocation for target tracking in sensor-cloud [J]. Ad Hoc Networks, 2015, 33: 140-153
- [21] Wang Tian, Peng Zhen, Liang Junbin, et al. Following targets for mobile tracking in wireless sensor networks [J]. ACM Trans on Sensor Networks, 2016, 12(4): Article 31
- [22] Kim K H, Lee S J, Congdon P. On cloud-centric network architecture for multi-dimensional mobility [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2012, 42(4): 509-514
- [23] Chandra A A, Lee Y, Kim B M, et al. Review on sensor cloud and its integration with arduino based sensor network [C] //Proc of 2013 Int Conf on IT Convergence and Security. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 1-4
- [24] ITU. ITU Internet reports 2005: The Internet of things [EB/OL]. [2016-10-30]. <http://itu.int/osg/spu/publications/internetofthings>

- [25] Gubbi J, Buyya R, Marusic S, et al. Internet of things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2013, 29(7): 1645-1660
- [26] Chen Haiming, Cui Li. Design and model checking of service oriented software architecture for Internet of things: A Survey [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2016, 39(5): 853-871 (in Chinese)  
(陈海明, 崔莉. 面对服务的物联网软件体系结构设计 with 模型检测[J]. *计算机学报*, 2016, 39(5): 853-871)
- [27] Sehgal V K, Patrick A, Rajpoot L. A comparative study of cyber physical cloud, cloud of sensors and Internet of things: Their ideology, similarities and differences [C] //Proc of the 6th Int Conf on Advance Computing. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 708-716
- [28] Guinard D, Trifa V, Mattern F, et al. From the Internet of things to the Web of things: Resource-oriented architecture and best practices [G] //Architecting the Internet of Things. Berlin: Springer, 2011: 97-129
- [29] Kurschl W, Beer W. Combining cloud computing and wireless sensor networks [C] //Proc of the 11th Int Conf on Information Integration and Web-based Applications & Services. New York: ACM, 2009: 512-518
- [30] Tan K L. What's NEXt?: Sensor+cloud!? [C] //Proc of the 7th ACM Int Workshop on Data Management for Sensor Networks. New York: ACM, 2010
- [31] Alamri A, Ansari W S, Hassan M M, et al. A survey on sensor-cloud: Architecture, applications, and approaches [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 9(2): Article 917923
- [32] LogMeIn Inc. Xively by LogMeIn [EB/OL]. [2016-06-22]. <http://xively.com>
- [33] GitHub. Nimbit—promote yourself [EB/OL]. [2016-06-22]. <http://nimbits.com>
- [34] Zhou Jiehan, Leppänen T, Harjula E, et al. Cloudthings: A common architecture for integrating the Internet of things with cloud computing [C] //Proc of the 17th Int Conf on Computer Supported Cooperative Work in Design. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 651-657
- [35] The MathWorks Inc. Internet of things-ThingSpeak [EB/OL]. [2016-06-22]. <http://thingspeak.com>
- [36] Arrayent Inc. Arrayent|The IoT platform for trusted brands [EB/OL]. [2016-06-22]. <http://arrayent.com>
- [37] Fluidinfo Inc. Fluidinfo [EB/OL]. [2016-06-22]. <http://fluidinfo.com>
- [38] Jalali S. M2M solutions—Design challenges and considerations [C] //Proc of 2013 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 210-214
- [39] Digi International Inc. M2M communications, remote monitoring & management—Digi [EB/OL]. [2016-06-22]. <http://idigi.com>
- [40] Qingdao Yeelink Information Technology Co, LTD. YeeLink [EB/OL]. [2016-06-22]. <http://yeelink.net>
- [41] Chatterjee S, Misra S. Dynamic and adaptive data caching mechanism for virtualization within sensor-cloud [C] //Proc of the 8th Int Conf on Advanced Networks and Telecommunications Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 1-6
- [42] Lim Y, Park J. Sensor resource sharing approaches in sensor-cloud infrastructure [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014, 10(4): 1-8
- [43] Doukas C, Maglogiannis I. Bringing IoT and cloud computing towards pervasive healthcare [C] //Proc of the 6th Int Conf on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 922-926
- [44] Phan D H, Suzuki J, Omura S, et al. Multiobjective communication optimization for cloud-integrated body sensor networks [C] //Proc of the 14th IEEE/ACM Int Symp on Cluster, Cloud and Grid Computing. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 685-693
- [45] Amdouni I, Adjih C, Plesse T. Network coding in military wireless ad hoc and sensor networks: Experimentation with gardinet [C] //Proc of the 17th Int Conf on Military Communications and Information Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 1-9
- [46] Misra S, Singh A, Chatterjee S, et al. Mils-cloud: A sensor-cloud-based architecture for the integration of military tri-services operations and decision making [J]. *IEEE Systems Journal*, 2016, 10(2): 628-636
- [47] Xu Enyang, Ding Zhi, Dasgupta S. Target tracking and mobile sensor navigation in wireless sensor networks [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2013, 12(1): 177-186
- [48] Chatterjee S, Misra S. Target tracking using sensor-cloud: Sensor-target mapping in presence of overlapping coverage [J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(8): 1435-1438
- [49] Dash S K, Mohapatra S, Pattnaik P K. A survey on applications of wireless sensor network using cloud computing [J]. *International Journal of Computer science & Engineering Technologies*, 2010, 1(4): 50-55
- [50] Zhou Jin, Chen C P, Chen Long, et al. A user-customizable urban traffic information collection method based on wireless sensor networks [J]. *IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(3): 1119-1128
- [51] Zhu Chunsheng, Leung V, Yang L T, et al. Collaborative location-based sleep scheduling for wireless sensor networks integrated with mobile cloud computing [J]. *IEEE Trans on Computers*, 2015, 64(7): 1844-1856
- [52] Hu Chuli, Chen Nengcheng, Guan Qingfeng, et al. An integration and sharing method for heterogeneous sensors oriented response in smart city [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2014, 51(2): 260-277 (in Chinese)

- (胡楚丽, 陈能成, 关庆锋, 等. 面向智慧城市应急响应的异构传感器集成共享方法[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(2): 260-277)
- [53] Zhuo Li, Zhang Jing, Zhao Yingdi, et al. A QoS-guaranteed multi-path routing protocol for WVSNS [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(6): 1122-1129 (in Chinese)  
(卓力, 张菁, 赵霆颀, 等. 一种面向无线视频传感器网络的多径 QoS 保障路由协议[J]. 电子学报, 2013, 41(6): 1122-1129)
- [54] Zhu C, Nicanfar H, Leung V, et al. An authenticated trust and reputation calculation and management system for cloud and sensor networks integration [J]. *IEEE Trans on Information Forensics and Security*, 2015, 10(1): 118-131
- [55] Mazo M, Tabuada P. Decentralized event-triggered control over wireless sensor/actuator networks [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2011, 56(10): 2456-2461
- [56] Su Jinshu, Guo Wenzhong, Yu Chaolong, et al. Fault-tolerance clustering algorithm with load-balance aware in wireless sensor network [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2014, 37(2): 445-456 (in Chinese)  
(苏金树, 郭文忠, 余朝龙, 等. 负载均衡感知的无线传感器网络容错分簇算法[J]. 计算机学报, 2014, 37(2): 445-456)
- [57] Chen Hongsheng, Shi Ke. Quadrilateral steiner tree based connectivity restoration for wireless sensor networks [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2014, 37(2): 457-469 (in Chinese)  
(陈洪生, 石柯. 基于四边形成斯坦纳树的无线传感器网络连通恢复[J]. 计算机学报, 2014, 37(2): 457-469)
- [58] Poolsappasit N, Kumar V, Madria S, et al. Challenges in secure sensor-cloud computing [G] // *Workshop on Secure Data Management*. Berlin: Springer, 2011: 70-84
- [59] Cao Zhenfu, Dong Xiaolei, Zhou Jun, et al. Research advances on big data security and privacy preserving [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2016, 53(10): 2137-2151 (in Chinese)  
(曹珍富, 董晓蕾, 周俊, 等. 大数据安全与隐私保护研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(10): 2137-2151)
- [60] Zhu Chunsheng, Sheng Zhengguo, Leung V, et al. Toward offering more useful data reliably to mobile cloud from wireless sensor network [J]. *IEEE Trans on Emerging Topics in Computing*, 2015, 3(1): 84-94
- [61] Viani F, Robol F, Polo A, et al. Wireless architectures for heterogeneous sensing in smart home applications: Concepts and real implementation [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(11): 2381-2396
- [62] Bonomi F. Connected vehicles, the Internet of things, and fog computing [C] // *Proc of the 8th ACM Int Workshop on Vehicular Inter-Networking*. New York: ACM, 2011: 13-15
- [63] Bonomi F, Milito R, Zhu J, et al. Fog computing and its role in the Internet of things [C] // *Proc of the 1st Conf of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing*. New York: ACM, 2012: 13-16
- [64] Vaquero L M, Rodero-Merino L. Finding your way in the fog: Towards a comprehensive definition of fog computing [J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2014, 44(5): 27-32
- [65] Hong K, Lillethun D, Ramachandran U, et al. Mobile fog: A programming model for large-scale applications on the Internet of things [C] // *Proc of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Mobile Cloud Computing*. New York: ACM, 2013: 15-20
- [66] Shi Weisong, Cao Jie, Zhang Quan, et al. Edge computing: Vision and challenges [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(5): 637-646
- [67] Xu Yi, Helal A. Scalable cloud-sensor architecture for the Internet of things [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(3): 285-298
- [68] Wang Tian, Peng Zhen, Wen Shen, et al. Reliable wireless connections for fast-moving rail users based on a chained fog structure [J] *Information Sciences*, 2017, 379: 160-176
- [69] Bonomi F, Milito R, Natarajan P, et al. Fog computing: A platform for Internet of things and analytics [G] // *Big Data and Internet of Things: A Roadmap for Smart Environments*. Berlin: Springer, 2014: 169-186
- [70] Wang Tian, Peng Zhen, Hong Xiaohua, et al. Mobility-assisted target tracking in wireless sensor networks [J]. *Journal of Huaqiao University: Natural Science*, 2016, 37(6): 737-742 (in Chinese)  
(王田, 彭臻, 洪晓华, 等. 无线传感器网络中的移动式目标跟踪[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2016, 37(6): 737-742)
- [71] Wang Tian, Cai Yiqiao, Jia Weijia, et al. Maximizing real-time streaming services based on a multi-servers networking framework [J]. *Computer Networks*, 2015, 93(1): 199-212
- [72] Zeng Jiandian, Wang Tian, Lai Yongxuan, et al. Data delivery from WSNs to cloud based on a fog structure [C] // *Proc of the 4th Int Conf on Advanced Cloud and Big Data*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 104-109
- [73] Li Yang, Wang Tian, Liang Junbin, et al. Efficient data collection in sensor-cloud system with multiple mobile sinks [C] // *Proc of the 10th Asia-Pacific Services Computing Conf on Advances in Services Computing*. Berlin: Springer, 2016: 130-143
- [74] Brante G, Souza R D, Garcia-Frias J. Spatial diversity using analog joint source channel coding in wireless channels [J]. *IEEE Trans on Communications*, 2013, 61(1): 301-311
- [75] Mikki S M, Antar Y M. On cross correlation in antenna arrays with applications to spatial diversity and MIMO systems [J]. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 2015, 63(4): 1798-1810
- [76] Yannuzzi M, Milito R, Serral-Gracià R, et al. Key ingredients in an IoT recipe: Fog computing, cloud computing, and more fog computing [C] // *Proc of the 19th Int Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks*. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 325-329

- [77] Madsen H, Burtchschy B, Albeanu G, et al. Reliability in the utility computing era; Towards reliable fog computing [C] // Proc of the 20th IEEE Int Conf on Systems, Signals and Image Processing. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 43-46
- [78] Kost G J. Theory, principles, and practice of optimizing point-of-care small-world networks [J]. Point of Care, 2012, 11(2): 96-101
- [79] Larsson E G, Edfors O, Tufvesson F, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 186-195
- [80] Chen Deyan, Zhao Hong. Data security and privacy protection issues in cloud computing [C] //Proc of Int Conf on Computer Science and Electronics Engineering. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 647-651
- [81] Liu Xiao, Zhao Hai, Li Shaofeng, et al. Vital signs of IPv4/IPv6 macroscopic Internet topologies [J]. Journal of Computer Research and Development, 2016, 53(4): 824-833 (in Chinese)  
(刘晓, 赵海, 李少峰 等. 互联网(IPv4/IPv6)宏观拓扑结构生命特征[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(4): 824-833)
- [82] Liu Wentao. Research on cloud computing security problem and strategy [C] //Proc of the 2nd IEEE Int Conf on Consumer Electronics, Communications and Networks. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 1216-1219



**Zeng Jiandian**, born in 1992. Master candidate. His main research interests include wireless sensor networks and mobile computing.



**Wang Tian**, born in 1982. PhD, associate professor. Member of CCF. His main research interests include wireless sensor networks, cloud computing, social network, Internet of things and mobile computing.



**Jia Weijia**, born in 1957. PhD, professor and PhD supervisor. Senior member of the IEEE and member of the ACM and CCF. His main research interests include next generation wireless communication, protocols, heterogeneous networks.



**Peng Shaoliang**, born in 1979. PhD, Assistant professor at National University of Defense Technology. Member of the IEEE and the ACM. His main research interests include distributed system, high performance computing, cloud computing, and wireless networks.



**Wang Guojun**, born in 1970. PhD, professor and PhD supervisor. Distinguished member of CCF, and member of the IEEE, ACM, and IEICE. His main research interests include network and information security, Internet of things and cloud computing.