

传感网中间件测试与验证平台

李 强¹ 秦伟俊¹ 刘 燕² 王瑞聪² 韩 冰²

¹(中国科学院软件研究所 北京 100190)

²(北京大学软件与微电子学院 北京 102600)

(qinweijun@is.iscas.ac.cn)

Test and Verification Platform for Middleware of Sensor Networks

Li Qiang¹, Qin Weijun¹, Liu Yan², Wang Ruicong², and Han Bing²

¹(Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

²(School of Software and Microelectronics, Peking University, Beijing 102600)

Abstract Middleware for wireless sensor networks (WSNs) is system software between WSNs and applications, which shielding the underlying network hardware differences and the complexity of a distributed environment, providing a stable environment for application development. With the development of sensor network and its application, the overall complexity of such systems is continuously increasing. These will require high performance and high-quality middleware for sensor networks, which directly affecting the research and the development of sensor networks. Considering the ISO/IEC 9126 standards and the characteristics of sensor networks, test standards and content of middleware for WSNs are proposed in this paper. In addition, we introduce the design and implementation a platform, which test and verify the quality and performance of middleware for WSNs. The overall architecture of this platform and the details of each module in the platform are described in this paper. According to different types of middleware for WSNs, users can design tests programs by the platform.

Key words middleware; testing platform; wireless sensor networks; testing

摘 要 传感网中间件是介于无线传感器网络 and 上层应用之间的系统软件,屏蔽底层的网络硬件差异性和分布式环境的复杂性,提供一个稳定的应用开发环境.随着传感网及其应用的发展,系统的复杂性也随之增加,对传感网中间件的质量和性能的要求也不断增加,传感网中间件的性能和质量直接影响到传感网应用的推广,因而传感网中间件的测试与验证是传感网研究的重要方面.结合 ISO/IEC 9126 标准和传感网应用的特征,提出了传感网中间件的测试标准和测试内容.在此基础上,提出了一个传感网中间件测试与验证平台,描述了测试与验证平台的整体架构和各个模块的实现细节及测试平台的工作流程.

关键词 中间件;测试与验证平台;无线传感器网络;测试

中图法分类号 TP393

收稿日期:2011-07-06

基金项目:中国科学院知识创新工程领域前沿项目(ISCAS2009-DR15);国家重大科技专项基金项目(2010ZX03006-001-01,2011ZX03005-002-02)

无线传感器网络(wireless sensor network)是由部署在监测区域内大量的微型传感器节点通过无线网络连接形成的一个多跳的自组织网络系统. 无线传感器网络无法得到广泛应用的原因,除了网络自身的限制(诸如资源有限、网络动态拓扑、多跳和自组织的影响),更主要是上层应用的普适性与底层传感网的差异性,导致无线传感器网应用的开发十分复杂. 传感网中间件^[1-3]是介于无线传感器网络和上层应用之间的系统软件,为应用开发提供一组共通的应用接口程序(application interface, API),从而屏蔽底层的网络硬件差异性和分布式环境的复杂性. 传感网中间件作为能够提供标准化服务、适应资源和应用需求动态变化的自适应策略和机制的技术,为无线传感器网络应用的开发提供了一个相对稳定、高层应用环境,给研究人员提供一个统一的运行平台和友好的开发环境,目前已成为无线传感器网络的研究热点.

传感网中间件可以降低无线传感器网络的底层硬件和上层应用所提供的服务之间的耦合度,从而推动无线传感器网络的应用. 若传感网中间件的质量能够通过有效的测试手段得到进一步保证,那么服务提供商们可以不必关注无线传感器网络硬件和底层的差异,而把精力集中于无线传感器网络的上层应用所能提供的服务上. 从而进一步地推动无线传感器网络的商业应用. 然而,传统测试方法^[4-5],并未考虑到传感器节点有限的计算能力、资源受限、网络动态拓扑变化、多跳、自组织等特性,并不适合传感网中间件的测试方法. 目前传感网中间件测试技术的研究仍然处于起步阶段,许多研究离实用还有很大的距离,同时还有很多问题仍需进一步寻找解决方案,但是传感网中间件测试技术的研究是传感网研究和发展中一个亟待解决的问题.

传感网中间件是介于无线传感器网络和上层应用之间的系统软件,可以作为一种软件产品,ISO/IEC 9126^[6]是一个衡量软件质量的标准,它把软件质量的衡量划分为一系列的属性和子属性. 考虑到无线传感网的特性,不能直接将ISO/IEC 9126标准运用到传感网中间件的评估上去. 本文通过ISO/IEC 9126标准到传感网中间件评估的映射,得到传感网中间件的测试标准,并结合中国移动对中间件系统测试方法^[7],提出了传感网中间件的测试内容. 在此基础上,本文提出了一个传感网中间件测试与验证平台,描述了测试与验证平台的整体架构和各个模块的实现细节以及测试与验证平台的工作流

程. 测试与验证平台支持测试人员根据不同的类型的传感网中间件,自定义测试方案;实时地收集测试结果并进行记录和分析,通过前端界面展示测试结果.

1 现有工作基础

依据ISO/IEC JTC1 SGSN^[8]标准化工作组的定义,传感网及其应用系统内部是通过服务和服原语进行业务连接与交互. 传感网中的服务指传感网节点提供的标准化业务功能,服务之间的交互使用标准化的服务原语. 一些国内的研究机构和大学(包括中国科学院上海微系统与信息研究所、中国移动、上海贝尔、北京大学、武汉大学等等)以ISO/IEC JTC1 SGSN^[9]标准化工作组所定义的服务为依据,将传感网中间件系统划分基于承载网(移动蜂窝网、互联网等)的业务中间件和基于底层传感器网络中间件,国家重大专项“新一代宽带无线移动通信网”也是如此划分无线传感器网络中间件系统,并认为此类划分有利于推广无线传感器网络的应用,其中较为典型代表有上海贝尔提出的基于移动通信网中间件和重庆邮电大学提出的基于底层传感网的时钟同步中间件. 基于移动通信网中间件为上层的传感网应用开发提供了包括管理服务与应用服务两大类,管理服务是指支持整个传感网系统的运行、管理、计费、认证、授权,应用服务则是面向终端用户的服务支持. 基于底层传感网的时钟同步中间件,运用基于广播同步、匹配同步与过度侦听相结合的新型多层次时间同步机制来解决各个节点对时间同步精度的差异化需求,在传感器节点侧提供时钟同步中间件模块和定义时钟同步服务接口. 本文依据此类传感网中间件系统的划分,并针对基于底层传感器网络中间件和基于承载网业务中间件这两类中间件,提出了相应的测试标准和测试内容,以此为基础设计和实现了一个传感网中间件测试与验证平台.

无线传感器网络的测试研究,近年来国内外一些著名大学、商业研究机构纷纷建立了相应的辅助测试平台软硬件开发,其中比较有代表性的是哈佛大学的MoteLab^[10]平台和俄亥俄州立大学开发的Kansei^[11]平台. MoteLab平台是哈佛大学开发的无线传感器网络辅助测试平台,节点在测试时通过以太网接口的编程板连接服务器,然后服务器通过以太网对节点进行重编程以及收集实验数据,并通过Web的方式提供了试验任务管理、日程调度和用户

访问控制等功能. Kansei 平台是俄亥俄州立大学开发的面向多种应用的针对无线传感器网络的测试平台. 从结构上划分, Kansei 平台由静止网络、便携网络和移动网络 3 部分组成, 利用部署、回收便利的便携网络可以在实际的环境条件下进行数据采集, 通过实际节点与理论模拟相结合的混合模拟方法, 有效地解决了测试平台网络节点规模不够大的问题, 移动网络的设计使得 Kansei 平台可以对移动无线传感器网络应用进行测试评估, 网络结构更加丰富灵活. 虽然, 传感网中间件的测试和评估也需要和上述那些传感网测试平台一样, 需要考虑传感器节点资源受限、网络拓扑动态变化等特性, 但本文所提出的传感网中间件测试平台侧重于评价和测试一个传感网中间件的设计方法是否可行, 验证传感网中间件所提供的服务是否高效可靠.

本文通过 ISO/IEC 9126 标准到传感网中间件评估的映射, 得到传感网中间件的测试标准, 并结合中国移动对中间件系统测试^[7], 提出了传感网中间件的测试内容. 在此基础上, 提出了一个无线传感网中间件测试平台, 描述了测试平台的架构和各个模块的实现细节以及测试平台的工作流程.

2 传感网中间件的测试和评估

ISO/IEC 9126^[6] 是一个衡量软件质量的标准, 它把软件质量的衡量划分为一系列的属性和子属性. ISO/IEC 9126 标准可以评价软件产品是否为高质量软件产品, 传感网中间件是介于无线传感器网络和上层应用之间的系统软件, 也可以使用 ISO/IEC 9126 标准作为评估和测试的标准. 如图 1 所示, ISO/IEC 9126 标准一共包括 6 个属性和 26 个子属性. 其中功能属性, 软件在使用的过程中满足应用性功能; 可靠性属性, 软件产品在平时和特定环境下均能维持稳定表现; 可用性属性, 软件产品可以理解、使用、学习、吸引用户; 效率属性, 软件产品在特定条件下对资源利用率等性能表现; 可维护性属性, 软件产品在运行环境改变或应用需求改变的情况下, 可以通过修改或提高的特质; 可移植性属性, 软件支持从一个环境移植到另一个环境的能力. 每个属性的子属性可以参见图 1 所示:



图 1 ISO/IEC 9126 属性

由于无线传感器网络的特性, 诸如传感器节点有限的计算能力、资源受限、网络动态拓扑变化、多跳、自组织的影响, 传感网中间件的测试标准不能直接运用 ISO/IEC 9126 标准. 因此, 需要结合传感网中间件的特性和 ISO/IEC 9126 的软件评估标准, 实现符合传感网中间件的测试标准的 ISO/IEC 9126 标准的映射, 如图 2 所示. 传感器节点资源受限, 效率属性是传感网中间件测试评估的首要原则, 其子属性分别包括响应时间、资源利用率和能量消耗. 无线传感器网络具有动态拓扑变化、多跳自组织等特点, 因此, 可靠性是传感网中间件测试评估重要方面, 其子属性分别为稳定性、容错性和简单性. 作为介于无线传感器网络和上层应用之间的系统软件, 传感网中间件是为上层应用提供服务, 功能性和可

用性是必不可少的部分, 其子属性可以包括适用性、有效性和简洁性、可操作性. 传感网中间件是为了屏蔽底层的网络硬件差异性和分布式环境的复杂性, 可移植性是传感网中间件重要的部分, 其子属性可以包括可扩展性和异构支持性. 可维护性对于开发和研究传感网中间件来说, 可以作为可选的属性, 本文不将其作为传感网中间件评估标准.

根据上文所提出的传感网中间件的评估标准, 本文结合中国移动对中间件系统测试^[7], 提出的无线传感网中间件测试内容大致包括: 功能性测试, 主要验证中间件系统的 API 函数是否能够互相配合完成中间件系统的设计目标; 性能测试, 包括测试中间件系统处理单个函数调用需要的时间 (即响应时间)、吞吐量、在一定软硬件环境下中间件系统对内

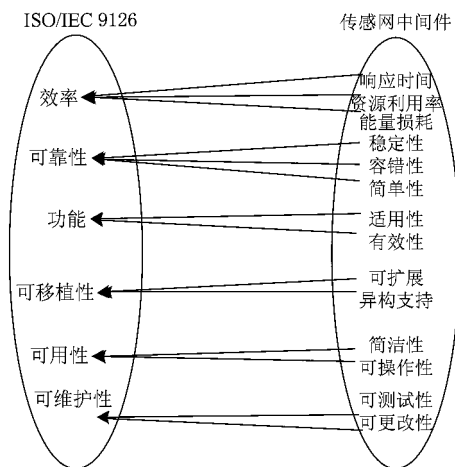


图2 ISO/IEC 9126 和传感网中间件之间的映射

存资源、CPU 资源等的占用情况;安全性测试,包括测试中间件自身对权限管理、日志管理、安全身份等安全管理功能的支持;压力测试,指的是需要模拟环境中的很多设备,或者大量数据量访问时,传感网中间件软件是否仍然能够正确处理这些请求,同时需要测试出在压力情况下中间件的性能数据;兼容性测试,是指是否支持各种硬件配置;否支持系统兼容性、数据库兼容性、Web 服务器兼容性、研发工具兼容性、和其他中间件产品的兼容性等多个方面。

3 传感网中间件测试平台

根据第3节的传感网中间件的评价标准和测试内容,本文提出一个传感网中间件测试平台。传感网中间件测试平台主要包括通信代理模块、测试任务模块、数据收集模块、数据的分析与统计模块、测试模式设置和用户界面。其中通信代理模块负责传感网中间件测试平台与传感网中间件的通信,获取传感网中间件内部信息并提供内部程序调用接口;测试任务模块负责将测试用户自定义测试方案分解成若干个测试子任务,为每个测试任务调用相应的测试用例,并通过通信代理模块对中间件进行测试;数据收集模块负责测试结果数据的实时地收集;数据的分析和统计模块负责将分析测试结果数据;测试模式设置负责选择传感网中间件测试参数的设置;用户界面负责展示传感网中间件测试结果和支持测试用户对测试方案的自定义。传感网中间件测试平台的总体架构如图3所示:

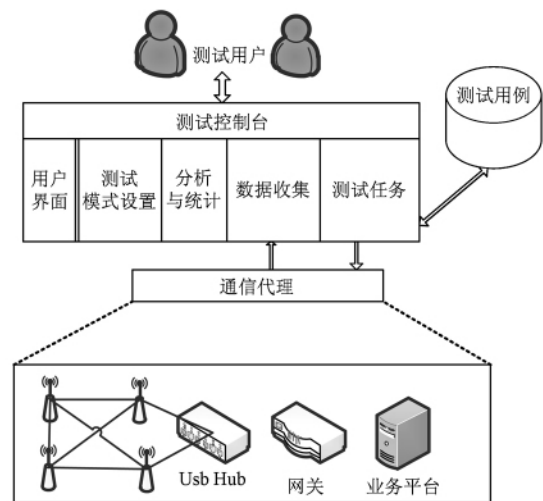


图3 传感网中间件测试平台的架构

3.1 通信代理模块

通信代理模块用于实现传感网中间件与传感网中间件测试平台之间的通信,获取中间件内部的数据和调用内部程序接口。根据现有的国内科研机构和院校(相关工作)对传感网中间件系统的分类,传感网中间件包括位于传感器节点上提供局域服务的中间件,位于承载网侧(移动蜂窝网、互联网等)提供全局服务的业务中间件,以及位于网关侧的提供上层业务网络与底层传感器网络整合服务的网关中间件。通信代理模块需要分别部署在这些中间件之中,为之提供相应的通信机制和调用中间件内部程序接口。

位于传感器节点侧的通信代理模块,命名为 Agency_Sensor 模块,包括数据接口和命令接口,通过数据接口发送 Zigbee 数据到传感网中间件测试平台的数据收集模块,同时侦听传感网中间件测试平台的测试任务模块所下发的测试指令,通过命令接口调用中间件内部接口命令,获取传感网中间件的数据。由于传感器节点本身的计算能力和资源受限,我们的通信代理模块只占用较少的内存和 CPU,并不影响传感网中间件的运行。位于承载网侧(移动蜂窝网、互联网等)的业务中间件的通信代理模块,我们开发命名为 Agency_Network 模块,基本功能和 Agency_Sensor 模块相似,采取 TCP/IP 方式和传感网中间件测试平台进行通信,位于网关侧的中间件的通信代理模块,我们开发命名为 Agency_Gateway 模块,基本功能类似,采取串口 RS 232 和 TCP/IP 2 种方式和传感网中间件测试平

台进行通信. 测试人员在使用传感网中间件测试平台时,只需要和通信代理模块进行交互,不需要关注传感网中间件所处的网络环境和硬件平台,方便了传感网中间件的测试与验证. 通信代理模块的工作流程如图 4 所示:

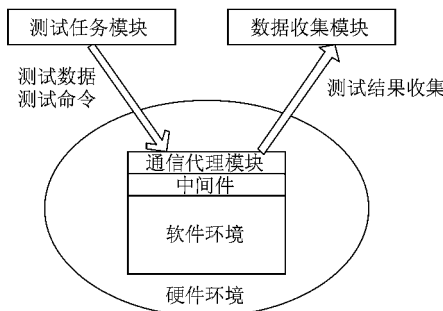


图 4 通信代理模块工作流程

3.2 测试控制台

平台控制模块具有信息处理和与测试人员交互功能,可以在逻辑上分为服务层和展示层. 服务层负责数据的收集、分析与统计,分解测试方案和测试任务的执行;展示层负责设置传感网中间件测试参数,显示测试结果和支持用户的测试方案的自定义.

服务层,通过数据收集模块和通信代理之间的通信,实现测试结果数据的实时收集;通过分析和统计模块,分析和比较测试结果数据和测试期望,从而得到测试任务的测试结果,并将结果返回到展示层;通过任务执行模块,将用户自定义的测试方案分解成子任务,并从数据库中得到相应的测试用例,将测试命令和测试数据通过通信代理模块下发到传感网中间件.

展示层负责显示数据分析的结果,将测试结果以图形方式进行绘制,支持测试用户对测试方案的自定义. 无线传感器网络中间件测试平台系统的展示界面是基于 .NET Frameworks 所开发的前端控制软件,提供了有的人及交互界面,方便测试人员进行测试. 展示界面主要分为:对无线传感器网络中间件测试平台系统的控制,用户自定义测试方案,和测试结果的展示. 测试用户既可以通过预定义文件自动生成测试方案,也可以手动输入测试方案;测试平台使用 MySQL 存储历史数据,方便以后的使用者进行查看分析,同时支持通过导入数据库文件,实现对历史测试数据的展示,支持实时状态和历史状态的切换. 无线传感器网络中间件测试平台系统的展示界面如图 5 所示:



图 5 测试平台的展示界面

3.3 测试流程

使用无线传感器网络中间件测试平台系统对某一种传感网中间件进行测试与验证的流程大致可以分为 4 个层次,如图 6 所示:

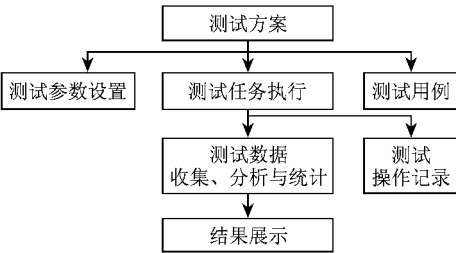


图 6 测试流程

测试方案,在测试工作开始前用户在测试控制台上输入测试方案或者使用默认的测试方案,测试方案涵盖了传感网中间件的测试内容(第 3 节所描述),同时载入测试传感网中间件的相关信息(类型,端口,服务类型)作为传感网中间件的配置参数. 测试任务执行,在配置完测试参数后,分解传感网中间件测试方案到相应的子任务,调用相应的测试用例,运行传感网中间件的测试任务. 测试数据收集、分析与统计,在测试任务运行时,记录完每一个测试操作,并实时地对传感网中间件进行地数据收集,例如收集传感网中间件的 CPU 占用率、内存使用率、响应时间、服务有效性,发送数据频率等等. 统计和分析这些测试数据进行,并将测试结果传递到结果展示. 结果展示,以图形化的方式展示测试结果,并生成相应的测试报告.

4 结论和展望

传统的中间件的测试方法没有考虑到传感器节点有限的计算能力、资源受限、网络动态拓扑变化、多跳、自组织等特性,并不适合传感网中间件的测试

方法. 本文通过 ISO/IEC 9126 标准到传感网中间件评估的映射, 得到传感网中间件的测试标准, 并结合中国移动对中间件系统测试, 提出了传感网中间件的测试内容. 在此基础上, 提出了一个无线传感网中间件测试平台, 描述了测试平台的架构和各个模块的实现细节以及测试平台的工作流程. 目前传感网中间件测试技术的研究仍然处于起步阶段, 还有许多问题需要进一步探讨.

无线传感器网络中间件测试平台系统目前仍然处于开发阶段, 要做到功能完备, 我们还有许多路要走, 为了进一步完善测试平台, 我们将会在几个方面做一些改进: 1) 无线传感器网络中间件测试平台的扩展性和通用性. 目前我们的测试平台必须通过通信代理和传感网中间件进行交换. 若增加一个新型的传感网中间件, 就必须改进相应的通信代理, 这不利于测试平台的扩展性和通用性原则, 我们会在今后的工作中, 针对传感网中间件的应用需求, 提取共性要点, 拓展平台的通用性. 2) 测试用例. 目前平台通过预先固定的测试数据和测试结果期望来得到测试用例, 考虑到测试用例对传感网中间件测试的重要性, 将来需要针对传感网中间件可复用和通用的测试用例.

参 考 文 献

- [1] Kormentzas G, Magedanz T. Middleware challenges for next generation networks and services. *Computer Network*, 2007, 51(16): 4596-4598
 - [2] Masri W, Mammeri Z. Middleware for Wireless Sensor Networks: Approaches, Challenges, and Projects // *Proc of IEEE Signal Processing and Communications*. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 1399-1402
 - [3] Molla M, Ahamed S. A survey of middleware for sensor network and challenges // *Proc of Parallel Processing Workshops*. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 223-228
 - [4] Wallace D, Fujii R. Software for effective validation of analytical methods. *Software*, IEEE, 1999, 6(3): 10-17
 - [5] Jones J. Software testing methods and techniques. *Communications of the ACM*, 1993, 38(10): 495-500
 - [6] Correia J, Kanellopoulos Y, Visser J. A survey-based study of the mapping of system properties to ISO/IEC 9126 maintainability characteristics // *Proc of IEEE Int Conf on Software Maintenance*. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 61-70
 - [7] 中国移动通信研究院. 中国移动中间件系统测试规范. 北京: 中国标准出版社, 2006
 - [8] ISO/IEC. Technical Document of ISO/IEC JTC 1 Study Group on Sensor Networks (SGSN), Study on Sensor Networks, Version 3. London: Organization for Sensor Network Standards, 2009
 - [9] Dongarra J. Performance of various computers using standard linear equations software. *ACM SIGARCH Computer Architecture News*, 1988, 16(1): 47-69
 - [10] Werner-Allen G, Swieskowski P, Welsh M. MoteLab: A wireless sensor network testbed // *Proc of IEEE Int Symp on Information Processing in Sensor Networks*. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 483-488
 - [11] Ertin E, Arora A, Ramnath R, et al. Kansei: A testbed for sensing at scale // *Proc of IEEE the 5th Int Conf on Information Processing in Sensor Networks*. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 399-406
- 李 强 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络测试研究.
- 秦伟俊 男, 1981 年生, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为无线传感器网络中间件研究.
- 刘 燕 女, 1971 年生, 副教授, 主要研究方向为计算机网络、软件工程.
- 王瑞聪 女, 1987 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络测试研究.
- 韩 冰 男, 1988 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络测试研究.