

# 普适计算中间件技术的研究与进展<sup>\*</sup>)

徐文拴 辛运帏 卢桂章

(南开大学信息技术科学学院 天津 300071)

**摘要** 当前,普适计算已经成为计算机科学中一个极具活力和影响力的研究领域。普适计算环境规模很大并且具有高度异构性,如网络架构的异构性、硬件平台的异构性、操作系统的异构性、应用服务的异构性等,而普适计算中间件技术可以解决异构性和跨平台特征,提供不同服务的集成应用,因此成为普适计算中的一个研究热点。基于此,本文对于目前国外关于普适计算中间件技术的研究现状做了一个总结;通过分析和比较,给出了普适计算中间件的设计原则;探讨了普适计算中间件技术的未来发展方向。

**关键词** 普适计算,中间件,普适计算中间件,上下文感知中间件,服务发现中间件

## Research and Development of Pervasive Computing Middleware Technology

XU Wen-Shuan XIN Yun-Wei LU Gui-Zhang

(College of Information Technical Science, Nankai University, Tianjin 300071)

**Abstract** Pervasive computing has become one of the most effective fields in computer science. In pervasive computing environments, it has very large scale and high heterogeneity, which exists between network infrastructures, hardware platforms, operating systems and application services. Since pervasive computing middleware technology is capable of solving the problem of heterogeneity very well, it has become a hot spot in pervasive computing. The existing related researches on pervasive computing middleware are analyzed and compared in the paper, and the design guidelines for pervasive computing middleware are presented, too. At last, a summary and a prospect are proposed.

**Keywords** Pervasive computing, Middleware, Pervasive computing middleware, Context-aware middleware, Service discovery middleware

以1999年 Ubiquitous Computing 国际会议、2000年 Pervasive Computing 国际会议的分别召开和2002年 IEEE Pervasive Computing 期刊的创立为标志,普适计算<sup>[1~4]</sup>已经成为计算机科学中一个极具活力和影响力的研究领域。普适计算的目标就是要实现一个“无时不在、无处不在而又不可见”(Anytime, Anywhere, Invisible)的计算环境。普适计算环境的多样性、异构性,决定了必然有多种平台、多种操作系统、多种形式的资源和服务集成在这个计算环境中。中间件技术可以起到屏蔽不同的普适计算设备的作用,可以为不同普适计算设备应用程序提供统一的接口和规范,减少普适计算软件的开发难度和时间,增加系统的兼容性和重用性。因此,中间件是普适计算环境中的服务无缝集成应用涉及的非常关键的技术。

### 1 普适计算中间件的相关问题

在普适计算环境下,普适计算中间件相对于传统计算环境中的中间件应用具有其独特性,归纳这些特性,主要包括:

#### • 高度异构性

在普适计算环境中,由于环境的异构性、多样性、复杂性以及没有统一的业界标准,因而有多种硬件设备、操作系统和网络协议或标准存在,而这些不同的协议或标准的应用又增加了普适计算环境的异构性、多样性、复杂性。

#### • 上下文感知

环境智能是普适计算的先决条件,上下文感知技术集中体现了普适计算以人为服务中心的思想。所谓上下文感知是指具备收集、解释、分析并利用来自各种资源的数据(如设备上下文、用户上下文和环境信息等)并提供适合当前情景(包括计算任务、用户位置、时间、用户身份等)的服务的能力,从而实现服务的人性化、个性化、智能化。因此,普适计算中间件系统应该提供一种有效的上下文感知方法。

#### • 安全性

安全问题不是普适计算环境特有的要求,在普适计算设备无处不在时如何保证通信过程的安全、用户的隐私以及在资源受限设备上如何控制过重的安全计算任务消耗也是普适计算中间件需要考虑的一个重要问题。

#### • 资源受限

普适计算环境中的设备是多种多样的,包含各种资源受限的设备,如移动设备、手持设备和其它各种小型嵌入式计算设备。

#### • 动态性

普适计算环境的高度动态性主要表现在环境网络拓扑结构的不断变化,用户的不断移动和变化,计算设备的地理位置分布不断变化等方面,而这些变化又是不可预期的,这就要求普适计算中间件具有环境自组织、自适应处理能力。

<sup>\*</sup>)天津市应用基础研究计划(自然科学基金)项目(06YFJMJC00200);南开大学创新基金项目。徐文拴 博士研究生,主要研究方向:普适计算、信息自动化;辛运帏 博士、教授,主要研究方向:普适计算、信息加密技术;卢桂章 教授、博士生导师,主要研究方向:信息自动化,智能机器人系统。

### · 扩展性

普适计算的目标就是要使得环境中的计算能力无处不在,因此大量的嵌入式设备加入网络,而如何保证这些异构设备的无缝集成、相互协作是普适计算中间件需要考虑的又一个重要问题。

已有的一些研究主要是围绕以上普适计算中间件的特点来解决相关问题。本文第2节对当前国外的一些研究工作分类进行对比和介绍,并讨论未来各种技术的发展趋势;在此基础上,第3节归纳提出普适计算中间件的设计原则;最后总结全文并探讨了未来的研究方向。

## 2 相关研究分析总结

目前国外对于普适计算的研究开展得非常广泛,而普适计算中间件技术的研究又是其中的研究重点,普适计算中间件的研究更多地关注于上下文感知、服务发现、安全控制、解决环境异构性和适用于嵌入式资源受限设备的处理等方面。按照普适计算中间件的开发目的,可以把普适计算中间件分为以下几类:数据处理中间件、上下文感知中间件、服务发现中间件、安全中间件、综合应用中间件和其它类型的中间件。

### 2.1 数据处理中间件

在普适计算环境中,分布式数据管理是一个重要的方面。数据处理中间件可以提供完整的数据库管理系统(DBMS)的功能,比如 AmbientDB<sup>[51]</sup> 是一个用于普适计算智能环境的 P2P(Peer-to-Peer) 数据管理中间件,采用了 P2P 的设计思想,解决了传统数据库中的查询处理问题、同步问题和模式集成问题。AmbientDB 执行一个三级查询转换:抽象代数、具体代数、数据流代数,进行查询处理过程;使用基于规则的同步方法(以数据库更新查询的优先级表示)解决数据一致性问题;使用基于表-视图的模式集成技术将局部模式映射到全局模式。论文还指出,下一步的工作在于开发集成数据库管理系统中的触发功能,以更好地提供服务。

目前关于普适计算数据管理中间件的研究还不多见,但随着普适计算研究的深入和相关应用的进一步发展,关于普适计算数据处理和知识应用中间件的研究会越来越广泛。

### 2.2 上下文感知中间件

上下文感知是普适计算中的一个重要研究领域,用于完成普适计算环境中的上下文数据感知、处理等功能,进而进行学习、推理和辅助决策,从而可以最大程度地减少人工干预<sup>[6]</sup>,提高普适计算环境智能性。关于普适计算环境中的上下文感知中间件的研究有很多<sup>[7-9,32-35,40,42,43]</sup>,大部分的研究集中在以下几个方面:

基于位置信息感知、环境信息感知等方面的研究:如在 SAFE-RD<sup>[20]</sup> 中可以提供一定程度上的范围感知; MiddleWhere 中间件<sup>[33]</sup> 等可以支持位置感知。

上下文感知机制自动配置方面的研究:典型的有, Draco 中间件<sup>[40]</sup> 使用上下文信息进行服务的自动重新配置; RC-SM<sup>[7]</sup> 采用上下文触发的通信模型,可以自由配置上下文处理组件; UbiCOSM<sup>[42]</sup> 中的中间件组件主动提供上下文信息; UBIDEV<sup>[43]</sup> 本身就是以上下文为中心的模型。

基于本体技术的研究:比如 SOCAM<sup>[8,34]</sup> 基于本体的方法(使用 OWL: Web Ontology Language)为各种上下文建模,这种上下文建模支持语义表示、上下文推理及上下文知识共享,本体用 OWL 语言书写成 RDF 元组集合的形式,在文<sup>[34]</sup>中,作者又引入了基于规则的推理(RDFS 推理和

OWL 推理)技术。

值得强调的是,还有一些研究开始关注于环境中用户的偏好行为学习和一些推理机制等,典型的有: InterPlay 中间件<sup>[9]</sup> 基于简单的上下文可以推断用户的意图并给出建议,使用 OWL 和 RDF 来定义设备和任务描述模式,并使用 Java 专家脚本 JESS 来处理这些描述; MiddleWhere 中间件<sup>[33]</sup> 引入概率推理(probabilistic reasoning)技术,支持位置感知; A. Ranganathan 等在文<sup>[35]</sup>中引入了一阶谓词逻辑(first order logic)、线性时序逻辑(temporal logic)推理机制; MICA<sup>[32]</sup> 则可以根据用户的行为学习用户的偏好。

上下文感知中间件总结如下表 1 所示。可以看到,结合本体技术和推理机制的上下文感知中间件的开发研究是目前的一个主要发展方向,也就是:应用本体技术进行上下文数据和知识的表达,然后引入相应的推理机制,如一阶谓词逻辑、线性时序逻辑推理等,再利用一些成熟的学习算法推断用户的意图,从而提高普适计算中间件系统的智能性。

表 1 上下文感知中间件总结与比较

上下文感知机制	典型中间件
提供有限的上下文信息支持	O. A. Dragoi 等 <sup>[12]</sup>
提供范围感知	SAFE-RD <sup>[20]</sup>
基于本体的上下文建模	SOCAM <sup>[8,34]</sup>
使用上下文信息进行服务的自动重新配置	Draco <sup>[40]</sup>
引入概率推理(probabilistic reasoning)技术,支持位置感知	MiddleWhere <sup>[33]</sup>
引入基于规则的本体推理(RDFS 推理和 OWL 推理)	T. Gu 等 <sup>[34]</sup>
中间件组件主动提供上下文	UbiCOSM <sup>[42]</sup>
上下文独立,可以自由增加或删除 ADCs	RCSM <sup>[7]</sup>
以上下文为中心	UBIDEV <sup>[43]</sup>
引入一阶谓词逻辑(first order logic)、线性时序逻辑(temporal logic)推理	A. Ranganathan 等 <sup>[35]</sup>
可以学习用户的偏好	MICA <sup>[32]</sup>
基于简单的上下文可以推断用户意图	InterPlay <sup>[9]</sup>

### 2.3 服务发现中间件

可用于完成普适计算环境中的资源或服务发现任务,体现环境的普适化特征。服务发现问题是提供普适计算应用的前提,因此,关于这方面的研究工作有很多。

目前绝大部分中间件为上层应用提供标准的 API(Application Programming Interface)接口调用,还有一部分研究关注于利用其它机制进行服务的描述,如本体、簇结构等。一些多样化的服务描述机制的研究集中在以下几个方面:文<sup>[10]</sup>提出一种由服务发现协议 PDP 和服务描述语言 GSDL 组成的服务发现中间件,PDP 是一个安全分布式协议,综合了拉和推的特征,GSDL 是一个基于 XML 的语言(用 XML Schema 来描述),使用层次服务描述并使用 WSDL(Web Service Description Language)描述接口;文<sup>[29]</sup>、UBIDEV<sup>[43]</sup> 等采用了基于本体论(ontology)的概念抽象描述; SAFE-RD<sup>[20]</sup> 基于簇树结构(tree structure of the cluster)对服务进行描述; UbiCOSM<sup>[42]</sup> 则采用了抽象的元数据(metadata)描述机制。

值得注意的是,目前还有一部分研究开始关注于引入其它学科中的概念来解决服务发现问题,典型的有: Bionet 中间件平台<sup>[11]</sup> 将普适计算网络应用建模为自动代理的一个集合,网络应用架构中的代理依据一些生物学概念和机制而设计;

R. Robinson 等人提出利用蚂蚁或其它昆虫之间间接通信方法的思想来优化服务的查询性能<sup>[44]</sup>。服务发现中间件总结如表 2 所示。

表 2 服务发现中间件总结与比较

服务接口描述机制	典型中间件
抽象的元数据(metadata)描述	UbiCOSM <sup>[42]</sup>
基于本体论(ontology)的概念抽象描述	E. Niemela 等 <sup>[29]</sup> 、UBIDEV <sup>[43]</sup>
簇树结构(tree structure of the cluster)描述	SAFE-RD <sup>[20]</sup>
基于生物学概念和机制	Bionet <sup>[11]</sup>
使用 WSDL 描述接口	PDP 与 GSDL <sup>[10]</sup>

综上所述,服务描述机制多样化(如本体描述、簇结构等)的服务发现中间件的开发可能是未来的发展方向;服务发现中间件的另外一个发展趋势是同其它学科相结合,利用其它学科中的一些概念来更好地解决普适计算环境中的服务发现问题。

### 2.4 安全中间件

用于解决普适计算环境下的安全控制问题,包括认证、访问和使用控制、隐私、分发控制等问题<sup>[13]</sup>,为环境中的应用服务提供安全保证。

关于这方面的研究有很多,但大部分是对已有加密或认证算法的改进应用,如:文<sup>[15]</sup>提出了一种安全组通信服务,使用了对称加密算法,组成员间共享同一个秘密密钥用于加密/解密,组中的成员需要进行身份的合法性认证;Mobile Gaia<sup>[38,39]</sup>基于公钥系统完成认证功能;文<sup>[12]</sup>将服务发现问题同基于角色的认证相结合,可以对用户进行身份认证;MARKS<sup>[19~21,23]</sup>中间件改进了秘密共享算法和 PGP(Pretty Good Privacy)信任模型,进行安全控制;MICA 中间件<sup>[32]</sup>基于黑板的设计思想,使用了一个全局共享内存进行信息的通信和存储,安全控制包括认证、安全和隐私三个方面:认证机制的实现采用了标准化公钥加密系统,安全措施由一系列规则组成,如哪些类型的 MICA 对象可以对哪些 nym 可见等,隐私的实现通过使用 nym 来控制黑板上信息的可见性,其中 nym 代表用户身份,也就是用户的访问权限;UbiCOSM<sup>[42]</sup>解决了动态环境的安全问题,提出并实现了一个新的以上下文为中心的访问控制模型,相关安全策略同应用逻辑分离;HESTIA<sup>[14]</sup>将安全、隐私、容错等作为关键问题来考虑,可以提供分布式配置机制,如访问控制、匿名、重用、负载均衡、认证及入侵检测等。

表 3 安全中间件总结与比较

安全机制	典型中间件
基于安全规则	MICA <sup>[32]</sup>
访问控制、认证及入侵检测	HESTIA <sup>[14]</sup>
改进的秘密共享算法,改进的 PGP 信任模型	MARKS <sup>[19~21,23]</sup>
对称加密算法、安全组通信	S. S. Yau 等 <sup>[15]</sup>
基于公钥的认证	Mobile Gaia <sup>[38,39]</sup> 、MICA
以上下文为中心的访问控制	UbiCOSM <sup>[42]</sup>
基于角色的认证	O. A. Dragoi 等 <sup>[12]</sup>

安全中间件的总结如表 3 所示。可以看出,大部分的安全中间件采用的还是传统的安全控制算法,如对称加密算法、安全组通信、标准的公钥加密算法等。由于现有的方法和策略对于计算能力、存储能力的过高要求,使其不适用于普适计

算环境中的资源受限设备,因此,未来针对普适计算环境自身特点开展相关的安全控制机制的研究可能是一个发展趋势。

### 2.5 综合应用中间件

这类普适计算中间件的功能并不是单一的,如不仅可以完成上下文感知、服务发现等功能,还可以提供安全保障,是综合应用类的普适计算中间件,典型的有 Gaia 中间件和 Marks 中间件。

Gaia 中间件系统<sup>[16~18]</sup>的工作包括:组件管理核心、上下文文件系统、事件管理器、空间知识库、组件知识库、设备框架、数据描述等方面。Gaia 组件需要通信中间件支持远程交互,目前 Gaia 使用 CORBA 实现通信,一些服务在现有中间件服务基础上构建,其它则是对通信中间件的扩展。

MARKS 中间件<sup>[19~24]</sup>由一系列核心组件和服务组成,核心组件包括:对象请求代理(ORB)、资源发现<sup>[20,22]</sup>、信任管理<sup>[21]</sup>和统一服务访问单元,核心组件之上是 MARKS 中间件提供的服务,包括上下文服务、知识使用服务(Knowledge Usability service)<sup>[24]</sup>和自恢复服务(Self-healing service)<sup>[23]</sup>。中间件应用基于簇(cluster)的动态哈希算法解决资源发现问题,通过实现改进的秘密共享和 PGP 信任模型来维护隐私及安全特征。对 Gaia 和 Marks 中间件功能总结如表 4 所示。

表 4 Gaia 中间件和 Marks 中间件功能总结与比较

提供功能	典型中间件
上下文处理、安全控制、支持手持应用等	Gaia <sup>[16~18]</sup>
上下文服务、知识使用服务、自恢复服务、服务发现服务、安全控制等	MARKS <sup>[19~24]</sup>

普适计算中间件综合系统的开发是未来的一个极具潜力的发展方向,也就是在中间件系统中集成若干中间件,将各种功能集成在一起为用户提供综合性应用服务,从而提高系统的集成性和可用性。

### 2.6 普适计算中间件的实现机制

综合以上介绍,目前的中间件开发平台或工具如 CORBA、Java、C 等仍然是主流选择,如 HESTIA<sup>[14]</sup>、Gaia<sup>[16~18]</sup>、MiRAGE<sup>[30,41]</sup>等都是基于 CORBA 开发平台进行通信;Bionet<sup>[11]</sup>、PDP 与 GSDL<sup>[10]</sup>、Draco<sup>[40]</sup>、InterPlay<sup>[9]</sup>等采用 Java 技术实现。还应该注意,目前也已经有一些关于其它中间件实现方法的研究,如 UbiCOSM<sup>[42]</sup>、Bionet<sup>[11]</sup>等的实现采用了代理(Agent)技术。对于普适计算中间件的实现机制总结如表 5 所示。

表 5 中间件实现机制总结与比较

实现机制	典型中间件
利用 CORBA 进行通信	A. Ranganathan 等 <sup>[35]</sup> 、HESTIA <sup>[14]</sup> 、Gaia <sup>[16~18]</sup> 、MiRAGE <sup>[30,41]</sup> 、T. Nakajima <sup>[30]</sup>
Java/C 语言实现	MICA <sup>[32]</sup>
基于 Java 技术实现	Bionet <sup>[11]</sup> 、PDP 与 GSDL <sup>[10]</sup> 、T. Gu 等 <sup>[34]</sup> 、Draco <sup>[40]</sup> 、InterPlay <sup>[9]</sup> 、P. Bellavista 等 <sup>[31]</sup>
C# (.net 集成框架)	MARKS <sup>[19~21,23]</sup>
嵌入式 C++	RKF <sup>[27]</sup>
基于代理(Agent)技术实现	O. A. Dragoi 等 <sup>[9]</sup> 、UbiCOSM <sup>[42]</sup> 、Bionet <sup>[11]</sup> 、A. Ranganathan 等 <sup>[35]</sup> 、P. Bellavista 等 <sup>[31]</sup>
使用 DAML+OIL 实现本体	A. Ranganathan 等 <sup>[35]</sup>
OWL+RDF	SOCAM <sup>[8,34]</sup> 、InterPlay <sup>[9]</sup>
C++ 和 omniORB	MiRAGE <sup>[41]</sup>

从表5可以看出,既充分利用现有的技术和开发工具,又不断地研究其它新技术,引入新的技术更好地解决普适计算环境中的各种问题,是未来普适计算中间件实现机制的一个发展方向。

国外关于普适计算环境下的中间件研究工作还有很多<sup>[25-29,45,46]</sup>,限于篇幅,这里不再一一介绍。下面将从几个方面总结和探讨普适计算中间件的设计原则以及未来的发展方向。

### 3 普适计算中间件的设计原则分析与总结

基于以上对于国外已有的研究情况的分析和总结,再结合普适计算环境的主要特征,可以归纳普适计算中间件的设计原则如下:

(1)有明确的目的性。也就是中间件系统的功能一定要明确,不同的应用可以采取不同的中间件实现方案。

(2)简单高效。普适计算的目标就是要实现将计算设备潜入到人的工作和生活空间,使得计算和通信能力无处不在,这样环境中的资源受限设备会大量存在。因此,简单高效的轻量级中间件的开发对于普适计算环境中的资源受限设备是非常重要的。

(3)具有良好的交互接口。中间件最终是要交给用户使用的,因此必须保证友好的交互接口,接口规范必须统一化、标准化。

(4)易于实现。中间件的设计要考虑到最终的实现方案,如系统开发平台、应用对象等等,对于最后的实现要简单可行。

(5)可靠性和容错性。在普适计算环境中,由于环境的动态性,各模块之间的联系可能会不可预见地出现中断或者其它故障,从而导致整个系统的崩溃。因此,中间件系统的设计必须考虑到系统的可靠性和容错性。

(6)可扩展性。普适计算环境规模很大,环境、设备、用户都是动态变化的,因此,中间件系统必须是可扩展的。应该能够根据用户的多样化应用需求添加或更改不同的系统功能,而不会影响已有的系统组件的功能,这是在设计阶段需要考虑的又一个重要问题。

**结论** 普适计算中间件技术的研究是目前普适计算领域中的一个研究热点,本文分类总结了国外已有的相关工作并指出了未来各种技术的发展趋势,在此基础上归纳总结了普适计算中间件的设计原则。通过对于现有研究成果的分析和比较,结合国外的一些研究<sup>[6,36,37]</sup>,可以得出未来普适计算中间件研究的发展方向:

(1)针对不同的普适计算环境功能,具体的普适计算中间件设计粒度可能更细,从而使得其扩展性和重用性更强。未来的研究可能关注于其它一些更细粒度的功能类中间件的开发,如RFID(Radio Frequency Identification)中间件、通信中间件等。

(2)综合类应用中间件系统的研究可能会越来越多。在普适计算环境下单一孤立的应用是不现实的,必须开展各种应用的集成才能更好地为用户提供服务,体现环境的普适化特征。具体的实现可以通过一个中间件集成系统来解决,也就是将各种类型的具体普适计算中间件应用集成到一个中间件系统中,既有利于系统的扩展和中间件的重用,又可以为用户提供更好的综合性服务。

(3)同其它学科相结合,引入其它学科的一些思想开发完

成相关普适计算中间件功能,如引入生物学的一些思想来解决普适计算环境中的服务发现问题。

(4)轻量级普适计算中间件技术的研究。对于设备的计算能力、存储能力、电池能量等不做过高的要求,可以应用于普适计算环境中的大量嵌入式资源受限设备。

(5)普适计算中间件系统开发标准的研究。由第2节可以看到,目前关于普适计算中间件技术的研究开展地非常广泛,根据不同的应用目标,所采取的解决方案和开发标准也各不相同,因此,需要研究和制定统一的、规范的普适计算中间件开发标准,为将来不同的中间件系统的应用集成奠定良好的基础。随着普适计算应用的推广,普适计算中间件开发标准的研究和制定已经显得越来越有必要。

(6)普适计算中间件实现机制的研究。充分使用和借鉴成熟的技术,基于已有技术如Jini、CORBA等开发普适计算中间件,既可以增强系统的可实现性,又可以在一定程度上突破已有的技术,探索引入新的开发技术,如Agent技术等,有所创新和突破。

(7)普适计算中间件的具体应用研究,如医疗保健、智能家居、智能办公、智能教室等。应用服务类中间件的开发是目前研究的一个热点,随着普适计算应用的推广,普适计算应用类中间件的研究会越来越广泛。

**致谢** 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行,尤其是南开大学计算机科学技术系辛运伟教授领导的普适计算讨论班上的同学和老师表示感谢。同时,特别感谢美国Marquette University的Sheikh Iqbal Ahamed博士提供相关的参考文献。

### 参考文献

- Weiser M. The computer for the twenty-first century. *Scientific American*, 1991, 265(3): 94~104
- Weiser M. Hot topics; Ubiquitous computing. *IEEE Computer*, 1993, 26(10): 71~72
- Weiser M. Some computer science issues in ubiquitous computing. *Communications of the ACM*, 1993, 36(7): 75~84
- Weiser M. The world is not a desktop. *Interactions*, 1994, 1(1): 7~8
- Fontijn W, Boncz P. AmbientDB; P2P data management middleware for ambient intelligence. In: *Proceedings of the Second IEEE Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW 2004)*, IEEE Computer Society, Washington, DC, 2004. 203~207
- Satyanarayanan M. Pervasive computing; Vision and challenges. *IEEE Personal Communications*, 2001, 8(8): 10~17
- Yau S S, Karim F, Wang Y, et al. Reconfigurable context-sensitive middleware for pervasive computing. *IEEE Pervasive Computing*, 2002, 1(3): 33~40
- Gu T, Pung H K, Zhang D Q, et al. A middleware for building context-aware mobile services. In: *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2004)*, Milan, Italy, May 2004
- Messer A, Kunjithapatham A, Sheshagiri M, et al. InterPlay; A middleware for seamless device integration and task orchestration in a networked home. In: *Proceedings of the Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2006)*, IEEE Computer Society, Washington, DC, 2006. 296~307
- Campo C, Muñoz M, Perea J C, et al. PDP and GSDL; A new service discovery middleware to support spontaneous interactions in pervasive systems. In: *Proceedings of the 3rd IEEE Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW 2005)*, IEEE Computer Society, Washington, DC, 2005. 178~182
- Suzuki J, Suda T. Middleware Support for Super Distributed Autonomous Services in Pervasive Networks. In: *Proceedings of the 2004 International Symposium on Applications and the Internet Workshops (SAINTW'04)*, Tokyo, Japan, 2004. 375~381
- Dragoi O A, Black J P. Discovering services is not enough. *IEEE*

- Distributed Systems Online, August 2004, 5(8)
- 13 Thomas R K, Sandhu R. Models, protocols, and architectures for secure pervasive computing: Challenges and research directions. In: Proceedings of the Second IEEE Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW 2004), IEEE Computer Society, Washington, DC, 2004. 164~170
  - 14 Hill R, Al-Muhtadi J, Campbell R, et al. A middleware architecture for securing ubiquitous computing cyber infrastructures. IEEE Distributed Systems Online, 2004, 5(9): 1~14
  - 15 Yau S S, Zhang X. A middleware service for secure group communication in mobile ad-hoc networks. In: Proceedings of 27th Annual International Computer Software and Application Conference (COMPSAC 2003), IEEE Computer Society, Washington, DC, 2003. 10~15
  - 16 Romn M, Hess C, Cerqueira R, et al. Gaia: A middleware platform for active spaces. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2002, 6(4): 65~67
  - 17 Romfn M, Hess C, Cerqueira R, et al. A middleware infrastructure for active spaces. IEEE Pervasive Computing, 2002, 1(4): 74~83
  - 18 Al-Muhtadi J, Chetan S, Ranganathan A, et al. Super spaces: A middleware for large-scale pervasive computing environments. In: Proceedings of the 2nd IEEE Annual Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW 2004), IEEE Computer Society, Washington, DC, 2004. 198~202
  - 19 Sharmin M, Ahmed S, Ahamed S I. MARKS (Middleware Adaptability for Resource Discovery, Knowledge Usability and Self-healing) for mobile devices of pervasive computing environments. In: Proceedings of the Third International Conference on Information Technology: New Generations (ITNG 2006), 2006. 306~313
  - 20 Sharmin M, Ahmed S, Ahamed S I. SAFE-RD (Secure, Adaptive, Fault Tolerant, and Efficient Resource Discovery) in pervasive computing environments. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Information Technology (ITCC 2005), IEEE Computer Society, Washington, DC, 2005. 271~276
  - 21 Sharmin M, Ahmed S, Ahamed S I. An adaptive lightweight trust reliant secure resource discovery for pervasive computing environments. In: Proceedings of the Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computer and Communications (PerCom 2006), IEEE Computer Society, Washington, DC, 2006. 258~263
  - 22 Ahamed S I, Zulkernine M, Anamanamuri S. A dependable device discovery approach for pervasive computing middleware. In: Proceedings of the International Conference on Availability, Reliability and Security (AreS'06), IEEE CS Press, Vienna, Austria, 2006. 66~73
  - 23 Ahmed S, Sharmin M, Ahamed S I. ETS (Efficient, Transparent, and Secured) self-healing service for pervasive computing applications. International Journal of Network Security, 2007, 4(3): 271~281
  - 24 Ahmed S, Sharmin M, Ahamed S I. Knowledge usability and its characteristics for pervasive computing. In: Proceedings of the 2005 International Conference on Pervasive Systems and Computing (PSC-05) in Conjunction with The 2005 International Multi-conference in Computer Science and Engineering, CSREA Press, Las Vegas, NV, USA, 2005. 206~209
  - 25 Becker C, Schiele G, Gubbels H, et al. BASE-A micro-broker-based middleware for pervasive computing. In: Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom'03), IEEE Computer Society, Washington, DC, 2003. 443~451
  - 26 Becker C, Schiele G. Middleware and Application Adaptation Requirements and their Support in Pervasive Computing. In: Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW'03), IEEE Computer Society, Washington, DC, 2003. 98~103
  - 27 Yau S S, Karim F. A lightweight middleware protocol for ad hoc distributed object computing in ubiquitous computing environments. In: Proceedings of the Sixth IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (IS-ORC'03), IEEE Computer Society, Washington, DC, 2003. 172~179
  - 28 Shirazi B, Kumar M, Sung B Y. QoS middleware support for pervasive computing applications. In: Proceedings of the 37th Annual Hawaii international Conference on System Sciences (HICSS'04) - Track 9 - Volume 9 (January 2004), IEEE Computer Society, Washington, DC, 2004. 294~303
  - 29 Niemelä E, Vaskivuo T. Agile middleware of pervasive computing environments. In: Proceedings of the Second IEEE Annual Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW 2004), IEEE Computer Society, Washington, DC, 2004. 192~197
  - 30 Nakajima T. Middleware design and human factor. In: Proceedings of the Ninth IEEE International Workshop on Object-Oriented Real-Time Dependable Systems (WORDS'03), 2003. 195~197
  - 31 Bellavista P, Corradi A, Stefanelli C. The ubiquitous provisioning of Internet services to portable devices. IEEE Pervasive Computing, 2002, 1(3): 81~87
  - 32 Kadous M W, Sammut C. MICA: Pervasive middleware for learning, sharing and talking. In: Proceedings of the Second IEEE Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW 2004), IEEE Computer Society, Washington, DC, 2004. 176~180
  - 33 Ranganathan A, Al-Muhtadi J, Chetan S, et al. MiddleWhere: A middleware for location awareness in ubiquitous computing applications. In: Proceedings of the 5th ACM/IFIP/USENIX International Conference on Middleware (Middleware 2004), Springer-Verlag, New York, 2004. 397~416
  - 34 Gu T, Pung H K, Zhang D Q. A service-oriented middleware for building context-aware services. Elsevier Journal of Network and Computer Applications (JNCA), 2005, 28(1): 1~18
  - 35 Ranganathan A, Campbell R H. A middleware for context-aware agents in ubiquitous computing environments. In: Proceedings of the ACM/IFIP/USENIX International Middleware Conference (Middleware 2003), Springer-Verlag, Heidelberg, 2003. 143~161
  - 36 Raatikainen K, Christensen H B, Nakajima T. Application requirements for middleware for mobile and pervasive systems. Mobile Computing and Communications Review, 2002, 6(4): 16~24
  - 37 Nakajima T, Ishikawa H, Tokunaga E, et al. Technology challenges for building Internet-scale ubiquitous computing. In: Proceedings of the Seventh International Workshop on Object-Oriented Real-Time Dependable Systems (WORDS 2002), IEEE Computer Society, Washington, DC, 2002. 171~179
  - 38 Chetan S, Al-Muhtadi J, Campbell R, et al. Mobile Gaia: A middleware for ad-hoc pervasive computing. In: Proceedings of the IEEE Consumer Communications & Networking Conference (CCNC2005), 2005. 223~228
  - 39 Chetan S, Al-Muhtadi J, Campbell R, et al. A middleware for enabling personal ubiquitous spaces. In: UbiSys '04: System Support for Ubiquitous Computing Workshop at Sixth Annual Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2004), 2004
  - 40 Preuveneers D, Rigole P, Vandewoude Y, et al. Middleware support for component-based ubiquitous and mobile computing applications. In: Joolia A, Jean S, eds. Proceeding of ACM/IFIP/USENIX 6th International Middleware Conference Workshop (Middleware2005), Demonstrations Extended abstracts, 2005. 1~4
  - 41 Tokunaga E, van der Zee A, Kurahashi M, et al. A middleware infrastructure for building mixed reality applications in ubiquitous computing environments. In: Proceedings of the First Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems; Networking and Services (MobiQuitous'04), IEEE Computer Society, Los Alamitos, Calif., 2004. 382~391
  - 42 Corradi A, Montanari R, Tibaldi D, et al. A context-centric security middleware for service provisioning in pervasive computing. In: Proceedings of the Symposium on Applications and the Internet (SAINT-2005), IEEE Computer Society, Washington, DC, 2005. 421~429
  - 43 Maffioletti S, Mostefaoui S K, Hirsbrunner B. Automatic resource and service management for ubiquitous computing environments. In: Proceedings of the Second IEEE Annual Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW'04), IEEE Computer Society, Washington, DC, 2004. 219~226
  - 44 Robinson R, Indulska J. Superstring: a scalable service discovery protocol for the wide-area pervasive environment. In: Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Networks (ICON'03), Sydney, Australia, 2003. 699~704
  - 45 Yau S S, Wang Y, Huang D. Situation-aware contract specification language for middleware for ubiquitous computing. In: Proceedings of the Ninth IEEE Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems (FTDCS'03), IEEE Computer Society, Washington, DC, 2003. 93~99
  - 46 Kumar M, Shirazi B A, Das S K, et al. PICO: A middleware framework for pervasive computing. IEEE Pervasive Computing, 2003, 2(3): 72~79