

# 分布式情境感知分层模型设计与角色分析

叶 剑, 李锦涛, 朱珍民

(1. 中国科学院计算技术研究所, 北京 100190; 2. 移动计算与新型终端北京市重点实验室, 北京 100190)

**摘 要:** 情境感知是普适计算环境的本质特征之一. 本文提出了一种面向分布式情境感知的分层模型, 通过情境资源的空间划分, 刻画了传感器到情境知识的逐层抽象的特质. 同时, 分层模型对情境感知系统中的角色及角色间的关系进行了有效规约. 本文通过与经典的 Context Toolkit 模型比较, 证明了分层模型的运行时负载低的优点; 通过模型的主动性分析, 验证了情境感知主动性对系统数据收发负载的正反比影响. 分层模型将在分布式情境感知系统部署和配置中发挥重要作用.

**关键词:** 情境感知; 分层模型; 感知主动性

**中图分类号:** TP302.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2012) 08-1572-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.08.012

## Hierarchical Distributed Context Awareness Model and Analysis on Roles

YE Jian, LI Jin-tao, ZHU Zhen-min

(1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and New Devices, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Context aware is one of the essential characteristics of the ubiquitous computing environment. Through the division of context space, this paper proposes a hierarchical distributed context awareness model which describes the layered abstraction from sensor data to context information. On the basis of the hierarchical model, this paper gives the detailed specification of the diversified roles of a context awareness system and the relationship between those roles. At the end of this paper, the simulation experiment is built to compare the proposed model with typical Context Toolkit model. The experiment shows that the proposed model has an advantage of lower runtime payload over the Context Toolkit model. Through the analysis on the activeness of the model, it is proved that the aware activeness is proportional to receiving data payload and inversely proportional to sending data payload. The hierarchical model which will play an important role in the configuration of a distributed context awareness system.

**Key words:** context awareness; hierarchical model; aware activeness

## 1 引言

普适计算环境是一个高度动态的环境, 尽管技术的发展使得感知数据日趋精确, 但由传感数据向情境信息的映射无法与系统的动态变化匹配, 往往造成应用所需情境与传感数据之间的语义鸿沟<sup>[1]</sup>. 普适计算环境中的情境感知系统具有提供获取和利用不精确的情境的能力, 这依赖于适应环境特征和应用需求的情境组织架构和呈现接口的研究与设计<sup>[2]</sup>.

为此, 本文提出了一种分布式情境感知模型 DCAM (Distributed Context Awareness Model). 基于情境资源模型的形式化描述, DCAM 模型将情境资源空间划分为四层的子空间: 传感器空间、感知信息空间、对等情境空间和应

用空间. DCAM 模型支持分布式的情境共享和情境演化, 通过建立异构分布式情境共享平台, 支持分布式异构传感器的动态发现和组织. DCAM 在多服务角色划分基础上, 构建角色间的关系和操作定义, 建立了全局统一映像的情境感知空间.

## 2 相关工作

情境感知模型主要描述在感知网络环境中, 建立满足应用空间与异构的物理传感器之间交互需求的系统框架, 屏蔽物理空间的异构特性, 实现情境信息的管理和过滤, 构建情境感知的一般模式. 情境感知模型通常分为两种模式: 集中模式和 P2P 模式.

(1) 集中模式: 情境计算和管理集中在一台服务器

中进行, 察觉计算应用请求服务器获取相关的情境知识, 集中式架构的优点是可以支持设备能力较弱的用户设备. 代表性项目包括 Gaia<sup>[3,4]</sup>、PACE<sup>[5]</sup>、SOCAM<sup>[6]</sup> 以及 CoBrA<sup>[7]</sup>. 其中, Gaia 是集中模式的最为著名的项目, 其主要贡献在于提供了服务间的交互机制, 基于此开发人员将普适计算环境抽象为可编程的反馈实体, 便于在异构的设备物理环境中的部署和实现.

(2) P2P 模式: P2P 模式的资源框架体系和建模方法受到了越来越多的研究者的关注<sup>[8,9]</sup>. 情境计算和管理分布在用户的设备上, 察觉计算应用请求用户设备获取相关的情境知识. 代表性项目包括 ContextToolkit<sup>[10]</sup> 和 Confab<sup>[11]</sup>. 其中 Context Toolkit (以下简称 CTK) 由情境感知组件、支持该组件驻留的情境融合组件和情境意译组件组成, 是感知计算领域最有影响的框架之一. 相对于集中模式, P2P 模式的计算环境提供了更为灵活的情境资源的组织和融合机制, 是自组织网络终端情境管理的必然选择. 但现有 P2P 模式通常将每个传感器和察觉计算应用通过消息广播发现注册中心并注册, 这种全网注册 - 查询方式势必会随着终端数量的增加而大大增加终端间的通信开销<sup>[12]</sup>, 此外也会造成终端节点间传感器注册信息的过度冗余. 与现有的 P2P 模型不同, DCAM 模型将分布式情境感知资源空间进行层次划分, 描述了层内的信息特征和层间的逻辑关系, 明确了模型中的角色划分和功能定义, 可有效降低分布式情境感知系统的通信开销和存储冗余.

### 3 DCAM 模型的定义与规约

DCAM 模型定义为四元组  $DCAM = (SNS, AIS, VCS, AS)$ , 定义了情境资源的空间划分.

#### 3.1 传感器空间 SNS (Sensor Network Space)

传感器空间 SNS 代表了 DCAM 模型中的物理空间. 在 SNS 中, 情境资源以传感器 (包括物理传感器和逻辑传感器) 为载体, 部署在普适计算环境中.

**定义 1** 同类关系  $R_{SNS} \subseteq SNS \times SNS$ , 同类意味着可产生相同类型的信息.  $\forall s_1, s_2 \in SNS, s_1, s_2$  属于同一类型的传感器, 当且仅当  $\langle s_1, s_2 \rangle \in R_{SNS}$ . 显然,  $R_{SNS}$  为定义在 SNS 上的等价关系.

**定义 2** SNS 可定义为  $R_{SNS}$  所决定的划分的成员的并. 假设  $D = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$  为 SNS 关于  $R_{SNS}$  的商集  $SNS/R_{SNS}$ , 则  $SNS = \bigcup_{i=1}^n S_i$ , 即 SNS 是所有传感器资源的集合.

#### 3.2 感知信息空间 AIS (Awareness Information Space)

AIS 实现了面向情境感知总线绑定需求的物理空间向逻辑空间的信息映射, 进而完成感知信息的发布. 在此, 感知信息与情境的含义是等价的.

**定义 3** AIS 中的同类关系  $R_{AIS} \subseteq AIS \times AIS. \forall a_1, a_2 \in AIS, a_1, a_2$  属于同一类型的传感器产生的信息, 当且仅当  $\langle a_1, a_2 \rangle \in R_{AIS}$ . 同定义 1,  $R_{AIS}$  为定义在 AIS 上的等价关系.

**定义 4** 与定义 2 类似, AIS 可以定义为  $R_{AIS}$  所决定的划分成员的并, 即  $AIS = \bigcup_{i=1}^n A_i$ .

**定义 5** 被感知生成映射  $\bar{G}: AIS \rightarrow SNS, \forall a \in AIS, \exists s \in SNS$ , 并且  $s$  是唯一的, 使得  $s = \bar{G}(a)$ . 值得注意的是,  $\bar{G}$  不是双射.

划分定义了传感器的分类, 不同类的传感器可以感知获得不同的情境. 划分至关重要, 因为划分定义的分类可用作传感器空间或者感知信息空间的地址表示.

#### 3.3 对等情境空间 PCS (Peer-to-Peer Context Space)

PCS 实现对分布式情境信息的有效组织, 在 PCS 中, 情境通过与不同的总线注册中心的绑定, 实现对情境信息的分布式组织和管理.

**定义 6**  $PCS = \bigcup_{i=1}^n PC_i$ , 即对等情境空间由 DCAM 模型中的对等簇构成. 其中,  $PC_1, PC_2, \dots, PC_n$  为定义在 PCS 之上的一个划分, 即  $\forall i, j, 1 \leq i, j \leq n, PC_i \cap PC_j = \emptyset$ .

**定义 7** 隶属映射  $M: AIS \rightarrow PCS. M$  为满射而非入射, 即  $\forall a \in AIS, \exists PC_i \in PCS$ , 并且  $PC_i$  是唯一的, 使得  $PC_i = M(a)$ . 显然定义在 AIS 的幂集到 PCS 之间隶属映射  $M'$  是双射, 即  $M': 2^{AIS} \rightarrow PCS$ , 即  $\forall as \in 2^{AIS}, \exists PC_i \in PCS$ , 使得  $PC_i = M'(as)$ , 反之亦然.

#### 3.4 应用空间 AS (Application Space)

在 AS 中, 应用通过动态的加入对等情境空间的某个对等簇, 从而实现了对簇内、簇外情境信息的访问. 这一动态过程在应用空间形成动态变化的抽象映像, 形成以应用为中心的虚拟情境组织 VCO (Virtual Context Organization).

**定义 8** 应用空间定义为应用的集合  $AS = \{app_i \mid i = 1, 2, \dots, m\}$ .

**定义 9** 虚拟情境组织 VCO 定义为绑定映射  $A: AS \rightarrow PCS$ . 在任一特定时刻,  $A$  为双射, 即  $\forall app \in AS, \exists PC_i \in PCS$ , 使得  $PC_i = A(app)$ , 反之亦然.

根据定义 7,  $M'^{-1}: PCS \rightarrow 2^{AIS}$ , 即  $\forall PC_i \in PCS, \exists as \in 2^{AIS}$ , 使得  $as = M'^{-1}(PC_i)$ . 结合定义 7 和定义 9, 定义复合函数  $f = M'^{-1} \circ A$ , 即建立了 AS 到 AIS 的幂集  $2^{AIS}$  的映射  $f: AS \rightarrow 2^{AIS}$ , 即  $\forall app \in AS, \exists as \in 2^{AIS}$ , 使得  $as = f(app)$ . 基于此可引出定义 10 和定义 11.

**定义 10** 同群情境: 基于映射  $f$  的定义,  $\forall a \in as, a$  称为与  $app$  是同群的, 或者  $a$  称为  $app$  的同群情境.

**定义 11** 异群情境: 基于映射  $f$  的定义,  $\forall a \notin as, a$  称为与  $app$  是异群的, 或者  $a$  成为  $app$  的异群情境.

## 4 基于 DCAM 模型的角色划分

在普适计算环境中,情境组织和管理最终目标是为情境的有效获取建立统一框架和方法基础.基于 DCAM 模型的情境感知服务构成了一个自组织的情境资源框架,其中的角色包括服务角色和情境角色.服务角色划分如图 1 所示.

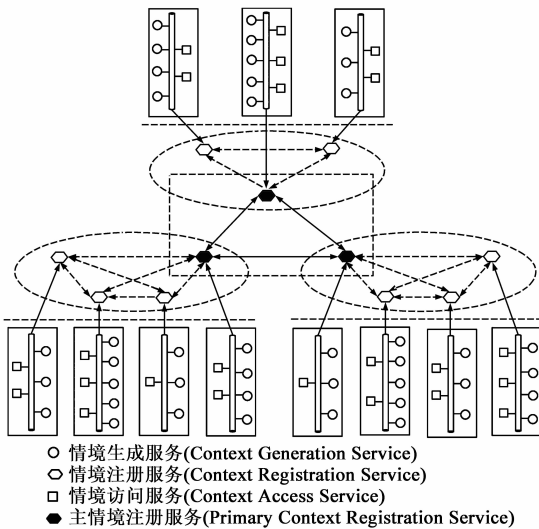


图1 DCAM模型的角色划分

情境生成服务 CGS (Context Generation Service): CGS 管理维护传感器.传感器作为情境生成器,可通过 CGS 封装,方便地注册到情境共享服务总线中,可以被需要情境信息的服务访问.

情境访问服务 CAS (Context Access Service): CAS 是情境信息的需求者,通过在情境共享服务总线中注册,并经过服务查询、请求发送、响应解析,完成对特定 CGS 的服务访问,实现对分布式情境信息的采集和建立情境信息库的功能.

情境注册服务 CRS (Context Registration Service): 作为情境共享服务总线的核心部件,CRS 主要完成 CGS 和 CAS 的注册,并负责与其他 CRS 的发现和互联互通. CRS 之间的局部互联互通构成了 DCAM 模型中对等情境空间的基础,如图 1 中椭圆形虚线框所示.随着系统规模扩展,CRS 服务间的组合可根据特定的策略确定主次关系,在更高的抽象层实现对情境服务的有效组织如图 1 中的矩形虚线框所示.基于 DCAM 模型的角色之间的关系与操作定义如下:

**定义 12** 情境感知容器 CAC (Context Awareness Container) 是 DCAM 模型中应用空间 AS 的服务角色定义,  $CAC = \langle rcenter\_set, cconsumer\_set, cprovider\_set \rangle$ . 其中,  $rcenter\_set$  为服务注册中心的集合,服务注册中心承担容器中的服务的注册和查询功能;  $cconsumer\_set$  为情境访问服务集;  $cprovider\_set$  为情境生成服务集. CAC

可以执行针对  $cprovider\_set$  中的服务感知的情境信息的存储、查询、访问等管理和维护业务.下面给出定义在情境感知容器 CAC 之上的关系定义.

**定义 13** 感知生成关系  $R_{aware}: R_{aware} \subseteq cprovider\_set \times c\_set$ , 其中  $c\_set$  为情境集.  $\forall c \in c\_set, \exists CGS \in cprovider\_set$ , 使得  $\langle CGS, c \rangle \in R_{aware}$ , 表明情境  $c$  由情境生成服务 CGS 生成.

**定义 14** 同代注册关系  $R_{register}: R_{register} \subseteq s\_set \times rcenter\_set$ , 即  $\forall s \in s\_set, \exists rc \in rcenter\_set$ , 使得  $\langle s, rc \rangle \in R_{register}$ . 其中,  $s\_set = cconsumer\_set \cup cprovider\_set$ ,  $rcenter\_set$  为服务注册中心集.

**定义 15** 同代关系  $R_{agent}: R_{agent} \subseteq s\_set \times s\_set$ , 则  $\forall s_1, s_2 \in s\_set, \langle s_1, s_2 \rangle \in R_{agent}$  当且仅当  $\exists rc \in rcenter\_set$ , 使得  $\langle s_1, rc \rangle \in R_{register} \wedge \langle s_2, rc \rangle \in R_{register}$ . 同代关系  $R_{agent}$  定义在整个服务集合上,因此两个 CGS 之间、两个 CAS 之间或 CGS 与 CAS 之间都可以存在  $R_{agent}$  关系.

**定义 16** 同簇关系  $R_{cluster}: R_{cluster} \subseteq rcenter\_set \times rcenter\_set$ . 显然,  $R_{cluster}$  为定义在注册中心集  $rcenter\_set$  之上的等价关系.  $R_{cluster}$  定义了  $rcenter\_set$  之上的等价类划分. 假设  $rcenter\_set$  关于  $R_{cluster}$  的商集  $CS = rcenter\_set / R_{cluster}$ ,  $CS = \{CS_1, CS_2, \dots, CS_n\}$ , 则  $rcenter\_set = \bigcup_{i=1}^n CS_i$ ,  $CS_i, i = 1, 2, \dots, n$  为同簇的服务注册中心构成的集合.

基于定义 12 到定义 16,以情境访问服务为参照系, DCAM 模型中的情境角色定义如下:

**定义 17** 驻留情境:  $\forall CAS \in cconsumer\_set$ , 若  $\exists c \in c\_set, \exists CGS \in cprovider\_set, \langle CGS, c \rangle \in R_{aware} \wedge \langle CAS, CGS \rangle \in R_{agent}$ , 则  $c$  称为与 CAS 同簇的驻留情境.

**定义 18** 邻居情境和簇外情境:  $\forall CAS \in cconsumer\_set, \exists rc_1 \in rcenter\_set$ , 使得  $\langle CAS, rc_1 \rangle \in R_{register}$ , 同时  $\exists c \in c\_set, \exists CGS \in cprovider\_set, \langle CGS, c \rangle \in R_{aware}$ , 并且  $\exists rc_2 \in rcenter\_set$ , 使得  $\langle CGS, rc_2 \rangle \in R_{agent}$ . 设  $rcenter\_set$  关于  $R_{cluster}$  的商集为  $CS = \{CS_1, CS_2, \dots, CS_n\}$ ,  $rc_1 \in CS_i, rc_2 \in CS_j$ , 若  $i = j$ , 则  $c$  称为与 CAS 同簇的邻居情境; 若  $i \neq j$ , 则  $c$  称为与 CAS 异簇的簇外情境.

不同的情境角色意味着 CAS 访问情境信息的复杂程度. 本文将通过建立模型验证平台,对 DCAM 模型特点,特别是模型在感知主动性变化时的系统消耗变化规律,进行实验验证和分析.

## 5 DCAM 模型的验证及特点分析

本文建立模型验证平台 DCAM-TB,通过智能空间中的移动计算仿真环境,与经典的 CTK 模型进行对比实验,分析和验证 DCAM 模型在系统存储和网络通信负载上的特点. DCAM-TB 平台由传感器、注册中心和感

知应用构成,伴随用户的移动,应用采集分布在智能空间中的传感器信息.DCAM-TB 模型遵循最近距离原则,即应用完成与传感器关于数据类型和通信模式的协商之后,应用将选择与自己距离最近的传感器作为有效传感器.为了验证 DCAM 模型在通信和系统存储方面的系统特点,仿真实验设计并部署了按照特定轨迹运动的 4 个并发用户和 25 个传感器,如图 2 所示.

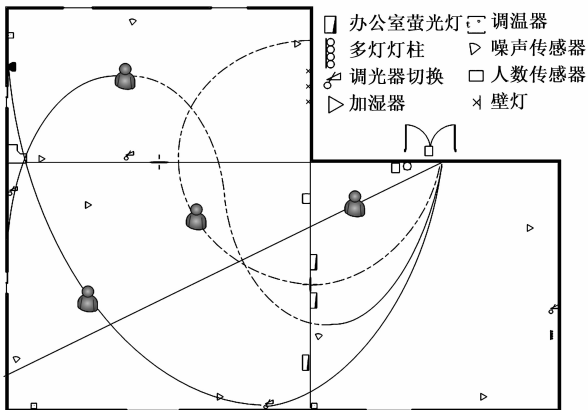


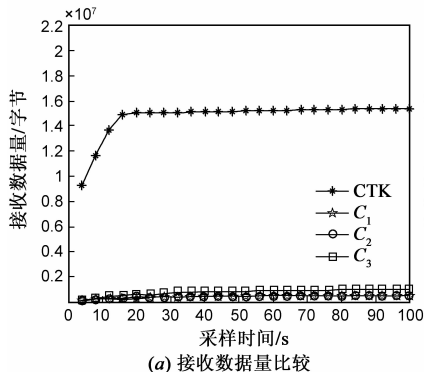
图2 DCAM-TB仿真实验环

### 5.1 DCAM 与 CTK 的模型对比实验

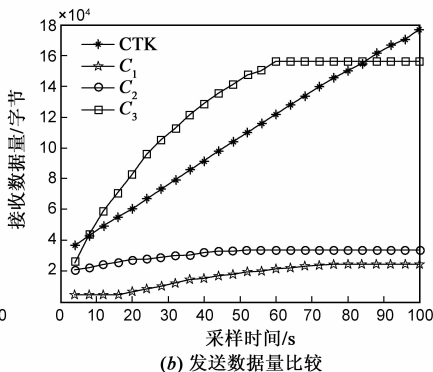
注册中心是情境共享和控制消息的中枢,其通信和存储负载在一定程度上体现了系统平台的负载.为此,对比实验主要选择注册中心的发送和接收数据量、数据存储量作为系统运行负载的考量.对比实验通过控制 DCAM-TB 上的用户运动速率,在移动用户按照既定轨迹运动时进行采样.DCAM 和 CTK 运行时的系统负载进行对比,如图 3 所示.

总体上 DCAM 模型相对于 CTK 在接收数据(图 3(a))和数据存储(图 3(c))方面的运行时负载有比较大的降低,即使计算 3 个注册中心的负载之和,相对于 CTK 也具有一定的优势.但 DCAM 模型在数据发送方面的优化效果并不明显,如果统计 3 个注册中心数据发送量(图 3(b))之和,会超过 CTK.这表明作为分布式系统,DCAM 体系架构会引起网络通信量的增加.

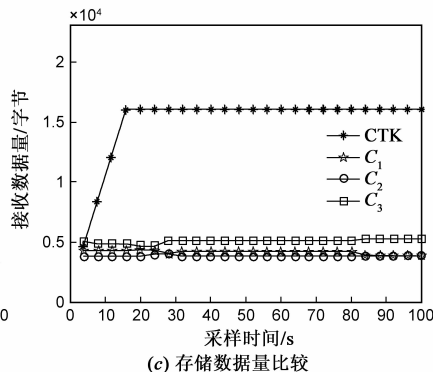
### 5.2 DCAM 模型特点分析实验



(a) 接收数据量比较



(b) 发送数据量比较



(c) 存储数据量比较

图3 DCAM-CTK运行时系统负载比较

情境感知系统中,传感器以主动(active)还是从动(passive)方式提供感知信息对情境感知系统的效率具有重要影响<sup>[1]</sup>.主动方式是以事件触发机制为基础,传感器一旦感知到信息就执行数据传输;从动方式是以请求响应机制为基础,传感器收到感知信息查询请求后发送最新感知的信息.感知主动性定义为采用主动方式的传感器占的比重.

本实验通过调节 25 个传感器中主动传感器的数量,考察基于 DCAM 模型的感知系统在不同的感知主动性条件下的系统特点.统计数据采用定长时间窗口采样方法,假设采样次数为  $n$ ,时间窗口定长为  $\Delta t$ ,设采样起始时间为  $t_1, t_2, \dots, t_n$ .则各个时间窗口为  $[t_1, t_1 + \Delta t], [t_2, t_2 + \Delta t], \dots, [t_n, t_n + \Delta t]$ ,则统计数据为

$$count = \frac{\sum_{i=1}^n count_{[t_i, t_i + \Delta t]}}{n}$$

$count$  反应了不同时间段的产生的数据量.实验结果如图 4 所示.

实验结果清楚地表明,基于 DCAM 模型的情境感知系统的主动性具有 3 个特点:

(1)伴随着系统主动性的增强,注册中心接收和发送数据量呈现规律性变化,接收数据量与系统主动性的相关性更为明显,如图 4(a)、(b)所示.而注册中心的存储数据量与系统的感知主动性的相关性较弱,呈现的变化不具有明显的规律性,如图 4(c)所示.

(2)如图 4(a)所示,注册中心的接收数据量与系统主动性呈现出明显的正比关系.由于事件触发的频率通常高于应用请求的频率,同时某些监控类传感器通常采用定时机制(时钟事件触发),而应用的请求呈现相对的随机性,因此注册的采用主动方式的传感器较多,则会导致注册中心更多的数据输入.

(3)如图 4(b)所示,伴随着系统主动性的增强,注册中心的发送数据量呈现降低的趋势.这是由于更多的传感器采取主动感知方式,不需要注册中心发送感知请求消息,因此会降低注册中心的发送数据量.

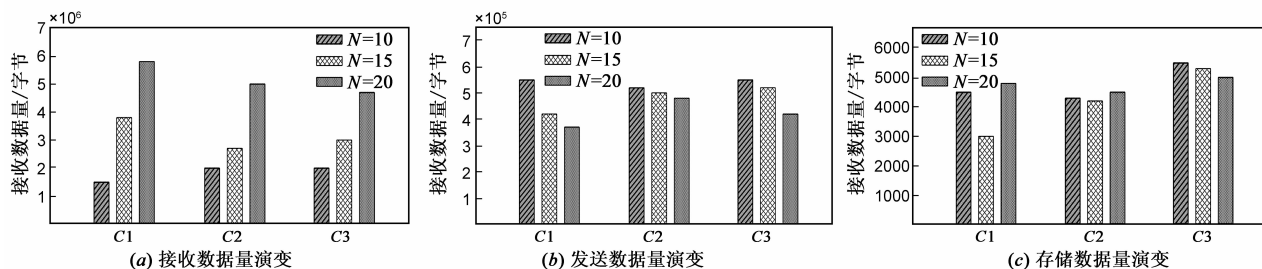


图4 DCAM模型特点分析实验效果

## 6 结论

本文提出了一种分布式情境感知模型 DCAM, 将情境资源空间划分为 4 个层次: 传感器空间、感知信息空间、对等情境空间和应用空间. 通过对资源空间的划分和空间之间映射关系的定义, 可以清晰地描述感知过程中情境信息的逐层抽象过程. 以此为基础, DCAM 模型引入多角色的服务定义, 建立了全局统一映像的情境感知空间, 实现透明的情境组织结构, 实现分布式情境的协调组织. 本文建立了分布式情境共享模型验证平台 DCAM-TB, 在分布式的感知计算环境中验证了 DCAM 模型的优点和有效性, 同时分析和验证了 DCAM 模型在吞吐量和系统存储方面的负载特点. DCAM 模型的建立, 将在普适计算环境中的情境感知系统部署和资源组织过程中发挥重要作用.

## 参考文献

- [1] Tobias Zimmer. QoC: quality of context-improving the performance of context-aware applications[J]. *Advances in Pervasive Computing*, 2006, 207(2): 209 – 214.
- [2] Nirmalya Roy, et al. Supporting pervasive computing applications with active context fusion and semantic context delivery [J]. *Pervasive and Mobile Computing*, 2010, 6(1): 21 – 42.
- [3] Anand Ranganathan, Jalal Al-Muhtadi, Roy H. Campbell. Reasoning about uncertain contexts in pervasive computing environments[J]. *IEEE Pervasive Computing*, 2004, 3(2): 62 – 70.
- [4] Jalal F. et al. An intelligent authentication infrastructure for ubiquitous computing environments[D]. Normal, Illinois, United States: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2005.
- [5] K Henricksen. Developing context-aware pervasive computing applications: models and approach[J]. *Journal of Pervasive and Mobile Computing*, 2006, 2(1): 37 – 64.
- [6] Tao Gu, Hung Keng Pung, Da Qing Zhang. A middleware for building context-aware mobile services [A]. *Proceedings of IEEE 59th Vehicular Technology Conference*[C]. Washington: IEEE Computer Society, 2004. 2656 – 2660.
- [7] H Chen. An intelligent broker architecture for pervasive context-aware systems [D]. College Park, Maryland, United

States: University of Maryland, 2004.

- [8] 张珂, 黄永峰, 李星. 一种基于适应度和节点聚类的 P2P 拓扑建模方法[J]. *电子学报*, 2010, 38(7): 1634 – 1640.  
ZHANG Ke, HUANG Yongfeng, LI Xing. A model for topology of P2P network based on fitness and node clustering[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(7): 1634 – 1640. (in Chinese)
- [9] 刘业, 杨鹏, 等. 适应自组织管理模式的 P2P 资源共享网络激励模型的研究[J]. *电子学报*, 2006, 34(11): 2081 – 2084.  
LIU Ye, YANG Peng, LIU Lin feng, XIA Qin. An Incentive Model Adapted to SelfOrganizing Management Model for Resource Sharing in P2P Networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(11): 2081 – 2084. (in Chinese)
- [10] Anind K. Dey. Enabling the use of context in interactive applications[A]. *Proceedings of the 2000 Conference on Human Factors in Computing System*[C]. Washington: ACM, 2000. 79 – 80.
- [11] J I Hong. An architecture for privacy-sensitive ubiquitous computing[D]. Berkeley, California, United States: University of California, Berkeley, 2005.
- [12] William G. Griswold, Robert Boyer, Steven W. Brown, et al. A component architecture for an extensible, highly integrated context-aware computing infrastructure[A]. *Proceedings of the 25th International Conference on Software Engineering*[C]. Washington: IEEE Computer Society, 2003. 363 – 372.

## 作者简介



叶 剑 男, 1974 年 6 月生于山东济南. 现任中国科学院计算技术研究所高级工程师. 研究方向为普适计算, 智能感知技术.

E-mail: jye@ict.ac.cn

李锦涛 男, 1962 年 3 月生于湖南华容. 现任中国科学院计算技术研究所副所长, 研究员, 博士生导师. 研究方向为多媒体技术, 视频检索, 普适计算. E-mail: jlti@ict.ac.cn

朱珍民 男, 1962 年 3 月生于湖南慈利. 现任中国科学院计算技术研究所正研级高级工程师. 研究方向为普适计算, 嵌入式系统.

E-mail: zmzhu@ict.ac.cn