

基于随机 Petri 网的协同服务模型与分析

曾明¹ 杨扬¹ 王元卓² 张静乐¹

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)¹ (清华大学计算机系 北京 100084)²

摘要 提出了一种基于随机 Petri 网的协同服务模型与分析方法,选择了企业协同服务中几个最具有代表性的流程,利用随机 Petri 对这些代表流程进行了建模以及模型简化和证明。然后,以电子商务系统中的物流系统为例,在随机 Petri 网模型建模的基础上应用模型等价化简和性能评价方法,对模型化简前后的系统性能和计算时间进行了对比分析。

关键词 随机 Petri 网,协同服务,电子商务

Modeling and Analysis of Cooperative Services Based on Stochastic Petri Net

ZENG Ming¹ YANG Yang¹ WANG Yuan-zhuo² ZHANG Jing-le¹

(School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)¹

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)²

Abstract A model and analysis method of collaborative services based on Stochastic Petri net were put forward, a collaborative enterprise service in several of the most representative process was selected. We used stochastic Petri net to model these processes. Then, we took the logistics system of e-commerce systems as example, based on stochastic Petri net modeling, used equivalent simplification, and performance evaluation and compared the original model and simplified model of system performance and computing time.

Keywords Stochastic Petri net, Collaborative service, E-business

1 引言

随着计算机网络技术、多媒体技术的发展,多学科专家已经能够克服空间、时间、异种计算机设备等的阻碍,可以“虚拟同地”一起工作,形成一种异地协同服务方式,实现了功能和服务过程的交互。国外对协同服务的研究起步较早,相关的研究成果颇丰。R. Galli 利用图形工作站设计了一套用于三维物体协同服务的计算机支持协同工作系统,使参加协同工作的图形工作站通过网络连接在一起,异地分布的工作人员可以共享一个三维虚拟环境同时完成工作。Sherwin 利用 Java 设计了一个基于客户机/服务器结构的多用户远程协同系统 JETS,使用户可以实时共享 Java applets 的内容。Rolando 描述了基于 Java RMI 和 VRML、用于协同工作的分布式虚拟环境,这种结构使 VRML 具有了多用户协同工作的能力。Zhuang Y 运用 Java3D 技术开发了一套名为“CyberEye Viewer”的协同浏览系统,它是 Internet 使能的、与平台无关的三维浏览系统。为了支持基于 Web 的协同设计, Qin S F 提出了网络协同设计环境下的仿真建模技术,等等。

网络协同服务最根本的出发点是提高服务效率,从而提高生产效率,如果能抓住影响服务效率的最主要的环节并重点对待,无疑将大大提高服务间协作的效率,缩短服务进度,因此,对协同服务过程中关键环节进行提取、分析并且优化是实现其初衷的一个非常重要的方面,但是,目前网络协同服务过程分析与优化等研究方面还存在一些难点,例如面向协同

服务的流程建模^[1]、协同服务系统性能分析^[2]等等。本文正是基于以上研究中的难点,提出了针对协同服务流程中关键环节的模型建模与模型等价化简,并且给出了相关协同服务模型等价化简的证明过程。由于 Petri 网作为一种比较理想的系统建模和性能分析工具,已经在很多领域得到了广泛的应用,因此,本文将重点研究利用 Petri 网进行协同服务模型的建模以及性能分析。

2 协同服务模型及其化简方法

本文中,针对网络协同服务中最普遍的几个协同服务流程,利用随机 Petri 网抽象出了以下几种最常见的协同服务模型。

2.1 随机 Petri 网

随机 Petri 网(Stochastic Petri Net)自从 1981 年提出以来,它的理论和分析技术已经得到很大发展。SPN 作为分析离散事件动态系统的有力工具被广泛地应用于计算机网络^[1]、资源共享系统^[2]以及并行和并发计算^[3]等研究领域。本文将主要基于 SPN 对系统进行建模以及对系统性能进行分析评价。

定义 1(随机 Petri 网) 随机 Petri 网可以描述成一个四元组 $SPN = (P, T, F, \lambda)$, 其中: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, 是有穷位置集合; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 是有穷变迁集合; $(P \cap T \neq \Phi)$, $(P \cup T \neq \Phi)$; $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$, 是弧的集合; $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$, 是变迁平均实施输率集合。

2.2 协同服务模型

协同服务是指为了完成某一任务目标,由两个或两个以上的服务主体,通过一定的信息交换和相互协调机制,分别完成不同的子任务从而达到最终目标^[4]。协同服务主要是描述两个或者多个服务之间进行协同,完成某个目标服务,从它的特点出发,分析出以下几种基本形式。

定义 2(基本服务) 对于某个单独的服务,存在输入、处理、输出 3 个部分,将一个独立的服务通过 Petri 网描述,如图 1 所示。

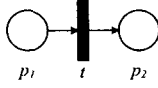


图 1 基本服务

图 1 中 P_1 为该服务的输入, t 为服务的处理, P_2 为处理后的输出结果。

定义 3(顺序协同服务) 多个不同的服务流程通过前后顺序关系产生的协同服务为顺序协同服务,其模型如图 2 所示。

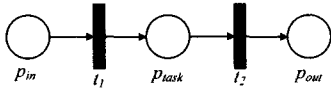


图 2 顺序协同服务

定义 4(并行协同服务) 由多个不同的协同服务流程,并最终通过结束位置交汇产生的协同服务,其模型如图 3 所示。

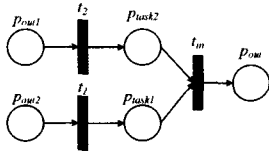


图 3 并行协同服务

定义 5(分支协同服务) 在起始位置分叉产生的多个不同的协同服务流程,其模型如图 4 所示。

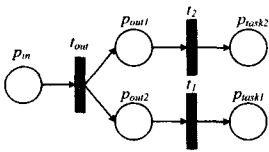


图 4 分支协同服务

定义 6(组合协同服务) 由 i 个并行协同服务经过串联而成,每个并行协同服务由 n 个不同的服务流程并行执行,并在交互位置触发为 m 个其他的并行服务流程,其模型如图 5 所示。

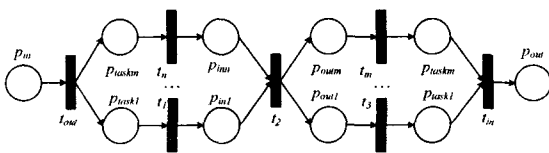


图 5 组合协同服务

2.3 协同服务模型化简

在大型、复杂系统的模型中, Petri 网应用的主要困难是模型状态空间的复杂性问题,对模型化简技术的研究始终是 Petri 网研究的主要问题之一^[5,6]。本节针对上一节提出的几种服务模型对其性能等价化简的基本原理、性能等价公式进

行推导与证明。

2.3.1 顺序服务模型化简

顺序服务模型由 n 个内部服务 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 组成,并按照前后的顺序顺序执行。顺序服务模型的化简方法如下:

定理 1 顺序服务由 n 个内部服务 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 组成。其关系如图 6 所示。每个服务的执行速率 $\lambda_i (1 \leq i \leq n)$ 是服从指数分布的随机变量。则其等价简化模型中的变迁 CS 表示的外部服务的服务速率为 $\lambda = 1 / (\sum_{i=1}^n 1 / \lambda_i)$ 。

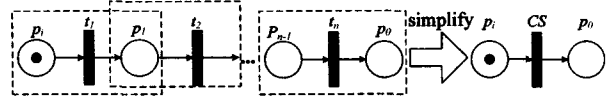


图 6 顺序服务及其等价化简模型

证明:设时间变迁 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 的响应速率为 n 个相互独立的随机变量 $X_1, X_2, \dots, X_n$, 且等价模型中变迁 CS 的响应速率为随机变量 Y , 则:

$$Y = X_1 + X_2 + \dots + X_n$$

$$\frac{1}{\lambda} = E(Y) = E(X_1 + X_2 + \dots + X_n) = E(X_1) + E(X_2) + \dots + E(X_n) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \quad (1)$$

2.3.2 并行服务模型化简

对应变迁并联结构,本文给出了并行服务模型的性能等价化简,并行服务由两个内部服务 t_1, t_2 组成,且这两个服务并行执行。并行服务模型的化简方法如下:

定理 2 并行服务由两个内部服务 t_1, t_2 和一个汇总服务 t_m 组成。其关系如图 7 所示。每个服务的执行速率 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_m$, 是服从指数分布的随机变量。则其等价简化模型中的变迁 CS 表示的外部服务的服务速率为:

$$\lambda = \lambda_m \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2) / (\lambda_m (\lambda_1^2 + \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2^2) + \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2))$$

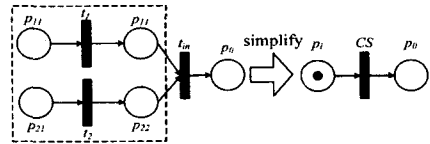


图 7 并行服务及其等价化简模型

证明:设 t_1, t_2, t_m 的响应速率为相互独立的随机变量 X_1, X_2, X_m , 其分布函数为 $F_i(x) = 1 - e^{-\lambda_i x}$, t_1, t_2 组成并发服务的响应速率为 λ_{12} 。

根据文献^[7], 并发结构等效时间变迁 t 的平均延时时间

$$\lambda_t = 1 / (\sum_{i=1}^n 1 / \lambda_i - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n 1 / (\lambda_i + \lambda_j) + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n 1 / (\lambda_i + \lambda_j + \lambda_k) + \dots + (-1)^{n-1} 1 / \sum_{i=1}^n \lambda_i)$$

$$\text{令 } n=2, \text{ 则 } \lambda_{12} = (\lambda_1^2 + \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2^2) / \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (2)$$

根据定理 1, 由 λ_{12} 和 λ_m 组成的顺序服务的等效时间变迁 CS 的平均延时时间 λ 为:

$$1 / \lambda = 1 / \lambda_{12} + 1 / \lambda_m = (\lambda_m (\lambda_1^2 + \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2^2) + \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2)) / \lambda_m \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2)$$

$$\lambda = \lambda_m \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2) / (\lambda_m (\lambda_1^2 + \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2^2) + \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2)) \quad (3)$$

证毕。

2.3.3 分支服务模型化简

分支服务是由一个分叉服务 t_{out} 和两个内部服务 t_1, t_2 组成, 且 t_{out} 分别与 t_1, t_2 服务串行执行然后二者又并发执行, 分

支服务模型的简化方法如下:

定理 3 分支服务关系如图 8 所示。每个服务的执行速率 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_{out}$, 是服从指数分布的随机变量。则其等价简化模型中的变迁 CS 表示的外部服务的服务速率为:

$$\lambda = \frac{2\lambda_1\lambda_2 + \lambda_{out}(\lambda_1 + \lambda_2)}{\lambda_1\lambda_2\lambda_{out}} - \frac{(\lambda_1 + \lambda_{out})(\lambda_2 + \lambda_{out})}{2\lambda_1\lambda_2\lambda_{out} + \lambda_{out}^2(\lambda_1 + \lambda_2)}$$

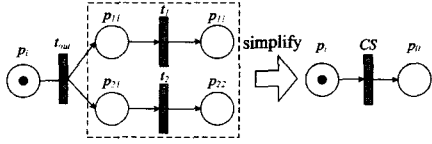


图 8 分支服务及其等价简化模型

证明: 设时间变迁 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 的响应速率为 n 个相互独立的随机变量 $X_1, X_2, \dots, X_n$, 其分布函数为 $F_i(x) = 1 - e^{-\lambda_i x}$, 由 t_1, t_2 分别和 t_{out} 构成的顺序服务其响应时间分别为 t_{1out}, t_{2out} , 根据定理 1:

$$\lambda_{1out} = \lambda_1\lambda_{out} / (\lambda_1 + \lambda_{out}), \lambda_{2out} = \lambda_2\lambda_{out} / (\lambda_2 + \lambda_{out})$$

由定理 2, 并发结构等效时间变迁 t 的平均延时时间 $\lambda_{1out2out}$ 为:

$$\begin{aligned} \lambda_{1out2out} &= (\lambda_{1out}^2 + \lambda_{1out}\lambda_{2out} + \lambda_{2out}^2) / \lambda_{1out}\lambda_{2out}(\lambda_{1out} + \lambda_{2out}) \\ &= ((\lambda_{1out} + \lambda_{2out})^2 - \lambda_{1out}\lambda_{2out}) / \lambda_{1out}\lambda_{2out}(\lambda_{1out} + \lambda_{2out}) \\ &= 1/\lambda_{1out} + 1/\lambda_{2out} - 1/\lambda_{1out} + \lambda_{2out} \end{aligned}$$

分别将 λ_{1out} 和 λ_{2out} 代入得到:

$$\lambda = \frac{2\lambda_1\lambda_2 + \lambda_{out}(\lambda_1 + \lambda_2)}{\lambda_1\lambda_2\lambda_{out}} - \frac{(\lambda_1 + \lambda_{out})(\lambda_2 + \lambda_{out})}{2\lambda_1\lambda_2\lambda_{out} + \lambda_{out}^2(\lambda_1 + \lambda_2)} \quad (4)$$

证毕。

2.3.4 组合服务模型化简

定理 4 组合服务由 k 个局部并行服务构成且每个并行服务由 n 个内部服务 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 组成, 其关系如图 9 所示。每个服务的执行速率 $\lambda_{ij} (1 \leq i \leq k, 1 \leq j \leq n)$ 是服从指数分布的随机变量。则其等价简化模型中的变迁 CS 表示的外部服务的服务速率为:

$$\lambda = 1 / (\sum_{i=1}^n 1/\lambda_{ij}), \text{ 其中}$$

$$\lambda_{ij} = (\sum_{j=1}^n 1/\lambda_{ij} - \sum_{s=1}^{n-1} \sum_{t=s+1}^n 1/(\lambda_{is} + \lambda_{it}) + \sum_{s=1}^{n-2} \sum_{t=s+1}^{n-1} \sum_{u=t+1}^n 1/(\lambda_{is} + \lambda_{iu} + \lambda_{it} + \lambda_{iu}) + \dots + (-1)^{n-1} 1/\sum_{i=1}^n \lambda_{ii})$$

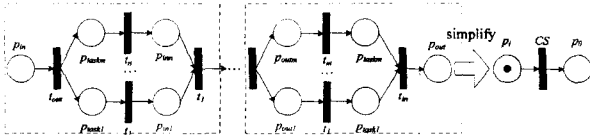


图 9 组合服务及其等价简化模型

证明: 设时间变迁 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 的响应速率为 n 个相互独立的随机变量 $X_1, X_2, \dots, X_n$, 其分布函数为 $F_i(x) = 1 - e^{-\lambda_i x}$, 等价模型中变迁 CS 的响应速率为 Y , 则根据组合服务的定义, 可将组合服务中的每一个局部并行服务进行简化, 简化后的服务模型其外部服务的服务速率为:

$$\begin{aligned} \lambda_{ij} &= (\sum_{j=1}^n 1/\lambda_{ij} - \sum_{s=1}^{n-1} \sum_{t=s+1}^n 1/(\lambda_{is} + \lambda_{it}) + \sum_{s=1}^{n-2} \sum_{t=s+1}^{n-1} \sum_{u=t+1}^n 1/(\lambda_{is} + \lambda_{iu} + \lambda_{it} + \lambda_{iu}) + \dots + (-1)^{n-1} 1/\sum_{i=1}^n \lambda_{ii}) \end{aligned}$$

经过简化后的局部并行服务可由一个局部的顺序服务代替, 由于每个局部并行服务之间是串联而成, 因此对每个局部并行服务进行等价替换之后可以得到一个顺序服务模型, 每个

等价替换的变迁为 λ_i , 再由定理 1, 组合服务的服务速率为:

$$\lambda = 1 / (\sum_{i=1}^n 1/\lambda_{ij}) \quad (5)$$

证毕。

3 实例分析

ELMS (E-Business Logistics Management System) 是一种新型的电子商务模式。ELMS 使得物流系统中的供应商与门店之间不再建立直接连接, 而是通过 ELMS 提供的网络服务来实现物流配送系统的各种需求。ELMS 将为各个服务供应商以及门店用户提供信息流、资金流、物流等各种保障, 以确保整个物流系统安全、高效地运行。

3.1 ELMS 建模与等价化简

本文中以 ELMS 的下单流程为例, 对该流程进行建模和分析。

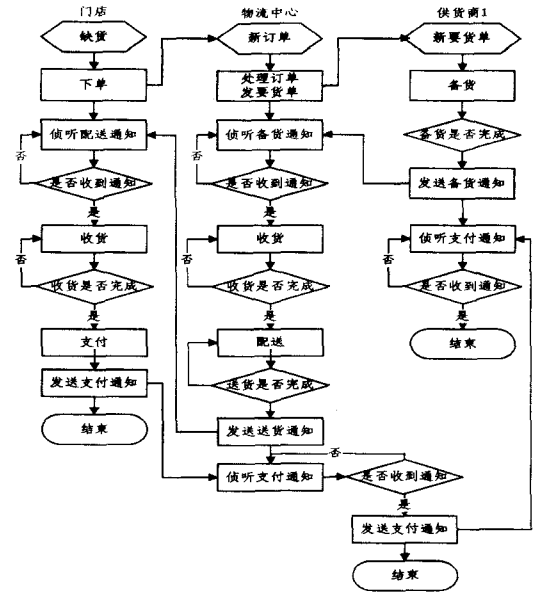


图 10 ELMS 下单流程图

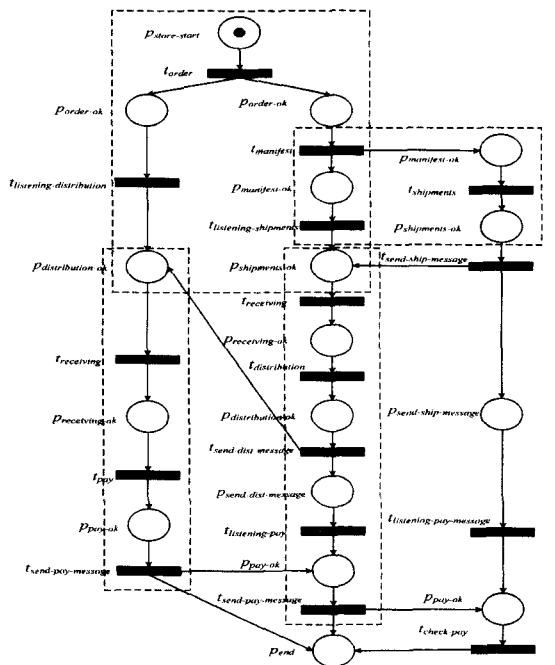


图 11 ELMS 下单流程 Petri 网模型图

图 11 是利用随机 Petri 进行建模之后的模型图,从图中虚线处可以看出,这个系统含有多处上文中提到的并行、分支等协同服务结构模型,将上图中虚线圈起来的并行、分支和顺序结构利用化简模型替换后的 Petri 网模型图如图 12 所示。

- entiated service; modeling and performance analysis [A]// Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, 2000. Proceedings, 8th International Symposium on [C]. Book, News, Inc, Portland, OR; IEEE, 2000; 441-448
 - [2] 林闯. 一种资源共享系统的模型和近似性能分析[J]. 计算机学报, 1997, 20(10): 865-871
 - [3] Balbo G. Performance issues in parallel programming [A]// Application and Theory of Petri Nets 1992, Lecture Notes in Computer Science [C]. Springer Verlag, 1992, 616: 1-23
 - [4] Kensing F, Blomberg J. Participatory design: Issues and concerns [J]. Computer Supported Cooperative Work, 1998, 7(3): 167-185
 - [5] Cabodi G, Camurati P, Quer S. Reachability analysis of large circuits using disjunctive partitioning and partial iterative squaring [J]. Systems Architecture, 2001, 47(2): 163-179
 - [6] Zuberek W M, Rada I. Modeling and analysis of distributed state space generation for timed Petri nets [A]// 342th Annual Simulation Symposium (SS-2001) [C]. Stattle, WA: The Society for Computer Simulation International (SCS), 2001; 93-98
 - [7] 林闯. 一种随机 Petri 网性能等价化简与分析方法[J]. 电子学报, 2002, 30(11): 1620-1623
 - [8] Ciaodo G, Muppala J, Trivedi K S. SPNP: Stochastic Petri Net Package [C]// Proc. Petri Nets and Performance Models, 1989; 142-151
-
- (上接第 13 页)
- [16] Tran V X, Tsuji H. OWL-T: A Task Ontology Language for Automatic Service Composition [C]// Proceedings of the Sixth International Semantic Web Conference, Salt Lake City, Utah, USA, 2007; 1164-1167
 - [17] Isbell C L, Omojokun O, Pierce J S. From Devices to Tasks: Automatic Task Prediction for Personalized Appliance Control [J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2004, 8(3): 146-153
 - [18] Ni Hongbo, Zhou Xingshe, Yu Zhiwen, et al. OWL-based Context-dependent Task Modeling and Deducing [C]// Proceedings of the 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, Niagara Falls, Canada, 2007; 846-851
 - [19] 岳玮宁, 王悦, 汪国平, 等. 基于上下文感知的智能交互系统模型 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(1): 74-79
 - [20] Poladian V, Sousa J P, Garlan D, et al. Dynamic Configuration of Resource-aware Services [C]// Proceedings of the 26th International Conference on Software Engineering, Edinburgh, 2004; 604-613
 - [21] Román M, Hess C K, Cerqueira R, et al. Gaia: A Middleware Infrastructure to Enable Active Spaces [J]. IEEE Pervasive Computing, 2002, 1(4): 74-83
 - [22] Ranganathan A. A Task Execution Framework for Autonomic Ubiquitous Computing [D]. Urbana-Champaign: University of Illinois, 2005
 - [23] Look G, Peters S, Shrobe H. Plan-driven Ubiquitous Computing [C]// Proceedings of the Workshop on AI in Mobile Systems (AIMS) at the International Conference on Ubiquitous Computing, Seattle, Washington, USA, 2003; 66-73
 - [24] Song Z X, Labrou Y, Masuoka R. Dynamic Service Discovery and Management in Task Computing [C]// Proceedings of first Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems, Boston, Massachusetts, USA, 2004; 310-318
 - [25] MacIntyre B, Mynatt E, Volda S, et al. Support for Multitasking and Background Awareness Using Interactive Peripheral Displays [C]// Proceedings of ACM User Interface Software and Technology, Orlando, Florida, 2001; 41-50
 - [26] 周宇, 马晓星, 曹建农, 等. 普适环境下基于软件代理虚拟化的应用迁移 [J]. 软件学报, 2007, 18(8): 2038-2048
 - [27] 张德干, 尹国成, 史元春, 等. 普适环境中的无缝迁移策略 [J]. 控制与决策, 2005, 20(1): 6-10
 - [28] 张德干, 班晓娟, 曾广平, 等. 构件化无缝主动迁移机制中的资源调度策略 [J]. 计算机学报, 2006, 29(11): 2027-2036
 - [29] Sousa J P, Garlan D. Aura: An Architectural Framework for User Mobility in Ubiquitous Computing Environments [C]// Proceedings of the IFIP 17th World Computer Congress - TC2 Stream/3rd IEEE/IFIP Conference on Software Architecture, Montreal, Canada, 2002; 29-43
 - [30] Ranganathan A, Chetan S, Al - Muhtadi J, et al. Olympus: A High-level Programming Model for Pervasive Computing Environments [C]// IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, Kauai Island, Hawaii, 2005; 7-16
 - [31] Bardram J E, Christensen H B, Olsen A K. Activity-driven Computing Infrastructure-Pervasive Computing in Healthcare [C]// Proceedings of the Conference of Pervasive Computing, 2004
 - [32] Bardram J E, Christensen H B. Pervasive Computing Support for Hospitals: An Overview of the Activity-based Computing Project [J]. IEEE Pervasive Computing, 2007, 6(1): 44-51
 - [33] Bellur U, Narendra N C. Towards Service Orientation in Pervasive Computing Systems [C]// Proceedings of International Conference on Information Technology: Coding and Computing, Las Vegas, Nevada, USA, 2005; 289-295
 - [34] Shehzad A, Ngo H Q, Lee S Y, et al. A Comprehensive Middleware Architecture for Context-aware Ubiquitous Computing Systems [C]// Proceedings of IEEE Fourth Annual ACIS International Conference on Computer and Information Science, Jeju Korea, 2005; 251-256
 - [35] Mokhtar S B. Semantic Middleware for Service-oriented Pervasive Computing [D]. INRIA-Rocquencourt, France, 2007