

导弹控制系统稳定性研究^{*}

刘湘崇 梁彦 潘泉 程咏梅 张洪才

(西北工业大学自动化学院 西安 710072)

摘要 导弹控制系统是一个非线性的时变系统;传统的控制器设计是将总的飞行时间分为几段,然后对于不同的时间段设计不同的控制器;由于在同一时间段内系统参数不断变化,而控制器参数不变,这样就造成在时间段内控制系统性能变差;为了解决在每一个时间段内系统性能变差问题和在时间段之间切换控制器时系统性能的突变及发动机工作的不稳定的问题,提出了采用对各个控制器相对时间进行单点模糊化、乘积推理和平均加权反模糊化的方法,实现在整个时间段控制系统的平稳工作。克服动态性能的跳变和发动机工作不稳定的问题,提高了导弹的可靠性。仿真实验证明了此方法的有效性。

关键词 模糊控制,导弹,相角裕度,稳定性

On the Stability of the Missile Control System

LIU Xiang-Chong LIANG Yan PAN Quan CHENG Yong-Mei ZHANG Hong-Cai

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract The missile control system is a nonlinear time-varying system. The traditional design of controller is to design different controllers for different time sections obtained by dividing the whole flight time. For the parameters of the system varies all the time and the parameters of the controller in a time section are constant, the performance of the control system is deteriorating in the time section. To solve the problems of the system performance deterioration in each time section, and sharp changes of the system performance and unstable engine running during the controllers exchange between time sections, using singleton fuzzifier, product inference and average defuzzifier to the controllers in time domain, the stable working of the control system in all time sections is realized. The sharp change of the dynamic performance and the unstable working of the engines because of changing controllers are overcome and the reliability is enhanced. The simulation shows the effectiveness of the approach.

Keywords Fuzzy control, Missile, Phase margin, Stability

1 引言

第一枚导弹 V1(当时叫飞弹)是由德国卡塞尔地区格哈德·费恩勒股份有限公司的工程师罗伯特吕塞尔领导的设计小组设计的,它采用斜轨发射,装有一个预定制导装置,由此装置引导导弹大致按指定的方向飞行,控制系统相当的简单。第一次 V1 导弹发射试验,于 1942 年 12 月在德国佩内明德进行,此次试验是使用一架 FW200“秃鹰”巡逻轰炸机进行空中发射的。

现代战术导弹及近程攻击导弹(如飞航导弹)大多采用滑模控制^[1~3]。滑模控制(sliding mode control)是变结构控制中,使从任意一点出发的状态轨线通过控制作用使其到达某一指定的滑模面,然后沿着此滑模面滑动到原点。变结构控制为了使系统在滑动模形上运动需要在不同的控制逻辑间来回切换,容易引起系统不停的振颤,从而对系统的硬件造成损害,并易导致系统的不稳定^[15]。

有些战术导弹(如反舰导弹)是基于微分几何理论对控制系统进行设计的。微分几何方法是把系统描述成一个形如状态方程的仿射非线性系统,通过微分同胚和反馈,可以变换成能控的线性系统。微分几何方法在理论上比较容易展开,可以从统一的微分几何概念出发深入研究各种不同的问题,但

这一途径比较抽象,不便在工程上推广使用;状态反馈线性化实质上要解一组偏微分方程,这对一般系统几乎是不可能的,这限制了它的应用^[15]。

中远程导弹及巡航导弹的初期都是采用的弹道式飞行控制的方法。目前弹道式导弹的控制器设计一般采用按时间段直接切换分控制器的方法。这种控制的特点是系统有明显的开关特性。当转换的模型多时,可以提高控制的精度和控制系统的性能。但是这样必然造成元器件的增多,增加了成本和重量,并且使得系统出故障的可能性增大,降低了系统的可靠性。目前的导弹控制系统采用是用较少的模型,提高可靠性;但是,另一方面,在一个模型运行期间,系统性能随着空气动力、弹体重量等变化,控制系统的性能变差。而且在模型转换的期间,发动机运行不平稳。并且,随着导弹的超期存放,元器件的老化,接触不良等问题时有发生。

随着科技的发展,人们对武器装备性能的要求也越来越高。如何在降低可靠性的基础上,提高系统的性能,是需要解决的问题。

本文首先以苏式某远程导弹控制为例,分析目前控制系统设计在可靠性和性能上存在的问题;第二、根据提出的问题,改进控制器的设计方法;第三、进行仿真实验和方法比较;最后是结束语。

^{*} 本文受到国家自然科学基金(60404011, 60372085)的资助。刘湘崇 博士生,从事信号处理、智能控制、控制理论与控制工程研究。张洪才 教授,博导,从事控制理论与应用、多目标跟踪与识别、信息融合、C3I 技术、动态系统的建模、估计与控制、智能信息处理等研究。梁彦 副教授,从事复杂动态大系统建模、估计、控制与仿真、信息融合、信息感知与控制、图像理解等研究。潘泉 教授,博导,研究领域为控制理论与应用、多目标跟踪与识别、信息融合、C3I 技术、图像处理、智能信息处理、生物信息等。程咏梅 教授,博导,研究领域为控制理论与应用、多目标跟踪与识别、信息融合、C3I 技术、动态系统的建模、估计与控制、智能信息处理等。

2 问题提出

远程导弹是垂直发射的,并按预定的程序进行转弯,最后进入太空关机。导弹控制系统是对关机前的这段飞行姿态进行控制。导弹的飞行姿态主要通过三个姿态角表现出来,这三个姿态角为俯仰、偏航和滚动三个角。由于弹道式导弹是姿态角,是小的变化,而且扰动是小扰动,这样这三个姿态角的控制就可分别进行控制,即俯仰、偏航和滚动三个通道是解耦控制的。这三个姿态通道的控制系统的设计有所不同。俯仰通道和偏航通道的控制系统的设计基本相同,而滚动通道的控制系统设计参数有所不同。这主要是由于弹体的转动的惯量有所不同。

设某型导弹的某个姿态通道的被控对象的传递函数为 $G_0(s, t)$, 其控制器的传递函数为:

$$G_k(s, t) = \begin{cases} G_{k1}(s), & t_1 \leq t < t_2 \\ G_{k2}(s), & t_2 \leq t < t_3 \\ \vdots \\ G_{kn}(s), & t_{n-1} \leq t \leq t_n \end{cases} \quad (1)$$

其中: n 为分控制器的数目, $G_{k1}(s), G_{k2}(s), \dots, G_{kn}(s)$ 是分控

制器的传递函数。

整个开环系统的传递函数为:

$$G(s) = G_0(s, t) \cdot G_k(s, t) \quad (2)$$

这样的控制器存在三个问题。第一个问题:在某个时间段内的控制器的参数不变,由于燃料量的减小,空气动力的改变使得控制对象的参数发生改变,这样整个控制系统的幅值裕度和相角裕度也发生改变,并且整个系统的性能是变差的。图1为苏式某导弹的偏航通道控制系统的幅值裕度和相角裕度在整个飞行过程的变化图。该导弹是将整个主动段(关机前的飞行段)分成三段进行控制的。导弹在飞行过程中随着速度的提高,控制力矩也越来越大,这就要求控制系统的幅值裕度应随时间逐渐适当变大,而相角裕度应适当变小。而在每个时间段内的幅值裕度和相角裕度恰相反。

第二个问题:发动机在两个时间段之间控制器切换时运行不稳定。当某一通道在对姿态角进行修正时,如果这时控制器切换,发动机的摆动就会有波动,这对于发动机的可靠性是不利的。如图2所示,当偏航通道在28秒时系统受到阶跃输入信号影响,而系统在30秒时必须切换控制器,可以看到发动机的电位计的输出在30秒时有一个明显的波动。

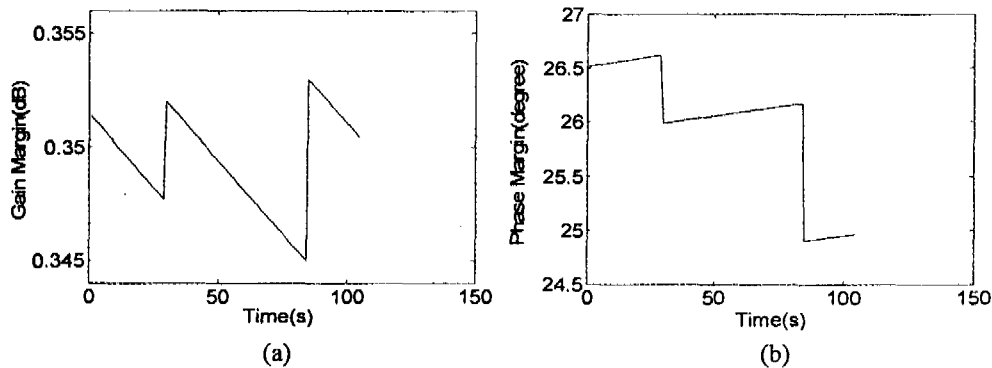


图1 某导弹原系统幅值裕度和相角裕度变化趋势

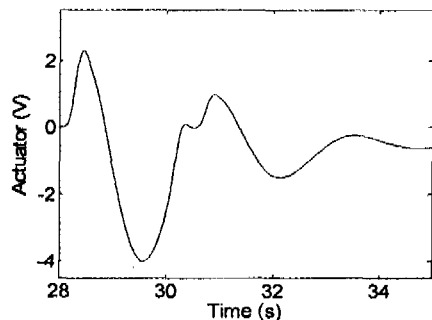


图2 在控制器转换时,发动机工作出现波动

第三个问题:切换各个分控制器是用继电器实现的,继电器出故障的概率是较高的。如果继电器出现故障,有可能造成整个系统失去稳定。

3 算法实现

为了达到在整个主动段的控制系统的平稳运行的目的,采用对各个时段的控制器相对时间进行单点模糊化、乘积推理和平均加权反模糊化的方法,实现整个控制系统的控制器 $G_k(s, t)$ 。

$$G_k(s, t) =$$

$$\begin{cases} \frac{t_2-t}{t_2-t_1}G_{k1}(s) + \frac{t-t_1}{t_2-t_1}G_{k2}(s), & t \in [t_1, t_2) \\ \frac{t_3-t}{t_3-t_2}G_{k2}(s) + \frac{t-t_2}{t_3-t_2}G_{k3}(s), & t \in [t_2, t_3) \\ \vdots \\ \frac{t_{n-1}-t}{t_{n-1}-t_{n-2}}G_{k2}(s) + \frac{t-t_{n-2}}{t_{n-1}-t_{n-2}}G_{k3}(s), & t \in [t_{n-2}, t_{n-1}) \\ \frac{t_n-t}{t_n-t_{n-1}}G_{kn-1}(s) + \frac{t-t_{n-1}}{t_n-t_{n-1}}G_{kn}(s), & t \in [t_{n-1}, t_n) \\ 1, & t \geq t_n \end{cases}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n K_i(t)G_{ki}(s)}{\sum_{i=1}^n K_i(t)} \quad (3)$$

$$\text{其中}, K_1 = \begin{cases} \frac{t_2-t}{t_2-t_1}, & t \in [t_1, t_2] \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$$K_2 = \begin{cases} \frac{t-t_1}{t_2-t_1}, & t \in [t_1, t_2] \\ \frac{t_3-t}{t_3-t_2}, & t \in (t_2, t_3] \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

.....

$$K_{n-1} = \begin{cases} \frac{t-t_{n-3}}{t_{n-2}-t_{n-3}}, & t \in [t_1, t_2] \\ \frac{t_{n-1}-t}{t_{n-1}-t_{n-2}}, & t \in (t_2, t_3] \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$$K_n = \begin{cases} \frac{t_n-t}{t_n-t_{n-1}}, & t \in [t_{n-1}, t_n] \\ 1, & t > t_n \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

其中: $K_1(t)$, $K_2(t)$, ..., $K_n(t)$ 分别为相对于 $G_{k1}(s)$, $G_{k2}(s)$, ..., $G_{kn}(s)$ 的隶属函数。如果用电器元件实现, 可以用上面的三角隶属函数实现。

如果用计算机实现, 隶属函数可以用较为精确的隶属函数, 如高斯函数。用高斯隶属函数实现的控制系统的控制器如下。

$G_k(s, t) =$

$$\begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{t-t_1}{t_2-t_1}\right)^2\right]G_{k1}(s) + \exp\left[-\left(\frac{t-t_2}{t_3-t_2}\right)^2\right]G_{k2}(s), & t \in [t_1, t_2] \\ \exp\left[-\left(\frac{t-t_2}{t_3-t_2}\right)^2\right]G_{k1}(s) + \exp\left[-\left(\frac{t-t_3}{t_4-t_3}\right)^2\right]G_{k2}(s), & t \in [t_2, t_3] \\ \exp\left[-\left(\frac{t-t_{n-1}}{t_n-t_{n-1}}\right)^2\right]G_{k1}(s) + \exp\left[-\left(\frac{t-t_n}{t_{n+1}-t_n}\right)^2\right]G_{k2}(s), & t \in [t_{n-1}, t_n] \\ \exp\left[-\left(\frac{t-t_n}{t_{n+1}-t_n}\right)^2\right]G_{k1}(s) + \exp\left[-\left(\frac{t-t_{n+1}}{t_{n+2}-t_{n+1}}\right)^2\right]G_{k2}(s), & t \in [t_n, t_{n+1}] \\ 1, & t \geq t_n \end{cases}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n K_i(t)G_{ki}(s)}{\sum_{i=1}^n K_i(t)} \quad (4)$$

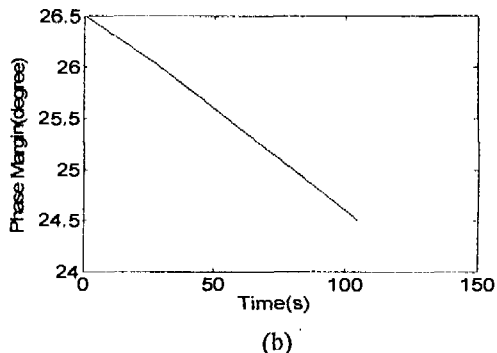
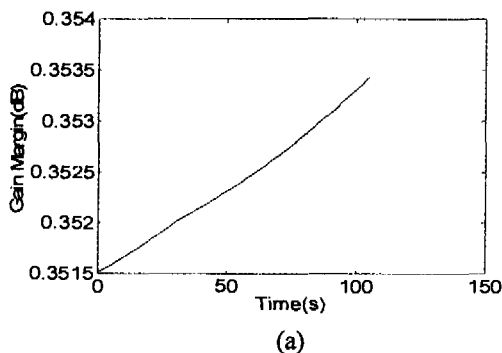


图4 用模糊加权控制器控制的某导弹系统的幅值裕度和相角裕度

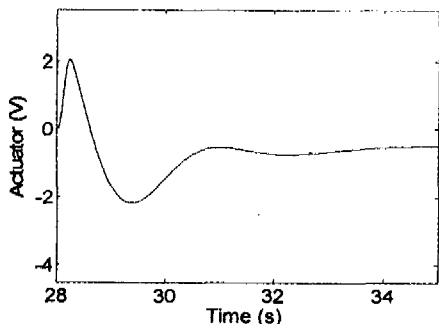


图5 模糊加权控制器的控制后的某导弹发动机的输出信号

结束语 远程导弹具有造价高、存放时间长、精度相对较差等特点; 元器件的老化使得可靠性降低。有些开关器件在地面上测试正常, 但由于导弹起飞的强烈振动, 使得有些弹簧片的压力发生变化, 加上元器件的老化, 使得继电器等开关器

其中: $K_i = \exp\left[-\left(\frac{t-t_i}{R^i}\right)^2\right]$ 为高斯隶属函数。 K_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为在时间段 $[t_i, t_{i+1}]$ 上的分控制器 $G_{ki}(s)$ 的隶属函数。 R^i 是隶属函数的宽度。 $R^i = t_{i+1} - t_i$ ($i=1, 2, \dots, n-1$), $R^n = R^{n-1} = t_n - t_{n-1}$ 。

4 算法比较

对于苏式某导弹的偏航通道的控制系统的主动段的三个时间段的控制器用上面的方法进行改进后, 相对这三个时间段的控制器的传递函数的隶属函数如图3所示。

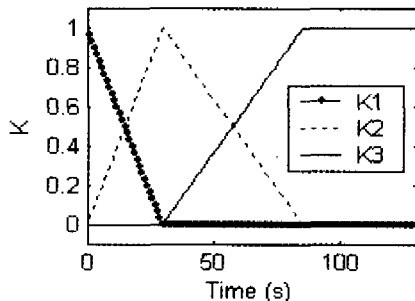


图3 $G_{k1}(s)$, $G_{k2}(s)$ 和 $G_{k3}(s)$ 的隶属函数 K_1 , K_2 和 K_3

改进后的偏航通道的幅值裕度和相角裕度的如图4所示。其幅值裕度是逐渐上升的, 而相角裕度是逐渐下降的。其幅值裕度和相角裕度的变化也是平稳的, 这符合导弹飞行实际的要求。当改进后的偏航通道在28秒受到一个阶跃干扰的情况下, 其发动机的运行情况如图5所示, 其偏航角的修正过程是平稳的。

件的可靠性降低。将多个控制器由单个之间相互切换变为同时工作和模糊加权运算一定会大大提高导弹飞行的可靠性。而且这种算法改进不仅可以使整个系统的动态和稳态性能有所改善, 而且使得发动机运行平稳; 这一模糊算法改善整体的控制系统性能。

参考文献

- 1 YU Jin-yong, GU Wen-jin, ZHAO Hong-chao. Second Order Sliding-Mode Controller Design for the Longitudinal Control of the Aerodynamical Missile. JOURNAL OF SYSTEM SIMULATION, 2003, 1319~1321
- 2 Li Wenlin. Fuzzy sliding model control for non matching uncertain system. Control and Decision, 2004, 655~659
- 3 Shtessel Y B. Smooth Siding Model Controller for Robust Missile Autopilot, A D, AQM02-03-0226
- 4 Hsieh F-S. Fault-tolerant deadlock avoidance algorithm for assembly processes, Systems, Man and Cybernetics, Part A, IEEE Transactions on, 2004, 34(1): 65~79
- 5 Tohma Y. Incorporating fault-tolerance into an autonomic computing environment, Distributed Systems Online, IEEE, 2004, 5(2): 3/1~3/12

- 6 Clouqueur T, Saluja K K, Ramanathan P. Fault-tolerance in collaborative sensor networks for target detection, Computers. IEEE Transactions on, 2004, 53(3): 320
- 7 Christian J, Feser K. Procedures for Detecting Winding Displacements in Power Transformers by the Transfer Function Method, Power Delivery. IEEE Transactions on, 2004, 19(1): 214
- 8 Ayoubi R A, Ziade H A, Bayoumi M A. Fault-tolerant Hopfield associative memory on torus, Defect and Fault-Tolerance in VLSI Systems, 2003. In: Proc. 18th IEEE International Symposium on, Nov. 2003. 369~376
- 9 Choi M, Park N, Lombardi F. Modeling and analysis of fault-tolerant multistage interconnection networks, Instrumentation and Measurement. IEEE Transactions on, 2003, 52(5): 1509~1519
- 10 Stoustrup J, Blondel V D. Fault-tolerant control: a simultaneous stabilization result, Automatic Control. IEEE Transactions on, 2004, 49(2): 305~310
- 11 Huang J, Tahoori M B, Lombardi F. Fault-tolerance of program-mable switch blocks, [C] Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition, 2004. Proceedings, Volume: 2, Feb. 2004. 1358~1359
- 12 Stanley-Marbell P, Marculescu D. Local decisions and triggering mechanisms for adaptive fault-tolerance, [C] Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition, 2004, proceedings, Volume: 2, Feb. 2004. 968~973
- 13 Jackson A H, Canham R, Tyrrell A M. Robot fault-tolerance using an embryonic array, [C] Evolvable Hardware, 2003. Proceedings, NASA/DoD Conference on, July 2003. 91~100
- 14 杨军, 杨晨, 段朝阳, 等. 现代导弹制导控制系统设计. 北京: 航空工业出版社, 2005
- 15 宋闯, 魏毅寅. 非线性系统理论在导弹控制中的应用研究进展与展望. 战术导弹技术, 2003(6): 48~53

(上接第 207 页)

```

A = {name, city, state, zip, BID, btitle, ISBN, PID, ptitle, art, rating}
S = {Root}
P = {Root → root (Person*)}
Person → person (@name, ((@city, @state) + @zip) (Book + + Paper +), Review +)
Book → book (@btitle, @ISBN, @BID)
Paper → paper (@ptitle, @PID)
Review → review (@Aref, @rating)
Σ = IDREF constraints:
{Aref::DREF → (Book + Paper)}
Key constraints:
{key(Person) = (@name),
key(Book) = (@ISBN),
key(Paper) = (@ptitle),
key(Review) = (parent::person/@name, @Aref)}

```

4 实验分析

作者用 J2EE 平台和 Oracle9i 数据库管理系统在 Windows 2000 上实现了 XMAS, 个人电脑的配置为 P4 2.1G 处理器, 内存 256 M。采用的实验数据来源于 Jon Bosak 提供的部分 XML 文档^[15]。在进行查询实验之前, 需要把 XML 文档导入到数据表中存储并建立索引, 表 1 列出了数据分析及导入所用时间, 以及对相应文档元素属性的统计。

表 1 实验数据分析

实验数据名	元素节点数	值节点数	元素边数	属性边数	时间(秒)
Four Religious Works	6637	5472	12109	2718	22.3

对数据查询, 本文根据查询目标所在的目录层次挑选了 5 条查询语句, 根据优化前后对查询的执行情况, 可以得到图 3 的实验结果。

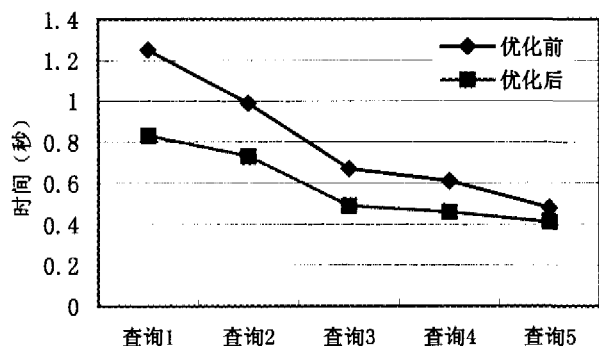


图 3 查询性能对比图

查询 1: tstmt [contains='christ']
 查询 2: tstmt/bookcol [contains='christ']
 查询 3: tstmt/bookcol/book [contains='christ']
 查询 4: tstmt/bookcol/book/chapter [contains='christ']
 查询 5: tstmt/bookcol/book/chapter/v [contains='christ']

表中的数据都是针对同一个查询语句运行 3 次所用时间

的平均值。通过优化前和优化后查询执行所用时间的对比可知, 优化后的查询时间普遍少于优化前的查询时间。随着查询目录层次的深入, 两者查询时间的差值在减少。

在大部分情况下, 基于索引的查询优化都能够使查询效率得到一定的提高。由于对于索引的维护也需要一定的系统开销, 因此加入索引后在导入数据时会使其效率降低。但总的来说, 对那些有频繁查询要求的 XML 数据, 索引的引入还是必需的。

结论 本文介绍一个基于 XML 的多 Agent 系统——XMAS。该系统采用带根连通有向图来表示 XML 文档数据模型, 并对 XML 文档的原子数据和元素名建立索引, 能更完整地保存 XML 文档中的信息。XMAS 采用 XGrammar 作为 XML 的模式定义语言, 以通用语法作为输出, 而不依赖某种具体的语言标准, 在此输出的基础上, 可以容易地得到所需文档模式信息。在数据存储过程中的索引优化使得 XMAS 在数据查询上具有良好的性能。

进一步的研究工作包括对 XMAS 中 Web 服务的扩展以及查询优化策略的细化。

参考文献

- 1 Kavi K, Kung D, Bhambhani H. Extending UML to Modeling and Design of Multi-Agent Systems. In: Proc. of ICSE 2003 Workshop on Software Engineering for Large Multi-Agent Systems, Portland, Oregon, 2003
- 2 Wooldridge M, Ciancarini P. Agent-Oriented Software Engineering: The State of the Art. In: First Int. Workshop on Agent-Oriented Software Engineering, LNAI 1957, 2000. 1~28
- 3 Tanenbaum A S, Van Steen M. Distributed Systems Principles and Paradigms. Prentice Hall Inc, 2002. 57~66
- 4 Sturn O S. A Framework for Evaluating Agent-Oriented Methodologies. In: Int. Workshop On Agent-Oriented Information Systems, 2003
- 5 Dam K H, Winikoff M. Comparing Agent-Oriented Methodologies. In: Int. Workshop On Agent-Oriented Information Systems, 2003
- 6 Amor M, Fuentes L, Troya J M. A Component-Based Approach for Interoperability Across FIPA-Compliant Platforms. In: Cooperative Information Agents VII, LNAI 2782, 2003. 266~288
- 7 Cabri G, Leonardi L, Zambonelli F. BRAIN: a Framework for Flexible Role-based Interactions in Multi-agent Systems. In: The Conf. on Cooperative Information Systems, Catania, Italy, November 2003. <http://www.w3.org>
- 8 Murata M, Lee D, Mani M. Taxonomy of XML Schema Languages using Formal Language Theory. In: Extreme Markup Languages, Montreal, Canada, Aug. 2001
- 9 W3C. XML Schema Working Group. <http://www.w3.org/XML/Schema.html>
- 10 Document Object Model (DOM) Technical Reports. <http://www.w3.org>
- 11 UDDI Version 3 specification. www.uddi.org
- 12 Web Services Description Language (WSDL) version 1.1. W3C Note, Mar. 15, 2001. <http://www.w3.org/TR/wsdl>
- 13 SOAP Version 1.2 Recommendation documents. <http://www.w3.org/TR/soap>
- 14 World Wide Consortium's Technical Reports. Boston. 2003; <http://www.w3.org/TR/>
- 15 <http://www.ibiblio.org/bosak/xml/eg/>