

# 多 QoS 约束的多播路由协议\*

李腊元<sup>+</sup>, 李春林

(武汉理工大学 计算机系,湖北 武汉 430063)

## A Multicast Routing Protocol with Multiple QoS Constraints

LI La-Yuan<sup>+</sup>, LI Chun-Lin

(Department of Computer Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-27-86534381, Fax: +86-27-86538436, E-mail: jwtu@public.wh.hb.cn, <http://www.whut.edu.cn>

Received 2003-03-31; Accepted 2003-09-18

Li LY, Li CL. A multicast routing protocol with multiple QoS constraints. *Journal of Software*, 2004,15(2): 286~291.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/286.htm>

**Abstract:** Multicast routing is the process for establishing a tree which is rooted from the source node and contains all the multicast destinations. A multicast routing tree with multiple QoS constraints is the one in which the delay, delay jitter, packet loss and bandwidth should satisfy the pre-specified bounds. This paper discusses the multicast routing problem with multiple QoS constraints, deals with the delay, delay jitter, bandwidth and packet loss metrics, and describes a network model for investigating the routing problem. It presents a multicast routing protocol with multiple QoS constraints (MRPMQ). The MRPMQ attempts to significantly reduce the overhead for constructing a multicast tree with multiple QoS constraints. In the MPRMQ, a multicast group member can join or leave a multicast session dynamically without the disruption of the multicast tree. In this paper, the proof of correctness and the complexity analysis of the MRPMQ are also given. Simulation results show that the MRPMQ is an effective approach to multicast routing decision with multiple QoS constraints.

**Key words:** multicast routing; protocol; multiple QoS constraints; QoS routing; NP-complete problem

**摘要:** 随着高性能网络、移动网络及 Internet 的不断发展,具有 QoS 约束的多播路由技术已成为网络及分布式系统领域的一个重要研究课题.研讨了具有多 QoS 约束的多播路由问题,其中主要包含延迟、延迟抖动、带宽、代价等 QoS 约束.描述了一种适应于研究 QoS 多播路由的网络模型,提出了一种具有多 QoS 约束的多播路由协议(multicast routing protocol with multiple QoS,简称 MRPMQ).MRPMQ 试图有效减少生成多 QoS 约束的多播树的开销.在 MRPMQ 中,一个多播组成员能够动态地加入/退出一个多播会话,且不干扰现有的多播树.给出了该协议的正确性证明和复杂性分析.仿真实验结果表明,MRPMQ 为多 QoS 约束多播路由提供了一种新的有效途径.

**关键词:** 多播路由;协议;多 QoS 约束;QoS 路由;NP 完全问题

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60172035, 90304018 (国家自然科学基金)

作者简介: 李腊元(1946—),男,湖北新洲人,教授,博士生导师,主要研究领域为高性能网络技术,通信协议;李春林(1974—),女,博士,讲师,主要研究领域为分布式网络,高性能计算.

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

随着 Internet、移动网络、全光网络等高性能网络技术的不断发展、演进及其应用领域的日益扩大,基于服务质量(QoS)多播路由协议的设计理论与方法的研究,已成为网络领域中的一类重要课题<sup>[1-4]</sup>。传统 Internet 路由协议只提供尽力服务,不能提供 QoS 保证。研究表明,两个约束及多个特征值的混合寻径问题都属于 NP-完全问题。

V. Kompella 等人曾提出了一种基于最小生成树的集中启发式算法。此外, Q. Zhu 等人也曾建议了一种有界最短多播算法(BSMA)<sup>[1]</sup>。在分布式算法方面, V. Kompella 等人曾建议过一类基于约束 Steiner 树的分布式启发算法<sup>[1,2]</sup>; X. Jia<sup>[1]</sup>也建议了一种基于贪婪 Steiner 树的分布式启发式算法。上述这些算法(X. Jia 的算法除外)均假设链路状态信息是可用的(如每条链路的带宽、延迟和代价等信息)。在 X. Jia 的算法中,单播路由协议提供了一个节点到所有其他节点的最短延迟路径。这些算法基本上只适用于域内多播,且只考虑了延迟约束(除带宽外)。研究表明,将它们扩展到多 QoS 约束(延迟、延迟抖动、带宽、包丢失率等)的场合是比较困难的。近年来,加拿大多伦多大学提出了一种 QoS MIC 的路由协议<sup>[2]</sup>。该协议由于仍属于 PIM-SM 和 CBT 的变种,因此也存在稀疏型协议固有的缺陷。Aiguo Fei 等人提出了 RIMQoS<sup>[3]</sup>,它提供了只满足延迟和延迟抖动两种约束的多播树示例。本文研究了多 QoS 约束多播路由问题,提出了一种适应于多 QoS 约束的多播路由协议(multicast routing protocol with multiple QoS,简称 MRPMQ)。在 MRPMQ 中,一个多播组成员能够动态地加入或退出一个多播会晤,而不至于扰现有的多播树。该协议还可以有效地减少生成多播树的开销。

## 1 网络模型

就多播路由而言,一个网络可表示成一个加权图  $G=(V,E)$ ,其中  $V$  表示节点集, $E$  表示连接节点的通信链路集。 $|V|$ 和 $|E|$ 分别表示该网络中的节点数和链路数。为不失一般性,只考虑这样的一类图,即在该类网络中,一对节点之间最多只有一条链路,链路旁的参数可用于描述该链路当前的状态。就本文讨论的 QoS 多播路由问题而言,链路或边的特征可用一个 4 元组 $(D,J,B,C)$ 来表征,其中  $D$  表示延迟约束, $J$  表示延迟抖动约束, $B$  表示带宽约束, $C$  表示代价约束。设  $p(s,t)$  表示从源节点  $s$  至端节点  $t$  的路径, $T(s,M)$  表示多播树。 $s \in V$  为一棵多播树的源节点, $M \subseteq \{V-\{s\}\}$  为该多播树的端节点或叶节点集。设  $R$  为正实数集, $R'$  为非负实数集。对于任意链路  $e \in E$ ,可定义某些 QoS 特征值(metrics):延迟函数  $delay(e):E \rightarrow R$ ,代价函数  $cost(e):E \rightarrow R$ ,带宽函数  $bandwidth(e):E \rightarrow R$ ,延迟抖动函数  $delay-jitter(e):E \rightarrow R'$ 。类似地,对于任一节点  $n \in V$ ,也可定义某些 QoS 特征值(metrics):延迟函数  $delay(n):V \rightarrow R$ ,代价函数  $cost(n):V \rightarrow R$ ,延迟抖动函数  $delay-jitter(n):E \rightarrow R'$ ,信包丢失函数  $packet\ loss(n):V \rightarrow R'$ 。由于节点和链路具有等价性,在下面的讨论中只考虑链路或边的 QoS 约束。

## 2 MRPMQ

在 MRPMQ 中,路由器或网络节点需要保存一个特定的路由表  $R(G,s,in,out)$ ,其中  $R.G$  表示组地址, $R.s$  表示源地址, $R.in$  表示输入网络接口, $R.out$  则表示输出网络接口。MRPMQ 的主要控制报文集可定义如下:

- (1) JOINreq——请求加入报文,它由希望加入多播组( $G$ )的新成员发送给源节点。
- (2) JOINack——接受确认报文,它由源节点或其他接受加入请求的节点回送给请求加入的新节点。
- (3) JOINnak——拒绝接受报文,它由源节点或其他拒绝接受加入请求的节点回送给请求加入的新节点。
- (4) JOINpend——挂起报文。如果正搜索的路径不满足延迟约束  $D$ ,且下一个节点( $t_j^*$ )不是节点  $t_j$  直接相邻的上游节点,则  $t_j$  将添加一个挂起(pending)信息至路由表,并将  $t_j^*$  标注为一个可能的上游节点。

在 MRPMQ 中,多播组成员可动态地加入/退出一个多播会晤。这些成员的加入/退出不应影响现存的多播树造成干扰,且当它们加入/退出后,多播树仍能满足所有树上接收节点的 QoS 约束,并保持它是最优或近优的。若每当一个成员加入/退出,多播树要从源节点来重构,则树上节点可能不会同时交换至新的多播树,且来自原多播树的信包可能会因丢失而必须重传。为此,需要采用使多播树渐近变化的方法,以实现多播树状态的无缝迁

移.当一个接收节点退出一个多播会晤时,若该接收节点是多播树的一个叶节点,它将向上游发送一个退出报文.该退出报文将沿着向上游方向的树枝传直直至树叉节点(该节点具有多个下游接口和/或在其连接的子网上有多个接收节点).当接收到该退出报文后,中间节点将释放网络资源,多播树的其余部分将保持不变.另一方面,若该退出接收节点不是叶节点,则可以简单地将输入报文输出至下游接口,从而不会影响正在进行的多播会晤.

当某接收节点欲加入一个多播会晤时,它将发送一个加入请求报文 JOINreq 及延迟、延迟抖动、带宽、代价等信息给该会晤的源节点.当一节点通过 ICMP 协议从其他节点接收到 JOINreq 以后,若该节点不是树上节点,它将计算从源节点  $s$  到它本身的路径.如果一个加入请求被接受,则 JOINack 报文将沿着下游方向回送给该新成员;否则,若加入请求被拒绝,则 JOINnak 报文将回送给该请求节点.在 MRPMQ 中,源节点每隔 10 秒向所有的接收节点发送 QoS 试探报文,以使 QoS 约束信息能被该报文携带,这可使相关节点及时更新当前的 QoS 约束要求.此外,MRPMQ 还假设每个接收节点均知晓本域内多播组中所有链路的状态信息及多播组地址.

下面通过实例说明 MRPMQ 是如何以分布式方式工作和生成多播树的.图 1 是本实例的一个网络图.节点  $t_0$  是本多播组的源节点. $t_4, t_6, t_{14}, t_{19}$  和  $t_{24}$  为欲加入多播组的新节点.在如图 1 所示的例子中,假设  $D=20, J=30, B=40$ . 当  $t_4$  欲加入本多播组时,它将根据多个 QoS 约束来计算路径,其中  $(t_0 \rightarrow t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_3 \rightarrow t_4), (t_0 \rightarrow t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_3 \rightarrow t_8 \rightarrow t_4)$  和  $(t_0 \rightarrow t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_7 \rightarrow t_8 \rightarrow t_4), (t_0 \rightarrow t_5 \rightarrow t_6 \rightarrow t_7 \rightarrow t_8 \rightarrow t_4)$  和  $(t_0 \rightarrow t_1 \rightarrow t_6 \rightarrow t_7 \rightarrow t_8 \rightarrow t_4)$  满足延迟约束、延迟抖动约束和带宽约束.其中  $(t_0 \rightarrow t_1 \rightarrow t_6 \rightarrow t_7 \rightarrow t_8 \rightarrow t_4)$  具有最小的低价,因此它应作为  $t_4$  的加入路径.图 2(a)中的粗实线表示  $t_4$  已加入多播组时的多播树.类似地,可获得  $t_9, t_{14}$  加入多播组后的多播树.图 2(b)中的粗实线表示  $t_9$  加入多播组后的多播树.

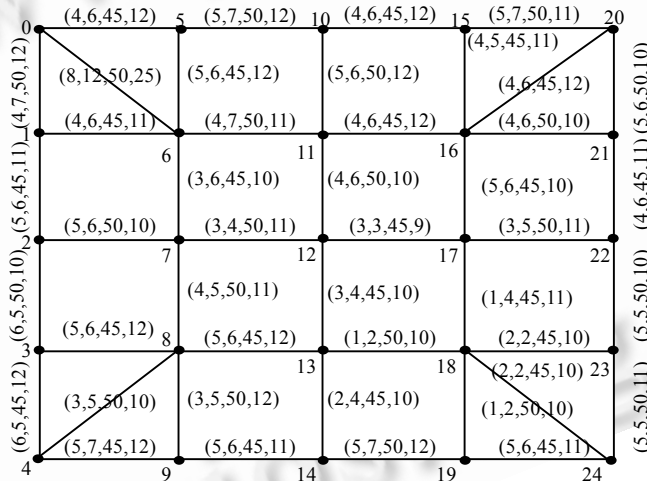


Fig.1 An example of network

图 1 网络图的一个例子

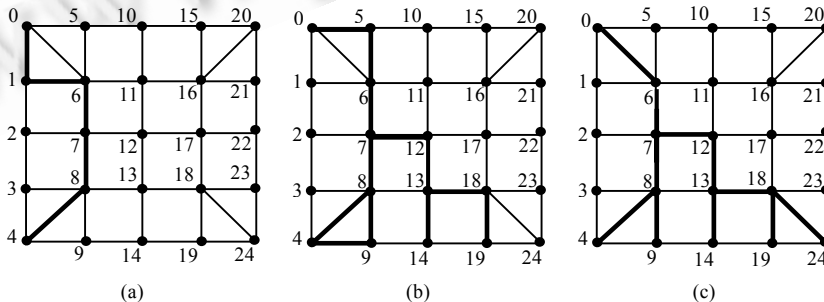


Fig.2 The process for generating multicast tree

图 2 多播树生成过程

当  $t_{24}$  欲加入多播组时,它将按类似的方法计算加入路径.当  $t_{18}$  接收到  $t_{24}$  发送来的 JOINreq 报文时它将发现,现存的路径( $t_0 \rightarrow t_5 \rightarrow t_6 \rightarrow t_7 \rightarrow t_{12} \rightarrow t_{13} \rightarrow t_{18}$ )对于新节点  $t_{24}$  而言不满足延迟约束,而新路径( $t_0 \rightarrow t_5 \rightarrow t_6 \rightarrow t_7 \rightarrow t_{12} \rightarrow t_{17} \rightarrow t_{18}$ )又不满足延迟抖动的约束.此时, $t_{18}$  将计算新的可行路径,考虑延迟约束则可由下式给出:

$$\begin{aligned} d(p(s, j)) &= \min[d(s, *), D - d(j, i)] \\ &= \min[(d(0, 5) + d(5, 6) + d(6, 7) + d(7, 12) + d(12, 13) + d(13, 18)), D - d(18, 24)] \\ &= \min[19, 18] \\ &= 18. \end{aligned}$$

同时考虑延迟抖动约束,则可由下式给出:

$$\begin{aligned} dj(p(s, j)) &= \min[dj(s, *), J - dj(j, i)] \\ &= \min[(dj(0, 5) + dj(5, 6) + dj(6, 7) + dj(7, 12) + dj(12, 13) + dj(13, 18)), J - dj(18, 24)] \\ &= \min[28, 28] \\ &= 28. \end{aligned}$$

因此,该新的可行路径应是( $t_0 \rightarrow t_6 \rightarrow t_7 \rightarrow t_{12} \rightarrow t_{13} \rightarrow t_{18}$ ).与此同时, $t_6$  将再次从与前父节点  $t_5$  所连接的链路中剪掉,而与新父节点  $t_0$  相连接,最终生成的多播树如图 2(c)中的粗实线所示.

### 3 MRPMQ 正确性证明及复杂性分析

#### 3.1 正确性证明

**定理 1.** 若从某新成员至  $T(s, M)$  的一条路径有足够多的资源满足 QoS 约束且具有最小代价,那么只需要搜索一条路径.

证明:搜索多条路径的必要条件是单条路径不满足 QoS 约束,如 $(d(p(s, j)) \neq \min[d(s, *), D - d(j, i)]) \wedge (dj(p(s, j)) \neq \min[dj(s, *), J - dj(j, i)])$ .然而,如果该路径上的每条链路和节点均有充足的网络资源,就不会有正在传递 JOINreq 的节点进入搜索多条路径的状态,因此该定理得证.  $\square$

**引理 1.** 无论何时,在 MRPMQ 的路由过程中,所有被搜索的路径都会生成一个多播树  $T(s, M)$  结构.

证明:被搜索的路径将由各节点中的路由表来标注.在 MRPMQ 中,任一路由表都只有一个输出(out)接口,且有一个或多个输入(in)接口.因此,这些节点将生成一个搜索树结构,此树即为多播树  $T(s, M)$ .

**定理 2.** MRPMQ 搜索的可行路径应是无循环的(loop-free).

证明:本定理可直接由上述引理 1 得证.  $\square$

**引理 2.** 如果未搜索到一条可行的路径,MRPMQ 就终止,那么  $T(s, M)$  之外的节点可能处于初始状态或故障状态.

证明:MRPMQ 未搜索到可行的路径就终止的情况只有当新成员的 JOINreq 被拒绝时才会发生,亦即系统进入了故障状态.由于新成员一般是该搜索树的叶节点,当系统处于故障状态时,该搜索树上的所有节点也必定会进入故障状态.与此同时,树外的节点将会保留在初始状态.  $\square$

#### 3.2 复杂性分析

QoS 多播路由协议的复杂性可根据生成多播树的计算复杂性和所需要的报文数来进行分析,如果 QoS 特征值是延迟和带宽,则其复杂度为  $O(|V| \times |E|)$ ,其中  $|V|$  为网络节点数, $|E|$  为网络的链路数.对于大多数网络而言, $|E| = O(|V|)$ ,因此,该复杂度可简记为  $O(|V|^2)$ .对于一个具有  $|M|$  个成员的多播组而言,其计算开销为  $O(|V|^2 |M|)$ .研究表明,CSPT 和 BSMA 的计算复杂度分别为  $O(|E| \log |V|)$  和  $O(|V|^3 \log |V|)$ .MRPMQ 的计算复杂度为  $O(|V|^2 |M|)$ .在报文交换方面,MRPMQ 主要有两种报文,即 JOINreq 和 JOINack 或 JOINnak,这意味着具有  $|M|$  个成员的多播组将涉及  $2|M|$  个报文.一份 JOINreq 报文将经历  $K$  步跳跃,直到接受/拒绝本次请求的节点为止,因此,对于加入  $|M|$  个成员的报文处理开销应是  $K \cdot 2|M|$ ,其报文处理比 X. Jia 算法、QoSMIC 等要简单<sup>[1,2]</sup>.

### 4 仿真

为了进一步验证 MRPMQ 的有效性和可用性,我们将 MRPMQ,CSPT,BSMA 和 KMB 进行了仿真实验研究.实验中的网络图由 Waxman 随机图模型生成<sup>[1,2]</sup>.在此随机图中,边的概率为

$$P_e(u,v) = \beta \exp\left(-\frac{d(u,v)}{\alpha L}\right).$$

其中  $d(u,v)$ 表示节点  $u$  至节点  $v$  的几何距离, $L$  表示两节点间的最大距离,参数  $\alpha$ 可用来控制随机图中短边和长边呈现的数量,参数  $\beta$ 则用来控制随机图的平均度.网络代价可用仿真运行数的平均值来度量.在每个仿真点,仿真运行 80 次,每次多播组  $G$  的节点可从网络图中随机抽取,网络代价主要针对延迟界限  $D$  和多播组规模两个参数来进行仿真.为了模拟实际情况,多播组规模总是少于全部节点的 20%,这是因为运行在广域网中的多播应用,如视频会议系统、远程学习、协同编辑系统等,大都只包含整个网络中的少部分节点.图 3 表示网络代价随多播组规模增大的变化曲线.在该仿真实验中,网络节点数被设为 300, $D=d_{max}+3/8d_{max}$ .由图 3 可以看出,当多播组规模增大时,MRPMQ,BSMA 和 KMB 所产生的代价比 CSPT 所产生的代价低得多,MRPMQ 位于 BSMA 和 KMB 之间,它可以生成与 BSMA 和 KMB 代价差不多的多播树.

图 4 表示网络代价随延迟界限  $D$  增加的变化曲线.在该仿真实验中,网络节点数被固定为 300 个节点,多播组规模为 20.我们定义  $D$  的最小有效值为  $d_{max}=\max\{d_u\}$ 对于任何  $u \in G; d_u$  是从  $s$  至  $u$  的最短路径上的延迟}, $D$  起始于  $d_{max}$ .由于每次仿真实验中的  $G$  不同,因而  $d_{max}$  也是不同的,因此  $x$  轴上的  $D$  的值是平均值.从图 4 可以看出,CSPT 的网络代价在该图的顶部,且几乎不随  $D$  的增加而变化.这是因为其最短路径的生成不取决于  $D$ ,在其他 3 种算法及协议中,本文所建议的 MRPMQ 具有最低的代价.从图 4 还可以看出,MRPMQ,BSMA 和 KMB 的代价均随  $D$  的增加而减小.从图 3 和图 4 可知,MRPMQ,BSMA 和 KMB 可生成代价相仿的多播树.然而与 BSMA 和 KMB 相比较,本文提出的 MRPMQ 具有全分布方式、允许多播树渐近生成、可动态地实现新成员加入多播树等优点.此外,MRPMQ 所需要的计算代价以及与其他节点的协同操作比其他算法或协议要少得多.

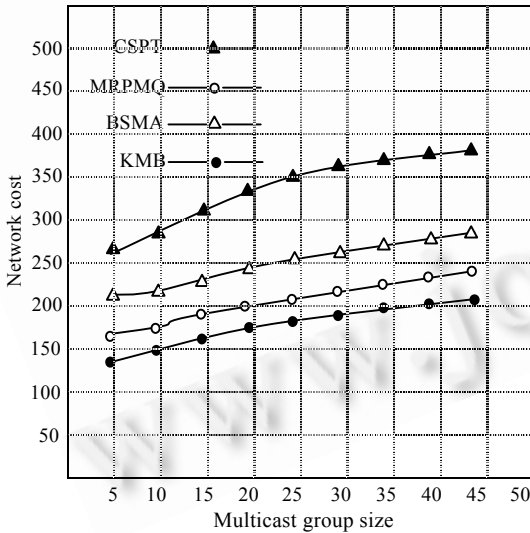


Fig.3 Network cost vs. multicast group size  
图 3 网络代价 vs.多播组规模

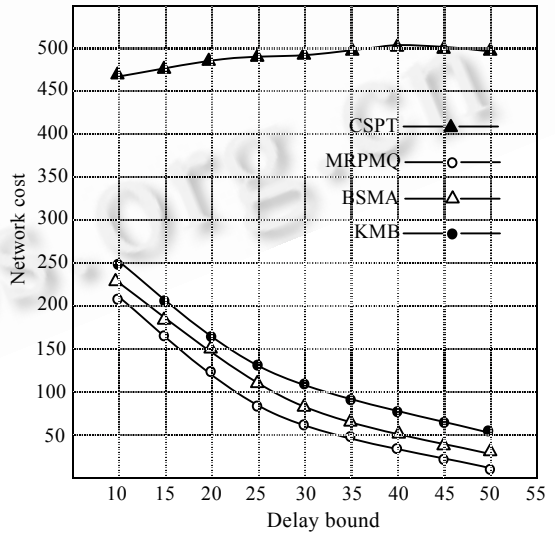


Fig.4 Network cost vs. delay bound  
图 4 网络代价 vs.延迟界限

### 5 结论

本文主要研讨了具有 QoS 约束的多播路由问题,主要涉及延迟、延迟抖动、带宽和信包丢失率等特征值.文中描述了适应于研究 QoS 多播路由的网络模型,提出了一种具有多 QoS 约束的多播路由协议 MRPMQ.MRPMQ 能够有效地减少生成多播树的开销.在 MRPMQ 中,一个多播组成员能够动态地加入或退出

一个多播会话,且不会干扰现有的多播树.该协议可以通过分布式方式搜索到多条可行的路径树枝,且能够选择最好的一条将新成员连入多播树.文中已给出该协议的正确性证明和复杂性分析.仿真实验结果表明,MRPMQ 为多 QoS 约束多播路由技术提供了一种新的有效途径.

## References:

- [1] Jia X. A distributed algorithm of delay-bounded multicast routing for multimedia applications in wide area networks. IEEE/ACM Trans. on Networking, 1998,6(6):828~837.
- [2] Yan SQ, Faloutsos M, Banerjea A. QoS-Aware multicast routing for the Internet: The design and evaluation of QoS MIC. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2002,10(1):54~56.
- [3] Fei AG, Gerla M. Receiver-Initiated multicasting with QoS constraints. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE CS Press, 2000. 62~69.
- [4] Li LY, Li CL. Computer Networking. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. 287~292 (in Chinese)

## 附中文参考文献:

- [4] 李腊元,李春林.计算机网络技术.北京:国防工业出版社,2001.287~292.

\*\*\*\*\*

## 第 9 届中国机器学习会议(CCML 2004)

### 征 文 通 知

第 9 届中国机器学习会议(CCML 2004)由中国人工智能学会机器学习专业委员会和中国计算机学会模式识别与人工智能专业委员会联合主办,复旦大学和上海海运学院联合承办,将于 2004 年 10 月 22 日~24 日在上海召开.该系列会议每两年举行一次,现已成为国内机器学习界最主要的学术活动之一.此次会议将为机器学习及相关研究领域的学者交流最新研究成果、进行广泛的学术讨论提供便利,并将邀请国内机器学习领域的著名学者做精彩报告.欢迎参加会议并踊跃投稿.

#### 一. 征稿范围(不仅限于如下主题)

机器学习的新理论、新技术与新应用,人类学习的计算模型,计算学习理论,监督学习,非监督学习,强化学习,多示例学习,半监督学习,集成学习,多策略学习,基于案例的推理,增量学习与在线学习,对复杂结构数据的学习,增强学习系统可理解性,数据挖掘与知识发现,神经网络,神经网络集成,进化计算,人工生命,模糊集与粗糙集,多 Agent 系统中的学习,模式识别,信息检索,生物信息学,语音、图像处理与理解,自然语言理解.

#### 二. 投稿要求

- 论文必须未公开发表过,一般不超过 6000 字;中、英文稿均接受.
- 论文应包括题目、作者姓名、作者单位、摘要、关键字、正文和参考文献;另附作者地址、邮政编码、电话或传真及 E-mail 地址.
- 参选优秀学生论文的稿件请注明(须由在校博/硕士生或本科生)为第一作者.
- 会议鼓励电子投稿,也可邮政投稿:

若电子投稿,请将 Word, PS 或 PD 格式的文件发送到:sgzhou@fudan.edu.cn(超过 1M 的文件请先压缩;请注意接收会议组织机构发出的收稿确认电子邮件);

若邮政投稿,请将 3 份打印稿于截稿日期前寄达:(200433)上海市邯郸路 220 号复旦大学 计算机科学与工程系 周水庚.

#### 三. 论文出版

所有录用论文将在《复旦大学学报》(自然科学版)正刊发表.会后将根据论文及报告质量评选出优秀论文,其中一部分在国际刊物 Asian Journal of Information Technology 的 Special Issue of Selected Papers of CCML 2004 发表(中文稿需译为英文,所有选中的稿件都需进行必要的扩展),另一部分在《模式识别与人工智能》正刊发表.会议还将评出 3 篇优秀学生论文,颁发证书并给予奖励.

#### 四. 重要日期

全文投稿:2004 年 3 月 10 日      录用通知:2004 年 5 月 10 日      修改定稿:2004 年 7 月 10 日

五. 网址: <http://www.cs.fudan.edu.cn/ccml2004>