

一种高效可靠的移动 Agent 间通信机制*

周竞扬⁺, 陈韬略, 陈道蓄, 吕建

(南京大学 计算机软件新技术国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

A Reliable and Efficient Communication Mechanism for Mobile Agents

ZHOU Jing-Yang⁺, CHEN Tao-Lue, CHEN Dao-Xu, LÜ Jian

(National Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

+ Corresponding author: Phn: 86-25-3592339, Fax: 86-25-3700710, E-mail: Jingyang@nju.edu.cn

<http://cs.nju.edu.cn>

Received 2002-11-20; Accepted 2003-04-01

Zhou JY, Chen TL, Chen DX, Lü J. A reliable and efficient communication mechanism for mobile Agents. *Journal of Software*, 2003,14(8):1470~1480.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1470.htm>

Abstract: Mobile Agent is thought to be the popular computing model for the next-generation distributed system. Collaboration and communication are essential for mobile Agent systems. However, there still exists some deficiency in the current communication mechanism for mobile Agents especially when communication reliability and efficiency are emphasized. In this paper, an efficiently message forwarding scheme (EMFS) for mobile Agents is introduced. This scheme adopts a novel addressing mechanism, which combines the pointer forwarding and central addressing approaches. At the same time, the problem of communication failure can be settled by checking approach with the aid of synchronization. Thus, the performance of the whole communication system can be greatly improved. Meanwhile, besides discussing of setting main parameters of the protocol, the performance of EMFS is analyzed in theory and simulation data is also provided, which illuminates the correctness and the efficiency of EMFS.

Key words: mobile computing; mobile Agent; Agent communication; message passing

摘要: 作为未来分布式系统的一种主流计算模式,移动 Agent 技术具有广阔的研究前景.协作与通信是移动 Agent 系统必不可少的组成部分.然而由于 Agent 的移动性和自主性,现有研究工作所提出的移动 Agent 间通信机制在可靠性尤其是有效性上存在着一定的不足,如不能够在底层理想地解决通信失效等问题.针对上述问题,设计了一种具有高度自适应性的消息传递机制——EMFS(efficiently message forwarding scheme).该协议在 Agent 寻址上采取指针寻址和集中式寻址相结合的方式;而对于通信失效的解决则采用了以检测法为主,辅以同步的方法,从而能够在彻底解决通信失效的基础上,较大地提高整个通信系统的性能.此外还对协议的主要参数进行了讨论,

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.69273034 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant Nos.2001AA113050,2001AA113110 (国家高技术研究发展计划(863)); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2002CB312002 (国家重点基础研究发展规划(973))

第一作者简介: 周竞扬(1979—),男,江苏泰州人,硕士生,主要研究领域为分布式并行计算,移动 Agent 技术.

从理论上分析比较了 EMFS 的性能,并给出了模拟实验数据,说明了协议的正确性和高效性。

关键词: 移动计算;移动 Agent; Agent 通信;消息传递

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

作为 Internet 和移动计算应用与发展的催生物,移动 Agent 技术被普遍期望在未来的分布计算环境中扮演重要的角色.虽然移动 Agent 技术的一个优势在于变远程交互为本地交互,然而由于各方面的原因^[1],远程通信仍然是移动 Agent 平台的一项必不可少的基础设施,因而在移动 Agent 系统的构建中具有十分重要的意义.并且由于 Agent 的自主性和移动性,移动 Agent 间的通信机制在很大程度上区别于一般的 Agent 间通信模式,需要深入的研究与讨论.

一般而言,移动 Agent 系统通过消息交换以实现 Agent 间通信^[2],但在移动 Agent 的通信环境中,由于 Agent 的自主移动特性,常会导致消息被发送到某一网络节点但接收者已经离开而无法收到该消息.这种因为通信主体物理位置发生变化而造成的通信不正常现象,我们称为移动通信失效^[3].值得注意的是,在 Agent 移动非常快的情况下,消息可能追随目标 Agent 在网络各节点间游荡却永远无法送达而产生消息追逐现象^[4].通信失效和消息追逐都与网络和节点故障无关,是纯粹由 Agent 的移动造成的,它们使得协作中的 Agent 不能及时得到协同信息,从而导致协作的失败甚至造成整个系统的崩溃,是移动 Agent 系统的致命缺陷.

当前研究对上述问题所提出的解决方案在可靠性和有效性上都存在一定的不足,而且对网络环境的适应性较弱,不能很好地解决 Agent 移动所带来的特殊通信问题.为此,本文的研究集中于针对移动 Agent 间的消息传输层,提出了一种新的移动 Agent 间的消息传递机制——EMFS(efficiently message forwarding scheme),能够在保证通信可靠性的同时,有效地解决 Agent 移动所带来的通信失效以及消息追逐等问题.

目前针对移动 Agent 通信机制的研究多以不考虑网络传输故障为前提,这里我们也假设在物理网络上传输的数据总是能够在有限时间内从信道的源端到达目的端,并且这个信道是先进先出的通道(FIFO channel).

本文第 1 节对现有的移动 Agent 间通信机制进行介绍和分析.第 2 节提出了一种有效的基于消息传递的移动 Agent 通信机制——EMFS,并对其做了优化.模拟实验的结果和系统性能的分析将在第 3 节给出.第 4 节是对全文的总结,并展望了进一步的工作方向.

1 相关问题分析

1.1 已有研究

文献[5]提出了“Session-Oriented Communication”的想法,采取“请求-应答”方式,在一对互相知道对方地址的 Agent 之间通信.Mole 系统^[6]采纳了这种面向会话的通信思想,同时采用类似 DNS 的寻址方式,并对通信失效问题提出了几种可能的处理方法:将失效消息丢弃,丢弃的同时回送错误信息以及将失效消息就地保存,待目标 Agent 返回时再交付.Mole 系统没有解决通信失效问题,没有提供一个可靠的通信协议.

Epidaure^[7]通过 Agent 移动后留下的“路标”(signpost)在节点间转发消息,并且在 Agent 移动时使用了缓存机制,保证 Agent 获取在移动期间发送给它且被两端缓存的消息.Epidaure 系统中的消息虽然会沿着 Agent 移动的轨迹发往目标 Agent,但它并不能解决消息追逐问题,因而也不是一个可靠系统.

文献[8]所设计的 MDP(message delivery protocol)将系统中的节点按区域组织成层次型树状结构,这样从根结点到目标 Agent 所在节点有一条指向该 Agent 的惟一路径,沿该路径可以高效地移动 Agent 和发送消息.层次型结构的缺点在于根节点负载大,不易应用到 Internet 中.更重要的是,MDP 也不能解决消息追逐问题.

Mogent^[9]系统为 Agent 引入了“状态”的概念.Mogent 中每个节点除了有一个负责通信细节的 Communicator 以外,还设计了一个 Home,这两个模块分别纪录信号量“Agent 状态”和“在途信件数”.Mogent 通过控制这两个信号量,确保了消息发送者仅向处于静止状态的 Agent 发送消息,并且 Agent 只有在没有消息发送给它的情况下才能移动.Mogent 系统虽然解决了通信失效问题,但却需要限制 Agent 的移动以及消息的发送,影响了 Agent 的自主性和移动性.

文献[10]对 Agent 的移动不加任何限制,它根据“网络快照”的思想,为每个节点的入度通道设计了多种状态,通过在整个系统内广播要发送的消息并配合以通道的状态控制,可以确保目的 Agent 收到消息.但由于使用广播而导致了大量通信开销,这种通信机制不适合 Internet 等拥有大量节点的 Agent 平台.

文献[4]提出的 ARP 协议(adaptive and reliable protocol)为每一个 Agent 分配一个“邮箱”,并且邮箱可以与 Agent 分处于不同节点.所有消息都被送到接收者对应的邮箱中存储,然后采用 pull 的方法最终送达目标 Agent.但在 pull 方式下,Agent 每次收信都要通知信箱,且设定收信频率也是个问题:频率过低则消息不能及时到达目标 Agent,频率过高就会引起过多“空收信”的情况.另外,邮箱移动时也会带来较大的额外通信.同样,采用邮箱形式的 JATLite^[11]系统也存在着类似问题.

1.2 方案分析

一个完整的移动 Agent 通信协议至少要包括 Agent 寻址和消息传送两大主要部分.对于移动对象的透明寻址,一般有 4 种方式^[1,2]:广播/组播寻址、层次式寻址、集中式寻址和转发指针寻址.另外,我们认为通信失效的解决方法主要分为 3 类:鸵鸟法、预防法和检测法,其中鸵鸟法忽略问题的存在,不采取任何措施;预防法采用同步通信的方法从结构上避免通信失效的发生;而检测法的目的是通信失效发生后再采取其他方法将消息传递给目标 Agent.结合这两方面的考虑,可以描绘出如图 1 所示的移动 Agent 间通信协议的二维设计空间.

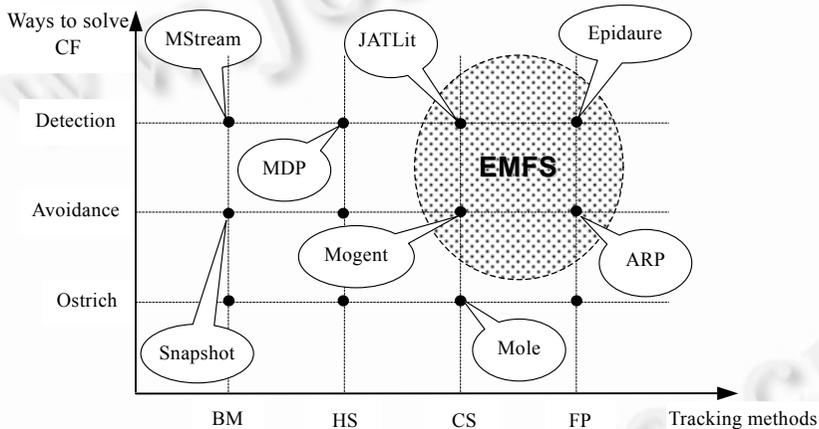


Fig.1 Design space of communication protocol for MA

图 1 移动 Agent 通信协议的二维设计空间

鸵鸟法不能为移动 Agent 系统提供一种可靠的通信机制;预防法虽不会导致通信失效现象,但是控制复杂,效率低下;检测法很好地符合了移动 Agent 的特性,但又面临消息追逐的难题.综合这些考虑并权衡各种寻址方式的利弊,我们针对消息传递这一层次提出了一种可靠且有效的移动 Agent 间的通信机制——EMFS,在 Agent 寻址上采取指针寻址和集中式寻址相结合的方式,对于通信失效的解决则采用了检测法作为通信的主体,但在处理消息追逐现象时又采取了同步的方法(如图 1 阴影部分所示).这样既发挥了指针寻址和检测法的特长,又融入集中式寻址和预防法的优点以克服前两者的不足.另外,EMFS 的参数动态可调特性使得通信机制可以随着网络环境的变化而不断自我调整以赢得最佳系统性能,从而能很好地在实际中应用于移动 Agent 系统.

2 EMFS:一种有效的通信模式

移动 Agent 平台可以描述为整个移动 Agent 系统是一个“Mobile Agent Space”,而各个节点被称为“Place”,每个 Place 上有 Home 和 Communicator 模块,多个 Place 通过网络连接组成了 Space.Agent 可在 Place 之间根据任务需要自主移动,并在某一个 Place 之上停留运算.Agent 和消息的命名和编号机制另请见文献[10].

任何对 Agent 旅行计划和移动范围以及网络结构的预知限制都是不合理的.所以在设计 EMFS 的时候,除了本文一开始的假设以外,不再对系统有其他额外的要求,而且对于 FIFO 通道的网络延迟也只能肯定是一个非

瞬时的有限时间.下文将对 EMFS 协议进行详细的介绍.

2.1 通信机制

2.1.1 主要数据结构

在我们的系统中,Home 和 Communicator 都必须维护一定的信息以辅助和控制消息的传递.Home 模块负责登记在本节点上“出生”的 Agent 当前所在节点地址(location);而 Communicator 负责为在本节点活动的 Agent 提供一个通信接口,完成寻址与消息转发等功能.为此,Communicator 须纪录当前在本 Place 的所有 Agent 的名称以及已经离开的 Agent 的名称(name)、去向(link)和离开的时间(time).另外,消息 Message 中除了消息主体 (message body)外,还应该包括消息编号(No.)、目标 Agent 的名称(destination name)和已经被转发的次数(hop count).Home,Communicator 所维护的状态表和 Message 的数据结构如图 2 所示.

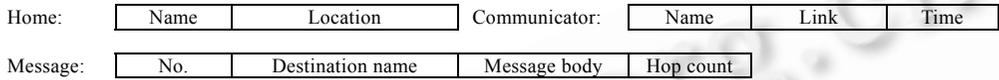


Fig.2 Main data structure

图 2 主要数据结构

2.1.2 通信过程与算法

消息的异步转发是 EMFS 机制的核心思想.为了实现消息在节点之间自由转发且不限 Agent 的移动,任意 Agent 必须在移动前后向出生地的 Home、当前和目的 Place 的 Communicator 登记.以 Agent β 从某一个 Place P_β 移动到 P'_β 为例: β 出发准备移动的同时,必须向其出生地 Home(设为 H_β)以及 P_β 的 Communicator(设为 C_β)登记旅行目的地 P'_β ;到达 P'_β 后, β 还要向 C'_β 登记.但整个过程是个异步的过程,即 β 发消息给 H_β 并不需要 H_β 应答,发控制消息与移动可以同时进行,并且只有向 Home 登记的消息需要真正在网络上传输.另外,登记旅行目的地是在 Agent 自主做出移动决定之后,所以向 Home 和 Communicator 登记的动作既没有限制更没有预知 Agent 的移动.

如图 3 所示,Agent 移动的过程描述如下,这里不考虑具体的 Agent 迁移细节.

- ① Agent 向本地 Communicator 发送迁移通知,同时开始迁移.
- ② C 修改自己的状态表信息,并转发迁移消息给 Agent 的 Home.
- ③ Agent 到达目的地后向新的 Communicator C' 登记.

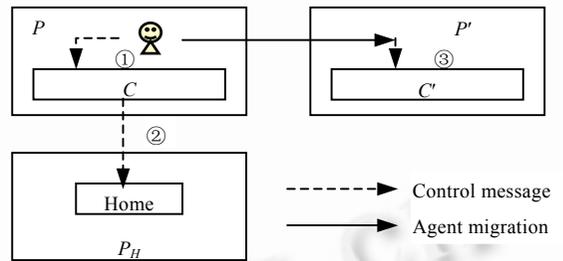


Fig.3 Migration of Agents

图 3 Agent 迁移过程示意

当 C 收到 Agent 的移动通知后,既要把状态表中对应项的“Link”字段从空值“Null”修改为 Agent 的移动目的地“ P' ”,还要将“Time”字段清零.Agent 的 Home 收到登记消息后,只要修改所维护的状态表中对应项的“Location”字段为 P' .当 Agent 移动到 P' 后, C' 检查状态表,若有关项已存在 (Agent 曾经到达过 P'),则将“Link”设为“Null”,并把“Time”置为一个被认为是无穷大的值;若没有此项,则新建之.

图 4 为消息发送过程示意图.我们把 Agent α 发送消息 M 给 β 的通信过程,主要分为 3 步:

- ① α 将 M 发送给所在 Place 的 Communicator.
- ② Communicator 按一定的算法处理消息.
- ③ β 最终获得消息.

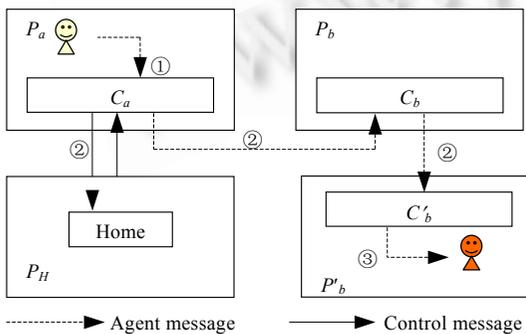


Fig.4. Message delivery procedure

图 4 消息传送过程示意

第②步中,Communicator 的处理算法可用算法 1 来描述.

算法 1. EMFS 算法

① Communicator 收到消息后,查所维护状态表中有关 β 的信息(这一步需要使用系统原语执行).

a) 表中有“Name”为 β 的项,且“Link”为空,转③.

b) 表中有“Name”为 β 的项,且“Link”不为空,令临时变量 Next=Link,转②.

c) 表中无“Name”为 β 的项,根据 M 中“Destination Name”的值和 Agent 命名规则,求出 β 的出生 Place 地址,向其上的 Home 查询得知 β 当前所在的 Place,赋值给 Next,并在状态表中添加有关 β 的项,转②.

② Communicator 将 M 转发给 Next 所指向 Place 的 Communicator,算法结束.

③ Communicator 将 M 发送给 β ,算法结束.

如果 α 和 β 处于同一个 Place,消息可以在节点内直接发送;如果不在同一节点,Communicator 可以根据状态表中的信息或者向 β 的 Home 查询得到 β 的地址后再发送.即使 Agent 在消息传递的过程中发生了移动,由于 Agent 从一个 Place 移走的同时留下了其迁移目的地,处理时可以很方便地从状态表中得知其去向,迅速地转发消息,而不需要每次都向 Home 查询其地址使得 Home 成为系统的潜在瓶颈.

然而,在 Communicator 上保留已离去 Agent 的“Link”信息过长时间会影响消息传递的效率.因为时间太长或 Agent 移动频繁,在一段时间内 Agent 已经移动了多个 Place,但是消息仍追随 Agent 移动的轨迹依次在各个节点间转发.所以,EMFS 定义了 Timeout(状态超时)参数 T_0 :Communicator 以一定时钟频率 T_F 扫描状态表,对“Location”不为空的项(表示对应 Agent 已从本节点移出)将其“Time”字段加 1,如果 Time 值达到了 Timeout(设为 T_0),则将对应项从表中删除.对于如何设定状态超时参数,第 2.2.1 节将做进一步讨论.

2.1.3 消息追逐的解决

虽然设置了 Timeout 参数,但是当 Agent 移动过于频繁时,消息每到达一处 Place,Agent 都已经离开.这样,消息不断追随目的 Agent 在 Space 中的各个 Place 之间转发却永远无法送达,从而出现了消息追逐问题.

由于纯粹的异步方式不可能解决消息追逐问题^[10],所以当系统中出现(或可能)出现消息追逐时,必须采用同步通信方式,强迫 Agent 停止移动,等待追逐它的消息送达后才能继续自主移动.为此,我们从两方面入手实现同步:追逐消息登记和 Agent 超速等待.所谓“追逐消息登记”是指当消息每次从一个 Communicator 转发给另一个 Communicator 时,消息的“Hop Count”字段值加 1(初始值为 0);当“Hop Count”的值等于一个预先给定阈值 C_0 (称之为“追逐判定参数”)时,便认为该消息处于“追逐状态”,而将此消息的编号提交给目标 Agent 出生节点的 Home 上的“追逐消息表”保存.算法 1 第②步依此修改为:

② Communicator 把 M 的“Hop Count”字段值加 1,如果“Hop Count”不等于 C_0 ,直接将 M 转发给 Next 所指向 Place 的 Communicator,否则发送一条控制消息给 β 的 Home,通知其 M 的标号后再转发 M ,算法结束.

另一方面,Agent 每到一个 Place 都要计算自己的移动速率 V :曾经到达过的 Place 的个数/(当前时间-出生时间)或者现在时刻以前的一段时间内到达的 Place 个数/时间跨度.当 V 超过给定的最高速率 V_0 时,Agent 与其 Home 建立连接,获得 Home 保存的追逐消息编号列表(Agent 收取后 Home 立即清空该表),然后 Agent 被限制在当前 Place,直到收到所有列表中包含的追逐消息后才能继续移动.这就是“Agent 超速等待”.

当 Agent 的速度比较低时,消息总能送达目标 Agent;而当 Agent 的速度太高而使得消息无法追上时,“Agent 超速等待”策略可以在理想的网络条件下保证消息送达.除此以外,我们又设定了 Agent 定期检测时间 T_S ,即 Agent 每移动 T_S 时间向 Home 获取追逐消息列表,然后等待这些消息的到达.这样,EMFS 进一步确保了消息的送达,而无论移动 Agent 系统中的网络传输延时发生怎样的无规则变化.

通过结合追逐消息登记以及 Agent 超速等待和定期检测,EMFS 解决了消息追逐问题,实现了 Agent 间的可靠通信.

2.2 EMFS参数分析

EMFS 机制的参数有 4 个: T_0 , C_0 , V_0 和 T_S ,这几个参数的设定,在很大程度上会影响到整个系统的性能,这里简单分析如下(下文 T_n 为网络节点间网络传输时间的期望值).

2.2.1 状态超时参数 T_0

根据消息产生节点 Communicator 对消息处理的不同,消息的发送可以被分为两种:一种是直接根据状态表中信息的向下一个 Place 转发(包括节点内通信的情况,对应 EMFS 算法的①a)和①b),出现概率为 p ;另一种是向 Home 查询后再转发(对应①c),概率为 $(1-p)$,此时假设经过 t_{h1} 时间后消息送达.对于第 1 种情况,如果消息经过有限步转发后送达目标 Agent,我们假设共耗时 t_{z1} ,概率为 q ;而如果消息转发到某一节点后,该节点状态表中有关目标 Agent 的状态消息由于超时而不再存在,此时必须向 Home 查询后再转发,此时该过程又可划分为两部分,前一部分单纯转发,历经时间 t_{z2} ;后一部分查询后再转发,经过 t_{h2} 到达目的地.这样,消息的整个发送时间可以表示为

$$t = p[qt_{z1} + (1-q)(t_{z2} + t_{h2})] + (1-p)t_{h1}. \quad (1)$$

如果认为消息的发送过程都可以分为直接转发和向 Home 查询后再转发两部分,且平均消耗时间分别为 $E(t_z)$ 和 $E(t_h)$ ($E(t_z) \geq 0, E(t_h) \geq 0$),对式(1)两边取期望值,可得

$$E(t) = pE(t_z) + (1-p)E(t_h). \quad (2)$$

对于某一个 Agent 而言,在任意时刻整个系统中保留有其状态信息的节点个数有 X 个,且 X 服从某一概率分布函数 $P(X)$,其期望值为 $E(X)$.如果消息的产生遵从平均分布,那么一个消息产生后可以无须向 Home 查询而直接转发的概率为

$$p = E(x)/N \quad (N \text{ 为系统中节点的个数}). \quad (3)$$

由多次实验记录的结果来看,消息被转发到某一节点后又向 Home 查询出现的次数几乎为 0,为了方便讨论,我们将忽略这种情况而认为 $q=1$.

如果各个节点处理运算的时间足够快,直接转发的消息传输的速度 $V_M = 1/T_n + T_{process} \approx 1/T_n$.另外,由于 Agent 总具有自主性,Agent 的移动与停留可以认为是一个 Markov 过程,即 Agent 在本节点的停留时间与在以前节点的停留时间无关,且在每一个节点停留的时间是随机的.假设停留时间 T_m 服从指数分布 $(1-e^{-\lambda})$,这样,Agent 的平均移动速度为

$$\bar{v} = 1/(\lambda^{-1} + T_n).$$

在 EMFS 中,Agent 离开某一个节点后,其去向信息将被保留 T_0 时间,而在这段时间内,Agent 移动的平均节点个数 $\bar{n} = E(X) = T_0/(\lambda^{-1} + T_n)$,所有这些节点的 Communicator 都会有该 Agent 的状态信息.如果消息的产生与 Agent 的移动独立,当某一个消息产生时,目标 Agent 已经移动的节点个数为 k ,其期望值 $E(k) = \bar{n}/2$.对于完全由直接转发而送达目标 Agent 的情况,可以求得

$$E(T_z) = E(k)/(V_M - \bar{v}) = \lambda T_n T_0 / 2. \quad (4)$$

对于 T_h ,从消息向目标 Agent 的 Home 发送寻址请求到消息被转发到寻址所获得的节点共需 $3T_n$ 时间,而从 Home 返回 Agent 当前地址到消息被转发的 $2T_n$ 时间内 Agent 已经移动了 k' 个节点,消息平均需要花费 $E(k')/V_M - E(v)$ 时间才能追上,所以有

$$E(T_h) = 3T_n + E(k')/(V_M - \bar{v}) = 3T_n + 2\lambda T_n^2. \quad (5)$$

将式(3)~式(5)带入式(2),可得

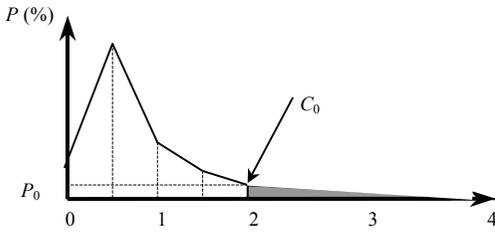
$$t = \frac{\lambda T_n}{N(1 + \lambda T_n)} \left[\frac{\lambda}{2} T_0^2 - (3 + 2\lambda T_n) T_0 \right] + 3T_n + 2\lambda T_n^2. \quad (6)$$

当 $T_0 = 3/\lambda + 2T_n$ 时, t 取得最小值

$$t_{\min} = T_n \left[3 + 2\lambda T_n - \frac{9 + 12\lambda T_n + 4\lambda^2 T_n^2}{2N(1 + \lambda T_n)} \right]. \quad (7)$$

2.2.2 追逐判定参数 C_0

从理论上讲,追逐的消息经过无穷次转发后仍不能送达目标 Agent,但 EMFS 将转发超过一定次数的消息就视为追逐消息.对于追逐判定参数 C_0 的确定,尚不能给出一个关于 T_n 和 λ 的表达式,一般是权衡各方面的代价,

Fig.5 Decision of C_0 图 5 追逐判定参数 C_0 的选择

设置最优值.如果 C_0 过小,系统中追逐消息过多会使得 Agent 超速等待太久,而若 C_0 过大则消息送达时间太长.目前我们采用的 C_0 设置方法是将 EMFS 除去同步功能后模拟运行一次,并统计所有消息在送达前所经历的转发次数,由此得出消息转发次数的概率分布*,当大于某个转发次数 C 后消息出现的概率之和(图 5 中的阴影部分)小于一个给定的值 ϵ ,此时 C 便被作为 C_0 .

2.2.3 最高速率参数 V_0

消息追逐是由于 Agent 移动太快而导致消息追不上的现象,临界情况是 Agent 每刚刚离开一个 Place,发给它的消息便随之到达这个 Place;而由式(3),此时状态信息不可能失效.为了让消息总能“追”得上 Agent,所以有 $v \leq V_M$ (v 为 Agent 速度, V_M 为消息传递速度),带入 $V_M = 1/(T_p + T_n)$,可得 $v \leq 1/(T_p + T_n)$,忽略 T_p ,则 Agent 移动的最快速率 $v_0 \leq 1/T_n$.

2.2.4 定时检测参数 T_S

T_S 是为了在网络条件发生频繁变化的情况下确保 EMFS 的可靠性,但实际上在使用了“Agent 超速等待”以后,消息追逐的几率已经微乎其微,所以 T_S 可以设定得相当大;并且网络条件越好, T_S 越长.模拟实验说明, T_S 的存在几乎对 EMFS 的性能没有什么负面影响,相反地,在某些情况下还可以提高性能.

2.2.5 参数可调性讨论

MESF 的一个特色在于,能够针对网络的状况对协议的主要参数进行调节,从而做到在一定程度上的自适应.上文主要对这些参数进行了理论上的分析,从中可以发现,它们的取值都和通信延时 T_n 密切相关.一旦运用到实际的移动 Agent 系统中,EMFS 应周期性获取网络通信延时的值,并据此动态调节 4 个通信协议参数,从而使得算法根据网络环境变化而变化,进一步地提高通信效率.值得指出的是,通信延时 T_n 的获取并不需要在系统中附加额外的功能模块,而可以直接通过系统原有的公共功能(如 QoS 保障模块)获得.

采用了如上所述的各种方法之后,Agent 的通信效率可以获得大幅提高.当然,这种提高也有代价:Agent 在移动到每个结点之后,都要进行获取诸如速度计算等工作,这在实现上一般体现为字节流的反序列化过程;某些情况下 Agent 的移动亦会受到一定的限制,从而付出一定的时间代价.然而,这种开销对于通信效率的提高是相当值得的,下文的实验数据也很好地说明了这一点.

3 性能分析与实验结果

本节主要从理论上和实验中对 EMFS 的性能进行分析和比较,其中模拟实验采用了 10 台 IBM RS6000 服务器结合 C/MPI 环境,各台服务器同过以太网两两相连;而 Agent 的行为模型采用指数分布,并采用“probe”在程序运行时记录相关数据.另外,由于 Mogent 是比较典型的预防法通信机制,与 EMFS 以检测法为主的特点有较大区别,所以下文以 Mogent 作为 EMFS 的主要比较对象.

3.1 EMFS 的 Agent 限速策略与系统可靠性

假如对 Agent 的行为不作任何限制,完全异步转发消息,虽然大部分消息能够经过一定次数的转发后送达目标 Agent,但不能保证所有消息在有限步数内到达;特别当 Agent 移动频繁时,容易出现消息追逐,不符合可靠通信的基本要求;即使没有出现追逐现象,消息转发次数也会偏多,导致消息传递过程太长,降低整个系统的性能.EMFS 系统采取了“追逐消息登记”和“Agent 超速等待”的策略,一方面保证了系统的通信可靠性,同时又在一定程度上提高了系统性能.

表 1 是任意选取 $T_n; T_m; T_0 = 1:10:30$ 的模拟实验条件下,消息送达前被转发次数的概率统计.图 6 是根据表 1,

* 在实际应用中,同一节点内通信(消息转发次数为 0)可能较高.实验中为了便于实现和讨论,我们采取的是 Agent 随机选取通信对象.下文的分析也是基于这一假设.

对于转发次数较多的消息,采取和没有采取 Agent 限速的两种情况下所模拟的概率密度曲线.由此可见,在这种系统环境下,通过应用 Agent 限速,消息总能够在比较理想的有限次转发后送达,而且消息的平均送达时间也有小幅降低.尽管这个降低是以扣留 Agent 为代价的,但如果参数调配得当,整个系统的综合性能仍会有所提高.

我们记 ζ 为系统运行一次,所有消息在送达前所经历转发次数的平均值.图 7 是由模拟实验得到的数据,反映了采用 Agent 限速后, ζ 与 T_m, T_n 的关系.从实验可见,由于 Agent 的限速,EMFS 系统中消息的转发次数总能被控制在一个比较理想的范围内,不会由于消息转发而造成网络拥塞.尤其当 $T_m > 10T_n$ (T_m 为 Agent 在每个节点的平均停留时间, T_n 为网络传输时间)以后,消息平均转发次数被降到了 1 次左右,而在实际应用中 $T_m > 10T_n$ 这个条件是相当普遍的.

Table 1 Comparison of forwarding times when using and not using Agent blocking

表 1 采用限速策略前后消息转发次数概率分布比较

Forwarding times	Non-Block (%)	Agent block (%)
0	10.06	9.92
1	64.12	65.08
2	21.00	20.46
3	4.08	4.01
4	0.60	0.49
5	0.08	0.04
6	0.01	0.00
7	0.02	0.00
8	0.01	0.00
9	0.00	0.00
≥ 10	0.02	0.00
Total Msg sent	45 878	45 682
Success rate (%)	99.98	100.00

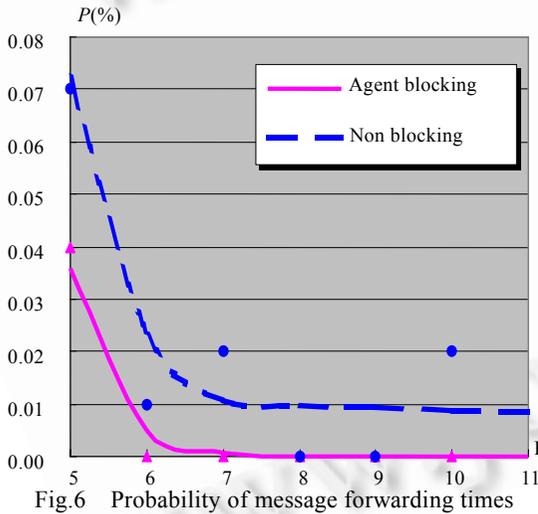


图 6 消息转发次数概率

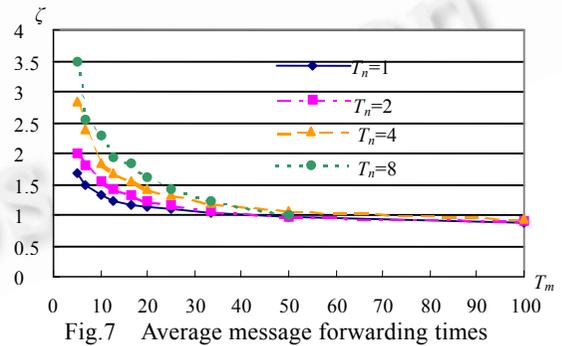


图 7 消息平均转发次数曲线

3.2 EMFS与Mogent性能比较

前文已经在第 2.2.1 节对 EMFS 的性能进行了分析.对于 Mogent 系统,假设消息发送过程中对目标 Agent 的寻址请求没有被放入等待队列,此时消息送达时间为 $3T_n$,出现概率为 p' ;如果寻址请求因为 Agent 的状态为移动态而阻塞,则消息送达时间为 $(3T_n+T_w)$,其中 T_w 为寻址请求被阻塞的时间.这样,消息的平均送达时间为

$$t' = 3p'T_n + (1-p')(3T_n+T_w) = 3T_n + (1-p')T_w \tag{8}$$

在 Mogent 系统中,寻址消息要被阻塞到对应 Agent 的状态信息从“移动态”改为“静止态”,可计算最长等待时间为 $4T_n$,故 $T_w \in (0, 4T_n)$,如果消息在这段时间内以平均分布随机到达,由此并对式(8)取期望值得

$$E(t') = (5-2p')T_n \tag{9}$$

由于总有 $p' < 1/(1+3\lambda T_n)$, 所以

$$t' > \left(3 + \frac{6\lambda T_n}{1+3\lambda T_n} \right) T_n \tag{10}$$

将式(9)减去式(10)可得

$$\Delta t = t' - t > \frac{2\lambda T_n(2-3\lambda T_n)}{1+3\lambda T_n} + \frac{9+12\lambda T_n+4\lambda^2 T_n^2}{2N(1+\lambda T_n)} \tag{11}$$

当 $\Delta t > 0$ 时, EMFS 的消息平均送达时间小于 Mogent.

我们分别模拟实现了 EMFS 和 Mogent 的通信算法. 图 8 是在其他条件相同的前提下, 对于不同的 T_m 取值 ($T_m=1/\lambda$, 以模拟时间片为单位), 实验中得到的 Δt 随 T_n 的变化曲线. 由此可见, 在绝大多数应用环境中, EMFS 的消息平均送达时间要优于 Mogent, 且随着 T_m 的增大, 优势愈加明显.

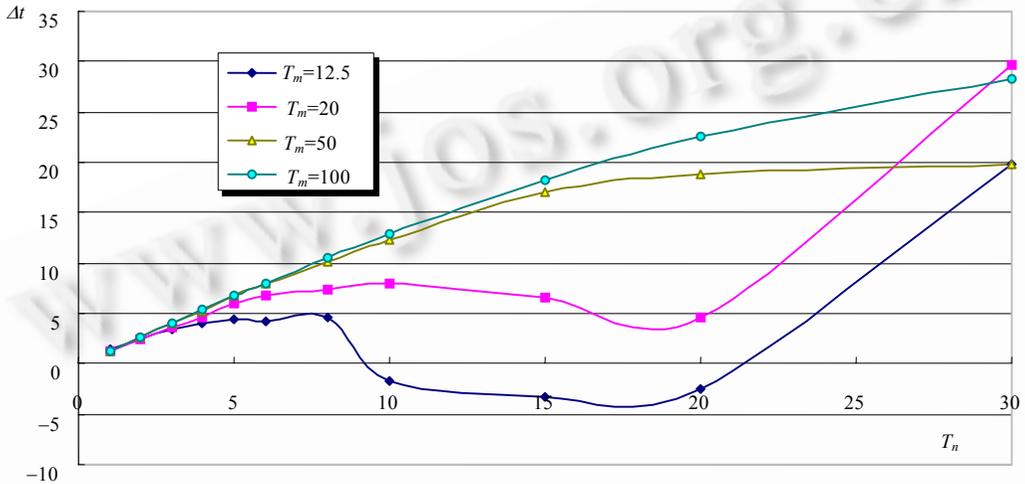


Fig.8 Delivery time difference between Mogent and EMFS

图 8 消息平均送达时间差值曲线

由于采用了以异步为主的通信方式, EMFS 对 Agent 的移动性影响极少, 能够有效地保证 Agent 的自主特性. 相比 Mogent 系统中 Agent 每次移动都至少要等待 $2T_n$ 时间, EMFS 只有在 Agent 超速并且没有收到所有登记“追逐”消息的情况下才将 Agent 扣留在当前节点, 无论强制扣留的时间还是概率都远远小于 Mogent 系统. 如果以消息平均送达时间 T_s 乘以 Agent 平均扣留时间 T_k 作为衡量系统综合性能的指标**, Mogent 和 EMFS 系统的性能指数 η 分别如图 9 和图 10 所示. 由此可见, EMFS 的性能指数要远远优于 Mogent 系统, 提高幅度至少为一个数量级, 而在某些条件(对应不同的 T_n, T_m 值)下, 甚至可以提高上百倍或更高, 并且这些条件往往是实际应用中最为出现的情况.

如果不考虑网络容错的假设, 消息在传输中可能会发生丢包等错误, 而且出错的概率与消息的转发次数成正比. 此时, 我们必须在网络传输的底层采取一定的措施以保证消息在网络各节点间的无误传输(如采用 TCP 链接等). 由于 EMFS 中消息要多次传送, 在底层采用同样的可靠传输协议, Mogent 的额外开销比 EMFS 要少, 但是这不会在整体性能上影响 EMFS 比 Mogent 的优越性.

** 为避免 $\eta=0$, 实验采用的性能指数公式为 $\eta=[T_s*(T_k+\epsilon)]$, 其中 ϵ 为一无穷小量, 取其值为 0.001. η 值越小, 说明系统性能越好.

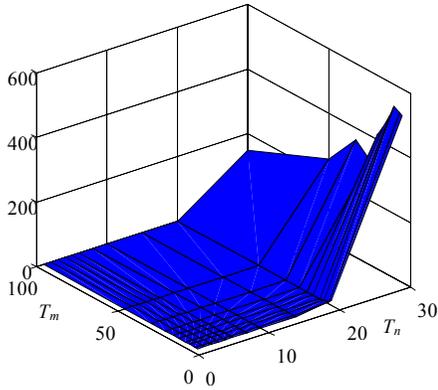


Fig.9 System performance of EMFS

图 9 MEFS 性能指标图像

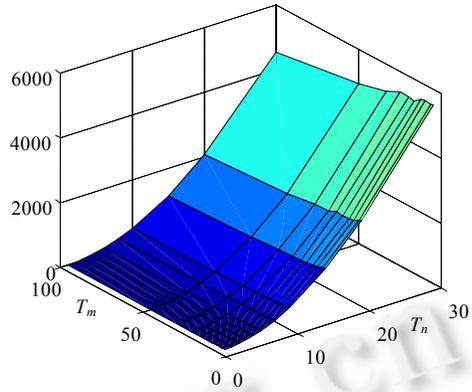


Fig.10 System performance of Mogent

图 10 Mogent 性能指标图像

4 总结与进一步工作

移动 Agent 的通信机制是移动 Agent 系统的重要组成部分,本文提出了一种具有较强自适应性的消息传递机制——EMFS(T_0, C_0, V_0, T_S),在保证通信可靠性的前提下,有效地解决了通信失效等问题.本文还对 4 个参数的设定进行了讨论,并分析和比较了 EMFS 的性能.

在 EMFS 机制中,只要 Agent 移动速度不超过 V_0 ,Agent 就可以不受限制地在整个 Space 内自主移动,而且可以保证消息经过一定次数的转发后送达目的 Agent.由于不需要每次通信都建立同步连接,所以比起 Mogent 等系统采用的通信机制来说,EMFS 的通信代价要小得多.虽然当发生消息追逐后 Agent 仍然会被限制移动,但这毕竟是小概率事件.而在每个 Place 的 Home 和 Communicator 维护状态表和追逐消息编号表,在绝大多数情况下也不是一件高负载工作,并且符合分布式系统的特点.

EMFS 机制中每条消息都有其惟一的编号,只要接收 Agent 事先知道消息的总数,就可以暂时存储先到的消息,待完全接受后对消息进行排序从而实现消息保序.另外,对于消息的组播(multicast),EMFS 所采用的状态表也能给予高效率的支持.

综上所述,EMFS 是一种多功能的有效而可靠的移动 Agent 间通信机制,而且由于其假设前提少,并具有参数可调特性,能够很好地适应不同的环境,应用范围相当广泛.

然而 EMFS 还需要深入研究,尤其是在参数的动态调整和路径压缩等方面.另外,通信协议还需要进一步细化,这些都将在以后的工作中继续探讨.

References:

- [1] Feng XY. Design and analysis of mobile Agent communication protocols [MS. Thesis]. Nanjing: Nanjing University, 2002.
- [2] Tanenbaum AS, Van Steen M. Distributed Systems Principles and Paradigms. Prentice Hall Inc., 2002. 57~66.
- [3] Tao XP. Research on internet based mobile Agent technology and application [Ph.D. Thesis]. Nanjing: Nanjing University, 2001 (in Chinese with English abstract).
- [4] Feng XY, Cao JN, Lü J, Chan H. An efficient mailbox-based algorithm for message delivery in mobile agent systems. In: Picco GP, ed. Mobile Agents. LNCS 2240, Springer-Verlag, 2001. 135~151.
- [5] Baumann J, Hohl F, Radouniklis N, Rothermel N, Straßer M, Rothermel K. Communication concepts for mobile Agent systems. In: Mobile Agents. Proceedings of the 1st International Workshop, MA'97. Springer-Verlag, 1997. 123~135
- [6] Baumann J, Hohl F, Straßer M, Rothermel K. Mole-Concepts of a mobile Agent system. WWW Journal, 1998,(Special Issue on Applications and Techniques of Web Agents):536~554.
- [7] Desbiens J, Lavoie M, Renaud F. Communication and tracking infrastructure of a mobile Agent system. In: Proceedings of the 31st

- Annual Hawaii International Conference on System Science, Vol 7. IEEE Computer Society, 1998. 54~63.
- [8] Lazar S, Weerakoon I, Sidhu D. A scalable location tracking and message delivery scheme for mobile Agents. In: Proceedings of the 7th IEEE International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises. IEEE Computer Society, 1998. 243~248
- [9] Tao XP, Feng XY, Li X, Zhang GQ, Lü J. Communication mechanism in Mogent system. Journal of Software, 2000,11(8): 1060~1065 (in Chinese with English abstract).
- [10] Murphy AL, Picco GP. Reliable communication for highly mobile Agents. In: Agent Systems and architecture/Mobile Agents (ASA/MA)'99. IEEE Computer Society, 1999. 141~150.
- [11] Jeon H, Petrie C, Cutkosky MR. JATLite: A Java Agent infrastructure with message routing. IEEE Internet Computing, 2000,4(2):87~96

附中文参考文献:

- [2] 陶先平.基于 Internet 的移动 Agent 技术和应用研究[博士学位论文].南京大学,2001.
- [9] 陶先平,冯新宇,李新,张冠群,吕建.Mogent 系统的通信机制.软件学报,2000,11(8):1060~1065.

中国计算机学会 2003 年下半年部分活动计划

10 月 10-12 日 长沙

第 20 届全国数据库学术会议

主办数据库专委; 承办: 国防科技大学

联系: 梁妍, 随品波 电话: 0731-4552710 E-mail: yangshq@mail.tsinghua.edu.cn

10 月 15-18 日 贵阳

第十二届全国多媒体技术学术会议

主办: 多媒体技术专委等, 承办: 贵州大学

联系人: 徐光祐 电话: 010-6278 4141 传真: 010-6277 1138 E-mail: xgy-dcs@mail.tsinghua.edu.cn

地址 北京清华大学计算机系媒体所 100084

联系人: 陈孝威 电话: 0851-3621678 E-mail: xwchen@tmail.gzu.edu.cn

地址: 贵州大学计算机系, 贵阳 550025

10 月 24 日 北京

学术报告会: 数字医学

主办: 中国计算机学会

联系: 学会办公室 010-6252 7486 E-mail: yocsef@ict.ac.cn

11 月 21 日 北京

学术报告会: 语义 Web

主办: 中国计算机学会

联系: 学会办公室 010-62527486 E-mail: yocsef@ict.ac.cn

12 月 20 日 北京

专题论坛: 电子政务误区何在

主办: 中国计算机学会

联系: 学会办公室 010-6252 7486 E-mail: yocsef@ict.ac.cn