

主题重叠网络的构造与搜索算法研究^{*})

傅向华 王志强 明 仲 陶 兰

(深圳大学信息工程学院 深圳 518060)

摘要 结构化 P2P 网络虽然具有扩展性良好的数据查找机制,但只支持基于键的准确匹配搜索。为提供更丰富的数据查询能力,本文提出一种基于主题重叠网络的结构化 P2P 搜索算法——主题重叠网络搜索算法(TONS)。其基本思想是在结构化 P2P 网络之上,将结点按主题组织成分层的重叠网络,使含有相似主题的结点相互链接在一起;利用主题中继结点所具有的全局导航能力,TONS 能够基于内容将查询限定在 P2P 网络的局部范围内,并且通过在重叠网络中随机添加一些长距离链接,使重叠网络具有 Small-World 特性,改善 TONS 的搜索性能。实验结果表明,TONS 大大提高了搜索的查全率,减少了 P2P 网络信息搜索时的平均路径距离和平均消息数目。

关键词 结构化 P2P 网络,主题重叠网络,分布式信息检索,P2P 搜索

Research on Construction and Searching Algorithms of Topic Overlay Networks

FU Xiang-Hua WANG Zhi-Qiang MING Zhong TAO Lan

(College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060)

Abstract Structured P2P systems are not suitable for complex queries because they only support keyword-based and exact-match lookup. To provide complex queries in DHT-based P2P system, a topic overlay networks search algorithm (TONS) is proposed in this paper. The basic idea is to construct a hierarchy topic overlay network on top of the existing structured P2P network at first. The novel overlay network can be generated by dynamically clustering peer nodes that include relevant topic document set and linking them together. And then with the global navigation capacity global navigation of the overlay network, TONS can restrict a query in partial nodes of P2P network and achieves a very competitive trade-off between the search latencies/bandwidth and maintenance overheads. Furthermore, to improve the search performance, some long distance linkages are randomly added to the topic overlay networks to organize them into a small-world networks. The experiment results showed that TONS can reduce network bandwidth, improve the search efficiency and precisions.

Keywords Structured Peer-to-Peer, Topic overlay network, Distributed information retrieval, P2P search

P2P 系统中的所有结点同时具有客户机和服务器的功能,协同完成计算任务,正成为继 B/S、C/S 之后一种新的极具前景的分布式计算模式。当前,Peer-to-Peer (P2P) 系统在数据对象共享、信息搜索和协同工作等方面得到越来越多的应用。

有效的搜索算法是影响 P2P 系统性能的首要因素,也是当前亟待解决的问题^[1]。现有的分布式 P2P 搜索算法可分为两种:非结构化索引方式和结构化索引方式。非结构化索引方式中每个结点为数据对象建立本地索引,以“洪泛”方式或随机游走方式向路由表中的结点发送查询消息,可以支持复杂查询,然而搜索效率很低,系统扩展性比较差,对应的系统如 Gnutella、FreeNet。结构化索引方式基于分布式哈希表来组织结点,通过相容散列函数,根据结点属性(如结点 IP 地址)和数据对象属性(如数据对象名)得到唯一的结点标识符和数据对象键值,然后将结点组织成具有一定结构的逻辑重叠网络,并根据键值将数据对象索引分散到各个结点上,使每个结点负责某个数据对象属性的全局索引,保证搜索步数在 $O(\log N)$ 的范围内(N 为结点总数),对应的系统如 Chord^[2]、CAN^[3]、Pastry^[4]、Tpastry^[5]、Symphony^[6]。虽然结构化的索引方式增强了扩展性和搜索的效率,但只能进行基于键的数据查找,不支持多关键词、部分匹配等复杂查询条件的信息搜索。

已有一些研究试图改进结构化 P2P 网络不能支持复杂

查询的问题。如文[7]中,根据多个文本块产生指纹(finger)向量,然后以指纹向量作为特征向量产生键。文[8]基于结构化 P2P 网络试图构建一个分布式的搜索引擎,提供基于关键词匹配的全文检索,采用了 Bloom filters、增量结果等多种性能优化方法。peer Search^[9]在文档的语义向量空间与 CAN 中结点所处的欧几里得空间建立映射,将语义相似的内容映射到 CAN 中邻近的结点中,限制特定查询的搜索范围。对于多关键词的查询,文[7,8]的方法需要利用结构化 P2P 网络的数据查找机制获取每个关键词的查询结果集合,然后对每个关键词的查询结果集合求交集,得到查询结果。当数据对象集合和查询关键词很多时,通信量会很大,扩展性不好;而文[9]中的方法只能适用于 CAN 网络,不便于应用到其他类型的结构化 P2P 网络中。另外,Triantafillou 和 Pitoura^[10]提出统一的 P2P 系统查询框架,包括等式、范围、联合以及聚合、排序等特定功能。其他一些研究人员对连续查询、递归查询进行了研究^[11,12]。

实际应用中,每个结点包含的资源具有特定的主题,从每个结点发出请求的查询也与该结点的兴趣有关,因而本文在结构化 P2P 系统基础上,提出主题重叠网络的概念和基于主题重叠网络进行 P2P 信息搜索的方法。该方法根据主题将结点组织成层次化的重叠网络,使含有相似主题的点聚集到一块,保证在与查询主题相关的局部结点子集中进行搜索,为结构化索引的 P2P 系统提供了一种基于多关键词搜索数据

^{*}深圳大学科研启动基金项目(200648)。傅向华 博士,讲师,主要研究领域为信息检索、机器学习等。

对象的有效方法。

1 主题重叠网络

1.1 主题重叠网络相关概念

首先形式化地给出主题重叠网络的相关概念。设结构化的 P2P 网络系统中所有的结点集合为 $P = \{p_i | 1 \leq i \leq N\}$, 数据对象集合为 $D = \{d_j | 1 \leq j \leq M\}$, 特征词集合为 $W = \{w_u | 1 \leq u \leq U\}$, 类别集合为 $C = \{c_k | 1 \leq k \leq K\}$, 每个类 c_k 确定一个主题 t_k , 所有主题集合为 $T = \{t_k | 1 \leq k \leq K\}$ 。 t_k 可用特征词向量表示, 即 $t_k = (x_1, x_2, \dots, x_U)$, 其中 x_u 为特征词 w_u 的词频。每个结点 p_i 的数据对象集合记为 $D(p_i)$, 分类器 F 将所有数据对象映射为 $K (K \leq M)$ 个类, 每个结点的类别集合记为 $C(p_i)$, $C(p_i) = \{F(d_i) | d_i \in D(p_i)\}$ 。设 p_i 对每个主题有一个兴趣度, 构成兴趣度向量 $L(p_i) = (l_1(p_i), l_2(p_i), \dots, l_k(p_i))$, 其中 $l_k(p_i)$ 表示 p_i 对 t_k 的兴趣度。

定义 1 (结点 p_i 的兴趣主题 $T(p_i)$) 给定兴趣度阈值 Δl , 结点 p_i 中所有兴趣度大于 Δl 的主题, 即 $T(p_i) = \{t_k | l_k(p_i) \geq \Delta l\}$ 。结点的兴趣主题数目为 $|T(p_i)|$ 。

定义 2 (主题重叠网络) 对于主题 t_k , P2P 网络系统中所有兴趣主题包含 t_k 的结点组成的对等网络, 称为主题为 t_k 的主题重叠网络。可用图 $TON(t_k) = (P(t_k), E(t_k))$ 来表示, 其中结点集合为 $P(t_k) = \{p_i \in P | t_k \in T(p_i)\}$, 边的集合为 $E(t_k) = \{e | \forall p_i \in P(t_k), \exists p_j \in P(t_k) \wedge e = (p_i, p_j), (p_i, p_j), \text{为从 } p_i \text{ 连接到 } p_j \text{ 的有向边}\}$ 。 $TON(t_k)$ 中结点的数目用 $|P(t_k)|$ 表示。

定义 3 (结点距离) 结构化的 P2P 网络中任意两结点 p_i 与 p_j 之间的距离定义为其结点标识符 $id(p_i)$ 与 $id(p_j)$ 在环状标识符空间上的最短距离, 即 $Dist(p_i, p_j) = \min\{|id(p_i) - id(p_j)|, H - |id(p_i) - id(p_j)|\}$, 其中 H 为标识符的最大值。

定义 4 (结点间的平均路径距离) 在由 n 个结点按标识符大小依次组成环状网络中, 任意两结点 p_i 与 p_j 之间的平均路径距离 $L = \frac{1}{n(n-1)/2} \sum_{1 \leq i < j \leq n} Dist(p_i, p_j)$ 。

定义 5 (主题中继结点) 若结点 p_i 不仅存放其兴趣主题 $T(p_i)$ 对应主题重叠网络的相关索引信息, 而且存放非兴趣主题 $t_k \in T - T(p_i)$ 对应主题重叠网络 $TON(t_k)$ 的相关索引信息, 即称其为主题 t_k 的中继结点, 用 $TR(t_k)$ 表示。

定义 6 (主题中继重叠网络) 所有主题中继结点 $TR(t_k)$ 组成的对等网络称为主题中继重叠网络。可用图 $TRON = (P(TR(t_k)), E_r)$ 来表示, 其中 $P(TR(t_k)) = \{TR(t_k), k = 1, 2, \dots, K\}$ 为所有中继结点的集合, $E_r = \{e | \forall TR(t_k), \exists TR(t_s) \wedge e = (TR(t_k), TR(t_s))\}$ 。 $TRON$ 中结点的数目用 $|P(TR(t_k))|$ 表示。

1.2 主题重叠网络的索引结构

构建重叠网络后的结点分为两种: 一种为一般结点, 另一种为主题中继结点。每个结点 p_i 有一个唯一的结点标识符 $id(p_i)$, 将包含有相同主题 t_k 的结点按着结点标识符的顺序首尾相连, 组成环状结构, 构建成一个主题重叠网络 $TON(t_k)$ 。同样, 将所有中继结点构建环状的主题中继重叠网络 $TRON$ 。每个结点需要维护一个路由表, 存放该结点在重叠网络中的前驱和后继结点。路由表中的索引项包括两类: (1) 主题重叠网络结点之间的链接信息, 如对于主题 t_k , 即为有关 $E(t_k)$ 的信息, 用于限定查询的搜索范围; (2) 主题

中继重叠网络结点之间的链接信息, 即有关 $Relay(t_k)$ 和 E_r 的信息, 用于快速搜索查询相关的主题重叠网络。另外, 为改善搜索速度, 随机添加一些长距离的快捷链接 (2.3 小节说明); 为提高容错性, 存放重叠网络的连续几个前驱和后继结点信息。一般结点的路由表只包含第 1 类索引信息, 中继结点的路由表包含第 1 类和第 2 类索引信息。结点路由表中的索引项用四元组表示, 即: $(Topic, NodeID, NodeProperty, Overlay)$ 。其中 $Topic$ 为索引项属于的主题, 取值范围为主题集合 T ; $NodeID$ 为结点的标识符, 取值范围为结点集合 N ; $NodeProperty$ 为结点属性, 取值范围为 $\{preceeding, successor, shortcut\}$; $preceeding$ 表示前驱结点, $successor$ 表示后继结点, $shortcut$ 表示快捷结点。 $Overlay$ 为属于的重叠网络类别, 取值为 $\{TON, TRON\}$ 。

图 1 为一个含有 8 个结点的结构化 P2P 网络。所有结点的数据对象属于 t_1, t_2, t_3 三个主题, 每个结点包含主题在结点旁标出, 用 TR 表示该结点为中继结点。含有不同主题的结点分别被组织到 TON_1, TON_2, TON_3 三个主题重叠网络中。所有的中继结点被组织成中继重叠网络。其中结点 26 包含所有三个主题的内容, 且为中继结点, 表 1 为结点 26 的路由表项。

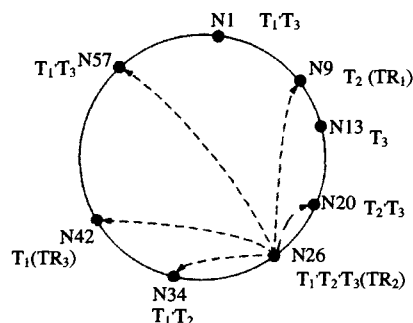


图 1 含有 8 个结点的结构化 P2P 网络

表 1 结点 26 的主题重叠网络路由表

重叠网络	索引项	结点 ID	说明
TRON	TR ₁	9	preceeding relay
	TR ₃	42	successor relay
TON	t ₁	1	preceeding node
		34	successor node
		57	shortcut node
	t ₂	20	preceeding node
		34	successor node
		9	shortcut node
	t ₃	20	preceeding node
		57	successor node
		1	shortcut node

2 基于主题划分的 P2P 搜索算法

2.1 基于信息瓶颈原理聚类数据对象确定主题

每个结点上的数据对象具有聚类特性, 因而将整个结点的数据对象作为整体考虑, 首先对结点上所有的数据对象进行聚类, 然后根据聚类结果判断结点包含的主题。

信息瓶颈方法^[13,14]为聚类分析提供了一种好的相似性度量。设 X, Y 为两个随机变量, 它们之间的互信息表示 X 包含有关 Y 的信息量, 定义为

$$I(X, Y) = \sum_{x \in X, y \in Y} p(x)p(y|x) \log \frac{p(y|x)}{p(y)} \quad (1)$$

两个变量 x_1 和 x_2 之间的相似度可由 x_1 和 x_2 条件下 y 的分布, 即 $p(y|x_1)$ 和 $p(y|x_2)$ 之间的 Kullback-Libeler divergence 度量, 则:

$$\begin{aligned} Sim(x_1, x_2) &= D_{KL}(p(y|x_1) \parallel p(y|x_2)) \\ &= \sum_y p(y|x_1) \log \frac{p(y|x_1)}{p(y|x_2)} \end{aligned} \quad (2)$$

将 X 聚类为簇集合 \tilde{X} 时, 需要确定每个 x 属于哪个簇, 此时应在满足从 $X, I(\tilde{X}; X)$ 抽取信息的前提下使 $I(\tilde{X}; Y)$ 最大化。若只考虑每个 $x \in X$ 仅属于一个簇 $\tilde{x} \in \tilde{X}$ 的情况, 那么该最大化问题等价于下面的方程组:

$$p(\tilde{x}|x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \in \tilde{x} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$p(y|\tilde{x}) = \frac{1}{p(\tilde{x})} \sum_{x \in \tilde{x}} p(x)p(y|x) \quad (4)$$

$$p(\tilde{x}) = \sum_{x \in \tilde{x}} p(x) \quad (5)$$

利用汇聚层次聚类算法可以很容易地求解上述方程^[15], 计算 \tilde{X} 和 Y 之间的互信息, 得到聚类好的簇 \tilde{X} 。

基于信息瓶颈原理对结点 p_i 的数据对象集合 $D(p_i)$ 进行聚类, 那么每个数据对象中词的条件分布为: $p(w|d) = \frac{n(w|d)}{\sum_{w \in W} n(w|d)}$, 其中 $n(w|d)$ 为词 w 在数据对象 d 中的出现次数。根据(2)式, 两个数据对象之间的相似性度量为

$$\begin{aligned} Sim(d_1, d_2) &= D_{KL}(p(w|d_1) \parallel p(w|d_2)) \\ &= \sum_w p(w|d_1) \log \frac{p(w|d_1)}{p(w|d_2)} \end{aligned} \quad (6)$$

解方程组得到数据对象簇集合 G , 每个簇 g_v 的簇中心为词 $\{w_1, w_2, \dots, w_{|w|}\}$ 上的条件分布: $p(w|g_v) = \sum_{d \in g_v} p(w|d) / |g_v|$, 可以表示为一个主题 t 。从式(2)可得两个主题 t_k 和 t_s 之间的相似度为

$$\begin{aligned} Sim(t_k, t_s) &= D_{KL}(p(w|t_k) \parallel p(w|t_s)) \\ &= \sum_w p(w|t_k) \log \frac{p(w|t_k)}{p(w|t_s)} \end{aligned} \quad (7)$$

(7)式用于比较两个主题之间的相似性, 确定结点的兴趣主题和查询相关主题。

2.2 基本主题重叠网络搜索算法

具有相同主题的结点被组织成主题重叠网络, 而主题中继重叠网络可以为搜索过程提供全局导航能力。当在某个结点 p_i 提交查询 Q 时, 基本主题重叠网络搜索算法(BTONS)可以通过主题中继重叠网络, 迅速将查询路由到与该查询最相似的主题重叠网络, 然后再在该主题重叠网络内部进行局部搜索。

设预先设定的相似度阈值为 Δr , 若用户向结点 p_i 提交查询消息 Q , 则整个搜索过程如下:

① p_i 检索本地数据对象, 若与 Q 匹配, 则向用户返回结果;

② 根据(7)式计算查询 Q 与所有兴趣主题 $T(p_i)$ 的相似度 $Sim(Q, T(p_i))$, 然后从 p_i 的所有主题重叠网络 $TON(t_k)$ 索引中选择与 Q 相似度大于 Δr 的主题 t_k , 向对应的结点发送查询消息 Q ;

③ 若 p_i 不包含与 Q 相似度大于 Δr 的主题, 则向 p_i 链接的中继结点 TR_1 发送查询消息 Q ;

④ 中继结点 TR_1 在主题中继重叠网络 $TCON$ 链接信息中选择与 Q 相似度大于 Δr 的主题, 向对应的中继结点 TR

(t_k) 发送查询消息; 若 TR_1 没有与 Q 相似度大于 Δr 的主题, 则选择相似度最大的中继结点 TR_2 , 向 TR_2 发送查询消息 Q 。依次路由, 直到找到包含有与 Q 相似度大于 Δr 的主题的中继结点 $TR(t_k)$;

⑤ $TR(t_k)$ 根据 $E(t_k)$ 的信息, 将 Q 传播到环状的主题重叠网络 $TON(t_k)$ 中, 每个结点检索本地数据对象, 并向邻居结点转发查询消息, 依次进行搜索, 查询消息在 $TON(t_k)$ 中转发的结点数由消息的 TTL 值确定。

⑥ $TON(t_k)$ 中包含 Q 的结点对 p_i 返回查询结果集合。

BTONS 为两阶段搜索, 首先从中继主题重叠网络中找到相关主题重叠网络, 然后在主题重叠网络中搜索满足查询要求的数据对象。结点之间的消息传送由下层的结构化 P2P 网络进行路由。由于结构化 P2P 的平均路径距离为 $O(\log N)$, 故查询 Q 在 $RTON$ 中的平均路径距离为 $O(|P(TR(t_k))|)$, 在 $TON(t_k)$ 中的平均路径距离为 $O(|P(t_k)|)$, 故整个搜索过程的平均路径距离为 $O(|P(TR(t_k))|) + O(|P(t_k)|)$ 。

2.3 用 Small-World 改进 BTONS 算法

在 BTONS 算法中, 主题重叠网络和主题中继重叠网络均组织成一个环状结构, 搜索过程按线性方式进行。为改进 BTONS 算法的效率, 基于 Small-World 模型^[16,17], 在重叠网络的每个结点上添加一些连接到远距离结点的快捷链接。

现在常用的 Small-World 模型是 $WS^{[18]}$ 模型: n 个结点分布在一个圆环上, 初始状态时, 每个结点有 h 个连接, 分别连向最近的 h 个点。然后依次以概率 p 随机地改变连接的终端, 但避免连向结点本身。当 $p \approx 0$ 时, 有 $L \sim \frac{n}{2h}$, 此时网络拓扑呈规则形状; 当 $0.001 < p < 0.01$ 时, $L \sim \frac{\ln n}{\ln h}$, 此时结点不仅与相邻结点连接, 还与远距离结点建立了一些快捷连接, 从而有效缩短 L , 使整个网络呈现出 Small-World 特性。

Kleinberg^[14] 提出一种在环状网络上构建 Small-World 网络的模型, 证明通过贪婪路由, 查询消息路由到任何结点的平均路径距离为 $O(\log^2 n)$ 。而在 Symphony^[6] 中, 通过扩展 Kleinberg 的工作, 证明当每个结点维护 $h = O(1)$ 个远距离链接时, 平均路径距离可达到 $O(\frac{1}{h} \log^2 n)$ 。利用 Symphony 的方法来改进 BTONS 算法。首先将 n 个结点组成的环状网络映射到 $[0, 1]$ 区间, 然后为每个结点建立 $h \geq 1$ 个远距离链接。建立远距离连接的方法是: 结点首先根据概率分布函数 $p(x)$ 产生一个随机数 $x \in [0, 1]$, 然后通过路由, 找到 x 在环状网络空间中对应的结点 p_i , 建立一个到 p_i 的快捷链接。使用得概率分布函数定义 $p(x)$ 为: 若 $x \in [1/n, 1]$, $p(x) = 1/(x \ln n)$, 否则 $p(x) = 0$ 。在建立快捷连接的过程中, 若设定每个结点链入链接数目的上限为 $2h$, 当一个结点链入数目达到上限, 将拒绝后面的链入请求, 此时请求链入的结点重新产生随机数, 向其他结点请求链入。

改善后的 BTONS 算法称为 TONS 算法, TONS 算法中, 查询 Q 在 $TCON$ 中的平均路径距离为 $O(\frac{1}{h} \log^2 |P(TR(t_k))|)$, 在 $TON(t_k)$ 中的平均路径距离为 $O(\frac{1}{h} \log^2 |P(t_k)|)$, 故整个搜索过程的平均路径距离为: $O(\frac{1}{h} \log^2 |P(TR(t_k))|) + O(\frac{1}{h} \log^2 |P(t_k)|)$ 。

2.4 重叠网络的构造与维护

主题重叠网络只需在结构化 P2P 系统之上增加少量的路由表项。若结点 p_i 包含 $|T(p_i)|$ 个兴趣主题, 每个主题维护 2 个邻居连接, $2h$ 个远距离结点以及 1 个主题中继链接, 那么一般结点需要维护的链接数目为 $|T(p_i)| \times (2h+3)$ 个, 主题中继结点另外还需维护 $2h+2$ 个主题中继覆盖链接。

P2P 网络中不断有新的结点加入和离开, 因而需要动态维护主题重叠网络和主题中继重叠网络的结构。设新结点 p_i 请求加入主题重叠网络, 即结点加入过程如下:

① 基于信息瓶颈的聚类方法, p_i 聚类数据对象集合确定局部兴趣主题集合 $T'(p_i)$, 然后与全局主题 T 相比较, 确定应该加入的兴趣主题集合 $T(p_i)$;

② 向任意中继结点 $TR(t_k)$ 发送加入请求消息 M_{add} , 该中继结点在中继重叠网络 $TRON$ 中搜索包含 $T(p_i)$ 的中继结点 $TR(T(p_i))$;

③ $TR(T(p_i))$ 将 M_{add} 送入相应的主题重叠网络 $TON(T(p_i))$, 在 $TON(T(p_i))$ 的各结点之间进行路由, 根据结点标识符, 找到合适的插入结点 p_j ;

④ 结点 p_j 处理 M_{add} , 向 p_i 发送有关的路由表信息 $R(p_j)$, 并将 p_i 作为自己的后继, 同时向路由表项中的相关结点发送更新消息 M_{update} , 然后依概率函数 $p(x)$ 随机添加长距离链接。

⑤ 结点 p_i 根据接受到路由信息 $R(p_j)$, 填充自身路由表信息 $R(p_i)$, 并依概率函数 $p(x)$ 随机添加长距离链接。

当结点 p_i 要离开主题重叠网络 $TON(T(p_i))$ 时, 由 p_i 向路由表 $R(p_i)$ 中的结点发送离开消息 M_{leave} , 有关结点收到离开通知后更新自身路由表。另外, 为提高主题重叠网络的容错性能, 各个结点定时向其邻居发送心跳消息, 以确认其路由表信息是否正确。

3 仿真实验及结果分析

3.1 实验设置

基于结构化的 P2P 平台 Chord^[2] 实现了一个 P2P 仿真系统。实验中的数据语料取自搜狐网, 利用爬行软件抓取 2004 年搜狐网的相关主题的网页。搜狐网对所有的网页进行了分类, 这有利于我们评估实验结果。经过预处理(包括转化成文本数据对象, 分词, 去除停用词)后, 得到 34178 个数据对象, 涉及 32 个主题(包括体育、生活、科技等); 再将其分为 500 个集合, 对应 500 个结点, 每个集合随机选择多个主题的数据对象子集, 作为一个结点的数据对象集合。记录每个主题所包含数据对象的数目, 用于评估数据对象查询结果的查准率和查全率。分别从不同主题的数据对象集合中词频出现最高的词作为查询词, 设计了 8 组查询, 每组 5 个, 每组查询包含的查询词数目分别从 1 到 8 个。

根据已有的研究结果, 采用下面的评价指标: (1) 数据对象搜索的查全率 $R(Q)$ 和查准率 $P(Q)$; (2) 搜索过程中的平均消息数目; (3) 平均路径距离 L 。

$R(Q)$ 和 $P(Q)$ 分别定义如下:

$$R(Q) = \frac{\text{搜索结果中相关主题文档数目}}{\text{文档集合中相关主题文档总数目}}$$

$$P(Q) = \frac{\text{搜索结果中相关主题文档数目}}{\text{搜索结果文档总数目}}$$

3.2 3 种搜索算法的性能的比较

将未构建主题重叠网络的结构化 P2P 网络搜索算法记为 SNS, 对 SNS、BTONS 和 TONS 三种搜索算法进行比较,

试验结果如表 2 所示。数据为 10 次试验的平均值, 试验中, BTONS 和 TONS 的每个主题的链接数目上限为 10, 数据对象主题数目选择为 32, $TTL=20, \Delta l=0.01$ 。

表 2 3 种算法的搜索性能

算法	查全率(%)	查准率(%)	平均消息数目	平均路径长度
SNS	14.6%	89.4%	25.13	10.87
BTONS	85.7%	82.5%	22.86	8.56
TONS	89.3%	82.8%	18.38	5.93

由表 2 的试验结构比较可以看出, SNS 算法只能进行完全匹配的搜索, 查询消息只能发送到完全匹配的数据对象上, 因而其检索的查全率只有 14.6%。通过在结构化的 P2P 系统上构建主题重叠网络, 大大提高 P2P 系统的查全率, BTONS 达到 85.7%, TONS 达到 89.3%, 但同时查准率有所下降, 从 SNS 的 89.4% 分别降为 82.5% 和 82.8%, 这主要是由于返回部分匹配的数据对象时, 也返回了一些无关主题的数据对象。表 2 的结果还可以看出, 由于主题重叠网络的构建, 查询消息被限制在整个 P2P 系统的局部范围内传播, 从而使得发送的平均消息数目由 SNS 的 25.13 减少为 BTONS 的 22.86 和 TONS 的 18.38, 平均路径长度从 SNS 的 10.87 减少为 BTONS 的 8.56 和 TONS 的 5.93。BTONS 算法和 TONS 算法的比较说明通过在索引项中随机增加一些长距离链接, 可以使查询消息传播到网络中更多相关的结点上, 并使网络通信量和搜索平均路径长度得到改善。

3.3 TONS 算法分析与讨论

3.3.1 检索性能分析

兴趣主题阈值 Δl 对 TONS 算法具有较大的影响, 分别设定 Δl 的取值为 0.01, 0.05, 0.15, 0.25, 0.45 进行实验, 对不同主题重叠网络的结点, 根据其与管理查询的相似度进行排序, 依次进行搜索。图 2 和图 3 为选择不同的主题聚类数目在 8 组查询上的平均搜索查全率和查准率。

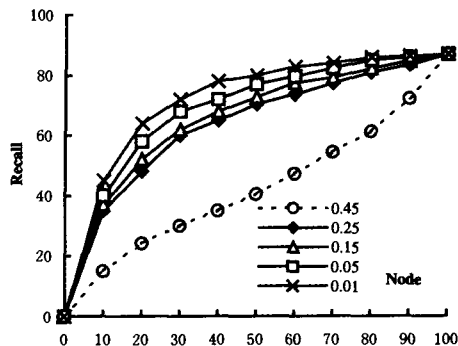


图 2 不同兴趣主题阈值对查全率的影响

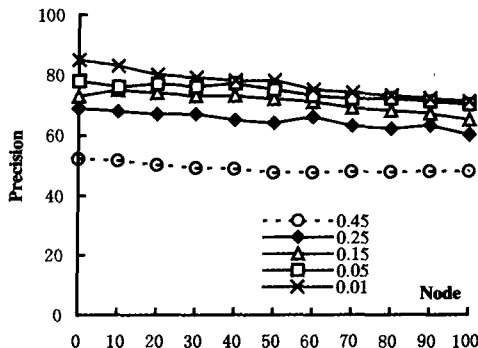


图 3 不同兴趣主题阈值对查准率的影响

3.3.2 网络通信量分析

由实验结果我们可以看出,随着主题兴趣阈值 ΔI 的减少,查全率逐渐降低,而查准率逐渐升高。这是由于主题划分越来越细,同一主题中的文档越来越相似,使得查准率增加,但是也可能将一些含有相关主题的结点排除到该主题重叠网络之外,同一主题重叠网络之中的结点数目会减少,使得查全率有所下降。从实验结果还可以看出,通过合适选取主题聚类数目,搜索 30% 的结点,就可以得到 70% 以上的查全率,大大减少搜索时间。

兴趣主题阈值 ΔI 对 TONS 算法具有较大的影响,分别设定的取值为 0.01, 0.05, 0.15, 0.20, 0.40 进行实验。图 4 为获得不同的查全率结果与消耗网络带宽的对比图。从图中可以看出,随着 ΔI 的减少,主题得到细化,通信量也随之减少。这也表明利用主题信息进行 P2P 网络下的信息搜索可以很好地减少网络通信带宽。

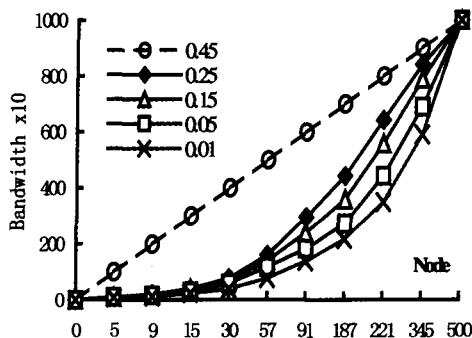


图4 不同兴趣主题阈值对网络通信量的影响

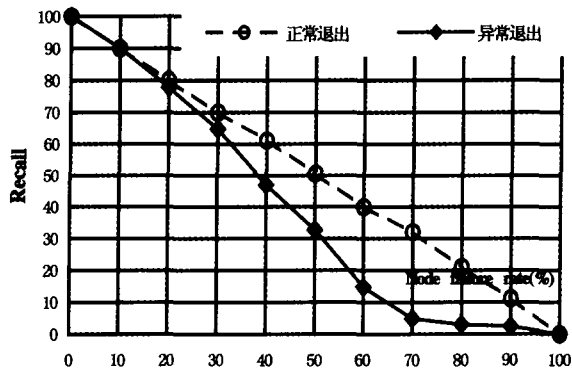


图5 节点正常退出和异常退出对检索性能的影响

3.3.3 动态性影响分析

由于在 P2P 网络中结点会动态地加入和退出,因而会对 P2P 的检索性能产生影响。我们从 P2P 网络中随机选择结点,分别对结点的正常退出和结点异常退出两种情况进行试验,试验结果如图 5 所示。由于结构化的 P2P 网络通过有效地组织结点的连接方式,并通过自适应的容错机制维护固定的结构,可以为上层应用提供了一个比较稳定的重叠网络。因而结点正常退出时,检索的查全率基本与结点数目成正比,但大量结点的异常退出会使整个系统的搜索性能急剧下降。图 5 中,当结点异常退出率小于 30% 时,查全率的下降仍呈线性下降,这是由于每个结点同时维护多个与其他结点的连接,少量结点的失效并不会很大影响检索性能。但是当结点失效率超过 30% 以后,检索性能急剧下降,这是由于重叠网络结构被破坏,查询消息不能发送到相关主题结点造成的。

3.3.4 容错性分析

在构建的主题重叠网络中,每个主题有 $2h+2$ 个连接,这

使其具有较好的容错性。设每个连接结点失效的概率为 τ , 则所有连接同时失效的概率为 τ^{2h+2} 。由于并不限定中继结点的数目,因而对于一个主题,可能同时存在多个中继结点,当某些主题中继结点失效时,新结点依然可以从其他中继结点处获得加入主题重叠网络的入口,不过会使性能有所下降。若 t_k 对应的主题中继结点全部失效,当从一个不包含主题 t_k 的结点 p_i 上查询有关 t_k 的内容时,TONS 算法很难完成对有关 t_k 内容的搜索。在这种情况下,可以利用当前结点下层的结构化 P2P 索引,将查询消息广播到整个 P2P 系统中,此时的搜索类似于“洪泛”搜索算法。

结论 结构化的 P2P 系统虽然增强了搜索的速度和系统扩展性,却不能支持部分匹配的数据对象内容搜索。本文提出一种基于主题重叠网络的结构化 P2P 信息搜索机制,为结构化的 P2P 系统提供了一种支持多关键词、部分匹配等复杂搜索的方法。通过将含有相似内容主题的结点组织到一起构成主题重叠网络,将查询限制在网络中最相关的局部结点子集内。与未构建主题重叠网络的结构化 P2P 网络相比,试验结果表明,主题重叠网络搜索算法可以提高搜索查全率,减少搜索的平均消息数目和平均路径距离。

参考文献

- Daswani N, Garcia-Molina H, Yang B. Open problems in data-sharing peer-to-peer systems. In: Calvanese D, Lenzerini M, Motwani R, eds. Proc. of the 9th Int'l Conf. on Database Theory (ICDT). Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 1~15
- Stoica I, Morris R, Karger D, et al. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications. In: Proceeding of the ACM SIGCOMM conference, San Diego, CA, 2001. 149~160
- Ratnasamy S, Francis P, Handley M, et al. A scalable content-addressable network. In: Proceeding of the ACM SIGCOMM, San Diego, CA, 2001. 161~172
- Rowstron A, Druschel P. Pastry: Scalable, distributed object location and routing for large-scale peer-to-peer systems. Lecture Notes in Computer Science, 2001(2218): 329~350
- Zhao B Y, Kubiawicz J D, Joseph A D. Tapestry: An infrastructure for fault-tolerant wide-area location and routing. [Technical Report]. CSD-01-1141. Berkeley Computer Science Division, University of California, CA, 2001
- Manku G S, Bawa M, Raghavan P. Symphony: Distributed Hashing in Small World. In: Proceedings of the 4th USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems, 2003
- Zhou Feng, Zhuang Li, Zhao B Y, et al. Approximate Object Location and Spam Filtering on Peer-to-peer Systems. In: Proceeding of ACM/IFIP/USENIX Intl Middleware Conference, Middleware, 2003
- Reynolds P, Vahdat A. Efficient Peer-to-Peer Keyword Searching. Middleware'03, 2003
- Tang Chunqiang, Xu Zhichen, Dwarkadas S. Peer-to-Peer Information Retrieval Using Self-Organizing Semantic Overlay Networks. In: Proceeding of the ACM SIGCOMM 2003, Karlsruhe, Germany, August 2003
- Huebsch R, Hellerstein J M, Lanham N, et al. Querying the Internet with PIER[C]. In: Proceedings of the 29th International Conference on Very Large Databases, Berlin, Germany, 2003. 321~332
- Hellerstein J M. Toward network data independence[J]. ACM SIGMOD Record, 2003, 32(2): 4~40
- Loo BT, Hu esch R, Hellerstein JM, et al. Analyzing P2P Overlays with Recursive Queries[R]. Computer Science Oivision at the University of California at Berkeley 2004
- Xu J, Croft W B. Cluster-based language models for distributed retrieval. In: Proceeding of 22nd ACM Conference on Information Retrieval (SIGIR), 1999. 254~261
- Tishby N, Pereira F, Bialek W. The information bottleneck method. In: The 37th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, 1999
- Slonim N, Tishby N. Agglomerative Information Bot- tleneck. In: Proc. of Neural Information Processing Systems (NIPS-99), 1999. 617~623
- Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of small world-world networks. Nature, 1998, 393: 440~442
- Kleinberg J. The small-world phenomenon: an algorithmic perspective. In: Proc. 32nd ACM Symposium on Theory of Computing (STOC 2000), 2000. 163~170