

缓存失效策略的性能分析数学模型

吴 劲, 卢显良, 任立勇, 魏青松

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)

【摘要】在研究多种缓存策略的基础上,提出了一种满足移动计算环境的特殊要求的性能分析数学模型,该模型基于数据更新率、热集查询率、无线网络带宽、上下行查询开销等参数,可计算出具体策略的吞吐量。利用该模型对无缓存、时戳法和移动代理法等具体方案进行了计算和比较,其结果和定性分析结果一致,证明该模型具有很强的实用性。

关键词 缓存; 失效报告; 移动计算环境; 吞吐量; 性能分析模型

中图分类号 TP393 文献标识码 A

A Performance Analyzing Model for Cache Invalidation Strategies

WU Jing, LU Xian-liang, REN Li-yong, WEI Qing-song

(School of Computer Science and Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract Researching many cache invalidation strategies, we propose a performance analyzing model which can evaluate the cache schemes in the mobile computing environments. Based on some parameters - the update rate, the hitting “hot spot” rate, the bandwidth of the wireless, the overhead of the uplink and downlink, etc., the throughput of cache strategies can be computed. Using this model, we evaluate the performance of four schemas - no caching, ideal strategies, timestamp, mobile agent. Our study shows that this model is intensive practicability.

Key words caching; invalidation reports; mobile computing environments; throughput; performance analyzing model

缓存技术是分布式计算环境中的重要技术,它可以改善系统的整体性能(如吞吐量、查询响应时间等),而移动计算的网络环境是一种特殊的分布式环境^[1],与传统的分布式系统相比,它具有鲜明的特点:移动性、断接性、带宽多样性、可伸缩性、弱可靠性、网络通信的非对称性、电源能力局限性等等。这些特点使得缓存技术的应用在移动计算环境中显得尤为重要,因为缓存能有效减少带宽需求,并能节省移动计算机的能耗。

文献[2]提出了一种称为“缓存失效报告”的方案:即服务器定期或异步地广播缓存失效报告,该报告中包含了最近被更新的对象,根据报告内容,客户可使缓存中被更新对象失效,以保证缓存的有效性。针对失效报告策略又可提出了很多改进算法^[3],在研究和改进缓存策略的工作中,需要一种简单、合理和公平的性能分析数学模型对算法进行分析和评估。本文将阐述缓存失效策略的性能分析数学模型,并用它对一些典型策略加以分析和评估。

收稿日期:2003-09-02

基金项目:信息产业部预研基金资助项目(51406070201DZ0211)

作者简介:吴劲(1972-),女,博士,讲师,主要从事计算机网络及分布式数据库技术方面的研究;卢显良(1943-),男,教授,博士生导师,主要从事计算机网络技术及应用方面的研究。

1 几种典型的缓存失效策略

下面将描述两种基于失效报告(Invalidation Reports, IRs)的缓存策略,关于缓存失效法的详细分类可参考文献[4],假设服务器每隔 L 秒广播一次失效报告,并用 D 表示数据库中数据项的集合。

1.1 时戳法

时戳法要求失效报告中包含在过去的 w 秒内已经被更新的数据项,一般 $w = kL$ 且 $k > 0$ 。报告中的记录可表示为 $[id, TS]$, id 为更新对象的标识符, TS 表示该对象最近被更新的时戳。假设服务器在 $T_i = iL$ 时刻广播报告,报告内容定义如下:

$$U_i = \{[j, t_j] \mid j \in D \text{ and } T_i - T_i < t_j < T_i\} \quad (1)$$

移动主机收到失效报告,与缓存中的相关项 $[j, t_c]$ 比较(t_c 为缓存中项 j 的时戳),若 $t_j > t_c$ 则该项失效。另外移动主机还保留了一个变量 T_i 表示最近收到的失效报告的时戳,以及一个查询清单 Q_i ,其定义如下:

$$Q_i = \{j \mid j \text{ has been queried in the interval } [T_{i-1}, T_i]\} \quad (2)$$

时戳法的具体算法如下:

<pre> if($T_i - T_i > \delta$) {remove the entire cache;} else{ for(every item j in the cache){ if(there is a pair $[j, t_j]$ in U_i){ if($t_j > t_c$){ remove j from the cache;} else{$t_c = t_j$} } } </pre>	<pre> $T_i = T_i$; } for(every item $j \in Q_i$){ if(j in the cache){ if($t_j > t_c$){ remove j from the cache;} else{$t_c = t_j$} } } </pre>
---	--

1.2 移动代理法

在移动代理法中^[3],每个移动主机,都在本机有一个数据缓存区;除此之外,在该主机所在的无线网络

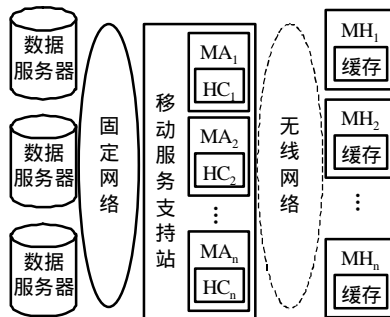


图1 缓存体系结构

内,都有一个连接在固定网络上的移动服务支持站(Mobile Support Station, MSS),MSS上有 n 个移动代理(Mobile Agent)负责分别管理该网络内相应的 n 个MH的缓存副本,该副本称为本地缓存(Home Cache),其缓存结构如图1所示。

对于一个具体的MSS而言,在它的覆盖范围内有 n 个移动主机($MH_i, 1 \leq i \leq n$),对于任一个 i ,都有一个相应的移动代理 MA_i 维护其 HC_i ,此 HC_i 是对应 MH_i 的缓存副本。 HC_i 由一系列的记录清单组成的,每个记录是一个三元组 $(x, TS, invalid_flag)$ 。其中 x 表示数据项, TS 是服务器在失效报告中提供时戳(Time-Stamp), $invalid_flag$ 是失效标

记,缺省值为FALSE。

因为本方案的失效报告的传送是异步的,失效报告先缓存在 HC_i 中,当移动主机与MSS连接时才由 MA_i 传送报告给MH。若失效项已发给MH但没收到确认, $invalid_flag$ 被标记为TRUE。每个移动主机维护本机的经常被访问缓存数据项,在回答任何应用查询之前,它首先检查数据的一致性状态。具体过程如下:当MSS收到来自服务器的失效报告,MSS通过和MA协商决定哪些MH集合需要这些数据并发送给它们。MH收到失效信息,它使本机缓存中的相应数据项失效。当MH从应用层收到查询请求,检查缓存数据的有效性,如果数据项有效,在本地就可以满足查询;否则,向MSS中的MA发送上行查询,MA再向服务器提出此请求,当MA从服务器收到请求数据后,先增加到HC中,再发送给MH。

2 数学模型

下面将建立一个用于分析移动计算环境里缓存策略性能的数学分析模型,该模型的假设参数如下:

- 1) 数据库中有 n 个数据项, 用 D 表示数据项的集合;
- 2) 无线网络的带宽为 W ;
- 3) 每个查询的请求上行开销为 b_q bit, 回答下行开销为 b_a bit;
- 4) 每个时戳(timestamp)消耗 b_T bit;
- 5) 数据更新的发生遵从指数分布, 且每一项的更新率为 m ;
- 6) 每个移动主机经常会查询的数据项的集合是 D 的子集, 这个子集称为针对特定移动主机的热集(hotspot), 热集中的每个数据项的被查询率为 \bar{e} ;
- 7) 在失效缓存策略中, 服务器每 L s广播一个失效报告;
- 8) 移动主机在每个时间间隔中, 处于断连状态的概率为 s , 处于连接状态的概率为 $1-s$ 。

根据上面的假设, 其公式推导如下:

首先设事件 A 表示“在时间间隔 L 中没有发生查询”, 事件 B 表示“在时间间隔 L 内移动主机处于连接状态”, 事件 C 表示“在时间间隔 L 内无更新”, 根据假设参数6)可以得到:

$$P(A|B) = 1 - P(\bar{A}|B) = 1 - (1 - e^{-LL}) = e^{-LL} \quad (3)$$

根据条件概率·概率乘法定理, 连接状态下无查询发生的概率 q 为:

$$q = P(AB) = P(A|B)P(B) = (1-s) e^{-LL} \quad (4)$$

式中 事件 A 可分为事件 A_1 “在断连状态无查询”和事件 A_2 “在连接状态无查询”, 根据概率加法定理, 事件 A 发生的概率 p 为:

$$p = P(A) = P(A_1) + P(A_2) = s + q = s + (1-s) e^{-LL} \quad (5)$$

$$P(\bar{A}) = 1 - P(A) = 1 - s - (1-s) e^{-LL} = (1-s)(1 - e^{-LL}) \quad (6)$$

根据假设参数5), 可得:

$$P(\bar{C}) = 1 - e^{-mL} \quad (7)$$

则事件 C 发生的概率 r 为:

$$r = P(C) = 1 - P(\bar{C}) = 1 - (1 - e^{-mL}) = e^{-mL} \quad (8)$$

每个时间间隔可分为两部分: 接收失效报告的时间和剩余时间(该时间可用于移动主机向服务器发出查询和接收响应)。在每个时间间隔中可传输的数据总量为 LW 比特, 可以根据具体策略计算出失效报告的广播量 B , 因此可用于提交服务器的查询带宽为 $LW-B$ 。假设 h 为查询缓存的命中率, T 为时间间隔内的系统总查询量(吞吐量), $(1-h)T$ 为没有命中缓存必须提交给服务器的查询量。根据假设参数3)每个查询需消耗 (b_q+b_a) 比特, 因此用于提交服务器查询的通信量为 $T(1-h)(b_q+b_a)$, 应等于 $LW-B$, 所以可得到:

$$T = LW - B / (b_q + b_a)(1-h) \quad (9)$$

2.1 最大吞吐量

设想一种理想的、无法实现的策略: 假设服务器知道每个移动主机的具体位置以及它的缓存内容, 一旦缓存数据项被更新, 可立即无代价的使之失效。这种策略可得到最大命中率(只有缓存项被更新才会无法命中), 而且该策略无需失效报告的开销, 因此 $B=0$, 由式(9)可得:

$$T_{\max} = LW / (b_q + b_a)(1-h_{\max}) \quad (10)$$

下面来计算最大命中率 h_{\max} , 假设某一时刻有一查询发生, 若满足下面两个条件, 该查询能命中缓存:

- 1) 对该项的最后一个查询发生在 δ 秒之前;
- 2) 两个查询之间没有发生更新。根据假设参数6), 事件1可简化为在 δ 时间间隔内的概率 $1e^{-LL}$, 根据式(8)事件2的概率为 $e^{-m\delta}$, 由于事件1和事件2是独立事件, h_{\max} 可按下式计算:

$$h_{\max} = \int_0^{\infty} 1e^{-\delta t} e^{-ut} dt = \int_0^{\infty} 1e^{-(L+u)t} dt = \int_0^{\infty} -\frac{1}{L+u} e^{-(L+u)t} d(-L-u)t = -\frac{1}{L+u} e^{-(L+u)t} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{L+u} \quad (11)$$

2.2 无缓存的吞吐量

对于无缓存的策略而言, 没有失效报告, 因此 $B=0$; 为了便于和其他策略比较 L 参数仍旧使用; 又由于没有缓存, 所以命中率 h 为0; 由此无缓存策略的吞吐量为:

$$T_{nc} = \frac{LW}{(b_q + b_a)} \quad (12)$$

2.3 时戳法的吞吐量

由1.1节可知 $w = kL$ 且 $k > 0$, 在时间间隔 w 内被改变的项数 n_c 可由下式算出:

$$n_w = n(1 - e^{-mw}) \quad (13)$$

因此可计算出 B 为:

$$B = n_i (\lg(n) + b_T) \quad (14)$$

根据前面的推导可得到时戳法的吞吐量 T_{TS} 为:

$$T_{TS} = \frac{LW - n_c(\lg(n) + b_T)}{(b_q + b_a)(1 - h_{ts})} \quad (15)$$

式中 h_{ts} 的值是未知的, 根据文献[5]中的分析可以给出该值的上下限为:

$$\frac{(1-p)r}{1-pr} - \frac{(1-p)r^{k+1}s^k}{1-pr} - \frac{(1-p)r^{k+1}s^k q}{(1-pr)^2} < h_{ts} < \frac{(1-p)r}{1-pr} - \frac{(1-p)r^{k+1}s^k}{1-qr} \quad (16)$$

2.4 移动代理法的吞吐量

对于移动代理法而言它的命中率 h 等于 h_{max} , 只需计算出它的 B 值, 就可计算出该策略的吞吐量。在时间间隔 L 内被改变的项数 n_L 可由下式算出:

$$n_L = n(1 - e^{-mL}) \quad (17)$$

因此可计算出 B 为:

$$B = n_L (\lg(n) + b_T) \quad (18)$$

根据前面的推导可得到移动代理法的吞吐量 T_a 为:

$$T_a = [LW - n_L(\lg(n) + b_T)] / (b_q + b_a) \left(1 - \frac{1}{1+m} \right) \quad (19)$$

3 结束语

吞吐量是评价移动计算环境缓存策略性能的一个非常重要的指标。通过对不同的缓存策略的吞吐量的计算和比较, 可以看出采用了缓存的策略, 其吞吐量明显优于无缓存策略; 而文献[3]中提出的移动代理法其吞吐量又优于普通时戳法。另外, 吞吐量还与第二小节提出的若干参数如数据库大小、带宽、更新率等相关, 利用该模型合理设置参数, 可以提出新的改进算法。

参 考 文 献

- [1] Imielinski T, Badrinath B R. Mobile wireless computing: challenges in data management[J]. Communication of ACM, 1994, 37(10): 18-28
- [2] Barbara D, Imielinski T. Sleepers and workaholics: Caching strategies in mobile environments[C]. Proceedings of the 1994 ACM-SIGMOD International Conference on Management of Data, 1994: 1-12
- [3] 吴 劲, 卢显良, 任立勇. 在移动计算环境中基于移动代理的缓存失效方案[J]. 计算机科学, 2003, 30(4): 82-84
- [4] 吴 劲, 卢显良, 任立勇, 等. 移动计算环境中缓存失效策略的归类研究法[J]. 计算机科学, 2004, 31(1): 39-41
- [5] Tan Kian-Lee, Cai Jun, Beng Chin Ooi. An evaluation of cache invalidation strategies in wireless environments[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed System, 2001, 12(8): 789-807

编 辑 刘文珍