

최적화된 다중디스크 브로드캐스트 프로그램 생성을 위한 디스크 주파수 할당

황정현, 조성호, 황종선

고려대학교 컴퓨터학과 분산시스템 연구실

Selection of Disk Frequencies for Optimal Multidisk Broadcast Program Generation

Jeong-Hyon Hwang, SungHo Cho, Chong-Sun Hwang
Distributed Systems Lab., Dep. of Computer Science, Korea University

요 약

서버로부터 클라이언트로의 전송 능력이 클라이언트로부터 서버로의 전송 능력보다 월등히 높다는 통신 비대칭성 (communication asymmetry)이 여러 유무선 정보 시스템에서 관찰됨에 따라서, 클라이언트가 서버로 데이터에 대한 요청을 보내는 전통적인 클라이언트/서버 통신 방식과는 달리 클라이언트로부터의 직접적인 요청 없이도 서버가 클라이언트에 데이터를 전송하는 “푸시(push)” 기법 및 일대다(one-to-many) 푸시 기법인 “데이터 진파(data dissemination)” 기법에 대한 연구가 활발히 진행되어오고 있다. 본 논문은 비균등 선호도 분포(non-uniform popularity distribution)를 가지는 데이터를 단일 브로드캐스트 채널에 효과적으로 전송하기 위해 연구되어온 브로드캐스트 디스크(Broadcast Disks) 기법에서 데이터에 대한 평균 지연 시간을 최소화하기 위해 각 디스크에 대한 주파수를 최적으로 설정하는 문제를 다루고 있다. 본 논문에서는 최적의 주파수 설정과 인판된 조건을 규명하기 위해서 수학적 모델링과 증명을 하였으며, 이러한 접근 방식의 정확성을 입증하기 위한 시뮬레이션 결과들을 제시한다.

1. 서 론

정보 시스템 상의 서버로부터 클라이언트로의 전송 능력이 클라이언트로부터 서버로의 전송 능력보다 월등히 높다는 특징이 다수의 유무선 시스템에서 관찰되고 있다. 통신 비대칭성 (communication asymmetry)라고 불리는 이러한 특징으로 인해서, 클라이언트가 서버로 데이터에 대한 요청을 보내는 전통적인 클라이언트/서버 통신 방식과는 달리 클라이언트로부터의 직접적인 요청 없이도 서버가 클라이언트에 데이터를 전송하는 “푸시(push)” 기법 및 일대다(one-to-many) 푸시 기법인 “데이터 진파(data dissemination)”에 대한 연구가 활발히 진행중이다.

본 논문은 “브로드캐스트 디스크(Broadcast Disks)”라고 불리는 주기적 데이터 진파 기법을 기반으로 하고 있다. 이 기법은 비균등 선호도 분포(non-uniform popularity distribution)를 가지는 데이터가 단일 브로드캐스트 채널에 효과적으로 전송하기 위해서, 비슷한 접근 빈도를 가지는 데이터별로 구분하고, 이들 각각을 디스크라 불리는 복수개의 영역에 할당한 다음, 하나의 브로드캐스트 주기 동안 각 디스크별로 전송 횟수를 다르게 해서 전송하는 방식을 말한다. [AAFZ95, Achar98, ZFAA94] 본 논문에서는 데이터를 접근하기 위한 평균 지연 시간(expected delay)을 최소화하기 위해서 각 디스크 별로 전송 횟수(주파수)를 어떻게 할당할 것인가에 대한 문제를 수학적 모델링과 증명을 통해서 해결한다.

2. 다중디스크 브로드캐스트 프로그램의 생성

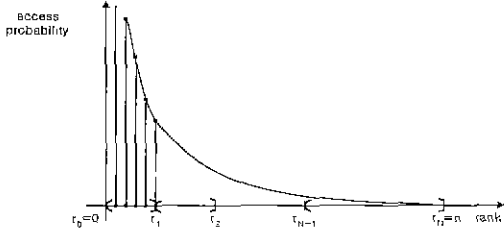
[AAFZ95]와 [Achar98]에서 제안한 다중디스크 브로드캐스트 프로그램 생성 알고리즘(multidisk broadcast program generation algorithm)은 다음과 같다.

1. 데이터를 접근빈도가 높은 것에서 낮은 것으로 정렬한다
2. 접근 확률이 유사한 데이터들을 구분해서 여러 개의 디스크로 분할한다. 디스크는 D_1 부터 D_N 으로 표시된다
3. 각 디스크 D_i 에 대한 주파수(frequency) f_i 를 결정한다.
4. f_1, f_2, \dots, f_N 에 대한 최소공배수(LCM) T_{max} 를 구한 다음, 각 디스크 D_i 를 $T_i = T_{max}/f_i$ 개의 소단위(chunk)로 분할한다. $C_{i,j}$ 은 디스크 D_i 에서의 j 번째 소단위를 나타낸다
5. 다음과 같은 방식으로 브로드캐스트 프로그램을 생성한다.
 - 5.1. for $i=0$ to $T_{max}-1$
 - 5.2. for $j=1$ to N
 - 5.3. broadcast $C_{i,((i \bmod T_j) - 1)}$
 - 5.4. endfor
 - 5.5. endfor

본 논문은 위 알고리즘에서의 3번째 단계인 주파수 할당에 있어서 최적의 브로드캐스트 프로그램을 생성하기 위한 조건을 규명하는 데 초점을 두고 있다.

3. 수학적 모델링 및 증명

본 절에서는 다중디스크 프로그램 생성시 최적화된 주파수 할당에 대한 여러 가지 정리를 증명한다.



[그림 1] 다중디스크 분할 예

위 그림 1은 n 개의 데이터들로 구성된 데이터베이스 $D = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 에 대한 접근 빈도의 분포를 보여준다. 여기서 데이터들은 가장 접근 빈도가 높은 것에서부터 낮은 것으로 정렬되어 있으며, 모두 동일한 크기를 갖는다고 가정한다. 가장 접근 빈도가 높은 데이터의 순위(rank)는 1이다 $R = (0, n]$ 이라고 하자

정의 3.1. 개폐구간 $(a, b]$ 가 R 에서 정의되어 있을 때, 집합 $P = \{r_0, r_1, \dots, r_N\}$ 이 $a = r_0 < r_1 < \dots < r_{N-1} < r_N = b$ 를 만족한다면, 집합 P 를 구간 $(a, b]$ 에 대한 분할(partition)이라고 하며, $n_k = r_k - r_{k-1}$ 으로 정의한다.

정의 3.2. 데이터 x 에 대한 순위(rank)는 $r(x)$ 로 표기하며, 순위가 r 인 데이터에 대한 접근 확률(access probability)은 $\beta_r(x)$ 로 표기한다. 이 때, 데이터 x 에 대한 접근 확률 $\beta(x)$ 은 다음과 같이 정의된다.
$$\beta(x) = \beta_r(r(x))$$

정의 3.3. $P = \{r_0, r_1, \dots, r_N\}$ 이 $R = (0, n]$ 에 대한 분할일 때, k 번째 브로드캐스트 디스크 D_k 는 다음과 같이 정의된다.

$$D_k = \{x \in D \mid r(x) \in (r_{k-1}, r_k]\}$$

여기서, 각 브로드캐스트 디스크 D_k 는 구간 $(r_{k-1}, r_k]$ 상에서 정의되며, n_k 개의 데이터를 가진다.

정리 3.1. N 개의 브로드캐스트 디스크들의 집합인 $\{D_i\}_{i=1, \dots, N}$ 은 다음과 같은 성질을 갖는다.

- 1 임의의 $i, j (i \neq j)$ 에 대해서, $D_i \cap D_j = \emptyset$.
- 2 $D = \bigcup_{i=1, \dots, N} D_i$.

(증명 생략)

정의 3.4. 데이터 x 에 대한 주파수는 $freq(x)$ 로 표기한다. 브로드캐스트 디스크 D_k 에 대한 주파수를 f_k 로 표기하면, $x \in D_k$ 인 모든 데이터 x 에 대해서, $freq(x) = f_k$ 가 성립된다.

정의 3.5. 브로드캐스트 프로그램의 주기(period) P 는 다음과 같이 정의된다.

$$P = \sum_{x \in D} freq(x)$$

정리 3.2. 브로드캐스트 디스크 D_i 에 대해서 데이터의 개수를 n_i , 주파수를 f_i 라고 한다면, 주기 P 는 다음과 같이 표현된다

$$P = \sum_{i=1}^N n_i f_i$$

(증명) 브로드캐스트 디스크들의 집합 $\{D_i\}_{i=1, \dots, N}$ 은 데이터베이스 D 를 분할하므로 (정리 3.1),

$$\begin{aligned} P &= \sum_{x \in D} freq(x) \\ &= \sum_{x \in D_1} freq(x) + \sum_{x \in D_2} freq(x) + \dots + \sum_{x \in D_N} freq(x) \\ &= \sum_{x \in D_1} f_1 + \sum_{x \in D_2} f_2 + \dots + \sum_{x \in D_N} f_N \\ &= \sum_{i=1}^N n_i f_i \end{aligned}$$

정의 3.6. 브로드캐스트 프로그램의 주기를 P , 데이터 x 에 대한 주파수를 $freq(x)$ 라고 한다면, $x \in D$ 인 데이터 x 에 대해서, x 에 대한 평균 지연 시간 $\omega(x)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\omega(x) = \frac{P}{2 \cdot freq(x)}$$

정의 3.7. 임의의 데이터에 대한 평균 지연 시간(expected delay) ω 는 다음과 같이 정의된다

$$\omega = \sum_{x \in D} \beta(x) \omega(x)$$

정리 3.3. 브로드캐스트 디스크 D_i 내 데이터들의 수를 n_i , 디스크 D_i 내 데이터들에 대한 접근 확률의 합을 B_i (즉, $B_i = \sum_{x \in D_i} \beta(x)$), 디스크 D_i 에 대한 주파수를 f_i 라고 한다면, 평균 지연 시간 ω 는 각 주파수 f_i 가 $\sqrt{\frac{B_i}{n_i}}$ 에 비례할 때 최소값을 가지게 된다

(증명) 브로드캐스트 디스크들의 집합 $\{D_i\}_{i=1, \dots, N}$ 은 데이터베이스 D 를 분할하므로 (정리 3.1),

$$\begin{aligned} \omega &= \sum_{x \in D_i} p(x) \omega(x) \\ &= \sum_{x \in D_1} p(x) \omega(x) + \sum_{x \in D_2} p(x) \omega(x) + \dots + \sum_{x \in D_N} p(x) \omega(x) \\ &= \sum_{x \in D_1} p(x) \frac{P}{2 \cdot \text{freq}(x)} + \dots + \sum_{x \in D_N} p(x) \frac{P}{2 \cdot \text{freq}(x)} \\ &= \sum_{x \in D_1} p(x) \frac{P}{2 \cdot f_1} + \dots + \sum_{x \in D_N} p(x) \frac{P}{2 \cdot f_N} \\ &= \frac{P}{2} \cdot \sum_{x \in D_1} p(x) + \dots + \frac{P}{2} \cdot \sum_{x \in D_N} p(x) \\ &= \frac{P}{2} \cdot \frac{B_1}{f_1} + \frac{P}{2} \cdot \frac{B_2}{f_2} + \dots + \frac{P}{2} \cdot \frac{B_N}{f_N} \\ &= \frac{P}{2} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{B_i}{f_i} \end{aligned}$$

그런데, 정리 32에 의해서 $P = \sum_{i=1}^N n_i f_i$ 이므로,

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^N n_i f_i \right) \left(\sum_{i=1}^N \frac{B_i}{f_i} \right) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{1 \leq i, j \leq N} n_i f_i \frac{B_j}{f_j} \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N n_i B_i + \frac{1}{2} \sum_{1 \leq i < j \leq N} n_i f_i \frac{B_j}{f_j} \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N n_i B_i + \frac{1}{2} \sum_{1 \leq i < j \leq N} \left(n_i f_i \frac{B_j}{f_j} + n_j f_j \frac{B_i}{f_i} \right). \end{aligned}$$

산술 평균과 기하 평균의 관계를 이용하면, 각 i, j ($i < j$)에 대해서,

$$n_i f_i \frac{B_j}{f_j} + n_j f_j \frac{B_i}{f_i} \geq 2\sqrt{n_i n_j B_i B_j}$$

이 성립하게 되며, 이 때 등호는 $n_i f_i \frac{B_j}{f_j} = n_j f_j \frac{B_i}{f_i}$ 일 때

성립하게 된다
 그런데,

$$\begin{aligned} n_i f_i \frac{B_j}{f_j} &= n_j f_j \frac{B_i}{f_i} \Leftrightarrow f_i^2 \frac{B_j}{n_i} = f_j^2 \frac{B_i}{n_j} \\ &\Leftrightarrow f_i \cdot f_j = \frac{B_i \cdot B_j}{n_i \cdot n_j} \\ &\Leftrightarrow f_i \cdot f_j = \sqrt{\frac{B_i}{n_i}} \cdot \sqrt{\frac{B_j}{n_j}} \end{aligned}$$

이므로, 각 주파수 f_i 가 $\sqrt{\frac{B_i}{n_i}}$ 에 비례할 때 $n_i f_i \frac{B_j}{f_j} + n_j f_j \frac{B_i}{f_i}$ 은

최소값 $2\sqrt{n_i n_j B_i B_j}$ 을 가지게 된다

또한, 이 때 최소 지연 시간 ω_{\min} 은 다음과 같이 표현된다

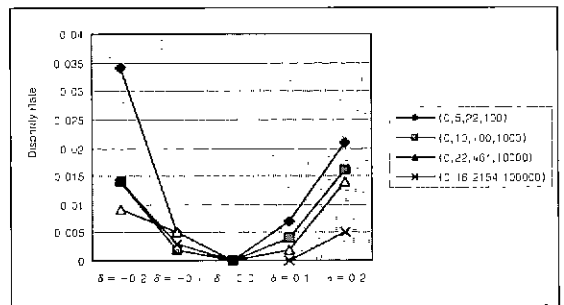
$$\omega_{\min} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N n_i B_i + \sum_{1 \leq i < j \leq N} \sqrt{n_i n_j B_i B_j}.$$

5. 시뮬레이션

본 길에서는 제 3절 수학적 모델링 및 증명에 대한 정확성을 입증하는 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 2는 브로드캐스트 디스크의 개수가 4인 경우, Zipf 분포를 따르는 데이터의 개수를 100에서 100000까지 증가시켜 가면서 최적의 주파수 할당에 관한 실험을 한

결과를 보여준다. 이 실험에서는 각 디스크에 데이터들을 할당하기 위해서 사용된 분할 $P = \{r_0, r_1, \dots, r_N\}$ 가 기하급수를 따르도록 하였으므로, n_i 이 선제 데이터들의 수를 나타낼 때, $r_0 = 0, r_1 = x, r_2 = x^2, \dots, r_N = x^N = n$ 을 만족한다. 또한, 디스크 D_i 에 대한 최적의 주파수 f_i 를 정리 43에서 언급된 것과 같이 $\sqrt{B_i/n_i}$ 에 비례하는 양의 정수로서 $f_N = 1$ 을 만족하도록 할당하였다. 그리고, 각 디스크 분할에 대해서 앞서 언급된 주파수 설정 방식의 최적성에 대한 검증을 하기 위해 다섯 가지 경우로 주파수 값을 설정한 다음 각 경우에 대한 지연시간을 비교하였는데, 본 실험에서는 다섯 개의 δ 값에 대해 아래와 같은 방식으로 각 주파수를 구하였다. $f_N = 1, f_{i-1} = f_i \cdot \frac{F_i - 1}{F_i} \cdot (1 + \delta)$ (단, F_i 는 디스크 D_i 에 대해서 최적으로 할당된 주파수)

실험결과 그림 2에서 보여주는 것과 같이 각 분할에 대해서 $\delta = 0$ 인 경우, 즉 최적의 주파수 할당 방식인 경우, 산출된 평균 지연 시간 ω_i 가 최소로 나타나게 되었는데, i 번째 실험의 편차 비율(Disparity Rate)은 다음과 같이 정의되었다 $\frac{\omega_i - \min\{\omega_j\}_{j=1,2,\dots,5}}{\min\{\omega_j\}_{j=1,2,\dots,5}}$ (단, ω_i 는 i 번째 실험에서의 평균 지연 시간)



[그림 2] 주파수 할당 실험 결과 (N=4)

6. 결론

본 논문에서는 다중디스크 브로드캐스트 프로그램을 생성할 때, 분할된 각 디스크에 대한 최적의 주파수 값을 할당할 수 있는 조건을 수학적 모델링과 증명을 통해서 규명하였으며, 시뮬레이션을 통해서 이러한 수학적 접근의 정확성을 입증하였다. 향후 과제로는 디스크의 개수 N 이 주어졌을 때, 최적으로 디스크를 분할하는 방법에 대한 연구를 계획 중에 있다.

참고문헌

[AACH95] S. Acharya, R. Alonso, M. Franklin, and S. Zdonik, "Broadcast Disks: Data management for asymmetric communications environments," In Proceedings of the 1995 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, pages 199-210, San Jose, CA, May 1995.

[AACH98] S. Acharya, "Broadcast Disks: Dissemination-based Data management for Asymmetric Communication Environments," Ph.D. Thesis, Brown University, May 1998.

[ZFAA94] S. Zdonik, M. Franklin, R. Alonso, and S. Acharya, "Are 'Disks in the Air' Just 'Pie in the Sky'?" In IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, December 1994.