무선 브로드캐스트 환경에서 편향된 데이터 접근 패턴을 갖는 모바일 트랜잭션을 위한 효율적인 동시성 제어 기법

최근하° 정성원
서강대학교 컴퓨터학과
purymul°@sogang.ac.kr, jungsung@sogang.ac.kr

An Efficient Concurrency Control Scheme for Mobile Transactions with Skewed Data Access Patterns in Wireless Broadcast Environments

Keun-Ha Choi° Sungwon Jung
Dept. of Computer Science, Sogang University

요 약

무선 브로드캐스트 환경에서는 모바일 클라이언트의 제한된 배터리와 클라이언트에서 서버로의 제한된 상향 대역폭 등의 문제로 기존의 동시성 제어 기법을 그대로 사용할 수 없다. 이런 문제를 해결하고자 많은 동시성 제어 기법들이 연구되어 왔는데, 지금까지 제안된 기법들은 편향된 데이터의 접근 패턴을 반영한 브로드캐스트 환경을 고려하지 못하고 있다. 무선 브로드캐스트 환경에서 서버는 일반적으로 모바일 클라이언트의 접근 패턴을 고려하여 편향된 접근 빈도를 갖는 데이터 아이템을 브로드캐스트 한다. 본 논문에서는 무선 브로드캐스트 환경에서 편향된 데이터 접근 패턴을 고려한 동시성 제어 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 브로드캐스트 디스크 모델에서 전체 메이저 브로드캐스트 주기마다 모바일 트랜잭션을 위한 제어 정보를 보내는 것이 아니라 일정한 마이너 브로드캐스트 주기마다 제어 정보를 전송한다. 이는 접근 빈도가 높은 데이터가 갱신된 경우, 갱신된 내용을 마이너 그룹마다 반영하므로 읽기 전용 트랜잭션이 접근하는 데이터가 최신 정보임을 보장할 뿐만 아니라 갱신 트랜잭션이 최종 검증을 위해서 상향 통신 대역폭을 이용하는 횟수를 줄이고, 보다 빠른 재실행을 통해 모바일 트랜잭션의 평균 응답시간을 줄여줄 수 있다. 또한 모바일 트랜잭션의 요청이 편향된 경우, 반복적인 트랜잭션의 중단, 재실행으로 인한 성능 저하를 개선하고자 정적 백오프 기법을 이용하여 모바일 트랜잭션 간 충돌 가능성을 줄여준다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 기존의 기법들에 비해 평균 접근 시간, 상향 통신 대역폭 등의 사용량이 현저히 줄어드는 것을 보임으로써 제안하는 기법의 성능을 검증한다.

1. 서 론

최근에 핸드폰이나 PDA와 같은 이동 가능한 컴퓨터나 무선 통신 네트워크의 발전은 분산된 이동 컴퓨팅 패러다임을 부각시키고 있다[1]. 하지만, 무선 환경에서 모바일 기기는 물리적인 제약 조건으로 인해 비대칭적인 통신 대역폭과 배터리 부족 등의 문제를 갖고 있다. 이런 환경에서 브로드캐스트 방식은 모바일 클라이언트의 수와 상관없이 확장이 가능하고 서버와의 상향 통신량을 줄일 수 있다는 장점으로 인해 주식 거래, 경매, 기상 정보, 교통 정보 방송과 같은 다양한 응용 분야에 적용되고 있다[4]. 주식 거래와 같은 응용 분야에서는 데이터 브로드캐스트 모델의 특징 상, 다수의 모바일 클라이언트가 서버로부터 브로드캐스트 되는 공통의 주식 정보를 읽거나, 하나의 주식을 여러 모바일 클라이언트가 동시에 구입하거나 판매하는 갱신 트랜잭션이 발생하게 된다. 이에 따라 브로드캐스트 되는 데이터를 일관성 있게 관리하기 위한 트랜잭션 단위의 동시성 제어 기법이 필요하다.

하지만 무선 환경에서의 제약 조건으로 인해 기존의 동시성 제어 기법을 그대로 적용하는 것은 적합하지 않다. 이를 해결하고자 무선 데이터 브로드캐스트 환경을 위한 많은 트랜잭션 처리 기법들이 연구되어 왔다[3][4][5][6][7]. 하지만 지금까지의 트랜잭션 처리 기법들은 모바일 클라이언트의 편향된 접근 패턴을 고려하지 못하고 있다. 실제로는 데이터마다 모바일 클라이언트의 선호도의 차이가 존재하는데 이에 따라 선호도가 높은 데이터에 대해서는 빈번하게 읽기 연산이 발생하고 동시에 여러 모바일 클라이언트에서 갱신 연산을 실행하는 확률이 높아진다. 그로 인해 모바일 클라이언트의 접근 패턴이 편향된 경우에는 트랜잭션 간에 충돌이 발생할 확률이 훨씬 높아지게 된다. 그러므로 데이터의 접근 패턴이 편향된 경우에 적합한 트랜잭션 처리 기법이 요구된다.

본 논문에서는 모바일 클라이언트의 편향된 접근 패턴을 고려한 브로드캐스트 디스크 방식을 기반으로 브로드캐스트 주기마다 제어 정보를 전송하는 것이 아니라 보다 작은 단위인 일정한 마이너 브로드캐스트 주기마다 제어 정보를 제공하도록 한다. 이로 인해 읽기 전용 트랜잭션이 접근하는 데이터가 최신 정보임을 보장하고, 갱신 트랜잭션의 최종 검증을 위해 상향 통신 대역폭을 사용하는 횟수를 줄일 수 있도록 한다. 또한 보다 빠른 재실행을 통해 트랜잭션의 평균 응답시간을 줄여줄 수 있다. 마지막으로 모바일 트랜잭션의 요청이 편향된 경우에 발생하는 트랜잭션의 반복적인 중단 및 재실행으로 인한 성능 저하를 개선하고자 정적 백오프 기법을 이용하여 모바일 트랜잭션간의 충돌 가능성을 줄여준다.

본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 기존의 브로드캐스트 모델인 브로드캐스트 디스크 방식과 동시성 제어 기법인 OCC 기법에 대해 설명한다. 3장에서는 제안하는 기법인 GMCCI (Group of Minor Cycle with Control Information) 기법에 대해 소개하고 4장에서는 제안된 기법의 성능을 분석하고, 마지막으로 5장에서는 논문의 결론을 논의한다.

2. 관련 연구

본 논문에서 제안하는 기법을 설명하기 위해서 브로드캐스트 모델인 브로드캐스트 디스크 방식과 동시성 제어 기법인 OCC (Optimistic Concurrent Control) 기법에 대해서 설명한다.

브로드캐스트 모델에서는 각 데이터에 대역폭을 할당하는 방법에 따라 평균 지연 시간이 크게 차이를 보일 수 있다. 만약 데이터의 접근 패턴이 편향된 경우에는 접근 빈도가 높은 데이터에 좀 더 많은 대역폭을 할당하는 기법이 더 나은 성능을 보인다[2]. Acharya는 브로드캐스트 디스크 기법을 제안하여 데이터의 접근 패턴이 편향된 환경에 적합한 브로드캐스트 프로그램 할당 기법을 연구하였다. 이 기법은 데이터를 접근 빈도에 따라 접근 빈도가 높은(Hot) 데이터에서 접근 빈도가 낮은(Cold) 데이터 순서로 정렬하여 여러 개의 디스크(disk)로 분할하여 전송하는 방식이다. 이 기법은 인기 있는 데이터를 좀 더 빠른 디스크에 할당함으로써 전체 평균 지연 시간을 감소시킨다. 하지만 균등하게 데이터를 배열하는 Flat 기법에 비해 브로드캐스트 주기가 길어지는 단점이 있다.

OCC 기법은 무선 환경에서의 제약점을 극복하고자 하는 동시성 제어 기법이다. V. Lee는 서버와 모바일 클라이언트에서 정방향 검증과 부분적인 역방향 검증을 이용한 OCC 기법을 제안하였다[4]. 이 기법은 모바일 트랜잭션의 대부분을 차지하는 읽기 전용 트랜잭션의 경우 서버와의 연계 없이 부분적인 역방향 검증을 통해 모바일 클라이언트 자체적으로 수행하도록 한다. 갱신 트랜잭션의 경우에는 정방향 검증

을 통하여 서버에서 최종 검증을 수행하도록 한다. 이 기법은 읽기 전용 트랜잭션의 경우 지역적으로 커미트가 가능하기 때문에 통신비용을 크게 줄일 수 있다는 장점을 갖는다. 하지만 모바일 트랜잭션의 접근 패턴이 편향된 경우 반복적인 트랜잭션의 중단 및 재실행으로 인해 상향 대역폭을 불필요하게 사용하고 모바일 클라이언트의 자원을 낭비하는 단점을 갖는다. 또한 이 기법은 브로드캐스트 디스크 방식의 긴 브로드캐스트 주기를 고려하지 않고 있기 때문에 부분적인 역방향 검증의 효율이 낮다는 단점이 있다.

본 논문에서는 모바일 클라이언트이의 접근 패턴이 편향된 경우 GMCCI 기법과 정적 백오프 기법을 통해서 이와 같은 문제를 해결한다.

3. GMCCI 기법

본 논문에서 브로드캐스트 모델은 편향된 데이터 아이템의 접근 빈도를 반영하기 위해서 앞에서 설명한 브로드캐스트 디스크 방식을 가정한다[2]. GMCCI 기법은 모바일 트랜잭션을 위한 제어 정보를 매 브로드캐스트 주기의 시작부분에서만 제공하는 것이 아니라, 브로드캐스트 주기를 구성하는 마이너 주기를 k개의 마이너 그룹으로 구성하여 각 그룹의 시작에서 제어 정보를 제공하는 기법이다. 정의 1에서 마이너 그룹 $G_{i,j}$에 대해 정의한다.

정의 1. C_i를 브로드캐스트의 메이저 주기라고 하고, $C_{i,j}$는 브로드캐스트의 메이저 주기 C_i의 마이너 주기라고 하자. 즉, 마이너 주기 $C_i = \sum_{j=1}^{m} C_{i,j}$ 이다. 단, $1 \le j \le m$ 이다. 이 때, 브로드캐스트 C_i의 마이너 그룹 $G_{i,l}$은 임의의 c개의 마이너 주기로 이루어진 그룹을 의미한다. 즉, $G_{i,l} = \sum_{j=c(l-1)+1}^{d} C_{i,j}$ 이고, $C_{i,j} = \sum_{l=1}^{k} G_{i,l}$이다. 단 $1 \le c \le m$, $1 \le l \le k$ 이다. 만약 $m = c' c$가 아니라면 마지막 마이너 그룹 $G_{i,k}$는 나머지 마이너 주기의 합으로 구성된다. 단 c'는 임의의 상수이다. □□

서버에서는 모바일 트랜잭션의 부분적인 역방향 검증을 위해 각 마이너 그룹의 시작마다 제어 정보 $CI[G_{i,l}]$를 전송한다. $CI[G_{i,l}]$은 다음과 같다.

- $CI[G_{i,l}]$: 서버에서 실행이 완료된(committed) 트랜잭션의 쓰기 집합으로 브로드캐스트의 마이너 그룹 $G_{i,l-1}$에 갱신된 데이터의 ID로 구성된다. 즉, $CI[G_{i,l}] = \sum_{j=c(l-1)+1}^{cl} WCI[C_{i,j}]$ 이다.
- $WCI[C_{i,j}]$: 서버에서 실행이 완료된(committed) 트랜잭션의 쓰기 집합(Write Set)으로 브로드캐스트의 마이너 사이클 $C_{i,j-1}$에 갱신된 데이터의 ID로 구성된다. 단, $1 \le j \le m$ 이다.

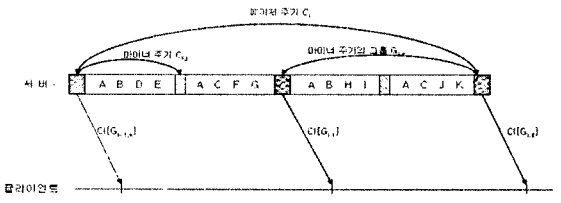


그림 1 GMCCI 기법에 의한 제어 정보 전송

즉, GMCCI 기법에서는 그림 1과 같이 각 마이너 그룹의 시작에서 제공되는 제어 정보를 통해서 모바일 트랜잭션의 부분적인 역방향 검증을 수행한다. 즉, 각 마이너 그룹 $G_{i,j}$에서 전송되는 데이터는 전체 데이터 아이템을 k개의 마이너 그룹의 수로 중복 분할한 형태이다. 그러므로 각 마이너 그룹 $G_{i,j}$에서 데이터의 일관서이 유지됨을 정리 1과 정리2를 통해서 증명한다.

정리 1. 마이너 그룹 $G_{i,l}$ 안에서 브로드캐스트 되는 데이터는 마이너 그룹 $G_{i,l}$ 안에서 일관성(consistency)을 유지한다.
증명. 증명은 기술 논문을 참조하기 바랍니다[8]. □□

정리 2. 각각의 마이너 그룹 $G_{i,j}$에서 브로드캐스트 되는 데이터는 전체 데이터베이스에서의 일관성을 보장한다.
증명. 증명은 기술 논문을 참조하기 바랍니다[8]. □□

정리 1과 정리 2를 통해서 각 마이너 그룹 $G_{i,j}$에서 브로드캐스트 되는 데이터를 수신하여 트랜잭션을 수행하는 것은 일관성을 유지함을 알 수 있다. 또한 멀티 디스크를 구성함으로써 길어지는 브로드캐스트 주기를 k개의 마이너 그룹으로 분할함으로써 보다 서버로부터 보다 빠른 시점에 제어 정보를 받을 수 있게 된다. 즉, 제어 정보를 통해서 서버와의 최종 검증에서 실행 취소가 될 트랜잭션들을 모바일 클라이언트 자체적으로 검증 할 수 있게 됨으로서 불필요한 상향 통신 대역폭과 자원의 낭비를 줄일 수 있다.

다음 그림 2와 그림 3은 각각 모바일 클라이언트에서 수행되는 부분적인 역방향 검증과 서버에서 수행되는 최종 검증에 관한 알고리즘이다.

```
Tv : the validating transaction
Gi,j : the j-th minor group of the i-th broadcast cycle
CI[Gi,j] : the control information of the Gi,j
partial_validation(Tv)
{ if WS(Tv) ≠ { } then {
    if CI[Gi,j]∩RS(Tv) ≠ { } or CI[Gi,j]∩WS(Tv) ≠ { } then
      abort(Tv);
    else {
      record the value of Gi,j;
      Tv is allowed to continue;
    }
  }
}
```

그림 2 모바일 클라이언트의 부분적인 역방향 검증 알고리즘

```
Tv : the validating transaction
Ta : the conflicting transactions existing at the server
Tc : the committed transactions
Gi,j : the j-th minor group of the i-th broadcast cycle
CI[Gi,j] : the control information of the Gi,j
validation(Tv)
{ if Tv is a mobile transaction then {
      final_validation(Tv);
      if return fail then {
        abort(Tv);
        staticBackoff(Tv);
      }
  }
  foreach Ta (a=1,....,n)
    if RS(Ta)∩WS(Tv) ≠ { } then abort(Ta);
  commit WS(Tv) to database;
  CI(Gi,l) = CI(Gi,l)∪WS(Tv);
}
final_validation(Tv)
{ foreach Tc (v=1,....,m)
    if WS(Tc)∩RS(Tv) ≠ { } then return fail;
}
```

그림 3 서버의 정방향 검증 알고리즘

4. 정적 백오프 기법

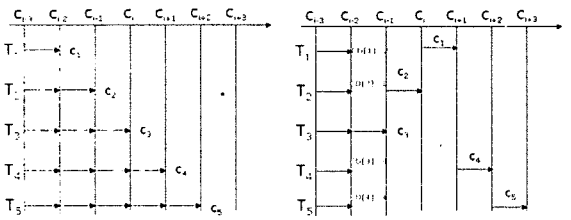
OCC 기법은 트랜잭션의 재실행 비율에 따라 성능이 크게 저하될 수 있다. OCC 기법은 브로드캐스트 주기 동안 하나의 갱신 트랜잭션만을 허용하고 나머지 트랜잭션은 다음 주기에 재실행을 하게 된다. 데이터의 접근 패턴이 편향된 경우, 선호도가 높은 데이터에 대하여 다수의 모바일 트랜잭션이 접근할 확률이 높아지게 되고, 반복적인 트랜잭션의 재실행이 발생하여 제한적인 모바일 클라이언트의 자원을 낭비하는 문제가 발생한다.

이 때 한 브로드캐스트 주기 동안 충돌이 발생한 트랜잭션에 대해 서버에서 백오프 정도를 계산하여 충돌이 발생한 모바일 트랜잭션의 편향된 접근을 분산시킬 수 있다. 그림 5의 (a)와 같이 반복적인 재실행의 경우 총 10번의 재실행이 발생하지만, (b)와 같이 정적 백오프

를 사용하는 경우에는 5번의 재실행이 발생하는 것을 알 수 있다. 다음 그림 4는 서버에서 정적 백오프를 수행하는 알고리즘이다.

```
Tv : the validating transaction
conflictDegree[x] : contention degree of the data item x
void staticBack(Tv)
{  foreach Tv's conflicted data item x in database {
       if conflictDegree[x] > 1
            staticbackoff = conflictDegree[x];
       else
            staticbackoff = 1;
   }
   restart Tv at staticbackoff-th minor group
}
```

그림 4 정적 백오프 알고리즘



(a) (b)

그림 5 반복적인 재실행과 정적 백오프 기법을 사용한 예

5. 성능 평가

본 논문의 실험은 Intel(R) Pentium(R) 4 CPU 2.6GHz 프로세서와 1GB 메모리상에서 수행되었다. 모든 실험에 대해서 모바일 클라이언트의 비정규 분포의 접근 패턴을 모델링하기 위해서 매개 변수 θ를 갖는 Zipf 분포를 사용하였다. 실험은 브로드캐스트의 Flat 모델을 기반으로 한 V.Lee가 제안한 FBOCC 기법 (FBOCC_FLAT)과 브로드캐스트 디스크 모델 기반의 FBOCC 기법(FBOCC), 브로드캐스트 디스크 모델에서의 제안하는 GMCCI 기법(GMCCI), 그리고 정적 백오프를 사용한 GMCCI 기법(GMCCI_STATIC)을 비교하였다.

그림 6은 zipf factor에 따른 평균 응답 시간을 측정하였다. Flat 모델은 데이터의 접근 빈도를 반영하지 못하기 때문에 zipf 값이 높아지면 급격하게 응답 시간이 증가하는 것을 알 수 있다. 브로드캐스트 디스크 기반의 FBOCC 기법은 zipf 값이 증가함에 0.5까지는 따라 응답시간이 줄어들지만 그 이후에는 모바일 클라이언트의 충돌이 잦아지기 때문에 응답시간이 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 제안하는 GMCCI 기법에서는 데이터의 접근 빈도를 반영한 브로드캐스트 디스크 모델에 적절하게 적응하여 클라이언트의 요청이 집중됨에도 응답시간이 크게 증가하지 않는 것을 알 수 있다.

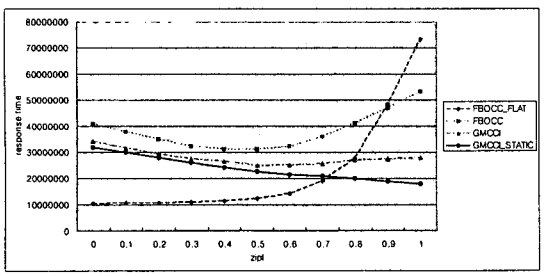


그림 6 zipf factor에 따른 평균 응답 시간(bit-time)

그림 7은 모바일 클라이언트의 요청이 집중됨에 따라 Flat이나 브로드캐스트 디스크 모델에서의 FBOCC기법은 최종 검증을 위한 상향 통신 대역폭의 사용이 급격하게 증가하지만, 제안하는 GMCCI 기법에서는 마이너 그룹의 제어 정보를 통해 클라이언트 측에서 미리 검증을 수행하기 때문에 최종 검증을 위한 상향 통신 대역폭의 사용이 현저히 줄어든 것을 알 수 있다.

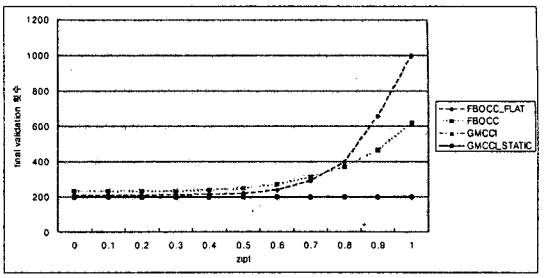


그림 7 zipf factor에 따른 최종 검증 요청 횟수

6. 결 론

본 논문에서는 브로드캐스트 디스크 모델에 적합한 효율적인 동시성 제어 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 브로드캐스트의 메이저 주기가 아닌 일정한 마이너 주기의 그룹마다 제어 정보를 전송하도록 한다. 이 기법은 브로드캐스트 디스크 모델의 긴 브로드캐스트 주기로 인한 부분적인 역방향 검증의 효율이 낮아지는 것을 보완한다. 또한 접근 빈도가 높은 데이터가 갱신된 경우, 갱신된 내용을 전체 주기가 아닌 마이너 그룹마다 반영하기 때문에 읽기 전용 트랜잭션이 접근하는 데이터가 최신 정보임을 보장한다. 갱신 트랜잭션의 경우에는 서버와의 통신 없이 자체적으로 검증을 수행하여 불필요한 상향 대역폭의 사용을 줄일 수 있다. 마지막으로 정적 백오프를 이용하여 모바일 트랜잭션의 접근을 분산시킴으로써 반복적인 재실행으로 인한 성능 저하를 방지하였다. 본 논문에서 제안하는 GMCCI 기법에서 마이너 그룹의 개수를 결정하는 최적화 기법에 대한 연구를 향후 계획으로 남긴다.

7. 참고문헌

[1] T. Imielinkski and B.R. Badrinath, "Mobile Wireless Computing: Challenges in Data Management." *Comm. ACM*, vol. 37, no. 10, pp.18-28, 1994

[2] S. Acharya, M. Franklin, S. Zdonik, and R. Alonso, "Broadcast Disks: Data Management for Asymmetric Communication Environments," *Proc. ACM SIGMOD Conference*, pp. 199-210, 1995.

[3] H. Cho, "Concurrency Control for Read-Only Client Transactions in Broadcast Disks," *IEICE Trans. Comm.*, vol. E86-B, no.10, 2003.

[4] V. Lee, K-W. Lam, T-W Kuo, "Efficient validation of mobile transactions in wireless environments," *The Journal of Systems and Software*, pp.183-193, 2004.

[5] V. Lee, Sang H.Son, "On Transaction Processing with Partial Validation and Timestamp Ordering in Mobile Broadcast Environments", *IEEE transaction on Computer*, Vol 15, No. 10, 2002.

[6] Kung, H. T., Robinson, J. T., "On optimistic methods for concurrency control," *ACM Transactions on Database Systems 6(2)*, pp. 213-226, 1981.

[7] E. Pitoura, P. K. Chrysanthis, "Scalable Processing of Read-Only Transactions in Broadcast Push," *Proc. 19th IEEE International Conference on Distributed Computing System*, pp. 432-439, 1999.

[8] Keun-ha Choi, Sungwon Jung, "An efficient transaction processing method for data of skewed access patterns in wireless broadcast environments", *Technical report, Sogang University*, 2005