

센서 네트워크를 위한 저전력 통신 기법†

서울대학교 임근수* · 김지홍** · 고 건**

1. 서 론

센서 네트워크는 차세대 유비쿼터스 컴퓨팅 환경의 네트워크 모델을 반영하기 때문에 최근 이와 관련된 폭 넓은 연구와 개발이 진행되고 있다(1). 센서 네트워크는 다수의 소형 센서 노드들을 사용하여 구성하며, 온도, 빛, 소리 등과 같은 물리 데이터를 비용 효율적인 방식으로 수집하는데 사용한다. 센서 노드들은 (예를 들면 Mote(2)와 Smart-Its(3)) 수집한 데이터를 저가의 RF 통신 모듈을 사용해 임시적으로 구성된 통신 경로를 통해서 중앙의 기지국 노드로 전송한다. 이로 인해 센서 네트워크는 설치 및 사용이 용이하고 비용이 적게 든다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인하여 최근 사무 및 가정 자동화를 비롯하여 군사 및 의료 목적 등으로 널리 사용되고 있다.

앞으로 센서 네트워크를 보다 다양한 사회 분야에서 유용하게 사용하기 위해서는 크게 두 가지 성능상의 문제를 해결해야 한다. 하나는 에너지 소비 문제이다. 센서 노드는 소형 배터리를 사용해 에너지를 공급받는데 일반적으로 배터리 교환이 용이하지 않은 위치에 설치되기 때문에 센서 노드의 평균 소모 전력을 최소화할 필요가 있다. 알려진 바에 따르면 센서 노드의 전체 소모 전력의 20-60%를 무선 통신에 사용하는 RF 모듈이 차지하고 있다(4,5). 따라서 센서 노드와 센서 네트워크의 평균 작동 시간을 연장하기 위한 저전력 통신규약에 대한 연구 및 개발이 반드시 필요하다.

다른 하나는 신뢰성 있는 데이터 전송 문제이다. 일반적으로 센서 노드에 장착된 소형 RF 모듈은 약 50%에 이르는 높은 패킷 에러율을 갖는다(6). 이로 인해 네트워크 환경이 넓어지면 패킷의 성공적인 전송률이 심각하게

낮아져 센서 네트워크의 유용성을 심각하게 떨어뜨린다. 또한 낮은 패킷 전송률은 불필요한 통신 에너지의 낭비를 의미한다. 왜냐하면 전송에 실패한 경우 송수신에 사용된 에너지가 낭비된 것이기 때문이다. 뿐만 아니라 여러 노드에 걸쳐 성공적으로 전송된 패킷이 기지국 노드에 전달되기 전에 유실되면 그때까지 패킷을 전송하는데 사용된 에너지가 낭비된 것이기 때문이다. 따라서 데이터의 신뢰성 있는 전송은 센서 네트워크의 유용성을 높이고 소모 전력을 줄이기 위해서 반드시 필요한 기술이다.

이 두 가지 문제점은 RMST(7)와 같은 신뢰성 있는 전송규약을 사용해 막을 수 있다. RMST는 연결층에서는 ARQ(8)를 사용하고 전송층에서는 선택적 NACK(negative ACK)기법을 사용하여 센서 노드와 기지국 노드 사이의 완전한 신뢰성 있는 전송을 보증한다. 반면 이 특성은 RMST로 하여금 하나의 패킷을 전달하는데 보다 많은 에너지를 소모하게 한다. 더욱이 일반적으로 센서 네트워크에서는 개별 센서 노드들의 측정치에 대한 신뢰성 있는 탐지보다는 전체 네트워크에서 발생한 이벤트에 대한 신뢰성 있는 탐지에 관심이 높기 때문에 RMST와 같이 높은 신뢰도를 갖는 통신규약은 과도한 설계 사양이다.

따라서 최근에 네트워크에서 발생한 이벤트를 신뢰성 있게 관측하면서도 통신 에너지를 줄일 수 있는 부분적으로 신뢰성 있는 전송규약인 ESRT(9)가 고안되었다. ESRT는 기지국 노드를 사용하여 사용자가 요구하는 신뢰도에 (기지국 노드로 데이터를 완전하게 전송한 센서 노드들의 수를 전체 센서 노드의 수로 나눈 값) 맞추어 모든 센서 노드들의 보고 주기를 제어한다. 예를 들어, 온도를 측정하기 위해서 요구되는 신뢰도가 50%라고 하자. ESRT는 센서 노드에서 보고된 데이터의 비율이 이보다 낮으면 보고 주기를 짧게 하고, 역으로 높으면 주기를 늘려 과도한 전송에 따른 에너지 소모를 막는다. 하지만 ESRT는 빈번하게 보고 주기를 변경하고 이를 전체 센서 노드들에게 브로드캐스트하여 알리기 때문에 심각

† 본 연구는 대학 IT 연구센터 육성 지원사업의 연구 결과로 수행되었다. 본 논문의 작성과정에 부분적인 도움을 준 김진호 학생과 이세환 학생에게 감사의 마음을 전한다.

* 학생회원

** 종신회원

한 제어 비용을 낳는다. 만약 기지국 노드가 강력한 RF 모듈을 가지고 한번에 제어신호를 전송한다고 하여도, 현실적으로 기지국 노드의 단가가 네트워크의 환경에 비해 상승하고 통신 지형에 따라 특정 센서 노드에 RF 신호를 정확하게 전송하지 못할 수 있다.

본 논문에서는 이와 같은 제어비용을 크게 줄이기 위해서 분산형 부분적 신뢰성 있는 전송규약 (DPRT: *Decentralized Partially Reliable Transport*)을 제안한다. 제안하는 DPRT에서는 라우팅 패킷을 사용하여 요구되는 신뢰도를 모든 센서 노드들에게 알리고 이를 바탕으로 각 센서 노드들이 자체적으로 보고 주기를 결정한다. 두 가지 보고 주기 결정법이 있다. 하나는 독립적 보고 기법으로 난수를 발생시켜 요구되는 신뢰도의 확률로 데이터를 보고하는 기법이다. 다른 하나는 협력적 보고 기법으로 목시적으로 이웃 노드들과 협력하여 보고 주기를 결정함으로써 데이터를 보고하는 센서 노드들을 네트워크 전체에서 보다 균등하게 선택하는 기법이다. 패킷 전송 시에 에너지 측면에서 최적화된 ARQ를 사용하기 때문에 센서 노드에서 전송된 데이터는 항상 기지국 노도에까지 신뢰성 있게 전달된다.

다음으로 DPRT의 에너지 소모를 보다 줄이기 위하여 본 논문에서는 측정된 데이터가 유사한 경우에는 요구된 신뢰도보다 적은 양의 데이터만을 기지국 노드에 보고하고 보고되지 않은 데이터는 기지국 노드에서 보관하는 기법을 제안한다. 세부적으로 일반적으로 온도와 소리 등과 같은 물리 데이터들은 강력한 시공간적 유사성을 갖고 있는데 이를 활용한 라우팅 및 리포팅 기법을 제안한다. 제안하는 라우팅 기법은 공간적 유사성을 활용하여 인접한 센서 노드를 중에서 헤더 노드를 선출하여 라우팅 경로에 포함시키고 나머지 노드들은 전원 절약 모드로 두어 소모 전력을 줄이며, 제안하는 리포팅 기법은 시간적 유사성을 활용하여 측정 데이터가 이전에 보고한 데이터와 충분히 다른 경우에만 기지국 노드에 보고함으로써 통신 에너지를 줄인다. 보고 데이터들은 ARQ를 사용해 기지국 노드에 전달되며, 기지국 노드에서는 보관법을 사용하여 보고되지 않은 데이터들을 정교하게 복원한다.

제안하는 기법의 성능을 평가하기 위하여 바이트 단위의 센서 네트워크 시뮬레이터를 개발해 다수의 센서 노드를 사용해 실측한 데이터와 함께 사용하였다. 실험 결과 독립적 보고 기법을 사용한 DPRT는 항상 요구 신뢰도와 근접한 신뢰도를 발휘함을 보이며, 협력적 DPRT는 이와 더불어 네트워크 전체의 보고 밀도를 보다 균일하게 유지함을 보인다. 그리고 제안하는 라우팅 기법은 명시된 공간적 지역성에 따라서 전체 센서 노드

의 28-66%를 전원 절약 모드에서 관리할 수 있으며, 제안하는 리포팅 기법은 측정 정확도를 5% 이하로 낮추면서도 센서 노드에서 소모되는 통신 에너지를 72-96%까지 줄일 수 있음을 보인다.

본 논문의 구성의 다음과 같다. 2장에서는 제안하는 DPRT의 구조와 동작 원리에 대해 설명하며, 3장에서는 제안하는 시공간적 유사성을 활용한 라우팅 및 리포팅 기법에 대해 소개한다. 4장에서는 실험 환경에 대해 기술하며, 5장에서는 성능 평가 결과를 제시한다. 그리고 6장에서는 관련 연구를 소개하며, 7장에서는 결론을 맺는다.

2. 분산형 부분적 신뢰성 있는 전송 기법

이 장에서는 제안하는 분산형 부분적 신뢰성 있는 전송 기법인 DPRT를 기존의 중앙 집중형 기법인 ESRT와 비교해 설명한다. 서론에서 언급한 것과 같이 ESRT에서는 중앙의 강력한 기지국 노드가 모든 센서 노드들의 보고 주기를 제어한다. 이때 센서 노드와 기지국 노드 간의 통신에 신뢰성 있는 전송규약이 사용되지 않기 때문에, 물리적인 통신 환경에 따라 기지국 노드에 정확하게 보고된 데이터의 양에 차이가 발생한다. 따라서 기지국 노드는 통신 환경에 따라 센서 노드들의 보고 주기를 동적으로 변경하게 되며, 이는 통신 양과 통신 시간상의 추가한 비용을 야기한다. 반면에 제안하는 DPRT에서는 각각의 센서 노드들이 자체적으로 보고 주기를 조정하고 신뢰성 있는 전송규약을 사용해 데이터를 기지국 노드에 보고하기 때문에 이와 같은 추가비용을 야기하지 않는다. 제안하는 DPRT는 크게 다음의 세 가지 단계로 구성된다.

첫째, 라우팅 단계에서는 기지국 노드에서 사용자가 명시한 신뢰도를 라우팅 패킷에 명시함으로써 라우팅된 모든 센서 노드들에서 요구되는 신뢰도를 전달한다. 경우에 따라 라우팅 단계와 구분하여 라우팅 단계 이후에 PSFQ[10]와 같은 신뢰성 있는 멀티캐스팅 통신규약을 사용하여 요구되는 신뢰도를 라우팅된 모든 센서 노드들에게 전달할 수 있다.

둘째, 보고 의사결정 단계에서 그림 1에 제시된 것과 같은 두 가지 의사결정 기법을 사용한다. 독립적 보고 기법에서는 그림 1(좌)에 제시된 것과 같이 센서 노드가 자신의 노드 번호를 사용해 0과 1사이의 난수를 발생시켜, 이 난수의 값이 요구된 신뢰도 이하이면 해당 데이터를 기지국 노드로 전송하고 그렇지 않으면 전송하지 않는다. 이때 데이터를 보고하는 센서 노드들을 전체 네트워크에서 균등하게 선택하기 위하여, 협력적 보고 기법에서는 각 센서 노드들은 보고 의사결정 과정에서 주위

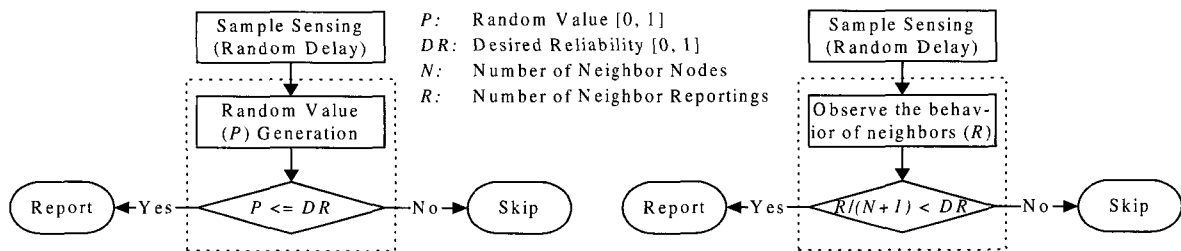


그림 1 독립적 보고 기법(좌)과 협력적 보고 기법(우)의 알고리즘

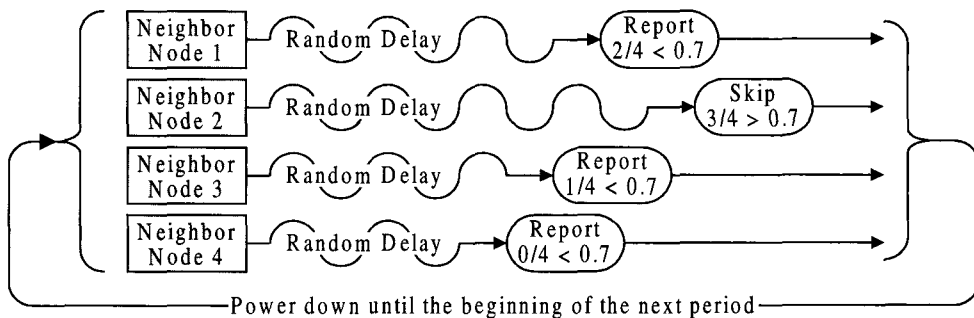


그림 2 협력적 보고 기법의 동작 예제

노드들과 묵시적으로 협력한다. 그림 1(우)에 제시된 것과 같이 요구된 신뢰도를 현재까지 보고한 이웃 노드의 수를 전체 이웃 노드의 숫자보다 하나 큰 값으로 나누고 비교한다. 만약 이미 이웃 노드들이 요구된 신뢰도를 만족시켰으면 불필요하게 통신 에너지를 낭비하지 않기 위하여 해당 센서 노드는 데이터를 보고하지 않는다.

그림 2는 요구된 신뢰도가 70%이고 이웃 노드의 수가 3인 경우의 협력적 보고 기법의 동작 예제이다. 이때 무선 통신이기 때문에 모든 패킷은 브로드캐스트 되어 이웃 노드의 보고 여부를 RF 모듈을 수신 모드로 두어 확인할 수 있다. RF 모듈은 일반적으로 감지 (listen) 모드와 수신 모드에서 비슷한 에너지를 소모하기 때문에 이를 위한 에너지 소모는 크지 않다. 뿐만 아니라 주변 노드의 숫자는 라우팅 과정에서 계산 가능해, 전체적으로 제안하는 협력적 보고 기법은 큰 추가비용을 야기하지 않는다.

셋째, 의사결정 단계에서 분산된 형태로 요구된 신뢰도에 맞게 보고할 센서 노드들을 결정하였기 때문에, 이 보고 단계에서는 선택된 센서 노드들의 데이터가 신뢰성 있게 기지국 노드에게까지 전달될 수 있도록 연결 층에서 ARQ를 사용한다. 이때 통신 에너지 소모를 줄이기 위하여 선택적 반복 (selective-repeat) ARQ의 재전송 타이머와 송수신 버퍼 크기와 같은 파라미터를 5장에 제시된 것과 같이 최적화한다. 추가적으로 패킷 헤더로 인한 통신비용을 줄이기 위하여 몇 개의 데이터 패킷을 하나의 패킷으로 통합하는 패킷 통합 (aggregation) 기법을 사용한다. 이때 통합할 최대 패킷의 개수는 실험을 통하

여 최적화한다. 이러한 패킷 통합 기법의 사용이 가능한 이유는 일반적으로 센서 네트워크에서는 패킷의 데이터 부분에 모든 정보가 기록되어 네트워크에서 각 패킷이 직접적으로 확산되기 때문이다[11].

3. 데이터 유사성을 활용한 라우팅 및 리포팅 기법

이 장에서는 데이터의 시공간적 유사성을 활용하여 통신 에너지를 크게 줄이면서도 측정 정확도를 높게 유지하는 라우팅 및 리포팅 기법에 대해 소개한다.

3.1 공간적 유사성에 기반한 라우팅

그림 3은 다수의 센서 노드들이 설치되어 있는 한 대학 건물의 평면도이다. 이 건물 내부의 온도를 측정하는 경우 같은 방안에 설치된 센서 노드들이 측정한 온도는 공간적 유사성으로 인하여 서로 비슷하다. 따라서 각 방에서 하나의 센서 노드만을 라우팅하여도 측정 정확도를 떨어뜨리지 않고 통신 에너지를 크게 줄일 수 있다. 이를 위해서 제안하는 라우팅 기법은 가장 큰 방의 내부 길이를 라우팅 거리로 설정한다. 실제로 라우팅 거리는 사용자에게 의해 결정되어 기지국 노드에서 라우팅 패킷에 기록되어 라우팅 과정을 통해 모든 센서 노드들에 전송된다.

기지국 노드 1번은 이렇게 결정된 라우팅 거리를 바탕으로 RF 신호의 세기를 조정하여 라우팅 거리 내부에 있는 센서 노드들에게만 라우팅 패킷을 전송한다. 이 패킷은 2번부터 6번까지의 센서 노드들이 수신하며, 이 노

드들은 처음으로 라우팅 패킷을 수신하였기 때문에 곧바로 라우팅 과정에 참여한다. 각 노드들은 패킷에 명시된 기지국 노드까지의 노드 수를 의미하는 라우팅 깊이를 기록한다. 이후에 다른 라우팅 패킷을 수신하게 되면 이 값과 이후에 수신한 패킷에 기록된 깊이를 비교하여 해당 라우팅 패킷의 수용 여부를 결정한다.

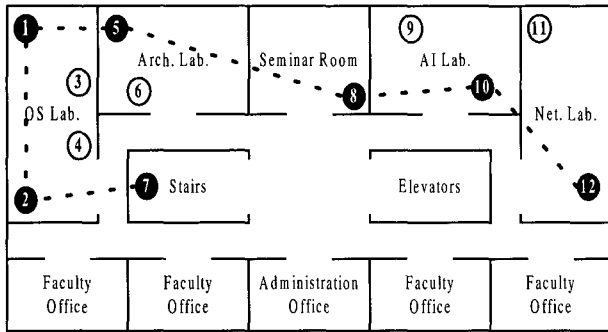


그림 3 실내 라우팅 경로 예제

라우팅 패킷을 수신한 센서 노드들은 두 가지 방법을 사용하여 라우팅 경로에 포함될 헤더 노드를 선출한다. 하나는 거리에 기반한 선출 기법이며, 다른 하나는 배터리 잔류량에 기반한 선출 기법이다. 거리에 기반한 기법은 라우팅 패킷 수신 시의 RF 신호의 세기를 사용한다 [12]. 만약 신호의 세기가 강하면 송신 노드가 가까이에 위치한 것으로 고려하고 보다 긴 응답시간을 사용한다. 반대로 신호의 세기가 약하면 수식 1과 같이 보다 짧은 응답시간을 사용한다. 각 노드들은 이러한 방식으로 결정된 응답시간을 타이머로 설정하고 타이머가 만료될 때까지 대기한다. 이 예제에서는 센서 노드 2번이 가장 약한 신호로 라우팅 패킷을 수신하였기 때문에 이 노드의 타이머가 가장 먼저 만료되어 응답하게 된다.

$$Response\ Time \propto Signal\ Strength \quad (1)$$

센서 노드 2번은 응답을 위해 기지국 노드와 동일한 방식으로 RF 신호의 세기를 조정하여 라우팅 깊이가 1만큼 증가된 라우팅 패킷을 주변 노드들에게 전송하며 이를 통해 라우팅 경로에 참여한다. 이 패킷을 수신한 센서 노드 3번, 4번, 그리고 6번은 이 패킷에 명시된 라우팅 깊이가 이전에 수신한 라우팅 패킷의 깊이가 1만큼 크기 때문에 센서 노드 2번이 지역의 헤더 노드로 선출된 것을 인식하고 다음 번 라우팅 주기까지 전원 절약 모드로 진입하여 대기한다. 그리고 센서 노드 7번은 이 패킷을 수신한 후 타이머를 설정한 후 이의 만료를 기다린다.

이 후에 센서 노드 5번의 타이머가 만료되면 동일한 방법으로 라우팅 패킷을 주변 노드들에게 전달하게 된다. 이때 센서 노드 7번은 5번 노드가 전송한 라우팅을

수신하게 되지만 이 패킷에 기록된 라우팅 깊이가 2번 노드에서 수신한 라우팅 패킷에 명시된 깊이가 같고 동일하기 때문에 센서 노드 5번이 자신의 지역 헤더 노드가 아님을 인식하고 이 패킷을 무시하게 된다. 그리고 이후에 처음에 명시했던 타이머가 만료되면 라우팅 패킷에 응답함으로써 라우팅 경로에 참여한다.

이와 같이 패킷 송신 시의 RF 신호의 세기를 앞서 설정한 라우팅 거리를 바탕으로 제한하였기 때문에 위에서 설명한 방식으로는 평면도 상의 오른쪽 부분에 위치한 센서 노드들에게 라우팅 패킷을 전달하지 못한다. 그래서 헤더 노드들은 충분히 긴 시간이 지난 후에 최대 RF 신호 세기를 사용하여 라우팅 패킷을 재전송한다. 이렇게 되면 센서 노드 8번은 센서 노드 5번이 재전송한 패킷을 수신할 수 있고 앞서 설명한 방식으로 지역의 헤더 노드를 선출하게 된다. 이를 통해 최종적으로 센서 노드 8번과 10번과 12번이 헤더 노드들로 선출된다. 선출된 헤더 노드들 사이의 거리는 명시된 라우팅 거리와 유사하기 때문에 거리에 기반한 선출 기법은 명시된 공간적 지역성을 충분히 활용한 라우팅 경로를 설정할 수 있다.

하지만 센서 네트워크에서는 모든 센서 노드들의 에너지를 균등하게 사용해야 한다. 그렇지 않으면 일부 센서 노드들이 빠르게 에너지를 소진하여, 네트워크의 구조가 파괴되고 궁극적으로 네트워크의 실효성이 저하되고 동작 시간이 단축되게 된다. 따라서 제안하는 배터리 잔류량에 기반한 선출 기법은 배터리 잔류량이 높은 센서 노드들이 빠르게 응답하는 수식 2를 사용하여 응답시간을 결정한다. 센서 네트워크에서는 동적인 네트워크 상황에 대응하기 위하여 일반적으로 주기적으로 라우팅 과정을 반복하기 때문에 이 선출 기법은 모든 센서 노드들의 에너지를 균등하게 사용할 수 있게 한다.

$$Response\ Time \propto \frac{1}{Remained\ Battery\ Capacity} \quad (2)$$

최종적으로 제안하는 라우팅 기법은 이 두 가지 선출 기법을 병합한 수식 3을 사용하여 응답시간을 결정한다. 이때 알파의 값이 0에 가까우면 에너지를 균등하게 사용할 수 있도록 라우팅 경로가 설정될 것이며, 이 값이 1에 가까우면 공간적 유사성을 충분히 활용할 수 있도록 경로가 구성될 것이다. 따라서 본 논문에서는 이 값을 0.5로 설정한다.

$$Response\ Time \propto \left\{ \frac{\alpha \cdot Normalized\ Battery\ Capacity + (1 - \alpha) \cdot (1 - Normalized\ Signal\ Strength)}{1} \right\} \quad (3)$$

위 과정을 통해 선출된 헤더 노드들은 측정 데이터를 기지국 노드에 전송한다. 기지국 노드는 각 헤더 노드의 물리적인 위치를 바탕으로 헤더 노드로 선출되지 않은

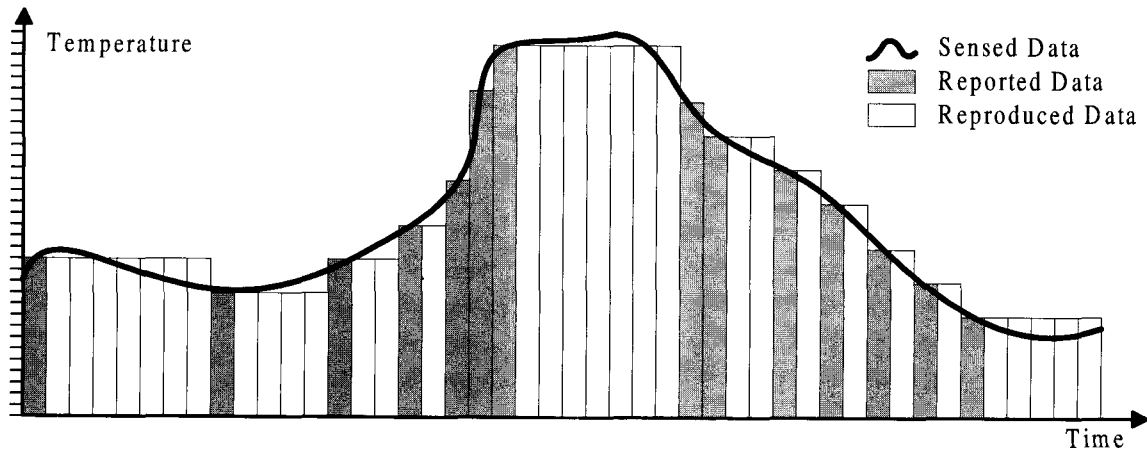


그림 4 제안하는 리포팅 기법을 사용해 수집한 온도 샘플

노드들의 측정치를 보간할 수 있다[13]. 이때 각 노드들의 물리적인 위치를 구하기 위하여 기존의 위치 인식 방식[12,14]을 사용할 수 있다.

경우에 따라 측정하려고 하는 물리 데이터가 공간적 지역성을 갖지 않을 수 있다. 하지만 이러한 경우에도 센서 노드들이 계획적으로 설치되지 않고 군사적 목적으로 적진에 뿌려지는 것과 같이 흩뿌려지는 경우에는 아주 가깝게 센서 노드들이 위치할 수 있다. 따라서 이러한 경우에는 가깝게 위치한 센서 노드들의 중복된 데이터의 보고와 잦은 RF 신호의 충돌을 막기 위하여 제안하는 라우팅 기법을 사용할 필요가 있다.

3.2 시간적 유사성에 기반한 리포팅

제안하는 라우팅 기법을 사용해 선출된 헤더 노드에서도 데이터의 시간적 유사성을 활용하여 통신 에너지를 줄일 수 있다. 예를 들어 그림 4는 여름날 하루 동안 측정된 온도 샘플로 시간적 유사성을 갖고 있다. 기존의 리포팅 기법에서는 주기적으로 데이터를 측정하여 이를 간단한 신뢰성 없는 전송규약을 사용하여 기지국 노드로 보고하였다. 만약 측정 데이터가 이전에 보고한 데이터와 같은 경우에도 이전에 보고한 데이터가 기지국 노드에 신뢰성 있게 전송되었다는 보장이 없기 때문에 이를 재전송하였다. 하지만 제안하는 리포팅 기법에서는 2장에서 언급한 신뢰성 있는 MAC을 사용한다. 이를 바탕으로 이전에 보고한 데이터가 측정된 데이터와 유사한 경우에는 이 데이터를 기지국 노드에 보고하지 않는다. 그리고 측정 데이터가 이전에 보고한 데이터와 명시된 양자화 정도 이상의 차이를 보일 경우에만 그림 상에서 회색 막대로 표시된 것과 같이 기지국 노드로 보고한다.

기지국 노드에서는 신호처리 분야에서 널리 사용되고 있는 다양한 보간법[13]을 활용하여 원래 데이터를 복원한다. 본 논문에서는 비교적 간단한 계단식 보간법과 선

형 보간법을 사용한다. 계단식 보간법은 보고되지 않은 데이터가 이전에 보고된 데이터와 같다고 추정하는 것으로 온라인으로 데이터를 보간할 수 있다. 반면에 선형 보간법은 보고되지 않은 데이터가 이전에 보고된 데이터와 이후에 보고된 데이터와 사이에서 선형 비례 관계에 있다고 추정하는 것으로 실시간으로 데이터를 보간할 수는 없다. 이렇게 보고되지 않은 데이터를 보간함으로써 제안하는 리포팅 기법은 데이터의 측정 정확도를 크게 저하시키지 않으면서도 통신 에너지를 크게 줄일 수 있다.

4. 실험 환경

이 장에서는 성능 평가 방법에 대해 설명한다. 제안하는 기법들의 성능을 기존의 기법들과 비교해 정확하게 측정하기 위하여 자바 언어를 사용하여 바이트 단위의 통신 정확도를 갖는 센서 네트워크 시뮬레이터를 개발하였다. 개발한 시뮬레이터에서 센서 노드들은 소프트웨어 타이머와 작업 큐를 갖고 있는 유한 상태 기계로 모델링되었다. 그리고 시뮬레이터는 시뮬레이션 시간을 한 바이트를 송수신하는데 걸리는 시간으로 나누고 매 단위 시간마다 각 센서 노드들을 한번씩 스케줄링하는 방식으로 동작한다.

시뮬레이터는 그림 5와 같은 두 가지 실외 및 실내 통신 에러 지도를 사용한다. 이 지도는 넓이가 $25m^2$ 인 셀 51×51 개로 구성되며, 각 셀의 명암은 0%에서 1% 사이의 비트 에러율을 나타내는데 어두울수록 높은 값을 의미한다. 두 셀 간의 에러율은 각 셀의 에러율의 평균을 사용해 계산하였다. 그림 5(a)는 실외 환경이기 때문에 랜덤한 에러율 분포를 가지며, 그림 5(b)는 실내 환경이기 때문에 벽 주변의 가장자리의 에러율이 간섭으로 인하여 높게 나타나는 특성을 갖는다. 이 에러 지도들은 그림 5(c), (d)에 제시된 것과 같은 두 가지 센서 노드

들의 위상 지도와 함께 사용되었다. 이 위상 지도들에서 기지국 노드는 정중앙에 하나씩 위치하며, 센서 노드에서 기지국 노드까지의 노드의 수는 1에서 30 사이의 값이다.

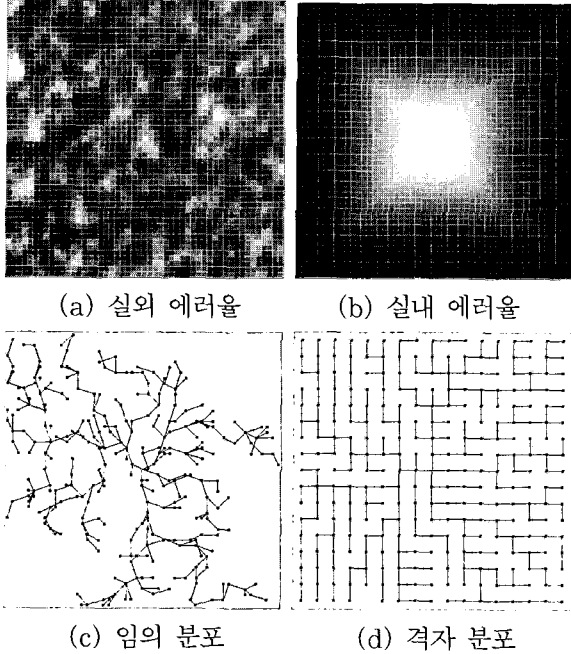


그림 5 통신 에러 지도(a)(b)와 센서 위상 지도(c)(d).

다음으로 하드웨어 파라미터는 Mote[2]를 바탕으로 설정하였다. 예를 들어, 통신 대역폭과 최대 통신 반경은 각각 40kbps와 30m로 설정하였고, RF 모듈의 소모 전력은 대기 상태 5 μ A, 감지와 수신 상태 4.5mA, 그리고 송신 상태 12mA로 설정하였다. 또한 소프트웨어 파라미터는 사전 시뮬레이션을 통하여 설정하였다. 예를 들어, MAC 채널의 재전송 타이머는 통신망의 에러율에 따라 30-60ms 범위에서 적응적으로 변화하도록 설정하였다. 이 값은 패킷의 왕복 전송(round trip) 시간보다 항상 길고 센서 노드에서는 ACK 패킷이 가장 높은 우선순위로 처리되기 때문에 이러한 설정은 불필요한 패킷 재전송을 막았다. 그리고 데이터 패킷과 ACK 패킷의 처리 시간은 각각 10ms와 2ms로 설정하였으며, 라우팅 패킷의 크기와 보고 패킷의 헤더 부분의 크기, 그리고 보고 패킷의 데이터 부분의 크기는 각각 12바이트, 8바이트, 그리고 6바이트로 설정하였다. 그리고 샘플링 주기는 200ms로 설정하였다. 이때 샘플링 후에 측정된 데이터를 각 센서 노드들이 동시에 전송함으로써 발생할 수 있는 통신 충돌을 피하기 위하여 각 센서 노드들의 최초 샘플링 시점은 난수를 사용해 설정하였다.

5. 성능 평가

이 장에서는 제안하는 기법들의 성능을 평가해 기록한다.

5.1 제안하는 부분적 신뢰성 있는 전송규약

표 1은 일반적인 신뢰성 없는 전송기법과 기존의 신뢰성 있는 전송기법 그리고 제안하는 부분적 신뢰성 있는 전송기법의 성능을 요약한 것이다. 표에서 에너지 소모는 전체 센서 노드들의 RF 모듈의 소모 에너지의 총합을 의미하며, 통신 시간은 모든 센서 노드들에서 보고된 데이터가 기지국 노드에게까지 완전하게 도달하는데 걸린 시뮬레이션 시간을 의미한다.

기존의 신뢰성 없는 전송기법의 경우 실험에 사용한 네트워크의 크기가 비교적 크기 때문에 극단적으로 낮은 4%대의 전송률 또는 신뢰도를 보인다. 반면에 이 기법은 짧은 통신 시간을 사용하고 적은 양의 에너지를 소모한다. 이 기법의 신뢰도는 패킷 재전송 기법을 사용하여 10%까지 개선시킬 수 있으나, 재전송 기법은 네트워크 혼잡 등으로 인해 통신 시간과 에너지 소모를 심각하게 증가시킨다. 따라서 기존의 중앙집중형 부분적 신뢰성 있는 전송규약과 같이 신뢰성 없는 전송기법에 기반한 방식은 네트워크의 크기가 커지지만 효율성이 심각하게 저하된다.

다음으로 기존의 신뢰성 있는 전송기법은 ARQ의 성능을 에너지 측면에서 최적화하였다. 제안하는 패킷 통합 기법을 stop-and-wait ARQ에 적용하여 성능을 평가한 결과 최대 2개의 패킷까지 통합한 경우에 성능이 최적화되었다. 이를 바탕으로 선택적 반복 ARQ의 송수신 버퍼의 크기를 최적화한 결과 버퍼 크기가 6 패킷인 경우 최적의 성능을 보임을 확인하였다. 버퍼의 크기가 6 패킷 이상인 경우 성능이 저하된 이유는 네트워크 혼잡과 패킷 충돌 때문이다.

다음으로 이렇게 최적화한 MAC 채널을 바탕으로 제안하는 DPRT의 성능을 평가하였다. 표에 제시된 것과 같이 독립적 DPRT를 사용해 원하는 신뢰도와 유사한 신뢰도를 얻었고, 협력적 DPRT를 사용해서는 항상 원하는 신뢰도보다 큰 신뢰도를 얻었다. 따라서 이 두 보고 기법은 응용에 따라 선택적으로 사용될 수 있다. 에너지 측면에서 제안하는 DPRT는 신뢰도를 낮춘 만큼 통신 에너지를 줄인다. 따라서 DPRT를 사용하여 응용이 요구하는 신뢰도에 따라 통신 에너지 소모를 줄일 수 있다.

그림 4는 DPRT의 두 가지 보고 기법에 따른 측정 밀도를 시각화한 것이다. 흰색은 보고가 없는 영역, 밝은 회색은 원하는 신뢰도보다 보고된 데이터가 적은 영역, 어두운 회색은 적절한 신뢰도를 보인 영역, 그리고 검은

표 1 전송기법의 성능 요약

기법	세부사항	신뢰도 (%)		통신시간 (ms)	소모전력 (μJ)
		최소	평균		
신뢰성 없는 전송기법 (R: 재전송 횟수)	R=0	2	4	223	731
	R=3	4	7	948	1,385
	R=7	5	10	22,260	7,730
Stop-and-Wait ARQ (U: 패킷 통합 개수)	U=1	100	100	12,730	9,823
	U=2	100	100	10,352	9,389
	U=3	100	100	11,340	10,852
Selective-Repeat ARQ (B: 버퍼 크기, U=2)	B=4	100	100	8,199	8,504
	B=6	100	100	8,188	8,356
	B=8	100	100	8,984	8,539
독립적 DPRT (U=2, B=6) (DR: 요구 신뢰도)	DR=100	100	100	8,479	8,638
	DR=90	84	91	7,751	8,985
	DR=70	68	71	6,185	6,453
	DR=50	46	51	5,268	4,947
협력적 DPRT (U=2, B=6) (DR: 요구 신뢰도)	DR=100	100	100	8,201	8,692
	DR=90	99	100	7,457	8,408
	DR=70	78	82	6,932	7,141
	DR=50	61	64	5,240	5,744

색은 과도하게 데이터를 보고한 영역을 의미한다. 이를 통해서 협력적 DPRT는 전체적으로 보고 밀도를 균등하게 유지함을 알 수 있다. 이러한 특성은 궁극적으로 측정된 데이터의 품질을 높이는 장점이 있다.



(a) 독립적 DPRT (b) 협력적 DPRT

그림 6 실외에서 센서 노드들이 랜덤하게 분포한 경우의 측정 밀도

5.2 제안하는 라우팅 및 리포팅 기법

다음으로 제안하는 라우팅 기법의 성능을 기존의 최단 경로 라우팅 기법과 비교해 평가하였다. 표 2는 라우팅 거리에 따라 라우팅된 센서 노드들의 비율이다. 기존 라우팅 기법은 공간적 지역성을 활용하는 특성이 없었기 때문에 이 실험에서는 모든 센서 노드들이 라우팅 경로에 포함되었다. 반면에 제안하는 기법에서는 라우팅 거리가 증가함에 따라 라우팅된 센서 노드의 비율이 줄어들었다. 특이한 점은 라우팅 거리가 10m와 같이 매우 짧은 경우에는 라우팅 패킷이 효율적으로 전송되지 못해 라우팅된 노드의 비율이 줄어들었다. 이 실험에서 제안한 기법은 명시된 지역적 유사성에 따라 전체 노드 중에

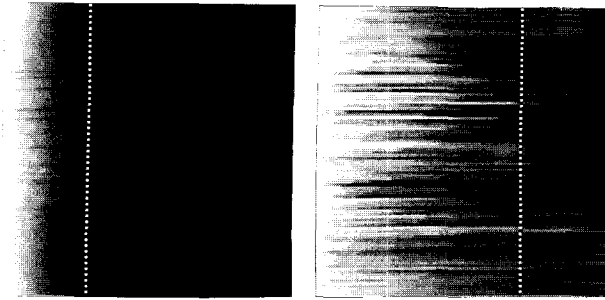
서 28-66%를 전원절약 모드에 두어 에너지 소모를 줄일 수 있었다.

표 2 라우팅 거리에 따른 라우팅된 노드의 비율

라우팅 기법	라우팅 거리	실외		실내		평균
		랜덤	격자	랜덤	격자	
제안하는 라우팅	10m	57%	72%	39%	67%	59%
	15m	65%	67%	62%	67%	65%
	20m	57%	54%	59%	55%	56%
	25m	43%	48%	50%	48%	47%
	30m	34%	35%	43%	38%	38%
기존 라우팅	30m	100%	100%	100%	100%	100%

그림 5는 이 두 가지 라우팅 기법을 사용한 경우 시간에 따른 센서 노드들의 배터리 잔류량의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 X축은 시간을 Y축은 센서 노드의 번호를 그리고 명암은 배터리 잔류량으로 밝을수록 높은 값을 의미한다. 이를 통해 기존 라우팅 기법의 경우 모든 센서 노드들이 빠르게 에너지를 소진하고, 일부 중간 라우터 노드의 자식 노드들에서 온 패킷을 전달하는 역할로 인하여 더욱 빠르게 에너지를 소진함을 확인하였다. 반면에 제안하는 라우팅 기법에서는 앞서 언급한 특성으로 인하여 점선으로 표시된 것과 같이 센서 노드들의 평균 수명이 기존 기법에 비하여 약 230% 연장되었다. 또한 제안하는 기법의 파라미터 알파가 0에 가까워지면 센서 노드들의 배터리가 보다 균등하게 사용되는 특성을 확인하였다.

마지막으로 제안하는 리포팅 기법의 성능을 평가하였다. 이를 위해 5개의 센서 노드에서 하루 동안 10분 간



(a) 기존 라우팅 (b) 제안하는 라우팅

그림 7 시간(X축)에 따른 센서 노드들(Y축)의 배터리 잔량 변화

격으로 실측한 온도, 습도, 태양열 샘플을 사용하였다 [15]. 표 3은 실험 결과를 요약한 것으로 이 샘플 데이터에 대해 명시된 양자화 정도에 따른 보고된 데이터의 비율과 수식 4를 사용해 계산한 측정 정확도를 제시한다. 수식에서 $S(i)$ 는 i 번째 샘플 데이터를 $R(i)$ 는 보간법을 사용해 복원한 i 번째 데이터를 의미한다. 이를 통해 제안하는 리포팅 기법은 측정 정확도를 5% 이하로 낮추면서도 보고에 사용되는 통신 에너지를 72-96%까지 줄일 수 있음을 알 수 있다. 추가적으로 계단식 및 선형 보간법 모두 비교적 정확하게 원 데이터를 복원함을 확인하였다.

$$Sensing\ Accuracy = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\|R(i) - S(i)\|}{|S(i)|} \quad (4)$$

6. 관련 연구

최근 센서 네트워크에서의 통신 에너지 소모를 줄이기 위해서 TAG[16]와 같은 패킷 통합 기법이 제안되었다. TAG는 네트워크 내부의 라우터 노드들에서 데이터를 통합하여 최소, 최대, 또는 평균 값 등을 계산하는 기법으로 기존 중앙 기지국 노드로 데이터를 취합하여 분석하는 기법에 비하여 통신 에너지 소모를 줄일 수 있

다. 그러나 TAG에서는 보고된 데이터의 양을 제어할 수 없었기 때문에 부분적 신뢰성 있는 전송규약인 ESRT [9]가 제안되었다. 그리고 ESRT의 제어 비용을 줄이기 위하여 분산형 부분적 신뢰성 있는 전송규약을 본 논문에서 제시하였다. 이 기법들에서 한 걸음 나아가 데이터의 질을 고려하여 보고 데이터가 시공간적으로 유사한 경우 데이터를 보고하지 않음으로써 통신 에너지를 줄이고 대신에 기지국 노드에서는 보고되지 않은 데이터를 보간법을 사용해 정교하게 복원하는 기법을 본 논문에서 제시하였다. 신호처리에서 사용되던 보간법을 활용한 점이 기존의 시공간적 지역성을 활용한 기법[17]과 제안하는 기법과의 가장 큰 차이점이다.

7. 결 론

본 논문에서는 센서 네트워크의 작동 시간을 연장하기 위하여 저전력 통신규약들을 설계하고 성능을 검증하였다. 제안하는 전송규약은 특정한 양의 네트워크상에 균등하게 분포한 데이터만을 정확하게 기지국 노드에 보고함으로써 원하는 신뢰도를 만족시키며 통신에 따른 에너지 소모를 줄였다. 그리고 제안하는 라우팅 및 리포팅 기법은 데이터의 시공간적 유사성을 활용하여 유사한 데이터의 전송을 피해 불필요한 통신 에너지 사용을 막으며, 전송되지 않은 데이터를 기지국 노드에서 보간법을 사용해 복원함으로써 측정 정확도를 높게 유지하였다. 실험을 통하여 제안하는 기법들을 통해 통신 에너지를 기존 방식의 1/10 가량으로 낮출 수 있음을 확인하였다.

제안하는 기법들에서 요구되는 신뢰도, 라우팅 거리, 양자화 정도를 사용자가 설정하고 이를 라우팅 패킷에 기록하여 각 센서 노드들에게 알려주는 방식을 사용하였다. 이러한 파라미터들을 사용자의 명시 없이 센서 노드들이 협력하여 자동으로 설정할 수 있도록 설계한다면 흥미있는 향후 연구가 될 것이다.

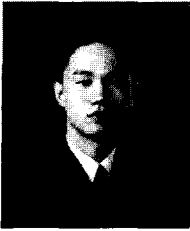
표 3 제안하는 리포팅 기법의 보고 비율 및 측정 정확도

온도			습도			태양 복사 에너지		
양자화 정도	보고 비율	정확도	양자화 정도	보고 비율	정확도	양자화 정도	보고 비율	정확도
0°C	100%	100%	0%	100%	100%	0Lux	100%	100%
1°C	58%	100%	1%	38%	100%	10Lux	15%	100%
2°C	28%	97%	5%	17%	98%	50Lux	13%	99%
3°C	16%	94%	10%	6%	96%	100Lux	11%	99%
5°C	9%	91%	20%	3%	92%	200Lux	8%	99%
10°C	5%	86%	50%	2%	80%	500Lux	4%	98%

참고문헌

- [1] I.F. Akyildiz, S. Weilian, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, No. 8, pp. 102-114, 2002.
- [2] <http://webs.cs.berkeley.edu/tos/>, The TinyOS and Mote Project.
- [3] <http://www.smart-its.org/>, The Smart-Its Project.
- [4] J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. Culler, and K. Pister, "System Architecture Directions for Network Sensors," *In Proceedings of the ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, pp. 93-104, 2000.
- [5] J. Hill and D. Culler, "A Wireless- Embedded Architecture for System Level Optimization," *UC Berkeley Technical Report*, 2002. (Available at [2])
- [6] R. Rubin, "Analysis of Wireless Data Communication," *UC Berkeley Technical Report*, 2000. (Available at [2])
- [7] F. Stann and J. Heidemann, "RMST: Reliable Data Transport in Sensor Networks," *In Proceedings of the IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications*, pp. 102-112, 2003.
- [8] G. Fairhurst and L. Wood, "Advice to Link Designers on Link Automatic Repeat reQuest (ARQ)," *Request for Comments (RFC)*, No. 3366, 2002.
- [9] Y. Sankarasubramaniam, O. B. Akan, and I. F. Akyildiz, "ESRT: Event-to-Sink Reliable Transport in Wireless Sensor Networks," *In Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad-Hoc Networking and Computing*, pp. 177-188, 2003.
- [10] C.-Y. Wan, A. T. Campbell, L. Krishnamurthy, "PSFQ: A Reliable Transport Protocol for Wireless Sensor Networks," *In Proceedings of the ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, 2002.
- [11] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, "Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks," *In Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 56-67, 2000.
- [12] P. Bahl and V. Padmanabhan, "RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System," *In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications*, Vol. 2, pp. 775-784, 2000.
- [13] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, and J. R. Buck, *Discrete-Time Signal Processing*, 2nd Ed., Prentice Hall, 1999.
- [14] J. Hightower and G. Borriello, "Location Systems for Ubiquitous Computing," *IEEE Computer*, Vol. 34, No. 8, pp. 57-66, 2001.
- [15] The Habit Monitoring on Great Duck Island Project, <http://www.greatduckisland.net/>.
- [16] S. Madden, M. Franklin, J. Hellerstein, and W. Hong, "TAG: a Tiny Aggregation Service for Ad-Hoc Sensor Networks," *In Proceedings of the 5th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation*, 2002.
- [17] J. Chou, D. Petrovic, and K. Ramchandran, "A Distributed and Adaptive Signal Processing Approach to Reducing Energy Consumption in Sensor Networks," *In Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications*, 2003.

임 근 수



2003 연세대학교 컴퓨터과학(학사)
2003 연세대학교 전기전자공학(학사)
현재 서울대학교 컴퓨터공학부 석사과정
관심분야: 컴퓨터 구조, 운영체제, 그리고
컴퓨터 네트워크
E-mail : ksyim@oslab.snu.ac.kr

김 지 흥



1986 서울대학교 계산통계학과(학사)
1988 Univ. of Washington 컴퓨터과학
과(석사)
1995 Univ. of Washington 컴퓨터과학
및 공학과(박사)
현재 서울대학교 컴퓨터공학부 부교수
관심분야: 컴퓨터구조, 내장형 시스템, 저
전력 시스템, 멀티미디어 시스템
E-mail : jihong@davinci.snu.ac.kr

고 건



1974 서울대학교 응용물리학(학사)
1979 Univ. of Virginia 전산학(석사)
1981 Univ. of Virginia 전산학(박사)
현재 서울대학교 컴퓨터공학부 교수
관심분야: 운영체제, 컴퓨터 구조, 컴퓨터
시스템 성능평가, 분산 컴퓨터시스
템
E-mail : kernkoh@oslab.snu.ac.kr

• 2005 병렬처리시스템 동계학술대회 •

- 일 자 : 2005년 1월 28~30일
- 장 소 : 보광 휘닉스파크(강원도)
- 주 최 : 병렬처리시스템연구회
- 내 용 : 논문발표 등
- 문 의 처 : 포항공대 이승구 교수(slee@postech.ac.kr)