

무선 센서 네트워크에서 동기화 메시지 감소를 위한 참조 보간 프로토콜

(Reference Interpolation Protocol for Reducing the Synchronization Messages in Wireless Sensor Network)

박 충 명 [†] 임 동 선 ^{**} 이 좌 형 [†] 정 인 범 ^{***}
(Chongmyung Park) (Dongsun Lim) (Joahyoung Lee) (Inbum Jung)

요 약 무선 센서 네트워크에서 센서 노드들이 이벤트 발생에 따라 신속한 대응을 하기 위해서는 노드들 간에 유기적인 협력이 필요하다. 이러한 협동 기능을 오류 없이 수행하기 위해서는 센서 노드들이 이벤트를 동일한 시간에 인식하기 위한 시간 동기화 기능이 제공되어야 한다. 무선 센서 네트워크에서는 시간 정보 메시지를 교환함으로써 센서 노드들 사이에 시간 동기화를 유지한다. 그러나 무선 센서 네트워크의 특성상 센서 노드들은 고립된 환경에서 제한된 전력으로 동작해야하므로 시간 동기화를 위한 과도한 메시지 전송은 센서 노드들의 수명을 단축시키는 결과를 가져온다. 본 논문에서는 시간 동기화를 위한 메시지 전송 개수를 감소시키기 위한 참조 보간 프로토콜을 제안한다. 제안된 방법은 센서 노드들의 시간 동기화를 위하여 참조 패킷의 시간과 베이스스테이션의 전역 시간을 보간 하는 과정을 수행한다. 기존의 참조 브로드캐스트 동기화 기법과 비교할 때 제안된 기법은 두 번의 메시지 패킷만을 시간동기화를 위하여 사용한다. 간단해진 동기화 절차로 인하여 제안된 참조 보간 프로토콜은 무선 센서 노드들의 시간 동기화를 위한 메시지 수를 크게 감소시켜 참조 브로드캐스트 동기화 기법에 비해 12.7배의 감소된 전력을 사용한다. 참조 보간 프로토콜로 인하여 감소된 메시지 패킷의 개수는 무선 센서들의 동기화 시간의 단축을 가져왔을 뿐만 아니라 절약된 배터리 에너지만큼 무선 센서 노드들의 수명을 연장시킨다.

키워드 : 무선 센서 네트워크, 시간 보간, 동기화, 메시지 트래픽, 수렴 시간

Abstract In wireless sensor network, to provide the proper responses quickly for diverse events, wireless sensor nodes have to cooperate with each other. For successful cooperation, the time synchronization among sensor nodes is an important requirement for application execution. In the wireless sensor network, the message packets including time information are used for the time synchronization. However, the transmission of many message packets will exhaust the battery of wireless sensor nodes. Since wireless sensor nodes works on the limited battery capacity, the excessive transmission of message packets has a negative impact upon their lifetime. In this paper, the Reference Interpolation Protocol (RIP) is proposed to reduce the number of message packets for the time synchronization. The proposed method performs the time interpolation between the reference packet's time and the global time of the base station. The proposed method completes the synchronization operation with only 2 message packets when compared to the previous Reference Broadcast Synchronization (RBS) technique. Due to the simple synchronization procedure, our method greatly reduces the number of synchronization messages and showed the 12.7 times less power

· 본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

논문접수 : 2006년 4월 24일

심사완료 : 2007년 9월 18일

[†] 학생회원 : 강원대학교 컴퓨터정보통신공학과
cmpark@snslab.kangwon.ac.kr
jhlee@snslab.kangwon.ac.kr

^{**} 정 회 원 : 강원대학교 컴퓨터정보통신공학과
dslim@etri.re.kr

^{***} 종신회원 : 강원대학교 컴퓨터정보통신공학과 교수
ibjung@snslab.kangwon.ac.kr
(Corresponding author임)

: 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용될 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지 : 정보통신 제34권 제6호(2007.12)

Copyright © 2007 한국정보과학회

consumption than the RBS method. From the decrease in the transmission of message packets, the convergence time among wireless sensor nodes is shortened and the lifetime of wireless sensor nodes is also prolonged as much as the amount of saved battery energy.

Key words : wireless sensor network, time interpolation, synchronization, message traffics, convergence time

1. 서론

최근 초소형, 저비용, 저전력 하드웨어의 발달로 무선 센서 네트워크에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 센서 네트워크를 구성하는 센서 노드들의 다양한 어플리케이션들이 올바르게 동작하기 위한 시각 동기화 기법은 중요한 역할을 담당한다. 특히 위치 추적, 이동 센서에서의 데이터 감지, 밀집한 지역에서의 이벤트 감지, 보안, TDMA 스케줄링 등에서 정확한 시간 동기화가 중요하게 된다. 시각 동기화가 이루어지지 않은 상태에서 이벤트를 감지했을 경우, 이벤트의 시간적 순서나 동일한 이벤트에 대한 데이터인지를 판별할 수 없게 된다. 예를 들어 그림 1을 보면, 노드 1에서 E1을 감지하고 노드 2에서 E2를 감지하여 노드 3으로 전송하는 경우에 만약 E2가 먼저 도착하게 되면 시간적으로 E1이 먼저 발생하였더라도 노드 3에서는 이를 확인 할 수 없다[1]. 또한, 환경이나 동물의 생태 감시를 위한 센서 네트워크의 경우에 관찰자가 특정 시간대 즉, 밤 동안 또는 낮 시간대에만 감시를 원할 경우 지정된 시간에만 깨어서 주어진 역할을 수행하면 된다. 움직이는 물체를 추적하거나 속도를 측정하는 경우에는 여러 센서들이 동일 물체에 대한 센싱을 하고 정보를 수집하여 결과를 계산해야 하는데 이러한 경우에도 시간적, 공간적 정보가 필수적이다[2].

대부분의 센서 네트워크는 노드들이 배치된 후 관리자가 노드의 유지관리를 하지 않는 형태이므로 한번 배치된 후 긴 수명을 갖고 데이터를 수집하기 위해서는 노드 자체의 전력을 효율적으로 사용하여야 한다. 최근 이러한 무선 센서 노드의 전력소비를 줄이기 위하여 액티브 상태와 전력소비가 적은 슬립상태를 변경시키는 연구가 이루어지고 있다[3]. 전력 소비를 줄이기 위하여 몇몇 센서 노드들을 슬립 상태로 유지하다가 나중에 깨어나 액티브 상태로 될 경우 전역시각 측면에서 그동안 액티브 상태에서 계속하여 데이터를 수집하고 있던 다른 노드들과 시각 동기화가 진행되어야 한다. 무선 센서 노드들이 슬립과 액티브 상태를 반복하면서 운영될 경우 전역시각 동기화는 네트워크 안에서 발생된 사건들에 대한 정확한 판단을 위하여 반드시 필요하다.

무선 센서 노드들 간의 시각 동기화는 센서 네트워크

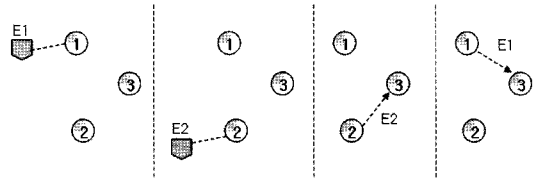


그림 1 센서 네트워크에서 발생할 수 있는 동기화 문제

를 이용하는 응용 프로그램들의 병행제어, 보안, 데이터 일관성 유지, 중복 데이터 검사, 통신 프로토콜의 효율성 등에서 일관성을 유지하기 위하여 중요한 부분을 차지한다. 기존의 분산 컴퓨팅 환경에서도 수 년 동안 분산된 컴퓨터들 사이의 시각 동기화를 위하여 많은 동기화 기법이 제안되어왔다. 하지만 센서 네트워크는 일반적인 분산 컴퓨팅 환경과는 다른 노드의 에너지 효율성, 이동성, 계산 능력, 제약된 메모리 등의 자원 제약적인 특성으로 NTP나 GPS 등 전통적인 분산 시스템에서 사용하던 동기화 기법을 그대로 적용할 수 없다. 기존 네트워크 환경에서 사용하는 동기화 프로토콜들은 가능한 정확한 동기화를 목적으로 하고 있다. 그러나 정확한 동기화를 수행하기 위해서는 그만큼 많은 자원을 사용하게 된다. 많은 자원의 사용은 소모되는 전력의 량을 증가시키므로 배터리의 전력 소비량을 최소화해야 하는 무선 센서 네트워크 환경에서 기존 방식들의 단순한 적용은 부정적 결과를 가져오게 된다. 또한, 기존의 NTP 같은 프로토콜은 서버와 클라이언트의 직접적인 메시지 교환을 통해서 동기화를 수행하지만, 무선 센서 네트워크에서는 센서 노드들 간의 멀티 홉 방식으로 네트워크가 구성된다. 멀티 홉 방식에서는 각 홉을 지날 때 데이터에 대한 지터(jitter)가 많이 발생한다. 지터의 발생은 동기화 오류를 발생시킬 수 있게 하므로 이러한 문제점을 고려한 프로토콜이 설계되어야 한다[4,5].

무선 센서 네트워크에서 NTP 나 GPS 방식에서 같이 전역 시간을 메시지의 타임스탬프 값으로 하여 브로드캐스트 하는 경우 메시지들의 전송시간과 접근시간의 지연으로 인하여 시각 동기화에 문제가 발생한다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 참조 브로드캐스트 동기화(Reference Broadcast Synchronization, RBS)기법이 제안되었다. RBS 방식은 전역시간 값을 가지고 무선센서 노드들의 시각동기화를 수행하는 것이 아니라 센서

노드들에게 전송된 참조 메시지 패킷의 수신 시간을 근거로 각각의 센서 노드들 사이의 상대적 시간 차이 값을 기준으로 시각 동기화를 수행한다. RBS 방식은 메시지 전송시간 및 접근시간을 크게 감소시키는 장점을 가지고 있다. 그러나 RBS에서는 시각 동기화에 참여하는 무선 센서 노드들의 개수가 증가할수록 센서 노드들 사이의 메시지 전송 횟수도 증가하는 결과를 가져오고 있다. 무선 센서 노드에서 무선으로 메시지를 전송하는 동작은 센서 노드에서 발생하는 동작 항목별 전력소모량 중 가장 큰 부분을 차지하고 있다. 기존 RBS 방식에서 센서 노드 개수의 증가는 동기화 메시지 개수의 증가를 가져오고 그 결과 소모되는 전력량 증가를 가져오게 된다.

본 논문에서는 센서 네트워크를 위한 시각 동기화 기법인 RBS의 문제점을 개선한 참조 보간 프로토콜(Reference Interpolation Protocol, RIP)을 제안한다. 제안된 RIP 방식은 참조 패킷 전송 노드 이외에 베이스 스테이션에도 시각 동기화를 위하여 참조 패킷을 브로드캐스트 한다. 두 번의 참조 패킷들을 수신한 무선 센서 노드들은 패킷들의 수신시간을 반영하여 베이스 스테이션의 전역 참조 시간으로 보간된 시각 동기화를 하게 된다. RIP 방식에서는 타임스탬프 값을 가진 동기화 메시지를 사용하지 않으므로 MAC 계층을 통해 통신할 때 발생할 수 있는 오류를 없앨 수 있고, 단일 홉 범위 안에서는 두 번의 메시지 교환으로 동기화를 이루므로 시각 동기화를 위한 메시지의 개수를 대폭 줄일 수 있다. 감소된 메시지량은 무선 센서 노드들의 전력 소모량을 감소시키므로 무선센서 노드의 수명을 증가시키게 된다. 또한 감소된 메시지는 무선 센서 네트워크를 구성하는 모든 센서들의 동기화 수립 시간을 크게 단축시킴으로 긴급한 사건들이 발생되었을 경우 신속하고 정확한 대응을 가능하게 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시각 동기화 방식에서 발생하는 공통적인 오류 및 분류된 동기화 기법들을 설명하고, 센서 네트워크에서 시각 동기화를 위한 기존의 연구들에 대하여 기술한다. 3장은 본 논문에서 제안하는 참조 보간 프로토콜을 제안한다. 4장은 제안된 기법에 대한 실험 및 결과에 대하여 기술한다. 끝으로 5장에서 본 논문에 대한 결론 및 향후 연구에 대하여 논의한다.

2. 관련 연구

2.1 시각 동기화의 오류 발생원인

네트워크 통신에서 비결정적인 지연시간은 정확한 시각 동기화를 저해하는 요인이다. 시각 동기화 기법을 위해서 이러한 요인에 대한 분석과 발생할 수 있는 동기

화 오차를 줄이는 방법에 대한 고려가 필요하다. 그림 2는 메시지가 전송될 때 송신자에 수신자의 사이에서 발생하는 지연 시간들을 보여주고 있다.

이런 상황을 바탕으로 Kopetz와 Schwabl는 네트워크에서 발생하는 비결정적 요인을 다음과 같이 분류하여 정의하였다[6].

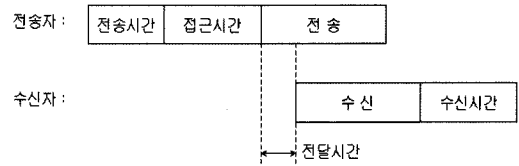


그림 2 메시지 전송 시 발생하는 지연

- 전송시간(Send Time)

어플리케이션에서 데이터를 전송하기 위해 전송 명령을 수행했을 때, 실제로 전송을 시도하는데 걸리는 시간으로 커널 프로세싱, 문맥 교환, 시스템 콜 등과 같은 현재 시스템 부하에 따라 달라진다.

- 접근시간(Access Time)

노드에서 전송 준비가 된 후 네트워크 인터페이스 카드와 같은 매체를 통해 무선 채널에 접근하는데 걸리는 시간으로 현재 네트워크 부하에 따라서 달라진다.

- 전달시간(Propagation Time)

Radio 신호가 송신측에서 수신측에 도착하는데 걸리는 시간으로 두 노드간의 거리에 따라 달라지며, 센서 네트워크에서 전송시간과 접근시간에 비해 무시해도 될 정도로 작다.

- 수신시간(Receive Time)

수신한 데이터가 어플리케이션에 도달하는데 걸리는 시간.

2.2 시각 동기화 기법 분류

시각 동기화를 무선 센서 노드간의 시간을 일치시킨다는 것으로 생각할 수 있지만, 여러 유형의 동기화가 있을 수 있으며, 응용 프로그램의 요구사항에 따라서 동기화 방법을 선택 적용해야 한다. 다음은 동기화 기법의 분류 방법을 나타낸다.

- 전역 시간 유무에 따른 분류

네트워크 외부로부터 전역 시간을 참조해 시각 동기화를 수행하는 방법과 전역 시간 없이 네트워크 내 노드 간에 동기화하는 방법이 있다. NTP는 이와 같은 외부 동기화를 수행하는 방법이며, 모든 노드가 외부와 동기화된 마스터 노드에 동기화한다. 외부 동기화는 컴퓨터, 핸드폰, PDA 등 일상생활에서 많이 사용되고 있는 방법이다. 반면에 외부와의 동기화 없이 네트워크 내 노드 간에 동기화 하는 방법은 내부 동

기화 방법이다[7].

• 동기화 시점에 따른 분류

주기적으로 동기화를 수행하는 방법과 요구가 있을 경우에 동기화 하는 방법(On-Demand)이 있다. On-Demand 동기화 방법은 특정 이벤트가 발생했을 경우 즉각 동기화 하는 방법이다. 이 방법은 주기적으로 동기화를 수행하지 않으므로 주기적 방법에 비하여 에너지 소비를 적게 되지만, 항상 동기화 되어있지 않기 때문에 실시간 동기화를 요구하는 분야에는 적합하지 않다.

• 동기화 범위에 따른 분류

동기화 하는 노드들이 네트워크 내의 모든 노드들인지 특정 그룹 멤버인지에 따라 분류할 수 있다. 어플리케이션에 따라서 각 방법이 적용될 수 있다. 예를 들어, 밀집된 센서 노드들이 이벤트를 감지하는 경우 동일 이벤트 인지를 검사하기 위해서 전체 센서 노드들이 아닌 일부분의 센서노드들로 구성된 클러스터 내부의 센서 노드만이 시간 동기화를 통하여 일을 처리하는 경우이다.

2.3 NTP 동기화 기법

분산 컴퓨팅 환경에서 다양한 측면에서 클럭 동기화를 위한 프로토콜들이 연구되어왔다. 기존의 연구들에서는 시간 동기화 프로토콜을 비연결성 메시지 또는 서버-클라이언트 모델로 시간 정보를 교환하는 방식을 사용한다[8-10]. 특히, NTP는 인터넷 표준 시각 동기화 프로토콜이며 1/1000s 이하로 동기화시키기 위해 협정 세계시각(UTC)를 사용한다. NTP는 서버 클라이언트 모델로서 동작하며 마스터 노드들은 1μs 이하의 정확성을 갖는 GPS를 통한 고유의 채널을 사용하여 동기화 되고, 네트워크의 각 노드들은 마스터 노드들을 통해 전역 참조 시간으로 동기화 된다. 그림 3은 NTP 방식에서 마스터 노드와 트리 구조로 형성된 기타 노드들과의 동기화 과정을 보여주고 있다. 그림에서 나타나듯이 NTP에서는 노드들 사이에 전송 지연 및 시각 표류 현상이 발생하고 있다.

NTP는 인터넷과 같은 정적인 토폴로지를 갖는 큰 네트워크에 맞게 설계되었고, 무선통신, 모트 플랫폼의 성능이나 자원의 제약, 저전력 사용의 필요 등 센서 네트

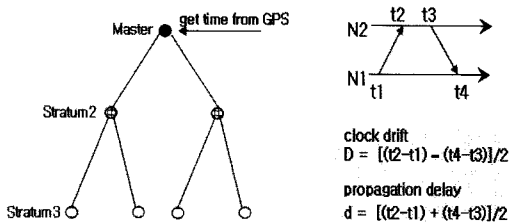


그림 3 NTP의 서버넷과 딜레이 예측 방법

워크의 특징을 고려하지 않았기 때문에 센서 네트워크에 적합하지 않다. 우선 NTP는 인터넷에 맞게 설계되어 있어 전력 소모의 효율성을 최적화 하고 있지 않다. NTP는 시스템 클럭 카운터를 규칙적으로 조금씩 증가 시킴으로써 동기화된 시스템 클럭을 유지하는데, 이러한 경우에 모드의 프로세서가 전력 소모가 적은 슬립 상태로 가는 것을 방해하는 요인이 된다. 또한 NTP 서버는 항상 동기화 요청을 받아들이기 위해 Listen 상태를 유지해야 하므로 이에 따른 비용이 증가한다.

2.4 FTSP 동기화 기법

그림 4는 FTSP(Flooding Time Synchronization Protocol) 방법에서 전역 참조 시간을 브로드캐스트하고 이를 수신하는 노드들은 중복해서 브로드캐스트를 받음으로써 클럭 오차를 선형적으로 줄여가는 방법을 보여주고 있다. 이를 위해 우선 리더 노드를 선택하고 리더 노드는 주기적으로 전체 센서 네트워크에 참조 클럭을 포함한 동기화 메시지를 이웃 노드에 브로드캐스트 한다. 이를 수신한 이웃 센서 노드들은 동기화 메시지의 타임스탬프에 자신의 클럭을 동기화 시키고 싱크 메시지를 다시 브로드캐스트 한다. 이러한 방법으로 중복해서 같은 싱크 메시지를 수신함으로써 리더 노드와의 시각 오차를 예측할 수 있다[11].

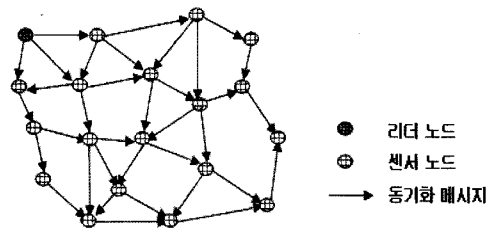


그림 4 FTSP 네트워크 플러딩

2.5 TPSN 동기화 기법

TPSN(Timing-sync Protocol for Sensor Networks)은 센서 네트워크의 모든 노드들로 구성된 신장 트리의 루트로부터 레벨별로 동기화를 이루는 방법이다. 그림 5에서는 TPSN에서 신장 트리를 구성하는 단계와 동기화 단계의 두 단계의 동작을 보여주고 있다. 트리를 구성한 후 루트 노드는 주기적으로 동기화 요청 메시지를 자식 노드에게 브로드캐스트하고 레벨 1노드들과 Pair-wise 동기화 방법을 이용하여 동기화 한다. 레벨 1의 노드들의 동기화가 끝나면 레벨 1노드들과 레벨 2노드들도 마찬가지로 방법으로 동기화를 수행한다. TPSN은 적은 컴퓨팅 파워와 저장 공간을 필요로 하지만 센서 노드들 사이의 통신에 많은 오버헤드가 존재한다[12].

2.6 RBS 동기화 기법

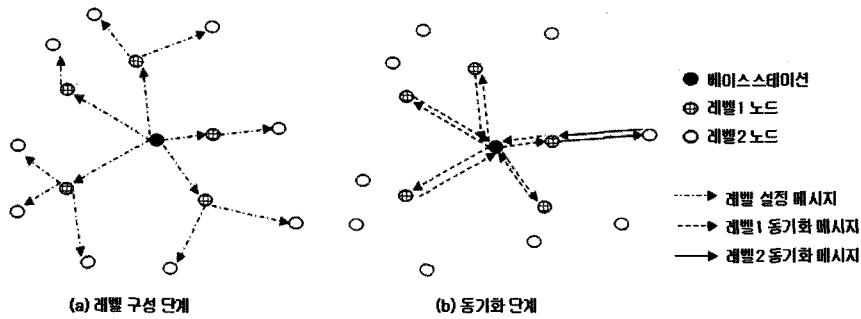


그림 5 TPSN 동작과정

최근 무선 센서 네트워크 동기화 환경에 적합한 연구가 활발히 진행되면서 기존 네트워크에서 사용되던 방법과는 다른 접근방법의 시각 동기화 방법이 연구되고 있다 [11-13]. RBS(Reference Broadcast Synchronization)는 메시지 수신 시각에 의한 시각 동기화 방법을 사용하여 동기화 하는 방법이다. 참조 패킷 송신자가 주변의 노드에 참조 패킷을 전송하며 패킷을 수신한 노드들은 각각 수신한 시각을 서로 교환함으로써 서로 동기를 맞춘다. 그림 6은 RBS에서 참조 패킷이 브로드캐스트 되어 무선 센서 노드들이 참조 패킷에 의하여 상대적인 시간 정보를 유지하는 것을 보여주고 있다. 즉, RBS 방식에서는 무선 센서 노드들이 같은 전역적인 시간을 갖는 것이 아닌 이웃 노드와의 시간차이를 나타내는 오프셋 값만으로 동기화 하는 특징을 가지고 있게 된다.

RBS 기법에서는 서버-클라이언트 모델처럼 전역 참조 시간을 전송하여 동기화를 맞추지 않으므로, 패킷 전송 시에 발생할 수 있는 예측하기 어려운 전송시간, 접근시간으로 인한 오류를 제거하였다. 또한 참조 패킷은 타임스탬프를 포함하지 않고 있어, RTS/CTS 같은 여러 다른 브로드캐스트를 이용하여 동기화할 수 있는 장점이 있다. 하지만 RBS는 이웃 노드의 클럭 정보를 유지해야 하며, 센서 노드들의 개수가 증가되면서 동기화를 위한 메시지 교환이 많이 이루어지므로 저 전력에서 동작해야 하는 무선 센서 노드들의 수명을 단축시키는 문제점을 발생시킨다.

3. 참조 보간 프로토콜(Reference Interpolation Protocol)

3.1 싱글 홉에서의 기본 동작

참조 패킷에 기반을 두어 시각 동기화를 하는 RBS는 참조 패킷 수신 후 참조 패킷 수신 시간을 유니 캐스트를 이용하여 서로 교환한다. 이에 따라서 무선 센서노드의 개수가 증가할 경우 메시지 교환 횟수가 증가하고, 또한 각 노드의 참조 패킷 수신시간 정보를 유지해야 하므로 메모리 사용이 증가한다. 이러한 단점들 이외에 RBS 방식에서는 참조 패킷의 송신자는 동기화에 참여하지 않을 뿐만 아니라, 이웃하는 무선 노드들과의 상대적 시각만을 유지 하므로 센서 네트워크 전체의 전역 시간을 갖지 않는 문제점이 있다.

본 논문에서는 브로드캐스팅 방법을 적용하여 네트워크의 모든 노드가 동기화되는데 걸리는 수렴시간을 단축시키고, 참조 패킷 송신자 및 베이스 스테이션도 동기화에 참여하므로 전역 참조 시간을 모든 무선 센서노드들이 갖는 참조 보간 프로토콜, RIP(Reference Interpolation Protocol)을 제안한다. 제안되는 참조 보간 프로토콜은 RBS와 마찬가지로 무선 센서 노드들 사이의 시간동기화를 위하여 참조 패킷을 사용한다. 참조 패킷을 사용한 시각 동기화는 기존의 NTP 방식과 같이 타임스탬프를 가진 동기화 패킷을 이용하여 동기화 하는 방법에서 발생하던 송신측의 전송시간 및 접근시간의

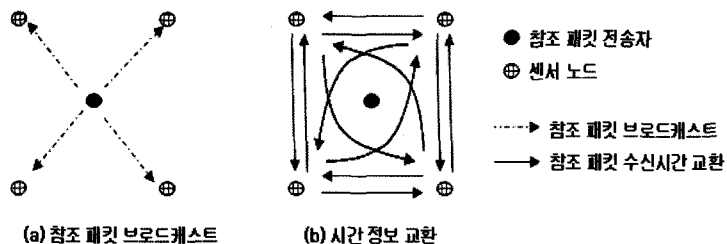


그림 6 RBS 동작 과정

그림 6 RBS 동작 과정

비결정성에 따른 동기화 오차를 제거할 수 있는 장점을 가지고 있다. RBS 방식이나 본 논문에서 제안되는 RIP 방식은 시각 동기화를 위하여 참조 패킷을 사용한다. 참조 패킷을 이용한 시각 동기화 기법들에서 부정확성을 발생시킬 수 있는 요인은 전달시간과 수신시간이다. 하지만 조밀한 네트워크에서 노드간 거리가 근접하게 될수록 전달시간은 무시할 정도로 작다[13].

그림 7은 본 논문에서 제안하는 참조 보간 프로토콜의 시퀀스 다이어그램이다. 참조 패킷 송신자가 참조 패킷을 브로드캐스트하고, 인접 노드 및 베이스스테이션은

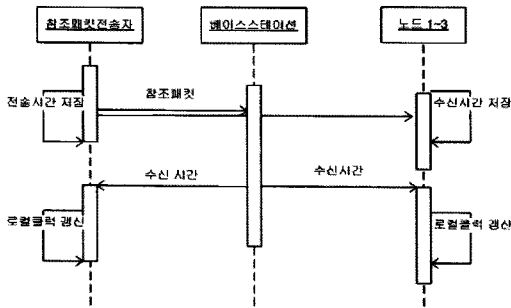


그림 7 RIP의 시퀀스 다이어그램

참조 패킷을 수신한 시간을, 참조 패킷 송신자는 패킷을 전송한 시간을 저장한다. 참조 패킷을 수신한 베이스스테이션은 자신의 수신 시간을 브로드캐스트 한다. 인접 노드 및 참조 패킷 송신자는 베이스스테이션으로부터 데이터를 수신하여 참조 패킷 송신자로부터 최초 패킷을 수신한 시간과 비교하여 자신의 로컬 클럭을 보간 한다. 이러한 과정을 통해 참조 패킷 송신자 및 베이스스테이션의 인접 노드들은 베이스스테이션의 시간에 동기화 된다.

그림 8은 단일 홉에서의 참조 보간 프로토콜의 동작 과정을 나타낸 예이다. 베이스스테이션(Base), 참조 패킷 송신자(RS)와 3개의 노드로 구성되어 있는 네트워크의 간단한 예이다. 그림 8(a)에서 RS의 참조 패킷 브로드캐스트로 동기화가 시작된다. 노드들의 로컬 클럭은 그림에서와 같다. 각 노드와 베이스스테이션은 참조 패킷을 수신하고 각 수신시간을 기록하고, RS는 브로드캐스트 하는 시각을 기록한다. 그 후 참조 패킷을 수신한 베이스스테이션은 그림 8(b)와 같이 자신의 수신시간인 1:30:00의 타임스탬프를 브로드캐스트 한다. 이를 수신한 이웃 센서 노드들 및 RS는 그림 8(c)처럼 수신한 타임스탬프를 자신의 로컬 클럭과 비교하여 베이스

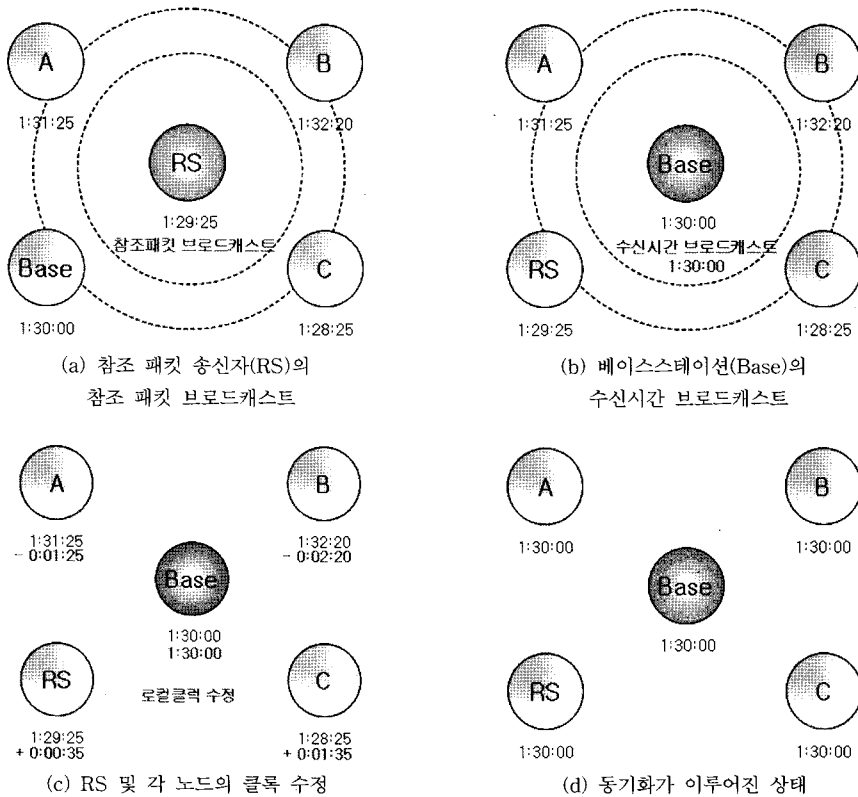


그림 8 참조 보간 프로토콜의 동기화 시나리오

스테이션과의 시간 오프셋 값($T_{base} - T_A$)을 유지하거나, 그림 8(d)와 같이 베이스 스테이션의 클럭에 $T_A' = T_A + (T_{base} - T_A)$ 로서 동기화 시킨다.

3.2 멀티 홉에서의 동작

센서 네트워크를 구성하는무선 센서들은 멀티 홉을 기반으로 데이터들을 전송하게 된다. 그림 9는 멀티 홉 센서 네트워크 토폴로지를 간략화 하여 나타낸 그림이다. 그림 9에서 A, B, C 노드는 참조 패킷 송신자를 나타내며, 2, 3노드는 두 참조 패킷 송신자에 의하여 모두 동기화 되는 게이트웨이 노드이다. 1번 노드를 베이스스테이션이라고 하면, 멀티홉에서의 RIP 방식을 적용할 때 센서 노드들의 시각 동기화 순서는 다음과 같다.

단계 1 : 베이스스테이션(1번 노드)에서 동기화 시작을 알리는 패킷 전송

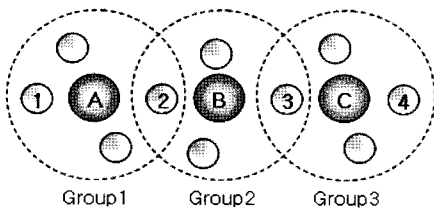


그림 9 멀티 홉에서의 참조 보간 기법

단계 2 : A 노드는 시작 메시지를 받은 후 참조 패킷(RP)을 브로드캐스트

단계 3 : 각 노드는 참조 패킷을 수신한 로컬 시간을 기록

단계 4 : 1번 노드는 참조 패킷을 수신한 시간을 기록한 패킷을 브로드캐스트

단계 5 : 각 노드는 단계 4에서 브로드캐스트 한 패킷을 수신하여 로컬 시간을 수정

단계 6 : 게이트웨이 노드인 2번 노드는 자신이 베이스스테이션이 되어 1~5번 과정 반복

그림 9와 위의 6단계의 동기화 순서를 기반으로 동기

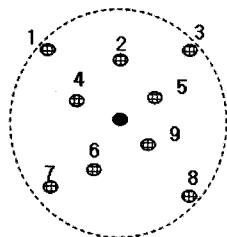
화를 위하여 발생하는 메시지 개수를 계산해보면, RIP는 한 홉을 구성하는 그룹에서 2번의 메시지 교환이 있고 G 개의 그룹이 있을 때 2G 번의 메시지 교환이 있다. 반면에 2장에서 설명된 기존의 패킷 참조 기법인 RBS의 경우 노드가 n개 있을 경우 $n \times (n-1)$ 번의 메시지 교환이 이루어지며, G개의 그룹이 있을 경우 $n \times (n-1) \times G$ 번의 메시지 교환이 발생된다. 즉, RBS는 네트워크가 커질수록 네트워크 내에서 동기화를 위해 발생하는 메시지 수가 RIP에 비해 급격히 증가함을 예측할 수 있다.

3.3 동기화 수렴 시간

네트워크 수렴 시간 측면에서 보면, 싱글 홉에서 두 번의 브로드캐스트로 동기화가 이루어지므로 RBS에 비하여 빠른 수렴 시간을 갖는다. 그림 9와 같이 멀티 홉의 경우 상위 레벨 그룹의 동기화가 완료된 후 하위 레벨 그룹의 동기화가 이루어진다. RBS는 동기화 시작 메시지가 베이스스테이션으로부터 풀러딩을 통해 센서 네트워크로 전파되면 참조 패킷 송신자가 랜덤 시간을 설정하고 설정된 시간 이후에 동기화를 수행하는 방법을 취한다. RIP가 순차적으로 동기화를 하므로 수렴 시간이 오래 걸릴 것 같으나, 메시지들의 교환 횟수가 적어 동기화 속도가 빠르게 진행된다. 반면에 RBS 방식은 조밀한 네트워크일 경우 노드 사이에 경쟁(contention)이 발생하므로 모든 무선 센서 노드들이 동기화되는 수렴 시간이 증가되는 상황을 발생시키게 된다.

3.4 센서 노드에서의 자원 소모

메모리 사용 측면을 보면, RBS의 경우 각 노드들이 모든 노드들의 수신 시간을 유지하여 노드 간에 동기화를 맞춘다. 조밀한 네트워크에서 동기화 하는 노드의 수가 많은 경우 각 노드에서 시각 동기화를 위해 사용하는 메모리의 양이 늘어나게 된다. 그림 10은 참조 패킷 송신자를 제외하고 9개의 노드로 구성된 싱글 홉의 RBS의 예를 나타낸다. 9번 노드에서 이웃 노드들에 대한 시간 오프셋 테이블을 보면 이웃 노드들에 대한 시



● 참조 패킷 전송자 ⊕ 센서 노드

Node-9의 오프셋 테이블

Node ID	1	2	3	4
Offset	-98	+11	0	-9
Node ID	5	6	7	8
Offset	+24	+5	-32	0

그림 10 싱글 홉 RBS의 이웃 노드 오프셋 테이블

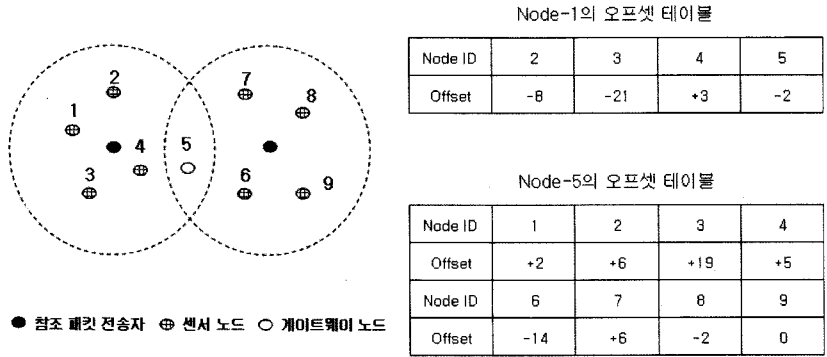


그림 11 멀티 홉 RBS의 이웃 노드 오프셋 테이블

간 오프셋 값들을 유지해야한다. 8개의 이웃 노드가 있을 경우 8개의 시간 오프셋 값을 메모리에 유지하고 있어야 한다. 만약 n개의 노드로 구성되고 시간 오프셋의 크기가 k바이트인 싱글 홉 이라면, 각 노드들에서 유지해야하는 메모리 크기는 $[(n-1) \times k]$ 바이트가 되며 한 그룹에서 시간 오프셋 유지를 위해 사용되는 메모리의 총 크기는 $[n(n-1) \times k]$ 바이트가 된다. 그림 11과 같은 멀티 홉의 경우, 5번 노드와 같이 하나의 노드가 두 그룹 이상에 중첩되어 속할 수 있으므로 중간 노드들이 유지해야 할 메모리는 한 그룹에만 속한 노드의 2 배가 된다. 반면에 RIP는 RBS와 달리 전역 시간을 사용하기 때문에 노드들의 참조 패킷 수신시간을 유지할 필요 없이 베이스스테이션의 전역 시간에 맞게 자신의 로컬 시간을 수정하면 되므로 자원 제약적인 센서 네트워크의 모트에서 메모리 사용을 줄일 수 있다.

4. 성능측정

4.1 실험 환경

NS2 2.26에 센서 네트워크 플러그인인 NRLSensor-Sim Extention을 사용하여 시뮬레이션 하였다[14,15]. 기본적인 시뮬레이션 환경은 아래 표 1과 같으며 노드의 수와 그리드의 크기를 변경하여 실험하였다.

4.2 싱글 홉 시뮬레이션

싱글 홉 시뮬레이션은 500×500 그리드의 중앙에 참조 패킷 송신자를 위치시키고, 노드들을 랜덤하게 배치시켰

다. 비교를 위해 RIP와 RBS 각각의 경우 동일 조건으로 노드의 수를 5개에서 30개까지 증가시키면서 실험하였다. 두 프로토콜 모두 동일한 패킷을 사용하여 실험하였다. 참조 패킷은 참조 패킷 전송자의 아이디를 포함하고, 수신 시간 교환에는 노드 아이디와 수신 시간을 포함하는 패킷을 사용하였다. 실험에서는 각 노드들이 수신하는 메시지의 수와 동기화가 수행되어 완료되기까지의 시간인 수립 시간을 측정하여 평균값을 구하였다.

그림 12는 노드 수의 증가에 따른 메시지 수를 나타낸다. RBS가 17~677개의 메시지 교환이 이루어진데 반해, RIP의 경우 4~27개 메시지 전송만이 이루어져 RBS에 비해 적은 메시지가 발생함을 확인하였다. 센서

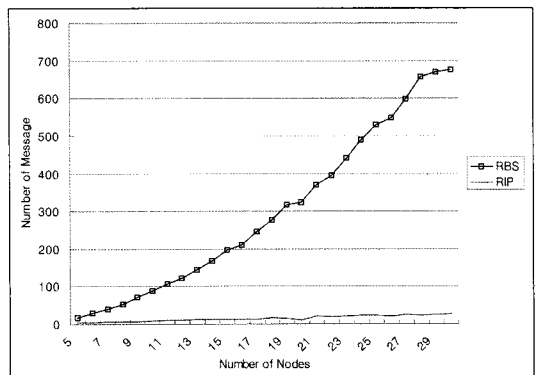


그림 12 싱글 홉에서 노드 수의 증가에 따른 메시지 수

표 1 NS2의 실험 환경 변수

set val(chan)	Channel/WirelessChannel	;; channel type
set val(prop)	Propagation/TwoRayGround	;; radio-propagation model
set val(netif)	Phy/WirelessPhy	;; network interface type
set val(mac)	Mac/802_11	;; MAC type
set val(ifq)	Queue/DropTail/PriQueue	;; interface queue type
set val(ant)	Antenna/OmniAntenna	;; antenna model
set val(rp)	NRLOLSR	;; routing protocol

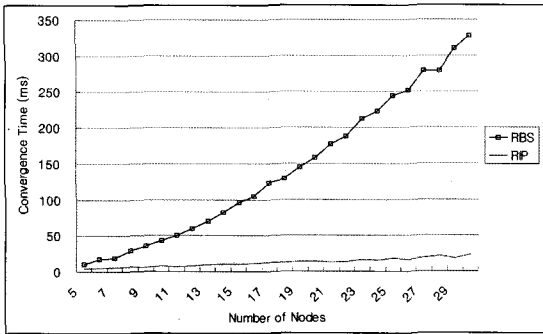


그림 13 싱글 홉에서 노드 수의 증가에 따른 수렴 시간

노드의 개수가 30개일 때 RIP는 RBS 방식보다 약 98% 적은 메시지들을 발생하였다.

센서 네트워크를 기반으로 하는 응용 프로그램 및 프로토콜 개발할 때 중요한 요구사항은 효율적인 전력소모에 있다. Mica 시리즈와 같은 센서 네트워크용 모드의 전력 중 많은 부분을 RF를 이용한 무선 통신에서 소모하고 있다[16]. 위 결과와 같이 RIP는 적은 메시지를 사용함으로써 RBS에 비해 전력 소모 측면에서 효율적인 뿐 아니라 아니라 무선 통신에 따른 오버헤드가 적음으로써 모드에서 목적에 맞는 역할을 수행하는데 많은 자원을 할당 할 수 있게 된다.

그림 13은 노드 수의 증가에 따라 모든 무선 센서 노드들에서 동기화가 이루어지는 수렴 시간을 측정하여 나타내고 있다. 메시지 수의 그래프와 유사하게 수렴 시간이 RIP에 비해 RBS가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. RIP의 경우 하나의 그룹이 동기화가 완료된 후 하위 그룹으로 동기화를 수행하는 반면 RBS는 동기화 시작 메시지를 수신한 후 랜덤하게 시간 격차를 두고 각 그룹이 동기화 과정을 수행한다. 따라서 단계별로 실행되는 RIP가 수렴시간이 증가될 것 같으나 한 그룹을 동기화 하는데 두번의 메시지 교환이 있어 동기화 시간이 짧아져 전체적으로 수렴시간이 작다. RIP와 달리 RBS는 전체 네트워크의 각 그룹들이 비슷한 시점에 동기화를 수행하기 때문에 경합이 많이 발생하게 되고 수렴시간도 증가하게 된다. 센서 노드의 개수가 30개 일 때 RIP는 RBS 방식보다 모든 노드들의 동기화 수렴시간이 91% 이상 단축되는 결과를 가져왔다.

4.3 멀티 홉 시뮬레이션

멀티 홉 시뮬레이션은 2~5홉으로 증가시켜 수렴 시간과 메시지 수를 측정하였다. 한 그룹은 베이스스테이션, 참조 패킷 송신자, 다른 그룹과의 게이트웨이 역할을 하는 게이트웨이 노드와 일반 노드로 구성된다.

그림 14는 홉 수에 따른 메시지 수를 나타낸다. 3장에서 계산한 것처럼 각 그룹의 센서 노드 수가 n일 경

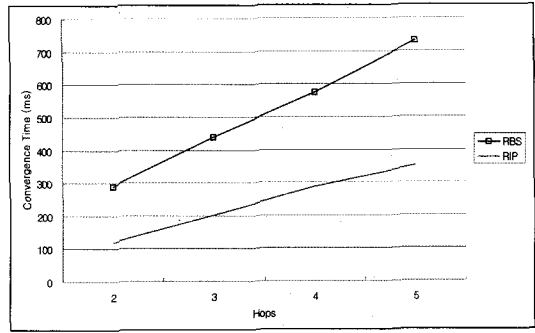


그림 14 멀티 홉에서 홉의 증가에 따른 메시지 수

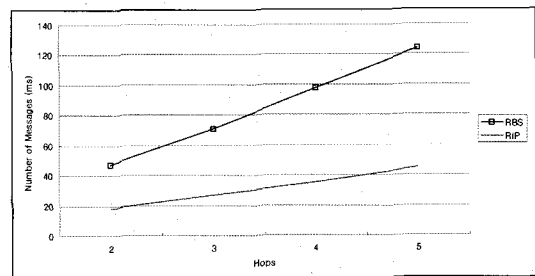


그림 15 멀티 홉에서 홉의 증가에 따른 수렴 시간

우에 제어 메시지를 제외한 메시지 교환수가 RIP는 2, RBS는 $n \times (n-1)$ 이다. RBS와 RIP 방식 모두 각 홉에서 이루어지는 동기화가 다른 홉에 영향을 미치지 않으므로 발생하는 메시지의 양은 선형적인 증가를 나타내지만 증가 속도는 RBS 방식이 더 큰 결과를 발생하고 있다.

그림 15는 홉 수에 따른 수렴 시간을 보여준다. 수렴 시간도 발생한 메시지 개수와 마찬가지로의 결과를 나타낸다. RIP는 베이스스테이션에 가까운 상위 그룹의 동기화가 완료된 후 하위 그룹의 동기화를 수행하지만, RBS는 동기화 시작 메시지를 수신 후 각 참조 패킷 송신자에서 랜덤 값으로 설정된 시간 이후 동기화를 수행한다. RBS는 각 그룹에서 거의 동시에 동기화를 수행하지만 RIP에서는 각 그룹에서 동기화를 완료 하는데 시간이 매우 짧기 때문에 RBS 보다 빠른 수렴 시간을 나타낸다. 멀티 홉의 경우 하나의 그룹을 5개의 센서 노드로 구성하였지만, 한 그룹에 속하는 센서 노드가 클 경우 앞서 살펴봤듯이 메시지 수, 메모리 사용, 수렴시간의 성능 차이가 더욱 커지게 될 것이다.

4.4 전력 소모량

표 2는 센서 네트워크에 관한 연구에서 많이 이용되는 버클리 모드들의 전력 소모량을 나타낸다. 마이크로 프로세서의 슬립 상태의 경우 μW 단위의 적은 전력 소모량을 가지기 때문에 액티브 상태와 슬립 상태를 적절

표 2 버클리 모드의 전력 소모량

모드 종류	WeC	Rene	Rene2	Dot	Mica	Mica2Dot	Mica2	Telos
마이크로 컨트롤러								
유형	AT90LS8535		ATmega163		ATmega128		TI MSP430	
프로그램 메모리 (KB)	8		16		128		60	
RAM (KB)	0.5		1		4		2	
전력	Active (mW)	15	15	15	8	33	3	3
	Sleep (μ W)	45	45	45	75	75	6	6
무선 통신								
유형	TR1000			TR1000	CC1000	CC2420		
데이터 전송률 (kbps)	10			40	38.4	250		
모듈레이션 유형	OOK			ASK	FSK	O-QPSK		
전력	Rx (mW)	9			12	29	38	
	Tx (mW)	36			36	42	35	

표 3 RIP와 RBS의 전력 소모량 비교

노드 수	메시지 수		소비된 전력 (Tx)		수립 시간 (ms)		전력 소모량 (W/s)	
	RIP	RBS	RIP	RBS	RIP	RBS	RIP	RBS
5	4	17	0.17	0.71	0.04	0.11	1.56	6.65
10	8	88	0.34	3.70	0.08	0.43	0.78	8.55
15	13	198	0.55	8.32	0.10	0.97	0.57	8.61
20	11	323	0.46	13.57	0.14	1.58	0.29	8.59
25	24	529	1.01	22.22	0.18	2.44	0.41	9.09
30	27	677	1.13	28.43	0.23	3.28	0.35	8.67
평균							0.66	8.36

히 컨트롤하여 에너지를 절약할 수 있다. 하지만 RF를 사용한 데이터 전송 및 수신은 프로세서를 이용한 데이터 처리에 비해 많은 전력 소모를 하는 것으로 나타나기 때문에 프로세서 상태를 조절하는 것보다 데이터 통신에 관한 에너지를 절약하는 것이 모드의 수명 연장에 효율적이다. RF 통신에도 프로세서와 마찬가지로 사용하지 않을 경우 또는 필요에 따라 안테나의 전원을 차단하는 등의 방법을 사용할 수 있고, 데이터 압축이나 통신 프로토콜의 개선으로 데이터 전송을 적게 하는 방법이 있을 수 있다[17].

표 3은 4.2의 실험 결과와 표 2에서 나타내는 Mica2의 전력 소모량 중 Rx, Tx 시의 소모 전력량을 적용하여 RIP와 RBS에서의 전력 소모를 비교하고 있다. Mica2는 RF 수신 및 전송시 각각 29mW, 42mW의 전력을 소모한다. 이를 이용하여 메시지 수와 데이터 전송에 소모되는 전력량을 초당 전력 소모량으로 계산하여 표 3에 나타내었다. 표 3에서 나타나듯이 평균적으로 RIP는 0.66W, RBS는 8.36W를 소비한다. 시각 동기화를 위하여 사용되는 메시지 개수가 적은 RIP가 상대적으로 많은 메시지를 사용하는 하는 RBS에 비해 약 12.7배 적은 전력을 소모함을 확인할 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 센서 노드들의 시각 동기화 기법에 관하여 연구하였다. 센서 네트워크에서는 발생하는 사건에 대하여 정확한 대응을 해야 하므로 노드들의 동기화는 신속하게 이루어져야한다. 그러나 센서 네트워크는 특성상 전력, 컴퓨팅 파워, 메모리 등 제한적인 자원을 가지고 있으며, 또한 동적인 네트워크 토폴로지 특징으로 기존의 분산 시스템에서 동기화 기법을 적용하기 어렵다.

본 논문에서는 시간 동기화를 위하여 사용되는 메시지 패킷의 개수를 줄이므로 무선 센서 노드들의 전력 소모량을 줄이므로 센서 노드들의 수명을 연장시킬 수 있는 참조 보간 프로토콜(RIP) 방식을 제안하였다. RIP 방식은 참조 패킷 송신자가 모든 센서 노드들에게 전송한 참조 패킷의 도착 시간과 베이스 스테이션이 보내온 참조 패킷의 수신 시간을 비교하여 각각의 센서 노드들이 자신의 시간을 보간 하므로 센서 네트워크내의 모든 노드들이 시간 동기화되는 기법이다. RIP는 참조 패킷을 이용하기 때문에 시각 동기화를 부정확하게 하는 원인인 접근 시간과 전송 시간을 배제 시켰을 뿐만 아니라 베이스 스테이션의 시간으로 보간 하므로 짧은 시간 안에 적은 메시지 교환으로 모든 무선 센서 노드들의 정확한 동기화를 수행한다.

동기화 기법들의 성능평가를 위하여 싱글/멀티 홉의

환경에서 기존의 RBS 방식과 제안된 RIP 방식에서 모든 센서노드들에서 발생된 메시지 개수와 동기화 수렴 시간을 측정하였다. 실험 결과는 센서노드의 개수가 증가함에 따라 RBS 방식에서는 시간동기화를 위한 메시지의 개수가 선형적으로 증가함을 관찰할 수 있었다. 반면에 RIP 방식은 시간 동기화에 참여한 센서 노드들 사이에 두 번의 메시지 전송만으로 동기화를 완성하므로 센서 노드의 수가 증가할지라도 전송 메시지의 수가 급격하게 증가하지 않았다. 실험 결과들 중 센서 노드의 개수가 30개 일 때 RIP 는 RBS 방식보다 약 98% 적은 메시지들을 발생하였고, 모든 노드들의 동기화 수렴 시간도 91% 이상 단축되는 결과를 가져왔다. 이렇게 감소된 메시지의 개수는 저 전력을 요구하는 무선 센서 네트워크 노드들의 특성상 센서 노드들의 전력소모를 감소시키는 결과를 가져온다. 본 논문에서는 실용화된 무선 센서 노드에서 메시지를 전송 할 때 소모되는 전력량 측정치에 기반을 두어 RBS 와 RIP 방식에서의 전력 소모량을 비교하였다. 실질적 전력 소모량에서 제안된 RIP 방식은 기존의 RBS 방식보다 시간 동기화를 위한 메시지 전송으로 약 12.7배의 감소된 전력을 사용하는 것으로 측정되었다. 이렇게 감소된 소모 전력량은 무선 센서 노드들의 수명을 연장시켜주는 효과가 있을 것으로 기대된다.

향후에는 센서 네트워크를 사용하는 다양한 응용프로그램들이 제안된 RIP 방식을 쉽게 사용될 수 있도록 무선 센서 네트워크용 동기화 컴포넌트 라이브러리로 구현할 예정이다. 또한 동기화 시간의 주기성에 대한 연구를 통하여 전력 소모의 효율성이나 동기화 시간의 정확성에 대한 연구를 진행할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] J. Elson, K. Romer, "Wireless Sensor Networks: A New Regime for Time Synchronization," ACM SIGCOMM Computer Communication Review (CCR), Vol.33, No.1, pp. 149-154, January 2003.
- [2] W. Chen, J. Hou, L. Sha, "Dynamic clustering for acoustic target tracking in wireless sensor networks," IEEE Transactions on Mobile Computing, Special issue self-reconfiguring in sensor networks, Vol.3, No.3, pp. 258-271, July-September 2004.
- [3] G. Pottie, W. Kaiser, "Wireless Integrated network sensors," Communications of the ACM, Vol.43, No.5, pp. 51-58, May 2000.
- [4] D. L. Mills, "Internet Time Synchronization: the Network Time Protocol," IEEE Transactions on Communications, Vol.39, No.10, pp. 1482-1493, October 1991.
- [5] J. Mannermaa, K. Kalliomaki and T. Mansten, S. Turunen, "Timing performance of various GPS receivers," In Proceedings. IEEE International Frequency Control Symposium, April 1999.
- [6] K. Romer, P. Blum and L. Meier, "Time Synchronization and Calibration in Wireless Sensor Networks," Handbook of Sensor Networks: Algorithms and Architectures, pp. 199-237, Wiley and Sons, October 2005.
- [7] L. Lamport, "Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system," Communications of the ACM, Vol.21, No.7, pp. 558-565, July 1978.
- [8] M. Lemmon, J. Ganguly and L. Xia, "Model-based Clock Synchronization in Networks with Drifting Clocks," In Proceedings. 2000 Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing, pp. 177-184, December 2000.
- [9] J. Berthaud, "Time synchronization over networks using convex closures," IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.8 No.2, pp. 265-277, April 2000.
- [10] K. Romer. "Time Synchronization in Ad Hoc Networks," In Proceedings. ACM Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 01), pp. 173-182, October 2001.
- [11] S. Ganeriwal, R. Kumar and M. B. Srivastava, "Timing-Sync Protocol for Sensor Networks," In Proceedings. ACM Conference on Embedded Networked Sensor System (SenSys), pp. 138-149, November 2003.
- [12] M. Maroti, B. Kusy, G. Simon and A. Ledeczi, "The flooding time synchronization protocol," In Proceedings, ACM Second International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'04), pp. 39-49, November 2004.
- [13] J. Elson, L. Girod and D. Estrin, "Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts," In Proceedings. The fifth symposium on Operating System Design and Implementation(OSDI), pp. 147-163, December 2002.
- [14] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [15] <http://nrlsensorsim.pf.itd.nrl.navy.mil/>
- [16] J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. Culler and K. Pister, "System architecture directions for network sensors," In Proceedings. The 0th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS-IX), November 2000.
- [17] J. Polastre, R. Szewczyk, C. Sharp and D. Culler, "The Mote Revolution: Low Power Wireless Sensor Network Devices," In Proceedings. Hot Chips 16: A Symposium on High Performance Chips, August 2004.



박 충 명

1998년~2005년 강원대학교 정보통신공학과 학사. 2005년~2007년 강원대학교 컴퓨터정보통신공학과 석사. 2007년~현재 강원대학교 컴퓨터정보통신공학과 박사과정. 관심분야는 멀티미디어 시스템, 센서네트워크



임 동 선

1986년 숭실대학교 전자계산학과 학사
1996년 한국과학기술원 정보통신공학과 석사. 1986년~현재 한국전자통신연구원 임베디드S/W연구단 책임연구원. 2003년~현재 강원대학교 컴퓨터정보통신공학과 박사과정. 관심분야는 임베디드 소프트웨어 플랫폼, 실시간 시스템, 소프트웨어 아키텍처

이 좌 형

정보과학회논문지 : 정보통신
제 34 권 제 5 호 참조

정 인 범

정보과학회논문지 : 정보통신
제 34 권 제 5 호 참조