
무선 센서 네트워크에서 시각 동기 정확도 분석

황소영*

Accuracy Analysis of Time Synchronization in Wireless Sensor Networks

Soyoung Hwang*

본 논문은 2011년도 부산가톨릭대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 수행된 것임

요 약

센서 네트워크의 여러 핵심 기술 요소 중에서 시각 동기 기술은 센서 네트워크 응용에 필수 요소이다. 여러 노드들로부터 같은 이벤트의 중복 감지 인식, 기록된 이벤트의 발생순서 구분, 이동체의 이동 속도 계산 등에 시각 정보는 기저 데이터가 된다. 본 논문에서는 다양한 무선 센서 네트워크 시각 동기 기법 중 대표적인 시각 동기 모델인 pair-wise 시각 동기 알고리즘을 대상으로 시각 동기 오류 요소를 추출하고 이러한 오류 요소가 시각 동기 정확도에 끼치는 영향을 이론적으로 분석하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 이론적 분석 결과를 검증하였다. 이러한 결과는 향후 센서 네트워크 시각 동기 알고리즘의 성능 개선이나 개발에 활용될 것으로 기대된다.

ABSTRACT

Time synchronization is a prerequisite in wireless sensor network applications such as object tracking, consistent state update, duplication detection, and temporal order delivery. This paper analyze time synchronization accuracy of pair-wise time synchronization algorithm which is a typical time synchronization model of time synchronization method in wireless sensor networks. In addition, the analyzed results are verified by simulations. These results can be utilized for performance improvement or development of time synchronization in wireless sensor networks.

키워드

무선 센서 네트워크, 시각 동기, 오류 분석

Key word

Wireless Sensor Networks, Time Synchronization, Error Analysis

* 정회원 : 부산가톨릭대학교(soyoung@cup.ac.kr)

접수일자 : 2013. 02. 12

심사완료일자 : 2013. 03. 19

I. 서 론

센서 네트워크의 여러 핵심 기술 요소 중에서 시각 동기 기술은 센서 네트워크 응용에 필수 요소이다. 센서 노드가 감지한 데이터를 전달할 때 노드는 정확한 시각 정보를 데이터에 포함해서 전달해야 이 정보를 필요로 하는 노드, 혹은 싱크가 유용하게 가공해 효과적으로 이용할 수 있기 때문이다. 즉, 여러 노드들로부터 같은 이벤트의 중복 감지 인식, 기록된 이벤트의 발생 순서 구분, 이동체의 이동 속도 계산 등에 시각 정보는 기저 데이터가 된다. 또한, 제한된 에너지의 효율적인 활용을 위해 노드가 스스로 동작을 중단하거나 다시 시작하는 것을 주기적으로 반복하게 되는데, 이때 노드들 간의 동기화된 데이터 센싱과 송수신을 위해 동작의 중단점과 시작점을 정하는 데에 시각 정보는 필수적인 요소가 된다 [1,2,3].

본 논문에서는 다양한 무선 센서 네트워크 시각 동기 기법 중 대표적인 시각 동기 모델을 대상으로 시각 동기 오류 요소를 추출하고 이러한 오류 요소가 시각 동기 정확도에 끼치는 영향을 이론적으로 분석한다. 또한 시뮬레이션을 통해 이론적 분석 결과를 검증한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 센서 네트워크 시각 동기 알고리즘의 구조와 대표적인 시각 동기 모델을 살펴본다. 3장에서 시각 동기 알고리즘의 정확도를 분석하고 4장에서 시뮬레이션을 통해 분석 결과를 검증한다. 마지막 5장에서 논문의 결론을 맺는다.

II. 센서 네트워크 시각 동기 알고리즘 구조

기존의 시각 동기 기법 뿐 만 아니라 센서 네트워크 시각 동기 알고리즘의 동작도 크게 세가지 단계를 거친다. 첫째, 언제 재동기를 수행해야 할지를 판단한다. 둘째, 자신의 클럭 오류 정도를 알기 위해 원격 노드의 클럭값을 예측한다. 셋째, 두번째 단계의 결과값을 이용해 자신의 클럭을 보정한다[4]. 이러한 동작 단계에 근거하여 시각 동기 프로토콜의 구조는 그림과 같이 세가지 블록으로 구성된다.

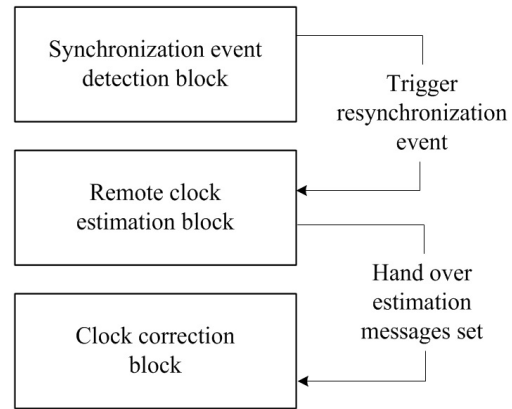


그림 1. 시각 동기 알고리즘 구조
Fig. 1 Architecture of time synchronization algorithm

- 동기 이벤트 검출 블록 (synchronization event detection block): 언제 재동기를 수행해야 할지 지정하는 부분이다. 대부분의 시각 동기 프로토콜에서 재동기는 클럭의 최대 표류율에 근거하여 주기적으로 수행된다. 하나의 재동기 프로세스는 라운드 (round)로 명명된다. 일정 시간 내에 이러한 라운드가 중첩될 경우 식별 번호 (sequence number)를 통해 각 라운드를 구분하고 노드는 가장 최근의 재동기 라운드를 제외한 나머지 라운드는 무시하도록 한다.
- 원격 클럭 추정 블록 (remote clock estimation block): 원격 노드의 클럭 값을 추정하는 부분이다. 이는 시각 전송 기법 (time transmission technique)과 원격 클럭 획득 기법 (remote clock reading), 두가지가 있다. 먼저 시각 전송 기법의 동작은 다음과 같다. 노드 i 가 실제 시각 t 에 자신의 로컬 클럭 $L_i(t)$ 를 이웃 노드 j 에 송신한다. 노드 j 는 자신의 로컬 시각 $L_j(t')$, $t' > t$ 에 노드 i 가 보낸 클럭 값을 수신한다. 노드 j 는 $t = t'$ 이라 가정하고 $L_i(t)$ 를 클럭 추정값으로 한다. 이때, $t-t$ 동안 알려진 오류 요소, 즉 노드 i 가 전송한 패킷의 채널 점유 시간, 전파 지연 (propagation delay) 등을 제거함으로써 더 정밀한 값을 갖게 된다. 두번째로 원격 클럭 획득 기법의 동작은 다음과 같다. 노드 j 는 원격 노드 i 에 클럭 정보를 요구하는 메시지를 보내고, 이를 수신한 노드 i 는 그에 응답하여 자신의 클럭 정보를 포함한 응답 메시지를 보낸다. 노드 j 는 응답받은 메시지 정보와 일주 지연 시간 (round-trip time)을 통해 노드 i 의 클럭을 추정한다. 위

두가지 기법은 모두 다음 클럭 보정 단계에서 보정치를 계산하기 위한 참조값을 제시한다.

- 클럭 보정 블록 (clock correction block): 두번째 단계의 결과를 이용해 클럭 보정량을 계산하고 보정을 수행하는 부분이다.

표 1. 동기 주기를 구하기 위한 기호 및 설명
Table. 1 Notation for synchronization period

기호	설명	단위
τ	동기 주기	second
α	요구되는 동기 정확도	second
ρ_i	센서 노드 i 의 클럭 표류율	ppm

일반적으로 동기 이벤트의 발생 주기는 다음과 같다. 센서 네트워크를 구성하는 센서 노드 클럭의 표류율 중 최대 표류율을 바탕으로 요구되는 정확도를 만족시키도록 동기 주기를 지정한다.

$$\tau \leq \frac{\alpha \cdot 10^6}{\max(\rho_i)} \quad (1)$$

예를 들어, 센서 노드 클럭의 최대 표류율이 40ppm이고, 주어진 응용에서 요구되는 동기 정확도가 0.1초라고 하면 동기 주기 τ 의 최대값은 2,500초가 된다. 즉, 0.1초 이내에서 시각 동기를 이루기 위해서는 41분 4초 이하의 주기로 재동기가 이루어져야 한다.

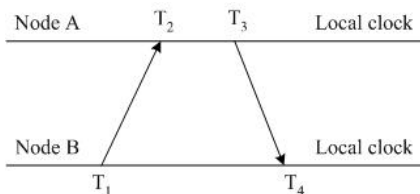


그림 2. 오프셋과 전송 지연 측정
Fig. 2 Measuring offset and delay

무선 센서 네트워크에 적용되는 다양한 원격 클럭 추정 및 보정 기법 중 가장 대표적인 모델은 pair-wise 시각 동기 기법이다. 그림 2와 식 (2)는 pair-wise 시각 동기 기법의 시각 오프셋 (clock offset)을 얻는 방법이다. 시각 오

프셋은 기준 시각에 일치하도록 조절해야 하는 지역 클럭의 보정량을 나타낸다[5,6]. 두 노드 A와 B 사이의 전송 지연과 시각 오프셋은 무선 통신 링크를 통해 교환되는 시각 소인 메시지 (time-stamp message)에 의해 구해진다. 노드 A에 대한 노드 B의 일주 지연 (round-trip delay) δ 와 시각 오프셋 θ 를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta &= (T_4 - T_1) - (T_3 - T_2), \\ \theta &= \frac{(T_2 - T_1) + (T_3 - T_4)}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

III. 시각 동기 정확도 분석

본 장에서는 앞서 살펴본 구조에 따른 시각 동기 알고리즘의 동기 정확도를 분석한다. 먼저, 동기 정확도에 영향을 끼치는 오류 요소에 대해 살펴보고, 이러한 오류 요소를 바탕으로 제안한 시각 동기 기법의 단일 홉 내 동기 오류 및 멀티 홉 네트워크에서 동기 정확도를 살펴본다.

3.1. 시각 동기 오류 요소

정밀한 네트워크 시각 동기를 저해하는 가장 큰 원인은 비결정적 처리 지연 (non-deterministic delay)에 있다. 이러한 지연은 앞서 기술한 시각 동기 프로토콜의 구성 요소 중 원격 클럭 추정 블록에서 발생하게 된다. 원격 클럭을 추정하는 과정에서 발생한 예기치 못한 이벤트나 네트워크 충돌 등에 의한 지연은 정확한 클럭 예측을 저해하고 이는 시각 동기 정확도에 영향을 미친다. 이러한 시각 동기 오류 요소는 다음 다섯가지로 나누어 볼 수 있다[7].

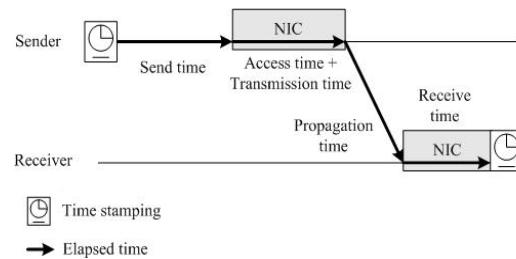


그림 3. 시각 동기 오류 요소
Fig. 3 Synchronization error sources

- 송신 지연 (send time): 데이터를 보내려는 송신측에서 메시지를 구성하는데 걸리는 지연 시간으로 문맥 교환과 같은 운영체제 부담과 호스트에서부터 네트워크 인터페이스까지 메시지 전달 지연 시간을 포함한다.
- 매체 접근 지연 (access time): 메시지 전달을 위해 실제 통신 채널을 점유하는데까지의 지연 시간이다. 이것은 어떤 MAC 프로토콜을 쓰느냐에 따라 달라진다. 이더넷과 같은 경쟁 기반 MAC에서는 채널에 충돌이 없을 때까지 기다려야 한다. 802.11에서와 같이 무선 RTS/CTS 기법에서는 데이터를 전송하기 전에 제어 패킷을 먼저 주고 받은 후 전송 여부를 결정하게 된다. TDMA에서는 자신에게 할당된 슬롯 타임이 되었을 때 데이터를 전송할 수 있다.
- 전달 지연 (transmission time): 전송할 데이터 패킷을 물리 계층에서 각 비트 (bit-by-bit) 단위로 전송 매체에 전달하는데 걸리는 지연 시간이다. 이것은 전달할 데이터 패킷의 크기와 라디오 속도 (radio speed)를 통해 구해지는 일정한 값이며 소프트웨어로 구현된 트랜스미터 (transmitter)의 경우 인터럽트 응답 시간에 따른 변동이 발생할 수 있다.
- 전파 지연 (propagation time): 송신측과 수신측 네트워크 인터페이스간 실제 메시지가 전파되는데 걸리는 지연 시간이다. 애드 혹 네트워크에서 서로 이웃한 노드의 경우와 같이 송신측과 수신측이 동일한 물리 전송 매체를 공유하고 있는 경우라면 이 시간은 실제 그 매체를 통해 메시지가 전파되는 물리적인 시간과 같으며 거의 무시할 수 있는 값이다.
- 수신 지연 (receive time): 수신측의 네트워크 인터페이스에서 수신한 메시지를 처리하여 상위 계층으로 전달하는데 걸리는 지연 시간이다. 일반적으로 이는 네트워크 인터페이스에서 메시지를 받았다는 수신 신호를 발생시키기까지의 시간에 해당한다.

일반적으로 앞서 살펴본 시각 동기 알고리즘 구조를 공유하는 기법에서 시각 동기 오류 요소는 기본적으로 포함된다. 따라서, 이러한 오류 요인을 줄이는 것 또한 시각 동기 정확도를 높이는 데 중요한 역할을 하게 된다. 기존의 센서 네트워크 시각 동기 기법에서 제시하고 있는 바와 같이 송수신 지연은 어플리케이션 계층이 아닌 MAC 계층에서 시각 소인 기능을 수행함으로써 개선될 수 있다. 그리고, 매체 접근 지연의 경우는 무선 통신 채널

의 충돌에 의한 지연이 가장 큰 지연 요소이므로 이러한 충돌을 최대한 회피할 수 있는 MAC 프로토콜을 활용하는 것이 중요하다.

3.2. 시각 동기 정확도 분석

본 절에서는 무선 센서 네트워크에서 대표적인 시각 동기 기법인 pair-wise 시각 동기 알고리즘의 동기 정확도를 단일 홉 내에서 동기 오류, 멀티 홉 네트워크에서 동기 오류로 나누어 분석한다. 다음 표는 이러한 동기 오류를 표현하기 위한 기호 및 설명을 나타낸 것이다.

표 2. 시각 동기 오류 기호 및 설명
Table. 2 Notation for analysis

기호	설명
ϵ_s	비결정적 지연 요소에 따른 동기 오류
ϵ_p	노드간 상대적인 표류에 따른 동기 오류
ϵ_s	단일 홉 내에서 동기 오류
ϵ_m	멀티 홉 네트워크에서 동기 오류

3.2.1. 단일홉 내에서 동기 오류

Pair-wise 시각 동기 알고리즘은 시각 소인 메시지 교환에 의해 이루어지며 일주 지연 및 보정할 클럭 오프셋은 2장의 식 (2)에 의해 구해진다.

표 3. 단일 홉 시각 동기 오류 분석에 사용된 표기법
Table. 3 Notation for single-hop analysis

기호	설명
T	시각 소인 (time-stamp)
t	UTC (real time)
S	송신 지연 (send time)
A	매체 접근 지연 (access time)
M	전달 지연 (transmission time)
P	전파 지연 (propagation time)
R	수신 지연 (receive time)
δ	delay time (일주 지연 및 송수신 지연)
θ	시각 오프셋 (clock offset)
ϕ	노드간 상대적 표류 (relative drift)

식 (2)는 다음 두가지 가정을 내포한다.

- 전송 지연 및 수신 지연 (one-way delay)은 일주 지연 값의 반으로 간주한다.
- 시각 소인 메시지 교환 동안 각 노드 클럭의 표류율은 같거나 그 차이가 0에 가까운 값으로 무시할 수 있다.

그러나, 앞의 그림 3에서 기술한 바와 같이 시각 소인 메시지 교환 과정에서 비결정적 처리 지연이 발생하게 되고, 이에 의해 동기 오류가 발생하게 된다. 그림 4에 비결정적 지연 요소의 영향을 나타내었다.

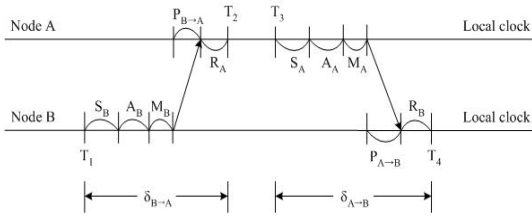


그림 4. 시각 소인 과정에서 비결정적 지연 요소의 영향
Fig. 4 Non-deterministic error factors

이러한 지연 요소를 고려한 일주 지연 δ 를 식 (3)과 식 (4)에 나타내었다.

$$\delta = (T_4 - T_1) - (T_3 - T_2) \quad (3)$$

$$= \delta_{B \rightarrow A} + \delta_{A \rightarrow B}$$

$$\delta_{B \rightarrow A} = S_B + A_B + M_B + P_{B \rightarrow A} + R_A \quad (4)$$

$$\delta_{A \rightarrow B} = S_A + A_A + M_A + P_{A \rightarrow B} + R_B$$

이때 노드 A와 노드 B간의 클럭 오프셋을 θ' 라 두고 시각 소인 메시지 교환을 통해 을 구하면 식 (5) 및 식 (6)과 같다.

$$T_2 = T_1 + \theta' + \delta_{B \rightarrow A} \quad (5)$$

$$T_4 = T_3 - \theta' + \delta_{A \rightarrow B}$$

$$\theta' = \frac{(T_2 - T_1) + (T_3 - T_4)}{2} + \frac{\delta_{A \rightarrow B} - \delta_{B \rightarrow A}}{2} \quad (6)$$

결국, 비결정적 처리 지연에 의해 발생하는 동기 오류

는 식 (7)이 된다.

$$\epsilon_\delta = \theta - \theta' \quad (7)$$

$$= \frac{\delta_{B \rightarrow A} - \delta_{A \rightarrow B}}{2}$$

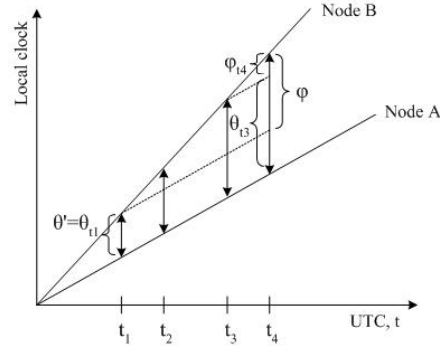


그림 5. 노드 클럭 간 오프셋 및 상대적 표류
Fig. 5 Clock offset and relative drift between nodes

여기서, 그림 5에 나타낸 것과 같이 시각 소인 메시지 교환 동안에도 노드간 상대적인 표류가 발생하게 된다. 이러한 상대적인 표류를 적용하면 앞의 식 (5)는 다음 식 (8)로 치환된다.

$$T_2 = T_1 + \theta_{t1} + \delta_{B \rightarrow A} \quad (8)$$

$$T_4 = T_3 - (\theta_{t3} + \phi_{t4}) + \delta_{A \rightarrow B}$$

위 식을 Θ 와 Φ 에 대한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\theta_{t1} + \theta_{t3} + \phi_{t4} = T_2 - T_1 + T_3 - T_4 + \delta_{A \rightarrow B} - \delta_{A \rightarrow B} \quad (9)$$

식 (9)에 식(10)을 대입하여 θ' 에 대한 식으로 정리하면 식 (11)이 된다.

$$\theta_{t3} + \phi_{t4} = \theta_{t1} + \phi \quad (10)$$

$$\theta_{t1} = \theta'$$

$$\theta' = \frac{(T_2 - T_1) + (T_3 - T_4)}{2} + \frac{\delta_{A \rightarrow B} - \delta_{B \rightarrow A}}{2} - \frac{\phi}{2}$$

$$(11)$$

따라서, 비결정적 처리 지연 및 노드간 상대적 표류에 의해 단일 홉 내에서 발생하는 시각 동기 오류 ϵ_s 는 식 (12)로 정리된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \theta - \theta' \\ &= \frac{\delta_{B \rightarrow A} - \delta_{A \rightarrow B}}{2} + \frac{\phi}{2} \\ &= \epsilon_\delta + \epsilon_\phi, (\epsilon_\delta = \frac{\delta_{B \rightarrow A} - \delta_{A \rightarrow B}}{2}, \epsilon_\phi = \frac{\phi}{2}) \end{aligned} \quad (12)$$

3.2.2. 멀티 홉 네트워크 동기 오류

Pair-wise 시각 동기 기법에 기반한 센서 네트워크 시각 동기는 트리 형태의 네트워크 토폴로지를 구성하여 트리의 에지 (edge)를 따라 노드간 시각 동기를 이룬다. 따라서, 구성한 트리의 깊이가 동기 정확도에 영향을 미친다.

표 4. 멀티 홉 시각 동기 오류 분석에 사용된 표기법
Table. 4 Notation for multi-hop analysis

기호	설명
L	정방형 센서 필드에서 한변의 길이
N	센서 필드에 배치된 노드의 수
r	노드의 무선 전송 거리
s	배치된 노드간 간격
d	트리의 깊이

센서 필드에 배치된 노드의 수를 N, 노드의 무선 전송 거리 내에 한 개 이상의 이웃 노드가 존재한다고 했을 때 최악의 트리 깊이는 다음과 같다.

$$d_{worst} = N - 1 \quad (13)$$

다음은 보다 유효한 분석을 위해 이상적인 환경에서 센서 네트워크 토폴로지 구성 과정이 동작되는 경우를 가정한 것이다.

- 센서 필드 내에 노드는 그림 6과 같이 균일한 격자 형태로 배치된다.
- 무선 통신 환경은 이상적으로 동작한다. 즉, 무선 링크의 충돌, 에러 및 지연은 없다고 본다. 따라서, 임의의 노드의 무선 전송 거리 범위 내에 있는 이웃 노드들

- 은 해당 노드가 전송한 메시지를 동시에 수신한다.
- 각 노드의 무선 전송 거리 $r \geq \sqrt{2}s$ 조건을 만족한다. (r: 노드의 무선 전송 거리, s: 센서 필드에 배치된 노드간 간격)
- 레벨 설정 처리에 대한 오버헤드는 없다.

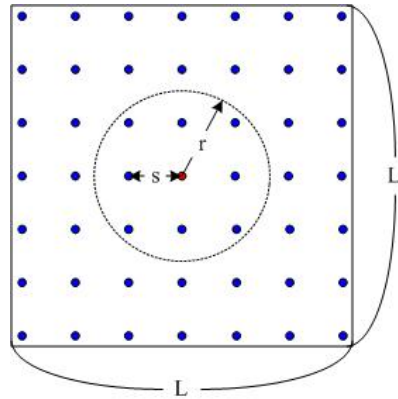


그림 6. 멀티홉 센서 네트워크 구성
Fig. 6 Multi-hop sensor networks

이러한 가정을 바탕으로 구한 트리 깊이는 루트 노드의 위치에 따라 식 (14) 식 (15)로 정리된다. 루트 노드의 위치가 센서 필드의 중심에 위치할 경우 트리의 깊이를 $d_{r-center}$, 루트 노드의 위치가 센서 필드 가장 자리에 위치할 경우 트리의 깊이를 $d_{r-corner}$ 로 나타내었다.

$$d_{r-center} = \left\lceil \frac{L}{\sqrt{2}r} \right\rceil, r \geq \sqrt{2}s \quad (14)$$

$$d_{r-corner} = \left\lceil \frac{\sqrt{2}L}{r} \right\rceil, r \geq \sqrt{2}s \quad (15)$$

토폴로지 구성 결과에 따른 트리 깊이를 d라 두고, 시각 동기 과정동안 각 노드 클럭의 표류를 변화는 없다고 가정하면 제안한 기법의 멀티 홉 네트워크 동기 오류 ϵ_m 은 다음과 같다.

$$\epsilon_m = d \cdot \epsilon_s \quad (16)$$

IV. 시뮬레이션

분석한 동기 정확도를 검증하기 위해 PARSEC 플랫폼 기반의 NESLsim에서 시뮬레이션을 수행하였다. PARSEC (PARallel Simulation Environment for Complex system)은 C 기반의 이산 이벤트 시뮬레이션 언어이다 [8,9,10]. NESLsim에서 센서 네트워크는 센서 노드, 무선 채널, 노드를 관리하는 관리 엔티티로 구성된다. 시뮬레이션 환경에서 시간 정밀도 즉, 노드 클럭의 해상도는 10 μ s이다. 시뮬레이션에서 사용된 클럭 모델은 버클리 Mica 모트에 사용된 수정발진자의 특성에서 유도하였으며 모든 센서 노드의 시간은 독립적으로 흐른다. 초기 시작 시간 차이를 보여주기 위해 각 센서 노드간 2초 가량의 램덤 오프셋을 적용하였다. 시뮬레이션 설정 파라미터는 표 5와 같다.

표 5. 분석 내용 검증을 위한 시뮬레이션 설정 파라미터

Table. 5 Simulation parameters

항목	설정값
L	100X100
N	100
센서 노드의 배치	uniformly random
ρ	20ppm
r	28
MAC	CSMA MAC
전송 속도	19.2kb/s
데이터 패킷 크기	128bits
루트 노드의 위치	중심 (50, 50), 가장자리 (0, 0)

그림 7은 루트 노드의 위치에 따른 토폴로지 구성 결과를 나타낸 것이다. 표 6에서 보는 것과 같이 트리 깊이는 앞서 분석한 내용을 만족시키며, 레벨에 따라 동기 오류가 증가하는 것을 그림 9와 10을 통해 확인할 수 있다. 이는 단일 홉 동기 오류 $\epsilon_s=0.03ms$ 일 때 분석 결과와 비교한 것으로 트리 깊이에서와 마찬가지로 동기 오류 결과도 분석 내용을 만족시킴을 알 수 있다.

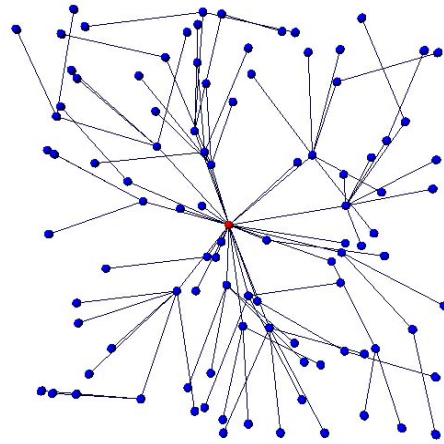


그림 7. 루트 위치가 중심일 때 토폴로지 구성 결과
Fig. 7 Topology setup result: center

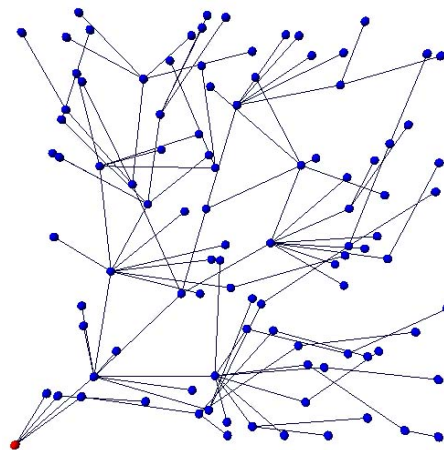


그림 8. 루트 위치가 가장자리일 때 토폴로지 구성 결과
Fig. 8 Topology setup results: corner

표 6. 루트 노드의 위치에 따른 트리 깊이
Table. 6 Tree depth

루트의 위치	중심	가장자리
분석 결과	$\lceil \frac{L}{\sqrt{2}r} \rceil = 3$	$\lceil \frac{\sqrt{2}L}{r} \rceil = 6$
시뮬레이션 결과	3	6

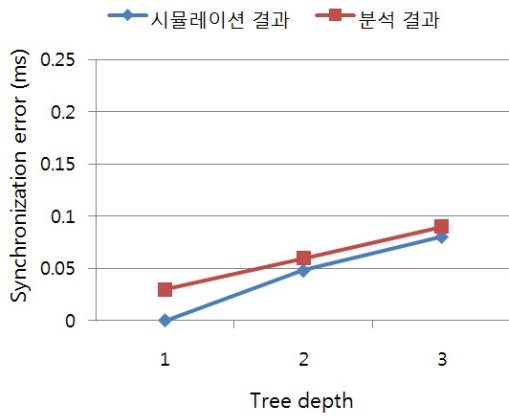


그림 9. 루트 위치가 중심일 때 동기 오류
Fig. 9 Synchronization error: center

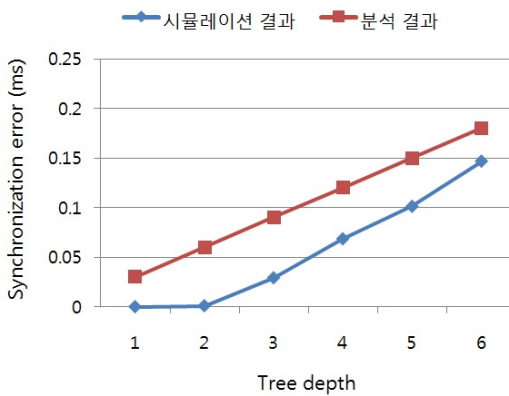


그림 10. 루트 위치가 가장자리일 때 동기 오류
Fig. 10 Synchronization error: corner

V. 결 론

센서 네트워크의 여러 핵심 기술 요소 중에서 시각 동기 기술은 센서 네트워크 응용에 필수 요소이다. 본 논문에서는 다양한 무선 센서 네트워크 시각 동기 기법 중 대표적인 시각 동기 모델인 pair-wise 시각 동기 알고리즘을 대상으로 시각 동기 오류 요소를 추출하고 이러한 오류 요소가 시각 동기 정확도에 끼치는 영향을 이론적으로 분석하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 이론적

분석 결과를 검증하였다. 이러한 결과는 향후 시각 동기 알고리즘 성능 개선 및 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 김대영, “센서 네트워크 클록 동기 및 위치인식 기술”, FA 저널, 268: 134-139, (주) 인포더, 2004년 6월.
- [2] K. Römer, P. Blum, and L. Meier, “Time synchronization and calibration in wireless sensor networks,” in *Handbook of sensor networks: algorithms and architecture*, Ivan Stojmenovic (Ed.) John Wiley & Sons, 2005.
- [3] D. Culler, D. Estrin, and M. Srivastava, “Overview of sensor networks,” *IEEE Computer*, 37(8):41-49, 2004.
- [4] E. Anceaume, and I. Paaut, “Performance evaluation of clock synchronization algorithms,” IRISA Research Report No. 3526, IRISA, 1998.
- [5] D.L. Mills, “Internet time synchronization: The network time protocol,” *IEEE Transactions on Communications*, 39(10):1482-1493, 1991.
- [6] D.L. Mills, “Network time protocol (Version 3) specification, implementation and analysis,” RFC 1305, 1992.
- [7] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, “Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts,” *ACM Operating Systems Review*, 36(SI): 147-163, 2002.
- [8] PARSEC User Manual, <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/parsec>, 1999.
- [9] Y. Zheng and A. Shakil, *Networks for Computer scientists and Engineers*, Oxford University Press, 2002.
- [10] S. Ganeriwal, V. Tsiatsis, C. Schurgers and M.B. Srivastava, “NESLsim: A parsec based simulation platform for sensor networks,” NESL, 2002.

저자소개



황소영 (Soyoung Hwang)

1999년 부산대학교
전자계산학과(이학사)
2001년 부산대학교
전자계산학과(이학석사)

2006년 부산대학교 전자계산학과(이학박사)
2006년 ~ 2010년 2월 한국전자통신연구원 선임연구원
2010년 3월 ~ 현재 부산가톨릭대학교 멀티미디어
공학과 조교수

※관심분야: 센서 네트워크, 임베디드 시스템, 시각
동기, e-Navigation