

# TDOA 기반의 실시간 위치 측정 시스템을 위한 정밀 무선 시각 동기 시스템

정회원 조 현 태\*, 준회원 정 연 수\*, 장 현 성\*,  
정회원 박 인 구\*\*, 종신회원 백 운 주\*<sup>o</sup>

## Precision Time Synchronization System over Wireless Networks for TDOA-based Real Time Locating Systems

Hyuntae Cho\* *Regular Member*, Yeonsu Jung\*, Hyunsung Jang\* *Associate Members*,  
Ingu Park\*\* *Regular Member*, Yunju Baek\*<sup>o</sup> *Lifelong Member*

### 요 약

실시간 위치 측정 시스템은 사람 또는 사물의 위치를 측정하고 추적하는 시스템이다. TDOA 기반의 실시간 위치 측정 시스템은 태그로부터 전달된 신호의 도착시간 차이를 이용하여 위치를 측정한다. TDOA 기반의 실시간 위치 측정 시스템에서 리더들 간의 도착시간 차이를 계산하기 위해서는 리더 간 시각 동기화가 필수적이다. 본 논문에서는 IEEE 802.15.4 네트워크에서의 실시간 위치 측정 시스템을 위한 정밀 시각 동기 시스템을 제안한다. IEEE 802.15.4 네트워크에서 정밀한 시각 동기를 이루기 위해서 본 논문에서는 네트워크 프로토콜 스택의 지연과 지터 등의 에러요인을 분석한다. 분석된 에러 요인들에 기반하여 하드웨어 시각 측정 장치를 개발하고, 칼만 필터를 적용하여 네트워크 프로토콜에서 발생하는 지연과 지터를 최소화하였다. 제안한 기법을 통하여 성능평가 결과, 실시간 위치 측정 시스템에서의 리더들은 상호간에 10나노초 이하의 시각 동기를 이루었다.

**Key Words** : Time Synchronization, Clock Synchronization, Precision Time, IEEE 802.15.4, IEEE1588, RTLS, TDOA

### ABSTRACT

RTLS is a system for automatically locating and tracking people and objects. The TDOA-based RTLS determines the location of the tag by calculating the time differences of a signal received from the tag. In TDOA-based RTLS, time synchronization is essential to calculate the time difference between readers. This paper presents a precision time synchronization method for TDOA-based RTLS over IEEE 802.15.4. In order to achieve precision time synchronization in IEEE 802.15.4 radio, we analyzed the error factors of delay and jitter. We also deal with the implementation of hardware assisted time stamping and the Kalman filtering method to minimize the error factors. In addition, this paper described the experiments and performance evaluation of the proposed precision time synchronization method in IEEE 802.15.4 radio. The results show that the nodes in a network can maintain their clocks to within 10 nanoseconds offset from the reference clock.

※ "이 논문은 2008년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임" (지역거점연구단육성사업/차세대물류IT기술연구사업단)

\* 부산대학교 컴퓨터공학과(yunju@pusan.ac.kr)(<sup>o</sup>: 교신저자), \*\* LIG 빅스원

논문번호: KICS2008-07-319, 접수일자: 2008년 7월 16일, 최종논문접수일자: 2008년 11월 11일

## I. 서 론

유비쿼터스 컴퓨팅 시대가 도래함에 따라, 사물 또는 사람의 위치 또는 경로를 효율적이고, 신뢰성 있게 알고자하는 요구사항이 증가하고 있다. 실시간 위치 측정 시스템(RTLS : real time locating systems)은 사람 또는 사물의 위치를 실시간으로 측정하는 시스템이다. 위치를 측위하는 대표적인 기법으로는 ROA(RSSI of arrival)<sup>[1]</sup>, AOA(angle of arrival)<sup>[2]</sup>, TOA(time of arrival)<sup>[3]</sup>, 그리고 TDOA(time difference of arrival)<sup>[4]</sup> 등이 있다. ROA는 신호의 세기를 이용하여 태그의 위치를 추정해내는 기법이며, AOA는 신호의 도달 각도를 이용해서 태그의 위치를 추정하는 기법이다. 반면, TOA 기법은 위치 정보를 알고 있는 리더와 위치를 알고자 하는 태그의 신호 비행시간을 계산하여 거리를 구한 후 위치를 측정하는 방법이며, TDOA 기법은 태그 메시지가 전송 매체를 통하여 전달되는 신호의 전송지연의 차이를 이용하여 위치를 추정하는 기법이다. TDOA를 이용하는 기법은 크게 두 가지 방법이 존재한다. 첫 번째로 둘 이상의 독립적인 전송 매체를 사용하여 측정하는 방법이다. 예를 들어, RF 신호와 초음파의 전송 속도 차이를 이용하여 계산한다<sup>[5]</sup>. 이는 측정에 있어서 매우 정확한 결과를 산출하지만, 초음파 매체의 특성으로 인하여 전송거리에 한계를 가진다. 두 번째는 같은 전송 매체를 사용하여 측정하는 방법이다. 둘 이상의 리더가 태그의 신호를 수신하고, 각 리더들 간의 신호 수신 시각 차이를 이용하여 위치를 추정하는 기법이다. 후자의 경우 전송 거리의 한계를 극복하지만, 리더들 간의 시각 동기가 전제되어야 한다. 이러한 리더들 간의 시각 동기는 위치 측정 시스템의 성능을 결정짓는 중요한 요소로서, 1 나노초의 시각 동기 오차는 30 센티미터의 거리 오차를 초래한다.

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 네트워크에서 TDOA 기반의 실시간 위치 측정 시스템을 위한 정밀 무선 시각 동기 시스템을 제안한다. 제안한 정밀 무선 시각 동기 시스템은 기본적으로 메시지 교환에 의해서 네트워크 내의 리더들이 참조시각에 동기화한다. 메시지 교환을 통하여 정밀한 시각 동기를 유지하기 위해서는 프로토콜 스택의 불확도(uncertainty)를 제거하여야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 IEEE 802.15.4 네트워크 프로토콜에서 발생하는 지연과 지터 등의 오류 요인을 분석하고, 이러한 오류 요인을 제거하기 위한 하드웨어 시각 측정 장치를 설계 및

구현하였다. 제안한 하드웨어 시각 측정 장치는 MAC 상위계층에서 발생하는 지연과 지터를 제거할 수 있다. 또한 본 논문에서는 물리계층에서 발생하는 지연과 지터를 제거하기 위하여 칼만 필터를 사용하는 정밀 시각 동기 기법을 제안한다. 제안한 시각 동기 시스템은 성능평가 결과, 실시간 위치 측정 시스템에서의 리더들은 상호간에 10나노초 이하의 시각 동기를 이루었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 TDOA 기반의 실시간 위치 측정 시스템을 위한 시각 동기 기법 등의 관련연구를 언급하며, III장에서는 본 논문에서 설계 및 구현한 시각 동기 시스템과 정밀 무선 시각 동기 기법에 대해서 기술한다. IV장에서는 시각 동기 시스템의 성능평가를 수행하고, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 관련연구

### 2.1 시각 동기 기법

NTP(network time protocol)<sup>[6]</sup>는 오랜 기간 동안 인터넷 환경아래에서의 시각 동기 표준으로 자리 잡았지만 정밀도는 수 밀리초 정도에 불과하여, 위치 측정 시스템을 위한 정밀 시각 동기 기법에는 적합하지 않다. GPS<sup>[7]</sup>는 UTC(universal coordinated time)에 동기화하면서 마이크로초 이하의 정밀도를 제공한다. 하지만, 수신기가 비싸며, 실외용 안테나가 필요하다는 단점이 있다. IEEE 1588<sup>[8]</sup>은 측정 및 제어 시스템 클럭들의 시각 동기를 맞추는데 밀리 초 이하의 정밀도를 제공하기 위해 제정된 표준이다. IEEE 1588은 데이터 네트워크 환경에서 마이크로초 이하의 높은 정밀도를 제공하기 위한 표준이다. 하지만, 높은 정밀도 제공을 위해 하드웨어적 접근법<sup>[9]</sup>이 필요하며, 대부분의 이더넷과 무선 LAN<sup>[10]</sup>을 중심으로 연구 개발이 진행되어 왔으며, RTLS를 위한 무선 시각 동기 기법으로는 다소 부적절하다.

최근 무선 센서 네트워크에서 센서 노드들 간의 동기를 이루기 위해서 RBS<sup>[11]</sup>, TPSN<sup>[12]</sup>, 및 FTSP<sup>[13]</sup>와 같은 시각 동기 기법들이 제안되고 있다. 하지만, 무선 센서 네트워크에서의 시각 동기는 제한된 에너지, 계산능력, 메모리 등을 가지는 센서 노드 상에서 이루어진다. 이러한 센서 노드들은 대부분의 경우 20PPM에서 50PPM의 오차를 가지는 저렴한 크리스탈 오실레이터를 활용하기 때문에, 정밀한 시각 동기를 제공하지 못한다. 또한, 이러한 무선 센서 네트워크에서의 시각 동기는 무선 환경에서 발생하는 오류

요인들에 대한 분석을 포함하고 있지 않기 때문에, 정밀한 시각 동기를 제공하기가 어렵다. Cox<sup>[14]</sup>은 IEEE 802.15.4 네트워크에서의 시각 동기화를 위한 시각 측정 지점에 대해서 언급하였으며, Kusy<sup>[15]</sup>는 무선 네트워크 프로토콜에서 발생할 수 있는 불확도를 분석하였다. 그러나 이들 논문 역시 무선 센서 네트워크에서 센서 노드들 간의 시각 동기에 초점을 맞추었으며, 노드가 가지는 한계를 극복하지 못하고 단지 마이크로초 수준의 시각 동기를 제공하였다. 본 논문에서는 나노초 수준의 정밀 시각 동기를 제공하기 위해 보다 상세한 에러 분석을 제공하며, 이를 바탕으로 하드웨어 시각 측정 장치를 개발한다.

2.2 에러 요인 분석

본 절에서는 IEEE 802.15.4 무선 통신을 통하여 시각 동기화를 수행함에 있어서 발생하는 에러 요인에 대해서 분석한다. 전통적인 시각 동기 기법은 노드들 간의 메시지 교환을 통하여 이루어진다. 그림 1은 메시지 교환을 통한 전통적인 시각 동기 기법을 나타낸다. 노드 A가 t1 시점에 자신의 시각 정보를 측정하고 동기 메시지를 전송하면, 노드 B는 t2 시점에 메시지를 수신하고 t3 시점에 응답을 수행한다. 노드 A는 다시 t4 시점에 응답메시지를 수신하여 오프셋과 지연을 계산한다. 두 노드간의 오프셋과 지연은 식 (1)과 같이 계산된다<sup>[6]</sup>.

$$offset = \frac{(t2-t1)-(t4-t3)}{2} \quad (1)$$

$$delay = \frac{(t2-t1)+(t4-t3)}{2}$$

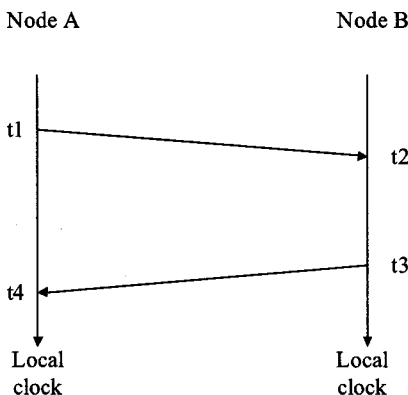


그림 1. 메시지 교환을 통한 시각 동기  
Fig. 1. Time synchronization by message exchange

두 노드간의 메시지 교환 과정에서 발생하는 오류 요인은 송신측, 수신측, 그리고 물리적 클럭에 의한 오류가 있다<sup>[14]</sup>.

2.2.1 송신측 오류 요인

- **Send Time** : 메시지를 생성하고 MAC 계층에 전송 요청하는데 걸리는 시간이며, 이 지연은 시스템 콜 부하와 프로세서의 부하에 따라 가변적이다.
- **Access Time** : 전송이 시작되고 채널에 접근하는데 걸리는 시간이며, 이 지연은 채널 경쟁(channel contention)시간에 따라 가변적이다.
- **Transmission Time** : 전체 메시지를 송신하는데 걸리는 시간이며, 이 지연은 메시지의 수와 전송속도에 따라 가변적이다.
- **Encoding Time** : 메시지를 변환하고 전자기파로 변환하는데 걸리는 시간이며, 이 지연은 송수신 장치(RF transceiver)의 칩속도(chip rate)에 따라 가변적이다.
- **Propagation Time** : 메시지가 송신기에서 수신기까지 전달되는데 걸리는 시간으로서 두 노드 사이의 거리에 따라 이 시간은 변한다.

2.2.2 수신측 오류 요인

- **Decoding Time** : 전자기파를 복조하는데 걸리는 시간이며, 송수신 장치의 칩속도에 따라 변한다.
- **Reception Time** : 전체 메시지를 수신하는데 걸리는 시간이며, 만약 전달지연(propagation time)이 무시된다면 transmission time과 같다.
- **Receive Time** : 수신한 메시지를 처리하고, 수신기의 응용계층에 알리는데 걸리는 시간이며, send time과 유사하다.
- **Interrupt Handling Time** : 프로세서가 무선 메시지의 도착 시각을 측정하기 위해 걸리는 시간이며, 이시간은 프로세서의 부하에 따라 가변적이다.

본 논문에서는 send time, access time, 그리고 transmission time을 묶어서 전송지연이라 칭하며, reception time, receive time 및 interrupt handling time을 수신지연이라 부른다.

2.2.3 물리적 클럭에 의한 오류 요인

컴퓨터 시스템은 전통적으로 크리스탈이나 오실레

이더 등과 같은 물리 클럭의 발진을 카운팅함으로써 시간을 측정한다. 이러한 물리 클럭은 이상적인 환경 하에서, 정확한 주파수를 가지고 동작하지만, 실세계에서는 제조공정에서의 오차, 온도, 습도 등과 같은 환경에서 동작 주파수는 가변적이게 된다. 물리 클럭에 의한 오류 요인은 다음과 같다.

- 시각 표현 에러 (time representation error) : 이벤트가 발생한 시점과 이 이벤트를 인지하는데 걸리는 시간 차이이다. 컴퓨터 시스템은 이산적인 데이터를 기록하는 시스템이다. 따라서 로컬 클럭은 그림 2에서 보는 바와 같이 나타난다. 이벤트가  $T_E$  시간에 발생하였다 하더라도, 프로세서의 타이머는  $T_E$  시간이 아니라 다음 상승에이진  $T_{DE}$  시간에 기록될 것이다. 이러한 시각 표현 에러는 프로세서의 클럭 주파수에 의해 영향을 받으며 최대 시각 표현에러는  $1/f$ 이다. 이러한 시각 표현 에러는 프로세서뿐만 아니라 무선 주파수 송수신기등과 같은 모든 이산 시스템에서 발생하며, 이러한 시각 표현 에러를 완전히 제거하는 것이 불가능하다.
- 주파수 휨(frequency skew) : 두 노드 클럭 주파수 사이의 차이를 의미한다. 그림 3은 두 노드 사이의 주파수 휨을 나타내는 예이다. 두 노드는 다른 주파수 위상을 가지기 때문에 이벤트가 동시에 발생하더라도 각기 다른 시점을 이벤트 발생 시점이라고 기록할 것이다. 즉, 이벤트가  $T_E$  시점에 발생하더라도 노드 A는  $T_{AE}$

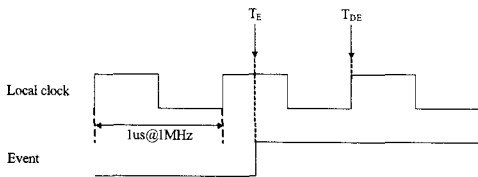


그림 2. 시각 표현 에러 예  
Fig. 2. Example of time representation error

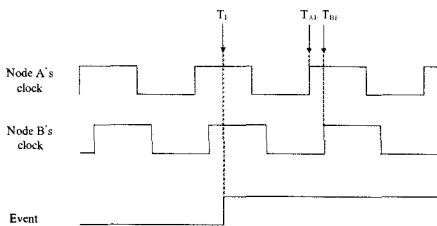


그림 3. 두 노드사이의 주파수 휨  
Fig. 3. Frequency skew between two nodes

에 이벤트를 인지하고, 노드 B는  $T_{BE}$  에 인지하게 될 것이다.

- 환경에 의한 특성 : 온도, 습도, 오실레이터의 수명등에 의해서 주파수는 영향을 받는다. 이러한 특성은 오실레이터에 따라 다르게 나타나므로 완전한 제거가 힘들다.

### III. 정밀 시각 동기 시스템

실시간 위치 측정 시스템은 자신의 위치를 알고 있는 RTLS 리더와 사물 또는 사람에 부착되어 행로를 추적하고자 하는 태그로 구성된다. TDOA 기반의 실시간 위치 측정 시스템을 위해 본 장에서는 리더들간의 시각 동기를 이루기 위한 정밀 시각 동기 시스템에 대해서 언급한다. 정밀 시각 동기 시스템은 이전에 언급한 에러 요인 분석을 기반으로 하여 브로드캐스트에 의한 단방향 시각 측정 장치를 설계 및 구현하고, 시각 동기 기법을 제안한다.

#### 3.1 정밀 시각 동기 시스템 프로토타입

정밀 시각 동기 시스템을 위한 리더는 정밀한 시각 측정 능력과 수집된 시각 동기화 메시지로 리더들간 정밀하게 시각을 동기화 할 수 있는 충분한 연산 능력을 갖추어야 한다. 정밀 시각 동기 시스템은 프로세서부, 시각 측정부(time stamping unit), 그리고 RF 모듈로 구성되어 있다. 시스템 프로토타입은 그림 4와 같다.

프로세서부는 시각 동기화 연산을 위해 Intel의 PXA255를 메인 프로세서로 사용하였다. 시각 측정부는 FPGA를 통해 하드웨어적으로 구성되었으며, 메시지의 송수신 시각 측정 및 RF 모듈의 제어를 담당한다. 시각 측정부의 가장 큰 특징은 시각 측정을 하드웨어적으로 수행하므로 시각 측정에 대한 지연은 무시할 정도이다. FPGA를 위해 Cyclone II를 채택하

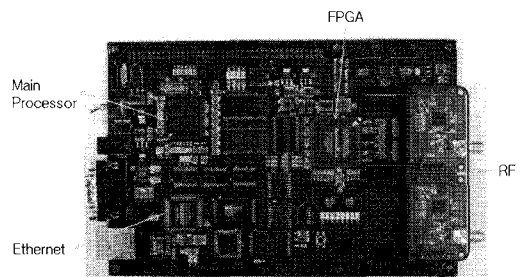


그림 4. RTLS 리더 하드웨어  
Fig. 4. Prototype of RTLS reader

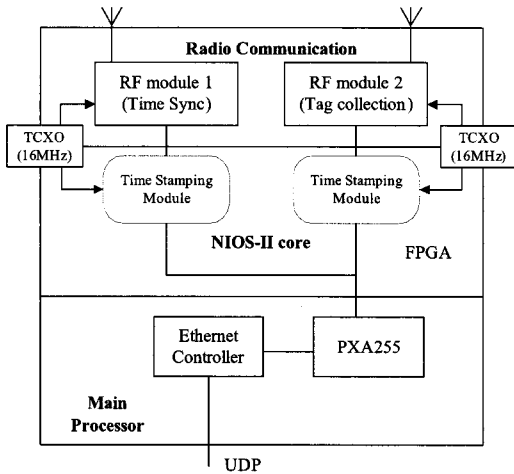


그림 5. RTLS 리더 구조  
Fig. 5. Architecture of RTLS reader

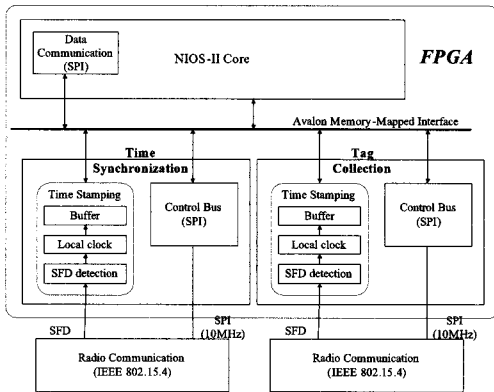


그림 6. 하드웨어 시각 측정 장치의 구조  
Fig. 6. Architecture of the HW time stamping unit

으며, RF 모듈은 FPGA의 NIOS에 의해 제어되며, 무선 통신을 위해 두 개의 RF 모듈을 탑재하고 있다. 하나는 리더간 시각 동기를 위해 사용되며, 또 다른 하나는 RTLS 태그의 메시지를 수신하기 위해 사용

한다. 분리된 통신 채널을 사용함으로써 상호간의 간섭을 제거하고, 정밀한 시각 동기를 이루도록 한다. 무선 통신을 위해 Zigbee/IEEE 802.15.4를 준수하는 TI사의 CC2420이 RF 모듈에 탑재되었다. 그림 5는 RTLS 리더의 구조를 보여준다.

리더의 소프트웨어는 메인 프로세서의 경우 리눅스를 이식하여 응용 프로그램으로 동작한다. FPGA의 경우는 무선 신호의 정확한 시각 측정을 위해, 내부 카운터는 HDL(hardware description language)를 이용하여 작성하고 이 모듈을 NIOS-II 프로세서 코어의 주변장치로 탑재하였다. 코어의 동작 클럭은 160MHz이고 시각 측정부에 내장되어 있기 때문에 최대 시각 표현에러는 6.25나노초(시스템의 1 틱(tick))이다. 그림 6은 정밀한 시각 측정을 위한 FPGA의 구조를 보여준다.

### 3.2 시각 동기 프로토콜

네트워크 내의 리더들은 기본적으로 메시지 교환을 통하여 시각 동기를 이룬다. 네트워크 내의 리더들 중 하나의 리더가 마스터 리더로 선택되며, 마스터 리더는 다른 리더들(슬레이브 리더)에게 시각 동기 정보를 전달한다. 그림 7은 시각 동기 프로토콜에 대한 과정을 보여준다. 마스터 리더는 주기적으로 슬레이브 리더들에게 시각 정보를 전송한다. 시각 정보를 받은 슬레이브 리더들은 자신의 시각을 마스터 리더의 시각에 맞추도록 보정한다. 먼저 마스터 리더가  $T_m$  시간에 메시지를 생성하여 네트워크로 전달한다.  $T_s$  시간에 마스터 리더의 시각 정보를 받은 슬레이브 리더들은 자신의 시각을 마스터 리더로부터의 메시지 내에 포함된 시각 정보에 동기화한다. 슬레이브 리더에서의 오프셋 보정은 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{offset} &= \text{dock}_{\text{slave}} - \text{dock}_{\text{master}} \\ &= T_s - T_m \end{aligned} \quad (2)$$

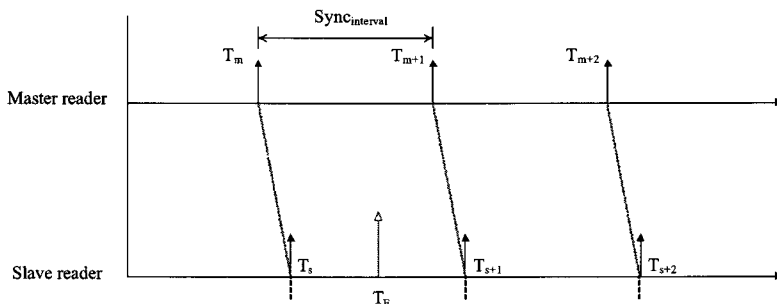


그림 7. 시각 동기 프로토콜  
Fig. 7. Time synchronization protocol

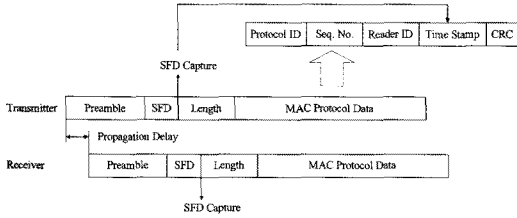


그림 8. 메시지 송수신 과정에서의 시각 측정  
Fig. 8. Time stamping points at IEEE 802.15.4

동기화 도중에 RTLS 태그로부터의 이벤트 신호 ( $T_E$ )가 발생하게 되면, 마스터 리더는 자신의 로컬 클럭을 이용하여 신호 도착 시간을 측정하고 슬레이브 리더들은 마스터와의 오프셋 차이를 보정한 값을 이용한 값을 이용하여 도착 시간을 계산한다. 이렇게 측정된 신호 도착 시각을 이용하여 실시간 위치 측정 시스템을 구현할 수 있다.

시각 동기 메시지 송신 중, 네트워크 프로토콜 스택에는 전송지연 및 수신지연이 포함되게 된다. 프로토콜 스택에서 발생하는 전송지연 및 수신지연을 제거하기 위해서는 시각 측정 시점이 중요하다. 시각 측정 시점은 네트워크 계층의 모든 계층에서 수행될 수 있지만, 본 논문에서는 물리계층과 MAC 계층 사이의 MII(media independent interface) 계층에서 수행하여 전송지연과 수신지연을 제거하였다. MII 계층에서 시각 측정은 CC2420에서 제공하는 SFD(start of frame delimiter) 핀을 이용하여 이루어 졌으며, 그림 8은 메시지를 송수신시 SFD 신호가 타임 스텝 평되는 지점을 보여준다. 메시지의 송수신시 같은 곳에서 시각 측정하므로 쉽게 송수신간의 시간을 알 수 있다. 마스터 리더는 송신 시각 측정 결과는 해당 메시지 내에 포함시켜 전송한다. 슬레이브 리더는 수신 시각을 자신의 지역 클럭으로 측정후, 지역 클럭 값을 메시지 내의 클럭값으로 보정한다.

시각 측정 장치는 FPGA를 이용하여 물리 계층을 통해서 메시지의 수신 시간을 구하는데 그림 9와 같은 시각 측정 오류가 발생할 수 있다. 실제 메시지가 안테나를 통해서 오는 시각은  $T_{RF}$  이지만 RF 모듈에서 신호를 샘플링하고 메시지 수신을 알리는 시각은  $T_{SFD}$  시각이 될 것이다. 그리고 예측된 시각 오차는 IEEE 802.15.4의 8Mchip/s 해상도, 즉  $\pm 0.125$  마이크로초로 나타난다. 하지만 RF 트랜시버와 시각 측정부 간에 동기화가 이루어져 있지 않으면 이벤트 측정 시각은  $err_{TSU}$ 가 될 것이다.  $T_{RF} \sim T_{SFD}$  간의 시각 차이는 무선 통신의 해상도 문제이므로 극복하기 어렵지만,  $T_{SFD} \sim err_{TSU}$  간의 시간 차이는 무선 통신

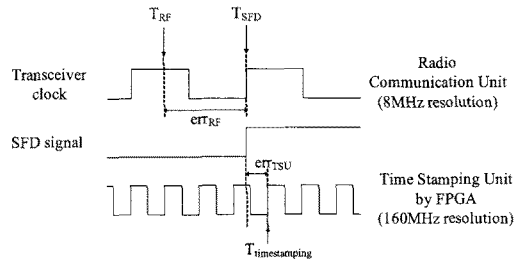


그림 9. 송수신기와 시각 측정 장치 사이의 오류  
Fig. 9. Uncertainty caused by time representation error

모듈과 시각 측정 장치간의 동기화로 쉽게 극복 가능하다. 이는 두 모듈 간에 동일한 발진자로부터 클럭을 제공받음으로서 해결된다.  $T_{RF} \sim T_{SFD}$  간의 오차를 개선하는 것이 하드웨어적으로 힘들지만  $\pm 0.125$  마이크로초의 오차는 정밀한 시각 동기를 요구하는 TDOA 기반의 실시간 위치 측정 시스템의 성능을 결정지을 만큼 큰 수치이다. 따라서 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 칼만(Kalman) 필터링 기법<sup>[16]</sup>을 적용한다.

칼만 필터는 최적화된 재귀적인 자료 처리 알고리즘이다. 본 논문에서는 시각 동기화에 적용하여 각 슬레이브 리더가 수신한 시각동기화 메시지의 시각 정보를 토대로 마스터 리더의 시각에 동기화 하도록 한다. 칼만 필터로 측정한 송수신 시각의 오류를 제거하기 위해서는 먼저 선형 시스템에 대해서 식 (3)으로 정의하였다.

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \quad (3)$$

A, B: 행렬  
x: 시스템의 상태  
u: 입력  
w: 처리오류

$$y_k = Cx_k + z_k \quad (4)$$

C: 행렬  
y: 적용된출력  
z: 측정오류

식 (3)은 k 시각에서의 선형 시스템의 상태를 나타낸 것이다. 벡터 x는 시스템의 현재 상태에 관한 모든 정보를 포함하고 있다. 그러나 x는 직접 측정할 수 없다. 대신에 z라는 오류를 포함한 y를 측정한다. x의 상태를 예측하기 위해서 식(4)의 y를 이용할 수 있다. 하지만 노이즈를 포함한 y를 있는 그대로 정보로 사용할 필요는 없다. 예를 들어, 두 리더간의 입력 클럭의 상대적인 차이가 일정하다고 가정하자. 리더간의 입력 클럭의 상대적 차이에 대한 상태 S와 리더

간의 시각 차이에 대한 상태  $O$ 가 있다.  $u$ 는 리더간의 시각 차이의 변화량이고  $y$ 는 측정된 리더간의 시각 차이이다.  $u$ 는 시간에 따라서 계속 변할 수 있고 매  $T$  시간마다 두 리더간의 시각 차이를 측정한다. 이 경우 상태  $S$ 를 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$S_{k+1} = S_k + Tu_k + S'_k \quad (5)$$

현재의 리더간의 입력 클럭의 상대적 차이는 이전의 값 곱하기 시간 차이에 대한 변화량이 수식적으로 맞지만 이전 상태가 현재 상태에 대해서 정확한 값을 주지 않는다. 상대적인 차이 값 자체가 이후의 값에 노이즈를 주는 것으로 생각할 수 있고 이를  $S'$ 로 표현한다. 이와 유사하게 리더 간의 시각 차이는 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$O_{k+1} = O_k + TS_k + \frac{1}{2} T^2 u_k + O'_k \quad (6)$$

여기서  $O'$ 는 시각 차이에 대한 오류이다. 상태 벡터  $x$ 를 두 리더간의 시각 차이와 입력 클럭의 상대적 차이로 정의할 수 있다.

$$x_k = \begin{bmatrix} O_k \\ S_k \end{bmatrix} \quad (7)$$

정리하면 본 논문에서 사용하는 선형 시스템은 식 (8)과 같게 정의할 수 있다. 이때  $z$ 는 무선 네트워크 프로토콜에 대한 해상도로 발생하는 오류이다.

$$x_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x_k + \begin{bmatrix} T^2 \\ T \end{bmatrix} u_k + w_k \quad (8)$$

$$y_k = [1 \ 0] x_k + z_k$$

다시 상기하자면 시스템에서  $y$ 를 측정하여 시스템의 상태  $x$ 를 알고자 한다. 이를 위해서는 2가지 필요조건이 있다. 첫 번째는 예측된 평균이 실제 상태의 평균과 같아야 한다. 예측된 평균이 어느 한쪽으로 치우치지 않아야 한다. 두 번째는 예측된 상태가 실제 상태와 비교했을 때 가능하면 적게 벗어난다. 이는 예측된 평균이 실제 상태의 평균과 같은 것만 아니라 예측된 상태가 가능하면 작은 변화를 가지는 것이다. 위의 2가지 필요조건은 칼만 필터로 가능하다. 하지만 실제 시스템에 영향을 주는 노이즈에 대한 적절한 가정이 만족되어야 적용할 수 있다. 이를 위해서  $w$ 와  $z$ 의 평균은 0으로 가정한다. 또한 어떠한  $k$  시간에서의  $w_k$ 와  $z_k$ 는 독립적인 랜덤 변수로 서로 연

관이 없다. 이 때 처리 노이즈 공분산 행렬  $S_w$ 와 측정 노이즈 공분산  $S_z$ 는 식 (9) 같이 정의한다.

$$S_w = E(w_k w_k^T) \quad (9)$$

$$S_z = E(z_k z_k^T)$$

이때 함수  $E$ 는 기대 값을 의미하고  $w_T$ 와  $z_T$ 는 각 랜덤 노이즈  $w$ 와  $z$ 에 대한 이항을 의미한다. 여러 가지 칼만 필터에 대한 표현이 가능하지만 우리는 다음과 같은 식으로 칼만 필터 방정식을 만들었다.

$$K_k = AP_k C^T (CP_k C^T + S_z)^{-1} \quad (10)$$

$$\hat{x}_{k+1} = (A\hat{x}_k + Bu_k) + K_k (y_{k+1} - C\hat{x}_k)$$

$$P_{k+1} = AP_k A^T + S_w - AP_k C^T S_z^{-1} CP_k A^T$$

3개의 방정식으로 구성되어 있다.  $K$ 는 칼만 이득이고  $P$  행렬은 예측 오류 공분산이다. 상태 예측  $\hat{x}_k$  방정식은  $k+1$  시간에서 예측을 이끌어 낸다. 이는  $k$  시간에서의 상태 예측  $\hat{x}_k$ 를 단지  $A$ 배하고  $k$  시간에서의 알고 있는 입력을  $B$  배하여 직관적으로 만든 것이다. 수식이 의미하는 바를 자세히 살펴보면 측정 오류가 커지면  $S_z$ 가 커질 것이다. 이에 따라  $K$ 는 작아지고 다음 상태  $\hat{x}$ 를 계산할 때 측정된  $y$ 를 신뢰하기 힘들어진다. 바꿔 말하면 만약 측정된 오류가 적을 때  $S_z$ 는 작아지고 이에 따라  $K$ 는 커진다. 그래서 다음  $\hat{x}$ 를 계산할 때 측정에 많은 신뢰성을 줄 수 있다.

#### IV. 성능평가

본 장에서는 TDOA 기반의 실시간 위치 측정 시스템을 위한 정밀 무선 시각 동기 시스템의 성능을 평가한다. 성능평가를 위한 시스템은 그림 10과 같다. 평가 시스템은 참조시각을 제공하는 마스터 리더와

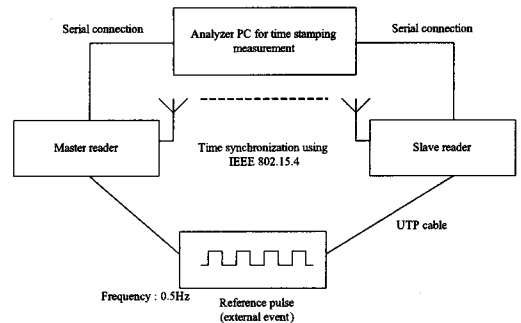


그림 10. 성능평가를 위한 시스템 환경  
Fig. 10. Environment for performance evaluation

이에 시각을 동기화 하는 슬레이브 리더로 구성된다. 두 리더는 메시지 교환을 통하여 주기적으로 시각을 동기화 한다. 이때, 참조 펄스 생성기(reference pulse generator)는 외부에서 두 리더에게 동시에 이벤트를 발생시킨다. 이벤트를 감지한 두 리더는 자신의 지역 클럭을 이용하여 시각을 측정한다. 두 리더간에 동기화가 정확히 되어 있다면, 같은 시각을 기록하게 될 것이다. 이때, 참조 펄스 생성기는 2초에 1회씩 펄스를 생성한다.

먼저, 두 노드간의 메시지 빈도수에 따른 시각 동기화의 성능을 수행하였다. 시각 동기 메시지는 초당 10, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 800 및 1000씩 설정되었다. 성능평가에 이용된 모든 실험은 500회 반복되었다. 그림 11은 메시지 수에 따른 마스터 리더와 슬레이브 리더의 오프셋 차이의 표준편차를 보여준다. "HW only"는 하드웨어 시각 측정 장치만을 이용하여 시각 동기를 이루었을 경우의 결과를 나타내며, "HW + Kalman"은 하드웨어 시각 측정 장치로 정밀한 시각 측정을 수행한 후에, 이를 토대로 나머지 지연과 지터를 제거하기 위해 칼만 필터를 적용한 결과이다. 그림 11은 표준편차(오프셋)가 0에 가까울수록 슬레이브 리더가 마스터 리더와 동기를 이루는 것을 나타낸다. 만약 표준편차가 0과 같다면, 슬레이브 리더는 마스터 리더와 정확하게 동기를 이루게 된다. 하드웨어 시각 측정 장치만 사용한 시각 동기 기법은 메시지의 수에 관계없이 40나노초 수준의 시각 동기를 이루는 것을 볼 수 있다. 하지만, 직관적으로 40나노초의 시각 동기는 12미터의 거리오차를 발생시킨다. 40 나노초의 시각 동기를 TDOA 기반의 실시간 위치 측정 시스템에 적용하기에는 어려움이 발생한다. 반면 칼만 필터를 이용한 시각 동기 기법은

메시지의 수가 초당 300회 이상이 되면, 약 10나노초 수준의 시각 동기를 이룬다는 것을 볼 수 있다. 칼만 필터를 이용한 시각 동기의 경우 동기 메시지 수가 50이하 일 경우 하드웨어 시각 측정 장치만을 이용한 시각 동기 결과가 좋지 않은 이유는 칼만 필터링을 처리하는데 필요한 측정치가 너무 작기 때문에 발생하는 문제이다.

그림 11은 시각 동기 메시지 수에 의한 시각 동기 결과이다. 칼만 필터의 경우 동기 메시지의 수가 적을 경우 급격한 성능변화를 보였다. 이를 자세히 하기 위하여 시각 동기 분포를 분석하였다. 그림 12는 하드웨어 시각 측정 장치만을 사용하였을 경우의 시각 동기 편차 결과를 보여준다. 그래프에서 양수는 슬레이브 리더의 클럭이 마스터 리더의 클럭보다 느리게 동작한다는 것을 보여주고 음수는 슬레이브 리더가 빠르게 동작한다는 것을 나타낸다. 시각 동기 메시지의 수가 10일 때, 시각 동기 오차의 표준편차는 40.9나노초(6.54 클럭), 최소 오프셋은 -197.2나노초(-31.55 클럭)이며, 최대 오프셋은 102.8나노초(16.4 클럭)이다. 시각 동기 메시지의 수가 200일 경우, 시각 동기 오차 표준편차는 42.23 나노초 (6.75 클럭)이며, 최소 오프셋은 -225.5나노초(-36.1 클럭), 그리고 최대 오프셋은 93.27 나노초(14.9 클럭)이다. 그림 12에서 볼 수 있듯이 하드웨어 시각 측정 장치만을 사용하여 시각 동기화를 이루었을 경우 시각 동기 성능은 메시지의 수에 크게 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

그림 13은 칼만 필터를 사용하였을 경우의 시각 동기 오차의 분포를 보여준다. 시각 동기 메시지의 수가 10일 경우 표준편차는 146.4 나노초(23.4 클럭)이며, 최소 오프셋은 -476.1 나노초(-76.2 클럭) 그리고 최대 오프셋은 492.6 나노초(78.8 클럭)이다. 이전에 언급한 바와 마찬가지로 이 결과는 하드웨어 시각 측정 장치만을 사용한 시각 동기보다 나쁜 결과를 보여준다. 하지만 시각 동기 메시지의 수가 증가하면서 칼만 필터를 사용한 시각 동기의 성능이 좋아 지는 것을 보여준다. 시각 동기 메시지의 수가 200일 경우 표준편차는 17.6 나노초, 최소 오프셋은 -187.7 나노초(-30 클럭) 그리고 최대 오프셋은 74.8 나노초(12 클럭)이다. 칼만 필터를 포함하는 하드웨어 시각 측정 시각 동기는 시각 동기 메시지의 수에 따라 보다는 성능을 보인다는 것을 알 수 있다. 그림 11과 13은 칼만 필터를 적용한 하드웨어 시각 측정 장치는 메시지의 수에 따라서 성능향상을 이루는 것을 볼 수 있다. 하지만 상기 그래프들은 전체 시스템에 대한

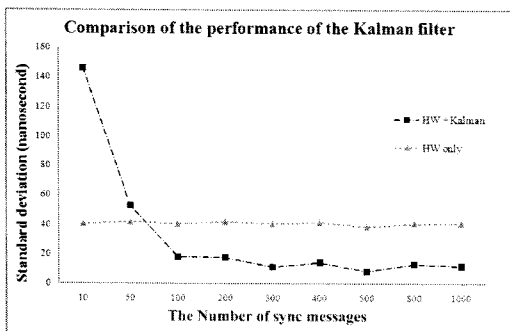


그림 11. 시각 동기 결과 (표준편차 : 시각 측정 장치 vs. 칼만 필터)  
Fig. 11. Performance evaluation as a function of the number of sync messages



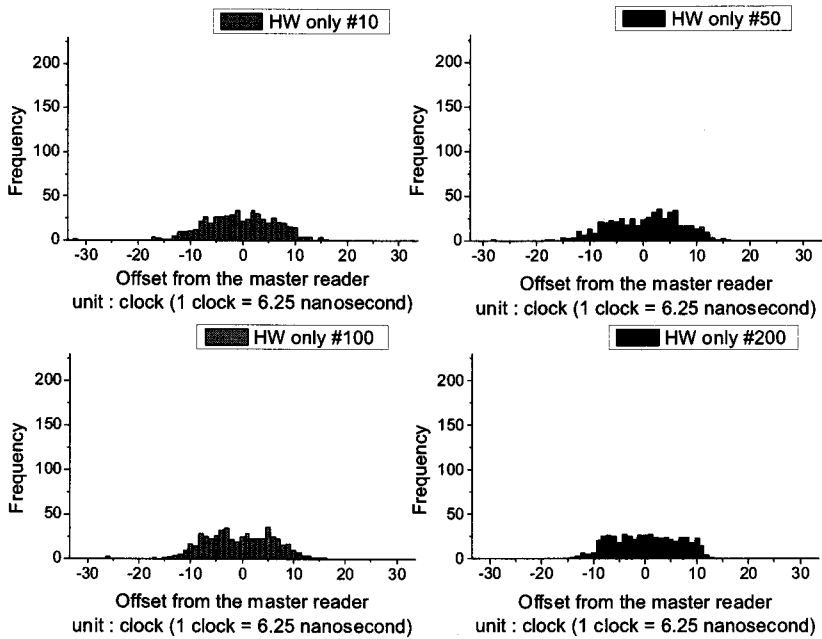


그림 12. 하드웨어 시각 측정 장치만을 사용한 시각 동기 결과  
 Fig. 12. Histogram of time synchronization without the Kalman filter

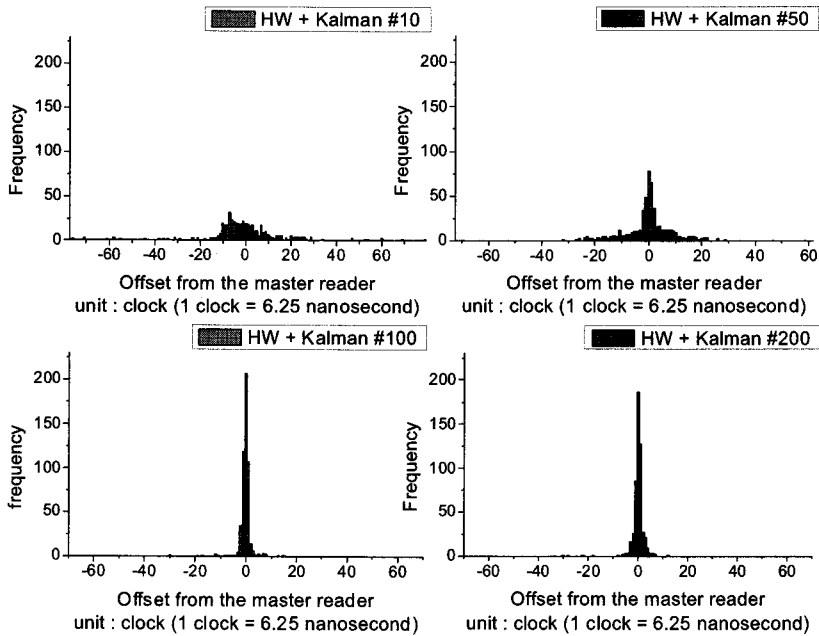


그림 13. 하드웨어 시각 측정 장치와 칼만 필터를 동시에 사용한 시각 동기 결과  
 Fig. 13. Histogram of time synchronization with the Kalman filter

통계치이다. 시간에 따른 시각 동기 결과의 안정성에 대한 검토가 필요하다. 그림 14는 메시지 수에 따른

시각 동기의 안정성을 보여준다. 그래프는 오프셋이 0에 가까우면 가까울수록 보다

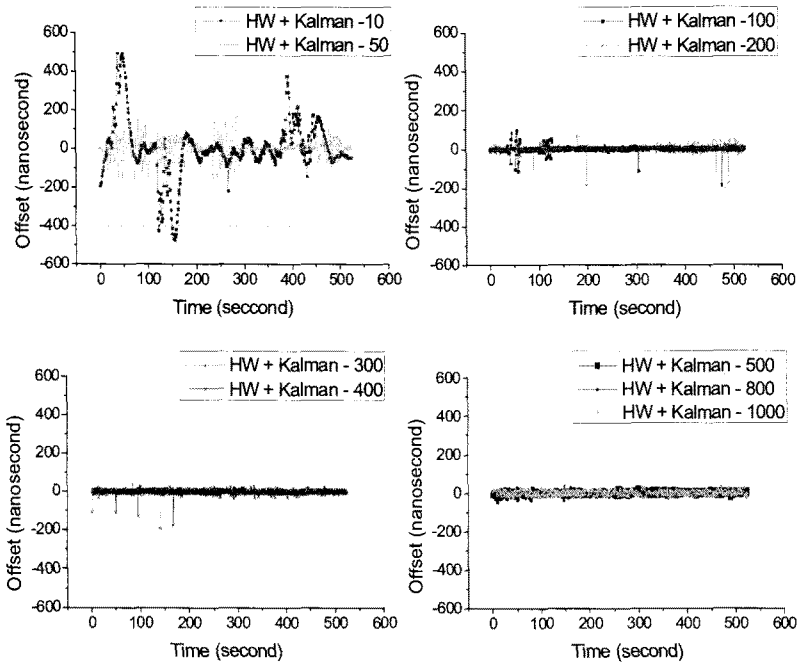


그림 14. 칼만 필터를 사용한 시각 동기의 메시지 수에 따른 시각 동기 안정도  
 Fig. 14. Stability of time synchronization as a function of the number of sync messages

정확하게 동기화가 된다는 것을 의미한다. 0과 정확히 일치한다면 마스터 리더와 슬레이브 리더는 정확히 동기화 된 것이다. 그래프에서 양수는 슬레이브 리더가 마스터 리더보다 늦은 시각을 가지고, 음수는 슬레이브 리더가 빠른 시각을 가진다는 것을 의미한다. 그림 11에서 칼만 필터를 사용한 시각 동기 기법이 메시지의 수가 100을 초과하면 모두 비슷한 동기 결과를 보이는 것처럼 보인다. 하지만 그림 14에서는 전체 시간에 따른 안정도를 보여준다. 시각 동기 메시지의 수가 10과 50일 경우 시간의 흐름에 따라서 아주 큰 편차를 나타내고 있으며 100, 200, 300, 400일 경우에도 간헐적으로 시각 동기 오차가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 반면 동기 메시지의 수가 500 이상일 경우에는 메시지의 수에 따른 성능에 큰 의미를 부여하기 힘들 정도로 좋은 성능을 나타낸다. 메시지의 수가 500인 경우 칼만 필터를 사용한 시각 동기에서 표준 편차는 8.32나노초, 최소 오프셋은 -25.1나노초이며, 최대 오프셋은 24.9 나노초이다. 성능평가 결과, 제안한 시각 동기 시스템은 네트워크 내의 리더들이 참조시각에 10 나노초 이내의 시각 동기를 유지하는 것을 보여준다.

## V. 결 론

본 논문에서는 2.4GHz 대역의 RTLS를 위한 정밀 시각 동기 시스템을 설계 및 구현하였다. 먼저 시각 동기화를 이루기 위해서 메시지 시각 측정에 대한 오류를 분석하였고, 무선 통신 모듈과 시각 측정부 간의 동기화와 물리 계층에서의 시각 측정을 통해서 시각 측정 시 발생하는 오류를 최소화 하였다. 리더 간의 시각 차이를 예측하기 위해 측정된 시각 동기화 메시지의 송수신 시간은 이산적이다. 이에 비해 실제 시간의 흐름은 선형적이다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 칼만 필터를 도입하였고, 이를 통해서 수신측이 송신측의 시간의 흐름에 대해서 알 수 있게 하였다. 이런 시각 동기화를 통하여 실제 무선 통신 프로토콜이 가지는 해상도의 한계보다 정밀하게 외부 이벤트에 대한 시각 측정이 가능하게 되었으며, 또한 두 리더간의 입력 클럭의 상대적인 차이를 보정할 수 있었다. 제안된 시각 동기 시스템은 이중 주피수를 사용하여 시각 동기에 필요한 전용 채널을 할당함으로써 데이터 통신 또는 태그와의 정보교환에 필요한 충돌을 회피하였다.

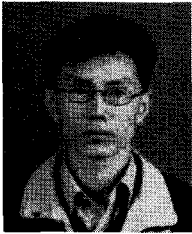
본 논문에서 개발한 정밀 시각 동기 시스템은 RTLS 뿐만 아니라 다양한 무선 네트워크에서 정밀한 시각 동기를 요구하는 시스템에 적용가능 할 것으로 판단된다. 정밀 시각 동기 에 필요한 향후 과제로는 보다 정밀한 시각 동기, 멀티 홉 네트워크에서의 시각 동기, 트래픽량의 최소화 등과 같은 연구들이 필요한 것으로 보인다.

### 참 고 문 헌

- [1] Jeffrey Hightower, Gaetano Borriello, "A Survey and Taxonomy of Location Systems for Ubiquitous Computing," *IEEE Computer*, Vol.34, No.8, pp.57-66, August 2001.
- [2] Li Xiong, "A Selective Model to Suppress NLOS Signals in Angle-of-Arrival (AOA) Location Estimation," *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Vol.1, pp.461-465, September 1998.
- [3] G. P. Yost and S. Panchapakesan, "Improvement in Estimation of Time of Arrival (TOA) from Timing Advance(TA)," *IEEE International Conference on Universal Personal Communications*, Vol.2, pp.1367-1372, October 1998.
- [4] L. Zhu and J. Zhu, "A New Model and its Performance for TDOA Estimation," *IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol.4, pp.2750-2753, October 2001.
- [5] Nissanka B. Priyantha, Anit Chakraborty, and Hari Balakrishnan, "The Cricket Location-Support System," *MobiCom '00: Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp.32-43, August 2000.
- [6] Mills, D.L, "Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation and Analysis," *RFC1305*, 1992.
- [7] Elliott D. Kaplan, "Understanding GPS: Principles and Applications," *Artech House Publishers*, December 2005.
- [8] IEEE 1588, "Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems," November 2002.
- [9] J. Guilford, "Design of an FPGA-Based Hardware IEEE-1588 Implementation," *IEEE-1588 Conference*, September 2005.
- [10] T. Cooklev, J.C. Eidson, and A. Pakdaman: "An implementation of IEEE 1588 over IEEE 802.11b for synchronization of wireless Local Area Network nodes," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol.56, no.5, pp.1632- 1639, Oct. 2007.
- [11] Jeremy Elson, Lewis Girod and Deborah Estrin, "Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts", *The Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI)*, pp.147 - 163, December 2002.
- [12] Ganeriwal, S. Kumar, R., Srivastava, M.B., "Timing-sync protocol for sensor networks" *Proceedings of the ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.138 - 149, 2003.
- [13] Maroti, M., Kusy, B., Simon, G., Ledeczi, A., "The flooding time synchronization protocol" *Proceedings of the ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.39 - 49, November 2004.
- [14] D. Cox, E. Jovanov, and A. Milenkovic, "Time synchronization for Zigbee networks", in *Proceedings of the 37th Annual Southeastern Symposium on System Theory (SSST '05)*, pp.135 - 138, March 2005
- [15] Branislav Kusy, Prabal Dutta, Philip Levis, Miklos Maroti, Akos Ledeczi, David Culler , "Elapsed Time on Arrival: A simple and versatile primitive for canonical time synchronization services," *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, pp.239-251, Jan. 2006
- [16] D. Simon, "Kalman Filtering," *Embedded Systems Programming*, Vol.14, No.6, pp.72-79, June 2001.

조 현 태 (Hyuntae Cho)

정회원



2003년 2월 한국해양대학교 컴퓨터공학과 학사

2005년 2월 부산대학교 컴퓨터공학과 석사

2005년 3월~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> 무선 센서 네트워크, RFID, RTLS, 시각 동기

박 인 구 (Ingu Park)

정회원



2006년 2월 부산대학교 컴퓨터공학과 학사

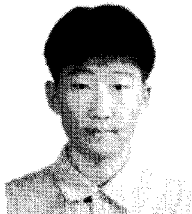
2008년 2월 부산대학교 컴퓨터공학과 석사

2008년 3월~현재 LIG Nex1 Engineering Team 5(EO/IR), 연구원

<관심분야> 임베디드시스템, 시각 동기, 이미지 처리

정 연 수 (Yeonsu Jung)

정회원



2005년 2월 부산대학교 컴퓨터공학과 학사

2007년 2월 부산대학교 컴퓨터공학과 석사

2007년 3월~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> 임베디드시스템, RTLS, 토폴로지 제어

백 윤 주 (Yunju Baek)

종신회원



1990년 2월 한국과학기술원 전산학과 학사

1992년 2월 한국과학기술원 전산학과 석사

1997년 2월 한국과학기술원 전산학과 박사

1996년 6월~2002년 2월 NHN

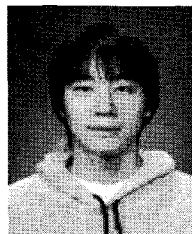
(주) 연구소장

2003년 9월~현재 부산대학교 정보컴퓨터공학부 교수

<관심분야> 무선 센서 네트워크, 컴퓨터구조, 임베디드시스템, RTLS

장 현 성 (Hyunsung Jang)

준회원



2007년 2월 부산대학교 컴퓨터공학과 학사

2007년 3월~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 석사과정

<관심분야> 임베디드시스템, RTLS, 시각 동기