

# 무선 센서 네트워크에서 다중 왕복시간차를 이용한 위치측정

(A Localization Using Multiple Round Trip Times in Wireless Sensor Networks)

장 상 옥 <sup>†</sup>                      하    란 <sup>\*\*</sup>  
(Sangwook Jang)                      (Rhan Ha)

**요 약** 무선 센서 네트워크(WSNs)에서는 수많은 센서들이 사람이 접근하기 어려운 환경에 배치된다. 이러한 환경에서, 센서들의 절대적 또는 상대적인 위치정보를 이용함으로써 무선 센서 네트워크를 다양한 응용서비스에 이용할 수 있다. 지금까지는 센서 노드의 위치를 측정하는 방법으로 신호의 도착시간차(time-of-arrival, TOA)에 기반을 둔 방법이 가장 정확도가 높게 평가되었다. 그러나 TOA방법에서는 두 노드간에 clock skew나 clock drift가 생기면 거리오차가 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 주기적인 시간동기화 기법들이 제시되었는데, 이러한 방법에서는 거리오차를 줄일 수 있지만 시간동기화에 따른 overhead가 발생하게 된다. 본 논문에서는 이러한 clock skew가 발생하는 상황에서도 거리와 위치 정확도를 높일 수 있는 신호의 다중 왕복시간차(multiple round-trip times of arrival, RTOA)에 기반한 위치 측정 방법을 제안한다. 실험 결과, RTOA가 기존의 TOA방법보다 최대 93%의 위치 정확도 향상을 보였다.

**키워드** : 센서 위치측정, 왕복시간, 비동기

**Abstract** In wireless sensor networks (WSNs), thousands of sensors are often deployed in a hostile environment. In such an environment, WSNs can be applied to various applications by using the absolute or relative location information of the sensors. Until now, the time-of-arrival (TOA) based localization method has been considered most accurate. In the TOA method, however, inaccuracy in distance estimation is caused by clock drift and clock skew between sensor nodes. To solve this problem, several numbers of periodic time synchronization methods were suggested while these methods introduced overheads to the packet traffic. In this paper, we propose a new localization method based on multiple round-trip times (RTOA) of a signal which gives more accurate distance and location estimation even in the presence of clock skew between sensor nodes. Our experimental results show that the proposed RTOA method gives up to 93% more accurate location estimation.

**Key words** : Sensor localization, Round trip time, Asynchronization

## 1. 서 론

무선 센서 네트워크의 가장 큰 특징은 고정된 인프라의 도움없이 센서 노드만으로 이루어진 네트워크이다. 이러한 무선 센서 네트워크에서 센서 노드의 논리적 또는 절대적인 위치 정보를 이용하면, 효율적인 라우팅이

나 위치 추적, 감지범위, 보안등 여러 가지 기술에 활용 할 수 있다. 이러한 센서 노드의 위치를 파악하는 고도의 위치 인식 기술은 센서 네트워크의 핵심기술로 자리 매김하고 있는데, 위치를 측정하기 앞서 거리를 측정하는 기술로써 TOA(Time of Arrival)를 들 수 있다. 이 TOA방법은 현재까지 거리를 측정하는 많은 방법들 중에 가장 정확도가 높은 기술로써 신호의 도착시간차를 이용하게 된다[1,2].

TOA는 RF신호와 초음파신호의 전송속도 차를 이용한 거리측정 방식이다. TOA방법은 송신자 노드 A가 수신자 노드 B에게 2개의 신호를 전송하고, 수신자 노드 B는 두 신호의 도착시간차를 이용하여 송신자 노드 A까지의 거리를 계산한다. 하지만, 이러한 방법은 수신

· 본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(KRF-R01-2006-000-10073-0), 대학 IT연구센터 육성지원사업 HY-SDR 연구센터, 2006년 홍익대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었음

<sup>†</sup> 학생회원 : 홍익대학교 컴퓨터공학과  
swjang94@gmail.com

<sup>\*\*</sup> 종신회원 : 홍익대학교 컴퓨터공학과 교수  
rhanha@cs.hongik.ac.kr

논문접수 : 2006년 9월 29일

심사완료 : 2007년 5월 29일

되는 노드가 정확한 시간동기화가 이루어졌을 때 가능한 방법이다. 실제 Berkeley Motes의 Cricket센서는 거리에 따른 많은 오차를 보이게 되는데, 이런 오차의 원인으로서는 전파의 다중경로에 의한 도착시간의 지연이나 장애물에 의한 전파의 회절과 같은 외부 환경적 요인을 들 수 있다. 뿐만 아니라 송수신장치의 통신 지연이나 clock 비율의 변화와 같은 하드웨어 내부 요인에 의해서도 거리오차가 발생하게 된다. 이중에서도 TOA 방법은 clock offset, clock skew, clock drift와 같은 clock 비율의 변화에 많은 영향을 받게 된다. clock offset은 두 노드들의 clock이 서로 다른 시간에 시작하여 일정한 차이를 두고 동작하는 것을 말한다. clock skew는 두 노드간의 clock이 서로 다른 주파수를 가지고 동작하기 때문에 시간이 지남에 점점 더 시간차가 커지는 현상을 말하며, clock drift는 온도와 같은 센서 외부 요인에 의해서 일시적으로 clock 주파수가 변화하는 것을 말한다[3]. 도착시간차에 매우 민감한 TOA 방법에서는 clock skew와 clock drift에 의해서 거리오차가 발생할 수 밖에 없으며, 실질적인 시험을 통해서 센서 노드들 사이의 clock drift가 최대  $52\mu s$ 가 발생할 수 있다고 보고되었다[4]. 이러한 clock drift에 의한 거리오차는 clock drift가 높을수록 거리오차는 증가하게 되며, 실질적인 센서 노드들 사이의 거리가 증가할수록 거리오차가 증가하게 된다. 따라서 시간 동기화를 통해서 거리오차를 줄일 수 있는 방법 중에 하나로 clock drift를 줄이는 방법이 제안되었지만[4-7], 시간 동기화에 따른 오버헤드가 발생할 뿐 아니라, clock skew에 대한 문제점을 여전히 가지고 있다.

본 논문에서 제안하는 왕복시간차를 이용한 거리측정 방법은 clock skew에 의해서 발생하는 도착 시간차를 보정하고, 센서 노드들 사이의 거리에 무관한 거리측정 방법을 제시한다. 또한, 측정된 거리를 기반으로 위치를 측정하는 방법으로 MMSE(Minimum Mean Square Estimate)를 사용한다[1,2,8]. MMSE는 자신의 위치를 모르는 센서 노드가 주변 anchor노드의 거리 및 위치 정보를 통하여 자신의 위치를 추정할 때 사용된다. 따라서 본 논문에서 좀 더 정확한 위치 측정을 위해서 MMSE를 기반으로 결정된 초기 위치를 가지고 Newton-Raphson방법을 사용하여 위치를 보정한다[9].

2절에서는 본 논문에서 제안하는 RTOA(Round trip Time of Arrival) 거리 측정함수와 위치 측정방법에 대해서 알아보고, 3절에서는 기본적인 TOA방법과 RTOA 방법을 사용한 위치 측정결과를 실험을 통하여 비교 평가한다. 4절에서는 거리 및 위치측정에 관한 관련 연구를 살펴본 후 5절에서는 결론 및 향후 연구 방향에 대해서 기술한다.

## 2. Round-trip Times of Arrival

### 2.1 TOA 거리 측정 방법의 문제점

기존 TOA방법을 통하여 거리를 측정하는 방법은 RF 신호와 초음파신호의 도착시간차를 이용한다. 즉, 표준 시간을 알고 있는 anchor노드는 서로 다른 전파속도를 가지고 있는 2개의 신호(RF, 초음파)를 동시에 송신하고, 수신자노드에서는 이 2개의 신호의 도착시간차를 계산함으로써 anchor노드와의 거리를 측정하게 된다. 이 방법은 수신자노드가 주변노드와의 거리를 판별하는데 수동적인 성격을 가지고 있다. 즉, 주변 anchor노드에 의해서 송신된 2개의 신호가 있어야만 주변노드와의 거리를 측정할 수 있다. 만약, 송신자 노드와 수신자 노드 사이에 clock skew가 발생하여, clock 비율이 다르게 동작한다면 두 노드사이의 거리도 잘못 계산하게 된다. 이러한 거리오차는 clock 비율의 차가 높으면 높을수록, 두 노드 사이의 거리가 멀어지면 멀어질수록 선형적으로 더 크게 발생하게 되는데, 그림 1은 거리와 clock skew에 따른 거리오차를 정리하였다.

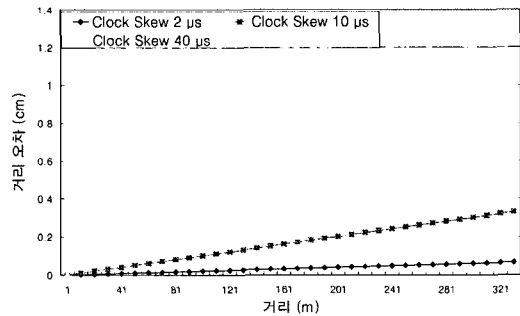


그림 1 거리와 clock skew에 따른 거리오차

### 2.2 RTOA 거리 측정 방법

본 논문에서는 clock skew의 의해서 발생하는 거리오차를 보정하기 위해서 신호의 왕복시간차를 이용할 것이다. RTOA방법은 자신의 위치를 모르는 노드가 주변 노드와의 통신을 통하여 능동적으로 자신의 위치를 알고 있는 노드와의 거리를 측정한다. RTOA거리 측정 방법은 다음과 같이 최소한 2번의 왕복신호 교환으로 구성되어 있다.

그림 2와 같이 표준 시간과 비교하여 노드 A와 노드 B의 clock의 변화율을 각각  $\beta_a$ ,  $\beta_b$ 라고 하자. 즉, 노드 A는 표준 시간과 비교하여 초당  $\beta_a$ 만큼씩 차이가 발생하고, 노드 B는 초당  $\beta_b$ 만큼씩 차이가 발생한다고 가정하자. 그러면 노드 A는 노드 B와의 거리를 왕복시간차를 측정하여  $d_{AB} = \left( (A_{T2} - A_{T1}) - (B_{T2} - B_{T1}) \right) \times \frac{\beta_a}{\beta_b} \times \frac{1}{2} \times s \times \frac{1}{\beta_a}$

로 측정할 수 있다. 왜냐하면, 노드 A와 노드 B의 clock 비율은  $\beta_a : \beta_b$  임으로, 시간이 지남에 따라 노드 A의 clock은 노드 B의 clock에 항상  $\frac{\beta_a}{\beta_b}$  만큼 차이가 발생하고, 또한 전파의 실제 이동속도도 노드 A의 clock비율에 따라서  $s \times \frac{1}{\beta_a}$  만큼 변화되어야 한다. 따라서 노드 A는 실제 총 왕복시간을  $(A_{T2} - A_{T1}) - (B_{T2} - B_{T1}) \times \frac{\beta_a}{\beta_b}$  로 계산해야 하며, 노드 B까지의 거리( $d_{AB}$ )를 편도시간과 전파의 속도( $s \times \frac{1}{\beta_a}$ )를 곱함으로 계산해야 한다. 같은 방법으로 노드 B도 노드 A까지의 거리( $d_{BA}$ )를  $d_{BA} = \left( (B_{T3} - B_{T2}) - (A_{T3} - A_{T2}) \times \frac{\beta_b}{\beta_a} \right) \times \frac{1}{2} \times s \times \frac{1}{\beta_b}$  로 계산할 수 있다. 따라서 노드 A가 측정한 거리( $d_{AB}$ )와 노드 B가 측정한 거리( $d_{BA}$ )는 같기 때문에 다음과 같은 공식

$$\left( (A_{T2} - A_{T1}) - (B_{T2} - B_{T1}) \times \frac{\beta_a}{\beta_b} \right) \times \frac{1}{2} \times \frac{s}{\beta_a} = \left( (B_{T3} - B_{T2}) - (A_{T3} - A_{T2}) \times \frac{\beta_b}{\beta_a} \right) \times \frac{1}{2} \times \frac{s}{\beta_b}$$

으로 유도된다. 위 식을 정리하면  $(A_{T3} - A_{T1}) \times \beta_b = (B_{T3} - B_{T1}) \times \beta_a$  임으로 노드 A의 clock과 노드 B의 clock을 비율로 표시하면  $\beta_a : \beta_b = (A_{T3} - A_{T1}) : (B_{T3} - B_{T1})$  으로 표시 될 수 있는데, 이것은 세 번째 신호전달을 통하여 노드 B는 노드 A와의 clock 비율을 알 수 있게 되는 것이다. 최종적으로 노드 B가 노드 A에게 네 번째 정보 전송을 통하여 두 노드는 서로의 상대적인 clock 비율을 알 수 있게 된다. 따라서 두 노드 중 하나의 노드라도 표준시간과의 clock 비율을 알고 있다면, 표준시간과의 clock 비율을 모르고 있는 다른 노드는 두 번의 왕복신호를 통하여 표준시간과의 clock비율 계산할 수 있다. 하지만, 두 노드 모두 표준시간과의 clock 비율을 모른다면 상대적인 clock 비율을 계산할 수는 있지만 전파의 속도( $s \times \frac{1}{\beta}$ )를 보정할 수 없기 때문에, 여전히 정확한 거리를 측정할 수 없다.

결론적으로 하나의 노드가 표준시간과의 clock 비율을 알고 있다면, 표준시간과의 clock 비율을 알지 못하는 다른 노드도 최소한 2번의 왕복시간차 통하여 서로간의 clock 비율을 알 수 있으며, 이 clock 비율을 이용하여 상대방과의 거리를 보정할 수 있다. 기존의 TOA 방법[1,2]은 거리오차가 실질적인 두 노드 사이의 거리와 두 노드의 clock 비율에 따라서 영향을 받게 되지만,

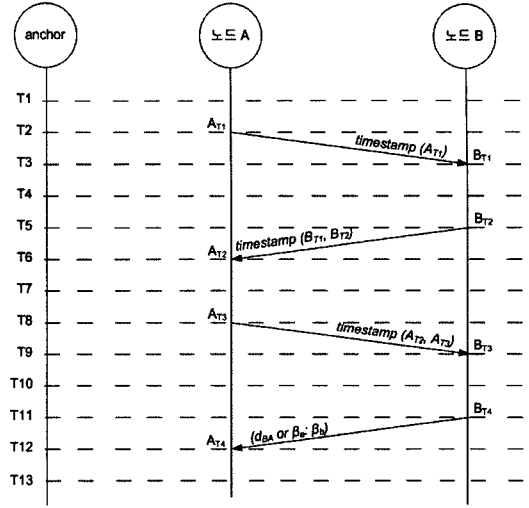


그림 2 초음파신호의 왕복시간을 통한 거리 계산

RTOA방법은 두 노드 사이의 왕복시간을 계산하기 때문에 두 노드 사이의 거리와 clock 비율에 영향을 받지 않게 된다.

그림 3은 RTOA방법을 통하여 거리를 측정하는 예이다. 그림 3에서 초음파 속도는 340m/s라고 가정하고, 표준시간과 노드 A의 clock 비율( $\beta_a = 1 + 40\mu$ )은 표준시간과 비교하여 초당 40 $\mu$ s 빠르게 동작하고, 노드 B의 clock 비율( $\beta_b = 1 - 40\mu$ )은 표준시간에 초당 40 $\mu$ s 느리게 동작한다고 가정하자. 이러한 상황에서 기존의 TOA 방법에서 두 노드의 거리는 각각의 clock skew에 의해서 서로 틀리게 계산된다. 즉, 노드 A는 노드 B까지의 거리를 33.99864m로 계산하며, 노드 B는 노드 A까지의 거리를 34.00136m로 잘못 계산하게 된다. 따라서, 2.2절의 RTOA 거리 측정방법을 사용하면 각각의 clock skew에 대한 거리 오차를 보정할 수 있다.

그림 3에서는 점선으로 표시된 것은 표준시간을 표시한 것으로 0.1s 간격으로 표시하였고, 표 1은 노드 A와 노드 B의 왕복시간을 정리하였다. 즉, 노드 A의 첫 번째 신호가 왕복한 시간은  $A_{T2} - A_{T1} = (0.5s + 20\mu s) - (0.1s + 4\mu s) = 0.4s + 16\mu s$  으로, 실제 왕복시간은 0.4s이지만 노드 A의 clock skew에 의해서 잘못 계산하였다. 그러므로 노드 A는 자신의 clock 비율을 알기 위해 임의의

표 1 왕복 시간

	노드 A	노드 B	왕복시간
T2 - T1	0.4s + 16 $\mu$ s	0.2s - 8 $\mu$ s	노드 A의 왕복시간
T3 - T2	0.2s + 8 $\mu$ s	0.4s - 16 $\mu$ s	노드 B의 왕복시간
T3 - T1	0.6s + 24 $\mu$ s	0.6s - 24 $\mu$ s	clock 비율

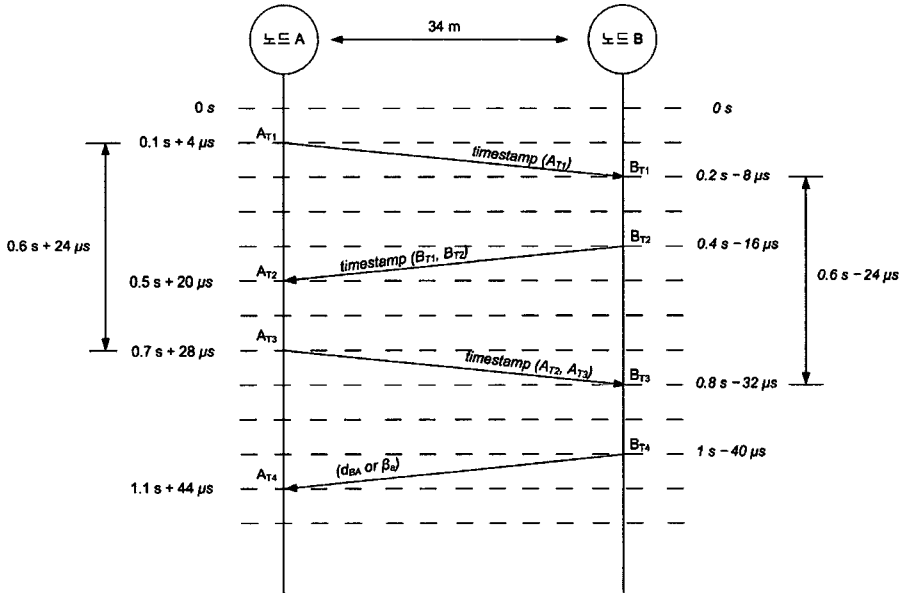


그림 3 노드 A와 노드 B 사이의 RTOA 거리 측정 예

시간(0.2s + 8μs)이 경과한 후 세 번째 신호를 송신하면, 노드 B는 B<sub>T3</sub> 시간(0.8s - 32μs)에 세 번째 신호를 수신하여 노드 A와 상대적인 clock 비율을 계산 할 수 있게 된다 (β<sub>a</sub> : β<sub>b</sub> = A<sub>T3</sub> - A<sub>T1</sub> : B<sub>T3</sub> - B<sub>T1</sub> = 0.6 + 24μ : 0.6 - 24μ).

만약 노드 B가 기준 시간과의 clock 비율 (β<sub>b</sub> = 1 - 40μ)을 알고 있다면, 노드 B는 노드 A와의 거리(d<sub>BA</sub>)를 거리측정함수

$$d_{BA} = \left\{ (B_{T3} - B_{T2}) - (A_{T3} - A_{T2}) \times \frac{\beta_b}{\beta_a} \right\} \times \frac{1}{2} \times \frac{s}{\beta_b}$$

를 이용하여

$$d_{BA} = \left\{ 0.4s - 16\mu s - (0.2s + 8\mu s) \times \frac{0.6 - 24\mu}{0.6 + 24\mu} \right\} \times \frac{1}{2} \times \frac{340m/s}{1 - 40\mu} = 34m$$

로 정확히 보정할 수 있다. 따라서 노드 B는 4번째 신호에 자신이 측정한 노드 A까지의 거리정보 (d<sub>BA</sub> = 34m)를 전달하거나 노드 A의 표준적인 clock 비율(β<sub>a</sub> = 1 + 40μ)을 전달하면, 노드 A도 노드 B까지의 거리를 거리측정 함수

$$d_{AB} = \left\{ (A_{T2} - A_{T1}) - (B_{T2} - B_{T1}) \times \frac{\beta_a}{\beta_b} \right\} \times \frac{1}{2} \times \frac{s}{\beta_a}$$

를 이용하여

$$d_{AB} = \left\{ 0.4s + 16\mu s - (0.2s - 8\mu s) \times \frac{0.6 + 24\mu}{0.6 - 24\mu} \right\} \times \frac{1}{2} \times \frac{340m/s}{1 + 40\mu} = 34m$$

로 거리 정보를 보정 할 수 있다.

이렇게 왕복시간차를 이용하여 거리를 측정하면 기존의 TOA에서 발생했던 거리오차가 발생하지 않게 된다. 즉, clock 비율 변화에 따라서 센서 노드 사이의 측정거리가 영향을 받지 않게 되는 것이다. 단지, RTOA거리 측정방법은 두 노드 사이의 clock skew나 실제 거리 증가와 무관한 성질을 가지게 되지만, 반드시 2번의 왕복신호를 이용해야 한다.

만약, 서로간의 거리를 측정할 때, anchor 노드와 같이 표준시간을 알고 있는 노드가 없을 경우에는 2번의 왕복시간차를 측정하더라도 거리오차는 발생하게 된다. 따라서 이렇게 주변 노드가 표준 시간과의 clock 비율을 알고 있지 않을 경우에는 그림 4와 같이 다중 홉 방

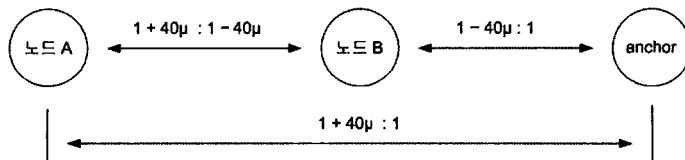


그림 4 다중 홉 clock 비율 조정

법을 통하여 자신의 clock 비율을 유추한다. 그림 4에서와 같이 노드 A는 직접적으로 anchor 노드와의 통신이 가능하지 한다고 가정할 때, anchor 노드와 직접적으로 통신이 가능한 노드 B를 통하여 자신의 clock 비율을 유추해 나간다. 만약, 노드 B가 anchor 노드와의 통신을 통해 자신의 clock이  $40\mu s$  빠르다는 것을 알게 되었다면, 노드 B는 새로운 anchor 노드가 된다. 따라서 노드 A는 노드 B를 통하여 노드 A의 clock이  $40\mu s$  느리게 동작한다는 것을 유추할 수 있다. 결과적으로 anchor 노드들과 직접적인 통신이 가능한 노드들은 자신의 clock 비율을 유추한 후에 새로운 anchor 노드가 되고, 반복적인 작업을 통하여 전체 네트워크에 있는 노드들은 자신의 clock 비율을 유추해 나갈 수 있다.

### 2.3 RTOA 위치 측정 방법

센서노드의 위치를 측정하는 방법으로 삼변측량(Trilateration)을 사용한다[1,2,8]. 즉, 자신과 다른 노드들과의 상대적 또는 절대적인 위치를 측정하기 위해서, 적어도 3개 이상의 노드들과의 거리를 측정하여 결정된다. 그림 5와 같이 노드 A의 위치는 자신의 위치를 알고 있는 노드 B, C, D에 의해서 결정된다. 이러한 측정방법은 측정된 거리를 기반으로 위치를 측정하는 방법으로 MMSE(Minimum Mean Square Estimate)라고 한다[1,2]. MMSE는 자신의 위치를 모르는 노드가 위치를 알고 있는 적어도 3개 이상의 주변 노드들과의 거리를 이용하는 방법으로써 거리기반 위치측정이라고도 한다. 이렇게 결정된 초기 위치를 기반으로 급강하(Steepest Descent Method)기법보다 수렴속도가 빠른 Newton-Raphson방법을 사용한다[8,9]. Newton-Raphson방법은 거리오차의 제곱합이 최소가 되는 위치를 결정하는 방법으로써 반복적인 계산과정을 통하여 계산된다[9].

본 논문에서 사용하는 위치 측정방법은 노드 자신이 자신의 위치를 능동적으로 측정한다.[2] 즉, TOA방법은 자신의 위치를 알고 있는 주변 노드들이 RF신호와 초음파신호를 발생할 때에만 자신의 위치를 측정하는 수동적인 형태이지만, RTOA방법은 자신의 위치를 측정하고 싶을 경우, 주변 노드들과 각각 2번의 초음파 왕복신호를 통하여 능동적으로 위치를 측정하게 된다.

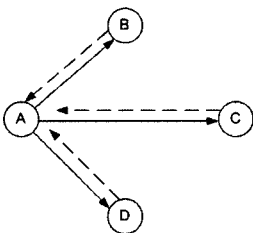


그림 5 node A의 위치 측정 방법(Trilateration)

## 3. 실험 평가

### 3.1 실험 환경

성능평가는 센서들의 위치를 미리 정해진 곳에 위치시키고, TOA방법과 RTOA방법을 비교하여 위치오차를 계산하였다. 모든 센서들은 같은 전송범위를 가지고 있으며, 각각 전송범위는  $100m$ 와  $200m$ 로 실험하였다. 또한 anchor 노드와 센서 노드들은 임의로 배치되었으며, 거리오차의 원인인 clock rate의 변화를 최대  $\pm 100\mu s$ 로 하였다.

- 1) 센서 노드 수에 따른 위치오차[1]
- 2) 다중흡에 따른 위치오차[10]

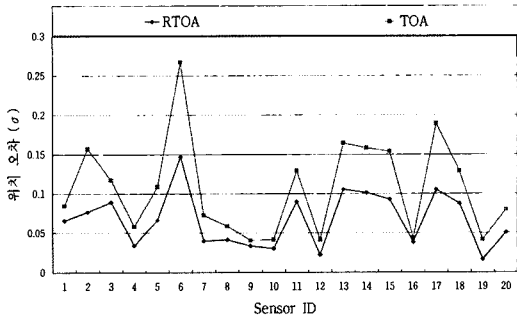
첫 번째, 센서 노드 수에 따라서 위치오차를 측정하는 이유는 주변 1-홉 센서 노드의 수의 변화에 대하여 위치 오차의 정도를 측정하기 위해서이다[1]. 즉, 같은 네트워크 공간에 센서의 수를 변화했을 경우, 자신의 위치를 부정확하게 알고 있는 노드의 수와 1-홉 이웃 노드의 수가 변화하게 된다. 그로 인하여 자신의 위치를 부정확하게 알고 있는 주변 센서 노드 수에 대하여 얼마나 많은 위치 오차가 발생하는가를 측정하기 위해서 실험기준에 포함시켰다. 두 번째, 다중흡을 통하여 위치를 측정하게 될 경우 이웃 노드와의 clock skew와 anchor 노드부터 홉 수가 증가함에 따라서 주변 이웃 노드의 부정확한 정보가 증가하게 된다. 이로 인하여 위치오차가 증가하기 때문에 anchor 노드로부터의 홉 수 증가에 대한 오차 정도를 알아보기 위해서 실험기준에 포함시켰다[10].

### 3.2 실험 결과 및 평가

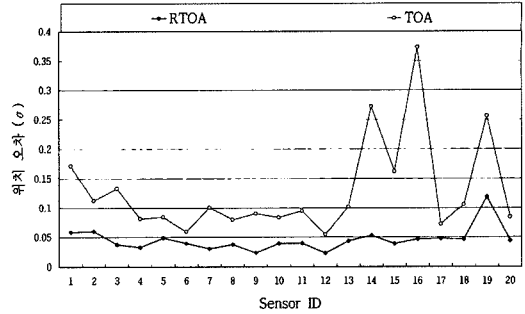
- 1) 센서 노드 수에 따른 위치오차[1]

각각의 실험은 100번을 반복하여 평균값을 취하였다. 그림 6은 센서의 초음파 전송범위를  $100m$ , 네트워크 공간을  $200m \times 200m$ 하였을 때의 실험결과이다. 그림 6(a), 6(b), 6(c)는 각각 센서의 수를 20개, 50개, 200개로 임의로 배치시켜놓고 RTOA, TOA방법을 사용하여 각각의 위치오차( $\sigma = \sqrt{(r_x - e_x)^2 + (r_y - e_y)^2}$ ,  $r$ : 실제좌표,  $e$ : 측정좌표)를 측정하였다. 위치 오차  $\sigma$ 는 X-Y평면에서 실제 센서 노드의 위치와 주변 이웃 노드를 이용하여 자신의 위치를 측정된 좌표의 거리차를  $m$ 단위로 측정된 것이다. 진한 실선은 RTOA방법을 사용하여 실험한 결과이며, 희색 실선은 TOA방법을 사용하여 실험한 결과이다.

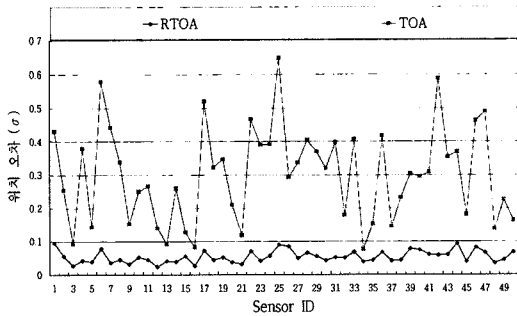
그림 6에서 알 수 있듯이 전반적으로 RTOA방법이 TOA방법보다 위치오차가 작게 나타남을 알 수 있는데, 그림 6(a)에서 TOA에서의 위치오차는 평균  $0.107m$ 이지만, RTOA에서는 평균  $0.067m$ 로 약 38%의 정확도 향상을 보였다. 특히 위치 정확도의 향상은 주변 노드의



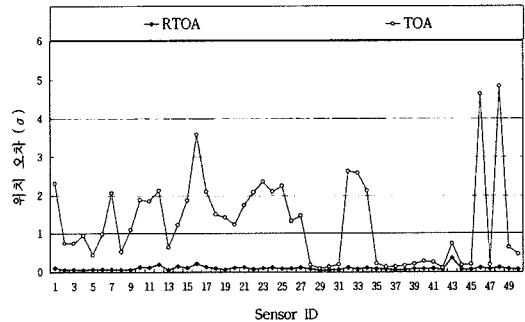
(a) 센서 수 : 20개



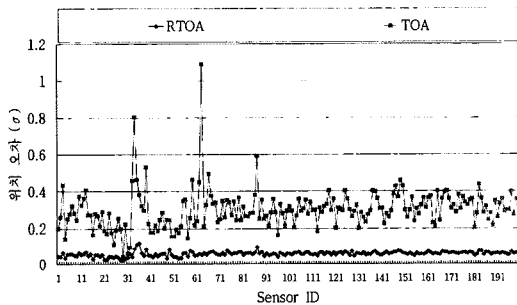
(a) 센서 수 : 20개



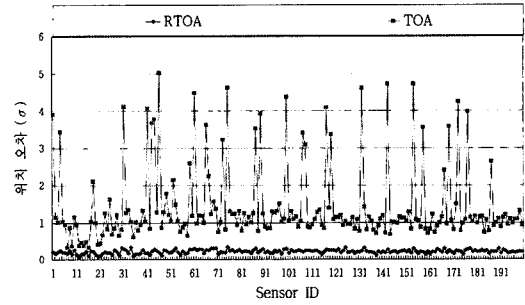
(b) 센서 수 : 50개



(b) 센서 수 : 50개



(c) 센서 수 : 200개



(c) 센서 수 : 200개

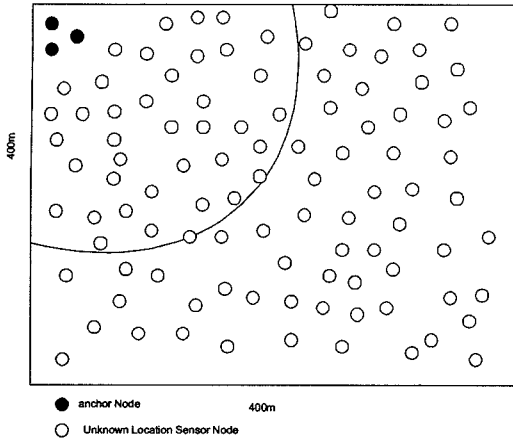
그림 6 센서 노드들의 위치오차(초음파 전송범위 : 100m, 네트워크 공간 : 100m×100m)

그림 7 센서 노드들의 위치오차(초음파 전송범위 : 200m, 네트워크 공간 : 400m×400m)

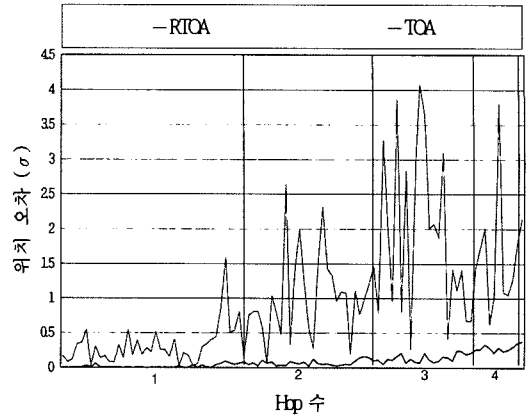
수가 많으면 많을수록 더 높은데, 그림 6(b)와 그림 6(c)에서와 같이 각각 약 81%, 82%의 더 높은 위치 정확도 향상을 보였다. 그 이유는 RTOA방법을 사용한 센서들은 주변 노드들의 거리정보와 위치정보가 상대적으로 TOA방법보다 더 많기 때문에 더 좋은 위치 정확도 향상을 보이게 된 것이다.

그림 7은 센서의 초음파 전송범위를 200m, 네트워크 공간을 400m×400m하고 실험하였다. 그림 7의 (a), (b), (c)의 센서의 수는 그림 6과 같이 각각 20개, 50개, 200개로 임의로 배치한 후에 RTOA방법과 TOA방법을 사용하여 실험하였다. 즉, 그림 7은 센서 사이의 거리를

증가시키고, 센서의 전송범위를 200m로 했을 경우인데, TOA의 최대 위치오차는 그림 7(c)에서와 같이 최대 5.02m이상으로 높은 편차를 보였지만, RTOA에서의 최대 위치오차는 0.35m로 낮은 편차를 보였다. 평균 위치 오차의 비교하면, TOA에서는 0.13m, 1.3m, 1.4m를 보였지만, RTOA에서는 0.05m, 0.10m, 0.22m로 약 65%, 93%, 85%의 위치 정확도 향상을 보였다. 그림 6과 그림 7의 실험결과를 통하여 위치 정확도의 향상은 센서 사이의 거리가 멀어지면 멀어질수록, 주변 이웃 노드의 정보가 많으면 많을수록, RTOA가 TOA에 비해 더 정확한 위치 측정을 하게 됨을 알 수 있다.



(a) 다중 홉 모델



(b) 홉 수 증가에 따른 위치 오차

그림 8 anchor 노드로부터 홉 수 증가에 따른 위치오차

2) 다중홉에 따른 위치오차[10]

그림 8(a)는 anchor 노드로부터 홉 수 증가에 따른 위치오차 모델이며, 그림 8(b)는 anchor 노드로부터 홉 수 증가에 따른 위치오차의 결과이다. 그림 8(a)에서 전체 네트워크 크기는 400m×400m 안에서 3개의 anchor 노드를 네트워크 모서리에 배치하고, 전송범위가 100m 인 센서 노드를 임의로 100개 배치하였다. 그림 8(b)의 결과에서 홉 수가 증가하면 할수록 위치오차가 증가함을 알 수 있다. 왜냐하면, anchor노드와 직접적으로 통신할 수 없는 노드들은 다중홉을 통하여 자신의 위치를 측정하기 때문에 홉 수가 증가하면 할수록 부정확한 이웃 노드들의 위치정보가 많아지기 때문이다. 그림 8에서 홉 수당 TOA의 위치오차는 평균 0.24m, 0.97m, 1.9m, 1.38m이지만, RTOA에서는 0.01m, 0.05m, 0.12m, 0.26m로 각각 96.06%, 94.02%, 93.57%, 81.33%의 정확도 향상을 보였다.

본 논문에서 사용하고 있는 RTOA방법은 clock 비울 변화에 대한 TOA의 문제점을 해결할 수 있도록 초음파신호의 왕복시간차를 이용하였다. 따라서 TOA방법을 사용하는 Cricket 센서와 같이 초음파를 송수신할 수 있는 장비가 필요할 뿐만 아니라 신호의 도착시간을 정확히 계산할 수 있어야 한다. 또한 센서 네트워크 환경에서는 센서의 전송범위가 100m미만이기 때문에 위치오차가 마이크로단위로 계산이 되어 절단오차와 같은 계산오차를 유발할 수 있다.

4. 관련 연구

4.1 거리 측정 방법

거리를 측정하는 시스템으로 크게 4가지의 분류로 나눌 수 있다. 전파신호의 세기를 이용하는 방법(RSS,

Received Signal Strength)[1,11], 전파신호의 도달 각도를 이용하는 방법(AOA, Angle of Arrival)[12,13], 전파신호와 초음파의 도착시간을 이용하는 방법(TOA, Time of Arrival)[1,2,8], RF신호의 도착 지연 시간을 이용하는 방법(TDOA, Time Difference of Arrival) [14,15]이 있다.

이 중 RSS방법은 Rockwell사에서 개발한 WINS노드가 대표적인데, 거리에 따른 신호의 세기 변화를 이용한 것이다. 이러한 신호세기를 이용한 거리측정 방법은 노드의 위치를 측정함에 있어서 많은 오차를 갖게 된다[11].

AOA방법은 전파의 도달각도에 따른 거리측정방법이다[12,13]. 현재 전파의 신호각도를 측정할 수 있는 노드는 개발되어 있지 않지만, [13]에서는 단 방향신호를 송수신할 수 있는 802.11 카드를 노트북 컴퓨터에 장착하여 레코드판 위에서 돌려가며 신호의 세기를 측정하는 실험을 하였다. 이러한 방법을 통하여 신호각도를 측정했을 경우에도 표준오차는 22°로 많은 오차를 보이고 있다. [13]에서는 신호의 세기와 각도를 이용하여 노드의 위치를 측정하는 방법을 소개하였다.

초음파를 이용하여 위치를 인식하는 시스템으로 캠브리지 대학에서 개발한 Active Bat시스템이 있는데, 이를 시작으로 활발한 연구가 진행되었다[14]. Active Bat 시스템은 TDOA방식으로, 사람이나 사물에 Bat이라는 초음파 발생기를 부착하고, 사무실의 천정에 초음파 수신기를 부착한다. 위치를 측정하는 방법은 서버에서 초음파 수신기들을 모두 초기화하고, 특정 Bat을 호출하게 되는데, 이때 호출된 Bat은 초음파를 발생하여 이 신호를 천정에 장착한 초음파 수신기를 통해서 서버에 전송되게 된다. 이 때, 서버는 각각의 수신기인 Bat에서 송신된 신호의 도착 지연시간을 측정하여 위치를 계산하

게 된다. 이러한 Active Bat은 고정된 인프라를 이용하여 측정하기 때문에 Ad hoc 무선 센서 네트워크에 적용하기 어렵다. 또 다른 시간을 이용한 방법 중에 TPS(Time based Positioning System)가 있다[15]. 이 방법은 3개의 베이스 스테이션에서 순차적인 신호의 도착시간차를 노드에게 전송하여 노드의 위치를 파악하는 것이다. 이러한 방법도 노드의 clock 비율이 다를 경우에는 동작하지 않으며 네트워크에 있는 모든 노드는 베이스 스테이션과 직접적으로 통신이 가능해야 하는 제약이 있다.

반면에, MIT에서 개발한 Cricket[2]은 도착 지연 시간을 기반으로 측정하는 방식이지만, Active Bat과는 다르게 TOA방법을 사용한다. TOA방법은 전파의 이동 속도가 다른 2개의 신호, 즉 RF신호와 초음파 신호를 동시에 발생한다. 2개의 신호 중 전파의 속도가 빠른 RF신호가 먼저 수신기에 도착하고, 이 후 초음파 신호를 수신하게 되는데, 이 때 두 신호의 도착 시간차를 이용하는 것이다. 따라서 신호의 도착 시간차를 이용하여 거리를 측정하고, 3개 이상의 발생기를 통하여 수신기의 위치를 측정하게 된다[1,2]. 이러한 TOA방법은 수신되는 노드의 clock 비율에 영향을 받는다. 만약 수신되는 노드의 clock 비율이 표준시간과 다를 경우 거리에 거리오차는 선형적인 오차를 보이게 된다.

이러한 clock 비율의 변화에 대한 차이를 줄이기 위해서 시간 동기화를 이용하는 많은 연구가 있다. FTSP[4], RBS[5], TPSN[6]과 같이 비콘 노드가 동기화 신호를 방송하고 1홉 내에 있는 노드들은 수신된 정보를 통하여 시간을 동기화 하거나, 1홉 밖에 있는 노드들은 다중 홉 형식으로 시간을 동기화시킨다. RFA[7]는 하나의 비콘 노드를 통하여 시간을 동기화 하는 것이 아니라, 일정한 기간에 동시성(Synchronicity)을 맞추는 방법을 소개하고 있다. 이러한 모든 시간동기화를 통하여 clock drift를 항상 20 $\mu$ s에서 40 $\mu$ s 이내로 맞추고 있다[5,7]. 하지만, 주기적인 시간동기화에 필요한 패킷 오버헤드가 존재할 뿐 아니라, clock skew에 대한 거리오차는 항상 발생하게 된다.

#### 4.2 위치 측정 방법

센서 노드의 위치는 정확하지 않은 거리정보 및 각도 정보에 의해서 위치오차를 발생하게 된다. 따라서 지역화(localization)를 통하여 위치를 측정하게 되는데, 가장 대표적인 방법으로 삼변측량법(Trilateration)[1,2,8]과 삼각측량(Triangulation)[12,13]을 들 수 있다. 또한 위치를 최적화하기 위해서 급강하기법[9], Newton-Raphson[9]와 같은 보정기법이 있다.

첫 번째, 삼변측량은 대표적으로 연구된 방법으로써 자신의 위치를 알고 있는 3개 이상의 노드들로부터 주

변 거리정보를 기반으로 MMSE(Minimum Mean Square Estimation)을 적용하는 것이다[1,2,8]. 3개 이상의 거리 정보를 얻지 못할 경우에는 Multilateration방법을 사용하여 부족한 거리 정보를 보정하는 방법이다[1]. 삼각측량방법은 각도를 기반으로 위치를 측정하는 방법으로써 자신의 위치를 알고 있는 2개 이상의 노드로부터 각도 정보를 기반으로 위치를 측정하는 방법이다[12,13]. 위의 방법들은 행렬식을 이용하여 floating point연산이 필요하기 때문에, 간단한 방법으로 Min-max방법도 소개되었다[16]. Mix-max방법은 각각의 anchor노드들에 의해서 서로 교차되는 위치의 최소-최대 사각형을 형성하여, 중복된 사각형의 중점을 센서의 위치로 추정하는 방법이다. Min-max방법은 간단한 연산을 통하여 센서 위치를 결정할 수 있는 장점은 있지만, 삼변측량이나 삼각측량보다 위치오차가 높은 단점이 있다.

두 번째, 위치를 최적화하기 위한 방법 중에서 급강하 기법(Steepest Descent Method)[9]과 Newton-Raphson[8,9]방법은 거리정보를 기반으로 거리오차의 제곱합이 최소가 위치를 측정하는 방법이다. 즉, 자신의 위치를 알고 있는 노드들의 위치를 각각  $(a_i, b_i)$ 라고 하고, 측정된 거리를 각각  $r_i$ 라고 하면, 센서의 위치는  $f(x, y) = \min \left( \sum_{i=1}^n \left( \sqrt{(x-a_i)^2 + (y-b_i)^2} - r_i \right)^2 \right)$ 으로 측정될 수 있다. 위 두 최적화 방법은 센서의 초기 위치에 따라서 수렴여부가 결정되는데, 적당한 초기 위치가 결정되면 Newton-Raphson방법이 급강하 기법보다 빠르게 수렴한다[9].

본 논문에서는 센서의 위치를 측정하기 위해서 2가지 방법을 모두 사용하였다. 즉, 센서의 초기 위치 값을 결정하기 위해서 MMSE를 사용하고, 이 초기 위치 값을 기반으로 Newton-Raphson방법을 사용하여 위치를 보정하였다.

### 5. 결론 및 향후 연구 과제

본문의 RTOA방법을 사용하여 센서 노드의 위치를 측정하였을 경우 서로간의 시간동기화가 필요하지 않으므로 오버헤드가 적으며, 복잡한 연산을 수행하지 않기 때문에 위치계산을 빠르게 수행할 수 있다. 거리오차는 실질적인 노드 사이의 거리와 무관하게 측정될 수 있기 때문에, 센서의 초음파 전파범위가 확장된 환경에서도 쉽게 적용이 가능할 뿐 아니라 clock 비율이 변화하더라도 정확한 거리 측정이 가능하다.

실험결과에서 RTOA방법의 위치오차는 TOA방법의 위치오차보다 최소 38%에서 최대 93%의 위치 정확도 향상을 보였다. 이는 RTOA는 센서 주변의 노드 수가



많을수록 거리오차 및 위치오차의 비율이 TOA보다 더 작기 때문에 위치 정확도가 더 높게 나타났으며, 센서 사이의 실제적인 거리가 멀수록 거리오차 및 위치오차가 더 작게 나타남을 알 수 있다. 또한 다중홉 방식의 실험을 통해서 anchor노드부터의 홉 수가 증가함에 따라 위치오차의 위치 정확도도 평균 10%의 향상을 보였다.

하지만, 센서 노드의 위치측정에는 오차의 원인이 다수 존재한다. 센서 노드들의 결합, 센서 노드 사이의 장애물, 주변 온도들과 같은 거리측정의 오차 원인들이 존재하는데, 이를 해결하기 위한 결합 허용 연구는 향후 과제로 남긴다. 더 나아가 이러한 결합 허용 연구를 통하여 실시간 위치추적에 대한 RTOA 확장도 향후 연구 과제로 남긴다.

### 참 고 문 헌

- [1] A. Savvides, C. C. Han and M. B. Strivastava, "Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors," In Proceedings of ACM SIGMOBILE, pp. 166-179, 2001.
- [2] A. Smith, H. Balakrishnan, M. Goraczko, and N. Priyantha, "Tracking Moving Devices with the Cricket Location System," In Proceeding of MobiSys '04, pp. 138-149, 2004.
- [3] S. Granerawal, S. Capkun, C.C. Han, M.B. Srivastava, "Secure Time Synchronization Service for Sensor Networks," In Proceeding of ACM workshop on Wireless security, pp. 97-106, 2005.
- [4] M. Maroti, B. Kusy, G. Simon, A. Ledeczi, "The Flooding Time Synchronization Protocol," In Proceedings of SenSys, pp. 39-49, 2004.
- [5] J. Elson, L. Girod and D. Estrin, "Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts," In Proceedings of OSDI, Volume 36, pp. 147-163, 2002.
- [6] S. Ganerawal, R. Kumar, and M. B. Strivastava. "Timing-sync protocol for sensor networks," In Proceeding of ACM SenSys, pp. 138-149, 2003.
- [7] G. Werner-Allen, G. Tewari, "Firefly-Inspired Sensor Network Synchronicity with Realistic Radio Effects," In Proceedings of SenSys, pp. 142-153, 2005.
- [8] D. Moore, J. Leonard, D. Rus, S. Teller, "Robust Distributed Network Localization with Noisy Range Measurements," In Proceedings of SenSys, pp. 50-61, 2004.
- [9] R.L. Burden, J.D. Faires, "Numerical Analysis," seventh edition, Thomson, 2001.
- [10] S. Basagni, M. Battelli, M. Iachizzi and C. Petrioli, "Limiting the Propagation of Localization errors in Multi-hop Wireless Networks," In Proceeding of IEEE PERCOMW '06, p. 6, 2006

- [11] Wireless Intergated Network Systems(WINS) <http://wins.rsc.rockwell.com/>.
- [12] D. Niculescu and B. Nath, "Ad Hoc Positioning Systems (APS) Using AoA," In Proceedings of INFOCOM, Volume 3, pp. 1734-1743, 2003.
- [13] D. Niculescu and B. Nath, "VOR Base Stations for Indoor 802.11 Positioning," In Proceedings of SIGCOM, pp. 58-69, 2004.
- [14] A. Ward, A. Jons, A. Hooper, "A new location technique for the active office," Personal Communications, In Proceeding of IEEE, Volume 4, pp. 42-47, 1997.
- [15] X. Cheng, A. Thaeler, G. Xue, and D. Chen, "TPS : A Time-Based Positioning Scheme for Outdoor Wireless Sensor Networks," In Proceedings of IEEE INFOCOM, volume 4, pp. 2685-2696, 2004.
- [16] K. Langendoen, N. Reijers, "Distributed Localization in Wireless Sensor Networks : a Quantitative Comparison," In Proceeding of Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, Volume 43, pp. 499-518, 2003.



장 상 욱

2002년 홍익대학교 수학교육과 졸업(학사). 2005년 3월~현재 홍익대학교 컴퓨터공학과 석사 과정. 관심분야는 ad hoc 센서 네트워크



하 란

1987년 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업  
1989년 서울대학교 컴퓨터공학과 석사  
1989년 3월~1990년 7월 한국통신 전임 연구원. 1995년 University of Illinois at Urbana-Champaign 전산학 박사. 1995년 9월~현재 홍익대학교 컴퓨터공학과 부교수. 관심분야는 센서네트워크, 모바일/무선 컴퓨팅, 실시간 시스템, SDR, 네트워킹, 멀티미디어 시스템