

# RSSI의 거리 추정 방식에 바탕을 둔 실내 무선 측위 성능 향상 알고리즘

준회원 박주현\*, 정회원 이정규\*, 종신회원 김성철\*

## Performance Improvement Algorithm for Wireless Localization Based on RSSI at Indoor Environment

Joo-hyun Park\* Associate Member, Jung-kyu Lee\* Regular Member, Seong-cheol Kim\* Lifelong Member

### 요 약

본 논문에서는 실내에서 무선으로 위치를 추정하는데 사용되는 삼변측량과 최소제곱법의 정확도 향상을 위한 두 가지 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서는 삼변측량을 사용하여 위치를 추정할 때 상대적으로 큰 위치 추정 오차를 발생시킬 수 있는 경우, 즉 3개의 원이 교직선을 형성하지 못하는 경우를 사면체를 위한 헤론의 공식을 적용하여 분류하고, 분류과정에서 얻어진 부피의 절댓값을 이용하여 측정된 추정 거리를 신뢰성 있는 추정 거리로 변환하는 알고리즘을 제안한다. 또한 Anchor node의 개수가 3개 이상인 경우에 사용하는 최소제곱법의 변형된 알고리즘인 RWGH의 연산량을 개선하면서 더 좋은 성능을 낼 수 있는 가중치를 이용한 무게 중심 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해 성능을 검증한다.

**Key Words :** Trilateration, Heron's Formula, Least Square, Received Signal Strength Indicator

### ABSTRACT

In this paper, we propose two algorithm for improving the performance of wireless localization(Trilateration and Least Square) based on the range based approach method in indoor environment using RSSI for ranging distance. we propose a method to discriminate the case that has relatively large estimation errors in trilateration using Heron's formula for the volume of a tetrahedron. And we propose the algorithm to process the discriminated types of distance using the absolute value calculated by Heron's formula. In addition, we propose another algorithm for the case of which the number of anchor nodes larger than three. In this case, Residual Weighting Factor(RWGH) improves the performance of Least Square. However, RWGH requires many number of calculations. In this paper, we propose Iterative Weighted Centroid Algorithm(IWCA) that has better performance and less calculation than RWGH. We show the improvement of performance for two algorithms and the combination of these algorithm by using simulation results.

### 1. 서 론

최근 스마트 폰에 대한 관심이 폭발적으로 증가하

면서 증강현실과 같은 위치기반 서비스(LBS, Location Based Service)가 큰 주목을 받고 있다. 위치기반 서비스의 기반이 되는 무선측위는 Range free

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2010-0000844).

\* 서울대학교 전기 컴퓨터공학부 전파 및 무선통신 연구실(gongbi81@mxwell.snu.ac.kr, minishao@maxwell.snu.ac.kr)  
논문번호: KICS2011-01-004, 접수일자: 2011년 1월 3일, 최종논문접수일자: 2011년 4월 11일

approach와 Range based approach 방식으로 접근 방식에 따라 크게 2가지로 분류된다<sup>[1]</sup>. 옥외 환경에서는 이미 GPS가 일정수준 이상의 정확도로 옥외에서 많은 사용자들의 요구를 충족시키고 있다. 하지만 GPS는 실내에서 활용이 어려우며, 단말기가 고가라는 단점이 있다<sup>[2]</sup>. 이러한 이유로 실내에서의 무선 측위를 위해 WLAN(Wireless Local Area Network), 초광대역(UWB, Ultra Wide Band)통신 그리고 WSN(Wireless Sensor Network) 등의 방식이 제안되고 많은 연구가 진행되었다<sup>[3,8]</sup>. 그 중 WSN은 크기가 작은 Sensor Node를 많이 확보하여 측위에 이용하는 방법이다. Zigbee 기술은 IEEE 802. 15. 4 기반의 저가, 저 전력, 저속의 근거리 무선통신 기술이다. 매우 간단한 하드웨어 구조를 지내고 있어 초저가의 Sensor Network를 구성할 수 있으며 하나의 네트워크에 많은 노드를 연결할 수 있게 만들어졌다<sup>[4]</sup>.

본 논문에서는 송신단과 수신단의 거리를 추정하는 방법인 RSSI<sup>[2]</sup>는 수신된 신호의 세기를 바탕으로 거리를 추정하는 방법으로 신호의 Path loss 모델을 사용한다. 이 방법은 간단하지만, 신호의 특성상 비가시 거리(NLOS, None Line of Sight)가 형성되면 정확도가 떨어진다. 하지만 저가의 node로 좁은 지역에 Network를 구성하면 각 node들이 가시거리(LOS, Line of Sight)를 형성할 수 있다. 삼변측량은 RSSI와 같은 방법으로 추정된 송수신단의 거리를 이용하여 사용자의 위치를 추정하는 기본적인 방법이다. 삼변측량을 이용한 정확한 측위를 위해서는 위치를 알고 있는 노드(Anchor node)를 중심으로 하고, RSSI 등의 방식으로 추정된 거리를 반지름으로 하는 3개의 원들이 교직선을 형성해야 하고, 이러한 교직선들이 그림 1의 빨간 점과 같이 하나의 교점을 형성해야 한다. 하지만 실제 환경에서 거리의 추정 값에 큰 오차가 포함되어 있는 경우가 발생한다. 지금까지는 삼변측량에 대한 방향보다 Anchor node의 숫자를 늘려 최소제곱법의 성능을 향상하는 방향으로 연구의 흐름이 진행되어왔다. 본 논문에서는 삼변측량에 대한 성능이 개선되면, 삼변측량을 이용한 다른 알고리즘도 성능이 개선될 수 있다는 판단으로 삼변측량에 대한 성능 개선 알고리즘을 제시한다. 본 논문에서는 1개의 원이 완전히 분리되어있는 경우와 다른 원을 완전히 포함하는 경우를 None Intersection Case(NIC)로 정의(그림 1의 녹색 점)하고, NIC와 그와 반대되는 경우인 Intersection Case(IC)를 사면체를 위한 헤론의 공식을 이용하여 분류한다. 본 논문에서는 이렇게 분류된 NIC에 사면체를 위한 헤론의 공식을 이용해 얻은 부피의 절댓값

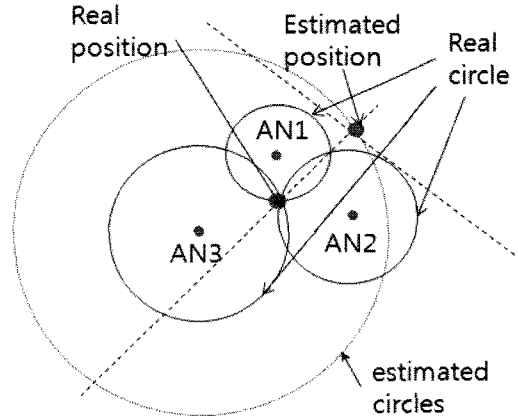


그림 1. 삼변측량의 예시

과 위치 추정 오차 거리가 양의 상관관계를 갖고 있다는 것을 보이고, 이를 이용하여 실제 환경에서 확인할 수 없는 추정위치의 신뢰도를 부피의 절댓값의 크기로 확인한다. 본 논문에서는 또한 이러한 양의 상관관계를 이용하여 NIC로 분류된 경우에 추정된 거리 값을 부피의 절댓값을 이용하여 가공하고, 이를 통해 삼변측량의 성능을 개선한다.

추정된 송수신단의 거리가 4개 이상인 경우는 삼변측량법이 아닌 최소제곱법을 사용한다. 하지만 최소제곱법은 1개의 추정값이 큰 오차를 갖고 있는 경우, 그 추정값을 포함하고 측위를 수행했을 때의 오차가 그 값을 제외하고 측위를 수행했을 때의 오차보다 크다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 Residual Weighting Algorithm(RWGH)이 제안되었다<sup>[6]</sup>. 하지만 위 알고리즘은 연산량이 매우 크다. 본 논문에서는 위의 RWGH 알고리즘의 변형된 형태인 반복 무게중심(Iterative Weighted Centroid Algorithm (IWCA)) 알고리즘을 제안하고 그 성능을 시뮬레이션을 통해 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 삼변측량에서 None Intersection Case에 대해 정의하고 이를 분류하는 방법과 분류된 경우의 추정된 거리 값을 가공하는 알고리즘에 대해 소개한다. 3장에서는 Anchor node가 4개 이상인 경우에 IWCA를 소개한다. 4장에서는 제안된 알고리즘을 시뮬레이션을 통해 검증하고 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 삼변측량에서 NIC의 분류와 성능개선 알고리즘

### 2.1 세원의 기하학적 관계와 NIC의 분류

본 절에서는 삼변측량에서 사용될 3개의 원의 관계

를 기하학적으로 살펴본다. 3개의 원이 갖는 기하학적인 관계를 두 원의 3가지 기하학적인 관계를 이용하여 설명한다. 두 원의 반지름과 두 원의 중심사이의 거리를 이용하면, 두 원의 기하학적인 위치관계는 아래와 같이 3가지로 분류된다<sup>[11]</sup>.

- a. 분리 :  $d_{ij} > \hat{r}_i + \hat{r}_j$   
: 두 개의 원이 서로 분리되어 만나지 않는 경우
- b. 교차 :  $\hat{r}_i - \hat{r}_j \leq d_{ij} \leq \hat{r}_i + \hat{r}_j$   
: 두 개의 원이 2점 또는 1점에서 만나는 경우
- c. 포함 :  $d_{ij} < \hat{r}_i - \hat{r}_j$   
: 한 개의 원이 다른 한 원을 완전히 포함하여 만나지 경우

여기서  $d_{ij}$ 는 두 원의 중심사이의 거리를 의미하며  $\hat{r}_i$ 와  $\hat{r}_j$ 는 두 원의 반지름을 의미한다. ( $\hat{r}_i > \hat{r}_j$ 로 가정한다.) 표 1은 3개의 원이 형성하는 모든 기하학적인 관계를 보여준다. 표 1에서  $C_1$ 은 반지름이 가장 작은 원,  $C_2$ 는 반지름이 중간인 원,  $C_3$ 는 반지름이 가장 큰 원을 의미한다. 표 1에서 Case7을 제외한 모든 경우가 두 원 사이의 ‘완전한 분리’관계나 ‘완전한 포함’ 관계를 갖고 있다. 이러한 경우들은 Case7에 비해 비교적 큰 추정 오차를 포함하고 있다. 예를 들어 ‘완전한 포함’관계를 갖고 있는 경우, 그림 1(표 1의 Case2)의 녹색 점은 빨간 점으로부터 크게 떨어져 큰 위치 추정 오차가 발생함을 보여준다. 본 논문에서는 상대적으로 큰 오차를 유발하는 경우인 Case1, 2, ..., 6, 8, ..., 11을 None Intersection Case(NIC)로 정의하고, Case7은 Intersection Case(IC)로 정의한다.

표 1. 3개의 원이 형성하는 기하학적인 관계

Case	$C_1, C_2$	$C_1, C_3$	$C_2, C_3$	NIC/IC
1	분리	분리	분리	NIC
2	분리	분리	교차	NIC
3	분리	분리	포함	NIC
4	분리	교차	교차	NIC
5	분리	포함	교차	NIC
6	분리	포함	포함	NIC
7	교차	교차	교차	IC
8	교차	포함	교차	NIC
9	교차	포함	포함	NIC
10	포함	포함	교차	NIC
11	포함	포함	포함	NIC

## 2.2 IC의 분류 알고리즘

본 절에서는 위의 절에서 언급한 IC를 헤론의 공식을 이용하여 분류하는 방법에 대하여 제안한다. 3개의 Anchor node를 이용할 경우, 3개의 Anchor node 사이의 거리 3개와 각 Anchor node에서 추정된 거리 3개를 포함한 6개의 변을 얻을 수 있다. 실제 환경에서 Anchor node 3개가 형성하는 평면 위에 blind node가 위치할 가능성은 거의 없다. 즉, 즉, RSSI로 거리가 정확하게 추정된 경우 3개의 Anchor node와 1개의 blind node가 형성하는 6개의 변은 사면체를 형성한다. 본 절에서는 위에서 언급한 6개의 변이 사면체를 형성한다는 것과 사면체의 부피를 헤론의 공식의 확장을 통해 구할 수 있다는 점을 이용하여 IC와 NIC를 분류하는 방법을 제안한다. 삼각형에 대한 3변의 길이를 알고 있을 경우, 삼각형의 넓이를 구하는 헤론의 공식이 존재한다. 이러한 삼각형의 넓이를 구하는 공식을 확장하여, 사면체의 6변의 길이를 알고 있을 때, 사면체의 부피를 구할 수 있는 공식이 아래와 같이 존재한다.

$$V = \frac{AT \cdot BT \cdot CT}{6} \sqrt{1 + f(\alpha, \beta, \gamma)} \quad (1)$$

여기서

$$f(\alpha, \beta, \gamma) = 2 \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma - (\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma)$$

이고,  $\alpha = \angle ATB, \beta = \angle ATC, \gamma = \angle BTC$ 이다. 모든 변의 길이를 알고 있으므로 각각의 cosine값은 cosine 제2법칙을 이용하여 구할 수 있다. 헤론의 공식을 통해 구해진 부피의 값이 실수를 갖는 경우를 생각해 보면, 식(1)의 root안 값이 양수인 경우이다. 이러한 조건을 만족하기 위한 최소한의 조건은 모든 cosine값의 절댓값이 1보다 작아야 한다는 것이다

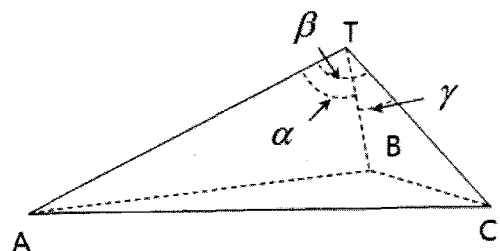


그림 2. 사면체

( $|\cos\alpha| \leq 1, |\cos\beta| \leq 1, |\cos\gamma| \leq 1$ ). 이러한 조건일 때 3개의 원의 관계는 표 1의 case7에 해당된다. 즉, 위의 부피 값이 양수인 경우는 모든 cosine값의 절댓값이 1보다 작은 경우이다. 두 개의 원이 형성하는 기하학적인 관계가 교차인 경우 중심사이의 거리와 추정된 두변은 삼각형을 형성하고, 이에 대한 cosine의 절댓값은 1보다 작다. 두 원의 포함관계는 한 개의 변이 매우 큰 상황에서 발생하는데, 이때의 cosine값은 1보다 크다. 분리관계는 두 개의 변이 모두 작은 상황에서 발생하는데, 이때의 cosine값은 -1보다 작다. 이는 부피를 위한 헤론의 공식이 추정된 거리가 IC에 해당되지 않는 경우를 분류해 낼 수 있음을 의미한다. 이 공식은 NIC와 IC를 분류하기 위해서 사용되고, 삼변측량을 사용하기 때문에 단순히 판별식의 용도로 사용할 수 있다.

### 2.3 부피의 절댓값과 오차거리의 상관관계와 측위의 신뢰도

본 절에서는 부피의 절댓값과 오차거리에 대한 양의 상관관계를 수학적으로 알아본다. 삼변측량에서 오차거리와 부피는 3개의 Anchor node들과 Blind node 사이의 실제 거리와 각각의 수신신호에 영향을 주는 RSSI모델의 섀도잉값에 의해 결정된다. 본 논문에서 삼변측량과 최소제곱법의 성능을 평가하기 위해 사용하는 오차거리의 공식은 아래와 같다.

$$|x - \bar{x}| = \sqrt{(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2} \quad (2)$$

여기서  $\bar{x}$ 는 추정된 위치,  $x$ 는 실제 위치,  $(\hat{x}, \hat{y})$ 는 추정된 위치의 좌표,  $(x, y)$ 는 실제 위치의 좌표를 의미한다. 삼변측량의 위치 추정 공식을 통해 얻어진 추정 위치의 좌표를 위의 식에 대입하고, 이를 가장 긴 변의 추정거리인  $\hat{r}_3$ 에 대해 정리하면 아래와 같다.

$$|x - \bar{x}| = \sqrt{A(\hat{r}_3)^4 + B(\hat{r}_3)^2 + C(\hat{r}_3)} \quad (3)$$

여기서  $A, B, C$ 는 모두 상수이며, 3개의 Anchor node의 위치와 Blind node와 Anchor node사이의 거리인  $\hat{r}_1, \hat{r}_2$ 에 의해 결정된다.

본 논문에서 제시한 부피의 공식인 (1)의 모든 Cosine값을 거리에 대한 식으로 적용하여 대입하고  $\hat{r}_3$ 에 대해 정리하면 아래와 같다.

$$|V| = \sqrt{|A(\hat{r}_3)^4 + B(\hat{r}_3)^2 + C(\hat{r}_3)|} \quad (4)$$

여기서  $A', B', C'$ 는 모두 상수이며 각 Anchor node사이의 거리와 Blind node와 Anchor node사이의 거리인  $\hat{r}_1, \hat{r}_2$ 에 의해 결정된다.

부피에 대한 식과 오차거리에 대한 식이 각 차수의 상수만 다르고 같은 형태임을 확인할 수 있다. 즉, 추정된 위치와 실제 위치간의 오차거리가 커지게 되면, 부피도 커지게 된다. 하지만 오차거리에 비해 부피 값은 매우 큰 값을 갖는다. 그러므로 부피의 값을 측위의 신뢰도로 사용하기 위해서는 적절하게 가공하는 과정이 필요하다.

헤론의 공식을 통해 얻어진 부피의 절댓값을 높이에 해당하는 값으로 변환하여 신뢰도에 대한 정보를 얻을 수 있다. 위에서 얻어진 부피의 절댓값을 일반적인 사면체의 부피의 공식에 적용하면 높이에 해당하는 값을 얻을 수 있으며, 그 식은 아래와 같다.

$$H = \frac{3 \times |V|}{A} \quad (5)$$

여기서  $V$ 는 사면체를 위한 헤론의 공식을 통해 얻은 부피의 값이며,  $A$ 는 3개의 Anchor node가 형성하는 삼각형의 넓이이다. 위의 공식을 이용하여 헤론의 공식을 통해 분류된 NIC에 대하여 높이에 대한 PDF를 구하고, 오차거리에 대한 PDF와 비교하였다. 각 PDF는 시뮬레이션을 통해 얻었으며, 시뮬레이션 환경은 10mX10m의 일반 오피스 환경으로 가정하였으며 Anchor node의 위치는 AN1(2,2), AN2(7.5,2), AN3(8,8)로 설정하고, Blind node는 임의의 위치에 발생시킨다. 또한 RSSI의 수신신호에 대한 표준편차인  $\sigma_{dB}$ 는 1.5dB와 3.5dB로 설정하였다.

아래의 그림은 사면체의 높이와 오차거리가 확률적으로 유사한 분포를 이룬다는 것을 보여준다. 이와 같

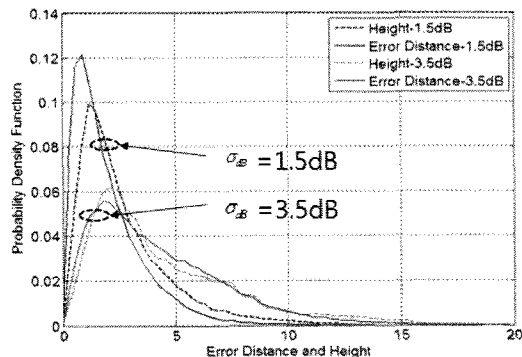


그림 3. 사면체의 높이와 오차거리의 PDF

은 관계를 이용하여 실제 환경에서 Blind node의 실제 위치를 모르고 있는 상태에서 위치 추정값의 신뢰도를 부피나 높이의 절댓값을 이용하여 부여할 수 있다.

2.4 추정거리의 변형 알고리즘

본 절에서는 위의 절에서 분류된 NIC를 부피의 절댓값과 위치 추정 오차의 상관관계를 이용하여 추정된 3개의 거리 중 1개를 변환하는 방법을 제안한다. 본 논문에서는 3개의 추정 거리 중 1개가 큰 오차를 포함할 확률이 3개 모두가 큰 오차를 포함할 확률보다 크다고 가정한다. 그리고 가장 큰 추정 거리값, 또는 가장 작은 추정 거리값에 오차가 포함되어 있을 경우의 오차거리가 그 이외의 추정 거리값에 오차가 포함되어있는 경우의 오차거리보다 크다고 가정한다. 그러므로 본 논문에서는 3개의 추정거리 중 가장 큰 값이나 가장 작은 값에 대해서 후 처리하는 방법을 제안한다. 헤론의 공식을 통해 분류 되어진 NIC를 가장 크게 추정된 거리값을 이용하여 형성된 원인  $C_3$ 와 가장 작게 추정된 거리를 통해 형성된 원인  $C_1$ 의 기하학적인 관계를 이용하여 다시 분류한다. 반지름이 가장 큰 원과 반지름이 가장 작은 원의 기하학적인 관계가 분리(표 1의 Case 1,2,3)일 경우는 Cosine값이 -1보다 작다. 이런 경우는 최소 거리가 작게 추정되었다고 가정하고, 최소로 추정된 값을 증가 시킨다. 반대로 두 원이 포함관계에 있는 경우에 얻어진 Cosine값은 1보다 크게 되며, 이러한 경우 최댓값이 크게 추정되었다고 가정할 수 있다. 두 원의 포함관계가 교차인 경우, 포함관계와 마찬가지로 최댓값이 크게 추정되었다고 가정한다. 교차인 경우와 포함인 경우 최댓값이 크게 추정되었다고 가정하였으므로 최대로 추정된 값을 감소시킨다. 그러므로  $C_1$ 과  $C_3$ 의 위치관계를 분리인 경우와 그렇지 않은 경우로 분류하여, 분리인 경우 최솟값을 증가하고, 분리가 아닌 경우 최댓값을 감소하도록 후 처리를 한다. 최솟값과 최댓값을 처리하는 공식은 각각 아래와 같다.

$$\widetilde{r}_{\min} = \alpha \times \widehat{r}_{\min} \tag{6}$$

$$\widetilde{r}_{\max} = \widehat{r}_{\max} / \alpha \tag{7}$$

여기서  $\alpha$ 는 추정된 거리의 증가량과 감소량을 결정하는 후 처리 가중치이다. 본 논문에서는 아래의 공식과 같이 후 처리 가중치  $\alpha$ 를 구하는 방법을 제시한다.

$$\alpha = \sqrt{\frac{|V|}{A}} \tag{8}$$

여기서  $V$ 는 사면체를 위한 헤론의 공식을 통해 얻은 부피의 값이며,  $A$ 는 3개의 Anchor node가 형성하는 삼각형이다. 위의 절에서 부피의 절댓값과 위치 추정 오차가 양의 상관관계가 있다는 것을 알았으므로, 최댓값과 최솟값을 후 처리할 때 부피의 값을 반영하도록 한다. 부피의 절댓값이 큰 경우에 부피의 절댓값과 추정 위치 오차의 상관관계가 명확하기 때문에 부피의 절댓값이 큰 경우, 즉  $|V| > A$ 인 경우에 한해서만 후 처리를 한다. 가장 크게 추정된 거리 값 또는 가장 작게 추정된 거리 값을 후 처리할 때  $|V| > A$ 인 조건에 대해서 후 처리를 수행하면, 항상  $\alpha \geq 1$ 의 조건을 만족할 수 있다. 식 (4)에서 가장 크게 추정된 거리와 부피의 상관관계를 확인할 수 있으며, 가장 크게 추정된 거리와 부피는 거리의 제곱에 관한 상관관계가 있으므로 부피의 값에 제곱근을 이용하여 가중치를 계산한다. 위에서 설명한 모든 과정을 정리하면 아래의 그림 4와 같다.

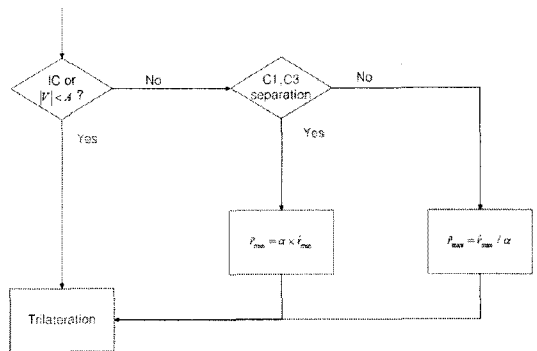


그림 4. NIC 후 처리 전체 흐름도

III. 반복 가중치 무게중심 알고리즘

$N(>3)$ 개의 Anchor node를 사용하는 경우에 각각의 모든 Anchor node의 신뢰도는 Blind node와의 실제 거리에 따라 다르다. 이렇게 서로 다른 신뢰도를 갖는 추정거리를 위치 추정에 반영하기 위해 Residual Weighting Algorithm(RWGH)<sup>[6]</sup>과 최소의 Residual Error를 이용하는 여러 가지 방법의 알고리즘이 제안되었다<sup>[9,10]</sup>. RWGH방식은 각 추정된 거리값에 가중치를 두어 위치를 추정하는 방식이다. 하지만 RWGH 방식은 가중치를 구하는 과정에서 Residual 오차를 사용하게 되며, Residual 오차가 크게 되면 알고리즘의

정확도에 문제가 발생한다. 또한 가능한 모든 부분집합에 대해 최소제곱법을 사용하여 위치를 추정하고, 그에 대한 Residual 오차를 이용해 가중치를 계산하기 때문에 연산량도 매우 많다는 단점이 있다. 본 절에서는 가중치를 구함에 있어서 Residual 오차를 이용하지 않고, 각 Anchor node에서 추정된 거리값을 이용하고, 위치를 Iterative하게 추정하는 방법을 아래와 같이 제안한다.

- 1)  $N$ 개의 추정된 거리 값을  $N-1$ 개의 원소를 갖는  $N$ 개의 부분집합으로 나눈다.
- 2)  $N-1 > 3$ 이면 앞서 구한 부분집합을  $N-2$ 개의 원소를 갖는 부분집합으로 다시 나누고,  $N-1=3$ 이면 삼변측량을 이용하여 위치를 추정한다.
- 3) 삼변측량을 이용하여 추정된 위치에 추정된 거리 값을 이용한 가중치를 곱하여 원소의 개수가 4개인 부분집합에 대한 각각의 위치를 추정한다. 이렇게 구해진 4개의 원소를 갖는 부분집합의 위치 추정 값과 그 부분집합에 대한 가중치를 계산하여 다시 5개의 원소를 갖는 부분집합의 위치를 구하고, 반복적으로  $N$ 개를 이용했을 때의 위치를 구한다. 이를 그림으로 설명하면 아래와 같다.  $N$ 개의 추정 거리를 사용하여 위치를 추정할 때, 그림 5와 같이  $i$ 번째 node에서 추정된 거리를 제외하고 위치를 추정할 값인  $\hat{x}_i$ 와 그 가중치인  $w_i$ 를 이용하여 식(9)과 같이  $\hat{x}$ 를 구한다.  $i$ 번째 node를 제외한  $\hat{x}_i$ 를 구할 때와 위와 같은 방법으로 구하며,  $\hat{x}_i$ 를 구하는데 사용되는 추정 거리의 개수가 3개일 경우만 삼변측량을 이용한다.

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^N w_i \times \hat{x}_i \quad (9)$$

여기서  $\hat{x}_i$ 는  $i$ 번째 node를 제외하고 추정된 위치이며,  $w_i$ 는 그에 대한 가중치를 의미하며 추정된 거리를 이용하여 구한다. 가중치  $w_i$ 를 구하는 과정은 다음

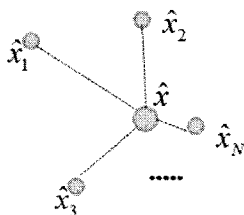


그림 5. 반복 가중치 무계중심 알고리즘을 이용한 위치추정

과 같다. RSSI로 추정된 거리 오차에 대한 표준편차는 아래의 식과 같이 거리의 제곱에 비례한다<sup>[15]</sup>.

$$\sigma \propto (r_i)^2 \quad (10)$$

이는 거리가 길수록 오차의 크기가 커질 확률이 높음을 의미한다. 이는 확률적으로 추정된 거리가 짧은 것을 이용하여 위치를 추정할 때의 신뢰도가 더 높고, 추정된 거리가 긴 것을 포함하여 위치를 추정할 때의 신뢰도가 낮음을 의미한다. 이러한 사실을 이용하여 가중치를 다음과 같이 구한다.

$$w_i = \frac{(\hat{r}_i)^2}{\sum_{k=1}^N (\hat{r}_k)^2} \quad (11)$$

이 가중치는  $i$ 번째 node를 제외하고 위치를 추정할  $\hat{x}_i$ 와 곱해진다.  $i$ 번째 node에서 추정된 거리의 값이 큰 경우를 생각해 보면,  $i$ 번째 node에서 추정된 거리의 값을 제외하고 위치를 추정할  $\hat{x}_i$  값이 신뢰도가 높고 이 값에 높은 가중치를 주어야 한다.  $i$ 번째 node에서 추정된 거리가 큰 값을 갖고 있었으므로 이 값을 이용하여 위와 같이 가중치를 구하면  $\hat{x}_i$  값에 높은 가중치가 부여된다. 반대로  $i$ 번째 node에서 추정된 거리의 값이 작은 값을 갖고 있는 경우에는  $\hat{x}_i$  값을 구하는 과정에 큰 거리 값이 포함되어 있으므로  $\hat{x}_i$ 의 신뢰도는 낮게 되며, 가중치 또한 낮게 부여되어야 한다. 그런데  $i$ 번째 node에서 추정된 거리의 값이 작은 경우라고 하였으므로 위와 같이 가중치를 계산하게 되면  $\hat{x}_i$ 에 낮은 가중치가 부여된다.

제시된 알고리즘은 부분집합의 원소 개수가 3개일 경우만 삼변측량을 하게 되어, RWGH 방식보다 최소제곱법( $N=3$ 인 경우 삼변측량과 최소제곱법은 같은 방법이다.)을 사용하는 횟수가 적다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 앞서 제시한 알고리즘의 성능을 시뮬레이션을 통해 검증한다. 시뮬레이션을 통해 NIC와 IC를 분류하고 각 경우의 오차를 분석하며 제시된 알고리즘을 적용하여 성능개선을 확인한다. 또한 제안된 IWCA를 RWGH와 비교하여 성능개선을 확인한다. 본 논문에서는 시뮬레이션 환경을 10m X 10m의 실

내 오피스 환경으로 가정한다. 일반적인 실내 오피스 환경의 크기에서 10m X 10m이면 Anchor node와 blinde node가 LOS를 형성하기 충분하다고 가정한다. 본 논문에서 사용되는 Path loss exponent는  $n_p = 2.2011$ 로 사용되며, 이 값은 9.2m X 7.4m의 실내 환경에서 Zigbee device를 이용하여 실내에서 실험을 통해 얻어진 값이다<sup>[7,12,13]</sup>. 본 논문에서 시뮬레이션에 사용한 RSSI모델은 가우시안 모델로써 수신신호의 세기가 아래의 식과 같은 정규분포를 따르는 모델이다.

$$P_{ij} \sim N(\overline{P_{ij}}, \sigma_{dB}^2) \quad (12)$$

여기서  $\overline{P_{ij}}$ 는 수신신호의 평균세기(dBm),  $\sigma_{dB}$ 는 쉐도잉의 표준편차를 의미한다. 본 논문에서 시뮬레이션에 사용될 RSSI의 쉐도잉에 대한 표준편차는 1.5dB에서 3.5dB이다. Anchor node의 위치는 AN1(2, 2), AN2(7.5, 2), AN3(8, 8)이며, 3개의 Anchor node가 특정한 삼각형(정삼각형 또는 직각삼각형)을 형성하지 않도록 위치하였다. 시뮬레이션 상에서 Blind node를 Monte Carlo방식[14]을 이용하여 random하게 발생하였으며 삼변측량과 제안된 알고리즘을 통해 그 위치를 추정하였으며, 실제 위치와 추정된 위치의 Residual 오차를 이용하여 성능을 분석하였다. Anchor node의 개수(N)가 4개 이상인 경우는 위와 마찬가지로 10m X 10m의 일반 오피스 환경을 가정하였다. Anchor node의 위치는 방의 중심에 반지름이  $3\sqrt{2}$ 인 원을 그리고 그 원 위에 정 N각형이 접하도록 설정하였다. 본 논문에서는 시뮬레이션 횟수를  $10^6$ 으로 하였다.

#### 4.1 삼변측량의 성능개선

본 절에서는 제안된 알고리즘을 적용하지 않은 삼변측량의 결과와 제안된 알고리즘을 적용한 삼변측량의 평균 오차를 비교하여 성능을 분석한다. 즉, 분류해 낸 NIC를 후 처리했을 경우 전체적인 삼변측량의 성능향상에 대한 결과이다. 그림 6은 전체적인 성능향상의 결과를 보여주며 표 2 또한 마찬가지로 성능향상에 대한 정도를 숫자로 보여준다. 수신신호의 세기에 영향을 주는 쉐도잉의 표준편차가 커질수록 NIC의 빈도가 많아지고 그에 따른 후 처리의 성능 개선량 또한 많으므로 전체적인 성능향상도 많아진다. 표 2의 마지막 행은 후 처리된 평균 오차값을 후 처리 하지 않은 값으로 normalize한 값을 1에서 뺀 값으로 성능향상의 정도를 나타낸다. 표준편차가 3.5dB 일 때, 후

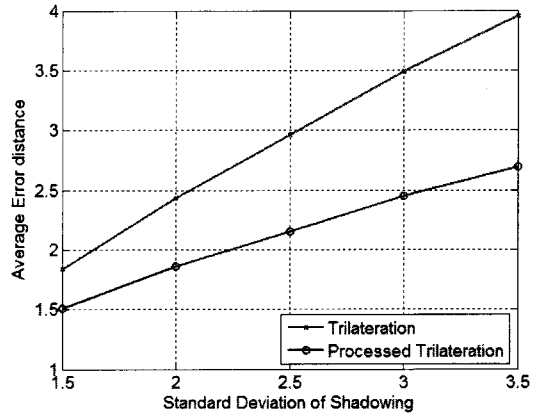


그림 6. 후 처리를 통한 삼변측량의 성능개선

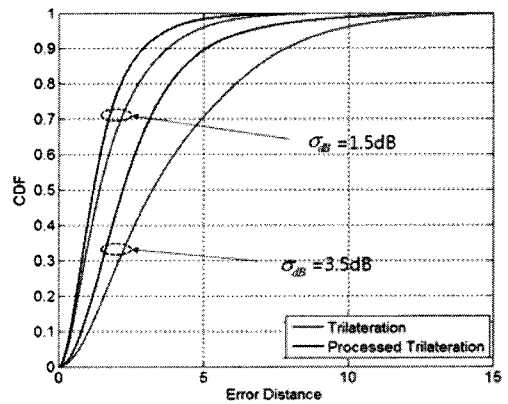


그림 7. 평균 오차거리에 대한 CDF

표 2. 후처리를 통한 삼변측량의 성능개선(m)

	1.5dB	2B	2.5dB	3dB	3.5dB
삼변측량	1.8391	2.4386	2.9630	3.4919	3.9574
후 처리 삼변측량	1.5081	1.8576	2.1549	2.4465	2.6969
성능향상	18.00%	23.83%	27.27%	29.94%	31.85%

처리를 통한 삼변측량의 평균오차가 기존의 삼변측량에 대한 평균오차에 비해 31.85% 정도의 개선되었음을 의미한다. 그림 7은 삼변측량과 제안된 방법을 거친 후의 삼변측량에 대한 CDF를 보여준다. 쉐도잉의 표준편차가 큰 경우, 위에서 언급한 대로 NIC가 발생하는 경우가 많아 성능향상의 폭이 더 큼을 확인할 수 있다.

#### 4.2. N=4인 경우 IWCA 성능 분석

본 절에서는 Anchor node의 개수가 4개인 경우에

위에 언급한 최소제곱법, RWGH, IWCA 방식에 대해 성능을 비교 분석한다. 분석 방법은 주어진 환경에서 웨도잉의 표준편차 값을 변화시켜가며 평균오차를 구한다. 그림 8은 웨도잉의 표준편차에 따른 각 방식의 평균 오차를 보여준다. 그림 8의 결과와 표 3의 결과를 확인하면 RWGH방식은 최소제곱법에 대한 개선량이 웨도잉의 변화에 따라 거의 일정하다는 것을 알 수 있고, 제한된 방식인 IWCA방식은 표준편차가 커질수록 즉, 환경이 안 좋을수록 최소제곱법에 대비한 성능 개선량이 많아지는 것을 알 수 있다. 그림 9는 최소제곱법과 IWCA 그리고 RWGH의 CDF를 웨도잉의 표준편차가 2.5dB일 때 나타낸 것이다. RWGH의 오차는 약 4.2m 이전까지는 최소제곱법보다 확률적으로 더 좋은 성능을 보인다. 하지만 4.2m 이후에서 최소제곱법이 더 좋은 성능을 나타낸다. 이는 매우 큰 오차를 갖는 경우가 최소제곱법보다 RWGH에서 더 많이 나타난다는 것을 의미한다.

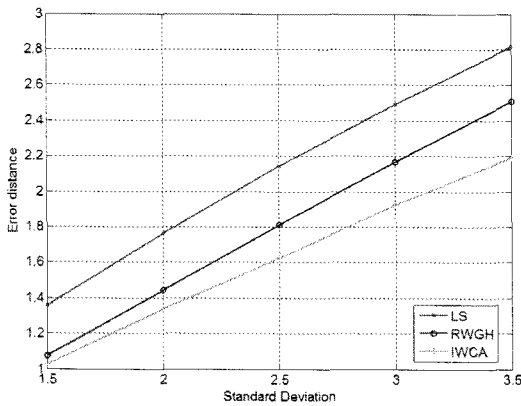


그림 8. 웨도잉의 표준편차 변환에 따른 평균 오차거리

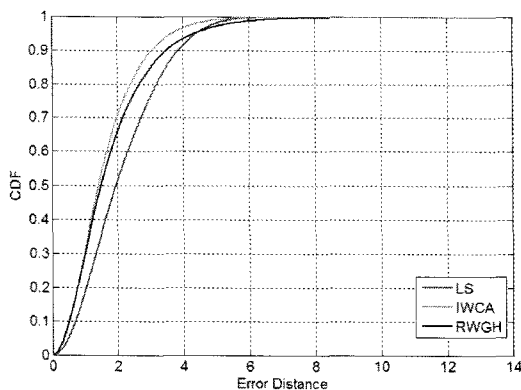


그림 9. 4개의 Anchor node를 사용하였을 경우 CDF( $\sigma_{dB}=2.5$ )

RWGH는 1개의 추정거리가 큰 오차를 갖고 있으면 최소제곱법에 비해 확실한 성능 개선을 보이지만 큰 오차를 갖고 있는 추정 거리가 2개 이상이면 좋지 않은 성능을 보이게 된다. 확률적으로 2개 이상의 추정 거리가 큰 오차를 갖고 있을 확률은 적지만, 이러한 경우가 나타나게 되면 RWGH의 경우 최소제곱법보다 큰 추정 오차를 갖게 된다. 하지만 IWCA의 경우 모든 거리 값에서 최소제곱법보다 좋은 성능을 갖고 있다는 것을 위의 그림 9로 확인 할 수 있다. 이는 세 가지 방식의 표준편차를 구해보면 쉽게 확인할 수 있다.

표 3. 웨도잉의 표준편차에 따른 평균 오차거리(m)

	1.5dB	2B	2.5dB	3dB	3.5dB
최소제곱법	1.3566	1.7633	2.1433	2.4933	2.8166
RWGH	1.0764	1.4445	1.8135	2.1700	2.5061
IWCA	1.0258	1.3339	1.6265	1.9250	2.1912

### 4.3 N값에 따른 IWCA성능 분석

본 절에서는 주어진 방법들의 N값에 따른 성능을 분석한다. Anchor node의 개수가 많아짐에 따른 성능 개선을 각 방법에 따라 분석한다. 그림 10은 Anchor node의 개수를 4개에서 6개까지 증가시킴에 따른 성능의 변화를 보여준다. 그림 10과 표 4의 결과는 웨도잉의 표준편차가 2.5dB인 경우 N값을 변화하며 결과를 보여준다. 그림 10를 통해 RWGH의 경우 Anchor node의 개수가 많아질수록 성능 향상의 정도가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 node의 개수가 많아짐에 따라 RWGH를 위한 최소제곱법을 사용할 때 큰 오차를 갖고 있는 node의 영향이 줄어들기 때문이다.

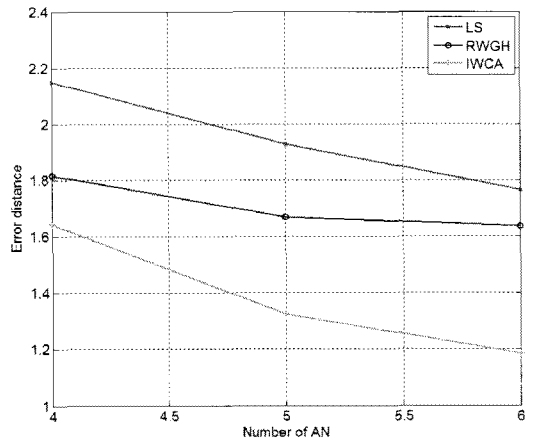


그림 10. Anchor node의 개수에 따른 오차거리의 성능분석



표 4. Anchor node의 개수에 따른 오차거리의 성능분석(m)

	N=4	N=5	N=6
최소제곱법	2.1479	1.9293	1.7655
RWGH	1.8160	1.6678	1.6365
IWCA	1.6414	1.3242	1.1842

그만큼 RWGH에 사용되는 가중치 값의 효용성이 떨어지게 된다. 반면 IWCA방식은 기본적으로 위치 추정을 삼변측량을 통해서, 가중치 값을 추정된 위치와 상관없이 구하기 때문에 일정수준의 성능향상을 보여 준다. 제안된 알고리즘을 사용할 경우 Anchor node를 4개만 사용해도 최소제곱법과 RWGH방법을 이용하여 Anchor node 6개를 사용하는 것과 비슷한 성능을 얻을 수 있다.

4.4 NIC 후 처리 방식과 IWCA의 결합 분석

본 논문에서 제시한 IWCA방식은 많은 추정거리를 이용하여 여러 번의 삼변측량을 하고, 삼변측량을 통해 구해진 위치 값에 가중치를 부여하여 최종 위치를 구하는 방식이다. 이는 여러 번의 삼변측량을 수행할 때, 본 논문에서 제시한 NIC 후 처리 방식을 사용할 수 있다는 것을 의미한다. 본 절에서는 본 논문에서 제시한 2가지 방법을 결합하였을 경우 성능향상을 시뮬레이션을 통해 확인한다. 그림 11과 표 5를 통해 최

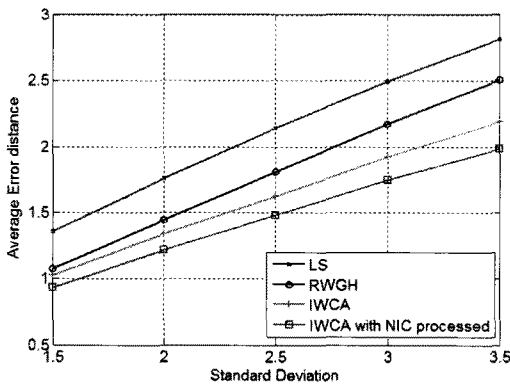


그림 11. NIC 후 처리 방식과 IWCA의 결합 성능

표 5. NIC 후 처리 방식과 IWCA의 결합성능(m)

	1.5dB	2B	2.5dB	3dB	3.5dB
최소제곱법	1.3566	1.7633	2.1433	2.4933	2.8166
RWGH	1.0764	1.4445	1.8135	2.1700	2.5061
IWCA	1.0258	1.3339	1.6265	1.9250	2.1912
IWCA + 후처리	0.9314	1.2155	1.4834	1.7487	1.9857

소제곱법과 비교하여 큰 수준의 성능향상이 이루어진 것을 확인할 수 있다. 이는 삼변측량의 성능 향상이 제안된 NIC 후 처리 방법을 통해 이루어지기 때문이다. NIC 후 처리를 통한 삼변측량과 정확한 가중치의 계산이 큰 성능향상의 이유이다.

4.5 IWCA와 RWGH의 연산량 비교

RWGH방식은 가능한 모든 경우의 부분집합에 대해 최소제곱법을 적용하는 방식이므로, 최소제곱법을 연산하는 횟수는 아래와 같이 계산된다.

$$C_{RWGH} = \sum_{j=3}^{N_R} \binom{N_R}{j} = \sum_{j=3}^{N_R} \frac{N_R!}{j!(N_R-j)!} \quad (13)$$

하지만 IWCA의 경우 알고리즘을 잘 생각해보면 부분집합에 대한 원소의 개수가 3개일 경우만 최소제곱법을 수행하므로 최소제곱법을 수행하는 횟수는 아래와 같이 계산된다.

$$C_{IWCA} = \binom{N_R}{3} = \frac{N_R!}{3!(N_R-3)!} \quad (14)$$

위의 두 식에서 비교할 수 있듯이 IWCA방식은 RWGH방식에 비해서 연산량에서 많은 이득이 있게 된다. 이를 그래프로 비교하면 그림 12와 같다. RWGH의 경우 Anchor node의 개수가 증가함에 따라 IWCA방식에 비해 연산량이 기하급수적으로 증가한다는 것을 알 수 있다.

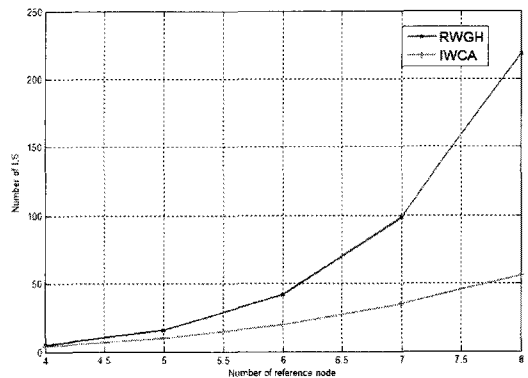


그림 12. RWGH와 IWCA방식의 연산량 비교

V. 결 론

본 논문에서는 무선 위치 추정의 방법에 있어서

Range based approach 방식인 삼변 측량과 최소제곱법의 성능을 개선하는 2가지 방법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 성능을 확인한다. 첫 번째는 삼변측량의 성능을 개선하는 방법이다. 상대적으로 큰 추정오차를 유발하는 None Intersection Case를 정의하고 이를 사면체의 부피를 위한 헤론의 공식을 통해 분류한다. 분류 과정에서 얻어진 사면체 부피의 절대값과 추정오차가 양의 상관관계에 있다는 점을 이용하여 추정된 값들 중 최댓값과 최솟값을 후 처리 하여 전체적인 삼변측량의 성능을 개선한다. 두 번째는  $N(>3)$ 개의 Anchor node를 사용하는 경우에 대한 알고리즘이다.  $N$ 개의 Anchor node를 사용할 경우 최소제곱법등의 방법으로 Blind node의 위치를 추정한다. 최소제곱법의 방법은 몇 개의 안 좋은 추정값이 포함되어 있을 경우에 전체적인 성능이 크게 안 좋아지는 단점이 있다. 본 논문에서는  $N$ 개의 추정된 거리 값을 원소가 3개인 부분집합으로 나누어 최종 위치를 추정하는 방법을 제안한다. 각 부분집합을 이용하여 삼변측량을 통해 위치를 추정한다. 각 부분집합에서 나온 삼변측량의 위치 값에 추정된 거리 값을 이용한 가중치를 주어 최종 위치를 추정한다. 위와 같이 제안된 방법을 이용하여 위치를 추정하면 몇 개의 안 좋은 거리 추정값이 포함된 경우, 이 값들의 영향을 가중치를 통해 줄여주게 되어 전체적인 성능이 향상된다. 첫 번째로 제안된 방법은 삼변측량의 성능을 개선하는 방법이고, 두 번째로 제안한 방법은 여러 개의 측정값을 삼변측량을 할 수 있도록 나누어 최종 위치를 추정하는 방법이다. 첫 번째 방법과 두 번째 방법은 함께 사용될 수 있는 방법으로 두 가지 방법을 함께 사용하였을 경우 IWCA 방식만을 사용했을 때 보다 큰 성능향상이 있다.

### 참 고 문 헌

[1] He T, Huang CD, Blum BM, Stankovic JA, Abdelzaher T. "Range Free Localization schemes in large scale sensor networks." In *Proc. Of the 9th Annual Int'l Conf. On Mobile Computing and Networking*, San Diego, ACM Press, 2003, pp.81-95

[2] Bahl, P. and Padmanabhan, V.N, "RADAR : An in-building RF-based user location and tracking system", *IEEE INFOCOM*. Vol.2, 26-30 pp.775-784, March 2000.

[3] Yao, R. Chen, Z and Guo, Z. "An efficient multipath channel model for UWB home

networking," *IEEE Radio and Wireless Conference*, 19-22 pp.511-516, Sept. 2004.

[4] P. Kinney, "ZigBee Technology : Wireless Control that Simply Works," *Communications Design Conference*, 2003.

[5] A. Harter, A. Hopper, P. Steggles, A. Ward and P. Webster, "The anatomy of a context-aware application," in *Proc. Of the 5th Annual ACM/IEEE Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*, Seattle 1999, pp.59-68

[6] P.C. Chen, "A non-line-of-sight error mitigation algorithm in location estimation," *IEEE Wireless Communication and Networking Conference*, Vol.1, pp.316-320, Sep. 1999

[7] "ZigBee Alliance," <http://www.zigbee.org>, Online Link.

[8] T. Haenselmann, "An FEL'ed Textbook on Sensor Networks," chapter 3,4, University of Mannheim, Mannheim, Germany, 2007

[9] Fugen Su, Weizheng Ren. "Localization Algorithm based on difference estimation for wireless sensor networks" *International Conference on Communication Software and Networks*, 2009

[10] Xinrong Li, "An Iterative NLOS Mitigation Algorithm for Location Estimation in Sensor Networks,"

[11] L.M. Blumenthal, "Theory and Application of Distance Geometry," Oxford, 1959

[12] P. Kinney, "ZigBee Technology : Wireless Control that simply works," *Communication Design Conference*, 2003

[13] Shahin Farahani, ZigBee Wireless Networks and Transceivers, Elsevier Ltd. 2008

[14] Wang, W.D and Zhu, Q.X., "RSS-based Monte Carlo Localisation for mobile sensor networks," *IET communications*, Vol.2, Issue5, pp.673-681, May 2008

[15] Choi, J.W, Kang, J.S, Kim, Y.H and Kim, S.C, "Modeling of Localization Error in Wireless Sensor Network," *Ieice Transactions on communications*, Vol.E92-B, No.2, pp628-631, Feb 2009

박 주 현 (Joo-hyun Park)

준회원



2009년 2월 연세대학교 전기  
전자공학부 학사  
2011년 2월 서울대학교 전기  
컴퓨터공학부 석사  
<관심분야> Localization,  
MIMO, Relay

김 성 철 (Seong-cheol Kim)

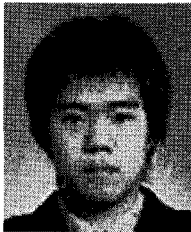
중신회원



1984년 2월 서울대학교 전기  
공학과 학사  
1987년 2월 서울대학교 전기  
공학부 석사  
1995년 2월 미국 폴리테크닉  
대학교 박사  
1995년~1999년 AT&T Bell  
Lab. Member of Technical Staff  
1999년~2003년 : 서울대학교 전기, 컴퓨터공학부  
조교수  
2003년~2008년 서울대학교 전기, 컴퓨터공학부 부  
교수  
2009년~현재 서울대학교 전기, 컴퓨터공학부 정교수  
<관심분야> Wireless Communication System,  
Channel modeling, Communication Algorithm,  
MIMO, Relay, Localization

이 정 규 (Jung-kyu Lee)

정회원



2008년 2월 고려대학교 전파  
통신 공학과 학사  
2010년 2월 서울대학교 전기  
컴퓨터공학부 석사  
2010년~현재 서울대학교 전기,  
컴퓨터공학부 박사과정  
<관심분야> Localization, WSN,  
Communication System