

무선 센서네트워크 환경에서 VRN을 이용한 협력 위치추정 알고리즘의 성능 분석

Performance Analysis of the Cooperative Localization Algorithm with Virtual Reference Nodes in Wireless Sensor Networks

정승희*, 오창현*

Seung-Heui Jeong* and Chang-Heon Oh*

요 약

본 논문에서는 무선센서네트워크에서 미지의 노드 위치를 추정하기 위하여 VRN을 이용한 수신신호 세기 기반의 협력 위치추정 알고리즘을 제안하였다. 제안한 위치추정 시스템은 모든 노드들을 모니터링하고 중첩 영역의 반복적 이용과 협력적 위치추정을 통해 BN의 좌표를 추정하였다. 실험결과 협력위치 추정시 반복횟수가 증가함에 따라 BN의 존재가능 영역이 줄어들음을 확인하였으며, RN의 수가 적을수록 최소 4회 이상의 반복적인 위치추정 횟수가 확보되어야만 BN의 존재가능 영역이 현저히 협소해짐을 보였다. 또한 위치추정 오차거리인 RN의 수가 4개인 경우에도 기존의 위치추정 알고리즘에 비해 약 71.6%의 성능이 향상되었다. 따라서 본 논문에서 제안한 VRN을 활용한 위치추정 알고리즘이 기존의 RSS기반의 위치추정 알고리즘에 비해 우수한 위치추정 성능이 나타남을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we proposed a RSS based cooperative localization algorithm using VRN for wireless sensor networks, which can estimate the BN position. The proposed localization system monitoring all nodes estimates a position of BN, and calculates an intersection area with cooperative localization. From the results, we confirm that BN intersection area is reduced as the number of RN is increased. In addition, the fewer RN exists, the more iteration needs at least 4 times. Moreover, the propose algorithm using 4 RNs is improved 71.6% estimation performance than conventional method. Therefore, the cooperative localization algorithm with VRN provides higher localization accuracy than RSS based conventional method.

Key words : cooperative localization, virtual reference node

I. 서 론

최근 들어 무선 센서네트워크에서는 다양한 혁신적인 응용을 위한 새로운 신호처리와 무선통신 방식

이 연구되고 있다[1]-[3]. 일반적으로 센서들은 event-driven 방식이며, 무선 센서네트워크에서 이들 센서는 주로 응급 정보의 감지를 목적으로 활용되고 있다. 그러나 센서가 어떠한 응급 정보를 감지하여

* 한국기술교육대학교 전기전자공학과 (Dept. of Electrical and Electronics Eng., Korea Univ. of Technology and Education)

· 교신저자 (Corresponding Author) : 오창현

· 투고일자 : 2008년 11월 25일

· 심사(수정)일자 : 2008년 11월 26일 (수정일자 : 2008년 12월 18일)

· 게재일자 : 2008년 12월 30일

송신되더라도 정확한 위치 정보가 파악되지 못하면 응용 정보는 무의미한 정보로 남을 것이다[4]. 그러므로 신뢰성 있는 위치 정보의 제공은 무선 센서 네트워크에서 필수적이며, 새로운 에너지 절약형 기술의 설계에 반드시 요구되는 기술이다. 예를 들어 대규모 무선 센서네트워크의 복잡한 라우팅 알고리즘을 위해 위치 정보가 활용될 수 있다면 라우팅 복잡도를 감소시킬 수 있을 것이다[5]. 따라서 센서 노드의 위치를 파악하기 위한 무선 위치추정 기술은 다양하게 연구되어 왔다. 대표적인 위치 추정 기술로 TOA (Time Of Arrival)[6], TDOA (Time Difference Of Arrival)[7], 그리고 AOA (Angle Of Arrival)[8], RSS (Received Signal Strength Indicator) [9]-[11] 기술들이 있다. 열거한 기술들 중에서 RSS 기반 시스템은 비용 대비 정확도 측면에서 효율적이므로 광범위한 분야에서 응용되고 있다. RSS 기반 위치추정 시스템에서 레퍼런스 노드들은 자신의 절대 위치를 알고 있는 반면, 일반 센서노드들은 레퍼런스 노드와의 수신 신호 세기를 측정하여 자신의 위치를 추정하게 된다.

RSS 기반 위치추정 기술은 신호의 감쇠 및 장애물에 의한 빈번한 신호 세기 변화로 인해 전술한 3가지 위치추정 기술 (TOA, TDOA, AOA)에 비해 정밀도가 낮다고 알려져 있다. 이러한 RSS 기반 위치추정 기술의 낮은 정밀도 문제를 해결하기 위한 간편한 방법은 가능한 많은 수의 레퍼런스 노드를 활용하는 것이다. 그러나 그에 따른 비용의 증가를 야기하므로 본 논문에서는 가상의 레퍼런스 노드를 이용한 RSS 기반의 새로운 협력 위치추정 알고리즘을 제안하고 실험을 통해 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 위치추정기술에 대해 설명하고, III장에서는 신호 전파 모델을 기술한다. IV장에서는 제안하는 협력 위치추정 알고리즘을 제안하고 V장에서는 해당 알고리즘의, 성능을 분석한다. 마지막으로 VI장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 위치추정 기술

2-1 센서노드의 특성

RN (reference node)은 고정된 위치를 가지며, 센서 필드 내에서 절대적 좌표를 알고 있는 노드를 의미한다. 자신의 좌표 정보가 포함된 신호를 주변의 RN과 BN (blind node)에게 주기적으로 송신한다. BN은 센서필드 내부 임의의 장소에 위치하며, 자신의 절대적 좌표는 알지 못한다. 또한 자신의 ID 정보가 포함된 비컨 신호를 주변의 이웃 노드들에게 전송함으로써 이웃에 존재하는 RN과 BN들은 비컨 신호를 수신하고 신호의 세기를 측정한다. 측정된 비컨 신호의 세기를 기반으로 송신한 BN의 위치를 추정할 수 있거나 다른 BN의 탐색에 도움을 줄 수 있다. BN의 영역 내부에서 임의의 지점은 VRN (virtual reference node)이 되어 이웃 BN의 영역들과 협력을 통해 BN의 위치추정에 활용된다. 그림 1은 RN과 BN들 그리고 VRN을 나타내고 있다.

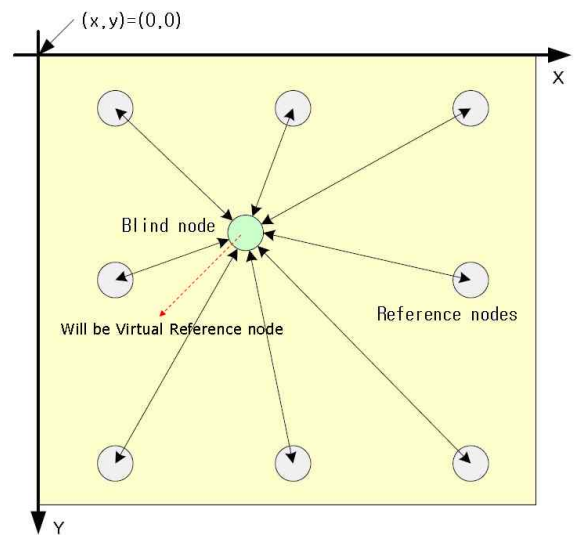


그림 1. VRN을 이용한 협력 위치추정
Fig. 1. Cooperative localization with VRN.

2-2 위치 추정 과정

센서 필드 내에 존재하는 모든 RN과 BN들은 자신의 ID가 기록된 비컨 신호를 주기적으로 센서필드 내에 방사한다. 이때, 임의의 노드로부터 전송된 신호를 받은 BN들은 해당 신호의 수신세기를 측정하고,

ID를 기록하여 자신이 보유한 RSS 테이블에 저장하고 주변의 RN에게 갱신된 RSS 테이블을 전송한다.

RN을 통해 수집된 여러 BN의 RSS 테이블은 전달 과정을 통해 위치를 추정하는 서버로 전송되며, 위치 추정 서버에서는 해당 RSS 테이블을 활용해 BN의 위치를 추정하게 된다.

III. 신호 전파모델

본 장에서는 협력 위치추정 알고리즘에 활용되는 수신 신호의 전파 모델을 설명한다.

3-1 이론적 신호 전파모델

수신된 신호의 세기는 측정된 전력과 송수신 사이의 거리의 함수로 나타낼 수 있다. 이때 수신된 신호의 세기는 일반적으로 거리가 증가함에 따라 감소하게 된다. 식 (1)은 거리에 따른 수신 신호 세기를 나타낸 수식이다.

$$RSS = -(10n \log_{10} d + A + \sigma_{offset}). \quad (1)$$

여기서 n 은 신호의 전파 상수이며, d 는 송수신 노드의 거리이다. 또한 A 는 1m 당 측정된 수신신호의 세기이며, σ_{offset} 은 발생하는 측정 오차이다. 따라서 수신신호의 세기를 나타내는 식 (1)을 거리 d 에 관한 식으로 변환하면 식 (2)와 같다[12].

$$d = 10^{\frac{-(RSS + A + \sigma_{offset})}{10n}}. \quad (2)$$

3-2 수신 신호 세기 특성

A 는 한 점에서 송신된 신호에 대해 공간적으로 1m 거리에서 각 방향으로 수신된 신호의 세기를 의미한다. A 는 이론적으로 모든 방향에서 동일한 신호 세기를 나타내어야 한다. 그러나 실제 안테나를 무지향성 빔패턴으로 구현할 수 없으므로 평균적인 수신 신호 세기를 사용하게 된다[13].

3-2 신호 전파 상수

n 은 신호의 전파 상수로서 거리가 증가함에 따라 지수적으로 감소하게 되며, 전파환경에 의존적이다. 그림 2는 거리에 따른 이론적 n 의 값을 나타내고 있으며, 실제 전파 환경에 가급적이면 적합한 상수를 적용해야 한다. 본 논문에서는 이론적 수신신호의 전파상수로서 3에서 5의 값을 임의로 선택하여 활용하였다.

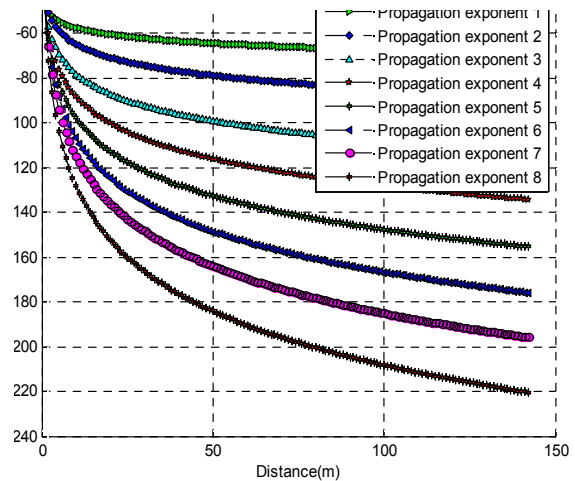


그림 2. 신호 전파 상수에 따른 거리별 RSS
Fig. 2. RSS value according to the signal propagation exponent.

IV. 협력 위치추정 알고리즘

본 장에서는 RSS 테이블과 협력 위치추정을 위한 3단계 알고리즘에 대하여 살펴본다.

4-1 측정된 RSS 테이블

임의의 BN은 자신을 제외한 모든 외부의 신호들을 수신하게 되며, 수신신호의 세기를 측정하여 해당 송신노드의 ID, RSS가 포함된 테이블정보를 이웃의 RN로 전송하며, RN는 수집된 RSS 테이블을 위치추정 서버로 전송하게 된다. 전송된 RSS 테이블을 기반으로 위치추정 서버에서는 협력 위치추정 단계를 거치면서 미지의 BN 위치를 추정하게 된다. 표 1은 위

치추정 서버에 기록된 RSS 테이블의 예이다.

표 1. RSS 테이블 예
Table 1. RSS table set.

Blind Node's ID	Received neighbor node's ID(include reference node's ID)	RSS [dBm]
# 1	2	-49
	3	-56
	4	-80
# 2	1	-49
	5	-77
	14	-38

# 3	1	-56
	7	-45
	23	-52

# 4	1	-80
	6	-78
	9	-60

...
N

4-2 협력 위치추정

무선 센서 네트워크에서 수신 신호 세기를 측정할 수 있는 노드는 RN 뿐만 아니라 수신된 외부 신호의 ID를 인식할 수 있어야 하므로 BN 또한 수신 신호의 세기 측정이 가능하다. 본 장에서는 제안하는 VRN을 이용한 협력 위치추정 알고리즘의 3단계를 설명한다.

단계 1: BN의 초기 영역추정

일반적으로 RN들의 좌표는 알려져 있다. 그러므로 임의의 BN들이 존재할 것으로 예상되는 영역을 추정할 수 있다. 각 RN들로부터 송신된 RSS 테이블을 통해 위치추정 서버는 초기 영역 추정이 가능하지만 대략적인 영역이며, BN의 정확한 좌표는 아니므로 상당한 오차를 포함하고 있다. 그림 3은 단계 1의 과정을 나타내고 있다. 여러 개의 RN을 통해 1차로 추정된 각각의 BN의 영역을 나타내고 있다.

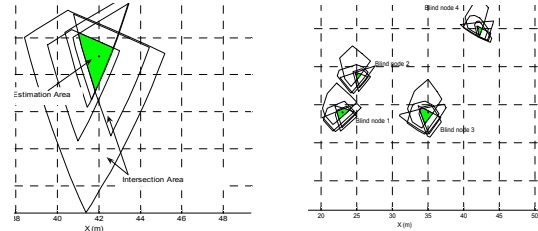


그림 3. RN을 통해 추정된 BN의 1차 추정 영역
Fig. 3. Intersection 1st area of BN with RN.

단계 2: 협력을 통한 BN의 위치 재추정

단계1에서 획득된 영역은 BN이 위치할 것으로 예상되는 영역일 뿐, 실제 BN의 좌표는 아니므로 BN의 정밀한 좌표 확보를 위해 존재 가능한 영역을 더욱 제한할 필요가 있다. 그림 4에서 BN1이 존재 가능한 영역은 BN1_Area와 같다. 또한 BN1으로부터 일정 수신 세기만큼 이격된 BN2와 BN3의 존재 가능 영역은 BN2_Area, BN3_Area로 가정할 수 있다. 그러므로 3개의 영역 중 면적의 크기가 제일 협소한 BN1_Area의 외부 경계선을 시점으로 d_{12} , d_{13} , d_{23} 의 거리를 유지하며 존재하는 노드를 VRN2와 VRN3로 가정하면 BN1_Area 영역을 BN2_Area와 BN3_Area에 중첩할 수 있으며 이를 통해 기존의 BN2_Area와 BN3_Area 보다 더욱 협소해진 새로운 BN2_Area와 BN3_Area를 획득할 수 있다.

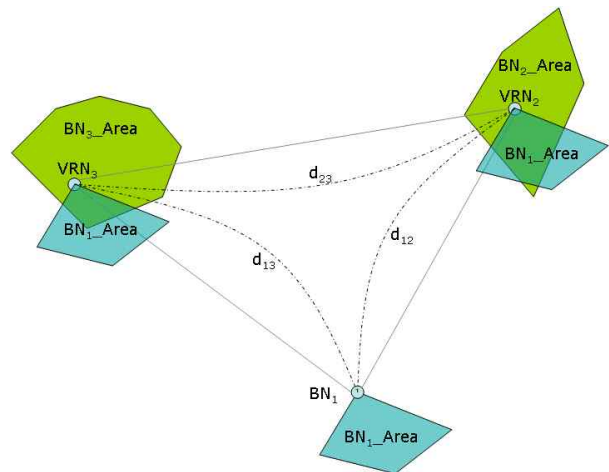


그림 4. VRN을 이용한 BN1_Area의 추정 영역
Fig. 4. Estimation of BN1_Area with VRN.

그림 5는 VRN들을 이용한 영역 재추정을 나타내

고 있다. 따라서 1단계와 2단계를 거치면서 BN의 존재 가능한 영역은 VRN들의 순차적인 협력 과정을 통해 점차 감소하게 된다.

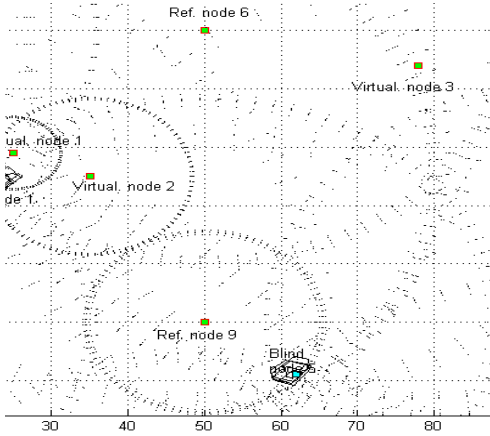


그림 5. VRN과 RN을 이용한 BN의 영역 재추정
Fig. 5. Re-estimated BN area with RN and VRN.

단계 3: BN의 좌표 결정

단계 1, 2를 통해 BN이 존재할 것으로 예상되는 영역을 점진적으로 감소시켰으나 영역 내부의 한 지점이 실제 존재하는 BN의 좌표이므로 단계 3을 통해 해당 BN의 좌표를 추정해야 한다.

본 논문에서는 반복적인 최적화 기법을 통해 BN의 중첩 영역을 결정하고 협소해진 영역의 무게 중심점을 최종 BN의 좌표로 결정한다. 식 (3)의 $I_{i,j}$ 는 해당 BN이 존재할 것으로 예상되는 최소의 영역 크기를 나타내고, C_i, C_j 는 i 번째, j 번째의 노드의 유효 수신 영역을 의미한다.

$$I_{i,j} = C_i \cap C_j \{i, j | 1 \dots n, i \neq j\}. \quad (3)$$

단계 2를 거친 협소화된 영역이 결정되었으면 BN이 존재할 것으로 예상되는 X, Y 좌표 모음은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X_{f,g} = [f(x_{i,j}) - g(x_{i,j})], Y_{f,g} = [f(y_{i,j}) - g(y_{i,j})]. \quad (4)$$

여기서 $X_{f,g}, Y_{f,g}$ 는 획득된 BN_{ij}_Area의 외곽선 X, Y 좌표들이다. 따라서 식 (5)와 같이 X, Y 좌표

를 중첩 영역 $I_{i,j}$ 로 나누면 BN_i_Area의 면적에 대한 무게 중심 좌표를 도출해 낼 수 있다. \bar{x}, \bar{y} 는 BN의 추정된 최종 X, Y 좌표를 의미한다.

$$\bar{x} = \frac{1}{I_{i,j}} \int X_{f,g} dx, \bar{y} = \frac{1}{I_{i,j}} \int Y_{f,g} dy. \quad (5)$$

V. 시뮬레이션 및 검토

본 장에서는 VRN을 이용한 협력 위치추정 알고리즘을 MATLAB(R13)을 이용하여 시뮬레이션하고 그 결과를 분석한다.

5-1 시뮬레이션 환경

본 논문에서는 시뮬레이션 환경 변수로 TI사의 CC2431 chipset[13]을 기준으로 표 2와 같이 설정하였다.

표 2. 시뮬레이션 변수
Table 2. Simulation parameters.

Parameters	Values
Size of sensor field	X=0-100[m], Y=0-100[m],
Number of RN	[4,9,13,25] ref. figure 6
Number of BN	6
RSS at a distance of 1 meter	-45[dBm] to -49[dBm], randomly
Distance for propagation exponent	3 to 5, randomly
Max signal transmit distance	Outdoor=100[m], Indoor=30[m]
Interval distance between RN	Every 25 to 100[m], ref. figure 6

그림 6은 가로, 세로 100m의 영역에서 일정 간격으로 이격된 4, 9, 13, 25개의 RN의 배치(A-D)를 나타내었다. 이때, RN은 BN과 좌표 상에서 겹치지 않으며, RN 및 BN의 최대 신호 전송 거리는 실외에서 100m 이내로 제한하였다.

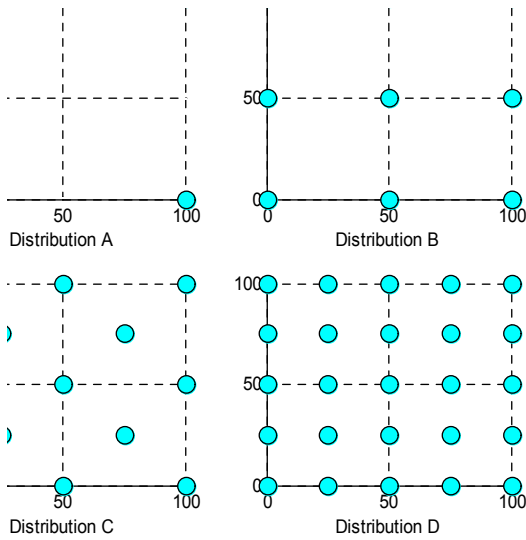


그림 6. RN의 배치 형태 (A-D)
Fig. 6. Distribution types of RN (A to D).

5-2 성능 분석

그림 7은 제안하는 알고리즘과 RSS 기반의 위치 추정 알고리즘을 이용한 위치추정 성능을 비교하여 나타낸 것이다. RN의 수가 4개일 때, 기존 RSS 기반의 위치추정 알고리즘은 오차거리가 1.83m이었으나, 본 논문에서 제안하는 VRN을 이용한 협력 위치추정 알고리즘은 0.52m로 평균적으로 약 71.6%의 성능 향상을 보였다. 또한, RN의 수가 25개일 때, 기존 RSS 기반 위치추정 성능은 0.39m이었으나 제안하는 협력 위치추정의 오차거리는 0.05m로 약 81.2%의 성능 향상을 나타내었다. 이는 제안하는 알고리즘이 적은 수의 RN에서도 효과적인 위치추정이 가능함을 나타내고 있다. 그러므로 본 논문에서 제안하는 VRN을 이용한 협력 위치추정 알고리즘이 기존의 RSS 기반 위치추정 방식에 비해 오차거리 성능이 우수함을 확인할 수 있다.

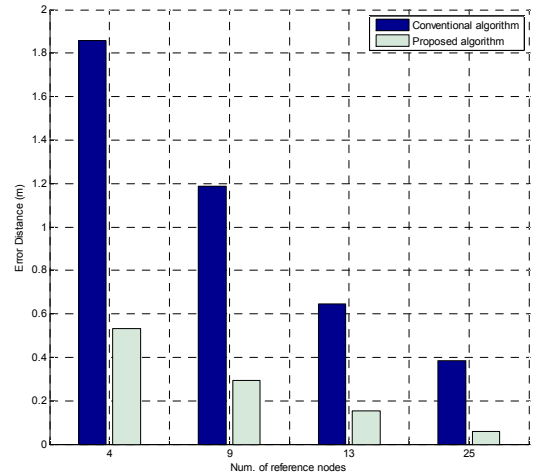
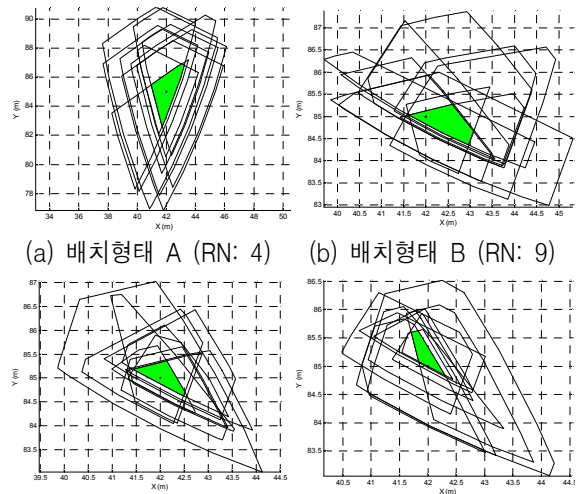


그림 7. 일반적인 RSS 기반 위치추정 방식과 제한한 위치 추정 방식의 오차거리 비교

Fig. 7. Comparison of the error distance between RSS based conventional and proposed algorithm.

그림 8은 배치형태별 위치추정의 반복 횟수에 따른 추정된 중첩 영역의 면적이다. 반복횟수가 10회일 때, 배치형태 (A-D)에 따라 중첩 영역의 면적은 RN의 수가 증가할수록 감소되었다. 그러므로 면적의 크기는 RN의 수와 반비례하고 중첩 영역 내에 BN이 존재할 가능성과도 반비례함을 확인할 수 있다.



(a) 배치형태 A (RN: 4) (b) 배치형태 B (RN: 9)
(c) 배치형태 C (RN: 13) (d) 배치형태 D (RN: 25)
그림 8. 배치 형태에 따라 추정된 중첩 영역 (반복 10회)

Fig. 8. Estimated intersection area according to the distribution type (10 iteration).

그림 9에서 위치추정 반복횟수가 최종 중첩영역의 면적에 미치는 영향을 분석하기 위해 RN의 배치형태

를 변경하면서 실험하였다. 실험 결과, 반복횟수의 증가에 따라 존재가능 영역의 크기가 협소해짐을 확인할 수 있었으며, RN의 수가 적은 형태의 배치일수록 위치추정의 횟수를 최소 4회 이상 반복해야지만 BN의 존재가능 영역이 협소해짐을 확인하였다.

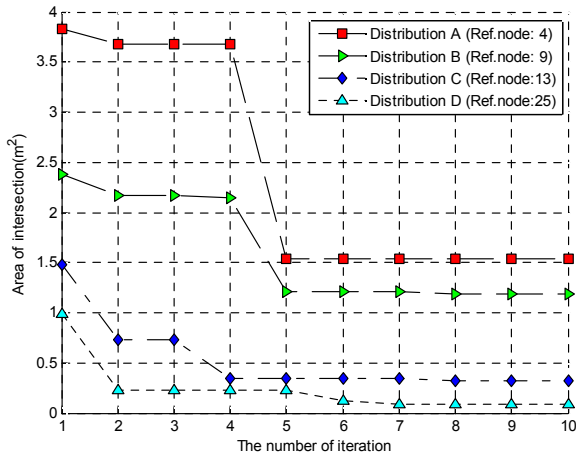


그림 9. RN의 배치 형태별 반복횟수 증가에 따른 중첩영역 크기 비교 (1-10회)

Fig. 9. Comparison of the intersection area according to the distribution type (1-10 iteration).

BN의 위치를 추정하는 횟수가 제안한 협력 위치 추정 알고리즘의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 RN의 수를 변경하면서 위치 추정 횟수를 반복적으로 증가시켰을 때의 위치추정 결과를 그림 10에 나타내었다. 실험 결과, 위치추정의 반복 횟수가 증가할수록 오차거리는 점차 감소됨을 보였으며, RN의 수가 4개 일 때 반복 추정 횟수가 1에서 5회인 경우, 오차거리는 1.38m에서 0.77m로 약 45% 향상되었다. 이는 반복횟수가 증가할수록 위치추정 성능이 향상됨을 의미하며, 적은 수의 RN이 배치되더라도 높은 위치추정 성능이 나타남을 의미한다. 따라서 본 논문에서 제안한 알고리즘을 반복적으로 사용하면 경제적면에서도 유리한 위치추정 성능을 나타남을 확인하였다.

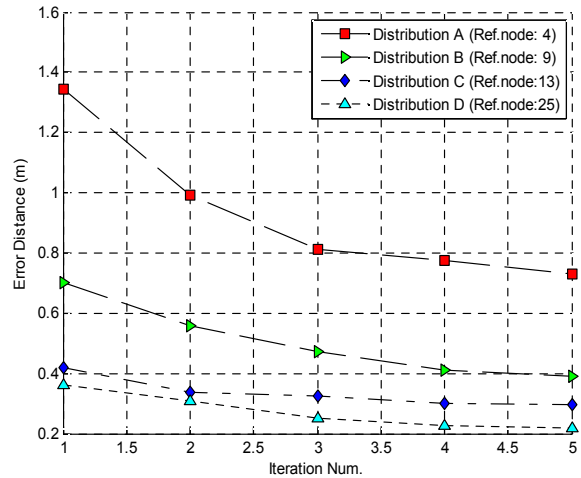


그림 10. RN의 배치 형태별 반복횟수 증가에 따른 오차거리 비교

Fig. 10. Comparison of the error distance according to the distribution type.

VI. 결 론

본 논문에서는 VRN을 이용한 수신신호 세기 기반의 협력 위치추정 알고리즘을 제안하였다. 위치추정 시스템은 모든 노드들을 모니터링하고 중첩 영역의 반복적 이용과 협력적 위치추정을 통해 BN의 좌표를 추정하였다. 실험에서는 위치를 알고 있는 4, 9, 13, 25개의 RN과 위치를 알지 못하는 6개의 BN이 존재하는 환경을 가정하였다. 실험결과 협력 위치 추정시 반복횟수가 증가함에 따라 BN의 존재가능 영역이 줄어들음을 확인하였으며, RN의 수가 적을수록 최소 4회 이상의 반복적인 위치추정 횟수가 확보되어야만 BN의 존재가능 영역이 현저히 협소해짐을 보였다. 또한 VRN을 이용한 협력위치 추정시 오차거리는 RN의 수가 4개인 경우에도 기존의 위치추정 알고리즘에 비해 약 71.6%의 성능이 향상되었다. 따라서 VRN을 활용한 위치추정 알고리즘이 기존의 RSS기반의 위치추정 알고리즘에 비해 우수한 위치추정 성능이 나타남을 확인하였으며, 경제적인 위치추정 알고리즘으로 VRN을 통한 협력적 위치추정 알고리즘이 고려될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] C.-Y. Chong and S. P. Kumar, "Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges," *Proc. IEEE*, vol. 91, no. 8, pp. 1247-1256, Aug. 2003.
- [2] D. Culler, D. Estrin, and M. Srivastava, "Overview of sensor networks," *IEEE Computer*, vol. 37, no. 8, pp. 41-49, Aug. 2004.
- [3] K. Martinez, J. K. Hart, and R. Ong, "Environmental sensor networks," *IEEE Computer*, vol. 37, no. 8, pp. 50-56, Aug. 2004.
- [4] J. M. Rabaey, M. J. Ammer, J. L. da Silva, Jr., D. Patel, and S. Roundy, "PicoRadio supports ad hoc ultra-low power wireless networking," *IEEE Computer*, vol. 33, no. 7, pp. 42-48, Jul. 2002.
- [5] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey," *IEEE Wireless Comm.*, vol. 11, no. 6, pp. 6-28, Dec. 2004.
- [6] L. Girod and D. Estrin, "Robust range estimation using acoustic and multimodal sensing," *Proc IEEE/RSJ Int'l Conf Intelligent Robots and Systems (IROS'01)*, vol. 3, pp. 1312-1320, 2001.
- [7] NB. Priyantha, A. Chakraborty and H. Balakrishnan, "The cricket location-support system," *Proc. of the 6th Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking*, 2000.
- [8] D. Niculescu and B. Nath, "Ad hoc positioning system (APS) using AOA," *Proc 22nd Annual Joint Conf of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'2003)*, vol. 3, 2003.
- [9] K. Lorincz and M. Welsh, "MoteTrack: a robust, decentralized approach to RF-based location tracking," *Proceedings of the International Workshop on Location and Context-Awareness at Pervasive*, 2005.
- [10] D. Niculescu and B. Nath, "DV based positioning in ad hoc networks," *Journal of Telecommunication Systems*, pp. 267-280, 2003.
- [11] P. Bahl and Venkata N. Padmanabhan, "RADAR:

An in-building RF-based user location and tracking system," *Proc. of the IEEE INFOCOM2000*, vol. 2, pp. 775-784, 2000.

- [12] Wenping Chen and Xiaofeng Meng, "A cooperative localization scheme for zigbee-based wireless sensor networks," *ICON '06. 14th IEEE International Conference*, vol. 2, pp. 1-5, Sept. 2006.
- [13] K. Aamodt, *CC2431 Location Engine*, Application Note AN042(Rev.1.0), July 2006.

정 승 희 (鄭昇熙)



2005년 2월: 한국기술교육대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2007년 2월: 한국기술교육대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2007년 3월~현재: 한국기술교육대학교 전기전자공학과 (박사과정)
 관심분야 : Ranging/LBS, Wireless

Sensor N/W

오 창 헌 (吳昌憲)



1988년 2월 : 한국항공대학교 항공통신공학과 (공학사)
 1990년 2월 : 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 (공학석사)
 1996년 2월 : 한국항공대학교 대학원 항공전자공학과 (공학박사)

1990년 2월~1993년 8월: 한진전자(주) 기술연구소 전임연구원
 1993년 10월~1999년 2월: 삼성전자(주) CDMA 개발팀 선임연구원
 1999년 2월~현재: 한국기술교육대학교 정보기술공학부 부교수
 2006년 8월~2007년 7월: 방문교수(University of Wisconsin-Madison)
 관심분야 : 이동통신, 무선통신, Wireless Sensor N/W, CR