

## 무선 센서 네트워크에서 두 노드간 거리 추정 기법

권오흠\*, 김숙연\*\*

### Distance Estimation Method between Two Nodes in Wireless Sensor Networks

Oh-Heum Kwon \*, Sook-Yeon Kim \*\*

#### 요약

무선 센서 네트워크에서 인접성 정보만 가지고 두 홉 이내의 노드간의 거리를 추정하는 기법을 제안한다. 이 기법은 인접성 정보만 가지고 노드들의 위치를 측정하는 기존의 알고리즘들의 성능의 한계를 대폭 극복하게 해줄 뿐만 아니라, 두 홉 떨어진 노드간의 거리를 추정하게 해주는 최초의 방법이기도 하다. 공통 이웃의 개수를 헤아림으로써 두 노드간의 거리를 추정하는데, 이는 두 노드를 중점으로 하는 두 단위디스크의 공통면적에 공통 이웃의 개수가 비례한다는 가정을 기반으로 한다. 시뮬레이션을 통해 성능을 분석한 결과 거리추정 오차율은 10%에서 20%정도이다. 한편 본 방법을 분산 알고리즘으로 활용하기 위해서 필요한 메시지 개수는 겨우 노드 개수의 두 배이다.

#### Abstract

In wireless sensor networks, an estimation method is proposed for distances between nodes within two hops. The method uses only proximity information of nodes without physical distance measurements. It drastically improves the performance of localization algorithms based on proximity information. In addition, it is the first method that estimates distances between nodes exactly in two hops. The distances are estimated from the number of common neighbors under an assumption that the number of common neighbors is proportional to the intersection of two unit disks centered at the two nodes. Simulation analysis shows that the estimation error is roughly from 10 to 20 percent of real distances. Meanwhile, the number of messages required by a distributed algorithm realizing this method is only two times the number of nodes.

▶ Keyword : wireless sensor networks, distance estimation, proximity, localization

• 제1저자 : 권오흠

• 접수일 : 2005.09.20, 심사완료일 : 2005.11.02

\*부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 부교수, \*\*한경대학교 컴퓨터공학과 조교수

## 1. 서론

무선 센서 네트워크[1][2]에서 최근 몇 년간 활발히 연구되고 있는 노드 위치 측정 문제는 크게 두 가지 부류로 나뉘어 질 수 있다. 첫 번째는 노드들 간의 인접성 (proximity) 정보만 알려진 상태에서 위치를 측정하는 것이다 [3][4][5]. 각 노드는 무선 신호와 같은 통신 채널을 이용하여 근처에 있는 노드들을 파악할 수 있으나 그들까지의 거리는 알 수 없다. 위치 측정 문제의 두 번째 부류는 인접성 정보와 함께 인접한 노드간의 거리도 알려지는 것이다 [6].

인접성만 알려지는 위치 측정 문제에서는 무선 센서 네트워크가 그래프  $G=(V, E)$ 로 모델링된다. 노드 집합  $V$ 는 센서 노드들을 나타내는데, 앵커(anchor)를 소수 개 포함한다. 여기서 앵커는 위치가 알려진 노드로서 위치를 모르는 노드들의 위치를 측정하는데 있어 기준이 된다. 에지 집합  $E$ 는 인접성 정보를 나타내는데, 두 노드  $u$ 와  $v$  간에 통신이 가능할 때만 에지  $(u, v) \in E$ 가 존재한다. 인접한 노드 쌍의 거리까지도 알려지는 부류의 위치 측정 문제에서는 각 에지  $(u, v)$ 에 두 노드  $u$ 와  $v$ 간의 거리가 덧붙여진다.

인접성 정보만 가지고 위치를 측정하는 기법들에 있어서 인접한 노드 쌍의 거리도 알려지면 성능이 뚜렷하게 향상된다 [7][8]. 예를 들어, 중앙 집중적 알고리즘인 MDS-MAP은 인접성 정보만 가지고 위치측정을 할 경우 평균 분지수 (degree)가 12정도일 때 오차율이 50%내외이다. 그런데 인접한 노드 쌍의 거리 정보를 추가하여 계산하면, 오차율이 25%내외로 대폭 감소한다[9]. 한편 인접성 정보만 가지고 위치를 측정하는 많은 분산 알고리즘들이 공통적으로 사용하는 방법은 각 노드에서 3개 이상의 앵커에 대한 홉수 (hop count)를 알아낸 후 앵커까지의 거리를 추정하여 multilateration을 적용하는 것이다 [10][11]. 그런데 이렇게 인접성 정보만을 이용하여 측정한 위치에 정밀화 (refinement) 알고리즘을 추가로 적용하면 오차율을 훨씬 줄일 수 있음이 알려져 있다 [8]. 정밀화 알고리즘은 인접한 노드 쌍의 거리를 최소 제곱 삼각 기법 (least-squares triangulation)에 적용하여 각 노드의 위치에 대한 정밀도를 차례로 높여 나가는 방법이다.

위치 측정 기법들의 성능을 향상시키기 위해 인접한 노드 쌍의 거리를 알려면 물리적인 측정 방법을 도입해야 하는 것으로 알려져 있다. 대표적인 물리적 측정 방법은 RSSI (Received Signal Strength Indicator), ToA (Time of Arrival), TDOA(Time Difference of Arrival) 등이다. RSSI 방법은 거리가 멀어짐에 따라 전파의 강도가 감소하는 성질을 이용하여 이웃 노드에서 보내온 신호의 강도로부터 거리를 구한다[12][13]. 그런데 RSSI 방법으로 추정된 거리는 정확하지 않거나 신뢰도가 높지 못한 경향이 있다. 왜냐하면 신호가 전파되는 환경이 일반적으로 균일하지 않아서 신호가 불규칙하게 전파되기 때문이다[14]. 한편 ToA와 TDOA(Time Difference of Arrival) 방법은 각각 전파 지연 시간과 전파 도달 시간 차이로부터 이웃 노드까지의 거리를 구하는데, 정확성 면에서는 RSSI 보다 일반적으로 좀더 우수하다. 그러나 동기를 맞추기 위한 타이밍 유닛을 비롯하여 전력 소모가 많은 고가의 하드웨어를 필요로 한다[5]. 특히 센서 노드가 초음파 같이 라디오 보다 전파 속도가 빠른 신호를 다룰 경우엔 이를 위한 하드웨어도 추가되어야 한다[15].

이러한 물리적인 측정 방법들을 도입하여 인접한 노드간 거리를 알게 되면 인접성만으로 노드들의 위치를 측정하는 것보다 훨씬 정밀하게 측정할 수 있지만 추가적인 비용이 필요하다. 더구나 이러한 물리적인 방법들은 두 홉 이상 떨어진 노드간의 거리는 측정할 수 없다. 만약 인접성 정보만 가지고도 가까운 노드들 간의 거리를 추정할 수 있다고 해보자. 그러면 인접성만으로 노드들의 위치를 측정하는 기존의 알고리즘들이 획기적으로 성능을 향상시킬 수 있게 된다.

본 논문에서는 인접성 정보만 가지고 두 홉 이내의 노드 쌍의 거리를 추정하는 방법을 제안한다. 두 노드가 가까울수록 공통 이웃의 개수가 늘어난다는 성질을 이용하여 두 노드간의 거리를 물리적 측정 없이 추정한다. 시뮬레이션을 통해 성능을 분석한 결과 거리추정 오차율은 10%에서 20%정도이다. 또한 본 방법을 분산 알고리즘으로 활용하기 위해서 필요한 메시지 개수는 겨우 노드 개수의 두 배이다.

2장에서는 본 방법의 기본 개념을 제시하고 3장에서는 쉽게 구현할 수 있는 반복적인 알고리즘을 제시하고 4장에서는 본 방법을 분산 알고리즘으로써 활용하기 위해 필요한 메시지 방송 방법과 메시지 개수를 제시한다. 5장에서는 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하고 6장에서 결론을 맺는다.

## II. 기본 개념

본 방법은 공통 이웃의 개수를 헤아림으로써 두 노드간의 거리를 추정하는 것이다. 일반적으로 두 노드가 가까울수록 공통 이웃의 개수는 늘어난다. 그러므로 두 노드를 중심으로 하는 두 단위디스크의 공통면적에 공통 이웃의 개수가 비례한다는 가정 하에 두 노드간의 거리를 추정할 수 있다.

그래프  $G=(V,E)$ 를 단위 디스크 그래프 (unit disk graph)[16][17]라고 하자. 노드  $v_i$ 와 노드  $v_j$ 간의 실제 거리를  $d_{ij}$ 라 하자. 거리  $d_{ij}$ 를 포함하여 이 절에서 사용하는 변수들이 <표 1>에 정리되어 있다. 만약 노드  $v_i$ 와 노드  $v_j$ 가 한 홑 떨어져 있으면 서로 이웃이고 거리  $d_{ij}$ 는 1이하이다. 노드  $v_i$ 의 이웃의 집합을  $N_i$ 라 하자. 서로 이웃인 두 노드  $v_i$ 와 노드  $v_j$ 는 반드시 공통의 이웃을 갖는다고 가정하자 ( $N_i \cap N_j \neq \emptyset$ ). 만약 노드  $v_i$ 와 노드  $v_j$ 가 두 홑 떨어져 있으면 서로 먼 이웃이라 하자. 만약 노드  $v_i$ 와 노드  $v_j$ 가 서로 먼 이웃이면 반드시 공통의 이웃을 갖고 ( $N_i \cap N_j \neq \emptyset$ ), 거리  $d_{ij}$ 는 2이하이다.

표 1. 변수들의 정의  
Table 1. Definition of variables

변수	정의
$d_{ij}$	노드 $v_i$ 와 노드 $v_j$ 간의 실제 거리
$N_i$	노드 $v_i$ 의 이웃의 집합
$D_i$	노드 $v_i$ 를 중심으로 하는 단위 디스크
$R_{ij}^a$	단위 디스크의 면적 $\pi$ 에 대한 공통 면적 $ D_i \cap D_j $ 의 비율
$R_{ij}^n$	이웃의 개수 $ N_i $ 에 대한 공통 이웃의 개수 $ N_i \cap N_j $ 의 비율

노드  $v_i$ 를 중심으로 하고 반경이 1인 단위 디스크를  $D_i$ 라 하자. 그러면 공통 면적  $|D_i \cap D_j|$ 는 거리  $d_{ij}$ 의 함수이다. 이 함수를 다음과 같이  $f$ 라 하자.

$$|D_i \cap D_j| = f(d_{ij}) \dots\dots\dots (2.1)$$

단위 디스크의 면적  $\pi$ 에 대한 공통 면적  $|D_i \cap D_j|$ 의 면적 비율을  $R_{ij}^a$ 이라 하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$R_{ij}^a = \frac{|D_i \cap D_j|}{\pi} = \frac{f(d_{ij})}{\pi} \dots\dots\dots (2.2)$$

위 식으로부터 면적 비율  $R_{ij}^a$ 이 두 노드 간의 거리에 대한 함수임을 알 수 있다. 그러므로 거리가  $d$ 일 때의 면적 비율을  $R^a(d)$ 로 나타낼 수 있다. 즉  $R_{ij}^a = R^a(d_{ij})$ 이다. 한편 위 식 (2.2)로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$d_{ij} = f^{-1}(\pi R_{ij}^a) \dots\dots\dots (2.3)$$

이웃의 개수  $|N_i|$ 에 대한 공통 이웃의 개수  $|N_i \cap N_j|$ 의 비율을 개수 비율  $R_{ij}^n$ 이라 하자.

$$R_{ij}^n = \frac{|N_i \cap N_j|}{|N_i|} \dots\dots\dots (2.4)$$

만약 단위 면적당 노드 수인 조밀도가 무한히 높아지면 면적 비율  $R_{ij}^a$ 과 개수 비율  $R_{ij}^n$ 은 같아진다. 식 (2.3)은 면적 비율  $R_{ij}^a$ 와 개수 비율  $R_{ij}^n$ 을 같다고 가정할 때 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$d_{ij} = f^{-1}(\pi R_{ij}^n) \dots\dots\dots (2.5)$$

이제까지 개수 비율  $R_{ij}^n$ 로부터 거리  $d_{ij}$ 를 구할 수 있음을 설명하였다.

이제 식 (2.5)의 함수  $f$ 를 기술한다. 식 (2.1)에서 알 수 있듯이 함수  $f$ 는 거리  $d_{ij}$ 와 면적  $|D_i \cap D_j|$ 의 관계이다. 이들의 관계를 (그림 1)을 통해 살펴보자. (그림 1)에는 교집합을 가지는 두 디스크  $D_i$ 와  $D_j$ 가 나타나 있다. 디스크  $D_i$ 와  $D_j$ 의 외곽선이 만나는 두 점을  $a_u$ 와  $a_d$ 라 하고 각  $\angle(a_u, v_i, a_d)$ 의 절반을  $\alpha$ 라 하자. 그러면  $d_{ij}$ 와 각  $\alpha$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{d_{ij}}{2} = \cos \alpha \dots\dots\dots (2.6)$$

또한 부채꼴  $\angle(a_u, v_i, a_d)$ 의 면적은  $\pi \cdot \frac{2\alpha}{2\pi}$  이므로 부채꼴에서 삼각형  $\triangle(a_u, v_i, a_d)$ 을 뺀 반달 모양  $A$ 의 면적은  $\alpha - \cos \alpha \cdot \sin \alpha$ 이다. 반달 모양  $A$ 의 면적의 두 배가 공통 면적  $|D_i \cap D_j|$ 이 된다.

$$|D_i \cap D_j| = 2\alpha - 2\cos \alpha \cdot \sin \alpha \dots\dots\dots (2.7)$$

식 (2.6)과 식 (2.7)로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$|D_i \cap D_j| = 2 \arccos \frac{d_{ij}}{2} - d_{ij} \sqrt{1 - \frac{d_{ij}^2}{4}} \dots\dots\dots (2.8)$$

식 (2.8)로부터 식 (2.1)의 함수  $f$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f(d) = 2 \arccos \frac{d}{2} - d \sqrt{1 - \frac{d^2}{4}} \dots\dots\dots (2.9)$$

식 (2.9)와 식 (2.5)를 이용하여 개수 비율  $R_{ij}^n$ 로부터 거리  $d_{ij}$ 를 구할 수 있다.

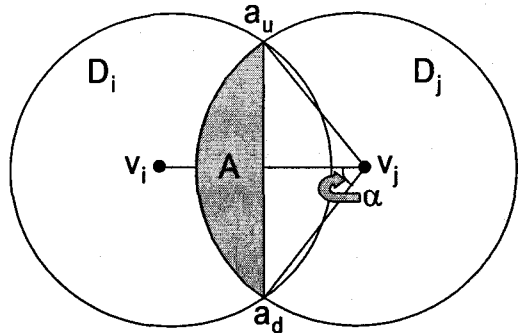


그림 1. 공통 면적  $|D_i \cap D_j|$ 과 거리  $d_{ij}$ 간의 관계  
 Fig. 1. Relationship between intersection  $|D_i \cap D_j|$  and distance  $d_{ij}$

만약 노드  $v_i$ 가 네트워크의 외곽에 있고 노드  $v_j$ 가 안쪽에 위치한다고 해보자. 그러면 식 (2.5)를 이용하여 노드  $v_i$ 에서 노드  $v_j$ 까지의 거리를 측정할 경우 실제보다 매우 짧게 측정될 수도 있다. 그러므로 개수 비율  $R_{ij}^n$ 를 다음과 같이 바꾸어 정함으로써 거리측정 오차율을 줄인다.

$$R_{ij}^n = \frac{|N_i \cap N_j|}{\max\{|N_i|, |N_j|\}} \dots\dots\dots (2.10)$$

### III. 노드 간의 거리를 구하는 알고리즘

이 절에서는 거리  $d_{ij}$ 를 알아내는 알고리즘을 제시한다. 거리  $d_{ij}$ 를 식 (2.5)의 함수  $f^{-1}$ 로부터 직접 계산해 내는 것은 어렵지만 반복적인 알고리즘으로 거리  $d_{ij}$ 의 근사치를 쉽게 알아낼 수 있다. 이 반복적인 알고리즘은 거리  $d_{ij}$ 에 대하여 이진 탐색 (binary search) 을 수행하여 면적 비율  $R^a$ 과 개수 비율  $R_{ij}^n$ 의 차이를 줄여 나가는 것이다.

예를 들어 노드  $v_i$ 와 노드  $v_j$ 가 서로 이웃이라고 해보자. 그러면 거리  $d_{ij}$ 는 범위  $[0, 1]$ 에 존재한다. 그러면

첫 번째 추정치  $\bar{d}_{ij}^1$ 는 0.5라고 한다. 만약 면적 비율  $R^a(\bar{d}_{ij}^1)$ 가 개수 비율  $R_{ij}^n$  보다 작으면 실제 거리  $d_{ij}$ 는 0.5 보다 작음을 알 수 있다. 따라서 두 번째 추정치  $\bar{d}_{ij}^2$ 을 0.25라고 한다. 만약 면적 비율  $R^a(\bar{d}_{ij}^2)$ 가 개수 비율  $R_{ij}^n$ 보다 크면 실제 거리  $d_{ij}$ 는 0.5 보다 큼을 알 수 있다. 따라서 두 번째 추정치  $\bar{d}_{ij}^2$ 을 0.75라고 한다. 이런 식으로 개수 비율과 면적 비율의 차이가 최소화 될 때까지 반복한다. 만약 노드  $v_i$ 와 노드  $v_j$ 가 서로 먼 이웃이면 거리  $d_{ij}$ 가 존재할 수 있는 초기 범위를 [1, 2]로 하면 된다. 실험을 해보면 다섯 번 이내의 반복으로 충분히 정확한 값을 계산해 낼 수 있다. 노드  $v_i$ 에서 두 홉 이내의 노드  $v_j$ 까지 거리를 추정하는 반복적인 알고리즘은 (그림 2)와 같다.

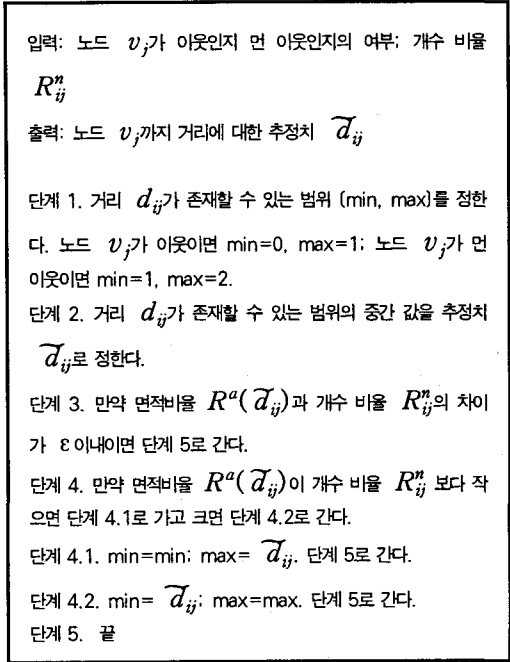


그림 2. 노드  $v_i$ 에서 거리를 추정하는 알고리즘

Fig. 2. Algorithm for distance estimation at node  $v_i$

#### IV. 메시지 방송 방법

본 방법을 분산 알고리즘으로 활용하기 위해서는 각 노드  $v_i$ 가 두 홉 이내의 노드  $v_j$ 에 대한 개수 비율  $R_{ij}^n$ 을 알아야 한다. 개수 비율  $R_{ij}^n$ 을 알기 위해서는 식 (2.4)의 경우 이웃의 개수와 공통 이웃의 개수를 알아야 한다. 이 절에서는 네트워크 전체적으로 총 2 |V|개의 메시지를 방송함으로써 각 노드  $v_i$ 가 개수 비율  $R_{ij}^n$ 을 계산할 수 있음을 보인다.

각 노드는 자신의 존재를 알리는 메시지를 이웃들에게 방송한다. 이러한 메시지는 자신의 노드 식별자를 포함해야 한다. 만약 어떤 노드  $v_j$ 가 이웃  $v_i$ 로부터 메시지  $m$ 을 받으면 노드  $v_i$ 는 받은 메시지에 자신의 노드 식별자를 추가하여 이웃들에게 다시 방송한다. 이 때 노드  $v_i$ 는 메시지  $m$ 을 전달(relay)했다라고 한다. (그림 3)과 같이 메시지  $m$ 에 대해서 노드  $v_j$ 를 원천자(originator), 노드  $v_i$ 를 전달자(relayer)라 하자. 각 메시지는 단 한번만 전달될 수 있다.

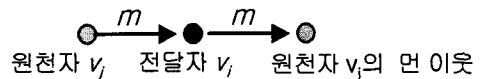


그림 3. 메시지 방송 방법

Fig. 3. Message broadcast method

모든 메시지가 원천자의 먼 이웃까지 도착하면, 각 노드는 자신의 이웃과 먼 이웃을 알게 된다. 만약 노드  $v_i$ 가

노드  $v_j$ 로부터 직접 메시지를 받았으면 노드  $v_j$ 는 노드  $v_i$ 의 이웃이다. 만약 노드  $v_i$ 가 노드  $v_k$ 로부터 직접 메시지를 받지 못했는데  $v_k$ 가 원천자로 되어 있는 메시지를 받았다면 노드  $v_k$ 는 노드  $v_i$ 의 먼 이웃이다. 더구나 직접 받은 것이 아닌 전달된 메시지 중 원천자가  $v_j$ 인 것의 개수는 노드  $v_i$ 와 노드  $v_j$ 의 공통 이웃의 개수가 된다.

이제 메시지의 개수를 세어 보자. 먼저 원천자가 직접 방송하는 메시지의 개수부터 세어 보자. 한 노드를 원천자로 하는 메시지의 수는 한 개이다. 따라서 원천자가 직접 방송하는 메시지의 총 개수는  $|V|$ 이다. 다음으로는 전달자가 방송하는 메시지의 개수를 세어 보자. 한 전달자는 자신이 받은 각 메시지에 대해서 한 개의 메시지를 생성해서 방송한다. 그런데 한 전달자는 분지수(degree) 만큼의 메시지를 받는다. 그러므로 각 전달자가 방송하는 메시지 개수는 분지수  $|N_i|$ 와 같다. 그러므로 모든 전달자가 방송하는 메시지의 총 수는 모든 노드의 분지수를 합한 값  $\sum |N_i| = 2|E|$ 이다. 따라서 메시지의 총수는  $|V| + 2|E|$ 이다.

그러나 전달자가 방송하는 메시지들을 합병함으로써 전체 메시지 수를 줄일 수 있다. 전달자가 방송하는 메시지들을 합병하려면 각 노드  $v_i$ 는 원천자가 직접 보낸 메시지  $|N_i|$  개가 모두 도착할 때까지 충분한 시간을 기다려야만 한다. 각 전달자가 방송하는 메시지들을 합병하면 원천자가 직접 방송하는 메시지의 개수는 줄어들지 않지만 전달자가 방송하는 메시지의 개수는  $|V|$ 개로 줄어들게 된다. 따라서 총 메시지 개수도  $2|V|$ 개로 줄어든다. 이제까지 총  $2|V|$ 개의 메시지를 이용하여 모든 노드가 식 (2.4)의 개수 비율  $R_{ij}^m$ 을 계산할 수 있음을 보였다.

개수 비율  $R_{ij}^m$ 이 식 (2.10)일 경우 노드  $v_i$ 는 공통 이웃의 개수뿐만 아니라 노드  $v_j$ 의 분지수도 알아야 한다. 노드  $v_i$ 가 노드  $v_j$ 의 분지수를 아는 방법은 노드  $v_j$ 를 원천자로 하는 메시지에 노드  $v_i$ 의 분지수를 실어서 보내는 것이다. 다시 말해서 각 노드  $v_j$ 가 자신을 원천자로 하는 메시지를 방송할 때 자신의 분지수를 함께 실어 보내는 것이다. 이 경우 각 노드는 자신의 분지수를 알고 있다는 가정이 필요하다. 이러한 가정 하에 이 절의 메시지 방송 방법을 그대로 활용할 수 있다.

## V. 성능 평가

이절에서는 시뮬레이션을 통해 성능을 분석한다. 다양한 전송 범위, 조밀도, 노드 수, 면적, 평균 분지수를 가지는 센서 네트워크를 모두 다루기 위해서는 다음과 같은 변수들이 필요하다.

- $r$ : 각 노드의 전송 범위. 임의의 두 노드간의 거리가  $r$  이하일 때만 에지가 있다.
- $d$ : 조밀도. 면적  $r^2$ 의 평면에 위치한 평균 노드 수.
- $n$ : 총 노드의 개수.
- $a$ : 전체 네트워크가 차지하는 평면의 면적.
- $e$ : 평균 분지수. 이웃의 평균 개수.

노드들이 균일하게 분포되어 있다고 가정하면 조밀도  $d$ 와 평균 분지수  $e$ 는 서로 비례한다. 따라서 두 변수 중 하나만 고려하여도 충분하므로 평균 분지수  $e$ 를 다루겠다. 평균 분지수  $e$ 는 나머지 세 변수와 다음과 같은 연관성을 가진다. 단  $k$ 는 상수이다.

$$n \approx k \frac{ae}{r^2} \dots\dots\dots (5.1)$$

위 식 (5.1)의 양변은 노드 개수가 무한대로 접근할 때 정확히 같게 된다. 본 시뮬레이션에서는 면적  $a$ 를 500\*500, 노드 수  $n$ 을 250으로 고정시키고 전송 범위  $r$ 을 증감시킴으로써 평균 분지수를 조절하였다. 하나의 평균 분지수에 대한 거리 측정 오차를 구하기 위해서 30개 이상의 샘플 그래프에 대한 실험을 하였다. 각 샘플 그래프는 250개의 노드들을 가지도록 하되, 각 노드의 위치는 0에서 500사이의 숫자 두 개를 무작위로(randomly) 생성함으로써 가로와 세로의 좌표로 정하였다. 전송 범위  $r$ 이 증가할수록 노드들의 분포가 조밀하게 되므로 평균 분지수도 늘어

난다. 이렇게 생성된 샘플 그래프들은 전송 범위  $r$ 에 대해서 정규화 (normalize) 하면 모두 단위 디스크 그래프가 된다. 따라서 앞의 2, 3, 4 절에서 설명한 방법을 그대로 적용할 수 있다.

본 방법은 노드들의 분포가 조밀하거나 균일할수록 정확히 거리를 추정하는 경향이 있다. (그림 4)에 시뮬레이션 결과가 나타나 있다. 이 그림에서 가로축은 평균 분지수를 나타내며 세로축은 거리추정 오차율을 나타낸다. (그림 4)의 위쪽의 검은 선은 실제 거리와 추정된 거리의 차이를 실제 거리로 나눈 값이다. 아래쪽 검은 선은 실제 거리와 추정된 거리의 차이를 전송범위  $r$ 로 나눈 값이다. (그림 4)에서 평균 분지수가 커질수록 거리추정 오차율이 작아짐을 볼 수 있다. 평균 분지수가 7에서 30이 될 때 거리추정 오차율은 20%에서 10%정도가 된다.

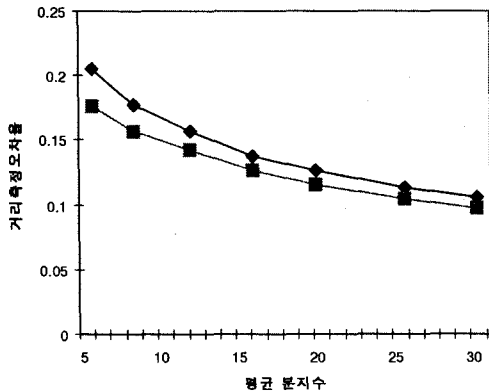


그림 4. 평균 분지수에 대한 거리추정 오차율  
Fig. 4. Error rate for average degree

## VI. 결론

본 논문에서는 인접성만 가지고 두 홉 이내의 노드간의 거리를 추정하는 방법을 제안하였다. 본 방법은 두 노드를 중심으로 하는 단위디스크들의 공통면적에 공통 이웃의 개수가 비례한다는 가정 하에 두 노드간의 거리를 추정한다. 시뮬레이션을 통해 본 방법의 성능을 분석한 결과 거리추정 오차율은 10%에서 20%정도이다. 본 방법과 같이 면적과

노드 개수의 관계를 분석하면 인접성 정보만 가지고 3홉 이상 떨어진 노드간의 거리도 추정할 수 있을 것으로 보인다. 구체적인 방법은 향후 연구과제이다.

한 홉 떨어진 노드 간의 거리를 측정하는데 있어서는 물리적 측정 방법들이 본 방법보다 더 정확할 수도 있다. 그러나 무선 센서 네트워크의 많은 애플리케이션에서 정확성 보다는 비용 효율이 더 중요하다. 본 논문에서 최초로 고안한 두 홉 떨어진 노드간의 거리를 추정하는 방법은 인접성 정보만 가지고 위치를 측정하는 알고리즘들의 성능의 한계를 극복하는데 획기적인 기여를 할 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- [1] 이호선, 조익래, 이균하. "대규모 무선 센서 네트워크 환경을 위한 다중 Sink 브로드캐스팅 기법 설계," 한국컴퓨터정보학회논문지, 10(4):239-248, 2005.
- [2] 조영복, 정운수, 김동명, 이상호. "유비쿼터스 센서 네트워크에서의 저전력 상호인증 프로토콜," 한국컴퓨터정보학회논문지, 10(2):187-197, May 2005.
- [3] N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin. "GPS-less low cost outdoor localization for very small devices," IEEE Personal Communications Magazine, 7(5):28-34, October 2000.
- [4] N. Sundaram and P. Ramanathan. "Connectivity-based location estimation scheme for wireless ad hoc networks," In Proc. of IEEE Globecom 2002.
- [5] T. He, C. Huang, B. Blum, J. Stankovic, and T. Abdelzaher. "Range-free localization schemes in large scale sensor networks," In Proc. of The International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), 2003.
- [6] S. Capkun, M. Hamdi, and J. Hubaux. "Gps-free positioning in mobile ad-hoc networks," In Proc. of ACM SIGCOMM Workshop on Data Communication in Latin America and the Caribbean, April 2001.

[7] L. Doherty, K. Pister, and L. El Ghaoui. "Convex position estimation in wireless sensor networks," In Proc. of IEEE Infocom 2001.

[8] C. Savarese, J. Rabaey, and K. Langendoen. "Robust positioning algorithm for distributed ad-hoc wireless sensor networks," In Proc. of USENIX Technical Annual Conf., Monterey, CA, June 2002.

[9] Y. Shang, W. Ruml, Y. Zhang, and M. Fromherz. "Localization from mere connectivity," In Proc. of Intl. Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC), 2003.

[10] D. Niculescu and B. Nath. "DV-based positioning in ad hoc networks," Telecommunication Systems, 22(1-4):267-280, July 2003.

[11] R. Nagpal, H. Shrobe, and J. Bachrach. "Organizing a global coordinate system from local information on an ad hoc sensor network," In Proc. of Information Processing in Sensor Networks (IPSN), 2003

[12] P. Bahl and V. N. Padmanabhan. "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system," In Proc. of the IEEE INFOCOM '00, March 2000.

[13] J. Hightower, R. Want, and G. Borriello. "SpotOn: An indoor 3d location sensing technology based on RF signal strength," Technical Report UW CSE00-02-02, University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, Seattle, WA, February 2000.

[14] D. Ganesan, B. Krishnamachari, A. Woo, D. Culler, D. Estrin and S. Wicker. "Complex behavior at scale: an experimental study of low-power wireless sensor networks," Technical Report UCLA/CSD-TR 02-0013, 2002.

[15] A. Savvides, C. C. Han, and M. Srivastava. "Dynamic fine-grained localization in ad hoc networks of sensors," In Proc. of The International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), July 2001.

[16] H. Breu and D. G. Kirkpatrick. "Unit disk graph recognition is NP-hard," Computational

Geometry Theory and Applications, 9(1-2):3-24, 1998.

[17] F. Kuhn, T. Moscibroda, and R. Wattenhofer. "Unit disk graph approximation," In Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications (DIAL-M), 2004.

저자 소개



권 오 흠

1988년 8월 서울대학교 컴퓨터공학과  
공학사  
1991년 2월 KAIST 전산학과 공학  
석사  
1996년 2월 KAIST 전산학과 공학  
박사  
1997.3~현재 부경대학교 전자컴퓨  
터정보통신공학부 교수  
<관심분야> 알고리즘, 그래프이론,  
유비쿼터스 컴퓨팅



김 숙 연

1991년 2월 연세대학교 전산학과  
이학사  
1993년 2월 KAIST 전산학과 공학  
석사  
1998년 2월 KAIST 전산학과 공학  
박사  
1998년 3월~2004년 2월 한국전자  
통신연구원(ETRI) 선임연  
구원  
2004년 2월~현재 한경대학교 컴퓨  
터공학과 교수  
<관심분야> Interconnection  
Network, 알고리즘, 그래프  
이론