

# 무선 센서 네트워크에서 에지 가중치를 이용하여 위치를 측정하는 기법

정회원 김 숙 연\*, 권 오 흠\*\*

## Location Estimation based on Edge Weights in Wireless Sensor Networks

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

### 요 약

무선 센서 네트워크에서 위치측정 문제는 위치가 알려진 일부 고정 노드들을 기준으로 나머지 노드들의 위치를 결정하는 문제이다. 기존의 많은 위치 측정 기법들은 고정 노드들로부터의 거리나 각도의 측정값을 기반으로 multilateration 이나 삼각기법(triangulation)을 사용한다. 본 논문에서는 서로 전송 범위 내에 있는 노드 쌍에 대해서 가중치를 주어 미지 노드들의 위치를 계산하는 새로운 중앙 집중적 알고리즘을 제안한다. 본 기법은 단순하다는 장점을 지니며, 위치 측정 문제가 일차원 행렬 방정식으로 정형화 될 수 있음을 보여준다. 이러한 일차원 행렬 방정식이 유일한 해를 가짐을 수학적으로 증명함으로써 모든 미지 노드들의 위치를 유일하게 결정할 수 있음도 보인다. 가중치는 다양하게 설정될 수 있으나 현실적으로 활용될 수 있을 만한 세 가지 가중치 설정 방법을 제시한 후 시뮬레이션을 통해 성능을 비교 분석한다.

Key Words : wireless sensor network, localization, weight, linear matrix equalities, centralized algorithm

### ABSTRACT

Localization in wireless sensor networks is to determine the positions of all nodes based on the known positions of several nodes. Much previous work for localization use multilateration or triangulation based on measurement of angles or distances to the fixed nodes. In this paper, we propose a new centralized algorithm for localization using weights of adjacent nodes. The algorithm, having the advantage of simplicity, shows that the localization problem can be formulated to a linear matrix equalities. We mathematically show that the equalities have a unique solution. The unique solution indicates the locations of unknown nodes are capable of being uniquely determined. Three kinds of weights proposed for practical use are compared in simulation analysis.

### I. 서 론

수백에서 수천 개에 이르는 노드들로 구성된 센서 네트워크에서 각 노드의 위치를 수동으로 설정하는 것은 불가능한 경우가 많다. 예를 들어 미지의

지역을 탐사하기 위해서 수천 개의 센서 노드들을 공중에서 떨어뜨려 분포시킨다면 각 센서의 위치를 수동으로 설정하는 것은 불가능하게 된다. 그렇다고 모든 센서에 GPS(Global Positioning System)<sup>[1]</sup>를 부착하는 것은 하드웨어적으로나 전력 면에서 너무

\* 한경대학교 컴퓨터공학과 조교수 (sookyeon@hknu.ac.kr)

\*\* 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 부교수 (ohkwn@pknu.ac.kr)

논문번호 : KICS2005-03-102, 접수일자 : 2005년 3월 11일

많은 비용을 요구한다. 더구나 GPS 수신기가 실체에 있거나 초목, 구름 같은 다른 장애물로 가려져 있을 경우에는 제대로 동작하지도 않는다.

그러나 센서 노드가 탐지한 데이터를 처리하기 위해서는 센서 노드의 위치를 알아야만 한다. 센서 네트워크에서 각 노드의 위치를 측정하는 것은 사건탐지(event detection)뿐만 아니라 위치기반계산(location-dependent computing)<sup>[2, 3]</sup>, 지리적인 라우팅(geographic routing)<sup>[4]</sup>, 커버리지와 트래킹(coverage and tracking)<sup>[5]</sup> 등과 같은 중요한 네트워크 기능을 수행하기 위해 필수적이다.

따라서 위치가 알려진 일부 노드들을 기준으로 나머지 노드들의 위치를 알아내는 방법들이 연구 개발 되었다. 위치가 알려진 노드를 앵커(anchor), 레퍼런스 노드(reference node), 혹은 고정 노드(fixed node)라고 부른다. 위치가 알려지지 않은 나머지 노드들을 미지 노드(unknown node)라고 하자. 고정 노드의 위치는 수동으로 미리 설정해 놓거나 GPS를 사용하여 결정할 수 있으며, 이외에 어떤 다른 기술이라도 도입될 수 있다. 고정 노드의 위치가 항상 일정해야 하는 것은 아니나 고정 노드의 위치가 바뀌면 나머지 미지 노드들의 위치도 다시 측정해야 한다.

고정 노드를 기준으로 미지 노드들의 위치를 알아내는 기법들은 크게 분산적인 기법과 중앙 집중적인 기법으로 나눌 수 있다. 분산적인 방법으로는 Centroid<sup>[6]</sup>, APIT<sup>[7]</sup>, DV-Hop, DV-Distance<sup>[8]</sup> 등이 알려져 있다. 중앙 집중적인 방법들은 볼록 최적화 문제<sup>[9]</sup>, 반복적 기법(iterative approach)<sup>[10]</sup>, MDS (Multidimensional Scaling)<sup>[11]</sup> 등을 사용하여 매우 엄밀하고도 복잡한 계산을 통해 미지 노드의 위치를 구한다. 그러나 수천에서 수만 개에 이르는 센서 노드들에 대한 정보를 한곳에 모아서 엄밀하고도 복잡한 계산을 수행하는 것은 때로 불가능하다. 따라서 알고리즘의 단순성과 계산량의 최소화는 중앙 집중적으로 위치를 측정하는데 있어 간과할 수 없는 요구사항이 된다.

이러한 위치 측정 기법들에 있어서 센서 네트워크는 그래프로 모델링 된다.  $N$  개의 센서 노드로 구성된 네트워크는  $N$  개의 노드를 가지는 그래프  $G=(V, E)$ 로 모델링 된다. 여기서 노드 집합  $V$ 는 센서 노드들을 나타내며 에지 집합  $E$ 는 노드 쌍 간의 통신 여부를 나타낸다. 만약 노드  $u$ 와  $v$ 가 서로의 전송 범위 안에 놓여져 있으면 두 노드  $u$ 와  $v$  사이에 에지  $(u, v)$ 가 있다. 만약 모든 노드

의 전송범위를 1이라고 가정하면 이 그래프는 단위 디스크 그래프<sup>[12,13]</sup> 이다.

본 논문에서는 서로 전송 범위 내에 있는 노드 쌍에 대한 가중치를 이용하여 위치 측정을 하는 새로운 중앙 집중적 기법을 제안한다. 본 기법은 매우 단순하다는 장점을 지니며, 위치 측정 문제가 일차원 행렬 방정식으로 정형화 될 수 있음을 보여준다. 이러한 일차원 행렬 방정식이 유일한 해를 가짐을 수학적으로 증명함으로써 모든 미지 노드들의 위치를 유일하게 결정할 수 있음도 보인다. 가중치는 다양하게 설정될 수 있으나 현실적으로 활용될 수 있을 만한 세 가지 가중치 설정 방법을 제시한다. 첫 번째 가중치 설정 방법은 인접한 노드간의 거리를 모를 때 적용될 수 있는 방법이며 나머지 두 가지는 인접한 노드간의 거리를 알 때 적용될 수 있는 방법이다. 제시한 세 가지 가중치 설정 방법에 대해서는 시뮬레이션을 통해 성능을 비교 분석한다.

2절에서는 관련연구를 분석하고, 3절에서는 서로 전송 범위 내에 있는 노드 쌍에 대한 가중치를 이용하여 미지 노드의 위치를 구하는 기법을 제시하고, 4절에서는 이 기법에서 사용하는 행렬 방정식이 유일한 해를 가짐을 수학적으로 증명하고, 5절에서는 세 가지 가중치 설정 방법에 대해서 시뮬레이션을 통해 성능을 비교 분석하고 이 기법의 몇 가지 특성을 고찰한 후, 6절에서는 결론을 맺는다.

## II. 관련 연구

많은 기존의 위치 측정 기법들은 고정 노드들로부터의 거리나 각도의 측정값을 기반으로 multi-lateration 이나 삼각기법(triangulation)을 적용한다<sup>[14,15,16]</sup>. 거리의 추정에는 RSSI(Received Signal Strength Indicator)나 ToA(Time of Arrival) 방법을 사용한다. RSSI 방법으로 추정된 거리는 정확하거나 신뢰도가 높지 못한 경향이 있다. 왜냐하면 신호가 전파되는 환경이 보통 균일하지 않기 때문이다. ToA 방법은 정확성면에서는 좀더 우수하나, 센서 노드가 초음파 같이 라디오 보다 전파속도가 빠른 신호를 수신하기 위해서 추가적인 하드웨어를 가져야 한다는 단점이 있다<sup>[17]</sup>. 본 논문에서는 서로 전송 범위 내에 있는 노드들 간의 거리의 측정값을 활용하여 위치 측정을 하는 방법을 제시할 뿐 아니라 오직 노드 쌍 간의 통신 가능 여부만 근거로 하여 위치를 측정하는 방법도 제시한다. 여기서 노드 쌍 간의 통신 가능 여부를 연결성(connectivity)이라

고도 부른다.

거리나 각도의 측정값 없이 오직 연결성(connectivity)만 근거로 하여 위치를 측정하는 방법들은 활발히 연구되어 왔는데<sup>7,18,9,10</sup> 이 중 Centroid 기법<sup>6</sup>은 위치가 알려진 고정 노드들에 대한 직접적인 연결성만을 기반으로 미지 노드의 위치를 측정하는 분산 알고리즘이다. 각 고정 노드들은 동일한 무선 전송 범위를 가지고 네트워크에 중첩되어 배치되어 있다. 고정 노드들은 주기적으로 자신의 위치 정보를 담은 비컨을 방송한다. 각각의 미지 노드들은 특정 시간 동안 주변 고정 노드들로부터 방송되는 모든 비컨 신호를 수집한다. 각 미지 노드는 수집한 비컨 신호로 주변 레퍼런스 노드들의 위치 정보를 알 수 있으며, 연결된 모든 고정 노드들이 커버하는 중첩 영역을 자신의 위치로 인식한다. 위치인식 오차는 고정 노드의 전송 범위가 클수록 배치 밀도가 높을수록 작아진다.

Centroid 기법은 단순하여 미지 노드의 부하를 줄일 수 있다는 장점을 가진다. 하지만, 사전에 동일한 전송 범위를 가진 고정 노드들을 중첩하여 배치하여야 한다. 고정 노드들의 전송 범위가 모든 미지 노드를 커버하기 위해서는 고정 노드의 개수가 충분히 많거나 각 고정 노드의 전송 범위가 매우 넓어야 한다. 그러나 이 두 가지 모두 고비용을 요구한다. 본 논문의 기법 중 오직 연결성(connectivity)만 근거로 하여 위치를 측정하는 방법은 Centroid 기법과 비슷하다. 그러나 Centroid 기법은 분산적이고 본 기법은 중앙 집중적이라는 면에서 다르다. 또한 본 기법은 각 미지 노드가 세 개 이상의 고정 노드와 직접 통신이 가능해야 한다는 Centroid 기법의 단점을 갖지 않는다.

고정 노드의 전송 범위가 모든 노드들을 커버하지 않아도 되는 분산 알고리즘 중 대표적인 것은 각 미지 노드에서 3개 이상의 고정 노드에 대한 홉수(hop count)를 알아낸 후 고정 노드까지의 거리를 추정하여 위치를 계산해 내는 방법이다<sup>8,18</sup>. 이외에도 다양한 분산 알고리즘들이 알려져 있다<sup>7</sup>.

한편 중앙 집중적으로 위치를 측정하는 알고리즘 중 Doherty의 방법은 인접한 노드 쌍의 거리를 제한조건으로 입력하여 볼록 최적화 문제(convex optimization)를 푸는 것이다<sup>9</sup>. 구체적으로 말하자면 선형 계획법(linear programming)을 일반화한 semi-definite 프로그램(SDP)의 형태로 문제를 변형하여 푸는 것이다. SDP의 가장 단순한 형태인 선형계획법도 내부 점 방법(interior point method)을 적용할

때 크기가  $N \times N$  이상인 행렬에 대한 방정식 계산을 수차례 반복해야만 한다.

또 다른 중앙 집중적 기법 중 Sundaram의 방법은 인접한 노드 쌍의 거리뿐만 아니라 인접하지 않은 노드 쌍의 거리에 대한 조건까지 추가하여 반복적인 계산법(iterative approach)으로 위치를 구한다<sup>10</sup>. 이 방법은 반복횟수를 무한히 늘임으로써 이론적으로는 정확한 위치를 계산해 낼 수 있지만 실제로는 단계가 늘어날수록 각 노드에 대해서 저장해야 할 정보량과 계산량이 기하급수적으로 늘어나게 된다. 따라서 긴 복도와 같은 형태의 1차원 문제에 적합한 알고리즘이라 볼 수 있다.

알려진 또 다른 기법은 모든 노드 쌍 간의 최단 거리를 구한 후 고전적인 MDS(Multidimensional Scaling)를 적용하여 상대좌표를 구한 후 3개 이상의 고정노드를 이용하여 절대 좌표로 변환하는 것이다<sup>11</sup>. 이 기법에서는  $O(N^3)$ 의 시간 복잡도의 작업을 단계별로 반복한다.

이상에서 살펴본 바와 같이 중앙 집중적이라고 알려진 알고리즘들은 노드 쌍의 거리에 대한 수많은 제한 조건들로부터 위치를 알아내기 위해서 엄밀하고도 매우 복잡한 계산을 수행한다. 그러나 본 방법에서는 크기가  $N \times N$  미만인 대칭양정치(symmetric and positive definite) 행렬에 대한 일차 방정식을 한번만 풀면 된다. 대칭양정치 행렬에 대한 일차 방정식의 시간복잡도 및 계산 횟수는 다른 행렬 일차 방정식들의 시간 복잡도  $O(N^3)$  보다는 훨씬 적음이 알려져 있다<sup>20</sup>. 그러므로 실제 계산 횟수에 있어서 기존의 방법들보다 본 방법은 대폭 개선된 것이다.

### III. 알고리즘

본 논문에서는 센서 네트워크를 모든 노드의 전송범위가 1인 단위 디스크 그래프<sup>12,13</sup>로 모델링한다. 본 기법의 기본 전략은 각 노드가 인접한 노드들의 가중된 중점(weighted centroid)에 위치한다고 보는 것이다. 만약 인접한 노드들의 가중치를 같다고 본다면 각 노드는 인접한 노드들의 중점(centroid)에 위치하게 된다. 먼저 간단한 예를 통해 본 위치 측정 기법을 개략적으로 설명한다. 다음 그림 3.1과 같은 그래프  $G=(V, E)$ 가 있다고 하자.

그래프  $G$ 의 노드 집합  $V$ 는  $v_1, v_2, v_3, v_4$ 으로 구성되는데 이 중  $v_1$ 은 미지 노드이고  $v_2, v_3, v_4$ 는

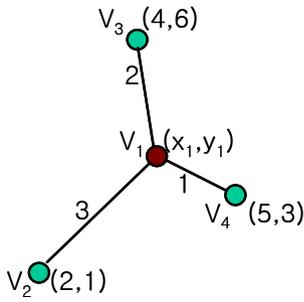


그림 3.1. 간단한 예  
Figure 3.1. Simple example

고정 노드이다. 미지 노드  $v_1$ 의 좌표를  $(x_1, y_1)$ 라 하자. 고정 노드  $v_2, v_3, v_4$ 의 좌표를 각각  $(2, 1), (4, 6), (5, 3)$ 이라 하자. 미지 노드  $v_1$ 으로부터 고정노드  $v_2, v_3, v_4$ 까지 거리는 각각 3, 2, 1이라 하자.

미지 노드  $v_1$ 의 x 좌표  $x_1$ 는 노드  $v_1$ 의 인접 노드  $v_2, v_3, v_4$ 의 x 좌표 2, 4, 5에 대하여 가중된 평균값으로 추정한다.

$$x_1 = \frac{w_2 \cdot 2 + w_3 \cdot 4 + w_4 \cdot 5}{w_2 + w_3 + w_4} \quad (3.1)$$

여기서 가중치  $w_2, w_3, w_4$ 는 인접 노드  $v_2, v_3, v_4$ 에 대한 거리에 반비례해서 다음과 같이 정한다.

$$w_2 = \frac{1}{3}, w_3 = \frac{1}{2}, w_4 = \frac{1}{1}$$

그러면 식 3.1을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$x_1 = \frac{w_2 \cdot 2 + w_3 \cdot 4 + w_4 \cdot 5}{w_2 + w_3 + w_4} = 4.18$$

또한 미지 노드  $v_1$ 의 y 좌표  $y_1$ 는 노드  $v_1$ 의 인접 노드  $v_2, v_3, v_4$ 의 y 좌표 1, 6, 3에 대하여 가중된 평균값으로 추정한다.

$$y_1 = \frac{w_2 \cdot 1 + w_3 \cdot 6 + w_4 \cdot 3}{w_2 + w_3 + w_4} = 3.45 \quad (3.2)$$

이제까지 그림 3.1의 그래프의 미지노드  $v_i$ 의 좌표 값  $(x_1, y_1)$ 을 인접한 노드들의 가중된 중점 (4.18, 3.45)로 계산해 내었다.

여기서 만약 가중치  $w_2, w_3, w_4$ 를 인접 노드  $v_2, v_3, v_4$ 에 대한 거리의 제곱에 반비례하게 정한다면 다음과 같다.

$$w_2 = \frac{1}{9}, w_3 = \frac{1}{4}, w_4 = \frac{1}{1}$$

이러한 가중치를 이용하여 미지 노드  $v_1$ 의 좌표를 구해보면 다음과 같다.

$$x_1 = \frac{w_2 \cdot 2 + w_3 \cdot 4 + w_4 \cdot 5}{w_2 + w_3 + w_4} = 4.57$$

$$y_1 = \frac{w_2 \cdot 1 + w_3 \cdot 6 + w_4 \cdot 3}{w_2 + w_3 + w_4} = 3.39$$

이제까지 가중치를 거리의 제곱에 반비례하게 정함으로써 미지노드  $v_1$ 의 좌표 값  $(x_1, y_1)$ 을 가중된 중점 (4.57, 3.39)로 계산해 내었다.

이제 위 예제에서 보였던 기법을 일반화해서 설명한다. 그래프  $G=(V, E)$ 는  $n$ 개의 미지 노드와  $m$ 개의 고정 노드를 가진다 ( $N=n+m$ ). 그러면 노드 집합  $V$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$V=\{v_i \mid 1 \leq i \leq N\}$ . 일반성을 잃지 않고 처음  $n$ 개의 노드들  $v_1, v_2, \dots, v_n$ 을 미지 노드라 하고 마지막  $m$ 개의 노드들  $v_{n+1}, \dots, v_N$ 을 고정노드라 하자. 그리고 노드  $v_i$ 의 좌표를  $(x_i, y_i)$ 라 하자. 그러면  $1 \leq i \leq n$ 인 경우,  $x_i$ 와  $y_i$ 는 미지수가 되는 반면,  $n+1 \leq i \leq N$ 인 경우, 상수가 된다.

그래프  $G$ 의 각 에지  $(v_i, v_j)$ 에 대해서 양수의 가중치  $w_{ij}$ 가 정의되어 있다고 해보자. 단 두 노드  $v_i$ 와  $v_j$ 간에 에지가 없으면  $w_{ij}=0$ 이다. 그리고 미지 노드  $v_i$ 의 x 좌표 값을 인접한 노드들의 x 좌표 값들에 대한 가중된 평균값으로 계산해 보자. 그러면 노드  $v_i$ 의 x 좌표 값은 다음과 같다.

$$x_i = \frac{w_{i,1} \cdot x_1 + w_{i,2} \cdot x_2 + \dots + w_{i,N} \cdot x_N}{\sum_{j=1}^N w_{ij}} \quad (3.3)$$

식 3.3에서 분모  $\sum_{j=1}^N w_{ij}$ 를  $d_i$ 라 하면 위 식 3.3은 다음과 같이 바꾸어 표현할 수 있다.

$$-w_{i,1}x_1 - w_{i,2}x_2 - \dots - w_{i,i-1}x_{i-1} + d_i x_i - w_{i,i+1}x_{i+1} - \dots - w_{i,N}x_N = 0 \quad (3.4)$$

식 3.4 중 마지막  $m$ 개의 항은 상수인데, 이들을 등호의 오른 쪽으로 옮기면 다음과 같은 식 3.5를 얻을 수 있다.

$$-w_{i,1}x_1 - w_{i,2}x_2 - \dots - w_{i,i-1}x_{i-1} + d_i x_i - w_{i,i+1}x_{i+1} - \dots - w_{i,N}x_N = w_{i,n+1}x_{n+1} + \dots + w_{i,N}x_N \quad (3.5)$$

$n$  개의 미지 노드들에 대해서 위 식 3.5를 각각 구하면 다음과 같은 행렬 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} d_1 & -w_{12} & \dots & -w_{1i} & \dots & -w_{1n} \\ -w_{21} & d_2 & \dots & -w_{2i} & \dots & -w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -w_{n1} & -w_{n2} & \dots & d_i & \dots & -w_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -w_{n1} & -w_{n2} & \dots & -w_{ni} & \dots & d_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$= \begin{bmatrix} w_{1,n+1}x_{n+1} + \dots + w_{1,N}x_N \\ w_{2,n+1}x_{n+1} + \dots + w_{2,N}x_N \\ \vdots \\ w_{i,n+1}x_{n+1} + \dots + w_{i,N}x_N \\ \vdots \\ w_{n,n+1}x_{n+1} + \dots + w_{n,N}x_N \end{bmatrix}$$

위의 행렬 방정식 3.6에서 왼쪽의 행렬을  $M$ 이라 하고 미지 노드들의  $x$  좌표를 나타내는 벡터를  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^t$ 라 하고 등호의 오른쪽에 있는 벡터를  $\mathbf{b}^x = (b_1^x, b_2^x, \dots, b_n^x)^t$ 라 하자. 그러면 식 3.6은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M\mathbf{x} = \mathbf{b}^x \quad (3.7)$$

여기서 행렬  $M = (m_{i,j})$ 의 대각선에 있는 원소  $m_{i,i}$ 는  $d_i$ 로서 노드  $v_i$ 와 인접한 노드들에 대한 가중치의 총합이다. 만약  $i \neq j$ 이면 원소  $m_{i,j}$ 는  $-w_{ij}$ 인데, 노드  $v_i$ 와 노드  $v_j$ 가 인접하지 않으면 0이 된다. 따라서 가중치  $w_{ij}$ 와  $w_{ji}$ 가 항상 같으므로 행렬  $M$ 은 대칭적(symmetric)이다. 한편 벡터  $\mathbf{b}^x$ 의 원소  $b_i^x$ 는 노드  $v_i$ 와 인접한 고정 노드들의  $x$  좌표에 가중치를 곱한 값들의 합임을 알 수 있다. 이제까지 설명한 행렬  $M$ 과 벡터  $\mathbf{b}^x$ 는 아래의 정의 3.1과 정의 3.2와 같다. 정의 3.2에는  $y$ 축에 대한 벡터  $\mathbf{b}^y$ 도 함께 정의되어 있다.

정의 3.1. 그래프  $G = (V, E)$ 가 있다고 하자. 크

기가  $n$ 인 노드 집합  $V$ 는 노드 집합  $V$ 의 부분 집합이라고 하자.  $V' = \{v_i \mid 1 \leq i \leq n\}$ 이라 할 때 크기가  $n \times n$ 인 행렬  $M = (m_{i,j}), 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n$ ,은 다음과 같이 정의된다.

$$m_{i,j} = \begin{cases} d_i & \text{if } i = j \\ -w_{ij} & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서  $d_i = \sum_{j=1}^N w_{ij}$ 이다.

정의 3.2.  $N$ 개의 노드를 가지는 연결된 그래프  $G = (V, E)$ 가 있다고 하자. 크기  $n$ 인 노드 집합  $V$ 는 노드 집합  $V$ 의 부분 집합이라고 하자. 또한 노드 집합  $V' = V - V'$ 를  $V' = \{v_i \mid n+1 \leq i \leq N\}$ 이라 하자. 노드 집합  $V'$ 에 속하는 임의의 원소  $v_i$ 는 좌표값  $(x_i, y_i)$ 를 가진다고 하자. 그러면 크기  $n$ 인 벡터  $\mathbf{b}^x$ 와  $\mathbf{b}^y$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{b}^x = \begin{bmatrix} \sum_{j=n+1}^N w_{1j}x_j \\ \sum_{j=n+1}^N w_{2j}x_j \\ \vdots \\ \sum_{j=n+1}^N w_{ij}x_j \\ \vdots \\ \sum_{j=n+1}^N w_{nj}x_j \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}^y = \begin{bmatrix} \sum_{j=n+1}^N w_{1j}y_j \\ \sum_{j=n+1}^N w_{2j}y_j \\ \vdots \\ \sum_{j=n+1}^N w_{ij}y_j \\ \vdots \\ \sum_{j=n+1}^N w_{nj}y_j \end{bmatrix}$$

정의 3.1과 정의 3.2의 행렬과 벡터로 구성된 방정식  $M\mathbf{x} = \mathbf{b}^x$ 와  $M\mathbf{y} = \mathbf{b}^y$ 를 풀면 미지 노드들의 좌표를 구할 수 있다.

연결된 그래프  $G = (V, E)$ 에 한 개 이상의 고정 노드가 존재할 때, 미지 노드들의 좌표를 구하는 알고리즘을 그림 3.2와 같이 정리할 수 있다.

#### IV. 해가 유일함의 증명

본 절에서는 정의 3.1의 행렬  $M$ 과 정의 3.2의 벡터  $\mathbf{b}^x$ 와  $\mathbf{b}^y$ 에 대해서 행렬 방정식  $M\mathbf{x} = \mathbf{b}^x$ 와  $M\mathbf{y} = \mathbf{b}^y$ 가 각각 유일한 해를 가짐을 보이겠다. 여기서 유일한 해를 가진다는 것은 미지 노드들의 좌표 값이 유일하게 결정됨을 의미한다. 행렬 방정식이 유일한 해를 가지려면 행렬  $M$ 의 결정자(determinant)가 0이 아니면 된다. 행렬  $M$ 의 결정자가 0이 아님을 보이는 방법은 여러 가지가 있겠지만 여기서는 행렬  $M$ 이 양정치(positive definite)임을

보이는 방법을 택한다. 양정치는 다음과 같이 정의된다.

정의 4.1. 임의의 행렬  $A$  는 모든 벡터  $\mathbf{x} \neq \mathbf{0}$  에 대하여  $\mathbf{x}^t A \mathbf{x} > 0$  이면 양정치이다. 또한 그 역도 성립한다.

어떤 대칭 행렬  $A$  가 양정치이면 행렬  $A$  의 결정자가 양수임을 다음과 같은 성질 4.1과 성질 4.2로부터 알 수 있다.

성질 4.1. 대칭 행렬  $A$  가 양정치이면  $A$  의 모든 고유치(eigenvalue)들은 양수이다. 또한 그 역도 성립한다.

성질 4.2. 행렬의 결정자는 고유치들의 곱과 같다.

$$|A| = \prod_{i=1}^n \lambda_i$$

입력:  $N$ 개의 노드를 가지는 연결된 그래프  $G=(V, E)$ ; 노드 집합  $V$ 의 부분 집합인 고정 노드의 집합  $V'$ ; 고정 노드 집합  $V'$ 의 각 원소  $v_i$ 에 대한 좌표 값들  $(x_i, y_i)$ , 단  $V' \neq \{\}$ ,  $V' \neq V$ ; 가중치  $w_{ij}$ ,  $1 \leq i, j \leq n$ .

출력: 노드 집합  $V$ 의 부분 집합인 미지 노드의 집합  $V''=(V-V')$ 의 각 원소  $v_i$ 에 대한 좌표 값들  $(x_i, y_i)$ .

단계 1: 노드 집합  $V''$ 의 크기를  $m$ 이라 하고, 노드 집합  $V$ 의 크기를  $n$ 이라 한다. 단  $V=\{v_i \mid 1 \leq i \leq n\}$ ,  $V''=\{v_i \mid n+1 \leq i \leq n+m\}$ .

단계 2: 크기  $n \times n$ 인 행렬  $M$ 을 구한다.

단계 2.1. 모든  $i, 1 \leq i \leq n$ , 와 모든  $j, i \neq j, 1 \leq j \leq n$ , 에 대해서  $m_{ij} = -w_{ij}$

단계 2.2. 모든  $i, 1 \leq i \leq n$ , 에 대해서  $m_{ii} = d_i$ , 단  $d_i$ 는  $\sum_{j=1}^N w_{ij}$ .

단계 3: 크기  $n$ 인 벡터  $\mathbf{b}^x$ 와  $\mathbf{b}^y$ 를 구한다.

단계 3.1 모든  $i, 1 \leq i \leq n$ ,에 대해서  $b_i^x = \sum_{j=n+1}^N w_{ij} x_j$ ,  
 $b_i^y = \sum_{j=n+1}^N w_{ij} y_j$

단계 4: 벡터  $\mathbf{x}$ 와  $\mathbf{y}$ 를 구한다.

단계 4.1 방정식  $M\mathbf{x} = \mathbf{b}^x$ 으로부터 벡터  $\mathbf{x}$ 를 구한다.

단계 4.2 방정식  $M\mathbf{y} = \mathbf{b}^y$ 으로부터 벡터  $\mathbf{y}$ 를 구한다.

단계 5: 벡터  $\mathbf{x}$ 와  $\mathbf{y}$ 로부터 집합  $V''$ 의 원소들에 대한 좌표 값들  $(x_i, y_i)$ ,  $1 \leq i \leq n$ ,을 구한다.

그림 3.2. 알고리즘  
Figure 3.2. Algorithm

그럼 이제부터 정의 3.1의 행렬  $M$ 이 고정 노드가 한 개라도 있을 경우 양정치임을 보이겠다.

소정리 4.1. 정의 3.1의 행렬  $M$ 은  $V' \neq \{\}$ 이면 양정치이다.

증명. 행렬  $M$ 의 원소를  $m_{i,j}$ 라 하고 임의의 벡터  $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_n)^t \neq \mathbf{0}$ 가 있다고 하자.  $\mathbf{x}^t M \mathbf{x} > 0$  임을 보임으로써 본 정리를 증명하겠다.  $\mathbf{x}^t M \mathbf{x} = T$   $\mathbf{x}^t M \mathbf{x} = T$ 는 다음과 같다.

$$T = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n] \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \dots & m_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij} x_i x_j$$

식 4.1은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij} x_i x_j \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n (m_{ij} x_i x_j) + \sum_{i=1}^n m_{ii} x_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n (-w_{ij} x_i x_j) + \sum_{i=1}^n d_i x_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n (-2w_{ij} x_i x_j) + \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^N w_{ij}) x_i^2 \quad (4.2) \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n (-2w_{ij} x_i x_j) \\ &\quad + \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^n w_{ij}) x_i^2 + \sum_{i=1}^n (\sum_{j=n+1}^N w_{ij}) x_i^2 \end{aligned}$$

식 4.2에서 마지막 줄의 세 번째 항  $\sum_{j=n+1}^N w_{ij}$ 를  $\delta_i$ 라고 하자. 변수  $\delta_i$ 는 노드  $v_i$ 에 인접한 예지 중 고정 노드 집합  $V'$ 에 속하는 노드에 연결된 예지에 대한 가중치의 합이다. 따라서  $\delta_i \geq 0$ 이다.  $\delta_i$ 가 양수이면 노드  $v_i$ 는 고정 노드와 직접 연결되어 있고, 0이면 고정 노드와 직접 연결되어 있지 않다. 식 4.2에서 두 번째 항  $\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^n w_{ij}) x_i^2$ 를  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n (w_{ij} x_i^2 + w_{ij} x_j^2)$ 로 치환하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n (w_{ij} x_i^2 - 2w_{ij} x_i x_j + w_{ij} x_j^2) + \sum_{i=1}^n \delta_i x_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n (\sqrt{w_{ij}} x_i - \sqrt{w_{ij}} x_j)^2 + \sum_{i=1}^n \delta_i x_i^2 \quad (4.3) \end{aligned}$$

그런데  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n (\sqrt{w_{ij}} x_i - \sqrt{w_{ij}} x_j)^2 \geq 0$ 이고  $\sum_{i=1}^n \delta_i x_i^2 \geq 0$  이므로  $T \geq 0$  이다.

만약  $T$ 가 0 이라면 벡터  $\mathbf{x}$ 가 0이 됨을 보임으로써  $T > 0$ 임을 증명하겠다. 만약  $T$ 가 0 이라면  $(\sqrt{w_{ij}} x_i - \sqrt{w_{ij}} x_j)^2 = 0$  이고  $\sum_{i=1}^n \delta_i x_i^2 = 0$  임을 의미한다. 그런데 앞서 밝혔듯이  $\delta_i \geq 0$ 이므로 모든  $i$ 에 대해서  $\delta_i x_i^2 \geq 0$ 이다. 따라서 양수인  $\delta_i$ 에 대해서  $x_i$ 는 0임이 자명하다. 그럼 이제 0인  $\delta_i$ 에 대해서  $x_i$ 가 0임을 보이기만 하면 된다.

$V' \neq \{\}$  이므로 모든  $k, 1 \leq k \leq n$ ,에 대해서 0이 아닌  $\delta_k$ 가 적어도 한 개 존재한다. 그러므로 어떤  $p, 1 \leq p \leq n$ ,가 존재해서  $\delta_p$ 가 양수라고 해보자. 그러면  $v_p$ 와 인접한 모든 노드  $v_p$ 에 대해서  $(\sqrt{w_{ij}} x_p - \sqrt{w_{ij}} x_{p'})^2 = 0$  이므로  $x_{p'}$ 도 0이 된다. 이런 식으로 노드  $v_p$ 와  $E'(G)$ 에 의해서 연결된 모든 노드  $\{v_\pi | v_p \text{ is connected to } v_\pi \text{ by } E'(G)\}$ 에 대해서  $x_\pi$ 가 0이 되어 버린다. 여기서 집합  $E'(G)$ 는 노드 집합  $V'$ 에 의해서 인접스되는 에지 집합이라고 하자. 다시 말해서 고정 노드와 직접 연결된 노드  $v_p$ 와  $E'(G)$ 에 의해서 연결된 모든 노드의  $x$  좌표는 0이 되어 버린다. 노드 집합  $V'$ 의 모든 연결 컴포넌트(connected component)에 대해서 이와 같은 작업을 수행하면 모든  $i, 1 \leq i \leq n$ ,에 대해서  $x_i$ 가 0이 됨을 보일 수 있다. 그런데 벡터  $\mathbf{x}$ 는 0 벡터가 아니므로  $T$ 는 0이 아니다.

증명끝.

성질 4.1과 성질 4.2와 소정리 4.1로부터 행렬  $M$ 의 결정자는 양수임을 알 수 있다. 따라서 행렬 방정식  $M\mathbf{x} = \mathbf{b}^x$ 는 유일한 해를 가진다.

정리 4.2. 정의 3.1의 행렬  $M$ 의 결정자는  $V' \neq \{\}$ 이면 양수이다.

따름정리 4.3. 정의 3.1의 행렬  $M$ 과 정의 3.2의 벡터  $\mathbf{b}^x$ 에 대해서 행렬 방정식  $M\mathbf{x} = \mathbf{b}^x$ 는 유일한 해를 가진다.

정리 4.2로부터  $y$  축에 대한 행렬 방정식  $M\mathbf{y} = \mathbf{b}^y$ 도 유일한 해를 가짐을 알 수 있다.

따름정리 4.4. 정의 3.1의 행렬  $M$ 과 정의 3.2의 벡터  $\mathbf{b}^y$ 에 대해서 행렬 방정식  $M\mathbf{y} = \mathbf{b}^y$ 는 유일

한 해를 가진다.

## V. 시뮬레이션

본 절에서는 시뮬레이션 결과를 보이고 본 기법의 몇 가지 특성을 고찰한다. 본 시뮬레이션에서는 다양한 노드 수, 전송 범위, 밀도, 면적을 가지는 센서 네트워크를 다루기 위해서 다음과 같은 변수들을 설정한다.

$N$ : 총 노드의 개수

$r$ : 각 노드의 전송 범위.

$d$ : 면적  $r^2$ 의 평면에 위치한 평균 노드 수

$a$ : 노드들이 위치할 수 있는 평면의 면적.

위 변수들 중 전송 범위  $r$ 은 각 노드가 다른 노드와 통신할 수 있는 거리의 최대 값을 의미하므로, 센서 네트워크를 그래프로 모델링할 때 임의의 두 노드간의 거리가 전송범위  $r$  이하일 때만 에지가 있게 된다. 일반성을 잃지 않고 전송범위  $r$ 은 1로 고정시킨다. 위 네 개의 변수들 간에는 다음과 같은 연관성이 존재한다.

$$N \approx \frac{a}{r^2} d \tag{5.1}$$

밀도  $d$ 가 무한대로 접근할 때 식 5.1의 좌변과 우변은 같게 된다.

전송범위  $r$ 은 1 이므로 세 개의 변수  $N, a, d$  중 두 개만이 독립변수가 된다. 따라서 노드 수  $N$ 과 면적  $a$ 를 변수로 사용하여 시뮬레이션을 하면 네 개의 변수  $r, d, N, a$ 가 각기 자유자재로 변하는 모든 상황을 다룰 수 있다. 본 시뮬레이션에서는 노드 수  $N$ 과 면적  $a$ 를 정한 후에  $x$ 와  $y$ 의 좌표가 0에서  $\sqrt{a}$ 가 되도록 무작위로 노드들을 생성한다.

예를 들어 노드 수를 48개로 정하고 면적을  $4 \times 4$ 로 정하면  $r=1, d=3, N=48, a=16$ 이 된다. 이 경우엔  $x$ 와  $y$ 좌표가 0에서 4사이에 있도록 48개의 노드를 무작위로 생성하면 된다. 그리고 생성된 노드 쌍 간의 거리가 1 이하일 경우에만 에지가 있게 한다. 각 미지 노드의 원래의 위치와 계산된 위치간의 차이의 평균값을 위치측정오차율로 정의하자. 만약 위치측정오차율이 100%라면 미지 노드의 원래의 위치와 계산된 위치간의 평균 거리가 1임을 의미한다.

다. 이 위치측정오차율은 전송 범위  $r$ 에 대해서 정규화된(normalized) 에러율로도 볼 수 있다.

본 시뮬레이션에서는 하나의 샘플 그래프에 대해서 아래와 같은 세 가지 가중치 설정 방법을 비교한다.

- $w_{ij}^a = 1$
- $w_{ij}^b = \frac{1}{\text{distance}(v_i, v_j)}$
- $w_{ij}^c = \frac{1}{(\text{distance}(v_i, v_j))^2}$

첫 번째 가중치 설정 방법에서 모든 에지의 가중치는 같다. 이 방법은 에지들의 길이를 모르는 상황에 적합하다. 또한 모든 가중치 설정 방법 중 가장 단순하다. 각 미지 노드의 위치는 인접한 노드들의 좌표 평균으로 계산된다.

두 번째 가중치 설정 방법에서 각 에지의 가중치는 에지 길이의 역수이다. 이 방법을 적용하려면 에지의 길이를 알아야 한다. 각 미지 노드의 위치는 인접한 노드들의 가중된 좌표 평균으로 계산된다. 따라서 각 미지 노드의 위치는 인접 노드들 중 가까운 노드에 가깝도록 계산된다.

세 번째 가중치 설정 방법에서 각 에지의 가중치는 에지 길이의 제곱의 역수이다. 두 번째 방법과 매우 비슷하나 에지 길이의 차이가 더욱 크게 반영된다는 특징이 있다. 다시 말해서 각 미지 노드의 위치는 인접 노드들 중 가까운 노드에 더욱 가깝도록 계산된다.

위에서 언급했듯이 두 번째와 세 번째의 가중치 설정 방법에서는 에지의 길이를 안다고 가정한다. 에지의 길이가 알려져 있을 때 미지 노드의 위치를 정확히 구하는 문제는 매우 어려운 문제로 알려져 있다. 에지의 길이가 알려진 그래프를 단위 디스크 그래프로 평면에 임베딩할 수 있는지 결정만 하는 문제도 NP-hard이다[19]. 따라서 본 논문에서는 에지 길이를 가중치로 활용함으로써 대략적인 위치를 구하는 것이다.

그림 5.1은 노드 수  $N$ 이 48이고 면적  $a$ 가  $4 \times 4$ 인 샘플 그래프이다(밀도 3). 그림 5.2는 48개의 노드 중 50%에 해당하는 24개를 고정 노드로 정한 후, 세 번째 설정 방법의 가중치  $w^c$ 를 사용하여 나머지 미지 노드의 위치를 계산해낸 결과이다. 위치측정오차율은 12.6801%이다. 이 샘플 그래프를 포함하여 본 시뮬레이션에서는 볼록 껍질(convex hull)을 구성하는 노드들은 고정 노드에 포함시켰다.

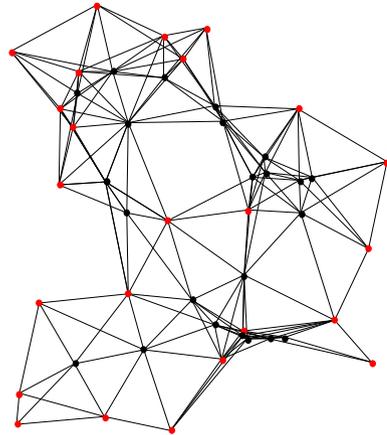


그림 5.1. 샘플 그래프(48 노드,  $4 \times 4$  면적)  
Figure 5.1. Sample graph(number of nodes: 48, area:  $4 \times 4$ )

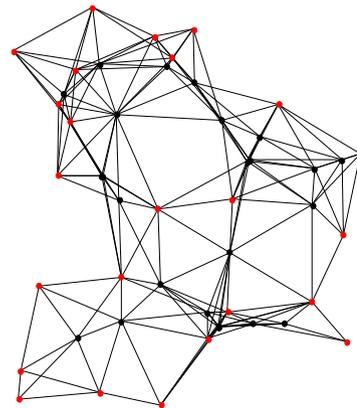


그림 5.2. 미지 노드의 위치를 추정 후의 그래프(위치측정오차 12.6801%)  
Figure 5.2. Graph after localization(error rate 12.6801%)

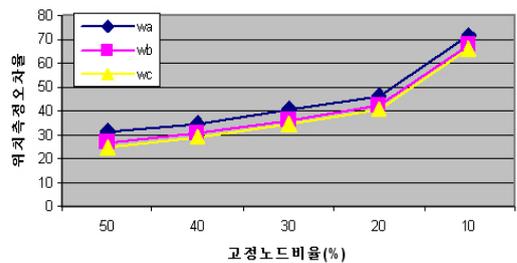


그림 5.3. 고정 노드 비율에 대한 위치측정오차율(밀도 3, 노드 수 300)  
Figure 5.3. Error rate for the ratio of fixed nodes(density: 3, number of nodes: 300)

그림 5.3은 고정 노드 비율에 대한 위치측정오차율의 변화를 나타낸다. 이 그래프는 노드 수  $N$ 이 300이고 면적  $a$ 가  $10 \times 10$ 인 샘플 그래프(밀도 3)를

100개 생성하여 얻은 결과이다. 고정 노드 비율 50, 40, 30, 20, 10%에 대하여 각각 20개의 샘플그래프를 생성하여 계산하였다. 이 그래프에서 가로축은 전체 노드 수에 대한 고정 노드의 비율을 백분율로 나타내며 세로축은 위치측정오차율을 나타낸다. 제일 위에 있는 꺾은 선은 첫 번째 가중치  $w^a$ 에 대한 결과이며 아래의 두 꺾은 선은 각각 두 번째 세 번째 가중치  $w^b$ 와  $w^c$ 에 대한 결과이다. 첫 번째, 두 번째, 세 번째 가중치  $w^a$ ,  $w^b$ ,  $w^c$ 순으로 위치측정오차가 적어지는 경향이 있다. 이 그래프에서도 볼 수 있듯이 고정노드의 비율이 증가할수록 위치측정오차율은 증가한다. 특히 고정노드의 비율이 0에 가까울수록 위치측정오차율은 더욱 급격히 증가하는 경향이 있다

그림 5.4는 밀도에 대한 위치측정 오차율의 변화를 나타낸다. 이 그래프는 면적  $a$ 가  $4*4$ 이고 고정 노드 비율이 50%인 샘플 그래프를 100개 생성하여 얻은 결과이다. 노드수를 조절하여 밀도가 3, 6, 9, 12, 15인 샘플그래프를 각각 20개씩 생성하여 계산하였다. 이 그래프에서 가로축은 밀도를 표시하며 세로축은 위치측정 오차율을 표시한다. 제일 위에 있는 꺾은 선은 첫 번째 가중치  $w^a$ 에 대한 결과이며 아래의 두 꺾은 선은 각각 두 번째 세 번째 가중치  $w^b$ 와  $w^c$ 에 대한 결과이다. 첫 번째, 두 번째, 세 번째 가중치  $w^a$ ,  $w^b$ ,  $w^c$ 순으로 위치측정 오차율이 적어지는 경향이 있다. 이 그래프에서 볼 수 있듯이 밀도가 증가할수록 위치측정오차율은 감소한다. 그러나 밀도가 무한대에 가까울수록 위치측정오차율은 더 완만히 감소하는 경향이 있다.

본 기법이 계산해 내는 미지 노드의 위치에 대한 몇 가지 특성을 고찰해 보면 다음과 같다.

성질 5.1. 만약 고정 노드가 1개만 있다면 모든 미지 노드가 그 고정노드와 같은 좌표를 갖는다.

성질 5.2. 만약 고정 노드가 2개만 있다면 모든 미지 노드가 두 고정 노드를 연결하는 직선상에 위치한다.

성질 5.3. 만약 고정 노드가 3개 있다면 모든 미지 노드는 세 고정 노드를 꼭지점으로 하는 삼각형 안에 위치한다.

성질 5.4. 모든 미지 노드는 고정 노드들을 모두 포함하는 최소의 볼록 껍질(convex hull)안에 위치한다.

성질 5.5. 고정 노드의 개수의 비율이 커질수록 위치측정오차율은 적어지는 경향이 있다.

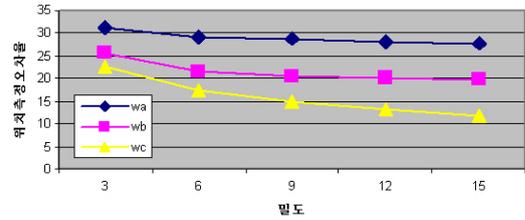


그림 5.4. 밀도에 대한 위치측정오차율(면적  $4*4$ )  
Figure 5.4. Error rate for density(area:  $4*4$ )

성질 5.6. 전체 노드들의 밀도가 높을수록 위치측정오차율은 적어지는 경향이 있다.

성질 5.7. 첫 번째, 두 번째, 세 번째 가중치  $w^a$ ,  $w^b$ ,  $w^c$ 순으로 위치측정오차율이 적어지는 경향이 있다.

## VI. 결론

본 논문에서는 각 미지노드가 인접한 노드들의 가중된 좌표 평균에 존재한다는 가정으로부터 미지 노드의 위치에 대한 일차원 행렬 방정식을 정의하였다. 주어진 그래프가 연결된 그래프이고 한 개 이상의 고정 노드가 존재하면 이 행렬 방정식이 유일한 해를 가짐도 수학적으로 증명하였다. 이는 소수 개의 고정 노드가 주어져 있을 때라도 미지 노드의 위치를 유일하게 결정할 수 있음을 의미한다. 단, 계산된 미지 노드의 위치의 정확도는 고정 노드의 비율이나 밀도에 비례하고 가중치를 설정하는 방법에 따라 달라진다. 제시한 세 가지 가중치 설정 방법 중 에지 길이의 제곱의 역수를 사용하는 방법이 가장 위치측정오차율이 적음을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 위치특정오차율을 최소화하는 가중치 설정 방법에 대한 연구는 더 필요할 것으로 보인다.

## 참고 문헌

- [1] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, Global positioning system. "Theory and Practice," Fourth Edition. Springer-Verlag, 1997.
- [2] G. H. Forman and J. Zahorjan, "The challenges of mobile computing," IEEE Computer. 27(4), pp. 38-47, April 1994.
- [3] M. Weiser, "Some computer science problems in ubiquitous computing," Communications of ACM, July 1993.

- [4] B. Karp and H. T. Kung, "GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks," In Proc. of the Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking(MOBICOM), 2000.
- [5] S. Meguerdichian, F. Koushanfar, G. Qu, and M. Potkonjak, "Exposure in wireless ad-hoc sensor networks," In Proc. of the Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM) 2001.
- [6] N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin, "GPS-less low cost outdoor localization for very small devices," IEEE Personal Communications Magazine, 7(5), pp. 28-34, October 2000.
- [7] T. He, C. Huang, B. Blum, J. Stankovic, and T. Abdelzaher, "Range-free localization schemes in large scale sensor networks," In Proc. of the Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking(MOBICOM), 2003.
- [8] D. Niculescu and B. Nath, "DV-based positioning in ad hoc networks," Telecommunication Systems, 22(1-4), pp. 267-280, July 2003.
- [9] L. Doherty, K. Pister, and L. El Ghaoui, "Convex position estimation in wireless sensor networks," In Proc. of IEEE Infocom 2001.
- [10] N. Sundaram and P. Ramanathan, "Connectivity-based location estimation scheme for wireless ad hoc networks," In Proc. of IEEE Globecom 2002.
- [11] 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.
- [12] H. Breu and D. G. Kirkpatrick, "Unit disk graph recognition is NP-hard," Computational Geometry Theory and Applications, 9(1-2), pp. 3-24, 1998.
- [13] 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.
- [14] A. Nasipuri and K. Li, "A directionality based location discovery scheme for wireless sensor networks," In Proc. of 1st ACM Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications(WSNA'02), pp. 105-111, Atlanta, GA, Sept. 2002.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] A. Savvides, C. C. Han, and M. Srivastava, "Dynamic fine-grained localization in ad hoc networks of sensors," In Proc. of the Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), July 2001.
- [18] 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(IPSNS), 2003.
- [19] J. Aspnes, D. Goldengerg, and Y. R. Yang, "On the computational complexity of sensor network localization." In Proc. of the First International Workshop on Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks, 2004.
- [20] S. J. Leon, Linear Algebra with Applications, 6th ed. Prentice Hall, chapter 6, 2001.

김 숙 연 (Sook-Yeon Kim)

정회원



1991년 2월 연세대학교 전산  
과학과 이학사

1993년 2월 KAIST 전산학과  
공학석사

1998년 2월 KAIST 전산학과  
공학박사

1998년 3월~2004년 2월 한국

전자통신연구원(ETRI) 선임연구원

2004년 2월~현재 한경대학교 컴퓨터공학과 조교수

<관심분야> Interconnection Network, 알고리즘, 그  
래프 이론

권 오 흠 (Oh-Heum Kwon)



1988년 8월 서울대학교 컴퓨  
터공학과 공학사

1991년 2월 KAIST 전산학과  
공학석사

1996년 2월 KAIST 전산학과  
공학박사

1997년 3월~현재 부경대학교

전자컴퓨터정보통신공학부 재직

<관심분야> 알고리즘, 그래프이론, 유비쿼터스 컴퓨팅