

비등방성 센서 네트워크에서 가상 홀을 이용한 다중 홉 Range-Free 측위 알고리즘

이 상 우*, 김 선 우^o

Multihop Range-Free Localization with Virtual Hole Construction in Anisotropic Sensor Networks

Sangwoo Lee*, Sunwoo Kim^o

요 약

본 논문에서는 비등방성 센서 네트워크에서 노드 간 연결 정보만을 이용하여 일반노드의 위치를 찾는 다중 홉 Range-free 측위 알고리즘을 제안한다. 제안하는 측위 알고리즘에서 일반노드는 자신과 앵커노드 쌍이 이루는 최단경로의 측정 홉 수와 기대 홉 수를 비교하여 최단경로의 우회 정도를 측정하고, 우회 정도에 따라 자신으로부터 앵커노드까지의 거리를 추정한다. 일반노드는 이러한 과정을 네트워크의 모든 앵커노드 쌍에 대하여 반복하며, 획득한 거리 정보를 사용하여 위치를 추정한다. 제안하는 알고리즘은 기존의 Range-free 알고리즘에 비해 적은 수의 앵커노드를 필요로 하며, 적은 통신 오버헤드를 갖는다. 마지막으로 성능평가를 위하여 MATLAB 시뮬레이션을 수행하였으며, 기존의 Range-free 측위 알고리즘에 비해 향상된 위치정확도를 보였다.

Key Words : range-free localization, anisotropic networks, range estimation, network localization, connectivity

ABSTRACT

This paper presents a multihop range-free localization algorithm to estimate the physical location of a normal node with local connectivity information in anisotropic sensor networks. In the proposed algorithm, a normal node captures the detour degree of the shortest path connecting an anchor pair and itself by comparing the measured hop count and the expected hop count, and the node estimates the distances to the anchors based on the detour degree. The normal node repeats this procedure with all anchor combinations and pinpoints its location using the obtained distance estimates. The proposed algorithm requires fewer anchors and less communication overhead compared to existing range-free algorithms. We showed the superiority of the proposed algorithm over existing range-free algorithms through MATLA simulations.

I. 서 론

무선센서네트워크가 환경 모니터링, 헬스케어, 물체추적, 그리고 군사 감시와 같은 위치기반서비스의

기반 기술로 자리 잡음에 따라 무선센서네트워크에서 무선노드의 위치측위 기술에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다^{1,2)}. 위치를 모르는 일반노드는 GNSS(Global Navigation Satellite System)³⁾ 또는 기

* 본 연구는 한국연구재단 연구과제(No.2012-0003885) 지원으로 수행되었습니다.

• 주저자 : 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 무선통신시스템 연구실, lswoo@hanyang.ac.kr, 준회원

o 교신저자 : 한양대학교 융합전자공학부 무선통신시스템 연구실, remero@hanyang.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2012-11-537, 접수일자 : 2012년 11월 15일, 최종논문접수일자 : 2013년 1월 4일

타 방법을 통해 자신의 정확한 위치를 인지하고 있는 앵커노드로부터 상대적 거리정보(range)를 측정함으로써 자신의 위치를 찾을 수 있다. 이 때 일반노드와 앵커노드 간 거리 측정 방법에 따라 무선센서네트워크 위치추위 기술은 Range-based 기법과 Range-free 기법으로 나뉜다.

Range-based 기법은 일반노드가 앵커노드로부터 수신하는 신호의 세기, 지연시간, 지연시간차, 또는 입사각 측정을 통해 얻은 거리정보를 위치추정에 이용하며^[4,9], Range-free 기법은 네트워크 내 노드 간 연결정보(connectivity)에 기반을 두어 일반노드의 위치를 추정한다^[10-18]. 일반적으로 Range-based 기법이 Range-free 기법에 비해 높은 정확성을 갖지만, 거리 정보를 얻기 위한 장비 또는 동기화 같은 과정이 추가적으로 필요하기 때문에 비용과 에너지 문제가 야기될 수 있다. 이러한 문제는 저가, 저전력 운용을 목적으로 하는 무선센서네트워크에 치명적이기 때문에, 네트워크 내 노드 간 연결정보만을 이용하여 일반노드의 위치를 찾는 Range-free 기법에 대한 연구와 관심을 받고 있다.

초기 Range-free 기법은 일반노드가 한 홉 거리에 위치한 이웃 앵커노드의 정보만을 이용하여 자신의 위치 후보지를 줄여나감으로써 위치를 찾는 방법에 초점을 맞추어 연구가 이루어졌다^[10,11]. 그러나 이러한 방법을 통해 네트워크 내 모든 노드의 위치를 추정하기 위해서는 많은 수의 앵커노드를 네트워크 전역에 배치하거나 앵커노드가 큰 전송반경을 가져야 한다. 이와 같은 단점을 보완하고자 노드 간 최단경로의 홉 수를 거리정보로 환산하여 위치를 찾는 다중 홉 Range-free 기법이 제안되었다^[12-15]. DV-Hop 알고리즘^[12]은 대표적인 다중 홉 Range-free 기법으로, 앵커노드의 위치정보를 이용하여 홉 당 평균 거리를 산출하고, 노드 간 거리를 홉 당 평균 거리와 홉 수의 곱으로 계산한다. 이후 홉 당 평균 거리 오차를 줄임으로써 거리추정의 정확도를 향상시키는 방법이 제안되었다^[14,15]. 그러나 DV-Hop 기반 알고리즘은 노드 간 홉 수와 거리가 정비례한 등방성(isotropic) 네트워크만을 가정하고 있어, 장애물, 제한된 자원, 불규칙 노드 배치, 불규칙 안테나 패턴, 지형 등의 원인으로 발생하는 홀로 인해 노드 간 최단경로가 우회하는 비등방성(anisotropic) 네트워크에서는 정확도가 심하게 저하된다. 또한, 비등방성 네트워크에서 DV-Hop 기반 알고리즘은 위치추정에 따른 토폴로지가 실제 토폴로지와 왜곡되는 Flip Ambiguity^[19] 문제를 갖는다. Flip Ambiguity 문제를 해결하고자 스프링 방법^[20,21]에 기

반을 두어 일반노드가 1홉 또는 2홉 이웃노드의 위치 추정치를 이용하여 자신의 위치를 보정하는 방법이 제안되었다^[22]. 재귀적 위치보정을 통해서 DV-Hop 기반 알고리즘의 단점을 효과적으로 보완하였지만, 각 노드가 주기적으로 자신의 위치 추정치를 이웃노드에게 전송해야 하기 때문에 전체 통신 오버헤드(overhead)가 급격하게 증가하며, 일반노드의 위치추정치가 수렴하기 위해서는 노드 간 안정된 링크가 필수적으로 요구된다^[23].

최근에 들어서 비등방성 네트워크에서의 위치추위 문제를 보다 효과적으로 해결하기 위한 연구가 이루어지고 있다. REP(Rendered Path)^[16] 알고리즘은 우선 홉 추정 알고리즘^[24]를 통해서 네트워크 내 홉을 찾는다. 그리고 홉에 의한 노드 간 최단경로의 우회정도를 측정하고 이를 거리추정에 이용한다. 최단경로가 홉을 지나지 않는 경우에는 DV-Hop 알고리즘을 이용하여 거리를 계산한다. 이론적으로 REP 알고리즘은 홉 검색을 통해서 3개의 앵커노드만으로도 비등방성 네트워크에서 정확한 위치추정이 가능하지만, 크기가 작아 검출이 불가능한 홉^[24]에 의해서 오차가 발생할 수 있으며, 최단경로가 여러 개의 작은 홉을 지나는 경우에 오차는 급격하게 증가한다. 이뿐만 아니라, REP 알고리즘은 홉 검출을 위해서 네트워크 전역의 연결정보를 이용하므로 지나친 통신 오버헤드를 갖는다. REP 알고리즘 외에 실험을 바탕으로 최단경로의 홉 수에 따른 임계값(threshold)을 설정하고, 임계값 이상으로 들어오는 측위정보의 사용을 제한하는 휴리스틱(heuristic) 알고리즘이 제안되었다^[17,18]. 큰 거리오차를 가질 것으로 의심되는 앵커노드의 정보는 측위에 사용하지 않음으로써 측위정확도를 향상시킬 수 있지만, 측위를 위해서 앵커노드가 일반노드 근처에 위치해야 하며, 네트워크 상태를 고려하지 않고 정해진 임계값은 다양한 네트워크에 적용하기에 부적합하다.

본 논문에서는 적은 수의 앵커노드만을 이용하여 비등방성 네트워크에서의 측위정확도를 향상시키기 위해 앵커노드-일반노드-앵커노드의 연결정보를 이용하는 다중 홉 Range-free 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 앵커노드 한 쌍의 기대 홉 수와 일반노드가 측정하는 앵커노드 쌍의 최단경로 홉 수를 비교함으로써 최단경로의 우회 정도를 측정하고, 이에 비례하여 가상 홉을 생성한다. 가상 홉에 따라 앵커노드-일반노드-앵커노드의 최단경로를 모델링하고, 최단경로의 우회 정도를 고려하여 일반노드와 앵커노드 간 거리를 추정한다. 일반노드는 네트워크 내 모든

앵커노드 조합에 대해 이 과정을 반복하고, 이로부터 얻은 추정거리를 바탕으로 위치를 추정한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 네트워크 모델과 본 논문에서 사용하는 용어에 대해 설명한다. III장에서는 앵커노드-일반노드-앵커노드 간 최단경로의 우회에 따른 거리 및 위치추정 알고리즘을 제안한다. IV장에서는 제안하는 알고리즘과 기존 알고리즘의 성능을 비교한다. V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 네트워크 모델

본 장에서는 네트워크 모델과 본 논문에서 사용하는 용어에 대해 설명한다. 본 논문에서는 2차원 평면 상에 위치를 모르는 N 개의 일반노드와 자신의 위치정보를 갖는 A 개의 앵커노드를 통해 구성된 무선센서네트워크를 고려한다. 일반노드는 랜덤하게 배치하며, 앵커노드는 네트워크 외곽에 위치한다. 앵커노드는 외곽에 존재함으로써 백본(backbone) 또는 외부 네트워크를 연결하는 싱크(sink) 노드 역할을 담당할 수 있다. 모든 노드는 고정되어 있으며, 전송반경 d_{Tx} 의 전방향 안테나를 갖는다. 이에 모든 노드는 πd_{Tx}^2 의 전송범위를 갖는다. 모든 노드는 주기적으로 자신의 전송범위 내에 위치하는 이웃노드에 Hello 패킷을 전송하고, 각 앵커노드는 자신의 위치와 홉 수 정보가 포함된 비컨(beacon) 메시지를 네트워크 전역에 보낸다. 비컨 메시지를 수신하는 노드는 메시지 내 홉 수를 1만큼 증가시켜 다시 포워딩한다. 패킷 플러딩(flooding)^[25]을 통해서 네트워크 내 모든 노드는 앵커노드의 위치정보와 앵커노드까지의 최소 홉 수를 기록한다.

노드 i 의 위치좌표가 $\mathbf{p}_i = [x_i, y_i]^T$ 일 때, 노드 i 와 j 간 거리는 $d_{ij} = \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|$ 이다. 여기서 T 는 벡터의 트랜스포즈(transpose)를 의미하며, $\|\cdot\|$ 는 2D 유클리디언 놈(Euclidean norm)이다. 노드 i 와 j 간 최단경로 홉 수를 h_{ij} 라고 할 때, 노드 i 가 관측하는 노드 j 와 k 의 최단경로 홉 수는 $h_{i(j,k)} = h_{ij} + h_{ik}$ 이다. 노드 i 와 j 간 거리에 따른 기대 홉 수를 h_{ij}^* 라고 정의한다. 기대 홉 수는 균일(uniform) 노드 배치 환경에서 최단경로가 두 노드 간 직선을 따를 때의 홉 수를 의미한다. 최단경로의 우회와 관측노드의 위치에 따라

$h_{ij}^* \leq h_{i(j,k)}$ 라고 가정한다. 노드 간 기대 홉 수에 대해서는 III장에서 자세히 설명한다.

본 논문에서는 패킷 충돌, 간섭, 자원할당과 같은 물리계층과 MAC(media access control) 계층의 문제는 고려하지 않는다. 그러나 IV장에서 QUDG(quasi unit disk graph) 통신 모델^[26]을 이용하여 노드 간 링크의 불규칙성(DOI:degree of irregularity)에 따른 성능을 비교한다.

III. 최단경로 우회 정도 측정을 통한 거리 및 위치추정 알고리즘

본 장에서는 앵커노드-일반노드-앵커노드(ANA: anchor-normal-anchor) 간 최단경로의 우회 정도를 고려한 일반노드와 앵커노드 사이의 거리추정과 일반노드의 위치추정 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 다음과 같이 동작한다. 일반노드는 앵커노드의 위치정보와 노드밀도를 통해 ANA 쌍의 두 앵커노드 간 기대 홉 수를 구하고, 이를 측정 홉 수와 비교함으로써 ANA 간 최단경로의 우회 여부를 검사한다. 기대 홉 수와 측정 홉 수의 차이에 따라 가상 홉을 생성하고, 가상 홉의 경계를 따라 최단경로를 모델링함으로써 최단경로의 우회 정도를 측정한다. 일반노드는 가상 홉에 따라 그려지는 최단경로를 바탕으로 자신으로부터 각 앵커노드까지의 거리를 추정하며, 동일 과정을 모든 앵커노드 조합에 대해 수행한다. 마지막으로 일반노드는 앵커노드 조합에서 얻어진 추정거리를 바탕으로 위치를 추정한다.

3.1. 두 앵커노드 간 기대 홉 수

본 절에서는 앵커노드-일반노드-앵커노드 간 최단경로의 우회 여부 검사 설명에 앞서 ANA 쌍의 두 앵커노드 간 기대 홉 수를 유도한다. 노드 간 홉 수는 크게 두 노드 간 거리, 노드 배치 분포와 노드밀도에 의해 결정된다. II장에서 언급하였듯이 기대 홉 수는 두 노드 간 최단경로가 직선의 형태를 이루면서, 최단경로를 구성하는 모든 노드의 간격이 균일한 경우 얻을 수 있는 홉 수를 의미한다. 따라서 기대 홉 수는 두 노드 간 거리와 균일 노드 배치에서 노드 간 간격을 통해 구할 수 있다. 최단경로를 구성하는 1홉 중간(intermediate)노드 간 균등 거리가 μ_l 일 때, 앵커노드 j 와 k 의 기대 홉 수는 다음과 같이 계산한다.

$$h_{jk}^* = \left\lceil \frac{d_{jk}}{\mu_L} \right\rceil \quad (1)$$

여기서 랜덤 변수 $L^{[27]}$ 은 최단경로 상 1홉 거리의 중간노드 간 거리이며, μ_L 은 L 의 평균을 의미한다.

μ_L 을 구하기 위해 균일 노드 배치를 가정한다. 이때 하나의 노드가 n 개의 이웃노드를 가질 확률은 Poisson 분포로 정의할 수 있다.

$$P[n; \pi d_{Tx}^2] = \frac{(\lambda \pi d_{Tx}^2)^n}{n!} \exp(-\lambda \pi d_{Tx}^2) \quad (2)$$

여기서 λ 는 네트워크의 노드 밀도다. L 이 α 보다 작을 확률은 반지름이 α 와 d_{Tx} 인 동심원 사이에 노드가 존재하지 않을 확률과 같다.

$$P[L \leq \alpha] = \exp[-\lambda \pi (d_{Tx}^2 - \alpha^2)] \quad (3)$$

(3)으로부터 L 의 PDF(probability density function)은 다음과 같다.

$$p_L[\alpha] = 2\lambda\pi\alpha \exp[-\lambda\pi(d_{Tx}^2 - \alpha^2)] \quad (4)$$

결과적으로 μ_L 은 $[0, d_{Tx}]$ 구간 내 L 의 평균이므로 다음과 같다.

$$\mu_L = \int_0^{d_{Tx}} 2\lambda\pi\alpha^2 \exp[-\lambda\pi(d_{Tx}^2 - \alpha^2)] d\alpha \quad (5)$$

(5)는 Imaginary Error Function으로 정의되기 때문에 계산을 위해서는 근사화가 필요하다. 전체 파티션의 수가 Δ 인 경우에 Riemann Sum^[28]을 이용한 (5)는 다음으로 근사화가 가능하다.

$$\mu_L \approx 2\lambda\pi \left(\frac{d_{Tx}}{\Delta}\right)^3 \sum_{\delta=0}^{\Delta-1} \delta^2 \exp\left[-\lambda\pi d_{Tx}^2 \left(1 - \frac{\delta^2}{\Delta^2}\right)\right] \quad (6)$$

3.2. 최단경로 우회 검사와 거리추정

일반적으로 무선센서네트워크에서 노드 간 최단경로는 선형 배치가 아닌 이상, 그 길이가 짧더라도 다양한 비등방성 요인으로 인해 최단경로는 우회하는

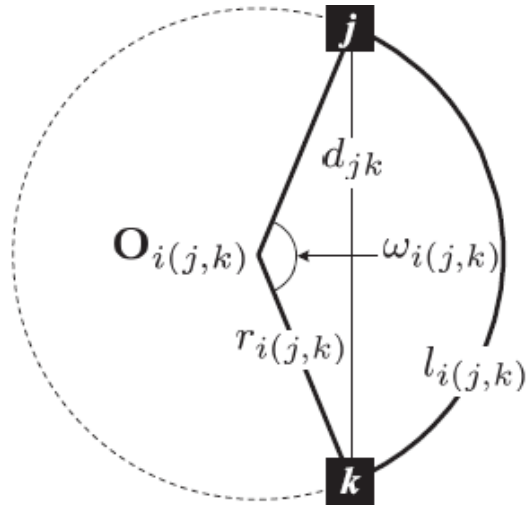


그림 1. 일반노드 i 가 생성한 앵커노드 j 와 k 간 최단경로와 가상 홀
Fig. 1. Geometric parameters describing a shortest path and a virtual hole between anchors j and k at node i

경향을 갖는다. 이러한 특성은 등방성 네트워크의 한 예인 균일 노드 배치 환경에서도 발견되며, 최단경로의 길이가 증가할수록, 즉 홉 수가 클수록 네트워크 내 비등방성 요인이 누적되어 최단경로는 결과적으로 크게 우회할 수 있다.

ANA 쌍에서 일반노드는 각 앵커노드로부터 플러딩을 통해 측정된 홉 수를 이용하여 ANA 쌍 최단경로의 홉 수를 계산한다. 이때 측정 홉 수는 패킷이 최단경로를 따라 이동한 총 거리를 의미하지만, 최단경로가 어떤 패턴 혹은 모양을 띄는지 의미하지 않는다. 다만 앞서 산출한 두 앵커노드 간 기대 홉 수는 최단경로가 직선인 환경에서 얻을 수 있는 값이므로 ANA 쌍의 두 앵커노드의 기대 홉 수와 일반노드가 측정된 홉 수를 비교함으로써 ANA 쌍 최단경로가 직선이 아닌 다른 우회 경로를 따르는지 여부를 검사할 수 있다. 보다 자세하게, ANA 쌍 최단경로의 측정 홉 수가 두 앵커노드 간 기대 홉 수보다 같은 경우에는 그 모양이 직선을 따르며, 반대로 측정 홉 수가 큰 경우에는 네트워크 비등방성 요소 또는 두 앵커노드에 따른 일반노드의 상대적 위치로 인해 ANA 쌍 최단경로는 우회한다고 볼 수 있다.

본 논문에서는 ANA 쌍의 최단경로는 두 앵커노드 사이에 위치하는 원형의 가상 홀에 의해 우회한다고 가정한다. 이에 최단경로는 양 끝점에 두 앵커노드가 위치하는 부채꼴의 호로 표현된다. 가상 홀은 최단경로의 측정 홉 수와 기대 홉 수의 차이가 작을수록 부채꼴의 호가 두 앵커노드를 잇는 직선에 수렴하도록,

차이가 클수록 직선으로부터 멀어지도록 생성한다.

일반노드 i , 앵커노드 j 와 k 인 ANA 쌍을 고려할 때, 두 앵커노드 사이에 위치하는 원형 가상 홀의 중심점과 반지름을 각각 $\mathbf{O}_{i(j,k)} = [x_{i(j,k)}, y_{i(j,k)}]^T$ 와 $r_{i(j,k)}$ 라고 정의하고, 호(최단경로)의 길이와 부채꼴의 중심각을 $l_{i(j,k)}$ 와 $\omega_{i(j,k)}$ 로 정의한다. 그림 1은 일반노드 i 의 입장에서 측정하는 앵커노드 j 와 k 사이의 최단경로와 가상 홀을 보인다.

일반적으로 노드 밀도와 노드 배치 분포와 관계없이 최단경로를 구성하는 중간노드 간 거리의 분산은 매우 작다. 밀도와 배치에 따라 중간노드 간 평균 거리는 다르지만, 분산은 상대적으로 균일하다. 이는 최단경로를 구성하는 단계(즉, 플러딩)에서 이전 송신노드로부터 가장 멀리 위치하는 노드를 중간노드로 선택하기 때문이다. 이에 1홉 거리의 중간노드 간 거리가 균일하다고 가정할 때, 패킷의 총 이동길이의 의미하는 최단경로의 길이, 즉 호의 길이는 다음으로 계산한다.

$$l_{i(j,k)} = \begin{cases} \mu_L h_{i(j,k)} & \text{if } h_{i(j,k)} > h_{jk}^* \\ d_{jk} & \text{if } h_{i(j,k)} \leq h_{jk}^* \end{cases} \quad (7)$$

기하학으로부터 다음의 관계를 얻을 수 있으며,

$$l_{i(j,k)} = \omega_{i(j,k)} r_{i(j,k)} \quad (8)$$

$$d_{jk} = 2r_{i(j,k)} \sin\left(\frac{\omega_{i(j,k)}}{2}\right) \quad (9)$$

(8)과 (9)로부터 부채꼴의 중심각에 따른 수식은 다음과 같다.

$$\sin\left(\frac{\omega_{i(j,k)}}{2}\right) = \frac{d_{jk} \omega_{i(j,k)}}{2l_{i(j,k)}} \quad (10)$$

(10)을 만족하는 폐쇄형(closed-form) 해는 존재하지 않는다. 따라서 (10)을 다음의 최적화 문제로 정의하고, Gradient 또는 Newton 방법과 같은 최적화 알고리즘을 통해서 최적 해 $\omega_{i(j,k)}^*$ 을 찾는다.

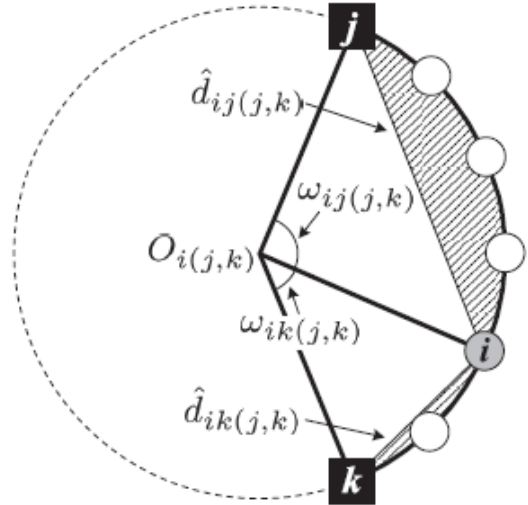


그림 2. 가상 홀에 따른 일반노드 입시위치와 앵커노드 간 거리 추정 예

Fig. 2. An example of distance estimation to anchor combination j and k with virtual hole construction where $h_{ij} = 4$, $h_{ik} = 2$ and $h_{i(j,k)} > h_{jk}^*$

$$\begin{aligned} \min f(\omega_{i(j,k)}) &= \left| \sin\left(\frac{\omega_{i(j,k)}}{2}\right) - \frac{d_{jk} \omega_{i(j,k)}}{2l_{i(j,k)}} \right|^2 \\ \text{subject to } \omega_{i(j,k)} &\in (0, 2\pi) \end{aligned} \quad (11)$$

부채꼴의 중심각을 구하였으므로 가상 홀의 반지름은 (8)을 이용하여 쉽게 구할 수 있으며, 가상 홀의 중심점은 중심점에서 두 앵커노드까지의 거리가 반지름으로 동일한 특성을 이용하여 찾을 수 있다. 이때 가상 홀은 2가지의 중심점을 갖는다. 그러나 중심점은 두 앵커노드 간 직선을 기준으로 서로 대칭이므로, 가상 홀 중심에 따라 생성되는 최단경로 상 모든 지점과 그 대칭 지점은 앵커노드로부터 동일한 거리에 위치한다. 그림 1과 2는 가상 홀의 중심점이 두 앵커노드를 잇는 직선에 왼쪽에 위치한 예를 보인다.

본 논문에서 제안하는 일반노드와 앵커노드 간 거리 추정 방법은 다음과 같다. 가상 홀에 따라 그려지는 최단경로에 의해 일반노드를 포함한 ANA 쌍 최단경로를 구성하는 모든 노드가 가상 홀의 경계에 위치한다고 가정한다. 본 논문에서는 ANA 쌍 최단경로에 놓이는 모든 노드가 균일하게 위치한다고 가정하므로 일반노드 i 는 앵커노드 j 와 k 로부터 홉 수 비율에 따라 부채꼴을 다시 작은 부채꼴로 나누어 최단경로에 자신의 입시 위치를 정한다. 이때 작은 부채꼴의 중심각을 각각 $\omega_{ij(j,k)}$ 와 $\omega_{ik(j,k)}$ 로 정의하며, 다음으로 정한다.

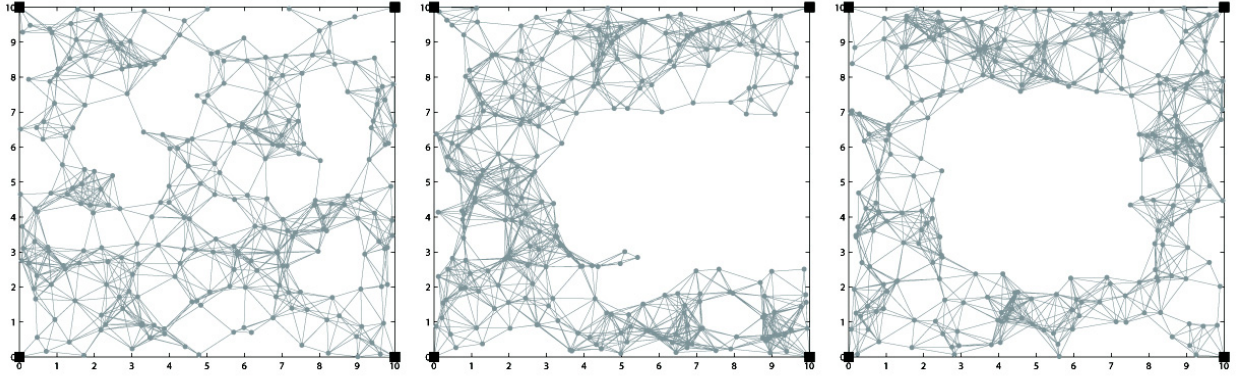


그림 3. Regular, C-shaped, O-shaped 지형 모델
Fig. 3. Regular, C-shaped, O-shaped terrain models

$$\omega_{ij(j,k)} = \frac{h_{ij}}{h_{i(j,k)}} \omega_{i(j,k)}^* \quad (12)$$

$$\omega_{ik(j,k)} = \frac{h_{ik}}{h_{i(j,k)}} \omega_{i(j,k)}^* \quad (13)$$

이에 따라 일반노드와 두 앵커노드까지의 거리는 코사 이(cosine) 법칙을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\hat{d}_{ij(j,k)} = r_{i(j,k)} \sqrt{2(1 - \cos \omega_{ij(j,k)})} \quad (14)$$

$$\hat{d}_{ik(j,k)} = r_{i(j,k)} \sqrt{2(1 - \cos \omega_{ik(j,k)})} \quad (15)$$

그림 2는 가상 홀에 따른 일반노드와 앵커노드 사이의 거리추정을 보이는 예다.

3.3. 최소자승법 기반 위치추정

일반노드는 위의 과정을 네트워크 내 모든 앵커노드 조합에 따라 반복한다. 이로써 일반노드는 총 $\binom{A}{2}$ 개의 추정거리를 가지며, 다음과 같은 선형의 측정 수식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & -2x_i(x_u - x_v) - 2y_i(y_u - y_v) \\ & = \hat{d}_{iu(u,v)}^2 - \hat{d}_{iv(u,v)}^2 - \|\mathbf{p}_u\|^2 + \|\mathbf{p}_v\|^2 \end{aligned} \quad (16)$$

$u, v \in \Omega_A, u = 1, 2, \dots, A-1, v = u+1, u+2, \dots, A$ 그

리고 Ω_A 는 앵커노드 집합이다. 최종적으로 일반노드 i 의 위치는 다음과 같이 최소자승법을 통해 결정한다.

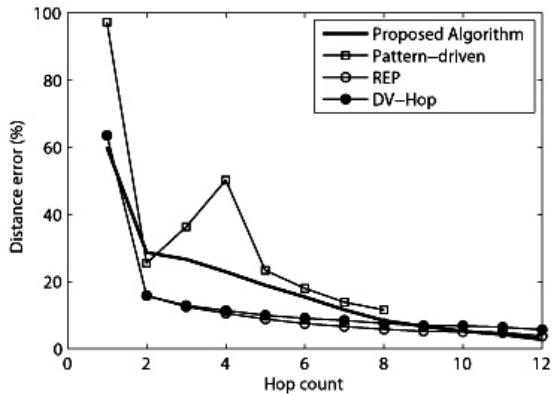
$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{p}}_i &= (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{z}_i = [\hat{x}_i, \hat{y}_i]^T \\ \mathbf{H} &= -2 \times [(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2) \ \cdots \ (\mathbf{p}_u - \mathbf{p}_v) \ \cdots \ (\mathbf{p}_{A-1} - \mathbf{p}_A)]^T \\ \mathbf{z}_i &= \begin{bmatrix} \hat{d}_{i1(1,2)}^2 - \hat{d}_{i2(1,2)}^2 - \|\mathbf{p}_1\|^2 + \|\mathbf{p}_2\|^2 \\ \vdots \\ \hat{d}_{iu(u,v)}^2 - \hat{d}_{iv(u,v)}^2 - \|\mathbf{p}_u\|^2 + \|\mathbf{p}_v\|^2 \\ \vdots \\ \hat{d}_{iA-1(A-1,A)}^2 - \hat{d}_{iA(A-1,A)}^2 - \|\mathbf{p}_{A-1}\|^2 + \|\mathbf{p}_A\|^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

IV. 성능 분석

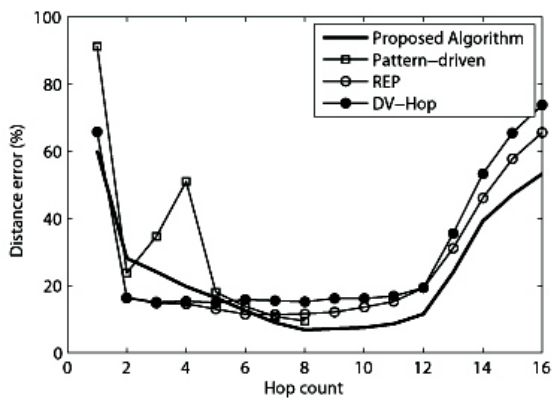
본 장에서는 제안하는 알고리즘의 성능을 시뮬레이션을 통해 DV-Hop^[12], REP^[16], 그리고 Pattern-driven^[17] 알고리즘과 비교 분석한다. 성능 평가 지표는 실제거리로 정규화된 거리 오차와 전송반경으로 정규화된 위치 오차를 사용한다.

시뮬레이션을 위한 환경은 다음과 같다.

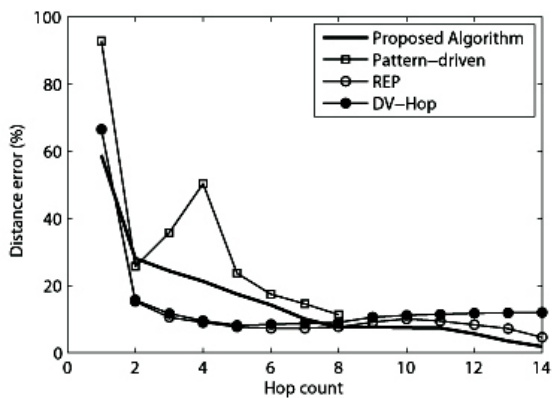
$10d_{Tx} \times 10d_{Tx}$ 영역에 200개의 일반노드를 랜덤하게 배치하고, 4개의 앵커노드를 실험 영역의 각 모서리에 배치한다. Pattern-driven 알고리즘을 위하여 추가적으로 4개의 앵커노드를 랜덤하게 배치한다. 제안하는 알고리즘은 모서리에 위치한 개 앵커노드만을 사용하지만, DV-Hop, REP와 Pattern-driven 알고리즘은 총 8개의 앵커노드를 위치측위에 사용한다. 비등방성 요소로 지형적 특징과 DOI 비율을 고려한다. 지형은 Regular, C-shaped, O-shaped 모델(그림 3)을



(a) Regular



(b) C-shaped



(c) O-shaped

그림 4. 지형에 따른 다중 홉 Range-free 알고리즘의 거리오차

Fig. 4. Distance errors of multihop range-free localization algorithms with respect to terrain conditions

사용한다. DOI는 QUDG 통신 모델^[26]을 사용한다. QUDG 모델에 따라 두 노드 간 거리 $d \in [0, d_{Tx}/DOI]$ 인 경우에는 항상 안정된 (perfect) 링크를, $d \in (d_{Tx}/DOI, d_{Tx}]$ 인 경우에는 $p = DOI(d_{Tx} - d)/d_{Tx}(DOI - 1)$ 확률로 링크를

설정한다. 동일한 환경에서 100번의 시뮬레이션을 수행하고 결과를 비교 분석한다.

네트워크 내 큰 홀에 따른 영향을 보기 위하여 DOI 비율은 1로 정하고 지형 모델을 변화하며 시뮬레이션을 하였다. 그림 4는 4개 Range-free 알고리즘의 홉 수에 따른 거리 오차를 보인다. Pattern-driven 알고리즘은 8 홉 이상의 앵커노드 정보는 폐기하므로 1~8 홉에 따른 거리오차만 측정하였다. 그림 4를 통해서 제안하는 알고리즘은 홉 수가 증가할수록 거리추정 정확도가 증가함을 알 수 있다. 그러나 8홉 이내의 경우에서 제안하는 알고리즘은 REP와 DV-Hop 알고리즘에 비해 거리추정의 정확도가 낮았다. 이는 제안하는 알고리즘은 전체 노드밀도에 기반을 두어 다소 큰 값을 갖는 μ_L 을 이용하지만, REP와 DV-Hop 알고리즘은 시뮬레이션에서 앵커노드의 배치로 인하여 상대적으로 작은 홉 당 평균 거리를 이용하기 때문이다. Pattern-driven 알고리즘은 일반노드가 앵커노드로부터 4홉 이내로 위치할 때, 일반노드와 앵커노드 사이에 중첩지역의 면적(노드 수)에 비례하도록 거리를 계산한다. 이러한 방법은 균일배치와 높은 노드밀도 환경에서만 높은 정확성을 보장할 수 있다. 그렇기 때문에 비등방성 요소가 적은 Regular 모델에서도 낮은 정확도를 보였다. Pattern-driven 알고리즘은 4~8홉의 경의 경우에는 일반노드가 주위 4홉 이내 위치한 앵커노드를 참조하여 거리를 보정하기 때문에 4홉 이내의 경우보다 향상된 정확도를 보였다.

최단경로의 왜곡이 극심해지는 8홉 이상에서는 제안하는 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해 거리추정의 정확도가 높았다. 특히, C-shaped과 O-shaped 모델에서 제안하는 알고리즘과 다른 알고리즘과의 성능 차이는 홉 수가 증가할수록 증가하였다. C-shaped 모델에서 REP와 DV-Hop 알고리즘의 거리오차는 65.4%와 73.7%까지 증가한 반면에 제안하는 알고리즘은 53.2%에 그쳤다. O-shaped 모델에서 홉 수가 증가할수록 DV-Hop의 성능은 조금 떨어졌지만, 제안하는 알고리즘과 REP 알고리즘은 11홉부터 정확도가 증가하였다.

그림 5는 Regular 모델에서 DOI 비율이 2인 환경에서의 각 알고리즘의 거리오차를 보인다. 그림 4의 Regular 모델에서의 결과와 비교하였을 때, REP와 DV-Hop 알고리즘의 거리오차는 10%까지 수렴하였다가 11홉부터 오차는 증가하기 시작하였다. 그리고 16홉에서 각각 13.8%와 17.5%의 거리오차를 보였다. Pattern-driven 알고리즘은 일반노드로부터 4홉

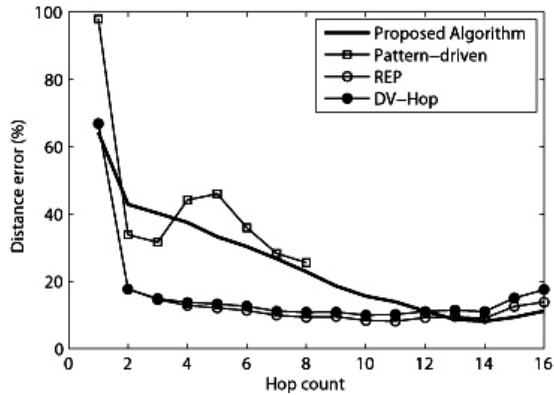


그림 5. DOI에 따른 다중 홉 Range-free 알고리즘의 거리오차
 Fig. 5. Distance errors of multihop range-free localization algorithms in high radio irregularity

이내에 위치한 앵커노드의 수가 적어 거리보정이 가능한 노드의 수가 줄어들었음을 알 수 있다. 제안하는 알고리즘은 DOI에 의해 10%의 거리오차가 증가하였다. 이는 일반노드가 바라보는 두 앵커노드의 최단 경로가 DOI에 의하여 부분적으로 중복되어 기대 이상으로 큰 가상 홉을 생성하기 때문이다. 그럼에도 불구하고 제안하는 알고리즘의 위치오차와 DOI에 따른 성능 저하는 다른 알고리즘에 비해 낮았다.

표 1은 각 알고리즘의 평균위치오차를 보인다. 제안하는 알고리즘의 평균위치오차는 모든 환경에서 다른 알고리즘에 비해 낮았다. 기존의 알고리즘이 일반노드와 앵커노드 간 홉 수가 작은 환경에서 제안하는 알고리즘보다 높은 거리추정 정확도를 보였지만, 제안하는 알고리즘은 홉 수가 큰 환경에서 다른 알고리즘에 비해 높은 정확도를 보였다. 거리오차 비율(%)이 동일하더라도 노드 간 거리가 멀수록, 즉 홉 수가 클수록 실제 거리오차가 작은 경우에 비해 상대적으로 크기 때문에 제안하는 알고리즘의 위치추정 정확도가 높았다. 또한, 제안하는 알고리즘은 두 앵커노드 조합을 이용하여 거리를 추정하기 때문에 시뮬레이션에서 각 앵커노드까지 3개의 추정거리를 얻을 수 있다. 이로 인해서 거리추정치 오차에 따른 위치추정 오차를 보다 줄일 수 있다.

통신 오버헤드 측면에서 제안하는 알고리즘은 다른 알고리즘에 비해 적은 오버헤드를 갖는다. 제안하는 알고리즘은 앵커노드의 비컨 메시지 플래딩을 위한 오버헤드 $O(AN)$ 만을 가지며, Pattern-driven, REP와 DV-Hop 알고리즘은 플래딩 외 앵커노드의 홉 당 평균 거리를 네트워크에 전송하기 위해 $O(AN)$ 의 추가 오버헤드를 갖는다. REP 알고리즘의 경우는 홉 검색

표 1. 다중 홉 Range-free 측위 알고리즘의 위치오차
 Table 1. Localization errors of multihop range-free localization algorithms

Terrain Model (DOI)	Algorithm	Localization error (d_{Tx})	Standard deviation (d_{Tx})
Regular (1)	Proposed	0.457	0.249
	Pattern-driven	0.691	0.508
	REP	0.496	0.272
	DV-Hop	0.617	0.358
C-shaped (1)	Proposed	1.113	0.939
	Pattern-driven	1.216	1.283
	REP	1.469	0.862
	DV-Hop	1.485	0.996
O-shaped (1)	Proposed	0.469	0.244
	Pattern-driven	0.789	0.640
	REP	0.612	0.353
	DV-Hop	0.703	0.382
Regular (2)	Proposed	0.502	0.303
	Pattern-driven	1.115	1.135
	REP	0.547	0.309
	DV-Hop	0.684	0.376

알고리즘에 따라 오버헤드가 더 증가한다.

V. 결론

본 논문에서는 적은 수의 앵커노드만을 이용하여 비등방성 네트워크에서 일반노드의 위치를 찾는 다중 홉 Range-free 기법을 제안하였다. 앵커노드가 적은 환경에서 대부분의 일반노드와 앵커노드 간 최단경로는 큰 홉 수를 가지며, Range-free 기법에서 큰 홉 수를 통해 수신한 앵커노드의 정보는 일반노드의 위치 측위 정확도를 극심하게 저하시키는 요인으로 여겨져 왔다. 기존의 알고리즘은 이를 해결하기 위해 우회경로를 따른다고 의심되는 앵커노드 정보의 사용을 제한하거나 네트워크의 비등방성 검출 알고리즘을 이용하여 경로의 우회 여부를 판단하였다. 그러나 이와 같은 방법은 앵커노드가 적은 환경에서 부적합하거나 지나친 통신 오버헤드를 요구한다. 제안하는 알고리즘은 앵커노드-일반노드-앵커노드 간 최단경로의 연결 정보만으로 최단경로의 우회 여부를 검사하고, 우회 정도를 고려하여 보다 정확한 거리추정이 가능하다. 또한, 앵커노드 조합에 따라 거리를 추정하기 때

문에 일반노드가 추정하는 각 앵커노드까지 거리의 개수는 총 (전체 앵커노드 수-1)개다. 보다 많은 거리측정치를 얻을 수 있음에 따라 기존 알고리즘에 비해 정확한 위치추정이 가능하다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 알고리즘은 기존 알고리즘에 비해 일반노드와 앵커노드 간 홉 수가 큰 환경에서 보다 정확한 거리추정이 가능함을 확인하였고, 4개의 앵커노드만을 이용하고 적은 오버헤드를 가지고 기존 알고리즘보다 정확한 위치추정이 가능함을 보였다.

References

- [1] B. Rao and L. Minakakis, "Evolution of Mobile Location-based Services," *Commun. ACM*, vol. 46, no. 12, pp. 61-65, Dec. 2003.
- [2] C. Y. Chong and S. P. Kumar, "Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges," *Proc. IEEE*, vol. 91, no. 8, pp. 1247-1256, Aug. 2003.
- [3] C. Fernandez-Prades, "Satellite Radiolocation from GPS to GNSS and Beyond: Novel Technologies and Applications for Civil Mass Market," *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 11, pp.1882-1904, Nov. 2011.
- [4] A. S. Paul and E. A. Wan, "RSSI-based Indoor Localization and Tracking Using Sigma-Point Kalman Smoother," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 3, no. 5, pp. 860-873, Oct. 2009.
- [5] S. D. Chitte, S. Dasgupta and Z. Ding, "Distance Estimation from Received Signal Strength under Log-Normal Shadowing: Bias and Variance," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 16, no. 3, pp. 216-218, Mar. 2009.
- [6] X. Li and K. Pahlavan, "Super-resolution TOA Estimation with Diversity for Indoor Geolocation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 1, pp. 224-234, Jan. 2004.
- [7] L. Yang and K. C. Ho, "Alleviating Sensor Position Error in Source Localization Using Calibration Emitters at Inaccurate Location," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 58, no. 1, pp. 67-83, Jan. 2010.
- [8] Y. Shen and M. Z. Win, "On the Accuracy of Localization Systems Using Wideband Antenna Arrays," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 1, pp. 270-280, Jan. 2010.
- [9] D. Munoz, F. Bouchereau, C. Vargas and R. Enriquez, "Signal Parameter Estimation for the Localization Problem," *Position Location Techniques and Applications*, United States: Academic Press, pp. 23-65, 2009.
- [10] N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin, "GPS-less Low-cost Outdoor Localization for Very Small Devices," *IEEE Pers. Commun.*, vol. 7, no. 5, pp. 28-34, Oct. 2000.
- [11] T. He, C. Huang, B. M. Blum, J. A. Stankovic and T. Abdelzاهر, "Range-free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks," in *Proc. of Int. Conf. MobiCom*, pp. 81-95, San Diego, United States, Sept. 2003.
- [12] D. Niculescu and B. Nath, "Ad Hoc Positioning System (APS)," in *Proc. of IEEE GLOBECOM*, pp. 25-29, San Antonio, United States, Nov. 2001.
- [13] Y. Shang, W. Ruml and Y. Zhang, "Improved MDS-based Localization," in *Proc. of IEEE INFOCOM*, pp. 2640-2651, Hong Kong, Mar. 2004.
- [14] S. Lee, D. Lee and C. Lee, "Enhanced DV-Hop Algorithm with Reduced Hop-Size Error in Ad Hoc Networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E94-B, no. 7, pp. 2130-2132, July 2011.
- [15] Y. Wang, X. Wang, D. Wang and D. P. Agrawal, "Range-free Localization Using Expected Hop Progress in Wireless Sensor Networks," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 20, no. 10, pp. 1540-1552, Oct. 2009.
- [16] M. Li and Y. Liu, "Rendered Path: Range-free Localization in Anisotropic Sensor Networks with Holes," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 18, no. 1, pp. 320-332, Feb. 2010.

[17] Q. Xiao, B. Xiao, J. Cao and J. Wang, "Multihop Range-free Localization in Anisotropic Wireless Sensor Networks: A Pattern-driven Scheme," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 9, no. 11, pp. 1592-1607, Nov. 2010.

[18] B. Xiao, L. Chen, Q. Xiao and M. Li, "Reliable Anchor-based Sensor Localization in Irregular Areas," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 9, no. 1, pp. 60-72, Jan. 2009.

[19] A. A. Kannan, B. Fidan and G. Mao, "Use of Flip Ambiguity Probabilities in Robust Sensor Network Localization," *Wirel. Netw.*, vol. 7, no. 5, doi:10.1007/s11276-011-0333-z, July 2011.

[20] N. B. Priyantha, H. Balakrishnan, E. Demaine and S. Teller, "Anchor-free Distributed Localization in Sensor Networks," Tech. Rep. 892, MIT Lab. For Comp. Sci., Apr. 2003.

[21] J. Sheu, P. Chen and C. Hsu, "A Distributed Localization Scheme for Wireless Sensor Networks with Improved Grid-scan and Vector-based Refinement," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 7, no. 9, pp. 1110-1123, Sept. 2008.

[22] S. Lee and C. Lee, "Range-free Localization Based on Residual Force-vector with Kalman Filter in Wireless Sensor Networks," *Journal of KICS*, vol. 34, no. 4, pp. 647-658, Apr. 2010.

[23] T. Eren, D. K. Glodenberg, W. Whiteley and Y. R. Yang, "Rigidity, Computation, and Randomization in Networks Localization," in *Proc. of INFORCOM*, pp. 2673-2684, Hong Kong, Mar. 2004.

[24] Y. Wang, J. Gao and J. S. B. Mitchell, "Boundary Recognition in Sensor Networks by Topological Methods," in *Proc. of Int. Conf. MobiCom*, pp. 122-133, Los Angeles, United States, Sept. 2006.

[25] S. Lee and C. Lee, "Broadcasting in Mobile Ad Hoc Networks," *Mobile Ad-Hoc Networks: Protocol Design*, India: Intech, pp.

579-594, 2011.

[26] L. Barriere, P. Fraigniaud and L. Narayana, "Robust Position-based Routing in Wireless Ad Hoc Networks with Unstable Transmission Ranges," in *Proc. of ACM DIALM*, pp. 19-27, Rome, Italy, July 2001.

[27] X. Wang, "QoS Issues and QoS Constrained Design of Wireless Sensor Network," Ph.D. dissertation, University of Cincinnati, 2006.

[28] J. A. Fridy, *Introductory Analysis: The Theory of Calculus*, 2nd ed., United States: Academic Press, 2000.

이 상 우 (Sangwoo Lee)



2009년 2월 아주대학교 전자공학부 학사
 2011년 2월 아주대학교 전자공학과 석사
 2011년 3월~현재 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 박사과정

<관심분야> Network Localization, Location-based Communications, Wireless Positioning System

김 선 우 (Sunwoo Kim)



1999년 한양대학교 전자전기공학부 학사
 2002년 미국 University of California, Santa Barbara 전기공학과 석사
 2005년 미국 University of California, Santa Barbara

전기공학과 박사

2005년 3월~2012년 8월 한양대학교 융합전자공학부 조교수

2012년 9월~현재 한양대학교 융합전자공학부 부교수

<관심분야> Wireless Positioning System, 수중음향통신, MIMO 레이더