

무선 센서 네트워크를 위한 저복잡도 3차원 무선측위 기법

정희원 판 트 링*, 김 광 열*, 종신회원 신 요 안*

A Simplified 3D-Location Scheme for Wireless Sensor Networks

Quan T. Hoang*, Kwangyul Kim* *Regular Members*, Yoan Shin*^o *Lifelong Member*

요 약

무선 센서 네트워크는 다양한 분야에서 광범위하게 사용되고 있으며, 무선측위는 센서 네트워크의 응용을 위한 필수적이고 핵심적인 기술로 집중을 받고 있다. 하지만 무선 센서 네트워크의 환경이 3차원으로 이루어져 있는 반면에 대부분의 무선측위 기법은 2차원으로 구현되어 있어 새로운 기법이 요구되고 있는 상황이다. 이에 본 논문에서는 3차원 공간에서 동작하는 무선 센서 네트워크를 위한 저복잡도 무선측위 메커니즘을 제안한다. 기본 개념은 2개의 앵커 노드를 한쌍으로 탑재한 비행체를 이용하는 것으로, 이 앵커 노드들은 그들의 현재 위치를 담고 있는 비컨 신호를 주기적으로 전파하며 임의 노드들은 앵커 노드들의 통신 범위에 들어가자마자 이 비컨 신호를 수신한다. 제안된 기법은 3차원 무선측위의 복잡도를 줄이기 위하여 3차원 문제를 2차원의 계산으로 변형하여 임의 노드의 위치를 추정한다. 모의실험 결과를 통해 무선 센서 네트워크에서 제안된 기법이 3차원 무선측위에 효과적임을 확인하였다.

Key Words : Wireless Sensor Network (WSN), Three Dimensional, Localization, Flying Anchors

ABSTRACT

WSNs (Wireless Sensor Networks) are becoming more widely used in various fields, and improving localization performance is a crucial and essential issue for sensor network applications. In this paper, we propose a low-complexity localization mechanism for WSNs that operates in 3D (Three-Dimensional) space. The basic idea is to use aerial vehicles or flying objects that are deliberately equipped with the anchor nodes. These anchor nodes periodically broadcast beacon signals containing their current locations, and the unknown nodes receive these signals as soon as they enter the communication range of the anchors. We estimate the locations of the unknown nodes based on the proposed scheme that transforms the 3D problem into 2D computations to reduce the complexity of 3D localization. Simulated results show that our approach is an effective scheme for 3D self-positioning in WSNs.

I. 서 론

최근에 무선 센서 네트워크는 목표물 추적, 검색 및 구조, 재해 구난, 스마트 환경과 같은 생물학, 국방, 산

업 등의 다양한 응용 분야에서 각광을 받고 있다¹⁾. 무선측위는 무선 센서 네트워크를 위한 핵심 기술로, 대부분의 무선측위 알고리즘은 일반적으로 그들의 현재 위치를 확인하여 주는 GPS (Global Positioning

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업 (NIPA-2011-C6150-1101-0004)과 지식경제부의 산업원천기술개발사업 (No.10011385-2011-32)으로 지원된 연구결과임.

* 숭실대학교 정보통신전자공학부 통신 및 정보처리 연구실({ht_quan; kky1117}@amcs.ssu.ac.kr, yashin@ssu.ac.kr), (° : 교신저자)
논문번호: KICS2011-08-340, 접수일자: 2011년 8월 5일, 최종논문접수일자: 2011년 9월 6일

System) 수신기가 탑재된 앵커 노드 (Anchor Node) 를 기반으로 임의 노드 (Unknown Node)의 위치를 계산한다. 실제 무선 센서 네트워크는 3차원에서 구현되어야 하나, 대부분의 무선측위 기법들은 2차원 배치를 가정하여 설계되어 있다. 이러한 2차원 알고리즘들은 3차원에 직접 적용하기 어려운 문제가 있으며^[2,3], 3차원 무선측위 기법들은 과도한 연산량이 요구되어 센서 노드의 전력 효율 또한 감소시킨다^[4].

이러한 문제점들을 해결하기 위하여, 본 논문에서는 무선 센서 네트워크를 위한 저복잡도의 3차원 무선측위 기법을 제안한다. 이를 위하여 동일 수직축상에 배치된 2개의 앵커 노드가 한쌍으로 탑재된 1개 이상의 비행체 (Aerial Vehicle 또는 Flying Object)를 고려한다. 비행체 탑재 앵커 노드들은 센서 네트워크가 포설된 지역을 비행하여 통과할 때 그들의 위치를 포함하고 있는 비컨 (Beacon) 신호를 전파한다. 이 때, 위치 측정이 필요한 임의 노드는 자신과 2개의 수신 비컨 신호가 위치하는 수직면을 결정한다. 그 수직면 상에서 임의 노드는 높이 정보 및 비컨의 계산된 거리를 이용함으로써 자신의 높이 좌표를 결정한다. 마지막으로, 다른 2개의 비컨의 집합을 선택하고 삼각측량 기법을 기반으로 임의 노드의 다른 좌표들을 계산한다.

비행체를 이용한 3차원 무선측위에 대해서는 최근 자주 연구 결과가 보고되고 있다^[2,5]. 여기서 비행체는 지속적인 측위를 지원하기 위하여 감지 지역을 여러 차례 비행하게 되며, 제안 기법은 이러한 종류의 시나리오에 적합하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 무선측위 관련 기존 연구에 대하여 정리하고, III장에서는 본 논문에서 제안하는 무선측위 기법에 대하여 자세하게 설명한다. IV장에서는 모의실험을 통하여 제안된 기법과 기존의 3차원 무선측위 기법의 성능을 평가하고, 마지막으로 V장에서는 결론을 내린다.

II. 무선측위 관련 기존 연구

무선 센서 네트워크를 위해 최근까지 연구된 전형적인 무선측위 기술은 거리를 측정하는 (Ranging) 방식과 거리를 측정하지 않는 (Ranging-Free) 방식으로 분류된다.

우선, 거리를 측정하지 않는 방식은 측위를 위하여 노드와의 정확한 거리나 각도를 측정하거나 추정하는 것이 아니므로 시스템을 경제적으로 구축할 수 있다는 장점이 있다. 이 가운데 “Centroid” 알고리즘은 앵커 노드들의 위치를 포함한 비컨 신호들을 이용하여

임의 노드의 위치를 계산하는 방식이다^[5]. 또한, 이 알고리즘을 향상시키기 위해 적응적인 비컨 배치 알고리즘에 대한 연구도 제안된 바 있다^[6]. 또 다른 알고리즘인 DV (Distance Vector)-Hop 측위 기법은 각 노드로부터 특정 앵커 노드까지의 홉 개수와 삼각측량을 통해 센서 노드의 위치를 추정하는 방식으로^[7], 이의 측위 정확도가 향상된 기법이 역시 제안된 바 있다^[8]. 한편 APIT은 지역 기반의 무선측위 접근 방식으로서, 앵커 노드들 사이를 삼각 영역으로 분할하고, 센서 노드가 이들 영역 안에 있는지 혹은 밖에 있는지 점검함으로써 센서 노드의 위치를 추정하는 방식이다^[9]. 또 다른 방식으로서, Ou와 Ssu는 어떤 원의 현 (Chord)에 대한 수직 이등분선이 원의 중심을 지난다는 기하학적 사실에 기반하여 이동 앵커 노드를 이용한 무선측위 기법을 제안하였다^[2]. 이 기법은 센서 노드가 무선측위를 위하여 이웃 노드들과 별도의 통신을 할 필요가 없어 여타의 거리를 측정하지 않는 다른 방식들보다 통신 비용을 절감할 수 있으며, 고정밀의 측위도 가능하다.

한편, 거리를 측정하는 방식들은 무선측위를 위하여 거리 정보를 이용한다. 무선측위에 필요한 거리 정보는 ToA (Time of Arrival), TDoA (Time Difference of Arrival), RSSI (Received Signal Strength Indicator), AoA (Angle of Arrival)와 같은 다양한 방법들을 통해 얻을 수 있다. 이 가운데 가장 널리 이용되는 ToA는 삼각측량의 대표적인 기법으로, 전파 속도를 알고 있을 때 거리를 추정하기 위하여 전송 시간을 이용한다^[10]. 이 기법은 높은 정확도를 제공한다. 이 기법은 송신기와 수신기의 엄격한 동기화를 위해서는 고가의 에너지 소모형 장비가 요구된다는 단점이 있다. 반면 TDoA는 수신기와 송신기 사이의 도달 신호의 시간차를 이용한다^[11]. 이 기법은 앵커 노드들간에 교해상도 시각 동기화가 필요하기 때문에 저전력의 센서 장비들에게는 부적합하다. RSSI는 앵커 노드로부터 센서 노드로 전송된 무선 신호의 감쇄를 측정함으로써 두 노드 사이의 거리를 추정하는 기법이다^[12]. 마지막으로, AoA는 임의 노드의 위치를 얻기 위하여 도달 신호의 각도를 이용하는 기법이다^[13]. 수중 센서 네트워크를 위한 측위 기법도 제안되었는데, 임의 노드의 위치를 추정하기 위하여 다중측량 기법과 음향 레인지 기법을 사용한다^[14]. 이러한 다양한 거리 측정 기반의 기법들은 일반적으로 높은 정확도를 얻을 수 있지만, 거리를 측정하기 위해 특수하고 복잡한 장비가 요구된다는 단점이 있다.

하지만 이러한 거리 측정 기반의 위치 추정 기법들

중에서 RSSI가 최소의 복잡도를 요구하며, 본 논문에서 제안하는 기법과 비슷한 “Landscape-3D” 기법에서도 임의의 노드의 위치를 추정하기 위하여 RSSI를 이용한다^[3]. “Landscape-3D” 기법은 RSSI 기반 거리 측정의 정확도를 향상시키기 위한 교정 절차 (Calibration Procedure)를 가지고 있으며, 이 기법의 핵심은 3차원 삼각측량을 이용한 상태 예측과 갱신의 반복이다. 각각의 임의의 노드는 비컨 신호를 수신하고 RSSI 기반으로 거리를 추정하며, 그들의 위치 추정을 갱신하기 위하여 칼만 필터 루프를 실행한다.

본 논문에서는 3차원 문제를 2차원 연산으로 변형함으로써 3차원 무선측위 기법의 복잡도를 효율적으로 감소시키는 방식을 제안한다. 제안된 기법은 임의의 노드로부터 비행체 탑재 앵커 노드까지의 거리를 추정하기 위하여 RSSI를 이용하고, 이 거리 정보를 이용하여 임의의 노드의 위치를 추정한다. 그리고 일반적인 3차원 공간에서의 삼각측량 기법은 매우 복잡한 연산을 필요로 하기 때문에, 3차원 연산을 2개의 2차원 연산으로 변형하여 간략화 한다. 이 과정에서는 우선, 한쌍의 앵커 노드를 탑재한 비행체를 이용하여 적절한 수직면상에서 임의의 노드의 높이 좌표를 쉽게 추정할 수 있다. 그 후, 3차원의 세로와 가로 좌표는 적절한 수평면상에서 2차원 삼각측위 기법을 이용하여 추정하게 된다. 이러한 방법을 통해 제안된 기법은 3차원 측위 과정에서 발생하는 복잡도를 감소시키면서도 고정밀의 위치 성능을 제공할 수 있다.

III. 제안된 무선측위 기법

본 논문에서는 비행체에 탑재된 앵커 노드의 사용을 가정한다. 고정된 앵커 노드가 오직 한번 GPS 기능을 사용하므로 나머지 오랜 기간 동안 GPS 설치 비용을 낭비하는 것과는 달리, 비행체 탑재 앵커 노드는 설치 비용 뿐만 아니라 GPS 기능을 위한 에너지도 절약한다^[15]. 여기서 비행체로는 주로 헬리콥터나 열기구 등을 고려하며, 한쌍의 앵커 노드는 이 비행체의 맨 위와 맨 아래의 동일 수직축상에 배치되는 것으로 가정한다. 이는 이들 앵커 노드들이 동일한 세로와 가로의 좌표축을 갖는다는 것을 의미한다. 각 앵커 노드는 현재 그들의 위치를 인지하기 위한 GPS 수신기를 가지고 있으며, 센서 네트워크가 포설된 지역을 비행할 때 그들의 위치를 전파한다.

모의실험에서는 비행체들 (및 이에 탑재된 앵커 노드들)이 “Random Waypoint” 모델에 의하여 동시에 움직인다^[16,17]. 이 모델에서 모의실험 공간내의 각 비

행체는 임의의 목적지를 선택함과 동시에 주어진 일정한 속도로 목적지를 향해 움직이며, 목적지에 다다른 비행체는 또 다른 임의의 목적지를 선택하고 앞서 기술한 것처럼 주어진 속도로 목적지를 향해 움직인다. 모의실험은 모든 비행체들이 이러한 수행을 반복하여 주어진 비행 경로를 마치면 종료된다. 또한, 모의실험 환경에는 앵커 노드까지의 거리를 RSSI를 이용하여 결정할 수 있는 임의로 분산된 수많은 센서 노드들이 있다고 고려한다.

본 논문에서 제안하는 무선측위 기법의 기본 원리는 측위 복잡도 및 연산 비용을 줄이기 위하여 3차원 측위 문제를 2차원 연산으로 변형하는 것이다. 그림 1에서 보는 것과 같이, 임의의 노드 U의 높이 좌표 h' 를 추정하기 위하여, h_1 과 h_2 를 각각 앵커 노드 A1과 A2의 높이 좌표라고 하자. 단, 여기서 앵커 노드 A1과 A2는 하나의 비행체에서 동일한 수직축상에 배치되므로 동일한 세로와 가로 좌표를 갖는다. 그리고 d' 와 d'' 는 임의의 노드 U로부터 앵커 노드 A1과 A2까지의 RSSI 기반으로 추정된 거리를 각각 나타낸다. 이러한 정보들은 수신된 비컨 신호들로부터 추출된다.

2개의 앵커 노드 A1과 A2, 그리고 임의의 노드 U를 통해 결정된 수직면상에서 다음과 같이 임의의 노드의 높이 h' 를 구한다.

$$d''^2 = (h_1 - h_2)^2 + d'^2 - 2(h_1 - h_2)d' \cos \alpha \quad (1)$$

$$\cos \alpha = \frac{(h_1 - h_2)^2 + d'^2 - d''^2}{2(h_1 - h_2)d'} \quad (2)$$

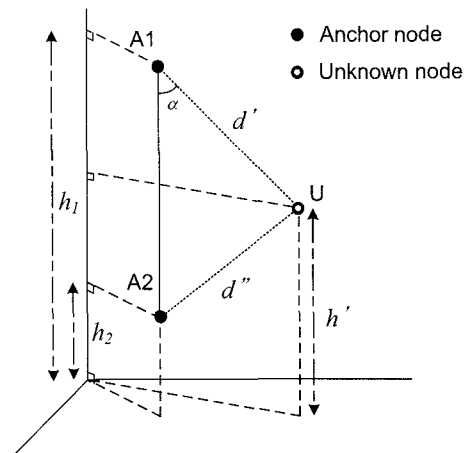


그림 1. 제안된 기법의 높이 추정 방식

$$h' = h_1 - d' \cos \alpha = h_1 - \frac{(h_1 - h_2)^2 + d'^2 - d''^2}{2(h_1 - h_2)} \quad (3)$$

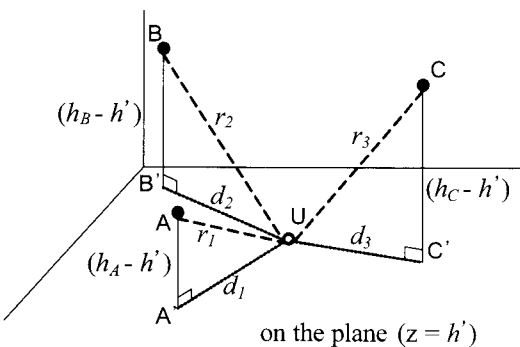
보다 향상된 정확도를 얻기 위하여 N 개 비행체에 대하여 동일한 계산을 반복한다. 이 때, 임의 노드의 높이 좌표는 식 (4)와 같이 N 개 높이 값들의 평균을 통하여 얻을 수 있다.

$$h' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[h_{i1} - \frac{(h_{i1} - h_{i2})^2 + d_i'^2 - d_i''^2}{2(h_{i1} - h_{i2})} \right] \quad (4)$$

임의 노드의 세로와 가로 좌표를 측정하기 위하여, 그림 2와 같이 적절한 3개의 앵커 노드 A, B, C를 수평면 $z = h'$ 에 투영한다. 이들 3개의 앵커 노드들은 동일선상에 존재하지 않는 3개의 최근접 수신 비컨 신호들로부터 선택된다. 수평면 $z = h'$ 상에서 앵커 노드 A, B, C가 투영된 점을 각각 A', B', C'라 하고 임의 노드 U로부터 RSSI 기반으로 추정된 앵커 노드 A, B, C까지의 거리를 각각 r_1, r_2, r_3 라 하자. 또한, h_A, h_B, h_C 를 각 앵커 노드의 높이 좌표, d_1, d_2, d_3 를 임의 노드 U로부터 A', B', C'의 거리를 각각 나타낸다고 하자. 이 때 수평면 $z = h'$ 에서 d_1, d_2, d_3 는 식 (5)와 같이 계산된다.

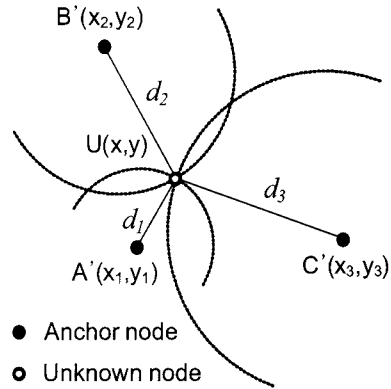
$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{r_1^2 - (h_A - h')^2} \\ d_2 &= \sqrt{r_2^2 - (h_B - h')^2} \\ d_3 &= \sqrt{r_3^2 - (h_C - h')^2} \end{aligned} \quad (5)$$

그림 3에서 $(x, y), (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ 은 수평면 $z = h'$ 상에서의 U, A', B', C'의 위치를 각각



- Anchor node
- Unknown node

그림 2. 3개 앵커 노드의 수평면으로의 투영



- Anchor node
- Unknown node

그림 3. 삼각측량을 이용한 무선측위

나타낸다. 여기서 임의 노드 U의 세로와 가로 좌표는 다음 식 (6)과 같이 추정된다.

$$\begin{aligned} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= d_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 &= d_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 &= d_3^2 \end{aligned} \quad (6)$$

이들 2차 연립 방정식을 다음과 같은 선형 연립 방정식으로 변형할 수 있다.

$$2(x_2 - x_1)x + 2(y_2 - y_1)y = \alpha \quad (7)$$

$$2(x_3 - x_1)x + 2(y_3 - y_1)y = \beta \quad (8)$$

여기서,

$$\alpha = (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \quad (9)$$

$$\beta = (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \quad (10)$$

따라서 이러한 연립 방정식은 식 (11)의 행렬 연산을 이용하여 구해진다.

$$x = \frac{\begin{bmatrix} \alpha & 2Y_1^2 \\ \beta & 2Y_1^3 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 2X_1^2 & 2Y_1^2 \\ 2X_1^3 & 2Y_1^3 \end{bmatrix}}, \quad y = \frac{\begin{bmatrix} 2X_1^2 & \alpha \\ 2X_1^3 & \beta \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 2X_1^2 & 2Y_1^2 \\ 2X_1^3 & 2Y_1^3 \end{bmatrix}} \quad (11)$$

여기서 $X_j^i \equiv (x_i - y_j), Y_j^i \equiv (y_i - y_j)$ 이다.

3차원 공간에서 목표물의 위치를 계산하기 위한 시

간은 2차원 공간에서보다 약 4배 정도의 시간이 더 필요하다^[18]. 게다가 앵커 노드의 수가 증가함에 따라 2차원 무선측위의 연산 비용은 선형적으로 증가하는 반면, 일반적인 3차원 무선측위의 연산 비용은 급격하게 증가한다^[18]. 하지만 제안된 기법은 3차원 무선측위 문제를 2차원의 연산으로 간략히 변형시킴으로써 일반적인 3차원 무선측위 기법들보다 전력 및 처리 시간을 효과적으로 절감할 수 있다. 또한 다음 장의 성능 평가 결과를 통해, 제안된 기법이 일반적인 3차원 무선측위 기법들보다 고정밀의 측위 성능을 얻을 수 있다.

IV. 모의실험을 통한 성능 평가

4.1 모의실험 환경

모의실험은 100개의 임의의 노드가 랜덤하게 배치된 $100 \times 100 \times 100 \text{ m}^3$ 크기의 3차원 입방체에서 수행되었다. 표 1은 모의실험을 위한 파라미터들을 정리한 것으로, 이들 중에서 괄호 안의 값은 기본값을 의미한다. 제안 기법의 성능을 검증하기 위해 비행체를 사용하는 또 다른 3차원 RSSI 기반 무선측위 기법들인 “Ou & Ssu” 기법^[2] 및 “Landscape-3D” 기법^[3]과 비교하였다. 모든 기법들에서 한쌍의 앵커 노드들은 비행체의 동일 수직선상에 $H \text{ m}$ 만큼 떨어져서 탑재된 것으로 가정하였다.

표 1. 모의실험 파라미터

파라미터	값
전송 범위 (R)	10,15,20,25,(30),35,40,45,50 m
비행체 개수 (N)	1,2,3,(4),5,6
비행체 탑재 앵커 노드간 수직 거리 (H)	1,1.5,(2),2.5,3,3.5,4,4.5,5 m
비행체 속도 (S)	10,15,(20),25,30,35,40,45,50 m/s
전파 불규칙도 (Degree Of Irregularity; DOI)	0,0.02,0.04,(0.06),0.08,0.1

4.2 모의실험 결과

식 (13)은 고려된 모든 무선측위 기법들의 성능 평가 척도인 평균오차 (Mean Error)를 계산하는 식으로, M 개 임의의 노드의 실제 위치 (X, Y, Z)와 추정 위치 ($\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}$) 사이의 거리 오차의 평균을 나타낸다. 각 모의실험은 평균적으로 10,000번 실행하였다.

$$\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sqrt{(\hat{X}_i - X_i)^2 + (\hat{Y}_i - Y_i)^2 + (\hat{Z}_i - Z_i)^2} \quad (13)$$

4.2.1 비행체 개수에 따른 평균오차 비교

그림 4는 비행체 개수에 따른 평균오차를 비교한 것으로, 제안 기법이 다른 기법들 보다 훨씬 적은 측위 오차를 얻는 것을 볼 수 있다. 일례로 비행체 개수 N 이 1일 때, 제안 기법의 측위오차는 “Ou & Ssu” 기법 및 “Landscape-3D” 기법보다 각각 3 m, 2 m 만큼 향상된 것을 볼 수 있다. 그리고 모든 기법에서 평균오차는 N 이 증가함에 따라 줄어드는 것을 관측할 수 있다. 특히, N 이 1에서 4까지 증가하였을 때 제안 기법의 평균오차가 다른 기법들보다 급격히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 하지만 N 이 4 이상인 경우, 다른 기법들과 마찬가지로 비행체 개수가 증가할수록 제안 기법의 평균오차 개선량이 조금씩 줄어드는 것을 볼 수 있다.

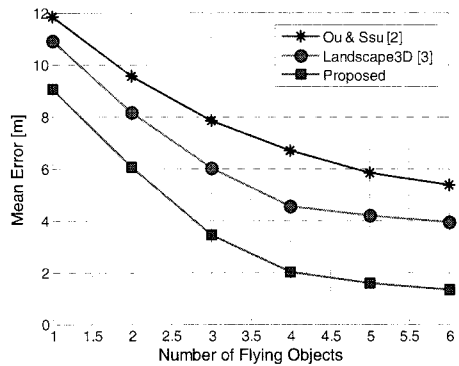


그림 4. 비행체 개수에 따른 평균오차 성능 비교

4.2.2 제안 기법에서 전송 범위에 따른 측위 성공률 비교

그림 5는 제안 기법에서 비행체 개수 N 이 1에서부터 6까지 변화할 때, 전송 범위에 따른 임의의 노드의

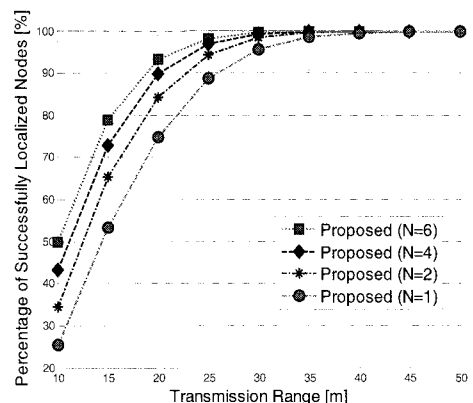


그림 5. 제안 기법에서 전송 범위에 따른 임의의 노드 측위 성공률 비교

측위 성공률을 도사한 것이다. 이로부터 전송 범위나 비행체 개수가 증가할 때, 임의 노드의 측위 성공률이 높아지는 것을 알 수 있다. 특히, 제안된 기법에서 모든 임의 노드에 대한 측위 성공률이 90% 이상이면 전송 범위 R 이 25 m 이상이고 비행체 개수가 2 이상이어야 한다는 것을 알 수 있다.

4.2.3 비행체 탑재 앵커 노드간 수직 거리에 따른 평균오차 비교

그림 6은 비행체 탑재 앵커 노드간의 수직 거리 H 에 따른 평균오차를 도사한 것이다. 이로부터 앵커 노드간의 거리가 커질수록 제안된 기법에서의 측위오차는 줄어드는 것을 볼 수 있다. 거리 H 가 1 m부터 2 m일 때에는 제안된 기법의 측위오차가 급격히 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 2 m보다 클 경우에는 대해서는 조금씩 줄어드는 것을 볼 수 있다. 반면에 “Ou & Ssu” 기법 및 “Landscape-3D” 기법에서는 앵커 노드간의 거리가 증가함에도 불구하고 평균오차는 여전히 5.8 m와 3.8 m 정도인 것을 볼 수 있다. 실제로 비행체로 이용될 헬리콥터나 무인 항공기 등에 앵커 노드를 배치하기 위한 거리 H 는 1 m나 2 m 정도가 적당하며, 이 경우에 제안된 기법의 측위오차는 각각 2.4 m와 1.3 m 정도이다.

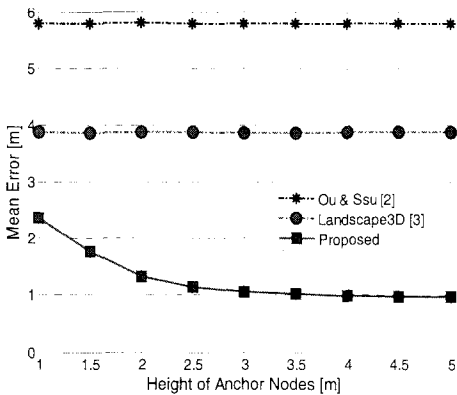


그림 6. 비행체 탑재 앵커 노드간의 수직 거리에 따른 평균오차 성능 비교

4.2.4 비행체 속도에 따른 평균오차 비교

그림 7은 비행체 속도와 평균오차의 관계를 도사한 것이다. 여기서 비행체 속도가 증가함에 따라 모든 기법에서의 평균오차는 증가하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 비행체의 속도는 증가하는 반면 비컨 신호를 수집하는 시간이 일정하다면, 임의 노드가 수신하는 비컨 신호의 개수가 자연적으로 줄어들게 되면서 측

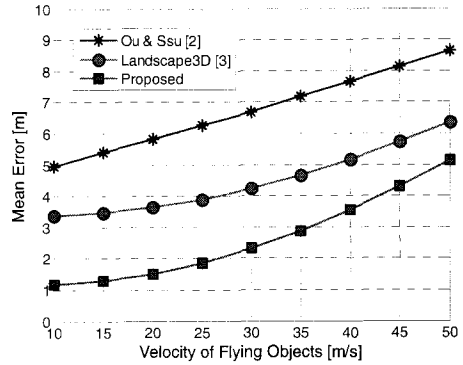


그림 7. 비행체 속도에 따른 평균오차 성능 비교

위 정밀도가 저하되기 때문이다. 비행체 속도 S 가 10 m/s부터 20 m/s까지일 때에는 제안된 기법의 평균오차는 1.2 m에서 1.5 m로 조금씩 증가하였으며, 25 m/s 이상 일 때에는 1.8 m에서 5.1 m로 급격히 증가하였다. 그리고 비행체 속도 S 에 상관없이 제안된 기법은 다른 기법들보다 항상 성능이 향상된 것을 볼 수 있다.

4.2.5 제안 기법에서 전파 불규칙도에 따른 평균오차 비교

DOI (Degree Of Irregularity) 모델은 2차원 공간에서 현실적인 라디오 전파 모델의 하나로 제안되었다^[9]. 본 논문에서는 이를 3차원 공간으로 확장하였고, RSSI가 측위 정확도에 미치는 영향을 예측하기 위하여 이 모델을 이용하였다. 여기서 DOI가 0이면 신호가 완벽히 전파된 것을 의미하고, DOI가 0.1이면 추정 거리는 가정된 전송 범위의 90%부터 110% 사이에서 임의로 선택된다는 것을 의미한다. 그림 8은 이러한 전파 불규칙도가 제안된 기법의 정확도에 미치는 영향을 보여준다. 모의실험 결과를 통해 DOI가

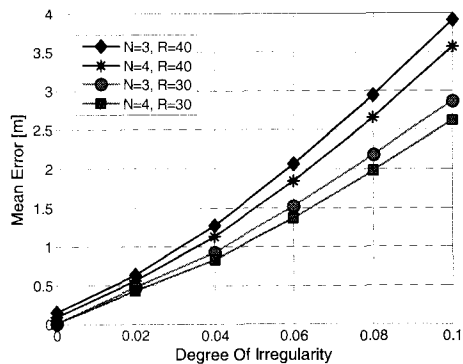


그림 8. 제안 기법에서 전파 불규칙도에 따른 평균오차 성능 비교

증가할 때에 평균오차가 증가함을 볼 수 있다. 그리고 DOI가 동일한 상황에서는 더 많은 비행체 (즉, 앵커 노드)가 사용될 때에 성능이 향상되었으며, 전송 범위가 길어질수록 평균오차는 증가함을 볼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 비행체에 탑재된 앵커 노드를 이용하는 3차원 무선측위 기법을 제안하였다. 제안된 기법에서는 비행체에 앵커 노드를 수직 배치함으로써 복잡한 3차원 무선측위 문제를 2차원의 문제로 간략화 하였다. 모의실험을 통해 제안된 기법이 다른 일반적인 3차원 무선측위 기법들보다 적은 계산량으로도 상당히 개선된 성능을 얻을 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] H. Karl and A. Willig, *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*, Ch. 2, John Wiley & Sons, 2005.
- [2] C. H. Ou and K. F. Ssu, "Sensor position determination with flying anchors in three-dimensional wireless sensor networks," *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.7, No.9, pp. 1084-1097, Sept. 2008.
- [3] L. Zhang, X. Zhou, and Q. Cheng, "Landscape-3D: A robust localization scheme for sensor networks over complex 3D terrains," *Proc. IEEE LCN 2006*, pp. 239-246, Tampa, USA, Nov. 2006.
- [4] V. Yadav, M. K. Mishra, A.K. Singh, and M. M. Gore, "Localization scheme for three dimensional wireless sensor networks using GPS enabled mobile sensor nodes," *Int'l Jour. Next-Generation Networks*, Vol.1, No.1, pp. 60-72, Dec. 2009.
- [5] N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin, "GPS-less low cost outdoor localization for very small devices," *IEEE Personal Commun.*, Vol.7, No.5, pp.28-34, Oct. 2000.
- [6] N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin, "Adaptive beacon placement," *Proc. ICDCS 2001*, Phoenix, USA, Apr. 2001.
- [7] D. Niculescu and B. Nath, "DV based positioning in ad hoc networks," *ACM Jour. Telecommun. Syst.*, Vol.22, pp. 267-280, 2003.
- [8] C. Savarese, J. Rabay, and K. Langendoen, "Robust positioning algorithms for distributed ad-hoc wireless sensor networks," *Proc. USENIX ATC 2002*, pp. 317-327, Monterey, USA, June 2002.
- [9] T. He, C. Huang, B. Lum, J. Stankovic, and T. Adalzaher, "Range-free localization schemes for large scale sensor networks," *Proc. ACM MobiCom 2003*, pp.81-95, San Diego, USA, Sept. 2003.
- [10] I. Guvenc, C. C. Chong, and F. Watanabe, "Joint TOA estimation and localization technique for UWB sensor network applications," *Proc. IEEE VETECS 2007*, pp.1574-1578, Dublin, Ireland, Apr. 2007.
- [11] A. Savvides, C. C. Han, and M.B. Srivastava, "Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors," *Proc. ACM MobiCom 2001*, pp.166-179, Rome, Italy, July 2001.
- [12] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, "Radar: An in-building RF-based user location and tracking system," *Proc. IEEE INFOCOM 2000*, Vol.2, pp. 775-784, Tel-Aviv, Israel, Mar. 2000.
- [13] D. Niculescu and B. Nath, "Ad-hoc positioning systems (APS) using AoA," *Proc. IEEE INFOCOM 2003*, Vol.3, pp.1734-1743, San Francisco, USA, Apr. 2003.
- [14] J. Jin, Y. Wang, C. Tian, W. Liu, and Y. Mo, "Localization and synchronization for 3D underwater acoustic sensor networks," *Proc. UIC 2007*, pp.622-631, Hong Kong, China, July 2007.
- [15] Z. Zhong, D.-Y. Luo, S.-Q. Liu, X.-P. Fan, and Z.-H Qu, "An adaptive localization approach for wireless sensor networks based on Gauss-Markov mobility model," *Acta Automatica Sinica*, Vol.36, No.11, pp.1557-1568, Nov. 2010.
- [16] C. Bettstetter, H. Hartenstein, and X. Perez-Costa, "Stochastic properties of the random waypoint mobility model," *Wireless Networks*, Vol.10, No.5, pp.555-567, Sept. 2004.
- [17] C. Bettstetter and C. Wagner, "The spatial node distribution of the random waypoint mobility model," *Proc. German WMAN 2002*, pp.41-58, Ulm, Germany, Mar. 2002.

- [18] C. Y. Shih and P. J. Marron, "COLA: Complexity-reduced trilateration approach for 3D localization in wireless sensor networks," *Proc. IEEE SensorComm 2010*, pp.24-32, Venice, Italy, July 2010.
- [19] N. Ababneh, "Radio irregularity problem in wireless sensor networks: New experimental results," *Proc. IEEE SARNOFF 2009*, pp. 563-567, Princeton, USA, Mar. 2009.

관 트 령 (Quan T. Hoang)
한국통신학회논문지 Vol.35, No.10 참조

정회원

김 광 열 (Kwangyul Kim)
한국통신학회논문지 Vol.36, No.6 참조

정회원

신 요 안 (Yoan Shin)
한국통신학회논문지 Vol.34, No.1 참조

종신회원