

이동 로봇의 상대위치 추정을 위한 기준노드 선택 기법

하태진¹⁾ · 김선용¹⁾ · 박선영²⁾ · 권대훈³⁾ · 함재현³⁾ · 임혁^{*1)}

¹⁾ 광주과학기술원 정보통신공학부

²⁾ 광주과학기술원 기초교육학부

³⁾ 국방과학연구소 제2기술연구본부

Reference Node Selection Scheme for Estimating Relative Locations of Mobile Robots

Taejin Ha¹⁾ · Sunyong Kim¹⁾ · Sun Young Park²⁾ · Daehoon Kwon³⁾ · Jaehyun Ham³⁾ · Hyuk Lim^{*1)}

¹⁾ School of Information and Communications, Gwangju Institute of Science and Technology, Korea

²⁾ College, Gwangju Institute of Science and Technology, Korea

³⁾ The 2nd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 15 February 2016 / Revised 18 April 2016 / Accepted 22 July 2016)

ABSTRACT

When GPS signals are not available, a relative localization can be alternatively used to represent the topological relationship between mobile nodes. A relative location map of a network can be constructed by using the distance information between all the pairs of nodes in the network. If a network is large, a number of small local maps are individually constructed and are merged to obtain the whole map. However, this approach may result in a high computation and communication overhead. In this paper, we propose a reference-node selection scheme for relative localization map construction, which chooses a subset of nodes as a reference node that is supposed to construct local maps. The scheme is a greedy algorithm that iteratively chooses nodes with high degree as a reference node until the chosen local maps are successfully merged with a sufficient number of common nodes between nearby local maps. The simulation results indicate that the proposed scheme achieves higher localization accuracy with a reduced computational overhead.

Key Words : Mobile Robots(이동로봇), Multi-Dimensional Scaling(다차원척도법), Localization(위치추정), Relative Location(상대위치), Greedy Algorithm(그리디 알고리즘)

1. 서론

정보통신 기술의 발달로 오늘날의 전투는 네트워크 중심전(network-centric warfare)의 양상을 띠며, 이는 전투체계 구축에 있어서 적의 치사율을 높임과 동시에 아군의 생존율을 높일 수 있는 무인 항공기(Unmanned

* Corresponding author, E-mail: hlim@gist.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

Aerial Vehicle, UAV) 또는 무인 자율주행차(Unmanned Ground Vehicle, UGV)와 같은 무인체계 도입의 필요성을 증대시켰다.

UAV는 베트남전에서 군사용으로 본격적으로 활용되기 시작한 후 걸프전, 아프간전, 이라크전 등에서 감시·정찰 등 보조적인 역할을 수행하며 성공적인 전투를 이끌었고, 현재는 직접적인 공격을 위한 무인 전투기 운용 연구가 이루어지고 있다^[1]. 미국의 경우 지난 2013년 7월 무인전투시범기 X-47B가 세계 최초로 항공모함에서 성공적으로 이·착륙을 하였으며, 이외에도 유럽, 이스라엘, 중국 등에서도 국가 주도하여 UAV 관련 프로젝트를 진행 중이다. 우리나라는 2018년 전력화를 목표로 한국형 중고도 무인정찰기 개발 사업을 진행 중이다. UGV 관련 연구도 미국, 이스라엘, 유럽 등에서 활발히 연구되고 있다^[2]. 미국은 소형 감시 로봇, 다목적 로봇, 차량형 로봇 및 전투형 로봇 등 전 분야에 걸쳐 실용화 기술을 확보한 상태이거나 개발이 완료된 상태이다. 이스라엘도 무인전투체계에 대해 집중적인 연구를 수행하고 있으며, 특히 전투형 로봇에 있어서 미국과 함께 2대 강국으로 분류되고 있다. 우리나라의 경우 2002년 ‘국가 지능로봇 공학육성 기본계획’을 시작으로 연구를 진행하고 있으며 국방과 학연구소에서는 2005년 야지자율주행 실험로봇 XAV를 처음 개발하였고 현재까지 지속적으로 개선 및 발전 중이다.

미래 전장에서 이러한 무인로봇을 효율적으로 활용하기 위해서는 무인로봇의 정확한 위치 정보 확보가 필수적이다. 특히, 전장 환경 특성상 다양한 방해 전파가 혼재하여 위치 정보를 파악할 수 있는 GPS(Global Positioning System) 신호에 대해 신뢰가 힘들기 때문에 이를 극복할 수 있는 기술이 필요하다. 이를 위해 미 육군 무기연구개발엔지니어링센터(ARDEC)에서는 GPS 거부지역에서 운용 가능한 무인센서 개발 계획을 발표하기도 했다^[3].

본 논문에서는 GPS 거부지역에서의 위치 추정을 위해 기존의 상대 위치 추정 기술의 문제점을 분석하고 이를 개선한 알고리즘을 제안한다. 대부분의 상대 위치 추정 기술은 위치 추정을 위한 대상 네트워크를 작은 크기의 여러 네트워크로 나누고, 각각에 대해서 위치추정을 수행한 후에 이를 통합함으로써 전체 대상 네트워크에 대한 상대위치 추정을 수행한다. 이러한 경우 네트워크를 나누는 방식에 따라 상대위치 추정 정확도 및 상호교환 정보량이 달라지게 된다. 본 논문

은 상대 위치 추정 정확도를 유지하면서도 최소개의 작은 네트워크를 만들어 상호교환 정보량을 줄일 수 있는 기준 노드 선정법을 제시하고, 시뮬레이션을 통해 기존의 방식과의 성능을 비교, 제시한다.

2. 관련 연구

2.1 위치 추정 기법

무인체계의 위치 추정은 절대위치 추정방식과 상대 위치 추정방식 두 가지로 구분되며, 절대위치 추정방식은 경·위도 등으로 표시되는 로봇의 절대적인 위치 좌표를 추정하는 것을 의미하고, 상대위치 추정방식은 두 개 이상의 로봇이 존재할 때의 로봇 간 상대적 위치를 추정하는 것을 뜻한다.

대표적인 절대 위치 추정방식은 trilateration(3변측량법)^[4] 기법이다. Trilateration은 세 개 이상의 기준점으로 부터 목표물까지의 거리 정보를 이용하여 목표물의 위치 추정하는 방식으로, 기하학을 이용하는 대표적인 방식인 triangulation(3각측량법)에 비해 작은 오차를 나타낸다. Trilateration을 이용하는 대표적인 예로는 위성항법장치(GPS)^[5]가 있다. 하지만 1장에서 언급한대로, GPS와 같은 trilateration기반 위치 추정방식은 실제 전장 환경에서는 다양한 방해 전파로 인해 불능인 경우가 많기 때문에, 위치정보를 기반으로 한 로봇 간 통신이나 라우팅 등을 수행하기 위해서는 절대위치추정 기법에 의존하지 않고 상대위치 추정 기법을 병행하여 로봇 위치 추정의 안정성과 신뢰성 확보가 필요하다.

상대 위치 측정 기법은 다양한 방법으로 분류될 수 있다. 우선 계산 방식에 따라 맵핑과 노드의 위치 계산을 동시에 수행하는 SLAM(Simultaneous Localization And Mapping) 방식과 노드 간 거리로부터 위치를 추정하는 방식으로 구분할 수 있다^[6]. 전자는 위치 지도 변환의 모호성에 유리하지만 계산량이 많은데 비해 후자는 적은 수의 센서를 요구하나 지도 변환 모호성에 약하다. 다른 분류 방식은 앵커(anchor) 노드의 유무에 따른 분류이다^[7]. 앵커 노드는 위치 정보를 갖는 노드를 의미하며, 앵커 노드들이 위치 정보를 브로드캐스팅(broadcasting) 하면 각 노드들이 수신한 신호들을 비교 분석하여 자신의 위치를 추정할 수 있다. 상대적으로 정확하며 계산 복잡도가 낮기 때문에 에너지 소모가 적으나, 앵커 노드의 설치 문제 및 확장성 부족이 단점이다. 앵커 프리(anchor-free) 방식은 싱크

(sink) 노드를 선정하고, 선정된 싱크 노드들이 자신이 측정한 주변 정보를 전달해 준다. 정보 교환을 위해 노드 간 많은 통신을 요구하며 이로 인해 에너지 소모가 큰 단점이 있고 상대적으로 부정확하나, 확장성이 있어 실제 환경에서 유용하다.

앵커 노드가 없는 위치 추정 방식 중 MDS(다차원 척도법, multi-dimensional scaling)^[8]를 활용하는 방식이다. 다수 제안되었다^[9,10]. MDS는 데이터를 2차원 이상의 다차원 공간에 기하학적으로 표현하여 데이터 간 상관관계를 비교할 수 있는 분석 기법이다. 각 데이터는 공간상의 점으로 표시되며 데이터(점) 간의 거리는 데이터 간의 유사성과 비례한다. 즉, 기준 점에서 거리가 가까운 점일수록 기준 점과 높은 유사도를 나타내는 데이터로 해석할 수 있다. MDS를 이용하여 상대 위치를 얻기 위해서는 노드(로봇) 간 거리 정보가 필요하며, 모든 로봇 간의 거리 정보를 획득하여 MDS 분석을 통해 로봇의 상대위치 지도(map)를 구성할 수 있다. 그러나 로봇의 통신 거리 제약으로 인해 모든 로봇 간의 거리를 파악한다는 것은 매우 힘든 일이므로, 실제 환경에서 MDS를 위치 추정에 적용하기 위한 연구들이 진행되어왔다.

2.2 MDS 기반 위치 추정

상대위치 추정을 필요로 하는 n 개의 노드(로봇)이 2차원 또는 3차원 공간에 임의로 분포되어 있다고 가정한다. 각 노드가 m 차원의 좌표를 갖는다고 하면, 노드 i 의 좌표는 $\mathbf{x}_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m})^T$ 와 같이 표현할 수 있다. 절대좌표가 주어지지 않는 상대좌표 추정에서, 모든 노드는 초기에 n 차원의 좌표를 가지며 (i.e., $m = n$), 노드 i 에 대하여 $x_{i,j}$ 는 노드 i 와 j 간의 측정거리 $d_{i,j}$ 로 주어진다. 이 때 거리행렬(distance matrix) D 는 다음과 같이 정의된다.

$$D = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

노드 자신과의 거리는 0이므로 거리 행렬 D 의 대각항에 위치한 원소의 값은 항상 0이다. 궁극적으로, MDS 기반 위치 추정 기법은 식 (1)의 거리 행렬 D 를 근사화하는 2차원 또는 3차원의 좌표를 구한다(i.e., $m = 2, 3$).

Double centering(이중 중심위치 결정)을 위해 중심화 행렬(centering matrix) H 를 다음과 같이 정의한다.

$$H = I_n - \frac{1}{n} \mathbf{1}_n \mathbf{1}_n^T. \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{1}_n$ 은 모든 원소가 1이고 크기가 $n \times 1$ 인 벡터를 의미하며, 중심화 행렬 H 를 이용하여 행렬 B 를 다음과 같이 정의한다.

$$B = -\frac{1}{2} \widetilde{D} H H^T. \quad (3)$$

이 때, 행렬 \widetilde{D} 는 제곱거리 행렬(squared distance matrix)을 의미한다.

$$\widetilde{D} = \begin{bmatrix} 0 & d_{12}^2 & \dots & d_{1n}^2 \\ d_{21}^2 & 0 & \dots & d_{2n}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1}^2 & d_{n2}^2 & \dots & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

행렬 B 에 대해 singular value decomposition(특이값 분해)을 적용하여 B 에 대한 eigenvalue와 eigenvector를 추출할 수 있다. 추출한 eigenvalue 및 eigenvector의 수를 k 라고 할 때, 최종적으로 k 차원 공간에 대한 상대 위치를 추정할 수 있다. 추출한 eigenvalue를 대각항으로 가지는 행렬 $A = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k]$ 와 normalized eigenvector로 이루어진 행렬 $V = [V_1, V_2, \dots, V_k]$ 에 대해 행렬 B 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$B = V A V^T. \quad (5)$$

최종적으로 MDS를 통해 추정한 노드의 상대위치 좌표 Y 는 다음과 같이 표현된다.

$$Y = V A^{1/2}. \quad (6)$$

2.3 기존의 MDS 기반 위치추정 기법

Yi^[4]가 제안한 MDS-MAP는 상대 위치를 알고자 하는 타깃 노드가 통신 거리 밖에 존재하여 거리 정보를 얻을 수 없는 경우 이를 주변 노드의 거리 정보를 조합하여 타깃의 위치를 추정하는 중앙 집중제어(centralized) 방식의 알고리즘이다. 우선 노드 전체의 연결성 정보를 확인하여 모든 노드 쌍에 대해 Dijkstra 등의 최단경로 알고리즘을 이용하여 최단경로를 찾는

다. 이 때 노드간의 거리 $d_{i,j}$ 는 두 노드간 최단경로에 있는 각 링크(link)들의 거리의 합으로 근사한다. 얻어진 최단경로 거리 값으로 거리행렬 D 를 구성한다. 이 거리행렬에 대해 MDS를 적용하면 상대 위치를 추정할 수 있다. 이 방식은 직접 연결성이 없기 때문에 측정할 수 없는 노드간 거리에 대해 최단경로를 이용한 링크간 거리의 합으로 계산하는 방식으로 찾은 최단경로의 홉(hop) 수가 증가할수록 오차가 커지게 되는 문제점이 있다.

네트워크 크기 증가에 따른 상대 위치추정 결과의 불확실성을 개선하기 위하여, MDS-MAP 알고리즘을 개선한 MDS-MAP(P)^[5]가 제안되었다. P의 의미는 patch로서, 하나의 네트워크 지도를 다수개의 지도(patch)로 나누어 각각의 상대위치를 추정하고, 이를 병합하는 방식이다. 기본적으로 분산제어(distributed) 방식으로 동작한다. 다수개의 기존의 홉 수 증가에 따른 오차를 최소화하기 위하여 모든 노드에 대해 2-hop 이내의 노드 거리 정보만을 이용하여 MDS를 적용한 후 부분적 상대위치 지도를 구성하고, 이를 병합하여 전체 노드의 상대위치 지도를 구성하는 방식으로 동작한다. 단순 거리합으로 계산되는 부정확한 거리정보 사용량이 줄어들어 기존의 MDS-MAP에 비해 상대적으로 높은 위치추정 오차를 제공한다. 하지만, 모든 노드에 대해 상대위치 지도를 구성하는 방식이므로 높은 계산 복잡도를 가진다.

Shon^[11]가 제안한 CMDS(Cluster-based MDS)는 기존 MDS-MAP의 복잡도를 낮추기 위해 노드들을 클러스터링 한 후 클러스터 별로 MDS를 수행하고 합쳐서 전체 위치를 추정한다. 이 방식은 네트워크 토폴로지에 홀(hole)이 있는 경우 MDS-MAP에 비해 성능(복잡도, 오차)을 개선할 수 있으며, 일반적인 상황에서는 측정 오차가 증가한다.

본 논문에서는 모든 노드 쌍에 대해 MDS를 적용하는 기존 방식과 달리, 상대 위치 지도의 중심이 될 기준 노드를 선택적으로 정하고, 이에 대해서 MDS를 적용함으로써 복잡도를 낮춤과 동시에 정확성을 확보하였다.

3. 제안 알고리즘

3.1 문제 정의

MDS 기반 위치 추정 기법은 거리 행렬을 사용하여

상대 위치를 추정하는데 실제 네트워크에서는 각 노드의 통신 반경의 제약으로 인해 모든 노드간의 거리를 포함한 온전한 거리 행렬을 구할 수가 없다. Fig. 1은 노드 N_1 의 2-hop 이내 주변 노드를 나타낸 것이다. 원(vertex)은 노드를 의미하며, 선(edge)은 노드 간 통신이 가능한 경우(connectivity)를 의미한다. 노드 N_1 는 노드 $N_2, N_5, N_7, N_8, N_9, N_{13}$ 과 연결 되어 직접 통신이 가능하며, 이들과의 거리정보만 가지고 있다. 따라서 N_1 에서는 전체 네트워크에 대해 온전한 거리 행렬을 구성할 수 없다.

앞서 언급한 MDS-MAP 기법은 최단경로를 이용하여 연결성이 없는 노드 쌍 간의 거리의 근사 값을 구한다. 예를 들어, 노드 N_2 와 노드 N_8 사이의 거리는 최단경로가 노드 N_2, N_1, N_8 을 차례로 지나간다고 할 때 N_2-N_1 간의 거리와 N_1-N_8 간의 거리의 합으로 근사할 수 있다. Fig. 1의 네트워크는 최단경로가 최대 4-hop을 가지는 노드 쌍(N_3-N_{10})이 존재하는 네트워크로 MDS-MAP은 4 hop만큼의 오차를 가지고 전체 위치 맵을 구성하게 된다. MDS-MAP(P)는 네트워크의 최대 hop 수와 상관없이 각 노드에서 2 hop만큼 네트워크를 추출하여 거리 행렬을 구성하고 모든 노드에 대한 정보를 종합하여 전체 위치 맵을 구성하게 된다. 이때 각 노드의 상대위치 지도를 선형 변환하여 전체 위치를 추정하는 과정에서 상당한 계산량을 요구한다. 따라서 실제 전장 환경에 적용될 수 있도록 기존 MDS 기반 위치 추정 기법의 단점인 거리 근사로 인한 오차를 줄이고 계산 복잡도를 낮추는 기법이 필요하다.

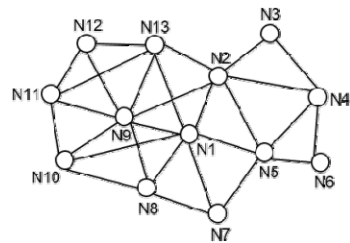


Fig. 1. 2-hop neighbor nodes of node N_1

3.2 기준노드 선정 알고리즘

본 논문에서는 기존 MDS기반 위치 추정 방식들의 문제점인 높은 계산 복잡도와 근사를 통한 오차 발생을 줄이기 위해 위치 지도 구성 시 모든 노드에서 구한 지도를 결합하는 방식이 아닌 1개의 최적 노드 선정하는 방식을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 greedy

알고리즘으로 상대위치 지도를 구성할 노드의 개수를 차츰 늘려가며 최적의 노드 개수를 찾는 방식이다.

우선 총 n 개의 노드를 가진 네트워크에 대해 노드들 간의 연결성 정보를 담고 있는 인접행렬(adjacency matrix) C 를 구성한다. C 는 $n \times n$ 크기의 이진(binary) 행렬로 노드 i 와 노드 j 가 서로 연결되어 있는 경우 C 의 원소 $c_{i,j}$ 는 1의 값을 가진다. 예를 들어, Fig. 1에 대한 인접행렬은 다음과 같다.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

n 개의 노드 중 지역적 상대위치 지도의 중심이 될 l 개의 노드를 ‘기준노드(reference node)’라고 명명하며, 기준노드 벡터 s 는 다음과 같이 정의된다.

$$s = \{s_1, s_2, \dots, s_l\}. \quad (8)$$

이 때, 기준노드 벡터의 원소는 각 기준노드의 인덱스를 의미하며, 전체노드에 대한 벡터를 u 라 할 경우 비기준노드 벡터는 $s^C = u - s$ 로 표현할 수 있다. 또한, 기준노드 벡터의 cardinality는 $\|s\| = l$ 이므로, $\|u\| = n$, $\|s^C\| = n - l$ 이다.

최종적으로 원하는 위치 좌표의 차원이 m^* 인 경우, 초기 기준노드의 개수 l_0 는 $m^* + 1$ 개부터 시작한다. 즉, 2차원 좌표를 구하고 싶은 경우 기준노드 개수의 초기 값은 3개이다. 이는 기준노드로부터 얻은 상대위치 지도 결합 때문이다. 상대위치 지도간의 결합은 위치 지도의 선형 변환(이동, 회전, 크기 조정)을 통해 이뤄지는데, 개수가 m^* 개만큼만 있는 경우에는 지도가 반전된 상태를 인지할 수 없다. Fig. 2는 2차원 공간에서 공통 노드 N_1, N_2 를 기준으로 MAP 1과 2를 결합하는 예시이다. 상대위치 지도이기 때문에 MAP 2가 반전이 되어도 MAP 2의 상대위치 정보에는 이상이 없으며, 두 지도 간의 결합도 문제없이 이루어지지만, 결합 이후 두 경우의 위치 지도는 차이를 보인다.

즉, 유일한 결합 지도를 얻을 수 없다. 이와 같은 상황은 $m^* + 1$ 개 이상의 상대 위치지도를 이용함으로써 방지할 수 있다.

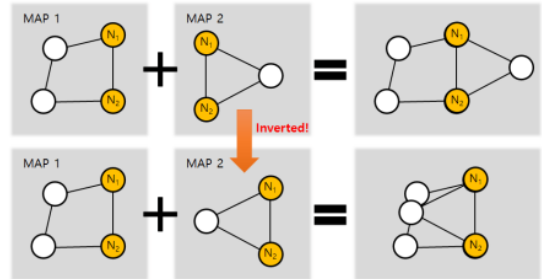


Fig. 2. Merging relative-location maps

Fig. 2에서 두 MAP의 공통 노드(N_1, N_2)의 개수가 2개가 아니라 3개 이상인 경우 지도의 개수가 $m^* + 1$ 가 되지 않아도 반전을 인지할 수 있다. 즉, 지도 간의 공통된 노드의 degree(이웃 노드의 수)가 높을수록 결합 지도의 구성이 쉬워짐을 알 수 있다. 이를 반영하기 위해 노드 중 기준노드 $m^* + 1$ 개 이상 연결된 노드의 비율을 δ ($0 < \delta \leq 1$)로 정의한다. δ 가 커질수록 지도간의 공통된 노드의 수는 많아지지만, 이를 만족하기 위한 기준노드의 수 또한 증가하므로 지도 구성의 복잡도와 지도 결합의 복잡도 간의 적절한 값을 찾는 것이 중요하다.

기준노드를 선정하는 방법은 degree가 높은 노드를 우선적으로 선택하는 방식을 따른다. 직관적으로, degree가 높은 소수의 노드에 대해 우선적으로 상대위치 지도를 구성하는 것이 δ 를 달성하기에 유리하며, 이는 기준노드 개수의 최소화, 즉, 상대 위치 지도 결합의 복잡도를 낮추는 결과를 가져온다. 또한 같은 수의 기준노드에 대해 연결성이 높은 경우 더 많은 위치 정보를 가질 수 있으므로 오차 또한 줄어들게 된다.

따라서 초기 기준노드는 $\text{degree}(n_i)$ 의 $\text{degree} = \sum_{j=1}^n c_{i,j}$ 가 높은 순으로 l_0 개를 선택하여 초기 기준노드 벡터 $s_0 = \{s_1, s_2, \dots, s_{l_0}\}$ 를 구성한다.

초기 기준노드가 선정되면, 이후에는 그리디 방식으로 δ 를 만족할 때까지 기준노드를 계속 추가한다. 비(非)기준노드 중 한 개의 노드를 임시로 기준노드로 선정한 후, 기준노드와 비기준노드 간의 연결성을 비교하여 최종 추가 노드로 선정한다. 연결성 비교는 앞

서 언급한대로 상대 위치 지도 결합 시 복잡도를 낮추기 위해 degree가 $m^* + 1$ 이상인 노드들이 많아지도록 하는 후보 노드를 우위에 둔다. 기준노드 벡터 \mathbf{s}_j 에 대해, 모든 노드와 기준노드와의 연결성을 나타내는 벡터 \mathbf{d} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{d}(\mathbf{s}_j) = \{d_1, d_2, \dots, d_n\} \quad (9)$$

이 때, d_i 는 노드 N_i 가 \mathbf{s}_j 에 속한 노드(기준노드) 중 몇 개의 노드와 연결되어 있는지를 나타낸다. $N_i \notin \mathbf{s}_j$ 인 노드 N_i 에 대해 $\mathbf{d}_i(\mathbf{s}_j) = \mathbf{d}(\mathbf{s}_j \cup \{N_i\})$ 로 정의하고 $\mathbf{d}_i(\mathbf{s}_j)$ 의 원소들 중 값이 $m^* + 1$ 이상인 원소의 개수를 Δ_i 라 하면, 기준노드에 추가될 노드 N_i^{\max} 는 Δ_i 를 최대화하는 노드로 구할 수 있다. 후보 노드 선택 시 동물이 발생한 경우, $\mathbf{d}_i(\mathbf{s}_j)$ 의 원소들 중 값이 m^* 이상인 원소의 개수를 비교하여 선정하며, 차후 계속 동물 발생 시 같은 방식으로 반복한다. 선정된 노드에 대해 기준노드벡터를

$$\mathbf{s}_{j+1} = \mathbf{s}_j \cup \{N_i^{\max}\}, \quad N_i^{\max} \notin \mathbf{s}_j \quad (10)$$

와 같이 업데이트 한 후, 주어진 조건 δ 를 비교한다. 그리고 $\Delta_i \geq \delta \cdot n$ 를 만족할 때까지 반복하여 기준노드를 추가 선정한다.

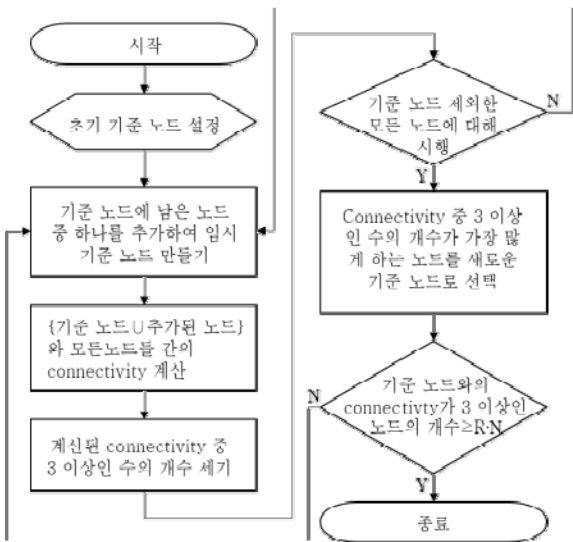


Fig. 3. Procedure of the proposed algorithm

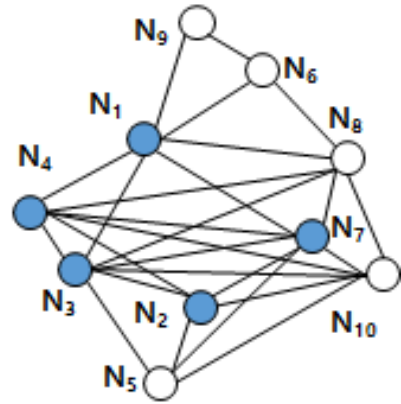


Fig. 4. Example of selecting reference nodes

3.3 제안 알고리즘 적용 예시

Fig. 3는 제안 알고리즘에 대한 순서도를 나타내며, Fig. 4의 예시를 이용하여 알고리즘을 적용하면 다음과 같다. $m = 2, n = 10$ 인 환경이며 δ 의 값은 0.8로 정한다.

- 1) 우선 Fig. 4의 인접행렬을 구하여 각 노드의 degree를 확인한다. 초기 기준노드 벡터는 degree가 7인 노드 N_3, N_7 와 degree가 6인 노드 중 가장 빠른 인덱스를 가지는 N_1 로 선정한다(i.e., $\mathbf{s}_0 = \{s_1, s_3, s_7\}$).
- 2) 기준노드로 추가할 노드 선정을 위해 각 비기준노드별 $\mathbf{d}_i(\mathbf{s}_0)$ 및 Δ_i 를 계산한다.

예) $\mathbf{d}_2(\mathbf{s}_0) = \{2, 2, 3, 4, 3, 1, 3, 4, 1, 3\} \rightarrow \Delta_2 = 6$

- 3) N_4 가 $\Delta_4 = 7$ 로 최대값을 가지므로 N_4 를 기준노드로 추가 선정한다.

$$\mathbf{s}_1 = \mathbf{s}_0 \cup \{N_4\}$$

- 4) 현재 $\Delta_4 < \delta \cdot n = 8$ 이므로 다시 추가 기준노드를 선택한다. $\mathbf{d}_i(\mathbf{s}_1)$ 및 Δ_i 를 계산하면

$$\mathbf{d}_2(\mathbf{s}_1) = \{3, 3, 4, 4, 3, 1, 4, 4, 1, 4\} \rightarrow \Delta_2 = 8$$

$$\mathbf{d}_{10}(\mathbf{s}_1) = \{3, 4, 4, 4, 3, 1, 4, 5, 1, 3\} \rightarrow \Delta_{10} = 8$$

이 되어 두 개의 후보노드가 생긴다. $m^*(=2)$ 이상인 노드의 개수도 0으로 동일하고 $m^* - 1(=1)$ 이상인 노드의 개수 또한 2개로 동일하므로 인덱스가 빠른 N_2 를 추가 기준노드로 선정한다.

- 5) $\Delta_2 \geq \delta \cdot n = 8$ 을 만족하므로 알고리즘을 종료한다. 최종 기준노드는 총 5개이며, 최종 기준노드 벡터는 $\mathbf{s}_2 = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_7\}$ 이다.

4. 성능 평가

4.1 시뮬레이션 환경

제안한 기준노드 선택 기법의 성능 평가를 위해 MATLAB 소프트웨어를 사용하여 알고리즘을 구현하고 시뮬레이션을 수행하였다. 네트워크 토폴로지는 2차원 공간(10 km × 10 km)에서 로봇(노드)들이 무작위로 존재하는 상황을 가정하며, 각 노드들은 3 km의 동일한 통신거리를 가진다고 가정하였다. 각 노드에서 통신거리 안에 있는 다른 노드까지의 거리는 거리측정 방법을 통해 알 수 있고, 측정 오차는 없다고 가정한다. 최단경로는 Dijkstra 알고리즘을 이용하여 구하였다. 본 시뮬레이션에서는 3가지 요소에 대해 평가를 수행했으며, 평가에 따라 앞서 언급한 MDS-MAP 및 MDS-MAP(P)기법과의 비교를 수행하였다. 본 실험에서는 특정 크기의 대상 공간과 통신거리에 대하여 실험하였으나, 통신거리를 대비 상대적 성능으로 정규화될 수 있다.

4.2 시뮬레이션 결과

4.2.1 δ 에 따른 성능 평가

δ 는 MDS 수행 시 결합해야 할 상대위치 지도의 수에 영향을 주는 요소이므로, 주어진 네트워크와 성능 목표에 맞게 δ 를 정해주는 것이 중요하다. 본 시뮬레이션에서는 δ 값의 변화에 따른 평균 오차 및 총 기준노드 수의 변화를 확인한다. Fig. 5는 δ 의 변화에 따른 위치 추정 값의 오차를 노드 수 별로 나타낸 그래프이며, δ 가 증가함에 따라 위치 추정 오차가 줄어드는 경향을 나타낸다. 이는 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 δ 가 증가하면서 기준노드의 수가 증가하게 되고, 결합하는 상대 위치 지도의 수가 늘어나게 되어 많은 정보를 통해 위치를 추정하기 때문이다. δ 값 선택에 따라 20~43 %의 오차 개선율을 보인다.

4.2.2 전체 노드 수에 따른 성능 평가

동일 면적에 노드 수가 증가하면 노드 간 거리가 짧아지기 때문에 직접 통신할 수 있는 노드의 수가 증가한다. 이는 위치 추정의 정확도를 높일 수 있으며, 결합해야 할 상대 위치 지도의 수가 늘어나는 결과를 낳는다. Fig. 7은 δ 가 0.9일 때 노드 수에 따른 위치 추정 값의 오차를 나타낸다. 노드가 적을수록 위치 추정 오차 개선율이 높은 것을 알 수 있으며, 이는 노드 수가 늘어날수록 노드 간 거리 근사 빈도수가 감소하

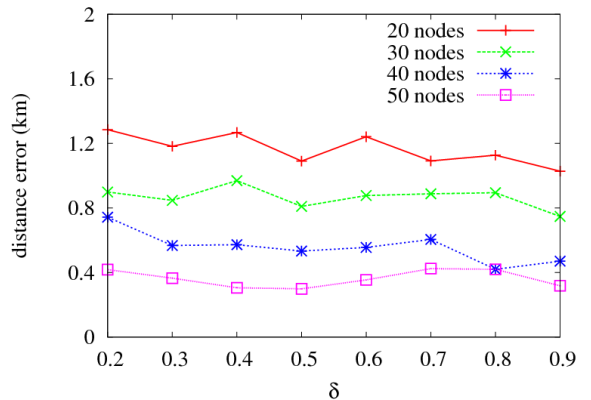


Fig. 5. Localization performance with respect to δ

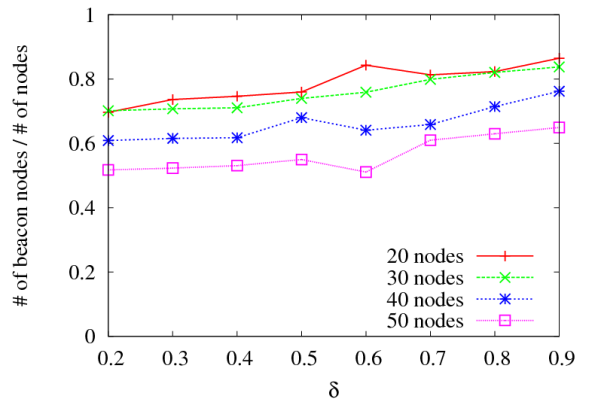


Fig. 6. Number of relative maps with respect to δ

기 때문이다. 반면, Fig. 8에서 보듯이 MDS-MAP(P) 방식에 비해 적은 상대 위치 지도의 수로 나온 성능의 위치 추정을 달성할 수 있다. 8~17 %의 오차 개선율을 나타내며, 상대 위치 지도의 수는 최대 59 % 절감하는 효과가 있다.

4.2.3 네트워크 연결 정도에 따른 성능 평가

마지막으로, 네트워크 연결 정도(전체 노드의 평균 Degree)는 네트워크의 밀집도를 나타내며, 서로 잘 연결된 네트워크 일수록 노드 간 거리 측정이 용이하여 인접행렬 완성이 쉽다. Fig. 9는 평균 Degree에 따른 위치 추정 값의 오차를 나타내며, Fig. 10는 평균 상대 위치 지도 수를 나타낸다. 앞서 두 개의 지표와 유사한 결과를 나타내고 있다. Degree가 낮을수록 노드 간 거리 측정이 힘든 네트워크이므로 제안 알고리즘의 높은 오차 개선율을 보이고, Degree가 높을수록

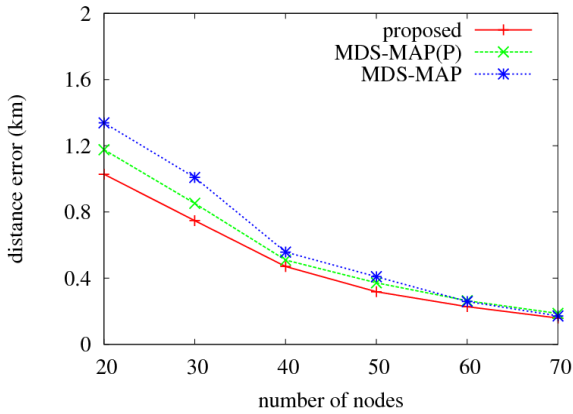


Fig. 7. Localization performance with respect to number of nodes

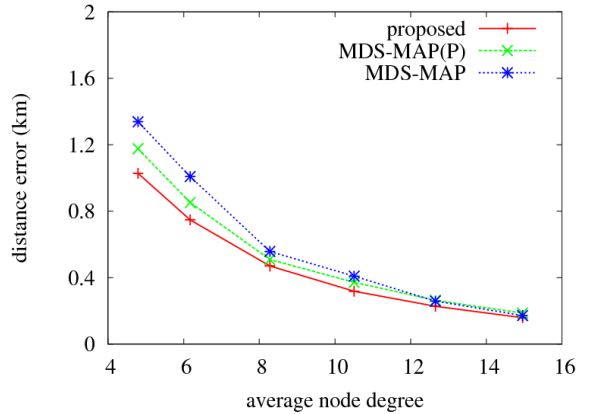


Fig. 9. Localization performance with respect to average degree

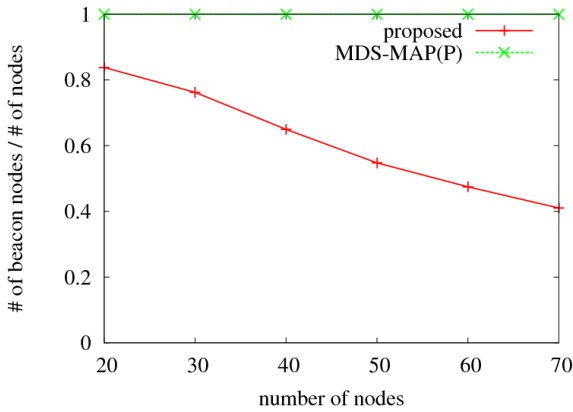


Fig. 8. Number of relative maps with respect to the number of nodes

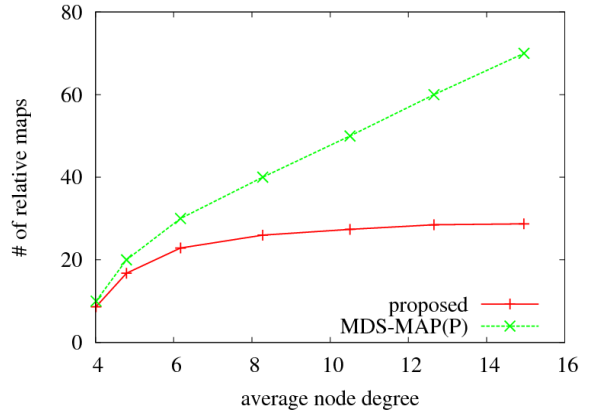


Fig 10. Number of relative maps

결합 할 상대 위치 지도의 수가 낮아짐을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문은 절대위치를 측정하기 힘든 전장 환경에서 로봇의 상대위치 파악을 위한 MDS 기반 위치 추정 기법 수행 시 계산 복잡도와 오차를 줄여주는 기준노드 선정 기법을 제안한다. 기존 MDS 기반 위치 추정 기법이 갖고 있는 문제점인 높은 계산 복잡도와 위치 추정의 오차를 해결하기 위해 모든 노드에서 상대 위치 지도를 구성하는 대신, 노드 간 연결도가 높

은 노드를 선택하여 상대 위치 지도를 구성함으로써, 결합해야 할 상대 위치 지도의 수를 줄임과 동시에 위치 추정 오차를 개선하는 기준노드 선택 기법이다. 시뮬레이션 결과는 제안한 알고리즘이 기존 알고리즘에 비해 사용되는 상대 위치 지도의 수를 낮춤으로써 상대 위치 지도 결합 복잡도를 줄임과 동시에 노드 간의 부정확한 거리 근사의 빈도를 줄여 위치 추정 오차를 줄여주는 것으로 나타났다.

후 기

본 논문은 국방과학연구소의 “그룹 무인로봇체계용 위치기반 전술 MANET 통신/제어 S/W 개발” 과제의

지원을 받아 수행된 연구임.

References

- [1] Sung-Bae Kim, Sung-Jin Kim, "Trends and Issues of Military Unmanned Aerial Vehicles in Major Countries," Korea Defense Issue & Analysis(Korean Version), Vol. 1501, pp. 1-11, 2014.
- [2] Ji-Eun Lee, "Development Status and Trends of Unmanned Ground Combat Systems," Agency for Defense Technical Investigation Paper(in Korean), Vol. 425, pp. 96-107, 2014.
- [3] Naomi Zirkind, "Algorithmic Approaches for Place Recognition in Featureless, Walled Environments," No. ARWSE-TR-14009, Army ARDEC, 2015.
- [4] Federico Thomas, and Lluís Ros, "Revisiting Trilateration for Robot Localization," IEEE Transactions on Robotics, Vol. 21, No. 1, pp. 93-101, 2005.
- [5] Bernhard Hofmann-Wellenhof, Herbert Lichtenegger, and James Collins, "Global Positioning System: Theory and Practice," Springer Science & Business Media, 2013.
- [6] Carmelo Di Franco, Alessandra Melani, and Mauro Marinoni, "Solving Ambiguities in MDS Relative Localization," IEEE International Conference on Advanced Robotics(ICAR), pp. 230-236, 2015.
- [7] Zhe Qu, Minglei Shu, Ming Yang, Chongqing Zhang, Nuo Wei, Qingbei Guo, and Tao Du, "An Energy Efficient Anchor-Free Localization Algorithm for No-Identity Wireless Sensor Networks," International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015.
- [8] Warren S. Torgerson, "Multidimensional Scaling: I. Theory and Method," Psychometrika, Vol. 17, No. 4, pp. 401-419, 1952.
- [9] Yi Shang, Wheeler Ruml, Ying Zhang, and Markus P. J. Fromherz, "Localization from Mere Connectivity," Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing(MobiHoc), pp. 201-212, 2003.
- [10] Yi Shang, and Wheeler Ruml, "Improved MDS-based Localization," IEEE Computer and Communications Societies(INFOCOM), Vol. 4, pp. 2640-2651, 2004.
- [11] Minhan Shon, Minho Jo, and Hyunseung Choo, "An Interactive Cluster-based MDS Localization Scheme for Multimedia Information in Wireless Sensor Networks," Computer Communications, Vol. 35, pp. 1921-1929, 2012.