

재난 구조용 다중 로봇을 위한 GNSS 음영지역에서의 TWR 기반 협업 측위 기술

TWR based Cooperative Localization of Multiple Mobile Robots for Search and Rescue Application

이창은[†], 성태경¹

Chang-Eun Lee[†], Tae-Kyung Sung¹

Abstract For a practical mobile robot team such as carrying out a search and rescue mission in a disaster area, the localization have to be guaranteed even in an environment where the network infrastructure is destroyed or a global positioning system (GPS) is unavailable. The proposed architecture supports localizing robots seamlessly by finding their relative locations while moving from a global outdoor environment to a local indoor position. The proposed schemes use a cooperative positioning system (CPS) based on the two-way ranging (TWR) technique. In the proposed TWR-based CPS, each non-localized mobile robot act as tag, and finds its position using bilateral range measurements of all localized mobile robots. The localized mobile robots act as anchors, and support the localization of mobile robots in the GPS-shadow region such as an indoor environment. As a tag localizes its position with anchors, the position error of the anchor propagates to the tag, and the position error of the tag accumulates the position errors of the anchor. To minimize the effect of error propagation, this paper suggests the new scheme of full-mesh based CPS for improving the position accuracy. The proposed schemes assuring localization were validated through experiment results.

Keywords Two-way-ranging (TWR), Ultra-wideband (UWB), Full-mesh based Cooperative Positioning System (CPS)

1. 서론

재난환경에서 구조 및 탐사 임무를 수행하는 다중 로봇들의 원격관제를 위해서는 실시간 위치정보는 매우 중요한 요소이다. 그러나 재난환경에서는 측위 인프라가 소실되었고 또한 GNSS (Global Navigation Satellite

System) 신호 역시 높은 건물 잔해 등에 의해 미약하며 로봇이 탐사해야 하는 실내 및 터널, 지하공간 등은 GNSS 음영 지역이므로 측위 정확도는 매우 낮다^[1-3]. 따라서 이와 같은 환경에서의 GNSS 측위를 보완하기 위한 여러 가지 대체 방법들이 연구되고 있다. Kurazume 등은 레이저와 포토 디텍터를 이용하여 상대거리와 각도를 계산하는 AOA (Angle of Arrival) 기반 협업 측위 시스템을 제안하였다^[4]. 그러나 이 협업측위 시스템은 성능은 우수하지만 가격이 비싸고 로봇이 바라보는 시선각 벡터가 60도라는 제약사항이 있다. Ryan Parker 등은 차량의 협업 측위를 위하여 RSS (Received Signal

Received : Jun. 2. 2016; Revised : Jul. 19. 2016; Accepted : Jul. 21. 2016

※This work was supported by the Industrial Foundation Technology Development Program of MKE/KETI [Development of Collective Intelligence Robot Technologies]

[†]Corresponding author: Intelligent and Robot Control Research Laboratory, ETRI, Yuseong-gu, Daejeon, Korea (celee@etri.re.kr)

¹Information and Communication Engineering, Chungnam University (tksaint@cnu.ac.kr)

Copyright©KROS

Strength)를 거리 측정치로 이용한 측위 기법에 대하여 연구하였다⁵⁾. 이 또한 측정치의 수가 부족할 시 측위 결과가 위상기하학적으로는 동일하나 서로 다른 위치에 존재하고 위치의 뒤집힘 모호성(Flip ambiguity), 위치의 휨 모호성(Flex ambiguity) 등의 ambiguity를 초래할 수 있음이 지적되고 있다. 또한 WLAN, WPAN, 적외선, 초음파 등을 이용하는 대체 항법도 연구되고 있다⁶⁾.

이와 같이 최근 실제 재난현장 및 전장 등 인프라가 소실된 환경에서 별도의 인프라 구축 없이 이러한 대체 항법을 적용시켜야 하는 요구사항이 대두되고 있다. 특히 소대/중대의 병사나 군집 로봇 등과 같이 군집으로 대형을 유지하며 이동하는 경우, 군집 로봇들간의 상대 위치를 파악하는 것은 매우 중요하며, 인프라가 소실된 GNSS 음영지역에서 TWR (Two Way Ranging) 기반 무선 협업 측위 기술은 무선 통신을 통하여 군집 로봇들간 거리 및 상대 위치를 구하는 방법으로써 측위 구성요소의 이동이 자유롭고 측위 정보 외에도 무선통신을 통하여 기타 정보를 공유할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 논문은 재난 탐사 및 구조용 다중 로봇들을 위한 GNSS 음영지역에서의 끊임없는 고정밀 실내외 연속 측위를 가능하게 하는 TWR 기반 협업 측위 기술을 제안한다. 2장에서는 이와 같은 TWR 기반 협업 측위 기술을 제시하고, TWR 기반 협업 측위 기술의 측위 오차 전파 원인에 대해 분석하고 이를 최소화하기 위한 전방(Full-Mesh)형 협업 측위 메커니즘 및 제약조건 생성방안에 대해 제안하며 마지막으로 제안된 방법이 최종 측위 오차에 대한 성능 향상을 제공함을 실험을 통해 검증 한다.

2. TWR 측정치 기반의 협업 측위 시스템

2.1 TWR based Cooperative Positioning Robot System

Fig. 1은 TWR 측정치 기반 협업 측위 기술을 나타낸다. 실외에 있는 이동형 단말은 GNSS로 측위를 수행하고, GNSS 음영 지역으로 진입한 이동형 단말은 Fig. 1의 동작메커니즘과 같이 TWR 측정치 기반의 협업 측위를 통하여 위치를 계산한다. Fig. 1의 1에서와 같이 모든 이동형 단말이 실외에 있는 경우에는 GNSS로 자신의

위치 를 계산하며 임무를 수행한다. Fig. 1의 2와 같이 만약 이동형 단말 중의 일부가 GNSS 음영 지역으로 진입하면 자신의 위치를 구할 수 없음을 BS (Base Station)에게 알린다. Fig. 1의 3과 같이 BS는 GNSS 음영 지역으로 진입한 이동형 단말을 태그 모드로 전환하도록 하고 GNSS로 위치를 구할 수 있는 이동형 앵커와 GNSS 음영 지역 및 실내에 있는 태그 모드의 이동형 단말 간에 TWR을 수행하여 태그의 위치를 구하는 실내외 연속 협업 측위를 수행한다. Fig. 1의 4와 같이 위치를 구한 태그는 앵커 모드로 전환되어 위치를 모르는 주변 새로운 이동형 단말의 협업 측위를 지원할 수 있다.

기존의 TWR 기반 측위의 경우에는 고정된 위치에 설치된 앵커를 사용하여 태그의 위치를 계산하기 때문에 다중경로 오차, 앵커와 태그 간의 클럭 오프셋, TWR 측정치 해상도 등이 위치 오차의 주요 요인이다. 그러나 TWR 기반 협업 측위에서는 이러한 요소 이외에도 이동형 앵커의 위치 오차도 태그의 위치 오차에 영향을 준다. 이를 분석하기 위하여 우선 협업 측위 시스템의 거리 오차에 대하여 모델링 하였고 TWR 기반 위치 추정치의 오차를 분석한다.

태그로 지정된 이동형 단말이 앵커로 지정된 이동형 단말들과 거리를 구하여 위치를 계산할 때 앵커들의 위치 오차가 태그의 위치 오차로 전파된다. 다수의 이동형 단말이 GNSS 음영지역으로 진입하면 GNSS로 위치를 구한 이동형 앵커뿐만 아니라 앵커와 TWR을 수행하여 위치를 구한 태그도 앵커로 이용될 수 있다. 이와 같이 군집 개체간의 협업 측위를 수행할 때 GNSS로 위치를 구한

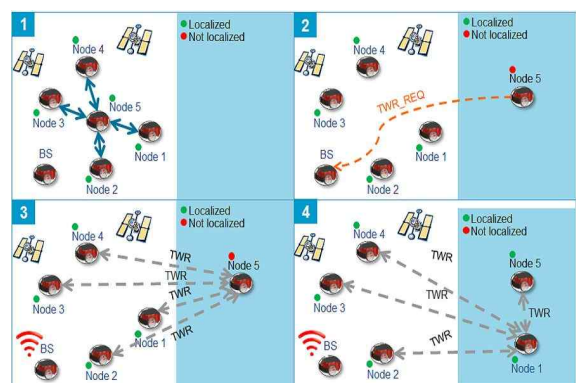


Fig. 1. The operational mechanism of TWR-based CPS

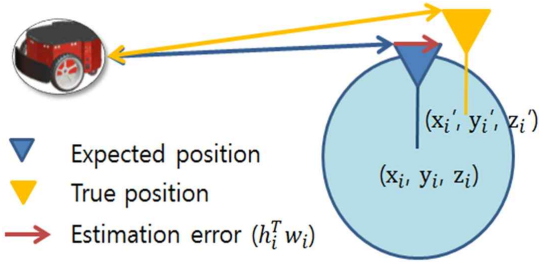


Fig. 2. Range error propagation of mobile node

이동형 앵커와 직접 TWR을 수행할 수 없는 경우에는 위치 오차가 누적되며, 본 절에서는 이러한 거리 오차 전파를 수식화 한다. Fig. 2는 앵커 위치 오차와 거리 오차의 관계를 도식한 것이다.

Fig. 2에서 실제 위치는 단말의 실제 위치이고 안테나의 예상 위치는 단말이 GNSS 등을 통하여 구한 위치라고 가정한다. 한편, 측위 모델은 측정치 및 안테나의 예상 위치를 이용하는데 안테나의 예상 위치가 안테나의 실제 위치와 일치하지 않기 때문에 추정 거리 오차가 발생하게 된다. 다시 정리하면, 측위 모델에서는 로봇과 안테나의 예상 위치 간 거리만큼의 TWR 측정치가 획득된다고 가정하기 때문에 이 차이만큼의 오차가 거리 측정치에 반영된다. 따라서 이러한 오차 발생을 최소화하기 위하여, 모든 노드 간의 가능한 TWR 측정치를 이용하여 미지의 노드 위치뿐만 아니라, 오차를 포함하고 있는 노드들의 위치도 함께 보정해 주는 Full-mesh 기반 협업 측위 시스템을 제안하였다.

다중경로 오차와 앵커와 태그 간의 클럭 오프셋이 없고 TWR 측정치의 해상도가 충분히 높다고 가정할 때, 태그와 앵커 사이의 TWR 측정치는 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} + w_i \quad (1)$$

식에서 x_i, y_i, z_i 는 i 번째 앵커의 위치이고 x_u, y_u, z_u 는 태그의 위치이며, w_i 는 측정 노이즈를 나타낸다. 식 (1)은 비선형 방정식이며 이를 풀기 위해서는 선형화가 적용되어야 한다. 여기서 태그의 위치는 다음과 같은 식 (2)를 통해 얻을 수 있다^[7].

$$\delta\rho_i = \rho_i - \rho_{i0} = \frac{-(x_{u0} - x_i)}{\rho_{i0}} \delta x_u + \frac{-(y_{u0} - y_i)}{\rho_{i0}} \delta y_u + \frac{-(z_{u0} - z_i)}{\rho_{i0}} \delta z_u \quad (2)$$

여기서 x_{u0}, y_{u0}, z_{u0} 는 태그의 명목 위치이고, 태그의 명목 위치 벡터 및 i 번째 앵커 사이의 거리 측정치 $\rho_{i0} = \sqrt{(x_i - x_{u0})^2 + (y_i - y_{u0})^2 + (z_i - z_{u0})^2}$ 이며, 이를 벡터 표기법을 사용하면 식 (3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{\delta\rho}_i = \vec{h}_i^T \vec{\delta x} \quad (3)$$

여기서 $\vec{h}_i = \left[\frac{-(x_{u0} - x_i)}{\rho_{i0}} \quad \frac{-(y_{u0} - y_i)}{\rho_{i0}} \quad \frac{-(z_{u0} - z_i)}{\rho_{i0}} \right]^T$ 이고 $\vec{\delta x} = [\delta x_u \quad \delta y_u \quad \delta z_u]^T$ 이다. 식 (4)는 N개의 앵커에 대한 위치 측위 솔루션을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \delta\rho_1 \\ \delta\rho_2 \\ \vdots \\ \delta\rho_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{h}_1^T \\ \vec{h}_2^T \\ \vdots \\ \vec{h}_N^T \end{bmatrix} \vec{\delta x} \quad (4)$$

식 (4)로부터 (N-1)개의 측정치를 이용하여 GN (Gauss Newton) 측위를 수행하면 식 (5)의 위치 변위량 $\vec{\delta x}$ 이 구해지고, 태그의 위치는 식 (5)를 반복적으로 계산하여 구할 수 있다.

$$\vec{\delta x} = (H^T H)^{-1} H^T \vec{\delta\rho} \quad (5)$$

이와 같이 협업 측위 시, 태그는 주변 앵커들과 TWR을 통하여 식 (1)의 거리 측정치를 구하고 앵커의 위치 정보를 포함한 비선형 방정식을 계산하여 위치를 도출한다. 본 논문에서 제안하고 있는 TWR 기반 Full-mesh형 협업 측위에서는 태그와 앵커 사이의 차이가 없으므로 모든 구성요소들을 노드로 표현할 수 있으며 i 번째 노드와 j 번째 노드 사이의 거리 측정치는 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} + w_{ij} \quad (6)$$

식 (6)의 선형화를 통해 식 (7)이 유도되며, 또한 식 (8)로써 간략히 표현할 수 있다.

$$\delta\rho_{ij} = \frac{(x_{i0} - x_{j0})}{\rho_{ij0}} \delta x_{ij} + \frac{(y_{i0} - y_{j0})}{\rho_{ij0}} \delta y_{ij} + \frac{(z_{i0} - z_{j0})}{\rho_{ij0}} \delta z_{ij} \quad (7)$$

$$\vec{\delta\rho}_{ij} = \vec{h}_{ij}^T \Delta \vec{x}_{ij} \quad (8)$$

여기서 i 번째 노드와 j 번째 노드 사이의 상대적 관측 벡터는 $\rho_{ij0} = \sqrt{(x_{i0} - x_{j0})^2 + (y_{i0} - y_{j0})^2 + (z_{i0} - z_{j0})^2}$ 이고 x_{k0}, y_{k0}, z_{k0} 는 k 번째 노드를 위한 명목 위치이며 $\Delta \vec{x}_{ij} = [\delta x_{ij} \ \delta y_{ij} \ \delta z_{ij}]^T$ 는 i 번째 노드와 j 번째 노드 간의 상대적 변위로써 식 (9)로 나타낼 수 있으며 식 (8)은 또한 식 (10)으로 표현된다.

$$\Delta \vec{x}_{ij} = [\delta x_i - \delta x_j \ \delta y_i - \delta y_j \ \delta z_i - \delta z_j] = \Delta \vec{x}_i + \Delta \vec{x}_j \quad (9)$$

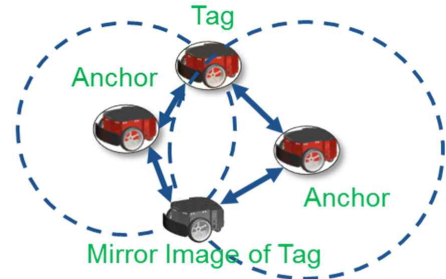
$$\vec{\delta\rho}_{ij} = \vec{h}_{ij}^T \Delta \vec{x}_{ij} = \vec{h}_{ij}^T \Delta \vec{x}_i - \vec{h}_{ij}^T \Delta \vec{x}_j \quad (10)$$

이렇게 유도된 식을 기반으로 총 5개의 노드들이 TWR 기반 협업 측위를 수행한다면, 식 (11)을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \vec{\rho}_{12} \\ \Delta \vec{\rho}_{13} \\ \Delta \vec{\rho}_{14} \\ \Delta \vec{\rho}_{15} \\ \Delta \vec{\rho}_{23} \\ \Delta \vec{\rho}_{24} \\ \Delta \vec{\rho}_{25} \\ \Delta \vec{\rho}_{34} \\ \Delta \vec{\rho}_{35} \\ \Delta \vec{\rho}_{45} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{h}_{12}^T & -\vec{h}_{12}^T & 0 & 0 & 0 \\ \vec{h}_{13}^T & 0 & -\vec{h}_{13}^T & 0 & 0 \\ \vec{h}_{14}^T & 0 & 0 & -\vec{h}_{14}^T & 0 \\ \vec{h}_{15}^T & 0 & 0 & 0 & -\vec{h}_{15}^T \\ 0 & \vec{h}_{23}^T & -\vec{h}_{23}^T & 0 & 0 \\ 0 & \vec{h}_{24}^T & 0 & -\vec{h}_{24}^T & 0 \\ 0 & \vec{h}_{25}^T & 0 & 0 & -\vec{h}_{25}^T \\ 0 & 0 & \vec{h}_{34}^T & -\vec{h}_{34}^T & 0 \\ 0 & 0 & \vec{h}_{35}^T & 0 & -\vec{h}_{35}^T \\ 0 & 0 & 0 & \vec{h}_{45}^T & -\vec{h}_{45}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \vec{x}_1 \\ \Delta \vec{x}_2 \\ \Delta \vec{x}_3 \\ \Delta \vec{x}_4 \\ \Delta \vec{x}_5 \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.2 Additional constraints for improving position accuracy

TWR 위치 측위 시스템에서 토폴로지는 같으나 좌표



Two nodes with known position

Fig. 3. Mirror image of location of tag

계상에서는 다른 Fig. 3과 같은 미리 이미지인 경우가 종종 발생한다. 이것은 위치를 아는 노드(여기서는 원의 중심에 있는 앵커노드)들로부터의 TWR 측정치가 부족하여 발생하는 경우이다. Fig. 3인 경우 앵커 노드가 2개이므로 태그의 위치는 두 원이 겹치는 두 곳 중 한곳에 위치할 수 있다. 따라서 태그의 위치에 대한 모호성을 제거하기 위해서는 위치를 아는 노드(앵커노드)는 최소한 3개 이상 이어야 한다는 제약조건을 적용해야 한다. Full-mesh형 협업 측위 시에 이러한 제약조건을 추가하여 위치를 구하게 되면, 모호성이 존재하지 않도록 노드들의 위치를 구할 수 있다.

2.3 Experiment Results

본 절에서는 제안한 TWR 기반 Full-mesh형 협업 측위 기술을 검증하기 위해 Table 1 및 Fig. 4와 같이 기하학적 구조를 가진 5개의 노드를 기반으로 구성된 IR-UWB (Decawave)를 대상으로 2.2절에서 추가로 제시한 제약조건을 적용하여 협업측위에 대한 표준편차를 구하였다.

Fig. 5는 Node 4, 5번을 Anchor로 하여 Anchor 4, 5번의 위치가 주어졌을 때의 노드 1, 2, 3에 대한 협업 측위

Table 1. Node configuration for experiment

	X [m]	Y [m]
Node 1	3.0	0.0
Node 2	0.0	4.0
Node 3	1.0	8.0
Node 4	5.0	8.0
Node 5	6.0	4.0

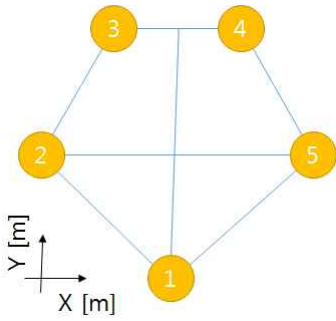


Fig. 4. Geometry formation of experiment nodes

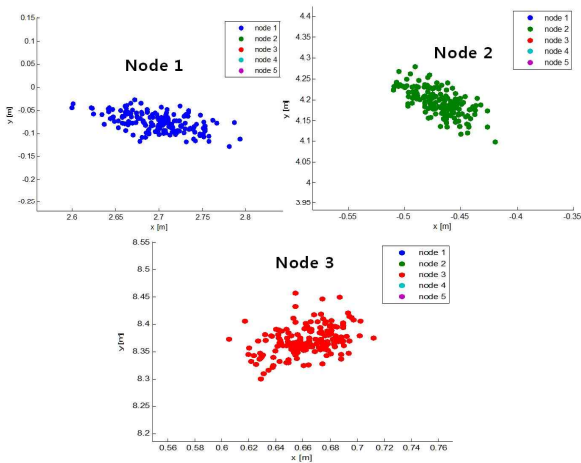
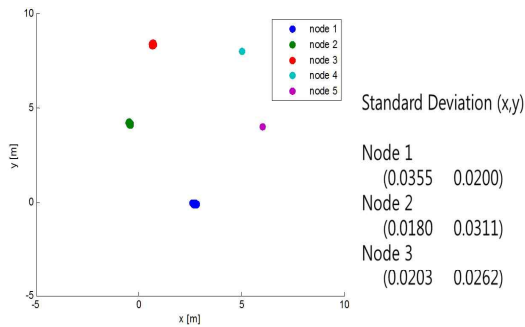


Fig. 5. Full-mesh based CPS with two constraints : Standard deviation of experimental results about Node 1, 2, 3

결과에 대한 표준 편차를 나타낸다. 실험 결과를 분석해 보면 Node 1의 x 성분에 대한 표준편차가 큼(위치 정밀도가 떨어짐)을 알 수 있다.

따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 앞선 2.2 절의 2차원 위치에 대한 최소한의 제약조건인 위치가 알려진 3개의 앵커를 기반으로 한 TWR 기반 Full-mesh 형 협업 측위를 수행해야 한다. Fig. 6은 이와 같은 측위 정밀도를 향상시키기 위해 Node 3, 4, 5번을 Anchor로

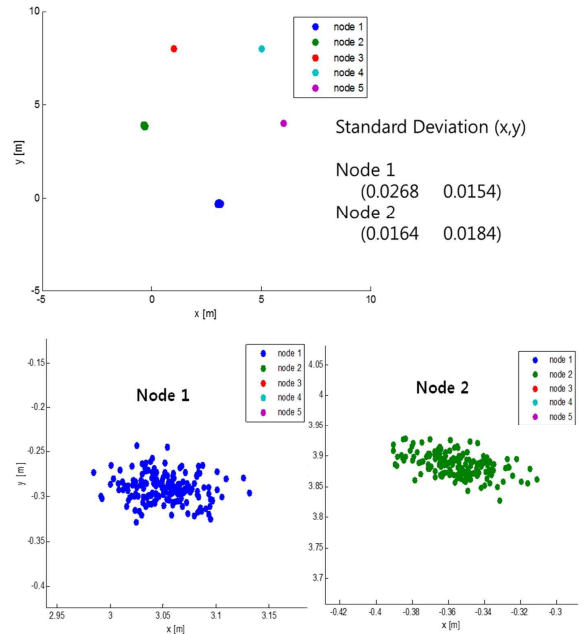


Fig. 6. Full-mesh based CPS with three constraints : Standard deviation of experimental results about Node 1, 2

하여 Anchor 3, 4, 5번 위치가 주어졌을 때 노드 1, 2의 협업 측위 결과에 대한 표준 편차를 나타낸 것이다. 실험 결과를 분석해 보면 Node 1의 x 성분에 대한 표준편차가 앞선 Fig. 5의 실험결과에 비해 작음(위치 정밀도 향상)을 알 수 있다.

이상의 실험으로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다. TWR 기반 Full-mesh형 협업 측위 시스템은 기존의 협업 측위 시스템과 비교하였을 때 보다 많은 측정치를 이용하기 때문에 계산량은 많지만 모든 노드 간의 가능한 TWR 측정치를 이용하여 미지의 노드 위치뿐만 아니라, 측위 오차를 포함하고 있는 노드들의 위치도 함께 보정해 주는 효과를 가지므로 위치 정밀도를 향상시킬 수 있으며, 측위 시의 DOP (Dilution of Precision)를 높일 수 있음을 실험을 통해 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문은 재난 탐사 및 인명구조용 군집 로봇들을 위한 GNSS 음영지역에서의 끊임없는 고정밀 실내외 연속 측위를 가능하게 하는 TWR 기반 협업 측위 기술을 제시하였다. 우선 실외에서 실내로 진입하는 협업 측위

메커니즘을 제안하였고 협업 측위 시 발생할 수 있는 오차 요인을 분석하였다. 또한 협업 측위 시에는 앵커의 위치에 오차가 포함되어 있을 수 있으며, 이는 측위 오차 전파의 원인이 된다. 이러한 측위 오차 전파를 최소화하기 위하여, 본 논문에서는 미지의 노드 위치 뿐 아니라, 측위 오차를 포함하고 있는 노드의 위치를 함께 구하여 위치를 보정해 줄 수 있는 새로운 방법인 TWR 기반 Full-Mesh형 협업 측위 메커니즘 및 제약조건 적용방안을 제시하였으며, Full-mesh형 협업 측위 시에 위치의 모호성을 해소하기 위해 N차원 측위 시 (N+1)개의 고정된 노드의 위치가 필요함을 실험을 통해 보였으며 또한 위치를 알고 있는 노드를 포함하여 Full-mesh형 협업 측위를 수행하였을 때 관심 노드들의 위치가 정밀하게 구해지는 것을 확인하였다. 향후 10개 이상의 2개의 클러스터로 구성된 군집로봇들을 대상으로한 TWR 기반 Full-mesh형 협업측위 메커니즘에 대한 추가 실험이 필요하며 TWR 기반 협업 측위 시스템의 오차요인인 다중 경로를 경감시키는 기법들에 대한 연구도 추가적으로 필요하다.

References

- [1] S.H. Song, J.W. Park, J.H. Park, and T.K. Sung, "Performance analysis of signal acquisition in L2C Assisted GPS receivers," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 61-67, Jan. 2011.
- [2] S.H. Park and S.J. Lee, "An efficient assisted-GPS method in weak signal environment," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 96-102, Jan. 2004.
- [3] J.W. Park, J.M. Lim, and T.K. Sung, "Enhancement of hearability in geolocation using mobile WiMAX network with interference cancellation and long integration," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 375-383, Apr. 2012.
- [4] R. Kurazume, S. Hirose, S. Nagata, and N. Sashida, "Study on cooperative positioning system (basic principle and measurement experiment)," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1421-1426, 1996.
- [5] R. Parker and S. Valaee, "Vehicular node localization using received-signal-strength indicator," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 6, pp. 3371-3380, Nov. 2007.
- [6] P.D. Groves, "Principles of GNSS, inertial, and multisensory integrated navigation systems," Altech house, 2013.
- [7] J.B.Y. Tsui, "Fundamentals of global positioning system receiver: a software approach (second edition)," Wiley, 2006.



이창은

1996년 한양대학교 전자공학과 졸업
 1998년 동 대학원 전자공학과 석사졸업
 2014년 ~ 현재 충남대학교 정보통신공학과 박사과정

2001년 ~ 현재 한국전자통신연구원 책임연구원
 관심분야: 인공지능, 분산 및 협업 로봇 제어, WPAN 기반 로봇 위치 측위



성태경

1984년 서울대학교 제어계측공학과 졸업
 1986년 동 대학원 제어계측공학과 석사졸업
 1992년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(박사)

1997년 ~ 현재 충남대학교 정보통신공학과 교수
 관심분야: GPS/ GNSS, 지상파 측위, UWB WPAN 측위, 위치인지 신호처리