

무선 센서 네트워크 기반 군집 로봇의 협조 행동을 위한 위치 측정

Localization for Cooperative Behavior of Swarm Robots Based on Wireless Sensor Network

탁 명 환, 주 영 훈*

(Myung Hwan Tak¹ and Young Hoon Joo¹)

¹Kunsan National University

Abstract: In this paper, we propose the localization algorithm for the cooperative behavior of the swarm robots based on WSN (Wireless Sensor Network). The proposed method is as follows: First, we measure positions of the L-bot (Leader robot) and F-bots (Follower robots) by using the APIT (Approximate Point In Triangle) and the RSSI (Received Signal Strength Indication). Second, we measure relative positions of the F-bots against the pre-measured position of the L-bot by using trilateration. Then, to revise a position error caused by noise of the wireless signal, we use the particle filter. Finally, we show the effectiveness and feasibility of the proposed method through some simulations.

Keywords: swarm robots, leader robot, follower robot, cooperative behavior, WSN (Wireless Sensor Network), Ad-Hoc network, APIT (Approximate Point In Triangle), RSSI (Received Signal Strength Indication), trilateration

I. 서론

최근 지능형 로봇산업의 급속한 성장으로 로봇의 역할과 수행이 증가하여 역할에 따라 효율적으로 로봇을 제어하는 연구가 진행 중이다. 그 중에서 각각의 로봇이 스스로 주위의 환경과 자신의 상태를 판단하고 사용자에게 의해서 또는 필요에 따라서 주위의 로봇과 협조를 통하여 작업을 수행하는 군집 로봇(swarm robot) 시스템이 각광받고 있다. 군집 로봇시스템은 로봇간의 정보 교환과 지능적인 협조 제어를 통해 집단지성의 효과를 나타내는 시스템으로 단일 로봇의 작업 수행 능력 이상의 성능을 목표로 한다[1]. 목표 달성을 위해 군집 로봇은 각 로봇 간의 협조 행동을 필요로 하며 이러한 협조 행동을 위해서는 각 로봇의 정확한 위치를 측정해야만 한다. 로봇의 위치를 측정하기 위한 대표적인 시스템으로는 인공위성을 이용한 GPS (Global Positioning System), 초음파와 RF (Radio Frequency) 신호의 속도차이를 이용한 cricket, 적외선 센서를 이용한 active badge, 무선 랜을 이용한 radar, 3차원 카메라를 이용한 easy living 등이 있다. 상기의 시스템들은 구축 가능한 환경 내에서 1 m 내외의 우수한 위치 측정 결과를 보여주고 있다. 그러나 해당 시스템의 에너지 소비 문제, 시스템 구동의 제한적 환경, 장치의 소형화, 고가의 장치 문제 등은 군집 로봇 시스템의 제어 복잡성을 가중시키고 적용 가능한 환경을 제약시키는

문제점을 갖고 있다[2]. 또한, 거리 정보를 기반 하지 않는 위치 측정 기술로는 찾고자 하는 노드의 위치를 1 hop으로 통신 가능한 기준 노드 좌표들의 중심을 인식하는 Centroid [3], 노드의 배치 분포가 균일하고 기준 노드의 밀도가 적은 경우 사용하는 DV hop [4], 찾고자 하는 노드 주변에 통신 가능한 기준 노드가 비교적 많을 경우 사용하는 APIT (Approximate Point In Triangle) 기술등으로 분류된다[5]. 상기 방법들은 찾고자 하는 노드의 위치를 측정하기 위해 좌표를 알고 있는 기준 노드들이 필요하다. 거리 정보를 기반으로 하는 위치 측정 기술은 무선 센서 노드에서 송신한 신호를 거리와 수신된 신호의 세기에 따라 인식하는 RSSI (Received Signal Strength Indication) [6], 신호의 도착 시간을 이용하는 TOA (Time of Arrival) [7], 신호의 도착 시간 차이를 이용하는 TDOA (Time Difference of Arrival) [8], 신호의 방향각을 이용하여 각도를 측정하여 방향각의 교차점을 이용한 AOA (Angle of Arrival) 방법등이 있다[9]. 상기의 위치 측정 방법은 가장 일반적인 방법임에도 불구하고 송신기와 수신기 사이의 시야가 확보되지 않아 송신한 신호를 직접 수신하지 못하고 반사, 회절, 분산된 신호만 수신하는 NLOS (Non-line of Sight)와 다중 경로 페이딩(MPF: Multi-path Fading)과 같은 주변 환경으로 인해 오차가 발생한다[10]. 또한 AOA와 TOA 방법을 혼합한 방식은 하나의 송신기만으로도 위치 인식이 가능하다는 장점이 있지만 정확도가 떨어지는 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 위치 측정 시스템의 문제점을 해결하기 위해 다수의 로봇으로 이루어진 군집 로봇간 네트워크 특성을 무선 센서 네트워크(WSN: Wireless Sensor Network)의 측위 기술에 접목하여 효과적인 군집 로봇의

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 5. 15., 수정: 2012. 6. 14., 채택확정: 2012. 6. 30.

탁명환: 군산대학교 대학원 전자정보공학부(takgom@kunsan.ac.kr)

주영훈: 군산대학교 제어로봇공학과(yhjoo@kunsan.ac.kr)

※ 이 논문은 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012014088).

위치 측정 기법을 제안하고자 한다. 이를 위해 먼저 로봇을 L-bot (Leader robot)과 F-bot (Follower robot)으로 구성하고, 이들 로봇간의 통신을 위해 무선 Ad-Hoc 센서 네트워크로 구성한다. 그리고 다수의 로봇에서 획득한 로봇 간 신호 세기를 기반으로 APIT와 RSSI 기법을 이용하여 L-bot과 F-bot들의 위치를 측정한다. 다음, 삼변 측정법(trilateration)을 이용하여 L-bot을 원점으로 하는 F-bot들의 상대 위치를 구한다. 마지막으로, 파티클 필터를 이용해 NLOS 및 다중 경로 페이딩에 의한 측위 오차 보정 기법을 사용하여 위치를 보정하는 방법을 제안한다. 최종적으로, 본 논문에서 제안한 기법의 우수성 및 응용 가능성을 여러 시뮬레이션을 통해 증명한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장은 본 논문에서 구성한 군집 로봇의 계층적 구조 및 무선 센서 네트워크에 대해 간략히 언급하고 계층적 구조에서의 군집 로봇 위치 측정 기법을 기술한다. III 장에서는 측정된 각 로봇의 측위 오차를 파티클 필터를 이용해 보정 시킨 뒤, IV 장에서 시뮬레이션을 통해 제안한 기법의 응용 가능성을 증명하고 V 장에서 결론을 맺는다.

II. 무선 센서 네트워크 기반 군집 로봇 시스템의 위치 측정

1. 군집 네트워크 구성

본 연구에서는 군집 로봇간 위치 측정 및 제어의 용이함을 위해 군집 로봇을 2개의 계층적인 구조로 나눈다. 즉, 군집 로봇들의 행동을 제어하고 각 로봇의 환경 정보를 수집하는 1대의 L-bot과 환경 데이터 수집 및 협조 행동을 담당하는 다수의 F-bot들로 구성한다. 그 다음, 군집 로봇의 동적 이동 및 네트워크 변화의 유연성을 위해 무선 Ad-Hoc 센서 네트워크를 이용하여 네트워크를 구성한다. 기존의 유선망 기반 무선 네트워크는 군집 로봇의 고장 시 네트워크 전체가 마비 될 수 있고, 기지국의 자체 용량 때문에 동시 접속할 수 있는 로봇의 개수가 제한된다[11]. 그러나 무선 Ad-Hoc 센서 네트워크는 특정 기지국에 의존하지 않고 무선 센서 노드들만으로 구성된 분산형 무선 통신 네트워크로써, 재해에 강하며 로봇의 수에 따라 네트워크의 용량을 자유롭게 변경할 수 있는 장점을 갖는다. 그림 1은 1대의 L-bot과 5대의 F-bot을 이용하여 무선 Ad-Hoc 센서 네트워크의 구조를 도시한 그림이다.

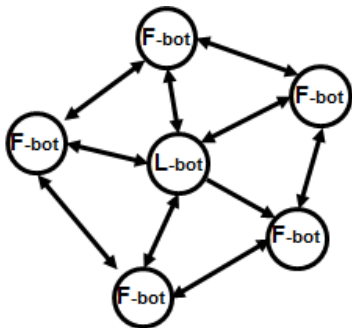


그림 1. Ad-Hoc 네트워크 구조.
Fig. 1. Ad-Hoc network architecture.

2. 군집 로봇의 위치 측정

본 논문에서 제안하는 무선 Ad-Hoc 센서 네트워크 환경에서 군집 로봇의 위치 측정은 다음과 같다. 먼저 APIT 기법을 이용해 L-bot의 존재 유무를 판단하기 위해 RSSI 기법을 이용하여 F-bot들의 삼각형을 구성한다. 그 다음 구성된 삼각형 내의 L-bot의 위치를 측정한다. 측정된 L-bot은 군집 로봇의 중심좌표가 되며 L-bot을 중심으로 F-bot들의 위치를 측정한다.

APIT 기법은 일반 노드의 위치를 찾기 위해 그림 2와 같이 주변에 통신이 가능한 고정된 노드들이 다수 일 경우 사용하는 방법이다. 이때 고정된 노드들의 위치를 알고 있어야 하며 인접한 노드들을 선택하여 삼각형을 구성한다. 이렇게 만들어진 삼각형에 찾고자 하는 일반노드가 내부 및 외부 있는지 판단하는데, 내부에 존재하는 삼각형들의 무게 중심을 이용하여 일반노드의 위치를 측정한다[5].

이러한 APIT 방법을 이동성이 강한 군집 로봇 시스템에 적용하여 L-bot의 위치를 찾기 위해 F-bot들의 삼각형을 구성해야한다. 하지만 F-bot들의 위치를 알 수 없기 때문에 본 논문에서는 4개 이상의 F-bot들 간에 거리를 측정하여 삼각형을 구성하기 위해 RSSI 기법을 사용한다.

RSSI 기법은 F-bot이 송신하는 신호를 인접한 F-bot이 수신할 때 신호의 파워 손실 혹은 경로 손실(path loss)을 이용하여 거리를 측정하는 기법으로 신호의 경로 손실 L 은 다음과 같이 구한다.

$$L = 20 \times \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) (dBm) \tag{1}$$

여기서 λ 는 전파의 파장이며, d 는 거리이다. 식 (1)을 거리에 대하여 나타내면 식 (2)와 같다.

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \times 10^{\frac{L}{20}} = \frac{c}{4\pi f} \times 10^{\frac{L}{20}} \tag{2}$$

여기서 f 는 주파수를 나타내며 c 는 전파 속도를 나타낸다. 전파 속도는 빛의 속도로 가정한다. 4개 이상의 F-bot들 간의 거리를 측정하여 교점을 이용하면 삼각형을 구성할 수 있다. 구성된 다수의 삼각형에서 L-bot의 위치를 측정하기 위해 모든 삼각형의 내부 및 외부에 L-bot이 존재하는지 판단한다. 판단하기 위해 L-bot은 RSSI 기법을 이용하여 F-bot

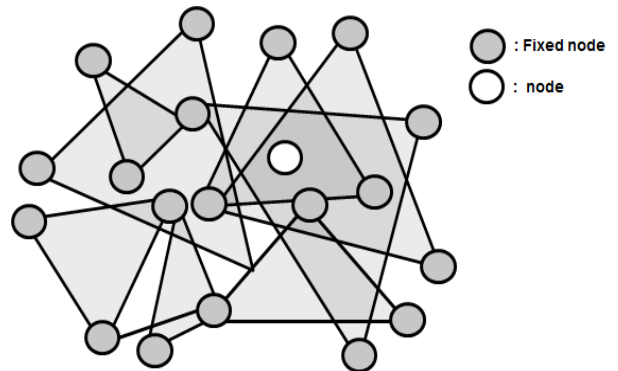


그림 2. APIT.
Fig. 2. Approximate point in triangle.

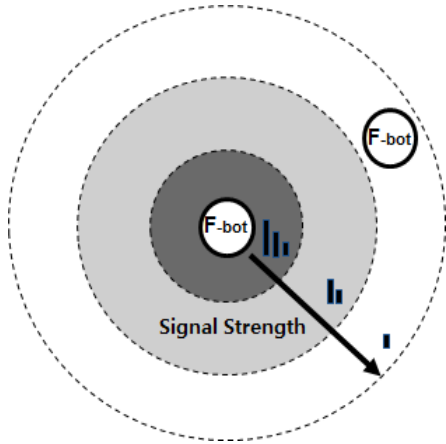


그림 3. 수신된 신호의 강도 표시.
Fig. 3. Received signal strength indication.

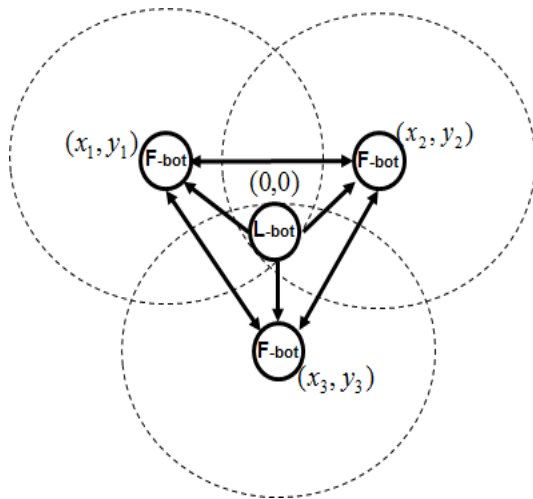


그림 4. 삼변측량법.
Fig. 4. Trilateration.

들과의 거리를 측정한다. 측정된 거리를 이용하여 삼각형 내부에 L-bot이 존재한다고 판단된 하나 이상의 삼각형들에서 F-bot과 L-bot들과의 위치를 측정하기 위해서 F-bot중 하나의 로봇의 초기 위치를 랜덤하게 설정하고 삼변 측량법을 이용하여 위치를 측정한다. 이는 그림 4와 같다.

삼변 측량법은 측정된 F-bot들과 L-bot의 거리를 이용하여 L-bot의 위치를 계산한다. 삼변 측량법은 위치를 측정하는 간단한 기하학적 방법으로, 먼저, 그림 4와 같이 F-bot의 위치를 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) 라고 가정하고 L-bot의 위치를 (x, y) 라 가정한다. 그 다음, RSSI 기법을 통해 구한 F-bot과 L-bot 간의 거리를 d_1, d_2, d_3 라 하면 식 (3)을 통해 L-bot의 위치를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} d_1^2 &= (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \\ d_2^2 &= (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \\ d_3^2 &= (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

L-bot을 포함하는 모든 삼각형에 대해 식 (3)의 과정을

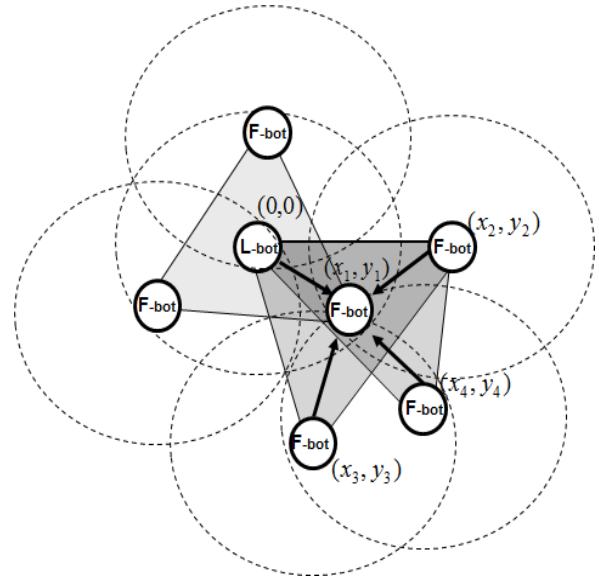


그림 5. F-bot들의 위치 측정.
Fig. 5. Localization of the F-bots.

반복하면 삼각형의 개수만큼 L-bot의 위치가 생성되며 이들의 중심점을 L-bot의 위치로 정한다. 여기서 측정된 L-bot의 위치를 이용하면 다수의 F-bot들의 위치를 L-bot의 상대적인 위치로 변화시킬 수 있다. 그러면, L-bot의 위치는 그림 5와 같이 군집 로봇 시스템의 원점 $(0, 0)$ 이 되며, 측정된 L-bot의 원점 좌표를 중심으로 F-bot의 위치들이 상대적으로 측정된다. F-bot들의 위치를 측정하기 위해 L-bot이 포함된 삼각형 내부에 존재하는 F-bot들을 삼변측량을 이용하여 상대적인 위치를 측정한다.

III. 파티클 필터를 이용한 측위 오차 최소화

일반적으로 무선 신호를 이용하는 RSSI 기법은 주변 환경 및 신호를 차단하는 예기치 않은 상황으로 인해 반사, 회절, 굴절, 분산되어 측위 오차를 갖게 된다. 이러한 현상은 군집 로봇시스템에서 로봇간 시야가 확보되지 않아 송신한 신호를 직접 수신하지 못하는 현상인 NLOS, 로봇이 사용 목적에 따라 다수의 신호를 수신 할 때 장애물에 의한 다중 반사 및 신호 간의 상호 간섭에 의한 다중경로 페이딩 현상이 나타난다. 본 논문에서는 이러한 무선 신호의 왜곡 현상에서 기인하는 위치 측정 오차를 줄이기 위해 대표적인 비선형 위치 추정 알고리즘인 파티클 필터(Particle Filter)를 사용한다[12]. 파티클 필터는 연속적으로 획득하는 정보를 이용하여 베이지안 모델을 추정하기 위한 효율적인 근사 방법이다. 획득하는 정보가 많을수록 베이지안 최적 추정치에 접근하기 때문에 위치를 정확하게 추정할 수 있다. 또한 로봇이 위치하고 있을 가능성이 높은 상태에 집중하기 때문에 효율적인 구현이 가능하다.

3. Particle Filter

본 논문에서는 파티클 필터를 사용하여 위치 오차를 보정하기 위해 군집 로봇의 초기 위치를 설정(white-gaussian noise) 사용 한 후 측정된 L-bot의 위치를 중심으로 파티클을 배치한다. 먼저, 각 파티클은 시간 t 에서 i 번째 L-bot의

위치 상태 s_t^i 와 위치 정보를 가지고 있는 가중치 $w_t = 1/n$ 을 가지며 시간 t 에 대한 군집 로봇의 위치 상태 S_0 는 식 (4)와 같다.

$$S_0 = \left\{ \left(s_0^1, \frac{1}{n} \right), \left(s_0^2, \frac{1}{n} \right), \left(s_0^3, \frac{1}{n} \right), \dots, \left(s_0^n, \frac{1}{n} \right) \right\} \quad (4)$$

여기서, n 은 파티클의 개수를 나타낸다. 그 다음 s_t 는 L-bot의 위치, 제어 입력을 c_t , 측정된 F-bot의 위치를 z_t 라 하면 시간 t 일 때 베이지안 필터를 적용한 로봇의 상태 정보를 예측하는 파티클의 분포는 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} p(s_t | s_{t-1}, c_t) \text{bel}(s_{t-1}) \\ = p(s_t | s_{t-1}, c_t) p(s_{0:t-1} | z_{0:t-1}, c_{0:t-1}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\text{bel}(s_{t-1})$ 은 이전 로봇의 위치의 확률을 나타내며 $p(s_t | s_{t-1}, c_t)$ 을 적용하여 새로운 로봇의 위치 정보의 확률을 계산한다. 또한 각 파티클의 가중치를 계산하기 위해서는 현재 군집 로봇의 상태 정보를 알아야 한다. 현재의 군집 로봇의 위치 정보의 분포는 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} p(s_{0:t} | z_{0:t}, c_{0:t}) \\ \text{bayes} = \eta p(z_t | s_{0:t}, z_{1:t-1}, c_{1:t}) p(s_{0:t} | z_{1:t-1}, c_{1:t-1}) \\ \text{markov} = \eta p(z_t | s_t) p(s_{0:t} | z_{1:t-1}, c_{1:t-1}) \\ = \eta p(z_t | s_t) p(s_t | s_{0:t-1}, z_{1:t-1}, c_{1:t-1}) p(s_{0:t-1} | z_{1:t-1}, c_{1:t-1}) \\ \text{markov} = \eta p(z_t | s_t) p(s_t | s_{t-1}, c_t) p(s_{0:t-1} | z_{1:t-1}, c_{1:t-1}) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, η 는 정규화 상수(normalizing constant)이다. 예측된 파티클의 분포와 측정된 정보를 이용하여 가중치를 구하는 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} w_t &= \frac{\eta p(z_t | s_t) p(s_t | s_{t-1}, c_t) p(s_{0:t-1} | z_{1:t-1}, c_{1:t-1})}{p(s_t | s_{t-1}, c_t) p(s_{0:t-1} | z_{0:t-1}, c_{0:t-1})} \\ &= \eta p(z_t | s_t) \\ &\propto \eta p(z_t | s_t) \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에 의해 계산된 가중치는 식 (8)로 각 파티클에 적용된다.

$$w_t = p(z_t | s_t) \times w_{t-1} \quad (8)$$

새로 계산된 가중치 w_t 와 이전에 계산한 가중치 w_{t-1} 를 비교해 가중치가 낮은 파티클들을 삭제하고, 삭제된 파티클의 수만큼 가중치가 높은 파티클을 복제하면 총 파티클의 수는 일정한 파티클 군집을 형성한다. 이를 반복하면, 형성된 파티클 군집은 오차가 보정된 위치 확률이 높은 곳에 형성되기 때문에 군집 로봇이 측정된 위치의 오차를 보정할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 논문에서 제안한 기법을 증명하기 위해, 미지의 실내 공간에서 Ad-Hoc 센서 네트워크를 통해 1대의 L-bot과 다수의 F-bot들로 구성된 시스템을 사용한다. 여기서, 각 로봇 간 통신 주파수(f)는 2.4 GHz라 가정했다.

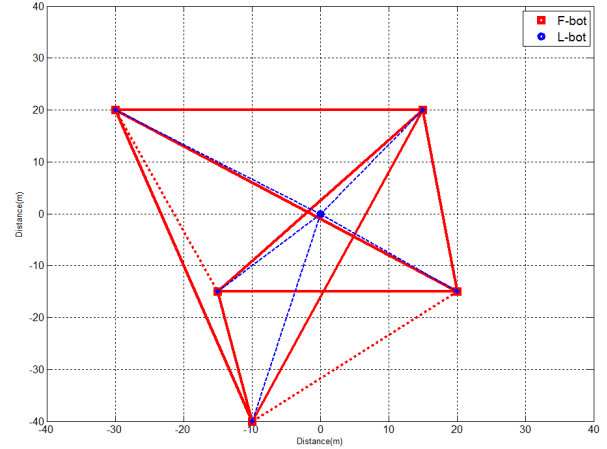


그림 6. L-bot과 F-bot들의 상대 위치 측정.

Fig. 6. Relative localization between L-bot and F-bots.

그림 6은 본 논문에서 제안한 APIT와 RSSI 기법을 이용하여 1대의 L-bot과 5대의 F-bot들로 구성된 로봇들의 상대 위치를 측정된 결과를 도시한 그림이다. 먼저 L-bot의 존재를 판단하기 위해 F-bot들간의 측정된 거리를 선으로 표시하여 삼각형을 구성하였다. 그림에 의하면 L-bot 위치는 점선으로 나타낸 삼각형의 외부에, 그리고 실선으로 나타낸 삼각형의 내부에 있는 것으로 판단되었다. 그 다음 삼변 측량법을 이용하여 L-bot의 위치를 원점 (0, 0)으로 하는 5대의 F-bot들의 상대 위치는 측정한다. 그림에서 L-bot에 대한 F-bot들간의 상대 위치는 파란색 점선으로 나타내었다. 이때, 무선 신호의 특성으로 인한 오차는 포함 되지 않았다.

그림 7은 RSSI를 이용한 거리 변화에 따른 위치 오차를 도시한 그림이다. 이때, 무선 신호에 포함된 잡음으로 인하여 발생하는 오차를 표현하기 위해 정규분포를 가지는 White-Gaussian Noise를 사용하였다. 그림에 의하면, 거리가 가까울수록 무선 신호의 세기가 크기 때문에 오차는 작지만 거리가 멀어질수록 오차는 크게 발생함을 알 수 있다. 즉, RSSI를 이용하여 군집 로봇의 거리를 측정할 경우 거리에 따라 발생하는 측정 오차를 보정해 줘야 함을 알 수 있다.

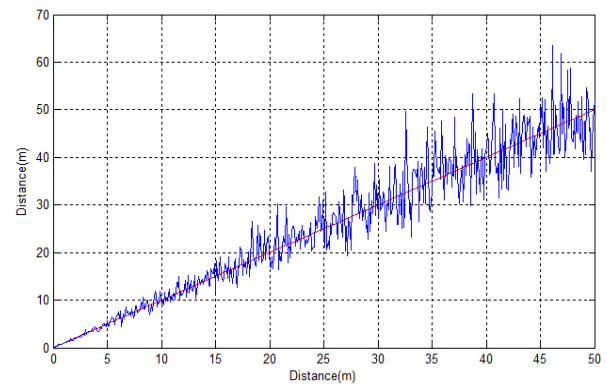


그림 7. RSSI 를 이용한 거리 변화 따라 측정된 위치 오차.

Fig. 7. Position errors measured according to distance using RSSI.

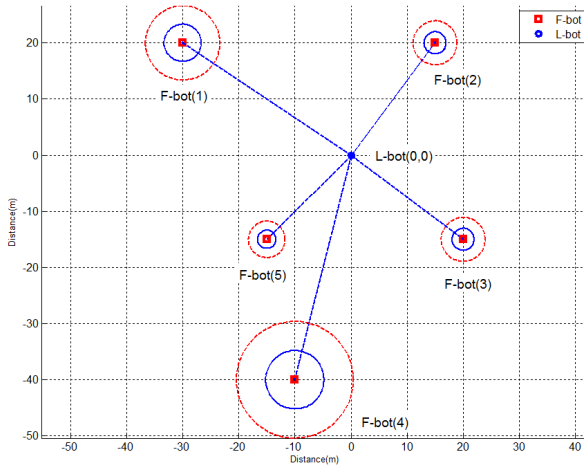


그림 8. 위치 측정 오차 보정 전후의 위치 측정.
 Fig. 8. Localization before and after revising position errors.

표 1. 위치 오차 및 오차 보정 결과.

Table 1. Results of position error and revised position error.

	평균 오차(m)	보정된 오차(m)
F-bot(1)	8.857	4.375
F-bot(2)	4.763	2.335
F-bot(3)	4.876	2.448
F-bot(4)	10.543	5.241
F-bot(5)	3.231	1.624

그림 8은 20번의 실험을 통하여 위치 오차를 보정하기 전(빨간색 원)과 파티클 필터를 이용하여 보정한 후(파랑색 원)의 위치 측정 값의 최대 범위를 원으로 도시한 그림이다. 본 그림에 의하면 보정 전후의 위치 측정 범위가 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 20번의 실험을 통해 측정된 측정 오차를 포함한 위치 평균 오차와 파티클 필터를 이용하여 오차를 보정한 결과는 표 1에 나타내었다. 표 1에 의하면 보정전보다 보정후 오차가 상당히 보정되었음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크 기반 군집 로봇의 협조 행동을 위한 위치 측정 기법을 제안하였다. 제안된 방법은 다음과 같다. 먼저 로봇을 L-bot과 F-bot들로 구성하고, 이들 로봇간의 통신을 위해 무선 Ad-Hoc 센서 네트워크로 구성한다. 그리고, 다수의 로봇에서 획득한 로봇 간 신호 세기를 기반으로 APIT와 RSSI 기법을 이용하여 L-bot과 F-bot들의 위치를 측정한다. 다음, 삼변 측정법(trilateration)을 이용하여 L-bot을 원점으로 하는 F-bot들의 상대 위치를 구한다. 마지막으로, 파티클 필터를 이용해 NLOS 및 다중 경로 페이딩에 의한 측위 오차 보정 기법을 사용하여 위치를 보정하는 방법을 제안한다. 최종적으로, 본 논문에서 제안한 기법의 우수성 및 응용 가능성을 여러 시뮬레이션을 통해 증명하였다.

본 논문에서 제안한 알고리즘은 실제 환경에서 발생 할 수 있는 무선 신호의 왜곡 현상을 가정하였다. 하지만 실제 환경에서는 여러 가지 변수들에 의해 무선 신호의 왜곡 현

상은 다양하게 존재하기 때문에 성능을 보장할 수 없다. 또한, 군집 로봇의 개수가 많아질수록 계산 량의 증가에 따라 시스템의 속도가 현저히 낮아질 수 있다. 따라서 이러한 환경 변수에 강인할 수 있고 실제 로봇에 적용하기 위해 알고리즘을 개선해야 한다. 이를 위해 컴퓨터 시뮬레이션이 아닌 실제 군집 로봇 시스템을 제작하고 운용하는 실험을 하여야 할 것이다.

참고문헌

- [1] D. M. Stipanovic, P. F. Hokayem, M. W. Spong, and D. D. Siljak, "Cooperative avoidance control for multi-agent systems," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 129, pp. 699-707, 2007.
- [2] C. Alippi and G. Vanimini, "A RSSI-based and calibrated centralized localization technique for wireless sensor networks," *Proc. of the Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*, pp. 1-5, 2006.
- [3] N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin, "GPS-less lowest outdoor localization for very small devices," *IEEE Personal Communications Magazine*, Oct. 2000.
- [4] D. Niculescu and B. Nath, "Ad Hoc positioning system (APS)," *IEEE Globecom '01, San Antonio, TX*, Nov. 2001.
- [5] T. He, C. Huang, B. M. Blum, J. A. Stankovic, and T. Abdelzaher, "Range-free localization schemes for large scale sensor networks," *Proc. of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 81-95, Sep. 2003.
- [6] J. Hightower and G. Borriello, "Location sensing techniques," *Technical Report UW CSE 2001-07-30, Department of Computer Science and Engineering, University of Washington*, pp. 1-8, 2001.
- [7] J. J. Caffery, Jr., "A new approach to the geometry of TOA location," *Vehicular Technology Conference, IEEE*, vol. 4, pp. 1943-1949, 2000.
- [8] R. Yamasaki, "TDOA location system for IEEE 802.11b WLAN," *Proceedings of IEEE WCNC'05*, pp. 2338-2343, Mar. 2005.
- [9] D. Niculescu and B. Nath, "Ad Hoc positioning system (APS) using AOA," *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, vol. 3, no. 30, Mar. 2003.
- [10] L. Cong and W. Zhuang, "Non-line-of-sight error mitigation in TDOA mobile location," *Global Telecommunications Conference, IEEE*, vol. 1, pp. 680-684, 2001.
- [11] L. E. Parker, "Multiple mobile robot systems," *in Springer Handbook of Robotics*, pp. 921-941, 2008.
- [12] C. Kwok, D. Fox, and M. Meila, "Real-time particle filters," *Proc of the IEEE*, vol. 92, pp. 469-484, 2004.



탁 명 환

2009년 군산대 전기전자제어과 졸업.
2009년 동 대학원 석사. 2011년~현재
군산대 제어로봇공학과 박사과정. 관
심분야는 군집 로봇, 지능 제어, 영상
처리.



주 영 훈

1982년, 1984년, 1995년 연세대학교 전
기공학과 졸업(공학사, 공학석사, 공학
박사). 1986년~1995년 (주)삼성전자 자
동화연구소 책임연구원. 1998년 2
월~1999년 1월 미국 휴스턴대학 전기
및 컴퓨터공학과 박사후박사과정. 2009
년 한국지능시스템학회 회장. 1995년~현재까지 군산대학교
제어로봇공학과 정교수. 현재 군산대학교 Post BK21 사업
팀장, 제어·로봇·시스템학회 지능시스템연구회장, Int.
Journal of Control, Automation, Systems (IJCAS) Editor. 대한
전기학회 정보제어부문 부회장. 관심분야는 지능형로봇, 인
간-로봇 상호작용, 지능 제어, 감정 인식, 네트워크 기반 제
어기설계 등.