

# GPS 데이터 오차 간의 상관 관계를 활용한 군집 로봇의 위치 추정

## Cooperative Multiple Robot Localization utilizing Correlation between GPS Data Errors

조 경 환<sup>1</sup> · 이 지 흥<sup>†</sup>

Kyoungwan Jo<sup>1</sup> · Jihong Lee<sup>†</sup>

**Abstract** It is essential to estimating positions of multiple robots in order to perform cooperative task in common workspace. Accordingly, we propose a new approach of cooperative localization for multiple robots utilizing correlation among GPS errors in common workspace. Assuming that GPS data of individual robot are correlated strongly as the distance among robots are close, it is confirmed that the proposed method provides improved localization accuracy. In addition, we define two operational parameters to apply proposed method in multiple robot system. With mentioned two parameters, we present a practical solution to accumulated position error in traveling long distance.

**Keywords:** Cooperative Localization, Multiple Robot System, Mobile robot, GPS navigation

### 1. 서 론

모바일 로봇이 그들의 작업 공간에서 자율적으로 작업을 수행하기 위해서는 반드시 정확한 자신의 위치를 파악하는 과정이 선행되어야 한다. 따라서, 각종 센서를 기반으로 하는 위치 추정은 모바일 로봇틱스 분야에서 가장 핵심적인 문제 중 하나로 꾸준한 연구가 진행되고 있다. 이러한 이전 연구들은 대부분 로봇 한대의 위치 추정 문제에 대해서 주로 다루고 있다<sup>[1-4]</sup>. 그러나, 최근 많은 로봇 어플리케이션들은 주어진 작업을 보다 효율적으로 수행하기 위해서 협동작업을 요하는 경우가 많아지고 있다. 비교적 로봇 간의 거리가 가까운 환경에서 협동 작업을 수행하는 여러 대의 로봇, 즉 군집 로봇은 서로 간의 충돌을 피하기 위해서 보다 정밀한 절대적인 위치와 상대적인 위치 정보를 필요로 한다.

다중 모바일 로봇 시스템은 단일 모바일 로봇

시스템과는 다르게 각각의 로봇으로부터 다중의 센서 데이터를 수집하고, 통합할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 따라서, 이러한 다중 모바일 시스템은 수집된 다중의 센서 데이터를 통합하여, 군집 로봇 각각의 위치 추정 성능 및 정확도의 강인성을 높일 수 있다. 그러나, 앞에서 언급한 장점들에도 불구하고, 현존하는 대부분의 군집 로봇의 위치 추정에 관한 연구들은 그러한 장점을 활용하지 못하고 있다<sup>[5,6]</sup>. 즉, 다중 모바일 로봇 시스템에서도 단일 로봇 자신의 센서 데이터만을 활용하여 자신의 위치를 추정하고 있다.

최근, 군집 로봇의 절대적인 위치와 상대적인 위치의 불확실성을 줄이기 위해서 다중의 로봇으로부터 다중의 센서 데이터를 통합하는 연구들이 진행되고 있다<sup>[6, 10-14]</sup>. 이러한 연구들은 대부분 Kalman filter<sup>[8]</sup>, triangulation<sup>[7]</sup>, MCL(Monte Carlo Localization)<sup>[9]</sup>을 기반으로 하고 있으며, 이들을 활용하여 다중의 센서 데이터를 통합할 경우 군집 로봇 내의 단일 로봇 자신들의 센서 데이터만을 활용하여 로봇 자신의 위치를 추정하는 경우보다 위치 정확도를 향상시킬 수 있다. 반면에 이러한 접근 방법은 통계적인 값들을 다루기 때문에 상대적으로 복잡하며, 대부분 실내 로봇의 경우에 한정되고 있다.

※ 본 연구는 한국정보통신연구원의 유연한 모듈형 구조를 가지는 민수용 견마로봇 플랫폼 연구 과제 지원으로 수행되었음.

<sup>†</sup>교신저자 : 충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단 교수

<sup>1</sup>충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단 석사과정

본 논문에서, 우리는 각각의 로봇이 지나는 GPS 오차간의 상관 관계를 활용하여 군집 로봇의 위치 추정을 수행하는 새로운 방법을 제시한다. 제안된 방법은 기존의 방법(Kalman filter, triangulation, MCL)에 비하여 상대적으로 알고리즘 구현이 간단하며, 단일 로봇 자신의 센서 데이터를 활용하여 로봇 자신의 위치를 추정하는 방법보다 향상된 위치 추정 성능을 보인다. 또한 GPS를 활용한 실외 로봇의 위치 추정뿐만 아니라, 실내 GPS(indoor GPS)<sup>[15]</sup>를 활용한 실내 로봇의 위치 추정에도 적용될 수 있다. 제안된 방법은 공동 작업 공간 내에서 로봇들간의 거리에 따라서 GPS 데이터의 오차는 서로 상관 관계를 가지며, 각각의 로봇들은 원격 통제 스테이션과 통신이 가능하다는 것을 전제로 한다. 이러한 가정들을 바탕으로 각 로봇간의 거리를 바탕으로 GPS 데이터의 오차 보정 가중치를 산출한다.

2장에서는 제안된 군집로봇 위치 추정 알고리즘의 세부적인 수식에 대해서 다루고, 3장에서는 제안된 알고리즘의 성능을 입증하기 위해 필요한 가상의 센서 데이터를 생성하는 방법에 대해서 언급한다. 4장에서는 시뮬레이션 결과를 제시하여 제안된 알고리즘의 성능을 입증하며, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. 군집 로봇의 위치 추정

먼저, 본 장에서는 제안된 군집 로봇 위치 추정 알고리즘을 수행하기 위한 몇 가지 가정을 제시한다. 그 다음으로, 제안된 알고리즘의 수식을 살펴본다. 마지막으로 제안된 알고리즘을 실제 시스템에 적용하기 위한 조작 변수 및 갱신 주기에 관해서 설명한다.

### 2.1 가정

제안하는 군집 로봇 알고리즘은 아래와 같은 가정 하에서 적용된다.

- 1) 모든 로봇은 2차원 평면상에서 움직인다.
- 2) 각각의 로봇은 추측항법(dead-reckoning)에 의해서 로봇 자신의 절대 위치 및 상대 위치를 파악할 수 있도록 GPS 수신기, 주행거리계(odometer), 자이로(gyro) 센서를 장착하고 있다.
- 3) 작업 공간 내에서 각 로봇의 GPS 오차는 로봇간에 거리에 따르는 상관 관계를 갖는다.
- 4) 모든 로봇은 각각의 로봇으로부터 측정된 위치 데이터를 원격 통제 스테이션, 혹은 각각의 로봇끼리 통신할 수 있는 장치를 가지고 있다.
- 5) 모든 로봇은 omni-directional 모바일 로봇이다.

## 2.2 군집 로봇 위치 추정 알고리즘

2.1절에서 언급한 가정을 바탕으로, 군집 로봇 위치 추정 알고리즘의 수식에 사용되는 변수들은 표 1과 같이 정리된다.

표 1. 군집 로봇 localization 변수 정의

변수	의미
$\bar{P}_i^k$	시각 $i$ 에서 군집 로봇 localization 알고리즘에 의해서 추정된 $k$ 번째 로봇의 위치
$\hat{P}_i^k$	시각 $i$ 에서 로봇의 추측 항법에 의해서 추정된 $k$ 번째 로봇의 위치
$\tilde{P}_i^k$	시각 $i$ 에서 GPS에 의해서 추정된 $k$ 번째 로봇의 위치
$V_i$	시각 $i-1$ 에서 $i$ 사이의 평균 속도
$e_i$	시각 $i-1$ 에서 $i$ 사이에서 로봇의 바퀴와 지면 사이의 미끄러짐 등에 의해서 생성될 수 있는 위치 오차
$\delta t$	샘플링 주기
$W_i^{kj}$	시각 $i$ 에서 $k$ 번째 로봇과 $j$ 번째 로봇간의 거리에 따른 가중치
$\Delta P_i^k$	시각 $i$ 에서 GPS에 의한 추정 위치와 추측 항법에 의한 위치간의 차에 의해 추정되는 $k$ 번째 로봇의 GPS 오차
$l_i^{kj}$	시각 $i$ 에서 $k$ 번째 로봇과 $j$ 번째 로봇간의 거리
$L_i^k$	시각 $i$ 에서 로봇들간의 전체 거리에 의해 결정되는 인자

작업 공간 내에  $m$  대의 로봇이 있다면, 시각  $i+1$  에서 추측 항법에 의해 추정된  $k$  번째 로봇의 위치는 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{P}_{i+1}^k = \bar{P}_i^k + (V_{i+1} + e_{i+1})\delta t \quad (1)$$

여기에서  $k = 1, \dots, m$ . 한편 GPS 데이터  $\tilde{P}_{i+1}^k$  는  $\hat{P}_{i+1}^k$  이 계산되는 시각과 동일한 시각인  $i+1$  에 샘플링 된다.

그리고 제안된 군집 로봇 위치 추정 알고리즘의 핵심적인 아이디어는 아래와 같이 간단한 수식으로 정리될 수 있으며, 이 때 수식들에 사용되는 GPS, 주행거리계, 자이로 센서 데이터는 통계적인 파라미터인, 표준 편차를 산출하여 알고리즘에 적용한다.

$$\bar{P}_{i+1}^k = \tilde{P}_{i+1}^k - \Delta P_{i+1}^{k*} \quad (2)$$

$$\Delta P_{i+1}^{k*} = \sum_{j=1}^m (W_{i+1}^{kj} \Delta P_{i+1}^k) \quad (3)$$

$$W_{i+1}^{kj} = \frac{1/(l_{i+1}^{kj} + 1)}{L_{i+1}^k} \quad (4)$$

$$L_{i+1}^k = \sum_{j=1}^m 1/(l_{i+1}^{kj} + 1) \quad (5)$$

$$l_{i+1}^{kj} = |\hat{P}_{i+1}^k - \hat{P}_{i+1}^j| \quad (6)$$

$$\Delta P_{i+1}^k = \tilde{P}_{i+1}^k - \hat{P}_{i+1}^k \quad (7)$$

여기에서  $k = 1, \dots, m$  이다.

제안된 알고리즘은 참값에 가까운 위치 정보와 오차가 포함된 위치 정보의 비교를 통해서 GPS의 오차를 보정하는 DGPS 개념으로부터 아이디어를 얻었다. 즉, 동일한 접근 방법으로 우리는 식(7)과 같이 오차가 포함된 위치 정보  $\tilde{P}_{i+1}^k$  와 의사 위치 참값  $\hat{P}_{i+1}^k$  의 차로 의사 위치 오차  $\Delta P_{i+1}^k$  를 계산한다. 또한, 작업 공간 내에 위치한 로봇 각각의 의사 위치 오차들에는 식(4)로 계산된 각각의 가중치가 적용되며, 이를 모두 합하여 식(3)과 같이  $k$  번째 로봇의 위치 정보  $\tilde{P}_{i+1}^k$  를 보정하기 위한 새로운 의사 위치 오차  $\Delta P_{i+1}^{k*}$  를 계산 할 수 있다. 최종적으로 식(2)와 같이 오차가 포함된  $k$  번째 로봇의 위치 정보  $\tilde{P}_{i+1}^k$  에서 의사 위치 오차  $\Delta P_{i+1}^{k*}$  를 제거하면 보다 정확해진  $k$  번째 로봇의 위치  $\hat{P}_{i+1}^k$  를 구할 수 있다.

수식 (4)와 같이 가중치 항  $W_{i+1}^{kj}$  은  $1/(l_{i+1}^{kj} + 1)$  항을 포함하고 있는데, 이 항은 GPS 오차를 보정할 때 사용할 각 보정 값들의 가중을 결정한다. 즉, GPS의 오차를 보정하기 위해서 각 로봇들의 오차 정보를 융합할 때, 서로 가까이 있는 로봇의 GPS 오차 정보는 서로 멀리 떨어져 있는 로봇의 GPS 오차 정보에 비하여 보정 값에 보다 큰 기여를 한다. 여기에서 식 (6)과 같이 로봇 간의 거리는 시각  $i+1$  에서 각 로봇이 추측 항법에 의해서 추정된 위치로부터 계산된 값이며, 식 (5)와 같이  $k$  번째 로봇과 나머지 로봇 간 거리의 역수를 모두 합하면  $L_{i+1}^k$  이 계산된다. 단순히 역수만을 합하지 않고,  $l_{i+1}^{kj} + 1$  과 같이 1이 더해진 이유는 로봇 간의 거리가 0인 경우 즉,  $k$  번째 로봇 자신이 추정된 위치 정보를

가장 많이 활용하기 위해서이다.

물론, 제안된 알고리즘의 경우 추측 항법에 의해서 추정된 로봇의 위치 오차가 작으면 작을수록 보다 나은 위치 추정 성능을 보일 것이다. 그러나, 추측 항법에 의해서 추정된 로봇의 위치는 시간이 지남에 따라서 오차를 누적시키며, 이는 제안된 알고리즘의 성능을 저하시키는 문제로 작용하게 된다.

### 2.3 갱신 주기(Refresh Interval)

대부분의 모바일 로봇 어플리케이션은 절대 위치 추정 또는 상대 위치 추정 방법을 사용한다. 절대 위치 추정은 일반적으로 표식(landmark), 맵 매칭(map matching), 인공위성 기반의 GPS, 항해 표지(navigation beacon)에 의존한다. 본 논문에서는 각각의 로봇이 자신의 절대적인 위치를 추정하기 위해서 GPS 데이터를 수신하는 것으로 가정하였다. 그러나 제안된 알고리즘은 GPS외에 다른 종류의 외부 수용의(exteroceptive) 센서를 사용해도 무관하다.

상대 위치 추정 방법은 주행거리계와 자이로 센서를 바탕으로 하는 추측 항법이 일반적이다. 주행거리계와 자이로 센서는 가격이 저렴하고, 사용이 간편하며, 실시간 처리가 용이하다는 장점을 가지고 있다. 반면에, 주행거리계는 측정되는 로봇의 위치 오차가 누적되는 단점을 가지고 있으며, 자이로 센서 역시 로봇의 방향에 대한 상대적으로 큰 오차를 야기시키는 편류(drift) 현상을 가지고 있다. 따라서 추측 항법에 의해 추정된 위치의 오차를 줄이기 위해서는 주기적으로 추정된 위치를 절대적인 위치로 보정해주는 과정이 필요하다.

제안된 알고리즘 역시 추측 항법에 의해 추정된 위치 정보를 활용하므로 이를 적절한 갱신 주기마다 GPS 위치 정보로 갱신하는 과정이 필요하다. 따라서 우리는 4장의 시뮬레이션을 통해서 제한된 조건 하에 각 로봇들의 위치 추정 정확도를 높일 수 있는 최적의 갱신 주기를 산출할 것이다.

## 3. 가상 센서 데이터

본 논문에서 제안하고 있는 군집 로봇 위치 추정 알고리즘에 대한 시뮬레이션을 수행하려면 2.1절에서 언급한 것과 같은 가정에 따르는 시뮬레이션 환경을 구축해야 한다. 구축된 시뮬레이션 환경에서는 10대의 로봇이 가상의 공간을 임의의 방향과 속도를 가지고 움직인다. 각각 로봇들의 GPS 오차는 각각의 로봇이 동일한

GPS 수신기를 가지고 있다는 가정 하에, 동일한 표준 편차를 갖는 오차 확률 분포에 따라서 생성된다. 또한 로봇과 지면 사이의 미끄러짐 등에 의해서 발생할 수 있는 추측 항법의 위치 오차 역시 동일한 표준 편차를 갖는 오차 확률 분포에 따라서 생성된다.

### 3.1 동일 공간에 위치한 GPS들간의 데이터 상관 관계

본 논문에서 제안하고 있는 군집 로봇 위치 추정 알고리즘은 작업 공간 내에서 각 로봇들의 GPS 데이터 오차들간의 상관성을 가정하고 있다. 동일 공간 내에서 두 GPS간의 위치 데이터 상관 관계는 그림 1과 같은 장치들을 사용하여 측정했다. 동종의 차량용 GPS 두 대를 GPS 위치 오차 범위 내에 두고, 두 GPS의 위치 데이터를 비교해보았다. 그 결과 그림 2에서 볼 수 있듯이 실험을 통해서 측정된 두 GPS의 시간에 따른 오차는 위도, 경도 모두에서 유사하게 나타났다. 여기에서 DGPS의 데이터는 변화가 미미하여 평균한 값을 사용하였다.

두 GPS간 거리에 따라 변하는 오차들 간의 상관 관계는 반복된 실험을 통해서 측정되고, 함수화될 수 있으나, 이는 추후 연구로 진행될 것이다. 본 논문에서는 기존의 연구<sup>11)</sup>를 바탕으로 거리에 따른 GPS 데이터 오차들의 상관 관계를 선형화하여 사용하였다.

### 3.2 GPS 위치 데이터의 가상 오차 생성

그림 3은 작업 공간 내에서 각 로봇들의 가정된 GPS 데이터 오차들간의 상관성을 나타내고 있다. 2.1절에서 가정한 것과 같이 서로 가까이 있는 로봇들의 GPS 오차는 서로 연관성이 크고, 로봇들 간의 거리가 멀어질수록 GPS 오차의 연관성은 줄어들어야 한다. 우리는 아래와 같은 단계에 따라 이를 위한 각각 로봇의 가상 GPS 경도 오차를 생성한다.

- 1) 로봇의 가상 GPS 경도 데이터를 생성하기 위해서 그림 3(a)에서 화살표로 표시된 것과 같이 가장 왼쪽에 있는 로봇(reference robot)을 선택한다.
- 2) 그림 4에 나타난 실선과 같은 확률 분포 곡선에 따라서 기준 로봇의 가상 GPS 경도 오차를 생성한다.
- 3) 기준 로봇으로부터 가까이 있는 로봇은 그림 4에 나타난 점선과 같은 확률 분포 곡선에 따라서 가상 GPS 경도 오차를 생성한다.

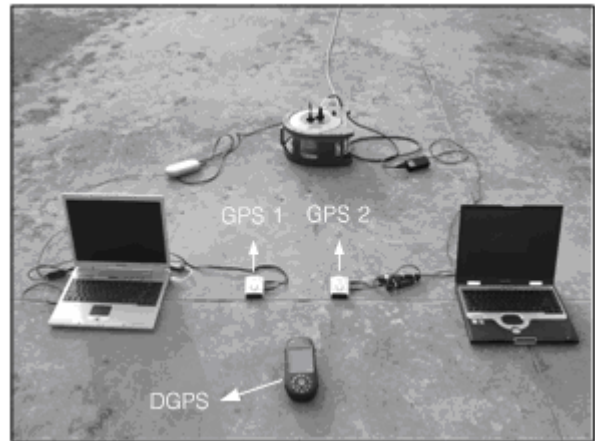


그림 1. GPS들간의 데이터 상관 관계를 측정하기 위한 실험 장치 구성

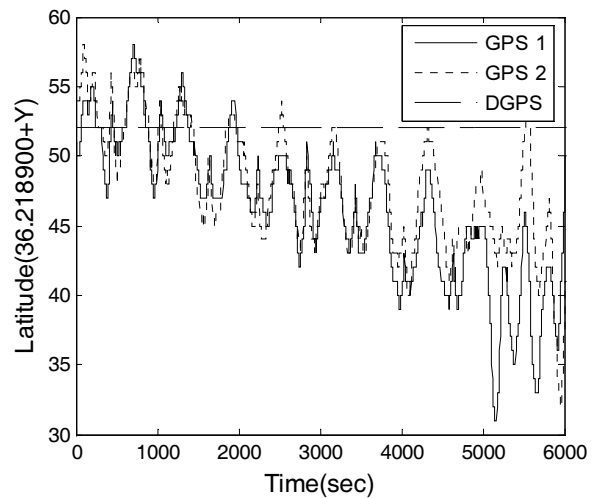


그림 2. GPS 오차 범위 내에서 위치한 두 GPS의 위도 오차 상관 관계

- 4) 기준 로봇으로부터 멀어질수록 각 로봇들의 가상 GPS 경도 오차 생성을 위한 확률 분포 곡선은 그림 4의 점선으로 그려진 확률 분포 곡선에서 실선으로 그려진 확률 분포 곡선으로 선형적인 x축 평행 이동을 한다.

로봇의 가상 GPS 위도 오차는 위에서 설명한 경도 오차를 생성하는 방법과 동일하며, 이 때의 기준 로봇은 그림 3(b)에서 화살표가 가리키는 로봇과 같이 가장 아래 쪽에 있는 로봇이 된다.

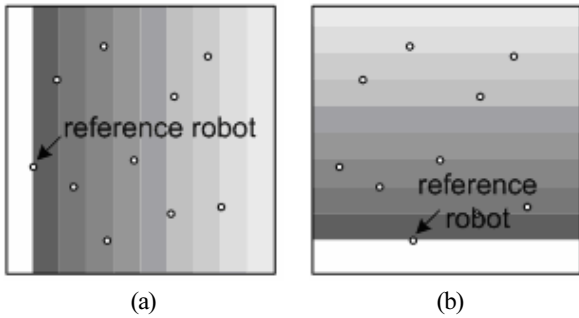


그림 3. 각 로봇들의 GPS 데이터 오차들간의 상관 관계 :  
(a) GPS 경도 데이터 오차간의 상관 관계,  
(b) GPS 위도 데이터 오차간의 상관 관계

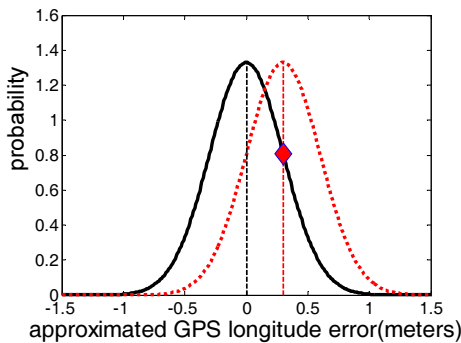


그림 4. 거리에 따른 로봇의 상관 관계가 고려된  
GPS 경도 오차 생성

### 3.3 추측 항법에 의한 위치 데이터의 가상 오차 생성

그림 5에 나타난 것과 같이 추측 항법에 의해서 추측된 위치의 가상 오차는 로봇이 1m/s로 주행할 때, 초당 최소 0m 에서 최대 0.1m 사이의 오차가 발생하도록 구현되었다.

이것은 로봇이 1m/s로 주행할 때 0m 와 0.1m 사이의 어떤 값이든 선택될 확률이 같다는 의미를 가지고 있다. 그림 5와 같은 연속 확률 분포 곡선의 표준 편차는  $\sigma_{DR} = 0.02887m$  이며, 본 논문의 4장에서 다룰 모든 시뮬레이션의 로봇 작동 파라미터 중 하나로 활용될 것이다.

## 4. 시뮬레이션 결과

앞장에서 언급한 것과 같이 우리는 가상 센서 데이터를 활용하여 제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위한 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 군집 로봇의 공동 작업

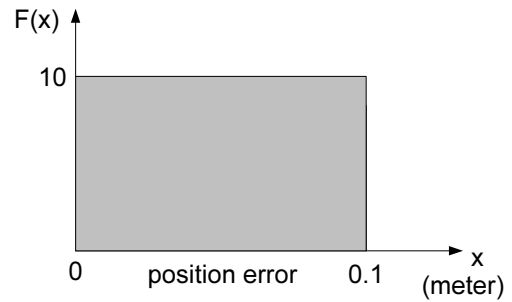


그림 5. 추측 항법에 의한 위치 오차의 연속 확률 분포

공간은 가로 세로 40m의 크기이며, 로봇의 모양은 50cm의 반경을 갖는 원기둥의 omni-directional 로봇이다. 그리고 이동 중 로봇 간의 충돌을 피하기 위해서 로봇 간의 거리는 최소 1m로 제한했고, 각 로봇의 최대 속도는 1m/s 라고 가정했다. 총 10대의 로봇이 2차원의 공동 작업 공간에서 각각 임의의 방향과 속도로 움직인다.

또한 우리는 시뮬레이션 상에서 사용될 군집 로봇 두 가지 작동 파라미터를 정의한다. 하나는 절대 위치 추정을 위한 센서(GPS)와 상대 위치 추정을 위한 센서(DR) 간의 표준 편차의 비율이다. 나머지 하나는 2.3절에서 언급했던 상대 위치 추정을 위한 센서의 오차 누적을 막기 위해서 추정된 상대 위치를 오차가 누적되지 않는 절대 위치로 갱신하기 위한 주기다.

### 4.1 절대 / 상대 위치 추정 센서들의 오차 표준 편차 비에 따른 성능 비교

본 절에서는 절대/상대 위치 추정 센서들의 오차 표준 편차의 비가 변함에 따라서 제안된 알고리즘의 성능이 어떻게 변하는지를 살펴본다. 또한 자기 자신의 GPS 위치 정보와 추측 항법에 의한 위치 정보 만을 융합하여 로봇 자신의 위치를 추정하는 단일 로봇 위치 추정 방법<sup>[16]</sup>과 비교해 보았다. 이 방법은 관측위성의 수가 4개 이상이면 GPS 신호에 의해 위치를 계산하고, 4개 이하이면 추측항법으로 위치를 계산하며, 추측 항법에 의해서 누적되는 오차는 GPS로 보정한다. 이 때, 표 2와 같이 추측 항법의 단위 시간당 표준 편차는 0.02887m이고, GPS의 표준 편차는 0.05574m이다. 따라서 GPS 오차는 대략 3~4m 정도이며, 이는 몇몇 GPS 보정 알고리즘<sup>[18]</sup>을 사용하면 일반 저가 차량용 GPS를 사용해서도 구현이 가능하다.

#### 4.1.1 Case 1 $\sigma_{DR} : \sigma_{GPS} = 1:2$

표 2. 군집 로봇 localization 작동 파라미터 1

작동 파라미터	파라미터 값
$\sigma_{DR}$	0.02887m
$\sigma_{GPS}$	0.05774m
Operating Time	30s

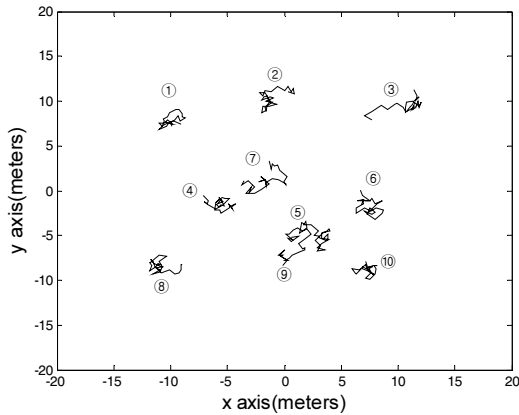


그림 6. 10대 로봇의 이동 경로

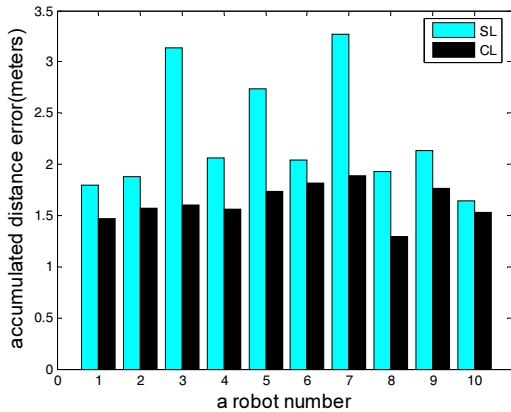


그림 7. 10대 로봇의 실제 위치와 떨어진 거리를 누적한 오차

그림 6은 절대/상대 위치 추정 센서의 오차 표준 편차의 비가 로봇 작동 파라미터가 표 2와 같이 1:2일 때 10대 로봇의 이동 경로를 나타낸다. 그림 8은 10대 로봇이 이동한 30s 동안 발생한 x축의 거리 오차이다. 그림 7은 10대 로봇이 동작한 30s 동안 누적된 실제 로봇의 위치와 추정한 로봇의 위치 간에 발생한 오차의 합을 단일로봇 위치추정 방법(SL)과 제안된 방법(CL)에 따라 각각 나타낸 그림이며, 수식 (8)에 의해서 계산되었다.

$$E_d^k = \sum_{i=1}^{op.time} \|P_{i,real}^k - P_{i,est}^k\| \quad (8)$$

여기에서  $P_{i,real}^k$  은 시각  $i$ 에서  $k$  번째 로봇의 실제 위치이고,  $P_{i,est}^k$  은 각 알고리즘에 의해 추정된 시각  $i$ 에서  $k$  번째 로봇의 추정 위치이다.  $op.time$  은 로봇의 운행 시간이다.

단일 로봇 위치 추정 알고리즘(SL)의 수행결과와 비교해볼 때, 군집 로봇 위치 추정 알고리즘(CL)에 의해서 추정된 각각의 로봇들의 위치 오차 값은 모든 로봇에 대해서 줄었음을 확인할 수 있다.

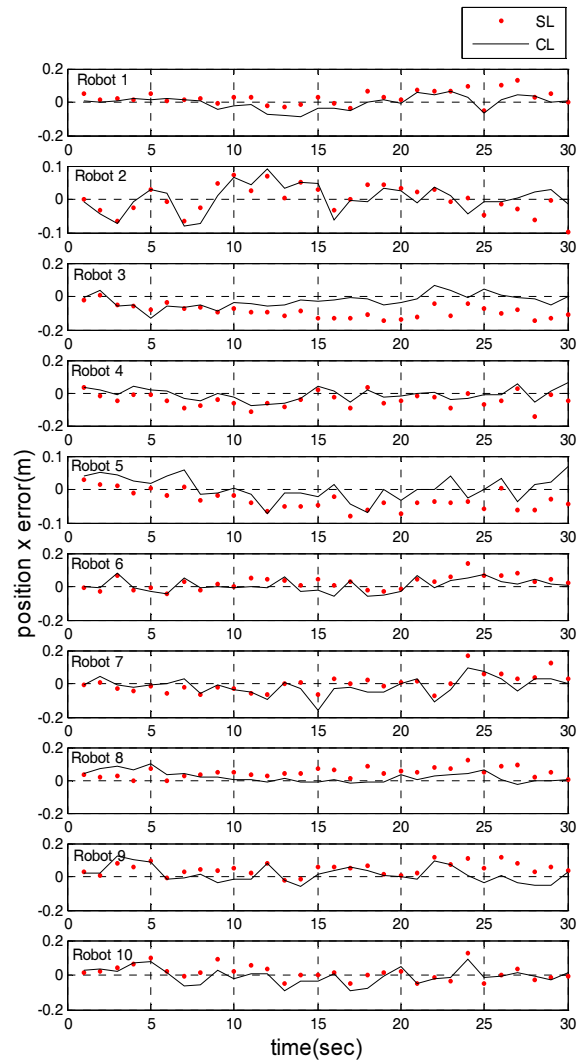


그림 8. 10대 로봇의 x축 거리 오차

4.1.2 Case 2  $\sigma_{DR} : \sigma_{GPS} = 1:5$

표 3. 군집 로봇 localization 작동 파라미터 2

작동 파라미터	파라미터 값
$\sigma_{DR}$	0.02887m
$\sigma_{GPS}$	0.14435m
Operating Time	30s

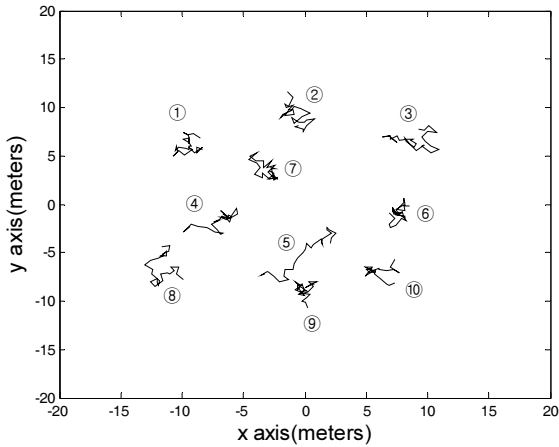


그림 9. 10대 로봇의 이동 경로

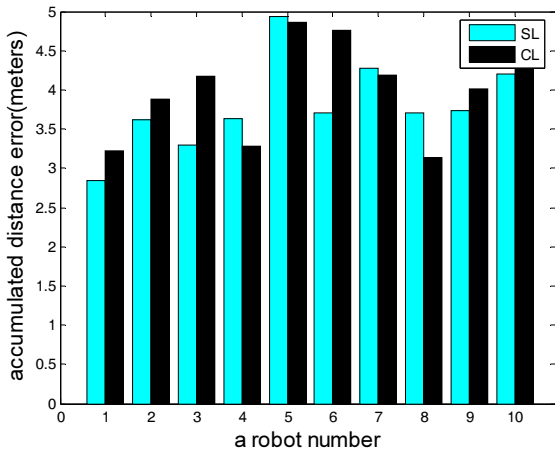


그림 10. 10대 로봇의 실제 위치와 떨어진 거리를 누적한 오차

그림 9는 절대/상대 위치 추정 센서의 오차 표준 편차의 비가 1:5일 때이고 나머지 작동 파라미터가 표 3과 같을 때, 10대 로봇의 이동 경로를 나타낸다. 그림 11은 10대 로봇의 30s간 이동하는 동안 발생한 x축 거리 오차이며, 그림10은 수식 (8)에 의해서 10대 로봇의 30s

동안 실제 로봇의 위치와 추정된 위치들 사이의 거리를 누적한 값이다. 제안된 알고리즘(CL)과 단일 로봇 위치 추정 알고리즘(SL)의 수행결과를 비교해볼 때, ④,⑦,⑧번 로봇을 제외한 나머지 로봇은 오차가 오히려 커졌음을 확인할 수 있다. 이는 절대/상대 위치 추정 센서의 오차 표준 편차의 비가 커짐에 따라서 제안된 알고리즘의 성능이 떨어지고 있음을 의미하며, 사실상 1:5의 비율을 넘게 되면 제안된 알고리즘의 사용이 제한됨을 시뮬레이션을 통해 파악 할 수 있다.

4.1.3 절대/상대 위치 추정 센서들의 오차 표준 편차의 비 제안된 군집 로봇 위치 추정 알고리즘의 성능을 극대화할 수 있는 절대/상대 위치 추정 센서들의 오차 표준 편차의 비는 그림 12에서 볼 수 있는 것과 같이

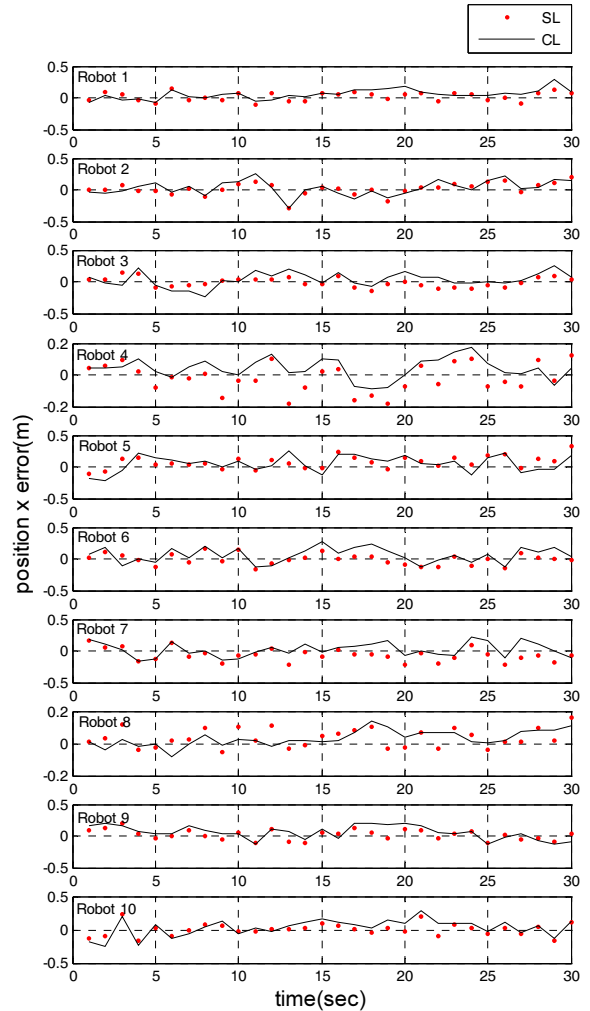


그림 11. 10대 로봇의 x축 거리 오차



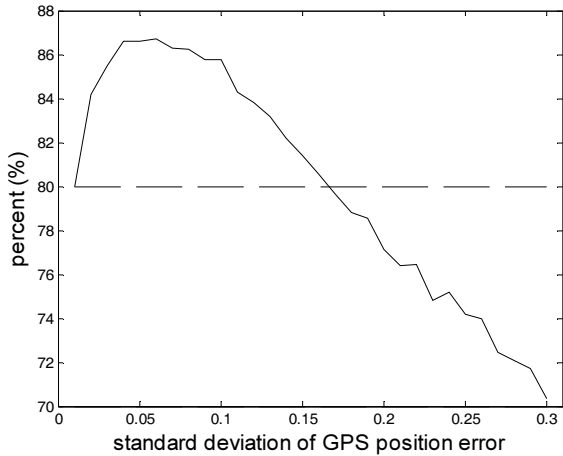


그림 12.  $\sigma_{DR} = 0.02887m$  일 때, GPS 위치 데이터의 오차 표준 편차에 따른 군집 로봇 위치 추정 알고리즘의 성능

$\sigma_{DR} : \sigma_{GPS} = 1:1 \sim 1:5$  정도를 이룰 때이며, 이 때는 80% 이상의 확률로 향상된 값이 출력됐다. 비가 1:5보다 커질 경우에는 추정 위치의 정확도가 80% 이하로 떨어짐을 알 수 있다.

#### 4.2 갱신 주기

본 절에서는 제안된 알고리즘을 사용하여 로봇을 장거리 주행시킬 때, 추측 항법에 의한 위치 정보를 GPS 위치 정보로 갱신하기 위한 주기를 산출한다. 이 과정은 극단적으로 빠른 주기에 의해 추측 항법에 의한 위치 정보를 GPS 정보로 대체했을 때, 추측 항법에 의한 위치 오차에 비해 GPS 데이터 오차가 오히려 큼으로 인해 위치 추정 정확도 떨어지는 것을 막기 위해서 필요하다. 즉, 적절한 갱신 주기로 추측 항법에 의한 위치 정보를 GPS 위치 정보로 보정해주면 보다 위치 추정 정확도를 향상시킬 수 있다.

##### 4.2.1 Case 3 $\sigma_{DR} : \sigma_{GPS} = 1:3$

표 3. 군집 로봇 localization 작동 파라미터 3

작동 파라미터	파라미터 값
$\sigma_{DR}$	0.02887m
$\sigma_{GPS}$	0.08661m
Operating Time	300s
Refresh Interval	50s

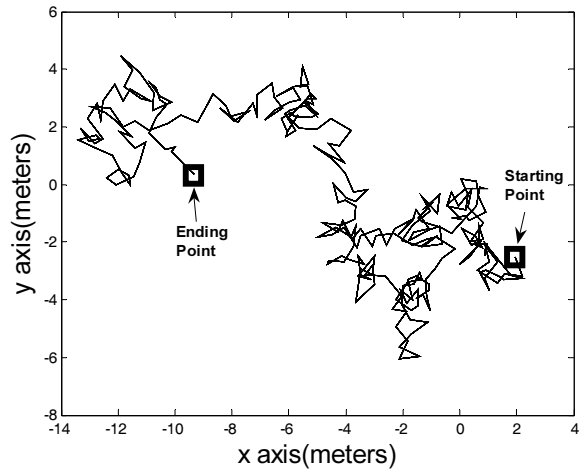


그림 13. 5번 로봇의 이동 경로

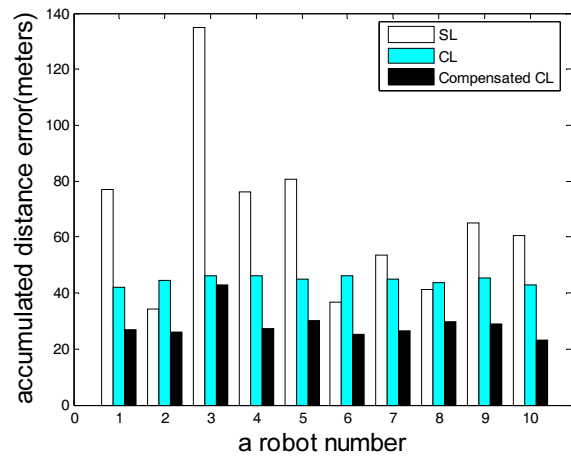


그림 14. 10대 로봇의 실제 위치에서 떨어진 거리를 누적한 오차

그림 13은 표3과 같은 로봇 작동 파라미터 하에서 5번 로봇의 이동 경로를 보여주고 있다. 그림 14는 수식(8)에 의해서 10대 로봇의 실제 위치와 추정 로봇이 위치 사이의 떨어진 거리를 시간에 따라서 누적한 오차들이다. 단일 로봇 위치 추정 알고리즘(CL)과 갱신 주기를 두어서 추측 항법에 의한 위치 정보를 갱신하지 않은 군집 로봇 위치 추정 알고리즘(CL)과 갱신한 알고리즘(Compensated CL)의 누적되는 오차를 비교해보면, 추측 항법에 의한 위치 정보를 갱신한 알고리즘의 누적되는 오차가 절반 가까이 작은 것을 확인할 수 있다. 표 3과 같이 주어진 로봇의 작동 파라미터에서 적절한 로봇의 갱신 주기는 시뮬레이션 결과 30s ~ 80s 정도였으며, 이는 주어진 로봇의 작동 파라미터에 따라서 달라진다.



## 5. 결론

본 논문에서 제안한 군집 로봇의 위치 추정 방법은 작업 공간 내에 서로 거리가 가까운 로봇의 GPS 오차는 유사하다는 DGPS의 개념에서 아이디어를 얻었으며, 이는 기존의 방법들에 비해서 매우 간단한 수식으로 표현될 수 있다. 또한 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 제시한 절대/상대 위치 추정 센서들간의 오차 표준 편차 범위 안에 들 경우, 단일 로봇의 위치 추정 알고리즘과 비교하여 보다 향상된 위치 추정이 가능하다. 또한 누적되는 추측 항법에 의해서 추정된 위치를 적절한 갱신 주기마다 절대 위치인 GPS 추정 위치로 갱신해 줌으로써 보다 추정된 위치의 오차를 줄일 수 있었다. 향후 연구로는 실제 거리에 따른 GPS 데이터 오차간의 상관관계를 정의하고, 시뮬레이션을 통해서 확인된 군집 로봇의 위치 추정 방법을 실제 다중 로봇 시스템에 구현하려고 한다.

## 참고문헌

- [1] F. Chenavier and J. Crowley, "Position estimation for a mobile robot using vision and odometry", in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 2588-2593, May 12-14, 1992.
- [2] Gourley and M. Trivedi, "Sensor based obstacle avoidance and mapping for fast mobile robots", in Proc. 1994 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1306-1311, May 8-13, 1994.
- [3] J. Borenstein and L. Feng, "Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots", IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 12, pp. 869-880, Dec. 1996.
- [4] S. I. Roumeliotis and G. A. Bekey, "Bayesian estimation and Kalman filtering: A unified framework for mobile robot localization", in Proc. 2000 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 2985-2992, Apr. 24-28, 2000.
- [5] C. Ferrari, E. Pagello, J. Ota, and T. Arai, "Multirobot motion coordination in space and time", Robotics and Autonomous Systems, vol. 25, no. 3/4, pp. 219-229, Nov. 1998.
- [6] Y. Arai, T. Fujii, H. Asama, H. Kaetsu, and I. Endo, "Realization of autonomous navigation in multirobot environment", in Proc. 1998 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots Systems, pp. 1999-2004, Oct. 13-17, 1998.
- [7] I. Rekleitis, G. Dudek, and E. Milios, "Experiments in free space triangulation using cooperative localization", in Proc. 2003 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots Systems, pp. 1777-1782, Oct. 2003.
- [8] S. I. Roumeliotis and G. A. Bekey, "Collective localization : a distributed Kalman filter approach to localization of groups of mobile robots", in Proc. 2000 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 2958-2965, Apr. 24-28 2000.
- [9] J. Liu, K. Yuan, W. Zou, and Q. Yang, "Monte Carlo multi-robot localization based on grid cells and characteristic particles", in Proc. 2005 IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics, 510-515, July 24-28, 2005.
- [10] S. I. Roumeliotis and G. A. Bekey, "Distributed multirobot localization", IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 18, pp. 780-795, Oct. 2002.
- [11] A. Howard, M. J. Mataric, and G. S. Sukhatme, "Putting the 'I' in 'team' : an ego-centric approach to cooperative localization", IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 868-874, Sep. 14-19, 2003.
- [12] J. R. Splezer and C. J. Taylor, "A bounded uncertainty approach to multi-robot localization", in Proc. 2003 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1258-1265, Oct. 2003.
- [13] T. Yoshida, A. Ohya, and S. Yuta, "Cooperative self-positioning system for multiple mobile robots", in Proc. 2003 IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics, 223-227, 2003.
- [14] A. I. Mourikis and S. I. Roumeliotis, "Performance analysis of multirobot cooperative localization", IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 22, pp. 666-681, Aug. 2006.
- [15] Indoor GPS, (retrieved in Jan. 2006). [Web]: <http://www.ninety.co.kr>
- [16] 김양환, 최병석, 이장명, "GPS와 듀얼 전자 컴파스를 이용한 차량의 혼합항법시스템", 제어·자동화·시스템공학회논문지, 제12권, 제2호, pp. 106-112, 2006.
- [17] G. Harkleroad, W. Tang, N. Johnson, "Estimation of error correlation distance for differential GPS operation", Position Location and Navigation

Symposium, 1990. Record. 'The 1990's - A Decade of Excellence in the Navigation Sciences'. IEEE PLANS '90. IEEE, pp. 378-382, May 1990.

[18] 김윤구, 이기동, "DGPS형 정밀위치시스템을 이용한 이동 로봇 위치 보정" 제어·자동화·시스템공학회논문지, 제12권, 제9호, pp. 883-890, 2006.



### 조 경 환

2006 충남대학교 메카트로닉스공학과(공학사)  
2006~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 석사과정

관심분야 : 지능 로봇 시스템의 설계 및 제어, 군집 로봇의 위치 추정, SLAM, HCI



### 이 지 흥

1983 서울대학교 전자공학과(공학사)  
1985 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(석사)  
1991 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(박사)

1983~1988 현대중공업 로봇 사업부 연구원

1991 한국과학기술원 연수연구원

1994~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수

관심분야 : 로봇틱스, 지능제어, 전자파 차폐, 컴퓨터 기반 신호처리 시스템