

# 이동로봇의 저비용 위치추정을 위한 효율적인 인공표식 배치기법

## Efficient Placement of Artificial Landmarks for Low-cost Localization of a Mobile Robot

김 지 웅 \*, 정 우 진\*\*

Jiwoong Kim\*, Woojin Chung\*\*

### Abstract

Artificial landmarks have been widely used for reducing the uncertainty in localization of a mobile robot. In addition, research for efficient placement of artificial landmarks has been considered as one of the fundamental issues since the cost of localization is increased with the number of used landmarks. Therefore, this paper proposes a method in which landmarks are efficiently placed by considering the uncertainty characteristics of the motion model and the sensor model. Because two models have different uncertainty distributions, the final uncertainty can be considerably reduced through their efficient combination. The usefulness of the proposed method is demonstrated by simulation results.

### 요 약

인공표식은 이동로봇의 위치추정에서 불확실성을 감소시키기 위해 널리 사용되어 왔다. 또한, 사용되는 인공표식의 수가 증가함에 따라 위치추정 비용이 증가하기 때문에, 인공표식의 효율적 배치를 위한 연구는 핵심적인 이슈 중 하나로서 여겨져 왔다. 따라서 본 논문은 운동모델과 센서모델의 불확실성 특성을 고려함으로써 인공표식들을 효율적으로 배치하기 위한 방법을 제안한다. 운동모델과 센서모델은 서로 다른 불확실성 분포를 가지기 때문에, 최종 불확실성은 두 가지 불확실성의 효율적 조합을 통해 크게 감소될 수 있다. 제안한 기법의 유용성은 시뮬레이션 결과에 의해 입증된다.

*Key words* : Localization, Artificial Landmarks, Uncertainty, Motion Model, Sensor Model

\* School of Mechanical Engineering, Korea University

★ Corresponding author

: Tel: +82-2-3290-3375, Email: smartrobot@korea.ac.kr

※ Acknowledgment

: This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MEST) (2013-029812). This research was also supported by the MIKE, Korea, under the ITRC support program (NIPA-2013-H0301-13-2006) supervised by the NIPA.

Manuscript received Nov. 04, 2013; revised Nov. 21, 2013; accepted Nov. 21, 2013

## 1. 서론

첨단 자동화 시대로의 도약과 함께 다양한 형태의 로봇에 관한 연구가 수행되고 있다[1]-[2]. 그 중에서도 특히 로봇의 위치추정 분야의 발전은 로봇의 이동성을 향상시킴으로써 이동로봇으로서의 활용도를 높이는데 크게 기여하고 있다. 이러한 로봇의 위치추정에 있어서 가장 중요시 여겨지는 이슈 중 하나는 추정된 위치의 불확실성을 극복하는 일이다. 이는 로봇의 위치 불확실성의 크기를 줄임으로써 더욱 정밀한 운동제어가 가능해지기 때문이다.

위치 불확실성은 로봇의 휠 구동 량으로부터 예측 과정에서 발생하는 오도메트리 운동모델과 장착된 외부센서로부터의 관측과정에서 발생하는 센서모델에 대해 따로 정의될 수 있다. 이렇게 정의된 불확실성을 감소시키기 위해 많은 연구들이 수행되어 왔다 [3]-[4]. [3]에서는 위치 불확실성을 최소화시키는 레이저 센서의 측정방향을 결정하는 문제를 다루었고, [4]에서는 다중센서를 사용하는 로봇에 대해 위치추정 불확실성을 최소화하기 위한 센서정보의 융합 방법을 제시되었다. 이때, 사용되는 센서의 종류 또는 위치추정 환경에 따라 각각의 불확실성의 형태는 다른 방향성을 보여준다.

한편, 외부센서의 선택 시 불확실성 이외의 요인도 고려되어야 한다. 센서의 종류에 따라 제한적인 환경에서만 사용 가능할 수도 있고, 비용적인 측면에서 문제가 발생할 수도 있기 때문이다. 대표적인 예로서 레이저 센서를 사용한 위치추정 시스템이 있다 [5]-[6]. 비록 레이저 센서는 벽면으로부터 정확한 거리 측정값을 얻을 수 있지만, 센서의 가격이 비싸고 측정거리 값의 한계 때문에 넓게 트인 환경에서 거리 데이터를 측정할 수 없다. 또한, 천장에 설치된 인공 표식을 인식함으로써 위치를 추정하는 Stargazer[7]는 정밀한 위치정보를 제공함에도 불구하고, 높은 천장이 있는 환경에서는 사용이 불가능하다는 단점이 있다. 반면에, 초음파 센서는 가격이 저렴하며 높은 천장이 있는 환경에서도 사용이 가능하다. 뿐만 아니라, 제어가 간단하여 로봇의 위치추정에 널리 사용되고 있다[8]-[9]. 비록 초음파 센서는 잡음에 민감하여 상대적으로 낮은 정확도를 가지고 있지만, 적절한 배치와 알고리즘을 통해 오도메트리 정보와 융합함으로써 성능이상의 효과를 기대할 수 있다. 따라서 본 논문은 오도메트리 운동모델과 초음파 비컨센서의 센서모델로부터의 불확실성 분포형태에 주목함으로써 위치추정 과정에서 지속적으로 증가하는 불확실성을 효율적으로 감소시키기 위한 방법론을 제시한다.

초음파 비컨은 인공표식으로서 위치추정 환경에 배치되고, 로봇은 장착된 수신기를 통해 비컨으로부터의 거리 값을 읽어 들인다. 초음파 비컨을 인공표식으로 활용한 통상적인 위치추정 시스템은 위치추정 환경에 설치된 비컨들로부터 측정되는 거리 값들을 가지고 삼변측량법을 이용해 로봇의 위치를 추정한다. 이와 달리 본 연구에서는 불확실성의 특성을 활용함으로써 동일 공간에 사용되는 비컨센서의 수를 줄이는 보다 효율적인 위치추정 기법을 제안하고자

한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 운동모델과 센서모델에서 나타나는 각각의 불확실성 특성과 그것을 이용한 위치추정의 기본원리를 소개하고, 3장에서는 정해진 공간 내에 초음파 비컨센서를 효율적으로 배치하는 기법을 다룬다. 그리고 4장에서는 제안한 위치추정기법의 효율성을 시뮬레이션을 통해 검증한다. 마지막으로, 5장에서 결론이 언급된다.

## II. 위치 불확실성

### 1. 운동모델의 불확실성

이동로봇의 운동에 의해 변화된 위치는 내부센서인 휠 엔코더에 의해 휠의 회전 량을 감지함으로써 추정할 수 있는데, 이것을 그림 1에서 보여지는 오도메트리 운동모델[10]이라고 한다. 오도메트리 운동모델은 4개의 운동오차 파라미터 ( $\alpha_1 \sim \alpha_4$ )를 통해 다양한 움직임에 대한 경향을 볼 수 있어서 대부분의 이동로봇에 적용 가능하다는 장점이 있다. 오도메트리 운동모델에서 4개의 운동오차 파라미터는 각각 일정 각도 또는 거리만큼 이동했을 때 나타나는 각도 및 거리오차를 의미한다. 운동오차 파라미터에 따른 오도메트리 운동모델의 적용방법은 [10]에 자세히 서술되어 있다. 본 논문에서 사용된 운동오차 파라미터의 값은 그림 2에서 보여지는 이륜 이동로봇인 P3-DX와 Stargazer로 실내 환경에서 실험적으로 측정되었고, 그 값은 표. 1에 제시되어 있다.

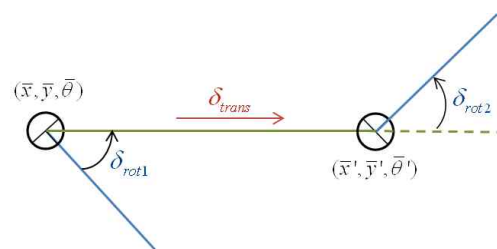


Fig. 1. Odometry motion model[10]

그림 1. 오도메트리 운동모델[10]



Fig. 2. P3-DX and Stargazer

그림 2. P3-DX와 스타게이지

Table 1. Motion error parameters

표 1. 운동오차 파라미터

$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$
[rad/rad]	[rad/m]	[m/m]	[m/rad]
0.0052	0.0148	0.0473	0.0401

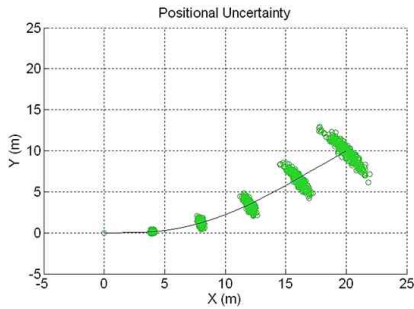


Fig. 3. Uncertainty of odometry motion model  
그림 3. 오도메트리 운동모델의 불확실성

오도메트리 운동모델의 불확실성은 주로 평평하지 않은 바닥 면 또는 지나친 가속도로 인해 발생한다. 또한, 불확실성의 크기는 예측된 샘플위치의 공분산에 의해 정의되며, 타원의 형태로 표현된다. 그림. 3은 오도메트리 운동모델의 불확실성 타원의 전개양상을 보여주는데, 주행방향에서의 불확실성보다 수직방향에서의 불확실성이 크게 증가함을 확인할 수 있다 [11]. 즉, 주행방향에서 미끄러짐에 대한 불확실성보다 어긋난 방향각으로 인해 발생하는 불확실성이 크다.

**2. 센서모델의 불확실성**

센서모델의 불확실성은 센서의 종류, 센서의 개수, 위치추정 환경, 위치추정 기법 등 다양한 요인에 의해 결정된다. 그 중에서도 본 논문에서는 단일 초음파 비컨센서로 거리 값을 측정할 때 발생하는 불확실성만을 고려한다. 그림. 4에서 볼 수 있듯이 센서모델에 의한 로봇 위치의 불확실성은 비컨으로부터 예측된 위치까지의 거리인  $d$ 에 대한 가우시안 확률분포로 표현될 수 있다. 이때 실제로 로봇이 초음파 거리센서로부터  $d^*$ 의 거리에 위치한다면, 가우시안 확률분포의 평균은  $d^*$ 가 되며 표준편차는 센서의 성능에 의존한다. 하지만 초음파 비컨은 거리정보만을 로봇에 제공하기 때문에, 초음파 비컨으로부터 동일한 거리에 있는 로봇의 잠재적인 위치들 중 실제 로봇의 위치를 추정함에 있어서 큰 불확실성이 존재하게 된다.

**3. 불확실성의 조합**

로봇의 최종 위치 불확실성은 운동모델의 불확실성과 센서모델의 불확실성을 조합함으로써 결정된다.

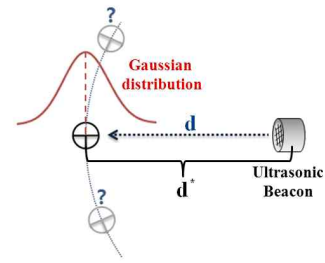


Fig. 4. Uncertainty of the sensor model related to the ultrasonic beacon  
그림 4. 초음파 비컨과 관련된 센서모델의 불확실성

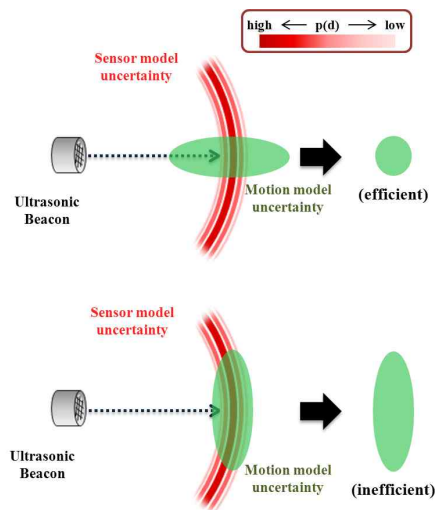


Fig. 5. The combinations of the motion model uncertainty and the sensor model uncertainty  
그림 5. 운동모델 불확실성과 센서모델 불확실성의 조합

다시 말해서, 운동모델에 의해 예측된 위치에 센서정보를 더함으로써 최종 위치 불확실성이 결정된다. 따라서 운동모델에서 불확실성이 가장 큰 방향에 센서모델에서 불확실성이 가장 작은 방향이 적용될 때 불확실성 감소효과는 최대가 된다. 그림. 5는 오도메트리 불확실성과 초음파 비컨센서의 불확실성이 조합되는 두 가지 경우를 보여준다. 먼저, 운동모델에 의해 형성된 불확실성 타원의 장축이 센서지향방향과 일치선 상에 있을 때 최종 불확실성 감소효과는 최대가 된다. 반대로, 불확실성 타원의 단축이 센서지향방향과 일치선 상에 있을 경우에는 불확실성 감소효과가 거의 없음을 확인할 수 있다.

운동모델과 센서모델의 불확실성이 조합되는 구체적인 위치추정 알고리즘으로는 Monte Carlo Localization(MCL)[12]이 사용된다. MCL은 잠재적인 로봇의 위치를 샘플들을 이용해 나타내며, prediction, measurement update, resampling 총 3단계로 이루어

진다. 먼저, 초기의 샘플들은 prediction 단계에서 운동모델의 불확실성에 의해 발산한다. 발산된 샘플들은 measurement update 단계에서 센서모델로부터 가중치를 각각 부여 받는다. 다음으로, resampling 단계에서는 부여된 가중치에 따라 샘플들이 수렴한다. 이러한 사이클은 정해진 시간간격마다 반복된다.

### III. 인공표식 배치기법

#### 1. 불확실성을 고려한 인공표식의 배치

그림. 6은 로봇이 직선 경로를 주행할 때, 비컨센서가 배치된 방향에 따른 불확실성 크기의 감소량을 비교한 결과를 보여준다. 여기서 녹색 원들의 집합은 운동모델만 적용되었을 때의 불확실성 타원이고, 적색 원들의 집합은 센서모델을 적용시킴으로써 수렴한 불확실성 타원이다. 먼저, 그림. 6의 (a), (b)와 같이 단 하나의 비컨만 설치된 환경에서 로봇이 비컨을 향해 이동할 경우 운동모델의 불확실성은 센서정보를 받아도 크기가 거의 감소되지 않는다. 하지만, 그림. 6의 (c)와 (d)에서 볼 수 있듯이 위치추정 영역 내에 사거리를 만족하는 추가적인 비컨이 다른 방향에 항상 배치된다면 불확실성의 크기는 지속적으로 감소될 수 있다. 마찬가지로, 두 개의 비컨이 설치된 환경에서 로봇이 두 비컨을 이은 선을 따라 이동할 경우에도 불확실성 감소효과가 거의 없기 때문에, 추가적인 비컨을 적절한 방향에 배치함으로써 이를 보완하여야 한다. 따라서 운동모델과 센서모델의 불확실성 특성을 고려할 때 비컨이 추가적으로 배치될 필요가 있는 상황은 아래와 같다.

- 가. 한 개의 비컨이 설치된 환경에서 로봇이 비컨을 향해 이동할 경우
- 나. 두 개의 비컨이 설치된 환경에서 로봇이 두 비컨을 이은 선을 따라 이동할 경우

#### 2. 단위공간에서 인공표식 배치기법

이동로봇의 위치추정을 위해 비컨센서를 배치할 때 두 가지 관점에서 문제에 접근할 수 있다. 하나는 로봇의 경로가 완전히 고정된 상황에서 위치추정 효율을 최대화하기 위해 비컨을 배치하는 문제이고, 또 하나는 정해진 공간 내에서 자유롭게 로봇이 주행할 수 있도록 비컨을 배치하는 문제이다. 본 논문에서는 후자의 관점에서 접근함으로써 정의된 공간 내에서는 로봇의 경로와 무관하게 신뢰성 있는 위치추정이 가능하도록 비컨을 배치하고자 한다.

그러기 위해서 그림. 7과 같이 면적이  $100m^2$ 인 단위공간을 정의하고, 내부에 4개의 비컨센서를 정사각

형의 구조로 배치하였다. 비컨센서는 장거리에서 음파의 감쇠로 인해 5m이내에서 신뢰성 있는 거리정보를 준다고 가정할 때, 5m내에 위치한 비컨의 개수에 따라 단위공간은 4개의 부분공간으로 나눌 수 있다. 그리고 앞서 3.1에서 언급하였던 문제 상황을 고려하여 한 개의 비컨이 설치된 공간은 최소화시키고, 두 개의 비컨이 설치된 공간에서는 두 비컨을 이은 선이 존재하지 않도록 하였다. 또한, 로봇이 주행하는 공간의 면적이 증가함에 따라 단위공간을 하나씩 더할 수 있다. 이때 단위공간이 더해지는 방향에서는 5m 이내에 한 개의 비컨만이 위치한 공간이 더욱 줄어들게 된다. 이렇게 정의된 영역 내에 로봇이 위치할 때, 각 시점에서의 운동모델의 불확실성 분포형태에 따라 유리한 방향에 있는 비컨센서를 선택하여 위치추정이 이루어진다.

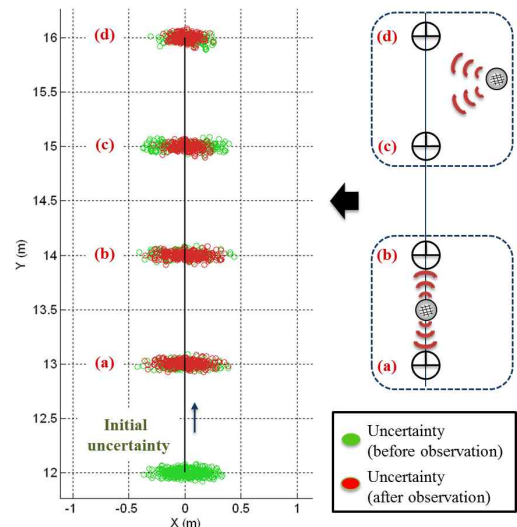


Fig. 6. The reduction of uncertainties related to the location of the ultrasonic beacon

그림 6. 초음파 비컨의 위치에 따른 불확실성 감소

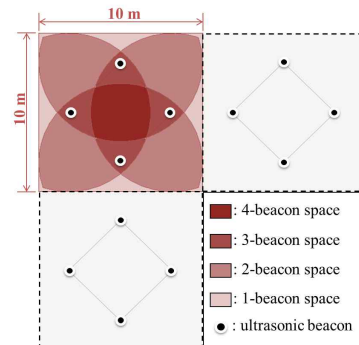


Fig. 7. Sensor placement method in driving environments

그림 7. 주행환경에서 인공표식 배치기법

### IV. 시뮬레이션 결과

#### 1. 가상 경로에서의 위치추정 성능

제안한 기법의 위치추정 성능을 분석하기 위해 시뮬레이션을 하였다. 그림. 8과 같이 두 개의 단위공간으로 구성된 영역에 가상경로를 설정하고, 로봇이 이동할 때 불확실성 타원의 크기변화를 관찰하였다. 여기서 로봇은 1m/s의 속도로 이동하고, 센서 측정값은 1초 주기로 반영되었다. 시뮬레이션 결과를 살펴보면, 로봇이 이동하는 과정에서 운동모델의 불확실성에 의한 불확실성 증가와 센서모델 불확실성과의 조합을 통한 불확실성 감소를 반복함으로써 불확실성의 크기는 일정수준 이하로 유지되었다. 결국, 경로 내에서 최대 불확실성의 크기는  $\pm 0.2$  m 이내로 나타났다.

#### 2. 통상적인 기법과의 비교

이 절에서는 초음파 비컨센서를 인공표식으로 사용하며 삼변측량법을 이용해 로봇의 위치를 추정하는 통상적인 기법과 제안한 기법을 성능과 비용 면에서 비교하였다. 비교 결과는 표. 2에 나타나 있다. 통상적인 기법은 최초의 위치추정영역  $25m^2$ 을 구성하는데 4개의 비컨센서가 필요하고, 이후로 1~2개의 비컨센서를 추가함으로써 위치추정영역을  $25m^2$ 씩 확장시켜나간다. 그에 반해, 제안한 기법은 항상 비컨센서 4개당  $100m^2$ 의 위치추정영역을 구성한다. 그러므로 그림. 9와 같이 면적이  $400m^2$ 인 공간에서의 위치추정문제를 고려한다면, 통상적인 기법은 25개의 비컨센서가 필요하지만 제시기법은 16개의 비컨센서만으로도 가능하다. 따라서 제안한 기법을 통해 동일면적의 공간에 사용되는 비컨센서의 수를 줄임으로써 위치추정 비용을 절감할 수 있다. 하지만, 최대 불확실성을 비교하면 제안한 기법이 통상적인 기법보다 크게 나타나기 때문에 매우 정확한 위치추정을 요구하는 로봇을 대상으로는 적합하지 않다.

Table 2. Comparison between the proposed method and the conventional method

표 2. 제안한 기법과 통상적 기법의 비교

	제안한 기법	통상적 기법
단위공간 면적	$100m^2$	$25m^2$
$400m^2$ 공간의 위치추정에 필요한 비컨센서의 수	16개	25개
최대 불확실성	$\pm 0.2$ m	$\pm 0.1$ m

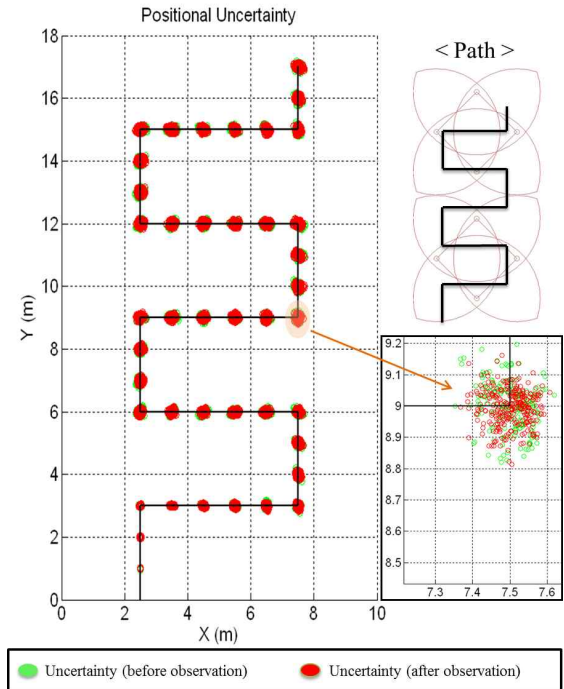


Fig. 8. The simulation result on the virtual path

그림 8. 가상 경로에서의 시뮬레이션 결과

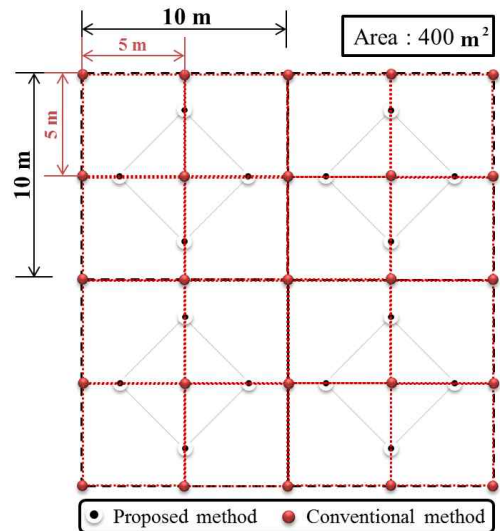


Fig. 9. Comparison of the number of beacon sensors placed in the space of  $400m^2$  area

그림 9.  $400m^2$ 면적의 공간에 배치되는 비컨센서의 개수 비교

### V. 결론

본 연구에서는 이동로봇의 운동모델과 센서모델의 불확실성을 이용한 인공표식 배치기법을 제안하였다. 즉, 오도메트리 운동모델과 초음파 비컨과 관련된 센



서모델의 불확실성의 방향성을 분석함으로써 조합된 불확실성의 크기를 상당히 줄일 수 있는 비컨센서의 배치방향을 찾아내었고, 이를 바탕으로 일정한 공간에 비컨을 효율적으로 배치하는 기법을 제시하였다. 또한, 제안한 기법은 통상적인 기법에 비해 적은 수의 비컨을 사용함으로써 위치추정에 소요되는 비용을 절감할 수 있음을 보였다. 비록 위치추정 정확도면에서는 제안한 기법이 다소 떨어지지만, 주어진 공간 내에서의 순찰 또는 물류이송 등의 목적으로 주행하는 로봇에 사용될 수 있는 충분한 성능을 보여주었다. 따라서 제안한 기법은 위치추정 비용절감을 목적으로 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- [1] N. L. Doh, C. Nam, S. Lee and H. Kim, "Particle filter-assisted ad hoc routing in a multi-hop wireless ad hoc network for multi-robots," *Journal of IKEEE*, 14(4), pp.312-316, 2010
- [2] R. Paek, K. Han and I. Shin, "Development of Multi-Link Mobile Robot for Rough Road Driving," *Journal of IKEEE*, 14(2), pp.58-63, 2010
- [3] G. Borghi and V. Caglioti, "Minimum Uncertainty Explorations in the self-localization of Mobile Robots," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(6), pp.902-911, 1998
- [4] S.R. Sukumar, et al., "Uncertainty Minimization in Multi-Sensor Localization Systems Using Model Selection Theory," *19th International Conference on Pattern Recognition*, pp.1-4, 2008
- [5] D. Lee, W. Chung and M. Kim, "A Reliable Position Estimation Method of the Service Robot by Map Matching," *Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp.2830-2835, 2003
- [6] C. Moon, W. Chung and N.L. Doh, "Observation Likelihood Model Design and Failure Recovery Scheme toward Reliable Localization of Mobile Robots," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 7(4), pp.113-122, 2010
- [7] <http://www.robotshop.com/ca/hagisonic-stargazer-localization-system-3.html>
- [8] K. Lee, N.L. Doh and W.K. Chung, "An exploration strategy using sonar sensors in corridor environments," *Journal of Intelligent Service Robots*, Vol. 3, pp.89-98, 2010
- [9] J. Laaksonen and V. Kyrki, "Localization in ambiguous environments using multiple weak cues," *Journal of Intelligent Service Robots*, Vol. 1, pp.281-288, 2008
- [10] S. Thrun, D. Fox and W. Burgard, *Probabilistic Robotics*, The MIT Press, pp.132-139, 2005
- [11] Roland Siegwart and Illah R. Nourbakhsh, *Introduction to Autonomous Mobile Robot*, A Bradford Books, pp.182-191, 2004
- [12] F. Dellaert, D. Fox, W. Burgard and S. Thrun, "Monte Carlo Localization for Mobile Robots," *Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp.1322-1328, 1999

## BIOGRAPHY

### Kim Jiwoong (Student Member)



2011 : BS degree in Mechanical Engineering, Korea University.  
2011~Present : PhD Candidate in Mechanical Engineering, Korea University.  
<Research Interests>  
Mobile Robot Navigation

### Chung Woojin (Member)



1993 : BS degree in Mechanical Design and Production Engineering, Seoul National University.  
1995 : MS degree in Mechanical Engineering, The University of Tokyo.  
1998 : PhD degree in Mechanical Engineering, The University of Tokyo.  
1998~2005 : Senior Research Scientist, Korea Institute of Science and Technology.  
2005~Present : Professor, School of Mechanical Engineering, Korea University.  
<Research Interests>  
Design and Control of Nonholonomic Underactuated Mechanical Systems,  
Trailer System Design and Control,  
Mobile Robot Navigation