

---

# 자율주행 장치를 위한 특징 맵 기반 SLAM

김정민\* · 정승영\*\* · 전태룡\*\* · 김성신\*\*\*

SLAM based on feature map for Autonomous vehicle

Jungmin Kim\* · Sungyoung Jung\*\* · Taeryong Jeon\*\* · Sungshin Kim\*\*\*

---

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)로부터 지원받아 수행된 연구임  
(지역거점연구단육성산업/차세대물류IT기술연구사업단)

---

## 요 약

본 논문에서는 초음파와 전자나침반, 엔코더, 자이로센서를 복합적으로 구성하여 로봇의 SLAM 방법을 제시하였다. 일반적으로 전자 나침반과 엔코더, 자이로를 이용한 로봇의 위치측정은 작업공간에서의 상대위치만을 알 수 있다. 실제 로봇이 작업공간에서 작업을 하기 위해서는 로봇의 절대위치 정보를 알아야만 하며, 이는 SLAM으로 얻을 수 있다. 본 논문에서는 SLAM 구현을 위하여 로봇의 작업공간을 초음파 센서를 이용하여 구조적 맵 생성 기법을 통해 맵을 생성한 후, 이를 특징 맵으로 변환하였다. 생성된 특징 맵과 맵 매핑을 활용하여 맵 상의 절대위치를 구한다. 실험은 직접 설계 및 제작한 로봇을 이용하였고, 실험 방법은 초기 좌표를 모르는 로봇을 임의의 장소에 위치시키고 제안한 SLAM 알고리즘을 이용하여 로봇의 전역 좌표를 찾으려 하였다. 실험 결과, 제안한 SLAM 알고리즘을 이용하여 맵 상의 절대위치를 모두 찾음을 확인하였다.

## ABSTRACT

This paper is presented an simultaneous localization and mapping (SLAM) algorithm using ultrasonic for robot and electric compass, encoder, and gyro. Generally, localization based upon electric compass, encoder, and gyro can be measured just local position in workspace. However, actual robot must need an information of the absolute position in workspace to perform its mission. Absolute position in workspace could be calculated using SLAM algorithm. To implement SLAM in this paper, a map is built using ultrasonic sensor and hierarchical map building method. And then, we the map will be transformed into a feature map. The absolute position could be calculated using the feature map and map mapping method. As a test bed, we designed and construct an autonomous robot and showed the experimental performance of the proposed SLAM algorithm based on feature map. Experimental result, we verified that robot can found all absolute position on experiments using proposed SLAM algorithm.

## 키워드

robot, localization, map building, map mapping, SLAM

---

\* 부산대학교 전자전기공학과 박사과정  
\*\* 부산대학교 전자전기공학과 석사과정  
\*\*\* 부산대학교 전자전기공학과 부교수 (교신저자)

접수일자 2009. 01. 20  
심사완료일자 2009. 02. 09

### I. 서 론

최근, 지능형 로봇의 시장규모는 점점 커지고 있으며, 앞으로도 계속 늘어날 것이라 전망하고 있다[1]. 과거의 로봇은 작업 지시내용을 받아들이는 방법에 따라 수동적으로 반복 작업만 되풀이 하는 산업용 로봇으로 인식되었지만, 다양한 기술 분야가 발달함에 따라 스스로 환경을 인식하고 판단할 수 있는 지능형 로봇이 요구 되고 있다. 지능형 로봇을 개발하기 위해서는 기본적으로 위치추정, 경로계획, 그리고 맵 생성 기술 등을 필요로 하게 된다. 이들 중에서도 위치추정과 맵 생성 기술은 지능형 로봇의 기반 기술로써 현재 활발히 연구가 이루어지고 있는 기술 분야이다. 최근에는 위치추정과 맵 매핑 기술을 함께 이용하는 기술을 SLAM(simultaneous localization and mapping) 기술로 명명하고 있으며, 이 기술은 위치를 알고 있는 특징들을 이용하여 위치추정 기술의 성능을 향상시킬 수 있는 기술이다[2].

SLAM 기술은 크게 맵 생성과 매핑, 위치추정 기술을 필요로 한다. 이는 맵 생성이 선행되어야 하며, 맵 생성 방법에 따라 성능이 좌우된다. 맵 생성 방법은 맵의 형태에 따라 그리드(grid), 토폴로지컬(topological), 특징(feature) 맵으로 나누어진다. 표 1은 맵 생성에 사용되는 맵 형태에 따른 비교를 보여준다.

표 1. 맵 형태의 비교  
Table. 1 Comparison according to map forms

methods items	Grid	Topological	Feature
operation cost	high	low	middle
storage	high	low	low
accuracy	high	low	middle
intuition	high	middle	middle

맵 생성과 매핑을 구현하기 위해서는 특징을 추출할 수 있는 센서를 이용한다. 가장 많이 사용되는 센서로는 레이저 센서와 적외선 센서, 초음파 센서와 같은 거리 측정 센서가 있으며, 영상의 특징을 이용하는 비전 센서가 있다. 각 센서들은 장·단점을 가지고 있지만, 이 중 초음파 센서는 저가에 평균 300cm 이상의 거리 측정이 가능하며, 외란에 대한 영향이 적어 높은 정확도와 신뢰성을

가지므로 가장 많이 사용되는 센서이다[2-4].

위치추정 기술에 사용되는 센서들은 크게 전역위치 측정 센서와 상대위치 측정 센서로 나눌 수 있다. 전역위치 측정 센서들은 그 가격이 매우 비싸고, 설치 및 외란에 약한 문제를 가지고 있다. 이에 반해 상대위치 측정 센서는 대표적으로 엔코더, 자이로, 전자나침반 등이 있으며, 이들은 전역위치 측정 센서들에 비해 가격이 현저히 낮고 외부 노이즈에 강한 장점이 있지만, 오차 누적에 따른 데이터 신뢰성 저하와 전역위치를 측정할 수 없는 문제점이 있다. 이러한 전역위치를 알 수 없는 문제는 SLAM을 통해 해결이 가능하다[5,6].

본 논문에서는 엔코더, 자이로, 전자 나침반을 이용한 위치추정 기술과 초음파를 이용한 특징 맵 기반 SLAM에 대해 이야기한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 시스템 구성 장치에 대한 설명을 다루고, 3장에서는 SLAM에 관련된 기술들에 대해 보여준다. 마지막으로 4장에서는 실험 및 결과를 기술하였다.

### II. 자율주행 장치

#### 2.1 계측 시스템

로봇의 위치추정과 맵 생성, 맵 매핑을 위해서 초음파 센서 5개와 엔코더 2개, 자이로, 전자 나침반을 이용해 실제 무인 자율주행이 가능한 로봇을 직접 설계 및 제작하였다. 그림 1은 제작된 로봇의 시스템 구성을 보여준다.

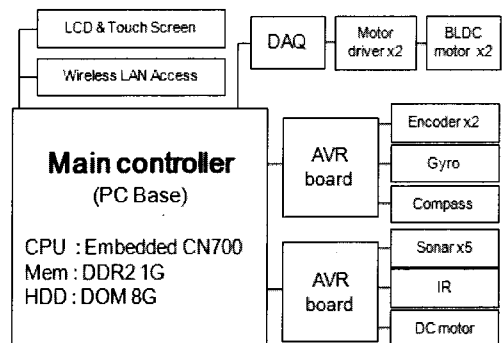


그림 1. 로봇의 시스템 구성  
Fig. 1 System configuration of robot

구성된 시스템에 사용된 센서는 크게 맵 매핑을 위해 사용된 초음파 센서와 위치측정을 위한 엔코더, 자이로, 나침반 센서가 사용되었다. 표 2는 위 센서들의 주요 사양을 보여준다.

표 2. 사용된 센서들의 주요 사양  
Table. 2 Spec. of sensors used

Item	Specification
Ultrasonic (SRF04)	Frequency : 40kHz
	Range : 3~300cm
Encoder (MD200)	Voltage : 5V
	R-F Time : 300us
Gyro (ADXRS401)	Voltage : 5V
	sensitivity : ±75°/s
Compass (CMPS03)	Resolution : 0.1°
	Accuracy : 3~4° approx.

최근의 연구는 로봇의 방향각을 계산하기 위하여 전자 나침반을 많이 사용되고 있으나 본 연구에서 사용된 로봇의 경우, 구동부 모터의 자기장에 의해 전자 나침반의 방향각이 유동적으로 변하는 문제점이 발견되었다. 따라서 본 논문에서는 로봇이 주행 중에는 자이로를 이용하고, 주행하지 않을 경우에 전자나침반을 사용하였다.

2.2 기구학

로봇의 위치측정을 위해서는 로봇의 움직임에 대한 분석이 이루어져야한다. 그림 2는 로봇이 위치한 공간에서의 좌표를 보여준다.

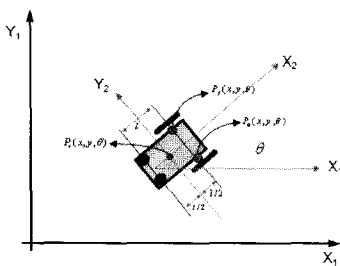


그림 2. 로봇의 좌표계  
Fig. 2 Coordinate system for robot

위의 그림에서 X1-Y1 좌표계는 로봇 외부에 기준점을 둔 절대좌표계이다. X2-Y2 좌표계는 로봇의 중심점을 원

점으로 두고, 로봇이 향한 방향을 x축으로 하는 좌표계이다. 다음은 로봇의 자세(posture) P의 정의이다.

$$P = (x, y, \theta)^T \tag{1}$$

여기서 x, y는 로봇의 중심점의 좌표이고, theta는 로봇의 앞부분이 향하는 방향각이다. 본 논문에서 사용된 로봇은 그림 3과 같이 자전거 모델(bicycle model)으로 간단히 나타낼 수 있다.

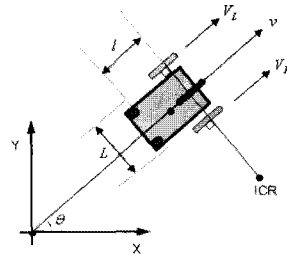


그림 3. 자전거 모델의 기구학  
Fig. 3 Kinematics of bicycle model

로봇의 양 뒷바퀴의 각속도를 w 이라고 하면, 오른쪽과 왼쪽 바퀴의 속도는 식 (2)와 같다.

$$V_R = r w, \quad V_L = r w \tag{2}$$

단, r 은 바퀴의 반지름

식 (2)에서 v 는 로봇 중심의 선속도를 나타내고, VR 와 VL 은 각각 오른쪽, 왼쪽 바퀴의 선속도를 나타낸다.

$$w = \frac{V_R - V_L}{L} = \frac{r}{L} v$$

$$v = \frac{V_R + V_L}{2} = r w \tag{3}$$

단, L 은 양 바퀴 사이의 거리

위 식은 2차원 평면 좌표계(그림 2)에서 식 (4)과 같은 기구학식에 의해 연관 관계를 가지게 된다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ w \end{pmatrix} \tag{4}$$

### III. Simultaneous Localization and mapping

#### 3.1 맵 생성

SLAM을 구현하기 위해서는 먼저 맵 생성을 하여야 하며 맵 생성 정밀도에 따라 그 성능이 좌우되게 된다. 맵을 생성하는 방법은 크게 두 가지로 나뉘는데, 로봇이 맵을 이동하며 연속적으로 맵을 생성하는 일반적인 방법과 로봇이 위치한 환경을 나누어 맵을 생성한 후, 생성된 맵을 연결시키는 구조적 맵 생성 방법이다[7,8]. 그림 4는 일반적인 맵 생성을 이용한 맵을 보여준다.

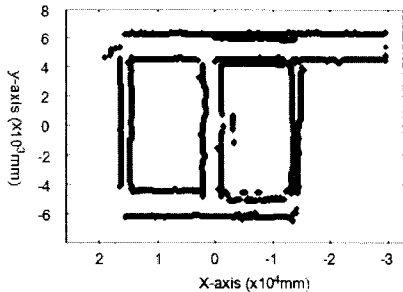


그림 4. 일반적인 맵 생성  
Fig. 4 General map building

본 논문에서 맵 생성 시에는 로봇의 좌우 두 개의 초음파만을 사용하였다. 일반적인 맵 생성의 경우에 로봇이 이동하는 모든 점들이 모여 맵을 생성하므로 중복된 벽이 발생될 뿐 아니라, 엔코더와 자이로의 누적 오차에 의해 오차가 발생된다. 실제로 180m 주행 후에 방향각과 거리 오차는 각각 약 6°와 20cm 정도 이었다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 본 논문에서는 그림 5와 같이 맵을 나누어 맵 생성을 하였다.

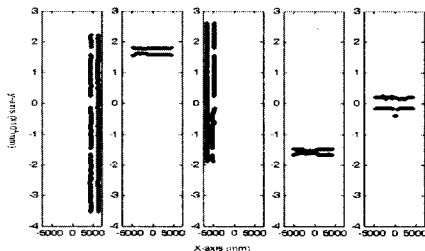


그림 5. 구조적 맵 생성 순서  
Fig. 5 Sequence of hierarchical map building

구조적 맵 생성은 그림 5에서 보이는 바와 같이 맵을 나누어 각각의 정보를 받아 연결하면, 그림 6과 같이 구조적 맵이 생성된다.

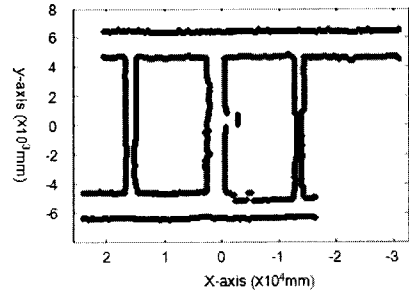


그림 6. 구조적 맵 생성  
Fig. 6 Hierarchical map building

구조적 맵 생성은 일반적인 맵 생성에 비해 비교적 밀한 맵을 만들 수 있다. 하지만 이와 같이 그리드 형태로 맵을 표현할 경우에는 매우 큰 저장 공간을 필요로 하여 실시간 연산이 필요한 로봇에 적용이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 실시간 연산을 위해 특정 맵으로 변환하여 사용한다.

생성된 맵에서 특징을 구성하는 방법은 연속된 점들의 변화량의 크기에 따른 것이다. 이는 변화량이 작은 것(문, 거울 등)과 변화량이 큰 것(통로)으로 나뉜다. 찾아진 특징들은 각 특징들의 종류와 위치한 좌표를 룩업 테이블로 저장하여 SLAM에 사용하였다.

#### 3.2 사용된 SLAM

일반적으로 자이로와 엔코더만을 이용한 위치측정 기술은 로봇의 주행 시작점을 기준으로 상대좌표에서의 로봇의 위치만을 알 수 있으나, 임의의 위치에서 로봇이 목표지점으로 가기 위해서는 로봇이 위치한 절대좌표를 알아야한다. 임의의 위치에서 로봇의 절대좌표를 구하기 위한 SLAM 알고리즘은 그림 7과 같다.

임의의 지점에 위치한 로봇은 먼저 전자 나침반을 이용하여 자신의 각도를 계산한다. 그리고 초음파 센서의 거리 값을 이용하여 상대적인 방향각을 계산한 후, 이와 전자나침반을 통해 계산된 각도 값을 이용하여 맵 상에서의 로봇의 상대적인 방향각을 계산한다. 계산된 방향각과 초음파의 거리 값을 이용하여 로봇은 복도의 중앙으로 이동한다.

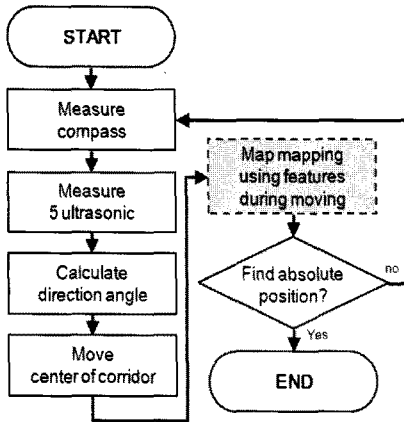


그림 7. SLAM의 알고리즘  
Fig. 7 SLAM algorithm

로봇이 복도의 중심으로 이동하는 중에 초음파를 통해 특징을 찾게 되면, 그림 8의 알고리즘을 통해 맵 상의 절대좌표를 찾게 된다.

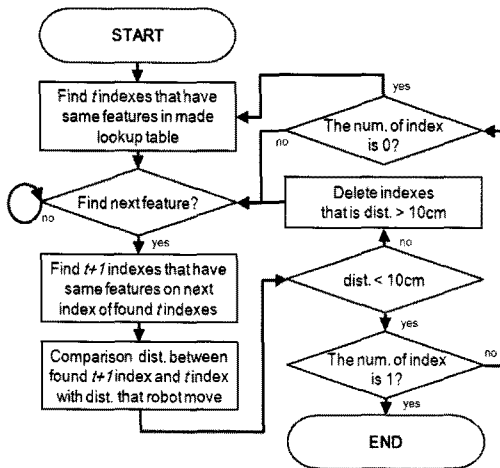


그림 8. SLAM의 맵 매핑 알고리즘  
Fig. 8 Map mapping algorithm of SLAM

로봇이 초음파를 통해 특징 점을 찾게 되면, 3.1절에서 만든 특징 맵의 룩업 테이블에서 같은 형태의 특징을 가진 모든 t번째 인덱스를 찾는다. 그리고 로봇이 다음 특징 점을 찾으면, t번째 인덱스의 다음 t+1 번째 인덱스들을 찾게 된다. 찾아진 t+1번째 인덱스는 t-1번째 인덱스와 t번째 인덱스의 특징 좌표 값을 이용하여 사이의 거리를 계산하고, 이 거리가 10cm 이상인 인덱스들은 삭제

한다. 만약 10cm 이하이고, 찾은 인덱스의 개수가 하나 밖에 없다면 이는 절대좌표 값으로 취한다. 만약 인덱스의 개수가 0개라면 다시 반복하게 되고, 인덱스의 개수가 '0' 혹은 '1'이 아니라면 로봇이 다음 특징 점을 찾을 때까지 수행된다.

#### IV. 실험 및 결과

그림 9는 실험을 위해 제작된 자율주행이 가능한 로봇을 보여준다. 개발 환경은 Windows XP Fundamental 상에서 Borland C++ 6.0 builder와 Codevision, AVR studio 를 사용하였다.

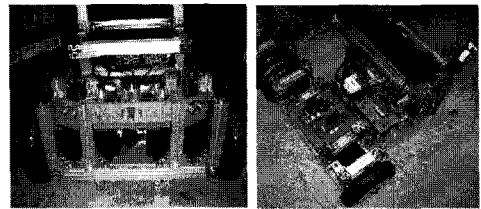


그림 9. 실험에 사용된 로봇  
Fig. 9 Used robot on experiment

#### 4.2 특징 맵

본 논문에서 사용된 맵의 특징 점들은 연속된 점들의 변화량의 크기인 작은 특징(문, 거울 등)과 큰 특징(통로)으로 구성된다. 그림 10은 생성된 특징 맵을 보여준다.

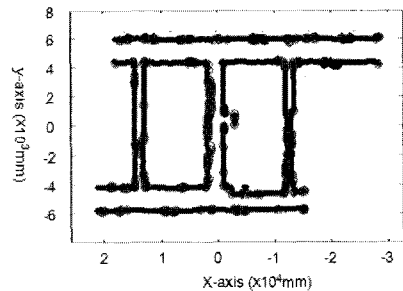


그림 10. 특징 맵  
Fig. 10 Feature map

맵 생성을 통해 찾은 특징은 중첩된 정보들을 모두 포함하여 총 780개이고, 중첩된 특징들은 클러스터링 방법

을 이용하여 106개의 특징 개수로 줄였다. 이는 위쪽 가로 복도는 38개, 아래쪽 가로 복도는 28개, 왼쪽 세로 복도는 10개, 중앙 세로 복도는 14개, 오른쪽 세로 복도는 16개이다. 생성된 맵을 기준으로 각각의 특징들의 오차를 정리하여 그림 11에 나타내었다.

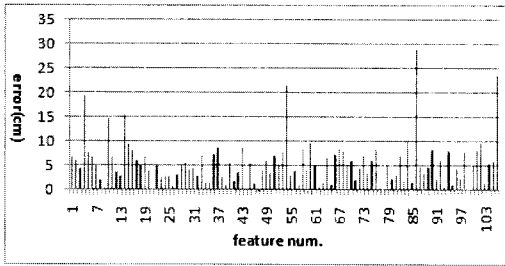


그림 11. 특징들의 오차  
Fig. 11 Error of features

특징들의 오차는 SLAM의 성능 실험에서 로봇의 위치 측정 오차로 이어지고, 특징들의 개수는 많을수록 좋지만 연산량이 많아지는 단점과 중첩된 특징에 의한 오차가 생기게 된다. 본 실험 환경에서의 시험 결과, 특징들의 오차는 평균 5.43cm이었으며 21.99cm의 분산을 보였다.

### 4.3 SLAM의 실험

실험 방법은 맵을 생성한 후, 생성된 맵 상의 임의의 위치 8 곳에 로봇을 두고, 로봇이 맵 상의 절대 위치를 찾는 시간과 거리를 확인하였다. 그림 12는 실험한 로봇의 위치들을 보여준다.

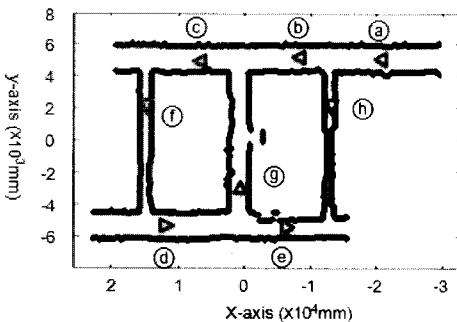


그림 12. 로봇의 임의의 위치  
Fig. 12 Positions of robot on experiment

충돌 문제에 의해 로봇은 평균적으로 5cm/sec 으로 주행하였다. 그림 13은 로봇이 위치한 곳에서 벽에 평행하게 주행된 후, 절대좌표를 찾는 시간과 이동거리, 사용된 특징의 개수를 보여준다.

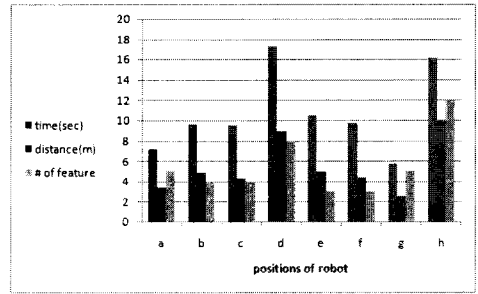


그림 13. 실험 결과  
Fig. 13 Experimental results

실험 결과, 8번의 독립적인 실험에서 평균 10.7초 동안 평균 5개의 특징을 사용하여 평균 5.39m를 주행 후, 절대좌표를 찾았다. 그림 12에서 ④, ⑥ 위치에서 다른 위치의 실험결과에 비해 절대좌표를 찾는 시간이 오래 걸렸다. 그 이유로는 ④ 위치의 경우 특징의 개수가 적은 경우이고, ⑥ 위치의 경우 복도에 놓인 물건들에 따른 거리 측정 오차가 발생된 경우이다. 실험 결과, 절대좌표를 찾는 주행 거리와 시간이 각각 최대 10m와 17.1sec가 걸렸지만, 로봇이 스스로 절대좌표를 찾음을 확인할 수 있었다.

## V. 결론

본 논문은 로봇의 SLAM을 구현하기 위하여 초음파 센서와 엔코더, 자이로, 전자나침반을 이용하였다. SLAM을 구현하기 전 단계인 맵 생성을 위하여 로봇의 좌우 두 개의 초음파 센서의 거리 변화율을 이용하여 구조적 맵 생성 방법으로 맵을 생성하였다. 또한 실시간 연산을 위해 적은 저장 공간과 연산이 가능한 특징 맵 형태로 이용하였다. 실험 결과, 평균 10.7초 동안 평균 5개의 특징을 사용하여 평균 5.39m를 주행 후, 절대좌표를 찾을 수 있었다. 이는 실제 로봇에 적용하여 실험하여 실시간 연산으로 맵 상의 절대좌표를 로봇이 찾을 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Trevor Davies, Amor Jnifene, "Multiple Waypoint Path Planning for a Mobile Robot using Genetic Algorithms," IEEE Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces, and Measurement Systems, pp.21-26, 2006.
- [2] Momotaz Begum, George K. I. Mann, Raymond G. Gosine, "An Evolutionary SLAM Algorithm for Mobile Robots," Proc. of IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4066-4071, 2006.
- [3] Ho-Duck Kim, Sang-Wook Seo, and Kwee-Bo Sim, "SLAM of Mobile Robot in the indoor Environment with Digital Magnetic Compass and Ultrasonic Sensors," Conference on Control, Automation and Systems, pp. 87-90, 2007.
- [4] SungHwan Ahn, Jinwoo Choi, Nakju Lett Doh, Wan Kyun Chung "A practical approach for EKF-SLAM in an indoor environment: fusing ultrasonic sensors and stereo camera," LLC 2008, vol. 24, pp. 315-335, 2008.
- [5] Michael Montemerlo, Sebastian Thrun, William Whittaker. "Conditional particle filters for simultaneous mobile robot localization and people-tracking," Proceedings of the 2002 IEEE, International Conference on Robotics & Automation, Washington, pp. 695-701, 2002.
- [6] Christian Brenneke, Oliver Wuif, Bernardo Wagner. "Using 3D Laser Range Data for SLAM in Outdoor Environments," Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ, Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 188-193, 2003.
- [7] Henrik Andreasson, Andre Treptow and Tom Duckett "Localization for mobile robots using panoramic vision, local features and particle filter," IEEE Conference on Robotics and Automation, Barcelona, pp. 3348-3353, 2005.
- [8] Sunghwan Ahn and Wan Kun Chung, "Efficient SLAM Algorithm with Hybrid Visual Map in an Indoor Environment," Conference on Control, Automation and Systems, pp. 663-667, 2007.

저자소개



김정민(Jungmin Kim)

2006년 : 신라대학교 컴퓨터공학과 (공학사)  
 2008년 : 부산대학교 전기공학과 (공학석사)

2008년~현재 : 동대학원 전자전기공학과 박사과정  
 ※ 관심분야 : 신호처리, 영상처리, 지능제어, 로봇



정승영(Sungyoung Jung)

2008년 : 부산대학교 전자전기 통신 공학부 (공학사)  
 2008년~ 현재 : 동대학원 전자전기 공학과 석사과정

※ 관심분야 : 지능제어, 로봇



전태룡(Taeryong Jeon)

2007년 : 신라대학교 정보통신 공학과 (공학사)  
 2008년 : 부산대 전자전기공학과 석사과정

※ 관심분야 : 신호처리, 영상처리, 지능제어



김성신(Sungshin Kim)

1986년 : 연세대학교 전기공학과 (공학석사)  
 1996년 : Georgia Inst. of Technology, 전기및컴퓨터공학과 (공학박사)

1998년~현재 : 부산대학교 전자전기통신공학부 부교수

※ 관심분야 : 지능 시스템, 데이터 마이닝, 고장예측및 진단