

초음파센서를 이용한 자율 이동로봇의 위치추적

최창혁*(고려대 대학원), 송재복(고려대 기계공학과), 김문상(KIST 휴먼로봇센터)

Localization of an Autonomous Mobile Robot Using Ultrasonic Sensor Data

Chang-Hyuk Choi (Graduate School, Korea Univ.), Jae-Bok Song (Dept. of Mechanical Eng., Korea Univ.),
Munsang Kim (Advanced Robotics Center, KIST)

ABSTRACT

Localization is the process of aligning the robot's local coordinates with the global coordinates of a map. A mobile robot's location is basically computed by a dead reckoning scheme, but this position information becomes increasingly inaccurate during navigation due to odometry errors. In this paper, the method of building a map of a robot's environment using ultrasonic sensor data and the occupancy grid map scheme is briefly presented. Then, the search and matching algorithms to compensate for the odometry error by comparing the local map with the reference map are proposed and verified by experiments. It is shown that the compensated error is not accumulated and exists within the limited range.

Key Words : Localization (위치추적), Occupancy grid map (점유격자지도), Reference map (기준지도), Local map (국부지도), Active Window (활성창), Matching index (매칭 인덱스)

1. 서론

자율 이동로봇(autonomous mobile robot)은 주위 환경을 인식하여 자신의 판단에 따라 원하는 목표 지점까지 충돌 없이 자율적으로 이동할 수 있는 능력을 갖는 로봇으로서, 제어 알고리즘 개발과 경로계획(path planning), 궤적추종(trjectory tracking), 장애물회피, 각종 센서데이터의 융합, 비전시스템의 응용, 위치추적(localization) 등이 종합적으로 관련되어 있다. 이 가운데 경로계획과 위치추적은 지도로 표현되는 환경 정보를 필요로 한다. 따라서 미지의 환경에 대해 이러한 지도를 로봇 스스로가 작성할 필요가 있는데, 이런 기능을 지도작성(map building)이라고 한다.

이 중에서 주행 중 절대좌표계에 대한 현재 위치를 올바르게 측정할 수 있는 위치추적 방법의 개발이 이동로봇의 실용화 여부를 좌우하는 가장 중요한 기술 중의 하나이다. 이동로봇의 절대위치에 대한 평가가 부정확하면 정상적인 주행과 신뢰성 있는 지도작성이 불가능하게 된다. 따라서 이동로봇의 위치추적에 관한 연구가 많이 진행되고 있다.

위치추적을 구현하기 위한 방법에는 주행 중 바

퀴에 장착된 엔코더를 사용하여 각 바퀴의 주행 거리를 측정 후, 이로부터 각 소구간마다의 위치 변화량을 계산하여 초기 위치로부터 현재의 위치를 계산하는 추측항법(odometry)이 있다. 그러나 이동로봇의 휠과 바닥 간의 슬립, 휠 지름의 변화, 평탄하지 않은 바닥에서의 주행, 휠 간의 거리 변경 등에 의해서 오차가 발생하게 되며, 이는 시간이 경과함에 따라 누적된다. 이러한 오차는 이동 영역 내의 표적(landmark) 등과 같은 외부 센서의 정보 또는 비전센서^[1]와 초음파센서 등으로부터의 정보를 이용하여 보정하여야 한다.

Leonard^[2]는 초음파센서로 모델기반지도(model-based map)를 작성하고, 저장된 지도와 현재 초음파 측정치를 확장 칼만필터(extended Kalman filter)를 이용하여 매칭하고 오차를 보정하였다. Cox^[3]와 Freud^[4]는 각각 적외선센서와 레이저센서를 이용하여 측정된 기하학적 primitive을 저장된 모델기반지도와 최소사승법을 이용하여 매칭하고 오차를 보정하였다. 그러나 이 같은 연구에서 사용된 모델기반지도는 변화하는 환경에 대한 즉각적인 갱신이라는 측면에서 단점을 가지고 있으므로 제한적인 실용성을 가지게 된다. 따라서 지속적인 갱신이라는 지도

의 목적에 부합하기 위해서는 격자지도방식(grid map)이 필요하게 된다. 최근에는 자이로 센서와 가속도계를 이용하여 위치추적을 수행하는 방법도 제시되고 있다.

본 논문에서는 초음파센서 데이터로부터 격자지도방식의 하나인 점유격자지도(occupancy grid map) 방식을 사용하여 지도를 작성하고, 미리 저장된 기준지도와 현재 위치에서 얻은 국부지도와의 매칭이라는 과정을 통해 이동로봇의 위치를 추적하는 방식에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 실제 실험을 통하여 효율성을 검증하였다.

2. 지도작성 알고리즘

2.1 초음파센서

초음파센서는 이전부터 장애물 감지용으로 많이 사용되어 왔으며, 거리라는 비교적 처리하기 쉬운 정보(time of flight, TOF)를 다룬다는 장점이 있다. 그러나 초음파센서 측정에는 불확실성이나 잡음이 포함되어 있어, 이에 대한 보완이 필요하다. 특히, 각도 분해능(angular resolution)이 우수하지 않으므로, 반사파가 감지되더라도 장애물이 실제로 빔 폭(beam width) 내에서 어디에 존재하는지를 알아내기 어렵다. 따라서 센서 중심축에 대해 물체가 존재할 가능성을 Gaussian 분포로 가정하고, 각각의 격자(grid)에 확률값을 부여하는 방식을 사용하여 이러한 불확실성에 대처하게 된다.

Fig. 1은 초음파센서 측정에서 각 격자에 확률값을 부여하기 위하여 설정한 극좌표계를 나타내는데, 격자의 위치는 좌표 (r, θ) 로 표현된다. 이 때, β 는 초음파센서의 빔의 폭(beam width)을 각각 나타낸다.

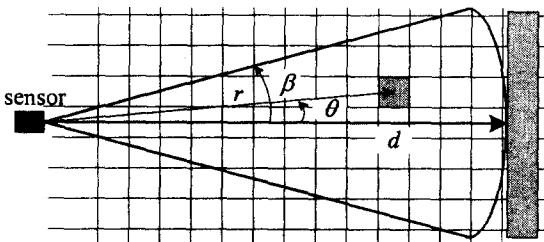


Fig. 1 Representation of grids in polar coordinates.

2.2 점유격자지도 방식^[5]

Fig. 1에서 초음파센서로 측정된 거리가 d 일 때, 격자까지의 거리 r , 중심축과 격자간의 각도 θ 에 대한 각 격자의 점유 확률밀도함수(occupancy probability density function)는 다음과 같이 정의된다.

$$p(d|r) = \frac{a}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp[-(r-d)^2 / (2\sigma^2)] \quad (1)$$

여기서, σ 는 격자의 크기이다. 각 격자가 점유되어 있을 확률은 식 (1)의 확률밀도함수로부터 다음과 같은 베이시안 확률 갱신식(Bayesian updating formula)을 통하여 구할 수 있다.

$$P[S = OCC | \{d\}_t] = \frac{p(d_t | S = OCC)P[S = OCC | \{d\}_{t-1}]}{\sum_S p(d_t | S)P[S | \{d\}_{t-1}]} \quad (2)$$

여기서, $\{d\}_t$ 는 시간 t 까지의 초음파센서의 측정치, S 는 셀의 점유상태로서 점유(OCC) 또는 비점유(EMP)로 나눌 수 있다. 한편, 격자가 비점유되어 있을 확률은 점유되어 있을 확률의 여사건이라는 조건에 의해 다음과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$P[S = EMP | \{d\}_t] = 1 - P[S = OCC | \{d\}_t] \quad (3)$$

이러한 점유격자지도 알고리즘을 통해 복도라는 환경에서 지도를 작성하였으며(Fig.2), 이 지도를 기준지도로 사용하게 된다. 각 격자는 식 (2)에 따라 0부터 1까지의 확률을 가지게 되며, 확률값이 높을수록 점유되었을 가능성이 높다는 것을 의미한다. 그림에서 원은 그 격자가 점유되었다는 것을 표시하는데, 이 때 임계값으로 0.9의 확률을 이용하였다.

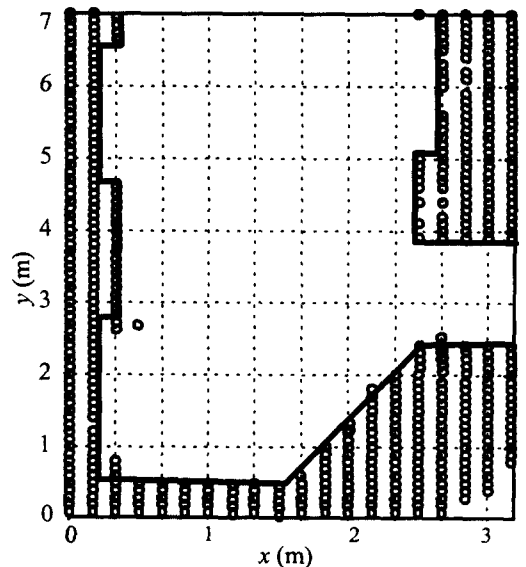


Fig. 2 Reference map using occupancy grid map method in corridor ($\sigma=10\text{cm}$).

3. 위치추적 알고리즘

위치추적(localization)은 추측항법을 기본으로 하며, 발생하는 오차를 보정하는 방식으로 수행된다. 이를 위해서 점유격자지도 방식에 기초하여 작성된 초기 지도를 기준지도로 하여, 마찬가지로 점유격자지도 방식으로 각 위치에서 얻은 국부지도와의 매칭을 수행하였다. 즉, 현재 로봇의 위치에서 작성한 국부지도를 통해 활성창(active window)을 결정하고, 활성창 내의 모든 격자와 그에 대응하는 기준지도 내의 격자를 매칭하는 것을 통해 오차를 보정하게 된다.

3.1 검색 알고리즘

추측항법에서 발생하는 오차는 초기에는 작지만, 시간이 지남에 따라 증가하게 된다. 따라서 짧은 시간 간격마다 오차를 보정하게 되면, 오차가 증가하지 않게 된다. 추측항법에 의해서 격자상에서의 로봇의 현재 위치가 (x, y) 로 주어진다면, 오차를 감안하여 Fig. 3에서와 같이 (x, y) 를 중심으로 하는 9개의 격자 중 하나에 로봇이 실제로 위치한다고 가정할 수 있다.

$(x-1, y+1)$	$(x, y+1)$	$(x+1, y+1)$
$(x-1, y)$	(x, y)	$(x+1, y)$
$(x-1, y-1)$	$(x, y-1)$	$(x+1, y-1)$

Fig. 3 Searching range for the robot positioned at (x, y) .

3.2 매칭 알고리즘

각 격자의 상태를 점유확률의 크기에 따라서 다음의 세 가지 경우로 분류한다.

$$S = \begin{cases} \text{OCC} & \text{if } P > 0.5 \\ \text{EMP} & \text{if } P < 0.5 \\ \text{UNKNOWN} & \text{if } P = 0.5 \end{cases} \quad (4)$$

기준지도와 국부지도 내의 격자간의 상태를 비교하기 위해 다음과 같은 매칭 인덱스(matching index)를 정의한다.

$$\text{Matching index}_i = \begin{cases} 1 & \text{if } S_R = \text{OCC}, S_L = \text{OCC} \\ 1 & \text{if } S_R = \text{EMP}, S_L = \text{EMP} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

여기서, S_R 은 기준지도에서의 점유상태, S_L 은 국부지도에서의 점유상태를 각각 나타낸다. 따라서 매칭 인덱스가 1 이면 비교가 되는 두 격자의 상태가 동일함을 알 수 있다. 활성창 내에서 구한 모든 매칭 인덱스를 합하여 매칭율(matching rate)을 구한다.

$$\text{Matching rate} = \sum_i \text{Matching index}_i \quad (6)$$

매칭률이 클수록 두 지도가 유사함을 알 수 있다. 앞에서 구한 9개의 격자에 대해 동일한 방법으로 매칭율을 구하여 최대값을 가지는 격자가 로봇의 현재 위치가 된다.

4. 실험 결과

앞서 설명한 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 다음과 같이 실험을 수행하였다.

4.1 이동로봇

Fig. 4는 실험에 사용된 ActiveMedia사의 Pioneer 2-DX 로봇으로 2개의 구동륜과 1개의 수동 캐스터로 구성되어 있으며, 몸체 주위에 16개의 초음파센서를 장착하고 있다. 또한, 이동로봇의 제어 및 알고리즘의 수행을 위해서 Advantech사의 industrial PC를 사용하였으며, Visual C++를 사용하여 프로그램을 작성하였다.



Fig. 4 Pioneer 2-DX mobile robot quipped with ultrasonic sensors and PC.

4.2 실험 결과

Fig. 2의 기준지도를 이용하여 각 위치에서 작성한 Fig. 5와 같은 국부지도와의 비교를 통해 위치를 보정한 결과는 Fig. 6과 같다.

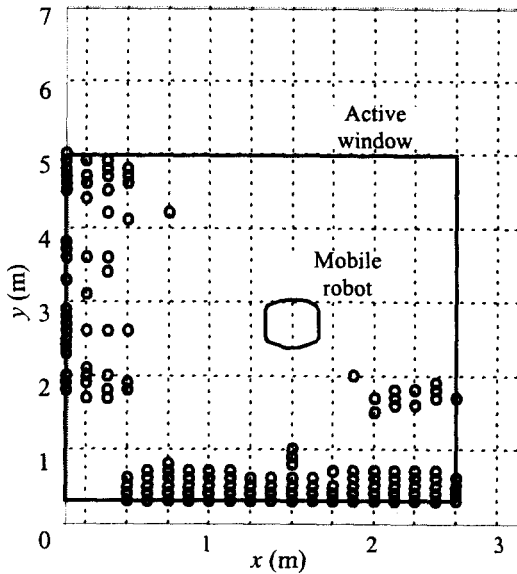


Fig. 5 Local map and active window at $(x, y) = (1.7, 2.6)$.

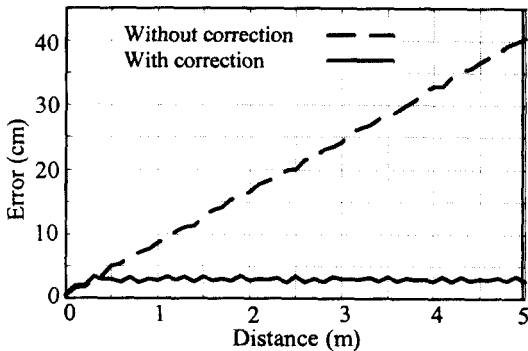


Fig. 6 Errors as a function of driving distance.

위의 실험 결과를 통하여 위치를 보정하지 않았을 때는 오차가 누적되어 증가하였지만, 보정을 수행하였을 때는 오차가 오차범위($\pm 5\text{cm}$) 내에 존재함을 알 수가 있다. 이 때, 오차범위는 격자의 크기에 의존한다.

5. 결론

본 논문에서는 초음파센서와 점유격자지도 방식을 사용하여 주변환경에 대한 지도를 작성하는 방

법과 이렇게 작성된 기준지도와 각 위치에서 작성된 국부지도와의 비교를 통해 추측항법의 오차를 보정하는 방식에 대한 연구를 수행하였다. 이러한 보정을 통해서 오차가 누적되지 않고 제한된 범위 내에 존재하게 되며, 또한 이 알고리즘은 실시간으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

현재 이미 작성된 기준지도 상에서의 위치추적에 더하여 지도작성과 위치추적을 동시에 수행하는 방식과 변화하는 환경에 대한 지도의 갱신 문제에 대한 연구가 진행되고 있다.

후기

이 연구는 서비스로봇 기술개발 사업의 일환으로 한국과학기술연구원의 지원하에 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Raj, T., "Mobile Robot Self-location Using Model-Image Feature Correspondence," *IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 11, No. 1, Feb. 1996.
2. Leonard, J.J., Durrant-Whyte, H.F., and Cox, I.J., "Dynamic Map Building for an Autonomous Mobile Robot," *Int. Journal of Robotics Research*, pp. 286 - 298, 1992.
3. Cox, I. J., "Blanche - An Experiment in Guided and Navigation of an Autonomous Robot Vehicle," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, pp. 193 - 204, 1991.
4. Freud, E. and Dierks, F., "Laser Scanner Based Free Navigation of Autonomous Vehicles," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, pp. 193 - 204, 1991.
5. Elfes, A., "Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation," *IEEE Computer*, pp. 46-57, 1989.
6. Schultz, A. C., "Continuous Localization Using Evidence Grids," *Proc. of ICRA*, pp. 2833 - 2839, 1998.
7. Dudek, G., and Jenkin, M., "Computational Principles of Mobile Robotics", Cambridge University Press, 2000.