

RF/초음파센서와 이동특성에 기반한 고속 이동로봇의 위치추정기법

Localization of a High-speed Mobile Robot Using Ultrasonic/RF Sensor and Global Features

이수성, 최문규, 박재현, 이장명*

(Soosung Lee, Mungyu Choi, Jaehyun Park, and Jangmyung Lee)

Abstract: A new localization algorithm is proposed for a fast moving mobile robot, which utilizes only one beacon and the global features of the differential-driving mobile robot. It takes a relatively long time to localize a mobile robot with active beacon sensors, since the distance to the beacon is measured by the traveling time of the ultrasonic signal. When the mobile robot is moving slowly, the measurement time does not yield a high error. At a higher mobile robot speed, however, the localization error becomes too large to locate the mobile robot. Therefore, in high-speed mobile robot operations, instead of using two or more active beacons for localization, only one active beacon and the global features of the mobile robot are used to localize the mobile robot in this research. The two global features are the radius and center of the rotational motion for the differential-driving mobile robot, which generally describe motion of the mobile robot and are used for the trace prediction of the mobile robot. In high speed operations, the localizer finds an intersection point of this predicted trace and a circle which is centered at the beacon and has the radius of the distance between the mobile robot and the beacon. This new approach resolves the large localization error caused by the high speed of the mobile robot. The performance of the new localization algorithm has been verified through the experiments with a high-speed mobile robot.

Keywords: localization, differential-driving mobile robot, active beacon, global features, localizer

I. 서론

공장자동화를 위한 로봇은 산업체에 처음 도입한 이래 현재는 공공서비스, 가정용으로까지 활용범위가 넓어지고 있다. 서비스목적으로 많이 활용되는 이동로봇이 보다 다양한 환경에서 작업을 수행하기 위해서는 현재의 위치를 스스로 인식하는 것이 무엇보다 중요하다[1,2]. 목표지점을 향한 주행(Path planning)이나 사람과 같은 장애물을 지능적으로 회피하는 기술(Obstacle Avoidance)은 로봇 자신의 위치를 파악하는 일에서부터 시작하기 때문이다. 따라서, 로봇의 정확한 위치인식(Localization)은 로봇틱스에서 가장 기본적이고 중요한 문제 중 하나이다.

현재 다양한 영역에서 위치인식시스템이 연구되고 있다. 위치인식시스템은 사용되는 센서에 따라 상대 위치추정기법과 절대 위치추정기법으로 분류된다. 상대위치추정기법의 대표적인 예는 이동로봇에 인코더나 자이로센서를 부착하는 방법이다. 이 방법은 시스템의 구현이 용이하고 저렴한 장점이 있다. 하지만 주행량이 증가하면 바퀴의 미끄러짐 등으로 오차가 발생하고, 이 오차가 누적되어 정확한 위치인식이 어렵게 된다. 또한 위치인식 도중 로봇을 인위적으로 이동시키면(kidnap) 시스템이 정상적으로 작동하지 않는 단점이 있다[3,4].

GPS, 비전센서, 초음파센서 등의 거리정보, 혹은 시각정보

등을 이용하는 절대위치추정기법들은 상대위치추정기법에 의해 발생하는 문제점들을 해결해준다. 하지만 비전 센서를 사용하는 영상처리기법은 조명이나 주위 색상에 따라 정보의 변화가 생길 수 있고, 해상도와 카메라의 수가 늘어남에 따라서 연산량이 증가하는 문제점이 있다[5,6]. GPS에 의한 위치인식 방식은 건물 안이나 터널 지역 같은 신호 음영지역에는 중계기를 따로 설치해야 하는 단점이 있다[7]. 또한 이 기법들의 특징은 물체의 이동 속도에 따라 위치오차가 달리 발생한다는 것이다[8]. 측위대상물체가 정지해있거나 저속으로 움직일 경우 이 오차는 무시할 수 있으나 고속으로 움직일 경우 이동으로 인한 위치오차는 커진다. 이것은 보통 위치인식을 위해 소요되는 시간 동안 로봇이 빠르게 이동함으로써 이동거리가 늘어나기 때문에 생긴다. 즉, 추정된 위치좌표는 이동로봇의 과거 좌표에 해당되거나 실제 좌표에 비해 큰 오차성분을 포함하게 된다.

본 논문에서는 고속이동로봇의 위치오차를 줄이기 위한 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘에서는 위치인식 샘플링 주기를 최소화하기 위하여 단 한 개의 비컨만을 사용하게 된다. 이 비컨으로부터 얻은 거리 값과 로봇의 과거 궤적을 이용해 빠르고 정밀한 위치인식을 실현한다. II 장에서는 RF와 초음파센서를 이용한 위치인식시스템인 iGS의 구성과 동작에 대하여 소개한다. III 장에서는 iGS를 이용해 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 설명한다. IV 장에서는 실험을 통해 알고리즘의 타당성을 검증하고, 마지막으로 V 장에서 결론을 맺는다.

II. iGS (indoor GPS System)를 이용한 실내위치인식

1. 구성

이동로봇의 실내위치인식을 위해 나인티 시스템(社)과 부

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2008. 12. 9., 채택확정: 2009. 5. 1.

이수성: 과학영재고등학교(Isora@dreamwiz.com)

최문규, 박재현, 이장명: 부산대학교 전자전기공학부

(mintand@pusan.ac.kr/jae-hyun@pusan.ac.kr/jmlee@pusan.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음 [2008-S033-01, 실내 외 겸용 광역 Localization Sensor 개발].

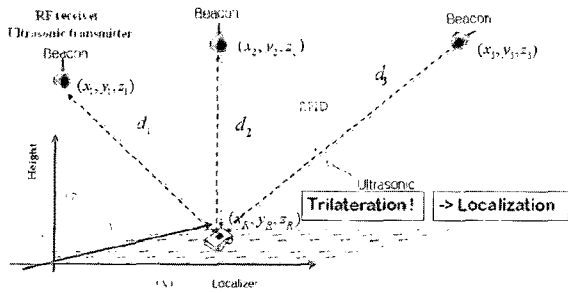


그림 1. iGS의 배치.
Fig. 1. Arrangement of iGS.

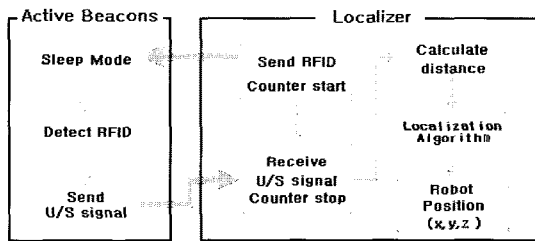


그림 2. iGS의 운용 구조.
Fig. 2. Operating sequence of the iGS.

산대학교 지능로봇실험실에서 공동 개발한 iGS를 사용하며 이 iGS는 RF/초음파센서로 이루어진 비컨과 초음파센서 수신기를 내장한 Localizer로 구성된다. 그림 1과 그림 2는 iGS의 전체적인 구성을 나타낸 것이다. 이동로봇의 기본 작업공간 천정에 RF/초음파센서로 이루어진 비컨으로 불리는 송신기 3개가 설치된다. Localizer에는 비컨에서 송출된 초음파 신호를 수신하는 초음파 수신부와 해당 비컨을 호출하는 RF 송신부가 장착되어 있고 수집된 초음파신호를 이용해 삼변측량(Trilateration)을 하는 DSP가 있다. 이 Localizer는 보통 이동로봇 위에 장착되어 이동물체의 위치정보를 사용자에게 알려준다.

2. 세부동작

iGS 동작은 크게 1) Localizer가 비컨으로부터 받은 초음파 신호의 TOF(Time of Flight)를 측정하는 과정과 2) 최종 위치 좌표를 산출하기 위한 삼변측량으로 나눌 수 있다[9,10]. 먼저 Localizer측에서 호출하고자 하는 비컨의 RFID를 전송함과 동시에 카운터를 시작한다. 자신의 ID임을 확인한 비컨은 Localizer로 초음파 신호를 발신한다. 카운터는 초음파 신호를 수신할 때까지 계속되며 초음파 신호를 수신하면 카운터는 멈춘다. 이 카운터 값은 초음파의 비행 시간을 측정하는 것이 되며 Localizer와 비컨 사이의 거리를 계산하기 위해 사용된다. (RF신호의 전송시간은 초음파신호 전송시간에 비해 무시할 수 있을 정도로 작으므로 무시한다.) 이를 수식으로 나타내면,

$$r[m] = v[m/sec] \cdot s[sec] \tag{1}$$

$$v[m/sec] = 331.5 + 0.6 \times T[^\circ C] \tag{2}$$

$$s = n \times T_c - t_d \tag{3}$$

여기서, T 는 실내 온도(24°C), T_c 는 타이머 주기(3.2μs), n 는 타이머 카운터, t_d 는 회로의 초음파 신호 검출지연시간,

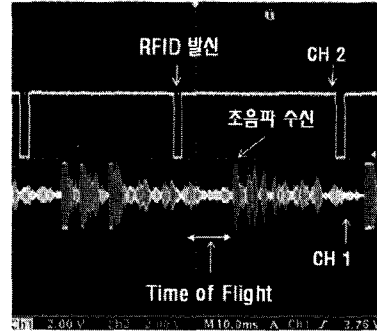


그림 3. 초음파 비행시간 측정.
Fig. 3. Measurement of TOF.

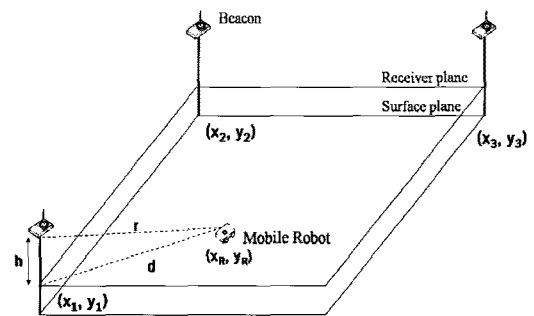


그림 4. 삼변측량에 의한 거리측정.
Fig. 4. Measurement of distance between the beacon and the receiver by trilateration.

s 는 전체 초음파 신호의 비행 시간, r 는 거리 값을 나타낸다. 식 (2)와 같이 초음파의 속도는 온도의 영향을 받기 때문에 사용 환경의 온도를 측정하여 적용시킴으로써 보다 정확한 거리 값을 측정할 수 있다.

그림 3은 비컨에서 RF신호를 송신(CH2)하고 Localizer에서 초음파를 수신한 신호(CH1)를 오실로스코프로 확인한 그림이다. 한 비컨당 데이터 측정 시간은 약 40ms이하이고 비컨 3개를 이용한 삼변측량법은 약 160ms가 소요된다.

그림 4는 iGS에서 사용된 삼변측량기법의 개념도이다. 이동로봇이 하나의 실내공간에서 작업할 때 천정의 높이 h 는 일정한 주어진 값으로 가정할 수 있으므로, 평면 상에서의 비컨과 이동로봇 사이의 거리, d 는 다음과 같이 구해진다.

$$d = \sqrt{r^2 - h^2} \tag{4}$$

이렇게 해서 구해진 세 개의 거리 정보 d_1, d_2, d_3 와 이미 알고 있는 세 비컨의 위치 정보 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ 를 이용하여 3개의 원의 방정식을 유도할 수 있다. 높이 h 가 상수로 주어져 있으므로, 이 3개의 원의 교점으로부터 이동로봇의 위치 좌표 (x_R, y_R) 를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} (x_R - x_1)^2 + (y_R - y_1)^2 \\ (x_R - x_2)^2 + (y_R - y_2)^2 \\ (x_R - x_3)^2 + (y_R - y_3)^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1^2 \\ d_2^2 \\ d_3^2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

식 (5)의 일반 해는 간단하게 구해진다[10,11].

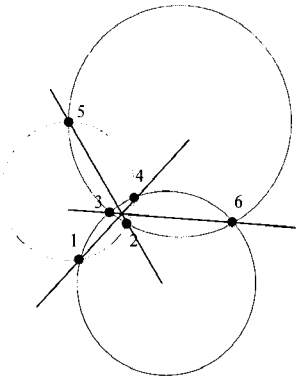


그림 5. 삼변측량 오차의 최소화.
Fig. 5. Minimization of localization error.

각 비컨으로부터 측정된 거리 값은 초음파센서 자체의 오차 특성, 수신 회로의 A/D 분해능, 그리고 초음파 신호 특성상 발생하는 반사파와 잔파 영향 등에 의해 오차를 유발하게 된다. 이러한 영향들로 인하여 세 원의 교점은 정확히 한 점에서 만나지 않게 된다. 따라서, 그림 5와 같이 서로 다른 두 원의 교점을 잇는 세 직선을 구해서 그 직선들이 만나는 교점을 초음파 수신부의 위치로 계산하여 오차를 최소화한다 [12].

III. Feature 기반 위치인식 알고리즘

1. 이동하는 로봇의 오차 분석

로봇의 이동(Localizer는 이동로봇 위에 장착되어있음)으로 발생하는 위치오차는 위치인식을 위해 소요되는 최소한의 시간 동안에도 로봇이 빠르게 움직이고 있기 때문에 발생한다. 1회의 위치인식을 위해 필요로 하는 시간은, 1) Localizer가 비컨과 동기를 위해 RFID신호를 송출하는데 필요한 시간, 2) 동기된 비컨으로부터 오는 초음파 신호를 Localizer가 받기까지의 시간(TOF), 3) Localizer의 프로세서가 각 비컨으로부터 수집한 초음파신호의 TOF를 이용해 삼변측량연산을 하는 시간, 4) 산출된 위치좌표를 사용자에게 전송하는데 걸리는 시간으로 세분화할 수 있다. 그러나 프로세서의 고속연산이 가능해지고 RF신호의 우수한 전파속도특성(빛의 속도)으로 인해 고속주행시의 위치오차는 주로 초음파신호의 TOF에 의해 발생하는 것으로 해석할 수 있다. 특히 고속 주행시에 문제 시 되는 것은 비컨으로부터 출발한 초음파신호(320m/s)가

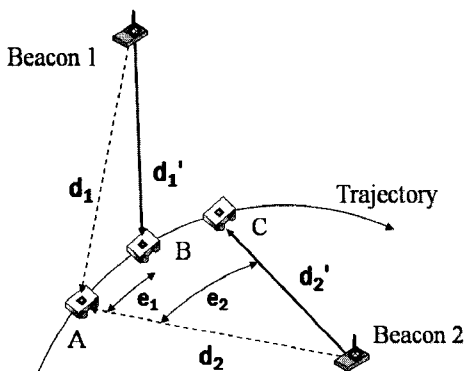


그림 6. 로봇이 이동할 시 발생하는 거리오차.
Fig. 6. Position error by the fast robot motion.

Localizer의 초음파 수신부에 도달하는 동안 로봇은 다른 위치로 계속 이동하고 있기 때문이다.

그림 6과 같이 이동로봇이 점 A에서 시작해 화살표방향으로 빠르게 주행하고 있다고 가정하면, 우선 로봇은 비컨 1과의 거리를 측정하기 위해 비컨 1에 해당하는 RFID를 송출한다. 이에 반응한 비컨 1은 로봇에 부착된 Localizer를 향해 초음파신호를 송출하지만, 이 순간에도 로봇은 이동하고 있기 때문에 실제거리 d_1 이 아닌 d_1' 의 거리 값을 측정하게 된다. 즉, 초음파신호의 느린 음파 속도로 인해 식 (6)과 같이 e_1 성분만큼의 오차가 발생하게 된다. 비컨 2의 경우에도 마찬가지로 요인으로 인해 비컨 1의 경우보다 더 심각한 e_2 가 발생하게 된다. 이를 일반화하여 표시하면,

$$e_n = d_n - d_n' \tag{6}$$

로 비컨의 사용 개수가 증가할수록 오차가 증가함을 보여 준다.

이 오차는 기존의 환경적 오차 요인들과 결합하여 거리정보를 바탕으로 하는 삼변측량법에 큰 위치오차를 유발하게 한다. 특히 고속이동로봇의 위치좌표는 사용되는 비컨의 개수가 많아질 수록, 그리고 로봇의 속도가 증가할수록 신뢰도가 낮아지게 된다.

2. 2자유도 차륜구동형 이동로봇의 운동 특성

2자유도 차륜구동형 이동로봇은 양쪽 바퀴 속도에 의해 운동상태가 달라진다[13,14]. 이러한 로봇은 회전운동을 할 때 순간회전중심점(ICC: Instantaneous Center of Curvature)을 기준으로 운동하는 특성을 띄게 된다. 그림 7에서 보인 것처럼 순간회전중심점은 바퀴 회전축의 연장선들이 만나는 점이 되므로, 두 바퀴축의 동일선상 어느 곳에서나 위치할 수 있다. 이 경우 ICC 위치는 양 바퀴의 속도비에 의해 결정된다 [15,16]. 또한, 회전 곡률이 클수록, 즉 R이 작을수록 바퀴의 미끄러짐 현상이 심해져 정밀한 주행제어가 어렵게 된다. 따라서 목표지점을 향한 주행을 할 때에는 R을 가능하면 크게 설정하여 사용함을 알 수 있다[17].

이동로봇이 ICC를 기준점으로 주행한다는 것은 미소시간에 대한 로봇의 주행경로를 기준점 ICC와 R에 의해 예측할 수 있음을 의미한다. 본 논문에서는 이러한 이동로봇의 이동 특성을 기반으로 주행로봇의 ICC와 R을 구하고 이를 활용하여 이동로봇의 순간궤적을 예측한다. 실제적으로 차륜구동 이동로봇의 운동은 Single curvature 들의 연속 궤적으로 해석

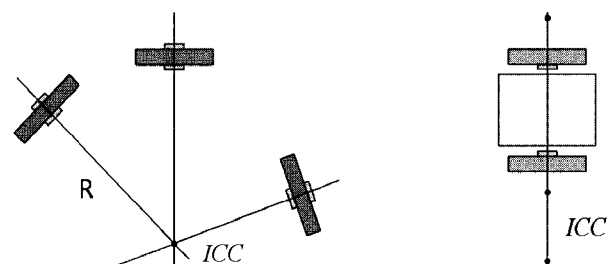


그림 7. 이동로봇의 순간회전중심점.
Fig. 7. Instantaneous center of curvature, ICC.

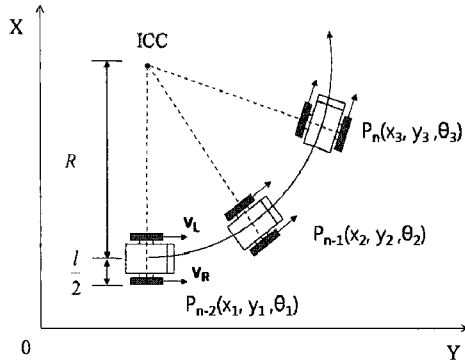


그림 8. 이동로봇의 Single curvature motion.
Fig. 8. Single curvature motion of a mobile robot.

할 수 있다(그림 8). 또한 로봇의 회전방향이 반대방향으로 바뀌는 경우도 ICC와 R의 값만 달라지게 되므로 그대로 적용이 가능하다. 이 경우 일반적으로 회전반경이 클 경우에는 큰 오차 없이 적용이 가능하지만 회전반경이 작고 급격한 방향전환의 경우에는 곡선상의 변곡점(point of inflection)이 생겨 Double Curvature 나 Multi Curvature 같은 방식이 사용되기도 한다. 이론적으로는 2개의 과거 위치좌표, $P_{n-1}(x_1, y_1, \theta_1)$, $P_n(x_2, y_2, \theta_2)$ 만 알고 있으면 ICC와 R을 이용해 Single curvature를 예측할 수 있다[18,19]. 실제로 단지 2개의 좌표만을 이동로봇의 운동 특성인 ICC와 R을 구하고 이를 사용하여 궤적을 예측하는 것은 큰 오차를 유발할 가능성이 높다.

본 논문에서는 엔코더의 정보를 사용하지 않고 초음파 비컨에 의해 측위된 3개의 위치좌표, (P_{n-2}, P_{n-1}, P_n) 를 이용해 보다 신뢰성 있는 궤적을 예측하고자 한다(그림 8). 예측된 궤적은 ICC를 중심으로 하고, R을 반경으로 하는 하나의 원이 된다. 로봇은 이 원 상위에 위치하므로, 여기에 비컨의 좌표를 중심으로 하고, 비컨과 로봇간의 거리 d를 반경으로 하는 또 다른 원과의 교점을 사용하면 하나의 지점으로 추정된다. 즉, 이 교점이 곧 로봇의 위치좌표를 나타낸다(그림 9).

세 점, (P_{n-2}, P_{n-1}, P_n) 에 의한 ICC와 R을 구하는 식은 아래와 같이 행렬식으로 표시된 원의 방정식으로부터 구할 수 있다.

$$M \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = N \tag{7}$$

$$\text{이 식에서 } M = \begin{bmatrix} 2x_1 & 2y_1 & 1 \\ 2x_2 & 2y_2 & 1 \\ 2x_3 & 2y_3 & 1 \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} -(x_1^2 + y_1^2) \\ -(x_2^2 + y_2^2) \\ -(x_3^2 + y_3^2) \end{bmatrix} \text{이며}$$

(x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) 은 로봇의 과거 위치좌표이고 $[a \ b \ c]^T$ 는 ICC의 x,y좌표 및 반경 R을 결정한다.

행렬식 (7)은 다음과 같이 간단히 구해진다.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = M^{-1}N. \tag{8}$$

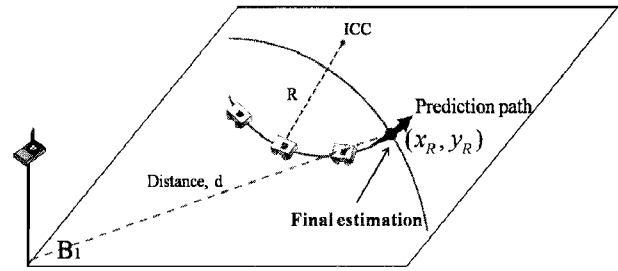


그림 9. Global features와 비컨을 이용한 로봇의 위치인식.
Fig. 9. Position estimation with global features and one beacon.

식 (8)로부터 ICC와 R의 최종식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (x_{icc}, y_{icc}) &= (-a, -b) \tag{9} \\ R &= \sqrt{a^2 + b^2 - c} \tag{10} \end{aligned}$$

그림 9는 위 식에 의해 구해진 ICC와 R을 기준으로 로봇이 Single curvature를 따라 주행하고 있는 모습을 도식화한 것이다. 이 궤적, f_1 을 이용해 로봇의 다음 위치를 예측하게 되고, 여기에 한 개의 비컨을 사용해 좌표 B_1 을 중심으로 하는 또 다른 원, f_2 를 이용해 식 (11)과 같이 두 원의 교점을 찾는다. 이 교점이 곧 로봇의 최종 위치좌표가 된다. 이를 수식화 하면

$$f_1(ICC, R) \cap f_2(B_1, d) = (x_R, y_R) \tag{11}$$

이 된다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 로봇이 고속주행 시 단 한 개의 비컨만을 사용하여 위치인식을 행하기 때문에 그만큼 위치인식 오차를 줄일 수 있게 된다.

IV. 실험 및 결과

1. 실험환경

알고리즘을 검증하기 위해 사용된 iGS의 Localizer와 비컨은 그림 10으로 보여준다. Localizer에는 고속연산을 위해 TI사의 TMS320LF2406A를 탑재하였고, Microchip사의 rPIC12F675F를 이용해 433Mhz대역의 RF신호를 제어하였다. 비컨은 전력관리가 어려운 Active type의 단점을 보완하기 위하여 MSP430F1101A(TI(社))를 채택하여 저전력 비컨을 실현하였다. 초음파 센서는 40Khz 대역을 갖는 AR/T40-10R

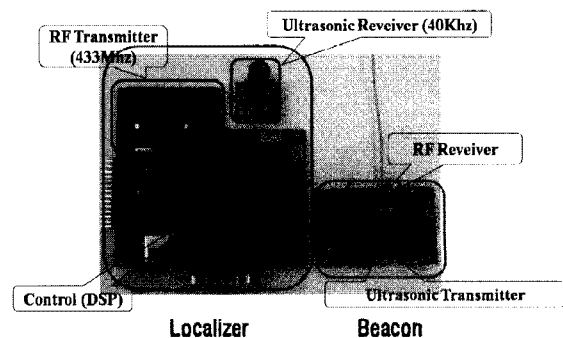


그림 10. Localizer와 비컨.
Fig. 10. The localizer and beacon.

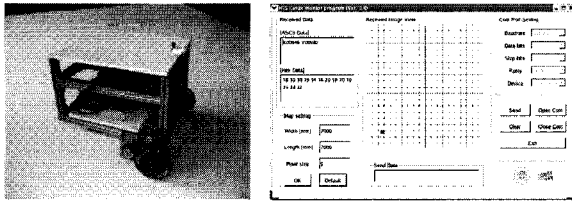


그림 11. 이동로봇과 리눅스 기반 2D 모니터프로그램.
Fig. 11. Mobile robot and monitor program based on linux OS.

(Nippon Ceramic(社))을 이용해 구성하였다.

이동로봇은 고속주행실험을 위해 500 rpm의 성능을 갖는 DC모터를 이용해 최대 15km/h의 속도를 낼 수 있게 하였다. 이 모터를 구동하기 위해 dsPIC30F4012 (Microchip 사)를 이용하여 모터구동 드라이브를 설계하였으며, 적외선 무선통신을 통해 원격으로 제어할 수 있게 하였다. Localizer는 최종 연산한 위치좌표를 블루투스 무선통신을 통해 사용자에게 알려주게 된다. 리눅스 기반 PC에서 성능을 확인할 수 있도록 QT Library 3.3.8을 이용해 개발하였으며, 2D 지도상에서 로봇의 위치를 확인할 수 있도록 하였다.

2. 고속이동 시 위치오차의 평가

이동로봇이 주행 시 얼마만큼의 위치오차가 발생하는지 알아보기 위해 3가지 경우의 속도에 대해 실험하였다. 본 실험

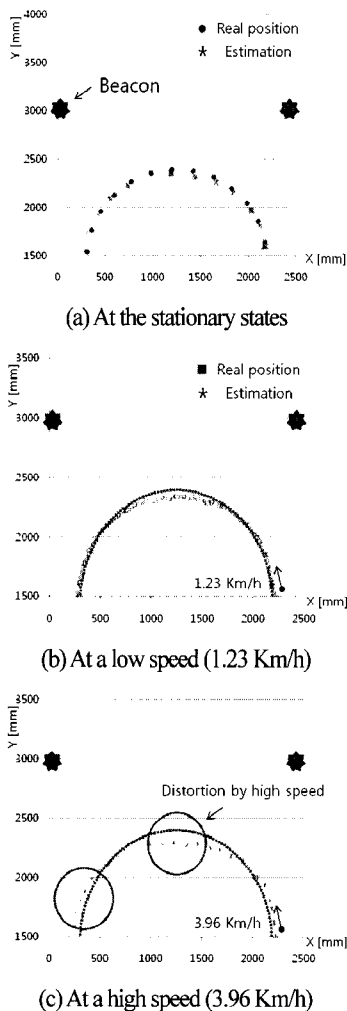


그림 12. 이동속도에 따른 로봇의 위치오차.
Fig. 12. Position error by speed of mobile robot.

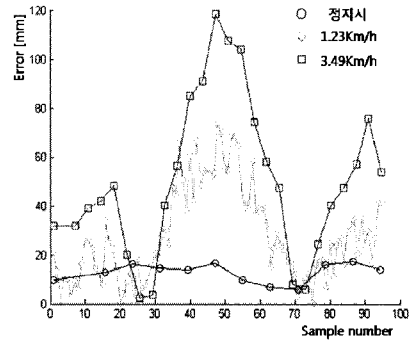


그림 13. 이동속도에 따른 위치오차의 비교.
Fig. 13. Comparison of position error in 3 cases.

험은 이동하는 로봇에 대한 오차성능을 평가하는 것이기 때문에 정지상태의 측위오차를 최소화할 필요가 있다. 이를 위하여 실험공간을 작게 설정(2.5m×3m)하여 초음파신호의 직 접과 세기를 크게 하였고, 실내온도를 온도계로 측정해 온도 보정계수를 적용해주었다. 실제 궤적은 영상 촬영을 통하여 측정하였고, 이 측정값을 기준으로 하여 위치오차를 파악할 수 있다. 그림 11은 로봇이 정지했을 경우와 이동했을 경우에 대한 실제 좌표와 측위 좌표를 보여준다. 그림 12(b)와 그림 12(c)는 각각 로봇이 1.23Km/h, 3.96Km/h로 주행시 위치오차를 나타낸다. 정지 시(2개의 비컨 사용)에는 최대오차 5cm의 정밀한 위치 인식을 보여주었다. 속도가 증가할수록 실제 궤적에 비해 왜곡이 심해지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 이동 로봇의 위치오차는 주행속도에 비례함을 알 수 있다.

그림 13은 위 3가지 경우에 대한 위치오차를 비교한 결과이다. 속도 증가에 따른 위치인식 오차의 증가가 명백하게 보여진다. 로봇의 이동속도가 증가하면 주어진 구간 내에 이동로봇이 체류하는 시간이 짧기 때문에 측정된 위치좌표의 개수가 줄어들게 된다. 보다 신뢰성 있는 위치오차 비교실험을 위해 고속구간에 대해서 다수의 주행을 통하여 많은 샘플 데이터를 수집하였다. 저속에 비해 고속인 경우 최고 2배의 위치오차가 발생함을 알 수 있다.

3. 알고리즘 실험결과

본 논문에서 제안하는 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 우선 이동로봇의 속도를 그림 14와 같이 설정하였다. 로봇은 구간 $t_0 \sim t_1$ 에서 등가속도운동을 하며, 이 구간에서 비컨 2개를 이용해 위치추정을 한다. 고속주행 시 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 임계속도를 13Km/h로 설정해 등속 운

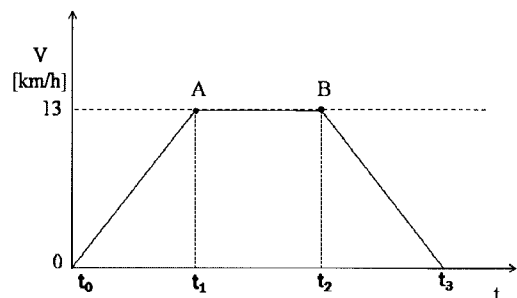


그림 14. 이동로봇의 속도.
Fig. 14. Velocity planning of the mobile robot.

동 하도록 하였고, 이 구간 $t_1 \sim t_2$ 부터 고속이동 시 일어나는 오차에 대응하기 위해 비컨 1개와 로봇의 이동특성을 이용해 위치추정을 시작한다. t_2 이후에는 로봇의 속도가 저속임을 인식하여 비컨 2개를 이용하여 위치 추정을 하게 된다. 인코더 정보를 사용하지 않기 때문에 로봇 속도의 변화는 마이크로 컨트롤러에 의해 과거 위치좌표와 현재 위치좌표와의 차이로 계산하게 된다.

그림 15와 그림 17은 각각 곡선과 직선주행의 경우에 대해 본 논문의 알고리즘을 실험한 결과이다. 본 알고리즘은 로봇이 고속구간에 진입할 시 과거의 좌표들을 이용해 예상 궤적을 생성하게 된다. 이 때 정확한 궤적을 위해서는 정확한 ICC와 R을 추정해야 한다. 하지만 iGS 시스템뿐만 아니라 대부분의 위치인식시스템의 경우에는 센서 자체의 오차

특성과 잡음 등의 복잡한 환경변수에 의해 기본적인 위치오차가 발생하게 되고, 이 오차가 정확한 ICC와 R을 추정해내는데 장애요소가 된다. 또한 이 오차로 인해 발생하는 로봇의 회전방향과 다른 방향에 ICC와 R이 측정되는 것과 같은 위치 오차를 최소화 해야 한다. 본 실험에서는 이러한 오차 특성에 보다 강인하게 대응하기 위해 다수의 과거 좌표들에 대해 최소자승법을 시행, 오차를 최소화하여 정확한 ICC와 R을 추정하도록 하였다.

그림 16을 통해 각각의 경우 추정된 위치좌표의 오차를 비교하였다. 곡선주행 시 고속구간에서 평균 위치오차는 14.7cm, 최대 위치오차는 22.7cm인 반면 제안한 알고리즘의 경우는 평균 7.5cm, 최대 8.2cm로 위치오차가 줄어들었음을 알 수 있다. 곡선주행 시 실제 ICC와 R은 각각 ICC=[133cm, 111cm], R=113cm에 반해 추정된 값은 ICC=[134.1cm, 103.8cm], R=110.2cm로 근사한 값이다. 그림 15에서 점선이 추정된 ICC와 R에 의해 생성된 예상 궤적으로 실제 궤적을 근접하게 추종하고 있음을 알 수 있다.

표 1에는 본 알고리즘 적용에 따른 위치인식 오차의 개선 정도와 이동특성인 ICC 및 R의 추정 정도를 정리하여 보여 준다.

그림 17처럼 로봇이 x축과 평행하게 직선주행을 할 경우 ICC의 y좌표와 R은 이론적으로 무한대이다[17]. 실제 실험을 통해 추정된 값은 각각 ICC=[208.8cm, 12,860.1cm],

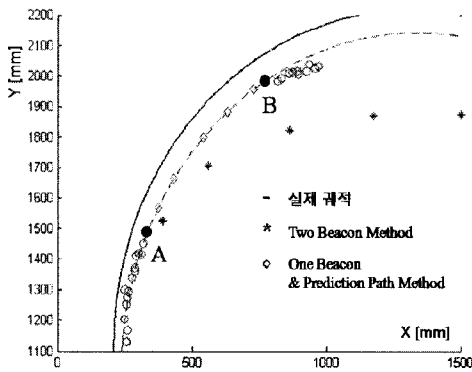


그림 15. 제안한 알고리즘의 실험결과(곡선주행 시).
Fig. 15. Experimental results of the proposed algorithm (Curve motion).

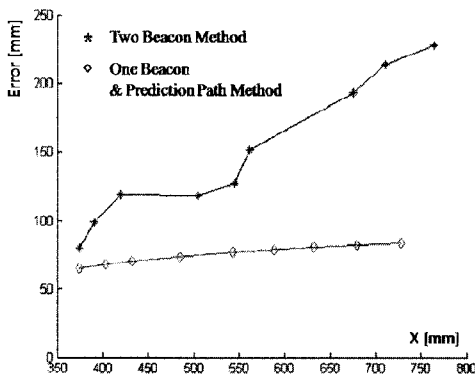


그림 16. 기존 방식과 제안한 방식과의 위치오차 비교(곡선주행 시).
Fig. 16. Comparison of estimation errors (Curve motion).

표 1. 고속 곡선구간에서의 오차평가 및 ICC, R 추정[cm].
Table 1. Comparison of position error and estimation result of ICC and R in high-speed (Curve motion, [cm]).

항목	오차		좌표 항목	X	Y	R(반경)
	평균	최대				
알고리즘 적용 전	14.7	22.7	이론치	133	111	113
알고리즘 적용 후	7.5	8.2	추정치	134.1	103.8	110.2

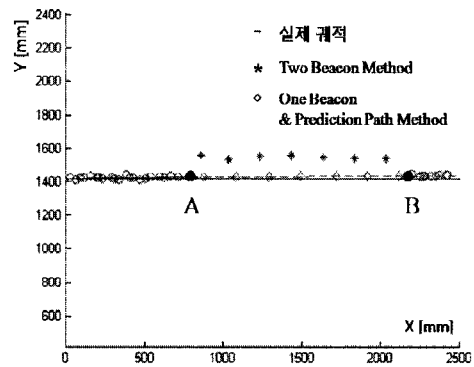


그림 17. 제안한 알고리즘의 실험결과(직선주행 시).
Fig. 17. Experimental results of the proposed algorithm (Straight line).

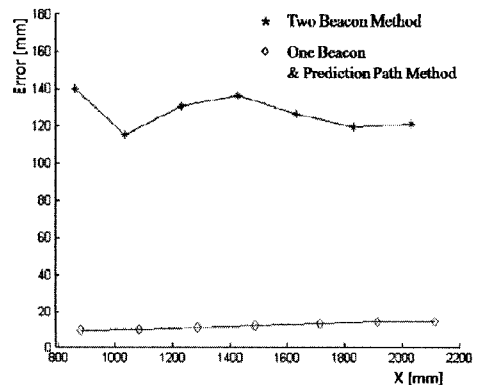


그림 18. 기존 방식과 제안한 방식과의 위치오차 비교(직선주행 시).
Fig. 18. Comparison of estimation errors (Straight line).

표 2. 고속 직선구간에서의 오차평가 및 ICC, R 추정[cm].
Table 2. Comparison of position error and estimation result of ICC and R in high-speed (Straight line motion, [cm]).

항목	오차		항목	좌표		
	평균	최대		X	Y	R(반경)
알고리즘 적용 전	12.6	14.0	이론치	151	∞	∞
알고리즘 적용 후	1.1	1.4	추정치	208.8	12,860	13,003

R=13,003.6cm로 실험공간이 2.5m×3m 크기임을 감안할 때 이 값은 거의 무한대에 가까운 값이다. 즉, 직선주행의 경우에도 로봇의 이동특성에 의한 예상 궤적이 실제 궤적과 근사하다는 것을 알 수 있다. 그림 18에서 직선 운동에 대해 각각의 경우 추정된 위치좌표의 오차를 비교하였다. 고속구간에서의 평균 위치오차는 12.6cm, 최대 위치오차는 14.0cm인 반면, 제한된 알고리즘의 경우는 평균 1.1cm, 최대 1.4cm로 직선주행 시에도 본 알고리즘의 적용이 타당함을 알 수 있다. 비컨 2개를 사용하였을 때도 오차는 크지만 offset이 있는 직선경로가 측정되게 되는데, 이는 로봇이 A-B 구간에서 등속 운동을 하기 때문에 로봇은 일정한 거리를 이동하게 되고, 비컨과 로봇의 거리 값 d도 선형성을 띄게 된다. 그에 따라 측정된 로봇의 거리 값의 교점이 일정한 offset을 가진 지역에 일정한 주기를 가지고 직선으로 측정되게 된다. 또한 로봇의 속도가 빨라질 경우 offset이 더 큰 직선경로를 추종하게 된다.

표 2에는 직선운동에 대하여 본 알고리즘 적용에 따른 위치인식 오차의 개선 정도와 이동특성인 ICC 및 R의 추정 정도를 정리하여 보여준다.

V. 결론

본 논문에서는 RF/초음파센서를 기반으로 하는 실내위치 추정 시스템인 iGS을 이용해 고속으로 주행하는 로봇의 위치오차 개선 방안을 제안하였다. 현재까지는 주로 로봇이 정지 시나 저속주행 시에서 위치 정밀도를 향상시키는 방법에 대해 연구되어왔지만 활용범위가 넓어짐에 따라 고속주행이 필요하게 되었고, 이 환경에서도 신뢰성 있는 위치좌표를 추정해내는 기법이 필요하게 되었다. 본 논문에서는 차륜구동 이동로봇의 iGS를 이용한 위치인식 오차가 로봇의 이동속도에 비례한다는 것을 실험을 통해 보여주었으며 이를 기반으로 고속주행 로봇의 위치인식 정도 향상을 위한 방안을 제시하였다. 즉, 2자유도 차륜구동형 이동로봇이 미소구간에 대해 일정한 중심점 ICC와 반경 R을 가지고 원운동을 하는 특성을 이용해 고속주행 시 위치오차를 줄일 수 있는 알고리즘을 제안하였으며 실험을 통해 타당성을 검증하였다. 이 알고리즘은 빠른 이동속도에 대응하기 위해 단 하나의 비컨과 로봇의 과거 위치좌표들로 인해 생성된 예상궤적을 사용한다. 비컨과 로봇간의 초음파 왕복시간을 최소화함으로써 고속으로 주행하는 로봇의 위치정밀도를 높였다. 비컨을 하나로 줄인다는 점과 엔코더 정보를 이용하지 않기 때문에 응용에 있어 제한적일 수 있으나, 고속이동에 대응하여 샘플링 타임을 줄인다는 측면과 엔코더 정보 없이도 위치 측정이 가능하다는

점에서 그 의미가 크다고 하겠다. 더불어 이 결과는 장애물 환경일지라도 최소 하나의 비컨이 Localizer의 시야에 가려지지 않는다면(Line of Sight) 짧은 구간에 한해 신뢰성 있는 위치추정이 가능하다는 것을 의미한다. 본 연구 결과는 고속이동로봇의 위치추정에 관한 해를 제공할 수 있기 때문에 로봇이 보다 넓고 다양한 환경에서 활용되는데 유용할 것이라 기대된다. 또한 특별한 장비나 하드웨어의 추가가 없이 저렴하게 시스템을 구축할 수 있기 때문에 실용적으로 활용될 수 있을 것이라 생각한다.

참고문헌

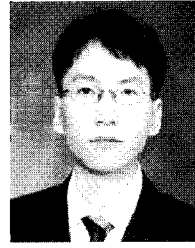
- [1] D. Lee and W. Chung, "Discrete-status-based localization for indoor service robots," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 53, issue 5, pp.1737-1746, 2006.
- [2] A. Talneau, S. Slempekes, and A. Ougazzaden, "Multisensor fusion for simultaneous localization and map building," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 17, issue 6, pp. 908-914, 2001.
- [3] Ching-Chih Tsai, "A localization system of a mobile robot by fusing dead-reckoning and ultrasonic measurements," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 47, issue 5, pp. 1399-1404, 1998.
- [4] J. Borenstein and L. Feng, "Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 12, pp. 869-880, 1996.
- [5] J. Wolf, W. Burgard and H. Burkhardt, "Robust vision-based localization by combining an image-retrieval system with monte carlo localization," *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 21, issue 2, pp. 208-216, 2005.
- [6] F. Chenavier and J. Crowley, "Position estimation for a mobile robot using vision and odometry," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nice, France, pp. 2588-2593, 1992.
- [7] J. Huang and H.-S. Tan, "A low-order dgps-based vehicle positioning system under urban environment," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 11, Issue 5, pp. 567-575, 2006.
- [8] S. K. Cho, S. C. Shin and J. M. Lee, "A dynamic localization algorithm for mobile robots using the iGS system," *Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, July 2-5, 2008, China.
- [9] J. M. Yun, S. B. Kim and J. M. Lee, "Robust positioning a mobile robot with active beacon sensors," *LNAI 4251*, ISSN 0302-9743, Part I, pp. 890-897, 2006.
- [10] S. B. Kim and J. M. Lee, "Precise indoor localization system for a mobile robot using auto calibration algorithm," *Korean Robotics Society*, vol. 2, no. 1, pp. 40-47, 2007.
- [11] D. E. Manolakis, "Efficient solution and performance analysis of 3-D position estimation by trilateration," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, pp. 1239-1248, 1996.
- [12] S. S. Ghidary, T. Tani, T. Takamori, and M. Hattori, "A new Home Robot Positioning System (HRPS) using IR switched multi ultrasonic sensors," *Systems, Man, and Cybernetics, 1999. IEEE SMC '99 Conference Proceedings*, vol. 4, pp. 737-741, 1999.
- [13] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, and Dieter Fox, "Probabilistic Robotics," The MIT Press, Cambridge, 2005.

- [14] W. E. Dixon, D. M. Dawson, E. Zergeroglu, and A. Behal, "Nonlinear control of wheeled mobile robots," Springer Verlag, 2003.
- [15] W.-C. Chang and S.-A. Lee, "Autonomous vision-based pose control of mobile robots with tele-supervision," *Proc. IEEE Int. Conf. on Control Applications*, pp. 1049-1054, 2004.
- [16] Tzuu-Hseng S. Li, S.-J. Chang, and W. Tong, "Fuzzy target tracking control of autonomous mobile robots by using infrared sensors," *IEEE Transaction on Fuzzy systems*, vol. 12, no. 4, pp. 491-501, 2004.
- [17] S. S. Han, B. S. Choi, and J. M. Lee, "A precise curved motion planning for a differential driving mobile robot," *Mechatronics*, vol. 18, pp. 1-9, 2008.
- [18] Shangming Wei and Milo Zefran, "Smooth path planning and control for mobile robots," *IEEE Proc. on Networking, Sensing and Control*, pp. 894-899, 2005.
- [19] W.-C. Chang and S.-A. Lee, "Autonomous vision-based pose control of mobile robots with tele-supervision," *Proc. IEEE Int. Conf. on Control Applications*, pp. 1049-1054, 2004.



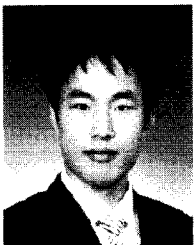
이수성

1985년 충남대학교 전자공학과 졸업. 2002년 부산대학교 박사. 2005년~현재 한국과학영재학교 교사. 관심분야는 센서응용, Localization, 지능로봇제어.



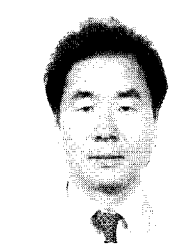
최문규

2007년 청주대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2007년~현재 부산대학교 대학원 메카트로닉스협동과정 석사과정 재학 중. 관심분야는 Localization, 지능로봇제어, USN (Ubiquitous Sensor Network).



박재현

2008년 동의대학교 컴퓨터소프트웨어공학부 졸업. 2008년~현재 부산대학교 대학원 전자공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 Localization, 지능로봇제어, 임베디드 시스템.



이장명

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1982년 동 대학원 석사. 1990년 USC(미국 남가주 대학교). 1992년~현재 부산대학교 정교수. 관심분야는 지능로봇 시스템 설계 및 제어, 마이크로 프로세서 응용, Localization.