Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (2010) 16(12):1182-1188
DOI:10.5302/J.ICROS.2010.16.12.1182 ISSN:1976-5622

iGS와 듀얼 컴퍼스를 이용한 고속 이동로봇의 정밀 위치 인식기법

A Precise Localization Method for a High Speed Mobile Robot using iGS and Dual Compass

장 원 석, 이 장 명*
(Won-Seok Jang[1] and Jang-Myung Lee[1])
[1]Pusan National University

Abstract: This paper proposes a precise localization algorithm for a quickly moving mobile robot. In order to localize a mobile robot with active beacon sensors, a relatively long time is needed, since the distance to the beacon is measured using the flight time of the ultrasonic signal. The measurement time does not cause a high error rate when the mobile robot moves slowly. However, with an increase of the mobile robot's speed, the localization error becomes too high to use for accurate mobile robot navigation. Therefore, in this research into high speed mobile robot operations, instead of using two active beacons for localization an active beacon and dual compass are utilized to localize the mobile robot. This new approach resolves the high localization error caused by the speed of the mobile robot. The performance of the precise localization algorithm was verified by comparing it to the conventional method through real-world experiments.

Keywords: precise localization, localization, mobile robot, beacon, dual compass, magnetic compass

I. 서론

로봇은 센서를 통하여 외부나 자신의 상황을 인식하고 분석하며 그 결과에 따라 작동하게 된다. 과거에는 로봇이란 매니퓰레이터(robot manipulator) 또는 원격제어 로봇을 의미하였다. 매니퓰레이터는 고정된 장소에서 반복적인 일을 수행하는데 이용되었으며, 원격 제어 로봇은 조종자가 멀리 떨어져있는 로봇을 수동으로 제어함으로 작업의 위험을 최소화하는데 주로 이용되었다. 오늘날에는 실시간 위치 인식을 바탕으로 주변의 물체나 사람과 충돌하지 않고 자율적으로 주행하는 이동 로봇이 연구 및 개발 되고 있으며, 가까운 미래에는 유비쿼터스 로봇, 인간형 서비스 로봇의 개발이 곧 도래할 것으로 예상된다. 자율주행을 위해서는 자기 위치 인식 기술이 우선적으로 필요하다. 자기 위치 인식 기술이란 운동 공간상에서 로봇 자신이 어디에 놓여 있고 어느 방향을 향하는지를 알아내는 것을 말한다. 이동 로봇이 실내를 이동할 때 자신의 위치를 인식하고 있어야 목표지점으로 이동하기 위한 궤적계획이 가능하며 그에 따른 제어도 가능하기 때문에 기본적으로 연구가 요구되는 분야이다[1-3].

위치를 인식하는 방법은 로봇의 초기 위치정보로부터 이동체의 속도 및 방향을 측정하는 상대 위치 인식방법과 오차 누적이 없는 센서를 사용하는 절대 위치 인식방법이 있다[4-7].

상대 위치 인식방법은 엔코더(encoder) 및 자이로센서, 가속도센서 등을 장착하여 상대적인 위치(relative position)를 측정하는 방식이다. 이 방식은 상대 위치 측정 센서를 이용해 초기 위치로부터 변위를 측정하고, 그 측정값을 바탕으로 현재의 위치를 누적하여 추정하는 방법이다. 비교적 손쉽게 위치를 추정할 수 있다는 장점이 있으나, 주행 량이 증가하면 바퀴의 미끄러짐이나 센서 오차 등으로 오차가 발생하고, 이 오차가 누적되어 정확한 위치 측정이 어렵게 된다. 따라서 초기 위치 오차가 거의 없고 주행 량이 적은 경우에만 제한적으로 사용되거나, 보조적인 역할만을 담당한다.

절대 위치 인식에 사용되는 센서는 RFID 센서와 레이저 센서, 초음파 센서, CCD 카메라 등이 있는데, RFID 센서의 active 타입은 작동시간의 제한을 받으며 passive 타입은 인식거리가 짧고 리더기에서 많은 전력이 소모된다[4]. 레이저 센서는 비교적 고가이며 일차원 거리 정보만을 제공하며[5], CCD 카메라를 이용한 영상 처리기법은 다소 많은 정보량을 처리해야 하므로[6], 데이터 처리에 많은 노력과 시간이 소모될 뿐만 아니라 주위의 시스템을 구축하는데 많은 비용이 드는 단점이 있다. 초음파 센서는 동시에 여러 개를 사용할 경우 간섭현상이 일어나지만 이를 해결할 수 있다면 저가의 시스템으로 정밀한 위치 측정이 가능하게 된다[3,7]. 현재의 실내 위치 인식에 대한 연구는 센서 fusion을 통한 위치 인식과 등속 및 저속의 로봇에 대한 연구가 활발히 이루어지지만[5,8,9], 가변 또는 고속 로봇의 위치 추정에 대한 연구는 미비하다. 실내공간에서 고속으로 움직이는 로봇에 대한 위치 추정을 위해서라면 더 효율적인 위치 추정 기법이 고려되어야만 한다.

본 논문에서는 iGS와 dual compass를 이용하여 고속으로 이동하는 로봇의 위치를 추정하기로 한다. 로봇이 정지 상태 혹은 저속으로 주행할 때는 2개의 beacon을 이용하여 비교적 정밀한 위치를 추정할 수 있지만 로봇이 빠른 속도로 이동할 경우 2개의 beacon을 이용하는 샘플링 타임 동안 로봇은 이미 로봇의 속도와 샘플링 타임의 곱에 해당하는 거리만큼 이동하게 되어 위치 추정오차가 크게 증가하기 때문에 실시간

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수: 2010. 9. 10., 수정: 2010. 10. 7., 채택확정: 2010. 12. 1.
장원석, 이장명: 부산대학교 전자전기공학과
(masura0727@pusan.ac.kr/jmlee@pusan.ac.kr)
※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음.

Copyright© ICROS 2010

위치 추정이 어렵게 된다. 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 고속 이동구간에서 1개의 beacon과 dual compass을 이용하는 알고리즘을 제안한다. 고속 이동구간에서 2개의 beacon을 이용한 경우의 궤적과 제안하는 알고리즘을 이용한 경우의 궤적을 실험을 통해 비교함으로써 제안하는 알고리즘의 효율성을 입증하였다. 본 논문의 II 장에서는 iGS의 구성과 동작에 대해 살펴보고, III 장에서는 dual compass에 대해 소개한다. 그리고 IV 장에서는 제안하는 알고리즘에 대해서 설명하고, 본 알고리즘의 효율성을 검증하기 위한 실험과 결과를 V 장에 담았으며, VI 장에서 본 논문의 결론을 맺었다.

II. iGS(INDOOR GPS SYSTEM)

1. 시스템 구성

본 연구에 사용된 iGS는 ㈜나인티시스템과 부산대학교 지능로봇연구실이 실내 위치인식을 위하여 공동으로 개발한 시스템으로 그림 1과 같이 크게 localizer 부분과 beacon 부분, 그리고 PC 부분으로 나뉜다. Localizer 부분은 RFID 신호를 전송하기 위한 RF 송신부와 beacon에서 발생한 초음파 신호를 수신하기 위한 초음파 수신부로 구성되어 있으며, beacon 부분은 수신기에서 전송한 RFID를 수신하기 위한 RF 수신부와 초음파 신호를 발생하기 위한 초음파 송신부로 구성되어 있다. 정확한 위치에 설치된 beacon들 사이에서 이동 로봇에 설치된 localizer가 정확한 위치를 계산하면 그 정보는 bluetooth를 통해 PC에 전달된다.

2. 동작원리

Localizer가 RFID 신호를 전송하면서 동시에 카운터를 시작하고 beacon은 RFID를 수신하여 자신의 ID와 비교하고 자신의 ID와 같으면 초음파 신호를 발신한다. Localizer가 다시 초음파 신호를 수신하면 카운터는 멈춘다. 이 카운터 값은 초음파의 비행 시간이며 수신기와 beacon 사이의 거리를 계산하기 위해 사용된다. (RF신호의 전송시간은 초음파신호 전송시간에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다.) 이를 수식으로 나타내면,

$$r[m] = v[m/\sec] \times t_{TOF}[\sec] \tag{1}$$

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

$$t_{TOF} = n \times t_c \tag{3}$$

이다[2,10].

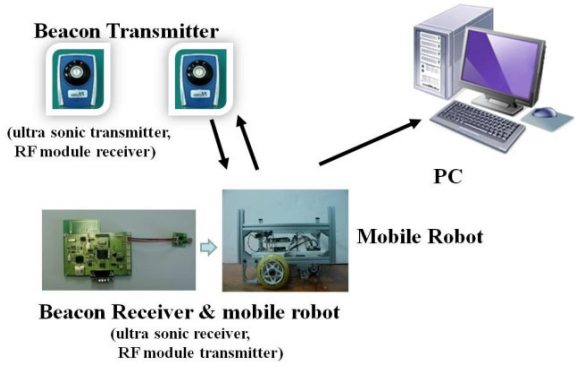


그림 1. 실내 위치인식 시스템(iGS).
Fig. 1. Indoor GPS system.

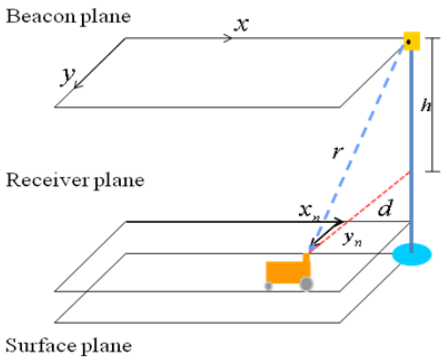


그림 2. iGS를 이용한 거리측정.
Fig. 2. Measurement of distance using iGS.

여기서 r 은 beacon과 localizer 사이의 거리, v 는 초음파의 전파속도, t_{TOF} 는 초음파의 time of flight, T 는 실내온도, t_c 는 카운터 주기 그리고 n 은 타이머 카운터를 나타낸다. 음파의 전파속도는 식 (2)와 같이 온도의 영향을 받으므로 실내온도를 고려하여 줌으로써 정확한 거리 값을 계산할 수 있는데, 본 논문에서는 $24°C$ 로 가정하였다.

Beacon은 이미 알고 있는 고정된 높이에 설치가 되며 localizer 또한 로봇의 고정된 위치에 설치되기 때문에 높이가 일정하다. 따라서, 수신기와 beacon 사이에 수직 높이는 미리 알고 있으므로 상수이다. 그래서 로봇의 위치 인식 문제는 그림 2에서와 같이 2차원 문제가 된다. 따라서 일반적인 iGS는 3개 이상의 beacon으로 위치를 추정하지만, 본 논문에서는 일반적인 저속구간에서 2개의 beacon을 사용함으로써 위치를 추정하였다[11].

특정 beacon에서의 초음파 거리 데이터 r 과 높이 h 를 이용하여 평면상의 거리 값 d 를 구할 수 있고, 이것을 이용하여 평면 좌표상에서 로봇이 위치하게 될 가능성이 있는 곳을 원으로 나타낼 수 있다.

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

$$(x_r - x_b)^2 + (y_r - y_b) = d^2 \tag{5}$$

여기서 (x_b, y_b) 는 beacon의 좌표를 (x_r, y_r) 은 로봇의 좌표를 의미한다. 두 beacon으로부터 식 (4)를 이용해 구해진 거리 정보 d_1, d_2 와 는 미리 알고 있는 beacon의 위치좌표 (x_1, y_1), (x_2, y_2) 을 이용하여, 두 원의 교점을 구하면 이동 로봇의 위치 좌표를 식 (6)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} (x_r - x_1)^2 + (y_r - y_1) \\ (x_r - x_2)^2 + (y_r - y_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1^2 \\ d_2^2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

식 (6)의 해, 즉 두 원의 교차점은 2개가 되지만 그 중 한 개는 항상 y성분이 음수이므로 이 해를 배제하면 된다[12].

III. DUAL COMPASS

1. Magnetic compass의 원리

Magnetic compass는 자기 저항 센서와 같은 특수 소자를 이용하여 지구의 자기장을 검출한다. 미약한 지구 자기장을 측정하여 자북에 대한 지구 방위각을 구할 수 있는 방위각 센

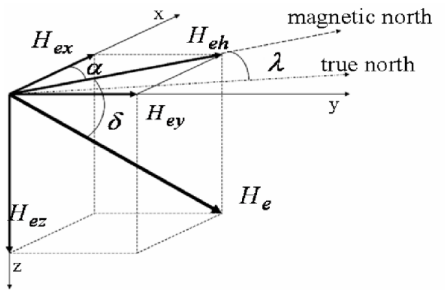


그림 3. 지구 자기장 벡터 해석.

Fig. 3. Vector analysis of earth magnetic field.

서이다. 그림 3에서 자기장 성분 H_{eh}는 H_{ex}, H_{ey} 성분으로부터 측정되는 지구 자기장의 수평 성분을 나타낸다. λ, δ는 자북과 진북 사이의 각과 자기저항 센서의 기울기 각을 나타낸다. 자북의 방위각 α는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다[13].

$$\alpha = \arctan \frac{H_{ey}}{H_{ex}} \tag{7}$$

본 연구에 사용된 센서는 Barber pole 형태의 2개의 소자가 90°로 직교된 것을 사용하여 x축과 y축을 동시에 측정하여 360°의 전 방위를 검출할 수 있다. 그림 4는 자기 센서의 구조와 출력 특성을 나타낸다. 그림 6(a)는 compass 내부 구조를 나타내며, compass를 α 방향으로 360°회전 시키면 그림 6(b)와 같이 지구 자기장은 x축 센서와 y축 센서에 미소 전압 값으로 측정된다.

2. Dual compass를 이용한 방위각 측정

Single compass에 발생하는 오차는 어떤 외부의 간섭 없이 설계상 발생하는 기본적인 3가지의 오차가 있다. Offset의 차

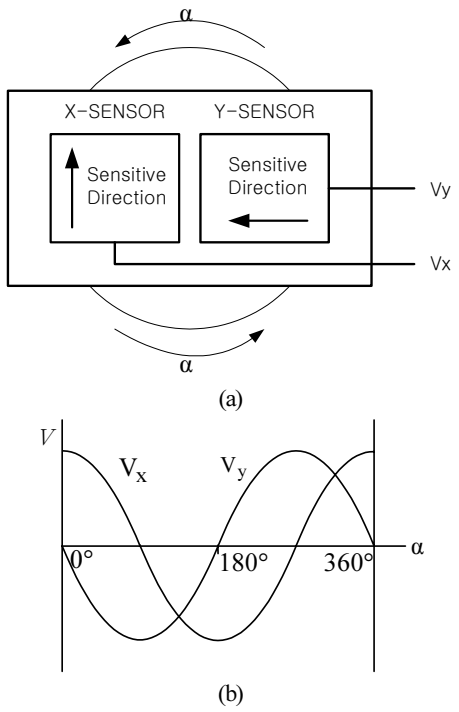


그림 4. (a) 센서의 내부구조 (b) 출력 특성.

Fig. 4. (a) Inner structure of the sensor (b) Output characteristics.

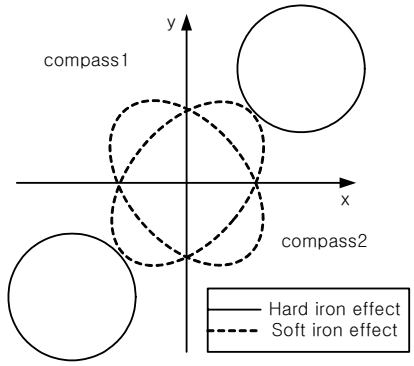


그림 5. 금속 영향에 의한 자화원 변화.

Fig. 5. Change of magnetized circles with iron structures.

이에서 발생하는 오차, 소자의 감도에 의한 편차와 증폭률의 차이에서 발생하는 소자 출력 감도 차이, 센서 제작 시 발생하는 비 직교 오차가 있다. 이러한 오차는 single compass 보정 알고리즘으로 해결이 가능하다. 현재까지의 기술로 고정된 위치에 있는 순간적인 외부 환경에 의해 발생되는 오차는 보정하기 어렵다[14]. 그림 5는 금속 영향에 대한 자화원 변화를 나타내었다.

이동로봇의 방위각을 측정하는 방법으로 2개의 magnetic compass를 180°의 위상 차를 가지도록 설치하여 dual compass로 오차를 보정하여 교정된 방위각을 측정할 수 있다. 양방향 교정 법칙에 의해 soft iron effect의 경우는 식 (8)로 간단히 보정할 수 있다.

$$\begin{aligned} H1 + H2 &= \begin{pmatrix} H1_X \\ H1_Y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} H2_X \\ H2_Y \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} He_X + Hi_X \\ He_Y + Hi_Y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -He_X + Hi_X \\ -He_Y + Hi_Y \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 2Hi_X \\ 2Hi_Y \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{8}$$

위 식은 다시 식 (9)로 정리된다.

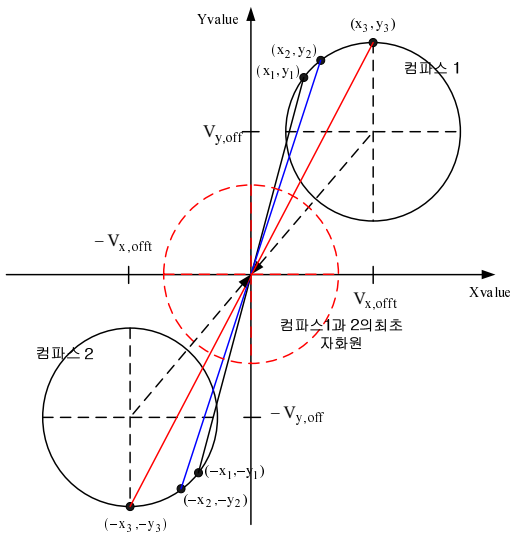


그림 6. 3-point 교정 방법.

Fig. 6. 3-point calibration method.

$$Hi_X = \frac{1}{2}(H1_X + H2_X)$$
$$Hi_Y = \frac{1}{2}(H1_Y + H2_Y) \quad (9)$$

Hard iron effect의 경우 각각의 compass는 원점을 기준으로 양방향으로 shift된 2개의 원으로 분리되며 이는 시간에 대해서 일정하게 작용하므로 그림 6에 나타낸 dual compass 3-point calibration method를 이용하여 보정할 수 있다. 3개의 측정된 센서 값으로 원의 중심을 구할 수 있으며 간섭에 의해 이동된 자화원의 중심을 원점으로 이동 가능하다[15].

IV. iGS와 DUAL COMPASS를 이용한 LOCALIZATION ALGORITHM

1. 고속 이동로봇의 오차분석

2개의 beacon을 사용하여 로봇의 위치 추정을 위해 소요되는 시간은 다음과 같다.

$$2T_l + T_{\mathrm{RF}} \approx 2T_l \quad (10)$$

여기서 T_l 은 하나의 초음파 센서의 거리 데이터를 처리하는 시간으로 약 43ms정도 소요되며, T_{RF} 는 RFID를 주고 받는 시간으로써 무시될 수 있다. 따라서 전체 샘플링 타임의 주기는 약 86ms이다. 만약 로봇이 정지해 있다면, 이런 샘플링 타임은 어떠한 error도 발생시키지 않는다. 그러나 만약 로봇이 빠르게 주행한다면, 즉, 샘플링 타임 동안 로봇이 많이 움직인다면, 위치 추정오차는 무시할 수 없다. 따라서 로봇이 빠르게 움직일 때에는 beacon을 2개 이상 사용하여 위치를 인식하는 기존의 방식이 적합하지 않다. 그림 7은 로봇이 샘플링 타임 동안 이동할 때 발생하는 오차를 나타낸 것이다.

식 (10)에서 정의된 $2T_l$ 을 이용하여 2개의 beacon을 사용했을 때 허용 가능한 로봇의 속도를 구해보면 다음과 같다.

$$|Max\ iGS_{error}| + 2T_l \times V_{robot} < Pe \quad (11)$$

여기서 $|Max\ iGS_{error}|$ 은 beacon을 이용하여 정지해 있는 로봇의 위치를 추정할 때 발생하는 최대 오차로써 5cm이다. Pe 는 장애물을 회피하기 위한 허용 오차 범위로써 본 논문에서는 10cm로 두었다. T_l 가 약 43ms이므로 식 (11)을 계산해 보면, 2개의 beacon을 사용했을 때 장애물을 회피하며 로봇이 안정적으로 주행할 수 있는 최대 허용 속도는 약 58cm/s가 된다. 다시 말하자면, 로봇이 58cm/s 이상의 속도로 주행을 할 때 기존의 위치인식 방법을 사용할 수 없다는 것이다. 따라서 이때 본 논문에서 제안하는 고속 이동로봇에 적합한 정밀한 위치인식 알고리즘이 적용된다. 전체 알고리즘을 그림 8에 나타내었다.

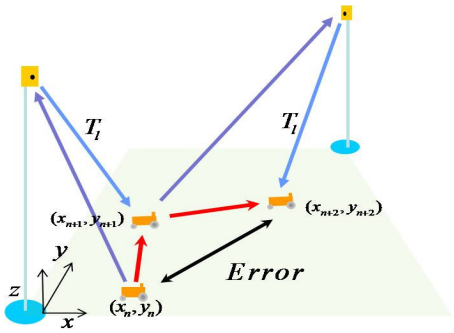


그림 7. iGS의 위치 추정 에러.
Fig. 7. Positioning error of the iGS.

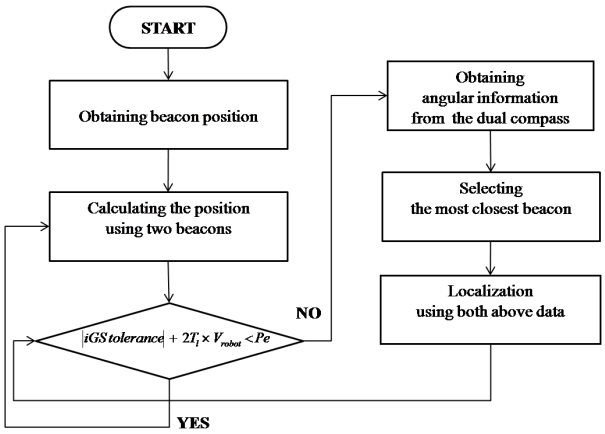


그림 8. 전체 위치인식 알고리즘 흐름도.
Fig. 8. The localization algorithm flowchart.

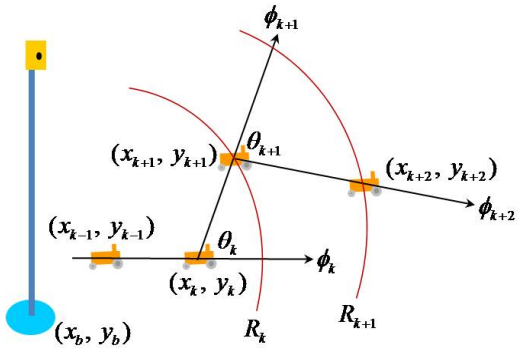


그림 9. iGS와 dual compass를 이용한 위치인식기법.
Fig. 9. Localization method using iGS and dual compass.

2. 고속 이동로봇을 위한 정밀 위치인식기법

제안하는 알고리즘은 로봇의 위치를 측정하기 위해 로봇의 이동 진행 방향과 이동거리 정보를 이용하는데, dual compass로부터 진행 방향의 정보를 얻고 beacon으로부터 로봇이 위치할 수 있는 거리의 정보를 얻는다. 이를 그림 9로 표현하였다.

$$ang_{k-1} = \arctan\left(\frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}}\right) \quad (12)$$

본 알고리즘의 적용을 위해 초기의 위치와 방향각을 알아야 한다. 그래서 식 (12)와 같이 고속 주행 시작 직전의 두 점 좌표를 이용하여 초기 방향각, ang_{k-1} 을 구할 수 있고, 초기 위치 좌표는 (x_k, y_k) 가 된다. 방향각의 변화는 dual compass로부터 얻은 각도 정보 ϕ_k 을 이용하는데 식 (13)에 정의 하였다.

$$\theta_k = \phi_k - \phi_{k+1} \quad (13)$$
$$ang_k = ang_{k-1} + \theta_k \quad (14)$$

Dual compass와 beacon으로부터 43ms마다 data를 받으므로 식 (14)과 같이 로봇의 진행 방향각을 43ms마다 갱신해줄 수 있다. 좌표 (x_b, y_b) 에 설치된 beacon에서 얻는 거리 data를 R_k 라고 한다면, 새롭게 구해지는 로봇의 위치좌표를 수식화 하면

$$\begin{aligned} f_1 &: y = \tan(ang_k)(x - x_k) + y_k \\ f_2 &: (x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 = R_k^2 \\ f_1 &\cap f_2 = (x_{k+1}, y_{k+1}) \end{aligned} \tag{15}$$

이 되는데, 이는 로봇의 이전 좌표와 dual compass의 방위각 정보를 이용하여 얻는 직선, f_1 과 beacon에 의해 구해지는 원, f_2 의 교점으로 위치좌표를 구하는 방법이다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 로봇이 고속 주행 시 43ms마다 beacon과 dual compass로부터 data를 받아 위치를 갱신하기 때문에 beacon 2개를 사용할 때 보다 위치인식오차를 줄일 수 있게 된다.

V. 실험 및 결과

1. 실험환경

그림 10은 본 실험을 위하여 부산대학교 지능로봇연구실에서 제작된 이동로봇이다. 이 로봇은 두 개의 DC 모터(Max. 500rpm, model: IG42GM, D&J(社))를 사용하여 최대 15km/h의 속도까지 주행할 수 있으며, DC 모터는 엔코더 일체형으로써 바퀴가 1회전 할 때 128 count의 정밀도를 가지고 있다. 로봇 몸체는 알루미늄으로 제작되었으며, 바퀴는 미끄러짐이 적은 고탄성 고무재질의 인라인 바퀴를 사용하였다.

이동로봇을 위한 제어보드에는 하나의 dsPIC30F6010과 두 개의 dsPIC30F4012를 사용하였는데, 6010은 operator로부터의 명령을 받아들여 각 바퀴를 제어하는 CAN통신을 이용하여 4012로 전달한다. Localizer 보드에는 TMS320LF2406A를 사용하였다. 최종 데이터는 bluetooth를 통해 PC로 전달된다.

4개의 beacon은 각각 A(0,0,200), B(270,0,200), C(270,270,200), D(0,270,200)[cm]에 설치되었으며, 초음파 수신기는 로봇의 양 바퀴 사이의 중앙에 지상으로부터 22.5cm 높이에 부착되었다.

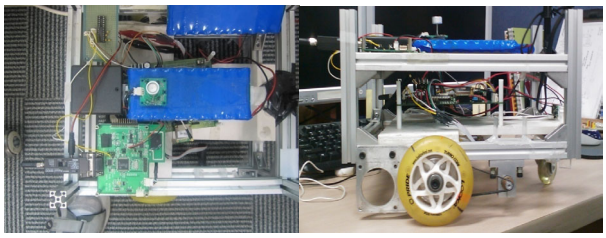


그림 10. 실험에 사용된 이동로봇.
Fig. 10. Mobile robot for the experiment.

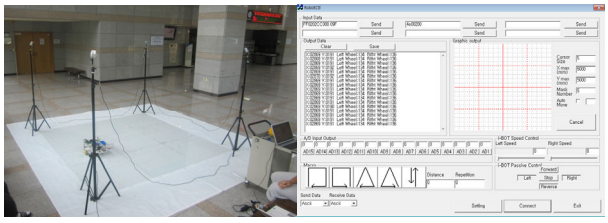


그림 11. 실험 환경과 모니터 프로그램.
Fig. 11. Experimental environment and monitor program.

본 실험은 이동하는 로봇에 대한 오차성능을 평가하는 것이기 때문에 정지상태의 위치오차를 최소화할 필요가 있다. 이를 위해 실험공간을 작게 설정하여 초음파신호의 직접파 세기를 크게 하였고, 실내온도를 온도계로 측정해 온도 보정 계수를 적용해 주었다.

2. 실험 및 고속주행 구간에서의 위치측정 오차분석

이동 로봇이 주행할 때 고속 구간에서 beacon 2개를 사용하는 기존의 방식과 비교해 본 논문에서 제안하는 beacon 1개와 dual compass를 사용하는 방식이 얼마만큼의 정밀한 위치추정이 가능한가를 평가해보기 위해 원 주행 실험과 직선 주행 실험을 하였다. 각 실험은 속도를 변화시키며 저속주행

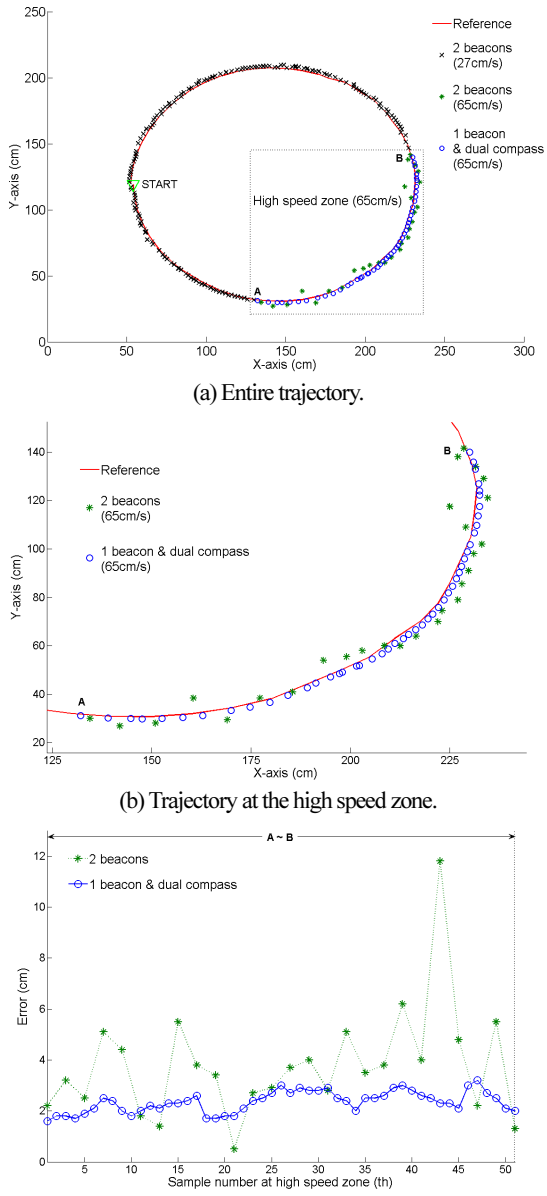
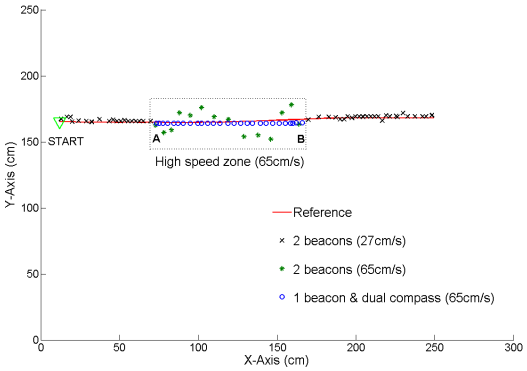


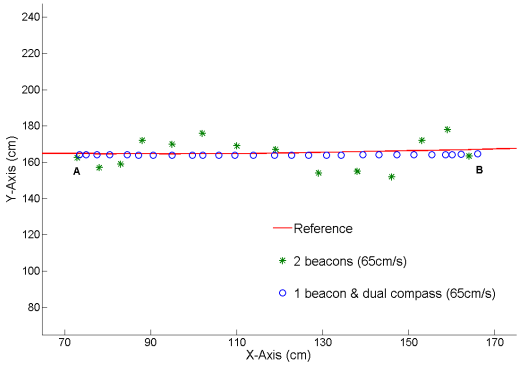
그림 12. 원 주행 실험.
Fig. 12. Circular trajectory driving experiment.

구간에서는 27cm/s의 속도로, 고속 주행구간에서는 65cm/s의 속도로 로봇을 주행 시키며 실험을 하였다.

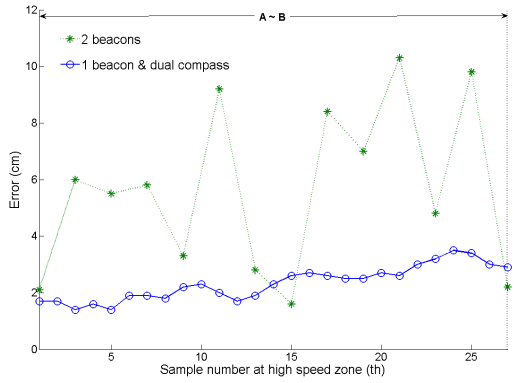
각 실험의 결과를 그림 12, 13을 통해 보여준다. 저속구간에서는 기존의 방식을 사용해도 문제가 없으므로 오로지 고속구간에서만 두 알고리즘의 실험결과를 비교할 수 있도록 그림 12(b)와 13(b)에 나타내었다. 그림 12(c), 13(c)에서는 고속구간에서 두 알고리즘의 오차를 평가해놓았다. 원 주행 실험에서 기존의 방식에 의한 평균오차와 최대오차는 각각 4.27cm, 11.81cm였고, 제안하는 방식에 의한 오차는 각각 2.35cm, 3.24cm였다. 그리고 직선 주행 실험에서 기존의 방식에 의한 오차는 각각 5.63cm, 10.37cm였고, 제안하는 방식에 의한 오차는 각각 2.33cm, 3.56cm였다. 두 실험에서 모두 본 논문에서 제안하는 알고리즘의 효과를 명백하게 확인할 수 있었다. 각 실험의 오차를 요약하여 표 1에 정리하였다.



(a) Entire trajectory.



(b) Trajectory at the high speed zone.



(c) Error comparison at the high speed zone.

그림 13. 직선 주행 실험.

Fig. 13. Straight line driving experiment.

표 1. 고속 구간에서의 오차 평가[cm].

Table 1. Error comparison at high speed zone[cm].

Error	1 beacon & dual compass		Conventional method	
	Average	Max.	Average	Max.
Circle	2.35	3.24	4.27	11.81
Straight line	2.33	3.56	5.63	10.37

VI. 결론

본 논문에서는 2개 이상의 beacon을 사용하는 일반적인 초음파 위치인식 시스템에서 문제가 되는 고속 이동로봇의 위치추정을 해결하기 위해 하나의 beacon만을 사용하고 dual compass를 이용하여 위치를 추정하는 효과적인 위치인식 알고리즘을 제시하였다. 이 방법을 통하여 2개 이상의 beacon을 사용하는 기존의 시스템에서 소요되는 샘플링 타임을 1/2 이상 줄일 수 있었으며, dual compass을 사용함으로 인해 주변으로부터 받는 자기장의 영향에도 불구하고 오차가 거의 없는 방향각 정보를 얻을 수 있었다. 그로 인해 로봇이 고속으로 주행하는 경우에도 저속주행에서처럼 정밀하게 위치 추정이 가능함을 실험을 수행하고 오차를 분석해 봄으로써 확인할 수 있었다.

본 알고리즘은 정교한 위치 추정이 필요한 곳, 가변 속도를 가진 물체의 위치 추정이 필요한 곳, 장애물이 많아서 2개 이상의 beacon에서의 수신이 원활하지 못한 곳 또는 위치 추정 지연을 최소한으로 하여 고속에서 안전한 자율 주행이 필요한 시스템에 유용한 알고리즘이라 판단된다. 또한 특별한 장비나 고가의 하드웨어의 추가가 없이 저렴하게 시스템을 구축할 수 있기 때문에 실용적으로 활용될 수 있을 것이라 생각한다.

참고문헌

[1] G. Silveira, E. Malis, and P. Rives, “An efficient direct approach to visual SLAM,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, issue 5, pp. 969-979, Oct. 2008.

[2] S. Hernandez, C. A. Morales, J. M. Torres, and L. Acosta, “A new localization system for autonomous robots,” *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1588-1593, Sep. 2003.

[3] J. Gonzalez, J. L. Blanco, C. Galindo, A. Oriz-de-Galisteo, J. A. Fernandez-Madrigal, F. A. Moreno, and J. L. Martinez, “Mobile robot localization based on ultra-wide-band ranging: a particle filter approach,” *Journal of Robotics and Autonomous System*, vol. 57, no. 5, pp. 496-507, May 2009.

[4] S. Han, H. Lim, and J. Lee, “An efficient localization scheme for a differential-driving mobile robot cased on RFID system,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 6, pp. 3362-3369, Dec. 2007.

[5] G. Bleser and D. Stricker, “Advanced tracking through efficient image processing and visual-inertial sensor fusion,” *Journal of Computer and Graphics*, vol. 33, no. 1, pp. 59-72, Feb. 2009.

[6] D. Lo, R.A. Goubran, R. M. Dansereau, G. Tompson, and D. Schulz, “Robust joint audio-video localization in video conferencing using reliability information,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, no. 4, pp. 1132-1139, Aug. 2004.

[7] P. Krammer and H. Schweinzer, “Localization of object edges in

arbitrary spatial positions based on ultrasonic data," *IEEE Sensors Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 203-210, Feb. 2006.

[8] S. B. Lazarus, I. Ashokaraj, A. Tsourdos, R. Zbikowski, P. M. G. Silson, N. Aouf, and B. A. White, "Vehicle localization using sensors data fusion via integration of covariance intersection and interval analysis," *IEEE Sensors Journal*, vol. 7, no. 9, pp. 1302-1314, Sep. 2007.

[9] P. U. Lima, "A Bayesian approach to sensor fusion in autonomous sensor and robot networks," *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 10, no. 3, pp. 22-27, June 2007.

[10] C. Tsai, "A localization system of a mobile robot by fusing dead-reckoning and ultrasonic measurements," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 47, no. 5, pp. 1399-1404, Oct. 1998.

[11] J. Yun, S. Kim, and J. Lee, "Robust positioning a mobile robot with active beacon sensors," *LNAI 4251*, ISSN 0302-9743, Part I, pp. 890-897, Oct. 2006.

[12] S. Kim, J. Lee, and I. O. Lee, "Precise indoor localization system for a mobile robot using auto calibration algorithm," *The 13th International Conference on Advanced Robotics*, pp. 206-211, Aug. 2007.

[13] S. Han, I. Kang, and J. Lee, "Implementation of spread pose control using dual-electronic compasses," *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, pp. 69-70, Jan. 2009.

[14] J. Ko, W. Kang, Y. Kim, and J. Lee, "Robust electric compass to dynamic magnetic field interface," *Institute of Control, Automation, and Systems Engineers*, vol. 11, no. 1, pp. 27-33, Jan. 2005.

[15] K. Lee, Y. Kim, J. Yun, and J. Lee, "Magnetic-interference-free dual-electric compass," *Sensors and Actuators*, vol. 120, no. 2, pp. 441-450, May 2005.

장 원 석

2009년 부산대학교 전자전기공학부 졸업. 2009년~현재 부산대학교 대학원 전자전기공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 지능로봇 제어, 위치인식, sensor application.

이 장 명

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1982년 동 대학원 석사. 1990년 USC 공학박사. 1992년~현재 부산대학교 전자전기공학부 정교수. 관심분야는 지능로봇 시스템 설계 및 제어, 마이크로 프로세서 응용, 센서융합, Navigation/Localization.