

다수의 초음파 송수신기를 이용한 이동 로봇의 정밀 실내 위치인식 시스템의 개발

Development of Precise Localization System for Autonomous Mobile Robots using Multiple Ultrasonic Transmitters and Receivers in Indoor Environments

김 용 휘, 송 의 규, 김 병 국*
(Yong-Hwi Kim¹, Ui Kyu Song¹, and Byung Kook Kim¹)

¹Korea Advanced Institute of Science and Technology

Abstract: A precise embedded ultrasonic localization system is developed for autonomous mobile robots in indoor environments, which is essential for autonomous navigation of mobile robots with various tasks. Although ultrasonic sensors are more cost-effective than other sensors such as LRF (Laser Range Finder) and vision, they suffer inaccuracy and directional ambiguity. First, we apply the matched filter to measure the distance precisely. For resolving the computational complexity of the matched filter for embedded systems, we propose a new matched filter algorithm with fast computation in three points of view. Second, we propose an accurate ultrasonic localization system which consists of three ultrasonic receivers on the mobile robot and two or more transmitters on the ceiling. Last, we add an extended Kalman filter to estimate position and orientation. Various simulations and experimental results show the effectiveness of the proposed system.

Keywords: ultrasonic transmitter, ultrasonic receiver, matched filter, least squares method, extended Kalman filter

I. 서론

첨단 기술의 발전과 더불어 인간의 삶의 질을 높이기 위한 자율 이동 로봇(autonomous mobile robot)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, 이동 로봇이 사용자의 명령에 따라, 다양한 작업을 수행하기 위해서는 내비게이션(navigation) 기능이 필수적이다. 그러므로 로봇의 실내 위치인식 시스템(indoor localization system)은 로봇의 독립 주행을 위한 필수 능력이다.

데드-레코닝 방법(dead-reckoning method)은 바퀴 이동 로봇(WMR: Wheeled Mobile Robot)의 현재 위치를 계산하는데 광범위하게 사용되어 왔지만, 바퀴의 미끄러짐이나 지면의 굴곡 때문에 위치 계산시 누적 오차가 발생할 수 있다. 즉, 이동 로봇이 먼 거리를 이동할 경우, 위치 및 방향 계산 오차가 누적되어 로봇의 실제 위치를 측정하는데 실패할 가능성이 있다[1]. 따라서 이동로봇의 위치와 방향을 비교적 정확하게 예측하기 위해서 외부 센서가 필요하다.

LRF (Laser Range Finder) 센서는 높은 정확도 때문에 실내 위치인식 분야와 SLAM [2] 분야에서 광범위하게 사용되지만, 높은 센서 가격으로 인하여 가격 효율적인 면에서 떨어진다. 반면에, 초음파 센서(ultrasonic sensor)는 낮은 비용 때문에 가

격 효율적인 위치인식 시스템에서 광범위하게 적용되고 있다.

초음파 송수신기를 천정 위의 정해진 위치에 배치하고, 초음파 수신기들을 로봇 위에 배치한다. 로봇이 초음파 신호를 발생시킬 송수신기를 선택하면, 해당 송수신기에서는 초음파 신호를 발생시킨다. 로봇 위에 설치된 수신기에서 수신한 초음파 신호를 이용하여 시간 차를 구하게 되고, 이로부터 다수의 송, 수신기들 사이의 거리 데이터를 얻을 수 있다. 이동로봇은 이러한 거리데이터를 이용하여 로봇의 위치 및 방향을 측정하게 된다. 이를 초음파 비컨 위치인식 시스템(ultrasonic beacon positioning system)이라고 한다. MIT에서 개발한 크리켓(cricket) 시스템[3]이 대표적인 초음파 비컨 위치인식 시스템이다. 그러나 초음파 위치인식 시스템에 대해서 다양한 연구가 이루어지고 있음에도 불구하고, 여전히 위치인식 시스템의 위치 및 방향에 적지 않은 오차가 존재한다.

본 논문에서는 경제적인 이동 로봇의 위치 및 방향 계산의 신뢰도가 높은 초음파 위치인식 시스템에 대해 다룬다. 제안하는 시스템은 전역 좌표계(global coordinate)상에서 위치를 알고 있는 다수의 초음파 송수신기들과 이동 로봇 위에 배치된 다수의 초음파 수신기들로 구성이 된다. 본 논문에서는 구성된 시스템을 이용하여 이동 로봇의 위치와 방향을 정밀 측정하기 위해서 3가지 관점으로 오차의 원인을 분석하였다.

먼저, 초음파 수신기는 잡음이 있는 초음파 신호를 수신하기 때문에, 거리 계산시 정확한 측정이 쉽지가 않다. 대부분의 초음파 거리 측정 시스템에서는 문턱값(threshold)을 이용하여 수신기에서 초음파 신호를 인식을 한다. 하지만, 문턱값을 낮게 정할 경우 거리값이 잡음에 민감하고, 문턱값을 높

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 1. 29., 수정: 2010. 6. 28., 채택확정: 2011. 1. 27.

김용휘, 김병국: 한국과학기술원 전자전산학과 전기전자전공

(yhkim@rtcl.kaist.ac.kr/bkkim@ee.kaist.ac.kr)

송의규: 한국과학기술연구원 로봇·시스템본부 영상미디어센터

(uksong@imrc.kist.re.kr)

* 본 연구는 (고려대학교 로봇자율주행기술 전문인력양성센터를 통한) 지식경제부/한국산업기술진흥원 융복합형로봇전문인력양성사업의 지원으로 수행되었음.

계 정할 경우 실제 거리보다 계산된 거리 값이 항상 크게 계산된다. 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 거리계산에 정합 필터(matched filter) [4]를 적용한다. 정합 필터는 잡음의 효과를 줄여, 높은 정확도를 가지는 초음파 거리 측정 시스템에 광범위하게 활용되고 있다. 그러나 정합 필터는 컨볼루션(convolution) 계산이 필요하기 때문에, 계산 복잡도가 크다는 단점을 가지고 있다. 그러므로 본 논문에서는 계산 복잡도를 크게 줄여 임베디드(embedded) 제어 장치에서도 계산이 가능한 정합 필터 알고리즘을 제안한다.

다음으로 초음파의 송, 수신기의 수에 따라 이동 로봇의 위치 및 방향 정확도가 영향을 받는다. 특히, 위치와 방향 정보를 모두 얻기 위해서는 최소한 2개의 초음파 수신기가 이동 로봇 위에 배치되어야 한다. 만약 초음파의 수신기의 수가 늘어나게 되면 더 많은 거리 정보를 얻을 수 있으므로, 위치와 방향 오차를 줄일 수 있을 것이나, 가격이 상승한다. 이러한 관점에서 본 논문에서는 3개의 수신기를 이용한 위치인식 시스템을 제안한다.

마지막으로 확장 칼만 필터(extended Kalman filter) [5,6]를 적용하였다. 확장 칼만 필터는 이동하고 있는 로봇의 위치 추정 문제에서 센서 데이터 융합 알고리즘으로 활용되고 있다. 이 확장 칼만 필터를 본 시스템에 적용하여 이동하고 있는 로봇의 오도메트리(odometry) 정보로부터 얻은 위치 계산 값과 초음파 센서로부터 계산된 위치 계산 값을 융합하여 로봇의 위치 및 방향 오차와 그 편차를 줄일 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 II장에서는 초음파 위치인식 시스템의 구성에 대하여 설명한다. II장의 1절에서는 정합 필터의 계산 간략화 알고리즘을 다룬다. 그리고 정합 필터로부터 계산된 거리 데이터를 이용하여 II장의 2절에서는 3개의 초음파 수신기를 이용한 위치인식 시스템을 구성하는 법에 대하여 다룬다. II장의 3절에서는 적용된 확장 칼만 필터를 다룬다. III장에서는 제안한 시스템의 효용성을 시뮬레이션과 실험으로 검증하고 IV장에서는 본 논문의 결론에 대하여 서술한다.

II. 초음파 위치인식 시스템(ultrasonic localization system)

최근에 Lin [7]은 2 개의 송신기가 천정에 고정되어 있고, 3 개의 수신기가 이동 로봇에 있을 때, 로봇의 위치 및 방향 계산법에 대하여 제안하였다. 이 방법은 3차원 공간 내에서 로봇의 위치를 계산할 수 있지만, 거리 데이터가 부정확한 경우 신뢰가 상당히 떨어지는 위치 및 방향 인식 결과를 가질 수 있다[8]. 또한 Lin의 수식은 2개의 초음파 송신기로 한정해서 구한 수식이므로, 3개 이상의 초음파 송신기로부터 거리 데이터를 얻을 경우, 그 정보들을 활용할 수 없다. S.J. Kim [8]은 천정에 임의의 수로 배치된 송신기와 로봇에 배치된 3개의 수신기 사이의 거리를 이용하여 위치와 방향을 계산하는 방법을 제안했다. 이 방법은 2개 이상의 송신기에서도 위치 계산이 가능하지만, 측정된 송수신기 사이의 거리 데이터를 이용하여 바로 로봇의 위치와 방향을 계산하는 구조를 사용하였기 때문에, 계산이 복잡하다는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 먼저, 거리 데이터로부터 3개의 초음파 수신기의 위치를 먼저 구하고, 그 위치 데이터들을 최소 오차자승법(least error squares method)을 이용하여 로봇의 위치와

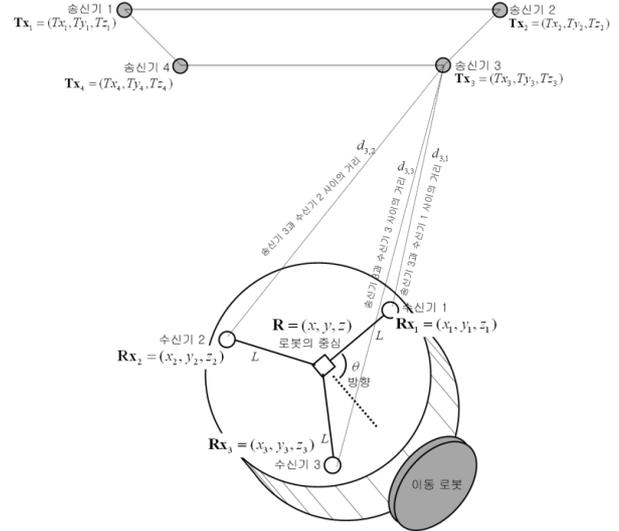


그림 1. 초음파 위치인식 시스템.

Fig. 1. Ultrasonic localization system.

방향을 인식하는 시스템을 제안한다.

그림 1은 제안한 초음파 위치인식 시스템을 간략하게 나타낸 그림이다. N개의 초음파 송신기가 천정 위에 고정된 점 $Tx_1 \sim Tx_N$ 에 배치하고, 3개의 초음파 수신기는 로봇 위에 배치한다. 이 때 각 초음파 수신기는 정삼각형의 3개의 꼭지점에 배치하고, 정삼각형의 중심이 로봇의 중심이 되도록 배치한다. 로봇의 위치를 $R = (x, y, z)$ 이라 하고, 방향을 θ 라 하면, 제안하는 시스템은 R 와 θ 를 초음파 송, 수신기 사이의 거리 정보들을 이용하여 구하게 된다. 이 때, $z = 0$ 으로 가정한다.

초음파 송, 수신기 사이의 거리 값을 얻기 위해서, 이동 로봇은 하나의 송신기를 선택하고, 초고주파 통신으로 메시지를 보낸다. 그 후에, 로봇으로부터 메시지를 받은 송신기는 초음파 신호와 초고주파 메시지를 로봇으로 전송한다. 수신기에서는 송신기가 전송한 초고주파 메시지 송신 시간과 초음파 신호를 받은 시간 사이의 시간 간격을 정합 필터를 이용하여 계산한다. 그 시간 간격에 초음파의 속도를 곱하면, 송, 수신기 사이의 거리를 알 수 있고, 그 거리 값을 이용하여 이동 로봇의 위치와 방향을 계산한다. 그리고 이동하고 있는 로봇의 위치 및 방향 오차를 줄이기 위하여 정합 필터, 최소 자승법, 확장 칼만 필터를 적용한다.

1. 정합 필터(matched filter)

초음파 센서는 송신기와 수신기 사이의 초음파 신호가 전송되는데 걸리는 시간으로부터 송, 수신기 사이의 거리를 측정하는 센서이다. 이 때 수신부에서 수신한 초음파 신호는 다음과 같다.

$$m(t) = a \cdot s(t - t_d) + n(t) \tag{1}$$

여기서 $s(t)$ 는 송신기에서 송신한 신호, a 는 송신 신호의 감쇄 계수, t_d 는 시간 지연, $n(t)$ 는 잡음 신호이다. 여기에 초음파 속도를 c 라 하면 송, 수신기 사이의 거리 d 는 다음과 같다.

$$d = c \cdot t_d \tag{2}$$

초음파 거리 인식 시스템에서 수신된 신호의 크기가 정해진 문턱값을 초과하는 시간을 측정하여 송수신 시간 지연 t_d 를 계산하는 방법은 간단한 계산 때문에 광범위하게 사용된다. 하지만, 문턱값을 낮게 정할 경우 거리 값이 잡음에 민감하고, 문턱값을 높게 정할 경우 실제 거리보다 계산된 거리 값이 항상 크게 계산된다.

정합 필터는 수신된 신호의 처리에 잡음의 영향을 최소화시키는, 즉 신호 대 잡음비(SNR: Signal to Noise Ratio)를 최대화하는 신호처리 방법이다. 정합 필터는 잡음의 효과를 줄여, 높은 정확도를 요구하는 초음파 거리 측정 시스템에 광범위하게 활용되고 있다. 정합 필터를 초음파 거리 측정 시스템에 적용시킬 경우, 신호 대 잡음비가 최대값을 가질 때, 그 시간이 시간 지연 t_d 가 된다. 그러나 정합 필터는 컨볼루션(convolution) 계산이 필요하기 때문에, 계산 복잡도가 크다는 단점을 가지고 있다.

정합 필터 출력은 송신 신호와 수신 신호를 컨볼루션한 결과이다. 샘플링(sampling) 주기를 T라고 하면, 정합 필터의 출력은 다음과 같다.

$$y(jT) = \sum_{k=0}^{\infty} s(kT)m((k-j)T) \quad (3)$$

여기서 송신 신호 $s(t)$ 는 초음파 송신기에서 발생한 시간 지연이 없는 신호이다. $y(jT)$ 의 값을 최대로 하는 j 를 구하면, 시간지연은 jT 로 구해진다. 통상적으로 k 는 0부터 무한대가 아닌 충분히 큰 값까지 계산한다.

1.1 기존의 정합 필터의 계산 간략화 알고리즘[11]

초음파 신호 $s(t)$ 는 포락선(envelope)의 크기 $e(t)$ 와 사인(sine) 함수의 곱으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = e(t)\sin(\omega t) \quad (4)$$

여기서 ω 는 초음파의 각속도를 나타낸다. 만약 포락선 $e(t)$ 가 송신 초음파의 한 주기시간 p 내에서는 일정하다고 근사화하면, $s(t)$ 는 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$s(t) = e_i \sin(\omega t) \quad (5)$$

여기서 송신 초음파 주기수와 송신기의 잔여 진동에 의하여 송신 신호의 의미 있는 구간은 L 주기로 제한된다. 즉 i 의 범위는 $ip \leq t < (i+1)p, i = 0, 1, \dots, k, \dots, L-1$ 이다. 이로부터 식 (1)의 수신 초음파 신호 $m(t)$ 는 아래와 같이 근사화시킬 수 있다.

$$m(t) = g_i \sin(\omega(t-t_d)) + n(t), \quad ip \leq t < (i+1)p, i = 0, 1, \dots, k, \dots, M-1 \quad (6)$$

여기서 g_i 는 수신 초음파 신호의 포락선 크기, $n(t)$ 는 잡음이고, M 은 원하는 최대 측정거리 값이 된다.

만약 시간지연 t_d 를 신호의 주기시간 p 로 나눈다면, t_d 는 주기시간 p 로 나눈 몫 n 과 나머지 ϕ 로 나타낼 수 있다.

$$t_d = n \cdot p + \phi \quad (7)$$

여기서 n 은 정수이고, ϕ 는 p 미만의 실수이다. 특히 $\omega\phi$ 는 $m(t)$ 와 $s(t)$ 사이의 위상 지연(phase delay)을 나타낸다.

수신신호의 i -번째 주기에서의 C_i, S_i 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$C_i = \frac{1}{p} \int_{ip}^{(i+1)p} m(t)\sin(\omega t)dt, \quad (8)$$

$$S_i = \frac{1}{p} \int_{ip}^{(i+1)p} m(t)\cos(\omega t)dt$$

그런데 잡음 $n(t)$ 의 주파수는 송신신호 각 주파수 ω 와 관련이 없으므로, 식 (8)을 식 (5)에 의해 변형하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_i = \frac{g_i}{p} \int_{ip}^{(i+1)p} \sin(\omega(t-ip-\phi))\sin(\omega t)dt = \frac{g_i}{2} \cos(\omega\phi) \quad (9)$$

$$S_i = \frac{g_i}{p} \int_{ip}^{(i+1)p} \sin(\omega(t-ip-\phi))\cos(\omega t)dt = -\frac{g_i}{2} \sin(\omega\phi)$$

이로부터 포락선의 크기 g_i 와 위상 지연 $\omega\phi$ 는 C_i, S_i 로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g_i = \sqrt{C_i^2 + S_i^2} \quad (10)$$

$$\omega\phi_i = \text{atan2}(S_i, C_i) \quad (11)$$

식 (9)는 연속 시간 영역에서의 C_i, S_i 이므로, 이를 이산 시간 영역으로 바꾸어 주어야 한다. 샘플링 주기 T를 초음파 주기시간 p 의 정수배가 되도록, 즉 $p = NT$ 가 되도록 T를 결정하면 C_i, S_i 는 아래 식으로 근사적으로 계산 된다.

$$C_i = \frac{T}{p} \sum_{j=0}^{N-1} m((iN+j)T)\sin(j\omega T) \quad (12)$$

$$S_i = \frac{T}{p} \sum_{j=0}^{N-1} m((iN+j)T)\cos(j\omega T)$$

특히 $N=4$ 일 경우, 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$C_i = \frac{1}{4}[m((4i+1)T) - m((4i+3)T)] \quad (13)$$

$$S_i = \frac{1}{4}[m((4i)T) - m((4i+2)T)]$$

즉 (13)을 이용하면 어려운 계산 없이 쉽게 포락선의 크기 g_i 를 구할 수 있다는 것을 의미한다. 식 (11)로부터 얻은 위상지연을 고려하여, 수신신호의 포락선의 크기를 수정하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_i = g_i \times (1 - \phi_i/p) + g_{i+1} \times \phi_i/p = g_i + (g_{i+1} - g_i) \times \phi_i/p \quad (14)$$

이를 이용하면 정합 필터의 계산 결과는 다음과 같다.

$$y(j) = \sum_{k=0}^{M-k-j} e_k h_{k+j} \quad (15)$$

이러한 주기 기반의 정합 필터 계산은 식 (3)의 정합 필터 계산에 비하여 계산 복잡도를 $1/N^2$ 로 현저하게 줄일 수 있는 장점이 있다.

실제 시간 지연 t_d 를 구하기 위하여 $y(jT)$ 의 최대 값을 가지는 j 값을 찾아 n 으로 설정한다.

$$n = \arg \max_j y(j) \tag{16}$$

1.2 제안하는 계산 간략화 알고리즘

[11]의 알고리즘은 정합 필터의 계산 복잡도를 $1/N^2$ 로 크게 줄일 수 있지만, 다수의 초음파 송, 수신기를 이용한 위치 인식 시스템에 적용하기에는 여전히 계산량이 적지 않다. 이에 대한 주요 원인은 실수(floating point)형 계산을 반복해서 계산하기 때문이다. 따라서, 3가지의 관점에서 알고리즘을 수정하고자 한다.

먼저 식 (10)에서 C_i, S_i 값은 A/D 변환기의 출력 값으로부터 계산하기 때문에, 정수 값을 가지도록 만들 수 있다. 하지만 제공된 계산을 경우, 일반적으로 실수형 계산이 필요하고, 오차를 감안하고 정수 부분만 취하도록 정수형 제공된 계산을 하더라도, 많은 양의 루프 반복이 필요하다. 정합 필터는 $s(t)$ 와 $m(t)$ 의 컨볼루션 값이 최대값을 가지게 하는 t 의 값을 찾는 것이다. 그런데 e_i 와 g_i 는 양수이므로, e_i 를 e_i^2 로, g_i 를 g_i^2 로 바꾸어 식 (5), (6)을 아래와 같이 수정할 수 있다.

$$s'(t) = e_i^2 \sin(\omega t) \tag{17}$$

$$m'(t) = g_i^2 \sin(\omega(t - t_d)) + n(t) \tag{18}$$

이로부터 $s'(t)$ 와 $m'(t)$ 를 이용하여 정합 필터를 계산하여 최대값을 가지는 t 의 값을 구하게 되면 $s(t) * m(t)$ 의 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있다. 그러므로 식 (10)에서 제공된 계산을 제거하여 다음의 식으로 수정하여 정합 필터를 수행하여도 계산 결과는 동일하고, 제공된 계산을 없앨 수 있어서, 계산 복잡도를 크게 줄일 수 있다.

$$g_i = C_i^2 + S_i^2 \tag{19}$$

두번째, 위상 지연 $\omega\phi$ 의 계산시 룩업 테이블(lookup table)을 이용한다. 식 (11)에서 역탄젠트(arc-tangent) 계산은 실수형의 삼각함수 계산이 필요 하므로, 계산량 증가에 영향을 준다. 그러므로, 역탄젠트 계산 부분을 1차원 룩업 테이블로 만들어 메모리에 저장시킨 후, C_i, S_i 의 값에 따라 두 개의 근접 값을 룩업 테이블에서 읽은 후 선형 보간을 통하여 간단히 계산함으로써 계산량을 현저히 줄일 수 있다.

마지막으로 위상지연 $\omega\phi$ 를 고려한 포락선 크기 계산 부분인 식 (14)를 정수형 계산으로 변형시킨다. 소수 부분 ϕ 의 경우 $0 \leq \phi < 1$ 값을 가지므로, h_i 를 계산 하는 부분은 실수 계산을 하게 된다. 계산량을 개선하기 위하여 이 역시 정수 계산으로 변형 시킨다. 먼저 ϕ 를 다음의 식으로 변형시킨다.

$$\phi \times 2^{10} = \phi_n + \phi_p \tag{20}$$

ϕ_n : integer quotient, ϕ_p : $0 \leq \phi_p < 1$

그리고 계산된 ϕ_n 을 취하고 ϕ_p 는 버린다. 이 경우 약간의 오차가 생길 수 있지만, 그 양은 크지 않다. 여기서 $1024=2^{10}$ 이므로, 식 (14)는 식 (21)로 변형시킬 수 있다.

$$h_i = g_i + (g_{i+1} - g_i) \cdot \frac{\phi_n}{2^{10}} \tag{21}$$

$= g_i + ((g_{i+1} - g_i) \cdot \phi_n \gg 10)$

여기서 g_i, g_{i+1}, ϕ_n 모두 정수 값을 가지므로, 2^{10} 으로 나누어주는 계산은 10비트의 우측 시프트(right shift) 연산으로 대체할 수 있다. 시프트 연산의 경우 나눗셈 연산보다 적은 양의 계산 복잡도를 가지게 되므로, 계산량을 감소시킬 수 있다.

2. 세 개의 수신기를 이용한 초음파 위치인식 시스템

로봇의 위치와 방향을 계산하기 위해서는, 먼저 3개의 초음파 수신기 위치 ($\mathbf{R}x_1, \mathbf{R}x_2, \mathbf{R}x_3$)를 거리 값으로부터 계산하여야 한다. 만약, 이동 로봇이 2개의 송신기로부터 거리 값을 얻었으면, 2차 방정식(quadratic equation) [9]을 이용하여 각 수신기의 위치를 알 수 있고, 3개 이상의 초음파 송신기로부터 거리 값을 얻었으면, 최소 자승법(least squares method) [10]을 이용하여 각 수신기의 위치를 구할 수 있다. 이 때, 3개의 초음파 수신기들은 로봇 위의 평면상에 위치하므로, 각 초음파 수신기의 z좌표는 $z_1 = z_2 = z_3 = 0$ 로 가정하고 계산할 수 있다.

측정된 각 초음파 수신기의 위치를 이용하여 실제 로봇의 위치와 방향을 측정하는 단계로 방법은 그림 2에 따른다. 거리 측정을 이용하여 측정된 초음파 수신기의 위치를 $\mathbf{R}x'_1, \mathbf{R}x'_2, \mathbf{R}x'_3$ 라하고, 실제 초음파 위치를 $\mathbf{R}x_1, \mathbf{R}x_2, \mathbf{R}x_3$ 라 하면, 측정된 각 초음파 수신기의 위치와 실제 초음파 위치 사이의 거리 오차 e_1, e_2, e_3 는 아래와 같다.

$$e_1 = \|\mathbf{R}x'_1 - \mathbf{R}x_1\|_2 = \sqrt{(x'_1 - x_1)^2 + (y'_1 - y_1)^2}$$

$$e_2 = \|\mathbf{R}x'_2 - \mathbf{R}x_2\|_2 = \sqrt{(x'_2 - x_2)^2 + (y'_2 - y_2)^2} \tag{22}$$

$$e_3 = \|\mathbf{R}x'_3 - \mathbf{R}x_3\|_2 = \sqrt{(x'_3 - x_3)^2 + (y'_3 - y_3)^2}$$

그런데 실제 초음파의 위치 $\mathbf{R}x_1, \mathbf{R}x_2, \mathbf{R}x_3$ 를 실제 로봇의 위치 $\mathbf{R} = (x, y)$ 과 방향 θ , 초음파 수신기와 중심 사이의 거리 L 로 나타내면 아래와 같다.

$$x_1 = x + L \cos \theta, \quad y_1 = y + L \sin \theta$$

$$x_2 = x + L \cos(\theta + 120^\circ), \quad y_2 = y + L \sin(\theta + 120^\circ) \tag{23}$$

$$x_3 = x + L \cos(\theta - 120^\circ), \quad y_3 = y + L \sin(\theta - 120^\circ)$$

여기서 식 (22)에 식 (23)를 대입하면, 아래의 식을 얻을 수 있다.

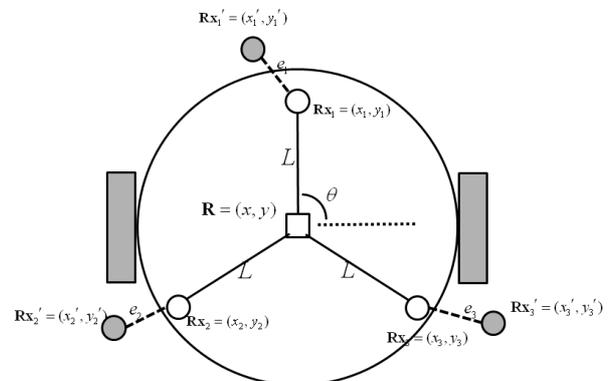


그림 2. 제안하는 위치인식 시스템.
Fig. 2. Proposed localization system with three receivers.

$$\begin{aligned}
 e_1 &= \sqrt{(x'_1 - x - L \cos \theta)^2 + (y'_1 - y - L \sin \theta)^2} \\
 e_2 &= \sqrt{(x'_2 - x - L \cos(\theta + 120^\circ))^2 + (y'_2 - y - L \sin(\theta + 120^\circ))^2} \\
 e_3 &= \sqrt{(x'_3 - x - L \cos(\theta - 120^\circ))^2 + (y'_3 - y - L \sin(\theta - 120^\circ))^2}
 \end{aligned} \tag{24}$$

그런데 이동 로봇의 위치와 방향은 거리 오차 e_1, e_2, e_3 의 제곱의 합을 최소화 시키는 식 (25)의 최소 오차 자승 문제 (least error squares problem)의 해로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Find } (x, y, \theta) \text{ minimizing } E &= \sum_{i=1}^N e_i^2 : \\
 \text{i.e., solve } \frac{\partial E}{\partial x} = 0, \frac{\partial E}{\partial y} = 0, \frac{\partial E}{\partial \theta} = 0
 \end{aligned} \tag{25}$$

위 문제를 풀면 (x, y, θ) 는 아래 식 (26)와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{x'_1 + x'_2 + x'_3}{3}, \quad y = \frac{y'_1 + y'_2 + y'_3}{3} \\
 \theta &= \text{atan2}(\beta, \alpha) \\
 \alpha &= (x'_1 - x) - \frac{1}{2}(x'_2 - x) + \frac{\sqrt{3}}{2}(y'_2 - y) - \frac{1}{2}(x'_3 - x) - \frac{\sqrt{3}}{2}(y'_3 - y) \\
 \beta &= (y'_1 - y) - \frac{\sqrt{3}}{2}(x'_2 - x) - \frac{1}{2}(y'_2 - y) + \frac{\sqrt{3}}{2}(x'_3 - x) - \frac{1}{2}(y'_3 - y)
 \end{aligned} \tag{26}$$

여기서 로봇의 위치 (x, y) 는 측정된 3개의 초음파 수신기의 무게중심(center of mass)이 된다. 이 경우 3개의 초음파 수신기를 이용하면, 기존의 2개의 초음파 수신기를 이용한 위치 인식보다, 더 많은 거리측정 데이터로부터 로봇의 위치 및 방향을 측정하므로, 더 정확한 결과를 얻을 수 있다.

3. 확장 칼만 필터(extended Kalman filter)

이동하고 있는 로봇의 경우, 이동 속도 및 각속도와 같은 오도메트리(odometry) 정보를 로봇으로부터 얻을 수 있다. 이동하는 로봇의 오도메트리 정보를 활용하여 초음파로 측정된 로봇의 위치 및 방향 값과 융합하면, 초음파 위치인식 시스템만 이용하여 계산한 위치 및 방향 정확도를 보다 향상시킬 수 있다. 오도메트리 정보와 초음파로 측정된 위치 및 방향 값의 융합은 확장 칼만 필터 [5,6]를 사용하고 그림 3의 구조를 갖는다.

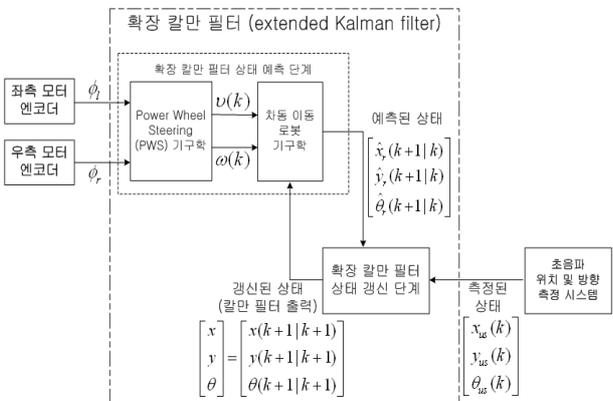


그림 3. 확장 칼만 필터.

Fig. 3. Extended Kalman filter.

3.1 상태 예측 단계(state prediction step)

확장 칼만 필터 상태 예측 단계(prediction step)는 이전 k번 짜에서 갱신된 로봇의 위치와 방향 $X(k) = [x(k), y(k), \theta(k)]^T$ 로부터 다음 예측된 상태를 구하는 단계이다. 이동하는 로봇으로부터 얻은 양 바퀴 회전수 ϕ_l, ϕ_r 를 이용하여, PWS (Power Wheel Steering) 기구학으로부터 로봇의 속도 $v(k)$ 와 각속도 $\omega(k)$ 를 구할 수 있다. PWS방식의 로봇이란 2개의 독립적인 구동 바퀴를 가지는 로봇이고, PWS 기구학은 양 구동 바퀴의 회전수로부터 로봇의 속도와 각속도를 구하는 것을 말한다. 로봇의 속도, 각속도 이전에 갱신된 로봇의 위치와 방향 $[x(k), y(k), \theta(k)]^T$ 을 입력으로 차동 이동 로봇 기구학을 구하면 로봇의 예측된 상태 $[\hat{x}_r(k+1|k), \hat{y}_r(k+1|k), \hat{\theta}_r(k+1|k)]^T$ 를 구할 수 있다.

차동 이동 로봇 기구학에 의해서 현재 상태 $X(k)$ 로부터 다음 상태 $X(k+1)$ 을 예측하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 X(k+1) &= f(X(k), u(k), k) + c(k) \\
 f(X(k), u(k), k) &= X(k) + T_s \begin{bmatrix} \cos \theta(k) \cdot v(k) \\ \sin \theta(k) \cdot v(k) \\ \omega(k) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{27}$$

여기서 $u(k) = [v(k), \omega(k)]^T$ 이고, T_s 는 샘플링 주기가 된다. $c(k)$ 는 프로세스 잡음(process noise)으로, 공분산 행렬이 $C(k) = \text{diag}(\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_\theta^2)$ 이고, 평균이 0인 백색 가우시안 잡음(white Gaussian noise)의 형태로 가정하였다.

차동 이동 로봇 기구학 식을 이용하여 $[\hat{x}_r(k+1|k), \hat{y}_r(k+1|k), \hat{\theta}_r(k+1|k)]^T$ 을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \hat{X}(k+1|k) &= f(\hat{X}(k|k), u(k), k) \\
 P(k+1|k) &= F(k)P(k|k)F(k)^T + C(k) \\
 \text{where } F(k) &= \frac{\partial f}{\partial X} \Big|_{X=\hat{X}(k|k)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -T_s \sin \theta(k) \cdot v(k) \\ 0 & 1 & T_s \cos \theta(k) \cdot \omega(k) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{28}$$

여기서 $P(k+1|k)$ 는 예측된 상태의 공분산 행렬(covariance matrix)을 나타낸다.

3.2 상태 갱신 단계(state update step)

확장 칼만 필터의 상태 갱신 단계에서는 초음파 위치 측정 시스템으로부터 측정된 상태 $[x_{us}(k), y_{us}(k), \theta_{us}(k)]^T$ 와 예측된 상태 $[\hat{x}_r(k+1|k), \hat{y}_r(k+1|k), \hat{\theta}_r(k+1|k)]^T$ 를 융합하여 실제 로봇의 위치와 방향을 추정하는 단계이다. 여기서 초음파 위치 및 방향 측정 시스템은 3개의 초음파 수신기로부터 얻은 위치 및 방향 인식 시스템을 말한다. 이로부터 갱신된 상태 값 $[x(k+1|k+1), y(k+1|k+1), \theta(k+1|k+1)]^T$ 은 확장 칼만 필터의 출력 $[x(k+1), y(k+1), \theta(k+1)]^T$ 이다.

초음파 센서로부터 측정된 상태 $Y(k) = [x_{us}(k), y_{us}(k), \theta_{us}(k)]^T$ 와 실제 로봇의 상태 $X(k)$ 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$Y(k) = X(k) + w(k) \tag{29}$$

여기서 $w(k)$ 는 측정잡음(measurement noise)로 공분산 행렬이 $W(k) = \text{diag}(\sigma_w^2, \sigma_v^2, \sigma_\theta^2)$ 이고, 평균이 0인 백색 가우시안 잡음(white Gaussian noise)의 형태로 가정하였다.

상태를 최적으로 예측하고 갱신하기 위해서는 칼만 이득(Kalman gain) R_k 를 계산 하여야 한다.

$$R_k = P(k+1|k)H(k+1)^T S_1^{-1} \quad (30)$$

여기서

$$S_1 = H(k+1)P(k+1|k)H(k+1)^T + W(k+1),$$

$$H(k+1) = \frac{\partial h}{\partial X} \Big|_{X=\hat{X}(k+1|k)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

이를 바탕으로 갱신 단계의 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + R_k S_2$$

$$P(k+1|k+1) = P(k+1|k) - R_k H(k+1)P(k+1|k) \quad (32)$$

where $S_2 = Y(k+1) - \hat{X}(k+1|k)$

III. 시뮬레이션 및 실험 결과

1. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서는 초음파 수신기의 수와 위치인식 오차 사이의 관계를 분석하였다. 제한한 3개의 초음파 수신기 위치인식 시스템의 효용성을 보이기 위하여 2개의 초음파 수신기 위치인식 시스템과 비교를 하였다. 방의 크기는 800cm(x축) X 600cm(y축)이고, 그 높이는 250cm로 가정하였다. 초음파 송신기는 2개를 배치하였고, 각 위치는 (0,0), (800,0)에 배치하였다. 3개의 초음파 수신기는 중심에서 L=25cm로 정삼각형의 꼭지점에 배치하였고, 2개의 초음파 수신기를 이용한 위치인식 시스템의 경우에는 L=25cm로 로봇 양 끝에 배치하였다고 가정하였다. 이 때, 초음파 거리 인식 최대 오차는 1cm, 그리고 오차 분포는 균일 분포(uniform distribution)를 갖는다고 가정하였다.

표 1과 2는 시뮬레이션 결과이다. 표에서 가로축은 x좌표

표 1. 2개의 수신기를 이용한 위치인식 시스템의 위치 및 방향 인식 오차.

Table 1. Localization error with two receivers.

	(a) Average position error (cm)					(b) Average orientation error (deg)				
	200	300	400	500	600	200	300	400	500	600
170	1.019	1.072	1.093	1.072	1.019	1.689	1.814	1.855	1.814	1.689
250	0.835	0.851	0.86	0.851	0.835	1.263	1.324	1.345	1.324	1.263
330	0.773	0.771	0.772	0.771	0.773	1.064	1.091	1.1	1.091	1.064
410	0.76	0.748	0.746	0.748	0.76	0.956	0.961	0.962	0.961	0.956

표 2. 3개의 수신기를 이용한 위치인식 시스템의 위치 및 방향 인식 오차.

Table 2. Localization error with three receivers.

	(a) Average position error (cm)					(b) Average orientation error (deg)				
	200	300	400	500	600	200	300	400	500	600
170	0.84	0.886	0.904	0.886	0.841	1.114	1.166	1.179	1.145	1.082
250	0.684	0.698	0.705	0.698	0.684	0.906	0.921	0.921	0.908	0.886
330	0.632	0.631	0.632	0.631	0.632	0.836	0.831	0.828	0.822	0.821
410	0.621	0.612	0.609	0.612	0.621	0.82	0.806	0.799	0.798	0.808

의 변화를 나타내고, 세로축은 y좌표 변화를 나타낸다. 결과를 보면, 3개의 초음파 수신기를 이용한 위치인식 시스템의 위치 및 방향 오차가 2개의 초음파 수신기보다 더 줄어드는 것을 볼 수 있다. 즉, 제한하는 초음파 위치인식 시스템이 2개의 수신기를 이용한 시스템 보다 더 정확하다는 것을 알 수 있다.

2. 실험 결과

2.1 실험 환경

실험을 위한 전체 시스템 구성은 그림 4와 같다. 초음파 센서는 Murata사의 MA40S5를 사용하였고, 주제어기는 PC 보다 연산능력이 현저히 떨어지는 모바일 기기에 사용되는 PXA255 ARM 프로세서를 사용한 EZ-X5 보드를 사용하였다. 먼저, PXA255 보드에서 USB로 연결된 Rx모듈에게 특정 Tx 모듈을 지정한 다음, 해당 Tx 모듈에 장착된 초음파 신호를 발사하라고 명령을 하면, 해당 Tx 모듈에서 초음파 신호를 발사하게 된다. 그 후, 로봇 위에 설치된 3개의 초음파 수신기가 신호를 받아들이고, 이를 A/D 컨버팅하여 PXA255보드에 전달한다. 전달 받은 신호로부터 지정한 Tx모듈과 초음파 수신기 사이의 거리를 정합 필터로 계산한다. 이러한 방식으로 모든 Tx와 초음파 수신기 사이의 거리를 측정할 수 있고, 측정된 거리 데이터로부터 로봇의 위치와 방향을 계산한다.

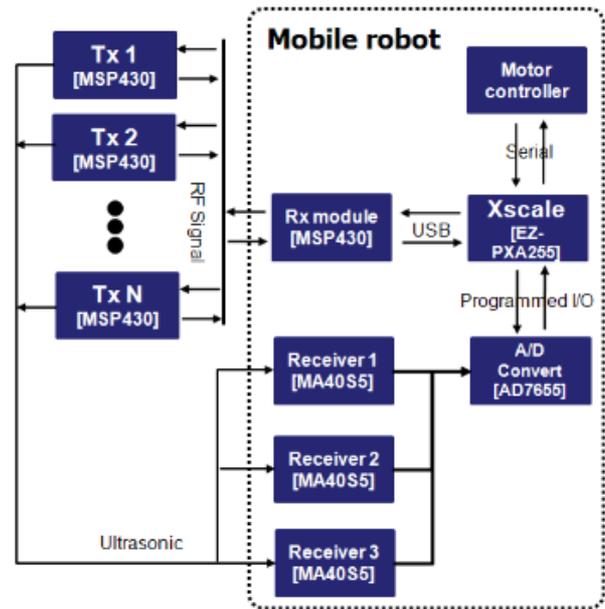


그림 4. 시스템 구성도.

Fig. 4. System diagram.

표 3. 초음파 송, 수신기 수에 따른 위치 및 방향 계산 가능 여부.

Table 3. Computation possibility according to the number of transmitters and receivers.

송신기의 수 \ 수신기의 수	1	2	3
1	X	X	X
2	X	위치/방향	위치/방향
3	위치	위치/방향	위치/방향
4 이상	위치	위치/방향	위치/방향

또한 움직이는 로봇이라고 한다면, 시리얼 통신으로 연결된 모터 제어기로부터 오도메트리 정보를 얻을 수 있고, 이를 확장 칼만 필터를 사용하여 융합한다.

표 3은 송, 수신기 수에 따른 위치 및 방향 계산 가능 여부를 나타낸다. 송신기의 수는 최소 2개가 있어야 위치와 방향을 계산할 수 있다. 수신기는 1개인 경우도 계산이 가능하지만, 그 경우 로봇의 위치만 계산 가능하다. 수신기 2개인 경우에는 위치와 방향 모두 계산할 수 있지만, 앞선 시뮬레이션에서 수신기가 3개인 경우 2개인 경우보다 오차가 적다는 것을 밝혔다. 그러므로 위치와 방향이 계산이 가능하기 위해서는 송신기의 수는 최소 2개, 수신기의 수 역시 최소 2개는 필요하다. 실제 실험을 할 경우, 어떠한 상황에서는 수신기가 3개가 아닌 2개만 보이는 경우, 또는 송신기가 2개가 보이는 경우가 발생한다. 제안하는 알고리즘인 3개의 수신기 위치 인식 알고리즘과 더불어, 수신기가 2개만 계산되어도 위치와 방향이 인식 가능하도록 프로그램을 구성하였다.

2.2 실험 결과

먼저, 제안하는 정합 필터 알고리즘의 효용성을 보여주기 위하여 거리 측정 실험을 하였다. 거리 측정 실험은 계산 시간 측정과 거리 오차 측정 2가지로 나누어 실험하였다.

정합 필터 계산시간 측정은 아래의 3가지의 경우에 대하여 실험하였다.

- 1) 정합 필터
- 2) 정합 필터 + 계산 간략화 알고리즘[11]
- 3) 정합 필터 + 계산 간략화 알고리즘 + 제안하는 정수형 계산 알고리즘

3가지에 대한 계산 시간은 표 3과 같다. 표 4를 보면, 1)원래의 정합 필터 계산은 그 계산 시간이 1095ms로 매우 길다. 하지만, 2) [11]에서 제안한 방법을 사용할 경우 그 계산시간이 매우 줄어들음을 알 수 있다.

여기에 제안하고자 하는 알고리즘 3)은 2)에 3가지 요소(제공근 계산 제거, 역탄젠트 계산시 룩업테이블 사용, 위상 지연을 고려한 포락선 계산시 정수형 계산)를 이용하여 계산하였다. 포락선 계산시 제공근 계산을 제거할 경우, 제공근 계산 시간을 10ms에서 0ms로 없앨 수 있다. 또한, 위상 계산시 역탄젠트 계산을 룩업테이블로 계산 할 경우, 11ms에서 0ms로 크게 줄일 수 있다. 또한 위상 지연을 고려한 포락선 계산시 정수형 계산으로 모두 바꿀 경우, 11ms에서 3ms로 변화시킬 수 있다. 따라서 2) 알고리즘보다 제안하는 3) 알고리즘의 계산 시간이 1/3로 줄어드는 결과를 얻을 수 있다.

표 4. 정합 필터 계산 시간.

Table 4. Calculation time for matched filter.

		알고리즘		
연산		1)	2)	3)
포락선 계산 (ms)	제공근 계산	N/A	10	0
	기타 포락선 계산		11	3
위상 계산 (ms)	역탄젠트 계산		13	0
	기타 위상 계산		1	1
퀵루트선 계산(ms)		1095	9	9
전체 시간(ms)		1095	44	13

표 5. 거리 별 오차 및 표준 편차.

Table 5. Distance statistics (100 iterations).

거리 (cm)	문턱값		제안한 정합 필터	
	평균 오차 (cm)	표준 편차 (cm)	평균 오차 (cm)	표준 편차 (cm)
300	1.8697	1.2475	0.3360	0.3874
400	2.4685	1.67874	0.4435	0.4425
500	2.9634	1.4365	0.1180	0.5553
600	3.0247	1.7698	0.1535	0.5691

거리 오차 측정은 3m에서 6m까지 1m간격으로 각 거리에 대해 100회씩 측정하였다. 표 5는 문턱 값과 정합필터로 측정된 평균 거리와 표준편차를 비교한 표이다. 결과를 보면 정합 필터는 대부분의 거리에서 1cm의 거리 오차를 보이고 있고, 표준 편차 또한 0.3cm ~0.6cm의 분포를 보이는 반면에, 문턱값을 사용한 경우 오차와 표준 편차 모두 크게 나오는 것을 알 수 있다.

다음으로, 거리 오차 데이터를 이용하여 실제 공간 내에서 위치 및 방향 실험을 하였다. 실험 공간의 크기는 200cm(x축) X 200cm(y축), 높이는 2.5m로 설정하고, 천정에 4개의 초음파 송신기를 각 모서리에 배치하였다. 즉, 각 초음파 송신기는 (0, 0), (200,0), (200,200), (0, 200)에 배치하였다. 초음파 수신기는 시뮬레이션 수행 시와 함께 L=25cm로 배치하였다. 표 6은 실험 결과이다.

표 6의 결과를 보면, 초음파 송신기의 수가 늘어나면 대부분, 위치 및 방향 오차가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그리고, 정적인 환경에서는 제안하는 시스템의 위치 오차는 3cm 이하이고, 방향 오차는 3도 이하의 결과를 얻을 수 있다.

앞선 실험은 특정 두 위치에 대한 실험 결과이므로, 전반적인 위치 및 방향 오차를 측정하기 위하여, 다른 실험을 수행하였다. 실험 공간의 크기는 앞선 실험과 달리 300cm(x축) X 300cm(y축), 높이는 2.5m로 설정하고, 천정에 4개의 초음파 송신기를 (50, 50), (250,50), (250,250), (50, 250)에 배치하였다. 그리고 위치는 가로와 세로 모두 각각 30cm 간격으로 11등분 하여, 총 121개의 위치에 대하여 1번씩 위치측정을 하였다. 또한 방향은 180도로 배치하고, 각 위치에서 각도 측정을 하였다. 표 7은 실험 결과이다

표 7의 결과를 보면, 제안하는 시스템의 평균 위치 오차는

표 6. 정적 위치인식 오차(100번 반복 수행).

Table 6. Static localization error (100 iterations).

송신기의 수	2	3	4
평균 위치(cm)	(99.68, 52.17)	(100.29, 48.41)	(100.39, 49.03)
평균 위치 오차(cm)	2.19	1.62	1.04
평균 각도(도)	183.25	178.96	179.08
각도 오차(도)	3.25	1.04	0.92

표 7. 격자 위치에 대한 위치 오차 및 방향오차.

Table 7. Localization error at various positions.

평균 위치 오차(cm)	최대 위치 오차(cm)	평균 방향 오차(도)	최대 방향 오차(도)
1.86	4.07	1.42	5.23

표 8. 동적 위치인식 오차.

Table 8. Dynamic localization error.

	초음파 위치인식 시스템	확장 칼만 필터 사용
평균 위치 오차(cm)	4.2538	3.3370

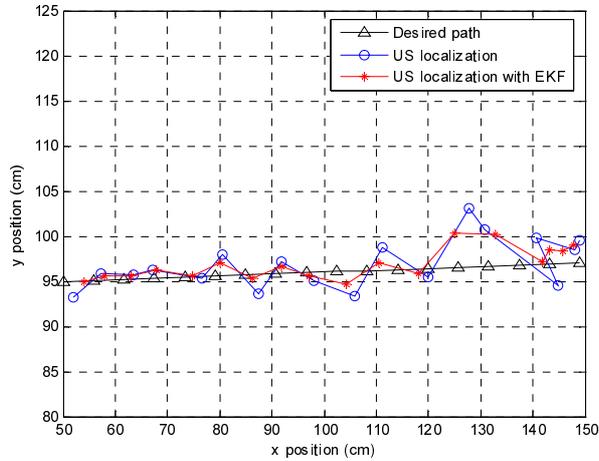


그림 5. 동적 환경에서의 위치인식 결과.

Fig. 5. Localization result in dynamic environment.

1.86cm, 최대 위치 오차는 4.07cm이고, 평균 방향오차는 1.42도, 최대 방향 오차는 5.23도인 것을 볼 수 있다. 이는 상용 제품인 한국 LPS사의 USAT시리즈[12]가 20cm, 나인티 시스템의 igs-U[13]가 10cm의 위치 오차를 가지는 것과 비교하면, 적은 오차를 가지는 것을 알 수 있다.

마지막으로, 확장 칼만 필터 실험을 위하여 로봇이 (50cm, 95cm)에서 (150cm, 95cm)로 일직선으로 0.1m/s로 움직인다고 가정하였다. 실험에 앞서, 초음파 위치인식 시스템 오차의 표준 편차를 $\sigma_{x_{us}}^2 = \sigma_{y_{us}}^2 = 1.5cm^2$ 와 $\sigma_{\theta_{us}}^2 = 1deg^2$ 로 가정하였고, 오도메트리 오차의 표준편차를 $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = 1cm^2$ 와 $\sigma_{\theta}^2 = 1deg^2$ 로 가정하고 실험하였다. 마지막으로 로봇이 이동 중에 위치 및 방향 값은 약 300ms마다 계산을 한다.

그림 5는 확장 칼만 필터를 사용한 실험 결과이고, 평균 위치 오차는 표 8과 같다. 그림과 표로부터, 확장 칼만 필터를 적용하면, 초음파센서만을 사용한 위치인식 결과보다 더 정확한 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

IV. 결론 및 추후 과제

본 논문에서는 3개의 초음파 수신기와 다수의 초음파 송신기로 구성된 초음파 위치인식 시스템에 대하여 기술하였다. 위치 측정 오차를 줄이기 위하여 3가지에 대하여 제안하였다. 먼저, 정밀한 초음파 거리 측정을 위하여 정합 필터를 적용하였고, 계산량을 줄이기 위하여 정합 필터의 계산 간략화 알고리즘[11]을 적용하였다. 하지만 [11]의 알고리즘보다 계산량을 더 줄이기 위하여, 정수형 계산 활용법을 제안하여 적용하였다. 다음으로, 3개의 초음파 수신기를 로봇 위에 배치하여 기존의 2개의 수신기를 이용한 위치인식 시스템보다 더 정확한 계산이 가능하도록 하였고, 다른 3개의 수신기를 이용한 초음파 위치 인식 방법인 [8]보다 계산이 간단하다는

장점을 가지고 있다. 마지막으로 동적 환경에서의 위치인식을 위하여 기존에 동적 위치 인식에서 많이 활용되는 확장 칼만 필터를 적용하였다. 그리고 제안하는 3가지에 대하여 시뮬레이션과 실험 결과로부터, 오차를 현저히 줄일 수 있음을 보였다. 또한, 대부분의 계산 시간을 차지하는 정합 필터의 계산 복잡도를 크게 줄였기 때문에, 임베디드 시스템과 같은 소형 제어 장치에도 정밀한 위치인식 시스템을 쉽게 적용이 가능할 것으로 기대한다.

본 논문에서는 정적 위치 인식 문제를 주로 다루었고, 동적 위치 인식 문제에 대해서는 비교적 느린 속도인 0.1m/s에서 실험을 하였다. 하지만 로봇의 속도를 더 올릴 경우, 위치 및 방향 계산을 하는 약 300ms 동안에도 로봇은 움직이기 때문에, 정확한 위치 결과를 보장하기가 어렵다. 그러므로 추후에는 위치 계산을 하는 동안에 움직이는 로봇의 위치를 보상하여, 더 빠른 속도에서도 비교적 정밀한 동적 위치 인식이 가능하도록 위치 보상 알고리즘 개발할 것이다.

참고문헌

- [1] H. Lin, C. Tsai, J. Hsu, and C. Chang, "Ultrasonic self-localization and pose tracking of an autonomous mobile robot via fuzzy adaptive extended information filtering," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA2003)*, pp. 1283-1290, Sep. 2003.
- [2] H. J. Sohn and B.K. Kim, "An efficient localization algorithm based on vector matching for mobile robots using laser range finders," *Journal of Intelligent and Robotic System*, vol. 51, no. 4, pp. 461-488, Aug. 2008.
- [3] N. Priyantha, A. Chkraborty, and H. Balakrishnan, "The cricket location-support system," *Proc. of ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*, Aug. 2000.
- [4] A. Carson, P. Crilly, and J. Rutledge, *Communication systems: an introduction to signals and noise in electrical communication*, 4th Ed., McGraw Hill International, 2002.
- [5] H. Choset, K. M. Lynch, S. Hutchinson, G. Kantor, W. Burgard, L. E. Kavraki, and S. Thrun, *Principles of robot motion: Theory, algorithms, and implementations*, Cambridge, MA: MIT Press, 2005.
- [6] S. I. Roumeliotis and G. A. Bekey, "An extended Kalman filter for frequent local and infrequent global sensor data fusion," *Proc. of the Sensor Fusion and Decentralized Control in Autonomous Robotic Systems (SPIE)*, Pittsburgh, PA, USA, pp. 11-22, 14-15, Oct. 1997.
- [7] H. Lin, C. Tsai, and J. Hsu, "Ultrasonic localization and pose tracking of an autonomous mobile robot via fuzzy adaptive extended information filtering," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 9, pp. 2024-2034, Sep. 2008.
- [8] S. J. Kim and B. K. Kim, "A hybrid algorithm for global self-localization of indoor mobile robots with 2-D isotropic ultrasonic receivers," *Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009)*, pp. 1446-1451, Jul. 2009.
- [9] A. Kushleyev and T. Young, "Cricket as a positioning system for control applications," *Metrit Program Summer Research paper*, 2005.
- [10] F. Figueroa and A. Mahajan, "A robust method to determine the

coordinates of a wave source for 3-D position sensing," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 116, no. 3, pp. 505-511, Sep. 1994.

- [11] S. J. Kim, C. H. Kim, J. B. Kim, and B. K. Kim, "Ultrasonic distance measuring system for docking of robotic wheelchair to battery charging station," *Proc. 8th International Workshop on Human-friendly Welfare Robotic Systems*, pp. 114-118, Oct. 2007.

[12] <http://www.lps.kr/>

[13] <http://www.ninety.co.kr/>



김용휘

2005년 세종대학교 전자공학과 졸업. 2007년 한국과학기술원 전기전자전공 석사. 2007년~현재 동 대학원 전기전자전공 박사과정 재학 중. 관심분야는 작업 계획, 다중 로봇 제어, 로봇 위치 인식, 이동 로봇



송의규

2008년 KAIST 전자전산학과 졸업. 2010년 동 대학원 전기 및 전자공학과 석사 졸업. 2010년~현재 KIST 로봇·시스템본부 영상미디어센터 근무 중. 관심분야는 이동 로봇, 로봇 위치 인식



김병국

1975년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1975년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1981년 동 대학원 박사. 1981년~1986년 우진계기(주) 연구실장. 1982년~1984년 University of Michigan 방문연구. 1986년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수. 관심분야는 실시간 시스템, 로보틱스, 임베디드 제어.