

마이크로폰 어레이를 이용한 이동 로봇의 음원 추적 제어

Sound Source Tracking Control of a Mobile Robot Using a Microphone Array

한 종 호, 한 순 신, 이 장 명*
(Jong-Ho Han¹, Sun-Sin Han¹, and Jangmyung Lee¹)
¹Pusan National University

Abstract: To follow a sound source by a mobile robot, the relative position and orientation of the sound source from the mobile robot have been estimated using a microphone array. In this research, the difference among the traveling times of the sound source to each of three microphones has been used to calculate the distance and orientation of the sound source from the mobile robot which carries the microphone array. The cross-correlation between two signals has been applied for detecting the time difference between two signals, which provides reliable and precise value of the time difference comparing to the conventional methods. To generate the tracking direction to the sound source, fuzzy rules are applied and the results are used to control the mobile robot in a real-time. The efficiency of the proposed algorithm has been demonstrated through the real experiments comparing to the conventional approaches.

Keywords: microphone array, location, estimation, mobile robot, sound source

I. 서론

최근 로봇산업의 발달로 다양한 로봇들이 개발되어 지고 있으며, 이 중에서 음원을 이용하여 위치를 추정하는 시스템이 오래전부터 연구 되어 오고 있다[1]. 이러한 음원 추정은 화자의 위치를 파악하는 애완용 로봇, 지능형 로봇 및 서비스 로봇 등에 많이 사용되고 있다. 또한 음원 데이터와 카메라를 이용한 시스템에 적용되어 카메라에서 찾지 못하는 화자를 음원을 이용하여 화자의 위치를 찾는 시스템에 적용되고 있다[2]. 로봇의 청각 시스템에 적용된 음원 위치 추정 방법에는 로봇의 머리 전달함수를 이용한 방법, 다수의 마이크로폰 어레이를 이용하여 빔 포밍을 적용한 방법, 인공 귀를 이용한 방법 등이 있다[3-6]. 이러한 제품들이 대부분 잡음에 약하고, 장애물로 인하여 소리 지연이 발생하고, 음원의 반사, 흡수 등의 작용으로 음원 추정 성능을 떨어지게 한다. 따라서 로봇의 음원 정보를 이용하여 음원 발원지에 대한 위치 추적은 로봇이 주위의 환경적 요인에 적절하게 대응할 수 있도록 해야 한다. 음원 추적 시스템은 보통 잡음이 없거나 조용한 실험실 환경에서 좋은 성능을 나타낸다. 하지만 실제 이동 로봇에 마이크로폰을 설치하고, 마이크로폰으로 들어오는 입력의 값은 주변 환경의 잡음으로 인해 사용자가 원하는 정확한 신호를 얻지 못한다. 또한 정확하지 못한 정보를 사용하여 이동 로봇이 음원 발

원지인 위치를 인식하기란 상당히 어렵다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 줄이기 위해 마이크로폰으로 들어오는 신호의 음원을 추정하는 알고리즘을 적용하여 음원의 위치 정보를 얻을 수 있게 하고, 음원의 발원지로 이동 로봇이 이동하게 될 때, 정확한 음원의 위치로 도달할 수 있게 퍼지 규칙을 적용하여 음원의 위치를 추적하는 시스템을 연구한다.

먼저 II 장에서는 음원 위치 추정을 하기 위한 도달 시간차, 상호 상관 및 위치 인식 알고리즘 부분을 설명하고, III 장에서는 이동 로봇의 음원 추적에 대한 시스템에 대한 설명과 IV 장에서는 실제 실험을 통하여 적용된 알고리즘이 타당성을 검토하고, 마지막으로 V 장에서는 결론을 제시함으로써 이 논문을 마무리 한다.

II. 음원 인식 알고리즘

1. 도달 시간차 알고리즘

일반적으로 음원을 추적하기 위해 2개의 마이크로폰을 이용하여 음원의 방향 및 거리를 검출하나 정확한 결과 값을 얻기가 어렵게 된다. 조금 더 정확한 결과를 얻기 위해 본 논문에서는 3개의 마이크로폰을 이용하였다. 우선 이동 로봇에 일정한 간격으로 마이크로폰 3개를 설치하였고, 이를 통하여 음원 데이터를 수신하였을 때 마이크로폰에 수신된 신호들 사이에는 도달시간차가 발생하게 된다. 이 신호들의 도달시간 차를 검출하여 음원 신호의 거리, 방향, 좌표를 측정하는 기본적인 알고리즘을 제시한다.

마이크로폰으로부터 얻은 음원 데이터의 도달시간 차를 검출하여 음원의 위치를 구하는 알고리즘은 다음과 같다. 추정 음원 신호로부터 발신된 음원 신호가 3개의 마이크로폰으로 구성된 수신부에 수신되었다면 어떤 시간 t 에 대하

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 9. 6., 수정: 2011. 11. 16., 채택확정: 2012. 2. 3.

한종호, 한순신: 부산대학교 전자전기 박사과정, 박사

(gkswhdgh114@pusan.ac.kr/ranger112@pusan.ac.kr)

이장명: 부산대학교 전기전자공학부(jmlee@pusan.ac.kr)

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 특수환경 Navigation/Localization 기술 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2011-(C7000-1001-0004)).

여 i 번째 마이크로폰에 수신되는 신호음 $MR_i(t)$ 은 다음과 같이 표현된다[7].

$$MR_i(t) = s(t + \Delta t_i) + n_i(t) \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

위 식에서 $s(t)$ 은 마이크로폰에 수신되는 신호, $n_i(t)$ 은 마이크로폰에 수신되는 외부잡음, Δt_i 은 도달시간 차를 나타낸다. 추정 음원으로 부터 i 번째 마이크로폰까지의 거리 R_i 은 다음과 같이 표현된다[8].

$$R_i = t_i \cdot c [m], \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

이 식에서 t_i 는 음원으로부터 i 번째 마이크로폰까지 추정 음원까지의 도달시간, c 는 음파의 속도(340 m/s)를 나타낸다. 각 마이크로폰 사이의 추정 음원의 도달시간차를 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} t_{ij} &= t_i - t_j \\ &= -t_{ji} \quad i, j = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (3)$$

도달시간 차를 이용한 방법을 일렬로 배치하게 되면 많은 수의 마이크로폰이 필요하며 계산 량도 많아지게 되고 반향 신호의 영향이 많은 곳에서는 방향검지에 대한 신뢰도가 떨어지는 단점이 있다[9].

2. 상호상관 알고리즘

그림 1에서 ①, ②, ③음원은 각 마이크로폰에 도달한 시간차를 나타낸다. 음원의 위치가 왼쪽에서 발생되었을 때 수신한 신호음을 나타낸다. 상호 상관 알고리즘의 핵심은 도달 시간차를 이용하여 기준 신호음을 두고 나머지 신호음을 서로 더하여 기준 신호음과 비교하여 음원의 유사성을 알아보는 방법을 이용한다.

그림 1의 ①은 가장 먼저 신호가 수신된 음이며, 다른 두 개의 수신된 신호음 ②, ③을 비교하여 각 마이크로폰으로 도달하는 시간차를 계산하고, 이 시간차를 이용하여 음원의 거리를 알아낸다. 이를 위해 상호상관 알고리즘을 사용하는데 파형 ①을 시간 축으로 이동시켜서 다른 신호와

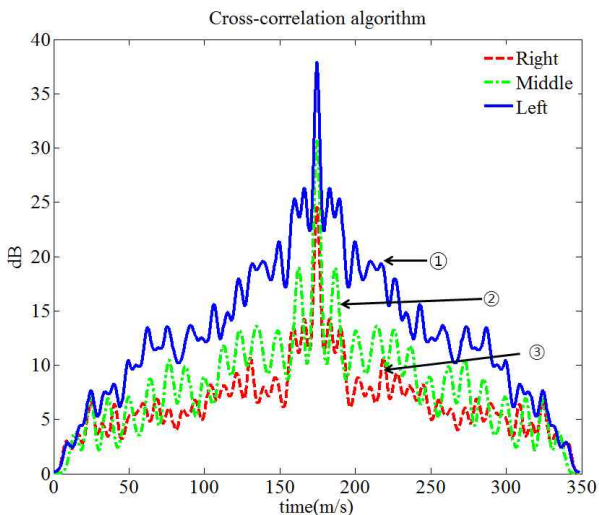


그림 1. 세 개의 마이크로폰으로 들어오는 음원신호 - 박수소리.
Fig. 1. Incoming sound signal of the three Microphone - clapping.

곱하는 연산을 함으로서 최대의 결과 값이 나오게 되는 때의 샘플링 값을 기준으로 얼마의 시간이 지나게 되었는지 알아 볼 수 있는 것이다. 이러한 방법으로 알아낸 추정 음원이 두 마이크로폰 M_1, M_2 와 $t, \Delta t_{12}$ 에 시간차를 가지고 수신되었을 때, 다음과 같이 표현된다[8,10,11,12]. (여기서, $M_1 = x_1, M_2 = x_2$ 로 나타낸다.)

$$x_1(t) = s_1(t) + n_1(t) \quad (4a)$$

$$x_2(t) = s_2(t + \Delta t_{12}) + n_2(t) \quad (4b)$$

(4)식에서는 $s_1(t), s_2(t), n_1(t), n_2(t)$ 는 시간의 함수 값으로써 수신 신호인 $s_1(t), s_2(t)$ 에 잡음성분인 $n_1(t), n_2(t)$ 가 영향을 받지 않을 때, 두 신호의 상호상관 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} C_{x_1x_2}(\Delta t_{12}) &= E[x_1(t) \cdot x_2(t + \Delta t_{12})] \\ &= \overline{x_1(t) \cdot x_2(t + \Delta t_{12})} \end{aligned} \quad (5)$$

(5)식에서 E 는 기대치(expectation)를 나타내는 것으로 이 기대치가 최대가 되는 Δt_{12} 에서 두 신호는 상관이 가장 크게 되는 것이고, Δt_{12} 가 두 신호의 도달시간차가 되는 것이다. 신호의 관측 시간 T 는 유한한 범위를 가지므로, 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} C_{x_1x_2}(\Delta t_{12}) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_1(t) \cdot x_2(t + \Delta t_{12}) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T x_1(t) \cdot x_2(t + \Delta t_{12}) dt \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 $C_{x_1x_2}(\Delta t_{12})$ 에서 얻은 범위 Δt_{12} 를 MCU의 A/D 변환 샘플만큼 곱하여 주게 되면 얼마만큼의 시간차를 가지는지 알 수가 있게 된다. 또한 식 (6)의 x_1 이 Δt_{12} 만큼 이동 하였을 때의 신호 x_2 와의 상호상관 함수로 나타낸 것이다. 최종적으로 식 (7)과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\Delta t_{12} = \frac{\sum_{n=1}^N [(x_1(n-d) - mx_1) \times (x_2(n) - mx_2)]}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (x_1(n-d) - mx_1)^2} \times \sqrt{\sum_{n=1}^N (x_2(n) - mx_2)^2}} \quad (7)$$

식 (7)에서 분모의 각 신호의 크기 값으로 나누어 준 이유는 신호 값 자체의 크기로 인해 상관도가 영향을 받지 않기 위해 평준화(normalize)한 값을 표현한 것이다. 여기서 n 은 샘플링 데이터 개수를 나타내고, d 는 Time shift 시킬 수 있는 범위, mx_1, mx_2 는 두 개의 신호의 평균값을 의미한다. 또한, 여기에서 상호 상관 알고리즘을 이용하여 다양한 형태의 음원 데이터를 분석해 보았다. 그림 2는 음원 신호 ‘아’를 외쳤을 때 얻은 데이터 값이고, 그림 3은 영어로 ‘come’ 이라고 외쳤을 때, 그림 4는 ‘back’라고 했을 때 얻은 정보이다. 그림에서 음원의 순서가 다른 부분이 있는 것은 측정 당시에 들어오는 신호의 순서가 달랐기 때문이다.

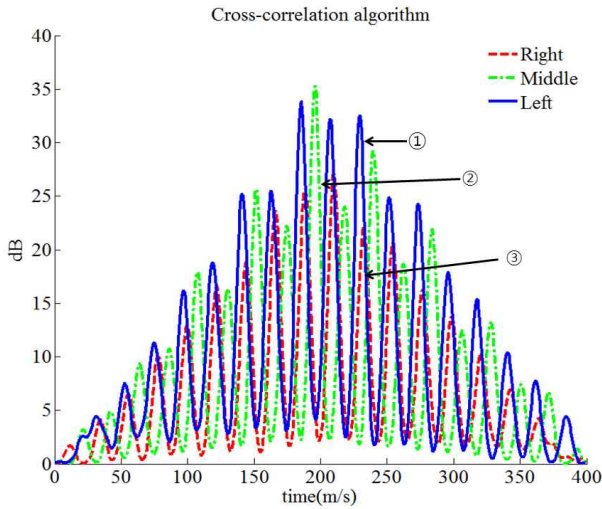


그림 2. 세 개의 마이크로폰으로 들어오는 음원신호 - 'Ah'.
Fig. 2. Incoming sound signal of the three Microphone - 'Ah'.

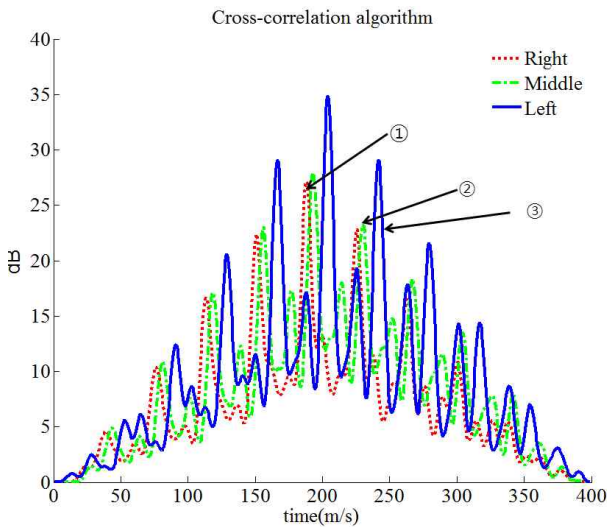


그림 3. 세 개의 마이크로폰으로 들어오는 음원신호 - 'come'.
Fig. 3. Incoming sound signal of the three Microphone - 'come'.

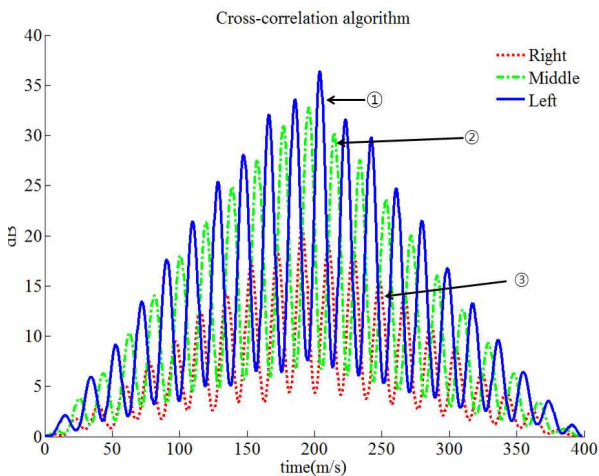


그림 4. 세 개의 마이크로폰으로 들어오는 음원신호 - 'back'.
Fig. 4. Incoming sound signal of the three Microphone - 'back'.

3. 음원 위치 인식 알고리즘

3.1 2차원 공간에서의 거리 측정

하나의 음원과 3개의 마이크로폰 M_1, M_2 , 및 M_3 를 한 평면상에서 일정한 간격으로($l_1 = l_2 = 15cm$) 배열하면 추정 음원으로부터 각각의 마이크로폰까지 R_1, R_2 및 R_3 의 거리로 구해지며, 이를 도식화 하면, 그림 5와 같이 나타낼 수 있다[8,10,11].

그림 5에서 추정 음원으로부터 각각의 마이크로폰으로 들어올 때의 거리를 R_1, R_2 및 R_3 라 하면 각각의 거리는,

$$R_1 = c \cdot t_1 = x \tag{8a}$$

$$R_2 = c \cdot t_2 = x + c \cdot \Delta t_{12} \tag{8b}$$

$$R_3 = c \cdot t_3 = x + c \cdot \Delta t_{13} \tag{8c}$$

로 나타낼 수 있다. 식 (8)에서 c 는 음파의 속도(340 m/s)이고, t_1 는 추정 신호음이 첫 번째 마이크로폰까지 도달하는데 걸리는 시간 값을 t_2 역시 추정 신호음으로부터 두 번째 마이크로폰까지 걸리는 시간 값을 나타낸다. 앞에서 상호 상관 알고리즘으로 구한 Δt_{12} 을 이용하면 t_2 는 $t_1 + \Delta t_{12}$ 으로 표기된다. 같은 방법으로 세 번째 마이크로폰까지 도달하는 시간 t_3 는 $t_1 + \Delta t_{13}$ 가 되고 이 값들을 이용해서 거리를 계산하게 되면, 식 (8)과 같이 표현된다. 도달시간차와 마이크로폰 간격 정보를 이용해 파푸스 중선 법칙(Pappus summary)에 따라 식 (9)와 같이 거리 x 가 구해진다.

$$R_1^2 + R_3^2 = 2 \cdot (R_2^2 + l_1^2) \tag{9a}$$

$$x = \frac{2l_1^2 + 2(c \cdot \Delta t_{12})^2 - (c \cdot \Delta t_{13})^2}{2c(\Delta t_{13} - 2 \cdot \Delta t_{12})} \tag{9b}$$

3.2 2차원 공간에서의 각도 측정

2차원 평면상에서 음원(S)로부터 세 개의 마이크로폰까지의 거리는 식 (9)에 의해 구하였으며, 이 거리 정보를 이용하여 그림 6의 $\triangle SM_1M_2$ 에 cos 제 2 법칙을 적용시키면 음원이 해당 마이크로폰으로 들어오는 각도 정보를 알 수 있다.

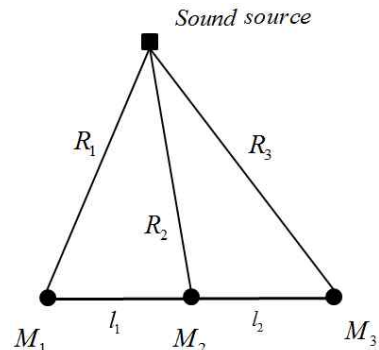


그림 5. 2차원 공간에서의 음원 거리 측정원리.

Fig. 5. Distance measurement principle in the two-dimensional space.

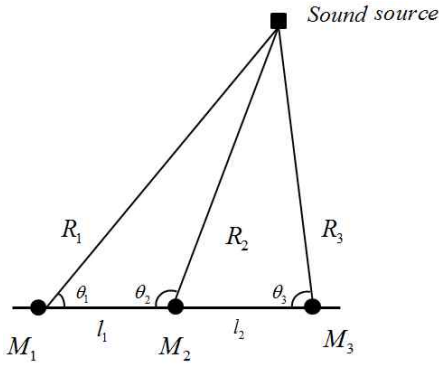


그림 6. 2차원 공간에서의 음원 각도 측정원리.
Fig. 6. Angle measurement principle in the two-dimensional space.

세 개의 마이크로폰에 적용해 보면 각각 마이크로폰으로 들어오는 음원의 각도 정보를 구할 수 있다. 음원이 첫 번째 마이크로폰으로 들어오는 각도를 θ_{M1} 이라하면,

$$\theta_{M1} = \cos^{-1} \frac{R_2^2 + l_1^2 - R_1^2}{2R_2l_1} \quad (10)$$

와 같이 구할 수 있다. 같은 방법으로 다른 두 마이크로폰에 대해 똑같은 알고리즘을 적용시키면,

$$\theta_{M2} = \cos^{-1} \frac{R_1^2 + l_1^2 - R_2^2}{2R_1l_1} \quad (11a)$$

$$\theta_{M3} = \cos^{-1} \frac{R_3^2 + l_2^2 - R_1^2}{2R_3l_2} \quad (11b)$$

와 같이 구할 수 있다. 그림 6은 각도 측정하는 알고리즘 방법을 나타낸다.

3.3 좌표측정

그림 7에서 $\triangle SM_1M_2$ 를 두 개의 삼각형으로 나누고, 식 (2)에서 구한 거리 정보를 바탕으로 M_1 을 원점으로 거리좌표를 만들게 되면 $M_1 = (0,0)$, $M_2 = (l_1,0)$, $M_3 = (l_1 + l_2,0)$ 로 정의할 수 있다. 음원의 좌표를 $S=(a,b)$ 라고 할 때, 다음의 점선으로 둘러싸인 두 개의 삼각형으로부터, 피

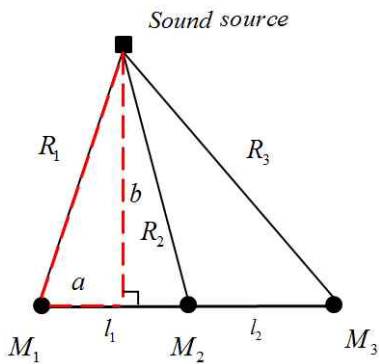


그림 7. 2차원 공간에서의 음원 좌표 측정원리.
Fig. 7. Coordinates measurement principle in the two-dimensional space.

타고라스 정리를 사용하게 되면, $a^2 + b^2 = R_1^2$ 과 $(l_1 - a)^2 + b^2 = R_2^2$ 두 식을 얻을 수 있다. 두 식으로부터 좌표(a, b)를 구하게 되면,

$$a = \frac{R_1^2 - R_2^2 + l_1^2}{2l_1} \quad (12a)$$

$$b = \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{R_1^2 - R_2^2 + l_1^2}{2l_1}\right)^2} \quad (12b)$$

로 나타낼 수 있으며, 결국 음원의 좌표, $S(a,b)$ 는 다음과 같이 구해진다[8,11].

$$S = \left(\frac{R_1^2 - R_2^2 + l_1^2}{2l_1}, \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{R_1^2 - R_2^2 + l_1^2}{2l_1}\right)^2} \right) \quad (13)$$

III. 음원 인식에 의한 이동체 추적

1. 이동로봇 시스템

그림 8은 실험을 위해 제작된 이동로봇의 구조를 나타낸다. 이동로봇은 두 개의 DC 모터로 구동되며 한 개의 보조 바퀴를 부착하여 자세를 안정화 하였다. 그리고 엔코더를 이용하여 속도와 방향을 측정하였고, 마이크로폰 3개를 부착하여 전방환경에 대한 음원정보를 얻는다. 또한 마이크로폰으로부터 얻어진 위치 정보를 바탕으로 이동로봇이 이동할 때 장애물에 대한 회피를 하기 위하여 전방에 초음파 센서 2개를 부착하였다.

그림 9와 같이 좌표계를 설정하여 이동로봇의 운동을 Jacobian 식으로 해석하였으며, 실제 바퀴의 각속도와와의 관계로 표현된 식을 얻을 수 있다[13,14].

일반적으로 이동로봇은 절대좌표계에서 위치와 방향을 가지며 운동은 두 제어입력인 진행방향 속도, v 와 중심축에 대한 회전각속도, ω 에 의해 제어되는 시스템으로 식 (14)와 같이 모델링 된다.

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_R \\ v_L \end{pmatrix} \quad (14)$$

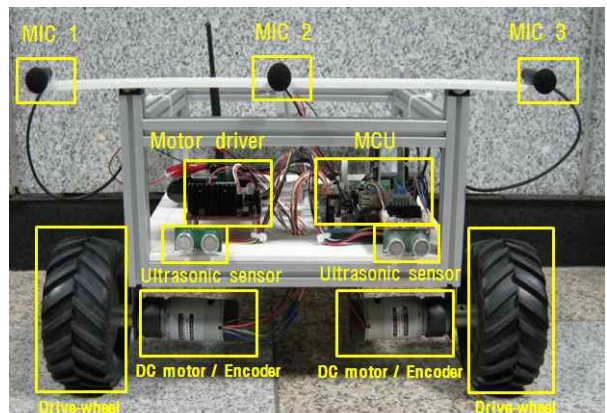


그림 8. 이동로봇 설계 구조.
Fig. 8. Design structure of the mobile robot.

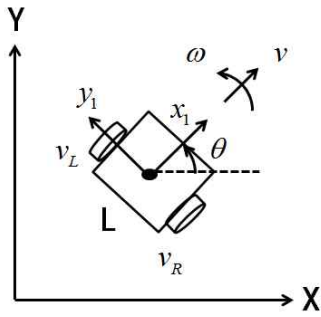


그림 9. 이동로봇을 위한 좌표계.
Fig. 9. Coordinate for a mobile robot.

여기서 L은 두 바퀴 사이의 거리, v_L 과 v_R 은 각각 왼쪽과 오른쪽 바퀴의 속도를 나타낸다. 그리고 로봇의 방향은 회전속도를 적분한 값으로 식 (15)와 같이 표현할 수 있다.

$$\theta[n] = K \sum_{k=0}^n \frac{1}{m} \sum_{i=n-m}^n (V[i] - offset) \delta t \quad (15)$$

여기서 K는 이득상수, m은 적분 window의 크기, n은 이산 시간을 나타낸다. 그리고 $V[i] - offset$ 은 속도센서의 출력에서 offset 값을 보정한 결과를 의미한다.

2. 퍼지규칙에 의한 이동로봇의 주행

2.1 퍼지규칙 및 이동 방향의 원리

움직이는 음원을 추적하는 기법은 정지 상태에서의 음원의 위치와 방향을 추정하는 알고리즘과 더불어 음원과 이동로봇의 상대적 특성에 따라 지능적인 알고리즘이 필요하다. 그래서 본 논문에서는 퍼지규칙을 이용하였다. 퍼지모델의 성능은 퍼지규칙의 구성 방법에 따라 달라지며 더 나은 성능을 위해서 퍼지규칙의 최적화 과정이 필요하다. 퍼지규칙은 다음과 같다.

Rule : **IF** Distance is A_D^i and Angle is B_A^i **Then** (16)
LeftOutput is X_L^i and RightOutput is Y_R^i

여기서 X_L^i, Y_R^i 는 왼/오른쪽 모터 변위, A_D^i, B_A^i 는 이동로봇과 음원과의 거리 및 각도 나타낸다. 또한 퍼지 규칙은 사람의 생각을 쉽게 규칙으로 나타낼 수 있으므로, 지능적

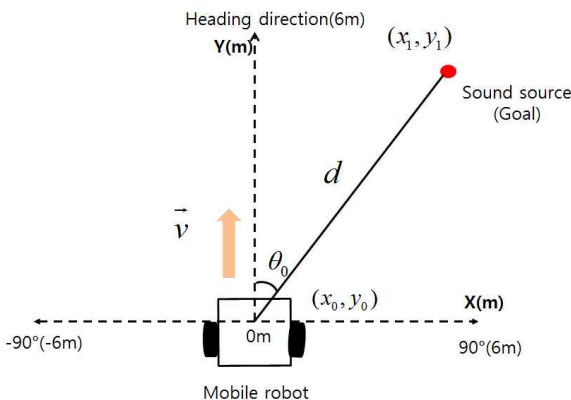


그림 10. 퍼지 제어를 이용한 이동 방향의 원리.
Fig. 10. Principle of movement direction using Fuzzy control.

인 판단을 로봇에 쉽게 반영할 수 있다. 본 논문에서는 음원에서 얻은 거리, 각도, 위치 좌표를 이용하여 이동로봇이 음원이 발생한 지점으로 이동하게 할 수 있는 원리는 그림 10과 같다[15,16].

2.2 퍼지규칙에 의한 데이터 추론

퍼지규칙을 위한 변수 중에서 각도 θ_0 는 그림 10에 거리 d를 포함하게 되며, 각각의 출력변수 2개의 입력변수로도 적절한 결과 값을 퍼지규칙을 통해서 추론할 수 가 있다.

본 논문에서 사용하는 퍼지규칙은 그림 11과 같이 2개의 input과 2개의 output 형태로 구성된다.

이동 방향을 결정하기 위해 퍼지 알고리즘의 입력변수는 음원 위치의 거리 d와 이동 로봇의 진행방향과 음원 위치의 각도 θ 이며, 결과 값은 z로 이동 로봇이 이동할 방향을 나타낸다. 여기서 거리 d는 0 m ~ 8 m이고, 각도 θ 는 $-90^\circ \sim 90^\circ$, z는 각각 모터의 Left 및 Right로 0 V ~ 12 V를 나타낸다. 또한 결과 값을 결정함에 있어서 비퍼지화는 일반적인 Mamdani의 무게중심법을 사용하였고, 정성적인 언어변수로 표현하였다.

퍼지규칙은 음원과의 거리와 각도가 클수록 약간의 방향 변화가 발생하게 되며 이동 로봇이 음원 위치로 이동하게 될 때, 변화가 커지게 되는데 이 변화를 줄이는 방법으로

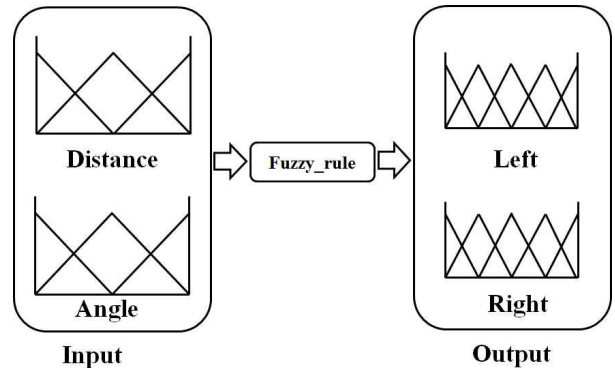


그림 11. 퍼지 규칙의 구조.
Fig. 11. The structure of fuzzy rules.

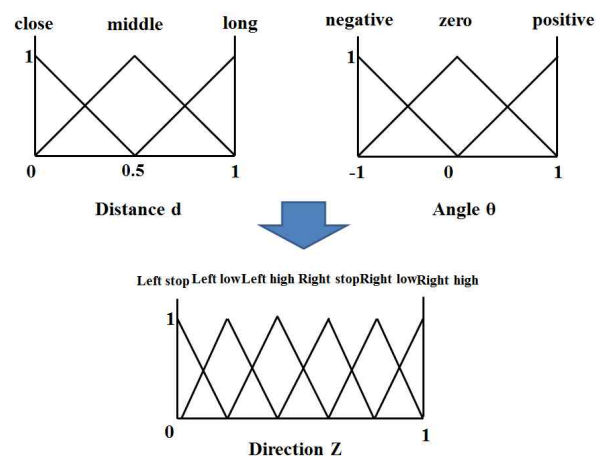


그림 12. 퍼지 입, 출력변수.
Fig. 12. Fuzzy input and output variables.

표 1. 입·출력 퍼지규칙.

Table 1. Input and output fuzzy rules.

Dist \ Ang	close	middle	long
negative	left stop right low	left stop right low	left low right high
zero	left low right low	left low right low	left high right high
positive	left low right stop	left low right stop	left high right low

제어가 가능하다. 이러한 내용을 표 1로 퍼지규칙을 나타내었다.

3. 이동로봇의 주행 궤적에 대한 원리

이동로봇이 궤적을 따라 주행 할 때, 회전반경은 주행오차에 크게 영향을 미치게 한다. 일반적으로 직선주행 시보다는 곡선주행 시에 많은 오차를 가지게 되고 이상적인 주행 조건이 주어지지 않는 실제 환경에서는 큰 차이를 보이게 된다. 또한, 로봇이 곡선을 주행한다고 가정하면 이동로봇에는 구심력과 원심력이 동시에 작용한다. 이 때 로봇의 바퀴와 지면과의 마찰력으로 바퀴의 미끄러짐으로 인해 주행오차가 발생한다. 여기서 곡선 또는 곡면의 휨 정도를 나타내는 변화율을 곡률이라고 한다. 그림 13에서 점 P가 곡선을 따라 일정한 속도로 움직일 때, 그 진행 방향은 이동한 거리 S에 따라 변화하게 되는 것이다. 곡률을 C라고 가정하고 표시 했을 때, 다음과 같이 나타낼 수 있다[17].

$$C = \lim_{s \rightarrow \theta} \left| \frac{\Delta \theta}{\Delta s} \right| = \left| \frac{d\theta}{ds} \right| \quad (17)$$

일정한 곡률을 가진 원의 반경을 회전반경이라고 한다. 회전반경(ρ)은 다음과 같이 나타낸다.

$$C > 0 \text{ 이면, } \rho = \frac{1}{c} \quad (18)$$

여기서 $c=0$ 이 되면 곡선은 구부러지지 않으므로 직선이 된다. 직선은 무한반경을 가진 원으로 생각 할 수 있다. 따라서 구심력은 회전반경과 속도에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

$$F = c \frac{mv^2}{r} \quad (19)$$

그림 14, 15, 16은 음원을 이용하여 이동 로봇이 궤적 주행을 할 때, 직선 궤적 조건 1과 곡선 궤적 주행 조건 2, 원 궤적 주행 조건 3으로 조건을 주어 실험을 하였다. 우선 조금 더 정확한 결과 값을 얻기 위하여 랜덤한 위치가 아닌 지정된 위치에서 음원을 도출하고, 도출된 음원으로 이동 로봇이 이동하게 하는 원리로 실험을 진행하게 된다.

그림에서 직선과 곡선 궤적은 2 m를 기준으로 하였으면 원 궤적은 3 m와 2 m를 서로 번갈아가면 기준점을 두어 실험을 하였다. 그림 17에서는 장애물이 있는 공간에서 회피를 하는 조건을 주어 실험을 진행하였다. 여기서는 장애물 회피에 대한 음원을 추정하는 실험을 진행하였다. 앞에서 이동 로봇 앞에 초음파 센서 두 개를 설치하였는데 여

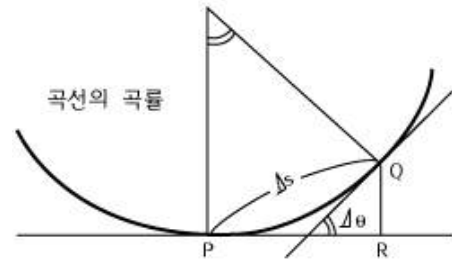


그림 13. 곡선의 곡률.

Fig. 13. Curvature.

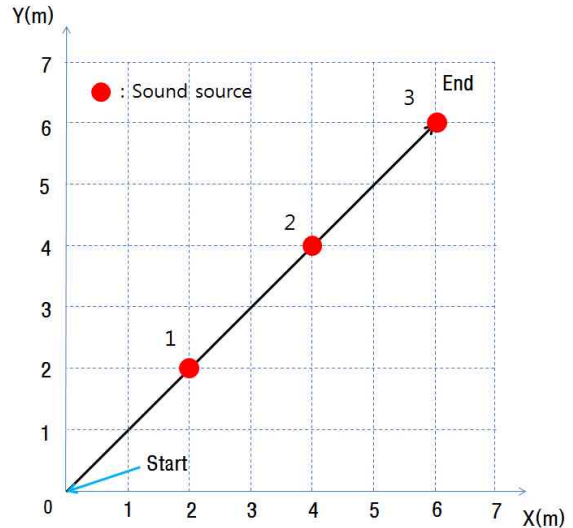


그림 14. 직선 궤적 주행 조건 1.

Fig. 14. Straight line trajectory driving condition 1.

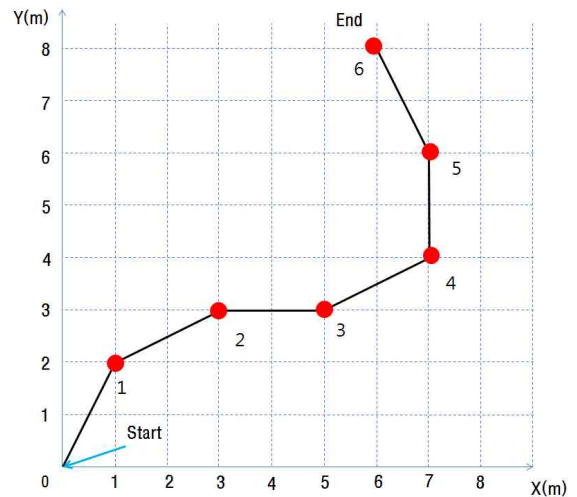


그림 15. 곡선 궤적 주행 조건 2.

Fig. 15. Curve trajectory driving condition 2.

기서 초음파 센서 두 개가 장애물을 인식하게 되면 왼쪽 방향으로 이동하게 하였다. 그리고 오른쪽, 왼쪽 초음파 센서 각각에 장애물이 인식하게 되면 각 위치의 반대 방향으로 진행하게 하였다[18].

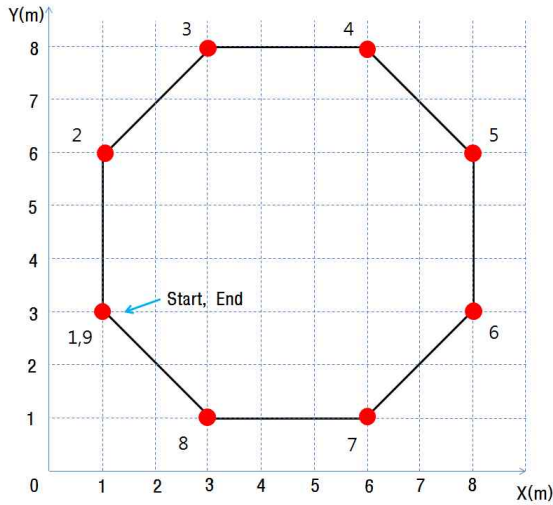


그림 16. 원 궤적 주행 조건 3.
Fig. 16. Circular trajectory driving condition 3.

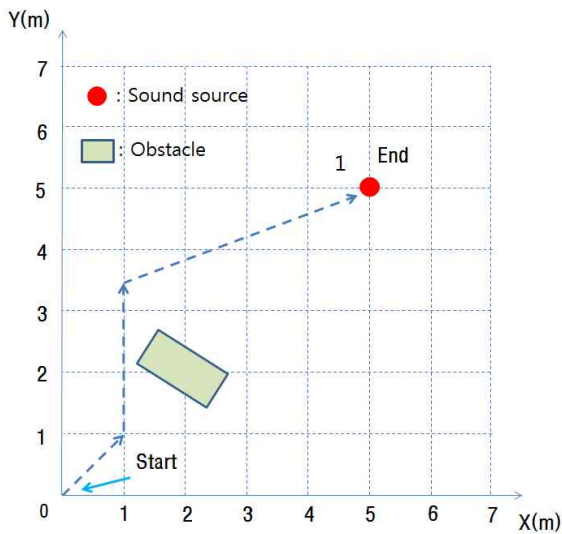


그림 17. 장애물 회피 주행 조건 4.
Fig. 17. Obstacle avoidance driving condition 4.

1. 왼쪽 초음파 인식 - 오른쪽 이동
2. 오른쪽 초음파 인식 - 왼쪽 이동
3. 양쪽 초음파 인식 - 왼쪽 우선 이동

IV. 실험 및 결과

1. 실험환경

II, III 장에서 설명한 음원 위치 추정 방법과 이동 제어에 대한 성능 평가를 위해서 실험 환경 그림 18에서 조건 1과 곡선 주행과 원 주행을 하였을 때, 어떠한 성능을 가지는지 알기 위하여 조건 2를 두어 실험을 진행하였다.

- 조건 1: 가로 6.5 m, 세로 7.0 m, 높이 2.8 m의 장소에서 이루어지고, 음원의 박수소리를 이용하여 데이터 값을 얻었다.

- 조건 2: 가로 8.5 m, 세로 8.5 m의 높이 2.8 m 장소에서 이루어지고, 음원의 데이터는 동일하다.

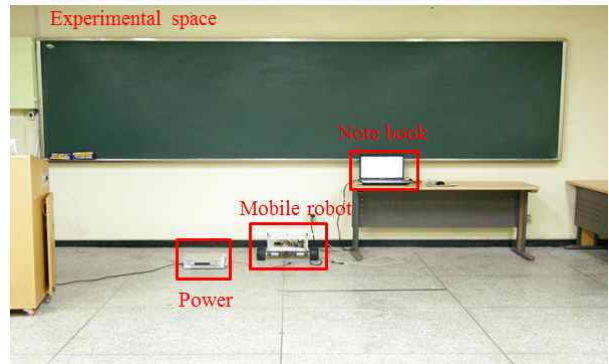


그림 18. 실험 환경.
Fig. 18. The experimental environment.

마이크로폰으로 들어오는 신호를 처리하기 위한 MCU (LM8962)와 이동 로봇의 위치와 방향을 알기 위해 모터의 엔코더 값을 얻고, 속도를 제어한다. 세 마이크로폰으로의 샘플링 주파수는 500 kHz(2 usec)로 하여 신호를 측정하였으며, 측정된 신호에서는 매 50 usec마다 음원의 위치를 추정하게 하였다. 그리고 제안된 방법의 성능 반복성을 검증하기 위해서 여러 번의 실험을 통해 성능을 평가하였다.

2. 실험 및 결과

본 절에서는 조성된 실험환경에서 실제실험으로 성능을 평가한다. 본 논문에서는 음원에서 사용되는 두 가지의 방법을 실험을 통하여 비교 하고자 한다. 첫 번째로 종래의 방법으로 threshold를 사용하여 음원 위치를 추정하는 알고리즘과 TDOA (Time difference of arrival)를 이용할 때, 사용하는 cross-correlation 알고리즘의 오차를 비교하고자 한다. 논문에서는 threshold만 사용한 방법과 cross-correlation을 함께 사용하였을 때를 표 1에 나타내었다. threshold를 사용하는 알고리즘은 특정 주파수 대역 이상을 음원으로 사용하여 데이터를 얻기 때문에 잡음 문제점에 매우 약한 반면 cross-correlation 알고리즘은 잡음에 강하여 threshold방법 보다 강한 특성을 가지고 있다. 표 2에서는 이를 비교한 데이터를 나타낸다. 거리를 2~6 m간격 기준으로 하여 측정하였을 때, 본 논문에서 제안된 cross-correlation에 의한 방법이 threshold의 의한 방법보다 더 높다는 것을 알 수가 있었다.

표 3은 위에 언급한 II, III 장에서 제안한 알고리즘을 이용하여 거리는 2~6 m에서 각도는 30~90°를 기준 설정 값을 두어 측정하였다. 그리고 표 4는 기준에 따른 측정오차 데이터를 나타내었다.

표 2. 음원 위치추정 오차 비교.

Table 2. Sound source location estimation error comparison.

길이	제안된 cross-correlation에 의한 방법	Threshold에 의한 방법
2 m	10 %	15 %
3 m	15 %	18 %
4 m	19 %	25 %
5 m	25 %	35 %
6 m	30 %	40 %

표 3. 거리 및 각도 측정 실험.

Table 3. Distance and angle measurement experiment.

거리 \ 각도	30°	45°	90°
2 m	29°, 1.8 m	44°, 2.3 m	92°, 1.8 m
3 m	28°, 3.2 m	43°, 3.2 m	88°, 3.2 m
4 m	32°, 3.6 m	42°, 3.7 m	87°, 4.3 m
5 m	33°, 4.8 m	47°, 4.8 m	92°, 5.2 m
6 m	35°, 5.5 m	43°, 5.6 m	93°, 5.8 m

표 4. 거리 및 각도 측정 오차.

Table 4. Distance and angle measurement error.

거리 \ 각도	30°	45°	90°
2 m	0.2°, -0.2 m	-1°, 0.3 m	2°, -0.2 m
3 m	-1°, 0.2 m	-2°, 0.2 m	-2°, 0.2 m
4 m	2°, -0.4 m	-3°, -0.3 m	-3°, 0.3 m
5 m	3°, 0.2 m	2°, -0.2 m	2°, 0.2 m
6 m	5°, 0.5 m	-2°, -0.4 m	3°, -0.2 m

그림 19는 조건 1의 환경에서 실험한 데이터 결과이다. 여기에서는 x, y의 길이를 6 m기준으로 하고, 음원의 위치를 다르게 하여 실험 결과이며, 음원은 15°, 60°, 75°각도에서 음원을 발생하게 하였다. 그림 16에서 음원의 위치가 15°일 때 실험한 결과 거리는 6.18 m와 각도 13°을 얻었고, 두 번째 실험에서 음원이 60°에서 발생하였을 때 실험 결과 거리는 6.2 m와 각도 67°를 얻었다. 마지막으로 음원이 75°에서 발생하였을 때 실험을 한 결과 거리는 6.3과 각도 80°을 얻어 결과는 표 5에 나타내었다.

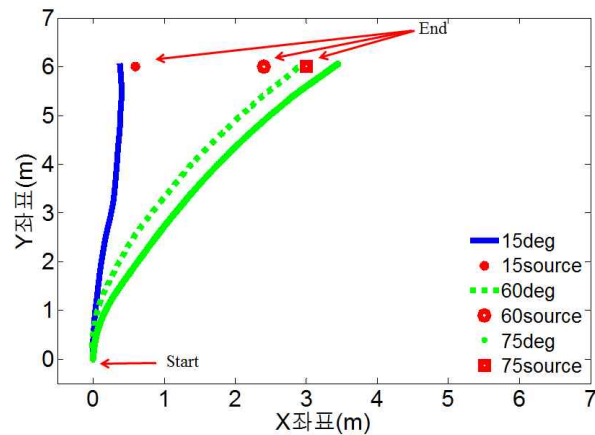


그림 19. 각도 15°, 60°, 75°일 때의 이동 로봇의 이동 경로.

Fig. 19. Navigation path of mobile robot by 15°, 60°, 75°.

표 5. 각도 15°, 60°, 75°일 때의 이동 로봇의 이동 오차.

Table 5. Navigation path of mobile robot by 15°, 60°, 75°.

순서 \ 측정	결과 값	기준	오차
1	13°, 6.18 m	15°, 6 m	2°, 0.18 m
2	69°, 6.2 m	60°, 6 m	9°, 0.2 m
3	80°, 6.3 m	75°, 6 m	5°, 0.3 m

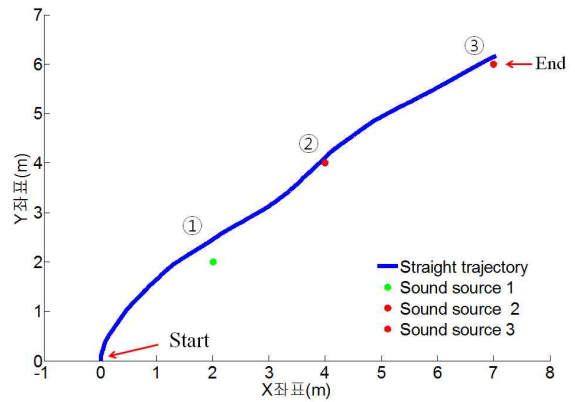


그림 20. 직선 주행 실험.

Fig. 20. Straight line trajectory driving experiment.

표 6. 직선 거리 및 각도 측정.

Table 6. Straight line distance and angle measurement.

순서 \ 측정	결과 값	기준	오차
1	48°, 1.8 m	45°, 2 m	3°, 0.2 m
2	87°, 2.21 m	90°, 2 m	-3°, 0.21 m
3	88°, 2.34 m	90°, 2 m	-2°, 0.34 m

그림 20, 21, 22는 조건 2의 환경에서 음원의 위치가 이동하게 될 때 이동 로봇의 음원 추적에 대한 실험 결과이다. 그림 20은 직선 주행을 하였을 때 얻은 결과 값이다. 음원의 위치를 그림 14의 조건 1과 같이 발생하게 하였으며, 처음 이동 로봇의 위치는 90°방향에서 음원의 위치를 추적하게 하였다. 첫 번째 위치는 x=2, y=2 m에 있고 45°에서 두 번째는 x=4, y=4 m에서 90°에서 세 번째는 x=6, y=6 m에서 90°에서 발생하게 하였다. 실험의 측정값과 오차는 표 6에 나타내었다.

그림 21은 곡선 주행을 하였을 때 얻은 결과 값이다. 음원의 위치를 그림 15의 조건 2와 같이 발생하게 하였으며, 처음 조건 1과 같이 이동 로봇의 위치는 90° 방향에서 음원의 위치를 추적하게 하였다. 실험의 측정값과 오차는 표 7에 나타내었다.

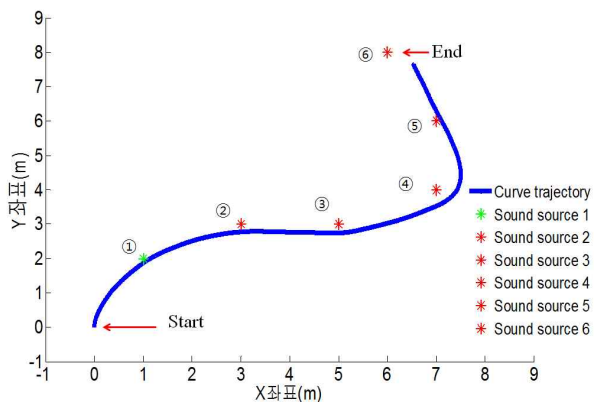


그림 21. 곡선 주행 실험.

Fig. 21. Curve trajectory driving experiment.

표 7. 곡선 거리 및 각도 측정.

Table 7. Curve distance and angle measurement.

순서 \ 측정	결과 값	기준	오차
1	43°, 1.8 m	45°, 2 m	-2°, 0.2 m
2	54°, 1.8 m	50°, 2 m	4°, 0.2 m
3	47°, 1.8 m	45°, 2 m	2°, 0.2 m
4	48°, 1.6 m	50°, 2 m	-2°, 0.4 m
5	48°, 1.5 m	50°, 2 m	-2°, -0.5 m
6	47°, 1.5 m	45°, 2 m	2°, -0.5 m

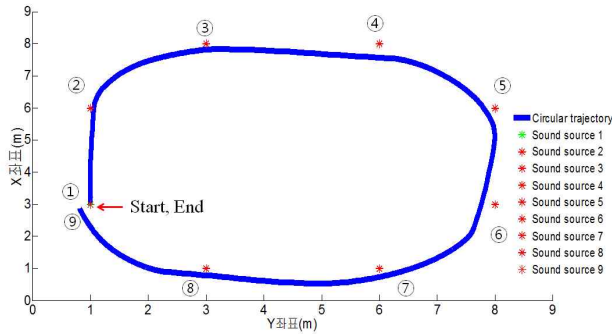


그림 22. 원 주행 실험.

Fig. 22. Circular trajectory driving experiment.

표 8. 원 거리 및 각도 측정.

Table 8. Circular distance and angle measurement.

순서 \ 측정	결과 값	기준	오차
1	90°, 0 m	90°, 0 m	0
2	86°, 3.09 m	90°, 3 m	-4°, 0.09 m
3	43°, 1.84 m	45°, 2 m	-2°, -0.16 m
4	48°, 2.86 m	50°, 3 m	-2°, -0.14 m
5	43°, 1.64 m	45°, 2 m	-2°, -0.36 m
6	45°, 3.24 m	50°, 3 m	-5°, 0.24 m
7	52°, 2.14 m	50°, 2 m	2°, 0.14 m
8	47°, 3.14 m	45°, 3 m	2°, 0.14 m
9	47°, 2.24 m	45°, 2 m	2°, 0.24 m

그림 22는 원 주행을 하였을 때 얻은 결과 값이다. 음원의 위치를 그림 16의 조건 3과 같이 음원을 발생하게 하였으며, 처음 이동로봇의 위치는 $x=1, y=3$ m에서 정면 90° 방향에서 음원의 위치를 추적하게 하였다. 실험의 측정값과 오차는 표 8에 나타내었다.

그림 23은 장애물이 있는 환경에서 음원을 추정된 후에 이동 로봇이 이동하게 될 때 장애물을 회피하는 실험을 진행한 것이다. 우선, 음원의 위치가 $x=4, y=6$ 에 위치하게 하였고, 각도는 x축 방향으로 90°로 하고 장애물은 네모난 상자를 3 m 정도의 위치에 설치하여 이동 로봇이 진행에 방해되도록 설치하였다. 초음파센서는 1 m에서 회피 할 수 있게 하여 그림 23에서 보이는 것과 같이 회피를 하여 음원으로 이동하는데 실제 음원 위치에 제대로 추정을 하지 못하고 오차가 많이 나는 것을 알 수 있었다. 오차는 $x=0.7, y=0.2$ 으로 나타났다.

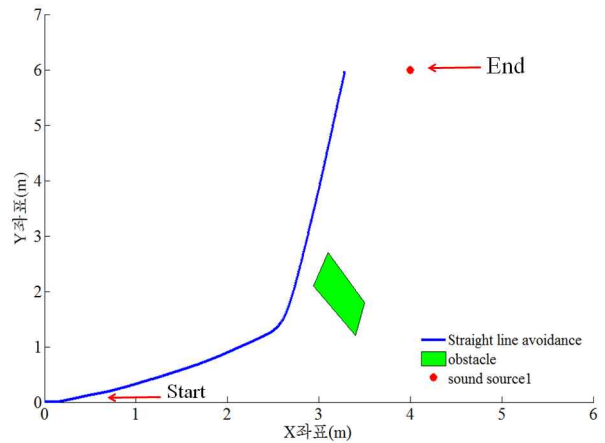


그림 23. 장애물 회피 실험.

Fig. 23. Obstacle avoidance experiment.

V. 결론

본 논문에서는 마이크로폰 어레이를 이용한 이동로봇의 음원 위치 추적에 대한 연구를 하였다. 우선 3개의 마이크로폰으로 입력신호를 얻기 위해 박수소리를 이용하였고, 이 입력 신호들의 도달 시간차, 상호 상관 및 위치인식 알고리즘을 통하여 음원의 발생 거리, 방향 및 좌표를 얻는다. 처음 정지 상태일 때, 이동 로봇의 x 및 y축을 6 m기준으로 두고 음원의 위치 각도를 15°, 60°, 75°가 되도록 하여 이동 로봇의 이동 경로가 x, y축으로 최소 0.221 m에서 최대 0.519 m까지 오차를 가지는 것을 알 수 있었다. 두 번째 실험은 음원이 이동할 때 이동 로봇이 이동하는 음원을 추적하는 실험을 하였다. 그림 14, 15, 16, 17에서 준 조건을 이용하여 직선과 곡선, 원 주행과 장애물이 있는 곳에서 음원의 위치를 추적하는 실험을 하였다. 각 실험의 결과와 오차는 표로 잘 나타내었으며, 하지만 장애물이 존재하는 환경에서의 실험에서는 다소 어려운 점이 있어, 앞으로 연구를 더 진행하고 오차를 줄이는 방안을 마련할 계획이다.

참고문헌

- [1] Y.-E. Kin and J.-G. Chung, "The method of elevation accuracy in sound source localization system," *The Institute of Electronics Engineers of Korea*, vol. 46, 2009.
- [2] K. Nakadai, T. Lourens, H. G. Okuno, and H. Kitano, "Active audition for humanoid," *Proc. of 17th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2000)*, pp. 832-839, 2000.
- [3] S. M. Hwang, Y.-S. Park, and Y. J. Park, "Detection of speaker position for robot using HRTF," *Proc. of the KSNVE Annual Autumn Conference 2005*, pp. 637-640, 2005.
- [4] Y. Sasaki, S. Kagami, and H. Mizoguchi, "Multiple sound source mapping for a mobile robot by self-motion triangulation," *Proc. of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.

- 380-385, 2006.
- [5] S. M. Hwang, Y. J. Park, and Y.-S. Park, "Sound direction estimation using artificial ear," *International Conference on Control, Automation and Systems 2007*, pp. 1900-1910, 2007.
- [6] B.-H. Kwon, Y.-J. Park, and Y.-S. Park, "Spatially mapped GCC function analysis for multiple source and source localization method," *Journal of Institute of Control*, vol. 16. no. 5, May 2010.
- [7] G. Clifford Carter and P. B. Abraham, "Estimation of source motion from time delay and time compression measurements," *J. Acoust. Soc. Am*, vol. 67, no. 3, pp. 830-832, 1980.
- [8] S.-B. Moon, "A study on ship's whistle sound tracking system using microphone array," *Korea Maritime University*, 2002.
- [9] Y.-W. Jung, H.-G. Kang, C.-Y. Lee, and D.-H. Youn, "Adaptive microphone array system with self-delay estimator," *Korea Information and Communication Society*, vol. 30, no. 1C, pp. 54-60, 2005.
- [10] D.-K. Kim, S.-S. Han, and H.-U. Ha, "An accidental position detection algorithm for high-pressure equipment using microphone array," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 2300-2307, 2008.
- [11] S.-S. Han, J.-Y. Choi, and J.-M. Lee, "Malfunction detection of high voltage equipment using microphone array and infrared thermal imaging camera," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 1 pp. 25-32, Jan. 2010.
- [12] Y. S. Lim, J. S. Choi, and M.-S. Kim, "Probabilistic sound source localization," *Proc. of International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 1925-1928, Oct. 17-20, 2007.
- [13] Y. Zhao and S. L. BeMent, "Kinematics, dynamics and control of wheeled mobile robots," *Proc. of IEEE Conf. Robotics and Automation*, pp. 91-96, 1992.
- [14] S. H. Lee, S. Y. Yi, J. O. Park, and C. W. Lee, "Reference adaptive impedance control and its application to obstacle avoidance trajectory planning," *Proc. IEEE/RSJ Int. Workshop on Intel. Robotics and Systems*, vol. 2, pp. 1158-1162, 1997.
- [15] H. Kamada, S. Naoi, and T. Goto, "A compact navigation system using image processing and fuzzy control," *IEEE Southeastcon, New Orleans*, Apr. 1990.
- [16] X. Yang, M. Moallem, and R. V. Patel, "A fuzzy logic-based reactive navigation algorithm for mobile robots," *Proc. of IEEE Conference on Control Applications Toronto, Canada*, Aug. 28-31, 2005.
- [17] B.-S. Choi and J.-M. Lee, "A capturing algorithm of moving object using single curvature trajectory," *Journal of Control Automation and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 2, no. 2, pp. 145-152, Feb. 2006.
- [18] Y.-K. Choi, W.-S. Choi, and J.-B. Song, "Obstacle avoidance of a mobile robot using low-cost ultrasonic sensors with wide beam angle," *Journal of institute of control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15. no. 11, pp. 1102-1107, Nov. 2009.



한 종 호

2010년 진주산업대 전자공학과 졸업.
2012년 부산대학교 대학원 로봇협동
과정 석사 졸업. 2012년 2월~현재 부
산대학교 전자전기공학부 박사과정 재
학 중. 관심분야는 지능제어시스템, 마
이크로프로세서 응용, Navigation and
Localization, 신호처리.



한 순 신

2004년 동서대학교 전자공학과 졸업.
2006년 부산대학교 전자공학과 석사졸
업. 2012년 2월 부산대학교 전자공학
박사 졸업. 관심분야는 센서응용, 마이
크로프로세서 응용.



이 장 명

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업.
1982년 동 대학원 석사. 1990년 USC
공학박사(미국 남가주 대학교). 1992
년~현재 부산대학교 정교수. 관심분야
는 지능로봇시스템제어, 마이크로프로
세서 응용, Navigation/Localization.