능동 가상 임피던스를 이용한 이동 음원 추종 로봇의 장애물 회피

Obstacle Avoidance of a Moving Sound Following Robot using Active Virtual Impedance

한 종 호, 박 숙 회, 노 경 옥, 이 동 혁, 이 장 명*

(Jong-Ho Han¹, Sook-Hee Park¹, Kyung-wook Noh², Dong-Hyuk Lee¹, and Jang-Myung Lee^{1,*})

¹Department of Electrical Engineering, Pusan National University

²Department of Interdisciplinary Program in Robotics, Pusan National University

Abstract: An active virtual impedance algorithm is newly proposed to track a sound source and to avoid obstacles while a mobile robot is following the sound source. The tracking velocity of a mobile robot to the sound source is determined by virtual repulsive and attraction forces to avoid obstacles and to follow the sound source, respectively. Active virtual impedance is defined as a function of distances and relative velocities to the sound source and obstacles from the mobile robot, which is used to generate the tracking velocity of the mobile robot. Conventional virtual impedance methods have fixed coefficients for the relative distances and velocities. However, in this research the coefficients are dynamically adjusted to elaborate the obstacle avoidance performance in multiple obstacle environments. The relative distances and velocities are obtained using a microphone array consisting of three microphones in a row. The geometrical relationships of the microphones are utilized to estimate the relative position and orientation of the sound source against the mobile robot which carries the microphone array. Effectiveness of the proposed algorithm has been demonstrated by real experiments.

Keywords: microphone array, location, obstacle avoidance, mobile robot, sound source

1. 서론

마이크로폰을 이용하여 음원의 위치나 방향을 인식하는 음원 위치 인식 기술과 사람의 음성을 인식하는 음성 인식 기술은 현재까지 많은 발전을 해왔으며, 이를 이용하는 연구에는 다양한 기법들이 사용되고 연구되었다. 음원에서 발생한 음파는 위상차와 음압차를 가지고 각 마이크로폰에 도달하며, 음원 인식 방법으로써 음파의 위상차와 음압차를 이용한다. 마이크로폰에서 획득한 음파의 음압차(difference of sound pressure level)는 역제곱 법칙(inverse square law)에 따라 음파의 크기가 거리 제곱에 반비례하기 때문에 먼 거리에서의 음원 검출이 어렵다. 또한 공기 (혹은 매질)의 온도, 장애물의 유무, 공간의 크기, 주변음의 크기 등의 환경에 따라 음파가 반사, 회절, 간섭 등 영향을 많이 받아 원

신호가 왜곡될 가능성이 높기 때문에 신뢰도가 상당히 떨어진다. 반면 위상차를 이용하는 방법은 음파가 각 마이크로폰에 도달할 때 발생하는 시간차를 이용하여 위치정보를 추정하는 것[1,2]으로, 도달 시간차(TDOA: Time Difference of Arrival)를 측정하는 방법으로는 크게 특정 값을 추출하는 방법과 신호의 유사성을 분석하는 방법이 있다.

특정 값 즉, 최댓값 또는 역치(threshold value)를 추출하는 방법은 계산량이 적고 속도가 빠른 장점을 가지지만 잡음에 강인하지 못하다는 단점이 있다. 반면, 신호의 유사성을 분석하는 방법으로 차분법 및 상호상관(cross correlation) 또는 일반화된 상호상관(generalized cross correlation, PHAT 적용)을 적용하여 잡음 성분에 강인한 방법을 사용한다. 최근에는 이 상호상관 함수에 시간지연을 추정하지 않고, 적절한 사상함수를 이용하여 상호상관 함수를 공간좌표로 사상시킨 후 음원의 위치를 추정방법이 연구가 되었다[3,4]. 그 외 로봇의 음원 시스템으로 적용되는 머리전달함수(HRTF: Head Related Transfer Function), 빔포밍(beam forming) 방법, 사람 형상을 모방한 인공 귀(artificial ear)를 이용한 방법 등이 있지만, 계산량이 많고 시스템이 고가인 경우가 대부분이다[5-7].

음원 위치 인식 기술은 실제 로봇에 적용하기에는 노이즈에 매우 약하고 안정적이지 못하다는 문제점 때문에 대부분 특정 신호를 분석하는 신호처리에 중점을 두고 연구가 진행되었다. 현재는 이 연구들을 기반으로 기술과 장비가 발달하여 상당히 안정적으로 음원을 인식할 수 있게 되

* Corresponding Author

Manuscript received July 17, 2013 / revised October 31, 2013 / accepted November 19, 2013

한종호, 박숙회, 이동혁, 이장명: 부산대학교 전자전기공학과
(gkswhdgh114@pusan.ac.kr/sookhee7379@pusan.ac.kr/ldh0917@pusan.ac.kr/jmlee@pusan.ac.kr)

노경옥: 부산대학교 로봇관련협동과정(kyungwook7379@pusan.ac.kr)

※ 본 연구는 산업통상자원부 및 정보통신산업진흥원 융복합형 로봇전문인력양성 특수환경 Navigation/Localization 로봇기술연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(H1502-13-1001).

※ This research was financially supported by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE), Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) through the Inter-ER Cooperation Projects.

면서, 이러한 음원 위치 인식 기술을 응용하고 적용하는 연구로 관심이 기울여졌다. 그 중 한 분야로써 이동 로봇에 대한 적용이 있으며, 인식된 위치로 이동 및 추종, 장애물 회피 등의 연구가 있다[8,9]. 특히 음원 위치 인식 이동 로봇의 경우, 임의의 위치에서 발생하는 음원을 추종하기 때문에 이동 로봇 궤적의 급격한 회전과 비정상적 속도 변화가 발생할 수 있다. 따라서 실시간으로 이동하는 음원을 인식하여 추종하면서 장애물을 회피하기 위해서는 목표점과 이동 로봇, 장애물 사이의 상호 작용이 매우 중요하다.

실제로 이동 로봇이 주행하기 위해서 로봇의 기구학적 해석과 그 해석을 기반으로 로봇의 위치를 인식하고 경로를 계획하여야 한다. 이동 로봇의 위치를 인식하기 위한 방법으로는 모터의 엔코더를 이용한 추측항법(dead reckoning)이 대표적이다. 하지만 엔코더 센서만으로는 장애물이 공존하는 환경에서는 한계를 가지고 있으므로, 장애물을 인식하는 센서를 이용하여 실시간으로 장애물의 유무를 판별하고 회피를 하면서 목표점으로 이동할 수 있게 하여야 한다.

실시간으로 장애물 회피를 하는 방법으로는 VFH (Vector Field Histogram approach), CVM (Curvature Velocity Method), DWA (Dynamic Window Approach)가 있는데, 이런 방법들은 기본적으로 국부최소(Local minimum)을 가지고 있어 이 점을 극복 할 수 있는 다른 기법과 함께 혼합하여 국부최소를 보완하는 방법을 사용한다[10-12].

PFM (Potential Field Method)는 이동 로봇과 목표 지점 사이의 인력과 장애물과의 척력을 가정하여 로봇의 이동 방향 및 속도를 결정하는 방법[13,14]으로, 본 논문에서 제안하는 가상 임피던스 기법(virtual impedance method)이 이에 해당한다[15,16]. 가상 임피던스 알고리즘은 불확실한 환경과 로봇과의 상호작용을 스프링과 댐퍼로 대표되는 임피던스로 모델링하여 Potential Vector를 생성하는 알고리즘으로, 일반적인 임피던스 알고리즘을 이동로봇의 주행 및 충돌회피 분야에 적용하여 연구되어왔다. 하지만 목표점을 향해 주행 중 이동 장애물 혹은 밀집된 장애물과 마주치면 더 이상 주행하지 못하거나, 경우에 따라 충돌을 회피하지 못하고 경로를 이탈하는 상황이 발생할 수 있다. 이를 보완하기 위해 본 논문에서는 주변 환경과 로봇의 관계를 충돌 가능성에 따른 함수로 정의하여 보다 상황에 효율적으로 대처하는 능동 가상 임피던스 방법(active virtual impedance method)을 제안한다.

본 논문에서는 TDOA를 기반으로 한 상호상관 알고리즘으로 이동 음원의 위치를 인식하는 실험을 수행하며, 음원을 추종하는 이동 경로에서 장애물을 만나는 경우, 능동 가상 임피던스 기법을 적용하여 제안된 방법의 이동 음원 추종과 장애물 회피 성능이 타당성을 가지는지 실제 실험환경에서 장애물을 회피하는 실험을 통하여 평가한다.

먼저 II 장에서는 음원 위치 인식 알고리즘을 설명하고, III 장에서는 이동 로봇을 기구학적으로 해석한다. IV 장에서는 본 논문에서 제안하는 장애물 회피 알고리즘인 능동 가상 임피던스 방법에 대하여 말하고, V 장에서는 이동로봇 및 거리센서의 구성을 설명한 다음, VI 장에서 실험을 통한 결과를 논의하고, 마지막 장에서는 결론을 제시함으로써 이 논문을 마무리 한다.

II. 음원 위치 인식 알고리즘

1. 점음원

일반적으로 음파는 물체의 진동에 의하여 발생한다. 인위적으로 소리를 발생시키기 위해 스피커나 경적을 음원으로 사용할 수 있는데, 일정한 규칙으로 시간 간격을 두고 발생시켜 경고를 하거나 위치를 알리는 등의 의미를 가진다. 이렇게 비교적 짧은 시간에 순간적으로 소리를 발생시키는 점음원은 짧은 순간 에너지가 방출되는 형태로, 이러한 형태의 음원은 음파가 있는 부분과 없는 부분의 경계가 비교적 명확하다.

음원이 속도 v 를 가지고 이동하는 경우, 도플러 효과에 의해 파면이 동심원의 형태가 아니기 때문에 음원을 관측하는 위치에 따라 음파의 주파수 혹은 파형이 달리 측정될 수 있다. 다음은 도플러 공식이다.

$$f' = f \left(\frac{c \pm v_o}{c \pm v_s} \right) \quad (1)$$

여기서 v_o 와 v_s 는 각각 관측자와 음원의 이동속도를 나타내며, c 는 소리의 전달 속도를 말한다. 위 식에서 $c \gg v_o$ 이고 $c \gg v_s$ 이면, 즉 이동하는 음원에 대해서 음파가 발생하는 시간이 이동 로봇의 이동 시간에 비해 짧을 때 점음원 검출에 대해서 도플러 효과는 무시할 수 있다. 그 외 소리의 확산, 회절, 반사등에 의한 간섭은 음원의 백색 소음과 더불어 신호의 검출 및 위치 추정을 어렵게 한다.

소리의 전파는 진동을 통하여 에너지가 전달되는 것으로, 한 음원에서 발생한 음파가 방사형으로 퍼질 때 전달 속도 c 는 340 m/s로 일정하기 때문에 음파가 다수의 마이크로폰에 도달하는 시간은 음원과 각 마이크로폰 사이의 거리와 비례한다. 따라서 음원의 위치정보는 음파 도달 시간으로부터 추정할 수 있다.

2. 도달 시간차 및 차분법

추정 음원으로부터 i 번째 마이크로폰까지의 거리 R_i 를 음파 도달 시간 t_i 에 대하여 표현하면 다음과 같다.

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

이 식에서 t_i 는 음원으로부터 i 번째 마이크로폰까지 추정 음원까지의 도달시간, c 는 음파의 속도(340 m/s)를 나타낸다. 그러나 임의의 음원 위치 추정은 초음파 센서를 이용한 거리 측정과는 달리 임의의 음원과 음원 측정 장치 사이의 시간적 동기화가 이루어지지 않기 때문에 음파가 다수의 마이크로폰에 도달하는 시간을 직접 측정할 수 없다. 따라서 도달시간차(TDOA: Time Difference of Arrival)를 이용하며[1,2], 음원 위치 추정을 위하여 2개 이상의 도달 시간차가 필요하므로 마이크로폰은 3개 이상 사용한다. 추정 음원으로부터 발신된 음파 신호가 3개의 마이크로폰으로 구성된 수신부에 수신될 때 어떤 시간 t 에 대하여 i 번째 마이크로폰에 수신되는 신호음 $MR_i(t)$ 은 다음과 같이 표현된다.

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

위 식에서 $s(t)$ 은 마이크로폰에 수신되는 신호, $n_i(t)$ 은 i 번째 마이크로폰에 수신되는 외부잡음을 나타낸다. Δt_i 는 기준 마이크로폰과 i 번째 마이크로폰 사이의 도달시간차를 나타내며, 임의의 두 마이크로폰 사이에 대하여 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta t_{ij} &= t_i - t_j \\ &= -\Delta t_{ji} \quad i, j = 1, 2, 3\end{aligned}\quad (4)$$

측정된 두 신호의 시간차를 추정하기 위해 차분법을 이용한다. 차분법이란 두 신호의 차를 더하여 유사도를 추정하는 방법으로, 두 신호 차의 합이 작을수록 유사도가 높다. 즉, 두 신호 중 한 신호를 Δt_{ij} 만큼 이동시켰을 때 유사도가 가장 높게 나타나면, 이를 두 신호의 도달시간차라 한다.

측정된 두 파형 x_1 과 x_2 를 각각 n 개의 불연속 데이터 군으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} x_1(0), x_1(1), \dots, x_1(n-1) \\ x_2(0), x_2(1), \dots, x_2(n-1) \end{cases}\quad (5)$$

이 때, 두 신호의 차를 모두 더하여 차분계수 S_{x_1, x_2} 를 추정하는 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{x_1, x_2} = \sum_{k=0}^{n-1} \sqrt{(x_1(k) - x_2(k))^2}\quad (6)$$

두 번째 신호 $x_2(k)$ 를 j_M 만큼 이동시켰을 때, 차분계수를 j_M 에 대한 함수로 나타내면 식 (7)과 같다.

$$S_{x_1, x_2}(j_M) = \sum_{k=0}^{n-1} \sqrt{(x_1(k) - x_2(k + j_M))^2}\quad (7)$$

j_M 은 0~n-1의 값을 가지며, 유사도가 가장 크게 나타나는 j_M 에 샘플링타임을 곱하면 두 신호의 도달 시간차 Δt_{12} 가 된다. 다음 수식은 이를 수학적으로 표현한 것이다.

$$\Delta t_{12} = \frac{\arg \min}{j_M = 0, 1, \dots, n-1} [S_{x_1, x_2}(j_M)] \times t_{\text{sampling}}\quad (8)$$

3. 음원 위치 인식 알고리즘

앞서 수행한 음원 분석 알고리즘을 기반으로 음원의 거

그림 1. 2차원 공간에서의 음원과 마이크로폰의 기하학적 구조.
Fig. 1. The geometric structure of microphones and sound from 2D space.

리와 각도를 구할 수 있다. 하나의 음원과 3개의 마이크로폰 M_1 , M_2 , 및 M_3 를 한 평면상에서 일정한 간격($l_1 = l_2 = 40\text{cm}$)으로 배열하여 추정 음원으로부터 각각의 마이크로폰까지 거리인 R_1, R_2 및 R_3 와 각도 θ 를 구할 수 있다.

3.1 2차원 공간에서의 거리 측정

그림 1에서 R_1, R_2 및 R_3 를 추정 음원으로부터 각각의 마이크로폰으로 들어올 때의 거리라고 하고, 중심에 위치한 M_2 까지의 거리인 R_2 를 이동 로봇과 음파의 거리 D 라고 하면, R_1, R_2 및 R_3 는

$$\begin{cases} R_2 = c \cdot t_2 = D \\ R_1 = c \cdot t_1 = D + c \cdot \Delta t_{12} \\ R_3 = c \cdot t_3 = D + c \cdot \Delta t_{23} \end{cases}\quad (9)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (9)에서 c 는 음파의 속도(340 m/s)이며, $t_i (i = 1, 2, 3)$ 는 추정 신호음이 i 번째 마이크로폰까지 도달하는데 걸리는 시간 값을 나타내고, Δt_{12} 와 Δt_{23} 은 앞에서 차분법을 통하여 구한 도달 시간차를 나타낸다.

그림 1에서 두 삼각형이 넓이 조건을 이용하면 거리 D 를 구할 수 있다. 헤론의 공식(Heron's formula)을 이용하여 두 삼각형 $\triangle SM_1M_2$ 와 $\triangle SM_2M_3$ 의 넓이를 각각 구하면 다음과 같다.

$$\triangle SM_1M_2 = \sqrt{s_1(s_1 - R_1)(s_1 - R_2)(s_1 - l_1)}\quad (10-a)$$

$$\triangle SM_2M_3 = \sqrt{s_2(s_2 - R_2)(s_2 - R_3)(s_2 - l_2)}\quad (10-b)$$

이 때, $s_1 = \frac{1}{2}(R_1 + R_2 + l_1)$, $s_2 = \frac{1}{2}(R_2 + R_3 + l_2)$ 이다.

$l_1 = l_2 = l$ 일 때, 두 삼각형 $\triangle SM_1M_2$ 와 $\triangle SM_2M_3$ 은 넓이가 같으므로 다음 식이 성립한다.

$$\begin{aligned}\sqrt{s_1(s_1 - R_1)(s_1 - R_2)(s_1 - l)} \\ = \sqrt{s_2(s_2 - R_2)(s_2 - R_3)(s_2 - l)}\end{aligned}\quad (11)$$

위 식에, 식 (9)를 대입하여 정리하면 다음과 같이 거리 D 를 구할 수 있다.

$$D = \frac{l^2 + lc(\Delta t_{12} + \Delta t_{23}) - c^2(\Delta t_{12}^2 + \Delta t_{12}\Delta t_{23} + \Delta t_{23}^2)}{2c(\Delta t_{12} + \Delta t_{23})}\quad (12)$$

3.2 2차원 공간에서의 각도 측정

2차원 평면상에서 음원으로부터 세 개의 마이크로폰까지의 거리는 마이크로폰 간격에 비해 충분히 크기 때문에 음파는 각 마이크로폰에 평행하게 도달한다. 따라서 코사인 법칙을 이용하여 간단하게 방향각을 추정할 수 있다.

그림 2에서 각 마이크로폰에 평행하게 입사되는 음파의 방향각 θ_1, θ_2 는 다음과 같이 표현된다.

$$\theta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{d_1}{l}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{c \cdot \Delta t_{12}}{l}\right)\quad (13-a)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{d_2}{l}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{c \cdot \Delta t_{23}}{l}\right)\quad (13-b)$$

그림 2. 2차원 공간에서의 음원 각도 측정 원리.

Fig. 2. The principle of sound angle measurement form 2D space.

표 1. 거리 및 각도 측정 평균.

Table 1. Distance and angle measurement average.

거리 \ 각도	0°	30°	60°
1 m	0.4°, 1.04 m	29.9°, 0.99 m	60°, 0.99 m
2 m	0.3°, 1.98 m	30°, 1.90 m	61.3°, 1.98 m
3 m	0.3°, 3.07 m	30.1°, 2.86 m	61.6°, 2.89 m
4 m	0.6°, 3.93 m	30.4°, 3.72 m	59.7°, 3.82m

표 2. 거리 및 각도 측정 표준 편차.

Table 2. Distance and angle measurement standard deviation.

거리 \ 각도	0°	30°	60°
1 m	0.08°, 0.02 m	0.2°, 0.03 m	0.2°, 0.07 m
2 m	0.05°, 0.05 m	0.34°, 0.08 m	0.54°, 0.13 m
3 m	0.15°, 0.09 m	0.35°, 0.12 m	0.66°, 0.37 m
4 m	1.12°, 0.48 m	2.27°, 0.20 m	2.4°, 0.43 m

4. 음원 위치 인식 알고리즘 성능 테스트

음원 위치 추정 성능을 검증하기 위하여, 장애물이 없고 공간이 넓은 실내에서 일정 간격의 기준 좌표를 주어 실험을 진행하였다. 음원과 마이크로폰 어레이 중심의 거리가 1, 2, 3, 4 m로 주어졌을 때, 각 경우에 대하여 음원의 각도가 0°, 30°, 60°인 위치에서 실험함으로써, 음원의 위치에 따른 음원 위치 인식 알고리즘 성능을 테스트하고자 하였다. 표 1과 표 2는 실험을 통하여 측정한 거리와 각도 값의 평균과 표준오차를 나타낸다. 이 때, 각도는 이동 로봇의 진행방향과 이루는 각으로 한다. 보다 일반적인 실험 결과를 얻기 위해 각각 100회의 실험을 수행하였다.

표 1에서 나타내고 있는 측정 평균값과 표 2에서 나타내고 있는 표준 편차를 종합하여 보면, 동일한 조건에서 음원과의 거리가 멀수록 오차가 커진다. 또한, 음원이 이동 로봇의 측면에 위치할수록 오차가 커짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 음원에서 멀어지고 측면에 위치할수록 마이크로폰에 입력되는 신호의 왜곡이 크고 음장(Sound Field)의 영향을 받아 정확한 도달시간차 측정이 어렵기 때문이다.

III. 이동 로봇의 기구학적 해석 및 주행

이번 장에서는 음원을 추종하고 장애물을 회피하기 위한 이동 로봇의 기구학적 해석과 이동하는 로봇의 주행 방법에 대해서 간략히 설명하고자 한다.

1. 기구학 해석

그림 3. 이동 로봇의 기구학 모델.

Fig. 3. The kinematics model of a mobile Robot.

2차원 $X-Y$ 직교좌표계(cartesian coordinate)상에서 로봇의 위치는 $x_R(t)$ 와 $y_R(t)$ 로 표시하며, 방향은 y 축을 기준으로 $\theta_R(t)$ 로 나타낸다. 그림 3은 이동 로봇의 기구학 모델을 나타낸다.

직교좌표공간의 위치 및 방향을 자세 벡터 P 로 정의하면,

$$P = [x_R(t) \ y_R(t) \ \theta_R(t)]^T \quad (14)$$

로 표시된다. 또한 직교 좌표 상에서 속도는

$$\dot{P} = [\dot{x}_R(t) \ \dot{y}_R(t) \ \dot{\theta}_R(t)]^T \quad (15)$$

로 나타내어진다. 이를 다시 선형속도 $v(t)$ 와 각속도 $\omega(t)$ 에 대해 표현하면 $\dot{x}_R(t) = \cos\theta \cdot v$, $\dot{y}_R(t) = \sin\theta \cdot v$ 및 $\dot{\theta}_R(t) = \omega$ 로 정의되며, 이동 로봇의 기구학 모델은 자코비안 행렬 J (Jacobian matrix)에 의해 식 (16)로 표시된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (16)$$

2. 이동 로봇 주행

이동 로봇의 주행은 양 바퀴의 속도에 의해서 결정되며, 기구학 모델을 바탕으로 선형속도 v 와 각속도 ω 와의 관계는 다음과 같이 정의된다.

$$v = \frac{v_R + v_L}{2} \quad (17)$$

$$\omega = \frac{(v_R - v_L)}{l} \quad (18)$$

여기서, v_L 은 왼쪽 바퀴의 속도, v_R 은 오른쪽 바퀴의 속도를 나타내며, 양 바퀴 사이의 길이는 l 로 표시한다. 능동 가상 임피던스 알고리즘을 통해 이동 로봇의 선형 속도 $\dot{x}_R(t)$, $\dot{y}_R(t)$ 가 주어지면, 선형속도 v 와 각도 $\theta(t)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v = \sqrt{(\dot{x}_R(t))^2 + (\dot{y}_R(t))^2} \quad (19)$$

$$\theta_R(t) = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{y}_R(t)}{\dot{x}_R(t)} \right) \quad (20)$$

또한, 식 (17), (18)에 의해 양 바퀴의 속도 식이 다음과 같이 유도된다.

$$v_R = v + \dot{\theta}_R(t) \frac{l}{2} \quad (21)$$

$$v_L = v - \dot{\theta}_R(t) \frac{l}{2} \quad (22)$$

위 식들을 이용하여 이동 로봇의 속도 $\dot{x}_R(t)$, $\dot{y}_R(t)$ 에 따라 로봇의 양쪽 바퀴에 적절한 속도 값 v_R , v_L 을 주어서 로봇이 우리가 원하는 방향과 위치로 이동하게 한다.

IV. 능동 가상 임피던스를 이용한 장애물 회피

음원 위치 인식 알고리즘을 통해 얻어진 음원의 위치 정보로 이동하고 장애물을 효율적으로 회피하기 위한 주행 알고리즘으로 새롭게 능동 가상 임피던스 알고리즘을 제안한다.

1. 충돌 벡터 생성 및 공간회전

이동 로봇이 목표점을 향한 주행 경로 상에서 장애물을 회피하기 위해서는 우선 장애물의 정확한 위치 파악이 필요하다. 이동 로봇의 주행 방향을 기준으로 임의의 거리 센서가 이루는 각과 센서의 거리 데이터를 이용하여 거리 벡터 $\vec{L}_i$ (i : interger)을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \vec{L}_i &= (x_i, y_i) = (d_i \sin \theta_i, d_i \cos \theta_i) \\ &= ((d_{i,f} + d_{i,u}) \sin \theta_i, (d_{i,f} + d_{i,u}) \cos \theta_i) \end{aligned} \quad (23)$$

식 (23)에서 d_i 는 초음파에서 초점 사이의 거리 $d_{i,f}$ 와 i 번째 거리 센서를 통하여 얻은 장애물과 로봇 사이의 거리 $d_{i,u}$ 의 합으로 표현된다. 즉, d_i 는 i 번째 초음파가 감지한 장애물과 초음파의 초점 P_o 사이의 거리이고 θ_i 는 로봇의 주행 방향 Y_R 과 i 번째 거리 센서가 이루는 각이다.

본 논문에서는 로봇 전면부의 장애물 인식을 위하여 3개의 거리 센서를 사용하며, 각 센서의 장애물 인식 여부에 따라 이동 로봇의 중심과 장애물 사이의 거리와 방향을 벡터로 표현하고 이를 충돌 벡터(Collision Vector, $\vec{C}$)로 정의한다[14]. 충돌 벡터 생성은 크게 다음 두 가지 경우로 나눌 수 있다.

- 경우 1: 1개의 거리 센서에서 장애물이 감지되는 경우로써 비교적 폭이 좁은 장애물이 이 경우에 해당된다. 장애물이 감지되는 거리 센서의 거리 벡터 $\vec{L}_i$ 에 대하여 충돌 벡터를 다음과 같이 정의한다.

$$\vec{C} = \vec{L}_i \quad (24)$$

- 경우 2: 연속한 2개의 거리 센서에서 장애물이 감지되는 경우로, 각 거리 센서를 통하여 얻은 거리 벡터 $\vec{L}_i$, $\vec{L}_{i+1}$ 의 검출 점 P_i , P_{i+1} 를 다음 수식과 같이 표현할 수 있다.

그림 4. 충돌 벡터 검출 원리.

Fig. 4. The principle of collision vector detection.

그림 5. 충돌 벡터의 공간회전.

Fig. 5. The space rotation of collision vector.

$$P_i = (x_i, y_i) = (d_i \sin \theta_i, d_i \cos \theta_i) \quad (25-a)$$

$$P_{i+1} = (x_{i+1}, y_{i+1}) = (d_{i+1} \sin \theta_{i+1}, d_{i+1} \cos \theta_{i+1}) \quad (25-b)$$

검출된 두 벡터를 하나의 장애물로 인식하기 위해 식 (25)를 이용하여 선분 $\overline{P_i P_{i+1}}$ 를 구하고, 초음파의 초점 P_o 를 지나면서 선분 $\overline{P_i P_{i+1}}$ 에 수직하는 벡터 $\overrightarrow{P_o P_c}$ 를 충돌 벡터 $\vec{C}$ 로 정의한다.

$$\vec{C} = \overrightarrow{P_o P_c} = (x_c, y_c) = \left(\frac{V \cdot x_i - y_i}{V + \frac{1}{V}}, \frac{x_i + \frac{1}{V} \cdot y_i}{V + \frac{1}{V}} \right) \quad (26)$$

여기서 $V = \frac{y_i - y_{i+1}}{x_i - x_{i+1}}$ 이며, 초음파의 초점 P_o 는 원점 (0, 0)으로 설정하였다.

충돌 벡터의 경우 이동하는 로봇을 기준으로 구해진 상대 벡터이므로 절대좌표로 공간회전이 필요하다.

아래 식은 z 축을 기준으로 현재 이동 로봇의 자세 각도 θ_R 만큼 공간을 회전하는 행렬이다.

$$\begin{bmatrix} x_{ab} \\ y_{ab} \\ \theta_{ab} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_R & \sin \theta_R & 0 \\ -\sin \theta_R & \cos \theta_R & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ \theta_c \end{bmatrix} \quad (27)$$

2. 가상 힘 모델링

이동 로봇의 현재 위치와 목표점(reference point), 장애물

그림 6. 가상 임피던스 모델.

Fig. 6. The virtual impedance model.

과의 거리 및 속도 관계를 스프링(spring)과 댐퍼(damper)로 모델링하여 임피던스 알고리즘을 이동 로봇의 장애물 회피에 적용하면 로봇의 가속도 $\ddot{x}(s)$ 를 구할 수 있다[14]. 이러한 방법을 가상 임피던스 방법(Virtual Impedance Method)이라고 하며, 그림 6은 가상 힘 모델링을 보여준다.

그림 6을 통하여 얻은 이동 로봇의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{x}_s = \frac{1}{M_s} \left(F_m - \sum_{i=1}^{n_{os}} F_{os,i} - \sum_{i=1}^{n_{od}} F_{od,i} \right) \quad (28)$$

여기서 F_m 은 현재 로봇의 위치 x_s 와 목표점(reference point) X_r 와의 가상의 인력을, $F_{os,i}$ 와 $F_{od,i}$ 는 각각 현재 로봇의 위치 x_s 와 i 번째 고정 장애물 $x_{o,s}$ 및 이동 장애물 $x_{o,d}$ 사이의 가상의 반발력을 나타내며, 각각 목표점을 추종하고 장애물을 회피하는 역할을 한다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_m &= K_r(X_{r,s}) + D_r(\dot{X}_{r,s}) \\ &= K_r(X_r - x_s) + D_r(\dot{X}_r - \dot{x}_s) \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} F_o &= K_o(X_{s,o}) + D_o(\dot{X}_{s,o}) \\ &= \sum_{i=0}^n \{ K_o(x_s - x_{oi}) + D_o(\dot{x}_s - \dot{x}_{oi}) \} \end{aligned} \quad (30)$$

식 (28), (29) 및 (30)에서 쓰인 각 변수에 대한 정의를 표 3에 정리하였다.

표 3. 가상 임피던스 알고리즘 상수에 대한 정의.

Table 3. Definition of constants for virtual impedance algorithm.

변수	정의
M_s	로봇 궤적의 상대적인 변화율을 조절하는 인자
n_{os}	고정 장애물의 개수
n_{od}	동적 장애물의 개수
K_r	현재 로봇 위치와 목표점 사이의 스프링 상수
D_r	현재 로봇 위치와 목표점 사이의 댐퍼 상수
K_o	장애물과 로봇 사이의 스프링 상수
D_o	장애물과 로봇 사이의 댐퍼 상수

앞서 구한 충돌 벡터 $\vec{C}$ 를 이용하여 식 (30)을 정리하면,

$$\begin{aligned} F_o &= K_o(X_{s,o}) + D_o(\dot{X}_{s,o}) \\ &= \begin{cases} K_o(\rho_o - \|\vec{C}\|)\vec{u}_c + D_o(\|\Delta\vec{C}\|)\vec{u}_c & (\text{when } \|\vec{C}\| < \rho_o) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \end{aligned} \quad (31)$$

와 같이 정리되며, 이 때 $\vec{u}_c = \frac{\vec{C}}{\|\vec{C}\|}$ 이다.

일반적인 단일 고정 장애물의 경우, 기존 가상 임피던스 방법으로 장애물을 회피할 수 있으나, 여러 장애물이 밀집한 경우에 이동 로봇이 더 이상 주행하지 못하는 상황이 발생한다. 또한, 이동하는 장애물에 대한 갑작스러운 반발력의 증가는 이동 로봇의 비정상적인 속도변화를 유도한다. 이는 이동 로봇의 경로가 진동하거나 심지어 이탈하도록 하기 때문에 적절한 보완이 필요하다.

3. 능동 가상 임피던스 알고리즘

가상 임피던스 방법은 장애물 또는 목표점과의 거리와 접근속도에 따라 이동 로봇의 운동을 결정하며, 기존의 방법은 그 관계를 스프링 상수와 댐퍼 상수로 정의하여 선형성을 가진다. 본 논문에서는 장애물과의 반발력을 충돌 가능성에 대한 비선형 함수로 정의하여, 거리와 접근 속도에 따라 상수 값을 변화시키는 능동 가상 임피던스 방법을 제안한다. 스프링 상수 및 댐퍼 상수를 함수화하여 장애물과의 반발력을 다음과 같이 정의한다.

$$K_o(X_{s,o}) = k_{ref} \exp\left(-\frac{\|\vec{C}\|}{\alpha}\right) \|\vec{C}\| \vec{u}_c \quad (32-a)$$

$$D_o(\dot{X}_{s,o}) = d_{ref} \exp\left(\frac{\|\Delta\vec{C}\|}{\beta}\right) (\mu_o - \|\Delta\vec{C}\|) \vec{u}_c \quad (32-b)$$

(단, $\|\Delta\vec{C}\| < \mu_o$)

식 (32)에서 k_{ref} 와 d_{ref} 는 각각 거리 및 접근 속도에 대한 반발력을 조절하는 인자이고, α 및 β 는 반발력의 비선형적 모양을 결정하며 μ_o 는 이동 로봇이 인지하는 접근 속도의 최댓값이다.

그림 7은 기존의 가상 임피던스와 능동 가상 임피던스의 척력 발생을 장애물과의 거리 및 접근 속도에 따라 그림으로 나타낸 것이다. 그림 7(a)는 장애물과의 거리에 대한 반발력을 보여주며, 능동 가상 임피던스는 기존 방법과 달리

그림 7. 장애물과의 거리 및 접근 속도에 따른 반발력.

Fig. 7. Repulsive force by distance and velocity of obstacle.

표 4. 가상 임피던스 알고리즘의 비교.

Table 4. Comparison of virtual impedance algorithm.

	Virtual Impedance	Active Virtual Impedance
Spring constant	K_o	k_{ref}
Damper constant	D_o	d_{ref}
Distance factor	$\rho_o - \ \vec{C}\ $	$\exp\left(-\frac{\ \vec{C}\ }{\alpha}\right)\ \vec{C}\ $
Velocity factor	$\ \Delta\vec{C}\ $	$\exp\left(\frac{\ \Delta\vec{C}\ }{\beta}\right)(\mu_o - \ \Delta\vec{C}\)$
Constraint condition	$\ \vec{C}\ < \rho_o$	$\ \Delta\vec{C}\ < \mu_o$

충돌벡터의 크기가 ρ_o 보다 큰 경우에도 약간의 반발력이 발생함을 알 수 있다. 이는 비교적 먼 거리의 장애물을 인식하여 속도를 크게 줄이지 않으면서, 충돌 벡터는 이동 로봇의 자세를 영점으로 하는 상태 벡터이므로 주행 방향을 바꿔 장애물에 근접하지 않도록 한다. 그림 7(b)는 기존의 가상 임피던스와 능동 가상 임피던스에서 장애물과의 접근 속도에 대한 반발력을 보여주며, 접근 속도가 μ_o 이상일 때에는 장애물이 이동 로봇에 앞서 지나가는 경우이므로 장애물을 인식하지 않는다. 식 (31)과 (32)를 이용하여 최종적으로 가상의 반발력 F_o 를 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$F_o = K_o(X_{s,o}) + D_o(\dot{X}_{s,o})$$

$$= k_{ref} \exp\left(-\frac{\|\vec{C}\|}{\alpha}\right) \|\vec{C}\| + d_{ref} \exp\left(\frac{\|\Delta\vec{C}\|}{\beta}\right) (\mu_o - \|\Delta\vec{C}\|) \quad (33)$$

충돌 가능성에 따라 반발력이 선형적으로 증가하는 기존의 가상 임피던스와는 달리, 능동 가상 임피던스 알고리즘은 그림 7과 같이 비선형적 모델을 제안한다. 기존의 가상 임피던스와 능동 가상 임피던스를 표 4에 정리하여 비교하였다.

Distance 및 Velocity factor를 비교하여 보면, 기존 가상 임피던스는 충돌 벡터에 대하여 반발력이 양 혹은 음의 방향으로 선형적 변화를 보이는 반면, 능동 가상 임피던스는 지수 항에서 반발력의 비선형적 형태를 결정하며 충돌 벡터의 크기를 곱하여 충돌 벡터가 0(zero) 혹은 μ_o 일 때 반발력을 발생시키지 않도록 한다. 이에 따라 기존 가상 임피던스와 능동 가상 임피던스의 제약조건이 표 4와 같이 다르게 나타난다.

능동 가상 임피던스에서 α 및 β 값은 각각 ρ_o 및 μ_o 와 비교하여 선정할 수 있다. α 의 경우 크기가 작아질수록 반발력 전체 크기가 작아지면서 좌측으로 이동한다. $\|\vec{C}\| < \rho_o$ 일 때 충분한 크기의 반발력을 형성하기 위하여, 충돌 벡터의 크기가 $\rho_o/2$ 일 때 반발력의 크기가 $K_o \rho_o/2$ 이어야 하며 β 의 경우도 역시 동일하다. 이 때, α 및 β 는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\alpha = \frac{\rho_o}{2 \ln(k_{ref}/K_o)} \quad (\text{단, } k_{ref} > K_o) \quad (34)$$

$$\beta = \frac{\mu_o}{2 \ln(d_{ref}/D_o)} \quad (\text{단, } d_{ref} > D_o) \quad (35)$$

V. 이동 로봇 및 거리 센서의 구성

1. 이동 로봇 시스템의 구성

본 논문에서는 실험을 위하여 두 개의 차륜 구동 형태의 로봇을 구성하였다. 서두에서 음원을 방출하면서 이동하는 로봇과 방출된 음원의 위치를 실시간으로 인식하여 추종하며 장애물을 회피하는 로봇으로 시스템을 구성하였다.

그림 8은 음원 추종 이동 로봇의 시스템 동작 구조이다. 음원 위치 추종 및 장애물 회피는 실시간으로 동작하는 시스템으로, 크게 음원 위치 인식과 로봇 주행 부분으로 나눌 수 있다. 임의의 시간에 발생하는 암묵음원(blind sound)의 위치를 추정하기 위하여 음원 위치 인식 부분은 소리가 발생할 때 마다 실시간으로 위치를 추정한다. 본 논문에서는 음원을 방출하는 이동 물체가 1.8초 마다 약 0.5초간 반복하여 소리를 발생시키도록 구성하여 성능을 실험하였다. 로봇 주행 부분은 25ms 마다 능동 가상 임피던스 알고리즘을 수행하여 음원 추종 로봇이 장애물을 인식하고 회피 및 주행하도록 하였다.

이동물체: NTRexLAB에서 제작한 NT-Commander-1로, 양쪽의 앞과 뒤의 바퀴는 같은 속도로 움직이게 구성하여 2자유도를 구성하였다. DC 모터는 D&J WITH의 RB-35GM이다. 감속비는 50:1이며, 자기식 Encoder(2600 Pulses/rot)를 가지고 있어 모터의 위치 정보를 얻는다. 이동물체에는 음원을 방출하는 스피커를 부착하여 실시간으로 일정한 소리를 방출하도록 하였다. 스피커는 롯데전자 사의 LS-705로 최대 30 W로 음원의 크기를 방출하게 된다. 스피커 소리를 방출할 수 있도록 FunnyKIT 사의 5 W 파워 앰프(R002)를 구성하였다.

그림 9와 10은 구성된 이동 물체와 이동 로봇을 각각 나타낸다.

2. 센서의 구성과 장애물 거리 측정 방법

장애물 회피를 위한 거리 센서로는 일반적으로 가장 많이 사용되는 초음파 센서 SRF-05를 사용하였으며, 센서의 탐지 각도는 중심에서 좌우로 각각 약 30°이고 3 cm ~ 300

그림 8. 음원 추종 이동 로봇 시스템 흐름도.

Fig. 8. The flowchart of sound tracking mobile robot system.

그림 9. 이동 물체.

Fig. 9. The moving object.

표 5. 이동물체의 하드웨어 제원.

Table 5. The hardware specifications of the moving object.

List	Specification
Size (mm)	352(W)*326(L)*320(H)
Weight (kg)	5.3
Distance between wheels (mm)	290
Radius of wheel (mm)	55

그림 10. 이동 로봇.

Fig. 10. The mobile robot.

표 6. 이동 로봇의 하드웨어 제원.

Table 6. The hardware specifications of the mobile robot.

List	Specification
Size (mm)	380W*290L*471H
Weight (kg)	8.5
Distance between wheels (mm)	289
Radius of wheel (mm)	75

cm까지 물체를 탐지한다. SRF-05는 제어하기가 쉽고 가격이 저렴하지만 지향성이 넓지 않은 단점이 있다. 초음파의 지향성을 극복하고 효율적으로 장애물을 탐지하기 위해 이동 로봇의 전면부에 3개의 초음파 센서를 그림 11과 같이 좌측, 중앙, 그리고 우측에 60° 간격으로 배치하여 전면부에 위치한 장애물을 탐지할 수 있도록 한다. 이 때, 초음파

그림 11. 초음파 센서의 구성.

Fig. 11. The configuration of ultrasonic sensors.

센서의 간격 때문에 발생하는 사각지대는 장애물과 모바일 로봇의 크기에 비해 무시할 수 있을 만큼 충분히 작다.

로봇의 장애물 회피는 회피 알고리즘뿐 아니라, 센서를 통해 장애물의 위치를 정확히 파악하는 능력에 따라서도 성능이 결정된다. 따라서 센서의 특성을 고려하여 정확한 거리정보를 얻어올 수 있도록 하여야 한다. 보통의 초음파 센서는 40~50 kHz의 주파수로 방사되며, SRF-05는 40 kHz로 방사된다. 또한 음파의 속도는 매질과 주변온도에 따라 달라지는 특성을 가지고 있다. 초음파 센서로부터 장애물까지의 거리는 음파의 비행시간(time of flight, TOF)을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$v[m/sec] = 331.5 + 0.6 \times T \quad (36)$$

$$d = \frac{vt}{2} \quad (37)$$

여기서 v 는 공기 중의 음파의 전달속도(331.5m/s, 0°C)이며, T 는 공기의 섭씨온도이다. d 은 장애물까지의 거리이고, t 는 음파가 방사되어 수신될 때까지의 비행시간을 나타낸다.

VI. 실험 및 결과

II, III IV 장에서 설명한 내용에 대하여 성능을 평가하기 위하여 다음 세 가지 상황에 대해 실험을 수행하였으며, 바닥면에 요철이 없는 실내에서 진행되었다. 각 실험에서 음원과의 인력을 결정하는 스프링 상수 및 댐퍼 상수는 시뮬레이션을 통하여 선정하였으며, 각각 $K_r = 2$ 와 $D_r = 1$ 로 설정하였다.

• 실험 1: 실시간 음원 추종 실험

우선, 제안한 알고리즘의 음원 위치 추종 성능 실험을 간단히 보이고자 한다. 가로 7.0 m, 세로 7.0 m의 장애물이 없는 환경에서 직선으로 이동하는 음원을 추종하도록 하였다.

그림 12는 장애물이 없는 환경에서 음원 추종 로봇이 실시간으로 음원 위치를 인식하고 추종함을 보인다. 소리는 1.8초 간격으로 발생시켰으며, 음원 추종 로봇의 총 주행시간은 11.2초이다. 이때, 음원 추종 로봇이 인식한 소리의 거리 값과 각도 값을 표 7에 정리하였다. 각도는 이동 로봇의 정면을 0°로, 좌우를 각각 -, +로 표현하였다.

• 실험 2: 다중 고정 장애물 회피

본 논문에서 제안하는 능동 가상 임피던스 알고리즘을 적용하여 연속하는 고정 장애물 회피 실험을 수행함으로

그림 12. 음원 추종 성능 실험.

Fig. 12. Sound tracking performance experiment.

표 7. 실시간 음원 추종 결과(시간, 거리, 각도).

Table 7. The result of real time sound localization(Time, Distance, Angle).

Time(s)	Start	1.8	3.6	5.4	7.2	9	11.2 (End)
Distance(m)	1.65	2.15	1.92	1.80	1.66	1.79	-
Angle(°)	31	17.5	-6.0	1.5	0	-1.5	-

그림 13. 다중 고정 장애물 회피 실험 환경.

Fig. 13. The experimental environment for multi-fixed obstacle avoidance.

써 기존의 가상 임피던스 알고리즘과의 차이점을 보이고자 한다.

그림 13은 고정 장애물 회피 실험에 대한 실제 실험 환경 사진이다. (4, 4) 위치에 음원을 고정하고, 고정 장애물 두 개를 예상 경로에 연속하도록 위치시켰다. 음원은 1회만 발생시켜 목표점을 고정시키도록 하였다.

그림 14는 기존 가상 임피던스 알고리즘과 능동 가상 임피던스 알고리즘을 각각 적용하여 실험한 궤적을 비교한다. 기존 가상 임피던스를 이용한 실험에서 충돌 벡터를 통하여 장애물을 감지하는 최소 거리 ρ_o 는 800 mm로 설정하였고, 능동 가상 임피던스를 적용한 실험에서 이동 로봇이 인지하는 최대 접근 속도 μ_o 는 600 mm/s로 설정하였다. 이

그림 14. 다중 고정 장애물 회피 실험 결과.

Fig. 14. The experimental result of multi-fixed obstacle avoidance.

그림 15. 이동 장애물 회피 실험 환경.

Fig. 15. The experimental environment for moving obstacle avoidance.

때, 기존 가상 임피던스와 능동 가상 임피던스 적용 주행 시간은 각각 9.475초와 8.821초로, 능동 가상 임피던스를 적용한 경우 약간 빨랐음을 알 수 있다.

기존의 가상 임피던스 알고리즘의 경우, 장애물이 전면 에 위치하더라도 ρ_o 보다 먼 거리에 위치한 장애물은 인식하지 못하기 때문에 장애물 방향으로 주행하고 장애물과의 거리가 충분히 가까워진 이후에 주행방향을 수정한다. 반면, 능동 가상 임피던스를 적용한 경우, 초음파가 인식할 수 있는 모든 거리 값에 대해서 척력이 발생하기 때문에 비교적 먼 거리의 장애물에 대해서도 반발력이 작용한다. 이때, 척력은 크기가 작아 주행 속도에는 영향을 미치지 않고 주행 방향에 조금씩 변화를 주어 주행 궤적을 완만하게 하는 역할을 한다.

• 실험 3: 이동 장애물 회피 실험

능동 가상 임피던스 알고리즘의 이동 음원 추종 및 움직이는 장애물 회피 성능을 보이기 위해 다음과 같이 실험을 수행하였다. 실험은 단일 이동 장애물과 진행 방향이 다른 두 이동 장애물 회피에 대해 각각 진행하였다.

그림 15는 이동 장애물 회피 실험 환경을 보여준다. 실험은 가로 6.0 m, 세로 8.0 m의 실내 환경에서 진행하였다.

그림 16. 이동 장애물 회피 실험 결과.

Fig. 16. The experimental result of moving obstacle avoidance.

표 8. 이동 장애물 회피의 음원 인식 결과(시간, 거리, 각도).

Table 8. Sound localization result of moving obstacle avoidance (Time, Distance, Angle).

Time(s)	Start	1.8	3.6	5.4	7.2	9.32 (End)
Distance(m)	2.40	2.88	-	2.45	3.22	-
Angle(°)	46	-3.1	-	-53.2	-28.5	-

그림 17. 다중 이동 장애물 회피 실험 결과.

Fig. 17. The experimental result of multi-moving obstacle avoidance.

이동 음원의 속도는 300 mm/s로 설정하였으며, μ_o 는 720 mm/s로 설정하였다.

표 9. 다중 이동 장애물 회피 실험에서 실시간 음원 위치.

Table 9. Sound localization of multi-moving obstacle avoidance.

Time(s)	Start	1.8	3.6	5.4	7.2	9	10.8	11.89 (End)
Distance(m)	2.51	2.67	1.87	-	1.66	1.2	1.2	
Angle(°)	31	-1.5	3	-	-41.2	60	38	

그림 16은 단일 이동 장애물을 회피하며 실시간으로 이동 음원을 추종하는 궤적 그래프이다. 이 때, 인식한 음원의 위치를 표 8에 정리하였다. 실험 결과, 이동 로봇이 음원을 추종할 때 이동 장애물을 만나면, 장애물을 회피한 후에 음원을 추종하며, 음원 추종 로봇이 장애물을 회피하는 방향은 장애물과의 거리와 접근 속도에 따른 반발력이 작용하는 방향임을 알 수 있다. 3.6초에는 이동 장애물을 회피하는 동안 음원의 방향이 위치 추정 범위를 벗어나게 되어 인식된 음원 위치 데이터가 없다. 이때에는 1.8초에 인식한 위치를 목표점으로 주행방향을 설정한다.

그림 17은 이동하는 장애물을 연속하여 마주치는 경우에 대한 실험 결과이다. 그림 17(b)에서 다중 이동 장애물의 경우에는 첫 번째로 마주치는 이동 장애물을 회피한 후, 목표하는 이동 음원의 주행 궤적을 추종하려는 것을 알 수 있다. 그림 17(c), (d)에서는 이동 로봇 주행 방향의 오른쪽에서 이동하는 장애물을 감지하고 추종 음원 궤적을 벗어나 장애물을 회피한 후, 다시 추종함을 보인다. 이 때, 실시간으로 인식된 음원의 위치를 표 9에 정리하였다.

VII. 결론

본 논문에서는 능동 가상 임피던스 알고리즘을 제안하고, 음원 추종 실험 및 장애물 회피 실험을 통하여 이동 음원을 추종하고 장애물을 회피하는 데 효과적인 알고리즘이라는 것을 확인하였다. 능동 가상 임피던스 방법은 충돌 가능성에 따라 댐퍼 및 스프링 상수를 변화시킴으로서 기존의 가상 임피던스 방법보다 효율적으로 장애물을 회피하면서 주행을 가능하게 한다. 즉, 장애물이 가까워지기 전에 이동 로봇의 주행 궤적을 새롭게 설정하여 제어하고, 이동 로봇의 미끄러짐을 유발하는 급격한 방향변화 없이 완전한 주행이 가능하도록 한다. 완전한 주행으로 갑작스런 주행각의 변화가 없기 때문에 슬립 현상이 적어지며 궤적 추종의 성능도 향상될 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 즉, 댐퍼 및 스프링 상수의 적절한 변화를 통하여 로봇의 주행 경로를 최대한 완전한 곡선주행이 되도록 하는 것이 주행제어의 정도 향상에 도움이 됨을 확인하였으며, 다수의 동적 장애물의 존재 시 최적의 회피 경로에 대한 연구는 자세히 진행되어야 할 것이다.

REFERENCES

- [1] J. H. Yoon, G. H. Choi, and J. M. Yoo, "A study about direction estimate device of the sound source using input time difference by microphones arrangement," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, vol. 21, no. 5, pp. 91-98, 2004.

- [2] K. Kodera, A. Itai, and H. Yasukawa, "Sound localization of approaching vehicles using uniform microphone array," *Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, pp. 1054-1058, 2007.
- [3] Y.-E. Kim, S.-A. Hong, and J.-G. Chung, "Efficient implementation of IFFT and FFT for PHAT weighting speech source localization system," *The Institute of Electronics Engineering of Korea*, vol. 46, no. 1, pp. 71-78, 2009.
- [4] 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, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 5, pp. 415-419, 2010.
- [5] H. Tsuchiya, T. Nissato, H. Hasegawa, S. Matsumoto, A. Koike, K. Takagi, and M. Kasuga, "Sound distance localization using head-related transfer functions (HRTFs) approximated by IIR filters," *International Technical Conference on Circuits Systems, Computers and Communications*, pp. 681-684, 2003.
- [6] J.-H. Han, S.-S. Han, and J.-M. Lee, "Sound source tracking control of a mobile robot using a microphone array," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 4, pp. 343-352, 2012.
- [7] S. M. Hwang, K. H. Shin, and Y. J. Park, "Artificial ear for robots," *IEEE Conference on Sensors*, pp. 1460-1463, 2006.
- [8] I.-H. Jang, K.-J. Park, H.-C. Yang, J.-C. Lee, and K.-B. Sim, "Object tracking algorithm for intelligent robot using sound source tracking sensor network," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 13, no. 10, pp. 983-989, 2007.
- [9] N. Uchiyama, S. Sano, and A. Yamamoto, "Sound source tracking considering obstacle avoidance for a mobile robot," *Robotica*, vol. 28, pp. 1057-1067, 2010.
- [10] J. Borenstein and Y. Koren, "The vector field histogram fast obstacle avoidance for mobile robots," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 278-288, 1991.
- [11] R. Simmons, "The curvature-velocity method for local obstacle avoidance," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, pp. 3375-3382, 1996.
- [12] P. Ögren and N. E. Leonard, "A convergent dynamic window approach to obstacle avoidance," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 2, pp. 188-198, 2005.
- [13] Y.-H. Kim, T.-S. Yoon, and J.-B. Park, "Collision avoidance algorithm of an intelligent wheelchair considering the user's safety with a moving obstacle," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*,

vol. 19, no. 10, pp. 936-940, 2013.

- [14] J.-J. Park, H.-S. Kim, and J.-B. Song, "Collision-free path planning for a redundant manipulator based on PRM and potential field methods," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 4, pp. 362-367, 2011.
- [15] K.-S. Woo, J.-H. Park, and U.-Y. Huh, "Dynamic path planning for mobile robots using fuzzy potential field method," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 61, no. 2, pp. 291-297, 2012.
- [16] T. S. Jin, "Obstacle avoidance of mobile robot with virtual impedance," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 451-456, 2009.

한 종 호

2010년 진주산업대 전자공학과 졸업. 2012년 부산대학교 로봇협동과정 석사 졸업. 2012년 3월~현재 부산대 전자전기공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 지능제어시스템, 마이크로프로세서 응용, Navigation/Localization, 신호처리.

박 속 희

2011년 부산대학교 전자전기공학부 졸업. 2014년 부산대학교 전자전기공학과 석사. 관심분야는 센서응용, 마이크로프로세서 응용, 신호처리, Navigation/Localization.

노 경 옥

2012년 동아대학교 전자전기공학과 졸업. 2014년 부산대학교 로봇협동 과정 석사. 관심분야는 지능제어시스템, 원격제어시스템, 센서 응용.

이 동 혁

2011년 진주산업대 메카트로닉스공학부 졸업. 2013년 부산대학교 로봇협동과정 석사 졸업. 2013년 3월~현재 부산대 전자전기공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 지능로봇제어, 원격제어, 마이크로프로세서응용.

이 장 명

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