

초음파 신호의 2차원 역추적 방법에 관한 연구

이규정^{1*}, 이충호¹

¹한밭대학교 정보통신 전문 대학원

2D Backtracking Method of Ultrasonic Signal

Kyu-Joung Lee^{1*}, Choong Ho Lee¹

¹Graduate School of Information and Communication, Hanbat University

요 약 본 논문에서는 초음파 신호의 2차원 역추적 방법을 제안한다. 초음파 센서는 송수신 장치를 서로 쌍으로 이용하여 거리 측정 및 실내 위치 추적에 많은 연구가 되어 산업 분야에 쓰이고 있는 보편적인 기술이다. 본 논문에서는 초음파 신호를 수신기만 활용하여 임의의 초음파 송신 장치들의 신호원을 2차원 평면상으로 추적하는 방법을 제안한다. 초음파 신호를 추적하기 위해 수신기는 최소 3개를 이루어 신호를 수신한다. 3개의 수신기는 각각의 초음파 수신음의 도달 시간차(Time Difference of Arrival, TDOA) 이용하여 방향 및 거리를 연산할 수 있다. 기존 초음파를 이용한 신호원 추적 방법은 송수신기가 쌍으로 이루어 지거나 센서마다 독립적으로 설치가 되어야 하기 때문에 장치들의 시간 동기화가 문제가 있다. 이 문제를 해결하기 위해 초음파 수신기의 거리를 최소화하여 설치고 하나의 장치로 구성한다. 하나의 장치로 설치된 센서는 하나의 연산기로 처리하기에 시간 동기화 문제를 해결할 수 있다. 시간차 정확도를 올리기 위해 시간 분해능이 높은 고속 32비트 타이머를 사용하여 거리 및 방향을 빠르게 연산 및 추적할 수 있다.

• 주제어 : 초음파, TDOA(Time Difference of Arrival), 역추적, 측위, 음속

Abstract In this paper, 2-dimensional backtracking method for ultrasonic signals. Ultrasonic sensors are a common technology used in industrial fields as many studies have been conducted on distance measurement and indoor location tracking using transmission and reception devices in pairs. A method for tracking a signal of an arbitrary ultrasonic transmission device on a 2D plane using only a receiver of an ultrasonic signal is proposed. In order to track the ultrasonic signal, the receiver receives the signal by making at least three. The three receivers may calculate a direction and a distance using a time difference in which the ultrasound reception sound is reached. The existing method of tracking signal sources using ultrasonic waves has a problem of time synchronization of devices because the transceivers must be paired or installed independently for each sensor. In order to solve this problem, the distance of the ultrasonic receiver is minimized, and it is configured as one device. The sensor installed as one device may be processed by one operator, thereby solving the time synchronization problem. To increase time difference accuracy, high-speed 32-bit timers with high time resolution can be used to quickly calculate and track distances and directions.

• Key Words : Ultrasonic, TDOA(Time Difference of Arrival), Backtracking, Positioning, velocity of sound

Received 13 September 2023, Revised 27 September 2023, Accepted 29 September 2023

* Corresponding Author kyu-joung Lee, information and communications, Hanbat University, 125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea, E-mail: gaeron85@hanmail.net

I. 서론

최근 실내 측위를 위해 여러 가지 기술에 관하여 많은 연구들이 진행 중이다. GPS(Global Positioning System)는 실외에서 가능한 측위 기술이고 오차가 미터 단위로 발생하기에 정확한 위치를 알기에 어렵다 [1]. Wifi 및 BLE(Bluetooth Low Energy)의 수신 강도를 이용한 실내 측위 또한 주변 환경에 따라 정확도의 편차가 심한 것이 특징이다. 이를 보완한 것이 UWB(Ultra-wideband) 기술이다.

UWB(Ultra-wideband)는 앵커와 태그로 이루어져 있으며 3GHz 이상의 주파를 활용하여 전파 전달 시간차를 이용하여 거리를 측정한다. 10cm의 오차를 가지고 있으나 송수신 장치의 시간 동기화와 3개 이상의 앵커가 설치되어야 하고 주기적으로 전파를 송수신해야 하기 때문에 배터리 소모도 많다. 또한 라이더 및 적외선을 이용한 실내 측위 기술도 상당히 많은 발전을 하였지만 시스템이 복잡하고 기술 구현도가 어렵다는 문제점과 영상처리도 같이 동반된다는 어려움도 있다.

위에서 기술한 내용 중 최근 주로 많이 쓰이는 기술은 TDOA(Time Difference of Arrival)를 이용한 것들이다[2]. 초음파를 이용한 거리 측정 및 실내 측위 또한 많은 연구 중이고 실내 이동형 로봇의 거리 측정 용도로도 많이 사용된다. 본 논문에서는 초음파를 이용하는 실내 측위 시스템에서 이동형 장치들의 초음파를 수신하여 역으로 추적하는 방법을 제안한다.

즉, 약속된 초음파 신호를 받지 않고 초음파 수신기에 수신된 각 센서마다의 수신 시간차를 이용하여 초음파 음원의 위치를 역으로 추적하여 2D 평면상에 표현하도록 한다[3].

II. 관련연구

2.1 초음파 수신기 및 회로

음원을 추적하기에 일반 마이크는 일상생활에서 생기는 노이즈에 취약하기에 초음파 수신기를 활용한다. Fig. 1는 초음파 수신기의 특성 패턴의 정보이다. 40kHz에서 최대 압력을 검출할 수 있도록 선정하여 일상생활 노이즈를 하드웨어적으로 제거할 수 있다[4]. 또한

일반 마이크는 설치 환경에 제한이 있다. Fig. 2. 는 초음파를 수신하기 위한 압전 소자이다. 마이크는 실내에서만 사용할 수 있고 방수, 방진에 취약하기에 음원 추적에 어려움이 있어 선정된 센서는 방수, 방진이 될 수 있도록 메탈 재질로 몰딩 된 센서를 선정하였다.

Fig. 3~4 은 센서 증폭기 및 트리거 아날로그 회로이다. 1단 op-amp에서는 수신기의 40kHz 고주파수 필터를 적용 후 2단에서는 수신 값을 증폭하였다. 또한 시간 측정 트리거 레벨을 측정하기 위해 오프셋 전압을 입력할 수 있도록 설계하였다. 2단 op-amp에서 출력된 값은 비교기를 통해 트리거 신호로 사용하여 각각의 센서마다 시간차를 측정할 수 있다. 트리거 레벨은 실험을 통해 최적의 값을 찾을 수 있도록 DAC(Digital to Analog Converter)를 통한 측정 레벨을 변경하도록 하였다.

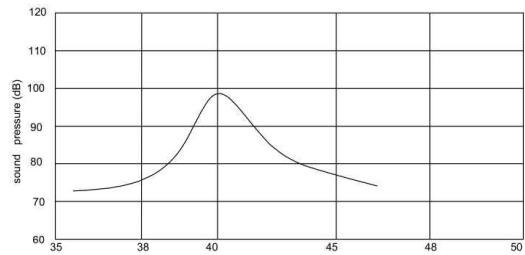


Fig. 1. Frequency



Fig. 2. Sensor - Waterproof

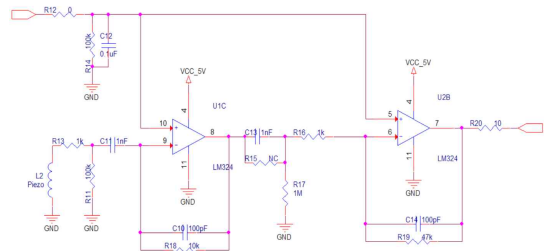


Fig. 3. Sensor schematic

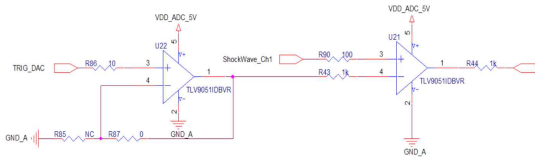


Fig. 4. Trigger schematic

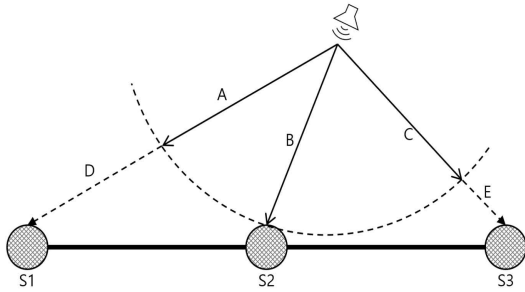


Fig. 5. SOUND TDOA

Fig. 5는 초음파 수신기의 시간차를 설명한다. 각각의 수신기는 음원의 각도에 따라 도달 시간의 차이가 생기게 되어있다. 각각의 센서 음원 도달 시간은 다음과 같다. S1의 도달시간 (A+D), S2의 도달 시간 (B), S3의 도달 시간 (C+E)이다. 음원의 각도에 따라 먼저 음원이 도착한 센서로부터 각각의 시간차는 두 가지가 발생한다.

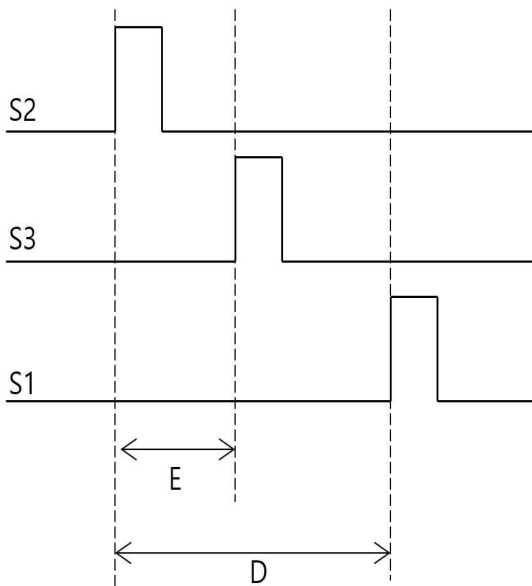


Fig. 6. Sensor TDOA

Fig. 6은 초음파 수신음의 시간차 트리거 신호이다. 시간차 D, E의 값으로부터 음원의 발생 각도 및 거리를 알아낼 수 있다.

시간차는 D, E가 발생하고 기준 음원으로부터 A, B, C의 값은 같다는 것을 알 수 있다. 음원의 위치를 알기 위해선 A, B, C의 시간 값과 시간차 D, E 값을 더한 값을 음속으로 거리를 환산해야 한다. 하지만 음속은 매질에 따라 다르고 온도에 따라서도 속도가 다르다[5]. 음원에 관한 속도식은 다음과 같다.

$$C = 331.5 + (0.6 * T) \text{ m/s}$$

C : 음속

T : 온도

센서에 도달한 음원 거리는 다음과 같다.

$$S1T = A+D$$

$$S2T = B$$

$$S3T = C+E$$

$$S1D = C * (A+D)$$

$$S2D = C * (B)$$

$$S3D = C * (C+E)$$

SnT : 음원 도달 시간

SnD : 음원과의 거리

III. 실험 내용

3.1 센서 시간차 측정

Fig. 7 센서를 2열로 배치한 기구 사진이다. 센서의 간격을 600mm로 설치하고 40kHz 초음파를 600mm 위쪽 지점에서 초음파를 송신하여 시간차를 측정하고 거리를 환산하여 좌표를 추적하였다.

Fig. 8은 센서에서 수신되는 초음파 센서의 시간차 전압 출력을 오실로스코프로 측정한 사진이다.

두 개의 센서는 음원의 각도에 따라 시간차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 시간차를 최대한 많이 나도록 하기 위해 600mm 간격으로 설치하였고 센서의 수신기가 최대한 반응하는 거리로 설치하였다.

센서 간격이 넓을수록 수신 감도가 줄어들 수 있기에 실험을 통하여 수신기가 반응하도록 설치하였다[6].

각 수신기의 신호 시간차의 오차를 줄이기 위해 타이머 1 Tick 당 시간은 1μs로 설정하였고 최대 카운트

시간은 2³²로 카운터 오버플로우를 방지하도록 하였다.



Fig. 7. Sensor assembly

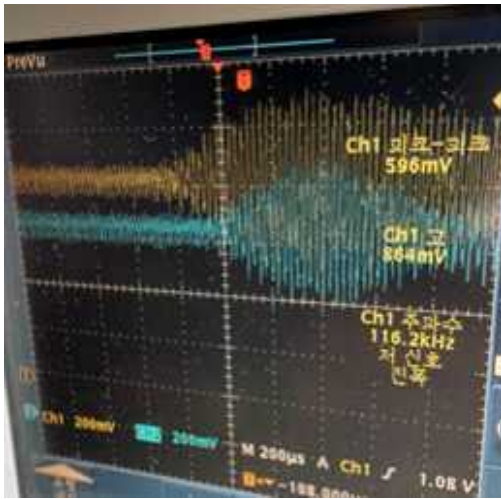


Fig. 8. Time difference measurement

IV. 실험 결과

임의 초음파 송신을 20회 실시 하였고 시간차에 따른 X, Y 좌표를 추적하였다. Fig. 8은 최종 추적한 신호의 좌표 그래프이다. 주황색 점은 실측 좌표이고 파랑 점은 측정 좌표이다.

Table 1은 센서의 수신된 시간차를 기록한 것이다. 단위는 us이며 신호의 처음 도착을 알 수 있는 중간 센서의 시간은 0인 것을 알 수 있다. 즉 처음 도착한 수신음의 시작 S2로부터 S1과 S2의 시간차, S3와 S2 시간차를 측정하고 이 시간차 값을 이용하여 각각의 센서마다 초음파의 거리를 알 수 있다.

Fig. 5에서 보듯이 S2의 시간은 기준값으로 A, B, C의 거리는 같고 S1, S3에 도달하지 않은 초음파 소리의 차이 D, E의 값으로 최종 거리를 알아낼 수 있다. D, E의 거릿값은 Table 2에서 확인할 수 있다.

시간차 값에서 거리로 변환은 온도에 따라 차이가 있고 온도 센서를 활용하여 거리 계산값을 보정하였다.

최종 측정된 측정 오차 값 평균은 X방향으로 -17.288mm, Y 방향으로 86.3mm로 나왔다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 전체적으로 Y값은 X값보다 비교적 많은 오차를 보인다. Fig. 9는 기본 좌표 추적 Y값에 일반 상숫값 1.5를 곱하여 보정한 그래프이다. 보정한 Y 값 평균 오차는 6mm로 많이 줄어든 것을 확인할 수 있다.

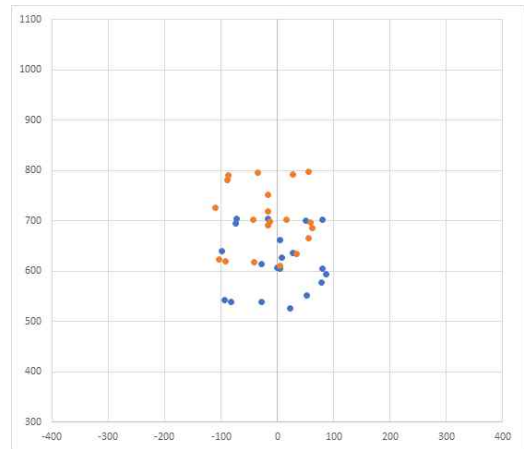


Fig. 9. Coordinates

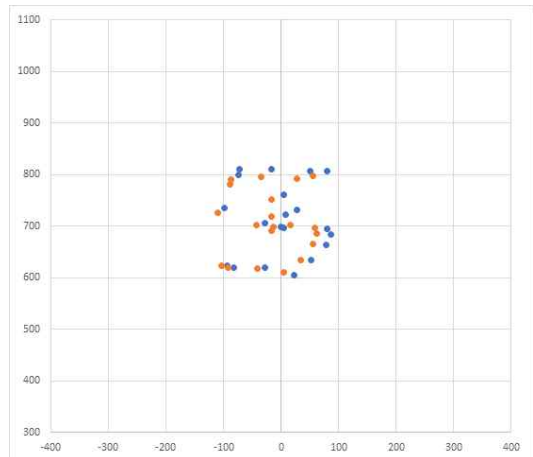


Fig. 10. Calibration coordinates

Table 1. Time difference (unit : microsecond)

	S1	S2	S3
1	231.5	0	210.79
2	206.57	0	228.53
3	213.82	0	230.36
4	192.9	0	248.54
5	233.4	0	165.87
6	261.69	0	214.71
7	165.43	0	307.41
8	147.48	0	255.23
9	179.89	0	221.38
10	259.38	0	183.13
11	214.17	0	270.75
12	142.14	0	280.63
13	217.93	0	184.51
14	266.57	0	191.73
15	174.62	0	302.85
16	147.21	0	251.92
17	212.86	0	235.24
18	199.39	0	220.66
19	264.6	0	182.69
20	249.06	0	241.81

Table 2. Measurement coordinates (unit : cm)

Actual coordinates		Measurement coordinates	
x	y	x	y
15.95	702.95	4	606
-17.13	718.14	-28	614
-12.7	699.17	80	702
-42.85	702.09	52	552
56.2	796.99	-93	542
34.2	634.49	-74	695

-102.81	624.08	-16	705
-88.66	781.04	80	605
-34.45	795.02	-28	539
58.51	697.18	-98	640
-40.64	618.18	50	701
-109.16	726.34	78	577
27.7	792.76	-82	539
55.94	665.53	-72	705
-92.4	619.14	0	607
-86.81	790.56	4	662
-17.07	690.88	86	595
-17.05	751.57	22	526
62.31	686.45	27	637
5.17	610.63	8	628

V. 결론

본 논문에서는 초음파 수신음 시간차를 활용하여 임의의 초음파 신호를 역 추적하는 방법을 제안하였다. 기존의 초음파 거리 측정 방법은 송수신 장치가 쌍으로 이루어져 관측 목적으로 사용되고 있지만 제안된 방법은 초음파를 이용하는 모든 음파를 탐지하여 탐지된 신호 음파를 2차원 평면상으로 역 추적하여 표시할 수 있었다. 실험을 통한 보정된 오차 값은 10mm 내외로 기존 실내 측위 보다 시스템 간소화 및 원가 절감에 도움이 된다. 추후 실질적으로 사용되어야 하는 3차원 평면상으로 추적하는 방법은 수신기를 하나의 장치에 6개를 적용하여 이동 방향 및 속도를 측정하는 연구가 필요할 것이다.

REFERENCES

- [1] Him-Chan Woo, "An Implementation of Sound Tracking Mobile Robot Using Sound Sensors", IEMEK J. Embed. Sys. Appl. 2018 Feb, pp. 33
- [2] Jin-Oh Park, "Analysis of Two Moving Platform Passive Emitter Location with Continuously Measurable Parameters", Vol. 51, NO. 9, September 2014, pp. 2044

- [3] Dong-Gyu Kim, "Emitter Geolocation Based on TDOA/FDOA Measurements and Its Analysis", KICS2013-05-209, pp.751
- [4] Yong-Eun Kim, "Efficient Implementation of IFFT and FFT for PHAT Weighting Speech Source Localization System", IEIE 2009-46SP-1-10, pp. 73
- [5] Lee Seong Ho, "Implementation of Effective Ultrasonic Location Tracking Device Using Machine Learning", Department of Computer Graduate school of Information and Technology, Incheon National University, Incheon, Korea. July. 2017, pp. 5
- [6] Yoon Hee Ji, "Investigation of Target Echoes in Multi-static SONAR system - Part II", Numerical Modeling with Experimental Verification Journal of Ocean Engineering and Technology 28(5), 440-451 October, 2014, pp. 447
- [7] Hyungchul Im, "Interference Elimination Method of Ultrasonic Sensors Using K-Nearest Neighbor Algorithm", j.inst.Korean.electr.electron.eng. Vol.26, No.2,169-175,June 2022
- [8] Su Sik Bang, "Estimation of Time Difference between Ultrasonic Signals via Time-frequency Analysis", Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers Vol.59, NO.5, May 2022
- [9] Mariam Yiwere · Eun Joo Rhee. "3-D Sound Source Localization using Energy-Based Region Selection and TDOA", J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng. Vol. 21, No. 2 : 294-300 Feb. 2017
- [10] Seung-Ho Yum, "A Study of Path Driving Algorithm based on Area for Flexible Driving of Following Cooperative Robots using Ultrasonic Sensors", Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers Vol.59, NO.2, February 2022
- [11] Suk Chan Kim, "TDOA-based Drone Position Estimation in Microphone Array Distributed Deployment Environment", 2022, Korean Telecommunications Society Winter Comprehensive Academic Conference

저자소개

이 규 정 (Kyu-Joung Lee)



2011년 2월 : 한밭대학교
제어계측공학과(공학사)
2014년 2월 : 한밭대학교
정보통신공학과(공학석사)
관심 분야 : 신호처리, 디지털로직,
제어계측, 마이크로프로세서,
시스템 반도체

이 충 호 (Choong-Ho Lee)



1985년 2월 : 연세대학교
전자공학과(공학사)
1987년 2월 : 연세대학교
전자공학과(공학석사)
1998년 3월 : 도호쿠대학교(일본)
정보과학연구과(공학박사)
1987년 2월 ~ 2000년 2월 :
KT 전임연구원
2000년 2월~현재 : 한밭대학교
정보통신공학과 교수
관심 분야 : 영상처리, 컴퓨터비전,
기계학습, 빅데이터, 소프트웨어교육