

초음파 이용 거리측정을 위한 센서 개발에 관한 연구

박근철¹ · 이승희² · 박창수³ · 김동원² · 김원택² · 전계록^{1,+}

Study on the Development of Sensors for Distance Measure Using Ultrasonic

Geun Chul Park¹, Seung Hee Lee², Chang Soo Park³, Dong Won Kim², Won Taek Kim², and Gye Rok Jeon^{1,+}

Abstract

In this paper, we report a novel algorithm based on phase displacement, which supplements conventional TOF methods for distance measurement using an ultrasonic wave. The proposed algorithm roughly measures the distance between the transmission part and the receiving part by using the initial TOF. Thereafter, the precise distance is determined by measuring the phase displacement value between the synchronizing transmission signal and the signal obtained at the receiving end. A distance measurement experiment using a micrometer was performed to verify the accuracy of the ultrasonic wave sensor system. We found that the mean errors from the one adopting the distance measurement algorithm based on phase displacement varied from a minimum of 0.03 mm to a maximum of 0.09 mm. In addition, the standard deviation varied from a minimum of 0.04 mm to a maximum of 0.07 mm, thus giving a precision of ± 0.1 mm.

Keywords: Ultrasonic, Distance measure

1. 서 론

초음파는 주파수가 20 kHz 이상으로 사람의 귀로 들을 수 없는 음파이다. 초음파의 고유한 성질은 가청 범위의 음파와 같다. 그러나 주파수가 높고 파장이 짧기 때문에 상당히 강한 진동이 발생하는 특징을 지니고 있다. 초음파는 물체 인식[1,2], 거리 측정[3,4], 질병 진단과 치료[5] 등 거리 정보에 기반한 응용에 많이 이용되고 있다.

초음파를 이용해서 거리 정보를 알아내기 위해서는 초음파를 발생 시켜 송신하는 부분과 송신된 초음파를 수신하는 부분으

로 구성하고 펄스파 또는 연속파를 사용한다. 연속파를 사용한 거리 측정은 송신부에서 초음파를 전송한 순간부터 수신부에 그 파가 도착한 순간의 시간 경과를 계산하여 수행한다[6-8]. 이 거리 측정 방법을 일반적으로 TOF(Time-of-Flight)법이라고 한다. TOF를 측정하는 방법은 임계값 검출 기법[9], 포락선 추정 기법[10], 주파수 인식 기법[11] 등이 적용되고 있다. 임계값 검출 기법은 초음파 신호의 세기가 주위 환경에 의해 발생하는 소음보다 높아야 한다는 전제 조건을 만족해야 한다. 포락선 추정 기법은 포락선이 측정 거리에 따라 감쇠되는 단점이 존재한다. 주파수 인식 기법에서는 수신되는 초음파 신호에 잡음과 여러 주파수들이 혼합되어 수신된다. 따라서 잡음 제거를 위한 필터와 추가적인 신호처리 기법을 적용해야 하는 단점이 있다. TOF 방법의 단점을 제거하기 위해 초음파 신호를 진폭 변조하여 송신하고, 송신부와 수신부 사이의 위상 차이를 이용하여 거리를 측정하는 방법이 소개되었다[12]. 이 방법은 변조를 위해 송신부에 변조기, 수신부에 복조기와 증폭기를 추가해야 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 TOF 방법의 단점을 배제시킬 수 있고 간단하게 구성할 수 있는 위상 변위 기반 거리 측정 알고리즘을 제안한다. 제안하는 위상 변위 기반 거리 측정 알고리즘은 초기 TOF를 사용하여 송신부와 수신부의 거리를 개략적으로 측정한 후, 송신 동기 신호와 초음파 센서의 수신부에서 얻은 신호 사이의 위상 변위 값을 측정하여 정밀하게 거리를 측정한다. 그리고 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 기반으로 거리를 측정할 수 있

¹부산대학교 의학전문대학원 의공학협동과정 (Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Pusan National University)
49 Busandaehak-ro, Mulgeum-eup, Yangsan-si, Gyeongsangnam-do, 626-870, Korea

²부산대학교 병원 방사선종양학과 (Department of Radiation oncology, Pusan National University Hospital)
179 Gudeok-ro, Seo-Gu, Busan 602-739, Korea

³부경대학교 IT 융합응용공학과 (Department of IT Convergence and Application Engineering, Pukyong National University)
45 Youngso-ro, Nam-Gu, Busan 608-737, Korea

⁺Corresponding author: grjeon@pusan.ac.kr

(Received : Oct. 14, 2013, Accepted : Dec. 30, 2013)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/bync/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

는 초음파 센서 시스템의 하드웨어와 소프트웨어를 구현하였다.

2. 위상 변위 기반 거리 측정 알고리즘

초음파 신호를 이용하여 거리를 측정하는 알고리즘은 초음파 신호의 전달속도와 전달시간 정보를 이용한다. TOF는 초음파가 대기를 통해 전달되는 시간을 말한다. TOF를 수식으로 정의하면 식 (1)과 같으며 T_1 은 송신한 시간, T_2 는 수신한 시간이다.

$$TOF = T_2 - T_1 \tag{1}$$

TOF를 이용하여 송신 지점부터 매질까지의 거리를 측정하는 수식은 식 (2)와 같다.

$$d = (c \times TOF) + d_0 \tag{2}$$

여기서 d_0 는 초음파 송수신부의 진동판 위치 오차로 인해 발생하는 거리 오프셋, c 는 초음파의 속도, d 는 거리를 나타낸다. 그런데 초음파의 전파속도는 온도가 높아질수록 빨라지는 현상이 발생되므로 초음파를 이용하여 거리를 측정할 때는 반드시 온도에 의한 영향을 반영해야 한다. 따라서 건조공기 내의 초음파 속도는 온도가 반영된 식 (3)으로 표현된다.

$$c = 331.3 \sqrt{1 + \frac{T}{273.15}} \approx (331.3 + 0.606T) [m/s] \tag{3}$$

여기서 T 는 대기 섭씨온도이다. 만약 대기의 온도가 15°C이면 초음파 신호의 속도는 식 (3)에 의해서 약 340 m/s 이다.

본 논문에서 제안하는 위상 변위 기반 거리 측정 알고리즘은 초음파 센서의 송신기에서 발생한 송신 동기 신호와 초음파 수신기에서 얻는 수신 신호의 위상 변위를 기반으로 정밀하게 거리를 측정하는 알고리즘이다. 이 알고리즘은 먼저 직접파 방식의 TOF를 기반으로 개략적인 거리를 산출한다. 그 다음 위상 변위 값을 검출해 정밀한 거리를 산출한다.

초음파 신호의 한 주기 파장의 길이는 식 (4)로 구한다.

$$\lambda = \frac{v}{f} \tag{4}$$

여기서 v 는 초음파 신호의 속도, f 는 초음파 신호의 주파수이다. 만약 초음파 신호의 주파수가 40 kHz이면 대기온도 15°C에서 초음파 신호 파장은 8.5 mm 이다.

초음파 센서의 송신부에서 발생시키는 초음파 신호의 각 주기별 시작 지점마다 송신 동기 신호를 변조시켜 전송한다. 그 후 수신부에서 얻은 초음파 신호의 위상 변위 값을 산출하여 거리를 측정한다. 본 논문에서 제안하는 방법을 도식화하여 Fig. 1에 나타내었다.

송신 동기 신호는 유선방식, 적외선 또는 무선 주파수를 사용하여 전송한다. 유선방식은 전기의 속도, 적외선은 빛의 속도,

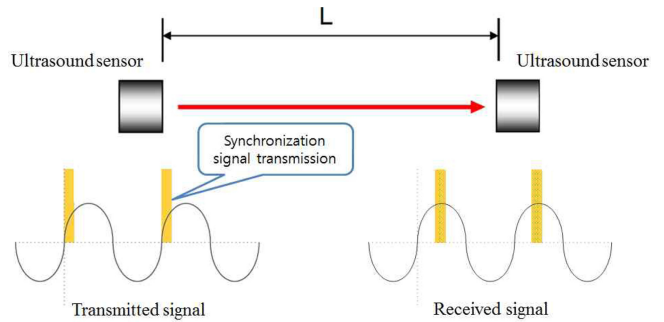


Fig. 1. The concept of distance measurement using a phase-shift algorithm.

무선 주파수는 전파의 속도로 전달된다. 전기, 적외선, 그리고 전파는 빛의 속도에 가까운 10^8 m/s의 매우 빠른 값을 가지고 송신 초음파 신호는 10^2 m/s의 속도로 전달된다. 따라서 송신 동기 신호가 송신 초음파 신호보다 10^6 배 빠르므로 송신부에서 동기 신호 발생과 동시에 수신부에 도달한다고 가정하였다.

송신부에서 발생한 송신 동기 신호는 대기온도가 15°C인 경우 식 (3)에 의해 약 340 m/s의 속도로 전파된다. 따라서 수신 동기 신호와 수신 초음파 신호의 시작 지점은 다르게 된다. 초음파 신호의 주파수가 40 kHz이면 수신 동기 신호와 수신 초음파 신호는 식 (4)에 의해 한 주기 파장 길이인 8.5 mm 마다 동기를 이루어 수신부에 나타나게 된다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 송신 동기 신호와 초음파 센서의 수신부에서 얻은 신호 사이의 위상 변위 값을 시작지점의 시간으로 나타낼 수 있다. 초음파 신호의 한 파장의 시간은 식 (5)로 구할 수 있다.

$$t_\lambda = \frac{\text{단위시간}}{f} \tag{5}$$

주파수가 40 kHz인 초음파 신호의 한 파장의 시간은 식 (6)에 의해 25 μ s 이다. 따라서 거리 측정의 정밀도는 이 시간을 어느 정도의 분해능으로 구분하는가에 따라 정해진다. 본 논문에서 송신 동기 신호와 수신된 초음파 신호의 위상 변위 값을 마이크로컨트롤러에 내장되어 있는 카운터를 자동으로 증가시키고, 외부의 입력 값이 변화하는 순간의 카운터 값을 메모리에 저장하는 캡처 기능을 사용하여 구하였다. 이를 위해 ATmega128 마이크로컨트롤러를 16 MHz로 동작 시켜 사용하였다. 분해능은 초음파 신호의 한 파장의 시간을 마이크로컨트롤러 동작 주파수 한 파장의 시간으로 나누는 식 (6)으로 정의할 수 있다.

$$\text{위상 분해능} = \frac{\text{수신된 초음파 신호의 한 주기}}{\text{마이크로컨트롤러의 최소 카운터 동작 주기}} \tag{6}$$

ATmega128의 한 파장의 시간은 식 (5)에 의해 0.0625 μ s이다. 따라서 한 파장의 시간이 25 μ s인 초음파 신호는 식 (6)에 의해 400등의 분해능을 가지게 된다. 길이 정밀도는 식 (7)과 같이 계산된다.

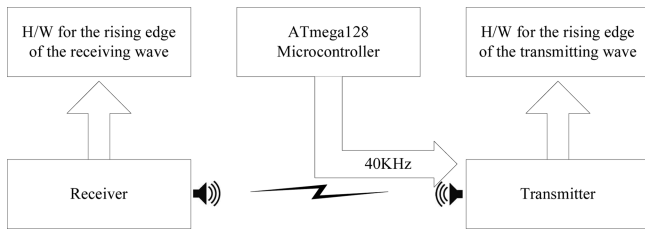


Fig. 2. A schematic diagram of the hardware.

$$\text{길이 정밀도} = \frac{\text{초음파 신호 한 파장의 길이}}{\text{분해능}} \quad (7)$$

한 파장의 길이가 8.5 mm인 초음파 신호를 사용하면 길이 정밀도는 식 (7)에 의해 0.02125 mm이다.

3. 위상 변위 기반 초음파 센서 시스템 구현

본 논문에서 제안하는 위상변위 기반 거리 측정 알고리즘을 사용한 초음파 센서 시스템의 하드웨어 구성도는 Fig. 2에 나타내었다.

위상 변위 기반 거리 측정 알고리즘을 이용한 초음파 센서 시스템의 제어를 위해 ATmega128 마이크로컨트롤러를 사용하였다. TOF와 위상 변위 값은 ATmega128의 외부인터페이스용 타이머를 이용하는 캡처 기능을 사용하였다.

송신부는 마이크로컨트롤러의 PWM (Pulse Width Modulation) 기능을 사용하여 초음파 신호를 발생시킨다. 발생시킨 초음파 신호는 트랜지스터를 거쳐 5 V의 전압레벨에서 9 V의 전압레벨로 변환하였다. 변환된 초음파 신호는 2단계의 반전 집적 회로 (inverted integrated circuit)를 사용하여 초음파 신호의 위상은 동일하면서 신호는 안정적으로 발생되도록 하였다.

수신부는 초음파 센서 400STR100(Pro-Wave Electronic Co., Taiwan)을 사용하였다. 이 센서는 고유 동작 주파수가 40 kHz이며 민감도가 이 주파수에서 -65 dB로 가장 높다. 그리고 음압도 동작 주파수 근처에서 117 dB로 가장 높게 나타난다. 이 센서는 특정 주파수 대역만 통과 시키는 대역통과 필터의 기능을 수행한다고 볼 수 있으므로 본 논문에서는 별도의 대역통과 필터를 사용하지 않았다. 수신부는 수신된 초음파 신호를 전기적인 신호로 변환하여 제공하지만 신호의 세기가 몇 mV로 미약하므로 캡처 신호로 제공하기 위해서 증폭 시켜야 한다. 본 논문에서는 최소 261배에서 최대 1327배까지 증폭시켰다.

ATmega128의 PWM 기능을 사용하여 40 kHz의 주파수를 생성하기 위해 ATmega128의 카운터 레지스터를 연속적으로 증가시키고, 설정 레지스터 값과 같아지면 출력 핀을 반전시키는 타이머가 작동되도록 프로그램 하였다. ATmega128의 동작 주파수 16 MHz를 사용하여 40 kHz 주파수 생성을 위해 식 (8)을 적용한 결과를 설정 레지스터에 저장한다.

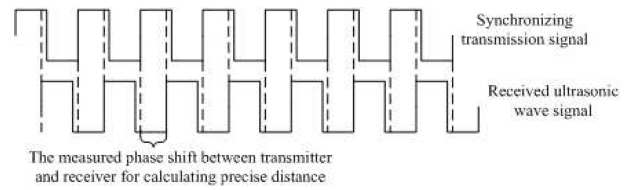


Fig. 3. Measuring the phase shift between the transmitter and receiver of ultrasonic sensors.

$$\frac{16000000\text{Hz}/40000\text{Hz}}{2} - 1 = 199 \quad (8)$$

설정 레지스터에 저장된 값에 따라 200번의 카운트를 하면 신호는 0에서 1 또는 1에서 0으로 반전되어 나타난다. 다시 200 번 카운트하면 신호는 원래 전압 레벨로 돌아가 한 주기를 완성한다. 따라서 40 kHz의 주파수를 가지는 신호를 출력한다.

위상차가 값 측정을 위하여 연속으로 동작하는 카운터 레지스터의 데이터를 캡처 핀을 통하여 외부의 신호가 감지되면 캡처 레지스터에 저장 시킨다. 송신 동기 신호와 수신 초음파 신호의 상승 에지를 사용하여 카운터 값을 저장한다. 송신 동기 신호와 수신 초음파 신호가 동시에 마이크로컨트롤러에 제공되면 송신 동기 신호가 저장되는 ICR 레지스터와 수신 초음파 신호가 저장되는 ICR 레지스터의 값이 동일하게 된다. 만약 두 신호가 1/2 주기만큼 차이가 난다면 두 ICR 레지스터 값의 차이가 200이 된다. 레지스터 값의 차이가 1인 경우 식 (7)의 결과인 0.02125 mm만큼 거리가 떨어져 있다고 해석할 수 있다. 위상차가 값 측정은 연속으로 수행한다.

마이크로컨트롤러에서 생성된 송신 동기 신호와 수신 초음파 신호 사이의 위상 차이가 양상을 Fig. 3에 나타내었다.

4. 실험 결과

ATmega128 보드에는 송신 동기 신호와 수신 초음파 신호의 카운터 값 차이를 표시하기 위해 FND를 장착하였다. 초음파 송신부는 거치대에 고정 시키고 수신부는 정밀한 거리 조정을 위해 마이크로미터에 장착하여 송수신부 사이의 거리를 측정하였다. 실험에 사용한 마이크로미터는 0.001 mm까지 조절이 가능하다.

실험을 위하여 설치한 위상 변위 기반 초음파 센서 시스템을 Fig. 4에 나타내었다.

실험은 초음파 센서 송수신부 사이의 거리를 100, 200, 300, 400 mm로 설정하고 거리에 따른 초음파 센서 송수신 신호 사이의 위상차가 값을 측정하였다. 실험은 각 거리별로 10회씩 측정하여 평균값을 계산하였다. 마이크로미터를 회전시켜 송신 동기 신호와 수신 초음파 신호의 차이를 표시하는 FND의 값을 0에서 600까지 변화 시켰다. 이 때 FND의 값이 50의 배수를 나타내면 마이크로미터의 회전을 멈추고 마이크로미터의 거리를

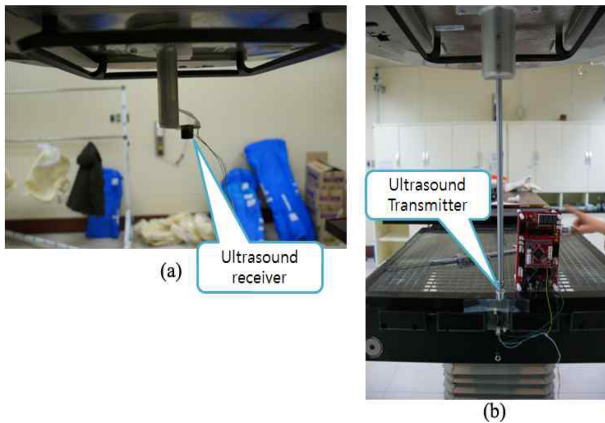


Fig. 4. The installation location of transmitter and receiver of the ultrasonic sensor system; (a) Installation location of receiver and (b) installation location of transmitter.

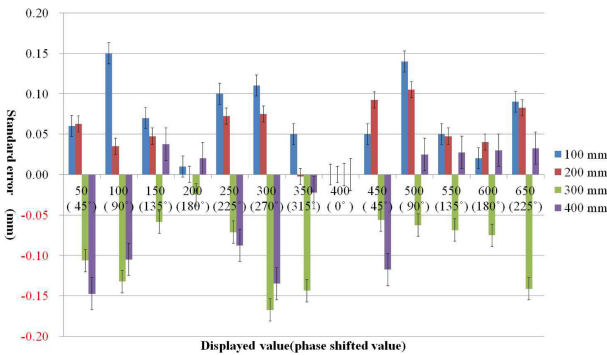


Fig. 5. The standard error of the experimental results.

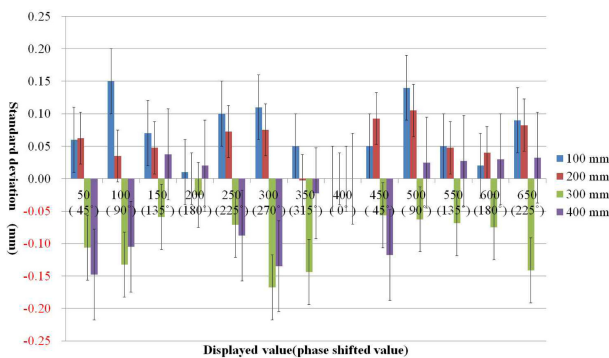


Fig. 6. The standard deviation of the experimental results.

기록하였다. FND에 표시되는 값은 0에서 399까지만 존재할 수 있다. 그러나 거리 측정의 선형성과 재현성을 확인하기 위해 399 이후에 오는 0을 400으로 간주하여 600까지 산출하였다.

실험 결과 오차는 100 mm에서 최대 0.15 mm, 200 mm에서 최대 0.11 mm, 300 mm에서 최대 0.17 mm, 400 mm에서 최대 0.15 mm 발생 하였다. 각 거리에서 오차평균은 0.07, 0.05, 0.09, 0.03 mm 이었다. 각 거리별 표준편차는 0.05, 0.04, 0.05, 0.07

mm 이었다. 표준오차도 0.02 mm 이하의 값을 나타내었다.

실험 결과의 통계적 분석을 위해 표준편차와 표준오차의 그래프를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

본 논문에서 제안한 위상 변위 기반 알고리즘을 적용한 초음파 센서 시스템은 0.1 mm 내외의 정밀도를 나타내었다. 일반 사용제품이 1 mm 이상의 정밀도를 나타내는데 비해 제안하는 시스템의 정밀도가 훨씬 뛰어나다. 그리고 기존에 사용되는 하드웨어만으로 구현이 가능하여 추가적인 비용이 소요되지 않는다는 장점도 지닌다.

5. 결 론

본 논문은 초음파를 이용한 거리 측정을 위해 기존 방식인 TOF 방식을 보완한 위상 변위를 기반으로 한 새로운 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 초기 TOF를 사용하여 송신부와 수신부 사이의 거리를 개략적으로 측정한다. 그 후 송신 동기 신호와 수신부에서 얻은 신호 사이의 위상 변위 값을 측정하여 거리를 정밀하게 구한다. 또한, 제안한 알고리즘을 기반으로 거리를 정밀하게 측정할 수 있는 초음파 센서 시스템을 구현하였다. 구현된 초음파 센서 시스템은 ATmega128 마이크로컨트롤러를 사용하여 하드웨어를 구현하고, 제안 알고리즘을 수행할 소프트웨어를 구현하였다.

초음파 센서 시스템 검증을 위하여 마이크로미터를 사용한 거리 측정 실험을 수행하였다. 기존 TOF 방식을 사용한 거리 측정 결과와 위상 변위 기반 알고리즘을 사용한 거리 측정 결과를 비교했을 때 위상 변위 기반 거리측정 알고리즘을 적용한 것의 오차평균이 최대 0.09 mm, 최소 0.03 mm를 나타내었다. 그리고 표준편차는 최대 0.07 mm, 최소 0.04 mm로 나타났다. 따라서 0.1 mm 내외의 정밀도를 가지는 것을 알 수 있다. 따라서 1 mm 내외의 정밀도를 나타내는 일반 상용화 제품들에 비해 위상 변위 기반 거리측정 알고리즘을 적용한 시스템의 정밀도가 훨씬 뛰어남을 알 수 있다. 그리고 초음파가 주위 환경에 민감한 반응을 하는 점을 고려할 때 본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용한 시스템이 정확성과 신뢰도를 높일 수 있어 더욱 효과적이라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음

REFERENCES

[1] M. K. Brown, "Feature extraction techniques for recognizing solid objects with an ultrasonic range sensor", *IEEE*

- J. Robot Automat.*, vol. RA-1, no. 4, pp. 191-205, 1985.
- [2] J. Borenstein and Y. Koren, "Obstacle avoidance with ultrasonic sensors", *IEEE J. Robot. Automat.*, vol. 4, no. 2, pp. 213-218, 1988.
- [3] M. Yang, S. L. Hill, B. Bury, and J. O. Gray, "A multifrequency AM-based ultrasonic system for accuracy distance measurement", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 43, no. 6, pp. 861-866, 1994.
- [4] Y. C. Lim, E. S. Kim, T. G. Kim, C. S. Park, Y. M. Kim, "Ultrasonic ranging system insensitive to atmospheric condition", *J. Sensor Sci. & Tech.*, vol. 2, no. 1, pp. 49-56, 1993.
- [5] E. J. Kim, M. G. Kim, D. K. Kim, Y. D. Kim, and Y. G. You, "Position and attitude estimation of a capsule endoscope based on ultrasonic ranging", *Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea*, vol. 44-SC, no. 5, pp. 38-44, 2007.
- [6] B. Barshan, "Fast processing techniques for accurate ultrasonic range measurements", *Meas. Sci. Technol.*, vol. 11, pp. 45-50, 2000.
- [7] R. Queirós, F. C. Alegria, P. S. Girão, and A. C. Serra, "Cross-correlation and sine-fitting techniques for high-resolution ultrasonic ranging", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 12, pp. 3227-3236, 2010.
- [8] D. T. Blackstock, *Fundamentals of Physical Acoustics*, Wiley-Interscience, New York, pp. 32-35, 2000.
- [9] M. Parrilla, J. Anaya, and C. Fritsch, "Digital signal processing techniques for high accuracy ultrasonic range measurements", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 40, no. 4, pp. 759-763, 1991.
- [10] A. K. T. Lee, J. Lucas, and L. E. Virr, "Microcomputer-controlled acoustic range finding technique", *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 22, pp. 52-58, 1989.
- [11] D. Marioli, C. Narduzzi, C. Offelli, D. Petri, E. Sardini, and A. Taroni, "Digital time-of-flight measurement for ultrasonic sensors", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 41, no. 1, pp. 93-97, 1992.
- [12] H. Hua, Y. Wang, and D. Yan, "A low-cost dynamic range-finding device based on amplitude-modulated continuous ultrasonic wave", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 51, no. 2, pp. 362-367, 2002.