초음파센서의 장거리 측정을 위한 신호 처리 방법

신승인*[1)].김민현[1)].최세범[1)]
한국과학기술원 기계공학과

Signal processing method for long-range distance measurement using an ultrasonic sensor

Seungin Shin*[1)] · Min-Hyun Kim[1)] · Seibum B. Choi[1)]

[1)] *Department of Mechanical Engineering, KAIST, 291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea*

Abstract : 제안된 측정 방법은 crosstalk문제를 해결하고, 거리가 증가해도 sampling rate이 낮아지지 않을 수 있다. CPPM방법으로 초음파 펄스를 송신했고, TOF는 송신신호와 수신신호를 cross correlation해서 얻어냈다. FFT threshold를 사용함으로서 노면 소음과 같은 noise를 걸러낼 수 있게 했다. 전체적인 신호처리 방법을 되도록 계산량이 적게 하여 초음파센서의 장점인 가격경쟁력을 살리도록 하였다. 제안된 방법의 장점은 일반적인 초음파 하드웨어와 일반적인 프로세서를 이용하여 높은 샘플링 레이트를 유지하며 crosstalk rejection 할 수 있는 것이다. 따라서 20m내에서 측정 시 측정 성능을 개선하여, 차량 안전성에 기여할 수 있다고 할 수 있다.

Key words : Chaotic pulse position modulation (CPPM), distance measurement (거리 측정), sonar (소나), signal processing(신호처리), signal to noise ratio (신호 대 잡음 비), measurement rate(측정 속도)

Nomenclature

d: 초음파센서와 물체와의 거리, m
C: 음속, m/s
θ: 대기 온도, ℃
t_{tof}: time of flight
X_{40kHz}: 실시간 40kHz 성분 값
x_n: 수신된 초음파 신호

Subscripts

TOF : time of flight
CPPM : chaotic pulse position modulation

1. 서 론

기술의 발전에 따라 차량은 점점 운전자의 조작에만 의존하지 않고, 수많은 센서를 기반으로 판단하여 운전에 도움이 되는 능동 제어 기술이 증가하고 있다. 현재 충돌을 방지하는 기술은 충분하지만 시장에서 대부분의 자동차에 적용되지 않는 이유는 비용 경쟁력이 없거나 기술적 인 문제가 있어서이다. 초음파센서는 다른 거리 센서에 비해 굉장히 저렴한 장점이 있지만 물리적인 한계들이 존재한다.

초음파센서의 물리적인 한계를 극복하기위해 신호 처리에 많은 연구가 집중되어왔다. 초음파 거리 센서에 관한 대부분의 연구는 펄스 변조 기술에 의

* 신승인, E-mail: minou93@kaist.ac.kr

한 초음파 센서의 성능 향상에 관한 연구이다. 주파수 변조, 펄스 폭 변조 (PWM) 및 펄스 위치 변조 (PPM)에 의한 신호 코딩과 같이 초음파 신호에 더 많은 정보를 포함하는 방법이 있다.

본 연구는 차량 환경을 고려한 신호 처리 기술을 이용하여 초음파 센서의 성능을 향상시키는 것을 목적으로 한다. 위에서 소개된 다른 연구들과 달리 이 연구에서 연구의 초점은 다중 사용자 환경에서 초음파 센서 시스템의 샘플링 속도를 높이는 것이다. Chaotic pulse position modulation (CPPM) 신호는 크로스톡 및 다중 사용자 문제를 보장하며, 신호 코딩 방법을 사용하여 종래의 단순 비행 시간 (TOF) 방법과는 달리 실시간으로 높은 샘플링 속도로 측정 할 수 있다. 추가로, 차량 어플리케이션에서는 특별히 더욱 고려해야 할 점이 있다. 센서 시스템은 환경 노이즈에 강해야 하며 움직이는 표적을 측정 할 수 있어야한다. 기본적으로 다중 사용자 상황에서 사용할 수 있어야하며 무엇보다도 비용 경쟁력이 있어야한다.

2. 측정 시스템

Fig. 1 은 제안 된 시스템의 하드웨어 다이어그램을 보여준다. 송신기와 수신기는 모두 40 kHz 초음파 변환기를 사용했다. 마이크로 컨트롤러는 데이터 수집 및 신호 처리에 사용되었다. 이 마이크로 컨트롤러에는 FPGA 모듈이있는 1.33 GHz 듀얼 코어 CPU가 있고 초음파 신호 수집을 위해 1 MHz ADC 변환기가 포함되어 있다.

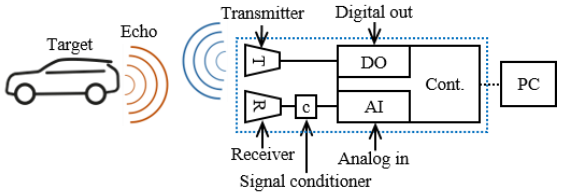

Fig. 1 Diagram of the ultrasonic distance sensor system. It contains an ultrasonic transmitter, an ultrasonic receiver, a signal conditioner and a microcontroller.

3. 신호처리 방법

3.1 TOF 방법

초음파 센서는 TOF 방법을 사용한다. 컨트롤러는 발사에서부터 반향 도달까지의 시간을 측정한다.

$$d = C \cdot t_{tof}/2 \quad (1)$$

공기 중 음속는 온도의 함수이며 습도는 대개 무시한다. 실시간 온도 측정은 초음파 센서 측정의 기본이며 초음파 거리 감지에 필수이다.

$$C = (331.3 + 0.606 \cdot \theta) \quad (2)$$

3.2 단일 펄스 방법

기존의 초음파 거리 센서의 측정방법을 단일 펄스 방법이라고 한다. 초음파 송신기가 사운드 펄스를 내고 컨트롤러는 에코 펄스가 돌아 오기를 기린다. 이 방법에서 에코를 기다리는 데 시간을 낭비하는 것은 불가피 하다. 초음파 펄스의 비행 시간이 거리에 비례하여 증가하기 때문에 측정 속도는 거리와 반비례하여 감소한다. 또한 소음이나 환경적 요인으로 인해 에코가 사라지면 더 심각한 문제가 발생한다. 시간 초과가 될 때까지 센서가 다음 초음파 펄스를 쏠 수 없다.

단일 펄스 방법의 최대 측정 속도는 다음과 같습니다.

$$\text{Maximum measurement rate} = \frac{1}{t_{tof}} = \frac{C}{2 \cdot d} \quad (3)$$

최대 측정 속도는 거리에 반비례하므로 10m 타겟의 경우 17Hz 이다. 초음파 거리 센서의 측정 속도를 높이기 위해서는 신호의 특성화가 필요하다. 이전 초음파 펄스가 비행하는 동안 초음파 센서가 추가 사운드 펄스를 전송하면 단일 펄스 에코 방법에서는 두 초음파 펄스를 구별할 수 없기 때문에 잘못된 TOF가 계산된다. 제안 된 방법은 하나의 초음파 펄스를 사용하는 대신에 초음파 펄스 시퀀스를 비교함으로써 TOF를 계산하여 이 문제를 해결한다. 이전 연구[8]에서는 각각의 초음파 펄스는 이전 초음파 펄스까지의 간격으로 특성화 되었다. 이 연구에서, 특성화는 이전 펄스와의 간격보다는 CPPM 신호 배열에 의해 달성되었다.

3.3 Chaotic pulse position modulation

CPPM 신호를 생성하기 위해, 카오스 신호는 PPM 과정을 거친다. 이 방법은 Fortuna[9] 에 의해 초음파 거리 센서 시스템에 도입되었다. Fig 2. 에 CPPM 의 메커니즘이 그려져 있다.

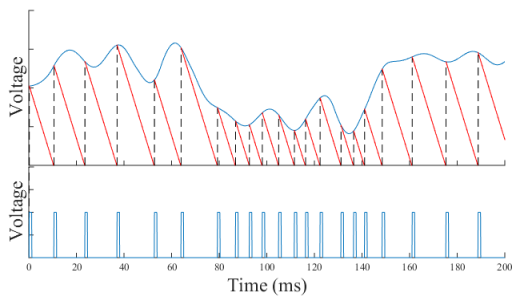

Fig. 2 The chaotic signal of Chua's circuit and the CPPM mechanism.

3.4 실시간 40kHz FFT 성분 분석

FFT를 사용하여 초음파 수신기에서 수집 한 전압 신호에 초음파 신호가 있는지 여부를 확인했다. 이 연구에서 사용 된 초음파는 40 kHz (정확히는 39.4 kHz)였다. 들어오는 전압 신호에서 전체 FFT의 또 다른 주파수 영역이 필요하지 않으므로 40 kHz 성분 만 계산 된 경우 계산 량이 매우 작아서 신속하게 계산할 수 있다. 정해진 시간 간격마다 25 μs 길이 동안의 40 kHz 성분 값을 계산하여 실시간 40 kHz 성분 분석을 실시한다.

$$X_{40kHz} = \left|\sum_{n=1}^{N-1} x_n \cdot (\cos(-2\pi k \frac{n}{N}) + i \sin(-2\pi k \frac{n}{N}))\right| \quad (4)$$

3.5 단일 비트 신호처리

실시간 40 kHz의 값이 임계 값보다 큰 경우, 초음파가 수신되어 단일 비트 신호로 변환되었다고 할 수 있다.

High - 초음파 신호가 존재하는 상태.

Low - 초음파 신호 없음

임계 값은 차량이 90 km/h 로 달리며 노면에서 얻은 소음을 걸러낼 수 있는 값으로 설정되었다.

Fig. 4는 전반적인 신호 처리 과정을 보여준다. Fig. 4 (a)는 기준 신호를 나타내며, 초음파 송신기는 상승 에지에서 발진하고 초음파 펄스 (b)를 방출한다. 전송 된 초음파 펄스는 대상으로 반사되어 수신기 (c)로 반향되고 컨트롤러는 실시간 40kHz FFT 값 (d)을 계산한다. 40 kHz 값 계산과 동시에 단일 비트 신호가 임계 값 (e)에 의해 생성되었다.

3.6 상호상관을 이용한 TOF 계산

TOF는 CPPM 송신 신호와 수신 신호 사이의 교차 상관에 의해 얻어졌다. 두 신호의 상호 상관 값중 가장 높은 지점에서의 딜레이가 TOF가 된다.

Fig. 3 에서 전송 된 레퍼런스 신호와 수신 신호, 및 그 둘의 상호 상관이 나타나있다. 최대값을 가지는 딜레이는 19.25ms이며 이는 수신 신호가 기준 신호에 비해 그만큼 딜레이 될 때 수신 신호가 기준 신호와 가장 유사 함을 의미한다. 따라서, TOF는 피크의 딜레이인 19.25ms이고, 물체와의 거리는 식 (1)에 따라 3.215m이다. 온도 보정이 들어간 값이고, 레이저 센서에 의해 측정 된 실제 값은 3.218m 이었다.

두 신호가 이진 단일 비트 신호이기 때문에 처리 시간이 굉장히 단축된다. 교차 상관에서는 곱셈연산이 굉장히 많기 때문에 단일 비트 곱셈은 다중 비트 곱셈에 비해 전체 계산을 크게 줄일 수 있다[10]. 더 나아가 논리 연산으로 단일 비트 곱셈을 쉽게 수행 할 수 있습니다.

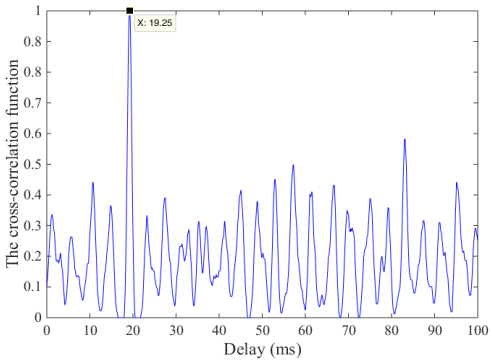

Fig. 3 Cross-correlation function of reference signal and single-bitted received signal.

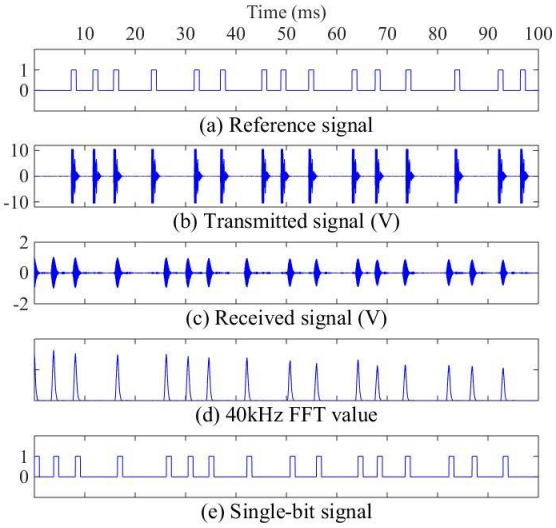

Fig. 4 Signal processing procedure.

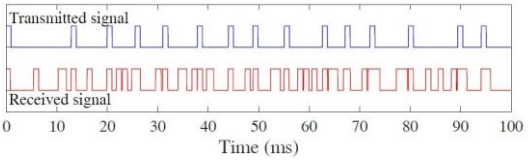

Fig. 5 Transmitted reference signal and received signal in 5 multiuser condition.

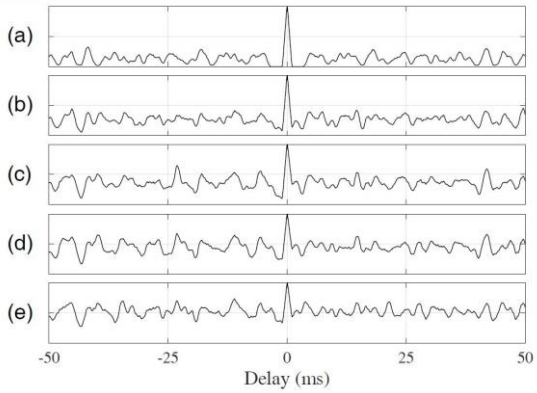

Fig. 6 The cross-correlation functions of transmitted reference signal and received signal in multiuser situation. (a) Single user condition. (b-e) 2-5 multiusers conditions.

3.7 다중 사용자 환경에서의 크로스톡 제거 시뮬레이션

크로스톡이 제거되는 것을 보여주기 위해 시뮬레이션을 하였다. 다중 사용자 조건 하에서, 초음파 센서 시스템은 Fig. 5과 같이 자신의 전송보다 더 많은 원하지 않는 초음파 신호를 수신한다. 크로스톡을 발생하는 4 개의 추가적인 사용자가 있다고 가정했다. 시뮬레이션을 단순화하기 위해, 어느 신호도 초음파 전달 지연은 갖지 않았다.

Fig. 6 는 여러 다중 사용자 조건에서 상호 상관 함수를 보여준다. 시뮬레이션을 통해 다중 사용자의 수에 따라 상호 상관 피크가 얼마나 명확한 지 확인했다. Fig. 6 는 사용자 수가 증가함에 따라 피크가 명확하지 않아 잘못된 TOF 검출의 가능성이 높아질 수 있음을 보여준다. 사용자가 5 명 이상일 때 크로스톡으로 인한 피크 이외의 값의 평균값은 피크의 절반 이상이다. 이는 제안 된 방법으로 구성된 초음파 센서가 5 개 이상의 크로스톡이 발생하면 측정하기가 어렵다는 것을 의미한다. 하지만 이 결과는 크로스톡을 발생시키는 다중 사용자의 초음파 전송 구성에 따라 달라질 수 있다.

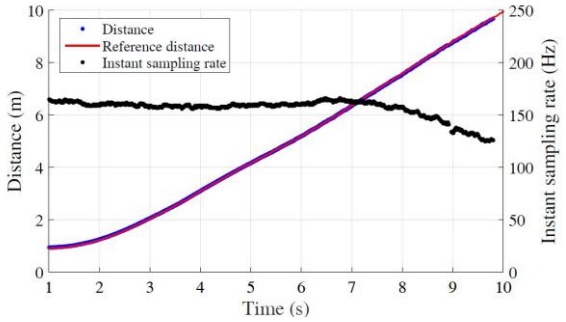

Fig. 7 Distance measurement result.

3. 실험 결과

CPPM 기반의 높은 측정 속도의 초음파 거리 센서 시스템의 하드웨어는 Fig. 1 과 같이 구성되었다. 물체는 거친 벽이었고 초음파 시스템은 차량에 설치되어 벽과의 거리를 측정했다. 초음파 송신기와 수신기는 차량의 앞면에 부착되었다. 컨트롤러는 CPPM 신호를 송신기에 보내어 초음파를 발진 시키고, 발진 된 초음파 펄스가 반사되어 수신기를 통해 컨트롤러에 반향이 수집되었다. 1 MHz ADC 속도로 수집 된 초음파 신호의 40 kHz 구성 요소를 매 10 μs마다 조사해 초음파 펄스가 수신되었는지 여부를 판별하고 단일 비트 신호를 생성한다. 초음파 신호가 수신되면 생성 된 단일 비트 신호를 CPPM 레퍼런스 신호와 교차 상관시킴으로써 TOF와 거리를 계산한다.

Fig. 7 는 거친 벽에 대한 실험 결과를 보여준다. 실제값으로는 레이저 센서 (빨간색 선)를 사용했고 초음파 센서 (파란색 점)로 측정한 거리 결과가 그려져 있다. 또한 시간 별로 순간 측정 속도 (검은 선)가 그려져 있다.

그림에서 Fig. 7는 측정 속도 결과를 요약하고있다. 초음파센서 실험 데이터의 측정 속도는 파란색 점, 빨간색 파선은 단일 펄스 에코 방법의 최대 측정 속도를 나타낸다. 단일 펄스 에코 방법의 측정 속도의 감소는 식 (3)과 같이 비행 시간의 상승으로 인해 거리에 반비례하는 것을 보여준다.

Fig. 7에서의 단일 펄스 방법과 제안된 방법의 측정 속도의 비는 Table 1 에 요약되어 있다. Table 1 의 개선 비는 기존의 단일 펄스 에코 방법과 비교하여 개선 된 비율을 나타낸다. 이 결과는 기존 단일 펄스 에코 법보다 훨씬 더 높은 측정 속도로 측

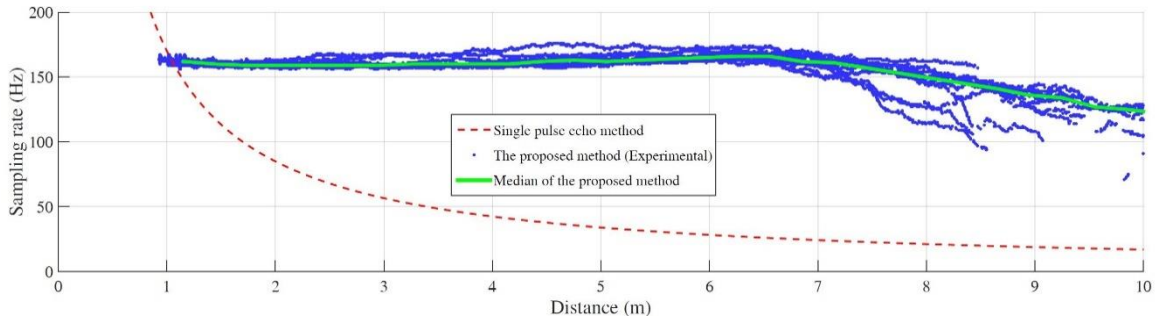

Fig. 8 Sampling rate comparison of the conventional single pulse echo method and CPPM method.

정이 가능함을 보여준다. 4m 이상의 거리에서 단일 펄스 에코 방법의 측정 속도는 너무 낮아 많은 제어 어플리케이션에서 사용이 문제될 정도이다. 일반적인 차량 제어에서는 100 Hz 이상의 측정 속도가 바람직하며 제안 된 방법은 이 기준을 충족한다.

또한, 제안된 방법의 사용으로 초음파 거리 센서 시스템의 최대 측정 거리가 연장 될 것으로 기대된다. 확률적으로, 제안 된 방법은 약 5m에서 기존 방법보다 5 배 이상의 측정 속도로 측정 할 수 있다. 측정 마진에서 신호대 잡음비 (SNR)가 증가함에 따라 최대 측정 거리의 증가될 거라고 예상한다. 따라서 실험 결과는 추가적인 하드웨어 없이 소프트웨어를 업그레이드함으로써 시스템의 성능이 향상됨을 보여준다.

Table 1 Measurement rate and its improvement

물체와의 거리	2	4	6	8	10
단일펄스 방법 (Hz)	56	34	22	16	14
제안된 방법 (Hz)	159	160	165	149	122
개선 비	2.8	4.7	7.5	9.3	8.7

4. 결 론

이 연구에서는 단일 초음파 센서 시스템에서 CPPM 신호와 단일 비트 신호 처리를 사용하여 높은 측정 속도로 누화 제거 거리를 측정하는 방법을 소개했습니다. 이를 확인하기 위해 차량에 설치된 센서 시스템을 사용하여 벽에 대한 누화 제거 시뮬레이션과 측정 속도 실험을 수행했습니다.

누화 제거 시뮬레이션은 초음파 센서 다중 사용자 조건에서 얼마나 많은 누화가 제거 될 수 있는지를 보여주었습니다. 모든 사용자는이 연구에서 제안 된 방법을 사용한다고 가정했다. 상호 상관 피크를 제외한 값의 평균값이 피크의 절반을 초과하지 않았기 때문에 다중 사용자의 모든 초음파 신호가 누화로 작용할 때 최대 4 명의 사용자가 괜찮은 것처럼 보입니다. 실험 결과는 제안 된 방법이 기존의 단일 펄스 에코 방법보다 훨씬 빠른 측정 속도를 제공하면서 누화를 제거 할 수 있음을 시사한다. 측정 속도는 100Hz 이상에서 측정 할 수 있으며 이는 일반적인 자율 이동 차량 제어에 충분합니다. 측정 속도와 SNR의 향상에 따라 시스템의 측정 가능한 최대 거리가 증가 할 것으로 예상됩니다.

전반적인 신호 처리는 계산 집약적이며 저가의 마이크로 컨트롤러로 수행 할 수 있습니다. 교차 상관 프로세스에서 곱셈 연산은 비트 단위 ₩ 및 연산자로 대체 될 수 있습니다. 이렇게하면 연산에 사용되는 메모리와 계산량이 크게 줄어 듭니다. 또한, 단일 비트 신호의 시간 해상도를 의도적으로 낮춤으로써, 계산 될 데이터의 양이 크게 감소 될 수있다.

References

1) A. Broggi, A. Zelinsky, M. Parent, and C. E. Thorpe, Intelligent Vehicles. Berlin, Heidelberg:Springer Berlin Heidelberg, pp. 1175-1198, 2008.
2) P. Seiler, B. Song, and J. K. Hedrick, Development of a collision avoidance system," in International Congress and Exposition. SAE International, feb 1998.
3) K. Audenaert, H. Peremans, Y. Kawahara, and J. V. Campenhout, “Accurate ranging of

multiple objects using ultrasonic sensors," in Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 1992, pp. 1733-1738 vol.2.

4) A. Hernandez, J. Urena, J. J. Garcia, M. Mazo, D. Hernanz, J. P. Derutin, and J. Serot, "Ultrasonic ranging sensor using simultaneous emissions from diferent transducers," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 51, no. 12, pp. 1660-1670, Dec 2004.

5) M. Parrilla, J. J. Anaya, and C. Fritsch, "Digital signal processing techniques for high accuracy ultrasonic range measurements," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 40, no. 4, pp. 759-763, Aug 1991.

6) D. Marioli, C. Narduzzi, C. Offelli, D. Petri, E. Sardini, and A. Taroni, "Digital time-of-fight measurement for ultrasonic sensors," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 41, no. 1, pp. 93-97, Feb 1992.

7) K. W. Jorg and M. Berg, "Sophisticated mobile robot sonar sensing with pseudo-random codes," Robotics and Autonomous Systems, vol. 25, no. 3, pp. 241-251, 1998.

8) S. Shin, M. H. Kim, and S. B. Choi, "Improving efficiency of ultrasonic distance sensors using pulse interval modulation," in 2016 IEEE SENSORS, Oct 2016, pp. 1-3.

9) L. Fortuna, M. Frasca, and A. Rizzo, "Chaos preservation through continuous chaotic pulse position modulation," in ISCAS 2001. The 2001 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (Cat. No.01CH37196), vol. 3, May 2001, pp. 803-806 vol. 2.

10) S. Hirata, M. K. Kurosawa and T. Katagiri, "Cross-Correlation by Single-bit Signal Processing for Ultrasonic Distance Measurement," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol. E91-A, no. 4, pp. 1031-1037, Apr 2008.