

파형 정합에 의한 초음파센서의 거리 측정

신 창 완\*, 김 봉 수\*\*, 김 종 만\*, 김 형 석\*  
 \*전북대학교 제어계측공학과, \*\* (주)카스

Distance Measurement of Ultrasonic Sensor-based on Waveform Matching

Chang-Wan Shin\*, Bong-Su Kim\*\*, Jong-Man Kim\*, Hyong-Suk Kim\*

\*Dept. of Control & Instrumentation Engineering, Chonbuk National Univ., \*\*CAS Co.LTD

**Abstract** - 수신된 초음파 파형이 표준 파형과 정합되는 시간을 수신 시점으로 사용함으로써 정확한 거리측정을 가능하게 하는 초음파 센서 거리계의 성능 개선을 제안하였다. 근거리 측정용으로 많이 사용되는 초음파센서는 다른 거리측정 시스템에 비해 하드웨어 구현이 용이하고 가격이 저렴한 장점이 있으나 센서 수신부측 Limit 회로의 threshold level의 선택 문제에 따른 거리 측정의 오차와 소음에 의한 거리 측정 오차가 매우 큰 문제가 되고 있다. 본 논문에서는 수신된 초음파 파형에 표준 파형을 정합하여 최대의 정합값을 가지는 시점을 수신 시간으로 간주하여, 소음환경에서도 거리 측정이 가능한 파형 정합 방법을 제안하였다. 본 논문의 실험을 통하여, 잡음이 심한 소음환경에서도 제안한 파형 정합 방법이 Threshold 방법 보다 초음파센서 거리 측정 성능이 개선됨을 확인할 수 있었다.

이다.

2. 초음파센서 거리계의 system 구성

초음파센서 거리측정의 기본원리는 초음파가 송신되어 그 파가 수신될 때까지의 경과된 시간(TOF)을 측정한다. 다음 이를 거리값으로 환산한다. 즉, 전송 매질의 속도(V)와 경과되는 시간(t)을 알면, 경과된 거리(S)를 계산할 수 있다. (S=V/t)

송·수신분리형 반사방식의 거리 측정 원리를 수식으로 설명하면 다음과 같다.

$$\text{초음파 속도} : V = 331.5 + 0.60714T \quad (1)$$

( T : 온도[℃] )

초음파 이동 시간 : TOF (Time of Flight)

$$\text{object와의 거리} : D_s = V \times \frac{TOF}{2} \quad (2)$$

따라서,

$$\text{거리 } D_s = (331.5 + 0.60714T) \times \frac{TOF}{2} \quad (3)$$

식(3)에서, 거리는 온도(T)와 이동시간(TOF)에 의존함을 알 수 있다. 그런데, 온도(T)는 이미 알고 있다고 가정하므로, TOF를 측정하면 물체와의 거리값을 구할 수 있다.

따라서, 초음파센서 거리계의 성능은 얼마나 정확하게 TOF를 구할 수 있는냐에 의해 결정된다.

본 연구에서 구현한 초음파센서 거리계의 하드웨어 구성도는 그림 1와 같다.

1. 서 론

초음파는 정상적인 청력을 가진 인간이 청 감각을 느낄 수 없을 정도의 주파수(진동수)가 높은 음파(탄성파)이다. 편의상 20[kHz]이상의 음향적 진동(주파수)을 초음파라고 하는데, 빛이나 전파에 비하여 반사성이 강하고, 전파 속도가 느리다는 특징 때문에 각종 거리계에 이용되고 있다. 이 밖에도 응용분야가 넓어서 의료용 진단기, 연삭, 용접 가공, 가열·살균 작용등에도 많이 이용되고 있다

초음파 센서의 거리측정은 펄스 반사(pulse-echo) 방식과 위상차를 이용하는 방식이 있다. 펄스 반사 방식중에 가장 기본적인 방법은 수신 signal이 설정된 amplitude level 이상일 때, 수신시간(TOF)으로 거리측정을 하는 Threshold 방법[1]이다. 이 방법은 하드웨어 구성이 간단하고 싸지만 거리측정 성능이 낮은 단점이 있다. 위상차를 이용하는 방식은 송신과 수신과의 위상차를 이용한 거리 측정 방법으로 거리 측정 성능은 정밀하나, 위상차에 대한 파장의 길이를 integer 해야 하는 하드웨어가 필요하여 system이 복잡해지는 단점이 있다[2]. 초음파센서를 이용한 거리 측정기들의 공통적인 문제점은 측정치가 주변 환경 요소에 많은 영향을 받는다는 점이다. 따라서 온도, 습도등에 대해 보상을 통하여 정확한 값을 얻으려는 연구도 많이 수행되었다[3]-[5]. 그러나 초음파 센서를 공장이나 자동차 및 무인 헬기 등과 같이 소음이 많은 환경에서 거리 센서로 이용할 경우 많은 거리측정 오차가 발생한다. Alessio는 신경회로망을 적용하여 noise에 강한 센서 system을 개발했으나 별도의 noise 측정 실험 장치가 필요한 단점이 있었다[6]. 본 논문에서는 별도의 noise 측정 장치 없이 소음 환경에서도 초음파센서 거리계의 성능을 개선할 수 있는 파형 정합 방법을 제안하였다.

제안한 파형 정합 방법은 표준 파형을 수신된 초음파 파형에 순차적으로 정합해 가면서 최대의 정합값을 가질 때의 시간을 측정(TOF)하여 거리값으로 환산하는 방법

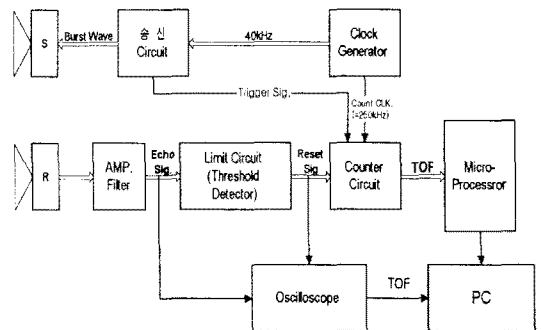


그림 1 초음파센서 거리계의 하드웨어 System

이 system의 기본 동작 주파수는 250kHz이며, 송신 회로에서는 40kHz의 버스트파를 생성하여 25Hz의 주기로 송신 센서를 통해 초음파를 출력하게 된다. 또한

초음파가 출력되는 시점에서 Counter Circuit에 Set 신호가 입력되어 계수를 시작하게 한다. 한편, 초음파 수신센서에서는 초음파가 수신되는 순간, Threshold Detector가 동작하여 Counter Circuit로 Reset 신호를 내보낸다. Counter Circuit에서는 Set 신호가 입력되면 카운터가 250kHz로 계수를 시작하게 되고, Limit Circuit로부터 Reset 신호를 받게되면 그때의 계수값을 유지한채로 카운터의 동작을 정지한다. 이 계수된 값은 초음파가 송신되어 수신될 때까지의 경과된 시간이 TOF(Time of Flight)이다. 이 값은 마이크로 프로세서를 통하여 RS-232에 의해 PC로 입력된다. TOF가 구해지면, 거리값은 식(3)에 의해 계산된다.

이 system의 Time Chart는 그림 2와 같다. Threshold를 이용한 방법은 위에서 설명한 바와 같이 수신파의 도착시간(TOF)검출에 일정한 크기 값과의 비교를 이용하는 기법인데 강도가 큰 잡음이 수신되는 경우는 거리측정 오류가 발생하기 쉽다.

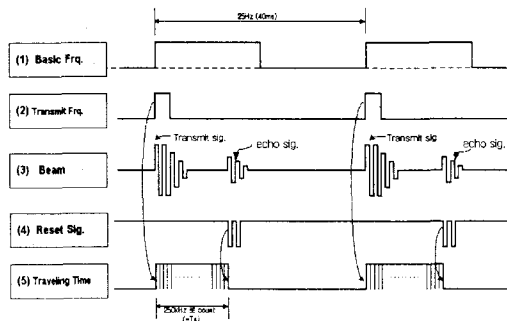


그림 2 초음파센서 거리 System Time-Chart

### 3. Waveform 정합 방법

Threshold 방법은 수신 파형이 어느 threshold level 이상이면 그때까지의 측정된 시간을 거리값으로 환산하므로 소음과 수신 파형과의 구별 기능이 없다. 제안한 파형 정합 방법의 원리는 수신된 파형들을 종합하여 표준 파형을 준비한 후, 측정하고자 하는 수신된 신호에 대해 시간축 상에서 연속적으로 정합하여 표준파형과 최대의 정합값을 얻는 시점을 초음파의 도착시간으로 간주하는 방법이다.

표준 파형(Standard Echo Signal, SES)은 디지털 오실로스코프를 이용하여 수신측으로부터 얻은 10개의 echo signals을 sampling하여 평균한 값(median)으로 설정하였다. 그림 3은 이렇게 얻은 표준 파형이며, 80개의 Sampling 데이터로 구성되어 있다.

수신파형의 예는 그림 4와 같다. 표준파형과 수신파형의 정합은 두 파의 곱으로 계산한다. 즉,

$$\text{파형 정합값}(M) = \text{표준파형}(\text{SES}) \times \text{수신파형}(\text{MES}) \quad (4)$$

으로 나타낼 수 있다.

또한, 파형의 수신 시간은 수신 파형에 표준 파형을 shift해 가면서 구한 정합값들 중에 최대값이 얻어지는 시점으로 한다.

표준 파형과 수신파 간의 정합 값의 최대값이 MES파의 m번째 sampling 위치로부터 얻어지며 이 값을  $M(m)$ 라고 하면,

$$M(m) = \text{MAX} \left[ \sum_{j=1}^N \text{SES}(j) \times \text{MES}(i+j), i=1, 2, \dots, k \right] \quad (5)$$

이다. 여기서, N은 표준 파형의 샘플링 수이고 k는 최

대의 TOF이다.

파형의 Sampling 간격을  $T_s$ 라고 하면,

$$\text{수신시간 TOF} : \text{TOF} = m \times T_s, \quad (6)$$

이다.

따라서, 식(6)을 식(3)에 대입하면, 반사체와의 거리 값을 구할 수 있다.

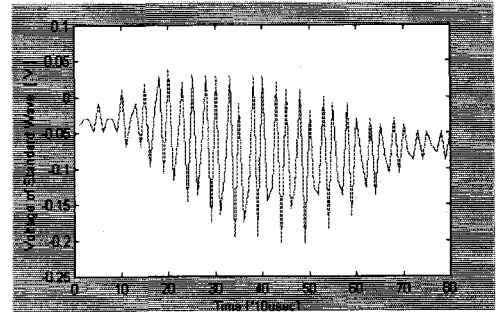


그림 3 표준 파형(SES, Standard Echo Signal)

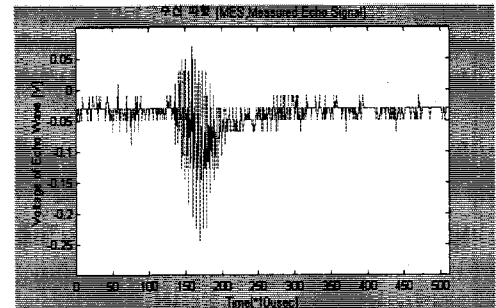


그림 4 수신 파형(MES, Measured Echo Signal)

### 4. 실험 및 결과

본 논문의 실험은 소음 환경하에 센서가 노출된 경우, 기존의 Threshold 방법과 제안한 파형 정합 방법과의 초음파센서 거리계의 성능을 비교하였다.

파형 정합을 위해 초음파 파형은 디지털 오실로스코프로 이용해서 100kHz로 Sampling한 데이터를 사용하였다. 따라서 sampling 간격은  $T_s = 10^{-5}$ sec이다.

첫 번째 실험은 noise가 없는 환경에서 초음파센서 거리계의 두 방법을 실험하여 비교한 것이다. 또한 threshold 이용기법에서는 적절한 threshold를 설정했을 때와 그렇지 않을 때 거리오차에 얼마나 영향을 미치는지를 비교하기 위한 실험도 수행하였다. 그림 5는 25cm 거리의 물체를 100회 반복 측정된 경우의 초음파 센서의 거리 측정결과이다. 그림에서 굵은 실선은 제안한 파형 정합방법을 이용한 결과이고 간격이 좁은 점선은 적절한 threshold를 사용한 결과이며 넓은 점선은 threshold 값이 잘못 설정된 결과이다.

잡음이 없는 경우 제안한 파형 정합 방법은 적절하게 설정한 threshold에 의한 측정 결과와 유사한 성능을 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 잘못 설정된 Threshold 사용하면 그림의 threshold level(2)처럼 빈번히 측정 오차를 유발하게 됨을 보여준다.

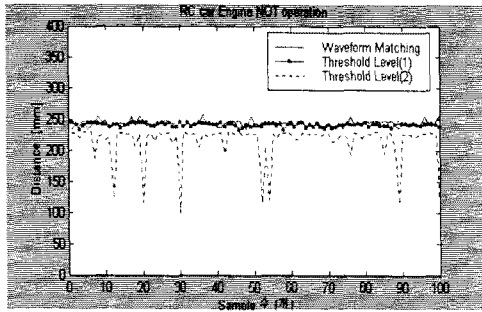


그림 5 소음이 없는 환경에서의 거리 측정 결과

표 1은 이 실험에 대한 수치적 비교로서 제안한 파형 정합 방법의 결과는 적정하게 설정한 threshold 기법의 성능에 근사적으로 접근함을 알 수 있다.

물체와의 거리	250 mm		
방식	파형정합	Threshold(1)	Threshold(2)
최대거리	257.6250	245.2590	230.1450
최소거리	235.2975	232.8930	99.6150
평균거리	244.4690	241.3362	226.7100 (median)
표준편차	4.9382	2.8204	29.1847

표 1 파형정합과 Threshold 방법 비교 (소음이 없는 환경에서)

두 번째 실험은 noise가 있는 환경에서 20cm 거리의 물체를 반복 측정한 실험이다. 이 실험에서 사용한 소음은 RC Car를 구동하여 만들었다. Thresholding 기법을 위해 사용한 threshold level은 잡음이 없는 환경에서 여러 번의 시행 착오를 거쳐 얻은 최적의 값을 사용하였다. 그림 6은 실험 결과인데, 기존의 thresholding 이용 기법은 측정오류가 빈번하게 발생하는 반면 제안한 파형 정합 방법에서는 100회의 반복 측정 실험에서 잡음의 영향 없이 모두 안정적인 측정 결과를 보였다.

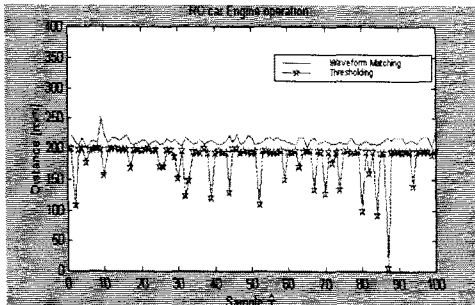


그림 6 RC Car의 소음이 있는 환경에서의 거리 측정 결과

표 2는 잡음이 있는 경우의 실험결과를 수치적으로 보여준다. 파형 정합의 결과가 threshold 기법에 비해 측정의 표준편차가 현저하게 작음을 알 수 있다.

방식	Threshold	파형 정합
최대 거리	200.6040	252.4725
최소 거리	4.8090	200.9475
평균 거리 (median)	194.4210	211.2525
표준 편차	31.3245	7.0556

표 2 파형정합과 Threshold 방법 비교 (소음환경에서)

위 실험의 데이터 분석 결과, 소음이 있는 환경에서는 파형 정합 방법이 Threshold method 방법보다 월등히 우수함을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

초음파는 강한 반사성과 진파의 지연성을 이용한 거리 측정계로서 가격이 저렴하기 때문에 실용적인 분야에 많이 이용되고 있다. 거리측정을 위해서 많이 사용되는 방식은 반사되어 들어오는 파가 threshold에 의해 검출되는 시간까지를 거리로 환산하는 threshold 이용방법이다. 이 방법은 단순히 파형의 크기가 threshold만 넘으면 반사파가 수신되었다고 간주하기 때문에 소음이 있는 환경에서는 소음을 반사된 파로 검출하게 되므로 빈번히 거리 측정 오류가 발생한다. 제안한 파형 정합에 의한 초음파센서 거리계의 성능은 기존의 방법보다 소음 환경에서 매우 우수한 거리 측정 성능을 보여 주었다. 이는 noise 때문에 기존의 초음파센서 거리계로는 센서기능을 할 수 없는 환경에서도 강인한 초음파센서 거리계를 제작할 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

본 연구에서는 디지털 오실로스코프로 수신 파형을 획득하여 PC에서 파형 정합을 하였는데, 앞으로 디지털 오실로스코프 대신 고속의 A/D converter를 사용하여 실시간 처리를 하면 산업현장에 응용할 수 있는 실용적인 장치라 될 수 있을 것이다.

## (참 고 문 헌)

- [1] T.M.Frederiksen and W.H.Howard, "A single-chip monolithic sonar system," IEEE Trans. Solid-State Circuits, vol. SC-9, pp.394-403, Dec. 1974.
- [2] T.Ono, M.Kohata, and T.Niyamoto, "Ultrasonic phase-sensitive rangefinder with double modulation doppler-free method for shallow seafloor survey," in Proc.IEEE 1984 Ultrasonic Symp., Dallas, TX, Nov. 14-16, 1984.
- [3] 임영철, 김의선, 김태곤, 발철수, 김영민, "대기조건에 둔감한 초음파 거리 측정 시스템의 설계," 센서학회지, 제2권 제1호, pp 49-56, 1993.
- [4] C.Calani, G.D.Cicco, B.Morte, M.Prudenziat, and A.Taroni, "A Temperature Compensated Ultrasonic Sensor Operating in Air for Distance and Proximity Measurement," IEEE Transactions, Ind. Electron., VOL. IE-29, Nov. pp336-341, 1982.
- [5] Angelo Maria Sabatini, "A Digital Signal-Processing Technique For Compensating Ultrasonic Sensors," IEEE Trans.Instrum.Meas., vol.44, no4, pp869-874, 1995.
- [6] Alessio Carullo, "Ultrasonic distance Sensor Improvement Using a Two-Level Neural Network," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, VOL.45, NO.2, pp 677-681 April 1996.