

주기인식 검출방식을 이용한 장거리 정밀 초음파 거리측정 시스템 개발

이동활#, 김수용*, 윤강섭**, 이만형***

A Long Range Accurate Ultrasonic Distance Measurement System by Using Period Detecting Method

Dong Hwal Lee[#], Su Yong Kim^{*}, Kang Sup Yoon^{**} and Man Hyung Lee^{***}

ABSTRACT

In this paper, we proposed a new ultrasonic distance measurement system with high accuracy and long range. To improve accuracy and enlarge range, the time of flight of ultrasonic is calculated by the period detecting method. In the proposed ultrasonic distance measurement system, the ultrasonic transmitter and receiver are separated but synchronized by RF(Radio frequency) module. The experiment has been implemented from short distance 1m to maximum available distance 30m. And the period detecting method is compared with the conventional threshold level method. Experimental results show the accuracy and range of the distance measurement are improved by this period detecting method.

Key Words : Ultrasonic (초음파), Distance measurement system(거리측정 시스템), Time of flight (비행시간), Period detecting method (주기인식 검출방식)

기호설명

- T_t = transmitted time of ultrasonic waves
- T_r = received time of ultrasonic waves
- T.O.F = time of flight
- d = distance between ultrasonic transmitter and receiver
- c = the sound velocity
- T = centigrade temperature
- $C_{\omega}(k)$ = filtered signal by using autocorrelation

1. 서론

일반적으로 초음파는 물체와의 거리측정을 통한 이동로봇에서 장애물 인식, 차량의 후방 물체 검출기, 차량통행검출기, 속도계, 동물이나 인간의 침입검출 보안용, 정밀 가공 및 측정 등에 활용되고 있다.¹⁻³

초음파를 이용한 거리측정시스템은 반사파를 이용하는 송수신부 일체형과 직접파를 이용하는 송수신부 분리형으로 나눌 수 있다. 송수신부 일

접수일: 2006년 12월 7일; 게재승인일: 2007년 5월 23일

교신저자: 부산대학교 지능기계공학과, 한국 LPS

E-mail: hl5bcx@dreamwiz.com Tel. (051) 516-3655

* 부산대학교 지능기계공학과, 한국 LPS

** 대구대학교 자동차산업기계공학과

*** 부산대학교 기계공학과

체형은 구성이 간단하고 조작성이 편리하지만, 송수신부의 지향성 문제로 지향각이 넓어져 정확한 대상점의 지시가 곤란하다. 반면에 송수신 분리형은 반사파로 인한 문제들은 없지만, 송수신부의 동기화가 필요하다. 두 방식에서 초음파를 이용한 거리 측정의 기본적인 방법은 초음파가 발신되어 수신될 때까지의 비행시간(Time of Flight)을 측정하는 것이다.

초음파의 비행시간을 측정하기 위해 가장 널리 사용되는 방식이 문턱값 검출방식(threshold method)이다.⁴ 그러나 문턱값 검출방식은 온도, 거리에 따른 감쇠, 물체의 초음파 흡수, 공기중 매질 변화 등의 영향으로 문턱값을 정확히 정하기 어렵고 잡음에 민감하고 정밀도가 떨어지는 방식으로 이를 보완하기 위해서 사용환경에 따른 문턱값(threshold level)을 조절하는 방식도 사용되고 있다. 또한, 음파 포락선의 최대 진폭지점으로부터 수신파형의 시작점을 계산하는 방법과 초음파 송수신 신호를 이용하여 송수신 신호간의 상호 상관(crosscorrelation)이 최대화 되는 시간을 계산하여 비행시간을 계산하거나, 변조된 송수신파에 대한 수신파의 위상 정보를 이용하여 비행시간을 측정하는 방법도 있다.⁵⁻⁸ 그리고 이산푸리에 변환(Discrete Fourier Transform)을 이용하여 한 파장내의 위상 차를 계산하는 방법과 문턱값 검출방식을 같이 사용하기도 한다.⁹

이상에서 살펴본 여러 비행시간 검출방식은 거리측정 정도 및 범위에 있어서 한계가 있으며, 또한 대부분 반사파를 이용한 방식으로 직접파를 이용하는 경우에 비해 2 배의 비행시간으로 인한 문제점을 가지고 있다. 본 논문에서는 거리측정 정도를 향상시키고 측정범위를 확장하기 위해서, 송수신부 일체형과 분리형에서 모두 사용이 가능한 새로운 비행시간 검출방식인 주기인식 검출방식(Period detecting method)을 제안하고, 또한 RF(Radio frequency) 동기신호를 사용한 송수신부 분리형인 새로운 거리측정시스템을 제안하였다. 그리고 실험을 통하여 제안된 방법이 기존의 방법에 비하여 높은 정확도와 넓은 측정영역을 가짐을 입증하였다.

2. 주기인식 검출방식

본 장에서는 기존의 방식에 비해서 정확도와

넓은 측정영역을 가진 새로운 비행시간 측정방식인 주기인식 검출방식을 제안하였다. 우선 기본적인 비행시간 검출방식을 살펴보고, 제안하는 주기인식 검출방식의 원리를 설명하였다.

2.1 기본적인 비행시간의 검출방식

초음파가 송수신부에서 발신되어 수신부에 수신될 때까지의 비행시간은, Fig. 1 에서와 같이 발신된 시각 T_1 과 그 신호가 수신된 시각 T_2 와의 차이로 정의된다. 송수신부가 분리된 직접파를 이용한 방식에서, 초음파 송수신부 사이의 거리 d 는 다음과 같이 표현된다.

$$d = c \times T.O.F + d_0 \quad (1)$$

여기서 d_0 는 송수신부의 진동판 위치오차로 인한 거리 오프셋(offset)을 나타내며, c 는 대기중의 초음파 속력으로 대기의 섭씨온도 T 에 대하여 다음과 같이 정의된다.

$$c = 331.5 + 0.60714 \times T \quad (2)$$

따라서, 초음파 거리측정 정도는 비행시간의 측정정도, 즉 초음파 수신시간 T_2 의 인식 정도에 직접적인 영향을 받는다.

초음파의 비행시간(또는 초음파 수신시간 T_2)의 인식 기법으로, 문턱값 검출방식과 포락선 검출방식(envelop method)이 일반적으로 사용되고 있다. 문턱값 검출방식은 수신된 파형의 진폭을 기준으로 신호를 검출하는 방법으로, 문턱값 이하의 신호는 잡음으로, 그 이상의 신호가 검출되면 발신된 신호인 것으로 판단하는 방식이다.⁴

문턱값 검출방식에서는 Fig. 2 에서와 같이, 신호의 수신시간을 T_2' 로 인식하므로 $c \cdot (T_2' - T_1)$ 만큼의 거리 측정 오차가 발생하며, 송수신 거리의 증가에 따라 수신되는 음파의 진폭이 감쇠되어 오차의 크기가 증가한다. 이러한 오차를 줄이기 위하여 문턱값을 낮추면, 수신신호의 잡음에 의한 오차가 발생한다. 이를 극복하기 위하여 문턱값을 가변하는 방법도 사용되나 기본적으로 발생하는 오차를 완전히 극복하기에는 어려움이 있다.

송수신 간의 거리나 매질의 변화로 발생하는 음파의 진폭 변화에 영향을 받지 않는, 포락선 검출방식⁵ 은 Fig. 3 에서와 같이 음파 포락선의 최

대 진폭지점으로부터 수신파형의 시작점을 역추적하는 방식이다. 이러한 방식은 수신신호가 포화되는 경우 포락선이 얻어지지 않으므로, 포화를 막기 위하여 송수신부 증폭기의 이득을 가변구조로 구성해야되므로 구조가 복잡해진다.

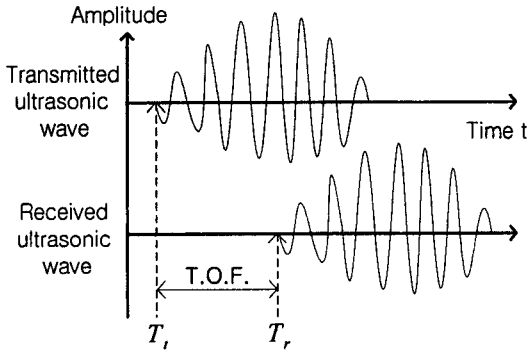


Fig. 1 Definition of T.O.F

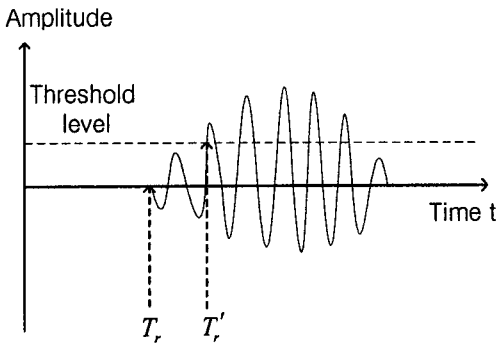


Fig. 2 T.O.F detecting process of threshold method

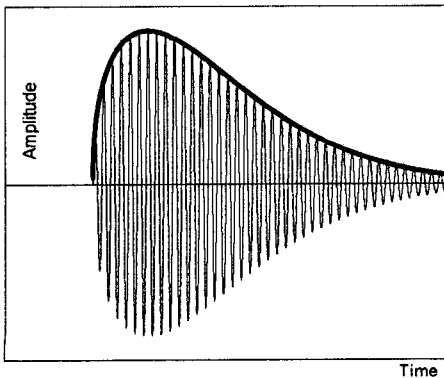


Fig. 3 T.O.F detecting process of envelop method

앞의 두 방식은 송수신부가 일체형이거나 분리형이어도 사용이 가능하다. 그러나 송수신 신호의 상관계수(cross correlation)를 최대화 하는 방법⁶, 변조된 송신파에 대한 수신파의 위상정보를 이용하는 방법⁷⁻⁸ 등은 기본적으로 송신 신호와 반사된 수신 신호를 모두 이용하여야 되므로 송수신을 분리하여 사용하기가 곤란하다

2.2 주기인식 검출방식

송신기에서 발신된 초음파는 비행시간의 증가에 따라 진폭은 감소하지만 주기는 변하지 않는 특징을 가진다. 따라서 주기 검출에 의한 비행시간의 측정은 음파 감쇠에 의한 측정 오차를 제거하여, 거리측정 정도를 높일 수 있다.

비행시간의 측정을 위한 주기인식 검출방식은 다음과 같은 단계로 이루어진다. 우선 수신된 신호 $\omega_r(t)$ 는 아날로그 저주파통과 필터에 의해 고주파 잡음 성분이 제거된다. 그리고 A/D 변환기를 사용하여 디지털 신호 $\bar{\omega}_r(k)$ 를 얻는다. 이렇게 얻어진 디지털 신호는 송신되는 초음파 주파수와 동일한 주기의 신호인 $\omega_t(k)$ 와의 자기상관 연산 (autocorrelation operation)을 매 주기마다 수행해 줌으로 해서 송신 주파수 성분이 증폭된 신호 $C_o(k)$ 로 변환된다.

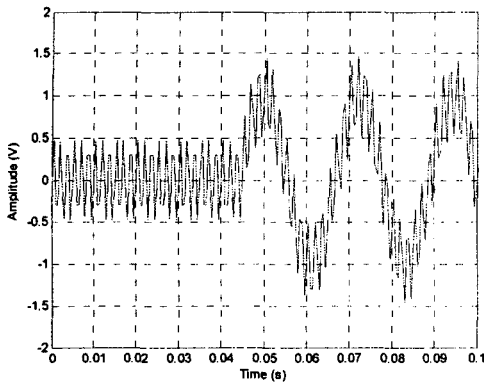
$$C_o(k) = \sum_j \omega_t(j) \bar{\omega}_r(k+1-j) \quad (3)$$

여기서, $\omega_t(k)$ 는 송신되는 초음파 주파수와 동일한 주기의 신호로 다음과 같이 송신되는 초음파 송신주기 T_t 와 샘플링 시간 t_s 을 이용하여 정의된다.

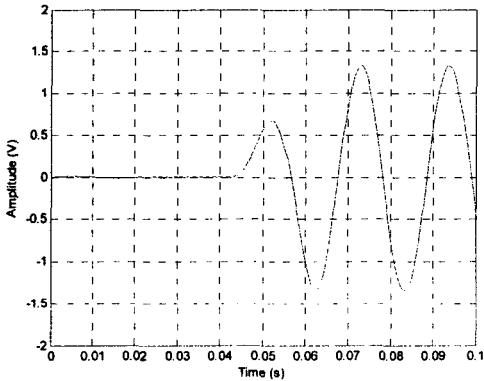
$$\omega_t(k) = \sin\left(\frac{2\pi}{T_t} kt_s\right) \quad (4)$$

이러한 기법을 이용하면 특정 주파수를 용이하게 판별할 수 있으므로 특정 주파수의 주기를 인식할 수 있게 된다.

위에서 제안한 주기인식 검출방식의 자기상관 연산을 통해서 정확한 수신시점을 확인할 수 있는지를 살펴보기 위해서 간단한 시뮬레이션을 MATLAB 을 이용하여 수행하였다. 발신부에서 40Hz 의 초음파가 발신되어 0.45 초 후에 수신부에 수신되고, 수신된 신호에는 1kHz 의 고주파 잡음이 포함되어 있다고 가정하여, 식 (3)과 같이 자



(a) The waves blending 40Hz with 1kHz frequency

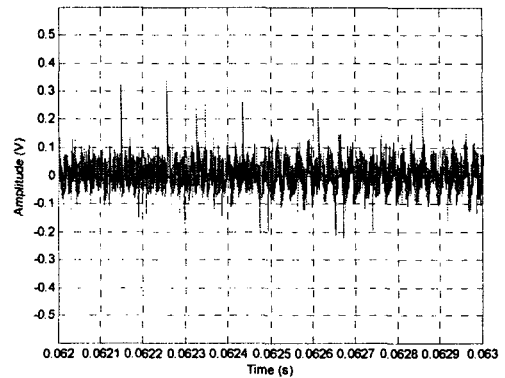


(b) The filtered waves by using autocorrelation

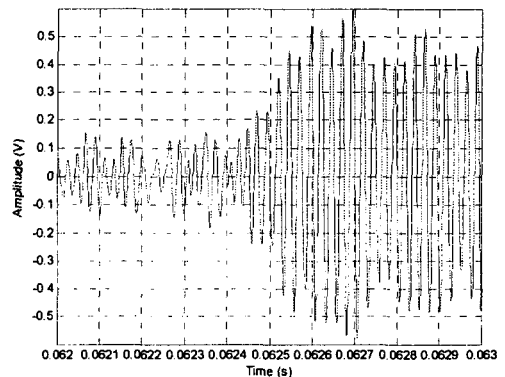
Fig. 4 Simulation results of period detecting method

기상관 연산을 수행하였다. Fig. 4(a)는 잡음이 포함된 수신신호를, Fig. 4(b)는 자기상관 연산을 수행한 결과를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과로부터, 자기상관 연산으로 40Hz 주기가 시작되는 부분이 0.45 초로 정확한 수신시점이 나타남을 볼 수 있다. 주기인식 검출방식의 마지막 단계는 자기상관 연산을 수행한 신호로부터 수신시점을 찾는 단계로서, 자기상관 연산을 수행한 신호의 주기를 계속적으로 검사하면서 송신된 초음파와 동일한 주기가 반복적으로 나타나면 반복되는 주기의 처음 시간을 초음파를 수신시점으로 인식하여 비행시간을 계산한다.

주기인식 검출방식에 의한 거리측정 실험을 실시하였다. 초음파의 주파수는 40kHz 를 사용하였으며, 송수신부의 거리를 20m 로 설정하였다. 실험결



(a) The signal $\omega_r(t)$ received at the point 20m away from the transmitter



(b) The filtered signal $C_m(k)$ received at the point 20m away from the transmitter

Fig. 5 Experimental Results of period detecting method

과를 Fig. 5 에 나타내었으며, (a)는 수신부에서 실제 측정된 신호, (b)는 신호처리된 신호를 나타낸다.

문턱값 검출방식에서도 이와 같은 신호처리 방법을 적용할 수는 있지만, Fig. 5(a)와 같이 잡음의 진폭이 신호에 비해서 큰 경우에는 신호처리된 신호(Fig. 5(b))의 진폭이 크게 커지지 않으므로 문턱값을 사용하여 초음파 수신시점을 정확히 찾을 수 없고, 초음파 수신시점 이전에도 문턱값을 초과하는 경우가 발생되어 초음파 수신시점을 정확히 찾을 수 없다.

하지만 주기인식 검출방식으로는 초음파 수신시점을 정확히 찾을 수 있다. 그 이유는 신호처리

된 신호에서 초음파 수신시점 이전에는 불규칙적인 주기가 나타나지만, 초음파 수신시점 이후에는 진폭은 일정하지 않지만 송신 주파수와 동일한 주기신호가 명확하게 나타나기 때문이다.

그리고 실제 시스템에서는 초음파 주파수가 외부 환경의 영향을 받게 되고, 송수신부가 이동하는 경우에는 도플러 효과를 고려해야 되므로, 수신 주파수(f_r)와 송신 주파수(f_i) 사이에 오차가 발생할 수 있다. 그러므로 오차 범위(ϵ)를 적절히 설정하여 오차범위 이내에 들어오는 신호를 사용하여 초음파의 수신시점을 결정하였다.

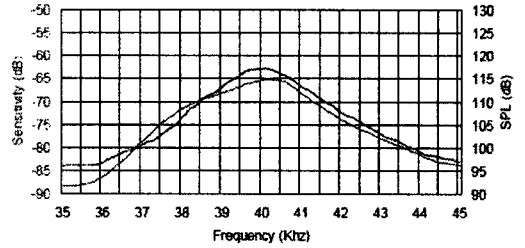
$$|f_r - f_i| \leq \epsilon \quad (5)$$

실제 식 (5)를 만족하는 주기가 검출되더라도, 주기의 지속성 여부를 판단하여 음파 수신시점이 결정된다. 즉 송신된 신호는 일정 주기가 지속적으로 나타나지만, 잡음은 주파수 변화가 불규칙하여 주기가 지속적으로 유지되지 않는다. 따라서 수신 신호의 증폭 시, 잡음이 함께 증폭되어도 잡음에 반응하지 않으면서 특정 주기의 신호를 추출할 수 있다.

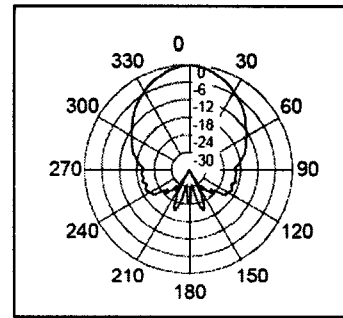
3. 초음파 거리측정 실험

3.1 장거리 정밀 초음파 거리측정 시스템

장거리 정밀 초음파 거리측정 시스템을 구현하기 위하여 사용된 초음파 센서는 40kHz 의 Murata 사 MA40BR/S 이다. 이 초음파 센서는 초음파 장애물 검출 센서 등 초음파를 이용한 시스템에 가장 널리 사용되고 있으며 그 성능은 Fig. 6 과 같다. Fig. 6 에서 보듯이 40kHz 부근에서 가장 감도가 뛰어나며 약 70 도의 범위로 퍼져나간다. 다음으로 장거리 정밀 초음파 거리측정 시스템은 Fig. 7 과 같이 구성된다. 초음파 송신부와 수신부는 분리된 형태로 구성하였으며, 초음파 송수신부간의 동기는 RF 를 이용하여 초음파가 송신되는 시점을 초음파 수신부에게 전달한다.¹⁰ RF 에 의한 시간 지연은 초음파에 비해 미소하여 무시하였다. 그리고 초음파 송신부는 초음파를 일정 주기로 송신하고, 초음파 수신부는 송신된 초음파와 RF 신호를 수신하도록 구성되어 있다. 초음파 수신부에는 위에서 제안된 주기인식 검출방식을 이용하여 비행시간을 계산하고, 계산된 비행시간을 사용하여 최종 거리정보를



(a) Sensitivity and Sound Pressure Level : tested under 10V at 300mm



(b) Beam angle : tested at 40kHz frequency

Fig. 6 Specification of the ultrasonic transducers

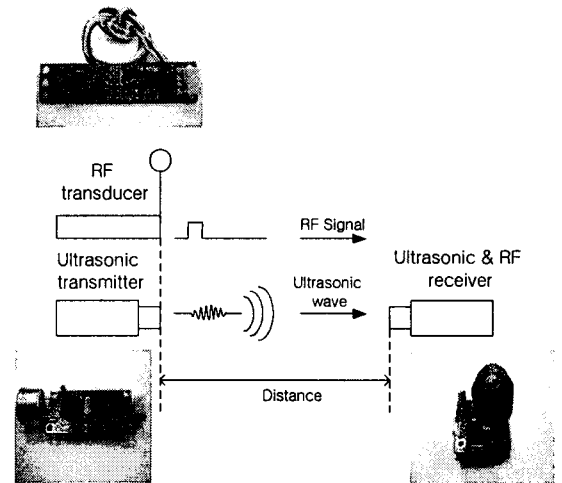


Fig. 7 Configuration of ultrasonic distance measurement system

계산한다. 계산된 거리정보는 블루투스 무선 통신을 이용하여 115200 bps 의 속도로 데이터를 PC 로

전송하게 된다.

3.2 초음파 거리측정 실험

제안된 초음파 거리측정 시스템의 거리측정 실험은 근거리인 1m 부터 최대인식영역인 30 m 까지 실시하였다. 그리고 송수신기를 마주보게 붙여서 (0m) 실험을 실시하여, 송수신부의 진동판 위치오차로 인한 거리 오프셋 d_0 를 측정하고, 이를 거리 정보에 반영하였다.

Fig. 8 은 1m 와 20m 의 거리에서 측정한 초음파 수신 파형과 RF 를 이용한 동기신호이다. 그림 위 부분의 파형은 수신기에서 받은 초음파 신호로

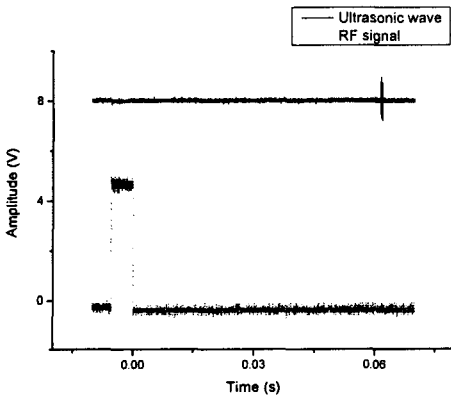


Fig. 8(a) Transmission of ultrasonic waves at RF down edge signal and ultrasonic receiver sensor received ultrasonic waves at 1m

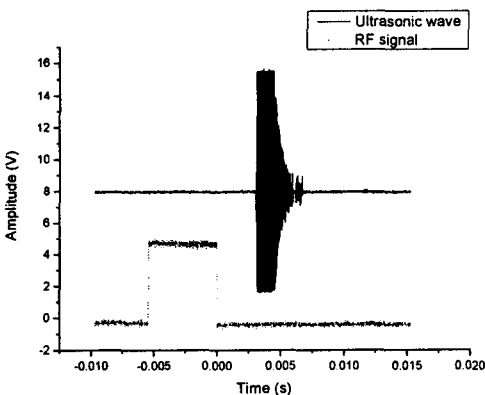


Fig. 8(b) Transmission of ultrasonic waves at RF down edge signal and ultrasonic receiver sensor received ultrasonic waves at 20m

아직까지 신호처리가 되지 않은 신호이고, 그림 아래 부분의 사각 파형은 동기용 RF 신호로서 하강엣지부분이 초음파 발신시점 T_1 에 해당한다.

Fig. 9 는 Fig. 8 의 초음파 수신 파형을 확대한 것으로서 가까운 곳에서는 초음파 신호의 진폭이 포화되어 나타나지만 거리가 멀어질수록 진폭이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 먼저 기존에 널리 사용되는 문턱값 검출방식은 Fig. 9 의 문턱값과 초음파 수신값이 만나는 수신시점 T_1 이 도착 시점보다 지난 시점 T_1' 에 측정이 되며 초음파 신호가 가까울 때는 오차가 크지 않으나 멀어질수록 오차가 커지며 Fig. 9(b)에서와 같이 문턱값이 초음파 신호를 측정할 수 있도록 적절하게 설정하지 않으면 문턱값보다 초음파 신호가 낮아져 오차가 커지거나 완전히 신호를 놓칠 수가 있다. 이를 방지하기 위해 문턱값을 낮추게 되면 다른 노이즈 신호에 영향을 받아 잘못된 거리를 인식하게 되므로 문턱값을 적절히 정하는 것이 쉽지 않다. 본 논문에서는 실험 데이터를 바탕으로 노이즈가 없는 상황에서 먼 거리에서도 거리 측정이 가능한 문턱값을 적절히 선정하였다.

Fig. 10 은 앞의 Fig. 8 의 1m 와 20m 의 거리에서 측정한 초음파 수신 파형을 앞에서 제안한 주기인식 검출방식으로 신호처리를 수행하고 신호처리된 신호의 주기를 정확히 측정하기 위하여 제로 크로싱(zero crossing)된 신호이다. 이를 통하여 초음파 신호의 주기를 정확히 계측하였다. Fig. 10 에서 보듯이 가까운 거리에서는 초음파 신호가 크게 나타나고 먼 거리에서는 초음파 신호가 감소되어 파형이 줄어들어 일정주기의 개수가 줄어들지만 동일한 주기가 반복되는 것을 확인할 수가 있다. 또한 앞의 Fig. 9 에서 문턱값에 의해 발생하는 $T_1' - T_1$ 의 오차없이 정확한 수신 시점 T_1 을 반복되는 주기의 시작지점을 측정함으로써 구할 수 있다.

거리측정 실험은 동일한 시스템하에서 각 거리 별로 10 회씩 실시하였으며, 제안된 주기인식 검출 방식과 문턱값 검출방식에 대해서 실시하여 두 방식의 측정결과를 비교하였다. 두 방식의 거리오차의 평균과 표준편차를 정리하여 Table 1 과 같이 나타났다.

실험결과를 살펴보면, 단/중거리(15m 이하)에서 주기인식 검출방식의 평균거리오차가 문턱값 검출 방식보다 약 50%로 감소하였음을 볼 수 있고, 장

거리(15~25m)에서는 약 15% 이하로 감소하였음을 볼 수 있다. 또한 제안된 주기인식 검출방식은 문턱값 검출방식과 달리, 단/중거리에서 측정거리와 관계 없이 거의 일정한 표준편차 및 거리오차가 나타나고 장거리에서도 표준편차가 크게 증가하지 않는다. 30m 의 더 먼 거리에서도 거리를 측정해보았을 때도 문턱값 검출방식보다 평균오차 및 표준편차가 더 크게 차이가 남을 알 수 있다. 따라서 제안된 주기인식 검출방식을 사용하면, 기존의 방식보다 먼 거리에서 높은 정확도로 거리측정이 가능하다.

한편, 주기인식 검출방식의 거리오차가 나타나는 주요한 원인을 살펴보면 다음과 같다. 음파는 외부환경에 민감하게 반응할 수 있다. 앞에서 보았

듯이 온도에 따라 속도가 변하며 가까운 거리에서는 음파가 강하므로 외부의 외란에 크게 영향을 받지 않으나 먼 거리에서는 실내에서 테스트하여도 외부의 외란에 영향이 커지게 된다. 그리고 사용된 초음파 주파수가 40kHz 로써 한 주기를 길이로 환산하면 약 8.5 mm 이다. 그리고, 초음파 주파수의 수신 시점을 판단하기 위해서, 초음파 주기가 반복되는지 살펴보고 반복되는 시점의 첫 부분을 찾게 되는데, 이 때 식 (5)와 같이 약간의 오차 범위가 설정되어 있어 초음파 파형의 한 주기를 놓치게 되었을 경우 약 8.5 mm 의 오차가 발생하게 되기 때문이다. 이 오차는 외부환경의 영향으로 초음파 주파수가 영향을 받을 경우 발생하게 된다.

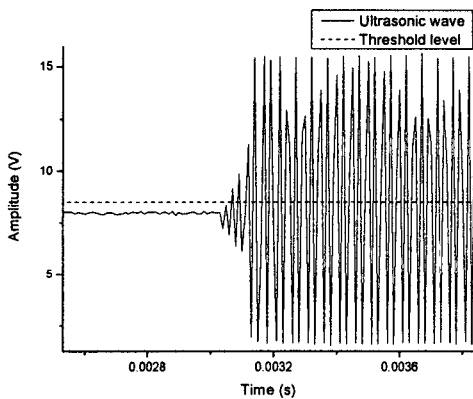


Fig. 9(a) Received time of ultrasonic waves using threshold method at 1m

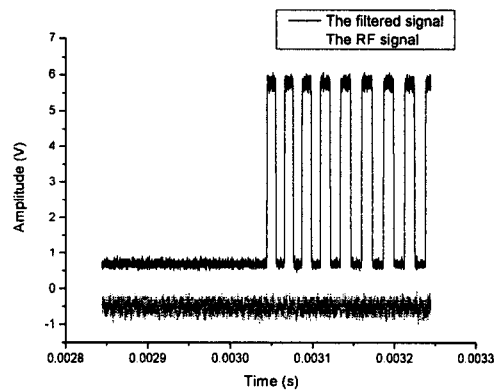


Fig. 10(a) The filtered signal by using period detecting method at 1m

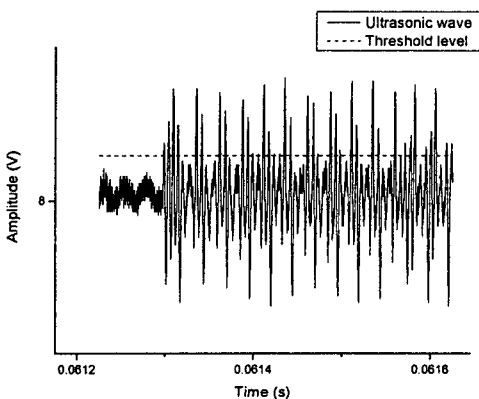


Fig. 9(b) Received time of ultrasonic waves using threshold method at 20m

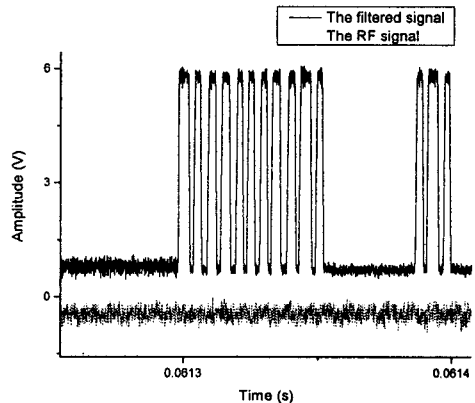


Fig. 10(b) The filtered signal by using period detecting method at 20m

Table 1 The result of distance measurement errors by using threshold method and period detecting method

Distance (mm)	Threshold method (mm)		Period detecting method (mm)	
	mean	STD	mean	STD
1000	9.959	1.011	3.584	0.459
3000	12.698	1.455	5.611	0.681
5000	13.655	1.713	4.113	0.905
10000	11.180	3.589	4.879	1.280
15000	10.377	6.684	3.600	1.981
20000	10.241	9.139	6.715	5.417
25000	45.808	10.982	5.291	7.138
30000	97.166	24.853	14.602	16.559

그러나 초음파의 인식영역(25m)내에서는 한 주기 이내로 정확도가 유지된다. 이러한 오차문제는 높은 초음파 주파수를 사용하여 파형의 한 주기길이를 짧게 하면 더욱 높은 정확도가 가능하리라 생각된다. 또한, 식 (5)의 오차 범위를 적당히 조절하는 방법도 가능하리라 생각된다.

이러한 오차의 문제가 존재하더라도 기존에 널리 사용되고 있는 초음파 센서를 이용하여 제안한 검출방식을 이용하였을 경우 기존에 널리 사용되고 있는 문턱값 검출방식보다 먼거리에서 노이즈의 영향을 덜 받는 정밀한 거리측정 시스템을 개발할 수 있다는 것을 실험을 통해 검증하였다.

4. 결론

본 논문에서는 장거리용 정밀 초음파 거리측정 시스템을 제안하였다. 우선 초음파의 비행시간의 측정 정도를 높이기 위해서 주기인식 검출방식을 제안 하였다. 이 방식은 수신된 초음파신호를 신호 처리하고, 이로부터 송신음파와 동일한 주기의 음파가 수신된 시점을 찾아내어, 이를 기준으로 비행 시간을 계산하는 방식이다. 그리고 실험을 통하여 제안된 주기인식 검출방식이 기존의 방식에 비하여 거리측정 정도가 향상, 측정영역의 확장, 확장된 측정영역에서 측정 정도의 유지 등을 확인하였다.

또한, 기존의 연구에서 송수신부 일체형에만 적용 가능 했던 정밀 측정 기술을 송수신부가 분리된

경우에도 적용 가능한 거리측정 시스템을 제안하였다. 이를 위해서 분리된 송수신부를 RF 신호로 동기화하는 방법이 사용되었다. 송수신부의 분리로 송신부 혹은 수신부가 이동하는 경우에도 거리 측정이 보다 편리하게 되어, 향후 여러 분야로의 응용이 가능하리라 생각된다.

참고문헌

1. Borenstein, J. and Koren, Y., "Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 19, No. 5, pp. 1179-1187, 1989.
2. Yi, W. and Yun, I. S., "A Study on Technical Development of Ultrasonic Test for Application of Industrial Fields," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 14, No. 8, pp. 49-56, 1997.
3. Chu, C. N., Han, D. C., Park, H. J., Park, S. S. and Je, S. U., "A Study on the Ultrasonic Micro-machining and Measurement System," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 19, No. 7, pp. 133-140, 2002.
4. Marioli, D., Narduzzi, C., Offelli, C., Petri, D., Sardini, E. and Taroni, A., "Digital Time-of-Flight Measurement for Ultrasonic Sensors," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 41, No. 1, pp. 93-97, 1992.
5. Han, Y. J. and Hahn, H. S., "Localization and Classification of Target Surfaces using Two Pairs of Ultrasonic Sensors," Journal of Control, Automation and System Engineering, Vol. 4, No. 6, pp. 747-752, 1998.
6. Parrilla, M., Anaya, J. J. and Fritsch, C., "Digital Signal Processing Techniques for High Accuracy Ultrasonic Range Measurements," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 40, No. 4, pp. 759-763, 1991.
7. Webster, D., "A Pulsed Ultrasonic Distance Measurement System based upon Phase Digitizing," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 43, No. 4, pp. 578-582, 1994.
8. Tong, C. C., Figueroa, J. F. and Barbieri, E., "A Method for Short or Long Rang Time-of-flight

- Measurements Using Phase-Detection With an Analog Circuit,” IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 50, No. 5, pp. 1324-1328, 2001.
9. Gueuning, F. E., Varlan, M., Eugene, C. E. and Dupuis, P., “Accurate Distance Measurement by an Autonomous Ultrasonic System Combining Time-of-Flight and Phase-Shift Methods,” IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 46, No. 6, pp. 1236-1240, 1997.
 10. Arai, T. and Nakano, E., “Development of Measure Equipment for Location and Direction(MELODI) using Ultrasonic Waves,” Transactions of the ASME, Vol. 105, pp. 152-156, 1983.