

論文97-34S-11-6

## 초음파 거리 센서의 계측오차 감소를 위한 연구

## (A Study to Reduce Measurement Errors of an Ultrasonic Rangefinder)

都 勇 兌 \* , 金 泰 昊 \*\* , 柳 奭 桓 \*

(Yongtae Do, Taeho Kim, and Seog-Hwan Yoo)

## 요 약

초음파 센서는 저비용으로 간편하게 목표물까지의 거리를 측정하기 위한 수단으로 널리 사용되고 있다. 그러나 초음파 센서의 계측치에는 주변환경 조건에 대한 음속의 의존성에 기인하는 시스템 오차와 불확실한 요인에 의한 불규칙 오차가 포함된다. 본 논문에서는 이러한 오차를 감소시켜 로봇 및 자동화 장치의 거리계측을 위해 사용된 초음파 센서 시스템의 신뢰도를 향상시키기 위한 연구의 결과를 제시한다. 여기서 설계된 시스템은 기준 목표와 두 개의 수신기를 포함하는 독특한 구조를 가진다. 기지의 거리에 설치된 기준 목표로부터의 반사파는 환경에 따른 음속의 변화를 보상하기 위해 사용하였는데, 기존의 방식과는 달리 별도의 보상용 센서를 사용하지 않으면서도 온도뿐 아니라 모든 환경요소에 대한 보상이 가능하도록 하였다. 복수의 수신기를 사용할 때 얻어지는 잉여의 출력은 확률적 견지에서 불규칙 오차를 줄이기 위해 융합하였다. 융합과정 중에는 하드웨어를 부분적으로 공유하는 수신기들의 출력에 가지는 상관관계도 고려하였다. 본 논문을 통해 제안된 방식은 개념적으로 간단하고 실현이 용이하며, 실험을 통해서도 계측의 정확성을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

## Abstract

Ultrasonic sensors are widely employed in detecting range to a target by the virtue of their low cost and simplicity. However, the sensor's measurements are corrupted by systematic errors due mainly to the dependency of sound speed upon surrounding conditions and random errors of uncertain origin. In this paper, we present the results of research carried out to reduce these errors for increasing the reliability of an ultrasonic sensor system to be used in robotic or other automated systems' range finding. The sensor system designed herein is in a peculiar structure having a reference target and two receivers. Echoes from a small reference target placed at a known distance are used for compensating the variations of sound speed according to the changes of sensing conditions. Unlike existing ones, the technique proposed can compensate the effects of temperature or any other physical parameters without an additional sensor dedicated to the compensation. The measurements by two redundantly employed receivers are fused to reduce random errors in a statistical sense. The correlation of the signals from the receivers sharing a hardware in part is considered in the fusion process. The methodology described in this paper is conceptually simple, easy to be implemented, and effective to increase the accuracy of the sensor measurements as experimental results confirm.

\* 正會員, 大邱大學校 情報通信工學部  
(Taegu University, School of Computer & Communication Engineering)

\*\* 正會員, 大原産業(株)

(Daewon Machinery Work Co., Ltd.)

※ 이 논문은 1997학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의한 논문임.

接受日字: 1997年6月16日, 수정완료일: 1997年11月3日

## I. 서 론

로봇이나 자동화 시스템에서 목표물까지의 거리는 가장 기본적인면서도 중요한 계측량이 된다. 비접촉 거리 계측기법에는 여러 가지가 있지만<sup>[1]</sup>, 대부분 광이나 초음파의 이용에 기반을 두고 있다. 광학적 원리에 의한 계측은 사용되는 신호의 파장이 짧아 정확성이 높고, 온도나 압력같은 외부 환경요소에 민감하지 않다는 점에서 장점을 갖는다. 그러나 대체로 장치가 고가이고 신호처리 알고리즘이 복잡해질 수 있다는 문제가 있다. 이에 비해 초음파를 이용한 거리계측은 해상도가 비교적 낮고 외부 환경에 따라 진행파의 속도나 감쇠의 정도가 달라지는 단점이 있지만, 측정방식이 간단하고 장치가 저가라는 실제적 장점외에도 광학적 방법의 센서와는 달리 먼지가 많은 곳이나 더러운 작업공간에서도 목표물의 색깔이나 투명성에 무관하게 사용 가능하다는 이점을 지니고 있다. 따라서 초음파 센서는 로봇이나 무인 이동체를 위한 계측장치로써 뿐만 아니라 수중탐사장치, 의료용 진단장치, 비파괴검사 장치 등 여러 가지 용도로 널리 활용되고 있다<sup>[2,3]</sup>.

초음파 센서의 성능은 초음파의 세기와 주파수, 지향성, 전파 매질의 임피던스, 센서와 매질의 정합, 수신기의 감도, 목표물의 반사도 등에 의해 영향을 받으며, 이들은 주로 물리적 센서의 제조과정중에 고려되어야 할 사항이다<sup>[4]</sup>. 그러나 센서를 이용하여 계측 시스템을 설계할 경우, 시스템의 신뢰성은 계측 오차의 적절한 처리에 의해 향상될 수 있다. 일반적으로 계측 오차는 측정자에 의한 전오차(gross error)와 시스템 자체에 내재하는 오차(system error), 그리고 규정할 수 없는 요인에 의한 불규칙 오차(random error)로 나눌 수 있다<sup>[5]</sup>. 본 논문에서는 로봇을 비롯한 자동화 시스템에의 활용을 전제로 초음파 거리 센서의 시스템 오차와 불규칙 오차를 줄일 수 있는 방법에 대해 연구하고 그 결과를 제시한다.

우선 시스템 오차를 줄이기 위해서는 센서 계측치의 환경에 대한 의존성을 효과적으로 보상할 필요가 있다. 이는 초음파 거리계측 방법으로 널리 쓰이는 비행시간(time of flight; TOF) 측정법을 사용할 때, 계측 결과가 초음파 진행의 매질이 되는 공기의 특성(온도, 습도, 밀도, 기압, 기류 등)에 민감한 문제가 있기 때문이다. Moritz<sup>[6]</sup>는 기류의 영향을 감소시키기 위해

센서주위에 스크린을 설치하고, 온도를 따로 측정하여 음속을 보상하고자 하였다. 또 Canali<sup>[4]</sup>는 써미스터(thermistor)와 타이머 IC로 구성된 온도 보상회로를 시스템내에 포함시켜 계측의 신뢰성을 향상시켰다. 이러한 접근법은 모두 온도의 측정을 위한 센서가 별도로 필요하며 온도이외의 환경 요소에 대해서는 보상할 수 없는 문제가 있다. 한편 Martin<sup>[7]</sup>은 음속과 센서 재료로 사용된 압전소자의 공진주파수 사이에 의존성이 있음을 이용하여, 환경에 따른 음속의 변화를 보상하는 방법을 제안하였다. 이 경우 부가적인 장치가 불필요하다는 장점이 있지만, 공진 주파수와 음속과의 관계표를 만드는 과정이 요구되어지고 이는 센서의 종류마다 달라지므로 보정의 비용이 과중해진다. 모든 환경요소를 고려하기 위한 방법으로 정해진 위치에 설치한 기준 목표(reference target)와 이를 위한 더미(dummy) 센서에 의한 방법<sup>[8,9]</sup>이 있는데, 이 경우 효과적인 보상이 가능하지만 추가적인 센서의 사용이 요구된다. 한편 Sabatini<sup>[10]</sup>는 대략적인 위치가 알려진 기준목표와 초음파 센서 배열(array)과의 기하학적 관계를 이용하고, 확장칼만필터를 사용하여 음속을 추정하는 방법을 사용하였다. 모든 환경요소에 대한 보상이 가능하며 기준목표의 위치가 대략적으로만 알려져 있으면 된다는 장점을 가지는 대신, 다수의 센서가 배열을 이루며 정확하게 설치된 경우에만 적용할 수 있다는 문제가 있다. 본 논문에서는 더미 센서없이 기준 목표만을 이용하여 음속의 환경 의존성을 보상하는 방법과 이를 실현하도록 설계된 시스템의 보정(calibration)방법을 제시한다.

규정할 수 없는 요인에 의해 발생하는 불규칙 오차를 줄이기 위해서는 확률적 처리 방법이 전통적으로 사용되어 오고 있는데<sup>[5]</sup>, 확률적 견지에서 불규칙 오차를 감소시켜 신뢰도를 높이는 것은 센서 계측치 오차의 분산을 줄이는 것으로 해석될 수 있다. 불규칙 오차를 줄일 수 있는 효과적인 방법으로 잉여 센서의 융합(redundant sensor fusion)이 근래에 와서 활발히 연구되고 있다<sup>[11-14]</sup>. 본 논문에서는 복수의 수신기를 사용함으로써 잉여 센서의 사용에 따른 이점을 얻는다. 특히 많은 기존의 연구들에서 흔히 기본적인 가정으로 사용하는 잉여 센서 계측치들의 상호 확률적 독립성(independence)이 지켜질 수 없을 때의 경우로 문제를 확장하여 실효성을 높였다.

## II. 계측환경의 영향 보상

### 1. 음속에 무관한 거리 계측

거리계측을 위해 초음파를 사용하는 방식에는 몇 가지가 있지만<sup>[15]</sup>, 공기 중에서 로보트나 자동화 장치를 위해 사용하는 경우에는 펄스반사(pulse-echo) 방식이 널리 사용된다. 초음파 펄스를 발사한 후 목표물에 반사되어 돌아올 때까지 걸리는 시간(TOF)을 측정하면, 이는 비행거리에 비례하므로 목표물까지의 거리를 계산할 수 있는 것이다. 즉, 센서에서 목표물까지의 거리가  $L$ 이고 TOF를  $T$ 라고 하면,  $L$ 은 아래의 식에 의해 간단히 구할 수 있다.

$$L = C_0 \frac{T}{2} \quad (1)$$

여기서  $C_0$ 는 초음파의 진행속도인데, 기존 연구에서는 대부분 기지이거나 상수라고 가정하였다<sup>[16,17]</sup>. 그러나 음속은 실제로 음파가 진행하는 매질의 물리적 조건에 의해 크게 영향을 받는다. 예를 들어 공기중에서 음속 [m/sec]의 온도와 기압 및 밀도 의존성은 각각 아래 식들과 같이 주어진다<sup>[6,9,18]</sup>.

$$C_0 = 331.5 + 0.60T_c \quad (2)$$

$$C_0 = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}} \quad (3)$$

여기서  $T_c$ 는 섭씨온도,  $P$ 는 기압,  $\rho$ 는 밀도,  $\gamma$ 는 기체의 종류에 따라 결정되는 상수이다. 즉, 다른 환경조건은 고정된 상황에서 온도가 0°C에서 30°C로 변화한다면 50cm의 거리에 있는 목표물에 대해서는 2.6cm(약 5%)의 오차가 생기게 된다.

이처럼 펄스반사 방식은 개념상 간단하고 기본적으로 계수기(digital counters)를 이용한 시간의 측정만으로 쉽게 구현할 수 있다는 장점이 있지만, 그 측정치가 주변 환경요소의 변화에 따라 달라지는 문제가 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 효율적으로 극복하기 위해서 그림 1에서 보인 바와 같이 음파의 진행 각도내 기지의 거리에 기준 목표를 장치한다. 기준 목표가 충분히 작다면 송신기에서 발사된 음파는 기준 목표와 미지의 실제 측정 대상물 모두에서 반사되어 시차를 두고 수신기에서 검파되게 된다. 두 개의 목표에 대해 얻어지는 음파의 비행시간  $T_1$ 과  $T_2$ 로부터 식 (1)을 사용하여 다음의 식(4.a)와 (4.b)를 얻을 수 있다.

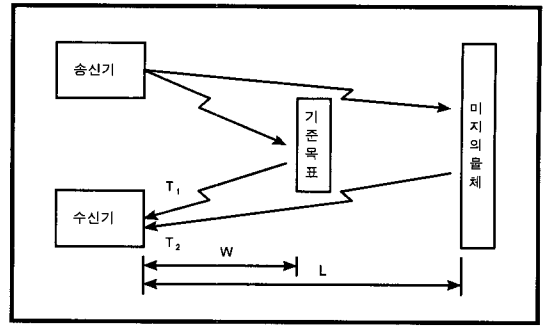


그림 1. 기준 목표물을 사용한 펄스반사 방식  
Fig. 1. Pulse-echo method using a reference target.

$$W = C_0 \frac{T_1}{2} \quad (4.a)$$

$$L = C_0 \frac{T_2}{2} \quad (4.b)$$

여기서  $W$ 는 기준 목표까지의 거리로 기지이며,  $L$ 은 구하고자 하는 미지의 물체까지의 거리이다. 이 두 식으로부터 간단히 음속과는 무관한 식(5)를 얻을 수 있다. 이러한 접근법은 기존의 대부분 기법과는 달리 별도의 환경계측용 센서를 사용하지 않고도 자연스럽게 모든 환경요소에 대한 보상이 가능하게 한다.

$$L = W \frac{T_2}{T_1} \quad (5)$$

TOF측정에 기반한 대부분의 시스템에서는 음파의 발사와 계수기의 동작을 동기시키고, 수신기의 신호가 어떤 기준치(threshold)이상이면 음파가 반사되어 돌아온 것으로 간주하고 계수를 멈추게 된다. 그러나 식 (5)를 구현하기 위한 시스템은 기준치 이상의 신호가 돌아오더라도 이는 기준 목표에 의한 반사파이므로 계수를 멈추지 않고, 미지의 목표물에 부딪혀 돌아오는 신호가 나타날 때까지 계수를 계속하도록 설계되어야 한다. 다만 때에 따라서는 계측가능 거리안에 목표물이 존재하지 않을 수도 있으므로, 정해진 시간내에 두 번째 반사파가 나타나지 않으면 새로운 계측주기를 시작할 필요가 있다.

상기와 같은 방식으로 동작하는 시스템에서 발생하는 문제 중 하나는 실제로 계수기로부터 얻어지는 시간과 음파의 순수한 TOF와는 정확하게 일치하지 않는다는 점이다. 이의 원인으로는 신호의 잡음, 계수기의 해상도, 설정된 기준치의 부적절성, 그리고 수신기에 검파된 신호를 증폭하고 필터링한 후 비교기 회로를 거치는 동안의 지연시간과 같은 것들을 생각할 수

있다. 대부분 기존의 초음파 센서활용에서 이러한 불일치는 무시되고 있지만, 이는 TOF 측정치의 오차로 작용하며 특히 부적절한 기준치와 신호처리과정에서의 지연시간은 측정치를 바이어스(bias)되게 하므로 이를 보정할 필요가 있다. 즉, 바이어스를 고려한 시간 측정치를 아래와 같이 표현할 때,

$$t_1 = T_1 + \tau \quad (6.a)$$

$$t_2 = T_2 + \tau \quad (6.b)$$

$t_1$ 과  $t_2$ 는 기준과 미지 목표에 대한 계수기의 TOF 측정치이며,  $\tau$ 는 바이어스 항이고,  $T_1$ 과  $T_2$ 는 음파의 순수한 TOF이다. 식(5)는 식(6)을 이용하여 다음과 같이 변형되며,

$$L = W \frac{t_2 - \tau}{t_1 - \tau} \quad (7)$$

여기서 TOF 측정치의 바이어스 항은 임의의 알려져 있는  $L$ 을 이용하여 구할 수 있다.

## 2. 제안된 방식의 오차해석

일반적으로 두 계측치의 비(division)가 가지는 상대오차(relative error)는 각 계측치 상대오차의 합으로 근사화될 수 있다<sup>[5]</sup>. 따라서 식(7)을 사용하여 얻은 결과는 기준 목표와 실제 목표물까지의 두 TOF 계측치의 상대오차 보다 큰 오차를 가지게 된다는 문제를 갖는다. 이러한 점을 고려하면 본 논문에서 제안된 방식이 유용할 경우는 계측 환경의 변화가 각 계측치 상대오차의 합보다 큰 오차를 초래할 때가 된다.

기존의 펄스반사 방식에 측정치의 바이어스를 고려하면 식(1)은 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$L = C_0 \frac{t - \tau}{2} \quad (8)$$

만약 시간계측의 오차가  $\epsilon$ 이라고 하면, 상대오차  $r$ 은 아래와 같이 정의한다.

$$\frac{\pm \epsilon}{t - \tau} = \pm r \quad (9)$$

일반적으로 초음파 센서에서 계측의 상대오차는 거리에 무관하므로<sup>[19]</sup>, 식(7)에서 사용된 두 계측치의 상대오차도 거의  $r$ 이 된다.

$$\frac{\pm \epsilon_1}{t_1 - \tau} \approx \frac{\pm \epsilon_2}{t_2 - \tau} \approx \pm r \quad (10)$$

여기서  $\epsilon_1$ 과  $\epsilon_2$ 는 각 TOF 계측치의 절대오차이다.

따라서 식(7)에 의해 음속과는 무관하게 제안된 방식이 갖는  $L$ 의 상대오차는 근사적으로  $2r$ 이 된다.

기존의 기법이 갖는 오차를 해석하기 위해 식(8)을 사용하고 환경의 변화에 의해 음속이  $\Delta C$ 만큼 변화하였을 때를 고려하면, 거리 계측치는 절대오차  $\epsilon$ 을 포함하여 아래와 같이 얻어진다.

$$L = \frac{C_0 \pm \Delta C}{2} (t - \tau \pm \epsilon) \quad (11)$$

식(11)의 상대오차는 아래 식(12)와 같이 주어지므로,

$$\frac{\pm C_0 \epsilon / 2 \pm \Delta C (t - \tau \pm \epsilon) / 2}{C_0 (t - \tau) / 2} = \pm \left( r + \frac{\Delta C (t - \tau \pm \epsilon)}{C_0 (t - \tau)} \right) \quad (12)$$

제안된 식(7)에 의한 방식이 유용할 수 있으려면 아래 식(13)의 조건이 성립하여야 한다.

$$2r \leq r + \frac{\Delta C (t - \tau \pm \epsilon)}{C_0 (t - \tau)} \quad (13)$$

이는 음속의 변화(=  $\Delta C / C_0$ )가 오차를 포함한 TOF에서 오차가 차지하는 비율(=  $\epsilon / (t - \tau \pm \epsilon)$ )보다 클 때 제안된 방식이 유용할 수 있다는 의미로 해석할 수 있다.

## III. 불규칙 오차의 감소를 위한 잉여 수신기 출력의 융합

### 1. 센서융합

일반적으로 센서의 출력신호에는 시스템 오차외에도 여러 가지 요인에 의해 발생하는 불규칙 오차가 포함된다. 불규칙 오차는 그 발생 원인이 불확실한 경우가 많고, 그 특성을 파악하기도 어려우므로 확률적 방법에 의한 표현과 처리가 유용할 수 있다<sup>[5]</sup>.

초음파 센서가 공기중에서 사용된 경우, 수중에서와는 달리 전파속도가 느리고 감쇠가 크며 잡음의 영향 등에 의해 수신기에서는 보통 큰 왜곡을 가지는 파형을 얻게 된다<sup>[15]</sup>. 초음파 센서의 반사파에 포함되는 잡음은 급속히 변화하며 비상관적인 특성을 갖는 성분과 완만하게 변화하며 큰 상관관계를 갖는 성분으로 분류될 수 있는데<sup>[10]</sup>, 후자의 경우 주로 온도나 기류와 같은 환경변화에 의한 것이므로 II장에서 제안된 기법에 의해 충분히 보상되었다고 가정한다. 본 장에서 고려하려고 하는 급속히 변화하고 비상관적인 특성을 가지는 잡음에 대해서는 다음과 같은 요인을 생각할 수 있다<sup>[19]</sup>.

- 사용된 전원에서 비롯한 잡음.
- 전자회로의 열적 잡음(thermal noise).
- 음파의 TOF를 계측하는 디지털 회로에서 발생하는 양자화 잡음.

불규칙 오차를 감소시키기 위한 기법으로 본 논문에서는 계측치를 잉여로 얻어 융합하는 방법을 사용한다. 일반적으로 동일한 목표에 대해 독립적으로 사용된 잉여 센서의 출력을 융합하면 불확실성이 감소된 계측이 가능하다<sup>[11-14]</sup>. 예를 들어 N개의 독립적인 측정치가 모두 같은 분산  $\sigma^2$ 을 가진다고 하면, 이들을 평균한 값의 분산은  $\sigma^2/N$ 으로 감소됨은 잘 알려진 사실이다. 이 때 얼마나 많은 잉여 센서를 사용할 것인가는 용도에 따라 달라지겠지만, 하나의 추가된 센서는 특히 큰 의미를 가진다. 즉, 추가된 하나의 센서로 말미암아 시스템에 잉여성이 부여되며 확률적으로도 이미 설치된 단수의 센서가 가지는 확률적 불확실성이 1/2로 감소될 것이 기대되므로, 이 후 추가되는 센서와 비교하면 그 역할이 상대적으로 큰 것이다. 따라서 본 논문에서는 하나의 송신기에 대해 복수의 수신기를 사용함으로써 잉여의 계측치를 얻고 이를 융합하여 계측의 불확실성을 감소시키고자 한다. 초음파 센서는 일반적으로 가격이 저렴하고 펄스반사 방식을 사용할 경우 사용이 단순하여 센서의 추가적인 사용이 계산상으로는 경제적으로 큰 부담이 되지 않을 것이므로 이러한 접근 방식은 실제적으로 유용할 수 있을 것이다.

그림 2는 하나의 송신기에 대해 추가적으로 수신기를 한 개 더 사용한 경우를 보여 준다. 송신기 좌우에 설치된 수신기들로부터 기준 목표와 미지의 장애물에 대해 획득한 각각의 TOF를  $t_{L1}$ ,  $t_{L2}$ 와  $t_{R1}$ ,  $t_{R2}$ 라 하면, 식(7)에 의해 두 개의 거리 계산치  $L_1$ 과  $L_2$ 를 얻을 수 있다. 이들 출력은 두 수신기가 멀리 떨어져 있고 초음파의 방사각(beam dispersion angle)이 작은 센서를 사용하여 기울어짐이 큰 목표물까지의 거리를 측정할 때를 제외하고는 잉여성을 가지게 된다. 잉여 센서출력을 융합하는 데 사용할 수 있는 기존의 기법에는 여러 가지가 있지만, MLE(maximum likelihood estimation) 방식이 직접적이고 선형의 기법이라는 이유에서 널리 사용된다<sup>[11-14]</sup>. MLE에 의한 센서 융합 방식을 본 장에서 설계한 시스템에 적용하면 다음과 같다.

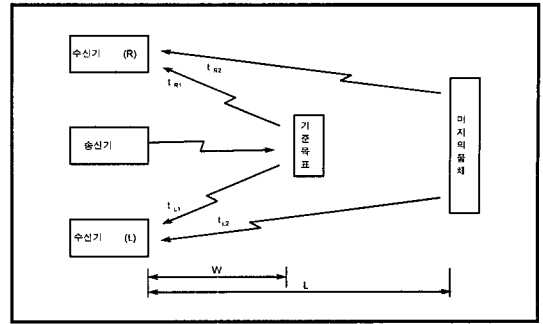


그림 2. 복수의 수신기를 사용한 거리계측  
Fig. 2. Range measurements using two receivers.

미지의 거리  $L$ 에 대해 두 수신기의 출력으로부터 계산된 값을  $L_1$ 과  $L_2$ 라 하고 이들이  $L$ 을 기대치로 하고 임의의 분산  $\sigma_1^2$ 과  $\sigma_2^2$ 을 각각 가진 정규분포의 확률밀도함수를 따른다고 하면,  $L_m$ ,  $m=1,2$ ,의 확률분포는 아래와 같이 주어진다.

$$p(L_m|L) = (1/\sqrt{2\pi\sigma_m^2})\exp[-(1/2)(L_m - L)^2/\sigma_m^2] \quad (14)$$

따라서 피계측치  $L$ 은 두 개의 측정치  $l=(L_1, L_2)$ 로부터 식(15)의 likelihood 함수를 최대화하는 값을 찾음으로서 식(16)과 같이 추정될 수 있다.

$$p(l|L) = p(L_1|L)p(L_2|L) \quad (15)$$

$$\hat{L} = \frac{\sigma_2^2 L_1 + \sigma_1^2 L_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (16)$$

### 2. 비독립적인 수신기 출력의 융합방식

확률적으로 독립인 zero-mean 정규분포의 불규칙 오차를 가지는 센서 계측치들에 대해 식 (16)에 의한 융합은 확률적으로 최적인 추정을 가능하게 한다. Krotkov는 다른 정확도를 가지는 다수의 센서를 MLE에 의해 융합한 결과는 가장 정확한 센서 단독에 의한 결과보다 확률적으로 정확함을 이론적으로 증명해 보이고<sup>[13]</sup>, 스테레오 시각에 의한 거리계측과 초점맞추기(focusing) 방식에 의한 거리계측의 결과를 융합하는데 식(16)을 사용하였다<sup>[14]</sup>. 그러나 본 논문에서 설계된 시스템은 복수의 수신기가 하드웨어의 일부를 공유하는 구조를 가지므로, 두 센서 계측치가 확률적으로 완전히 독립이라는 가정을 적용하기 곤란하다. 따라서 본 논문에서는 두 계측치의 상관관계를 고

려할 수 있도록 식(16)을 확장한다.

미지의 거리  $L$ 에 대한 잉여의 두 수신기 계측치  $L_1$  과  $L_2$ 가 결합정규(jointly gaussian) 분포를 하고 있다고 가정하면, 결합밀도함수는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$p(L_1, L_2 | L) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left\{\frac{(L_1-L)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\rho(L_1-L)(L_2-L)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(L_2-L)^2}{\sigma_2^2}\right\}\right] \quad (17)$$

여기서 상관계수  $\rho = E[(L_1-L)(L_2-L)]/\sigma_1\sigma_2$  이다. 주어진 식을 최대화하는  $L$ 은 로그함수를 사용하여 보다 간편하게 구할 수 있다. 즉, 식(17)의 로그함수는

$$\log p(L_1, L_2 | L) = -\log(2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}) - \frac{1}{2(1-\rho^2)}\left\{\frac{(L_1-L)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\rho(L_1-L)(L_2-L)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(L_2-L)^2}{\sigma_2^2}\right\} \quad (18)$$

이고, 이를 최대화하는  $L$ 은 아래 식(19)로부터

$$\frac{\partial}{\partial L} \log p(L_1, L_2 | L) = \frac{1}{2(1-\rho^2)} \frac{2\sigma_1^2(L_1-L) + 2\rho\sigma_1\sigma_2(L_2-L_1-L) + 2\sigma_2^2(L_2-L)}{\sigma_1^2\sigma_2^2} \quad (19)$$

$\partial \log p(L_1, L_2 | L) / \partial L = 0$ 로 하는 값을 추정치  $\hat{L}$ 로 아래 식(20)과 같이 얻을 수 있다.

$$\hat{L} = \frac{\sigma_2^2 L_1 - \rho\sigma_1\sigma_2(L_1 + L_2) + \sigma_1^2 L_2}{\sigma_1^2 - 2\rho\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (20)$$

두 수신기 출력 오차의 확률적 특성, 즉 분산과 상관계수가 알려지면 식(20)을 사용하여 임의의 목표에 대해 두 출력을 융합할 수 있다.

식(20)은 상관계수가 0인 경우를 포함하므로 식(16)을 확장한 것이라 볼 수 있지만, 이의 사용에는 두 측정치가 정규분포를 따른다는 조건이 따른다. 이러한 조건은 대체로 받아들여지지만<sup>[10,19]</sup>, 한쪽의 수신기가 이상동작을 하는 때와 같은 경우에는 충족될 수 없다. 이 때는 식(20)의 사용이 부적절하므로 융합에 앞서 이를 확인하는 과정이 필요하며, 본 논문에서는 계측치의 일관성(consistency)을 점검하는 방법으로 다음과 같이 가설과 검정(hypothesis and test)의 절차를 사용한다.

- 가설: 우선 센서가 과거의 확률적 특성안에서 제대로 동작한다고 가정하고, 식(20)의 융합 방식에 의해 거리를 계산한다.
- 검정: 아래 식(21)의 조건을 확인하고, 성립하는 경우에는 가설을 증거하는 것이므로 이미

계산된 추정치  $\hat{L}$ 을 사용한다. 단  $k$ 는 임의의 상수이며, 이는 정규분포에서는 기대치를 중심으로  $\pm 2\sigma$  혹은  $\pm 3\sigma$ 내에 각각 자료의 95%와 99.7%가 포함됨을 이용하여 정할 수 있다.

$$\sqrt{(L_m - \hat{L})^2} \leq k\sigma_m, m=1,2 \quad (21)$$

상기의 절차에서 검정에 실패한 경우, 즉 식(21)의 조건이 만족되지 못하는 경우는 비정상적인  $L_1$  혹은  $L_2$ 가 존재하는 것이므로 식(20)의 융합방식을 적용하는 것은 적절하지 못하다. 이 때의 대처법은 일률적이기보다는 센서가 활용된 환경에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어 로봇의 경로 쇄신율(path update rate)에 비해 충분히 큰 계측 주파수를 가지는 센서 시스템에서는 검정에 실패한 계측치를 모두 버리고 다음의 계측을 진행하더라도 센서에 의해 제어되는 로봇의 동작에 지장을 주지 않는다. 그러나 그렇지 못한 경우에는 두 수신기의 출력 중 임의의 것을 선택하거나, 산술평균, 혹은 과거 계측치로부터의 예측치(predicted value) 등을 사용할 필요가 있다.

#### IV. 실험 및 결과

본 논문에서 제안된 방식을 실험하기 위하여 거리 계측용 초음파 센서 시스템을 설계하였다. 시스템은 그림 3에 보인 바와 같이 초음파 송수신기와 신호처리 회로, 마이크로 콘트롤러, 그리고 PC로 구성되어 있다. 시스템에서 사용된 센서는 중심 주파수가 40KHz인 무라다사의 MA40A5이며, 마이크로 콘트롤러는 20 MHz로 동작하는 마이크로칩사의 PIC17C42이다.

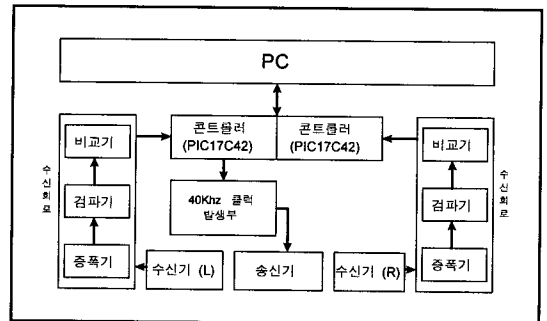


그림 3. 설계된 센서 시스템의 하드웨어 구성도  
Fig. 3. A schematic block diagram of the designed sensor system.

시스템의 동작은 먼저 마이크로 컨트롤러가 송신기 용 클럭 발생부에 시작 펄스를 보냄과 동시에 내부 16비트 계수기를 초기화시킴으로서 시작된다. 수신기에서는 수신된 신호를 증폭한 후 포락선 검파기를 통해 신호중 양의 성분만을 얻게 되는데, 이 신호가 기준치 이상이면 비교기에서 negative-going 펄스를 발생하게 된다. 이 펄스에 의해 컨트롤러는 인터럽트되어 이때의 계수기 값을 저장시키고, 미지의 물체에 대한 반사파가 수신기에 검지되기를 기다린다. 두 번째 반사파, 즉 미지의 물체에 의해 반사된 파가 검지되면 컨트롤러는 계수기 값을 저장시킨 후, 지금까지 저장된 계수기 값들을 RS-232C를 통해 PC로 전송한다. PC에서는 계수된 값들을 TOF( $t_{L1}$ ,  $t_{R1}$ ,  $t_{L2}$ ,  $t_{R2}$ )로 변환하고, 본 논문에서 제안된 알고리즘에 의해 거리를 계산하게 된다. 만약 미지의 물체에 대한 반사파가 없어 카운터가 over-flow하면 센서의 측정영역 안에 물체가 존재하지 않는 것으로 간주하고 컨트롤러는 다시 시작 신호를 발생시키며 상기의 절차를 되풀이한다. 그림 4는 이러한 방식으로 동작하는 센서 시스템의 주요한 신호파형들을 오실로스코프를 통해 관찰한 것이다.

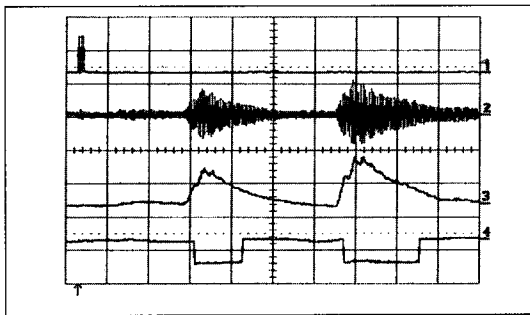


그림 4. 센서 시스템의 주요한 신호파형: (1) 송신파형, (2) 수신파형, (3) 포락선검파기의 출력, (4) 비교기의 출력

Fig. 4. Major signal waveforms of the sensor system: (1) transmitted wave train, (2) received wave, (3) output of an envelope detector, (4) output of a comparator.

실험은 기준 목표를 사용한 환경 의존성 극복 기법과 잉여 계측치의 융합에 의한 확률적 오차의 감소기법을 각각 독립적으로 점검한 후 이들을 종합하는 방식으로 진행하였다. 먼저 센서로부터 70Cm 거리에 목표물이 될 플라스틱 판(100Cm × 100Cm)을 위치시

키고, 같은 방향으로 20Cm 거리에 기준목표로 사용할 작은 플라스틱 판(10Cm × 10Cm)을 설치하였다. 센서 주위에 전기난로와 가습기를 설치하여 환경을 급격히 변화시키면서, 약 15초 주기로 200개의 데이터를 얻은 후 기존의 식(1)을 단순히 사용한 경우와 제안된 식(7)을 사용하여 보상을 행한 경우를 비교하였다. 실험의 결과는 그림 5에 나타난 바와 같으며, 이 때 비보상치와 보상치의 평균 절대오차는 9.72mm와 1.80mm이다. 즉, 그림에서와 같이 온도와 습도가 증가됨에 따라 기존 방식에 의한 거리 측정치는 급격히 변화하지만 제안된 방식은 그 영향이 상대적으로 작음이 확연히 드러난다.

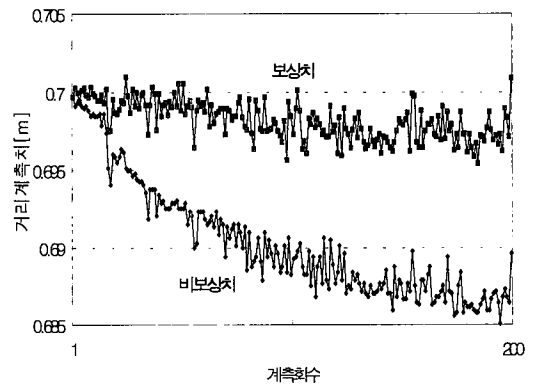


그림 5. 환경의 변화에 따른 측정치의 변화  
Fig. 5. Measurement variations according to the change of sensing surroundings.

다음으로 수신기를 중복 사용하고 잉여로 얻어진 계측치들을 융합함으로써 센서 시스템의 신뢰도를 향상시킬 수 있음을 실험을 통해 확인하였다. 송신기의 양쪽에 5Cm 간격으로 수신기를 설치하고, 70Cm 거리에 놓여진 목표까지의 거리를 3초 간격으로 계측하여 200개의 계측치  $L_1$ ,  $L_2$ 를 mm단위로 얻었다. 정적인 환경에서 실험이 진행되었으므로 TOF로부터 거리값으로의 변환은 비보상 계측 방식인 식(1)을 사용하였다. 얻어진 출력이 일관성을 가지는지 점검한 결과 5개의 데이터가 과도한 잡음에 의해 기대치의  $\pm 3\sigma$  범위를 벗어나 있었으며, 이들을 포함하여 처리한 결과와 이들을 제외한 결과를 표 1에 제시하였다. 기존의 식(16)을 사용한 방법은 사용된 두 개의 수신기 중 비교적 정확한 수신기 단독에 의한 계측치( $L_1$ )와 같거나 더욱 작은 분산을 보였으며, 이는 Krotkov의 실험결과<sup>[14]</sup>와 일치하는 것이다. 이 결과는 상관관계를 고

려한 식(20)을 적용했을 때 조금 더 개선될 수 있었다.  $L_1$ 과  $L_2$ 의 상관계수는 전 데이터와 일관성의 점검을 통과한 데이터에 대해 각각 0.50과 0.57이었다

표 1. 정적인 환경에서 복수 수신기 계측 [mm]의 융합 결과: (a) 모든 데이터를 사용한 경우, (b) 일관성의 점검을 통과한 데이터만 사용한 경우

Table 1. Results of fusing the two receivers' measurements [mm] in static environments: (a) when all collected data are used, (b) when only consistent data are used.

	데이 터의 종류	데이 터의 갯수	계측 방법				
			$L_1$	$L_2$	산술 평균	식(16)	식(20)
계측 치의 분산	(a)	200	0.20	0.28	0.18	0.17	0.17
	(b)	195	0.11	0.25	0.13	0.11	0.10

표 2. 변화하는 환경에서 복수 수신기 계측 [mm]의 융합 결과

Table 2. Results of fusing the two receivers' measurements [mm] in changing environments.

방법	비보상치		보상치		산술 평균	식(16)	식(20)
	$L_1$	$L_2$	$L_{c1}$	$L_{c2}$			
평균 절대오차	5.41	7.51	0.19	1.19	0.69	0.45	0.35
분산	5.13	10.93	1.20	3.35	1.50	1.16	1.12

마지막으로 변화하는 환경내에 설치된 두 수신기의 출력을 융합하여 보았다. 사용된 장치의 구성은 전의 실험과 동일하며, 융합의 결과는 표 2와 같다. 여기서  $L_1$ 과  $L_2$ 는 기존의 식(1)을 사용한 계측치이고,  $L_{c1}$ 과  $L_{c2}$ 는 식(7)을 사용하여 보상한 값이다. 그림 6은 이들 데이터의 환경에 따른 변화를 보여준다.  $L_{c1}$ 과  $L_{c2}$ 의 상관관계를 고려하여 MLE에 의해 융합한 결과, 정적인 환경에서와 마찬가지로 추정치는 가장 작은 분산을 가졌다. 그러나 절대 오차의 평균치는 융합한 두 계측치들 중 보다 정확도가 높은  $L_{c1}$ 에 비해 큰 값이 얻어졌는데, 이는 MLE에 의한 융합기법이 추정치의 분산을 최소화 하려는 의도만을 가지고 있다는 점에서 이해될 수 있는 것이다. 즉, 본 논문에서 제시된 기법은 센서들이 잘 보정되어 평균 절대오차가 거의 0일 때 분산을 줄여 계측의 불확실성을 최소화하는 데 유

용한 기법이라는 것을 알 수 있다. 그림 7은 융합기법에 따른 추정치들의 변화를 비교하여 보이기 위한 것이다. 실험에 사용된 계측치들 중  $\pm 3\sigma$ 를 기준으로 했을 때 일관성의 점검을 통과하지 못한 것은 존재하지 않았으며,  $L_{c1}$ 과  $L_{c2}$ 의 상관계수는 0.36이었다.

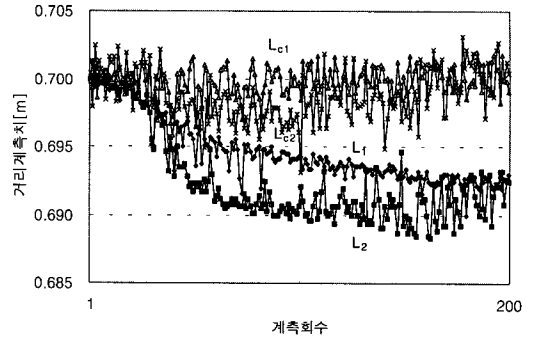


그림 6. 변화하는 조건내에 사용된 복수 수신기의 출력 ( $L_1, L_2$ : 비보상치,  $L_{c1}, L_{c2}$ : 보상치)

Fig. 6. Readings of two receivers employed in varying conditions. ( $L_1, L_2$ : uncompensated measurements,  $L_{c1}, L_{c2}$ : compensated values)

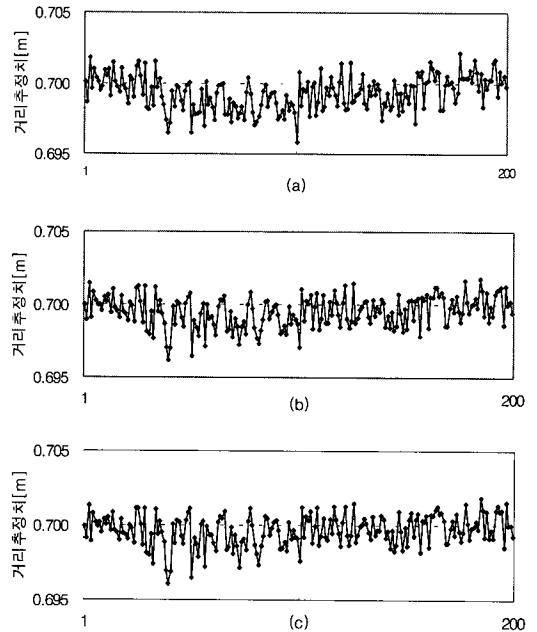


그림 7. 그림 6의  $L_{c1}$ 과  $L_{c2}$ 에 기반한 추정치: (a)산술 평균, (b)식(16)의 사용, (c)식(20)의 사용

Fig. 7. Estimated values based on the  $L_{c1}$  and  $L_{c2}$  of Fig. 6: (a)arithmetic average, (b)using eq.(16), (c)using eq.(20)



## V. 결론

본 논문에서는 로봇 및 자동화 장치의 거리계측을 위해 널리 사용되고 있는 초음파 센서 시스템의 계측 오차를 감소시키기 위한 방법을 제시하였다. 펄스반사 방식을 사용할 때 TOF 계측 오차를 유발시키는 음속의 환경 의존성 극복을 위해 기지의 거리에 장치된 기준 목표물을 사용하였다. 제안된 방식은 별도의 보상용 센서가 필요하지 않으며, 온도를 비롯하여 음속에 영향을 미치는 모든 환경요소에 대한 보상이 가능하다. 또 보상이 계측의 속도에 큰 영향을 미치지 않으며, 기존의 연구에서 흔히 무시되어 온 TOF 측정치의 바이어스 항도 보정을 통해 고려할 수 있도록 하였다. 이론의 전개와 실험은 송수신기가 분리된 형태의 센서를 사용하여 진행하였으나, 송수신기가 통합된 형태의 센서에 대해서도 그대로 적용 가능하다. 단, 초음파의 진행방향에 기준목표가 위치함에 따라 전체적으로 시스템의 크기가 커지고, 근거리 계측범위가 제한된다는 점은 단점이 된다.

불규칙 오차를 감소시키기 위해서 수신기를 이중으로 사용하고, 이들로부터 얻어지는 출력을 융합하기 위한 방식을 제시하였다. 수신기들은 하드웨어를 공유하고 있으므로 이들로부터 얻어진 측정치들 사이의 상관관계까지 고려함으로써 확률적 의미에서 불확실성을 감소시킬 수 있었다. 그러나 잉여의 수신기를 설치하고 측정치의 상관관계와 일관성까지 고려함에 따라 전체 시스템의 크기와 가격이 상승하고 알고리즘이 복잡하여 진 점은 단점이 된다. 본 논문에서 제시된 복수의 수신기의 추가로 수신기를 사용할 경우 얻을 수 있는 이득과 소요 경비를 비교 검토하는 일은 앞으로 수행되어야 할 과제로 남아 있다.

상기의 사항들을 고려해 볼 때 본 논문에서 제안한 방식은 이동 로봇이나 자율 주행체와 같이 장애물과 센서와의 거리가 어느 정도 유지되고 시스템의 크기가 중요한 문제가 되지 않거나, 자동 검사공정에서와 같이 신뢰성 있는 계측이 결정적 요소가 될 경우에 유용할 수 있을 것이다. 특히 제안된 방식이 개념적으로 간단하고 실현이 용이하다는 점은 주요한 장점이 될 것이다.

## 참고 문헌

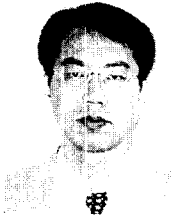
[1] A.C.Kak, "Depth perception for robots," in

*Handbook of Industrial Robotics*, ed. S.Y.Nof, John Wiley & Sons, pp.272-319, 1985.

- [2] L.C.Lynnworth, "Industrial applications of ultrasound - a review II. Measurements, tests, and process control using low-intensity ultrasound," *IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics*, vol.SU-22, no.2, pp.71-101, 1975.
- [3] 성평모, "초음파공학의 응용," *전기학회지*, 32권, 11호, pp.649-654, 1983
- [4] C.Canali *et al.*, "A temperature compensated ultrasonic sensor operating in air for distance and proximity measurements," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. IE-29, pp.336-341, 1982.
- [5] D.A.Bell, *Electronic Instrumentation and Measurements*, 2nd ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1994.
- [6] W.E.Moritz *et al.*, "Analysis of an ultrasonic spatial locating system," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol.25, pp.43-50, 1976.
- [7] J.M.Martin *et al.*, "Ultrasonic ranging gets thermal correction," *Sensor Review*, vol.9, pp.153-155, 1989.
- [8] P.K.Chande and P.C.Sharma, "A fully compensated ultrasonic sensor for distance measurement," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol.33, pp.128-129, 1984.
- [9] 임영철 외 "대기 조건에 둔감한 초음파 거리측정 시스템의 설계," *센서학회지*, 2권 1호, pp.49-56, 1993.
- [10] A.M.Sabatini, "A digital signal-processing technique for compensating ultrasonic sensors," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol.44, no.4, pp.869-874, 1995.
- [11] J.K.Hackett and M.Shah, "Multi-sensor fusion," *Technical Report CS-TR-89-16*, Dept. Computer Science, Univ. of Central Florida, 1989.
- [12] 도용태, "다중센서의 사용에 의한 계측의 불확실성 감소기법," *센서학회지*, 4권, 4호, pp.47-54, 1995

- [13] E.Krotkov, "Exploratory visual sensing for determining spatial layout with an agile stereo camera system," *Ph.D Dissertation, Univ. of Pennsylvania*, 1987.
- [14] E.Krotkov and R.Kories. "Adaptive control of cooperating sensors: focus and stereo ranging with an agile camera system," in *IEEE Conf. Robotics and Automation*, pp.548-553, 1988.
- [15] J.J.Leonard and H.F.Durrant-Whyte, *Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, 1992.
- [16] D.Marioli *et al*, "Ultrasonic distance measurement for linear and angular position control," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol.37, no.4, pp.578-581, 1988.
- [17] 전형조, 김병국, "세 개의 초음파 센서를 사용한 이동 로봇용 월드 맵 구성에 관한 연구," *전자공학회 논문지*, 32권B, 6호, pp.20-28, 1995
- [18] F.Bueche, *Technical Physics*, Harper & Row, New York, 1977.
- [19] B.Barshan and R.Kuc, "Differentiating sonar reflections from corners and planes by employing an intelligent sensor," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, no. 6, pp.560-569, 1990.

## 저 자 소 개



都 勇 兌(正會員)

1986년 경북대 전자공학과 (공학사), 1988년 서강대 전자공학과 (공학석사), 1992년 영국 Univ. of Hull 전자공학과 (Ph.D), 현재 대구대학교 공과대학 정보통신공학부 조교수



金 泰 昊(正會員)

1972년 3월 30일생, 1995년 대구대 전자공학과 (공학사), 1997년 대구대 전기 및 전자공학과(공학석사), 현재 대원산업(주) 기술연구소 연구원



柳 爽 桓(正會員)

1975년 서울대 전기공학과 (공학사), 1979년 서울대 전기공학과 (공학석사), 1989년 미국 Univ. of Florida 전기공학과 (Ph.D), 현재 대구대학교 공과대학 정보통신공학부 부교수