

# 이중 주파수와 코드를 이용한 초음파 위치 인식 시스템 구현

## Implementation of the Ultrasonic Local Positioning System using Dual Frequencies and Codes

조 봉 수\*, 조 석 빈, 양 성 오, 백 광 렬, 이 동 활

(Bong-Su Cho, Seck-Bin Cho, Sung-Oh Yang, Kwang-Ryul Baek, and Dong-hwal Lee)

**Abstract :** This paper presents real-time algorithm for an ultrasonic Local Positioning System(LPS). An ultrasonic LPS consists of 4 transmitters and n receivers. Each transmitter transmits an sequential ultrasonic signal to avoid interference of ultrasonic signal. This method is a noneffective application for a fast object. Because receiver detects four sequential transmissive ultrasonic signal and calculates a position. This paper proposes the method which 4 transmitters transmit simultaneous ultrasonic signal and each transmitter distinguished by frequencies and codes. And Auto-Correlation Function(ACF) method separates codes from an ultrasonic echo signal which is interference of each transmitter's code. If the receiver uses only ACF method, it is difficult to implement real time application for increased computation. This paper implements LPS using dual frequencies and ACF method. Using dual frequencies reduces codes length. The reduced codes length save computation in ACF. To prove this algorithm by experiment, high performance DSP(digital signal processor) used. The result shows the performance of the designed system is good enough positioning.

**Keywords :** ultrasonic, LPS, frequency, code, auto-correlation, ACF

### I 서론

최근 공장자동화 및 홈 유틸리티 산업이 발달함에 따라 모바일 로봇(mobile robot)의 무인 주행 연구가 많이 이루어지고 있다. 모바일 로봇이 무인 주행을 하기 위해서 우선적으로 현재 자신의 위치를 인식해야 한다. 모바일 로봇의 위치 인식을 위하여 GPS, 초음파, 적외선, RF, 레이저, Vision 등을 이용한 연구가 이루어지고 있다. 이들 중 초음파를 이용한 시스템이 먼 거리 전송이 힘들고 신호간의 간섭 현상이 일어나는 단점에도 불구하고, 가격이 저렴하고 구동 시스템이 간단하며 주변 환경의 영향에 둔감하여 위치 인식시스템으로 많이 사용된다[1-4].

초음파를 이용한 물체의 위치 인식시스템은 고정된 위치에 설치된 4개의 송신기와 초음파 신호의 지향성을 해결하기 위한 n개의 수신기로 구성된다. 수신기는 4개의 송신기로부터 방출된 초음파 신호를 받아서 현재 자신의 위치를 계산하게 된다[5]. 이런 초음파를 이용한 물체의 위치 인식 시스템은 우수한 성능에도 불구하고 초음파 신호의 간섭 현상으로 인하여 다음과 같은 문제점이 있다.

- 초음파 신호의 간섭으로 인하여 각 송신기들은 동기 신호에 맞추어 순차적으로 초음파 신호를 방출해야 한다.
- 각 수신기와 송신기들은 초음파 신호의 방출 시간을 RF등을 이용하여 공유해야 한다.
- 수신기는 4개의 초음파 송신기가 순차적으로 방출한

신호를 모두 수신한 후 이를 이용하여 위치를 계산하므로 빠른 속도로 움직이는 물체에 대하여 적용이 어렵다.

이런 문제를 해결하기 위해 송신기들은 정의된 코드(code)를 일정 시간 간격으로 동시에 방출하고 수신기는 자기상관함수(auto-correlation function, ACF)를 이용하여 정의된 코드 신호를 분리한 후 위치를 계산하는 방법이 연구되었다[6]. 이 방법은 4개의 특정 코드를 분리해야 하므로 자기상관함수 특성이 우수한 긴 코드를 사용해야하며, 이 늘어난 코드로 인하여 실시간 연산량이 지수 비례적으로 증가한다. 또한 4개의 초음파 신호가 중첩되어 초음파의 보강, 상쇄 간섭 발생하여 신호 왜곡이 많이 발생한다. 따라서 실시간 구현에 어려움이 있다.

본 논문에서는 초음파의 간섭 현상으로 발생하는 문제와 실시간 구현 문제를 해결하기 위해 다음과 같은 시스템을 설계한다. 4개의 송신기는 다른 중심 주파수(frequency)를 가지는 초음파 송신기를 두개씩 사용한다. 수신기 또한 다른 중심 주파수를 가지는 초음파 수신기 두 가지를 사용한다. 초음파 센서는 물리적으로 bandpass filter 특성이 우수하므로 다른 대역의 초음파 신호는 서로 간섭 영향을 받지 않는다. 따라서 중심 주파수가 다른 두 수신 센서들은 각자 중심 주파수의 초음파 신호만 수신한다. 4개의 초음파 송신기는 일정 시간 간격으로 동시에 정의된 코드 신호를 방출한다. 일차적으로 주파수 대역으로 신호를 분리하였으므로 중첩된 초음파 신호를 분리하기 위한 정의된 코드는 4개가 아닌 2개만 있으면 된다. 각 수신기에서 수신된 중첩된 초음파 신호는 자기상관함수를 이용한 코드 분리방법을 사용하여 각 신호를 분리한다. 마지막으로 수신기는 분리된 4개의 초음파 신호의 시간차를 이용하여 거리를 계산한다[7].

본 논문에서 제안하는 방법으로 설계된 초음파 위치 인

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 11. 16., 채택확정 : 2008. 5. 9.

조봉수, 조석빈, 백광렬 : 부산대학교 전자과

(mscho97@pusan.ac.kr/chosb@pusan.ac.kr/krbaek@pusan.ac.kr)

양성오 : LG 전자(kalkiny@empal.com)

이동활 : 한국LPS(LDH@korealPS.co.kr)

식 시스템은 송신기 4개를 동시에 구동하므로 순차적으로 송신기 4개를 구동하는 방법보다 시간 손실을 줄일 수 있다. 주파수 대역을 이용하여 일차적으로 중첩된 초음파 신호를 분리하므로 2개의 정의된 코드만 사용한다. 2개의 정의된 코드만 사용하므로 초음파의 보강, 상쇄 간섭이 작게 발생하고, 연산량을 줄이기 위해 짧은 코드를 사용하여도 자기상관함수를 이용한 코드 분리방법의 신뢰성이 높아진다. 또한 수신기는 수신된 신호의 시간차를 이용하여 위치를 계산하므로 송신기와 수신기들 사이에 동기 신호를 공유해야 하는 문제를 해결하여 시스템 구성이 더 간단해지는 장점이 있다.

II. 초음파를 이용한 위치 인식

1. 초음파를 이용한 거리 측정

2차원 공간에서 초음파 센서를 이용한 위치 인식은 삼각법을 이용하여 위치를 계산한다. 이 삼각법을 이용하기 위해 각 송신기와 수신기 사이의 거리를 측정해야 한다. 초음파 센서를 이용한 거리측정은 초음파의 전달 속도와 초음파의 이동시간의 곱으로 측정한다. 초음파의 이동시간은 그림 1과 같이 TOF(time of flight)라 하며 초음파 신호가 전송된 시간( $T_t$ )부터 수신된 시간( $T_r$ )까지의 시간차이로 정의한다. 초음파의 전달 속도는 환경 조건에 영향을 받지만 [8,9], 본 논문에서는 상온에서 측정만을 가정하여 초음파의 속도를 343m/s로 가정하였다.

$$TOF = T_r - T_t \tag{1}$$

$$c \cong 331.4 \sqrt{T/273} = 343m/s \tag{2}$$

$$d = c \times TOF \tag{3}$$

2. 자기 상관 함수를 이용한 수신 시간 측정

초음파 센서를 이용한 거리 측정의 정확성은 TOF의 측정에 의해 결정된다. 초음파 수신 신호에서 수신 시간의 검출 방법은 일반적으로 문턱값(threshold), 창문 이동(sliding window) 방법을 이용한다[10,11].

본 논문에서는 초음파 신호에 코드를 실어서 초음파 신호를 전송하므로 자기상관함수를 이용하여 수신 시간을 검출한다. 자기상관함수를 이용할 경우 다른 방법보다 복잡한 연산이 필요하고 전송된 전체 신호가 필요하다는 단점이 있지만, 더 정밀하게 수신시간을 측정할 수 있고 초음파 신호가 중첩이 되는 경우에도 수신 신호를 검출할 수 있다.

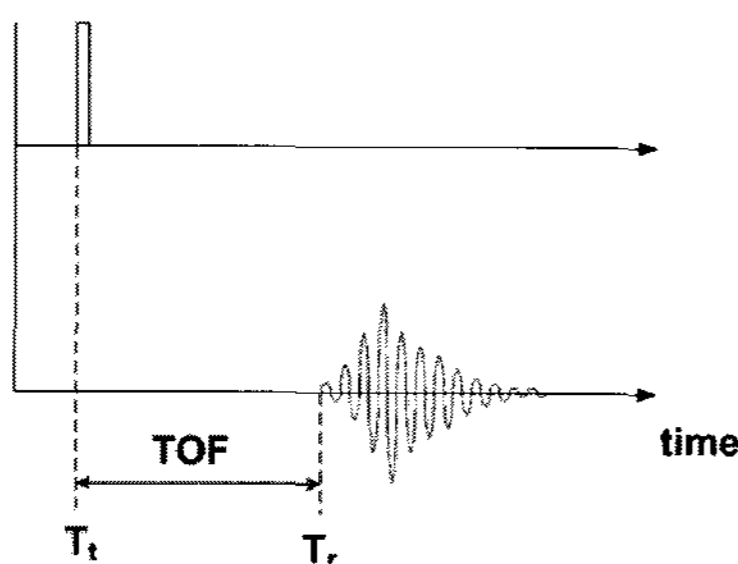


그림 1. 초음파 이동 시간.

Fig. 1. Time of flight.

송신기에서 동시에 코드를 실은 초음파 신호를 방출하므로 수신기는 송신기와 동기 신호를 공유하지 않고도 수신된 신호의 시간차이를 이용하여 각 송신기와의 거리를 측정할 수 있는 장점이 있다.

3. 2차원 위치 인식

초음파 센서를 이용한 위치 인식 시스템은 그림 2와 같이 송신기 4개 수신기 n개로 구성된다[6]. 만약 5개의 송신기를 사용하면 3차원 위치인식이 가능하다. 하지만 초음파 위치 인식 시스템은 건물 내부 등 좁은 특정 공간에서 움직이는 물체의 위치를 인식하는데 사용된다. 따라서 본 논문에서는 ‘수평면의 고도는 일정하다’ 가정을 하여 2차원 위치만을 고려하였다. 송신기는 25KHz, 40KHz 두개의 다른 주파수 센서를 각각 두개씩 사용하며, 수신기는 두 주파수 신호를 검출하기 위해 25KHz, 40KHz의 두 가지 센서를 사용한다. 송신기의 위치는 알고 있는 정보이며 수신기의 위치가 측정하고자하는 물체의 위치이다.

위치 인식 방법은 다음과 같다. 4개의 송신기는 각 신호를 구별하기 위한 코드와 주파수가 할당 되어있으며 동시에 코드가 실린 4개의 초음파 신호를 방출한다. 수신기는 이 신호를 중심 주파수가 다른 초음파 센서 2개와 자기상관함수를 이용한 코드 분리 방법을 이용하여 4개의 신호의 수신 시간을 측정한다. 이때 송신기와 수신기 사이의 동기

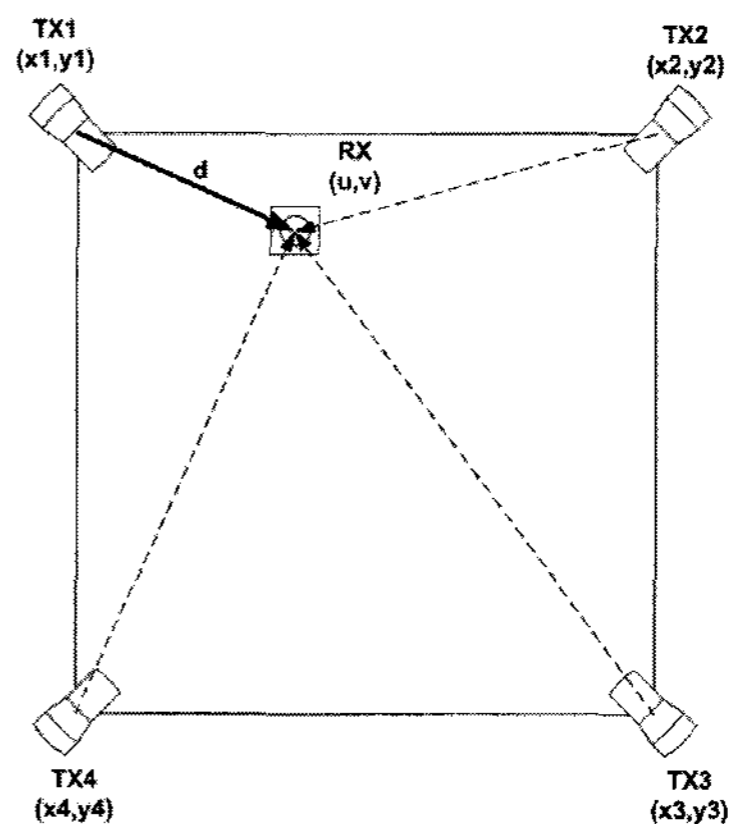


그림 2. 위치 인식 시스템.

Fig. 2. Local positioning system.

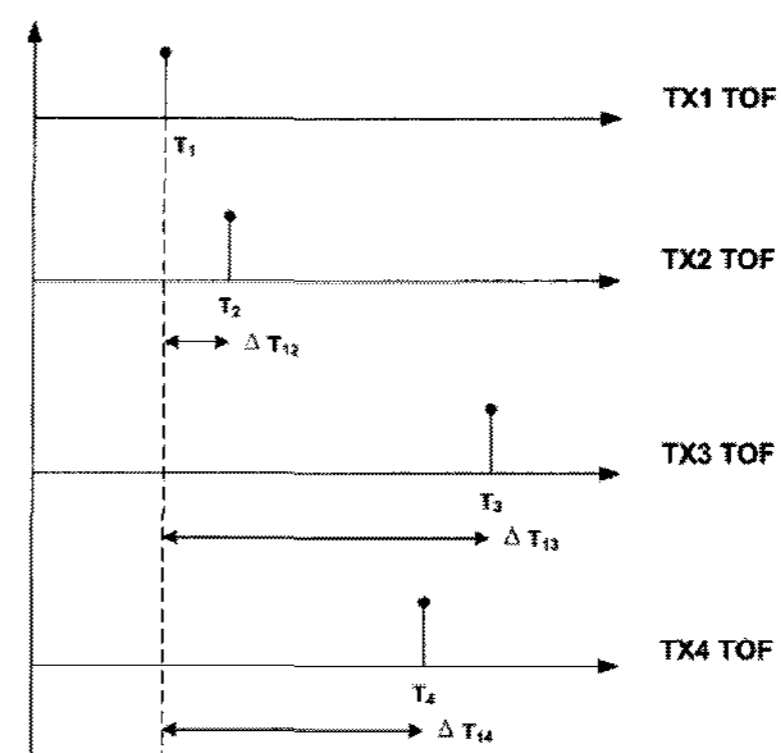


그림 3. 각 송신기의 TOF.

Fig. 3. TOF of each transmitter.

신호가 공유되지 않으므로 수신기는 수신시간을 측정할 수 있지만 송신 시간은 측정 할 수 없다. 즉, 수신기는 TOF를 측정할 수 없다. 하지만 수신기는 4개의 수신시간 정보를 측정할 수 있으므로 각 신호의 시간차이를 이용하여 거리를 측정 할 수 있다.

수신기의 위치를 (u,v)라 하고 각 송신기와 수신기 사이의 거리를  $d_1, d_2, d_3, d_4$ 라 하면 다음 식과 같이 위치를 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} (x_1 - u)^2 + (y_1 - v)^2 &= d_1^2 \\ (x_2 - u)^2 + (y_2 - v)^2 &= d_2^2 \\ (x_3 - u)^2 + (y_3 - v)^2 &= d_3^2 \\ (x_4 - u)^2 + (y_4 - v)^2 &= d_4^2 \end{aligned} \quad (4)$$

그림 3과 같이 각 송신기들의 TOF를  $T_1, T_2, T_3, T_4$  라 하고  $T_1$ 이 가장 먼저 수신된 신호라 하면  $T_1$ 을 기준으로 각 송신기의 TOF차이는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta T_{12} &= T_2 - T_1 \\ \Delta T_{13} &= T_3 - T_1 \\ \Delta T_{14} &= T_4 - T_1 \end{aligned} \quad (5)$$

또한 가장 가까운 송신기를 제외한 나머지 3개 송신기의 거리는 가장 가까운 송신기의 거리  $d_1$ 과 기준 TOF와의 차이  $\Delta T_{1x}$ , 초음파의 전달 속도  $c$ 를 이용하여 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} d_2 &= d_1 + c\Delta T_{12} \\ d_3 &= d_1 + c\Delta T_{13} \\ d_4 &= d_1 + c\Delta T_{14} \end{aligned} \quad (6)$$

이 식을 이용하면 기준 송신기를 제외한 나머지 3개 송신기와 수신기 사이의 거리는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} (x_2 - u)^2 + (y_2 - v)^2 &= (d_1 + c\Delta T_{12})^2 \\ (x_3 - u)^2 + (y_3 - v)^2 &= (d_1 + c\Delta T_{13})^2 \\ (x_4 - u)^2 + (y_4 - v)^2 &= (d_1 + c\Delta T_{14})^2 \end{aligned} \quad (7)$$

이 식들을 정리하면 다음과 같은 행렬식으로 2차원 공간에서의 수신기 위치를 측정 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 2x_1 - 2x_2 & 2y_1 - 2y_2 & -2c\Delta T_{12} \\ 2x_1 - 2x_3 & 2y_1 - 2y_3 & -2c\Delta T_{13} \\ 2x_1 - 2x_4 & 2y_1 - 2y_4 & -2c\Delta T_{14} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ d_1 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} c^2\Delta T_{12}^2 + x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2 \\ c^2\Delta T_{13}^2 + x_1^2 + y_1^2 - x_3^2 - y_3^2 \\ c^2\Delta T_{14}^2 + x_1^2 + y_1^2 - x_4^2 - y_4^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}$$

$$\text{단, } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ d_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2x_1 - 2x_2 & 2y_1 - 2y_2 & -2c\Delta T_{12} \\ 2x_1 - 2x_3 & 2y_1 - 2y_3 & -2c\Delta T_{13} \\ 2x_1 - 2x_4 & 2y_1 - 2y_4 & -2c\Delta T_{14} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} c^2\Delta T_{12}^2 + x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2 \\ c^2\Delta T_{13}^2 + x_1^2 + y_1^2 - x_3^2 - y_3^2 \\ c^2\Delta T_{14}^2 + x_1^2 + y_1^2 - x_4^2 - y_4^2 \end{bmatrix}$$

이 알고리즘을 이용하여 물체의 위치를 계산하면 초음파 센서에서 측정된 수신 시간이 같을 경우 singular matrix가 된다. 이를 해결하기 위하여 수신기는 이 알고리즘을 적용하기 전에 자기상관함수 이용하여 4개의 신호의 수신 시간을 계산한다. 만약 4개의 수신 시간이 같을 경우는 정 가운데 위치로 인식한다. 그리고 두 대각선 송신기로부터 측정된 수신 시간이 같을 경우는 대각선상에 물체가 위치하는 경우이다. 따라서 3개의 수신신호만을 이용하여 직선상의 물체의 위치를 계산할 수 있다.

### III. 수신된 초음파 신호의 신호 분리

코드가 실린 중첩된 신호는 자기상관함수를 사용하여 신호를 분리할 수 있고, 초음파 송수신 센서는 물리적으로 우수한 bandpass filter 특성을 가진다. 이런 특성들을 이용하여 본 논문에서는 주파수와 자기상관함수를 이용하여 송신기에서 방출된 4개의 코드 신호를 분리한다.

초음파 센서는 단일 중심 주파수에서 4개의 정의된 코드를 자기상관함수를 이용하여 분리하는 경우, 초음파의 보강, 상쇄 간섭으로 인하여 측정값의 신뢰도가 떨어진다. 이를 해결하기 위해 정의된 코드의 길이를 늘려 자기상관함수의 직교성(orthogonality) 특성을 높여야 한다. 하지만 이 방법은 연산량이 크게 증가 하고, 코드가 방출되는 시간이 증가하여 실시간 처리 분야에서는 적용하기가 어렵다. 본 논문에서는 다른 중심주파수를 가지는 초음파 센서를 사용하여 주파수영역에서 두 가지의 코드를 먼저 분리 한 후 비교적 짧은 코드를 자기상관함수를 이용하여 분리한다.

#### 1. 주파수를 이용한 신호 분리

공기중에서 초음파 센서는 압전효과(piezo-electric)를 이용한 피에조 세라믹 소자(piezo ceramic element)를 진동시켜 초음파를 송수신한다. 피에조 세라믹 소자는 그림 4와 같이 모델링되며 단일 펄스가 가해지면 특정 공진주파수(resonant frequency)에서 진동을 한다.

피에조 세라믹 소자를 사용하는 초음파 센서는 중심 주파수에서 높은 Q를 가지는 bandpass filter 특성을 가진다. 서로 다른 중심 주파수를 가지는 초음파 송수신 센서는 이 bandpass filter 특성으로 인하여 상호 간섭현상 없이 각 중심 주파수의 초음파 신호를 송수신 할 수 있다.

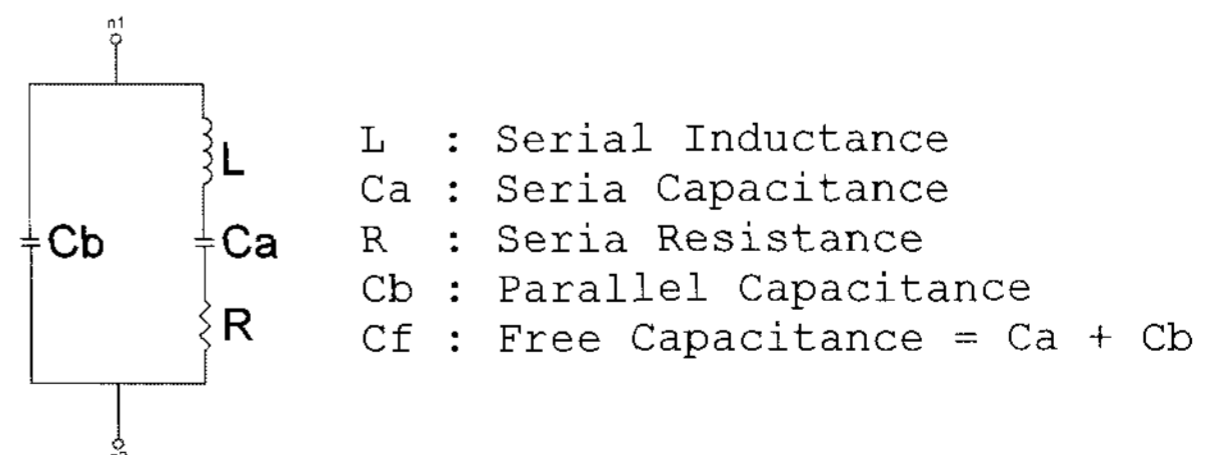


그림 4. 피에조 세라믹 소자의 등가 회로.

Fig. 4. Equivalent circuit for piezo ceramic element.

표 1. 초음파 센서의 임피던스 특성.

Table 1. Impedance characteristic of ultrasonic sensor.

Item (초음파센서)	Center Frequency	Cb(pF)	R( $\Omega$ )	L(mH)	Ca(pF)
T2516A1	25kHz	2000	1000	250	160
T4016A1	40kHz	2100	800	120	130

표 1은 본 논문에서 사용한 초음파 센서들의 각 임피던스 특성이고[12,13], (10)은 피에조 세라믹 소자의 등가 회로의 근사적 공진주파수이다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_a}} \quad (10)$$

본 논문에서는 두개의 다른 중심주파수를 가지는 초음파 송수신 센서 2가지를 사용하여 일차적으로 코드 신호를 분리하였다.

2. 자기상관함수를 이용한 신호 분리

자기상관함수는 코드의 길이가 길고 직교성이 우수한 코드 일수록 우수한 특성이 나타난다. 하지만 자기상관함수의 연산량은 코드의 개수가 증가하고 코드의 길이가 늘어나면 지수 비례하여 증가하므로 실시간 처리가 힘든 단점이 있다. 본 논문에서는 주파수를 이용하여 코드가 실린 초음파 신호를 일차적으로 분리하였다. 따라서 두개의 코드만 자기상관함수를 이용하여 분리하므로 비교적 길이가 짧은 6bit의 PN sequence 를 이용하여 연산량을 감소시켰다.

송신부와 수신부가 분리된 시스템은 자기상관함수 연산을 수행하기 위해서 초음파 신호의 시작점이 수신부에서 필요하다. 따라서 코드는 시작 bit가 1로 시작하는 PN sequence 중 자기상관함수와 상호상관함수(cross-correlation function, CCF)가 우수한 코드를 선정하였고, 선정된 코드는 다음과 같다[14-17]. 그림 5는 각 코드의 ACF, CCF이다.

Code 0 : 1, 1, 0, 1, 0, 0

Code 1 : 1, 0, 0, 0, 1, 1

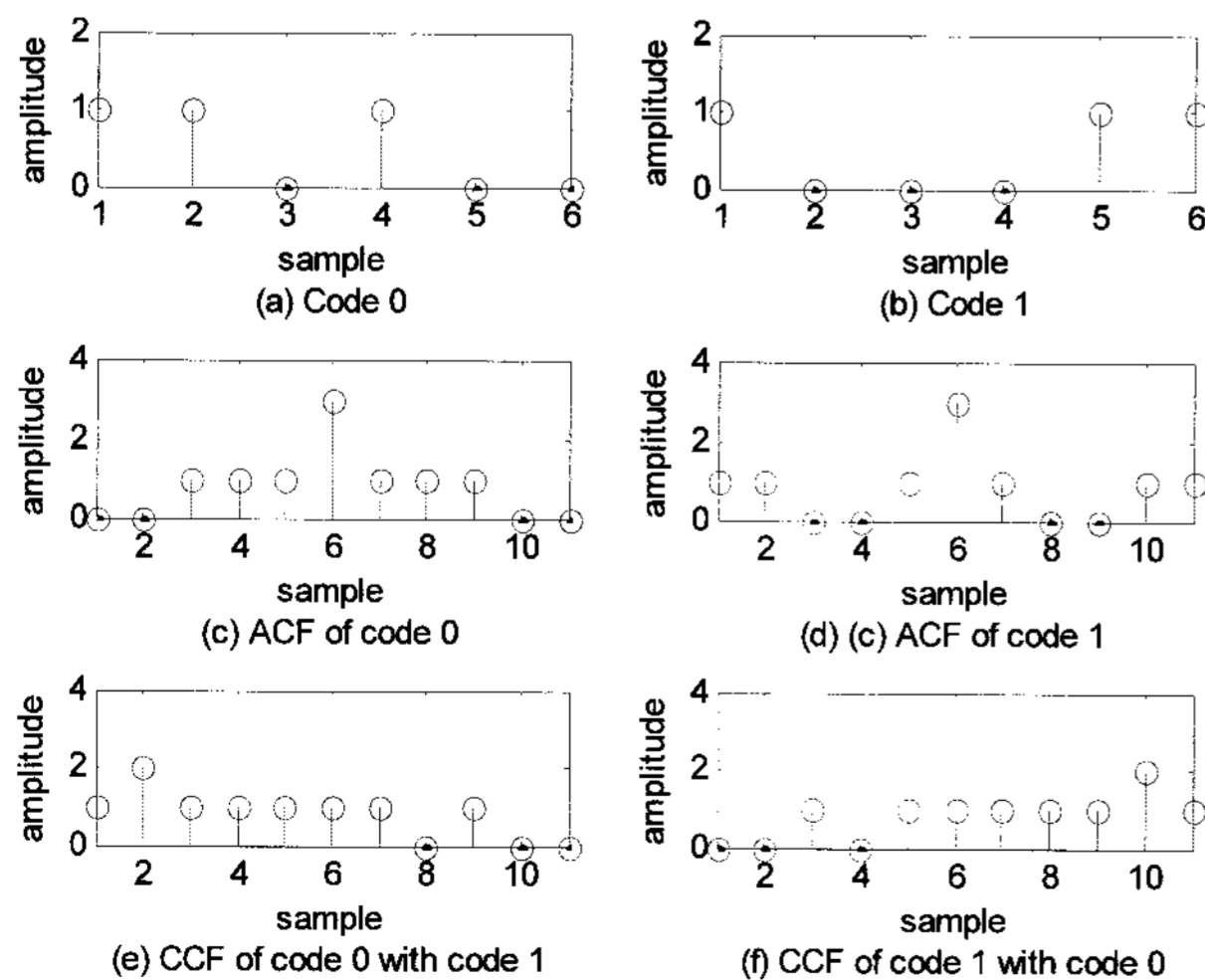


그림 5. 6비트 PN sequences의 ACF와 CCF.

Fig. 5. ACF and CCF of 6 bits PN sequences.

3. 초음파 신호 전송

초음파 센서는 Q가 크고 주파수 대역이 좁기 때문에[18], 단일 펄스 신호에도 긴 물리적 진동(ringing)이 존재한다. 따라서 초음파 송신기는 2ms인 대기시간(Td)를 이용하여 각 bit를 코드를 방출한다. 코드는 '1', '0'의 디지털 값으로 구성되어 있다. 초음파 센서를 이용한 코드 구현은 그림 6과 같이 '1'일 경우 송신 센서를 구동하고, '0'일 경우 송신 센서를 구동하지 않는 방법을 이용한다.

4. 초음파 신호의 자기상관함수 연산

초음파 수신 신호에서 자기상관함수는 다음과 같은 순서로 처리한다. 먼저 신호의 존재 유무를 검출하고 디지털 맵핑(mapping)을 위하여 수신 신호를 정류한다. 다음 고주파의 초음파 신호의 제거를 위하여 수신 신호의 envelope 신호를 구한다. 마지막으로 수신 신호와 코드간의 자기상관함수 값을 구한다.

초음파 신호는 정현파 형태로서 진동하는 신호이다. 초음파 구동 신호는 디지털 신호 '1', '0'이다. 초음파 신호와 디지털 신호를 간단히 매핑시키기 위하여 0보다 큰 단극성(unipolar) 형태의 신호로 변환한다.

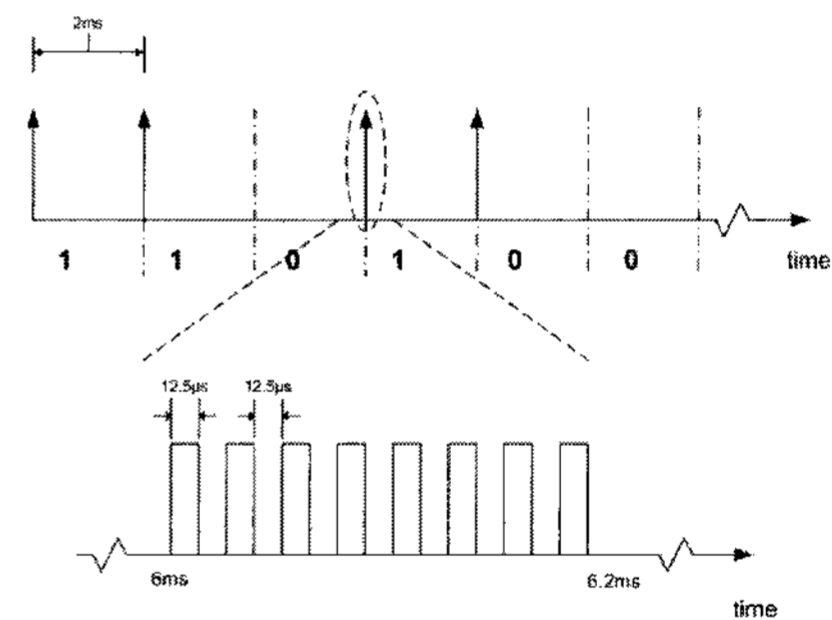


그림 6. 40Khz, 코드 0 송신신호.

Fig. 6. Transmitted signal of 40kHz, code 0.

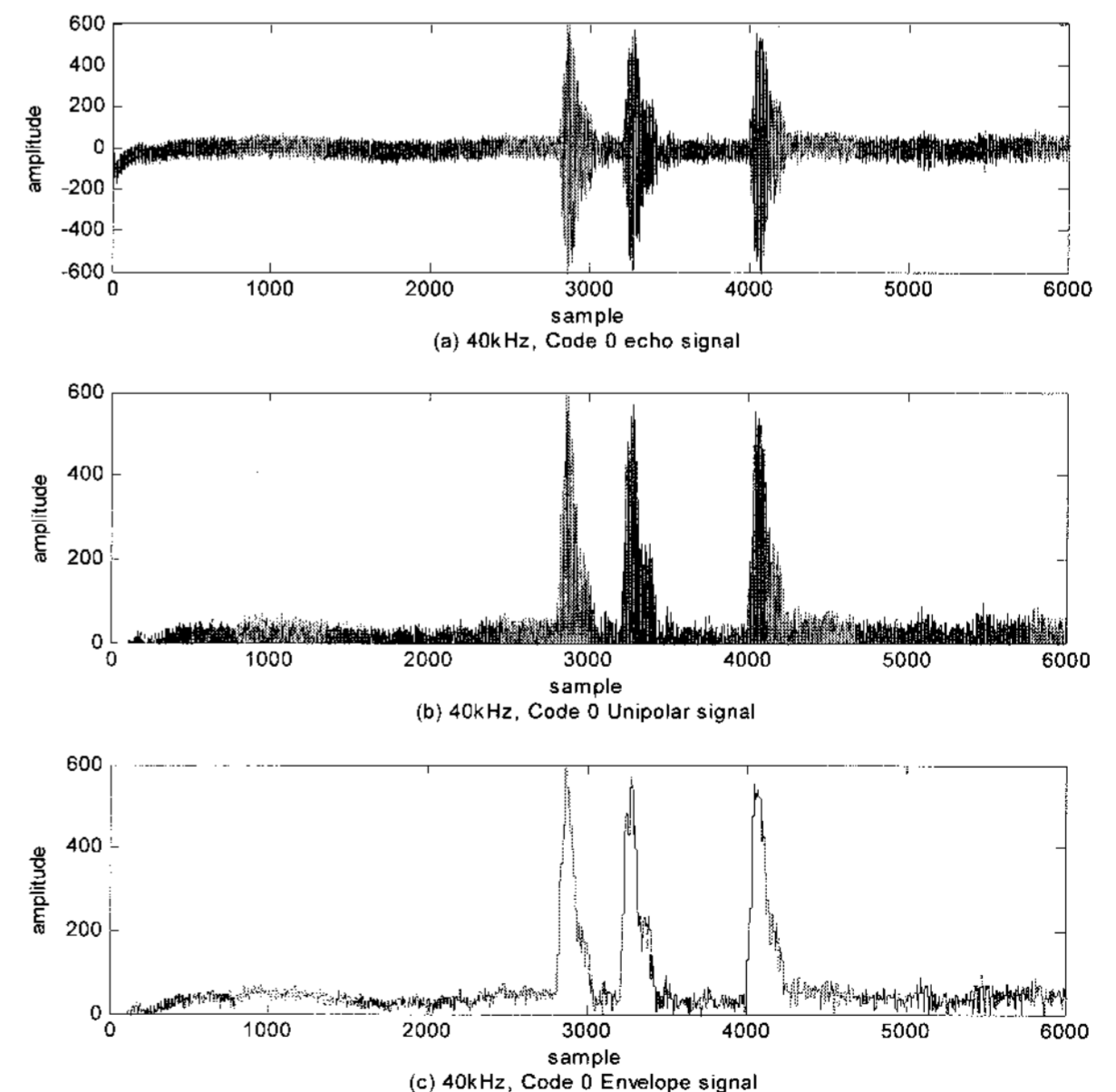


그림 7. 40kHz, 코드 0 초음파 신호 처리.

Fig. 7. Ultrasonic signal processing of 40kHz, code 0.

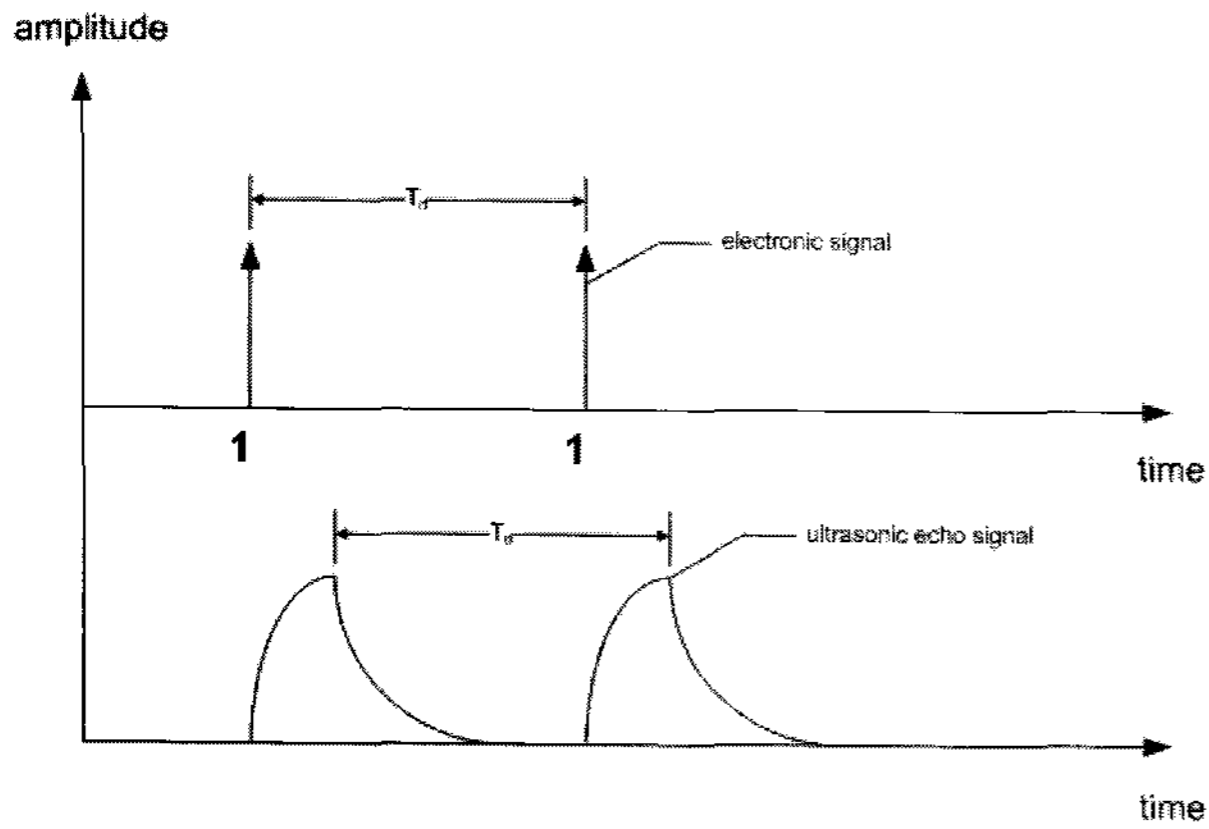


그림 8. 구동 신호와 수신 신호.  
Fig. 8. Transmitted signal & echo signal.

단극성 신호는 초음파 전송 신호(carrier signal)를 포함하고 있다. 이 초음파 전송 신호를 제거하기 위하여 신호의 envelope을 구한다. Envelope 신호는 빠른 연산을 위해 앞 샘플 신호와 뒤 샘플 신호와의 변곡점만을 찾는다. 그림 7은 수신된 초음파 신호를 단극성, envelope 처리하는 과정을 나타낸다.

본 논문의 위치 인식 시스템은 초음파 신호를 5us마다 샘플링(sampling) 한다. 초음파 신호는 디지털 코드에 따라 대기 시간 2ms마다 전송되므로, 1비트 디지털 신호는 400개의 샘플을 의미한다. 자기 상관 함수 연산은 1비트의 연산 값을 구하기 위해 400개의 샘플을 연산해야 한다. 자기 상관 함수 1회 연산량은 총 2400(코드 길이 \* 1비트당 샘플수)번이다. 이런 연산 방식은 많은 연산 시간이 소요된다.

본 논문에서는 빠른 자기 상관 함수 연산을 위해 다음과 같은 연산 방식을 제안한다. 그림 8과 같이 디지털 코드에 의해 생성된 초음파 신호의 최대값은 대기 시간 (T<sub>d</sub>)마다 존재한다. 따라서 1비트 연산은 400개의 샘플대신, 최대값 1 샘플만 이용한다. 그 후 다음 비트 연산은 대기 시간 만큼 뒤의 샘플과 다음 비트와의 연산을 한다.

400샘플을 1샘플로 연산을 하게 되면 노이즈에 민감한 영향을 받고 연산 결과의 정확성이 감소한다. 따라서 1비트 연산은 1샘플보다 많은 5샘플을 이용한다. 즉 1bit, 400 샘플을 연산하는 대신 1 비트를 5샘플로 샘플수를 줄여 연산을 하였다. 따라서 자기 상관 함수 1회 수행의 연산량은 2400번 대신 (11)처럼 30번의 연산만으로 자기 상관 함수 값을 찾을 수 있다.

$$r[i] = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l=0}^4 g[i+l+k \times n] \times code[n] \quad (0 \leq i < M-(N \times k)) \quad (11)$$

$g$  : unipolar envelope signal

$code$  : digital code

$N$  : length of code

$M$  : length of echo signal

$k$  :  $T_d/T_s$

그림 9는 40kHz, 코드 0 초음파 수신 신호의 자기상관 함수의 결과이다.

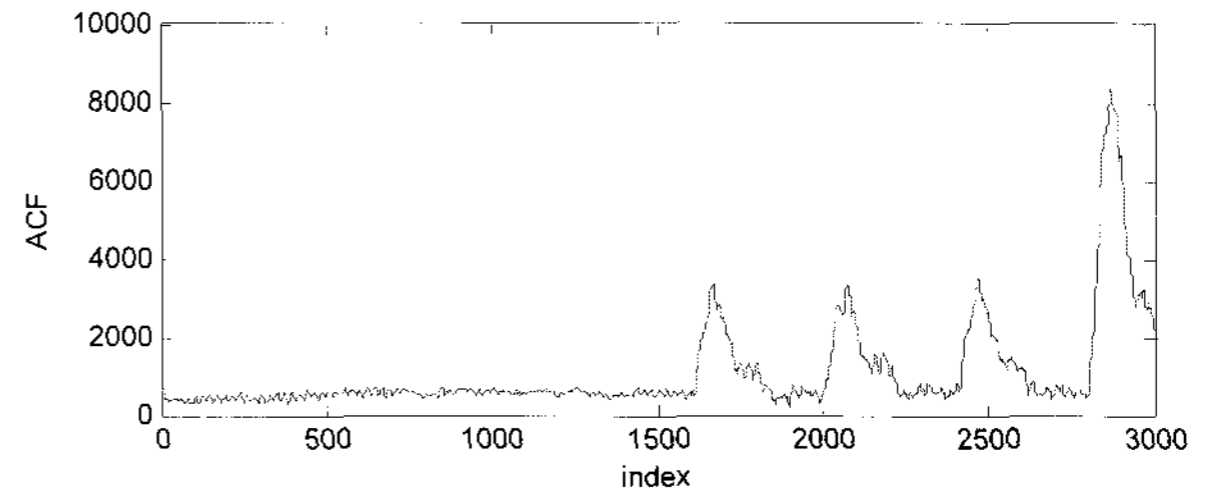


그림 9. 40kHz, 코드 0 자기 상관 함수 결과.  
Fig. 9. 40kHz, code 0 ACF result.

### 5. 코드가 섞인 초음파 신호의 처리

여러 코드가 중첩된 초음파 수신 신호는 코드 bit '1'과 '1'이 겹쳐 보강 간섭을 일으킬 경우 에너지가 커진다[16]. 이 보강 간섭으로 커진 에너지는 자기 상관 함수 연산에서 오류를 초래한다.

그림 10은 25kHz 초음파 신호에서 코드 0, 코드 1이 중첩된 신호와 중첩되지 않은 개별 신호이고, 그림 11은 자기 상관 함수 연산 결과이다. 각각 코드를 중첩시키지 않고, 초음파 신호를 측정하여 자기 상관 함수 연산 결과는 3060샘플, 3105샘플이다. 하지만 중첩된 신호에서 자기 상관 함수 연산 결과는 3114샘플, 3111샘플이다. 이 결과는 수신된 초음파 신호의 에너지 크기가 다르기 때문에 두 초음파 신호가 중첩될 때 중첩된 에너지 크기로 인하여 신호의 위치도 바뀌지만 신호의 순서도 바뀌는 오차가 나타날 수 있음을 보여준다.

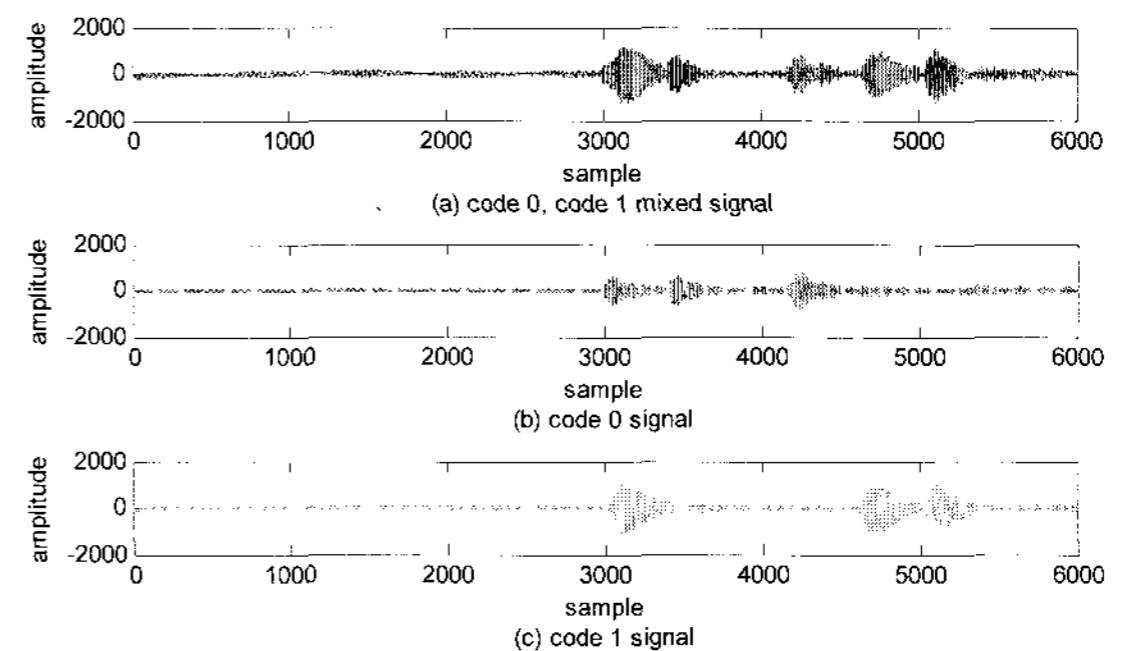


그림 10. 25kHz 혼합 신호와 개별 신호.  
Fig. 10. 25kHz, mixed signal and each signal.

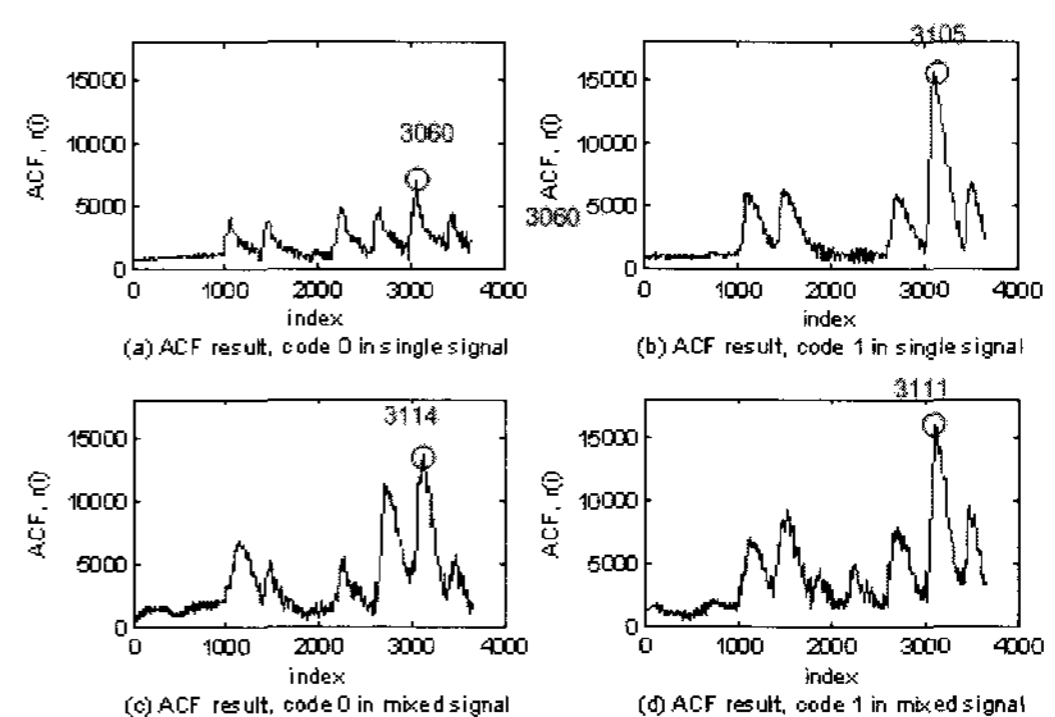


그림 11. 25kHz 혼합 신호 및 개별 신호의 ACF 결과.  
Fig. 11. ACF result of 25kHz, mixed signal and each signal.

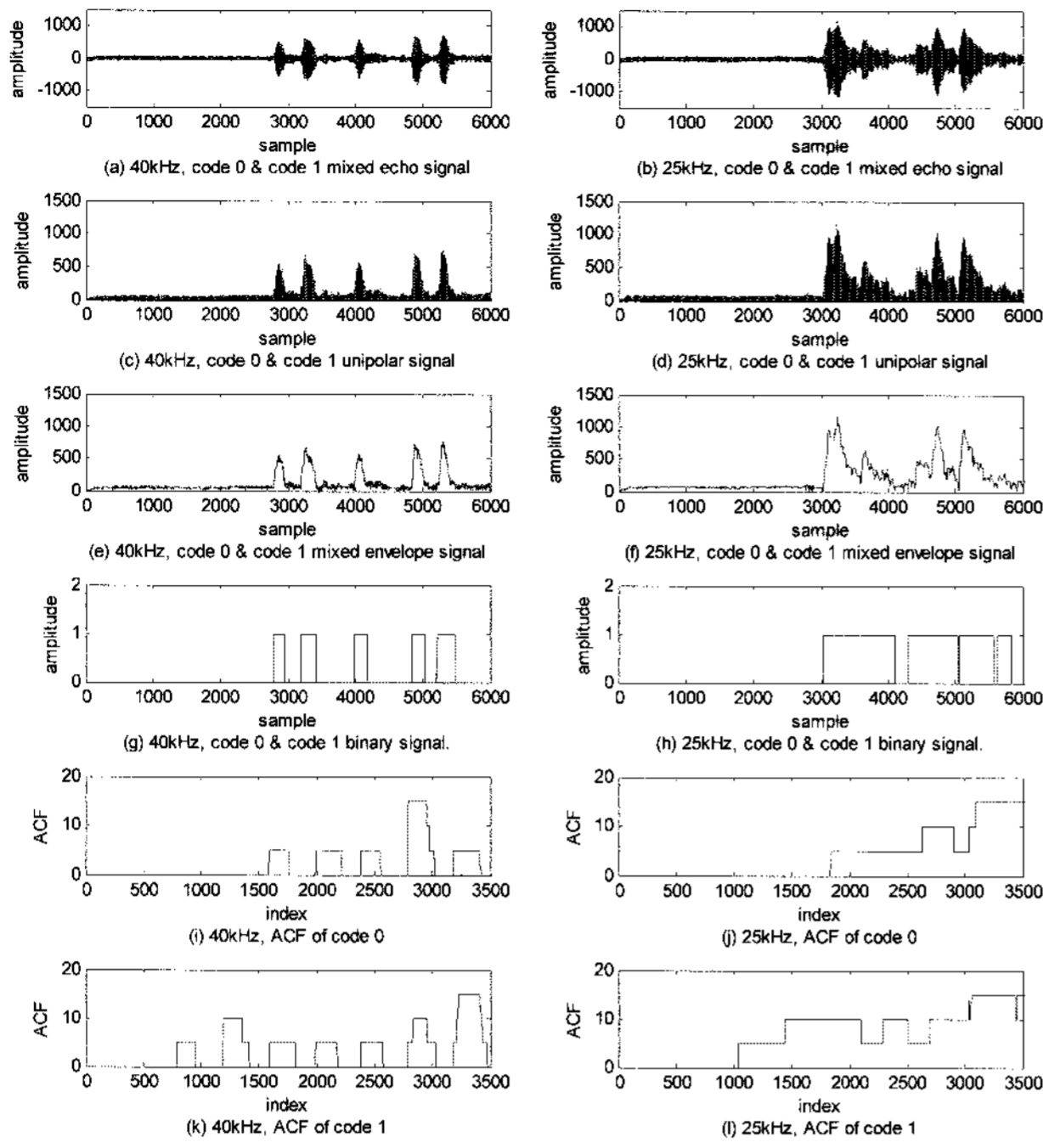


그림 12. 초음파 신호의 ACF 과정.  
Fig. 12. ACF processing of ultrasonic signal.

코드가 중첩되어 에너지가 커지는 문제는 초음파 수신 신호를 이진화하여 해결한다. 이진화는 수신된 초음파 신호에서 이진 문턱 값보다 클 경우 '1'로, 이진 문턱 값보다 작을 경우 '0'으로 변환한다. 단, 노이즈의 영향을 줄이기 위하여 이진 문턱 값보다 큰 신호가 일정시간 이상 지속될 경우만 '1'로 변환한다. 이 값들은 실험을 통하여 설정한다. 그림 12는 40kHz주파수에 코드 0과 코드 1이 중첩된 초음파 수신 신호와 25kHz주파수에 코드 0과 코드 1이 중첩된 초음파 수신 신호에서 수신 시간을 찾는 과정을 나타낸다.

그림 12에서 (a), (b)는 40Khz, 25Khz 각각 수신 센서로부터 수신된 초음파 신호이다. (c), (d)는 수신된 양극성 초음파 신호를 단극성 초음파 신호를 변환하는 과정이다. (e), (f)는 수신된 단극성 초음파 신호의 envelop을 구하는 과정이다. (g), (h)는 ACF 연산을 위해 이진화하는 과정이다. (i), (j), (k), (l)은 수신된 초음파 신호에서 각각 코드의 ACF 연산 결과이다.

IV. 실험 및 결과

1. 송신부

송신부는 40kHz 두개, 25kHz 두개의 초음파 센서를 일정 시간 마다 동시에, 각각 정의된 코드를 방출하였다. 초음파 센서가 코드를 방출하는 시간은 4개의 초음파 송신기의 위치에 따른 초음파의 이동시간 및 수신기의 연산시간을 측정하여 결정하였다. 정의된 코드를 발생하는 송신부는 TI社의 TMS320C32 DSP(digital signal processor)를 이용하여 구현하였다. 송신 센서는 Nicera社의 T4016A1, T2516A1을 이용하였다. 그림 13은 송신부의 구성도이다.

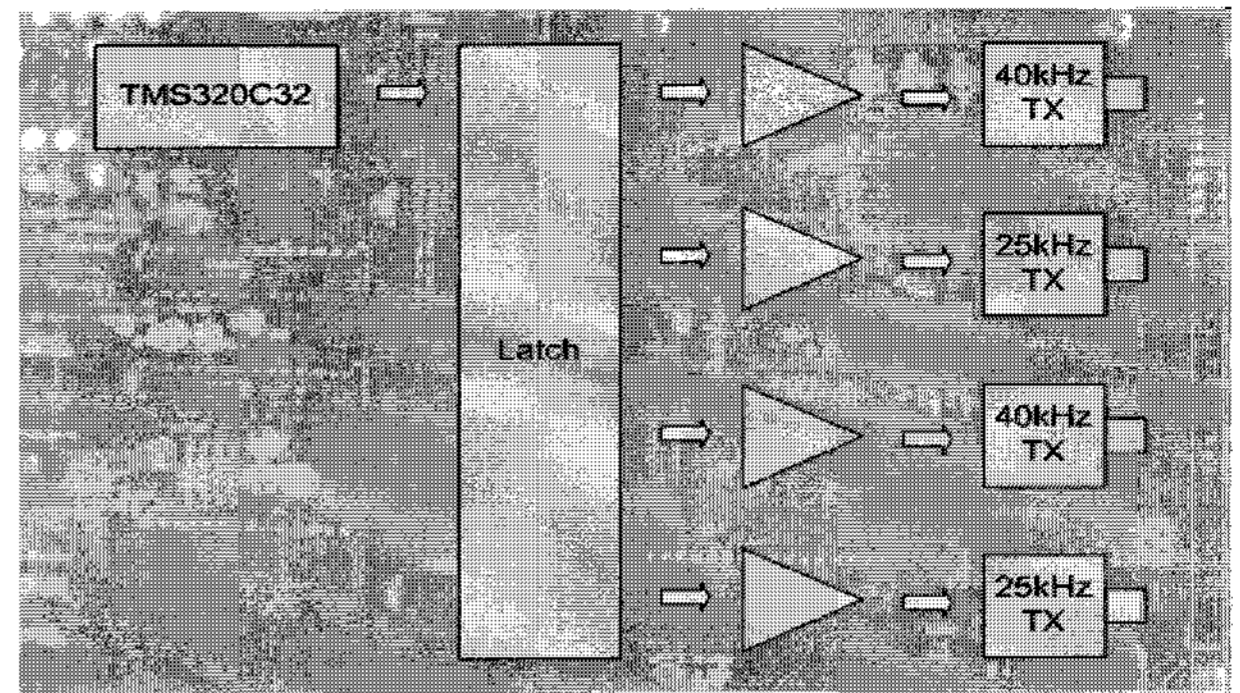


그림 13. 송신부 구성도.  
Fig. 13. Block diagram of TX system.

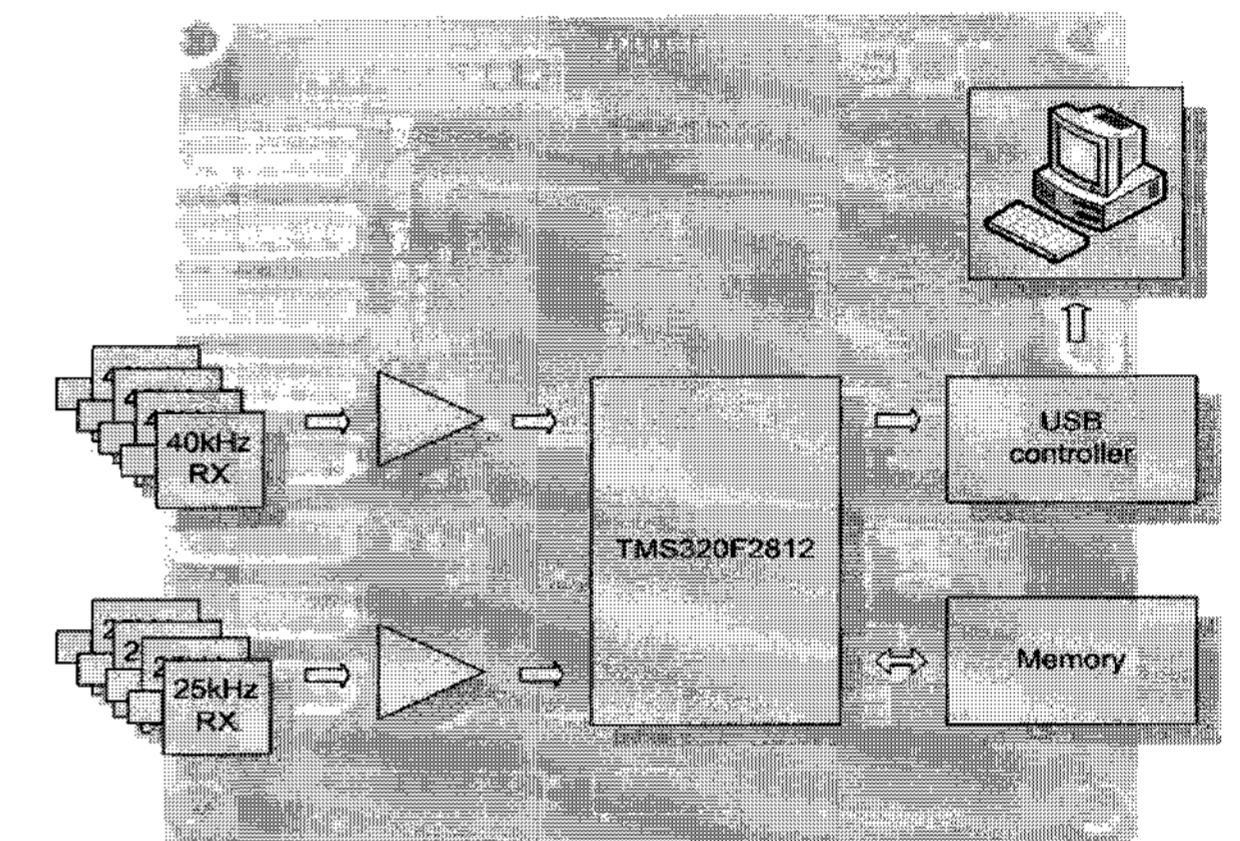


그림 14. 수신부 구성도.  
Fig. 14. Block diagram of RX system.

2. 수신부

초음파 신호는 지향성 신호이므로 수신 센서는 지향성 문제를 해결하기 위해 40kHz, 25kHz 수신 센서를 4방향으로 설치하였다. 수신 센서는 송신 센서와 같은 Nicera社의 R4016A1, R2516A1을 이용하였다.

위치 인식 시스템은 4번의 자기상관함수 연산을 실시간으로 연산해야 하고, 중첩된 초음파 원신호를 샘플링하기 위하여 빠른 ADC(analog digital converter)와 연산 속도가 우수한 DSP가 필요하다. 본 논문에서는 150MIPS(million instruction per second) 연산 속도와 12bit, 25MSPS(mega sample per second) 컨버전(conversion) 속도를 가지는 ADC를 탑재한 TI社의 TMS320F2812를 이용하였다. 수신된 데이터들을 분석하기 위하여 데이터가 저장될 외부 메모리와 PC와의 빠른 통신을 위한 USB 제어기를 추가로 설계하였다. 그림 14는 송신부의 구성도이다.

3. 실험 환경 및 결과

실험 환경은 그림 15와 같다. TX1은 40kHz 초음파 송신기와 코드 0을 이용한다. TX2는 25kHz 초음파 송신기와 코드 0, TX3은 40kHz 초음파 송신기와 코드 1, TX4는 25kHz 초음파 송신기와 코드 1을 이용한다.

수신기에서 4개의 수신 신호를 받아서 본 논문에서 제안한 방법으로 위치를 계산 하는 위치 추정 연산시간은 50ms 정도로 측정되었다. 그림 16은 고정된 위치에서 500회 실험

수행 시 결과이다. 기존의 순차적 구동방법의 결과가 본 논문에서 제안한 방법보다 우수한 위치 추정 결과를 보이고 있다. 이런 결과는 본 논문에서는 송수신기 사이에 초음파 송신시점을 공유하지 않고, 수신기에서 수신된 수신시간 차이를 이용하여 위치를 추정하므로 생기는 결과이다. 즉 위치 추정 연산을 할 때 수신신호의 시간차이를 이용하므로 개별 수신신호의 작은 오차가 수신 시간차  $\Delta T$ 에는 더 큰 영향을 주기 때문이다. 본 논문에서 제안한 방법으로 고정된 위치에서 위치 측정시 최대 오차는 54mm이고 순차적 구동에 의한 방법은 26mm로 측정되었다.

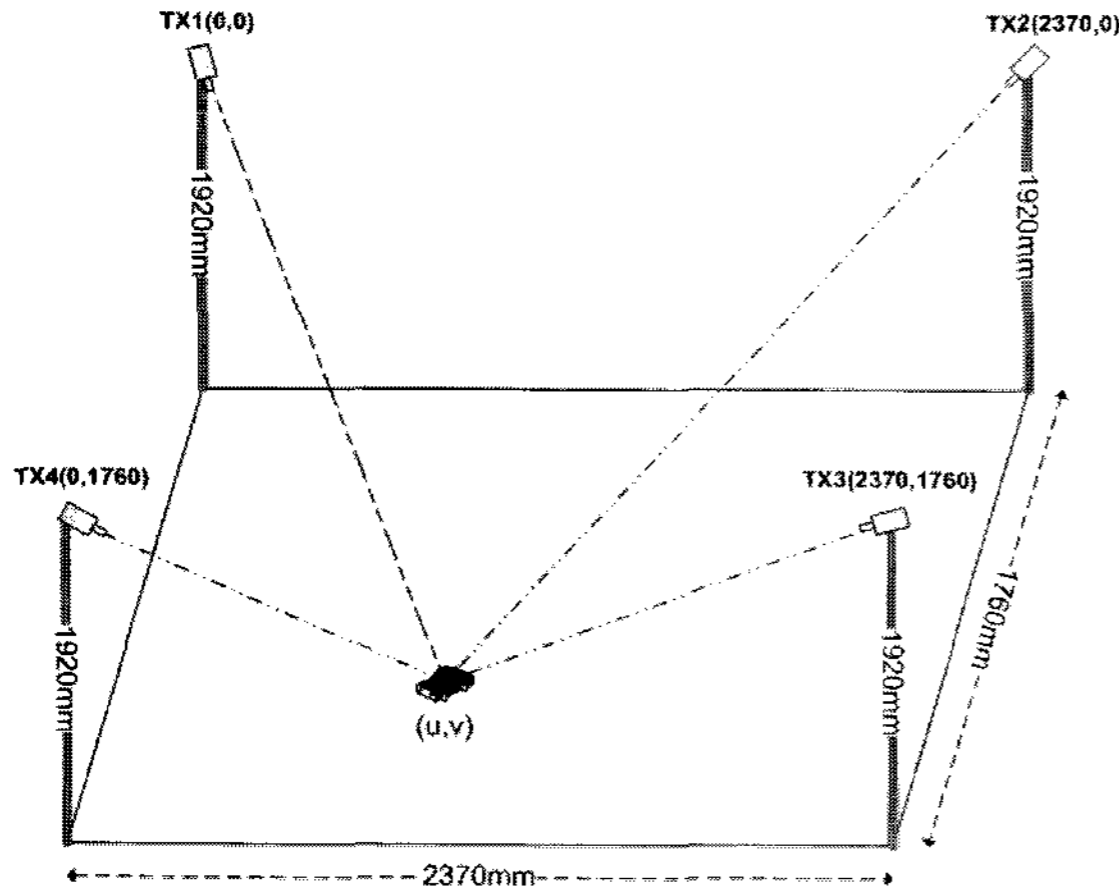


그림 15. 실험 환경 1.  
Fig. 15. Test environment 1.

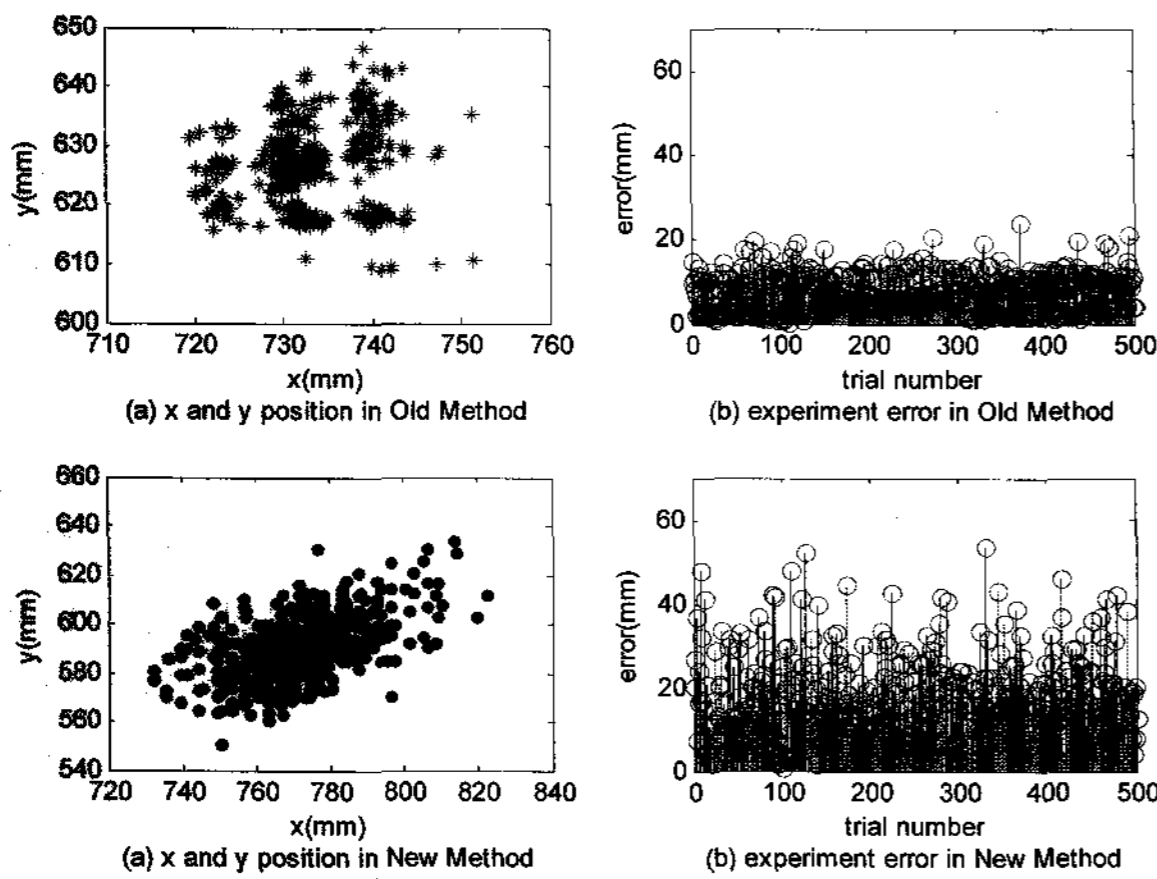


그림 16. 실험 결과 1: (a)(b) 기존의 방법, (c)(d) 제안한 방법.  
Fig. 16. Experiment 1: (a)(b) old method, (c)(d) proposed method.

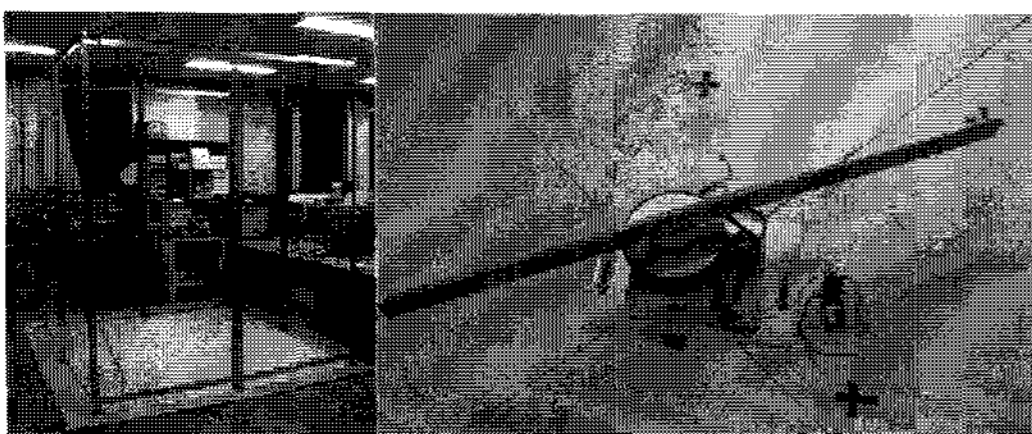


그림 17. 실험 환경 2.  
Fig. 17. Test environment 2.

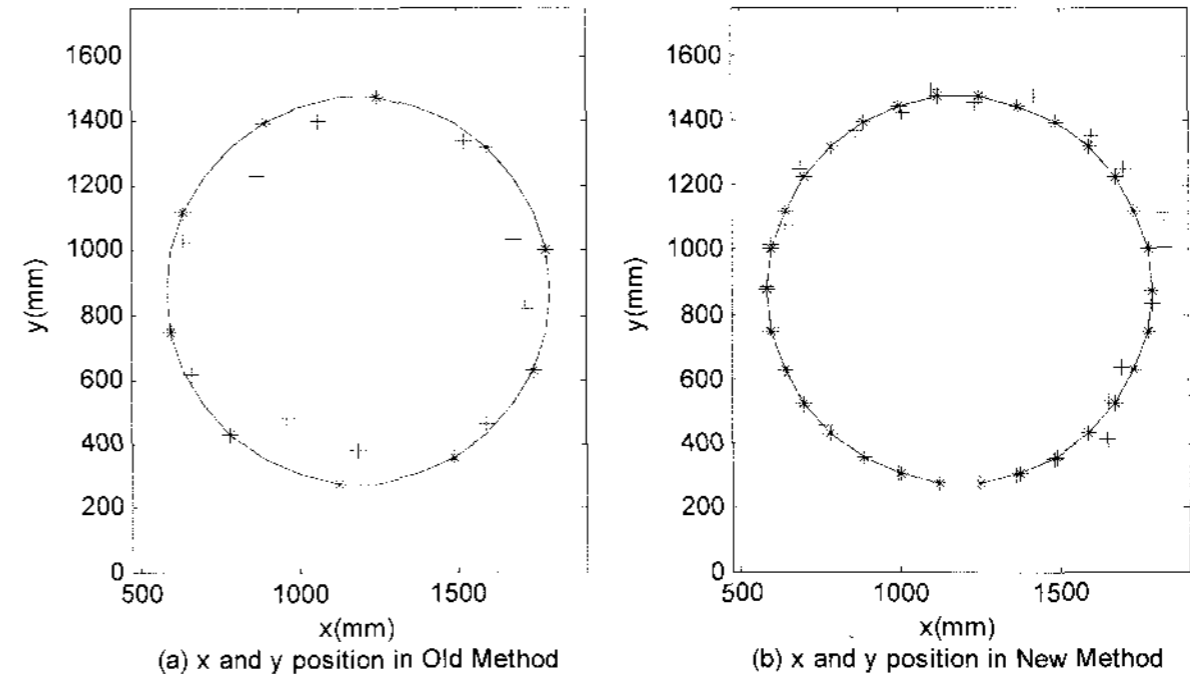


그림 18. 실험 결과 2: (a) 기존의 방법, (b) 제안한 방법.  
Fig. 18. Experiment 2: (a) old method, (b) proposed method.

그림 18은 움직이는 물체에 대한 실험 결과이다. 이 실험은 그림 17과 같이 모터를 이용하여 지름 1200mm, 각속도  $\frac{1}{2}\pi$  rad/s로 등속 원 운동하는 시스템을 구현하여 실험하였다. 이 속도는 직선상 942.48mm/s의 속도로 등속 운동하는 속도이다. 기존의 순차적 송신방법은 100ms 마다 순차적으로 송신기에서 초음파신호를 송신하고 수신기는 300ms 마다 세 번의 초음파 신호를 측정하여 위치를 계산하였다. 실험결과 기존의 순차적 방법은 각 100ms 이전 수신값을 이용하여 현재 위치를 계산하므로 비교적 빠른 속도로 움직이는 물체에 대하여 큰 오차를 나타낸다. 하지만 본 논문에서 제안한 방법은 100ms 마다 동시에 4개의 송신기로부터 코드가 실린 초음파 신호를 수신하여 위치를 계산하므로 움직이는 물체에 대한 응답 특성이 우수한 것으로 나타났다. 순차적 구동에 의한 방법의 최대 오차는 515mm, 본 논문에서 제안한 방법은 94mm로 측정되었다.

V. 결론

초음파 센서를 이용한 위치 인식 시스템에 관한 연구는 계속 진행되고 있다. 기존의 시스템들은 초음파 신호의 간섭 현상을 피하기 위해 송신기를 순차적으로 구동한다. 이에 따라 각 송신기들과 수신기들은 초음파가 방출되는 시점을 공유해야 하며, 수신기는 순차적으로 4개의 초음파 송신기가 방출한 신호를 수신한 후 이를 이용하여 위치를 계산하므로 빠른 속도로 움직이는 응용에 적용하기 어렵다. 또한 송신기는 특정 코드를 일정 시간 간격으로 동시에 방출하고 수신기는 자기상관함수를 이용하여 특정 코드 신호를 분리하는 방법은 자기상관함수 특성이 우수한 긴 코드를 사용하므로 실시간 연산에 어려움이 있다.

본 논문에서는 초음파 간섭 현상으로 인한 이런 문제를 해결하기 위해 다른 중심 주파수를 가지는 초음파 센서를 이용하여 신호를 선 분리한 후 자기상관함수를 이용한 코드 분리 방법을 제안하고 시스템을 구현하였다. 초음파 신호의 간섭 현상 해결은 송신기의 동시 구동이 가능하게 하며, 초음파 신호 측정 시간을 단축하였다. 중심주파수가 다른 두 초음파 센서를 이용하여 신호를 선 분리하여 정의된 코드의 길이를 줄여 자기상관함수 연산량을 크게 개선하였다. 또한 TOF가 아닌 초음파의 수신 시간차를 이용하여 위

치를 측정하여 각 송수신기 사이에 초음파 방출시간을 공유해야 하는 문제를 해결하였다.

본 논문의 향후 과제는 다음과 같다.

첫째, 본 논문에서는 송신기에서 방출된 4개의 초음파 신호로 분리하는 방법으로 2개의 주파수와 각각 2개의 코드를 사용하였다. 이는 단일 주파수를 사용할 경우 코드개수 증가와 코드 길이 증가로 인하여 자기상관함수를 이용한 코드 분리에서 많은 연산량이 필요하고 초음파 신호의 보강, 상쇄 간섭이 복잡하게 발생하기 때문이다. 향후 단일 주파수와 4개의 코드를 사용하는 방법도 고려해 볼 수 있다.

둘째, 초음파의 TOF가 아닌 수신시간의 차를 이용하여 위치를 계산하였다. TOF에 비하여 수신시간의 차는 아주 작은 값이므로 약간의 측정오차에도 큰 위치 오차를 발생하였다. 수신 시간 측정 오차를 제거 하는 알고리즘 및 적절한 위치 추정 알고리즘을 적용한다면 더욱 정밀한 위치 추정이 가능할 것이라 기대한다.

#### 참고문헌

- [1] H. Peremans and J. V. Campenhout "A high-resolution sensor based on tri-aural preception," *Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 265- 270, May 2-6 1993.
- [2] T. Tanzawa, N. Kiyohiro, S. Kotani, and H. Mori, "The ultrasonic range finder for outdoor mobile robots," *Proc. IEEE Conf. Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, pp. 368-373, Aug. 5-9 1995.
- [3] M. Hiyama, T. Emura, and M. Kumagai, "Sharpening directivity of ultrasonic range sensor using multiple transmitters by different amplitude and pulse width method," *Proc. IEEE Conf. Mechatronics and Machine Vision in Practice*, pp. 73-78, Sep. 23-25 1997.
- [4] W.-L. Yao, "A pseudo random(PR) code based ultrasonic navigation system(UNS)," *IEEE Conf. Robotics, Automation and Mechatronics*, vol. 2, pp. 752-757, Singapore, Dec. 1-3 2004.
- [5] S. Y. Kim, D. H. Lee, H. T. An, S. H. Lee, Y. H. Koh, and M. H. Lee, "Performance analysis of UPS(Ultrasonic Positioning System) using DGPS," *IEEE Conf. Industrial Electronics Society*, vol. 1, pp. 609-613, Busan, Korea, Nov. 2-6 2004.
- [6] J. M. Villadangos, J. Urena, M. Mazo, A. Hernandez, F. Alvarez, J. J. Garcia, De Marziani C. and D. Alonso, "Improvement of ultrasonic beacon-based local position system using multi-access techniques," *IEEE Int. Intelligent Signal Processing*, pp. 352-357, Faro, Portugal, Sep. 1-3 2005.
- [7] A. Mahajan and M. Walworth, "3-D position sensing using the differences in the time-of-flights from a wave source to various receiver," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 17, no. 1, pp. 91-94, Feb. 2001.
- [8] B. Barshan, "Fast processing techniques for accurate ultrasonic range measurements," *IOP J. Meas. Sci. Technol.*, vol. 11, pp. 45-50, Jan. 2000.
- [9] M. Parrilla, J. J. Anaya, and C. Fritsch, "Digital signal processing techniques for high accuracy ultrasonic range measurements," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol. 40, no. 4, pp. 759-763, Aug. 1991.
- [10] B. Barshan and B. Ayrulu, "Performance comparison of four time-of-flight estimation methods for sonar signals," *IEEE Electronics Letter*, vol. 34, no. 4, pp. 1616-1617, Aug. 6 1998.
- [11] J. V. DiFranco and W. L. Rubin, "Radar Detection," U.S.A., Scitech Publishing, INC., 2004.
- [12] Nippon Ceramic Co., Ltd, [http://www.nicera.co.jp/pro/ut/html\\_e/ute.htm/](http://www.nicera.co.jp/pro/ut/html_e/ute.htm/)
- [13] Murata Manufacturing Co., Ltd., <http://www.murata.com/>
- [14] R. Y. Chiao and X. Hao, "Coded excitation for diagnostic ultrasound: A system developer's perspective," *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control*, vol. 52, no. 2, pp. 160-170, Feb. 2005.
- [15] V. Diaz, J. Urena, M. Mazo, J. J. Garcia, E. Bueno, and A. Hernandez, "Using golay complementary sequences for multi-mode ultrasonic operation," *Proc. IEEE Conf. Emerging Technologies and Factory Automation*, vol. 1, pp. 599-604, Oct. 18-21, 1999.
- [16] J. J. Komo and C.-C. Yuan, "Evaluation of code division multiple access systems," *Proc. IEEE Conf. Energy and Information Technologies in the Southeast*, vol. 2, pp. 849-854, Apr. 9-12, 1989.
- [17] Y. Y. Han and J. S. Jun, "Analysis for time offset of PN sequence in CDMA system," *IEEE Conf. Global Telecommunications including a Communications Theory Mini-Conference*, vol. 1, pp. 48-53, Houston, Nov. 29 - Dec. 2, 1993.
- [18] W. R. Hendrick, D. L. Hykes and D. E. Starchman, "Ultrasound physics and instrumentation 3rd. Ed.," U.S.A., Mosby, 1992.

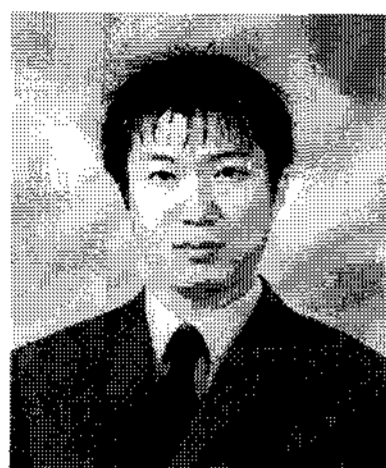


**조 봉 수**

제어 자동화 시스템공학 논문지 제 13 권 제 1 호 참조.

**조 석 빈**

제어 자동화 시스템공학 논문지 제 9 권 제 7 호 참조.



**양 성 오**

2005년 부산대학교 전자과 졸업. 2007년 부산대학교 전자과 석사. 2007년~현재 LG전자 CTO 사업부 연구원. 관심분야는 신호처리 및 시스템 설계.

**백 광 렬**

제어 자동화 시스템공학 논문지 제 5 권 제 1 호 참조.



**이 동 활**

1984년 부산대학교 기계공학과 졸업. 1986년 동 대학원 석사. 2000년 동 대학원 박사수료. 1988년~1999년 (주)LG 전자 생산기술센터 책임연구원. 1999년~2004년 부산대학교 기계기술연구소 전임연구원. 2004년~현재 한국LPS 대표. 관심분야는 정밀위치인식, 지능로봇제어, 양산 전수 계측/검사.