초음파의 이산 주파수 합성을 이용한 거리 측정

Distance Estimation Using Discretized Frequency Synthesis of Ultrasound Signals

박 상 욱, 김 대 은*

(Sangwook Park¹ and DaeEun Kim¹)

¹Yonsei University

Abstract: In this paper, we suggest a method for discretized frequency modulations of ultrasonic signals. A continuous sweep of frequency modulation signals can be modelled with fine levels of discretization. If the ultrasound signals are modulated with monotonically decreasing frequencies, then the cross-correlation between an emitted signal and received signal can be used to identify the distance of multiple target objects. For the discretized frequency synthesis, CF ultrasounds with different frequencies are serially ordered. The auto-correlation test with the signal shows effective results for distance estimation. The discretized frequency syntheses have better distance resolution than CF ultrasound signals and the resolution depends on the number of the combined ultrasound frequencies.

Keywords: ultrasound, cross-correlation, distance estimation, discretized frequency modulation

I. 서론

광대역 초음파(broadband ultrasound)를 이용할 경우 단일 주파수의 초음파를 이용하였을 때보다 더 많은 정보를 얻을 수 있다는 사실이 알려져 있다. 공기 중에서 CF (Constant Frequency) 초음파 시스템은 기본적으로 초음파가 물체에 반사되어 돌아오기까지의 시간(time of flight)을 이용해 물체의 거리를 측정하는 데에 사용된다. CF 초음파의 경우, 송신, 수신부의 값이 싸고 별다른 신호처리 없이 신호가 출발한 순간과 신호가 돌아오는 순간 사이의 시간 차이만 계산하면 되므로 CF 초음파는 거리 측정에 많이 쓰이고 있다. 거리를 측정하는 용도 외에도 도플러 효과를 이용해 물체의 속도를 추정하거나, CF 트랜스듀서를 배열 형태로 구성해 물체가 위치한 각도나 3D형태를 추정하는 등의 다양한 연구도 있지만[1,2], 공기 중에서 CF 초음파는 다른 복잡한 용도로 사용되기 보다는 주로 거리를 측정하는 용도로 사용되고 있다.

광대역 초음파는 초음파의 주파수가 시간에 따라서 변하는 초음파이다. FM (Frequency Modulated) 초음파, CTFM (Continuous Transmission Frequency Modulated) 초음파, FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) 초음파 등의 용어는 모두 광대역 초음파와 비슷한 의미로 사용되는 단어이다. FM초음파는 박쥐를 연구하는 분야에서 많이 사용되는 용어로, 박쥐가 사용하는 초음파 중에서 높은 주파수에서 낮은 주파수로 단조 감소하는 형태를 갖는 초음파를 지칭한다. 본 논문에서 우리는 광대역 초음파 중에서 높은

주파수에서 낮은 주파수로 단조 감소하는 초음파에 초점을 맞추어서 연구를 진행하였다. 박쥐는 초음파만을 이용하여 먹이 추적, 장애물 회피, 홈 네비게이션 등에서 정교한 초음파 탐지 능력을 보여주는데, 이러한 능력은 박쥐가 FM 초음파를 사용하기 때문에 얻어지는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 FM 초음파 역시 초음파의 TOF를 이용해서 CF 초음파와 마찬가지로 물체의 거리를 측정한다. 하지만 신호 증폭과 같은 간단한 과정만 거쳐서 TOF를 측정하는 CF와는 다르게 FM 초음파는 보통 FM 초음파의 이점을 살릴 수 있는 푸리에 변환, 스펙트로그램, 필터링, 상호 상관 (Cross-correlation), 필터 뱅크(filter bank) 등의 기술이 연관되어 사용된다. Simmons는 상호 상관 방법으로 박쥐가 보여주는 먹이 탐지, 추적, 장애물 회피 능력을 설명하였다 [3]. 필터 뱅크 방법[4]은 동물의 달팽이관을 여러 개의 필터가 쌓여 있는 형태로 모델링 한 것으로, 필터 뱅크를 통과시키면 음파를 스펙트로그램 처리한 것과 동등한 정보를 얻을 수 있다. 스펙트로그램은 신호의 시간에 따른 주파수 성분의 변화를 볼 수 있는 방법으로 신호의 주파수 성분만 볼 수 있는 푸리에 변환에 비해 더 많은 정보를 가지고 있다. FM 초음파에 이와 같은 과정을 적용한 후에 얻어낸 TOF를 이용하면 CF 초음파를 이용하였을 때보다 물체의 위치를 정확하게 측정할 수 있으며 그 결과로 물체의 3D 이미지, 물체가 위치한 각도 등의 경우도 더 정확하게 측정할 수 있다. 또, 가까운 거리에 여러 개의 물체가 있어 CF 초음파로는 각각의 물체를 구별하기 힘든 상황에서도 FM 초음파를 사용하여 위와 같은 신호 처리 과정을 거치게 되면 물체 각각의 거리를 얻어낼 수 있다. 이 이외에도 FM 초음파를 이용해 공기 중에서 물체의 재질을 분류하는 연구, 나무의 종을 구분하려는 연구, 얼굴 인식 등의 다양한 연구가 있다[5-7].

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 12. 30., 수정: 2011. 3. 10., 채택확정: 2011. 3. 30.

박상욱, 김대은: 연세대학교 전기전자공학과

(pswook@yonsei.ac.kr/haramcho@gmail.com)

※ 본 연구는 2010년도 산학협동제단의 자금을 받아 수행된 연구임.

FM 초음파는 CF 초음파에 비해 많은 정보를 얻을 수 있다는 장점을 갖고 있지만 하드웨어를 구성하는 데에 많은 비용이 든다는 단점으로 인해서 널리 쓰이지 못하고 있다. 일반적으로 초음파 트랜스듀서를 제작하는데 많이 사용되는 피에조(Piezo) 필름을 사용하여 트랜스듀서를 만들게 되면 고유 주파수가 존재하게 되어 고유 주파수에 해당하는 초음파는 잘 송신되지만 그 이외의 주파수를 갖는 초음파는 송신, 수신에 잘 되지 않는다. 따라서 광대역 초음파를 발생시키기 위해서는 일반적인 방법 외에 다른 소재나 다른 방법을 사용하여 발신부를 구성하여야 한다. 본 논문에서 우리는 FM 초음파를 발생시킬 수 있는 트랜스듀서를 직접 만드는 대신 서로 다른 주파수를 갖는 CF 초음파를 시간적으로 결합하여 비용을 줄이면서 FM 초음파와 같은 효과를 얻을 수 있는지 살펴볼 것이다. Matlab을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션과 초음파 트랜스듀서를 이용한 실제 실험을 통해 이를 알아볼 것이다. 우리는 일련의 CF 초음파가 FM 초음파와 같은 효과를 얻을 수 있는지를 판단하기 위한 기준으로 자기상관 방법을 사용하였다. CF 초음파와, CF 합성 초음파, FM 초음파의 자기상관 결과를 비교함으로써 CF 합성 초음파가 얼마나 유용하게 사용될 수 있는지 확인할 것이다.

II. 실험 방법

1. CF 초음파를 이용한 CF 합성 초음파 구성

이 실험에서는 다양한 주파수의 초음파를 발생시켜야 하기 때문에 광대역 초음파를 발신할 수 있는 발신부를 구성하여 실험하였다. 초음파 트랜스듀서로는 Polaroid사의 트랜스듀서를 이용하였다. 초음파 주파수 발생은 PWM 발생 IC를 이용하였다. PWM IC를 이용해 원하는 주파수를 생성시킨 후, 자체적으로 제작한 증폭 회로를 통과시켜 200V 이상의 전압으로 증폭시키고 증폭된 신호를 트랜스듀서에 공급하였다. 수신부의 경우 Knowles acoustics의 초음파 센서를 이용하였다. 수신부에서 수신된 초음파 신호는 OP Amp로 증폭한 후 DAQ 보드를 이용해서 1MHz 샘플링 주파수로 신호를 변환하였다.

우리는 서로 다른 주파수를 갖는 CF 신호를 시간 축에서 연속적으로 결합하여 새로운 신호를 발신할 수 있었다. 결합된 신호의 스펙트로그램은 그림 1에서 볼 수 있듯이 계단 모양의 형태가 되게 되는데 본 논문에서 우리는 이것을 ‘계단형 신호’라고 부를 것이다. 그림 1(a)~(f)는 실제 초음파 트랜스듀서로 발생시킨 신호를 발신부 바로 앞에서 수신하고 스펙트로그램처리를 한 결과이다. 그림 1(a)는 주파수가 60kHz이고 3ms의 지속시간을 갖는 CF 신호를 발생시킨 결과이다. 그림 1(b)는 60kHz의 CF 초음파를 1.5ms동안 발신하고 이어서 1.5ms동안 40kHz의 CF 초음파를 발신한 계단형 신호이다. 나머지 3개, 4개, 5개의 합성 신호의 경우도 마찬가지로 방법으로 서로 다른 주파수를 갖는 CF 신호를 결합한 결과이다. 합성하는 신호의 수가 증가하더라도 총 신호의 지속시간은 3ms로 일정하게 유지되도록 하였고, 주파수의 변화는 60kHz~40kHz 사이에서 일어나도록 하였다. 그림 1(f)는 3ms동안 60kHz에서 40kHz로 주파수가 연속

그림 1. CF 합성 초음파의 스펙트로그램.

Fig. 1. Spectrogram of discretized frequency modulations of ultrasound signals (a) CF ultrasound. (b) 2 frequencies (c) 3 frequencies (d) 4 frequencies (e) 5 frequencies in the modulated signal (f) continuous sweep of FM ultrasound.

적으로 단조 감소하는 FM 신호이다. FM 초음파의 경우 이론적으로는 주파수가 연속으로 낮아지는 신호이지만 Matlab으로 FM 신호를 생성하는 경우, 샘플링 타임보다 짧은 간격으로 주파수를 변경시킬 수 없고, PWM IC로 FM 신호를 생성하는 경우 한 주기보다 짧은 간격으로는 주파수를 변경시킬 수 없다는 점에서 FM 초음파 역시 무수히 많은 계단형 신호의 연속으로 볼 수 있다. 이와 같이 서로 다른 CF 주파수를 합성하는 방법으로 하나에서 21개까지 결합된 초음파를 실험에 사용하였다. 추가로 초음파 신호의 지속시간이 3ms 이상 혹은 이하이거나, 신호의 주파수 대역폭이 다른 경우에 대한 실험과 시뮬레이션도 진행하였다.

2. 발신된 신호와 수신된 신호의 상호 상관 방법

본 논문에서 우리는 상관 방법을 이용해서 결합된 초음파 신호를 평가할 것이다. 상호 상관 방법은 아래의 식 (1)처럼 정의된다.

$$a[n] \star b[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a^*[m]b[n+m] \quad (1)$$

$$a[n] * b[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a[m]b[n-m] \quad (2)$$

위 식에서 a^* 는 a 의 쥘레 복소수(complex conjugate)를 의미하고 $\star$ 는 상호 상관을, $*$ 는 convolution을 나타낸다. 식 (2)는 convolution의 정의인데 식 (1)과 식 (2)에서 볼 수 있듯이 상관 방법은 convolution과 비슷한 성질을 가지고 있다. 상관 방법과 convolution의 관계를 식으로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$a[n] \star b[n] = a^*[-n] * b[n] \quad (3)$$

발신된 신호와 수신된 신호를 상호 상관하는 방법을 이용하여 신호가 도착한 시간을 정확하게 측정할 수 있다. 발신된 신호를 $s[n]$, 수신된 신호를 $r[n]$, 초음파를 발신, 수신되는 공간의 임펄스 응답을 $h[n]$ 이라고 하였을 때, 일반적으로 받은 신호 $r[n]$ 는 $s[n]$ 과 $h[n]$ 의 convolution 결과와 같다. 식 (3)의 상관 방법과 convolution의 관계와 convolution의 결합법칙을 이용하면, 보낸 신호와 받은 신호의 상호 상

관은 아래와 같이 나타낼 수 있다[8].

$$\begin{aligned} s[n] \star r[n] &= s[n] \star (s[n] \star h[n]) \\ &= s^*[-n] \star (s[n] \star h[n]) \text{ 식 (2)에 의해,} \\ &= (s^*[-n] \star s[n]) \star h[n] \text{ 결합 법칙.} \\ &= (s[n] \star s[n]) \star h[n] \end{aligned} \quad (4)$$

위 식 (4)에서 주변의 물체를 탐지하는 데에 있어서 필요한 정보는 모두 임펄스 응답 $h[n]$ 으로부터 얻을 수 있다. 임펄스 응답은 임펄스를 입력하였을 때 출력되는 신호로 정의된다. 이 정의를 초음파를 이용한 물체 탐지에 적용하게 되면, 어떤 공간의 임펄스 응답은 공간에 임펄스 음파를 발신하였을 때 돌아오는 음파를 의미한다. 따라서 임펄스 응답으로부터 초음파 발신부와 물체까지의 거리를 알 수 있다. 그러므로 우리가 보내는 신호와 받는 신호를 상호 상관 하는 이유는 임펄스 응답 $h[n]$ 을 얻기 위해서라고 할 수 있다.

발신된 신호와 수신된 신호를 상호 상관하는 것은 위의 식 (4)에서처럼 수신된 신호를 자기 상관한 결과를 임펄스 응답과 convolution한 것과 같다. 따라서 발신된 신호의 자기 상관 결과의 폭이 좁으면 발신한 신호와 수신된 신호를 상호 상관 하였을 때 임펄스 응답과 비슷한 신호가 얻어지지만, 보내는 신호의 자기 상관 결과의 폭이 넓을 경우 상호 상관 결과로부터 임펄스 응답을 추정하기가 힘들어지게 된다. 즉 발신하는 신호의 자기 상관 결과의 폭이 좁아질수록 발신된 신호를 수신된 신호와 상호 상관 하였을 때 더 정확한 임펄스 응답을 추정할 수 있다.

III. 실험 결과

서로 다른 주파수를 갖는 CF 초음파가 합성되었을 때, 합성된 초음파의 효과를 알아보기 위해 해당 신호의 자기 상관 결과를 CF 신호와 FM 신호 각각의 자기 상관 결과와 비교해 보았다. 그림 2는 트랜스듀서에서 발신된 초음파를 초음파 센서로 수신하여 얻은 초음파 신호를 이용하여 얻은 결과이다. 초음파 발신부 정면에 초음파 수신부를 놓고 초음파를 측정하고, 측정된 신호를 자기 상관하여 정규화하였다. 그림 2(b), (c), (d), (e)는 각각 2, 3, 4, 5개의 CF 합성 신호로 얻은 자기 상관 결과이고 그림 2(a), (f)는 각각 CF 신호와 FM 신호의 자기 상관을 구한 결과이다. 눈으로 확인할 수 있듯이 합성하는 CF 수가 늘어나게 되면 자기 상관 결과로 나타나는 신호의 폭이 좁아지는 것을 확인할 수 있다.

표 1은 자기 상관으로 얻어진 신호의 너비의 길이를 테이블로 정리한 것이다. 1단계 합성 신호는 CF 신호를 의미한다. 표 1에서 FM의 경우 자기 상관 결과의 폭을 정확히 측정하기 힘들어 정확한 값을 표시하지 않았다. 앞에서 설명하였듯이 상호 상관 결과를 이용하여 물체의 거리 측정을 할 때, 자기 상관으로 얻어진 신호의 폭이 좁아질수록 물체를 탐지할 수 있는 해상도는 높아지게 된다.

예를 들어 3ms 지속시간의 CF 신호를 사용하였을 경우, 표 1에서 볼 수 있듯이 자기 상관으로 얻어진 신호의 폭은 6ms가 된다. 따라서 서로 $51\text{cm}(6\text{ms}/2 \times 340\text{m/s}/2)$ 이하의 거

그림 2. 정규화된 자기 상관 결과.

Fig. 2. Normalized auto-correlation (a) CF. When (b) 2 frequencies (c) 3 frequencies (d) 4 frequencies (e) 5 frequencies in the modulated signal (f) continuous sweep of FM.

표 1. 합성하는 CF 신호의 수에 따른 자기 상관 결과의 폭.

Table 1. Width of the auto-correlation result depending on the number of discrete frequencies.

	1step	2step	3step	4step	5step	FM
자기 상관 결과의 폭 (실험 결과)	6.22ms	2.91ms	1.79ms	1.46ms	1.06ms	0.4ms 보다 작음
자기 상관 결과의 폭 (Matlab 시뮬레이션)	6ms	2.98ms	1.96ms	1.48ms	1.18ms	0.4ms 보다 작음

리에 두 개 이상의 물체가 있게 되면 송신한 초음파 신호와 수신된 초음파 신호를 상호 상관 하였을 때 각각의 물체에 의해 나타나는 신호가 겹치게 되어 물체의 거리 추정이 힘들어 질 수 있다. 그림 2와 표 1에서는 보이지 않았지만 6개 이상의 CF가 합성된 초음파의 자기 상관 결과의 경우도 마찬가지로 합성되는 신호의 주파수 수가 늘어나면 신호의 자기 상관 결과의 폭이 줄어드는 경향이 있음을 확인하였다. 하지만 그 수가 늘어남에 따라 무한정 자기 상관 결과가 줄어들지는 않았는데 합성하는 CF 주파수 수가 18개 이상이 되면 신호의 스펙트로그램, FFT, 자기 상관 결과의 형태가 FM 신호와 거의 같아지는 것을 확인하였다. 지금까지는 초음파의 전체 신호의 길이가 3ms로 고정되어 있고, 40kHz ~ 60kHz의 동일한 주파수 대역폭을 갖는 신호에 대해서 시뮬레이션 실험과 실제 실험결과를 보였다. 신호의 길이와 주파수의 대역폭이 변하게 될 경우에 대한 실험도 진행하였는데 그 결과는 표 2에 정리되어 있다.

주파수 변화율 (Sweep rate) =

$$\text{신호의 대역폭 (Hz)} / \text{신호의 지속시간 (s)} \quad (5)$$

식 (5)에서처럼 신호의 대역폭을 신호의 길이로 나눈 것을 신호의 주파수 변화율이라고 한다. FM 초음파의 경우 주파수 변화율이 커지면 자기 상관 결과의 폭이 좁아지고 주파수 변화율이 작아지면 자기 상관 결과의 폭이 넓어진다는 것이 알려져 있다[9]. 식 (5)의 관계로부터 신호의 주파수 변화율을 높이는 방법에는 신호의 대역폭을 높이는

표 2. 신호의 자기 상관 결과의 폭과 신호의 주파수 변화율과의 관계.

Table 2. Relationship between the auto correlation result and the sweep rate of the ultrasound signals.

	대역폭이 늘어날 때	대역폭이 줄어줄 때	신호의 지속시간이 길어질 때	신호의 지속시간이 짧아질 때
FM 초음파	자기 상관 결과 폭이 감소 (신호의 밴드위스와 반비례)	자기 상관 결과 폭이 증가 (신호의 밴드위스와 반비례)	자기 상관 결과 폭이 증가 (신호의 지속시간과 비례)	자기 상관 결과 폭이 감소 (신호의 지속시간과 비례)
CF 합성 초음파	자기 상관 결과 형태는 변하지 폭은 일정	자기 상관 결과 형태는 변하지 폭은 일정	자기 상관 결과 폭이 증가 (신호의 지속시간과 비례)	자기 상관 결과 폭이 감소 (신호의 지속시간과 비례)

그림 3. 초음파 신호의 스펙트로그램.

Fig. 3. Spectrogram of ultrasound signals when (a) 60, 56, 52kHz (b) 60, 54, 48kHz (c) 60, 51, 42kHz, and Auto correlation result with discretized signals (d) 60, 56, 52kHz (e) 60, 54, 48kHz (f) 60, 51, 42kHz.

방법과 신호의 지속시간을 줄이는 방법이 있음을 알 수 있다. 반대로 주파수 변화율을 낮추는 방법에는 신호의 대역폭을 좁게 하는 방법과 신호의 지속시간을 길게 하는 방법이 있다. 이 각각의 경우에 대해서 자기 상관 결과의 폭의 차이가 받는 영향을 표 2와 같이 정리하였다.

표 2에서 확인할 수 있듯이 FM 신호의 경우 이미 알려진 대로 신호의 주파수 변화율이 높아지면 신호의 자기 상관 결과는 좁아지게 되고 그 반대의 경우 자기 상관 결과가 넓어지는 것을 확인하였다. CF 합성 초음파 신호의 경우 신호의 지속시간에 따른 자기 상관 결과의 변화는 FM 신호와 마찬가지로이다. 하지만 신호의 대역폭이 변할 경우에는 자기 상관 결과의 폭이 일정하였다. 그림 3은 3단계 합성 초음파의 주파수가 60, 56, 52kHz일 때, 60, 54, 48kHz일 때, 60, 51, 42kHz일 때 각각의 스펙트로그램과 자기 상관 결과이다. 총 신호의 지속시간은 모두 3ms로 동일하였다. 그림 3(d), (e), (f)에서 볼 수 있듯이 주파수 간격이 변함에 따라 자기 상관 결과의 밀도는 변하지만 자기 상관 결과의 폭은 일정한 것을 확인할 수 있다.

CF 합성 초음파 신호의 주파수 간격이 2kHz 이하로 줄

그림 4. 세 개의 물체가 초음파 발신부로부터 각각 1.2m, 1.4m, 1.7m 떨어져 있을 때의 시뮬레이션 결과.

Fig. 4. Simulation when three objects are at the distance of 1.2m, 1.4m, 1.7m from an ultrasound transducer, respectively (a) Reflected signal when CF ultrasound is used (b) Cross-correlation result between the emitted signal and the receiver signal (c) Reflected signal with 5 step emitter signal (d) Cross-correlation result between 5 step signal and the corresponding receiver signal.

어떻게 되면 점점 불규칙한 형태의 자기 상관 결과가 얻어지며, 주파수 간격이 0Hz에 가까워질수록 상관 결과의 폭이 넓어진다. 주파수 간격이 0이 될 경우 CF 신호가 되어 넓은 폭을 가지는 자기 상관 결과가 나타났다.

그림 4는 상호 상관 방법을 이용해서 얻을 수 있는 효과를 보여주는 시뮬레이션 실험 결과이다. 그림 5의 실제 실험 결과는 시뮬레이션 결과와 유사함을 볼 수 있다. 그림 4(a), 5(a)는 초음파 발신부로부터 각각 1.2m, 1.4m, 1.7m의 거리에 위치해 있는 3개의 물체를 향해서 신호의 지속시간이 3ms인 CF 초음파를 발신 하였을 때 물체들로부터 반사되어 돌아온 초음파 신호이다. 그림 4(c), 5(c)는 그림 4(a)와 같은 5단계 합성 초음파를 발신 하였을 때, 각각의 물체에서 반사되어 돌아온 신호이다. (a)와 (c)에서 확인할 수 있듯이 3개의 물체 각각에서 반사된 신호가 하나로 뭉쳐지게 되어 각각의 물체 위치를 추정하기가 쉽지 않다. 그림 4, 5의 (b)와 (d)는 반사되어 돌아온 초음파 신호와 발신된 신호를 상호 상관 하였을 때 나타난 결과이다. CF 초음파의 자기 상관 결과는 넓게 퍼지는 모양이기 때문에 5(b)에서처럼 상호 상관을 하더라도 상관 결과가 겹치기 때문에 각각의 물체 위치를 알 수 없으나 자기 상관 결과의 폭이 좁은 5개 CF 합성 신호를 사용하였을 경우 그림 5(d)에서 본 바와 같이, 각각의 자기 상관 결과가 서로 겹치지 않게 된다. 그림 5(d)에서 t_1 은 1.186ms이고 t_2 는 1.965ms인데 이는 각각 20.16cm와 33.41cm에 해당한다($340\text{m/s} \times 1.186\text{ms} = 20.16$

그림 5. 세 개의 물체가 초음파 발신부로부터 각각 1.2m, 1.4m, 1.7m 떨어져 있을 때의 실제 실험 결과.

Fig. 5. Real experiments when three objects are at the distance of 1.2m, 1.4m, 1.7m from an ultrasound transducer, respectively (a) Reflected signal when CF ultrasound is used. (b) Cross-correlation result between the emitted signal and the receiver signal. (c) Reflected signal with 5 step emitter signal (d) Cross-correlation result between 5 step emitter signal and the corresponding receiver signal.

cm, $340\text{m/s} \times 1.965\text{ms} / 2 = 33.4\text{cm}$). 이 값들은 초음파 트랜스듀서와 가장 가까운 물체와 두 번째로 가까운 물체 사이의 거리가 20cm이고 세 번째 물체와 두 번째 물체 사이의 거리가 30cm라는 실험 상황과 거의 일치한다.

IV. 결론

본 논문에서 우리는 서로 다른 주파수를 갖는 CF 초음파를 연속적으로 합성하여 FM 형태의 신호를 생성하였다. Matlab 시뮬레이션과 실제 실험을 통해 합성된 자기 상관 결과의 폭에 영향을 주는 요인을 확인하였다.

위에서 보았듯이 발신한 신호와 수신하는 신호의 상호 상관을 통한 거리 측정에 있어서 신호의 자기 상관 결과의 폭은 거리 측정 해상도를 의미한다. 실험 결과로부터 결합하는 CF 신호의 수가 늘어나고, 신호의 지속시간이 감소할수록 거리 측정 해상도가 높아지는 반면에, 해당 주파수 간격이 2kHz 이상일 경우 주파수 간격은 거리 측정 해상도에 영향을 주지 않는다는 것을 확인하였다. 신호의 지속시간의 경우 지속시간이 짧아지면 자기 상관 결과의 폭은 줄어들지만 그만큼 신호의 에너지가 줄어들게 되어 상관 결과의 진폭이 줄어든다. 따라서 실제 노이즈가 있는 환경에서는 신호의 지속시간을 줄이는 데에는 한계가 있을 것이다.

본 논문에서는 다양한 주파수의 초음파를 발생시켜야 하기 때문에 광대역 초음파 발신부를 구성하여 결합된 초음파 신호를 발신하였으나 결합된 초음파의 주파수가 정해졌을 경우 그에 해당하는 고유 주파수를 갖는 트랜스듀서를 이

용하여 발신부를 구성할 수 있다. 예를 들면 60, 50, 40kHz의 3개의 CF 합성 초음파 발신부를 구성하려고 할 경우 60, 50, 40kHz의 고유 주파수를 갖는 협대역 피에조 트랜스듀서를 이용하여 발신부를 구성할 수 있을 것이다. 협대역 피에조 트랜스듀서는 광대역 트랜스듀서보다 비용이 적게 들기 때문에 이렇게 발신부를 구성할 경우 발신부 구성에 필요한 비용을 줄일 수 있다. 결합된 초음파 발신부를 이용할 경우 광대역 초음파 발신부를 이용할 때와 같은 거리 측정 해상도는 얻지 못하지만, 광대역 초음파 발신부를 구성할 때보다 적은 비용으로 초음파 발신부를 구성할 수 있다는 장점이 있다. 광대역 초음파 발신부를 이용할 때만큼은 아니지만 CF 초음파 발신부를 이용할 때보다는 높은 해상도를 얻을 수 있으므로 결합하는 초음파 발신부의 개수를 조절함으로써 비용과 거리 측정 해상도 사이에 트레이드 오프를 할 수 있다. 추가적으로 한 공간에 여러 개의 초음파 발신부가 있는 상황에서, 초음파 발신부마다 특정 주파수를 보내는 시간, 주파수 간격, 주파수의 시퀀스를 다르게 함으로써 각각의 초음파 발신부에서 발신된 신호들의 구별이 가능할 것이다.

참고문헌

- [1] L. Kleeman and R. Kuc, *Sonar Sensing*, Handbook on Robotics, edited by B. Siciliano and O. Khatib, Springer-Verlag, 2008.
- [2] M. Moebus and A. M. Zoubir, "Three-dimensional ultrasound imaging in air using a 2D array on a fixed platform," *Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP 2007. IEEE International Conference on*, vol. 2, pp. II-961-II-964, pp. 15-20, April 2007.
- [3] J. A. Simmons and R. A. Stein, "Acoustic imaging in bat sonar: echolocation signals and the evolution of echolocation," *J. Comp. Physiol.*, vol. 135, pp. 61-84, 1980.
- [4] J. Reijniers and H. Peremans, "On population encoding and decoding of auditory information for bat echolocation," *Biological Cybernetics*, vol. 102, no. 4, pp. 311-326, 2010.
- [5] P. J. McKerrow and B. E. Kristiansen, "Classifying surface roughness with CTFM ultrasonic sensing," *IEEE Sensors Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 1267-1279, Oct. 2006.
- [6] Y. Yovel, M. O. Franz, P. Stilz, and H. U. Schnitzler, "Plant classification from bat like echolocation signals," *Plos Comput Biol* 4:e1000032, 2008.
- [7] P. McKerrow and K. K. Yoong, "Classifying still faces with ultrasonic sensing," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 55, no. 9, pp. 702-710, 2007.
- [8] S. Haykin and B. V. Veen, *Signals and Systems*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [9] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, New York, McGraw-Hill, 2005.

박 상 욱

2010년 연세대학교 전기전자공학부 학사 졸업. 2010년~현재 연세대학교 전기전자공학과 석사과정. 관심분야는 바이오로보틱스, 초음파.

김 대 은

1989년 서울대학교 컴퓨터공학과 학사 졸업. 1993년 The University of Michigan, Ann Arbor, USA 석사. 2002년 The University of Edinburgh, UK, 박사. 2002년 Max Planck Institute for Human Cognitive & Brain Sciences, Cognitive Robotics, Research Scientist. 2006년 The University of Leicester, Neurobiology Lab, Research Associate. 2007년~현재 연세대학교 전기전자공학부 조교수. 관심분야는 바이로보틱스, 인공지능, 인공생명, 신경과학, 인지과학.