

박쥐의 먹이 탐지 전략을 모방한 초음파 센서의 물체 위치 추정

Ultrasound Echolocation Inspired by a Prey Detection Strategy of Big Brown Bats

박 상 욱, 김 대 은*
(Sangwook Park¹ and DaeEun Kim¹)

¹Yonsei University

Abstract: It is known that big brown bats can distinguish echo of a prey at various angles. In this paper, we suggest a new object localization strategy using ultrasonic echolocation. We calculate the relative energy ratio between a high frequency component of ultrasound signal and a low frequency component of ultrasound signal for a target object. We found the measure depends on bearing angle of the object in space. We also tested energy ratio of echoed FM ultrasound signals depending on frequency, based on cross-correlation. It can determine the relative angular position of objects even though the reflected signals are congested form each object.

Keywords: ultrasonic, echolocation, object localization, big brown bats

I. 서론

주변 환경 정보를 탐지하는 것은 로봇 시스템의 필수적인 요소이다. 로봇에 사용될 수 있는 다양한 종류의 센서들 중 로봇의 목적에 따라 로봇 센서를 선택하게 된다. 초음파 센서는 낮은 비용으로 주변의 물체를 탐지할 수 있다는 장점으로 인해 많은 로봇 시스템에서 사용되고 있다. 일반적으로 초음파 센서는 단순한 처리 과정을 거쳐 장애물이 있는지 없는지 여부를 판단하거나 물체의 대략적인 거리를 측정하는 용도로 간단하게 사용된다. 하지만 로봇에 사용할 수 있는 자원에 제한이 있다는 것을 생각한다면 로봇에 사용되는 센서들을 가능한 한 최대한 이용하는 것이 바람직할 것이다. 이러한 관점에서 초음파 센서를 효율적으로 활용하기 위한 기존의 연구들이 있어 왔다[1-3]. 본 논문에서 우리 역시 주어진 초음파 센서를 효과적으로 사용할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다.

초음파를 통한 주변 환경의 감지에 대하여 이전의 연구자들이 수행한 많은 연구들도 있으나 초음파 시스템은 인간이 초음파 도구를 사용하기 훨씬 이전부터 몇몇 종의 동물들에 의하여 사용되어 왔다. 박쥐는 공기 중에서 초음파를 사용하여 주변 환경 정보를 파악하는 동물로 극지나, 몇몇 외딴 섬을 제외한 모든 지역에서 서식하고 있는 동물이다. 약 1200여 종의 다양한 박쥐 종이 있는 것으로 알려져 있으며 이는 포유류 전체 종의 약 20%를 차지한다[4]. 각각의 박쥐 종은 그들이 서식하는 환경 조건에 맞추어 진화하였으며 박쥐가 초음파를 이용하여 장애물 회피, 먹이 탐

색 및 사냥, 네비게이션 등의 고차원적인 행동을 수행하는 것을 보았을 때 박쥐의 초음파 시스템은 현재 공기 중에서 사용되는 초음파 시스템보다 기술적인 면에서 뛰어난 시스템이라고 생각할 수 있다.

박쥐가 초음파를 사용하여 주변 환경 정보를 획득한다는 사실이 밝혀진 이후 박쥐에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 앞에서 설명하였듯이 다양한 박쥐 종이 존재하며 각각의 종은 그들의 서식지에 맞추어 진화해 왔기 때문에 박쥐의 초음파 시스템은 동일하지 않으며 박쥐 종에 따라서 사용하는 초음파의 형태나 물체를 탐지하는 방식이 다를 수 있다. 이러한 이유로 박쥐의 초음파 시스템에 대한 연구는 어떤 종의 박쥐를 연구하였는지에 따라 다르며, 박쥐가 사용하는 다양한 물체 탐지 전략들에 대한 연구들이 있다[5-7]. 우리는 이러한 연구 결과들을 초음파 센서를 기술에 응용하는 연구를 진행하였다. 이 논문에서는 큰갈색박쥐 (Big brown bat, *Eptesicus fuscus*) 가 물체를 탐지하는 방법에 대하여 연구된 최근의 논문을 바탕으로 박쥐의 물체 탐지 방법을 응용하고자 한다.

박쥐는 종이나 상황에 따라 다양한 형태의 초음파 call을 발신하는데 박쥐의 초음파 call은 크게 CF (Constant Frequency) 성분과 FM (Frequency Modulated) 성분으로 분류할 수 있다. 이러한 분류 방법은 박쥐 연구자들 사이에서 많이 사용되는 분류 방법으로 CF 신호는 초음파 신호의 주파수가 일정한 신호이고 FM 신호는 신호의 주파수가 시간에 따라서 변하는 신호이다. 박쥐는 종에 따라서 CF 신호를 사용하는 박쥐, FM 신호를 사용하는 박쥐 또는 CF 신호와 FM 신호가 결합된 CF-FM 신호를 사용하는 박쥐가 있다[9]. 큰갈색박쥐는 FM 신호를 사용하여 먹이가 되는 곤충을 감지하여 사냥을 하는 것으로 알려져 있다[10].

박쥐가 먹이를 사냥하는 환경은 나무들이 많은 환경으로, 박쥐가 발신한 초음파가 나무에 반사될 경우 나무의 나

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 11. 15., 수정: 2011. 12. 5., 채택확정: 2011. 12. 20.

박상욱, 김대은: 연세대학교 전기전자공학부

(pswook@yonsei.ac.kr/daeeun@yonsei.ac.kr)

* 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0000210).

못있 각각이 하나의 반사체로 작용하기 때문에[11] 복잡한 형태의 반사파가 발생하고 이 반사파는 박쥐가 감지해야 할 곤충에 의한 반사파와 겹쳐서 박쥐가 먹이를 감지하기 어려울 수 있다. 큰갈색박쥐는 하모닉 FM 신호를 발신하고 초음파의 주파수에 따라서 빔형성이 다르다는 것을 이용하여 정면에 있는 먹이에 반사되어 돌아오는 초음파와 정면에서 벗어난 위치에 있는 나무로부터 반사되어 돌아오는 초음파를 구분할 수 있고 따라서 나무가 있는 복잡한 환경에서 먹이를 감지하고 사냥할 수 있다[8,12].

우리는 FM 초음파를 발신하는 하드웨어를 구성하여 실험을 진행하였다. 실험을 통하여 물체가 위치한 각도에 따라서 물체에 반사되는 FM 신호의 주파수 특성이 변하는 것을 확인하였다. 물체의 위치가 정면에서 벗어날수록 초음파 신호의 높은 주파수성분의 세기가 낮은 주파수성분의 세기보다 높은 비율로 감소되었으며 이러한 비율을 미리 알고 있을 경우 반사되어 돌아온 신호가 대략적으로 어떤 각도에서 반사되어 돌아온 신호인지 판단할 수 있음을 확인하였다. 또한 상호상관(cross-correlation)을 이용하여 여러 물체가 존재하는 조건에서 각각의 물체에 반사된 신호의 고주파수 성분과 저주파수 성분의 비율을 판단하는 방법을 제안하였다.

II. 실험 방법

일반적으로 사용되는 피에조 초음파 센서는 특정한 주파수에 맞추어져 있어 CF 초음파 신호를 발신하기에는 적합하나 FM 초음파 신호를 발신할 수 없다는 단점이 있다. 본 논문에서는 FM 초음파 신호를 SensComp사의 정전형 방식의 초음파 센서를 사용하여 초음파 발신회로를 구성하였다. ATmega128의 PWM발생 기능을 이용하여 신호의 주파수가 90 kHz-40 kHz로 선형적으로 감소하는 약 3 ms 길이의 FM 신호를 발생시켰으며, 정전형 방식의 초음파 센서의 경우 초음파를 발신하기 위하여 높은 구동 전압을 요구하므로 승압회로를 이용하여 FM 신호를 증폭하였다. 물체에 반사된 초음파를 감지하기 위하여 광대역 초음파 센서를 사용하였고 Data acquisition board를 이용하여 신호를 컴퓨터로 수신하여 Matlab 소프트웨어를 통하여 신호를 처리할 수 있도록 하였다. 구성된 발신부와 수신부는 그림 1과 같다.

우리는 먼저 물체가 위치한 각도에 따라 물체에 반사된 초음파 신호의 주파수 분포가 어떻게 변하는지 알아보는 첫 번째 실험을 진행하였고 그 후에 이 실험에서 확인한

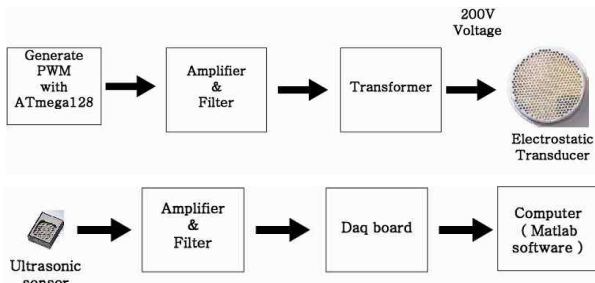


그림 1. 초음파 발신부와 수신부.
Fig. 1. Ultrasonic emitter and receiver.

결과를 이용하여 물체가 정면에 있는지 측면에 있는지를 판단하는 두 번째 실험을 진행하였다.

첫 번째 실험에서는 물체가 위치한 각도에 따라 물체에 반사된 FM 초음파 신호의 주파수 분포가 어떻게 바뀌는지 알아보기 위하여 물체와 초음파 센서와의 거리를 50 cm부터 100 cm까지 10 cm 간격으로 변화시키고 물체가 위치한 각도 또한 정면에서 40° 까지 10° 간격으로 물체의 위치를 바꾸어 가며 각각에 위치에 물체가 있을 때 반사되어 돌아오는 초음파 신호를 측정하였다. 그림 2, 3은 각각 물체가 초음파 센서로부터 90 cm 거리에 정면으로 위치하였을 때 초음파 센서에 받아들인 신호와 그 신호의 스펙트로그램의 예이다.

그림 2와 그림 3에서 3개의 큰 FM 신호를 확인할 수 있는데, 가장 먼저 수신된 신호는 초음파 발신부에서 수신부로 바로 수신된 신호이고 두 번째로 수신된 신호는 물체에

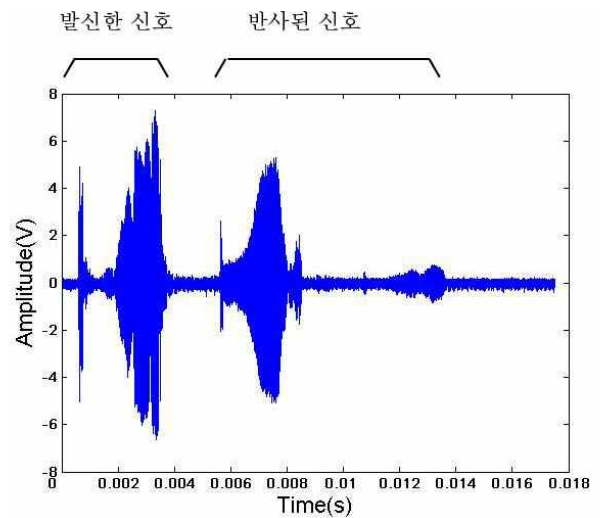


그림 2. 물체가 초음파 센서로부터 90 cm 거리에 정면으로 위치하였을 때 받아들인 신호.
Fig. 2. Received signals when an object is located 90 cm away from sensor.

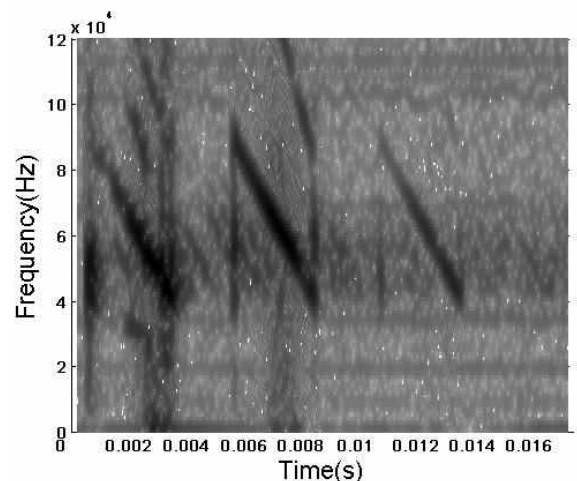


그림 3. 그림 2의 신호 스펙트로그램.
Fig. 3. Spectrogram of signals shown in Fig. 2.

반사되어 돌아온 신호이다. 마지막 세 번째로 보이는 약한 신호는 초음파가 물체에 반사된 후 바닥에 반사되어 돌아온 신호이다. 그림 3의 스펙트로그램에서 확인할 수 있듯이 각각의 신호의 주파수는 90 kHz에서 시작하여 40 kHz로 선형적으로 감소하는 신호임을 알 수 있다. 우리는 첫 번째 실험을 위하여 하나의 반사체가 위치한 거리와 각도를 바꾸어 가면서 반사체의 매 위치에서 반사되어 돌아오는 신호를 측정하였으며 두 번째 실험을 위하여 초음파 발신부 주변에 여러 개의 물체를 두고 초음파 신호를 수집하였다.

III. 실험 결과

1. 첫 번째 실험

반사된 신호의 주파수 특성을 확인하기 위하여 우리는 각각의 거리와 각도에 물체를 놓고 초음파를 발신하고 수신한 신호 중 물체에 반사되어 돌아온 신호를 시간적으로 분리하고 그 신호에 푸리에 변환을 하였다. 그림 4는 물체가 초음파 센서로부터 90 cm 거리에 정면에 위치하여 있을 때 물체로부터 반사된 신호의 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density)이다.

우리는 물체가 위치한 각도와 주파수에 따라 반사되는 초음파 신호의 주파수 특성이 어떻게 변화되는지 알아보기 위하여 10 kHz 단위로 주파수를 나누어 각각의 주파수에 포함된 에너지 값의 비율이 어떻게 달라지는지 확인해 보았다.

표에서 확인할 수 있듯이 50 cm ~ 100 cm의 모든 경우에 대해서 정면을 기준으로 물체가 위치한 각이 커질수록 모든 주파수대의 신호의 에너지가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 주파수에 따라서 에너지가 감소되는 비율이 다른 것을 확인할 수 있다. 각각의 주파수 범위에서 물체가 위치한 각도가 증가함에 따라 감소되는 에너지 비율을 확인하기 위하여 우리는 각각의 주파수 대역별로 에너지 값을 정규화 한 후 그 결과를 비교하여 보았다.

그림 5는 물체와의 거리가 50 cm 일 때, 70 cm 일 때, 90 cm 일 때의 세 가지 경우에 대해서 정면을 기준으로 물체가 위치한 각도가 커짐에 따라 에너지가 감소하는 비율을

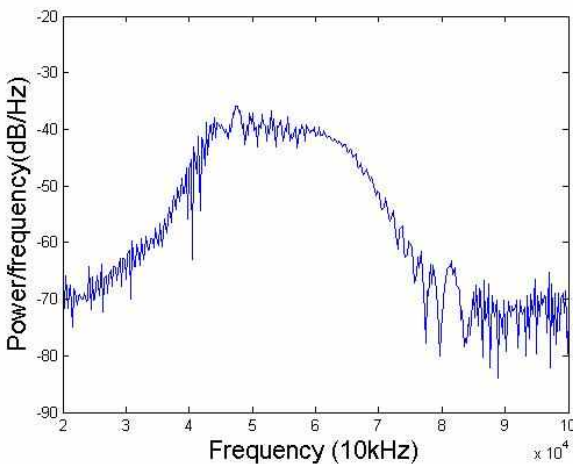


그림 4. 물체에 반사된 신호의 푸리에 파워 스펙트럼 밀도.
Fig. 4. Power spectral density of reflected ultrasonic signals.

살펴본 결과이다. 물체의 거리에 따라 약간의 차이는 있으나 물체에 반사되어 돌아온 신호의 40 kHz ~ 60 kHz의 주파수에 해당하는 에너지는 60 kHz 이상의 주파수에 해당하는 에너지보다 더 빠르게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉 반사되어 돌아온 신호의 40 kHz ~ 60 kHz의 주파수에 해당하는 에너지와 60 kHz 이상의 주파수에 해당하는 에너지의 비율을 식 (1)과 같이 α 로 정의하면 α 값은 물체가 위치한 각도에 따라 변하게 될 것이다.

식 (1)에서 확인할 수 있듯이 α 값을 계산할 때에 60 kHz ~ 70 kHz 사이의 주파수의 성분은 사용되지 않았다. 여러 가지 방법으로 α 값을 계산해 본 결과 실험에 사용한 40 kHz ~ 90 kHz의 FM 신호의 중간 대역인 60 kHz ~ 70 kHz의 주파수 성분을 사용하지 않았을 때 각도에 따른 α 값의 변화가 더 명확해짐을 확인하였다.

$$\alpha = \frac{40 \sim 60 \text{ kHz 주파수에 해당하는 에너지}}{70 \text{ kHz 이상의 주파수에 해당하는 에너지}} \quad (1)$$

표 2는 물체가 위치한 거리와 각도에 따른 α 값을 계산한 결과이다. 표 2에서 확인할 수 있듯이 모든 거리에 대해서 α 값은 0°일 때 가장 작음을 알 수 있다.

위의 실험은 모두 같은 크기의 직육면체를 (60 mm × 60 mm × 195 mm) 이용하고 직육면체의 면이 초음파 센서를 정면으로 바라보도록 하고 실험한 결과이다. 하지만 물체의

표 1. 물체가 위치한 거리와 각도에 따른 반사된 신호의 에너지 분포.

Table 1. Energy distribution according to the bearing angle and distance of an object.

50 cm	0°	10°	20°	30°	40°
40~60 kHz	8.6E-03	7.8E-03	5.3E-03	2.5E-03	4.2E-04
60~70 kHz	2.0E-03	4.8E-04	9.1E-05	4.6E-05	9.3E-06
70~90 kHz	7.5E-05	3.7E-05	9.4E-07	1.9E-06	7.8E-07
60 cm	0°	10°	20°	30°	40°
40~60 kHz	7.5E-03	4.1E-03	2.4E-03	1.0E-03	3.3E-04
60~70 kHz	3.0E-03	3.7E-04	5.0E-05	8.7E-05	2.1E-05
70~90 kHz	6.5E-04	8.5E-06	1.8E-06	1.7E-06	2.2E-07
70 cm	0°	10°	20°	30°	40°
40~60 kHz	6.4E-03	2.7E-03	1.5E-03	4.9E-04	1.2E-04
60~70 kHz	2.4E-03	2.4E-04	2.4E-05	4.4E-05	1.0E-05
70~90 kHz	1.5E-04	1.0E-05	1.4E-06	1.8E-06	8.6E-08
80 cm	0°	10°	20°	30°	40°
40~60 kHz	4.6E-03	3.2E-03	4.5E-04	3.5E-04	1.5E-04
60~70 kHz	2.1E-03	1.4E-04	1.8E-05	2.8E-05	2.1E-05
70~90 kHz	1.7E-04	9.3E-06	8.0E-07	6.4E-07	1.6E-07
90 cm	0°	10°	20°	30°	40°
40~60 kHz	3.1E-03	1.2E-03	2.3E-04	2.0E-04	9.1E-05
60~70 kHz	2.7E-03	7.5E-05	6.9E-06	2.2E-05	1.3E-05
70~90 kHz	4.1E-04	5.8E-06	7.8E-07	8.8E-07	8.9E-08
100 cm	0°	10°	20°	30°	40°
40~60 kHz	2.3E-03	3.9E-04	3.7E-04	1.6E-04	0
60~70 kHz	2.3E-03	2.5E-05	2.4E-05	1.1E-05	0
70~90 kHz	3.9E-04	3.4E-06	3.3E-06	2.2E-07	0

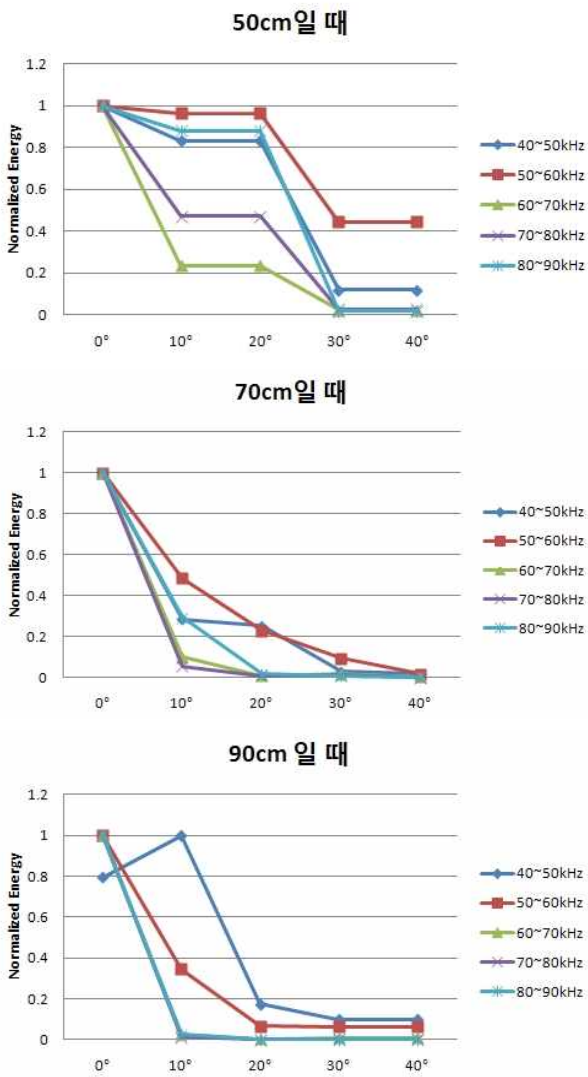


그림 5. 물체가 위치한 각도의 증가에 따른 반사된 초음파 신호의 에너지 감소 비율.

Fig. 5. Energy decreasing ratio of reflected ultrasonic signal according to angle increase.

표 2. 물체가 위치한 거리와 각도에 따른 α 값의 변화

Table 2. Change of α value according to distance and bearing angle of a target object.

	0°	10°	20°	30°	40°
50 cm	115	207	5651	1302	530
60 cm	12	477	1359	597	1485
70 cm	42	262	1059	275	1388
80 cm	27	345	557	551	914
90 cm	7	206	290	228	1022
100 cm	6	112	112	750	

각도가 바뀌어 물체의 면이 초음파 센서의 방향과 다른 방향을 향하게 될 경우 높은 비율의 초음파 에너지가 초음파 센서와 다른 방향으로 반사되게 된다. 따라서 초음파 센서에 수신되는 초음파 에너지의 양 또한 줄어들게 된다.

그림 6은 초음파 센서의 정면, 그리고 초음파 센서로부

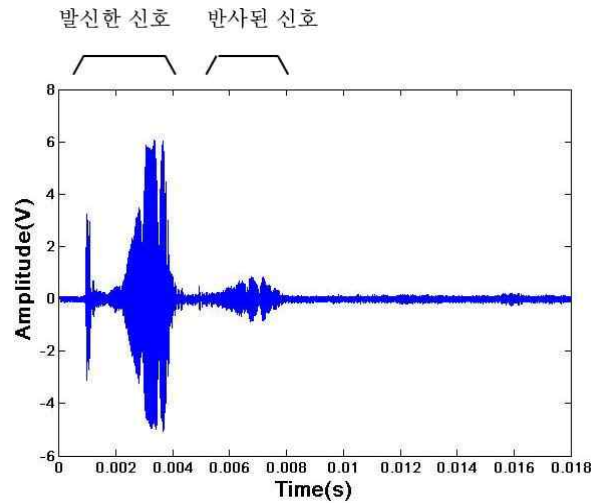


그림 6. 물체가 초음파 센서로부터 70 cm거리의 정면에 비스듬하게 위치하였을 때 받아진 신호.

Fig. 6. Received signals when an object located at 70cm with a bearing angle of 0° (The object side has a oblique angle to the sensor direction).

터 70 cm의 거리에 직육면체 형태의 물체를 다른 각도로 두고 초음파 신호를 발신하고 수신하였을 때 수신된 신호이다. 그림 2와 비교하였을 때 같은 물체를 사용하였음에도 물체의 면의 방향에 따라 수신되는 초음파 신호의 세기에 큰 차이가 생기는 것을 알 수 있다. 물체의 방향 외에도 초음파의 크기나 모양에 따라서 반사되는 초음파의 세기에 변화가 생길 수 있다.

우리는 초음파 센서로부터 70 cm의 거리와 0°, 20° 각도에 대해서 앞에서 사용한 것과 같은 크기의 물체를 이용하여 물체의 방향을 바꾸어 가면서 초음파를 발신 수신하여 앞서와 같은 방법으로 α 값을 구하였다. 또한 기존의 물체보다 작은 크기의 물체(30 mm × 55 mm × 75 mm 크기의 직육면체)에 대해서도 α 값을 구하여 보았다.

표 2에서 물체가 70 cm 0°의 각도에 있을 때 α 값은 42였으나 물체의 각도를 바꿀 경우 최대 133까지 값이 증가하였으며, 70 cm 20°에 있을 때 α 값은 1059였으나 물체의 각도를 바꿀 경우 457~3600 사이에서 값이 변화하였다. 작은 크기의 물체의 경우 70 cm거리, 0° 각도에서 α 값이 31~224 사이에서 값이 변화하였으며, 70 cm거리 20° 각도에서는 343~923 사이에서 값이 변화하였다. 이 실험으로부터 물체의 각도 외에 물체의 크기나 방향과 같은 반사체의 특성 또한 수신된 신호의 α 값에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

α 값이 물체의 특성에 따라서 변하지만 0°의 각도일 때와 20°의 각도일 때, α 의 중간값 또는 평균값을 비교할 경우 큰 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 α 값을 이용하여 물체가 위치한 정확한 각도를 결정할 수는 없으나 물체가 정면에 있는지 아닌지에 대해서 확률적으로 추정할 수 있을 것이다. 예를 들어 α 값이 50 이하의 낮은 값이 나왔다면 매우 높은 확률로 물체가 정면에 있을 것으로 생각할 수 있으며 α 값이 1000 이상의 큰 값이 나왔을 경우 물체가 정면에 없을 확률이 클 것으로 생각할 수 있다.

2. 두 번째 실험

반사체의 특성 외에 α 의 변화에 영향을 줄 수 있는 요인으로 노이즈를 생각해 볼 수 있다. 앞의 실험에서는 반사되어 돌아온 신호에서 각각의 주파수 대역에 포함된 에너지를 구하기 위하여 푸리에 변환을 사용하였다. 하지만 물체가 비스듬히 놓여 있거나 물체의 크기가 작은 경우 그림 6에서처럼 수신되는 초음파 신호의 세기가 약하기 때문에 푸리에 변환을 이용할 경우 노이즈에 영향을 크게 받을 수 있을 것이다.

상호상관 방법은 발신한 신호를 알고 있을 때 SNR이 최대가 되도록 하는 방법이다. 따라서 상호상관 방법을 이용

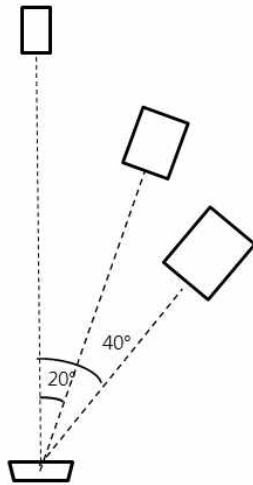


그림 7. 실험 환경(센서로부터 각각 90, 70, 50 cm 거리와 0°, 20°, 40° 각도에 위치, 40° 각도에 가장 큰 물체를 두었고 0°에 가장 작은 물체를 두었다).

Fig. 7. Experimental environment (located 90, 70, 50cm away from sensor with bearing angle 0°, 20°, 40°. The largest object located at a bearing angle of 40° and the smallest object located at a bearing angle of 0°).

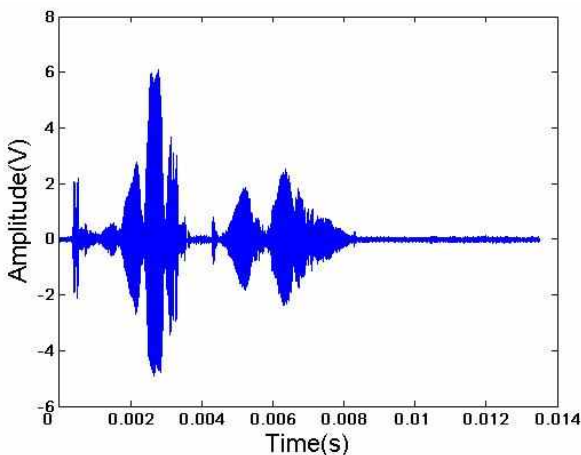


그림 8. 세 개의 반사체에서 반사된 신호(센서로부터 각각 90, 70, 50 cm 거리와 0°, 20°, 40° 각도에 위치).

Fig. 8. Reflected signal from three objects (located at a distance of 90, 70, 50 cm and with bearing angles 0°, 20°, 40°).

하여 수신된 신호의 높은 주파수 성분의 에너지와 낮은 주파수 성분 에너지의 비율을 구할 경우 노이즈의 영향을 줄일 수 있을 것이다.

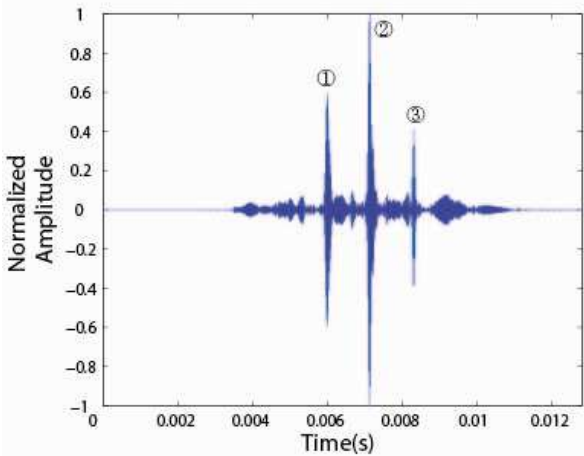
그림 8은 그림 7과 같이 초음파 센서로부터 90, 70, 50 cm 거리에 그리고 각각 0°, 20°, 40° 각도에 반사체가 있는 조건에서 수신된 신호이다. 이 신호 역시 그림 2의 신호와 마찬가지로 약 4 ms 까지의 신호가 초음파 발신부에서 발신된 신호가 수신부로 바로 수신된 신호이고 그 뒤의 신호가 반사되어 돌아온 신호이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 세 개의 물체에서 반사되어 돌아온 신호들이 서로 겹쳐있는 것을 알 수 있다. 일반적으로 반사체의 거리가 큰 차이가 없을 때에는 물체가 정면에 있을수록 반사되어 돌아오는 초음파 신호의 진폭이 크지만 이번 실험에는 크기가 각각 다른 세 개의 반사체를 사용하였기 때문에 진폭에 큰 차이가 없었다(40°에 가장 큰 물체를 두었고 0°에 가장 작은 물체를 두었다).

반사되어 돌아온 신호를 별다른 처리 없이 시간-진폭 그래프로 볼 경우 초음파 신호가 각각의 물체에서 반사되어 돌아온 정확한 시간을 파악하기 힘들기 때문에 발신한 신호와 반사되어 돌아온 신호를 상호상관 하는 방법을 사용하여 각각의 물체에서 반사되어 돌아온 신호를 확인할 수 있다[13]. 그림 9(a)는 초음파 센서에서 발신되는 신호와 그림 8의 그래프에서 4 ms 이후 신호에 해당하는 물체에 반사된 신호를 상호 상관한 결과이다.

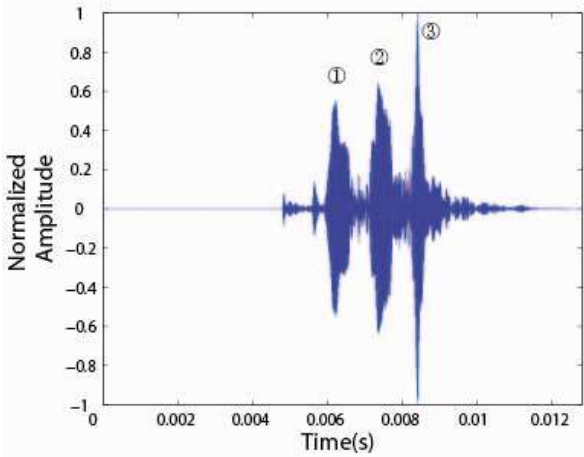
그림 9(a)에서 확인할 수 있듯이 상호상관한 결과 세 개의 피크 신호가 나타나게 된다. 1번, 2번, 3번 신호는 순서대로 각각 50 cm, 70 cm, 90 cm에 위치한 물체에 의해서 나타나는 신호이고 이것은 반사체 3개를 위치시킨 실제 실험 환경과 일치하는 결과이다. 이 결과로부터 3개의 물체에서 반사된 신호가 수신된 시간은 확인할 수 있으나 어떤 물체가 초음파 센서의 정면에 있고 어떤 물체가 측면에 있는지는 판단하는 것은 불가능할 것이다. 하지만 첫 번째 실험에서 확인하였듯이 정면에 위치한 물체에서 반사된 초음파 신호가 측면에 위치한 물체에서 반사된 신호보다 고주파수 성분이 많기 때문에 이 성질을 이용하기 위하여 이번에는 발신된 초음파의 신호 중 고주파수 성분인 65 kHz~90 kHz의 주파수를 갖는 신호의 일부와 그림 6의 그래프에서 4ms 이후 신호에 해당하는 신호를 상호상관 하였다.

그림 9(b)에서 확인할 수 있듯이 1번과 2번과 같은 측면에 위치한 물체에 의해 발생한 피크 신호는 상대적인 진폭이 줄어들거나 비슷하지만, 정면에 위치한 물체에 의해 발생한 3번과 같은 피크는 상대적인 진폭이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

즉 그림 9(a)는 발신한 신호와 수신한 신호를 상호상관한 결과이므로 세 개의 물체에 반사되어 돌아온 신호의 전체 에너지에 상대적인 양을 보여주는 것이고 그림 9(b)는 발신한 신호의 65 kHz~90 kHz에 해당하는 신호와 전체 스펙트럼에 걸쳐 수신한 신호를 상호상관 한 결과이므로 반사되어 돌아온 신호의 65 kHz~90 kHz에 해당하는 에너지에 상대적인 양을 보여주는 결과이다. 따라서 두 결과를 비교할 경우 어떠한 신호가 상대적으로 65 kHz~90 kHz에 해



(a)



(b)

그림 9. (a) 발신한 신호와 수신된 신호를 상호상관한 결과. (b) 발신한 신호의 고주파수 부분 (65 kHz ~ 90 kHz)과 수신된 신호를 상관한 결과.

Fig. 9. (a) Result of cross-correlation between emitted signal and received signal. (b) Result of cross-correlation between high frequency part (65 kHz ~ 90 kHz) of emitted signal and received signal.

당하는 에너지가 많이 감소하였는지 감소하지 않았는지를 확인할 수 있으며 이를 이용하여 어떤 물체가 더 정면과 가까운 각도에 있는지 아니면 측면에 있는지를 확인할 수 있다.

IV. 토의

그림 10은 박쥐가 나무와 같은 복잡한 반사체가 있는 환경에서 먹이를 탐지하는 전략을 설명하는 그림이다. 그림 10(a)는 큰 갈색 박쥐가 발신하는 초음파 신호를 보여주는데 큰 갈색 박쥐는 FM1과 FM2로 이루어진 하모닉 초음파 신호를 발신한다. 실험 결과에서 확인하였듯이 반사체의 위치가 초음파 발신부의 정면에서 벗어날수록 반사체에 반사되어 돌아온 초음파 신호의 고주파수 성분이 크게 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 그림 10(b)에서처럼 박쥐의 정면에 먹이가 있고 측면에 복잡한 반사체가 있을 경우 정면

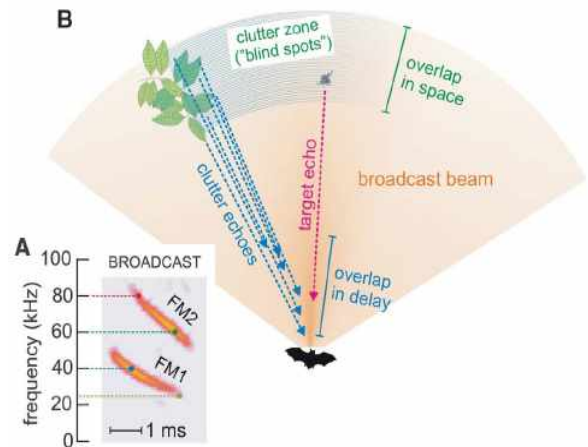


그림 10. 큰 갈색 박쥐의 먹이 탐지 전략 (Mary E. Bates at al.의 그림에서 발췌됨[5]).

Fig. 10. Prey detection strategy of big brown bats (Reprinted from M. E. Bates at al.[5]).

에서 반사되어 돌아온 신호와 측면에서 반사된 신호가 겹치게 되어 어떤 신호가 먹이에서 반사되어 돌아온 신호인지 알 수 없게 된다. 이러한 상황에서 큰 갈색 박쥐의 경우 FM1과 FM2의 비율을 통하여 정면의 먹이에서 반사된 신호와 측면의 나무에서 반사되어 돌아온 신호를 구분하는 것으로 알려져 있다. 큰갈색박쥐의 초음파 먹이 탐색 방법에 대한 생체모방 응용으로 로봇시스템에서 주변 물체의 상대적 위치를 판별하는 방법을 생각할 수 있다.

본 논문에서 우리는 박쥐와 같은 두 단계의 주파수 분포를 갖는 하모닉 신호를 사용하는 대신 하나의 FM 신호를 사용하여 반사되어 돌아온 신호의 낮은 주파수대의 에너지와 높은 주파수대의 에너지의 비율을 구하여 보았다. 표 2에서 확인할 수 있듯이 α 값이 작은 값을 가질 경우 높은 확률로 물체가 정면에 있는 것으로 판단할 수 있으며 α 값이 큰 값을 가질 경우 높은 확률로 측면에 물체가 위치할 것으로 판단할 수 있다.

물체가 위치한 각도 외에 α 에 영향을 주는 다른 요인이 있으나 실험을 통하여 물체의 크기나 물체의 방향과 같은 요인이 α 값에 미치는 영향보다는 물체의 각도가 α 값에 미치는 영향이 큰 것으로 판단하였다. 우리는 40 kHz ~ 90 kHz FM 신호를 사용하였으나 FM 신호의 대역폭을 증가시킬수록 반사체의 특징에 의해 특정 주파수의 에너지가 영향을 받음으로 발생하는 오차를 줄일 수 있을 것이다.

일반적으로 초음파 신호의 주파수가 높아질수록 진폭의 감쇠속도가 빨라지는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 50 cm ~ 100 cm의 비교적 짧은 범위 내에서 대해서 실험을 진행하였기 때문에 주파수에 따른 초음파의 감쇠율을 생각하지 않았으나 1m 이상의 넓은 범위에 대해서 응용하기 위해서는 주파수에 따른 감쇠율이 α 값에 미치는 영향에 대한 실험을 통해 감쇠율 역시 고려해야 할 것이다. 또한 상호상관을 통한 수신된 신호의 비율 측정 방법을 이용하여 먼 거리의 물체를 측정할 때에 나타나는 초음파 신호의 세기 감소에 따른 노이즈 문제를 해결할 수 있을 것이다.

마지막으로 박쥐의 경우 초음파를 수신하는 귀나 초음파가 발신되는 코의 모양이 특이한 형태를 가지고 있으며 이러한 귀나 코의 형태는 수신한 초음파 신호의 주파수 비율에 영향을 줄 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 반사된 신호의 주파수에 따른 비율을 통하여 물체의 위치를 추정하는 데에 있어서 박쥐의 귀, 코의 모양이 미치는 영향에 대해서도 연구할 필요가 있을 것이다.

V. 결론

본 논문에서 우리는 박쥐의 먹이 탐지 전략을 모방하여 초음파 탐지 기술에 적용시켜 보았다. 광대역 FM 초음파를 발신한 후 물체에 반사되어 돌아오는 신호의 고주파수 성분과 저주파수 성분의 비율의 측정을 통해 물체가 초음파 발신부로부터 정면에 있는지 측면에 있는지를 판단할 수 있음을 확인하였다. 고주파수 성분과 저주파수 성분의 비율을 알고 있다면 하나의 초음파 센서로도 물체가 위치한 각을 대략적으로 추정할 수 있다. 또한 우리는 각각의 물체에서 발사되어 돌아온 신호가 겹치는 상황에서도 반사되어 돌아온 신호의 주파수 성분 비율을 사용하여 물체의 위치를 추정하는 것이 가능함을 보였다.

참고문헌

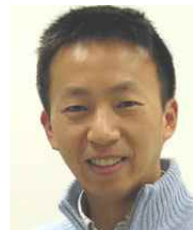
- [1] S. Kim and H. Kim, "Optimal design of overlapped ultrasonic sensor ring for high resolution obstacle detection," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 2, pp. 79-87, 2011.
- [2] S. Park and D. E. Kim, "Distance estimation using discretized frequency synthesis of ultrasound signals," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 5, pp. 499-504, 2011.
- [3] H. M. Han, J. T. Park, and J. B. Song, "Grid map building based on reliability model of sonar data," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 12, pp. 1219-1226, 2011.
- [4] C. Tudge, "The variety of life," Oxford Univ. Press, 2000.
- [5] R. Dawkins and L. Pyle, *The Blind Watchmaker*, Penguin Harmondsworth, 1991.
- [6] C. Moss and A. Surlykke, "Probing the natural scene by echolocation in bats," *Frontiers in behavioral neuroscience*, Frontiers Research Foundation, vol. 4, no. 33, 2010.
- [7] C. Moss and A. Surlykke, "Auditory scene analysis by echolocation in bats," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 110, no. 4, pp. 2207-2226, 2001.

- [8] M. Bates, J. Simmons, and T. Zorikov, "Bats use echo harmonic structure to distinguish their targets from background clutter," *Science, American Association for the Advancement of Science*, vol. 333, no. 6042, pp. 627-630, 2011.
- [9] J. Simmons and R. Stein, "Acoustic imaging in bat sonar: echolocation signals and the evolution of echolocation," *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, vol. 135, no. 1, pp. 61-84, 1980.
- [10] P. Saillant, J. Simmons, F. Bouffard, D. Lee, and S. Dear, "Biosonar signals impinging on the target during interception by big brown bats, *Eptesicus fuscus*," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 121, no. 5, pp. 3001-3010, 2007.
- [11] Y. Yovel, P. Stilz, M. Franz, A. Boonman, and H. Schnitzler, "What a plant sounds like: the statistics of vegetation echoes as received by echolocating bats," *PLoS Computational Biology*, vol. 5, no. 7, 2009b.
- [12] S. Stamper, M. Bates, D. Benedicto, and J. Simmons, "Role of broadcast harmonics in echo delay perception by big brown bats," *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology, Springer*, vol. 195, pp. 79-89, 2009.
- [13] S. Haykin and B. Van Veen, *Signals and Systems (international edition)*, 2003.



박 상 옥

2010년 연세대학교 전기전자공학부 학사 졸업. 2012년 동 대학원 석사 졸업. 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. 2007년~현재 연세대학교 전기전자공학부 조교수. 관심분야는 바이오로보틱스, 인공지능, 인공생명, 신경과학, 인지과학.