

생체모방에 기반한 초음파
물체 위치 탐지 방법

연세대학교 대학원

전기전자공학과

박 상 욱

생체모방에 기반한 초음파
물체 위치 탐지 방법

연세대학교 대학원

전기전자공학과

박 상 욱

생체모방에 기반한 초음파 물체 위치 탐지 방법

지도교수 김 대 은

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

2011년 12월 일

연세대학교 대학원

전기전자공학과

박 상 욱

감사의 글

연세대학교 바이오사이버네틱스 연구실에서의 생활을 마무리하는 시점에서 2년 전의 제 모습을 떠올려보면 대학원생으로서의 지난 2년간의 생활을 통화여 학문적 공부뿐만 아니라 자아 발전을 위한 공부도 할 수 있었으며 저의 발전에 많은 도움이 되었다고 생각합니다. 제 스스로 이러한 발전이 있었기에 부족하나마 이 학위 논문을 완성할 수 있었을 것이며 무엇보다도 2년간 많은 관심과 격려로 대학원 생활을 마칠 수 있도록 지도해주신 김대은 교수님께 감사드립니다. 아울러 논문이 완성되는 과정에서 관심을 가지고 지도해주신 강홍구 교수님과 김은태 교수님께 감사의 인사를 드립니다.

연구실에서 1년 이상 함께 생활을 하면서 도움을 준 미영누나, 승은이, 재홍이, 영서, 은석이와 짧지만 졸업논문을 완성하는 과정에서 응원을 해준 세준이, 현구, 창민이에게도 감사의 말을 전합니다. 끝으로 대학원 생활동안 응원해준 부모님과 동생에게 감사드리며 힘들 때 격려해준 연구실 밖의 친구들, 선배, 후배들에게도 감사드립니다.

2011년 12월
박상욱 드림

차 례

그림 차례	iii
표 차례	vi
국문요약	v
제1장 도입	1
제 2장 연구 배경	7
2.1. 박쥐가 발신하는 초음파 펄스	8
2.2. 도플러 효과	11
2.3. 박쥐의 초음파 발신 패턴	13
2.4. 펄스의 주파수에 따른 빔 패턴	16
2.5. 상호 상관 방법	18
2.6. 요약	18
제 3장 고정된 초음파 센서	21
3.1. 초음파 센서를 이용한 환경 정보 획득 방법	21
3.2. 시뮬레이션 방법	22
3.3. 상호상관 방법을 이용한 신호처리	24
3.4. 하나의 초음파 센서를 이용한 물체의 위치 추정	25
3.5. 초음파 배열을 이용한 물체의 위치 추정	27
3.6. 요약	33

제 4장 움직이는 초음파 센서	35
4.1. 움직이는 초음파 센서를 이용한 물체의 위치추정	35
4.2. 도플러 효과를 이용한 물체의 위치추정	36
4.3. 격자 기반 방식의 초음파 지도	41
4.4. 요약	48
제 5장 빔 패턴을 이용한 위치 추정	49
5.1. 광대역 초음파 발신 회로	49
5.2. 물체가 위치한 각도에 따른 echo의 주파수 특성	52
5.3. 상호상관 방법을 이용한 주파수 비율 측정	53
5.4. 요약	57
제 6장 결론	59
6.1. Future work	60
6.1.1. 박쥐의 발성 행동	60
6.1.2. 빔 형성을 이용한 각도 추정	61
6.1.3. 시뮬레이션 방법	61
6.1.4. 광대역 초음파 센서	62
6.1.5. 로봇 응용	62
참고 문헌	65

그림 차례

2.1. CF 초음파와 FM 초음파	9
2.2. 박쥐 중에 따른 다양한 초음파 펄스의 형태 (Simmons and Stein, 1980) . . .	10
2.3. FM 초음파 펄스와 click 형태의 초음파 펄스의 비교 (Yovel et al., 2011) . . .	11
2.4. 박쥐의 도플러 보상 행동 (Hiryu et al., 2008)	12
2.5. 박쥐의 3가지 상태 (Moss and Surlykke, 2010)	13
2.6. 박쥐와 먹이의 거리에 따른 펄스 간격의 변화 (Weinbeer and Kalko, 2007) . .	14
2.7. 그룹 형태로 묶어서 발신되는 초음파 펄스 (Kingston et al., 1999)	15
2.8. 모호성 문제 (Melcón et al., 2010)	16
2.9. 큰 갈색 발귀쥐 먹이 탐지 전략 (Bates et al., 2011)	17
2.10. 큰 갈색 발귀쥐 먹이 탐지 전략 (Bates et al., 2011)	17
3.1. 시뮬레이션으로 그린 초음파 펄스 ((a)주파수가 100kHz인 초음파. (b) FM 초음파, $p=0.5$ 일 때. (c) FM 초음파, $p=1$ 일 때. (d) FM 초음파, $p=2$ 일 때.)	23
3.2. 상호상관 방법	25
3.3. CF 신호와 FM 신호의 자기상관 결과 ((a)CF 신호의 자기상관 결과 (b)FM신호의 자기상관 결과)	25
3.4. 하나의 초음파 센서를 이용한 상황 ((a)시뮬레이션 환경 (b)발신한 FM 초음파 펄스(c)수신된 echo (d)발신한 초음파 펄스와 echo를 상호상관한 결과)	26
3.5. 궤적을 통한 물체의 위치추정 ((a)수신부와 발신부가 같은 위치에 있을 경우 (b)수신부와 발신부가 다른 위치에 있을 경우)	27
3.6. 초음파 센서 배열을 이용한 물체의 위치 추정 (초음파 센서 사이의 간격이 50cm 일 때)	28
3.7. 7개의 초음파 센서에서 받은 echo를 이용하여 초음파 지도를 그리는 과정 . .	28
3.8. 7개의 초음파 센서 배열을 이용하여 그린 초음파 지도 ((a)초음파 지도를	

2차원으로 본 결과 (b) 초음파 지도를 3차원으로 본 결과)	29
3.9. 각각의 센서에서 서로 다른 주파수 범위의 FM 초음파를 발신하여 그린 초음파 지도 ((a)초음파 지도를 2차원으로 본 결과 (b)초음파 지도를 3차원으로 본 결과)	30
3.10. 초음파 센서에서 발신된 신호와 수신된 신호를 상호상관한 결과 ((a)한번에 하나의 센서에서 초음파를 발신하였을 때 (b)각각 다른 주파수의 FM 초음파를 모든 센서에서 동시에 발신하였을 때)	31
3.11. 센서 배열의 형태 ((a)초음파 센서를 10cm간격으로 일렬로 배열. (b)초음파 센서를 50cm간격의 정육면체로 배열 (c)초음파 센서를 10cm간격으로 일렬로 배열하였을 때의 초음파 지도 (d)초음파 센서를 50cm간격의 정육면체로 배열하였을 때의 초음파 지도)	32
4.1. 초음파 센서가 이동하는 상황에서의 위치 추정 ((a)초음파 센서가 이동하는 상황(b) 신호를 발신 수신한 각각의 위치에서 원 궤적을 통한 위치 추정)	36
4.2. CF-FM 초음파	37
4.3. 로봇의 위치 추정에 필요한 값들 (Park and Kim, 2011b)	37
4.4. CM-FM 초음파를 푸리에 변환한 결과	38
4.5. 센서의 빔의 방향에 따른 물체의 위치 추정 ((a)초음파 센서의 빔이 속도의 방향과 같을 때 (b)초음파 빔이 속도의 방향과 다를 때)	39
4.6. 펄스 그룹 발신을 통한 도플러 효과 측정	41
4.7. 움직이는 센서를 이용한 물체 위치 추정 ((a) 7번의 초음파 발신 수신 (b) 13번의 초음파 발신 수신)	41
4.8. 센서가 움직이는 조건 ((a) 초음파를 7번 발신하였을 때 2차원 지도(b) 초음파를 7번 발신하였을 때 3차원 지도 (c) 초음파를 13번 발신하였을 때 2차원 지도 (d) 초음파를 13번 발신하였을 때 3차원 지도)	42
4.9. 도플러 효과에 따른 상호상관 결과의 왜곡 ((a)도플러 효과를 고려한 상호상관 (b)도플러 효과가 0일 때 상호상관 결과 (c)센서가 5m/s로 이동할 때 상호상관 결과)	43
4.10. 모든 셀에 대해서 인공적인 도플러 효과가 적용된 펄스와 echo를 상호상관 하였을 때 ((a)발신한 펄스에 도플러 효과를 적용하여 상호상관하는 방법 (b)2차원으로 본 결과 (c)3차원으로 본 결과)	44
4.11. 그림 3.8. 지도를 정면에서 바라본 결과	45

4.12. 물체에 반사되는 echo가 발신하는 신호와 같아지도록 발신하는 신호에 도플러 보상을 하는 방법	47
4.13. y+방향으로 초음파 센서가 이동할 때 ((a)시뮬레이션 환경(b)초음파 지도) . .	47
5.1. 일반적인 피에조 트랜스듀서	50
5.2. 피에조 센서의 주파수에 따른 민감도와 음압 (400st/r100 데이터시트 참조) . .	50
5.3. 정전형 트랜스듀서 ((a)정전형 트랜스듀서 (b)정전형 트랜스듀서의 주파수에 따른 민감도와 음압 (SensComp, Inc. 데이터시트 참조))	51
5.4. 초음파 발신, 수신회로 ((a)초음파 발신회로 (b)초음파 수신회로)	51
5.5. 초음파 발신회로 구성도	51
5.6. 초음파 수신회로 구성도	52
5.7. 물체에 반사된 신호의 파워 스펙트럴 밀도	53
5.8. 물체가 위치한 각도의 증가에 따른 반사된 초음파 신호의 에너지 감소 비율 .	55
5.9. 실제 환경에서의 실험 ((a)실험 환경 (센서로부터 각각 90, 70, 50cm 거리와 0°, 20°, 40° 각도에 위치, 40° 각도에 가장 큰 물체를 두었고 0°에 가장 작은 물체를 두었다)(b)세 개의 반사체에서 반사된 신호)	56
5.10. 상호상관 결과 ((a)발신한 신호와 수신된 신호를 상호상관한 결과(b)발신한 신호의 고주파수 부분(65kHz~90kHz)과 수신된 신호를 상호상관한 결과) . . .	57

표 차례

4.1. 초음파 지도를 그리는 방법 비교	46
5.1. 물체가 위치한 거리와 각도에 따른 반사된 신호의 에너지 분포	54
5.2. 물체가 위치한 거리와 각도에 따른 α 값의 변화	55

국 문 요 약

생체 모방에 기반한 초음파 물체 위치 탐지 방법

박쥐는 초음파를 이용하여 환경을 지각하는 것으로 널리 알려진 날 수 있는 포유류이다. 박쥐가 빠른 속도로 비행을 하면서 장애물을 피하고 나방과 작은 곤충을 사냥한다는 것을 보았을 때 박쥐는 뛰어난 초음파 시스템을 가지고 있다고 생각할 수 있다. 우리는 박쥐의 초음파 시스템에 대한 연구를 통해 기존의 공기 중에서의 초음파 센서를 이용한 연구와는 다른 방법이나 방향을 제시할 수 있을 것이라고 생각하였다. 박쥐의 초음파 시스템에 대한 연구를 진행하면서 박쥐가 물체를 탐지하기 위하여 취하는 행동에 대하여 조사하였고 이를 적용하여 공기 중에서 초음파 센서를 이용하여 물체를 탐지할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다.

지구상에 약 1200여 종의 박쥐 종이 있으며 이는 포유류 전체 종의 약 70%에 해당하는 만큼 박쥐는 생물학적으로도 중요한 위치에 있는 포유류이다. 박쥐에 대한 연구는 오래 전부터 진행되어 왔으며 박쥐의 초음파 시스템에 대한 연구가 본격적으로 시작된 것은 1940년대로 그 동안 박쥐의 초음파 시스템에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 박쥐의 초음파 시스템에 대하여 많은 부분이 정리되었지만 아직도 더 이해되어야 할 부분이 많으며 지금도 박쥐의 초음파 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 우리는 박쥐의 초음파 시스템에 대한 기존의 다양한 연구 자료들을 조사, 정리하였고 그 중에 박쥐의 흥미로운 발성 행동에 대한 연구를 접하게 되었다.

박쥐는 초음파 펄스를 발신하고 발신된 펄스가 주변의 물체에 반사되어 돌아오는

echo를 이용하여 물체를 탐지하는 능동적 센싱을 통해 주변 환경 정보를 파악한다. 물론 박쥐 역시 주변 환경에서 발생하는 음파를 감지하는 수동적 센싱도 하지만 박쥐의 정교한 물체 탐지 능력은 능동적 센싱에 의해 얻어지는 것이다. 우리의 연구는 박쥐가 보여주는 박쥐의 뛰어난 초음파 감지 능력에 대해서 기존의 박쥐 연구자들이 실험하고 토의한 자료들을 찾아서 정리하는 것으로 시작되었다. 우리는 특히 박쥐가 이동하면서 물체를 감지한다는 점에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다.

공기 중에서의 음파의 속도가 다른 매질이나 전자기파와 같은 파동에 비해 느리기 때문에 비행을 하는 박쥐에게 있어 도플러 효과는 박쥐의 초음파 시스템에 영향을 주는 중요한 요소 중에 하나임을 확인하였고 도플러 효과에 적극적으로 대응하여 공기 중에서 물체를 탐지하는 방법에 대하여 연구하였다. 도플러 효과에 의한 펄스의 길이나 주파수의 변화는 주변 환경 정보를 획득하는 데에 방해가 될 수 있는 요소가 될 수도 있는 반면에 적절히 이용할 경우 물체의 탐지에 이용할 수 있는 추가적인 정보를 획득할 수 있었다.

우리는 이 논문에서 박쥐의 행동에 대한 조사를 바탕으로 시뮬레이션을 진행하면서 박쥐의 초음파 발성 행동이 가지는 이점에 대하여 생각해 보았다. 시뮬레이션이 실제 상황과 벗어나는 것을 최소화하기 위하여 직접 초음파 발신부를 구성하여 간단한 실험을 진행하였다. 또한 우리는 초음파 센서가 이동하는 상황을 생각하고 초음파 센서가 이동할 때 적용할 수 있는 물체 위치 탐지 방법에 대하여 연구하였다. 시뮬레이션을 통하여 초음파 센서의 이동으로 발생하는 도플러 효과가 물체의 위치 탐지에 미치는 영향을 확인하고 도플러 효과에 의한 영향을 줄이는 방법과 이를 이용한 물체 탐지 방법을 제안하였다.

핵심되는 말 : 생체모방, 박쥐, 초음파, 위치추정, 센싱

제 1 장

도 입

인간의 청각 시스템으로 들을 수 있는 음파의 주파수는 20Hz~20kHz 이며 가청 주파수 이상의 주파수를 갖는 음파를 초음파라고 한다. 초음파가 인간에게 들리지 않는다는 점 때문에 여러 동물, 곤충이 초음파를 사용하고 있음에도 불구하고 인간이 초음파에 대한 알게 된 것은 그리 오래 되지 않았다. 1910년대에 이르러서야 처음으로 초음파로 물체를 탐지하는 특허와 기기가 처음 발명되었고, 박쥐가 초음파를 이용하여 물체 탐지를 한다는 사실은 그것보다 더 늦은 1930 년대에 밝혀졌다. 하지만 사람이 초음파를 들을 수 없다는 점은 초음파를 환경을 탐지하는 센서로 이용함에 있어서는 오히려 소음이 발생하지 않는다는 장점으로 작용하였다. 초음파 센서는 기체, 액체, 고체에서 모두 이용되고 있으며 공기 중에서보다 소나, 의료용 초음파 기기, 비파괴 검사와 같이 액체나 고체에서 더 활발하게 사용되고 있는데 가장 큰 이유는 공기 중에서는 시각센서가 사용될 수 있는 반면에, 기체나 액체에서는 전자기파가 진행이 불가능하거나 빠르게 산란 또는 반사되어 근거리에 대한 정보만 얻을 수 있기 때문이다. 따라서 액체나 고체와 같은 매질에서는 초음파 센서가 주요 센서로 사용되지만 공기 중에서는 시각 센서를 보조하는 용도로 사용되는 경우가 많으며 그 결과 시각 센서에 대한 연구나 액체나 고체에서 초음파 센서를 이용하는 연구에 비해 공기 중에서 초음파 센서에 대한 연구는 상대적으로 덜 이루어져 있다.

하지만 시각 센서 또한 모든 정보를 파악하기에 적절하지 않을 수 있으며 따라서 다양한 센서가 활용되며 초음파 센서 또한 자주 사용되는 센서 중 하나이다. 현재 공기 중에서 초음파 센서를 통한 정보 획득은 대부분 가까운 거리에 장애물이 있는지 없는지를 판단하는 용도나 물체의 속도를 측정하는 등의 간단한 용도로 주로 사용되고 있다. 대부분의 시스템은 자원 사용에 제약이 있기 때문에 센서 사용에 제약이 있으며 따라서 주어진 센서로부터 얻어지는 정보들을 가능한 한 최대로 활용하는 것이 바람직할 것이다. 이러한 관점에서 우리는 초음파 센서에서 얻어지는 정보를 이용하여 공기 중에서의 물체 위치 탐지하는 방법에 대한 연구를 진행하였다.

만약 초음파를 이용하여 정보를 획득하는 정교한 시스템이 이미 존재한다면, 그러한 시스템에 대해서 조사하는 것은 당연한 일일 것이다. 초음파를 이용하는 대표적인 동물에는 박쥐와, 돌고래가 있다. 두 동물 모두 초음파를 사용하기는 하지만 우리는 공기 중에서의 초음파 센서 시스템에 대해 연구하고 있기 때문에 박쥐의 초음파 시스템을 조사하는 것이 연구 목적에 적합하다고

판단하였다. 포유류 전체 종의 20%가 박쥐 종이며 (Tudge, 2000), 북극과 남극이나 외딴 섬을 제외하고는 모든 지역에 서식하고 있다는 점은 박쥐가 주변 환경에 잘 적응하였다는 것을 말해준다. 박쥐는 초음파를 사용하는 것으로 알려져 있으나 모든 박쥐가 초음파를 사용하는 것은 아니다. 박쥐는 ‘megabat’ 과 ‘microbat’ 이라고 하는 두 개의 아목 (亞目, suborder) 으로 나뉘는데 이 중 ‘megabat’ 아목에 속해있는 종은 대부분 초음파를 사용하지 않으며, ‘microbat’ 아목에 속해있는 종들이 초음파를 사용하는 것으로 알려져 있다. 초음파를 이용하는 박쥐는 초음파로 먹이 사냥, 장애물 회피, 네비게이션, 커뮤니케이션 등의 생활에 필요한 정보를 획득하는 하는 포유류로 알려져 있다. 대부분의 박쥐가 곤충을 먹이로 삼는데, 점과 숲이나 정글과 같이 복잡한 환경에서 초음파를 이용하여 먹이를 사냥한다는 점은 박쥐가 뛰어난 초음파 탐지 능력을 가지고 있음을 알 수 있다. 박쥐의 초음파 능력에 대한 여러 관찰 실험 연구들을 참고하여 생각하였을 때, 현재 공기 중에서 사용되는 초음파 기술보다 박쥐의 초음파 시스템이 앞서 있다고 판단하였다. 따라서 ‘생체모방 (biomimetic, bio-inspired)’ 관점에서 박쥐의 초음파 시스템에 대하여 조사하고 그 응용방안을 생각해 보는 것은 의미가 있는 연구가 될 것이라고 판단하였다.

박쥐가 초음파 펄스를 이용하여 주변 환경을 감지한다는 사실이 밝혀진 이후 (Griffin, 1958) 지금까지 박쥐의 초음파 시스템에 대한 다양한 연구가 이루어졌다. 초장기의 박쥐의 초음파 시스템에 대한 연구 중 많은 연구들이 여러 종의 박쥐가 발신하는 초음파 펄스를 녹음, 분석하는 데에 집중하였다. 박쥐의 초음파 시스템을 구분하는 방법에는 여러 가지 방법이 있지만 (Simmons and Stein, 1980) 그 중에서 널리 사용되는 기준 중 하나는 박쥐가 발신하는 초음파 펄스의 주파수가 시간에 따라 일정한가 (Constant Frequency) 또는 시간에 따라 변하는가 (Frequency modulated)이다. CF 초음파 펄스를 사용하는 박쥐의 경우 펄스의 발신 사이클이 긴 반면에 (high duty cycle) FM 초음파를 사용하는 박쥐는 초음파의 발신 사이클이 짧기 (low duty cycle) 때문에 (Schnitzler and Henson Jr, 1980) 박쥐의 초음파 시스템을 초음파 펄스를 발신하는 속도에 따라 HDC 시스템과 LDC 시스템으로도 구분할 수도 있다 (Fenton, 1999). 대부분의 CF 펄스를 사용하는 박쥐들의 청각 시스템에는 특정 주파수의 초음파에 특히 민감한 "acoustic fovea"가 존재하는 것으로 알려져 있다 (Schuller and Pollak, 1979; Rübsamen et al., 1988). 모기나 나방과 같이 날갯짓을 하는 곤충의 날개에 초음파가 반사될 경우 반사되는 echo의 진폭에 떨림 효과 (flutter) 가 발생하고 echo의 주파수는 도플러 효과에 의하여 변하게 되는데 CF 초음파를 사용하는 박쥐의 경우 먹이에 반사되어 돌아오는 초음파 echo에서 먹이의 날갯짓에 의한 펄스의 변화를 감지하여 먹이를 찾는다 (Emde and Schnitzler, 1986; Bell and Fenton, 1984; Roverud et al., 1991). 이러한 방식의 먹이 감지 방식은 주변에 먹이 외에 나무나 수풀과 같은 복잡한 반사체가 있더라도 먹이를 식별할 수 있도록 한다 (먹이 외의 반사체에 반사된 echo에서는 날갯짓에서 발생하는 것과 같은 변형이 발생하지 않기 때문).

반면에 FM 초음파의 경우 확실한 것은 아니지만 초음파 펄스의 특성상 CF 초음파 사용하는 박쥐보다 경우 날갯짓에 의한 떨림 효과를 감지하는 능력이 떨어지는 것으로 보이며 (Roverud et al., 1991) CF 박쥐와는 다른 방식으로 먹이를 찾는 것으로 생각되고 있다. CF, FM 펄스를 사용하는 박쥐 외에도 CF 성분과 FM 성분이 모두 있는 CF-FM 형태의 초음파를 사용하는 박쥐 종도

있는데 이 박쥐종의 경우 CF 초음파로는 날갯짓 감지를 통하여 먹이를 감지하고, FM 초음파로는 물체의 위치를 감지하는 것으로 알려져 있다. (Emde and Schnitzler, 1990; Tian and Schnitzler, 1997) FM 펄스의 경우 시간에 따라서 주파수가 변하기 때문에 CF펄스에 비해 다양한 형태의 펄스가 존재할 수 있고, 실제로 다양한 형태의 FM 펄스가 관찰되었다. 박쥐가 발신하는 초음파 펄스는 종마다 다르며 (Simmons and Stein, 1980; Neuweiler, 1984; Schnitzler et al., 2003) 연구자들 사이에서 이러한 차이는 서식하는 환경이나 먹이에 따라 박쥐의 초음파 시스템이 적응하면서 나타나는 차이일 것이라고 생각되고 있다. 또한 같은 종의 박쥐이더라도 상황에 따라서 (Kalko and Schnitzler, 1993; Surlykke and Moss, 2000), 박쥐가 군집으로 있는가 혼자 있는가에 따라 (Pearl and Fenton, 1996; Siemers and Kerth, 2006), 성별 나이와 같은 박쥐의 개별적인 의 조건에 따라 다르다는 것 (Masters et al., 1995; Obrist, 1995; Kazial et al., 2001; Yovel et al., 2009a) 이 관찰되었다. 최근에는 박쥐의 펄스에 대한 관찰에서 나아가, 예를 들어 박쥐가 어떠한 방법으로 먹이를 감지하는지 (Bates et al., 2011; Simon et al., 2011), 펄스의 형태가 물체 감지에 어떠한 영향을 미치는지 (Siemers and Schnitzler, 2004; Yovel et al., 2010) 등의 같은 연구가 이루어지고 있다.

박쥐의 초음파 시스템에 대한 다양한 기존의 연구들을 우리 나름의 관점으로 박쥐에 대한 기존의 연구들을 분류해 보았다. 첫 번째 그룹은 박쥐의 생태에 대한 연구로 어느 지역에 어떤 박쥐가 서식하는지, 사용하는 초음파 펄스의 특징은 무엇인지, 청각 시스템의 해부학적 구조는 어떻게 되는지 등과 같은 연구들이 여기에 속할 것이다. 두 번째 그룹은 박쥐의 초음파 발성 적응 행동 (adaptive vocal behavior) 에 대한 연구로 여러 실험 환경과 조건에서 박쥐가 어떻게 반응하고, 박쥐가 사용하는 초음파 탐지 전략에 어떠한 변화가 생기는가에 대한 연구이다. 세 번째 그룹은 박쥐의 초음파 시스템을 모방하여 실제 상황에 적용한 연구들로 로봇으로 구현하여 성능을 실험하는 연구들이 여기에 속한다. 이와 같이 우리는 기존의 박쥐에 대한 연구들을 분류하였는데 이러한 분류는 순전히 생체모방 (bio-inspired) 된 기술 개발에 목적을 둔 연구자의 기준에서 분류해본 결과이다.

생체 모방 기술의 최종 목적을 자연으로부터 실제 응용될 수 있는 기술을 얻는 것이라고 하였을 때, 가장 어려운 점은 기존의 기술 또는 알고리즘과 비교해서 더 나은 성능 또는 최소한 비슷한 성능을 보여주거나 새로운 방향을 제시해야 한다는 점이다. 하지만 우리가 자연에서 배우는 시스템의 매커니즘과 우리의 기술이 움직이는 매커니즘은 다르기 때문에 대부분의 경우 자연에서 배운 것들이 바로 기술화되기는 힘들다. 예를 들면 박쥐의 경우 세포와 신경으로 이루어져 있으나 우리는 이것을 기계구조와, 회로로 바꾸어야 하기 때문에 그 변환 과정에서 많은 이점들이 사라지고, 변질될 수 있다. 따라서 생체 모방 기술이 나오기까지 자연과 기술을 이어주는 중간 단계의 고리 역할을 할 많은 연구들이 필요하다. 생체 모방 연구에 있어 가장 기본적인 단계는 동물이나 곤충 자체에 대한 전반적인 연구로 위에서 분류한 첫 번째 그룹이 이에 해당한다. 이 단계에서는 동물이나 곤충에 대한 연구를 바탕으로 각각의 생물이 환경에 적응하고 경쟁을 하는 과정에서 얻어진 장점들을 발견하게 될 것이다. 위에서 분류한 두 번째 그룹의 연구는 동물이나 곤충이 가진 장점에 초점을 두어 연구한 것으로 박쥐를 예를 들면 여러 가지 상황에서 박쥐의 초음파 call의 주파수, 지속시간, 발신 회수 등의 파라미터 변화를 관찰하는 단계이다. 첫 번째

단계와 두 번째 단계의 연구를 바탕으로 실제 쓰일 수 있는 알고리즘을 제안하거나, 로봇과 같은 하드웨어로 구현하는 등의 연구가 세 번째 단계의 연구가 될 것이다. 대부분의 이처럼 경우 동물, 곤충이 가진 장점을 응용하여 실제 적용할 수 있는 기술이 개발되기까지는 많은 단계적인 연구 과정이 필요하다.

생체모방 (bio-inspired) 된 기술 개발에 목적을 둔 입장에서 위의 세 그룹에 해당하는 연구를 모두 진행하는 것도 바람직할 수 있지만 시간적인 제약과 직접 동물을 다루어 본 경험이 없다는 이유와 더불어 박쥐의 초음파 적응 행동을 연구함에 있어서 기존의 연구자들이 관찰하고 기록한 연구 자료들이 부족함이 없다고 판단하여 우리는 첫 번째 단계와 두 번째 단계를 2장에서 기존의 연구 자료를 조사, 정리하는 것으로 대체하였다. 우리는 이 논문에서 기존의 박쥐에 대한 자료를 바탕으로 위에서 분류한 세 번째 그룹에 해당하는 내용이거나 또는 두 번째 그룹과 세 번째 그룹에 걸쳐있는 연구를 수행하였다. 이번 장에서 우리는 공기 중에서 초음파를 이용한 정보 획득을 연구하는 데에 있어서 박쥐의 초음파 시스템에 대하여 조사하고 참고한 이유를 설명하였다. 박쥐의 경우 현재 사용되거나 제안된 공기 중에서의 초음파를 통한 정보 획득 기술보다 정교한 초음파 시스템을 가지고 있는 것으로 판단되며 2장의 내용을 바탕으로 3, 4, 5장의 연구를 진행하였다. 우리는 다음과 같은 내용에 중점을 두어 생체모방에 기반을 둔 물체 탐지 방법에 대한 연구를 진행하였다.

정지한 초음파 센서를 이용한 물체 탐지 방법. 3장에서는 움직이지 않는 초음파 센서 배열을 이용하여 물체를 탐지하는 방법에 대해서 연구하였다. 초음파 센서를 이용한 주변 정보를 파악하는 데에 있어서 기존의 연구에서 사용하고 있는 방법인 격자 기반의 방법으로 초음파 지도를 그려 보았다. 초음파 센서가 움직이지 않는 경우 물체의 위치를 정확하게 추정하기 위해서는 사용하는 센서의 수를 증가시켜야 한다. 하나 이상의 초음파 센서 배열을 사용할 경우 센서 사이의 간섭으로 인해 정보 획득 시간이 지연되거나 정보 획득이 어려워질 수 있는데 이 문제를 해결할 수 있는 방법에 대해서도 생각해 보았다.

움직이는 초음파 센서를 이용한 물체 탐지 방법. 박쥐의 초음파 탐지 시스템의 특징 중 하나는 빠른 속도로 비행을 하면서 초음파를 사용한다는 점이다. 박쥐는 3m/s~10m/s의 속도로 비행을 하는 것으로 알려져 있는데 이로 인해 도플러 효과가 발생하게 된다. 공기 중에서의 음파의 속도인 340m/s이기 때문에 박쥐의 비행으로 발생하는 도플러 효과는 무시될 만큼 작지 않으며 따라서 박쥐의 초음파 시스템은 도플러 효과에 대해서 나름대로의 대응 전략을 가지고 있다. 우리는 4장에서 초음파 센서가 움직이는 센서의 움직임으로 인해 발생하는 도플러 효과를 고려하여 격자 기반의 초음파 지도를 그리는 방법에 대해서 연구하였다.

주파수에 따른 빔 패턴을 이용하는 방법. 박쥐는 물체에 반사되어 돌아온 echo의 주파수 분포로부터 물체에 대한 정보를 획득할 수 있는 것으로 알려져 있다. 최근의 한 연구에서 큰갈색 박쥐는 echo의 주파수 분포를 이용하여 물체가 정면에 있는지 측면에 있는지를 구분할 수 있다는 것이 밝혀졌다. 5장에서는 실험을 통하여 큰갈색박쥐와 같은 원리로 물체가 위치한

방향을 대략적으로 추정할 수 있는지에 대한 연구를 진행하였다.

제 2 장

연구 배경

박쥐의 능력에 대한 최초의 기록된 연구는 1794년 이탈리아의 과학자인 Lazzaro Spallanzani 에 의해서 이루어진 연구이다. Spallanzani는 박쥐가 청각을 사용하여 물체를 감지한다고 주장하였으나 박쥐가 초음파를 사용하는지까지는 밝혀내지 못하였다. 그 후 1938년이 되어서야 Donald R. Griffin에 의해 박쥐가 초음파를 사용하여 물체를 탐지한다는 것이 밝혀졌고 (Griffin, 1958) 그 이후로 박쥐의 초음파 시스템에 대한 많은 연구들이 뒤따랐다. 박쥐에 초음파 시스템에 대한 연구는 방대하다. 영국의 동물행동학자, 진화생물학자인 리처드 도킨스는 그의 저서인 “눈먼 시계공” 2장의 대부분을 할애하여 자연의 ‘Good design’의 예로서 박쥐의 초음파 시스템에 대해서 상세히 다루었다(Dawkins and Pyle, 1991). 그 책의 구절 중 박쥐의 초음파 시스템의 다양함에 대해 설명한 구절을 인용하여 보았다.

“It is misleading to speak of bats as though they were all the same. It is as though we were to speak of dogs, lions, weasels, bears, hyenas, pandas and others all in one breath, just because they are all carnivores. Different groups of bats use sonar in radically different ways, and they seem to have ‘invented’ it separately and independently, just as the British, Germans and Americans all independently developed radar.”

이러한 상황으로 미루어 보건데 수십 년간에 박쥐의 초음파 시스템에 대한 연구에도 불구하고 박쥐의 초음파 시스템에 대한 일반적인 정리나 포괄적인 설명이 정립되지 않은 것은 당연한 일이라고 생각할 수 있다. 현재에도 1200여 종의 박쥐 중 박쥐의 초음파 시스템에 대하여 연구가 된 종을 일부에 지나지 않는다. 또한 기존의 많은 연구들이 관찰이나 동물 실험을 통한 박쥐의 초음파 감지 능력의 성능이나 박쥐가 발신하는 초음파 펄스의 특징과 같은 데이터에 수집을 목적으로 이루어졌으나 이에 비해 박쥐의 청각 시스템이 어떻게 초음파 echo로부터 주변 환경 정보를 지각하는지에 대한 연구는 비교적 적게 이루어졌다 (Moss and Surlykke, 2001). 최근에는 실험 장비의 발전으로 인해 기존에는 데이터화하기 힘들었던 박쥐들이 비행 중에 보이는 행동 패턴들에 대한 자료 수집도 이루어지고 있으나 아직 박쥐의 청각 시스템이 초음파 echo에서 어떻게 또는 어떠한 정보를 얻어내는지는 확실하지 않다.

이번 장에서는 박쥐의 초음파 펄스 대한 기본적인 설명과 박쥐가 보여주는 발성 적응 행동에 대한 기존의 연구들을 소개할 것이다. 다만 박쥐에 초음파에 대한 기존의 모든 연구들을 정리하

는 것이 이 논문의 목적이 아닐 뿐더러, 앞에서 설명한 대로 박쥐 종의 다양성으로 인해 그 내용 또한 방대하고 제각각이기 때문에 기존에 연구된 모든 박쥐 종에 대한 연구를 정리하기 보다는 우리가 연구를 진행하는 데에 영감을 얻은 연구 내용들을 주로 인용하였다. 즉 이번 장에는 이 논문의 주요 내용인 3, 4, 5장과 관련이 있는 또는 논문을 이해하는데 도움이 될 수 있는 박쥐에 대한 기존 연구들을 정리하였다. 생체 모방의 기본은 대상이 되는 동물 곤충에 대한 관찰을 통해 그들의 장점을 찾아내는 것이라는 점에서 이번 장은 연구의 기반이 되는 중요한 내용일 것이다.

2.1 박쥐가 발신하는 초음파 펄스

약 70%의 박쥐 종이 곤충을 먹이로 하지만 (Kober and Schnitzler, 1990) 곤충 외에 작은 동물이나 물고기, 과일, 꽃가루 그리고 동물의 혈액을 먹이로 하는 박쥐도 있다. 또한 곤충을 먹이로 하더라도 모기, 나방과 같이 날아다니는 곤충을 먹이로 하는 박쥐도 있는 반면에 지면이나 나무 표면 등에 붙어서 서식하는 곤충을 먹이로 하는 박쥐들도 있다. 박쥐의 서식처 또한 다양한데 여러 박쥐 연구자들은 박쥐가 서식하는 환경이나 그들의 먹이와 같은 주변 환경 조건과 박쥐가 발신하는 펄스 사이에 관계가 있을 것으로 생각하고 있다. 초음파를 사용하는 박쥐 종들은 저마다 다른 형태의 초음파 펄스를 사용하며 박쥐가 발신하는 초음파 펄스의 형태는 박쥐의 종을 구분하는 주요한 지표중 하나로 박쥐의 펄스를 이용하여 박쥐의 종을 찾아내기도 한다 (Armitage and Ober, 2010). 2장에서 설명하였듯이 일반적으로 박쥐의 초음파 펄스는 주파수가 일정한 CF 성분과 시간에 따라 주파수가 변하는 FM 성분으로 이루어져 있다.

그림 2.1은 CF성분으로만 이루어진 초음파 신호와 FM 성분으로만 이루어진 초음파 신호를 비교한 것이다. 그림 2.1.(a)와 (b)는 각각 CF초음파 신호와 FM초음파 신호를 시간-진폭 축에서 그린 것으로 진폭은 일정하고 신호의 길이는 2ms인 신호에 랜덤한 노이즈가 더해진 신호이다. 시간-진폭축의 그래프로는 신호의 주파수를 관찰할 수 없기 때문에 그림 2.1.(c)와 (d)는 CF초음파 신호와 FM초음파 신호를 푸리에 변환하여 신호의 주파수를 확인할 수 있다. 푸리에 변환 결과로부터 CF초음파 신호는 100kHz의 주파수에 에너지가 집중되어 있으며 이루어져 있으며 FM초음파 신호는 30kHz~100kHz의 주파수에 에너지가 흩어져 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 시간-진폭 그래프와 푸리에 변환 결과로부터 CF신호의 주파수는 100kHz이고 2ms동안 지속되는 신호임을 알 수 있다. 하지만 FM초음파 신호의 경우 30kHz~100kHz의 주파수를 갖는 신호임을 알 수 있으나 시간에 따라서 주파수가 어떻게 변하는지는 알 수 없다. 이러한 이유로 박쥐 초음파 펄스의 특성을 보려고 할 때에는 박쥐의 초음파 신호의 스펙트로그램을 그려서 신호의 특징을 관찰하는 방법이 일반적으로 많이 사용된다. 그림 2.1.(e)와 (f)는 CF초음파 신호와 FM초음파 신호의 스펙트로그램이다. 스펙트로그램은 시간에 따라 신호의 주파수가 어떻게 변하는지 쉽게 확인할 수 있도록 하는 신호처리 방법으로 스펙트로그램으로부터 위에서 예를 든 FM 초음파 신호는 100kHz에서 시작하여 2ms동안 30kHz까지 주파수가 감소하는 FM신호임을 쉽게 확인할 수 있다.

박쥐는 종에 따라서, 또한 같은 종이더라도 상황에 따라서 다른 형태의 초음파를 사용한다. 다른

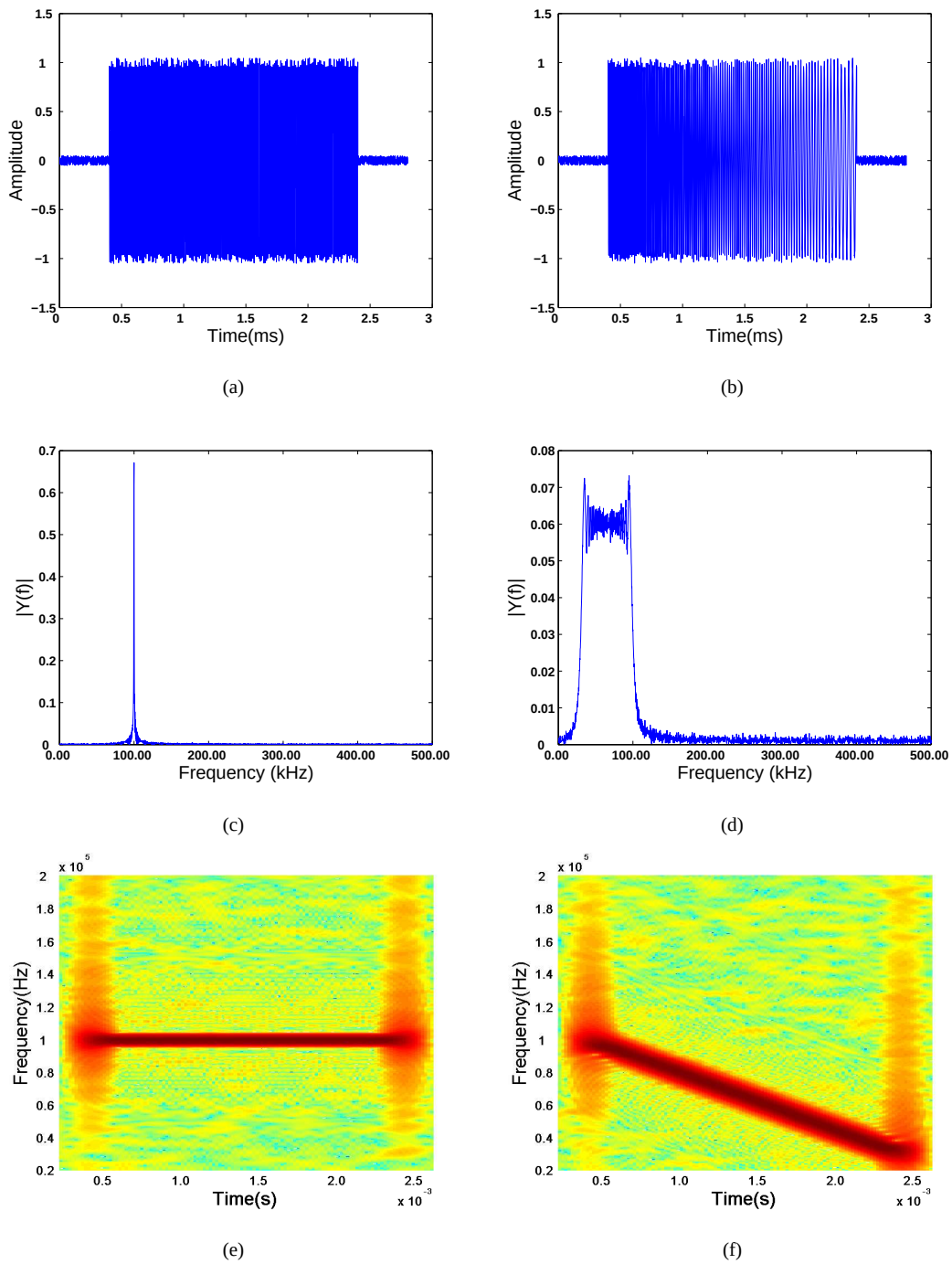


그림 2.1: CF 초음파와 FM 초음파.

형태라고 함은 박쥐의 종에 따라 초음파 펄스의 주파수, 지속시간 등의 파라미터가 다를 수 있다는 것을 의미한다. 예를 들어 CF초음파의 경우 초음파 펄스의 주파수나 지속시간이 종마다 다를 수 있다. FM초음파의 경우 더 다양한 형태의 초음파 펄스가 가능한데 초음파의 시작 주파수, 끝 주파수, 초음파 신호의 지속시간이 다를 수 있으며 초음파의 주파수가 시간에 따라 선형적으로 감소하는지, 오목하게 볼록하게 감소하는지와 같은 파라미터들도 있을 수 있다. 그림 2.2은 다

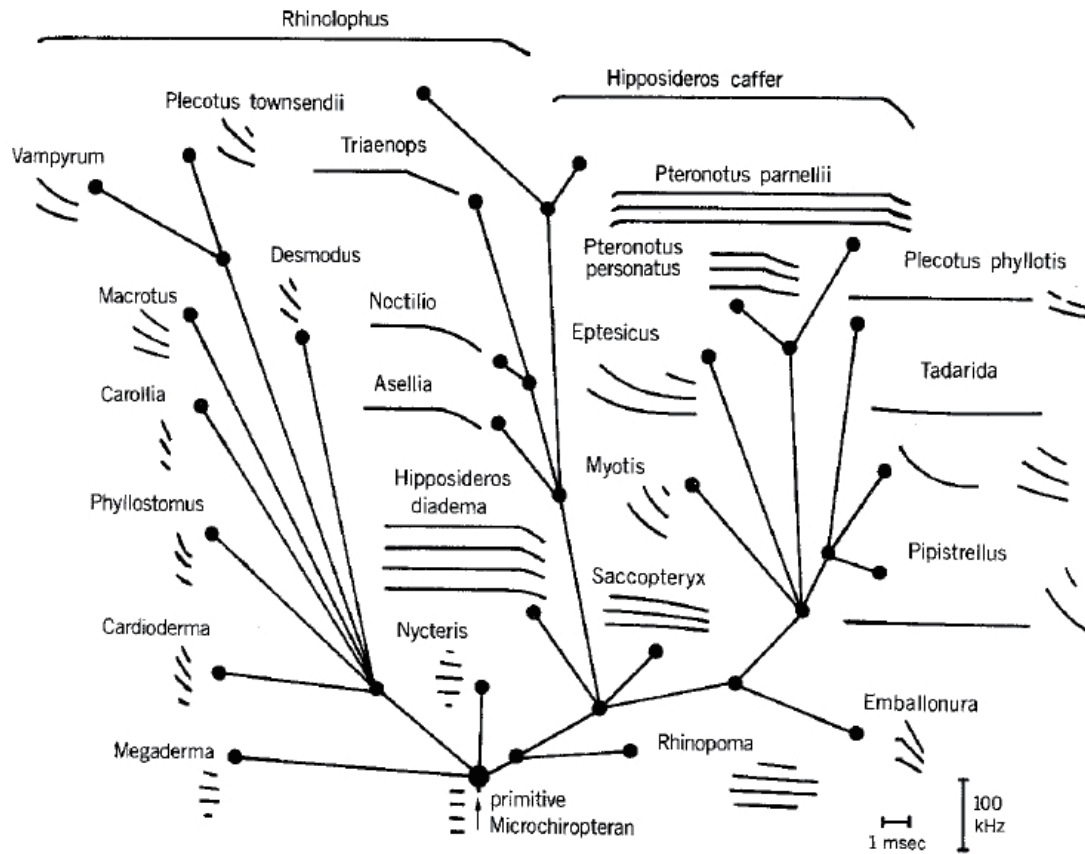


그림 2.2: 박쥐 종에 따른 다양한 초음파 펄스의 형태 (Simmons and Stein, 1980).

양한 박쥐 종의 초음파 펄스의 스펙트로그램을 정리한 그림이다 (Simmons and Stein, 1980). 그림 2.2에 소개된 박쥐의 초음파 펄스들은 신호의 길이가 최소 1ms이거나 그 이상인 초음파 펄스들로 CF성분이나 FM성분만 있는 초음파 펄스도 있지만 두 성분이 다 있는 CF-FM초음파 펄스도 있다. 또한 그림에서 확인할 수 있듯이 어떤 박쥐들은 스펙트로그램 상에서 여러 줄의 초음파 펄스가 보이게 되는데 이러한 펄스를 harmonic 이라고 부른다. 그림 2.2에서 보이는 초음파 펄스들은 CF, FM 또는 CF-FM신호로 분류될 수 있는 신호들이지만 이와는 다른 형태의 ‘click’ 형태로 초음파를 발신하는 박쥐 종도 있다 (Holland et al., 2004; Jones and Teeling, 2006).

그림 2.3은 click형태의 초음파 펄스를 발신하는 Egyptian 박쥐와 일반적인 FM 펄스를 발신하는 박쥐의 펄스를 비교한 것이다 (Yovel et al., 2011). Click 형태의 초음파 펄스의 특징은 신호의 길이가 약 50~100us ms단위인 박쥐와 비교하였을 때 매우 짧다는 특징이 있다. 어떤 형태의 펄스를 사용하느냐에 따라 박쥐의 물체 탐지 전략이 다를 수 있다. CF초음파를 사용할 경우 박쥐가 먹이로 하는 나방의 날갯짓에 의한 반사파의 변화를 쉽게 감지할 수 있는 것으로 알려져 있으며 FM초음파를 사용할 경우 시간과 주파수를 연동하여 분석을 할 수 있기 때문에 물체의 위치추정이나 물체를 식별하는 데에 유리할 것으로 생각되고 있다. Click 형태의 초음파의 경우 최근까지는 원시적인 형태의 초음파 펄스라고 생각되어 Click 형태의 초음파를 사용할 경우 물체 탐지의 정확성이 낮을 것으로 생각되어 왔으나 최근의 연구에서는 빔 (beam) 각도에 의한

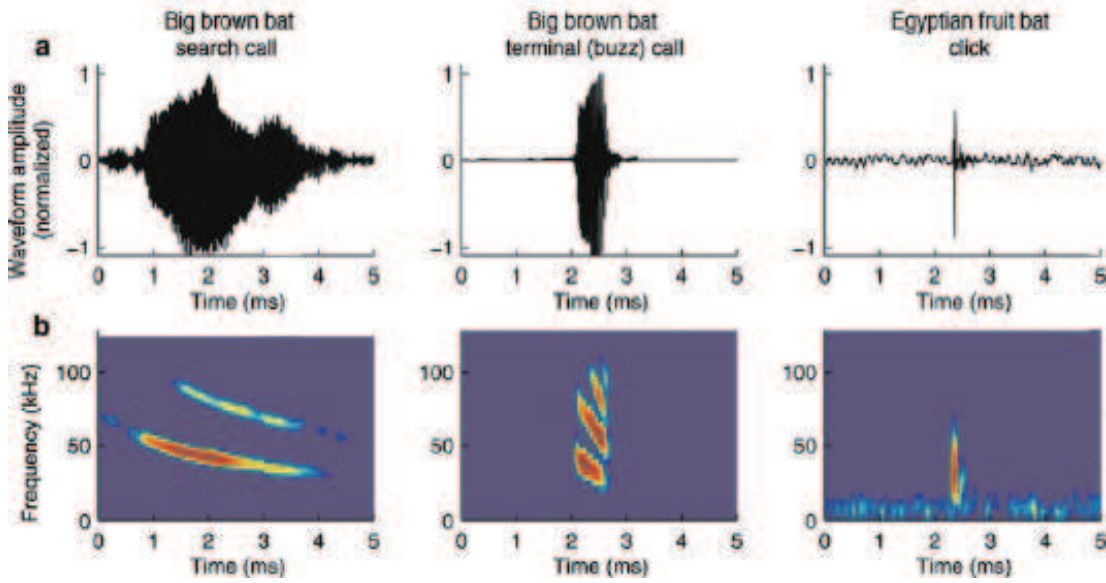


그림 2.3: FM초음파 펄스와 click 형태의 초음파 펄스의 비교 (Yovel et al., 2011).

진폭의 변화율을 이용하여 물체의 위치를 탐지할 것이라는 가설이 제기되기도 하였다 (Yovel et al., 2010).

2.2 도플러 효과

도플러 효과를 나타내는 기본적인 수식은 다음과 같다.

$$f_{do} = \frac{(c + v_r)}{(c + v_s)} f_0 \quad (2.1)$$

이때 c 는 음파의 속력이고, v_r 은 초음파 수신부의 속도를 나타내는 값으로 방향은 음원 (source)으로 다가가는 방향이고 크기는 매질에 대한 수신부의 상대 속도의 크기를 의미한다. 즉 초음파의 수신부가 음원으로 다가갈 때 양의 값을 가지고, 수신부가 음원으로부터 멀어질 때 음의 값을 갖는다. v_s 는 초음파 음원의 속도를 나타내는 값으로 방향은 초음파 수신부로부터 멀어지는 방향이고, 크기는 마찬가지로 매질에 대한 음원의 상대 속도의 크기를 의미한다. 즉 초음파의 음원이 수신부로부터 멀어질 때 양의 값을 가지고, 음원이 수신부와 가까워질 때 음의 값을 갖는다. 식 2.1는 신호가 음원에서 수신부로 전달될 때의 도플러 효과이고, 신호가 물체에 반사되어 돌아오는 경우 도플러 효과를 한 번 더 적용해야 한다. 신호가 수신부에서 반사되는 경우 이번에는 수신부가 음원이 되고 원래의 음원이 수신부가 되게 될 것이다. 따라서 음파가 음원에서 출발하여 수신부에 도달하고 다시 수신부에서 반사되어 음원에 도달하는 과정에서 발행하는 도플러 효과는 식 2.2와 같다.

$$f_{reflected} = \frac{(c + v_r)(c - v_s)}{(c + v_s)(c - v_r)} f_0 \quad (2.2)$$

도플러 효과는 신호의 주파수를 변화시키는데, 신호의 원래 파장의 길이가 더 짧아지기 때문에 나타나는 현상이다. 따라서 도플러 효과는 신호의 주파수만 변화시키는 것이 아니라 신호의

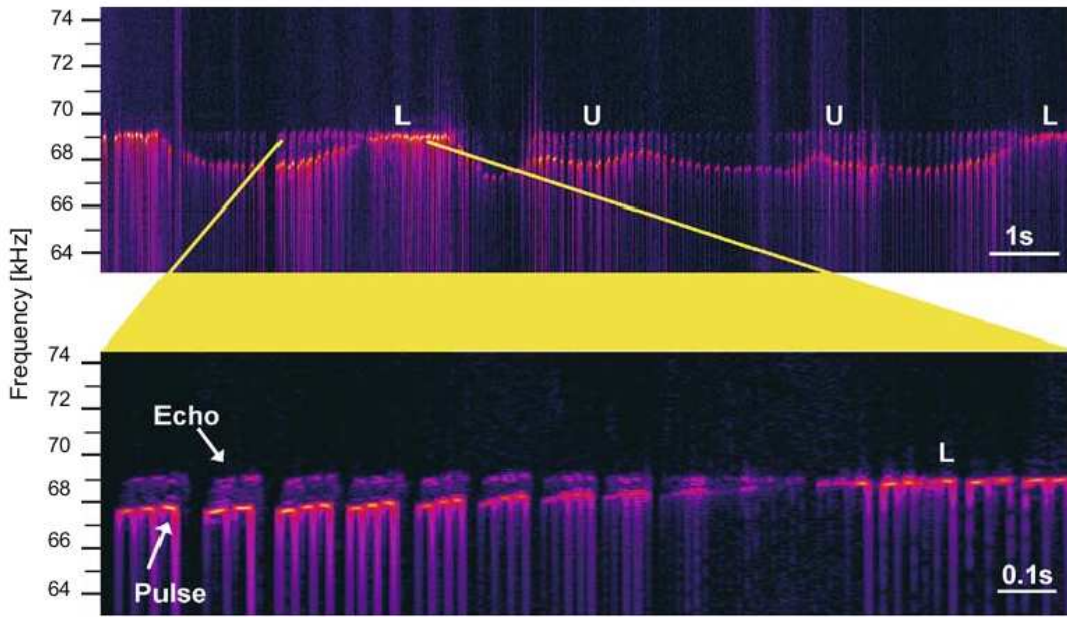


그림 2.4: 박쥐의 도플러 보상 행동 (Hiryu et al., 2008).

길어도 변하게 된다.

$$t_{reflected} = \frac{(c + v_s)(c - v_r)}{(c + v_r)(c - v_s)} t_0 \quad (2.3)$$

위의 식들로부터 음파의 주파수는 음원이 수신부와 가까워질 때 증가하고 멀어질 때 감소하며, 신호의 길이는 음원이 수신부와 가까워질 때 짧아지고 멀어질 때 길어진다는 것을 확인할 수 있고 이것은 직관적으로 도플러 효과에 대해서 예측하였을 때 예상할 수 있는 결과와 일치한다. 공기 중에서 음파의 속도는 약 340m/s로 물속에서의 음파의 속도 (1484m/s) 나 금속에서의 속도 (5120m/s) 와 비교하였을 때 느리다. 도플러 효과는 매질에서의 음파의 속도와 물체가 움직이는 속도의 상대적인 비율과 관련이 있기 때문에 공기 중에서 박쥐의 비행 속도에 의한 도플러 효과는 무시할 수 없는 요소이다. 박쥐 중 CF성분이 있는 펄스를 발신하는 박쥐는 도플러 효과에 대해서 도플러 보상 (doppler compensation) 이라는 행동으로 반응하는 것으로 알려져 있다 (Schuller et al., 1974; Simmons, 1974).

CF-FM 초음파를 사용하는 박쥐인 greater horseshoe 박쥐의 청각 시스템을 연구한 결과 청각 시스템이 특히 민감하게 반응하는 특정 주파수가 있는 것이 확인되었고 (Suga and Jen, 1976; Ostwald, 1984) greater horseshoe 박쥐는 민감하게 반응할 수 있는 특정 주파수 범위 내에 반사되어 돌아오는 초음파의 주파수가 들어오도록 발신하는 펄스의 주파수를 변경하는 것이 관찰되었는데 이러한 행동을 도플러 보상 행동이라고 한다. 도플러 효과에 대한 박쥐의 행동 역시 모든 종에 대해서 일반적으로 밝혀지지는 않았다. CF초음파 펄스를 사용하는 모든 박쥐에 대해서 조사된 것은 아니지만 CF초음파를 사용하는 박쥐 종의 경우 그림 2.4 에서 볼 수 있듯이 도플러 보상을 통해 반사되어 돌아오는 echo의 주파수를 그들의 청각이 가장 민감한 주파수, 즉 "acoustic fovea"의 주파수로 맞추려고 한다는 것이 관찰되었다.

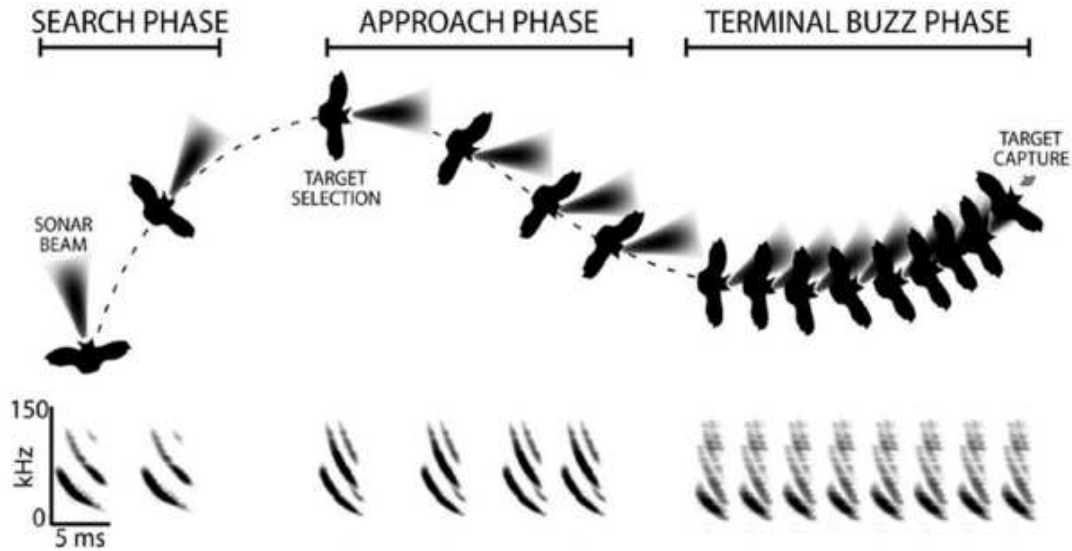


그림 2.5: 박쥐의 3가지 상태 (Moss and Surlykke, 2010).

FM 초음파 펄스를 사용하는 박쥐 종의 경우 일반적인 상황에서는 도플러 효과를 감지하지 못할 것이라는 연구 결과도 있다 (Boonman et al., 2003; Long et al., 2010). FM 초음파를 사용하는 'big brown' 박쥐를 이용한 실험에서 도플러 효과에 의한 주파수 변화가 원래 신호의 주파수의 8% 이상 되어야 박쥐가 그 변화를 감지하는 것으로 관찰되었다 (Wadsworth and Moss, 2000). 하지만 일반적인 박쥐의 비행 속도는 3~10m/s로 이에 해당하는 도플러 효과는 8%를 넘지 못한다. FM 초음파를 사용하는 big brown 박쥐의 경우 greater horseshoe 박쥐처럼 신호를 민감하게 감지할 수 있는 "acoustic fovea" 가 없으며 따라서 박쥐의 비행에 의해 발생하는 도플러 효과는 구분하지 못할 것이라고 생각되고 있다.

2.3 박쥐의 초음파 발신 패턴

앞 절에서는 박쥐의 초음파 펄스 하나에 대해서 CF 초음파 펄스와 FM 초음파 펄스로 분류를 하였다. 이번 장에서는 박쥐가 먹이를 사냥할 때 보이는 발성 패턴에 대한 내용을 소개할 것이다. 박쥐의 발성 패턴 역시 박쥐의 종이나 박쥐가 처한 상황에 따라서 다르겠지만 우리는 연구가 어느 정도 진행되어 잘 정리되어 있는 박쥐 종에 대한 발성 패턴에 연구에 대하여 조사하였다. 박쥐의 발성 패턴은 그림 2.5에서와 같이 탐색 상태 (Search phase), 접근 상태 (Approach phase), 최종 상태 (Terminal buzz phase) 의 세 가지 상태로 구분할 수 있다 (Simmons, 1979; Moss and Surlykke, 2010).

탐색 상태의 경우, 먹이를 찾는 상태로 세 개의 상태 중 가장 PI (pulse interval) 이 길고 펄스의 지속시간 또한 긴 상태이다. 접근 상태는 탐색 상태에서 먹이를 감지한 후 먹이를 향해 접근하는 상태로, 탐색 상태 때보다 PI와 펄스의 지속시간이 줄어들게 된다. 최종 버즈 상태는 박쥐와 먹이와의 거리가 충분히 가까워져 박쥐가 먹이를 향해 비행하는 시점부터, 먹이를 잡을 때까지의

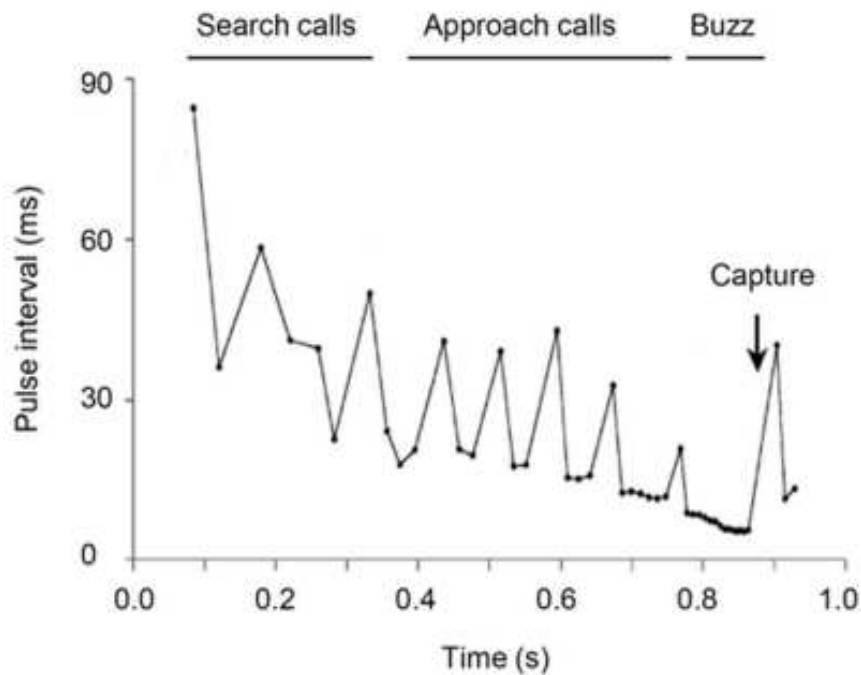


그림 2.6: 박쥐와 먹이의 거리에 따른 펄스 간격의 변화 (Weinbeer and Kalko, 2007).

상태로, 가장 짧은 PI와 펄스를 갖는 상태이다. 이와 같은 펄스의 발신 속도의 변화 외에도 박쥐는 각각의 상태에서 박쥐의 주변 환경이나 상황에 따라 다양한 발성 적응 행동 (adaptive vocal behavior) 을 보여 준다. 박쥐 실험에 쓰이는 측정 장비들의 발전에 따라 최근의 박쥐 연구들에서는 종전의 연구와 비교해서 더 세밀한 박쥐의 발성 적응 행동을 관찰할 수 있게 되었고, 그 중에서 우리는 접근 상태에서 보여주는 박쥐의 발성 적응 행동에 집중하였다.

종전의 박쥐의 초음파 펄스에 대한 연구는 하나의 펄스에 대한 연구가 주를 이루었다. 박쥐의 초음파 펄스의 지속시간, 주파수 밴드위스, 펄스의 시작 주파수 끝 주파수, 펄스의 세기, 펄스의 형태(CF, FM, CF-FM) 등과 같이 개별적인 펄스의 파라미터에 대한 많은 연구들이 진행되었다. 하지만 박쥐가 어떻게 물체를 인지하는지에 대해서 알기 위해서는 펄스 하나하나에 대한 관찰과 연구 외에, 시간에 따라 전체적인 발성 패턴 변화에 대한 관찰 또한 필요할 것이다 (Moss and Surlykke, 2001). 그림 2.6는 박쥐가 먹이에 다가갈 때 펄스와 다른 펄스 사이의 간격인 PI (pulse interval)의 변화를 본 그림이다 (Weinbeer and Kalko, 2007).

그림 2.6로부터 박쥐가 먹이에 다가감에 따라 전체적으로 PI가 감소하는 것을 볼 수 있지만, PI의 감소는 연속적으로 일어나는 것이 아니라 불규칙적으로 일어난다는 것을 확인할 수 있다. PI는 단조롭게 감소하는 것이 아니라 짧은 PI 중간에 긴 PI가 나타나며 따라서 박쥐의 초음파 펄스가 균일한 시간 간격을 두고 발신되는 것이 아니라 2개 이상의 펄스가 마치 하나의 그룹과 형태로 발신되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 펄스 패턴은 다른 연구에서도 관찰되었다 (Kingston et al., 1999; Moss et al., 2006). 그림 2.7은 앞에서 설명한 펄스 패턴을 시각적으로 확인하기 쉬운 스펙트로그램 형태로 나타낸 것이다(Kingston et al., 1999). 그림 2.7의 경우 짧은 PI과 긴 PI가 한 번씩

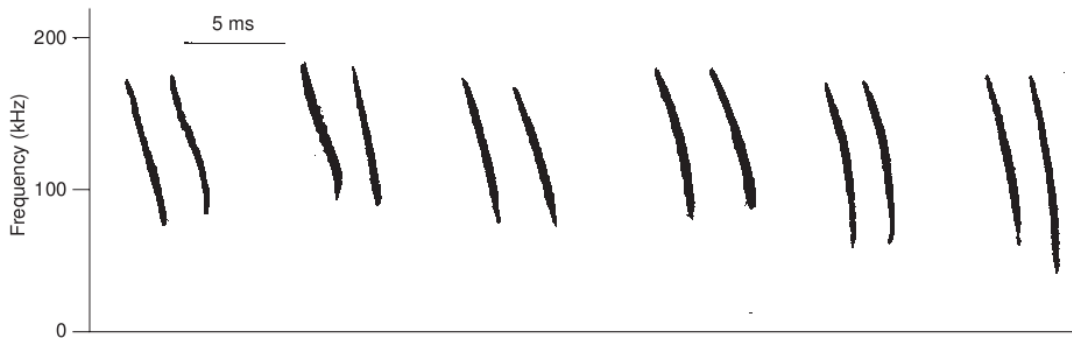


그림 2.7: 그룹 형태로 묶여서 발신되는 초음파 펄스 (Kingston et al., 1999).

반복되면서 2개의 펄스가 하나의 그룹을 이루는 형태로 초음파 신호가 발신되고 있다. 이와 같은 ‘펄스 그룹’에 대해서 일부박쥐 연구자는 ‘strobe group’이라고 부르기도 한다. 여러 박쥐 관찰 실험에서 박쥐가 일정 거리 이상 물체와 가까워지면 여러 개의 펄스가 짧은 간격으로 뭉쳐있는 형태의 펄스 그룹을 발신하는 것이 관찰되었으나 아직 박쥐가 왜 그룹 형태로 펄스를 발신하는 지에 대해서는 정확히 설명되지 않고 있다. PI를 단조롭게 감소시킬 경우, 즉 각각의 펄스사이의 거리가 비슷하게 되도록 펄스를 발신할 때와 비교하면 펄스 그룹형태로 초음파를 발신할 경우 박쥐가 감수해야 할 몇 가지 것들이 있다.

첫 번째는 에너지 손실이다. 초음파 펄스를 발신하여 물체의 위치를 측정하기 위해서는 반사되어 돌아오는 echo의 에너지가 충분해야 한다. 박쥐가 발신하는 초음파 펄스의 음압 (SPL:sound pressure level) 측정을 바탕으로 계산하여 본 결과 박쥐가 초음파 펄스를 발신하는 데에 많은 양의 에너지가 필요하며, 박쥐의 비행에 필요한 에너지까지 생각한다면 박쥐는 상당한 양의 에너지가 필요한 것으로 알려져 있다. 이에 대해서 박쥐는 날갯짓과 초음파 펄스의 발신 사이클을 맞추어 (coupling) 초음파 펄스에 소모되는 에너지를 최소화 하 한다 (Wong and Waters, 2001; Holderied and Von Helversen, 2003). 하지만 박쥐가 펄스를 그룹 형태로 사용하였을 경우 펄스의 발신 사이클이 박쥐의 날갯짓 사이클보다 짧아지게 되고, 날갯짓과 펄스의 발신 사이클의 커플링을 통한 에너지 절약 효과를 이용할 수 없게 된다 (Waters and Wong, 2007).

두 번째는 모호성 문제 (ambiguity problem) 이다. 펄스 그룹의 처음 펄스와 다음 펄스 사이의 간격이 짧을 경우, 먼저 발신된 펄스에 의해 반사된 초음파가 아직 박쥐에게 돌아오지 않은 상황에서 다음 펄스가 발신되는 상황이 발생할 수 있으며 이럴 경우 반사되어 돌아온 초음파 echo가 먼저 발신된 펄스에 의해 발생한 것인지, 다음에 발신된 펄스에 의해 발생한 것인지 구분할 수 없게 된다. 그림 2.8는 이러한 모호성 문제를 설명하고 있다 (Melcón et al., 2010). 그림 2.8.(a)는 나중에 발신한 펄스에 해당하는 echo가 수신되었을 때 그 echo를 먼저 발신한 펄스에 의한 echo로 혼동할 수 있다는 것을 보여주는 그림이고, 그림 2.8.(b)는 처음 발신한 펄스에 해당하는 echo가 수신되었을 때 그 echo를 나중에 발신한 펄스에 의한 echo로 혼동할 수 있다는 것을 보여주는 그림이다. 반사체의 개수가 적을 경우 발신한 펄스에 해당하는 echo의 수와 그 간격이 일치하도록 각각의 펄스에 대해서 echo를 할당하여 위에서 설명한 모호성 문제를 해결할 수 있겠지만

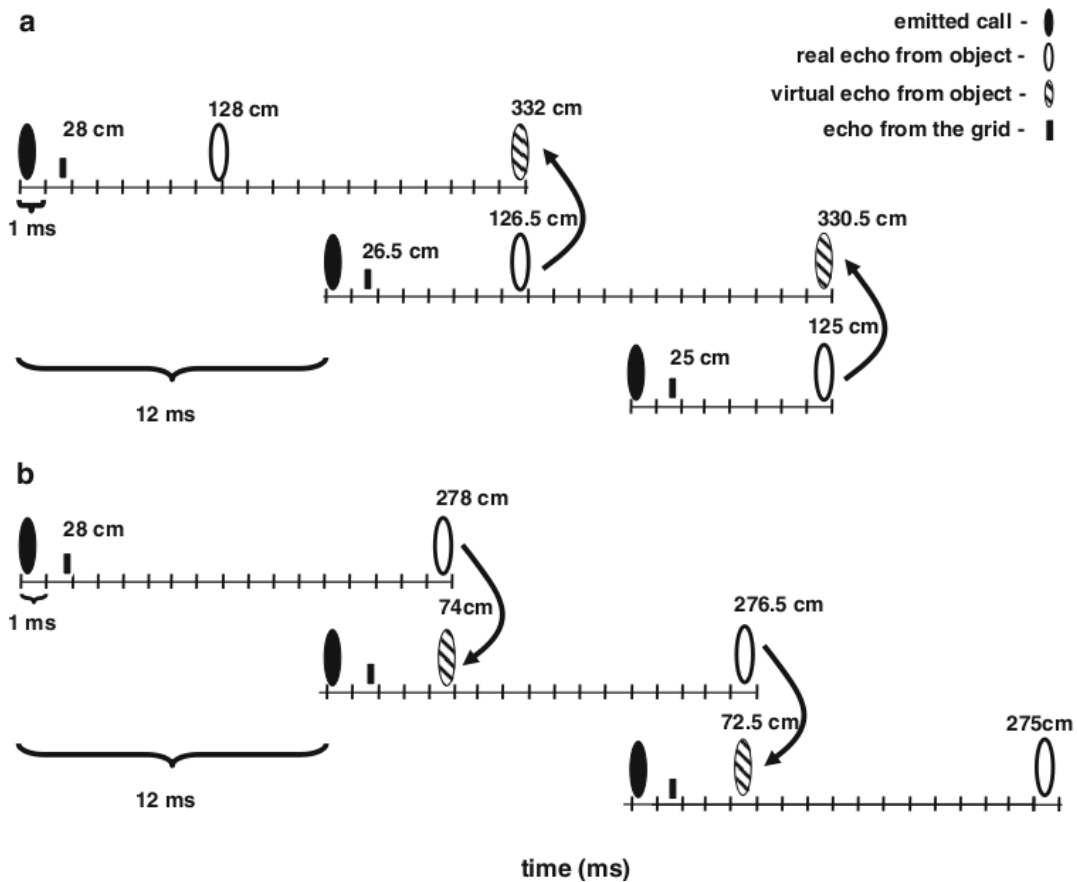


그림 2.8: 모호성 문제 (Melcón et al., 2010).

반사체의 개수가 많아질 경우 모호성 문제를 해결하기 힘들어진다. 박쥐가 펄스 그룹을 사용할 경우 펄스 그룹에 속한 펄스 사이의 시간 간격이 짧기 때문에 위에서 설명한 모호성 문제는 더 심해지게 될 수 있다. 박쥐가 펄스를 그룹으로 발신할 때 감수해야 하는 문제점이 있는 반면에 박쥐가 펄스를 그룹으로 사용할 경우 얻을 수 있는 이점이나 이유에 대해서는 아직 명확하게 알려지지 않았는데 박쥐가 각각의 펄스를 따로따로 처리하기 보다는 종합하여 처리함으로써 추가적인 정보를 획득하는 것으로 볼 수 있다. 우리는 이러한 생각을 바탕으로 4장에서 여러 위치에서 얻은 정보를 종합하여 물체의 위치를 파악하는 연구를 진행하였다.

2.4 펄스의 주파수에 따른 빔 패턴

그림 2.9.(b)는 나무와 같이 복잡한 반사체가 있는 환경에서 먹이를 감지해야 하는 상황을 나타내는 그림이다. 각각의 나뭇잎은 하나의 반사체로 작용하기 때문에 박쥐는 나뭇잎에 반사되어 돌아온 echo와 먹이로부터 반사되어 돌아오는 echo가 중첩된 신호를 받게 된다. Bates et al. 은 그의 연구 결과에서 큰갈색박쥐는 이와 같은 상황에서 초음파의 주파수에 따라 빔 각도가 다르다는 점을 이용하여 먹이로부터 반사되어 돌아오는 echo와 나뭇잎에 반사되어 돌아오는 echo를 구분할 수 있다고 주장하였다(Bates et al., 2011).

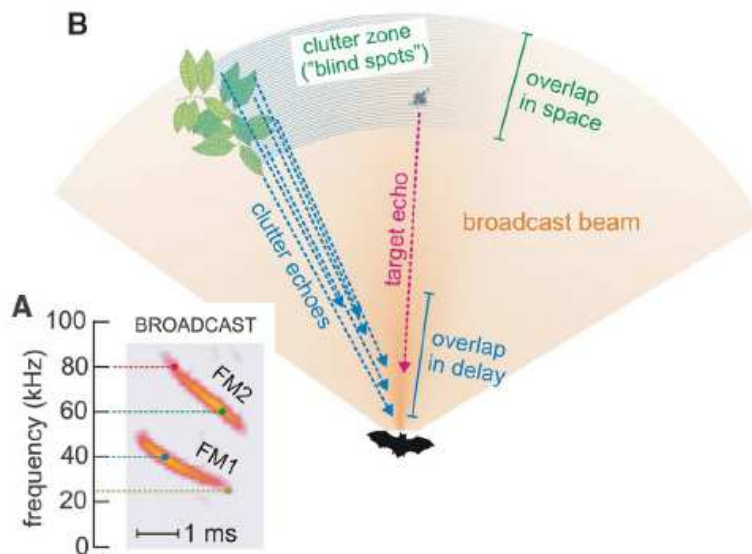


그림 2.9: 큰 갈색 박쥐의 먹이 탐지 전략 (Bates et al., 2011).

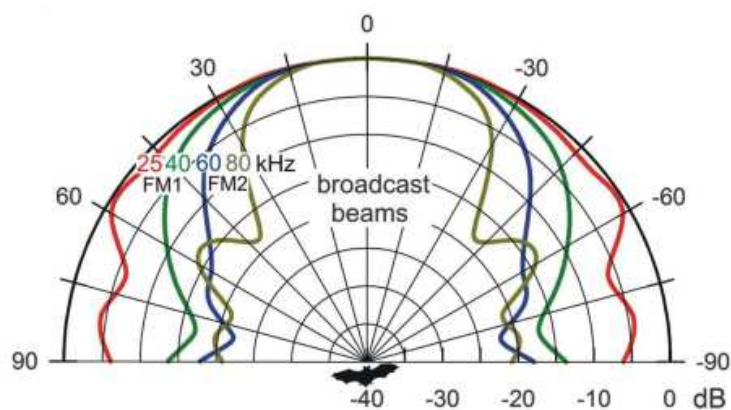


그림 2.10: 큰 갈색 박쥐의 먹이 탐지 전략 (Bates et al., 2011).

그림 2.10는 초음파의 주파수에 따라 빔 패턴이 달라지는 것을 보여주는 그림이다. 일반적으로 발신하는 초음파의 주파수가 높아질수록 빔 각도가 줄어들게 된다. 즉 초음파의 주파수가 높아질수록 측면으로 발신되는 초음파의 세기가 약한 것을 알 수 있다. 큰 갈색 박쥐의 경우 그림 2.9.(a)와 같이 높은 주파수의 FM2 신호와 낮은 주파수의 FM1 신호를 함께 발신하는 형태의 초음파 펄스를 발신하는데 이러한 형태의 펄스를 하모닉 펄스라고 부른다. 그림 2.9.(b)와 같은 상황에서 하모닉 펄스를 발신하였을 때 정면의 먹이로부터 반사된 echo의 FM2와 FM1의 에너지 비율과, 측면의 물체로부터 반사된 echo의 FM2와 FM1의 에너지 비율을 확인한다면 echo가 정면에서 반사되어 돌아온 것인지 측면에서 반사되어 돌아온 것인지 판단할 수 있을 것이며 박쥐는 이러한 원리를 이용하여 복잡한 환경에서도 먹이를 사냥할 수 있을 것으로 생각된다. 5장에서 우리는 실험을 통해 위와 같은 원리를 물체의 위치 추정에 사용할 수 있는지 알아보았다.

2.5 상호 상관 방법

박쥐의 다양한 초음파 펄스에 대한 관찰이 이루어 졌지만 박쥐의 펄스를 비교하는 기준은 그렇게 많지 않다. 박쥐의 청각 시스템에 대해 일반적으로 인정되는 생물학적인 모델이 정해지지 않았기 때문에 초음파 펄스의 여러 파라미터의 변화가 박쥐가 물체를 탐지하는 데에 구체적으로 어떤 영향을 줄 것인지 판단할 수 없다.

Simmons는 FM 박쥐가 상호 상관 방법을 사용할 것이라고 주장하기도 하였지만 앞에서 설명하였듯이 박쥐의 청각 시스템 내부에서 구체적으로 어떤 식으로 초음파 신호를 처리하는지 모르기 때문에 박쥐가 상호 상관 방법을 사용한다는 주장은 하나의 가설에 머물고 있다. 이 외에도 필터뱅크를 기본으로 한 여러 가지 박쥐의 뇌에서 일어나는 신호처리 과정에 대한 가설이 제기되었으나 마찬가지로 가설로 머물고 있는 상태이다.

하지만 박쥐가 실제 상호 상관 방법을 사용하는지 사용하지 않는지와 관계없이 상호상관 방법은 박쥐의 초음파 펄스의 성능을 판단하는 기준으로 종종 사용되고 있는데, 그 이유는 상호상관 방법 외에 박쥐의 펄스에 대해서 평가할 수 있는 방법이 많지 않기 때문이다. 일반적으로 많이 쓰이는 신호 처리 방법에는 푸리에 변환 방법과 스펙트로그램 방법이 있지만 이러한 신호처리 방법만으로는 박쥐 펄스의 파라미터 변화가 박쥐의 물체 위치 추정에 미치는 영향을 확인하고 측정하기에 부족한 부분이 있다. 상호상관 방법 외에 별다른 신호 처리 방법이 없다는 점 외에도, 상호 상관 방법은 공학적으로 구현이 가능한 방법이라는 점은 상호 상관 방법의 장점일 것이다.

상호 상관 방법은 matched 필터라고 불리기도 한다. 상호 상관 방법에 대한 두 가지 관점이 있는데 한 가지 관점은 SNR 관점으로, 보낸 신호와 같은 신호를 상호상관 하는 것은 SNR을 최대로 만든다는 관점이고 두 번째 관점은 보낸 FM 신호와 같은 신호를 상호상관하게 되면 IR (Impulse response) 을 추정할 수 있다는 관점이다. 우리는 이 논문에서 박쥐가 기본적인 신호처리 방법으로 상호상관 방법을 사용하였다. 상호 상관 방법을 통해 얻어진 시뮬레이션 결과에 대해서 두 번째 관점으로 보아야 그 의미를 이해할 수 있을 것이다.

2.6 요약

이번 장에서는 우리는 박쥐의 다양한 형태의 펄스에 대하여 살펴보았고, 박쥐의 펄스를 대략적으로 CF성분과 FM성분으로 분류할 수 있음을 설명하였다. 이러한 분류 방법은 CF초음파와 FM초음파가 각각 다른 방법으로 물체를 탐지할 수 있다는 점에서 의미가 있는 분류 방법이다. 또한 우리는 박쥐의 다양한 발성 패턴에 대해서도 알아보았다. 기존의 연구들이 박쥐 관찰 장비들의 한계나 또는 기타 이유로 인해 박쥐가 발신하는 하나하나의 펄스에 대한 연구에 집중되었다면 최근에는 펄스 하나하나에 대한 연구를 기반으로 혹은 펄스에 대한 연구와 더불어 박쥐의 행동 패턴에 많은 관심이 집중되고 있다. 마지막으로 우리가 알아본 바로는 현재 박쥐의 청각 시스템에 대한 구체적인 이론이 성립되지 않은 상황이기 때문에 상호 상관 방법을 사용하여 실험을

진행하였다.

제 3 장

고정된 초음파 센서

관찰 실험을 통하여 박쥐가 어떠한 발성 적응 행동을 하는지 밝혀지고 있으며, 그에 따른 새로운 가설이 세워지고 있다. 이러한 발성 적응 행동들을 직접적으로 응용하여 기계, 로봇으로 응용할 수 있다면 바람직하겠지만 실제 구현을 위해서는 관찰된 행동뿐 아니라 박쥐의 청각 시스템에서 일어나는 신호처리 과정이나 처리된 신호를 통합하여 판단하는 알고리즘 등에 대한 연구뿐만 아니라 이를 기계 구조와 회로로 구현할 수 있는 방법에 대한 공학적 연구 또한 필요하다. 대부분의 경우 관찰 실험을 통해 박쥐가 어떠한 발성 적응 행동을 하는지는 확인할 수 있으나 박쥐 내부적으로 어떻게 처리되는지에 대한 연구는 충분하지 않은 상황이다. 따라서 박쥐의 발성 적응 행동을 초음파 센서를 이용한 탐지 기술에 직접적으로 적용하는 것은 쉽지 않음을 알 수 있다. 비록 박쥐의 발성 적응 행동을 초음파 센서를 탐지 기술에 직접적으로 응용하지 못한다고 하더라도 박쥐에 대한 연구를 하는 과정에서 우리 나름대로 정리한 방법들이 있는데, 3장 4장 5장에서 우리는 박쥐의 발성 적응 행동에서 영감을 얻은 공기 중에서의 초음파를 이용한 물체 탐지 방법들을 소개할 것이다.

3.1 초음파 센서를 이용한 환경 정보 획득 방법

공기 중에서 초음파 센서를 이용하여 이용한 기존의 연구들은 물체의 위치를 탐지하는 방법에 대한 연구에서 부터 (Kaniak and Schweinzer, 2008; Barshan and Ayrulu, 1998; Elmer and Schweinzer, 2004; Bank, 2002), 초음파 발신부의 빔의 형태에 대한 연구 (Kuc, 2009, 2003; Waters, 2007), 물체 표면의 거칠기를 탐지하는 연구 (McKerrow and Kristiansen, 2006; Politis and Smith, 2001; Probert Smith and Zografos, 2005), 나무 종을 분류하는 연구 (Simon et al., 2011), 얼굴 인식 연구 등(McKerrow and Yoong, 2007) 에 이르기까지 다양한 연구가 존재하는데 우리는 초음파 센서를 이용하여 초음파 지도를 그리는 방법에 대해서 연구하였다.

주변 환경 지도 (map) 를 그리는 방법에는 여러 가지 방법이 있는데 크게 특징 기반 (feature-based) 방식과 격자 기반 (grid-based) 의 방식으로 구분할 수 있다(Barshan, 2007). 특징 기반의 방식은 예를 들어 벽, 벽의 모서리, 문틀과 같은 특정한 구조에 반사되어 돌아오는 초음파의 패턴, 특징을

파악하여 데이터화 한 후 이를 기반으로 주변 환경 지도를 그리는 방식이다. (Crowley, 1985; Drumheller, 1987; Cox, 1991; Wijk and Christensen, 2000; Hong and Kleeman, 1997). 특징 기반의 방법들은 초음파 신호가 특정 구조를 갖는 물체에 반사되었을 때 반사된 신호에는 그에 해당하는 특정한 패턴이 있을 것이라는 생각을 바탕으로 한 방법으로 평편한 벽면이나 모서리와 같이 자주 등장하는 구조에 대해서 초음파가 반사되었을 때 나타나는 특징을 기억하고 용하는 방법이다. 격자 기반 방식은 주변 공간을 격자로 나누어 나누어진 각각의 셀 (cell) 에 물체가 있는지 없는지를 판단하는 방법이다. 즉 초음파 echo로부터 TOF를 계산하고 계산된 TOF를 이용하여 물체가 위치할 수 있는 궤적을 그리고 그려진 궤적들을 바탕으로 각각의 셀에 물체가 있는지 없는지를 결정하는 방법으로 물체의 여부를 결정하는 기준에 대한 여러 연구가 존재한다(Kuc and Siegel, 1987; Barshan, 1999; Elfes, 1987; Choset et al., 2003).

3.2 시뮬레이션 방법

우리가 알아본 바로는 공기 중에서 초음파의 진행을 시뮬레이션 할 수 있는 정형화된 소프트웨어 툴은 없는 것으로 알고 있다. 음향 관련한 시뮬레이션 관련 툴은 있으나, 대부분이 사람의 가청 주파수대역에 초점을 맞추어져 있으며, 박쥐가 사용하는 것과 같은 직접 초음파 펄스를 발신하고 그 반사파를 통해 환경을 파악하는 능동적인 센싱보다는 외부의 음원으로부터 오는 소리를 듣는 수동적인 센싱에 초점이 맞추어져 있고 또한 박쥐의 발성 행동을 응용하여 적용하는 데에는 적합하지 않은 것으로 판단되었다. 우리의 연구는 주로 매트랩을 이용한 시뮬레이션으로 이루어져 있으며 우리가 사용한 시뮬레이션 방법에 대한 설명이 필요할 것이다. 따라서 이번 절에서는 우리가 사용한 시뮬레이션 방법에 대해서 간단히 소개할 것이다. 시뮬레이션의 기본적인 방법은 기존의 다른 연구자의 시뮬레이션과 우리의 기존의 연구를 참고하였다 (Park and Kim, 2010b).

박쥐가 발신하는 초음파 역시 파동 이므로 다른 파동을 나타내는 것과 마찬가지로 박쥐의 초음파 또한 sin함수로 나타낼 수 있다. 주파수가 f 인 초음파는 아래의 식으로 나타내어진다.

$$y = \cos(2\pi ft) \quad (3.1)$$

주파수는 1초에 몇 주기가 변하는지를 나타내는 값이므로 어떤 sin함수의 주파수는 함수의 phase, ϕ 를 시간으로 미분하고 2를 나눠주면 구할 수 있다.

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{\phi}{dt} \quad (3.2)$$

박쥐는 주파수가 일정한 CF 초음파 외에도 시간에 따라 주파수가 감소하는 FM초음파를 사용하는데 FM초음파는 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Matlab chirp function 참고).

$$y_{fm} = \cos(2\pi (\frac{\beta}{p+1} t^{p+1} + f_0 t)) \quad (3.3)$$

$$\beta = (f_1 - f_0) t_d^{-p} \quad (3.4)$$

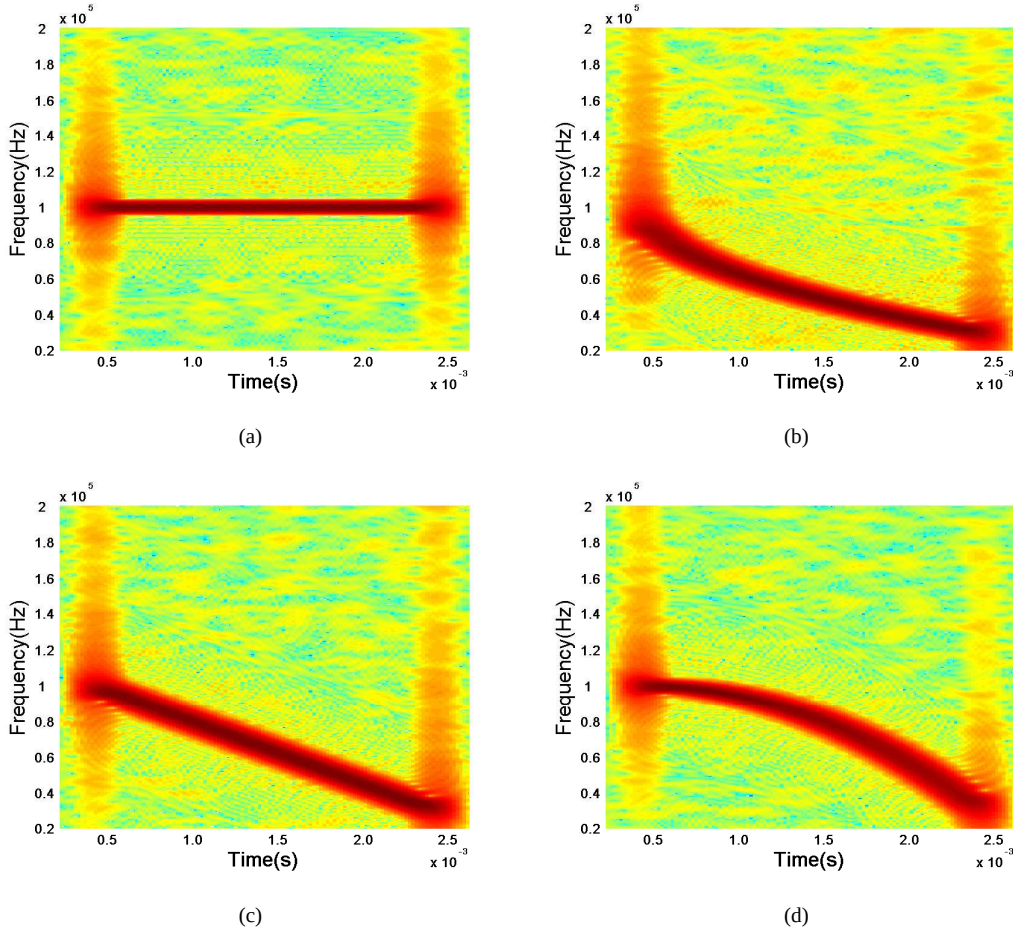


그림 3.1: 시뮬레이션으로 그린 초음파 펄스 ((a)주파수가 100kHz인 초음파. (b) FM 초음파, $p=0.5$ 일 때. (c) FM 초음파, $p=1$ 일 때. (d) FM 초음파, $p=2$ 일 때.).

식 3.3과 식 3.4에서 f_0 는 FM초음파의 시작 주파수, f_1 은 끝 주파수, t_d 는 초음파 신호의 지속시간, p 는 FM초음파가 선형적으로 감소하는지 오목, 볼록하게 감소하는지를 결정하는 값이다. 식 3.2를 이용하여 3.3의 주파수를 구하면,

$$y_{fm} = \beta t^p + f_0 = \frac{f_1 - f_0}{t_d^p} t^p + f_0 \quad (3.5)$$

가 됨을 얻을 수 있다. 그림 3.1은 주파수가 100kHz 일정한 CF 초음파 신호와, 2ms 동안 주파수가 100kHz에서 30kHz까지 감소하는 FM초음파 신호이다. p 값에 따라서 FM초음파의 기울기가 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 발신하는 초음파 신호의 다음으로 초음파 반사체에 대한 모델링이 필요하였다. 초음파의 반사를 모델링 할 때 반사체 각각의 크기, 위치, 방향, 반사율과 같은 변수들과, 초음파의 반사, 굴절, 회절과 같은 현상들을 모두 고려하기는 힘들었다. 우리는 초음파 반사를 모델링함에 있어서 컴퓨터로 나무를 모델링하고 초음파가 반사되어 돌아오는 것을 시뮬레이션하고 실제 나무에서 돌아온 초음파 결과와 비교한 기존의 다른 연구를 참고하였다 (Yovel et al., 2008, 2009b).

이 논문에서는 물체의 위치와 초음파의 반사만을 고려하여 시뮬레이션 하였고, 물체의 크기나

방향 등의 복잡한 변수를 고려하지 않았음에도 시뮬레이션 결과와 실제 초음파를 반사체 쏘고 반사되어 돌아오는 신호를 측정된 결과를 비교하였을 때 어느 정도 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 즉 3.4장의 시뮬레이션에서 우리는 반사체의 크기나 방향들을 고려하지 않는 점 반사체로 생각하고, 파동의 여러 성질 중 반사 성질만을 고려하여 시뮬레이션을 진행하였다.

3.3 상호상관 방법을 이용한 신호처리

우리는 반사되어 돌아오는 초음파 신호의 TOF를 측정하기 위한 방법으로 상호상관(cross-correlation) 방법을 사용하였다. 상호 상관 방법은 아래의 식 3.6 처럼 정의된다.

$$a[n] \star b[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a^*[m]b[n+m] \quad (3.6)$$

$$a[n] * b[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a[m]b[n-m] \quad (3.7)$$

위 식에서 a^* 는 a 의 켈레 복소수 복소수 (complex conjugate) 이고 $\star, *$ 는 각각 상호상관과 convolution을 나타낸다. 식 3.7는 convolution의 정의이고 상호 상관 방법과 convolution의 관계는 식 3.8과 같다.

$$a[n] \star b[n] = a^*[-n] * b[n] \quad (3.8)$$

발신한 초음파 펄스 $s[n]$ 을 주변 환경에 발신하였을 때 반사되어 돌아오는 echo $r[n]$ 은 발신한 초음파 신호 $s[n]$ 과 주변 환경에 해당하는 전달 함수 $h[n]$ 를 convolution한 결과와 같다 (Haykin and Van Veen, 2003).

$$r[n] = s[n] * h[n] \quad (3.9)$$

발신한 초음파 $s[n]$ 과 반사되어 돌아온 echo $r[n]$ 를 상호 상관한 결과를 수식적으로 정리하면,

$$\begin{aligned} s[n] \star r[n] &= s[n] \star (s[n] * h[n]) \text{ 식 3.9에 의해} \\ &= s^*[-n] * (s[n] * h[n]) \text{ 식 3.8 에 의해} \\ &= (s^*[-n] * s[n]) * h[n] \text{ 결합 법칙} \\ &= (s[n] \star s[n]) * h[n] \end{aligned} \quad (3.10)$$

과 같다. 그림 3.2는 식 3.10의 과정을 그림으로 나타낸 것이다. 식 3.10에서 주변 환경에 대한 정보는 모두 전달 함수 $h[n]$ 으로부터 얻을 수 있고, 신호를 상호 상관 처리하는 이유는 전달 함수 $h[n]$ 를 추정하기 얻기 위해서이다. $h[n]$ 는 전달 함수 외에도 임펄스 응답이라고도 불리는 값으로, 인풋으로 임펄스를 주었을 때 얻을 수 있는 아웃풋이다. 초음파 센서에서 임펄스를 발신할 경우 물체에 반사되어 돌아온 echo는 초음파 센서와 반사체의 거리에 따라 각각 다르게 지연 (delay)된 임펄스 신호가 될 것이다. 따라서 임펄스 응답에서 각각의 임펄스가 얼마만큼 지연되어 들어왔는지를 통해 각각의 반사체가 삼각형 마크로부터 얼마만큼의 거리에 있는지 알 수 있다.

식 3.10에서 발신한 초음파 신호와 수신한 초음파를 상호상관 한 결과는 발신한 신호의 자기상관 결과와 임펄스 응답과의 convolution한 결과와 같다. 따라서 발신한 신호의 자기 상관 결과가

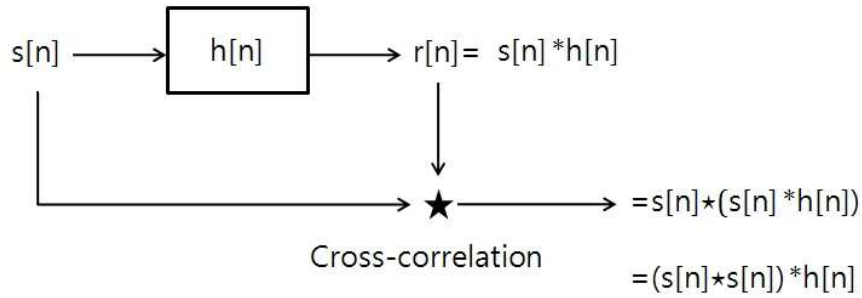


그림 3.2: 상호상관 방법.

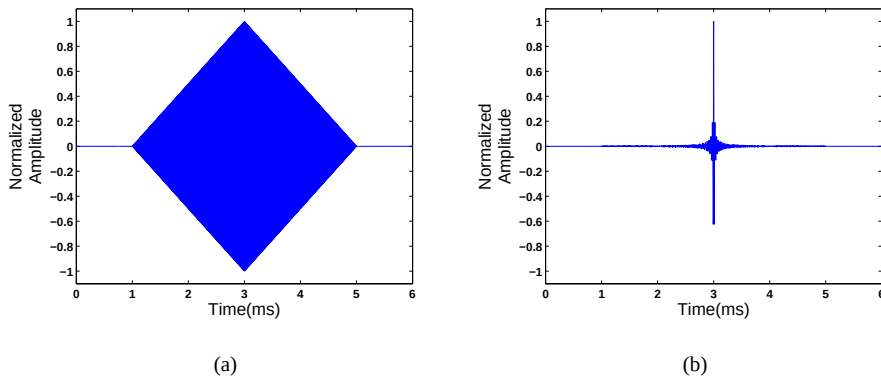


그림 3.3: CF신호와 FM 신호의 자기상관 결과 ((a)CF 신호의 자기상관 결과 (b)FM 신호의 자기상관 결과)

어떤지에 따라 임펄스 응답을 얼마나 정확하게 추정할 수 있는지가 결정되게 된다. 그림 3.3.(a), (b)는 각각 CF 신호와 FM 신호의 자기상관 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 CF 신호의 자기상관 결과는 폭이 넓은 반면에 FM 신호의 자기상관 결과는 폭이 좁은 것을 확인할 수 있다. 따라서 FM초음파를 발신하고 상호상관 방법을 사용하는 것이 임펄스 응답을 정확히 추정할 수 있음을 알 수 있다.

3.4 하나의 초음파 센서를 이용한 물체의 위치 추정

초음파 센서를 이용하여 물체의 위치를 추정하는 가장 일반적인 방법은 초음파 echo에서 발신한 초음파 펄스가 반사되어 돌아오는 시간(TOF)를 측정하여 초음파 센서와 물체와의 거리를 계산하고, 이 거리로부터 물체의 위치를 측정하는 방법이다. 이러한 방법의 경우 물체가 위치할 것으로 추정되는 위치는 원 또는 타원형 궤적으로 나타난다. 그림 3.4. (a)는 임의의 상황으로 삼각형 마크는 초음파 펄스가 발신되는 위치이고, 검정색 점은 물체의 위치를 나타낸다. 그림 3.4. (c)는 그림 3.4. (a)의 환경에서 그림 3.4. (b)와 같은 초음파를 발신하였을 때 물체에 반사되어 돌아온 echo이다. 반사되어 돌아온 echo와 발신한 초음파 펄스를 상호상관 할 경우 그림 3.4. (d)와 같이 초음파 펄스가 발신된 후 물체에 반사되어 돌아오기까지의 시간 (TOF)에 해당하는 위치에 발신한 FM신호를 자기상관한 결과가 생기는 것을 알 수 있다.

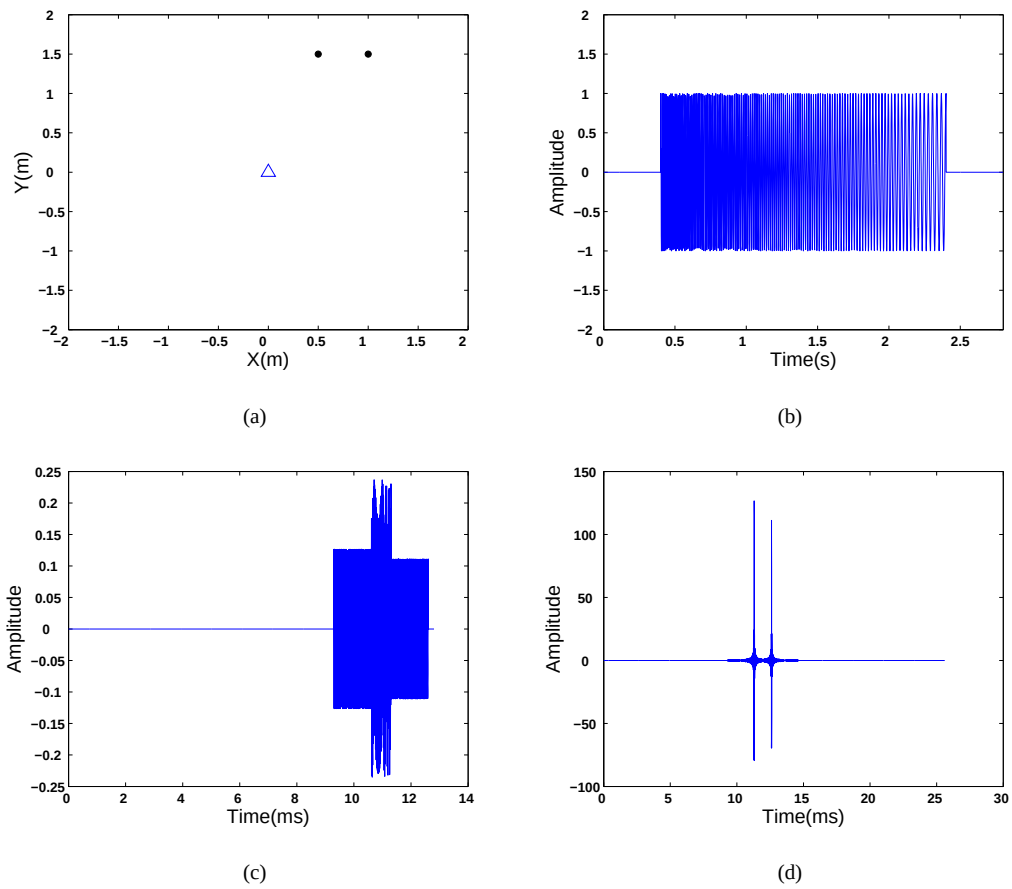


그림 3.4: 하나의 초음파 센서를 이용한 상황 ((a)시뮬레이션 환경 (b)발신한 FM초음파 펄스 (c)수신된 echo (d)발신한 초음파 펄스와 echo를 상호상관한 결과).

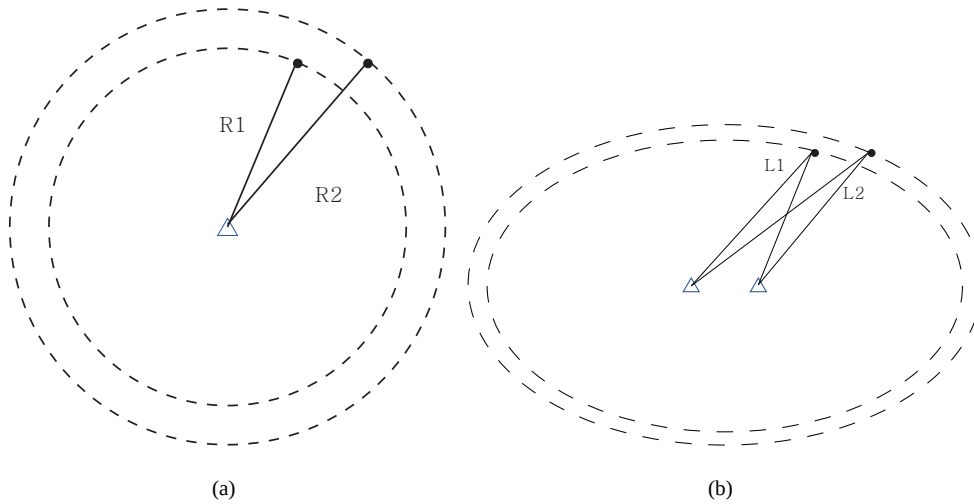


그림 3.5: 궤적을 통한 물체의 위치추정 ((a)수신부와 발신부가 같은 위치에 있을 경우 (b)수신부와 발신부가 다른 위치에 있을 경우).

그림 3.4. (d)로부터 구한 TOF로부터 각각의 물체와 초음파 발신부와 거리 $R1$ 과 $R2$ 를 구할 수 있고 따라서 물체의 위치는 그림 3.5. (a)와 같이 각각 반지름이 $R1$, $R2$ 인 원 위의 어딘가에 있을 것으로 추정할 수 있다. 그림 3.5. (a)의 경우는 초음파 발신부와 수신부가 같은 위치에 있을 때이고 3.5. (b)는 초음파 발신부와 수신부가 서로 다른 위치에 있을 때의 결과이다. 초음파 발신부와 수신부가 서로 다른 위치에 있을 경우 발신부와 수신부는 각각 타원의 초점이 되고 물체가 위치는 타원형의 궤적을 그리게 된다. 초음파 센서를 하나만 사용할 경우 물체가 위치한 정확한 위치는 알 수 없으며 물체가 위치할 것이라고 생각되는 원이나 타원과 같은 궤적만을 추정할 수 있다.

TOF정보 외에 이용할 수 있는 정보는 초음파 센서의 빔 각도이다. 초음파 센서의 빔 각도를 알고 있다면 물체가 위치할 것으로 생각되는 궤적이 원위의 한 점에서 호 위의 한 점으로 축소시킬 수 있다. 만약 수신부와 발신부가 따로 존재한다면 수신부와 발신부의 빔이 겹치는 부분에 물체가 존재한다고 생각할 수 있다. 하지만 초음파 센서를 이용하여 로봇의 장애물 회피, 네비게이션과 같은 활동을 하기 위해서는 물체의 위치를 더 정확하게 파악할 수 있는 방법이 필요할 것이다. 그 중 한 가지 방법은 하나 이상의 초음파 센서를 사용하는 방법이다.

3.5 초음파 배열을 이용한 물체의 위치 추정

초음파 배열을 이용할 경우 물체의 위치를 더 정확하게 파악할 수 있다. 그림 3.6는 초음파 센서 7개를 각각 50cm 간격으로 일렬로 배치한 상황을 나타낸 것이다. 그림에서 삼각형 표시는 센서를 의미하며, 점은 반사체의 위치를 나타낸다.

7개의 초음파 센서를 사용하였으므로 총 7개의 상호상관 결과를 얻을 수 있고 우리는 이 신호들을 이용하여 격자 기반의 초음파 지도를 그려 보았다. 초음파 지도를 완성하기 위해서는 지도를

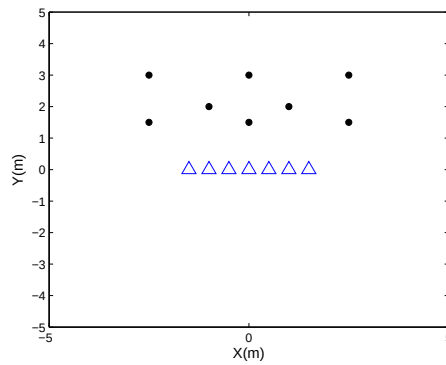


그림 3.6: 초음파 센서 배열을 이용한 물체의 위치 추정(초음파 센서 사이의 간격이 50cm일 때).

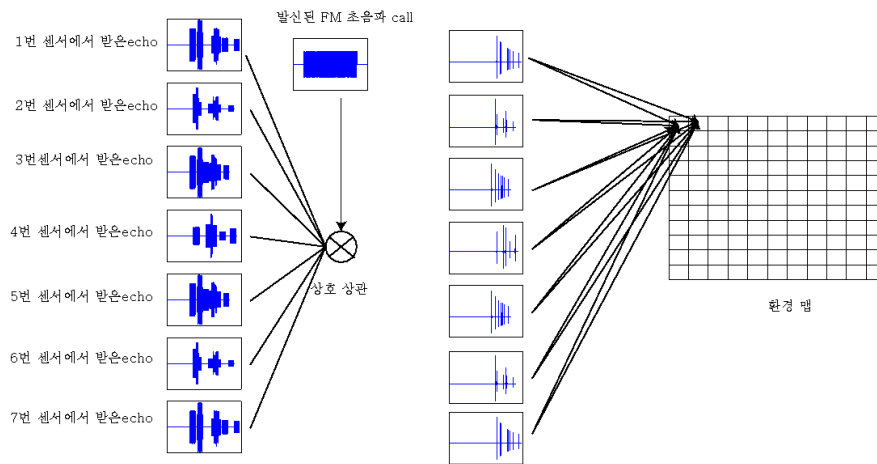
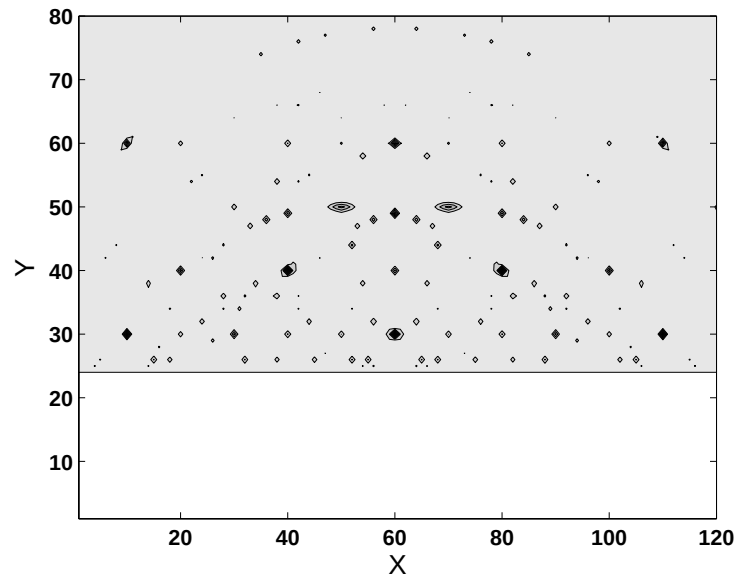


그림 3.7: 7개의 초음파 센서에서 받은 echo를 이용하여 초음파 지도를 그리는 과정.

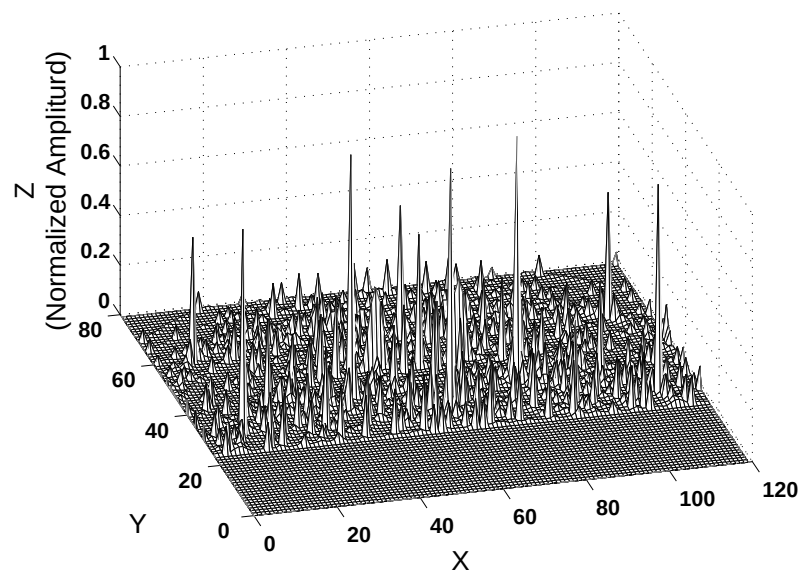
격자로 나누고 격자로 나누어진 각각에 셀에 대해서 값을 결정해야 한다. 먼저 지도의 한 셀을 선택하고 그 셀의 위치와 초음파 센서와의 거리에 따른 TOF를 계산한 후에 상호상관 처리된 echo 신호에서 계산한 TOF에 해당하는 값을 얻어낸다. 총 7개의 echo 신호가 있으므로 7개의 값을 얻어낼 수 있고 이 값들을 더한 것을 그 셀의 값으로 저장하고 이 과정을 모든 셀에 대하여 반복하게 되면 초음파 지도를 얻을 수 있다. 7개의 echo신호로부터 초음파 맵을 그리는 과정을 그림으로 나타내면 그림 3.7와 같다.

그림 3.8.(a)는 앞에서 설명한 과정을 거쳐 주변 지도를 그린 결과이다. 그림 3.6의 실제 환경과 비교하여 보았을 때 실제 물체가 있는 곳에 신호가 세게 나타나지만, 실제 물체가 없는 곳에도 오차 신호가 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 3.8.(b)는 초음파 지도에서 각 물체가 위치한 셀의 값과 물체가 없는 셀의 값의 차이를 살펴보기 위해 3차원으로 그린 결과이다.

일반적으로 하나 이상의 초음파 센서를 사용할 경우 물체위치를 더 정확하게 측정할 수는 있으나 측정 반복 속도는 느려지게 된다. 예를 들어 모든 초음파 센서에서 동시에 초음파를 발신할 경우 각각에 초음파에서 발신된 신호들에 의한 echo가 겹쳐서 들어오게 되며 이럴 경우 echo 중 어떤 신호가 어떤 초음파에서 발신된 신호인지 구별이 불가능하기 때문에 TOF의 측정이 불가능



(a)



(b)

그림 3.8: 7개의 초음파 센서 배열을 이용하여 그린 초음파 지도 ((a)초음파 지도를 2차원으로 본 결과 (b) 초음파 지도를 3차원으로 본 결과).

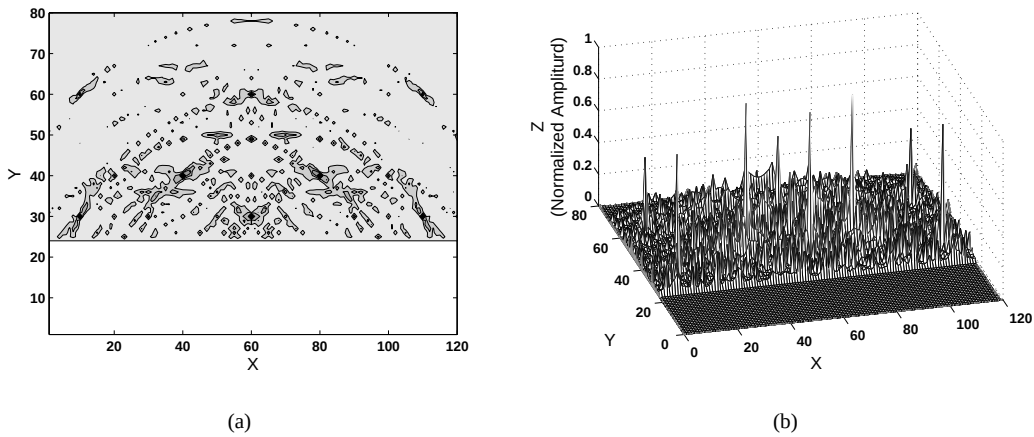


그림 3.9: 각각의 센서에서 서로 다른 주파수 범위의 FM 초음파를 발신하여 그린 초음파 지도((a)초음파 지도를 2차원으로 본 결과 (b)초음파 지도를 3차원으로 본 결과).

해 진다. 따라서 하나의 초음파 센서에서 발신된 신호가 물체에 반사되어 돌아오기까지 충분한 시간을 기다린 후 다른 센서에서 초음파를 발신하는 식으로 측정을 진행하여야 하는데 이럴 경우 하나의 초음파를 사용할 때에 비해서 측정 속도가 느려지게 된다.

우리는 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 각각의 센서에서 발신하는 초음파의 FM 주파수를 다르게 하여 초음파 신호를 동시에 발신하여 수신되는 신호가 겹치더라도 상호상관 방법을 통하여 각각의 신호를 구분할 수 있었다. FM 초음파의 경우 신호의 시작 주파수, 끝 주파수, 시간에 따른 주파수의 변화율, 주파수가 선형적으로 감소하는가 곡선으로 감소하는가 또는 증가하는가 등등 여러 파라미터가 있기 때문에 어떻게 서로 다른 FM초음파를 할 것인지에 대한 방법은 여러 가지가 있을 수 있다.

그림 3.9는 7개의 초음파 센서에서 발신하는 FM신호의 주파수를 135kHz~120kHz, 120kHz~105kHz,, 45kHz~30kHz로 서로 주파수 대역이 겹치지 않도록 하고 동시에 발신하도록 시뮬레이션 하여 얻은 결과이다. 각각의 하나의 초음파 센서에서 발신된 신호가 수신되기까지 기다린 후 다른 초음파 센서에서 초음파를 발신하는 방식으로 신호를 획득하여 초음파 지도를 그린 그림 3.8.(b)의 결과와 비교하였을 때 노이즈가 심한 것을 확인할 수 있다.

그 이유는 각각의 센서에서 서로 다른 주파수의 FM신호를 사용하고 상호상관 방법을 통하여 자신 외에 다른 센서에서 발신된 신호의 영향을 최소화하였으나, 다른 센서에서 발신된 신호의 영향이 완전히 제거되지 않았기 때문이라고 할 수 있다. 그림 3.10.(b)는 모든 센서에서 각각 다른 주파수의 FM 신호를 발신하고 얻어진 echo와 발신한 FM 신호 중 하나의 신호와 상호상관한 결과이고, 그림 3.10.(a)는 한 번에 하나의 센서에서 초음파를 발신하고 수신된 echo와 발신한 신호를 상호상관한 결과이다. 두 그림 모두 피크가 나타나는 위치는 일치하지만 그림 3.10.(a)의 경우 피크가 나타나는 지점 외의 다른 곳에서도 약한 신호가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이 신호는 다른 센서에서 발신된 신호에 의한 결과이며, 초음파 맵을 그렸을 때 노이즈로 나타나게

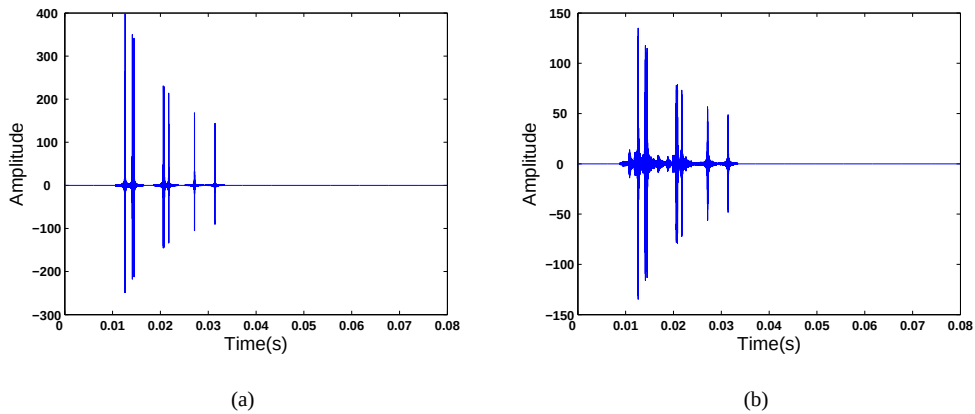


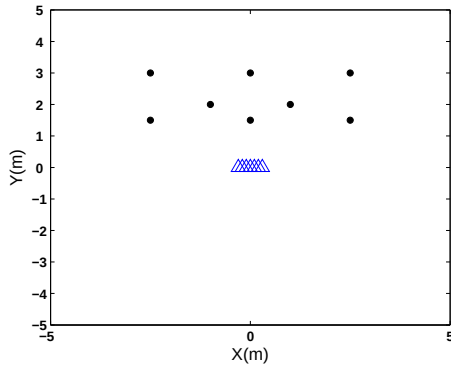
그림 3.10: 초음파 센서에서 발신된 신호와 수신된 신호를 상호상관한 결과 ((a)한번에 하나의 센서에서 초음파를 발신하였을 때 (b)각각 다른 주파수의 FM 초음파를 모든 센서에서 동시에 발신하였을 때).

된다.

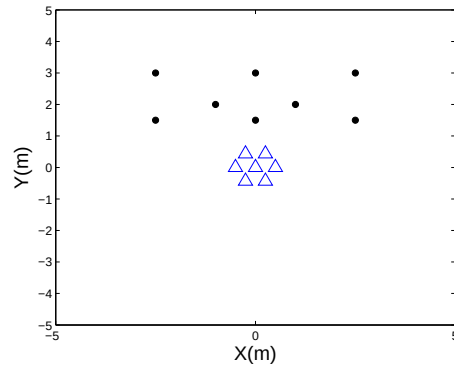
초음파 배열을 이용할 때에 중요한 것 중 하나는 초음파 센서를 어떻게 배치할 것인가이다. 그림 3.11.(a), (b)는 각각 초음파 센서를 10cm 간격으로 일렬로 배열한 것과, 한 변의 길이가 50cm인 정육각형의 꼭짓점과 중심에 초음파 센서를 배열한 그림이고 그림 3.11.(c), (d)는 각각의 초음파 배열을 이용하여 앞에서와 같은 방법으로 초음파 지도를 그린 결과이다. 같은 수의 초음파 센서를 사용하더라도 어떠한 형태로 초음파 센서를 배치하는지에 따라 얻을 수 있는 정확도는 달라진다. 하지만 일반적으로 초음파 센서를 배치하는 간격이 길어질수록 정확도가 증가하게 되는 것을 확인할 수 있다.

우리는 초음파 배열을 이용함에 있어서 센서 하나에서 신호를 발신하고 echo를 수신할 때까지 기다린 후 다음 센서를 발신하는 방법과, 각각의 초음파 센서에서 다른 주파수 대역의 FM 초음파를 동시에 발신하는 방법에 대해서 연구하였다. 이러한 방법 외에도 센서 사이에 신호를 발신하는 시간 간격을 조절하여 초음파 배열을 이용하는 효과를 높이는 위상 배열 (phased array) 방법이 있다. 이 방법은 센서에서 초음파를 발신하는 타이밍과 세기를 조절함으로써 원하는 위치에서 각각의 센서에서 발신된 신호들이 보강 간섭을 일으키고 다른 위치에서는 상쇄 간섭을 일으키도록 하고, 수신하는 경우 다른 위치에서 수신되는 신호의 세기는 줄이고 특정 위치에서 수신되는 신호의 세기만 키우도록 하는 방법이다.

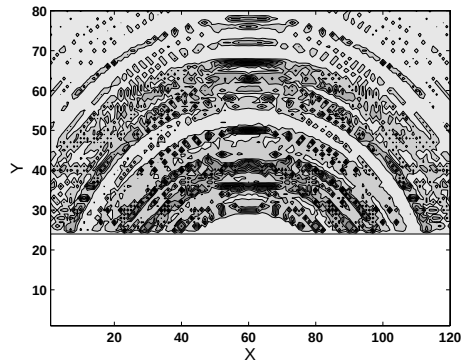
우리는 이러한 방향으로 연구를 진행할 수도 있었으나 몇 가지 고려해야 할 점이 있었다. 먼저 공기 중은 아니지만 의료용 초음파, 비파괴 검사와 같이 다른 매질에서 초음파 배열을 이용한 많은 연구가 이루어진 상황에서 기존 연구와 차별화된 연구를 하기 쉽지 않을 뿐더러 박쥐의 초음파 탐지 능력을 모방함에 있어서 박쥐는 하나의 초음파 발신부와 2개의 수신부를 사용한다는 점에서 여러 개의 초음파 센서를 사용하는 방법보다는 제한된 수의 초음파 센서를 이용하여 물체를 탐지하는 방향으로 연구를 진행하였다. 이와 관련된 내용은 다음 장에서 다룰 것이다.



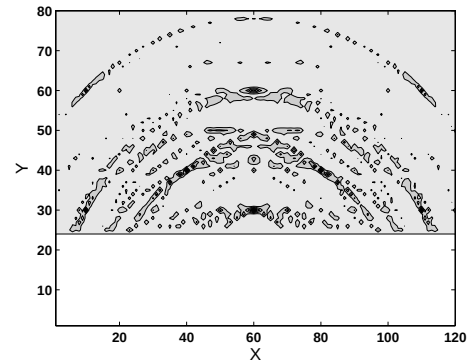
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3.11: 센서 배열의 형태 ((a)초음파 센서를 10cm간격으로 일렬로 배열. (b)초음파 센서를 50cm간격의 정육면체로 배열 (c)초음파 센서를 10cm간격으로 일렬로 배열하였을 때의 초음파 지도 (d)초음파 센서를 50cm간격의 정육면체로 배열하였을 때의 초음파 지도).

3.6 요약

이번 장에서는 초음파 배열을 이용하여 격자 기반의 초음파 지도를 그리는 방법에 대해서 정리하였다. FM 초음파 신호 발신과 상호상관 방법을 이용하여 초음파 센서와 물체까지의 거리를 추정할 수 있었으며, 초음파 배열의 각각의 센서에서 얻은 정보를 결합하여 초음파 지도를 그려보았다. 초음파 지도의 정확도는 초음파 센서들 사이의 간격이 넓어질수록 증가하지만, 실제로 로봇에 적용하기에는 초음파 센서의 간격이 좁은 것이 유리할 것이다. 또한 일반적으로 초음파 배열을 사용할 경우 각각의 초음파 센서에서 발신되는 초음파 신호의 간섭으로 인해 한 번에 하나씩 신호를 발신, 수신해야 하지만 서로 다른 주파수의 FM신호를 이용할 경우 동시에 신호를 발신 수신하더라도 다른 초음파 센서에 의한 간섭을 줄일 수 있음을 확인하였다.

제 4 장

움직이는 초음파 센서

박쥐가 비행하면서 초음파를 이용하여 정보를 획득하는 상황은 초음파 센서가 이동하는 상황에서 정보를 획득하는 상황으로 생각할 수 있다. 박쥐는 비행 중에 지속적으로 초음파 펄스를 발신하여 정보를 획득하는데 우리는 박쥐가 각각의 초음파 echo에 의한 정보를 종합하여 처리함으로써 더 정확한 정보를 획득할 수 있다고 생각하였다. 또한 2장에서 살펴보았듯이 박쥐는 박쥐의 비행으로 발생하는 도플러 효과에 도플러 보상과 같은 대응 전략을 가지고 있는 것으로 알려져 있다.

이번 장에서 우리는 초음파 센서가 움직이는 상황에서 적용할 수 있는 알고리즘에 대한 연구를 소개할 것이다. 초음파 센서를 이용한 기존의 많은 연구들은 초음파 센서가 정지한 상태나 도플러 효과가 발생하지 않는 상황, 도플러 효과가 미미한 상황을 가정하고 도플러 효과로 인한 신호의 변형을 고려하지 않고 초음파 신호의 발신 수신을 통해 초음파 지도를 그리는 방법에 대해서 연구하였다면 4장에서 우리는 박쥐와 같이 초음파 센서가 움직이는 상황에서 발생하는 도플러 효과를 고려하여 초음파 지도를 그리는 방법에 대하여 연구하였다.

4.1 움직이는 초음파 센서를 이용한 물체의 위치추정

3장에서 보았듯이 정지한 하나의 센서를 이용할 경우 물체가 원 궤적 위의 한 점에 있다는 것을 추정할 수 있으며 3장에서는 여러 개의 초음파 센서를 사용하는 방법으로 물체의 위치에 대한 불확실성을 줄이는 방법에 대해서 연구하였다. 물체의 위치에 대한 불확실성을 줄일 수 있는 다른 방법은 센서를 이동시키면서 초음파를 발신 수신하고 각각의 위치에서 얻은 신호들을 종합하여 위치를 추정하는 방법이다.

그림 4.1. (a)는 초음파 센서가 속도로 움직이고 있고 ①, ②, ③, ④의 위치에서 초음파를 펄스를 수신하고 echo를 받는 상황을 나타낸다. 이럴 경우 각각의 위치에서 받은 echo를 이용하여 물체가 위치할 것으로 추정되는 궤적을 그릴 수 있고, 그 궤적은 그림 4.1. (b)와 같다. 그림에서 확인할 수 있듯이 각각의 궤적이 만나는 교점이 생기게 되고 교점의 위치가 물체의 위치가 될 것이다. 그림에서 교점이 초음파 센서의 위쪽과 아래쪽에 생성되게 되지만 초음파 센서에서 초음파를

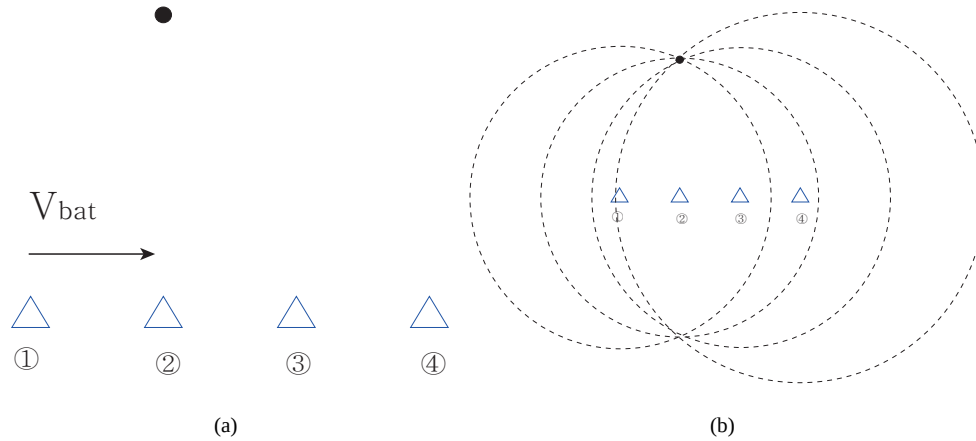


그림 4.1: 초음파 센서가 이동하는 상황에서의 위치 추정 ((a)초음파 센서가 이동하는 상황 (b)신호를 발신 수신한 각각의 위치에서 원 궤적을 통한 위치 추정).

위쪽을 향하여 발신하였는지 아래쪽을 향하여 발신하였는지 알 수 있으므로 위와 아래의 교점 중, 어느 위치에 물체가 있는지 알 수 있을 것이다.

4.2 도플러 효과를 이용한 물체의 위치추정

초음파 센서가 이동하는 상황에서 물체의 위치에 대한 불확실성을 줄일 수 있는 또 다른 방법은 초음파 센서의 이동으로 나타나는 도플러 효과를 이용하는 것이다. 초음파 발신부와 물체 사이의 상대적인 속도에 따라 도플러 효과가 발생하게 되며 2장에서 확인하였듯이 음파의 매질에서의 속도에 대해서 초음파 소스나, 반사체의 속도의 비율이 높을수록 더 큰 도플러 효과가 발생하게 된다. 음파의 속도는 20°C의 공기 중에서 343m/s, 액체인 물 속에서는 1482m/s, 고체인 금속에서는 5960m/s로 공기 중에서 가장 느린 것으로 알 수 있다. 박쥐의 비행 속도는 약 3-8m/s로 공기 중에서의 음파의 속도와 비교하였을 때 무시할 수 없는 속도이며 따라서 움직이는 박쥐가 발신하고 물체에 반사되어 돌아오는 echo에는 무시할 수 없는 도플러 효과가 발생하게 된다. 박쥐는 도플러 효과에 도플러 보상(doppler compensation)이라는 방법으로 박쥐는 도플러 효과에 능동적으로 대응한다는 관찰로부터, 우리 또한 도플러 효과를 물체의 위치 추정에 이용할 수 있을 것이라고 생각하였다.

그림 4.2는 CF-FM초음파 신호의 스펙트로그램이다. 그림 4.2의 초음파 신호는 처음부터 2ms구간까지는 60kHz의 일정한 주파수를 갖고 2ms부터 3ms 구간까지는 주파수가 감소하는 형태의 CF-FM 초음파 신호이다. 우리가 여기서 제안하는 방법은 움직이는 초음파 발신부에서 CF-FM 초음파를 발신하고 반사되어 돌아온 echo에서 발신한 CF-FM 초음파 신호의 CF 초음파 부분을 이용하여 도플러 편이를 측정하여 물체가 위치한 각을 알아내고, FM 초음파 부분에 해당하는 신호에 상호상관 방법을 적용하여 물체까지의 거리를 정확하게 측정하여 최종적으로 물체의 위치를 추정하는 알고리즘이다.

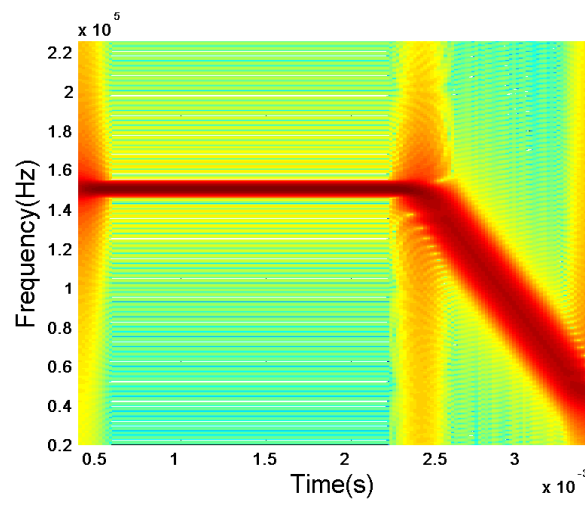


그림 4.2: CF-FM초음파.

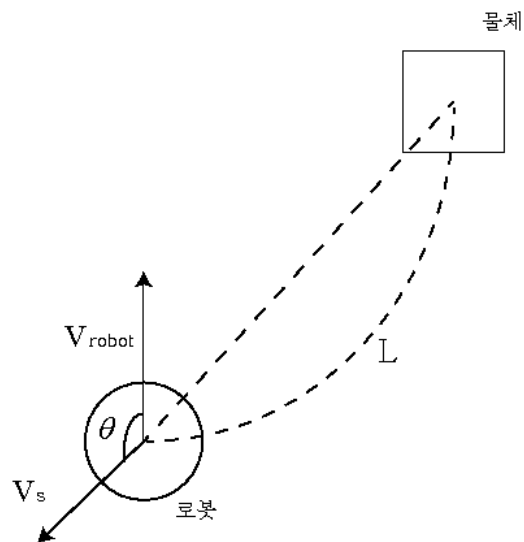


그림 4.3: 로봇의 위치 추정에 필요한 값들 (Park and Kim, 2011b).

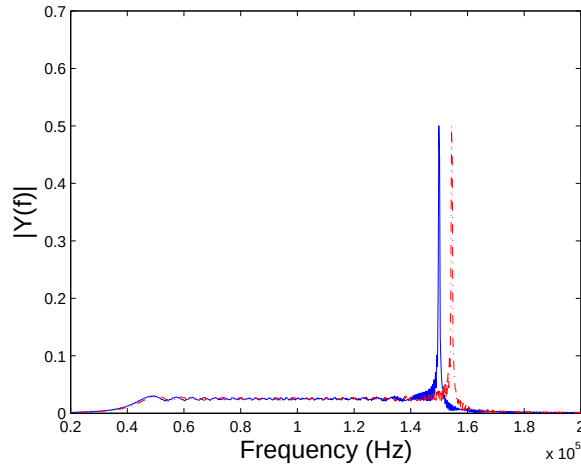


그림 4.4: CF-FM초음파를 푸리에 변환한 결과.

그림 4.3 는 물체가 임의의 위치에 고정되어 있고 로봇이 임의의 방향으로 v_{robot} 의 속도로 움직이고 있는 상황이다. 이 상황에서 물체의 위치를 추정하기 위해서는 물체까지의 거리 값인 L 과 물체가 위치한 각 θ 를 추정할 수 있어야 한다. 물체가 위치한 각을 추정하기 위해 우리는 echo 신호의 도플러 효과를 이용할 것이다. 움직이고 있는 초음파 발신부에서 발신된 초음파가 정지해 있는 물체에 반사되어 돌아올 때의 도플러 효과는 아래의 식과 같다.

$$f_r = \frac{c - v_s}{c + v_s} f_0 \quad (4.1)$$

여기에서 f_0 , f_r 은 각각 초음파 발신부에서 발신된 주파수, 반사되어 돌아온 초음파의 주파수이고 c 는 음파의 속도, v_s 는 초음파 센서가 물체로부터 멀어지는 방향의 속도이다. 발신한 초음파의 주파수 f_0 과 반사되어 돌아온 초음파 주파수 f_r 는 푸리에 트랜스폼을 이용해 알 수 있다. 예를 들어 로봇이 물체를 향해 5m/s의 속도로 움직이고 있는 상황에서 로봇이 60kHz 주파수의 CF초음파와 60kHz에서 40kHz로 주파수가 변하는 FM초음파가 결합된 CF-FM초음파를 발신한 경우 그림 4.4에서와 같이 각각의 초음파 신호를 푸리에 변환하여 f_0 , f_r 를 구할 수 있다.

그림 4.4에서 실선은 발신한 CF-FM 초음파를 푸리에 변환한 것이며, 점선은 수신된 echo를 푸리에 변환한 것이다. 그림에서 확인되는 두 개의 피크는 각각 발신된 펄스의 CF초음파와 수신된 echo의 CF초음파의 주파수에 해당하는 부분이다. 도플러 효과는 CF-FM초음파의 CF초음파 주파수에 의해 발생하는 피크로 쉽게 확인할 수 있으며 이러한 이유에서 FM 초음파를 사용하기 보다는 CF-FM초음파를 사용하는 것이 도플러 효과 측정에 유리할 것이다.

식 4.1에서 f_0 , f_r 의 값은 푸리에 변환으로 측정할 수 있고 공기 중에서의 음파의 속도 c (약 340m/s) 는 알고 있기 때문에 초음파 발신부가 물체로부터 멀어지는 방향의 속도 v_s 를 구할 수 있다. 또한 발신부에 부착된 모터 엔코더 등의 속도 측정 장치를 이용하여 발신부가 움직이는 속도 v_{robot} 를 알 수 있다고 하면, 그림 4.3의 θ 값은 식 4.2로 구할 수 있다. 이 경우 물체가 위치한

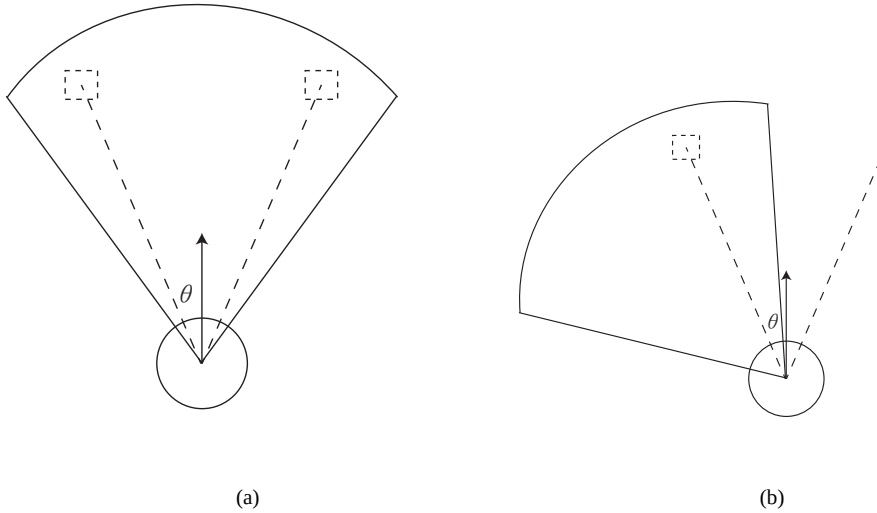


그림 4.5: 센서의 빔의 방향에 따른 물체의 위치 추정 ((a)초음파센서의 빔이 속도의 방향과 같을 때 (b) 초음파 빔이 속도의 방향과 다를 때).

각 $\pm\theta$ 를 구할 수 있다.

$$|v_{robot}| \cos\theta = |v_s| \quad (4.2)$$

발신부와 물체와의 거리 L 은 초음파가 발신부에서 발신된 후 물체에 반사되어 다시 발신부로 돌아오기까지 걸린 시간(TOF)를 측정하여 식4.3과 같이 구할 수 있다.

$$L = \frac{TOF}{2} * c \quad (c \text{는 음파의 속도}) \quad (4.3)$$

물체의 거리 추정은 CF-FM 초음파 신호의 FM부분을 이용한다. FM 성분이 있는 신호와 echo를 상호상관할 경우 CF 초음파만을 이용할 때보다 정확도를 높일 수 있고 서로 다른 물체가 초음파 발신부로부터 비슷한 거리에 위치하여 반사되어 돌아오는 신호가 겹치는 상황에서도 각각의 물체의 거리를 측정할 수 있다는 장점이 있다. 도플러 효과를 이용하여 물체의 위치를 추정하는 방법의 경우, 초음파 펄스를 발신하는 방향에 따라 위치 추정 효과가 다를 수 있다. 그림 4.5. (a)는 초음파를 센서의 빔을 속도 방향과 같은 방향으로 향하게 한 것이고, 4.5. (b)는 초음파 센서의 빔을 속도 방향과 비스듬한 방향으로 향하게 한 그림이다. 도플러 효과로부터 추정할 수 있는 위치각인 $+\theta$ 와 $-\theta$ 는 물체가 이동하는 속도 방향에 대한 각이기 때문에 그림 4.5 (b)에서와 같이 $+\theta$ 위치만 초음파 센서의 빔 안에 들어오게 되며 따라서 물체가 위치하는 각 θ 를 하나로 정할 수 있다. 이럴 경우 반대쪽에 있는 물체는 탐지할 수 없기 때문에, 초음파 센서를 반대쪽에 하나 더 설치하여 보완할 수 있을 것이다. 초음파 센서가 움직이는 상황에서 TOF에 추가로 도플러 효과를 이용하여 위치를 추정하는 방식은 하나의 센서를 사용함에도 두 점 정 하나의 점에($\pm\theta$) 물체가 있는 것으로 추정할 수 있다. 이 방법은 TOF만 사용하여 원이나, 호 위의 어딘가에 물체가 있는 것으로 추정하는 방식에 비해 위치의 불확실성을 크게 줄일 수 있는 방법이다.

앞에서는 도플러 편이를 측정하기 위하여 발신한 초음파 펄스 신호의 CF주파수와 수신한 신호의 CF주파수를 비교하였다. 하지만 여러 개의 반사체가 있는 복잡한 환경과 같은 상황에서는

각각의 반사체에서 반사된 신호가 겹치기 때문에 푸리에 변환을 통해서 CF 신호의 주파수의 변화를 측정하는 것이 어려울 수 있다. 도플러 편이를 측정하는 다른 방법은 발신한 초음파 펄스 신호의 길이와 수신한 신호의 길이를 비교하는 방법이다. 일반적으로 발신하는 초음파 펄스를 $s(t)$ 라고 한다면 수신되는 echo 신호는 도플러 효과에 의해서 $s(at)$ 와 같이 시간 축에서 신호는 압축 또는 확장이 된다. 이때 a 는 도플러 효과에 의한 상수로, 초음파 센서가 물체와 멀어지는 속도가 V_s 이고, 물체는 가만히 있는 상황에서 도플러 상수는 다음과 같다.

$$a = \frac{c - V_s}{c + V_s} \quad (4.4)$$

여기서 c 는 음파의 속도이고 V_s 는 초음파 센서가 물체와 멀어질 때 +값을 갖고 가까워질 때 -값을 갖는다. 보통 박쥐의 비행 속도는 3-8m/s이고, 박쥐가 8m/s로 멀어질 때와 가까워질 때의 도플러 factor는 각각 0.954, 1.048이다. 도플러 효과에 영향을 미치는 것은 박쥐의 절대적인 속력이 아니라 박쥐가 대상이 되는 물체와 얼마나 멀어지는지 가까워지는지에 의해 결정되기 때문에 박쥐의 비행 속도가 최대 8m/s라면 도플러 효과에 의한 상수는 0.954 1.048 사이의 값이 될 것이다.

박쥐가 발신하는 FM 초음파의 길이는 종마다 다르지만 보통 3ms를 넘지 않는다고 보았을 때, 도플러 효과에 의한 FM 초음파 신호의 길이 변화는 도플러 factor가 0.954일 때 (박쥐가 반사체와 멀어지는 방향으로 8m/s로 비행) $3.1447(=3/0.954)$ ms이고, 도플러 상수가 1.048일 때(박쥐가 반사체와 멀어지는 방향으로 8m/s로 비행) $2.8626(=3/1.048)$ ms이다. 도플러 상수를 알면 신호의 길이 변화를 계산할 수 있듯이 반대로 신호의 길이 변화를 알면 도플러 factor를 계산할 수 있고 도플러 factor로부터 V_s 를 구할 수 있으며, 식 4.2를 이용해 앞에서 설명했던 것과 같이 각 $\pm\theta$ 를 추정할 수 있다. 신호의 길이 변화를 이용하여 도플러 효과를 측정하려면 신호의 길이가 길수록 유리할 것이지만 신호의 길이를 늘리게 되면 반사되어 돌아오는 echo와 발신하는 초음파 펄스가 겹치게 될 확률이 증가하게 된다.

Echo와 초음파 펄스가 겹치는 확률을 줄이면서 신호의 길이를 늘이는 방법 중 하나는 박쥐가 접근 상태에서 사용하는 펄스 발신 패턴, 즉 펄스 그룹을 사용하는 것이다. 그림 4.6은 2개의 펄스로 구성된 그룹 펄스가 발신되고 반사되어 돌아온 것을 스펙트로그램으로 나타낸 것이다. 그림에서 a, b, c 는 각각 발신한 펄스 그룹에서 첫 번째 펄스의 길이, 첫 번째 펄스와 두 번째 펄스 사이의 간격, 두 번째 펄스 신호의 길이를 나타내고, a', b', c' 는 펄스가 반사되어 돌아왔을 때의 길이를 나타낸다.

직관적으로 길이가 짧은 a 나 c 의 길이가 어떻게 변화되었는지 확인하는 것 보다 b 의 길이가 어떻게 변화되었는지를 살펴보는 도플러 효과를 측정하는 데에 유리할 것으로 볼 수 있다. 예를 들어 발신한 펄스 그룹에서 b 의 간격이 10ms라고 한다면 도플러 상수가 0.954일 때 b' 는 10.4822ms이고, 도플러 상수가 1.048일 때 b' 는 9.54ms로 길이가 3ms인 초음파 펄스를 이용 하여 도플러 효과를 측정할 때보다 더 쉽게 도플러 효과를 측정할 수 있을 것이다.

이번 절에서 제안한 도플러 효과를 이용한 위치 추정 방법은 지상에서 빠르게 움직이는 모바일 로봇이나 자동차에 부착하여 간단하게 주변 장애물의 위치를 추정할 수 있을 것이다. 빠른 속도

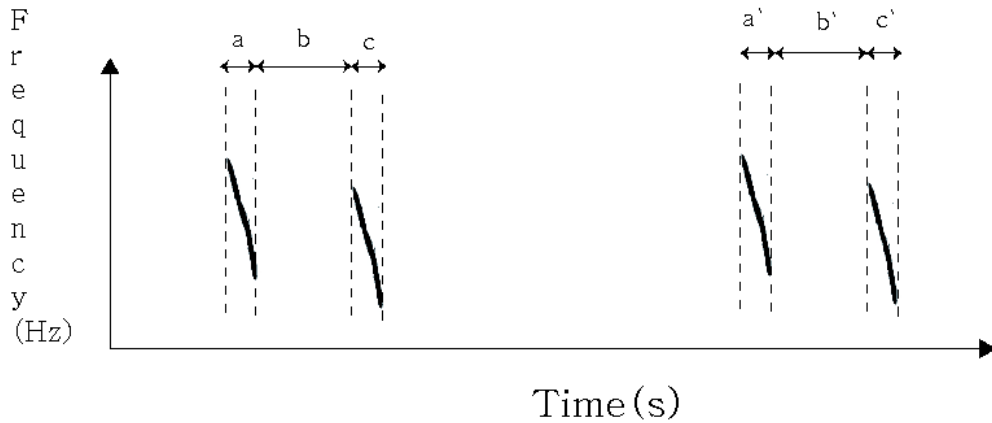


그림 4.6: 펄스 그룹 발신을 통한 도플러 효과 측정.

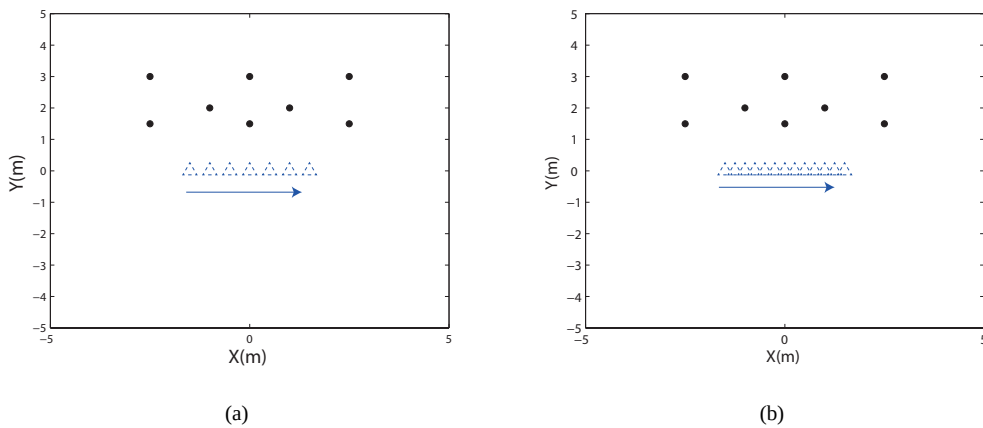


그림 4.7: 움직이는 센서를 이용한 물체 위치 추정 ((a) 7번의 초음파 발신 수신 (b) 13번의 초음파 발신 수신)

로 움직이는 모바일 로봇에서 시각 센서를 사용하여 물체를 거리를 파악하는 것은 많은 연산과 필요로 하고, 밤에는 사용할 수 없다는 것을 고려한다면, 간단한 물체의 위치 추정, 충돌 방지 등의 용도에는 본 초음파 센서 기술이 유용할 것이다. MAU (micro air vehicle) 와 같이 소형이고 빠르게 날아다니는 로봇의 경우에도 작고 가벼운 센서를 필요로 하는데, 이럴 경우에도 이번 절에서 소개한 방법이 유용할 수 있을 것이다.

4.3 격자 기반 방식의 초음파 지도

초음파 센서가 이동하는 경우 초음파 배열을 사용하지 않더라도 그림 4.7 에서처럼 이동 경로 중간 중간에 초음파 펄스를 발신, 수신함으로써 초음파 배열을 사용하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다. 초음파 센서를 이동시킬 때와 이동시키지 않을 때의 다른 점은, 초음파 센서가 이동될 경우 도플러 효과가 발생한다는 것이다. 그림 4.7 에서처럼 박쥐는 x축 방향으로 5m/s의 속도로 이동하면서 삼각형으로 표시된 위치에서 초음파를 발신하고 반사되어 돌아오는 echo를 수신하는 것으로 생각하고 앞에서와 마찬가지로 방법으로 초음파 지도를 그려보았다. 아래의 그림 4.8.

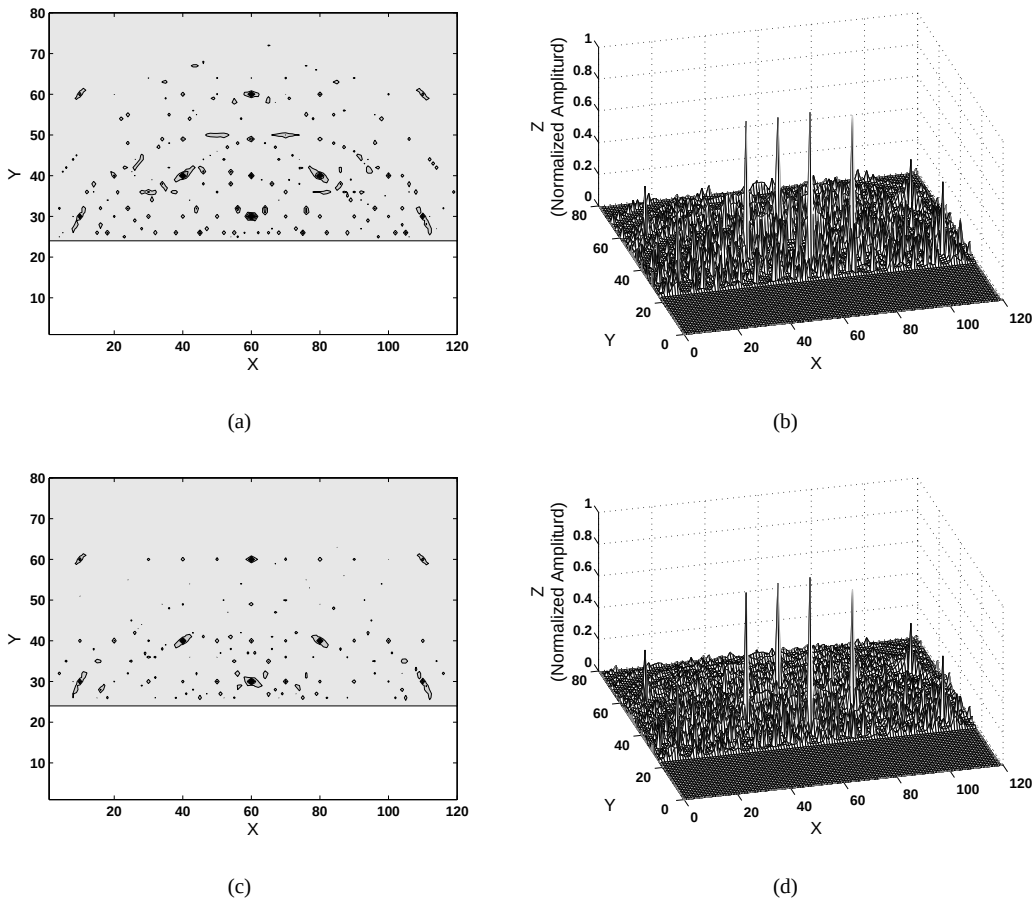


그림 4.8: 센서가 움직이는 조건 ((a) 초음파를 7번 발신하였을 때 2차원 지도 (b)초음파를 7번 발신하였을 때 3차원 지도 (c) 초음파를 13번 발신하였을 때 2차원 지도 (d) 초음파를 13번 발신하였을 때 3차원 지도)).

(a),(b) 와 그림 4.8. (c),(d) 는 그 결과이다.

초음파 배열을 사용할 때와 같은 수인 7곳의 위치에서 얻은 echo를 이용하였지만 초음파 배열을 사용하여 초음파 지도를 그린 그림 3.8의 결과와 비교하였을 때 노이즈가 더 심함을 알 수 있다. 노이즈가 심해진 이유는 도플러 효과에 의해서 물체에 반사되어 돌아온 echo신호가 변형되어 발신한 초음파 펄스와 상호상관을 하였을 때 왜곡이 생기기 때문이다.

그림 4.9는 도플러 효과에 의해 상호 상관 결과에 어떠한 왜곡이 생기는지 알아본 결과이다. 4.9. (a)는 도플러 효과에 의해 발신된 신호 $s[n]$ 이 도플러 효과에 의해 주파수와 신호의 길이가 변화된 $s'[n]$ 으로 바뀌게 되어 상호상관 결과에 영향을 미치게 됨을 나타내는 그림이다. 그림 4.9. (b)는 센서가 정지한 상태, 즉 도플러 효과가 0일 때 발신한 펄스와 echo를 상호 상관한 결과이다. 상호 상관을 하였을 때 피크가 나타나는 지점이 발신부와 물체의 TOF가 될 것이다. 그림 4.9. (c)는 초음파 센서가 물체를 향해 5m/s로 다가가고 있을 때 발신한 펄스와 수신된 echo를 상호 상관 한 결과이다. 초음파 센서가 물체를 향해 5m/s로 다가가고 있는 경우 발신한 FM 초음파 펄스의 주파수와 길이가 각각 35kHz~110kHz, 2ms이었다면 반사되어 돌아온 echo의 초음파는

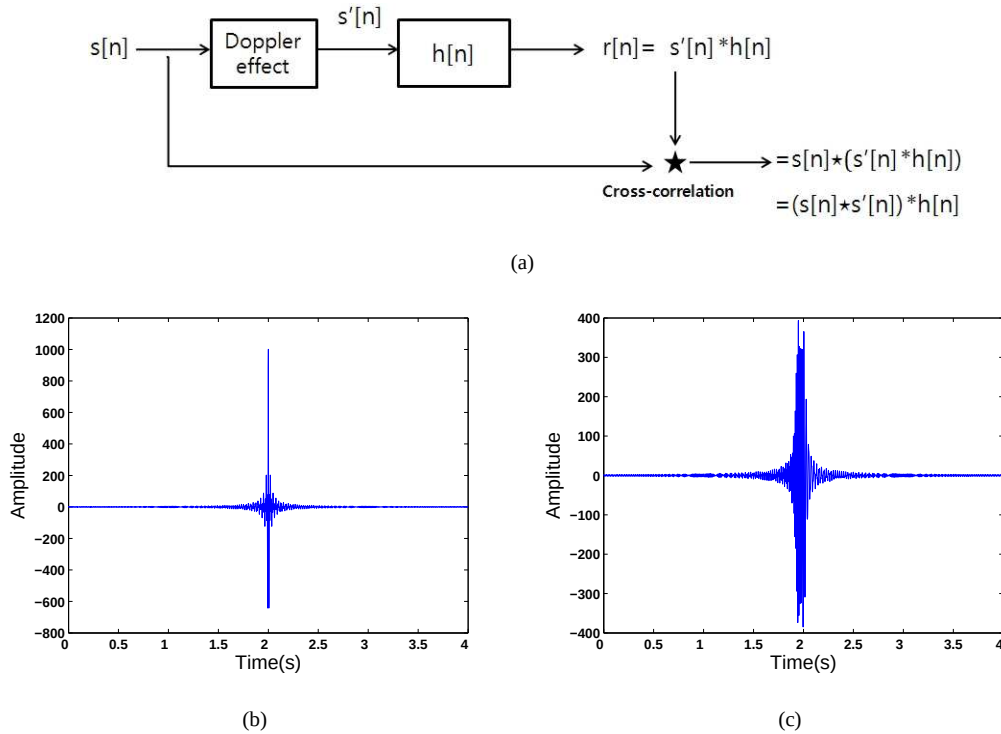


그림 4.9: 도플러 효과에 따른 상호상관 결과의 왜곡 ((a)도플러 효과를 고려한 상호상관 (b)도플러 효과가 0일 때 상호상관 결과 (c)센서가 5m/s로 이동할 때 상호상관결과).

36.05~113.28kHz, 1.942ms가 된다. 즉 상호 상관하는 두 신호가 서로 다른 주파수를 갖는 신호가 되기 때문에 그림 4.9. (c)와 같이 상호상관 결과 피크의 진폭이 줄어들고 피크가 나타나는 시간도 오차가 발생하게 되는 것을 알 수 있다.

우리는 도플러 편이로 발생하는 상호상관 결과에 왜곡을 막기 위한 방법으로 echo와 상호상관하는 신호를 발신한 펄스를 그대로 사용하는 대신에 발신한 펄스에 도플러 효과를 적용한 신호를 상호상관하여 보았다. 이 방법을 다이어그램으로 나타내면 그림 4.10과 같다. 초음파 센서가 이동하는 속도를 알고 있다면 지도의 한 셀을 선택하게 되었을 때 초음파 센서가 그 셀을 향해 다가가거나 멀어지는 속도를 알 수 있고 따라서 도플러 효과를 계산할 수 있다. 따라서 상호상관을 할 때 원래 발신한 초음파 펄스가 아니라 발신한 초음파 펄스에 도플러 효과를 적용한 초음파 펄스를 상호상관하면 상호상관 결과의 진폭이 줄어들거나 피크가 나타나는 지점이 왜곡되는 현상을 막을 수 있다.

앞에서 예를 든 것처럼 초음파 센서가 물체를 향해 5m/s로 다가가고 있는 경우 발신한 FM 초음파 펄스의 주파수와 길이가 각각 35kHz~110kHz, 2ms이었다면 반사되어 돌아온 echo의 초음파는 36.05~113.28kHz, 1.942ms가 된다. 이 상황에서 원래대로라면 발신한 35kHz~110kHz, 2ms의 FM 초음파 펄스와 echo를 상호상관하였지만 그 대신에 계산된 도플러 효과를 적용한 36.05~113.28kHz, 1.942ms의 FM신호를 echo와 상호상관 하여 왜곡이 일어나는 것을 막을 수 있다. 이 방법을 사용할 경우 지정한 셀에서 반사되는 echo에 대해서만 상호상관할 때 왜곡되는

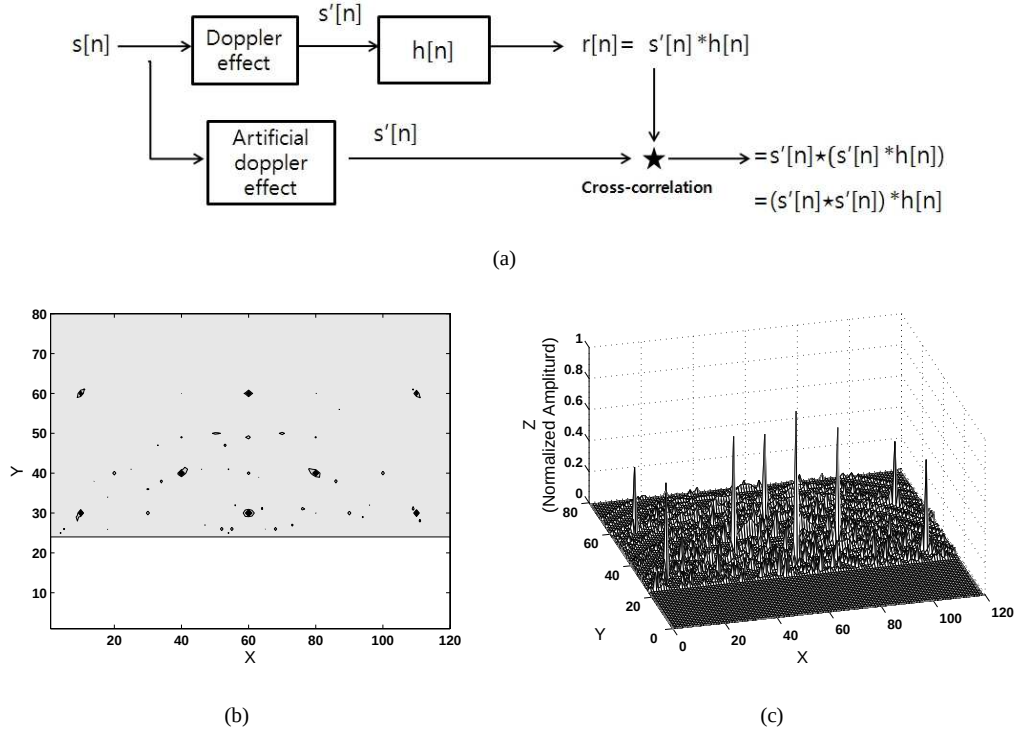


그림 4.10: 모든 셀에 대해서 인공적인 도플러 효과가 적용된 펄스와 echo를 상호상관하였을 때 ((a)발신한 펄스에 도플러 효과를 적용하여 상호상관하는 방법 (b) 2차원으로 본 결과 (b)3차원으로 본 결과).

것을 막아주고 다른 위치에서 반사되는 echo에 대해서는 진폭이 줄어들고 피크가 나타나는 시간에 왜곡이 일어나기 때문에 지정한 셀과 다른 위치에서 반사되어 돌아온 echo를 필터링하고 지정한 셀에서 반사되어 돌아오는 echo는 받아들이는 효과를 갖게 된다.

그림 4.10.(b)는 앞 단락에서 설명한 echo와 도플러 효과가 적용된 펄스를 상호상관하는 방법을 사용할 때의 지도이다. 그림 3.8, 그림 4.8와 비교하여 보았을 때 물체가 위치하지 않는 곳에 생기는 값들이 줄어들음을 확인할 수 있다. 하지만 발신한 펄스에 도플러 효과를 적용하여 상호상관하는 방법의 경우 매 셀마다 도플러 효과를 적용한 펄스와 echo를 상호상관하는 과정이 필요하기 때문에, 그림 3.7에서처럼 각 echo에 대해서 한번씩만 상호상관을 하고 지도를 그리는 방법과 비교하였을 때 많은 계산량이 필요하게 된다.

위에서 초음파 지도를 그리는 세 가지 방법에 대해서 알아보았다. 첫 번째 방법은 정지한 7개의 초음파 센서를 이용하여 각각의 위치에서 발신 수신한 echo를 이용하여 그리는 방법이고, 두 번째 방법은 초음파 센서가 이동하는 상황에서 첫 번째 방법과 같은 방법을 이용하여 초음파 지도를 그리는 방법이다. 세 번째는 첫 번째 방법이나 두 번째 방법과는 달리 각 셀의 값을 계산할 때마다 그 셀에 대한 도플러 효과가 적용된 신호와 echo를 상호상관한 결과를 이용하여 초음파 맵을 그리는 방법이다. 우리는 세 가지 방법에 대해서 그림으로 확인하는 방법 외에 다른 평가 기준을 사용하여 분석하였다.

첫 번째 기준은 오차로, 초음파 지도의 모든 셀에 대해서 가장 가까운 실제 물체가 위치한 셀과

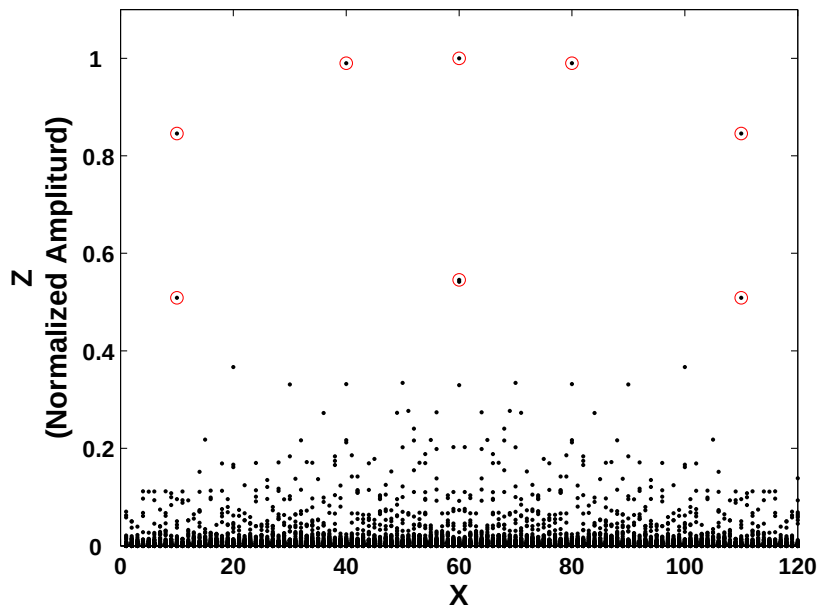


그림 4.11: 그림 3.8 지도를 정면에서 바라본 결과).

의 거리를 구하여 셀의 값과 곱하는 방법이다. 각각의 셀에 대해서 계산한 값을 더하여 그 값을 오차로 계산하였다. 즉 실제 물체가 없는 셀에 큰 값이 나올수록, 또 실제 물체가 위치한 셀과 먼 곳에 잘못된 값이 나올수록 오차의 크기는 커지게 될 것이다.

두 번째 기준은 명료성으로, 실제 물체가 있는 위치에 해당하는 셀의 값과 그렇지 않은 셀의 값이 어느정도 차이가 나는지를 나타내는 값이다. 그림 4.11는 그림 3.8 지도를 정면에서 바라본 결과이다. 3장과 4장의 시뮬레이션에서 각각의 셀은 한 변이 5cm인 정사각형의 크기이고, x축으로 120개의 셀이 y축으로 80개의 셀이 있다. 그림 4.11에서 각각의 점은 각 셀의 값을 나타낸다. 즉 1~120의 각각의 x축에는 80개의 셀에 해당하는 값이 나타나 있다. 그림에서 원으로 표시된 점은 실제 물체가 있는 8개의 셀에 해당하는 점으로 이 8개의 점들과 다른 점들과의 값의 차이가 클수록 초음파 지도의 명료성이 높다고 할 수 있다.

따라서 실제 물체가 있는 8개의 셀에 해당하는 값의 평균과 물체가 없는 셀 중 큰 값을 갖는 8개의 셀의 평균값의 차이를 명료성으로 두었다. 이 때 물체가 없는 셀 중에서 큰 값을 갖는 8개의 셀을 선택할 때 실제 물체가 있는 셀 주변의 8개의 셀은 제외시킨 나머지 셀 중에서 선택하였다. 따라서 명료성 값이 클수록 초음파 지도의 성능이 좋다고 할 수 있다.

세 번째 기준은 표준 편차로, 실제 물체가 위치한 셀들의 값에 표준편차를 나타낸다. 이 시뮬레이션에서는 모든 물체가 같은 크기와 같은 반사율을 갖는 것으로 계산하였으므로 실제 물체가 위치한 셀들의 값이 비슷할수록 좋을 것이라고 생각할 수 있다. 마지막으로 네 번째 기준은 연산량으로, 실제 시뮬레이션 시 계산의 대부분을 차지하는 상호상관연산의 회수를 비교하였다.

표 5.1은 네 가지 방법의 비교 결과를 나타낸 것이다. 표와 그림 3.8과 4.8.(a) (b) 를 보았을 때,

표 4.1: 초음파 지도를 그리는 방법 비교.

	오차	명료성	표준 편차	연산량
첫 번째 방법, 7개의 고정된 센서 (그림 3.8)	2.09*E04	0.41	0.25	7회
두 번째 방법, 움직이는 센서로 7곳에서 초음파 발신 수신 (그림 4.8.(a) (b))	3.36 *E04	0.31	0.21	7회
세 번째 방법, 움직이는 센서로 13곳에서 초음파 발신 수신 (그림 4.8.(c) (d))	1.92 *E04	0.46	0.22	13회
네 번째 방법, 움직이는 센서로 7곳에서 발신 수신 발신한 신호에 인공적인 도플러 효과를 적용하여 상호상관 (그림 4.10)	2.00 *E04	0.47	0.20	7회*셀의 개수

첫 번째 방법인 정지한 상태에서 초음파 지도를 그리는 것이 두 번째 방법인 움직이는 상태에서 그림의 그리는 것보다 평균 오차나 맞춘 비율 표준 편차 세 가지 기준에서 모두 앞서는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 앞에서 설명하였듯이 초음파 센서의 이동에 의해 나타나는 도플러 효과에 의한 상호상관 결과의 왜곡 때문이다.

세 번째 방법은 정확도를 높이기 위하여 움직이는 센서로 13곳에서 발신 수신한 신호를 이용하여 초음파 지도를 그린 것이고, 네 번째 방법은 도플러 효과에 의한 왜곡을 상쇄시키기 위하여 모든 셀에 대해서 각각 다르게 나타나는 도플러 효과를 적용한 신호를 상호상관하는 방법을 사용한 것이다. 세 번째 방법과 네 번째 방법 모두 첫 번째 방법과 비교해서 비슷하거나 더 나은 결과를 얻는 것을 확인할 수 있다. 세 번째 방법과 같이 초음파 신호를 발신하고 수신하는 주기를 빠르게 하는 방법의 경우 실제 상황에서 발신 주기를 빠르게 하는 데에는 한계가 있을 수 있을 것이다. 네 번째 방법의 경우는 초음파 신호를 발신 수신하는 주기를 늘리지 않고도 초음파 지도의 정확성을 높일 수 있으나 모든 셀에 대해서 상호상관을 해야 하기 때문에 연산량은 늘어나게 된다.

따라서 우리는 연산량을 줄이면서 도플러 효과에 의한 왜곡을 제거하는 방법을 생각해 보았다. 2장에서 설명한 그림 2.4은 박쥐가 도플러 효과에 대응하는 한 가지 방법으로, 박쥐는 자신에게 돌아오는 echo의 주파수가 항상 일정하게 되도록 하는 도플러 보상(doppler compensation)을 사용한다. 자신에게 돌아오는 echo가 항상 일정한 주파수를 갖도록 하기 위하여 박쥐는 발신하는 펄스의 주파수 값을 조절한다. 예를 들면 박쥐가 물체를 향해 가까워지는 속도를 가지고 있는 경우 박쥐는 의도적으로 발신하는 펄스의 주파수를 낮추어, 도플러 효과에 의해 echo의 주파수가 증가하더라도 일정 범위 내의 주파수를 갖도록 한다.

그런데 도플러 효과는 박쥐가 물체와 가까워지는 혹은 멀어지는 속도와 관계되어 있기 때문에

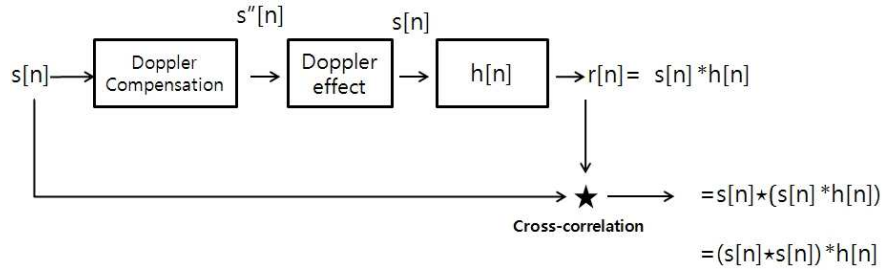


그림 4.12: 물체에 반사되는 echo가 발신하는 신호와 같아지도록 발신하는 신호에 도플러 보상을 하는 방법.

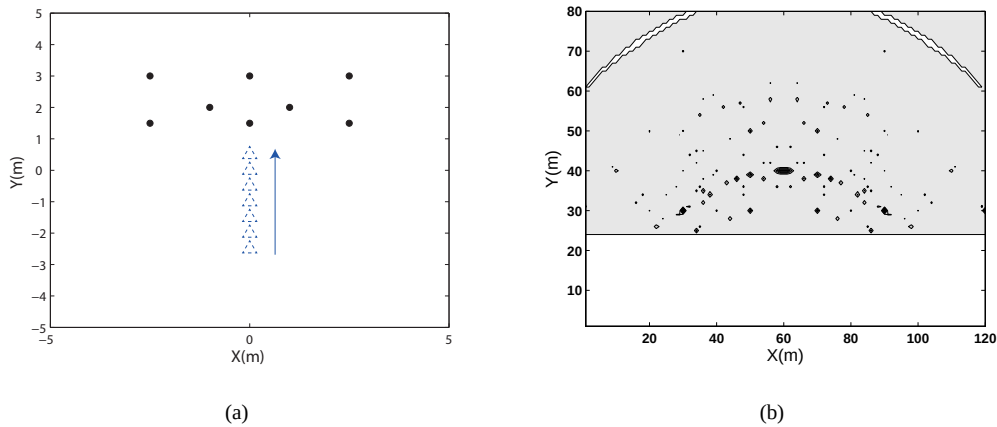


그림 4.13: y+방향으로 초음파 센서가 이동할 때 ((a)시뮬레이션 환경 (b) 초음파 지도).

물체가 서로 다른 위치에 있을 경우 서로 다른 도플러 효과가 발생하게 된다. 즉 주변에 여러 개의 반사체가 있는 경우 박쥐는 어떤 물체에 대해서 도플러 보상을 할 것인지 선택을 하여야 할 것이다. 직관적으로 생각하였을 때 박쥐는 자신이 관심이 있는 물체에 반사되어 돌아오는 echo의 초음파의 주파수가 일정하게 들어오도록 도플러 보상을 한다고 가정할 수 있다. 이와 같은 맥락에서 움직이는 센서를 이용하여 도플러 지도를 그릴 때, 지도에서 관심 있는 부분을 정하여 그 부분에 반사되어 돌아오는 echo가 일정한 주파수를 갖도록 발신하는 펄스를 바꾸는 방법을 생각할 수 있다. 이 방법을 그림으로 나타내면 그림 4.12와 같다. 이러한 방법을 사용할 경우 앞에서처럼 매 셀마다 상호상관을 하지 않고도 관심이 있는 위치에 대해서 정확히 측정할 수 있다.

이번 절에서는 초음파 발신부가 이동할 때 적용할 수 있는 알고리즘에 대하여 알아보았다. 위에서 든 모든 예에서 초음파 발신부는 물체가 위치한 방향과 직각의 방향으로 이동하는 것을 예를 들었다. 그림 4.13. (a)과 같이 초음파 센서가 y+방향으로 이동하는 경우 앞에서 사용한 방법과 같은 방법을 사용하여 초음파 지도를 그리더라도 그림 4.13. (b)와 같이 실제와 상관이 없는 초음파 지도가 얻어지게 된다.

대부분의 초음파 센서는 넓은 각의 초음파 빔을 가지고 있다. 초음파 빔이 넓어질 경우 넓은 영역을 탐지할 수 있다는 장점이 있으나 수평 방향의 해상도는 떨어지게 된다. 초음파를 이용한 물체

탐지에서 해상도는 수평 방향의 해상도와 수직 방향의 해상도로 구분할 수 있다. 거리 방향의 해상도는 상호상관을 이용하여 실제 물체 탐지에 적용할 수 있는 수준까지 향상시킬 수 있다. 이번 절에서 초음파 센서를 이동시키면서 여러 위치에서 발신 수신된 echo를 이용하는 것은 수직 방향의 해상도를 높이기 위한 방법이다. 그렇기 때문에 초음파 센서의 이동 방향이 물체와 직각의 방향으로 이동할 때 수직 방향의 해상도를 향상시키기 위해 여러 위치에서 측정된 신호를 합성하는 것이 의미를 가질 것이다.

4.4 요약

4장에서는 우리가 박쥐의 발성 적응 행동을 공부하면서 획득한 박쥐의 초음파 발신 패턴이나, 물체 탐지 전략을 바탕으로 물체의 위치를 탐지하거나, 초음파 지도를 그릴 때 적용될 수 있는 방법들을 제안하고 시뮬레이션을 통해 그 효과를 증명하였다. 일반적인 박쥐의 비행 속도가 3~8m/s라는 것을 보았을 때, 박쥐의 비행에 의해 발생하는 도플러 편이는 물체 탐지에 충분히 영향을 줄 수 있는 수치이다. 이러한 도플러 효과는 물체 탐지에 방해가 되기도 하고 오히려 물체를 탐지하는데 도움이 되기도 하는데 4장에서는 도플러 효과가 물체 탐지에 주는 영향과 도플러 효과를 이용할 수 있는 방법을 설명하였다.

4.2절에서는 초음파 센서로 얻을 수 있는 TOF에 더불어 도플러 효과를 이용할 경우 TOF만을 이용할 때보다 물체의 위치를 파악하기 유리함을 확인하였고, CF-FM 형태의 초음파 펄스를 발신하여, 펄스의 CF성분으로는 도플러 효과를 FM 성분으로는 상호상관을 통하여 TOF를 측정하는 방법을 제안하였다. 박쥐는 복잡한 환경에서 먹이를 사냥할 때, 먹이를 향해 바로 비행하지 않고 먹이와 비스듬한 방향으로 비행하여 먹이를 지나치고 먹이를 향해 다시 돌아오는 행동을 보이는데 4.3절에서는 이와 같이 비행을 하면서 중간에 얻은 초음파 echo를 종합하여 격자 기반의 초음파 지도를 그리는 방법을 제안하였다. 초음파 센서가 이동하는 상황에서 발생하는 도플러 효과에 의해 정지한 상황에서의 똑같은 방식으로 신호를 처리할 경우 초음파 지도에 더 많은 오차가 발생하게 되는데 우리는 각 셀마다 발생하는 도플러 효과를 계산하여 적용하는 방식과 박쥐의 도플러 보상 행동을 응용하는 방법으로 이 문제를 해결할 수 있음을 보였다.

제 5 장

빔 패턴을 이용한 위치 추정

2장에서 설명하였듯이 최근의 연구에 따르면 큰갈색박쥐는 초음파 신호의 주파수에 따른 빔 패턴을 이용하여 측면에 있는 물체와 정면에 있는 물체를 구분할 수 있다는 것이 밝혀졌다. 정면에서 반사되어 돌아오는 echo와 비교하였을 때 측면에서 반사되어 돌아오는 echo는 신호의 고주파수 성분이 감소하게 되며, 따라서 박쥐는 반사되어 돌아온 echo 신호의 높은 주파수 성분의 에너지와 낮은 주파수 성분의 에너지의 비율을 이용하여 물체가 정면에 있는지 측면에 있는지를 판단할 수 있다. 이번 장에서는 실제 실험을 통하여 초음파의 주파수에 따라 빔 패턴이 다름을 확인하고 이를 물체가 위치한 각을 알아내는 데에 이용될 수 있는지 알아보았다. 또한 상호상관 방법을 이용하여 여러 물체가 존재하는 조건에서 각각의 물체에 반사된 신호의 고주파수 성분과 저주파수 성분의 비율을 판단하는 방법을 제안하였다. (이 내용은 2012 제어, 로봇, 시스템학회생체모방 로봇 기술 논문 내용을 참고하였음(Park and Kim, 2012).) 이번 장에서 진행된 하드웨어는 실험은 이전의 연구에서 참고되었다. (Park and Kim, 2010a, 2011a).

5.1 광대역 (broadband) 초음파 발신 회로

이번 장의 실험을 위해서는 넓은 주파수 범위의 FM 초음파 신호 발생이 요구되었다. 현재 시중에 일반적으로 사용되고 있는 피에조 트랜스듀서 (piezoelectric transducer) 는 값이 싸다는 장점이 있으나 특정한 주파수에 맞추어져(tuned) 있다. 따라서 해당하는 주파수를 갖는 CF 초음파 신호는 발생시킬 수 있으나 넓은 범위로 주파수가 변하는 FM 초음파 신호는 일반적인 피에조 트랜스듀서 센서로는 발생시킬 수 없다.

그림 5.1은 일반적으로 사용되는 피에조 트랜스듀서로 40kHz 근처의 초음파를 송신, 수신할 수 있다. 이 초음파 센서에 40kHz가 아닌 주파수의 전압을 가할 경우, 40kHz의 전압을 가하였을 때 보다 낮은 음압의 초음파가 발생한다. 수신인 경우도 마찬가지로 40kHz의 초음파를 수신할 때 가장 민감도 (sensitivity) 가 높고 주파수가 40kHz에서 벗어날수록 민감도가 감소한다. 그림 5.2는 피에조 트랜스듀서 데이터시트에 있는 그래프로 센서의 주파수에 따른 민감도를 나타낸 그래프이다. 40kHz부근의 주파수신호에 대해서 민감도가 높고, 발신하는 주파수의 음압도 높음을 알



그림 5.1: 일반적인 피에조 트랜스듀서.

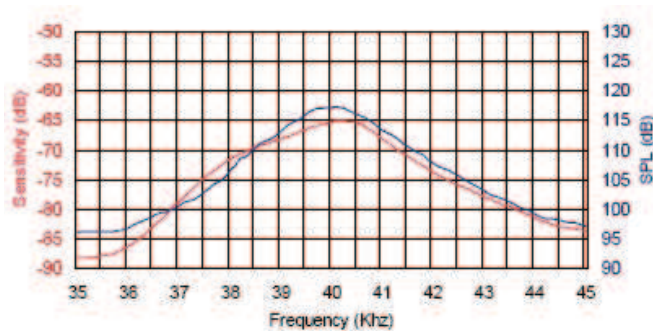


그림 5.2: 피에조 센서의 주파수에 따른 민감도와 음압 (400st/r100 데이터시트 참조).

수 있다.

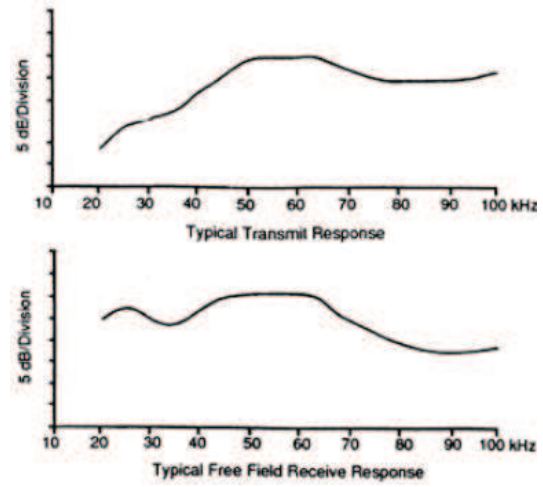
박쥐의 경우 주파수가 일정한 CF 초음파 외에도 FM 초음파를 사용하기 때문에 일반적인 피에조 트랜스듀서로는 박쥐의 다양한 펄스를 발신 수신할 수 없다. 현재 물체 감지 센서나, 거리감지계, 속도 센서로 쓰이는 센서들은 대부분 CF 초음파만 발생 가능한 센서를 사용하기 때문에, 국내에서는 광대역 (broadband)의 주파수 응답을 갖는 초음파 센서를 찾기 힘들었다. 그림 5.3는 정전형 트랜스듀서 (Electrostatic transducer) 로 피에조 센서와는 동작원리가 다른 센서이다. 이 센서의 경우 광대역의 주파수를 발생시킬 수 있으나 초음파를 발생시키는 데에 200V 이상의 높은 AC 전압을 요구하게 되어 별도의 회로 구성을 필요로 하였다.

2장에서 살펴보았듯이 박쥐는 상황에 따라 펄스의 주파수, 지속시간, 발신빈도를 바꾸는 발생 적응 행동을 보이기 때문에 실험에 사용할 초음파 발신부는 다양한 형태의 발신 주파수를 사용자가 원하는 대로 발신할 수 있어야 한다. 따라서 그림 5.4. (a)와 (b)에서처럼 초음파 발신부와 수신부를 직접 제작하였다.

그림 5.5는 초음파 발신회로의 다이어그램이다. 발신부의 경우 초음파 신호 발생을 위한 회로와, 주파수를 1차적으로 증폭시키고 필터링 하는 회로, 그리고 신호를 트랜스듀서가 요구하는 200V 이상의 높은 전압으로 높이기 위한 승압 회로로 구성되어 있다. 초음파 신호 발생 회로에는 마이크로프로세서인 ATmega128를 사용하였고, ATmega128 PWM 발생 기능을 이용하였다. ATmega128의 레지스터 설정을 통해 PWM의 주파수, 파장의 길이 등을 바꿀 수 있기 때문에 박

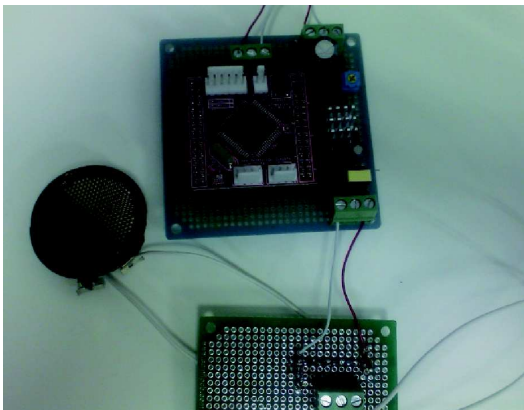


(a)

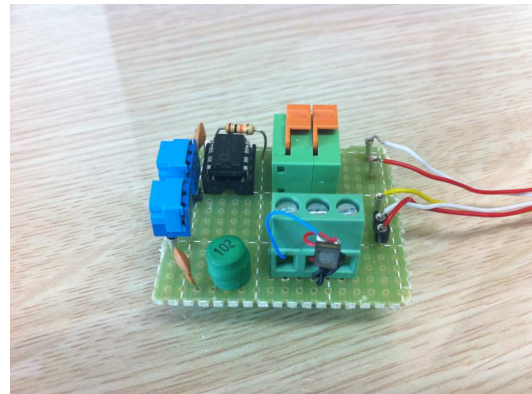


(b)

그림 5.3: 정전형 트랜스듀서 ((a)정전형 트랜스듀서 (b) 정전형 트랜스듀서의 주파수에 따른 민감도와 음압 (SensComp, Inc. 데이터시트 참조)).



(a)



(b)

그림 5.4: 초음파 발신, 수신회로 ((a)초음파 발신회로 (b)초음파 수신회로).

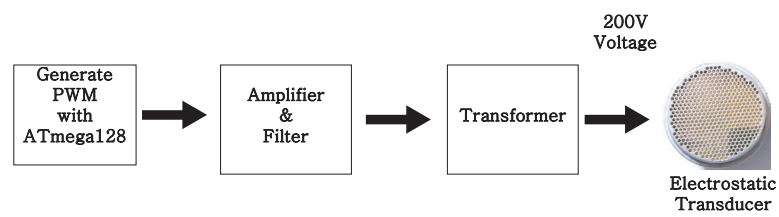


그림 5.5: 초음파 발신회로 구성도.

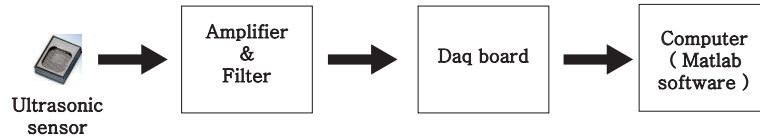


그림 5.6: 초음파 수신회로 구성도.

위의 펄스와 같은 다양한 형태의 초음파를 발생시키는 데에 적합하였다. 정전형 트랜스듀서는 200V 이상의 높은 구동 전압을 요구하기 때문에 ATmega128에서 발생시킨 PWM 신호를 증폭시키는 과정이 필요하였다. ATmega128에서 발생한 신호를 바로 증폭시킬 경우, 필요한 전력을 ATmega128에서 부담해야 하기 때문에 중간에 증폭기 (amplifier) 를 두어 두 단계를 거쳐 증폭되도록 하였다.

그림 5.7는 초음파 수신회로로, 초음파 수신부의 경우 초음파 발신에 사용된 정전형 트랜스듀서를 사용할 수도 있지만 200V의 높은 DC 전압을 요구하기 때문에, 초음파 발신은 불가능하지만 광대역 초음파 수신은 가능한 다른 소형 센서를 이용하였다. 일반적으로 초음파 수신만 가능한 센서는 발신 수신 둘 다 가능한 트랜스듀서 보다 가격이 쌀 뿐더러 크기도 더 작다. 수신부의 경우 센서에서 수신된 신호를 증폭시키고 필터링하기 위한 회로와 증폭, 필터링 된 신호를 컴퓨터로 전송하기 위한 Daq 보드 (Data acquisition board) 로 구성되었다. Daq 보드로 수집된 신호를 Matlab 소프트웨어로 전송하여 신호 분석과 처리는 Matlab 소프트웨어에서 이루어지도록 하였다.

5.2 물체가 위치한 각도에 따른 echo의 주파수 특성

우리는 먼저 물체가 위치한 각도에 따라 물체에 반사된 초음파 신호의 주파수 분포가 어떻게 변하는지 알아보는 실험을 진행하였고 그 후에 이 실험에서 확인한 결과를 이용하여 물체가 정면에 있는지 측면에 있는지를 판단하는 실험을 진행하였다. 첫 번째 실험에서는 물체가 위치한 각도에 따라 물체에 반사된 FM 초음파 신호의 주파수 분포가 어떻게 바뀌는지 알아보기 위하여 물체와 초음파 센서와의 거리를 50cm부터 100cm까지 10cm 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. 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 5.7는 물체가 초음파 센서로부터 90cm 거리에 정면에 위치하여 있을 때 물체로부터 반사된 신호의 파워 스펙트럴 밀도 (power spectral density) 이다.

우리는 물체가 위치한 각도와 주파수에 따라 반사되는 초음파신호의 주파수 특성이 어떻게 변화되는지 알아보기 위하여 10kHz 단위로 주파수를 나누어 각각의 주파수에 포함된 에너지 값이 어떻게 달라지는지 확인해 보았다. 표 5.1에서 확인할 수 있듯이 50cm 100cm의 모든 경우에 대해서 정면을 기준으로 물체가 위치한 각이 커질수록 모든 주파수대의 신호의 에너지가 감소하는

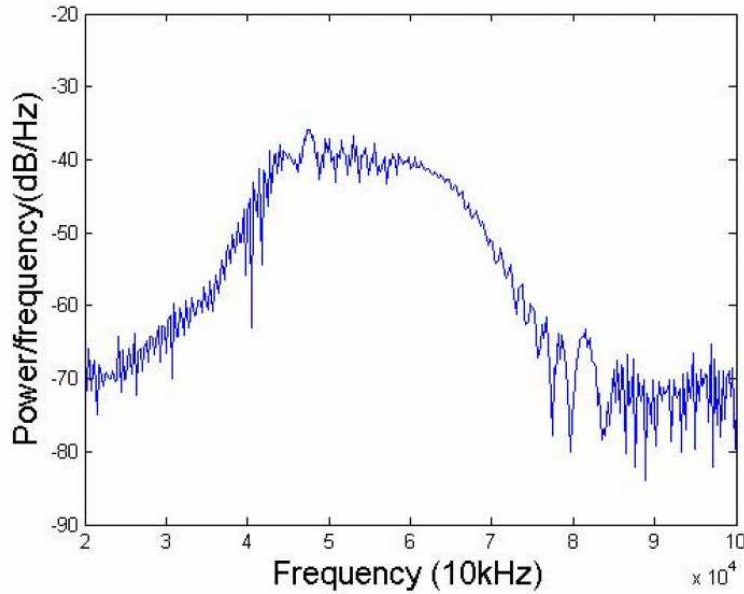


그림 5.7: 물체에 반사된 신호의 파워 스펙트럼 밀도.

것을 확인할 수 있다. 하지만 주파수에 따라서 에너지가 감소되는 비율이 다른 것을 확인할 수 있다. 이를 쉽게 확인하기 위하여 우리는 각각의 주파수 대역별로 에너지 값을 정규화 한 후 그 결과를 비교하여 보았다.

그림 5.8은 물체와의 거리가 50cm~90cm일 때의 경우에 대해서 정면을 기준으로 물체가 위치한 각도가 커짐에 따라 에너지가 감소하는 비율을 살펴본 결과이다. 물체의 거리에 따라 약간의 차이는 있으나 물체가 초음파 센서의 정면에서 벗어날수록 물체에 반사되어 돌아온 신호의 40kHz~60kHz의 주파수에 해당하는 에너지는 60kHz이상의 주파수에 해당하는 에너지보다 더 큰 비율로 감소한 것을 확인할 수 있다. 즉 반사되어 돌아온 신호의 40kHz~60kHz의 주파수에 해당하는 에너지와 60kHz이상의 주파수에 해당하는 에너지의 비율을 아래와 같이 α 로 정의하면 α 값은 물체가 위치한 각도에 따라 변하게 될 것이다. 실험에 사용한 센서의 경우 40°가 센서의 최대 빔 각도이기 때문에 40°각도에서 신호의 세기가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

$$\alpha = \frac{40 \sim 60\text{kHz 주파수에 해당하는 에너지}}{70\text{kHz이상의 주파수에 해당하는 에너지}} \quad (5.1)$$

표 5.2는 물체가 위치한 거리와 각도에 따른 α 값을 계산한 결과이다. 표 5.2에서 확인할 수 있듯이 모든 경우에서 α 값은 0° 일 때 가장 작음을 알 수 있다.

5.3 상호상관 방법을 이용한 주파수 비율 측정

그림 5.9.(b)는 그림 5.9.(a)와 같이 초음파 센서로부터 90, 70, 50cm 거리에 그리고 각각 0°, 20°, 40° 각도에 반사체가 있는 조건에서 수신된 신호이다. 이 신호에서 약 4ms까지의 신호는 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

표 5.1: 물체가 위치한 거리와 각도에 따른 반사된 신호의 에너지 분포.

	0°	10°	20°	30°	40°
50cm, 40~50kHz	4.2E-03	3.5E-03	3.5E-03	5.0E-04	5.0E-04
50cm, 50~60kHz	4.4E-03	4.2E-03	4.2E-03	2.0E-03	2.0E-03
50cm, 60~70kHz	2.0E-03	4.8E-04	4.8E-04	4.6E-05	4.6E-05
50cm, 70~80kHz	7.0E-05	3.3E-05	3.3E-05	1.8E-06	1.8E-06
50cm, 80~90kHz	5.2E-06	4.6E-06	4.6E-06	8.8E-08	8.8E-08
60cm, 40~50kHz	3.0E-03	9.7E-04	6.9E-04	5.0E-04	9.7E-05
60cm, 50~60kHz	4.5E-03	3.1E-03	1.7E-03	2.0E-03	2.4E-04
60cm, 60~70kHz	3.0E-03	3.7E-04	5.0E-05	4.6E-05	2.1E-05
60cm, 70~80kHz	5.9E-04	7.6E-06	1.5E-06	1.8E-06	1.6E-07
60cm, 80~90kHz	6.0E-05	9.2E-07	2.5E-07	8.8E-08	6.4E-08
70cm, 40~50kHz	1.8E-03	5.1E-04	4.6E-04	5.2E-05	3.1E-05
70cm, 50~60kHz	4.6E-03	2.2E-03	1.0E-03	4.4E-04	8.9E-05
70cm, 60~70kHz	2.4E-03	2.4E-04	2.4E-05	4.4E-05	1.0E-05
70cm, 70~80kHz	1.4E-04	8.1E-06	1.3E-06	1.7E-06	5.3E-08
70cm, 80~90kHz	7.9E-06	2.3E-06	1.4E-07	7.9E-08	3.4E-08
80cm, 40~50kHz	5.9E-04	7.9E-04	7.9E-05	4.6E-05	3.9E-05
80cm, 50~60kHz	4.0E-03	2.4E-03	3.7E-04	3.1E-04	1.1E-04
80cm, 60~70kHz	2.1E-03	1.4E-04	1.8E-05	2.8E-05	2.1E-05
80cm, 70~80kHz	1.4E-04	6.8E-06	6.9E-07	5.9E-07	1.0E-07
80cm, 80~90kHz	2.4E-05	2.5E-06	1.1E-07	4.9E-08	6.0E-08
90cm, 40~50kHz	1.5E-04	1.9E-04	3.3E-05	1.9E-05	1.9E-05
90cm, 50~60kHz	2.9E-03	1.0E-03	1.9E-04	1.8E-04	1.8E-04
90cm, 60~70kHz	2.7E-03	7.5E-05	6.9E-06	2.2E-05	2.2E-05
90cm, 70~80kHz	3.5E-04	4.3E-06	6.6E-07	8.4E-07	8.4E-07
90cm, 80~90kHz	6.5E-05	1.5E-06	1.2E-07	4.2E-08	4.2E-08
100cm, 40~50kHz	3.4E-04	4.6E-05	4.5E-05	2.3E-05	
100cm, 50~60kHz	2.0E-03	3.4E-04	3.3E-04	1.4E-04	
100cm, 60~70kHz	2.3E-03	2.5E-05	2.4E-05	1.1E-05	
100cm, 70~80kHz	3.2E-04	2.2E-06	2.1E-06	1.8E-07	
100cm, 80~90kHz	7.6E-05	1.3E-06	1.2E-06	4.0E-08	

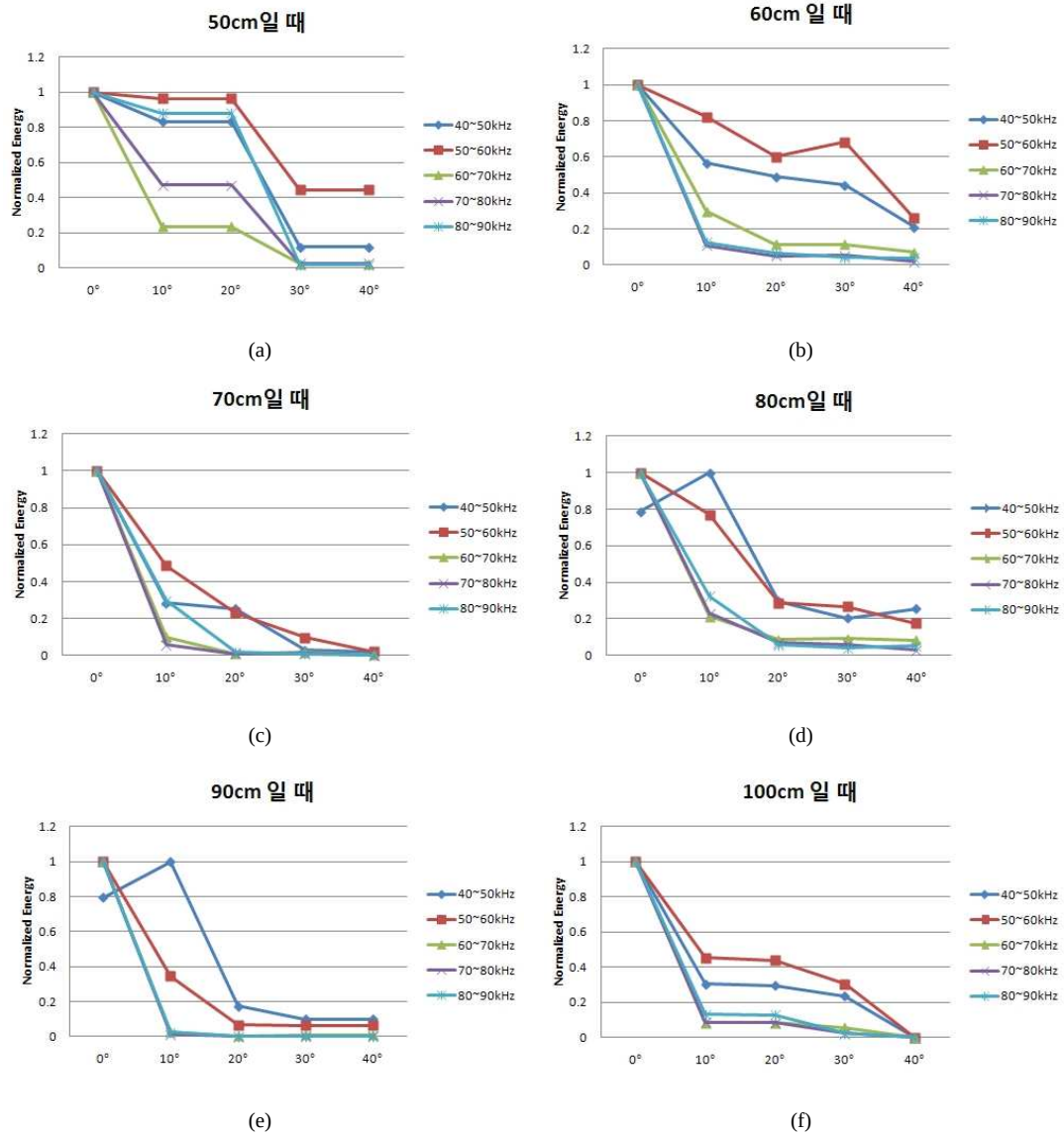


그림 5.8: 물체가 위치한 각도의 증가에 따른 반사된 초음파 신호의 에너지 감소 비율.

표 5.2: 물체가 위치한 거리와 각도에 따른 α 값의 변화.

	0°	10°	20°	30°	40°
50cm	14.12	16.17	80.81	43.25	24.41
60cm	3.76	23.84	39.38	43.25	39.77
70cm	7.72	15.42	35.92	17.73	36.76
80cm	5.13	17.69	23.71	24.47	30.67
90cm	2.48	13.08	16.57	16.08	33.26
100cm	3.0E-03	9.04	9.03	27.68	

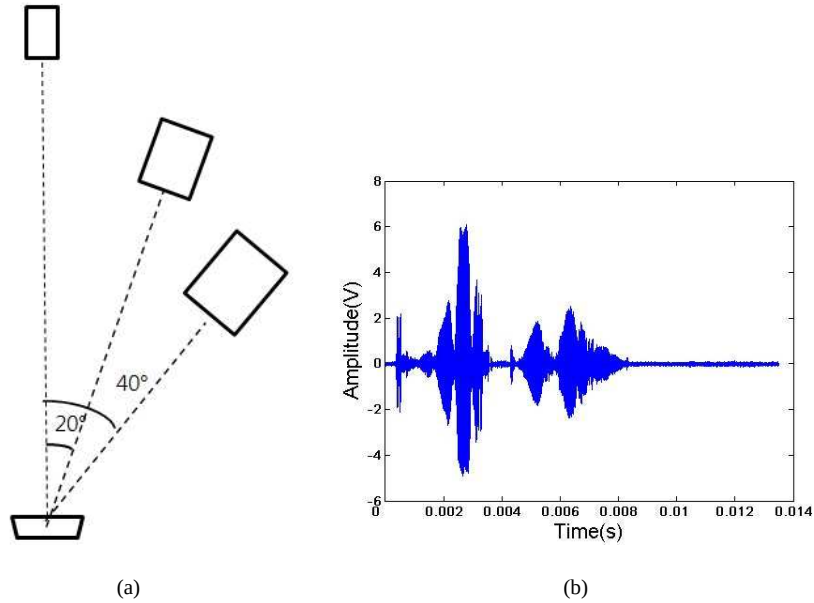


그림 5.9: 실제 환경에서의 실험 ((a)실험 환경 (센서로부터 각각 90, 70, 50cm거리와 0°, 20°, 40° 각도에 위치, 40° 각도에 가장 큰 물체를 두었고 0°에 가장 작은 물체를 두었다)(b)세 개의 반사체에서 반사된 신호)

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 그림 5.9.(b)에서처럼 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. 그림 5.10.(a)는 초음파 센서에서 발신되는 신호와 그림 5.9.(b)의 그래프에서 4ms이후의 신호인 물체에 반사된 신호를 상호상관한 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 상호상관한 결과 세 개의 피크 신호가 나타나게 된다. 1번, 2번, 3번 신호는 순서대로 각각 50cm, 70cm, 90cm에 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 있는지 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 65kHz~90kHz의 주파수를 갖는 신호의 일부와 그림 5.9.(b)의 그래프에서 4ms이후 신호에 해당하는 신호를 상호상관 하였다. 그림 5.10.(b)에서 확인할 수 있듯이 1번과 2번과 같은 측면에 위치한 물체에 의해 발생한 피크 신호는 상대적인 진폭이

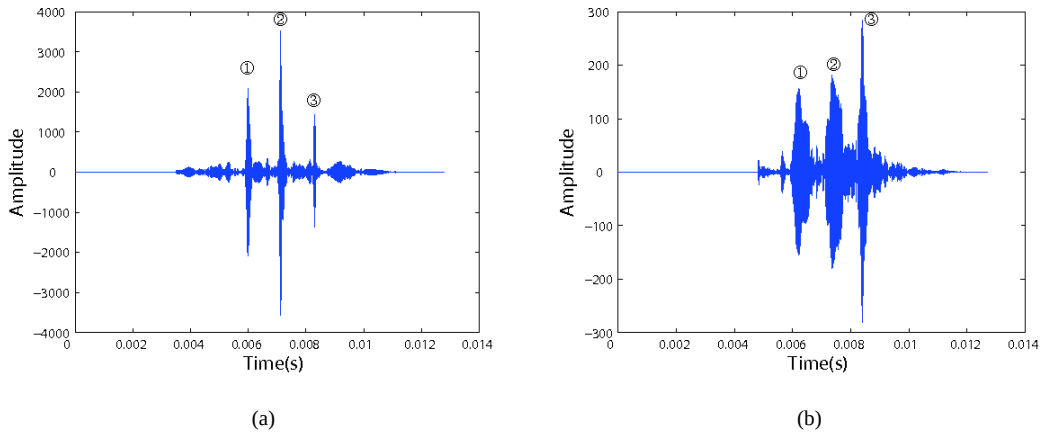


그림 5.10: 상호상관 결과 ((a)발신한 신호와 수신된 신호를 상호상관한 결과 (b)발신한 신호의 고주파수 부분 (65kHz~90kHz) 과 수신된 신호를 상관한 결과).

줄어들거나 비슷하지만, 정면에 위치한 물체에 의해 발생한 3번과 같은 피크는 상대적인 진폭이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

즉 그림 5.10.(a)는 발신한 신호와 수신한 신호를 상호상관 한 결과이므로 세 개의 물체에 반사되어 돌아온 신호의 전체 에너지에 상대적인 양을 보여주는 것이고 그림 5.10.(b)는 발신한 신호의 65kHz~90kHz에 해당하는 신호와 전체 스펙트럼에 걸쳐 수신한 신호를 상호상관 한 결과이므로 반사되어 돌아온 신호의 65kHz~90kHz에 해당하는 에너지에 상대적인 양을 보여주는 결과이다. 따라서 두 결과를 비교할 경우 어떠한 신호가 상대적으로 65kHz~90kHz에 해당하는 에너지가 많이 감소하였는지 감소하지 않았는지를 확인할 수 있으며 이를 이용하여 어떤 물체가 더 정면과 가까운 각도에 있는지 아니면 측면에 있는지를 확인할 수 있다.

5.4 요약

이번 장에서 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 5.2 에서 확인할 수 있듯이 α 값이 작은 값을 가질 경우 물체가 정면에 있는 것으로 판단할 수 있으며 α 값이 큰 값을 가질 경우 측면에 물체가 위치할 것으로 판단할 수 있다. α 값의 경우 같은 각도라도 물체의 거리에 따라서 변하게 되므로 물체가 정면에 위치하였는지 또는 측면에 위치하였는지에 대한 대략적인 판단을 내리기 위해서는 α 값과 같은 신호의 고주파수 성분과 저주파수 성분의 비율에 대한 값을 미리 알고 있어야 할 것이다. 또한 우리는 각각의 물체에서 발사되어 돌아온 신호가 겹치는 상황에서도 상호 상관 방법을 이용하여 반사되어 돌아온 신호의 주파수 성분 비율을 구하는 것이 가능함을 보였다.

제 6 장

Conclusion

우리는 이 논문에서 박쥐의 발성 행동에 대한 조사를 하였고 조사한 내용을 바탕으로 초음파 센서를 이용한 물체 탐지 방법을 연구하였다. 2장에서는 연구를 진행하면서 정리한 박쥐의 초음파 시스템에 대한 기본적인 배경 지식들을 소개하였다. 3장에서는 정지한 상태의 초음파 센서 배열을 이용하여 격자 기반의 초음파 지도를 그리는 방법에 대해서 알아보았다. 4장에서는 박쥐가 비행하면서 초음파 신호를 발신 수신하여 정보를 획득 하는 것처럼 움직이는 초음파 센서를 이용하여 초음파 지도를 그리는 방법에 대해서 연구하였다. 우리는 초음파 발신부가 공기 중에서 이동하는 상황에 적용할 수 있는 도플러 효과를 고려한 물체 탐지 알고리즘을 소개하였다. 또한 ‘도플러 보상 (doppler compensation)’이라고 불리는 박쥐가 도플러 효과에 대처하는 방법을 초음파 지도를 그리는 방법에 응용하여 보았다. 5장에서는 echo의 주파수 분포를 이용하여 물체의 위치 추정 방법에 응용하여 보았다. 3장과 4장의 실험은 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션으로 진행되었고, 5장은 구성한 하드웨어를 통한 실제 환경에서의 실험과 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션을 같이 진행하였다.

공기 중에서 초음파를 이용하여 획득할 수 있는 가장 기본적인 정보는 물체와의 거리이다. 물체와의 거리는 초음파가 발신된 후 물체에 반사된 echo가 초음파 수신부로 들어오기까지의 시간인 TOF를 측정하여 계산할 수 있다. 초음파를 이용하여 물체의 위치를 파악하기 위해서는 물체가 위치한 거리에 추가적으로 물체가 위치한 방향을 추정해야 한다. 우리가 3, 4, 5장에서 연구한 초음파 배열을 이용하는 방법, 이동하는 초음파 센서를 이용하는 방법, 주파수에 따라 다른 형태를 갖는 빔 패턴을 이용하는 방법은 결국 TOF만으로 파악할 수 없는 물체의 방향 정보를 추정할 수 있는 방법이다.

4장에서 연구한 내용은 박쥐의 행동 패턴에 대한 연구 내용을 참고한 것으로 박쥐는 사냥할 때 먹이가 있는 방향으로 바로 이동하는 대신 비스듬한 방향으로 비행하여 먹이를 지나친 후 다시 되돌아와 먹이를 잡는 비행 패턴을 보이는 것으로 알려져 있다. 이러한 패턴으로부터 박쥐가 먹이와 비스듬하게 비행하면서 여러 번의 펄스를 발신하고 echo를 수신하여 먹이와 주변 환경에 대한 정보를 수집하는 것으로 생각할 수 있으며 우리는 이와 같은 조건에서 물체의 위치를 추정하는 방법에 대한 연구를 진행하였다. 움직이는 조건에서 각각 같은 방법으로 격자 기반의

초음파 지도를 그리게 되면 도플러 효과에 의한 왜곡으로 인해 움직이는 조건에서는 물체의 위치 추정 정확도가 감소하게 된다. 우리는 이러한 도플러 효과에 의한 왜곡 현상을 해결할 수 있는 방법 또한 제시하였다.

5장의 내용 또한 박쥐가 echo 신호의 높은 주파수에 분포한 에너지의 낮은 주파수에 분포한 에너지의 비율을 이용하여 측면에 있는 물체에서 반사되는 신호와 정면에 있는 물체에서 반사되어 돌아오는 신호를 구분할 수 있다는 연구 결과를 바탕으로 하였다. 실제 실험을 통하여 물체에 반사되어 돌아온 echo의 높은 주파수 성분과 낮은 주파수 성분을 비율을 이용하여 대략적인 방향을 구분할 수 있음을 확인하였고, 높은 주파수 성분과 낮은 주파수 성분의 비율을 구하기 위한 방법으로 상호상관 방법을 제시하였다.

박쥐의 발성 행동을 연구하고 물체 측정 방법에 적용하는 과정에서 여러 가지 상황에 대해 생각해 볼 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 실험을 진행하는 것은 필수적 이었다. 우리는 연구 과정 중에 기존의 음향학 틀에 대하여 알아보았으나, 대부분이 사람이 들을 수 있는 대역의 주파수를 갖는 음파에 초점이 맞추어져 있었으며, 박쥐가 비행하면서 초음파를 발신하고 물체에 반사시켜 돌아오는 것과 같은 상황을 시뮬레이션 할 수 있는 적합한 틀은 찾지 못하였다. 따라서 우리는 기존의 박쥐 시뮬레이션 자료를 참고하여 여러 가지 행동이나 발신하는 초음파 펄스의 변화에 따른 결과를 관찰할 수 있는 간단한 시뮬레이션 환경을 구성하였다. 음파의 여러 가지 특성이 있으나 우리는 반사와 도플러 효과만을 고려한 시뮬레이션을 진행하였으며, 음파가 반사되는 물체 또한 점 반사체로 생각하여 시뮬레이션을 진행하였다. 이와 같이 실제 상황에서 발생하는 물리적인 현상과 조건 중 간단한 것만을 고려한 시뮬레이션 이었기 때문에 시뮬레이션의 타당성을 높이기 위하여 우리는 초음파 발신부를 구성하여 실제 실험을 진행하고 그 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 보았고 반사체의 개수가 많거나 복잡하지 않은 상황에서는 시뮬레이션 결과가 실제 결과와 유사함을 확인하였다.

6.1 Future work

6.1.1 박쥐의 발성 행동

2장에서 설명하였듯이 포유류 종의 20%를 차지하는 다양한 박쥐 종들이 존재한다. 종에 따라 초음파를 이용한 다양한 물체 탐지 방법을 사용하며 이러한 방법은 박쥐가 서식하는 환경에 최적화되어 있는 것으로 생각되고 있다. 공기 중에서 주변 환경 정보를 획득하는 방법을 연구하는 데에 있어서 박쥐의 물체 탐지 방법은 좋은 참고 자료가 될 것이다. 우리는 이 논문에서 박쥐의 발성 행동 중 도플러 보상과, 그룹으로 펄스를 발신하는 행동을 참고하였으나 이 외에도 박쥐가 보여주는 다양한 행동 패턴들이 있다. 우리가 조사하면서 느낀 것 중 하나는 마이크로폰이나 고속 카메라 등의 박쥐 관찰 실험에 사용되는 장비의 발전에 따라 최근에 이루어지는 박쥐에 대한 연구는 과거에 비해 구체적으로 이루어 지고 있다는 점으로, 이러한 연구들은 박쥐의 발성 행동을 응용하는 데에 큰 도움이 될 것이라고 생각된다.

이 논문에서 우리는 물체의 위치를 추정하는 방법에 대한 연구를 진행하였으나 위치 추정 외에도 물체의 특성을 파악하여 물체를 구분하거나, 초음파를 이용하여 통신을 하는 등의 이 논문에서는 다루어지지 않았으나 박쥐에 대한 다양한 연구들이 존재하며 이러한 연구들 또한 응용될 수 있다. 예를 들면 박쥐가 먹이를 사냥하거나 길을 찾을 때 echo 어떠한 특성을 이용하여 먹이를 구분하고, 어떠한 물체를 랜드마크로 기억하여 장소를 찾는지에 대한 연구는 초음파를 이용한 물체 탐지나 네비게이션에 응용할 수 있을 것이며, 또한 여러 마리의 박쥐가 같은 공간에서 사냥할 때나 서식지에 무리를 지어 있을 때 서로 간에 간섭을 피하기 위하여 취하는 행동에 대한 연구는 같은 3장에서와 같이 하나 이상의 초음파 센서를 사용하는 상황이나 공간에 초음파를 사용하는 여러 대의 로봇이 있어 서로 간섭이 되는 경우에 대한 해결책을 제시할 수 있을 것이다.

또한 2장에서 살펴본 바와 같이 박쥐 중에 따라 다양한 형태의 초음파를 사용하며 이는 서식하는 환경이나 먹이와 관련이 있을 것으로 생각되고 있다. 3, 4, 5장의 시뮬레이션에서 우리는 선형적으로 감소하는 FM 초음파 신호를 이용하여 연구를 진행하였는데 선형적으로 감소하는 FM 초음파를 주로 사용하였는데 그 이유 중 하나는 실제 초음파 센서에서 발생시키기에 간단하였기 때문이다. 하지만 추후의 연구에서는 다양한 형태의 초음파 신호를 사용해 볼 수 있을 것이며 각각의 초음파 신호가 갖는 장점이나 단점에 대한 연구를 진행할 수 있을 것이다.

6.1.2 빔 형성을 이용한 각도 추정

이 논문에서는 연구하지 못했으나 물체의 방향을 추정할 수 있는 다른 방법은 빔 형성(forming)을 이용한 방법이다. 센서에서 신호를 발신하고 수신하는 능동적 센싱의 경우 발신할 때와 수신할 때에 각각에 대해서 빔 형성을 하여 물체의 방향을 추정할 수 있다. 박쥐의 경우 입이나 코를 통해 초음파가 발신되는데 박쥐의 코는 상당히 특이한 형태를 가지고 있다. 이러한 모양은 박쥐가 빔 형성을 하는 데에 큰 도움이 될 것으로 생각되고 있으며 이에 대한 연구들도 존재한다. 박쥐의 귀 또한 마찬가지로 귀의 형태나 귀의 방향 조절을 통해서 빔 형성을 하는 것으로 알려져 있다. 박쥐 외에도 의료기구나 소나와 같이 공기와는 다른 매질에서 사용되는 기기의 경우에도 초음파 배열을 이용하여 빔 형성을 함으로서 측정 정밀도를 높이는 방법을 사용한다. 우리는 초음파 센서의 빔 형태에 대해서 고려하지 않고 연구를 진행하였는데 추후의 연구에서 초음파 센서의 빔 형태를 고려할 경우 물체의 방향 추정 성능을 향상시킬 수 있을 것이다.

6.1.3 시뮬레이션 방법

이 논문에서 우리는 음파의 물리적인 현상 중 초음파의 반사와 도플러효과만을 고려하였고, 물체의 물리적인 조건 중 물체의 위치만을 고려하여 물체를 점 반사체로 생각하고 시뮬레이션을 하였다. 실제 초음파를 발신 수신한 결과와 비교하여 봄으로서 반사체의 모양이 복잡하지 않고 수가 적은 간단한 조건에서는 우리가 사용한 시뮬레이션 방법과 실제의 결과가 크게 차이가 나지 않는 것을 확인하였다. 시뮬레이션의 경우 복잡한 환경에 대한 시뮬레이션도 진행하였으나

복잡한 환경에서의 실제 실험은 진행하지 않았다. 간단한 환경에서 시뮬레이션 결과가 실제 결과와 상당히 일치하기 때문에 복잡한 환경에서도 시뮬레이션 결과가 실제와 어느 정도 일치할 것이라고 가정하였으나 이 부분에 대해서는 확인이 필요하다. 복잡한 환경에서 실제로 하기 힘든 실험을 해 보는 것이 시뮬레이션의 목적 중 하나라는 점에서 우리의 실험이 의미를 가질 수 있을 것이지만 복잡한 환경에 대한 시뮬레이션 방법에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다. 음파의 반사 외에도 굴절, 회절, 간섭, 잔향 등의 일반적인 물리적 현상과 온도, 주파수에 따른 음파의 감쇄율을 고려할 수 있을 것이다. 또한 크기, 모양, 재질과 같은 반사체의 특성과 반사체의 방향, 앞에 위치한 반사체에 의한 가려짐 현상 등과 같은 반사체에 대해 고려하여야 할 조건 등도 있다. 이러한 조건들에 대한 시뮬레이션 툴의 개발은 박쥐의 초음파 시스템에 대한 연구뿐만 아니라 초음파를 이용한 물체의 위치추정 방법에 대한 공학적인 연구에도 도움이 될 것이다.

6.1.4 광대역 초음파 센서

우리가 알아본 바로는 국내에서 일반적으로 사용되는 초음파 트랜스듀서는 모두 특정 주파수만 발신할 수 있는 협대역 초음파 트랜스듀서로 박쥐의 FM 초음파를 발신, 수신할 수 없었다. 따라서 우리가 사용한 초음파 센서들은 국외에서 구할 수밖에 없었다. 협대역 초음파 트랜스듀서는 피에조 특성을 이용한 트랜스듀서로 낮은 전압에서도 간단히 구동되었으나 광대역 초음파 실험에 주로 사용되는 polaroid사의 정전형 방식의 트랜스듀서는 200V 이상의 높은 구동 전압을 요구하였다. 우리는 실험 진행을 위해 다양한 형태의 초음파를 발신할 수 있는 초음파 발신부를 구성하였는데 우리가 구성한 초음파 발신부의 경우 40kHz~60kHz 사이의 주파수를 갖는 펄스는 우리가 원하는 형태로 발신할 수 있었으나 그 이상이나 이하의 주파수를 갖는 펄스의 경우 정상적인 발신이 되지 않았다. 박쥐의 FM 펄스와 같은 다양한 형태의 광대역 초음파를 발신할 수 있는 실험 장비들은 있었으나 쉽게 구하기가 힘들고 대부분 부피가 크고 비싸다는 점에서 일반적으로 사용되기에는 문제가 있다는 것을 보았을 때 광대역 초음파를 이용한 알고리즘이 다양하게 응용되기 위해서는 센서의 크기와 가격을 향상시킬 수 있는 광대역 초음파 센서 모듈에 대한 연구가 필요할 것이다.

6.1.5 로봇 응용

시각 센서에서 제공하는 정보의 유용성과 사람은 시각은 통해 많은 정보를 획득하여 시각 센서로 얻은 정보를 직관적으로 받아들일 수 있다는 점 때문에 현재 많은 로봇에서 시각 센서를 주요 센서로 사용하고 있다. 반면에 초음파 센서는 물체가 있는지 없는지나, 거리만을 판단하는 등의 간단한 용도로 대부분 사용되고 있으며 따라서 공기 중에서 사용할 수 있는 초음파 기술에 대한 연구가 시각센서에 대한 연구가, 물이나 고체에서의 초음파에 대한 연구에 비해 활발하지 못한 것은 사실이다. 하지만 시각센서가 기본적으로 픽셀의 RGB 값을 제공한다면, 초음파 센서는 기본적으로 물체의 거리에 대한 값을 제공하기 때문에 초음파 센서는 시각 센서와는 다른 방식의

주변 환경 파악이 가능하며, 박쥐가 보여주는 것처럼 초음파를 이용하여 복잡한 환경 정보를 처리할 수 있는 가능성이 충분하다.

우리가 연구한 물체 위치 탐지 방법은 초음파 센서 도플러 효과를 이용하는 방법이기 때문에 도플러 효과를 측정할 수 있는 일정 속도 이상의 움직임이 필요하지만 정지한 상태에서 적용할 수 있는 정보 획득 방식에 대한 많은 기존의 연구가 있기 때문에 우리가 적용할 플랫폼이 항상 움직일 필요는 없을 것이다. 어떤 하드웨어를 사용하는지에 따라 도플러 효과의 측정 정확도와 도플러 효과를 이용하기 위한 최소의 요구 속도 값이 다를 것이므로 도플러 효과를 이용하기 위한 최소한의 속도 값을 알기 위해서는 실제 하드웨어를 구성하여 도플러 효과를 얼마나 정확하게 측정할 수 있는지에 대한 테스트 과정이 필요할 것이다.

참고 문헌

- Armitage, D. and Ober, H. (2010). A comparison of supervised learning techniques in the classification of bat echolocation calls. *Ecological Informatics*.
- Bank, D. (2002). A novel ultrasonic sensing system for autonomous mobile systems. *IEEE Sensors Journal*, 2(6):597–606.
- Barshan, B. (1999). Ultrasonic surface profile determination by spatial voting. *Electronics Letters*, 35(25):2232–2234.
- Barshan, B. (2007). Directional processing of ultrasonic arc maps and its comparison with existing techniques. *The International Journal of Robotics Research*, 26(8):797.
- Barshan, B. and Ayrulu, B. (1998). Performance comparison of four time-of-flight estimation methods for sonar signals. *Electronics Letters*, 34(16):1616–1617.
- Bates, M., Simmons, J., and Zorikov, T. (2011). Bats use echo harmonic structure to distinguish their targets from background clutter. *Science*, 333(6042):627.
- Bell, G. and Fenton, M. (1984). The use of doppler-shifted echoes as a flutter detection and clutter rejection system: the echolocation and feeding behavior of *hipposideros ruber* (chiroptera: Hipposideridae). *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 15(2):109–114.
- Boonman, A., Parsons, S., and Jones, G. (2003). The influence of flight speed on the ranging performance of bats using frequency modulated echolocation pulses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113:617.
- Choset, H., Nagatani, K., and Lazar, N. (2003). The arc-transversal median algorithm: a geometric approach to increasing ultrasonic sensor azimuth accuracy. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(3):513–521.
- Cox, I. (1991). Blanche-an experiment in guidance and navigation of an autonomous robot vehicle. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(2):193–204.
- Crowley, J. (1985). Navigation for an intelligent mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1(1):31–41.
- Dawkins, R. and Pyle, L. (1991). *The blind watchmaker*. Penguin Harmondsworth.

- Drumheller, M. (1987). Mobile robot localization using sonar. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (2):325–332.
- Elfes, A. (1987). Sonar-based real-world mapping and navigation. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3(3):249–265.
- Elmer, H. and Schweinzer, H. (2004). Ultrasonic distance measurement system with a well defined and adjustable detection area. In *Proceedings of IEEE Sensors, 2004.*, pages 437–440. IEEE.
- Emde, G. and Schnitzler, H. (1986). Fluttering target detection in hipposiderid bats. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 159(6):765–772.
- Emde, G. and Schnitzler, H. (1990). Classification of insects by echolocating greater horseshoe bats. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 167(3):423–430.
- Fenton, M. (1999). Describing the echolocation calls and behaviour of bats. *Acta chiropterologica*, 1(2):127–136.
- Griffin, D. (1958). *Listening in the dark*.
- Haykin, S. and Van Veen, B. (2003). Signals and systems (international edition).
- Hiryu, S., Shiori, Y., Hosokawa, T., Riquimaroux, H., and Watanabe, Y. (2008). On-board telemetry of emitted sounds from free-flying bats: compensation for velocity and distance stabilizes echo frequency and amplitude. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 194(9):841–851.
- Holderied, M. and Von Helversen, O. (2003). Echolocation range and wingbeat period match in aerial-hawking bats. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 270(1530):2293.
- Holland, R., Waters, D., and Rayner, J. (2004). Echolocation signal structure in the megachiropteran bat *rousettus aegyptiacus geoffroy 1810*. *Journal of experimental biology*, 207(25):4361.
- Hong, M. and Kleeman, L. (1997). Ultrasonic classification and location of 3d room features using maximum likelihood estimation-part ii. *Robotica*, 15(6):645–652.
- Jones, G. and Teeling, E. (2006). The evolution of echolocation in bats. *Trends in ecology & evolution*, 21(3):149–156.
- Kalko, E. and Schnitzler, H. (1993). Plasticity in echolocation signals of european pipistrelle bats in search flight: implications for habitat use and prey detection. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 33(6):415–428.

- Kaniak, G. and Schweinzer, H. (2008). A 3d airborne ultrasound sensor for high-precision location data estimation and conjunction. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008. IMTC 2008. IEEE*, pages 842–847. IEEE.
- Kazial, K., Burnett, S., and Masters, W. (2001). Individual and group variation in echolocation calls of big brown bats, *ptesicus fuscus* (chiroptera: Vespertilionidae). *Journal of Mammalogy*, 82(2):339–351.
- Kingston, T., Jones, G., Akbar, Z., and Kunz, T. (1999). Echolocation signal design in kerivoulineae and murinineae (chiroptera: Vespertilionidae) from malaysia. *Journal of Zoology*, 249(03):359–374.
- Kober, R. and Schnitzler, H. (1990). Information in sonar echoes of fluttering insects available for echolocating bats. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 87:882.
- Kuc, R. (2003). Recognizing retro-reflectors with an obliquely-oriented multi-point sonar and acoustic flow. *The International Journal of Robotics Research*, 22(2):129.
- Kuc, R. (2009). Model predicts bat pinna ridges focus high frequencies to form narrow sensitivity beams. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125:3454.
- Kuc, R. and Siegel, M. (1987). Physically based simulation model for acoustic sensor robot navigation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (6):766–778.
- Long, C., Flint, J., and Lepper, P. (2010). Wind turbines and bat mortality: Doppler shift profiles and ultrasonic bat-like pulse reflection from moving turbine blades. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128:2238.
- Masters, W., Raver, K., and Kazial, K. (1995). Sonar signals of big brown bats, *ptesicus fuscus*, contain information about individual identity, age and family affiliation. *Animal Behaviour*, 50(5):1243–1260.
- McKerrow, P. and Kristiansen, B. (2006). Classifying surface roughness with ctfm ultrasonic sensing. *Sensors Journal, IEEE*, 6(5):1267–1279.
- McKerrow, P. and Yoong, K. (2007). Classifying still faces with ultrasonic sensing. *Robotics and Autonomous Systems*, 55(9):702–710.
- Melcón, M., Yovel, Y., Denzinger, A., and Schnitzler, H. (2010). How greater mouse-eared bats deal with ambiguous echoic scenes. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, pages 1–10.
- Moss, C., Bohn, K., Gilkenson, H., and Surlykke, A. (2006). Active listening for spatial orientation in a complex auditory scene. *PLoS Biology*, 4(4):e79.
- Moss, C. and Surlykke, A. (2001). Auditory scene analysis by echolocation in bats. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110:2207.

- Moss, C. and Surlykke, A. (2010). Probing the natural scene by echolocation in bats. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 4.
- Neuweiler, G. (1984). Foraging, echolocation and audition in bats. *Naturwissenschaften*, 71(9):446–455.
- Obrist, M. (1995). Flexible bat echolocation: the influence of individual, habitat and conspecifics on sonar signal design. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 36(3):207–219.
- Ostwald, J. (1984). Tonotopical organization and pure tone response characteristics of single units in the auditory cortex of the greater horseshoe bat. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 155(6):821–834.
- Park, S. and Kim, D. (2010a). Object localization by using omni-directional ultrasonic sensor (In Korean). *Korea robotics society annual conference 2010*.
- Park, S. and Kim, D. (2010b). Ultrasound echolocation with frequency-modulated signals in cluttered background. *2010 International Conference on Control Automation and Systems (ICCAS)*, pages 2510–2513.
- Park, S. and Kim, D. (2011a). Distance estimation using discretized frequency synthesis of ultrasound signals (In Korean). *Journal of Institute of Control. Robotics and System*, 17(5):499–504.
- Park, S. and Kim, D. (2011b). Stationary object localization inspired by echolocation of bat (In Korean). *Korea robotics society annual conference 2011*.
- Park, S. and Kim, D. (2012). Ultrasound echolocation inspired by a prey detection strategy of big brown bat (In Korean, accepted). *Journal of Institute of Control. Robotics and System*.
- Pearl, D. and Fenton, M. (1996). Can echolocation calls provide information about group identity in the little brown bat (*myotis lucifugus*)? *Canadian journal of Zoology*, 74(12):2184–2192.
- Politis, Z. and Smith, P. (2001). Classification of textured surfaces for robot navigation using continuous transmission frequency-modulated sonar signatures. *The International Journal of Robotics Research*, 20(2):107.
- Probert Smith, P. and Zografos, K. (2005). Sonar for recognising the texture of pathways. *Robotics and Autonomous Systems*, 51(1):17–28.
- Roverud, R., Nitsche, V., and Neuweiler, G. (1991). Discrimination of wingbeat motion by bats, correlated with echolocation sound pattern. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 168(2):259–263.
- Rübsamen, R., Neuweiler, G., and Sripathi, K. (1988). Comparative collicular tonotopy in two bat

- species adapted to movement detection, *hipposideros speoris* and *megaderma lyra*. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 163(2):271–285.
- Schnitzler, H. and Henson Jr, O. (1980). Performance of airborne animal sonar systems. i. microchiroptera. *Animal sonar systems*. Plenum, New York, 109.
- Schnitzler, H., Moss, C., and Denzinger, A. (2003). From spatial orientation to food acquisition in echolocating bats. *Trends in Ecology & Evolution*, 18(8):386–394.
- Schuller, G., Beuter, K., and Schnitzler, H. (1974). Response to frequency shifted artificial echoes in the *batrhinolophus ferrumequinum*. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 89(3):275–286.
- Schuller, G. and Pollak, G. (1979). Disproportionate frequency representation in the inferior colliculus of doppler-compensating greater horseshoe bats: evidence for an acoustic fovea. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 132(1):47–54.
- Siemers, B. and Kerth, G. (2006). Do echolocation calls of wild colony-living bechstein's bats (*myotis bechsteinii*) provide individual-specific signatures? *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 59(3):443–454.
- Siemers, B. and Schnitzler, H. (2004). Echolocation signals reflect niche differentiation in five sympatric congeneric bat species. *Nature*, 429(6992):657–661.
- Simmons, J. (1974). Response of the doppler echolocation system in the bat, *rhinolophus ferrumequinum*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 56:672.
- Simmons, J. (1979). Perception of echo phase information in bat sonar. *Science*, 204(4399):1336.
- Simmons, J. and Stein, R. (1980). Acoustic imaging in bat sonar: echolocation signals and the evolution of echolocation. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 135(1):61–84.
- Simon, R., Holderied, M., Koch, C., and von Helversen, O. (2011). Floral acoustics: Conspicuous echoes of a dish-shaped leaf attract bat pollinators. *Science*, 333(6042):631.
- Suga, N. and Jen, P. (1976). Disproportionate tonotopic representation for processing cf-fm sonar signals in the mustache bat auditory cortex. *Science*, 194(4264):542.
- Surlykke, A. and Moss, C. (2000). Echolocation behavior of big brown bats, *eptesicus fuscus*, in the field and the laboratory. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108:2419.
- Tian, B. and Schnitzler, H. (1997). Echolocation signals of the greater horseshoe bat (*rhinolophus ferrumequinum*) in transfer flight and during landing. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101(4):2347–2364.

- Tudge, C. (2000). *The variety of life*. Oxford Univ. Press.
- Wadsworth, J. and Moss, C. (2000). Vocal control of acoustic information for sonar discriminations by the echolocating bat, *ptesicus fuscus*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107:2265.
- Waters, D. (2007). Echolocation in air: biological systems, technical challenges, and transducer design. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 221(10):1165–1175.
- Waters, D. and Wong, J. (2007). The allocation of energy to echolocation pulses produced by soprano pipistrelles (*pipistrellus pygmaeus*) during the wingbeat cycle. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(5 Pt1):2990.
- Weinbeer, M. and Kalko, E. (2007). Ecological niche and phylogeny: the highly complex echolocation behavior of the trawling long-legged bat, *macrophyllum macrophyllum*. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 61(9):1337–1348.
- Wijk, O. and Christensen, H. (2000). Triangulation-based fusion of sonar data with application in robot pose tracking. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(6):740–752.
- Wong, J. and Waters, D. (2001). The synchronisation of signal emission with wingbeat during the approach phase in soprano pipistrelles (*pipistrellus pygmaeus*). *Journal of Experimental Biology*, 204(3):575.
- Yovel, Y., Falk, B., Moss, C., and Ulanovsky, N. (2010). Optimal localization by pointing off axis. *Science*, 327(5966):701.
- Yovel, Y., Franz, M., Stilz, P., and Schnitzler, H. (2008). Plant classification from bat-like echolocation signals. *PLoS Computational Biology*, 4(3):e1000032.
- Yovel, Y., Geva-Sagiv, M., and Ulanovsky, N. (2011). Click-based echolocation in bats: not so primitive after all. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, pages 1–16.
- Yovel, Y., Melcon, M., Franz, M., Denzinger, A., and Schnitzler, H. (2009a). The voice of bats: how greater mouse-eared bats recognize individuals based on their echolocation calls. *PLoS Computational Biology*, 5(6):e1000400.
- Yovel, Y., Stilz, P., Franz, M., Boonman, A., and Schnitzler, H. (2009b). What a plant sounds like: the statistics of vegetation echoes as received by echolocating bats. *PLoS Computational Biology*, 5(7):e1000429.