

오디오 빔포밍을 이용한 감시장비 제어 시스템 설계

(Design of Surveillance Device Control System
Using Audio Beamforming)

사관생도 심 재 성*

(Cadet Sim Jaesung)

조교수 정 윤 교**

(Assistant Professor Jung Yoonkyo)

- 요약 문 -

최근 군 병력이 감소함에 따라 휴전선 부근 적을 감시할 수 있는 무인 감시장비의 필요성이 대두되고 있다. 따라서 현재 군의 감시 시스템은 다수의 카메라를 설치하여 소수의 인원이 교대로 감시 및 추적하는 방식으로 이루어지고 있다. 하지만 이러한 방식은 장시간 다수의 영상 정보에 집중해야 하는 감시 인력의 피로도 증가를 불러왔고, 결과적으로 무인 감시장비의 정확도 감소를 야기하고 있다. 본 연구에서는 소리 신호를 증폭하는 빔포밍 알고리즘을 설계하여 소리 정보를 바탕으로 소리의 발생 방향으로 감시장비를 유도 및 제어하는 시스템을 제안한다. 시스템 구현을 위해 MATLAB을 이용한 신호처리 샘플링, 힐베르트 변환, 빔포밍을 구현하였고, 해당 기술을 바탕으로 소리의 발생 방향을 추적할 수 있었다. 실험 환경에서 마이크 기준 좌우 15, 30, 45, 60도와 정면에서 소리를 20cm 간격으로 발생시켜 소리의 방향을 측정한 결과, 평균 3.4도, 최대 7도의 오차로 소리의 발생 방향을 추적할 수 있음을 확인하여 해당 시스템이 감시장비 유도에 유용함을 증명하였다.

주제어 : 빔포밍, 감시장비, 오디오 신호 처리, 카메라 유도

* 공군사관학교 컴퓨터과학과 4학년

E-mail: 7512892@mnd.go.kr

** Corresponding Author: 정윤교(Jung Yoonkyo)

공군사관학교 교수부 이학처 컴퓨터과학과

E-mail: ykjung@mnd.go.kr

Tel: 043-290-6434

1. 서론

현대에는 감시장비를 활용하는 소요가 점점 많아지고 있다. 육아나 애완동물 관리를 위해 가정용 CCTV를 설치하는 것부터 범죄 예방을 위해 회사에서 방범용 카메라를 설치하는 등 감시장비는 일상생활에 중요한 요소이다. 특히 군 내에서는 작전 수행에 필수적인 감시·정찰 활동을 위해 각종 지능형 감시장비 사용이 활발하게 이루어지고 있다. 기지 내·외곽을 감시하기 위해 CCTV를 사용하는 것은 물론 전자광학장비를 사용하여 국경, 해안, 주요시설을 24시간 경계하고 있으며, 열상감지장비 등을 사용하여 각종 테러에 대응하고 있다. 최근에는 공군에서 전자광학위성감시체계¹⁾ 전력화를 통해 인공위성과 우주 물체를 탐지·추적하는 등 국군의 감시정찰체계가 탐지하는 공간을 우주까지 확장했다.

대부분의 감시장비는 특정 영역만을 감시하고 있으므로 감시장비를 통해 전 방향을 탐지하기 위해 실시간으로 물체를 추적하는 기술이 적용되어야 한다. 초기에 CCTV에 사용된 기술은 영상을 추적하여 이벤트 감지를 하는 등²⁾ 영상 정보를 사용하여 물체를 감지하고 추적하는 시스템이 대부분이었다. 탐지 기술이 발전하며 감시장비에서 촬영한 정보를 바탕으로 총기나 칼을 소지한 사람을 확인하는 연구³⁾ 등을 통해 단순히 감시 범위를 확장하는 것뿐만 아니라 객체를 분류하고 위험을 감지하는 기술이 적용되었다. 하지만 감시장비에 적용되는 탐지·추적 기술은 영상 정보를 기반으로 수행되는 경우가 대부분이며, 이러한 방법은 사각지대에 있는 객체를 최초에 탐지하지 못할 경우 감시장비가 이를 추적할 수 없다는 단점이 있다.

본 연구에서는 특정 단말기에서 수신하는 신호를 집중시키는 빔포밍 기술을 통해 감시장비에 들어오는 오디오 신호를 강화시켜 소리가 발생한 객체의 위치를 파악하고, 위치 정보를 바탕으로 감시장비를 제어하여 해당 객체를 추적하는 시스템을 설계하였다. 실험을 위해 두 개의 마이크 소자에서 입력받은 신호를 처리하여 신호가 탐지된 방향으로 감시장비를 유도하는 시스템을 개발했고, 여러 각도에서 소리 신호를 발생시키고 빔포밍 알고리즘을 적용한 결과를 비교하여 시스템의 정확도를 확인했다. 그 결과 10도 이내의 오차 범위에서 객체의 위치 정보를 확인할 수 있었으며, 이는 본 연구에서 제시한 알고리즘이 실제 감시장비에 적용될 수 있음을 보여준다.

1) 오동준. '전자광학위성감시체계' 전력화, 한반도 상공 우주 '자력' 감시. *국방일보*. 2022, 1월 5일.

2) Luis M. Fuentes, Sergio A. Velastin, Tracking-based event detection for CCTV systems. *Pattern Analysis and Applications*, 7(4), 2004, 356-364.

3) Grega M, Mاتیolański A, Guzik P, Leszczuk M. Automated Detection of Firearms and Knives in a CCTV Image. *Sensors*, 16(1), 2016, 47.

2. 이론적 배경 및 선행 연구

2.1. 이론적 배경

2.1.1. 빔포밍

무선통신에서 빔포밍이란 안테나의 빔을 특정한 수신기기에 집중시키는 기술이다. 이 기술은 무선통신뿐만 아니라 군에서 사용하는 위상배열 레이더에도 사용되는 기술이다. 전파 송수신 모듈을 여러 개 부착하여 배열한 후, 각 모듈이 송수신하는 개별 전파의 위상을 제어하여 지향성을 가지도록 한 것이 위상배열 레이더⁴⁾이다. 위상배열 레이더의 종류는 PESA(Passive Electronically Scanned Array)⁵⁾와 AESA(Active Electronically Scanned Array)⁶⁾ 두 가지로 크게 구분되는데, 각 전파 송수신 모듈이 개별적으로 전파의 발생을 제어할 수 없으면 PESA, 개별적 제어가 가능하면 AESA 레이더로 구분된다. 위상배열 레이더의 가장 큰 장점은 기계적 구조가 적다는 점이다. 개별 전파의 위상을 변경하여 탐지 범위를 변경하므로, 기존 기계식 레이더가 지속적으로 회전하며 전방위 스캔을 하는 것과 달리 위상배열 레이더는 전파의 위상만 변경하면 스캔하는 방향을 변경할 수 있다. 이러한 장점은 레이더에 사용되는 기계식 부품의 수를 획기적으로 줄여 고장률을 낮출 수 있으며, 레이더를 회전할 필요가 없기 때문에 훨씬 빠른 속도로 스캔이 가능하다. 따라서, 실시간으로 빠른 속도로 이동하는 물체를 탐지하기 위한 방공 레이더, 전투기 레이더, 탄도탄 감시레이더, 이지스 함정의 레이더 등에 사용되고 있다.

본 연구에서는 빔포밍 기술을 이용하여 두 개의 마이크 소자, 즉 스테레오 마이크로 입력받은 소리 신호의 방향을 추적하고, 해당 방향으로 감시장비를 유도하는 시스템을 개발하고자 한다.

2.1.2. 신호처리 샘플링

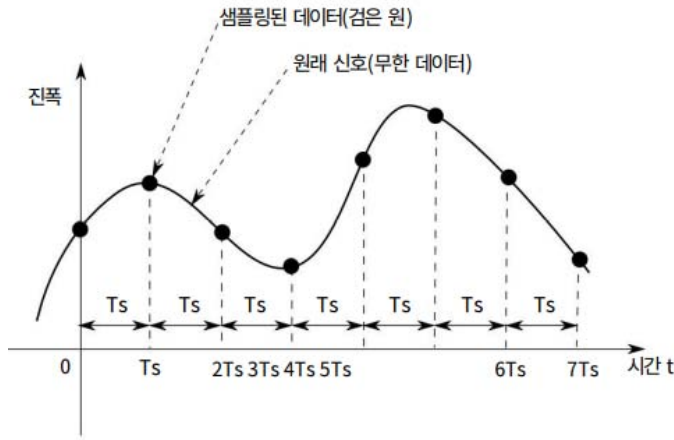
샘플링이란 아날로그로 된 값을 디지털에서 처리하기 위해서 일정한 주기로 값을 수집하는 것을 말한다. <그림 1>은 신호 샘플링을 나타낸 그림이다. 아날로그 신호는 기본적으로 연속된 값이기에, 이를 디지털 환경에서 처리하기 위해서는 주기를 나눠서 신

4) A. J. Fenn, D. H. Temme, W. P. Delaney, and W. E. Courtney. The development of phased-array radar technology, *Lincoln Laboratory Journal*, 12(2), 2000, 321-340.

5) Li. Y, Jiang. X, Liang. B, Cheng. J. C, and Zhang. L. Metascreen-based acoustic passive phased array, *Physical Review Applied*, 4(2), 2015, 024003.

6) K. H. Kim et al, Development of planar active phased array antenna for detecting and tracking radar, *2018 IEEE Radar Conference*, 2018, 100-103.

<그림 1> 신호 샘플링 과정



호를 수집하는 과정이 필요하다. 샘플링을 위한 대표적인 정리로는 나이퀴스트-새넌 샘플링 정리⁷⁾가 있다. 이는 원래 신호의 주파수보다 최소 2배 이상의 주파수로 샘플링을 했을 때, 원 신호를 완벽하게 복원할 수 있다는 것이다.

본 연구에서는 소리 신호를 입력받아 처리하기에 이를 샘플링 하는 과정이 필수적이다. 이때, 인간의 가청 주파수 범위를 고려하여, 그보다 2배의 주파수인 44.1KHz, 즉 CD 수준의 샘플링 레이트를 설정하여 소리 신호를 처리하고자 한다.

2.1.3. 힐베르트 변환

신호의 위상처리를 위해서 필수적인 과정으로서 힐베르트 변환이 있다. 힐베르트 변환은 신호의 진폭은 그대로 유지한 채, 위상만 변환시키는 변환 방법이다. 이는 삼각함수를 복소변환 하는 과정으로 구현할 수 있는데, 이는 푸리에 변환을 기초로 하여 음의 주파수 영역을 무시하는 대신 신호의 순시 세기와 순시 위상을 측정할 수 있게 한다. 이는 원래 삼각함수 형태로 표현되는 신호값을 복소수 값으로 변경하여 분석하기 용이한 형태로 처리할 수 있게 한다.

MATLAB에서 힐베르트 변환은 입력된 실수값에 대해 실수부는 기존 신호, 허수부는 변환된 신호를 반환하는 방식으로 구현된다. 힐베르트 변환으로 처리된 신호는 실제 데이터와 90도 위상 변위 관계를 가진다.

7) Shannon, C. E. Communication in the Presence of Noise. *Proceedings of the IRE*, 37(1), 1949, 10-21.

2.2. 선행 연구

빔포밍 기법을 활용한 선행 연구는 신호를 수신하는 특정 단말기에 신호를 집중시켜 통신 성능을 극대화하는 연구 위주로 진행되었다. 모바일 단말기의 송수신 신호 성능을 향상시키고 빔의 방향을 탐지하기 위해 여러 축의 안테나 시스템을 사용하여 신호를 제어하거나⁸⁾, 수중에서 발생하는 수신 신호의 성능을 높이기 위해 빔포밍 기술을 사용하는 등⁹⁾ 빔포밍 기술은 특정 객체에서 발생하는 신호를 집중하여 신호의 성능을 향상하는 연구가 주로 이루어졌다.

또한 사용자의 위치를 추정하기 위해 수신부 안테나의 길이를 고려하여 초점 거리 및 카메라 이미지 센서에 맺힌 상의 길이와 비례 관계를 계산하거나¹⁰⁾ 안테나의 수신 신호를 기반으로 방향을 탐지하는 등¹¹⁾ 빔포밍 기술을 응용하여 수신 데이터를 바탕으로 거리나 방위각 등 위치 정보를 파악하는 연구도 이루어졌다. 하지만 앞서 언급한 연구들은 신호를 수신하는 안테나를 사용해야 하기 때문에 광범위한 적용이 어려우며, 소리 신호를 처리하는 방법은 제안하지 않는다.

주택의 기밀 성능을 측정하기 위해 음향카메라에서 측정한 음파에 빔포밍 방식을 적용하는 등¹²⁾ 오디오 신호에 빔포밍을 적용하는 연구도 진행되었으나, 빔포밍을 구현한 목적과 용도가 다르기 때문에 감시장비에서 요구하는 빔포밍 설계 방식과는 차이가 있다. 따라서 본 연구에서는 감시장비가 갖는 한계점을 극복하고, 빔포밍 기법을 오디오 신호에 적용하여 수신 신호를 집중시켜 객체의 방향을 추적할 수 있는 시스템을 제안한다.

8) 조규남, 윤원상, 채상훈. 4축 구조를 사용한 4G 겸용 5G 이동통신용 빔 방향탐지 및 빔포밍 시스템. *한국정보기술학회논문지*, 20(8), 2022, 61-68.

9) 김준호, 차민혁, 왕비, 임태호, 고헌림. 대한민국 남해 해역에서 원형 배열 하이드로폰을 이용한 수중 OFDM 시스템의 MMSE 적응 빔포밍 연구. *한국통신학회논문지*, 47(7), 2022, 986-995.

10) 백승우, 방지훈, 최재훈, 김선우. 컴퓨터 비전 기반 밀리미터파 대역 빔포밍 시스템 구현. *2022 한국통신학회 동계종합학술발표회 논문집*, 2022, 1436-1437.

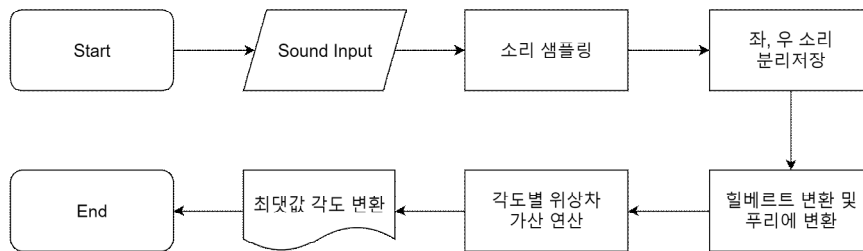
11) 오현수, 박철순, 장래규. 디지털 빔포밍을 이용한 모노펄스 방향 탐지 기법 연구. *한국통신학회논문지*, 45(5), 2020, 875-881.

12) 광병창, 김길태, 지원길, 김태민. 빔포밍 방식 음향 카메라를 활용한 공동주택 기밀성능 측정 연구. *한국건축환경설비학회 논문집*, 14(6), 2020, 674-686.

3. 시스템 설계

본 연구에서 설계한 빔포밍 시스템의 구조는 <그림 2>와 같다. 먼저 음성 신호를 입력받으면 아날로그 신호를 샘플링하여 디지털 신호로 변환한다. 두 개의 마이크에서 입력받은 음성 신호는 샘플링 후 좌·우 분리하여 저장되며, 힐베르트 변환과 푸리에 변환을 신호처리를 진행한다. 처리한 데이터는 각도별 위상차 가산 연산을 거쳐 소리의 최댓값이 발생한 각도로 변환할 수 있으며, 이를 통해 위치 정보를 얻을 수 있다.

<그림 2> 빔포밍 알고리즘 구조



3.1. 빔포밍 알고리즘 설계

3.1.1. 신호 샘플링

마이크를 통해서 입력받은 음향 데이터는 아날로그 데이터로서, 그 상태에서는 컴퓨터에서 처리하기가 불가능하다. 따라서 일정 시간 T_s 마다 데이터를 입력받아 시간을 이산적으로 표현하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 T_s 를 샘플링 주기, f_s 를 샘플링 주파수, N 을 총 샘플링 횟수로 설정했다. 샘플링 주파수는 CD와 동일한 44.1kHz로 설정하였으며, 이때, 새년의 표본화 정리에 따라서 취급할 수 있는 주파수는 $f_s/2$ 이므로, 22.05kHz미만의 주파수 신호를 처리할 수 있다. 인간의 가청 주파수 범위는 20Hz ~ 20kHz 범위이므로, 본 연구의 방법으로 인간의 가청 주파수 범위를 모두 다룰 수 있다.

3.1.2. 복소수를 이용한 신호 처리

샘플링을 통해 저장한 기존 신호를 $\cos(2\pi f_i t)$ 라고 할 때, 이 신호의 위상을 90도 변경한 신호는 힐베르트 변환에 의해 $\sin(2\pi f_i t)$ 로 나타낼 수 있다. 위상이 90도 변경한 신호는 (수식 1)의 오일러 공식을 사용하여 (수식 2)와 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서

는 MATLAB을 사용하여 신호처리를 진행하였기에, 허수 $i = \sqrt{-1}$ 를 j 로 표기한다.

$$e^{i\theta} = \cos(\theta) + i\sin(\theta) \quad (\text{수식 1})$$

$$e^{j2\pi f t} = \cos(2\pi f_t) + j \cdot \sin(2\pi f_t) \quad (\text{수식 2})$$

위와 같은 변환을 통해, 기존 신호 $s(t)$ 는 $s(t) = e^{j2\pi f t}$ 로 나타낼 수 있고, 여기에 주파수 f_0 에 대한 신호인 $w(t) = e^{j2\pi f_0 t}$ 를 곱한 신호는 (수식 3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t)e^{j2\pi f_0 t} = e^{j2\pi f t} e^{j2\pi f_0 t} = e^{j2\pi (f+f_0)t} \quad (\text{수식 3})$$

이러한 변환 과정을 거쳐 간단한 수식으로 수신 신호를 처리할 수 있다.

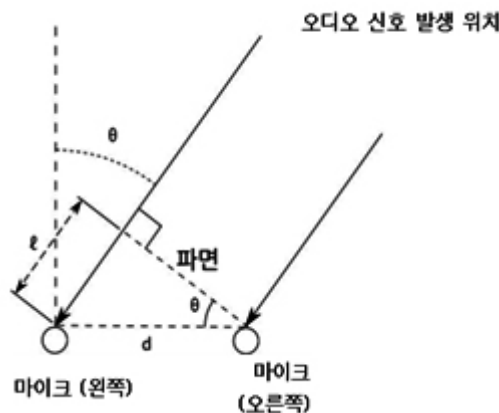
3.1.3. 스테레오 마이크를 이용한 신호의 방향 추정

본 연구에서는 스테레오 마이크를 이용하여 오디오 신호의 발생 방향을 추정한다. 충분히 먼 거리에서 발생된 신호는, 두 개의 마이크에 시간 차이를 가지고 도달하게 되고, 이 시간 차이를 이용하여 신호의 발생 방향을 추정할 수 있다.

신호의 발생 방향을 θ , 두 안테나 사이의 거리를 d , 신호 도달 시 나중에 도달한 신호의 지연 거리를 ℓ 로 설정하면 <그림 3>과 같이 신호 수신 상황을 가정할 수 있다.

그림에서 $\ell = d\sin(\theta)$ 이다. 여기서, 신호의 속도를 c 로 하고, 왼쪽 마이크가 오른쪽 마이크에 비해 지연된 시간을 τ 로 하면 $\ell = c\tau$ 이다. 따라서, $d\sin(\theta) = c\tau$ 이므로 (수식 4)와 같이 나타낼 수 있다.

<그림 3> 오디오 신호 발생시 신호 수신 예시



$$\tau = \frac{d \sin(\theta)}{c}, \quad \theta = \sin^{-1}\left(\frac{c\tau}{d}\right) \quad (\text{수식 4})$$

여기서, d 와 c 는 이미 알고 있는 값이고, τ 는 측정 가능한 값이기 때문에 θ 를 구할 수 있다.

오른쪽과 왼쪽 마이크의 입력 신호를 각각 시간 t 에 대하여 $x(t)$, $y(t)$ 로 정의한다. 여기서 총 샘플링 횟수가 N 이므로, 각 샘플링 시간을 $nT_s (n=0, \dots, N-1)$ 로 하면, $x_n = x(nT_s)$, $y_n = y(nT_s)$ 이다. 이를 이용하면 임의의 정수 m 에 대하여 지연시간 $\tau = mT_s$ 가 측정되었을 때, m 을 알면 τ 를 구할 수 있다. 이때, m 을 구하기 위해 상관 계수를 활용한다

3.1.4. 상관 계수와 상관 함수

상관 계수란, 벡터 $x = (x_1, \dots, x_n)$ 과 벡터 $y = (y_1, \dots, y_n)$ 의 유사도를 표현하는 값이다. 상관 계수 R 은 (수식 5)와 같이 정의할 수 있다. 여기서 x_n^* 는, x_n 의 켈레복소수이다.

$$R = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n^* y_{n+k} \quad (\text{수식 5})$$

이 상관 계수 R 은 벡터 x 와 y 의 내적으로도 표현할 수 있는데, 두 벡터의 각도 차이를 ϕ 라고 하면, 상관 계수는 (수식 6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = |x||y| \cos \phi \quad (\text{수식 6})$$

즉, x 와 y 의 값이 유사할수록 R 은 커지고, 반대의 경우 작아진다.

이를 이용하면 상관 함수를 정의할 수 있는데, 두 벡터의 어긋난 값을 k 라고 하면, 상관함수 $R(k)$ 는 (수식 7)과 같이 정의된다.

$$R(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n^* y_{n+k} \quad (\text{수식 7})$$

y_n 은 x_n 을 기준으로 어긋난 값이므로, $y_n = x_{n-m}$ 으로 나타낼 수 있으며, 상관 계수는 (수식 8)로 나타낼 수 있다.

$$R(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n^* x_{n-m+k} \quad (\text{수식 8})$$

그러므로 k 의 값을 변화시켜 $k=m$ 이 될 때, $R(k)$ 의 값은 최대가 된다. 즉, $R(k)$ 가 최대가 되는 지점의 k 를 구하면 m 을 추정할 수 있으며, 그로부터 지연시간 τ 를 계산하여 (수식 9)의 식으로 신호의 발생 위치 θ 를 추정할 수 있다.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{cmT_s}{d}\right) \quad (\text{수식 9})$$

상관 함수를 그대로 계산하면, $k > 0$, $n = N-1$ 일 때 $n+k \geq N$ 이 되어 계산할 수 없으며, $k \geq N$ 일 때도 계산이 불가능하다. 따라서 $K < N$ 이 되는 K 를 결정하고, $R(k)$ 는 $-K \leq k \leq K$ 에 대해서 결정하여 함수의 합을 데이터가 존재하는 범위 내로 한정하고, 계수는 가산한 데이터의 개수에 따라 조정해야 한다. 즉, 상관 함수는 (수식 10)과 같은 형태가 된다.

$$R(k) = \begin{cases} \frac{1}{N-k} \sum_{n=0}^{N-k-1} x_n^* y_{n+k} & (0 \leq k \leq K) \\ \frac{1}{N+k} \sum_{n=-k}^{N-1} x_n^* y_{n+k} & (-K \leq k < 0) \end{cases} \quad (\text{수식 10})$$

여기서 K 는 다음과 같이 구할 수 있다. 먼저 $\tau = mT_s$ 에 따라 (수식 4)를 응용하여 (수식 11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$mT_s = \frac{d \sin(\theta)}{c}, \quad m = \frac{d \sin(\theta)}{c T_s} = \frac{f_s d \sin(\theta)}{c} \quad (\text{수식 11})$$

위에서 도출한 식을 활용하여 $-1 \leq \sin(\theta) \leq 1$ 을 변환 후 (수식 12)와 같이 나타낼

수 있으며, 그 결과 도출한 K 의 값은 (수식 13)이다.

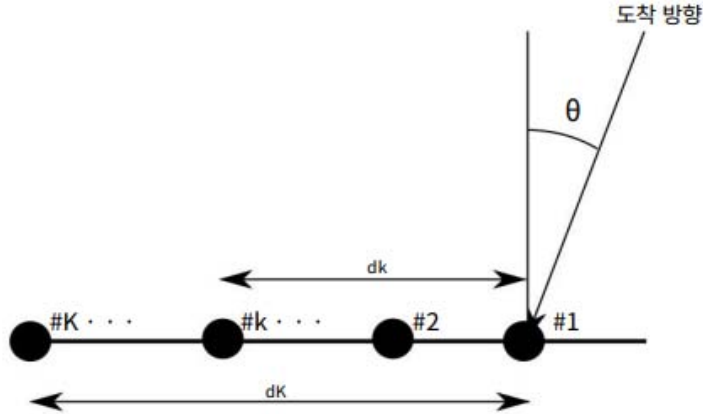
$$-\frac{f_s d}{c} \leq m \leq \frac{f_s d}{c} \quad (\text{수식 12})$$

$$K = \left\lfloor \frac{f_s d}{c} \right\rfloor \quad (\text{수식 13})$$

또한, 신호의 파장이 λ , 주파수가 f 일 때, 새년의 샘플링 정리에 따라 $d \leq \lambda/2$ 로 설정해야 하므로, 여기에 $\lambda = c/f$ 를 대입하면 $f \leq c/2d$ 가 되고, f 의 최댓값인 f_{\max} 는 $c/2d$ 가 된다.

3.1.5. 스테레오 마이크를 이용한 빔포밍

<그림 4> 빔포밍 설계에서 가정한 신호의 선형 배열



빔포밍 알고리즘을 설계하기 위해 <그림 4>와 같이 K 개의 점으로 이루어진 선형 배열을 가정했다. 이때, 신호의 주파수를 f , 수신 신호를 $E_0(t)$, 음파의 전파속도를 c , d_k 를 기준점으로부터 k 번째 점의 위치로 설정한다.

k 번째 점에서의 수신 신호를 $E_k(t)$ 로 하고, $E_k(t)$ 의 $E_0(t)$ 의 지연 시간을 τ_k 라고 한다. 이때, 신호의 각도를 θ_0 라고 하면, (수식 14)와 같이 정리할 수 있다.

$$\tau_k = \frac{d_k \sin(\theta_0)}{c}, \quad E_k(t) = E_0(t - \tau_k) \quad (\text{수식 14})$$

이 식에서 $E_0(t)$ 를 복소수로 변환하여 $E_0(t) = e^{j2\pi ft}$ 로 나타내면 (수식 15)와 같이 풀 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_k(t) &= E_0(t - \tau_k) \\
 &= e^{j2\pi f(t - \tau_k)} \\
 &= e^{j2\pi ft} e^{-j2\pi f\tau_k} \\
 &= E_0(t) e^{-j2\pi f\tau_k} \\
 &= E_0(t) e^{-j2\pi f \frac{d_k}{c} \sin(\theta_0)}
 \end{aligned} \tag{수식 15}$$

여기서, $e^{-j2\pi f \frac{d_k}{c} \sin(\theta_0)}$ 는 지연시간을 나타낸다.

각 점, 즉 마이크의 출력은 진폭 조정기 A_k , 가변 위상 조정기 δ_k 를 거쳐서 가산된다. 이 때 총 출력 $E_{sum}(t)$ 는 (수식 16)과 같다.

$$\begin{aligned}
 E_{sum}(t) &= \sum_{k=1}^K A_k E_k(t) e^{j\delta_k} \\
 &= E_0(t) \sum_{k=1}^K A_k e^{-j2\pi f \frac{d_k}{c} \sin \theta_0 + j\delta_k}
 \end{aligned} \tag{수식 16}$$

신호의 도달 각도가 θ_0 일 때, δ_k 는 (수식 17)의 방법으로 선택할 수 있다.

$$\delta_k = 2\pi f \frac{d_k}{c} \sin \theta_0 = \frac{2\pi}{\lambda} d_k \sin \theta_0 \tag{수식 17}$$

여기서 λ 는 신호의 파장이다. 이렇게 δ_k 를 설정했을 때 (수식 18)과 같이 E_{sum} 이 최대가 된다.

$$E_{sum}(t) = \frac{E_0(t)}{K} \sum_{k=1}^K e^0 = \frac{E_0(t)}{K} \sum_{k=1}^K 1 = 1 \tag{수식 18}$$

하지만, 실제 실험에서 θ_0 는 미지의 값이기 때문에, 미지의 신호가 θ 에서 도달한다고 가정하고 δ_k 를 계산하기 위해 $\delta_k = 2\pi/\lambda \cdot d_k \sin \theta$ 로 설정하여 $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 범위에

서 θ 를 변경하며 방향을 추정한다.

본 연구에서는 점의 간격을 일정하게 설정하여 $d_k = d(k-1)$ 로 하고, $A_k = 1/K$ 로 설정한다. 이 d_k , δ_k , A_k , λ 를 대입하면 (수식 19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{sum}(t) = \frac{E_0(t)}{K} \sum_{k=1}^K e^{-j2\pi \frac{d(k-1)}{\lambda} (\sin\theta_0 - \sin\theta)} \quad (\text{수식 19})$$

지향성 패턴일 경우, $E_0(t) = 1$ 로 설정하면 (수식 20)으로 표현된다.

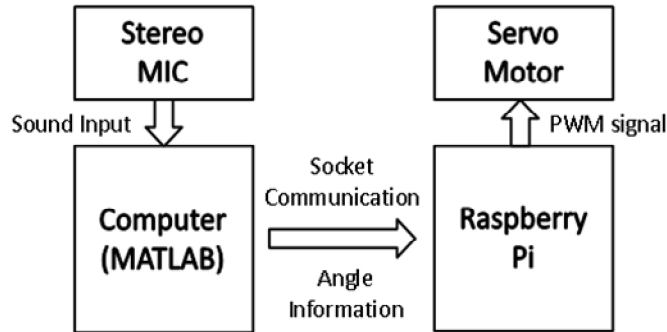
$$E_{sum}(t) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{-j2\pi \frac{d(k-1)}{\lambda} (\sin\theta_0 - \sin\theta)} \quad (\text{수식 20})$$

선의 배열이 선형일 경우, $d = \lambda/2$ 로 주로 설정한다. 이때, d 를 (수식 20)의 식에 대입하면 최종 방정식인 (수식 21)을 얻을 수 있다.

$$E_{sum}(t) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{-j\pi (k-1) (\sin\theta_0 - \sin\theta)} \quad (\text{수식 21})$$

3.2. 프로그램 설계

<그림 5> 시스템 구현을 위한 프로그램 설계 과정



<그림 5>는 빔포밍 적용을 위한 프로그램 설계 과정이다. 스테리오 마이크에 음성 데이터를 컴퓨터에 전송하여 MATLAB 코드로 처리하고, 객체의 방위각 정보를 계산하

여 서보모터가 연결된 라즈베리파이에 결과를 전송한다. 라즈베리파이는 입력받은 결과만큼 서보모터를 이동하여 카메라가 객체가 위치한 방향을 바라볼 수 있도록 조작한다.

3.2.1. 상관함수

먼저, 빔포밍을 위해서는 3.1.4에서 설명한 상관함수의 구현이 전제되어야 한다. 따라서 상관함수에 대한 프로그램을 MATLAB으로 작성하여 스테레오 마이크에서 입력받은 소리를 각각 배열로 변환한 후, 각각의 배열을 상관함수에 입력하기 위해서 세로 배열로 변환하였다. 배열 변환을 위해 사용된 프로그램의 의사 코드는 <그림 6>과 같다.

<그림 6> 입력받은 소리의 배열 변환을 위한 의사 코드

```
1:   $x, y \leftarrow$  행렬  $x, y$ 를  $N \times 1$  행렬로 변환
2:   $R \leftarrow 1 \times (2 \times K + 1)$  크기의 영행렬
```

N 은 배열의 전체 길이, R 은 상관함수의 계산 값을 입력하기 위한 변수, K 는 전체 입력점의 개수이다.

다음으로 이 값을 앞서 구한 상관함수로 계산하기 위해서 k 의 값에 따라서 분리하여 $-K$ 에서 K 까지의 범위에서 가산연산한다. 마지막으로 R 의 최종값 중 실수부만을 반환 해주면 상관함수의 연산값이 반환된다. 그 과정을 의사 코드로 표현하면 <그림 7>과 같다.

<그림 7> 상관함수의 연산값 반환을 위한 의사 코드

```
1:  for  $k \leftarrow -K$ 부터  $K$ 까지
2:    if  $k > 0$  then
3:       $r_1 \leftarrow 1 / (N - k)$ 
4:       $r_2 \leftarrow x$ 행렬의 1부터  $N - k$ 까지의 요소 컬레 전치
5:       $r_3 \leftarrow y$ 행렬의  $1 + k$ 부터  $N$ 까지의 요소
6:       $R$ 의  $k + K + 1$ 번째 요소  $\leftarrow r_1 \times r_2 \times r_3$ 
7:    else
8:       $r_1 \leftarrow 1 / (N + k)$ 
9:       $r_2 \leftarrow x$ 행렬의  $1 - k$ 부터  $N$ 까지의 요소 컬레 전치
10:      $r_3 \leftarrow y$ 행렬의 1부터  $N + k$ 까지의 요소
11:      $R$ 의  $k + K + 1$ 번째 요소  $\leftarrow r_1 \times r_2 \times r_3$ 
12:   end if
13: end for
14:  $R \leftarrow R$ 의 실수부
```

3.2.2. 빔포밍 및 입력 방향 계산

먼저, 입력 신호의 주파수를 CD와 동일한 수준인 44.1KHz로 설정하고, 음성 신호를 스테레오 마이크를 이용해서 입력받는다. 소리 신호의 입력 시간은 실험상 편의를 위해서 3초로 설정했다. 입력신호를 전처리하기 위하여 <그림 8>의 의사 코드에 따라 프로그램을 작성하였다.

<그림 8> 마이크 입력신호 전처리를 위한 의사 코드

```
1: 주파수  $f_s \leftarrow 44100$ 
2: 주기  $T_s \leftarrow 1/f_s$ 
3: my_recorder  $\leftarrow$  3초간 24bit, 2채널,  $f_s$ 주파수로 소리 녹음
4:  $s \leftarrow$  my_recorder를 행렬값으로 변환
5:  $s_L, s_R \leftarrow s$ 의 1번째, 2번째 열의 요소
6:  $hs_L, hs_R \leftarrow s_L, s_R$  힐베르트 변환
7:  $Fhs_L, Fhs_R \leftarrow hs_L, hs_R$  푸리에 변환
```

전처리 프로그램은 입력받은 음성 신호를 s 라는 배열값으로 변경해준다. 이 때, 수신하는 마이크는 두 개의 소자를 가진 스테레오 마이크이므로, 이 배열 값을 왼쪽, 오른쪽 마이크에 대하여 각각 s_L, s_R 이라는 배열로 분리할 수 있다. 계산의 편의성을 위해 힐베르트 변환을 통해 각각의 배열에 대해 복소변환을 수행한다.

전파값의 경우에는 중심주파수에 대해서, 전체 신호의 위상값 편차가 크지 않다. 하지만 본 연구에서 설계한 실험은 음성 및 소리 신호를 포착해야 하므로 중심주파수에 대해서 전체 신호의 위상편차가 크다. 따라서 푸리에 변환을 통해서 각각의 배열을 변환하는 작업을 수행한다.

또한 마이크의 전면부를 0도라고 했을 때, 마이크가 입력받을 수 있는 소리의 각도는 -90° 에서 90° 의 범위이다. 따라서 전체 벡터를 해당 범위로 한정하여 theta_vec 변수에 저장했다.

다음으로, 마이크의 지향성을 반영하기 위해서 값을 연산하기 위한 aL_vec, aR_vec 배열을 정의했다. 입력 마이크에 지향성이 있을 경우, 이 값을 변경하여 지향성을 반영한 계산을 할 수 있다. 하지만 본 연구에서 사용한 마이크의 경우, 무지향성 마이크이므로 해당 배열의 값을 모두 1로 입력했다.

해당 연구에서 사용한 마이크의 경우, 마이크 간 거리가 6cm 떨어져 있다. 따라서

빔포밍에서 입력 점의 거리인 d 를 0.06으로 설정하였다. 또한, 소리신호를 다루기에 입력신호의 속도인 c 를 340으로 설정하였다. 이를 구현한 프로그램의 의사 코드는 <그림 9>와 같다.

<그림 9> 마이크 방향, 거리 및 소리 속도 입력을 위한 의사코드

```

1:  theta_vec ← -90부터 90까지의 단위 간격 벡터
2:  aL_vec, aR_vec ← 1×181크기의 1행렬
3:  마이크 사이의 거리  $d$  ← 0.06
4:  소리 속도  $c$  ← 340

```

다음으로, 설정한 각도 범위 내에서 실제로 가산 연산을 진행하여 각각의 각도에 대한 신호 입력값을 연산한다. 주파수 벡터를 연산하여 f_vec 변수에 저장하고, 전체 연산 값을 저장할 FP 배열을 정의한다. 다음으로, 각도 범위를 0도 부터 180도까지 설정하여 가산연산을 수행한다.

<그림 10>은 가산연산 결과를 저장하는 프로그램의 의사 코드이다. 각도 벡터를 $theta_deg$ 로 정의하고, 연산의 편의를 위해서 이를 라디안 값으로 변환하여 $theta_rad$ 변수에 저장한다. 다음으로, 각도별 주파수에 대한 위상차를 연산하여 $delta_vec$ 변수에 저장한다. $delta_vec$ 변수를 기반으로, 마이크의 지향성을 반영하여 위상의 어긋남을 연산하여 Fbf 배열에 저장하고, 가산한 최종 신호 크기를 FP 배열에 저장한다.

<그림 10> 가산연산 수행 결과를 저장하기 위한 의사 코드

```

1:   $N$  ←  $sL$ 행렬의 길이
2:   $f\_vec$  ← 0부터  $N-1$ 까지 단위간격 벡터의 컬레전치  $\times f_s / N$ 
3:   $FP$  ← 1×181크기의 영행렬
4:  for  $theta\_idx$ 를 1부터 181까지 증가시키며
5:     $theta\_deg$  ←  $theta\_vec$  벡터의  $theta\_idx$  번째 값
6:     $theta\_rad$  ←  $theta\_deg$  값을 라디안 값으로 변환
7:     $delta\_vec$  ←  $e^{-j \times 2 \times \pi \times f\_vec \times d / c \times \sin(theta\_rad)}$ 
8:     $Fbr$  ←  $FhsR / aR\_vec$ 의  $theta\_idx$ 번째 요소
9:     $Fbl$  ←  $FhsL / aL\_vec$ 의  $theta\_idx$ 번째 요소
10:    $Fbf$  ←  $Fbr + Fbl$ 과  $delta\_vec$ 의 행렬 곱셈
11:    $FP$ 의  $theta\_idx$ 번째 요소 ←  $Fbf$ 의 유클리드 노름
12: end for

```

마지막으로, <그림 11>의 의사 코드 과정에 따라 *FP*배열을 그래프로 표시하고, 입력받은 음향 신호 중 가장 큰 값을 구해서 해당 신호가 발생한 곳의 각도를 구하여 *theta_est_bf_deg*변수에 저장하여 소리의 발생 위치를 최종적으로 구할 수 있다.

<그림 11> 소리 발생 위치를 구하기 위한 의사 코드

```

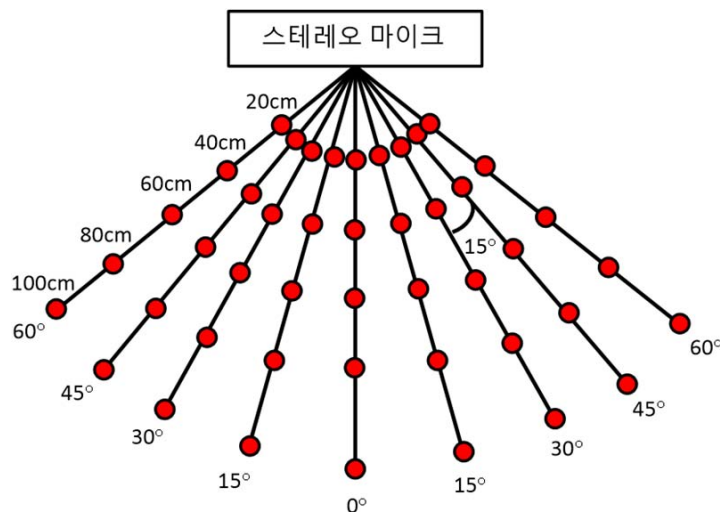
1:  FP의 그래프 출력
2:  mFPid ← FP행렬 최댓값의 배열 인덱스
3:  theta_est_bf_deg ← theta_vec의 mFPid번째 요소
    
```

4. 실험

4.1. 실험 환경

본 연구에서는 마이크의 전면부 및 좌·우측 15°, 30°, 45°, 60°에서 소리 신호를 발생시켜 신호의 발생 위치를 정확하게 추정할 수 있는지 확인하였다. <그림 12>는 시스템의 성능을 측정하기 위해 구성한 실험 환경이다. 실험을 위한 음향 발생 위치는 스테리오 마이크로부터 떨어진 거리를 20cm부터 100cm까지 20cm 간격으로 설정하여 총 40회 측정을 시행하였다.

<그림 12> 성능 측정을 위한 실험 구성



4.2. 데이터

스테리오 마이크로 입력받은 데이터는 음향 데이터로서, 입력받은 음향 데이터의 스펙은 <표 1>과 같다.

<표 1> 실험에 사용된 음향 데이터 스펙

표본화율	24bit
샘플링 레이트	44.1KHz
데이터 길이	3초
스테리오 채널 수	2채널

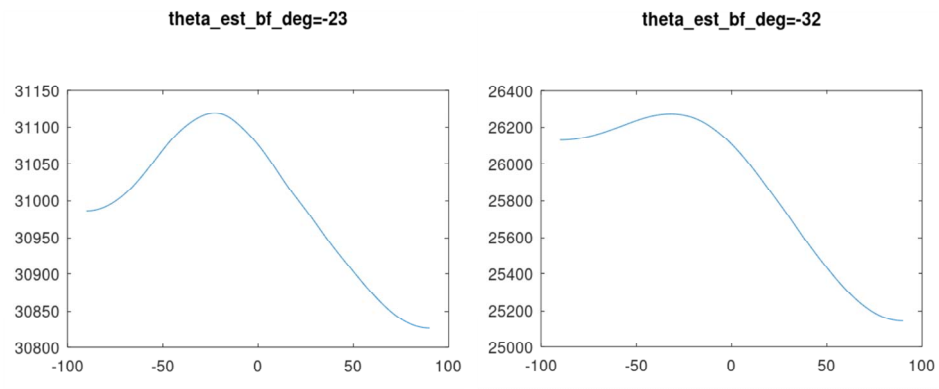
실험에 사용할 소리 신호의 경우에는, 일정한 크기의 신호를 발생시키기 위해서, 일반적인 말소리를 가정하여 대화소리를 녹음한 후 일반적인 대화 소리 크기로 측정되는 60dB 수준으로 재생하였다.

스테리오 마이크의 경우, ABKO사의 APC930 웹캠에 장착된 마이크를 사용하였다. 해당 웹캠에는 두 개의 마이크가 6cm 간격으로 설치되어 있으며, 두 개의 마이크 모두 무지향성 마이크이다.

4.3. 결과 및 분석

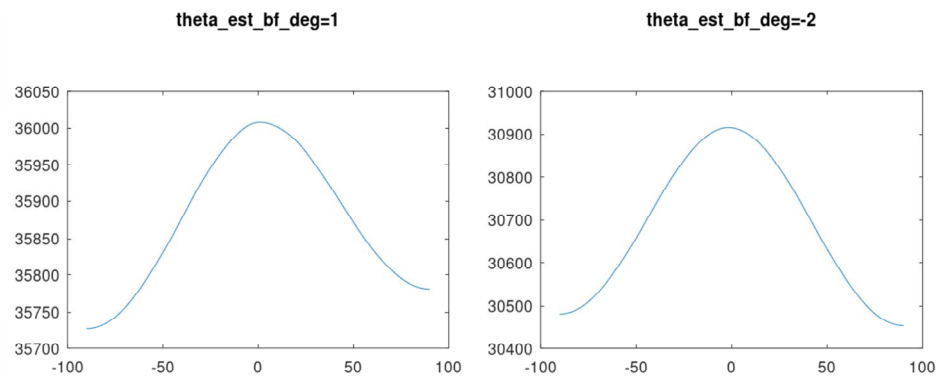
스테리오 마이크를 기준으로 각도를 구분하여 소리를 발생시키고, 빔포밍 알고리즘을 통해 각도를 확인한 결과는 <그림 13>의 예시와 같다. 해당 그림은 40cm, 60cm 거리에서 좌측 15°, 전면부, 우측 15°에 소리를 발생시키고 구현한 프로그램을 적용한 결과이다. 그래프에서 x축은 각도를, y축은 음향 신호 가산값을 의미한다. 그림에서 나온 결과와 같이 거리와 상관없이 동일한 각도에서는 유사한 그래프를 보여 측정값의 오차가 적다는 것을 알 수 있다.

<그림 13> 실험 결과 그래프 예시



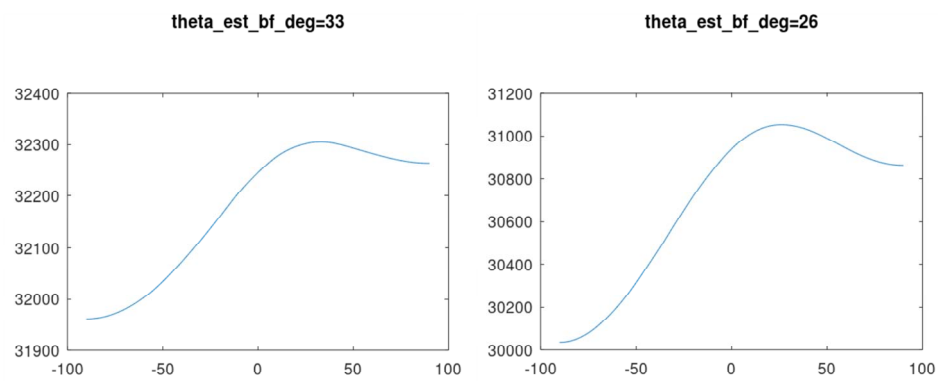
(1) 40cm, 좌향 30도

(2) 60cm, 좌향 30도



(3) 40cm, 정면

(4) 60cm, 정면



(5) 40cm, 우향 30도

(6) 60cm, 우향 30도

예시에서 확인한 데이터를 얻기 위해 5가지로 구분한 거리에서 각도별로 9번씩 실험을 진행하여 40개의 데이터를 얻을 수 있었다. <표 2>와 <표 3>은 실험 환경에 따른 측정값 및 오차를 보여준다. 표를 확인해보면 거리별 오차값이 큰 차이가 없음을 알 수 있고, 각도에 따른 오차도 다양하게 나오는 것을 알 수 있다. 전체 실험 결과 평균 3.07도, 최대 6도의 오차를 보여 설계한 빔포밍 알고리즘이 감시장비에 충분히 활용될 수 있음을 보여준다.

<표 2> 20cm, 40cm 측정 결과

거리(cm)	각도(°)	측정값(°)	오차(°)	오차평균
20	-60	-58	2	3.56
	-45	-49	4	
	-30	-30	0	
	-15	-11	4	
	0	5	5	
	15	21	6	
	30	28	2	
	45	40	5	
	60	56	4	
40	-60	-61	1	2.78
	-45	-43	2	
	-30	-27	3	
	-15	-12	3	
	0	4	4	
	15	14	1	
	30	35	5	
	45	46	1	
	60	65	5	

<표 3> 60cm, 80cm, 100cm 측정 결과

거리(cm)	각도(°)	측정값(°)	오차(°)	오차평균
60	-60	-61	1	2.56
	-45	-49	4	
	-30	-29	1	
	-15	-16	1	
	0	-5	5	
	15	15	0	
	30	31	1	
	45	39	6	
	60	64	4	
80	-60	-57	3	2.89
	-45	-39	6	
	-30	-30	0	
	-15	-11	4	
	0	-1	1	
	15	14	1	
	30	29	1	
	45	39	6	
	60	56	4	
100	-60	-62	2	3.56
	-45	-49	4	
	-30	-35	5	
	-15	-18	3	
	0	-4	4	
	15	19	4	
	30	27	3	
	45	43	2	
	60	55	5	

5. 결론

해당 연구를 통해서 스테레오 마이크를 통한 빔포밍으로 소리의 발생방향을 추적하여 감시장비를 유도할 수 있는 시스템을 설계하였다. 빔포밍 기술은 AESA 레이더 등에서 광범위하게 사용되어, 군 감시 장비에 있어서 필수적인 기술로 자리매김 하였다. 본 연구는 빔포밍 기술을 사용하여 감시 장비의 방향을 유도할 수 있는 시스템을 제안하여, 기존의 감시장비가 다수의 카메라를 사용하여 광범위한 지역을 지속적으로 감시해야하는 문제를 해결하고자 하였다. 실제로 실험을 설계하여 진행한 결과, 소리의 발생방향을 성공적으로 추정할 수 있었을 뿐만 아니라, 각각의 방향에서 발생한 신호의 크기 또한 배열 값 및 그래프로 가시화 하여 성공적으로 확인할 수 있었다.

해당 기술은 줄어드는 군 인력문제와 직결하여 감시 인력의 수 감축 및 감시 인력의 업무 피로도를 획기적으로 줄일 수 있는 방안으로 적절하다고 판단되며, 감시의 정확도 또한 증대시킬 수 있는 방법으로서의 효용성이 있다. 또한, 입력 신호를 소리 신호에 한정하지 않고, 안테나를 입력장비로서 사용하여, 전파의 발생 방향을 예측하는 시스템으로도 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

하지만 본 연구에서는 스테레오 마이크, 즉 2개의 입력점만을 이용하여 소리 신호를 입력받고, 해당 소리 신호를 기반으로 소리의 발생 방향을 계산할 수 있는 시스템을 설계하였다. 따라서, 본 연구에서 측정할 수 있는 소리 신호의 입력 범위는 최대 180도로 한정되었다. 또한, 입력점이 2개로 제한되었기에, 더 많은 수의 마이크를 사용한다면 보다 정확한 방향 예측을 수행할 수 있을 것이다. 따라서 해당 부분에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

추가로 본 연구에서는 장비의 한계로 인해서 무지향성 마이크를 사용했지만, 지향성 마이크를 사용하여 마이크의 지향성을 계산에 반영한다면 더욱 정확한 방향 계산과 유도가 가능할 것이다. 이를 보완하기 위해 향후에는 지향성 마이크를 사용한 추가 연구의 필요성이 제기된다.

- 참 고 문 헌 -

- 오동준. '전자광학위성감시체계' 전력화, 한반도 상공 우주 '자력' 감시. 국방일보, 2022, 1월 5일.
- Luis M. Fuentes, Sergio A. Velastin. Tracking-based event detection for CCTV systems. Pattern Analysis and Applications, 7(4), 2004, 356-364.
- Grega M, Matoriński A, Guzik P, Leszczuk M. Automated detection of firearms and knives in a CCTV image. Sensors, 16(1), 2016, 47.
- A. J. Fenn, D. H. Temme, W. P. Delaney, and W. E. Courtney. The development of phased-array radar technology, Lincoln Laboratory Journal, 12(2), 2000, 321-340.
- Li. Y, Jiang. X, Liang. B, Cheng. J. C, and Zhang. L. Metascreen-based acoustic passive phased array, Physical Review Applied, 4(2), 2015, 024003.
- K. H. Kim et al, Development of planar active phased array antenna for detecting and tracking radar, 2018 IEEE Radar Conference, 2018, 100-103.
- Shannon, C. E. Communication in the presence of noise. Proceedings of the IRE, 37(1), 1949, 10-21.
- 조규남, 윤원상, 채상훈. 4축 구조를 사용한 4G 겸용 5G 이동통신용 빔 방향탐지 및 빔포밍 시스템. 한국정보기술학회논문지, 20(8), 2022, 61-68.
- 김준호, 차민혁, 왕비, 임태호, 고학립. 대한민국 남해 해역에서 원형 배열 하이드로폰을 이용한 수중 OFDM 시스템의 MMSE 적응 빔포밍 연구. 한국통신학회논문지, 47(7), 2022, 986-995.
- 백승우, 방지훈, 최재훈, 김선우. 컴퓨터 비전 기반 밀리미터파 대역 빔포밍 시스템 구현. 2022 한국통신학회 동계종합학술발표회 논문집, 2022, 1436-1437.
- 오현수, 박철순, 장래규. 디지털 빔포밍을 이용한 모노펄스 방향 탐지 기법 연구. 한국통신학회논문지, 45(5), 2020, 875-881.
- 곽병창, 김길태, 지원길, 김태민. 빔포밍 방식 음향 카메라를 활용한 공동주택 기밀성능 측정 연구. 한국건축환경설비학회 논문집, 14(6), 2020, 674-686.

Design of Surveillance Device Control System Using Audio Beamforming

Cadet Sim Jaesung
Assistant Professor Jung Yoonkyo

– Abstract –

With the recent decrease in the number of military personnel, the need for unmanned surveillance equipment capable of monitoring enemies near the border has emerged. Therefore, most monitoring systems are currently installed with multiple cameras, and a small number of people take turns monitoring and tracking. However, this method has led to an increase in the fatigue of monitoring personnel who have to focus on a large number of image information for a long time, resulting in a decrease in the accuracy of unmanned monitoring equipment. This study proposes a system that induces and controls monitoring equipment in the direction of sound generation based on sound information by designing a beamforming algorithm that amplifies sound signals. To implement the system, signal processing sampling, Hilbert conversion, and beamforming were implemented using MATLAB, and the direction of sound generation could be tracked based on the corresponding technology. In the experimental environment, the sound direction was measured by generating the sound at intervals of 20cm from the left and right sides of the microphone at 15, 30, 45, 60 degrees and the front. As a result, it was found that the system was useful for inducing monitoring equipment.

Keywords: Beamforming, Surveillance System, Audio Signal Processing, Camera Guidance

투고 일자	심사 기간	게재 확정일
'22. 11. 28.	'22. 12. 08. ~ 12. 15.	'22. 12. 20.