

소리 특성과 TDoA를 이용한 디바이스 위치 이탈 감지 기법

(Device Displacement Detection Technique Using Sound Properties and TDoA)

이 준 성 [†]
(Jun-seong Lee)

이 진 규 ^{**}
(Jinkyu Lee)

요 약 IMU(Inertial Measurement Unit) 센서가 장착되지 않은 노트북과 같은 디바이스들은 S/W 레벨에서 기기의 물리적인 상태를 알 수 있는 방법이 없으므로 도난 방지 등의 응용 기법을 구현할 수 없다. 본 논문에서는 모든 노트북에 스피커와 마이크가 장착된 점에 착안하여 소리의 특성과 분석 기법을 활용, 디바이스의 위치 이탈을 감지하는 기법을 제시한다. 예를 들어 도서관에서 노트북을 두고 잠시 자리를 비울 경우 본 기법을 통해 책상 위에 놓여진 노트북을 누군가 들어올리는 것을 감지하여 도난 방지에 사용할 수 있다. 이 기법은 스피커와 마이크를 이용하는 그 어떤 디바이스에도 활용이 가능하므로 전자 기기는 물론 박물관의 전시품이나 액자 등 위치 이탈을 감지해야 하는 다른 사물에도 적용이 가능하다.

키워드: sound property, multipath propagation, amplitude attenuation, TDoA, linear chirp

Abstract Devices without IMU (Inertial Measurement Unit) sensors such as notebooks cannot implement anti-theft applications. This is because there is no way to know the physical state of the devices at the S/W level. In this paper, we focus on the fact that speakers and a microphones are installed in every notebook. We then, use a sound characteristic and an analysis technique to suggest a method of detecting the displacement of a device. For example, if you leave your laptop in the library for a while, the technique suggested in this paper will detect if someone raises the laptop placed on your desk and use it to prevent theft. This technique can be applied to any device that is equipped with speakers and microphones. Therefore, it can be implemented in another object that needs to detect displacement, such as electronic devices as well as museum exhibits and frames.

Keywords: sound property, multipath propagation, amplitude attenuation, TDoA, linear chirp

- 본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2017R1A2B2002458, 2017H1D8A2031628, 2017K2A9A1A01092689).
- 본 연구는 또한 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(2015-0-00914, IITP-2017-2015-0-00742)
- 이 논문은 2017 한국컴퓨터종합학술대회에서 'TDoA 기반의 랩탑 도난 방지 기법'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

[†] 학생회원 : 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과
acu.pe.kr@gmail.com

^{**} 종신회원 : 성균관대학교 컴퓨터공학과 교수
(Sungkyunkwan Univ.)
jinkyu.lee@skku.edu
(Corresponding author임)

논문접수 : 2017년 9월 25일
(Received 25 September 2017)
논문수정 : 2018년 1월 22일
(Revised 22 January 2018)
심사완료 : 2018년 2월 13일
(Accepted 13 February 2018)

Copyright©2018 한국정보과학회 : 개인 목적이거나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.
정보과학회논문지 제45권 제5호(2018. 5)

1. Introduction

스마트폰이나 스마트 워치 등의 최신 디바이스들에는 다양한 Inertial Measurement Unit(IMU) 센서가 장착되어 있다. 이 센서들의 특징은 디바이스의 물리적인 상태를 S/W 단에서 확인할 수 있다는 점이다. 예를 들어 GPS 센서를 통해 스마트폰의 현재 위치를 확인하거나, 스마트 워치의 가속도 센서로 팔의 움직임을 추정할 수도 있다[1]. 이외에도 센서 데이터를 분석하고 가공하여 새로운 가치를 창출하는 다양한 연구들이 발표되었으며 지금도 진행 중에 있다.

하지만 노트북과 같은 일부 디바이스들은 고가의 장비임에도 사용 목적이 달라 위와 같은 센서들이 장착되어 있지 않다. 이로 인해 앞서 언급한 센서 기반의 기법들을 적용할 수 없으며, S/W 단에서 디바이스의 물리적인 상태를 확인할 수 없다.

이러한 디바이스들에서 발생할 수 있는 문제점으로 도난에 취약하다는 점이 있다. 최근 들어 도서관이나 커피숍에서 잠시 자리를 비울 때 노트북을 그대로 자리에 두고 가는 모습을 자주 발견할 수 있다. 만약 누군가 디바이스를 탈취하려 시도할 경우 GPS나 IMU 센서가 없기 때문에 기기 스스로는 이를 전혀 감지할 수 없다.

비록 이러한 센서들은 없지만 모든 노트북에 장착된 부품이 있는데, 스피커와 마이크이다. 본 논문은 이러한 점에 착안해 소리를 이용하여 센서가 없는 디바이스에서도 장치의 물리적인 상황을 추정하는 기법을 제안한다. 구체적으로는, 디바이스가 놓여 있던 표면에서 떨어지게 되는 상황을 감지할 수 있으며, 대표적으로 책상 위에 올려져 있는 노트북을 들어 올리는 것을 감지하는 것이 예시이다.

본 논문에서 제안하는 기법은 소리가 가진 고유 특징과 분석 기법을 활용한다. 들어 올려진 노트북의 스피커에서 재생된 소리는 *Multipath propagation* 성질로 인해 마이크로 직진해서 가는 소리와 책상에 반사되어 전달되는 소리로 나뉘어 각각 마이크로 도달하게 된다. 이때 두 소리의 전파 거리가 다르므로 마이크로 도착한 시간에 차이가 발생하는데, 이것을 *TDoA* 기법을 사용하여 거리로 역산하면 책상과 노트북의 거리를 추정할 수 있다. 보조적인 지표로는 거리 증가에 따른 볼륨의 감쇄(*Attenuation*) 현상을 응용하기도 한다.

다만 언급할 점으로는 본 논문의 목표가 디바이스가 놓인 표면과의 거리를 정확하게 구하는 것이 아니라 소리를 통한 디바이스의 위치 이탈 감지, 즉 물리적인 상태 추정이 가능함을 보이는 것에 있다는 점이다. 여러 다양한 요인으로 인해 본 논문의 기법을 구현하는 과정에서 정밀성을 보이지는 못하였지만, 기반을 두고 있는

아이디어와 이론의 실현 가능성은 충분히 보여주고 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 제안하는 기법에 사용된 소리의 특징들에 관해 설명하고 3장에서 이 특징들이 사용된 기존 연구들을 알아본다. 4장에서는 본 논문이 기반하고 있는 아이디어와 예상되는 결과를 서술한다. 5장에서는 이를 구체적으로 어떻게 구현할지에 대한 방법론을 제시하고, 실제 구현 환경을 6장에서 설명한다. 마지막으로 7장에서는 제안하는 기법에 대해 간단한 성능 평가를 진행한다.

2. Background: Sound Properties

2.1 Multipath Propagation

스피커에서 재생된 소리는 한 방향으로만 재생되지 않으며 다양한 방향으로 방사되는 형태로 재생되게 된다. 각 소리는 여러 물체에 반사되어 마이크로 도착하게 되며 이때 물체의 개수와 위치만큼 소리가 복제되어 마이크로 여러 번 녹음된다[2]. 본 논문에서는 Multipath Propagation으로 인해 디바이스가 놓인 표면에 반사된 소리를 이용한다.

2.2 Time Difference of Arrival

소리는 공기를 매질로 하여 전달되며 약 340m/s라는 전달 속도를 가지고 있다. 소리가 속도를 가지고 있다는 점을 이용하여 소리의 도착 시간을 거리로 역산하는 도래 시간(Time of Arrival, ToA)이라는 방법이 제시되었고, 이를 발전시켜 2개 이상의 신호원으로 확장한 개념이 Time Difference of Arrival(TDoA) 기법이다[3]. 본 논문에서는 소리의 도착 시간 차이를 이용해서 거리를 역산하기 위해 TDoA를 사용한다.

2.3 Decrease of Sound with Distance

소리는 거리가 멀어질수록 음압 레벨(Sound Pressure Level)이 낮아지는 성질을 가지고 있다. 역 제곱 법칙(Inverse square law)에 의하면, 두 배의 거리에 따라 음압 레벨은 절반(6dB)으로 떨어지게 된다. 본 논문에서는 반사된 소리에 위 법칙을 적용하여 음압 레벨 감소에 따라 거리를 추정하게 된다.

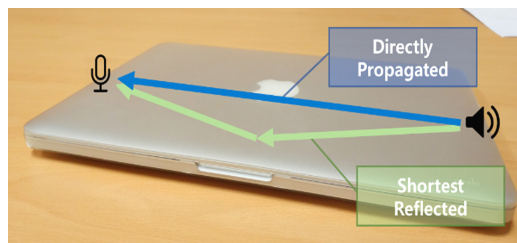


그림 1 마이크와 스피커, 그리고 소리의 전파 경로
Fig. 1 Microphone, Speaker and Propagation Path

3. Related Work

스마트폰 분야에서는 일찍이 소리의 특성을 이용한 논문들이 다양하게 제시되고 있다. 그중에서 본 논문이 사용한 소리의 특성과 동일한 원리를 이용한 논문을 몇 가지 언급하고자 한다.

3.1 Sound Properties

Structure-borne Propagation과 Airborne Propagation을 시간 축 기준으로 분리하여 Structure-borne Propagation만을 가지고 스마트폰 화면의 터치 압력 감지를 구현하는 기법[4]이 존재하며, 방출된 소리가 주변 사물에 부딪혀 돌아올 때 각 장소마다 서로 다른 Acoustic Feature를 갖는 점을 이용하여 Indoor Location Tagging을 구현한 논문[5]이 발표된 바 있다.

3.2 Time Difference of Arrival

스마트폰이 짧은 거리를 이동했을 때 주변 스마트폰들 간의 ToA가 달라지는 점을 이용해 서로 간의 위치를 특정할 수 있는 기법[6]이나, 스마트폰의 상단과 하단 마이크를 동시에 이용하여 공격자가 타인의 키보드 입력을 탈취하는 기법[7]이 발표된 바 있다.

4. Surface Deviation Detection

4.1 Inspiration

마이크가 노트북의 좌측에 있고 스피커가 우측에 있다고 가정하면, 스피커에서 재생된 소리 중 가장 짧은 전파 거리를 가지는 경로는 스피커와 마이크를 직선으로 연결한 Directly Propagated 경로이다. 소리의 Multi-path Propagation 특성에 의해, 스피커에서 재생된 소리는 방향성을 가지지 않고 사방으로 재생되며 주변 사물에 반사된 소리들은 전파된 거리에 따라 마이크에 시간 간격을 가지고 여러 번 녹음되게 된다. 이 중에서 2번째로 도착한 소리는 반사된 소리들 중에서 가장 짧은 전파 거리를 가진 소리(Shortest Reflected)로 간주할

수 있으며, 본 논문에서는 이를 책상 바닥에 반사된 소리로 가정한다. 즉, 1st Peak(Directly Propagated)와 2nd Peak(Shortest Reflected)의 도착 시간 차이를 거리로 변환하면 노트북이 바닥과 떨어진 거리를 추정할 수 있을 것이다.

노트북 주변에 책상보다 더 가까운 사물이 존재할 경우, 측정된 Shortest Reflected는 책상이 아니라 해당 사물과 노트북 간의 거리가 될 것이다. 하지만 해당 물체가 책상 위에 있는 물체라면 그 물체와의 거리를 측정한다 해도 본 논문의 목표를 동일하게 달성할 수 있다. 책상 위의 물체와 떨어진다는 것은 곧 책상과 떨어진다는 것을 의미하기 때문이다. 본 논문의 목표는 책상과의 거리를 정확하게 측정하는 것이 아니라 디바이스가 타인에 의해 원래 자리를 이탈하는 것을 감지하는 것이 주목표이다.

노트북마다 크기가 다양하고 스피커와 마이크의 위치가 서로 다를 수 있다. 본 논문에서 구현과 실험에 사용된 노트북은 Apple MacBook Pro 13인치이며, 본 논문에서는 위 노트북의 크기를 기준으로 계산을 진행하였다. 만약 다른 크기를 가지는 노트북을 사용하고자 한다면 수치 값을 시스템에 입력함으로써 해당 노트북에 맞는 계산을 올바르게 진행할 수 있다.

4.2 Expected Result

스피커와 마이크 사이의 거리를 X cm로, 책상으로부터 들어올린 높이를 Y cm로 둔다면 1st Peak와 2nd Peak의 sample 차이는 식 (1)로 구할 수 있다.

$$sample\ diff = \frac{44100}{34000} \left(\sqrt{\left(\frac{1}{2}X\right)^2 + Y^2 * 2} - 30 \right) \quad (1)$$

위 식에서는 소리의 전파 속도를 340m/s로 간주하였고 노트북의 Sampling Rate가 44,100hz 일 때를 가정하였다. 실험에 사용된 MacBook Pro 13인치에 적용해 보면, 스피커/마이크 사이 길이가 30cm 이므로 20cm를 들어 올릴 경우 위 식에 의해 26-sample의 차이가 발

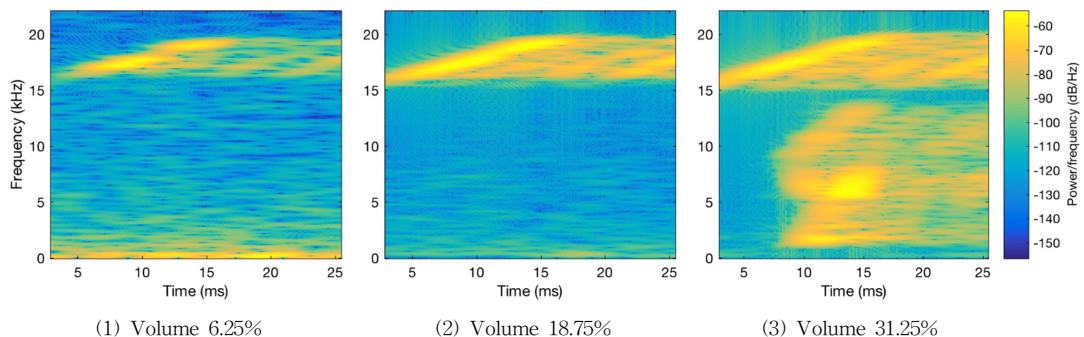


그림 2 볼륨 변화에 따른 Peak Spectrogram 비교

Fig. 2 Comparison of Peak Spectrogram according to Volume Change

생할 것으로 예상된다.

노트북이 책상 위에 놓여 있다면 1st Peak와 2nd Peak의 거리 차이가 없어 두 Peak가 겹쳐지게 되므로, Amplitude는 Peak 2개가 합쳐진 만큼 크게 나타날 것이다. 반대로 노트북이 책상에서 떨어질 경우 Peak의 Amplitude는 책상 위에 놓여 있을 때보다 절반 이하로 감소하게 될 것이다.

5. System Design

본 논문에서 제안하는 기법은 그림 3과 같이 단계별로 구성되어 있다. 시스템이 동작하기 전 준비 단계로써 좌우 스피커 중 어떤 스피커를 사용할지 선택하는 Speaker Selection, 어떤 소리를 재생할지 결정하는 Sound Selection, 그리고 녹음된 소리에서 Peak를 찾아 시간 차이를 추출하고 이를 기반으로 노트북의 상태를 추정하는 3단계의 프로세스로 구성되어 있다.

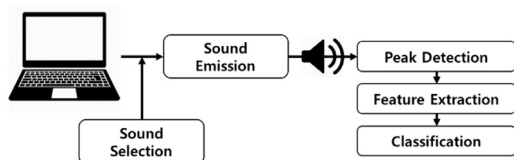


그림 3 시스템 Overview
Fig. 3 System Overview

5.1 Preliminaries

본 논문에서는 반사된 소리의 최대 거리를 50cm로 제한한다. 이는 그 이상의 거리를 가진 물체를 감지하는 것이 실효성이 없다고 판단되기 때문이다. 따라서 첫 번째 Peak를 기준으로 100-sample을 Crop 하여 분석에 사용한다.

5.2 Sound Selection

소리의 설계를 어떻게 하는지에 따라 시스템의 성능이 크게 좌우된다. 본 논문에서는 여러 번의 실험을 통해 그림 4와 같이 1000-sample의 길이와 16kHz~22kHz의 주파수 대역을 갖는 Linear Chirp를 선택하였다. 또한 Chirp의 양 끝에 Hamming Window를 적용하여 Spectral Leakage의 발생을 억제하였다[8]. 이 Window의 적용으로 Chirp의 시작 부분과 끝나는 부분의 볼륨이 0에 가까워지므로 해당 영역의 주파수는 들리지 않게 되어 결과적으로 약 18kHz~20kHz의 유효 범위를 갖게 된다.

5.3 Sound Emission

소리를 재생하는 볼륨은 측정 결과에 많은 영향을 줄 수 있다. 너무 작은 볼륨을 선택하면 녹음 시 Chirp 파형을 분간하기 어렵게 되고, 반사된 소리들이 거리에 따른 볼륨 감쇄로 인해 전파 도중 에너지를 잃고 마이크

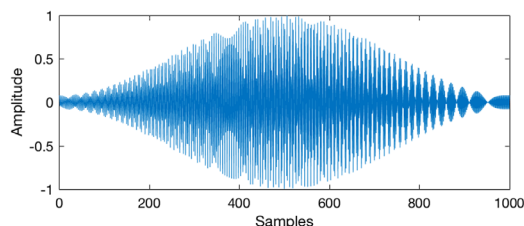


그림 4 비가청 범위의 Linear Chirp
Fig. 4 Linear Chirp in the non-audible range

에 도착하지 못하게 되므로 측정 가능한 거리가 짧게 제한된다. 반대로 너무 큰 볼륨은 가장 주파수 범위에 Frequency Leakage를 발생시켜 사용자가 소리를 인지할 수 있는 문제를 발생시킨다[9]. 그림 2는 볼륨을 변화시키며 측정된 소리들의 Spectrogram을 비교하여 보여준다. 6.25% 볼륨에서는 Chirp 파형이 완전하게 보이지 않으며, 31.25%의 큰 볼륨에서는 Frequency Leakage가 발생하고 있음을 알 수 있다. 본 논문에서는 18.75% 볼륨을 사용하였으며 이는 구동되는 디바이스마다 다를 수 있다.

5.4 Peak Detection

녹음된 소리에 Matched Filter를 적용하여 재생된 Chirp의 위치를 파악한다. 이후 Peak의 검출을 좀 더 쉽게 하기 위해 Moving Average Smoothing을 적용한다. 그림 5를 보면 Raw Signal에서 아무런 특징점이 보이지 않으나 Matched Filter를 적용 시 Peak가 뚜렷하게 보임

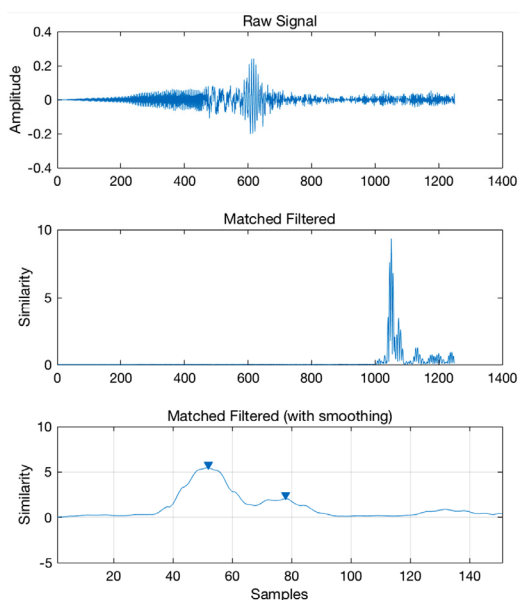


그림 5 측정된 신호와 처리 및 분석
Fig. 5 Measured signals, processing and analysis

을 알 수 있다. 첫 번째 Peak를 기준으로 100-sample 길이만큼 잘라내어 다른 Peak들을 찾게 된다.

Peak의 Threshold는 거리 감쇄를 고려하여 Max Peak의 Prominence의 25%로 설정하였다. 이는 책상 위에 놓여 있을 때 1st와 2nd Peak의 거리 차이가 1cm라고 가정했을 때, 4cm를 들어 올렸을 때부터 인식하겠다는 의미를 담고 있다. 역 제곱 법칙에 의해 거리가 4배가 되면 음압 레벨이 1/4로 줄어들기 때문이다. 또한, Peak 사이의 Minimum Distance는 Max Peak의 Width에 50%만큼으로 설정하였다. 이는 Peak의 절반은 Rising edge, 나머지는 Falling edge으로 나뉘질 수 있기 때문이다.

5.5 Displacement Decision

노트북이 책상 위에 놓여 있으면 1st Peak와 2nd Peak의 거리 차이가 없게 되므로 두 개의 Peak는 완벽히 겹쳐져 1개의 Peak로 보이게 되며, 이로 인해 Peak의 Amplitude는 2개의 Peak가 합쳐진 만큼 커지게 된다. 만약 노트북이 책상에서 떨어지게 될 경우 두 개의 Peak는 분리되며 단일 Peak의 Amplitude는 절반 혹은 그 이하로 감소하게 된다. 따라서 측정된 Amplitude가 책상 위에서 측정되었던 Amplitude보다 절반 이하로 떨어질 경우 일차적으로 책상 이탈로 간주하게 된다. 책상 위에서의 Amplitude는 사용자가 키보드/마우스를 사용할 때를 기준으로 하여 사전에 학습한다.

1st Peak와 2nd Peak의 Sample 차이를 거리로 변환하고 이것이 Threshold를 넘길 경우 표면 이탈로 간주한다. 여기서 Threshold는 사용자가 사전에 설정해야 하는 값이며, 시스템의 감지 민감도를 조절하는 의미를 가지고 있다.

책상과 노트북의 거리에 따라 크게 3가지 상태로 분류할 수 있는데, (1) 책상 위에 놓여 있는 경우 (2) 30cm 이내의 거리에 있는 경우 (3) 그 이상으로 멀어지는 경우이다. 이 중 (2)와 (3)을 구분하는 이유는 (2)의 환경에서는 2개의 Peak가 겹쳐지기 때문에 Width가 두꺼운 1개의 Peak로 나타나게 되며, 따라서 2개의 Peak를 구분할 수 없기 때문이다.

먼저 (1)의 상태는 사전에 사용자가 노트북을 사용 중일 때 Peak Amplitude와 Width를 측정하고 이를 이용하여 책상 위에 놓여 있는 상태인지 아닌지를 판단한다. 노트북이 들어올려져 (1)의 상태를 벗어나는 순간 역제곱 법칙에 의해 볼륨 음압이 크게 감소하게 된다. 이후 30cm 이내의 (2) 상태는 Peak의 Width가 (1)에서 측정된 Width보다 1.5~2배 두꺼울 경우에 판정된다. 노트북이 공중에 제공하는 시점에서는 스피커에서 재생된 소리가 주변 사물에 난반사 되므로 측정된 소리의 Peak는 그래프 상에서 두꺼우면서 뚜렷하지 않게 보여진다. 마지막으로 30cm를 초과하는 (3)의 상태는 2개의 Peak가 서로 분리되어 명확하게 보이게 된다. 이 때 각 Peak의 Width는 (1)에서 측정된 값과 유사하게 된다.

6. Implementation

본 논문에서 제안하는 시스템은 MacBook Pro 13인치 노트북과 Mac OS 상에서 MATLAB으로 구현되었으며 실시간으로 녹음 및 분석, 결과 출력이 이뤄지도록 구성되었다.

7. Evaluation

7.1 Distance Variation

그림 6은 책상과 노트북 사이의 거리에 따라 Peak 파형이 어떤 모습을 갖는지를 보여주고 있다. 그림 6(1)은 책상 위에 놓여 있을 경우 2개의 Peak가 합쳐져 1개로 나타남을 보여준다. 이후 30cm 이내의 거리로 노트북이 제공할 경우 (2)와 같이 Peak 2개가 겹쳐져 넓은 Width를 갖는 모양을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 노트북이 제공을 시작함과 동시에 Peak의 Amplitude가 책상 위에 있을 때보다 절반 이하로 감소하였음을 알 수 있다. 30cm부터는 (3)과 같이 Peak가 분리되기 시작하므로 2개의 Peak 사이의 거리를 구할 수 있게 되고, 책상과의 거리가 멀어질수록 Peak 사이의 거리 또한 멀어지고 있음을 (4)(5)를 통해 알 수 있다.

7.2 Noise Robustness

사용자가 다양한 장소와 환경에서 디바이스를 사용할

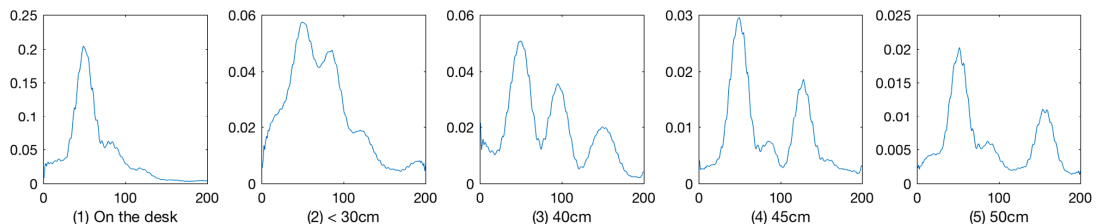


그림 6 거리에 따른 Peak 변화

Fig. 6 Peak changes with distance variation

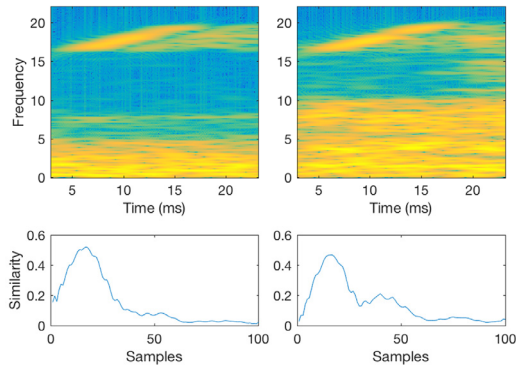


그림 7 주변 소음과 함께 측정된 데이터
Fig. 7 Measured data with ambient noise

수 있기 때문에 어떠한 주변 소음이 발생하더라도 정상 동작을 보장해야 한다. 본 논문에서는 (1) 음악이 나오는 카페와 (2) 선풍기를 강하게 틀어 놓은 상태에서 시스템의 동작을 실험하였다. 그림 7을 통해 주변 환경의 소음에 큰 영향을 받지 않고 Peak가 정상적으로 검출됨을 알 수 있다.

8. Discussion

8.1 Limitations

본 논문이 가지는 한계점이 몇 가지 존재한다. 첫 번째로, 각 Peak가 어떤 물체에 반사되어 도착했는지 알 수 없기 때문에 만약 사용자가 노트북에 신체를 가까이 가져갔을 경우 두 번째 Peak가 신체와의 거리를 측정하기 때문에 책상과의 거리를 알 수 없게 된다. 두 번째로, 공격자가 마이크를 손으로 가리는 등의 방해를 시도할 경우 본 기법을 무효화시킬 수 있다. 마지막으로 본 논문은 제안하는 기법의 실현 가능성을 보이는 것에 목표를 두었기에 노이즈 제거나 Classification 기법을 사용하지 않았다. 추후 연구에서 해당 사항이 보완될 수 있다.

8.2 Potential Applications

본 논문은 제안하는 기법을 노트북에 적용한 사례를 예시로 들어 내용을 서술하였다. 거리를 측정해야 하는 디바이스, 특히 물리적인 스위치나 적외선 센서 등으로 거리 감지가 구현되었던 기존의 시스템에 본 기법을 사용한다면 부품의 단가를 낮출 수 있을 것으로 기대된다. 또한 이미 IMU 센서가 존재하는 디바이스에 대해서도 IMU 센서의 고장 시 보조 지표로써 사용되어 안전한 동작을 보장하는 목적으로 사용될 수도 있다. 예를 들어 자동차나 항공기와 같이 Fail-Safe 환경이 보장되어야 하는 시스템의 경우 단일 장치에 의존하지 않고 다양한 보조 지표를 사용하므로 본 논문의 기법 또한 해당 분야에 적용될 수 있다.

9. Conclusion

본 논문에서는 소리를 이용하여 디바이스가 놓여진 표면과의 거리를 추정하고 이를 통해 디바이스가 표면을 이탈하는지 여부를 추정할 수 있는 기법을 제안하였다. 추가적인 하드웨어 설치나 IMU 센서의 도움 없이도 구현이 가능하다는 점이 제안하는 기법의 장점이다. 실험을 통해 거리가 변화됨에 따라 Peak의 경향성이 이론대로 보여지고 있음을 알 수 있었다. 구현이 간단하고 사용되는 부품의 비용이 저렴하므로 다양한 분야에서 응용이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] Shen, Sheng, He Wang, and Romit Roy Choudhury, "I am a Smartwatch and I can Track my User's Arm," *Proc. of the 14th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, ACM, 2016.
- [2] Stojanovic, Milica, and James Preisig, "Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization," *IEEE communications magazine*, Vol. 47, No. 1, pp. 84-89, 2009.
- [3] Gustafsson, Fredrik, and Fredrik Gunnarsson, "Positioning using time-difference of arrival measurements," *Proc. of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, IEEE, 2003.
- [4] Tung, Yu-Chih, and Kang G. Shin, "Expansion of human-phone interface by sensing structure-borne sound propagation," *Proc. of the 14th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, ACM, 2016.
- [5] Tung, Yu-Chih, and Kang G. Shin, "EchoTag: accurate infrastructure-free indoor location tagging with smartphones," *Proc. of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, ACM, 2015.
- [6] Han, Hao, et al., "Aml: Localizing neighboring mobile devices through a simple gesture," *Proc. of the 35th Annual IEEE Conference on Computer Communications Workshops*, IEEE, 2016.
- [7] Liu, Jian, et al., "Snooping keystrokes with mm-level audio ranging on a single phone," *Proc. of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, ACM, 2015.
- [8] F. Harris, On the use of windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform, *Proc. of the IEEE*, Vol. 66, No. 1, pp. 51-83, 1978.
- [9] P. Lazik and A. Rowe, Indoor pseudo-ranging of mobile devices using ultrasonic chirps, *Proc. of the 10th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems*, ACM, 2012.



이 준 성

2017년 성균관대학교 컴퓨터공학과 졸업 (학사). 2017년~현재 성균관대학교 컴퓨터공학과 석사과정. 관심분야는 모바일 컴퓨팅, 신호 처리, 소리 신호 분석



이 진 규

2004년 한국과학기술원(KAIST) 전산학과 학사. 2006년 한국과학기술원(KAIST) 전산학과 석사. 2011년 한국과학기술원(KAIST) 전산학과 박사. 2011년~2014년 미국 University of Michigan 방문 연구원/연구원. 2014년~현재 성균관대학교 컴퓨터공학과 조교수. 관심분야는 실시간 시스템, 배터리 관리 시스템 소프트웨어, 모바일 컴퓨팅