

음향 정보 분석과 스마트 기기 기술의 융합을 통한 사물의 속력 측정

남용욱, 김용혁*
광운대학교 컴퓨터과학과

Speed estimation of sound-emitted objects through convergence of sound information analysis and smart device technology

Yong-Wook Nam, Yong-Hyuk Kim*
Department of Computer Science, Kwangwoon University

요약 본 논문에서는 움직이는 사물이 내는 소리를 분석하여 속력을 측정하는 알고리즘을 소개한다. 일반적인 속력 측정기는 도플러 효과(Doppler effect)의 원리를 이용하여 움직이는 물체에 입사광을 투사하고, 산란광의 주파수 변화량으로 속력을 측정 하는 방법을 사용하지만, 본 논문에서는 물체가 다가올 때와 멀어질 때 내는 주파수를 측정하고 도플러 효과에 의해 발생한 주파수 차이를 이용하여 물체의 속력을 측정하는 방법을 제시한다. 실제 속력 측정 실험을 했을 때 평균적으로 6.08%의 오차가 발생하였으며, 이를 스마트 기기 어플리케이션 개발 기술과 융합 하면 별도의 장치가 없을 때 물체에 입사광을 투사하고 산란광의 주파수를 측정할 수 있는 기능이 없는 스마트 기기에서 물체의 속력을 측정할 수 있다.

• Key Words : 도플러 효과, 속력 측정, 음향 정보, 스마트 디바이스, 융합

Abstract In this paper, we present an algorithm that estimates the speed of a moving object only using its sound information. In general, the speed gun projects the incident light onto a moving object and measures the frequency variation of the scattered light. Then the speed is measured by this frequency difference. In our study, instead of light information, we measure the speed by sound frequency difference when the object is coming and moving away. In our experiments on the speed measurement, on average the error of 6.08% was obtained. Utilizing this algorithm for smart device, we can measure the speed of a moving object without sensor that measures the frequency of the light.

• Key Words : Doppler effect, speed estimation, acoustic information, smart device, convergence

1. 서론

일반적으로 속력 측정기는 움직이는 물체의 속력을 측정하는 기계로써 차량 속도위반 감시나 스포츠 경기에서 공의 속력을 측정하는 데에 사용되고 있다. 대부분의 속력 측정기는 도플러 효과를 이용하여 운동하는 물체에

전파를 쏘고 반사 된 전파의 주파수 변화로 속력을 측정하는 레이더 방식[1]을 활용한다. 따라서 속력을 측정하기 위해서는 전파를 발생시키고, 반사 되는 전파의 주파수를 측정할 수 있는 기능이 필요하다. 스마트 기기에 위의 기능을 제공하는 센서가 있으면 스마트 기기로도 물체의 속력측정이 가능하지만 현재 기본적으로 제공해주

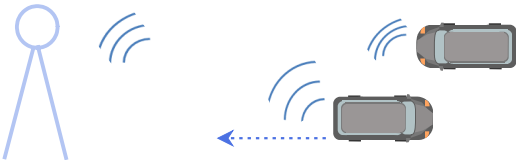
*교신저자 : 김용혁(yhdfly@kw.ac.kr)

지 않는다. 하지만 도플러 효과는 전파 뿐 만 아니라 청주파수의 음향에도 적용할 수 있기 때문에 사물이 내는 소리를 분석하여도 속력을 측정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 움직이는 사물의 음향 정보를 수집해서 분석한 뒤 자동적으로 속력을 측정하는 알고리즘을 제안하고, 이를 스마트 기기 기술과 융합하면 속력 측정을 할 수 있는 어플리케이션의 개발도 가능하다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2절에서는 도플러 효과를 활용한 기존의 속력 측정 방법을, 3절에서는 소리의 주파수를 분석하는 방법을, 4절에서는 소리를 이용하여 속력을 구하는 방법을, 5절에서는 4절에서 사용한 변수 h 와 t 의 영향력을, 6절에서는 실험 결과를, 7절에서는 본 연구를 토대로 어플리케이션을 개발할 때의 문제점을, 마지막 8절에서는 결론을 내린다.

2. 기존의 속력 측정 방법

도플러 효과는 파동을 생성하는 물체와 관측자가 상대적으로 움직일 때 주파수가 정지되어 있을 때와는 다르게 관측되는 현상이다. 기존 도플러 속력 측정기는 전파를 물체에 입사시키고 반사되는 전파의 주파수를 원래의 주파수와 비교하여 속력을 측정한다.



[Fig. 1] Speed estimation by the doppler radar

[Fig. 1]은 기존 도플러 속력계를 이용하였을 때의 전파의 변화를 나타낸다. 위 방법을 사용하기 위해 입사광과 반사광의 주파수를 알아내면 식(1)에 대입하여 도플러 주파수를 측정할 수 있다[2].

$$f_r = f_t \left(\frac{1+v/c}{1-v/c} \right) \quad (1)$$

여기서 f_t 는 입사광, f_r 은 반사광, c 는 빛의 속도, v 는 자동차의 속력을 나타낸다. 원 주파수와 반사 주파수의 차이인 도플러 주파수 f_d 는 비트주파수라고도 불리며

식(2)로 나타낼 수 있다.

$$f_d = f_r - f_t = 2v \frac{f_t}{(c-v)} \quad (2)$$

빛은 차의 속력보다 훨씬 빠르기 때문에 $(c-v)$ 는 c 로 나타낼 수 있다. 따라서 f_d 는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_d \approx 2v \frac{f_t}{c} \quad (3)$$

이를 활용하면 입사광의 주파수와 주파수의 차이로 움직이는 물체의 속력을 측정할 수 있다.

3. 소리의 주파수 분석

이날로그 소리는 연속된 파형이기 때문에 연속신호를 이산 신호로 샘플링 작업을 해주어야 한다. 샘플링된 이산 신호는 DTFT(Discrete-Time Fourier Transform)를 통해 원하는 정보인 주파수로 바뀐다.[3] 많은 연산을 요구하는 DTFT를 빠르게 수행하기 위해 일반적으로 FFT(Fast Fourier Transforms)를 이용한다[4,5]. 하지만 FFT로는 시간에 따라 변하는 주파수를 보여주지 못하기 때문에 STFT(Short-Time Fourier Transform)를 사용하여 특정 시간을 기준으로 설정된 바운더리 안의 이산 신호를 FFT 해준다[6]. 바운더리 크기가 클수록 더 넓은 범위에서 주파수를 찾을 수 있기 때문에 낮은 주파수를 검출하기 위해서는 바운더리 크기를 충분히 크게 잡아야 한다. 이 바운더리 크기를 본 논문에서 시행한 실험의 검증 소프트웨어로 사용된 Adobe Audition CC에서는 'FFT 크기'라고 하고[7], [Fig. 7]에서 충분히 크게 설정한 것을 볼 수 있다.

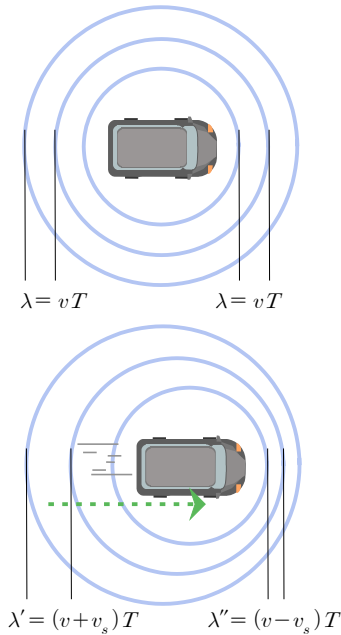
4. 소리를 이용한 속력 분석

도플러 효과를 이용하여 속도를 구하려면 일단 파동이 퍼지는 속도를 알아야 한다. 음파가 공기 중에 퍼지는 속도, 즉, 음속은 공기의 온도에 따라 달라진다[8]. 따라서 실시간 온도를 측정할 수 있는 기능이 스마트 기기에

있으면 측정기기 주변에서의 음속을 알 수 있지만 일반적인 스마트 기기에는 온도 측정을 할 수 있는 부속품이 없다.¹⁾ 따라서 위치 추적 기반으로 그 지역의 온도를 받는 라이브러리를 사용하여 대략적인 온도 t 를 알고 다음 식을 이용하여 측정 위치에서의 음속 v 를 계산한다.

$$v = 331.3 + 0.606t(m/s) \quad (4)$$

정지한 차량이 내는 소리는 [Fig. 2]의 상단과 같이 음속으로 퍼져 나간다.



[Fig. 2] Wave lengths of a stopped and running car[10]

거리 = 속도 × 시간 이므로 소리의 파장 $\lambda = vT$ (T = 파동의 주기) 이다. 오른쪽은 v_s 의 속도로 움직이는 차량이 내는 소리를 나타내며, 차량과 가까워지는 부분은 파장이 짧아지고 차량과 멀어지는 부분은 파장이 길어진다. 차량이 내는 소리의 주파수를 f 라고 할 때 f 는 음속에는 비례하고, 주기에는 반비례 한다. 따라서 파장 λ 에 도 반비례하므로 $f = \frac{v}{\lambda}$ 이다. 다가오는 차량에서는 f''

$= \frac{v}{\lambda''} = \frac{v}{(v-v_s)T}$ 인데 주기는 진동수에 반비례하기 때문에 $\frac{v}{(v-v_s)}f$ 로 바꿀 수 있다. 따라서 다가오는 차량의 주파수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$f'' = \frac{v}{(v-v_s)}f \quad (5)$$

멀어지는 차량에 대해서는 $\lambda' = (v+v_s)T$ 이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f' = \frac{v}{(v+v_s)}f \quad (6)$$

이를 적용하면 음속이 $340m/s$ 인 환경에서 $440Hz$ 의 주파수를 가진 음을 내보내는 차량이 다가올 때 주파수는 $\frac{340}{340-20} \times 440 = 467.5Hz$ 이고, 멀어질 때 주파수는 $\frac{340}{340+20} \times 440 \approx 415.5Hz$ 이다.

하지만 다가오는 차량이 $467.5Hz$ 의 주파수를 내보낼 때 측정자는 자동차의 속도를 알 수 없기 때문에 차량이 원래 내보내는 주파수도 알 수 없다. 따라서 가까워질 때의 주파수와 멀어질 때의 주파수를 모두 알고 차량이 등속도 운동을 하고 있어야 정확한 속도를 알 수 있다. 두 주파수의 차이를 이용하면 부록 A의 증명에 따라 다음 정리를 도출할 수 있다.

Theorem. 1

물체가 관측자를 통과할 때 식(7)과 같은 관계가 성립 된다

$$v_s = \frac{(f'' - f')}{(f'' + f')}v \quad (7)$$

v_s = 물체의 속도, v = 소리의 속도

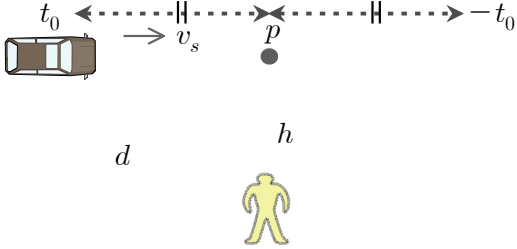
f'' = 물체가 다가올 때 관측된 주파수

f' = 물체가 지나가고 관측된 주파수

1) 단, 실시간 온도를 측정하는 하드웨어를 장착 하면 실시간으로 온도를 측정할 수 있고^[9], 최신 스마트기기(ex. 갤럭시 S4) 기종에는 온도를 측정할 수 있는 하드웨어가 탑재되었다.

위 결과는 차량이 관측자를 통과하였을 때 나오는 이상적인 환경에서의 값이다. 실제 스마트 기기로 관측할

때에는 사고가 나지 않게 차량과 스마트 기기 사이에 안전거리가 필요하다.



[Fig. 3] Actual environment for speed estimation

따라서 식(7)은 [Fig. 3]에서 관측지점이 p 일 때 적용할 수 있는 식이다. p 지점에서 관측하는 주파수 값은 차량이 등속도 운동을 한다면 계속 일정해야 하고, p 지점을 통과했을 때 갑자기 확 낮아져야 한다. 하지만 p 지점으로부터 h 만큼 떨어져 있을 때에는 차량이 v_s 의 속도로 등속도 운동을 한다고 해도 관측자의 관점에서의 상대속도는 일정하지 않다. 속도 = 거리/시간 이므로 차량이 관측자에게 가까워지는 정도가 상대속도가 되고, p 지점에서는 단위시간당 v_s 만큼 일정하게 가까워진다. t_0 은 p 지점까지 차량이 가기 위해 걸리는 시간이며, 이 시점에서의 f 와 p 를 지나고 t_0 초가 지난 $-t_0$ 시점에서의 f 를 비교해야 한다. 관측자가 p 지점으로부터 h 만큼의 안전거리를 확보하고 관측을 하면 차량과 관측자 사이의 거리는 $\sqrt{v_s^2 t^2 + h^2}$ 이다. 속도는 거리를 시간으로 미분해서 얻을 수 있으므로

$$\frac{d}{dt} \sqrt{v_s^2 t^2 + h^2} = \frac{v_s^2 t}{\sqrt{v_s^2 t^2 + h^2}} \quad (8)$$

이다. 여기서 $h = 0$ 일 경우 v_s 만 남게 되는데 이는 p 지점에서의 상대속도이다. 식(7)에서 얻은 결론은 $h = 0$ 인 지점에서의 속도와 주파수와의 관계식이기 때문에 h 를 고려할 경우 v_s 를 식(8)로 바꾸어야 하고, f 도 t_0 와 $-t_0$ 시점으로 맞춰야 한다. 즉,

$$\frac{v_s^2 t}{\sqrt{v_s^2 t^2 + h^2}} = \frac{f(t_0) - f(-t_0)}{f(t_0) + f(-t_0)} v \quad (9)$$

의 관계식이 만들어진다. $\frac{f(t_0) - f(-t_0)}{f(t_0) + f(-t_0)} v$ 를 W 로 치환하면 부록 B의 증명에 따라 다음 정리를 얻는다.

Theorem 2

물체가 안전거리 h 를 두고 관측차를 지나갈 때 식(10)과 같은 관계가 성립된다.

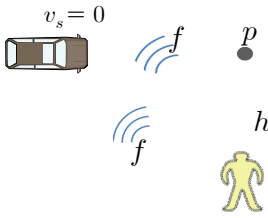
$$v_s = \sqrt{\frac{W^2 t^2 + \sqrt{W^4 t^4 + 4t^2 W^2 h^2}}{2t^2}} \quad (10)$$

- v_s = 물체의 속도 ,
- h = 물체와 관측자간의 안전거리
- t = 물체가 관측자를 통과할 때 까지 걸리는 시간
- $W = \frac{f(t_0) - f(-t_0)}{f(t_0) + f(-t_0)} v$, v = 소리의 속도
- $f(t_0)$ = 물체가 관측자를 지나가기 t 초 전에 관측된 주파수
- $f(-t_0)$ = 물체가 관측자를 지나가고 t 초 후에 관측된 주파수

즉, 관측자와 차량의 최단거리 h , t_0 시점에서의 f , $-t_0$ 시점에서의 f , 공기의 온도를 알면 차량이 움직이는 속력을 알 수 있다. 식(5)을 이용하면 차량이 원래 냈던 주파수도 알 수 있다. 식(5)을 f 에 관한 식으로 나타내면 $f = \frac{(v - v_s)}{v} f''$ 인데, h 가 0이 아닌 상황을 고려해야 하므로 다음 수식으로 바꿀 수 있다.

$$f = \frac{(v - \frac{v_s^2 t}{\sqrt{v_s^2 t^2 + h^2}})}{v} f(t_0) \quad (11)$$

이 때 f 또한 h 의 영향을 받지만 차량이 원래 내는 주파수는 차량의 상대속도가 0 일 때 관측되기 때문에 [Fig. 4]와 같이 관측자가 어느 지점에 있어도 똑같은 값을 가진다.

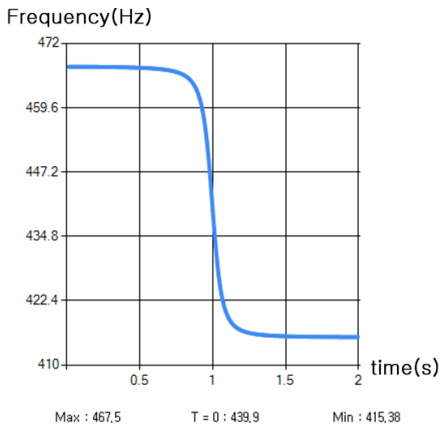


[Fig. 4] Sound frequency of a car when $v_s = 0$

원래의 주파수까지 구하면 임의의 시점 t_a 에서의 주파수도 구할 수 있다. 식(11)를 t_a 시점으로 바꾸면 식(12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(t) = \frac{v}{\left(v - \frac{v_s^2 t}{\sqrt{v_s^2 t^2 + h^2}}\right)} f \quad (12)$$

이를 활용하면 차량이 다가 올 때 467.5Hz를, 멀어질 때 415.5Hz의 주파수가 관측 되고, $t = 1, h = 2$ 일 때 관측되는 주파수의 변화는 [Fig. 5]와 같은 그래프로 나타낼 수 있다.

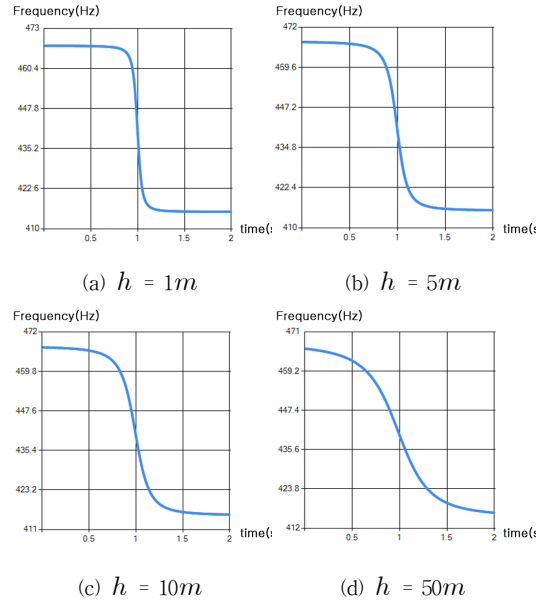


[Fig. 5] Observed changes in the frequency over time

5. 추가 변수(h, t)의 영향력

h 는 관측자와 움직이는 차량의 최단거리이다. h 가 0에 가까워질수록 시간에 따라 주파수가 급변하며, 커질수록 주파수가 완만한 곡선을 그린다. 즉 측정 대상과의 거리가 멀수록 음의 높이가 느리게 감소한다. 4절의 예시

에서 $t = 1$ 일 때 h 에 따른 주파수 그래프는 [Fig. 6]과 같다.



[Fig. 6] Frequency changes according to h

h 의 값에 관계없이 t 가 무한히 늘어나면 주파수는 특정한 값으로 수렴한다. 식(12)은 식(13)와 같이 정리 될 수 있다.

$$f(t) = \frac{vf\sqrt{v_s^2 t^2 + h^2}}{v\sqrt{v_s^2 t^2 + h^2} - v_s^2 t} \quad (13)$$

여기서 t 가 무한대로 갈 때 분모 분자를 vt 로 나누면

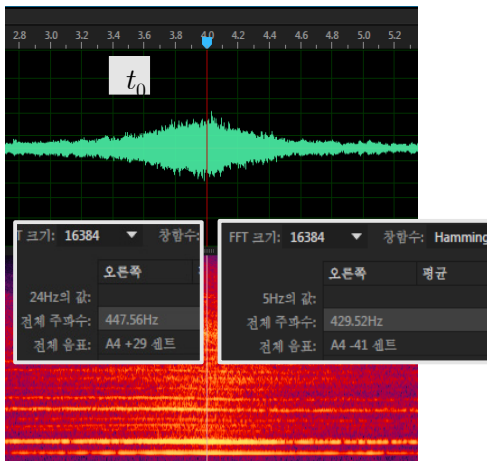
$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{vf\sqrt{v_s^2 t^2 + h^2}}{v\sqrt{v_s^2 t^2 + h^2} - v_s^2 t} &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{f\sqrt{v_s^2 + \frac{h^2}{t^2}}}{\sqrt{v_s^2 + \frac{h^2}{t^2}} - \frac{v_s^2}{v}} \\ &= \frac{fv_s}{v_s - \frac{v_s^2}{v}} = \frac{vf}{v - v_s} \quad (14) \end{aligned}$$

즉, 식(5)과 일치하는 것을 알 수 있다.

6. 실험

[Fig. 3]와 같은 환경에서 차량을 RC(Radio Controlled) 자동차로 대체하고, 블루투스 스피커를 장착하여 표준 조율 주파수[11]인 440Hz의 일정한 바이올린 소리가 나오게 했다. SE MAGANTO 콘텐서 마이크를 사용하고, 녹음 소프트웨어는 Cakewalk SONAR X3로, 결과 분석은 Adobe Audition CC로 하였다. [Fig. 3]의 p 지점으로부터 15m 떨어진 곳에서 차량이 출발하여 p 지점을 통과한 후 15m 를 더 가게 했다. 안전거리 h 는 2m 로 하여 25km/h 로 주행하는 RC자동차의 소리를 녹음하였고, 실험 당시 온도는 섭씨 2°C로 소리의 속도는 332.51m/s 였다.

차량의 속도 v_s 를 알기 위해 더 필요한 정보인 t_0 와 t_0 일 때 자동차가 내는 주파수, $-t_0$ 일 때 자동차가 내는 주파수는 Adobe Audition CC에서 [Fig. 7]과 같이 구한다. p 지점은 주파수가 급 하강하는 지점의 중앙으로 잡았다.



[Fig. 7]. Exporting an experimental result

추출한 데이터를 식(10)에 대입하여 속도를 계산한 값은 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Experimental results

Take	t_0 (Hz)	$-t_0$ (Hz)	v_s (km/h)
Take 1	448.17	429.78	26.02
Take 2	448.62	429.12	27.49
Take 3	450.38	430.34	28.12
Take 4	447.47	429.24	25.84
Take 5	447.56	429.52	25.62
Take 6	448.90	430.48	26.02
Average	448.52	429.75	26.52

실험에 사용한 속도 측정기의 오차범위는 $\pm 2km/h$ 이다. RC자동차의 속력을 정확하게 25km/h로 조정하기에 어려움이 있었지만 실험 결과 평균적으로 1.52 km/h 정도만 초과한 속도가 측정된 것을 볼 수 있었다.

7. 한계점

본 연구를 토대로 속도 측정 어플리케이션을 개발할 때 가장 큰 문제점은 주변에서 같이 들리는 소리이다. 도로에는 여러 대의 자동차가 비슷한 시간에 측정기기를 통과하는데 그 중 한 대의 자동차의 속력을 측정하기는 쉽지 않다. 다중 피치 검출 기술[12]을 이용하여 합성된 주파수를 나누는 방법도 있지만 이는 음정(pitch)이 서로 다른 소리에서 소리를 구분할 수 있는데 자동차가 주행하는 소리의 음정은 비슷하며, 주행음 자체도 공기, 바닷과의 마찰, 엔진음 등이 복합된 음이기 때문에 적용하기가 어렵다. 주변에서 들려오는 소음을 제거하는 기술도 필요하다. 비가 내릴 때 빗소리를 제거하는 기술[13]과 바람 소리를 제거하는 기술[14], 여러대의 마이크를 이용하여 수집된 데이터를 바탕으로 소음을 제거하는 연구 [15] 등이 있지만 자동차 소리의 주파수도 손상될 수 있기 때문에 보완점이 필요하다. 초음속으로 진행되는 물체의 속력은 측정할 수 없다. 음속보다 빠르게 진행하기 때문에 물체가 측정자를 지나간 후 소리가 들려서 관측자를 지나가기 전과 후의 소리를 비교할 수 없다.

8. 결론

본 논문에서는 움직이는 사물이 내는 소리를 이용하여 속력을 측정하는 알고리즘을 제안하였다. 이를 이용하면 전파를 발생시키고 감지할 수 있는 센서가 없는 스마트 기기에서도 사물의 속력을 측정할 수 있다. 7절에서 소개된 문제점들이 있기 때문에 이 방법으로 속도를 단속하는 시스템을 대대적으로 만들기에는 아직 무리가 있지만, 움직이는 물체의 소리를 측정할 수 있는 좋은 환경에서 물체의 속력을 측정하는 용도로 사용하기에는 적합할 수 있다. 지나가는 물체와의 최단거리인 h 와, p 지점을 자동적으로 계산하는 알고리즘도 있으면 사용자가 직접 입력하지 않아도 되기 때문에 편하다. 스마트 기기 자체에서 나는 소음도 줄이면 최대한 높은 품질의 소리

데이터를 얻을 수 있고, 많은 계산을 요구하는 FFT 부분을 어플리케이션과 동기화 할 때 최대한 부하가 적게 설계하면 성능이 좋지 않은 스마트기기에서도 어플리케이션을 충분히 구동할 수 있다. 향후에는 이러한 점들을 구현하여 움직이는 물체가 내는 소리를 녹음하고 속력을 측정하는 스마트 기기 어플리케이션을 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

부 록

A. 정리 1의 증명

차량이 다가올 때, 멀어질 때의 주파수를 모두 관측하면 두 주파수의 차를 알 수 있다. 이를 식으로 나타내면

$$\begin{aligned} f'' - f' &= \frac{v}{(v-v_s)}f - \frac{v}{(v+v_s)}f \\ &= \frac{2v_s}{(v-v_s)(v+v_s)}vf \end{aligned} \quad (15)$$

가 되고, 식(5)에 의해서 나온 다음 수식

$$f = \frac{(v-v_s)}{v}f'' \quad (16)$$

을 식(15)에 대입 하면

$$\begin{aligned} f'' - f' &= \frac{2v_s}{(v-v_s)(v+v_s)}v \frac{(v-v_s)}{v}f'' \\ &= \frac{2v_s}{(v+v_s)}f'' \end{aligned} \quad (17)$$

이 된다. 위 식을 v_s 에 대하여 정리 하면

$$\begin{aligned} \frac{f'' - f'}{f''} &= \frac{2v_s}{(v+v_s)} \\ \Rightarrow 2v_s f'' &= (f'' - f')v_s + (f'' - f')v \\ \Rightarrow (f'' + f')v_s &= (f'' - f')v \\ \therefore v_s &= \frac{(f'' - f')}{(f'' + f')}v \end{aligned} \quad (18)$$

의 식이 나온다. 음속이 $340m/s$ 이고, 차량이 다가올 때 내는 주파수가 $467.5Hz$, 멀어질 때 내는 주파수가 415.5

Hz 이면 식(18)에 대입하여

$$v_s = \frac{467.5 - 415.5}{467.5 + 415.5} \times 340 \approx 20.02 m/s$$

의 결과 값을 얻을 수 있다.

B. 정리 2의 증명

v_s^2 를 w 로 치환하면

$$\begin{aligned} wt &= W\sqrt{t^2w + h^2} \\ \Rightarrow w^2t^2 &= W^2(t^2w + h^2) \\ \Rightarrow t^2w^2 - W^2t^2w - W^2h^2 &= 0 \end{aligned}$$

근의 공식을 사용하여 w 를 구하면

$$\begin{aligned} w &= \frac{W^2t^2 + \sqrt{W^4t^4 + 4t^2W^2h^2}}{2t^2} \\ \therefore v_s &= \sqrt{\frac{W^2t^2 + \sqrt{W^4t^4 + 4t^2W^2h^2}}{2t^2}} \end{aligned}$$

REFERENCES

- [1] J. G. Dunne, "Laser-based speed measuring device", U.S. Patent No. 5,359,404. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 1994.
- [2] L. N. Ridenour, "Radar system engineering", MIT Radiation Lab series, Vol. 1, 1947.
- [3] J. Unpingco, "Discrete-Time Fourier Transform.", Python for Signal Processing. Springer International Publishing, pp. 45-55, 2014.
- [4] G. D. Bergland, "A guided tour of the fast Fourier transform", IEEE, Spectrum, Vol. 6, No. 7, pp. 41-52, 1969.
- [5] J. W. Cooley, J. W. Tukey, "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series." Mathematics of computation, Vol. 19, No. 90, pp. 297-301, 1965.
- [6] J. Allen, "Short-term spectral analysis, and

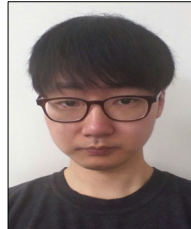
modification by discrete Fourier transform”, IEEE, Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, Vol. 25, No. 3, pp. 235-238, 1977.

- [7] <https://helpx.adobe.com/audition/using/noise-reduction-restoration-effects.html>
- [8] O. Cramer, “The variation of the specific heat ratio and the speed of sound in air with temperature, pressure, humidity, and CO₂ concentration.” The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 93, No. 5, pp. 2510-2516, 1993.
- [9] Thermodo, <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.robocatapps.thermodo>
- [10] Doppler Effect, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/dopp.html>
- [11] Standard tuning frequency (Standard musical pitch), http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=3601, 1975.
- [12] T. Tolonen, M. Karjalainen, “A computationally efficient multipitch analysis model”, Speech and Audio Processing, IEEE Transactions on, Vol. 8, No. 6, pp. 708-716, 2000.
- [13] P. A. Hetherington, A. R. Groves, “System for suppressing rain noise”, U.S. Patent, No. 7,949,522, 2011.
- [14] P. A. Hetherington, L. Xueman, P. Zakarauskas, “Method and apparatus for suppressing wind noise”, U.S. Patent Application 10/410, 736, 2003.
- [15] J. Bitzer, K. U. Simmer, K. D. Kammeyer, “Multi-microphone noise reduction by post-filter and superdirective beamformer”, Proc. Int. Workshop on Acoustic Echo and Noise Control (IWAENC), pp. 100-103, 1999.

저자소개

남 용 욱(Yong-Wook Nam)

[정회원]



- 2014년 2월 : 광운대학교 컴퓨터 소프트웨어학과 공학사
- 2014년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 컴퓨터과학과 석박통합과정

<관심분야> : 자동 작곡, 최적화 알고리즘

김 용 혁(Yong-Hyuk Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 서울대학교 전산과 학전공 이학사
- 2001년 2월 : 서울대학교 컴퓨터 공학부 공학석사
- 2005년 2월 : 서울대학교 컴퓨터 공학부 공학박사

- 2005년 3월 ~ 2007년 2월 : 서울대학교 반도체 공동연구소 연구원
- 2007년 3월 ~ 2012년 2월 : 광운대학교 컴퓨터소프트웨어학과 조교수
- 2012년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 컴퓨터소프트웨어학과 부교수

<관심분야> : 유전 알고리즘, 최적화 알고리즘