

잡음 환경에서 비선형 주파수 차감 및 교차 상관을 이용한 사람 발자국 탐지 방안

김 태 북*, 고 한 석°

Footstep Detection in Noisy Environment via Non-Linear Spectral Subtraction and Cross-Correlation

Tae-bok Kim*, Hanseok Ko°

요 약

감시경계 분야에서 진동센서를 이용한 발자국 탐지방안 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 진동센서는 탐지 성능은 우수하나 야외 환경에서 사용 시 잡음에 매우 민감하게 반응한다. 본 논문에서는 비선형 주파수 차감 후 기본 발자국 모델 신호와 입력 신호 간의 교차상관을 수행하여 잡음은 감쇄시키고 발자국 신호는 증대시켜 탐지 성능을 높일 수 있는 NSSC 방법을 제안한다. 이러한 잡음 제거과정 이후 탐지 이벤트 구간에 대한 식별 과정을 수행함으로써 실제 사람 발자국 여부를 최종 판단한다. 제시된 알고리즘의 성능 검증을 위하여 맑은 날, 비 오는 날에 수집된 발자국 신호에 대한 실험 결과를 제시하였다.

Key Words : Seismic, Footstep, Nonlinear Sepctral Subtraction, Correlation, Detection, Classification

ABSTRACT

Footstep detection using seismic sensors for security is a very meaningful task, but readings can easily fluctuate due to noise in outdoor environment. We propose NSSC method based on nonlinear spectral subtraction and cross-correlation using prime footstep model signal as a footstep signal refining process that enhances the signal-to-noise ratio (SNR) and attenuates noise. After de-noising, a detection event classification method is presented as further refining process to ensure that the detection result is a footstep. To validate the proposed algorithm, representative experiments including sunny and rainy-day cases are demonstrated.

1. 서 론

진동센서(Geophone)를 이용한 침입자 탐지에 관한 연구는 무인지상감시센서 (Unattended Ground Sensors, UGS) 분야에서 지속적으로 진행되고 있으나, 야외 환경에서 주변 소음, 바람, 비와 같은 다양한 잡음원에 의한 오경보 발생은 여전히 문제를 야기한다. 그럼에도 불구하고 진동센서는 저전력 동작이 가능하고 인

원표적에 대하여 360° 전방위 탐지 및 수 십미터에 이르는 감지능력으로 인하여 타 센서대비 설치비용 절감과 저 전력운용이 가능하다는 측면에서 강점을 갖고 있다.

발자국으로 인한 진동신호는 임펄스 특성을 갖고 있으며 지진파 형태로 전파된다¹⁻³⁾. 진동센서가 감지하는 입력신호는 표적으로부터 발생한 고유의 발자국 신호와 주변의 다양한 환경잡음 신호와의 합으로 이

* First Author : LIG넥스원 PGM 연구센터/고려대학교 영상정보처리학과 지능신호처리 연구실, kimtaebok@lignex1.co.kr, 정회원

° Corresponding Author : 고려대학교 영상정보처리학과 지능신호처리 연구실, hsko@korea.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2013-10-470, 접수일자 : 2013년 10월 30일, 심사일자 : 2013년 12월 27일, 최종논문접수일자 : 2014년 1월 7일

루어 졌다.

감시 시스템을 구축 할 경우 일반적으로 비용을 절감하기 위해 최소한의 진동센서를 사용하여 최대한의 경계영역을 설정하게 된다. 이러한 경우 원거리에서 발생한 사람 발자국 진동신호를 감지하기 위해 탐지 임계값을 낮출 수 밖에 없으며 이로 인한 오경보 발생 비율이 높아지게 된다.

입력된 신호에 대한 첨도(Kurtosis)를 분석하고 그 통계적 특성을 이용하여 사람 발자국을 탐지하는 방안^[4]이 제안되었으나 주변 환경에 따라 통계값이 가변적이므로 임계치 설정하는데 있어 여러 가지 어려움이 발생하게^[5,6]된다.

발자국 운율을 이용한 사람 탐지 방안도 연구되었다. 신호의 포락선(Envelope)을 이용하여 발자국의 운율을 계산하고 그 통계적 특성을 이용하여 사람을 탐지하는 것이다^[7-14]. 이 방법은 한 사람이 등속으로 이동할 경우에는 좋은 성능을 낼 수 있으나 두 사람 이상의 이동이나 불규칙적인 보폭으로 이동할 경우에는 성능이 급격히 낮아지게 된다. 이를 보완하기 위해 초음파 또는 도플러 레이더와 같은 보조 장비와 혼합하여 사람을 탐지하기도 한다^[15-17]. 운율 특성값을 얻기 위한 가장 널리 사용되는 방법은 포락선에 대한 푸리에변환(FFT) 방식을 취하는 것이며 일반적인 보폭기준으로 2Hz이하의 값을 갖는다^[18,19].

잡음을 제거하여 신호잡음비를 높이는 방안은 여러 가지가 있다. 최근 웨이블렛(Wavelet)^[20,21]을 이용한 잡음제거 방안이 연구되고 있다. 잡음을 제거하는 과정에서 신호성분 손실 최소화를 위한 여러 가지 형태의 웨이블렛 방안^[30,31]이 제시되고 있다. SVD(Singular Value Decomposition) 기반의 적응 임계치(Adaptive threshold)을 적용한 웨이블렛 잡음제거 방식^[21]은 적은 연산량 및 실시간 처리를 필요로 하는 임베디드 시스템에 적용하기에는 많은 고민을 해야 할 것이다. 실험 과정에서 잡음 제거 및 신호 증대를 위한 SVD기반의 웨이블렛 방식과 논문에서 제안하는 NSSC방식은 실험 플랫폼 연산능력 기준으로 약 40배 이상의 처리속도 차이를 나타내었다.

환경 잡음신호는 장소에 따라 비록 다르지만 동일 장소 내에서는 시간의 변화에 상관없이 일정한 통계적 분포를 나타내는 정상특성(Stationary)의 잡음(시스템잡음, 백색잡음, 일정한 주변소음 등)과 빗방울 충격파, 주변 인공 충격파와 같은 비정상(Non-stationary) 특성 잡음이 있다.

본 논문에서 제안하는 NSSC 방식은 비선형 주파수 차감 방법을 이용하여 정상 특성의 일정한 잡음은

제거하고, 기본 발자국 모델과 주파수 차감신호와와의 교차상관을 수행하여 발자국 신호는 증폭되되 주파수 특성이 다른 임펄스 노이즈는 상대적으로 감쇄시켜 탐지성능을 향상시키는 방안이다.

II. 발자국 탐지신호 처리 절차

발자국 탐지방안 연구를 위한 신호 수집을 위하여 1축 지오폰(GS-ONE, Geospace社)을 사용하였다. 지오폰은 가속도센서에 비하여 저 주파수 대역에서 우수한 감도를 갖는다^[22,23]. 입력신호의 아날로그 디지털 변환 및 기본적인 전처리를 위한 임베디드 처리장치를 만들고 노트북을 연결하여 실시간으로 신호를 저장하였다.

신호수집 장소는 흙으로 된 야외 공터이며 인원 표적에 대하여 15m부터 30m까지 1m 간격으로 거리별 발자국 발생신호를 수집하였다. 맑은 날(초속 5m/s 이하의 바람)과 비 오는 날(5mm/hour) 수집한 데이터를 본 논문 실험에 사용하였다.

발자국 신호는 특성상 주로 30~100Hz 내에서 주성분을 갖고 있기 때문에^[4] 전처리 과정에서 20~150Hz의 대역필터를 적용하였고, 샘플링 주파수는 1kHz로 하였다.

발자국 탐지를 위한 신호처리 절차는 그림 2에 도시되었으며 그 내용은 다음과 같다.

단계 ① : 시스템 초기화 과정에서 주파수 대역별 주변 평균잡음을 계산한 후 비선형 주파수 차감법을 이용하여 신호구간과 비 신호 구간에 대해 차등 차감 연산을 수행한다.

단계 ② : 기본 발자국 모델신호와 단계 ①의 신호

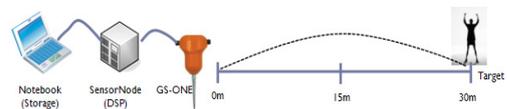


그림 1. 발자국 신호수집을 위한 시험세트 구성도
Fig. 1. Testset diagram for footstep signal acquisition

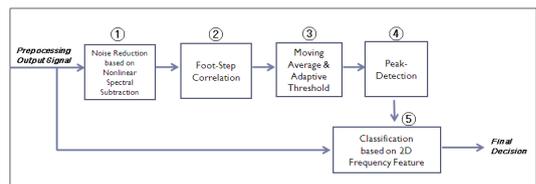


그림 2. 발자국 탐지과정 블록도
Fig. 2. Footstep detection procedure block diagram

처리 결과물을 교차상관(Cross-correlation)하여 발자국 및 발자국 유사 신호를 증대시킨다.

단계 ③ : 단계 ②의 신호를 에너지로 변환하고 이동 평균기법을 이용하여 적응 임계치를 설정한다.

단계 ④ : 단계 ③의 신호에서 임계치 이상의 신호 구간에 대하여 이벤트별 최고 에너지 지점(Peak)을 결정하고 이 지점을 탐지 유효지점으로 간주한다.

단계 ⑤: 단계 ④에서 구한 최고 에너지 지점과 동일한 시점의 원 입력자료 (Raw data)를 추출한 후 푸리에변환(FFT) 과정을 통해 원 신호로부터 2차원 특징점을 추출하고 식별 알고리즘을 이용하여 잡음과 사람 발자국을 구별한다.

III 장에서는 앞서 설명한 5단계 과정에 대하여 단계별로 조금 더 자세하게 기술한다.

III. NSSC 방법을 이용한 발자국 탐지 방안

3.1 비선형 주파수 차감을 이용한 잡음제거

잡음과 신호가 혼재된 상황에서 잡음을 제거하면 신호잡음비가 개선되어 표적 탐지 거리가 증대될 수 있다. 이러한 잡음 제거방법으로 1979년 Boll^[24]과 Berouti^[25]에 의한 주파수 차감법이 제안 되었으며 자동차 실내 소음 제거방안 등에 적용되고 있다^[28].

진동센서가 설치된 야외환경은 일정하게 지속되는 차량 소음, 바람과의 마찰에 의한 진동센서의 미세한 흔들림, 시스템 내부의 일정한 전기적 잡음 등이 혼재한다. 정상적(Stationary)인 잡음은 제거하되 사람 발자국과 같은 인위적인 임펄스 신호의 진동파형은 최대한 증대시키는 것이 주파수 차감방법의 주요 목적이다.

그림 3은 발자국 진동신호와 잡음이 혼합된 신호로부터 주변 잡음을 제거하여 신호잡음비가 향상되는 과정에 대한 기본 개념이다^[26].

그림 4는 비선형 주파수 차감과정을 통해 잡음을 제거하는 전체적인 과정을 도시하였다.

주파수 도메인 상에서 SNR이 높아진 발자국 신호는 식(1)과 같이 잡음이 섞인 입력신호에서 잡음을 뺀 식으로 표현할 수 있다.

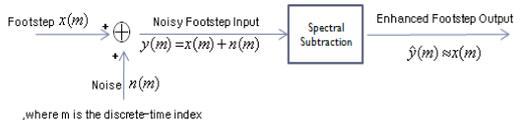


그림 3. 잡음제거 블록도
Fig. 3. Noise subtraction block diagram

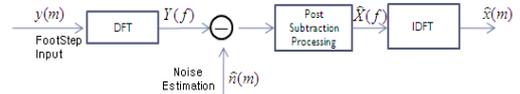


그림 4. 주파수 차감 처리과정
Fig. 4. Frequency subtraction processing procedure

$$\hat{X}_k^b = Y_k^b - a(k) \bar{N}_k^b \quad (1)$$

여기서 \hat{X}_k^b 는 발자국으로 추정하는 신호이며, \bar{N}_k^b 는 일정시간동안 평균된 잡음신호이다. b 는 식(1)이 Magnitude 스펙트럼일 경우 1, Power 스펙트럼일 경우 2다. a 는 차감시킬 잡음에 가중치를 주기 위함이며, $a=1$ 이면 완전-잡음차감(Full Subtraction), $a > 1$ 일 경우에는 과-잡음차감(Over Subtraction)이 된다.

\bar{N}_k^b 는 발자국 신호 입력이 없을 때 일정시간동안 평균된 신호로서 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{N}_k^b = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} N_{k,i}^b \quad (2)$$

이렇게 계산되어진 \hat{X}_k^b 는 주파수 영역에서의 추정 발자국 신호이고 임계치 적용을 통한 탐지과정을 위해 다시 시간 영역으로 변환되어야 한다.

$$\hat{x}(m) = \sum_{k=0}^{N-1} (\hat{X}_k^b e^{j\theta_{k,b}}) e^{j(2\pi/N)km} \quad m = 0, \dots, N-1 \quad (3)$$

식(1)를 통해 발자국 신호의 주파수 크기는 추정하였으나 위상정보는 고려되지 않았다. 위상정보가 없으면 시계열로 변환이 불가하여 잡음이 섞여있던 입력 신호 Y_k 의 위상값인 $\theta_{k,b}$ 를 \hat{X}_k^b 와 결합하여 역변환을 수행하였다. 이것은 주파수 차감법이 갖고 있는 이론적 한계를 나타낸다^[27]. 주파수 대역별 SNR을 고려하여 신호를 차감할 때 가변적인 가중치를 적용할 수 있다. 식(1)에서 $a(k)$ 가 잡음신호에 대한 가중치 상수이다. 유효한 발자국 신호가 입력되어 신호잡음비가 큰 경우는 a 가 1이 되어 잡음 평균 크기만 차감되는 반면 유효한 신호가 아닌 경우 SNR이 작아지게 되면 a 값을 크게 하고 실제 잡음보다 더 큰 신호를 차감하여 확실히 제거해 주는 방법이다. 그림 5는 SNR에 따른 가중치 a 값을 선정하기 위한 그래프를 나타낸다.

비선형 주파수 차감 과정에서 입력신호로부터 잡음을 차감한 \hat{x}_k^b 의 크기가 음수를 갖는 경우가 발생할 수 있다. 차감 연산 결과인 추정된 발자국 신호의 주

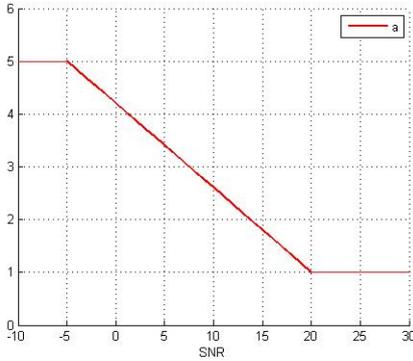


그림 5. a 값 참조 그래프
Fig. 5. a value reference graph

파수 크기가 음의 값을 갖는 경우 해당 값을 0 또는 0 이상의 최소 값으로 대체를 하여 시계열로 복원이 가능하게 한다³²⁾. 본 논문에서는 \hat{X}_k^b 의 최소값을 0이 아닌 최소 하한 값으로 실험적 수치인 0.03을 적용하였다.

이러한 후처리 과정은 매핑함수 식(4)과 같이 표현된다.

$$T[\hat{X}_k] = \begin{cases} \hat{X}_k & \text{if } \hat{X}_k > \beta N_k \\ \beta N_k & \text{if } \hat{X}_k \leq \beta N_k \end{cases}, \beta = 0.03 \quad (4)$$

여기서 추정 발자국신호 \hat{X}_k^b 의 주파수 크기가 평균 잡음신호 \bar{N}_k^b 와 β 의 곱한 값인 $\beta \bar{N}_k^b$ 보다 크면 주파수 차감 결과를 사용하고, 작으면 $\beta \bar{N}_k^b$ 값을 사용한다.

3.2 기본 발자국 모델 신호를 이용한 상관관계

단계1에서 비선형 주파수 차감방법을 통하여 정상적 잡음 신호에 대한 감쇄가 이루어졌다. 하지만 발자국, 빗방울과 같은 임펄스 성격의 신호나 비정상(Non-Stationary) 상태의 잡음은 상대적으로 감쇄가 되지 않는다. 유효한 발자국에 대한 신호세기가 보존되었으나 다른 임펄스 잡음도 함께 보존되었기 때문에 이에 대한 처리를 고려해야 한다. 이를 위하여 모델링된 순수한 발자국 기본 신호와 비선형 주파수 차감 처리된 신호와의 교차상관 연산을 수행한다. 그 결과로서 기본 신호와 유사한 발자국 신호에 대해 상승적분이 이루어져 신호세기가 증대되었고 주기가 다른 임펄스 신호(빗방울, 기타 잡음신호)에 대해서는 신호가 감쇄하였다.

입력신호와 기본 신호와의 교차 상관 연산은 식(5)와 같이 표현되며 기본 발자국 모델신호는 그림 6과

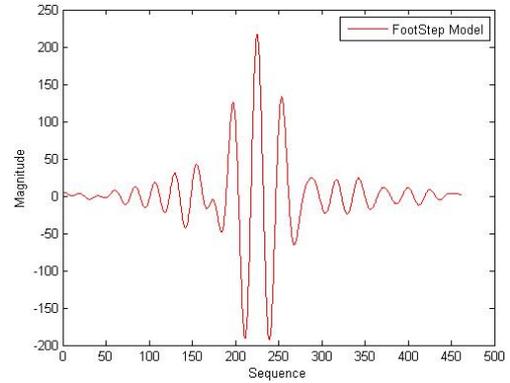


그림 6. 기본 발자국 모델 신호 파형
Fig. 6. Prime footstep model signal waveform

같다.

$$y[n] = f[n] * g[n] = \sum_{m=0}^n f[m]g[n-m] \quad (5)$$

기본 발자국 모델신호는 수집된 임의의 발자국 이벤트 신호를 곡선정합(Curve fit) 과정을 거쳐 재구성한 신호이다. 교차 상관을 위한 발자국 모델신호의 윈도우 사이즈는 460샘플로 하였다.

비 오는날 사람 발자국 신호에 대한 신호처리 결과는 그림 7과 같다. 원 신호가 맨 위 그림에 나타나 있고 붉은색 네모 표시 안에 참(True) 발자국 신호 구간임을 표시하였다. 두 번째 칸의 그림은 비선형 주파수 차감(NSS)처리 결과 신호이다. 붉은 사각형 바깥 부분에도 빗방울에 의한 임펄스 신호가 계속 존재함을

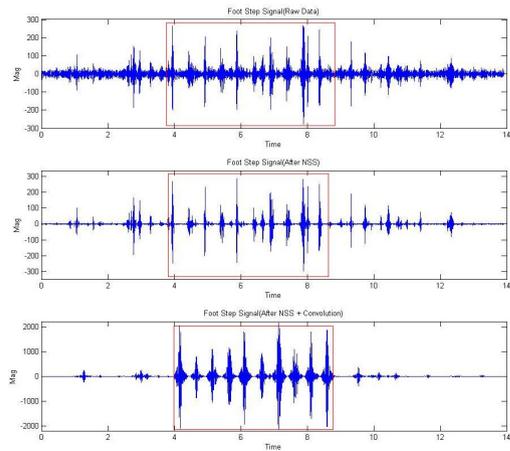


그림 7. 입력신호(맨위), NSS 처리후(중간), NSSC 처리후(맨아래)
Fig. 7. Input Sig.(Top), After NSS (Mid), After NSSC (Bottom)

알 수 있다. 이는 NSS과정이 일정한 잡음 신호에 대하여는 신호 감쇄 효과가 우수하지만 빗방울과 같은 잡음에 대해서는 필터링이 거의 이루어지지 않기 때문이다. 맨 아래 그림을 보면 NSS 처리된 신호와 발자국 모델 신호를 교차상관(cross-correlation)시켜 발자국 이외의 임펄스 신호에 대해 상대적으로 감쇄 효과가 나타났음을 확인할 수 있다.

3.3 적응 임계치 적용

비선형 주파수차감 및 교차상관 과정을 통과한 신호는 원 신호와 비교하였을 때 발자국 신호가 부각된 특징을 갖는다. 그러나 발자국 이외에도 다양한 형태의 임펄스 잡음 신호는 필터링을 완료한 후에도 일부 잔존하게 된다. 즉 신호가 감쇄할 뿐 완전히 없어지지 않기 때문에 발자국 신호 탐지과정에서는 반드시 임계치를 설정하여야 한다. 본 논문에서는 하한값을 갖는 적응 임계치를 적용하여 그 이상의 값에 대해 탐지 여부를 판단한다. 적응 임계치를 적용하기 위하여 단계② 과정을 완료한 신호를 에너지로 변환 후 슬라이딩 윈도우 방식을 이용하여 신호를 필터링하고 이동 평균 방식을 이용한 적응 임계치를 적용한다.

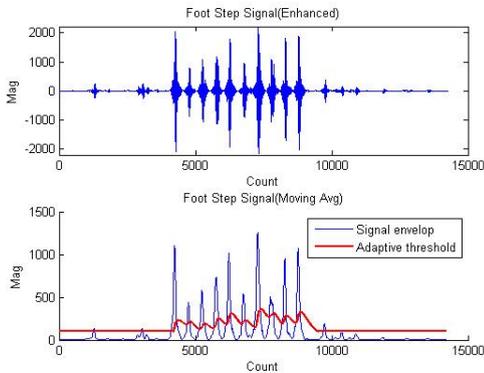


그림 8. NSSC 처리 신호에 대한 적응 임계치 적용
Fig. 8. Adaptive threshold applying to NSSC processed signal

3.4 Peak 에너지 탐지

신호 에너지 Peak 지점은 발바닥이 지면과 부딪칠 때 최대의 에너지를 발생시키는 순간이라고 할 수 있다. Peak 지점을 구하는 이유는 단계 5에서 논의될 잡음과 발자국 식별을 위한 원 신호 데이터 구간을 설정하기 위한 과정이다.

Peak 지점을 정하기 위한 방안은 신호 에너지 크기가 Peak 탐지용 임계치(실험적으로 100 적용) 이상으

로 신호가 급속히 감소하는지 여부를 판단하여 그 조건을 만족하는 구간에서의 최고점을 지역 Peak 지점으로 선정하는 방식이다. 그림 9에서 붉은 마름모 표시가 Peak지점을 나타낸다.

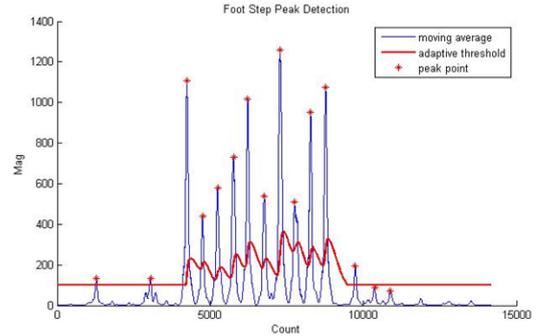


그림 9. 발자국 신호에 대한 peak 탐지
Fig. 9. Footstep signal peak detection

3.5 탐지 이벤트 식별과정

발자국 탐지를 위한 탐지 이벤트 식별과정은 앞서 논의된 단계1~4의 신호처리 과정을 통과한 탐지 이벤트에 대해 최종적으로 사람에게 의한 이벤트인지, 아니면 다른 잡음 요인에 의한 이벤트인가를 구분하여 사람 발자국일 경우 운용자에게 최종 탐지 결과를 알려주기 위함이다.

탐지 이벤트 식별과정은 다음과 같이 두 단계로 이루어진다.

- 1) '4. Peak 에너지 탐지' 과정에서 확인된 Peak지점과 동일한 순간의 원 데이터를 기반으로 2차원 특징벡터를 추출한다.
- 2) 2차원 특징벡터를 기반으로 대량의 야외 신호수집 과정을 통해 구축한 잡음과 발자국의 데이터베이스(DB)로부터 판별식을 이용하여 발자국 또는 잡음으로 식별한다.

본 논문을 위하여 발자국만의 신호와 잡음만의 신호를 이용하여 신호 데이터베이스를 구축하였다. 발자국 신호는 발자국이 지면에 닿는 순간의 Raw 데이터만을 이용하여 만들고, 잡음은 발자국 이외의 다양한 순간(바람, 빗방울 충격, 차량 소음 등)의 자료를 이용하였다.

그림 10은 여러 발자국과 잡음신호에 대한 주파수대역별 신호세기를 나타낸다.

식별을 위한 DB를 만드는 방법은 각각의 신호들에 대하여 256포인트 FFT를 수행하고 128차원의 주파수 특징점 만든다. 발자국은 140개, 잡음은 200개의 신호

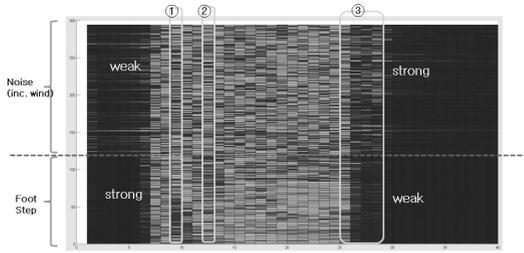


그림 10. 발자국과 잡음의 주파수 대역별 신호세기
Fig. 10. Power spectrum of footstep and noise

를 이용하여 특징점 DB를 구성하였다. 그림 10의 붉은 점선 하단부는 발자국 특징이고, 상단부는 잡음 특징이다. 잡음의 경우에는 저주파 대역에서 대체적으로 고른 에너지 분포를 갖는 반면 발자국의 경우 저주파 대역에서 강한 에너지를 나타내고 고주파 영역에서 상대적으로 낮은 에너지를 갖는다. 이렇게 구성된 특징점 DB는 차원이 높아 계산량이 많아진다. 차원 축소를 위하여 세로축의 ①, ②값 중 큰값을 이용하여 첫 번째 특징값을 만들고 ($f1 = \max(①, ②)$), ③번 구간의 평균값을 이용하여 ($f2 = \frac{1}{4} \sum_{f=25}^{30} \text{mag}(f_i)$) 두 번째 특징값을 만든다. 발자국 신호의 경우에는 약 36~40Hz 구간 혹은 48~52Hz 구간에서 강한 신호를 나타내고 있는데 이는 신호 수집 장소의 차이에 따른 발자국 진동 신호 차이로 추정된다.

차원을 축소하여 재 구성한 특징점 분포는 그림 11과 같다. 파란색 표시는 발자국 신호의 특징분포이고 붉은색 표시는 잡음을 나타낸다. 잡음은 그림의 붉은색 표시와 같이 다양하게 분포하고 있고 발자국은 저주파 영역(feature1, 36Hz 또는 48Hz)에서는 강하게, 고주파 영역(feature2, 100Hz)는 약하게 분포함을 알 수 있다.

이러한 특징점 분포를 이용하여 발자국과 잡음의

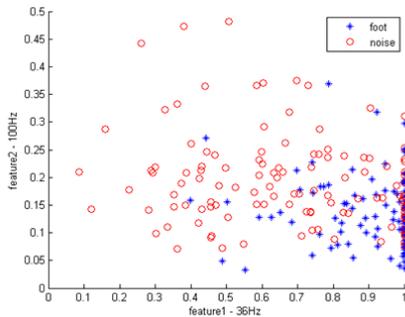


그림 11. 발자국과 잡음 특징점의 2차원구성
Fig. 11. 2-D feature of footstep and noise

경계영역을 설정하여야 한다. 잡음의 분포가 다양하기 때문에 완벽히 구분하는 것은 불가능하다. 최소 자승법 (Least Square) 방식과 k-NN(k=15) 방식을 이용하여 최소의 에러가 발생하는 경계면을 산출하면 그림 12, 13과 같이 표시된다.

따라서 새로운 발자국 이벤트 신호가 입력되면 2차원 특징점을 추출하고 그림 12, 13의 식별 경계면을 토대로 잡음과 발자국 신호를 분류하는 식별 과정을 수행하게 된다. 본 논문의 실험결과에 사용된 식별 방식은 k-NN을 적용하였다.

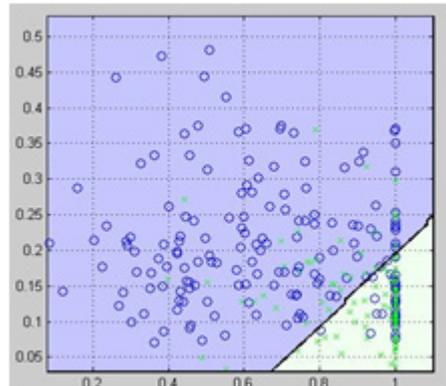


그림 12. LS방식을 이용한 식별 경계면
Fig. 12. Classification decision boundary using LS

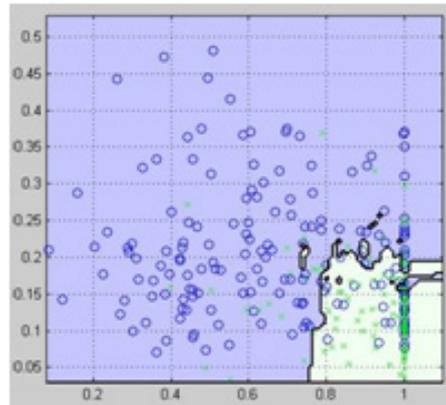


그림 13. k-NN방식을 이용한 경계면(k=15)
Fig. 13. Classification decision boundary using k-NN(k=15)

IV. 실험결과

실험은 두 가지 관점으로 진행하였다. 첫 번째는 입력신호에 대한 잡음감쇄 과정을 통해 신호잡음비가 향상 되는가에 대한 실험과, 두 번째는 기존의 탐지 알고리즘인 대역필터(BP), SVD기반 웨이블렛, 침도

(Kurtosis) 방식과 논문에서 제시하는 방안(NSSC)을 이용하여 발자국 탐지 성능을 비교하였다. 실험에 사용된 자료는 맑은 날 수집한 3,176회의 발자국 이벤트 신호와 비오는 날 수집한 860회의 발자국 이벤트 신호가 사용되었다. 그림 14는 15미터 거리에서의 10회의 발자국 이벤트에 대한 잡음제거 결과를 보여준다.

그림 15는 30미터 거리에서의 발자국 신호의 잡음 제거 결과를 나타낸다. 원 신호의 신호잡음비가 매우 낮아 기존의 필터링 방식으로 발자국 신호를 구분하기 어렵지만 NSSC방식을 이용하면 10회 중 7회의 발자국 이벤트가 눈으로 확인됨을 알 수 있다.

표 1은 거리별 적용 알고리즘에 따른 SNR을 나타내었다. 기존 알고리즘대비 제안 알고리즘을 사용하였을 경우 상대적 SNR 이득값이 크게 증가하였음을 알 수 있다. 이는 발자국과 같은 임펄스 잡음 이외의 신호에 대해서 식(4)에서 기술한 방식과 같이 신호를 제거하기 때문이다.

두 번째 실험은 네 가지 알고리즘(BP, Wavelet, Kurtosis, NSSC)을 이용한 탐지 및 오 경보에 대한 성능비교를 실시하였다. 탐지를 위한 임계치 설정을 위하여 대역필터, 웨이블릿, NSSC방식은 적응 임계치 방식을 사용하였고, 침도 방식은 알고리즘 특성상 고정 임계치 방식을 사용하였다.

그림 16은 비오는 날, 30미터의 거리에서 발생한 발자국 이벤트에 대한 알고리즘별 탐지 결과를 붉은

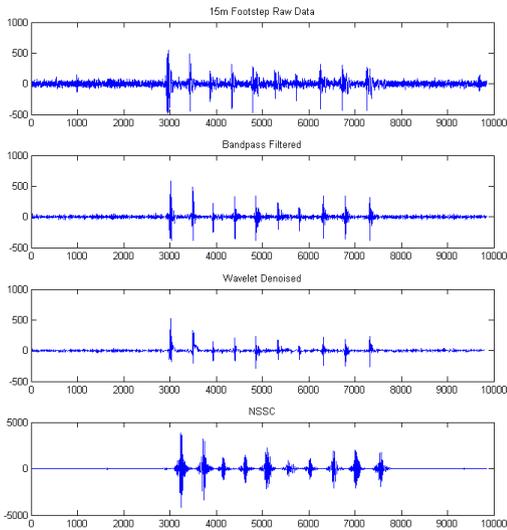


그림 14. 15미터, 맑은 날, 잡음 제거(Raw, BP, Wavelets, NSSC)
Fig. 14. 15m, sunny day, noise subtraction (Raw, BP, Wavelets, NSSC)

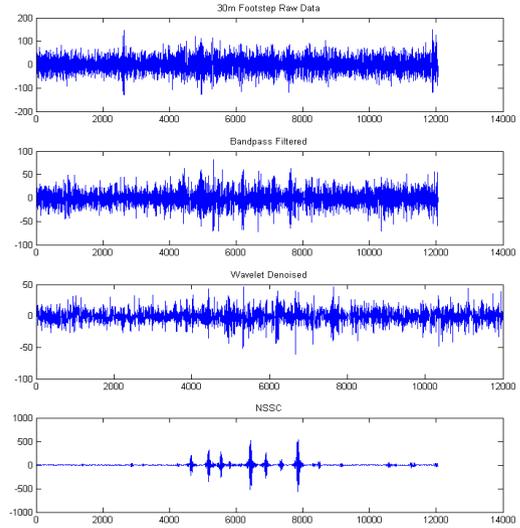


그림 15. 30미터, 맑은 날, 잡음 제거(Raw, BP, Wavelets, NSSC)
Fig. 15. 30m, Sunny day, noise subtraction (Raw, BP, Wavelets, NSSC)

표 1. 신호잡음비 성능 비교표
Table 1. SNR performance comparison

Distance	Method	SNR(dB)	Relative SNR (dB) Gain
15m	Raw	44.01	0
	Bandpass	49.80	+5.79
	Wavelets	49.90	+5.89
	NSSC	112.90	+68.89
20m	Raw	18.22	0
	Bandpass	29.90	+11.68
	Wavelets	29.90	+11.68
	NSSC	97.47	+79.25
25m	Raw	9.36	0
	Bandpass	12.65	+3.29
	Wavelets	13.10	+3.74
30m	NSSC	72.28	+62.63
	Raw	0.40	0
	Bandpass	9.80	+9.4
30m	Wavelets	11.70	+11.30
	NSSC	61.96	+61.56

색으로 표시하였다. 빗 방울이 센서와 부딪히면서 발생한 임펄스 잡음과 발자국 9회가 혼재되어 있으며 그림에서 가로축 8000번째 샘플 이후(8초 이후 신호)에서는 빗방울 충격으로 인한 잡음신호를 보여주고 있다. 기존 알고리즘(BP, Wavelet, Kurtosis)에서는 빗방울로 인한 오경보가 발생 하였고, 제안 방식에서는 모두 제거되었음을 확인 할 수 있다.

제안 알고리즘을 사용 시 실제 발자국 이벤트를 탐

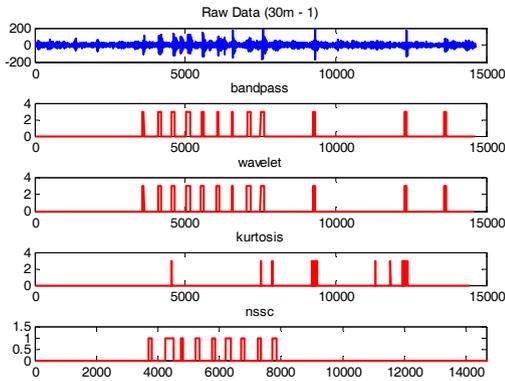


그림 16. 30미터, 비오는 날. 탐지 결과(Raw, BP, Wavelets, Kurtosis, NSSC)
Fig. 16. 30m, rainy day. detection result(Raw, BP, Wavelets, Kurtosis, NSSC)

지했음에도 불구하고 식별과정에서 잡음으로 판단을 하여 탐지를 놓치는 상황이 발생하기도 하였지만 오경보율은 기존 알고리즘 대비 개선효과를 볼 수 있다. 그림 17과 18은 전체 수집 데이터에 대한 탐지 및 오경보 빈도수에 관한 결과 요약이다. NSSC알고리즘을 적용하였을 때, 맑은 날의 경우는 잡음이 많지 않아 대역필터를 사용했을 때와 대비하여 오경보 성능에

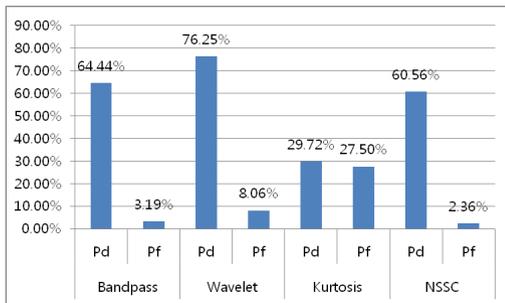


그림 17. 맑은 날(바람<0.5m/s) 탐지 및 오경보 확률
Fig. 17. Sunny day(wind<0.5m/s) Pd and Pf

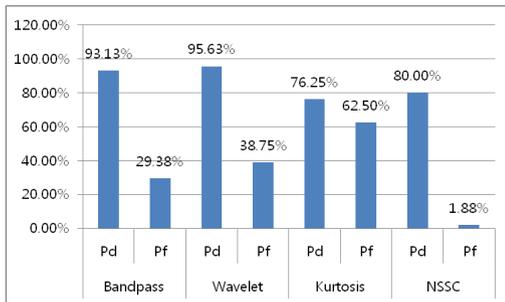


그림 18. 비오는 날(5mm/hour) 탐지 및 오경보 확률
Fig. 18. Rainy day(5mm/hour) Pd and Pf

큰 차이를 보이지 않았으나, 비가 오는 날의 경우 여러 잡음 요인이 존재 된 상황에서의 오경보율은 기존 알고리즘 대비 향상된 결과를 나타내고 있다.

V. 결론

통계적 특성을 이용하는 기존 방법으로는 진동센서가 감지한 빗방울과 같은 임펄스 잡음에 대해서는 사실상 필터링 역할에 한계가 있다. 대역필터, 웨이블렛, 단순한 주파수 차감 방법으로 SNR을 증대시킬 수는 있으나 비정상(Non-stationary) 특성을 갖는 잡음에 대한 오경보는 줄일 수 없다.

제안 알고리즘인 NSSC 방식을 이용하면 SNR을 증대시킬 뿐만 아니라 임펄스 잡음에 대한 오경보를 줄일 수 있음을 실험적으로 확인할 수 있다. 이러한 특성은 야외 환경에서 운영되는 시스템에 적용하기에 적합함을 의미한다. 제안 알고리즘은 개별 발자국 이벤트가 발생 시 마다 분석을 수행하기 때문에 한사람이 보행을 하던 여러 사람이 보행을 하던 일정한 운동이 없어도 발자국 탐지를 확인할 수 있다. 본 논문에서 발자국 이벤트에 대한 식별과정으로 논의된 방안은 실제 발자국 신호에 대한 특징을 잘 분류하지 못하는 단점을 나타내었으며 식별을 위한 보다 더 정교한 알고리즘 적용을 통해 높은 탐지 성능을 갖도록 추가적 연구 및 보완이 필요하다.

References

- [1] D. K. Wilson, D. H. Marlin, and S. Mackay, "Acoustic/seismic signal propagation and sensor performance modeling," in *Proc. SPIE*, vol. 6201, 2006.
- [2] H. Amick. "A frequency-dependent soil propagation model," *SPIE Conf. on Current Developments in Vibration Control for Optomechanical Systems*, Jul. 1999.
- [3] G. Succi et. al., "Problems in seismic detection and tracking," in *Proc. SPIE*, 4040, pp. 165-173, Jul. 2000.
- [4] G. Succi, D. Clapp, R. Gampert, and G. Prado, "Footstep detection and tracking," in *Proc. SPIE*, vol. 4393, pp. 22-29, 2001
- [5] L. Peck and J. Lacombe, "Seismic-based personnel detection," *IEEE*, pp. 169-175, Oct. 2007.

- [6] J. Lacombe, L. Peck, T. Anderson, and D. Fisk, "Seismic detection algorithm and sensor deployment recommendations for perimeter security," in *Proc. SPIE*, vol. 6231, 2006.
- [7] K. M. Houston and D. P. McGaffigan, "Spectrum analysis techniques for personnel detection using seismic sensors," in *Proc. SPIE* vol. 5090, 2003.
- [8] A. Pakhomov, A. Sicignano, M. Sandy, and T. Goldburt, "Seismic footstep signal characterization," in *Proc. SPIE*, vol. 5071, pp. 297-305, 2003.
- [9] A. Pakhomov, A. Sicignano, M. Sandy, and T. Goldburt, "A novel method for footstep detection with an extremely low false alarm rate," in *Proc. SPIE*, vol. 5611, 2004.
- [10] A. Pakhomov and T. Goldburt, "Seismic signals and noise assessment for foot step detection range estimation in different environments," in *Proc. SPIE*, vol. 5417, 2004.
- [11] A. Pakhomov, A. Sicignano, Matt Sandy, and T. Goldburt "Current seismic sensor issues for defense and security applications," in *Proc. SPIE*, vol. 5403, 2004.
- [12] A. Pakhomov and T. Goldburt, "New seismic sensors for footstep detection and other military applications," in *Proc. SPIE*, vol. 5403, 2004.
- [13] A. Pakhomov and T. Goldburt, "Seismic systems for unconventional target detection and identification," in *Proc. SPIE*, vol. 6217, 2006.
- [14] A. Pakhomov and T. Goldburt, "Zero false alarm seismic detection and identification systems," in *Proc. SPIE*, vol. 6943, 2008.
- [15] A. Ekimov and J. M. Sabatier, "Orthogonal sensor suite and the signalprocessing algorithm for human detection and discrimination," in *Proc. SPIE*, vol. 7303, 2009.
- [16] J. M. Sabatier and A. E. Ekimov, "Range limitation for seismic footstep detection," in *Proc. SPIE*, vol. 6963, 2008.
- [17] J. M. Sabatier and A. E. Ekimov, "A review of human signatures in urban environments using seismic and acoustic methods," *IEEE*, pp. 215-220, May 2008.
- [18] H. O. Park, A. A. Dibazar, and T. W. Berger, "Cadence analysis of temporal gait patterns for seismic discrimination between human and quadruped footsteps," *ICASSP 2009*, pp. 1749-1752, Apr. 2009.
- [19] S. Schumer, "Time domain classification of humans using seismic sensors," in *Proc. SPIE*, vol. 7693, May 2010.
- [20] Y. Tian, H. Qi, and X. Wang, "Target detection and classification using seismic signal processing in unattended ground sensor systems," *ICASSP 2002*, 2002.
- [21] H. Xing, F. Li, Y. Liu, "Wavelet denoising and feature extraction of seismic signal for footstep detection," in *Proc. 2007 Int'l Conf. on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*, 2007.
- [22] A. Pakhomov, A. Sicigno, M. Sandy, and E. T. Goldburt, "Single and three axis geophone: Footstep detection with bearing estimation, Localization and Tracking," in *Proc. SPIE*. vol. 5090, p. 155, Sept. 2003.
- [23] K. E. Speller and D. Yu, "A low-noise MEMS accelerometer for Unattended Ground Sensor applications," in *Proc. SPIE*, vol. 5417, p. 63, 2004.
- [24] S. F. Boll, "Suppression of acoustic noise in speech using spectral subtraction," *IEEE Trans. ASSP*, vol. 27(2), pp. 113-120, 1979.
- [25] M. Berouti, R. Schwartz, and J. Makhoul, "Enhancement of speech corrupted by acoustic noise," in *Proc. ICASSP*, pp. 208-11, 1979.
- [26] S. V. Vaseghi. "Advanced digital signal processing and noise reduction 3th ed.," John Wiley & Sons, 2006.
- [27] N. Evans, "An assessment on the fundamental limitations of spectral subtraction," in *Proc. IEEE*, May 2006.
- [28] R. M. Udrea, D.N. Vizireanu, and I. Pirnog, "A perceptual approach for noise reduction using nonlinear spectral subtraction," *TELSIKS 2007*, pp. 649-652, Sept. 2007.
- [29] L. L. Scharf, *Statistical signal processing:*

Detection, estimation, and time series analysis, Addison-Wesley, 1991.

- [30] K. N. Le, "On noise robustness of the Mexican-hat and hyperbolic wavelets with an experiment on chaos detection," *J. Sound and Vibration*, vol. 315, no. 1-2, pp. 343-364, Aug. 2008.
- [31] K. N. Le, K. P. Dabke, and G. K. Egan, "On mathematical derivations of auto-term functions and signal-to-noise ratios of Choi-Williams, first- and nth-order hyperbolic kernels," *J. Digital Signal Processing*, vol. 16, no. 1, pp. 84-104, Jan. 2006.
- [32] J. Beh and H. Ko, "Spectral subtraction using spectral harmonics for robust speech recognition in car environments," *J. Acoustical Society of Korea*, vol. 22, no. 2E, pp. 62-68, Jun. 2003.

고 한 석 (Hanseok Ko)



1982년 : Carnegie Mellon University, Dept of ECE, 학사
1988년 : Johns Hopkins University, Dept of ECE, 석사
1992년 : Catholic University of America, Dept of ECE, 박사
1995년3월~현재 : 고려대학교 전기전자공학과 교수

<관심분야> 신호처리

김 태 복 (Tae-bok Kim)



1994년 2월 : 고려대학교 제어
계측공학과 학사
2013년 2월 : 고려대학교 영상
정보처리협동 석사
2001년 1월~현재 : LIG넥스원
수석연구원

<관심분야> 신호처리, 센서네트워크, S/W 공학