한국군사과학기술학회지 제14권 제6호, pp. 1129~1137, 2011년 12월

학술논문 센서 · 신호처리 부문

진동센서를 이용한 효율적인 침입자 탐지 기법

An Efficient Intruder Detection using the Seismic Sensor

김 용 현* 정 광 수**
Yong-Hyun Kim Kwangsue Chung

Abstract

This paper reports on a design of the footstep signal detection system using the seismic sensor. First, we analyzed the characteristics of seismic signal, seismic sensor, and the UGS(Unattended Ground Sensor) system with seismic sensors. In addition, we summarized the existing algorithms to detect footstep using the seismic sensors, and developed our low-power and high efficient footstep detection algorithm. In this paper, the sensor node operations are classified into three different steps and different resources and algorithms are applied to each step, not only to minimize the power consumption, but also to improve the performance.

Keywords : Seismic Signal(진동신호), Seismic Sensor(진동센서), Footstep Detector(발자국 탐지기), UGS(무인지상센서)

1. 서 론

감시정찰 센서네트워크 시스템은 경계지역에 일정 간격으로 수십에서 수천 개의 센서노드를 배치시킨 후 경계지역 내에 침입하는 표적을 실시간으로 탐지 또는 추적하는 무선 시스템이다. 감시정찰 센서네트워크 시스템은 사람이 갈 수 없는 장소에 눈, 귀 등과 같은 감지력이 있는 센서를 배치함으로써 전장을 이해하는 새로운 수단을 제공한다.

감시정찰 센서네트워크 시스템은 EO/IR(Electro-Optical/InfraRed), SAR(Synthetic Aperture Radar)와 같은 기존 정찰시스템이 임무시간, 임무지역에 제한을 받는 것과 달리 24시간 지속적으로 운용가능하며, 기상 또는 지형의 영향을 덜 받고, 원하는 지역에 대한 정보 획득이 가능하다. 또한 기존 정찰시스템이 획득 및 운영하는데 비용이 많이 소요되는 것에 비해 감시정찰 센서네트워크 시스템은 저비용으로 획득 및 운영이 가능하다.

감시정찰 센서네트워크 시스템은 침입자를 탐지하기 위해 진동센서, 음향센서, 자기센서, PIR(Passive Infra Red), 이미지센서와 같은 수동센서와 UWB(Ultra Wide Band)센서, 초음파센서 등과 같은 능동센서를 사용한다. 탐지하려는 표적종류, 센서 설치지역 특성에 따라 적절한 센서를 선택하여 사용한다.

진동센서의 경우 표적이 지표면과 부딪치면서 발생시키는 진동신호를 탐지하는 것으로 사람발자국 탐지나 차량 탐지에 사용한다[1]. 진동센서에서 탐지거리와 오경보는 해결해야 할 두 가지 주요 기술적 과제이다. 환경 잡음(noise) 레벨은 탐지거리에 영향을 주고 또한

† 2011년 8월 19일 접수~2011년 11월 4일 게재승인
* 국방과학연구소(ADD)
** 광운대학교(Kwangwoon University)
책임저자 : 김용현(yonghyun@add.re.kr)

높은 오경보율을 발생시킨다. 특히, 환경 잡음영향을 최소화하여 탐지거리를 최대화시키고, 오경보율을 최소화하기 위한 많은 연구가 진행되었다. 가장 많이 사용되는 방법은 진동신호 진폭의 통계적인 분포 측정치인 첨도(kurtosis)를 이용하는 방법[2], 주파수 영역에서 사람의 전형적인 걸음걸이 특징인 운율(cadence)을 찾는 방법[3]이 있다. 이 두 가지 방법은 침입여부를 판정하기 위해 여러 개의 발자국 신호를 모아서 분석하는 블록단위 처리 알고리즘(block-wise processing algorithm)에 기반을 두고 있다. 다른 접근방법으로 필터와 포락선(envelope) 추출을 결합하여 개별 발걸음을 탐지하는 방법[4]이 있다. 진동 감시정찰 시스템은 차량, 발전기, 바람과 같은 진동 간섭(interference)에 의해 그 성능이 심각하게 감쇠되는데 이러한 진동 간섭을 상쇠시키고자 하는 연구[5]도 있다.

사람발자국 진동을 정확하게 탐지할 수 있는 알고리즘은 존재하지만 이를 적용하는데 여러 가지 어려운 점이 있다. 좀 더 정확하고, 에너지 소모량을 최소화할 수 있는 방법의 필요성이 증가하고 있지만 기존의 방법은 이러한 두 가지 요구사항을 충족하지 못한다. 본 논문에서는 센서노드의 탐지영역을 기준으로 센서노드의 운용 상태를 Pre-Detection 단계, Detection 단계, Post-Detection 단계로 구분하여 각 단계에 적합한 센서와 처리기를 선택할 수 있는 제어장치와 단계별 수준에 맞는 알고리즘을 달리 적용하여 센서노드의 에너지 소모를 최소화하고 표적탐지의 오경보율을 최소화한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 진동신호 및 진동센서 특징을 분석하고, 진동센서를 적용한 무인지상센서(UGS)를 분석한다. 또한 진동센서를 이용한 사람 발자국 탐지에 관한 기존연구를 분석 한다. 3장에서 센서노드의 에너지 소비를 고려한 사람발자국 탐지기 설계 내용을 제시하고 4장에서 시뮬레이션을 통한 성능 평가를 기술한다. 마지막으로 5장에서 결론 및 향후 연구를 기술한다.

2. 관련 연구

가. 진동신호

진동파는 중심파(body wave)와 표면파(surface wave)로 나눠진다. 사람발자국 진동신호의 에너지는 대부분 표면파에 실리며, 표면파에서도 R파(Rayleigh wave)에 실린다. 사람발자국 진동신호는 대표적인 저주파 신호로 분류되며, 저주파 특성을 고려하여 표적탐지 시스템을 개발하여야 한다. 사람발자국 진동신호는 신호대잡음비, 스펙트럼, 첨도, 반송 신호 주파수(carrier frequency) 측면에서 고유 특징이 있으며 이를 이용하여 사람발자국 진동신호를 다른 신호로부터 구분한다[6]. 사람발자국 이외에 기차, 차량, 헬기, 배 진동신호도 각자 고유 특징을 가지고 있으며, 이들 정보를 이용하여 구분할 수 있다[7].

잡음은 사람이 인공적으로 만든 것에서 발생하는 인공적인 잡음(culture noise)과 자연환경에서 발생하는 자연 발생적인 잡음(natural noise)으로 구분할 수 있다. 환경 잡음 중 진동 시스템에 가장 영향을 많이 주는 것이 도로(차량) 잡음과 바람 잡음이다[8]. 진동센서를 설치시, 잡음원(noise source)을 구체적으로 파악해야 하고, 설치하는 위치와 시설도 정확히 분석해야 한다.

나. 진동센서

진동센서가 탑재된 보안 탐지기는 대부분 지오폰과 가속도계를 사용한다. 특히 지오폰은 가격대성능비 측면에서 가장 많이 사용되고 있는 진동센서이다. 지오폰은 가격이 저렴한 장점이 있지만 10Hz 이하의 저주파 신호에 대한 응답이 약하고, 높은 감도 임계값(sensitivity threshold)으로 인해 먼거리에 있는 표적으로부터 오는 약한 진동신호를 탐지 못하는 단점이 있다. 또한 긴 댐핑(damping)신호 시간과 부정확한 응답으로 인해 잡음이 높은 환경에서 먼거리에 있는 표적을 탐지하는데 문제가 있으며, 전자기 간섭 영향으로 레이더 기지 근처에서 진동센서 사용이 제한된다[9].

이러한 지오폰의 문제점을 고려하여 시스템에 적용할 진동센서를 선택할 때는 광범위한 동적범위를 가져야 하며 저주파 대역 응답이 좋아야 한다. 또한 센서 자체 진동잡음이 작아야 하고, 진동센서의 감도(sensitivity)는 높고, 감도 임계값은 낮아야 한다.

다. 진동센서를 적용한 무인지상센서(UGS)

UGS는 음향, 자기, 진동, 적외선 센서 등을 이용하여 침입하는 표적을 탐지하고 무선 네트워킹을 통해 지휘소에 전달하는 무인 감시경계 시스템이다. Table 1에 대표적인 무인지상센서에 적용된 진동센서를 분석하였다[1]. UGS에 적용된 센서타입은 지오폰이며, 매설방법은 땅을 파서 노드 자체를 묻는 방법과 노드에

스파이크를 부착하는 방법이 있다. 또한 설치수단은 사람의 손으로 설치한다.

Table 1. UGS 제품별 진동센서 타입 및 운용방법

제품명	제조사	센서타입	매설방법	설치수단
REMBASS-II	L-3	지오폰	땅에매설	도수
SCORPION	Northrop Grumman	지오폰	땅에매설	도수
EMIDS, MMIDS	Qual-tron	지오폰	땅에매설	도수
MIS	Thales	지오폰	스파이크 부착	도수
Flexnet	Exensor	지오폰	스파이크 부착	도수

라. 사람발자국 탐지 알고리즘

진동신호에서 사람발자국 여부를 판단하기 위해 사용하는 기술은 에너지, 스펙트럼, 패턴, 통계 등을 이용하고 있다. 진동신호에서 특징을 추출하는 방법은 처리 영역(processing domain) 관점에서 시간 영역 방법, 주파수 영역 방법, 시간-주파수 영역방법으로 세 가지로 분류할 수 있다. 시간 영역 분석은 잡음 간섭, 복잡한 파형, 다양한 지역특성으로 인해 정확도가 떨어진다. 대부분의 표적식별에 관한 연구는 주파수 영역이나 시간-주파수 영역 방법을 사용한다. 고차원의 스펙트럼 분석은 가장 많이 사용되는 주파수 영역 분석 방법이다.

진동센서를 이용하여 사람발자국을 탐지하는 기존 연구를 Table 2에 정리하였다. 기존연구는 SPIE (international society for optics and photonics)에 최근에 발표된 10종류의 알고리즘을 대상으로 분석하였다.

George Succi는 첨도를 이용하여 사람 발자국을 탐지하는 알고리즘을 개발하였으며 이 방법은 많은 연구에서 비교대상으로 사용되었다[2]. Yuxin Tian은 신호의 통계치, 신호모양, 피크위치 등 총 30개의 특징을 추출하여 차량을 식별하는 SSWCC(Spectral Statistics and Wavelet Coefficients Characterization)라는 알고리즘을 개발하였다[10]. Kenneth M. Houston은 시간영역에서 변화량을 탐지하던 기존연구의 한계를 극복하기 위해 스펙트럼 분석을 통해 걸음걸이 주파수를 추출하여 사람발자국을 탐지하는 알고리즘을 개발하였다[3]. Alex Pakhomov는 진동신호처리 알고리즘 뿐만 아니라 진동센서와 신호처리 보드까지 폭 넓은 연구를 수행한 사람으로 포락선 정보를 이용하여 오경보율이 없는 경량 알고리즘을 개발하였다[4,7,9]. Lindamae Peck은 베이스캠프 보안에 적합한 알고리즘을 개발하였는데 이는 Kenneth M. Houston의 스펙트럼 분석 알고리즘을 보완한 것이다[11]. Huai-fei Xing은 웨이블릿 변환을 이용하여 배경잡음을 제거하고 웨이블릿 에너지로부터 특

Table 2. 기존의 사람발자국 탐지 알고리즘

제안자	제안 알고리즘	영역	탐지 대상	적용센서
George Succi('01)	Kurtosis	시간	사람	GS-20
Yuxin Tian('02)	SSWCC	주파수	차량	지오폰
K. M. Houston ('03)	Spectrum 분석	주파수	사람	GS-14-L9 GS-20DM
A. Pakhomov ('03～'08)	Envelop 분석	시간	사람 차량 말	GS-14-L3 GS-20DX GSS-EBS
Lindamae Peck ('04～'09)	CRREL Detection Algorithm	시간-주파수	사람	지오폰 (4.5Hz)
Huai-fei Xing('07)	Wavelet 분석	주파수	사람	-
A. Ekimov ('08～'09)	Cadence 분석	시간-주파수	사람 동물	PCB356B18 (가속도계) GS-32CT (지오폰)
Hyung O. Park ('09)	Gaussian Mixture Models (GMM)	시간	사람 말	지오폰
W. E. Audette ('09)	Adaptive Noise Cancellation (ANC)	시간-주파수	사람	지오폰 (4.5Hz)
Sean Schumer ('10)	Average Energy Autocorrelation	시간-주파수	사람	지오폰

징을 추출하여 사람을 식별하는 알고리즘을 개발하였다[12]. Alexander Ekimov는 수동센서와 능동센서의 고유특징을 조합하여 식별하는 알고리즘을 개발하여 사람과 동물을 구분하였다[13]. Hyung O. Park은 운율과 걸음걸이(gait)의 일시적인 변화에서 12개의 특징을 뽑아 사람과 말을 식별하는 알고리즘을 개발하였다[14]. William E. Audette는 사람 발자국 진동신호에 간섭을 주는 간섭원을 상쇄시켜 탐지거리를 향상시키는 ANC (Adaptive Noise Cancellation) 알고리즘을 개발하였다[5]. William E. Audette는 상용 UGS 시스템과 개발 알고리즘을 비교하였는데 상용 UGS가 거의 성능을 발휘하지 못하는 반면 ANC 알고리즘은 간섭원의 영향을 상당히 감내하였다. Sean Schumer는 표적탐지를 3단계로 나누고 프로세스에 무리가 가는 처리를 표적이 탐지영역을 벗어난 후에 처리하는 저전력 알고리즘을 개발하였다[15].

기존 연구에서 제안한 알고리즘은 주로 시간영역과 주파수영역에서의 신호특성을 분석하였으며, 사람, 차량, 동물을 탐지대상으로 하였다. 시간영역의 경우 대부분 제한된 자원을 고려한 알고리즘을 제안하였으며, 주파수영역에서는 자원에 제한을 주지 않고 탐지 정확도를 높이는 알고리즘을 제안하였다. 또한 기존 연구에서 사용한 센서는 대부분 지오폰이다.

본 연구에서는 기존 연구의 한계인 저전력과 정확도를 동시에 충족하는 하드웨어와 알고리즘을 개발하고자 한다.

3. 저전력, 고효율 침입자 탐지 기법

본 논문에서는 발을 이용하여 침투하는 침입자를 진동센서로 탐지하는 기법을 제안한다. 센서노드의 탐지영역을 기준으로 센서노드의 운용 상태를 Pre-Detection 단계, Detection 단계, Post-Detection 단계로 구분하여 각 단계에 적합한 센서와 프로세서를 선택할 수 있는 제어장치와 각 단계 수준에 맞는 알고리즘을 달리 적용하여 센서노드의 에너지 소모를 최소화하고 표적탐지의 오경보율을 최소화하는 방법이다. Pre-Detection 단계는 표적이 센서 탐지범위 내에 들어오기 전으로 표적을 탐지하기 이전 단계이며, Detection 단계는 표적이 센서 탐지범위에 들어와서 표적을 탐지하는 단계이다. Post-Detection 단계는 표적이 센서 탐지범위를 벗어나 표적 탐지가 없는 단계이다.

본 장에서는 제안하는 기법을 하드웨어와 신호처리 알고리즘으로 구분하여 기술한다.

가. 센서 및 처리기 선택을 위한 제어장치

센서와 처리기를 운용 상태에 따라 선택할 수 있는 제어장치 구조는 Fig. 1과 같다. 센서와 처리기 사이에 주제어 MCU에 의해 제어가 가능한 스위치와 분배기를 배치하여 운용 상태에 따라 적합한 센서와 처리기를 선택할 수 있다.

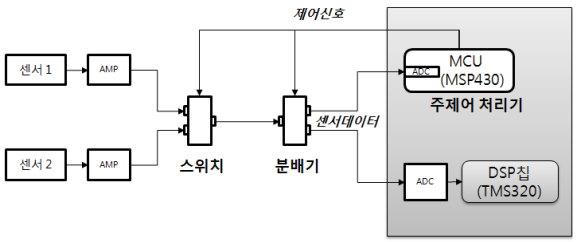


Fig. 1. 센서 및 처리기 제어장치 구조

Pre-Detection 단계에서는 전력소비가 적고 탐지거리가 먼 센서를 구동한다. 보통 진동센서나 PIR 센서가 여기에 속한다. 이때 처리기는 저전력의 MCU(MSP430)를 사용한다. Detection 단계에서는 표적식별이 가능한 센서를 구동한다. 보통 진동센서, 음향센서, UWB센서가 여기에 속한다. 처리기는 주파수 영역의 신호처리가 필요할 경우 DSP칩(TMS320)을 사용한다. Post-Detection 단계에서는 다시 Pre-Detection 단계에서 사용한 센서와 처리기로 전환한다.

Fig. 1은 여러 가지 센서를 부착하는 경우를 나타낸 것이며, 진동센서 하나만 부착하여 Pre-Detection 단계, Detection 단계, Post-Detection 단계에 맞는 신호처리 알고리즘을 달리하여 사용할 수 있다.

나. 운용 상태별 신호처리 알고리즘

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 센서노드의 운용 상태에 따라 수행되는 알고리즘은 감시경계, 표적탐지, 표적식별, 표적추적의 네 가지로 구분한다. Pre-Detection 단계에서는 감시경계 알고리즘이 수행되며, Detection 단계에서는 표적탐지, 표적식별, 표적추적 알고리즘이 수행된다. Post-Detection 단계는 Pre-Detection 단계와 동일한 감시경계 알고리즘이 수행된다. 네 가지의 알고리즘은 16bit 저전력 MCU인 MSP430과 신호처리 전용 DSP칩인 TMS320로 나눠서 수행된다. 감시경계, 표적

탐지, 표적추적 알고리즘은 MSP430에서 수행되고, 표적식별 알고리즘은 TMS320에서 수행된다.

각 단계별로 수행되는 진동센서 신호처리 세부 알고리즘은 Table 3과 같다. 감시경계는 배경잡음보다 큰 신호가 있는가를 모니터링하는 것으로 구현이 간단한 Adaptive Threshold 알고리즘을 적용한다.

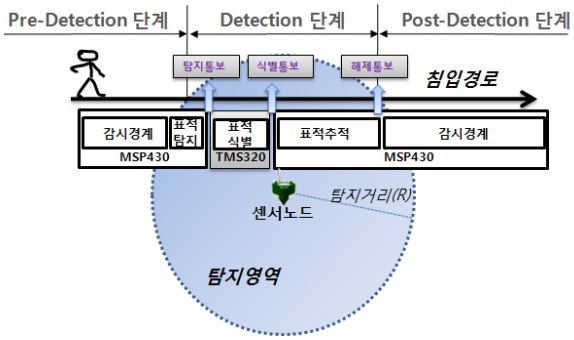


Fig. 2. 운용 상태별 신호처리 알고리즘

Table 3. 진동센서 신호처리 세부 알고리즘

구분	운용 상태	수행 프로세스	적용 알고리즘
감시 경계	Pre-Detection Post-Detection	MSP430	Adaptive Threshold
표적 탐지	Detection	MSP430	Envelope Analysis
표적 식별	Detection	TMS320 (DSP)	Spectrum Analysis
표적 추적	Detection	MSP430	Average Energy Autocorrelation

표적탐지는 감시경계에서 이벤트를 발생시키면 전환되어 수행되는 것으로 신호를 분석하여 탐지대상인지를 판단하는 것이다. 표적탐지에서는 MSP430과 같이 제한된 자원에서 오경보율이 낮아야 하는데 이를 위해 Envelope Analysis 알고리즘을 적용한다. 만약 이 단계에서 분석결과 탐지대상이 아니면 다시 감시경계로 전환한다.

표적식별은 표적종류를 정확히 식별하기 위한 것으로 정밀신호처리가 필요하므로 신호처리 전용인 DSP 칩을 사용한다. 정밀신호처리는 주파수 영역으로 신호를 바꿔 분석하는 Spectrum Analysis 알고리즘을 적용한다. 표적식별에서는 탐지대상이 사람과 차량일 때와 사람과 동물일 때의 표적을 구분할 수 있는 특징이 다르기 때문에 탐지대상에 따라 알고리즘이 변경될 수 있다.

표적 추적은 탐지영역에 있는 표적종류까지 식별된 상태에서 표적이 탐지영역 내에 있는가를 모니터링하는 것이다. 따라서 이전에 수집한 신호와 새로 입력되는 신호를 비교할 수 있는 알고리즘인 Average Energy Autocorrelation을 적용한다.

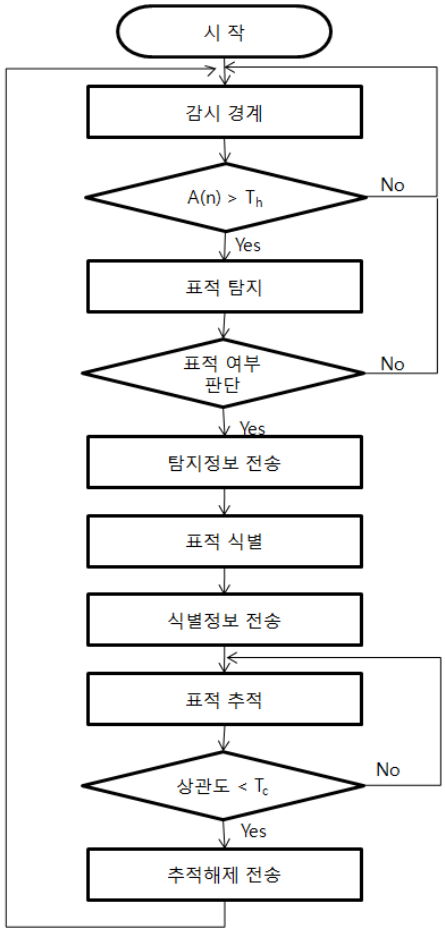


Fig. 3. 센서노드의 신호처리 알고리즘 순서도

Fig. 3은 센서노드에서 구동되는 신호처리 알고리즘의 동작 순서를 나타낸다. 센서노드가 동작하면 센서노드의 제어장치는 Pre-Detection 단계의 센서를 구동하고 이를 MCU로 전송하고, MCU에서는 입력되는 신호를 이용하여 감시경계 알고리즘을 수행한다. 입력되는

신호가 지정한 임계값(T_h)보다 크면 표적탐지 알고리즘으로 전환한다. 표적탐지 알고리즘을 통해 침입자가 침입한 것으로 판단되면 탐지정보를 C2(Command & Control)서버로 전송하고 표적식별 알고리즘으로 전환한다. 표적식별 알고리즘은 DSP 칩에서 구동되는 것으로 정밀 신호처리를 수행한다. 식별된 결과도 C2서버로 전송한다. 침입자가 식별된 이후는 에너지 소모를 줄이기 위해 침입자가 탐지영역 내에 있는가를 모니터링하는 표적추적 알고리즘으로 전환한다. 표적추적 알고리즘에서는 이전신호와 입력되는 신호간의 상관도를 계산하는데 상관도가 임계값(T_c)보다 작으면 침입자가 센서노드의 탐지범위를 벗어난 것으로 판단하고 표적 추적 해제 메시지를 C2서버에 전송하고 다시 감시경계 알고리즘으로 전환한다.

침입자가 센서노드의 탐지범위에 들어와서 탐지범위를 벗어날 때까지 센서노드는 C2서버에 데이터를 세 차례 전송한다. C2서버는 동일 센서노드로부터 수신되는 데이터를 연계시켜 관리함으로써 세 차례의 수신데이터로 표적을 관리할 수 있다. 이는 센서노드의 통신 데이터량을 최소화시킴으로써 통신에서 발생하는 에너지 소모를 줄이고자 하는 것이다.

4. 성능평가

제안하는 기법의 성능을 평가하기 위해서 MSP430에서 Adaptive Threshold 알고리즘을 수행한 경우, TMS320에서 Spectrum Analysis 알고리즘을 수행한 경우, 본 논문에서 제안한 방법을 수행한 경우에 대해 시뮬레이션을 통해 에너지 소모량과 오경보율/식별율을 비교 평가하였다. 에너지 소모량에 대한 시뮬레이션 조건은 Fig. 4와 같이 임의의 CPA(Closest Point of Approach) 지점에 대해 침입자가 센서탐지 밖에서부터 시작해서 CPA를 지나 센서 탐지범위를 벗어날 때까지 총 100m를 보행한다. CPA는 센서 탐지거리를 초과할 때까지 계속 증가시키면서 실험한다. CPA가 센서의 최대 탐지거리에 가까워질수록 침입자의 Detection 시간이 짧아지고, CPA가 0에 가까워지면 침입자의 Detection 시간이 최대에 가까워진다. 진동센서의 최대 탐지거리를 30m로 하고 진동센서의 샘플링 주기는 1KHz로 한다. 침입자는 1명이고, 걸음걸이는 정상보행을 가정한다. 침입자의 발자국 사이 시간 간격은 0.5s로 하고, 이동속도는 1m/s로 가정한다.

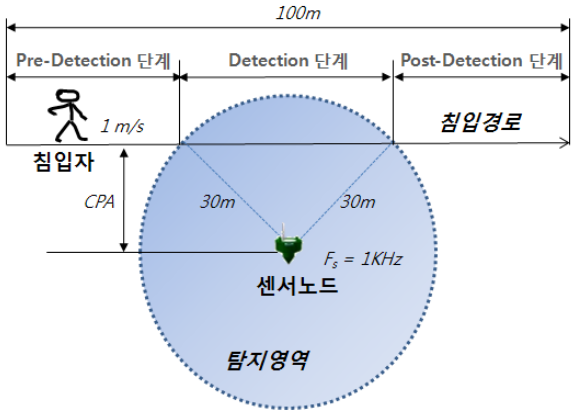


Fig. 4. 에너지 소모량에 대한 시뮬레이션 조건

Table 4에 CPA 거리에 따라 운용 상태별 이동거리를 계산하여 나타냈다. CPA 거리는 5m 단위로 증가시켰다.

Table 4. CPA 거리 기준 운용상태별 이동거리

거리(m) / CPA(m)	Pre-Detection 거리	Detection 거리	Post-Detection 거리
5	20	60	20
10	22	56	22
15	24	52	24
20	28	44	28
25	33	34	33
30	50	0	50
35	100	0	0

에너지 소모량 P는 식 (1)과 같이 진동센서 탐지시간, RF 송신 횟수, 프로세서 동작 시간만 계산한다. 나머지 에너지 소모 요소는 세 가지 비교대상이 모두 동일하다고 가정한다.

$$P = Sensor_{active} * T_{sp} + RF_{active} * T_{rfp} + Processor_{active} * T_{pp} \quad (1)$$

여기서 $Sensor_{active}$는 센서의 초당 소모전류이며, T_{sp}는 센서의 동작시간이다. RF_{active}는 RF칩의 초당 소모전류이고, T_{rfp}는 RF칩의 송신시간이다. $Processor_{active}$

는 프로세서의 초당 소모전류이며, T_{pp}는 프로세서의 동작시간이다.

진동센서가 연속적으로 동작한다고 가정하면 진동센서 탐지시간은 100s가 된다. RF 송신 횟수는 적용한 신호처리 알고리즘과 네트워크 프로토콜에 따라 결정된다. Adaptive Threshold 알고리즘의 경우 매 샘플마다 임계값과의 비교를 통해 탐지여부를 결정하므로 탐지주기는 1ms이다. Envelope Analysis와 Spectrum Analysis 알고리즘은 신호처리를 하는 윈도우 크기가 2.048s이고 슬라이딩 주기가 0.512s 이므로 탐지주기는 0.512s 이다. 세 가지 알고리즘을 고려해서 RF 송신주기는 0.512s로 하고 1회 송신에 소요되는 시간은 0.1s로 가정한다. 데이터 송신은 표적을 탐지한 경우에만 보내고, 송신출력은 10dBm으로 한다. 프로세서는 알고리즘이 수행되는 시간만 동작하는 것으로 가정한다.

Table 5는 국방과학연구소에서 연구개발하고 있는 '감시정찰 센서네트워크 개발' 과제에서 제작한 센서노드의 모듈별 에너지 소모량을 측정한 결과이다[16]. 에너지 소모량에 대한 시뮬레이션은 Table 5를 이용하여 수행한다.

Table 5. 센서노드 모듈별 에너지 소모량

구 분	소모전류	구 분	소모전류
RF		MCU	
수신	0.006mA	MSP430	0.008mA
송신(0dBm)	0.006mA	Idle	0.004mA
송신(1dBm)	0.006mA	DSP	
송신(2dBm)	0.006mA	TMS320	0.083mA
송신(3dBm)	0.007mA	Idle	0.008mA
송신(4dBm)	0.007mA		
송신(5dBm)	0.007mA	Sensor	
송신(6dBm)	0.008mA	PIR	0.001mA
송신(7dBm)	0.008mA	Geophone	0.001mA
송신(8dBm)	0.008mA	Acoustic	0.002mA
송신(9dBm)	0.009mA	Magnetic	0.003mA
송신(10dBm)	0.009mA	Idle	0.001mA

비교대상이 되는 세 가지 방법에 대한 에너지 소모 시뮬레이션의 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 본 논문에서 제안하는 방법의 에너지 소모량은 저전력 칩인 MSP430에서 Adaptive Algorithm을 수행한 경우와 거의 동일한 수준으로 평균 1mA 정도이다.

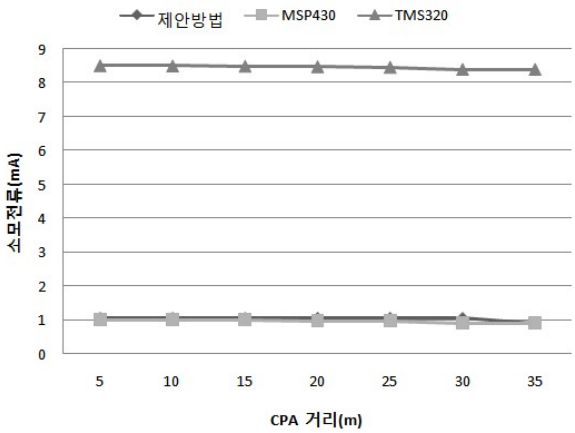
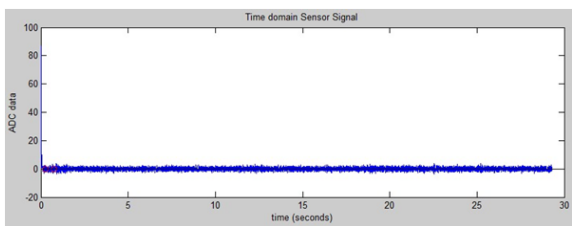
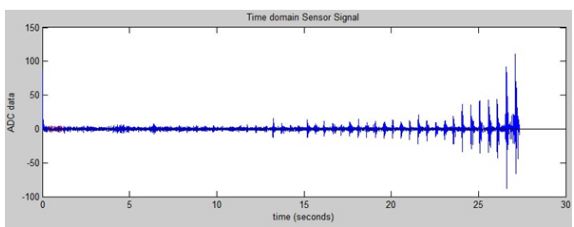


Fig. 5. 에너지 소모량 시뮬레이션 결과

오경보율과 식별율 계산은 양평지역에서 측정한 실험데이터와 기존연구에서 제시한 실험결과를 이용한다. Fig. 6은 양평지역에서 Geospace사의 GS-One 센서를 땅에 매설하여 측정한 환경잡음과 사람발자국 신호를 나타낸 것이다.



(a) 잡음신호



(b) 사람 발자국 진동 신호

Fig. 6. 양평지역에서 측정한 진동신호

양평지역에서 측정한 잡음 신호와 사람발자국 신호의 RMS(Root Mean Square) 값을 이용하여 Fig. 7과 같

은 히스토그램을 구하였다. 잡음신호의 경우 512개 샘플의 RMS값을 구하였고, 사람발자국 신호의 경우 256개 샘플의 RMS값을 구하였다.

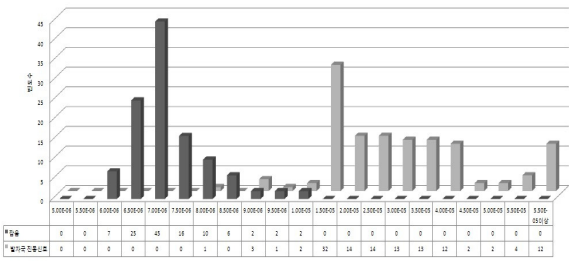


Fig. 7. 양평지역 실측데이터의 잡음과 신호의 히스토그램

Fig. 7의 히스토그램을 통해 Adaptive Threshold 알고리즘의 오경보율을 구한다. 탐지율을 100%라고 할 때 잡음신호와 발자국 신호의 겹치는 부분이 오경보율로 그 값은 19%이다. Adaptive Threshold 알고리즘은 임계값보다 큰 값이 들어오는 경우를 탐지하는 것으로 Adaptive Threshold 알고리즘은 사람발자국 여부를 식별하기는 적합하지 않다.

양평지역에서 측정한 잡음 신호와 거리별 발자국 진동신호의 RMS값과 SNR(Signal Noise Ratio)을 Table 6에 나타냈다. Spectrum Analysis 알고리즘은 25m 지점까지 SNR이 3dB이상으로 식별율은 100%이다. 하지만 30m 지점에서는 SNR이 1.78dB로 식별율이 30%이다. 5m 간격으로 측정한 데이터의 식별율 평균은 88.3%이다.

Table 6. 양평지역 실측데이터의 RMS 및 SNR

구분	잡음	15m	20m	25m	30m
RMS(uV)	7.02	22.3	16.1	11.1	8.6
SNR(dB)	0	10.1	7.18	3.9	1.78

제안하는 방법에서는 1차 탐지를 Adaptive Threshold 알고리즘, 2차 탐지를 Envelope Analysis 알고리즘, 식별은 Spectrum Analysis 알고리즘을 적용한다. 제안하는 방법은 1차 탐지에서는 모든 이상 징후를 탐지하도록 탐지율은 100%로 하고, 2차 탐지에서 1차 탐지된 신호 중에서 오경보율 0%의 Envelope Analysis 알고리즘을 이용하여 사람발자국 진동신호만을 걸러 식별하는 방법이다. 따라서 오경보율은 0%이고, 식별율은 탐지된 신호에 대해 100%이다.

세 가지 경우에 대한 오경보율과 식별율 결과를 Table 7에 나타냈다. 수치를 비교하면 제안방법이 다른 방법에 비해 성능이 월등함을 알 수 있다.

Table 7. 오경보율/식별율 시뮬레이션 결과

구 분	제안방법	MSP430 (AT)	TMS320 (SA)
오경보율	0%	19%	1.6%
식별율	100%	-	88.3%

5. 결 론

본 논문에서는 발을 이용하여 침투하는 침입자를 진동센서로 탐지하는 기법을 제안하였다. 제안방법은 센서노드의 탐지영역을 기준으로 센서노드의 운용 상태를 Pre-Detection 단계, Detection 단계, Post-Detection 단계로 구분하여 각 단계에 적합한 센서와 프로세서를 선택할 수 있는 제어장치와 각 단계별 수준에 맞는 알고리즘을 달리 적용하여 센서노드의 에너지 소모를 최소화하고 표적탐지의 오경보율을 최소화하는 것이다. 시뮬레이션을 통해 제안방법의 성능을 평가하였으며, 에너지 소모량과 오경보율/식별율에서 비교대상보다 성능이 좋음을 확인하였다.

향후 연구는 제안된 기법을 실제 하드웨어로 제작하고 알고리즘을 구현하여 성능을 평가하는 것이다.

후 기

본 연구는 민군겸용기술사업(Dual Use Technology Program) 지원을 받아 수행하였습니다.

References

[1] 김용현, 이노복, 정준, 정광수, “에너지 소비를 고려한 사람발자국 진동 탐지기 설계”, 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2011. 6.

[2] George Succi, Daniel Clapp, Robert Gampert, and

Gervasio Prado, “Footstep Detection and Tracking”, Proc. of SPIE, Vol. 4393, 2001.

[3] Kenneth M. Houston and Daniel P. McGaffigan, “Spectrum Analysis Techniques for Personnel Detection Using Seismic Sensors”, Proc. of SPIE, Vol. 5090, 2003.

[4] A. Pakhomov, A. Sicignano, M. Sandy, and T. Goldburt, “A Novel Method for Footstep Detection with an Extremely Low False Alarm Rate”, Proc. of SPIE, Vol. 5611, 2004.

[5] William E. Audette, David B. Kynor, Jed C. Wilbur, and John R. Gagne, “Improved Intruder Detection Using Seismic Sensors and Adaptive Noise Cancellation”, Human, Light Vehicle, and Tunnel Detection Workshop, 2009.

[6] Alex. Pakhomov, A. Sicignano, M. Sandy, and T. Goldburt, “Seismic Footstep Signal Characterization”, Proc. of SPIE, Vol. 5071, 2003.

[7] Alex Pakhomov and Tim Goldburt, “Seismic Systems for Unconventional Target Detection and Identification”, Proc. of SPIE, Vol. 6217, 2006.

[8] Lindamae Peck, “Overview of Seismic Noise and its Relevance to Personnel Detection”, U.S. Army Corps of Engineers, 2008.

[9] Alex Pakhomov, Al Sicignano, Matt Sandy, and Tim Goldburt, “Current Seismic Sensor Issues for Defense and Security Applications”, Proc. of SPIE, Vol. 5403, 2004.

[10] Yuxin Tian and Hairong Qi, “Target Detection and Classification Using Seismic Signal Processing in Unattended Ground Sensor Systems”, ICASSP, 2002.

[11] Lindamae Peck and James Lacombe, “Seismic-Based Personnel Detection”, Proc. of IEEE International Carnahan Conference on Security Technology, 2007.

[12] Hual-Fei Xing, Fang Li, and Yu-Liang Liu, “Wavelet Denoising and Feature Extraction of Seismic Signal for Footstep Detection”, Proc. of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 2007.

[13] James M. Sabatier and Alexander E. Ekimov, “Range Limitation for Seismic Footstep Detection”, Proc. of SPIE, Vol. 6963, 2008.

[14] Hyung O. Park, Alireza A. Dibazar, and Theodore W. Berger, “Cadence Analysis of Temporal Gait Patterns for Seismic Discrimination Between Human and Quadruped Footsteps”, Proc. of ICASSP, 2009.

[15] Sean Schumer, “Time-Domain Classification of Humans using Seismic Sensors”, Proc. of SPIE, Vol. 7693, 2010.

[16] 김수정, 김용현, 정광수, “감시정찰 센서네트워크를 위한 에너지 모델링 및 시뮬레이션”, 한국통신학회 동계종합학술발표회, 2011. 2.