

진동감지를 이용한 사용자 걸음걸이 인식

Estimating Human Walking Pace and Direction Using Vibration Signals

정은석, 김대은*
(Eunseok Jeong¹ and DaeEun Kim^{1,*})

¹School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University

Abstract: In service robots, a number of human movements are analyzed using a variety of sensors. Vibration signals from walking movements of a human provide useful information about the distance and the movement direction of the human. In this paper, we measure the intensity of vibrations and detect both human walking pace and direction. In our experiments, vibration signals detected by microphone sensors provide good estimation of the distance and direction of a human movement. This can be applied to HRI (Human-Robot Interaction) technology.

Keywords: pace recognition, vibration sensing, bio-inspired robot, HRI

I. 서론

서비스 로봇이 사람에게 서비스를 제공하기 위해서는 HRI (Human-Robot Interaction) 기술 중에 가장 먼저 진행되는 사람을 인식하고 판단하는 과정이 필수적이다. 특별히 사람의 여러 가지 생체신호들을 다양한 센서들을 이용하여 분석하고, 사람이 어떠한 상황에 있는지 어떠한 의도를 가지고 있는지에 대하여 올바르게 판단할 수 있어야 한다. 그동안 사람의 제스처나 표정 및 음성에 관하여 인식하는 과정이 계속해서 연구되어져 왔으나, 본 논문은 기존의 연구와는 다른 감각인 땅을 통해 전달되는 진동을 이용하여 사람의 상황과 의도를 판단하고 로봇이 그에 따른 적당한 반응을 보일 수 있도록 하는 것에 초점을 맞추었다.

기존에 사람의 걸음걸이에서 나오는 진동을 관찰하여 사람의 상황이나 의도를 인식하고 분석하기 위한 연구가 지속적으로 이루어져 왔다. 특별히 사람의 걸음에서 나오는 진동을 측정 및 주파수 분석을 통해 사람이 걷고 있는 땅이나 건물의 상태를 분석하거나, 사람의 특이한 걸음걸이를 인식하여 사람의 고유한 발걸음을 분석하도록 하는 연구가 진행되어 왔다. 사람의 걸음걸이의 스타일에 따라서 여러 가지 특징을 추출하여 사람을 인식할 수 있으며 고유한 사람의 걸음걸이에 대한 진동 신호를 고유의 특정한 스타일로 모델링을 할 수 있음을 보였다. 이러한 연구에서처럼 사람의 걸음에서 나오는 진동은 사람마다, 사람이 걷는 장소마다, 사람이 신고 있는 신발에 따라 다르며 그 각각의 진동을 분석함으로써 서비스 로봇이 사용자를 인식하고 분석

하여 그에 맞는 서비스를 제공할 수 있다[1].

또한 사람의 걸음걸이에서 나오는 진동의 분석을 통해 사람이 어디를 목적지로 향하여 걷고 있는지, 혹은 로봇과의 거리가 얼마나 떨어져 있으며, 방향은 어떻게 되는지 추정할 수 있다. 각각의 진동을 측정하는 다수의 센서를 배치하고 사람이 걸어갈 때의 그 진동의 크기를 측정하고 비교하는 방식으로 분석을 진행한다. 보통은 진동의 감쇄가 거리에 따라 일정하게 일어난다는 가정 하에 진동의 크기를 통하여 각각의 센서들로부터 얼마만큼의 거리를 진동이 전해져 왔는지를 계산하고, 이를 삼각측량 방법을 이용하여 진동이 어느 방향에서 왔는지를 추정하여 사람의 위치가 어떻게 변화하였는지 알 수 있다. 하지만 진동의 세기를 측정하는데 있어서 센서들이 동일한 진동에 대해 동일한 입력을 받아 전기신호로 변환할 수 있도록 계인을 동일하게 정해주는 작업이 필요한데, 이러한 부분에서 많은 어려움이 있어 진동의 세기를 통하여 사람을 추적하기가 어려운 실정이다[2]. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 일반적으로 진동을 감지하고 진원지의 방향을 추정하는 전갈의 신경망 구조를 이용하여[3], 좀 더 정확하고 간단한 사람의 걸음걸이 인식 연구를 진행하였다.

이러한 진동을 감지하는 센서는 여러 가지가 있을 수 있으나, 보통 로봇들에 장착되어 사용되기에는 작고 소형이어야 하며 그러면서도 진동에 대해서 정확히 측정이 가능해야 하기 때문에 주로 피에조 센서와 마이크 센서를 사용하게 된다[4,5]. 피에조 센서는 특성상 감도가 높은 센서 중 하나이기 때문에 작은 진동에도 큰 신호로 감지해내게 되지만[4], 사람의 걸음걸이의 주성분에 해당하는 저주파 부분을 측정하기에 정확한 측정이 힘들기 때문에 마이크 센서를 이용하여야 한다. 이러한 형태의 진동 감지 센서는 다양한 로봇에 적용될 수 있으며, 로봇이 정지되어 있는 상황이라면 다리나 바퀴에 부착이 가능하여 많은 용도로 사용

* Corresponding Author

Manuscript received February 15, 2014 / revised March 15, 2014 / accepted March 30, 2014

정은석, 김대은: 연세대학교 전기전자공학과
(eunseok.jeong@yonsei.ac.kr/daeeun@yonsei.ac.kr)

※ 본 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A2A4A01005677).

이 가능하다. 또한 바닥의 특성에 따라서 그에 맞는 센서들을 이용하여 더 효과적인 측정이 가능할 것이다. 특별히 본 논문에서는 이러한 센서 특성으로 인해 마이크 센서를 이용하여 사람의 걸음걸이 진동을 측정할 수 있도록 하였다.

II. 실험 회로 구성 및 걸음걸이 추정

1. 회로구성

전체회로는 6채널을 가지는 진동 감지 회로로 구성되었다. 먼저 본 실험에서 진동의 측정을 위해 사용되는 콘덴서 마이크는 BSE사의 CMP-762라는 제품을 사용하였다. 감도가 -62dB이며, 신호 대 노이즈비가 60dB 이상의 특성을 가진 콘덴서 마이크를 사용하여서, 노이즈에 강하며, 원하는 진동신호를 잘 감지할 수 있도록 하였다. 진동 신호의 증폭을 위하여 AD620칩을 이용, 앰프를 구성하였으며 회로에 가변저항을 이용하여 AD620의 이득을 동일하게 조절할 수 있도록 하였고, 출력단에 RC회로를 구성하여 저역필터를 설계하였다. 센서마다 앰프 회로를 내장하여 고정시키고, +5V, -5V, GND, 신호 라인을 연결하는 방식을 통하여 콘덴서 마이크와 앰프회로 사이를 최소화하여, 선으로 들어오는 노이즈에 대하여 강한 특성을 가지게 하였다. 측정에는 NI (National Instruments)의 DAQ(USB-6210)보드를 사용하였고, 10kHz의 샘플링 주기로 데이터를 받아들이도록 하였다. 최종적인 진동 감지 회로는 그림 1과 같이 구성되었다.

또한 걸음걸이의 진동이 주로 100~300Hz의 낮은 주파수로 이루어지는 것을 감안하여[1], 의료용으로 사용되는 청진기의 청진판 부분을 이용하였다. 청진판의 멤브레인은 보통 10Hz~1kHz영역의 진동을 증폭시켜 주는 역할을 담당하기 때문에, 걸음걸이의 진동을 측정에 도움을 줄 뿐만 아니라, 콘덴서 마이크와 청진판 부분에 소리가 새어 들어가지 않도록 밀봉을 해두어, 진동센서가 소리에 영향을 받기 보다는 진동만을 감지할 수 있도록 구성하였다.

2. 실험 방법

실험에 앞서서 위에서 구성된 진동 감지 회로를 배치하고 정확한 실험을 할 수 있도록 실험 방법을 결정하였다.

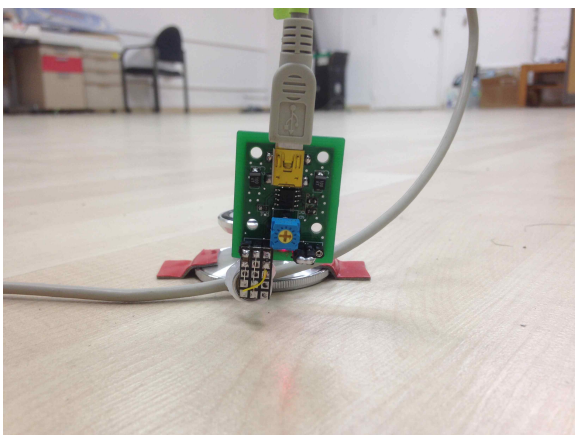


그림 1. 구성된 진동 감지 회로의 모습. USB라인을 통하여 +5V, -5V, GND의 전원을 공급하고 증폭된 진동신호를 DAQ로 전달하도록 설계되었다.

Fig. 1. The vibration sensor circuit.

진동 감지회로는 안에서 사람이 충분히 돌아다닐 수 있는 지름 5m의 원에 60도 간격으로 배치가 되었으며, 각각의 진동감지 센서의 각도를 0도(2번센서), 60도(1번센서), -60도(3번센서), -120도(4번센서), 180도(5번센서), 120도(6번센서)로 대칭적으로 설정하여 진동을 분석 할 수 있도록 하였다. 바닥은 일반적인 mdf 합판으로 구성되어 있으며, 콘덴서 마이크가 장착된 청진판을 바닥에 부착하여 실험환경을 구성하였다. 전체적인 실험환경과 진동 감지 회로의 배치는 그림 2, 3에서 보여지는 바와 같이 진행하였다. 실험은 원의 중심점으로부터 1.5m 반지름의 원형태의 경로를 걸어가는 것으로 진행하였으며, 사람의 걸음걸이인 약 20~40cm의 보폭을 가지고 걷는 것으로 실험을 진행하였다. 걸음걸이에 대한 정확한 발의 위치를 인식하며 걷지 않고, 자유롭게 걸어가는 형태로 실험을 진행하였으나, 이동경로와 시작점과 끝점에 대한 정보를 기록하여 그 결과를 비교하는 방법으로 검증하였다.

3. 걸음걸이 추정

진동이 전달되면 각 6개의 센서에서 진동을 감지하게 되고, 각각의 센서가 진동의 세기를 측정하여 진동의 각도를 추정할 수 있다. 먼저 백그라운드 노이즈에서 사람의 걸음

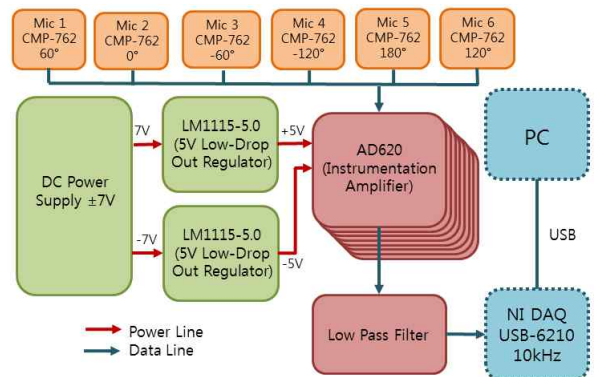


그림 2. 진동센서의 블록다이어그램.

Fig. 2. The block diagram of vibration circuit.



그림 3. 배치된 진동 감지 회로와 실험환경의 모습. 5m 지름의 원에 60도 간격으로 센서들을 배치하여 그 안에서 일어나는 걸음걸이 진동을 측정하고 그 위치를 추정하는 실험을 진행하였다.

Fig. 3. The location of the vibration sensor circuit and experiment environment.

걸이의 진동을 측정하기 위해서 이전까지 측정된 진동의 평균값을 구하고 일정한 상수를 곱하여 진동 입력의 기준값을 삼아 이 이상 진동이 들어왔을 때 진동이 들어온 것이라 간주하였다. 또한 진동을 감지하게 되었다면 사람의 걸음걸이는 1~4Hz이기 때문에[1], 그 뒤 250ms내에서 가장 큰 진동의 피크값을 찾게 된다. 이러한 방식으로 걸음걸이에서 나오는 진동의 세기를 측정하며, 순간순간 들어오는 비진동의 노이즈가 사람의 걸음걸이 진동으로 오인될 수 있어, 측정되는 진동 신호에 로우패스필터를 달아, 걸음걸이의 진동에 해당하는 낮은 주파수대역에서의 사람의 걸음걸이 진동을 더 확실하게 측정할 수 있게 해주었다. 이렇게 각 센서에서 구해진 진동의 피크값을 이용하여 다음 식과 같이 진원지의 각도 ϕ_s 를 진동의 크기에 의하여 생기는 각 센서에 대한 진동 점수와 각 센서의 각도를 복소함수로 구성하여 계산하였다[3].

$$ze^{i\phi} = \sum_{k=1}^m z_k e^{i\phi_k} = x + yi \quad (1)$$

$$x = \sum_{k=1}^m z_k \cos(\phi_k) \quad y = \sum_{k=1}^m z_k \sin(\phi_k) \quad (2)$$

$$\phi = \arctan(y/x) \quad z = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

위 식은 사막전갈의 진원지 방향추정의 모델로 알려져 있는, 뉴럴 네트워크 종류 중 하나인 Population coding으로, ϕ 는 진원지의 방향, 센서에 따른 진동 점수를 $z_k(m=6)$ 라 두고, 센서가 설치되어 있는 방향의 각도를 ϕ_k 라고 두어 각각의 센서의 점수와 각도의 관한 식을 (1)식과 같이 표현할 수 있다[3]. (1)식에서 $ze^{i\phi}$ 은 오일러의 공식을 통하여 코사인과 사인 값에 허수가 곱해진 복소수 형태로 표현될 수 있으며, 이후 각 센서의 점수와 각도의 값에 따라서 (2)식과 같이 표현할 수 있으며, 이를 통하여 x와 y의 값을 구할 수 있고, (3)식과 같이 진동의 근원지의 방향 각도 ϕ 를 x와 y의 값을 통하여 추정할 수 있다.

따라서 본 실험에서 쓰인 알고리즘과 같은 경우 진동이 크게 측정된 순서대로 각 다리에 점수를 주되, 진동이 제일 작게 도착한 센서가 측정된 진동크기값과 다른 센서들의 진동크기값의 차이를 구하여 각 센서들의 점수를 결정하게 된다. 진동이 제일 작게 도착한 센서의 경우 점수는 0으로 주어지게 된다. 예를 들어 1번센서에 진동의 크기가 1로 제일 작게 감지되고 2, 6, 3, 5, 4번의 센서 순으로 진동의 세기가 3, 5, 7, 9, 11로 점점 커지는 형태로 측정이 되었을 때, 각각의 센서들의 점수는 1번센서는 0점, 2번센서는 2점, 6번센서는 4점, 3번센서는 6점, 5번센서는 8점 4번센서는 10점을 획득하여, 각 센서들이 가지고 있는 각도들과 함께 계산을 하게 되고, 최종적으로 사람의 걸음걸이 진동의 방향을 측정할 수 있게 된다.

또한 진원지의 방향 추정만이 아닌 진원지의 거리 추정을 하기 위하여 센서들에 측정되는 진동의 세기의 비율을 통하여 진원지의 거리를 추정해 볼 수 있을 것이라 가정하였고, 진동이 제일 크게 측정된 센서를 중심으로 왼쪽과

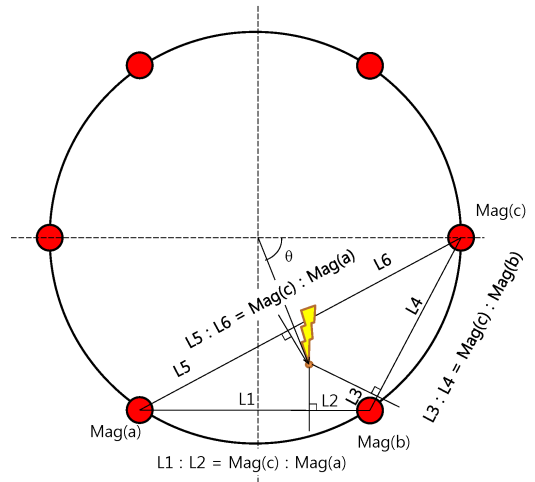


그림 4. 거리추정의 알고리즘을 표현한 다이어그램.

Fig. 4. The diagram of distance estimation algorithm.

오른쪽의 센서들에서 측정된 진동의 세기의 비율에 따라 세 개의 센서로 구성되는 삼각형의 각 변을 세기에 반비례하도록 각각 나누어 표현하였다. 그리고 그 나뉜 지점에 삼각형에 각 변에 수직인 직선을 그려 세 직선이 서로 교차되는 세 교차점의 중점을 구하여 전체 센서들의 중심과의 거리를 구해 걸음걸이 진동의 거리 추정을 진행하였다. 이론적으로는 세점이 생기지 않고 서로 한점에서 모여야 하지만, 센서들마다의 차이나, 에러가 있을 수 있기 때문에 각각의 교점을 구하여 그 중점을 구하는 방식으로 진행하였다.

4. 진동센서의 캘리브레이션 및 로봇 실험

이처럼 진동의 크기측정에 대한 전략을 구성하여 사람의 걸음걸이를 추정해내기 때문에 센서들이 진동을 동일한 이득을 가지고 받아들여야 한다. 그래서 모든 실험 이전에 각

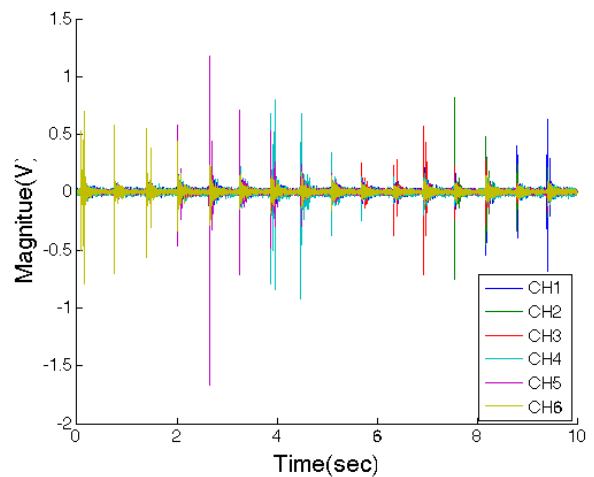


그림 5. 사람의 걸음에서 측정된 진동의 파형. 6개의 진동 센서와 사람의 거리에 따라서 진동 세기가 다르게 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 5. The vibration signal of the human footstep. The vibration intensity varies depending on the distance between the sensors and an agent.

각의 센서와 센서 사이 정중앙에 진동을 주고 그에 대한 진동의 크기의 평균을 계산하고 그 값으로 각각의 센서에서 나오는 진동의 크기를 나눠줌으로서 각각의 측정된 진동의 크기가 동일하게 나타나도록 캘리브레이션 작업을 진행하였다.

III. 결과

그림 4와 같은 모습으로 배치된 진동 감지 회로들을 통하여 우리는 사람의 걸음걸이 진동을 측정하고 분석을 진행하였다. 6개의 진동 감지 센서에서 측정된 진동들은 그림 5과 같이 진동 파형으로 나타낼 수 있었다. 총 16번의 걸음을 걸었고, 왼쪽 상단에 배치된 6번채널 센서에서부터 시계 반대방향으로 걸어 1번채널 센서까지 돌아가며 실험을 진행하였다. 그 결과 이에 따라 걸음걸이 진동의 크기에 대한 데이터들을 뽑아낼 수 있었고, 각각의 센서와 사람이 걸음을 걷는 위치에 따라서 진동의 크기가 확연하게 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다.

이렇게 측정된 진동의 크기를 이용하여 위의 알고리즘을 적용시켜 각각의 진동의 파형들이 어떤 곳에서의 걸음을 나타내는지 그림 6과 같이 표현할 수 있었다. 10초의 시간 동안 왼쪽 상단의 6번 센서에서 반시계 방향으로 원을 따라 진행하여 오른쪽 상단의 1번 센서까지 이동하는 걸음걸이를 비교적 정확히 추정하는 것을 확인할 수 있었다. 사람의 걸음걸이에서 나온 진동들이 사람이 어떠한 방향으로 진행하고 있는지 알려주었으며, 이동한 거리에 대해서도 대략적으로 측정이 가능하였다. 각각의 번호들은 진동이 일어났던 순서 즉, 사람의 걸음걸이의 순서를 말해주는데, 이를 통해 사람의 이동하는 방향에 대해서 센서로 측정하고 그 사람의 상황이나 의도를 분석하기에 올바른 판단을 내리는데 도움을 줄 수 있을 정도의 정확도를 보여주었다. 2번의 경우 사람의 걸음걸이 페이스에 맞지 않는 것을 보여주는

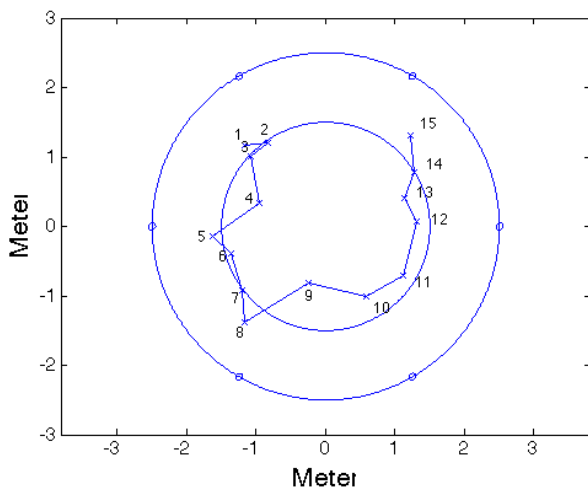


그림 6. 걸음걸이 추정의 결과. 숫자는 걸음걸이의 추정결과 순서를 의미한다. 왼쪽 상단으로부터 반시계방향으로 걸었을 때의 결과이다.

Fig. 6. The result of the estimated human footstep. The numbers mean the estimated sequence of the human's walking pace.

데, 이와 같은 경우 전체 16개의 걸음걸이 중 1개의 판단 에러로 볼 수 있다. 실제적으로 사용될 때엔 주변의 걸음걸이에 따라서 연속적인지 않은 패턴으로 결정되면 에러로 판단하고 무시하는 방식으로 해결할 수 있을 것이다. 이러한 걸음걸이 추정방법을 이용하여 이후에 서비스 로봇에 적용되어 사용자의 위치를 추정하며, 사용자의 진행방향에 따른 사용자의 의도를 파악하여 좀 더 나은 HRI 시스템을 구성할 수 있을 것이라 생각된다.

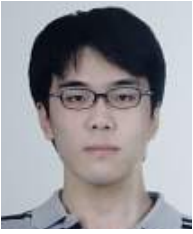
IV. 결론

본 논문에서 우리는 진동 감지 센서를 통하여 사람의 걸음걸이를 측정하였으며, 각 센서마다 측정되는 진동의 크기를 이용하여 비교적 정확하게 사람의 걸음걸이의 방향에 대해서 추정할 수 있었다. 특별히 추정과정 중에 쓰이는 알고리즘은 사막전갈의 신경망 모델에서 착안한 방식으로서 여러 센서들을 응용하여 진원지의 방향을 추정할 때 쓰이는 것으로 사람의 걸음걸이 추정에도 응용될 수 있음을 실험을 통해 알 수 있었다.

이러한 사람의 걸음걸이를 추정하며 사람을 따라갈 수 있는 능력은 HRI 기술을 응용하는 서비스 로봇의 중요한 역할 중에 하나가 되어, 이후에 이 기술이 서비스 로봇에 적용되어 사용자가 어디로 가고자 하는지, 사용자의 걷는 속도는 어떠한지에 따라 사용자의 상황을 분석하는데 도움을 줄 것이라 생각된다. 그래서 일정 속도로 걸어가고 있는 사용자와 같은 속도로 움직이며 안내할 때라던지, 경비 및 감시의 목적으로 사용할 때에도 유용하게 사용될 수 있을 것이라 생각된다.

REFERENCES

- [1] A. Ekimov and J. M. Sabatier, "Vibration and sound signatures of human footsteps in buildings," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 120, no. 2, pp. 762-768. 2006.
- [2] M. S. Richman, D. S. Deadrick, R. J. Nation, and S. Whitney, "Personnel tracking using seismic sensors," *In Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls, International Society for Optics and Photonic*, pp. 14-21, Sep. 2001.
- [3] P. H. Brownell and J. L. van Hemmen, "Vibration sensitivity and a computational theory for prey-localizing behavior in sand scorpions," *American Zoologist*, vol. 41, no. 5, pp. 1229-1240. 2001.
- [4] A. Wallander, R. A. Russell, and K. Hyypa, "A robot scorpion using ground vibrations for navigation," *In Australian Conference on Robotics and Automation*, pp. 75-79, Aug. 2001.
- [5] E. Jeong and D. Kim, "Detecting the direction of vibration inspired by prey detection behavior of sand scorpions," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 10, pp. 947-954, Oct. 2012.

**정 은 석**

2011년 홍익대학교 전자전기공학부 학사 졸업. 2012년~현재 연세대학교 전기전자공학과 석사과정. 관심분야는 바이오로보틱스, 진동 및 음향 응용 시스템.

**김 대 은**

1989년 서울대학교 컴퓨터공학과 학사 졸업. 1993년 The University of Michigan, Ann Arbor, USA 석사. 2002년 The University of Edinburgh, UK, 박사. 2002년 Max Planck Institute for Human Cognitive & Brain Sciences, Cognitive Robotics, Research Scientist. 2007년~현재 연세대학교 전기전자공학부 부교수. 관심분야는 바이오로보틱스, 인공지능, 인공생명, 신경과학, 인지과학.