

건설산업에서의 스마트 웨어러블 기술동향 (Smart Wearable Technologies in Construction)



서준오 Hong Kong Polytechnic University, Department of Building and Real Estate, 조교수
joonoh.seo@polyu.edu.hk

KICEM

I. 서론

최근들어 4차 산업혁명이 건설산업에서 주요 키워드이다. 인공지능이나 빅데이터, 사물인터넷 (Internet of Things) 및 모바일 기술 등 4차 산업혁명을 이끄는 핵심기술들의 활용은 기존 건설산업 생산 및 관리 프로세스를 혁신하기 위한 방안으로 주목받고 있다. 이 중, 스마트 웨어러블 기술 (Smart Wearable Technologies)은 건설작업자의 생산성 향상뿐만 아니라, 더욱 안전한 작업 환경 구현을 위하여 큰 가능성을 보여주고 있다. 이미 많은 부분 자동화와 로봇화가 이루어지고 있는 타 산업과는 달리 건설 현장은 여전히 다양한 작업자들에 의해 공사 및 작업의 대부분이 이루어지는 노동집약적 산업이다. 이에 따라 건설산업의 노동생산성은 산업평균 대비 저조한 수준이며, 성장률 또한 정체되어 있는 실정이다. 또한 건설현장의 위험한 작업 환경으로 인한 산업재해의 위험도 매우 높으며, 실제로 대부분의 선진국 산업재해 통계에 따르면 건설산업은 가장 위험한 산업 중 하나이다. 이러한 문제점들을 해결하고자 학계 및 산업계에서는 스마트 웨어러블 기술의 활용을 위한 다양한 시도들을 하고 있다. 이에 본 고에서는 스마트 웨어러블 기술 동향 및 이를 활용한 건설 작업자 생산성 향상 및 안전보건 관리와 관련된 최신 연구에 대하여 간략히 소개하고자 한다.

II. 스마트 웨어러블 기술동향

MIT 미디어랩 (MIT Media Lab)에 따르면, 웨어러블 기기를 "신체에 부착하여 컴퓨팅 행위를 할 수 있는 모든 전자기기를 지칭하며, 일부 컴퓨팅 기능을 수행할 수 있는 어플리케이션까지 포함"하는 것으로 정의하고 있으며, 일반적으로 사용자가 이

동 및 활동 중에도 사용가능하도록 신체나 의복에 착용가능하도록 개발된 차세대 전자기기를 일컫는다 (연구성과실용화진흥원 2015). 웨어러블 기술 및 관련 기기들은 주로 헬스케어/의료 및 피트니스 분야에서 많이 사용되어 왔으며, 최근 들어 산업계에서도 적극적으로 활용이 되고 있다. 스마트 웨어러블 기술들이 주목받게 된 배경에는 가볍고 사용이 용이한 기기 및 기술들의 등장과 더불어 시장규모 확대에 따른 기기 가격 하락과 기계학습 (Machine Learning) 등 수집된 데이터의 실시간 분석 기술의 발달이 있다. 최근 조사에 따르면 웨어러블 기기 시장은 전 세계 출하량 기준으로 2014년 6,700만대에서 2019년 4억 7,000만대 (예상치)로 약 7배 가량 성장했다.¹⁾ 이러한 시장확대와 더불어 그 가격 또한 저렴해지고 있는데, 가장 대표적인 스마트 웨어러블 기기인 스마트 워치 (예를 들어 Apple Watch, Galaxy Gear)는 20-30만원대에 가격이 형성되어 있으며, 일부 스타트업 기업 제품의 경우 10만원 내외로 저렴한 편이다. 또한 대부분의 웨어러블 기기들은 다양한 센서들을 탑재함으로써 실시간으로 데이터를 수집하고, 기계학습 (Machine Learning)과 같은 컴퓨팅 기술의 도움으로 데이터 실시간 처리 및 분석이 가능해짐에 따라 활용분야가 더욱 늘어날 전망이다.

기존 연구동향들을 살펴보면 건설산업 분야에서의 스마트 웨어러블 기술들은 작업자에 대한 실시간 데이터 수집 및 분석이 주요 목적이다. 신체 각 부위에 착용이 가능한 웨어러블 센서들은 건설 작업중에 작업자의 행동, 생리 및 인지반응과 관련된 데이터를 실시간으로 수집하고 분석함으로써 건설 작업에서의 문제점을 규명하고, 필요시에는 관리자나 작업자에게 실시간

1) <http://www.memsjournal.com/2014/10/wearable-sensor-market-to-expand-sevenfold-in-five-years.html>

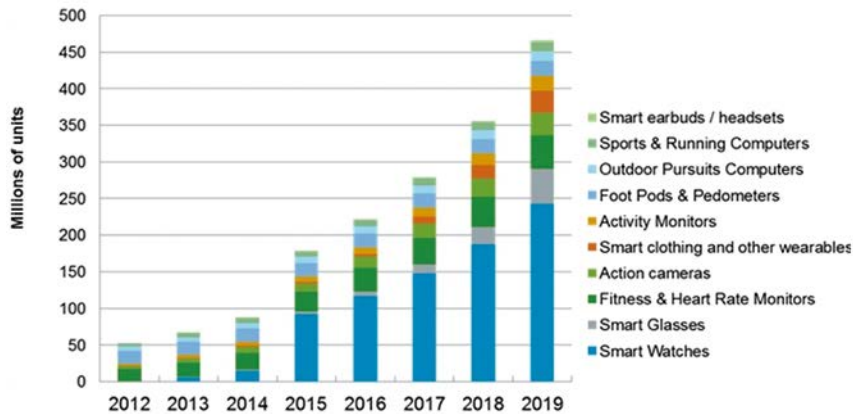


그림 1. 웨어러블 기기 시장 규모 (출처: MEMS & Sensors for Wearables Report - 2014)

피드백을 줄 수 있게 해준다. 궁극적으로는 건설작업자들이 언제 (when), 어디에서 (where), 어떤 작업 (what)을 수행하는지 이해하고, 작업과정에서 노출되는 안전보건 관련 리스크를 실시간으로 규명 및 제거함으로써 보다 안전하고 생산성 높은 작업 환경을 구현하는 것을 목표로 한다. 아직까지는 현장에 직접 적용된 사례는 많지 않지만, 특히 학계에서는 다양한 활용방안에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있으며 최근들어 건설산업계에서도 많은 관심을 보이고 있다. 표 1과 같이 활용목적에 따라 다양한 센서들이 존재하며, 센서의 경량화/소형화, 배터리 수명향상, 스마트 기기 등 무선 통신 인프라 구축 등에 힘입어 다양한 웨어러블 기기에 탑재됨으로써 그 활용가치가 늘어나고 있다.

Ⅲ. 최신 연구 동향

기존에는 건설작업자와 관련된 데이터 수집을 위해서 관찰 및 작업자 면담/설문 등 정성적인 데이터 수집에 국한이 되어왔다. 하지만, 건설현장의 대형화, 공사 진행에 따른 작업자의 잦

은 교체, 인력의 한계 등으로 인하여 현실적으로 작업자에 대한 실시간 데이터 수집은 거의 불가능하다. 하지만 웨어러블 센서의 개발 및 활용으로 인하여 다수의 건설작업자들을 대상으로 실시간 데이터 수집이 가능함에 따라 기존에는 이해하거나 규명하지 못했던 현장에서의 문제점을 찾아내고 시의적절한 조치를 취하는 것이 가능해지고 있다. 건설현장에서 활용가능한 웨어러블 센서들은 그 목적에 따라 1) 작업자 행동 분석을 위한 센서 (IMU 센서, 위치추적 센서, 압력센서), 2) 작업 수행과정에서의 작업자 생리반응 분석을 위한 센서 (심장박동 센서, 피부온도 센서, 전류피부저항반응 센서 등) 및 3) 작업자의 인지 기능분석을 위한 센서 (시선추적 센서, 뇌파센서)로 구분할 수 있다.

1. 작업자 행동 분석을 위한 웨어러블 센서

작업자 행동 분석을 위한 웨어러블 센서는 작업자의 동작 및 위치 변화와 관련된 정보를 실시간으로 수집하는 것이 주요 목적이며, 대표적인 센서로는 IMU 센서, 위치추적 센서, 압력센

표 1. 활용목적에 따른 스마트 웨어러블 센서 분류

목적	관련 웨어러블 기술	웨어러블 기기
행동 분석 (Behavioral Analysis)	IMU (Inertial Measurement Unit) 센서	스마트 헬멧, 스마트워치 / 밴드, 안전화, 전신 슈트 등
	위치추적 (예, BLE Beacon) 센서	스마트 헬멧, 스마트 목걸이 등
	압력 (Pressure) 센서	스마트 슈즈
생리 분석 (Physiological Analysis)	심장박동 (Photo-electric pulse PlethysmoGraph, PPG) 센서	스마트워치 / 밴드
	피부온도 (Skin Temperature) 센서	
	전류피부저항반응 (Galvanic Skin Resistance, GSR) 센서	
인지 분석 (Cognitive Analysis)	호흡수 (Piezo-resistive) 센서	스마트 의복
	시선추적 (Eye Tracking) 센서	스마트 글래스
	뇌파 (Electroencephalogram, EEG) 센서	스마트 헬멧

서, 모션센서 등이 있다 (표 2 참조). IMU (Inertial Measurement Unit) 센서는 3축 가속도계와 3축 자이로 센서(때로는 지자기 센서를 포함하기도 함)를 조합한 센서로서 부착된 신체부위의 움직임을 측정한다. IMU 센서는 소형화가 가능함에 따라 안전모, 스마트워치/밴드, 벨트, 신발, 스마트폰 등 다양한 부위에 부착이 가능하다. 건설분야 연구에서 가장 활발히 적용되는 사례는 IMU 센서를 이용한 작업자 추락 위험 분석이다 (Jebelli et al, 2016; Yang et al, 2016). 작업과정에서 건설작업자가 넘어짐, 미끄러짐 또는 추락 위험에 노출되면 몸의 균형이 흐트러지게 지게 되는데, 이는 가속도 및 자이로 데이터상에서의 특이한 패턴으로 나타나고, 이를 실시간 수집 분석함으로써 추락 위험을 찾아내는 원리이다. 또한 작업 종류에 따른 특정 가속도 데이터 패턴을 바탕으로 기계학습 알고리즘을 활용하며 자동으로 수행하고 있는 작업 종류를 인식하는 연구도 수행되었다 (Joshua & Varghese 2010; Joshua & Varghese 2014; Ryu et al, 2016). 그 외에도 IMU 센서는 작업자 자세 분석을 통한 근골격계 질환 리스크 분석 (Yang et al, 2017)이나 모션 캡처를 통한 건설작업의 운동학적 분석 (Seo et al, 2017) 등에도 활용 가능하다.

위치추적 센서는 현장에서의 작업자 위치를 실시간으로 추적하는 것뿐만 아니라, 장비나 자재 위치 추적 등 다양한 목적으로 활용된다 (Taneja et al, 2010). 작업자의 위치 정보는 주로 작업자의 생산성 분석 (Teizer et al, 2013)이나 작업자와 장비 또는 위험구역의 위치 정보를 바탕으로 하는 경고 시스템 개발 (Teizer et al, 2010; Wu et al, 2010) 등을 위해 사용된다. 작업자의 실시간 위치추적을 위해서 그동안 GPS, Wireless LAN (WLAN), Radio Frequency Identification (RFID) tags, Infrared and Ultrawide Band (UWB) 등 다양한 기술들이 활용이 적용되어 왔는데, 최근 들어서는 최소화된 장비 요구사항 및

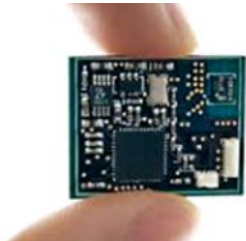


저렴한 비용 등의 장점으로 블루투스 비컨 (Bluetooth Beacon) 센서를 많이 사용하고 있다 (Park et al, 2016). 또한 소형화로 인해 안전모, 목걸이 또는 손목 등에도 부착이 가능한 장점이 있다.

마지막으로 스마트 슈즈나 깔창 등으로 불리우는 압력센서가 있다. 신발 또는 깔창에 내장된 다중 압력센서는 보행자의 보폭, 양발 균형, 압력지지 분포 등 다양한 데이터를 수집하여 보행 이상 유무를 분석하기 위하여 개발이 되었다. 헬스 케어 분야에서는 활발히 활용되어 오고 있으며, 건설 분야에서도 최근 들어 압력센서를 활용한 연구가 소개되었다 (Antwi-Afari et al, 2018). 건설산업에서 추락 위험은 떨어짐 (falls from height)과 넘어짐 (falls on the same level)로 구분할 수 있는데, 실제 사고율은 넘어짐이 월등히 높은 편이다. 이 연구에서는 넘어짐을 유발하는 다양한 행위 (미끄러짐, 걸림 및 헛디딤 등)들에 따른 특정한 신발 압력 패턴을 분석함으로써 작업자의 넘어짐 행위를 실시간으로 찾아냄으로써 넘어짐의 원인이 되는 환경적인 요소들 (미끄러운 바닥, 보행통로 상의 장애물 등)을 빠른 시간 안에 제거하는 것을 목표로 한다.

2. 작업자 생리 분석을 위한 웨어러블 센서

인체생리반응에 대한 연구는 헬스케어나 인간공학, 스포츠공학 등의 분야에서 오래전부터 연구되어 오던 주제이다. 특히 산업분야에는 작업자의 인체생리반응을 수집 및 분석함으로써 작업 및 작업 환경이 작업자의 건강 또는 심리상태에 미치는 영향을 이해하고, 보다 쾌적하고 안전한 작업 환경을 구축하는데 그 목적이 있다. 기존에는 인체생리반응 수집을 위해서는 실험실에서 작업 환경을 구현하고 소수의 실험자를 대상으로 데이터를 수집하였는데, 이러한 방식은 작업자의 다양한 특성 및 작

표 2 작업자 행동 분석을 위한 웨어러블 센서 종류 및 수집 데이터 유형

구분	IMU 센서	블루투스 비컨	압력센서
센서 종류			
수집 데이터	3축 가속도, 3축 각속도	센서간 거리, 심변추량을 통한 센서 위치	발바닥의 동적 압력분포

업 환경 등을 반영하기에 어려움이 따랐다. 하지만 인체생리반응을 측정할 수 있는 다양한 웨어러블 센서 및 기기의 등장으로 현장에서 다수의 작업자를 대상으로 한 실시간 생체신호 수집이 가능해졌으며, 이를 활용하여 현장 여건을 반영한 잠재적 리스크 규명이 가능하게 되었다. 주요 생체신호센서로는 적외선 검출 방식으로 피부 내 혈관의 혈류량과 심박수를 측정하여 외부충격, 쇼크 등을 검출하여 응급상황을 판별하는 PPG(Photo-electric pulse PlethysmoGraph) 센서, 호흡수를 측정함으로써 작업 강도등을 분석하는 Piezo-resistive 센서, 신체의 온도변화를 측정하여 급격한 체온저하나 체온상승을 검출하는 피부온도(Skin Temperature)센서, 피부의 전기 전도도를 측정하여 신체적, 정신적인 자극, 스트레스에 의한 전기적인 임피던스 변화를 측정하여 심신의 상태를 검출하는 GSR(Galvanic Skin Resistance)센서 등이 있다. 최근에는 이러한 인체생리반응 측정을 주 목적으로 상기 센서들을 내장하고 있는 스마트밴드나 스마트 의복 등이 출시되어 있다 (그림 1 참조).

건설 분야에서는 이와 관련된 연구가 아직은 초기단계에 있으며, 많은 연구들이 생체신호센서들의 건설현장에서의 활용가능성을 검증하는 연구가 주를 이룬다. Gatti et al. (2014)는 실험실에서 수집된 데이터를 바탕으로 웨어러블 기기를 활용한 심박수 및 호흡수 측정의 유효성을 증명함으로써 현장에서의 작업자 인체생리반응 모니터링의 필요성을 제시하였다. Hwang & Lee (2017)은 건설현장에서 수집한 작업자의 심박수 데이터를 분석하여 작업강도, 개인적 특성 (나이 등), 환경적 요인 등에 따른 심박수의 유의미한 변화를 검증하였으며, 이를 바탕으로 심박수 기반 작업강도 분석 지표의 활용가능성을 제안하였다. Guo et al. (2017)은 웨어러블 센서에서 수집된 심박수,

피부온도, 피부 전도도 등의 생체신호 데이터와 설문문을 통해 수집된 작업자가 느끼는 실제 감정 상태 (피로도 등) 간의 강한 상관관계를 규명함으로써 건설작업자 안전보건관리에 있어서 웨어러블 센서의 유효성을 검증하였다. 이러한 연구들은 궁극적으로는 잠재적으로 작업자의 건강에 악영향을 미치는 작업 종류 및 환경을 규명하거나, 과도한 작업으로 인해 건강상에 이상이 있는 작업자를 조기에 발견하는 함으로써 작업자의 생산성을 향상시키고 동시에 안전보건관련 리스크를 줄이는데 그 목적이 있다.

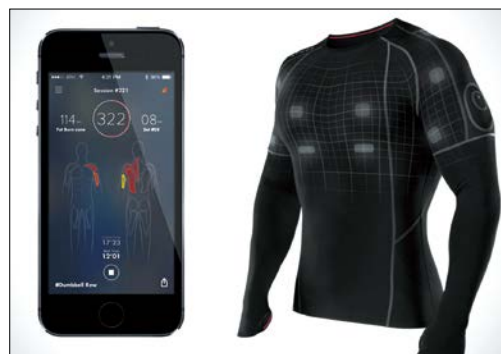
3. 작업자 인지 분석을 위한 웨어러블 센서

Heinrich의 사고발생 연쇄성 이론 (Domino Theory)에 따르면, 전체 사고의 88% 가량이 인간의 불안전 행동으로 발생하고, 그 배경에는 주의력 부족, 법령 및 지시에 대한 이해 부족 등 인간적 결함을 들고 있다. 다시 말해, 사고의 근본원인이 되는 인간적 결함을 정확히 파악하여 관리하지 않으면 재해를 근절할 수 없는 것이다. 불안정한 행동을 유발하는 인간적 결함들은 종종 작업자 일방의 잘못이라고 여겨지기도 하지만, 최근에는 이 또한 안전관리 영역으로 들어와 대책을 세움으로써 예방해 나가야 하는 것으로 인식되고 있다 (한국산업안전공단 2014). 하지만 작업자의 주의력 결핍이나 인지수준의 하락 등은 표면적으로는 관찰 불가능한 문제점이기 때문에 그동안은 교육훈련 등을 통한 안전관련 주의력 제고 등 수동적인 대책에 머물러왔다.

이러한 문제점들을 극복하고자 인간의 인지프로세스에 대한 이해를 바탕으로 웨어러블 기술들을 이용한 위험인지 방안들이 최근 들어 많이 소개되고 있다. 대표적으로 활용되는 기술로서



스마트 밴드
(E4 wristband, <https://www.empatica.com>)



스마트 의복
(Athos Core, <https://www.liveathos.com>)

그림 2. 스마트 밴드 및 의복 예시

시선추적 (Eye Tracking) 기술과 뇌파 (Electroencephalogram, EEG) 센서가 있다 (그림 2 참조). 시선추적 기술은 스마트 글래스 등에 부착된 카메라를 이용하여 안구의 움직임을 실시간으로 추적, 분석함으로써 사람의 어디를 바라보는지는 측정하는 것이 목적이다. 실제로 눈의 움직임은 사람의 인지프로세스를 이해하는데 큰 도움이 된다. 사람의 시선 변화는 복잡한 인지프로세스의 결과물로서, 사람이 어디에 관심을 두고 있는지, 어디에서 정보는 얻어내는지, 시선을 끄는 요소는 무엇인지 등의 지각(Perception) 능력과 밀접한 관련이 있다. 일명 EEG로 불리는 뇌파는 뉴런의 전기적인 활동을 머리 표면에 부착한 전극에 의해 비침습적으로 측정된 전기신호로서, 뇌의 활동에 대한 정보를 제공해준다. 인간의 인지프로세스는 복잡한 뇌의 활동을 수반하게 되는데, 뇌의 활동 유형에 따라 델타파, 세타파, 알파파, 베타파, 감마파 등 특정 주파수 영역의 뇌파들이 관찰되고 이를 분석함으로써 사람의 주의력 상태, 감정 및 스트레스 수준 등을 이해하는데 활용될 수 있다. 최근 웨어러블 기기의 발달로 EEG 센서를 부착한 스마트 헬멧이 개발되어 있으며, 일부 제품의 경우 안전모 안에 장착함으로써 실시간으로 뇌파를 측정하는 것이 가능하다.

건설분야에서는 주로 이러한 기술들을 활용하여 작업자의 인간적 결함 또는 결함을 야기할 수 있는 개개인의 정신상태 (Mental Status)를 측정 및 규명하고자 하는 연구들이 주로 수행되어 왔다. 시선추적 기술은 주로 현장에서의 건설작업자의 안전과 관련된 주의력 수준을 측정하거나 (Bhoir et al. 2015; Hasanzadeh et al. 2016), 주의력에 미치는 변수 (작업자의 경험, 교육 수준 등)들을 이해하고자 활용되어 왔다 (Hasanzadeh et al. 2017). 뇌파를 이용한 연구들은 작업자의 주의력 상태

(Wang et al. 2017), 정신적 피로도 (Chen et al. 2015), 감정상태 (Hwang et al. 2018), 스트레스 수준 (Jebelli et al. 2018) 등 작업자의 안전상황인지에 있어서 부정적인 영향을 미칠 수 있는 요소들을 측정 및 평가하는 연구가 주를 이루고 있다. 건설분야에서는 아직은 초기 단계에 있지만, 인지과학 분야에서는 새로운 분석기법 등의 발달로 더욱 상세한 인지과정에 대한 이해가 가능해지고 있기 때문에, ‘눈의 움직임이나 뇌파의 패턴으로 마음을 읽는’ 이와 같은 연구는 건설안전연구에 있어서 새로운 방법론을 제시해 줄 것으로 기대된다.

IV. 결론

본 고에서 소개한 바와 같이 스마트 웨어러블 기술은 기존에는 측정하거나 이해하지 못했던 건설현장에서의 문제점을 규명하고 해결책을 찾아내는데 있어 큰 가능성을 보여준다. 하지만 아직은 실험기반 연구 단계에 머무르고 있으며, 실무 적용을 위해서는 몇가지 한계점들의 극복이 필요하다. 먼저 대부분의 연구들이 소수의 실험자를 대상으로 한 실험 기반의 연구임에 따라 웨어러블 기술의 활용가능성을 보여준다는 점을 고무적인 일이지만, 다양한 작업자와 작업 환경에 일반화시킬 수 있을지는 여전히 의문이다. 더욱 중요한 문제점은 웨어러블 기기에서 수집하는 정보들이 많은 개인정보를 포함하기 때문에 프라이버시 침해의 위험성을 내포하고 있다. 또한 웨어러블 기기의 배터리 수명 또한 현장에서 활용가능할 정도로 충분한지 검토가 필요하며, 기기 부착시 작업에 불편함을 끼칠 가능성 또한 고려되어야 한다.

하지만 현재의 기술적인 진보 수준과 연구 동향을 고려해 볼



시선추적이 가능한 스마트 글래스
(Tobii Pro Glasses, <https://www.tobiipro.com/>)



스마트 헬멧
(Emotiv, <https://www.emotiv.com/>)

그림 3. 스마트 글래스 및 헬멧 예시

때, 이와 같은 한계점들은 머지 않은 미래에 해결될 것으로 예상된다. 스마트 웨어러블 기술은 무한한 잠재력으로 인하여 현재 급격히 성장하고 있는 분야이며, 건설 산업에서의 활용성 또한 매우 크다. 특히, 이러한 기술의 활용으로 전통적인 작업자 생산성 및 안전보건관리의 문제점들을 극복함으로써, 보다 안전하고, 능률적이며, 작업자 친화적인 건설 현장을 구현하는 것이 가능하다.

참고문헌

연구성과실용화진흥원 (2015) "웨어러블 디바이스 기술 및 시장 동향" S&T Market Report

한국산업안전공단 (2004) 불안정한 행동 재해의 예방 <www.kosha.or.kr/content/promotion/301850_12_attach_1.pdf>

Antwi-Afari, M. F., Li, H., Seo, J., Lee, S., Edwards, D. J., & Wong, A. Y. L. Wearable Insole Pressure Sensors for Automated Detection and Classification of Slip-Trip-Loss of Balance Events in Construction Workers. In Construction Research Congress 2018 (pp. 73-83).

Bhoir, S. A., Hasanzadeh, S., Esmaeili, B., Dodd, M. D., & Fardhosseini, M. S. (2015). Measuring construction workers' attention using eye-tracking technology. In Proc., ICSC15: The Canadian Society for Civil Engineering 5th Int./11th Construction Specialty Conf, Univ. of British Columbia, Vancouver, Canada.

Chen, J., Ren, B., Song, X., & Luo, X. (2015, January). Revealing the "Invisible Gorilla" in Construction: Assessing Mental Workload through Time-frequency Analysis. In ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (Vol. 32, p. 1). Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property.

Gatti, U. C., Schneider, S., & Migliaccio, G. C. (2014). Physiological condition monitoring of construction workers. *Automation in Construction*, 44, 227-233.

Guo, H., Yu, Y., Xiang, T., Li, H., & Zhang, D. (2017). The availability of wearable-device-based physical data for the measurement of construction workers' psychological status on site: From the perspective of safety management. *Automation in Construction*, 82, 207-217.

Hasanzadeh, S., Esmaeili, B., & Dodd, M. D. (2016). Measuring construction workers' real-time situation awareness using mobile eye-tracking. In Construction Research Congress 2016 (pp. 2894-2904).

Hasanzadeh, S., Esmaeili, B., & Dodd, M. D. (2017). Measuring the impacts of safety knowledge on construction workers' attentional allocation and hazard detection using remote eye-tracking technology. *Journal of Management in Engineering*, 33(5), 04017024.

Hwang, S., & Lee, S. (2017). Wristband-type wearable health devices to measure construction workers' physical demands. *Automation in Construction*, 83, 330-340.

Hwang, S., Jebelli, H., Choi, B., Choi, M., & Lee, S. (2018). Measuring Workers' Emotional State during Construction Tasks Using Wearable EEG. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(7), 04018050.

Jebelli, H., Ahn, C. R., and Stentz, T. L. (2016) Comprehensive Fall-Risk Assessment of Construction Workers Using Inertial Measurement Units: Validation of the Gait-Stability Metric to Assess the Fall Risk of Iron Workers. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 30, No. 3, pp. 04015034. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000511](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000511).

Jebelli, H., Hwang, S., & Lee, S. (2018). EEG-based workers' stress recognition at construction sites. *Automation in Construction*, 93, 315-324.

Joshua, L., & Varghese, K. (2010). Accelerometer-based activity recognition in construction. *Journal of computing in civil engineering*, 25(5), 370-379.

Joshua, L., & Varghese, K. (2014). Automated recognition of construction labour activity using accelerometers in field situations. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 63(7), 841-862.

Ryu, J., Seo, J., Liu, M., Lee, S., & Haas, C. T. (2015) Action Recognition Using a Wristband-Type Activity Tracker: Case Study of Masonry Work. In Construction Research Congress 2016 (pp. 790-799).

Seo, J., Alwasel, A., Lee, S., Abdel-Rahman, E. M., & Haas, C. (2017). A comparative study of in-field motion capture approaches for body kinematics measurement in construction. *Robotica*, 1-19.

Taneja, S., Akinci, B., Garrett, J. H., Soibelman, L., Ergen, E., Pradhan, A., ... & Shahandashti, S. M. (2010). Sensing and field data capture for construction and facility operations. *Journal of construction engineering and management*, 137(10), 870-881.

Teizer, J., Allread, B. S., Fullerton, C. E., & Hinze, J. (2010). Autonomous pro-active real-time construction worker and equipment operator proximity safety alert system. *Automation in construction*, 19(5), 630-640.

Teizer, J., Cheng, T., & Fang, Y. (2013). Location tracking and data visualization technology to advance construction ironworkers' education and training in safety and productivity. *Automation in Construction*, 35, 53-68.

Wang, D., Chen, J., Zhao, D., Dai, F., Zheng, C., & Wu, X. (2017). Monitoring workers' attention and vigilance in construction activities through a wireless and wearable electroencephalography system. *Automation in Construction*, 82, 122-137.

Wu, W., Yang, H., Chew, D. A., Yang, S. H., Gibb, A. G., & Li, Q. (2010). Towards an autonomous real-time tracking system of near-miss accidents on construction sites. *Automation in Construction*, 19(2), 134-141.

Yan, X., Li, H., Li, A. R., & Zhang, H. (2017). Wearable IMU-based real-time motion warning system for construction workers' musculoskeletal disorders prevention. *Automation in Construction*, 74, 2-11.

Yang, K., Ahn, C. R., Vuran, M. C., and Kim, H. (2017) Collective Sensing of Workers' Gait Patterns to Identify Fall Hazards in Construction. *Automation in Construction*, Vol. 82, pp. 166-178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.04.010>.