

인체동작을 계측하다 : 섬유기반 웨어러블 로봇 실증을 위한 인체동작분석



이용구

- 2000. 서울대학교 기계항공공학부 학사
- 2002. 서울대학교 기계공학과 석사
- 2007. 서울대학교 기계공학과 박사
- 2007-2008. University of Calgary HPL 박사후연구원
- 2009-2010. 경희대학교 기계공학과연구교수
- 2010-2012. 삼성전자 의료기기사업팀책임연구원
- 2012-현재. 한국기계연구원 책임연구원

1. 들어가며

최근 소프트 웨어러블 로봇 산업은 기존의 딱딱한 외골격 중심의 로봇에서 벗어나, 유연하고 가벼우며 의복처럼 착용 가능한 섬유 기반 착용형 시스템으로의 전환기를 맞이하고 있다. 이러한 변화는 섬유소재 공학, 인공근육, 센서 기술, 로봇공학의 융합을 통해 가속화되고 있으며, 실생활에 적용 가능한 기술로서 산업적·사회적 관심을 받고 있다.

특히, 섬유기반 인공근육 기술은 근골격계 보조, 근력 강화, 피로 감소 등 기능성을 동시에 확보할 수 있어, 의료 보조기기뿐만 아니라 재활·돌봄 산업에 이르기까지 광범위한 응용 가능성을 지닌다. 이를 실현하기 위해서는 다양한 동작 환경에서의 기능성 검증, 사용자 안전성 확보, 반복 착용 및 작동에 대한 내구성 평가가 필수적이다.



Figure 1. 동작분석 장치가 설치된 길이 37 m의 보행로(좌), Vicon 카메라와 로잉머신(우).

본 고에서는 한국기계연구원 대구융합기술연구센터 인체동작분석 연구실이 보유한 실증 실험 인프라와 이를 통해 개발·평가되고 있는 섬유기반 웨어러블 로봇 기술의 실제 적용 예를 중심으로 소개한다. 간병근로자, 고령자, 하지 절단 장애인 등 다양한 대상군을 고려한 보조기기의 정량적 실증 실험과 체측 기술, 그리고 융합형 분석 환경이 본 연구실의 강점이라 할 수 있다.

2. 섬유기반 인공근육을 위한 장비 기반 및 기술 개요

2.1. 장비구성 및 분석 환경 개요

한국기계연구원 대우융합기술연구센터 인체동작분석 연구실은 정밀 보행 분석부터 근력 평가, 생리신호 계측까지 다양한 실험이 가능한 통합 인체동작 계측 인프라를 갖추고 있다. 핵심 실험 공간은 길이 36 m, 폭 8 m의 직선형 트랙 구조로 설계되어 있으며, 보행, 달리기, 방향 전환, 점프, 착지 등 다양한 실험 동작을 수행할 수 있는 충분한 개방성과 작업 여유 공간을 제공하고 있다.

지면에는 지면반력이 설치가 가능한 모듈형 슬롯이 마련되어 있어, 실험 조건에 따라 다양한 장비 배치 및 조정이 용이하다. 실험실 전역에는 전원 및 유선무선 통신망이 구축되어 있어 Vicon, 마커기반 동작분석 장치, 근전도 측정 장치, 센서기반 동작분석 장치 등 측정 장비 간의 동기화와 통합 데이터 수집이 실시간으로 이루어지고 있어 정밀한 실험 설계와 정확한 데이터 획득을 가능하게 하며, 다기능 웨어러블 로봇의 실증 실험에 최적화된 기반을 제공한다.

이 공간에는 보행 중심의 수평 동작 외에도 고난도 수직 동작 분석이 가능한 시설이 함께 구성되어 있다. 특히, 연구실에 설치된 경사 조절형 인공암벽인 클라이밍 벽은 전신 근지구력, 사지 협응력, 균형 유지 전략 분석 등 복합적인 동작 실험을 가능하게 하며, 웨어러블 보조기 착용 상태에서의 자세 안정성과 신체 반응 변화를 관찰하는 데 유용하다. 또한, 지면반력기가 탑재된 이동형 계단과 경사 조절이 가능한 이동형 보행로도 함께 구비되어 있어, 다양한 지면 조건과 환경 변화를 고려한 실험 설계가 가능하다. 이들 장치는 모듈형 구조로 되어 있어 실험 목적에 따라 위치를 조정하거나 다른 장비와 연동하여 사용할 수 있으며, 실제 사용 환경에 가까운 조건에서 보조기기의 기능성과 안정성을 평가할 수 있다.

2.2. Vicon 기반 3D 동작 분석 시스템

연구실은 Vicon사의 T10S 모델 카메라 12대로 구성된 3차원 마커 기반 모션 캡처 시스템을 운영하고 있다. T10S 카메라는 소형·경량 구조로 최대 100 fps의 촬영 속도와 정밀한 적외선 반사 마커 추적 기능을 제공하며, 실험 공간 내 피험자의 관절 위치, 보행 속도, 관절각, 보폭 등을 실시간으로 측정할 수 있다. 해당 시스템은 주로

Plug-in Gait, CGM2 등 상용화된 생체역학 모델을 기반으로 하며, 맞춤형 모델링을 통해 인공근육 착용 전후의 보조 효과 비교, 균형성 변화, 관절 패턴 대칭성 등을 분석하는 데 사용가능하다.

또한, Vicon 시스템은 다른 장비(EMG, 지면반력기 등)와의 동기화가 가능해, 하나의 시퀀스 내에서 관절 움직임, 근전도 반응, 보행 반력 데이터를 동시에 분석할 수 있는 멀티모달 평가 플랫폼으로서의 기능을 수행할 수 있다.

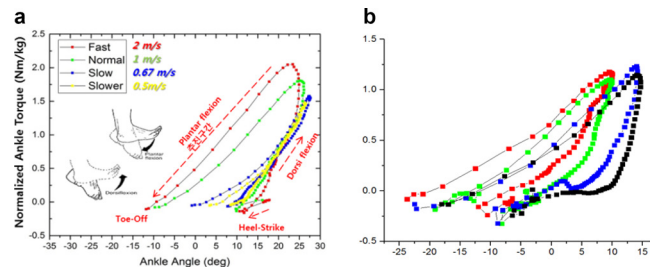


Figure 2. Vicon을 사용하여 분석한 평지 발목 운동의 보행모델 : 절단 장애인용 로봇의족의 개발을 위하여 활용됨.

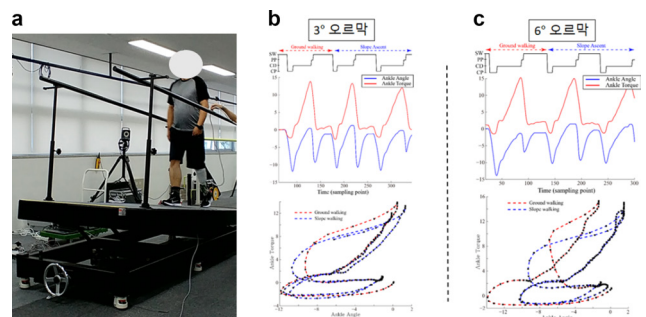


Figure 3. 경사로 발목 운동의 보행모델 : 절단 장애인용 로봇의족의 평가를 위해 활용됨.

2.3. 지면반력기 및 경사로 분석 환경

연구실 내 지면반력기 시스템은 실제 보행, 착지, 방향 전환 등의 다양한 동작에서 신체와 지면 간의 상호작용을 정밀하게 계측할 수 있는 기반을 제공한다. 바닥에는 Bertec사의 고정형 지면반력기 4060-07-2000 모델이 2대 설치되어 있으며, 각 장치는 6축(force/moment) 계측이 가능하고 최대 샘플링 속도는 10,000 Hz에 이른다. 넓은 측정부(400 mm×600 mm)는 빠른 속도나 넓은 보폭 실험에도 적합하며, 정확한 COP(center of pressure) 분석이 가능하다.

계단 보행 분석을 위해 설치된 지면반력기는 AMTI Optima 400600-2000 모델로, 3단 구성의 모듈형 계단 구조에 통합되어 있으며, 계단 오르내림 시 수직 및 전후 방향의 하중 분포를 고정밀로 측정가능하다. 검사 보행 실험을 위한 장비는 AMTI BP400600

2K 모델로 구성되어 있으며, 0도에서 30도까지 각도 조절이 가능한 경사로 내에 통합되어 있다. 경사로 보행 중 균형 유지 전략, 하지 관절 부하 재분포 등을 분석하는 데 사용된다. 이를 통해 로봇 착용 전후의 충격 완화 효과 및 자세 안정성을 분석한다.

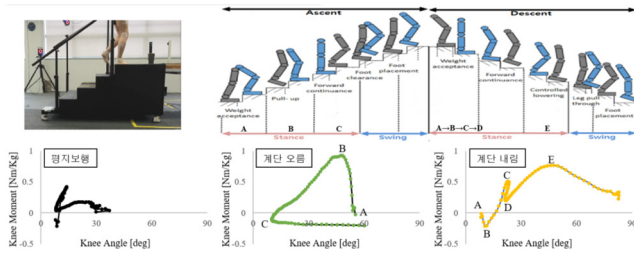


Figure 4. 계단 보행 시 무릎의 운동역학적(kinetic) 동작 분석 : 계단에 지면반력기가 탑재되지 않으면 측정이 불가능함.

함께 설치된 경사보행로는 0°부터 30°까지 전동 조절이 가능하며, 실제 병실, 경사 복도, 휠체어 경사판 등 다양한 상황을 모사하여 인공근육 웨어러블 보조기 착용 후 경사보행 중 하지 관절의 보정 정도, 균형 유지 전략 변화, 근 피로도 누적 양상을 정밀하게 분석할 수 있다.

2.4. 무선 근전도 시스템 및 IMU 기반 실험 장비

Noraxon사의 Telemyo DTS 무선 근전도(EMG) 시스템은 8 채널 독립 모듈형 센서로 구성되며, 각 센서는 고속 1500 Hz 이상 샘플링이 가능하고, 동작 중에도 안정적인 신호 품질을 유지할 수 있도록 설계되었다. 피부 접촉 저항 최소화를 위한 표면전극 설계와 무선 동기화 기능이 탑재되어 있으며, 관절 운동과의 실시간 연동 분석에 최적화되어 있다. 해당 시스템은 근육별 RMS(root mean square) 값, 활성 시간, 피로 누적지표 등을 실시간으로 확인할 수 있으며, 특히, 섬유기반 인공근육 보조기 착용 시 근육 부하 감소 효과를 정량적으로 분석하는 데 유용하다. SMA(Shape Memory Alloy) 기반 인공근육의 보조 효과는 해당 근육의 평균 활성도(RMS) 저감률, 동시활성도(co-contraction) 변화 등으로 분석된다.

연구실은 IMU(Inertial Measurement Unit) 기반 전신 동작 계측을 위해 Xsens MVN Biomech(Link) 시스템을 사용하고 있다. 이 시스템은 17개의 무선 IMU 센서로 구성되며, 각 센서는 3축 가속도계, 자이로스코프, 자기센서를 포함하여 전신의 자세와 관절 운동을 실시간으로 3차원으로 추적할 수 있다. MVN Link 모델은 유선보다 데이터 안정성이 높으며, 외부 환경에서도 마커 없이 실시간 동작 분석이 가능하다. 동작 데이터는 MVN Analyze 또는 Unity, MATLAB 기반 후처리 툴과 연동되며, 마커

기반 시스템과 동기화도 가능하다.

본 시스템은 간병인이 실제 병실에서 수행하는 ‘환자 돌리기’, ‘침대에서 들어 올리기’ 등 다양한 비정형 동작에서 웨어러블 로봇 착용 전후의 동작 변화와 보조 효과를 평가하는 데 사용된다. 또한, 로봇 착용 시 동작 자유도 제한 여부, 회전 궤적의 비대칭성, 협응성 변화 등을 정량적으로 분석하는 데 적합하다.



Figure 5. 상지동작 분석을 위해 적외선 마커와 무선 근전도를 동시에 측정하는 모습.

2.5. 기능성 분석 장비 : BTE Primus RS

연구실은 미국 BTE Technologies사의 다기능 근기능 분석 및 재활 훈련 장비인 Primus RS 시스템을 보유하고 있다. 이 장비는 등척성(isometric), 등장성(isotonic), 등속성(isokinetic) 모드에서의 저항 부하 설정이 가능하며, 상지 및 하지 주요 관절의 근력, 속도, 파워, 지구력, 운동 범위 등을 정량적으로 계측할 수 있다.

Primus RS는 교체 가능한 어태치먼트를 통해 다양한 자세(앉은 자세, 서 있는 자세, 누운 자세)에서 실험이 가능하며, 움직임

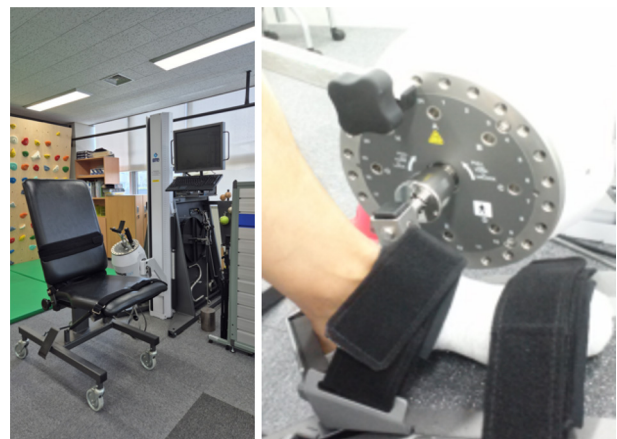


Figure 6. BTE Primus RS 장치(좌)와 인체 발목의 근력, 속도, 지구력 등을 측정하는 모습(우).

의 방향과 각도도 자유롭게 설정할 수 있다. 특히, 반복 작업 중 피로 누적 속도나 보조기 착용 전·후의 운동 효율 차이를 수치화하는 데 유용하며, 동작 시 발생하는 토크-속도 곡선, 파워 곡선 분석도 지원한다.

간병인의 경우, 반복적인 허리 신전 및 굴곡, 환자 이동 보조, 들기/밀기 등의 동작에서 보조기 착용 전후의 토크 생성량과 근 피로 누적 지표를 명확히 비교할 수 있어, 실증 연구의 핵심 장비로 활용된다.

2.6. 기타 장비

섬유기반 웨어러블 로봇의 실증 실험은 다양한 자세, 속도, 반복 조건에서의 움직임 특성과 피로 반응을 정밀하게 관찰할 수 있어야 하며, 이를 위해 본 연구실은 다음과 같은 보조 분석 장비를 함께 운용하고 있다.

필라테스 대기구는 캐딜락, 리포머, 체어, 바렐 등 다양한 요소로 구성되어 있으며, 웨어러블 보조기 착용 시 사용자의 체간 안정성, 가동범위 변화, 자세 정렬 상태 등을 다양한 자세에서 측정할 수 있다. 보조기의 신체 적응성과 움직임 제한 여부를 검토하는 데 활용된다는 캐딜락, 리포머, 체어, 바렐 등 다양한 요소로 구성되어 있으며, 웨어러블 기기 착용 시의 유연성, 정렬 안정성, 자세 변화 분석에 사용된다.

고속카메라(phantom miro EX4)는 초당 수천 프레임 촬영이 가능하며, 착지, 반사 반응, 갑작스러운 자세 전환 등 순간적인 고속 동작을 정밀하게 분석할 수 있다. 섬유기반 웨어러블 로봇이 신속한 동작 중 어떻게 충격을 흡수하거나 반응하는지를 영상 기반으로 초당 수천 프레임 촬영이 가능해 착지, 반사 반응 등 고속 동작의 영상 기반 분석에 활용된다.

압력 분포 측정 시스템(XSENSOR)은 압력 감응형 매트 및 인솔 센서를 통해 신체 접촉면의 실시간 압력 분포를 정밀하게 측정할 수 있는 시스템이다. 최대 126 Hz 이상의 샘플링 속도와 0.5 mm의 해상도를 지원하며, 좌우 발의 압력 편차, 접지 패턴, 압력 중심(COP)의 이동을 정량 분석할 수 있다. 웨어러블 로봇 착용 전후의 하중 재분포 효과, 착지 안정성, 정적 및 동적 균형 변화 등을 평가하는 데 유용하다.

3. 섬유기반 웨어러블 로봇 실증 사례: 간병근로자용 보조기기

본 연구실은 실제 간병인의 작업 환경을 모사하여 섬유기반 SMA 웨어러블 보조기기의 실효성을 평가하고 있다. 서츠형 조끼에 삽입된 인공근육은 허리 신전 시 수축되며, 복부 및 요추 주변의 부담을 보조하는 방식이다.



Figure 7. 필라테스 대기구(캐딜락, 리포머, 체어, 바렐)와 인공압벽.

실험실 내 실증 연구에서는 간병인의 실제 업무 환경을 모사하여 섬유기반 SMA 웨어러블 보조기기의 효용성을 평가하고 있다. 서츠형 조끼에 삽입된 인공근육은 허리 신전 시 수축되며, 복부 및 요추 주변의 부담을 보조하는 방식으로 설계되었다. 이 장비는 반복적인 굴곡 동작이 빈번한 환자 이송, 침상 정리, 물품 운반 등의 작업에서 근골격계 부담 완화를 목적으로 하며, 다양한 장비 기반 정량 분석을 통해 착용 전후의 움직임 변화, 근육 사용 패턴, 자세 안정성 차이를 비교하는 방식으로 실증할 수 있다.

향후에는 이 웨어러블 시스템에 AI 기반 보조 판단 알고리즘을 연동하여, 사용자의 움직임에 맞춘 예측 제어를 구현할 계획이다. 동시에 섬유소재의 통기성, 세탁성, 내마모성 평가도 병행하여 산업화를 위한 사전 기준을 정립하고 있다.

한편, 본 연구실은 하지 절단 장애인을 위한 능동형 로봇의 족 개발에 참여하였다. 실제 절단장애인을 위한 의족 시스템의 제어기 설계, 보행 전략 최적화, 착용성 검증 등을 목적으로, Vicon 시스템을 통한 관절 움직임 분석, 지면반력기 기반 보행 특성 측정, EMG 및 IMU를 활용한 근육 반응 및 균형 전략 평가가 수행되었다. 이와 같은 장비 기반 실증을 통해 의족 사용 시 보행 안정성 향상, 움직임 비대칭 감소 등 다양한 기술적 개선점을 도출할 수 있었으며, 로봇의족 연구개발의 실증 기반을 제공하였다.

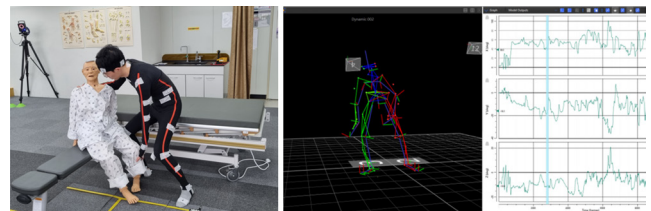


Figure 8. 간병근로자의 움직임을 분석하는 실험과 해당 동작분석 결과: 간병근로자를 위한 웨어러블 로봇 개발의 일환.

4. 결론 및 향후 전망

한국기계연구원 인체동작분석 연구실은 ‘소재부터 실증’까지의 전 과정을 포괄할 수 있는 기술 기반을 갖추고 있으며, 섬유 기반 인공근육과 인체보조기술을 융합한 차세대 웨어러블 로봇의 실증 플랫폼으로 수행 가능하다. 실험 인프라는 실제 사용자의 작업 환경과 유사한 다양한 조건을 재현할 수 있으며, 고정밀 계측 장비와 다중 모달 센서 시스템, 사용자 맞춤형 시나리오를 활용한 실증 프로토콜을 기반으로 웨어러블 로봇의 성능을 과학적으로 입증하고 개선해 나가고 있다.

연구실은 현재 간병근로자, 고령자, 하지 절단 장애인 등을 위한 보조 기술을 중심으로 실증 중심 연구를 진행 중이다. 특히, 실제 동작 환경에서의 반복 착용, 근육 피로 누적, 균형 유지 전략, 에너지 소비 변화 등을 정량 분석함으로써, 사용자의 체감 효용성과 안전성을 동시에 검증하고 있다. 이러한 실험 기반 접근은 기술 중심의 개발을 넘어 사용자의 삶의 질을 향상시키는 방향으로 확장되고 있다.

앞으로는 인공지능 기반의 실시간 피드백 시스템을 탑재한 웨어러블 보조기기의 개발, 섬유소재의 내마모성·통기성·세탁 가능성 등 일상 착용 조건을 반영한 소재 개발, 사용자 중심 성능 지표 기반의 로봇 평가 체계 구축 등 다양한 융합 연구가 병행될 예정이다.

궁극적으로 본 연구실은 섬유소재의 유연성과 웨어러블 로봇의 정밀성 사이를 연결하는 ‘실증 기반 융합 플랫폼’으로 자리매김하고 있다. 이는 단순한 기술 검증을 넘어, 사용자의 실제 문제를 해결하고 산업계로 연결되는 혁신적 생태계를 촉진하는 핵심 거점이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. L. Cappello, K. C. Galloway, S. Sanan et al., “Exosuit enabled by textile-based soft actuators for assisting shoulder movement”, *Soft Robotics*, 2018, **5**(2), 155–167.
2. S. Lee, J. Kim, and H. In, “Soft Wearable Devices for Physical Rehabilitation: Design, Fabrication, and Clinical Validation”, *Advanced Intelligent Systems*, 2021, **3**(1), 2000088.
3. J. Tang et al., “XSENSOR pressure measurement system: Evaluation and application in gait analysis”, *Journal of Biomechanics*, 2020, **104**, 109715.
4. P. Polygerinos, Z. Wang, K. C. Galloway et al., “Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation”, *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, **73**, 135–143.
5. R. Minto, M. S. Shourijeh, and V. Power, “Development and evaluation of wearable soft robotic devices for upper and lower limb rehabilitation: A scoping review”, *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2022, **19**(1), 46.