



# THEME 05

## 모방하고픈 인체의 보행

박수경 | KAIST 기계공학과 부교수 | e-mail : sukyungp@kaist.ac.kr

이 글에서는 인체의 보행 메커니즘의 역학적 분석에 대한 최근 연구동향을 간략히 소개하고 보행 시 에너지 효율에 관한 역학적 분석 사례를 공유함으로써 보행의 모방을 통한 새로운 보행보조 시스템 개발에서의 기계공학적 보행 분석 접근방법의 잠재력을 엿보고자 한다.

걷기 동작은 아마도 일상생활에서 떠올릴 수 있는 가장 간단한 인간의 움직임 동작이 아닌가 한다. 어린 아이도 돌만 지나면 아장 아장 걷기 시작하고 눈을 감아도 지면이 울퉁 불퉁 해도, 전화를 받는 다거나 다른 곳을 응시하는 등의 고난이도(!) 듀얼 태스크(dual task)를 수행하면서도 걷는 동작의 강인성(robustness)은 좀처럼 훼손 되지 않는다. 이렇게 안정적이고 사람이 가장 쉽게 취할 수 있는 동작 중의 하나인 걷기 동작은 그러나 막상 사람과 비슷한 휴머노이드 로봇이 수행하려고 하면 결코 쉬운 작업이 아니다.

카이스트의 휴보 로봇이 두발로 서고, 균형을 잡고, 걷고 뛰다. 이 위대한 기술의 진보에 많은 사람들이 박수를 보낸다. 두발로 서고 걷는, 이족보행 로봇연구

에 세계의 수많은 석학들이 밤을 지새며 연구를 하지만, 사람의 보행과 같이 자연스럽게 강인한 보행의 실현은 여전히 로봇 연구자들에게겐 도전이다. 좀 더 사람과 비슷한 보행을 구현하기 위해 모션 캡처 기술을 활용하여 사람의 동작을 모방하려는 시도를 하기도 한다. 인체의 각 관절에 광학 마커를 붙여 놓고 다리 동작, 팔동작, 그리고 땅을 밟을 때 가해지는 힘까지 다 계산하고 측정한다. 그리고 이렇게 측정한 인체의 동작데이터를 기반으로 로봇이 움직여야 할 관절운동을 생성해 내고 로봇에게 수행시킨다. 불과 수초 남짓의 걸음걸이를 걷게 하기 위해서는 성능 좋은 컴퓨터로 복잡한 동역학을 풀고 수십 개의 모델 변수를 최적화한다. 사람이라면 너무도 간단한 이 동작을 로봇이 구



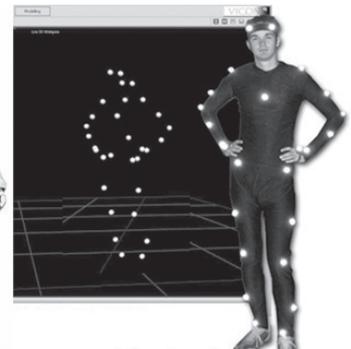
[3sigma.com]



[healthhackz.com]



[kaistnews.co.kr]



[umich.edu/~hamms]

**그림 1** 인체의 보행과 이를 모방하는 이족로봇 휴보. 그리고 로봇의 모션을 생성하기 위해 인체의 동작을 측정하기 위한 모션캡처용 광학센서를 부착한 모습(좌 → 우)

현하는 데 왜 이리도 복잡한 것인가?

수 세기 동안 연구자들은 인체의 무게중심을 점질량으로 하는 아주 간단한 모델로부터 시작해서, 컴퓨터의 계산능력의 도움을 받아 팔 다리 각 관절을 모사하는 복잡한 동역학에 이르기까지 인체의 보행을 구현하기 위한 연구를 해 왔다. 인체의 보행이 뇌에서 각 관절의 운동정보를 수집하고 이를 바탕으로 각 관절에 근육을 활성화시키는 신경신호를 보내는 일종의 피드백컨트롤(feedback control)에 의한 동작인지, 아니면 뇌까지 가지 않고 척수(spinal cord) 안에 위치한 중추패턴발생기(central pattern generator)에 의해서 기존에 저장되어 있던 동작이 트리거되어 구현되는 일종의 반사작용(reflex)인 것인지에 대한 연구가 수행되었다. 또한 각 관절의 운동과 상호작용을 고려한 다관절 보행 모델, 이를 제어하여 걷게 만드는 비선형 컨트롤 모델 등 복잡한 역학해석을 수반하는 보행연구가 수행되어 왔다. 그러다가 1990년대 초에 태드 맥기어(Tad McGeer)가 패시브 다이내믹 워킹(passive dynamic walking) 모델을 제안한 이후 보행분석의 연구는 새로운 전기를 맞게 된다.

기존의 다관절과 근육 및 신경을 고려한 복잡한 보행 모델에서, 무게중심과 두 질량없는(massless) 다리만 있는 너무도 간단한 패시브 다이내믹 워커는 언뜻 보기에는 복잡한 인체의 보행 특성을 고찰하는 데 활

용하기에는 턱없이 부족해 보인다. 그도 그럴 것이 사람으로 치자면 이 패시브 워커는 관절의 운동을 생성시키는 힘을 내기 위한 모터인 근육도 없고, 사지 운동을 코디네이션 할 컨트롤러인 뇌도 없다. 그냥 단지 뼈대 구조만 가지고, 로봇이라고 불리기에 민망한(!) 이 워커는 아무런 외부 에너지도 없이 빗면을 터벅 터벅 걸어 내려온다. 적절한 초기 조건(initial condition)에 대해서, 즉 패시브 워커의 초기 다리 벌림 각도라든가, 초기 무게중심의 속도만 절절히(!) 결정해주면 빗면을 무한히, 그리고 안정적으로 걸어 내려 올 수 있다. 좀 더 전문적으로는 비선형 주기운동을 리밋 사이클(limit cycle)이라고 표현하는데, 이 뼈대만으로 구성된 패시브 워커는 주기운동을 지속시키는 초기조건을 존재성을 이론적으로 보장할 뿐만 아니라, 걸음걸이 도중 가해지는 외란에 대해서도 그 크기가 적절하다면, 외란이 가해진 순간에는 일정한 보행 주기에서 이탈 하였다가도 시간이 지나면서 점점 주기적인 보행 패턴으로 수렴하는 안정한 리밋 사이클이라는 것이 증명되었다.

뼈만 앙상한(!) 패시브 다이내믹 워커의 출현으로 일부 연구자들은 복잡한 해석방법을 동원하였던 기존의 방법론 대신 간단한 모델로부터 보행 기본 메커니즘을 이해하고자 하는 시도를 하게 되었다. 최근 Dynamic Walking과 같은 학회를 통해서 자주 보고되

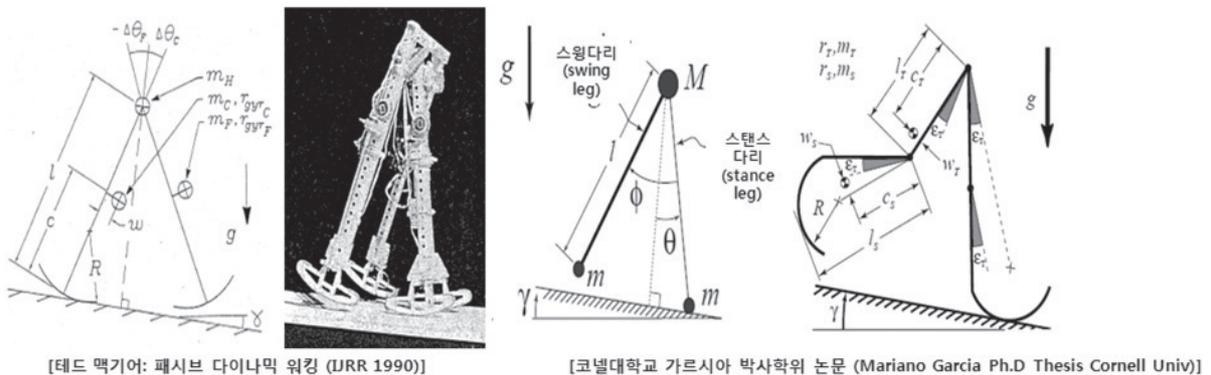


그림 2 Tad McGeer의 패시브 다이내믹 워커와 다양한 2D 패시브 워커 모델 연구(좌 → 우)



는 내용 하나를 소개하자면 인체 보행 시의 에너지 효율에 관한 것인데, 인체의 보행은 에너지 효율이 높다고 알려져 있고 구체적으로는 보행 시의 에너지 효율을 나타내는 cost of transportation(이동 시 소모된 에너지를 질량과 이동 거리의 곱으로 나눈 값)으로 정량화 한다면 사람 보행 시 에너지 효율은 로봇의 약 5배 정도로 높다고 한다. 사람의 보행이 높은 에너지 효율을 갖는 이유를 역학적으로 분석할 수 있을까? 다음에서는 다이나믹 워커 모델을 이용한 역학에너지 해석을 통해 보행 시 에너지 효율을 분석한 사례들을 소개하고자 한다.

구체적인 사례를 설명하기 전에 먼저 이해를 돕기 위해 보행과 관련된 몇 가지 용어를 정의하고자 한다. 보행주기를 나타낼 때 왼발(혹은 오른발)이 땅을 내딛는 순간부터 오른발(혹은 왼발)이 땅을 내딛을 때까지를 한 스텝(step)이라고 하고, 다시 왼발이 땅에 닿을 때까지를 한 스트라이드(stride)라고 한다. 보행주기(gait cycle)라고 하면 보통 한 스트라이드에 걸린 시간을 말하며, 한 보행주기를 기준으로 시간에 따른 하지의 동작을 보행주기에 대한 백분율(%)로 나타내어 설명하는 것이 일반적이다. 보행 시 무게중심을 한쪽 발에서 다른쪽 발로 이동시키며 전진하게 되는데, 한쪽 발만 지면에 닿아 있을 때를 한발지지구간(single support phase)이라고 하고 이때 지지하고 있는 다리를 스탠스다리(stance leg)라고 하며 공중에서 전후로 움직이는 다리를 스윙다리(swing leg)라고 한다. 한발지지구간이 끝날 무렵 앞으로 이동하던 스윙다리의 뒷발꿈치가 지면에 닿게 되면(HS: Heel Strike) 양발지지기(double support phase)가 되는데, 이때 기존의 스탠스 다리의 발목은 뒤로 젖혀지면서 지면을 밀어내게 되며 이때를 푸시오프(PO: Push-

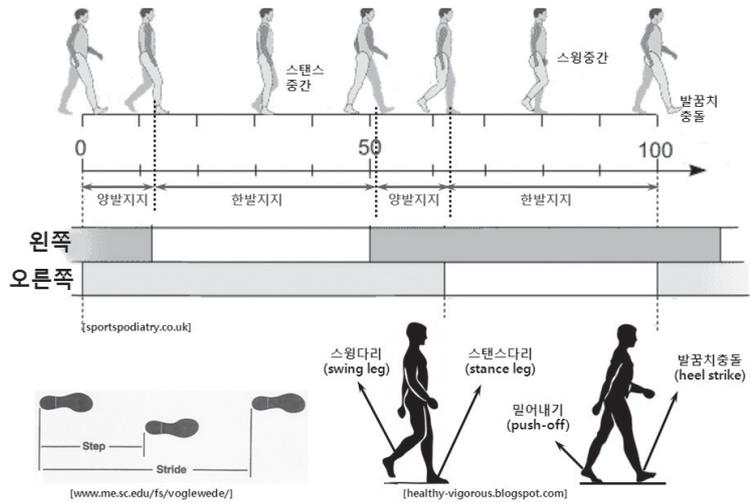
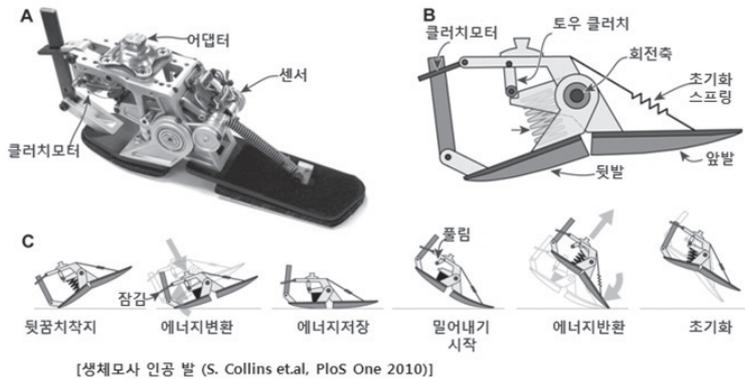


그림 3 보행주기별 동작과 세부 정의(상 → 하)

Off)라고 한다.

걸음을 걸으면서 우리는 끊임없이 에너지를 쓴다. 구체적으로 왼발에서 오른발로, 오른발에서 왼발로 내딛을 때 발뒤꿈치가 땅에 닿는 충돌(HS: Heel Strike)이 일어나면서 지속적으로 충격량에 의한 에너지 손실이 발생한다. 따라서 사람이 평지에서 계속해서 동일한 속도로 걷기 위해서는 지속적인 에너지 소모가 일어나게 되며 이를 보충하기 위해 지속적으로 무게중심에 에너지를 공급해 주어야 한다. 한 가지 방법은 무게중심을 전진방향으로 이동하는 양발지지구간에서 기존의 스탠스다리의 발목으로 지면을 발로 차는 밀어내기를 통해 일을 하는 것이고, 또 다른 방법으로는 한발지지구간에서 무게중심을 전진방향으로 이동시키기 위해 스탠스다리와 관련된 근육을 사용하여 회전토크를 발생시키는 방법이 있다. 이때에 관련되는 근육으로는 대퇴신근(hip extensor), 장지근(gastrocnemius), 강근(tibialis) 등이 있다. 물론 이외에도 팔을 앞뒤로 흔든다거나 스윙다리를 전진방향으로 회전시켜 추진을 얻는 방법 등이 있겠으나, 주요 에너지 공급원은 앞서 언급한 양발지지구간에서의 발목을 사용한 밀어내기 혹은 한발지지구간에서 하지 관



[생체모사 인공 발 (S. Collins et al. PloS One 2010)]

그림 4 보행 시 추진력을 모사한 보행보조기 사례들(상 → 하)

런 근육을 사용하여 전진토크를 발생시키는 방법이라고 알려져 있다. 편위상 전자를 발목토크(ankle torque)에 의한 추진, 후자를 힙토크(hip torque)에 의한 추진이라고 명명하도록 하겠다. 그렇다면 이 두 가지 방법 중 어떤 것이 혹은 어떠한 조합이 평지에서의 걸음을 지속할 수 있도록 에너지를 공급하는 것일까?

패시브 다이내믹 워커 모델에 기반하여 질량중심이 두 개의 질량없는 다리에 연결된 간단한 이족보행 모델에 대해 충격량-운동량변화의 공식으로부터 유도된 힘-에너지 관계식을 살펴보면, 힙토크 추진이 발목토크 추진에 비해 약 두 배 가량의 에너지를 더 소모한다는 계산이 나온다. 따라서 인체가 에너지를 효율적으로 사용하여 걷고 싶다면 양발지지구간에서 손실되는 에너지를 다 보상한 후에 한발지지구간으로 넘어가는 것이 가장 이상적이라는 결론이 나온다. 과연 이 간단한 패시브 다이내믹 워커 모델이 예측한 대로 사람은 에너지를 효율적으로 사용하기 위해 한발지지구간에서가 아니라 양발지지구간에서의 발목의 지면 밀어내기를 통해서 보행 시 손실되는 에너지를 보충받는 것일까? 캐나다 Simon Fraser University의 맥스 도넬런(Max Donelan)과 그의 동료들은 패시브 워커모델의 예측이 맞는지 실험해 보았다. 피험자의 보행 시의 운동을 재고, 걸을 때의 지면 반력을 측정하여 무게중심에 가해지는 힘과 일을 계산하였다 또한 보행 시 소

모되는 대사에너지를 측정하기 위해 산소 소비량을 측정하여 보니, 무게중심이 점질량(point mass)의 형태로 무질량(massless)의 다리 위에 얹혀진 너무도 간단한 이 모델이 예측하는 바와 같이 보행 시 에너지 소비가 눈에 띄게 증가하는 구간은 밀어내기를 수행하는 양발지지구간이라는 것이 증명되었다. 또한 보행속도, 보폭, 보행주기 등 보행변수의 변화에 대한 에너지 소비량의 변화 추세가 이 간단한

패시브 다이내믹 워커모델의 예측과 잘 맞아 떨어진다는 연구자들의 보고가 계속되고 있다. 발목 토크를 통한 밀어내기의 중요성을 알게 되자, 그 이후로 발목의 토크를 모사한 보행보조기의 연구가 다수 수행되었다. 발목의 밀어내기 동작을 발생시키는 근육을 모사하여 종아리에 유압펌프를 사용한 인공근육을 장착하여 보행 시에 발목근육이 밀어주는 토크를 발생하게 한 후 이때의 대사 에너지 소모의 변화를 측정하였다. 생체모사 보행보조기를 착용한 경우 현저하게 보행 시 대사에너지 소비가 감소하는 것이 보고되었다. 또한 인체가 양발지지구간 동안 발목근육의 밀어내기에 의한 추진력을 통해 지속적인 걸음을 걷는 것을 모사하기 위해 박판스프링의 압축 및 이완을 통한 탄성에너지를 추진력으로 사용하는 발목보조기(ankle orthosis)가 개발되기도 하였다. 역시 기존의 발목보조기에 비해 생체모사 발목보조기를 착용한 경우 대사에너지가 눈에 띄게 감소하였다.

한편, 일본의 이족보행 로봇 아시모를 개발한 혼다에서도 보행 보조기를 개발하였는데, 여기서 사용한 보행추진력은 발목의 밀어내기 동작이 아니라 힙관절의 토크이다. 왜 혼다에서는 발목이 아닌 힙토크를 이용한 추진을 하였을까? 혼다의 보행보조기는 생체모방 전략을 사용하지 않은 것일까? 혼다의 보행보조기의 원리에 대해서는 자세히 알려진 바가 많지 않아서



인공근육 보행보조기, 미시건대(D. Ferris, Umich.edu/)    혼다(Honda)의 보행보조기

확신은 할 수 없으나, 이 역시 생체모방의 관점에서 접근한 것이 아닐까 추정하는 바이다. 그 이유는 밀어내기 추진에 비해 힙토크를 사용한 추진이 유효한 경우도 보고되고 있기 때문이다. 일례로 발목의 근육이 밀어내기의 역할을 충분히 감당하지 못할 때를 생각해 보자. 연구자들은 발목의 근육이 약화된 상황이라든가, 발목의 운동이 제한된 경우 등과 같이 피험자의 밀어내기 기능을 약화 혹은 저하 시킨 상태에서 보행실험을 해 보았다. 러닝머신 위에서 일정한 속도 걸어야 하는 미션을 수행해야 하는 조건에서 발목근육은 정작 필요한 밀어내기 추진을 못하게 되니 사람은 바로 적응을 하여 대퇴신근 등 힙토크에 의한 추진 시 활성화 되었던 근육을 사용하여 걷기 시작하였다. 그 외에도 점차 걸음걸이의 속도를 증가시키기 위해 발목의 근육이 밀어내기 힘을 점차 증가 시켜 주어야 하는 경우에도, 근육의 구조상 지속적으로 근력을 증가시키는 데에는 생리학적인 한계가 있으므로 비록 에너지 효율 측면에서 최선은 아니지만, 힙토크 추진을 사용하여 보행 속도를 증가시키는 것이 관찰되었다. 그렇다면 발목토크에 의한 추진을 모사한 보행보조기가 더 사람의 보행과 유사한 접근인가, 아니면 힙토크에 의한 추진을 모사한 보행보조기가 더 유사한 방법인가? 이 질문에 대한 대답은 한때 유행했던 유행어처럼

그때 그때 다르다. 착용자의 상황과, 보행 조건에 따라서 필요로 하는 근력의 기여도가 다르기 때문이다. 따라서 사람의 보행조건이나 상황에 따른 추진특성에 따라 더 생체모방에 가까운 보행보조기의 승자가 결정될 것이다.

이 글에서는 매우 간단한 보행모델의 역학적 분석으로부터, 인체의 보행이 이족 로봇의 보행에 비해 훨씬 에너지 효율적인 이유를 추정해 볼 수 있었다. 데이터의 정량적, 정성적 특성을 잘 예측하였다고 하여, 인체의 뇌에서 패시브 다이내믹 워커의 운동에서와 같이 뉴턴의 역학법칙을 준수하고자 근육을 제어하는 것은 물론 아니겠지만, 인체를 하나의 강체로 간략화하여 그 운동을 분석해 보면 놀랍게도 기본 역학법칙으로부터 비교적 광범위한 보행특성이 잘 표현이 된다는 점은 생체역학 연구자에게는 참으로 고무적인 일이다. 다음 질문은, 이렇게 역학적 해석을 통해서 밝혀진 인체의 효율적인 보행메커니즘을 어떻게 모방하여 에너지를 더 절약하는 데 활용하거나, 아니면 관점을 바꾸어 다이어트를 목적으로 오히려 에너지를 더 소비하는 데에 활용 할 수 있을까 하는 것이다. 그 속제는 인체의 보행 모방에 관심있는 기계공학자가 풀어야 할 것 같다.