

로보틱 의족과 관련된 기술적 쟁점들

– 1. 하드웨어

Robotic lower-limb prosthetics related technical issues – 1. Hardware

글 송성문 (카네기멜론대학 로봇학과 박사과정, The Robotics Institute of Carnegie Mellon University) ssm0445@gmail.com, <http://www.cs.cmu.edu/~smsong/>

로봇이라 하면 일반 사람들은 대개 휴머노이드 로봇이나 우주 탐사로봇처럼 독립적으로 돌아다니며 특정 작업을 수행하는 기계를 떠올리기 마련이다. 하지만 로봇은 일반인들이 흔히 생각하는 것과 달리 매우 다양한 형태로 존재하면서 다양한 분야에서 연구개발되고 있다. 의료용 로봇은 그중에서도 많은 관심을 끌고 있으며 그중에 사람의 일부는 대체하는 로봇은 현재 여러 가지 이유로 각광을 받고 있다.

의료로봇 가운데 마치 사람 몸의 일부처럼 사람의 움직임에 반응적(reactive)으로 작동하는 로봇이 있으니 바로 로보틱 의족이다. 로보틱 의족은 다리가 절단된 사람의 다리 역할을 하는 로봇이다. 로보틱 의족을 연구 및 개발하는 데 있어서 동역학적 요소를 많이 고려해야 한다. 물건을 들거나 조작할 때 쓰는 팔에 비하여, 다리는 보행과 같이 상대적으로 더 동적인 동작에 관여하기 때문이다. 또한 전신의 정보를 갖고 제어를 하는 휴머노이드 로봇과는 달리 로보틱 의족은 매우 제한된 정보만으로 제어를 해야 한다. 예를 들어, 반대쪽 다리 무릎의 각도가 어떠한지, 상체가 어느 정도 기울어져 있는지와 같은 정보를 로보틱 의족에 전달하기는 쉽지 않기 때문이다. 이처럼 그 분야만의 독특함이 있는 로보틱 의족과 관련하여 어떠한 기술적 쟁점들이 있는지 살펴보자.

로보틱 의족의 필요성과 현재

기술적 쟁점들을 살펴보기에 앞서, 먼저 로보틱 의족이 왜 필요한지, 또한 현재 어느 단계까지 발전해있는지를 간단히 짚고 넘어가보자. 2012년 런던 올림픽에서 육상 부문을 관심 있게 본 이들은 굳이 로보틱 의족이 필요한가 의문을 가질 수도 있다. 왜냐하면 남아공 대표로 오스카 피스토리우스(Oscar Pistorius) 선수가 양다리 대신 의족을 양쪽에 착용하고 400m 달리기와 1600m 계주에 출전하여 다른 성한 다리를 가진 일반 선수들과 막상막하의 실력을 뽐냈기 때문이다. 이뿐만 아니라 의족을 연구하는 MIT의 휴 허(Hugh Herr)교수는 의족으로 71m 암벽 등반이라는 놀라운 기록도 갖고 있다.

의족이 이만큼 발전하여 센서나 모터 없이도 이런 역동적인 일들을 할 수 있는데 “왜 로보틱 의족이 필요할까?” 여러 가지 대답이 있을 수 있지만, 아마도 가장 간단한 대답은 “기존의 의족들은 사람의 다리와 다르기 때문”일 것이다. 오스카가 시합 때 착용한 일명 ‘치타 플렉스풋(Cheetah Flex-Foot)’은 탄력이 있어서 달리기에는 좋으나 단단한 지지가 필요한 암벽 등반에는 부적합하다. 반면, 액추에이터(actuator)가 있는 로보틱 의족은 상황에 맞는 제어를 통하여 일반 다리에

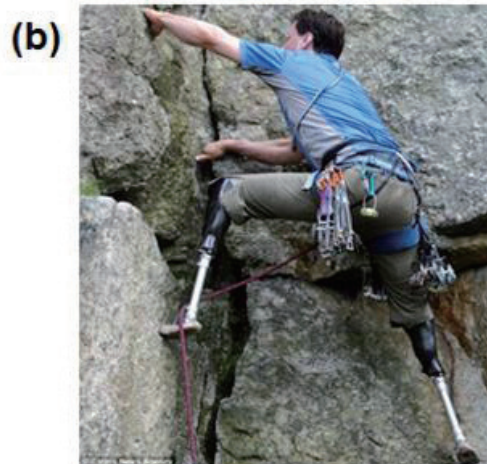


그림 1. 의족의 활용. (a) 오스카 피스토리우스 선수가 의족을 착용하고 2012년 런던 올림픽에서 400m 달리를 하고 있다. (b) 휴허 교수가 의족을 착용하고 암벽 등반을 하고 있다.

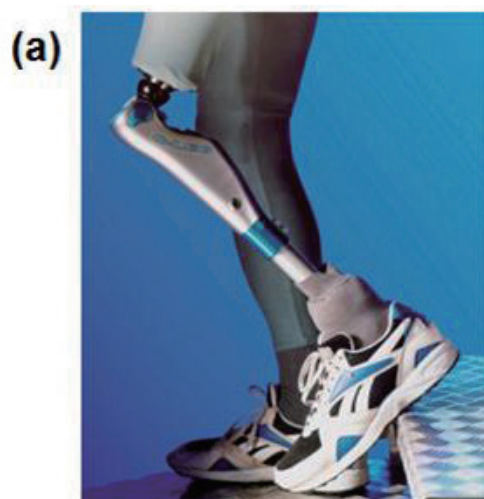


그림 2. 로봇틱 의족. (a) Otto Bock사의 C-Leg. (b) iWalk사의 BiOM.

맞먹는 혹은 그 이상의 기능을 할 수 있다는 목표로 연구되고 있다. 뿐만 아니라, 기존의 의족보다 착용자의 걸음걸이가 더 자연스러워 보이도록 하고 착용자의 에너지 효율을 높여주어 더욱 편안히 오래 일상생활을 하도록 도울 수 있다. 이런 취지로 개발된 몇몇 로봇틱 의족들은 이미 제품으로 나와 있다. 독일의 Otto Bock사에서 1997년에 개발한 C-Leg는 센서들로 현재 보행의 어느 단계인지를 감지하여 무릎 관절의 유압을 바꾸어 뻣뻣함(stiffness)을 적절히 조절한다. 예를 들어, 지지단계(stance phase)일 때는 단단한 무릎 관절을, 스윙단계(swing phase)일 때는 유연한 무릎 관절이 되도록 조절하는 것이다. 이 작업은 사람의 근육처럼 양

의 일(positive work)을 하는 것은 아니므로 에너지를 많이 소비하지 않아 충전 없이 40~45시간 사용할 수 있다. 최근 2012년에는 미국의 iWalk사에서 사람의 발목처럼 양의 일(positive work)을 하는 로봇틱 의족인 BiOM을 출시하였다. 이 로봇틱 의족은 내부 액추에이터(actuator)를 이용하여 발가락 떼기(push off) 때 필요한 힘을 내어 착용자로 하여금 더 자연스럽게 에너지 효율적인 보행을 하도록 해준다. BiOM은 배터리 교체 없이 4~5시간 사용할 수 있다.

현재 제품화된 로봇틱 의족들 모두 사람의 다리에 비하면 초보적인 단계라 할 수 있다. 이를 발전시키기 위하여 현재 어

면 연구들이 진행되고 있는지 관련된 기술적 쟁점들을 하나하나 살펴보자. 필자는 로보틱 의족과 관련된 기술적 쟁점들을 하드웨어 관련 쟁점들과 제어 알고리즘 관련 쟁점들로 나누어 정리하였으며, 전자는 이번 호에서 후자는 다음 호에서 다루고자 한다. (BiOM이 미화 7만불(한화 약 8천만원)이라는 것만 귀띔하며 가격 관련 쟁점은 자세히 다루지 않겠다. 참고로 로보틱 의족의 가격과 관련해서는 다리 절단 환자를 평생 돌보는 데 약 500만불의 비용이 들기에 국가에서 로보틱 의족의 구입을 보조해주었을 때의 잠재적 이익 등의 복잡한 내용이 있다.)

로보틱 의족의 기술적 쟁점들

먼저 의족이라면 공통적으로 만족시켜야 하는 부분들부터 간단히 짚어보자. 일단 우리 몸에 착용하는 다른 기기들처럼, 편하고 가볍고 내구성이 강해야 한다. 이에 더하여 의족으로서 요구되는 특성 중 하나는 착용한 사람이 건강한 다리를 가진 일반인처럼 자연스럽게 걸어 다닐 수 있어야 한다는 점이다.

하드웨어 관련 쟁점들 (Hardware-related issues)

로보틱 의족에는 위의 일반 의족들의 조건에 더하여 몇 가지 기술적 쟁점들이 더 따른다. 필자는 이를 하드웨어 관련 쟁점과 제어 알고리즘적 쟁점으로 나누었고, 하드웨어 관련 쟁점들을 다시 네 집단으로 나누어 정리하였다. 앞서 말했듯이, 이번 호에서는 하드웨어 관련 쟁점들에 해당하는 기구적

구조(kinematic structure), 센싱(sensing), 액추에이터(actuator), 그리고 에너지 효율(energy efficiency)에 대하여 살펴보겠다.

1. 기구적 구조 (kinematic structure)

전체적인 기구적 구조는 사람의 다리와 비슷해 보여야 한다는 점에서 이미 정해져버리는 부분들이 많다. 관절이 사람의 무릎 혹은 발목에 해당하는 위치에 있어야 하기에 액추에이터의 위치와 그 연결 구조가 어느 정도 정해지기 때문이다. 물론 액추에이터의 종류에 따라 그 위치의 자유도가 어느 정도 생길 수 있고, 기구적 설계로 에너지 효율을 높이는 연구도 이루어지고 있는데, 이는 아래에서 살펴보도록 하자.

2. 센싱 (sensing)

로보틱 의족에는 각도, 가속도, 힘/토크를 감지하는 아이엠유(IMU, inertial measurement unit)나 힘-토크 센서(force-torque sensor) 등과 같이 휴머노이드 로봇에 많이 쓰이는 센서들도 물론 사용되고 있다. 그러나 앞서 언급하였듯이 로보틱 의족이 다른 로봇과 구별되는 점은 사람의 행동에 맞추어 구동되어야 한다는 점인데, 이 글에서는 이와 관련된 센서들에 초점을 맞추었다.

사람의 뇌파 전위(EEG, electroencephalography)를 통하여 로봇팔을 제어하는 영상을 본 독자라면 뇌파 센서가 로보틱 의족에도 효과적으로 쓰일 수 있지 않을까 생각할 수 있



그림 3. 뇌파 전위(EEG)와 근전도(EMG) 센서들. (a) Emotiv사의 EPOC이라는 제품으로 뇌파 전위를 14개의 채널로 감지한다. (b) DELSYS사의 Trigno라는 제품으로 근육의 근복(muscle belly)에 가까운 피부에 붙이면 그 근육의 근전도를 감지한다.

다. 그러나 실상은 그렇게 간단하지 않다는 것을 사람의 보행 제어를 이해한다면 알 수 있다. 아직 사람의 보행 제어에 대하여 밝혀지지 않은 부분들도 많아 관련하여 현재에도 활발한 연구가 이루어지고 있는데, 현재 밝혀진 것 중 하나는 보행 제어의 많은 부분이 뇌가 아닌 척추에 있는 신경 네트워크에서 이루어진다는 점이다. 즉, 사람이 걸을 때에 뇌에서 “어느 근육을 어느만큼 수축시켜라” 등의 명령이 직접 내려오는 것이 아니라 척추 내에서 그 세부적인 제어들이 이루어지고, 뇌에서는 “걸어라/서라” 혹은 “계단을 올라라” 등의 단순한 명령만 내려진다는 것이다. 그래서 앞으로도 로봇틱 의족에서는 뇌파를 통하여 다리의 세부 제어를 한다기보다는 단순한 명령들을 전달하는 정도로 쓰일 가능성이 높아 보인다.

뇌파에 비하여 근전도(EMG, electromyography)를 센싱하는 로봇틱 의족 연구는 상대적으로 활발히 이루어지고 있다. 그러나 대부분의 연구에서는 근전도를 이용하여 로봇틱 의족의 세부 제어를 직접하기보다는 보행의 단계를 감지하는 용도로 쓰인다. 이해를 돕기 위해 쉬운 예를 만들어보자면, 고관절(hip joint) 근육들의 근전도를 감지하여 현재 보행이 지지 단계(stance phase)인지 스윙단계(swing phase)인지를 알아낸 후 그에 해당하는 (예를 들어, 지지단계면 무릎의 뻣뻣함(stiffness)을 높여주고 스윙단계면 무릎을 자유롭게 스윙하도록 뻣뻣함을 낮춰주는 식의) 제어를 로봇틱 의족 내부적으로 하는 것이다.

정리하자면, 로봇틱 의족은 주로 사용자가 직접 제어기 보다는 로봇틱 의족 자체가 착용자의 상태나 환경의 상태를 감지하여 내부적으로 세부 제어를 하는 방식이기에 로봇틱 의수와는 달리 사용자의 의지를 직접 감지해야 하는 부분이 상대적으로 적다.

3. 액추에이터 (actuator)

최근 들어 로봇틱 의족에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 만큼 다양하고 새로운 액추에이터들이 시험되고 있다. 기존 로봇들은 큰 토크(torque)를 내야 할 경우 대부분 전동 모터(electric motor)에 높은 기어비(gear ratio)를 가진 기어박스(gear box)를 연결하여 사용한다. 여기서 오는 단점은 높은 기어비에 따른 관성 때문에 관절이 기본적으로 뻣뻣하여 정확한 토크제어를 하기 어렵다는 점이다. 쉬운 예로, 꺼져 있는 액추에이터를 손으로 돌려보면 그 높은 관성을 느낄 수

있다. 이처럼 온 관절에 힘을 잔뜩 준 것과 같은 로봇의 팔이 무엇과 부딪힐 경우 큰 인적 물적 피해를 일으키기 십상이다. 직렬 탄성 액추에이터(SEA, series elastic actuator)는 기어박스과 관절 (혹은 관절에 걸리는 하중(load)) 사이에 완충 작용을 하는 스프링(spring)을 넣음으로써 이를 해결하려한다. 이렇게 되면 로봇의 팔이 사람과 부딪혀도 기어박스의 높은 관성이 사람에게 바로 영향을 미치지 않게 된다. 보행을 예로 들면, 뒤꿈치 닿기(heel strike)처럼 충동이 일어날 때에 스프링이 액추에이터 자체도 보호하고 결과적으로 착용자에게도 그 충격이 덜 전달되게 된다. 스프링이 부드러우면 부드러운수록 이런 효과는 크겠으나, 정확한 제어가 힘들어지므로 스프링을 정할 때에 이 둘을 고려해야 할 것이다. (직렬 탄성 액추에이터는 또한 기존의 액추에이터들 보다 토크 제어를 하기에 용이하다는 점도 최근 각광받는 이유 중 하나다.)

기존의 액추에이터에서 오는 또 한 가지 큰 단점은 마찰 없는 관절(frictionless joint)을 구현하기도 쉽지 않을 뿐더러 제어를 통해 이를 구현한다고 가정해도 큰 에너지 소비가 불가피하다는 점이다. 높은 기어비(gear ratio)의 관성을 전동 모터로 상쇄시켜야 하기 때문이다. 이 단점은 패시브 다이내믹스(passive dynamics)를 크게 활용할 수 있는 보행에서 특히 부각된다. 예를 들어, 보행의 스윙단계(swing phase)일 때는 무릎 관절에 큰 토크를 주지 않아도 이중 진자(double pendulum)처럼 자연스럽게 스윙 동작을 이룰 수 있는데, 뻣뻣한 관절로는 스윙 동작이 자연스럽게 이루어지지 않기에 에너지를 소비하여 스윙을 해야 하는 것이다.

이렇듯 중요하지만 구현하기 어려워 보이는 마찰 없는 관절을 쉽게 구현하는 방법이 있으니, 바로 방향성이 있는 액추에이터를 사용하는 것이다. 여기서 방향성 있는 액추에이터라 함은 당길 수만 있고 밀 수는 없는 액추에이터를 일컫는데, 텐던 구동 메커니즘(tendon-driven mechanism)과 공압 근육 액추에이터(air muscle actuator)가 이에 속한다. 텐던 구동 메커니즘은 동력원으로 관절을 직접 구동시키는 것이 아니라 당길 수는 있어도 밀 수는 없는 케이블(cable)이나 체인(chain)과 같은 것들을 통하여 구동시키는 방법을 일컫는다. 필요에 따라 이런 케이블이 느슨한 상태를 유지하도록 제어를 하면, 자연스레 마찰 없는 관절이 되는 것이다.

텐던 구동 메커니즘의 또 하나의 장점은, 액추에이터 무게의 대부분을 차지하는 동력원을 관절과 먼 곳에 둘 수 있기

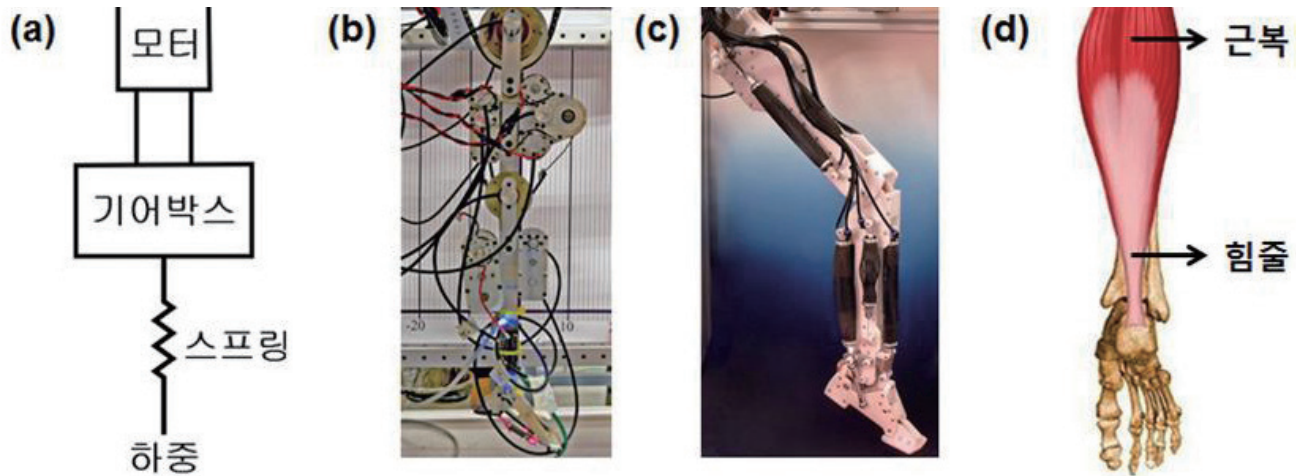


그림 4. 사람과 로봇의 의족의 액추에이터들. (a) 텐던 구동 액추에이터(SEA) 개념도. 모터가 토크를 기어박스가 증폭시키고 스프링이 완충시킨다. (b)텐던 구동(tendon-driven) 로봇의 다리. 카네기멜론 대학교의 하트무트 가이어(Hartmut Geyer) 교수의 연구실에서 개발한 로봇의 의족 연구에 쓰이고 있다. 직렬 탄성 액추에이터와 텐던 구동 매커니즘을 동시하였고, 사람 다리의 무게 분포와 비슷하다는 특징이 있다. (c) 공압 근육(air muscle) 로봇의 다리. Shadow사에서 개발한 로봇의 의족 연구에 쓰이고 있다. 맥기븐 인공 근육을 사용하여 개발되었다. (d) 근육 개념도. 근육은 근복과 힘줄로 구성되어있다. 근복이 수축 힘(contraction force)을 내어 힘줄을 통하여 뼈를 당긴다.

때문에 로봇 전체의 무게 분포를 비교적 자유롭게 디자인 할 수 있다는 것이다. 맥기븐 인공 근육(McKibben artificial muscle)으로 대표되는 공압 근육 액추에이터들도 고무 튜브 안에 공기를 불어 내부를 팽창시킴으로서 길이를 짧게 하여 당기는 힘만 낼 수 있다. 한 방향으로 힘을 낼 수 있다는 특성상 텐던 구동 매커니즘과 공압 근육 액추에이터들의 공통된 단점은 하나의 관절당 최소 두개의 액추에이터가 양쪽에 있어야 양방향으로 구동할 수 있다는 것이다. 또한 공압 근육 액추에이터는 액추에이터 자체는 가볍지만 무겁고 큰 공기 응축기를 동반해야 한다는 단점이 있다.

로봇의 의족에 새로이 적용되고 있는 직렬 탄성 액추에이터, 텐던 구동 매커니즘, 공압 근육 액추에이터에 대하여 살펴보았는데, 여기서 공통적으로 찾아볼 수 있는 재미있는 특징이 있다. 바로 이 액추에이터들이 모두 사람 근육(물론 동물의 근육도 마찬가지다)에 착안하여 개발되었다는 것이다. 근육은 동력원인 근복(muscle belly)과 힘줄(tendon)로 이루어져 있는데 힘줄은 일방향적 탄성을 가지고 있어 직렬 탄성 액추에이터의 스프링 역할과 텐던 구동 매커니즘의 케이블 역할을 한다.

4. 에너지 효율 (energy efficiency)

에너지와 관련해서는 배터리 용량을 늘리는 등의 다른 기계들

에도 해당되는 쟁점들이 있지만, 보행과 관련된 고유의 쟁점들도 있다. 편의상 하드웨어 관련 쟁점으로 분류하였으나, 실제로는 기구적 구조, 액추에이터, 제어 알고리즘 전반의 영향을 받으며, 휴머노이드 로봇의 보행에도 비슷하게 드러난다. 예를 들어, 아시모(Asimo)의 보행은 사람의 보행에 비하여 에너지 효율이 10배 이상 떨어지는데, 이는 다리를 항상 구부리고 걸어야 하는 제어 알고리즘적 측면도 있고, 패시브 다이내믹스(passive dynamics)를 이용하기 불리한 높은 기어비(gear ratio)를 사용하는 액추에이터에서 오는 부분도 있다. 최근에는 보행의 생물 역학(biomechanics)을 고려한 새로운 기구적 구조를 통하여 에너지 효율을 높이려는 연구들도 이루어지고 있다. 한 예로, 사람의 일반적 보행에서는 뒤꿈치 닿기(heel strike) 때 발생하는 지면과의 충돌로 잃은 에너지를 발목 근육들로 발가락 떼기(push off) 때 다시 보충해주는 작업이 반복적으로 일어나는데, 뒤꿈치 닿기 때의 충돌 에너지를 스프링(spring)에 저장했다가 발가락 떼기에 이용하는 새로운 기구적 구조가 개발되었다.

다음 호에서는 로봇의 의족의 제어 알고리즘적 쟁점들에 대해서 살펴보겠다. 액추에이터 관련하여 조언을 해준 알렉스 셰플맨에게 감사한다. Thanks to Alex Schepelmann for the comments on actuators. 