

## 로보틱 의족과 관련된 기술적 쟁점들 – 2. 제어 알고리즘

### Robotic lower-limb prosthetics related technical issues – 2. Control Algorithm

송성문 (카네기멜론대학 로봇학과 박사과정, The Robotics Institute of Carnegie Mellon University)

이메일: ssm0445@gmail.com

홈페이지: <http://www.cs.cmu.edu/~smsong/>

로보틱 의족(그림 1)과 관련된 기술적 쟁점들을 지난 호와 이번 호로 두번에 나누어 살펴보고 있다. 로보틱 의족은 다리가 절단된 사람의 다리 역할을 하는 로봇으로 건강한 사람의 다리 만큼의 혹은 그 이상의 기능을 대신하겠다는 목표로 연구되고 있다. 보행과 같이 동역학적 요소를 많이 고려해야 하는 작업을 주로 수행하며 제한된 정보만으로 제어를 해야한다는 것이 특성이다. 지난 호에서 로보틱 의족과 관련된 하드웨어적 쟁점들을 기구적 구성, 센싱, 액츄에이터, 에너지 효율에 관한 요소들로 나누어 살펴본데에 이어, 이번 호에서는 제어 알고리즘적 쟁점들을 보행(locomotion)을 수행해야하는 점과 사용자와의 상호작용(interaction with the wearer)이 높다는 점에서 오는 특징들로 나누어 정리해보자.

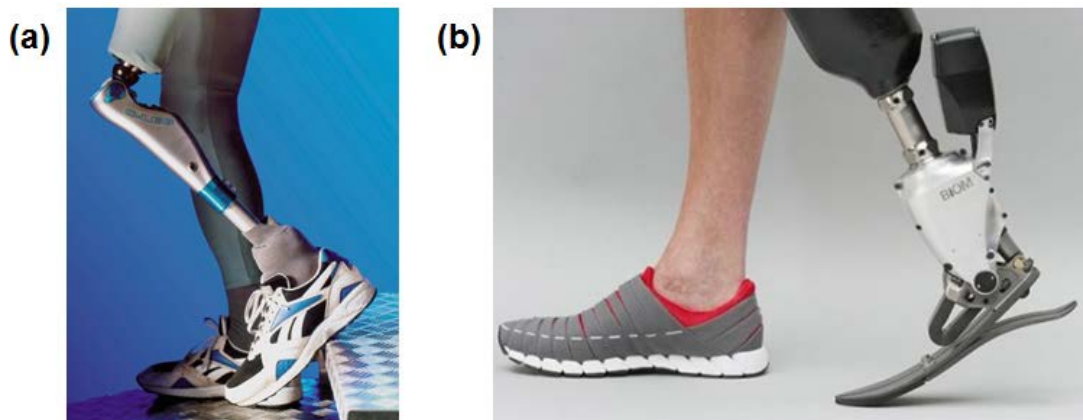


그림 1. 로보틱 의족. (a) Otto Bock 사의 C-Leg. (b) iWalk 사의 BiOM.

## 제어 알고리즘적 쟁점들 (Control algorithm related issues)

지난 호에서 살펴본 하드웨어적 요소들은 대부분 로봇틱 의족과 독립적으로 연구 개발 될 수 있다. 예를 들면 근전도(EMG) 센서나 직렬 탄성 액츄에이터(SEA, series elastic actuator)는 다른 분야에도 사용되는 것들이기에 독립적으로 발전이 되면 로봇틱 의족에도 적용을 할 수 있는 것이다. 그러나 제어 알고리즘은 로봇틱 의족에만 적용되는 매우 특수한 부분들이 많다. 이 글에서는 몇몇 제어 알고리즘들을 분석하기 보다는 로봇틱 의족의 제어와 관련된 기술적 쟁점들을 살펴봄으로서 이 분야에만 있는 특성들을 정리해보고자 한다.

### 1. 보행 (locomotion)

먼저 로봇틱 의족의 역할상 보행을 수행해야 하기에 오는 특성들이 있는데, 이러한 특성들은 대부분 휴머노이드 로봇과 같은 이족 로봇(bipedal robot)의 보행 제어에서도 보인다. 이족 보행 시스템을 제어 이론(control theory)의 용어들로 표현하자면 걸어가는 방향에 따라 제어가 달라지는 비홀로노믹 시스템(nonholonomic system)이며, 한발 지지단계(single stance phase)일 때는 열린 고리 시스템(open loop system)이었다가 두발 지지단계(double stance phase)일 때는 닫힌 고리 시스템(close loop system)이 되며, 시스템 전체의 방향을 고려하면 구동기가 부족한 시스템(underactuated system)이고, 또한 다관절로 이루어진 비선형 시스템(nonlinear system)이다. 이를 한마디로 표현하자면 전통 제어방식으로 보행을 제어하기는 “매우 어렵다”는 것이다. 이렇게 “어려운” 보행 제어와 관련된 특성들을 살펴보자.

### 안정성(robustness)

이족 보행에 있어서는 무엇보다도 안정성(robustness)을 보장해야 한다. 쉽게 얘기하자면 외부의 충격에도 넘어지지 않도록 제어를 해야한다는 것이다. 바퀴가 달린 로봇이나 네개 이상의 다리가 있는 로봇에 비하여 이족 로봇은 적절한 제어가 없다면 쉽게 넘어진다. 만약 로봇틱 의족의 제어 알고리즘이 충분히 안정적이 않아 착용자가 넘어지게 된다면 착용자 뿐 아니라 주변에 있는 다른 사람도 피해를 볼 수 있다. 캐나다의 통계에 의하면 넘어져서 죽는 사람이 교통사고로 죽는 사람보다 75 살이 넘어가면 약 2 배가 많으며 90 살이 넘으면 10 배나 많아진다고 한다. 이 만큼 안정적 보행은 중요하다.

안정적 보행을 위해서는 각 다리가 제 역할을 잘해야 한다. 즉 지지 다리(stance leg)는 몸의 무게를 잘 지탱해주어야 하며 스윙 다리(swing leg)는 잘 스윙해야 한다. 특히 안정적 보행에 있어서 스윙 다리를 필요한 위치로 잘 스윙하여 적절한 위치에서 다음 지지 다리가 되어주는 것이 매우 중요하다. 예를 들어, 걸어가는 사람을 왼쪽 방향으로 세게 민다면 그 사람은 넘어지지 않기 위해서는 왼쪽으로 다음 발을 디뎌야 한다. 그래서 로보틱 의족의 스윙단계의 제어 알고리즘에 특히 활발한 연구가 이루어지고 있다.

### **모호한 제어 목표(obscure control goal)**

보행 제어의 다른 특성은 “어느 속도로 어디까지 걸어라” 이외에 세부적으로 명확한 제어 목표를 세우기가 간단하지 않다는 점이다. 고전적 제어는 기본적으로 따라야 하는 기준 궤도(reference trajectory)가 있어 이와의 차이를 오류(error)로 정의하고 이 오류를 줄이는 방향으로 제어가 이루어진다. 예를 들자면, 보행의 스윙단계(swing phase)에서 스윙하는 발의 위치적 궤도가 정해져 있어 이 궤도를 따르도록 제어하는 것이 혼다의 아시모(Honda's Asimo, 그림 1-a)와 같은 로봇에 쓰이는 고전적 제어 방법이다. 그러나 학계에서는 보행에 있어서 이 기준 궤도가 무엇인지 (즉 위치적 궤도인지 토크의 궤도인지 혹은 또 다른 요소의 궤도인지), 기준 궤도는 어떻게 정할 것인지 등의 논쟁 부터 기준 궤도 자체가 없다(한 예로 보스턴 다이내믹스의 빅독과 펫맨(Boston Dynamics' BigDog and Petman, 그림 1-b)은 정해진 궤적을 따르는 것이 아니라 넘어지는 방향으로 다리를 뺀 식의 제어를 한다)고 생각하는 학자들도 있을 만큼 아직 의견이 분분하다.

### **자연스러움(naturalness)과 에너지 효율(energy efficiency)**

굳이 로보틱 의족과 이족 로봇과의 차이점을 하나 뽑자면 보행의 자연스러움(naturalness)에 대한 중요도가 로보틱 의족에서 더 높다는 것이다. 지난 호에서도 언급하였듯이 로보틱 의족의 목표 중 하나는 기존의 의족보다 착용자의 움직임이 건강한 다리를 가진 사람들 처럼 자연스러워 보이는데 있기 때문이다.

건강한 사람처럼 자연스럽게 걷는다는 것은 보행의 에너지 효율(energy efficiency)이 좋다는 말도 간접적으로 내포한다. 사람의 보행이 에너지 효율적인 면에서 최적화 되어있다는 것이 학계의 중론이기 때문이다. 한쪽 다리의 무릎 아래로 절단된 사람이 일반 의족을 착용하고 걸으면 건강한

사람보다 평균적으로 약 20% 낮은 속도로 걸으며 20% 많은 에너지를 소비한다. 대부분 휴머노이드 로봇의 보행도 사람의 보행에 비하면 에너지 효율이 매우 떨어진다. 예를 들어, 아시모의 보행 에너지 효율은 사람에 비하여 15 배 이상 떨어진다.

보행의 에너지 효율을 높이기 위하여 패시브 다이내믹스(passive dynamics)를 어떻게 하면 잘 이용하여 제어를 할 수 있을지에 대한 연구가 이루어지고 있다. 패시브 다이내믹스라 함은 파워를 생성하는 액추에이터(actuator) 없이 시스템의 움직임이 어떻게 되는지를 말하는 것이며, 패시브 다이내믹스를 잘 이용하자는 것은 이를 잘 이해하여 움직임이 자연스럽게 원하는 방향으로 이루어질 때에는 액추에이터를 사용하지 않고 필요할때에만 사용하자는 것이다. 패시브 다이내믹스를 최대한으로 이용하면서 걷도록 코넬 대학(Cornell University)에서 개발된 코넬 파워드 바이프드(Cornell Powered Biped, 그림 1-c)는 사람의 보행 에너지 효율과 비슷한 수준을 보이지만 평지에서도 쉽게 넘어질 정도로 안정성은 현저히 떨어진다.

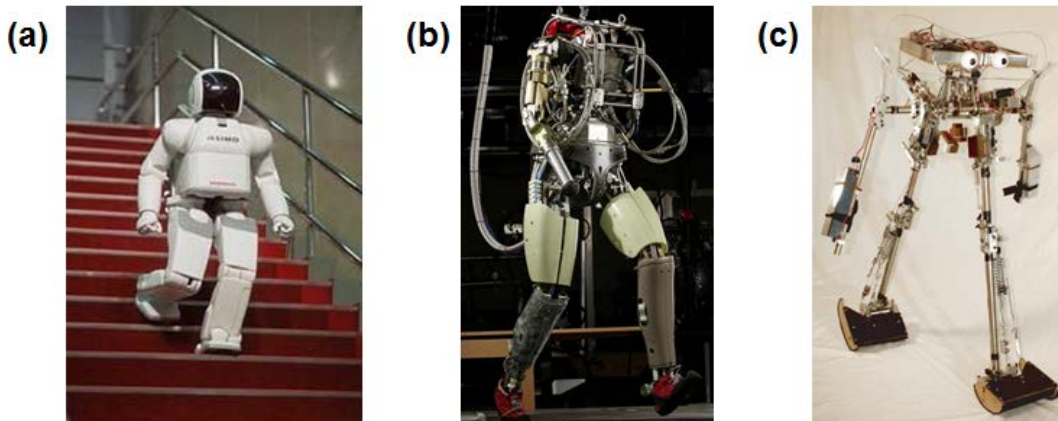


그림 1. 휴머노이드 로봇. (a) 혼다의 아시모(Asimo). (b) 보스턴 다이내믹스의 펫맨(Petman). (c) 코넬 대학의 코넬 파워드 바이프드(Cornell Powered Biped).

### 보행 제어 알고리즘에 대한 연구가 많이 필요하다

지금까지 살펴본 보행 제어 알고리즘들의 특성들을 한 문장으로 정리하면, 현재 개발된 로봇의 보행 제어 알고리즘들이 사람의 제어에 비하면 안정성이나 에너지 효율성 등 모든 면에서 많이 부족하며 이를 보완하기 위한 세부적 제어 목표가 무엇인지에 대한 의견마저도 분분한

상태다라고 할 수 있겠다. 로봇틱 의족을 착용한 사람이 건강한 다리를 가진 다른 사람들 처럼 평평한 땅 뿐 아니라 울퉁불퉁한 자갈밭, 겨울의 미끄러운 바닥, 질척거리는 진흙, 계단 등과 같은 곳을 곳을 자연스럽게 다닐 수 있기 위해서는 보행 알고리즘의 많은 발전이 필요하다.

## 2. 착용자와의 상호작용 (interaction with the wearer)

로봇틱 의족과 이족 로봇이 보행을 수행해야 한다는 점에서 공통점이 있는 반면, 로봇틱 의족은 착용자와 긴밀한 상호작용이 이루어 진다는 점에서 이족 로봇과 다르다. 휴머노이드 로봇은 혼자서 걸어다니고 (그림 2-a), 사람을 태우고 다니는 로봇은 타는 사람의 움직임에 고려하여 제어를 해야 안정적인 보행을 이룰 수 있다(그림 2-b). 반면 로봇틱 의족은 사람의 움직임에 반응하여 함께 동작할 때에만 안정적 보행을 할 수 있다(그림 2-c). 이것 만을 놓고 로봇틱 의족의 제어가 이족 로봇의 제어보다 어렵다거나 쉽다고 단정짓기는 쉽지않다. 착용자가 로봇틱 의족의 제어를 도와주는 측면도 어렵게하는 측면도 있기 때문이다.

먼저 사람의 제어가 현재 로봇 제어 기술에 비하여 워낙 뛰어나고 새로운 장치에 잘 적응하기에 로봇틱 의족의 제어가 쉬워지는 부분이 있다. 한쪽 다리의 무릎 아래로 절단된 사람의 경우 그 다리의 무릎과 고관절 그리고 반대편 다리는 사람의 뛰어난 제어가 이루어지기에 모든 다리를 제어해야하는 이족 로봇에 비해 제어가 쉬운 면이 있다. 그래서 사람은 아무런 제어가 이루어지지 않는 일반 의족을 착용하고도 최소한 넘어지지 않고 걸을 수 있는 것이다.

그러나 착용자가 제어를 함께한다는 면이 동시에 로봇틱 의족의 제어를 어렵게 하기도 한다. 왜냐하면 의족을 포함한 착용자 전체를 보행 시스템으로 봤을 때 시스템 전체에 대한 정보를 로봇틱 의족에 전달하기가 쉽지 않기 때문이다. 예를 들어, 반대쪽 다리가 어떤 상태인지, 상체가 어느 정도 기울었는지 등의 정보를 로봇틱 의족에 전달하기 위해서는 착용자의 몸 여기저기에 센서들을 부착하여 측정된 정보를 의족에 전달한다. 이것을 현 단계의 기술로 구현하려면 거추장스러운 장치들을 착용자의 온 몸에 많이 달아야한다. 그러면 이런 정보를 의족 로봇에 전달해주기 보다 사용자가 직접 로봇틱 의족을 제어할 수 있도록 하면 되지 않을까 라고 생각할 수 있다. 그러나 지난 호에서도 언급하였듯이 보행 제어의 많은 부분은 뇌가 아닌 척추에 있는 신경 네트워크에서 이루어기에 착용자가 의식적으로 로봇틱 의족을 제어하기는 적절하지 않다. 그렇게 되면 걷는 내내 사용자가 의식적으로 다리를 제어하는 부담을 지게되는 것이다.

센서를 몸 여기저기 달아야 하거나 의족을 의식적으로 제어하는 상황을 피하기 위하여, 많은 연구들이 로보틱 의족의 내부정보만을 이용한 성능이 좋은 제어 알고리즘을 개발하는데 집중을 하고 있다. 예를 들어, 무릎 아래로 절단된 사람을 위하여 발목의 정보만으로 발복을 제어할 수 있는 알고리즘을 개발하는 것이다. 그런데 신기하게도 사람의 보행 제어 또한 많은 부분이 내부적인 반사 제어(local reflex control)에 의해 이루어진다는 것이 여러 실험을 통하여 보여졌다. 즉, 사람이 걸을 때에 발목의 근육들의 제어가 그 근육들의 길이나 힘 같은 상태에 대한 정보만 갖고 반사적으로 이루어진다는 것이다. 그렇기에 로보틱 의족도 사람으로 부터는 “걸어라/서라” 혹은 “계단을 올라라” 등의 단순한 명령만 받아도 내부적인 정보로 많은 부분 제어가 가능해 보인다.

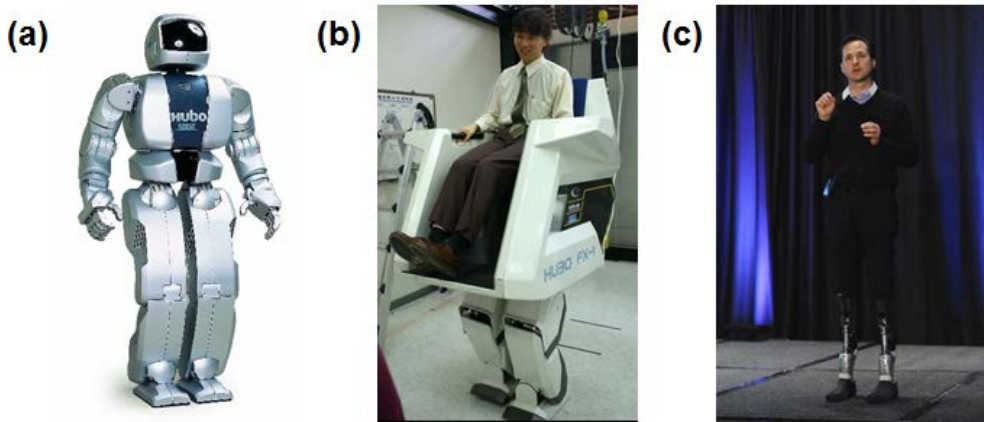


그림 2. 보행 로봇과 사람의 상호작용. (a) 카이스트의 휴보. (b) 카이스트의 휴보 FX-1. (c) 로보틱 의족.

## 맺음말

지난 호부터 지금 까지 살펴보았듯이 건강한 다리에 맞먹는 혹은 그 이상의 기능을 할 수 있는 로보틱 의족의 개발을 위해 하드웨적으로나 제어 알고리즘적으로 많은 연구가 되고 있으며, 또한 앞으로 발전해야 하는 부분들도 많다. 물론 연구자들마다 접근 방법이 다르지만, 필자의 식견으로는 사람의 신체나 제어를 깊이 이해하면 이를 적용할 부분이 매우 많아 보인다. 좋은 예로, 모터와 스프링으로 이루어진 직렬 탄성 액추에이터가 근복과 힘줄로 이루어진 사람의 근육과

흡사하다는 점이 있다. 이와 같이 사람의 내부적인 반사 제어(local reflex control)를 이해하면 로보틱 의족의 제어의 어려움도 많이 해결할 수 있을 것으로 보인다.

로봇은 이미 그 자체만으로도 기계, 전기, 컴퓨터가 다 필요한 학제간 연구 분야(interdisciplinary research field)인데, 사람과 상호작용이 활발한 로보틱 의족 같은 경우는 이에 더하여 사람의 생물 역학(biomechanics), 신경 생리학(neurophysiology), 재활 의학(rehabilitation medicine) 등도 이해해야 하는 매우 재미있는 분야이다. 또한 그 목적이 사람의 신체적 한계를 뛰어 넘을 수 있도록 도와주는 것이라는 점에서 보람되며 로봇의 궁극적 목표에 부합된다고 본다. 이러한 분야에 많은 사람들의 관심과 응원이 있기를 바래본다.