

# 지스트 Dynamics and Biomechatronics Lab (HUR Group) 소개

허 필 원  
(지스트 기계공학부)

## 1. 연구실 소개

“이 세상에서 가장 잘 걷는 시스템은 무엇일까?”라고 질문을 하면 당신은 무엇이라 답하겠는가? 나는 바로 “사람” 이라고 답하고 싶다. 사람이 걷기 시작한 역사는 연구에 따라서는 5백만년까지 거슬러 올라갈 수도 있다고 한다. 이런 수치를 차치하고서라도, 사람은 오랫동안 걸어왔고, 먼 거리를 걸어왔다. 즉, 사람은 효율적으로 걷고, 경제적으로 걷고, 안정적으로 걷고, 유연하게 걷는 방법을 스스로 체득해왔다. 반면, 이족보행로봇은 어떠한가? 최근 Boston Dynamics사의 ATLAS 로봇은 걷고, 달리고, 공중제비를 돌고, 계단을 뛰어 오를 수 있는 경지에 이르렀다. 누가 갑자기 밀더라도 ATLAS는 균형을 꽤 잘 잡는다. 하지만, 아직 사람의 자연스러움과 거리가 멀어 보인다. 예를 들어, 발의 아치와 발가락 관절을 활용한 Windlass Mechanism이 존재하지 않기 때문에 보행 시 에너지의 효율이 떨어질 뿐 아니라, 평평하지 않는 땅에서의 보행이 불안정하다. 또한, 대부분의 제어기가 외란제거(Disturbance Rejection)을 추구한 반면, 사람은 외란수용(Disturbance Acceptance)을 통해서 자연스럽게 자세를 제어한다.

이처럼 보행로봇 제어는 엄청난 발전을 거듭하여 왔음에도 불구하고, 여전히 발전을 위한 새로운 시각이 필요하다. 특히, 사람의 운동제어(Motor Control)이론을 연구해 볼 필요가 있다. 사람의 관절이나 근육의 갯수는 필요이상으로 많아 보이고, 이들을 모두 독립적으로 제어하는 것은 거의 불가능해 보인다. 하지만, 사람의 움직임, 특히 보행은 매우 안정적이고, 에너지 효율적이고, 외란에 대해서 강인할 뿐 아니라, 외란에 대해서 부드럽게 반응한다. 그러므로 로봇의 행동을 더 안정적이고 강인하고, 에너지 효율적이고 자연스럽게 제어하기 위해서는 사람의 운동제어 이론을 접목할 필요가 있다.

지스트의 Dynamics and Biomechatronics Lab은 기계공학부의 허필원 교수가 운영하는 연구실이다. 연구실 내부적으로는 HUR<sup>1)</sup> Group으로 부른다. 연구실의 이름이 내포하듯, 로봇과 사람의 운동을 동역학적으로 모델링하고 해석할 뿐 아니라, 생체역학 및 신경역학적 원리를 파악하여 로봇

1) Human Rehabilitation, 2) Human Union Robot

시스템에 적용 및 제어하는 연구실이다. 궁극적으로는 이러한 연구를 통해서 재활, 생산, 군사, 재난환경 등에 활용하여 사람을 돕고자함을 목표로 한다. HUR Group에서는 크게 세 가지의 연구를 진행한다. 첫째는 사람의 운동, 특히 보행과 자세제어의 생체역학(Biomechanics) 및 신경역학(Neuromechanics)적 매커니즘을 규명한다. 둘째는 사람이나 로봇의 행동을 동역학적으로 모델링하고, 최적화와 기계학습 기법을 통해서 수용 가능한 궤적과 임피던스를 예측한다. 이 과정에는 제어기 설계와 메카트로닉스가 포함된다. 셋째는 사람과 로봇의 상호작용이다. 즉, 사람과 로봇을 각각 서로 다른 시스템으로 두고, 두 시스템이 하나의 행동(예: 절단환자의 보행)을 가장 효율적으로 성취하기 위한 프레임워크를 개발한다. 특히, 서로 다른(Heterogeneous) 시스템을 통합하기 위해서, 신경과학이론의 하나인 Free Energy Principle에 기반한 접근을 한다.

허필원 교수는 2004년 한양대학교 기계공학부에서 학사학위를 받았고, 2006년 KAIST 기계공학과에서 석사학위를 받았으며, 2010년 University of Illinois at Urbana-Champaign의 기계공학과에서 생체역학(Biomechanics) 및 제어이론으로 박사학위를 받았다. 동시에 같은 학교 수학과에서 Algorithm and Optimization으로 응용수학 석사학위를 받았다. 이후, 2014년까지 University of Wisconsin-Milwaukee에서 Stroke 환자 재활에 관해 박사후연구를 하였고, 2014년 9월부터 Texas A&M University 기계공학과에서 조교수로서 재활로봇제어 및 신경역학에 관련된 연구를 수행하였다. 2020년 12월, 한국의 지스트로 자리를 옮겨 부교수로서 계속연구를 진행 중이다.

## 2. 생체/신경역학적 관점에서의 제어

사람의 운동제어는 고전 및 현대 제어이론에서 이야기하는 방식보다 훨씬 더 복잡하다. 복잡하다는 표현보다는 제어이론이 사람의 운동제어를 충분히 설명할 수 없다는 표현이 더 맞는 듯하다. 제어이론의 가장 궁극적 목표는 오차(Error)를 최소화하고, 외란을 제거하며(Disturbance Rejection), 불확실성(Uncertainty)이 존재하는 상황에서 변동성(Variability)을 최소화하여 시스템을 안정화하는 것이다. 또한, 이러한 효과를 낼 수 있는 제어기 중에서 최적의 제어기를 설계하는 것에 관심이 있다. 하지만, 사람의 운동제어는 이와는 상당한 거리가 있다. 사람은 오차를 최소화하는 것에는 관심이 없는 듯하다. 예를 들어, 서서 자세제어(Standing Balance)를 하는 경우, 자세를 꼳꿨이 직립으로 세워서 유지하지 않는다. 오히려 적당한 수준

의 흔들림을(Postural Sway) 용인한다. 오차를 완전히 제거하는 것은 근골격계(Musculoskeletal System)를 제어할 때 에너지 측면에서 비효율적이다. 오차가 일정 수준 이상으로 벗어나는 경우에만 능동적인 자세제어를 한다. 오히려 사람은 Variability를 적극 활용한다. 운동성능(Task Performance)에 영향을 미치지 않는 방향으로의 움직임은 자유도(Degrees of Freedom) 또는 복잡성(Complexity)을 높임으로써 외란에 대한 강인성(Robustness)을 더 높여준다. 여기서 강인성이 높아진다고 하여서 외란제거(Disturbance Rejection)를 의미하지는 않는다. 오히려 외란수용(Disturbance Acceptance)을 의미한다. 이는 마치 서있는 사람을 밀었을 때 Ankle Strategy에서 Hip Strategy로 전환을 하거나, 또는 걷다 미끄러지는 사람이 Single Stance Phase에서 Double Stance Phase로 전환하고 몸을 낮추며 팔을 회전시켜 각운동량(Angular Momentum)을 최소화하는 것과 비슷하다.

수많은 Redundancy를 가지는 근육과 관절을 효율적으로 제어하기 위해 Muscle Module을 생각해볼 수 있다. 이는 각각의 근육을 독립적으로 제어하기보다는 Muscle Group을 Module 별로 각각의 Control Knob을 제어함으로써 훨씬 더 간단하고 효과적인 제어를 할 수 있다(그림 1). Control Primitive를 활용하여 로봇을 제어하는 것과 비슷하다. 또한, 최적제어를 계산하기 위해 너무 많은 컴퓨팅 자원을 낭비하는 대신, 적당한 성능을 내지만(Good Enough) 계산이 효율적인 제어를 하는 것이 더 의미가 있을 수 있다. 실제로, 사람은 최적제어를 계산할 만한 컴퓨팅 자원은 없지만, “Good Enough” 제어를 통해 너무

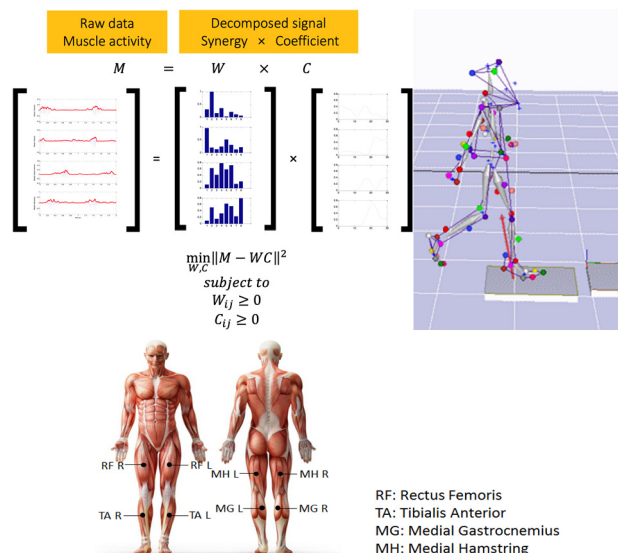


그림 1. Muscle synergy for human walking.

나도 안정적이고 강인한 보행 및 행동을 하는 것을 볼 수 있다. 이상에서 언급한 내용들은 Muscle Synergy, Uncontrolled Manifold, Equilibrium Hypothesis, Free Energy Principle 등의 운동제이론과 관련되어 있다. 이러한 이론들을 로봇제어에 적용해 보는 것은 의미가 있는 일이다.

### 3. 동역학/제어 관점에서의 운동

로봇이 운동을 하기 위해서는 궤적의 생성이 필수적이다. 이 족보행로봇의 경우 사람의 보행궤적을 얻어와서 로봇의 동역학적 특성에 맞게 수정하는 과정을 거치는 경우가 많다. 하지만, 참고할 만한 궤적이(Reference Trajectory) 존재하지 않는다면 이 방법은 유효하지 않다. 예를 들어, 다리절단환자를 위한 의족로봇의 경우 Reference Trajectory가 존재하지 않는다. 건강한 성인의 궤적을 사용할 수 없는 이유는 의족로봇을 착용한 다리 절단환자의 동역학적 특성이 건강한 성인의 그것과는 상당히 다르기 때문이다. 이 경우, 동역학적 특성과 행동의 특이점(예: 보행의 반복성, 충돌, 최소보폭, 시간) 등을 만족시키면서 목적함수를(예: 토크, Cost of Transport) 최소화하는 최적 제어와 궤적을 생성해낼 수 있다. 물론, 이 과정은 오프라인으로 진행되어야 하는 과정이다. 뿐만 아니라 사람의 발과 같이 아치나 발가락 관절을 활용한 다중접촉(Multi-contact)을 포함한 궤적을 생성하려면 최적화 과정이 단순하지는 않다. Direct Collocation과 같은 방법을 통하여, 근사화되었지만 확장성이(Scalable) 좋은 수치기법을 활용하는 것이 하나의 방법이다(그림 2). 로봇 제어에 있어서 단순한 궤적 추종(Trajectory Tracking)을 뛰어 넘어, 동역학적 특성을 잘 반영하는 제어기의 설계가 중요하다. 특히 사람의 경우, 오랜 시간동안의 학습에 의해 습득한 운동제어는 피드백 제어(Feedback Control)만으로 그 효율성을 이루어낼 수 없다. 이미 학습된 최적의 신경신호(Neural Command, Prior)를 피드포워드 제어(Feedforward

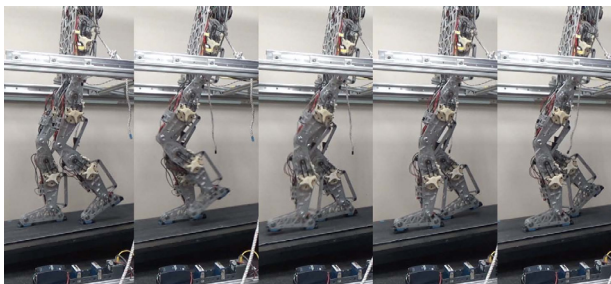


그림 2. Bipedal walking with multiple contacts.

Control) 방식으로 빠르고 효율적으로 제어를 한다. 궤적이 평균적인 궤적을 많이 벗어나는 경우에만 피드백 제어를 통해 수정해 준다. 이러한 방식은 Entropy를 최소화하는 제어와 연관이 있다.

### 4. Human-Robot Interaction

HUR Group의 최종적 연구목표는 사람과 로봇이라는 서로 다른 시스템이 주어진 Task를 가장 효율적으로 수행할 수 있도록 Interaction을 극대화하는 프레임워크를 만드는 것이다. 많은 연구에서 서로 다른 시스템을 독립적으로 간주하여서, 하나의 시스템은 행동의 기준을 제시하고, 나머지 시스템은 그 기준에 맞추는 경우가 많다. 하지만, 두 시스템이 각각 완벽히 작동하지 못하거나, 불확실성이 존재하거나, 또는 외부 세계로부터의 외란이 들어오는 경우, 원하는 목표를 효율적으로 이루는 것은 거의 불가능하다. HUR Group에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, 신경과학 이론 중 하나인 Free Energy Principle(FEP)을 공부하고, 연구에 적용해보고 있다. FEP는 살아 있는 생명체는(예: 사람) 엔트로피를 최소화하는 방향으로 인지하고(Perceive), 행동하고(Act), 학습한다는(Learn) 이론이다. 사람의 운동제어 시스템을 여러 계층으로 모델링할 수 있는데, 각 계층은 각각의 임무를 수행하지만, 계층 사이에 메시지를 양방향으로 전달하는(Bidirectional Message Passing) 방식을 통해서 결국 엔트로피를 최소화한다. HUR Group에서는 FEP가 사람의 자세제어에서 감각의 질이 향상됨에 따라 Entropy가 줄어드는 것을 보였다(그림 3). 현재 다리절단환자와 로봇의족이 Message Passing을 통해서 상호작용을 향상하는 연구를 진행하고 있다. 이를 위해서 다리절단 부위에 감각신호를 전달하기 위해서 촉각신호(Vibrotactile Signal)를 제공하고, 상호작용 힘

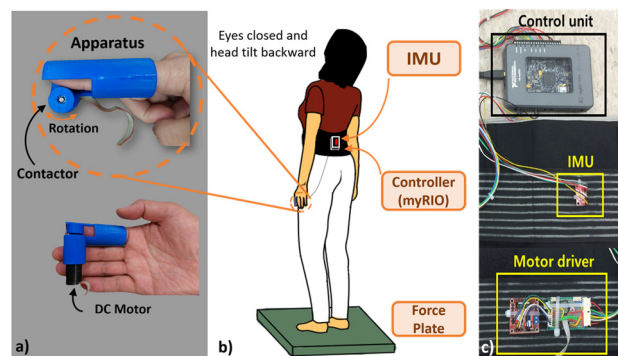


그림 3. Sensory augmentation reduces Entropy.

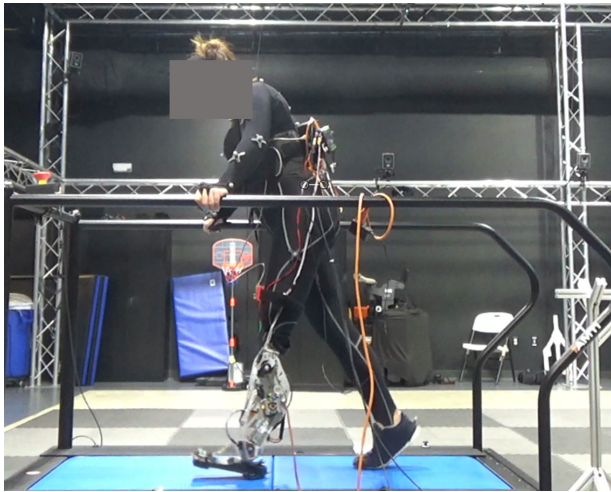


그림 4. Human-robot interaction for robotic prosthesis.

을 측정하기 위해 Pressure Mat과 같은 센서를 사용할 수 있다. 절단환자의 경우, 최적궤적은 실험적으로 구할 수 없으므로, Direct Collocation방법 등의 최적화 기법을 통해서 Prior를 구할 수 있다. 로봇의족에 포함되는 제어기는 사람의 보행패턴을 모니터링하여, 엔트로피를 최소화하는 방향으로 로봇을 제어한다(그림 4).

## 5. 결론

이미 로봇은 사람의 삶 속에 깊숙이 들어와 있다. 많은 연구자들이 기존의 제어이론과 더불어 새로운 아이디어를 제안하며 충분히 좋은 성능으로 로봇을 제어하고 있다. HUR Group은 사람의 운동제어로부터 배울 수 있는 인사이트를 로봇제어에 활용해보고 있다. 머지않은 미래에 로봇과 사람이 더 자연스럽게 안정적으로 지낼 수 있기를 기대해 본다.

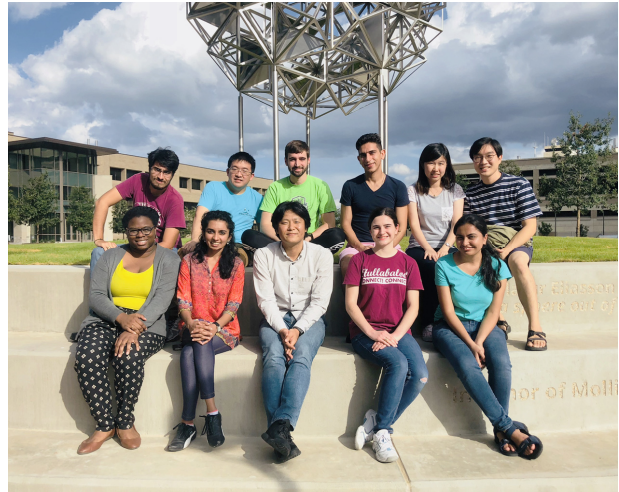


그림 5. Texas A&M University의 HUR Group.

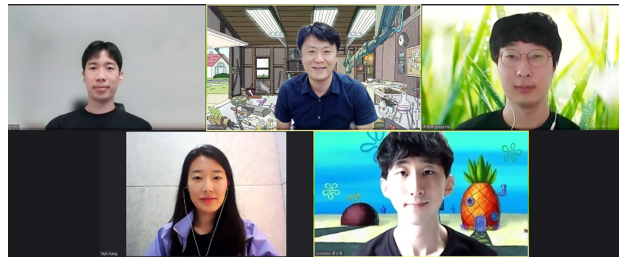


그림 6. 지스트의 HUR Group.