

# 보행 밸런싱 증대를 위한 무릎 외골격 조인트의 최적 설계

조훈호\*<sup>†</sup> · 유정한\* · 김윤영\*

\*서울대학교 기계공학과

## Optimal Design of Knee Exoskeleton Joint for Improving Balancing during Gait

Hunho Cho\*<sup>†</sup>, Jeonghan Yu\*, Yoon Young Kim\*

\*Dept. of Mechanical Eng., Seoul National Univ.

### Progress report 2.

원하는 Gait Motion 을 만들어낼 수 있는 4-bar Linkage 의 설계를 위한 최적설계기법의 적용 및 이를 통해 얻은 기구에서의 End-effector 의 Trajectory 분석

Progress report 1 에선 보행 밸런싱 증대를 위한 외골격의 기구 설계를 위한 첫 단계로, 간단한 4절 링크 기구를 Matlab 을 이용해 구현하여 이 기구의 Motion 을 작동시키며 End-effector 의 Trajectory 를 얻어보는 Code 를 짜보았다. 이후 이 4절 링크 기구의 End-effector 의 위치, joint 의 위치, 특성 등을 변화시켜보며 4 가지 variation 에서의 Trajectory 를 얻어보며 Gait Motion 에서의 Trajectory 를 얻어볼 수 있을지 여부에 대해 분석해보았다. 이번 Progress report 2 에선 원하는 Path 와 거의 일치하는 End-effector Trajectory 를 얻을 수 있는 링크 기구를 최적 설계 기법을 이용하여 설계해보고자 한다.

#### 최적 설계(Optimal Design) <sup>[1]</sup>

최적 설계란, 원하는 기능을 수행할 수 있는 Design 을 얻는 데에 있어서 설계 시간을 최소화시키면서 동시에 최고의 성능을 얻어내는 방법이다. 기본적인 최적설계 기법은, 최초의 Design 을 구상한 후, 그 design 에 대해서 설계 변수들을 지정해, 각 변수가 해당 제품의 성능에 미치는 영향력을 파악하여 목적함수를 설정하고, 변수들의 제약조건을 고려하여 이 목적함수의 값이 원하는 값에 도달하도록 설계 변수를 수정하여 최적의 변수 조합을 찾아내는 방식으로 진행된다.

본 연구에서는 이 최적 설계 기법을 4-bar Linkage 의 초기 Configuration 에서의 Link 의 위치, 각도에 대한 변수들을 설계 변수로 두고, 각 Joint 들에서의 Link 간의 연결 관계를 제한조건으로 두며, End-effector Trajectory 와 Desired Path 사이의 거리 값을 목적함수로 두어 이 값을 0 으로 수렴시키는 방식으로 적용하였다.

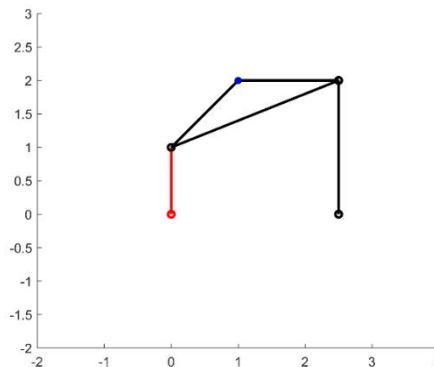


Figure 1 4-bar Linkage 의 Rigid Body Model

Progress report 1 에서 다룬 내용은 최적설계 단계에 들어가기 전에 설계의 가능성을 보기 위한 과정으로, 4-bar Linkage 를 Figure 1 과 같은 단순한 Rigid Body Model 으로 설정하였었다. 또한, 각 Joint 에서 연결된 두 링크가 만족해야 하는 특성을 함수 값으로 지정하였고, 이 함수가 각 Step 에서 0 으로 수렴하도록 하는 방법으로는 Newton-Raphson Method 방법을 사용했었다. 이 과정을 통해 앞에서 언급했던 내용과 같이 Rigid-body bar model 방법을 통해서도 Gait Motion 에 가까운 Trajectory 를 얻을 수 있음을 관찰할 수 있었다. 최적 설계 알고리즘은 비선형의 목적함수 및 제한 조건을 다루는 효과적인 Tool 로 사용될 수 있고, 빠른 수렴성을 특징으로 하기 때문에 MMA 로 설정하였다.

#### MMA(Method of Moving Asymptotes)<sup>[2]</sup>

목적함수  $f_0(x_i)$ 의 minimize 를 위한 한가지 방법으로, Newton-Raphson Method 와 유사하게 이전  $x_i$  에서의 함수의 값  $f(x_i)$ 와 Gradient 값  $\nabla f(x_i)$ 을 통해 다음 iteration 의  $x_{i+1}$  값을 계산하는 방법인데, 각 Iteration 에서  $x_i$ 에 대한 Upper Bound  $U_i$ 와 Lower Bound  $L_i$ 가 존재하여,  $x_i$ 값이 이 경계를 넘지 않고 수렴하여 계산속도가 빠르다. 또, Newton-Raphson Method 와는 다음 iteration 의  $x_{i+1}$  값을 계산하는데 있어서,  $f(x_i)$ 에서의 접선을 사용하는 것이 아니고, 두 분수함수  $\frac{A}{U_i - x_i}$  와  $\frac{B}{x_i - L_i}$  의 선형결합을 통해 얻어진 함수를 이용한다는 점에 차이가 있다.

또한, Progress report 1에서는 End-effector 의 Trajectory 가 Gait Motion 과 비슷하게 나오는지 여부를 그저 형상의 유사함 정도만 살펴보았는데, 이 Trajectory 를 실제 Desired Path 에 일치시키는 방법은 크게 2 가지 방법이 있다. 한가지 방법은 Desired Path 를 선 영역으로 잡아, End-effector 의 Trajectory 가 이 선 위에 위치하는지 여부를 살피는 방법이고, 다른 방법은 Desired Path 도 본 연구에서 얻어내는 End-effector 의 Trajectory 와 같이 step 마다의 점의 집합으로 잡아 각 step 마다 이에 해당하는 Path 의 점과 Trajectory 의 점이 일치하는지를 보는 방법이다. 이 중, 실제 보행 밸런싱 증대를 위한 설계를 위해선 단순히 같은 형상의 Trajectory 를 얻는 것에서 그치지 않고, Gait motion 에서 시간 진행에 따른 순간순간의 발목의 위치와 Trajectory 에서 각 step 에서의 End-effector 의 위치가 일치할 수 있도록 설계할 수 있어야 한다고 판단했고. 이를 위해서 Desired path 2 번째 방법인 Step 마다 위치했으면 하는 Point 로 잡았다.

이렇게 구상한 Desired Path 를 통해 각 step 마다의 End-effector Trajectory 와 Desired Path 사이의 거리 값을 목적함수로 두어, MMA 방법을 통해 값을 0 으로 수렴시키도록 진행하던 중에, Progress 1 과 같이 4-bar Linkage 를 Rigid Body Model 으로 설정할 경우, 각 설계변수가 목적함수에 미치는 sensitivity 가 적절히 구해지지 않는 문제가 발생하여, Model 을 Figure 2 와 같은 3by3 SBM 으로 수정하였다.

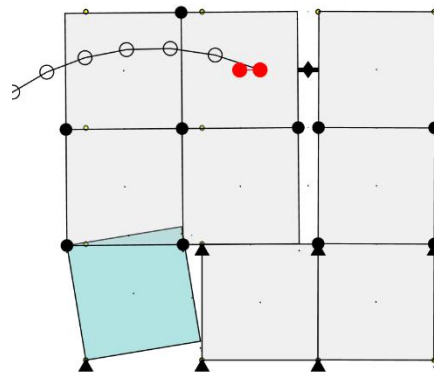


Figure 2 4-bar Linkage 의 3by3 SBM(Spring-connected Block Model)

### SBM (Spring-connected Block Model)<sup>[3]</sup>

SBM 방식은 먼저 도메인을 블록 단위로 나누고, 블록들을 가상의 spring 으로 이어, 이 spring 들에 강성도를 주어 Linkage Model 을 Design 하는 것이다. 각 블록들은 초기에 직사각형 모양으로 잡으며, 4-bar Linkage 에 기본적으로 사용되는 Revolute Joint 와 Prismatic Joint 를 구현하기 위하여, 인접하는 블록들과 붙어있는 꼭지점에서의 Revolute Joint 구현용 2 개 spring, 붙어있는 변에서의 Prismatic Joint 구현용 2 개의 직교하는 spring(Prismatic Joint 의 방향성을 설정해주기 위해 2 개가 필요하다!), 총 4 개의 spring 으로 연결되어 있으며, Ground 와도 각 꼭지점마다의 Ground Revolute Joint 구현용 4 개의 spring, 블록 자체의 Ground Prismatic Joint 구현용 2 개 총 6 개의 spring 으로 연결되어 있다. 이때 강성도에 대한 설정을 통해 각 Block 이 Rigid 하게 연결되는지, R joint 로 연결되는지, P joint 로 연결되는지가 결정된다. 또, 각 Block 은 초기에 단위 직사각형 꼴로 잡는데, 각 Node 의 초기 위치 변수, P joint 연결부의 각도 변수를 설계변수로 잡았다. 최적설계에 있어서 SBM 을 해석하는 방법은 Desired Path 에서의 End-effector 의 진행에 반대되는 방향으로 힘을 가하며, Work 의 input 값과 Output 으로 얻어지는 값을 통해 Efficiency  $\eta$  값을 1로 만드는 해석방법을 사용한다.

4bar linkage 의 SBM Model 구현에 필요한 최소한의 Block 수는 2by2 지만, 본 연구에서는 4 bar linkage 로의 최적 설계가 한계가 있을 수 있음을 감안하여, 추후 6 bar linkage 이상으로의 확장이 가능하도록 3by3 SBM Model 을 사용하였다. 또, SBM 에서의 Block 연결 spring 들의 강성도에 대한 설정은 설계 변수로 두지 않고 Topology 값으로 지정을 해주었다. 설계 변수는 3by3 Block 에서 나오는 16 개의 Node 의 초기 위치 값 (x, y)를 통해 32 개의 Shape Dof  $\xi^x$  를 얻었으며, Connecting Prismatic Joint 12 개와 Ground Prismatic Joint 9 개를 통해 각 Prismatic Joint 의 각도 변수로 21 개의 Ang Dof  $\xi^A$  를 얻었다. 제한조건은 End-effector 의 Trajectory 와 Desired Path 사이의 거리로부터 얻어지는  $\psi$  의 값이 지정한 error 값보다 작음을 만족시키면서 efficiency  $\eta$  가 1로 수렴하도록 MMA 방식을 사용하여 최적의 설계변수를 얻는 방법을 사용하였다.

이렇게 설정한 4-bar Linkage Design 의 최적설계기법을 본 Progress Report 2에서는 2 가지 Desired Path 를 설정하여 각 Path 에 대해 적용해보았다. Figure 3 에 나와있는 Path 1 은 경로 상에 Crunode (절점)이 있는 Closed Loop Path 로 설정하였다. 하지만, Gait Motion 은 사람의 보행 시에 발목이 그리는 Path 를 얻어낸 것이므로, 무릎 Exoskeleton 의 설계에 있어서는 꼭 완전한 Closed Loop Path 구현을 요구하지 않을 수 있다 생각되어 Desired Path 2 를 Open Loop Path 로 설정하여 이에 대해서도 최적설계를 해보기로 하였다.

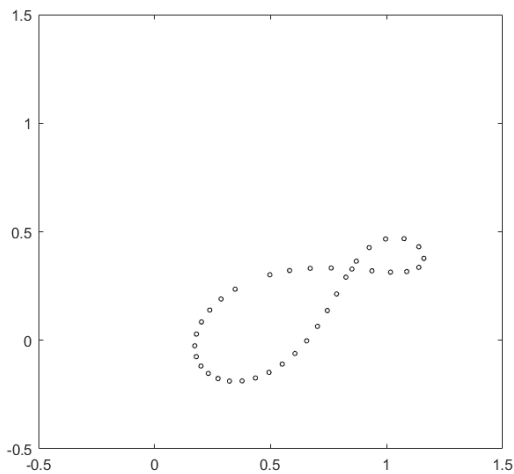


Figure 3 Desired Path 1 (Closed Loop Path)

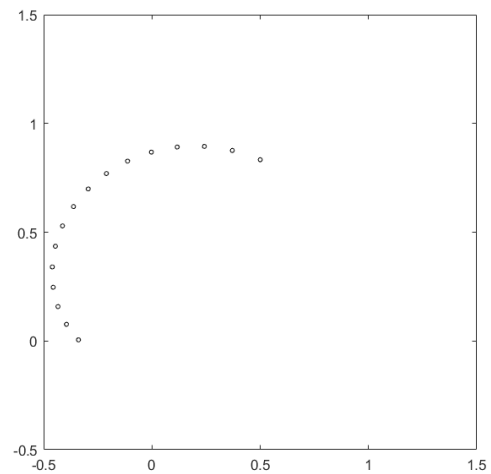


Figure 4 Desired Path 2 (Open Loop Path)

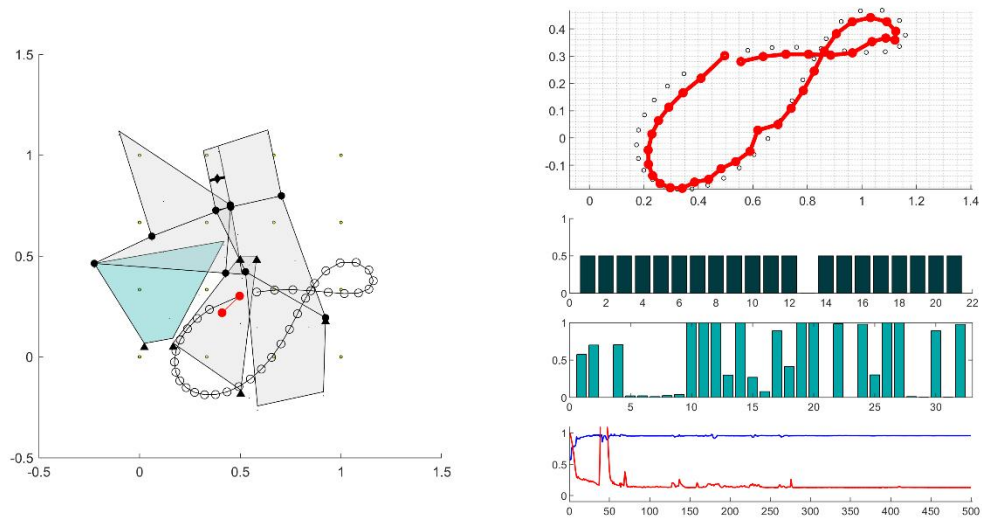


Figure 5 결과창 예시

이 최적설계를 구현할 수 있는 Matlab 코드를 구상한 후, 얻은 결과창은 Figure 5 에 나와있는 예시와 같이 나온다. 왼편의 그래프를 통해선 특정 Iteration 내에서 Input 의 Step 마다 4-bar Linkage 가 어떤 Configuration 을 갖고 있는지를 확인할 수 있고, 오른쪽 가장 위의 그래프를 통해선 이 Iteration 에서의 End-effector Trajectory(빨간색)과 Desired Path(흰 점)이 얼마나 일치하는지를 시각적으로 확인할 수 있다. 오른쪽 중앙의 두 막대그래프는 특정 Iteration 에서의 설계변수  $\xi$  에 대한 값으로, 위에서부터 순서대로 각각 Angle Dof  $\xi^A$  의 값과 Shape Dof  $\xi^x$  의 값을 나타낸다. 이때 Shape Dof는 각 Node 의 위치 변수에 의한 항으로, 초기 0.5 의 값에서 시작하여 모든 32 개의 값이 수정되는데 반해, Angle Dof는 Prismatic Joint 의 각도에 대한 term 이어서, Prismatic Joint 가 실제로 설정된 term 의 값만 변하게 된다. 0.5 의 값에서 변하지 않는 것은 Prismatic Joint 로 설정되지 않은 Angle Dof 라고 생각할 수 있다. 오른쪽 가장 아래의 그래프는 각 Iteration 에서의 Error 값과 Efficiency  $\eta$  의 값을 기록한 것으로, Error 는 빨간 선으로 표기되어 궁극적으로 0 으로 수렴하는 것을 목표로 하는 값이며, Efficiency 는 파란 선으로 표기되어 궁극적으로 1 으로 수렴하는 것을 목표로 하는 값이다.

#### Desired Path 1 에 대한 최적설계 분석

Desired Path 1 은 앞서 언급했던 것처럼 Figure 3 에 나와있는 Closed Loop Path 이며, 이때 사용한 초기 Topology 는 Figure 6 에 나와있는 것과 같다.

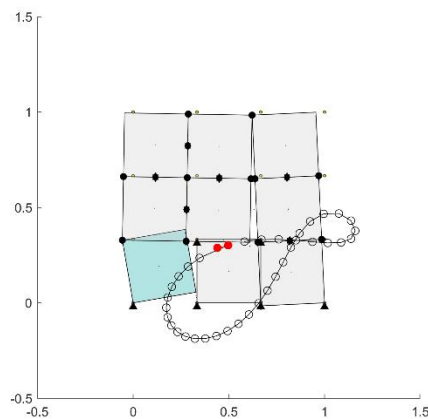


Figure 6 Desired Path 1 에서의 Topology (RRRR)

우선 Block 은 Rigid 하게 묶인 것들을 고려하면, Block 1, Block 2, (Block 3, 6, 9), (Block 4, 5, 7, 8)로 이루어져 있으며, 이중 Block 2는 바닥에 고정되어 있으면서 다른 Block 군집과의 연결이 없는 높으로 무시하면 총 4 개의 Link(바닥 포함)가 있는 4-bar Linkage 임을 알 수 있다. 각 Link 의 연결관계는, 우선 Block 1 은 Node 1 에서 Ground Revolute Joint 로 고정되어 있으며, Node 5 에서 (Block 4, 5, 7, 8)와 Revolute Joint 로 연결되어 있다. 또 (Block 3, 6, 9), (Block 4, 5, 7, 8)은 Node 15 에서 Revolute Joint 로 연결되어 있으며, (Block 3, 6, 9)는 Node 4 에서 Ground Revolute Joint 로 고정되어 있다. 즉, 이 Topology 는 4-bar RRRR Linkage 임을 알 수 있다.

이 Topology 를 만족시키는 SBM 을 이용하여 최적설계를 진행한 결과를 Iteration 0(설계변수 초기값에 의한 결과), Iteration 5, Iteration 10, Iteration 20, Iteration 100 에 대해서 데이터를 얻어 Figure 7~11 에 기록하였다.

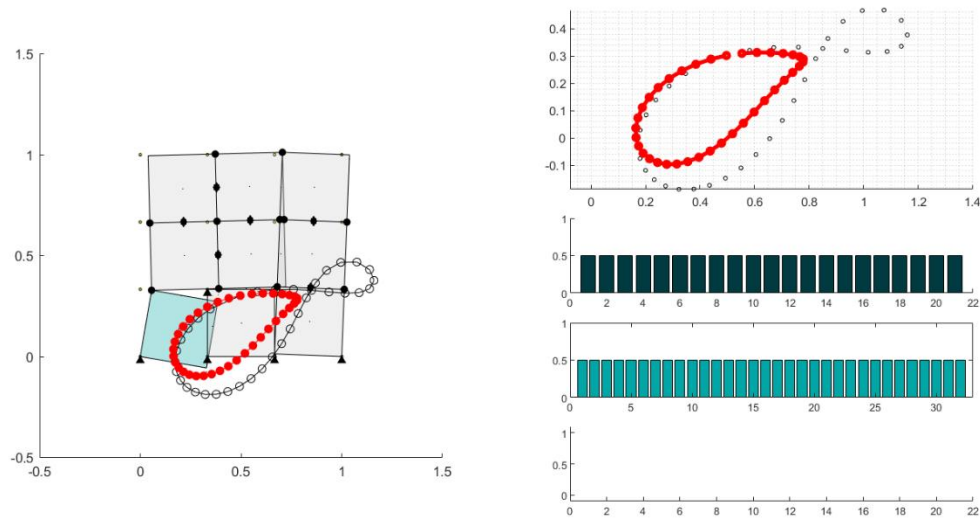


Figure 7 Desired Path 1 의 4-bar Linkage 최적설계 – Iteration 0

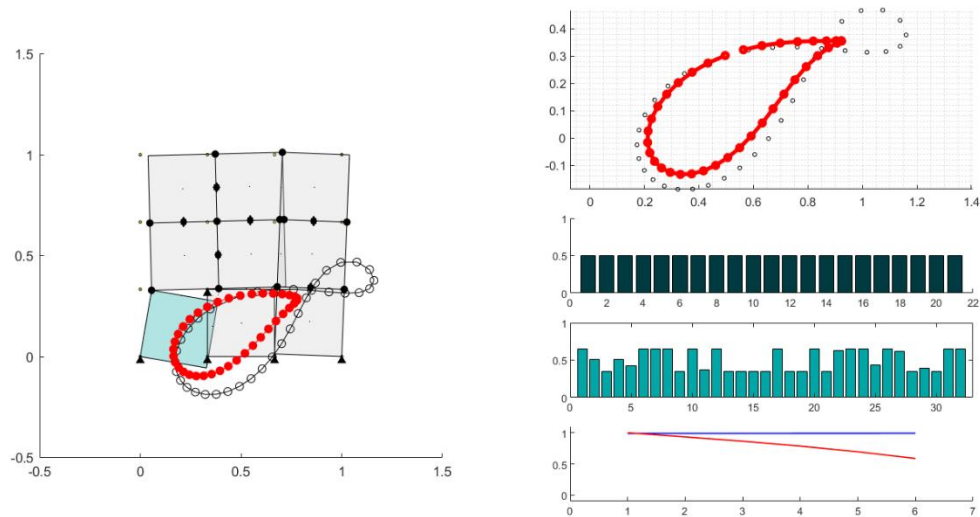


Figure 8 Desired Path 1 의 4-bar Linkage 최적설계 – Iteration 5

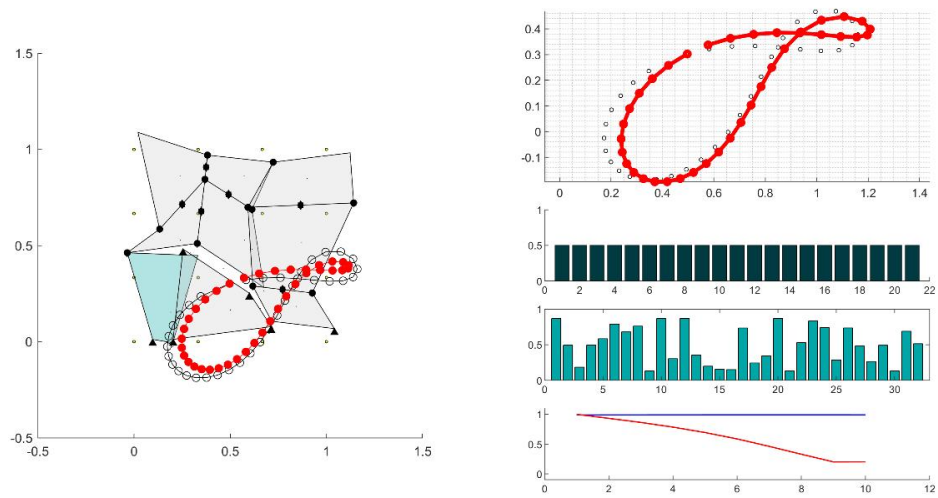


Figure 9 Desired Path 1 의 4-bar Linkage 최적설계 – Iteration 10

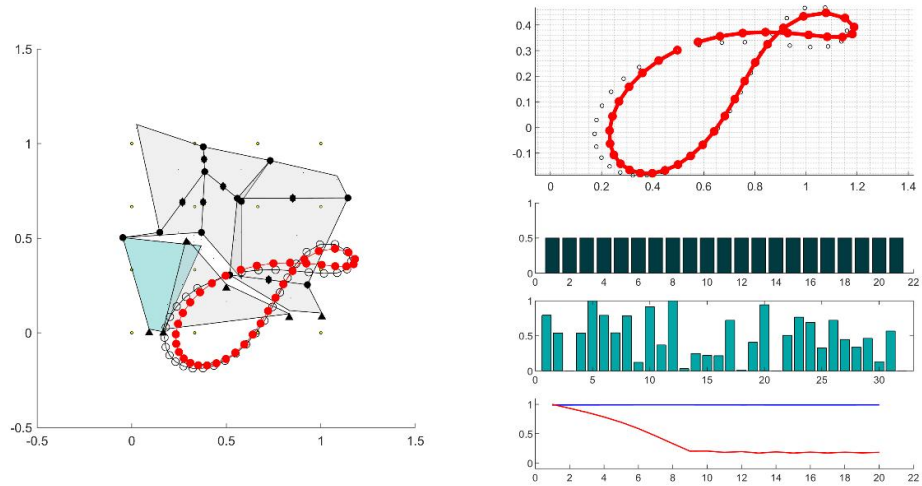


Figure 10 Desired Path 1 의 4-bar Linkage 최적설계 – Iteration 20

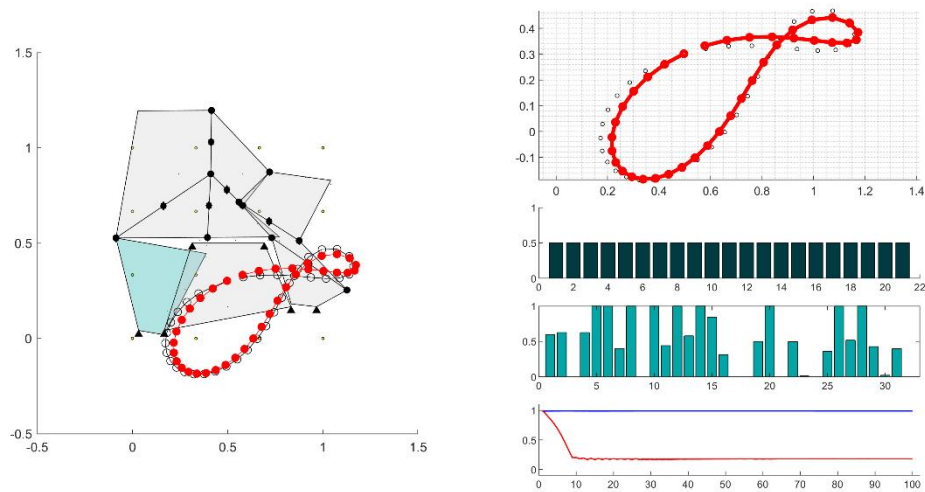


Figure 11 Desired Path 1 의 4-bar Linkage 최적설계 – Iteration 100



위의 결과 그래프들을 통해, 본 최적설계 방법을 통해서 End-effector Trajectory가 Gait Motion 과 유사한 형상을 갖는 Desired Path 1 에 Iteration 을 거듭할수록 근접하게 변해감을 확인할 수 있다. 이를 통해서 본 최적설계 방법이 꽤 효과적임을 알 수 있다. 추가로 Figure 9~11 에 나타난 Iteration 10~100 의 과정을 보면, Error 값이 작은 값에서 유지가 되며, 크게 형상이나 Path 에의 접근성이 더 좋아지지 않음을 볼 수 있다. 이 Error 값이 설정한 값보다 작은 값으로 나온 것이면 본 최적설계의 Iteration 이 끝나게 되도록 Matlab 코드를 작성하였음을 생각해볼 때, 이는 본 최적설계 방법을 통한 Design 수정이 더 이상의 효과적인 수렴을 하지 못하게 된 것이라고 생각해볼 수 있다. 즉, 본 방법을 통해 4-bar Linkage 를 Design 했을 경우, Iteration 을 100 보다 크게 충분히 늘리더라도 Figure 11 에 나와있는 정도로의 Gait motion 에 근접한 Trajectory 를 얻어낼 수는 있지만, 이정도 결과가 최적설계의 결과로 얻어지게 될 것임을 알 수 있다.

#### Desired Path 2 에 대한 최적설계 분석

Desired Path 2 은 앞서 언급했던 것처럼 Figure 4 에 나와있는 Open Loop Path 이며, 이때 사용한 초기 Topology 는 Figure 12 에 나와있는 것과 같다.

우선 Block 은 Desired Path 2 에서와 같게 Block 1, Block 2, (Block 3, 6, 9), (Block 4, 5, 7, 8)로 이루어져 있으며, Joint 의 연결 상태도 거의 같은 Topology 를 지닌다. 차이점은 (Block 3, 6, 9), (Block 4, 5, 7, 8)간의 연결이 기존의 Node 15 에서의 Revolute Joint 연결이 아닌, Block 8, Block 9 사이의 Prismatic Joint 로 있다는 점에 차이가 있다. 이를 통해 Desired Path 2 를 만족하는 설계에서의 Topology 는 4-bar RRRP Linkage 임을 알 수 있다.

Desired path 1 에서와 마찬가지로 이 Topology 를 만족시키는 SBM 을 이용하여 최적설계를 진행한 결과를 Iteration 0, Iteration 5, Iteration 10, Iteration 20, Iteration 50, Iteration 100 에 대해서 데이터를 얻어 Figure 13~18 에 기록하였다.

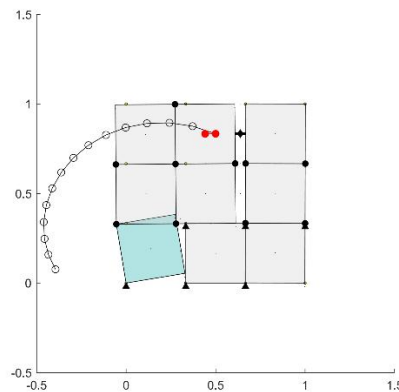


Figure 12 Desired Path 2 에서의 Topology (RRRP)

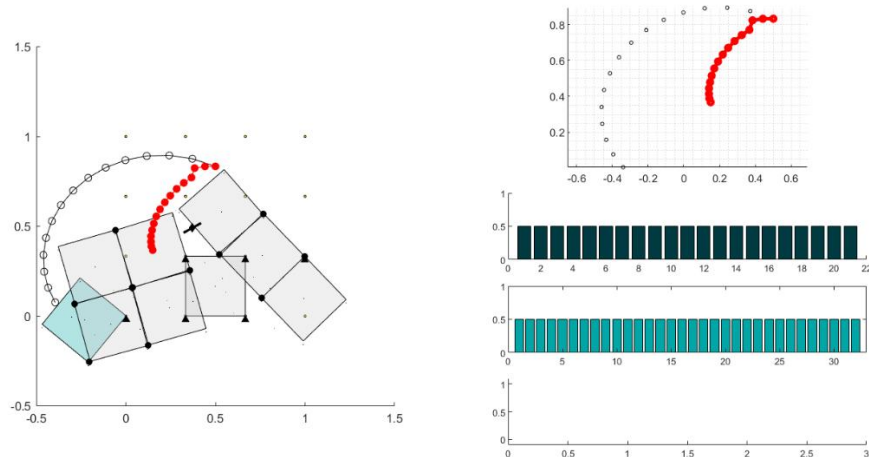


Figure 13 Desired Path 2 의 4-bar Linkage 최적설계 – Iteration 0

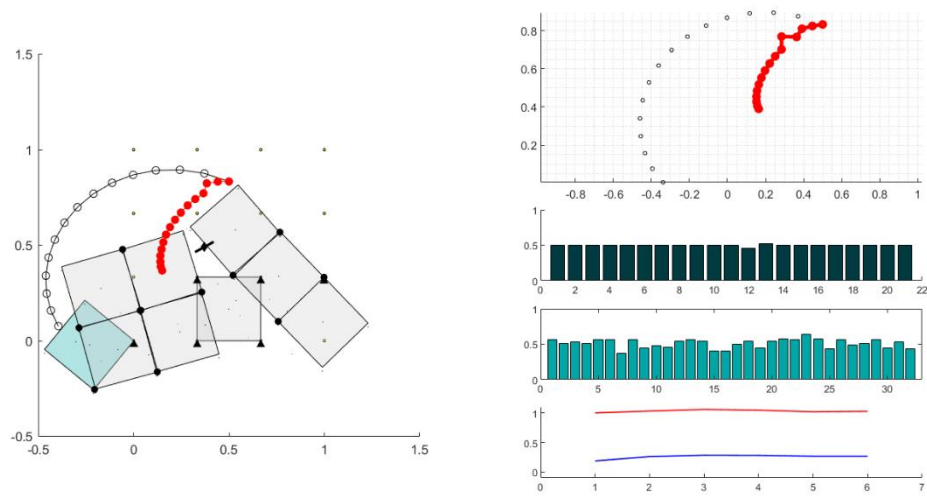


Figure 14 Desired Path 2 의 4-bar Linkage 최적설계 – Iteration 5

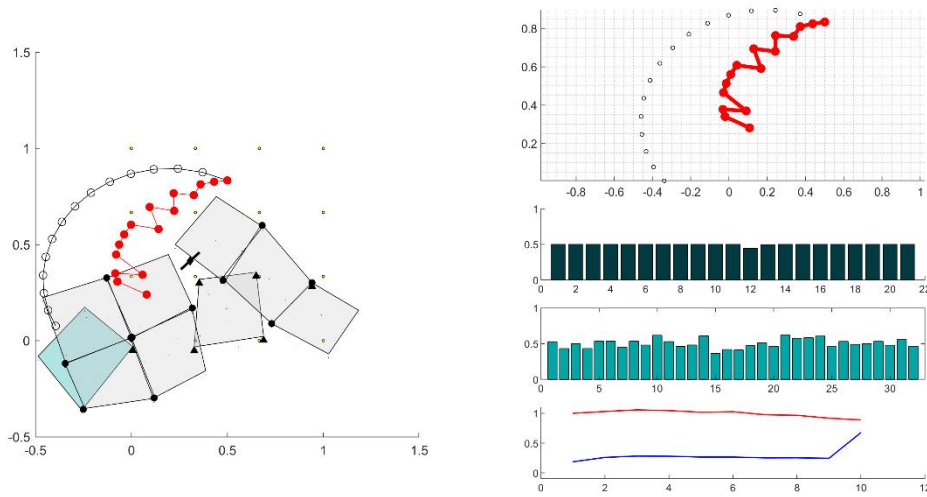


Figure 15 Desired Path 2 의 4-bar Linkage 최적설계 – Iteration 10

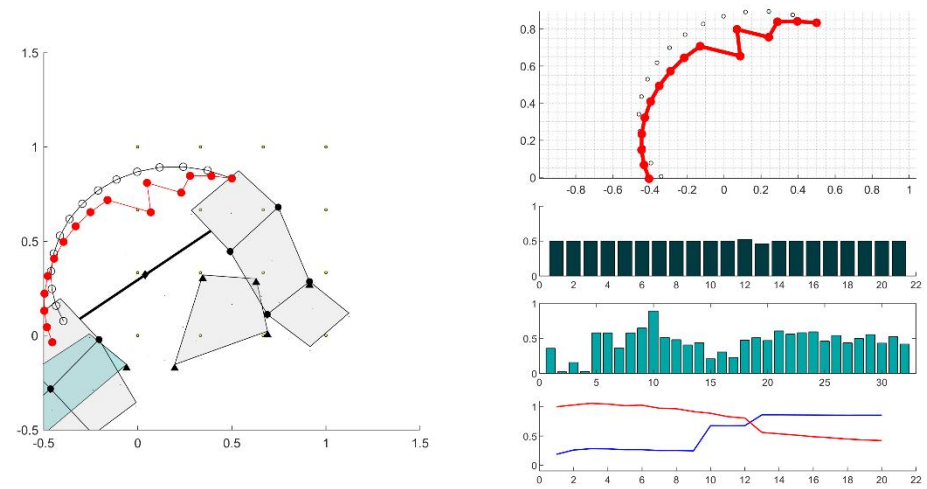


Figure 16 Desired Path 2 의 4-bar Linkage 최적설계 – Iteration 20



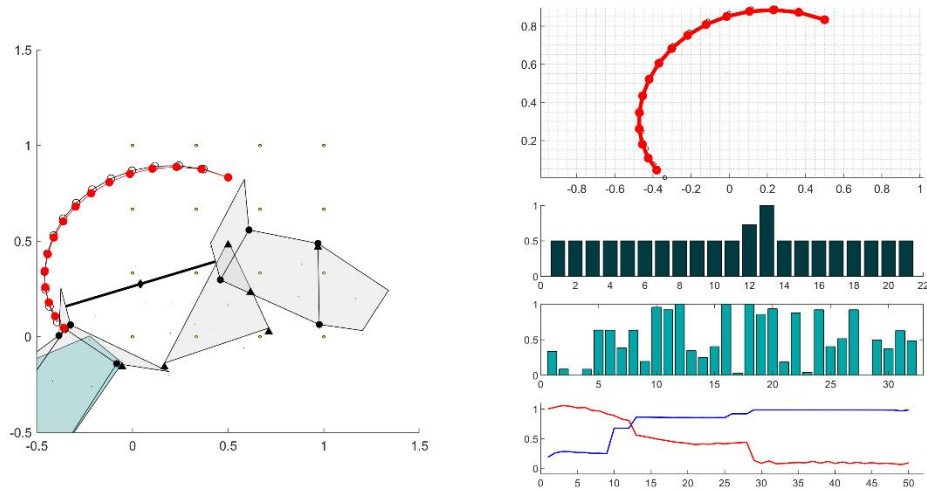


Figure 17 Desired Path 2 의 4-bar Linkage 최적설계 – Iteration 50

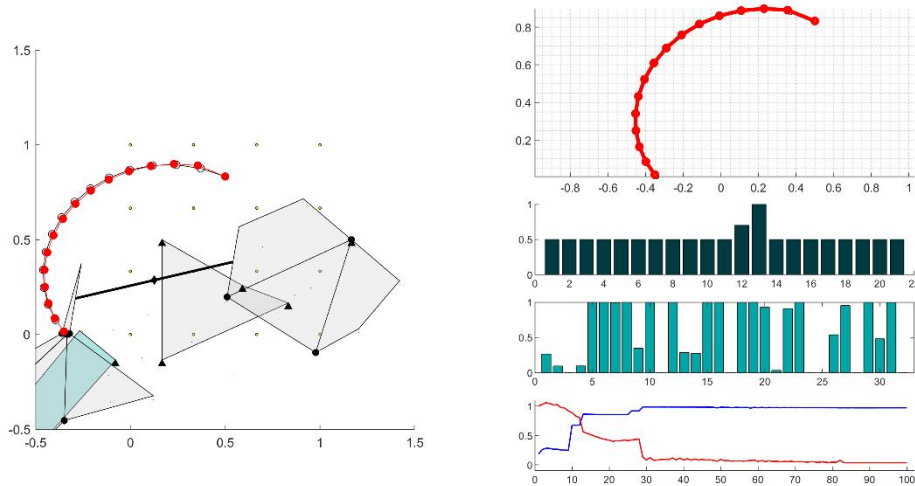


Figure 18 Desired Path 2 의 4-bar Linkage 최적설계 – Iteration 100

위의 결과 그래프들을 통해, 본 최적설계 방법을 통해서 End-effector Trajectory 가 임의의 Open Loop Path 와 유사한 형상을 갖는 Desired Path 2 에 Iteration 을 거듭할수록 근접하게 변해감을 확인할 수 있다. Desired Path 1 에 비해서는 Iteration 의 진행에 있어 수렴 속도가 느리긴 하지만, error 값이 0 근처에서 수렴한 후의 최종 Trajectory 를 보면 Desired Path 1 에서의 결과에 비해서 Desired Path 에 매우 근접한 결과를 얻어냈음을 알 수 있다. 즉, Gait Motion 의 일부나, 보행시에 고관절에 대한 무릎의 상대운동 경로만을 얻었을 경우 나타날 수 있는 Open Loop Path 에 대해서는 이에 매우 근접한 End-effector Trajectory 를 갖는 4-bar Linkage 를 본 연구의 최적설계 방법을 통해 구현할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 앞으로의 무릎 Exoskeleton 의 설계에 본 최적설계 기법이 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

## 참고문헌

- [1] "최적화(Optimization)와 최적설계(Optimal design)." *Altair Engineering*. 2020 년 6 월 17 일 수정, 2020 년 12 월 9 일 접속, <https://blog.altair.co.kr/65387>.
- [2] Krister Svanberg, 1987, "The Method of Moving Asymptotes – A New Method for Structural Optimization", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, VOL. 24, 359-373
- [3] Seok Won Kang, Yoon Young Kim , 2018, "Unified topology and joint types optimization of general planar linkage mechanisms", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, , VOL. 57, 1955-1983