

Multi-objective Genetic Algorithm 을 이용한 안센 메커니즘의 목표 궤적 트래킹 기반 최적 설계

허준 · 허영건
중앙대학교 기계공학부

Optimized design of Jansen mechanism based on target trajectory tracking method using multi-objective genetic algorithm

Joon Heo and Youngkun Hur
School of Mechanical Engineering, ChungAng University

ABSTRACT:

Recently, followed by rapid growth of robotics field, multi-linkage mechanism which can even pass by rough road is getting lots of attention. In this paper, I focused on Jansen mechanism. It's a kinematics object which is named after Dutch artist Theo jansen. Jansen mechanism embraces structure and mechanism which creates locomotion with the combination of the power and simple structure. Theo jansen suggests a 'Holy number'. It's an ideal ratio of leg components length. However, if there's desired gait locomotion, you have to adjust the ratio and the length. But even slight change of the length could cause a big change at the end-point. To solve this problem, I suggest a reverse engineering method to get a ratio of each links by nonlinear optimization with pre-set desired trajectory.

First, we converted a movement of the joint of Jansen mechanism to vectors by kinematics analysis of multi-linkage structure. And we showed the trajectory at the end-point. After that, we set desired trajectory which we found most ideal. Then we got the length of the leg components which draws a trajectory as same as trajectory we set, using Multi-objective genetic algorithm toolbox in MATLAB. Result is verified by Edison designer and mSketch. And we analyzed if it could pass through the obstruction which is set dynamically.

Key Words: Multi-linkage mechanism, Jansen mechanism, Optimization, Legged robotics, Gait locomotion, Trajectory tracking, MATLAB, Genetic algorithm, mSketch, EDISON

1. 서론

최근 로봇틱스 기술의 비약적인 발전과 맞물려 험준한 경로를 통과할 수 있는 기계장치에 대한 관심이 늘어나고 있다. 특히 2족 보행 로봇에 비해 안정적인 4족 보행 로봇에 대한 연구가 활발하다. 본 연구는 다족 로봇 보행 중, 네덜란드 출신 미술가 Theo Jansen 의 이름을 딴 기구학적 조형물인 Jansen Mechanism 에 초점을 맞췄다. 이 Jansen Mechanism 은 단순한 구조와 동력 공급만으로 locomotion 을 생성할 수 있는 multi-linkage 구조와 그 메커니즘 일체를 의미한

다. Jansen 이 제시한 holy number 라는 각 다리의 이상적인 길이 비가 있지만 원하는 gait locomotion 을 생성하기 위해서는 새로이 각 링크의 길이 비를 조정하여야 하는데, 각 링크의 길이 비는 조그만 변화에도 최종 end-point 에서의 궤적을 달리해 설계하기 까다롭다.

이러한 한계를 극복하기 위해 원하는 궤적의 형태를 설정하면 비선형적인 최적화 방법으로 각 링크의 길이 비를 산출해 주는 역설계 방법론을 고안했다.

목적을 달성하기 위해, 먼저 multi-linkage 구조의 기구학적 분석을 통해 Jansen Mechanism 각 관절의 움직임을 벡터로 변환했다. 그 다음

최종 end-point 의 궤적을 방향 벡터로 표현하고, 주어진 환경에서 가장 이상적이라 사료되는 target trajectory 를 상정했다. 그 후, MATLAB 의 multi-objective genetic algorithm toolbox 를 통해 목표 궤적과 최대한 일치하는 최종 궤적을 만드는 각 링크의 길이를 최적화시켰다. 마지막으로 CAD 프로그램인 EDISON 과 multi-linkage 해석 프로그램인 mSketch 를 통해 최종 검증을 수행하고 상정된 장애물들을 통과할 수 있는지에 대한 해석을 수행하였다.

2. Jansen Mechanism 궤적 도출

2.1 Multi-linkage end-point 위치 해석

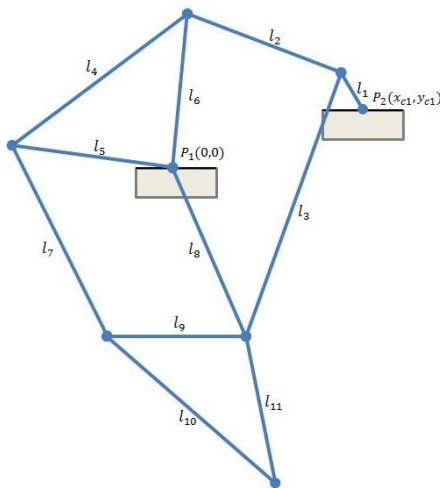


Fig. 3 Jansen Mechanism 의 구조

Figure 1 에서 볼 수 있듯이 Jansen Mechanism 은 11 개의 링크로 구성된 1 자유도 평면 linkage 로 표현된다. 먼저 기구 구동의 중심점이 될 점을 $P_1(0,0)$, 원점으로 설정하고 원점으로 설정하고, Actuator 가 부착되는 부분을 $P_2(x_{c1}, y_{c1})$ 으로 두었다. 그 다음 각 링크마다 길이 변수를 l_1 부터 l_{11} 까지 이름 붙였다. 각 링크의 양 끝단에도 그를 표현하는 점을 상정해 두었는데, 그에 대한 정보는 다음과 같다.

Table 1 각 링크와 링크 양단의 정보

Link #	Start Point	End Point
l_1	P_2	P_3
l_2	P_3	P_4
l_3	P_3	P_6
l_4	P_4	P_5
l_5	P_1	P_5
l_6	P_1	P_4
l_7	P_5	P_7
l_8	P_1	P_6
l_9	P_6	P_7
l_{10}	P_7	P_8
l_{11}	P_6	P_8

여기서 이야기 할 bilateration 행렬은 각 링크의 끝점이 이동 가능한 위치를 찾기 위해 사용된다. 만약 이동하는 위치를 알고 싶은 한 점 P_k 와 위치를 이미 알고 있는 두 점 P_i, P_j 이 있다면, 이는 bilateration 행렬을 이용한 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$p_{i,k} = Z_{i,j,k} p_{i,j}$$

여기서 $p_{i,j}$ 는 벡터 $\overrightarrow{P_i P_j}$ 를 의미하고, bilateration 행렬은 다음과 같이 나타낸다.

$$Z_{i,j,k} = \frac{1}{2s_{i,j}} \begin{bmatrix} s_{i,j} + s_{i,k} - s_{j,k} & -4A_{i,j,k} \\ 4A_{i,j,k} & s_{i,j} + s_{i,k} - s_{j,k} \end{bmatrix}$$

$$A_{i,j,k} = \pm \frac{1}{4} \sqrt{(s_{i,j} + s_{i,k} + s_{j,k})^2 - 2(s_{i,j}^2 + s_{i,k}^2 + s_{j,k}^2)}$$

$$s_{i,j} = l_{i,j}^2 = \|p_{i,j}\|^2$$

$A_{i,j,k}$ 는 $\Delta P_i P_j P_k$ 의 면적을 의미한다.

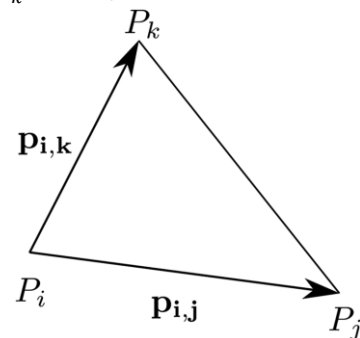


Fig. 2 Bilateration 행렬

2.2 Jansen Mechanism 각 링크의 궤적 계산

여기서 제시한 bilateration 행렬을 Jansen mechanism 에 적용하여 보았다. 다음은 본 연구에서 상정한 각 링크에 대한 위치를 구하기

위한 수식이다. 본 수행 과정은 MATLAB 을 통해 계산되었다.

$$p_{1,3} = Z_{1,2,3} p_{1,2} \quad (1)$$

$$p_{1,4} = Z_{1,3,4} p_{1,3} \quad (2)$$

$$p_{1,5} = Z_{1,4,5} p_{1,4} = Z_{1,4,5} Z_{1,3,4} p_{1,3} \quad (3)$$

$$p_{1,6} = Z_{1,3,6} p_{1,3} \quad (4)$$

$$p_{5,6} = -p_{1,5} + p_{1,6} = (-Z_{1,4,5} Z_{1,3,4} + Z_{1,3,6}) p_{1,3} \quad (5)$$

$$s_{5,6} = \det(-Z_{1,4,5} Z_{1,3,4} + Z_{1,3,6}) s_{1,3} \quad (6)$$

$$p_{6,7} = -Z_{6,5,7} p_{5,6} \quad (7)$$

$$p_{6,8} = Z_{6,7,8} p_{6,7} = -Z_{6,7,8} Z_{6,5,7} (-Z_{1,4,5} Z_{1,3,4} + Z_{1,3,6}) p_{1,3} \quad (8)$$

$$p_{1,8} = p_{1,6} + p_{6,8} = (Z_{1,3,6} - Z_{6,7,8} Z_{6,5,7} (-Z_{1,4,5} Z_{1,3,4} + Z_{1,3,6})) Z_{1,2,3} p_{1,2} \quad (9)$$

위 식 (1)부터 (9)까지는 고정점 $P_1(0,0)$ 기준에서의 점 P_9 위치벡터를 구하는 계산 순서이다. 이 단계의 신뢰성을 확보하기 위해 프로그램과 mSketch 에 동일한 임의의 링크 길이 값을 넣고 둘의 궤적이 일치하는지 확인하였다.

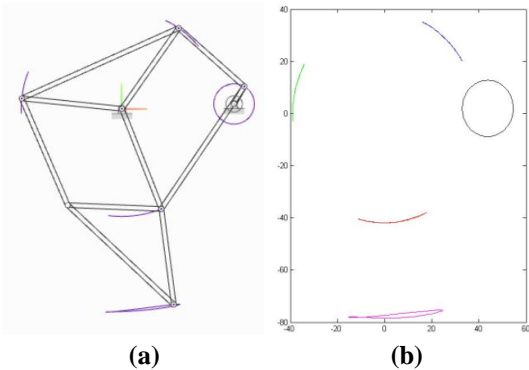


Fig. 3 (a) mSketch 를 통한 궤적 검증
(b) bilateration 을 통한 궤적 검증

2.3 목표 궤적 설정

이번 연구에서는 구동 모터의 한 바퀴 회전을 100 등분하여, 모터가 한 바퀴 도는 동안의 끝 점 궤적을 구하였다. 이를 통해 두 가지를 알 수 있었는데, 하나는 궤적의 시간에 따른 방향성과 또 궤적의 위치이다. 또한 모터가 일정한 각속도로 회전하고 있으므로 끝 점 궤적의 속도까지 알 수 있다.

여기서 우리는 먼저 시간에 따른 궤적의 방향에 집중했다. 시간에 따른 궤적의 움직임을 단위 방향 벡터로 나타내었고, 이를 궤적 가장 오른쪽에서부터 차례로 우리가 임의로 상정해둔 16 개의 방향 벡터에 가장 가까운 쪽으로 1 부터 16 까지 숫자를 매겼다. 다음 Fig. 4 에서처럼 3 시 방향에서부터 반시계 방향으로 1 부터 16 까지를 의미한다.

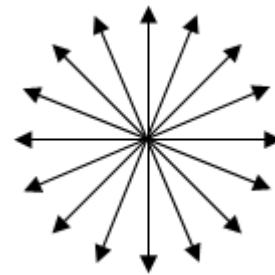


Fig. 4 상정해둔 방향 벡터

그 다음 이에 대응시킬 목표 궤적을 설정한다. 목표 궤적을 정하기 위해 몇 가지 기준을 두었다.

① 발이 지면에 닿아 있을 동안 궤적은 직선을 그려야 하고 속도가 일정해야 한다.

이것은 발이 지면에 닿아 있을 때 몸체에 대한 발의 상대 가속도가 0이 되어야 이상적이기 때문이다. 이런 이상적인 경우, 몸체의 지면에 대한 가속도 또한 0이 되고 발이 궤적을 그리는 동안 drag force 가 발생할 가능성을 줄일 수 있어 더욱 효율적이다.

② 크랭크는 운동하는 동안 일정한 각속도를 가져야 한다.

크랭크의 각속도가 일정하게 유지될 때, 다리의 각 부위들이 이상적인 속도와 가속도를 가진다. 각 부위들이 일정한 움직임을 가져야 발이 지면에 닿아 있을 때 속도가 일정하다.

③ 발을 들어올릴 때와 내릴 때의 궤적이 대칭이 되어야 한다.

둘의 궤적이 대칭이란 것은 발을 올릴 때, 소모하는 에너지와 내릴 때 보상되는 에너지가 같다는 의미이다. 이는 크랭크에 전달되는 알짜 힘을 최소화한다.

④ 발이 지면에 닿아 있을 시간이 길어야 한다.

더 빨리 이동하기 위해서는 발이 지면에 닿아 있는 시간이 길어야 하며, 운동하는 동안의 안정성이 높아진다.

⑤궤적의 높이가 충분히 높아야 한다
장애물을 넘기 위해서 궤적의 높이가 충분히 높아야 한다.

이러한 기준을 바탕으로 목표 궤적으로 잡을 이상적인 궤적을 다음과 같이 설정했다.

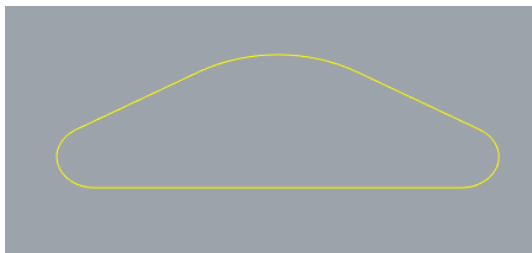


Fig. 5 목표 궤적 스케치

그 후 설정한 목표 궤적을 계산되는 궤적과 같이 방향과 속도를 고려하여 100 등분 하여 방향성을 나타내는 배열로서 나타냈다.

3. Multi-objective GA 를 이용한 최적화

3.1 Multi-objective 유전 알고리즘

Genetic Algorithm(유전 알고리즘)은 생명의 진화론에 기반을 둔 비선형 최적화 알고리즘이다. 1세대부터 n세대까지 적자 생존과 유전 그리고 돌연변이 등의 특성을 이용해 최적의 해를 구하는 것이다. 이 알고리즘에서 사용되는 몇 가지 용어가 있다. 먼저 number of variable 은 말 그대로 최적화 시킬 objective function 을 구성하는 변수의 개수다. 그리고 population 이란 각 변수를 이루고 있는 상태 값이다. 이 값들이 목적 함수에 대입되어 적합도를 판별하게 된다.

우리는 목표 궤적의 방향 벡터 배열과 계산된 궤적의 방향 벡터 배열을 비교하여 일치함의 정도가 높을수록 높은 점수를 매기고, 가장 높은 점수를 획득하는 궤적을 채택하는 방식으로 목적 함수를 구성했다. 유전 알고리즘은 MATLAB 에 내장되어 있는 Optimization Toolbox 를 사용했다. l_1 을 10mm 로 정해두고 P_1 의 좌표 x_{c1} , y_{c1} 와 Figure 1에 명시해 둔 각 링크의 길이 비

$l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7, l_8, l_9, l_{10}, l_{11}$ 총 12개의 number of variable 을 구성하였다. 또한 빠른 수렴을 위해 각 변수의 하한 값을 [10, -10, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2]로, 상한 값을 [60, 15, 10, 10, 6, 10, 5, 10, 5, 10, 10, 10]로 두었다. 마찬가지로 더 효율적인 수렴을 위해 각 값의 1세대 population 을 mSketch 를 통해 [32.436, 4.632, 4.849, 5.303, 3.833, 3.534, 3.229, 3.528, 3.357, 3.528, 5.866, 4.53]로 설정하여 최적화 하였다.

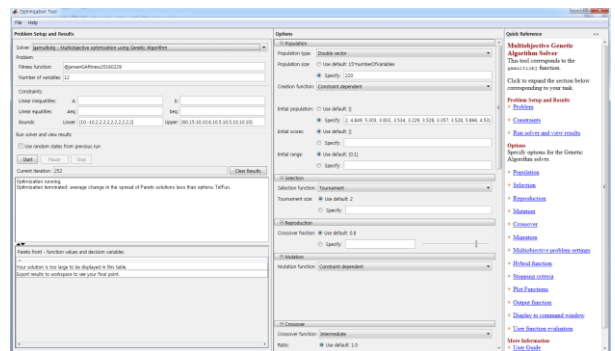
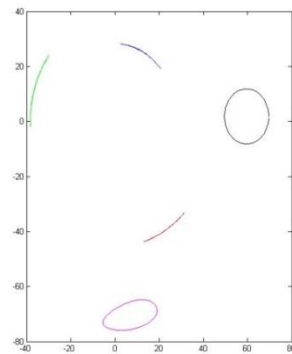
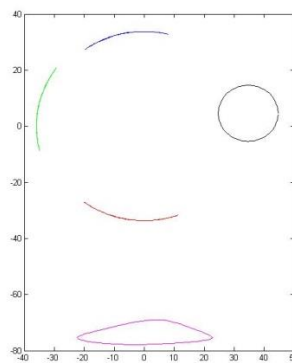


Fig. 6 MATLAB GA Toolbox



(a)



(b)

Fig. 7 (a) 초기 세대의 궤적
(b) 최종 세대의 궤적

초기 세대와 최종 세대의 결과 궤적이 확연히 차이 나는 것을 확인할 수 있다.

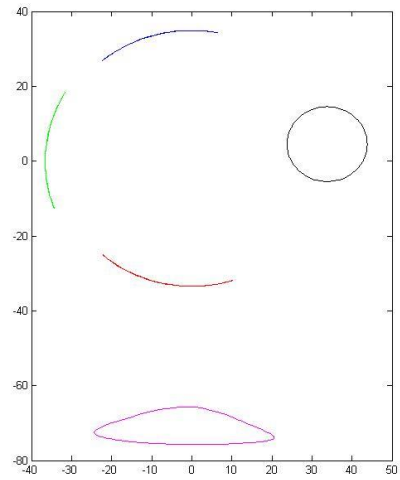
3.2 최적화 된 결과값

다음은 세 번의 본 최적화 과정을 통해 도출된 결과값이다. Genetic Algorithm 의 특성상 매 과정마다 조금씩 다른 최적화 값을 제시해주지만, 그 값들이 대동소이함을 확인할 수 있다.

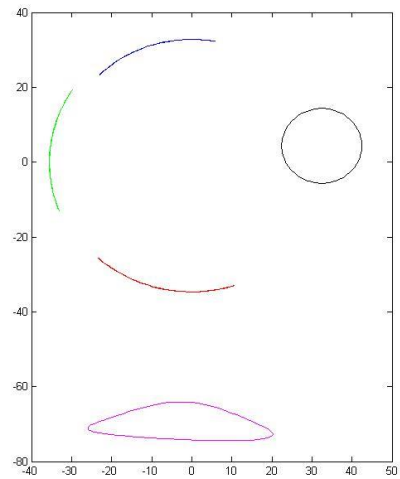
Table 2 도출된 결과값

Trial #		1	2	3
(mm)	Xc1	32.6181	32.4444	33.8126
	Yc1	4.7303	4.3477	4.5403
length ratio (1 = 10mm)	l1	1.0000	1.0000	1.0000
	l2	4.8655	4.8598	5.0384
	l3	5.4558	5.3295	5.3346
	l4	4.0379	3.7870	4.1279
	l5	3.5951	3.5520	3.6565
	l6	3.2794	3.2782	3.4905
	l7	3.6020	3.5688	3.9866
	l8	3.4564	3.4665	3.3470
	l9	3.7330	3.5632	3.9260
	l10	6.0000	5.8821	5.9315
	l11	4.5773	4.1438	4.3598

다음 Figure 8(a), (b), (c)는 각 결과값에 따라 생성된 궤적이다.

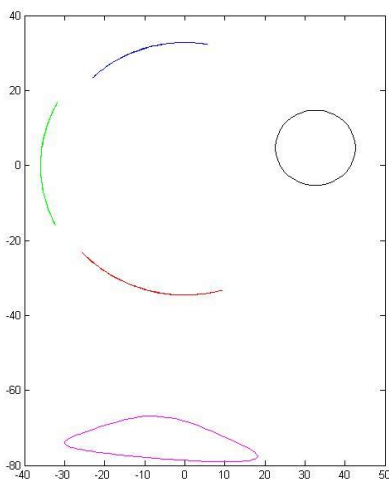


(b)



(c)

Fig. 8 (a) trial 1 의 궤적
(b) trial 2 의 궤적
(c) trial 3 의 궤적



(a)

3.3 끝 점 궤적 해석을 통한 최종 모델 선정

앞서 소개하였듯 유전 알고리즘을 통해 세 가지의 최적 궤적을 도출해낼 수 있었다. 위 세가지 output 중에서 2.3 에서 목표 궤적을 설정할 때, 염두 했던 요소들을 고려해 결과를 해석 비교하여 최종 모델을 선정하였다.

먼저 궤적이 지면에 닿아있을 경우에 최대한 직선이 되는 조건과 다리를 들고 내릴 때 궤적이 대칭을 이루는지, 그리고 발이 지면에 닿는 길이와 상정된 장애물을 충분히 지날 수 있을 만큼 충분히 다리를 들어올릴 수 있는지에 대한 것을 파악하기 위해 actuator 각도에 따른 각 궤적의 좌표를 분석하였다.

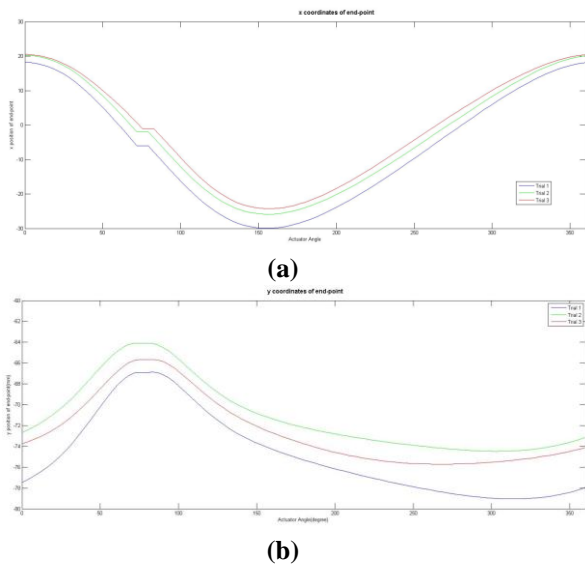


Fig. 9(a) 각 궤적의 x 위치 좌표(mm)
(b) 각 궤적의 y 위치 좌표(mm)

Figure 9(a)와 (b)는 각각 시도에서 구한 끝 점 궤적의 x, y 좌표점이다. 파란선, 녹색선, 붉은 선 순서로 trial 1, 2, 3 순서이다. 위 자료를 보면 먼저 다리를 들고 내릴 때의 곡률이 비슷한 것이 확인된다. 그 차이가 육안으로 보아도 크지 않아 세가지 경우 모두 궤적의 대칭성은 만족하는 것으로 간주하였다. 그리고 궤적이 지면에 닿아있을 경우 최대한 직선이 되는 조건을 고려했는데, y 좌표를 나타낸 그래프를 확인하면 trial 1 에 비해 trial 2, 3 이 보다 더 지면과 직선을 유지함을 알 수 있다. 위 자료에서 마지막으로 한 가지 더 고려한 것은 다리가 한 cycle 에 얼마나 많이 지면에 닿아있을 수 있는 지를 나타내는 stride length 와 충분히 다리를 들어올릴 수 있는지에 대한 step height 에 대한 분석이다.

각각에 대한 자료는 아래 테이블에 기술해두었다.

Table 3 Stride length 와 Step Height

	Trial 1	Trial 2	Trial 3
Stride Length(mm)	48.2217	46.1430	44.8293
Step Height(mm)	12.1928	10.3735	10.0573

위 테이블은 l_1 의 길이가 10mm 일 때의 경우를 두고 구한 값이다. Trial 3 에서 Trial 1 로 갈수록 stride length 와 step height 모두 증가하는 추세를 확인할 수 있다.

마지막으로 에너지 관점에서 효율을 극대화시키기 위해 일정한 각속도로 궤적이 움직이느냐에 대한 분석이 필요하다.

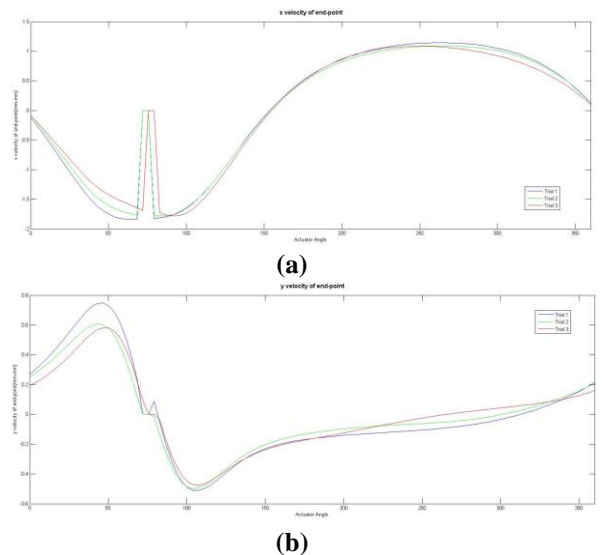


Fig. 10(a) 각 궤적의 x 방향 속도(mm-mm)
(b) 각 궤적의 y 방향 속도(mm-mm)

Figure 10(a)와 (b)는 각각 시도에서 구한 끝 점 궤적의 x, y 좌표의 변화 정도로, actuator 의 각속도가 일정하므로 위 자료를 궤적의 각속도로 간주하고 볼 수 있다. 위 그래프에서 값이 살짝 튀는 현상은 수치해석적인 오류로 간주했다.

또 한 가지 고려해야 할 것은 에너지 효율을 극대화시키기 위해서 궤적이 최대한 일정한 각속도로 운동하는 것이 이상적이라고 앞서 언급하였다. 그를 위해 actuator 각도에 따른 각 궤적의 속도도 함께 분석하였다. 방금 언급한 이상적인 요건을 충족시키는 관점으로 봤을 때,

위의 Figure 10 을 보면 trial 3, trial 2, trial 1 순서로 에너지 효율이 좋음을 알 수 있다.

위 결과들을 토대로 우리는 trial 2 의 결과 값을 최종적인 모델로 선정할 수 있었다.

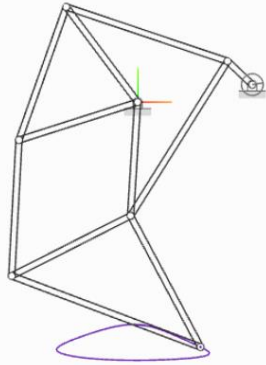


Fig. 11 mSketch 를 통한 최종 모델 검증

마지막으로 최종적인 모델을 mSketch 를 통해 시뮬레이션 해보고 검증 과정을 거쳤다. 그 결과 l_1 이 10mm 인 경우, 지면과 닿는다고 여길 수 있는 범위의 길이인 GL 이 42.435mm 그리고 actuator 운동 한 주기에 지면과 발이 붙어있는 시간을 비율적으로 나타낸 GAC 는 0.453 으로 초기에 목표로 설정했던 설계 방향에 적합하게 최적화 되었음을 확인할 수 있었다.

마지막으로 기구 전체의 안정성을 위해 각 다리의 위상이 정반대가 되는 $\frac{\pi}{2}$ 지점에 보조 다리를 하나씩 더해 달아 최종적인 모델을 완성하였다.

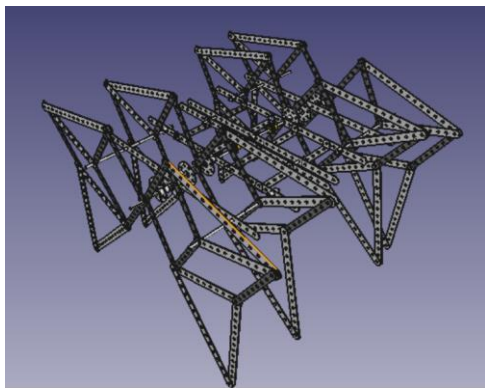


Fig. 12 EDISON 을 이용한 최종 구조 설계

본 연구를 통해 다관절 기구의 최적화 방법을 찾아냄과 동시에 오픈소스 소프트웨어인 mSketch 와 EDISON 의 기능성 또한 확인할 수 있었다. 먼저 다관절 링크 구조의 기구학적인 해석을 간편한 GUI 와 UI 를 통해 구현할 수 있었는데, GAC 와 GL 등 기존 MATLAB 등의 해석 프로그램으로 구해내기 번거로운 작업들을 클릭 한 번으로 구할 수 있었다. EDISON 또한 직관적이고 간편한 이용법이 기존의 CAD 프로그램들과의 확연한 차별성으로 느껴졌다. 단 하나 아쉬운 점은 두 소프트웨어 모두 view 의 이동이 자유롭지 않거나 불편한 것과 구속 조건의 개별 해제가 쉽지 않은 것이다.

다시 연구 내용으로 돌아가자면, 본 연구는 multi-linkage 로 구성된 4 족 보행 장치를 창작자가 원하는 목적에 맞추어 구동될 수 있도록 하기 위해 진행된 연구이다. 보행 장치는 시간이 갈수록 그 중요성이 부각되고 있고, 그에 따라 어떠한 환경이든 주행이 가능하도록 하는 설계 방법의 중요성도 주목된다. 해당 연구에서는 최적화 시킬 기구를 Jansen Mechanism 으로 두고, 주어진 환경 조건을 바탕으로 가장 이상적인 end-point 의 궤적을 따라가도록 최적화하는 것을 유전 알고리즘을 통해 성공적으로 수행할 수 있었다. 이를 바탕으로 단순한 구조를 가지면서도 상황에 맞게 최적의 궤적으로 움직일 수 있도록 하는 가변 길이 링크로 이루어진 기구 설계 등 다방면에서의 활용이 이루어 질 것이라 기대된다.

7. 감사의 글

8. 본 논문은 2015 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임

9. This research was supported by the EDISON Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning

10. (No. 2014M3C1A6038793)

4. 결론

11. 참고문헌

- (1) Stelian Coros, Bernhard Thomaszewski, Gioacchino Noris, *Computational Design of Mechanical Characters*, Disney Research Zurich, Disney Research Boston, MIT CSAIL
- (2) Nicolas Rojas, *DISTANCE-BASED FORMULATIONS FOR THE POSITION ANALYSIS OF KINEMATIC CHAINS*, Ph.D. Thesis, Universitat politecnica De Catalunya
- (3) Shunsuke Nansai, Mohan Rajesh Elara, Masami Iwase, 2015, *On a Jansen leg with multiple gait patterns for reconfigurable walking platforms*, Department of Advanced Multidisciplinary Engineering, Tokyo Denki University, Tokyo
- (4) Amanda Ghassaei, 2011, *The Design and Optimization of a Crank-Based Leg Mechanism*, Pomona College Department of Physics and Astronomy
- (5) Shunsuke Nansai, Mohan Rajesh Elara, Masami Iwase, 2013, *Dynamic Analysis and Modeling of Jansen Mechanism*, Department of Advanced Multidisciplinary Engineering, Tokyo Denki University, Tokyo
- (6) Andrew Chopperfield, Peter Fleming, Hartmut Pohlheim, Carlos Fonseca, *Genetic Algorithm TOOLBOX For Use with MATLAB version 1.2*, Department of Automatic Control and Systems Engineering, University of SHEFFIELD