

<응용논문>

1226-0606

pISSN

eISSN 2288-6036

타워워커: 보행 경로 최적화와 극대화된 다리 길이를 통한 속도 향상

남지원
카이스트 산업디자인과

TowerWalker: Speed improvement through trajectory optimization and maximally elongated leg

Jiwon Nam

Dept. of Industrial Design, KAIST

ABSTRACT:

In order to maximize the speed of Theo Jansen Mechanism in an given design space and prototyping material, the trajectory path was maximized according to several literature reviews, and the lower leg was elongated maximally in order to minimize the shift between support phase and transfer phase.

Key Words: Elongated, Mechanism simulation, Robotics, Simulation prototyping, Speed, Theo Jansen Mechanism planning, Trajectory, Walking trajectory

Received 0 xxxx 0000; received in revised form 0 xxxx 0000; accepted 0 xxxx 0000 [학회작성]

1. 서론

로봇이나 원격 조종 사물의 경우 종종 기동성을 필요로 한다. 이 때 종종 사용되는 메카니즘이 4 른 바퀴 메카니즘인데 일반적인 경우, 예컨대 포장 도로를 달리는 경우가 아닌 이상 여러가지 문제점을 직면하게 된다. 첫째로, 바퀴의 회전면이 땅과 닿기 때문에 험한 지형일 경우 바퀴의 파손 가능성이 있다. 둘째로, 바퀴의 회전면 반지름 간격 부위에 구동부가 위치해 있으므로 진흙이나 물, 모래 등이 들어가면 바

퀴의 회전 동작을 방해 받을 수가 있다. 그 외에도 바퀴의 회전 운동과 마찰력 등을 고려하면 험난한 지형에선 속도나 안정적인 이동에 직접적인 제한을 받을 수가 있다. 이러한 이유로 대체되는 메카니즘이 바로 테오얀센 메카니즘으로써 주로 걷는 로봇을 위해 사용되며 4 절 링크 이론을 도입한다. 험난한 지형을 극복하기 위한 로봇 메카니즘으로 족절 메카니즘이 이용되며^[1], 이 중 하나가 바로 테오얀센(Theo Jansen) 메카니즘이다. 4 절 링크 이론을 응용하는 덕분에 테오얀센 메커니즘은 무게중심 상하 변동 최소

† Corresponding Author, yykim@snu.ac.kr [8Point Times New Roman]
© 0000 Society of CAD/CAM Engineers [학회작성]

화로 소모 에너지를 최소화할^[2] 수 있다. 이에 과학상자 DC 모터 같은 비교적 보급적인 동력원으로 제작 및 제어가 가능하다. 테오안센의 걷는 동작은 지형의 높낮이나 거친 정도를 극복하는데 적합하다. 테오안센의 중점이 되는 4 절 링크의 경우 설계 단계에서 일정 정도 경로 설계가 가능하기 때문에 교육^[3]이나 산업 분야^[4]에서도 활용되는 메카니즘이다. 마찬가지로 테오안센에서 역시 설계 단계에서 4 절 링크 이론에 의해 원하는 Walking Trajectory 를 수학적 범위 내에서 예측하고 설계할 수 있다.

본 논문은 Walking Trajectory 를 테오안센 메카니즘의 최적화 중심 기준으로 잡고, 이 과정에서 극대화로 확장된 다리 길이가 속도 향상에 기여할 수 있다는 가설을 세운 뒤 제작을 진행하였다. ;

본 논문에서는 이러한 테오안센 메카니즘의 속도 향상과 프로토타이핑 제작을 위해 Edison 전산설계 프로그램들이 사용되었다. 사용된 프로그램은 Edison Jansen Mechanism Solver, Edison M.Sketch, Adobe Illustrator, Laster cutter driver 이며 설계, 도면 디자인, 제작의 단계를 거쳐 완성되었다. 사용된 재료는 제일과학 과학상자 300 번과 3t 두께의 아크릴이다.

2. 설계

2.1 Literature Review

실제 설계를 시작하기 앞서 학술적으로 신뢰할 수 있는 뼈대 및 시작점을 잡기 위하여 기존의 테오안센 기구 설계 및 제작에 관련된 논문들을 살펴보았다. 기본적인 길이와 비율, 최적화 기준들을 중점적으로 참고했다.

2.1.1 Basics

기본적인 테오안센 구조에서 출발하여 기존 논문의 최적화 비율과 길이를 참고하였다. 이때 테오안센의 기본 구조라고 하면 1 유닛(Unit)의 다리를 기준으로 할 때, 하부 다리와 상부 다리, 그리고 두 다리를 잇는 4 절 링크 형태의 2 개 절, 회전 축(Crank)을 맡는 짧은 절, 그리고 회전 축과 하부 다리, 상부 다리를 잇는 2 개의 절을 뜻한다. Fig. 1 이 이해를 도울 것이다. 이때 회전 축과 상부 다리의 밑 부분은 수직으로 연결된 앵커(Anchor)에 고정된다. 실제 수학적 분석과 계산을 통해 최적화 길이를 제안한

Ghassaei 의 최적화 가이드라인^[5]을 설계의 시작점으로 삼았다. Fig. 1 이 Ghassaei 의 테오안센 앵커 좌표와 각 링크 길이들을 보여준다.

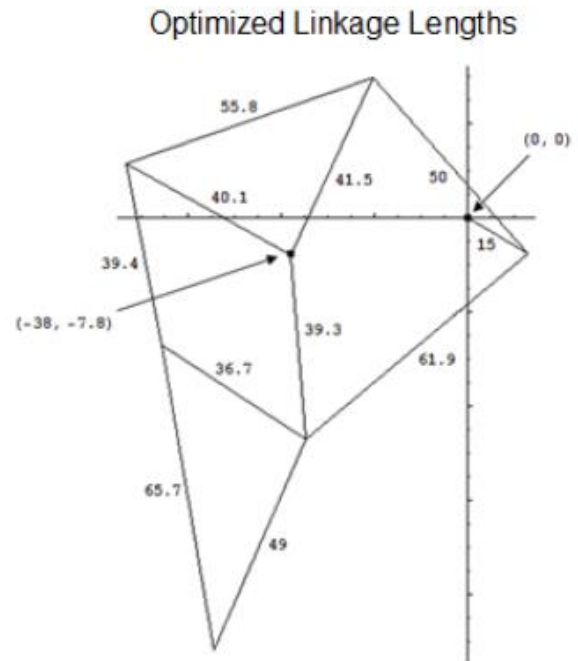


Fig. 1 Positions with coordinates indicate anchor point

이에 더해 실제 제작하여 걷는 과정에 있어서 참고해야할 사안들을 사전에 정리했다. 테오안센을 통해 4 족을 구현할 경우 이동 중 몸체의 상하 운동이 심해 에너지 손실이 크며 안정적인 이동에 방해를 받는다^[6]. 때문에 본 논문은 설계 단계에서 미리 8 족 테오안센을 토대로 하여 작업을 시작했다. 추가적으로 1 번 링크와 7 번 링크가 가장 큰 힘을 받는다는 실험 결과를 이용, 그 부분에 곡선 도면을 적용해 힘의 작용을 다른 부위로 퍼뜨려 테오안센 구조에 가는 부담을 완화하고자 했다^[6]. Fig. 2 는 테오 안센 구조에서 1 번과 7 번 링크 부분이 어디인지 표기한다.

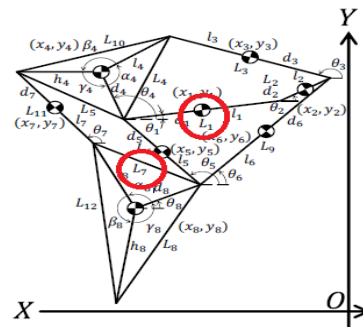


Fig. 2 Link 1 and Link 7 are circled in red

2.1.2 Trajectory

본 논문에서 가장 중점으로 삼은 최적화 기준은 테오안센 기구의 경로(Trajectory)이다. 4 절 링크를 기반으로 작동하는 만큼 테오안센 기구는 여러 절이 맞물려 운동하는 현상을 통해 움직인다. 하부 다리의 가장 밑부분, 즉 경로가 그려지는 밑바닥 부분은 땅과 맞닿는 부분으로써, 테오안센의 최종적인 동작 output 이 표출되는 곳이며 이를 통해서 테오안센 기구는 힘을 받아 의도된 방향으로 나아가게 된다. 이 때 경로는 크게 4 가지 부분으로 나뉘질 수 있는데 Fig. 3 에 나와 있는 것처럼 return, lift, lower, support 단계로 나뉘지며^[5] lift, lower 구간은 step height 를 결정하고 support 구간은 Ground Length 값이나 Trajectory Length 등을 결정한다.

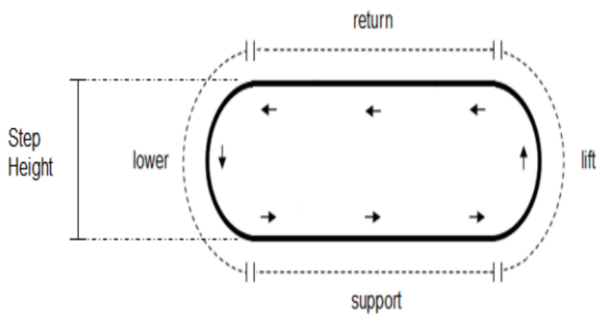


Fig. 3 The composition of trajectory path

이 때 step height 는 테오안센의 걷는 정도에 비해 높은 것이 험난한 지형을 지나는데 유리하며, 추가로 한 획의 경로에 있어서 왼편과 오른편의 step height 가 균일할 수록 안정된 이동이 가능해진다^[5].

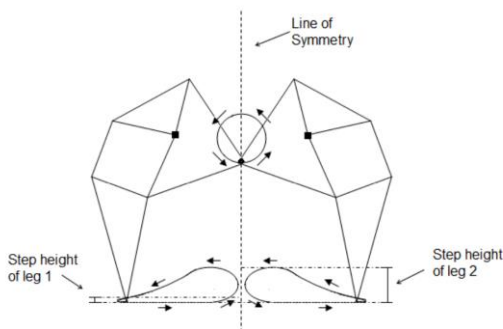


Fig. 4 Example of two trajectories with unequal step heights

Fig. 4 는 step height 가 좌우로 균일하지 않은 두

경로를 보여준다. 테오안센 기구는 필히 1 유닛의 다리가 2 개씩 1 개의 회전 축(Crank)에 맞물려 구성되므로 Fig. 3 와 같이 경로의 step height 가 한쪽으로 치우칠 경우 step height difference 로 인해 앞 발이 경로의 획을 따라 밀어내는 힘을 뒷 발이 일정 정도 반대 방향의 힘으로 cancel out 하는 경우가 생긴다^[5]. 이러한 이유로 경로의 step height 는 왼 편과 오른 편이 균일한 것이 테오안센의 이동에 적합하며, 결과적으로 경로는 좌우로 symmetric 한 것이 이동에 긍정적으로 기여한다. Ghassaei 는 결과적으로 Fig. 5 의 선택지 중에서 d 경로가 가장 적합한 경로라고 판단했다^[5].

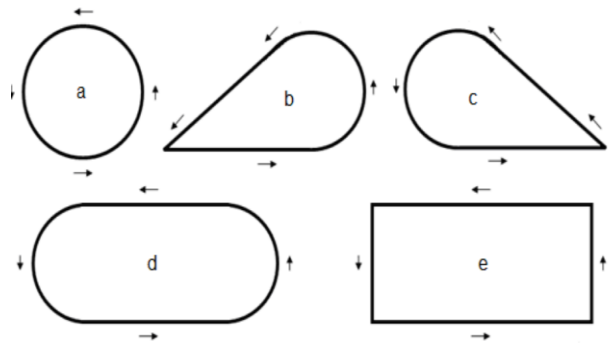


Fig. 5 Several optional trajectory paths suggested

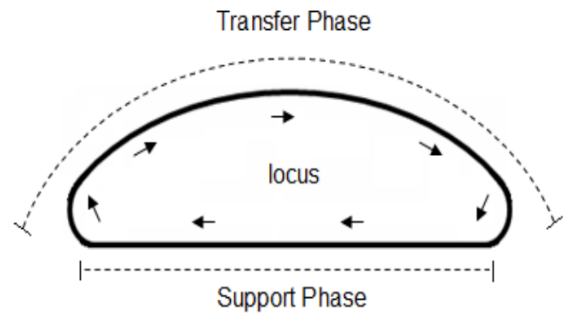


Fig. 6 Trajectory subdivide into two sections: transfer and support phase

추가로 Ghassaei 는 locus 라고도 칭하는 경로를 2 가지 구간으로 나누었다. 테오안센의 하부 다리 밑부분이 땅을 밀어내며 움직이는 support phase 와 허공에 떠서 다른 쪽 다리가 움직이는 구간을 기다리는 transfer phase 로 경로를 나누었다. 이 때 gait analysis 를 통해 Ghassaei 는 Fig. 3 에서 나열된 lower, lift 구간과 return 구간이 transfer phase 로 융합될 경우 더더욱 최적화된

경로를 얻을 수 있다고 정리했다^[5]. Fig. 6 가 그러한 이상적인 경로를 보여주고 있다. 이를 통해 lower, rift 구간과 return 구간이 나누어져 있을 경우 힘의 전환에 있어서 에너지 손실이 있을 수 있다는 가능성을 유추할 수 있다. 세 구간이 한 곡선으로 부드럽게 흘러야지 하나의 transfer phase 가 형성될 수 있고 에너지를 효율적으로 사용할 수 있다는 것이다. 추가적으로 Transfer Phase 와 Support Phase 의 전환에서도 힘이 나 에너지 손실이 있을 수 있다는 가정을 세워보았다.

2.1.3 Hypothesis

경로에 연관된 여러가지 Literature Review 를 기반으로 설계에 중점이 될 최적화 경로를 가정하여 보았다. Ghassaei 의 제안대로 Fig. 6 과 흡사하면서도, 최대로 support phase 가 길어서 transfer phase 와 support phase 의 전환 빈도수가 적은 경로를 목표로 삼았다. Lift, lower, return 간의 전환에 에너지 손실이 있어 transfer phase 로 합쳐야 최적화에 도움이 된다면, 분명 땅에 닿았다가 허공에 뜨는 support phase 와 transfer phase 사이의 전환에서도 에너지 손실이 있을 수 있다는 가정을 세웠다. 때문에 특정 거리 내에서 테오안센 기구가 이동할 때, 최소한의 support phase-transfer phase 간 전환이 있어야 최적화에 이바지할 것이라는 가설을 세웠다. 비유적으로 묘사하자면, 같은 힘으로 이동할 때, 자주 발을 바꾸는 경보보단 큰 보폭으로 걷는 것이 특정 시간 내에 더 많은 거리를 이동할 수 있을 거란 판단이다.

2.2 Jansen Mechanism Design

목표 경로를 정한 뒤, 설계 시뮬레이션을 통해 테오안센 메카니즘의 기구를 형성 및 시험했다. Edison system 의 M.sketch 라는 웹 기반 설계 프로그램을 사용했다. Fig. 1 에서 제안된 길이들을 기반으로 하여 기본적인 설계를 진행해보았다. 이후론 경로를 Fig. 5 의 d 경로와 비슷하게 만들기 위해 순차적으로 기구의 여러 부분들을 수정했다. 제대로 테오안센 기구를 구성했을 경우 Marker 기능을 통해 현 기구의 예상 경로를 눈으로 확인할 수 있다. 이러한 M.sketch 의 실시간 interactivity 는 눈으로 확인하며 즉각적으로 수정 작업을 거칠 수 있는 작업 환경을 제공했다. 작업 화면이 충분히 크지 않아 확대/축소 기능을 통해 distant camera view 에서 작업해야 했

던 점은 개선해야할 사안이었다. 카메라 뷰 제어 기능이 trackball control 외에도 포토샵의 이동 기능처럼 xy 축으로 이동할 수 있으면 설계가 더 수월할 것이다. 키보드론 그러한 움직임이 가능하지만, 마우스를 통해 직관적으로 xy 축으로 이동할 수 있는 방법은 없었다. Mirror copy 를 통해 한 유닛의 테오안센 다리를 뒤집어 복사할 수 있게 해주는 기능도 설계에 도움이 될 기능일 것이다.

2.2.1 Structure Space & elongated leg

가설대로 support phase 를 극대화하기 위해 일단 테오안센 기구를 유지 가능한 정도 내에서 최대한 크게 설계했다. 이 때 단순히 Fig. 1 의 길이를 비율대로 늘려 크기를 확장하는 것이 아니라, 실제 trajectory 에 더 효과적으로 영향을 끼칠 수 있도록 설계를 진행했다. Fig. 7 에 나온 대로 본 논문은 30x30x30(CM)를 최대 기구 설계 공간으로 삼았다.

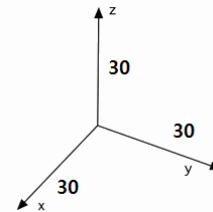


Fig. 7 Defined structure space was 30x30x30 cm

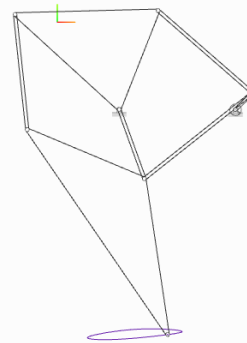


Fig. 8 Simulated Jansen Mechanism and its trajectory

Fig. 8 은 크기 확장을 고려하지 않은 상태에서 목표 경로를 시뮬레이션으로 형성해본 모습이다. 본래 의도한 대로 Fig. 6 와 흡사한 모습을 띄는 경로이다. 이 상태에서 더더욱 경로를 최적화하기 위해 크기 확장을 시도했다. 크기 확장 시도 과정에서 새로운 최적화 요소를 발견할 수 있었다.

M.sketch 를 활용한 결과 같은 구조의 테오안

센 메카니즘에서, 하부 다리가 길어지면 길어질 수록 trajectory path 의 전체 크기가 커지고 support phase 역시 길어지는 것을 발견할 수 있었다. 또한, M.sketch 에 내장된 해석 프로그램을 통해 GL 값과 GAC 값이 효과적으로 올라가는 것을 확인할 수 있었다.

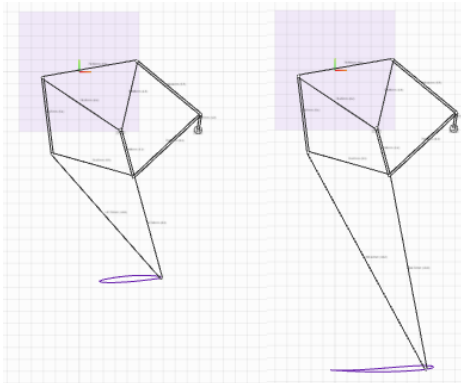


Fig. 9 Comparison between normal Jansen structure and elongated Jansen structure

Fig. 9 에서 보여지듯이 같은 구조를 가진 테오안센 메카니즘의 경우 하부 다리가 길어질 수록 trajectory path 가 길어진다. 이는 한 번 걸음으로 더 많은 거리를 이동한다는 뜻이며, 보폭이 크다는 걸 의미한다. 가설에서 의도한 대로, 특정 거리 내에서 큰 보폭과 짧은 보폭을 비교할 경우 큰 보폭을 통해 support phase 와 transfer phase 의 전환 빈도수를 줄일 수 있게 된다. 단, trajectory path 의 크기 확장을 피하는 과정에서 본래 목표 경로의 특성 중 하나였던 symmetric 특성을 일부 상실하였다. 하지만 길게 확장된 경로이기 때문에 step height difference 역시 문제가 될 정도로 크진 않았다. 험난한 지형을 통과하는 것보단 속도에 집중한 구조이기에, 장애물을 건너는 과정은 긴 trajectory path 의 지속적인 힘 작용으로 누르고 넘어가는 현상에 의존한다.

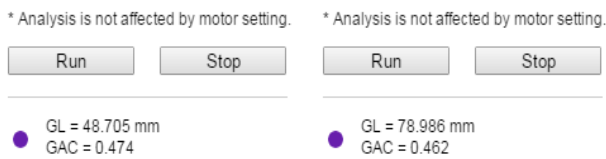


Fig. 10 Gait analysis result from M.sketch (right one is the elongated version)

Fig. 10 에서 보여지듯이 다리 길이가 확장된 테오안센 기구는 $GL = 78.986 \text{ mm} / GAC = 0.462$

의 분석 결과를 보여주었다. 반면 같은 구조에서 더 짧은 다리를 가진 테오안센 구조는 $GL = 48.705 \text{ mm} / GAC = 0.474$ 의 결과를 보여주었다. 이러한 분석 결과를 기반으로, 설계 공간을 하부 다리의 길이 확장에 적극 활용하는 설계 방향이 결정되었다. 가로는 각 유닛의 다리가 2 개 위치해야하기에 15CM 로 설정되었고 세로는 과학상자 기구를 포함하여 30CM 높이로 설정되어 설계가 진행되었다. 설계에서 중요하게 고려된 점은 사용하려고 준비해놓은 과학 상자 부품과 간격을 맞추는 일이었다. 필수적인 부분은 과학 상자 기어와 회전 축의 길이를 맞추는 일, 그리고 앵커의 간격이 과학 상자 바디 부품의 간격과 일치하게 하는 것이었다.

설계가 진행된 뒤에는 추가적인 최적화를 위해 Edison System 의 Jansen Mechanism Optimization Solver(JansenOptSolver)가 활용되었다. M.Sketch 에서 설계한 기구의 좌표들을 dat. 형식 파일에 순차적으로 기입하여 JansenOptSolver 에 업로드하였다. Table. 1 은 최적화된 좌표 값을 나열한다. 추후 최적화된 좌표를 기존 설계에 적용하였다.

Table 1 The optimized coordinates of elongated Jansen Mechanism

x	y
99.06	-48.56
101.23	-35.47
47.85	8.90
-30.46	-4.82
34.51	-48.43
45.29	-87.84
-22.50	-68.60
75.96	-249.68

3. 도면 디자인

3.1 Exporting blue print

M.sketch 의 가장 두드러지는 기능 중 하나는 설계한 시각화 가상 기구를 PDF 파일로 export 할 수 있다는 것이다. Fig. 11 은 export 되어 분류된 각 부품을 보여준다. 기본적으로 8 쪽을 위해선 이러한 부품이 8 쌍 제작되어야 하지만, 최적화를 위해서 더 많은 갯수의 부품이 제작되었다. 각 부품은 최종 도면 완성 후 레이저 커팅을 통

해 3t 두께의 아크릴 부품으로 제작되었다. 아크릴 레이저 커팅이 3d printing 보다 기구 내구도 면에서 더 우수할 거란 판단에서였다. Export 된 PDF 도면의 단점은 2 개 이상 링크의 길이가 비슷할 경우 다시 설계 공간으로 돌아가 가장 긴 링크와 다음으로 긴 링크를 직접 대조 비교해야 한다는 것이다. 그래야 상부 다리나 하부 다리와 연결된 각 절을 제대로 확인할 수가 있다. 이렇게 Export 된 PDF 도면은 illustrator 로 import 되어 추가 작업이 가능해진다.

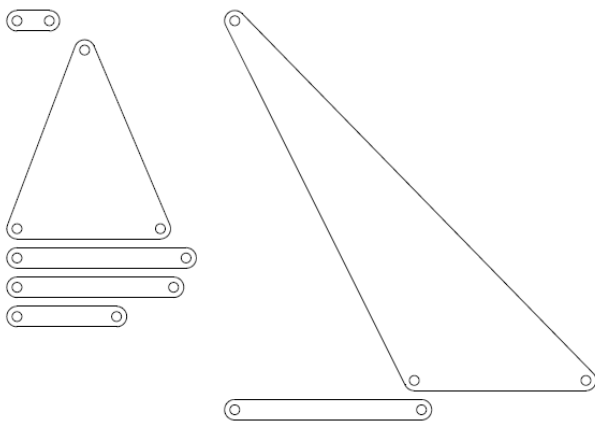


Fig. 11 Exported PDF version blue print of elongated Jansen Mechanism

3.2 Finalizing the blue print

Abode illustrator 로 import 된 PDF 도면은 비율 설정이 제대로 되어 있을 경우 설계 공간 그대로의 길이와 비율을 가지고 있다. 이를 통해, 설계한 비율과 길이를 그대로 가져가면서도 새로운 형태의 도면 디자인을 제작할 수 있다.

가장 먼저 시행되어야 했던 도면 디자인 작업은 과학 상자에 걸맞는 구멍 크기를 맞추는 것이었다. 앵커와 연결될 부분들은 4mm 지름(봉지름, 앵커 역할)의 구멍을 배치했고, 그 외 부분은 과학 상자의 플라스틱 베어링을 사용하기 위해 5mm의 구멍을 배치했다.



Fig. 12 The upper leg of Jansen final blueprint

Fig. 12 는 새롭게 디자인된 상부 다리의 도면이다. 무게를 줄이기 위해 내부의 불필요한 공간이 음각되었고, Link 1 부분을 포함한 외곽 부분에 가해지는 힘을 줄이기 위해 윤곽선을 곡선으로 채택했다.

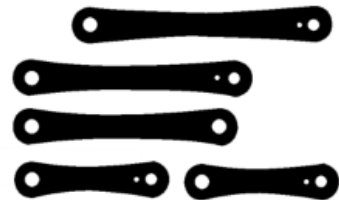


Fig. 13 The links of Jansen final blueprint

Fig. 13 은 링크 부품들의 도면 디자인들이다. 적절한 구멍 크기들이 배치되었으며, 4mm 구멍 주변에는 시각적 태그를 위해 추가로 작은 점이 배치되었다. 부품 조립도 테오안센 메카니즘 최적화 및 구현의 중요 부분이고, 실제로 조립 중 방향을 자주 헛갈리기 때문에 시각적 태그는 부품의 중요한 요소 중 하나이다.



Fig. 14 The lower leg of Jansen final blueprint

Fig. 14 는 최적화의 가장 핵심이 되는 하부 다리이다. 가설대로 길이가 극대화된 모습이며 그 외에도 무게를 줄이기 위해 내부 공간이 음각되었고 마찬가지로 윤곽선이 곡선으로 이루어져 있다. 이러한 곡선 윤곽선을 통해 Link 7 에 가해지는 힘을 다른 곳에 분배할 수 있다. 또한 추가로 긴 다리가 이동 중 잠시 넘어질 뻔할 때를 대비해, 바깥 방향으로 뺏어나와 있

는 빨을 배치했다. 여러 겹의 부품(2 겹)을 튼튼하게 묶기 위하여 추가적인 나사 구멍을 배치했다. 이는 Design Practice 에서 종종 쓰이는 Finger Joint 구조를 레이저 커팅된 아크릴 부품으로 구현하기 위한 시도이다. 마지막으로 무게 중심이 흐트러지는 걸 막고 안전성을 높이기 위해 다리 밑부분에 원 형태를 배치했고 원 형태이 앞 부분의 jamming 을 방지하기 위해 원과 다리 부분의 과여 들어가는 부분을 매웠다^[7].

4. 제작

4.1 Making/Tinkering

몸체는 제일과학 과학상자 300 번의 부품들을 활용해 구현했다. 일정한 간격으로 구멍이 뚫려 있어 균일한 과학 상자 부품의 배치가 가능했다. 하지만 기어와 아크릴 부품이 부딪치지 않게 하기 위해, 또한 4 쪽으로 구성된 원편과 오른편의 몸체를 합쳐된 8 쪽으로 만들기 위해 여러가지 간격을 매꾸거나 좁혀야 했다. 이를 위해서 나사나 부차적인 과학 상자 부품들을 사용했다. Fig. 15 는 과학 상자로 구성된 몸체를 보여준다. 긴 다리로 인해 무게 중심이 과학하게 올라갔는데, 이를 보완하기 위해 보편적으로 몸체 위에 배치하는 모터(개별적인 부품 중에서 가장 무거운 부품)를 몸체 아래, 즉 테오안센 다리 중간 부분에 배치하였다. 모터와 다리 관절이 부딪치지 않게 간격 조절을 하는 것 역시 프로토타이핑의 중요 관건이었다.

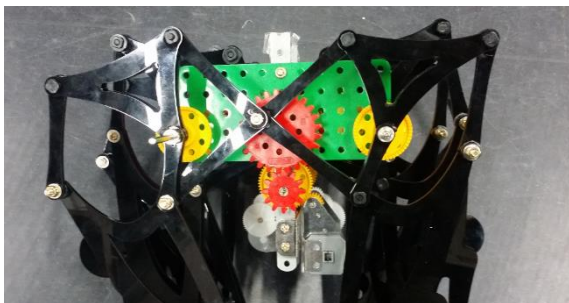


Fig. 15 The body part of completed Jansen Prototype



Fig. 16 4 layered leg to stable the elongated leg

그 외에도 다리가 너무 길어 실제 프로토타이핑을 시도 시 테오안센 기구가 제대로 걸지 못하고 좌우로 흔들리거나 넘어지는 등의 부작용을 보였다. 이를 보완하기 위해 2 차 프로토타이핑으로 하부 다리를 2 겹으로 구성해 Finger Joint 구성을 구현해 냈으며, 향상된 안정성을 더욱 견고히 하기 위해 하부 다리의 밑 부분, 원형 부위가 배치된 부분을 4 겹으로 만들어 안정성을 높였다. 각 아크릴 부품의 사이 간격은 나사를 통해 안정적으로 유지시켰다.

5. 결론

힘난한 지형을 이동하는 데에 적극 활용될 수 있는 테오안센 메카니즘의 속도 향상을 경로 최적화와 하부 다리 길이 극대화로 시도해보았다. Edison system 의 시뮬레이션과 최적화 프로그램을 사용해 최종 도면을 제작하였으며, 3t 아크릴을 레이저 커팅하여 과학 상자와 조합해 실제 프로토타이핑을 시행해 보았다. 실제 프로토타이핑이 가능했으며 긴 다리로 인해 오는 문제점들을 해결하기 위해 여러가지 보완 메커니즘을 배치하였다. 모터에 전원을 주어 시험해본 결과 주어진 설계 공간 안에서 최대로 속도에 맞춰져 최적화된 테오안센 메커니즘은 기존의 짧은 다리 테오안센 메카니즘보다 빠른 속도를 보여주었다.

감사의글

1. 전산설계교육·연구·산업체용 최적설계 프레임워크 개발 및 활용을 위하여 본 논문은 2015 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2014 M3C1A6038793)

2. 참고문헌

1. Pratt, J. and Roy, N., 2011, Special Issue on Legged Locomotion, *The International Journal of Robotics Research*, 30(2), pp. 139-140.
2. Kim, S. and Kim, Y. and et al., 2010, Development of a Legged Walking Robot Based on Jansen Kinetics, *Korean Intelligence System Journal*, 20(4), pp. 509-515.
3. Beak, Y., 2014, *The art education in middle school utilizing STEAM program –Based on the work by Theo Jansen-*, Master Thesis, Chungbuk Univ.
4. Chae, K. and Bae, G. and et al., 2011, Modularized Flexure-Hinge Nanopositioner Based on Four-Bar-Link-Mechanism, *Korean Nano Technology Journal*, 28(7), pp. 851-858.
5. Ghassaei A. and Choi P. and Whitaker D., 2011, *The Design and Optimization of a Crank-Based Leg Mechanism*, Master Thesis, Pamona College Department of Physics and Astronomy.
6. Nansai S, and Elara M., et al., 2013, Dynamic Analysis and Modeling of Jansen Mechanism, *Procedia Engineering* 64, pp. 1562-1571.
7. Ying. F., and Jun. K., and et al., 2015, *3D-Printable All-Terrain Biomimetic platform*, Ph.D Thesis, Raffles Instituion(JC), et al.