

< 응용논문 >

pISSN 1226-0606

eISSN 2288-6036

안센 메커니즘 기반의 보행 기구 설계

이현경¹ · 윤영규^{2†}

한국과학기술원 기계공학과¹, 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부²

Design Walking System Based on Theo Jansen Mechanism

Hyeonkyeong Lee¹, Yungkyu Yun^{2†}

¹Dept. of Mechanical Engineering, KAIST. ,

ABSTRACT:

Compared to wheel locomotion, walking has many advantages : Better to cross over obstacles, the contact with ground is in a determined point, the ground is damaged less. Because Theo Jansen mechanism can make walking motion that is very soft, there are many researches about that mechanism.

In this paper, We designed walking robot based on Theo Jansen mechanism. Most important design factor is velocity and stability. First of all, we considered kinematics knowledge and then, we made a new model by using simulation. Finally we developed the model by solving few design problems.

Key Words: Kinematics, Simulation, Theo Jansen mechanism

²Dept. of Mechatronics Engineering, Koreatech University.

1. 서론

보행로봇의 초기 연구는 주로 바퀴를 사용하여 진행되었다. 하지만 다리의 구조를 사용하여 생물체와 유사한 기계를 만들고자 하는 호기심이 생겨나기 시작했다. 다리 기구를 사용한 보행방식은 바퀴를 사용한 보행방식에 비해 경사, 장애물 그리고 특수 표면 등을 이동하는 데에 더욱 유용하다.

현재까지 진행되어 온 수많은 연구들 중에 하나인 Theo Jansen mechanism 은 보다 부드럽고 자연

스러운 다리 움직임의 구현이 가능하다. 각 링크의 길이에 따라 다리의 움직임 및 속도가 달라지기 때문에 Theo Jansen mechanism 에 대한 연구는 현재까지 지속되고 있다.

본 논문에서는 이러한 Theo Jansen mechanism 을 활용하여 보행로봇을 만든다. 먼저 보행로봇을 만들기 위해 필요한 기구학적인 기본 지식을 검토해 본다. 그리고 Simulation 을 통해 다리의 움직임 및 전체 조립을 예측 해본 뒤 실제 조립을 진행한다. 주로 다리부분은 아크릴을 사용하여 제작하고, 모터 구동부는 과학상자를 사용하여 제작 한다. 빠른 속도성능과 안정성을 목표로 하고 설계를 진행한다.

2. 초기 설계

설계 시 고려 할 부분을 크게 모터 구동부와 다리 부분으로 나눈다.

2.1 다리 설계

본 논문의 핵심인 다리 부분을 설계한다. 연구되고 있는 Theo Jansen mechanism 의 핵심 부분은 Upper 4-bar mechanism, Lower 4-bar mechanism, Coupler, Parallel mechanism 그리고 Foot-link 로 구성되어 있다.

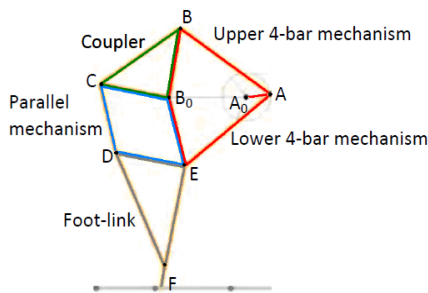


Fig. 1 A schematic figure of the leg

다리시스템을 구현하기 위해 각 링크를 다음과 같이 정한다.

- 링크 AA0 : Input link
- 링크 DEF : Foot link
(여기서 F는 Tracer point 로 작용한다.)
- 링크 A0B0 : Fixed link

적절한 기구의 구현을 위해 기구학적으로 기본적인 조건 및 제한사항을 고려하여 설계한다.

2.1.1 Grashof 조건

평면 4 절 링크장치에서 적어도 하나의 링크가 완전 회전 하기 위한 조건으로, 2 개의 링크 간에 상대적으로 연속적인 회전을 하도록 하려면 최단 링크와 최장링크의 길이의 합이 나머지 두 링크 길이의 합보다 커서는 안 된다. 다음 조건을 기호로 나타내면 다음과 같다.

$$s+l \leq p+q$$

- s: 가장 짧은 링크의 길이
- l: 가장 긴 링크의 길이

- p,q: 나머지 링크의 길이

본 논문에서 적용한 조건은 Grashof 의 조건을 만족하는 종류 중 하나인 크랭크-로커 조건이다.

- 크랭크 : 프레임에 고정된 최단 링크로, 360 도 회전을 한다.
- 로커 : 왕복각 운동을 하는 링크로, 프레임에 인접한 또 다른 링크이다.

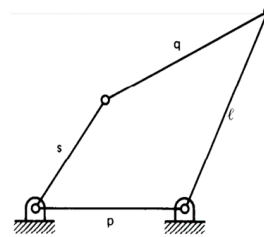


Fig. 2 4-bar link

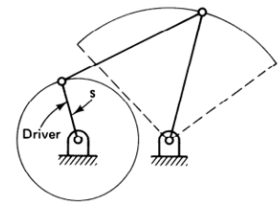


Fig. 3 Crank-rocker

본 논문에서는 Fig. 1 에서 입력링크인 AA0 를 크랭크로, 각각의 4-bar mechanism 에 대해서 링크 BB0 와 링크 EB0 를 로커로 설정한다.

2.1.2 입력부 길이

프레임은 주로 과학상자 및 아크릴을 사용하여 제작하였다. 과학상자의 부품은 제한적이기 때문에, 초반에 몇 가지 링크의 길이를 정해놓은 뒤 설계를 시작하였다. 제공된 과학상자 부품 중 기어를 입력링크로 사용하여 길이를 정하였고, 스트립을 고정링크로 사용하여 길이를 정하였다. 실제로 부품의 길이를 측정하여 입력링크의 길이는 12.5mm, 고정링크는 62.5mm 로 결정하였다.

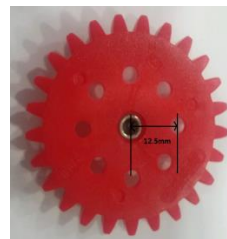


Fig. 4 Input link

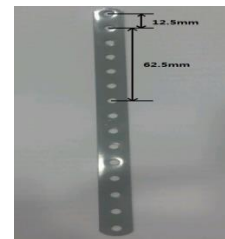
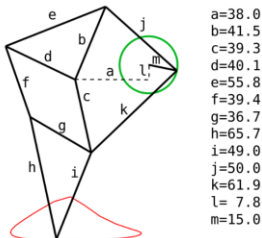


Fig. 5 Fixed link

2.1.3 기존연구

기존에 Jansen mechanism 에 대한 많은 연구들이 이루어지고 있다. Fig.6 에 제시된 모델은 Jansen mechanism 의 최적화 된 표준모델로 많이 알려져 있다. 이 모델은 스케일을 조정하여 사용할 수 있다. 과학상자 내 부품의 치수 제한이 있으므로, 이 모델의 치수 및 링크별 움직이는 궤도를 참고하여 효율적으로 보행하는 새로운 모델을 설계하도록 한다.



- a=38.0
- b=41.5
- c=39.3
- d=40.1
- e=55.8
- f=39.4
- g=36.7
- h=65.7
- i=49.0
- j=50.0
- k=61.9
- l= 7.8
- m=15.0

Fig. 6 Standard model of Theo jansen mechanism

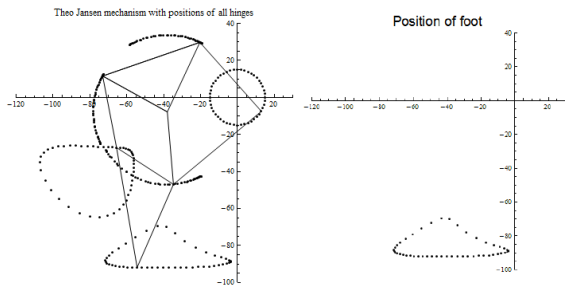


Fig. 7 Position of moving hinges of Theo jansen mechanism

2.1.4 Simulation

다리를 설계하기 위해 M.sketch 프로그램을 사용하였다. 먼저, 앞에서 제시된 조건들 및 기준에 제시된 표준모델을 토대로 M.sketch를 이용해 설계하였다.

그 다음 성능을 향상시키기 위해 각 링크 길이를 조절하였다. 주로 Ground angle coefficient와 Ground length 값을 토대로 초기 설계를 변경시켰다. 여기서 Ground length는 모터가 한 바퀴 회전시 다리가 지면에 닿아 지나가는 길이를 뜻하고, Ground angle coefficient는 모터가 한 바퀴 회전할 때의 360도에 대한 다리가 지면에 닿아 지나갈 때 모터가 회전하는 각도의 비를 뜻한다.

모터가 한 바퀴 회전하는 동안 다리가 지면을 쓸어가는 길이가 상대적으로 길면 길수록 주어진 시간에서 더 많은 거리를 지나갈 수 있으므로 효율이 좋은 것이다. 또한 GAC 값이 크면 클수록 더욱 효과적인 움직임을 실제로 구현할 수 있다. 그리하여 초반에 그려진 기구에서 각 링크의 길이를 조절하며 GAC 및 GL 값을 개선시켜 다리부분을 최종적으로 설계하였다.

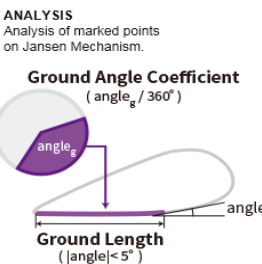


Fig. 8 GAC and GL

Table 1 Observation of GL and GAC

시도횟수	결과
1	● GL = 19.907 mm GAC = 0.124
2	● GL = 20.509 mm GAC = 0.131
3	● GL = 25.797 mm GAC = 0.150
4	● GL = 27.053 mm GAC = 0.153
최종	● GL = 36.815 mm GAC = 0.181

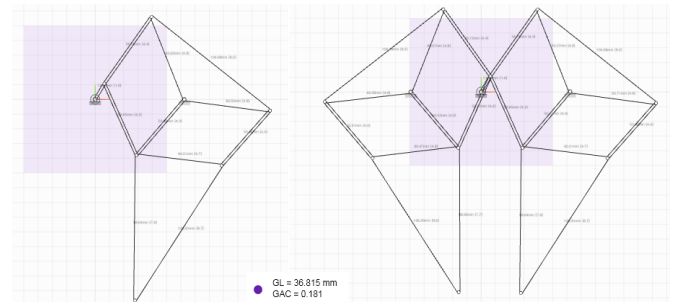


Fig. 9 Final design model

시물레이션을 통해 Fig. 1에서 나타난 각 링크의 길이가 최종적으로 결정되었다.

- AA0 : 12.5mm
- AB : 56.15mm
- BB0 : 60.63mm
- BC : 104.69mm
- CD : 50.46mm
- DE : 60.01mm
- BOE : 50.66mm
- DF : 109.91mm
- BOC : 60.53mm
- AE : 53.65mm

2.1.5 조건의 확인

앞서 설계할 때 기구학적으로 기본적인 Grashof 조건을 고려하였다. 최종적으로 설계된 모델에서 4-Bar mechanism이 Grashof 조건을 충족시키는지 최종적으로 확인해 보았다.

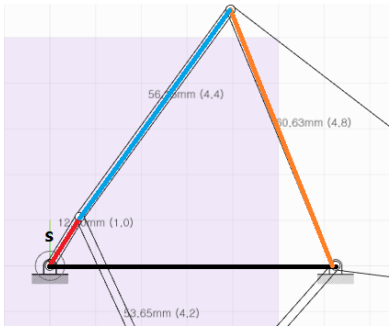


Fig. 10 Upper 4-bar mechanism

$$(62.5+12.5=75) < (56.15+60.63=116.78)$$

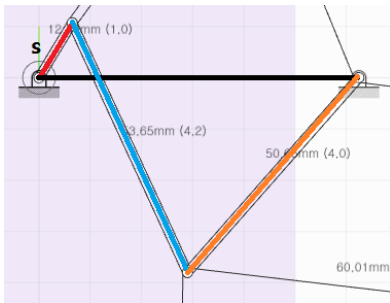


Fig. 11 Lower 4-bar mechanism

$$(62.5+12.5=75) < (53.65+50.66=104.31)$$

결과적으로 두 Mechanism 모두 초기 설계조건에 부합하는 것을 확인하였다.

2.2 모터 구동부

모터로부터 전달되는 동력을 여러 종류의 기어로 맞물려 다리부분의 입력 링크까지 전달한다. 여기서 기어는 주로 과학상자에 주어진 부품을 사용하였다.



Fig. 12 Gear setting

2.2.1 기어의 연결

주어진 기어를 이용하여 다음과 같이 조립하였다.

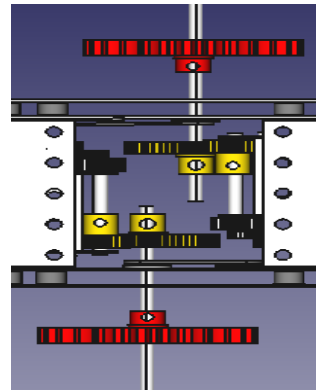


Fig. 13 Connected gears

3. 구현

3.1 재료 선정

모터 구동부는 주로 과학상자 부품을 활용하여 제작할 것이고, 다리 부분의 재료는 일상적으로 구하기 쉽고, 가격이 비교적 경제적인 아크릴로 선정하였다.

Table 2 Material properties of acrylic

물상수 지명	일반명 칭	비중	경도	인장 강도	신장율	탄성 계수
MMA	아크릴	1.19	85~97	670~780	10~20	30

아크릴의 두께는 몇 번의 시행착오를 거쳐 결정하였다. 3T까지는 모터 구동부의 무게를 견디기엔 쉽게 파손되는 등의 불안정적인 모습을 보였다. 따라서 아크릴의 두께는 비교적 안정적인 모습을 보이는 4T로 결정하였다.



Fig. 14 Fracture of acrylic (3T)

3.2 제작

3.2.1 아크릴 커팅

아크릴을 도면대로 자르기 위해 대전 소재 국립 중앙과학관에 위치하고 있는 ‘무한상상실’에 방문하였다. 레이저커팅 기계를 사용하여 제작하였고, 도면은 Solid works 프로그램을 이용해 기계와 호환이 되는 .dxf 파일로 작성하였다.

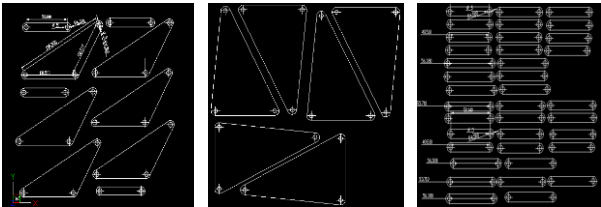
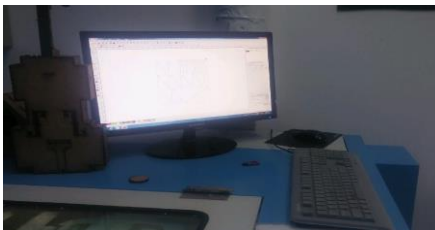


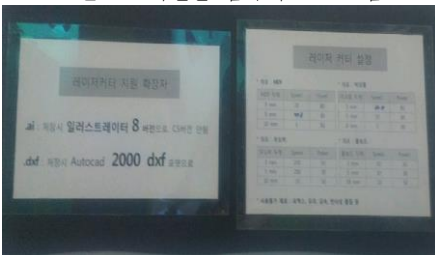
Fig. 15 Drawing of parts



1. 1.무한상상실 입구



2. 2.도면 .dxf 파일을 컴퓨터 프로그램으로 전송



3.아크릴 두께(4T)에 따른 속도 및 Power 설정



4. 레이저 기계로 Download 완료



5. 가공

Fig. 16 Cutting process

3.2.1 조립 Simulation

효율적인 조립을 돕기 위해 Edison designer 프로그램을 이용하여 조립을 시뮬레이션 해보았다. Edison designer 에는 이미 과학상자 부품에 대한 Library 가 내장되어 있어 부품을 전부 모델링 하지 않고도 쉽게 각 부품을 불러와 Assembly 를 할 수 있었다.

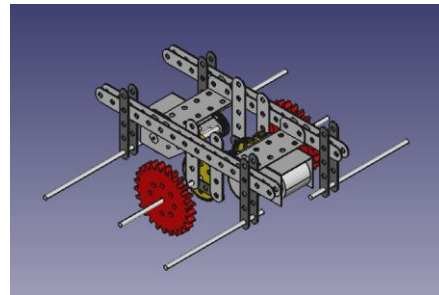


Fig. 17 Assembly

3.3 문제점 및 해결

조립을 모두 마친 뒤 실제로 구현을 해보았을 때, 초반 설계 시에는 예상하지 못했던 몇 가지 문제점들을 발견하였다. 그리하여 설계를 조금씩 고쳐나가며 문제점들을 보완하였다.

3.3.1 기어축의 흔들림

기어에 연결된 축이 잘 고정되지 않아 제멋대로 움직여 기어와 기어가 서로 맞물리지 않는 문제점이 발생하였다. 이를 해결하기 위하여 기어 부분에 짧은 스트립을 삽입하여 기어의 축을 고정하였다. 결과적으로 기어의 축이 잘 고정되어 기어와 기어가 서로 잘 맞물리게 되었다.

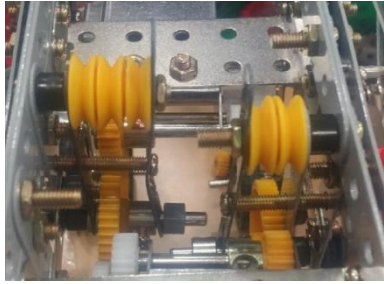


Fig. 18 Fixed frame

3.3.2 무게중심의 위치

프레임의 전체적인 무게 중에서 모터는 큰 부분을 차지한다. 초반설계에서 모터를 상대적으로 윗부분에 위치시켰기 때문에 무게중심은 윗부분으로 집중되었다. 무게중심이 기구의 윗부분에 있으면 기구는 불안정해지기 때문에 중심을 잘 잡지 못하고 쓰러지게 된다. 이를 보완하기 위하여 기구의 아랫부분에 과학상자 부품을 추가적으로 연결하여 무게중심을 아래로 이동시켜 안정성을 되찾았다.

3.3.3 모터 구동부의 무게

기구 설계 시 M.sketch simulation 을 통해 다리의 움직임을 구현할 수 있었다. Simulation 을 통해 예측했던 Tracer point 의 궤적은 바닥에 닿은 상태로 지나가다가 다시 제자리로 되돌아오는 부분에서 공중에 뜨는 것이었다. 하지만, 모터 구동부의 무게로 인해 다리가 크게 힘을 받아 공중에 뜨지 않고, 기어서 지나가는 것을 볼 수 있었다. 또한 연결된 부품들의 나사가 모터 구동부의 무게를 버티지 못하고 결국 풀리는 현상 또한 나타났다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 모터 구동부에서 무게 중심의 위치를 바꾸기 위해 추가적으로 연결했던 부품에 바퀴를 달아 바닥에 살짝 닿도록 위치시켜 힘을 분산시켰다. 그리하여 결국 다리부분에 큰 힘을 받지 않도록 하였고, 이전에 비해 더욱 빠른 속도로 보행하는 효과 또한 나타났다.

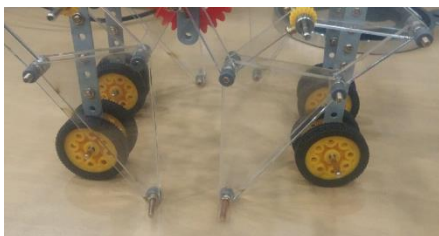


Fig. 19 Changed the center of gravity

4. 소프트웨어 개선을 위한 제안사항

설계를 진행하며 주로 사용한 소프트웨어에는 M.sketch 와 Edison designer 가 있다. 이들 프로그램을 이용하면서 추가되었으면 하는 기능들을 몇 가지 적어보도록 하겠다.

4.1 M.sketch

- 링크를 그릴 때 좌표로 지정을 해서 링크의 길이를 정하는 것이 아닌 사용자 임의대로 수치를 입력해서 치수를 설정하는 기능
- Link 를 복사하기 붙여 넣기 할 수 있는 기능
- Motor 의 속도를 설정할 수 있는 기능
- 각 링크 별로 속도 및 가속도를 계산할 수 있는 기능

4.2 Edison designer

- Assembly 를 하다 보면 Assembly 기능의 다중 사용으로 인해 Error 가 자주 나는데, Error 가 발생하지 않고, 쉽게 Assembly 를 할 수 있는 기능

5. 결론

본 논문의 목적은 Theo Jansen mechanism 의 원리를 이해하고 그 원리를 적용시켜 보행로봇을 설계하는 것이었다.

주로 프레임은 과학상자를 이용하여 만들었기 때문에, 입력링크 및 고정링크의 길이를 정해놓은 뒤 설계를 시작하였다. 그리고 기구학적으로 기본적인 원리인 Grashof 조건을 고려하였다. 그리하여 결과적으로 크랭크-로커조건을 만족시키는 두 가지의 4-Bar mechanism 을 설계하였다.

다리를 설계할 때에는 주로 M.sketch 프로그램을 사용하였고, 전체적인 부품을 조립할 때는 Edison designer 를 사용하여 먼저 Simulation 으로 확인해본 뒤 실제 조립을 시작하였다. M.sketch 에서는 주로 GAC 와 GL 을 확인해가며 몇 번의 시행착오를 통해 최종적인 치수를 결정하였다.

다리부분은 아크릴을 사용하여 제작하였고, 모터 구동부는 과학상자 부품을 활용하여 제작하였다. 아크릴은 '무한상상실'에 방문하여 레이저 기계를 사용하여 절단하였다.

전부 조립을 마친 뒤, 축의 흔들림 및 모터자체의 무게로 인한 문제가 발생하였다. 과학상자의 남은 부품을 활용하여 초반의 설계를 조금씩 바꾸어가며 이러한 문제들을 해결했다.

결론적으로 속도성과 안정성 두 가지 성능을 모두 충족시키는 보행로봇을 설계하였다.

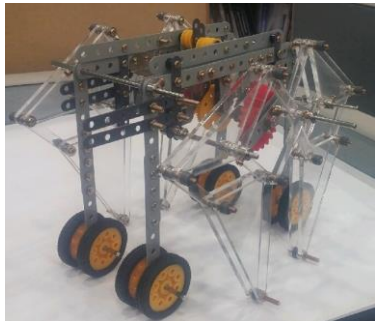


Fig. 20 Designed model

감사의 글

과거에 학교에서 기구학 과목을 재미있게 수강했던 기억이 있다. 일상생활에서 보이는 기구학적 원리를 이해하고 나면서 기구학의 매력의 폭 빠지곤 했다. 때문에 본 논문의 주제인 Jansen mechanism 을 이용해 보행기구를 만드는 내내 힘들다기 보단 흥미롭게 임했다. 설계를 하면서 기구학적 기본 지식을 되짚어 볼 수 있는 기회가 되었다.

예상했던 것과 같이 Simulation 은 이상적인 상황을 가정하고 결과를 내는 것이고, 실제로는 여러 가지 변수가 작용하기 때문에 시뮬레이션과 실제 구동의 결과는 다른 점이 많았다. 중간에 발생하는 문제점들을 깊이 생각해보고 해결하는 방안을 찾아나가는 과정에서 공학적인 감각을 기를 수 있었다.

또한 기구를 설계할 때 Edison 경진대회 주최측에서 제공해주신 M.sketch 프로그램과 Edison designer 프로그램 덕분에 보다 수월하게 설계를 진행할 수 있었다. 좋은 프로그램을 제공해 주시고, 좋은 대회를 경험할 수 있게 기회를 주신 Edison 경진대회 주최측 관계자 분들께 감사의 말씀을 전한다.

3. 참고문헌

1. A.Aan and M.Heinloo, 2014, Analysis and Synthesis of The Walking Linkage of Theo Jansen with a Flywheel, *Agronomy Research*, 12(2), pp. 657-652.
2. Swadhin Patnaik, 2015, Analysis of Theo Jansen Mechanism(Strandbeest) and Its Comparative

- Advantages over Wheel Based Mine Escavation System, *IOSR Journal of Engineering*, pp.43 - 52.
3. Kazuma Komoda and Hiroaki Wagatsuma, 2011, A Study of Availability and Extensibility of Theo Jansen Mechanism toward Climbing over Bump, *The 21st Annual Conference of the Japanese Neural Network Society*, pp.3-28.
- 4.Sun Wook Kim and Dong Hun Kim, 2011, Kinematic Analysis of a Legged Walking Robot Based on Four bar Linkage and Jansen Mechanism, *Korea Intelligence Conference*, pp.159-164.
- 5.Amanda Ghassaei, 2011, The Design and Optimization of a Crank Based Leg Mechanism, pp.63-76.