<응용논문>

pISSN 1226-0606
eISSN 2288-6036

Theo Janson Mechanism 을 이용한 보행 로봇 설계

저자 1 이병철
한국과학기술원 기계공학과

Designing walking robot using Theo Jansen Mechanism

Author 1 Byeongcheol Lee
Dept. of Mechanical Engineering, KAIST

ABSTRACT:

Existing moving robots has several kinds of moving method; using wheel, jointed leg structure and so on. Wheel type can be operated by DC motor so it is simple and efficient. However, it is not appropriate to pass irregular terrain and obstacle. Leg structure type has an advantage in those cases. Generally, Leg structure is operated by several servo motors attached to each joint. It makes a robot heavier and more complicate due to increase of the degree of freedom. However, by using Theo Jansen Mechanism, one (or more) leg have only single-degree of freedom and can be operated by only one DC motor. So leg structure using Theo Jansen Mechanism will be good choice if robots have to be mass-produced.

This paper describes the following a walking robot designed and produced based on Theo Jansen Mechanism, simulating process of Theo Jansen leg structure using Edison m.Sketch and how to solve several of discovered problem of the robot.

Key Words: Theo Jansen Mechanism, Centroid, Ground Length, Ground Angle Coefficient, Phase difference

1. 서 론

최근 점점 상용화가 진행되고 있는 Drone 과 같이 가볍고 단가가 낮으면서 주변을 순찰하고, 카메라나 센서로 정보를 전달하는 로봇의 연구가 활발하다. 기본적으로 이러한 탐사로봇은 인력이 동원되기 어려운 지역을 사람을 대신하여 찾아가야 하므로 어떠한 악조건에서도 목적지로 이동할 수 있어야 한다. 지금까지 이러한 이동 방식을 개선해 나가는 수많은 연구가 진행되었다.

로봇의 이동 방식은 크게 바퀴, 캐터필러, 그리고 관절이 있는 다리를 사용한 보행의 3 가지가 있다. 바퀴는 DC 모터만으로 간단히 구성할 수 있고 모터의 출력이 바퀴에 그대로 전달되기 때문에 에너지 소모가 적다. 다만 일반적으로 바퀴 직경의 1/2 를 넘는 장애물은 통과하기 어려우며, 불균일한 지형에서 유리한 캐터필러 역시 같은 문제를 가지고 있다. 다리를 사용한 보행 방식은 이런 장애물이나 각종 불규칙한 지형에서 이동하는데에 유리하며, 일반적으로는 다리의 각 관절에 서보 모터를 부착한 다 자유도 형태로 많은 연구가 진행되어 왔다. 하지만 서보 모터 방식은 많은 무게가 나가게 되고, 모터의 개수만큼 자유도가 늘어나기 때문에 시뮬레이션 및 이론적인 해석이 매우 복잡해지는 문제가 있다.

이에 대한 해결책으로 Theo Jansen Mechanism 을 적용한 보행 로봇 설계 방안을 제시한다. 이 메커니즘은 각 링크들의 길이를 적절히 조절하여 1 자유도만으로 보행 로봇을 설계할 수 있게 해 준다. 즉 이론적으로 DC 모터 하나만으로 로봇을 구동할 수 있어 Theo Jansen Mechanism 방식은 서보모터 방식에 비해 무게도 적게 들고 보다 적은 단가로

† Corresponding Author, yykim@snu.ac.kr
Ⓒ 0000 Society of CAD/CAM Engineers

로봇을 만들 수 있어 Drone 과 같은 대량 생산을 목표로 하는 탐사로봇에 보다 적합하다.

본 논문에서는 Edison m.Sketch 시뮬레이터를 사용하여 Theo Jansen Mechanism 이 적용된 로봇의 다리 부분을 설계하고, 전용 과학상자와 아크릴판을 이용하여 로봇을 제작하는 과정을 다룬다. 또한 그 과정에서 발생하는 문제점들과 해결방안에 대해 기술한다.

2. 보행 로봇 설계

2.1 몸체 설계

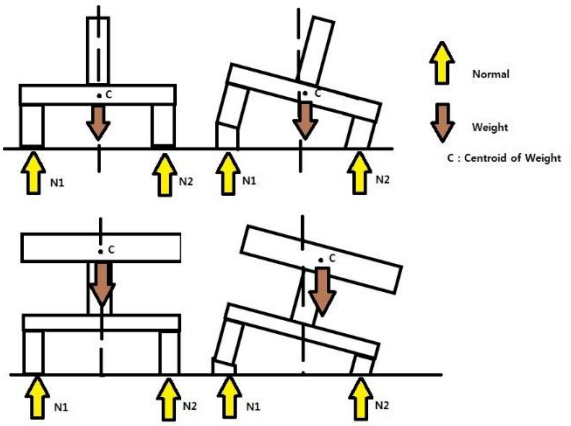

Fig. 1 Relation between Centroid and Stability

Figure 1 은 무게중심(Centroid)과 안정성 사이의 관계를 나타낸다.

Figure 1 에서 나타난 대로 형상에 비해 무게 중심이 높을수록 같은 각도만큼 회전할 때 회전 후 무게중심이 중심선으로부터 더욱 멀어진다. 즉 오른 다리 쪽에 더 가까워진다. 회전 후 각 Normal Force N1, N2 의 Centroid 로부터의 거리를 a, b 라 할 때 Moment Balance 식을 적용하면.

(N1)a = (N2)b

가 성립한다. 이 경우 무게중심이 더 높으면 a 의 길이는 증가하고 b 의 길이는 감소하므로 상대적으로 N2 >> N1 이 된다. 따라서 오른다리에 걸리는 부하가 증가하게 되며 모터의 출력은 한정되어 있으므로 기울임이 심해지면 어느 순간 몸체를 원상태로 되돌리기 위한 복원력이 부족해져 심할 경우 로봇이 전복될 수 있다.

모터를 최대한으로 활용하기 위해 구동부의 마찰을 줄여야 하므로 로봇 관절부의 구속을 다소 느슨하도록 하였더니 필연적으로 몸체의 흔들림이 발생하게 되었다. 이런 상황에서 몸체를 안정하게 유지하기 위해서 대부분의 무게를 차지하는 모터를 프레임의 아래 부분에 위치하도록 하였다.

2.2 관절 설계

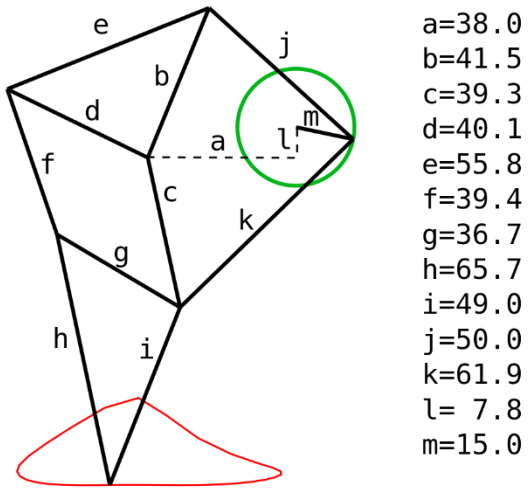

Fig. 2 Theo Jansen Linkage "11 Holy Numbers"

Figure 2 는 Theo Jansen Mechanism 하에서 11 개의 링크가 최적의 성능을 뽑아낼 수 있도록 하는 링크들의 길이비를 나타낸다. 최초에는 Edison m.Sketch 를 사용하여 이 길이비와 유사하도록 설계하였다. 앞으로 특정 링크를 언급 할 때 Figure 2 에서의 링크 명칭 a~m 을 사용할 것이다.

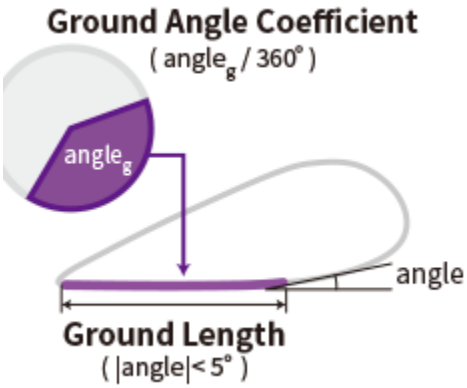

Fig. 3 Ground Length and Ground Angle Coefficient

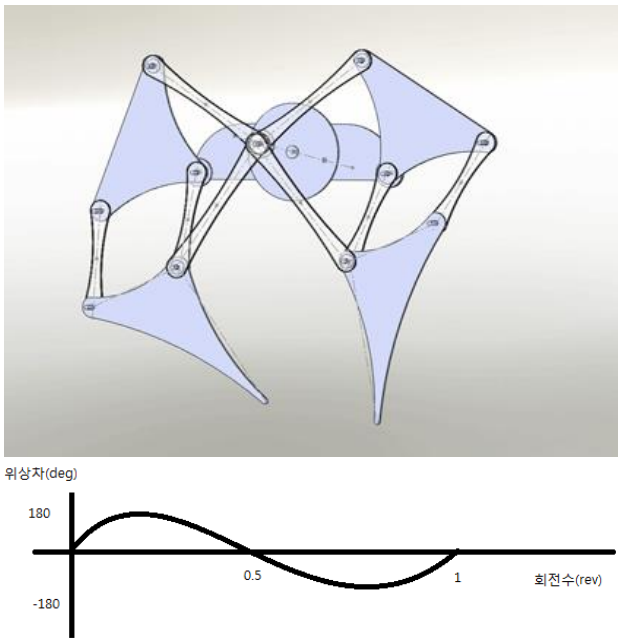

Fig. 4 2-legs Model and phase difference during cycle

Edison m.Sketch 시뮬레이션에는 두 가지 지표가 있다. Ground Length(GL)는 다리 끝부분의 궤적이 지면과 이루는 각도가 5 도 이하인 부분의 길이를 측정한 것으로 로봇의 다리가 실제 지면에 맞닿아 있다고 판정하는 부분이므로 이 길이가 길수록 다리와 지면사이의 미끄러짐이 없다고 가정할 때 모터 1 회전에 이론적으로 로봇이 GL 만큼의 길이를 전진할 수 있다. Ground Angle Coefficient(GAC)는 1 회전동안 다리가 지면에 맞닿아있는 비율이다. 이 값이 클수록 로봇의 다리가 지면을 차는 시간이 길어진다. GAC 값이 중요한 이유는, 4 족 기준으로 Figure 4 와 같이 앞과 뒤쪽 다리가 축을 공유하게 되는데, 모터가 회전하면서 양쪽 다리의 위상차가 증가했다 줄어들었다를 반복한다. 여기서 나타날 수 있는 최대 위상차는 180 도이다. 위상차가 180 도 일 때 만일 GAC 가 0.5 라면 한쪽 다리가 지면에서 떠 있을 때 반대쪽 다리는 반드시 지면에 붙어있게 된다. 위상차가 그보다 적거나 GAC 값이 0.5 보다 작다면 시뮬레이션상으로 두 다리가 모두 지면에서 떠 있는 상태가 발생한다. 실제 이러한 상황에선 자중에 의해 다리가 주저 앉고, 로봇 몸체가 기울어지게 되어 시뮬레이션에서 벗어난 결과를 내게 된다. 따라서 두 다리 중 하나라도 지면에 맞닿아있는 순간을 늘이기 위해 GAC 값이 높게 나오도록 시뮬레이션을 수행하는 것이 중요하다 할 수 있다.

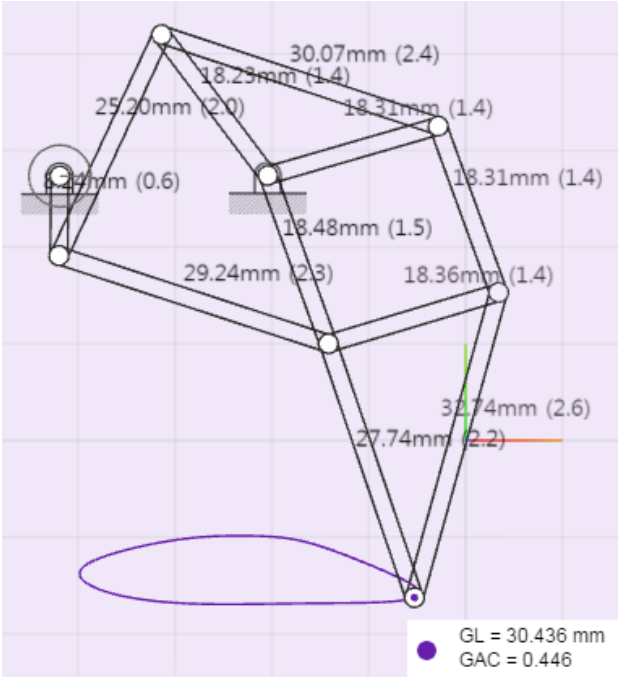

Fig. 5 First Design

Figure 5 는 Figure 2 의 “11 Holy Numbers”를 근사적으로 반영한 최초의 설계안이다. 시뮬레이션과 실제 길이 간의 축척은 1:3 이다. l 값은 주지 않고, 링크 m 값은 과학상자의 구멍 2 개 거리인 25mm 를 기준으로 두고 설계하였다. 시뮬레이션 상에서 다리 끝의 궤적은 비교적 완만한 곡선을 그렸으며, 궤적의 최대 높이는 약 10mm 정도이다. GL 과 GAC 값은 각각 30.436mm, 0.466 의 준수한 값이 나왔다. 특히 GAC 값이 높은 것이 주목할 만 하다.

2.2.1 제작/조립

Figure 5 의 초안에 따라 두께 3mm 의 아크릴판을 국립중앙과학관 무한상상실의 레이저커터로 가공하였다. 도면을 제작할 CAD S/W 는 SolidWorks 를 사용하였다.

Fig. 6 Process of Laser Cutting

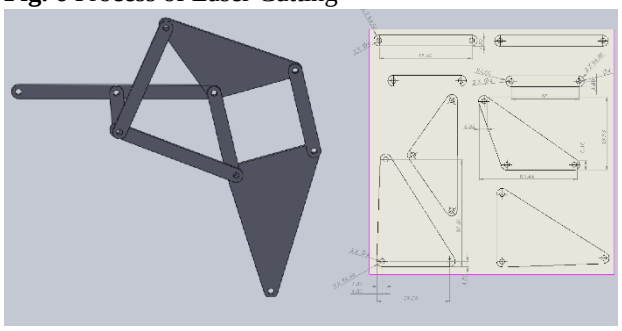

Fig. 7 Assembly and Design Plan

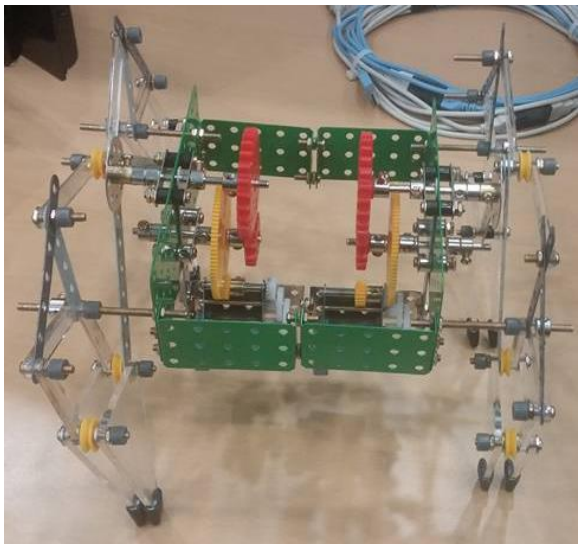

Fig. 8 Finished Robot

완성된 로봇은 Figure 8 과 같다. 2.1 절의 몸체 설계를 반영하여 모터를 아래에 위치시키고, 맞물리는 기어비를 크게 하여 적은 모터 출력으로도 큰 힘을 낼 수 있도록 하였다.

2.2.2 문제점 및 개선

Figure 5 의 초안에 따라 조립하였더니 링크 m 의 길이를 구멍 2 개 거리인 25mm 로 설계했을 때 구멍 1 개거리인 12.5mm 에 비해 전체적으로 다른 링크들의 변위 차이가 극심해졌다. 따라서 주어진 모터의 출력으로는 지면에서 원활하게 움직일 수가 없었다. 그 때문에 링크 m 의 길이를 12.5mm 로 재설계하였다.

Fig. 9 Collapsing of Robot due to linkage h

또한 구동 중 링크 h 가 바닥에 맞닿아버려 로봇이 주저 앉아 자력으로 일어설 수 없는 상황에 처했다. 아래 3 절링크의 바닥 부분이 지나치게 안쪽으로 치우쳐서 발생하는 문제로, 링크 e 의 길이를 줄여 b,d,e 로 이루어진 삼각형을 예각삼각형에 가깝도록 만들어 문제를 해결하였다. 이 경우 두 다리의 지면에 맞닿는 부분의 거리가 벌어져 다리 사이의 충돌과 링크 h 가 바닥에 맞닿는 것 둘 다 방지할 수 있다. 수정된 형태는 Figure 10 과 같다.

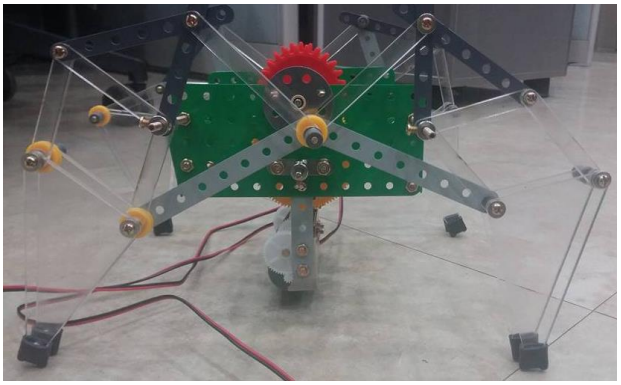

Fig. 10 Modified Model

이 수정된 모델에서 또 다른 문제가 발생했다. Figure 11 에서 보이는 대로, 링크 k 와 양쪽 고정 축이 모터 회전 중에 접촉하여 걸리는 사태가 일어났다. 이는 공중에서 구동 하였을 때는 발생하지 않고 지면에서만 발생하는 문제이다. 따라서 몸체의 기울어짐이 jamming 을 유발한다고 할 수 있다.

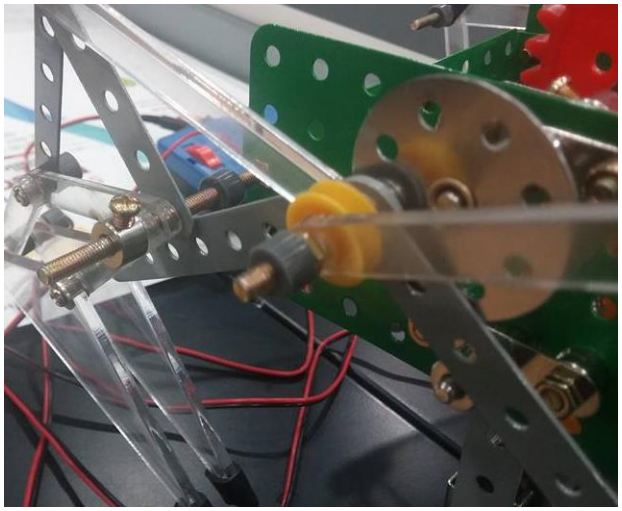

Fig. 11 Jamming between fixing shaft and linkage k

앞서 흔들림을 방지하기 위해서는 양 다리가 모두 떠 있는 시간을 줄여야 하고, 그것을 위해서 GAC 값이 높아야 한다고 언급하였다. GAC 값을 높이기 위해 높이 l 을 조정하는 방안을 택하였다.

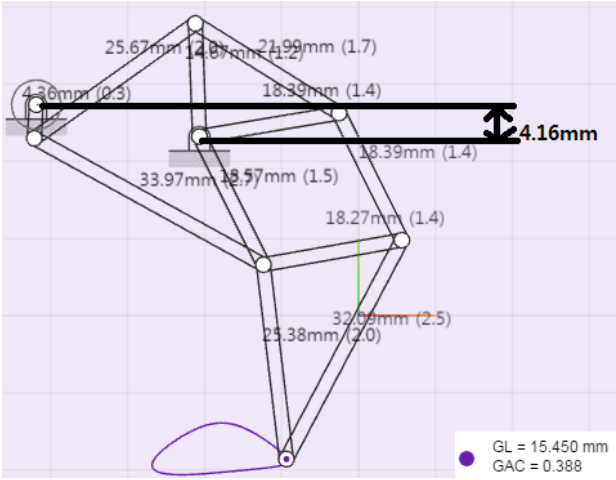

Fig. 12 Modified Model (in Edison m.Sketch)

Figure 12 는 지금까지의 설계 변경을 m.Sketch 에 반영한 것이다. 이 때의 높이 l 값은 12.5mm 이다. (Figure 12 에서는 축척이 3:1 이므로 4.16mm 로 나타난다.) GAC 값은 0.388 이다. 여기서 l 값을 변경을 변경하였을 대 그에 따른 끝부분의 궤적과 GAC 값의 변화가 Table 1 에 나타나 있다.

l value	Traictory	GAC
12.5mm		0.388
25mm		0.439
37.5mm		0.414

Table 1 Traictory and GAC according to length l

가능한 l 값 중 37.5mm 가 넘어가면 궤적이 교차하여 역주행을 할 가능성이 있기 때문에 고려대상에서 제외한다. 따라서 가장 큰 GAC 값을 가지는 25mm 를 l 값으로 설정하였다. Figure 13 은 수정 전/후의 로봇 형상을 나타낸다. 보다 더 안정적인 형상이 되었으며, 보행 성능도 보다 개선되었다.

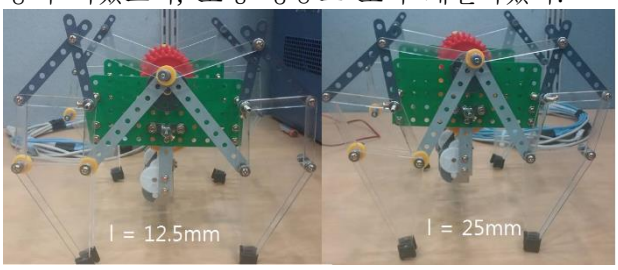

Fig. 13 Difference according to length l

3. 결 론

본 논문에서는 Theo Jansen Mechanism 을 이용한 이상적인 모델을 실제로 적용했을 때 발생하는 문제점들을 개선하는 방안을 중점적으로 서술하였다. 실제 상황에서 시뮬레이션과 유사한 결과를 내기 위해서는 위해서는 로봇의 자중과 다리가 동시에 뜨는 현상, 그로 인한 몸체의 기울어짐 등 고려해야 할 요소가 많았다.

이 일련의 설계변경을 통해 로봇의 안정성은 상당수 개선할 수 있었다. 다만 완성된 로봇의 보행 성능은 기어비가 큰 것을 감안해도 그다지 좋지 않았다. 안정성과 보행 성능을 모두 취하기 위해 향후 가능한 개선 방향으로 양 다리의 구동축(링크 m 부분)을 서로 분리하여 항상 180 도의 위상차를 유지하도록 하는 방법이 있을 것이다. 또한 다리의 개수를 4 족에서 6 족 또는 8 족으로 설계하여 다리가 지면에 맞닿을 가능성을 늘림으로써 로봇의 안정성을 높이는 방법 등을 사용하여 설계

를 보완할 필요가 있다고 판단된다.

감사의글

Theo Jansen Mechanism 을 이용하여 직접 다리를 설계해 보면서, 이론적으로 적절한 설계가 실제 상황에서는 자중과 같이 고려할 것이 많았음을 알게 되었다. 이론과 실제의 괴리감을 여러 번의 수치 변경과 반복적인 실험을 통해 좁혀 나가며, 최적의 결론을 도출해내는 실험과학의 존재의의를 깨닫게 된 귀중한 시간이었다.

4. 참고문헌

1. Ghassaei, A., 2011, *The Design and Optimization of a Crank-Based Leg Mechanism*, Master Thesis, Pomona College, USA.
2. Kim, S.U. and Kim, D.H., 2011, Kinematic Analysis of a Legged Walking Robot Based on Four-bar Linkage and Jansen Mechanism, *Korean Institute of Intelligent Systems.*
3. Giesbrecht, D., 2011, Design and Optimization of an Eight-Bar Legged Walking Mechanism Imitating a Kinetic Sculpture, “WIND BEAST”, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering.*