대한기계학회 주최

제10회 전국학생설계경진대회(2020년)

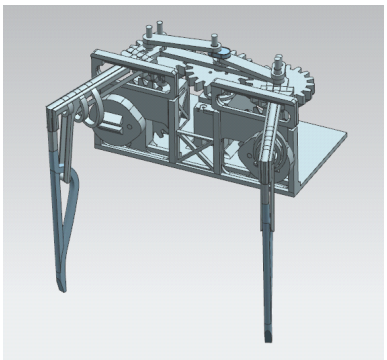
설계 최종 보고서

참가부	대학부 (√)				
참가분야	공모주제 ( ) / 자유주제 (√)				
참가팀명	Pioneer				
설계제목	멀티링크를 도입한 다족보행로봇				
지도교수/교사	(소속) 기계시스템공학과 (성명) 김상현 (이메일) shkim@hansung.ac.kr				
대표자 (신청인)	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
	임상현	한성대학교 기계시스템공학과			

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	임상현	한성대학교 / 기계시스템공학과 / 4학년	1596041@hansung.ac.kr
2	이동훈	한성대학교 / 기계시스템공학과 / 4학년	1596029@hansung.ac.kr
3	강현창	한성대학교 / 기계시스템공학과 / 4학년	1596003@hansung.ac.kr
4			
5			
6			

설계 요약문

참가분야	공모주제 (　　) / 자유주제 (✓)
참가팀명	Pioneer
설계제목	멀티링크를 도입한 다족보행로봇
대표자명	임상현
요약문	1) 4족 이상의 현대화된 다족보행로봇들은 다수의 서보모터를 제어하기 위해 복잡한 소프트웨어와 고가의 하드웨어를 필요로 하며 전력사용량이 많아 장시간 운행에 적절하지 않다. 2) 반복 운동의 경우 적절한 기구 설계를 통해 구현 가능하며 이는 하나의 저가 모터만을 가지고 다수의 다리를 현대화된 보행로봇과 같은 형태로 구동할 수 있게 만든다. 이를 통해 다족보행로봇의 제작비용을 줄이고 구동 시 필요한 전류의 양과 소프트웨어적 오류를 줄일 수 있으며, 환경적인 문제도 개선한다. 3) 서보모터를 이용한 다족보행로봇이나 기존의 기계적 구동을 하는 다족보행로봇이 가진 고질적인 단점들을 새롭게 구상한 알고리즘들로 극복하고 이를 역학적으로 분석해 수식을 전개한다. 3) 기존에 연구됐었던 주제가 아닌 새로 연구되고 정의되는 설계이므로 개념을 이해하기 쉽게 정의해야 한다. 또한 해석 프로그램들을 사용해 수식과 치수들을 적절하게 도출하는 방식을 보여주고 **원하는 목적에 맞게 누구나 간단히 재설계할 수 있도록 수식을 통해 정리해놓는다.** 
설계프로젝트의 입상 이력	없음

멀티링크를 도입한 다족보행로봇

임상현*† · 강현창** · 이동훈**
*한성대학교 기계시스템공학부·**한성대학교 기계시스템공학부

Multi-legged robot with multi-link

Sang-Hyun Im*, Hyun-chang Kang** and Dong-hoon Lee**
* School of Mechanical Engineering, Hansung University
** School of Mechanical Engineering, Hansung University

(Received September 15, 2020)

Key Words: Multi link(멀티링크), Multi-pedal robot(다족보행로봇), Mechanical robot(기계적 로봇)

초록: 기존의 다족보행로봇은 다리를 구동하기 위해 2 ~ 3 개의 모터를 사용하고 있습니다. 각 모터는 다리의 상하운동, 좌우운동 그리고 안정성 유지 목적으로 사용됩니다. 이러한 모터들은 로봇의 크기와 무게를 증가시킵니다. 또한 제작비용이 크고 구동 중 전력 사용이 높습니다. 이 연구에서 우리는 이러한 고가의 서보모터를 대체하기 위해 특수 제작된 멀티링크와 새로운 캠의 형태를 사용했습니다. 다리의 좌우운동은 2개의 4절 링크로 결합 된 멀티링크로 구현되고, 상하운동은 정면판캠에 의해 구현됩니다. 또한 안정성을 유지시키는 추가적인 링크도 존재합니다. 최종적으로 각 기구들은 베벨 기어로 결합됩니다. 이러한 방식으로 모터의 수를 줄일 수 있으며 많은 설계상의 이점을 기대할 수 있습니다.

Abstract: Existing multi-legged robots have been using 2 or 3 motors to drive their leg. Each motor drive leg's forward-backward movement, up-down movement and maintain stability. A number of motors cause increases of robot's size and weight. It also increases costs of assembly and usage of power. In this study, we used the form of combined multi-link and cam shaft to replace the number of motors. Leg's forward-backward movement is implemented by multi-link which is a combination of two four bar linkages. Up-down movement is implemented by an applied cam. There are also additional links to maintain stability. Three of them are combined with bevel gear. In this way, the number of motors can be reduced. Accordingly, many design advantages are expected.

1. 서 론

인명을 위협하는 재난 현장에서는 인명 구조자가 감수해야할 위험이 크며 구조력의 한계에 부딪힌다. 이를 해결하기 위해 다양한 종류의 탐사형 로봇이 존재하며 장시간동안 다양한 장애물을 극복할 수 있는 것에 초점을 맞추고 있다. 탐사형 로봇의 대표적인 보행 방식은 구동 바퀴를 이용하는 방식과 보행을 이용하는 방식이 있다. 전자의 경우 제작이 간단하고 장시간 운용될 수 있는 장점이 있지만 험지에 있는 장애물을 극복하는 데 어려움이 있다. 후자의 방식으로 이동하는 로봇은 제작이 어렵고 운용 중 전력소모가 크지만 장애물을 극복할 수 있다는 장점이 있다.

하지만 보행을 이용한 기존의 탐사형 로봇은 다수의 모터를 사용하여 보행한다. 다수의 모터를 사용함으로써 제작비용과 로봇 무게가 증가한다. 또한 많은 전력을 필요로 하여 장시간 운용이 불가능한 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 다양한 링크들을 사용하여 모터의 개수를 줄이는 방향으로 연구를 진

† Corresponding Author, dlapple6@naver.com
© 2020 The Korean Society of Mechanical Engineers

행한다. 기존의 탐사형 로봇은 보행을 위해 다리 1개당 3개의 모터를 사용한다. 각 모터는 다리의 상하 운동과 좌우 운동을 구현하며 보행시 안정성을 유지하며한다. 본 연구에서는 4절 링크를 상호 결합한 형태의 멀티링크로 다리의 좌우 운동을 구현하고 새롭게 제시된 정면판캠(SH-cam)을 이용하여 상하 운동을 구현하도록 한다. 또한 추가적인 링크(SH-link)를 설계하여 보행의 안정성도 유지할 수 있도록 해준다.

2. 설계핵심내용

2.1 다족보행로봇의 구동형태

기존의 다족보행로봇(multi-legged robot)이 탐사임무를 원활하게 수행하려면 각각의 다리에 2개의 링크와 3개의 서보모터를 필요로 한다. Fig. 1은 다족보행로봇의 2개 링크와 서보모터의 구동축을 도식하고 있으며 각기 다른 역할들을 수행한다. A위치의 서보모터는 넓적다리(Thigh)를 상하로 구동시켜주고 B위치의 서보모터는 넓적다리를 좌우로 구동시주며 로봇이 보행할 수 있도록 해준다. 마지막으로 C위치의 서보모터는 로봇이 안정적으로 보행할 수 있도록 종아리(Calf)의 끝단이 바닥에 닿는 위치를 조정시켜준다. 3개의 서보모터로 인해 정해지는 각 링크의 끝단 a와 b는 로봇공학적인 해석과 제어시스템을 통해 그 위치가 정해지며 시간에 따라 적절하게 위치하여야 한다. 이러한 설계는 안정성 향상을 위해 충분한 연구를 거쳐야 하며 고가의 서보모터 다수를 동시에 제어할 수 있는 전력과 장비가 필요하므로 가격적인 측면에도 문제가 생긴다. 또한 운용되는 다수의 서보모터에 오차가 누적되지 않도록 하면서 각 모터가 하중을 버틸 수 있도록 충분한 전력을 공급하여야 한다. 장시간 탐사를 거쳐야 하는 탐사로봇에게는 이러한 시스템이 다소 부적절하다.

이러한 상황으로 인해 어느 정도 완성도가 있는 보행로봇을 만드는 연구기관에서는 지속적으로 높은 제작비용과 연구비용을 필요로 하고 있으며 다양한 분야의 전문가를 필요로 한다. 이러한 문제들을 일부 해결하기 위해 오래전부터 기계설계만을 이용하는 구동형태가 고안되었지만 서보모터나 유압장치를 사용한 로봇의 안전성이나 가변성을 따라가지는 못하고 있으며 고전적인 구동방식으로 비추어진다.

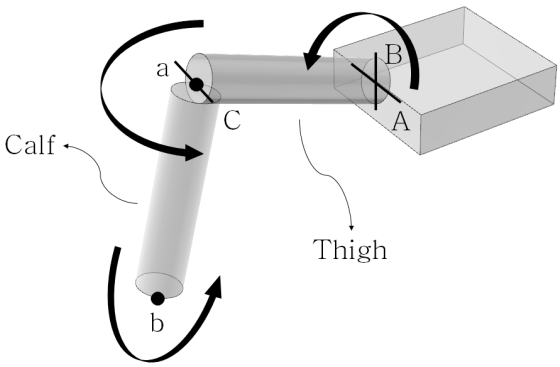


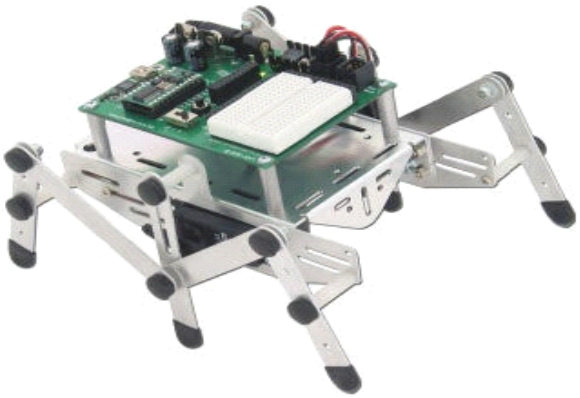
Fig. 1 Existing multi-pedal robot

2.2 기존의 기계적 다족보행로봇

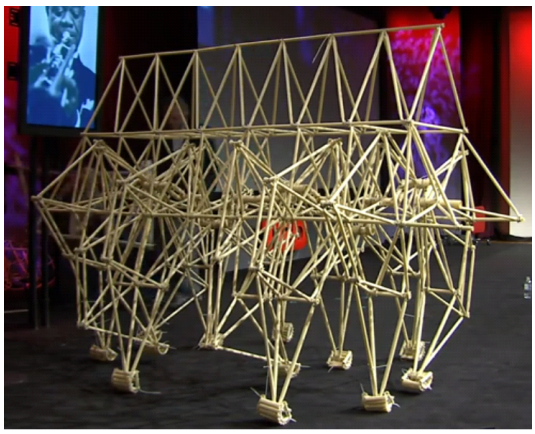
기계적 다족보행로봇은 서보모터나 유압장치를 사용하는 로봇에 비해 전력유지문제와 경제적인 문제를 충분히 보완해주지만 안정성 측면에서는 단점이 많은 구동방식으로 치부된다. 초기의 기계적 다족보행로봇은 독립적인 4절 링크를 통해 보행을 구동하였으며 지속적인 회전 운동을 다리의 반복운동으로 바꿔야 했으므로 크랭크-로커 기구를 주로 이용하였다(Fig. 2의 (a)). 이러한 로봇들은 단순한 구조인 만큼 큰 문제를 안고 있었는데 대표적인 문제가 로봇의 롤(roll)과 피치(pitch) 문제였다. 이러한 로봇은 롤과 피치로 인해 하중이 무거운 로봇에게 적용했을 때 구동 중 중심을 잃게 된다. 이보다 더 이상적인

구동 방식을 보여주는 기계장치는 공학자인 테오 얀센(Theo Jansen)의 Strandbeest(Fig. 2의 (b))으로 동일한 평면에 3개의 4절 링크를 서로 결합하여 몸체에 롤과 피치가 일어나지 않고 구동할 수 있게 해준다. 이러한 장점으로 인해 현대 로봇에서도 가끔씩 활용되는 구조이며 컴퓨터공학의 발달로 인해 기구설계가 더 쉬워졌다. 하지만 다리가 구동될 때 다리의 상하 변위와 좌우 변위가 종속적 관계이므로 다리의 궤적을 조금이라도 변화시키기 위해서는 모든 링크의 수치를 다시 계산하여야 하며 원하는 궤적으로 다리를 움직이게 하기 불가능 할 수 있다. 마지막으로 보폭에 비하여 다리가 차지하는 면적이 큰 편이기 때문에 탐사목적으로 구동하기에 부적절하다.

이외에도 1)컴퓨터를 이용해 기계적 캐릭터의 움직임을 구현하는 방법이 존재하며 이는 기어와 링크를 최소한으로 사용해 보행궤적을 구현하는 것에 초점을 맞추고 있다. 이 경우에 간단한 설정만으로 원하는 다리의 궤적을 부드럽게 표현할 수 있지만 간단한 구조 탓으로 인해 기어에 가해지는 하중이 커질 수 있으며 동일한 출력에서 보폭과 기어의 크기가 정비례하여 필요한 내부공간이 과하게 커질 수 있다는 사실을 고려하지 않았다. 마지막으로 기업 내의 연구를 위해 제작한 프로그램이기 때문에 일반인들은 논문으로만 관련내용을 접할 수 있다.



(a) Early walking robot using link[3]



(b) Strandbeest[4]

Fig. 2 Mechanical walking robot

공통적으로 현재 상용화되거나 연구되는 기계적인 보행구조는 다리의 좌우변위나 상하변위가 서로 종속적 관계여서 원하는 목적을 조금이라도 변경할 때마다 하드웨어 전체를 다시 설계하고 제작해야 한다는 경제적인 단점이 존재한다. 또한 대다수의 경우 보폭이 넓어질수록 로봇제작에 필요시 되는 공간도 커지므로 다수의 서보모터를 이용하는 다족보행로봇에 비해 불리하다.

2.3 다리의 운동

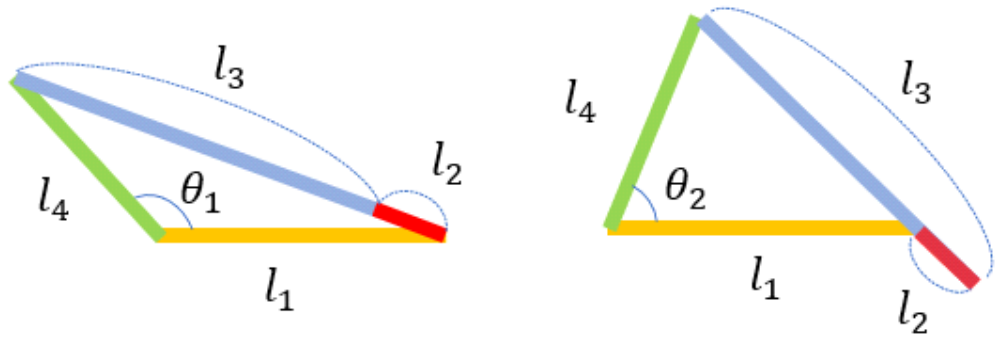
2.3.1 좌우운동

기존 다족보행로봇과 동일한 움직임을 기계적으로 표현하기 위해서는 각 서보모터의 움직임을 기계적 구조로 모방하여야 한다. 또한 각 운동을 독립적으로 모방한 후 결합시키면 기존 기계적 보행로봇이 가지던 단점을 보완할 수 있다.

정해진 운동을 반복적으로 구현하는 기계적 구조에 크랭크-로커구조(Fig. 3)가 있으며 각 링크의 길이와 역할에 따라 4절 링크의 움직임이 달라진다. 그라쇼프의 법칙(Grashof's law)에 만족하는 4절 링크는 반복적인 운동을 구현하기 위해 하나의 링크가 조인트를 기준으로 단 방향 회전을 해야 하며 이 조인트

1) 디즈니사(Disney)의 Computational Design of Mechanical Characters[1]

대신 DC모터를 장착했을 때 서보모터 없이도 좌우반복운동을 만들어 줄 수 있다. 식(1)은 그라쇼프의 법칙으로 기계적 보행구조를 설계하기 위해 필수적으로 만족해야하는 요소이다.



(a) When the driving angle is maximum (b) When the driving angle is minimum

Fig. 3 Crank-rocker link

크랭크-로커 기구의 경우 로커(Fig. 3의 l_4)가 원하는 로커각(Fig. 3의 θ_1과 θ_2)을 가지도록 설계할 수 있으며 이를 통해 로봇의 보행거리 및 보행속도를 구할 수 있다. Fig. 3의 (b)와 같이 크랭크와 커플러가 일직선이 되는 순간을 2)토글 위치라 하며 이 경우에는 4절 링크가 최대의 기계적 이득을 가지게 된다.

$$l_2 + l_4 \leq l_1 + l_3 \tag{1}$$

l_2 : 가장 짧은 링크의 길이

l_4 : 가장 긴 링크의 길이

l_1, l_3 : 나머지 링크들의 길이

다음 식은 로커각을 링크의 길이로 나타낸 결과이다.

$$\theta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{l_1^2 + l_4^2 - (l_3 + l_2)^2}{2l_1 l_4}\right) \tag{2}$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{l_1^2 + l_4^2 - (l_3 - l_2)^2}{2l_1 l_4}\right) \tag{3}$$

로커의 구동각이 클수록 다족보행로봇이 더 큰 보폭으로 움직이게 된다. 로커의 구동각은 2개의 토글 위치에서 발생하는 로커각의 차이로 구할 수 있으며 이는 다음과 같다.

$$\theta_{max} = \theta_1 - \theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{l_1^2 + l_4^2 - (l_3 + l_2)^2}{2l_1 l_4}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{l_1^2 + l_4^2 - (l_3 - l_2)^2}{2l_1 l_4}\right) \tag{4}$$

식(4)의 결과를 비추어 볼 때 최대 로커 구동각이 커지기 위해 모든 링크의 길이가 늘어날 필요가 없

2) 이론적으로 역학적 유효비가 ∞이 되는 위치[2]

다. 기존의 기계적 구동을 가지는 다족보행로봇들 중 대부분은 보폭이 커질수록 구동에 사용되는 부품의 크기가 커지거나 다리의 상하변위가 줄어들었다. 다리의 상하운동과 독립적인 관계를 가지는 4절 링크는 이러한 문제들을 해결해줄 것이며 기계적 구조만을 이용한 반복운동을 통해 서보모터가 가지고 있는 오차누적문제도 해결할 수 있다.

로커(Fig. 3의 l_4)가 넓적다리라고 한다면 4절 크랭크-로커기구는 기본적으로 1개의 4절 링크로 1개의 넓적다리가 가지는 좌우변위를 조정한다. 하지만 제시된 4절 링크가 다른 4절 링크들과 결합한다면 1개의 크랭크축이 2개 이상의 다리 좌우변위를 조정할 수 있다. 이러한 링크 집합들의 결합을 멀티링크(Multi link)라 명명하며 같은 프레임(Fig. 3의 l_1)을 공유하게 한다. 이를 위해 1개의 모터축이 2개의 크랭크에 연결되어 하중을 가해주어야 하며 2개 이상의 로커가 동일한 로커 구동각을 가지며 운동할 수 있도록 한다. 다만 4절 링크만을 이용하여 모터 1개가 3개 이상의 다리를 제어하면 전체적인 구조와 설계가 복잡해지므로 4절 링크에 기어를 결합하여 다족보행로봇을 완성하는 것이 설계를 간소화시킨다. 본 연구에서는 1개의 모터에 2개의 4절 링크를 결합시키며 기어를 통해 제어범위를 확장시키도록 한다.

4절 링크의 결합 후 각 로커의 위치관계는 설계자가 원하는 대로 설정할 수 있다. 본 연구에서는 가장 기본적인 다족보행로봇의 보행형태를 표현하기위해 Fig. 4와 같이 두 로커의 구동방향이 항상 반대가 되도록 한다. 이는 제2코사인 법칙을 통하여 설계할 수 있으며 2개의 4절 링크가 가지는 각 링크길이가 서로 같으므로 다른 보행형태도 모델링프로그램을 통해 쉽게 제작 가능하다. 만일 모델링프로그램을 이용하지 않는다면 두 로커가 순간적으로 위치해야하는 각도를 고려하여 아래의 수식을 전개해야한다[2].

$$\theta_r = \pi - \cos^{-1}\frac{l_1^2+l_2^2-l_3^2+l_4^2-2l_1l_2\cos\theta_c}{2l_4\sqrt{l_1^2+l_2^2-2l_1l_2\cos\theta_c}} - \frac{2l_1^2-2l_1l_2\cos\theta_c}{2l_1\sqrt{l_1^2+l_2^2-2l_1l_2\cos\theta_c}} \tag{5}$$

θ_r : 로커각

θ_c : 크랭크각

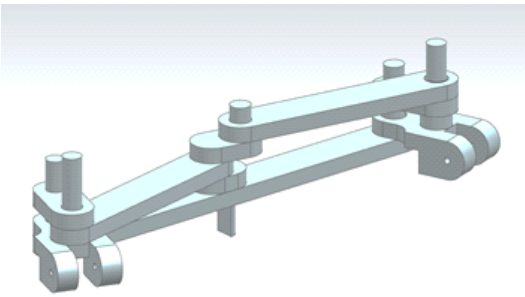
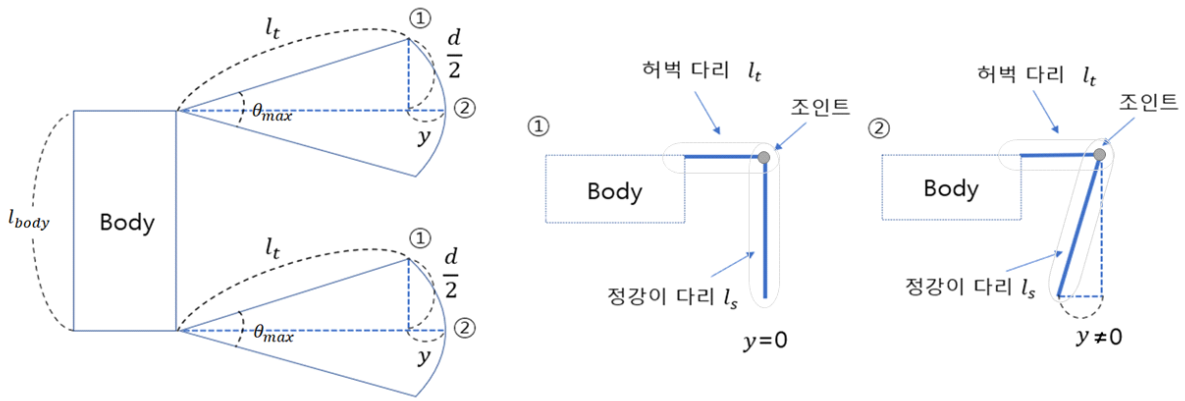


Fig. 4 Multi link

다족보행로봇에 사용할 멀티링크를 설계하기 위해서는 로커의 연장으로 생성되는 넓적다리의 길이도 고려해야 한다. Fig. 5에서 넓적다리의 길이를 l_t로 설정하고 허벅다리와 조인트로 연결되어 땅에 접지하는 부분을 종아리라 하며 길이를 l_s라 정의한다.



(a) Leg shape seen from above (b) Leg shape seen from the front

Fig. 5 Leg shape

식(2)에서 구한 최대 로커 구동각 $\theta_{\max}$를 통해 Fig. 4에 나타낸 로봇의 보폭 d를 구할 수 있으며 다음 식과 같다.

$$d = 2l_t \sin\frac{\theta_{\max}}{2} \tag{6}$$

본 연구에서는 두 개의 로커가 서로 다른 방향으로 움직이며 충돌하지 않도록 해야 한다. 다음 식은 이러한 충돌을 막기 위해 정의된 식이며 로봇 몸체가 빠른 속도를 내기위해서는 아래의 식을 만족하되 $2l_t \sin\frac{\theta_4}{2}$의 값이 두 로커 조인트사이의 길이($l_{body}$)값보다 크게 작지 않도록 해야 한다. $2l_t \sin\frac{\theta_4}{2}$의 값이 작아질수록 보폭도 몸체길이에 비해 좁아지므로 보행성능이 떨어지게 된다.

$$2l_t \sin\frac{\theta_4}{2} < l_{body} \tag{7}$$

2.3.2 상하운동

기존 다족보행로봇의 경우 다리의 좌우운동을 구동시키는 서보모터에 상하운동을 구동시키는 서보모터가 부착되어 있으며 두 서보모터는 독립적으로 구동될 수 있다. 마찬가지로 좌우변위를 구동시키는 4절 링크에 종속되지 않는 구조가 필요하며 이는 캠(cam)구조로 해결 가능하다.

현존하는 캠은 다양한 종류가 있으며 그 중 판캠과 정면캠이 동작구현에 가장 적합하다. 판캠의 경우 다족보행로봇에 적용하게 되면 외력에 저항하도록 다리의 복원력을 추가해야 하지만 정면캠에 비해 제작이 단순하고 사용되는 재료가 적다. 반면 정면캠의 경우 다리 구동 중 외력이 가해지더라도 구동 경로가 변하지 않아 추가적인 복원력을 필요로 하지 않는다. 하지만 판캠에 제작이 까다롭고 종동절의 돌출부(Fig. 6의 C)에 피로가 누적됐을 때 캠과 종동절과의 결합이 끊어질 수도 있다. 본 연구에서는 정면캠의 장점과 판캠의 장점을 모두 수용하고 각 캠의 단점을 해결한 정면판캠을 제안한다. 그 후 제안된 기구가 본 연구에도 적용가능한지 판단하도록 한다.

정면판캠(Fig. 6의 좌측)은 종동절의 돌출부와 결합하여 상하 운동을 구현하며 장애물을 딛고 올라가는 경우나 기울어진 상태로 구동되는 경우에 다리의 운동 형태가 바뀌는 것을 방지해준다. 서보모터를

사용하는 로봇들의 경우 이와 같이 운동 형태를 유지하기 위해 많은 전력을 서보 모터에 모두 공급해 주어야하며 서보 모터의 사양보다 더 큰 외력이 가해지면 순간적으로 운동 형태가 바뀐다. 이러한 문제로 인해 기존의 탐사로봇들은 토크가 강력한 고가의 서보 모터를 사용해야 했다. 본 연구에서 제안한 정면판캠은 서보모터보다 비교적 저렴한 DC모터 하나만으로 이러한 문제들을 해결한다.

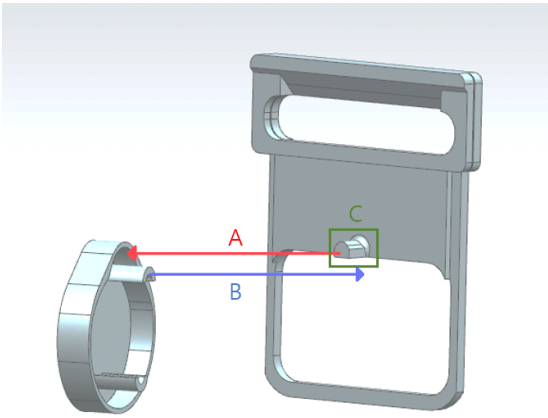
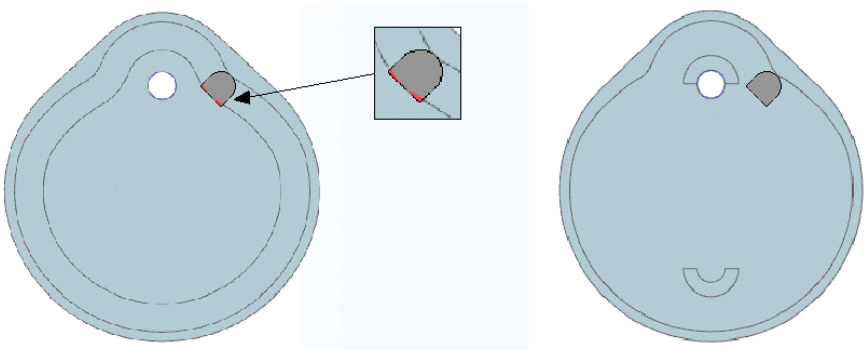


Fig. 6 Applied cam

정면판캠은 판캠과 정면캠의 특징을 모두 가지고 있어 종동절의 돌출부와 캠의 돌출부를 서로에게 삽입시키는 형태로 결합이 된다(Fig. 6). 이때 정면판캠의 구동방식은 정면캠과 유사하지만 정면캠에 비해 더 적은 재료로 제작가능하며 피로가 누적되었을 때 더 유리한 구조를 가지고 있다. 만약 본 로봇에 정면판캠이 아닌 정면캠을 적용한다면 종동절의 돌출부가 캠에 결합될 수 있도록 원통형이여야 한다. 정면캠에서 이 부분은 모든 방향으로 가장 큰 하중을 받게 되는 부분이므로 파단 위험이 가장 크다. 이를 예방하기위해 종동절의 돌출부를 원통 형태가 아닌 다른 형태로 제작한다면 Fig. 7의 (a)와 같이 구동 중간에 돌출부가 캠의 삽입부에 끼여 구동이 불가하게 된다. 하지만 정면판캠의 경우 돌출부의 일부가 원통형이라면 Fig. 7의 (b)와 같이 다른 부분의 형태는 단면이 사각 기둥 형태라도 상관이 없으며 힘도 한쪽 방향으로만 받게 된다. 이는 동일한 크기의 정면캠보다 더 유리하게 사용될 수 있으며 다족보행로봇이 보행 중 받게 되는 하중을 더 잘 버틸 수 있도록 해준다.



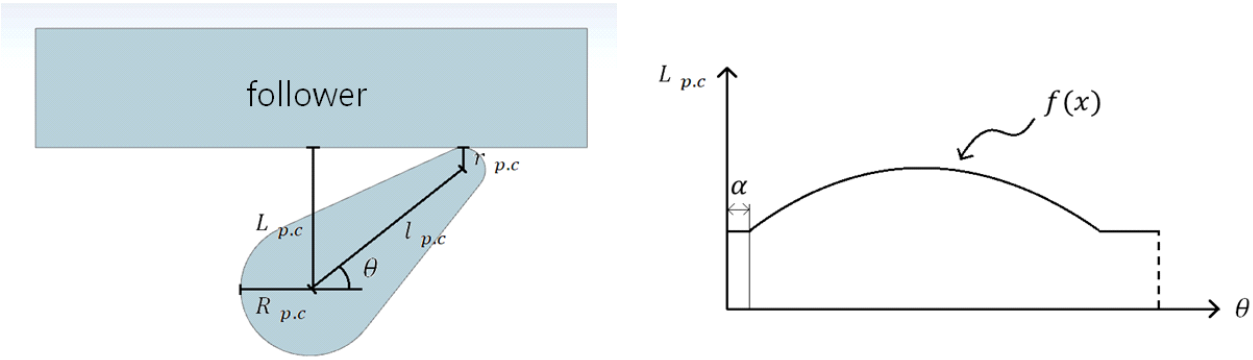
(a) Front cam and Projection part (b) Applied cam and Projection part

Fig. 7 Cam and Projection part

정면판캠을 제작하기 위한 첫 과정은 기존 다족보행로봇이나 생체모델의 다리의 상하 운동 궤적을 정확하게 파악하고 수식으로 표현하는 것이다. 본 연구는 정면판캠과 4절 링크의 결합을 고려하여 설계하

였으며 전갈다리의 궤적을 모방하고자 하였다. 캠축이 반 바퀴 회전할 때 종동절이 일정한 높이를 유지해야하고 나머지 반 바퀴를 회전할 때 종동절이 상하 운동해야 한다.

우선적으로 이러한 궤적을 만족시키는 평캠을 우선적으로 설계해야 하며 이 궤적은 캠축의 중심과 종동절 끝 단 사이의 거리$L_{p.c}$ 로 표현이 가능하다(Fig. 8).



(a) Flat cam-follower mechanism (b) Flat cam-follower mechanism relationship graph

Fig. 8 Flat cam

Fig. 8의 (b)를 수식으로 표현하는 것이 가능하며 이는 아래의 식과 같다.

$$L_{p.c} = r_{p.c} + l_c \circ \sin(\theta),\ \alpha < \theta < \pi - \alpha \tag{8}$$

$$L_{p.c} = R_{p.c},\ \pi - \alpha < \theta < 2\pi \tag{9}$$

$R_{p.c},\ r_{p.c}$: 캠의 반경

$l_{p.c}$: 캠의 길이

θ : 캠축이 돌아간 각도

본 연구에서는 θ가 0에서π로 변할 때 다리가 직선의 궤적으로 움직이고 π에서 2π로 변할 때 곡선의 궤적으로 움직이도록 할 것이다. 이러한 조건을 식(8)과 식(9)에 적용시키면 $R_{p.c}$크기와 $r_{p.c}$ 크기가 동일해야 한다는 결과가 도출된다.

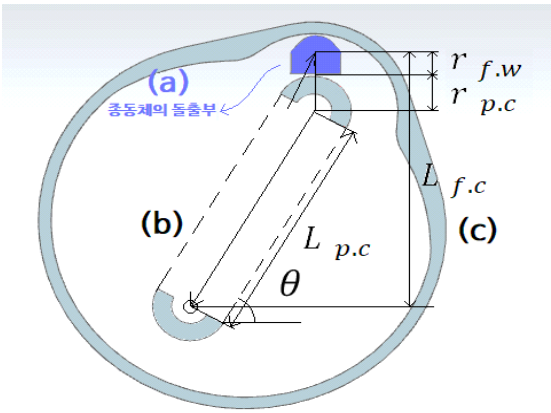


Fig. 9 Applied cam and formula

다음으로 정면판캠에 적용시킬 정면캠의 형상을 설계하여야 하며 이 또한 캠축의 중심과 종동절 돌출

부의 중심사이의 거리($L_{f.c}$)를 식으로 나타내 해석할 수 있다. Fig. 9에 따라 종동절의 돌출부가 그리는 궤적은 식(10)과 식(11)로 표현된다. Fig. 9에서 (a)는 종동절의 돌출부, (b)는 판캠의 형상 그리고 (c)는 정면캠의 형상이다.

$$L_{f.c} = r_{f.w} + r_{p.c} + L_{p.c} \circ \sin(\theta),\ 0 < \theta < \pi \tag{10}$$

$$L_{f.c} = r_{p.c} + r_{f.w},\ \pi < \theta < 2\pi \tag{11}$$

$r_{f.w}$: 돌출부의 반경

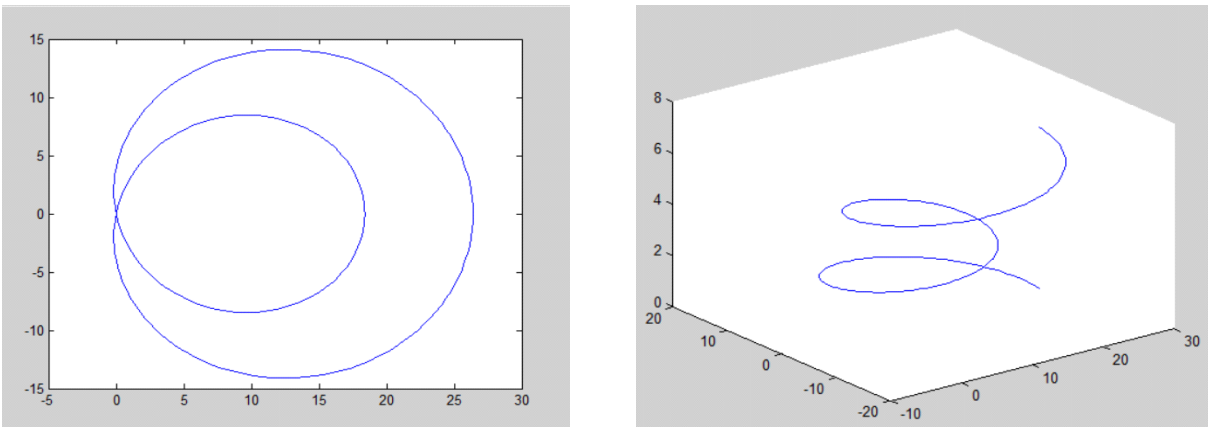
$r_{p.c}$: 판캠의 반경

$l_{p.c}$: 판캠의 길이

θ : 캠축이 돌아간 각도

설계자가 $r_{f.w}$, $r_{p.c}$ 그리고 $L_{p.c}$ 의 길이를 모두 알고 있는 상태라면 위 식들을 이용해 $L_{f.c}$ 와 θ의 관계를 극좌표계로 표현할 수 있으며 이를 통해 정면판캠의 형상을 유추할 수 있다.

식(10)에서 도출된 식은 수치해석을 통해 표현할 수 있다. Fig. 10은 [0, 2π]의 범위를 가진 θ를 통해 표현한 식(10)의 결과와 같으며 실제 정면판캠으로 구현하기 불가능하다. Fig. 10의 (a)는 평면상에 궤적을 표현한 것이며 Fig. 10의 (b)는 시간 축을 포함하여 공간상에 표현한 궤적이다



(a) Applied cam trajectory - 2D (b) Applied cam trajectory - 3D

Fig. 10 Applied cam trajectory

하지만 식(10)을 범위 [0, π]로 제한하고 표현되는 범위가 [π, 2π]인 식(11)을 조각 별로 정의한다면 정면캠의 형상을 새롭게 정의 할 수 있다. 이는 Fig. 11과 같으며 이 형상을 그대로 정면판캠에 적용하였을 때 Fig. 11의 B부분에서는 부드럽게 구동되지만 Fig. 11의 A부분에서 걸림 현상이 발생한다. 이를 위해 도출된 정면판캠의 형상에서 추가적인 수정을 필요로 한다.

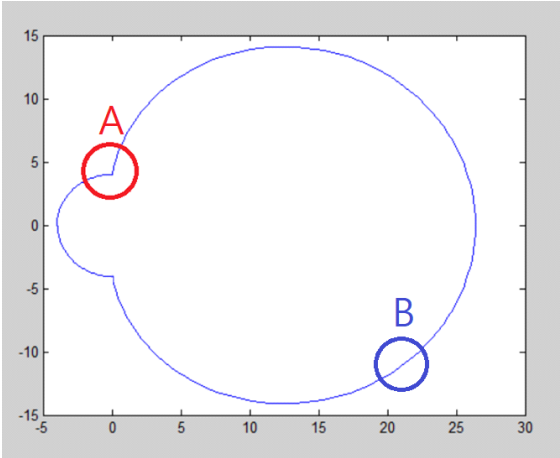


Fig. 11 Modified Applied cam trajectory

A구간에서 종동체의 돌출부가 걸리는 경우를 막기 위해 A구간에 적당한 필렛(fillet)으로 반경을 줄 수 있으며 이 때 A에서 생기는 반경이 매우 커지게 되면 다리의 상하 운동이 원하는 경로를 이탈할 수 있다. 반대로 반경이 너무 작게 되면 구동 시 모터가 더 큰 하중을 받게 된다. 따라서 설계를 할 때 구동 환경에 따라 적절한 반경을 형성 시키는 것이 중요하다.

2.4 다리의 안정성 향상

다족보행로봇은 다리를 땅에 닿게 한 채로 마찰하며 전진한다. 앞선 연구내용만을 가지고 로봇을 제작한다면 다리가 바닥을 끌고 갈 때의 궤적이 이상적인 직선이 아닌 부채꼴 형태로 그려지게 된다. 다시 말해 다리가 두 경로 사이(이상적인 직선궤적과 실제 그려지는 궤적)의 오차는 보행 중 몸체를 불안정하게 흔들게 된다. 보행의 안정성을 높이기 위해서는 이러한 오차를 최소화 시켜야 하며 허벅다리길이l_t와 오차y의 관계식은 다음과 같다(Fig. 5).

$$y = l_t - l_t \cos\frac{\theta_4}{2} \tag{12}$$

적절한 l_t값을 찾기 위해 위 식을 미분하여 Matlab을 통하여 그래프를 그린 결과는 Fig. 12와 같다. l_t의 크기가 어느 정도 커지게 되면 미분 값이 충분히 작아졌다는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 사실을 이용해 모터의 하중에 영향을 주는 l_t의 값은 충분히 작되 y값의 변화폭이 크지 않은 구간을 판단하여 각 링크의 치수를 설정하였다.

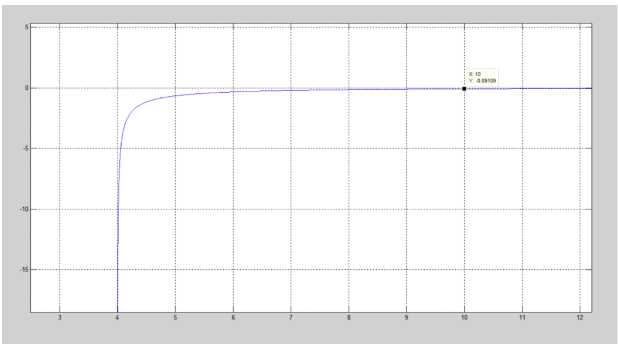
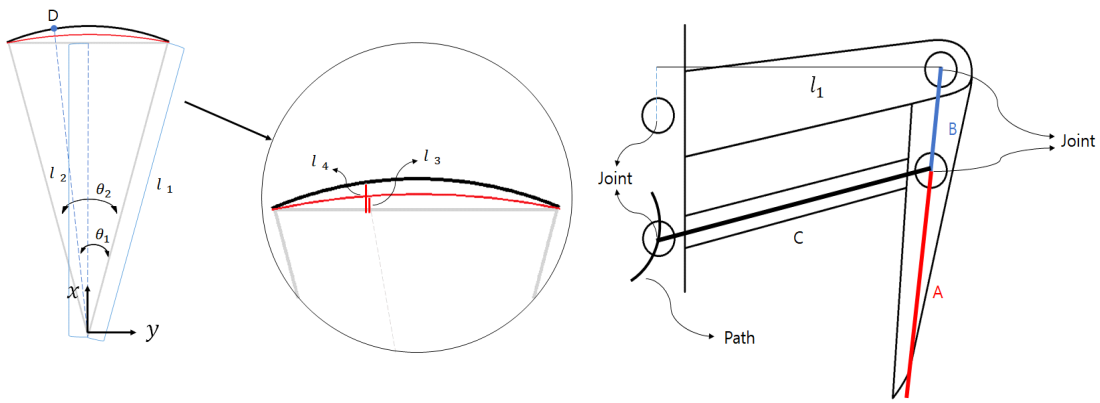


Fig. 12 Error graph(l_t-y) (Matlab)

하지만 위 방법으로는 오차를 0으로 만들 수 없으며 여전히 몸체의 흔들림이 다소 존재하게 된다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 다리의 길이 (Fig. 13 (a)의 l_1), 로커의 구동각 (Fig. 13 (a)의 θ_2) 그리고 종아리 다리의 비율(Fig. 13 (b)의 A와 B 길이 비율)을 안다면 링크(Fig. 13 (b)의 C)가 보행을 안정적으로 만들어줄 수 있다. 이러한 링크는 다리가 지면에 닿은 채로 보행할 때 다리 끝단이 움직이는 경로가 직선이 되도록 종아리 다리를 잡아당겨주어 로봇이 균형을 잃게 되는 상황을 막아준다. 다리의 끝단 부분이 정확하게 직선이 되기 위해서는 링크와 조인트 위치에 대한 수식적 전개가 필요하다.



(a) Leg in coordinate system (b) Legs and links

Fig. 13 Length of legs and links

우선 정강이 다리와 종아리 다리 사이의 조인트는 Fig. 13 (a)의 고정좌표계(fixed coordinate system)를 기준으로 좌표를 파악할 수 있다. 이는 다음과 같다.

$$D\left(-l_1\sin\left(\theta_1-\frac{\theta_2}{2}\right), l_1\cos\left(\theta_1-\frac{\theta_2}{2}\right)\right) \tag{13}$$

그리고 l_2의 길이는 주어진 수치들을 이용해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$l_2 = l_1\cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \tag{14}$$

조인트좌표의 y값(D_y)에 l_2의 길이를 감하여 주면 l_4의 길이가 도출되며 이때 A와 B의 길이 비(n)를 이용해 최종적으로 링크(Fig. 13 (b)의 D)끝단에 연결된 조인트의 y좌표를 알 수 있다. 직교좌표계는 각 좌표계로 치환할 수 있으며 이로부터 로커의 회전각도 θ_1 에 따른 링크의 길이를 알 수 있다. $n=\dfrac{B}{A+B}$일 때, 최종적으로 도출된 결과는 다음과 같다. ($\theta_2 < \pi$)

$$l_D = \frac{l_1\left[ncos\left(\theta_1 - \frac{\theta_2}{2}\right) + (1-n)\cos\frac{\theta_2}{2}\right]}{\cos\left(\theta_1 - \frac{\theta_2}{2}\right)} \tag{15}$$

이때 안정적인 보행을 위해 링크의 길이l_D는 식(15)에 따라 가변되어야 하며 이는 조인트의 위치를 로커의 회전각에 따라 변하게 만들거나 시간에 따라 변화하는 가변링크를 제작하여야한다. 본 연구에서는 조인트의 위치가 변할 수 있도록 수치해석을 통해 조인트의 이동경로를 도식화한 후 슬라이드링크에 적용시켰다.

2.5 각 기구의 결합

앞서 정의한 4절 링크와 캠은 서로 수직관계인 축을 통해 동시에 회전하여야 한다. 다른 벨트, 마찰차 같은 동력 전달 장치로는 정확한 속도비와 수직 방향으로 전달할 수 없으며 노화가 생길수도 있다. 이에 따라 본 연구에서는 베벨기어를 사용하여 동력을 전달한다.

모터에서 다리의 좌우 운동을 하는 멀티링크를 구동하기 위해 모터를 멀티링크의 축에 직접 연결할 수 있지만 동일한 축으로 캠축을 구동시키기에 구조적 문제가 따라온다. 따라서 모터에 기어를 장착하고 그 양 옆에 베벨기어를 추가해 캠축이 회전하게끔 만든다(Fig. 14).

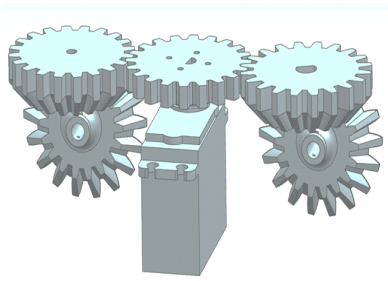


Fig. 14 Bevel gear

기존의 기계적 구동을 하는 다족보행로봇의 경우 하나의 모터로 동시에 다리의 상하운동과 좌우운동을 할 수 있도록 하중을 준다. 이 경우 모터가 한 번에 큰 하중을 받기 때문에 충분히 높은 사양의 모터를 필요로 한다. 하지만 본 연구에서 도출된 구조는 캠축에 가장 큰 하중을 주어야 할 때 4절 링크가 [2]기계적 이득을 가지는 위치에 있어 모터의 하중 대부분이 캠축에 집중되며 4절 링크가 하중을 필요로 할 때는 캠축 구동에 필요한 하중이 비교적 적다. 이러한 이점으로 인해 타 기계적 구조에 비해 더 저가의 모터를 써도 무관하며 하나의 모터가 구동시킬 수 있는 다리의 개수도 늘어나게 된다.

2.6 설계 과정

실제 설계 과정에서는 각 수치를 최솟값으로 설계해야 로봇의 부피와 무게를 줄일 수 있다. 본 연구는 누구나 목적에 맞게 기계적 구동을 가지는 이상적인 다족보행로봇을 제작하도록 수식을 제공하는 것에 중점을 맞추고 있으며 부차적으로는 그 수식을 이용한 결과물을 도출한다.

모든 부품을 ABS소재를 이용하여 제작하며 각 부품의 항복강도를 고려한다. 원형 조인트의 비틀림각은 아래의 식으로 나타낼 수 있다. 입력 토크의 크기는 본 연구에서 사용하는 모터 MG996R의 출력 토크 값을 사용한다. 이때 조인트의 길이를 l, 반경을 r이라고 한다[3].

$$\theta = \frac{Tl}{GJ} = \frac{Tl}{G\frac{\pi r^4}{2}} \tag{16}$$

각 부품의 안전계수는 2로 설정하여 설계하며 응력과 관련된 공식들로부터 각 부품들을 수치해석 한다(Fig. 15). 본 연구에서는 부품이 받는 하중이 급격히 높아지지 않는 선에서 최대한 작은 수치를 설정하는 방식으로 각 부품의 수치를 결정한다. 이는 Fig. 15에도 수치해석을 통해 표현되어 있다.

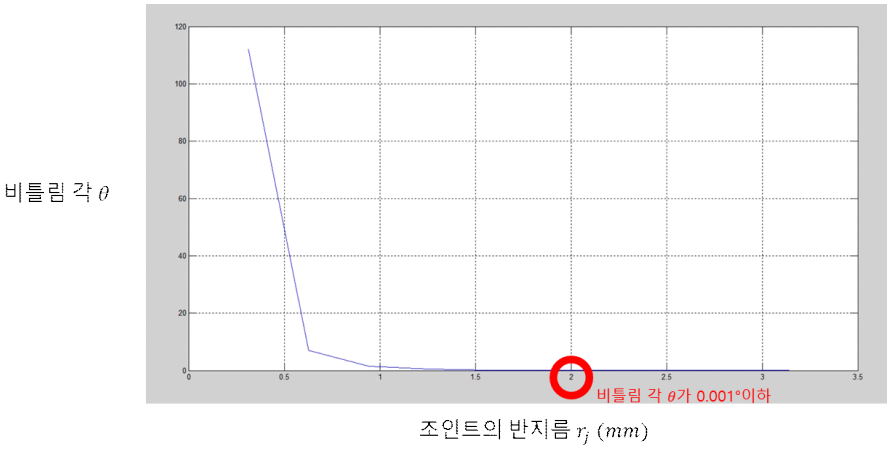


Fig. 15 The amount of change in torsional angle according to the radius of the joint. (Matlab)

2.7 안정성 해석

형태의 다양성 때문에 기본적인 응력의 공식만으로는 안정적인 설계인지 알 수 없기 때문에 제작 이전 최종적으로 유한요소해석을 통해야 한다. 본 연구에서는 Siemens사의 해석프로그램인 NX Nastran Solver을 이용하며 이 프로그램을 통해 최종적으로 모든 공학적인 사항을 검토하고 최종 제품이 원하는 성능을 문제없이 발휘할 수 있도록 해준다. 이 프로그램에서는 편미분 방정식으로 표현되는 연속체에 대한 지배방정식을 작은 요소에 대하여 차분화(differentiation) 시킨 후 전체 유한요소 모델에 대한 행렬식을 만들어 수치적으로 해를 구할 수 있다.

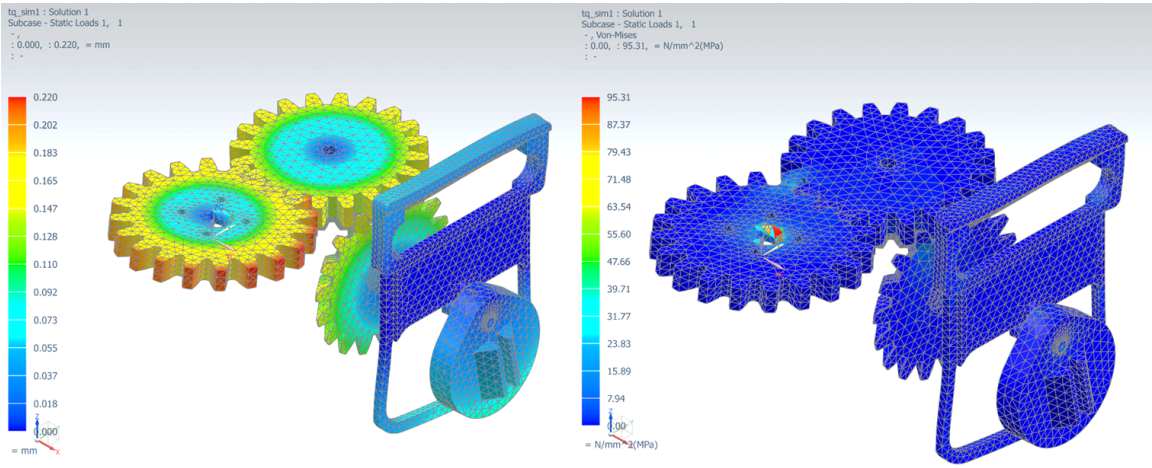
본 연구에서는 연구목적을 만족시키고 가장 경제적인 형태로 형상화한 최초모델을 Nastran 프로그램으로 해석한 후 취약점을 찾아내 보강해가는 방식으로 최종 설계를 진행한다. 이때 모터하중을 직접적으로 받게 되는 구동부인 캠 부분과 멀티링크 부분을 각각 나누어 해석하며 기구에 작용하는 응력과 변형을 파악한다.

본 연구에서는 최초로 모터의 최대 출력인 15kg/cm를 하중으로 주었으며 보행로봇 전체를 ABS재질로 가정하였다. 그리고 종동절이 고정된 상태에서 유한요소해석을 진행하였다. 각 요소(element)는 노드를 순차적으로 연결하여 정의하였으며 연속 모델을 유한개의 요소로 분해한다. 전체 요소에 대한 지배방정식(governing equation)은 다음과 같은 행렬식 형태가 된다[3].

$$[K]\{x\} = \{f\} \tag{17}$$

이때 $[K]$는 강성행렬(Stiffness Matrix)이고 $\{x\}$는 각 요소(element)의 변위를 나타낸다. 마지막으로 $\{f\}$는 구조물에 가해지게 되는 모든 형태의 하중을 나타낸다. 이를 통해 연구자들은 유한해석에 대한 결과물을 컴퓨터를 통해 도출할 수 있게 된다. 최소의 설계를 하였을 때 도출된 결과는 Fig. 16과 같으

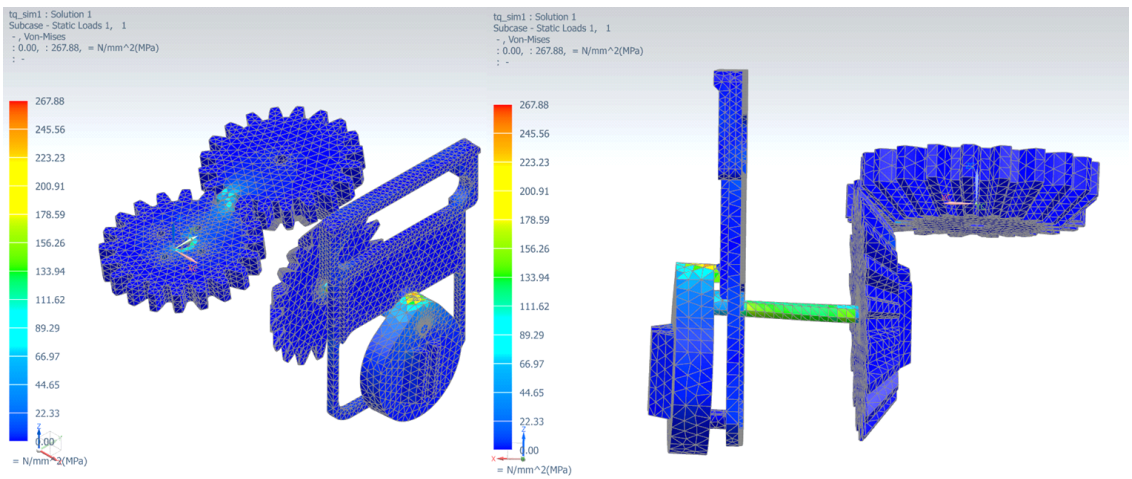
며 이때 구조물의 일부에서 생기게 되는 최대 변위는 0.22mm, 가해지는 응력은 95.31MPa이다.



(a) Strain analysis(Cam) (b) Stress analysis(Cam)

Fig. 16 Finite element analysis(Cam)

외부 프레임(Fig. 16의 캠축 고정프레임과 기어축 고정프레임)의 내구성이 충분하지 않아 프레임의 변형이 일어나는 경우도 유한요소해석을 통해 재현할 수 있었으며(Fig. 17의 (a)) 이때 구조물 일부에 생기게 되는 응력은 프레임이 단단히 고정되었을 때에 비해 약 3배정도 높아진다. 따라서 제작자들은 외부프레임 제작 시 적절한 공정을 통해 내구성이 충분하도록 제작해야 한다.



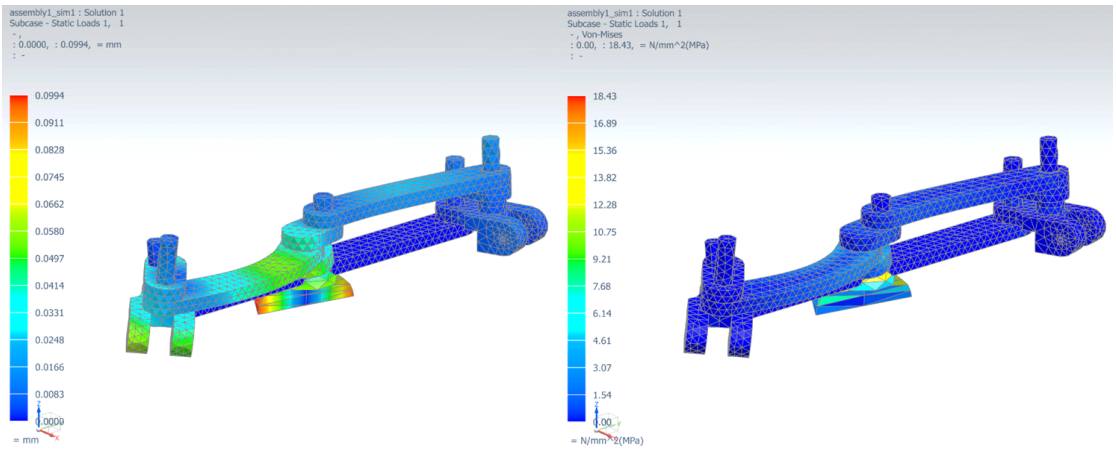
(a) Modified Stress analysis(Cam) - Isometric (b) Modified Stress analysis(Cam) - Side

Fig. 17 Modified Finite element analysis(Cam)

ABS의 극한 인장강도가 48.3MPa이고 안전계수가 2인 점을 고려하면 초기에 주었던 조건과 결과물의 형태가 일부 수정되어야 함을 알 수 있었다. 우선적으로 베벨 기어와 캠을 연결시켜주는 캠축이 눈에 띄는 응력을 견디고 있으므로 이를 알루미늄 재질로 바꾼다(Fig. 17의 (b)). 그 후 유한해석요소 결과를 통해 강한 변형과 응력집중을 보였던 구조물의 일부분을 보강하고 모터의 전압을 줄여 모터가 구조물에 가하는 하중을 10kg/cm정도로 완화하였다. 이 조건들을 다시 해석프로그램에 대입하였으며 이로부터 새로운 결과들을 도출 할 수 있었다. 이때 생기게 되는 최대 변위는 0.132mm이며 최대 응력은 23.83MPa

이다. 이는 안전계수를 고려했을 때 항복응력보다 적으므로 실제 연구에 적용시킬 수 있는 설계이다. 이때 해석결과물로부터 도출되는 응력은 폰 미세스 응력(Von-mises stress)을 따른다.

다음으로 멀티링크의 유한요소해석을 통해 멀티링크의 기계설계가 적절한지 판단해야 한다. 이때 모터에 가해지는 하중은 앞서 설정한 하중과 마찬가지로 10kg/cm이며 재질은 전부 ABS로 재작한다. 그리고 프레임을 고정 구속조건으로 두고 해석을 진행하도록 한다.



(a) Strain analysis(Multi link) (b) Stress analysis(Multi link)

Fig. 18 Finite element analysis(Multi link)

멀티링크의 경우 초기에 설계한 최소두께의 링크로 제작 시 생기는 응력이 약 30MPa정도이다. 이는 안전계수를 고려하였을 때 적절하지 않은 결과이므로 링크의 두께를 조금씩 조정해가거나 취약한 부분의 형태를 약간씩 바꿔 하중을 적절하게 버틸 수 있는 링크로 제작한다. 또한 조인트의 직경조정을 통해 취약점을 해결할 수 있다.

최종적으로 유한요소해석을 통해 부분적으로 조인트 직경을 6mm로 바꿨으며 이때 생기는 부분 변위는 최대 0.0994이고 부분에 생기는 응력은 18.43MPa이다. 이는 안전계수를 고려하였을 때 적절한 수치이며 최종설계에 적용이 가능하다. 본 연구에서는 더 안전한 설계를 위해 ABS재질을 더 단단한 재질로 바꾸는 경우도 고려한다.

3. 결과물

앞서 멀티링크를 통해 1개의 DC모터만을 사용하여 다수의 서보모터를 대체할 수 있는 다족보행로봇을 설계 및 제작하는 연구를 하였다. 다리의 좌우 운동은 멀티링크를 통해 구현하고 상하 운동은 정면 판캠을 통하여 구현하였으며 기구설계와 기계설계는 수치해석법, 유한요소해석법과 역학적 수식들을 이용하여 설계하였다. 도출된 설계를 토대로 3D CAD를 통해 제작을 하였으며 DC모터를 이용해 구동하였다. DC모터의 경우 로봇의 좌측 다리 집합과 우측 다리 집합에 독립되게 설치하였다. 이를 통해 로봇의 방향전환이 가능하며 실제 서보모터를 이용한 다족보행로봇과 유사한 움직임을 보였다. 연구에 따른 최종 결과물은 Fig. 19와 같다.

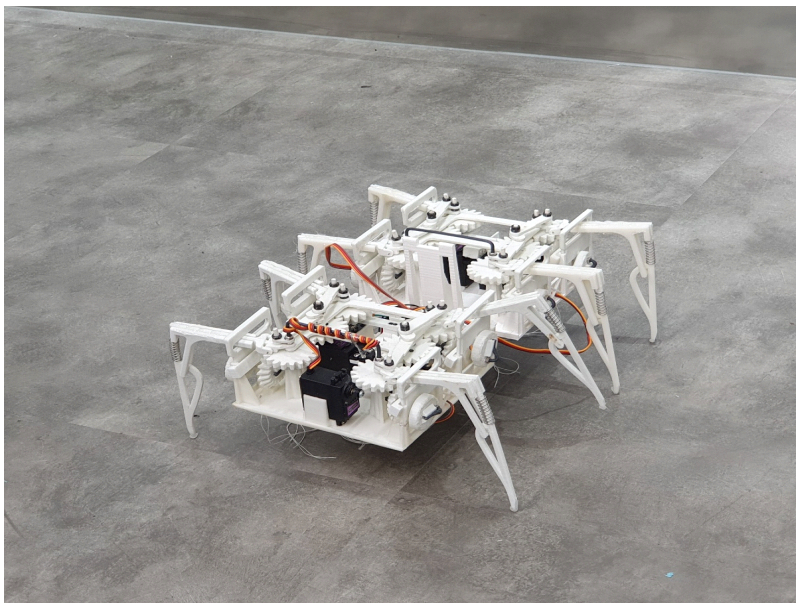


Fig. 19 Final product

연구를 통해 제작된 로봇은 순차적인 알고리즘을 통해 보행을 완성시키며 이는 Fig. 21의 (a) ~ (d)를 통해 알 수 있다. 이는 실제 생체모델과도 유사한 형태의 보행을 보이며 모터의 속도 조절에 따라 빠른 보행도 가능하다.

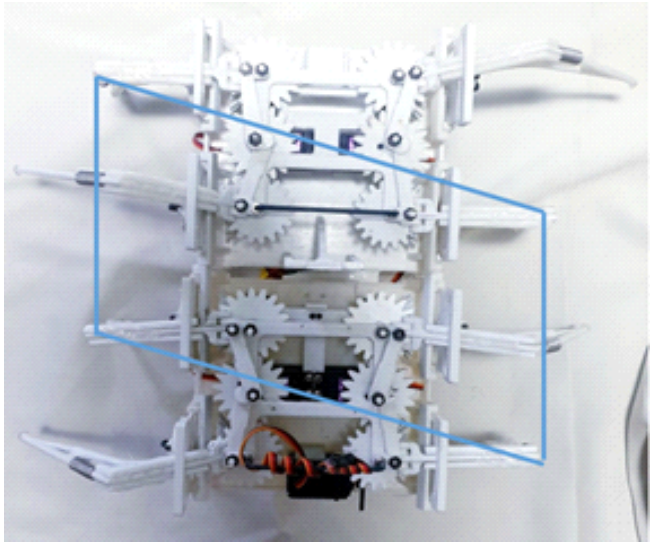
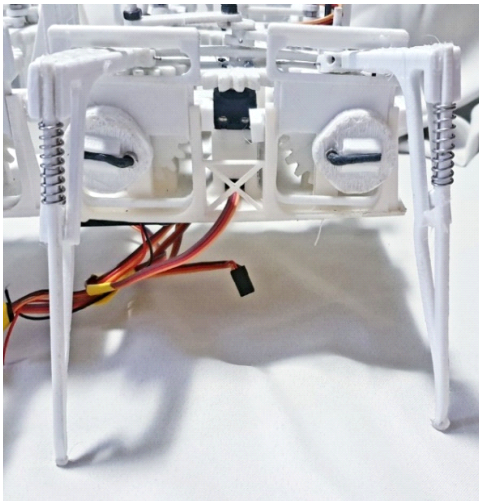
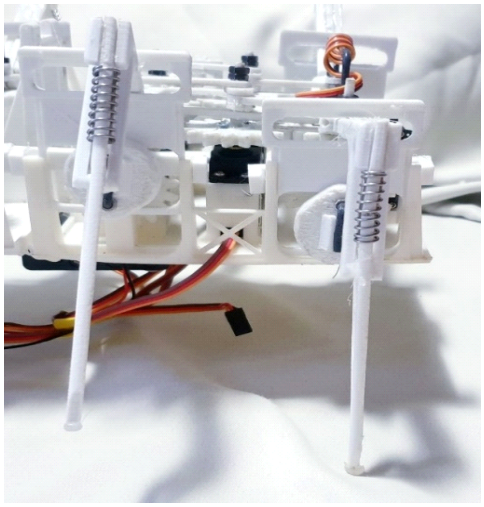


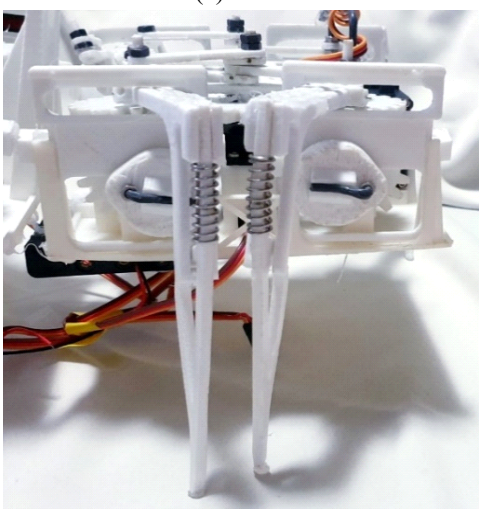
Fig. 20 Support polygon



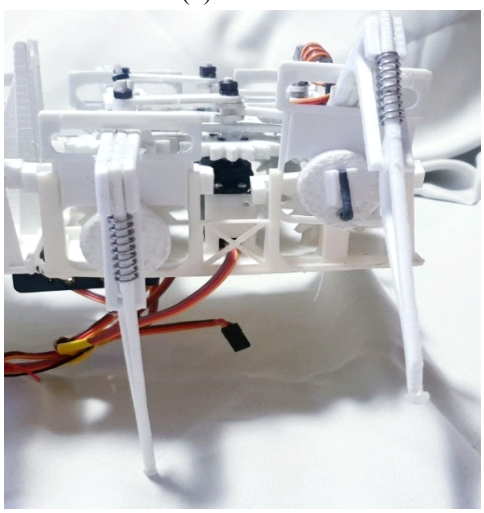
(a) First



(b) Second

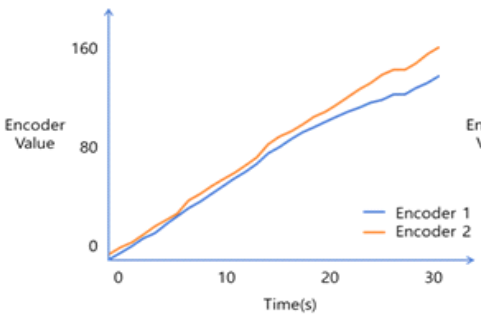


(c) Third

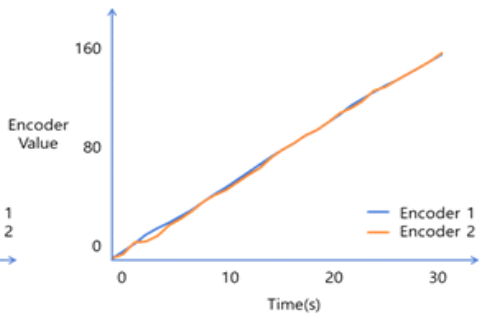


(d) Fourth

Fig. 21 Gait algorithm



(a) Original Gait



(b) Modified Gait

Fig. 22 Encoder control

제작된 다족보행로봇은 기존의 다족보행로봇처럼 보행 할 때 상대각도가 유지되는 다리에 의해서 항상 평행사변형 형태의 지지다각형을 가질 수 있으며 이로 인해 안정한 형태로 보행할 수 있다는 것을 확인할 수 있다(Fig. 20)

본 연구에서는 멀티링크를 도입함으로 인해 필요한 서보 모터의 개수가 감소하며 기존 제품의 동일한 기능을 수행하는 제품을 훨씬 적은 가격으로 제작할 수 있었다. 이로 인해 다족보행로봇이 큰 비용이 없이도 대량생산이 가능해질 것이라 기대되며 본 제품을 제작할 때 쓰이는 전기부품도 많지 않아 환경 오염에 의한 부담도 줄어든다. 또한 제작자의 입장에서는 다수의 서보 모터를 각각 제어하는 시스템을 설계할 필요가 없어 소프트웨어 구성과 제어측면에서 시간이 매우 단축된다. 전원관리 측면에서도 장시간 사용해야하는 탐사형 다족보행로봇에 유리하다. 본 결과물은 추후 다족보행로봇이 사용되는 재난 탐사 로봇이나 험지 탐사 로봇과 같은 분야에 양산형 제품으로 활용될 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구를 통해 우리는 다음과 같은 결론들을 도출할 수 있었다.

첫 번째, 다족보행로봇 넓적다리의 상하운동은 4절 링크로 재현이 가능하고 좌우운동은 정면판캠으로 재현이 가능하다.

두 번째, 서보모터를 이용한 다족보행로봇이 가진 장점이었던 안정성도 기구설계를 통해 복잡한 소프트웨어 없이 재현 가능하였다.

세 번째, 기계적 구조를 이용해 낮은 전력으로 다족보행로봇의 성능을 낼 수 있다.

네 번째, 순수기계 설계만을 통해 만들어진 로봇은 자유도가 낮기 때문에 보행로봇에 채택되기는 힘든 방식이었다. 기계공학자들도 로봇을 만들 때 한정적인 설계만 하였으며 최근에는 소프트웨어적 중요성이 더 부각되어 기계공학자들의 입지가 줄어들고 있다. 본 연구는 이러한 한계를 넘어 기계설계만으로 더 효율적인 로봇을 만들 수 있었다.

다섯 번째, 본 연구는 기존의 연구물들을 참고하는 방식이 아닌 실제 생체모델을 탐구하고 기존의 고성능 모델의 움직임만을 이미지화 시켜 순수 기계만으로 복잡한 움직임이 동일하게 구현되는 것을 보이고자 하였다. 최종적으로 완성된 모델은 실제 고성능모델과 유사한 움직임을 보여줬으며 오랜 시간동안 그 움직임이 안정적으로 유지되었다.

여섯 번째, 다수의 링크가 복잡한 형태로 움직이더라도 반복적인 운동성을 띈다면 이를 기구구조의 결합으로 재현할 수 있다.

일곱 번째, 다양한 아이디어 중 실제구동에 효율적이라고 판단되는 아이디어를 채택하였고 구현하였지만 기계식 다족보행로봇은 아직 나아갈 수 있는 영역이 더 넓다고 판단하며 본 연구물을 기반으로 더 많은 분야에 응용되거나 발전되기를 기대한다.

후 기

본 연구를 마친 후 우리는 연구물 구동 중 방향전환 시 DC모터 자체에 누적되는 오차들을 줄이기 위해 엔코더(encoder)를 이용한 실험을 하였다. 피드백 제어를 마친 보행로봇은 더 안정적이었으며(Fig. 22) 외란이 발생하더라도 금방 극복할 수 있었다. 하지만 이는 전자적인 요소였고 추후 전자적인 요소가 없더라도 기계적 요소만으로 방향전환 시에 생기게 되는 오차를 충분히 줄일 수 있을 것이라 기대하고 있다.

최종적으로 본 연구로 나온 작품은 학부생의 작업물이라 정교하지 못할뿐더러 가지고 있는 비용이 적어 사실상 머릿속의 형태를 모두 재현하지는 못했다. 몇 개의 DC모터와 공공 3D프린터만으로 제작하다 보니 결과물이 매우 약했고 부품간의 마찰이 심하였다. 하지만 이 부족한 작품에 많은 시간을 투자하였으며 좋은 아이디어를 찾기 위해 고군분투 하였기에 이 연구가 세상에 도움이 되지 못하더라도 우리의 인생에 있어 큰 도움이 되었을 것이라 확신한다.

마지막으로 제작 중 너무나도 힘들고 막막해 포기하고 싶을 때 저희를 북돋아주셨던 한성대학교 기계공학부 김상현 교수님께 감사 인사를 드립니다. 학부생의 작은 도전으로 끝날 수 있었던 주제였지만 설계대회까지 나갈 수 있도록 기회를 제공해주셨고 진심을 다해 상담해 주셔서 끝까지 노력할 수가 있었

습니다. 연구기간 내내 진심으로 감사드렸고 이 순간을 평생 기억하겠습니다.

참고문헌

(1) Stelian Coros, Bernhard Thomaszewsk, Gioacchino Noris, Robert W. Sumner, Bernd Bickel, Shinjiro Sueda, Moira Forberg, and Wojciech Matusik, Disney Research Zurich, Disney Research Boston, MIT CSAIL, 2013, "Computational Design of Mechanical Characters", pp. 1.

(2) JOHN J. UICKER, JR, GORDON R. PENNOCK and JOSEPH E.SHIGLEY, 2012, "THEORY OF MACHINES AND NECHANISMS", 4th, ITC, Paju, pp. 150.

(3) Robert C. Juvinall, Kurt M. Marshek, 2002, "Fundamentals of MACHINE COMPONENT DESIGN", 3rd, WILEY, Hoboken, pp136, pp218

(4) Early walking robot using link, techiebot, https://www.instructables.com/

(5) Strandbeest, TED, https://www.ted.com/