Journal of Korea Robotics Society (2019) 14(4):278-284
https://doi.org/10.7746/jkros.2019.14.4.278 ISSN: 1975-6291 / eISSN: 2287-3961

# 다리 수 조절이 가능한 모듈러 크롤러의 설계 및 6족 로봇의 주행 성능 평가

# Modular Crawler with Adjustable Number of Legs and Performance Evaluation of Hexapod Robot

임 소 정[1] · 백 상 민[1] · 이 종 은[1] · 채 수 환[1] · 유 재 관[2] · 조 용 진[3] · 조 규 진†
Sojung Yim[1], Sang-Min Baek[1], Jongeun Lee[1], Soo-Hwan Chae[1], Jae-Kwan Ryu[2], Yong-Jin Jo[3], Kyu-Jin Cho†

**Abstract:** Legged locomotion has high mobility on irregular surfaces by touching the ground at discrete points. Inspired by the creature's legged locomotion, legged robots have been developed to explore unstructured environments. In this paper, we propose a modular crawler that can easily adjust the number of legs for adapting the environment that the robot should move. One module has a pair of legs, so the number of legs can be adjusted by changing the number of modules. All legs are driven by a single driving motor for simple and compact design, so the driving axle of each module is connected by the universal joint. Universal joints between modules enable the body flexion for steering or overcoming higher obstacles. A prototype of crawler with three modules is built and the driving performance and the effect of module lifting on the ability to overcome obstacles are demonstrated by the experiments.

**Keywords:** Bio-inspired, Locomotion, Legged Robot, Crawler, Modular Robot

## 1. 서 론

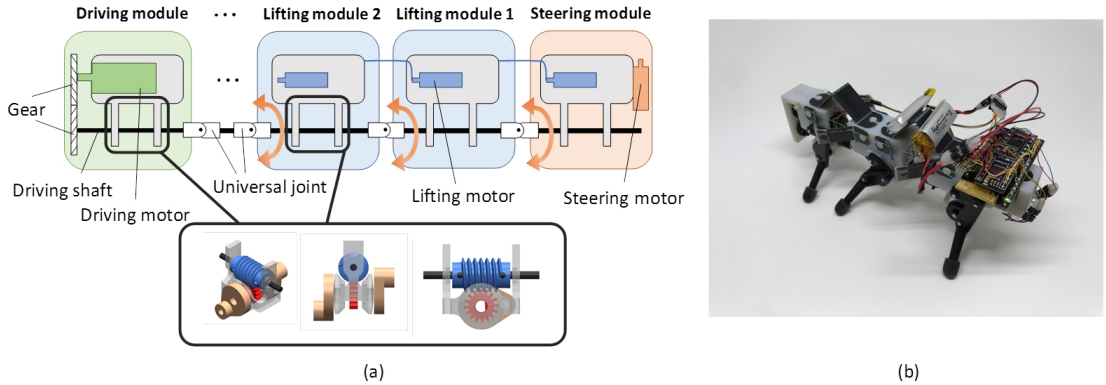
다리 형 운동(legged locomotion)은 다리 관절의 움직임으로 발 끝과 지면의 불연속적인 접촉을 만들어 이동한다. 이러한 방식은 균일하지 않은 표면에 쉽게 적응하여 움직일 수 있어 비정형 환경에서 이동성이 좋다. 인간이 접근하기 어려운 지역에서 정찰 및 수색 임무를 수행하기 위해서는 다양한 지형을 극복할 수 있어야 한다. 따라서 생물 다리 관절의 움직임이나 보행 패턴 등을 모사한 다리 형 로봇(legged robot)들이 개발되어 왔다.

Received : Sep. 9. 2019; Revised : Oct. 7. 2019; Accepted : Oct. 13. 2019
※ This research was supported by a grant to "Development of bio-inspired jump-crawler with high payload capacity" by LIG NEX1.
1. PhD student, Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea (yimsj94, bsm6656@gmail.com, yhjelee@snu.ac.kr, justices@hanmail.net)
2. Chief Research Engineer, Unmanned/Robotic Systems Lab. LIG Nex1, Seongnam, Korea (jaekwan.ryu@lignex1.com)
3. Research Engineer, Unmanned/Robotic Systems Lab. LIG Nex1, Seongnam, Korea (yongjin.jo@lignex1.com)
† Professor, Corresponding author: Mechanical and Aerospace Engineering and Institute of Advanced Machines and Design, Seoul National University, Seoul, Korea (kjcho@snu.ac.kr)

Copyright ⓒKROS

다리 형 로봇은 다리 수에 따라 안정성, 속도, 무게 등이 다르므로, 주어진 이동 환경과 임무에 적합한 다리 수를 선정해야 한다[1]. 다리 수가 적으면 에너지 효율적인 보행을 하고[2,3], 쉽게 방향 전환을 할 수 있다[4]. 따라서 고속 주행을 목적으로 하는 로봇들이 개발되었다. 다리 수가 많아질수록 많은 다리가 지면에 붙어 있어 안정적이고, 일부의 다리가 기능을 못하더라도 계속 주행할 수 있다[5]. 그리고 다리 수가 많아지면 몸이 길어지고 지면과 접촉하는 점도 많아지기 때문에 더 넓은 골과 더 높은 장애물을 넘을 수 있다[6]. 따라서 굴곡이 심한 지형을 이동하는 것을 목적으로 하는 다리가 많고 몸이 긴 정찰용 로봇들이 개발되었다.

더 나아가 다리 형 로봇의 성능을 개선하기 위해 생물 몸체의 유연성에 관심을 갖기 시작하였다. 생물은 척추의 유연한 움직임과 마디와 마디 사이의 유연한 연결로 에너지 효율과 장애물 극복 능력을 높인다[7-9]. 따라서 생물의 유연성을 적용한 다양한 로봇들이 개발되었다[5,10-13]. [10]에서는 4족 로봇에 치타 척추의 유연한 움직임을 적용하여 에너지 효율성을 높였고, [5]에서는 다족 로봇의 몸통을 유연하게 연결해 몸통의 파형 운동을 유도하여 로봇의 보폭을 늘려 속력을 증가시켰다. [11,12]에서는 다족 로봇의 모듈을 유연한 축으로 연결해 장애




[Fig. 1] Conceptual diagram of the modular crawler (a) Types of the module (driving, lifting, and steering) and the method of transferring rotation of the driving module to the other modules (b) Modular crawler prototype with three modules

물을 넘을 때 지면과의 접촉 점을 최대한 유지하도록 해서 다양한 장애물이 있는 환경에서 이동할 수 있음을 보여주었다. 이처럼 다양한 다리 형 로봇들이 개발됐고, 유연성을 활용해 이러한 로봇의 성능을 개선하는 연구가 진행됐다.

하지만 지금까지 개발된 다리 형 로봇들은 목표 환경에 맞춰 다리 수가 미리 결정되어 있어 특정 환경에서만 임무를 효과적으로 수행할 수 있다. 하지만 로봇이 탐사와 정찰 임무를 수행해야 하는 환경은 다양하고 다리 수가 고정된 로봇이 적용될 수 있는 환경에는 한계가 있다.

본 연구에서는 다리의 수를 쉽게 조절할 수 있어 다양한 환경에 맞춰 빠르게 적용할 수 있는 모듈러 크롤러를 제안한다. 모듈에는 한 쌍의 다리가 있어 모듈 수를 조절하여 다리 수를 쉽게 바꿀 수 있다. 또한 모듈 사이의 자유도로 생기는 몸체의 유연성을 활용해 더 높은 장애물을 넘어갈 수 있다. 하나의 주행 모터로 모든 다리를 구동하면서 모듈 사이의 자유도를 주기 위해 모듈은 유니버설 조인트로 연결된다. 본 논문에서는 모듈러 크롤러의 컨셉을 제시하고, 3개의 모듈로 구성된 프로토타입을 보여준다. 제작된 크롤러의 주행 성능을 측정하고 모듈의 리프팅 각도에 따른 장애물 극복 능력을 실험을 통해 보이고자 한다.

## 2. 설 계

[Fig. 1]은 모듈 수를 조절하여 다리 수를 바꿀 수 있는 모듈러 크롤러의 개념도를 보여준다. 크롤러는 주행용 모터가 포함된 하나의 구동 모듈과 방향 전환 모터가 포함된 하나의 방향 전환 모듈, 그리고 리프팅 모터가 포함된 다수의 리프팅 모듈들로 구성된다. 양 끝에 주행 모듈과 방향 전환 모듈이 있고, 가운데에 들어가는 리프팅 모듈의 수를 조절하여 모듈의 수를 조절한다. 각 모듈에는 좌우 한 쌍의 다리가 있어 N 개의 모듈을 연결하면 2N 개의 다리를 갖는 크롤러를 제작할 수 있다.

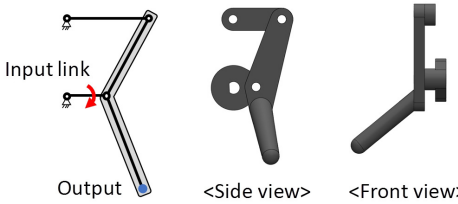
### 2.1 모듈 설계

이 로봇은 하나의 주행 모터로 모든 다리를 구동하도록 설계되었다. [Fig. 1(a)]를 보면 주행 모터가 포함된 모듈이 하나 있고 그 외의 모듈은 주행용 모터를 포함하지 않으며, 각 모듈마다 존재하는 동축의 연결로 동력을 전달받는다. 따라서 각 모듈에는 동축과 동축에서 다리 링키지로 동력을 전달하는 동력 전달부가 포함된다. 주행 모듈에서 주행 모터의 동력이 두 개의 평기어를 통해 주행 모듈의 동축으로 전달되고, 나머지 모듈로 동력을 전달하기 위해 동축은 유니버설 조인트로 연결된다. 유니버설 조인트로 연결되어 있어 모듈 사이의 각도가 변해도 계속 동력을 전달받을 수 있다.

모듈 내에서 동축의 회전을 다리의 움직임으로 전달하는 동력 전달부는 [Fig. 1(a)]와 같이 웜과 웜기어를 사용하였다. 웜기어를 사용하면 회전 방향을 90도 돌리면서 작은 공간에서 큰 감속비를 얻을 수 있다. 웜기어를 통해 동축의 회전 방향과 수직인 회전을 만들고, 이를 다리 링키지의 크랭크와 연결하였다. 웜기어의 감속비는 16:1로 설계되었다.

### 2.2 다리 링키지

다리는 [Fig. 2]와 같이 4절 링크를 기반으로 설계되었다. 링키지의 입력 링크는 웜기어와 연결되어 회전한다. 하나의 고정




[Fig. 2] Design of leg linkage: the leg linkage is based on the four-bar linkage, and the leg is sprawled for lateral stability

피봇(fixed pivot)은 몸통 부분에 위치한다. 가로 안정성(lateral stability)을 위해 다리가 좌우로 벌어지도록 하였다[14]. 양쪽 다리가 교차하며 지면에 닿도록 양쪽 크랭크는 180 도 위상 차이가 나게 설계되었다. 다리를 쉽게 교체할 수 있도록 입력 링크와 고정 피봇이 몸통과 탈부착이 되도록 하였다.

### 2.3 모듈 리프팅 메커니즘

크롤러는 발끝이 닿는 높이의 장애물만 넘을 수 있다. 따라서 더 높은 장애물을 넘어가기 위해서 발 끝의 궤적을 높여야 한다. 발끝의 궤적을 높이기 위해 유니버설 조인트로 연결된 동축 사이의 각도를 바꿔 모듈을 위쪽으로 들어 올리는 리프팅 메커니즘을 설계하였다.

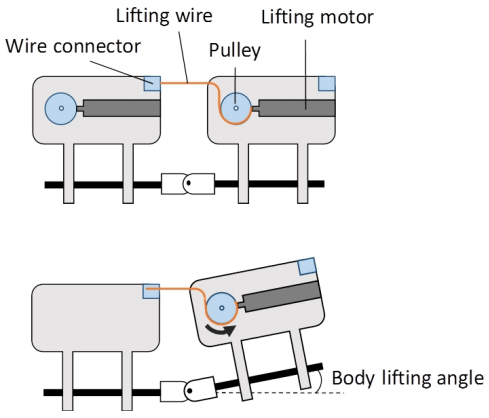
리프팅 메커니즘은 인접한 모듈을 연결하는 실과 이를 감거나 풀기 위한 풀리 및 모터로 구성된다. 실을 모듈에 고정하기 위해 실의 한쪽 끝이 고정된 커넥터를 모듈에 꽂는다. 실은 옆 모듈에 고정된 풀리에 감기며, 풀리에는 크라운기어가 있어 모터의 평 기어와 맞물려 모터를 회전시켜 실을 감거나 풀 수 있다. [Fig. 3]과 같이 모듈의 위쪽에 연결된 실을 감으면 동축이 유니버설 조인트의 중심점을 기준으로 위쪽으로 회전하여 모듈을 들어 올린다. 사용되는 실은 질량이 가볍고 강성이 낮아 모듈을 리프팅하는데 필요한 토크에 큰 영향을 끼치지 않는다. 모듈 리프팅은 주행 여부와 상관없이 리프팅 모터를 구동하여 수행할 수 있으며 최대 리프팅 각도 내에서 연속적으로 각도를 변경할 수 있다. 따라서 로봇이 주행 중 만나는 장애물을 넘기 위해 필요한 만큼 모듈을 리프팅하여 장애물을 극복할 수 있다.

### 2.4 방향 전환 메커니즘

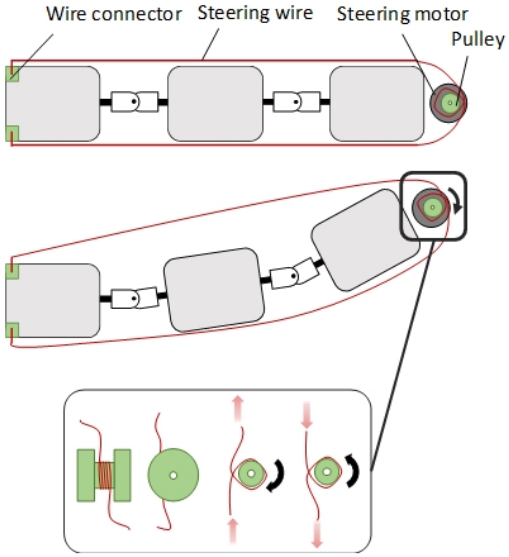
동축이 유니버설 조인트로 연결되어 위아래뿐만 아니라 좌우로도 움직일 수 있다. 이를 활용하여 방향 전환을 하기 위해 모듈을 좌우로 움직이게 하는 메커니즘을 설계하였다. 방향 전환 메커니즘은 로봇 전체를 감는 실과 구동 모터로 구성되어 있다. 실의 양쪽 끝은 리프팅을 위한 실 커넥터와 동일하게 실 커넥터에 고정되어 로봇의 마지막 모듈에 고정된다. 풀리는 구동 모터에 연결되고 구동 모터와 풀리는 첫 번째 모듈에 고정된다. 실의 중간이 풀리에 감겨 있어 [Fig. 4]와 같이 모터의 회전 방향에 따라 실이 움직인다. [Fig. 4]의 경우 모터를 시계 방향으로 회전시키면 위쪽 줄이 감기고 아래쪽 줄이 풀리며 로봇이 위쪽으로 굽혀진다. 모터를 반시계 방향으로 회전시키면 위쪽 줄이 풀리고 아래쪽 줄이 감기며 로봇을 펴진 상태로 만든다. 사용되는 실은 질량이 가볍고 강성이 낮아 로봇을 굽히는데 필요한 토크에 큰 영향을 끼치지 않는다. 주행 여부와 상관없이 방향 전환 모터를 구동하여 로봇을 좌우로 구부릴 수 있으며 모듈 사이 간섭이 나지 않는 최소 회전 반경 전까지 연속적으로 회전 반경을 바꿀 수 있다. 따라서 주행 시 자유롭게 방향 전환을 하여 원하는 위치에 도달할 수 있다.

### 2.5 3개의 모듈로 구성된 크롤러 프로토타입

[Fig. 1(b)]은 3개의 모듈로 구성된 크롤러의 프로토타입을 보여준다. 3개의 모듈이므로 6개의 다리가 있어 곤충에서 볼 수 있는 삼각 보행(tripod gait)이 되도록 다리의 위상 차이를 주었다. 이 로봇의 질량은 110.1 g이다. 크기는 길이 155 mm, 폭 50 mm, 높이 75 mm이다. 로봇은 3D 프린팅 파트들로 제작




[Fig. 3] Conceptual diagram of module lifting mechanism: generate body lifting angle by connecting two adjacent modules with a wire and wind the wire using the lifting motor




[Fig. 4] Conceptual diagram of steering mechanism: fix the steering wire surrounding the entire robot and change the direction by using the difference of wire length of both side depending on the rotation direction of the steering motor

되었다. 주행 모터는 Pololu의 30:1 Micro metal gearmotors HPCB 6V를 사용하였으며, 리프팅 모터와 방향 전환 모터는 디엔지위드의 감속기어모터 Ø6모터 LCP06-A03V-0700을 사용하였다. 두 개의 3.7 V 170 mAh의 리튬 폴리머 배터리로 전원을 공급한다. 컨트롤 보드는 DFRobot의 DFRobot CurieNano를 사용하였다. 두 개의 모터드라이버(DFRobot의 Thumbnail Sized DC Motor Driver)를 사용하여 4개의 모터를 PWM 제어한다. 통신은 CurieNano에 내장된 Bluetooth Low Energy를 사용하여 스마트폰 어플리케이션 Blynk를 통해 보드에 입력 신호를 보낸다.

## 3. 분 석

### 3.1 다리 링키지 궤적

발 끝이 움직이는 궤적을 계산하기 위해 [Fig. 5]와 같이 좌표계를 설정하였다. 4절 링크의 기구 분석을 위해 벡터 폐곡선 식을 세우면 식 (1)과 같다. $l_i$는 $i$번째 링크의 길이, $\theta_i$는 $i$번째 링크가 $x$축과 이루는 각도를 의미한다.

$$\overrightarrow{R_1}+\overrightarrow{R_2}-\overrightarrow{R_3}-\overrightarrow{R_4}=0 \tag{1}$$

$$l_1\cos\theta_1+l_2\cos\theta_2-l_3\cos\theta_3=0 \tag{2}$$

$$l_1\sin\theta_1+l_2\sin\theta_2-l_3\sin\theta_3-l_4=0 \tag{3}$$

식 (2)와 식 (3)을 연립하면 입력 링크의 각도 $\theta_1$에 따른 $\theta_2$와 $\theta_3$를 얻을 수 있다. 계산된 각도를 식 (4)에 대입하면 발끝의 궤적 $\vec{x}_{foot}$을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}\vec{x}_{foot} &= \overrightarrow{R_0}+\overrightarrow{R_1}+\overrightarrow{R_5} \\ &= \begin{bmatrix} x_0+l_1\cos\theta_1+l_5\cos(\alpha-\theta_2) \\ y_0+l_1\sin\theta_1-l_5\sin(\alpha-\theta_2)\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{4}$$

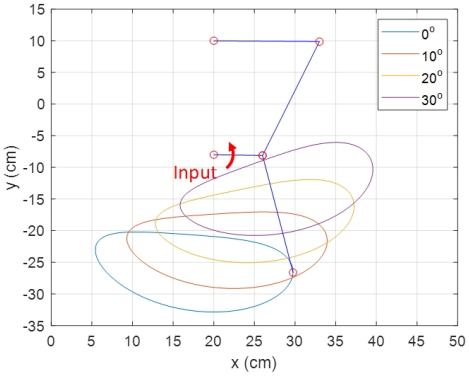
동축이 $\theta$만큼 회전했을 때 발끝의 궤적 $\vec{x}_{foot,\theta}$은 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$\vec{x}_{foot,\theta} = T(\theta)\,\vec{x}_{foot,0} = \begin{bmatrix}\cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_0+l_1\cos\theta_1+l_5\cos(\alpha-\theta_2) \\ y_0+l_1\sin\theta_1-l_5\sin(\alpha-\theta_2)\end{bmatrix} \tag{5}$$

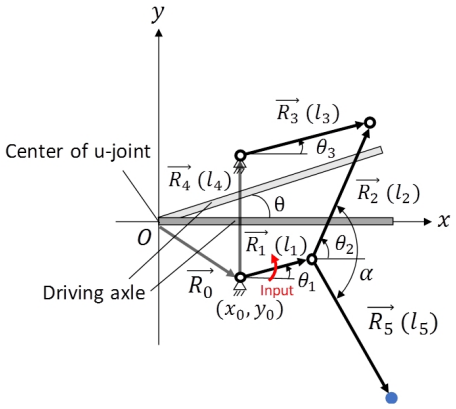
$\theta$가 0도, 10도, 20도, 30도 일 때 발의 궤적은 [Fig. 6]과 같다.

### 3.2 모듈 사이 길이에 따른 최대 리프팅 각도

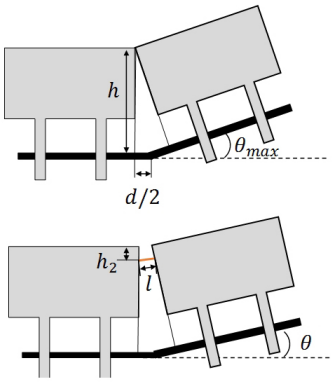
모듈 사이의 길이를 늘리면 모듈을 리프팅 할 수 있는 최대 각도를 증가시킬 수 있다. [Fig. 7]과 같이 모듈과 모듈 사이 길이를 $d$, 동축에서 모듈 위까지 길이를 $h$라고 할 때 들어 올릴 수




[Fig. 6] Trajectory of the foot according to the four case of body lifting angle ($\theta$= 0°, 10°, 20°, 30°)




[Fig. 5] Coordinate of leg's four bar linkage. $l_1$= 6 mm, $l_2$=19.1 mm, $l_3$= 13 mm, $l_4$= 18 mm, $l_5$= 18.8 mm, $x_0$= 20 mm, $y_0$= -8 mm, $\alpha$= 147.29°




[Fig. 7] Maximum body lifting angle which is determined by the length between two modules. Length of the lifting wire for the desired body lifting angle

있는 최대 각도 $\theta_{max}$는 식 (6)과 같다.

$$\theta_{max} = 180° - 2\tan^{-1}\frac{2h}{d} \tag{6}$$

모듈과 모듈 사이의 실을 감아 모듈을 들어 올리므로 원하는 리프팅 각도를 얻기 위해 설정해야 하는 실의 길이 $l$을 계산해야 한다. $h_2$를 모듈의 위쪽 끝에서 실이 고정된 곳까지의 길이라고 하면, $l$은 식 (7)과 같이 계산할 수 있다.

$$l = 2\sqrt{(h-h_2)^2+\left(\frac{d}{2}\right)^2} \times \sin\left(90° - 0.5\theta - \tan^{-1}\frac{2(h-h_2)}{d}\right) \tag{7}$$

현재 설계된 모듈은 $h$는 25.7 mm, $h_2$는 2 mm로, 모듈을 30도까지 들어올리기 위해 $d$를 7 mm로 설정하였다.

## 4. 실험 및 결과

### 4.1 주행 성능 실험 및 결과

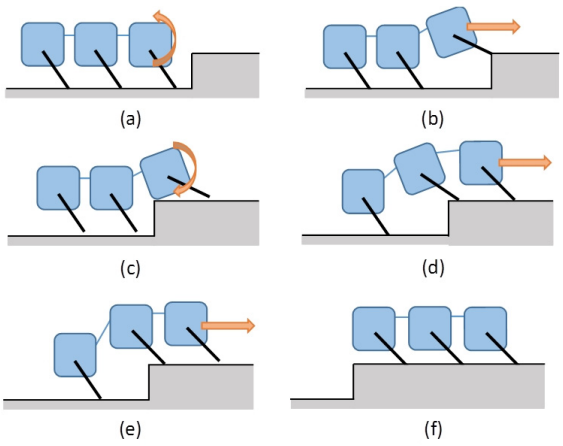
제작된 로봇의 주행 성능을 파악하기 위해 직진 주행 속력, 회전 속력과 최소 회전 반경을 측정하였다. 충분한 마찰을 제공하기 위해 평평한 판에 사포를 붙여 그 위에서 주행을 시켰다. 주행 시 영상을 촬영하여 영상 분석으로 결과를 계산하였다. 직진 주행 속력은 300 mm를 주행하는 데 걸리는 시간으로 계산하였다. 회전 속력과 회전 반경을 측정하기 위해서 로봇을 미리 왼쪽으로 구부려 놓고 한 바퀴 회전하도록 주행 시켰다.

최대 주행 속력은 16.1 mm/s (0.1 BL/s)이며, 회전 속력은 10 deg/s, 최소 회전 반경은 107 mm이다.

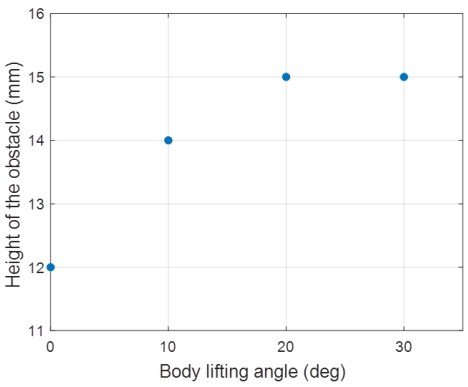
### 4.2 장애물 극복 실험 및 결과

첫 번째 모듈의 리프팅 각도에 따른 로봇이 극복할 수 있는 장애물의 높이를 측정하기 위한 실험을 진행하였다. 1 mm의 아크릴판을 하나씩 쌓으면서 로봇이 올라갈 수 있는 장애물의 최대 높이를 측정하였다. 이 실험은 장애물 높이를 1 mm씩 올리며 장애물 극복 여부를 확인하는 것으로 로봇을 구동하여 해당 높이의 장애물을 올라가면 성공하는 것으로 간주하였다. 첫 번째 모듈의 동축과 두 번째 모듈의 동축이 이루는 각도를 0도, 10 도, 20 도, 30 도로 두기 위해 식 (7)을 통해 계산한 리프팅 실의 길이가 14 mm, 9.8 mm, 5.6 mm, 1.3 mm가 되도록 실에 표시하였다. 로봇이 출발하기 전 실험하기 위한 리프팅 각도가 되도록 미리 실을 감아 놓고 주행을 시작했다. 주행 도중에는 설정한 리프팅 각도 이하의 각도 내에서는 리프팅 각도를 바꿀 수 있게 하였으며, 두 번째 모듈과 세 번째 모듈의 각도는 자유롭게 바꿀 수 있게 하였다. 장애물을 극복하기 위해 로봇을 구동한 방법은 [Fig. 8]과 같다. 먼저, 첫 번째 모듈의 발이 장애물 위에 놓이면 ([Fig. 8(b)]) 로봇을 앞으로 전진시켜 두 번째 모듈의 발이 장애물과 최대한 가까워지도록 한다 ([Fig. 8(c)]). 이때 첫 번째 모듈의 리프팅 각도를 낮추면 두 번째 모듈의 발이 들리며 장애물 위에 걸쳐진다 ([Fig. 8(d)]). 이 상태에서 로봇을 직진 주행시키면 두 번째 모듈의 발이 모두 장애물 위로 올라간다 ([Fig. 8(e)]). 앞의 두 모듈이 장애물 위에서 앞으로 주행하면 세 번째 모듈은 뒤따라 올라온다([Fig. 8(f)]).

[Fig. 9]는 실험 결과를 보여준다. 첫 번째 모듈을 더 많이 들어 올릴수록 더 높은 장애물을 극복할 수 있다. 하지만 [Fig. 6]에서




[Fig. 8] Driving method of the robot to overcome obstacle (a) Lift the first module (b) Drive forward to put the first module on the obstacle (c) Lower the first module to lift the second module slightly (d) Drive forward to put the second module on the obstacle (e) Drive forward to put the third module on the obstacle (f) All three modules are on the obstacle




[Fig. 9] Experimental result for measuring the obstacle height that the crawler can overcome depending on the body lifting angle

볼 수 있는 리프팅으로 발의 궤적이 높아지는 것에 비해 로봇이 넘을 수 있는 장애물의 높이가 많이 증가하지 않는다. 그 이유는 현재 무게 중심 배치로 인해 두 번째와 세 번째 모듈을 연결하는 리프팅 실을 당기면 두 번째 모듈이 위로 들리는 것이 아니라 세 번째 모듈이 위로 들리기 때문에 두 번째 모듈을 장애물 위로 올리는 데 한계가 있기 때문이다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 이동해야 하는 지형이나 수행해야 하는 임무에 따라 다리 개수를 조절할 수 있는 모듈형 크롤러를 제안하였다. 하나의 주행 모터로 모든 다리를 구동하며, 동축은 유니버설 조인트로 연결되어 위아래와 좌우 굽힘이 가능하다. 모듈의 리프팅을 활용하면 더 높은 장애물을 극복할 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

본 논문에서는 3개의 모듈을 연결하여 곤충의 삼각 보행을 모사한 크롤러를 보여주었다. 추후에는 더 다양한 수의 모듈을 연결하여 이동 특성을 파악하고 모듈의 숫자에 따른 로봇이 지나갈 수 있는 장애물을 파악하는 연구가 필요하다.

제시된 모듈 컨셉은 모듈 수를 조절하는 것뿐만 아니라 하나의 모듈 내에서 동력부와 다리 부가 쉽게 연결과 분리가 가능하다. 앞으로 다리 링키지 최적화를 할 때 다양한 다리 설계에 대해 동일한 동력부를 사용하고 다리만 교체하여 쉽게 실험해볼 수 있다. 더 나아가 크롤러의 모든 다리를 동일하게 하지 않고 다리 위치와 역할에 따라 적합한 형상과 궤적을 갖도록 할 때 동력부의 설계를 바꾸지 않고도 다양한 다리를 부착할 수 있다. 따라서 모듈 수를 바꾸는 것뿐만 아니라 다양한 다리 링키지를 갖는 로봇을 모듈러 컨셉으로 쉽게 구현하여 더욱 다양한 형태의 로봇을 제작할 수 있을 것이다.

## References


[1] P. Gonzalez de Santos, E. Garcia, and J. Estremera, “Walking Robots,” *Quadrupedal Locomotion: An Introduction to the Control of Four-legged Robots*, Springer London, 2006, pp. 3-32.

[2] T. Weihmann, “Leg force interference in polypedal locomotion,” *Science Advances*, vol. 4, no. 9, pp. eaat3721, 2018.

[3] D.-S. Kim, S.-P. Jung, and G.-P. Jung, “A Milli-Scale Hexapodal Robot using Planar Linkages,” *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 13, no. 2, pp. 97-102, 2018.

[4] S. Aoi, T. Tanaka, S. Fujiki, T. Funato, K. Senda, and K. Tsuchiya, “Advantage of straight walk instability in turning maneuver of multilegged locomotion: a robotics approach,” *Scientific Reports*, vol. 6, no. 30199, 2016.

[5] K. L. Hoffman and R. J. Wood, “Passive undulatory gaits enhance walking in a myriapod millirobot,” *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, CA, USA, pp. 1479-1486, 2011.

[6] K. L. Hoffman and R. J. Wood, “Towards a multi-segment ambulatory microrobot,” *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage, AK, USA, pp. 1196-1202, 2010.

[7] Y. Yesilevskiy, W. Yang, and C. D. Remy, “Spine morphology and energetics: how principles from nature apply to robotics,” *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 13, no. 3, pp. 036002, 2018.

[8] A. Garcia, S. Priya, and P. Marek, “Understanding the locomotion and dynamic controls for millipedes: Part 1-Kinematic analysis of millipede movements,” *ASME 2015 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, Colorado Springs, Colorado, USA, pp. V002T06A005, 2015.

[9] J. T. Watson, R. E. Ritzmann, S. N. Zill, and A. J. Pollack, “Control of obstacle climbing in the cockroach, Blaberus discoidalis. I. Kinematics,” *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 188, no. 1, pp. 39-53, 2002.

[10] G. A. Folkertsma, S. Kim, and S. Stramigioli, “Parallel stiffness in a bounding quadruped with flexible spine,” *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vilamoura, Portugal, pp. 2210-2215, 2012.

[11] D. Koh, J. Yang, and S. Kim, “Centipede robot for uneven terrain exploration: Design and experiment of the flexible biomimetic robot mechanism,” *2010 3rd IEEE RAS EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, Tokyo, Japan, pp. 877-881, 2010.

[12] T. Kinugasa, K. Osuka, R. Hayashi, N. Miyamoto, and K. Yoshida, “Development of a small and lightweight myriapod robot using passive dynamics,” *Artificial Life and Robotics*, vol. 22, no. 4, pp. 429-434, Dec., 2017.

[13] L. T. Phan, Y. H. Lee, D. Y. Kim, H. Lee, and H. R. Choi, “Stable running with a two-segment compliant leg,” *Intelligent Service Robotics*, vol. 10, no. 3, pp. 173-184, Jul., 2017.

[14] J. J. Chen, A. M. Peattie, K. Autumn, and R. J. Full, “Differential leg function in a sprawled-posture quadrupedal trotter,” *Journal of Experimental Biology*, vol. 209, pp. 249-259, 2006.

**임 소 정**

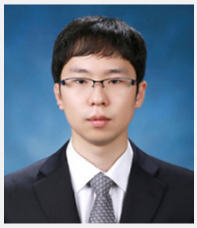
2017 서울대학교 물리교육과(이학사)
2019 서울대학교 기계항공공학부(공학석사)
2019~현재 서울대학교 기계항공공학부 박사과정

관심분야: 생체 모사 로봇 등

**백 상 민**

2014 한국과학기술원 기계공학과(공학사)
2014~현재 서울대학교 기계항공공학부 석박사통합과정

관심분야: 생체 모사 로봇 등



**이 종 은**

2016 서울대학교 기계항공공학부(공학사)
2016~현재 서울대학교 기계항공공학부 석박사통합과정

관심분야: 생체 모사 로봇 등

**채 수 환**

2017 서울대학교 기계항공공학부(공학사)
2018~현재 서울대학교 기계항공공학부 석박사통합과정

관심분야: 생체 모사 로봇 등

**유 재 관**

2004 경희대학교 기계공학과(공학석사)
2009 JAIST 로봇공학과(공학박사)
2009~현재 LIG넥스원 미래기술연구소 팀장
2012 마르퀴즈 후즈후 세계인명사전 등재
2018 올해의 10대 기계기술 선정(감시정찰 무인수상정)

관심분야: Unmanned & Robotic systems, Insect inspired robot, Behavior analysis

**조 용 진**

2011 한양대학교 전자시스템공학과(공학사)
2013 한양대학교 전자시스템공학과(공학석사)
2013~현재 LIG넥스원 미래기술연구소 선임 연구원

관심분야: Moving mechanism, Image enhancement, Object detection & tracking

**조 규 진**

1998 서울대학교 기계항공공학부(공학사)
2000 서울대학교 기계항공공학부(공학석사)
2007 Mechanical Engineering, MIT(공학박사)
2008~현재 서울대학교 기계항공공학부 교수

관심분야: 생체 모사 로봇, 소프트 로봇, 의료용 로봇, 웨어러블 로봇 등