

소형 곤충형 지상 이동 로봇 주행 메커니즘의 다리 기구 설계 및 분석

Design and Analysis of Leg Linkage of Small-scale Insect-inspired Ground Mobile Robot

임소정¹·이성준²·백상민¹·허석행²·유재관²·조규진[†]
Sojung Yim¹, Seongjun Lee², Sang-Min Baek¹, Seokhaeng Huh²,
Jaekwan Ryu², Kyu-Jin Cho[†]

Abstract: Small-scale ground mobile robots can access confined spaces where people or larger robots are unable. As the scale of the robot decreases, the relative size of the environment increases; therefore, maintaining the mobility of the small-scale robot is required. However, small-scale robots have limitations in using a large number of high-performance actuators, powerful computational devices, and a power source. Insects can effectively navigate various terrains in nature with their legged motion. Discrete contact with the ground and the foot enables creatures to traverse irregular surfaces. Inspired by the leg motion of the insect, researchers have developed small-scale robots and they implemented swing and lifting motions of the leg by designing leg linkages that can be adapted to small-scale robots. In this paper, we propose a leg linkage design for insect-inspired small-scale ground mobile robots. To use minimal actuation and reduce the control complexity, we designed a 1-DOF 3-dimensional leg linkage that can generate a proper leg trajectory using one continuous rotational input. We analyzed the kinematics of the proposed leg linkage to investigate the effect of link parameters on the foot trajectory.

Keywords: Robot, Small-scale Robot, Legged Robot, Linkage Design

1. 서 론

미래 전장에서 임무를 효과적으로 수행하고 인명피해를 최소화하기 위해 사람을 대신하거나 보조할 수 있는 다양한 로봇들이 요구되고 있다^[1]. 따라서 로봇이 운용되는 목표 환경과 임무에 따라 다양한 형태와 스케일의 로봇들이 개발되어 왔다. 그중 소형 지상 로봇은 사람이나 큰 로봇들이 접근하기 어려운 지하 동공이나 건물 내 좁은 통로에 은밀히 침투하여 적

에게 노출되지 않고 감시 정찰 임무를 수행할 수 있다. 또한 작은 크기로 눈에 띄지 않거나 좁은 틈 사이에 은신할 수 있어 은닉성이 좋다. 그리고 개인이 휴대하여 운반하기 쉬워 평소에는 부담 없이 로봇을 지니고 있다가 필요한 때에 로봇을 배치하여 활용할 수 있다. 이러한 로봇이 실제 임무에 활용되기 위해서는 다양한 지형에서 이동할 수 있어야 한다. 이때 로봇의 크기가 작아질수록 주위 환경의 상대적인 크기가 커지기 때문에 다양한 장애물이 있는 환경에서도 소형 로봇의 이동성을 확보하는 것이 필요하다^[2]. 하지만 소형 로봇은 크기의 제약으로 많은 수의 구동기와 센서를 사용하기 어렵고 제어를 수행할 수 있는 연산 장치 그리고 원격으로 구동하기 위한 파워 장치의 한계가 존재한다. 따라서 소형 로봇의 제한 조건 내에서 다양한 환경에서 이동할 수 있게 하는 주행 메커니즘의 개발이 필요하다.

곤충은 자연에 존재하는 다양한 지형을 효과적으로 이동할 수 있다. 곤충은 다리 관절들의 움직임으로 다리의 움직임을

Received : May. 30. 2023; Revised : Jul. 17. 2023; Accepted : Jul. 20. 2023

※ This research is performed based on the cooperation with the Defense Acquisition Program Administration and Defense Rapid Acquisition Technology Research Institute's Critical Technology R&D program (No. UC190002D)

1. Phd Student, Mechanical Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea (yimsj94, bsm6656@gmail.com)

2. Research Engineer, LIG Nex1, Seongnam, Korea (seongjun.lee, seokhaeng.heo, jaekwan.ryu@lignex1.com)

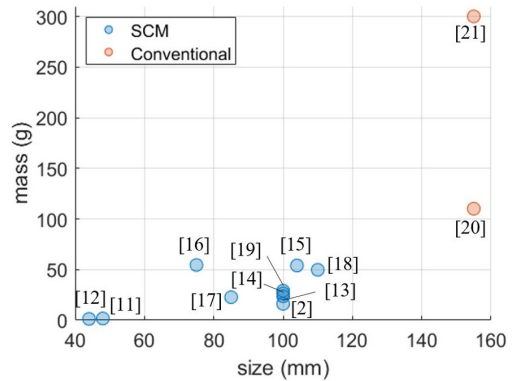
† Professor, Corresponding author: Mechanical Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea (kjcho@snu.ac.kr)

만들어 내고 발끝과 지면의 비연속적인 접촉을 통해 균일하지 않은 표면에서도 안정적으로 이동할 수 있게 한다. 보행을 위한 다리의 움직임 살펴보면, 다리가 지면에 닿는 입각기(stance phase)에서는 다리가 지면을 밀며 몸을 전진시키고 이후 유각기(swing phase)에서는 다리를 들어 올린 뒤 앞으로 보내 다음 보행을 위한 준비를 한다³⁾. 이처럼 다리 관절의 움직임으로부터 만들어지는 발끝의 궤적은 이동하는 환경에 따라 능동적으로 조절을 하거나^{4,5)} 다리와 환경의 상호작용을 통해 수동적으로 적응하여 이동하기도 한다^{6,7)}. 또한 곤충의 삼각 보행 패턴(alternating tripod gait)과 양 옆으로 뻗어 있는 다리 자세(sprawled leg)는 주행 시 정적, 그리고 동적 안정성을 유지할 수 있도록 한다⁸⁻¹⁰⁾. 이처럼 다양한 환경에서 안정적으로 이동할 수 있게 하는 곤충의 보행은 소형 로봇의 주행 메커니즘을 설계하는데 실마리가 될 수 있다.

따라서 다양한 환경에서 이동할 수 있는 곤충의 다리 움직임을 모사한 소형 생체 모사 로봇들이 개발되었다^{2,11-21)}. 이러한 생체 모사 로봇에서는 곤충의 움직이는 방식을 그대로 모사할 수 없기 때문에 사용하는 구동기가 내는 움직임을 통해 보행에 적합한 다리 궤적을 만들어내는 다리 기구의 설계가 필요하다. 일반적으로, 보행 방향으로 다리를 움직이는 swing 움직임과 다리를 지면에서 들어올리는 lifting 움직임을 구현했다. [11-12]에서는 다리 하나당 곱힘 운동이 가능한 압전형 구동기 두 개와 5절 구면 기구를 사용하여 다리의 swing과 lifting 움직임을 만들어 낸다. [2,13-15]에서는 모터 한 개의 연속 회전으로 다리의 swing과 lifting이 가능하도록 기구를 설계하여 다리 하나당 필요한 구동기의 수를 줄이고 제어 복잡도를 낮출 수 있었다. 그 외에도 두 개의 유니버설 조인트를 사용한 노젓는 모션¹⁶⁾, 크랭크 슬라이더 메커니즘과 비등방성 다리를 사용한 구현¹⁷⁾, 사절 링크를 활용한 1자유도 기구¹⁸⁾ 등 다양한 다리 기구를 통해 다리의 swing과 lifting 움직임을 구현했다. 이처럼 구동기의 입력을 다리로 전달하기 위해 작은 스케일에서 3차원의 복잡한 기구를 설계 및 제작해야 한다.

더 나아가 다리의 궤적은 주행 특성에 영향을 미치기 때문에 원하는 다리 궤적을 갖는 기구 설계가 필요하다²²⁾. 발이 지면에 닿아 있는 입각기에서 주행 방향 길이인 보폭(stride length)가 길수록 같은 주파수에서 더 빠른 속력을 낼 수 있다. 그리고 입각기에서의 주행이 아닌 방향의 변화가 작을수록 로봇이 좌우, 상하 방향으로 진동이 작아지고 안정적인 주행이 가능하다. 또한 발끝 궤적의 최대 높이가 높을수록 더 높은 장애물을 극복할 수 있다. 이러한 다리 궤적은 다리 기구의 설계 변수에 따라 달라지게 되므로, 적절한 다리 기구의 설계 변수 선정이 필요하다.

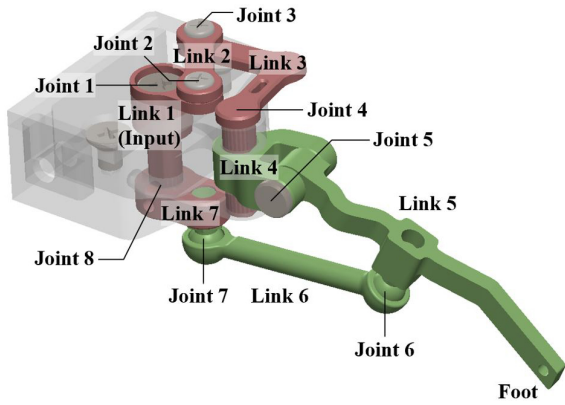
대부분의 기존에 개발된 소형 주행 생체 모사 로봇의 메커니즘들은 작은 스케일에서 기구를 구현하기 위해 SCM (Smart



[Fig. 1] Size and mass comparison of previously developed centimeter-scale legged mobile robots. Blue dots indicate robots designed by SCM method, and red dots indicate robots designed by conventional method

Composite Microstructures) 방식을 활용하였다^{2,11-19)}[Fig. 1]. SCM은 링크 역할을 하는 단단한 재료와 조인트 역할을 하는 유연한 재료를 레이저 가공하여 적층한 뒤 라미네이팅하여 기구를 구현하는 평면 기반 제작 방식이다²³⁾. 복합재를 활용하여 가벼우면서도 작은 크기로 메커니즘을 구현할 수 있었다. 또한 SCM으로 제작된 flexure 조인트는 마찰이 작다는 장점이 있어 표면력의 영향이 커지는 작은 스케일에서 많이 활용되었다²⁴⁾. 하지만 SCM 기반 flexure 조인트는 가동 범위가 한 바퀴 이내이기 때문에 이를 고려한 기구 설계가 필요하다. 이때 flexure 조인트의 조합을 통해 3차원의 움직임을 만들어야 하는데 설계에 따른 기구의 움직임을 직관적으로 파악하기 어렵다. 또한 SCM으로 제작된 flexure joint는 간섭 없이 움직이기 위해 링크의 두께만큼의 접합선 폭이 필요하지만 이 폭은 링크지의 공차를 만들어내기도 한다. 따라서 의도하지 않은 변형이 유도될 수 있다. 그리고 링크와 조인트 역할을 하는 재료의 접합을 통해 제작이 되기 때문에 재료 간의 접합이 떨어질 수 있어 내구성에 영향을 줄 수 있다. 또한 센티미터 스케일에서 전통적인 제작 방식인 링크와 조인트를 활용한 소형 지상 로봇의 제작이 가능한지 확인해 볼 필요가 있다.

본 논문에서는 곤충을 모사한 소형 지상 로봇 주행 메커니즘의 다리 기구 설계를 제안한다. 소형로봇의 특성을 고려하여 사용하는 모터의 개수를 최소화하고 제어 복잡도를 줄이기 위해 모터의 한 방향 연속 회전을 사용하여 옆으로 뻗어 있는 자세의 다리의 lifting과 swing이 가능한 1자유도 3차원 기구를 설계하였다. 전통적인 제작 방식으로 소형 로봇의 다리형 주행 메커니즘이 구현 가능한지 확인하고자 링크와 다양한 조인트(핀 조인트, 유니버설 조인트, 볼 조인트)를 활용하여 설계되었다. 더 나아가 다리 기구의 설계 변수에 따른 다리 궤적을 확인하기 위해 다리 기구 분석을 진행하였으며 다리 궤적의 특성을 나타낼 수 있는 변수들을 비교하였다.



[Fig. 2] Proposed leg linkage for small-scale insect-inspired ground mobile robot

2. 설 계

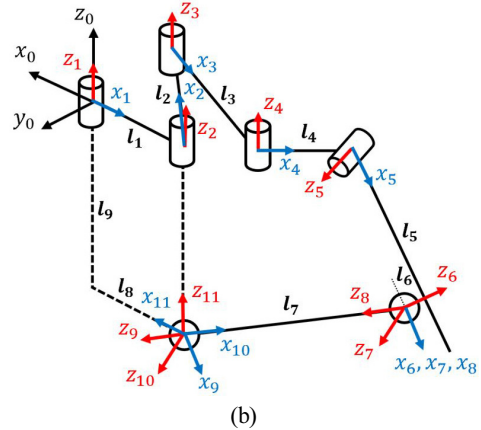
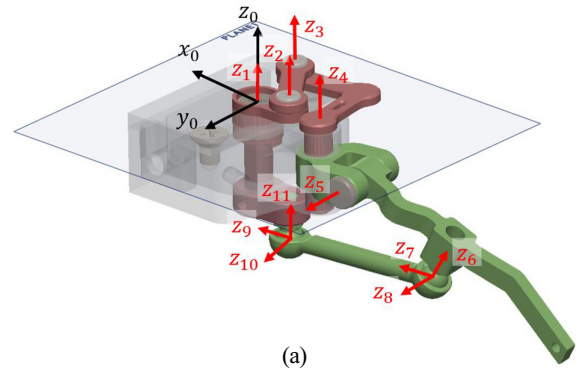
2.1 다리 기구 설계

다리 기구는 최소의 구동기를 사용하고 제어 복잡도를 낮추면서도 적절한 다리 궤적을 갖도록 모터 한 개의 연속 회전으로 옆으로 뻗어 있는 다리의 *lifting*과 *swing*이 가능한 1자유도 3차원 기구를 설계하였다 [Fig. 2]. 다리 기구는 크게 상단에 위치한 사절 기구와 하단에 위치한 3차원 폐기구로 이루어져 있다.

모터의 회전이 링크 1의 회전으로 전달이 되면 상단 사절 기구의 로커(링크 3)과 함께 움직이는 조인트 4의 원호 움직임을 만들며, 하단에 있는 링크 7은 링크 1과 동일하게 회전한다. 이 두 링크의 움직임이 3차원 폐기구의 입력이 되어 하나의 유니버설 조인트(링크 4의 조인트 4와 조인트 5)와 두 개의 볼 조인트(링크 6의 조인트 6와 조인트 7)을 통해 발끝(링크 5)의 3차원 움직임을 만들어 낸다. 유니버설 조인트의 활용으로 다리의 *swing*이 가능한 앞/뒤 움직임, 그리고 *lifting*이 가능한 위/아래 움직임을 만들어 낼 수 있다.

2.2 다리 기구 분석

제한된 다리 기구의 설계 변수에 따른 궤적을 확인하기 위해 기구 분석을 진행하였다. Denavit-Hartenberg (DH) 파라미터를 활용한 기구 분석을 위해 [Fig. 3(a)]과 같이 좌표계를 설정하였으며 링크 길이를 포함하여 도식화한 좌표계는 [Fig. 3(b)]와 같다. 계산상의 편의를 상단에 위치한 사절 기구가 [Fig. 3(a)]에 표시된 평면에 놓여있다고 가정하였다. 분석을 위해 사용된 변수는 [Table 1]에 정의되었으며, DH 파라미터는 [Table 2]에 표기되었다. 그리고 DH 파라미터에 따른 인접한 링크 간의 변환 행렬 T_{i-1}^i 는 식 (1)과 같다.



[Fig. 3] Leg linkage model for kinematic analysis with DH parameters (a) z-axis of each joint (b) Diagram for overall linkage illustrated with parameters

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

먼저, 링크 1의 회전 각도 (θ_1)에 따른 각 조인트의 회전 각도를 계산하였다. 이를 위해 사절 기구에서 링크 1이 한 바퀴 회전하는 동안 조인트 2와 3의 각도(θ_2, θ_3)를 식 (2)를 통해 계산한다.

$$T_0^1(\theta_1) T_1^2(\theta_2) T_2^3(\theta_3) T_3^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{0,4} \\ 0 & 1 & 0 & y_{0,4} \\ 0 & 0 & 1 & z_{0,4} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

다음으로 입력 각도 θ_1 , 식 (2)에서 계산된 θ_2, θ_3 , 식 (3)을 통해 나머지 조인트의 각도 ($\theta_5-\theta_{11}$)를 계산한다.

$$T_0^1(\theta_1) T_1^2(\theta_2) T_2^3(\theta_3) \dots T_9^{10}(\theta_{10}) T_{10}^{11}(\theta_{11}) = T_{0_{rev}}^{11}(\theta_1) \quad (3)$$

[Table 1] List of parameters for the leg linkage model

Parameter	Description
l_1	Length between joint 1 and joint 2 in link 1
l_2	Length between joint 2 and joint 3 in link 2
l_3	Length between joint 3 and joint 4 in link 3
l_4	Length between joint 4 and joint 5 in link 4
l_5	Length between joint 5 and anchored point of joint 6 in link 5
l_6	Length between anchored point of joint 6 in link 5 and center of the joint 6
l_7	Length between center of joint 6 and joint 7 in link 6
l_8	Length between center of joint 7 and joint 8 in link 7
l_9	Vertical displacement between center of joint 7 and joint 1
$x_{0,4}$	X position of joint 4 in coordinate O
$y_{0,4}$	Y position of joint 4 in coordinate O
$z_{0,4}$	Z position of joint 4 in coordinate O
$x_{5,f}$	X position of foot point in coordinate 5
$y_{5,f}$	Y position of foot point in coordinate 5
$z_{5,f}$	Z position of foot point in coordinate 5

[Table 2] DH parameter for the leg linkage

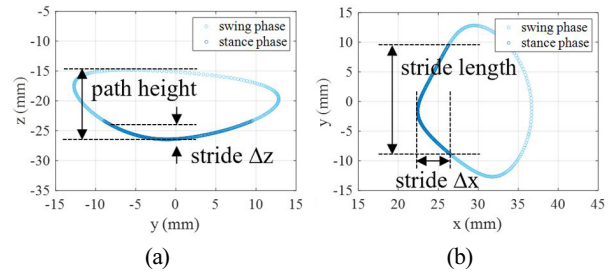
	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
T_0^1	0	0	0	θ_1
T_1^2	0	l_1	0	θ_2
T_2^3	0	l_2	0	θ_3
T_3^4	0	l_3	0	-45°
T_4^5	90°	l_4	0	θ_5
T_5^6	-90°	l_5	$-l_6$	θ_6
T_6^7	90°	0	0	θ_7
T_7^8	90°	0	0	θ_8
T_8^9	0°	0	l_7	θ_9
T_9^{10}	-90°	0	0	θ_{10}
T_{10}^{11}	-90°	0	0	θ_{11}
$T_0^{11 rev}$	0	l_8	l_9	θ_1

기준 좌표계 O 에서의 발 끝의 좌표 $(x_{0,f}, y_{0,f}, z_{0,f})$ 는 식 (2)와 식 (3)에서 계산된 조인트 각도를 식 (4)-(6)에 대입하여 계산할 수 있다.

$$T_5^f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{5,f} \\ 0 & 1 & 0 & y_{5,f} \\ 0 & 0 & 1 & z_{5,f} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_0^f = T_0^1(\theta_1) T_1^2(\theta_2) T_2^3(\theta_3) T_3^4 T_4^5(\theta_5) T_5^f \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} x_{0,f} \\ y_{0,f} \\ z_{0,f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_0^f(1,4) \\ T_0^f(2,4) \\ T_0^f(3,4) \end{bmatrix} \quad (6)$$



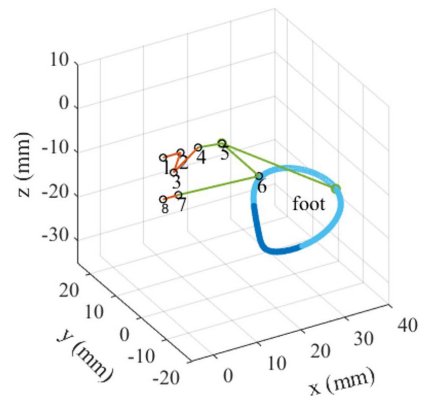
[Fig. 4] Description of trajectory comparison parameters in (a) yz plane and (b) xy plane. Dark blue points indicate the stance phase when the foot contacts the ground, and light blue points indicate the swing phase when the foot is in the air

다리 기구의 설계 변수에 따른 궤적을 비교하기 위해 [Fig. 4]에 표시된 바와 같이 발 끝 궤적의 stride phase에서의 y 방향 변위 stride length, x 방향 변위 stride Δx , z 방향 변위 stride Δz , 궤적의 최대 높이 path height를 계산하였다. 입각기는 삼각 보행을 가정하여 180도 위상 차이가 나는 두 개 다리의 z 방향 위치가 교차하는 순간을 계산하여 결정하였다.

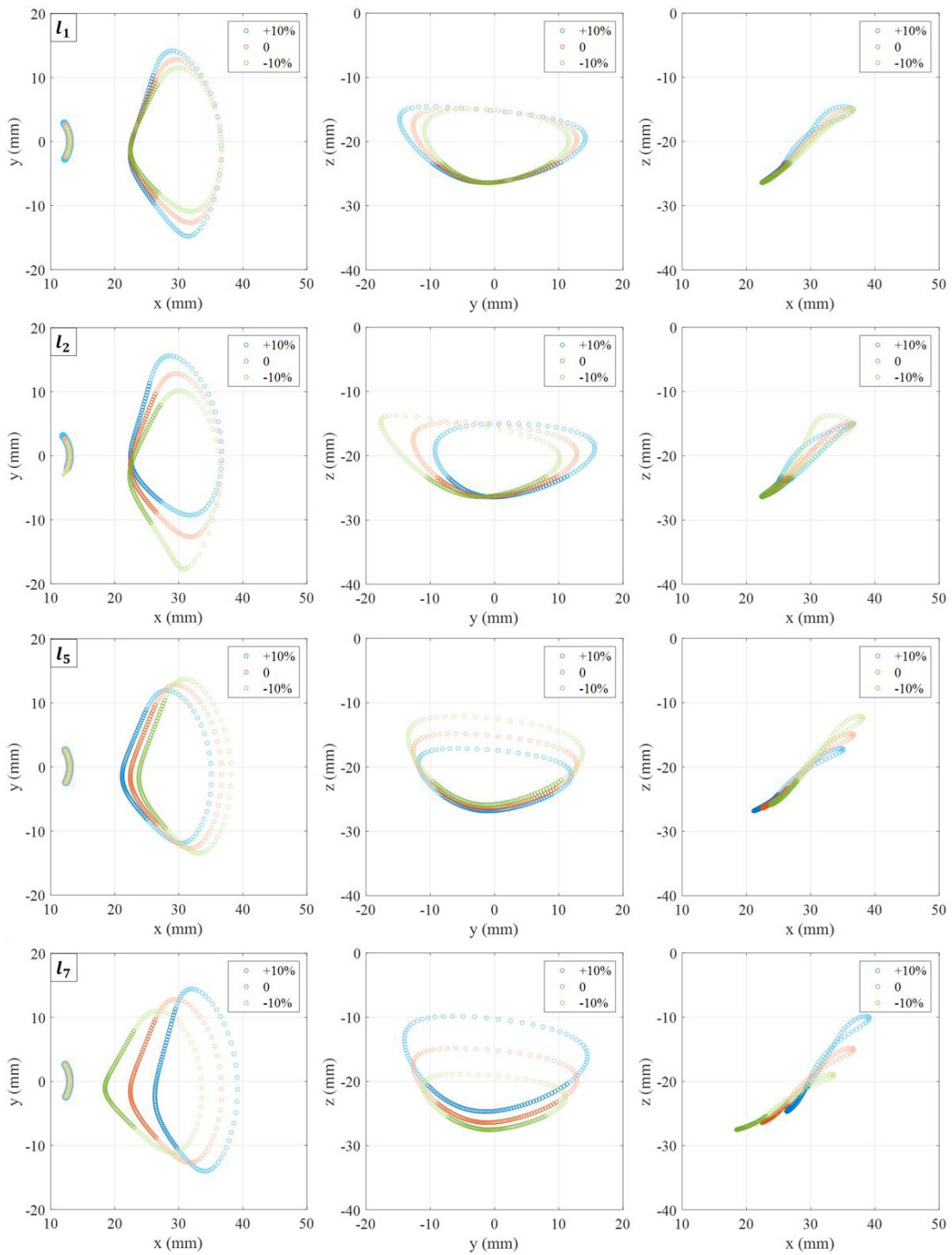
3. 결 과

3.1 다리 기구의 기구 분석 결과

[Fig. 5]는 [Table 1]의 설계 변수에 임의의 값을 대입하여 계산한 링크 1의 360도 회전에 따른 발끝의 위치와 초기 점에서의 조인트의 위치를 3차원으로 보여준다. 이 3차원 움직임을 2차원 평면으로 나타내면 [Fig. 6]와 같고, [Fig. 5]에서 사용한 설계 변수 값 세트의 궤적은 주황색 그래프와 같다. -y 축이 로봇의 진행 방향이며 로봇을 측면에서 본 yz 평면그래프를 살



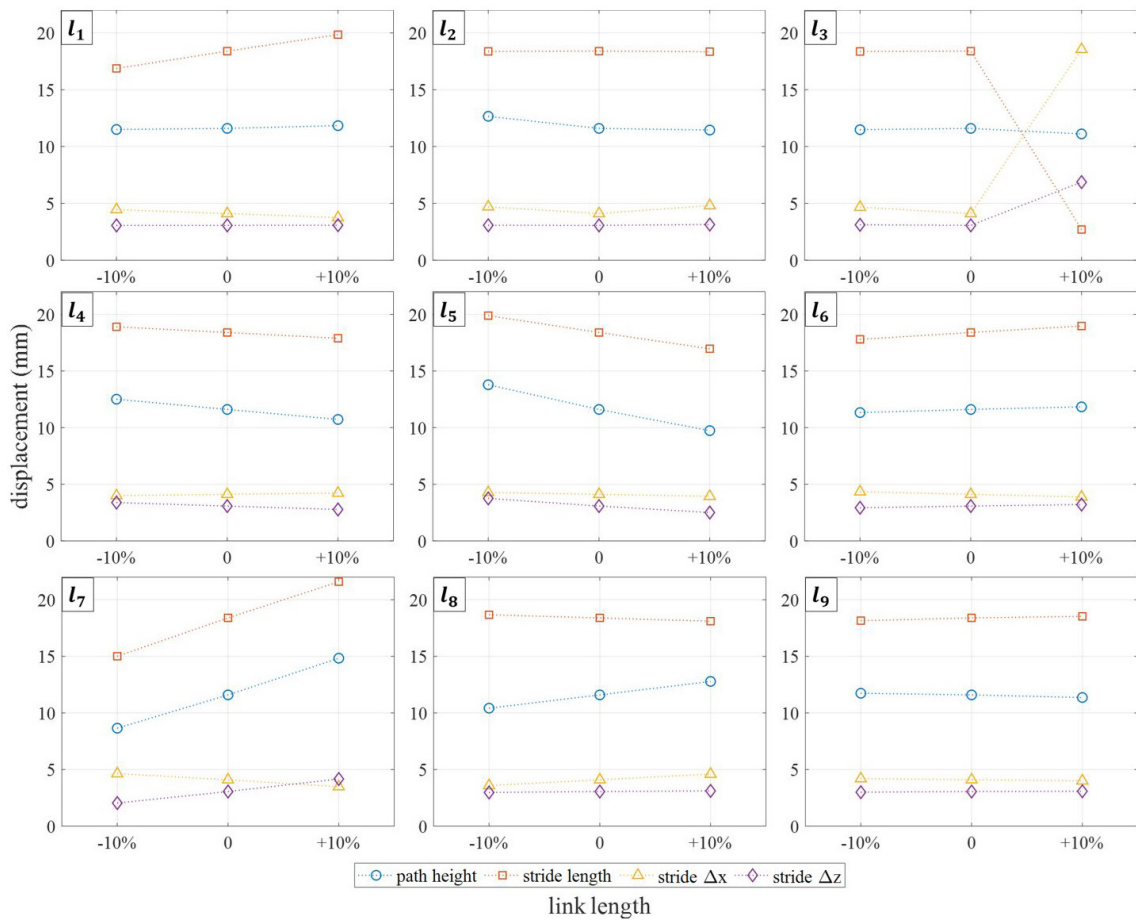
[Fig. 5] Result of kinematic analysis of the proposed leg linkage with randomly selected variable set. Black points indicate the joints and red and green lines indicate the links. The input rotation of the link 1 generates the 3D motion of the foot, and the swing and lifting motion can be achieved with only one rotational input



[Fig. 6] The resultant foot trajectory of the linkage while changing the design parameter (l_1, l_2, l_5, l_7) in xy, yz, and xz-plane. Only one variable was changed at once. Orange points are the result of trajectory with same variable values used for [Fig. 4], and blue points are when the length of the link was increased 10%, and green points are when the length of the link was decreased 10%

퍼보먼 입각기에서 발끝이 지면에 닿은 뒤에 로봇의 진행 방향과 반대 방향으로 움직이며(stride length) 이후 발이 지면에서 떨어지고 공중에서 원위치로 돌아가는 swing과 lifting 움직임을 보이는 것을 확인할 수 있다. 발이 공중에 뜨는 높이(path

height)를 통해 일정 높이의 장애물을 보행으로 극복할 수 있게 된다. 진동이 없는 이상적인 주행 궤적에서는 지면이 발에 닿는 동안 진행 방향으로만 움직인다. 하지만, 계산된 결과를 보면 입각기에서 z 방향 변위(stride Δz)가 있어 수직 방향 진동



[Fig. 7] Comparison of trajectory comparison parameters while changing the length of the link. Blue circles, orange square, yellow triangles, and purple diamonds indicate path height, stride length, stride Δx , and stride Δz , respectively. The parameters are calculated based on the trajectories illustrated in [Fig. 6]

이 발생함을 예상할 수 있다. 또한 다리의 좌우 방향 움직임을 확인할 수 있는 xy 평면을 살펴보면 입각기에서 x 방향 변위 (stride Δx) 가 있음을 볼 수 있다. 삼각 보행을 가정하면 한 면에 있는 두 개의 다리와 다른 면에 있는 하나의 다리가 동시에 움직이기 때문에 각 면의 다리가 가하는 힘의 불균형이 생겨 보행 한 사이클 이후 x 방향으로의 변위가 생기게 된다. 따라서 보행 시 횡 방향 진동이 발생함을 예상할 수 있다. 이러한 발끝 궤적은 기구의 설계 변수에 의해 결정되므로 설계 변수에 따른 궤적의 변화를 확인할 필요가 있다.

3.2 다리 기구의 설계 변수에 따른 발끝 궤적

설계 변수의 변화에 따른 발끝 궤적을 확인하기 위해 변수 $l_1 \sim l_9$ 각각을 [Fig. 5]에 사용된 값에서 10% 증가, 10% 감소하였을 때 궤적을 계산하였다. [Fig. 6]는 변수 l_1, l_2, l_5, l_7 에 대한 결과를 xy, yz, xz 평면에서 보여주며 xy 평면 그래프에서는 사절 기구의 영향을 확인하고자 조인트 5의 위치도 함께 표시하

였다. [Fig. 7]은 변수 $l_1 \sim l_9$ 에 대해 [Fig. 4]에서 보여주는 4개의 궤적 비교 변수의 결과값을 보여준다.

상단에 위치한 사절 링크의 설계 변수 $l_1 \sim l_3$ 은 링크 4의 z 방향 회전에 영향을 미친다. [Fig. 6]의 l_1 그래프를 보면 입력 링크 l_1 의 길이가 증가하면 링크 4의 회전 범위가 증가하고 따라서 발끝의 궤적도 전체적으로 더 넓어지는 것을 볼 수 있다. [Fig. 6]의 l_2 그래프를 보면 링크 l_2 의 길이에 따라 회전 시작 각도가 바뀌며 그 영향으로 전체적인 궤적이 이동하는 것을 확인할 수 있다.

하단에 위치한 링크의 설계 변수 $l_4 \sim l_9$ 는 링크 4의 z 방향 회전을 발끝의 lifting과 swing 움직임으로 만드는 데 영향을 미치게 된다. l_5 는 힘점에서 피벗 포인트까지의 거리로 생각될 수 있으며 [Fig. 6]와 [Fig. 7]의 l_5 를 보면 l_5 가 작아질수록 링크 4의 회전이 더 크게 증폭되어 path height와 stride length가 증가하는 것을 볼 수 있다. l_7 은 다리의 sprawled posture(y축에 대한 다리의 각도)에 영향을 미치는데 l_7 이 커질수록 다리가

수평에 가까워진다. [Fig. 6]와 [Fig. 7]의 l_7 그래프를 보면 발끝 궤적이 더 수직에 가까워져서 더 높은 path height과 더 긴 stride length를 확보할 수 있다.

결과적으로, 다리의 궤적은 다리 주행 특성에 영향을 미치며 필요한 주행 특성을 갖는 다리 기구를 설계 변수의 적절한 조합을 통해 구현할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 지하 동공이나 좁은 통로와 같이 좁은 공간에 접근하여 임무를 수행할 수 있는 소형 지상 이동 로봇의 주행 메커니즘에 적용할 수 있는 다리 기구를 제안하였다. 모터 1개의 연속 회전으로 옆으로 뻗어 있는 자세의 다리의 swing과 lifting 움직임을 구현할 수 있는 1자유도 3차원 다리 기구를 설계하였으며, 기구 분석을 통해 설계 변수에 따른 다리 궤적을 확인하였다.

본 논문에서는 주행 메커니즘의 설계 변수들을 실험적으로 변경하며 다리 궤적을 확인하였다. 다리 궤적의 특성을 비교하기 위해 주행 속력과 연관이 있는 stride length, 장애물 극복 능력과 관련이 있는 path height, 그리고 주행 시 진동과 관련된 stride Δx , stride Δz 를 계산하였다. 추후에는 적절한 목적 함수를 설정하여 설계 변수를 최적화하는 과정이 필요하다. Stride length가 길수록 빠른 주행 속력을 얻을 수 있지만 목표하는 크기 내에 6개의 다리를 배치해야 하므로 stride length가 너무 길어지면 다리 간의 간섭이 발생할 수 있다. 또한 path height이 크다는 것은 발끝이 더 높은 궤적에 도달하기 때문에 더 높은 장애물을 극복할 수 있게 되지만 [Fig. 7]을 보면 path height이 커질 때 stride Δz 또한 커지는 경향이 있는 것을 볼 수 있다. 이는 주행 시 로봇의 상하 진동이 심해진다는 것을 의미한다. 따라서 로봇의 목표 주행 속력, 목표 장애물 극복 높이를 설정하여 다리 간의 간섭이 없으면서 목표 성능을 만족시키고 로봇의 진동을 최소화할 수 있도록 목적 함수를 설정하여 기구 변수의 최적화 과정이 필요하다. 마지막으로 설계된 다리 기구 6개를 적용한 주행 메커니즘의 설계와 제작을 통해 제안된 다리 기구의 소형 로봇에서의 구현 및 적용 가능성을 확인해야 한다.

References

- [1] H. W. Chun, "Defence×IT Convergence : Focus on Military Robots," *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 28, no. 4, pp. 107-117, Aug., 2013, DOI: 10.22648/ETRI.2013.J.280411.
- [2] P. Birkmeyer, K. Peterson, and R. S. Fearing, "DASH: A dynamic 16g hexapedal robot," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, St. Louis, USA, pp. 2683-2689, 2009, DOI: 10.1109/IROS.2009.5354561.
- [3] R. F. Chapman, "Legs and locomotion," *The Insects: Structure and Function*, 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, pp. 151-184, DOI: 10.1017/CBO9780511818202.
- [4] J. 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: Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, vol. 188, pp. 39-53, Feb., 2002, DOI: 10.1007/s00359-002-0277-y.
- [5] S. W. Gart, C. Yan, R. Othayoth, Z. Ren, and C. Li, "Dynamic traversal of large gaps by insects and legged robots reveals a template," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 13, no. 2, Feb., 2018, DOI: 10.1088/1748-3190/aaa2cd.
- [6] D. M. Dudek and R. J. Full, "Passive mechanical properties of legs from running insects," *Journal of Experimental Biology*, vol. 209, no. 8, pp. 1502-1515, Apr., 2006, DOI: 10.1242/jeb.02146.
- [7] S. Sponberg and R. J. Full, "Neuromechanical response of musculo-skeletal structures in cockroaches during rapid running on rough terrain," *Journal of Experimental Biology*, vol. 211, no. 3, pp. 433-446, Feb., 2008, DOI: 10.1242/jeb.012385.
- [8] R. J. Full and M. S. Tu, "Mechanics of six-legged runners," *Journal of Experimental Biology*, vol. 148, no. 1, pp. 129-146, Jan., 1990, DOI: 10.1242/jeb.148.1.129.
- [9] L. H. Ting, R. Blickhan, and R. J. Full, "Dynamic and Static Stability in Hexapedal Runners," *Journal of Experimental Biology*, vol. 197, no. 1, pp. 251-269, Dec., 1994, DOI: 10.1242/jeb.197.1.251.
- [10] 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, no. 2, pp. 249-259, Jan., 2006, DOI: 10.1242/jeb.01979.
- [11] A. T. Baisch, C. Heimlich, M. Karpelson, and R. J. Wood, "HAMR3: An autonomous 1.7g ambulatory robot," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, San Francisco, USA, pp. 5073-5079, DOI: 10.1109/IROS.2011.6095063.
- [12] A. T. Baisch and R. J. Wood, "Pop-up assembly of a quadrupedal ambulatory MicroRobot," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Tokyo, Japan, pp. 1518-1524, 2013, DOI: 10.1109/IROS.2013.6696550.
- [13] A. M. Hoover, S. Burden, X.-Y. Fu, S. S. Sastry, and R. S. Fearing, "Bio-inspired design and dynamic maneuverability of a minimally actuated six-legged robot," *IEEE/ RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, Tokyo, Japan, pp. 869-876, 2010, DOI: 10.1109/BIOROB.2010.5626034.
- [14] D. W. Haldane, K. C. Peterson, F. L. Garcia Bermudez, and R. S. Fearing, "Animal-inspired design and aerodynamic stabilization of a hexapedal millirobot," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Karlsruhe, Germany, pp. 3279-3286, 2013, DOI: 10.1109/ICRA.2013.6631034.
- [15] D. W. Haldane and R. S. Fearing, "Running beyond the bio-inspired regime," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seattle, USA, pp. 4539-4546, 2015, DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139828.

[16] S.-H. Chae, S.-M. Baek, J. Lee, S. Yim, J.-K. Ryu, Y.-J. Cho, and K.-J. Cho, "Effect of Leg Stiffness on the Running Performance of Milli-Scale Six-Leg Crawling Robot with Payload," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 14, no. 4, pp. 270-277, Nov., 2019, DOI: 10.7746/jkros.2019.14.4.270.

[17] J. Lee, G.-P. Jung, S.-M. Baek, S.-H. Chae, S. Yim, W. Kim, and K.-J. Cho, "CaseCrawler: A Lightweight and Low-Profile Crawling Phone Case Robot," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 5858-5865, Oct., 2020, DOI: 10.1109/LRA.2020.3010205.

[18] D. S. Kim, S. Jung, and G.-P. Jung, "A Milli-Scale Hexapedal Robot using Planar Linkages," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 13, no. 2, pp. 97-102, Jun., 2018, DOI: 10.7746/jkros.2018.13.2.097.

[19] T.-Y. Kim, C. Kim, S.-H. Kim, and G.-P. Jung, "MutBug: A Lightweight and Compact Crawling Robot That Can Run on Both Sides," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 1409-1415, Apr., 2019, DOI: 10.1109/LRA.2019.2895896.

[20] S. Yim, S.-M. Baek, J. Lee, S.-H. Chae, J.-K. Ryu, Y.-J. Jo, and K.-J. Cho, "Modular Crawler with Adjustable Number of Legs

and Performance Evaluation of Hexapod Robot," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 14, no. 4, pp. 278-284, Nov., 2019, DOI: 10.7746/jkros.2019.14.4.278.

[21] S. Kim, J. E. Clark, and M. R. Cutkosky, "iSprawl: Design and Tuning for High-speed Autonomous Open-loop Running," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 25, no. 9, pp. 903-912, Sept., 2006, DOI: 10.1177/0278364906069150.

[22] S. Nansai, N. Rojas, M. R. Elara, R. Sosa, and M. Iwase, "On a Jansen leg with multiple gait patterns for reconfigurable walking platforms," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 7, no. 3, Mar., 2015, DOI: 10.1177/1687814015573824.

[23] R. J. Wood, S. Avadhanula, M. Menon, and R. S. Fearing, "Micro-robotics using composite materials: the micromechanical flying insect thorax," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Taipei, Taiwan, pp. 1842-1849, 2003, DOI: 10.1109/ROBOT.2003.1241863.

[24] W. S. N. Trimmer, "Microrobots and micromechanical systems," *Sensors and Actuators*, vol. 19, no. 3, pp. 267-287, Sept., 1989, DOI: 10.1016/0250-6874(89)87079-9.



임 소 정

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

관심분야: 생체 모사 로봇 등



허 석 행

2008~현재 LG넥스원 무인체계연구소 수석 연구원

관심분야: 생체모방로봇 설계, 무기체계 M&S, 로봇용 구동장치



이 성 준

2014 한국기술교육대학교 기계공학부(공학사)
2016 한국기술교육대학교 기계공학부(공학석사)
2018~현재 LG넥스원 무인체계연구소 선임 연구원

관심분야: 생체모방 메커니즘, 로봇, 구동기 등



유 재 관

2004 경희대학교 기계학과(공학석사)
2009 JAIST(일본) 로봇학과(공학박사)
2009~현재 현재 LG넥스원 미래기술연구소 연구소장

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



백 상 민

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

관심분야: 생체 모사 로봇 등



조 규 진

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

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