

타원 궤적을 동시에 추종하는 6족 로봇의 궤적 변수 최적화

Trajectory Parameter Optimization of a Six-legged Robot Following an Elliptical Trajectory

백준기^{1,†}, 이정현^{1,†}, 유성근^{1,*}(Joonki Baek^{1,†}, Jeonghyeon Lee^{1,†}, and Sungkeun Yoo^{1,*})¹Department of Robot Systems Engineering, Keimyung University

Abstract: This study proposes a locomotion method applicable to a 6-legged mobile robot with passive wheels. To achieve the desired movements of the robot, it is necessary to control the end points of the robot's legs to reach specific target positions. Leg end point positions can be defined relative to the robot's central coordinate system through kinematic modeling, which includes both forward and inverse kinematics. This study equips the proposed robot with passive wheels at the ends of its legs to facilitate movement through its actions. The robot's locomotion is planned by tracking an elliptical trajectory at its leg end points, and it gains propulsion for linear movement through the relationship between the absolute velocity of the wheels relative to the ground and the relative velocity of the legs in the robot's frame. The robot's performance is evaluated through 236 experiments, using the height, x-axis length, and y-axis length of the elliptical trajectory as design parameters. The results indicate that the optimal trajectory is achieved at a height of 92.5mm, with x-axis and y-axis lengths of 120mm and 70mm, respectively. Future research will focus on designing a mechanism for flexible switching between wheels and legs, as well as analyzing steering performance.

Keywords: 6-legged robot, wheeled-legged robot, passive wheels, gait planning, optimal trajectory, kinematics modeling

1. 서론

로봇기술이 고도화됨에 따라 물품 운송, 수색, 탐사 등과 같은 다양한 분야에서 사람을 대신하여 이동 로봇을 활용하려는 시도가 늘어나고 있다. 현재 사용되고 있는 이동 로봇은 평지에서 안정적인 주행을 위해 대부분 바퀴를 사용하는데, 이러한 로봇들은 바퀴보다 큰 요철과 같이 급변하는 형상의 지형에서는 안정적으로 이동하지 못한다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 가변형 바퀴와 같이 바퀴의 구조를 변형하는 연구가 진행되고 있지만, 바퀴의 특성상 바퀴 크기와 마찰 특성에 따라 극복할 수 있는 장애물의 높이가 제한된다[1-3].

바퀴의 구조를 변형하는 방식과 달리, 보행 로봇(legged robot)은 다리를 이용하여 이동하기 때문에 험난한 지형을 안정적으로 이동할 수 있고 비교적 높은 장애물을 극복할 수 있다[4-6]. 하지만 로봇이 평지에서 이동할 때, 보행 로봇은 바퀴를 이용하여 주행하는 로봇에 비해 상대적으로 복잡한 보행(gait) 알고리즘을 필요로 하기 때문에 속도가 느리고 움직이는 방향에 대한 제어가 어려운 특징이 있다.

바퀴로 움직이는 로봇과 보행 로봇이 갖는 단점을 보완하기 위해 바퀴-다리 가변 이동 로봇(wheeled-legged mobile robot)의 연구가 진행되고 있다. 이는 평지에서는 빠르게 주행하고

불규칙적인 지형에서는 보행 알고리즘으로 안정적으로 극복할 수 있는 특징을 갖는다. 기존의 바퀴-다리 가변 이동 로봇은 대부분 보행 로봇의 다리 끝단에 액티브 휠(active wheel)을 장착하여 설계한다[7-10]. 이 방식은 일반적인 이동 로봇과 같이 평지에서 빠르게 이동할 수 있지만, 바퀴를 구동할 모터를 추가로 장착해야 하기 때문에 효율이 떨어진다.

이에 따라 패시브 휠(passive wheel)을 사용하여 사람이 인라인 스케이팅을 하는 것과 같이 로봇의 다리 동작으로 주행하는 로봇이 연구되고 있다[11]. Endo는 4족 로봇의 각 3 자유도로 구성된 다리 끝에 패시브 휠을 장착하여 이동하는 연구를 진행했는데, 4족 로봇의 첫 번째 관절의 특성으로 인해 조향 중에 바퀴에 가해지는 반력에 따라 노면과 접촉이 불안정하여 동력이 온전히 추진력으로 전달되기 어렵다는 단점이 있다[12,13]. 또한, Bellegarda는 같은 형태의 로봇에 각 다리를 6 자유도로 구성했는데, 구동 축이 많아 다양한 동작을 구현할 수 있지만 제어가 복잡하고 속도에 비해 효율이 떨어진다[14,15].

본 연구에서는 위와 같은 로봇의 효과적인 주행 성능 향상을 위해 추종 경로에 따른 주행 속도와의 상관관계를 분석하고 최적 타원 경로 변수를 실험적으로 탐색하였다[16].

[†] Equally contributed

* Corresponding Author

Manuscript received September 18, 2024; revised November 12, 2024; accepted January 22, 2025

백준기: 계명대학교 로봇시스템공학과 대학원생(1114830@stu.kmu.ac.kr, ORCID[®] 0009-0007-4755-8211)이정현: 계명대학교 로봇시스템공학과 대학원생(1114832@stu.kmu.ac.kr, ORCID[®] 0009-0005-2170-6779)유성근: 계명대학교 로봇공학과 조교수(skyoo@kmu.ac.kr, ORCID[®] 0000-0002-5393-2560)

※ 이 논문은 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학협력기반지역혁신사업의 결과이고(재단과제관리 번호: 2022RIS-006), 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00391891). 또한 2024 제39회 제어·로봇·시스템학회 학술대회에 초안이 발표되었음.

타원 경로는 추력이 발생할 수 있는 가장 기본적인 궤적이며 정해진 궤적에 따라 로봇의 속도가 달라진다. 각 다리에서의 로봇의 속도가 모두 일치할 때 효과적으로 주행할 수 있으며, 이러한 방법 중 가장 기본적이며 경로 자체의 특성을 확인할 수 있는 방법은 여섯 개의 다리가 동시에 동일한 궤적을 추종하는 것이다. 이를 위해 6족 보행 로봇에 패시브 휠을 장착한 로봇을 제작하였으며 단계적인 실험을 통해 최적 타원 경로 변수를 제안한다. 실험에 사용된 로봇은 다양한 타원 경로를 안정적으로 추종할 수 있도록 6족 형태로 개발되었으며 향후 복잡한 지형에서 다리를 독립적으로 제어하여 능동적으로 대응할 수 있도록 연구할 예정이다. 실험을 위해 테스트베드를 설계하여 각 설계 변수에 따른 로봇의 속도와 전력 소모량을 실시간으로 측정하였으며 이를 바탕으로 소모 에너지 대비 주행 성능이 높은 주행 궤적을 탐색하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 로봇의 구조 및 다리의 설계, 3장에서는 로봇의 정기구학, 역기구학, 궤적 모델에 대해 설명한다. 4장에서는 실험을 위해 제작된 테스트 베드, 설계변수, 기능변수와 다양한 궤적에 따른 실험 결과 및 분석 수행 결과를 설명한다. 5장에서는 결론 및 추후 계획에 대해 언급한다.

II. 6족 이동 로봇 설계

본 연구에서 설계한 이동 로봇은 총 18자유도의 시스템으로 육각 형태의 몸체에 3자유도 다리 6개로 구성되어 있으며 크기와 무게는 그림 1과 같다. 다리의 각 관절은 보행과 주행을 위한 동작을 동시에 수행해야 하기 때문에 선정된 모터를 기반으로 다양한 궤적을 추종할 수 있어야 한다. 따라서, 모터의 배치 및 링크의 길이는 구동 영역을 최대화하며 모터에 부하를 최소화할 수 있도록 설계되었다. 다리 끝에는 패시브 휠을 장착하여 다리의 궤적에 따라 미끄러질 수 있도록 하였다.

로봇의 주행 성능은 로봇의 주행거리, 속도, 소모전류로 평가된다. 주행거리는 로봇 몸체 위에 장착된 아이들러와 타이밍 풀리와 연결되어 있는 엔코더를 통해 측정된다. 전원 공급에 따른 모터 성능 편차를 최소화하기 위해서 외부 SMPS에서 안정적인 전력을 로봇에 공급하였으며, 전류 센서를 장착하여 로봇이 움직일 때 소모되는 전체적인 전류를 측정하였다. 6개의 다리가 지정된 궤적을 동시에 추종할 수 있도록 동일한 모델의 18개의 Dynamixel 모터를

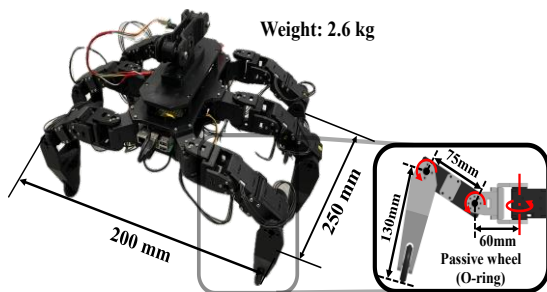


그림 1. 개발된 6족 이동 로봇과 그 크기.

Fig. 1. 6-legged mobile robot and dimension.

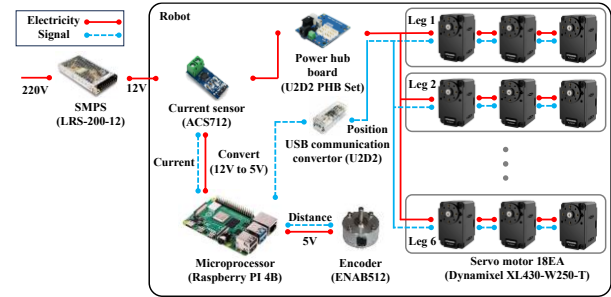


그림 2. 로봇의 전장 시스템.

Fig. 2. Electrical system configuration of robot.

상위 제어기인 Raspberry Pi 프로세서를 통해 제어하였다. 로봇의 전장 시스템은 그림 2와 같다.

III. 6족 이동 로봇 모델링

이동 로봇의 각 다리 끝단의 주행 방향은 패시브 휠의 방향으로 결정된다. 각 관절의 각도와 끝단의 위치, 방향과의 관계를 분석하기 위해서 정기구학 해석을 수행하였다. 다양한 말단 궤적을 구현하기 위한 각 다리별 관절 변수는 역기구학 해석을 통해 구하였다. 주어진 궤적과 로봇의 주행 속도와의 관계는 로봇에서의 말단 궤적 속도와 말단의 속도, 로봇의 속도 관계식으로 분석하였다.

1. 정기구학

3자유도의 로봇 다리는 추종하는 궤적에 따라 말단부의 자세가 정해진다. 6개의 다리는 그림 3과 같이 로봇의 중심 좌표계를 기준으로 일정한 높이의 xy 평면에서 정해진 궤적을 추종해야 한다. 이때 로봇 말단부는 장착된 패시브 휠의 방향인 $Bz_{i,3}$ 으로 주행하며 이 방향은 말단부의 위치에 따라 결정된다.

로봇의 6개의 다리 구조는 모두 동일하고 로봇의 중심 좌표계를 기준으로 각 다리의 0번 좌표계의 방위와 위치를 나타낼 수 있다. 로봇의 중심 좌표계와 다리 말단 좌표계의 관계식은 하나의 다리의 정기구학 식을 구하고, 로봇의 중심 좌표계 기준 다리의 0번 관절 좌표계의 위치와 방위를 로봇의 형상에 맞게 배치하여 구하였다. 그림 3은 로봇의 i 번째 다리에 대한 관절 좌표계이다. 여기에서, $l_{i,x}$, $l_{i,y}$, $\theta_{i,0}$ 는 로봇 중심 좌표계 기준 0번 좌표계의 위치 및 방위

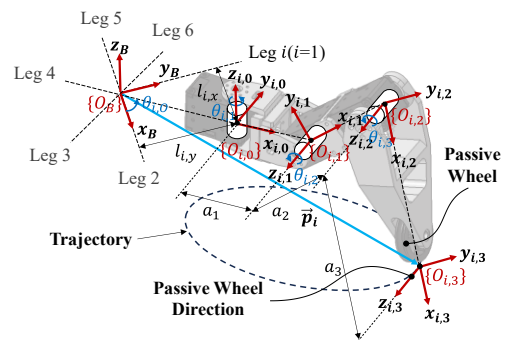


그림 3. 로봇의 중심 및 i 번째 다리 관절 좌표계.

Fig. 3. Coordinate systems of the robot center and i th leg joints.

표 1. $\{O_B\}$ 에서 $\{O_{i,0}\}$ 까지의 값.

Table 1. Transformation parameters from $\{O_B\}$ to $\{O_{i,0}\}$.

Leg i						
Parameters	1	2	3	4	5	6
$l_{i,x}$	65	98.5	65	-65	-98.5	-65
$l_{i,y}$	125	0	-125	-125	0	125
$\theta_{i,0}$	$\pi/2$	0	$-\pi/2$	$-3\pi/2$	2π	$3\pi/2$

표 2. DH 파라미터.

Table 2. DH parameters.

i th Joint	α	a	d	θ
Joint 1	$\pi/2$	a_1	0	$\theta_{i,1}$
Joint 2	0	a_2	0	$\theta_{i,2}$
Joint 3	0	a_3	0	$\theta_{i,3}$

값이다. 0번 좌표계와 관련된 값은 표 1과 같다. 각각의 로봇 다리의 0좌표계에서 말단까지의 관계를 구하기 위해 표 2와 같이 DH 파라미터를 정의하고, 표 1과 표 2에 따라 정기구학을 수행하면, 로봇의 중심에서 i 번째 다리 말단까지의 관계를 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} {}^B T_{i,3} &= {}^B T_{i,0} {}^{i,0} T_{i,1} {}^{i,1} T_{i,2} {}^{i,2} T_{i,3} \\ &= \begin{bmatrix} {}^B \hat{x}_{i,3} & {}^B \hat{y}_{i,3} & {}^B \hat{z}_{i,3} & {}^B \vec{p}_{i,3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서, ${}^B T_{i,3}$ 은 로봇의 중심 좌표계에서 i 번째 다리의 말단 좌표계까지의 동차변환행렬이고, ${}^B \hat{x}_{i,3}$, ${}^B \hat{y}_{i,3}$, ${}^B \hat{z}_{i,3}$ 는 말단 좌표계의 각 축의 단위벡터, ${}^B \vec{p}_{i,3}$ 는 말단 좌표계의 원점에 대한 위치 벡터이다. 말단부 위치벡터의 각 방향별 성분은 식 (2)와 같이 각 다리의 0좌표계의 위치와 방향($l_{i,x}$, $l_{i,y}$, $\theta_{i,0}$), 관절 각($\theta_{i,1}$, $\theta_{i,2}$, $\theta_{i,3}$)에 의해 결정된다.

$${}^B \vec{p}_{i,3} = \begin{bmatrix} p_{i,x} \\ p_{i,y} \\ p_{i,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{i,x} + c_{01}(a_1 + a_2 c_2 + a_3 c_{23}) \\ l_{i,y} + s_{01}(a_1 + a_2 c_2 + a_3 c_{23}) \\ a_2 s_2 + a_3 s_{23} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기에서, $s_{\#}$ 와 $c_{\#}$ 는 각각 $\sin\theta_{i,\#}$ 와 $\cos\theta_{i,\#}$ 함수를 의미하며, $s_{\#\#}$ 와 $c_{\#\#}$ 는 각각 $\sin(\theta_{i,\#} + \theta_{i,\#*})$ 와 $\cos(\theta_{i,\#} + \theta_{i,\#*})$ 함수를 의미한다.

그림 3에서 볼 수 있듯이 패시브 휠의 주행 방향은 3번째 관절 좌표계의 z 축 방향인 $\hat{z}_{i,3}$ 단위벡터의 방향과 같다. 이 단위벡터를 기준 좌표계의 방향별 성분으로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 각 방향별 성분을 보면 패시브 휠의 주행 방향은 0좌표계의 방위($\theta_{i,0}$)와 1번 관절의 관절 각($\theta_{i,1}$)에 의해서만 결정되는 것을 확인할 수 있다.

$${}^B \hat{z}_{i,3} = \begin{bmatrix} \sin(\theta_{i,0} + \theta_{i,1}) \\ -\cos(\theta_{i,0} + \theta_{i,1}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2. 역기구학

첫 번째 관절각은 말단의 x, y 좌표 값인 $p_{i,x}$, $p_{i,y}$ 를 활용하여 구할 수 있으며, 식 (4)와 같다.

$$\theta_{i,1} = \text{atan2}(p_{i,y} - l_{i,y}, p_{i,x} - l_{i,x}) - \theta_{i,0} \quad (4)$$

세 번째 관절 각은 세 위치 함수를 삼각함수 공식을 활용하여 유도하면 두 개의 해를 얻을 수 있으며, 원하는 다리의 형상을 고려하여 식 (5)와 같이 결정하였다.

$$\theta_{i,3} = \text{atan2}(y_{i,3}, x_{i,3}) \quad (5)$$

$$y_{i,3} = -\sqrt{4a_2^2 a_3^2 - (l_{cei}^2 + \alpha)^2}$$

$$x_{i,3} = l_{cei}^2 + \alpha$$

$$\alpha = a_1^2 - a_2^2 - a_3^2 - 2a_1 \sqrt{l_{cei}^2 - p_{i,z}^2}$$

여기에서, l_{cei} 는 식 (6)과 같이 첫 번째 관절에서 말단까지의 거리를 나타낸다.

$$l_{cei} = \sqrt{(p_{i,x} - l_{i,x})^2 + (p_{i,y} - l_{i,y})^2 + p_{i,z}^2} \quad (6)$$

두 번째 관절각은 세 위치 함수와 위에서 유도한 두 번째 관절 각 식을 활용하여 Cramer's rule을 적용하면 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$\theta_{i,2} = \text{atan2}(y_{i,2}, x_{i,2}) \quad (7)$$

$$y_{i,2} = p_{i,z}(a_2 + a_3 c_3) - a_3 s_3 \left(\sqrt{L_{cei}^2 - p_{i,z}^2} - a_1 \right)$$

$$x_{i,2} = \left(\sqrt{L_{cei}^2 - p_{i,z}^2} - a_1 \right) (a_2 + a_3 c_3) + p_{i,z} a_3 s_3$$

유도된 각 다리의 3개의 관절 각 식은 주어진 궤적 ($p_{i,x}$, $p_{i,y}$, $p_{i,z}$)을 통해 결정된다.

3. 궤적 모델

패시브 휠을 장착한 다족 이동 로봇의 주행 방법은 동적인 주행과 정적인 주행으로 나눌 수 있다[17-19]. 본 연구에서는 6족 로봇의 안정성을 활용하여 정적인 직진 주행 성능을 높일 수 있는 최적 궤적을 제안한다. 직진 주행의 효과만 확인할 수 있도록 양쪽 다리를 대칭으로 움직이는 궤적을 구현하여 횡방향으로 발생하는 분력을 상쇄하였다.

로봇은 6개의 다리가 동시에 그림 4와 같은 타원 궤적을 따른다. 타원 궤적은 x 축 반경과 y 축 반경 2개의 변수로 정의되며, 2개의 변수를 변경하여 다양한 종류의 궤적을 생성하였다. 식 (8)은 i 번째 다리가 추종하는 x 좌표의 범위이고, 식 (9)은 x 좌표에 따라 변하는 y 좌표 값이다.

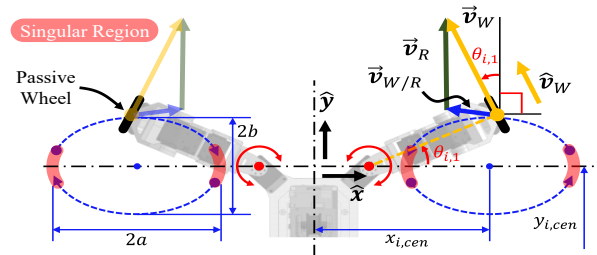


그림 4. 다리의 말단 궤적과 로봇의 속도, 로봇 바퀴의 속도, 로봇에 대한 로봇 바퀴의 속도.

Fig. 4. Leg trajectory, velocity of robot, velocity of wheel, velocity of wheel by robot.

$$p_{i,x.cen} - a \leq p_{i,x} \leq p_{i,x.cen} + a \quad (8)$$

$$p_{i,y} = \pm b \sqrt{1 - \frac{(p_{i,x} - p_{i,x.cen})^2}{a^2}} + p_{i,y.cen} \quad (9)$$

여기에서, a, b 는 각각 타원 궤적의 x 축, y 축의 길이의 반이고, $p_{i,x.cen}$ 는 타원 중심점의 x 축 좌표 값, $p_{i,y.cen}$ 는 타원 중심점의 y 축 좌표 값이다.

타원 궤적의 x 축 방향으로는 식 (10)과 같이 등속으로 왕복 이동하며, y 축 방향으로는 식 (9)를 시간에 대해 미분하여 식 (11)과 같이 구할 수 있다. 이 두 방향의 속도가 로봇에 대한 로봇 휠의 상대속도 벡터($\vec{v}_{W/R}$)의 요소이며 식 (12)와 같다.

$$v_{W/R,x} = \pm v_x \quad (10)$$

$$v_{W/R,y} = \mp \frac{v_{W/R,x} b (P_{xi} - P_{xi.min})}{a^2} \left(1 - \frac{(P_{xi} - P_{xi.min})^2}{a^2} \right)^{-1/2} \quad (11)$$

$$\vec{v}_{W/R} = \begin{bmatrix} v_{W/R,x} \\ v_{W/R,y} \end{bmatrix} \quad (12)$$

로봇의 다리 끝에 달려 있는 휠이 지면에서 미끄러지지 않고 휠의 방향으로 주행한다고 가정한다면, 로봇 다리 휠의 절대 속도(\vec{v}_W)는 로봇의 주행하는 절대 속도(\vec{v}_R)와 로봇에서의 로봇 휠 궤적의 상대속도($\vec{v}_{W/R}$)의 합으로 식 (13)과 같이 결정된다.

$$\vec{v}_W = \vec{v}_R + \vec{v}_{W/R} \quad (13)$$

휠의 절대 속도 벡터의 방향은 휠의 주행 방향과 동일하며, 정기구학 해석에서 확인한 바와 같이 첫 번째 관절에 의해 결정된다. 그림 4와 같이 첫 번째 관절 각도에서 반시계 방향으로 90도 회전하면 식 (14)과 같이 해당 벡터의 단위 벡터를 구할 수 있다.

$$\hat{v}_W = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{i,1} + \pi/2) \\ \sin(\theta_{i,1} + \pi/2) \end{bmatrix} \quad (14)$$

로봇이 이상적으로 주행하여 속도의 방향이 y 축이라고 가정한다면, 식 (13)을 식 (15)와 같이 속력과 단위벡터의 곱으로 나타낼 수 있으며, 이를 정리하여 로봇의 속력(v_R)과 휠의 속력(v_W)을 구하면 식 (16)과 같다.

$$v_W \hat{v}_W = v_R \hat{v} + \vec{v}_{W/R} \quad (15)$$

$$v_W = \frac{v_{W/R,x}}{\cos(\theta_{i,1} + \pi/2)},$$

$$v_R = -v_{W/R,y} + v_{W/R,x} \frac{\sin(\theta_{i,1} + \pi/2)}{\cos(\theta_{i,1} + \pi/2)} \quad (16)$$

식 (11), (16)을 보면, $p_{i,x}$ 값이 양쪽 끝으로 갈수록 식 (11)의 분모와 식 (16)의 코사인 값이 0에 가까워져 속도가 무한하게 커지는 특이 영역이 존재한다는 것을 확인할 수 있다. $p_{i,x}$ 의 속도인 $v_{W/R,x}$ 를 $\pm 50\text{mm/s}$ 로 지정하고, 위의 식을 기반으로 그림 5와 같이 궤적 및 로봇의 속도, 로봇의 이동거리를 특이 영역을 제외하고 나타내었다.

그림 5와 같이 궤적의 y 축의 길이가 60mm 로 동일한 경우에서, x 축의 길이가 커짐에 따라 로봇의 속도 및 이동거리가 높아지는 경향을 보인다. 하지만, 궤적의 x 축이 길어

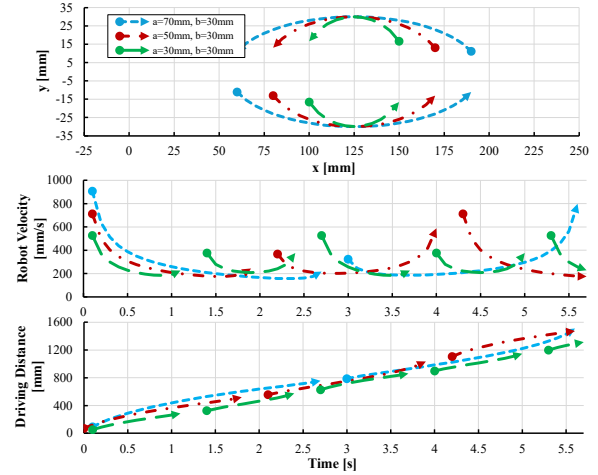


그림 5. 로봇의 궤적, 속도, 이동거리 그래프.
Fig. 5. Graphs of the robot's trajectory, velocity, and distance.

지면 다리가 넓게 펼쳐져 모터의 가해지는 토크가 높아져 구동이 불가능할 수 있고, 등속인 x 축 이동속도를 고려하면 x 축의 길이가 변함에 따라 타원 궤적의 추종 횟수가 달라져 주행 거리에 영향이 있다. 특히 영역에서는 분석이 불가능하며, 바퀴의 마찰이 충분하지 않아 미끄러질 수 있어 예측과 다른 결과가 나타날 수 있다. 따라서, 다양한 궤적에 대해 로봇의 실제 속도 및 이동거리를 확인할 수 있는 실험을 수행하여 최적의 궤적을 위한 변수를 탐색하였다.

IV. 실험 및 분석

1. 실험 환경

궤적에 따른 로봇의 주행 성능을 평가하기 위해 그림 6과 같은 테스트베드를 설계하고 제작하였다. 로봇의 직선 주행 성능은 로봇이 타이밍 벨트를 기준으로 주행할 때 로봇 위에 장착된 엔코더 데이터를 기반으로 분석하였다. 로봇 동작 시 소모되는 전류 데이터도 동시에 확보하여 소모되는 에너지 대비 효과적인 주행 여부를 확인하였다.

표 3. 궤적 설계 변수.

Table 3. Design parameters of trajectory.

Design parameters			
	Height	X-axis diameter	Y-axis diameter
#	3	9	9
Variables	92.5, 130, 167.5	60, 70, ..., 140	60, 70, ..., 140

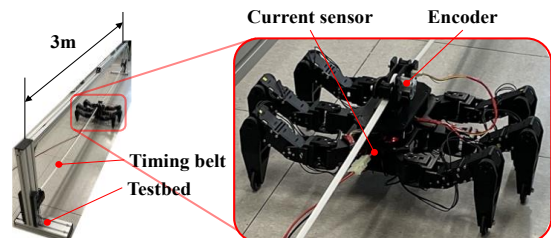


그림 6. 실험 환경.
Fig. 6. Experiments environment.

타원의 x 축, y 축을 설계 변수로 설정하여 다리의 작업 공간 내의 다양한 종류의 원을 추종할 수 있는 z 축 높이 세 구간을 결정하였다. 선정된 설계변수의 값은 표 3과 같으며, 특정 궤적에서 로봇의 무게중심이 앞뒤로 치우쳐져 넘어지고, 바퀴의 각도 변화가 거의 없어 전진하지 못하는 경우와 같이 주행에 실패하는 경우를 제외하고 총 236번의 실험을 진행하였다. 로봇은 모든 궤적은 3번 추종하도록 설정하였으며,

시작부터 10초 구간 사이에서 측정된 전류와 거리 데이터를 실험 결과로 사용하였다.

2. 실험 결과 분석

실험 결과는 로봇의 높이, x 축, y 축인 3개의 설계변수에 대해 운송 비용(CoT, Cost of Transport), 이동거리, 평균 전력 소비량을 기능변수로 하여 그림 7(a)와 같이 수준평균 분석 방법으로 변수 별 민감도를 1차로 분석하였다. 여기서 CoT란

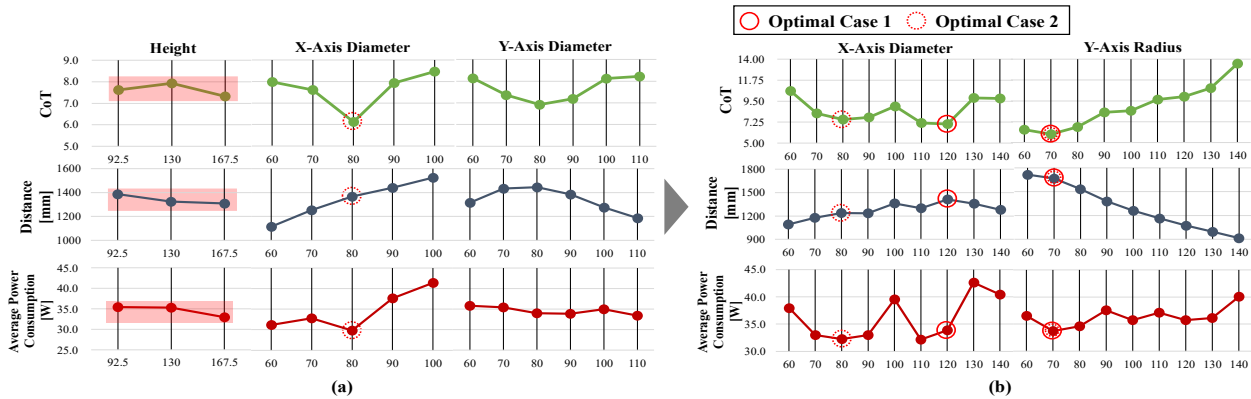


그림 7. (a) 3변수(높이, x 축 직경, y 축 직경) 실험 결과 변수별 민감도 그래프.

(b) 높이를 92.5mm로 고정한 2변수(x 축 직경, y 축 직경) 실험 결과 변수 별 민감도 그래프.

Fig. 7. (a) Sensitivity graph for the 3-variable experiment (height, x-axis diameter, y-axis diameter).

(b) Sensitivity graph for the 2-variable experiment (height, x-axis diameter, y-axis diameter) when the height is fixed to 92.5mm.

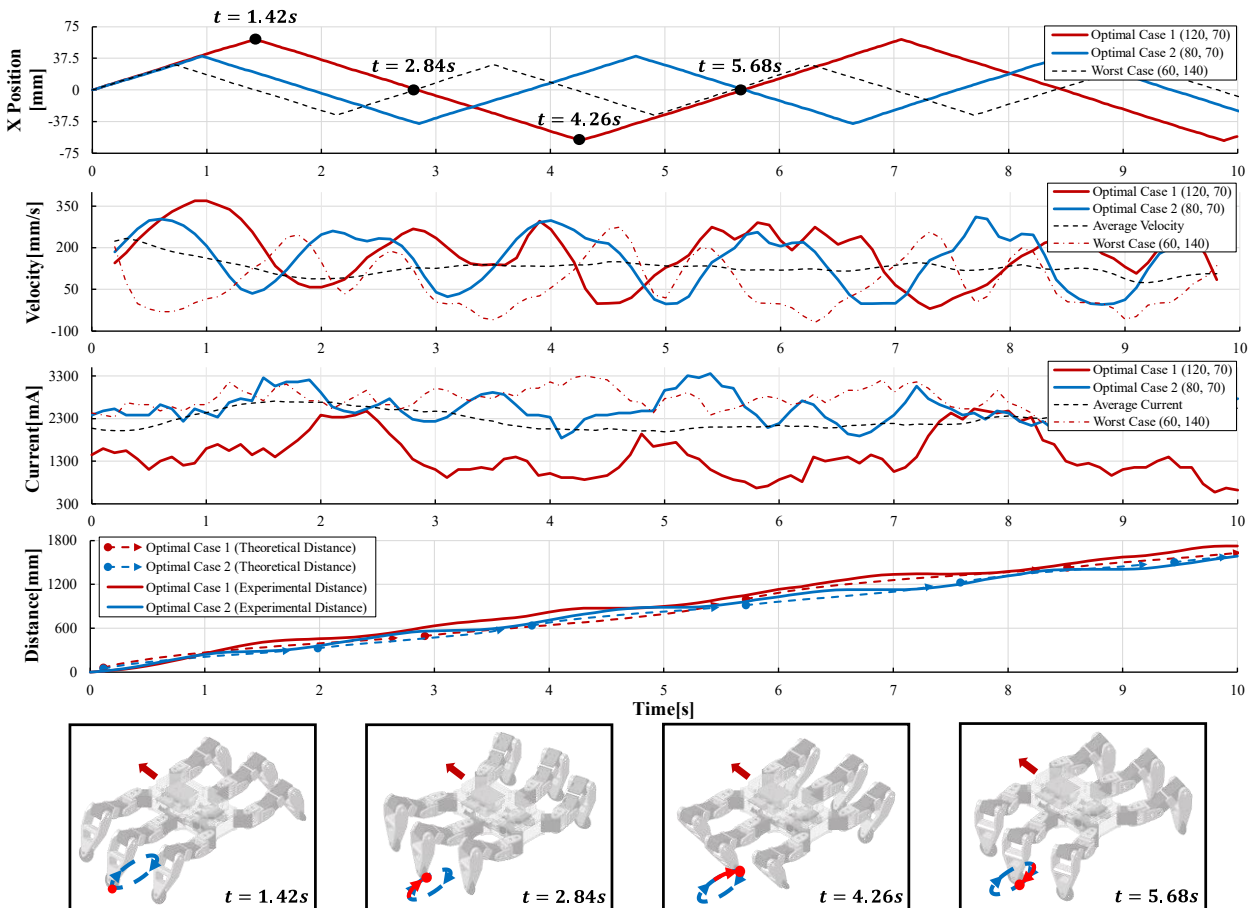


그림 8. 실험 결과 및 구간별 로봇 모습(로봇의 모습은 optimal case 1 기준).

Fig. 8. Experimental results and robot configurations by section (Robot configurations are based on optimal case 1).

식 (17)과 같이 평균 전력 소모량(\bar{P})을 로봇의 무게 (m), 중력가속도($g = 9.81m/s^2$), 평균 속도(\bar{v})로 구한 값으로 로봇의 전반적인 주행 성능을 평가하는 기능변수로 활용하였다[21,22].

$$CoT = \frac{\bar{P}}{m \cdot g \cdot \bar{v}} \quad (17)$$

로봇 다리의 구동 영역은 로봇의 높이에 의해 결정되며, 일부 궤적의 장축의 경우 작업 영역 밖에 존재하거나, 모터의 제한된 토크로 인해 x 축과 y 축의 궤적에 제한을 두고 분석하였다.

그림 7(a)에서 볼 수 있듯이 1차 분석의 최적 변수 조합은 높이 167.5mm, x 축 80mm, y 축 80mm인 정원을 그리는 궤적이다. 하지만, 높이 변수에 의해 다양한 궤적을 분석하기 어려웠던 점과, x 축 직경이 늘어남에 따라 증가하는 주행 거리, 로봇의 높이에 대한 3개의 기능변수 모두 낮은 민감도를 확인할 수 있기 때문에 x, y 축의 직경을 늘려 더 많은 궤적을 비교하는 방향으로 2차 분석을 수행하였다.

2차 분석은 다수의 궤적을 구현할 수 있는 높이인 92.5mm로 제한한 후 x, y 축 모두 60mm~140mm까지 변경하여 수행하였으며 그 결과는 그림 7(b)와 같다. 분석한 결과, x 축 120mm, y 축 70mm인 궤적을 추종하였을 때 CoT가 낮게 나타남을 확인하였다. 2차 분석은 로봇이 구동할 수 있는 대부분의 궤적 데이터 기반으로 수행되었기 때문에 도출된 최적 조합은 전역 최적해(global optimum)라고 볼 수 있으며, 1차 분석 결과는 국소 최적해(local optimum)라고 볼 수 있다.

2차 분석으로 도출된 전역 최적해인 (120, 70)을 optimal case 1, 비교 대상으로 (80, 70)을 optimal case 2로 하여 그림 8과 같이 로봇의 높이 92.5mm에 대해 optimal case 1, 2의 실험 결과를 타원 궤적의 x 좌표에 따라 전체 분석 데이터의 이동속도, 전력 소모량과 비교하고 그에 따른 이동거리를 나타내었다. 두 가지의 변수 조합에서 이동속도는 평균보다 높은 성능을 보였고, 특히 전력 소모량은 최적해 조합에서 평균보다 전 범위에서 낮은 것을 기록하여 가장 높은 주행 효율을 가지는 것을 확인할 수 있다.

그림 8의 거리 그래프는 로봇이 최적 궤적을 따라 주행 시, 10초간 이동거리에 대해 이론적인 분석 값과 실험값을 나타낸 것이다. 이론 값과 실험 값의 오차는 optimal case 1에서 5.5%, optimal case 2에서 3.9% 이며 이때의 타원 궤적에서의 특이 영역은 20~30%로 추정된다.

특이 영역에서의 특성은 로봇이 최적 궤적(optimal case 1)을 따라 주행 시, 궤적의 x 축 양 끝 쪽에 존재하는 특이 영역인 $t = 1.42s$, $t = 4.26s$ 을 지날 때 낮은 속도와 높은 전력 소모량이 측정됨으로 확인할 수 있다. 낮은 속도가 기록된 원인으로는 특이 영역에서 휠과 로봇의 진행 방향은 일치하게 되어 다음 동작 시 큰 마찰력이 발생하게 되어 추진력을 상실하게 되는 것으로 볼 수 있다. 이처럼 특이 영역에서의 휠의 구동 방향은 높은 마찰력이 존재하는 휠의 종방향으로 미끄러지는 것으로 예상되며, 이때 로봇은 휠의 종방향의 마찰력을 이겨내면서 궤적을 추종해야 하기 때문에 높은 토크와 전력이 요구된다. 특이 영역 외의 타원의 구간 $t = 2.84s$, $t = 5.68s$ 에서 최적 궤적을 추종하는 로봇은

표 4. 6족 이동 로봇의 CoT.

Table 4. Cost of transport (CoT) of 6-legged robots.

Robot	Mass [kg]	Speed [m/s]	CoT
HAntR [20]	2.9	0.43	1.5
Weaver [21]	7	0.16	1.5-1.8
AntBot [22]	2.3	0.90	6.2
EduBot [23]	3.3	2.5	0.5-1.6
Ours (Tripod gate)	2.6	0.13	12.6
Ours (Elliptical drive)	2.6	0.37	3.9

평균 속도보다 100mm/s 빠르게 주행하는 것으로 확인되었으며, 이는 장착된 휠의 방향대로 로봇이 주행하고 있어 마찰력이 최소화되고 동시에 관절에 부하가 적은 자세를 취하고 있어 에너지 효율이 가장 높을 수 있는 것으로 분석된다.

표 4와 같이 optimal case 1에서의 주행 성능을 다른 다족 보행 로봇의 CoT와 비교하였다. 다른 보행 로봇들에 비해 비교적 높은 CoT값을 확인할 수 있으나, 본 연구의 활용된 로봇의 tripod gate 보행 방식의 CoT보다 67% 감소함을 확인할 수 있으며, 가장 좋지 않은 변수 조합(60, 140)의 CoT 값인 16.3보다 76% 감소하였다.

V. 결론

본 연구에서는 패시브 휠이 장착된 6족 로봇의 효율적인 주행을 위한 타원 궤적의 최적 변수를 실험을 통해 도출하였으며 그 결과를 분석하였다. 정기구학과 역기구학 해석을 통해 개발된 로봇의 목표 궤적을 추종할 수 있도록 하였으며, 이를 기반으로 타원 궤적과 로봇의 주행 속도에 대한 관계를 분석하였다. 로봇의 높이, 타원의 x 축 직경과 y 축 직경을 설계 변수로 선정하여 다양한 궤적에서 주행 성능을 로봇의 CoT, 속도, 소모전력을 기능변수로 분석하였다. 1, 2차 분석을 통해 6족 로봇의 최적 타원 궤적의 변수 조합은 높이 92.5mm, x 축 120mm, y 축 70mm으로 도출되었다. 최적 궤적 경로를 추종할 때의 데이터를 바탕으로 CoT를 도출하여 타 로봇과 주행 성능을 비교하였고, 로봇의 자세 및 특이 영역을 중심으로 분석하였다. 후속 연구로 경사면에서도 효과적으로 구동할 수 있는 최적 궤적 탐색, 주행 및 보행을 위한 브레이크 메커니즘 설계, 동적 주행 및 관련 궤적을 탐색할 계획이다.

REFERENCES

- [1] J. Shin, J. Lim, and D. Shin, "Stair overcoming robot using splitting wheel," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 30, no. 3, pp. 219-225, 2024. doi: 10.5302/J.ICROS.2024.23.0207
- [2] T. Seo, S. Ryu, J. H. Won, Y. Kim, and H. S. Kim, "Stair-climbing robots: A review on mechanism, sensing, and performance evaluation," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 60539-60561, 2023. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3286871
- [3] S. Kim, M. Kim, K. Choi, D. Shin, "Radius-increasing expanding wheel for rough terrain robots," *Journal of Institute of*

- Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 30, no. 3, pp. 234-240, 2024.
doi: 10.5302/J.ICROS.2024.24.0001
- [4] Y. Zhao, J. Wang, G. Cao, Y. Yuan, X. Yao, and L. Qi, "Intelligent control of multilegged robot smooth motion: a review," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 86645-86685, 2023.
- [5] J. He and F. Gao, "Mechanism, actuation, perception, and control of highly dynamic multilegged robots: A review," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 33, no. 79, pp. 1-30, 2020.
doi: <https://doi.org/10.1186/s10033-020-00485-9>
- [6] Y. Cho and B. Cho, "Hybrid control of wheeled quadruped robot for enhanced mobility and efficiency in diverse terrains," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 30, no. 8, pp. 863-870, 2024.
doi: 10.5302/J.ICROS.2024.24.0055
- [7] J. Coelho, F. Ribeiro, B. Dias, G. Lopes, and P. Flores, "Trends in the control of hexapod robots: a survey," *Robotics 2021*, vol. 10, 100, 2021.
doi: <https://doi.org/10.3390/robotics10030100>
- [8] M. Kamedula, N. Kashiri, and N. G. Tsagarakis, "On the kinematics of wheeled motion control of a hybrid wheeled-legged centauro robot," *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2426-2433, 2018.
- [9] J. A. Smith, I. Sharf, and M. Trentini, "PAW: a hybrid wheeled-leg robot," *Proc. 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4043-4048, 2006.
- [10] X. Ding, K. Li, and K. Xu, "Dynamics and wheel's slip ratio of a wheel-legged robot in wheeled motion considering the change of height," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 25, no. 5, pp. 1060-1067, 2012.
doi: <https://doi.org/10.3901/CJME.2012.05.1060>
- [11] N. Hiraoka, J. Tatsuno, and K. Inagaki, "Omnidirectional motion planning for a leg-wheeled robot with reduced DOF and using passive wheels," *2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, pp. 1-6, 2016.
- [12] G. Endo and S. Hirose, "Study on roller-walker—multi-mode steering control and self-contained locomotion—," *Journal of the Robotics Society of Japan*, vol. 18, no. 8, pp. 1159-1165, 2000.
doi: <https://doi.org/10.7210/jrsj.18.1159>
- [13] G. Endo and S. Hirose, "Study on Roller-Walker—System Integration and Basic Experiments—," *Journal of the Robotics Society of Japan*, vol. 18, no. 2, pp. 270-277, 2000.
doi: <https://doi.org/10.7210/jrsj.18.270>
- [14] G. Bellegarda, K. van Teeffelen, and K. Byl, "Design and evaluation of skating motions for a dexterous quadruped," *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1703-1709, 2018.
- [15] G. Bellegarda, K. van Teeffelen, and K. Byl, "Trajectory optimization for a wheel-legged system for dynamic maneuvers that allow for wheel slip," *2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control*, pp. 7776-7781, 2019.
- [16] J. Baek, J. Lee, T. Kim, and S. Yoo, "Optimal path planning for a 6-legged wheel mobile robot for skating," *Proc. of 2024 39th ICROS Annual Conference (ICROS 2024)*, 2024.
- [17] G. Endo and S. Hirose, "Study on roller-walker-energy efficiency of roller-walk," *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5050-5055, 2011.
- [18] Y. Zhai, P. Gao, Y. Sun, S. Zhao, Z. Jiang, B. Li, Y. Hu, and J. Zhang, "Gait planning for a multi-motion mode wheel-legged hexapod robot," *2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 449-454, 2016.
- [19] J. Chen, K. Xu, and X. Ding, "Roller-skating of mammalian quadrupedal robot with passive wheels inspired by human," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 26, no. 3, pp. 1624-1634, 2020.
doi: 10.1109/TMECH.2020.3025942
- [20] P. Čížek, M. Zoula, and J. Faigl, "Design, construction, and rough-terrain locomotion control of novel hexapod walking robot with four degrees of freedom per leg," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 17866-17881, 2021.
doi: 10.1109/ACCESS.2021.3053492
- [21] M. Bjelonic, N. Kottege, and P. Beckerle, "Proprioceptive control of an over-actuated hexapod robot in unstructured terrain," *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016.
doi: 10.1109/IROS.2016.7759321
- [22] J. Dupeyroux, J. R. Serres, and S. Viollet, "AntBot: A six-legged walking robot able to home like desert ants in outdoor environments," *Science Robotics*, vol. 4, 2019.
doi: 10.1126/scirobotics.aau0307
- [23] K. C. Galloway, J. E. Clark, M. Yim, and D. E. Koditschek, "Experimental investigations into the role of passive variable compliant legs for dynamic robotic locomotion," *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011.
doi: 10.1109/ICRA.2011.5979941



백준기

2024년 계명대학교 로봇공학과(공학사).
2024년~현재 계명대학교 대학원 로봇시
스템공학과 석사과정 재학 중. 관심분
야는 로봇 설계, 기구 해석, 보행 로봇.



이정현

2024년 계명대학교 로봇공학과(공학사).
2024년~현재 계명대학교 대학원 로봇시
스템공학과 석사과정 재학 중. 관심분
야는 로봇 메커니즘 설계, 기구 해석.



유성근

2014년 서울대학교 기계항공공학부(공
학사), 디자인학부(미술학사). 2020년 서
울대학교 기계항공공학부(공학박사). 2020
년~2021년 삼성전자 생산기술연구소
책임연구원. 2021년~현재 계명대학교 로
봇공학과 조교수. 관심분야는 로봇 기
구부, 스마트 테스트베드, 메커니즘 설계 및 최적화.