

레그드-휠 기반 4족 지능 로봇의 보행 시뮬레이션과 구동 토크 분석

김찬희¹, 박태영¹, 권성진¹, 김환희¹, 김상훈¹

¹한경국립대학교 ICT로봇공학과

kimsh@hknu.ac.kr

Gait Simulation and Joint Torque Analysis for the Design of a Quadruped Legged-Wheel Robot

Chan-Hui Kim¹ Tae-Young Park¹ Seong-Jin Gwon¹ Hwan-Hee Kim¹
Sang-Hun Kim¹

¹Department of ICT&Robot Engineering, Hankyong National University

요 약

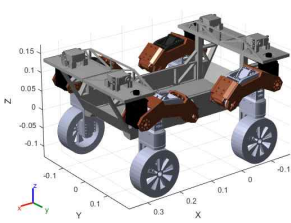
평지와 비평탄 지형에 모두 적응 가능한 Legged-Wheel 로봇을 제안하고, 로봇의 대표적인 보행 방법인 크롤 보행(crawl gait)을 MATLAB/Simulink 환경에서 시뮬레이션 하기 위해, 물리환경에서 목표하는 보행과 일치하도록 변수들을 설정하고 보행을 검증하였으며, 물리환경에서의 정상 보행에 필요한 최적의 다리 관절 토크량을 분석하여 구동기에 필요한 사양들을 도출하고 실제 제작에 반영하였다

1. 서론

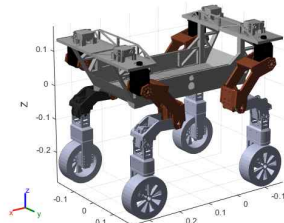
최근 로봇 시장은 자동화를 넘어 자율화로 나아가고 있다. 특히 물류·감시·재난·구조 분야에서는 바퀴형 로봇의 지형 제약을 극복할 대안이 요구된다. 이러한 배경에서 사족 보행 로봇은 험지와 비평탄 지형에 대한 높은 적응성을 바탕으로 핵심 연구 분야로 자리 잡았다[1]. 본 논문에서는 평지에서 주행이 가능하고 비평탄지형에서 보행이 가능한 레그드-휠(legged-wheel) 기반 사족 로봇의 하드웨어를 설계하고, 보행 시뮬레이션을 통해 관절별 최적의 모터 요구 토크를 도출하여 로봇 설계에 반영한다.

2. 로봇의 설계 사양

설계된 Legged-Wheel 하이브리드 로봇의 전체 외형 치수는 길이 550mm, 너비 350mm, 높이 302mm(Wheel-Mode)(그림 1), 554mm(Leg-Mode)(그림 2)이며, 총 중량은 약 7kg이다. 지면과 로봇간의



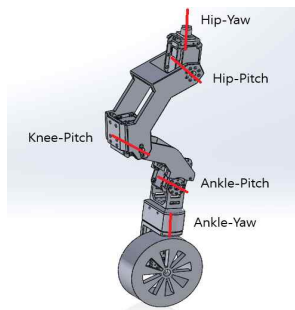
(그림 1) Wheel Mode



(그림 2) Leg Mode

최소 이격거리는 Wheel-Mode에서는 로봇의 높이가 약 128mm, Leg-Mode에서는 385mm까지 확장되도록 설계하여 지형 적응성과 장애물 대응 능력을 확보하였다.

본 로봇의 각 다리는 총 6 자유도로 구성되며, 다리 관절의 5 자유도와 바퀴의 구동을 위한 1 자유도로 구성된다. 다리 관절은 y축을 회전축으로 하는 pitch 관절 3개와 z축을 회전축으로 하는 yaw 관절 2개로 구성된다. 관절 배열은 몸체 측에서 발끝 방향으로 Hip-Yaw, Hip-Pitch, Knee-Pitch, Ankle-Pitch, Ankle-Yaw 순으로 배치하여 모드 전환시에 다리를



(그림 3) Leg Mode의 Leg

컴팩트하게 수납·전개할 수 있도록 설계하였다. 좌표계는 (그림 1,2)에 보이는 좌표축을 따른다.

3. 로봇 설계

본 로봇의 외형은 SolidWorks(2023)를 이용하여

설계하였다. 로봇의 기본적인 외형은 현대 자동차의 Tiger를 참고하였다.[2]

4. 실험 및 분석

(1) 시뮬레이션 조건

설계된 로봇 기반으로 MATLAB/Simulink(URDF 연동)에서 모드 전환(Wheel → Leg)과 정적 보행 시뮬레이션을 수행하였다. 보행은 세 다리가 항상 지면을 지지하여 정적 안정성을 유지하는 크롤 보행(crawl gait) 방식을 사용하였다.[3] 특히, 지면과 접촉하는 발의 재질을 고무 타이어로 가정하고 물리적으로 타당한 지면 반력을 모사하기 위해 스프링-댐퍼 기반의 유연 접촉 모델을 적용하였다. 접촉 파라미터는 강성(Stiffness) $3 \times 10^3 \text{ N/m}$, 감쇠(Damping) 50 N/(m/s) 로 설정하여, 충격 시 발생하는 토크 스파이크를 완화하고 안정적인 동역학 해석이 가능하도록 하였다.[4] 시뮬레이션에서는 Hip-Pitch, Knee-Pitch, Ankle-Pitch 관절만 구동하여 평면 보행을 구현했으며 Hip-Yaw, Ankle-Yaw는 고정하였다. 보행 순서는 <표 1> 1.3초 이후와 같으며 스윙 전 무게중심이 지지다각형 내부에 위치하도록 하였다. 본 패턴에서 전진 속도는 0.015 m/s 이며 저속 정적 보행 조건에서 관절별 토크 응답을 관찰하였다.

시간(s)	동작
0.0 - 0.5	초기 안정화
0.5 - 2.0	모드 변경(Wheel→ Leg)
2.0 - 3.0	무게중심(CoM) 이동
3.0 - 5.0	FR (스윙)
5.0 - 7.0	RL (스윙)
7.0 - 8.0	몸통 횡 이동
8.0 - 9.0	무게중심(CoM) 이동
9.0 - 11.0	FL (스윙)
11.0 - 13.0	RR (스윙)

<표 1> 시뮬레이션 단계별 동작 순서

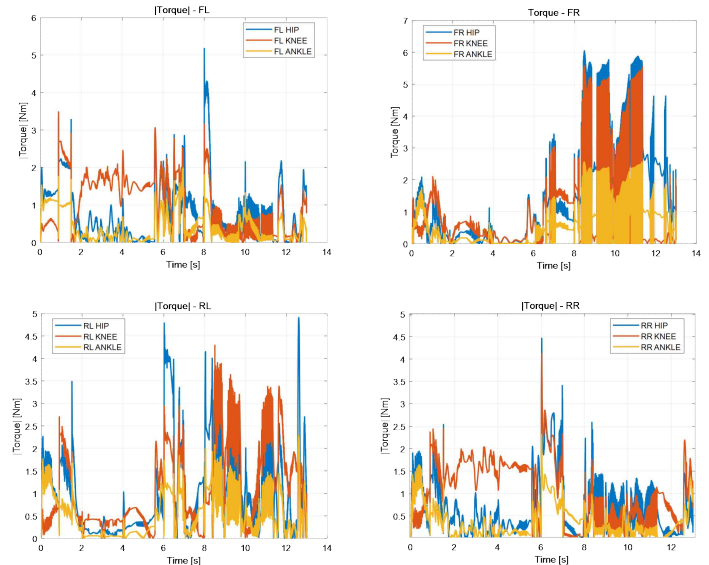
(2) 시뮬레이션 결과 및 토크 분석

시뮬레이션 결과 (그림 4) Hip-Pitch 최대 토크 $6.05 \text{ N}\cdot\text{m}$, Knee-Pitch 최대 토크는 $5.58 \text{ N}\cdot\text{m}$, Ankle-Pitch 최대 토크는 $2.77 \text{ N}\cdot\text{m}$ 이 나온다. 설계의 신뢰도를 높이기 위해 안전계수 1.3을 적용하여 산출된 구동기 요구 사양은 <표 2>와 같다. 설계된 로봇의 보행 시뮬레이션은 모드 전환과 정적 보행으로 구성되며, 일련의 과정은 <표 1>와 같다. 토크 값의 크기를 강조하기 위해 출력 토크 값의 절댓값을 취하여 그래프를 도출하였다.

5. 결론

Legged-Wheel 로봇을 설계하고, 시뮬레이션을 통

해 정적 보행에 필요한 관절별 구동기 토크 사양을



(그림 4) 시뮬레이션 토크 응답 그래프

Joint	Peak Torque	요구 사양
Hip-Pitch	$6.05 \text{ N}\cdot\text{m}$	$7.87 \text{ N}\cdot\text{m}$
Knee-Pitch	$5.58 \text{ N}\cdot\text{m}$	$7.25 \text{ N}\cdot\text{m}$
Ankle-Pitch	$2.77 \text{ N}\cdot\text{m}$	$3.60 \text{ N}\cdot\text{m}$

<표 2> 시뮬레이션 결과에 따른 구동기 요구 사양

도출하였다. MATLAB/Simulink 환경에서 크롤 보행을 구현하였으며, 스프링-댐퍼 기반의 유연 접촉 모델을 적용하여 물리적으로 타당한 해석 결과를 확보하였다. 시뮬레이션을 통해 도출된 각 관절의 토크 값에 안전계수 1.3을 적용하여 구동기 선정에 필요한 정량적인 요구 사양을 최종적으로 제시하였다. 본 연구의 결과는 실제 로봇 제작 시 구동기 선정을 위한 핵심적인 근거 자료로 활용될 것으로 기대된다.

사사

- 본 연구는 2025년도 ‘한이음 드림업’ 사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌

- [1] Y. Fan, Z. Pei, C. Wang, et al., "A Review of Quadruped Robots: Structure, Control, and Autonomous Motion," Adv. Intelligent Systems, 2024.
- [2] 조상협. "현대차그룹, 걸어다니는 무인 모빌리티 '타이거(TIGER)' 공개," 로봇신문, 2021-02-10, <https://www.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=23895>
- [3] Kurazume, R., Yoneda, K., and Hirose, S., "Feedforward and Feedback Dynamic Trot Gait Control for Quadruped Walking Vehicle," Autonomous Robots, Vol. 12, No. 2, pp. 157-172, 2002.
- [4] Marhefka, D. W., & Orin, D. E. (1999). A compliant contact model with damping for realistic robotic simulations. In Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation.
- [5] 정슬, 『로봇공학(제5판)』, 교문사(청문각), 2019