

가볍고 견고한 이족 보행 로봇 메커니즘 설계

Design of a Lightweight and Robust Bipedal Robot Mechanism

○김 현 주¹, 이 재 홍¹, 이 중 환¹, Troung Dat Thanh¹, 이 현 용², 최 혁 렬^{2*}

¹⁾ 성균관대학교 지능형로봇학과 (TEL: 010-8533-5541; E-mail: fgfg0203@g.skku.edu)

²⁾ 성균관대학교 기계공학과 (TEL: 010-2323-0226; E-mail: blrag@skku.edu)

Abstract This paper presents the design and development of a 10-DOF bipedal robot with a focus on achieving lightweight and robust construction suitable for stable and natural walking in various terrains. Conventional humanoid designs that attach actuators directly to the joints tend to increase leg weight and limit control effectiveness, necessitating additional sensors and increasing system complexity. To address these issues, we implemented a Quasi-Direct Drive(QDD) actuator system, positioning the actuators closer to the torso to minimize leg weight and inertia. Power is efficiently transmitted through a timing belt mechanism for the knee and a 4-bar linkage system for the ankle, enhancing the robot's energy efficiency and impact resistance. Simulation results demonstrate that the robot's joints maintain stability within designed torque limits during walking. Future work will involve validating the robot's performance in real-world settings and adding an upper body to complete the humanoid platform.

Keywords Humanoid Robots, Bipedal Robots, Quasi-Direct Drive, Mechanism, Hardware Design

1. 서 론

휴머노이드 로봇의 보행 안정성과 제어 효율성 확보는, 인간 환경에서의 실질적 활용을 위한 핵심 요건이다. 특히 보행을 담당하는 하체 구조의 설계는 전체 시스템 성능에 직접적인 영향을 미치며, 최근에는 실제 보행 시의 제어 응답성과 에너지 효율을 동시에 만족시키는 경량화 중심의 구조 설계가 중요한 연구 주제로 부각되고 있다. [1]

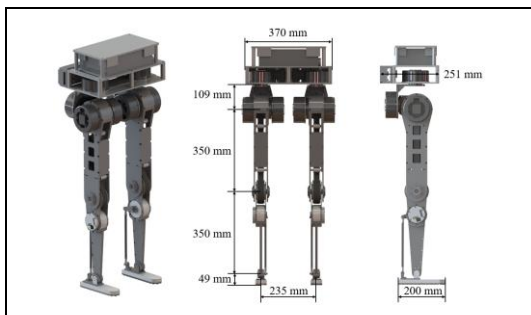


그림 1. 10-DOF 이족 보행 로봇의 설계와 크기

이에 본 연구에서는 Quasi-Direct Drive 기반의 구동기를 몸체 가까이 배치함으로써, 하체 하단의 관성과 질량을 효과적으로 저감하고, 제어 응답성과 경량화를 동시에 확보한 이족 보행 로봇의 하체 구조를 그림 1과 같이 개발하였다. [2]

2. 하드웨어 설계

2.1 다리 구조

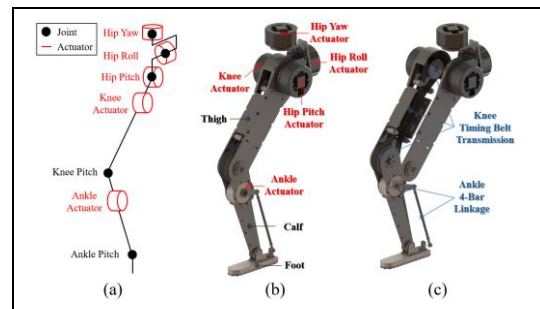


그림 2. 다리의 구조와 동력 전달 요소

성인에게 맞춰진 일반적인 환경에서 사용되는 것을 목적으로 상체까지 설계되었을 때 약 160 cm 정도가 되도록 그림 1과 같이 다리 한쪽의 길이를 약 0.9 m로 설계하였다. 또한, 그림 2의 (a)와 같이 한 다리의 관절 개수는 고관절(Hip) Yaw, Roll, Pitch로 3-DOF, 무릎(Knee)과 발목(Ankle) Pitch로 각 1-DOF로 총 5-DOF로 구성하였다. 다리의 무게와 관성을 최소화하기 위해 그림 2의 (b)와 같이 다리 무게에서 대부분을 차지하는 구동기의 배치를 가능한 몸통 쪽에 위치시켰다. 고관절과 무릎을 움직이는 4개의 구동기를 허벅지 상단에 위치시켰으며, 발목 구동기는 무릎 관절 바로 하단에 위치시켰다.

2.2 Quasi-Direct Drive (QDD) 구동기와 동력 전달 요소

QDD 구동기는 감속기로 인한 관성과 오차가 적고, 높은 전달성을 바탕으로 제어 응답성과 정밀도가 우수하다는 장점을 지닌다. 본 연구에서는 1단 유성기어를 사용하여 기어비 10:1, 최대 토크 120 Nm의 QDD 구동기를 제작하였으며, 발목 관절에는 상대적으로 토크 요구량이 적다는 점을 고려하여 경량화된 구동기를 별도로 제작하여 사용하였다.

무릎과 발목의 구동기는 관절부가 아닌 몸통에 가까운 위치에 배치되므로, 동력 전달을 위한 기구가 필수적이다. 특히 무릎 관절에는 높은 토크가 요구되므로, 타이밍 벨트를 사용하여 기어비를 1.5배 증가시켰으며, 벨트 장력 유지를 위해 상단 고정형 2개, 하단 조절형 2개의 텐서너를 구성하였다. 발목 관절은 큰 토크가 걸리지는 않지만 지면 반력을 가장 먼저 받는 구조적 특성상 충격 저항이 중요하므로, 4-bar 링크 메커니즘을 적용하여 1:1 비율의 안정적인 동력 전달 구조를 구현하였다.

3. 설계 및 실험 결과

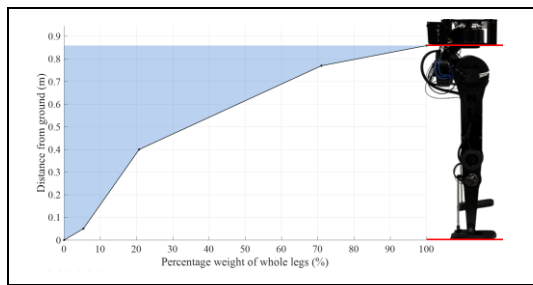


그림 3. 로봇의 높이에 대한 무게 분포

몸통 무게를 포함하여 총 33kg, 약 1.1m의 로봇으로 설계되었고, 실제 가공한 한 다리의 무게가 9.5 kg으로 측정되었다. 그림 3과 같이 지면으로 내려갈수록 다리 전체 무게가 감소한다. 각 관절의 허용 토크 값과 가동범위는 표 1과 같고 사람의 가동범위와 비교해보았을 때 모든 관절이 사람의 가동범위를 충분히 충족하는 범위로 설계되었다.

표 1. 관절의 제한

| 관절 이름 | 최대 허용 토크 (Nm) | 가동 범위 [최소, 최대] (deg) |
|-------------|---------------|----------------------|
| Hip Yaw | 120 | [-80, 80] |
| Hip Roll | 120 | [-35, 30] |
| Hip Pitch | 120 | [-120, 10] |
| Knee Pitch | 180 | [-120, 120] |
| Ankle Pitch | 24.8 | [-45, 45] |

최종 로봇 모델의 URDF를 제작하여 Gazebo 시뮬레이션을 통해 그림 4와 같이 각 관절에 걸리는 토크 값을 산출하였으며 Model-Based Control과 Whole-Body Control을 이용해 0.4 m/sec의 속도로 보행했을 때의 값이다. 무릎에 약 99 Nm로 가장 많은 토크가 걸리지만 설계된 관절에서 충분히 버틸 수 있는 토크 값이라고 할 수 있다.

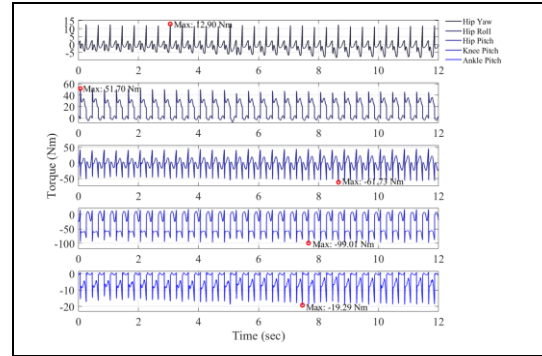


그림 4. 각 관절의 토크 값 (0.4 m/sec 로 보행 시)

4. 결론

본 연구에서는 사람과 유사한 자연스럽고 안정적인 보행을 위해 10-DOF 이족 보행 로봇 플랫폼을 설계하였다. 기존 연구에서 사용되던 구동기와 달리 QDD 구동기를 몸통과 가깝게 배치시켜 다리의 무게와 관성을 최소화하였다. 이로 인해 동력 전달 요소로 타이밍 벨트와 4-Bar 링크 시스템을 활용하였고 토크 이득과 함께 충격에 대한 견고함을 확보하였다. 시뮬레이션 결과에 따르면 관절의 토크 범위 내에서 안정적인 보행이 이루어짐을 확인하였다. 향후 연구에서는 실제 로봇에 대한 보행 성능을 검증하고 상체를 추가해 휴머노이드 로봇 플랫폼을 완성할 계획이다.

참고문헌

- [1] A. SaLoutos, E. Stanger-Jones, Y. Ding, M. Chignoli and S. Kim, "Design and Development of the MIT Humanoid: A Dynamic and Robust Research Platform," 2023 IEEE-RAS 22nd International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), Austin, TX, USA, pp. 1-8, 2023.
- [2] J. Li and Q. Nguyen, "Force-and-moment-based Model Predictive Control for Achieving Highly Dynamic Locomotion on Bipedal Robots," 2021 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Austin, TX, USA, pp. 1024-1030, 2021.