

이족 보행 로봇의 보행 성능 개선을 위한 탄성 구조 기반 발 설계

Elastic Structure-Based Foot Design for Improving Walking Performance of Bipedal Robots

○이 재 홍¹, 김 현 주¹, 이 중 환¹, Dat Thanh Truong¹, 이 현 용², 최 혁 렬^{2*}

¹⁾ 성균관대학교 지능형로봇학과 (TEL: 010-7113-2334; E-mail: ljh0649@g.skku.edu)

²⁾ 성균관대학교 기계공학과 (TEL: 031-290-7449; E-mail: choihyoukryeol@gmail.com)

Abstract This study introduces an innovative elastic foot design for bipedal humanoid robots, aiming to enhance walking stability and energy efficiency. Inspired by the arch structure of a human foot, the proposed mechanism leverages a compliant contact approach to absorb ground impact and reduce power consumption during locomotion. Through simulations conducted in Isaac Sim, we compared our elastic foot structure with a conventional rigid foot. The results indicate that the newly designed foot significantly decreases torque demands in the knee and ankle joints, leading to improved energy efficiency. Moreover, the lower variation in torque values demonstrates robust walking performance across varying conditions. By aligning with human-like gait dynamics, this elastic foot design has the potential to adapt effectively to various terrains, offering a more human-like walking pattern. Consequently, these findings suggest a promising pathway to advance real-world humanoid robotics in both performance and reliability.

Keywords Humanoid robot, Elastic foot structure, Walking stability, Bipedal locomotion, Energy efficiency

1. 서론

이족 보행 로봇의 보행 안정성과 에너지 효율성은 발의 구조적 설계에 크게 의존한다. 로봇이 사람과 유사한 이족보행을 수행하려면 균형을 유지하면서 효율적으로 이동할 수 있는 발 구조가 필수적이다. 사족보행 로봇의 경우 네 다리가 지면에 닿아 자연적으로 높은 안정성을 확보할 수 있지만, 이족보행 로봇은 두 다리만을 이용해 균형을 잡아야 하기 때문에 구조적 설계에 대한 요구가 더욱 까다롭다. 특히, 다양한 지면 조건과 보행 속도에 따라 발이 지면과 상호작용하는 방식은 로봇의 전체 보행 성능에 중요한 영향을 미친다.

현재 많은 이족보행 로봇의 발 구조는 강성 재료로 이루어져 있으며, 이는 지면 충격을 직접적으로 흡수해야 하기 때문에 로봇의 전체적인 에너지 소비를 증가시키는 요인으로 작용한다. 이에 본 연구에서는 사람의 발 형상[1], [2]을 모티브로 한 탄성 구조를 로봇의 발에 적용하여 보행 중 발생하는 충격을 효율적으로 흡수하고, 에너지 소비를 줄이며, 지면 적응력을 향상시키고자 한다[4]. 이러한 구조적 개선은 다양한 지형에서 로봇이 보다 안정적이고 인간과 유사한 보행을 수행할 수 있도록

돕는다. 이는 로봇이 다양한 지형에서 적응적으로 움직일 수 있는 가능성을 열어주며, 보다 인간과 유사한 보행을 구현하는 데 기여할 수 있다.

본 연구는 Isaac Sim을 활용하여 기존의 강성 발 구조와 제안하는 탄성 발 구조 간의 보행 성능을 비교하고, 탄성 발 구조가 적용된 이족 보행 로봇이 보행 중 안정성 및 에너지 효율에서 어떠한 장점을 가지는지 실증적으로 분석한다. 연구 결과는 이족 보행 로봇의 발 설계 개선을 통해 로봇의 실제 환경 적응성을 높이고, 궁극적으로 인간-로봇 상호작용에서의 안정성과 효율성을 강화하는 데 기여할 것으로 기대된다.

2. 이족 보행 로봇 발 설계

[그림 1]은 이족 보행 로봇 플랫폼에 사용하고자 하는 발의 구조 사진이다. 사람의 발에서 보행에 가장 중요한 역할을 하는 아치구조와 앞꿈치 및 뒷꿈치를 구현하고자 하였다[3]. 추가적인 구동기 없이 사람의 보행을 따라 할 수 있는 발을 설계하고자 하였고, 지면과 닿을 때, 그리고 발로 지면을 차는 상황 각각 탄성 구조를 통해 효율적인 보행을 가능하게 하고자 하였다.

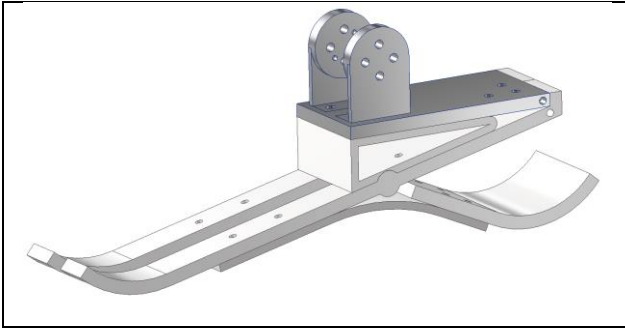


그림 1. 탄성구조를 가진 이족보행 로봇 발

추가적으로 일반적으로 채택되는 보행 방식은 두 발을 지면과 평평하게 하여 교차되는 보행에서도 충격을 흡수하는 효과와 보행의 효율을 높이하고자 하였다.

3. 보행 시뮬레이션 및 결과

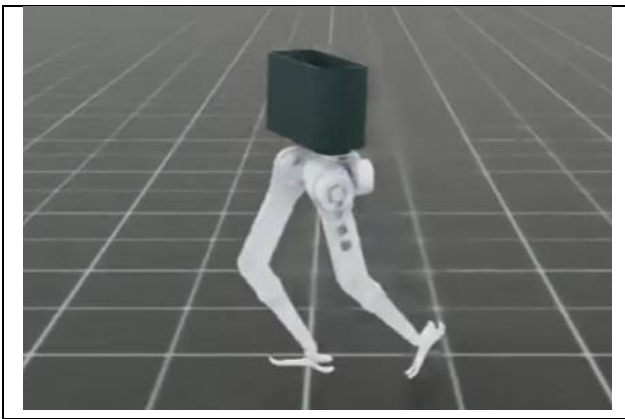


그림 2. Isaac Sim을 활용한 시뮬레이션
설계된 발의 구조가 보행 성능에 얼마나 효과적인지를 실험하기 위해 Isaac Sim을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 발의 탄성구조를 반영하기 위해 Isaac Sim에서 제공하는 compliant contact dynamics[2]을 이용하여 발의 탄성과 변형을 시뮬레이션 환경에 구현하였고, 강화학습 알고리즘을 통해 이족 보행 로봇을 보행시켰다. 비교를 위해 탄성과 변형이 없는 강체의 발로 수행한 결과와 비교를 진행하였다.

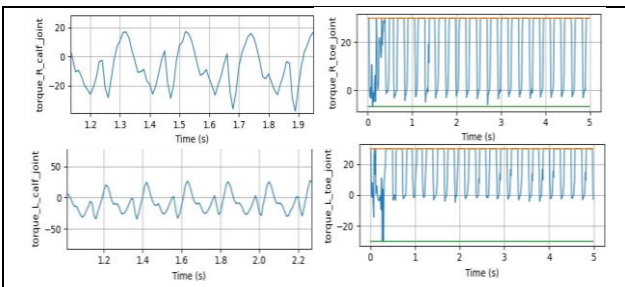


그림 3. 새롭게 설계한 발의 시뮬레이션 결과
같은 학습을 통해 보행한 결과는 [그림 3], [그림. 4]를 통해 확인할 수 있다. 엉덩이에 배치된 3자유도의 구동기에서는 큰 토크 변화가 없지만 무릎과 발목 관절

에 사용되는 토크 값이 줄어든 것을 통해 보행 시 에너지 효율이 증가했다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 값이 불 안정한 정도가 줄어들에 따라 새로 설계한 발을 이용한 발이 더 강인한 보행을 할 수 있다고 판단할 수 있다.

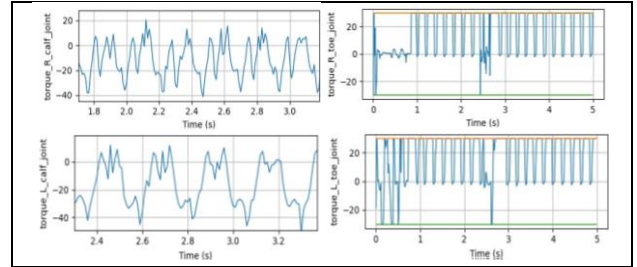


그림 4. 강체의 발의 시뮬레이션 결과

4. 결론

본 연구에서는 이족 보행 플랫폼의 효율적인 보행을 위해 새로이 발을 설계하였다. 시뮬레이션을 통해 이족 보행 로봇을 보행 시 더 효율적으로 걷는 것뿐만 아니라 더 강인한 보행을 할 수 있었다. 이를 통해 실제 로봇이 사용되는 환경에서도 효과적인 보행을 할 수 있을 것으로 판단한다.

참고문헌

- [1] Yamamoto, K. "Human-Like Toe Joint Mechanism." In Humanoid Robotics: A Reference, edited by A. Goswami and P. Vadakkepat, Springer Nature, 2019, pp. 435-454. doi:10.1007/978-94-007-6046-2_82
- [2] Choi, J., Chun, Y., Min, I., Ahn, M. S., and Han, J. "The Study on the Energy Efficiency of the Bipedal-Walking Pattern of a Humanoid Robot Using Four-Bar-Linkage Toe Joints." Proceedings of the 2023 20th International Conference on Ubiquitous Robots (UR), Honolulu, Hawaii, June 25-28, 2023, pp. 108-110. doi:10.1109/UR57808.2023.10202376.
- [3] Burgess, S., Beeston, A., Carr, J., Siempou, K., Simmonds, M., and Zanker, Y. "A Bio-Inspired Arched Foot with Individual Toe Joints and Plantar Fascia." Biomimetics, vol. 8, no. 6, 2023, article 455. doi:10.3390/biomimetics8060455
- [4] C. Yi, X. Chen, Z. Yu, H. Qi, and Q. Huang, "Research and design of a humanoid cushioning foot for robot jumping," Proc. of IEEE-RAS 21st International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), IEEE, pp. 330-336, 2022.