

이족 로봇 다리 관절의 일 특성 고찰

Work Consideration of Leg Joints of Bipedal Robots

김병호†

Byoung-Ho Kim

경성대학교 메카트로닉스공학과 생체모방 및 지능로봇 연구실

Biomimetics & Intelligent Robotics Lab., Dept. of Mechatronics Eng., Kyungsung University

요약

본 논문에서는 이족 보행 로봇을 위한 무릎 및 힙 관절의 일 특성을 분석하고자 한다. 이를 위하여 컴플라이언스 특성의 발을 갖는 이족 로봇 다리 메커니즘을 대상으로 전형적인 보행 패턴을 고려한다. 또한 딱딱한 지면과 접촉하는 로봇 발 공간으로부터 다리 관절 공간으로 전파되는 토오크 특성을 확인하고, 보행에 따라 관절 공간에 누적되는 일 특성을 제시한다. 결과적으로, 이러한 분석이 이족 로봇의 보행에서 발과 지면의 물리적인 접촉에 의한 다리 메커니즘의 피로 정도를 파악하는데 있어서 유용하고, 적절한 신발 착용 등에 의한 로봇 발 공간에서의 컴플라이언스 특성 개선에 활용될 수 있음을 보인다.

키워드 : 이족 보행 로봇, 무릎 및 힙 관절, 일 및 보행 피로

Abstract

This paper analyzes a virtual work of the knee and hip joints of bipedal walking robots. For the purpose, we consider a model of bipedal leg mechanism with a compliant foot and a typical walking pattern. We also check the torque characteristics at the joint space propagated from the space of the foot contacting a flat and stiff surface, and present the works accumulated at the joint space. As a result, it is shown that this analysis is useful for evaluating the fatigue of the leg mechanism by the physical walking contact between the foot and the surface, and it is applicable for improving the compliant characteristics at the foot space by employing a proper footwear.

Key Words: Bipedal walking robots, Knee and hip joints, Work and walking fatigue

1. 서론

그 동안 다양한 관점에서 연구가 많이 진행되어 온 보행 로봇(walking robot) [1]- [3]은 인간의 기능을 모사하기 위한 연구 플랫폼(platform)으로서 중요한 역할을

하고 있다. 이러한 로봇은 인간이 직접 수행하기에는 위험한 작업 영역뿐만 아니라 생산성 향상과 일관된 정밀도가 요구되는 산업시스템을 위한 능동적인 작업자나 보조 시스템 역할, 또는 인간 친화적인 다양한 작업의 수행에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 전망된다. 특히, Boston Dynamics사에서 개발하고 있는 PETMAN [3]의 경우, 광목할 만한 수준의 보행 동작이 가능함을 보여주고 있다.

접수일자 : 2013년 3월 31일

수정일자 : 2013년 4월 7일

완료일자 : 2013년 5월 3일

† Corresponding author

본 논문은 본 학회 2013년도 춘계학술대회에서 선정된 우수 논문입니다. 이 논문은 2013학년도 경성대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

보행 문제와 관련하여 사람의 경우, 오랫동안 보행을 지속하게 되면 전반적인 신체의 피로감을 느낄 수 있는데, 이것은 무릎 관절이나 힙 관절 등의 다리 관절이 보행에 따라 점진적으로 피곤해지는 현상에 의해 기인한다는 사실을 경험적으로 알 수 있다. 물론 이러한 시스템의 피로 현상은 기본적으로 시스템의 구조적인

특성과 보행 운동량에 의해 좌우될 수 있지만, 착용한 신발의 신축적인 특성에 따라 달라질 수 있을 것이다. 이러한 관점에서 두 발과 다리 메커니즘 및 몸체로 구성된 이족 로봇은 장시간 동안 다양한 기능성 신발의 편의성 시험을 위한 장치(test-bed)로써 활용이 기대된다. 이와 관련하여 주어진 어떤 보행 상황에서 로봇 발 공간의 컴플라이언스 특성에 따른 다리 관절 공간에서의 토오크 및 일 특성 관계에 대한 해석이 필요하다.

최근에, 재활의공학 분야에서는 다리 절단 수술을 받은 사람들에게 당연하게만 여겼던 보행의 즐거움을 되찾아 주기 위한 발목-발 보철(ankle-foot prosthesis) 메커니즘에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다 [4]. 이러한 보조 발 메커니즘이 일반적으로 딱딱한 보행 환경에 잘 적응하기 위해서는 적절한 컴플라이언스(compliance) 특성을 갖도록 설계하는 것이 매우 중요하다. 왜냐하면, 직관적으로 이러한 메커니즘의 컴플라이언스 특성은 발목과 다리 관절의 안정적인 동작이나 전체 로봇 시스템의 유연한 동작을 구현하는데 도움을 줄 수 있기 때문이다. 따라서, 로봇 발 메커니즘의 컴플라이언스 특성에 관한 고찰과 보행에 따른 다리 관절의 토오크 특성을 파악하는 것은 보행 로봇의 안정적인 활용의 관점에서 매우 의미가 있다 [5]. 또한 지속적인 보행 발의 접촉력에 따라 누적되는 다리 관절의 피로에 대한 연구는 로봇 시스템의 안정된 보행 뿐만 아니라 효과적인 발 메커니즘 및 다리 시스템 설계 관점 [6]- [8]에서 중요한 의미를 지닌다.

본 논문에서는 인간의 보행에 대한 관찰을 근거로 로봇 다리 메커니즘의 피로와 밀접한 관련이 있는 무릎(knee) 및 힙(hip) 관절의 일(work) 특성을 분석하고자 한다. 이러한 특성을 효과적으로 분석하기 위하여 컴플라이언스 특성의 발을 갖는 이족 로봇 다리 메커니즘을 대상으로 전형적인 보행 패턴을 고려한다. 또한 딱딱한 지면과 접촉하는 로봇 발 공간으로부터 다리 관절 공간으로 전파되는 토오크 특성을 파악하고, 보행에 따라 관절 공간에 누적되는 일 및 이에 따른 시스템적 영향을 고찰한다. 결과적으로, 이러한 분석이 이족 로봇의 보행에서 발과 지면의 물리적인 접촉에 의한 다리 메커니즘의 피로 정도를 파악하는데 있어서 유용하고, 적절한 신발 착용 등에 의한 로봇 발 공간에서의 컴플라이언스 특성 개선에 활용될 수 있음을 보인다.

2. 이족 로봇 다리 관절의 일 특성

본 장에서는 이족 로봇 다리 메커니즘의 무릎 및 힙 관절에 대한 일 특성에 관하여 기술한다. 이를 위하여 그림 1과 같은 이족 보행 모델을 사용하고, 사전 연구 [5]에서 제시된 그림 2와 같은 인간의 발과 이를 기반으로 모델링된 그림 3과 같은 다리 메커니즘을 사용하여 발의 접촉 반발력에 따른 무릎 관절과 힙 관절의 토오크 성분과 일 관계식을 기술한다.

실제로, 그림 1은 몸체(torso)와 두 다리로 구성된 전형적인 이족 보행 메커니즘 모델이며, 그림 3은 인간 발 메커니즘에 내재되어 있는 신축적인 특성 [9]을 간단하게 모방하여 컴플라이언스 특성을 갖도록 한 것이 특징

이다.

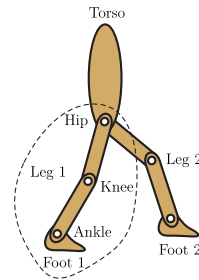


그림 1. 이족 보행 로봇 모델

Fig. 1. A bipedal walking robot model

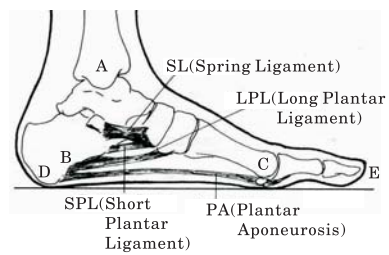
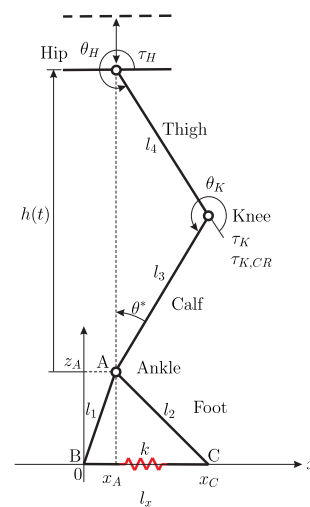
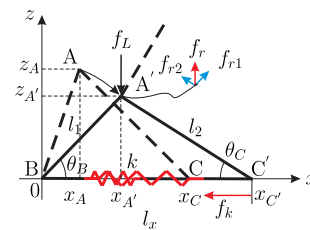


그림 2. 인간의 발에 포함된 컴플라이언스 특성 요소

Fig. 2. Compliant components of human foot



(a) 다리-발 모델



(b) 컴플라이언스 특성을 갖도록 한 발 모델

그림 3. 컴플라이언스 특성의 발을 갖는 이족 로봇의 다리 메커니즘

Fig. 3. A bipedal leg mechanism with a compliant foot

그림 3에서 A 부분은 사람의 발목 관절(ankle joint)을 의미하고, B와 C는 각종의 인대 및 발바닥 힘줄(plantar aponeurosis)의 고정부를 나타내며, D와 E 부분은 각각 뒷꿈치와 발의 앞부분을 나타낸다. 여기서, 스프링 인대(Spring Ligament, SL)는 BAC로 이어지는 종궁(longitudinal arch)을 지지하는데 있어서 중요한 역할을 하고, 단저측 인대(Short Plantar Ligament, SPL)와 장저측 인대(Long Plantar Ligament, LPL)는 골인대판(plate)의 외측에서 종적지지(longitudinal support)를 지원한다. 이러한 두 인대의 역할은 종입방관절(calcaneocuboid joint)을 지원하여 궁(arch)의 처짐을 감지하는 역할을 한다. 또한 발바닥 널힘줄(Plantar Aponeurosis, PA)은 트러스의 균형을 도와주는 이음보(tie-rod) 역할을 한다. 링크(link) l_1 은 그림 2에 나타난 인간의 발 구조에서 A와 B를 연결하는 부분을 나타낸 것이고, l_2 는 A와 C 부분을 하나의 링크로 고려한 것이며, B와 C 부분을 연결하는 하나의 스프링(spring)은 인간의 발에 포함되어 있는 다양한 컴플라이언스 요소들을 단순화시켜 모델링한 것이다 [10].

일반적인 가상의 일 법칙(virtual work principle)에 따르면, 무릎 관절 공간과 힙 관절 공간에서의 일 $w_K(t)$ 와 $w_H(t)$ 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_K(t) = \int_0^t \tau_K^T(t) d\theta_K(t) \quad (1)$$

$$w_H(t) = \int_0^t \tau_H^T(t) d\theta_H(t) \quad (2)$$

여기서, $\tau_K^T(t)$ 와 $\tau_H^T(t)$ 는 각각 무릎 운동과 힙 운동에 관여하는 전치된(transposed) 관절 토크를 나타내고, $d\theta_K(t)$ 와 $d\theta_H(t)$ 는 각각 무릎 관절과 힙 관절의 미소 운동 변위를 의미한다.

특히, 이족 로봇이 발걸음을 내딛는 과정에서 발 메커니즘을 통하여 발목에 입수되는 힘 성분, 즉 접촉 반발력 f_r 에 의해 전과되는 무릎 관절과 힙 관절의 토크 성분 τ_K 와 τ_H 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다 [5].

$$\tau_K = l_3 \sin\theta^* f_r \quad (3)$$

$$\tau_H = \{l_4 \sin\theta_K \cos\theta^* + (l_4 \cos\theta_K + l_3) \sin\theta^*\} f_r \quad (4)$$

여기서, 접촉 반발력 f_r 은 발의 강성 값 k 가 커지면 증가하게 되어 관절에 부담을 주는 토크를 가중시키게 된다. θ^* 는 발목을 통하여 나타나는 접촉 반발력의 역전과각을 의미하며, $h(t)$ 가 z 축과 평행하게 움직이는 경우에는 다음과 같이 결정된다.

$$\theta^* = \cos^{-1} \left\{ \frac{l_3^2 + h^2 - l_4^2}{2l_3h} \right\}. \quad (5)$$

3. 다리 관절의 일 특성 시뮬레이션

본 장에서는 2장에서 제시한 로봇 다리 및 발 시스템을 이용한 보행 시뮬레이션을 통하여 발의 접촉 반발력에 의해 누적되는 무릎과 힙 관절의 일 특성을 분석한다.

효과적인 시뮬레이션을 위하여 사전 연구 [5]에서 정의하였던 시뮬레이션 플랫폼을 동일하게 사용하였다. 구체적으로, 발 메커니즘에 사용된 스프링의 장력은 로봇의 전체 부하에 적절히 대응할 수 있고, 하중이 걸리지 않는 경우, 초기 상태의 트러스 구조로 안정하게 복구하는 상황을 고려하였다. 또한 그림 3에 제시된 로봇 다리-발 메커니즘의 힙 위치가 수직 방향으로만 변화할 때, 발목부에 가해진 힘 패턴에 대한 접촉 반발력의 동향을 확인하고, 이것으로 인한 로봇 다리의 무릎 관절과 힙 관절의 일이 어떤 패턴으로 누적되는지를 분석하는데 중점을 두었다.

표 1. 로봇 다리 및 발의 기구적인 파라미터

Table 1. Kinematic parameters of the robotic leg and foot

i	l_i (m)	z_A (m)	x_C (m)	Remarks
1	0.10	0.09	0.15	x_C 는 기구적으로 계산된 값임.
2	0.14			
3	0.38			
4	0.39			

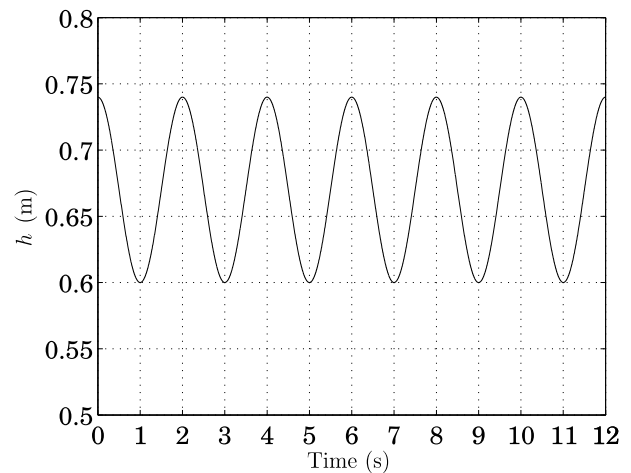


그림 4. 힙의 운동 패턴

Fig. 4. Motion pattern of the hip

그림 4는 이족 로봇의 보행 과정에서 나타나는 정현적인 힙의 운동 패턴으로써 로봇의 발목과 힙 사이의 거리 함수 $h(t)$ 를 나타낸 것이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h(t) = h_0 + 0.5d(\cos\pi t - 1.0) \quad (6)$$

여기서, h_0 는 발목과 힙 관절 사이의 초기 거리이고, d 는 힙의 상하 운동의 길이를 조정하는 파라미터이며, 각각 0.74m와 0.14m로 설정하였다. 실제로, 이러한 운동 패턴은 인간의 보행 과정에서 유사하게 경험할 수 있다 [11].

그림 5는 주어진 힙의 운동 패턴에 대한 발목의 운동각 θ^* 의 패턴을 나타내며, 주어진 보행 과정에서 요구되는 발목부의 운동 범위를 확인할 수 있다.

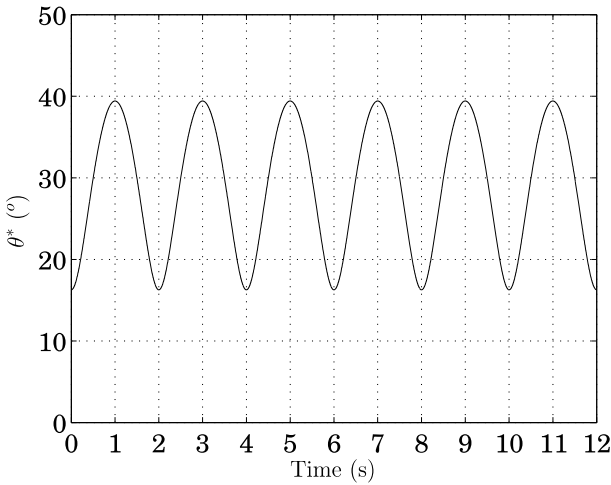


그림 5. 발목의 운동각 경로

Fig. 5. Trajectory of motion angle of the ankle

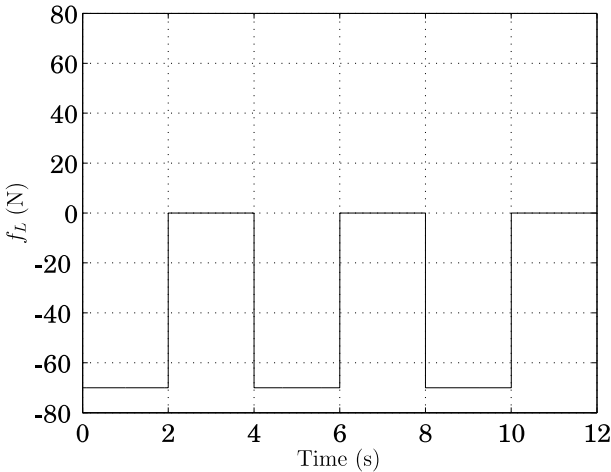


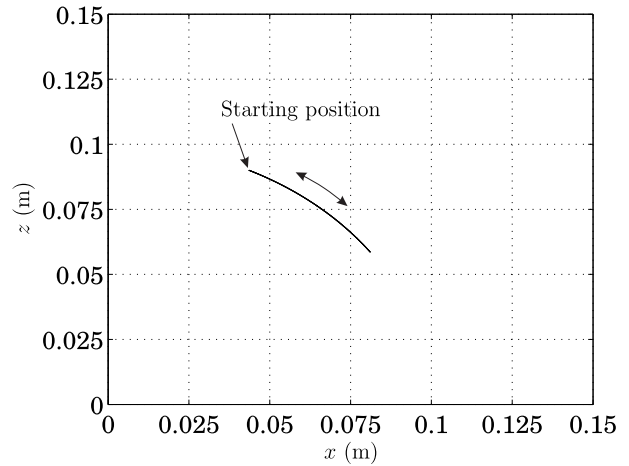
그림 6. 발목에 가해진 힘 패턴

Fig. 6. Force pattern given at the ankle

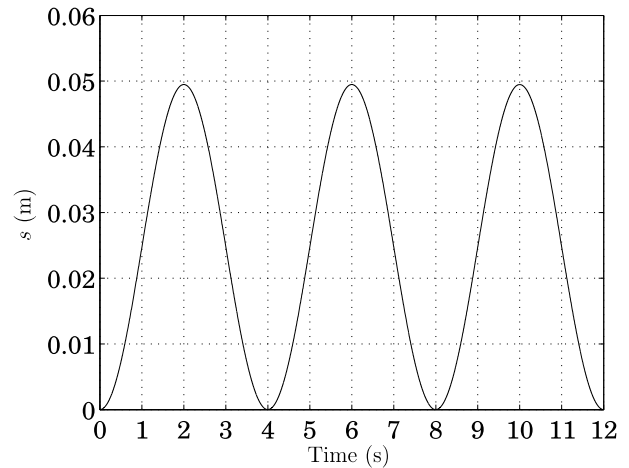
그림 6은 주어진 힘의 운동 패턴에 따라 로봇 발목에 z 축 방향으로 가해진 힘의 패턴을 나타낸다. 즉, 그림 6은 보행 로봇의 한쪽 발이 2초 간격으로 지지발이 되는 상황에서 로봇 몸체 및 추가적인 하중을 고려한 z 축 방향의 힘 -70N 이 반복적으로 작용되는 상황을 나타낸다. 이러한 상황에서 발목부 A 점이 xz 평면상에서 이동하는 경로는 그림 7(a)와 같고, 그림 7(b)는 k 를 700N/m 로 설정한 경우, 발목부 A 점의 운동 궤적을 나타내며, 다음과 같이 설정되었다.

$$s(t) = 0.5s_f\{1.0 - \cos(0.5\pi t)\} \quad (7)$$

여기서, s_f 는 운동 궤적의 길이를 나타내고, 사용된 스프링의 강성값에 의존하게 된다. -70N 의 f_L 이 작용하는 경우, 강성 파라미터 k 를 700N/m 나 525N/m 로 설정하면, 기구학적 계산에 의해 s_f 는 각각 0.0495m 나 0.0594m 로 결정된다.



(a) planar trajectory



(b) circular arc trajectory

그림 7. 발목의 운동 경로

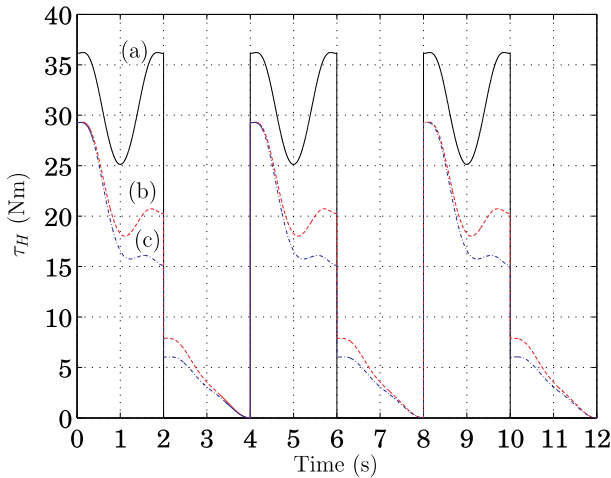
Fig. 7. Trajectory of the ankle

본 시뮬레이션에서는 발 메커니즘의 컴플라이언스 특성을 달리하면서 발목부에 가해진 힘 패턴에 대하여 발바닥에서 일어나는 접촉 반발력의 시스템적 영향을 확인하였다. 특히, 발 메커니즘의 완충 작용이 없는 경우($k=\infty\text{N/m}$)와 트러스의 변형 영역을 기반으로 $k=700\text{N/m}$, 그리고 $k=525\text{N/m}$ 인 경우에 대하여 고려하였다. 이러한 시도는 발 공간에서의 컴플라이언스 특성에 따른 다리 관절 공간의 토크 및 일 특성과의 연관성을 파악하는 관점에서 의미가 있다.

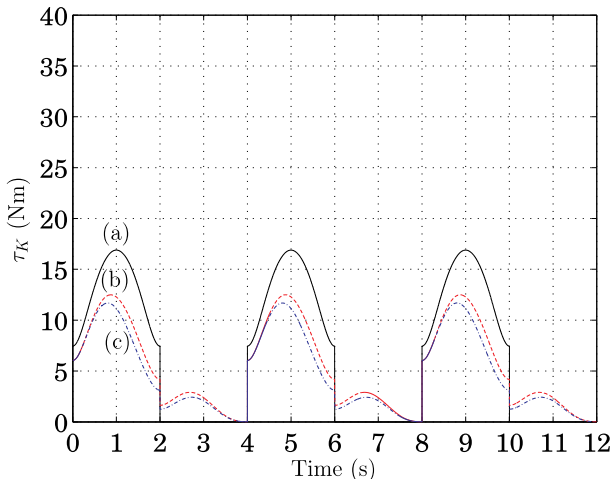
먼저, 주어진 보행 동작에서 발의 접촉 반발력에 의해 전파되는 무릎 관절과 힙 관절의 토크 특성은 그림 8에 제시하였다. 결과적으로, 로봇 발 메커니즘의 컴플라이언스 특성이 커질수록 무릎과 힙 관절에 가해지는 토크 영향이 감소되는 경향을 확인할 수 있다.

다음으로, 스프링의 강성 효과를 포함한 발의 접촉 반발력에 의해 무릎과 힙 관절에 지속적으로 누적되는 일 특성은 그림 9에 제시하였다. 구체적으로, 발의 강성 값이 무한대인 경우에는 지속적으로 누적되는 일의 양이 일정한 패턴으로 증가하는 경향을 보인다. 한편, 컴플라이언스를 갖게 되면, 상대적으로 일의 누적 폭

이 더 작기 때문에 시간이 흐름에 따라 가중되는 일의 크기가 점점 더 작게 되는 경향을 확인할 수 있다.



(i) Torques for the hip joint



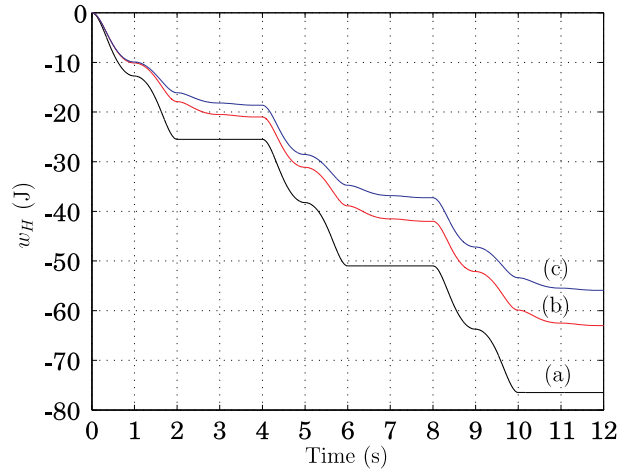
(ii) Torques for the knee joint

그림 8. 발의 접촉 반발력에 따른 다리 관절의 토오크 패턴 : (a) $k = \infty\text{N/m}$, (b) $k=700\text{N/m}$, and (c) $k=525\text{N/m}$.

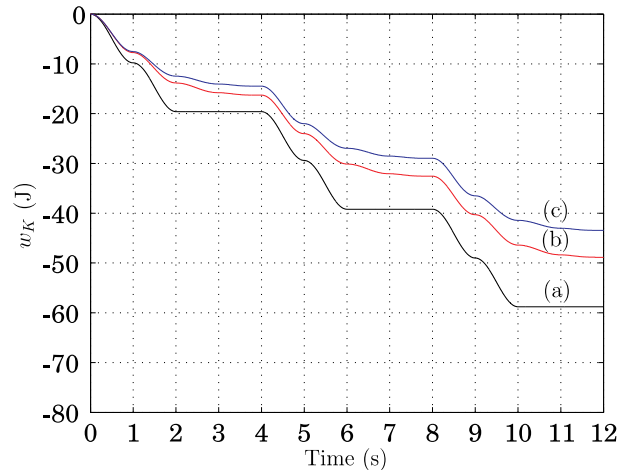
Fig. 8. Torque patterns of the leg joints by the contact repulsion of the robotic foot: (a) $k = \infty\text{N/m}$, (b) $k=700\text{N/m}$, and (c) $k=525\text{N/m}$.

실제로, 무릎 관절의 운동량에 따라 누적되는 일의 증가는 무릎 관절과 힙 관절의 피로가 가중됨을 의미한다. 따라서 사용된 로봇 발 메커니즘의 컴플라이언스 특성을 적절히 설정함에 의해 무릎 관절과 힙 관절의 피로가 개선될 수 있음을 파악할 수 있다. 사람의 보행에서도 이러한 경향은 경험적으로 알 수 있다. 특히, 탄력성이 작은 신발을 이용하는 경우에는 발걸음을 내딛는 순간마다 지면과의 접촉에 의해 무릎이나 힙, 허리 등의 관절에 강한 충격을 느낄 수 있고, 다리 및 몸 전체가 빨리 피곤해지게 됨을 인지할 수 있다. 이러한 관점에서 보면, 생활 체육이나 전문적인 스포츠 분야에서 신발의 적절한 선택은 좋은 운동 성과와 밀접한 관련이 있을 것으로 판단된다.

결과적으로, 컴플라이언스 특성을 갖는 로봇 발 메커니즘은 보행시 나타나는 발목의 충격과 무릎 및 힙 관절에 미치는 토오크 특성을 완화시킬 수 있기 때문에 이러한 메커니즘을 잘 이용하면, 각 관절에 가중되는 일과 전체 로봇 시스템의 보행 피로를 감소시키는 것이 가능하다고 판단된다. 특히, 이러한 보행 피로를 줄이는 문제는 비평탄 지형이나 계단이 있는 상황에서의 안정된 보행 [12] [13]에 큰 도움이 될 수 있고, 스포츠 산업과 관련된 다양한 기능성 신발의 편의성 판단에 있어서 중요한 요소가 될 수 있다.



(i) Work at the hip joint



(ii) Work at the knee joint

그림 9. 발의 접촉 반발력에 의해 누적되는 다리 관절의 일 : (a) $k = \infty\text{N/m}$, (b) $k=700\text{N/m}$, and (c) $k=525\text{N/m}$.

Fig. 9. Works accumulated at the leg joints by the contact repulsion of the robotic foot: (a) $k = \infty\text{N/m}$, (b) $k=700\text{N/m}$, and (c) $k=525\text{N/m}$.

4. 결론

본 논문에서는 컴플라이언스 특성의 발을 갖는 다리 모델을 사용하여 발에 작용되는 접촉 반발력에 따라 무릎 관절과 힙 관절에 누적되는 일에 대하여 분석

하였다. 이를 위하여 보행 과정에서 유발되는 발의 접촉 반발력이 무릎 관절과 힙 관절에 미치는 토오크 특성과 일 특성을 파악하였다. 결과적으로, 사용된 로봇 발 메커니즘의 컴플라이언스 특성에 따라 무릎 관절과 힙 관절에 누적되는 일을 줄일 수 있다는 것을 파악하였고, 발 메커니즘의 컴플라이언스 특성을 적절히 설정함에 의해 보행 운동에 따른 다리 관절의 피로가 개선될 수 있음을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 다리 관절의 피로 완화와 동작의 유연성 개선 뿐만 아니라 로봇 다리 메커니즘의 효과적인 설계, 재활의 공학적인 발 메커니즘 설계 및 다양한 기능성 신발의 편의성 제고에 기여할 수 있다.

추가적으로, 로봇 발이 다양한 패턴으로 접촉할 때, 메커니즘의 접촉력을 효과적으로 측정하는 방법과 다양한 보행 상황에 대한 고려 및 실험적인 연구가 필요하다.

References

- [1] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura, "The intelligent ASIMO: system overview and integration," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2478-2483, 2002.
- [2] Y. Ogura, H. Aikawa, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, H.-O. Lim, and A. Takanishi, "Development of a new humanoid robot, WABIAN-2," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2478-2483, 2002.
- [3] <http://www.bostondynamics.com> : PETMAN.
- [4] S. K. Au and H. M. Herr, "Powered ankle-foot prosthesis," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 15, no. 3, pp. 52-59, 2008.
- [5] B. -H. Kim, "Contact repulsion of robotic foot and its influence on knee and hip joints," *Jour. of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 12-17, 2013.
- [6] S.-W. Kim and D. H. Kim, "Design of leg length for a legged walking robot based on Theo Jansen using PSO," *Jour. of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 21, no. 5, pp. 660-666, 2011.
- [7] M. Davis, *Foot Design for a Humanoid Robot*, The University of Queensland, 2004.
- [8] J. Li, Q. Huang, W. Zhang, Z. Yu, and K. Li, "Flexible foot design for a humanoid," *Proc. of IEEE Int. Conf. Automation and Logistics*, pp. 1414-1419, 2008.
- [9] C. C. Norkin and P. K. Levangie, *Joint structure & function*, F.A. Davis Company, 1992.
- [10] B. -H. Kim, "Modeling and analysis of robotic foot mechanism based on truss structure," *Jour. of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 347-352, 2012.

- [11] A. D. Kuo, "Choosing your steps carefully," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pp. 18-29, June 2007.
- [12] Y.-T. Kim, S.-H. Noh, and H. J. Lee, "Walking and stabilization algorithm of biped robot on the uneven ground," *Jour. of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 59-64, 2005.
- [13] M. J. Powell, H. Zhao, and A. D. Ames, "Motion primitives for human-inspired bipedal robotic locomotion: walking and stair climbing," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 543-549, 2012.

저자 소개

김병호(Byoung-Ho Kim)



2001년 : 한양대 전자공학과(공학박사)

1995년 ~ 2001년 : 한국과학기술연구원 지능로봇연구센터 학생연구원

2002년 ~ 2004년 : JSPS Post-Doctoral Fellow, Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ., Japan

2004년 ~ 2005년 : Researcher, Biomimetic Control Research Center, RIKEN, Japan

2010년 ~ 2011년 : Visiting Faculty, Robotics Institute, Carnegie-Mellon Univ., USA

2005년 ~ 현재 : 경성대학교 메카트로닉스공학과 부교수

2006년 ~ 현재 : 한국지능시스템학회 이사

관심분야 : intelligent mobile manipulation, walking mechanism and algorithm, multi-legged & humanoid robots, biomimetic modeling and control, multi-fingered robot/artificial hands and multiple arm control, macro/micro mechanism and intelligent control, neural computation, and sports science.

Phone : +82-51-663-4692

E-mail : kimbh@ks.ac.kr