

발가락과 뒤꿈치 조인트를 갖는 유연한 로봇 발 설계

Design of a Flexible Robot Foot with Toes and Heel Joints

박진희¹, 김현술¹, 권상주^{1,✉}
Jinhee Park¹, Hyunsul Kim¹ and Sangjoo Kwon^{1,✉}

¹ 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 (School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace Univ.)

✉ Corresponding author: sjkwon@kau.ac.kr, Tel: 02-300-0178

Manuscript received: 2010.10.4 / Revised: 2011.1.2 / Accepted: 2011.1.18

In terms of the anatomy and mechanics of the human foot, a flexible robot foot with toes and heel joints is designed for a bipedal walking robot. We suggest three design considerations in determining foot design parameters which are critical for walking stability. Those include the position of the frontal toe, the stiffness of toes and heels, and the position of the ankle joint. Compared with the conventional foot with flat sole, the proposed foot is advantageous for human-like walking due to the inherent structural flexibility and the reasonable parameter values. Simulation results are provided to determine the design parameters and also show that the proposed foot enables smaller energy consumption.

Key Words: Robot Foot (로봇 발), Biped (이족 로봇), ZMP, Walking Robot (보행 로봇), Flexible Foot (유연 발)

1. 서론

인간이 보행할 때 발은 지면으로부터 발생하는 충격력을 흡수하고 불규칙한 지면에서의 안정성을 높여줄 뿐만 아니라, 원활한 방향 전환을 돕는다. 이족보행 로봇의 경우에도 발의 기능은 보행 성능에 매우 중요한 영향을 끼친다. 로봇 발에 대한 연구는 인간의 발이 가지는 기능과 역할을 로봇 설계에 응용함으로써 이족보행 로봇의 보행 성능을 향상시키는 것을 목적으로 한다. 최근에는 인간처럼 자연스럽게 걷는 로봇을 구현하기 위하여 기존의 평평한 발(flat foot)에서 벗어나 인간의 발처럼 유연한 발(flexible foot)을 설계하고 인간과 같이 자연스러운 보행 패턴을 적용하려는 연구가 점차 확대되고 있다. 또한 유연한 로봇 발이 갖는 이점을 에너지, 충격력, 안정성 등의 측면에서 규명하는 작업이 이루어지고 있다.

예를 들어 Minakata et al.¹은 로봇 발에 여러 개

의 스프링을 부착함으로써 충격력이 감소하고 에너지 효율이 증가하는 것을 보였다. Hashimoto et al.²은 불균일한 지면에서의 보행을 위하여 4 점 접촉형 바닥을 갖는 로봇 발을 제작하였다. Li et al.³은 고무를 활용한 신축성 있는 발(flexible foot)을 디자인하였다. 한편, Yoon et al.⁴은 두 발가락 부분이 독립적으로 움직이며 발목은 롤(roll)과 피치(pitch) 운동을 하는 직렬-병렬 복합 기구를 설계하였다. Sellaouti et al.,⁵ Kajita et al.,⁶ 및 Ouezdo et al.⁷ 등은 인간과 같이 발가락 관절을 갖는 발이 안정성 측면에서 유리하고 보행 속도를 향상시킨다는 것을 밝혔다. Huang et al.⁸은 인간과 유사한 보행 패턴 식을 세우고 이족보행 로봇에 적용하였을 때 힙 조인트 동작이 유연해지며 비균일한 지면에서 보다 안정적인 보행이 가능하다고 하였다. 또한 Seo and Yi⁹는 인간 발과 매우 흡사한 골격 구조를 갖는 로봇 발 메커니즘을 설계하고 시뮬레이션을 통해 불규칙한 지면에서의 효과를 보였다.

이러한 연구들은 인간 발의 메커니즘을 로봇 발에 응용하여 로봇과 지면 사이에 발생하는 접촉력과 에너지 소비량을 감소시키고, 불균일한 지면에서의 안정성을 확보하며 인간과 같이 자연스러운 걸음새를 구현하려는 시도라고 할 수 있다. 이외에도 발가락과 뒤꿈치를 로봇 발 설계에 적용하고 인간형 보행 방식을 적용하는 연구들이 지속적으로 이루어지고 있다.^{10,11}

본 논문에서는 평평한 로봇 발이 갖는 한계점을 보완하기 위하여 로봇 발 설계 과정에 인간 발에 대한 해부학적, 역학적 분석을 도입하며, 이를 바탕으로 발가락과 뒤꿈치 조인트를 갖는 유연한 구조의 로봇 발을 제안한다. 또한 발목 위치, 발가락 위치, 스프링 강성과 같이 보행 안정성 관점에서 위하여 중요한 파라미터들을 결정하기 위하여 인체역학에 근거한 설계 고려사항들을 다룬다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 2 장에서는 인간 발에 대한 형태적 분석과 운동학적 분석을 바탕으로 유연한 형태의 로봇 발을 설계한다. 3 장에서는 유연한 발에 적용하기 위한 보행 패턴을 설정한다. 4 장에서는 다양한 보행 시뮬레이션을 통하여 제안된 발의 설계 파라미터들을 결정한다. 5 장에서는 에너지감소 측면에서 제안된 발이 갖는 장점을 밝히고, 마지막으로 6 장에서 결론을 맺는다.

2. 인간 발 분석에 기반한 로봇 발 설계

2.1 해부학적 고찰

인간 발과 유사한 기능을 로봇 발에 적용하기 위해서는 우선 인체 해부학적 접근이 요구된다. Fig. 1 과 같이 인간 발은 뒤꿈치에 비교적 큰 뼈(종골)가 있어 발목에 가해지는 하중의 2/3 가량을 지탱한다.¹² 인간의 보행은 발 뒤꿈치가 지면에 닿으면서 시작되므로 뒤꿈치 뼈가 지면 충격력을 잘 버틸 수 있는 구조를 갖는다고 볼 수 있다.

인간 발은 각각의 작은 뼈들이 관절과 연결되어 있고 근육이 지탱해주는 유연한 구조물로서 충격력을 흡수한다. 그러나 로봇 발 설계에 이러한 복잡한 구조를 구현하는 것은 효율적이지 못하며 보행 제어 측면에서도 불리하다. 따라서 로봇이 지면과 접촉할 때 받는 충격력의 대부분을 흡수할 수 있도록 Fig. 2 와 같이 스프링 장착형 필러(pillar)로 이루어진 단순한 뒤꿈치(heel)를 고안하였으며, 뒤꿈치가 지면에 닿을 때의 측방향 안정성을 높이기

위해서 두 개의 필러를 나란히 배치하였다.

한편, 인간의 발은 Fig. 3 과 같이 발가락(toe)과 뒤꿈치(heel)가 이어지는 아치(arch)형 골격을 가짐으로써 수직적인 구조보다 효과적으로 지면 충격력을 흡수한다. 즉, 착지 때에 Fig. 3 에 표시한 L_1 과 L_2 골격의 운동에 의해 뒤꿈치에서 발가락 사이의 거리 L_3 가 변화됨으로써 구조적인 댐핑 효과를 일으킨다. Gefen et al.¹³ 은 발에 들어오는 충격력의 약 38%가 이러한 구조적 특징에 의해서 흡수된다고 밝혔다. 또한 Choi et al.¹⁴ 는 인간의 발가락이 다섯 개로 나뉘어져서 뒤꿈치보다 많은 방향성을 지님으로써 인간의 전방 보행에 도움을 주고 보행 중에 발가락들이 하중을 효과적으로 분산하여 안정성이 향상된다는 것을 확인하였다.

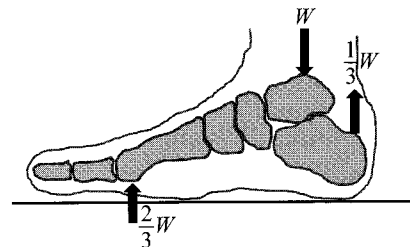


Fig. 1 Supporting force distribution in a human foot

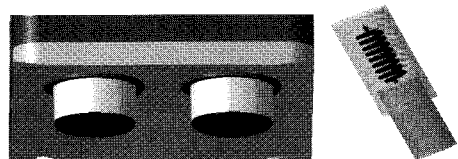


Fig. 2 Heel of the robot foot with built-in spring pillars

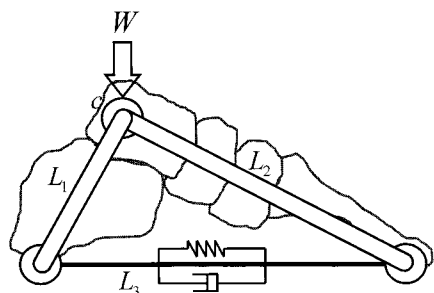


Fig. 3 Arch-type skeletal structure of human foot

본 논문에서 제안되는 로봇 발은 Fig. 4 와 같이 앞꿈치에 세 개의 필러 형태 발가락을 갖는다. 세 개의 발가락이 모든 방향에서 인가되는 충격력을 흡수할 수 있도록 각 발가락을 수직 방향에 대하

여 비스듬하게 서로 카메라 삼각대 형태가 되도록 구성하여 착지 안정성을 증가시킬 수 있다. 결과적으로 세 개의 발가락과 두 개의 뒤꿈치 필러를 갖는 유연한 로봇 발의 내부 구성도는 Fig. 5 와 같다. 여기서 각 뒤꿈치와 발가락들이 전체적으로 아치형 골격을 형성함으로써 인간의 발과 같이 효과적으로 충격력을 흡수할 수 있다.

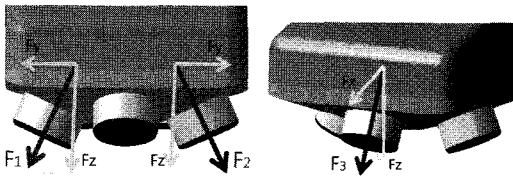


Fig. 4 Toes of the robot foot and the tripod structure

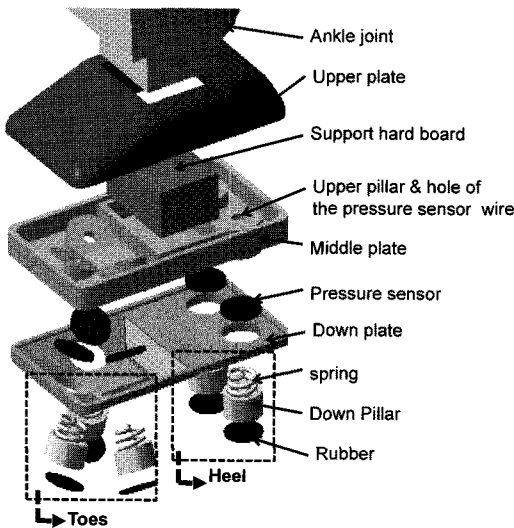


Fig. 5 Development figure of the flexible robot foot

2.2 인체역학적 고찰

인간 발에 대한 형태적인 모방뿐만 아니라 역학적인 관점에서 인간이 보행 운동을 할 때 발에서 얻는 이득을 로봇 발 설계에 적용하는 것이 매우 중요하다. 본 절에서는 인체역학에 기반하여 앞꿈치 발가락과 발목의 위치 이동에 따른 설계 고려사항을 살펴본다.

2.2.1 앞꿈치 발가락 위치

인간의 발은 보행 중에 체중에 의한 압력과 그에 따른 지면 반발력을 받게 되며 발바닥의 부위에 따라 작용하는 압력의 크기가 달라진다. Fig. 6 은 평균적인 성인 남성에게 대하여, 발 뒤꿈치가 지

면에 접촉할 때부터 발가락이 지면에서 떨어질 때까지 ZMP 가 이동하면서 발바닥의 각 부분에 작용하는 평균적인 압력 분포를 나타낸다.¹⁵ 그림과 같이 발 뒤꿈치 부분에서 가장 큰 압력을 받으며, 다른 발가락들 보다 상대적으로 엄지 발가락 부위가 큰 압력을 받는다는 것을 알 수 있다.

인체의 무게중심이 중앙에 있다는 것을 생각하면 이것은 타당한 수치이며, 이족 로봇의 경우에도 두 다리가 안정적인 보행을 하기 위해서는 발 앞꿈치의 안쪽 부분이 더 큰 압력을 흡수하도록 로봇 발을 설계해야 함을 의미한다. 따라서 Fig. 7 에서 전방 발가락(toe-front)의 위치를 발바닥의 내부 방향으로 이동하는 것이(즉, $l_{a1} < l_{a2}$) 역학적으로 유리하다. 단, 구체적인 이동 거리는 로봇의 무게, 보폭, 보행 속도, 보행 패턴 등 주어진 조건에 대하여 보행 안정성 시뮬레이션을 통해 조정하는 것이 바람직하다.

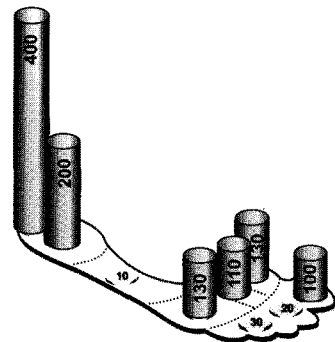


Fig. 6 Transition of the pressure on the sole of the human foot during a stride (kPa)

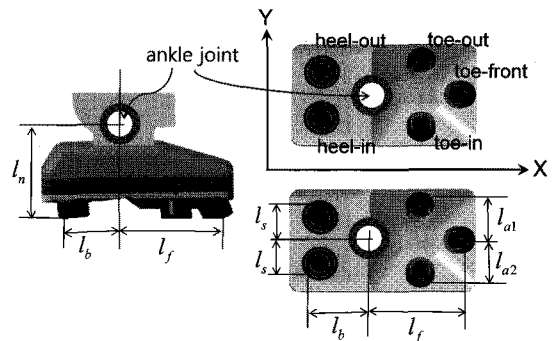


Fig. 7 Positions of toes, heels, and ankle joint

2.2.2 발목 위치

인간은 걷는 동작을 할 때 에너지 소비를 최소

화하는 방향으로 발목의 힘을 이용한다. 인간의 발은 내적인 근육 힘과 외적인 힘(체중, 물건의 무게)을 이용하는 일종의 지레(lever) 시스템으로서 보행에 필요한 토크를 발생시킨다. Fig. 8 에서 BW 는 체중, EMA(외적 모멘트 팔)는 발가락과 발등을 연결하는 앞꿈치 조인트에서 BW 벡터까지의 거리, IMA(내적 모멘트 팔)은 앞꿈치 조인트에서 발목 근육의 힘을 나타내는 MF 벡터까지의 거리를 나타낸다. 따라서 다음과 같이 모멘트 평형식을 통하여 요구되는 발목 힘을 계산할 수 있다.¹⁶

$$MF \times IMA = BW \times EMA \rightarrow MF = \frac{BW \times EMA}{IMA} \quad (1)$$

예를 들어, 체중 BW 150 lb, IMA 12cm, EMA 3 를 가정했을 경우, MF 는 37.4 lb 가 되므로 체중의 1/4 에 해당하는 발목 힘이 필요하다. 이와 같이 지레의 원리에 기반한 역학적 이득을 통해 인간은 체중에 비해 훨씬 작은 힘으로 에너지 소비를 가능한 작게 하는 보행을 한다. 이것은 수레의 손잡이가 바퀴에 비하여 뒤쪽에 있기 때문에 작은 힘으로 수레를 들어 올릴 수 있는 것과 같은 이치이다.

이상은 인체 발목의 위치가 무게중심 벡터에 대하여 발 뒤쪽에 위치하는 근거가 된다. 따라서 이족 로봇이 다음 절에서 설명하는 인간형 보행을 하기 위해서는 발목의 위치가 발 측면 중앙에서 무게중심 후방에 위치하도록 설계해야 한다. (즉, 그림 7 에서 $l_b < l_f$) 단, 구체적인 수치는 주어진 로봇의 제원과 보행 패턴에 대하여 동역학 시뮬레이션을 통해 결정해야 한다.

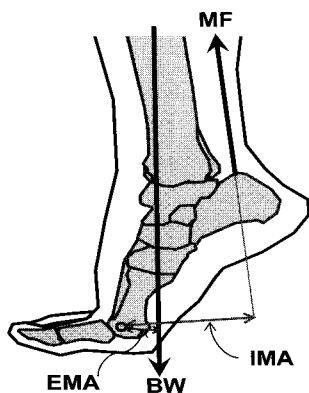


Fig. 8 Leverage of the human foot

3. 인간형 걸음새 패턴 생성

3.1 ZMP 이동 패턴

기존의 이족 로봇에 적용되었던 발은 주로 발가락(toe)과 뒤꿈치(heel)의 구분이 없는 평평한 바닥면을 갖는 발로서 바닥 전체가 한꺼번에 지면에 닿는 보행 방식을 취해왔다. 따라서 외발 지지 구간(single support phase)에서 ZMP 가 발바닥의 한 점에서 머무르다 다른 지지 발의 한 점으로 이동하는 ZMP 패턴이 일반적이다.

한편, 인간의 발은 뒤꿈치(heel)가 먼저 지면과 닿고 지면과의 접촉부가 발가락(toe) 쪽으로 연속해서 이동하는 방식으로 보행을 하므로 ZMP 가 접촉면의 변화와 함께 뒤꿈치 부분에서 발가락 부분으로 이동하게 된다. 본 논문에서 제안된 로봇 발은 발가락과 뒤꿈치의 유연한 구조를 가지므로 인간과 같이 외다리 지지 구간에서도 ZMP 가 발바닥에서 연속적으로 이동하는 패턴을 적용할 수 있다.

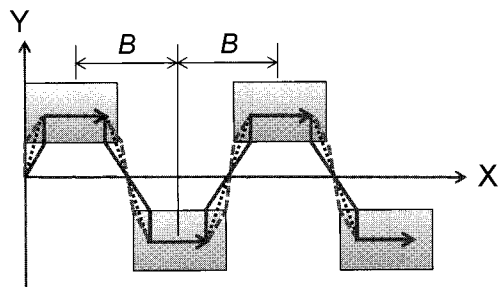
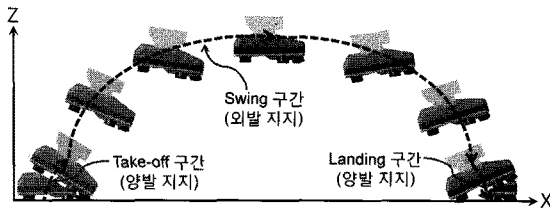


Fig. 9 ZMP patterns for a flexible foot

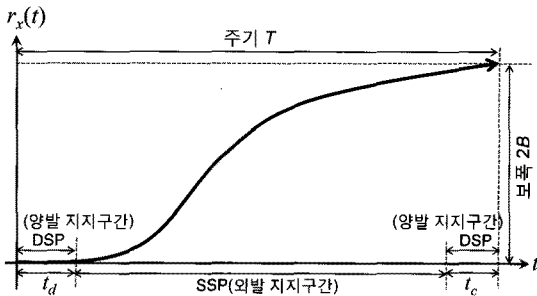
Fig. 9 에서 x 방향은 로봇의 이동 방향, y(+)는 왼발, y(-)는 오른발 방향을 나타내며 사각형은 발바닥을 의미한다. 또한 B 는 보폭의 절반에 해당되는 거리이다. 발바닥 안에 표시한 화살표 직선은 외다리 지지 구간에서 ZMP 가 이동하는 것을 표시하며, 그 외 선들은 양다리 지지 구간(double support phase)에서 적용할 수 있는 ZMP 패턴들이다. 본 논문에서는 Fig. 9 에서 전체적으로 실선에 해당하는 ZMP 패턴을 적용하였다.

3.2 발목 관절 이동 패턴

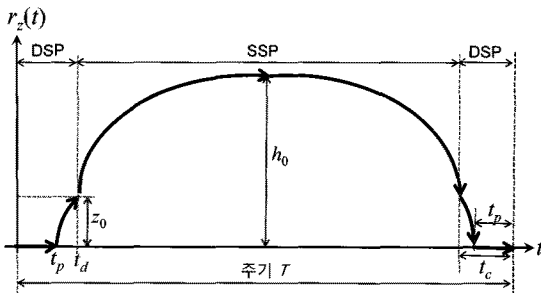
이족 로봇이 인간과 유사한 보행을 하기 위해서는 ZMP 패턴과 함께 양쪽 발목(ankle)의 이동 궤적 또한 인간 발의 운동과 유사해야 한다. 이와



(a) Change of the ankle posture in the sagittal plane



(b) x-directional trajectory



(c) z-directional trajectory

Fig. 10 Ankle trajectory of the swing foot during a single stride

관련하여 Huang et al.⁸은 인간의 걸음새를 모방한 궤적을 제안하였다. 한편, 인간형 보행의 한 주기 (T) 걸음은 Fig. 10(a)와 같이 로봇 발의 뒤꿈치가 먼저 지면에서 떨어진 후(heel-off), 발가락이 지면을 떠나면서(toe-off) 발이 공중에서 스윙하고 뒤꿈치가 먼저 지면과 닿는(heel-strike) 방식으로 이루어진다. Fig 10(b)와 (c)는 이에 따른 X-방향과 Z-방향에 대한 발목(ankle)의 시간 궤적을 나타낸다. 결론적으로 Fig. 9의 ZMP 패턴과 함께 발목 관절의 위치/자세가 Fig. 10과 같은 형상으로 주어지면 인간형 보행을 구현할 수 있다.

Fig. 10에서 뒤꿈치가 들리기 직전의 시간을 t_p , 발가락이 들리는 순간을 t_d , 발이 스윙한 후 뒤꿈

치가 착지하는 시간을 $t = T - t_c$, 발바닥이 모두 지면에 닿는 시간을 $t = T - t_p$ 로 정의한다. 또한 z_0 는 발이 지면을 떠날 때의 발목의 높이, h_0 는 발목의 최대 높이를 나타낸다. 즉, $t = 0 \sim t_d$ 와 $t = T - t_c \sim T$ 구간은 양쪽 발이 지면이 닿아있는 양발 지지구간이며, $t = t_d \sim T - t_c$ 는 한 쪽 발은 지면을 지탱하고 다른 쪽 발은 공중에서 스윙하는 외발 지지구간이다.

여기서 궤적이 전환되는 각 시간과 각 구간별 시간 궤적은 주어진 로봇의 보폭, 보행 속도, 발 사이즈 등에 따라 시뮬레이션을 통해 최적화하는 것이 바람직하다. 한편, 다음 절의 보행 시뮬레이션에서는 Fig. 10의 각 구간별 궤적을 적절한 정현파 함수로 결정하였으며 주기 $T = 2.5$ 초, 양발 지지구간 시간은 $t_d = t_c = 0.5$ 초로 설정하였다.

4. 설계 파라미터 결정

4.1 시뮬레이션 모델

본 절에서는 2 절에서 제안된 유연 로봇발의 장점을 검증하고 각 설계 파라미터를 결정하기 위하여 3 절에서 예시된 인간형 걸음새를 적용한 보행 시뮬레이션을 수행한다.

이족 로봇 모델은 Fig. 11과 같이 두 다리 골반(pelvis) 3 자유도, 무릎(knee) 1 자유도, 발목(ankle) 2 자유도로 구성되어 전체적으로 12 자유도를 갖는다. 다리의 상하부는 각각 길이 0.5 m, 직경 0.2 m인 원기둥이며, 각 무게는 4 kg, 3 kg이다. 상체는 폭 0.2 m, 너비 0.6 m, 높이 0.5 m인 10 kg의 박스로 가정한다. 양 발의 사이즈는 폭 0.2 m, 길이 0.3 m, 높이 0.1 m이고 무게는 1kg이다. 따라서 로봇의 총 무게는 26 kg이며 무게중심의 초기 위치는 Fig. 11과 같다. 그리고 Fig. 7에서 뒤꿈치와 발가락 위치는 $l_n = 0.13$ m, $l_b = 0.115$ m, $l_f = 0.18$ m, $l_s = 0.085$ m, $l_{a1} = l_{a2} = 0.09$ m이다.

본 논문에서는 로봇 동역학 시뮬레이션을 위하여 Marilou Robotics Studio (MRS)¹⁷를 이용하였다. MRS는 로봇 메커니즘, 외부 환경, 구동기, 센서 등에 대한 그래픽 모델링 및 프로그래밍 환경을 제공한다. 또한 이족 로봇의 실제 보행 동작을 구현하기 위해서는 3 절에 제시된 ZMP 패턴과 발목 궤적 패턴에 매칭되는 모든 관절의 궤적이 실시간으로 주어져야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 CoM 자코비안 분해 방법¹⁸에 의거하여 각 관절의 시간 궤적을 계산하였다.

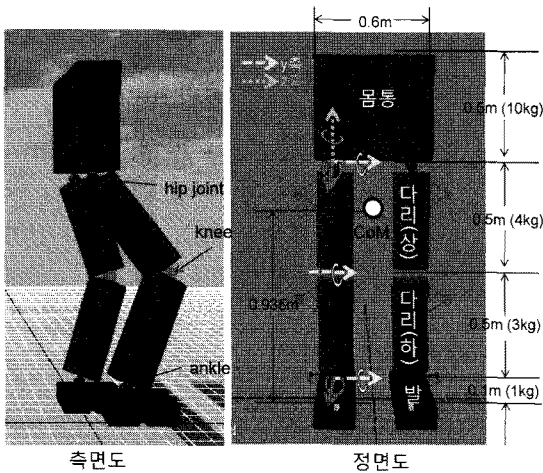


Fig. 11 Biped model for simulation

4.2 전방 발가락 위치

보행 시뮬레이션에 적용된 로봇 발 모델은 Fig. 5 와 같이 앞꿈치에 세 발가락을 갖는다. 여기서는 발가락의 위치가 보행 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 Fig. 9 와 시간적으로 매칭되는 ZMP 기준 궤적을 Fig. 12(‘ZMP desired’)와 같이 결정 한 후에 시뮬레이션을 수행한다. 이 때 보폭은 0.2 m, 보행 주기는 $T=2.5$ 초이다.

Fig. 12 는 i) Fig. 7 에서 전방 발가락(front-toe) 위치가 중앙에 있는 경우(‘front-toe middle’)와 ii) 발 내부로 절반 이동한 경우(‘front-toe inside’)의 추종 성능을 비교한 것이다. 즉, 첫째 경우는 Fig. 7 에서 $l_{a1}=l_{a2}=0.09$ m 이고 둘째 경우는 $l_{a2}=2l_{a1}$ ($l_{a1}=0.06$ m, $l_{a2}=0.12$ m)이다. 그래프에 나타난 결과와 같이 전방 발가락이 내부로 이동하여 로봇 무게중심에 가까워질 때, 특히 Y-방향 ZMP 오차가 많이 감소하였다. 한편, 보행시 발생하는 ZMP 값은 각 발가락과 뒤꿈치 필러에 부착한 압력센서 모델에서 산출되는 값을 환산하여 계산할 수 있다.

결과적으로 Fig. 6 에 제시된 근거를 따라서 발가락 위치를 변경하는 것만으로도 로봇의 보행 안정성이 상당히 개선된다는 것을 알 수 있다. 단, 각 뒤꿈치와 발가락의 최적 위치를 구하기 위해서는 다른 설계 파라미터와의 연관 효과를 고려한 보다 면밀한 분석이 요구된다.

4.3 발가락과 뒤꿈치 스프링 계수

제안된 로봇 발은 발가락과 뒤꿈치 필러 내부

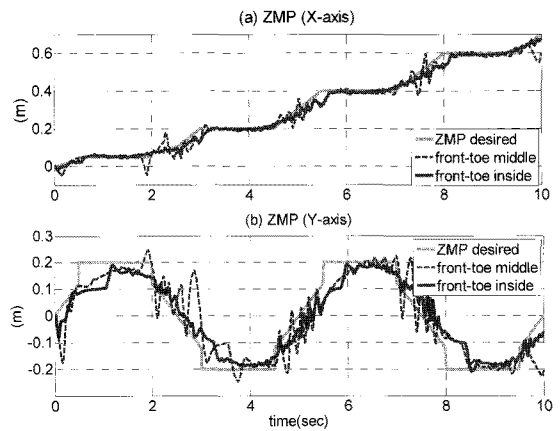


Fig. 12 ZMP errors depending on the frontal toe position

에 장착된 스프링들이 외부 충격력을 분산하여 흡수한다. 그러므로 각 필러에 작용하는 압력의 크기에 따라 적합한 스프링 계수를 결정하는 것이 안정된 보행을 위해 매우 중요하다.

Fig. 13 은 로봇이 Fig. 9 의 ZMP 궤적과 Fig. 10 의 발목 궤적을 따라 보행할 때, 두 번째 주기에서($t=2.5\sim 5$ sec) 지지 발(supporting foot)의 각 필러에 작용하는 반력의 변화를 나타낸다. 이때 지지 발은 지면에 항상 붙어있으며 반대편 발은 3 ~ 4.5 sec 동안 공중에서 스윙 동작을 한다. 첫째, 스윙 발(swing foot)의 뒤꿈치가 들려지는 3 초 부근에서 ZMP 가 지지 발의 뒤꿈치 부근으로 이동하면서 반력이 크게 증가한다. 이 때 지지 발의 바깥쪽보다 안쪽 뒤꿈치(heel-in)에 더 큰 힘이 작용하는데, 참고문헌에서도 그 근거를 발견할 수 있다.¹⁵ 둘째, 스윙 발이 착지를 시작하는 4.5 초 근방에서는 ZMP 가 지지 발의 앞 부분으로 이동함에 따라 앞꿈치 부분에 큰 반력이 작용한다. 이 때도 바깥쪽보다는 안쪽 부분(toe-in)에 큰 힘이 작용하고 전방 발가락(toe-front)에 작용하는 힘은 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 6 에 보인 인간 발의 경향과 유사하다.

본 논문에서 제안된 로봇 발에서 각 필러의 스프링 계수를 결정할 때, 위와 같은 시뮬레이션 결과와 인체역학적 근거를 따르는 것이 보행 안정성 측면에서 유리하다. 우선 Fig. 6 에 의해 뒤꿈치(heel-in/heel-out), 앞꿈치(toe-in/toe-out), 엄지 발가락(toe-front) 세 부분에 대한 스프링 계수의 비율을 대략 6:3.7:1.5 로 정한다. 각 필러의 계수는 각 부분에 대한 최대 탄성 변형량을 얼마로 허용하느냐

따라 달라질 수 있다. 결과적으로 Table 1 은 MRS 시뮬레이션 환경에서 각 필러의 최대 변형량이 5 mm 가 되도록 설정하여 산출된 것이다. 이 때 발 안쪽이 바깥쪽보다 더 큰 지면 반발력을 받는다는 것을 고려하여 안쪽 뒤꿈치(heel-in)가 바깥 쪽보다 약 10% 더 큰 강성을 갖도록 하였다. 보행 중에 발생하는 반발력은 일부가 스프링에 의해 흡수되며 나머지는 로봇 바디가 지탱한다.

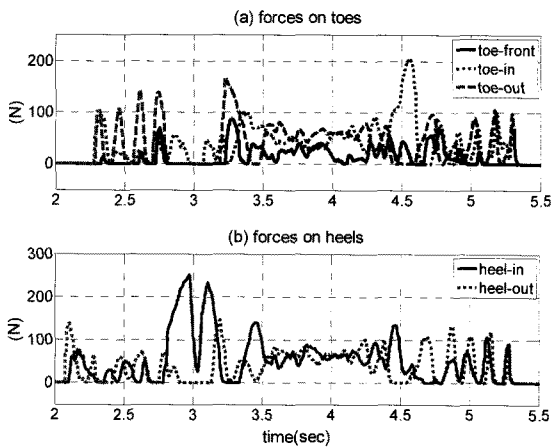


Fig. 13 Transition of the reaction forces on the toes and heels of the supporting foot ($T = 2.5$ sec, DSP: 2.5~3 sec & 4.5~5 sec, SSP: 3~4.5 sec)

Fig. 14 는 로봇 발의 각 필러에 Table 1 의 스프링 계수('varied spring')와 이들의 평균값에 해당하는 동일한 계수('equal spring')를 각각 적용했을 때 X-방향 무게중심 오차를 서로 비교한 것이다. 시뮬레이션에 사용된 무게중심(CoM) 기준 궤적은 Fig. 12 에 표시된 ZMP 기준 궤적과 동역학적으로 매칭되는 값으로서 역진자 모델을 이용하여 해석적으로 구할 수 있다.¹⁸

위와 같이 지면 충격력을 흡수하는 모든 필러가 동일한 탄성계수를 갖는 경우에는 로봇 무게중심이 목표한 궤적에서 많이 벗어나 보행 안정성이 떨어진다. 반면에 Table 1 과 같이 인체역학적 근거에 따라 결정된 값을 채택하면 보다 안정적인 보행이 가능하다는 것을 알 수 있다. 여기서 발가락과 뒤꿈치에 동일한 탄성계수를 사용하는 것은 바닥에 탄성 패드를 붙인 기존의 평평한 로봇 발에 Fig. 10 과 같은 인간형 걸음새를 적용하는 것과 유사한 경우라고 할 수 있다.

Table 1 Spring constants for toes and heels

Pillar	heel-in	heel-out	toe-in	toe-out	toe-front
k(N/m)	3800	3400	2200	2200	1800

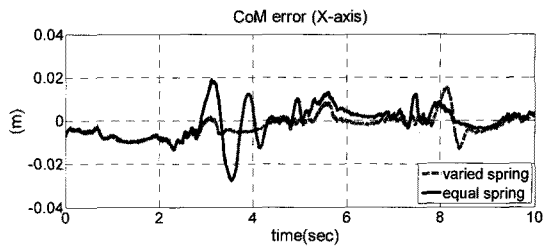


Fig. 14 Comparison of the center of mass (CoM) errors

4.4 발목 위치

로봇 발이 인간의 발처럼 지렛대 원리를 이용하여 원활하게 걷기 위해서는 2 장에서 언급한 바와 같이 발목 위치가 체중 벡터보다 후방에 있어야 한다. 이것은 발목 관절을 원점으로 한 정면 평면(frontal plane)에 대하여 로봇의 전체 무게중심이 항상 앞쪽에 있어야 한다는 것을 말한다. 최적의 발목 위치는 보폭, 보행 속도, 보행 패턴 등, 주어진 조건에 따라서 달라질 수 있지만, 여기서는 보행 주기를 2.5 초로 고정시키고 보폭의 변화에 대하여 보행 안정성 측면에서 타당한 발목 위치를 결정한다.

우선 Fig. 7 과 같이 발목을 기준으로 전방 발가락과 후방 뒤꿈치까지의 길이의 비를 $l_f : l_b$ 로 정의한 후, 0.2 ~ 0.4 m 의 보폭에 대하여 전후 비율을 변화시키면서 보행 시뮬레이션을 수행한다. 이 때 주어진 보폭에 대하여 ZMP 추종 오차의 RMS 값을 가장 작게 만드는 경우가 안정적인 보행을 위해 적합한 발목 위치라고 간주한다. 결과적으로 Fig. 15 과 같이 0.25 ~ 0.35 m 의 보폭에서는 대략 $l_f : l_b = 7:3$, 0.2 m 와 0.4 m 보폭에서는 대략 $l_f : l_b = 3:1$ 비율이 가장 작은 값의 ZMP 오차를 산출하였다. 이 결과는 평균적인 값보다 보폭이 상대적으로 크거나 작은 경우에는 발목의 위치를 후방 쪽으로 더 이동하는 것이 안정성 측면에서 유리하다는 것을 의미한다.

위 결과는 Fig. 11 과 같은 제원을 갖는 로봇에 대하여 Fig. 9, 10 의 보행 패턴을 적용했을 경우에 해당되며 ZMP 오차 외 다른 성능 지표에 대해서는 다른 결과를 보일 수도 있다. 그러나 로봇의 제원, 보행 패턴 등이 변화하더라도 그 경향은 유

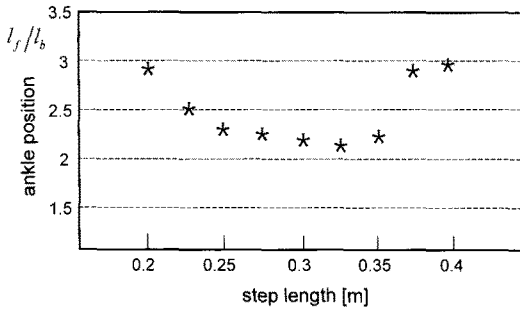


Fig. 15 Optimal ankle position with respect to the step length variation

사할 것으로 예상되며 로봇 발 설계를 위한 하나의 지침이 된다는 점에서 의미를 갖는다.

5. 유연한 발에 의한 에너지 감소 효과

로봇 보행시 각 링크의 운동에 의한 역학적 에너지는 다음과 같이 정의된다.

$$E = K + U = \sum_{i=1}^n K_i + \sum_{i=1}^n U_i \quad (2)$$

위에서 K_i 와 U_i 는 각각 각 링크의 운동에너지 위치에너지이며 다음 식과 같다.

$$K_i = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{x}}_i^T M_i \dot{\mathbf{x}}_i, U_i = m_i g h_i \quad (3)$$

단 $\dot{\mathbf{x}}_i$ 는 각 링크의 속도/각속도 벡터, M_i 는 각 링크의 관성 행렬, m_i 는 링크의 질량, g 는 중력가속도, h_i 는 각 링크의 지면으로부터 수직 거리이다.

현재까지 개발된 이족 로봇에 실제 적용된 발은 보통 평평한 바닥 면에 탄성 패드를 붙인 평발 (flat foot)인 반면, 본 논문에서 제안된 발은 인간형 보행을 하기 위하여 발가락과 뒤꿈치 조인트를 갖는 유연한 발(flexible foot)이다. 기존의 연구 결과들을 살펴보면 뒤꿈치를 갖는 유연한 발은 평발에 비해 보행 시에 역학적 에너지를 감소시킨다는 것을 알 수 있다.^{1,2,4,5,7,8} 한편, Fig. 16 은 본 논문의 유연 발을 적용했을 때 나타나는 역학적 에너지의 변화를 평발 보행의 경우와 비교한다. 결과적으로 본 논문에서 제안된 로봇 발을 이용하여 인간형 보행을 수행하면 전반적으로 에너지 소모가 감소

하는 것을 확인할 수 있다.

이러한 보행 에너지의 감소는 세 발가락과 두 뒤꿈치에 의한 구조적 댐핑 효과, 발 바닥 각 부위에 작용하는 압력의 크기에 따라 결정된 스프링 계수에 기인한다고 할 수 있다. 그림과 같이 특히 발에 가장 많은 지면 반발력이 작용하는 heel-strike 구간에서(0.2~0.7 초, 2.5~3 초, 5.2~5.7 초, 7.7~8.2 초, 10.2~10.7 초) 에너지 감소 효과가 분명해진다. 역학적 에너지가 감소하면 각 관절 구동기의 토크 레벨이 감소하여 보다 부드러운 보행이 이루어지고, 상대적으로 배터리 소모량도 감소하여 장시간에 걸친 로봇 운용이 가능해진다.

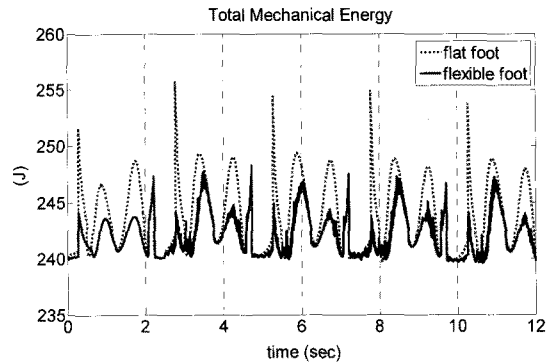


Fig. 16 Comparison of the total mechanical energy

6. 결론

본 논문에서는 인간 발에 대한 생체모방 관점에서 이족로봇의 인간형 보행을 위한 유연한 로봇 발을 설계하였다. 본 연구를 통해 해부학적, 인체 역학적 분석에 기반하여 발가락과 발목의 위치, 스프링의 탄성계수를 결정할 때 보다 안정적인 보행이 가능하다는 것과, 평발에 비해 발가락과 뒤꿈치 구조의 유연한 발은 에너지 소모를 감소시킨다는 것을 확인하였다. 결론적으로 본 논문에서 제안된 로봇 발은 보행 안정성과 에너지 소비 측면에서 보다 완성도 높은 이족보행 로봇 개발을 위해 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

향후 연구내용으로는 로봇 발의 각 파라미터 변화에 대하여 보행 성능을 정량적으로 평가할 수 있는 물리적 관점에서 타당한 지수(index)를 개발하고, 민감도 해석과 시뮬레이션을 통해 각 파라미터 값을 최적화하는 과정이 필요하다.

참고문헌

1. Minakata, H., Seki, H. and Tadakuma, S., "A study of energy-saving shoes for Robot Considering lateral plane motion," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 3, pp. 1271-1276, 2008.
2. Hashimoto, K., Sugahara, Y., Hayashi, A., Lim, H.-O. and Takahashi, A., "New foot system adaptable to convex and concave surface," *IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 1869-1874, 2007.
3. Li, J., Huang, Q., Zhang, W., Yu, Z. and Li, K., "Flexible foot design for a Humanoid robot," *IEEE Int. Conf. on Automation and Logistics*, pp. 1414-1419, 2008.
4. Yoon, J., Nandha, H., Lee, D. G. and Kim, G.-S., "A novel 4-DOF robotic foot mechanism with Multi-platform for Humanoid robot," *Proc. of the SICE-ICCAS Int. Joint Conference*, pp. 3500-3504, 2006.
5. Sellaouti, R., Stasse, O., Kajita, S., Yokoi, K. and Kheddar, A., "Faster and smoother walking of humanoid HRP-2 with passive Toe joints," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4909-4914, 2006.
6. Kajita, S., Kaneno, K., Morosawa, M., Nakaoka, S., Hirukawa, H., Nakaoka, S. and Hirukawa, H., "ZMP-based biped Running enhanced by Toe springs," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3963-3969, 2007.
7. Ouezdou, F. B., Alfayad, S. and Almastri, B., "Comparison of several kinds of feet for Humanoid Robot," *IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, pp. 123-128, 2005.
8. Huang, Q., Yokoi, K., Kajita, S., Kaneko, K., Arai, H., Koyachi, N. and Tanie, K., "Planning Walking Patterns for a Biped Robot," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 3, pp. 280-289, 2001.
9. Seo, J.-T. and Yi, B.-J., "Modeling and Analysis of a Biomimetic Foot Mechanism," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1472-1477, 2009.
10. Ogura, Y., Lim, H.-O. and Takanishi, A., "Human-like walking with Knee Stretched, Heel-contact and Toe-off Motion by a Humanoid Robot," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3976-3981, 2006.
11. Kumar, R. P., Handharu, N., Yoon, J. and Kim, G.-S., "Hybrid Toe and Heel joints for Biped/Humanoid Robots for Natural Gait," *Int. Conf. on Control, Automation and Systems*, pp. 2687-2689, 2007.
12. Kim, W. and Voloshin, S., "Role of plantar fascia in the load bearing capacity of the human foot," *Journal of Biomechanics*, Vol. 28, No. 9, pp. 1025-1033, 1995.
13. Gefen, A., "Stress analysis of the standing foot following surgical plantar fascia release," *Journal of Biomechanics*, Vol. 35, No. 5, pp. 629-637, 2002.
14. Choi, H. K., Kim, S. Y. and Lee, B. H., "Biomechanical analysis of human foot using the computer graphic-based model during walking," *Proc of KSPE Autumn Conference*, pp. 1088-1092, 2002.
15. Perry, J., "Gait analysis: Normal and pathological function," Slack Inc., 1992.
16. Neumann, D. A., "Kinesiology of the musculoskeletal system," Mosby, 2002.
17. AnyKode, <http://www.anykode.com/marilou.php>
18. Choi, Y., Kim, D., Oh, Y. and You, B.-J., "Posture/walking control for humanoid robot based on the kinetic resolution of CoM jacobian with embedded motion," *IEEE Trans on Robotics*, Vol. 23, No. 6, pp. 1285-1293, 2007.