

생체모방 발 메커니즘의 모델링 및 해석

서종태*, 이병주⁺

(논문접수일 2009. 7. 30, 심사완료일 2009. 8. 24)

Modeling and Analysis of a Biomimetic Foot Mechanism

Seo, Jong-Tae*, Yi, Byung-Ju⁺

Abstract

In these days, biomimetic approach in the design and control of robotic system has drawn much attention. The human-being and mammals possess their own feet. Using the mobility of their feet, they are able to walk in various environments such as plain land, desert, swamp, and so on. Previously developed biped robots and four-legged robots did not employ such adaptable foot. In this work, a biomimetic foot mechanism is investigated through analysis of the foot structure of the human-being. This foot mechanism consists of a toe, an ankle, a heel, and some springs replacing the foot muscles and tendons. Using five toes and springs, this foot can adapt to various environments. A mathematical modeling for this foot mechanism was performed and its characteristics were observed through numerical simulation.

Key Words : biomimetic(생체모방), foot design(발 설계), toe(발가락), spring mechanism(스프링 메커니즘)

1. 서론

최근에 인체 및 생물체 모방 로봇 설계 및 제어 방식이 연구자들의 많은 관심을 불러일으키고 있다. 이것은 바이오 시스템이 가지고 있는 우수한 모빌리티 및 제어 특성이라고 판단된다. 현재 다리를 지닌 이동형 로봇 중 발을 가진 로봇은 대부분 2족 로봇과 동물을 모방한 4족 로봇이다. 2족 로봇의 대표적인 로봇은 가장 널리 알려진 인간형 로봇인 일

본 혼다사의 아시모이다. 이 로봇은 현재 가장 부드러운 움직임을 보이고 있지만 언제나 다리를 구부리고 있으며 평평한 지면에서만 움직인다⁽¹⁾. 일본 와세다 대학교의 WABIAN-2는 아시모와 달리 1자유도의 발가락을 가지고 있다. 이 발가락이 있으므로 해서 더욱 인간 보행에 가까워 졌으며 더욱 안정적인 시스템이 되었다⁽²⁾. 일본 도쿄대학교의 인간형 로봇인 H7은 발바닥에 사람의 발바닥의 신경망을 모방해 여러 센서를 그물망처럼 만들어 지면의 상태를 읽어들이어 균형을

* 한양대학교 메카트로닉스공학과

+ 교신저자, 한양대학교 전자컴퓨터공학부 (bj@hanyang.ac.kr)

주소: 경기도 안산시 상록구 사3동 1271

잡는다⁽³⁾. 이처럼 점점 사람의 발에 가까워지고 있지만 보행만 안정된 것이지 다양한 지면에 대한 능동적인 대처가 어렵다. 또한 직육면체이며 발바닥에는 고무와 같은 쿠션⁽⁴⁾을 장착하거나 간단한 메커니즘의 스프링⁽⁵⁾을 사용하여 충격완화를 하였지만 구조적으로 충격흡수가 어렵다. 사람의 발이나 동물의 발은 여러 개의 관절로 이루어져 있어서 충격흡수를 한다. Chung과 Yi는 여러 개의 관절로 이루어진 사람과 동물의 발가락 메커니즘이 충격흡수를 더 잘 한다는 것을 해석적으로 밝혔다⁽⁶⁾.

본 논문에서는 환경 적응을 하는 사람 발의 뼈 구조와 근육에 대해 설명하고 이 뼈 구조와 근육을 3 자유도의 매니퓰레이터와 스프링으로 이루어진 모델을 제안하여 이에 대한 기구학 및 동역학 모델링을 수행하고, 사람발의 근육에 해당하는 스프링의 탄성을 해석한다. 또한 상용 동역학 모의실험 소프트웨어를 사용하여 제안된 생체 모방 발 메커니즘이 다양한 지면에 대하여 능동적으로 대처하는 능력을 파악하고자 한다.

2. 사람 발의 구조

Fig. 1은 사람 발의 뼈 구조와 발바닥의 근육 구조를 나타낸다. 발의 뼈는 크게 뒤꿈치에 해당하는 족근골과 발등 및 발허리에 해당하는 중족골과 발가락에 해당하는 족지골로 나뉘어진다. 발은 양쪽을 합하여 인체의 1/4에 해당되는 52개의 뼈가 있으며 60개의 관절, 214개의 인대, 38개의 근육을 비롯하여 수많은 혈관으로 구성된다. 이러한 혈관들은 거미줄 처럼 얽혀 다리를 통해 척수와 심장, 뇌로 연결된다. 발등을 이루는 골격은 서로 견고하게 연결되어 체중을 골고루 받쳐주며 걸을 때의 충격을 흡수해 주는 역할을 한다. 예를 들어서

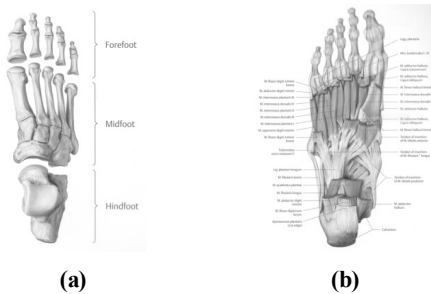


Fig. 1 (a) The bone of the foot from the dorsal view, (b) Right: the intrinsic foot muscles from the plantar view⁽⁷⁾

성인이 하루 동안 보행 중에 1,000톤의 무게를 견딜 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한 발바닥이 지면에 닿고 떨어졌다 하는 움직임은 펌프 작용을 해 혈액 순환을 돕기도 한다.

2.1 발의 아치 구조

발바닥의 안쪽은 일반적으로 움푹 들어간 아치(Arch)형이다. Fig. 2는 발의 아치 구조를 나타낸다. 발은 아치모양으로 생겼기 때문에 길을 걸을 때마다 일종의 스프링 역할을 한다. 체중이 실리면 스프링 길이가 줄어들 듯 아치가 약간 주저앉으면서 충격을 흡수하고 발을 바닥에서 떼면 아치가 올라가 발 근육들이 쉽게 수축, 이완을 할 수 있게 도와준다.

본 논문에서는 Fig. 3과 같이 아치형 발과 비슷한 4-bar 구조의 모델을 제시한다. 링크와 링크 사이에 스프링을 연결하여 아치의 완충 효과를 얻도록 한다. 여기서 F 는 수직 방향으로 가해진 힘 즉, 사람의 체중이며, k 는 스프링 계수, l 은 스프링 길이, d_1 과 d_2 는 늘어난 길이이다.

2.2 발의 움직임

사람의 발은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 환경 적응에 적합한 다양한 움직임을 가지고 있다. Fig. 4(a)는 발허리에 해당하는 중족골로 회전 움직임 시 각도를 나타내며 발 안쪽으로 더 많이 굽혀진다. Fig. 4(b)는 중족골을 강제로 움직였을 시의 좌우 움직임이며 이 또한 발 안쪽으로 더 많이 굽혀짐을 알 수 있다. Fig. 4(c)는 엄지발가락의 움직임을 나타낸 것으로 위로 70°, 아래로 45°로 위쪽으로 더 많이 굽혀짐을 알 수 있다.

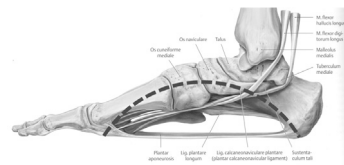


Fig. 2 Support of the longitudinal arch⁽⁷⁾

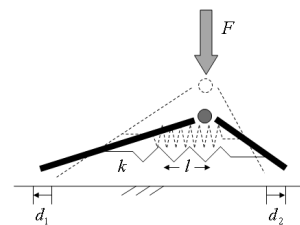


Fig. 3 The 4-bar linkage with an arch similar to the human foot

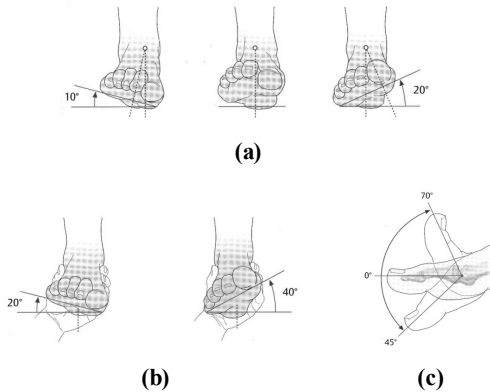


Fig. 4 Range of motion of the joints of the foot⁽⁷⁾

2.3 사람의 걸음새

Fig. 5는 사람의 한쪽 발이 지면에 닿는 걸음새를 나타내며 크게 3단계의 형태로 움직임을 알 수 있다. 첫 번째, 발 뒤꿈치가 먼저 지면에 닿고 두 번째, 발바닥과 발가락이 지면을 감싼 다음, 마지막으로 뒤꿈치가 들리는 움직임을 반복하게 된다.

2.4 발 설계

Fig. 6은 사람 발의 다양한 움직임을 관찰하여 고안한 생체 모방 발 메커니즘이다. 이 발 메커니즘은 뒤꿈치, 중족골,

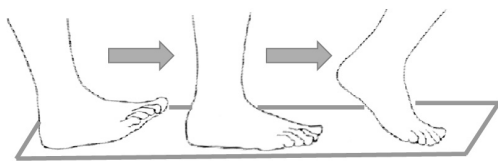


Fig. 5 Stance phase

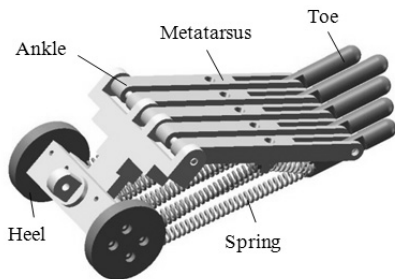


Fig. 6 Biomimetic Foot Mechanism

5 개의 발가락, 발목 관절을 가지고 있으며 5 개의 체인으로 묶여 있다. 또한 15 개의 스프링으로 구성되어 발의 외형을 유지할 수 있을 뿐만 아니라 다양한 환경에 능동적으로 대처할 수 있다. 중족골의 회전 움직임은 5 개의 체인의 조합으로 가능하며, 발가락의 상하 움직임 또한 가능하다.

3. 탄성 모델링

Fig. 7은 사람 발의 근육구조를 기반으로 한 2차원 3 자유도 모델을 나타낸다. 각각의 링크와 링크 사이에는 사람의 발바닥의 근육에 해당하는 모노 아티쿨러(Mono-articular)와 바이아티쿨러(Bi-articular) 형태의 스프링이 연결되어 있다⁽⁷⁾.

Fig. 8은 3자유도 인간형 매니퓰레이터의 기구학 및 동역학 해석을 위한 모델로서 l_1, l_2, l_3 는 링크의 길이, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 는 링크의 관절각, $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ 는 스프링의 위치, $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ 는 스프링의 자세를 나타낸다. Fig. 9는 3 자유도 생체모방 발 모델의 각각의 스프링과 기구학 매개변수들의 기하학 모델을 나타낸다.

관절 공간에서의 탄성 행렬 $[K_{\phi\phi}] \in R^{2 \times 2}$ 과 스프링 공간

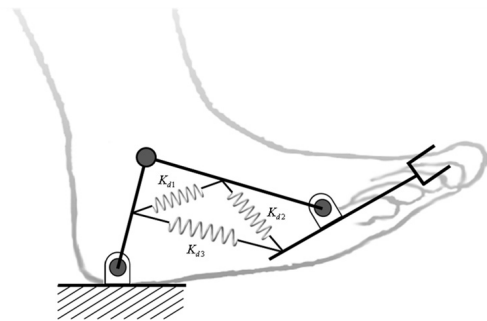


Fig. 7 Planar 3-DOF biomimetic foot model

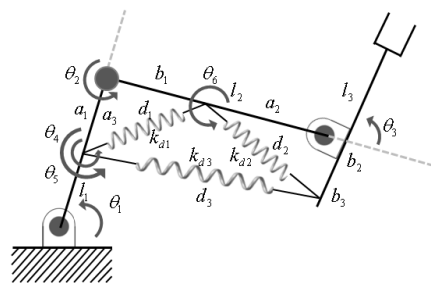


Fig. 8 Kinematic parameters of a biomimetic foot model

에서의 탄성 행렬 $[K_{dd}] \in R^{3 \times 3}$ 은 다음과 같이 정의된다⁽⁸⁾.

$$[K_{\phi\phi}] = [G_{\phi}^d]^T [K_{dd}] [G_{\phi}^d] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

여기서 스프링 공간에서의 탄성 행렬은 다음과 같이 정의되고

$$[K_{dd}] = \begin{bmatrix} k_{d3} & 0 & 0 \\ 0 & k_{d1} & 0 \\ 0 & 0 & k_{d2} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

스프링 공간을 관절 공간으로 표현한 자코비안 $[G_{\phi}^d] \in R^{2 \times 2}$

은 스프링 공간에서의 스프링들의 각 길이 d_1, d_2, d_3 를 두 개의 독립 관절 θ_2, θ_3 (2 자유도 직렬 체인에서의 두 관절)로 편미분하여 다음과 같이 표현되며

$$[G_{\phi}^d] = \begin{bmatrix} g_2^{d_3} & g_3^{d_3} \\ g_2^{d_1} & 0 \\ 0 & g_3^{d_2} \end{bmatrix}, \quad \left(g_j^{d_i} = \frac{\partial d_i}{\partial \theta_j} \right) \quad (3)$$

여기서 Fig. 9의 기하학적 모델로부터 스프링에 대한 자코비안 $[G_{\phi}^d]$ 의 각 구성 요소는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} g_2^{d_3} &= -l_2 \sin(\theta_2 - \theta_6) + b_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 - \theta_6) \\ g_3^{d_3} &= b_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 - \theta_6) \\ g_2^{d_1} &= -b_1 \sin(\theta_2 - \theta_4) \\ g_3^{d_2} &= b_2 \sin(\theta_3 - \theta_5) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (1)로 부터, 관절 공간과 스프링 공간의 탄성 요소들 간의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} k_{11} \\ k_{12} \\ k_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (g_2^{d_3})^2 & (g_2^{d_1})^2 & 0 \\ g_2^{d_3} g_3^{d_3} & 0 & 0 \\ (g_3^{d_2})^2 & 0 & (g_3^{d_2})^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{d3} \\ k_{d1} \\ k_{d2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

4. 동역학 모델

Fig. 3과 4에서 관찰한 인체 발의 동작특성을 고려한 공간형 발 모델을 살펴보고자 한다. Fig. 10은 생체 모방 발 메커니즘(Mechanism) 하나의 체인에 대한 기구학 및 동역학 해석을 위한 공간형 4 자유도 매니플레이터 모델을 나타낸다.

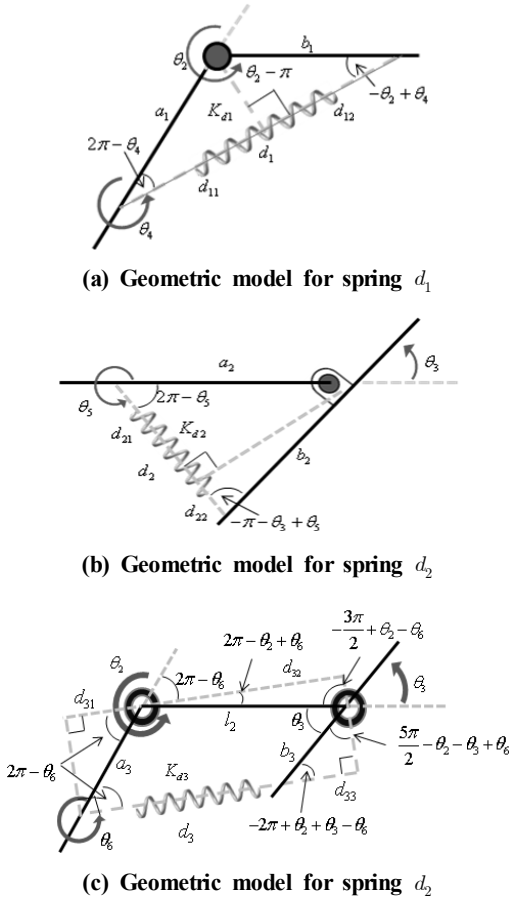


Fig. 9 Geometry of springs and kinematic parameters of a biomimetic foot model

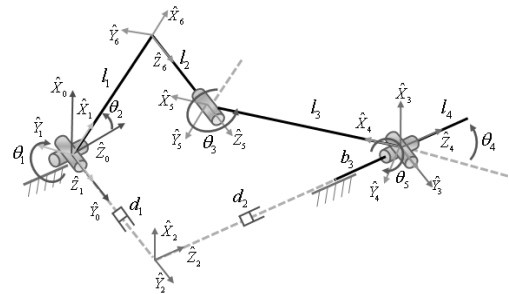


Fig. 10 One closed-chain model for the dynamic analysis

이 4 자유도 시스템은 지면에 닿아 폐쇄 체인을 형성할 경우에는 병렬 시스템으로 해석이 가능하다. l_2 의 길이가 있으면 5-bar, 없으면 4-bar 형태의 병렬형 구조를 가지고 있다. 본 절에서는 l_2 의 길이를 조절 할 수 있게 범용 적으로 사용하기 위해 5-bar로 해석한다. 이 모델의 운동성 (Mobility)은 2이고 독립 관절은 θ_1, θ_2 로 지면에 고정되어 회전되고 앞뒤 좌우 미끄러지는 움직임은 고려하지 않았으며, l_4 는 d_1 과 d_2 에 의해 앞뒤좌우로 움직인다. 종속 관절은 $\theta_3, \theta_4, \theta_5, d_1, d_2$ 로 정한다. 여기서, θ_1 과 θ_5 는 동일 회전축 선상에 놓여 있으며, 서로 같은 회전각을 갖는다. $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ 는 동일 평면상의 링크 회전각을 나타내며, d_1 은 θ_1 에 영향을 받아 변화되는 길이를 나타내며, d_2 는 발이 수직 방향으로 늘렸을 시 변화되는 길이를 나타낸다.

가상일(Virtual work)의 원리에 의해 5-bar의 모든 독립 관절에서 한 일과 뒤꿈치에서 발가락 끝이 지면에 닿은 부분까지 포함하는 4 자유도 직렬 체인의 모든 관절에서 한 일이 같다고 가정하면

$$\delta W = \tau_a^T \delta \phi_a = \tau_\phi^T \delta \phi \quad (6)$$

여기서 τ_a 는 5-bar의 독립 관절의 토크이며, τ_ϕ 는 4 자유도 직렬 체인 관절에서의 토크이다. 그리고 ϕ 와 ϕ_a 의 관계는 다음과 같다.

$$\delta \phi = [G_a^\phi] \delta \phi_a \quad (7)$$

식 (6)에 식 (7)을 대입하여 정리하면, 모션 토크는 독립 관절에 대한 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_a &= [G_a^\phi]^T \tau_\phi \\ &= [I_{aa}^*] \ddot{\phi}_a + \dot{\phi}_a^T [P_{aaa}^*] \dot{\phi}_a, \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $[I_{aa}^*]$ 와 $[P_{aaa}^*]$ 는 각각 독립 관절 집합으로 표현된 관성 행렬과 관성력 어레이 행렬로 나타내 진다⁽⁹⁾. 나머지 체인에 대한 동역학도 위와 동일한 방법으로 구한다. 이렇게 구한 5 개 체인의 모션 토크의 합은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{motion} &= \sum_{r=1}^5 \left([I_{aa}^*] \ddot{\phi}_a + \dot{\phi}_a^T [P_{aaa}^*] \dot{\phi}_a \right) \\ &= \left(\sum_{r=1}^5 [I_{aa}^*] \right) \ddot{\phi}_a + \dot{\phi}_a^T \left(\sum_{r=1}^5 [P_{aaa}^*] \right) \dot{\phi}_a \end{aligned} \quad (9)$$

발의 모션토크(τ_{motion})는 발에 작용하는 모든 외력 ($\tau_{external}$)에 의하여 작용하는데, $\tau_{external}$ 는 다음과 같이 구성되며

$$\tau_{external} = \tau_{stiffness} + \tau_{damper} + \tau_{weight} \quad (10)$$

여기서 $\tau_{stiffness}$ 와 τ_{damper} 은 관절의 탄성과 댐퍼에 의한 외력 토크이며, τ_{weight} 은 체중에 의한 외력 토크이다. 독립 관절의 탄성에 대한 외력 토크는

$$\tau_{stiffness} = \sum_{r=1}^5 [r k_{aa}] \delta \phi_a, \quad (11)$$

여기서 $[r k_{aa}]$ 은 r 번째 닫힌 체인에서 독립 관절에 대한 탄성 계수 행렬이다. 이 행렬은 직렬 체인의 모든 관절에 대한 탄성계수 행렬을 좌표 변환하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} [r k_{aa}] &= [r G_a^\phi]^T [r K_{\phi\phi}] [r G_a^\phi] \\ &= [r G_a^\phi]^T \left([r G_\phi^d]^T [r K_{dd}] [r G_\phi^d] \right) [r G_a^\phi] \end{aligned} \quad (12)$$

독립 관절의 댐퍼에 의한 외력 토크는

$$\tau_{damper} = \sum_{r=1}^5 [r b_{aa}] \dot{\phi}_a, \quad (13)$$

여기서 $[r b_{aa}]$ 은 r 번째 닫힌 체인에서의 댐핑 행렬이며, 열린 체인의 모든 관절 공간에서의 댐퍼와 스프링 공간에서의 댐퍼로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} [r b_{aa}] &= [r G_a^\phi]^T [r B_{\phi\phi}] [r G_a^\phi] \\ &= [r G_a^\phi]^T \left([r G_\phi^d]^T [r B_{dd}] [r G_\phi^d] \right) [r G_a^\phi] \end{aligned} \quad (14)$$

체중에 의한 외력 토크는

$$\tau_{weight} = \sum_{r=1}^5 \left\{ [r G_a^\phi]^T \left([r G_\phi^c]^T \begin{bmatrix} -mg \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \right\} \quad (15)$$

여기서 $[G_\phi^c]$ 는 각 링크의 중심까지의 자코비안이며, m 은 질량, g 는 중력 가속도를 나타낸다. 식 (9)를 각 가속도에 대하여 정리하면

$$\ddot{\phi}_a = \left(\sum_{r=1}^5 [{}_r I_{aa}^*] \right)^{-1} \left\{ -\dot{\phi}_a^T \left(\sum_{r=1}^5 [{}_r P_{aaa}^*] \right) \dot{\phi}_a + \tau_{external} \right\} \quad (16)$$

여기서 $\tau_{external}$ 는 식 (10)으로부터 구할 수 있다.

식 (16)을 두 번 적분 하면 독립 관절에 대한 관절의 각을 얻을 수 있으며, 기구학 식으로부터 나머지 종속 관절의 각을 얻을 수 있다.

5. 모의실험

5.1 동역학적 해석을 기반으로 한 모의실험

이 절에서는 위에서 언급한 생체모방 발 메커니즘의 동역학적 해석을 바탕으로 한 모의실험 결과를 보여준다. Fig. 11은 동역학적 해석을 바탕으로 한 생체모방 발 메커니즘의 모의실험 프로그램이다. 각각의 매개 변수를 조절하여 생체모방 발 메커니즘의 다양한 모션에 대한 모의실험을 수행 할 수 있다. Table 1은 모의실험에 사용된 한 개의 체인의 매개 변수들의 값을 나타낸다. 본 모의실험에서는 52kg의 체중이 두 발에 가해 질 때 한쪽 발에는 절반의 체중이 실린다고 가정하고 모의실험을 수행 하였다. 모의실험에서 사용된 5개 체인의 매개 변수들은 여러 사람들의 발목에서부터 발 뒤꿈치, 발목에서부터 발 앞꿈치, 발 앞꿈치에서 부터 엄지 발가락까지의

Table 1 Kinematic Parameters for the single chain

Parameter	Value
Link	$l_1=0.02m, l_2=0.02m, l_3=0.04m, l_4=0.015m$
Stiffness	$k_{d1}=k_{d2}=k_{d3}=12,000N/m$
Damping	$b_{d1}=b_{d2}=b_{d3}=200Ns/m$
Weight	26kg

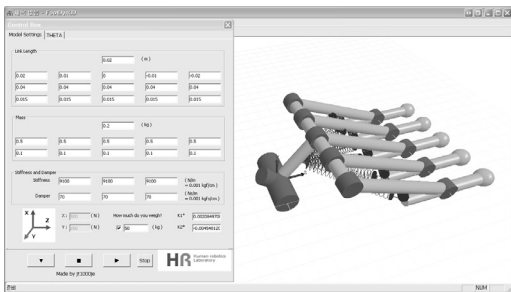


Fig. 11 The simulator for the dynamic analysis

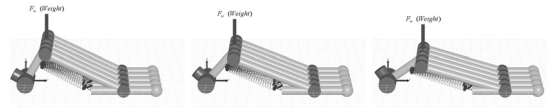


Fig. 12 The foot motion when the weight is applied vertically at the ankle position

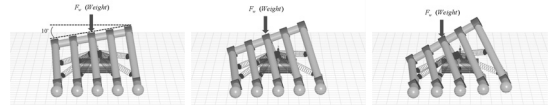


Fig. 13 Motion of the tilted foot by 10° when the weight is applied to the vertical direction at the ankle position

길이를 각각 측정하여 대략적인 평균값을 주었으며, 지면에 대한 마찰력은 고려하지 않았다. Fig. 12는 한쪽 발의 발목 부분에 수직 방향으로 전체 체중의 절반인 26kg의 체중이 가해 졌을 때 발의 움직임을 보여 준다. 그리고 Fig. 13은 발을 10° 기울인 상태에서 발목 부분에 체중을 가했을 때 발의 움직임을 보여 준다. 이러한 모의실험을 통하여 제한한 생체 발 모델이 인체 발과 유사한 동작을 보이고 있음을 알 수 있었다.

5.2 상용 동역학 프로그램 기반의 모의실험

본 절에서는 앞서 수행한 해석적 모의실험의 결과를 확인 하고, 보다 복잡하고 다양한 가상 환경에서 제한된 생체 모방 발 메커니즘의 특성을 살펴보기 위하여 Virtual Motion사에서 개발한 DFUL 동역학 모의실험 프로그램⁽¹⁰⁾을 사용

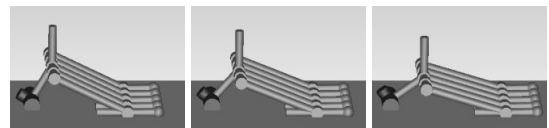


Fig. 14 The foot motion when a weight is applied (DAFUL)



Fig. 15 Motion of the tilted foot by 10° when a weight is applied to the vertical direction (DAFUL)

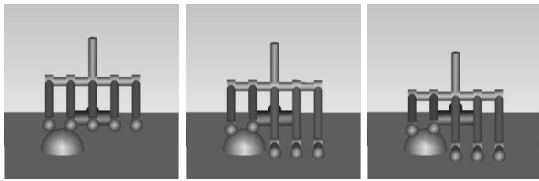
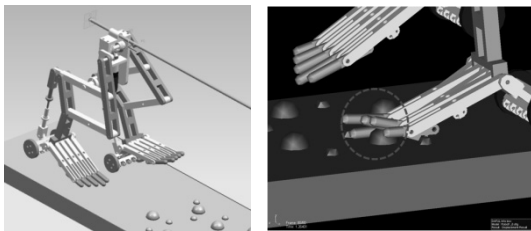


Fig. 16 Motion at uneven surface (DAFUL)

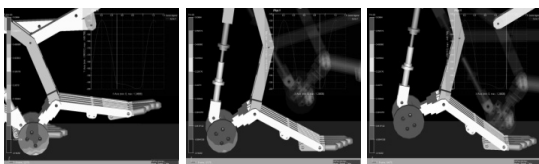
한다. Fig. 14와 Fig. 15는 앞서 수행한 모의실험 결과(Fig. 12와 Fig. 13)와 비슷한 결과를 보여 준다. Fig. 16은 울퉁불퉁한 지면에서 생체모방 발이 지면에 적응하는 모습을 보여주는데 이와 같이 생체 발 메커니즘은 다양한 지면에 순응하는 구조적 특성을 지니고 있음을 확인할 수 있다.

5.3 다양한 환경에서의 모의실험

사람의 걸음새를 모방한 메커니즘에 생체모방 발을 부착하여 가상의 환경을 걷는 모의실험을 수행하였다. Fig. 17(a)는 가상 환경과 생체모방 발 메커니즘을 장착한 걷는 로봇의 모의실험 모델을 보여 준다. 이 걷는 로봇은 사람과 비슷한 패턴의 걸음새⁽³⁾를 가지고 있으며, 한 개의 모터로 구동된다. 또한, 구조적으로 상하 운동을 하며 앞뒤로 움직인다. 발의 뒤꿈치와 다리 사이에는 사람의 아킬레스건을 모방한 스프링 메커니즘을 사용하였다. Fig. 17(b)과 Fig. 17(c)는 다 관절 발 메커니즘으로 인해 생체모방 발이 다양한 지면을 감싸



(a) (b)



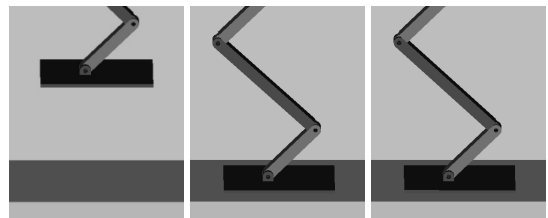
(c)

Fig. 17 Walking simulations(DAFUL), (a) Simulation model, (b) toe motion at the rough surface, (c) stance phase

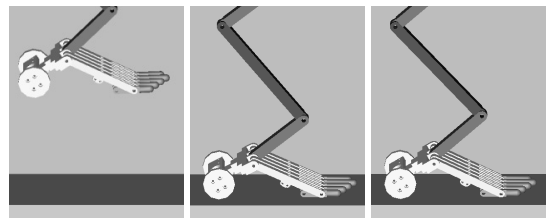
면서 움직이는 것을 볼 수 있다.

5.4 착지 모의실험

생체모방 발 메커니즘은 착지 동작에서 효과적이다. 본 모의실험에서는 생체모방 발 메커니즘의 성능 평가를 위해 평평한 발을 가진 메커니즘과 생체모방 발 메커니즘을 다양한 환경에서 착지 모의실험을 수행하였다. 이 착지 모의실험은

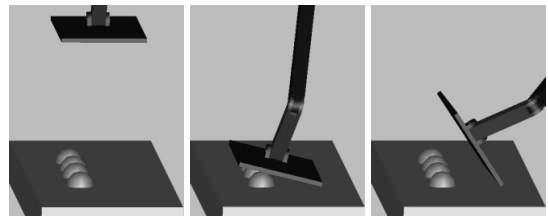


(a) Flat foot

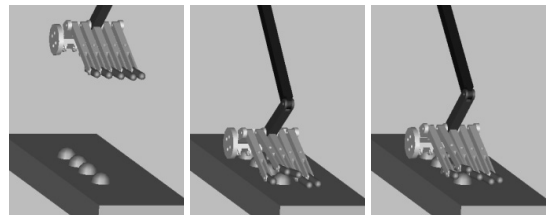


(b) Bio-mimetic foot

Fig. 18 Landing simulation at the even terrain (DAFUL)



(a) Flat foot



(b) Bio-mimetic foot

Fig. 19 Landing simulation at the simply uneven terrain (DAFUL)

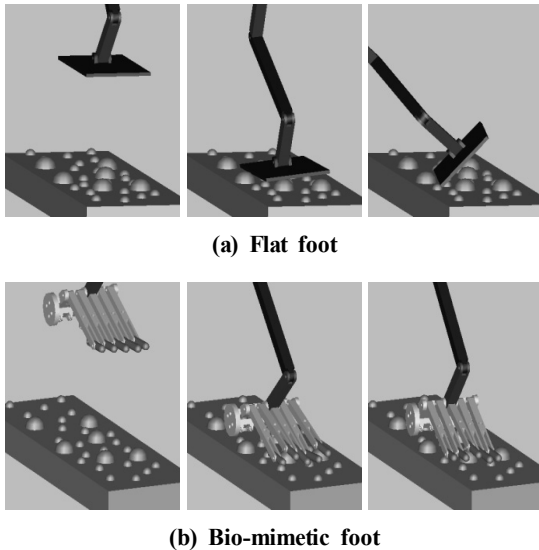


Fig. 20 Landing simulation at the complex uneven terrain (DAFUL)

별도의 제어를 필요로 하지 않는다. 단지, 시스템 자체의 동역학을 기반으로 모의실험이 수행 된다. Fig. 18은 평평한 지면에 대하여 평평한 발을 가진 메커니즘과 생체모방 발 메커니즘의 모의실험을 보여 준다. Fig. 19는 약간 울퉁불퉁한 지면에서의 모의실험을 보여 준다. Fig. 20에서는 좀 더 울퉁불퉁한 환경에서 평평한 발과 생체 모방 발의 모의실험을 보여 준다. 평평한 지면에서의 착지 모의실험의 경우 두 메커니즘 다 안정적으로 착지하는 동작을 볼 수 있다. 그러나 울퉁불퉁한 지면의 경우 평평한 발을 가진 메커니즘은 균형을 잡지 못하고 넘어지는 반면에 생체모방 발 메커니즘은 안정적으로 지면에 착지함을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문은 사람 다리를 가진 이동형 로봇의 환경 적응 발을 위한 생체모방 발 메커니즘을 제안 한 것이다. 이 생체모방 발 메커니즘은 사람 발의 다양한 움직임을 관찰하여 설계 된 것이며, 이에 대한 기구학 및 동역학 모델을 제시하고 해석과 모의실험을 수행하였다. 또한 상용 동역학 프로그램을 사용하여 다양한 환경에서 생체모방 발 메커니즘의 우수성을 보였다. 특히, 평평한 발을 가진 메커니즘과 생체 모방 발 메커니즘의 지면 착지 비교 모의실험을 통하여 다양한 환경에서의 생체모방 발이 더 효과적으로 지면에 착지한다는 것을 볼 수 있다.

참고 문헌

- (1) Sakagami, Y., Watanabe, R., Aoyama, C., Matsunaga, S., Higaki, N., and Fujimura, K., 2003, "The intelligent ASIMO: system overview and integration," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots and Systems*, pp. 2478~2483.
- (2) Takahashi, Y., Nishiwaki, K., Kagami, S., Mizoguchi, H., and Inoue, H., 2005, "High-speed pressure sensor grid for humanoid robot foot," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots and Systems*, pp. 3909~3914.
- (3) Ogura, Y., Shimomura, K., Kondo, H., Morishima, A., Okubo, T., Momoki, S., Lim, H., and Takanishi, A., 2006, "Human-like walking with knee stretched, heel-contact and toe-off motion by a humanoid robot," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots and Systems*, pp. 3976~3981.
- (4) Li, J., Huang, Q., Zhang, W., Yu, Z., and Li, K., 2008, "Flexible foot design for a humanoid robot," *Proc IEEE Int. Conf. Automation and Logistics*, pp. 1414~1419.
- (5) Yang, H., Shuai, M., Qiu, Z., Wei, H., and Zheng, Q., 2008, "A novel design of flexible foot system for humanoid robot," *Proc IEEE Conf. Robotics, Automation and Mechnronics*, pp. 824~828.
- (6) Chung, J., H. and Yi, B. -J., 2008, Intelligent mobility playing the role of impulse absorption, *in Proc. Int. Conf. Distributed Autonomous Robotic Systems*.
- (7) Schuenke, M., Schulte, E., and Schumacher, U., 2006, *General Anatomy and Musculoskeletal System*, Thieme, New York.
- (8) Kim, W., K., Yi, B., -J., and Cho, W., 2000, "RCC characteristics of planner/spherical three degree-of-freedom parallel mechanisms with joint compliances," *ASMETrans. J. Mechanical Design*, Vol. 122, pp. 10~16.
- (9) Lee, J., H., Yi, B., -J., and Suh, I., H., 2000, "Biomimetic trajectory planning via redundant actuation," *ProcIEEE/RSJInt. Conf. Intell. Robots and Systems*, pp. 1778~1784.
- (10) DAFUL : <http://www.virtualmotion.co.kr/eng/>