

생체모방 소형 점핑로봇의 설계 및 시뮬레이션§

호탐탄* · 최성학* · 이상윤*†

* 건국대학교 기계설계학과

Design and Simulation of Small Bio-Inspired Jumping Robot

Thanhnam Ho*, Sunghac Choi* and Sangyoon Lee*†

* Dept. of Mechanical Design and Production Engineering, Konkuk Univ.

(Received January 8, 2010 ; Revised June 16, 2010 ; Accepted June 18, 2010)

Key Words: Jumping Robot(점핑로봇), Shape Memory Alloy(형상기억합금), Bio-Inspired Robot(생체모방로봇)

초록: 본 논문은 형상기억합금 와이어에 의해 구동되는 점핑로봇에 대한 연구로서 기구의 설계와 컴퓨터 시뮬레이션을 포함하고 있다. 인간과 같은 척추동물 하지 근골격계의 구조와 기능을 모방한 구조의 점핑 기구를 설계하였다. 점핑 기구의 각 다리는 대퇴부, 정강이, 발의 세 부분으로 구성되고, 점핑에 필수적인 단일관절근육인 대둔근, 양관절근육인 대퇴직근과 비복근을 포함하는 구조이다. 각 근육을 형상기억합금 와이어로 대체한 컴퓨터 모델로 시뮬레이션한 결과, 로봇의 최대 점핑 높이가 로봇 신장의 약 4 배임을 확인하였다. 또한 구조가 보다 단순화된 로봇 모델과 점핑 성능을 비교하였고, 그 결과 근골격계를 모방한 모델이 점핑 높이 면에서 3.3 배 우수한 것으로 나타났다. 이러한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 형상기억합금이 소형 점핑로봇의 작동기로 사용하기에 적합함을 확인하였다.

Abstract: In this paper, we discuss the design and simulation of a jumping-robot mechanism that is actuated by SMA (shape memory alloy) wires. We propose a jumping-robot mechanism; the structure of the robot is inspired by the musculoskeletal system of vertebrates, including humans. Each robot leg consists of three parts (a thigh, shank, and foot) and three kinds of muscles (gluteus maximus, rectus femoris, and gastrocnemius). The jumping capability of the robot model was tested by means of computer simulations, and it was found that the robot can jump to about four times its own height. This robot model was also compared with another model with a simpler structure, and the performance of the former, which was based on the biomimetic design, was 3.3 times better than that of the latter in terms of the jumping height. The simulation results also verified that SMA wires can be suitable actuators for small jumping robots.

1. 서론

점핑(jumping)은 생물체가 지상에서 이동하기 위하여 사용하는 방법 중에서 매우 빠르면서도 에너지를 효율적으로 이용하는 방법에 해당이 된다. 예를 들어서 붉은 캥거루는 70 km/h 의 속도로 점프하면서 이동할 수 있다고 한다.⁽¹⁾ 또한 점핑 보행을 하는 생물체는 쉽게 장애물을 극복할 수 있으므로 다양한 지형에서 이동이 가능한 장점을 가지고 있다.

로봇과 같은 인공적인 기구에서 점핑 보행을 구

현하기 위해선 짧은 시간에 매우 큰 힘을 발생시킬 수 있어야 한다. 따라서 점핑 기구의 설계와 적합한 작동기가 점핑 로봇 개발에 핵심적인 요소이다. 기구 설계와 작동기의 경우, 생물체의 점핑 원리를 인공적인 시스템인 로봇에 적용하려는 시도가 다양하게 이루어져 왔다.⁽²⁻⁷⁾

우선 근육-힘줄(muscle-tendon) 시스템의 에너지 저장 원리를 모방하는 연구로서, 이 부류의 로봇은 대개 스프링에 저장된 에너지를 사용하여 점프를 하게 되고, 작동기는 스프링을 압축하거나 신장시키는데 사용된다.⁽²⁻⁵⁾ 이 경우 작동기가 점핑 기구를 직접적으로 구동하지 않기 때문에 작동기가 빠르고 강할 필요는 없다. 하지만 이러한 로봇들의 단점은 점핑과 착지의 제어에 어려움이 있다는 것이다.

두 번째 방법은 생물체 다리의 근골격계 시스템

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회(2009.

11. 4.-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, slee@konkuk.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

의 구조와 기능을 모방하여 인공적인 시스템에 적용하는 연구이다.^(6,7) 이 경우, 작동기는 생체근육과 같은 기능을 한다. 따라서 작동기는 점핑 운동의 특징을 반영하여 짧은 시간에 큰 힘을 낼 수 있어야 한다. 그 예로 신장 0.9m의 두 다리를 가진 Mowgli 로봇⁽⁶⁾과 길이 0.6m의 4족 토끼 모방 로봇⁽⁷⁾을 들 수 있다. 두 로봇에서 공통적으로 공압작동기가 점핑 동작을 구현하기 위한 작동기로 사용되고 있다.

공압작동기는 점핑에 필요한 큰 힘을 내는데 강점이 있고, 직선 운동에 적합한 장점이 있다. 그러나 공압작동기는 공압장치와 공압 공급원의 복잡성으로 인해서 로봇을 무겁고 크게 만드는 단점이 있다. 이는 소형 자기 충족형 이동로봇을 개발하는데 큰 제약 요인이 된다.

최근 인공근육작동기가 소형 이동로봇의 작동기로 관심을 모으고 있다.^(8~11) 인공근육작동기 중에서 형상기억합금(SMA: shape memory alloy) 작동기가 다음과 같은 이유로 소형 점핑로봇을 구동하기 위한 작동기로 적합한 것으로 평가된다. 첫째, SMA는 자체 무게를 거의 무시할 수 있을 정도로 가벼우므로 소형 로봇에 적합하다. 둘째, SMA는 원래 길이의 4 퍼센트 이상 변형이 가능하고, 중량 대비 힘의 발생 능력이 우수하다. 셋째, SMA는 직선적으로 변형하는 작동기이므로 생체근육의 수축과 이완 운동을 모방하는 기구에 적용하기에 적합하다.

본 논문에선 이러한 특징을 갖는 SMA 와이어를 로봇의 작동기로 이용하고 인체의 하지 골격시스템의 뼈대와 근육 구조를 모방한 점핑기구의 설계안을 제안한다. 그리고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 로봇의 점핑 성능을 입증함으로써 SMA 와이어가 점핑로봇의 작동기로 적합함을 보이고자 한다.

2. 점핑로봇의 다리 설계

점핑로봇이 성공적으로 기능을 수행하기 위해선 점핑이 효과적으로 이루어질 수 있는 기구의 설계가 필수적이다. 이를 위해서 우선 생물체, 특히 인간과 같은 척추동물 하지 근골격계의 구조와 기능에 대해 상세히 검토함으로써 기구 설계의 방향을 설정하였다.

인간의 하지는 Fig. 1과 같이 세 부분, 즉 대퇴부(thigh), 정강이(shank), 발(foot)로 나눌 수 있다. 인간의 근골격계의 구조와 기능에 대한 연구에 따

르면, 하지의 모든 동작은 아홉 개의 근육 그룹과 힘줄계가 골격계와 연결되어 작동한다.^(12~15) 각 관절의 움직임에 미치는 근육의 영향에 따라 하지의 아홉 개의 근육그룹은 두 가지 종류로 분류될 수 있다.

첫 번째 근육 그룹은 한 개의 관절의 움직임에만 영향을 미치는 단일관절근육을 포함한다. 단일관절근육 그룹에는 Fig. 1의 근육 중에서 장요근(iliopsoas), 대둔근(gluteus maximus), 광근(vastus group), 대퇴이두근(biceps femoris), 전경골근(tibialis anterior), 가자미근(soleus)이 해당된다. 반면에 양관절근육 그룹은 두 개의 다리 관절에 동시에 작용하도록 연결되어 있다. Fig. 1의 근육 중에서 대퇴직근(rectus femoris), 슬굴곡근(hamstrings), 비복근(gastrocnemius)은 양관절근육 그룹에 포함된다.

단일관절근육 중에서 대둔근, 광근, 가자미근은 점핑 시 필요한 에너지를 발생시키는데 중요한 역할을 수행한다.^(17,18) 발생된 에너지는 근육이 연결된 관절에 직접 작용하는데, 점핑 시 고관절과 무릎관절에서 필요한 양보다 많은 에너지가 발생되므로, 잉여에너지가 존재하게 된다.

양관절근육은 점핑 운동에서 매우 중요한 역할을 수행한다. 특히 대퇴직근은 대둔근에서 발생된 잉여에너지를 힙(hip)에서 무릎으로 전달하고, 비복근은 광근에서 발생된 잉여에너지를 무릎에서 발목으로 전달하는 기능을 담당한다. 이와 같이 점핑 시 양관절근육이 에너지 전달자의 역할을 수

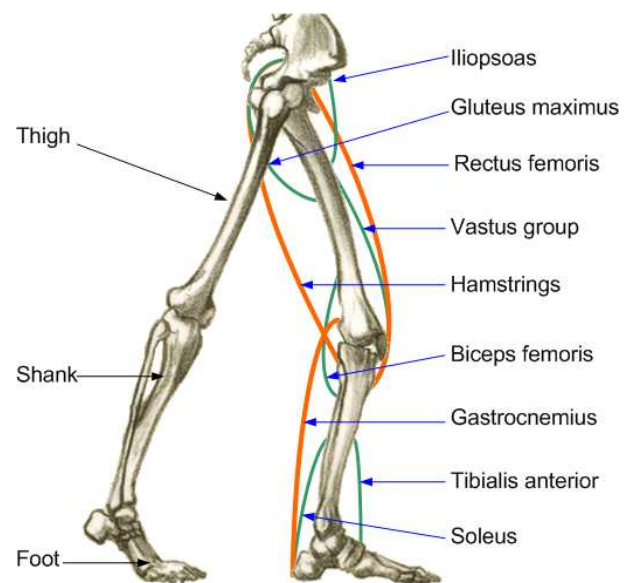


Fig. 1 Human's lower limb musculoskeletal system: the leg consists of three parts (thigh, shank, foot) that are actuated by nine kinds of muscles⁽¹⁶⁾

행하므로 신체 하부 근육의 크기나 중량이 상대적으로 적어도 다리의 하부를 수월하게 들어올릴 수 있게 되는 것이다. 실제로 4족 토끼 모방 로봇의 경우, 로봇의 뒷다리가 양관절근육인 대퇴직근과 비복근의 구조를 갖도록 설계하고 공압작동기를 적용하였다.⁽⁷⁾

본 논문에서 제안하는 점핑로봇의 경우, 이와 같은 척추동물 하지 근골격계의 구조에 기반하여 다리 구조를 설계하였다. 우선 다리는 Fig. 1의 근골격계 구조와 같이 대퇴부, 정강이, 발의 세 부분으로 구성하였다. 그리고 세 개의 회전 관절을 힙, 무릎과 발목에 배치하였다. 그러나 근육의 경우, 아홉 개의 근육 그룹을 Fig. 1과 동일하게 배치할 경우, 구조뿐만 아니라 동작의 제어에 매우 복잡하게 되므로 일정 정도의 단순화가 반드시 필요하다. 하지만 이 때 점핑에 필수적인 근육은 반드시 유지함으로써 점핑 기능 수행이 극대화될 수 있도록 하여야 한다.

에너지를 발생시키는 기능을 수행하는 단일관절 근육 중에서 대둔근은 힙에서 에너지를 발생시키는 주요한 근육이다. 이 에너지는 대퇴부와 몸통에서 사용될 뿐만 아니라 무릎까지 전달되므로, 점핑 동작을 일으키는데 가장 중요한 근육에 해당이 된다. 따라서 로봇의 다리 기구의 설계 시 대둔근을 포함하였다.

양관절근육은 에너지 전달 기능을 수행하는데, 점핑의 경우, 무릎과 발목 관절의 회전에 크게 영향을 주는 대퇴직근과 비복근이 특히 중요한 요소이다. 이 근육들은 두 가지 목적으로 로봇의 다리 기구 설계에 적용하였다. 첫째는 두 관절 사이의 에너지 전달, 그리고 둘째는 무릎과 발목에서 에너지를 발생시키는 것이다. 즉, 이에 해당되는 단일관절근육인 광근과 가자미근의 기능을 대체하는 역할을 하는 것이다.

이와 같이 대둔근, 대퇴직근, 비복근이 적용된 점핑로봇 다리 기구 설계 개념도를 Fig. 2에서 확인할 수 있다. Fig. 1과 비교하면 로봇의 다리 기구가 전반적으로 인체의 근골격 시스템을 모방한 구조임을 알 수 있다. 또한 다리를 움직이기 위한 세 가지 근육 그룹인 대둔근, 대퇴직근, 비복근을 세 개의 SMA 와이어로 대체할 수 있도록 설계하였다.

Fig. 2에서 SMA #1 (녹색)은 단일관절근육인 대둔근에 해당한다. 그리고 SMA #2 (주황색)는 대퇴직근에 대응되며, 이 근육은 무릎과 힙을 동시에 제어하는 양관절근육이다. SMA #3 (청색)은 양관절근육인 비복근의 역할을 수행하기 위한 것이다. 이것은 두 개의 인접한 관절인 발목과 무릎 모두에 영향을 주

는 근육이다. 로봇의 점핑 동작에서, 비복근의 작용에 의해 로봇이 앞으로 전진 이동하는 움직임을 얻는 동안 대둔근과 대퇴직근이 로봇을 위로 들어 올리는 역할을 주로 담당하는 것이다.^(6,19)

Fig. 1과 같은 인간의 하지 근골격계 구조와 달리 로봇의 다리에선 아홉 개의 근육이 세 개로 크게 감소되었으므로, 이를 보완하기 위하여 세 개의 스프링을 설치하였다. 이는 수동적인 스프링으로서, 힙, 무릎, 발목의 세 관절에서 굴근(flexor)과 신근(extensor) 쌍을 형성하도록 한 것이다. 점핑 동작 시 스프링의 기능을 보면, SMA 와이어가 수축할 때 스프링은 신장되게 된다. 반대로 SMA 와이어가 수축 되지 않는 기간 동안 스프링은 SMA 와이어가 본래의 형상을 빨리 회복할 수 있도록 도움을 주는 기능을 수행한다.

이러한 설계안의 도출 과정에서 SMA의 고유한 특징이 중요한 의미를 갖는다. 즉, SMA는 생체근육과 비교될 정도로 큰 수축률과 큰 힘의 생성이라는 특징을 갖는다. 또한 SMA는 매우 가볍고 가벼운 장점이 있다.

예를 들어 MMF150 SMA 와이어의 경우 수축률은 4.5%, 지름은 0.15 mm이고 비중량은 112 mg/m이다. SMA 와이어의 변형 원리는 가해진 열에너지에 따른 온도 변화에 기인하지만, 실제로 와이어의 양단에 적당한 전압을 가해 줌으로써 같은 효과를 얻을 수 있다. MMF 150 SMA의 경우, 작동 전압은 20.7 V/m이다.

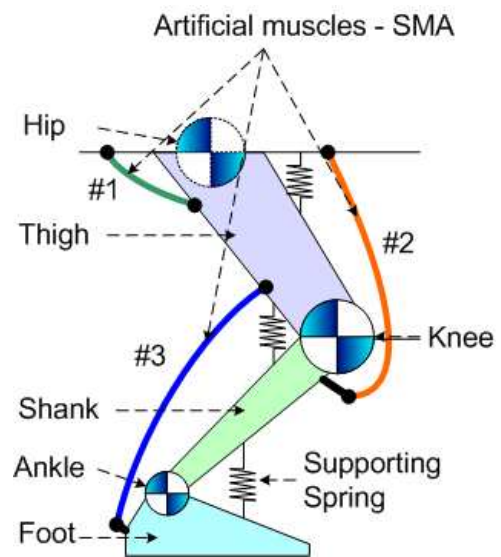


Fig. 2 Design of the robot leg with three leg parts (thigh, shank, foot) and three SMA wires for gluteus maximus (SMA #1), rectus femoris (SMA #2), and gastrocnemius (SMA #3)

3. 점핑로봇의 시뮬레이션

2 절에서 제안한 점핑로봇 설계안에 기반하여 컴퓨터로 로봇 모델을 생성하고, Working Model 소프트웨어를 사용하여 이 모델의 시뮬레이션을 수행하였다. 이 시뮬레이션의 주요 목적은 Fig. 1의 척추동물 근골격계의 구조와 기능을 모방하여 설계된 점핑로봇의 성능을 수직 점프 높이를 통해서 확인하는 것이다. 그리고 이를 통해서 SMA 와이어가 소형 점핑로봇의 작동기로 적합함을 검증하는 것이다.

또한 로봇 모델 다리를 Fig. 2와 같이 대퇴부, 정강이, 발의 세 부분으로 구성하고, SMA 와이어를 대둔근, 대퇴직근, 비복근에 대응하는 작동기로 사용하였을 때 발생시킬 수 있는 점핑 능력과 각 근육 그룹이 점핑에 미치는 영향을 확인하고자 하였다.

우선 컴퓨터 시뮬레이션에 적용할 두 가지 모델을 Fig. 3과 같이 생성하였다. Fig. 3(a)는 모델 A, Fig. 3(b)는 모델 B를 나타낸다. 두 모델의 동작은 모두 시상면에서 일어나고, 앞다리와 뒷다리는 동일한 형상을 가지고 있다. 점핑로봇 모델의 몸체 길이는 약 160 mm, 높이는 약 70 mm 이고, 중량은 약 70g 이다. 로봇의 몸체와 다리의 재료로 아크릴 수지가 적용되었다.

첫 번째 모델의 다리에서는 세 개의 링크를 가지는 기구가 적용되었다. 즉, 대퇴부, 정강이, 발에 대응되는 세 개의 링크로 구성되고, 각 링크의 길이는 순서대로 35, 40, 25mm 이다. 또한 각 다리에 세 개의 SMA 와이어가 적용되었고, 이는 위에서부터 대둔근, 대퇴직근, 비복근에 대응된다. 그림에서 로봇 다리의 세 관절인 힙, 무릎, 발목에 관절 회전각을 α , β , γ 로 표시하였다.

한편 Fig. 3(b)의 두 번째 모델은 첫 번째 모델보다 단순한 구조를 가지도록 구성하였다. 실제로 소형 로봇을 제작 시 구조의 단순성은 큰 이점이 되기 때문이다. 이 모델은 첫 번째 모델과 달리 각 다리가 두 개의 링크로만 이루어지는 구조이다. 두 링크는 대퇴부와 정강이에 대응되고, 길이는 각각 55, 40 mm 이다. 그림에서 로봇 다리의 두 관절인 힙과 무릎의 회전각을 각도를 α 와 β 로 표시하였다. 또한 점핑 시 두 개의 SMA 와이어가 각 다리를 구동하도록 되어 있다. 즉, 모델 B는 비복근에 대응되는 SMA 와이어가 제거되고, 발이 정강이에 붙어 있는 구조이다. 그 외 재료와 로봇 크기의 경우, 두 번째 모델은 첫 번째 것과 동일

하다.

로봇 모델의 점핑 시뮬레이션은 Working Model 소프트웨어에서 1 초간 수행되었다. 시뮬레이션에 적용된 SMA 와이어는 MMF150 형으로서 수축률은 4.5%이고 인장강도는 1.8kgf 이며, 최대 수축 속도는 약 45mm/s 이다. 모든 SMA 와이어는 0.4 초에서 수축을 시작하도록 시뮬레이션 하였다.

그리고 각 모델에 사용된 스프링의 스프링 상수는 0.05 N/mm 이다. SMA 와이어의 수축 시 작용하는 힘에 비해서 스프링의 힘이 상당히 작은 것이 유리하므로, 낮은 스프링 상수를 선택하였다. 또한 로봇의 발과 바닥 사이의 마찰계수를 1로 설정하여서 로봇의 미끄러짐을 방지하였다. 그리고 시뮬레이션 동안 로봇 프레임의 위치가 저장되도록 설정하였다.

Fig. 4에서 각 모델의 점핑 동작을 연속적으로 나타낸 그림을 확인할 수 있다. 그림의 (a)는 모델 A, (b)는 모델 B의 점핑 동작을 나타낸다. 또한 Fig. 5는 두 모델의 시뮬레이션 결과를 점핑 높이 면에서 비교한 것이다. 여기서 점핑 높이는 각 모델의 무게 중심과 지면 사이의 거리를 의미한다. Fig. 5에서 도시한 것과 같이 두 모델은 0.4 초에서 점핑을 시작하였고, 점핑은 수직방향으로만 발생하였으며, 점핑 곡선은 좌우대칭의 형상을 나타낸다.

두 모델의 점핑 높이를 보면, 모델 A는 로봇신장의 4 배에 가까운 높이를 점프하였다. 반면에 단

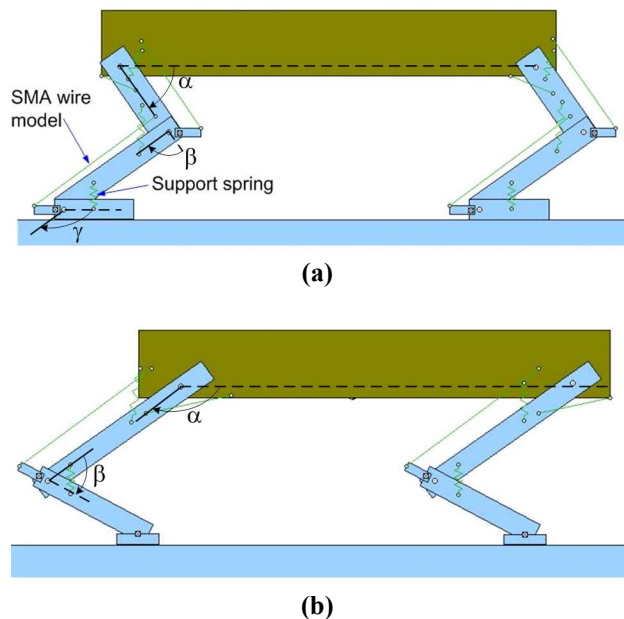


Fig. 3 Computer simulation models: (a) model A: three links and three SMA wires for each leg (b) model B: two links and two SMA wires for each leg

순한 구조의 장점을 가지는 모델 B는 첫 번째 모델에 훨씬 미치지 못하는 결과를 보여주었다. 점핑 높이를 비교하면, 첫 번째 로봇모델이 두 번째 모델에 비하여 약 3.3 배에 달하는 월등히 우수한 점핑 능력을 보유함을 알 수 있다.

이러한 점핑 능력 차이는 다리 기구 구조의 차이에 기인한 것으로 판단 된다. 모델 B의 경우, 척추동물 다리의 근골격 구조를 모방하여 설계된 관절과 링크의 감소로 인하여 전체적인 작동기 능력 역시 감소한 것이 원인으로 분석된다.

SMA 작동기의 작용으로 각 관절에서 발생하는 회전의 변화를 분석함으로써 두 모델의 점핑 능력 차이를 비교하였다. Fig. 6(a)에 도시한 것과 같이 모델 A는 힙, 무릎, 발목의 세 관절에서 회전이 일어난다. 각 관절의 회전각은 Fig. 3(a)의 α , β , γ 에 대응되고, 회전 방향은 시계반대방향에 정방향에 해당된다.

로봇 모델 A는 0.4 초에서 점핑을 시작하고 약 0.8 초에서 착지를 하는데, 관절각은 0.4 초에 회전을 시작해서 약 0.025 초 만에 최대 회전각에 도달하고 있다. 관절 별로 최대 회전각도의 크기를 보면, 힙은 약 32도, 무릎은 약 54도, 발목은 약 40도이다.

따라서 두 모델의 관절 회전을 비교하면, 모델 A의 힙과 무릎 관절이 약 1.6 배 빨리 회전하고 있음을 알 수 있고, 이것이 전체적인 로봇의 점핑 높이와 시간의 향상에 크게 기여하는 것으로 분석된다. 이것은 모델 B와 달리 모델 A에 설치된 비복근의 작용에 의해 발생하는 발목 관절의 회전이 무릎 관절에 영향을 주고, 무릎과 힙 사이 링크인 대퇴부의 움직임에도 간접적으로 영향을 주고 있는 것으로 판단 된다. 그러나 모델 B의 경우, 전반적인 점핑 능력이 모델 A에 비해 떨어지지만, 단순한 구조는 점핑로봇의 소형화에 유리한 점이 있다고 할 수 있다.

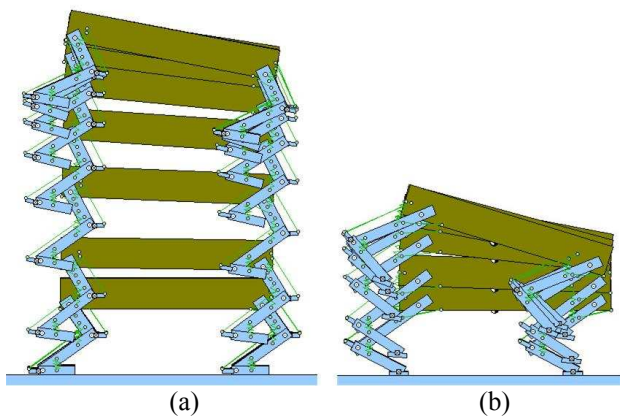


Fig. 4 Simulation of the robot model's jumping motion (a) model A (b) model B

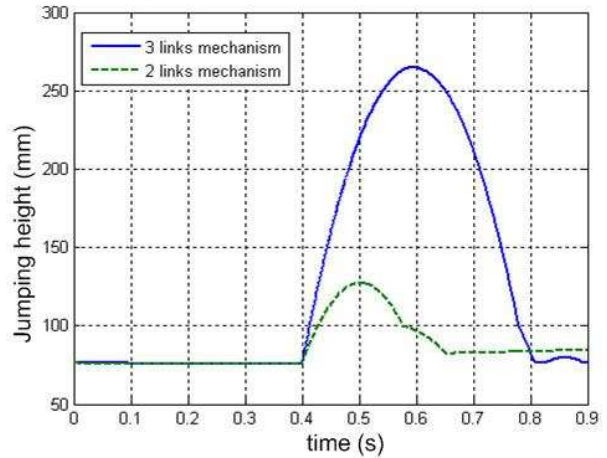


Fig. 5 Jumping height of robot models in computer simulation: model A (solid line) is found to be able to jump 3.3 times higher than model B (dotted line)

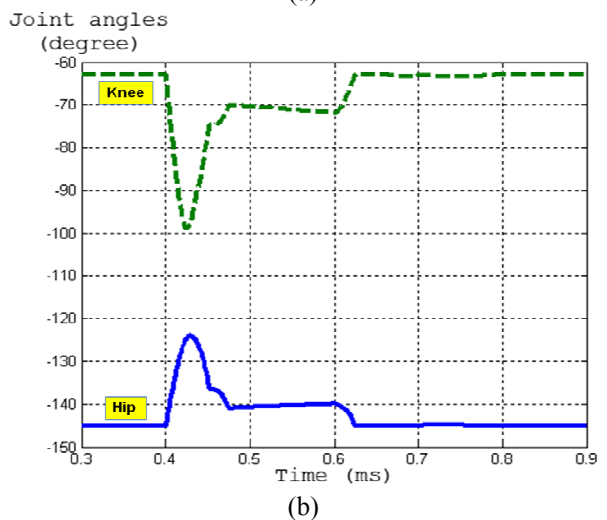
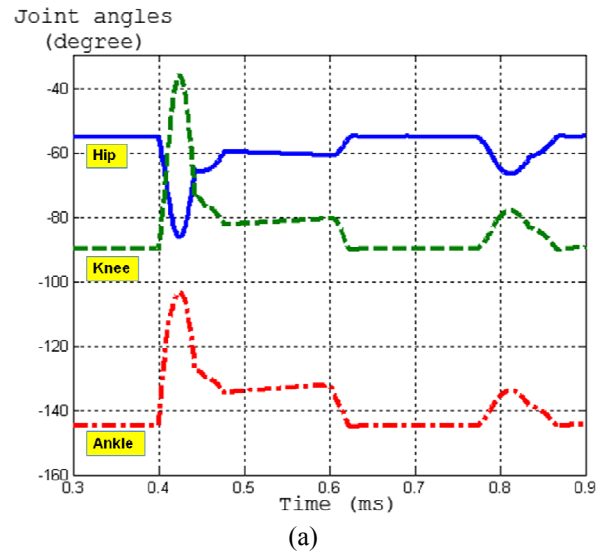


Fig. 6 Variation of joint angles in computer simulation (a) model A: rotation angles at hip, knee, and ankle, (b) model B: rotation angles at hip and knee

4. 결 론

본 논문에서는 소형 점핑로봇의 설계와 시뮬레이션에 관하여 보고하였다. 인간을 포함하는 척추동물 하지 근골격계의 구조와 기능에 대한 연구를 통해서, 점핑에 필수적인 세 개의 근육, 대둔근, 대퇴직근, 비복근을 적용한 로봇 다리의 설계안을 제시하였다. 각 근육을 SMA 와이어로 대체한 컴퓨터 모델을 개발하였고, 시뮬레이션을 통해서 점핑 성능을 검증하였다. 또한 각 다리에 두 개의 링크와 두 개의 SMA 와이어를 적용한 보다 단순화된 모델을 개발하였고, 두 가지 모델의 점핑 성능을 비교하였다.

컴퓨터 시뮬레이션 결과, 세 개의 링크와 지지스프링, 세 개의 SMA 와이어의 조합으로 이루어진 첫 번째 모델이 우월한 점핑 성능을 가짐을 확인할 수 있었다. 생물체 다리 구조를 모방한 이 기구는 로봇 모델 신장의 약 4 배를 점프할 수 있었고, 두 번째 모델에 비해 약 3.3 배 높이 점프할 수 있었다. 이러한 시뮬레이션 결과로 생체 모방로봇 설계의 유용성과 SMA 와이어가 소형 점핑로봇의 작동기로 적합함을 확인하였다.

본 연구는 SMA 와이어를 작동기로 상용한 소형 점핑로봇의 개발을 위한 초기 연구이고 점핑으로 이동이 가능한 소형 자율 이동로봇이라는 최종 목적의 달성을 위하여 여러 가지 추가적인 연구들이 향후 수행될 것이다. 특히 점핑으로 이동하기 위해선 점핑 시 일정 거리를 전진할 수 있어야 하므로 SMA 와이어를 작동시키는 최적의 순서를 찾는 것이 필요하다. 이에 대해서도 생체모방적 연구가 유용할 것으로 예상된다. 또한 연속적인 점핑이 가능해야 하므로 이에 대한 제어 기법의 개발이 이루어져야 한다. 이러한 추가 연구를 통해서 소형 점핑 로봇의 프로토타입을 제작, 실험할 계획이다.

후 기

이 논문은 2009 학년도 건국대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Wikipedia, "Kangaroo," <http://en.wikipedia.org/wiki/Kangaroo>.
- (2) Shin, Y. H., Ryu, K. U., Kim, T. J., Lee, J. H. and Choi, J. Y., 2007, "Mechanism and Control of a Jumping Robot," *International Conference on Control, Automation and System*.
- (3) Tsukagoshi, H., Sasaki, M., Kitagawa, A. and Tanaka, T., 2005, "Jumping Robot for Rescue Operation with Excellent Traverse Ability," *International Conference on Advanced Robotics*.
- (4) Scarfoglio, U., Stefanini, C. and Dario, P., 2007, "Design and Development of the Long-Jumping "Grillo" Mini Robot," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- (5) Scarfoglio, U., Stefanini, C. and Dario, P., 2009, "The Use of Compliant Joints and Elastic Energy Storage in Bio-Inspired Legged Robots," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 44, No. 3, pp. 580~590.
- (6) Niiyama, R., Nagakubo, A. and Kuniyoshi, Y., 2007, "Mowgli: A Bipedal Jumping and Landing Robot with an Artificial Musculoskeletal System," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- (7) Oshima, T., Momose, N., Koyanagi, K., Matsuno, T. and Fujikawa, T., 2007, "Jumping Mechanism Imitating Vertebrate by the Mechanical Function of Bi-articular Muscle," *International Conference on Mechatronics and Automation*.
- (8) Kim, B., Lee, M. G., Lee, Y. P., Kim, Y. and Lee, G., 2006, "An Earthworm-Like Micro Robot Using Shape Memory Alloy Actuator," *Sensors and Actuators A*, Vol. 125, pp. 429~437.
- (9) Hoover, A. M., Steltz, E. and Fearing, R. S., 2008, "RoACH: An Autonomous 2.4g Crawling Hexapod Robot," *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 26-33.
- (10) Berry, M. and Garcia E., 2008, "Bio-Inspired Shape Memory Alloy Actuated Hexapod Robot," *Proc. SPIE*, Vol. 6928, 69281M.
- (11) Ho, T. and Lee, S., 2009, "Piezoelectrically Actuated Biomimetic Self-Contained Quadruped Bounding Robot," *Journal of Bionic Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 29~36.
- (12) Spagele, T., Kistner, A. and Gollhofer, A., 1999, "Modelling, Simulation and Optimisation of a Human Vertical Jump," *Journal of Biomechanics*, Vol.32, No. 5, pp. 521~530.
- (13) Guyton, A. and Hall, J., 2005, *Textbook of Medical Physiology*, Elsevier Saunders, Philadelphia, p. 1104.
- (14) Graaff, V. D., 2001, *Human Anatomy*, McGraw-Hill, New York, p. 840.
- (15) Mader, S. S., 2004, *Understanding Human Anatomy and Physiology*, McGraw-Hill, New York, p. 444.
- (16) Langeneckert, M., "The Human Machine: Art and Anatomy," <http://shutupanddraw.blogspot.com.blogspot.com>.
- (17) Pandy, M. G., Zajac, F. E., Sim, E. and Levine, W. S., 1990, "An Optimal Control Model for Maximum-

- Height Human Jumping,” *Journal of Biomechanics*, Vol. 23, No. 12, pp. 1185~1198.
- (18) Bobbert, M. F. and van Ingen Schenau, G. J. , 1988, “Coordination in Vertical Jumping,” *Journal of Biomechanics*, Vol. 21, pp. 249-262.
- (19) Lutz, G. J. and Rome, L. C., 1996, “Muscle Function During Jumping in Frogs. II. Mechanical Properties of Muscle: Implications for System Design,” *Am J Physiol Cell Physiol*, Vol. 271, No. 2, pp. C571~578.