

## 점핑로봇 개발을 위한 생체모방적 설계 방법의 리뷰

# Review of Biomimetic Designs for the Development of Jumping Robots

호 탐 탄, 승 현 수, 이 상 윤\*  
(Thanhtam Ho<sup>1</sup>, Hyunsoo Seung<sup>1</sup>, and Sangyoon Lee<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Konkuk University

**Abstract:** Jumping is considered as a suitable way for realizing fast locomotion on the ground. As for the issue of developing mobile robots that can jump up and forward enough for accomplishing useful missions, this paper first introduces two types of jumping principles that are found in biological animals or insects. We also present how the principles are applied to several jumping robot examples that include outcomes for the past a few years and also our recent one. Design ideas and features of the robots are explained and compared in order to discuss important issues and guidelines for the design of jumping robots.

**Keywords:** jumping locomotion, biomimetics, jumping robot, legged robot

### I. 서론

많은 동물의 경우 점핑(jumping)은 먹이를 잡거나 위기 상황에서 탈출하기 위한 주요한 이동 방법이다. 캥거루를 예로 들면, 꼬리와 앞다리를 삼각대와 같이 사용하여 천천히 이동하는 보행 방법도 있지만, 점핑 또한 주요한 이동 수단 중 하나이다. 개구리는 점핑을 이동 수단으로 사용하는 또 다른 척추동물이다. 이 양서류는 자신의 몸길이가 수십 센티에 불과하지만 약 10 m의 거리를 전방으로 점프할 수도 있다[1]. 메뚜기는 점핑에 매우 뛰어난 곤충으로 잘 알려져 있다. 이 곤충은 점핑을 이동과 위기 상황의 탈출 방법에 사용하고 있다. 한편 Harpegnathos saltator라는 개미는 먹이를 잡기 위해 점핑을 이용한다[2].

점핑을 이용한 생물의 이동 방식과 점핑 기구의 특성은 일반적으로 다음과 같다.

- 점핑 동작에는 매우 짧은 시간 내에 큰 에너지의 방출이 요구된다.
- 점핑 거리와 높이는 그 동물의 크기에 비해 큰 편이다. 따라서 그 운동 속도는 다른 지상 보행 방법에 비해 빠르다.
- 점핑을 이용하는 생물은 그들의 몸체보다 몇 배나 높이 뛰어서 장애물을 극복할 수 있다.
- 대개 점핑을 위한 에너지는 점진적으로 저장되므로 구동 시스템이 짧은 시간 내에 큰 힘을 생성할 필요는 없다. 때로는 작은 구동기가 큰 움직임을 만들어 낼 수 있다.
- 많은 경우, 특히 곤충에서 점핑 시 착지가 제어되지 않는다. 착지 지점과 자세가 매우 임의적인 경향을 보인다. 지난 수 년 동안 점핑로봇에 대하여 다양한 연구가 발표되

었다[3-12,21]. 로봇의 전체적인 크기와 무게, 그리고 구동기 등 여러 가지 면에서 다양성을 확인할 수 있다. 또한 각 로봇은 점핑 능력과 착지 안정성 면에서 장단점을 가지고 있다. 예를 들어, 한 소형 점핑로봇은 단지 12 cm의 신장과 9.8 g의 무게를 갖는다[3]. 반면 토끼를 모방한 한 점핑로봇은 길이가 0.6 m이고 무게는 3.5 kg이다[4]. 거의 모든 점핑로봇의 구동 시스템은 DC 모터나 공압구동기와 같은 보편적인 구동기를 사용한다. 이러한 특징은 Mowgli 로봇[5], Grillo 로봇[6], 소형 점핑로봇[3], 구조용 점핑로봇[7] 혹은 Jollbot [8,9]에서 찾아볼 수 있다. 하지만 사족 점핑로봇[10]과 일족 점핑로봇[11]과 같은 일부 점핑로봇은 형상기억합금(SMA) 또는 압전재료로 만든 신소재 구동기를 사용한다. 본 논문은 생물의 점핑 원리를 소개하고 주요 점핑로봇의 장단점에 대한 분석을 제공함으로써 점핑로봇의 연구 개발에 대한 생체모방적 설계 방안을 제시하고자 한다.

### II. 생물의 점핑

생물의 점핑 원리는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 즉, 지렛대(leverage) 시스템을 이용하여 직접적으로 점핑 동작을 구동하는 것과 에너지 저장 시스템을 이용하여 간접적으로 점핑을 구동하는 것이다. 첫 번째 원리는 긴 다리를 가진 생물체, 예를 들어 개구리, 캥거루, 귀뚜라미, 또는 메뚜기의 점프에서 발견할 수 있다. 두 번째 원리는 벼룩이나 거품벌레(froghopper)와 같은 짧은 다리 곤충에서 찾아볼 수 있다[12]. 인간 또는 다른 척추동물의 점핑은 근육에 의해 직접 구동되므로 첫 번째 원리로 분류 될 수 있다.

#### 1. 직접 구동 방식의 점핑

메뚜기는 근육의 직접 구동이 지렛대 구조의 다리에 적용되어 점핑하는 생물의 전형적인 예이다. 특히 여섯 개의 다리 중 두 개의 뒷다리가 점프에 크게 기여하는데, 이 뒷다리의 구조를 그림 1에서 확인할 수 있다. 메뚜기 뒷다리에서 점프에 기여하는 주요 요소는 대퇴부와 상대적으로 긴 다리에 있는 큰 근육 시스템이다. 대퇴부 안쪽의 근육 시스템은 작은 굴근(flexor muscle)과 큰 신근(extensor muscle)을 포함한

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 11. 15., 수정: 2011. 12. 5., 채택확정: 2011. 12. 20.

호탐탄, 승현수, 이상윤: 건국대학교 기계설계학과

(thanhtam.h@gmail.com/pillios@konkuk.ac.kr/slee@konkuk.ac.kr)

※ 본 연구는 2009년 정부(교육과학기술부) 재원으로 한국연구재단의 지원(2009-0077778)과 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 해외우수연구기관유치사업(2011-00260)으로 진행된 연구임.

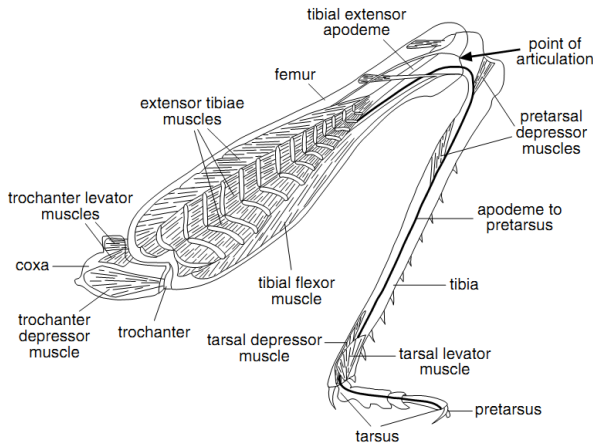


그림 1. 메뚜기 뒷다리의 근골격계[2,12].  
 Fig. 1. The musculoskeletal system of the grasshopper's rear leg (adapted from [2,12]).

다. 두 근육 시스템의 서로 다른 크기와 구조로 인해 서로 다른 힘이 생성될 수 있다. 경골의 굴근은 0.7 N까지 생성할 수 있지만 신근은 16 N, 즉 굴근 보다 약 23배 더 큰 힘을 생성할 수 있다[2].

메뚜기의 점프는 세 단계로 구성되어 있다. 첫 번째 단계에서는 굴근이 작동되어 경골(tibia)을 당김으로써 경골이 대퇴골(femur) 근처까지 이동되도록 한다. 이 때 신근은 구동되지 않는다. 두 번째 단계에서는 두 근육 모두 활성화된다. 그러나 굴근이 대퇴골-경골 관절에 부착된 지점이 신근의 부착 지점보다 더 멀리 떨어져 있으므로, 신근이 굴근 보다 훨씬 더 큰 힘을 생성하지만 경골은 계속 정지상태를 유지한다. 이 두 가지 힘은 semi-lunar process라는 대퇴골-경골 관절의 한 부분을 변형시키는데, 각피(cuticle)로 만들어진 이 부분이 구부러지는 것이다.

마지막 단계에선 굴근이 비활성화 상태에 있고 semi-lunar process가 원래의 상태로 이완되며, 신근은 경골의 윗부분을 강하게 잡아당긴다. 이 때 경골은 상당히 길기 때문에 신근의 부착지점에 매우 가까운 대퇴골-경골 관절이 지렛대 받침과 같은 역할을 하게 된다. 그러므로 지렛대 기구는 경골의 끝에서 움직임을 증폭하고, 이로 인해 곤충이 위로 점프할 수 있게 되는 것이다.

정리하면, 대퇴부 내의 신근과 굴근 근육 그룹과 대퇴골-경골 관절이 점핑 성능을 결정하는 가장 중요한 요소라고 할 수 있다. 이러한 점핑 원리는 직접 구동 점핑이라고 할 수 있는데, 그 이유는 경골이 펴지는 것의 대부분이 점핑의 마지막 단계에서 신근에 의해 직접적으로 만들어지기 때문이다. 이는 메뚜기의 대퇴부 안쪽 근육의 무게가 전체 몸무게의 약 14%를 차지하는 것의 원인으로 설명이 될 수 있다[13].

한편 인간과 같은 포유류의 점핑의 원리에서도 유사한 점을 발견할 수 있다. 그러나 인간 다리의 근골격 시스템은 훨씬 더 복잡한데, 그림 2에서 단순화된 근골격 시스템을 확인할 수 있다. 인간의 근골격 시스템은 뼈대와 함께 아홉 개의 근육 그룹과 힘줄로 구성되어 있다[14-16].

인체의 다리는 대퇴부(thigh), 정강이(shank), 발(foot)의 세 부분으로 나눌 수 있다. 다리의 아홉 개 근육 그룹은 단일관

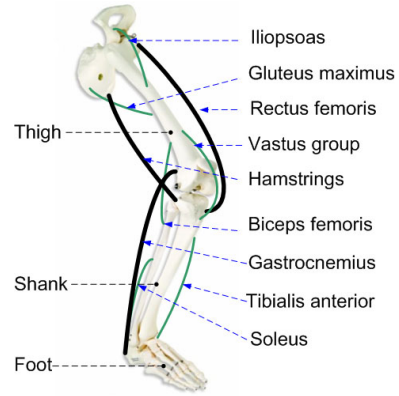


그림 2. 인체 다리의 근골격계.  
 Fig. 2. The musculoskeletal system of the human's leg.

절 및 양관절 근육의 두 종류로 나누어진다. 단일관절 근육은 한 개의 관절에 대해 작동하는 것으로, 장요근(iliopsoas), 대둔근(gluteus maximus), 광근(vastus group), 대퇴이두근(biceps femoris), 전경골근(tibialis anterior), 가자미근(soleus)이 해당된다. 양관절 근육은 두 개의 관절을 제어하기 위해 연결되고, 그림 2의 대퇴직근(rectus femoris), 슬굴곡근(hamstrings), 비복근(gastrocnemius)이 양관절근육 그룹에 포함된다.

점핑 운동에서 단일관절 근육은 관절에서 주요한 에너지 생성원으로 사용된다. 그리고 양관절 근육은 힙(hip)과 무릎에서 잉여 에너지를 발목까지 전달하는 에너지 전달 수단으로 작동한다. 점핑 동작에서 무릎으로부터 발목에 전달된 에너지는 발목이 지면에서 떨어져 점핑하는 동안 필요한 총 에너지의 1/4 이상으로 추정된다. 따라서 양관절 근육은 하부 근육 그룹의 크기와 무게를 줄일 수 있는 중요한 요소가 된다. 결과적으로 다리의 하부가 더 쉽게 가속될 수 있는 것이다. 점핑 시 모터 제어를 위한 가장 중요한 요소는 근육의 작동 순서라고 할 수 있다. 인간의 점핑 동작 연구에서 점핑 시 몸통에서 가까운 근육부터 작동된다는 것을 확인할 수 있다[16,17].

2. 간접 구동 방식의 점핑

짧은 다리를 가진 벼룩이나 거품벌레와 같은 곤충 역시 메뚜기와 같이 점핑 시 뒷다리를 이용한다. 하지만 메뚜기와 달리, 이들은 다리의 길이가 몸체보다 상당히 짧기 때문에 지렛대 시스템의 원리를 이용하지 못하고, 에너지의 저장과 급속한 방출이라는 캐터펄트(catapult) 원리를 이용한다. 직접 구동 방식 점핑의 경우 경골이 대퇴골-경골 관절에서 회전하는 것이 중요한 역할을 차지하는 반면, 대개 다리가 짧은 곤충의 점핑은 기절(coxa)-전절(trochanter) 관절에서 다리가 회전하는 것에 의해 발생한다[2]. 그림 3은 거품벌레의 뒷다리를 나타낸 것이다.

거품벌레의 점핑은 준비 단계, 에너지 저장 단계, 그리고 점핑 단계의 세 단계로 구분할 수 있다. 준비 단계에서 흉부 안쪽의 전절 하체 근육은 다리를 천천히 위로 당겨 올려서 전절 돌출부(coxal protrusion)에 걸려서 고정되도록 한다(그림 3의 오른쪽을 참조). 두 번째 에너지 저장 단계에선 다리가 고정된 상태에서 전절 하체 근육에 의해 발생된 힘이 흉부의 각피를 변형시키는데, 이 각피가 탄성 시스템의 기능을 한다.

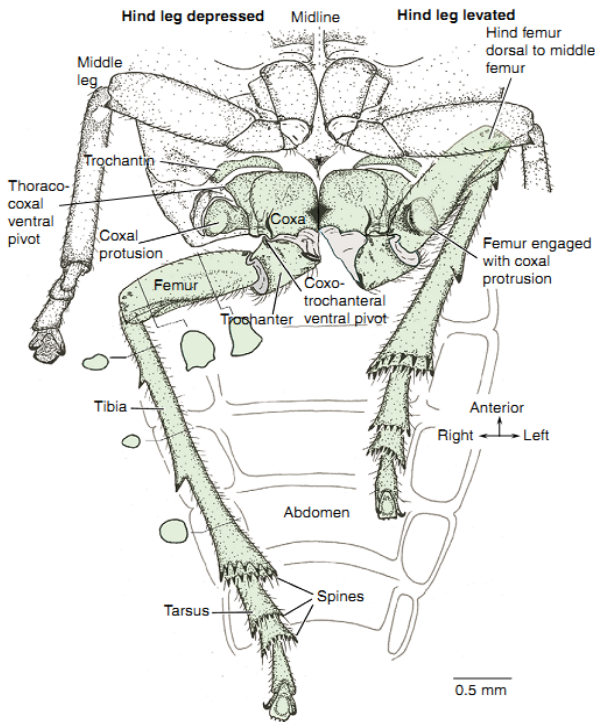


그림 3. 거품벌레의 뒷다리[18].  
Fig. 3. The froghopper's hind legs (adapted from [18]).

즉, 근육에서 나온 힘이 흉부 각피에 탄성에너지를 형태로 저장되는 것이다.

그리고 마지막 점핑 단계에선 다리의 퇴절(femur)이 고정 상태에서 풀리면서 저장되어 있던 탄성에너지가 다리를 밀게 된다. 이 때 다리는 기절-전절 관절에서 빠르게 회전하고, 이 순간의 회전속도는 약 75500 deg/s에 달한다. 이러한 고속 회전이 퇴절에 대한 경절(tibia)의 회전과 통합되면서 거품벌레의 점핑이 발생하는 것이다. 점핑의 세 단계는 단 1 ms 만에 완료된다[18]. 거품벌레의 경우 주된 에너지를 생성하는 근육이 다리가 아닌 흉부 안쪽의 전절 하체 근육이라는 점이 주목할 만한 특징이다. 이로 인해 뒷다리의 무게는 단지 몸 전체 무게의 2% 밖에 되지 않는다.

**III. 생물체 모방 점핑로봇**

간접 구동 방식의 점핑은 더 먼 거리를 점핑하는 것에 도움이 되지만 착지 안정성에 문제점을 가지고 있다. 대부분의 곤충의 경우, 점핑 후 착지 지점과 자세가 제어되지 않는다[2]. 반면 직접 구동 방식은 착지에 있어 장점을 가지고 있다. 이 점핑 방법은 동물 전체가 사용하는 방법은 아니지만 적어도 개구리, 캥거루, 토끼와 같은 많은 척추 동물의 예에서 볼 수 있듯이 착지를 안정적으로 수행할 수 있는 방법이다. 따라서 점핑로봇의 설계에 있어서 점핑 방법의 선택은 설계자의 목적에 의해 결정된다. 이 절에서는 서로 다른 점핑 방식을 구현한 여섯 가지 점핑로봇의 설계와 특징을 소개하고, 점핑 성능을 비교한다.

**1. 직접 구동 방식을 사용하는 점핑로봇**

Mowgli 로봇은 이족 점핑로봇으로 직접 구동 방식을 사용하고 있다[5]. 이 로봇은 그림 4와 같이 인간의 점핑 구조와

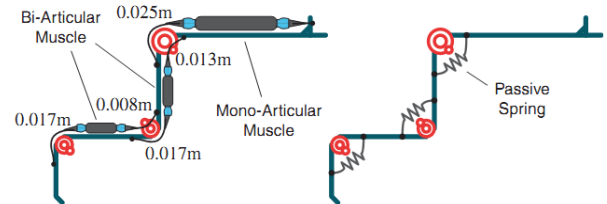
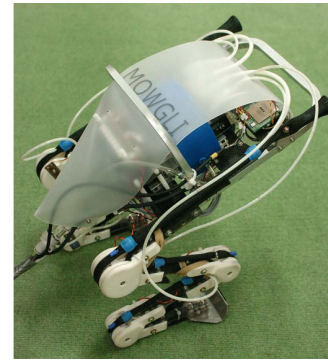


그림 4. Mowgli 로봇과 다리 구조[5].  
Fig. 4. Mowgli robot and the structure of one leg [5].

유사하게 네 개의 부분으로 이루어져 있다. 세 개의 공압 구동기가 인간 다리의 신근과 같이 구동한다. 그리고 세 개의 스프링이 굴근처럼 작동한다. 이러한 설계로 로봇이 양관절과 단일관절 근육 그룹의 기능을 모두 사용할 수 있을 뿐만 아니라 구조의 복잡성도 감소시킬 수 있다.

로봇의 신장은 약 0.5 m, 무게는 약 1.5 kg이고, 로봇을 제어하기 위해 구동기의 작동 순서를 고려하였다. 실험을 통해서 로봇이 외부 전원을 이용한 상태에서 신장의 50%까지 점핑할 수 있고, 착지가 가능함을 확인하였다. Mowgli 로봇은 직접 구동 방식 점핑 방법의 적용 가능성을 보여 주었다고 할 수 있다.

직접 구동 방식 점핑로봇의 두 번째 예는 토끼를 모방한 사족 점핑로봇으로 그림 5에서 전체적인 형상과 구조를 확인할 수 있다[4]. 로봇의 각 다리는 한 개의 공압구동기에 의해 작동된다. 점핑의 구조적 특징은 힘의 토크를 발로 전달 시켜주기 위하여 팬터그래프(pantograph) 링크 기구를 주로 사용하는 것이다. 자체 제어기와 공기 공급기를 포함한 로봇의 무게는 3.5 kg이고, 길이는 0.6 m, 신장은 0.2 m이다. 그리고 점핑 거리와 높이는 각각 0.5 m와 0.2 m이다. 이 점핑로봇은 점핑 거리에서 큰 이점을 보이지 않지만, Mowgli 로봇과 같이 착지 안정성에서 강점을 가지고 있다.

세 번째 직접 구동 방식 점핑로봇은 본 논문의 저자에 의해 개발된 것으로서, 신소재 구동기인 SMA 와이어를 유일한 구동기로 적용한 사족 점핑로봇이다[10]. SMA 구동기는 중량대 일률 면에서 매우 큰 이점을 가진 구동기이다[19]. 따라서 SMA 구동기는 로봇의 크기와 무게를 감소시키기 위한 적절한 선택이 될 수 있다.

로봇의 점핑 구조 설계를 위하여 그림 2의 인체 다리 근육 중 특히 점핑에서 중요한 역할을 하는 단일관절 근육인 대둔근과 양관절 근육인 대퇴직근과 비복근을 모방하였다. 즉, 그림 6(a)와 같이 로봇의 뒷다리에 세 개의 SMA 와이어를 설치하여 대둔근, 대퇴직근과 비복근의 기능을 수행하도록 설

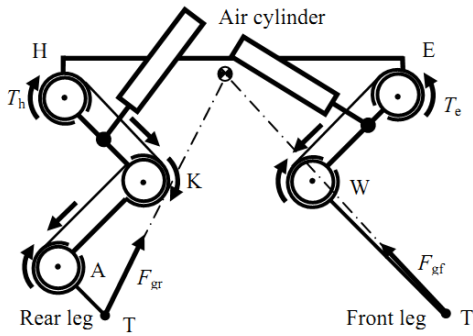
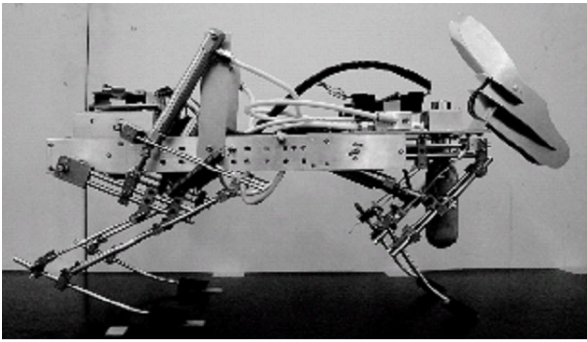
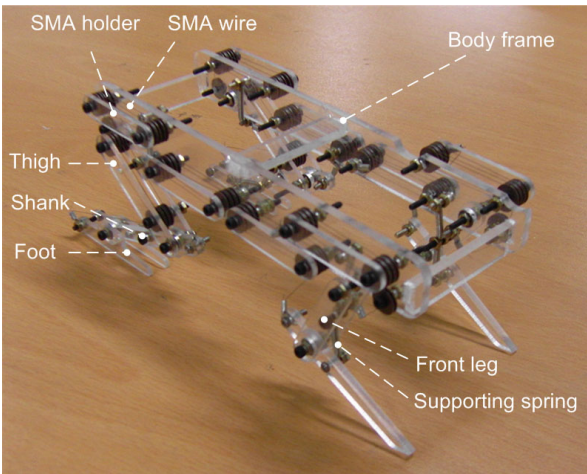
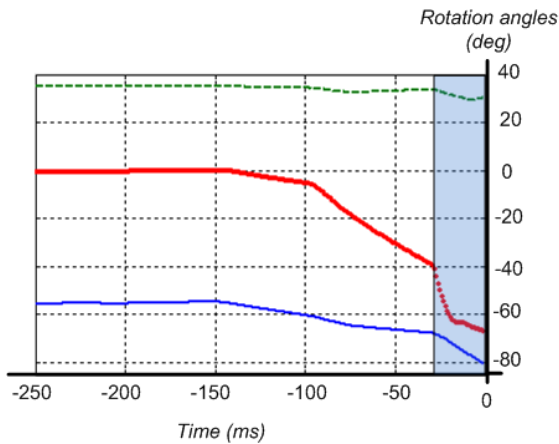


그림 5. 토끼 모방 사족 점핑로봇[4].  
Fig. 5. Rabbit-inspired four-legged jumping robot [4].



(a) Prototype.



(b) Rotation angles of the segments on the rear leg before take-off.

그림 6. 사족 SMA 구동 점핑로봇[10].  
Fig. 6. Four-legged SMA jumping robot [10].

계하였다. 그리고 앞다리의 경우 두 개의 SMA 와이어를 사용하였다. 초기모델의 길이, 폭 그리고 신장은 각각 15 cm, 6.5 cm, 6.5 cm이다.

다리의 무게는 로봇 전체 무게인 80 g의 약 20 %정도이다. 로봇의 점핑에 필요한 SMA 와이어의 작동 순서는 점핑 성능에 매우 중요한 요소인데, 파라미터(parameter) 시뮬레이션을 통하여 최적의 값을 얻었다(그림 6(b) 참조). 이 결과는 프로토타입의 실험에 적용되었고, 실험 결과 25 mm의 점핑 거리와 안정적인 착지 성능을 확인하였다. *Mowgli* 로봇이나 토끼 모방 점핑로봇과 비교할 때, 이 로봇의 장점은 점핑 능력보다는 로봇의 작은 크기와 무게에 있다. 또한 이 로봇은 점핑로봇의 구동기로 SMA가 적용될 수 있는 가능성을 보여준다. 예로 든 세 가지 로봇을 통해 직접 구동 방식 점핑로봇에 대하여 다음과 같은 특징을 확인할 수 있다.

- 다자유도 시스템으로, 다수의 링크 구조와 구동부로 구성되는 복잡한 구조이다.
- 짧은 시간 안에 큰 힘을 생성하기 위해 공압 구동기가 흔히 사용된다. 하지만 로봇이 크고 무거워지는 단점이 있다. SMA와 같은 구동기는 로봇의 크기와 무게를 감소시키는데 이점이 있다.
- 로봇의 점핑 거리와 높이는 뛰어나지 않지만 착지 안정성은 양호하다.

2. 간접 구동 방식을 사용하는 점핑로봇

*Grillo*는 스프링을 사용하는 점핑로봇으로, 짧은 다리를 가진 곤충의 간접 구동 방식 점핑 원리를 모방한 로봇이다[20]. 그림 7에서 이 로봇의 전체적인 형상을 확인할 수 있다. 이 로봇은 한 개의 DC 모터와 비틀림스프링을 사용하는 매우 간단한 구조를 가지고 있다. 이 스프링은 모터에서 생성된 에너지를 저장하는 기능을 한다.

로봇은 네 개의 다리를 가지고 있는데, 스프링이 다리의 역할을 하는 구조이다. 편심 캠이 DC 모터에서 생성되는 에너지를 비틀림스프링에 천천히 전달하고 이 저장된 에너지를 빠르게 방출하는 기능을 한다. 5 cm의 길이와 15 g의 무게를 가지고 있는 이 로봇은 몸체 길이의 5배에 달하는 거리를 점핑할 수 있다. 이것은 곤충과 비교할 수 있을 정도로 주목할 만한 결과이지만 착지 안정성이 확보되지 않는 문제가 있다.

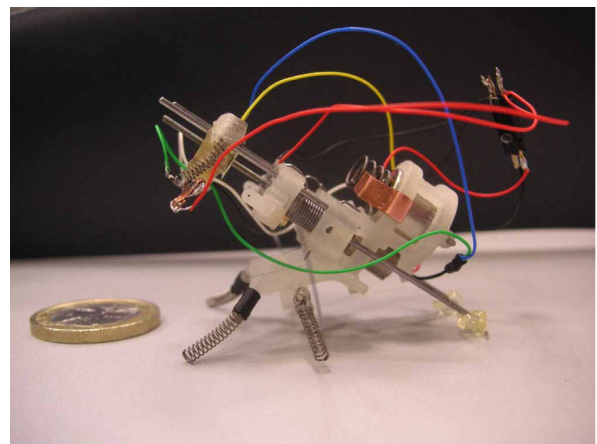


그림 7. Grillo 로봇[20].  
Fig. 7. Grillo robot [20].



그림 8. 소형 점핑로봇[3].  
Fig. 8. A miniature jumping robot [3].

한 개의 초소형 DC 모터로 매우 높이 점프할 수 있는 점핑로봇을 그림 8에서 확인할 수 있다[3]. 이 로봇은 Grillo와 유사하게 DC 모터에 의해 구동되고, 모터에서 생성되는 에너지를 비틀림스프링에 저장한다. 또한 캠을 설치하여 점핑을 위한 에너지를 저장하고 급속히 방출하는 것이 가능하도록 하였다. 그리고 로봇의 몸체를 구형 프레임으로 둘러싸서 착지 시 균형을 유지할 수 있도록 하였다. 구의 지름은 12 cm이고 로봇의 전체 무게는 9.8 g이다.

구형 프레임의 사용은 다른 점핑로봇과 차별되는 특징이다. 실험에서 로봇이 76 cm까지 점핑할 수 있다는 것을 확인되었다. 이는 로봇 신장의 6.3배에 해당하는 성과이다. 점핑 후 로봇은 초기 상태를 스스로 복구할 수 있고, 다음 점핑을 준비하는 것이 가능하다.

간접 구동 방식의 점핑로봇은, 지렛대 시스템과 달리 힘을 생성하는데 소요되는 시간에 대한 제약이 덜하다. 따라서, 더 다양한 종류의 구동기가 이 로봇에 적용될 수 있다. 그 예로 본 논문의 저자가 개발 중인 SMA 스프링에 의해 구동되는 점핑로봇을 소개한다. SMA 스프링은 SMA 와이어 보다 훨씬 더 큰 힘을 낼 수 있지만 수축 속도는 더 느리다. 그러나

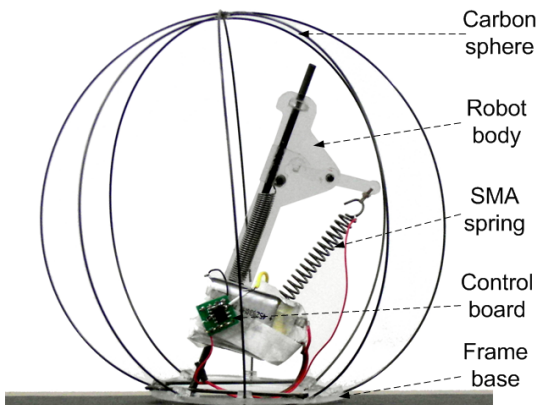


그림 9. SMA 스프링 구동 구형 점핑로봇.  
Fig. 9. A spherical jumping robot actuated by SMA spring.

SMA 스프링의 힘을 서서히 에너지 저장 기구에 저장하고 이 에너지를 신속하게 방출한다면 로봇의 점핑에 적합한 기구가 될 수 있다. 그림 9에서 로봇의 전체적 형상과 구조를 확인할 수 있다.

이 점핑로봇은 본체와 구형 프레임으로 구성되어 있다. 로봇의 본체는 SMA 스프링 구동기와 에너지를 저장하기 위한 일반 스프링, 후크(hook)-크랭크(crank) 기구, 배터리를 탑재한 제어회로로 이루어져 있다. 구형 프레임은 네 개의 탄소 막대로 제작되었고, 베이스(base)는 로봇이 안정된 자세를 가질 수 있도록 편평한 고리 형태로 설계되었다. 전체 시스템의 무게는 17 g이고 구형 프레임의 직경은 13 cm이다.

로봇의 점핑 동작은 준비, 점프, 그리고 복구의 세 단계로 나눌 수 있다. 그림 10은 점핑 준비 단계의 작동 기구를 나타내고 있다. 최초 준비 단계에서 우선 SMA 스프링을 작동시키기 위한 전압이 가해진다. SMA의 수축력( $F_S$ )은 그림 10(a)와 같이 크랭크를 시계방향으로 회전시켜서 후크를 위로 당긴다.

이 후크는 스프링에 연결되어 있기 때문에 후크의 움직임은 스프링을 신장시켜서 탄성력( $F_k$ )을 생성시킨다. 즉, 이 현상은 SMA 스프링의 에너지가 스프링에 의해 저장되는 것과 같다. 준비 단계의 종료 시점에서 후크는 최고 위치에 도달한다. 그리고 이 때 스프링의 신장과 탄성력은 최대치에 이른다. 이 순간 후크와 크랭크는 한 점에서 만나는데, 이 점을 변이점(그림 10(b)의 점 E)이라고 한다.

점핑의 두 번째 단계에서는 에너지 방출 시스템이 중요한 역할을 하게 된다. 크랭크가 변이점을 넘어서 이동하는 순간 후크와의 결속이 해제된다. 이 때 스프링을 당기는 힘이 매우 크므로, 몸체는 위로 빠르게 가속되고 로봇은 위로 점핑하게 된다.

마지막 복구 단계에서는 구형 프레임이 중요한 역할을 수행한다. 즉, 로봇이 착지 후 다음 점핑을 위한 초기 자세로 돌아갈 수 있도록 한다. 그림 9의 프로토타입을 이용한 실험에서 로봇의 평균 점핑 높이와 점핑 거리는 각각 20 cm와 16 cm로 확인되었다. 이는 로봇 신장의 1.5배와 길이의 1.2배를 점핑할 수 있음을 의미한다.

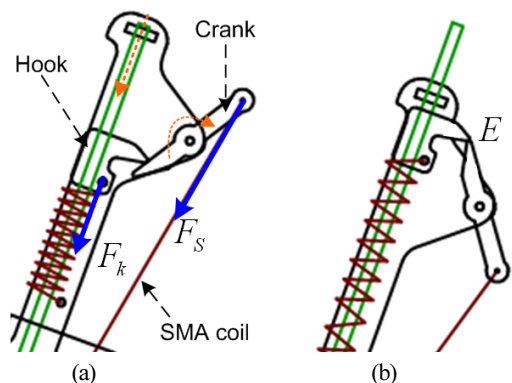


그림 10. 점핑 준비 단계의 작동 기구.  
Fig. 10. Working principle in the preparation phase of jumping. (a) Contraction of the SMA spring generates the motion of hook relative to the body. (b) The crank and the hook at the transition point.

표 1. 점핑로봇의 비교.

Table 1. Comparison of the jumping robots.

	Size (cm)	Weight (g)	Jumping height (per body height)	Jumping distance (per body length)	Landing stability
Mowgli [5]	50 (height)	1500	0.5	N/A	Yes
Rabbit robot [4]	60 (length) × 20 (height)	3500	1	0.8	Yes
Four-legged SMA robot [10]	15 (length)	80	N/A	0.17	Yes
Grillo [20]	5 (length)	15	N/A	5	No
Miniature robot [3]	1.2 (diameter)	9.8	6.3	N/A	Yes
SMA spring-actuated robot	13 (diameter)	17	1.5	1.2	Yes

이와 같이 에너지 저장과 급속한 방출이라는 원리를 따르는 간접 구동 방식의 점핑로봇에서 다음과 같은 특징을 발견할 수 있다.

- 대개 로봇의 자유도는 매우 적다. 이는 한 개의 자유도라도 에너지 저장 원리를 이용하여 충분히 점핑할 수 있기 때문이다. 따라서 간접 구동 방식의 로봇은 대체로 크기가 작고 무게가 가볍다.
- 구동 시스템에 대한 특별한 요구 조건은 없으므로 구동기 선택의 폭이 넓다고 할 수 있다.
- 간접 구동 방식의 로봇은 점핑 거리와 높이에서 상대적인 이점을 갖는다. 그러나 착지 안정성의 확보가 어려운 문제이다. 구형 프레임과 같은 부가적인 장치의 적용이 문제 해결에 도움이 될 수 있다[3,8,9].
- 간접 구동 방식 로봇의 제어는 직접 구동 방식의 로봇보다 훨씬 어렵다.

#### IV. 결론

이 논문에서 점핑로봇의 개발을 위한 생체모방적 설계 방법에 대해 논의하였다. 우선 동물과 곤충의 점핑에서 발견할 수 있는 점핑 원리를 두 가지로 정리하였다. 즉, 직접 구동방식을 이용한 점핑과 간접 구동방식을 이용한 점핑으로 구분하였다. 첫 번째 점핑 방식은 생물체의 근육이 직접적으로 점핑 동작을 발생시키는 것이고, 두 번째 점핑 방식은 근육에 의해 생성된 에너지를 저장하고 이 에너지를 점핑에 이용한다. 또한 이 논문에서는 각 방식에 대하여 세 가지 점핑로봇을 선택하여 로봇의 설계 상 특징 및 성능을 소개하였다. 그리고 로봇이 속한 두 가지 유형의 일반적인 특징을 요약하였다.

여섯 가지 로봇의 성능을 표 1에 요약, 비교하였다. 표 1에서 위의 세 가지 로봇은 직접 구동 방식 점핑로봇으로서 민첩한 점핑과 착지가 가능하나 점프 거리는 뛰어나지 않다. 다음 세 가지 로봇은 벼룩, 거품벌레처럼 간접 구동방식의 점핑을 사용하여 뛰어난 점프 성능을 갖고 있으나 대개 착지가 불안정한 단점이 있다.

점핑로봇의 개발을 위한 제안 및 고려 사항은 다음과 같이

정리할 수 있다.

- 점핑을 포함한 다종의 이동 방법이 가능한 대형 로봇의 개발을 위해선 직접 구동 방식이 적절한 선택이 될 수 있다. 이러한 로봇은 착지의 안정성이 점핑 거리보다 더 중요한 문제가 된다. 이 점핑 방식의 경우, 구동 시스템이 매우 중요한 역할을 하는데, 짧은 시간에 매우 큰 힘을 발생시킬 수 있는 구동기를 사용하여야 한다.
- 점핑 거리, 로봇의 크기, 무게가 중요한 문제인 경우, 에너지 저장 시스템을 이용하는 간접 구동 점핑 원리가 더 적합하다. 이 경우, 에너지를 저장하고 신속히 방출하는 기구의 설계가 점핑의 성능을 결정하게 된다. 또한 착지 안정성이 중요한 문제인데, 적절한 프레임의 사용이 도움이 될 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] E. S. Barnard, *Frogs (Amazing Animals)*: Wisconsin: Gareth Stevens Publishing, 2009.
- [2] R. F. Chapman, *The Insects: Structure and Function*, Cambridge University Press, 1998.
- [3] M. Kovac, et al., "A miniature jumping robot with self-recovery capabilities," 2009 IEEE/RSJ international conference on Intelligent robots and systems, St. Louis, MO, USA, 2009.
- [4] T. Oshima, et al., "Jumping mechanism imitating vertebrate by the mechanical function of bi-articular muscle," *ICMA 2007 International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 1920-1925, 2007.
- [5] R. Niiyama, et al., "Mowgli: A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system," *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2546-2551, 2007.
- [6] U. Scarfoglio, et al., "Design and development of the long-jumping "Grillo" mini robot," *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 467-472, 2007.
- [7] H. Tsukagoshi, et al., "Jumping robot for rescue operation with excellent traverse ability," *2005 ICAR 12th International Conference on Advanced Robotics*, pp. 841-848, 2005.
- [8] R. Armour, et al., "Jumping robots: a biomimetic solution to locomotion across rough terrain," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 2, p. S65, 2007.
- [9] R. Armour, "A biologically inspired jumping and rolling robot," Department of Mechanical Engineering University of Bath 2010.
- [10] T. Ho and S. Lee, "Design and implementation of an SMA-actuated jumping robot," *IROS 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3530-3535, 2010.
- [11] T. Ho and S. Lee, "Design of a piezoelectrically actuated jumping robot," *Advanced Materials Research*, vol. 311-313, pp. 2211-2214, 2011.
- [12] R. E. Snodgrass, *Principles of Insect Morphology (Comstock Book)*, Cornell University Press, 1935.
- [13] H. C. Bennet-Clark, "The energetics of the jump of the locust *Schistocerca gregaria*," *Journal of Experimental Biology*, vol. 63, pp. 53-83, Aug. 1975.
- [14] T. Spagele, et al., "Modelling, simulation and optimisation of a human vertical jump," *Journal of Biomechanics*, vol. 32, pp. 521-530, 1999.

- [15] A. Guyton and J. Hall, *Textbook of Medical Physiology: Philadelphia*, Elsevier Saunders, 2005.
- [16] M. F. Bobbert and G. J. van Ingen Schenau, "Coordination in vertical jumping," *Journal of Biomechanics*, vol. 21, pp. 249-262, 1988.
- [17] M. Bobbert, "The effect of coordination on vertical jumping performance," 20 International Symposium on Biomechanics in Sports, Cáceres, Spain, 2002.
- [18] M. Burrows, "Morphology and action of the hind leg joints controlling jumping in frog hopper insects," *J Exp Biol*, vol. 209, pp. 4622-4637, 2006.
- [19] C. Mavroidis, "Development of advanced actuators using shape memory alloys and electrorheological fluids," *Research in Nondestructive Evaluation*, vol. 14, pp. 1-32, 2002.
- [20] U. Scarfogliero, et al., "A bioinspired concept for high efficiency locomotion in micro robots: the jumping Robot Grillo," 2006. *ICRA 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4037-4042, 2006.
- [21] K. S. Kim, B. S. Kim, J. B. Song, and C. H. Im, "Mobility improvement of a jumping robot using conical spring with variable length endtip," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 12, no. 15, pp. 1108-1114, Nov. 2009.



### 호 탐 탄

2005년 호치민대학교 메카트로닉스학과 (공학사). 2008년 건국대학교 기계설계학과(공학석사). 2008년~현재 건국대학교 기계설계학과(공학박사 과정). 관심분야는 생체모방 로봇.



### 승 현 수

2010년 건국대학교 기계공학부 (공학사). 2010년~현재 건국대학교 기계설계학과 (공학석사 과정). 관심분야는 생체모방 로봇.



### 이 상 윤

1993년 서울대학교 공학사. 1996년 KAIST 공학석사. 2002년 Johns Hopkins University 기계공학과(공학박사). 2003년~현재 건국대학교 기계설계학과 교수. 관심분야는 로봇공학 및 자동화.