

형상기억합금 액추에이터와 상반 운동 개념을 적용한 도약 장치 Jumping device with shape memory alloys(SMA) actuators and antagonistic mechanism

*김승원¹, 박영선¹, #조규진¹

*S. W. Kim¹, Y. S. Park¹, #K. J. Cho¹(kjcho@snu.ac.kr)

¹ 서울대학교 기계항공공학부

Key words : Jumping device, Shape Memory Alloys(SMA) actuator, Antagonistic Mechanism

1. 서론

로봇의 공간 이동 방식에 있어서 비행을 제외하고는 바퀴로 굴러가는 방식, 다리를 이용하여 걷는 방식 그리고 도약 방식이 있다. 이 중에서 도약 방식만이 비행과 가장 근접하게 지면과의 접촉을 최소화 하면서 이동할 수 있는 방식이다. 도약은 바퀴를 이용한 이동 방식 또는 걸어서 가는 이동 방식이 가지고 있는 단점인 지면과의 지속적인 접촉 조건에서 벗어날 수 있기 때문에 지형상의 장애물들을 회피하고 원하는 목적지에 도달할 수 있는 방식이다.

이러한 이동 성능에서의 장점 때문에 소형 로봇 분야, 특히 생체 모방형 로봇 분야에서는 도약 능력을 갖춘 장치를 고안하고 이를 반영한 로봇들을 개발하고 있다. Kovač 등은 메뚜기의 도약 원리를 모방하여 초소형 7g 도약 로봇을 개발하였다 [1]. 이 로봇의 획기적인 도약은 모터와 캠 기어, 토션 스프링으로 구성되어 있는 장치에서 나온다. 모터로 회전하는 캠을 통해 토션 스프링에 에너지를 저장한 뒤 캠의 끝 단이 통과하면 에너지를 방출하는 방식을 택하여 도약을 한다. Scarfoglio 등은 7g 로봇과 같이 메뚜기의 도약 원리를 반영하였다 [2]. 이 로봇의 도약 장치는 모터와 스크류 기어, 자석, 스프링을 통해 구현하였으며 자석으로 스프링을 당기고 스프링의 장력이 자석의 힘보다 클 때 풀리면서 에너지를 방출하는 원리이다. 위 로봇들 모두 도약 에너지의 근원을 모터를 이용하여 스프링에 저장된 탄성 에너지를 한 번에 방출시킴으로써 얻어낸다. 하지만 소형 로봇 분야에서는 크기와 무게가 중요한 설계 고려 요인이기에 모터를 사용하지 않을 경우 에너지 저장 과정에서 필요한 요소 부품이긴 하지만 전체 로봇의 무게와 크기 측면에서 가장 큰 부분을 차지하여 로봇 개발의 자유도를 제한한다.

이러한 모터와 캠과 같은 기존의 도약 장치가 갖는 소형화의 한계를 뛰어넘기 위해 자연에서 다른 도약 원리를 탐색하였다. 탐색 결과 지구상에서 자신의 신체 대비로 138 배를 뛰는 최고 도약 생물인 벼룩의 도약 원리에 주목하였다. 벼룩의 도약 원리를 구성하는 핵심은 장전과 당김이다 [3]. 이 개념을 적용하면 기존의 도약 장치에 필수적인 모터가 없이도 충분한 도약이 가능하게 된다. 또한 재도약을 위한 준비 동작을 모터의 원형 운동 대신 생물들이 기본적으로 근육을 통한 움직임에 활용하고 있는 상반 운동 개념으로 대체할 수 있다. 장전, 당김 그리고 재장전을 위한 상반 운동을 고려한 도약 장치를 구현하기 위해 벼룩의 다리 구조를 고려한 다리 모델을 Fig. 1 과 같이 설계하였고 이에 대한 수치 해석을 수행하였으며, 시험 모델의 제작 과정에서 각 근육의 역할을 하는 구동기로 형상기억합금(shape memory alloy, SMA) 스프링 구동기를 사용하였다. 따라서 기존의 모터 기반 도약 장치와는 차별화된 원리를 가지고 소형화, 경량화에 적합한 새로운 도약장치를 개발하였다.

2. 도약 원리

벼룩의 획기적인 도약 능력은 도약에 최적화 된 다리 구조,

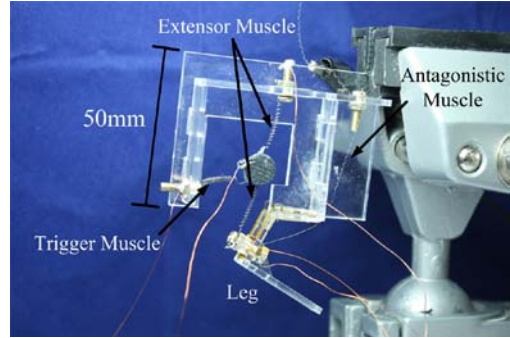


Fig. 1 SMA spring actuator Muscles distribution in the prototype of antagonistic jumping device.

특수한 근육 그리고 독특한 근육의 동작 원리에 있다 [4], [5]. 벼룩은 두 다리 마디를 연결하는 관절 속이 비어있기 때문에 다리를 펼치기 위한 당김 근육(extensor muscle)이 다리 회전 중심을 자유로이 지나칠 수 있다. 이 골격 구조로 당김 근육의 장력이 회전 초기부터 존재하기 때문에 순식간에 회전을 시작하게 되며, 회전을 함에 따라 회전 중심으로부터 당김 근육이 회전 다리에 접합된 지점까지의 거리, 모멘트 암(moment arm)이 점차 증가하게 되어 회전하는 다리의 전체 토크는 점차 증가하게 된다. 이 도약과정에서 상반 근육은 다리 회전을 따라 늘어나게 되는데, 도약 이후에 당김 근육과는 반대되는 반 시계 방향으로 토크를 생성하여 다리를 감아 올린다.

3. 수치 해석

효율성을 평가하기 위해 Fig. 2 와 같이 방아쇠 방식과 비 방아쇠 방식의 도약을 비교하였다. 두 방식에서 다리는 당김 근육이 연결되어 있는 C 지점에 힘을 받아 토크가 생긴다. 두 방식에서 당김 근육이 다리에 붙은 지점은 같으나 비 방아쇠 방식의 경우 방아쇠 과정이 필요 없도록 당김 근육이 이미 회전 가능한 기울기로 배치되어 있다. 이 두

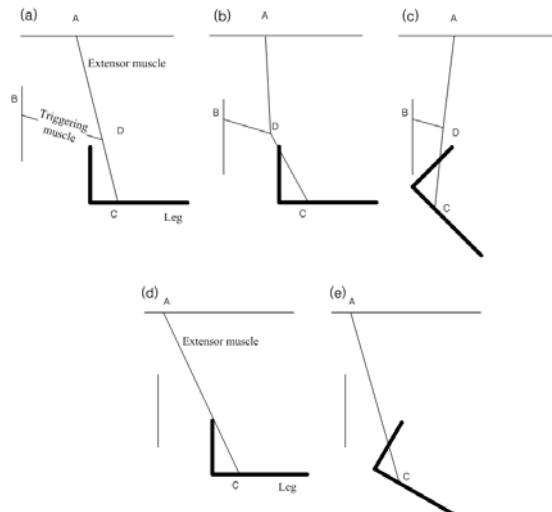


Fig. 2 Process of jumping with; (a)-(c) trigger, (d)-(e) non-trigger.

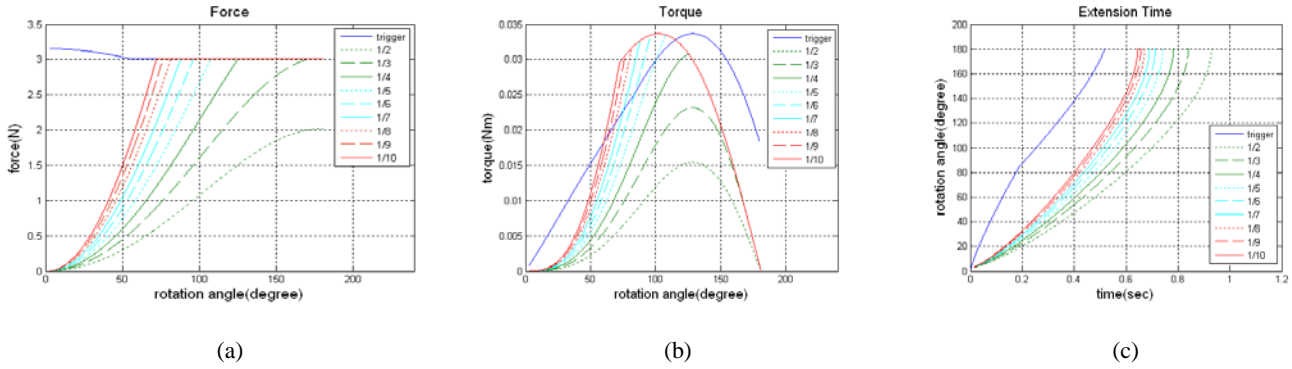


Fig. 3 (a) Leg rotation angle vs. force, (b) leg rotation angle vs. torque, and (c) leg extension time vs. rotation angle.

방식에서 다리에 가해지는 모멘트를 각각 계산하여 구하면 Fig.3 그래프를 얻을 수 있다. 방아쇠 과정은 앞 절에서 언급한대로 당김 근육에 힘을 저장한 상태로 도약을 시작하는 순간 초기에 힘을 갖고 있는 상태에서 회전을 시작하여 추진력이 크고 더 빠른 속도로 뛰어오르게 된다. 비 방아쇠 과정의 대기 자세에서는 다리가 회전 움직임을 하지 않아야 하므로 근육에 힘이 들어가지 않은 상태여야 한다. 따라서 초기에 근육에는 힘을 저장할 수 없고 도약 시에 근육 힘이 증가하면서 다리를 들어 올리게 되며, 당김 근육 수축률에 따라 최대 힘에 도달하는 시간에 차이가 생긴다. 최대 힘이 가해졌을 때 도약하는 도중 다리에 가해진 토크를 계산하고, 이 토크로부터 다리가 펼쳐지는데 걸리는 시간을 계산하였다. 도약 과정에서 시간이 짧을수록 빠르게 땅을 박차고 오르며 높은 초기 속도에 이르기 때문에 모든 경우에 방아쇠 도약 과정에서의 시간이 짧다. 방아쇠 과정의 다른 이점은 도약 시기를 원하는 대로 제어할 수 있다는 것이다. 방아쇠 당김을 하지 않는 Fig. 2 (d)와 같은 경우, 근육에 힘을 주면 바로 다리가 회전하며 베틀이 도약하게 되는데, 힘을 부가하거나 부가하지 않는 것으로 동작의 시작을 제어하기 때문에 구동 시기 제어의 경계가 모호하다. 방아쇠 과정의 경우 방아쇠 당김을 하지 않은 정지 상태에서는 도약이 일어나지 않으므로 도약 할 때 힘 분출은 더욱 큰 반면 대기 상태에서는 보다 안정적이다.

4. 제조 및 결과

도약 장치는 경량화를 위해 전체 구조를 아크릴로 제작하였다. 전체 구조의 크기는 회전 다리를 제외하고 가로 70mm, 세로 50mm 이다. 다리 부품과 본체 부품간의 연결에 있어서 축을 배제한 설계를 이루기 위해 회전 축의 연결을 캡톤(Kapton) 테이프를 이용하여 다리 부품 윗면과 아랫면에 붙여 연성 관절(flexible joint)을 구성하였다. SMA 스프링 구동기는 DYNALLOY, Inc 의 직경 0.254mm, Austenite 온도 70℃ 와이어를 이용하여 직경 1mm 봉에 드릴을 이용하여 감은 후, 양 끝 단을 볼트, 너트로 고정하여 300℃에서 1 시간 동안 오븐에서 가열하여 제작하였다 [6].

당김 근육 SMA 구동기와 방아쇠 근육 SMA 구동기의 연결은 직접적인 연결을 통한 접선을 피하기 위해 중간 연결이 가능한 부품을 설계하여 쾌속 조형(rapid prototyping)

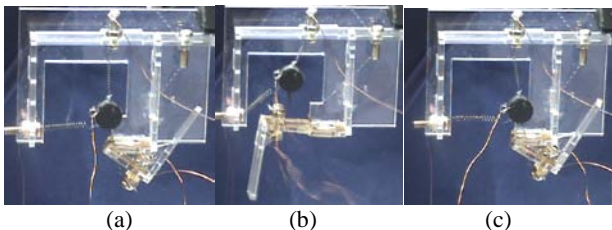


Fig. 4 Snap shot at (a) before jump, (b) after jump, and (c) antagonistic triggering.

장비로 가공하였다. 그리고 스프링의 이탈을 막기 위해 중간 연결 부품을 열 경화성 에폭시 수지로 접착시켰다. 각 SMA 구동기는 금속 볼트, 너트를 이용하여 고정된 뒤에 나셀선과 연결시켜 전류를 흐르게 하였다. 도약 장치에서 다리의 무게는 1.3g, 다리와 본체를 합친 무게는 12.7g, 구동기 장착 및 에나멜 선 연결을 포함한 전체 무게는 18.4g 이다. Fig. 4 를 보면 다리 회전 중심을 당김 근육의 작용선이 지나치기 전까지는 회전하지 않지만, 방아쇠 근육의 수축을 통해 다리 회전 중심을 지난 직후 다리가 회전하였다. 따라서 이 장치에 베틀의 도약 원리를 적용하여, 구동 모터 없이 일방향성 SMA 스프링 구동기를 통해 도약 및 재장전을 구현하였다. 향후 연구는 보다 작은 스케일로 복잡계 기반의 공정과정을 통해 소형 도약 로봇의 개발로 확장해 나갈 것이다.

후기

이 논문은 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2009-0087640).

참고문헌

1. Kovač, M., Fuchs, M., Guignard, A., Zufferey, J. C., and Floreano, D., "A Miniature 7g Jumping Robot," IEEE International Conference on Robotics and Automation, 373-378, 2008.
2. Scarfogliero, U., Stefanini, C., and Dario, P., "The Use of Compliant Joints and Elastic Energy Storage in Bio-inspired Legged Robots," Mechanism and Machine Theory, 44, 580-590, 2009.
3. Gronenberg, W., "Fast Actions in Small Animals: Springs and Click mechanisms," Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory Neural, and Behavioral Physiology, 178, 727-734, 1996.
4. Rothschild, M., and Schlein, J., "The Jumping Mechanism of *Xenopsylla Cheopis*: I. Exoskeletal Structures and Musculature," Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological, 271, 457-490, 1975.
5. Rothschild, M., Schlein, J., Parker, K., Neville, C., and Sternberg, S., "The Jumping Mechanism of *Xenopsylla Cheopis*: III. Execution of the Jump and Activity," Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological, 271, 499-515, 1975.
6. Koh, J., and Cho, K., "OmegeBOT: Biomimetic Inchworm Robot using SMA Coil Actuator and Smart Composite Microstructures (SCM)," IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 1154-1159, 2009.