

양면 주행이 가능한 소형 12족 주행 로봇

김성현, 정광필*

서울과학기술대학교 기계자동차공학과

A Milli-Scale Double-sided Crawling Robot

Sung-Hyun Kim, Gwang-Pil Jung*

Department of Mechanical and Automotive Engineering, SeoulTech

요약 소형의 다리형 주행 로봇은 몸체의 크기 대비 바퀴주행보다 높은 장애물을 극복할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 이점을 활용하여 다양한 형태의 다리 주행 소형 로봇이 개발되었다. 본 논문에서는 기존의 단면 주행을 넘어 양면 주행이 가능한 12족 생체모사 크롤링 로봇을 제안한다. 주행 로봇은 험지 주행 시에 전복되거나 자세가 흐트러지는 경우가 자주 발생한다. 12족 양면 주행로봇은 전복이 되어도 지체 없이 곧바로 주행이 계속 가능하다. 양면 주행을 위한 핵심 메커니즘은 구동부를 공유하는 것이다. 몸체부의 중간에 위치한 힘 전달 구조가 위와 아래에 위치한 모든 다리로 움직임을 전달한다. 이와 같이, 유사한 기능을 수행하는 구조물을 통합하여 구조의 간소화와 경량화를 달성하였다. 또한, 무게를 줄이기 위하여 종이 기반의 복합재를 사용하여 32g의 경량 설계를 수행하였다. 로봇의 성능을 평가하기 위해, 윗면과 아랫면 모두에 대해 주행 테스트를 실시하였다. 그 결과 윗면으로 주행 시 0.52m/s, 아랫면으로 주행 시 0.42m/s의 속력을 보여주어, 양면 모두 성공적인 주행이 가능함을 확인하였다.

Abstract This paper presents a lightweight milli-scale crawling robot that can crawl on both sides, which was inspired by the movement of insects. This robot has an excellent ability to overcome obstacles, such as the narrow gaps and the rough terrain. In addition, the robot can crawl steadily and rapidly through triangular alternation, such as ants or cockroaches. The process of smart composite microstructures (SCM) was employed to make a lightweight robot structure. The SCM process replaced the conventional mechanical parts with flexure joints and composite links, which allows the weight of the robot to be reduced. In addition, the robot structure was robust against external impacts owing to the compliance of the constituent materials. Using the SCM process, the robot weighed only 32g with twelve legs in total on both sides. The robot showed a crawling speed of 0.52m/s on the front side and 0.42m/s on the backside.

Keywords : Bio-inspired robot, Toy robot, Toy industry, Double-sided crawling, Crawling robot

1. 서론

소형의 다리형 주행은 수 센티미터 크기의 곤충들의 이동방식으로 주로 활용된다. 이러한 생체의 움직임에 영감을 받아 소형의 경량 크롤링 (crawling) 로봇들이 활발하게 개발되었다. DASH [1], iSprawl [2], HARM [3],

VelociRoACH [4] and Mini-Whlegs [5]이 로봇들은 대표적으로 생체모사한 소형 스케일의 크롤링 로봇이다. 이러한 로봇은 기존 바퀴로 가는 로봇과 달리 몇 가지 장점이 있다. 첫 번째로 장애물 극복 능력이 증대된다. 기존 바퀴의 경우 바퀴 크기의 반보다 큰 장애물은 극복하기 힘든 것으로 알려져 있다. 반면 다리의 경우 다리 끝 부

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Gwang-Pil Jung(SeoulTech)

email: gpjung@seoultech.ac.kr

Received December 27, 2019

Accepted April 3, 2020

Revised January 20, 2020

Published April 30, 2020

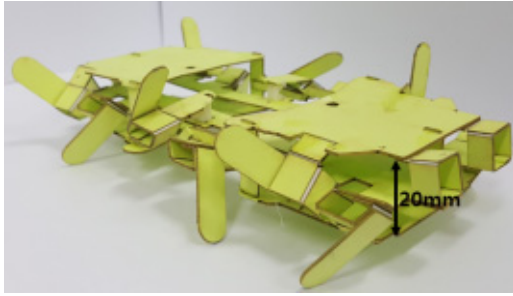


Fig. 1. A milli-scale double-sided crawling robot

분이 닿을 수 있고 구동 힘만 충분히 주어진다면, 극복 가능한 여지가 남아있다. 개미나 바퀴벌레의 경우 험난하고 복잡한 지형을 쉽게 가는 장애물 극복 능력이 있다.

앞서 언급된 로봇들은 단면 주행으로써 성공적인 주행 성능을 보여주었다. 그러나 주행 로봇의 실제 적용에 있어서는 전복될 경우, 주행을 지속할 수 없다는 한계가 존재한다. 이러한 부분을 해결하기 위해 양면주행이 가능한 로봇들이 몇 가지 개발되었으면 Table 1과 같다.

CardBot [6]은 두께가 매우 얇아 양면 주행이 가능한 로봇이다. 액추에이터에 슬라이더가 연결되어, 크랭크 운동으로 다리를 움직여 주행을 할 수 있다. 매우 얇고 가볍지만 속력이 0.2m/s로 빠른 주행에 적합하지 않은 부분이 있다. RSTAR [7]은 로봇의 몸체를 변형하여 양면주행을 할 수 있다. 로봇은 톱니기어 여러 개를 맞물려 동력을 전달한다. 그리고 1m/s로 빠른 속력과 건너뛰기, 벽 틈사이 주행 등 다양한 능력을 갖고 있다. 그러나 로봇은 모두 기존의 기계적 요소 (기어, 체인, 바퀴, 모터)로 구성되어 있어 380g의 질량을 가지며, 다소 무겁다. Mini-Whег [5]은 몸체보다 큰 바퀴로 양면주행을 할 수 있다. 0.9m/s로 매우 빠르지만, 트랜스미션이 메탈 기반의 기어체인으로 구성되어 경량화 측면에서 상대적으로 부족한 면이 있다.

본 논문에서는 전복이 되어도 지속적 주행이 가능한 소형 및 경량의 양면 주행로봇을 제안한다. 본 연구 그룹에서는 2019년 양면주행이 가능한 6족 로봇을 제안한

바 있다 [8]. 6족 주행 로봇의 주행 능력을 보다 향상시키기 위한 시도로 각 면에 6개의 다리, 도합 12개의 다리를 가지도록 재설계하였다. 본 논문의 소형 및 경량의 양면 주행로봇 개발을 위해 크게 두 가지 문제에 집중하였다. 첫째, 구조 단순화를 위해 유사 기능을 수행하는 요소를 공유하였다. 예를 들어, 각 다리로 힘을 전달해주는 힘 전달 트랜스미터의 경우 하나로 통합하여 해결할 수 있다. 둘째, 구조 경량화를 위해 기존의 메탈 기반 제조 방식에서 벗어나 smart composite microstructures (SCM) 방식을 적용하였다. 종이접기와 유사한 방식으로 기존의 기계 요소 부품을 사용하지 않고도 다양한 링크지 디자인이 가능하다. 따라서, 로봇을 소형화시키고 무게 측면에서도 획기적인 감소가 가능하다.

제작된 로봇은 Fig. 1.과 같다. 로봇은 가로 55mm, 세로 125mm, 높이 20mm로 작고 32g 의 가벼운 질량을 가진다. 성공적인 크롤링을 위해 각 면에 6개씩의 다리가 위치해 있다. 각 면의 6개 다리는 3개를 한 쌍으로 하여 삼각의 교차적 움직임 (tirpod gait) 으로 크롤링을 수행한다.

이어질 부분에선 삼각 교차 주행과 양면주행 그리고 안정적인 트랜스미션 운동이 어떻게 종이접기 방식으로 해결했는지 서술할 것이다. 또한, 주행 테스트로 로봇의 주행 속도와 안정적인 주행여부를 살펴보고 그래프를 분석할 것이다.

2. 본론

2.1 삼각 교차 주행 디자인

Fig. 2.는 12족 양면주행 로봇의 전체적인 디자인을 보여준다. 좌우에 모터가 1개씩 위치해 있고, 각 모터에 장착된 크랭크는 모션 트랜스미터와 연결된다. 모션 트랜스미터는 로봇의 좌우에 위치한 각 6개의 4절 링크와 이어진다. 즉, 모션 트랜스미터 1개는 6개의 4절 링크를 제어한다.

Table 1. Milli-scale Double-sided Crawling Robot

	Mass(g)	Max. Speed(m/s)	Size (mm)	Motion Transmission
CardBot	26.4	0.25	85 x 19	Multiple legs with slider
RSTAR	308	1.0	150	Serially connected geared spokes
Mini-Whег	146	0.9	90 x 20	Steel gear chain
The proposed crawling robot	32.0	0.52	125 x 55	Shared four-bars linkages

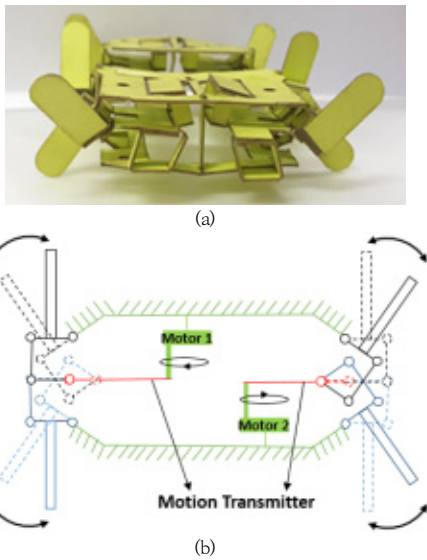


Fig. 2. Front view of Double-sided Crawling Robot.
(a) Front view and (b) Schematic view

4절 링크는 고관절의 역할을 수행하며, 각 4절 링크(four-bar linkage)는 1개의 다리를 가진다. 4절 링크는 평행 사변형의 형태로 구성되었으며, 지면에 대한 수직선을 기준은 $-65^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 도의 이동 범의 동작 범위를 가진다.

12족 주행로봇은 빠른 속도와 안정적인 무게중심 유지가 중요하기 때문에, 6족 곤충들과 유사하게 삼각 교대 보행(alternating gait)을 한다. 교대 보행은 모션 트랜스미터와 4절 링크의 연결 방식에 따라 이루어질 수 있다. Fig. 2 (b)에서 모터 1과 연결된 쪽을 보면, 중앙에 위치한 4절 링크는 링크의 윗 부분이 모션 트랜스미터와 연결된다. 반대로, 양 옆에 위치한 4절 링크는 링크의 아랫 부분이 모션 트랜스미터와 연결된다. 따라서, 모션 트랜스미터 1개를 통해 교대 보행의 움직임을 만들어 낼 수 있게 된다.

Fig. 3.는 측면의 움직임을 연속적으로 보여준다. Fig. (a), (b), (c)의 다리 자세의 변화를 살펴보면 위상이 변함을 확인할 수 있다. 앞, 뒤 측 가장자리의 다리는 동일한 위상으로 움직이고 가운데 다리는 반대 위상으로 움직인다. 그리고 정면에서 가장자리와 가운데는 90° 위상차가 있어 가장자리 다리가 지면에 있으면 가운데 다리는 공중에 뜨게 된다. 반대로 가운데 다리가 지면에 있으면 가장자리에 뜨게 된다. 그리고 이 다리가 그리는 궤적이 세 다리 모두 동일해야 주행 간 높이의 변함이 적어 안정적인 주행이 가능하다.

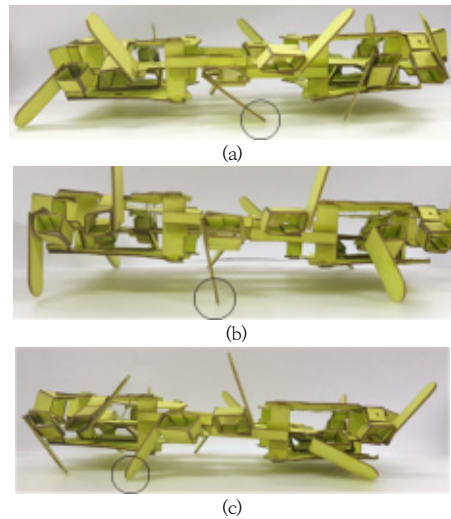


Fig. 3. Serial side-motion of tripod gait for stable crawling

로봇의 양쪽 모터는 서로 반대 방향으로 회전한다. 반대 방향 회전을 통해, 좌우 다리들은 180° 위상 차이를 가지고 양쪽의 다리가 움직이면 교차적인 삼각대 걸음(tripod gait)이 형성된다.

그리고 지면에 닿는 발의 궤적이 수직이 되도록 디자인해야 한다. Fig. 2.에서 만약 다리가 로봇 안쪽으로 들어오면 불필요한 움직임을 발생시킨다. 이러한 불필요한 움직임은 옆으로 가거나, 제자리에서 튀는 불안정한 주행을 야기한다.

2.2 양면 주행 디자인

Fig. 4.는 로봇의 측면과 모식도를 표현한 것이다. 앞서 말했듯 양면 주행이 가능하지만 로봇이 두꺼워 진다면 그 기능의 의미가 퇴색된다. 그래서 구동부인 모션 트랜스미터를 공유하도록 설계하였다. 하나의 힘 트랜스미터는 상하에 위치한 다리가 일시에 움직이도록 힘 전달을 수행한다. 이러한 공유 디자인으로 모든 다리의 궤적이 일직선위에 있을 수 있도록 설계되었다. 따라서 본 로봇은 몸체의 두께가 20mm으로 매우 얇은 구조를 가진다. 다리를 모두 포함할 경우 50mm의 높이를 가진다.

2.3 모션 트랜스미터 디자인

이전에 언급했듯 빠르고 안정적인 크롤링을 위해 삼각 교대 보행은 중요하다. 그래서 모션 트랜스미터의 역할은 세 다리에 같은 힘을 전달하고, 삼각 교대 보행을 나타내

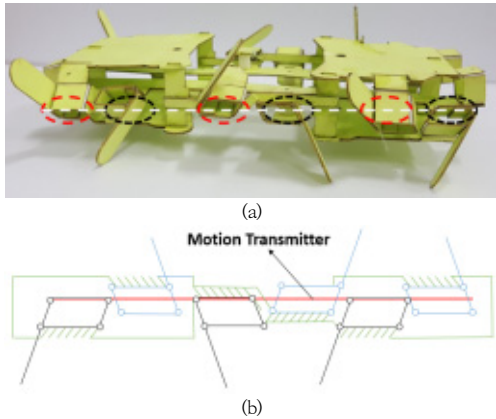


Fig. 4. side view of Dodecapedal-Double side-Crawling Robot. (a) side view and (b) Schematic view

는 것이다. 그래서 수직적으로 배열된 4 bar linkage를 활용하였다. 수직으로 배열된 4절 링크는 트랜스미션이 휘거나 이탈하지 않도록 상호 보완해주는 역할을 수행한다 [8].

이 문제를 다른 대표적인 크롤링 로봇인 DASH 와 CLASH는 트랜스미션과 평행한 축을 4절 링크로 구성해 해결했다. 이 방법을 적용할 경우 12족 로봇의 트랜스미션은 수평적으로 회전하기 때문에 차체가 너무 두꺼워지는 곤란함이 생기고 로봇의 볼륨이 필요 이상으로 커진다.

로봇의 부피를 키우지 않으면서 안정적인 모션 전달을 달성하기 위해, 우리는 Fig. 5. 처럼 4개의 4절 링크를 양 끝에 2개씩, 수평적으로 2개씩 배열하는 디자인을 구성했다. 그래서 크랭크 핀과 트랜스미션을 결합할 경우 트

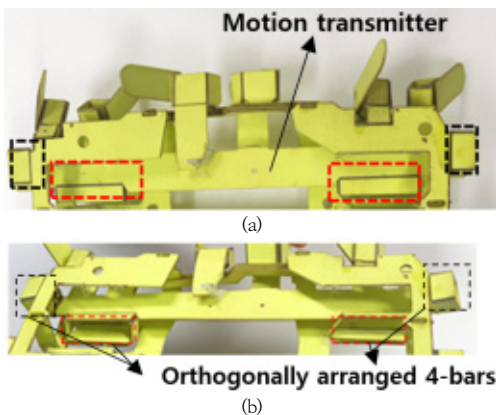


Fig. 5. Orthogonally oriented four-bar prevent the motion transmitter for deviation. Front view is (a) and side view is (b).

Table 2. Mass budget

Components	Mass (g)	Ratio (%)
2 DC Motors and Gears	10.8	33.8
Li-Po Battery	4.5	14.1
Control board	5.2	16.2
Body frame	11.5	35.9
Total	32.0	100

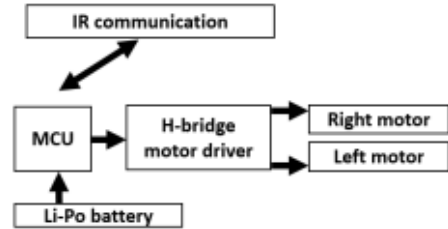


Fig. 6. Block diagram of the controller board.

랜스미션은 굽힘과 이탈이 사라지고 수평을 유지하며 운동할 수 있다. 그리고 정지 상태에서 다리가 외력을 받아도 수직 배열 4절 링크 덕분에 정자세를 유지할 수 있다. 즉, 크랭크 핀과 결합되었을 때 핀의 움직임에 따라 트랜스미션의 움직임이 대응되는 역학적 연동 (kinematic coupling) 이 된다. 결과적으로 이 수직 배열 4절 링크를 통해 모션 전달이 안정적으로 운동 할 수 있고, 빠른 크롤링이 가능하다.

2.4 로봇 제어부 및 기타 구성 요소

Fig. 6.은 로봇 제어부에 대한 다이어그램을 나타낸다. 적외선 통신을 통해 로봇의 좌측과 우측에 위치한 모터를 개별 제어할 수 있다. 두 개의 모터 방향 제어를 통해, 로봇의 전, 후, 좌, 우의 이동 방향을 결정할 수 있다. 전원은 Li-Po 배터리를 통해 공급되며, 좌우의 DC모터는 H-bridge 모터 드라이버 제어를 통해 동작된다. 모터에 부착된 크랭크는 Fig. 2 (b).에서 보듯이 모션 트랜스미터와 연결되어 다리를 구동한다.

Table 2.는 로봇의 구성 요소들과 질량에 대한 정보를 나타내었다. 로봇은 총 32g으로, 몸체 프레임과 모터 및 기어부가 높은 비율을 차지하고 있음 알 수 있다.

3. 실험 및 결과

로봇의 성능을 테스트하기 위해 주행 안정성과 속력을

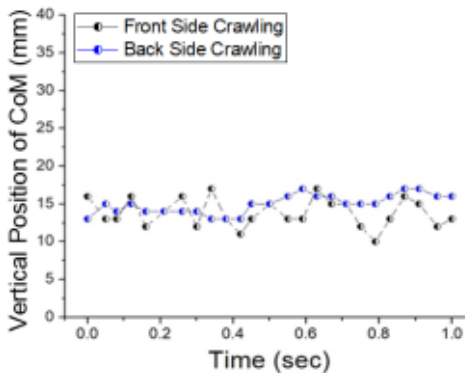


Fig. 7. Vertical position of the mass center

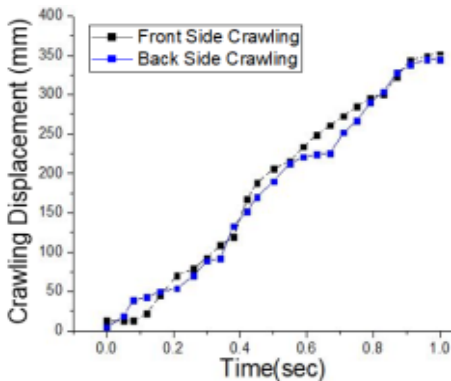


Fig. 8. Crawling displacement vs. time.

측정하였다. 첫 번째로 로봇의 주행 중 질량 중심의 수직 방향 변화를 측정하였다. 주행 중 질량 중심의 수직 방향 변화는 로봇의 진동을 의미하기 때문에 효율이 떨어질 뿐만 아니라, 전복가능성을 의미한다. 그래서 변화가 적을수록 안정적이라고 평가할 수 있다. 질량중심은 비디오 분석을 통해 수행되었다. 비디오 촬영을 통해 Kinovea 프로그램을 활용하여 질량 중심을 추적하는 방식으로 진행하였다.

Fig. 7.은 로봇이 앞면 주행, 뒷면 주행했을 때의 질량 중심 변화에 대한 그래프이다. 그래프를 보듯 z 축은 15mm를 기준으로 약 2~5mm 정도의 상하 진동을 보인다. 로봇의 총 두께가 50mm인 것을 감안하면, 4~10% 정도의 높이 변화가 발생하고 있으며, 통상적인 크롤링 로봇들과 비교했을 때, 안정적인 주행이 가능한 것으로 판단된다.

두 번째로 Fig. 8.은 로봇의 시간대비 수평 이동 거리를 나타낸 것이다. 질량 중심 변화와 마찬가지로 비디오 촬영을 통해 질량 중심을 트래킹하는 방식으로 데이터를 취득하였다. 실험에서 얻어진 데이터는 Fig. 8.과 같다.

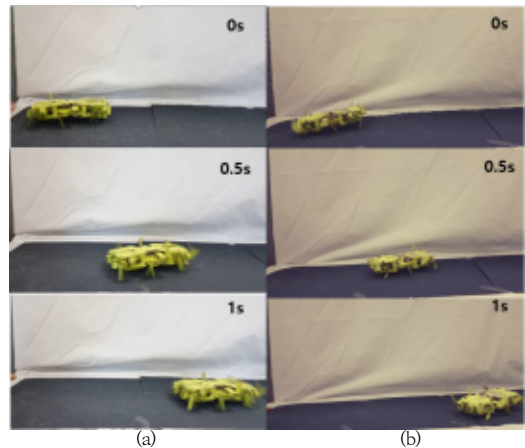


Fig. 9. Running of the crawling robot. (a) The front side crawling and (b) the back side crawling.

그래프를 보면 앞면 및 뒷면 주행 모두 초당 0.4~0.5m 정도 이동하는 것을 볼 수 있다. 로봇의 앞면 주행 시 약 0.52m/s의 속도를 갖고, 배면 주행 시에는 0.42m/s의 속도로 이동하는 것을 알 수 있다. Fig. 9은 실제 12족 양면 주행 로봇의 주행 모습이다. Fig. 9(a)는 앞면 주행, Fig. 9(b)는 배면 주행을 나타낸다. 앞면 및 배면 모두 정상적인 주행이 가능함을 볼 수 있다.

4. 결론

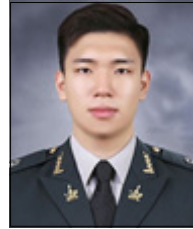
본 논문에서는 양면 주행이 가능한 12족 크롤링 로봇을 제작하였다. 그리고 얇은 두께 구현을 위한 다리 꺾적 오버랩과 안정적인 보행을 위한 트랜스미션 디자인을 제안했다. 로봇의 다리는 1차 유도의 움직임으로 움직이며 4절 링크 6개를 이어붙인 간단한 구조이다. 3개의 다리를 180° 위상차가 나게 디자인하였다. 그리고 3개의 다리를 하나의 모션 트랜스미터로 움직인다. 그래서 총 2개의 트랜스미션이 액추에이터로 평행적으로 회전한다. 이러한 구조의 다리가 양면에 6개가 있어 총 12개의 다리로 양면 주행 기능과 곤충과 같은 삼각 교대 보행을 할 수 있다. 주행 안정성에선 무게중심의 변동이 거의 없었다. 이러한 성능을 바탕으로 본 로봇은 0.52m/s의 속도로, 배면 주행은 0.42m/s의 속도로 빠른 주행이 가능하다. 결과적으로 본 논문은 양면 주행이 가능한 크롤링 로봇 디자인을 제작했고 유사 기능 통합 메커니즘 설계와 수직 4 bar linkage 배열로 소형 및 경량의 로봇 개발을 달성하였다.

References

- [1] P. Birkmeyer, K. Peterson, R. S. Fearing, "DASH: A dynamic 16g hexapedal robot," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, MO, USA, pp. 2683 -2689, October 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2009.5354561>
- [2] S. Kim, J. E. Clark, and M. R. Cutkosky, "iSprawl: Design and Tuning for High-speed Autonomous Open-loop Running," *The International Journal of Robotics Research*, Vol.25, No.9, pp. 903-912, September 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1177/0278364906069150>
- [3] D. W. Haldane, R. S. Fearing, "Running beyond the bio-inspired regime," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, WA, USA, pp. 4539-4546, July 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139828>
- [4] A. T. Baisch, C. Heimlich, M. Karpelson, R. J. Wood, "HAMR3: An autonomous 1.7g ambulatory robot," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, CA, USA, pp. 5073 -5079, September 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6095063>
- [5] J. M. Morrey, B. Lambrecht, A. D. Horchler, R. E. Ritzmann, R. D. Quinn, "Highly mobile and robust small quadruped robots," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, NV, USA, pp. 82 - 87, October 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2003.1250609>
- [6] J.-E. Lee, G.-P. Jung, K.-J. Cho, "Bio-inspired design of a double-sided crawling robot," *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems*, CA, USA, pp. 562-566, July 2017.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-63537-8_50
- [7] D. Zarrouk, L. Yehezkel, "Rising STAR: A highly reconfigurable sprawl tuned robot," *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol.3, No.3, pp. 1888-1895, Feb. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2805165>
- [8] T.-Y. Kim, C. Kim, S.-H. Kim, and G.-P. Jung, "MutBug: A Lightweight and Compact Crawling Robot That Can Run on Both Sides," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 1409-1415, Jan. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2895896>

김 성 현(Kim-Sung Hyun)

[준회원]



- 2016년 3월 ~ 현재: 서울과학기술대학교 기계자동차공학과

〈관심분야〉

로보틱스

정 광 필(Gwang-Pil Jung)

[정회원]



- 2010년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학석사)
- 2016년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학박사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 조교수

〈관심분야〉

로보틱스