

Direct-drive를 활용한 소형 연속 도약 로봇 및 DC모터의 열 모델을 통한 한계 분석

Hopping Robot Using Direct-drive Method and Thermal Modeling to Analyze Motor Limitation

장명진¹·양선교²·정광필[†]

Myeongjin Jang¹, Seongyo Yang², Gwang-Pil Jung[†]

Abstract: A hopping robot can move through a confined environment while overcoming obstacles. To create a small hopping robot, it must be able to generate a large amount of energy and release it at the same time. However, due to the small size of the robot, there is a limit to the size of the actuator that can be used, so it is mainly used to collect energy in an elastic element and release it at once. In this paper, we propose a small hopping robot with a simplified design by removing ancillary parts and enabling continuous hopping using only a small actuator based on a direct-drive method. In addition, repeated actuation over the rated voltage can cause thermal breakdown of the actuator. To check the safety of the actuator at high voltage, we perform modeling to predict the temperature of the actuator and verify the accuracy of the modeling through experiments.

Keywords: Hopping Robot, Direct-drive, Jumping Robot, Heat Transfer, Safety

1. 서론

소형 로봇에서의 연속 도약 기능은 본인의 몸체 크기에 대비하여 비정형 지형을 빠르게 이동할 수 있다는 장점이 있다. 소형 동물에서는 대표적으로 캥거루 쥐를 예시로 들 수 있다. 캥거루 쥐는 평소 자신의 몸체보다 두 배 긴 거리인 0.28 m를 연속도약으로 신속하게 이동한다^[1]. 이와 같은 locomotion을 소형 로봇에 적용할 수 있다면 크기 대비 이동 능력을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다^[2-4].

본 연구에서는 스프링 없이도 도약할 수 있는 새로운 소형 도

약 로봇을 제작하고 재도약 시간 지연 문제 해결 및 그 과정에서 발생하는 구동기의 열을 예측할 수 있는 모델링을 제안한다.

현재 대부분의 소형 도약 로봇들은 도약 동작을 위해 스프링의 형태에 에너지를 저장하였다가 한꺼번에 방출하는 방식을 사용한다^[5-8]. 하지만 이러한 방식은 충분한 에너지를 스프링에 저장하기까지 시간이 소요되어 다음 도약까지의 시간이 오래 걸리는 문제점이 있다.

따라서 이 문제를 해결하고자 이번 연구에서는 [Fig. 1]과 같이 구동기의 회전력을 바로 이용할 수 있는 direct-drive 방식을 사용한다^[9]. Direct-drive 방식을 사용한 도약에는 순간적인 높은 전압을 사용하여 점프에 필요한 에너지를 확보한다. 에너지를 확보하는 데 시간이 걸리지 않기 때문에 재도약 딜레이 문제를 해결할 수 있을 뿐 아니라 스프링을 사용하지 않아 소형 로봇에게는 크게 영향을 주는 무게도 줄일 수 있다는 장점이 있다.

그러나 열 측면에서는 구동기의 열화로 장시간 동작이 어려울 수 있다. 따라서 높은 전압으로 인해 구동기에 발생하는 열에 대해서 온도를 예측할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 열 모델을 제시하여 구동기의 안전성을 확인하였다. 이 온도 예측 모델링 방식을 통해 도약 로봇뿐 만 아니라 소형 구동기가 사용되는 어느 곳이든 온도 예측을 통한 안전성 확인에 이용될 수 있을 것이다.

Received : Nov. 1. 2023; Accepted : Nov. 15. 2023

※ This work was supported by the Korea Research Institute for Defense Technology Planning and Advancement (KRIT) funded by the Korean Government through the Defense Acquisition Program Administration (DAPA) (Development of a Platform for Small Scale Ground Robot, in 2023) under Grant KRIT-CT-22-006-01

1. Undergraduate Student, Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea (audwls3194@naver.com)

2. MS Student, Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea (usultgiu@gmail.com)

† Associate Professor, Corresponding author: Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea (gpjung@seoultech.ac.kr)

본 논문의 2장에서는 로봇의 전체적인 디자인 및 구동 방식을 소개하고 3장에서는 열 모델링 4장에서는 실험 결과 및 안정성을 검증해 보여주며 결론으로 마무리한다.

2. 디자인

2.1 컨셉 디자인

본 시스템의 개략적인 구성은 [Fig. 1]과 같다. 로봇의 핵심 디자인은 rack and pinion의 기본 구조로 제작되었다. Rack and pinion 구동방식은 구동기의 회전을 직선운동으로 바꿔주며 점핑을 가장 단순하게 구현할 수 있는 메커니즘이다. 또한 4절 링크의 다리형과 다르게 복잡한 기구설계 없이도 좌우대칭을 통해 무게 중심만 맞추면 직선 점프가 가능하다는 장점이 있다.

부품 구성은 모터의 동력을 전달하게 해주는 pinion, 회전운동을 직선운동으로 바꿔주기 위해 rack 구조의 body, 모터를 body와 고정해 주는 고정부, 무게중심을 맞추기 위해 사용되는 추를 body와 고정하기 위한 고정부 이렇게 네 가지로 설계하였다.

로봇 동작의 주요 메커니즘은 높은 전압에 의한 구동기의 빠른 회전운동을 직선운동 힘으로 바꾸어주는 것이며, 직선으로 이동하는 구동기가 body 윗부분에 주는 충격에 의해 점프한다. 무게를 최소화하면서 충분한 직선운동을 할 수 있도록 세로 높이는 80.7 mm, 무게 28.8 g로 제작되었다.

2.2 동작 방식

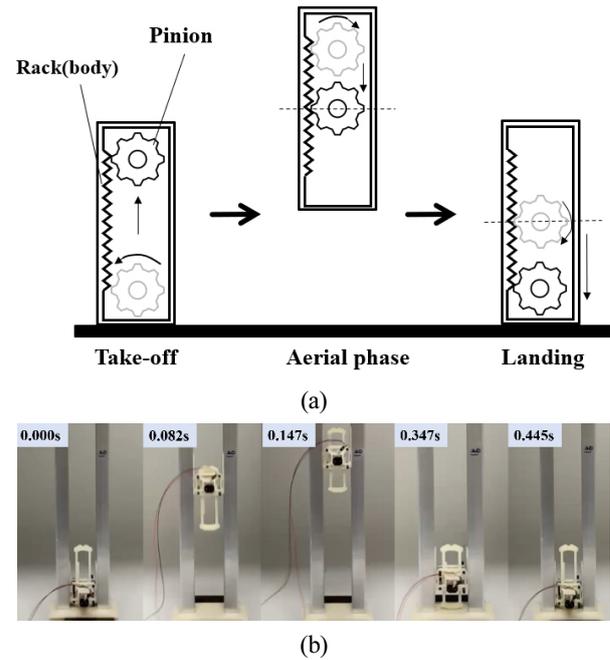
본 시스템의 점핑 과정은 [Fig. 2]와 같이 3가지로 나눌 수 있다. 처음으로 Take-off 단계에서 15 V의 순간 전압을 걸어주게 되고 빠르게 회전하는 모터는 rack and pinion 구조에 의해 수직으로 빠르게 이동하며 body 상단에 강하게 충돌하게 되고 그 충격으로 인해 로봇이 도약하게 된다.

Aerial phase 단계에서는 body와 pinion 사이의 간섭을 줄여 착지 및 다음 도약까지의 시간을 빠르게 하기 위해 역전압을 걸어주어 착지 전 구동기를 body 중간에 미리 위치시킨다. 마

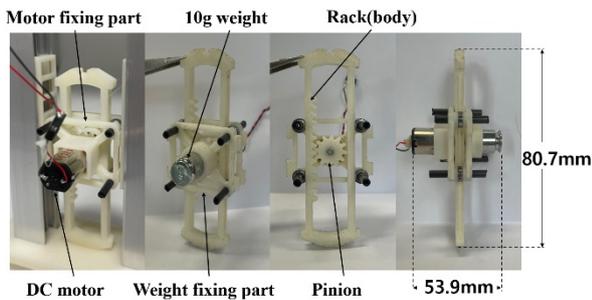
지막 landing 단계에서는 body가 우선 바닥에 충돌하게 되고 body 중간에 위치하던 모터는 관성에 의하여 body 하단으로 내려오게 된다. 이때 모터에 전압은 걸려있지 않은 상태이며, 모터 회전에 의한 유도기전력이 생성되고 이 유도기전력이 사라지는 순간을 착지로 인식하여 재도약을 하게 된다. 이 방식을 사용하게 되면 스위치 같은 추가 부품 없이도 재도약을 할 수 있기 때문에 무게를 줄일 수 있는 장점이 있다.

3. 열 모델

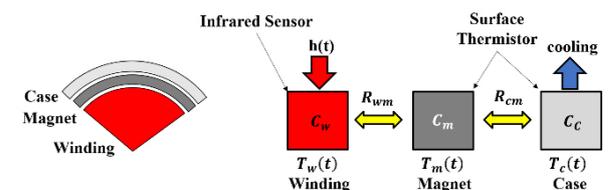
로봇이 도약할 때 필요한 많은 에너지를 얻기 위해 스프링 대신 모터에 15 V 전압을 걸어주게 된다. 하지만 실험에 사용되는 DC 구동기의 정격전압은 6 V이다. 일반적으로 구동기는 안정적인 사용을 위해 기준 정격전압을 정해 놓지만 그때의 전압은 구동기를 연속적으로 사용할 경우의 전압이기 때문에 아주 짧은 시간 동안 정격 전압 이상을 걸어주어도 구동기의 winding은 바로 타지 않는다. 하지만 최대 허용 전압이나 허용



[Fig. 2] (a) Hopping process. (b) Single jumping of the proposed hopping robot. The hopper is jumping up to 20 cm



[Fig. 1] Assembled Hopping Robot and Components



[Fig. 3] Quartered cross-section of DC motor and block diagram for lumped parameter thermal model of motor

시간에 대한 정확한 값을 모르기 때문에 사용 전압에 의한 모터의 열 해석은 필수이다.

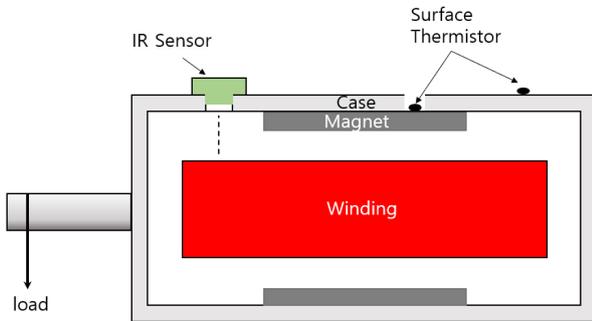
로봇에 사용하는 DC구동기를 모델링 하기 위해 그림으로 단순화하면 [Fig. 3]과 같이 표현할 수 있다^[10]. 구동기 내부를 winding, magnet, case 3가지로 단순화하여 모델링 하였다. 로봇이 도약하는 과정에서 전류와 winding의 저항에 의해 열이 발생되며 열에너지는 magnet, case, 대기의 공기 순서로 열이 전달된다. Case 표면과 외부 공기 사이의 열전달은 대류, 모터 내부에서의 열전달은 모두 전도로 가정하였다. 대류 열전달 계수는 공기의 일반적인 강제 대류 열전달계수 범위의 최솟값인 30으로 가정하여 모델링 하였다.

열에너지 전달 과정은 에너지 평형 방정식을 사용하여 다음과 같이 수식화 된다.

$$C_w \frac{dT_w(t)}{dt} = h(t) \left(T_w(t) - T_m(t) \right) \quad (1)$$

$$C_m \frac{dT_m(t)}{dt} = \frac{T_w(t) - T_m(t)}{R_{wm}} - \frac{T_m(t) - T_c(t)}{R_{cm}} \quad (2)$$

$$C_c \frac{dT_c(t)}{dt} = \frac{T_m(t) - T_c(t)}{R_{cm}} - h \cdot A \cdot (T_c(t) - T_\infty) \quad (3)$$



[Fig. 4] Diagram of experimental setup showing motor, sensors and applied load

[Table 1] Parameters Required for Modeling

Wire Specific Heat C_w	0.8011 J/K
Magnet Specific Heat C_m	0.00086 J/K
Case Specific Heat C_c	0.0027 J/K
Coil Resistance R	8.2 Ω
Room Temperature T_∞	23°C
Motor Case Surface Area A	0.000168 m^2
Convective heat transfer coefficient h	30 W/m ² .K
Winding-Magnet Thermal Resistance R_{wm}	215.2°C/W
Case-Magnet Thermal Resistance R_{cm}	26.16°C/W

$h(t)$ 는 전류에 의해 발생하는 열량을 의미하며 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$h(t) = I(t)^2 \cdot R \quad (4)$$

식(4)의 인풋 값 전류 $I(t)$ 를 정해주면 식(1), (2), (3)의 미지수 $T_c(t)$, $T_m(t)$, $T_w(t)$ 는 미분방정식을 통해 예측가능하게 되며, 전도에 의한 열 저항 값은 실험으로 구하고 나머지 변수들은 참고 문헌을 통해 구한다^[10]. 사용된 변수 값은 [Table 1]과 같다.

열용량 값은 각 물질의 비열과 질량을 곱한 값을 사용하였으며, 물질 사이의 열저항값들은 다음의 수식을 이용한 실험으로 구하였다.

$$R_{wm} = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{T_w(t) - T_m(t)}{h(t)} \right) \quad (5)$$

$$R_{cm} = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{T_m(t) - T_c(t)}{h(t)} \right) \quad (6)$$

[Fig. 4]에서처럼 수식에 필요한 $T_w(t)$ 값은 모터에 구멍을 뚫고 적외선 센서를 이용하여 wire의 온도를 측정하였다. $T_c(t)$, $T_m(t)$ 값은 접촉식 센서를 사용하여 온도를 측정하였다. 실험 및 검색으로 구한 변수들을 표로 나타내면 다음과 같다.

4. 실험 및 결과

4.1 모델링 검증

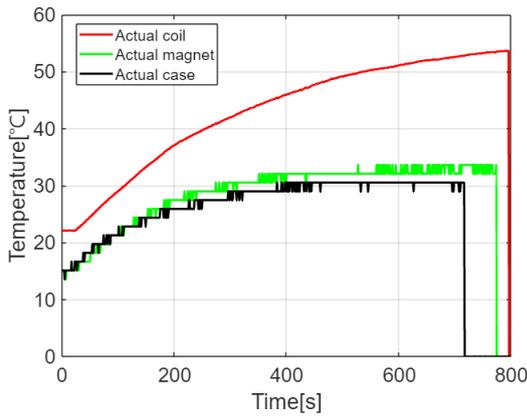
앞서 세운 모델을 검증하기 위해 [Fig. 4]와 같이 실험을 수행하였다. 모터의 정격전압인 6V를 인가하여 800초 동안 무부하 상태에서 연속으로 동작하도록 하였다. 무부하에서 정격전압으로 구동하였으므로, 온도가 특정 값으로 수렴할 것으로 예상할 수 있다.

실제 실험 결과와 모델 예측치는 [Fig. 5]와 같다. [Fig. 5(a)]는 실험값이다. Winding을 온도는 점차 증가하는 형태를 보여주었고, magnet과 case의 온도는 30°C 부근으로 수렴함을 볼 수 있다.

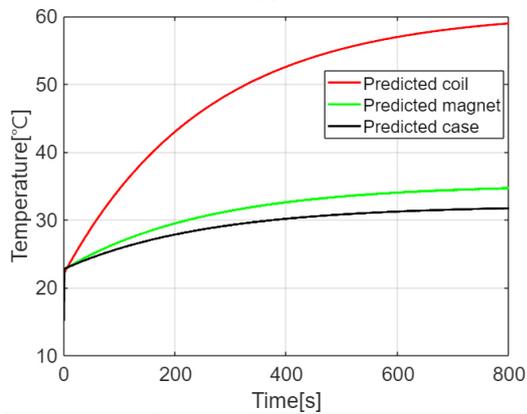
모델 예측치를 보여주는 [Fig. 5(b)]에서도 유사한 모습을 보였다. Magnet과 case의 온도는 시간이 지날수록 기온기가 완만해지며 30°C 근처로 수렴함을 볼 수 있었다. Coil 온도의 경우 [Fig. 5(a)]와 마찬가지로 증가하는 모습을 보이나, 기온기가 점차 완만해짐을 관찰하였다.

4.2 연속 도약 실험

이 모델링을 실제 점핑 로봇 시스템에 적용해 보기 위해 점

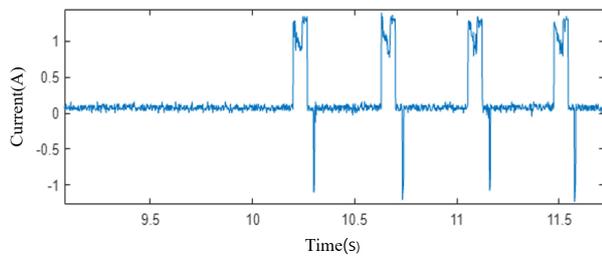


(a)



(b)

[Fig. 5] (a) Actual motor temperature at 6V-0.12A (b) Predicted motor temperature at 0.12A

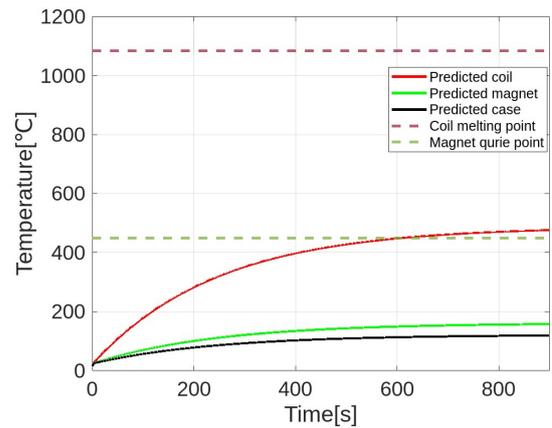


[Fig. 6] Current flowing to the motor when jumping

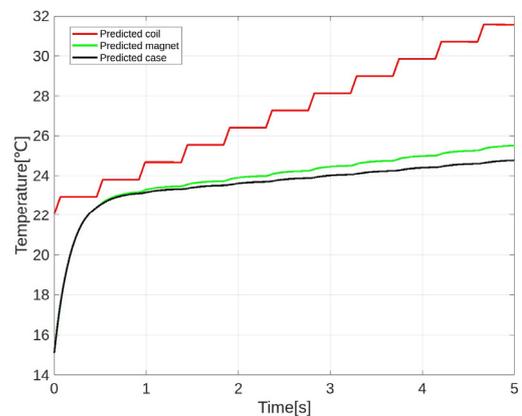
프 시 모터에 흐르는 전류를 측정해 보았다. [Fig. 6]약 0.46초의 점프 주기마다 0.0667초 동안 1.13A의 평균 전류가 흐르는 것을 확인하였고 전류 데이터를 단순화하여 모델링 인풋 값 $I(t)$ 에 넣어 온도를 예측해 보았다.

모델링 예측 결과 [Fig. 7]처럼 구동기의 case, magnet, winding의 온도가 예측되었으며 점프를 하지 않는 동안 열이 식는 구간 [Fig. 7(b)]이 생김으로 인하여 정격전압보다 높은 15 V를 사용하였음에도 코일의 녹는점 1083°C, 자석의 퀴리온도 450°C에 도달하지 않아 구동기가 안정적으로 작동할 것을 확인하였다.

예측 시스템과 실제 시스템을 비교하여 모델링의 정확성을

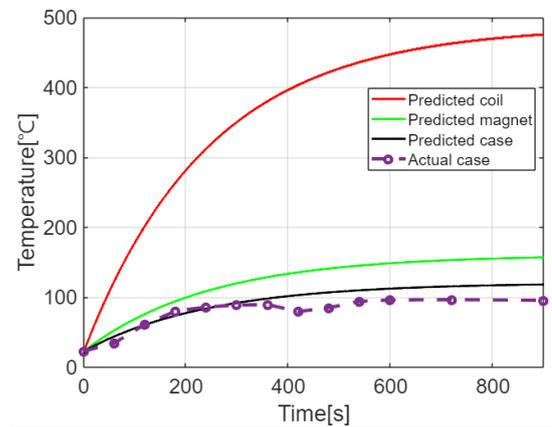


(a)



(b)

[Fig. 7] (a) Simulated Motor Temperatures for a 0.46s period square wave at 0-1.13 A. (b) A Magnified View of The Boxed Area



[Fig. 8] Comparison of Actual and Predicted Motor Case Temperatures

확인해 보았다. 점프하는 동안의 로봇의 winding과 magnet의 온도는 측정하기 불가능하므로 case의 온도를 열화상 카메라를 이용해 비교해 보았다. [Fig. 8]에서 볼 수 있듯이 실제 case 온도와 예측 case 온도가 거의 비슷한 기울기와 수렴 온도를 가지는 것을 확인하며 정확성을 검증하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 에너지 저장 방식이 아닌 direct-drive의 방식을 사용하여 추가적인 에너지 저장 요소 없이도 호핑 모션을 구현하는 새로운 디자인의 로봇 메커니즘을 제안하였다. 또한 저가형 DC 구동기의 모델링을 통해 구동기의 온도를 예측하여 안정성을 확인할 수 있는 방식을 제시하였다. 이런 방식은 호핑 로봇뿐 아니라 이 구동기가 사용되는 여러 구조물의 안정성 확보 및 온도 예측에 활용될 수 있을 것이다.

References

- [1] M. J. Schwaner, D. C. Lin, and C. P. McGowan, "Jumping mechanics of desert kangaroo rats," *Journal of Experimental Biology*, vol. 221, no. 22, Nov., 2018, DOI: 10.1242/jeb.186700.
- [2] C. Kim, D.-J. Lee, S.-P. Jung, and G.-P. Jung, "Dipo: a miniaturized hopping robot via lightweight and compact actuator design for power amplification," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 18, no. 4, May, 2023, DOI: 10.1088/1748-3190/acd290.
- [3] D. W. Haldane, M. M. Plecnik, J. K. Yim, and R. S. Fearing, "Robotic vertical jumping agility via series-elastic power modulation," *Science Robotics*, vol. 1, no. 1, Dec., 2016, DOI: 10.1126/scirobotics.aag2048.
- [4] S.-G. Yang, D.-J. Lee, C. Kim, and G.-P. Jung, "A Small-Scale Hopper Design Using a Power Spring-Based Linear Actuator," *Biomimetics*, vol. 8, no. 4, Aug., 2023, DOI: 10.3390/biomimetics8040339.
- [5] M. Kovac, M. Fuchs, A. Guignard, J.-C. Zufferey, and D. Floreano, "A miniature 7g jumping robot," *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, pp. 373-378, 2008, DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543236.
- [6] E. W. Hawkes, C. Xiao, R. Peloquin, C. Keeley, M. R. Begley, M. T. Pope, and G. Niemeyer, "Engineered jumpers overcome biological limits via work multiplication," *Nature*, vol. 604, pp. 657-661, Apr., 2022, DOI: 10.1038/s41586-022-04606-3.
- [7] V. Zaitsev, O. Gvirsman, U. Ben Hanan, A. Weiss, A. Ayali, and G. Kosa, "A locust-inspired miniature jumping robot," *Bioinspir Biomim*, vol. 10, no. 6, Nov., 2015, DOI: 10.1088/1748-3190/10/6/066012.
- [8] G.-P. Jung, C. S. Casarez, J. Lee, S.-M. Baek, S.-J. Yim, S.-H. Chae, R. S. Fearing, and K.-J. Cho, "JumpRoACH: A Trajectory-Adjustable Integrated Jumping-Crawling Robot," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 24, no. 3, pp. 947-958, Jun., 2019, DOI: 10.1109/TMECH.2019.2907743.
- [9] A. De and D. E. Koditschek, "The Penn Jerboa: A platform for exploring parallel composition of templates," *arXiv:1502.05347*, Feb., 2015, DOI: 10.48550/arXiv.1502.05347.
- [10] S. Trujillo and M. Cutkosky, "Thermally constrained motor operation for a climbing robot," *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japan, pp. 2362-2367, 2009, DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152870.



장 명 진

2018~현재 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 학사과정

관심분야: Bio-inspired robots, Smart actuators



양 선 교

2021 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 학사

2023 서울과학기술대학교 기계공학과 석사

관심분야: Bio-inspired robots, Smart actuators



정 광 필

2010 KAIST 기계공학과(공학사)

2016 서울대학교 기계공학과(공학박사)

2017~현재 서울과학기술대학교 부교수

관심분야: Bio-inspired robots, Origami-inspired robots, Smart actuators