

스크류 추진형 검측 로봇의 효율적인 검측을 위한 스크류 구조 변화 메커니즘

Screw Transformation Mechanism of Screw-Propelled Robot for Efficient Void Detection in Grease Pipe

김 동 선¹ · 김 호 중² · 김 진 현[†]

Dongseon Kim¹, Hojoong Kim², Jinhyun Kim[†]

Abstract: In general, detection robots using ultrasonic sensors are equipped with sensors to protrude outward or to contact objects. However, in the case of a screw-propelled robot that detects the inside of a reactor tendon duct, if the ultrasonic sensor protrudes to the outside, resistance due to grease is generated, and thus the propulsion efficiency is reduced. In order to increase the propulsion efficiency, the screw must be sharp, and the sharper the screw, the more difficult it is to apply a high-performance ultrasonic sensor, and the detection efficiency decreases. This paper proposes a screw shape-changing mechanism that can improve both propulsion efficiency and detection efficiency. This mechanism includes an overlapped helical ring (OHR) structure and a magnetic clutch system (MCS), and thus the shape of a screw may be changed to a compact size. As a result, the Screw-propelled robot with this mechanism can reduce the overall length by about 150 mm and change the shape of the screw faster and more accurately than a robot with a linear actuator.

Keywords: Screw-Propelled, Overlapped-Screw, Magnetic Clutch, Grease Robot

1. 서 론

일반적으로 이동 로봇은 주변 환경을 파악하기 위해 각종 센서를 사용하는데, 특히 물체를 감지하는 센서로 라이다, 레이다, 초음파 센서 등을 사용한다^[1]. 그 중 초음파 센서는 다른 센서에 비해 감지할 수 있는 범위가 해상력은 부족하지만, 다양한 매질에서 발생하는 노이즈에 강하기 때문에 비파괴 검사(NDT) 수행에서 많이 적용되고 있다^[2]. 초음파 센서는 감지되는 물체까지의 거리를 측정할 수 있는데, 송신기(Transmitter)에서 보낸 펄스가 매질의 경계에서 반사되어 수신기(receiver)로 도착하기까지 걸리는 시간(Time of flight)의 측정을 통해

물체까지의 거리를 계산한다^[3]. 따라서 초음파 센서를 사용하는 로봇은 결함까지의 거리를 효율적으로 측정하기 위해 센서를 외부로 돌출시키거나 검측하고자 하는 대상에 센서가 접촉하도록 위치시켜야 한다^[4,5].

초음파 센서를 활용하는 검측 로봇 중에서 원자로 포스트 텐셔닝(Post-tensioning)의 내부 결함을 검측하기 위해 개발된 Screw-Propelled 소구경 로봇^[6] 또한 초음파 센서를 사용한다. 원자로 포스트텐셔닝은 [Fig. 1]과 같이 구조물의 강도를 높이기 위한 강연선(Strand)과 강연선의 부식을 방지하기 위해 그리스(Grease)로 남은 공간을 채운 형태로 이루어진 100 m 길이의 텐던 덕트로 구성된다^[7]. 하지만 국내외 원자로에서 그리스 누유 사례가 발생하고 있고, 그리스가 누유되어 공극이

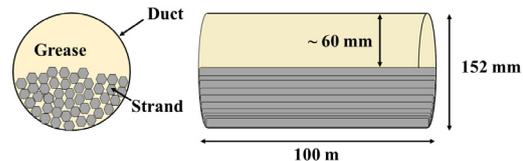
Received : Mar. 23. 2022; Revised : Apr. 20. 2022; Accepted : Apr. 22. 2022

※ This work was supported by KOREA HYDRO & NUCLEAR POWER CO., LTD (No.2019-Technology-03)

1. Researcher, Future Mechanical Technology Research Center in SEOULTECH, Seoul, Korea (ehdtjs0603@gmail.com)

2. Master's Course, SEOULTECH, Seoul, Korea (khj9634@g.seouttech.ac.kr)

† Full Professor, Corresponding author: SEOULTECH, Seoul, Korea (jinhyun@seoultech.ac.kr)



[Fig. 1] Tendon duct in a Atomic pile

발생하면 공기 중에 노출된 강연선이 부식되어 심한 경우 강연선의 파단까지 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 텐던 덕트에 삽입하여 내부를 직접 검측하기 위해 제안된 로봇은 공기 중의 물체를 탐지하는 일반적인 로봇과 달리 텐던 덕트 내 그리스의 공극(Void)을 검측하기 위한 용도로 초음파 센서를 사용한다.

특히 텐던 덕트는 내부를 육안으로 확인하기 어렵기 때문에, 검측 신뢰도를 높이기 위하여 높은 분해능의 초음파 센서가 필요하다. 따라서 그리스의 음향 임피던스와 반고체 상태인 점을 고려하여 분해능을 높이기 위해 주파수가 높은 센서를 적용해야 하고, 그리스에 의해 교란된 신호를 안정적으로 수신하기 위하여 직경이 큰 센서를 적용해야 한다^[8].

또한 해당 로봇은 유동성이 낮은 그리스에서 움직이기 위해 스크류의 회전으로 이동하는데, 스크류 회전으로 인한 노이즈 발생을 방지하고자 초음파 센서를 로봇의 가장 선두에 장착하여 덕트 내부의 그리스 공극을 탐지할 수 있다. [Fig. 2]와 같이 그리스의 공극이 발생한 경우, 초음파 센서를 통해 로봇으로부터 공극까지의 거리를 계산하여 공극의 여부를 확인한다.

하지만 초음파 센서가 로봇의 선두에 탑재된 이러한 형태는 로봇이 전진함에 따라 초음파 센서의 단면에 그리스의 저항이 작용하여 추진 효율이 감소한다[Fig. 3]. 초음파 센서의 단면적이 커질수록 추진 효율은 감소하고, 일정 크기 이상에서는 로봇의 추진력보다 그리스의 저항이 더 커져 로봇이 이

동하지 못할 수 있다.

추진 효율을 높이기 위해서는 로봇의 선두는 날카로운 형태를 가져야 하지만, 로봇의 스크류 직경이 60 mm 보다 작아야 하기 때문에 선두가 날카로워질수록 충분한 크기와 성능의 초음파 센서를 적용하기 어려워진다.

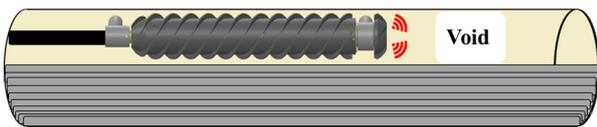
결과적으로 추진 효율을 높이기 위해 스크류 선두가 날카로워지면, 충분한 성능의 초음파 센서를 적용하지 못하기 때문에 공극 검측의 효율이 감소하게 된다.

본 논문에서는 이를 극복하기 위해 추진 효율과 검측 효율을 모두 극대화할 수 있는 메커니즘을 제안한다. 이 메커니즘은 Screw-Propelled 로봇 선두의 형상을 상황에 따라 변화시킬 수 있는데, 이러한 스크류 구조 변화 메커니즘을 구현하기 위하여 Overlapped helical ring과 Magnetic Clutch를 적용하였다. 이를 통해 로봇의 크기 변화를 최소화하며 스크류 구조 변화 메커니즘을 적용할 수 있다.

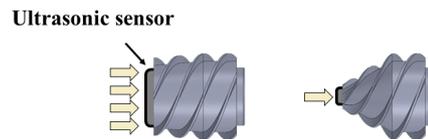
2. 메커니즘 모델링

2.1 Concept of mechanism

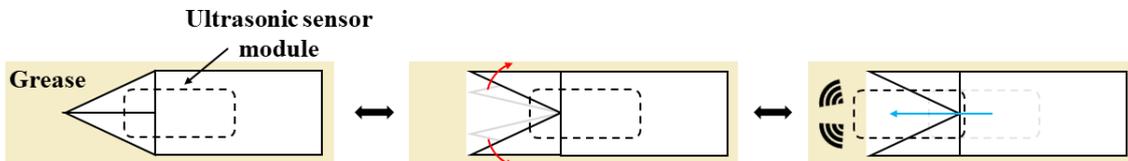
로봇의 효율적인 추진과 검측을 위한 스크류 구조 변화 메커니즘은, 추진을 위한 모드와 검측을 위한 모드로 구분되어 상황에 따라 모드를 변화시킨다. [Fig. 4]와 같이 추진 모드에서는 초음파 센서가 로봇에 내장되고, 선두는 날카로운 형태



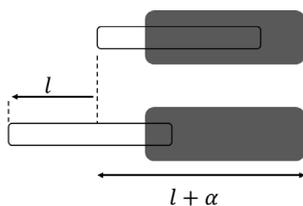
[Fig. 2] Detection a void of Screw-Propelled Robot



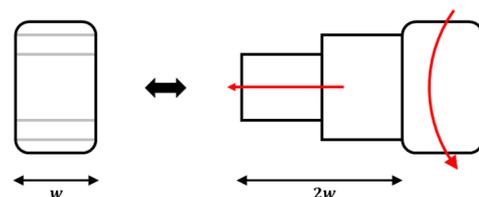
[Fig. 3] Shapes for ultrasonic sensor's size



[Fig. 4] Schematic diagram of screw transform mechanism



[Fig. 5] Schematic diagram of a Linear actuator's motion



[Fig. 6] Schematic diagram of OHR mechanism

를 유지하기 때문에 그리스의 저항을 최소화하여 로봇 추진력의 효율을 최대화하며 이동한다. 반대로 검측 모드에서는 선두의 스크류가 절개되어 초음파 센서가 돌출될 수 있는 공간을 마련하고, 이후 초음파 센서가 로봇의 선두로 돌출되어 그리스의 공극을 검측한다.

로봇에 내장된 초음파 센서를 외부로 돌출시키기 위해서는 직선적인 움직임이 필요하다. 일반적으로는 직선 운동을 발생시키는 액추에이터로 리니어 액추에이터를 적용하지만, 이를 위해서는 초음파 센서가 움직이는 거리보다 더 긴 공간이 필요하다[Fig. 5]. 따라서 리니어 액추에이터를 적용하는 경우, 작동을 위한 모터드라이버를 포함하여 로봇의 전장이 증가한다.

본 논문에서는 로봇의 전장의 변화는 최소화하면서 빠르고 효과적으로 초음파 센서를 이동시킬 수 있는 Overlapped helical ring 구조와 이를 작동하기 위한 회전 모터를 추가하지 않고 로봇의 추진용 모터로부터 동력을 전달받을 수 있는 Magnetic Clutch를 결합한 스크류 구조 변화 메커니즘을 고안하였다.

2.2 Overlapped helical ring (OHR) mechanism

OHR은 회전 운동이 직선 운동으로 변환되는 나사(screw)의 동작 원리에서 착안하여, 나선 홈이 있는 링 여러 개를 겹친 구조로 구성하였다. [Fig. 6]과 같이 모터가 나선 링 하나를 회전시키면 단계적으로 다른 나선 링들이 전개되는 구조이고, 링의 개수와 나선의 피치에 따라 직선 움직임의 거리를 조절할 수 있다.

본 논문에서는 20 mm의 공간에서 40 mm의 직선 움직임을 발생시킬 수 있도록 [Fig. 7]과 같이 OHR 모델링을 제작하였고, 스크류 개폐를 위한 구조와 초음파 센서 이동을 위한 구조

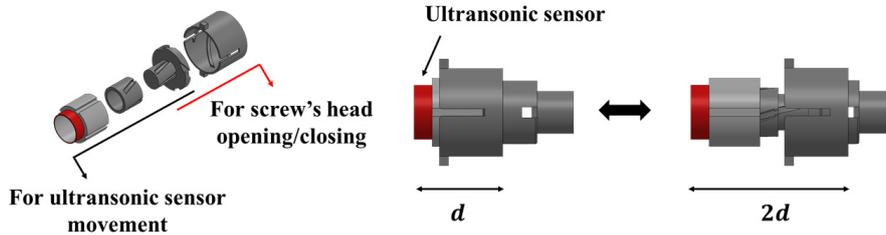
가 동시에 움직이며 스크류 구조를 변화시킨다.

2.3 Magnetic clutch system (MCS)

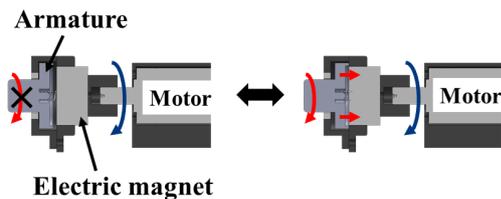
일반적으로 클러치는 차량에서 동력 전달을 제어하기 위해 사용되는데, 이러한 대형 클러치 시스템은 60 mm 이하의 소구경 로봇에 적용하기에 적합하지 않다. 따라서 소구경 로봇에 적용하기 위해 [Fig. 8]과 같이 클러치의 동작을 위한 On/Off 방식의 소형 전자석 모터(Electric magnet)와 동력 전달을 위한 전기자(Armature)로 구성하였고, 위와 같이 구성된 MCS는 입력하는 신호에 따른 전자석의 동작 여부로 동력 전달을 제어할 수 있다.

전자석에 신호를 인가하여 전기자가 접촉하면 로봇의 추진용 모터로부터 동력을 전달받은 OHR 구조가 작동된다. 반대로 로봇이 이동하는 추진 모드에서는 전자석에 인가한 신호를 끊어 전기자가 떨어지고, 추진용 모터로부터 OHR로 동력이 전달되지 않는다. MCS의 작동에는 릴레이 모듈을 통전 스위치로서 사용하여 전자석 모터를 On/Off 시킬 수 있도록 하였고, 이를 통하여 로봇의 추진 중에도 연속적인 구조 변화가 가능하도록 하였다.

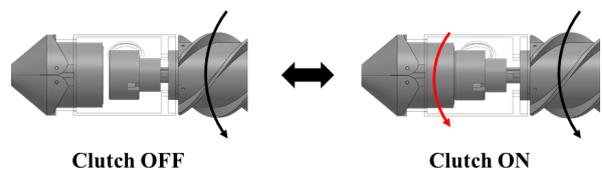
이를 토대로 MCS의 모델링을 제작하고, Screw-Propelled robot에 MCS를 적용시키기 위해 [Fig. 9]과 같이 로봇의 크기에 맞게 소형화한 모델링을 제작하였다. MCS가 적용된 로봇의 추진 모드에서는 클러치 OFF 상태를 유지하여 OHR 구조의 동작 없이 이동하며, 검측 모드로 변경 시 클러치에 신호를 인가하여 OHR에 동력이 전달되도록 한다. 동력을 전달받은 OHR은 스크류의 구조를 변화시켜 로봇이 그리스의 공극을 검측할 수 있도록 한다.



[Fig. 7] Modeling of OHR for Screw-Propelled robot



[Fig. 8] Schematic diagram of MCS



[Fig. 9] Modeling of MCS for Screw-Propelled robot

3. 실험 결과

OHR 구조와 MCS를 활용한 스크류 구조 변화 메커니즘의 모델링을 제작하였다. 로봇은 [Fig. 10]과 같이 이동을 위한 추진 모드에서는 스크류가 비교적 날카로운 형태로 추진 효율을 높이고, 검측 모드에서는 초음파 센서를 로봇의 가장 앞으로 이동시켜 그리스와 접촉하면서도 스크류 회전의 영향을 줄였다.

앞선 모델링을 기반으로 Screw-Propelled robot에 적용시킬 수 있는 스크류 구조 변화 메커니즘의 프로토타입을 3D 프린터를 통해 제작하였다.

스크류 절개에 필요한 최소 힘은 [Fig. 11]와 같이 구조가 변화되는 스크류를 둘러싼 그리스의 무게로 가정하였다. 따라서 외경 60 mm의 스크류를 둘러싼 그리스의 부피는, 내경 152 mm 덕트 내부를 가득 채운 그리스 부피에서 스크류의 부피를 제외한 값으로 정의하여 계산하였다[Table 1].

실제 현장에서 사용하는 RP 600 그리스의 밀도(0.9 g/cm^3)^[9]를 이용하여 스크류를 둘러싼 그리스의 무게가 5.3 N임을 구하였고, 따라서 스크류를 절개하기 위해 최소 5.3 N의 힘이 필요한 것으로 계산하였다. 실제 현장의 덕트에는 강연선이 삽

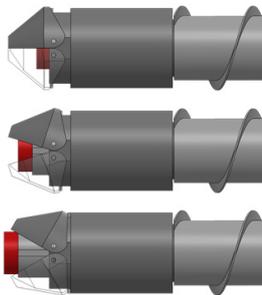
입되어 [Table 1]에서 가정한 덕트 내 그리스의 부피보다 적기 때문에, 스크류가 5.3 N 이상의 힘으로 절개되면 실제 현장에서도 절개가 가능하다.

로드셀을 이용하여 OHR에 의해 스크류가 절개되는 힘을 공기 중에서 측정한 결과, [Fig. 12]와 같이 최대 약 25 N의 힘으로 절개되는 것을 확인하였다. 따라서 스크류가 주변의 그리스를 충분히 밀어내며 1초 이내에 절개될 수 있다고 판단된다.

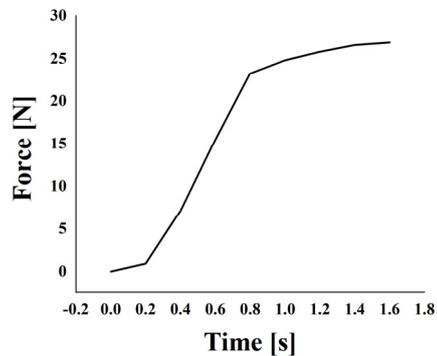
또한 프로토타입의 MCS의 동작 확인을 위해 내부를 확인할 수 있는 테스트베드를 제작하였고, 실험을 통해 MCS가 정상적으로 작동하여 동력을 전달하는 것을 확인하였다[Fig. 13].

OHR과 MCS가 결합된 스크류 구조 변화 메커니즘의 프로토타입을 로봇과 동일한 형태의 테스트베드에 장착하여 구동 실험을 진행하였고, 공기 중에서 실험을 통해 [Fig. 14]와 같이 상황에 맞게 스크류의 구조를 변화시킬 수 있었다.

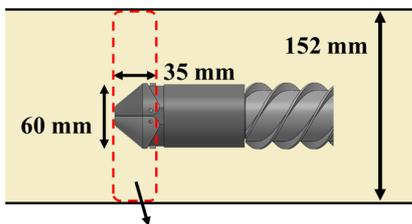
결과적으로 OHR과 MCS를 적용한 구조 변화 메커니즘을 통해 동력 시스템을 동기화하여 로봇 동작 중에도 간단한 제어 메커니즘 동작이 가능하고, 리니어 액추에이터를 사용하는 로봇과 비교하여 로봇의 전장을 약 150 mm 감소시켰다 [Fig. 15].



[Fig. 10] Sequence of screw transform mechanism

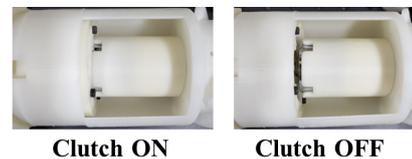


[Fig. 12] Result of screw opening force



Volume of grease around screw

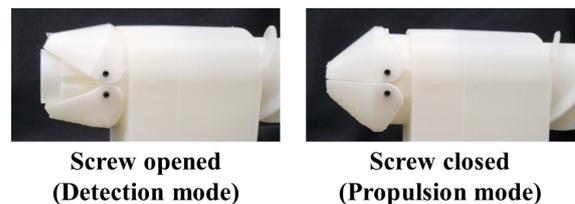
[Fig. 11] Volume of grease



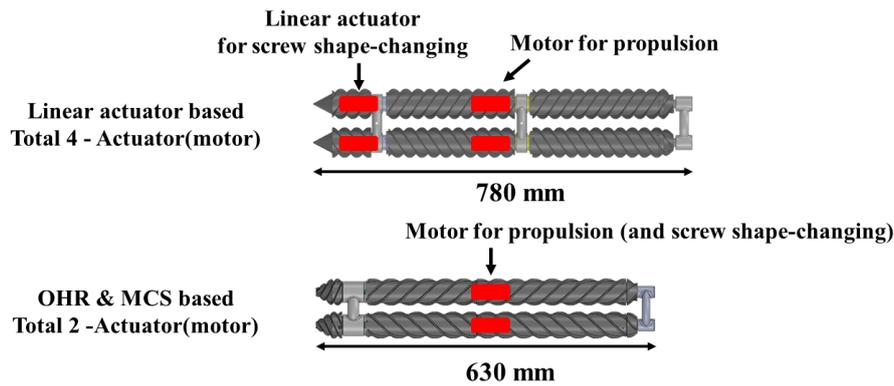
[Fig. 13] Change of MCS state

[Table 1] Various volume values

Volume of grease in duct (V_d)	Volume of screw (V_s)	Volume of grease around screw ($V_d - V_s$)
635.10 cm^3	33.0 cm^3	602.12 cm^3



[Fig. 14] Apply the mechanism to Robot



[Fig. 15] Comparison robot's size between Linear actuator based robot and OHR & MCS based robot

4. 결 론

본 논문에서 제안한 OHR 구조와 MCS가 적용된 스크류 구조 변화 메커니즘은 로봇의 추진 상황에서는 초음파 센서는 내장시키고 선두를 날카로운 형태로 유지하여 추진 효율을 높이고, 검측 상황에서는 스크류를 절개하여 초음파 센서를 가장 앞으로 이동시켜 검측 효율을 높일 수 있다. 실험을 통해 해당 메커니즘이 적용된 Screw-Propelled robot이 상황에 따라 형태를 변환할 수 있는 것을 확인하였다. 이를 통해 검측 임무 중에 로봇의 구조적 문제로 인해 발생하는 추진/검측 효율의 감소 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대한다.

다만 실제 현장에 적용하기 위해서는 3D 프린팅의 제작 한계와 재료의 내구성 문제를 극복할 수 있는 연구가 필요하고, 실제 그리스 배관에서 실험을 진행하여 로봇 동작 중에 그리스로 인해 발생할 수 있는 클러치의 슬립 현상을 방지하는 구조 설계가 필요할 것이다.

References

- [1] D. Ahn, N. Kim, J. Park, and Y. Kim, "2D Indoor Map Building Scheme Using Ultrasonic Module," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 41, no. 8, pp. 986-994, 2016, DOI: 10.7840/kics.2016.41.8.986.
- [2] H. Leon-Rodriguez, S. Hussain, and T. Sattar, "A compact wall-climbing and surface adaptation robot for non-destructive testing," *2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 404-409, 2012, [Online], <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6393473>.
- [3] M. Kelemen, I. Virgala, T. Kelemenová, L. Miková, P. Frankovský, T. Lipták, and M. Lörinč, "Distance measurement via using of ultrasonic sensor," *Journal of Automation and Control*, vol. 3, no. 3, pp. 71-74, 2015, [Online], <http://pubs.sciepub.com/automation/3/3/6/>.
- [4] M. Willcox, and G. Downes, "A brief description of NDT techniques," *Toronto: NDT Equipment Limited*, 2003, [Online], <https://www.insightndt.com/papers/technical/t001.pdf>.
- [5] D. Kim, H. Kim, and J. Kim, "Screw-propelled Robot movable from grease pipe," *The 16th Korea Robotics Society Annual Conference*, Pyeongchang, Gangwondo, Korea, pp. 399-400, 2021, [Online], <https://www.nl.go.kr/>.
- [6] A. Dimitrov and D. Minchev, "Ultrasonic sensor explorer," *2016 19th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*, Bourgas, Bulgaria, 2016, DOI: 10.1109/SIELA.2016.7542987.
- [7] J. Hong, J. Park, J. Lee, and J. Lee, "Inspection Technology of Post-Tensioning System of Containment Building in Nuclear Power Plant," *Machines and Materials*, vol. 11, no. 4, pp. 134-142, 1999, [Online], <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO199973336119428.page>.
- [8] K. T. Lee, J. B. Lee, and J. K. Kim, "Grease Void Detection in the Post-Tensioning Duct," *KSCE 2020 CONVENTION*, pp. 1171-1172, 2020, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10569882>.
- [9] D. Kim, "Screw-Propelled robot for internal inspection of tendon duct in Atomic pile," M.S thesis, Seoul National University of Science And Technology (SeoulTech), Seoul, Korea, 2022, [Online], <http://www.riss.kr/index.do>.



김 동 선

2020 서울과학기술대학교 기계자동차공학과
학사

2022 서울과학기술대학교 기계공학과 공학
석사

관심분야: Robotics, Mechanism design, Control System design



김 호 중

2021 서울과학기술대학교 기계자동차공학과
학사

2021~현재 서울과학기술대학교 기계공학과
석사과정

관심분야: Design of Robotic Mechanisms, Control, Actuators



김 진 현

1998 POSTECH 기계공학 과 학사

2000 POSTECH 기계공학과 공학 석사

2005 POSTECH 기계공학과 공학 박사

2005~2007 한국생산기술연구원 선임연구원

2007~현재 서울과학기술대학교 기계자동차
공학과 교수

관심분야: Redundant Manipulator, Underwater robots, Hovering
robots, Neuro Robotics