

스크류 바퀴가 장착된 수륙양용 정찰로봇 개발

Advancements in Amphibious Reconnaissance Robots with Screw Wheel Propulsion

배종호¹·배철희¹·진성호¹·이만기¹·박성호¹·조건래[†]
Jong-Ho Bae¹, Chul-Hee Bae¹, Sung-Ho Jin¹, Man-Gi Lee¹,
Sung-Ho Park¹, Gun-Rae Cho[†]

Abstract: This paper introduces an amphibious platform equipped with screw-type wheels capable of operating on various terrains, including sand, gravel, and water. Features such as screw-driven propulsion, buoyancy control, and adaptive suspension systems are incorporated to ensure effective mobility in different environments. The platform employs screw wheels and a bogie-structure suspension system to drive effectively in various environments. To verify the required reliability of the developed platform, drivability evaluation indicators were set and thoroughly tested. As the experimental results, the evaluated performance of the proposed amphibious reconnaissance robot platform was indicated its suitability for border surveillance tasks, including the ability to achieve required speeds and to overcome various environments. Despite some stability issues on land, the platform demonstrated deterministic potential for future integration with autonomous navigation systems to further enhance surveillance capabilities.

Keywords: Amphibious Reconnaissance Robot, Screw Wheel, Bogie Structure, Evaluation Index

1. 서론

대한민국은 삼면이 바다로 둘러싸여 있으며, 동해안은 비교적 단순한 해안선을 가지고 있고, 남해와 서해는 조수 간만의 차이가 심해 복잡한 해안선을 가지고 있다. 동해안은 모래 해안이 발달되어 있고, 서해안은 갯벌이 발달되어 있다. 비정형 환경에서 감시정찰을 수행하는 로봇은 모래사장, 자갈, 갯벌 등 다양한 환경에서 주행성이 확보되어야 한다. 또한 군사 자원의 감소, 계절적, 환경적 요인을 포함한 미래 인구 변화로 인해 병력을 대처할 로봇개발의 필요성이 시급하다. 감시 및 정찰 작전

의 조건을 개선하고 효율적인 보안 작전을 수행하기 위해 육상과 수상에서 작동할 수 있고 원격 제어 및 자율 주행을 통해 해안과 강에서 운용 가능한 수륙 양용 정찰 로봇 플랫폼을 소개한다.

2. 관련 연구

과거부터 지상과 해상의 운용이 가능한 수륙양용 플랫폼의 연구가 활발하게 진행되었다. 대부분의 모바일 로봇은 일반적으로 단일 유형의 모션 모드로 설계되는데, 이는 비정형 환경에서 복잡한 모션에 대한 제한 사항이 있다^[1-4]. 이런 점을 극복하기 위해 물과 땅의 환경에서 좋은 적응력을 가지는 양서류를 활용한 연구도 활발히 진행되었다^[5-7]. 이런 양서류는 독특한 신체구조와 기술을 가지고 있기 때문에 다양한 자연환경에서 생존이 가능했다. 악어, 거북이, 개구리, 펭귄, 게, 뱀과 같은 양서류를 모사한 로봇들의 예이다. 자연 환경에서 작동하는 로봇은 단단한 땅에서부터 모래, 심지어 잔디와 숲 지대와 해상과 같은 다양한 지형을 접하게 된다. 일반적으로 한가지 유형의 모드로만 다양한 환경에 적응성이 떨어지기 때문에 구동모드를 바꾸어 운용하는 방안이 적용되어야 한다.

Received : Oct. 24. 2024; Revised : Nov. 29. 2024; Accepted : Dec. 6. 2024

※ This research was financially supported by the Institute of Civil Military Technology Cooperation, funded by the Defense Acquisition Program Administration and the Ministry of Trade, Industry, and Energy of the Korean government under grant no. 22-CMGU-08.

1. Senior Researcher, Korea Institute of Robotics and Technology Convergence, Pohang, Korea (jongho.bae, baech, seongho1696, mangi11, psh84@kiro.re.kr)

† Chief Researcher, Corresponding author: Korea Institute of Robotics and Technology Convergence and Autonomous System R&D Division, Pohang, Korea (sandman@kiro.re.kr)

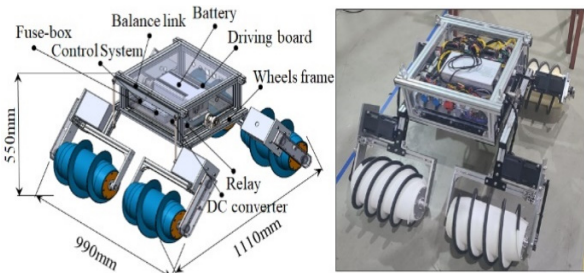
스크류 바퀴 기반 이동은 다중 영역 이동성을 위한 유망한 접근 방식이며 수륙 양용 차량 및 로봇 설계에 활용되었다^[8]. 20세기 중반에는 다양한 유형의 매질에서 이동 및 견인 능력을 입증하는 여러 가지 스크류 기반 추진 차량이 개발되었다^[9-15]. 스크류 바퀴 기반 플랫폼은 자연스럽게 대규모 차량에서 소형 모바일 로봇 공학으로 발전했다. 스크류 바퀴는 지상과 해상을 포함하여 지상과 해상 사이의 비정형한 다양한 환경을 극복하기 좋은 구조를 가졌다. 수륙 양용 로봇 플랫폼을 개발하기 전에 토이를 사용하여 주행성을 평가하기 위한 기초 연구가 수행되었습니다^[16]. 토이의 제원이 모두 다른 점을 고려하여 주행성 평가는 무차원화 하여 진행하였다. 평가항목은 힘과 에너지 전달 관점에서 바퀴성을 평가하여 결과를 도출하였다. 그 결과, 제안된 로봇 플랫폼은 자율 감시 시스템 적용에 높은 잠재력이 있는 것으로 입증했다.

본 논문은 스크류 바퀴가 장착된 수륙 양용 플랫폼을 소개한다. 이 플랫폼은 다양한 구동 방법을 사용하여 육지와 물에서 주행할 수 있다. 또한, 보기 구조는 지형의 다양한 변화에도 불구하고 4점 지지를 통해 안정적인 주행이 가능하다. 플랫폼의 성능을 평가하기 위해 다양한 환경에서 직진 주행성, 전방향성, 정지 위치 정확도, 등반 능력을 평가했다. 다양한 환경에서 실험을 수행하여 플랫폼의 주행성을 평가했다. 이러한 실험을 통해 플랫폼이 다양한 지형에서 안정적으로 주행할 수 있음을 검증하였다. 특히 개발된 플랫폼은 비정형 환경에서 멈추지 않고 주행하며, 전진 주행 시 좌우로 벗어나지 않고 직진 주행이 확보되었다. 개발된 플랫폼을 활용하여 자율 주행 기능을 갖춘 감시정찰 임무를 수행할 예정이다.

3. 수륙양용 로봇

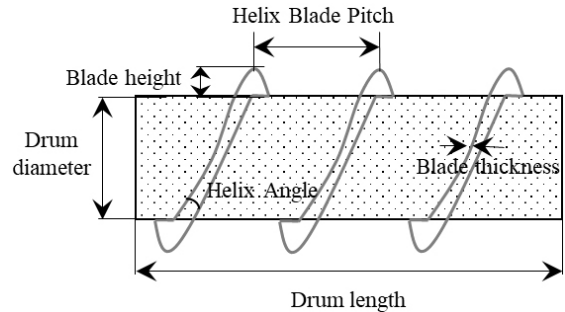
3.1 모델링

개발된 로봇은 4개의 스크류 바퀴를 가지고 있으며, [Fig. 1]과 같이 독립적으로 동작한다. 플랫폼의 크기와 각 구성 요소는 주행 환경에서의 기동 속도와 동작 시간을 고려하여 선정하였다.



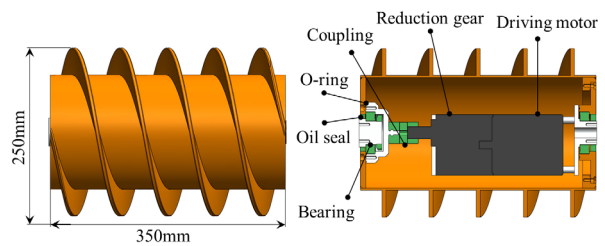
[Fig. 1] Developed amphibious robot platform using four screw wheels

스크류 바퀴의 구조는 [Fig. 2]와 같다. 바퀴 원통의 직경은 로봇의 하부 구조물과 지면과의 높이를 고려하여 선정하였으며, 직경이 클 경우 전기 모터의 필요 출력 토크가 높아지기 때문에 최대 이동속도와 토크를 고려하여 직경을 선정하였다. 바퀴 원통의 길이는 로봇의 형상과 바퀴 원통의 무게, 나사선 간, 원통의 직경, 나사선 각도 등을 고려하여 설정하였다. 나사선의 간격은 높을수록 1회전시 이동거리가 커지지만, 원통의 길이는 제한이 있다. 또한, 지면과 접촉하는 나사선 끝단의 수가 적어져 수직 항력이 증가한다. 또한 나사선 각도는 원통 직경과 나사선 간격에 따라 결정되며, 전기 모터의 필요 출력 토크에 영향을 준다. 스크류 바퀴에 영향을 줄 수 있는 사항을 고려하여 로봇의 하중을 지지하며 요구 주행속도에 적합한 스크류 바퀴를 SLA방식으로 가공하였다.



[Fig. 2] Structure of screw wheels of amphibious robot platform

원통형 바퀴에 스크류 날을 적용하여 지상 주행과 수상 주행이 가능하다. BLDC모터와 감속기가 스크류 바퀴 내부에 설치되고 커플링을 통한 동력 전달을 통해 스크류 바퀴가 구동이 가능한 구조를 설계하였다. 구동 회전부의 방수를 위해 수중 베어링 적용 및 오일 실을 이용한 방수 설계를 적용하였으며, 각 조립 부분에 오링을 적용하여 방수 설계를 진행하였다[Fig. 3].

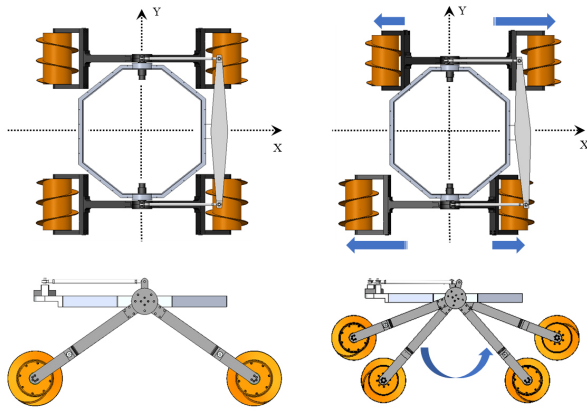


[Fig. 3] Internal structure of the screw wheel of amphibious robot platform

좌우 경사각에 대한 수평유지 기능을 구현하기 위해 구동프레임에 베어링을 적용하였다. 구동장치의 모터는 상위명령을 수행하여 4륜 바퀴의 속도 및 방향전환을 수행한다.

$$N = \frac{60 \cdot c_1}{T_c \cdot P_{ppr}} \quad (1)$$

모터의 회전 속도는 홀 센서를 사용하여 측정한다. 홀 센서는 5개의 극을 가지고 있으며 1.5펄스 출력을 가지고 있다. 일정한 간격으로 펄스를 세는 방법은 1초 동안 세어진 펄스 수를 측정하여 모터의 회전 속도를 측정한다. 여기서 N 은 모터의 회전 rpm을 나타내고 T_c 는 측정 시간이며 c_1 은 T_c 시간 동안 수신된 펄스 수이며 P_{rpm} 은 회전당 펄스를 의미한다. 최대 출력 200 W, 최대 속도 3000 rpm, 토크 0.63 Nm의 모터를 장착하였으며, 2채널 RS-485 모터 드라이브를 적용하였다. 높은 회전 토크를 생성하기 위해 1/20 감속비의 감속기를 적용하여 최대 150 rpm 까지 이동성을 확보하였다. 이 구조의 가장 큰 장점은 어느 방향으로든 움직일 수 있다는 것이다. 스크류 바퀴 구동 로봇의 추가 장점으로는 높은 바퀴 표면 접촉 면적, 모든 내부 가동 부품의 설계, 낮은 중심 위치 등이 있다^[17].

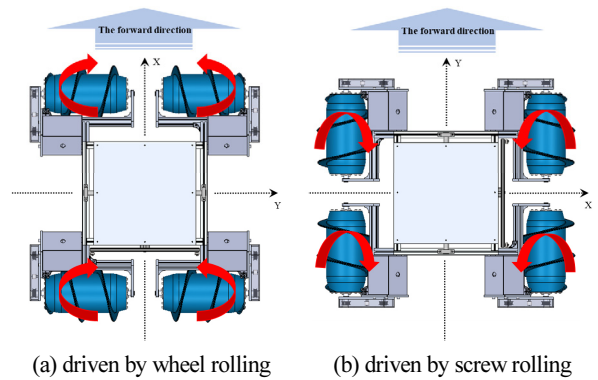


[Fig. 4] Applied bogie structure of amphibious robot platform for four-point support of wheels in various environments

보기구조는 고르지 않은 지형에서도 바퀴의 접촉을 보장하고 로봇이 장애물을 극복할 때 무게 중심이 이동하는 것을 최소화하여 요철에 강인한 메커니즘이다^[18]. 수동 서스펜션 방식을 사용하면 흠이 있는 경우 바퀴의 상대적 위치를 조절할 수 있다. 이러한 바퀴의 위치를 변경함으로써 지면의 다양한 환경 변화에 대응할 수 있다. 사륜 탐사 로봇의 보기 구조를 분석하여 설계에 반영하여 불규칙한 주행 환경에서 주행 안정성을 확보하였다. 보기 구조는 장애물을 극복하고 험한 지형에 대한 적응력을 극대화할 수 있다^[19]. 보기 메커니즘은 각 바퀴가 지면에 가하는 압력을 균형 있게 조절할 수 있어 모든 바퀴가 다양한 환경에서 지면과 접촉 상태를 유지할 수 있다. 또한, 전후 이동이 용이하고 로봇의 평균 피치 각도에서 균형을 유지함으로써 전복 가능성을 줄일 수 있다^[20,21]. 주행성을 극대화하기 위해 수동형 서스펜션 장치를 추가하였고, 로봇과 스크류 바퀴 프레임을 밸런스 링크와 로드로 연결하여 안정성을 향상시켰다[Fig. 4].

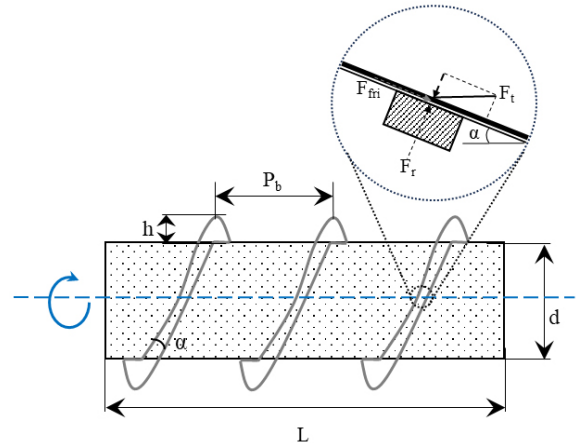
3.2 주행 메커니즘

스크류 타입의 바퀴구동은 크게 두가지로 구분된다. 첫번째는 바퀴 굴림으로 주행하는 방식이며, 두번째는 스크류 굴림으로 주행하는 방식이다. 바퀴 굴림을 이용하여 주행하는 방식은 상하 바퀴를 서로 수평인 상태에서 같은 방향으로 회전하며 앞으로 전진을 한다. 반대로 스크류 굴림으로 주행하는 방식은 상하 바퀴가 수직인 상태에서 다른 방향으로 회전하며 앞으로 전진을 한다.



[Fig. 5] Two movement mechanisms using wheel and screw driving

[Fig. 5]의 (a)와 같이 바퀴 굴림으로 주행하는 경우 앞뒤 바퀴가 시계방향으로 모터를 구동 시키면, 앞으로 전진을 하게 되고 반시계 방향으로 모터를 구동 시키면 후진을 한다. 또한 [Fig. 5]의 (b)와 같이 스크류 굴림으로 주행하는 경우 모터를 로봇 안쪽방향으로 회전을 시키면 앞으로 전진을 하며, 반대로 모터를 로봇 바깥쪽으로 회전을 시키면 후진을 한다. 비정형 환경에 따라 두개의 구동방식은 다르게 운용이 되어야 하며, 대부분의 경우 지상에서의 균일한 단면은 바퀴 굴림 방식이 적합하며, 해상에서는 스크류 굴림 방식이 적합하다.



[Fig. 6] Schematic of force required to drive screw

스크류 바퀴를 구동하는 데 필요한 주행 장치의 토크는 [Fig. 6]과 같이 산술적으로 계산할 수 있다. 모터의 토크로 인해 블레이드 끝부분에 작용하는 힘(F_t)과 로봇 무게에 대한 블레이드가 받는 수직력(F_r)은 다음과 같다.

$$F_r = \frac{m/2}{L/P_b} \cdot g \quad (2)$$

여기서 m 은 로봇의 무게를 의미하며, 지면과 접촉하는 블레이드의 마찰력(F_{fri})은 다음과 같다. 여기서 μ 는 블레이드와 바닥 사이의 마찰 계수를 나타낸다.

$$F_{fri} = (F_r \cdot \mu) + (F_t \cdot \mu \cdot \sin \alpha) \quad (3)$$

로봇의 무게에 대해 블레이드가 받는 수직력으로 인해 스크류 바퀴를 구동하는 최소 힘은 다음과 같다.

$$(F_r \cdot \mu) + (F_t \cdot \mu \cdot \sin \alpha) < F_t \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

$$\frac{F_r \cdot \mu}{(\cos \alpha - \mu \cdot \sin \alpha)} < F_t \quad (5)$$

또한, 구동플랫폼에 요구되는 전기모터의 요구 토크(T_M)는 다음과 같다.

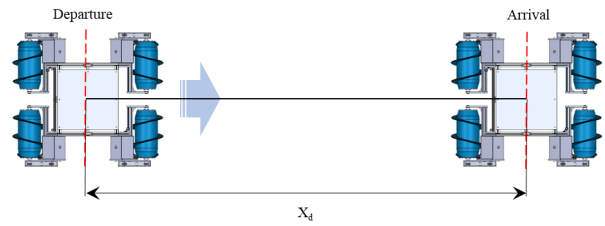
$$T_M > \left(\frac{d}{2} + h\right) \cdot F_r \quad (6)$$

4. 평가 항목

플랫폼의 주행 성능을 평가하기 위해 4가지 평가 기준을 도출했다. 평가 기준은 주로 모바일 로봇의 위치 성능을 평가하는데 사용되는 표준 규정을 참조하여 설정했으며, 직진 주행 시 이동 성능에 초점을 맞추어 선정하였다. 평가는 한 플랫폼을 고려하여 이동 속도를 저속과 고속으로 나누어 다양한 환경에서 수행하였다.

4.1 전방 주행속도

전방 주행속도의 성능 평가는 [Fig. 7]과 같이 시작점에서 목표점까지의 이동 속도를 측정한다. 테스트는 동일한 플랫폼에서 두 가지 입력 속도 값과 서로 다른 주행환경에서 진행되었다. 입력 속도는 저속에서 50 rpm, 고속에서는 100 rpm으로 설정하여 실험을 진행했다.



[Fig. 7] Description of robot driving speed measurement

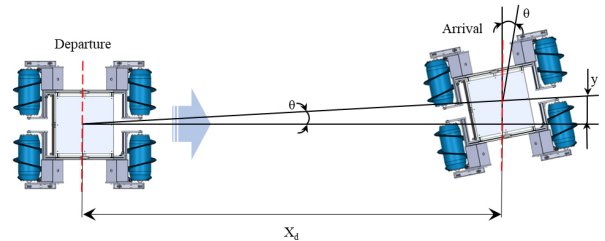
식 (1)에서 로봇이 이동하는데 걸리는 시간(T_c)은 입력 모터 회전속도와 측정된 펄스 수로부터 산출이 가능하다.

$$V = \frac{X_d}{T_c} \quad (7)$$

로봇이 이동하는 동안 기록된 데이터를 통해 이동속도(V)를 계산할 수 있다.

4.2 직진 주행성

직진 주행성 성능 평가는 [Fig. 8]과 같이 출발점에서 목표점까지 주행 후 자세 오차를 측정한다. 자세 오차를 측정함으로써 플랫폼의 주행 안정성이 유지되는지 여부를 판단할 수 있다. 전방 주행속도 성능 평가와 동일하게 두 가지 입력 속도를 설정하고 다양한 주행환경에서 테스트를 실시하였다.



[Fig. 8] Description of mobility measurement

도착지점에서 줄자를 이용하여 위치오차를 직접 측정하여 자세오차를 계산하였다.

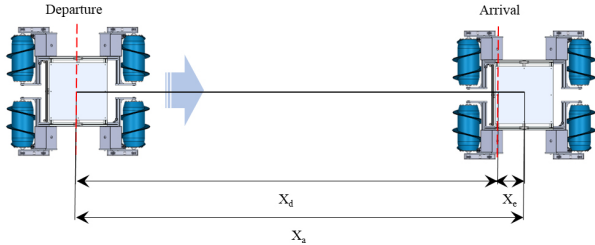
$$\theta_o = \arctan\left(\frac{Y_o}{X_o}\right) \quad (8)$$

시작점과 끝점이 일정하다면 X_o 는 고정된 값이고 Y_o 만 측정하면, 위치오차 산출이 가능하다.

4.3 제동거리

로봇의 제동거리는 [Fig. 9]와 같이 목표 지점의 시작 지점에

도달했을 때 정지 명령에 따른 제동 거리를 측정한다. 다양한 환경에서 스크류 바퀴가 장착된 로봇을 구동함으로써 로봇과 환경적 특성에 따른 미끄러짐 정도를 파악할 수 있다. 두 가지 입력 rpm 속도와 다양한 주행환경에서 성능 평가를 실시하였다.



[Fig. 9] Description of position accuracy

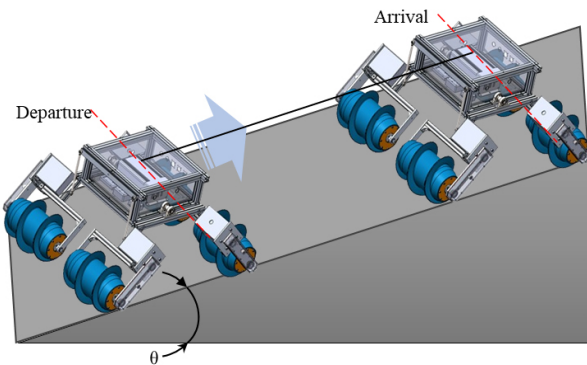
자세오차와 유사하게 위치오차는 도착지점에서 줄자를 이용하여 직접 측정하였다.

$$X_s = X_d - X_e \quad (9)$$

시작점과 끝점이 일정하다면, X_d 는 고정된 값이고 X_e 만 측정하면 정치위치 정확도를 산출할 수 있다.

4.4 등반 능력

등반능력은 비정형 환경에서 이동능력 및 다양한 지면의 변화를 수용할 수 있는 능력을 평가하기 위해 선정하였다[Fig. 10]. 경사면에 대한 등반능력을 성능지수의 하나로 목표 경사각 20°로 설정하여 테스트를 진행하였다. 다른 성능평가와 달리 등반능력은 테스트 베드상의 시멘트 환경으로 한정하였으며, 로봇 구동은 고속 rpm으로 설정하여 성능평가를 수행하였다.



[Fig. 10] Description of climbing capacity measurement

등반각도는 10도부터 30도까지 5도 단위로 측정이 가능한 지정된 위치에서 측정하였다.

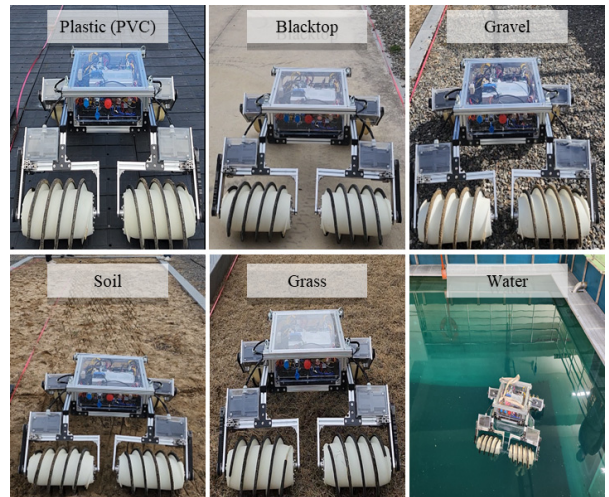
5. 평가 항목 검증



[Fig. 11] View of the experimental evaluation site

실험 평가는 [Fig. 11]과 같이 한국로봇융합연구원(KIRO) 안전로봇실증센터에서 수행했다.

테스트베드는 비정형 환경의 테스트 영역과 장애물 극복 영역으로 구성된다. 흙, 모래, 자갈, 수풀을 포함한 다양한 환경에서 테스트가 가능하다. [Fig. 12]와 같이, 개발된 플랫폼의 성능 평가는 6가지 실험환경에서 진행되었으며, 수상실험은 공학수조에서 진행되었다.

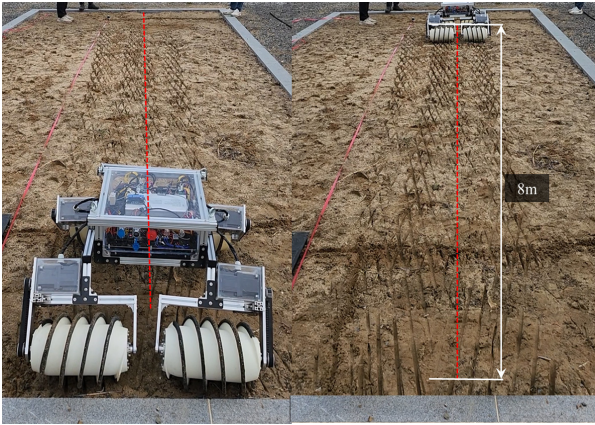


[Fig. 12] Description of the diverse experimental environments

5.1 전방 주행속도

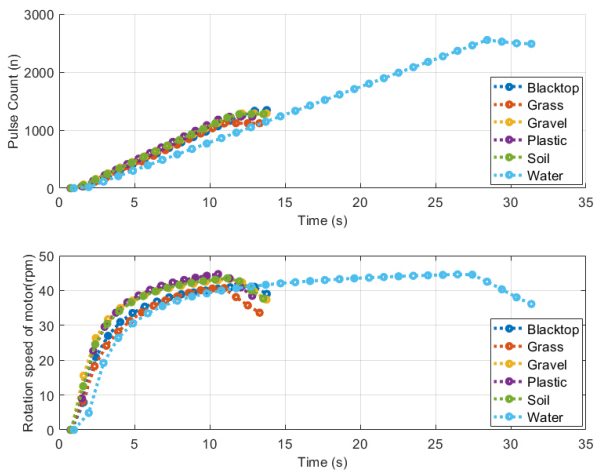
전방 주행속도 실험은 [Fig. 13]과 같이 시작점과 종료점을 지정한 후 다양한 환경에서 플랫폼이 주행할 수 있는지 확인하기 위해 수행되었다. 이 실험은 향후 다양한 환경에서

주행 메커니즘 연구에 도움이 될 것으로 판단된다. 전체 테스트 환경은 10 m인 것을 고려하여 주행 거리는 8 m로 제한하였고, 저속과 고속으로 구분하여 테스트를 진행하였다. 저속과 고속으로 구분한 이유는 주행 시 소모되는 배터리 부하를 비교 분석하기 위함이다. 측정된 이동성은 5회 테스트의 최대값과 최소값을 버리고 3회 테스트의 평균을 내어 산술하였다.



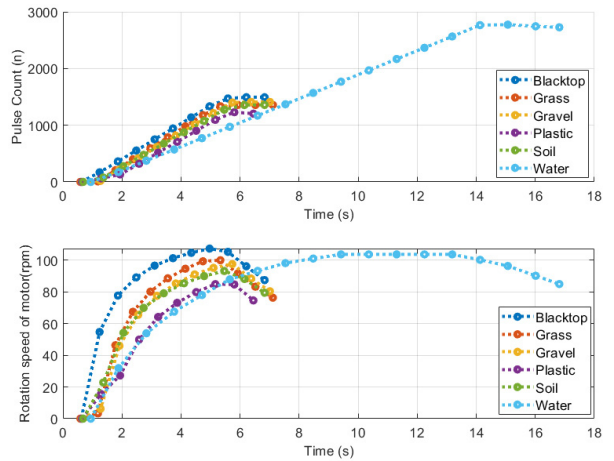
[Fig. 13] View of mobility measurement

적용된 속도 프로파일에 따라 속도가 점차 증가하며, 주행이 완료될 때까지 목표 rpm이 출력된다. 그러나 노면의 특성에 따라 차이가 있으며, [Fig. 14], [Fig. 15]와 같이 육상과 수상 환경은 확연히 차이를 보인다.



[Fig. 14] Output of driving motor for low motor speed

지상 환경에서 저속에서는 평균 13.5초, 고속에서는 평균 6.9초의 주행 능력을 갖는 것으로 검증되었다.



[Fig. 15] Output of driving motor for high motor speed

실험 결과는 [Table 1]에 요약되어 있다. 수상 환경에서의 주행성은 육상 환경에 비해 다소 떨어지지만, 다른 바퀴 타입(바퀴형, 갈퀴형, 궤도형)의 모바일 로봇에 비해 스크류 바퀴타입의 우월성은 실험을 통해 검증하였다^[16]. 수상 환경에서 주행성이 떨어지는 원인은 다양한 요인이 있을 수도 있지만, 세 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 물과 부력제 사이의 마찰, 둘째, 주행 모터에 연결된 감속기의 감속비, 셋째, 스크류 바퀴와 물 사이의 마찰로 설명할 수 있다. 부력제의 경우 로봇이 이동하면서 전진하는 운동량을 방해하는 요인으로 작용한다. 또한 주행 모터의 감속기는 초기에 1/5로 선정되었지만, 지상 주행 안정성을 높이기 위해 1/20 감속기로 교체하여 절대적인 회전수가 줄었다. 일반적으로 로봇 바퀴가 물에 많이 잠길수록 더 많은 추진력을 확보할 수 있다. 바다의 해상 상태를 고려하면 로봇 바퀴가 반쯤 물에 잠긴 상태로 설계되어 상대적으로 물과의 마찰이 커졌다.

[Table 1] Results of measured driving time according to the speed profile

Operating environment	Driving time (s)			
	Low motor speed		High motor speed	
	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
Plastic (PVC)	12.78	±0.15	6.57	±0.08
Blacktop	13.69	±0.21	6.79	±0.07
Gravel	13.44	±0.18	7.05	±0.07
Soil	14.15	±0.23	7.38	±0.12
Grass	13.44	±0.16	7.11	±0.10
Water	31.53	±1.87	16.81	±0.91

육상환경에서는 바퀴 굴림으로 구동하였고, 수상환경에서는 스크류 구동으로 구동하였다. 지상 환경에서도 스크류 구동으로 전진이 가능했으나, 바퀴 굴림에 비해 속도가 느리고 모터 부하가 심해 실험이 불가능했다.

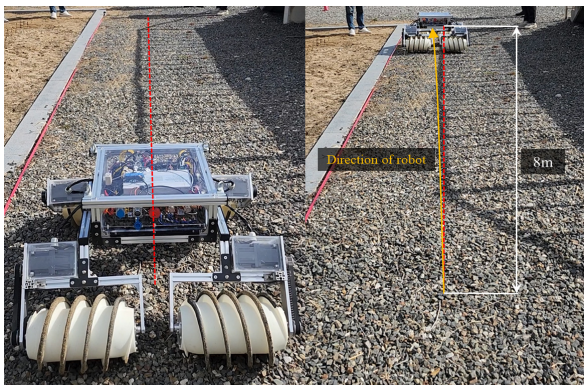
[Table 2] Results of dynamic power consumption

Operating environment	Power consumption (Wh)	
	Low motor speed	High motor speed
Plastic (PVC)	0.74	0.78
Blacktop	0.82	0.82
Gravel	0.81	0.83
Soil	0.84	0.87
Grass	0.79	0.84
Water	11.3	12.9

총 거리 8 m를 주행했을 때 배터리 소모량은 [Table 2]와 같으며, 육상에서 약 0.8 Wh, 수상에서 12 Wh 정도였다. 주행거리가 다소 짧아서 주행 속도에 따른 전력 소모량은 유의미한 차이가 없었다. 로봇의 이동 속도는 차량만큼 빠르지는 않지만, 다양한 환경에서 임무를 수행하는 것이 중요하다. 주행 시험을 통해 불규칙한 환경을 극복할 수 있으며 모터 부하가 크지 않음을 확인했다.

5.2 직진 주행성

직진 주행성은 주행 환경에 따라 주행 안정성을 평가할 수 있다. 로봇이 주행 명령과 동일한 방향으로 주행하지 않을 경우 주행 중 오차가 커지고 플랫폼의 신뢰성이 저하된다. 궁극적으로는 원하는 제어가 이루어지지 않고 계획된 경로를 따라 주행하기 어렵게 된다. 또한 적용된 보기 구조의 타당성을 검토하는 방법이기도 하다. 실험은 [Fig. 16]과 같이 모든 구간이 고르지 않은 불규칙한 환경에서 진행하였다. 직진 주행성 평가와 마찬가지로 총 거리 8 m를 기준으로 저속과 고속에서 각도 오차를 측정했다. 측정된 각도 오차는 5회 시험의 최대값과 최소값을 버리고 3회 시험의 평균을 내어 산출하였다.



[Fig. 16] View of omni-directionality measurement

실험 결과는 [Table 3]과 같다. 지상 환경에서는 대부분 1도 정도의 양호한 성능을 보였고, 수상 환경에서는 저속과 고속에서 다소 차이를 보였다. 개발된 플랫폼에는 보기 구조를 적용하여 바닥과 바퀴가 잘 지지되고 압력 분포가 원활했던 결과로 판단된다. 수상 환경에서는 지상 환경보다 방향 전환이 쉽기 때문에 누적 각도 오차가 큰 원인으로 보인다.

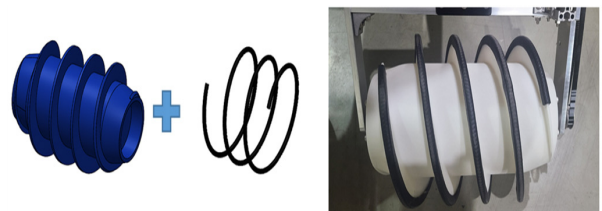
[Table 3] Results of mobility measurement

Operating environment	Angular error (°)			
	Low motor speed		High motor speed	
	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
Plastic (PVC)	0.39	±0.04	0.28	±0.02
Blacktop	1.25	±0.11	0.32	±0.05
Gravel	0.28	±0.02	1.28	±0.11
Soil	0.35	±0.04	1.43	±0.12
Grass	1.07	±0.09	1.14	±0.11
Water	3.57	±0.67	8.18	±1.07

직진 주행성 실험 결과를 바탕으로 개발된 스크류 바퀴가 장착된 플랫폼이 불규칙한 환경을 극복할 수 있음을 확인하였다. 또한 적용된 보기 구조는 바닥과 바퀴의 단차를 최소화하고 직진 주행성을 유지하는 것으로 검증하였다.

5.3 제동거리

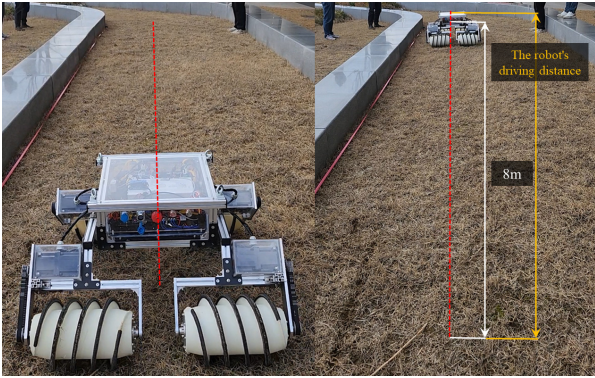
다른 바퀴구조와 달리 스크류 바퀴는 바퀴와 바닥 사이의 접촉 면적이 상대적으로 작다. 이러한 특성으로 인해 제동력이 충분하지 않을 경우 미끄러짐의 원인이 될 수 있다. 실제로 개발된 플랫폼은 정지 위치 오차를 줄이기 위해 기존 스크류 바퀴의 접지력을 향상시키는 최적 설계를 적용하였다.



[Fig. 17] Applying rubber rings to improve ground contact

기존 스크류 바퀴는 스크류 블레이드와 지면이 선접촉을 하고 마찰계수가 낮은 단점이 있었다. 이러한 단점을 보완하기 위해 [Fig. 17]과 같이 나선 나사산에 고무링을 추가하여 접지력

과 제동력을 향상시켰다. 스크류 바퀴의 특성은 제동거리의 정확성을 통해 확인할 수 있다. 이전 실험과 동일하게 [Fig. 18]과 같이 전체 8 m 구간에 정지하여 이탈위치를 측정하였다. 정지 위치의 정확도는 5번의 시험 중 최대값과 최소값을 버리고 3회 시험의 평균을 내어 산출하였다.



[Fig. 18] View of stopping position accuracy

제동거리 평가 결과는 저속에서 약 0.1 m, 고속에서 약 0.3 m의 성능을 보였다[Table 4]. 대부분의 실험에서 정확도 성능은 저속에 비해 고속에서 더 크게 나타났다. 뉴턴의 관성 법칙으로 인해 고속에서 정지하기 위해 정지 거리가 더 길어진 것으로 보인다.

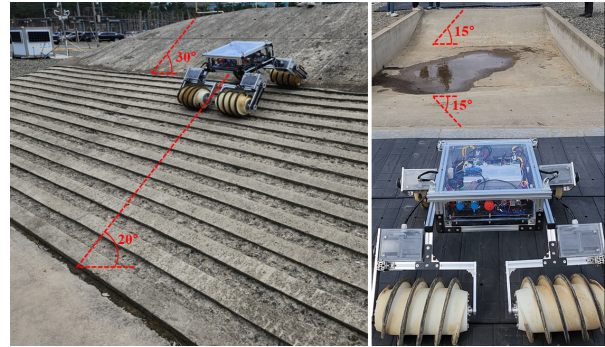
[Table 4] Results of stopping position accuracy

Operating environment	Position error (m)			
	Low motor speed		High motor speed	
	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
Plastic (PVC)	0.05	±0.01	0.31	±0.02
Blacktop	0.16	±0.02	0.36	±0.03
Gravel	0.16	±0.03	0.38	±0.04
Soil	0.07	±0.01	0.11	±0.01
Grass	0.14	±0.02	0.29	±0.02
Water	0.39	±0.07	0.87	±0.15

5.4 등반 능력

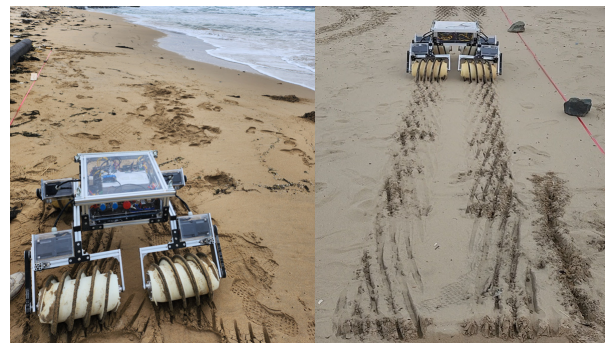
등반능력은 수륙양용 작전이 필요한 환경의 극복 가능성을 판단하는 지표이다. 일반적으로 감시정찰을 수행하는 환경은 평평하고 표준화된 도로가 아니다. 비정형한 환경의 경우 도로 표면이 고르지 않거나 작은 흠에서 큰 흠까지 다양한 경사가 있다. 등반 가능한 각도의 성능을 평가함으로써 주행의 신뢰성을 확인할 수 있다.

테스트 베드의 경사는 5도 단위로 측정할 수 있으며, [Fig. 19]와 같이 최대 30도까지 측정할 수 있다. 다양한 환경에서 측정이 불가능했기 때문에 아스팔트 환경에서 테스트를 실시했으며, 기존 실험과 달리 저속과 고속을 구분하지 않고 고속에서 실험을 진행했다.



[Fig. 19] View of climbing capacity measurement

테스트베드의 노면은 평탄한 구간과 균일하지 않은 구간으로 구성되어 있으며, 실험 결과 최대 30도까지 등반이 가능하였고, 모터에 큰 부하가 전달되지 않는 것을 확인했다. 등반 외에도 하강 및 상승이 있는 복합주행 가능성에 대한 실험도 진행하였다. 복합주행 구간도 문제없이 주행이 가능한 것을 확인했다.



[Fig. 20] View of the coastal driving test

마지막으로 실제 환경에서 주행성을 확인하기 위해 인근 해안에서 테스트를 진행했다. 실환경 시험에서는 [Fig. 20]과 같이 해안에 인접한 구간의 젖은 모래와 해안에서 멀리 떨어진 구간의 건조한 모래 위에서 주행 성능을 평가하였다. 실험 결과를 통해 테스트 베드에서 시험한 수준으로 주행이 가능함을 검증했다.

6. 결 론

본 논문에서는 스크류 바퀴가 장착된 수륙양용 감시 로봇 플랫폼을 소개하고 다양한 험지 조건에서도 빠르게 이동할 수 있

는 능력을 실험적으로 검증하였다. 다양한 시험 환경을 구축하고, 개발된 플랫폼의 주행 성능을 평가하기 위한 성능 평가 지표를 만들어 검증하였다. 스크류 바퀴를 적용하여 육상과 수상 환경에서 주행이 가능함을 확인하였다. 특히, 보기 구조를 적용하여 다양한 환경에서 전방향성이 잘 유지됨을 확인하였고, 비정형 환경을 극복하며 주행이 가능함을 확인하였다. 주행 성능 평가를 통해 로봇은 육상과 해상에서 다르게 주행해야 함을 알 수 있었다. 또한, 육상에서는 큰 토크가 필요하고 해상에서는 빠른 회전 속도가 필요함을 알 수 있었다. 본 실험을 바탕으로 다양한 모터 기어비를 적용하여 최적의 감속비를 검토할 예정이다. 주행 성능은 지상의 환경적 특성에 따라 달라지며, 지상에서의 주행 안정성이 떨어지는 경향이 있다. 이러한 문제는 주행 메커니즘을 개발하고 자율 주행과 연계하여 적절한 컨트롤러를 적용함으로써 극복할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 무인 수륙양용 로봇 플랫폼을 활용해 다양한 무인 감시 및 정찰 작전이 가능해질 것으로 기대된다. 추후 연구 주제는 최대 3 km 거리의 표적에 대한 다중 로봇 운용시스템과 실시간 모니터링을 개발할 예정이다. 또한 다중 로봇 시스템은 평시 및 표적 접근 정찰로 구분하고 해안에서 표적을 추적하는 제어 이론을 연구할 것이다.

References

- [1] J. Shintake, H. Shea, and D. Floreano, "Biomimetic underwater robots based on dielectric elastomer actuators," *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, Republic of Korea, pp. 4957-4962, 2016, DOI: 10.1109/IROS.2016.7759728.
- [2] S. Shimahara, L. Suphachart, R. Ladig, and K. Shimonomura, "Aerial torsional manipulation employing multi-rotor flying robot," *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, Republic of Korea, pp. 1595-1600, 2016, DOI: 10.1109/IROS.2016.7759258.
- [3] A. Kazakidi, X. Zabulis, and D. P. Tsakiris, "Vision-based 3D motion reconstruction of octopus arm swimming and comparison with an 8-arm underwater robot," *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seattle, WA, USA, pp. 1178-1183, 2015, DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139340.
- [4] M. Iwasa, T. Obo, and N. Kubota, "Motion generation of multi-legged robot by using knowledge transfer in rough terrain," *2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, Athens, Greece, pp. 1-5, 2016, DOI: 10.1109/SSCI.2016.7850242.
- [5] S. Guo, S. Mao, L. Shi, and M. Li, "Development of an amphibious mother spherical robot used as the carrier for underwater microrobots," *2012 ICME International Conference on Complex Medical Engineering (CME)*, Kobe, Japan, pp. 758-762, 2012, DOI: 10.1109/ICME.2012.6275640.
- [6] C. Georgiades, A. German, A. Hogue, H. Liu, C. Prahacs, A. Ripsman, R. Sim, L.-A. Torres, P. Zhang, M. Buehler, G. Dudek, M. Jenkin, and E. Miliot, "AQUA: an aquatic walking robot," *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)*, Sendai, pp. 3525-3531, 2004, DOI: 10.1109/IROS.2004.1389962.
- [7] K. Kawasaki, M. Zhao, K. Okada, and M. Inaba, "MUWA: Multi-field universal wheel for air-land vehicle with quad variable-pitch propellers," *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, Japan, pp.1880-1885, 2013, DOI: 10.1109/IROS.2013.6696605.
- [8] L. Kurinjimalar, N. Anitha, V. Malini, T. N. Hariprasad and S. K. Sundaram, "Screw Propelled Autonomous Amphibian Waste Collector," *2021 4th International Conference on Computing and Communications Technologies (ICCT)*, Chennai, India, pp. 391-395, 2021, DOI: 10.1109/ICCT53315.2021.9711886.
- [9] D. A. Schreiber, F. Richter, A. Bilan, P. V. Gavrilo, H. M. Lam, C. H. Price, K. C. Carpenter, and M. C. Yip, "Arcsnake: an archimedes' screw-propelled, reconfigurable serpentine robot for complex environments," *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Paris, France, 2020, pp. 7029-7034, DOI: 10.1109/ICRA40945.2020.9196968.
- [10] J. H. Lugo, M. Zoppi, and R. Molfino, "Design and kinematic modeling of a screw-propelled mobile robot to perform remote explosive scent tracing filter sampling in forest during humanitarian demining," *Advances in Cooperative Robotics*, pp. 699-715, 2016, DOI: 10.1142/9789813149137_0081.
- [11] D. Osinski and K. Szykiedans, "Small Remotely Operated Screw-Propelled Vehicle," *Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques*, pp. 191-200, 2015, DOI: 10.1007/978-3-319-15847-1_19.
- [12] J. Lim, C. Joyce, E. Peiros, M. Yeoh, P. V. Gavrilo, S. G. Wickenhiser, D. A. Schreiber, F. Richter, and M. C. Yip, "Mobility Analysis of Screw-Based Locomotion and Propulsion in Various Media," *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, London, United Kingdom, pp. 7317-7323, 2023, DOI: 10.1109/ICRA48891.2023.10160777.
- [13] F. Richter, P. V. Gavrilo, H. M. Lam, A. Degani, and M. C. Yip, "Arcsnake: Reconfigurable snakelike robot with archimedean screw propulsion for multidomain mobility," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 38, no. 2, pp. 797-809, Apr., 2022, DOI: 10.1109/TRO.2021.3104968.
- [14] J. H. Lugo, V. Ramadoss, M. Zoppi and R. Molfino, "Conceptual design of tetrad-screw propelled omnidirectional all-terrain mobile robot," *2017 2nd International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE)*, Bangkok, Thailand, pp. 13-17, 2017, DOI: 10.1109/ICCRE.2017.7935033.
- [15] J. T. Freeberg, "A study of omnidirectional quad-screw-drive configurations for all-terrain locomotion," Ph.D. dissertation, Univ. South Florida, Florida, USA, 2010, <https://digitalcommons.usf.edu/etd/3550/>.
- [16] J. H. Bae, S. H. Jin, H. S. Shin, S. H. Park, and G. R. Cho, "A

study on analysis of wheel characteristics using amphibious toys,” *2023 23rd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, Yeosu, Republic of Korea, pp. 1141-1145, 2023, DOI: 10.23919/ICCAS59377.2023. 10316792.

- [17] E. F. Kececi, “Dynamics and Controller Design of a Screw Wheel Drive Holonomic Rescue Robot,” *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, vol. 4, pp. 231-238, Oct., 2013, DOI: 10.1115/IMECE2012-85730.
- [18] B. Zhong, Y. Zhou, X. Li, M. Xu, and S. Zhang, “Locomotion Performance of the Amphibious Robot on Various Terrains and Underwater with Flexible Flipper Legs,” *Journal of Bionic Engineering*, vol. 13, pp. 525-536, Dec., 2016, DOI: 10.1016/S1672-6529(16)60325-6.

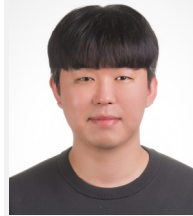
- [19] Matijevic, J., “Sojourner: The Mars Pathfinder Microver Flight Experiment,” *NASA Technical Reports*, NASA, 1997, [Online], <https://ntrs.nasa.gov/citations/20060034938>, Accessed: Sept. 03, 2024.
- [20] S. Nakajima, “Proposal for step-up gait of RT-Mover, a four-wheel-type mobile robot for rough terrain with simple leg mechanism,” *2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Tianjin, China, pp. 351-356, 2010, DOI: 10.1109/ROBIO.2010.5723352.
- [21] M. Lacagnina, G. Muscato, and R. Sinatra, “Kinematics, dynamics, and control of a hybrid robot wheeleg,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 45, no. 3-4, pp. 161-180, Dec., 2003, DOI: 10.1016/j.robot.2003.09.006.



배종호

2011 울산대학교 기계자동차공학과(학사)
 2014 한양대학교 로봇 및 자동차공학과(석사)
 2014~2017 두산인프라코어 기술연구소
 2017~현재 한국로봇융합연구원 선임연구원

관심분야: 모바일로봇, SLAM, 주행제어, 강화학습



이만기

2014 영남대학교 기계공학과(학사)
 2016 영남대학교 기계공학과(석사)
 2019 경북대학교 기계공학과(박사수료)
 2016~17(재) 경북테크노파크 그린카부품
 기술연구소
 2015~현재 한국로봇융합연구원 선임연구원

관심분야: 모바일로봇, 전자기구조 연동해석



배철희

2016 공주대학교 기계설계공학과(학사)
 2018 공주대학교 기계공학과(석사)
 2023 공주대학교 기계공학과(박사)
 2020~현재 한국로봇융합연구원 선임연구원

관심분야: SLAM, 물체인식, 수중항법, 해저맵핑



박성호

2010 영남대학교 전자공학과(학사)
 2010~현재 한국로봇융합연구원 선임연구원

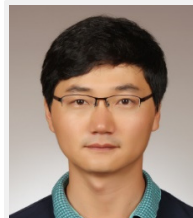
관심분야: 시스템 통합, 모바일로봇, 클라우드 포인트



진성호

2020 경상국립대학교 메카트로닉스공학과
 (학사)
 2023 부산대학교 전자공학과(석사)
 2023~현재 한국로봇융합연구원 주임연구원

관심분야: Robotics, AUV, Visual recognition



조건래

2001 KAIST 기계공학과(학사)
 2003 KAIST 기계공학과(석사)
 2010 KAIST 기계공학과(박사)
 2016~현재 한국로봇융합연구원 수석연구원

관심분야: 수중로봇, 물류로봇, 강인제어, 매니플레이션, 강화학습