

VELIS

(Vanguard Exploration & Localization Intelligence System)

FINAL REPORT

팀 제어계측

고려대학교 세종캠퍼스 전자기계융합공학과

최보경/ 권재용

제출일: 2026. 10. 06

요약

홍수로 잠긴 지하차도·지하주차장처럼 흙탕물로 가득 찬 수중 공간에서는 카메라가 무력화되고, 소나는 대략적인 윤곽만 알려줄 뿐 세부를 식별하지 못한다. 그 결과 실제 수색 현장에서는 다이버가 손으로 더듬어 찾는 위험한 작업이 반복된다. 본 프로젝트는 다이버보다 먼저 들어가는 측각 정찰 로봇 가디언스 파이어더(시스템명 VELIS)를 개발하였다.

로봇은 수중 소나 2개로 수조 벽까지의 거리를 재어 자신의 위치를 보정하고, 벽보다 가까운 반사는 “미확인 후보”로 표시한다. 앞쪽 더듬이 3개가 물체에 닿으면 즉시 정지하고 그 위치를 “확정 접촉점”으로 기록한다. 수심은 압력센서와 50 mL 주사기 2개로 이루어진 부력 장치로 조절한다. PC 프로그램은 이동 경로, 미확인 후보, 확정 접촉점을 하나의 지도로 보여준다.

하드웨어(주사기 부력 장치, 추진부, 회로, 방수 통)를 제작하고, 펌웨어·PC 프로그램·지도·재질 분류·강화 학습 소프트웨어를 구현하였다. 자동 검사 10개를 모두 통과하였고, 실제 지도 코드에 시뮬레이션 센서 데이터를 넣은 검증에서 의도적으로 20%의 속도 오차를 주었음에도 최종 위치 오차 약 0.6 cm, 접촉점 오차 평균 1.1~3.7 cm를 얻었다. 강화학습 정책은 시뮬레이션에서 규칙 기반 제어 대비 충돌을 약 91% 줄였다.

1. 프로젝트 개요

1.1 개발 배경 및 문제 정의

침수 재난이 발생하면 물은 곧 흙과 부유물로 탁해진다. 2023년 7월 오송 궁평2지하차도 침수 때는 내부가 흙탕물과 부유물로 가득 차 초기에 잠수부 투입이 어려웠고, 투입 후에도 시야가 확보되지 않아 수색이 지연되었다. 2022년 9월 포항 아파트 지하주차장 침수, 2010년 천안함 침몰 해역, 2021년 한강 수중 수색 등에서도 시야가 거의 없어 구조대가 측각에 의존하는 상황이 반복되었다. 시간당 100 mm 이상의 극한호우가 2024년 여름 16차례, 2025년 15건 발생하는 등 이러한 상황은 앞으로 더 잦아질 가능성이 높다.

정리하면, 탁한 물로 가득 찬 구조물 내부에서 “어디에 무엇이 있는지”를 사람이 들어가기 전에 안전하게 알려주는 저가형 정찰 수단이 없다는 것이 본 프로젝트가 정의한 문제이다.

1.2 프로젝트 목표

탁도와 무관한 감지 수단(소나, 측각)만으로 수중에서 이동하고 물체를 찾는다.

소나는 로봇 위치 파악을, 측각은 물체의 존재 확정을 맡도록 역할을 분리한다.

접촉 경험을 사람이 읽을 수 있는 지도로 실시간 누적한다.

주사기 부력 장치와 압력센서로 수심을 조절한다.

규칙 기반 제어와 강화학습 정책을 같은 안전 장치 아래에서 비교한다.

1.3 기존 기술과의 차별성

표 1. 기존 방식과의 비교

항목	일반 소형 수중 로봇(ROV)	VELIS
주 감지 수단	카메라 중심, 탁수에서 무력화	소나 + 측각, 탁도와 무관
가까운 물체 확인	영상 판독에 의존	더듬이 접촉으로 위치 확정

항목	일반 소형 수중 로봇(ROV)	VELIS
결과물	영상(사람이 계속 시청)	경로·후보·확정 접촉점이 담긴 지도와 로그
수심 조절	수직 추진기(지속 전력)	주사기 부력 장치(유지 시 전력 불필요)
신뢰성 설계	-	판정 오류(unknown), 단계별 구동 잠금, 통신 두절 정지
비용	수백만 원 이상	범용 부품 기반 수십만 원대

1.4 개발 범위와 단계 전략

개발은 세 단계로 나누어, 앞 단계가 확인된 뒤에만 다음 단계로 넘어가도록 하였다. 이 원칙은 펌웨어의 구동 승인 설정과 PC 프로그램의 운용 승인 설정으로 강제된다.

표 2. 단계별 개발 범위

단계	내용	판단 기준
L1	수동 조종, 더듬이 접촉 정지, 통신 두절 정지, 수심 측정, 지도 기록	각 안전 기능 재현, 지도 파일 생성
L2	규칙 기반 자동 탐색, 소나 벽 거리 위치 보정, 재질 데이터 수집·분류	위치 오차, 충돌, 분류 결과 기록
L3	시뮬레이터에서 학습한 Q-learning 정책 적용과 규칙 제어 비교	동일 조건 비교표

2. 이론적 배경

2.1 탁한 수중 환경에서 광학 센서가 실패하는 이유

가시광선의 파장은 약 $0.4\sim0.7\ \mu\text{m}$ 이고, 탁도를 만드는 점토 입자는 약 $1\sim10\ \mu\text{m}$ 이다. 파장과 입자 크기가 비슷하면 빛이 사방으로 강하게 흩어지는 미(Mie) 산란이 일어난다. 이 때문에 탁한 물에서는 조명을 켜도 수 cm 앞이 보이지 않으며, 같은 원리로 라이다도 무력화된다.

2.2 소나의 해상도 한계와 탁도의 관계

수중 음속을 약 $1480\ \text{m/s}$ 라 하면 $100\ \text{kHz}$ 소리의 파장은 $\lambda = v/f \approx 1.5\ \text{cm}$ 이다. 소리의 파장은 점토 입자보다 1000배 이상 크기 때문에 입자에 의한 산란이 매우 약하고(레일리 산란 영역), 탁도와 무관하게 거리를 잴 수 있다. 반면 파장보다 작은 형태는 구분할 수 없고, 소형 소나는 빔이 넓어 측정 끝점의 위치도 대략적이다. 즉 소나는 “무언가 있다”와 “벽까지 얼마나 떨어져 있다”는 잘 알지만, “그것이 무엇인가”는 알기 어렵다.

2.3 소나-촉각 역할 분리 원리

소나는 수조 벽처럼 크고 평평한 면까지의 거리를 정확히 잰다. 위치를 아는 벽까지의 거리를 재면 로봇의 좌표를 바로 계산할 수 있으므로, 소나의 주 역할을 위치 파악으로 정하였다. 측정값이 예상 벽 거리보다 확연히 짧으면 그 사이에 물체가 있다는 뜻이므로 이를 “미확인 후보”로 표시한다(보조 역할). 촉각은 닿는 순간 물체의 존재를 확정할 수 있지만 범위가 좁다. 따라서 소나가 위치와 후보를 제공하고(거

시), 더듬이가 이를 확정하는(미시) 구조로 두 센서의 약점을 보완하였다.

2.4 촉각 판별의 한계와 이상신호 개념

스위치 한 개로는 물체의 성분을 알 수 없다. 또한 의류나 구멍조끼처럼 겉을 덮은 물질은 내부 대상의 촉감을 가린다. 그래서 초기 설계의 “딱딱함/무름” 2분류를 버리고, 접촉 순간의 여러 센서 반응(거리, 가속도, 회전률, 수심 등)이 주변과 다른 패턴을 보이는지를 데이터로 판별하는 이상신호 방식으로 목표를 재정의하였다. 확신이 부족하면 억지로 판정하지 않고 판정 오류(unknown)로 남기며, 최종 판단은 사람이 한다.

2.5 부력 제어와 차동 구동

담수에서 물 1 mL는 약 1 g이다. 주사기에 물을 넣으면 전체 무게가 늘어 가라앉고, 빼면 떠오른다. 주사기 2개로 조절할 수 있는 양은 수십 g 수준이므로 큰 부력 오차는 품과 추로 먼저 맞추고 주사기는 미세 조정만 맡긴다. 수평 이동은 좌우 프로펠러의 회전 방향 조합으로 한다. 두 모터를 같은 방향으로 돌리면 전진, 반대로 돌리면 제자리 회전이다.

3. 시스템 설계

3.1 전체 시스템 구성

시스템은 물 밖의 조작석(PC, USB-RS485 변환기, 12 V 어댑터, 퓨즈, 차단 스위치)과 물속의 로봇 본체로 나뉘며, 4심 테더(+12 V, GND, RS485 A, B)로 연결된다. 로봇 안에서는 Arduino Mega 2560이 모든 센서를 읽고 두 모터 드라이버를 제어한다.

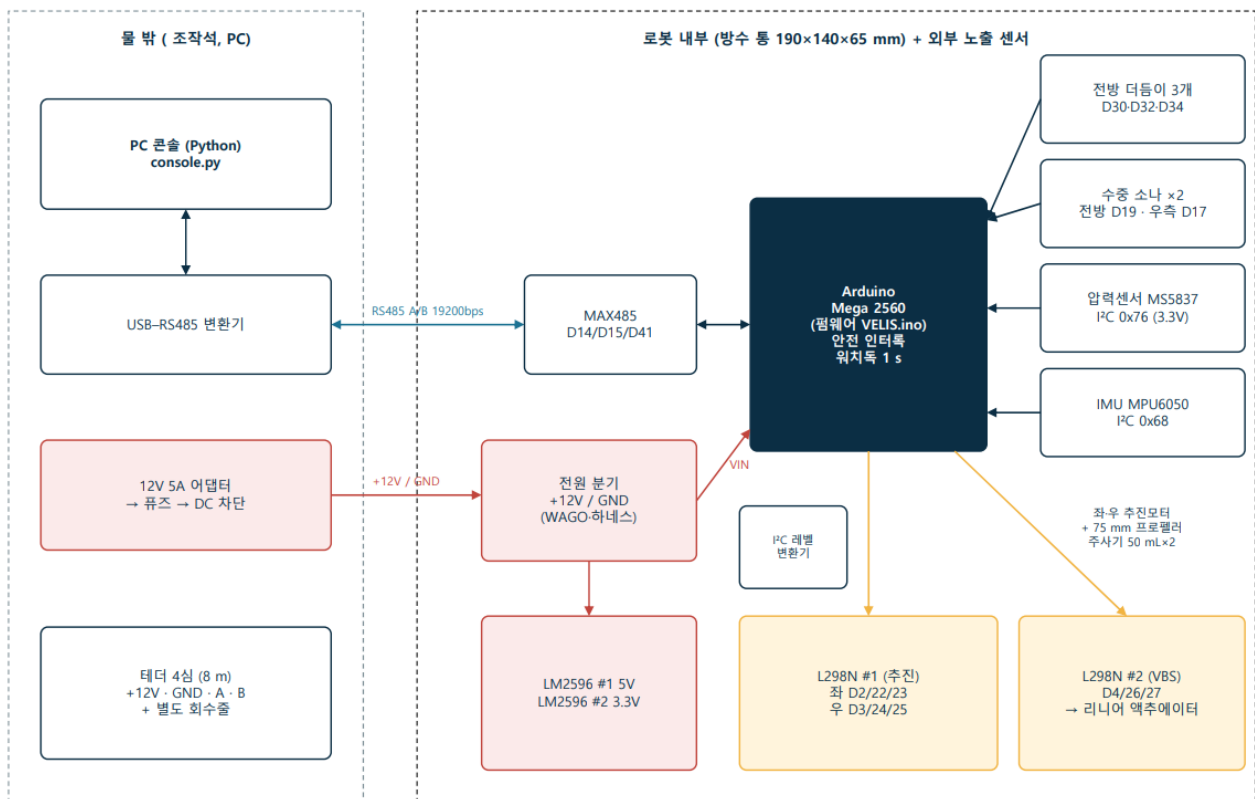


그림 1. 시스템 구성도

3.2 기구 설계

방수 통(내부 190 × 140 × 약 65 mm)의 긴 변을 앞뒤 방향으로 두고, 내부를 두 층과 뚜껑 모자부로 나누었다.

1층: 50 mL 주사기 2개와 그 사이의 리니어 액추에이터, 좌우 추진모터 2개. 주사기 입구는 뒤쪽(프로펠러 쪽)을 향한다.

2층: 트레이 위에 Arduino Mega, 브레드보드, L298N 모터 드라이버 2개, MAX485 통신 모듈.

뚜껑 모자부: LM2596 강압 모듈 2개, I²C 레벨 변환기, IMU, 압력센서. 테더는 모자부 뒤쪽 오른쪽으로 들어온다.

외부: 앞벽에 더듬이 3개와 전방 소나(왼쪽 위), 오른쪽 벽에 측면 소나(가운데에서 약간 뒤), 뒤쪽에 추진축과 프로펠러.

배치와 간섭은 OpenSCAD 매개변수 모델로 확인하였다. 모델은 부품 위치를 숫자로 바꿀 수 있고, 주사기를 끝까지 당겼을 때 앞벽 간섭, 주사기와 모터의 측면 간섭, 1층과 2층의 높이 간섭을 자동으로 검사한다.

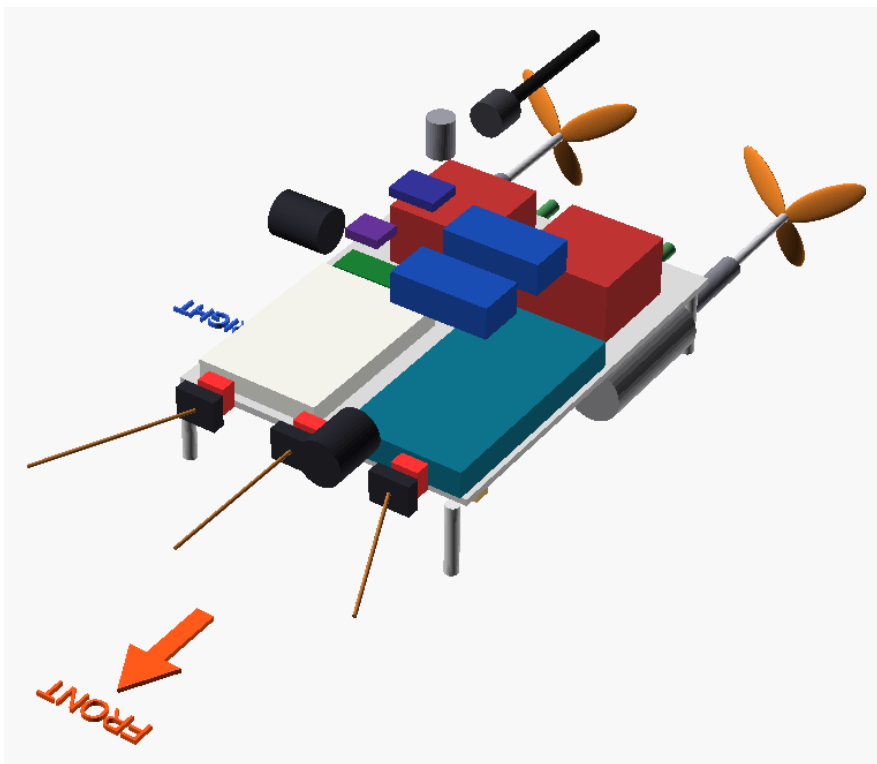
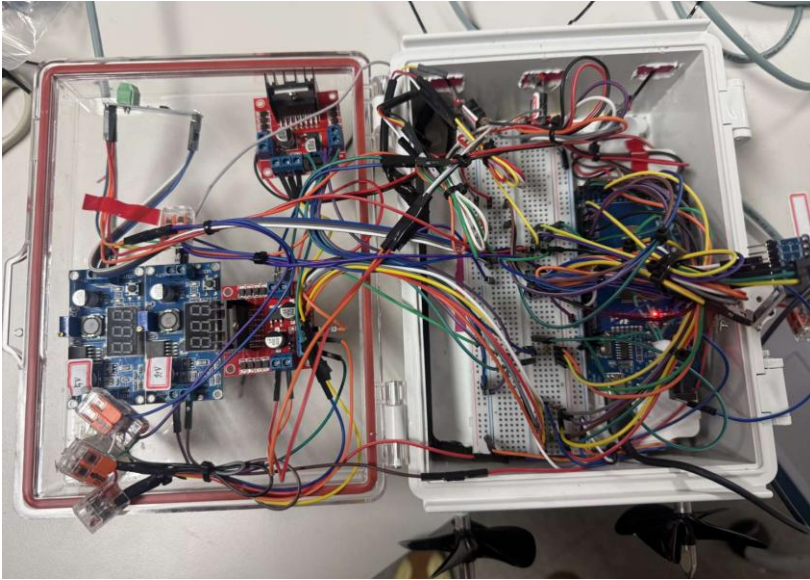
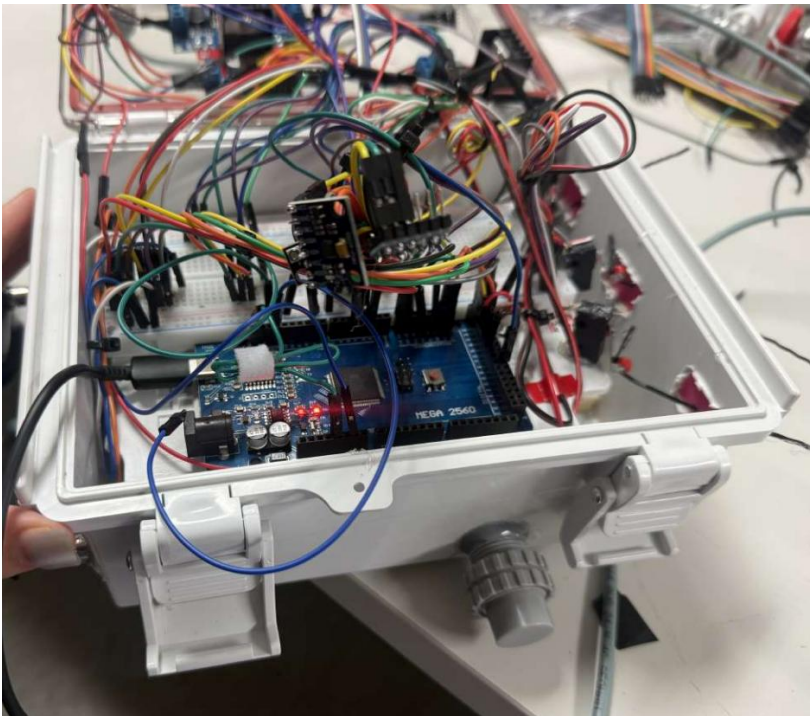


그림 2. 층 구조 3D 모델 (통 숨김)

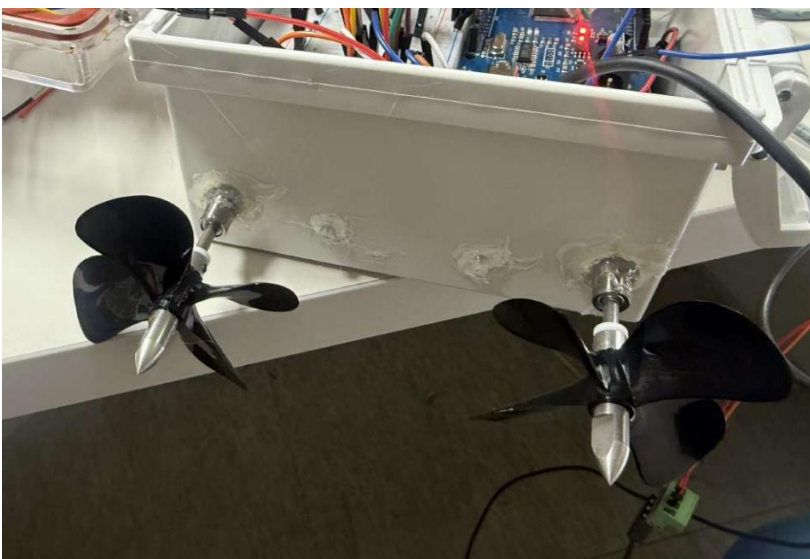
3.3 실제 하드웨어 사진



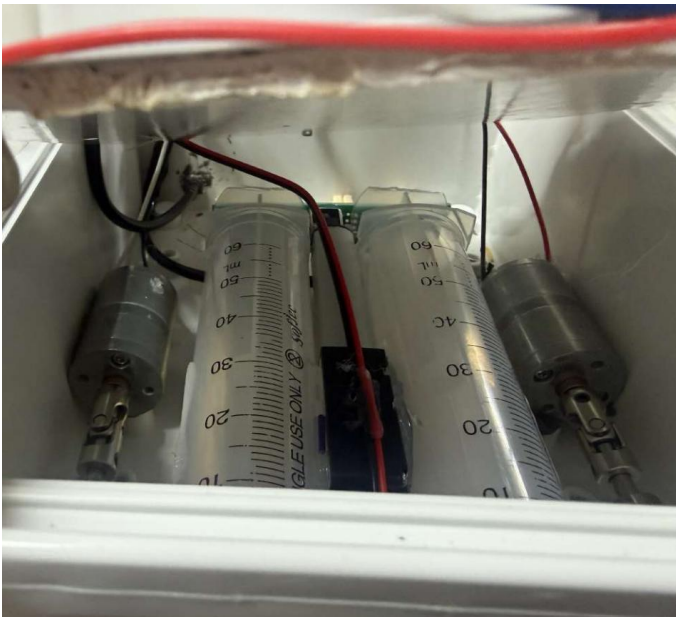
<내부 2층과 뚜껑1>



<내부 2층과 뚜껑2>



<프로펠러 구동부와 주사기 흡입구>



<내부 1층 주사기부력장치(리니어 액추에이터)와 모터,샤프트 장치>

3.4 방수 설계

관통부를 최소화하고, 회전하는 부분과 고정된 부분의 밀봉을 분리하였다.

표 3. 관통부별 방수 방식

관통부	밀봉 방식	검증 방법
뚜껑	방수 통 일체형 고무 패킹	빈 통과 마른 휴지 침수
테더	케이블그랜드로 벽 패킹과 케이블 외피를 각각 압착	당김 시험, 침수
추진축	고정 슬리브 외곽은 정적 밀봉, 축과 슬리브 사이는 그리스·부싱으로 회전 밀봉. 회전축에 에폭시 금지	정지 상태와 회전 상태를 나눠 시험
더듬이	구멍 없는 막 한 장을 판 사이에 고정, 철사가 막을 관통하지 않음	반복 눌림 후 누수 확인
소나·압력센서	측정면만 물에 노출, 전자부는 마른 쪽	측정값과 누수 동시 확인
주사기 호스	노즐 외경에 맞춘 호스, 벽 통과부 밀봉	흡입 중 누수 확인

검증은 전자부품 없는 빈 통 → 동작 부품 시험 → 무전원 부력 확인 → 전원 투입 순서로 진행

3.5 부력 제어 장치(VBS)

두 주사기의 몸통은 고정하고, 두 플런저 손잡이를 앞판과 뒷판 사이에 끼운 공통 이동판으로 묶었다. 12 V 리니어 액추에이터(스트로크 50 mm, 힘 100 N, 무부하 8 mm/s) 1개가 이동판을 밀고 당긴다. 위치 센서와 끝단 스위치가 없으므로, 실제 물에서 잦은 흡입·배출 속도(mL/s)와 구동 시간을 곱해 물 양을 추정하고, 시작 시 눈금을 보고 SYNC 명령으로 실제 양을 입력한다. 0 mL 미만이나 설정 상한을 넘는 명령은 거부한다.

주사기 길이(0 mL 150 mm, 50 mL 255 mm)로 계산하면 1 mL당 플런저가 약 2.1 mm 움직이므로, 스트로크 50 mm로 가능한 흡입량은 주사기 1개당 약 24 mL이다.

3.6 추진 시스템

같은 12 V 1/21 감속 DC모터(GDM-CD25-12S, 축 4 mm) 2개를 4×4 mm 조인트로 길이 10 cm 추진축에 연결하고, 끝에 75 mm 프로펠러를 달았다. 모터는 L298N #1로 구동하며, 한 번의 명령에 최대 300 ms만 돌고 자동으로 멈춘다. 뒤쪽 감지 센서가 없으므로 후진 명령은 두지 않았다.

3.7 센서 구성

표 4. 센서 구성

센서	부품·연결	역할
더듬이 3개	0.8 mm 스테인리스 철사 + 롤러 레버 스위치, D30·D32·D34 (내부 풀업)	접촉 확정, 접촉 시 즉시 정지
수중 소나 2개	UART 출력 수중 측정용, 전방 D19(RX1)·측면 D17(RX2)	벽 거리로 위치 보정, 미확인 후보 표시, 25 cm 이내 전진 차단
압력센서	MS5837-30BA, I ² C 0x76, 3.3 V	수심 = $(P - P_0)/(pg)$
IMU	MPU6050, I ² C 0x68	회전 각도(요) 추정

3.8 전기 설계

12 V 어댑터 → 퓨즈 → 차단 스위치 → 테더 → 통 안 분기 순서로 전원이 들어온다. 분기된 12 V는 L298N 2개, LM2596 2개, Mega VIN으로 간다. LM2596 #1은 5.0 V(L298N 로직, 소나, MAX485, 레벨 변환기 고전압 쪽), #2는 3.3 V(압력센서, 레벨 변환기 저전압 쪽)를 만든다. 모터 전류는 브레드보드를 지나지 않게 별도 선으로 공급한다.

보호 회로로 L298N의 EN 핀을 10 kΩ으로 GND에 연결해 전원 투입·리셋 중 모터 오동작을 막고, 드라이버 전원에 470 μF, 각 모터 단자에 0.1 μF 콘덴서를 달아 잡음을 줄였다. 테더(24AWG, 8 m)의 왕복 저항은 약 1.27 Ω으로, 2 A에서 약 2.5 V가 떨어지므로 부하 상태의 통 안 전압을 측정하도록 하였다.

3.9 부품 목록

표 5. 주요 부품

분류	부품	수량	용도
제어	Arduino Mega 2560	1	전체 제어
구동	L298N 듀얼 H브리지	2	추진, 액추에이터
구동	12 V 1/21 감속모터 GDM-CD25-12S	2	좌우 추진
구동	추진축 키트 L10cm 4×4 mm, 75 mm 프로펠러	각 2	추진
부력	12 V 리니어 액추에이터, 50 mL 주사기, 이동판	1 / 2 / 1식	수심 조절
감지	수중 UART 소나	2	위치·후보

분류	부품	수량	용도
감지	MS5837-30BA	1	수심
감지	MPU6050	1	방향
감지	롤러 레버 리미트 스위치 + 철사	3	더듬이
신호	I ² C 레벨 변환기	1	5 V ↔ 3.3 V
통신	MAX485, USB-RS485 변환기	각 1	테더 통신
전원	LM2596	2	5.0 V, 3.3 V
전원	12 V 5 A 어댑터, 퓨즈, 차단 스위치, 테더 4심 8 m	1식	물 밖 전원
기구	방수 통, 케이블그랜드, 트레이, 체결재	1식	본체

4. 핵심 기능 및 알고리즘

4.1 위치 추정

위치는 축별로 나누어 추정한다. 수평 위치(X, Y)는 소나 벽 거리, 수심(Z)은 압력센서, 방향은 IMU가 맡는다.

방향: IMU 회전을 시작 시 2초간 평균해 바이어스를 빼고, 시간에 대해 적분해 요 각도를 구한다.

이동 보간: 좌우 모터가 실제로 켜져 있던 시간 × 실측 속도로 이동 거리를 계산한다(추측 방법).

소나 벽 보정: 빔 방향이 수조 측과 15° 이내이고, 로봇이 정지해 있고, IMU가 유효하고, 측정값이 예상 벽 거리 ± 20 cm 안이면, 그 측 좌표를 오차 $L - (\text{센서 좌표} + r \cdot \cos\beta)$ 만큼 즉시 보정한다. 여기서 L은 벽 좌표, r은 측정 거리, β 는 빔 방향이다.

수심: 수면에서 기준 압력 P_0 를 저장한 뒤 수심 = $(P - P_0)/(\rho g)$, $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$ 로 계산한다.

추측 방법만 쓰면 물살, 미끄러짐, 테더 장력 때문에 오차가 계속 쌓이지만, 위치를 아는 벽을 기준으로 보정하면 오차가 누적되지 않는다.

4.2 측각 접촉 감지와 재질 판별

세 스위치를 매 루프마다 읽어 좌 = 1, 중 = 2, 우 = 4의 비트 마스크로 만든다. 추진 중 접촉이 생기면 즉시 모든 모터를 끄고 구동 허용을 해제하며, 접촉 중에는 구동 허용 자체를 거부한다. 지도에는 눌린 더듬이 끝의 위치(물체 표면)가 기록된다.

재질 판별은 데이터 기반으로 한다. 접촉 시작 전후 9개 기록(약 2초)에서 7개 신호(전방·측면 거리, 회전률, 가속도 2축, 수심, 주사기 양)의 평균·표준편차·변화폭 21개 특징을 만들고, 랜덤포레스트(트리 200개, 깊이 5)로 분류한다. 같은 물체가 학습과 평가에 동시에 들어가지 않도록 시편 단위로 나누어 평가하며, 균형 정확도 0.75 이상이고 예측 확률 0.8 이상일 때만 재질 이름을 붙이고 아니면 unknown으로 둔다.

4.3 소나 근접 정지와 후보 표시

전진 명령은 두 소나가 모두 유효하고 25 cm 이상일 때만 실행되며, 이동 중 조건이 깨지면 즉시 멈춘다. 측정값이 0이거나 오래된 값이면 “장애물 없음”이 아니라 “모름”으로 보고 멈춘다. 예상 벽 거리보다 짧은 측정값은 위치 보정에 쓰지 않고 지도에 미확인 후보로 표시하여, 더듬이로 확인할 지점을 알려준다.

4.4 안전 인터록

표 6. 안전 인터록

조건	동작
통신 750 ms 두절	모든 모터 정지, 구동 허용 해제
추진 중 더듬이 접촉	즉시 정지, 구동 허용 해제
1회 구동 시간	최대 300 ms 후 자동 정지
정지 후 100 ms 이내 재구동	거부 (모터 보호)
프로그램 멈춤	1초 위치독으로 재시작, 재시작 후 자동으로 움직이지 않음
메시지 체크섬 오류, 알 수 없는 명령	버리고 정지
같은 순번 명령 재수신	동작 반복 없이 이전 응답만 재전송
최대 수심 초과, 압력 무효	PC가 자동 모드와 수심 제어를 끄고 정지

4.5 운용 모드

PC 프로그램은 0.25초마다 로봇에 명령을 보내고 상태 20개 항목을 받는다. 운용 모드는 수동 조종, 규칙 기반 자동 탐색(AUTO RULE), 학습 정책 자동 탐색(AUTO Q) 세 가지다. 규칙 모드는 앞·옆 거리가 여유거리(0.25 m)보다 크면 전진하고 아니면 정지한다. 측면·후방 접촉 센서가 없으므로 자동 회전은 허용하지 않고, 정책이 회전을 고르면 정지하여 사람이 확인하게 하였다.

4.6 수심 제어

액추에이터에 위치 피드백이 없으므로 연속 PID 대신 보수적인 보정 펄스 방식을 사용하였다. 3초 이상 간격으로 목표 수심과 비교해, 오차가 허용범위(기본 0.02 m)를 넘으면 얕을 때 흡입, 깊을 때 배출을 최대 0.5 mL씩 실행한다. 이렇게 하면 추정 물 양의 오차가 크게 쌓이기 전에 압력센서 값으로 계속 교정된다.

4.7 매핑 알고리즘

지도는 5 cm 격자로 구성하며 세 가지 정보를 겹쳐 표시한다.

로봇 경로: 소나 벽 보정을 반영한 위치를 선으로 표시한다.

빈 공간과 미확인 후보: 소나 빔이 지나간 격자는 비어 있음 쪽으로 -0.12, 벽보다 짧게 잡힌 끝점 격자는 후보 쪽으로 +0.5 점수를 쌓는다(-4~+4로 제한). 여러 번 관측될수록 확실해진다.

확정 접촉점: 더듬이가 눌린 순간 더듬이 끝의 위치를 기록한다. 이것이 지도의 핵심 정보이다.

결과는 2초마다 JSON과 HTML로 저장되어 브라우저로 바로 볼 수 있고, 모든 원자료는 CSV로 남는다.

4.8 강화학습

표 기반 Q-learning을 사용하였다. 상태는 접촉 마스크, 전방·측면 거리 구간, 수심 오차 구간, 주사기 양 구간, 회전을 구간, 재방문 여부의 7개 정보이고, 행동은 정지·전진·좌회전·우회전·흡입·배출 6가지이다.

보상은 새 격자 방문 +1, 재방문 -0.05, 충돌 -10, 스텝당 -0.02, 수심 오차 $\times -5$ 로 정하였다. 학습률 $\alpha = 0.15$, 할인율 $\gamma = 0.95$, 탐험률 ϵ 는 0.8에서 0.05로 줄였다. 시뮬레이터는 매 에피소드마다 전진 속도

(0.04~0.12 m/s), 회전 속도, 부력 응답, 장애물 위치를 무작위로 바꿔(도메인 무작위화) 현실과의 차이에 강한 정책을 학습하게 하였다.

5. 구현 과정

5.1 개발 일정

표 7. 개발 일정

기간	내용	상태
2026.08	문제 정의, 아이디어 비교, 하이브리드 위스커 컨셉 수립	완료
2026.08~09	멘토링 반영, 구조 확정, 부품 선정·구매	완료
2026.09	VELIS 재설계(액추에이터 부력 장치, 전방 더듬이 3개, 12 V 추진, RS485 통신)	완료
2026.09~10	펌웨어, PC 프로그램, 지도, 재질 분류, 시뮬레이터, 자동 검사 구현	완료
2026.10	하드웨어 조립, 통신·전원 통합 시험	완료

5.2 설계 변경 이력

표 8. 주요 설계 변경

항목	초기	최종	변경 이유
위치 추정	테더 길이로 거리 추정	소나 벽 거리 보정 + IMU + 모터 시간	테더 처짐으로 길이 ≠ 거리 (멘토 피드백)
초음파	방수형 공기용 초음파	수중 측정용 UART 소나	방수와 수중 측정 가능성은 다름
본체	원통형 아크릴 관	사각 방수 통	Mega·드라이버 폭이 원통 내경보다 큼
더듬이	3방향 2단 스위치 + 서보 스윙	전방 3개, 스위치 1개씩, 고정형	조립 난이도, 스윙축 밀봉 위험
측면 범퍼	2개	제외, 자동 회전 금지로 보완	부품·관통부 감소
재질 판별	딱딱함/무름 임계값	다중 센서 이벤트 분류 + 판정 보류	의류·구멍조끼의 오판 문제
부력 장치	DC모터 + 나사봉	리니어 액추에이터 1개로 주사기 2개 구동	부품 수와 정렬 문제 감소
추진	TT모터 + 자석 커플링	12 V 감속모터 + 축 슬리브 키트	커플링 미끄러짐, 추력 부족

항목	초기	최종	변경 이유
IMU	9축 MPU-9250	6축 MPU6050(보유품)	부품 재활용, 기준점 보정으로 보완
통신	USB 시리얼	RS485 + 체크섬·순번·위치독	8 m 테더 잡음, 안전 정지
수심 제어	PID	보정 펄스	위치 피드백 없는 액추에이터에 맞춤
배선	만능기판	브레드보드(신호) + 별도 전원선(모터)	수정 용이성

5.3 소프트웨어 구현

표 9. 소스 구성

파일	위치	역할
VELIS.ino, Config.h, SonarParser.h	Mega	센서 판독, 모터 펄스, 안전 인터록, 통신, 단계별 구동 잠금
console.py	PC	조종, 기록, 수심 제어, 자동 모드, 재전송, 손 이동(HAND) 입력
core.py	PC	통신 검사, 지도, 소나 벽 보정, 후보·접촉점, 학습 상태 변환
train.py	PC	수조 시뮬레이터, Q-learning 학습, 규칙 제어와 비교
material.py	PC	접촉 이벤트 추출, 시편 분리 평가, 분류
test_package.py	PC	자동 검사 10개, 펌웨어 PC 모의 실행

5.4 멘토링 피드백과 반영

테더 길이로 위치를 추정하는 방식은 폐기하고, 테더는 전원과 통신 전용으로 사용하였다.

수심은 압력센서 기반으로 제어하도록 하였다.

방수를 최우선으로 하여 관통부를 줄이고 밀봉 방식을 분리하였다.

좁은 범위에서의 정밀한 위치 추정을 목표로, 위치를 아는 수조 벽을 기준으로 보정하는 방식을 택하였다.

6. 실험 및 결과

6.1 실험 환경

검증은 세 갈래로 진행하였다. ① 소프트웨어 자동 검사(PC), ② 실제 지도 코드에 시뮬레이션 센서 데이터를 넣은 매핑 검증, ③ 강화학습 시뮬레이션이다. 여기에 실물 하드웨어의 통신·전원 통합 시험을 더 했다. 매핑과 강화학습 검증의 가상 수조는 실제 시험 수조와 같은 1.22 m × 1.22 m로 설정하였다.

6.2 소프트웨어 자동 검증

자동 검사 10개를 모두 통과하였다. 펌웨어는 PC에서 가짜 센서와 시계로 컴파일·실행하여, 구동 잠금 상태와 허용 상태 두 가지 설정에서 동작을 확인하였다.

표 10. 자동 검사 항목

검사	확인 내용
체크섬	정상 메시지 해석, 위변조 메시지 거부
펌웨어 모의 실행	접촉 정지, 통신 두절 정지, 구동 시간·용량 제한, 근접 정지, 압력 영점
소나 벽 보정	위치에 +10 cm 오차를 넣은 뒤 앞벽 거리로 원위치 복원
후보 처리	예상보다 짧은 값은 위치 보정 없이 후보로 기록
접촉 기록	소나 장착값이 없어도 접촉점 기록
무효 수심	압력 무효 시 지도에 수심을 비워 둠
학습 상태	수심 변화가 학습 상태에 반영됨, 상태 7요소·행동 6개
정책 호환	형식이 다른 이전 정책 파일 거부
재질 특징	특징에 수심 포함
핀 구성	스위치 핀 30·32·34, 압력센서 사용 확인

6.3 매핑 알고리즘 검증

수조 안에 소나와 더듬이 모두에 감지되는 목재 블록(A)과, 소리를 흡수해 소나에는 보이지 않고 더듬이로만 감지되는 천으로 감싼 스펀지(B)를 두었다. 추측 항법 오차를 확인하기 위해 실제 속도(0.08 m/s)를 설정값(0.10 m/s)보다 20% 느리게 주었다. 소나 잡음은 표준편차 8 mm로 넣었다.

가디언스파이더 매핑 과정 — 소나로 위치를 알고, 더듬이로 확정한다

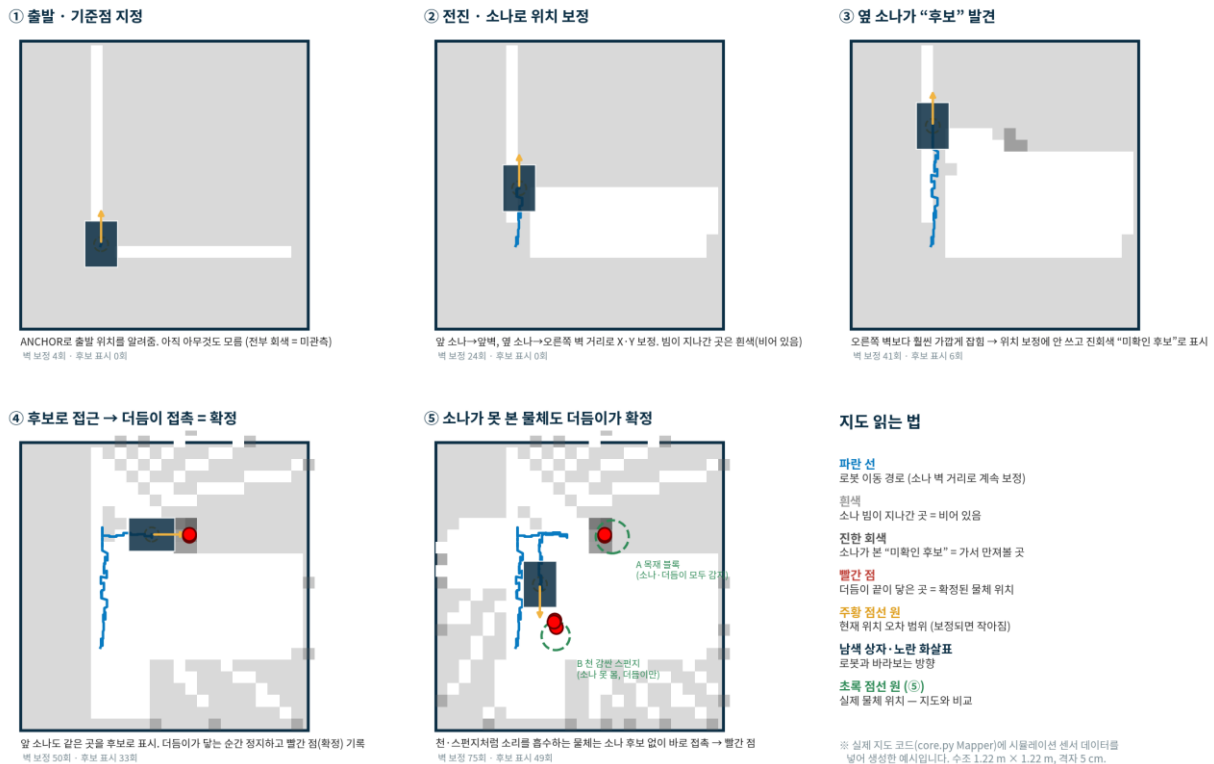
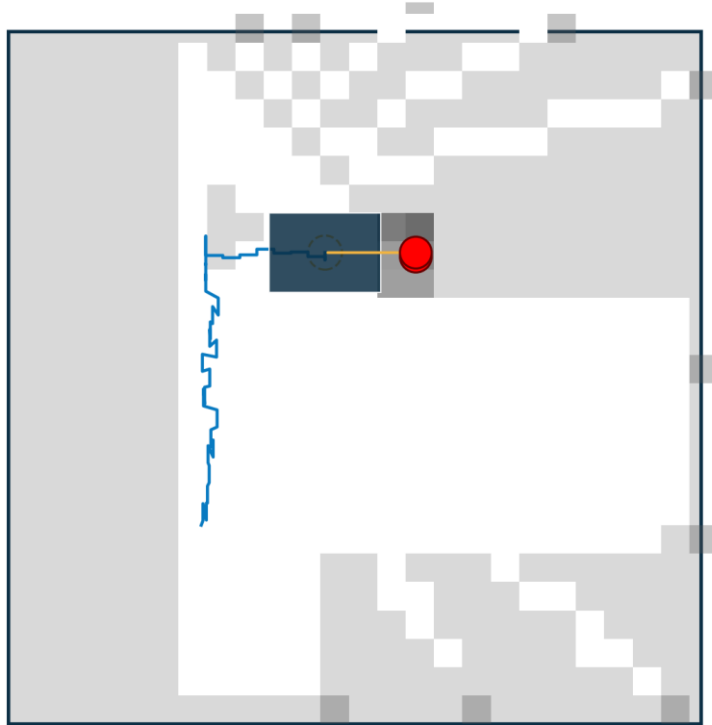


그림 3. 매핑 과정

탐색 과정은 다음과 같다. 출발 위치를 지정한 뒤 전진하면서 앞·옆 소나로 벽까지 거리를 재어 위치를 보정하고, 빔이 지나간 곳을 빈 공간으로 기록한다. 옆 소나가 벽보다 가까운 반사를 잡으면 그 지점을 미확인 후보로 표시한다. 후보 쪽으로 방향을 바꿔 접근하면 앞 소나도 같은 곳을 후보로 표시하고, 더듬이가 닿는 순간 정지하며 확정 접촉점을 기록한다. 소나에 보이지 않는 물체 B는 후보 없이 더듬이 접촉으로 바로 확정되었다.

④ 후보로 접근 → 더듬이 접촉 = 확정

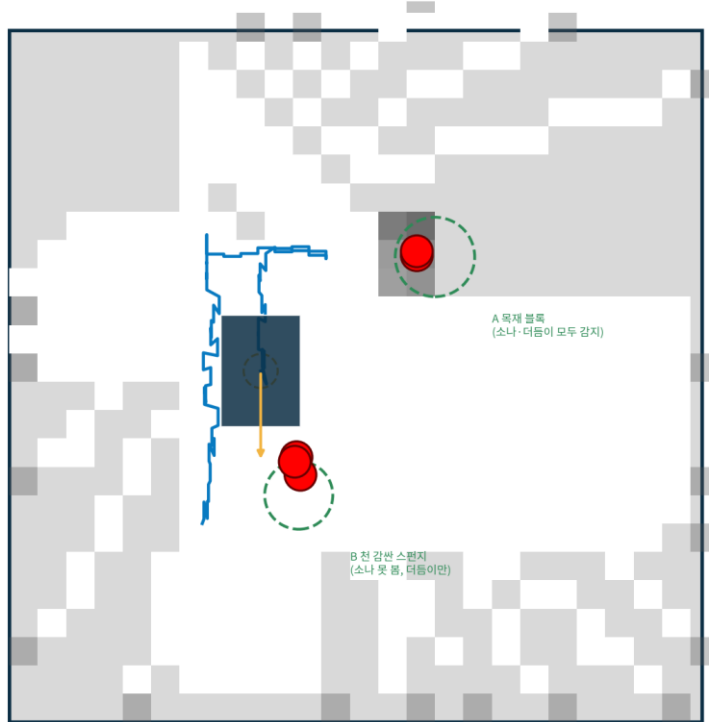


앞 소나도 같은 곳을 후보로 표시. 더듬이가 닿는 순간 정지하고 빨간 점(확정) 기록

벽 보정 50회 · 후보 표시 33회

그림 4. 후보로 접근 후 더듬이 접촉으로 확정

⑤ 소나가 못 본 물체도 더듬이가 확정



천·스펀지처럼 소리를 흡수하는 물체는 소나 후보 없이 바로 접촉 → 빨간 점

벽 보정 75회 · 후보 표시 49회

그림 5. 최종 지도와 실제 물체 위치(점선) 비교

표 11. 매핑 검증 결과

항목	결과	비고
소나 벽 보정 횟수	75회	약 24초 탐색
미확인 후보 표시	49회	물체 A 주변과 벽 경계
최종 위치 오차	약 0.6 cm	속도 오차 20%를 준 상태
물체 A 접촉점 오차	평균 3.7 cm	소나 후보와 같은 위치에 확정
물체 B 접촉점 오차	평균 1.1 cm	소나 후보 없이 더듬이로만 확정

추측 항법만 사용했다면 20%의 속도 오차가 그대로 위치 오차로 쌓였겠지만, 소나 벽 보정으로 최종 위치 오차를 1 cm 이하로 유지하였다. 접촉점 오차는 더듬이 길이 설정값과 실제 접촉 위치의 차이에서 주로 생기며, 실물에서는 더듬이 길이를 실측해 설정값에 반영하면 줄일 수 있다.

6.4 강화학습 시뮬레이션 결과

시드 4개(42, 7, 123, 2026)로 각각 2000 에피소드를 학습한 뒤, 학습에 쓰지 않은 평가 시드 100 에피소드 (각 300 스텝)에서 규칙 기반 제어와 비교하였다.

표 12. 규칙 제어와 Q-learning 비교

시드	정책	에피소드 보상	총돌 횟수	방문 격자 수	수심 오차(mm)
42	규칙	-2691.0	267.6	11.3	3.7

시드	정책	에피소드 보상	충돌 횟수	방문 격자 수	수심 오차(mm)
42	Q	-522.6	22.5	8.1	39.4
7	규칙	-2616.9	260.3	11.6	3.7
7	Q	-506.8	31.6	12.2	49.5
123	규칙	-2583.5	257.0	12.0	3.6
123	Q	-251.9	16.6	19.7	26.5
2026	규칙	-2612.5	259.9	12.5	3.8
2026	Q	-407.0	18.2	8.7	55.5
평균	규칙	-2626.0	261.2	11.8	3.7
평균	Q	-422.1	22.2	12.2	42.7

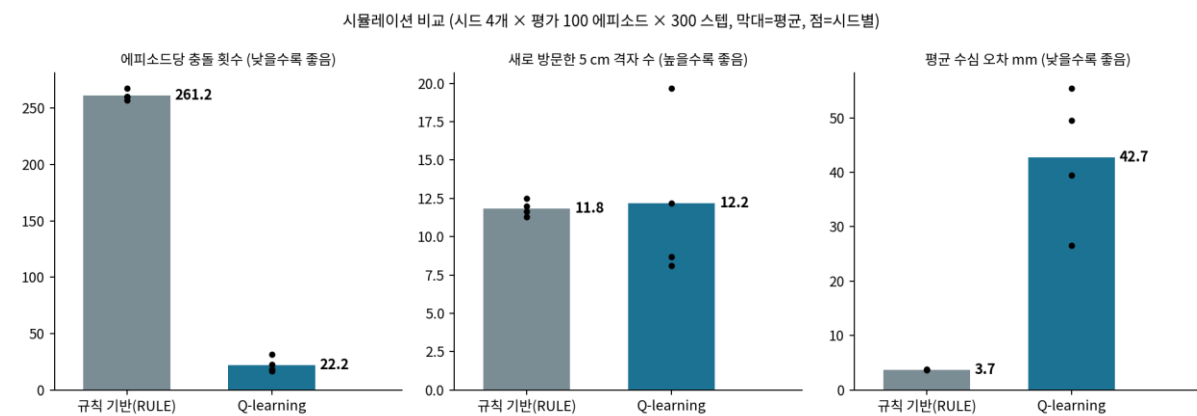


그림 6. 시뮬레이션 비교 (막대 = 평균, 점 = 시드별)

Q-learning 정책은 충돌을 평균 261회에서 22회로 약 91% 줄였다. 새로 방문한 격자 수는 비슷했지만 시드별 편차가 컸다. 반면 수심 오차는 규칙 제어(3.7 mm)가 Q 정책(42.7 mm)보다 훨씬 작았다. 규칙 제어는 수심 오차가 생기면 무조건 보정부부터 하지만, Q 정책은 탐색 보상과 수심 벌점을 저울질하며 수심을 덜 지켰기 때문이다. 이에 따라 실제 운용에서는 수심은 규칙이, 수평 이동은 학습 정책이 맡는 역할 분담을 채택하였다.

6.5 실물 하드웨어 통합 시험

표 13. 실물 시험 결과

시험 항목	결과	상태
펌웨어 컴파일·업로드	라이브러리 충돌 해결 후 업로드 성공	완료
PC-로봇 통신	0.25초 주기로 상태 20개 항목 수신 확인	완료
입력 핀 판독	D32 핀을 GND에 연결 시 접촉 값 2로 정상 판독	완료
전원 계통	테더 연결 시 어댑터 출력이 끊기는 합선 발견, 원인 제거	완료

시험 항목	결과	상태
더듬이 스위치	스위치를 눌러도 반응 없음, 배선 위치 점검 중	완료
센서(소나·압력·IMU)	전원 계통 정비 후 확인 예정	전압오류가 발생, 조정완료

7. 성능 평가 및 분석

7.1 목표 대비 달성도

표 14. 목표 대비 달성도

목표	달성 내용	달성 수준
소나·촉각 역할 분리 구조	설계와 소프트웨어 구현, 시뮬레이션 검증	달성 (실물 검증 예정)
접촉 경험의 지도화	지도 코드 구현, 시뮬레이션에서 위치 오차 1 cm 이하	달성 (실물 검증 예정)
안전 인터록	펌웨어 구현, PC 모의 실행 검증	달성
PC-로봇 통신	실물에서 확인	달성
수심 제어	부력 장치 제작, 제어 소프트웨어 구현	부분 달성
강화학습 비교	시뮬레이션 학습·평가 완료	달성 (실물 적용 예정)
실물 수중 탐색	하드웨어 통합 시험 진행 중	진행중

7.2 발견된 문제와 원인 분석

표 15. 발견된 문제

문제	원인	해결
컴파일 오류(MS5837 함수 없음)	같은 이름의 다른 라이브러리가 설치되어 잘못 선택됨	잘못된 라이브러리 폴더 삭제
PC에서 포트 열기 실패	블루투스 가상 포트를 Mega로 착각	장치 관리자에서 실제 포트 확인
PC에 응답 없음	통신 경로 설정이 테더(RS485) 모드로 업로드됨	USB 모드로 설정 후 재업로드
Mega 발열, 어댑터 출력 끊김	테더 이후 전원 분기에서 +12 V와 GND 합선	저항 측정으로 합선 지점을 찾아 제거
강압 모듈 출력 미확인	모듈 출력이 출고 시 5 V로 맞춰져 있지 않을 수 있음	출력선을 분리한 상태에서 5.0 V / 3.3 V로 조정
더듬이 무반응	Mega 판독은 정상이므로 스위치 선의 핀 위치 또는 GND 경로 문제로 추정	핀 위치와 스위치 단자(COM-NO) 점검 중

문제	원인	해결
흡입량 부족 가능성	액추에이터 스트로크 50 mm로 주사기 당 약 24 mL	설정 상한을 실측값에 맞춰 조정 예정

7.3 한계점

촉각 판별의 원리적 한계: 스위치는 눌림 여부만 알려주므로 재질은 간접 신호로만 추정할 수 있다. 판정 보류를 허용하고 최종 판단은 사람이 한다.

위치 추정 조건: 소나 벽 보정은 로봇이 벽과 거의 수직이고 정지해 있을 때만 동작한다. 그 사이에는 추측 항법 오차가 쌓인다.

감지 사각지대: 측면·후방에 접촉 센서가 없어 자동 회전을 허용하지 않았다.

부력 장치: 위치 피드백이 없어 물 양은 시간으로 추정하며, 주기적인 동기화가 필요하다.

시험 환경: 검증은 1.22 m 수조 크기를 기준으로 하였고, 실제 현장의 넓은 공간과 물살은 반영하지 않았다.

실물 검증 부족: 실물 수중 검증을 여러 차례 하지 못했다.

8. 기대효과 및 활용 방안

8.1 구조 현장 활용 시나리오

침수된 지하차도나 지하주차장에 다이버가 들어가기 전, 로봇을 테더로 먼저 투입한다. 로봇이 내부를 탐색하며 만든 지도에서 구조대는 통과 가능한 공간, 확인된 구조물·물체, 주의가 필요한 지점을 미리 확인한다. 이를 바탕으로 접근 경로와 절단·해체 위치 같은 진입 전략을 세우고, 다이버는 확인이 필요한 지점으로 바로 이동한다. 다이버가 물속에 머무는 시간이 줄어드는 만큼 구조대원의 위험도 줄어든다.

8.2 기대효과

산업적: 소방·해경 수난구조대의 다이버 투입 전 1차 정찰 보조 장비, 취수구·배수로·하수관·탱크 내부 점검, 항만·양식장 구조물 점검에 활용할 수 있다.

기술적: 시각이 차단된 환경에서도 접촉 경험을 지도로 바꿀 수 있음을 보이고, 소나와 촉각을 결합한 저가형 탐색 구조를 제시한다.

교육적: 범용 부품으로 센서 융합, 강화학습, 시뮬레이션과 현실의 차이 극복을 실습할 수 있는 플랫폼이 된다.

8.3 확장 방향

측면·후방 더듬이 추가로 자동 회전 허용

힘 센서(FSR, 스트레인게이지)로 접촉 강성 측정, 재질 판별 고도화

모터 엔코더, 자력계 IMU로 위치 정확도 향상

전용 PCB와 로봇 내 배터리로 배선 신뢰성 향상

이미징 소나 연동, 3차원 지도, 다수 로봇 협업 탐색

실제 탁수 현장 시험과 수색 기관 자문

9. 결론 및 향후 계획

9.1 결론

본 프로젝트는 시각이 차단된 수중 환경에서 소나는 위치 파악을, 측각은 물체 확정을 맡는 역할 분리 구조를 제안하고, 이를 구현한 수중 정찰 로봇 VELIS를 제작하였다. 소프트웨어는 자동 검사 10개를 통과하였고, 검증에서 20%의 속도 오차에도 위치 오차를 1 cm 이하로 유지하며 소나에 보이지 않는 물체까지 더듬이로 찾아냈다. 강화학습은 충돌을 크게 줄였으나 수심 유지는 규칙 제어가 우수하여 두 방식의 역할 분담을 도출하였다.

9.2 향후 개선 과제

더듬이 배선 점검과 센서(소나, 압력, IMU) 전원 검증 완료
모터·액추에이터 구동 확인과 흡입·배출 속도 실측
빈 통 누수 시험, 부력 조정, 수중 수동 주행
탁한 물 환경에서의 통합 탐색 시연

부록 A. 핀 배정표

표 16. 핀 배정

Mega 핀	연결 대상	비고
D2 / D22 / D23	L298N #1 ENA / IN1 / IN2	왼쪽 추진모터, ENA 10 kΩ 풀다운
D3 / D24 / D25	L298N #1 ENB / IN3 / IN4	오른쪽 추진모터, ENB 10 kΩ 풀다운
D4 / D26 / D27	L298N #2 ENA / IN1 / IN2	액추에이터, ENA 10 kΩ 풀다운
D30 / D32 / D34	더듬이 스위치 좌 / 중 / 우	내부 풀업, 눌림 = LOW
D19 (RX1)	전방 소나 TX	UART
D17 (RX2)	측면 소나 TX	UART
D20 / D21	레벨 변환기 → MS5837, MPU6050	I ² C 0x76, 0x68
D14 / D15 / D41	MAX485 DI / RO / DE+RE	RS485 19200 bps
VIN / GND	테더 +12 V / 공통 GND	책상 시험 시 VIN 분리

부록 B. 소스 코드 구성

소스 코드는 별도 첨부한 VELIS_소스코드.zip에 포함.

부록 C. 참고문헌

- [1] 서울신문, "28초 통화가 母와의 마지막"...오송 침수 지하차도 잠수부 투입, 2023.7.16.
- [2] 세계일보, 쉴 새 없이 뿜어지는 흙탕물... 씻겨지지 않는 '울음바다', 2023.7.16.
- [3] YTN, '한남노'로 6명 숨진 지하주차장...사고 뒤 첫 공개, 2022.9.7.
- [4] 재경일보, [천안함] "물속 시야 제로"...수중탐색 3분만에 종료, 2010.3.
- [5] 뉴시스, '시야 15cm' 한강 현미경 수색, 2021.5.10.
- [6] YTN, 극한 고온·극한 호우 전망 보도, 2025.8.17.
- [7] 세계일보, 기후 번덕에... '非 예보' 늘었다, 2026.2.4.
- [8] Blue Robotics, BlueRobotics_MS5837_Library.
- [9] TE Connectivity, MS5837-30BA 데이터시트.

- [10] InvenSense, MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions.
- [11] STMicroelectronics, L298 Dual Full-Bridge Driver 데이터시트.
- [12] C. J. C. H. Watkins, P. Dayan, "Q-learning," Machine Learning, 1992.
- [13] R. S. Sutton, A. G. Barto, Reinforcement Learning: An Introduction, 2nd ed., 2018.
- [14] J. Tobin 외, "Domain Randomization for Transferring Deep Neural Networks from Simulation to the Real World," IROS 2017.
- [15] S. Thrun, W. Burgard, D. Fox, Probabilistic Robotics, MIT Press, 2005.