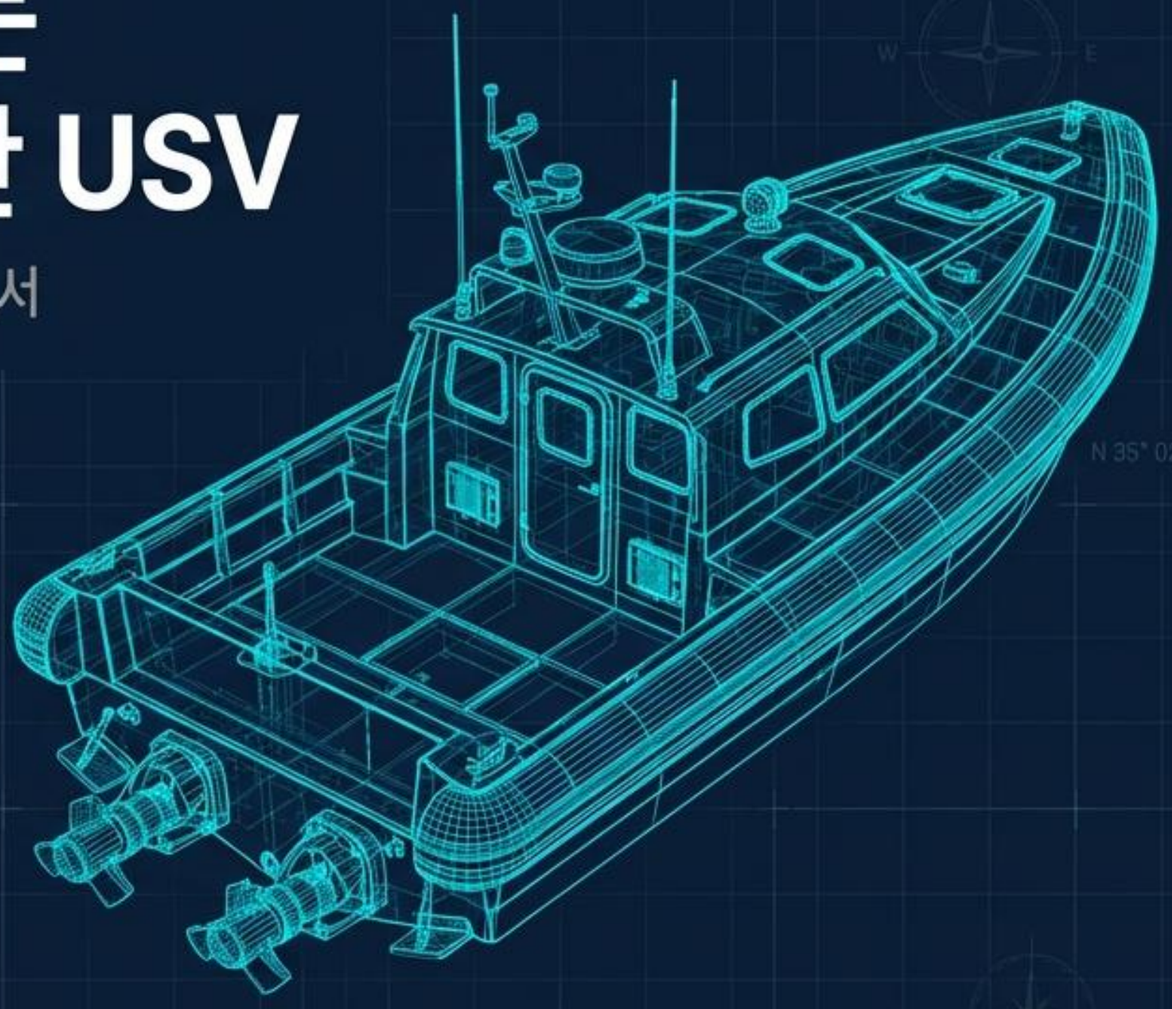
해상 구조의 한계를 넘는 디지털 트윈(SITL) 기반 USV

AIRL: 2026-1 파란학기제 중간교류회 기술 성과 보고서

[PROJECT_CODE]	SITL-USV-2026
[TEAM]	AIRL (Hardware & Software Engineering)
[OBJECTIVE]	소형 자율 임무 수행 로봇(USV) 설계 및 페루프(Closed-loop) 가상 검증



실제 바다에 띄우기 전, 물리 법칙과 데이터 파이프라인으로 완벽을 증명하다.

NotebookLM

극한 해상 환경의 한계 (The Challenge)

- 야간 및 악천후 등 기상 악화 시 유인 구조대(헬기, 대형선) 투입의 치명적 한계.
- 지중해 난민선, 대형 크루즈 사고 등 다수의 조난자가 산발적으로 발생하는 상황에서의 구조 골든타임 상실.

요구사항: 인명 피해 제로화를 위한 고속 기동성, 악천후 복원력, 그리고 군집 정밀 탐색이 필수적.

시스템 엔지니어링 기반 접근법 (Solution Architecture)

[Hardware]
물리적 생존: V-Hull 및 분산형 워터젯 설계, Slamming 하중 극복 기구부.

[Software]
디지털 두뇌: ROS2-gRPC 하이브리드 아키텍처, 초저지연 DDS 실시간 통신망.

[SITL]
가상 검증: Unity 기반 해양 디지털 트윈 구축 및 Sim-to-Real 검증 루프.

NotebookLM

하드웨어 설계 논리 및 선택 근거 (Hardware Design Rationale)

선형 설계 매트릭스 (Hull Design)

⚠ 쌍동선 (Catamaran)

정박 시 안정적이나 고속 주행 시 중앙부 '슬래밍(Slamming)' 현상으로 속도 저하.

V형 선체 (Deep V-Hull) [선택]

탁월한 조파(Wave-piercing) 성능으로 험준한 파도 돌파.
무인 수상정이므로 승차감 저하(틀링) 문제없음.
악천후 속 고속 돌파력 획득.

추진 시스템 매트릭스 (Propulsion System)

⚠ 단일 프로펠러 (Single Propeller)

잔해물 엉킴, 조난자 2차 부상(절단) 위험 존재.

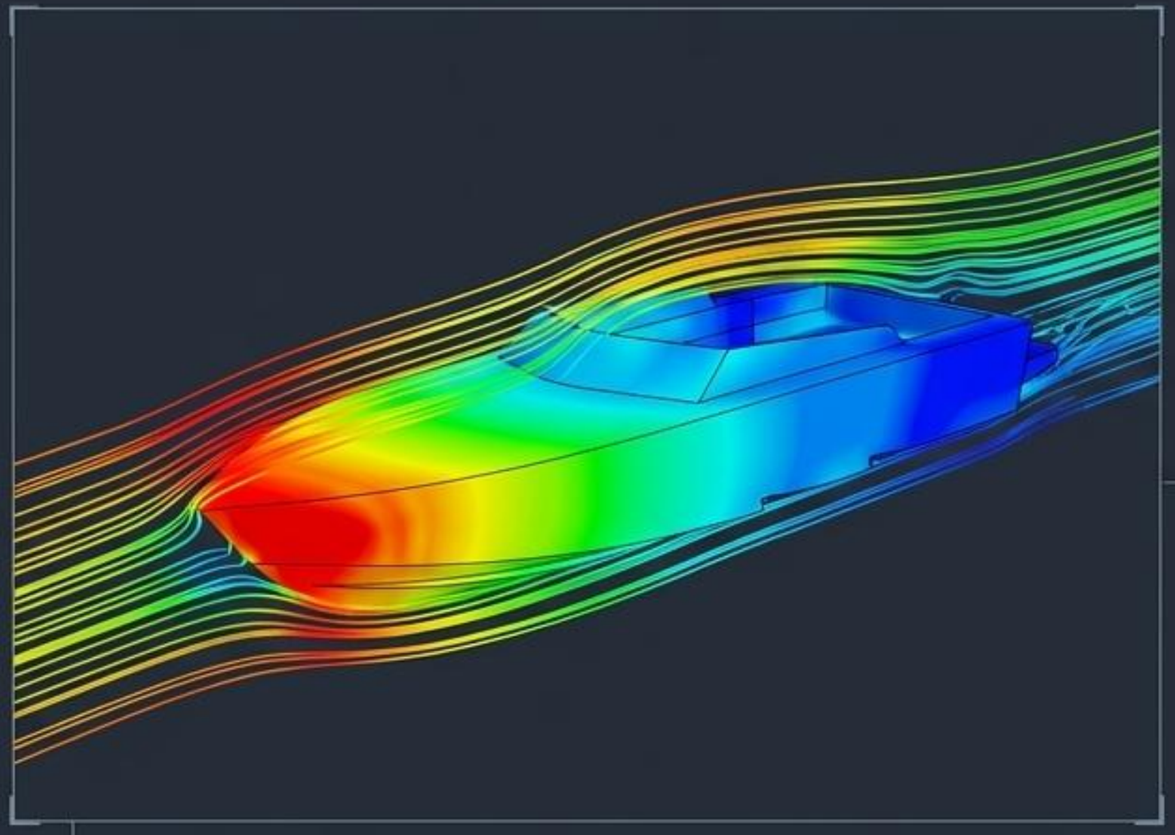
트윈 워터젯 (Twin Water Jet) [선택]

외부 노출 블레이드가 없어 안전 확보.
부하 분산으로 캐비테이션 지연.
한쪽 흡입구 노출 시에도 생존성(Redundancy) 보장.

360도 제자리 회전(Pivot) 기동성 획득.

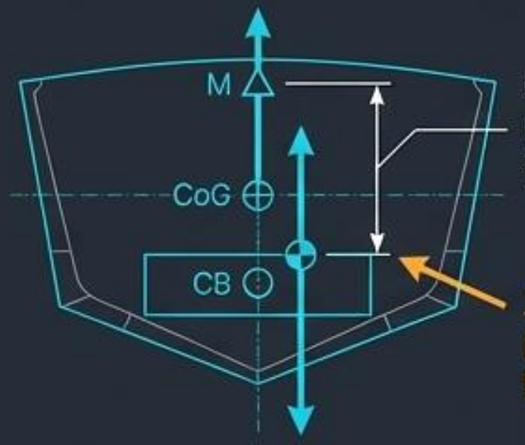
NotebookLM

전산유체역학(CFD) 분석



Insight: 선두에 추가 무게 배치를 통한 보우 라이즈(Bow Rise, 기수 들림) 원천 방지.

전복 복원성(Stability) 검증



배터리 및 모터 하단 배치로 메타센터 높이(GM) 확보. 강력한 복원 모멘트 생성.

고속 선회 시 인워드 뱅킹 (Inward Banking) 유도로 탈조(Spin-out) 방지.

최대 복원정(GZ) 65도, 소멸 안정각(AVS) 115도 기록.

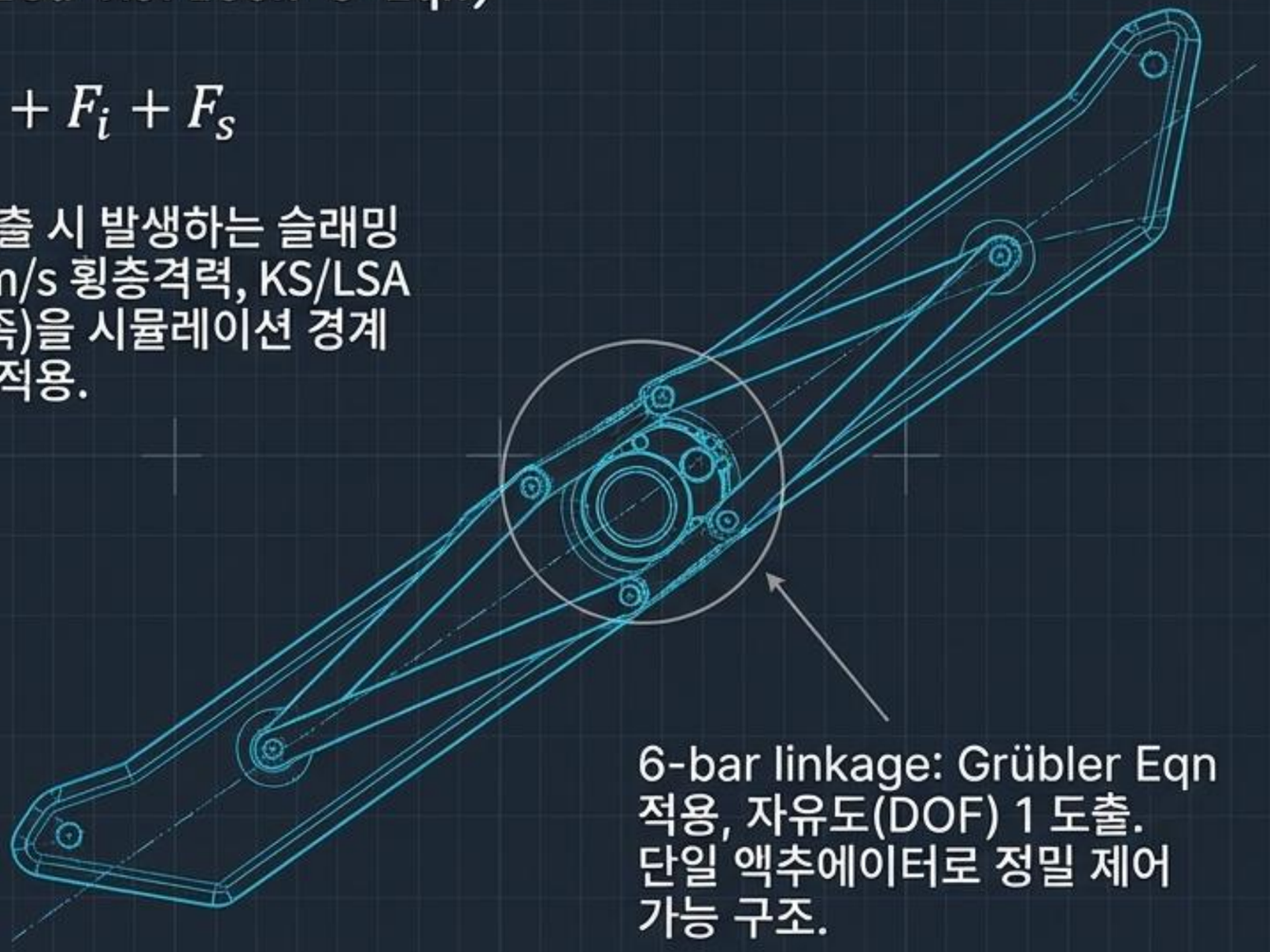
극한의 롤링 상황에서도 자체 진복 복구 수치적 검증.

NotebookLM

Wave Slamming Force (Modified Morison's Eqn)

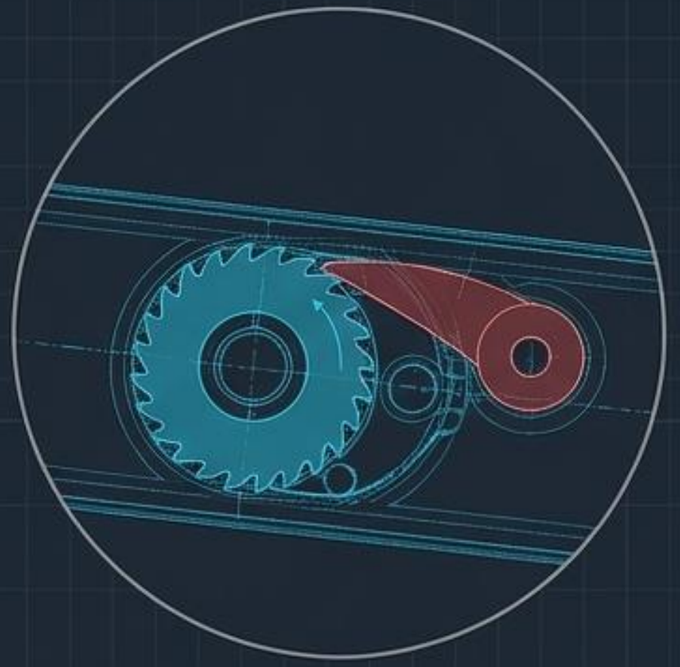
$$F = F_d + F_i + F_s$$

수면에 사출 시 발생하는 슬래밍 하중(3.5m/s 횡충격력, KS/LSA Code 충족)을 시뮬레이션 경계 조건으로 적용.



6-bar linkage: Grübler Eqn 적용, 자유도(DOF) 1 도출. 단일 액추에이터로 정밀 제어 가능 구조.

Fail-Safe: 중앙 라쳇(Ratchet) 메커니즘



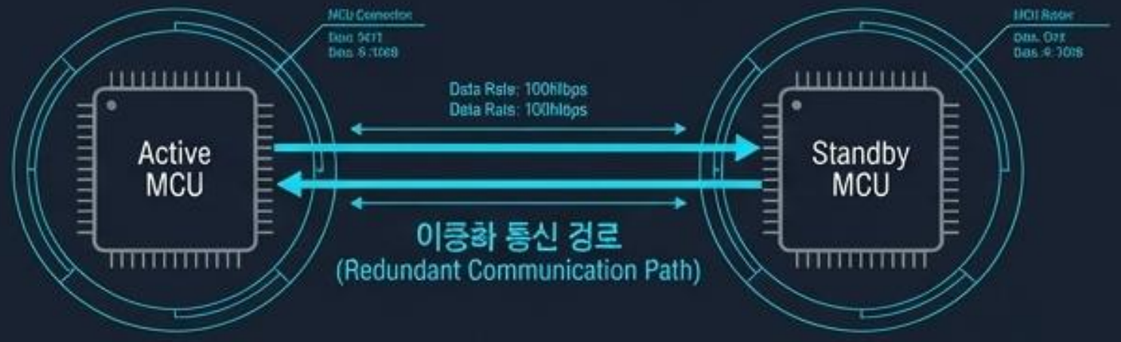
파도에 의한 강력한 압축력 발생 시 기계적 잠금 장치 작동.

비대칭 톱니와 **Pawl** 구조로, 전력 차단 및 유압 누유 극한 상황에서도 **역방향 수축 원천 차단**.

NotebookLM

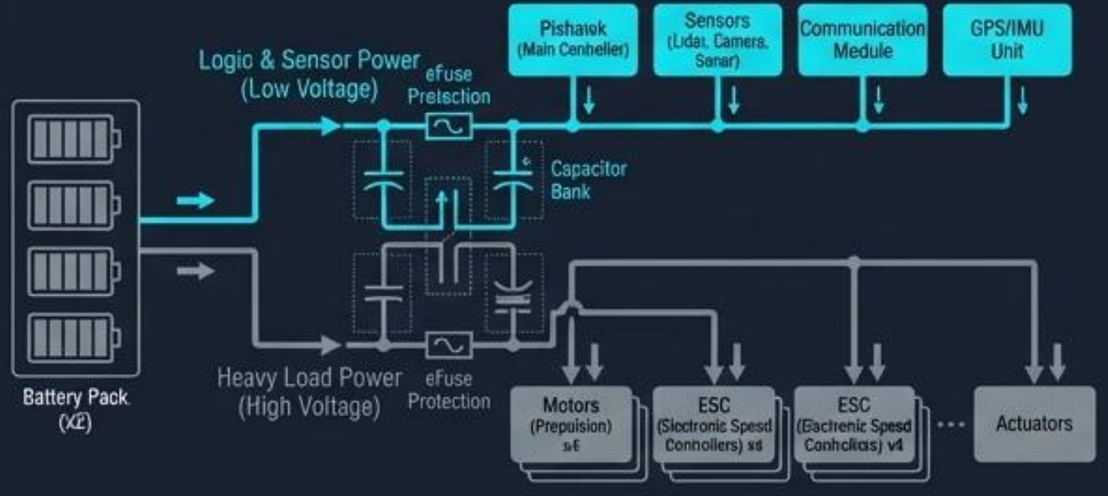
전기 토폴로지 및 회로 아키텍처 (Electrical Topology & Circuit Architecture)

고신뢰성 다중화 제어 (Redundant Control)



- 해상 단일 고장점(SPOF) 방지를 위한 임베디드 보드 이중화 설계.
- 메인 제어기 통신 단절 시 보조 제어기가 즉시 개입하는 Failover 로직.
- 공간 참조 프레임 정의 (NED, WGS84, 선체 고정 좌표계 FRD) 동기화.

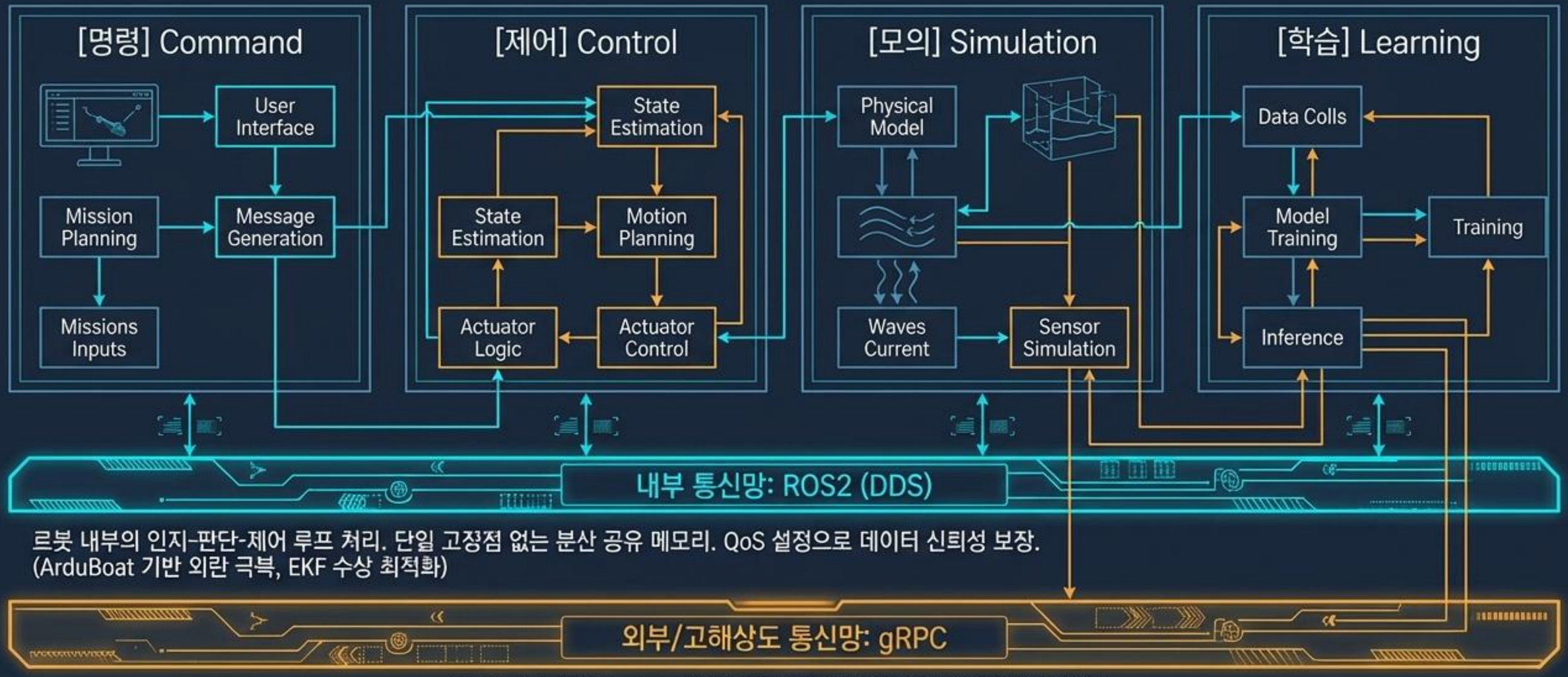
전원 분배 네트워크 (PDB Topology)



- 추진계통(ESC, 모터)과 인지/제어 계통(Pixhawk, 센서)의 전원 물리적 분리.
- 모터 구동 역기전력 보호를 위한 대용량 커패시터, eFuse 채택.

NotebookLM

ROS2-gRPC 하이브리드 소프트웨어 아키텍처



르봇 내부의 인지-판단-제어 루프 처리. 단일 고정점 없는 분산 공유 메모리. QoS 설정으로 데이터 신뢰성 보장.
(ArduBoat 기반 외란 극복, EKF 수상 최적화)

REST API, WebSocket 대비 네트워크 지연 최소화 및 엄격한 타입 체크.
대용량 센서 데이터 처리 특화.

NotebookLM

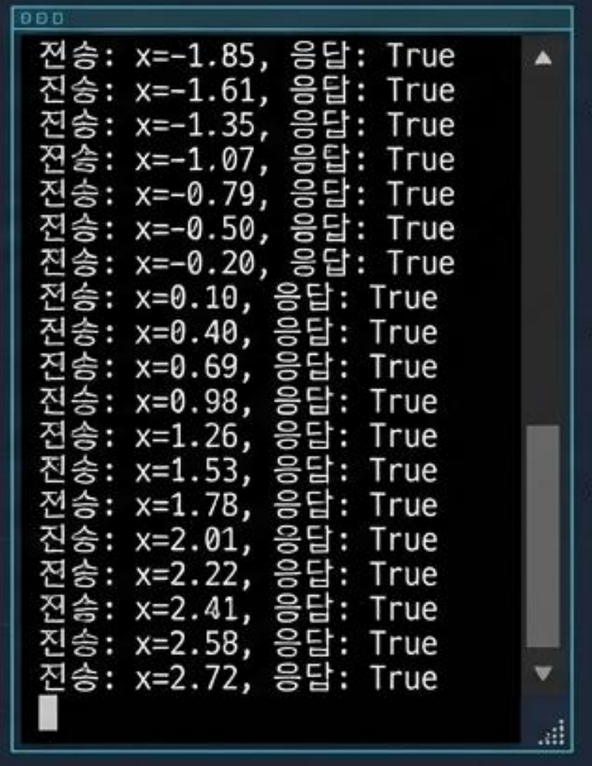
초저지연 DDS 실시간 통신망 성능 검증

Protocol Buffers (Protobuf) Optimization

```
message RobotState {
    float pos_x = 1; float pos_y = 2; float pos_z = 3;
    float vel_x = 4; float vel_y = 5; float vel_z = 6;
}
```

이진 직렬화(Binary Serialization) 도입.
JSON 대비 압도적인 메모리 효율.

20Hz 고주파수 제어 루프 검증



- 0.05초(20Hz) 간격의 루프 설계로 서버 부하 최소화 및 실시간 응답성(Latency) 달성.
- 지그재그 패턴(math.sin 함수) 기동 로직 테스트 통과.
- 데이터 유실 없이 response.success 응답 지속 검증 완료.

NotebookLM

물리 기반 Unity 해양 시뮬레이션 구축

- 단순 그래픽이 아닌 FFT(Fast Fourier Transform) 기반 파도 시뮬레이션 구축 (Unity Crest 5).
- 파고, 파장, 풍향 파라미터를 조절하여 악천후 스펙트럼 완벽 모사.

6-DOF Disturbance & Buoyancy

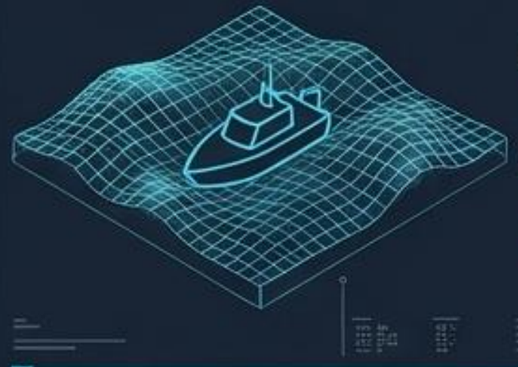
- 1주차 역학 계산(오뚜기 복원력)이 가상 환경 내 등역학 모델링으로 동일하게 적용.
- AI 학습 배속을 위한 블필요한 해저면 렌더링 오프(Off) 등 연산 최적화 완료.

- 1주차 역학 계산(오뚜기 복원력)이 가상 환경 내 동역학 모델링으로 동일하게 적용.
- AI 학습 배속을 위한 블필요한 헤저면 렌더링 오프(Off) 등 연산 최적화 완료.

NotebookLM

SITL 시뮬신 3- 상정 로당 루프 및 산도택

Unity 가상 세계



Step 1. Data Generation:
Unity 물리 엔진이 생성한 파도 외란 및 가상 센서(IMU, GPS, LiDAR) Raw 데이터 수집.

gRPC 브릿지

Communication Bridge (gRPC)

Step 2. High-Bandwidth Stream:
gRPC 채널 및 Protobuf 직렬화를 거쳐 데이터를 지연 없이 ROS2로 전송.

ROS2 AI 제어기

EKF (확장 칼만 필터)

Path Planning (경로 계획)

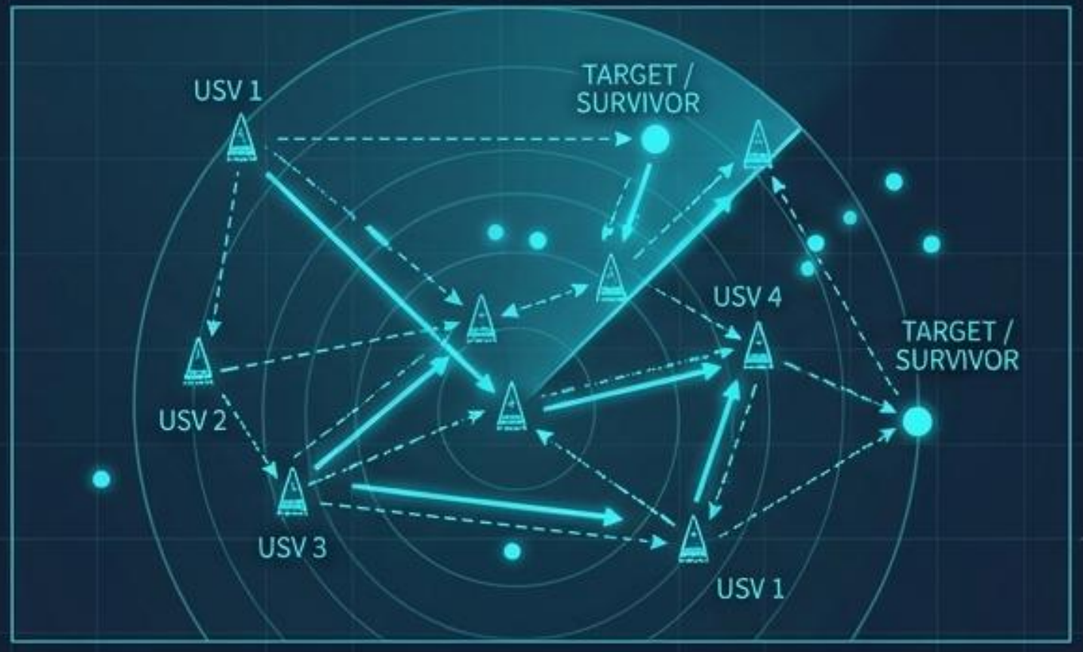
Step 3. Core Logic & Feed-back:
확장 칼만 필터(EKF)와 경로 계획 알고리즘이 제어 값을 산출하여 가상의 선체를 다시 기동시킴.

Closed-Loop Feedback

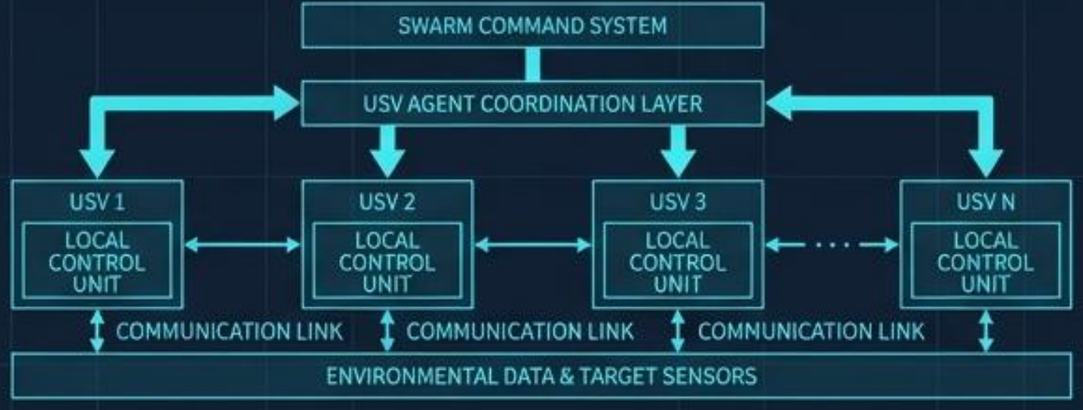
이 완벽한 시뮬레이션 루프를 통해
실제 기체 제작 전, 어떤 악천후 조건에서도
알고리즘을 무한히 안전하게 검증할 수 있습니다.

NotebookLM

TACTICAL SWARM CONTROL INTERFACE



SWARM BEHAVIOR & COMMAND HIERARCHY



다중 에이전트 군집 제어 (Swarm Robotics)

- 단일 지점 수색의 한계를 극복하기 위한 다중 노드 Leader-Follower 및 Virtual Structure 대형 기법 기초 설계

MARL(Multi-Agent Reinforcement Learning) 기초 환경

- Unity ML-Agents 연동을 통한 로봇의 행동(Action) 및 관측(Observation) 공간 정의.
- 다수의 조난자 발생 시 개별 로봇이 타겟을 스스로 배분하는 동적 임무 할당(Dynamic Task Allocation) 보상 함수 초안 설계 완료.

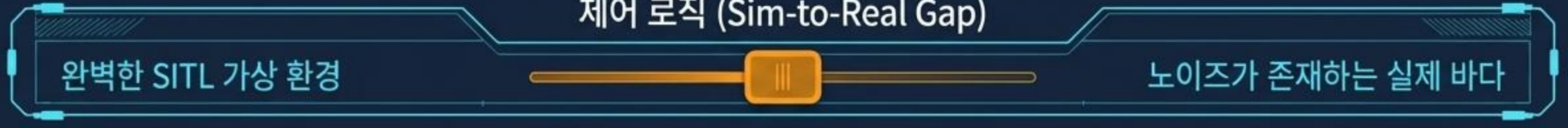
NotebookLM

현재의 한계와 트레이드오프 고민 (Current Challenges & Trade-offs)

기계 설계 (Mechanism)

시저 링크의 빠른 전개와 하중 지지 사이의 최적 타협점(Sweet spot) 탐색 중.

제어 로직 (Sim-to-Real Gap)



가상 환경에서 도출된 제어 로직이 실제 수조 및 해양 환경에서도 100% 동일하게 작등할 것인가에 대한 검증.

연산 자원 (Edge Computing Limits)

Jetson Nano 환경에서 무거운 지연 없이 실시간으로 처리하기 위한 S/W 경량화 과제.

NotebookLM

NEXT MILESTONES: THE ROADMAP TO REALITY

Phase 1. 물리적 검증 (Physical Prototype)

상세 파라메트릭 CAD 모델 기반 축소 모형 3D 프린팅 제작 및 방수/내구성 1차 검증.

Phase 2. 수조 데이터 연동 (Sim-to-Real Tuning)

실제 수조 테스트의 물리적 거동 데이터를 추출하여 Unity 시뮬레이터에 역산 적용(Domain Randomization).

Phase 3. 군집 학습 고도화 (Advanced MARL)

최적화된 통신망을 바탕으로 복수 USV 간의 협력적 장애물 회피 및 임무 분담 로직 강화.

우리의 디지털 도면은 이제 실제 바다를 향합니다.

NotebookLM