Check for updates

JFMSE, 38(1), pp. 215~221, 2026.
수산해양교육연구, 제38권 제1호, 통권139호, 2026.
www.ksfme.or.kr
https://doi.org/10.13000/JFMSE.2026.2.38.1.215

해류 환경에서 수중 드론의 정점 유지를 위한 예측 기반 통합 제어 시스템 개발에 관한 연구

노창균† · 차상현* · 노인철**
†,*목포해양대학교(교수) · **마이크론드론코리아(대표)

A Study on the Development of a Predictive-Based Integrated Control System for Station-Keeping of Underwater Drones in Current Environments

Chang-Kyun NOH† · Sang-Hyun CHA* · In-Cheol NOH**
†,*Mokpo National Maritime University(professor) · **Microdrone Korea(ceo)

Abstract

This study proposes a predictive integrated control system that combines sensor fusion based on Invariant Extended Kalman Filter(InEKF) and Model Predictive Control(MPC). To verify the performance of the proposed system, a MATLAB/Simulink-based six-degree-of-freedom simulator was constructed and evaluated over six scenarios(current 0.3 to 0.8 m/s, depth 50 to 100 m, uniform/time change/turbulent current). The proposed framework integrates sensor fusion, predictive control, and disturbance compensation, resulting in a 77.6% improvement in positioning accuracy and a 44.1% reduction in energy consumption compared to PID control. It has high commercialization potential using commercial sensors and general-purpose hardware, and can be applied to various marine applications such as submarine cable inspection, marine observatory maintenance, and underwater archaeological investigation.

Key words : Underwater drones, Model predictive control, Extended kalman filter, Ocean current compensation, Disturbance observation

I. 서 론

수중 드론(AUV)은 해양 조사, 항만 및 해운물류, 수중 구조물 검사, 자원 탐사 등 다양한 해양 작업에서 필수적인 역할을 수행한다(Smallwood and Whitcomb, 2004; Shen et al., 2018). 특히 해저 케이블 검사와 해양 관측소 유지보수와 같은 작업은 장시간 정밀 제어를 요구하며, 해류와 파도와 같은 외란 환경에서도 목표 위치를 안정적으로 유지하는 정점 유지(station-keeping) 능력이 중요하다(Caharija et al., 2016; Evans et al., 2003). 최근 개입형 AUV의 해저 패널 도킹과 밸브 조작 성공 사례는 정점 유지 기술의 중요성을 더욱 부각시키고 있다(Lane et al., 1997; Fossen, 2011).

선행연구를 살펴보면, 수중 드론의 정점 유지 기술은 선박의 동적 위치 제어(dynamic positioning)에서 발전하였다(Sørensen, 2011). Smallwood and Whitcomb(2004)은 6자유도 모델 기반 제어 기법을 제안했으나 완전 구동 시스템에 한정되는 한계가 있었다. 이후 저구동 AUV에 적용하기 위해

† Corresponding author : *개인정보 표시제한, baplie@naver.com
※ 이 논문은 2025년도 교육부 및 전라남도의 재원으로 전라남도RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다.(2025-RISE-14-002)

Caharija et al.(2016)은 시선 유도(line-of-sight guidance)와 백스테핑 제어를 결합한 방법을 제시하였다. 그러나 PID 및 백스테핑 기반의 피드백 제어는 제약 조건을 명시적으로 처리하기 어렵고 외란을 사전에 고려하지 못한다는 한계가 있다.

수중 환경에서는 GPS 사용이 제한되므로 IMU, DVL, 압력 센서, USBL 등을 융합한 상태 추정이 필수적이다(Paull et al., 2014; Kinsey, 2006). 그러나 센서의 낮은 갱신율과 누적 오차로 인해 장시간 운용 시 추정 정확도가 저하되는 문제가 보고되었다. 전통적인 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter, EKF)는 선형화 과정에서 발생하는 오차로 인해 필터 발산 가능성이 존재한다(Barrau et al., 2017; Bourmaud et al., 2013). 이러한 문제를 해결하기 위해 Lie 이론 기반의 Invariant Extended Kalman Filter(InEKF)가 제안되었으며, 상태 독립적인 오차 동역학을 통해 보다 안정적인 추정을 가능하게 한다(Potokar et al., 2021). 또한 Kang et al.(2014)은 센서 미정렬 보상을 통해 추정 성능을 향상시켰고, Wang et al.(2024)은 2-frame 군 필터링 기법을 제시하였다. 그러나 기존 연구는 상태 추정 정확도 향상에 주로 초점을 맞추고 있어, 추정된 외란 정보를 제어기에 통합하여 활용하는 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

모델 예측 제어(Model Predictive Control, MPC)는 미래 상태를 예측하여 제약 조건을 명시적으로 처리할 수 있어 자율 수중 시스템에 적합한 제어 기법으로 평가된다(Qin and Badgwell, 2003). Shen et al.(2018)은 Lyapunov 기반 MPC를 통해 안정성을 보장하였으며, Yan et al.(2020)는 이벤트 기반 재계획 기법을 제안하였다. 또한 Liu et al.(2024)는 물리 기반 신경망을 활용하여 계산 효율성을 향상시키는 방법을 제시하였다. 그럼에도 불구하고 온라인 최적화에 따른 계산 부담은 여전히 실시간 적용의 주요한 제약 요인으로 지적되고 있다.

한편 해류와 같은 지속적인 외란 환경에서는 단순 피드백 제어만으로 안정적인 정점 유지를 달성하기 어렵다. 강한 해류에서는 추진기 포화가 발생할 수 있으며, 시간 지연 제어는 고주파 잡음에 취약하고 외란 관측기 기반 접근법은 모델 불확실성에 민감한 것으로 보고되었다(Kim et al., 2016; Fossen et al., 2011). 따라서 외란을 사전에 추정하고 이를 제어 입력에 반영하는 피드포워드 기반 접근이 요구된다.

종합하면, 기존 연구는 정점 유지 제어, 상태 추정, 예측 제어 분야에서 각각 발전을 이루었으나, 해류와 같은 외란을 포함한 상태를 정밀하게 추정하고 이를 예측 제어와 통합하여 활용한 연구는 아직 제한적이다. 따라서 상태 추정과 예측 제어를 통합하고, 추정된 해류 정보를 제어 입력에 반영하는 새로운 접근이 필요하다.

이에 본 연구에서는 해류 환경에서 수중 드론의 정점 유지 성능을 향상시키기 위해 Invariant EKF 기반 상태 추정과 모델 예측 제어를 결합한 예측 기반 통합 제어 시스템을 제안한다. 본 연구의 주요 기여는 다음과 같다. 첫째, 해류를 포함한 12차원 상태를 동시에 추정할 수 있는 센서 융합 구조를 설계하였다. 둘째, 추정된 해류 정보를 MPC의 예측 모델에 피드포워드 방식으로 반영하는 통합 제어 프레임워크를 제시하였다. 셋째, 추진기 제약 조건을 고려한 예측 제어 구조를 통해 실시간 적용 가능성을 검증하였다.

Ⅱ. 연구 방법

1. 시스템 아키텍처

본 연구에서는 해류 환경에서의 안정적인 정점 유지를 위해 상태 추정, 예측 제어, 추진기 제어로 구성된 3계층 통합 제어 구조를 설계하였다.

하드웨어는 NVIDIA Jetson Xavier NX(21 TOPS), Teledyne DVL(0.2 cm/s), VectorNav IMU(100 Hz), Keller 압력 센서(0.01%), Sonardyne USBL(1 Hz)로 구성하였다(Lane et al., 1997). 추

진 시스템은 Blue Robotics T200 6개(최대5.1 kgf)로 수평 4개(45도 배치)와 수직 2개로 6자유도 제어 방식으로 제시하였다.

본 센서 구성은 수중 환경에서 발생하는 개별 센서의 한계를 상호 보완하도록 설계되었다. IMU는 높은 갱신율을 제공하지만 장시간 적분 시 드리프트가 누적되는 문제가 있으며, DVL은 상대 속도 추정에 강점을 가지나 해저 지형 및 고도에 영향을 받는다. 압력 센서는 안정적인 수심 정보를 제공하지만 수평 위치 추정에는 활용이 제한적이다. 따라서 다중 센서 융합을 통해 상태 추정의 강건성을 확보하고자 하였다.

또한 제어 주기와 센서 갱신율은 Nyquist 안정 조건과 실시간 제어 요구사항을 고려하여 설정하였다. 이는 급격한 해류 변화에도 안정적인 상태 추정과 제어 입력 생성을 가능하게 한다.

이러한 구조는 자율 수중 시스템 설계에서 널리 채택되는 다중 센서 기반 상태 추정 프레임워크와 일치한다.

본 연구의 전체 시스템 구성도 AUV의 센서, 제어 컴퓨터, 추진기 및 베이스 스테이션 간 통신 구조는 [Fig. 1]과 같다.

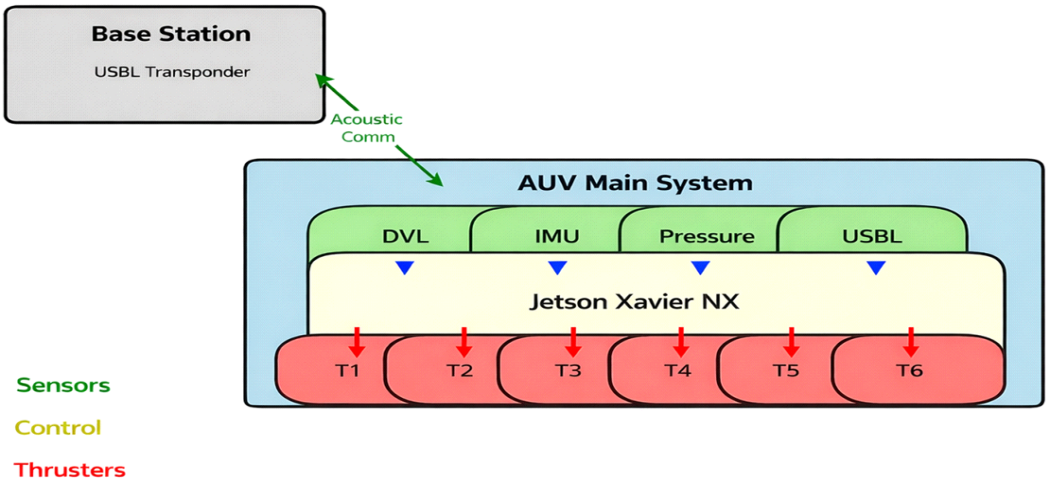
2. Invariant EKF 기반 센서 융합

SE(3) × R^3에서 상태 x = [R, p, v, ω, v_c]를 정의했다(R: 회전, p: 위치, v: 속도, ω: 각속도, v_c: 해류)(Potokar et al., 2021; Barrau et al., 2017). 예측은 IMU로 전파하고, DVL, 압력, USBL로 보정하였다(Wang et al., 2024). Invariant EKF는 오차 동역학이 상태 독립적이어서 장시간 운용에서 일관된 성능을 유지하였다(Barrau et al., 2017; Bourmaud et al, 2013). InEKF의 오차 상태는 $\delta x = [\delta\theta, \delta p, \delta v, \delta\omega, \delta v_c]$로 정의하였으며, 프로세스 잡음 공분산 Q는 IMU 특성을 기반으로 대각 행렬로 설정하였으며, IMU는 100Hz, DVL은 5Hz, USBL은 1Hz로 업데이트 하였다.

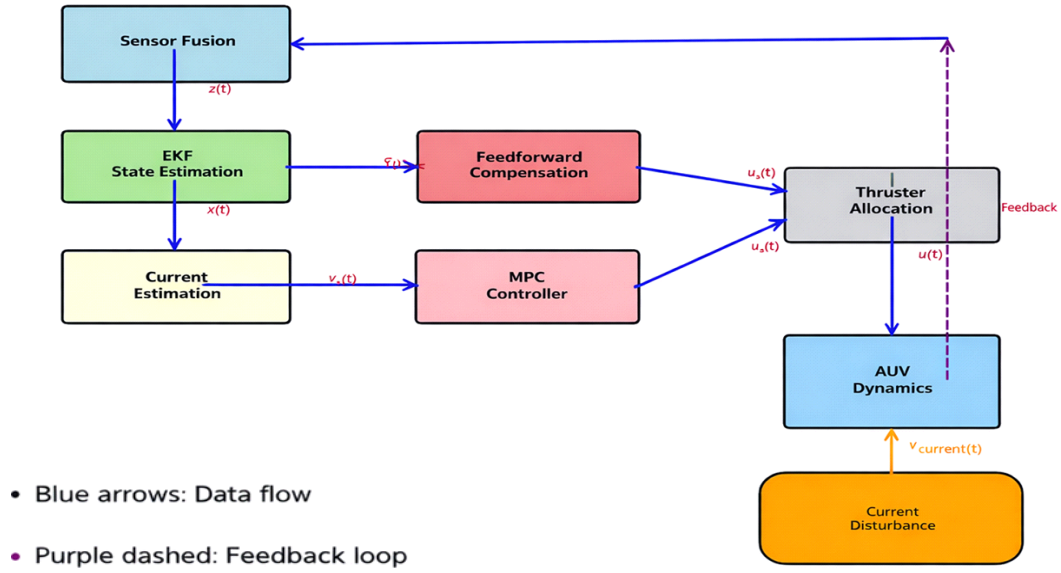
본제어 아키텍처, 센서 융합, EKF 추정, 해류 보상, MPC 최적화, 추진기 할당의 5단계 제어 흐름 구성도는 [Fig. 2]와 같다.

3. 예측 제어기 설계

예측 제어기는 2초 예측(N=20, dt=0.1s)에서 $J = \Sigma[\|p_k - p_d\|^2_Q + \|v_k\|^2_R + \|u_k\|^2_S + \|\Delta u_k\|^2_T]$를 최적화하였다(Qin et al, 2003). 예측



[Fig. 1] System Architecture.



[Fig. 2] Control Architecture.

모델 x_{k+1} = A·x_k + B·u_k + E·v_c에서 해류 피드포워드 u_ff = -B^+·E·v_c를 계산하였다(Loria et al, 2016). 제약은 추력(-150 ~ 230 N), 변화율(50 N/s), 속도(1.5 m/s), 안전 영역(5m)이다(Shen et al, 2018; Diehl et al., 2002).

4. 해류 보상 전략

피드포워드와 피드백 2단계로 보상한다. 피드포워드는 EKF 추정 해류를 예측 모델에 반영하여 정상 상태 표류를 상쇄하였다(Loria et al, 2016). 피드백은 예측 제어기가 잔여 오차를 제거한다. 시뮬레이션 분석 결과, 해류 추정 오차가 약 10% 이하로 유지될 경우 위치 오차가 50% 이상 감소하는 경향이 확인되었다

Ⅲ. 연구 결과

1. 시뮬레이션 환경

MATLAB/Simulink R2023b에서 Fossen 6자유도 모델로 구현하였다(Lane et al, 1997). 6개 시나리오의 S1(0.3 m/s, 50m), S2(0.5 m/s, 75m), S3(0.8 m/s, 100m), S4(시변 0.3~0.6 m/s), S5(난류 0.4 m/s RMS), S6(복합 0.5~0.7 m/s)를 300초간 수행하였다. 센서 잡음은 IMU(0.01 m/s²/√Hz), DVL(0.2 cm/s), USBL(거리의 0.1%)을 추가했다.

2. 정량적 성능 지표

지표는 평균 위치 오차(MPE), 정착 시간(T_s), 에너지(E), 성공률(SR)이다. 6개 시나리오 성능 지표 비교 결과 값은 <Table 1>과 같다.

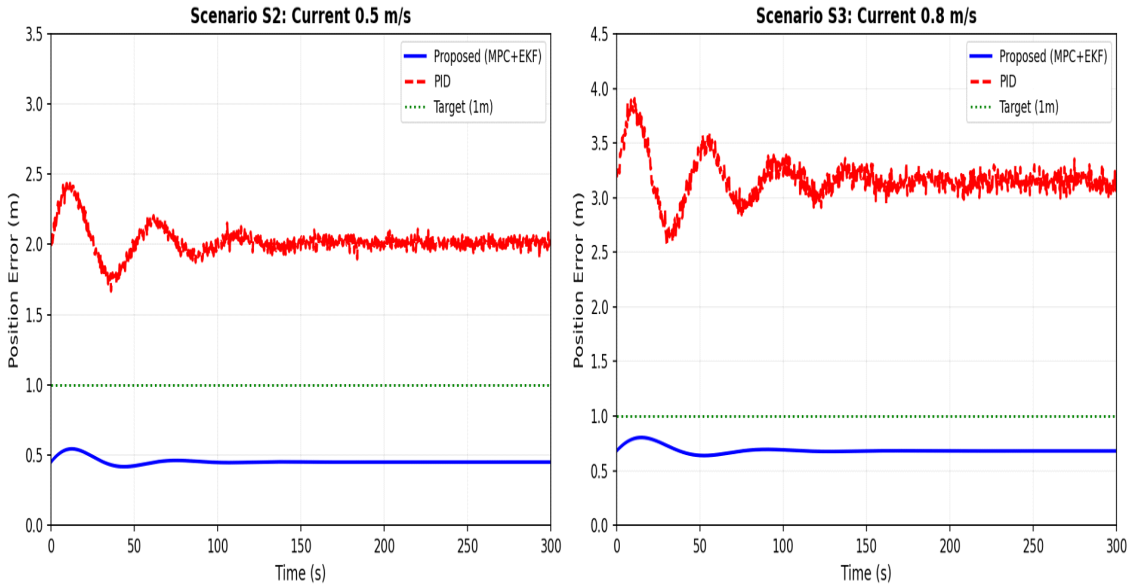
3. 결과 분석

제안 방법은 모든 시나리오에서 PID를 상회하였다. 평균 위치 오차는 PID 대비 77.6% 개선(0.50m vs 2.26m), 정착 시간은 66.4% 단축(42s vs 125s), 에너지는 44.1% 절감(271 kJ vs 485 kJ)을 달성했다.

[Fig. 3]은 시나리오 시뮬레이션 결과 S2(0.5 m/s)와 S3(0.8 m/s) 시나리오에서 제안 방법과 PID의 위치 오차 시계열을 보여주고 있다.

<Table 1> Comparison of Performance Indicators by Scenario

Characteristic	S1	S2	S3	S4	S5	S6
MPE (m) - Proposal	0.32	0.45	0.68	0.41	0.52	0.61
MPE (m) - PID	1.42	2.01	3.15	1.85	2.34	2.78
T_s (s) - Proposal	28	35	52	38	44	56
T_s (s) - PID	98	135	>300	142	168	>300
E (kJ) - Proposal	186	238	351	245	287	318
E (kJ) - PID	342	458	612	425	503	571
SR (%) - Proposal	100	100	98	100	100	97



[Fig. 3] Simulation Results.

Ⅳ. 결 론

1. 연구요약

본 연구에서는 해류 환경에서 수중 드론의 정점 유지 성능 향상을 위해 Invariant EKF 기반 상태 추정과 모델 예측 제어를 통합한 예측 기반 제어 시스템을 제안하였다. 시뮬레이션 결과, 제안한 방법은 기존 PID 제어 대비 위치 오차를 77.6% 감소시키고 에너지 소비를 44.1% 절감하는 성능을 보였으며, 평균 25.1 ms의 연산 시간으로 실시간 적용 가능성을 확인하였다.

이러한 결과는 외란을 사전에 추정하고 이를 제어 입력에 반영하는 통합 구조가 기존 피드백 제어 대비 정점 유지 안정성과 제어 효율성을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 시사한다. 특히 상태 추정과 예측 제어를 실시간으로 통합 구현했다는 점에서 자율 수중 시스템 설계에 실질적인 기여를 제공한다. 또한 상용 센서와 범용 임베디드 하드웨어를 기반으로 시스템을 구성함으로써 실해역 적용 가능성을 확인하였다.

본 연구는 시뮬레이션 환경에서 수행되었으므로 실제 해양 환경에서의 성능 검증이 필요하다.

또한 센서 잡음을 가우시안으로 가정하고 해류 모델을 단순화하였다는 한계가 있다. 향후 연구에서는 실해역 실험을 통해 다양한 외란 조건에서의 강건성을 추가적으로 검증할 예정이다.

2. 한계 및 향후 연구방향

본 연구의 한계는 시뮬레이션 기반, 센서 잡음 가우시안 가정, 해류가 완만하게 변화한다고 가정 하였으며 추진기 비선형 단순화, 장기 에너지 관리를 포함하지 않았다.

향후 연구 방향으로는 첫째, 다중 AUV 협력 제어이다. 분산 MPC(Distributed MPC)를 사용하여 여러 대의 AUV가 협력하여 넓은 해역을 효율적으로 탐사하거나, 항만 및 해운 물류 부문,대형 구조물을 공동으로 검사할 수 있을 것이다.

둘째, 학습 기반 제어와의 융합이다. 강화학습(Reinforcement Learning)을 MPC와 결합하여 장기 경험으로부터 제어 전략을 개선하고, 불확실한 환경에서의 적응력을 향상시킬 수 있을 것이다.

셋째, 인간-로봇 협업이다. 자율 제어와 원격 조종을 유연하게 전환하는 혼합 자율성(mixed autonomy) 시스템을 통해 복잡한 작업에서 인간 전문가의 판단을 활용할 수 있다.

넷째, 추정된 해류 속도를 MPC의 예측 모델에 피드포워드 방식으로 반영하여 외란을 능동적으로 상쇄하는 통합 제어 구조를 구축함으로써 사후 대응(feedback)이 아닌 사전 예방(feedforward) 방식으로 외란을 처리하여 제어 성능을 크게 향상시켰음을 알 수가 있다.

향후 실해역 실험, 강건 센서 융합, 적응형 예측 제어, 다중 AUV 협력, 에너지 최적 운용, 머신러닝 통합이 필요하다.

References

Alessandri A, Caccia M, and Veruggio G(1999). Fault detection of actuator faults in unmanned underwater vehicles, Control Engineering Practice, 7(3), 357~368.
https://doi.org/10.1016/S0967-0661(98)00169-5

Barrau A and Bonnabel S(2017). The invariant extended Kalman filter as a stable observer, IEEE Transactions on Automatic Control, 62(4), 1797~1812.
https://doi.org/10.1109/TAC.2016.2594085

Bourmaud A, Mégret R, Audrey G and Berthoumieu Y(2013). Discrete extended Kalman filter on Lie groups, 21st European Signal Processing Conference(EUSIPCO 2013), 1~5.

Caharija W, Pettersen KY, Bibuli M, Calado P, Zereik E and Braga J(2016). Integral line-of-sight guidance and control of underactuated marine vehicles(Theory, simulations, and experiments), IEEE Transactions on Control Systems Technology, 24(5), 1623~1642.
https://doi.org/10.1109/TCST.2015.2504838

Diehl M, Bock HG, Schlöder JP, Findeisen R, Nagy Z and Allgöwer F(2002). Real-time optimization and nonlinear model predictive control of processes governed by differential-algebraic equations, Journal of Process Control, 12(4), 577~585.
https://doi.org/10.1016/S0959-1524(01)00023-3

Evans J, Redmond P, Plakas C, Hamilton K and Lane D(2003). Autonomous docking for Intervention-AUVs using sonar and video-based real-time 3D pose estimation, OCEANS 2003(IEEE Xplore), 4, 2201~2210.
https://doi.org/10.1109/OCEANS.2003.178243

Fossen TI(2011). Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, John Wiley & Sons Chichester.

Kang L, Ye LY and Song KC(2014). A fast in-situ SINS and Doppler sensor calibration algorithm for underwater vehicle navigation, IEICE Electronics, 11(23), 1~11.
https://doi.org/10.1587/elex.11.20140994

Kim JY, Joe H and Yu SC(2016). Time Delay Controller Design for Position Control of Autonomous Underwater Vehicle Under Disturbances, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 63(2), 1052~1061.
https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2477270

Kinsey JC, Eustice RM and Whitcomb LL(2006). A

survey of underwater vehicle navigation(Recent advances and new challenges), IFAC Proceedings Volumes, 39(12), 1~6.

Lane DM, Bartolini G, Cannata G, Casalino G, Davies JBC and Veruggio G(1997). Advanced manipulation for deep underwater sampling(the AMADEUS research project), IEEE Robotics & Automation Magazine, 4(4), 34~45. https://doi.org/10.1109/CCA.1998.721621

Liu T, Zhao J, Huang J, Li Z, Xu L and Zhao B(2024). Research on model predictive control of autonomous underwater vehicle based on physics informed neural network modeling, Ocean Engineering, 304, 117844. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117844

Loria A, Dasdemir J and Jarquin NA(2016). Leader–Follower Formation and Tracking Control of Mobile Robots Along Straight Paths, IEEE Transactions on Control Technology, 24(2), 727~732. https://doi.org/10.1109/TCST.2015.2437328

Paull L, Saeedi S, Seto M and Li H(2014). AUV navigation and localization(A review), IEEE Journal of Oceanic Engineering, 39(1), 131~149. https://doi.org/10.1109/JOE.2013.2278891

Potokar RE, Norman K and Mangelson JG(2021). Invariant Extended Kalman Filtering for Underwater Navigation, IEEE Robotics and Automation Letters, 6(3), 5792~5799. https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3085167

Qin SJ and Badgwell TA(2003). A survey of industrial model predictive control technology, Control Engineering Practice, 11(7), 733~764. https://doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00186-7

Shen C, Shi Y and Buckham BJ(2018). Trajectory tracking control of an autonomous underwater vehicle using Lyapunov-based model predictive control, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65(7), 5796~5805. https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2779442

Smallwood DA and Whitcomb LL(2004). Model-based dynamic positioning of underwater robotic vehicles(theory and experiment), IEEE Journal of Oceanic Engineering, 29(1), 169~186. https://doi.org/10.1109/JOE.2003.823312

Sørensen AJ(2011). A survey of dynamic positioning control systems, Annual Reviews in Control, 35(1), 123~136. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2011.03.008

Yan Z, Gong P, Zhang W and Wu W(2020). Model predictive control of autonomous underwater vehicles for trajectory tracking with external disturbances, Ocean Engineering, 217, 107884. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107884

Yoerger DR, Bradley AM, Walden BB, Singh H and Bachmayer R(1998). Surveying a subsea lava flow using the Autonomous Benthic Explorer(ABE), International Journal of Systems Science, 29(10), 1031~1044. https://doi.org/10.1080/00207729808929596

• Received : 16 January, 2026
• Revised : 10 February, 2026
• Accepted : 16 February, 2026