



Received: 2024/08/31
Revised: 2024/09/06
Accepted: 2024/09/27
Published: 2024/09/30

***Corresponding Author:**

Hyunseung Kim

Dept. of Battlefield Analysis and Development,
LIG Nex1
333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,
Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea
Tel: +82-31-5179-7272
Fax: +82-31-5179-7086
E-mail: hyunseung.kim2@lignex1.com

Abstract

본 논문에서는 수중자율운동체가 해저지형을 회피하면서 심도 명령을 추종하도록 심도 제어기를 설계하였다. 이때, 한반도 주변 해역에 대한 실제 해저지형 데이터를 적용한 시나리오에 대해서 주행 성능을 분석하였다. 본 논문은 수중자율운동체의 해저지형 회피 및 추종을 통해 주행 효율 극대화를 위한 경로 수립에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

In this paper, we designed a depth controller to enable an underwater autonomous vehicle to follow depth commands while avoiding the seafloor topography. At this time, driving performance was analyzed for a scenario that applied actual underwater topography data for around the Korean Peninsula. The proposed algorithm is expected to be used to establish a route for maximizing driving efficiency through terrain avoidance and tracking for underwater autonomous vehicles.

Keywords

수중 자율 운동체(Underwater Autonomous Vehicle), 지형 추종 알고리즘(Terrain Tracking Algorithm), 심도 제어기(Depth Controller), 해저지형(Seafloor Topography)

수중자율운동체의 해저지형 회피를 위한 지형 추종 알고리즘 연구

Research on Terrain Tracking Algorithm for Seafloor Topography Avoidance of Underwater Autonomous Vehicle

김현승^{1*}, 현철², 이성균², 고진용², 김창환³

¹LIG넥스원 전장분석개발팀 선임연구원

²LIG넥스원 전장분석개발팀 수석연구원

³LIG넥스원 경어뢰-II 체계개발단 1팀 수석연구원

Hyunseung Kim^{1*}, Chul Hyun², Sungkyun Lee², Jinyong Go², Changhwan Kim³

¹Research engineer, Dept. of Battlefield Analysis and Development, LIG Nex1

²Chief research engineer, Dept. of Battlefield Analysis and Development, LIG Nex1

³Chief research engineer, Dept. of Light Weight Torpedo System Development, LIG Nex1

1. 서론

수중운동체가 자율주행하며 해저자원 탐사, 기뢰 탐색 등의 임무를 수행할 때, 운용 가능한 심도 구간 내에서 해저지형을 회피하면서 명령 심도를 추종해야 한다. 적을 피해 은밀하게 주행해야 하는 상황이 발생할 수 있고, 수중운동체는 추진체 소모를 최소화하여 주행 속도를 유지하며 최대한 장시간 주행하는 것이 중요하기 때문이다. 특히 해저지형면에 근접하여 감시정찰 임무를 수행하는 경우, 장애물과의 충돌 문제가 발생할 수 있기 때문에 해저지형의 해저산맥의 중심 위치를 산출하여 일정 심도를 떨어뜨려 효율적으로 주행할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 해저지형을 추종하는 알고리즘을 반영한 수중운동체의 제어기 설계 기법을 연구하고 주어진 시나리오에 따라 주행 성능을 분석하고자 한다.

일반적으로 지형 충돌 문제를 해결하기 위한 지형 추종 알고리즘은 항공기의 고도 유지에 적용되는 알고리즘으로 항공기가 지표로부터 일정 고도를 유지하며 비행하는 데 이용된다[1,2]. 여기에서 기준 궤적은 항공기 전방의 지형 고도를 획득함으로써 생성된다. 이때, 산, 건물 등의 지형 고도와 임무 고도를 고려한 궤적 생성 기술과 생성된 궤적을 안정적으로 추종하기 위한 제어기 설계

가 핵심 기술이다[3]. 항공기 전방은 현재 상태에서부터 예측된 예상 비행 영역 내에서의 항공기 수직면 상에서의 위치, 속도, 자세 정보를 고려하여 계산할 수 있다. 획득한 고도 프로파일로부터 최소 여유고도를 더하여 경로점을 주기적으로 갱신한다[4,5].

이러한 항공기 지형 추종 알고리즘을 기반으로 본 논문에서는 국립해양조사원에서 제공하는 해저지형 수심 데이터를 이용하여 불규칙적으로 다수 존재하는 해저산의 중심 위치를 추출하고, 수중운동체가 이러한 해저지형과 일정 고도를 유지하며 심도 명령을 추종하며 주행하도록 심도 제어를 설계하고 특정 시나리오를 수립 후 분석하였다.

이를 통해 본 연구는 한반도 주변 해역에 대한 실제 해저지형에 대하여 수중자율운동체가 명령 심도를 추종하며 주행하는지 사전에 분석하고, 주행시간과 배터리 효율을 최대화하는 경로 수립에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 한반도 해저지형

국립해양조사원에서 제공하는 위도 31~42도, 경도 122~135도 구간에 해당하는 한반도 해역의 해저지형은 Fig. 1에 도시한 바와 같다. 연녹색에서 짙은 청색으로 갈수록 수심이 깊어지고, 해저산은 울릉도와 독도 인근에 많이 분포함을 확인할 수 있다. 수중자율운동체의 지형 추종 알고리즘 검증 및 주행 시나리오를 수립하기 위하여 동해 구역의 해저지형을 추출한 데이터는 Fig. 2에 도시하였다. 동해 해역의 위도 38.6~40.6도, 경도 128.5~131.5도 구간에 해당하고, 평균 수심은 약 3 km이며 다수의 완만한 해저산이 불규칙하게 분포한 것이 특징이다.

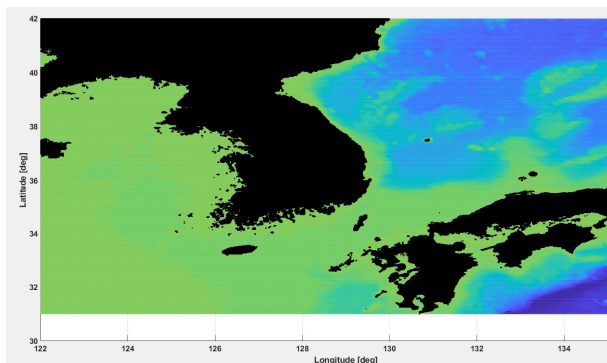


Fig. 1. Depth data of Korean Peninsula

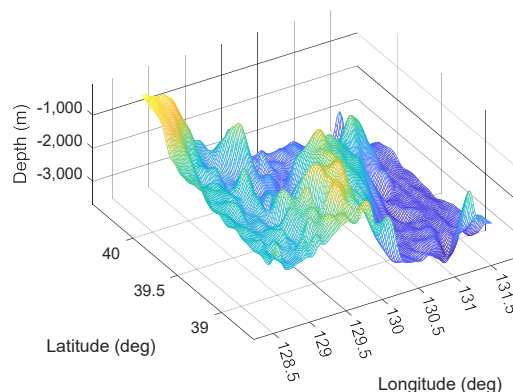


Fig. 2. Depth data of Korea East Sea

3. 지형 추종 알고리즘

지형 추종 알고리즘은 수중운동체가 해저지형 중에서도 큰 장애 요소인 해저산으로부터 일정 고도를 유지하며 주행하기 위해 필요한 알고리즘으로 아래와 같이 설계하였다.

수중운동체의 위치, 속도, 주행 방위가 주어졌을 때, 현재 해저산 위치를 기준으로 다음 시점에서의 거리에 해당하는 수심과 비교하여 심도의 상승, 유지, 하강 여부를 판단할 수 있다[6,7]. 이때, 해저산의 기울기가 급변하는 구간에 대해 심도 명령이 주어지면 제어타각의 구동기 반응 속도가 추종하지 못하는 상황이 발생한다. 따라서, 현재 시점 t_i 를 기준으로 t_{i+1} 과 t_{i+2} , 즉 시간 간격 2번에 해당하는 해저지형 수심 데이터를 이용해 지형 추종 알고리즘에 반영하였다.

수중 운동체가 등속운동을 한다고 가정하면, 시점 t_i 에서의 수중 운동체의 심도 z_i 가 주어졌을 때, 주행 속도 v_i 로 Δt 만큼 주행한 지점 x_{i+1} 과 $2\Delta t$ 만큼 주행한 지점 x_{i+2} 은 식 (1)에서 산출된다. 여기에서 Δt 는 식 (2)와 같이 정의되며 시뮬레이션 설정값으로 고정한다. x_{i+1} , x_{i+2} 각 지점에서의 수심 데이터 z_{i+1} , z_{i+2} 의 차이를 식 (3)으로 계산하여 심도 명령 산출에 활용하는데, Fig. 3에 도시한 바와 같이 현재 위치를 기준으로 해저지형 수심이 상승하다 하강하는 경우와 Fig. 4에 도시한 바와 같이 해저지형 수심이 연이어 상승하는 경우와 같이 각 시점에서의 수심 데이터 변화량의 방향에 따라 나누어 식 (4)와 같이 심도 명령을 산출하였다.

$$x_{i+1} = v_i \Delta t \quad (1a)$$

$$x_{i+2} = 2v_i \Delta t \tag{1b}$$

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i = t_{i+2} - t_{i+1} = const \tag{2}$$

$$\Delta D_1 = z_{i+1} - z_i \tag{3a}$$

$$\Delta D_2 = z_{i+2} - z_i \tag{3b}$$

$$D_{cmd} = \begin{cases} \Delta D_1 & (\Delta D_1 > \Delta D_2) \\ \Delta D_2 & (\Delta D_1 < \Delta D_2) \end{cases} \tag{4}$$

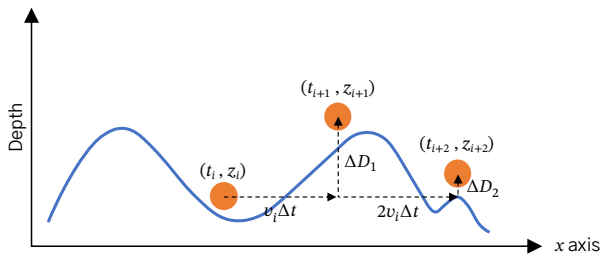


Fig. 3. Case that direction of depth change is different

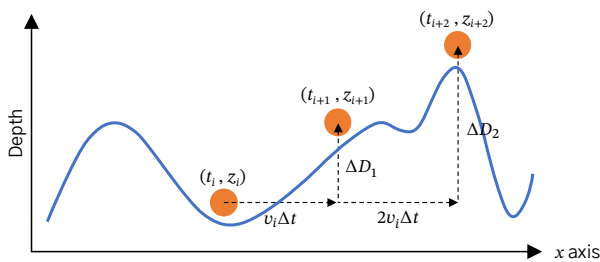


Fig. 4. Case that direction of depth change is identical

4. 선형 운동 모델 및 제어기 설계

수중 운동체가 해저산과 충돌하지 않고 추종하면서도 시나리오에 따라 주어진 궤적을 잘 추종하기 위한 심도제어를 설계하였다. 이를 위해 종축 운동에 대해 식 (5) - 식 (10)과 같이 선형 운동 모델을 적용하였다.

$$O_{long} \dot{X}_{long} = P_{long} X_{long} + Q_{long} u_{long} \tag{5}$$

$$O_{long} = \begin{bmatrix} m - Z_{\dot{w}} & -Z_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ -M_{\dot{w}} & I_{yy} - M_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$P_{long} = \begin{bmatrix} Z_w & Z_q + mV_{tot} & -(W - B) \sin \theta_0 & 0 \\ M_w & M_q & -Bb_x \sin \theta_0 + Bb_z \cos \theta_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -V_{tot} & 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$Q_{long} = \begin{bmatrix} Z_{\delta_e} \\ M_{\delta_e} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$X_{long} = \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$u_{long} = \delta_e \tag{10}$$

여기서, X_{long} : 운동방정식으로부터 산출하는 운동 변수,
 $Z_{\dot{w}}, Z_{\dot{q}}, M_{\dot{w}}, M_{\dot{q}}$: 수중운동체의 형상 및 운동 특성을 반영한 선형 유체력 계수,
 m : 질량 (단위: kg),
 W : 중력 (= mg , 단위: N),
 B : 부력 (단위: N),
 V_{tot} : 주행속력 (단위: m/s),
 I_{yy} : y축에 대한 관성량 (단위: kgm^2),
 b_x, b_z : 무게중심과 부력중심 간의 x와 z 방향 거리 (단위: m),
 θ_0 : 정상 상태에서의 받음각 (단위: rad),
 w : 동체좌표계 기준 수직면 속도,
 q : 수직면 각속도,
 θ : 수직면 자세,
 z : 심도.

3장에서 기술한 지형 추종 알고리즘을 검증하기 위해서는 운동체의 제어가 설계되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 식 (11)을 이용하여 심도 명령 추종을 위한 수직타각 δ_e 제어를 PD 제어기 형태로 설계하였다.

$$\delta_e = K_z(z_{cmd} - z) + K_p(\theta_{cmd} - \theta) + K_d q \tag{11}$$

여기서, δ_e : 수직타각 입력,
 z_{cmd} : 목표 심도값,
 z : 현재 심도값,
 θ_{cmd} : 목표 피치각도,
 θ : 현재 피치각도.

피치각도와 피치각속도는 PD 제어기로 설계하였

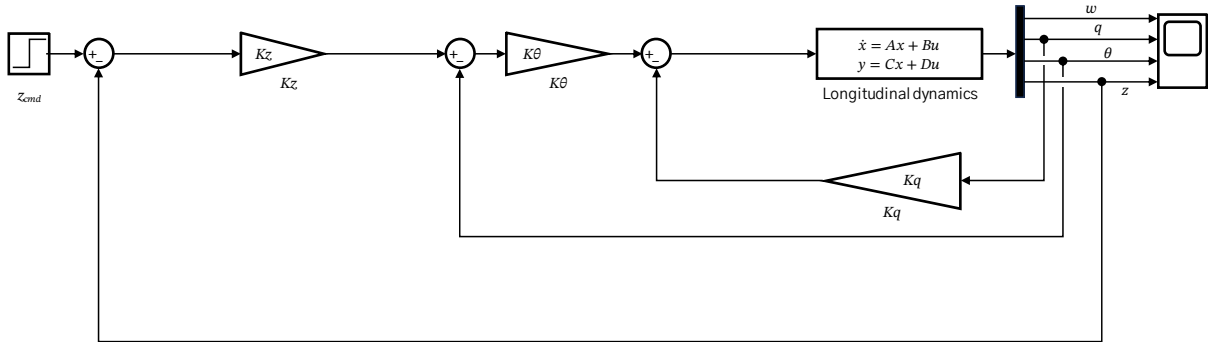


Fig. 5. Dynamics model and controller design for vertical axis

고, 심도 제어는 AUV의 피치 방향 운동으로부터 심도 변화가 만들어지기 때문에 θ 는 제어 입력에 대해 빠르게 반응하게 설계하였다. 이때 θ_{cmd} 는 자세 안정화를 위해 0으로 설정하였다. 다음으로 Fig. 5와 같이 MATLAB Simulink를 이용하여 게인(gain) K_p, K_d 를 설정하였다.

5. 해저지형 회피 및 추종 성능 분석

4장에서 기술한 운동 모델을 기반으로 지형 추종 알고리즘에 대한 분석 및 검증은 위해 Fig. 6에 도시한 바와 같이 시나리오를 수립하였다. 이때, 수중 운동체의 횡축 제어는 반영하지 않으므로 한 방향에 해당하는 해저지형을 기준으로 삼았고, 시나리오 입력 변수는 Table 1에 기술하였다.

3장에서 기술한 지형 추종 알고리즘을 적용하여 Fig. 6의 시나리오에 대해 수중 운동체의 심도 추종 성능을 분석한 결과는 Fig. 7에 도시한 바와 같다.

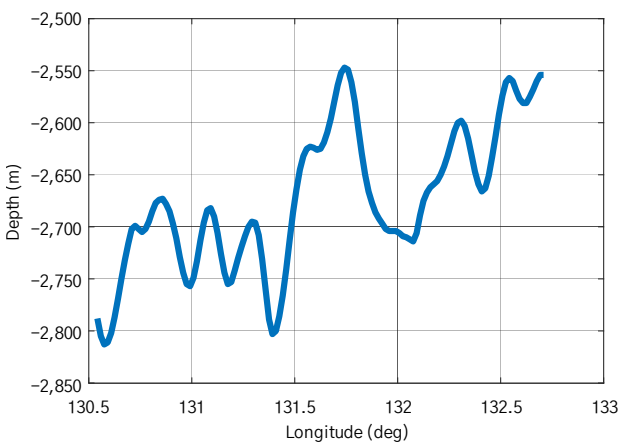


Fig. 6. Scenario for terrain tracking algorithm analysis and verification

Table 1. Scenario parameters for terrain tracking algorithm analysis and verification

Parameter	Value	Unit	Description
$[x, y, z]$	$[0, 0, 2780]$	m	Position for NED axis
V_{tot}	2	m/s	Speed
Δt	0.1	sec	Simulation time step
$[\phi \theta \varphi]$	$[0, 0, 0]$	rad	Attitude

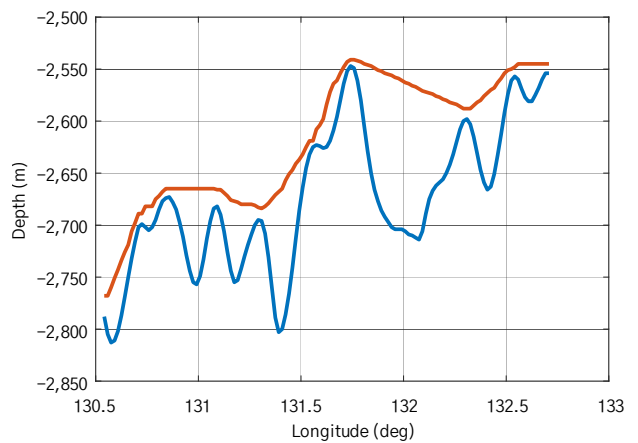


Fig. 7. Result of terrain tracking algorithm analysis and verification

해저지형 심도에 대해 충돌 가능성이 있기 때문에 10 m 이상 고도 차이를 두고 주행하도록 설정하였고, 해저지형의 기울기를 반영하여 효율적인 제어가 이루어지도록 하였다. 경도 131.5~132도 부근에서 심도가 150 m 이상 변화하는 구간에 대해서는 다음 지점인 132.3도 부근의 심도 데이터에 맞추어 주행하는 특징을 보였다. 이는 배터리 효율을 극대화하여 장시간 주행하기 위한 것으로 본 연구 목표에 맞게 알고리즘이 설계된 것을 검증할 수 있었다.

6. 결론

수중자율운동체가 주행할 때, 해저산과 같은 특정 장애물을 회피하여 심도를 추종하는 것이 중요하다. 이 때, 시간당 배터리 소모량을 최소로 하여 효율적으로 주행하는 것이 핵심이다.

이에 따라 본 논문에서는 위도 38도를 기준으로 경도 별 해저지형 수심에 따른 수중자율운동체의 해저지형 추종을 위한 심도 제어를 연구하였다. 이때, 해저지형 데이터는 대한국립해양연구원에서 제공하는 한반도 해역 데이터를 이용하였고, 경도 변화에 따른 해저산의 중심 위치를 산출하여 적용하여 분석하였다.

지형 추종을 위한 심도 명령을 생성하고 선형 운동 모델로부터 제어를 모델링하여 종축에 대한 안정성 및 조종성을 검증하였다. 하지만 추후에 수중 운동체의 횡축 운동에 대한 제어기 설계가 보강되어야 하고, 이를 통해 3차원의 해저지형 상에서 지형을 추종하는지 분석할 필요가 있다.

본 논문의 설계 및 분석을 통해 수중자율운동체의 해저지형 회피 및 추종 성능을 확인함으로써, 명령 심도 추종을 위한 제어기 성능을 주행 전에 사전 분석하고, 주행시간과 배터리 효율을 최대화하는 경로 계획 수립에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] K. W. Jang, K. W. Hong, H. C. Bang, S. I. Lee, J. Y. Jeon and K. H. Song, "Computational Guidance Algorithm for Terrain Following Using Model Predictive Path Integral Method," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 51, No. 11, pp. 769–777, Sep. 2023.
- [2] K. W. Hong, S. J. Kim, H. C. Bang, J. Y. Jeon and W. Y. Choi, "Trajectory Generation Algorithm for Terrain Following based on Terrain Elevation," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 51, No. 6, pp. 391–398, Sep. 2023.
- [3] J. J. Park, S. H. Park, C. K. Ryoo and S. S. Shin, "A Study on the Algorithm for Automatic Generation of Optimal Waypoint with Terrain Avoidance," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 37, No. 11, pp. 1104–1111, Nov. 2009.
- [4] H. J. Lee and S. C. Lee, "A Method to Generate Flight Path using Circular Path for Terrain Following," *KSAS Fall Conference 2022, Korea*, pp. 1431–1432, Oct. 2022.
- [5] I. G. Lim and S. W. Ra, "Waypoints Altitude Planning for Terrain Collision Avoidance and Maneuverability of an Unmanned Aerial Vehicle," *Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol. 16, No. 9, pp. 31–41, Sep. 2018.
- [6] K. H. Lee, J. S. Park, S. B. Lee and C. J. Kim, "Study on Terrain-Following Trajectory Generation Using RRT Algorithm," *KSAS Spring Conference 2023, Korea*, pp. 180–181, Apr. 2023.
- [7] Y. J. Kim, S. S. Park and C. K. Ryoo, "A Slope Based Terrain-Following Trajectory Generation Method Using a Terrain Database," *KSAS Spring Conference 2016, Korea*, pp. 471–473, Apr. 2016.