



Received: 2023/11/30
Revised: 2023/12/08
Accepted: 2023/12/28
Published: 2023/12/31

***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

수중운동체 자율주행 알고리즘 검증을 위한 고해상도 해저지형 생성

Generation of High-resolution Submarine Topography for Verifying Autonomous Driving Algorithm of Underwater Vehicle

김현승^{1*}, 현철², 이성균², 김창환², 고진용¹

¹LIG넥스원 전장분석개발팀 선임연구원

²LIG넥스원 전장분석개발팀 수석연구원

Hyunseung Kim^{1*}, Chul Hyun², Sungkyun Lee², Changhwan Kim², Jinyong Go¹

¹Senior researcher, Dept. of Battlefield Analysis and Development, LIG Nex1

²Principal researcher, Dept. of Battlefield Analysis and Development, LIG Nex1

Abstract

본 논문에서는 1.6 km 거리 간격의 한반도 동해안 인근 해저지형 실제 수심 데이터를 활용하여 거리 1 m 간격의 고해상도 해저지형을 모델링하는 기법을 제안한다. 랜덤워크 방식으로 생성한 기본 해저지형에 실제 수심 데이터에서 산출한 해저산의 개수와 반경, 최대고도를 기반으로 해저산을 생성하여 더하였다. 실제 수심 데이터와 모델링한 해저지형을 비교 검증하였고, 수중운동체의 자율주행 알고리즘 검증을 위한 경로계획 수립에 활용할 것으로 기대된다.

In this paper, we propose a technique to model high resolution seafloor topography with 1 m intervals using actual water depth data near the east coast of the Korea with 1.6 km distance intervals. Basic topography were generated by the random walk method and undersea mountains were created and added based on the number, radius, and maximum height of undersea mountains from actual water depth data. Modeled seafloor topography were compared with actual water depth data and verified, and it is expected to be used to establish a route plan to verify the autonomous driving algorithm of underwater vehicle.

Keywords

자율수중운동체(Autonomous Underwater Vehicle), 경로계획(Route Planning), 해저지형도(Underwater Topology), 디지털 트윈(Digital Twin)

1. 서론

수중운동체는 해양자원 개발, 해양환경 탐사, 기뢰 탐색 등의 임무를 수행하고 이 때 입력된 경로를 따라 자율적으로 주행한다[1-2]. 수중에서 이뤄지는 경로계획과 자율주행에 있어서 핵심은 해저지형을 기반으로 하여 해저산이나 기타 장애물을 회피하는 기술이고, 특히 운동체가 10 knot 이상 고속 기동하면 계획된 경로와 다르게 해저지형과 충돌할 수 있기 때문에 해저지형도의 해상도가 자율주행 알고리즘 성능을 좌우한다고 할 수 있다.

수중운동체 경로계획을 위한 3차원 해저지형을 생성하는 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[3]. 다중 빔 음향측심기 기술의 발달로 수심을 측량하여 생성할 수 있지만 이 방법은 탐지 범위에 한계가 있고[4], 획득한 정보를 비선형 보간법으로 가공하여 해저지형을 생성하기 때문에[5] 실제 지형 특성을 반영하지 못한다. 무엇보다도 한반도 해역 특성상 동·서·남해는 해저 형태가 상이하고, 특히 동해의 경우 경사가 가파르고 지형 기복이 불규칙적이며 해저산이 분포해 있기 때문에 촘촘한 간격의 해저지형을 측량하여 생성하는 것은 물리적 제약이 있다.

따라서 본 논문에서는 한반도 동해안 해역에 대해 보유하고 있는 거리 1.6 km 간격의 실제 해저지형 수심 데이터를 활용하여 위도 및

경도 1 m 간격의 고해상도 해저지형도를 생성하고 실제 데이터와 비교 검증하였다.

2. 해저지형도 실제 수심데이터

보유한 한반도 해역에 대한 해저지형도 수심데이터를 분석하여 고해상도 해저지형도 모델링 시 해저산, 지형 특성 등을 반영할 수 있다.

Fig. 1은 한반도와 주변 해역에 대하여 위도 및 경도 별 실제 고도 및 수심 데이터를 등고선으로 나타낸 것이다. 밝은 청색에서 남색으로 갈수록 수심이 깊어지고, 해저산이 울릉도와 독도를 중심으로 분포한 것을 확인할 수 있다. 보유한 데이터 중에서 위도 60 km, 경도 120 km 거리 내의 동해안 영역에 해당하는 해저지형에 대한 수심 값을 Fig. 2에 도시하였다. 이 구역의 평균 수심은 약 4.5 km이며, 최대 800 m 고도의 해저산이 존재하는 것을 확인할 수 있다.

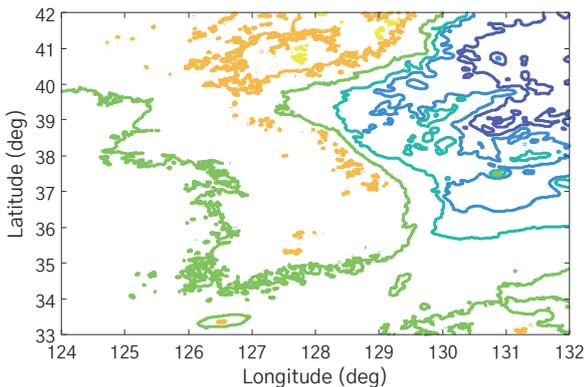


Fig. 1. Height and depth data of Korean Peninsula

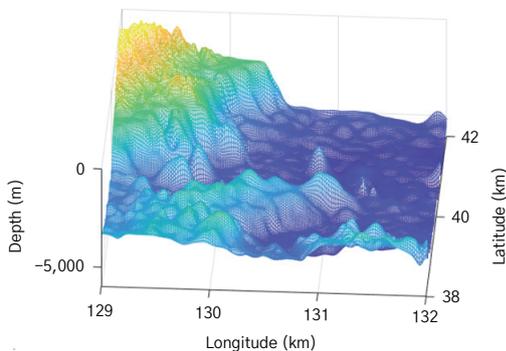


Fig. 2. Water depth data of East Coast of Korea

Fig. 3는 군사분계선과 인접한 고성군 인근 해역만 확대해서 도시한 것이다. 해저지형이 완만한 것으로

보이지만 이는 약 1.6 km 거리 간격에 따른 수심 데이터를 나타낸 것으로 저해상도이기 때문에 누락된 지형이 있을 수 있고, 나아가 최대 속도가 약 10 knot 정도인 수중운동체의 자율주행 경로계획 시 문제가 발생할 여지가 있다.

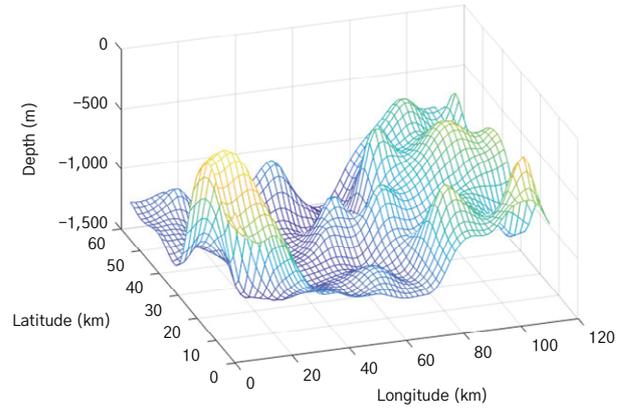


Fig. 3. Water depth data near the military border

3. 해저지형도 모델링 및 검증

2장에서 언급한 바와 같이 수중운동체의 자율주행 경로계획 시 적어도 5 m 거리 간격의 해저지형도가 있어야 회피 기동, 경로점 유도 검증에 대한 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

해저지형을 생성하기 위해 필요한 변수를 Table 1에 정의하였다.

Table 1. Input parameters for submarine topography generation

Parameter	Range	Unit
Longitude start-end point	[Lon1 Lon2]	deg.
Latitude start-end point	[Lat1 Lat2]	deg.
Grid distance	n	m
Max. mountain height	$Depth_m$	m
Mountain radius	$[r_{min,m}, r_{max,m}]$	m
Inclination	δh	-

3.1 기본 해저지형 생성 모델

실제 해저면은 평평하지 않기 때문에 랜덤워크 방

식의 랜덤 해저지형을 생성한다. 해저지형을 생성하는 거리 간격을 n 이라고 할 때, 모델링할 때 가정사항 3가지는 아래와 같다.

- 기본 해저지형의 최대 고도는 해저산의 최대 고도보다 작다.
- 기본 해저지형의 거리 간격 당 기울기(δh)는 일정 값 이하로 가정한다(0.015 적용).
- 랜덤워크 방식을 적용하여 기본 해저지형의 기울기가 한쪽으로 치우치지 않게 한다.

기본 해저지형의 거리 간격 당 기울기 제한치(δh)는 Fig. 3에서 해저산 구역을 제외한 영역에서의 평균 기울기 값을 산출하여 정하였다. 격자 (i, j) 에서의 기본 해저지형($Depth_{base}$)은 식 (1)과 같이 랜덤으로 생성하되 $i > 2$ 일 때는 식 (2)와 같이 $(i - 1, j - 1)$, $(i - 1, j)$, $(i - 1, j + 1)$, $(i, j - 1)$ 에서의 $Depth_{base}$ 와의 기울기 제한을 모두 만족하는 값으로 랜덤워크 방식을 적용하여 생성한다. 여기서 식 (1)의 w 는 랜덤 노이즈를 의미한다. 단, 해저지형 생성구간의 시작점과 끝점에서의 조건은 식 (3), 식 (4)와 같이 표현된다.

$$Depth_{base}(i, j) = Depth_{base}(i, j - 1) \pm \delta h \times w \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{|Depth_{base}(i, j) - Depth_{base}(i - 1, j - 1)|}{n} < \delta h \\ \frac{|Depth_{base}(i, j) - Depth_{base}(i - 1, j)|}{n} < \delta h \\ \frac{|Depth_{base}(i, j) - Depth_{base}(i - 1, j + 1)|}{n} < \delta h \\ \frac{|Depth_{base}(i, j) - Depth_{base}(i, j - 1)|}{n} < \delta h \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{|Depth_{base}(i, 1) - Depth_{base}(i - 1, 1)|}{n} < \delta h \\ \frac{|Depth_{base}(i, 1) - Depth_{base}(i - 1, 2)|}{n} < \delta h \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{|Depth_{base}(i, Lon2) - Depth_{base}(i - 1, Lon2 - 1)|}{n} < \delta h \\ \frac{|Depth_{base}(i, Lon2) - Depth_{base}(i - 1, Lon2)|}{n} < \delta h \\ \frac{|Depth_{base}(i, Lon2) - Depth_{base}(i, Lon2 - 1)|}{n} < \delta h \end{cases} \quad (4)$$

3.2 해저산 생성 모델

앞서 산출한 기본 해저지형에 해저산 개수, 반경 범위, 최대 고도를 입력받아 해저산을 모델링할 때 가정사항 3가지는 아래와 같다.

- 2개의 해저산의 중심 간 거리는 각각의 해저산 반경보다 크다.
- 해저산 윈도우 내의 간격 당 기울기(δh_m)는 일정 값 이하로 가정한다(0.1 적용).
- 해저산 윈도우에 가중치를 두어 완만한 산의 형태가 되도록 한다.

Fig. 4와 같이 기본 해저지형(흰색)을 바탕으로 황색 격자가 해저산 중심 위치일 때, 주변 해저산 윈도우 영역(청색)의 수심은 기본 해저지형 수심과 해저산 고도를 고려하여 가중치를 부여했다. Fig. 4의 좌측 그림과 달리 우측 그림에서는 청색 영역의 가중치를 연속적으로 변화시킴으로써 해저산의 모양이 완만한 산의 형태가 되도록 하였다. 이때 해저산의 거리 간격 당 기울기 제한치(δh_m)를 준수하였으며, Fig. 3에서 해저산 구역을 제외한 영역에서의 평균 기울기 값을 산출하여 정했다.

1	2	1	0	1	1	2	1	0	1
1	1	1	1	1	1	2.4	1.2	1.2	1
2	1	3	1	0	2	1.2	3	1.2	0
1	2	2	1	1	1	2.4	2.4	1.2	1
2	1	1	1	1	2	1	1	1	1

Fig. 4. Weighting method around underwater mountain

3.3 해저지형 검증 및 비교

모델링한 해저지형도 생성 결과에 대한 검증을 위해 Fig. 3에서 특징적인 지형이 나타나는 지역을 확대하여 비교하였다. 기본 해저지형에 해저산이 존재하는 영역에 대하여 해저산의 고도 및 반경을 고려하여 산출하였다. Figs. 5-6는 1.6 km 간격의 실제 해저지형 수심데이터와 1 m 간격으로 모델링한 해저지형 수심데이터를 가시화한 것이다. 실제 데이터와의 오차의 평균과 분산은 Tables 2-3와 같다.

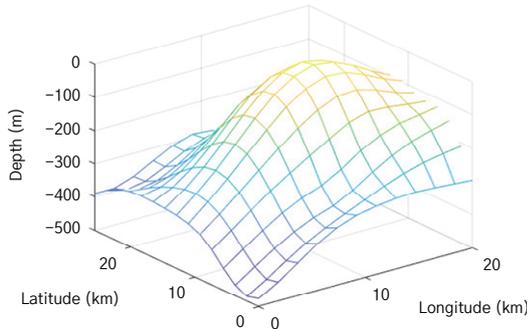
Fig. 5는 해저산이 단일하게 존재하는 경우로 실제

Table 2. Error calculation result for Fig. 5 (Unit: m)

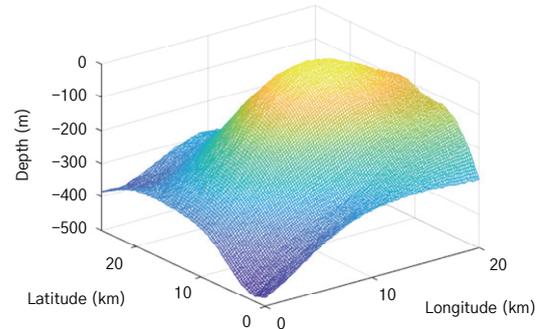
Max.	Min.	Mean	Variance
4.186	0.015	2.379	0.222

Table 3. Error calculation result for Fig. 6 (Unit: m)

Max.	Min.	Mean	Variance
7.883	1.161	4.703	0.148

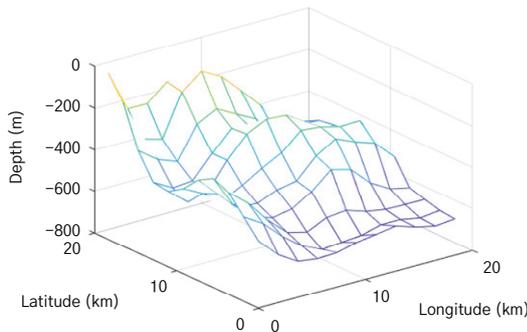


(a) Actual depth data

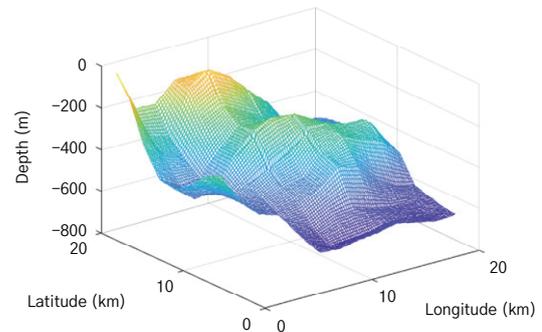


(b) Result of topography generation

Fig. 5. Comparison of actual depth data and topography generation result for one underwater mountain



(a) Actual depth data



(b) Result of topography generation

Fig. 6. Comparison of actual depth data and topography generation result for irregular terrain

데이터의 원본 지점과 생성한 고해상도 해저지형에서 실제 데이터의 원본 지점과 대응되는 지점을 비교하였을 때, 오차의 평균이 2.379 m, 분산이 0.222 m, 오차의 최댓값이 4.186 m로 완만한 편이다.

Fig. 6는 고도 약 300 m, 직경 약 4 km인 해저산 2개가 겹쳐 있으며 주변에 고도 50 m 정도인 해저산들이 불규칙적으로 위치한 경우로, 오차의 최댓값이 7.883 m로 해저산이 겹친 부분에서 고도 오차가 발생한 것으로 확인되었다. 하지만 오차 평균이 4.703 m, 분산이 0.148 m로 수중운동체의 경로계획에 영향을 주지 않는 범위이다.

4. 결론

한반도 해안 중에서 특히 동해 해역의 경우 불규칙하고 다수의 해저산이 분포한 해저지형 양상을 나타내

기 때문에 물리적으로 10 m 이내의 해상도를 가진 해저지형도를 측정하여 생성하는 것은 불가능하다.

이에 따라 본 논문에서는 한반도 동해안 해역에 대해 보유하고 있는 위도 및 경도 1.6 km 간격의 실제 해저지형 수심 데이터를 활용하여 위도 및 경도 1 m 간격의 고해상도 해저지형도를 모델링하였다. 이때, 기본 해저지형은 기울기가 치우치지 않도록 랜덤워크 방식으로 생성하였고, 실제 데이터에서 해저산의 개수와 반경, 최대고도를 기반으로 해저산을 생성하여 더하는 방식으로 해저지형도를 모델링하였다. 고성군 인근 해역에 대하여 위도 방향 20 km, 경도 방향 30 km 구간에 해당하는 실제 데이터와 제안한 기법으로 모델링한 해저지형 데이터를 비교한 결과 오차 평균은 3.541 m, 오차 분산은 0.174 m로 신뢰성을 확인하였다.

향후 해저지형 수심 데이터를 기반으로 해저산 같은

특이점이 있는 구역을 자동으로 찾아내어 해저지형을 생성하는 기법을 추가한다면, 한반도 전역에 대하여 고해상도 해저지형도를 생성할 수 있을 것으로 기대된다. 나아가 해저산 외의 특징점이 있는 구역에 대해 AI학습 기반으로 해저지형을 분석하여 수중운동체의 자율주행 알고리즘 검증을 위한 경로계획 수립에 활용할 수 있다.

참고문헌

[1] J. W. Choi, J. H. Park, J. D. Jung, Y. G. Lee and H. T. Choi, "Development of an Autonomous Surface Vehicle and Performance Evaluation of Autonomous Navigation Technologies," *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 18, No. 3, pp. 535–545, 2020.

[2] J. Yu, Z. Chen, Z. Zhao, X. Wang, Y. Bai, J. Wu and J. Xu, "Smooth Path Planning Method for Unmanned Surface Vessels Considering Environmental Disturbance," *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 21, No. 10, pp. 3285–3298, 2023.

[3] S. Y. Yang, J. H. Kim, B. J. Kim and K. S. Kim, "A Study on the 3-D Digital Modeling of the Sea Bottom Topography," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 5, No. 2, pp. 50–61, 2002.

[4] M. Aqdri, M. Kaess and I. Gkioulekas, "Neural Implicit Surface Reconstruction using Imaging Sonar," *arXiv*, 8221, 2022.

[5] I. G. Lee, J. S. Kim, S. H. Rho, K. C. Shin, J. J. Lee and S. C. Yu, "Real-time Data Enhancement of 3D Underwater Terrain Map Using Nonlinear Interpolation on Image Sonar," *Journal of Sensor Science and Technology*, Vol. 32, No. 2, pp. 110–117, 2023.