



Received: 2023/12/22
Revised: 2024/01/13
Accepted: 2024/03/19
Published: 2024/03/31

***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

Abstract

본 논문에서는 실제 보유한 수심데이터에서 해저산의 중심을 산출하여 거리 1.5 m 간격의 고해상도 해저지형도를 모델링하는 기법을 제안한다. Harris 코너 검출, FAST 알고리즘을 이용하여 해저산 중심 위치를 예측하고, 주변 해저지형을 생성하였다. 거리 1.6 km 간격의 실제 해저지형 수심 데이터와 모델링한 고해상도 해저지형을 검증한 결과, 오차 수준이 2.5 m 이내임을 확인하였다. 제안한 알고리즘은 수중운동체의 자율주행을 위한 경로계획 수립에 활용될 것으로 기대된다.

In this paper, we propose a technique to model high resolution seafloor topography with 1.5 m intervals by detecting the center of the seafloor mountain in irregular seafloor topography. Using Harris corner detection and FAST algorithms, the location of the center of seafloor mountain was predicted. The modeled high-resolution seafloor topography was verified within 2.5 m mean error between the actual warner dept data. The proposed algorithm is expected to be used to establish a path plan for autonomous navigation of underwater vehicle.

Keywords

해저지형도(Underwater Topology), 해저산(Sea Mountain), 특징점 산출 알고리즘(Feature Point Detection Algorithm), 해리스 코너 검출(Harris Corner Detection), FAST 알고리즘(Features from Accelerated Segment Test), 디지털 트윈(Digital Twin)

특징점 산출 알고리즘을 적용한 고해상도 해저지형 생성기법 개발

Development of High-resolution Seafloor Topograph Map Generation Techniques Applying Feature Point Detection Algorithm

김현승^{1*}, 현철², 이성균², 김창환², 고진용²

¹LIG넥스원 전장분석개발팀 선임연구원

²LIG넥스원 전장분석개발팀 수석연구원

Hyunseung Kim^{1*}, Chul Hyun², Sungkyun Lee², Changhwan Kim², Jinyong Go²

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

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

1. 서론

3차원 해저지형 모델은 실제 해저지형 데이터를 반영하여 모의한 것으로 해저 탐사, 자율 수중 로봇 제어, 해저 케이블 설계, 해양 재생 에너지 개발 등 다양한 분야에 활용될 수 있다. 특히 수중운동체의 경로 계획에 있어 해저지형도를 기반으로 해저산, 해구 등의 장애물을 회피하는 것이 주행 성능에 영향을 주기 때문에, 해저지형도의 해상도가 자율주행 알고리즘 성능을 좌우한다고 할 수 있다.

이를 위해 3차원 고해상도 해저지형도를 생성 또는 모의하는 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기본적으로 다중 빔 음향 측심기를 활용하여 실제 지형을 측정하여 지형도를 생성하는 기술이 개발되었다[1-2]. 하지만 비용 및 시간 소요가 크다는 점에서 실제 측량한 일부 데이터로부터 3차원 보간법을 적용하여 3차원 해저지형도를 생성하는 연구도 진행되었다[3-4]. 2차원의 고해상도 데이터를 활용하여 3차원화하는 기술도 개발되었지만[5], 획득한 정보로부터 비선형 보간법을 적용하였기 때문에 실제 지형 특성을 반영하지 못하는 한계가 있다.

따라서 본 논문에서는 국립해양조사원에서 제공하는 한반도 동해안 해역에 대해 거리 1.6 km 간격의 실제 해저지형 수심 데이터를 예제로 활용하여 위도 및 경도 1.5 m 간격의 고해상도 해저지형도

를 생성하는 기법을 제안하고자 한다. 대표수심 추출 및 재현 알고리즘을 제안한 연구를 참고하여[6] 설정한 수심 임계치보다 데이터 값이 작으면 평탄지역으로 간주하여 해저산이 없다고 판단하였다. 또한, 영역별 기울기 변화를 확인하여 실제 해저지형 수심데이터에서 불규칙적으로 분포하는 해저산의 위·경도 위치를 계산하는 특징점 산출 알고리즘을 적용하였다.

2. 해저지형 수심데이터

실제 보유한 해저지형 중에서 수중운동체가 주로 탐색하는 동해안 영역 수심데이터로부터 특징 수심을 산출하고, 고해상도 해저지형도를 모델링할 수 있다. Fig. 1은 위도 38.6~40.6도, 경도 128.5~131.5도 구간에 해당하는 위도 및 경도 별 수심 데이터를 도시한 것이다. 녹색에서 짙은 청색으로 변할수록 수심이 깊어지는 것이고, 해저산맥이 경도 129.5~130.5도 부근에 넓게 펼쳐져 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2에서는 Fig. 1의 흑색 타원 부분인 위도 38.7

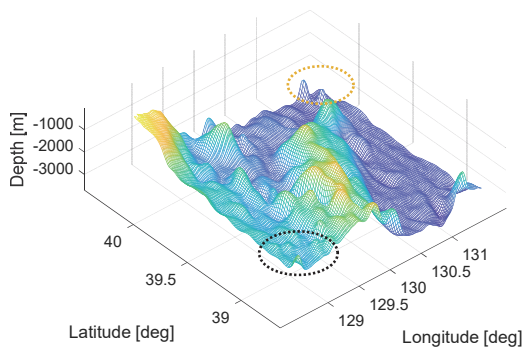


Fig. 1. Water depth data of Korea East Coast

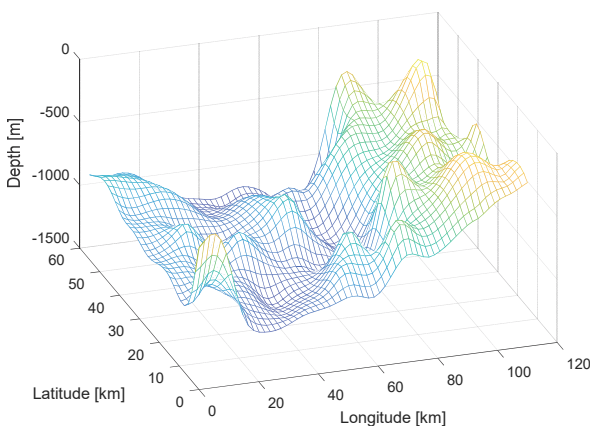


Fig. 2. Water depth data within the latitude[38.7~128.6] and longitude[39.2~129.6]

~39.2도, 경도 128.6~129.6도에 해당하는 구간을 추출하여 수심 데이터를 도시하였다. 이 구역의 평균 수심은 약 1.5 km이며, 평균 고도 280 m의 해저산이 겹쳐서 존재하는 특징을 보인다.

Fig. 3는 본 논문에서 제시하는 해저산의 특징점 산출 알고리즘을 검증하기 위해 Fig. 1의 황색 타원 부분과 같이 단일 해저산이 존재하는 위도 40~40.2도, 경도 131.2~131.6도 구간을 추출하여 수심 데이터를 도시한 것이다. 해저산 2개가 나타나 있으며 고도는 각각 1 km, 500 m이다.

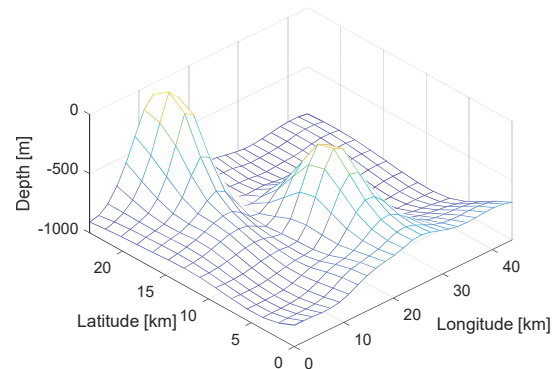


Fig. 3. Water depth data within the latitude[40.0~131.2] and longitude[40.2~131.6]

3. 특징점 산출 알고리즘

수중운동체의 자율주행 경로계획 시 속도 3 kts라고 가정하면 적어도 1.5 m 거리 간격의 해저지형도가 있어야 회피 기동, 경로점 유도 등 자율주행 알고리즘 검증에 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다. 이러한 고해상도 해저지형도를 생성하기 위해서는 해저산의 고도 최대점인 중심 위·경도를 산출하고 해저산의 반경, 기울기 변화 등의 분포를 실제 해저지형 수심 데이터와 유사하게 모의하는 것이 관건이다.

특징점 산출을 위하여 규칙 기반 특징점 추출 알고리즘에서 대표적인 Harris 코너 검출 알고리즘과 FAST(features from accelerated segment test) 알고리즘을 융합하여 적용한다[7]. Harris 코너 검출 알고리즘은 수심 데이터의 위·경도 방향에서 수심 변화가 급격하게 나타나는 점인 코너를 검출함으로써 단일 해저산 위치를 정확하게 계산할 수 있지만, 해저산이 중첩되어 있는 경우 정확한 위치를 계산할 수 없는 단점이 있다. FAST 알고리즘은 중심 픽셀과 이웃

한 픽셀의 밝기 값을 비교하는 알고리즘으로, 실제 해저지형 수심데이터에서 예상한 해저산의 중심 위치와 주변 영역의 수심 데이터의 차이가 특정 임계값보다 크면 예상한 해저산의 중심 위치에 해저산이 위치한다고 산출한다.

본 논문에서는 Harris 코너 검출 알고리즘과 FAST 알고리즘을 적용하여 보유한 실제 해저지형에서 해저산의 중심, 분포, 위치 등을 빠르고 정확하게 산출하고자 하였다. 이때 가정사항 3가지는 다음과 같다.

- (1) 해저산 수심 임계치는 고정값으로 설정한다(500 적용).
- (2) 이웃 해저산 기울기는 고정값으로 설정한다(10 적용).
- (3) FAST 알고리즘에서 중심 픽셀과 이웃 픽셀 데이터를 비교할 때, 이웃 픽셀 수는 고정값으로 설정한다(8 적용).

본 연구에서 적용하는 Harris 코너 검출 알고리즘 흐름도는 Fig. 4와 같다. i 는 위도, j 는 경도 인덱스로 수심 데이터가 해저산 수심 임계치(h)보다 클 때, 해저산 중심(COM, center of mountain)에서의 수심 데이터는 $Depth(i,j)$ 로 산출된다. 수심이 연속적으로 해저산 수심 임계치(h)보다 클 경우 가장 고도가 높은 지점을 해저산 중심으로 산출할 수 있다. 식 (1)은 FAST 알고리즘을 나타낸 것으로, 해저산 중심과 이웃한 수심 데이터의 차이가 설정한 기울기(δh)보다 커야 한다. 이는 해저산이 평평한 해저지형에 비해 경

```

i=1;
j=1;
k=1;
while i==위도길이
while j==경도길이-1
if Depth(i,j)>h && Depth(i,j)<0
if Depth(i-1:j-1:j+1)>h
COM(k,1:2)=find(Depth(i-1:i+1,j-1:j+1))==
max(Depth(i-1:i+1,j-1:j+1));
else
COM(k,1:2)=[i,j];
end
k=k+1;
i=i+1;
j=j+1;
end
end
end

```

Fig. 4. Flow chart for harris corner detection algorithm

사를 가지기 때문에 해저산과 아닌 구역을 구분할 수 있도록 한다.

$$\left\{ \begin{array}{l} |Depth(i, j) - Depth(i - 1, j - 1)| > \delta h \\ |Depth(i, j) - Depth(i - 1, j)| > \delta h \\ |Depth(i, j) - Depth(i - 1, j + 1)| > \delta h \\ |Depth(i, j) - Depth(i, j - 1)| > \delta h \\ |Depth(i, j) - Depth(i, j + 1)| > \delta h \\ |Depth(i, j) - Depth(i + 1, j - 1)| > \delta h \\ |Depth(i, j) - Depth(i + 1, j)| > \delta h \\ |Depth(i, j) - Depth(i + 1, j + 1)| > \delta h \end{array} \right. \quad \left(\begin{array}{l} i > 1, \\ j > 1 \end{array} \right) (1)$$

4. 해저산 산출 위치 검증

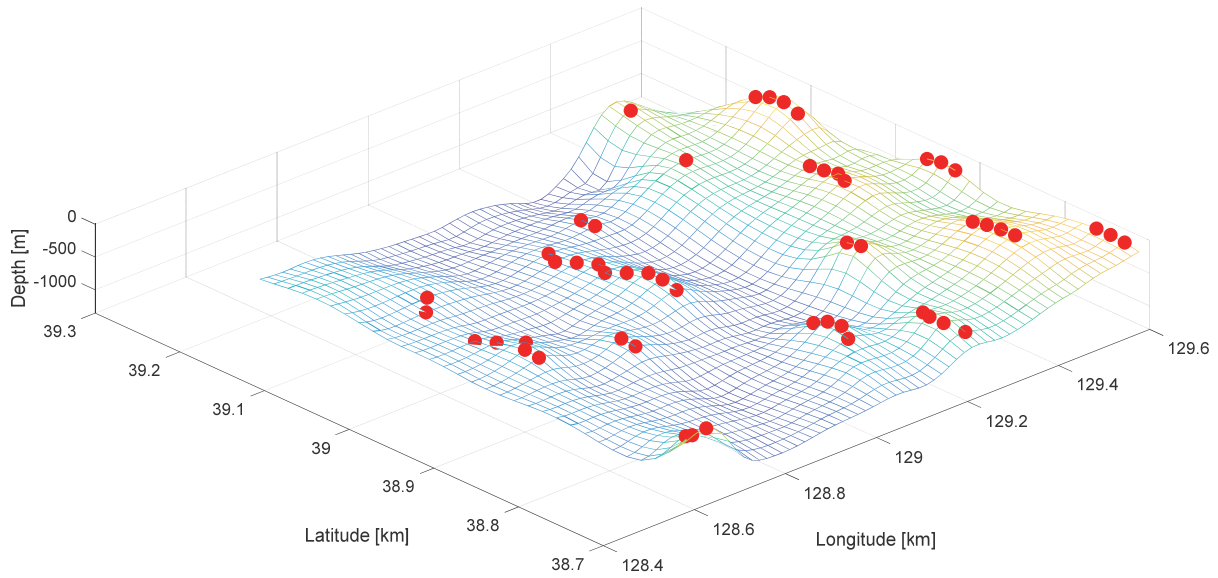
3장에서 기술한 특징점 산출 알고리즘을 검증하기 위해 Fig. 2와 같이 다양한 해저산맥이 존재하는 경우와 Fig. 3와 같이 2개의 해저산이 10 km 이상의 거리를 두고 존재하는 경우에 대해 분석하였다.

Fig. 5는 Fig. 2에 부합한 것으로 다양한 고도 및 기울기 변화를 갖는 해저지형에 대한 중심점을 추출한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 Harris 코너 검출 알고리즘만을 적용한 것으로 연속하여 고도가 해저산 수심 임계치보다 큰 영역에 대하여 가장 큰 고도를 추출하여 해저산 중심을 예측한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 해저산의 기울기가 완만한 경우 다수의 해저산 중심을 산출한다. 이를 보완하고자 FAST 알고리즘을 추가 적용한 결과는 Fig. 5(b)에 도시한 바와 같다. Harris 코너 검출 방식으로부터 산출한 해저산 중심 위치($COM(i,j)$)에 대해 상하좌우, 대각 성분으로 이웃한 수심 데이터에 대해 기울기가 δh 보다 큰 경우를 찾아 해저산 중심 위치를 재산출하였다.

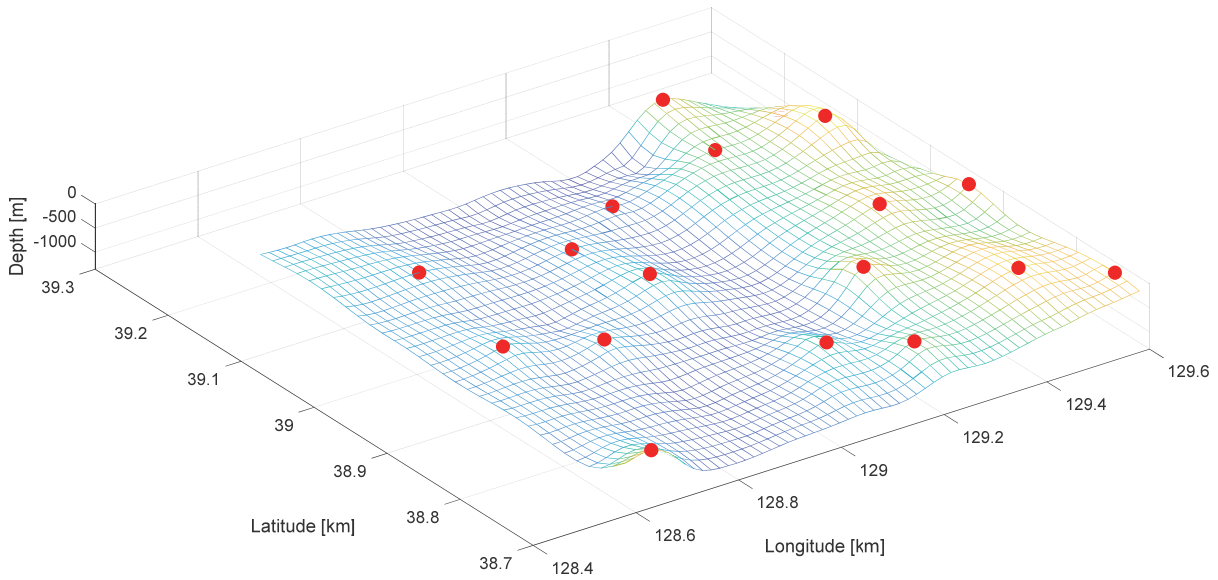
Fig. 6는 Fig. 3에 부합한 것으로 2개의 해저산이 10 km 이상 떨어져 위치했을 때 해저산 중심을 추출한 것을 확인할 수 있다. 이 경우 해저산의 경사가 급하여 Harris 코너 검출 알고리즘과 FAST 알고리즘을 적용한 결과가 같음을 확인하였다.

5. 실제 해저지형 수심 데이터와 모의 결과 비교

평균 고도 200 m의 해저산이 불균일하게 위치하

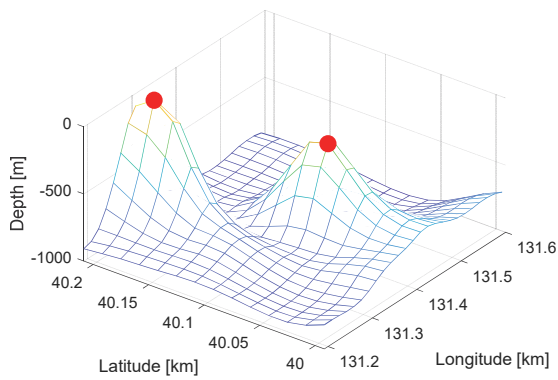


(a) Harris corner detection

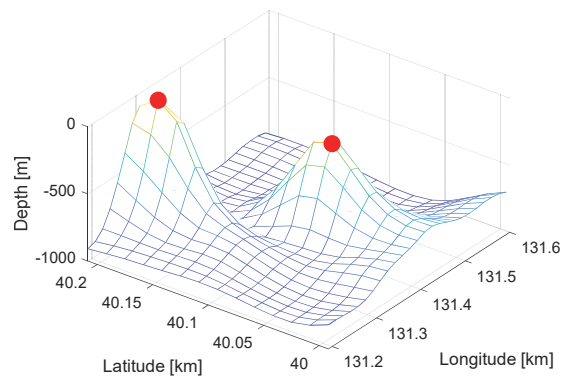


(b) Harris corner detection + FAST

Fig. 5. Result of calculation the center of the seafloor mountain based on Fig. 2.

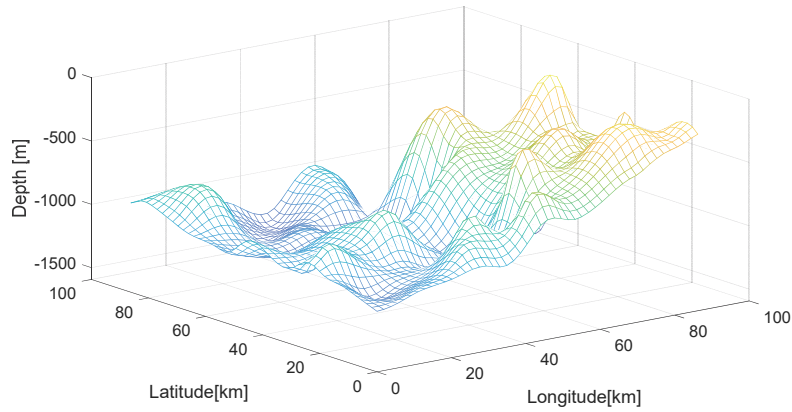


(a) Harris Corner detection

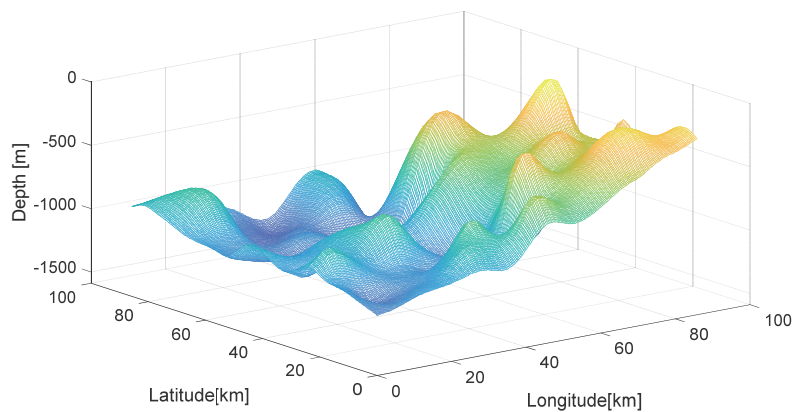


(b) Harris Corner detection + FAST

Fig. 6. Result of calculation the center of the seafloor mountain based on Fig. 3.



(a) Actual depth data



(b) Result of topography generation

Fig. 7. Actual depth data and result of topography generation

는 Fig. 7(a)의 경우에 대해서 해저산 중심 위치를 산출하지 않고, 1.5 m 거리 간격으로 해저지형을 모의한 결과는 Table 2와 같다. 실제 해저지형 수심 데이터와 생성한 해저지형의 오차는 평균이 4.703 m, 분산이 0.148 m, 최댓값이 11.883 m이다.

Table 2. Error between real depth data and topography simulation result without feature point detection algorithm (Unit: m)

Max.	Min.	Mean	Variance
11.883	1.161	4.703	0.148

이와 달리 Harris 코너 검출 알고리즘과 FAST 알고리즘을 적용하여 해저산의 중심 위치를 산출한 후, 1.5 m 간격으로 해저지형을 모의한 결과는 Fig. 7(b)에 도시한 바와 같다. 실제 해저지형 수심 데이터와 생성한 해저지형의 오차 수준은 Table 3과 같이 평균 2.497 m, 분산 0.064 m로 작고, 최댓값이 4.995 m이

다. 오차의 최댓값이 약 5 m인 이유는 탐색하는 해저지형 영역의 위도 및 경도 경계면에서 모델링 오차가 발생하기 때문이다. 경계면을 제외하고 산출한 오차 수준은 Table 4와 같고, 오차의 최댓값이 약 2.3 m로 감소하는 것을 확인하였다.

Table 3. Error between real depth data and topography simulation result with feature point detection algorithm (Unit: m)

Max.	Min.	Mean	Variance
4.995	0.004	2.497	0.064

Table 4. Error between real depth data and topography simulation result with feature point detection algorithm excluding boundary (Unit: m)

Max.	Min.	Mean	Variance
2.279	0.004	2.135	0.054

오차 수준 비교를 통해 해저산 중심 위치를 산출한 후 고해상도 해저지형을 생성하였을 때, 오차 수준이 작고 실제 해저지형 수심 데이터와의 일치성이 증가함을 검증하였다.

5. 결론

자율주행하는 수중운동체의 경우 해저지형도를 기반으로 장애물 회피 알고리즘을 수행하기 때문에 고해상도의 3차원 해저지형도를 생성하는 것이 중요하다. 실제 지형 측정 및 비선형 보간법을 적용한 해저지형 모의 연구가 진행되고 있지만, 시간과 비용이 많이 소요되고 동해 해역의 불규칙한 해저산을 완전히 반영하지 못하는 한계가 있다.

이에 따라 본 논문에서는 보유한 거리 1.6 km 간격의 한반도 동해안 해역의 실제 해저지형 수심 데이터를 활용하여 위도 및 경도 1.5 m 간격의 고해상도 해저지형도를 생성하는 기법을 제안하였다. 이때, 특징점 산출 알고리즘으로 많이 사용되는 Harris 코너 검출 알고리즘을 활용하여 설정한 수심 임계치보다 큰 영역에서 가장 큰 고도 값을 갖는 지점을 해저산 중심 위치로 1차 산출하였다. 그 후, FAST 알고리즘을 적용하여 1차 산출한 해저산 중심 위치에 이웃한 수심 데이터의 기울기 변화로부터 해저산의 중심 위치를 산출하였다. 해저산 중심 위치를 산출 알고리즘 적용 후 모델링한 고해상도의 해저지형도를 같은 영역에서의 실제 수심 데이터와 비교한 결과 오차 평균은 2.497 m, 오차 분산은 0.064 m로, 해저산 중심 위치 산출 알고리즘 미적용 시 모델링한 결과에 비해 정확도가 향상되는 것으로 나타났다.

향후 한반도 전역에 대한 해저지형에 대해 AI학습 기반으로 해저지형을 분석하고 고해상도로 모의함으

로써, 해저에서 디지털 트윈 시뮬레이션을 가능하게 하는 기발 기술을 제시하고, 수중운동체의 자율주행 알고리즘 검증에 활용할 수 있다.

참고문헌

- [1] Y. J. Lee, Y. J. Lim, T. K. Yeu, S. J. Lee, J. D. Jung, D. G. Park and J. B. Han, "A Simulation of Real-time Seabed Mapping using Multi-Beam Echo Sounder Measurement Model," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 28, No. 5, pp. 436-443, 2022.
- [2] J. B. Lee, H. J. Kim, H. S. Hur and G. J. Wie, "Integration of Airborne Bathymetric LiDAR and Multi-beam Echo-sounder Data for Construction of High Resolution Terrain data in Intertidal Zone," *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 27, No. 2, pp. 23-30, 2019.
- [3] G. Y. Kim, D. J. Seo and D. Y. Moon, "An Analysis of Accuracy for Submarine Topographic Information by Interpolation Method," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 20, No. 3, pp. 67-76, 2006.
- [4] 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.
- [5] M. K. Bae, H. I. Shin, D. J. Lee, I. K. Kang, Y. W. Lee and K. S. Kim, "Three Dimensional Visualization of Seafloor Topography for the Application of Integrated Navigation System," *Journal of Korean Society of Fisheries and Ocean Technology*, Vol. 42, No. 2, pp. 104-110, 2006.
- [6] S. C. Yoo, J. Y. Mun, W. Park, G. H. Seo, S. J. Gwon and R. Heo, "Development of Bathymetric Data for Ocean Numerical Model Using Sea-Floor Topography Data: BADA Ver.1," *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 31, No. 3, pp. 146-157, 2019.
- [7] S. G. Park, M. J. Chae and S. I. Cho, "Analysis of Recent Trends in Image Matching Technology Based on Feature Extraction," *Journal of Broadcast Engineering*, Vol. 28, No. 4, pp. 429-438, 2023.