

위치인식 신호획득 주기변화에 의한 위치추정값 영향

신창주*, 권오순, 서정민, 강현
한국해양과학기술원 해양공학연구본부

Effects on Localization by the Period Variation of Measured Position

Changjoo Shin*, Osoon Kwon, Seo Jungmin, Hyoun Kang

Coastal & Ocean Engineering Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology

요 약 한국해양과학기술원은 해저에서 지면 굴착 작업이 가능한 트랙 형태의 수중건설로봇 (URI-R)을 개발 중에 있다. 개발 로봇은 수중에서 굴착 작업을 수행하는 동안 강한 소음 및 진동 환경에 노출된다. 이로 인하여 음향을 이용하여 수중 위치 신호를 획득하여야 하는 개발 장비는 신호획득이 어려운 상황에 빈번하게 놓일 수 있다. 이를 극복하기 위하여 개발 장비가 수중 위치 신호가 간헐적으로 들어오는 상황 속에 놓여 있어도 연속적으로 자신의 위치를 인식하는 방안을 확보하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 비용절감 및 다양한 실험케이스를 확보하기 위하여 수중 작동 특성을 모사할 수 있는 실험을 육상에서 재현하여 실험하였으며 위치 추정을 위하여 관성항법 및 위성항법신호를 사용하였다. 위치 신호획득 주기가 길어짐에 따라 자기 위치 추정에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다. 이를 통하여 URI-R의 연속적인 자기 위치 인식을 수행하기 위한 위치 신호획득의 최대 주기를 확인하고 이를 적용하고자 한다.

Abstract A track type underwater construction robot(URI-R) which can trench on seabed is being developed by Korea Institute of Ocean Science & Technology. During the underwater trenching work, the robot is exposed high intensive noise and vibration so the underwater localization signal may not be obtained properly by the acoustic tracking system. Therefore it is necessary to research about continuous localization even though the measured position signal comes in intermittently. In this paper, the experiments were carried out on land to simulated the underwater operating environment characteristics. To estimate its position, inertial navigation system and global navigation satellite system are used. The effects of the period variation while localizing is investigated by the experiments, and the application for URI-R is proposed.

Keywords : INS, Intermittent Signal, Localization, Noise, Underwater Construction Robot

1. 서론

한국해양과학기술원은 수중건설로봇으로 Fig. 1과 같이 수중트랜처(URI-R)를 개발하고 있다. 개발장비의 목적은 수심 500m 해저면에 착저한 후 장비에 장착된 트랜칭커터를 이용하여 해저 케이블 또는 파이프라인을 매설할 수 있도록 단단한 모래지반 또는 연암지반을 굴착 작업을 수행하는 것이다.

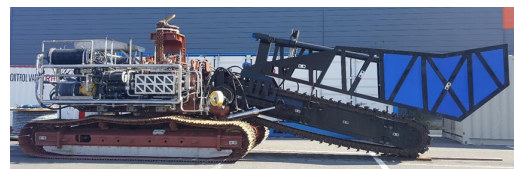


Fig. 1. Underwater trencher (URI-R) under development

URI-R이 수중에서 굴착 작업을 수행하면 무한케도,

이 논문은 2017년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양개발용 수중건설로봇 사업단, PJT200539)

*Corresponding Author : Changjoo Shin(KIOST)
Tel: +82-51-664-3563 email: cjshin@kiost.ac.kr

Received December 4, 2018

Revised January 3, 2019

Accepted March 8, 2019

Published March 31, 2019

트랜칭커터 작동에서 발생하는 장비 자체적 소음/진동 뿐만 아니라, 지반과 상호작용으로 인하여 발생하는 소음/진동이 필연적으로 발생한다. 이러한 소음/진동은 구조물에 영향을 주어 내구성 저하[1]를 가져올 뿐만 아니라 장비 내부에 설치된 각종 전장에도 영향을 미친다[2].

개발장비는 수중에서 사용자가 원하는 지점으로 이동하여 극도로 많은 부유물을 발생시키는 지반 굴착작업을 수행하기 때문에 광학장비를 통한 주변인식은 거의 불가능하다. 이에 반드시 수중에서는 자신의 위치를 인식할 수 있어야 한다. 육상에서는 GNSS (Global Navigation Satellite System)를 이용하여 자기위치를 쉽게 인식할 수 있으나, 수중에서는 매질에 의한 전파감쇄로 GNSS를 사용할 수 없기 때문에 다른 방법으로 자기위치를 인지하여야 한다.

수중위치 인식을 위하여 사용하는 장비는 주로 음향 위치추적시스템 (Acoustic tracking system)과 DVL (Dopler Velocity Logger)과 같은 음향장비와 관성측정장치 (IMU - Inertial Measurement Unit), 수심센서 등을 활용하며[3], 많은 경우 이러한 센서들로부터 획득된 정보를 칼만필터의 입력데이터로 활용하여 장비의 수중 위치를 추정한다[4]. 여기서 음향위치추적시스템은 육상의 GNSS와 같은 역할을 수행하기 때문에 매우 중요한 신호이다. 하지만 개발장비의 운영특성상 과도한 소음발생으로 인하여 음향위치추적시스템의 신호를 획득하기 어려운 경우가 빈번하게 발생할 수 있다.

Joel은 USBL (Ultra Short Base-Line) 시스템에 적용되는 개발보드가 노이즈에 취약하여 수중위치인식을 위한 신호잡음비를 높이는 연구를 수행하였다[5]. 이 연구는 정밀한 수중위치인식이라는 연구방향은 유사하나 전기노이즈를 최소화하여 신호잡음비를 높이는 방안에 대한 연구이다. Tao는 관성항법과 LBL (Long Base-Line)을 융합하여 자율무인잠수정에 적용하는 것을 연구하였으며 수중위치인식을 위하여 각종 센서값을 융합하여 연산하는 것을 제시하였다[6]. 하지만 음향위치추적시스템의 신호가 연속적으로 획득되는 것을 기본으로 전제하고 수행한 연구결과이며, 간헐적으로 해당 신호가 들어오는 조건에 대한 연구는 수행되지 않았다. Chao는 프로펠러, 구조물 충돌등이 발생하는 수중소음이 해양에 미치는 영향을 연구하였다[7]. 해당 연구에 의하면 수중소음이 수중기계 뿐만 아니라 수중 생태계에도 영향을 미칠 수 있다는 것을 알 수 있다. 앞서 기술한 선행연구들을 통하여

수중장비에 있어 정밀한 수중위치인식이 필요한 것을 인식할 수 있으며, 이를 위하여 다양한 센서융합 및 연산이 필요한 것을 알 수 있다. 하지만 개발장비의 운영 특성에 의해 이동 또는 작업 중 발생하는 수중소음에 의해 음향 위치추적시스템의 신호획득을 힘든 환경에서는 수중위치인식이 어렵다는 것을 예측할 수 있는데 이에 대한 연구가 드물었다. 개발장비의 원활한 수중위치 인식을 수행하려면 위치인식 신호획득 주기변화에 따른 위치 추정값 영향을 고찰하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 URI-R이 해저면에 착저하여 지반 굴착작업을 수행하는 동안 수중위치인식을 원활하게 하기 위한 방안을 모색하기 위한 연구를 수행하였다. 장비 운영특성을 고려하여 관성항법(INS, Inertial Navigation System)과 측정된 자기위치값을 칼만필터로 융합계산하고자 한다. 측정된 위치인식 신호획득의 주기 변화에 따른 위치추정값 영향을 고찰하고 개발장비에 적용하기 위한 방안을 제시하였다.

2. 자기위치 인식기법

개발장비는 수심 500m의 해저면에 착저하여 지반 굴착작업을 수행한다. 장비의 자기위치 인식을 위하여 음향위치추적시스템만 이용할 경우 정상상태에서는 약 1 초 간격으로 신호를 획득할 수 있다. 하지만, 작업 시 발생하는 소음/진동에 의해 음향신호가 오염되어 자기위치 인식신호 획득 시간이 지연될 수 있다. 이 경우에는 다음 신호가 획득될 때까지는 장비의 위치를 알 수 없기 때문에 이러한 blackout 구간을 보완하고자 INS를 이용한다. INS는 장비 거동에 관한 가속도 신호를 성분을 항법좌표계로 변환하고, 적분함으로써 현재 위치를 추정하는 추측항법 체계이다. INS 지배방정식은 식(1)과 같다[8].

$$\begin{bmatrix} \dot{r}^l \\ \dot{v}^l \\ \dot{R}_b^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D^{-1}v^l \\ R_b^l \mathcal{P} - (2\Omega_{ie}^l + \Omega_{et}^l)v^l + g^l \\ R_b^l (\Omega_{ib}^b - \Omega_{it}^b) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 r^l 은 측지좌표상에서 위도, 경도, 고도로 구성된 위치벡터로 $r^l = [\phi \ \lambda \ h]^T$ 이다. D^{-1} 은 항법축 (Local-Level Frame)으로 표현된 속도벡터 $v^l = [v_e \ v_n \ v_u]^T$ 를 위치벡터의 변화율로 변환하는 행렬,

R_b^l 은 동체축(Body Frame)으로 정의된 값을 항법축에 관한 값으로 변환하는 회전행렬, f^b 는 동체축으로 정의된 비힘벡터 $[f_x f_y f_z]^T$ 이다. Ω_{ie}^l 은 자이로에서 측정된 지구자전 각속도를 항법축으로 변환한 행렬, Ω_{ie}^l 은 ECEF(Earth Centered-Earth Fixed)축에 관한 각속도를 항법축으로 변환한 행렬, g^l 은 중력가속도 벡터이다. Ω_{ib}^b 는 자이로에서 출력되는 각속도 행렬, Ω_{ib}^b 는 관성축에 의한 지구자전각속도를 동체축으로 표현한 행렬과 ECEF축에 관한 항체축의 원점 변화를 동체축으로 표현한 행렬의 합이다.

Won은 소음/진동이 매우 큰 환경에서 느리게 운동하는 수중로봇의 경우 안정적인 항법을 구현하기 위해서는 IMU 업데이트 속도를 100Hz 이상으로 제한한 바 있다 [9]. 운용환경 특성상 자기위치 신호의 업데이트 주기가 길어지더라도 상대적으로 빠른 IMU 업데이트 속도를 활용하여 INS를 수행하고 수중에서 자기위치를 추정할 수 있다. 하지만 식(1)과 같이 INS는 가속도 성분으로부터 위치변화율, 속도변화율을 연산하는 시스템으로 적분 과정이 필수적이다. 이때 발생하는 적분상수로 인하여 INS만 이용하여 추측항법을 지속적으로 연산할 경우 그 위치값이 발산하게 된다. 장시간 연산 시 발산하는 시스템이지만 빠른 업데이트 속도를 활용하여 자기위치를 연산할 수 있는 INS, 상대적인 느린 업데이트 속도를 보이거나 발산하지 않고 안정적인 참조값을 제공하는 자기위치 신호를 융합계산하는 상보필터, 가장 많이 사용되고 있는 칼만필터를 활용하면 수중에서 안정적인 자기위치를 추정할 수 있다.

INS는 동적비선형 시스템으로 해당 시스템을 칼만필터에 바로 적용하는 것은 어렵다. 상태변수로 시스템 에러를 설정하고 1차 미분식으로 표현하면 칼만필터 적용이 가능하다[1]. 칼만필터는 예측단계와 수정단계로 구성된다. 예측단계에서는 상태변수 추정을 위하여

$$\mathbf{x}_k(-) = \Phi_{k|k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1}(+), \quad (2)$$

공분산 추정을 위해

$$P_k(-) = \Phi_{k|k-1} P_{k-1}(+) \Phi_{k|k-1}^T + Q_{k-1}, \quad (3)$$

연산을 수행한다.

여기서 $\mathbf{x} = [\delta\phi \ \delta\lambda \ \delta h \ \delta v_e \ \delta v_n \ \delta v_u \ \delta p \ \delta r \ \delta y]^T$ 로 시스템 에러로 구성된 상태변수이다. p, r, y 는 피치, 롤, 요이다. Φ 는 식(4)와 같다.

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{R_M+h} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(R_N+h)\cos\phi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_u & -f_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -f_u & 0 & f_e \\ 0 & 0 & 0 & 0 & f_n & -f_e & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_M+h} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{R_N+h} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-\tan\phi}{R_N+h} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

R_M 은 남북방향으로 이어지는 자오선 곡률반경, R_N 은 동서방향으로 이어지는 횡곡률반경이다. P 는 시스템 상태 공분산 행렬, Q 는 시스템 노이즈 행렬이다. $\hat{\mathbf{x}}(-)$ 는 추정된 상태변수의 예측값, $\hat{\mathbf{x}}(+)$ 는 추정된 상태변수의 수정된 값이다.

수정단계에서는 먼저 식(5)를 이용하여 칼만게인 K 를 도출한다.

$$K_k = P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1} \quad (5)$$

여기서 H 는 변수추출행렬, R 은 측정노이즈 공분산행렬이다. 도출된 칼만게인을 식(6, 7)에 적용하여 상태변수를 추정한다

$$\hat{\mathbf{x}}_k(+) = \hat{\mathbf{x}}_k(-) + K_k [z_k - H_k \hat{\mathbf{x}}_k(-)], \quad (6)$$

$$P_k(+) = [I - K_k H_k] P_k(-), \quad (7)$$

여기서 z 는 추정된 \mathbf{x} 를 평가하기 위한 외부로부터 획득된 측정벡터이다.

z, \mathbf{x} 의 값 차이가 작을수록 z 의 신뢰도가 높다는 것이고 이때 P 는 작아지고, K 는 커지게 된다. 이는 z 에 상대적으로 더 높은 가중치를 주고 \mathbf{x} 를 추정하는 것을 의미한다. 반면 z, \mathbf{x} 의 값 차이가 클수록 z 의 신뢰도가 떨어지는 것을 의미하고, 이 경우 P 는 커지고, K 는 작아지게 된다. 이는 z 에 상대적으로 더 작은 가중치를 주고 \mathbf{x} 에 더욱 의존하여 추정하겠다는 것을 의미한다.

3. 실험방법 및 고찰

수중에서 자기위치값을 인식하기 위해서는 주로 음향 위치추적시스템을 사용한다. 해당 시스템을 장비에 부착하고 실험역에서 다양한 실험을 수행하기에는 비용이 많이 소요된다. 육상의 GNSS 시스템은 수중의 음향위치추적시스템과 유사하게 자기위치 정보를 제공한다. 비용 절감 및 다양한 실험을 원활하게 수행하기 위하여 음향 위치추적시스템을 대신하여 육상 GNSS로 실험을 수행하였다.

INS를 수행하기 위하여 IMU는 Advanced Navigation사의 Spatial FOG를 사용하였고, GNSS 정보를 획득하기 위하여 Advanced Navigation사의 Poseidon을 사용하였다.

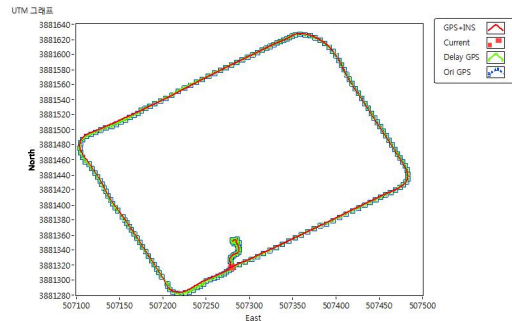
실험지역은 한국해양과학기술원 캠퍼스 내의 도로를 선택하였고 항법센서들을 차량에 장착하고 10~30km/h의 속력으로 주행하였다. 본 연구에서는 위치추정 오차 목표값을 20m 이하를 설정하고 실험결과를 고찰하였다.

Fig. 2는 자기위치 측정주기가 1초일 때 결과비교이다. Fig. 2(a)에서 붉은색 실선은 칼만필터를 이용하여 INS와 GNSS를 융합연산한 궤적 히스토리, 붉은색 점은 융합연산한 현재 값, 녹색선은 자기위치 측정주기가 변화된 궤적 히스토리, 파란색 점선은 1초 간격으로 측정된 자기 위치 궤적 히스토리이다. 초기 출발위치는 사각형 궤적 내부에 있는 뒤집힌 S 지점이다. 융합연산된 결과는 실제로 측정된 자기위치값을 잘 따라가고 있는 것을 알 수 있다. Fig.2(b)는 자기위치 측정값과 융합연산 결과값의 거리차를 나타낸다. 거리차가 작을수록 위치추정이 잘되는 것으로 판단할 수 있다. 이를 통하여 위치추정 오차가 20m 이하를 만족하는 것을 판단할 수 있다. 자기위치 측정주기가 1초일 경우 측정값과 융합연산 결과값은 최대 5.3m를 보였다. 이는 위치추정 오차 20m 이하를 만족한다.

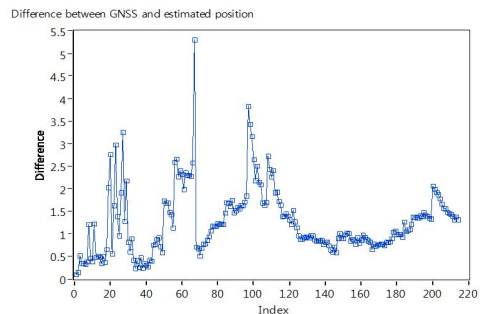
Fig. 3은 자기위치 측정주기가 5초일 때 결과를 비교한 것이다. Fig.3(a)에서 보인 것과 같이 직선주행일 경우에는 측정된 자기위치 궤적과 융합연산된 궤적이 유사하게 따라가는 것을 확인할 수 있다. 반면 방향전환이 이루어지는 4지점의 코너에서 측정값과 연산결과 값의 오차가 드러나는 것을 확인할 수 있다. 하지만 자기위치 측정값 주기가 5초일 경우, 융합연산 궤적 마지막 연산값이 초기 주행하던 도로 상으로 복귀하는 것을 확인할 수

있다. Fig.3(b)를 통하여 측정값과 위치추정 오차값은 최대 16.7m로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 위치추정 오차 20m이하를 만족한다.

Fig. 4는 자기위치 측정주기가 10초일 때 결과를 비교한 것이다. Fig.4(a)와 같이 직선주행의 경우 앞서 보인 경우와 유사하게 측정된 자기위치 궤적을 잘 추정하고 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 출발지점 부근, 4지점의 코너에서는 측정된 자기위치값과 추정값 사이의 차이가 두드러지는 것을 확인할 수 있다. INS를 통하여 코너를 도는 것을 표현하여야 하는데, 칼만필터 연산 시 사용되는 측정값이 이전값을 참조함으로써 INS에 의해 현재 변화되고 있는 값의 가중치 낮게 제공하기 때문에 이러한 현상이 나타나는 것이다. 실험이 종료되는 시점은 주행하던 직선도로 선상으로, 마지막 연산값은 직선상에 잘 표현된 것을 확인할 수 있다. Fig.4(b)를 통하여 측정값과 위치추정 오차값은 최대 42.9m로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 위치추정 오차 20m를 만족하지 못하는 결과이다.



(a) Trajectory comparison



(b) Difference between measured position and estimated position

Fig. 2. Localization comparison

(Updated measured position period 1 second)

4. 결론

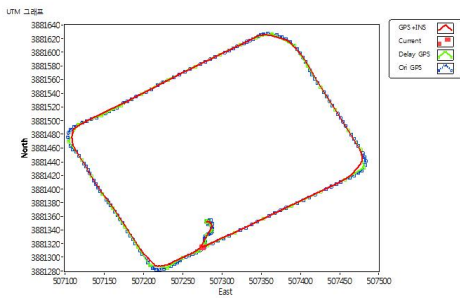
본 논문에서는 해저면에 착저하여 굴착작업을 수행하는 수중건설로봇에 적용하기 위한 자기위치 측정주기에 대한 항법특성을 확인하였다. 수중항법으로 INS와 자기위치 측정값을 융합연산하도록 칼만필터를 이용하였다. 자기위치 측정 시 음향위치추적시스템을 대신하여 GNSS 값을 활용하였다. 위치추정 오차 목표값은 20m 이하이다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 직선주행의 경우 추정된 위치값이 측정값을 잘 추정한다.
- (2) 코너를 돌아나가는 운동의 경우 측정된 자기위치값과 추정값 사이의 차이가 두드러진다. 이는 칼만필터 연산 시 사용되는 측정값이 이전값을 참조함으로서 INS에 변화되고 있는 현재 값의 가중치를 작게 제공함으로써 나타나는 현상이다.
- (3) 자기위치 측정주기가 5초일 경우 측정위치와 추정위치의 최대 거리차는 16.7m로 위치추정 오차 목표를 만족하였다.

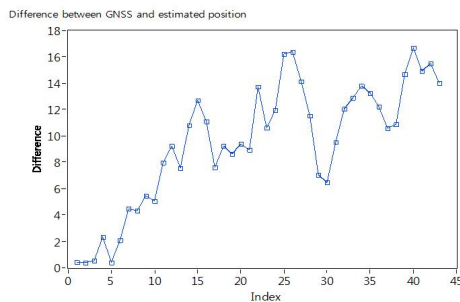
URI-R은 수중에 굴착작업을 수행하는 특성 상 큰 소음을 발생시키며 이로 인하여 음향위치추적시스템 신호획득 주기가 불규칙할 수 있다. 하지만 자기위치 신호획득 주기를 5초 이하로 만족할 경우 위치추정 오차목표를 만족할 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] Jasim Mohsin Naser, Fernando Serrano Toledano, Analysis of vibration-induced fatigue cracking in steel bridge, Master's thesis, p.5, Chalmers University of Technology, 2010.
- [2] B. Aytakin, H. Nevzat Ozguven, Vibration analysis of a simply supported PCB with a component-An analytical approach, 10th Electronics Packaging Technology Conference, p1-6, 2008.
- [3] Hayato Kondo, Toshihiro Maki, Tamaki Ura, Takashi Sakamaki, AUV Navigation based on multi-sensor fusion for breakwater observation, 23rd International Symposium on Automation Robotics in Construction, p72-77, 2006.
- [4] Yan Xincun, Ouyang Yongzhong, Sun Fuping, Fan Hui, Kalman filter applied in underwater integrated navigation system, Geodesy and Geodynamics, Vol.4, Issue1, p46-50, 2013.
- [5] Joel Reis, Marco Morgado, Pedro Batista, Design and

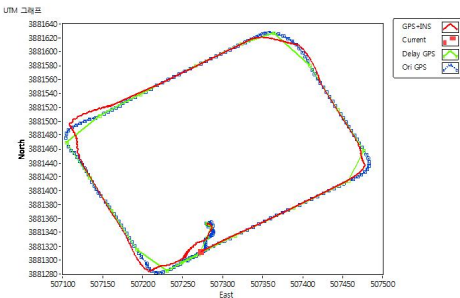


(a) Trajectory comparison

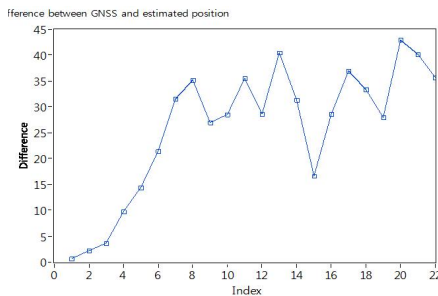


(b) Difference between measured position and estimated position

Fig. 3. Localization comparison
(Updated measured position period 5 second)



(a) Trajectory comparison



(b) Difference between measured position and estimated position

Fig. 4. Localization comparison
(Updated measured position period 10 second)

Experimental Validation of a USBL Underwater Acoustic Positioning System, Journal of Latex Class Files, Vol.11, No.4, p1-12, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.3390/s16091491>

- [6] Tao Zhang, Hongfei Shi, Liping Chen, Yao Li, Jinwu Tong, AUV Positioning Method Based on Tightly Coupled SINS/LBL for Underwater Acoustic Multipath Propagation, Sensors, Vol.16, No.3, p1-16, 2016.
- [7] Chao Peng, Xinguo Zhao, Guangxu Liu, Noise in the Sea and Its Impacts on Marine Organisms, International Journal of Environmental Research and Public Health, Vol.12, No.10, p12304-12323, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph121012304>
- [8] Aboelmagd Noureldin, Tashfeen B.Karamat, Jacques Georgy, Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration, Springer, 2013.
- [9] Sung Gyu Won, Changjoo Shin, Osoon Kwon, Jung-min Seo, Hyoun Kang, Effect of Inertial Sensor Signal Rate on Underwater Navigation, 2017 Autumn Conference of Korean Marine Robot Technology Society, 2017.

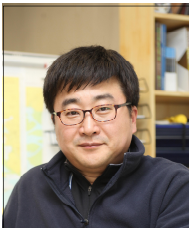
신 창 주(Changjoo Shin) [정회원]



- 2006년 2월 : 부산대학교 기계공학부 (공학사)
- 2012년 2월 : 부산대학교 기계공학부 (공학석·박사)
- 2012년 6월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 재직(현:선임연구원)

<관심분야>
수중로봇, 센서융합, 소음진동

권 오 순(Osoon Kwon) [정회원]



- 1990년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1998년 4월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 재직(현:책임연구원)

<관심분야>
해양지반조사, 해양구조물기초

서 정 민(Seo Jungmin) [정회원]



- 2011년 8월 : 한국해양대학교 공과대학 기계시스템공학과 (공학사)
- 2014년 2월 : 한국해양대학교 공과대학 기계공학과 (공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 재직

<관심분야>
2D/3D CAD, 수중운동체 설계/제작(AUV,ROV)

강 현(Hyoun Kang) [정회원]



- 2010년 2월 : 단국대학교 공과대학 토목환경공학과 (공학사)
- 2012년 8월 : 단국대학교 대학원 지반공학전공 (공학석사)
- 2014년 5월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 재직

<관심분야>
지반공학, 해양지반조사, 해양구조물