

수중 자율이동시스템의 수력학 모델 내장형 항법필터 설계

김은총, 이윤하, 정영광, 나원상
 한동대학교 기계제어공학과

Hydrodynamics Embedded Navigation Filter Design for Underwater Autonomous Systems

Eun-Chong Kim, Yun-Ha Lee, Young-Kwang Jung, Won-Sang Ra
 School of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University

Abstract - In this paper, a dynamics model embedded navigation filter is newly suggested for underwater autonomous systems without position or attitude aid. In order to ensure the observability on the INS errors, the hydrodynamics of the underwater vehicle is incorporated with the INS attitude error. This approach allows us to estimate and compensate the INS errors in spite of using external velocity sensor. Through the simulation, the performance and effectiveness of the proposed scheme are demonstrated.

1. 서 론

장시간 잠항임무를 수행하는 수중 자율이동체의 유도제어를 위해서는 정밀 항법기술 개발이 필수적이다. 자율이동체에 탑재된 관성항법장치는 충분히 빠른 주기로 항법정보를 제공하지만 시간이 지남에 따라 그 오차가 기하급수적으로 누적되는 특성을 갖고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 가장 일반적인 해법은 간헐적으로 제공되는 보조 항법센서 측정치를 이용하여 관성항법 오차를 추정·보상하기 위한 보정항법 필터를 설계하는 것이다. 하지만, 수중에서 위치 혹은 자세정보를 제공하는 보조항법 센서 사용이 제한되는 경우 항법오차에 대한 가관측성 확보가 어렵기 때문에 큰 수준의 항법성능 개선을 기대할 수 없다 [1].

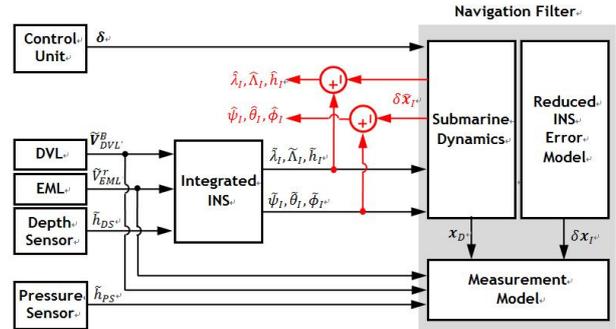
수중 자율이동체의 항법성능을 향상시키기 위해 최근 기존 보정항법 필터 개념에서 탈피하여 자율이동체의 동역학 모델을 적극적으로 활용한 항법필터 설계 방안이 연구되고 있다. 이 방식은 크게 두 가지 형태로 구분된다. 첫 번째 방법으로 제안된 것은 수중 자율이동체의 동역학 시뮬레이터 출력을 일종의 보조항법 센서처럼 활용하는 방법이다. 이 방법은 기존 보정항법필터의 구조를 그대로 차용할 수 있다는 장점이 있으나 수중 자율이동체의 동역학 모델에 사용되는 수력계수의 불확실성에 매우 취약하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 동역학 모델에 포함된 불확실성을 함께 추정하는 방법이 제안되기도 하였으나 항법필터의 차수 및 계산량 부담이 증가하는 부작용이 있다. 이와 달리, 도플러속도계나 대수속력계와 같이 보조항법 센서의 속도정보와 항법장치 속도정보를 융합하여 항법장치 오차 상태변수의 일부를 추정하는 방법이 있다. 이 방법은 항법오차 증가 정도를 완화하는 효과는 있으나, 여전히 위치 오차에 대한 가관측성 확보는 어려운 것으로 알려져 있다 [2].

이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 그림 1과 같이 수중 운동체의 동역학 모델 내장형 항법필터 구조를 제안한다. 자율이동체에 작용하는 수력학적 힘과 모멘트 중 일부가 자세각에 의해 결정된다는 사실에 착안하여 항법장치 출력과 및 항법오차로 수중 자율이동체의 운동 모델을 기술함으로써, 동역학 방정식과 항법오차 방정식이 결합된 비선형 시스템 방정식을 유도한다. 동역학 모델 기술을 위해 사용되는 상태변수에 항법장치 자세각 오차가 개입한다는 것은 이들 두 정보 간에 매우 밀접한 상관관계가 형성됨을 의미한다. 즉, 속도계를 보조항법센서로 사용하는 경우라 할지라도 자세센서를 사용하는 경우와 유사하게 항법오차에 대한 가관측성을 확보할 수 있을 것임을 예상할 수 있다. 제안되는 항법필터 구조는 별도의 수중 자율이동체 동역학 시뮬레이터를 필요로 하지 않으므로 계산량 부담이 상대적으로 적고, 수력 모델에 불확실성이 존재하는 상황에서도 항법필터의 오동작 가능성을 최소화할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 항법장치의 위치오차를 추정할 수 있다는 것은 기존 방법과 명확히 구분되는 특징이라 할 수 있다. 모의실험을 통해 속도 센서만이 주어지는 상황에도 제안된 항법필터 방법을 사용하는 경우 수중 자율이동체의 항법성능을 효과적으로 개선할 수 있음을 보인다.

2. 수중 이동체 동특성을 고려한 수중 자율이동체 항법필터 설계

2.1 항법필터 시스템 모델

수중 자율이동체의 무게중심이 중만면 상에서 편심되어 있지 않고 ($x_G \approx y_G \approx 0$), 관성행렬의 비대각 성분을 무시할 수 있다면, 수중 자율이동체의 운동방정식은 다음과 같이 정리된다.



〈그림 1〉 수중 자율이동체 수력학 모델 내장형 항법필터 구조

$$\begin{bmatrix} M_{RB} & E_{RB} \\ D_{RB} & J_{RB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}^B \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_{EB}^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{RB}(\mathbf{V}^B, \boldsymbol{\omega}_{EB}^B, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\epsilon}) \\ \mathbf{h}_{RB}(\mathbf{V}^B, \boldsymbol{\omega}_{EB}^B) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{F}^B(\dot{\mathbf{V}}^B, \mathbf{V}^B, \boldsymbol{\omega}_{EB}^B, \boldsymbol{\delta}) \\ \mathbf{M}^B(\dot{\mathbf{V}}^B, \mathbf{V}^B, \boldsymbol{\omega}_{EB}^B, \boldsymbol{\epsilon}, \boldsymbol{\delta}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{V}^B = [u \ v \ w]^T$ 는 동체좌표계 속도, $\boldsymbol{\omega}_{EB}^B = [p \ q \ r]^T$ 는 지구고정좌표계에 대한 동체좌표계의 회전각속도, $\boldsymbol{\rho} = [\lambda \ \Lambda \ h]^T$ 는 항법좌표계 위치(위도/경도/고도), $\boldsymbol{\epsilon} = [\psi \ \theta \ \phi]^T$ 는 요/피치/롤 자세각을 의미하며, M_{RB} , J_{RB} , E_{RB} , D_{RB} 는 자율이동체의 물성치를 반영하기 위한 행렬이다. 또한, 함수 \mathbf{f}_{RB} , \mathbf{h}_{RB} 는 수중 자율이동체의 강체운동을 기술하기 위해 도입된 것이며, 수중 자율이동체에 작용하는 동체좌표계 외력과 모멘트 \mathbf{F}^B , \mathbf{M}^B 는 Gertler-Hagen 표준 수력특성을 이용하여 모델링할 수 있다 [3].

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{RB} &\equiv -M_{RB}(\boldsymbol{\omega}_{EB}^B) \times \mathbf{V}^B + \boldsymbol{\omega}_{EB}^B \times (D_{RB} \boldsymbol{\omega}_{EB}^B) - 2M_{RB}(C_N^B \boldsymbol{\omega}_{IE}^N) \times \mathbf{V}^B \\ \mathbf{h}_{RB} &\equiv (J_{RB} \boldsymbol{\omega}_{EB}^B) \times \boldsymbol{\omega}_{EB}^B + \mathbf{V}^B \times (D_{RB} \boldsymbol{\omega}_{EB}^B) - \boldsymbol{\omega}_{EB}^B \times (D_{RB} \mathbf{V}^B) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}^B \\ \mathbf{M}^B \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{F}^a(\dot{\mathbf{V}}^B, \boldsymbol{\omega}_{EB}^B) + \mathbf{F}^s(\mathbf{V}^B) + \mathbf{F}^c(\mathbf{V}^B, \boldsymbol{\delta}) + \mathbf{F}^d(\mathbf{V}^B, \boldsymbol{\omega}_{EB}^B) \\ \mathbf{M}^a(\dot{\mathbf{V}}^B, \boldsymbol{\omega}_{EB}^B) + \mathbf{M}^s(\mathbf{V}^B) + \mathbf{M}^c(\mathbf{V}^B, \boldsymbol{\delta}) + \mathbf{M}^d(\mathbf{V}^B, \boldsymbol{\omega}_{EB}^B) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{F}^b(\boldsymbol{\epsilon}) \\ \mathbf{M}^b(\boldsymbol{\epsilon}) \end{bmatrix}$$

위의 식에서 $(\boldsymbol{\eta})^B$ 는 벡터 $\boldsymbol{\eta}$ 에 의해 결정되는 왜대칭행렬을 나타낸다. 조류의 영향을 무시하고, 항법장치 자세각 출력을 사용하여 수력모델에서 중력과 부력에 의한 힘과 모멘트를 계산하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} M & E \\ D & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}^B \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_{EB}^B \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{RB}(\mathbf{V}^B, \boldsymbol{\omega}_{EB}^B, \boldsymbol{\delta}, \boldsymbol{\epsilon}_{IN}) \\ \mathbf{h}_{RB}(\mathbf{V}^B, \boldsymbol{\omega}_{EB}^B, \boldsymbol{\delta}, \boldsymbol{\epsilon}_{IN}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{RH\phi}(\boldsymbol{\epsilon}_{IN}) \delta\boldsymbol{\phi}_{IN} \\ H_{RH\phi}(\boldsymbol{\epsilon}_{IN}) \delta\boldsymbol{\phi}_{IN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{RH} &\equiv \mathbf{f}_{RB}(\mathbf{V}^B, \boldsymbol{\omega}_{EB}^B, \boldsymbol{\rho}_{IN}, \boldsymbol{\epsilon}_{IN}) + \mathbf{F}^B - \mathbf{F}^a, \\ \mathbf{h}_{RH} &\equiv \mathbf{h}_{RB}(\mathbf{V}^B, \boldsymbol{\omega}_{EB}^B) + \mathbf{M}^B - \mathbf{M}^a, \end{aligned}$$

$$M \equiv \begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_v & 0 \\ 0 & 0 & m - Z_w \end{bmatrix}, E \equiv \begin{bmatrix} 0 & m z_G & 0 \\ -m z_G - Y_p & 0 & -Y_r \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$D \equiv \begin{bmatrix} 0 & -m z_G - K_v & 0 \\ m z_G & 0 & -M_w \\ 0 & -N_v & 0 \end{bmatrix}, J \equiv \begin{bmatrix} I_x - K_p & 0 & -K_r \\ 0 & I_y - M_q & 0 \\ 0 & 0 & I_z - N_r \end{bmatrix},$$

$$F_{RH\phi}(\boldsymbol{\epsilon}_{IN}) = \frac{\partial \mathbf{F}^b}{\partial \boldsymbol{\epsilon}}, \quad H_{RH\phi}(\boldsymbol{\epsilon}_{IN}) = \frac{\partial \mathbf{M}^b}{\partial \boldsymbol{\epsilon}}.$$

만일, 스트랩다운 항법장치가 보조센서로부터 측정된 속도정보를 이용한 보정항법필터를 포함하고 있어 가속도계 및 가속도계 바이어스에 의한 영향을 부분적으로 제거할 수 있다면, 항법좌표계 위치오차 $\delta \boldsymbol{\rho}_{IN}$, 속도오차 $\delta \mathbf{V}_{IN}^N = [\delta v_{IN}^N \ \delta w_{IN}^E \ \delta u_{IN}^D]^T$ 및 정렬오차 $\delta \boldsymbol{\phi}_{IN}$ 은 다음 미분방정식으로 간략히 모델링된다.

$$\delta \dot{\rho}_{IN}^N \approx P_\rho(\rho, \mathbf{e}, \mathbf{V}^B) \delta \rho_{IN}^N + P_v(\rho) \delta \mathbf{V}_{IN}^N \quad (4)$$

$$\delta \dot{\mathbf{V}}_{IN}^N \approx V_\rho(\rho, \mathbf{V}^B, \mathbf{e}) \delta \rho_{IN}^N + V_v(\rho, \mathbf{V}^B, \mathbf{e}) \delta \mathbf{V}_{IN}^N + V_\varphi(\rho, \mathbf{V}^B, \omega_{EB}^B, \mathbf{e}) \delta \varphi_{IN}^N$$

$$\delta \dot{\varphi}_{IN}^N \approx W_\rho(\rho, \mathbf{e}, \mathbf{V}^B) \delta \rho_{IN}^N + W_v(\rho, \mathbf{e}, \mathbf{V}^B) \delta \mathbf{V}_{IN}^N + W_\varphi(\rho, \mathbf{e}, \mathbf{V}^B) \delta \varphi_{IN}^N$$

만일 수중 자율이동체의 이동 범위가 제한되고 대부분의 잠항구간에서 순항한다면 지구타원체는 구(球)로, 피치/요 자세각과 동체좌표계 횡방향 속도성분은 미소각으로 간주할 수 있으므로 식 (4)에 사용된 행렬들을 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$P_\rho \approx \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{u \cos \psi - v \sin \psi}{(R_0 + h)^2} \\ \tan \lambda_{IN} (u \sin \psi + v \cos \psi) & 0 & -\frac{u \sin \psi + v \cos \psi}{(R_0 + h)^2 \cos \lambda_{IN}} \\ \frac{(R_0 + h) \cos \lambda_{IN}}{0} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_v \approx \text{diag} \left(\frac{1}{R_0 + h}, \frac{1}{(R_0 + h) \cos \lambda}, -1 \right)$$

$$V_\rho \approx \begin{bmatrix} 2\Omega^D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -2\Omega^N & 0 & 0 \end{bmatrix} (\mathbf{V}^N)_\times - \frac{1}{R_0 + h} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \rho^N \\ 0 & 0 & \rho^E \\ -\rho^N \sec^2 \lambda (R_0 + h) & 0 & \rho^D \end{bmatrix} (\mathbf{V}^N)_\times$$

$$V_v \approx -(2\omega_{IE}^N + \omega_{EN}^N)_\times + \frac{1}{R_0 + h} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\tan \lambda \end{bmatrix} (\mathbf{V}^N)_\times$$

$$V_\varphi \approx (\mathbf{f}^N)_\times$$

$$W_\rho = \frac{\partial \omega_{IN}^N}{\partial \rho} \approx \begin{bmatrix} \Omega^D & 0 & -\frac{\rho^N}{R_0 + h} \\ 0 & 0 & -\frac{\rho^E}{R_0 + h} \\ -\Omega^N - \rho^N \sec^2 \lambda & 0 & -\frac{\rho^D}{R_0 + h} \end{bmatrix}$$

$$W_v = \frac{\partial \omega_{IN}^N}{\partial \mathbf{V}^N} \approx \frac{1}{R_0 + h} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\tan \lambda \end{bmatrix}$$

$$W_\varphi = -(\omega_{IN}^N)_\times \approx \begin{bmatrix} 0 & \Omega^D + \rho^D & -\rho^E \\ -\Omega^D - \rho^D & 0 & \Omega^N + \rho^N \\ \rho^E & -\Omega^N - \rho^N & 0 \end{bmatrix}$$

위의 식에서 $\omega_{IE}^N = [\Omega^N \ 0 \ \Omega^D]^T$ 는 관성좌표계에 대한 지구고정좌표계의 회전각속도를 $\omega_{EN}^N = [\rho^N \ \rho^E \ \rho^D]^T$ 는 항법좌표계에서 정의된 수중 자율이동체의 이동각속도(transport rate)를 의미한다. 항법좌표계 비터벡터 \mathbf{f}^N 는 가속도계 출력을 좌표변환하여 계산되며, 일반화된 중력벡터 \mathbf{g}^N 는 위도의 함수로 기술된다.

이제, 수중 자율이동체의 동역학 모델 (3)과 항법오차 모델 (4)를 결합하면, 항법필터 설계를 위한 비선형 시스템 방정식을 정의할 수 있다. 만일 항법장치가 수심계 정보를 이용하여 수직채널 안정화를 수행하고 있다면 시스템 방정식은 13차 비선형 방정식으로 단순화 된다.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{w}_k \quad (5)$$

여기서 상태변수 \mathbf{x} 와 입력 \mathbf{u} 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{x} = [\mathbf{V}^B \ \omega_{EB}^B \ \delta \lambda_{IN} \ \delta \lambda_{IN} \ \delta v_{IN}^N \ \delta v_{IN}^E \ \delta \varphi_{IN}^N]^T,$$

$$\mathbf{u} = [\delta \rho_{IN} \ \mathbf{e}_{IN} \ \mathbf{f}^B]^T$$

식 (5)에서 \mathbf{w} 는 모델링오차를 반영하기 위한 것으로 분산이 Q 인 영평균 백색잡음으로 가정한다.

만일 도플러 속도계로부터 수중 자율이동체의 동체좌표계 속도벡터가 측정된다면, 항법필터 설계를 위한 측정방정식을 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\mathbf{y}_k = H\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (6)$$

여기서 측정치벡터와 측정행렬은 각각 $\mathbf{y} = \mathbf{V}_{DVL}^B$, $H = [\mathbf{I}^{3 \times 3} \ \mathbf{0}^{3 \times 3}]$ 로 정의되며, \mathbf{v} 는 분산이 R 인 영평균 백색 측정잡음이다.

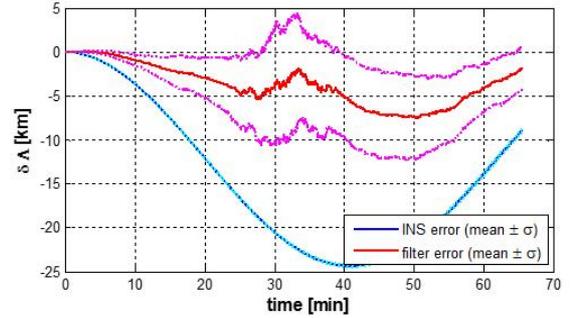
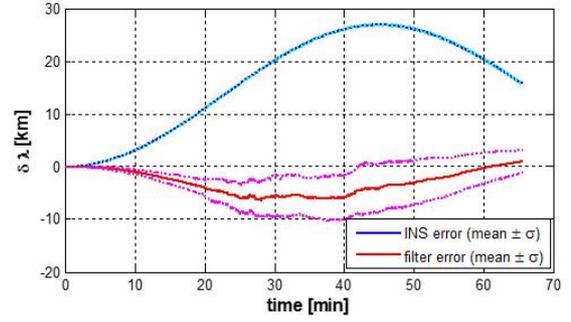
2.2 수중 항법성능 향상을 위한 항법필터

이상의 모델링 결과에 따라 수중 자율이동시스템의 항법필터 설계 문제는 비선형 확률 동적시스템 (5) 및 (6)에 대한 상태추정문제에 귀결된다. 시스템모델이 가진 비선형성을 적절히 다루기 위해 무향칼만필터 이론을 적용하면 수중 항법필터를 손쉽게 설계할 수 있다.

measurement update

$$\mathbf{X}_{k|k-1} = [\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \ \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \gamma \sqrt{P_{k|k-1}} \ \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} - \gamma \sqrt{P_{k|k-1}}]$$

$$\mathbf{Y}_{k|k-1} = H\mathbf{X}_{k|k-1}, \hat{\mathbf{y}}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(m)} \mathbf{Y}_{i,k|k-1}$$



〈그림 2〉 항법장치 출력 및 필터오차

$$P_{yy} = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(c)} [\mathbf{Y}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{y}}_{k|k-1}] [\mathbf{Y}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{y}}_{k|k-1}]^T + R$$

$$P_{xy} = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(c)} [\mathbf{X}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}] [\mathbf{Y}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{y}}_{k|k-1}]^T$$

$$K_k = P_{xy} P_{yy}^{-1}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + K_k (\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_{k|k-1})$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k P_{yy} K_k^T$$

time update

$$\mathbf{X}_{k|k} = [\hat{\mathbf{x}}_{k|k} \ \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \gamma \sqrt{P_{k|k}} \ \hat{\mathbf{x}}_{k|k} - \gamma \sqrt{P_{k|k}}]$$

$$\mathbf{X}_{k+1|k}^* = f(\mathbf{X}_{k|k}), \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(m)} \mathbf{X}_{i,k+1|k}^*$$

$$P_{k+1|k} = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(c)} [\mathbf{X}_{i,k+1|k}^* - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}] [\mathbf{X}_{i,k+1|k}^* - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}]^T + Q$$

3. 모의실험

제안된 수리학 모델 내장형 보정항법 필터구조의 유용성과 항법성능 개선효과를 확인하기 위해 모의실험을 수행하였다. 25회 몬테카를로 모의실험 결과는 그림 2에 도시한 바와 같다. 모의실험 결과, 제안된 보정항법 필터를 적용할 경우 평균오차 관점에서 볼 때, 항법장치의 오차를 1/3 수준으로 줄일 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 수중 자율이동체에 장착된 속도센서 측정치와 수중 운동체의 동특성 모델을 이용한 항법필터 설계 개념을 제안하였다. 항법오차에 대한 가관측성을 확보하기 위해, 수중 운동체의 운동방정식과 항법오차모델이 결합된 시스템 방정식을 유도하고, 무향 칼만필터를 이용하여 보정항법 필터를 설계하였다. 모의실험 결과 항법오차의 가관측성이 확보되지 않은 상황 속에서도 제안된 필터가 만족할 만한 항법성능을 제공함을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 박용근, 강철우, 이달호, 박찬국, “무인자율수중운동체의 보정항법을 위한 축소된 오차 모델”, 제어로봇시스템학회 논문지, 제5호, pp. 584-591, 2014.
- [2] Hegreness, O., Hallingstad, O., mmJalving, B. “Comparison of Mathematical Models for the HUGIN 4500 AUV Based on Experimental Data“, Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, 2007.
- [3] Gertler, M. and Hagan G. R. “Standard Equations of Motion for Submarine Simulation“, Naval Ship Research and Development Report 2510, June 1967.