

다중경로 도달시간차이를 이용한 확장칼만필터 기반의 표적 위치추정 기법

조현덕

국방과학연구소 해양기술연구원

Target Localization Method based on Extended Kalman Filter using Multipath Time Difference of Arrival

Hyeon-Deok Cho

Maritime Technology Research Institute, Agency for Defense Development

요 약 수동소나를 운용하는 수중 플랫폼은 임무수행을 위해 표적의 위치정보를 획득해야 한다. 동해와 같이 해저면 반사파가 존재하는 환경에서는 다중경로로 수신한 신호 간 도달시간 차이를 이용하여 표적의 위치를 추정할 수 있다. 본 논문에서는 다중경로 음파전달 환경에서 수동소나 운용 시 도달시간차이를 이용한 확장칼만필터(EKF: Extended Kalman Filter, 이하 EKF) 기반의 표적 위치 추정 기법을 제안한다. 기존의 표적기동분석(TMA: Target Motion Analysis, 이하 TMA)은 위치추정에 필요한 측정치를 장시간 누적해야하며 자함의 기동상태에 대한 제약이 있어 한정된 상황에서만 활용할 수 있다. 제안하는 방법은 표적에 대한 다중경로 음파전달로 인한 신호 간 도달시간 차이와 방위 정보를 측정치로 하는 확장칼만필터를 사용한다. 이 방법은 자함 기동과 측정치 누적 시간에 관계없이 표적 위치추정이 가능한 장점이 있다. 제안 기법의 성능 분석을 위해 표적의 거리와 수심에 따른 시뮬레이션을 반복 수행하여 거리에 따른 위치추정 오차와 수심에 따른 위치추정 오차를 분석하였다. 또한 거리에 따른 도달시간차이와 수심에 따른 도달시간차이를 분석하여 위치추정 오차와의 상관관계를 분석하였다.

Abstract An underwater platform operating a passive sonar needs to acquire the target position to perform its mission. In an environment where sea-floor reflections exist, the position of a target can be estimated using the difference in the arrival time between the signals received through multipaths. In this paper, a method of localization for passive sonar is introduced, based on the EKF (Extended Kalman Filter) using the multipath time difference of arrival in underwater environments. TMA (Target Motion Analysis) requires accumulated measurements for long periods and has limitations on own-ship movement, allowing it to be used only in certain situations. The proposed method uses an EKF, which takes measurements of the time differences of the signal arrival in multipath environments. The method allows for target localization without restrictions on own-ship movement or the need for an observation time. To analyze the performance of the proposed method, simulation according to the distance and depth of the target was performed repeatedly, and the localization error according to the distance and water depth were analyzed. In addition, the correlation with the estimated position error was assessed by analyzing the arrival time difference according to the water depth.

Keywords : Sonar, Localization, Multipath, Time Difference of Arrival, Extended Kalman Filter

*Corresponding Author : Hyeon-Deok Cho(Maritime Technology Research Institute, Agency for Defense Development)
email: chd@add.re.kr

Received April 16, 2021

Revised May 17, 2021

Accepted June 4, 2021

Published June 30, 2021

1. 서론

은밀성이 요구되는 수중 플랫폼은 수동소나를 이용하여 표적의 방사소음을 탐지함으로써 표적의 방위정보를 획득한다. 그러나 실질적인 임무수행을 위해서는 추가적으로 표적의 위치정보가 필요하다. 수중 플랫폼의 주요 활동 구역인 동해에서는 해저면 반사파와 같은 다중경로를 통해 표적 탐지가 가능하며 다중경로로 수신한 신호 간 도달시간차이를 이용하여 표적의 위치 추정이 가능하다[1,2]. 하지만 실제 환경에서는 신호와 잡음 간 상호상관으로 인하여 다중경로 수신 신호 간 도달시간차이 추정 시 오차가 포함되며 이는 위치추정 오차로 이어진다.

위치추정 정확도를 향상시키기 위하여 수동소나로 탐지한 방위와 도달시간차이를 일정시간 누적하여 표적의 위치를 추정하는 TMA 방법이 제안되었다[3]. TMA는 등속직선운동을 하는 표적에 대해 자함의 변침 또는 변속을 통해 가관측성을 확보하여 표적의 위치를 추정한다. 이를 위해서는 측정치를 장시간 누적해야 하는 제약이 있다[4]. 하지만 수중 플랫폼을 운용하는 상황에서는 자함의 기동 범위가 제한되는 경우가 일반적이기 때문에 한정된 상황에서만 TMA가 가능하다.

본 논문에서는 자함의 기동과 측정치 누적 시간에 관계없이 표적의 위치를 추정하기 위한 방법으로 표적의 방위와 다중경로로 수신된 신호 간 도달시간차이를 측정치로 하는 EKF 기반의 표적 위치 추정 기법을 제안하고자 한다. 칼만필터(KF: Kalman Filter, 이하 KF)는 측정치와 예측치에 적절한 이득을 적용하여 추정 오차를 줄일 수 있기 때문에 앞에서 언급한 문제를 효율적으로 해결할 수 있다[5]. 표적의 방위와 다중경로로 수신된 신호 간 도달시간차이가 KF의 측정치로 활용되고 표적의 위치가 KF의 상태 추정값이므로 시스템 모델은 비선형성을 가지게 된다. 따라서 비선형 시스템 모델의 측정 행렬을 선형화 시키는 EKF를 적용하였다[6,7].

논문의 구성은 1장 서론에 이어 2장에서는 다중경로 음파전달 환경에서의 표적과 자함에 대한 문제를 정의한다. 3장에서는 표적 방위와 도달시간차이를 측정치로 갖는 EKF에 대해 소개하며 4장에서는 설계된 EKF를 이용한 위치추정기법에 대한 시뮬레이션을 통해 위치추정 성능분석 결과를 제시한다. 또한 표적의 거리와 수심에 따른 위치추정 오차에 대한 분석을 제시한다. 그리고 5장에서 결론을 맺는다.

2. 문제 정의

본 연구에서는 표적의 신호가 직접경로와 해저면 반사경로를 통해 자함으로 수신되는 다중경로 환경을 가정하였다.

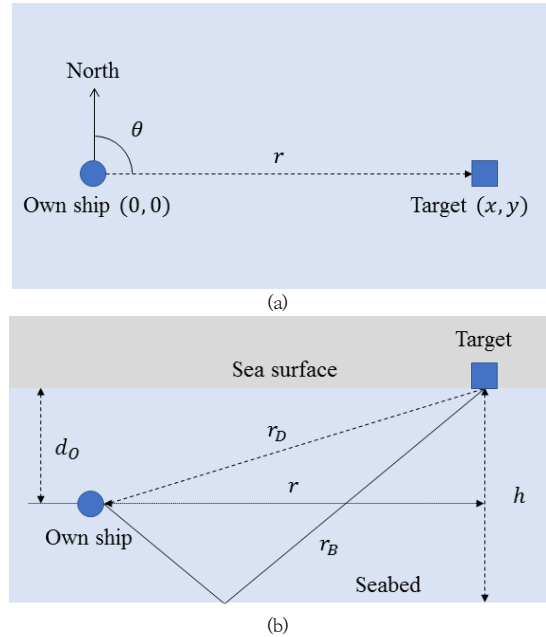


Fig. 1. Geometry of own ship and target in multipath environment as seen from (a) top view and (b) side view

Fig. 1은 자함인 수중 플랫폼과 표적인 수상 플랫폼의 기하학적 위치 관계를 나타낸 것이다. 2차원 평면상에서 자함의 위치를 원점으로 가정하였고 이 때 표적의 상대적인 위치를 (x,y) 로 나타내었다. θ 는 진북을 기준으로 표적의 탐지방위이며 r 은 2차원 평면상에서의 자함과 표적 간 거리로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (1)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2)$$

d_O 는 자함 심도이고 h 는 해저수심으로 알고 있는 값으로 가정한다. r_D 와 r_B 는 각각 자함과 표적 간의 직접 경로 거리와 해저면 반사경로 거리를 의미하며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$r_D = \sqrt{r^2 + d_O^2} \quad (3)$$

$$r_B = \sqrt{r^2 + (2h - d_O)^2} \quad (4)$$

음파 전달 모델은 등음속 구조를 가정하였다. 직접경로와 해지면 반사경로의 경로차이와 이로 인한 도달시간차이의 관계식을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{\Delta r}{c} \\ &= \frac{\sqrt{r^2 + (2h - d_O)^2} - \sqrt{r^2 + d_O^2}}{c} \end{aligned} \quad (5)$$

이때 τ 는 도달시간차이를 의미하며 c 는 수중에서의 음속을 의미한다. Δr 은 직접경로와 반사경로의 경로차이이며 $\Delta r = r_B - r_D$ 이다.

본 논문에서 제안하는 방법은 표적의 탐지방위 θ 와 도달시간차이 τ 를 측정치로 설정하여 이를 이용하여 표적의 위치정보 (x, y) 를 추정하는 것이다. 시뮬레이션을 통해 해저수심 h 와 자함과 표적 간 거리 r 에 따른 표적의 위치를 추정하고, 위치추정 오차를 분석한다. 이를 통해 수중 플랫폼에서 표적 위치 추정이 가능한 적정 운용 수심과 표적 탐지 거리를 알 수 있다.

측정치로부터 표적의 초기 위치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_0 = R \sin \theta \quad (6)$$

$$y_0 = R \cos \theta \quad (7)$$

where

$$R = \sqrt{\left\{ (h - d_O)^2 - \left(\frac{c\tau}{2} \right)^2 \right\} \left\{ \left(\frac{2h}{c\tau} \right)^2 - 1 \right\}}$$

R 은 자함과 표적 간 수평거리로, 표적의 (x, y) 위치에 대한 관계식으로 정의된 Eq. (2)와는 다르게 자함의 심도와 해저면을 기준으로 하는 자함 심도의 대칭 방향에 위치한 가상의 지점을 초점으로 하는 쌍곡선의 방정식으로부터 도달시간차이에 대한 관계식으로 정의된다.

3. EKF를 이용한 위치추정 기법 설계

이 장에서는 표적의 방위와 다중경로로 수신된 신호 간 도달시간차이를 측정치로 하여 표적의 위치를 추정하

는 EKF를 소개한다. Fig. 2는 EKF 알고리즘의 수행 순서를 나타낸다.

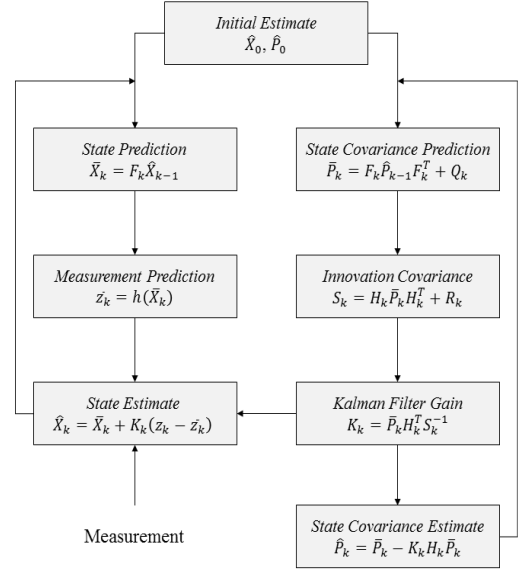


Fig. 2. The EKF algorithm flow diagram

기동하는 표적의 위치정보를 추정하기 위해서는 우선 표적의 기동 특성에 대한 동역학 모델링이 필요하다. 수면 위를 움직이는 표적의 기동특성을 반영한 표적의 상태 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$X_k = \begin{bmatrix} x_k & \dot{x}_k & y_k & \dot{y}_k \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$X_k = F_k X_{k-1} + w_k \quad (9)$$

여기서 X_k 는 k 시간에서 표적의 상태변수를 포함하고 있는 상태 벡터이며 상태변수 x_k 와 y_k 는 표적의 x 축 위치와 y 축 위치 좌표이며 상태변수 \dot{x}_k 와 \dot{y}_k 는 각각 x 축과 y 축 방향으로의 표적 속력을 의미한다. F_k 는 k 시간의 상태 천이 행렬(transition matrix)이며 샘플링 주기 T 를 갖는 선형모델로 가정한다. w_k 는 k 시간의 공정잡음(process noise)으로 평균이 0, 공분산 행렬 Q_k 인 백색 가우시안 잡음(white Gaussian noise)으로 가정한다.

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

소나에서 획득하는 측정치 정보는 탐지방위와 도달시간차이 정보이기 때문에 상태변수를 측정치 정보로 변환하기 위해서는 비선형성을 고려한 측정치 모델이 필요하다. EKF를 비선형성이 강한 모델에 적용하는 경우 필터의 성능이 저하되거나 필터가 발산할 가능성이 있지만 수동소나가 탑재된 수상 및 수중 플랫폼과 같은 기동성이 낮은 운동체의 경우에는 잠재적 선형화 오차를 무시할 수 있다[8].

$$z_k = h(X_k) + v_k \quad (11)$$

$$h(X_k) = \begin{bmatrix} \theta_k \\ \tau_k \end{bmatrix} \quad (12)$$

z_k 는 k 시간의 탐지방위 θ_k 와 도달시간차이 τ_k 의 측정치 벡터이며, $h(\cdot)$ 는 표적의 상태 벡터와 측정치 벡터와의 관계 함수이다. v_k 는 k 시간의 측정잡음으로 평균이 0, 공분산 행렬 R_k 인 백색 가우시안 잡음으로 가정한다.

시스템 모델과 상태 변수를 이용하여 탐지방위와 도달시간차이를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta_k = \tan^{-1} \frac{x_k}{y_k} \quad (13)$$

$$\tau_k = \frac{\sqrt{r_{xy}^2 + (2h - d_O)^2} - \sqrt{r_{xy}^2 + d_O^2}}{c} \quad (14)$$

표적의 동역학 모델과 측정치 모델로부터 예측 모델을 세울 수 있다. $k-1$ 시간에 추정된 상태 벡터는 \hat{X}_{k-1} 로 표현하였고, k 시간에 예측된 상태 벡터와 측정치 벡터는 \bar{X}_k 와 \bar{z}_k 로 표현하였다.

$$\bar{X}_k = F_k \hat{X}_{k-1} \quad (15)$$

$$\bar{z}_k = h(\bar{X}_k) \quad (16)$$

상태 벡터와 측정치 벡터의 예측값에 대한 오차 공분산은 \bar{P}_k 와 S_k 로 표현하였고 관계식은 다음과 같다. 이때 H_k 는 측정행렬로 Eq. (12)에서 정의된 $h(X_k)$ 의 자코비안 매트릭스로 정의된다.

$$\bar{P}_k = F_k \hat{P}_{k-1} F_k^T + Q_k \quad (17)$$

$$S_k = H_k \bar{P}_k H_k^T + R_k \quad (18)$$

$$H_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial x} & \frac{\partial \theta}{\partial y} & \frac{\partial \theta}{\partial x} & \frac{\partial \theta}{\partial y} \\ \frac{\partial \tau}{\partial x} & \frac{\partial \tau}{\partial x} & \frac{\partial \tau}{\partial y} & \frac{\partial \tau}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (19)$$

where

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{y}{r_{xy}^2}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{-x}{r_{xy}^2}$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} = \frac{x}{c} \left(\frac{1}{\sqrt{r_{xy}^2 + (2h - d_O)^2}} - \frac{1}{\sqrt{r_{xy}^2 + d_O^2}} \right)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial y} = \frac{y}{c} \left(\frac{1}{\sqrt{r_{xy}^2 + (2h - d_O)^2}} - \frac{1}{\sqrt{r_{xy}^2 + d_O^2}} \right)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\partial \tau}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial y} = 0$$

예측된 값과 측정치로부터 상태 벡터와 오차 공분산을 추정할 수 있으며 K_k 는 KF의 이득을 나타낸다.

$$K_k = \bar{P}_k H_k^T S_k^{-1} \quad (20)$$

$$\hat{X}_k = \bar{X}_k + K_k (z_k - \bar{z}_k) \quad (21)$$

$$\hat{P}_k = \bar{P}_k - K_k H_k \bar{P}_k \quad (22)$$

최종적으로 산출해낸 상태 벡터 \hat{X}_k 로부터 표적의 위치정보를 추정할 수 있다.

4. 시뮬레이션 및 성능분석

본 장에서는 앞에서 소개한 표적의 방위와 도달시간차이 정보를 측정치로 하여 표적의 위치를 추정하는 EKF의 성능을 분석하기 위해 시뮬레이션 결과를 제시한다. 정지상태의 자함과 등속직선 기동하는 표적이 존재하는 시나리오에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 음속은 1,500 m/s이며 자함은 수중 플랫폼으로서 심도는 100 m로 설정하였고 표적은 수상 플랫폼으로 설정하였다. 일반적인 원통형 수동소나를 고려하여 방위 측정잡음 표준편차 σ_θ 는 1°, 도달시간차이 측정잡음 표준편차 σ_τ 는 0.1 msec으로 설정하였다. 탐지 정보는 1초 주기로 갱신되며, 총 800개 프레임($t = 1, \dots, 800$ sec) 정보를 이용하였다. 표적의 위치추정 시작위치는 Target(n) = (2*n km, -2 km). $n = 1, \dots, 10$ 이며 표적의 속력은 5m/s, 침로는 0°로써 표적의 위치추정 종료위치는

Target(n) = (2*n km, 2 km) 이다. 동해 환경을 고려하여 수심을 500 m에서 3,000 m까지 500m 간격으로 조정하면서 수심과 표적 거리에 따른 위치 정확도를 분석하기 위해 시뮬레이션을 10,000회 반복하여 수행하였다.

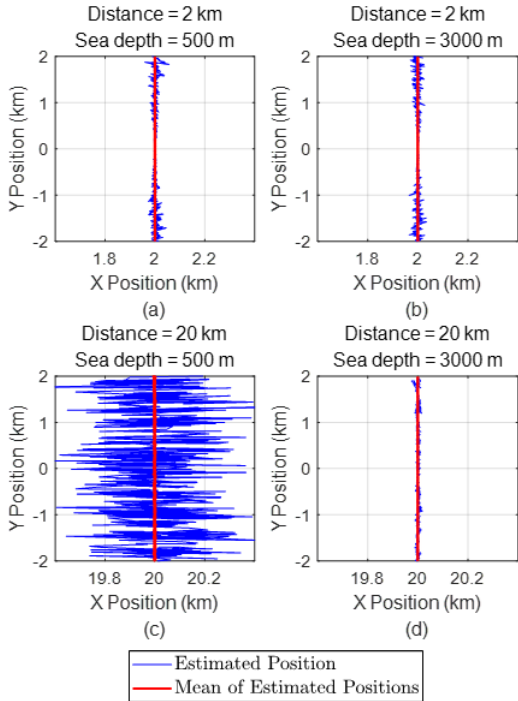


Fig. 3. The estimated position and mean of estimated positions for (a) x=2 km, depth=500 m, (b) x=2 km, depth=3000 m, (c) x=20 km, depth=500 m, (d) x=20 km, depth=3000 m

Fig. 3은 표적 거리와 수심에 따른 위치추정 결과를 비교하기 위하여 X-축 거리가 2 km와 20 km, 수심이 500 m와 3000 m 인 경우에 대한 한 번의 독립시행으로 얻은 표적 위치추정 결과와 10,000 회 반복하여 얻은 위치추정 결과들의 평균을 나타낸다. 표적의 위치추정 평균값은 시나리오와 근사함을 확인할 수 있지만 한 번의 독립시행으로 얻은 위치추정값은 실제 위치와 차이를 보여주고 있음을 알 수 있다.

또한 Fig. 3에서 표적의 거리가 멀고 수심이 얕을수록 평균위치와의 편차가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 반면 깊은 수심에서는 평균위치와의 편차가 표적의 거리 차이에 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 표적의 거리와 수심에 따른 위치추정 오차를 Fig. 4에 나타내었다.

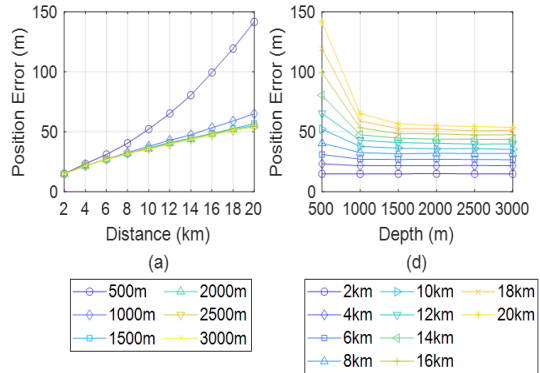


Fig. 4. The position error according to (a) distance by each depth and (b) depth by each distance.

Fig. 4(a)는 표적의 위치추정 오차가 자함과 표적의 거리가 멀어질수록 증가하고 수심이 깊을수록 감소하는 것을 보여준다. 수심 1000 m 이상에서는 위치추정 오차가 거리에 비례하여 선형적으로 증가하는 추세를 보이지만 수심 500 m에서는 위치추정 오차가 가파르게 증가함을 알 수 있다. 이를 통해 500 m 이하의 수심에서는 위치추정 정확도가 크게 저하되는 것을 추측할 수 있다. 또한 1000 m 이상의 수심에서 동일한 거리에 위치한 표적에 대한 위치추정 오차는 근소한 차이를 보이며 이러한 특징은 Fig. 4(b)에서 확인할 수 있다.

Fig. 5는 자함과 표적의 거리와 수심에 따른 다중경로의 도달시간차이를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에서 자함과 표적의 거리가 멀어질수록 도달시간차이가 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(a)와 비교해보면 도달시간차이가 줄어들수록 표적의 위치추정 오차는 증가하며 수심 500 m의 경우 거리 별 도달시간차이의 차이가 매우 작음을 알 수 있다. 도달시간차이가 작은 경우 도달시간차

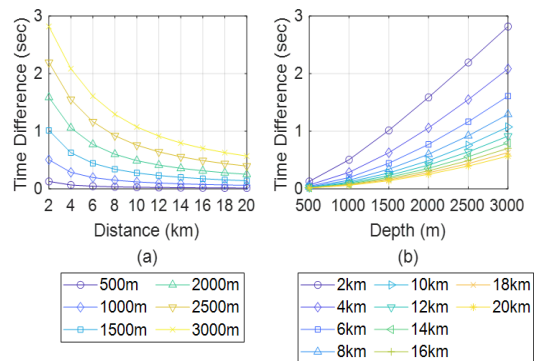


Fig. 5. The time difference according to (a) distance by each depth and (b) depth by each distance.

이 측정잡음에 민감한 영향을 받게되고 위치추정 오차가 커지게 된다. 또한 동일한 거리에 위치한 표적에 대해 수심이 깊을수록 도달시간차이가 증가하는 것을 Fig. 5(b)에서 확인할 수 있다. 이는 도달시간차이가 클수록 동일한 도달시간차이 측정잡음에 대해 영향을 적게 받게 되는 것을 의미한다. Fig. 4(b)의 1000 m 이상의 수심에서는 위치추정오차가 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있는데 이를 통해 일정 크기 이상의 도달시간차이는 측정잡음의 영향을 거의 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 3의 표적 기동 시나리오에 대한 시뮬레이션 반복 수행 시 표적이 자함과의 최단근접점(CPA : Closet Point of Approach, 이하 CPA)을 지나는 $t = 400$ sec 시점을 나타낸 것이다. CPA에 위치한 표적의 y 좌표는 0이 되므로 표적의 X-축 거리가 표적과 자함과의 거리가 된다. Fig. 6은 EKF를 이용한 위치추정 성

능을 비교하기 위하여 표적의 위치추정 분포, 위치추정 평균과 표준편차 변경, 측정치를 위치로 변환한 결과와 실제 위치를 함께 보여준다. 측정치 변환값은 방위와 도달시간차이 측정치를 Eq. (6)과 Eq. (7)을 이용하여 (x,y) 좌표로 변환하여 사용하였다. 정확한 비교를 위해 Fig. 6은 각각의 경우에 대해 동일한 축척을 적용하였다. 측정치를 바로 변환한 표적의 위치 분포는 실제 표적의 위치에서 넓게 퍼져있는 것을 알 수 있다. 이에 비해 EKF를 통해 얻은 위치추정 분포는 Y-축 방향으로는 상대적으로 분포가 좁아졌으나, X-축 방향으로는 큰 차이를 보이지 않고 있음을 알 수 있다. 하지만 표적의 위치추정 표준편차 영역을 통해 EKF의 위치추정 분포가 표적의 실제 위치에 상당히 집중해 있음을 알 수 있다.

Table 1은 Fig. 6의 표적의 위치추정 분포에 대한 평균과 표준편차를 나타낸다. μ_x 와 μ_y 는 표적의 위치 (x,y) 에 대한 추정 평균을 나타낸 것이며, σ_x 와 σ_y 는 표적의 위치추정 표준편차를 의미한다. Fig 5.와 Table 1에서 보는 바와 같이 위치추정 평균은 표적의 실제 위치와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 수심이 다르더라도 표적 거리가 동일한 경우에는 σ_y 가 근소한 차이로 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 같은 수심에서 표적의 거리가 멀어질수록 σ_y 는 커지는 것을 알 수 있다. σ_x 는 σ_y 와 마찬가지로 같은 수심에서 표적의 거리가 멀어질수록 커지지만, 표적의 거리가 동일한 경우에는 수심이 깊어질수록 작아지는 것을 알 수 있다.

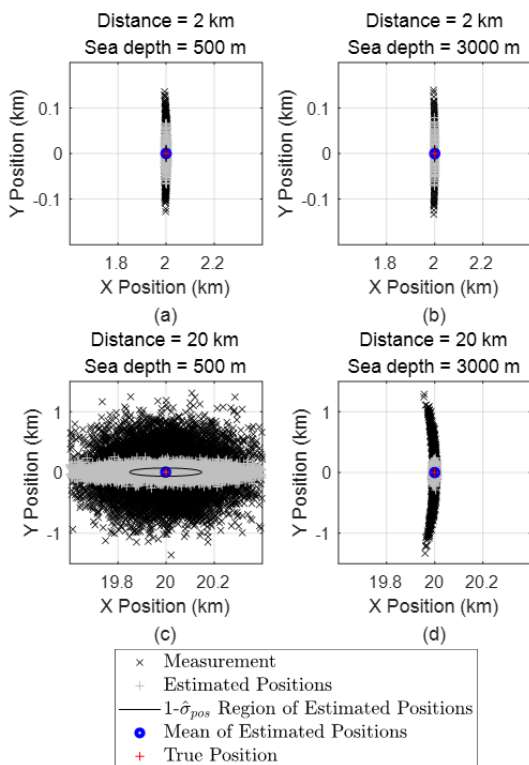


Fig. 6. The distribution of positions converted from measurement for 10,000 independent runs; estimated positions for 10,000 independent runs; true position; mean of estimated positions; region within one standard deviation of estimated positions for (a) $x=2$ km, depth=500 m, (b) $x=2$ km, depth=3000 m, (c) $x=20$ km, depth=500 m, (d) $x=20$ km, depth=3000 m

Table 1. The mean and standard deviation of estimated positions for 10,000 independent runs

Case	μ_x (m)	μ_y (m)	σ_x (m)	σ_y (m)
distance=2 km, depth=500 m	1,999.98	0.19	1.72	18.36
distance=2 km, depth=3,000 m	1,999.99	-0.05	0.26	18.46
distance=20 km, depth=500 m	19,998.43	6.30	149.85	67.70
distance=20 km, depth=3,000 m	19,999.84	0.53	3.67	67.01

5. 결론

본 논문에서는 표적의 방위와 다중경로로 수신된 신호 간 도달시간차이를 측정치로 하는 EKF 기반의 표적 위치 추정 기법을 제안하여 위치추정 성능과 표적의 거리

와 수신에 따른 위치추정 정확도에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주었다. 자함의 기동과 측정치 누적없이 EKF를 사용하여 표적의 위치추정 성능을 확인하였다. 1000 m 이상의 수신에서는 원거리 표적에 대해서도 우수한 위치추정 정확도를 보임을 확인하였다. 또한 도달시간차이 측정잡음이 동일한 경우 도달시간차이가 작을수록 위치추정 오차가 증가함을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 기법의 결과가 기존의 측정치를 변환한 위치추정 결과보다 정확하다는 것을 확인할 수 있었다.

향후 한국의 음파전달모델을 적용한 위치추정 기법에 대한 연구가 필요하며 해상실험을 통해 실제 해양환경과 음파전달모델과의 차이에 따른 영향성 분석과 알고리즘 성능검증이 요구된다.

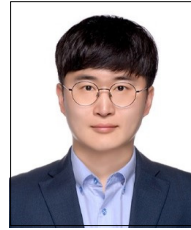
References

- [1] H. Li, K. Yang and R. Duan, "Robust multipath time-delay estimation of broadband source using a vertical line array in deep water", *IEEE Signal Processing Letters*, Vol.27, pp.51-55, Nov. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1109/LSP.2019.2954979>
- [2] G. Li, J. Wu, T. Tang, Z. Chen, J. Chen and H. Liu, "Underwater acoustic time delay estimation based on envelope differences of correlation functions," *Sensors*, Vol.19, No.5, Mar. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.3390/s19051259>
- [3] P. Blanc-Benon and C. Jauffret, "TMA from bearing and multipath time delays," *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System*, Vol.33, No.3, pp.813-824, Jul. 1997.
DOI: <https://doi.org/10.1109/7.599251>
- [4] V. J. Aidala, "Kalman filter behavior in bearing-only tracking applications," *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System*, Vol. AES-15, No.1, pp.29-39, Jan. 1976.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.1979.308793>
- [5] R. E. Kalman, "A new Approach to linear filtering and prediction problems," *Journal of Basic Engineering*, Vol.82, No.1, pp.35-45, Mar. 1960.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3662552>
- [6] L. D. Hostetler and R. D. Andreas, "Nonlinear kalman filtering techniques for terrain-aided navigation," *IEEE. Trans. Autom. Control*, Vol. 28, pp.315-323, Mar. 1983.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TAC.1983.1103232>
- [7] Y. Bar-Shalom and T. E. Fortmann, *Tracking and Data Association*, p.353, Academic Press, 1983.
- [8] M. St-Pierre and D. Gingras, "Comparison between the unscented kalman filter and the extended kalman

filter for the position estimation module of an integrated navigation information system," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, Parma, Italy, pp.831-835, Jun. 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1109/IVS.2004.1336492>

조 현 덕(Hyeon-Deok Cho)

[정회원]



- 2012년 2월 : 부산대학교 전자전 기공학부 학사
- 2015년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학부 (공학석사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 국방과학연구소 해양기술연구원 연구원

<관심분야>

수동소나, 정보처리