



Received: 2024/05/29
Revised: 2024/06/10
Accepted: 2024/06/27
Published: 2024/06/30

***Corresponding Author:**

Min-Seok Han

Dept. of Electronics and Control Engineering,
Republic of Korea Naval Academy
1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si,
Gyungsangnam-do, 51704, Republic of Korea
Tel: +82-55-907-5323
E-mail: mshan1024@navy.ac.kr

확장형 칼만 필터 (EKF)를 적용한 기뢰 탐지용 수중 드론의 정확도 향상

Accuracy Improvement of Mine Detection Underwater Drone with Extended Kalman Filter Application

황해석¹, 이서진¹, 홍승재¹, 한민석^{2*}

¹해군사관학교 전자제어공학과 사관생도

²해군사관학교 전자제어공학과 부교수

Hae-Seok Hwang¹, Seo-Jin Lee¹, Seung-Jae Hong¹, Min-Seok Han^{2*}

¹Midshipman, Dept. of Electronics and Control Engineering, Republic of Korea Naval Academy

²Associate Professor, Dept. of Electronics and Control Engineering, Republic of Korea Naval Academy

Abstract

본 논문에서는 확장형 칼만 필터를 적용하여 수중 환경에서 수중 드론의 기뢰 탐지 정확도를 향상시키기 위한 방안을 제안한다. Matlab 코드 기반 시뮬레이션 결과 확장형 칼만 필터를 적용했을 때 수중 기뢰 탐지 시 정확도가 27% 향상되고, 온도, 압력 및 소음과 같은 수중 환경의 복잡한 변수들로 인한 오류를 효과적으로 보정할 수 있었다. 이는 확장형 칼만 필터가 다양한 수중 환경 조건에서 신뢰할 수 있는 탐지 결과를 제공할 수 있음을 의미한다. 마지막으로 확장형 칼만 필터를 수중 드론에 적용할 방안과 향후 연구 과제에 대하여 제시하였다.

In this paper, we propose a method to improve the mine detection accuracy of underwater drones in the underwater environment by applying the extended Kalman filter. Matlab code-based simulation showed that when an extended Kalman filter was applied, the accuracy was improved by 27% when detecting underwater mines, and errors caused by complex variables in the underwater environment such as temperature, pressure, and noise could be effectively corrected. This means that EKF can provide reliable detection results in a variety of underwater environmental conditions. Finally, we presented ways to apply the extended Kalman filter to underwater drones and future research tasks.

Keywords

확장형 칼만 필터(Extended Kalman Filter),
수중 드론(Underwater Drone),
기뢰 탐지(Mine Detection),
수중 환경(Underwater Environment)

Acknowledgement

이 논문은 2024년도 해군사관학교 해양연구소 및 해사교육진흥재단 지원을 받아 수행된 논문임.

1. 서론

기뢰는 저렴한 비용과 낮은 기술 수준으로도 전략·전술적 효과를 달성할 수 있고 경로차단, 연안 및 항만 방어뿐만 아니라 해상 봉쇄, 표면 대항 및 대잠전 공격에도 활용될 수 있는 전략 무기이다. 기뢰는 북한과 같은 소규모 국가가 적군과의 전력 차이를 줄이고 기술 우위를 점하는 데 효과적으로 활용될 수 있다. 특히, 북한은 5만 개가 넘는 기뢰를 보유하고 있으며 은밀하고 기습적으로 기뢰를 부설할 수 있는 다양한 수단을 보유하고 있다. 따라서 남한은 기뢰의 위협이 높은 국가라 할 수 있다[1].

수중 환경에서 기뢰 탐지는 해양 안전 및 국방 분야에서 매우 중요하다. 해저에 설치된 기뢰는 해양 생태계에 위협을 가할 뿐만 아니라 해상 교통 및 해상 작전에도 심각한 위협을 초래할 수 있다. 특히, 수중 기뢰 탐지 및 제거 작업은 군함을 비롯한 선박 및 인력의 안전을 확보하기 위해 필수적인 절차이다[2]. 따라서, 효율적이고 정확한 기뢰 탐지 기술의 개발은 해상 작전 지속능력 및 해양 안보를 보장하고 사고를 예방하는 데 중요한 역할을 한다.

하지만, 수중 환경에서의 기뢰 탐지는 여러 가지 환경적인 측면에서 어려움에 직면해 있다. 수중 환경은 물 위에 비해 온도 및 압력 변화, 소음의 변동이 심해 탐지 장비의 성능을 저하시킬 수 있다.

첫째, 수온 변화는 수중 음향 신호의 전파 속도에 영향을 미쳐 탐지 결과의 정확성을 떨어뜨린다. 둘째, 수압의 변화는 장비의 감지 능력에 영향을 미치며, 특히 깊은 해역에서는 더욱 큰 변동이 발생할 수 있다. 셋째, 수중 소음은 자연적인 배경 소음과 인위적인 소음 모두를 포함하며, 이는 탐지 신호와 혼동되어 정확한 기뢰 위치의 파악을 어렵게 만든다. 이러한 요인들은 종합적으로 기뢰 탐지의 정확도를 저하시켜 탐지 결과의 신뢰성 확보를 어렵게 한다[3,4].

따라서, 본 논문에서는 기뢰 탐지용 수중 드론의 정확도 향상을 위해 확장형 칼만 필터(extended Kalman filter, EKF)를 적용하는 것을 제안하고 EKF를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 기뢰 탐지 정확도를 비교하도록 한다. EKF는 비선형 시스템의 상태 추정을 개선하는 데 널리 사용되는 방법으로, 수중 환경의 복잡한 변동 요소들을 효과적으로 보정할 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

EKF는 시스템 모델과 관측 모델이 선형이 아닐 때에도 잡음과 불확실성 관리를 통해 실시간 상태 추정을 효과적으로 수행할 수 있다. 수중 드론을 통한 기뢰 탐지는 복잡한 동적 시스템(수중 환경)을 다루므로 EKF가 적합하다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구는 EKF가 수중 기뢰 탐지의 정확도를 얼마나 향상시킬 수 있는지를 분석하고, 수중 환경에서의 기뢰 탐지 기술의 신뢰성을 높이는 방안을 모색하고자 한다.

2. 관련 연구

2.1 기존 기뢰 탐지 방법 및 기술

현재 수중 기뢰 탐지를 위해 다양한 방법과 기술이 사용되고 있다. 대표적인 기술로는 음파 탐지기(sonar), 자기 탐지기(magnetic detector), 그리고 지상 침투 레이더(ground penetrating radar, GPR)가 있다. 음파 탐지기는 음파를 이용해 기뢰의 위치를 파악하는 데 널리 사용되며, 주로 해군 작전에서 활용된다. 자기 탐지기는 금속 성분을 가진 기뢰를 탐지하는 데 효과적이며, 특히 해저에 매설된 금속 기뢰를 찾는 데 유용하다. GPR은 지하에 있는 물체의 반사파를 분석하여 기뢰를 탐지하는 기술로, 다양한 지형 조건에서 활용이 가능하다[5]. 그러나 이들 기술은 모두 수중 환경에서 발생하는 온도 및 압력 변

화, 소음의 변동 등으로 인해 탐지 정확도가 저하될 수 있다는 한계를 가지고 있다[6,7].

2.2 유사 상황에서의 EKF 적용 사례

EKF는 다양한 분야에서 상태 추정을 위해 널리 사용되는 알고리즘이다. 특히, 비선형 시스템에서의 상태 추정을 개선하는 EKF는 수중 탐지, 항법 시스템, 로봇 공학 등 여러 응용 분야에서 성공적으로 적용되어 왔다. 예를 들어, 무인 수중 차량(AUV)의 위치 추정에 EKF를 적용한 연구에서는 수중 소음과 센서 불확실성을 효과적으로 보정하여 위치 추정의 정확도를 높이는 결과를 얻었다. 또한, 해양 구조물의 상태 모니터링에서도 EKF를 사용하여 실시간으로 구조물의 변위를 추정하고, 이를 통해 구조물의 안전성을 평가하는 데 기여하였다. 이러한 연구들은 EKF가 수중 환경의 복잡한 변수들을 고려하여, 보다 정확한 상태 추정을 가능하게 함을 보여준다.

2.3 현재 연구의 격차 및 본 연구의 목표

현재의 기뢰 탐지 기술 및 EKF 적용 연구에도 불구하고, 여전히 몇 가지 중요한 격차가 존재한다. 첫째, 수중 기뢰 탐지에 있어서 EKF의 적용 가능성에 대한 연구는 제한적이다. 대부분의 연구는 일반적인 위치 추정 또는 구조물 모니터링에 초점을 맞추고 있으며, 기뢰 탐지에 대한 구체적인 응용은 부족하다. 둘째, 다양한 수중 환경 조건(온도, 압력, 소음의 변동 등)을 종합적으로 고려한 기뢰 탐지 연구가 부족하다. 이러한 격차를 보완하기 위해 본 연구는 EKF를 활용하여 수중 환경에서 기뢰 탐지의 정확도 향상 방안을 제안한다. 이를 통해 EKF가 수중 기뢰 탐지의 신뢰성을 얼마나 높일 수 있는지 평가하고, 기존 기술의 한계를 극복할 수 있는 새 접근법을 제시하고자 한다. 본 연구의 결과는 향후 수중 기뢰 탐지 기술 개발에 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

3. 연구 방법

3.1 EKF의 알고리즘 및 시뮬레이션 프로세스

EKF는 바로 이전에 추정된 값을 토대로 해서 현재

의 값을 추정하며, 바로 이전 시간 외의 측정값이나 추정값은 사용하지 않는다. 단계별 추정 시 계산은 두 단계로 이루어진다. 첫 단계에서는 이전 시간에 추정된 상태에 대해 특정 데이터를 입력했을 때 예상되는 측정값을 계산한다. 이 단계를 예측(prediction) 단계라고 부른다. 다음 단계에서는 앞서 예측된 측정값과 실제 측정값을 기반으로 현재의 상태를 추정한다. 이 단계를 업데이트 단계라고 부른다. EKF에서는 모델의 선형성을 가정하는 대신 상태 변화 함수의 미분 가능성을 가정한다. EKF 체계의 기본적인 단계 구성은 Table 1 및 Fig. 1에 나타난 것과 같다[8].

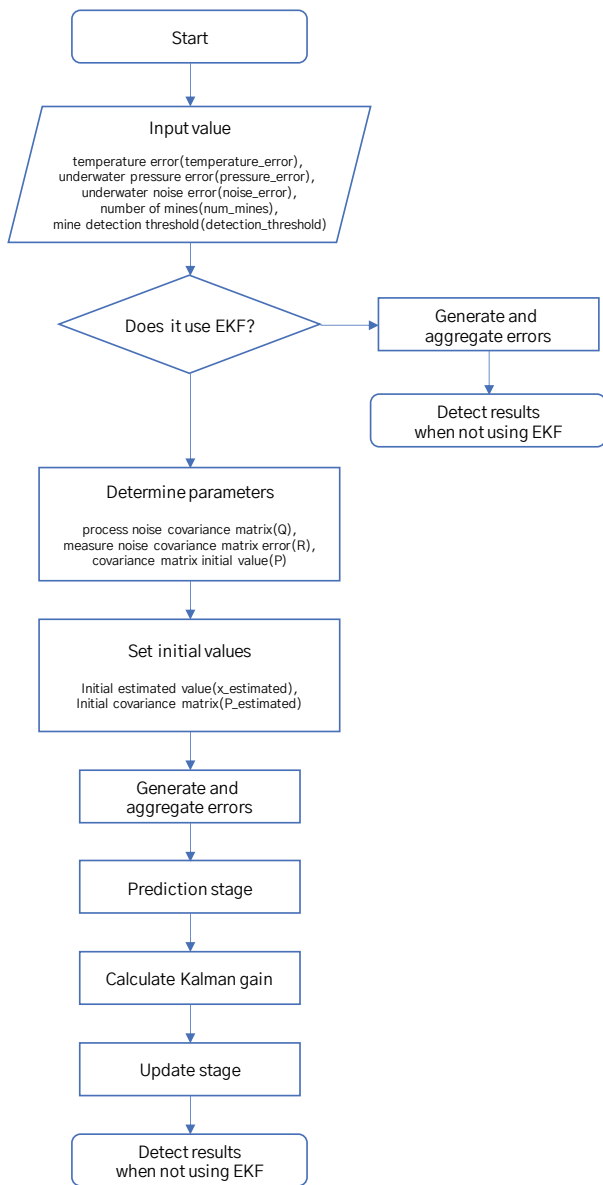


Fig. 1. Matlab code-based simulation flowchart

Table 1. Basic steps of the EKF system[8]

Stage	Description
Step 1 Start	Initial state estimates and error covariance settings
Step 2 Prediction stage	Predict current status and error covariance using the system model
Step 3 Measurement phase	Use the measurement model to obtain measurements and predict measurements in prediction states
Step 4 Calman gain calculation	Calculate the Kalman gain by considering the uncertainty between the measurements of the predicted state and the measurements of the predicted state
Step 5 Update stage	Update state and error covariance to correct the error between the measured value and the measured value of the predicted state
Step 6 Termination	Return final status and error covariance

4. EKF를 적용한 기뢰 탐지용 수중 드론 시스템 정확도 향상의 양적 측면

4.1.1 단계: 시스템 매개변수 설정

본 연구에서는 수중 환경에서 기뢰 탐지를 시뮬레이션하기 위해 초기 매개변수를 다음과 같이 설정하였다. 우선, 시뮬레이션에 사용된 기뢰는 총 100개로 설정하였다. 이는 다양한 탐지 상황을 고려하기 위한 적절한 숫자이다. 탐지 임계값은 0.1로 설정하여, 탐지 오차가 이 값보다 작을 경우 기뢰가 탐지된 것으로 간주하였다. 이 임계값은 수온 및 수압의 변화, 수중 소음의 변동 등의 영향을 고려하여 설정되었다.

4.2.2 단계: 오류 생성

수중 환경의 복잡한 조건을 시뮬레이션하기 위해 다양한 오류를 생성하였다. 여기에는 수온 및 수압 변화 그리고 수중 소음 변동으로 인한 오류가 포함된다. 각 오류는 특정한 표준 편차를 가진 정규분포를 따르도록 하였다. 수온 오류는 표준편차 0.1을 가지며, 이는 수온 변화가 탐지 시스템에 미치는 영향을 반영한다. 수압 오류는 표준편차 0.05를 가지며, 수심 변화에 따른 압력 변화를 나타낸다. 마지막으

로, 수중 소음 오류는 표준편차 0.01을 가지며, 자연적 및 인위적인 수중 소음의 영향을 모사하도록 하였다. 이러한 오류 요소들을 종합하여 수중 환경에서 발생할 수 있는 다양한 불확실성을 반영하였다.

4.3 3단계: EKF 구현

EKF는 비선형 시스템의 상태 추정을 개선하기 위해 사용된다. EKF는 상태 변수와 측정값 간의 비선형 관계를 다루기 위해 테일러 급수 전개를 사용하여 비선형 시스템을 선형화한다. 기본적인 EKF의 수학적 방정식은 다음과 같다.

$$x_{pred} = Fx_{est} + Bu \tag{1}$$

$$P_{pred} = FP_{est}F^T + Q \tag{2}$$

먼저 예측 단계에서는 식 (1)을 통해 예측값을 구하고 식 (2)를 통해 예측 공분산 행렬을 구한다. 이때, F 는 상태 전이 행렬로, 이를 사용하여 이전 상태를 기반으로 현재 상태를 예측한다. B 는 제어 입력 행렬로, 외부에서 제어 입력이 시스템에 어떻게 작용하는지를 설명한다. u 는 제어 입력 또는 제어 변수, T 는 시스템의 총 시뮬레이션 시간으로 각각 정의하였다.

다음으로, 업데이트 단계에서 식 (3)을 통해 칼만 이득을 계산한 후 식 (4)에서 추정값, 식 (5)에서 구한 공분산 행렬 업데이트를 통해 EKF 적용 여부에 따른 최종 합산 오차값을 각각 구한다.

$$K = P_{pred}H^T (HP_{pred}H^T + R)^{-1} \tag{3}$$

$$x_{est} = x_{pred} + K(z - Hx_{pred}) \tag{4}$$

$$P_{est} = (I - KH)P_{pred} \tag{5}$$

여기서, H 는 관측 행렬(시스템 상태를 측정하여 관측값으로 변환하는 행렬), I 는 항등 행렬이다.

4.4 4단계: 시뮬레이션 절차

EKF를 적용하지 않은 경우 기뢰 탐지 시뮬레이션 과정은 다음과 같다. 각 기뢰에 대해 수온, 수압, 수중 소음 오류를 무작위로 생성한 후 오류들을 합산하여 총 오류를 계산하고, 이를 기뢰 탐지 오류로 기록한

다. 탐지 오류가 설정된 임계값(0.1)보다 작을 경우 해당 기뢰는 탐지된 것으로 간주된다. 이러한 과정을 통해 전체 기뢰 중 탐지된 기뢰의 수를 계산하고 기록하도록 하였다.

EKF를 적용한 경우 기뢰 탐지 시뮬레이션 과정은 다음과 같다. 각 기뢰에 대해 수온, 수압, 수중 소음 오류를 무작위로 생성한 후 오류들을 합산하여 총 오류를 계산하고, 이를 기뢰 탐지 오류로 기록한다. 그리고 이를 EKF에 입력하여 상태를 추정한다. 이러한 과정을 통해 양적 측면에서 EKF를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 탐지 성능을 비교한다. 연구결과는 EKF가 수중 환경의 복잡한 변수들을 효과적으로 보정하여 기뢰 탐지의 신뢰성을 높일 수 있음을 시사할 것으로 기대된다.

Quantitative aspects of improving accuracy of mine detection underwater drone systems using EKF

```

1: num_mines = 100; % the number of mines laid on the
   underwater
2: detection_threshold = 0.1;
3: errors_no_filter = zeros(num_mines, 1);
4: errors_kalman_filter = zeros(num_mines, 1);
5: for k = 1:3
6:   total_error_kalman_filter = temperature_error +
   pressure_error + noise_error;
7:   x_pred = x_estimated;
8:   P_pred = P_estimated + Q;
9:   z = total_error_kalman_filter;
10:  K = P_pred / (P_pred + R);
11:  x_estimated = x_pred + K * (z - x_pred);
12:  P_estimated = (1 - K) * P_pred;
13: end;
14: errors_kalman_filter(i) = total_error_kalman_filter;
15: end;
16: detected_mines_no_filter = sum(abs(errors_no_filter) <
   detection_threshold);
17: detected_mines_kalman_filter =
   sum(abs(errors_kalman_filter) < detection_threshold);
    
```

Fig. 2. Quantitative aspects of improving accuracy of underwater drone system for mine detection using EKF Matlab code

4.5 5단계: 결과 분석 및 논의

EKF를 적용하지 않은 경우 기뢰 탐지 결과는 다음과 같다. 총 100개의 기뢰 중 37개가 탐지되었고, 63개는 탐지되지 못하였다. 이는 수중 환경의 복잡한 변수들로 인해 발생하는 오류가 탐지 정확도에 부정적인 영향을 미쳤음을 나타낸다. EKF를 적용한 경우, 탐지 성능이 현저히 향상되었다. 총 100개의 기뢰

중 67개가 탐지되었고, 33개는 탐지되지 않았다. 이는 EKF가 수중 환경의 복잡한 변수들로 인한 오류를 효과적으로 보정하여 탐지 정확도를 향상시킬 수 있음을 보여준다.

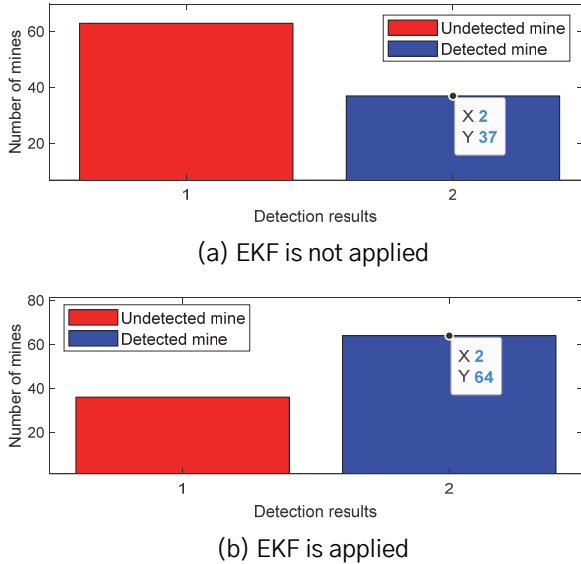


Fig. 3. Mine detection results in quantitative aspects based on EKF application on Matlab

Table 2. Total and average of the combined errors based on EKF application on Matlab

EKF is applied		EKF is not applied	
Sum of error	Average of error	Sum of error	Average of error
9.2722	0.0927	11.1841	0.1118

5. EKF를 적용한 기뢰 탐지용 수중 드론 시스템 정확도 향상의 질적 측면

5.1 1단계: 시스템 매개변수 설정

본 연구에서는 수중 환경에서 기뢰 탐지를 시뮬레이션하기 위해 초기 매개변수를 다음과 같이 설정하였다. 실제 기뢰 위치의 상태에 대한 초기 실제 상태를 가정하고 기뢰 50개를 해저에 무작위 배치하였다.

5.2 2단계: 오류 생성

4.2절과 동일하다.

5.3 3단계: EKF 구현

4.3절과 동일하다.

5.4 4단계: 시뮬레이션 절차

EKF를 적용하지 않은 경우 기뢰 탐지 시뮬레이션 과정은 다음과 같다. 각 기뢰에 대해 수온, 수압, 수중 소음 오류를 무작위로 생성한 후 오류들을 합산하여 기뢰 탐지 오류로 기록한다. 이를 기반으로 해저에 무작위로 부설된 기뢰 50개의 실제 위치를 추정한다.

EKF를 적용한 경우 기뢰 탐지 시뮬레이션 과정은 다음과 같다. 각 기뢰에 대해 수온, 수압, 수중 소음 오류를 무작위로 생성한 후 오류들을 합산하여 기뢰 탐지 오류로 기록한다. 그리고 이를 EKF에 입력하여 해저에 무작위로 부설된 기뢰 50개의 실제 위치를 추정한다. 이러한 과정을 통해 질적 측면에서 EKF를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 탐지 성능을 비교한다. 연구결과는 EKF가 수중 환경의 복잡한 변수들을 효과적으로 보정하여 기뢰 탐지의 신뢰성을 높일 수 있음을 시사할 것으로 기대된다.

Qualitative aspects of improving accuracy of mine detection underwater drone systems using EKF

```

1: A = eye(2);
2: B = zeros(2,1);
3: H = eye(2);
4: Q = 0.01*eye(2);
5: mine_accuracy = 0.05;
6: R = (mine_accuracy^2)*eye(2);
7: x_hat = [0; 0];
8: P = eye(2);
9: num_mines = 50;
10: noise_magnitude = 0.1;
11: theta = rand(1, num_mines) * 2 * pi;
12: for k = 1:N;
13: x_true = A*x_true + B*0.1 + sqrt(Q)*randn(2,1)
14: z = H*x_true + measurement_noise
15: x_pred = A*x_hat + B*0.1;
16: P_pred = A*P*A' + Q;
17: K = P_pred*H'/(H*P_pred*H' + R);
18: x_hat = x_pred + K*(mean(z, 2) - H*x_pred);
19: P = (eye(2) - K*H)*P_pred;
    
```

Fig. 4. Qualitative aspects of improving accuracy of underwater drone system for mine detection using EKF Matlab code

5.5 5단계: 결과 분석 및 논의

Fig. 5에 나타난 바와 같이 EKF를 적용한 경우와

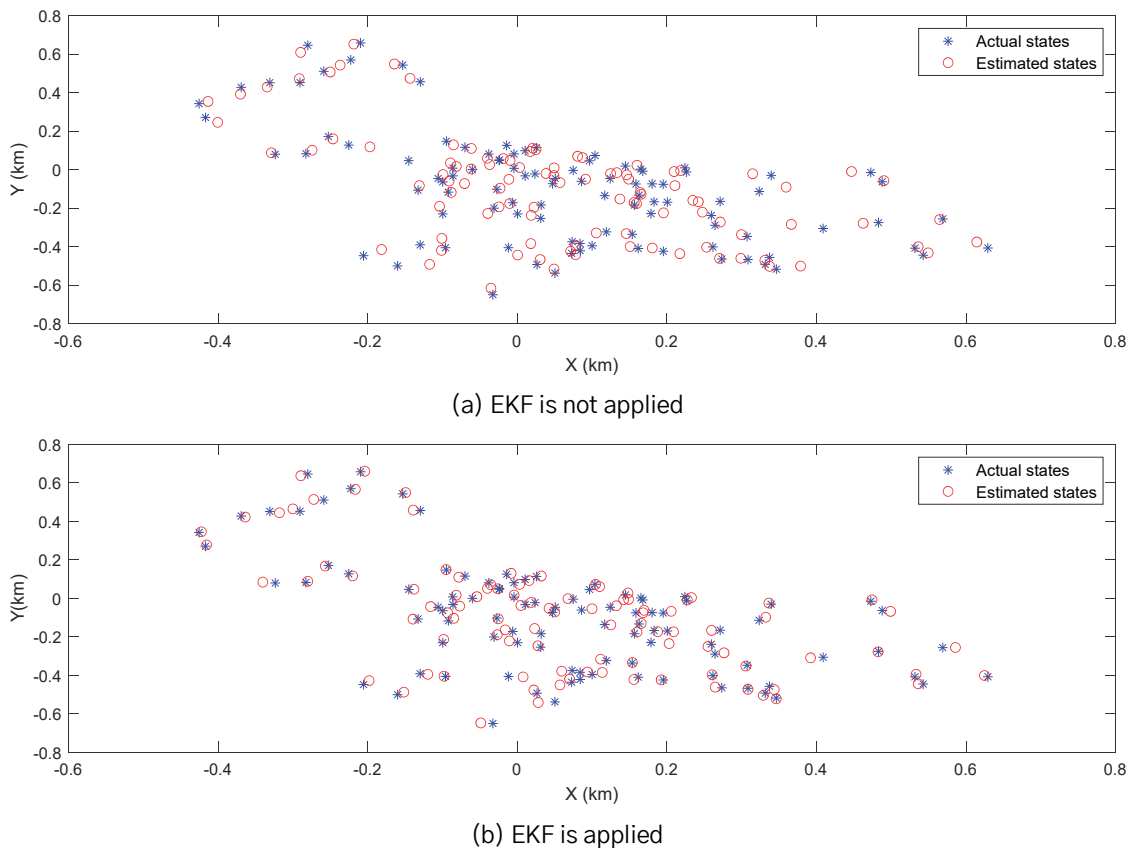


Fig. 5. Mine actual location estimation status results in qualitative aspects based on EKF application on Matlab

적용하지 않은 경우의 기뢰 실제 위치 추정 상태를 비교해보았다. 이때 EKF를 적용한 경우 해저에 무작위로 부설된 50개의 실제 기뢰 위치 상태를 더 근접하게 추정했음을 알 수 있다. 이는 EKF가 수중 환경의 복잡한 변수들로 인한 오류를 효과적으로 보정하여 탐지 정확도를 향상시킬 수 있음을 보여준다.

6. 결론

3~5장에서의 시뮬레이션 연구결과를 통해 EKF를 기뢰 탐지용 수중 드론에 적용했을 때 기뢰 탐지 정확도가 크게 향상될 수 있음을 알 수 있다.

이때 EKF는 내장된 컴퓨터 시스템에 적용할 수 있다. 일반적으로 EKF는 CPU 등에 적용이 가능한데, 무인 드론에 내장된 컴퓨터가 센서 데이터를 수집할 때 이 데이터들을 바탕으로 EKF 알고리즘을 적용하여 지속적으로 오차를 보정할 수 있는 것이다. 현재 개발되고 있는 기뢰 탐지용 수중 드론은 고급 기술이 집약된 체계로, 고급 컴퓨팅 기술과 정보 처리 능력을 갖추고 있기에 EKF 알고리즘도 충분히 실행

및 활용할 수 있을 것이다.

결론적으로 EKF를 기뢰 탐지용 수중 드론에 적용한다면 기뢰 위협에 효과적으로 대응할 수 있는 방안이 될 것이다. 또한, 유사시에 해군의 전력을 보장하고 해상 작전 수행 능력을 보장할 것이다.

하지만 본 연구는 EKF 활용 방안에 대한 제시와 이론적인 부분에서 시뮬레이션 수행에 초점을 맞췄다. 따라서 향후에는 EKF를 실제로 적용한 기뢰 탐지용 수중 드론을 실제 수중 환경에 활용하여 관련 실험을 진행해야 할 것이다. 시뮬레이션보다 더 복잡한 수중 환경에서 실효성을 검토했을 때 똑같이 유의미한 결과가 나온다면 차세대 핵심 기뢰 전력으로 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] Raul (Pete) Pedrozo, “한반도 전쟁 시 해상 기뢰전,” 한국해양전략연구소, 제301호, pp. 1-15, 2023.
 [2] 홍성준, 정인식, 박승수, “4차 산업혁명 신기술로 무장한 기뢰위협과 우리의 대응방안,” 한국해군과학기술학회논문지, 제3권, 제2호, pp. 147-156, 2020.

[3] 윤경식, “신호처리를 고려한 양상태 소나 시스템의 표적 위치 추정 오차 분석,” 한국정보기술학회논문지, 제17권, 제4호, pp. 79-86, 2019.

[4] 김준영, 신창호, 김경희, “소나와 무인기뢰처리기 정보를 활용한 기뢰전 체계 설계 방안,” 한국통신학회논문지, 제39권, 제12호, pp. 1243-1249, 2014.

[5] 최현호, “무인 기뢰 탐지 및 처리-해군 작전을 위협하는 기뢰 제거를 위한 첨단 기술,” 한국방위산업진흥회 국방과 기술, 제478호,

pp. 60-73, 2018.

[6] 윤정철, “소형 무인잠수정 소나의 이미지 식별 조건에 대한 실험적 연구,” 부경대 석사학위논문, 2023.

[7] 김명경, 이다운, 배호석, 유용준, 정우근 “측면주사소나 모델링 알고리즘을 활용한 운용 조건 분석,” 한국마린엔지니어링학회지, 제42권, 제6호, pp. 491-496, 2018.

[8] Jayyang, <EKF SLAM>, <<Simulation>>, 2017, <https://jay.tech.blog/2017/03/26/ekf-slam/>.