

견인 어레이 형상 추정의 칼만 필터 접근 방법에 대한 성능 개선

박민수, 도경철, 오원천, 윤대희, 이충용

연세대학교 전자공학과

전화 : (02) 361-2863 / 팩스 : (02) 312-4584

The Performance Improvement of Towed Array Shape Estimation Using Kalman Filters

Minsu Park, Kyeong Cheol Dho*, Won Tcheon Oh*, Dae-Hee Youn and Chungyong Lee

ASSP Lab., Electronic Eng., Yonsei Univ.

*Agency for Defense Development

Email : mac@lethe.yonsei.ac.kr

Abstract

This paper presents a performance improvement technique of 2-D towed array shape estimation using Kalman filters. The proposed algorithm by linear model approximation corrects the position errors caused by the Kalman filter results. However, since the assumed linear model makes errors at bending parts, the spline interpolation algorithm based on curve is proposed to reduce the errors.

I. 서론

수중 음향 시스템에서 사용하는 견인 어레이는 모두 일정한 깊이의 수심에서 직선을 유지하며 이동한다는 가정하에 각종 어레이 신호처리 기법이 적용되어 왔다. 그러나 그러한 가정은 견인선의 속도와 운항 경로, 해류 및 파도등과 어레이의 길이, 두께 등으로 인해 실제 상황에서는 성립하지 않으며, 이로 인해 등간격 선형 어레이를 가정한 기존의 시스템은 심각한 성능 저하를 가져오게 된다.

본 연구는 수중음향특화연구센터의 연구비 지원으로 이루어 졌습니다. (과제번호 : UA-22)

이러한 문제점을 해결하기 위하여, 견인 어레이의 형상 변화를 추정하려는 노력들이 진행되어 왔다. 그러한 견인 어레이의 형상 추정 방법에는 첫째, 어레이에 수심센서나 방위센서, 혹은 경사 센서 등의 비음향 센서를 보조 센서로 장착하여 형상을 추정하는 방법[1-3]과, 둘째로 하이드로폰으로부터 받아들인 데이터만으로 형상을 추정하는 방법이 있다[4,5]. 보조 센서를 사용하는 방법 가운데, Gray는 적은 수의 측정 센서를 선형 어레이에 설치하고 유체역학적 어레이 모델과 보조 센서 출력을 이용하는 칼만 필터를 설계하여 어레이 형상을 추정하였다.

본 논문에서는 변위를 측정하는 보조센서를 이용하는 경우 기존의 칼만 필터 방법을 모의 실험을 통해 성능을 분석해보고, x 좌표의 근사화로 인해 발생하는 하이드로폰 좌표의 오차를 수정하기 위해 직선 모델을 이용한 좌표 수정 방법과, 스플라인 보간법(spline interpolation)을 사용한 방법을 제안한다.

2 장에서는 칼만 필터를 이용한 기존의 방법을 설명하고, 변위 측정 센서를 사용할 경우의 문제점을 분석한다. 3 장에서는 직선 모델을 이용한 좌표 수정 방법과 스플라인 보간법을 이용한 방법을 제안하고, 4 장

에서는 제안된 방법을 모의 실험을 통해 결과를 알아 보며, 5 장에서 결론을 제시한다.

II. 칼만 필터를 이용한 어레이 형상추정

어레이의 직경이 길이에 비해 충분히 작고 유연하며, 수중에서 일정한 속도로 움직일 때, 다음 식 (1)로 표현되는 무차원 주파수가 $\bar{f} < 1$ 이면, 2 차원 어레이의 형상은 식 (2)와 같이 편미분 방정식으로 표현된다. 어레이의 수평, 수직 모양은 독립적으로 취급할 수 있다고 가정한다.

$$\bar{f} = f \frac{L}{U} = fT = \frac{T}{T_f} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \bar{\rho} \frac{\partial \eta}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial \tau} &= 0, \\ \tau &= t \frac{U}{L}, \xi = \frac{x}{L}, \eta = \eta(\tau, \xi) = \frac{y(t, x)}{L}, \bar{\rho} = \frac{\pi c_t + c_n}{c_n} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 f 는 어레이 모양을 나타내는 파형의 주파수이며, L 은 어레이의 전체 길이이며, U 는 어레이의 이동 속도이다. 또한 y 는 t 와 x 값에 따른 어레이 형상의 변위이며, c_t 와 c_n 은 각각 어레이에 작용하는 수평 및 수직 항력 계수이다.

식 (2)로 표현되는 어레이 운동 모양을 water pulley 모델이라 하고, 실제 환경에서 나타나는 어레이 형상을 잘 모델링한다[1-3]. 이 방정식의 해는 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta(\tau, \xi) = f(\xi - \bar{\rho}\tau) \quad (3)$$

위 식 (2)를 칼만 필터에 적용하기 위해서는 다음 식 (4)로 표현되는 상태 방정식과 (5)로 표현되는 측정 방정식이 사용된다.

$$\underline{\eta}(k+1) = F\underline{\eta}(k) + \underline{u}(k) + \underline{w}(k) \quad (4)$$

$$\underline{z}(k) = H^T \underline{\eta}(k) + \underline{v}(k) \quad (5)$$

F 와 H 는 각각 시간에 따른 상태의 변화를 나타내는 천이 행렬과 보조센서의 위치를 나타내는 측정 행렬로써 다음 식 (6)과 (7)로 표현된다.

$$F = (1 - \rho)I + \rho L \approx \alpha L \quad (6)$$

$$H_{mj} = \delta_{mj}, \quad m = 1, 2, \dots, M, \text{ and } j = 1, 2, \dots, K \quad (7)$$

여기서 M 은 어레이의 세그먼트 수이고, K 는 보조센서의 수이다. α 는 water pulley 모델하에서 실험적으로 1의 값을 사용하며, $u(k)$ 는 견인점의 운동에 따른 초기 변위이고, $w(k)$ 와 $v(k)$ 는 각각 모델오차와 측정센서의 오차를 나타낸다. 이 외에 상세한 칼만 필터 방법은 [1]에 자세히 설명되어 있으므로 여기서는 생략한다

변위센서를 사용했을 경우 칼만 필터에 의해 추정된 결과의 변위는, 기존의 방법을 사용할 경우 각 세그먼트의 변위가 고정된 x 좌표에 의해 하이드로폰의 좌표로 복원된다. 이 때 사용되는 x 의 최대값은 L 이며, 이를 등간격으로 나누어 값을 고정하므로 결과 좌표는 다음 그림 1과 같이 반드시 오차를 갖게 된다.

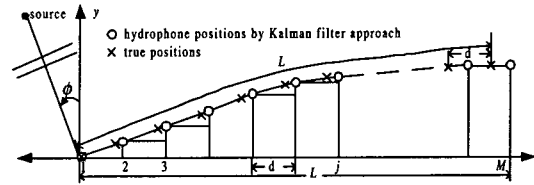


그림 1. 추정된 하이드로폰 좌표와 실제 좌표의 오차

III. 직선 모델과 곡선 모델을 이용한

하이드로폰의 좌표 수정 방법

(1) 직선 모델을 이용한 하이드로폰 좌표수정

세그먼트의 수를 어레이에 장착된 하이드로폰의 수와 동일하게 설정하였을 때, 칼만 필터에 의해서 추정된 결과는 그림 2에서와 같이 각 세그먼트의 변위, 즉 하이드로폰의 y 좌표이다. 이 때 고정된 x 좌표를 사용할 경우 칼만 필터에 의해 추정된 하이드로폰 좌표들 사이의 거리는, 어레이의 꼬리쪽으로 갈수록 실제 좌표들 사이의 고정된 간격보다 더 키지는 형태가 된다.

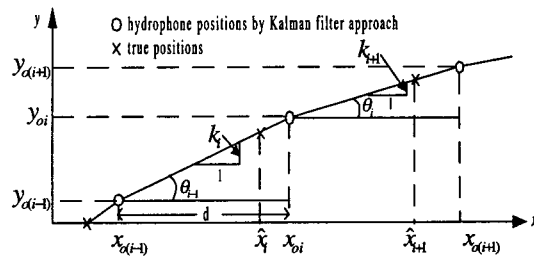


그림 2. 직선 모델로 근사화된 어레이 구조

따라서, 처음 추정된 좌표들 사이가 그림 2 처럼 직선으로 연결되어 있고, 실제 하이드로폰이 그 직선 위에 위치해 있다고 가정하면, 선형어레이는 등간격으로 이루어져 있으므로 다음과 같이 좌표를 수정할 수 있다.

칼만 필터 접근 방법에 의해 추정된 x, y 좌표 벡터를 X_i, Y_i 라 하면, X_i 은 다음 식 (8) 이다.

$$X_i^T = [0, d, 2d, \dots, (M-1)d] \quad (8)$$

여기서 d 는 하이드로폰 사이의 간격이며, M 은 총 하이드로폰의 개수이다. 제안한 알고리즘은 주어진 좌표를 이용하여 다음의 과정을 반복함으로써, 좌표들 사이의 거리가 d 가 되도록 위치를 수정하여 최종 좌표 \hat{X}, \hat{Y} 를 구하게 된다.

▶ 초기화 : $\hat{X} = [x_i], \hat{Y} = [y_i]$

▶ $m = 1, 2, \dots, M-1$ 에 대해 식 (9) ~ (14) 반복

▶ 주어진 좌표 사이의 기울기 계산 :

$$k_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}, \quad i = 1, 2, \dots, M-m \quad (9)$$

▶ 주어진 좌표 가운데 $M-m$ 개 만큼 선택 :

$$X_o^T = [x_1, x_2, \dots, x_{(M-m)}], Y_o^T = [y_1, y_2, \dots, y_{(M-m)}] \quad (10)$$

▶ 식 (10)를 기준으로 거리가 d 만큼 되는 곳의 좌표 계산 :

$$x_{ni} = d \cos \theta_i + x_{oi}, \quad \cos \theta_i = \frac{1}{\sqrt{k_i^2 + 1}} \quad (11)$$

$$y_{ni} = k_i(x_{ni} - x_{oi}) + y_{oi} \quad (12)$$

▶ 구하고자 하는 좌표 갱신 :

$$\hat{X}^T = [\hat{X}^T, x_{ni}], \hat{Y}^T = [\hat{Y}^T, y_{ni}] \quad (13)$$

▶ Iteration 을 위한 치환 :

$$X_o = X_n, \quad Y_o = Y_n \quad (14)$$

여기서 벡터 X_i, Y_i 의 원소는 x_i, y_i 로 표시하였으며, 마찬가지로 X_o, Y_o 의 원소는 x_{oi}, y_{oi} , X_n, Y_n 은 x_{ni}, y_{ni} 로 정하였다.

(2) 스플라인보간법을 이용한 하이드로폰 좌표수정 초기에 추정된 좌표를 기준으로 했을 때, 직선으로 모델링할 경우에는 곡선부분에서 많은 오차가 발생하므로, 곡선 모델링을 통해, 그 거리가 등간격 d 가 되도록 하는 새로운 좌표를 찾는 스플라인 보간법(spline interpolation)을 사용한다[6].

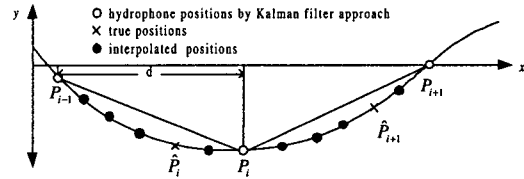


그림 3. Spline 보간법에 의한 곡선 모델과 직선 모델과의 비교

칼만 필터에 의해 추정된 점의 좌표를 P_i 라 하면, 스플라인 보간법은 이 좌표들을 포함하는 부드러운 곡선 위에, 샘플들을 지정한 개수만큼 구한다.

그러한 샘플들의 좌표 가운데에는 그림 3 에 나타나 있듯이, 실제 좌표 \hat{P}_i 와 일치하는 경우도 있을 수 있지만 그렇지 않은 경우가 대부분이며, 따라서 실제 좌표와 가장 근접한 샘플을 찾는 과정이 필요하다.

스플라인 방법에 의해 생성된 좌표들을 P_j 라 하자. 이 때 $j = 1, 2, \dots, N$ 이며, N 은 생성된 총 샘플 수 이다. N 이 충분히 클 경우, 샘플들 사이는 직선으로 근사화할 수 있으므로, 다음 식 (15)을 만족시키는 샘플을 모두 선택함으로써 실제 좌표와 가장 근사한 점을 정할 수 있게 된다.

$$\text{All } P_{k+1} \text{ which minimize } \left\{ nd - \sum_{j=1}^k |P_j - P_{j+1}| \right\}, \quad (15)$$

for each $n = 1, 2, \dots, N-1$

각 n 에 대해 k 를 증가 시키면서 오차가 최소인 P_{j+1} 을 선택하면, 그 점이 바로 하이드로폰의 실제좌표가 된다. 여기서 k 는 $1, 2, \dots, N-1$ 이다.

IV. 모의 실험 및 결과

하이드로폰은 25 개를 사용하였고, 어레이 총 길이는 150m 이다. 무차원 주파수는 0.892 이며, 모델 잡음의 분산과 변위 측정 센서 잡음의 분산은 모두 0.1 로 설정했고, 이는 0.33 m 정도의 오차를 나타낸다. 그림 4 는 실제 하이드로폰 좌표와, 칼만 필터에 의해 추정된 좌표, 그리고 제안한 직선 모델 방법 및 스플라인 보간법에 의해 수정된 좌표이다. 곡선 부분에서 직선 방법에 의해 수정된 좌표는 오차를 포함함을 볼 수 있으며, 반면에 스플라인 방법은 실제 좌표와 거의 일치한

다. 이러한 결과는 그림 5 에 나타나 있는 실제 좌표와 제안한 방법에 의해 수정된 좌표와의 거리 오차를 비교했을 때 명백하게 알 수 있다. 그림 6 은 SNR 10dB 인 환경에서 120Hz 의 톤(tone)신호가 10° 방향에서 입사 되며, 스플라인 좌표 수정 결과를 바탕으로 한 방향 추정 결과, 칼만 필터 결과와 스플라인 방법과의 방향 추정 오차는 25.1° 나 발생한다. 참고로 무차원 주파수가 작은 경우에는 직선 모델에 의한 방법과 스플라인 방법은 모두 실제 좌표와의 오차가 작다.

V. 결론

본 논문에서는 water pulley 모델하에, 기존에 제안된 칼만 필터를 이용한 2 차원 어레이 형상 추정 기법에서 변위 측정 센서를 이용하는 경우의 문제점을, 직선 모델을 이용한 방법과 곡선 모델을 이용한 스플라인 보간법을 사용하여 개선하여 하이드로폰 좌표 추정 오차를 줄일 수 있었다. 모의 실험 결과 수정된 좌표를 이용한 방향 추정 오차도 감소함을 확인할 수 있었다.

VI. 참고 문헌

- [1] D. A. Gray, B. D. O. Anderson, and R. R. Bitmead, "Towed array shape estimation using Kalman filters - theoretical models," *IEEE J. of Ocean. Eng.*, vol. 18, pp. 543-556, Oct. 1993.
- [2] J. L. Riley and D. A. Gray, "Towed array shape estimation using Kalman filters -experimental investigations," *IEEE J. of Ocean. Eng.*, vol. 18, pp. 572-581, Oct. 1993.
- [3] P. Felisberto and S. M. Jesus, "Towed-array beamforming during ship's manoeuvring," *IEE Proc.-Radar, Sonar Navig.*, Vol. 143, pp. 210-215, June 1996.
- [4] Daniel E. Wahl, "Towed array shape estimation using frequency-wavenumber data," *IEEE J. of Ocean. Eng.*, vol. 18, pp. 582-590, Oct. 1993.
- [5] J. H. Mathews and K.D. Fink, "Numerical Methods Using MATLAB," *Prentice Hall International, Inc.* 1999.

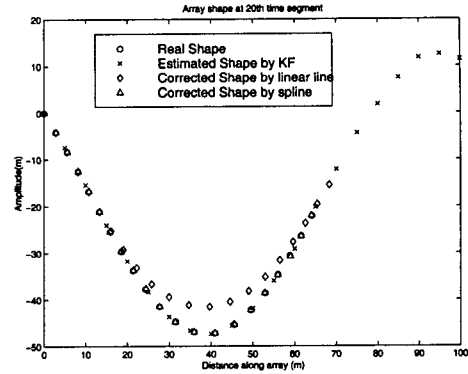


그림 4. 실제와 제안된 방법에 의한 하이드로폰 좌표

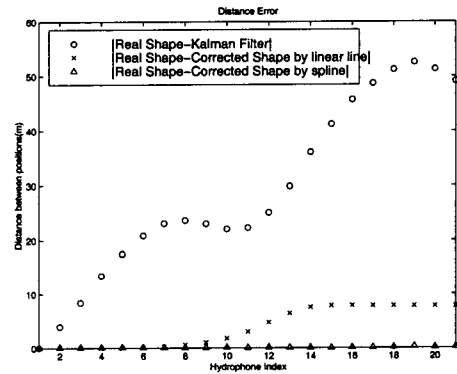


그림 5. 제안된 두 방법에 의한 좌표 추정 오차

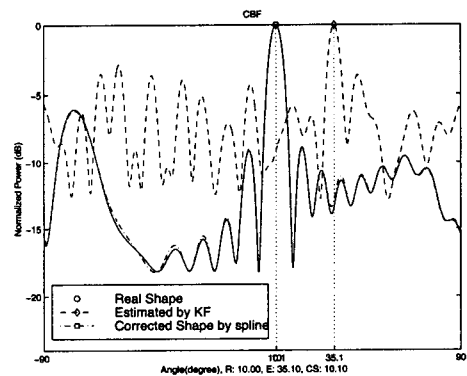


그림 6. 제안된 방법에 의한 방향 추정 결과