

이상치 검출 알고리즘을 이용한 TDOA와 FDOA 기반 이동 신호원 위치 추정 기법

유호근¹, 이재훈^{2*}

¹고려대학교 컴퓨터학과 대학원생, ²고려대학교 컴퓨터학과 교수

Robust Location Estimation based on TDOA and FDOA using Outlier Detection Algorithm

Hogeun Yoo¹, Jaehoon Lee^{2*}

¹Student, Department of Computer Science and Engineering, Korea University

²Professor, Department of Computer Science and Engineering, Korea University

요약 본 논문은 다수의 전자전 센서에서 추출된 시간지연 차이정보와 도플러주파수 차이정보를 이용하는 Two-step weighted least-squares 기반의 이동 신호원 위치 및 속도 추정 기법에서, 수집 정보의 이상치를 검출하는 알고리즘을 제안하고자 한다. 다수의 전자전 센서에서 추출되는 정보는 다양한 요인에 의해 정보에 이상치가 발생할 수 있으며, 이를 효과적으로 검출하고 데이터 융합과정에서 이상치를 배제하여 이동 신호원의 위치와 속도 추정의 정확도를 높이고자 한다. 본 논문에서는 이상치를 제외한 최소의 정상치 정보 집합을 추출하고, 이를 기반으로 나머지 정보의 이상치 여부를 확률적으로 판단하는 알고리즘을 제안하였으며, 이를 모의실험을 통해, 정보의 이상치가 효과적으로 제거되어 위치 및 속도 추정의 정확도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 정상치 거리정보 잡음이 20dB 이하인 경우, 이상치 정보를 효과적으로 제거하여, Cramér-Rao lower bound에 근접한 위치 및 속도 추정 정확도를 얻음을 확인하였다.

주제어 : 시간지연, 도플러주파수, 위치추정, 속도추정, 데이터융합, 이상치검출

Abstract This paper presents the outlier detection algorithm in the estimation method of a source location and velocity based on two-step weighted least-squares method using time difference of arrival(TDOA) and frequency difference of arrival(FDOA) data. Since the accuracy of the estimated location and velocity of a moving source can be reduced by the outliers of TDOA and FDOA data, it is important to detect and remove the outliers. In this paper, the method to find the minimum inlier data and the method to determine whether TDOA and FDOA data are included in inliers or outliers are presented. The results of numerical simulations show that the accuracy of the estimated location and velocity is improved by removing the outliers of TDOA and FDOA data.

Key Words : Time Difference of Arrival Frequency Difference of Arrival, Location Estimation, Velocity Estimation, Data Fusion, Outlier Detection

1. 서론

최근 전자전에서는 기술의 발달에 따른 전장의 광역

화로 이동 표적 신호원의 위치와 속도를 추정하기 위해 다수의 분산된 전자전 센서를 활용하고 있으며, 신호원의 위치와 속도 추정을 위한 다양한 연구가 진행되고

*This study is supported from Electronic Warfare Research Center (EWRC) at Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), originally funded by Defense Acquisition Program Administration (DAPA) and Agency for Defense Development (ADD).

*Corresponding Author : Jaehoon Lee (ejhoon@korea.ac.kr)

있다[1-6]. 이동 신호원의 위치와 속도를 추정하기 위해, 분산된 전자전 센서에서 수신된 신호들로부터 추출된 도착시간 차이인 Time difference of arrival(TDOA) 정보, 도플러주파수 차이인 Frequency difference of arrival(FDOA) 정보, 수신 신호의 도착 각도 정보인 Angle of arrival(AOA), 바이스테틱 레인지(Bistatic range) 등 다양한 정보가 활용되고 있으며, 이에 대한 연구가 진행되고 있다[2-3]. 여러 개 센서의 수신 신호로부터 직접 추출이 가능한 TDOA와 FDOA 정보를 동시에 이용하게 되면, TDOA 혹은 FDOA를 단독으로 이용하는 경우보다 위치와 속도 추정에 이용할 수 있는 정보량이 증가하여 보다 정확한 위치와 속도의 추정이 가능하다. TDOA와 FDOA 정보의 비선형성으로 인해, 테일러급수를 이용한 수치해석 방법이 활용되고 있으나, 위치 추정의 정확도가 초기값에 영향을 받는 문제가 대두되고 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위해 Two-step weighted least-squares (TSWLS), Total least-squares(TSL) 등의 방법 등이 제안되고 있다 [3-6].

한편, 위치 추적을 위해 수집되는 다양한 정보는 전파 신호의 다중 경로 페이딩, Non line of sight, 센서의 오동작, 재밍 등의 다양한 이유로 인해, 정보의 이상치가 발생할 수 있으며, 이상치가 발생한 정보를 이용하여 신호원의 위치와 속도를 추정할 경우, 추정의 정확도가 크게 낮아지게 되며, 이를 피하기 위해, 수집된 정보에서 이상치를 검출하고 제거하여 위치와 속도 추정의 정확도를 높이기 위해 Maximum likelihood, Random sample consensus, Adjacency matrix 등의 다양한 연구가 진행되고 있다[6-9].

본 논문에서는 다수의 분산된 전자전 센서에서 획득한 TDOA와 FDOA 정보를 활용하여 이동 신호원의 위치와 속도를 추정하는 TSWLS 기법에서, TDOA와 FDOA 정보의 이상치를 발생시키는 센서를 검출하고, 이상치 정보를 제거하여 신호원의 위치와 속도 추정 정확도를 높이는 알고리즘을 제안하고자 한다. 알고리즘은 이상치 정보(Outlier data) 개수를 모르는 상태에서, 신호원의 위치와 속도를 추정할 수 있는 최소한의 정상치 정보(Inlier data)를 결정하는 첫 번째 단계와 이를 토대로 추가적인 정보가 정상치인지 이상치인지 판단하는 두 번째 단계로 구성된다. 제안된 알고리즘은 모의실험을 통해, 그 성능을 비교 분석하여 이상치가

적절히 검출되는 것을 확인하였으며, 이상치 제거를 통해 신호원의 위치와 속도 추정의 정확도를 향상시킬 수 있는 것을 확인하였고, 이를 이론적 수치인 Cramér-Rao lower bound(CRLB)와 비교하였다.

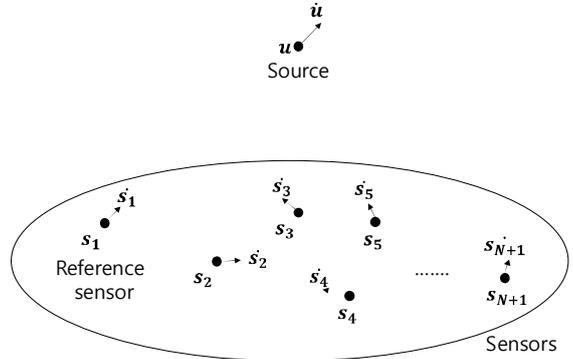


Fig. 1. Estimation geometry of a source location and velocity in 2-D view

2. TDOA와 FDOA 정보 기반의 위치추정

Fig. 1은 속도 \dot{u} 와 위치 u 를 갖는 이동 신호원의 위치와 속도를 추정하기 위해, $s_1, s_2, s_3, \dots, s_{N+1}$ 의 $N+1$ 개 센서가 활용되는 개략도를 보여주고 있다. 이동 신호원과 각 센서의 거리와 도플러주파수 천이는 아래와 같으며, 총 $N+1$ 개의 거리와 도플러주파수 천이를 구한다.

$$r_i^o = ct_i^o = |u - s_i| \tag{1}$$

$$\dot{r}_i^o = (\dot{u} - \dot{s}_i)^T (u - s_i) / r_i^o \tag{2}$$

이때, 센서 s_1 을 기준 센서로 활용하여 N 개의 TDOA 정보와 N 개의 FDOA 정보를 아래와 같은 수식을 통해, 추출할 수 있다.

$$r_{i1}^o = ct_{i1}^o = r_i^o - r_1^o \tag{3}$$

$$\dot{r}_{i1}^o = \dot{r}_i^o - \dot{r}_1^o \tag{4}$$

본 논문에서 이동 신호원의 위치와 속도 추정을 위해 사용하는 TSWLS 알고리즘의 경우, 비선형식으로 표현되는 N 개의 TDOA 정보와 N 개의 FDOA 정보를 이용하여 $\theta_1 = [u^T, r_1^o, \dot{u}^T, \dot{r}_1^o]^T$ 에 대해 Weighted

least-squares 해를 구한다[5].

$$e_1 = \begin{bmatrix} \varepsilon_i \\ \varepsilon_j \end{bmatrix} = h_1 - G_1 \theta_1 \quad (5)$$

$$h_1 = \begin{bmatrix} r_{21}^2 - s_2^T s_2 + s_1^T s_1 \\ \vdots \\ r_{(N+1)1}^2 - s_{(N+1)}^T s_{(N+1)} + s_1^T s_1 \\ 2(\dot{r}_{21} r_{21} - \dot{s}_2^T s_2 + \dot{s}_1^T s_1) \\ \vdots \\ 2(\dot{r}_{(N+1)1} r_{(N+1)1} - \dot{s}_{(N+1)}^T s_{(N+1)} + \dot{s}_1^T s_1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$G_1 = -2 \begin{bmatrix} (s_2 - s_1)^T & r_{21} & 0^T & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (s_{(N+1)} - s_1)^T & r_{(N+1)1} & 0^T & 0 \\ (s_2 - s_1)^T & \dot{r}_{21} & (s_2 - s_1)^T & r_{21} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (s_{(N+1)} - s_1)^T & \dot{r}_{(N+1)1} & (s_{(N+1)} - s_1)^T & r_{(N+1)1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

위의 수식을 이용하여 구한 θ_1 의 인자인 $u^T, r_1^o, \dot{u}^T, \dot{r}_1^o$ 들은 수식 (1)과 (2)와 같이, 서로 관련이 되어 있다. 이를 이용하여 오차를 최소화시키기 위해, θ_1 의 인자들에 대한 선형식을 이끌어 낼 수 있으며, 수식과 Weighted least-squares를 활용하여 최종적으로 신호원의 위치와 속도를 추정해 내게 된다[5]. 또한, TDOA와 FDOA 정보의 잡음으로부터 추정된 신호원의 위치와 속도에 대한 공분산을 구할 수 있다. 총 N+1개의 센서에서 N개의 TDOA 정보와 N개의 FDOA 정보를 추출하고 이를 이용하여 신호원의 위치, 속도를 추정하게 되며, N+1개의 센서가 적절히 동작하여 TDOA와 FDOA 정보에 이상치가 없을 경우, 신호원의 위치와 속도를 매우 정확하게 추정할 수 있다. 그러나 TDOA와 FDOA 정보에 이상치가 발생하여 이상치를 포함하여 신호원의 위치와 속도를 추정할 경우, 그 정확도가 크게 훼손되게 되며, 이를 방지하기 위해 적절한 이상치 검출 알고리즘이 요구된다. 본 논문에서는 이동 신호원의 위치와 속도 추정을 위한 TSWLS 알고리즘에서, TDOA와 FDOA 정보의 이상치를 검출하는 알고리즘을 제안하고자 한다.

3. 이상치 검출 알고리즘

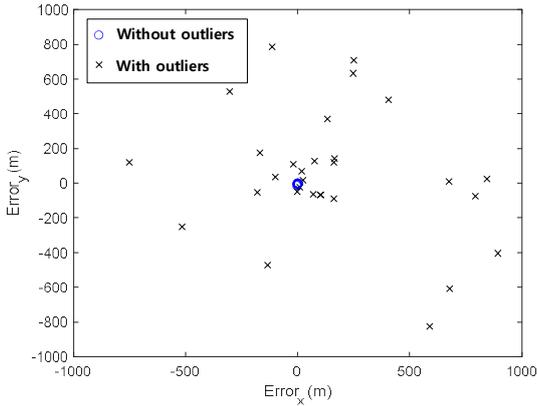
센서로부터 취득한 TDOA와 FDOA 정보는 센서의 오동작, 다중경로 페이딩, 재밍 등 다양한 이유로 인해 이상치를 포함할 수 있다. 이상치를 포함한 TDOA와

FDOA 정보를 융합하여 신호원의 위치와 속도를 추정할 경우, 추정의 정확도가 크게 저하되기 때문에, 정보를 융합하기 이전에 이상치를 만들어내는 센서를 검출하고 그 정보를 제거하는 것이 중요하다[6-8]. 본 논문에서는 2절에서 설명한 TDOA와 FDOA 기반의 위치 추정 기법인 TSWLS 알고리즘에서 인접 행렬 (Adjacency matrix)과 확률을 활용하는 두 단계로 구성된 이상치 검출 알고리즘을 제안하고자 한다. 기존의 인접 행렬을 이용한 이상치 검출 기법에서는 TDOA 정보로부터 추출되는 추정 위치의 유사도를 기반으로 인접행렬을 추출하여, 전체 정보 중 모든 이상치 정보를 검출하는 방식을 이용하였다[6]. 본 논문에서는 첫 번째 단계에서 인접행렬을 이용하여 TDOA와 FDOA 정보 기반의 위치와 속도 추정을 위한 최소한 정상치 정보를 추출하고, 두 번째 단계에서 최소한의 정상치 정보를 기반으로 추가되는 정보가 정상치에 해당하는지 이상치에 해당하는지를 확률적으로 판단하여, 최종적으로 이상치를 검출하고, 정상치 정보만을 이용하여 신호원의 속도와 위치를 추정하고자 한다.

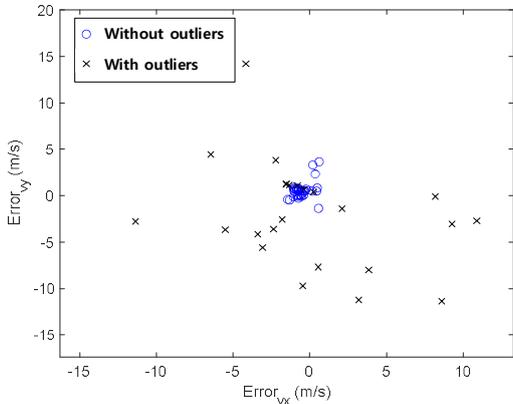
TDOA와 FDOA 정보는 각 센서에서 취득한 수신 신호와 기준센서의 수신 신호 사이의 차이값을 이용하는 것으로 기준센서에는 문제가 없다고 가정한다. 또한, 신호원의 신호를 수신하는 대부분의 정보가 정상치에 해당하여, 전체 정보 중에 이상치에 해당하는 정보의 개수가 정상치에 정보의 개수보다 작다고 가정한다.

일반적으로 TDOA와 FDOA 정보에서 이상치 정보의 개수를 모르기 때문에, 제안하고자 하는 이상치 검출 알고리즘은 두 단계로 나누어 이상치를 검출하고자 한다. 첫 번째 단계에서는 N개의 TDOA와 N개의 FDOA 정보에서 정상치에 해당하는 최소개의 TDOA와 FDOA 정보를 선택한다. 이를 위해, 2절의 수식을 활용한 TSWLS 기법을 이용하여 신호원의 위치와 속도를 추정하고, 추정된 이동 신호원의 위치와 속도의 유사도를 판단하여 인접행렬을 구성하고, 이를 이용하여 정상치에 있는 최소개의 TDOA와 FDOA 정보를 결정하게 된다. 이동 신호원이 2차원 평면에 존재하는 경우, θ_1 은 6×1 행렬이 되며, θ_1 의 해를 구하기 위해서, 각 3개의 TDOA와 FDOA 정보가 필요하게 된다. 즉, N+1개의 센서 중에 1개의 기준 센서와 3개의 센서에 의해 만들어지는 각 3개의 TDOA와 FDOA 정보를 활용하여, 신호원의 위치와 속도를 추정한다. 각 N개의

TDOA와 FDOA 정보 중에 각 3개의 정보를 활용하게 되므로, 모두 $N C_3$ 의 조합이 발생하고, 이 조합만큼 이동 신호원의 추정 위치와 속도를 얻게 된다. 정상치에 해당하는 각 최소개의 TDOA와 FDOA 정보를 이용하여 이동 신호원의 위치와 속도를 추정할 경우, 이상치를 포함한 경우에 비해, 추정된 위치와 속도의 유사도가 크게 나타나게 된다.



(a)



(b)

Fig. 2. Effect of outliers on estimated errors when $\epsilon = 3/10$. (a) location errors. (b) velocity errors.

Fig. 2은 각 10개의 TDOA와 FDOA 정보 중 최소개의 정보(2D의 경우 3개)를 이용하여, 총 $10 C_3$ 개의 조합을 해당하는 추정된 신호원의 위치와 속도를 보여주고 있다. 이상치 발생 확률은 3/10으로 설정하여, 10개의 TDOA와 FDOA 정보 중 3개의 이상치 정보를 포함하고 있다고 가정하였으며, 나머지 7개의 정상치 정보

는 정규 분포의 잡음을 포함하고 있다고 가정하였다. 이상치를 포함하지 않고 정상치만을 이용해 추정된 신호원의 위치와 속도의 경우, 추정 오차가 작게 나타나고 유사도가 매우 크게 나타나는 것에 비해, 이상치가 포함된 정보를 이용하여 신호원의 위치와 속도를 추정할 경우, 추정 오차가 크게 발생하여 추정 위치와 속도의 유사도가 현저히 떨어지는 것을 볼 수 있다.

각 최소개의 TDOA와 FDOA 정보를 이용하여 추정된 위치와 속도의 유사도에 대한 인접행렬 Ψ_u, Ψ_{udot} 을 구성할 수 있으며, 각 인접행렬의 크기는 $N C_3 \times N C_3$ 이 된다. 인접행렬의 요소는 아래의 수식을 이용하여 구성하며, 각각의 TDOA와 FDOA 정보 조합에 따른 추정 위치와 추정 속도의 차이값과 문턱값을 이용하여 인접행렬을 구성한다. 이때, 문턱값은 인접행렬이 양의 정부호 행렬이 되도록 설정한다.

$$\Psi_u(i,j) = \begin{cases} 1, & \|u_i - u_j\| \leq u_{threshold} \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (8)$$

$$\Psi_{udot}(i,j) = \begin{cases} 1, & \|\dot{u}_i - \dot{u}_j\| \leq \dot{u}_{threshold} \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (9)$$

인접행렬을 이용하여, 아래 수식에서 최대가 되는 벡터 γ^* 와 γ_d^* 을 찾는다. 벡터 γ^* 와 γ_d^* 은 가장 큰 고유값을 갖는 고유벡터로 구할 수 있다[7].

$$\gamma^* = \arg \max_r \frac{r^T \Psi_u r}{r^T r} \quad (10)$$

$$\gamma_d^* = \arg \max_{r_d} \frac{r_d^T \Psi_{udot} r_d}{r_d^T r_d} \quad (11)$$

벡터 γ^* 와 γ_d^* 의 크기는 $N C_3 \times 1$ 이 되며, 벡터의 요소는 각 3개의 TDOA와 FDOA 정보와 연관되어 있다. 2D의 경우, 각 3개의 TDOA와 FDOA 정보가 하나의 추정 위치와 속도를 만들어내므로, 하나의 벡터의 요소가 3개의 TDOA와 FDOA 정보와 연관되게 되며, 큰 벡터의 요소와 관련 있는 3개의 TDOA와 FDOA 정보를 추출하여 최소개의 정상치 TDOA/FDOA 정보를 결정한다. 제안된 알고리즘은 N개의 TDOA와 FDOA 정보에서 최소개의 정상치에 해당하는 TDOA와 FDOA 정보를 추출하므로, N개의 정보에서 정상치를 모두 추출하는 기존의 방식에 비해, 추출된 정보에 이

상치가 포함될 가능성이 적게 된다[6-7].

이렇게 추출된 최소개의 TDOA와 FDOA 정보를 정상치라고 가정하고, 이를 기반으로 두 번째 단계에서 나머지 TDOA와 FDOA 정보를 하나씩 추가하면서 추정되는 신호원의 위치와 속도를 살펴보고 이를 이용하여 추가된 TDOA와 FDOA 정보가 정상치인지 이상치인지 판단하게 된다. 즉, 정상치로 추정되는 n개의 TDOA와 FDOA 정보를 기반으로 추정된 신호원의 위치 u_n 와 속도 \dot{u}_n 를 가지고, 새로운 TDOA와 FDOA 정보를 추가하여, n+1개의 TDOA와 FDOA 정보를 기반으로 갱신된 신호원의 위치 u_{n+1} 와 속도 \dot{u}_{n+1} 을 서로 비교한다. 이때, 새롭게 갱신된 신호원의 위치와 속도의 확률을 구하여 일정 확률 이상일 경우, 새로운 TDOA와 FDOA 정보를 정상치로 판단하고, 일정 확률 이하일 경우, 이상치로 판단한다. 확률을 구하기 위해, n개의 TDOA와 FDOA 정보들의 잡음 공분산 행렬로부터 추정된 θ_i 의 공분산을 이용한다[5]. 이를 반복적으로 수행하여 전체 TDOA와 FDOA 정보에서 이상치를 검출하여 결정하고 최종적으로 정상치의 TDOA와 FDOA 정보만을 활용하여 이동 신호원의 속도와 위치를 추정한다.

4. 모의실험 결과

제안한 이상치 검출 알고리즘의 성능을 파악하기 위해 2D 환경에서 모의실험을 실시하였으며, 이상치 정보의 잡음에 대한 시나리오는 [8]과 유사하게 사용하였다. 모의실험을 위해, N=10이라고 가정하여, 총 11개의 센서에서 각 10개의 TDOA와 FDOA 정보를 이용하였다. 각 센서의 위치(Δ)와 신호원의 위치(o)는 Fig. 3과 Table 1과 같으며, 각 센서는 고정되어 있고, 이동 신호원은 (-20, 15) m/s의 속도로 이동하고 있다고 가정하였다.

측정한 TDOA와 FDOA 정보는 정상치의 경우, 정규분포의 잡음 가지고 있다고 가정하고, 이상치 정보는 바이어스와 잡음을 가지고 있다고 가정하였다. TDOA와 관련이 있는 수식(3)의 r_{i1}^o 의 잡음은 아래의 수식으로 모델링하였다[10].

$$p(n_i) = (1 - \epsilon)N(0, \sigma^2) + \epsilon N(\mu_0, \sigma_0^2) \quad (12)$$

TDOA와 FDOA 정보는 ϵ 의 확률로 이상치의 잡음

을 가지게 되고 (1- ϵ)의 확률로 정상치의 잡음을 갖게 된다. μ_0 측정 정보의 0배에서 2배까지 균일한 분포를 가지고 있다고 가정하고 $\sigma_0 = 2.18\sigma$ 로 설정하였다[6]. TDOA 잡음 σ_d^2 은 σ^2/c^2 으로 설정되며, 여러 개로 구성된 TDOA와 FDOA 정보의 공분산 행렬은 각각 $\sigma_d^2 R$, $0.1\sigma_d^2 R$ 로 설정하였다[6]. 행렬 R은 대각성분은 1이고 나머지 성분은 0.5인 행렬로 정의하였다. 모의실험에서는 N=10, ϵ 은 3/10으로 설정하였으며, 2000번의 모의실험을 통해 결과를 도출하였다.

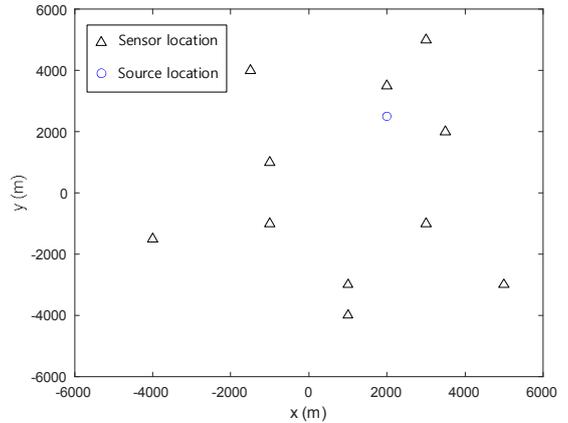


Fig. 3. Location of source and sensors in 2-D view.

Table 1. Position of source and sensors

	Position (m, m)
Source	(2000, 2500)
S_1	(3000, -1000)
S_i	(-4000, -1500), (3000, 5000), (3500, 2000), (-1000, 1000), (1000, -3000), (-1500, 40000), (5000, -3000), (2000, 3500), (-1000, -1000), (1000, -4000)

이상치 검출 알고리즘의 첫 번째 단계에서는 인접 행렬을 이용하여 최소개의 정상치 TDOA와 FDOA 정보를 찾는 과정으로 $N C_3$ 개의 추정 위치와 속도를 통해 인접 행렬을 생성하고 이를 통해 3개의 TDOA와 FDOA 정보를 추출하고, 두 번째 단계에서 확률을 기반으로 이상치를 검출하게 된다. 수식(3)에서 정의한 r_{i1}^o 의 잡음인 σ^2 의 크기에 따라, 첫 번째 단계에서 3개의 정보가 정상치에서 추출되는지와 두 번째 단계에서 이상치 정보가 정확히 검출되었는지 모의실험을 수행하였으며, 첫 번째 단계에서는 σ^2 이 40dB 이하에서, 두 번째 단계에서는 20dB 이하에서 95% 이상의 정확도를

보이며, 이상치가 적절히 검출되는 것을 확인하였다.

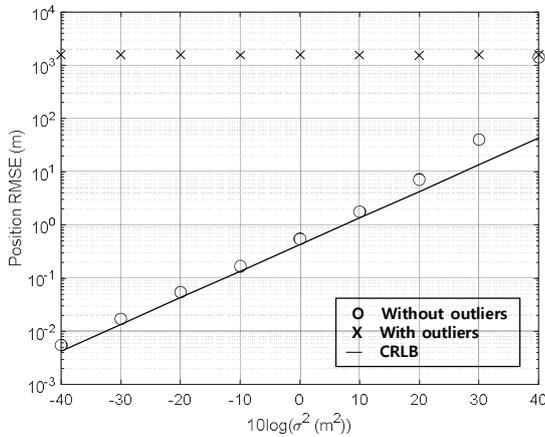


Fig. 4. RMSE of location estimation using proposed algorithm

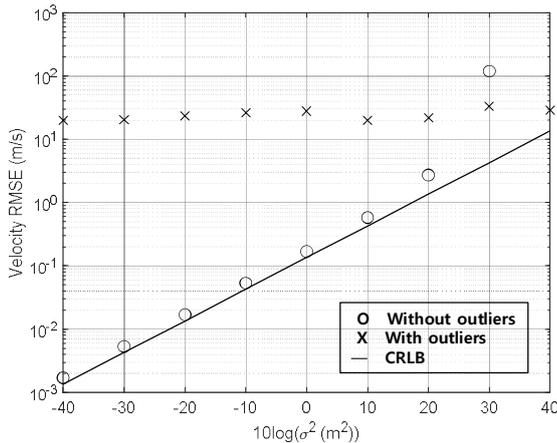


Fig. 5. RMSE of velocity estimation using proposed algorithm

Fig. 4와 Fig. 5는 TDOA와 FDOA 정보의 잡음에 따라 추정된 이동 신호원의 위치와 속도의 Root mean square error(RMSE)를 계산하여 보여주고 있으며, 이를 이론적 한계인 CRLB와 비교하였다[5]. 각 10개의 TDOA와 FDOA 정보가 각 3개의 이상치 정보를 포함하는 경우를 가정하였으며, 정상치 정보의 경우, 정규분포를 갖는 잡음을 인가하고, 이상치 정보의 경우, 수식 (12)와 같이 바이어스와 잡음을 인가하였다. 이상치 검출을 위한 첫 번째 단계에서는 120개($=_{10}C_3$)의 정보 조합을 통해 인접행렬을 구성하게 되고, 이를 통해 각 3개의 TDOA와 FDOA 정보를 추출한 후, 두 번째 단계

에서 확률을 기반으로 정보가 이상치인지 정상치인지 판단하였다. Fig. 4와 Fig. 5에서 이상치 검출 알고리즘 없이, 이상치를 포함한 각 10개의 TDOA와 FDOA 정보를 융합하여 이동 신호원의 위치와 속도를 추정할 경우, 잡음의 크기와 상관없이 추정 위치와 속도의 RMSE가 크게 분포하는 것을 알 수 있다. 이상치 검출 알고리즘을 적용할 경우, 잡음이 20dB 이하에서 이상치를 나타내는 TDOA와 FDOA 정보가 효과적으로 제거되어 RMSE가 이론치인 CRLB에 근접하는 것을 알 수 있다. 그러나 정상치 잡음이 크게 증가하는 경우, 이상치 검출 과정에서 오류가 발생하여 RMSE가 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

제안된 알고리즘은 정상치 잡음 σ^2 이 20dB 이하인 경우, 전파 신호의 다중 경로 페이딩, Non line of sight, 센서의 오동작, 재밍 등의 다양한 이유에 의해 발생하는 TDOA와 FDOA의 이상치 정보를 정확하게 검출하고 제거하여, TDOA와 FDOA의 정상치 정보만을 바탕으로 신호원의 위치와 속도를 추정할 수 있으며, 그 정확도를 이론치와 유사하게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 TDOA와 FDOA 기반의 위치 추정 기법인 TSWLS 알고리즘에서 인접 행렬과 확률을 활용하는 두 단계로 구성된 이상치 검출 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 이상치를 포함하지 않은 최소의 정보 집합을 인접행렬을 이용하여 추출하고, 이를 기반으로 나머지 정보의 이상치 여부를 확률을 기반으로 판단하기 때문에, 이상치 정보의 개수를 모르는 경우에도 이상치 정보를 정확히 검출하였다. 제안된 알고리즘을 구현하여 모의실험을 수행하였으며, 정보의 이상치가 효과적으로 추출되어 이동 신호원의 위치와 속도의 추정 정확도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 정상치 거리정보 잡음이 20dB 이하인 경우, Cramér-Rao lower bound에 근접한 위치 및 속도 추정 정확도를 얻음을 확인하였다.

REFERENCES

[1] A. E. Spezio. (2002). Electronic warfare systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and*

Techniques, 50(3), 633-644.
DOI : 10.1109/22.989948

- [2] J. Wang, Z. Qin, Y. Bi, S. Wei & F. Luo. (2018). Target localisation in multistatic radar using BR, TDOA, and AOA measurements. *IET Journal of Engineering*, 2019(19), 6052-6056.
DOI : 10.1049/joe.2019.0128
- [3] L. Yang, H. Gao, Y. Yang & G. Ru. (2019). Joint Position and Velocity Estimation of a Moving Target in Multistatic Radar by Bistatic Range, TDOA, and Doppler Shifts. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2019, Article ID 4943872.
DOI : 10.1155/2019/4943872
- [4] Z. Liu, Y. Zhao, D. Hu & C. Liu. (2016). A Moving Source Localization Method for Distributed Passive Sensor Using TDOA and FDOA Measurements. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2016, Article ID 8625039.
DOI : 10.1155/2016/8625039
- [5] K. C. Ho & W. Xu. (2004). An Accurate Algebraic Solution for Moving Source Location Using TDOA and FDOA Measurements. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 52(9), 2453-2463.
DOI : 10.1109/TSP.2004.831921
- [6] S. Al-Samahi, Y. Zhang & K. C. Ho. (2020). Elliptic and hyperbolic localization using minimum measurement solutions. *Signal Processing* 167, Article 107273.
DOI : 10.1016/j.sigpro.2019.107273
- [7] E. Olson, J. J. Leonard & Seth Teller. (2006). Robust Range-Only Beacon Localization. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 31(4), 949-958.
DOI : 10.1109/JOE.2006.880386
- [8] C. Luo & J. H. McClellan. (2010). Robust geolocation estimation using adaptive RANSAC algorithm. *IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing*, 3862-3865.
DOI : 10.1109/ICASSP.2010.5495817
- [9] Y. T. Chan, W. Y. Tsui, H. C. So & P. Ching. (2006). Time-of-arrival based localization under NLOS conditions. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 55(1), 17-24.
DOI : 10.1109/TVT.2005.861207
- [10] F. Gustafsson. (2005). Mobile Positioning Using Wireless Networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 22(4), 41-53.
DOI: 10.1109/MSP.2005.1458284

유 호 근(Hogeun Yoo)

[학생회원]



- 2018년 2월 : 경기과학기술대학교 전기제어공학과(공학사)
- 2018년 3월 ~ 2019년 12월 : 퍼펙트 대표
- 2020년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 컴퓨터학과 석사과정

- 관심분야 : 멀티 센서, SDR, 보안
- E-Mail : hogeunwoo@korea.ac.kr

이 재 훈(Jaehoon Lee)

[정회원]



- 1997년 2월 : 고려대학교 전파공학과(공학사)
- 1999년 2월 : 한국과학기술원 전기공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 고려대학교 전파공학과 (공학박사)
- 2003년 3월 ~ 2008년 2월 : 삼성전자

- 2008년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 컴퓨터학과 교수
- 관심분야 : 전자전 센서, 초고주파 회로, IoT, SDR 등
- E-Mail : ejhoon@korea.ac.kr