



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2024년 2월
석사학위 논문

고속 이동체에 특화된 TDOA/FDOA 기반
위치 추정 알고리즘

조선대학교 대학원

전자공학과

조태호

고속 이동체에 특화된 TDOA/FDOA 기반 위치 추정 알고리즘

TDOA/FDOA-based location estimation algorithm
specialized for high-speed moving object

2024년 2월 23일

조선대학교 대학원

전자공학과

조태호

고속 이동체에 특화된 TDOA/FDOA 기반 위치 추정 알고리즘

지도교수 황 석 승

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2023년 10월

조선대학교 대학원

전 자 공 학 과

조 태 호

조태호의 석사학위논문을 인준함

위원장 이 총 규 (인)

위 원 문 지 윤 (인)

위 원 황 석 승 (인)

2023년 12월

조선대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figureures	v
ABSTRACT	vii
제1장 서론	1
제1절 위치 추정 알고리즘 선행 연구	1
1. TDOA 선행 연구	1
2. FDOA 선행 연구	1
3. TDOA/FDOA 선행 연구	2
제2절 연구 배경 및 방법	3
제2장 TDOA와 FDOA 알고리즘	4
제1절 TDOA 알고리즘	4
제2절 FDOA 알고리즘	6

제3장 TDOA/FDOA 결합 알고리즘	8
제1절 고속 이동체에 특화된 위치 추정 알고리즘	8
1. 알고리즘 개요	8
2. TDOA/FDOA 결합 알고리즘	9
제4장 컴퓨터 시뮬레이션	14
제1절 이상적인 조건의 시뮬레이션	14
1. 센서와 타겟의 초기 위치 및 속도 파라미터	14
2. 고속 이동체의 위치 추정	17
제2절 시간 및 주파수 오차가 있는 시뮬레이션	21
1. 센서와 타겟의 초기 위치 및 속도 파라미터	21
2. 고속 이동체의 위치 추정	23
제3절 센서의 수가 증가한 조건의 시뮬레이션	28
1. 센서와 타겟의 초기 위치 및 속도 파라미터	28
2. 고속 이동체의 위치 추정	30

제4절	타겟의 속도가 변하는 조건의 시뮬레이션	34
1.	센서와 타겟의 초기 위치 및 속도 파라미터	34
2.	고속 이동체의 위치 추정	36
제5장	결론 및 향후 계획	40
REFERENCES		41

List of Tables

Table 4.1	Error and processing time for the first scenario.....	14
Table 4.2	Real initial position and velocity of sensors and high-speed moving object for the first scenario.....	15
Table 4.3	Error and processing time for the second scenario.....	20
Table 4.4	Sensor locations and Target location for the second scenario.....	21
Table 4.5	Error and processing time for the third scenario.....	27
Table 4.6	Real initial position and velocity of sensors and high-speed moving object for the third scenario.....	28
Table 4.7	Error and processing time for the fourth scenario.....	33
Table 4.8	Real initial position and velocity of sensors and high-speed moving object, and velocity changes of high-speed moving object for the fourth scenario.....	34

List of Figures

Figure 2.1	TDOA Algorithm target location curve.....	4
Figure 2.2	FDOA Algorithm target location curve.....	6
Figure 3.1	Block diagram for High-speed moving object location estimation algorithm.....	7
Figure 3.2	TDOA and FDOA combining algorithm flowchart.....	8
Figure 4.1	Sensor locations and Target location for the first scenario.....	15
Figure 4.2	Real location and the estimated location with the prediction range of the high-speed moving object for the first scenario.....	16
Figure 4.3	The localization estimation result for the high-speed moving object for the first scenario during 1.2 second.....	17
Figure 4.4	The localization estimation result for the high-speed moving object for the first scenario during 2.4 seconds.....	18
Figure 4.5	The location estimation error via time error for the first scenario.....	19
Figure 4.6	Sensor locations and Target location for the second scenario.....	21
Figure 4.7	Real location and the estimated location with the prediction range of the high-speed moving object for the second scenario.....	22
Figure 4.8	The localization estimation result for the high-speed moving object for the second scenario during 1.2 second.....	23
Figure 4.9	The localization estimation result for the high-speed moving object for the second scenario during 2.4 seconds.....	24
Figure 4.10	The localization estimation result for the high-speed moving object for the second scenario during 3.6 seconds.....	25
Figure 4.11	The location estimation error via time error for the second scenario.....	26
Figure 4.12	Sensor locations and Target location for the third scenario.....	28

Figure 4.13	Real location and the estimated location with the prediction range of the high-speed moving object for the third scenario.....	29
Figure 4.14	The localization estimation result for the high-speed moving object for the third scenario during 1.7 second.....	30
Figure 4.15	The localization estimation result for the high-speed moving object for the third scenario during 3.4 second.....	31
Figure 4.16	The location estimation error via time error for the fourth scenario..	32
Figure 4.17	Sensor locations and Target location for the fourth scenario.....	34
Figure 4.18	Real location and the estimated location with the prediction range of the high-speed moving object for the fourth scenario.....	35
Figure 4.19	The localization estimation result for the high-speed moving object for the fourth scenario during 1.2 second.....	36
Figure 4.20	The localization estimation result for the high-speed moving object for the third scenario during 2.4 seconds.....	37
Figure 4.21	The location estimation error via time error for the fourth scenario..	38

ABSTRACT

TDOA/FDOA-based location estimation algorithm specialized for high-speed moving object

Jo, Tae Ho

Advisor : Prof. Hwang, Suk-seung

Department of Electronic Engineering,

Graduate School of Chosun University

Accurately determining the precise location of rapidly moving objects at high speeds of 1 Mach (340 m/s) or higher, such as missiles or fighter jets, is an important problem in the fields of aerospace and defense. Typical technologies for estimating the location of moving objects include TDOA (Time Difference of Arrival) and FDOA (Frequency Difference of Arrival), which ensure excellent estimation performance for low-speed moving objects, but they may suffer significant estimation performance degradation in estimation accuracy when applied to high-speed moving objects. In order to enhance this problem, in this paper, we propose the combined location estimation algorithm based on TDOA and FDOA, complementing the limitations of each other. The proposed algorithm estimates the initial position of the moving object by employing TDOA, and it estimates the speed and direction of the moving object to predict its movement path by employing FDOA. The performance of the proposed algorithm is evaluated through computer simulations considering various scenarios. In the future, if the proposed algorithm for high-speed moving objects is applied in real, it is expected that effective position estimation in dynamic environments will be possible by estimating the position, speed, and direction.

제1장 서론

1절 위치추정 알고리즘 선행 연구

이동체의 위치를 추정하는 대표적인 알고리즘으로 TDOA (Time Difference of Arrival)와 FDOA(Frequency Differential of Arrival)를 들 수 있다. 본 절에서는 TDOA와 FDOA에 관련된 선행 연구에 대하여 설명한다.

1. TDOA 선행 연구

TDOA는 신호원들로부터 전송된 신호의 도착시간 차이를 이용하여 단말기의 위치를 추정하는 알고리즘이다[1-4]. [5-8]은 위치 기반 서비스 (Location Based Service, LBS)에 TDOA를 활용하여 정확한 위치 추정이 가능하지만, 신호 세기에 의해 오차가 발생한다는 단점을 가지고 있다. [9-12]는 RF 신호의 도착시간 차이를 이용해 위치를 추정하며, RF 신호를 이용한 위치 추정은 오차가 상대적으로 크다는 단점이 있다. 또한 [13-17]에서 음향 신호를 TDOA에 적용하여 스마트폰 및 수중 로봇의 위치를 추정하는 방식을 연구하였으며, 음향 신호를 이용한 위치 추정은 마이크와 같은 음향 센서의 간격이 좁을수록 오차가 커지는 단점을 가지고 있고, 수중 환경에서는 다양한 센서를 사용할 수 없어 음향 신호와 내부 센서들만을 사용할 수 있는 단점을 가지고 있다.

2. FDOA 선행 연구

FDOA는 신호원과 수신기들 간 도플러 천이를 이용하여 신호원의 위치 및 속도를 추정하는 알고리즘[2,18-20]이다. FDOA는 신호원과 수신기 간 상대적인 움직임이 존재할 경우 정확한 위치 추정이 가능하지만 그렇지 않을 경우 주파수 변화가 없어 정확한 위치 추정이 불가능하며, 단일 정보를 사용할 경우 추정성능이 저하되는 단점을 갖고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 FDOA를 KF(Kalman Filter)와 같은 적응형 필터 기술을 접목하여 성능을 개선하는 방식을 사용한다 [21,22]. 현재 [23-26]에서 FDOA를 활용하여 항공기, UAV(Unmanned Aerial Vehicle)

와 같은 이동하는 물체의 위치를 추정하는 연구가 진행되고 있다. 움직임의 변화가 적은 UAV의 위치를 추정할 경우 적은 오차율을 보이나 FDOA는 넓은 주파수 대역에서 추정성능이 저하되고 상태가 급변하는 물체에 대한 위치 추정에는 어려움이 있다.

3. TDOA/FDOA 선행 연구

TDOA와 FDOA를 동시에 이용할 경우 하나의 센서를 통해 두 가지 정보를 동시에 얻을 수 있어 신호원의 위치 추정을 위한 정보량의 수를 늘릴 수 있으며, 이로 인해 높은 추정성능을 가질 수 있다[4,27-30]. 하지만 두 가지 정보를 동시에 이용할 경우 계산 복잡도가 커지며, 고속 이동체의 경우 주파수 시프트의 범위가 넓어지기 때문에 추정오차가 커지는 단점이 있다. 이러한 위치 추정 오차를 보정하기 위하여 EKF(Extended Kalman Filter)를 추가로 결합하여 항공기, 미사일 등과 같은 이동 물체의 위치를 추정 및 추적하는 연구가 진행되고 있다[31-35]. 또한 [36-39]의 연구처럼 LEO(Low Earth Orbit)과 GEO(Geostationary Earth Orbit) 위성을 사용하여 TDOA와 FDOA를 통한 위치 추정이 이루어지고 있다. LEO 위성의 경우 지연 시간이 낮아 빠른 응답을 통한 근접 관측이 가능하며, GEO 위성의 경우 고정된 위치에서 안정적인 위치 정보를 제공할 수 있다[40]. 이러한 연구들을 통해 항공기, UAV와 같은 이동하는 물체에 대한 위치를 추정할 수 있다[41].

제2절 연구 배경 및 방법

항공 우주 및 국방 분야에서 고속 이동체는 일반적으로 1마하(340m/s) 이상으로 움직이는 물체를 뜻하는데, 항공 분야에서는 초음속 여객기, 고속 발사체 등이, 국방 분야에서는 미사일이나 전투기를 예로 들 수 있다. 부품 소재 및 반도체 기술의 발전으로 유체의 영향을 덜 받으면서 더욱 빠른 비행이 가능한 고속 이동체의 연구/개발이 진행되고 있어[42,43], 고속 이동체의 정확한 위치를 실시간으로 추정하기 위한 고성능 위치 추정 기술에 대한 연구도 주목을 받고 있다.

일반적인 TDOA는 속도가 고려되지 않아, 물체가 고속으로 이동하는 경우 신호의 강도가 약해지는 단점이 생기며, 위치 해를 계산하기 위한 프로세싱 시간에 의한 추정 오차가 발생하게 되어 심각한 위치 추정 성능 열화가 발생할 수 있다. FDOA는 이동체의 속도를 고려하여 이동체의 위치 추정에 적합하나, 고속 이동체의 경우 주파수 시프트 대역이 넓어져 단일로 사용하였을 경우 오차가 증가하며, 이동체의 위치를 결정하기 위해 적절한 위치 초기값을 설정해주어야 하는데, 부정확한 위치값이 초기값으로 입력되는 경우 심각한 추정오차를 유발할 수 있다.

이와 같은 문제점을 개선하기 위해, 본 논문은 TDOA와 FDOA가 결합된 고속 이동체에 적합한 위치 추정 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 FDOA의 민감한 초기값 문제를 해결하기 위해, TDOA를 사용하여 이동체의 초기 위치를 추정한다. 또한, FDOA를 사용하여 이동체의 이동 속도와 방향을 계산하고, 추정된 초기 위치, 이동 속도, 방향을 고려하여, 특정 시간에서의 정확한 이동체 위치를 계산한다. TDOA를 단독으로 사용하는 경우, 프로세싱 시간 동안 고속 이동체는 이미 상당한 거리를 이동하여 특정한 위치를 계산하지 못하고 대략적인 범위만을 특정할 수 있으나, 제안된 알고리즘은 정확한 고속 이동체의 위치를 결정할 수 있다.

제2장 TDOA와 FDOA 알고리즘

본 장은 논문의 기본이 되는 TDOA와 FDOA의 개념에 대해 간략히 설명하고, 각 알고리즘에 대한 측정값과 위치를 추정하기 위한 타겟과 센서 사이의 거리 및 거리 변화율을 소개한다.

제1절 TDOA 알고리즘

본 절은 TDOA 알고리즘을 소개한다. TDOA는 주로 레이더 시스템이나 위치 추적 시스템에서 사용되는 알고리즘이며, Figure 2.1과 같이 신호가 세 개 이상의 기지국 또는 센서에 도달하는 신호 도달 시간 차이를 기반으로 위치를 추정하는 알고리즘이다.

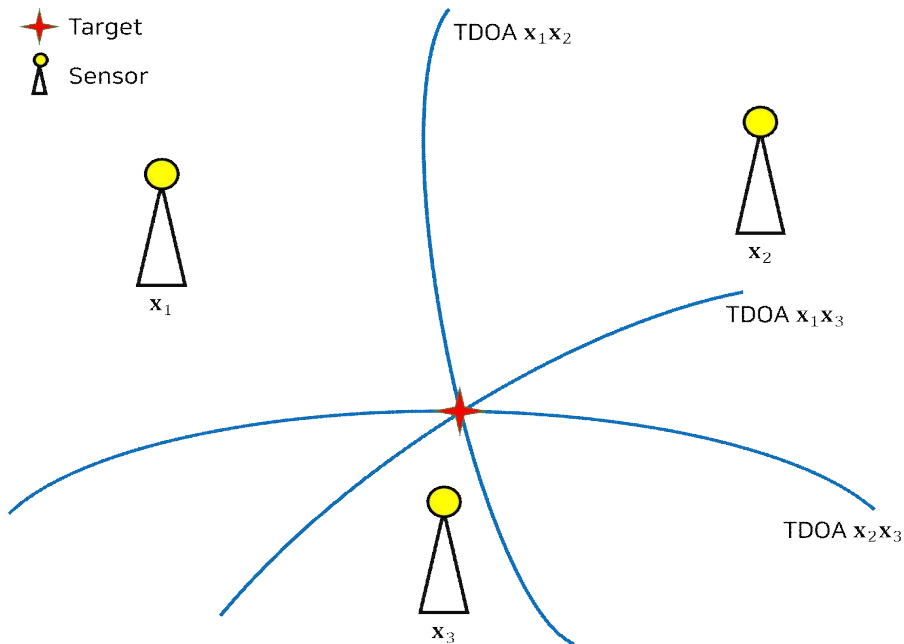


Figure 2.1 TDOA Algorithm target location curve

수신기의 TDOA 측정값은 식 (2.1)과 같이 나타낼 수 있으며, 타겟과 각 센서

사이의 도달 시간 차이를 나타낸다.

$$\tau_{i,j} = t_i - t_j \quad (2.1)$$

식 (2.1)에서 t_i 와 t_j 는 각각 타겟과 i 번째 센서, 타겟과 j 번째 센서의 도달 시간을 의미한다. 식 (2.1)에 빛의 속도 c 를 곱하여 타겟과 i, j 번째 센서의 거리 차이 $R_{i,j}(\mathbf{x})$ 를 식 (2.2)에 나타내었다[44-46].

$$R_{i,j}(\mathbf{x}) = c\tau_{i,j} = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_2 - \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_j\|_2 \quad (2.2)$$

식 (2.2)에서 \mathbf{x} 는 타겟의 좌표, \mathbf{x}_i 는 i 번째 센서의 위치 좌표를 나타내며, $\|\cdot\|_2$ 은 2차 Euclidean norm을 의미한다. 식 (2.2)에서 센서의 개수가 N 개이고, 기준 센서의 번호 역시 N 이라고 가정하면 $N-1$ 개의 TDOA 거리 측정값 벡터는 식 (2.3)과 같이 정리할 수 있다.

$$\mathbf{r}(\mathbf{x}) = [R_{1,N}(\mathbf{x}), R_{2,N}(\mathbf{x}), \dots, R_{N-1,N}(\mathbf{x})]^T \quad (2.3)$$

식 (2.3)에서 $[\cdot]^T$ 는 켈레 전치를 의미한다.

제2절 FDOA 알고리즘

본 절은 FDOA 알고리즘을 소개한다. FDOA는 주로 레이더 시스템과 통신 시스템에서 사용되며, Figure 2.2와 같이 신호원과 수신기들간 도플러 천이를 이용하여 신호원의 위치와 속도를 추정하는 알고리즘이다.

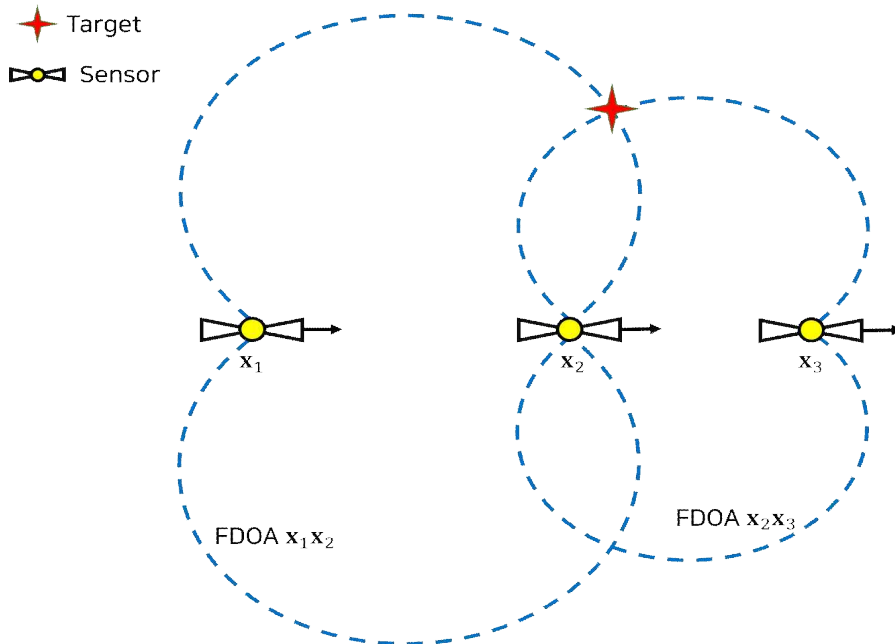


Figure 2.2 FDOA Algorithm target location curve

각 센서에 대한 FDOA 측정값은 식 (2.4)와 같이 나타낼 수 있으며, 타겟과 각 센서 사이의 주파수 도달 차를 의미한다.

$$F_{i,j} = f_i - f_j \quad (2.4)$$

식 (2.4)에서 f_i 와 f_j 는 각각 타겟과 i 번째 센서, 타겟과 j 번째 센서의 도달 주파수를 의미한다. 식 (2.4)에 빛의 속도 c 를 중심 주파수 f_0 로 나눈 값을 곱하여 타겟과 i, j 번째 센서의 거리 변화율 차이 $\dot{R}_{i,j}(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ 를 식 (2.5)에 나타내었다[44,47].

$$\dot{R}_{i,j}(\mathbf{x}, \mathbf{v}) = \frac{c}{f_0} F_{i,j} = \left[\frac{(\mathbf{v}_i - \mathbf{v})^T (\mathbf{x} - \mathbf{x}_i)}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_2} - \frac{(\mathbf{v}_j - \mathbf{v})^T (\mathbf{x} - \mathbf{x}_j)}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_j\|_2} \right] \quad (2.5)$$

식 (2.5)에서 \mathbf{v} 는 타겟의 속도, \mathbf{v}_i 는 i 번째 센서의 속도, \mathbf{v}_j 는 j 번째 센서의 속도를 나타내며, (\cdot) 는 해당 값의 1차 미분을 의미한다. $N-1$ 개의 FDOA 거리 변화율 벡터는 식 (2.6)과 같이 정리할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{r}}(\mathbf{x}, \mathbf{v}) = [\dot{R}_{1,N}(\mathbf{x}, \mathbf{v}), \dot{R}_{2,N}(\mathbf{x}, \mathbf{v}) \dots, \dot{R}_{N-1,N}(\mathbf{x}, \mathbf{v})]^T \quad (2.6)$$

이와 같은 TDOA 측정값 기반의 거리 벡터, FDOA 측정값 기반의 거리 변화율 벡터는 제안된 알고리즘의 입력으로 사용되어 특정 타겟에 대한 위치 추정이 가능해진다.

제3장 TDOA/FDOA 결합 알고리즘

본 장은 2장에서 설명한 TDOA와 FDOA가 결합되어 고속 이동체에 특화된 위치 추정 알고리즘에 대하여 설명한다.

제1절 고속 이동체에 특화된 위치 추정 알고리즘

본 절은 고속 이동체에 특화된 TDOA와 FDOA가 결합된 위치 추정 알고리즘을 소개한다. 2장의 TDOA와 FDOA 측정값을 계산하는 방법은 ILS(iterative Least Square)기법이다. 초기 매개변수를 설정하고 실제값과 측정값 간의 오차를 계산한 후, 오차를 최소화하기 위해 매개변수를 반복적으로 업데이트하며 새로운 예측값과 오차를 계산하는 과정을 반복한다. 충분한 반복 후에 알고리즘이 수렴하면 최종 매개변수 값을 얻을 수 있는 기법이다.

1. 알고리즘 개요

Figure 3.1는 제안된 알고리즘에 대한 블록다이어그램으로 TDOA 알고리즘을 사용하여 고속 이동체의 초기 위치를 추정하고, FDOA 알고리즘을 사용하여 속도와 방향을 추정한 후, 추정된 결과값을 기반으로 특정 시간에서의 고속 이동체 위치를 계산한다.

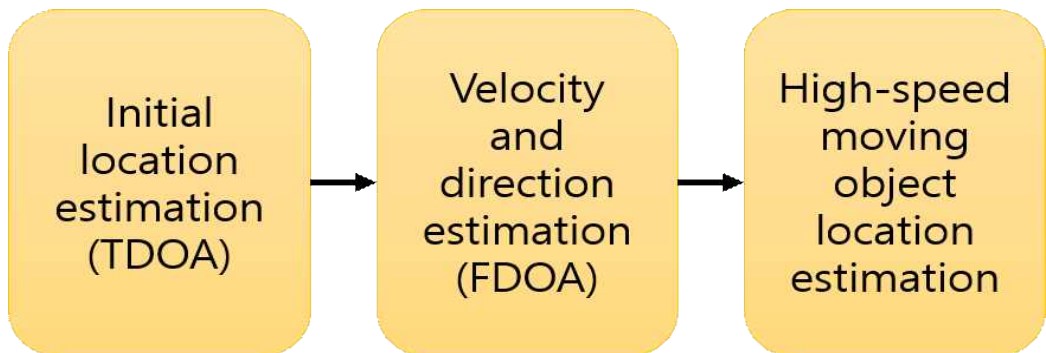


Figure 3.1 Block diagram for High-speed moving object location estimation algorithm

2. TDOA/FDOA 결합 알고리즘

Figure 3.2는 본 논문에서 제안된 고속 이동체에 특화된 TDOA/FDOA 기반 위치 추정 알고리즘의 순서도이다.

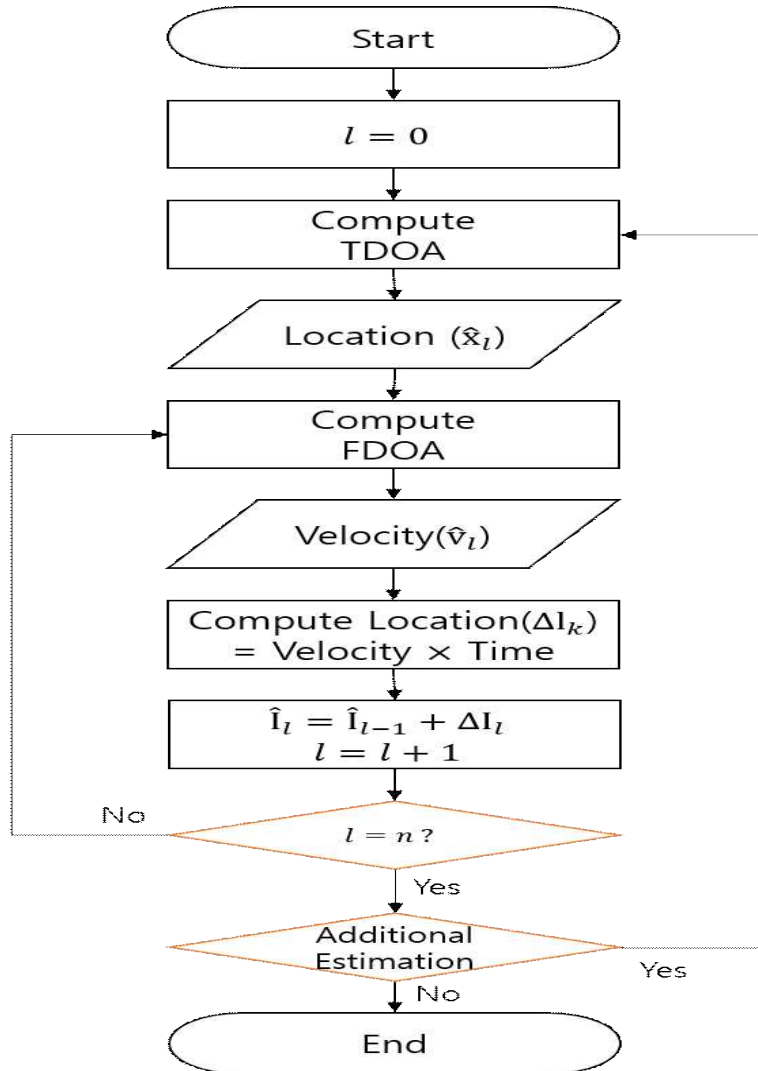


Figure 3.2 TDOA and FDOA combining algorithm flowchart

고속 이동체의 초기 위치값은 TDOA 측정치를 기반으로 식 (3.1)과 같이 ILS 알고리즘을 사용하여 계산한다[48-51].

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \Delta \mathbf{x}_k \quad (3.1)$$

식 (3.1)에서 $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ 은 ILS 알고리즘의 $k-1$ 번째 위치해, $\Delta \mathbf{x}_k$ 는 k 번째 위치 추정치이며 식 (3.2)와 같이 계산된다.

$$\Delta \mathbf{x}_k = [\mathbf{J}(\mathbf{x}_k) \mathbf{C}_\rho^{-1} \mathbf{J}^T(\mathbf{x}_k)]^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{x}_k) \mathbf{C}_\rho \mathbf{t}(\mathbf{x}_k) \quad (3.2)$$

식 (3.2)에서 $\mathbf{J}(\mathbf{x}_k)$ 는 k 번째 시행에 대한 센서 위치에서의 Jacobian을 의미하고, 식 (3.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}_k) = [\nabla_{\mathbf{x}} R_{1,N}, \dots, \nabla_{\mathbf{x}} R_{N-1,N}] \quad (3.3)$$

식 (3.3)에서 $\nabla_{\mathbf{x}} R_{i,N}$ 는 i 번째 센서와 기준 센서 N 의 범위 차이의 기울기를 의미한다. 또한, 식 (3.2)에서 \mathbf{C}_ρ 는 각 센서의 측정치의 분산으로 구성된 공분산 행렬을 나타내며, 식 (3.4)와 같이 계산된다.

$$\mathbf{C}_\rho = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & 0 \\ & \sigma_2^2 & \\ & & \ddots \\ 0 & & & \sigma_{N-1}^2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

식(3.2)에서 $\mathbf{t}(\mathbf{x}_k)$ 는 정규분포 특성의 오차를 포함하는 TDOA 거리 측정값(ρ)과

실제 관측값 사이의 오차를 의미하며, 식 (3.5)와 같이 계산된다.

$$\mathbf{t}(\mathbf{x}_k) = \boldsymbol{\rho} - \mathbf{r}(\mathbf{x}_k + \Delta \mathbf{x}_k) \quad (3.5)$$

고속 이동체의 속도 정보는 식 (3.1)을 통해 추정된 초기 위치 추정값과 FDOA 거리 변화율을 기반으로 ILS 알고리즘을 사용해 식 (3.6)과 같이 계산된다.

$$\hat{\mathbf{v}}_k = \hat{\mathbf{v}}_{k-1} + \Delta \mathbf{v}_k \quad (3.6)$$

식 (3.6)에서 $\hat{\mathbf{v}}_{k-1}$ 은 ILS 알고리즘의 $k-1$ 번째 속도해를 의미하며, $\Delta \mathbf{v}_k$ 는 식 (3.7)와 같이 계산되는 k 번째 속도 추정값이다.

$$\Delta \mathbf{v}_k = [\mathbf{J}(\mathbf{v}_k) \mathbf{C}_\rho^{-1} \mathbf{J}^T(\mathbf{v}_k)]^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{v}_k) \mathbf{C}_\rho \mathbf{f}(\mathbf{v}_k) \quad (3.7)$$

식 (3.7)에서 $\mathbf{J}(\mathbf{v}_k)$ 는 $\dot{\mathbf{r}}(\mathbf{v})$ 의 k 번째 시행에 대한 센서 속도에서의 Jacobian을 의미하고, 식 (3.8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{J}(\mathbf{v}_k) = [\nabla_{\mathbf{v}} \dot{R}_{1,N}, \dots, \nabla_{\mathbf{v}} \dot{R}_{N-1,N}] \quad (3.8)$$

식 (3.8)에서 $\nabla_{\mathbf{v}} \dot{R}_{i,N}$ 는 i 번째 센서와 기준 센서 N 의 거리 변화율 차이의 기울기를 나타낸다.

식 (3.7)에서 $\mathbf{f}(\mathbf{v}_k)$ 는 정규분포 특성의 오차를 포함하는 FDOA 거리 변화율($\dot{\rho}$)과 실제 관측값 사이의 오차를 의미하며, 식 (3.9)와 같이 계산된다.

$$\mathbf{f}(\mathbf{v}_k) = \dot{\rho} - \dot{\mathbf{r}}(\mathbf{v}_k + \Delta \mathbf{v}_k) \quad (3.9)$$

TDOA 프로세싱 시간(t_{TDOA})에 대한 위치 예측값 ($\Delta \mathbf{P}$)는 식 (3.10)과 같이 계산된다.

$$\Delta \mathbf{P} = \hat{\mathbf{v}}_k \times t_{TDOA} \quad (3.10)$$

초기 위치를 추정된 후 고속 이동체의 l 번째 위치 예측값($\Delta \mathbf{I}_l$)은 식 (3.7)에서 추정된 속도에 FDOA 프로세싱 시간(t_{FDOA})을 곱하여 식 (3.11)와 같이 계산된다.

$$\Delta \mathbf{I}_l = \hat{\mathbf{v}}_k \times t_{FDOA} \quad (3.11)$$

여기서 프로세싱 시간이란 TDOA와 FDOA의 수학적 모델의 계산에 걸리는 시간을 의미하며, FDOA가 TDOA보다 계산 복잡도가 커 프로세싱 시간이 더 오래 걸린다.

고속 이동체의 초기 위치 예측값은 식 (3.12)와 같이 계산되며, 최종 위치 예측값은 식 (3.13)과 같이 계산된다.

$$\hat{\mathbf{I}}_0 = \hat{\mathbf{x}}_k + \Delta \mathbf{P} \quad (3.12)$$

$$\hat{\mathbf{I}}_l = \hat{\mathbf{I}}_{l-1} + \Delta \mathbf{I}_l \quad (l \geq 1) \quad (3.13)$$

식 (3.13)에서 $\hat{\mathbf{I}}_{l-1}$ 은 $l-1$ 번째 위치 예측값이며, 설정한 임의의 시간($l=n$)까지 식 (3.6), 식 (3.10), 식 (3.13)을 반복하여 계산한다. 이 과정을 한 사이클로 설정하고, 설정된 시간 이후에도 이동체의 위치 추정이 필요한 경우, 식 (3.6)을 통해 다시 초기 위치를 계산하고, 위 과정을 반복한다.

제4장 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 3장에서 제안된 고속 이동체에 특화된 TDOA와 FDOA 기반 위치 추정 알고리즘의 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시한다. 제안된 알고리즘의 고속 이동체 위치 추정을 위한 센서는 기지국 환경과 같이 고정되어 있거나 위성 환경과 같이 이동하는 센서를 고려할 수 있는데, 본 시뮬레이션에서는 위성 환경으로 가정하였다. 또한, 시간 오차와 주파수 오차는 환경, 기술, 사용 목적 등에 따라 달라질 수 있으므로, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 시간 및 주파수 오차를 가정하고, 센서의 위치와 속도, 타겟의 위치와 속도를 변화시켜 알고리즘의 성능을 비교하였다. 성능평가는 설정한 조건을 통해 시뮬레이션을 500회 시행하여 나온 데이터의 평균 값을 그림에 표현하였다.

제1절 이상적인 조건의 시뮬레이션

본 절은 고속 이동체에 특화된 TDOA와 FDOA 기반 위치 추정 알고리즘의 성능평가를 위해 이상적인 환경에서의 시간 및 주파수 오차를 고려한 시나리오를 제시한다.

1. 센서와 타겟의 초기 위치 및 속도 파라미터

본 항은 첫 번째 시나리오의 위치 추정에 필요한 다양한 파라미터들을 제시한다. 시간 오차, 주파수 오차, 중심 주파수, TDOA와 FDOA의 프로세싱 시간은 Table 4.1과 같이 가정하였다. 본 시뮬레이션에서는 이상적인 상황을 고려하기 위하여 시간 오차와 주파수 오차에 Eps를 사용하였다. Eps란 머신 엡실론(Machine Epsilon)이며, 1과 1보다 큰 다음 수의 차이를 나타내어 숫자로 표현 가능한 가장 작은 양수 값($2.2204e^{-16}$)이다.

시나리오 1에 대한 센서 및 고속 이동체의 실제 초기 위치와 속도는 Table 4.2에 요약되어 있다. 타겟은 초기에 가정한 속도로 일정하게 움직이며, Figure 4.1은 시나리오 1에 대한 센서와 타겟의 초기 위치를 나타낸다. 시나리오 1의 한 싸이클에 걸리는 시간은 TDOA 1회(0.1s)와 FDOA 10회(1.1s)를 고려한 총 1.2s로

가정한다.

Table 4.1 Error and processing time for the first scenario

Scenario 1	
Time error	Eps
Frequency error	Eps
Center frequency	400MHz
TDOA processing time	0.1s
FDOA processing time	0.11s

Table 4.2 Real initial position and velocity of sensors and high-speed moving object for the first scenario

	$x[m]$	$y[m]$	$\dot{x}[m/s]$	$\dot{y}[m/s]$
Sensor1	0	1000	0	1000
Sensor2	-866	-500	866	500
Sensor3	866	-500	866	500
Sensor4	0	0	1000	0
Target	-400	400	290	180

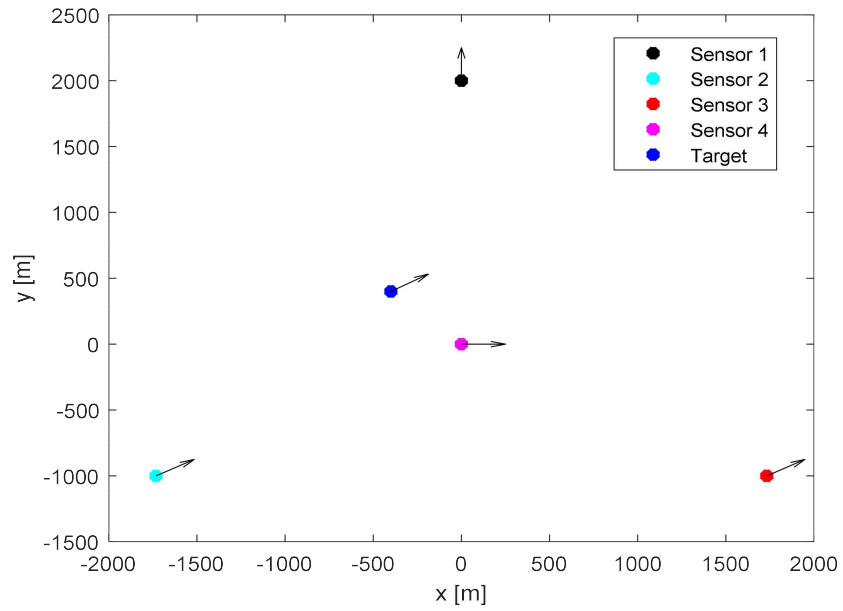


Figure 4.1 Sensor locations and Target location for the first scenario

2. 고속 이동체의 위치 추정

본 항은 이상적인 조건에서 고속 이동체에 특화된 TDOA와 FDOA 기반 위치 추정 알고리즘에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하고 분석한다.

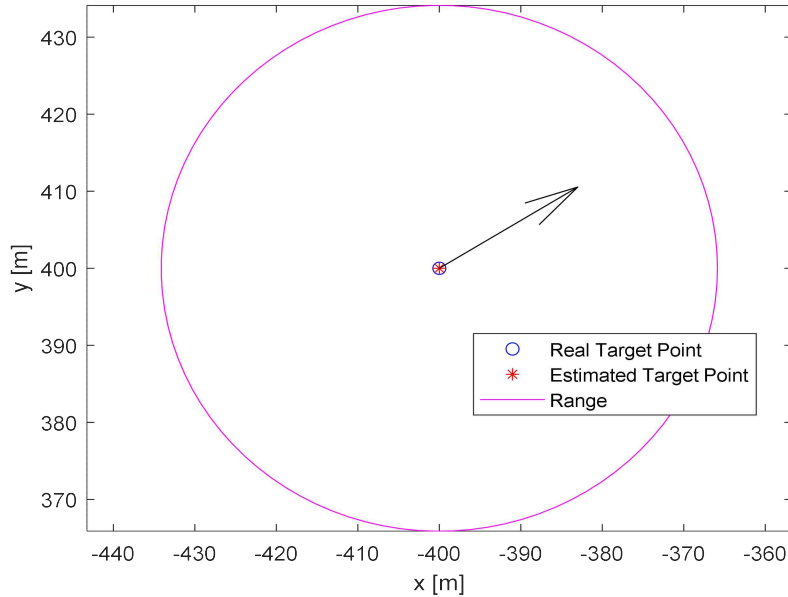


Figure 4.2 Real location and the estimated location with the prediction range of the high-speed moving object for the first scenario

Figure 4.2는 시나리오 1에 대한 고속 이동체의 실제 위치와 TDOA를 통해 추정된 초기 위치 및 FDOA를 통해 추정된 고속 이동체의 이동방향(화살표)을 나타낸다. 이상적인 조건을 가정하였기 때문에 실제 위치와 추정된 초기 위치가 유사한 것을 볼 수 있으며, 추정된 초기 위치를 중심으로 그려진 원은 TDOA의 프로세싱 시간 동안 이동한 물체가 위치할 수 있는 범위를 나타낸다. 즉, TDOA를 사용하여 초기 위치를 계산하는 동안, 이동체는 이미 다른 곳으로 이동하여 원 근처에 위치하므로, 정확한 추정 위치를 특정할 수 없다.

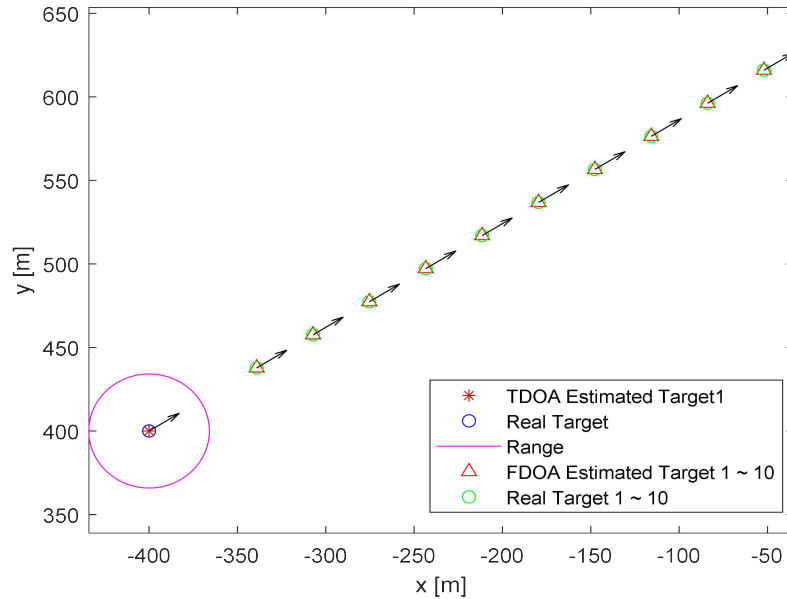


Figure 4.3 The localization estimation result for the high-speed moving object for the first scenario during 1.2 second

Figure 4.3은 1.2초간 이동한 이동체의 위치를 추정한 결과이다. TDOA를 사용해 초기 위치를 추정한 후, 0.11초마다 FDOA로 속도와 방향을 결정하여 계산된 위치를 그림에 나타내었다. 두 번째 추정 좌표는 TDOA 프로세싱 시간 0.1초와 FDOA 프로세싱 시간 0.11초가 고려된 0.21초간의 이동 거리를 표현하였으며, 두 번째 이후 다음 추정 좌표와의 거리는 FDOA 프로세싱 시간 0.11초만 고려되었기 때문에 첫 번째와 두 번째 사이의 거리보다 다소 가까운 것을 확인할 수 있다. 시나리오 1에서는 이 1.2초간의 과정을 한 사이클로 가정한다.

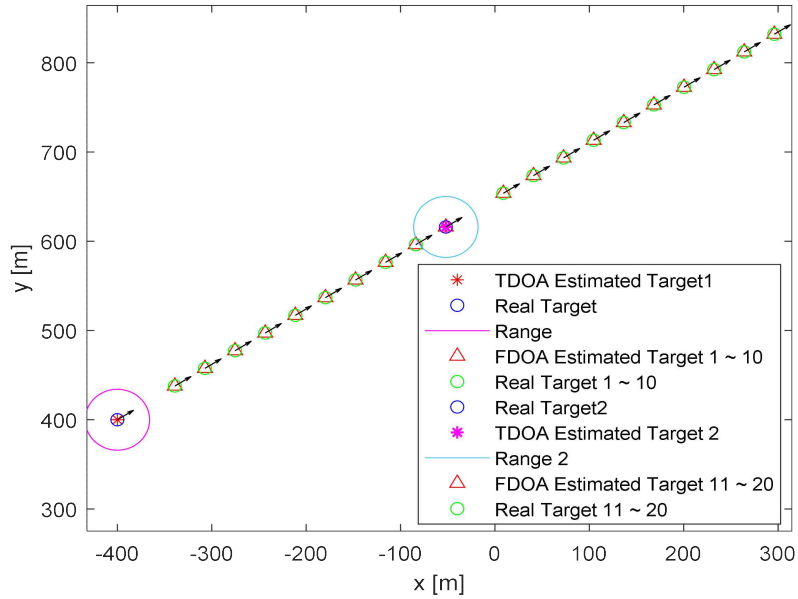


Figure 4.4 The localization estimation result for the high-speed moving object for the first scenario during 2.4 seconds

Figure 4.4는 타겟이 2.4초간 이동한 경우에 대한 추정 결과로, 총 두 개의 싸이클을 확인할 수 있다. 즉, 1.2초 경과 후 TDOA를 다시 실행하여 새로운 초기 위치를 추정하고, 그 결과를 기반으로 이동체의 속도와 방향을 추정하기 위해 FDOA를 반복적으로 실행한 결과이다. 이상적인 상황을 고려하였기 때문에 실제 위치와 추정된 위치와 속도가 매우 유사한 것을 확인할 수 있다.

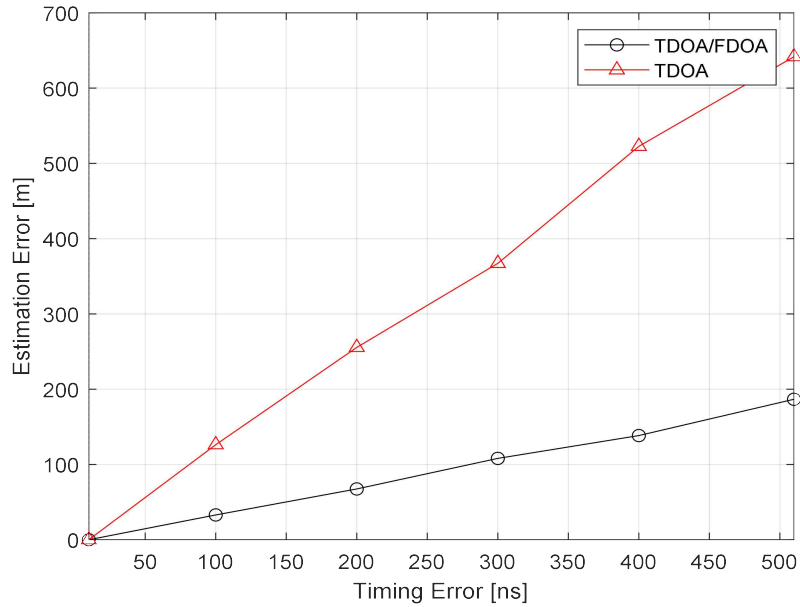


Figure 4.5 The location estimation error via time error for the first scenario

Figure 4.5는 시나리오 1의 오차 그래프를 나타낸다. 본 논문에서 제안된 TDOA/FDOA 기반의 결합 위치 추정 알고리즘이 TDOA 단일 알고리즘에 비해 오차가 작은 것을 확인할 수 있다. 성능 비교를 위해 시간 오차만을 고려하였기 때문에 단일 TDOA 알고리즘과 제안된 알고리즘의 성능을 비교하였으며, 이상적인 조건이 아닌 오차가 있는 경우의 성능 비교는 2절에서 설명한다.

제2절 시간 및 주파수 오차가 있는 시뮬레이션

본 절은 고속 이동체에 특화된 TDOA와 FDOA 기반 위치 추정 알고리즘의 성능 평가를 위해 시간 및 주파수 오차가 고려된 시나리오를 제시한다.

1. 센서와 타겟의 초기 위치 및 속도 파라미터

본 항은 두 번째 시나리오의 위치 추정에 필요한 다양한 파라미터들을 제시한다. 시간 오차, 주파수 오차, 중심 주파수, TDOA와 FDOA의 프로세싱 타임은 Table 4.3과 같이 가정하였다.

시나리오 2에 대한 센서 및 고속 이동체의 실제 초기 위치와 속도는 Table 4.4에 요약되어 있다. 타겟은 초기에 가정한 속도로 일정하게 움직이며, Figure 4.6은 시나리오 2에 대한 센서와 타겟의 초기 위치를 나타낸다. 시나리오 2의 한 사이클에 걸리는 시간은 TDOA 1회(0.1s)와 FDOA 10회(1.1s)를 고려한 총 1.2s로 가정한다.

Table 4.3 Error and processing time for the second scenario

Scenario 2	
Time error	300ns
Frequency error	4Hz
Center frequency	1GHz
TDOA processing time	0.1s
FDOA processing time	0.11s

Table 4.4 Real initial position and velocity of sensors and high-speed moving object for the second scenario

	$x[m]$	$y[m]$	$\dot{x}[m/s]$	$\dot{y}[m/s]$
Sensor1	0	-1000	0	-500
Sensor2	0	1000	0	-500
Sensor3	1000	1000	-500	-500
Sensor4	1000	-1000	500	-500
Target	300	300	150	-250

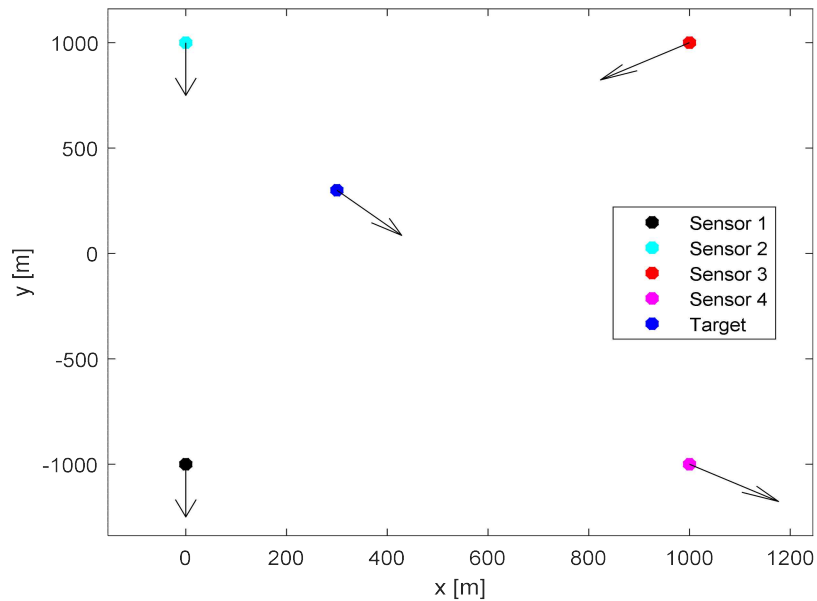


Figure 4.6 Sensor locations and Target location for the second scenario

2. 고속 이동체의 위치 추정

본 항은 시간 및 주파수 오차가 존재하는 조건에서 고속 이동체에 특화된 TDOA와 FDOA 기반 위치 추정 알고리즘의 위치 추정에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하고 분석한다.

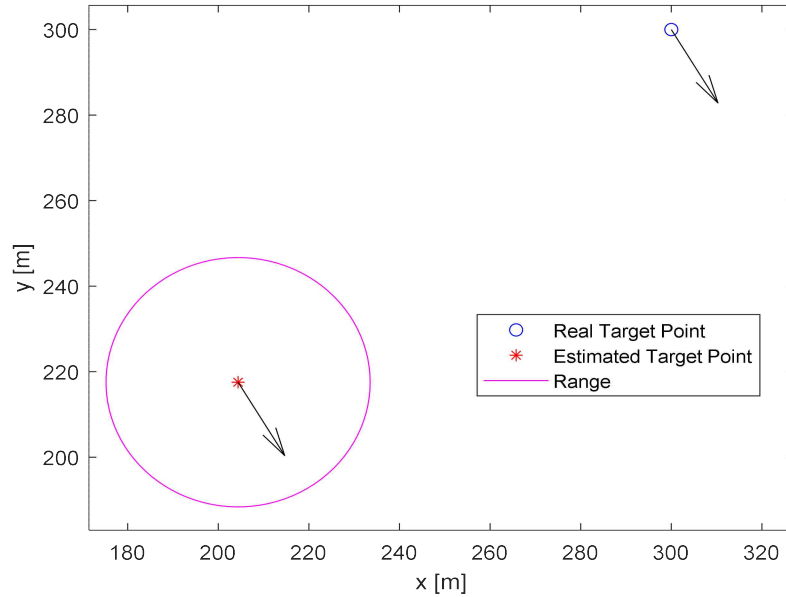


Figure 4.7 Real location and the estimated location with the prediction range of the high-speed moving object for the second scenario

Figure 4.7은 시나리오 2에 대한 고속 이동체의 실제 위치와 TDOA를 통해 추정된 초기 위치 및 FDOA를 통해 추정된 고속 이동체의 이동방향(화살표)을 보인다. 시간 오차 및 주파수 오차가 고려되었기 때문에 이상적인 상황과 달리 초기 위치 추정치와 실제 위치 사이에 오차가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 추정된 초기 위치를 중심으로 그려진 원은 TDOA의 프로세싱 시간 동안 이동한 물체가 위치할 수 있는 범위를 나타낸다. TDOA를 사용하여 초기 위치를 계산하는 동안, 이동체는 이미 다른 곳으로 이동하여 원 근처에 위치하므로, 정확한 추정 위치를 특정할 수 없다.

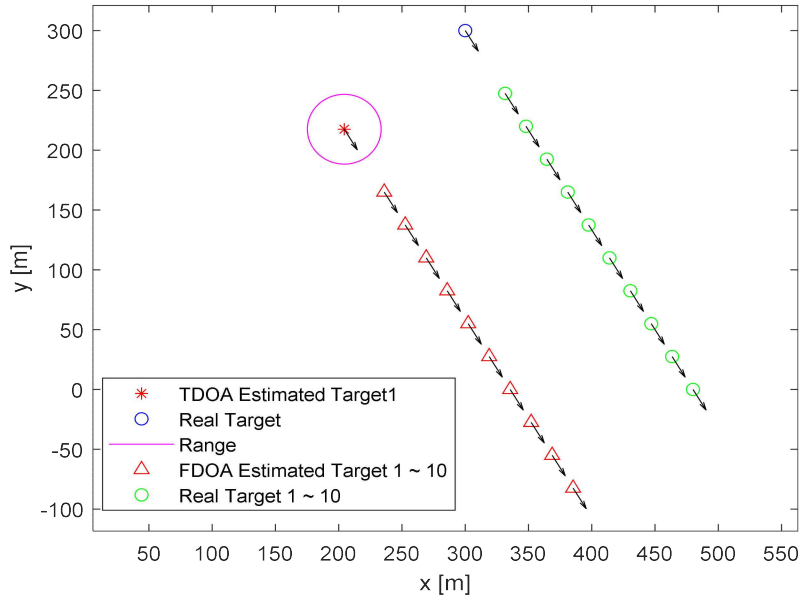


Figure 4.8 The localization estimation result for the high-speed moving object for the second scenario during 1.2 second

Figure 4.8은 1.2초간 이동한 이동체의 위치를 추정한 결과이다. TDOA를 사용해 초기 위치를 추정한 후, 0.11초마다 마다 FDOA로 속도와 방향을 결정하여 계산된 위치를 그림에 나타내었다. 두 번째 추정 좌표는 TDOA 프로세싱 시간 0.1초와 FDOA 프로세싱 시간 0.11초가 고려된 0.21초간의 이동 거리를 표현하였으며, 두 번째 이후 다음 추정 좌표와의 거리는 FDOA 프로세싱 시간 0.11초만 고려되었기 때문에 첫 번째와 두 번째 사이의 거리보다 다소 가까운 것을 확인할 수 있다. 시나리오 2에서는 이 1.2초간의 과정을 한 싸이클로 가정한다.

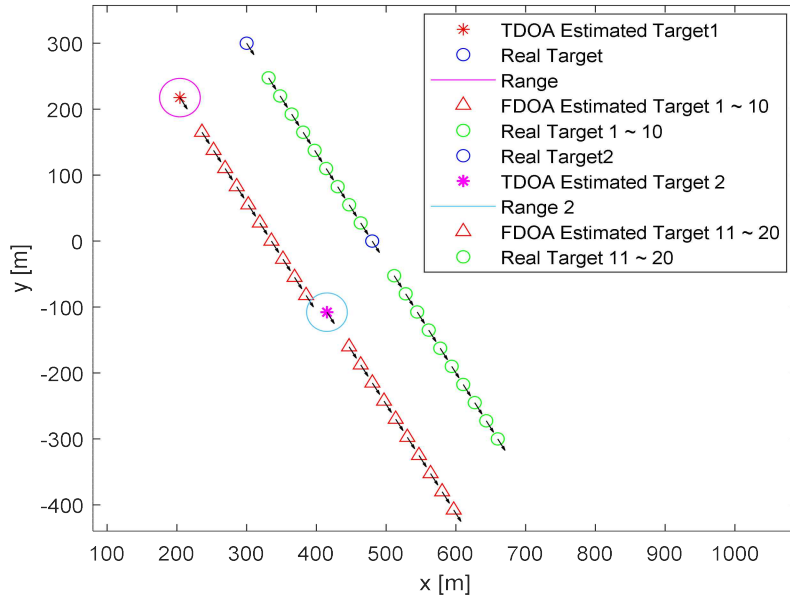


Figure 4.9 The localization estimation result for the high-speed moving object for the second scenario during 2.4 seconds

Figure 4.9는 타겟이 2.4초간 이동한 경우에 대한 추정 결과로, 총 두 번의 싸이클을 확인할 수 있다. 즉, 1.2초 경과 후 TDOA를 다시 실행하여 새로운 초기 위치를 추정하고, 그 결과를 기반으로 이동체의 속도와 방향을 추정하기 위해 FDOA를 반복적으로 실행한 결과이다.

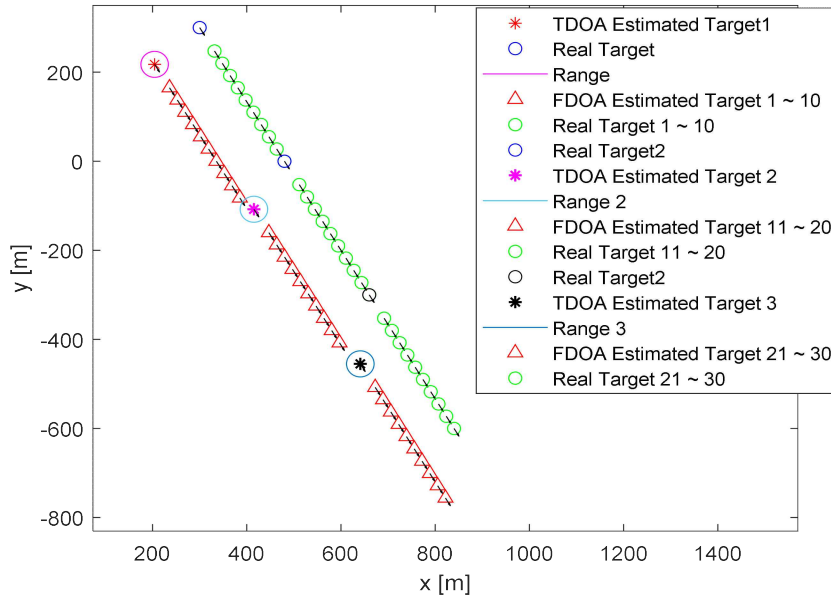


Figure 4.10 The localization estimation result for the high-speed moving object for the second scenario during 3.6 seconds

Figure 4.10는 타겟이 3.6초간 이동한 경우에 대한 추정 결과로, 총 세 번의 싸이클을 확인할 수 있다. 2.4초 경과 후 TDOA를 다시 실행하여 새로운 초기 위치를 추정하고, 그 결과를 기반으로 이동체의 속도와 방향을 추정하기 위해 FDOA를 반복적으로 실행한 결과이다. 시나리오 결과를 통해 주어진 오차에 따른 위치 추정 오차는 존재하지만, 물체의 이동 방향에 따라 효과적으로 위치를 추정하는 것을 확인할 수 있다. 시나리오 1과는 다르게 총 세 번의 싸이클을 실행하였으며, 이는 추가적인 위치 추정을 원했을 경우 성능이 유지가 되는지 확인하기 위함이다.

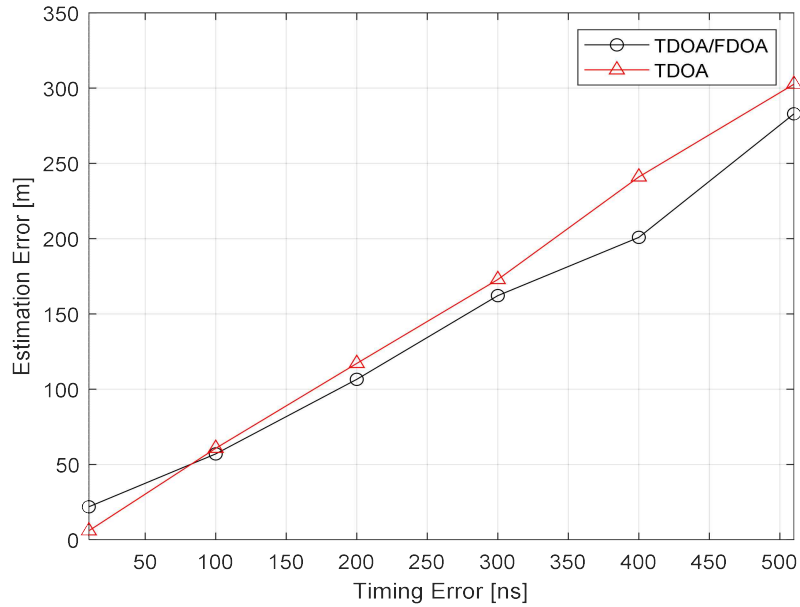


Figure 4.11 The location estimation error via time error for the second scenario

Figure 4.11는 두 번째 시나리오에 대한 시간 오차별 위치 추정 오차 그래프를 나타낸다. 단일 TDOA 알고리즘보다 TDOA/FDOA 기반의 결합 위치 추정 알고리즘의 성능이 우수한 것을 확인할 수 있다. 시간 오차가 낮은 경우 단일 TDOA 알고리즘의 성능이 더 좋은 것으로 보이지만 성능평가에서는 시간 오차만 고려되었기 때문에, 이는 주파수 오차로 인해 발생한 오차를 나타낸다. 또한, FDOA는 초기값에 민감하여 단일 위치 추정에 적합하지 않으며, 시간 오차만을 고려하였기 때문에 주파수 오차가 고려되는 단일 FDOA는 사용되지 않았다.

제3절 센서의 수가 증가한 조건의 시뮬레이션

본 절은 고속 이동체에 특화된 TDOA와 FDOA 기반 위치 추정 알고리즘의 성능 평가를 위해 4개 이상의 센서를 가지며 시간 및 주파수 오차가 존재하는 환경에서의 시나리오를 제시한다.

1. 센서와 타겟의 초기 위치 및 속도 파라미터

본 항은 세 번째 시나리오의 위치 추정에 필요한 다양한 파라미터들을 제시한다. 시간 오차, 주파수 오차, 중심 주파수, TDOA와 FDOA의 프로세싱 시간은 Table 4.5에 요약되어 있다.

시나리오 3에 대한 센서 및 고속 이동체의 실제 초기 위치와 속도는 Table 4.6에 요약되어 있다. 시나리오 1, 2와 달리 시나리오 3에서는 센서의 개수가 5개로 증가한 조건을 사용한다. 타겟은 초기 가정된 속도로 일정하게 움직이며, Figure 4.12는 시나리오 3에 대한 센서와 타겟의 초기 위치를 나타낸다. 시나리오 3의 한 사이클에 걸리는 시간은 TDOA 1회(0.1s)와 FDOA 10회(1.5s)를 고려한 총 1.6s로 가정한다.

Table 4.5 Error and processing time for the third scenario

Scenario 3	
Time error	300ns
Frequency error	4Hz
Center frequency	400MHz
TDOA processing time	0.1s
FDOA processing time	0.15s

Table 4.6 Real initial position and velocity of sensors and high-speed moving object for the third scenario

	$x[m]$	$y[m]$	$\dot{x}[m/s]$	$\dot{y}[m/s]$
Sensor1	0	2000	0	1000
Sensor2	-2000	0	1000	0
Sensor3	0	-2000	0	1000
Sensor4	2000	0	1000	0
Sensor5	0	0	1000	0
Target	150	150	180	-250

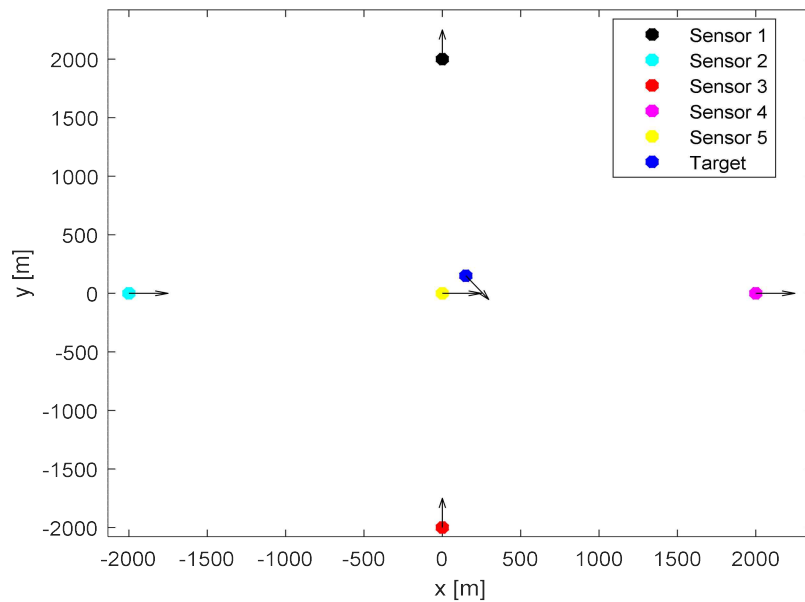


Figure 4.12 Sensor locations and Target location for the third scenario

2. 고속 이동체의 위치 추정

본 항은 5개의 센서가 존재하는 조건에서 고속 이동체에 특화된 TDOA와 FDOA 기반 위치 추정 알고리즘에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하고 분석한다.

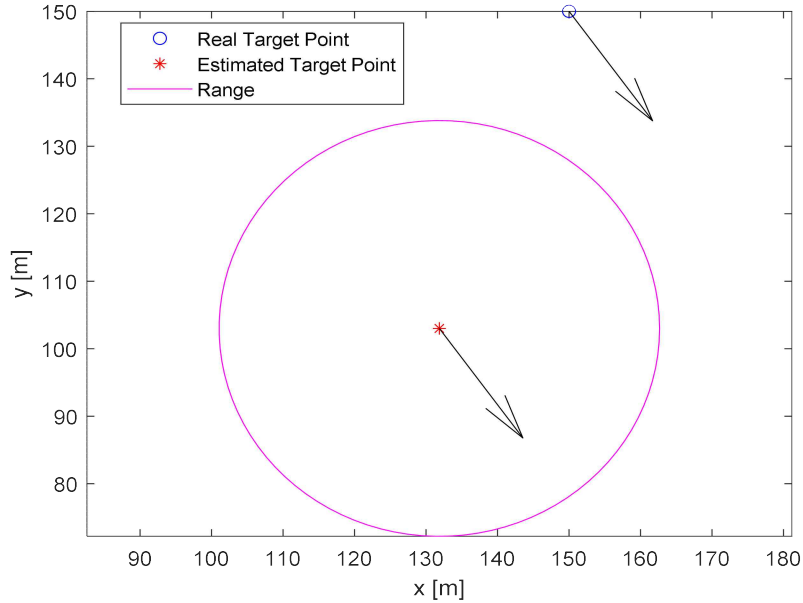


Figure 4.13 Real location and the estimated location with the prediction range of the high-speed moving object for the third scenario

Figure 4.13는 시나리오 3에 대한 고속 이동체의 실제 위치와 TDOA를 통해 추정된 초기 위치 및 FDOA를 통해 추정된 고속 이동체의 이동방향(화살표)을 보인다. 추정된 초기 위치를 중심으로 그려진 원은 TDOA의 프로세싱 시간 동안 이동한 물체가 위치할 수 있는 범위를 나타낸다. TDOA를 사용하여 초기 위치를 계산하는 동안, 이동체는 이미 다른 곳으로 이동하여 원 근처에 위치하므로, 정확한 추정 위치를 특정할 수 없다.

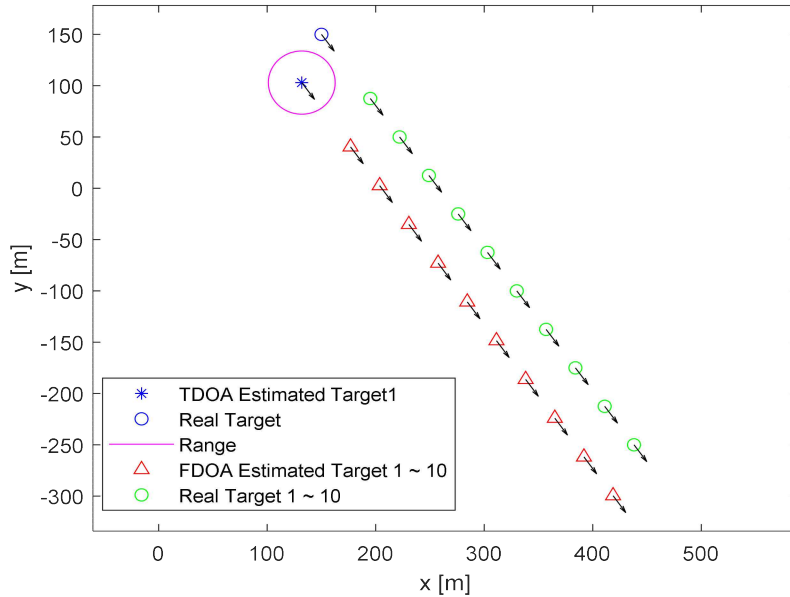


Figure 4.14 The localization estimation result for the high-speed moving object for the third scenario during 1.6 second

Figure 4.14는 1.6초간 이동한 이동체의 위치를 추정한 결과이다. TDOA를 사용해 초기 위치를 추정한 후, 0.15초마다 FDOA로 속도와 방향을 결정하여 계산된 위치를 그림에 나타내었다. 기존 시나리오와는 다르게 FDOA 프로세싱 시간이 0.15로 증가하였으며, 이는 위치해를 계산하는 과정에서 기존 추정 위치를 업데이트 하는 반복 횟수를 증가시켜 기존 0.11초에서 0.15초로 증가한 조건으로 변경하였다. 두 번째 추정 좌표는 TDOA 프로세싱 시간 0.1초와 FDOA 프로세싱 시간 0.15초가 고려된 0.25초간의 이동 거리를 표현하였으며, 두 번째 이후 다음 추정 좌표와의 거리는 FDOA 프로세싱 시간 0.15초만 고려되었기 때문에 첫 번째와 두 번째 사이의 거리보다 다소 가까운 것을 확인할 수 있다. 시나리오 3에서는 이 1.6초간의 과정을 한 사이클로 가정한다.

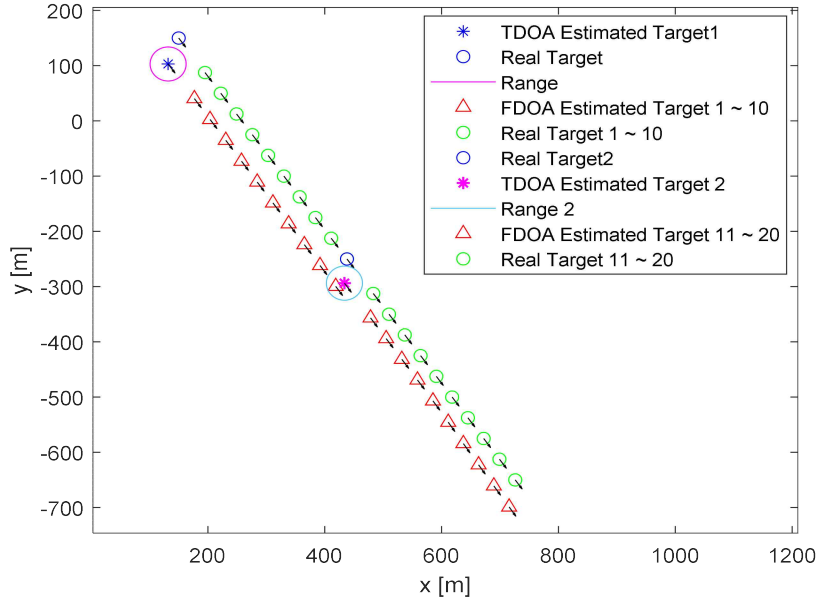


Figure 4.15 The localization estimation result for the high-speed moving object for the third scenario during 3.2 second

Figure 4.15는 타겟이 3.2초간 이동한 경우에 대한 추정 결과로 총 두 번의 싸이클을 확인할 수 있다. 즉, 1.6초 경과 후 TDOA를 다시 실행하여 새로운 초기 위치를 추정하고, 그 결과를 기반으로 이동체의 속도와 방향을 추정하기 위해 FDOA를 반복적으로 실행한 결과이다. 두 번의 싸이클을 통하여 고속 이동체의 실제 위치와 추정된 위치와 방향이 유사한 것을 확인할 수 있다.

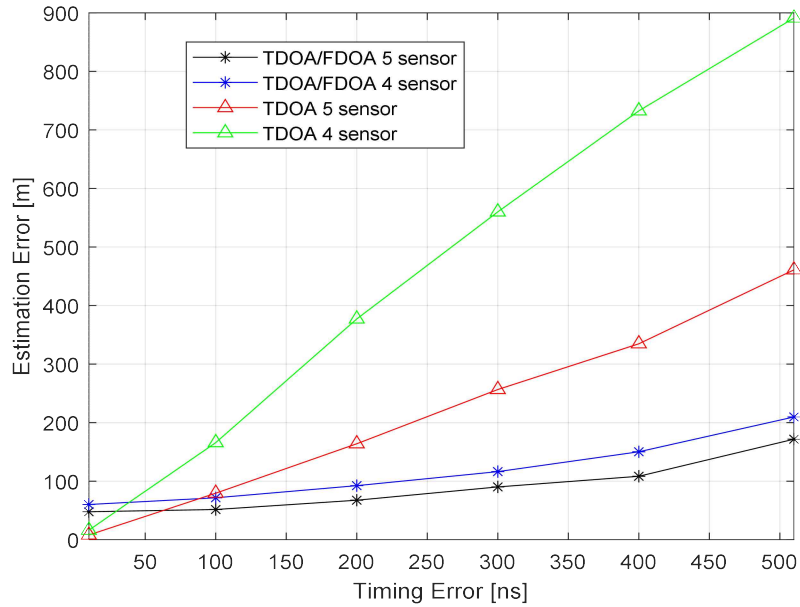


Figure 4.16 The location estimation error via time error for the fourth scenario

Figure 4.16은 시나리오 3의 시간 오차별 위치 추정 오차 그래프를 나타낸다. 그래프에서 각 색깔별 조건은 다음과 같다. 초록색과 빨간색은 각각 단일 TDOA 알고리즘에서 4개의 센서와 5개의 센서를 이용한 경우이며, 파란색과 검정색은 각각 TDOA/FDOA 결합 알고리즘에서 4개의 센서와 5개의 센서를 이용한 경우이다. 일반적으로 센서의 개수가 증가할수록 많은 수의 데이터가 입력으로 적용되기 때문에 더 좋은 추정성능을 기대할 수 있으며, 4개의 센서보다 5개의 센서를 이용한 경우에 더 좋은 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다. 시간 오차가 낮은 경우 단일 TDOA 알고리즘의 성능이 더 좋은 것으로 보이지만 성능평가에서는 시간 오차만 고려되었기 때문에, 이는 주파수 오차로 인해 발생한 오차를 나타낸다. 또한, FDOA는 초기값에 민감하여 단일 위치 추정에 적합하지 않으며, 시간 오차만을 고려하였기 때문에 주파수 오차가 고려되는 단일 FDOA는 사용되지 않았다.

제4절 타겟의 속도가 변하는 조건의 시뮬레이션

본 절은 고속 이동체에 특화된 TDOA와 FDOA 기반 위치 추정 알고리즘의 성능 평가를 위해 고속 이동체의 속도가 변화하는 조건에서의 시간 및 주파수 오차를 고려한 시나리오를 제시한다.

1. 센서와 타겟의 초기 위치 및 속도 파라미터

본 항은 제안한 알고리즘의 네 번째 시나리오의 위치 추정에 필요한 다양한 파라미터를 제시한다. 시간 오차, 주파수 오차, 중심 주파수, 프로세싱 시간은 Table 4.7과 같이 설정하였다.

시나리오 1, 2, 3에서는 타겟이 초기 가정된 속도로 일정하게 움직였지만, 본 시나리오에서는 타겟의 속도가 증가, 감소하는 조건을 추가하였다. 시나리오 4에 대한 센서 및 고속 이동체의 실제 초기 위치와 속도, 고속 이동체의 속도 변화량은 Table 4.8에 요약되어 있다. Figure 4.17은 시나리오 4 대한 센서와 타겟의 초기 위치를 나타낸다. 시나리오 4의 한 싸이클에 걸리는 시간은 TDOA 1회 (0.1s)와 FDOA 10회(1.1s)를 고려한 총 1.2s로 가정한다.

Table 4.7 Error and processing time for the fourth scenario

Scenario 4	
Time error	150ns
Frequency error	3Hz
Center frequency	600MHz
TDOA processing time	0.1s
FDOA processing time	0.11s

Table 4.8 Real initial position and velocity of sensors and high-speed moving object, and velocity changes of high-speed moving object for the fourth scenario

	$x[m]$	$y[m]$	$\dot{x}[m/s]$	$\dot{y}[m/s]$
Sensor1	0	-2000	0	1000
Sensor2	1732	1000	866	500
Sensor3	-1732	1000	866	500
Sensor4	0	0	1000	0
Target	-250	250	150	200

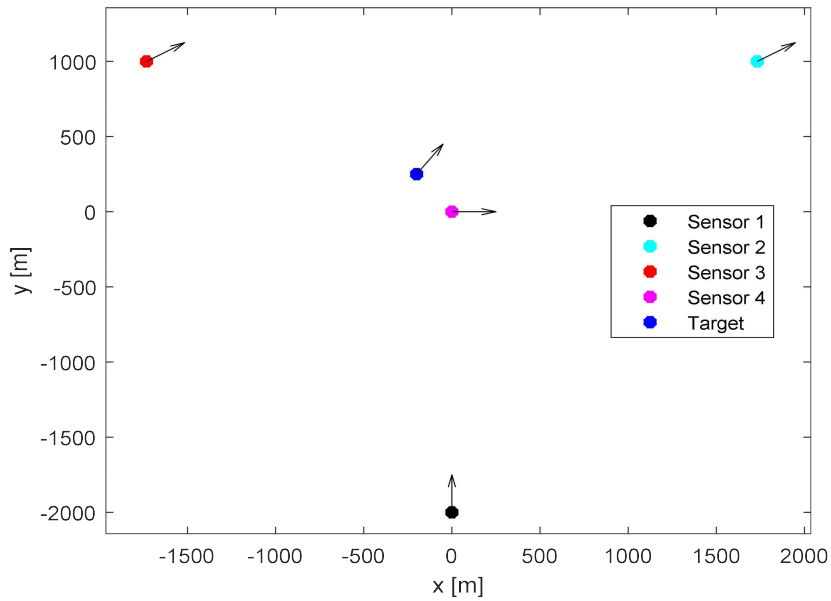


Figure 4.17 Sensor locations and Target location for the fourth scenario

2. 고속 이동체의 위치 추정

본 항은 타겟의 속도가 변하는 고속 이동체에 특화된 TDOA와 FDOA 기반 위치 추정 알고리즘에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하고 분석한다.

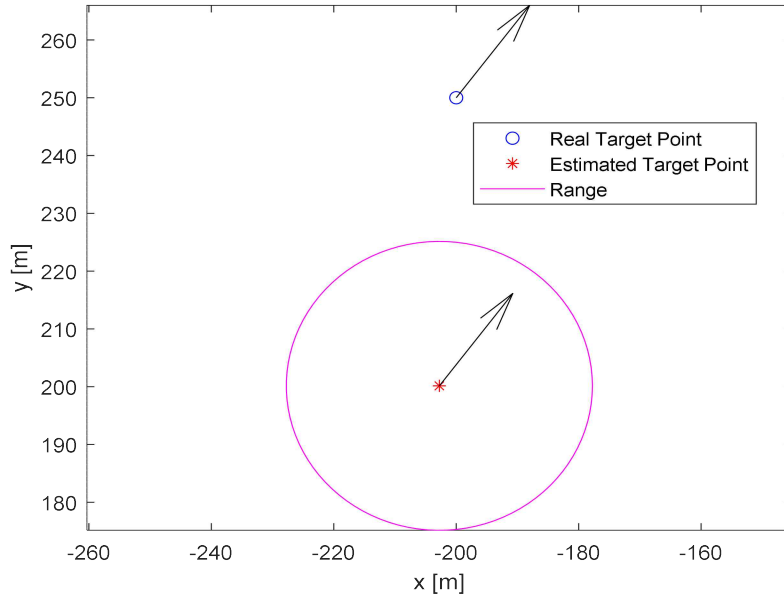


Figure 4.18 Real location and the estimated location with the prediction range of the high-speed moving object for the fourth scenario

Figure 4.18은 시나리오 4에 대한 고속 이동체의 실제 위치와 TDOA를 통해 추정된 초기 위치 및 FDOA를 통해 추정된 고속 이동체의 이동방향(화살표)을 보인다. 추정된 초기 위치를 중심으로 그려진 원은 TDOA의 프로세싱 시간 동안 이동한 물체가 위치할 수 있는 범위를 나타낸다. 즉, TDOA를 사용하여 초기 위치를 계산하는 동안, 이동체는 이미 다른 곳으로 이동하여 원 근처에 위치하므로, 정확한 추정 위치를 특정할 수 없다.

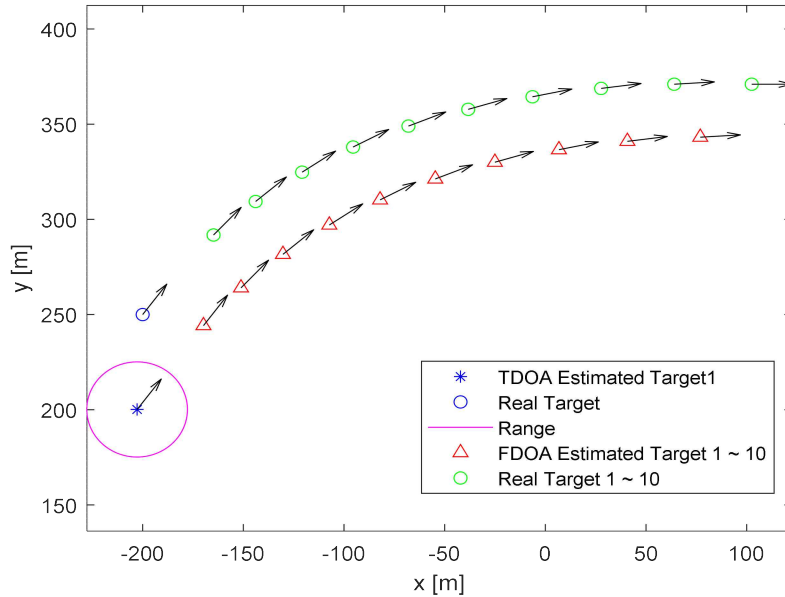


Figure 4.19 The localization estimation result for the high-speed moving object for the fourth scenario during 1.2 second

Figure 4.19는 1.2초간 이동한 이동체의 위치를 추정한 결과이다. TDOA를 사용해 초기 위치를 추정한 후, 0.11초마다 FDOA로 속도와 방향을 결정하여 계산된 위치를 그림에 나타내었다. 두 번째 추정 좌표는 TDOA 프로세싱 시간 0.1초와 FDOA 프로세싱 시간 0.11초가 고려된 0.21초간의 이동 거리를 표현하였으며, 두 번째 이후 다음 추정 좌표와의 거리는 FDOA 프로세싱 시간 0.11초만 고려되었다. 또한, 기존 시나리오와는 다르게 타겟이 초기 결정 속도로 일정하게 움직이지 않고 속도가 변하는 조건을 추가하였다. 첫 번째 사이클은 FDOA 프로세싱마다 속도가 $[20, -20]$ m/s로 변화하는 조건을 주었으며, 프로세싱 시간 동안 변화하는 속도에 따라 이동 방향이 바뀌며 그에 따른 위치를 추정하는 모습을 확인할 수 있다. 최종적으로 한 사이클 동안 속도는 기존 $[150, 200]$ m/s에서 $[350, 0]$ m/s로 변화하였다.

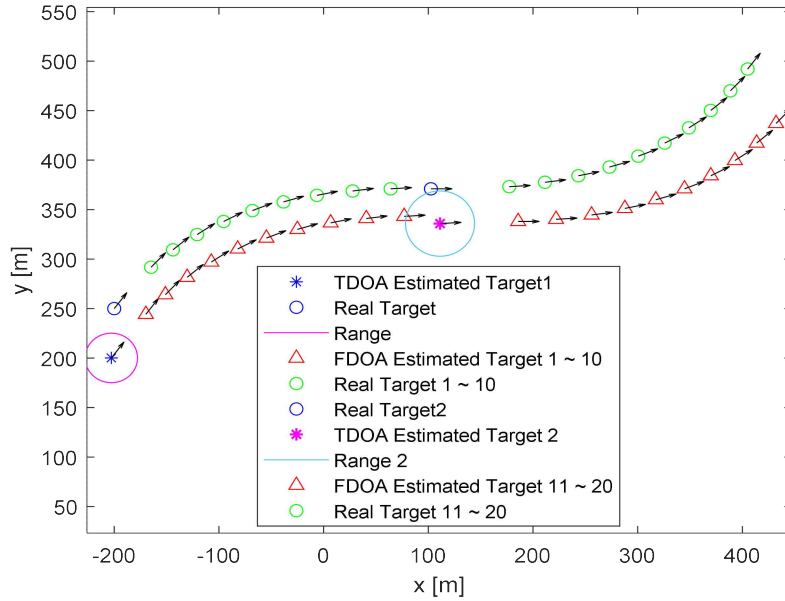


Figure 4.20 The localization estimation result for the high-speed moving object for the third scenario during 2.4 seconds

Figure 4.20는 타겟이 2.4초간 이동한 경우에 대한 추정 결과로, 두 개의 사이클을 확인할 수 있다. 즉, 1.2초 경과 후 TDOA를 다시 실행하여 새로운 초기 위치를 추정하고, 그 결과를 기반으로 이동체의 속도와 방향을 추정하기 위해 FDOA를 반복적으로 실행한 결과이다. 두 번째 사이클에서는 FDOA 프로세싱마다 속도가 $[-20, 20]$ m/s로 변화하는 조건을 주었으며, 그림에서 볼 수 있듯이 속도 변화에 따른 이동 방향이 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 최종적으로 두 번째 사이클에서의 속도는 $[350, 0]$ m/s에서 $[150, 200]$ m/s로 변화하였다.

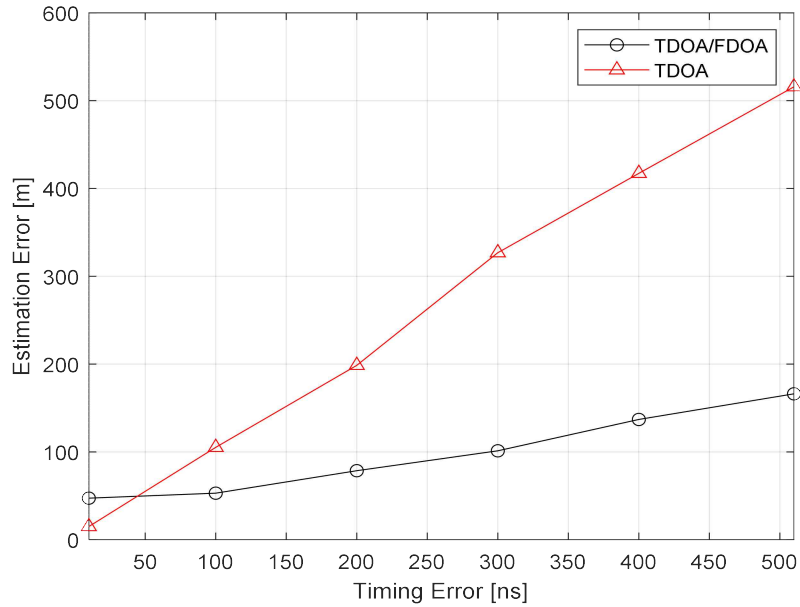


Figure 4.21 The location estimation error via time error for the fourth scenario

Figure 4.21는 시나리오 4의 시간 오차별 위치 추정 오차 그래프를 나타낸다. 시간 오차가 증가하여도 단일 TDOA 알고리즘보다 TDOA/FDOA 기반의 결합 위치 추정 알고리즘의 성능이 우수한 것을 확인할 수 있다. 시간 오차가 낮은 경우 단일 TDOA 알고리즘의 성능이 더 좋은 것으로 보이지만 성능평가에서는 시간 오차만 고려되었기 때문에, 이는 주파수 오차로 인해 발생한 오차를 나타낸다. 또한, FDOA는 초기값에 민감하여 단일 위치 추정에 적합하지 않으며, 시간 오차만을 고려하였기 때문에 주파수 오차가 고려되는 단일 FDOA는 사용되지 않았다.

제5장 결론 및 향후 계획

기존의 TDOA나 FDOA와 같은 위치 추정 알고리즘을 단독으로 사용하는 경우, 정지되어 있거나 느린 속도로 이동하는 물체의 위치는 효과적으로 추정할 수 있으나, 고속으로 이동하는 물체의 위치는 정확하게 추정하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문은 고속으로 이동하는 물체의 위치를 정확하게 추정하기 위한 TDOA와 FDOA가 결합된 위치 추정 알고리즘을 제안하였다. 이에 대한 연구로 위치 및 속도 추정에 사용되는 TDOA와 FDOA 알고리즘에 대해 살펴보고, 각 알고리즘 및 ILS에 대한 수식을 제시하였다. 제안된 알고리즘의 수행을 위해 먼저 TDOA를 사용하여 고속 이동체의 초기 위치를 정밀하게 추정하고, 이후 FDOA를 사용하여 특정 시간에서의 고속 이동체의 속도와 방향을 추정한다. 위 과정을 통해 추정된 초기 위치, 속도, 방향, 프로세싱 시간을 고려하여 특정 시간에서의 고속 이동체의 위치를 효과적으로 추정할 수 있다. 다양한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 위치 추정 알고리즘의 성능을 검증하였으며, TDOA 단일 알고리즘과 비교하여 우수한 위치 추정 결과를 갖는 것을 확인하였다. 추후, 다양한 2차원 또는 3차원 환경으로 확장하여 알고리즘의 성능을 추가로 검증하는 방안과, 제시한 시나리오들을 세부적으로 분류하여 성능평가를 진행한다면, 더욱 정확하고 현실적인 고속 이동체 위치 추정에 대한 이용 가능성을 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] H. T. Cho, Y. S. Jung, H. S. Jang, I. G. Park, & Y. J. Baek, "Precision Time Synchronization System over Wireless Networks for TDOA-based Real Time Locating Systems," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 34, no. 1, pp. 86-97, 2009.
- [2] K. C. Ho, & W. Xu, "An accurate algebraic solution for moving source location using TDOA and FDOA measurements," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 52, no. 9, pp. 2453-2463, 2004.
- [3] C. -D Kee, G. -H Kim & T. -J Lee, "Real-Time Sound Localization System For Reverberant And Noisy Environment," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, vol. 38, no. 3, pp. 258-263, 2010.
- [4] F. Gustafsson and F. Gunnarsson, "Positioning Using Time-Difference of Arrival Measurements," *In 2003 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2003. Proceedings (ICASSP'03), Hong Kong, China, Apr., 2003, vol. 6, pp. VI-553.
- [5] K. G. Lee & Y. W. Lee, "A LBS system for cellular phones," *In 2007 International Conference on Convergence Information Technology (ICCIT 2007)*, Gyeongju, Korea, Nov., 2007, pp. 222-228.
- [6] J. Lategahn, M. Muller, and C. Rohrig, "TDOA and RSS Based Extended Kalman Filter for Indoor Person Localization," *In 2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, Las Vegas, USA, Sep., 2013, pp. 1-5.
- [7] X. Gao, & J. Zhong, "Development of application system for mobile location-based services based on TDOA technology," *In The 2nd International Conference on Information Science and Engineering*, Hangzhou, China, Dec., 2010, pp. 3644-3647.

- [8] S. B. Jeon, H. S. Park, T. H. Jo, & S. S. Hwang, "A Location Estimation Algorithm Combined with TDOA and TOA Considering Repeaters," *In 2023 Fourteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Paris, France, Jul., 2023, pp. 583-586.
- [9] Z. Ai, & Y. Liu, "Research on the TDOA measurement of active RFID real time location system," *In 2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology*, Chengdu, China, Jul., 2010, vol. 2, pp. 410-412.
- [10] D. -Y Jun, S. -Ch Lee, K. -H You, "TDoA based Localization Algorithm using Recursive Total Least Squares," *CICS'09 2009 Conference on Information and Control Systems*, Jeju, Korea, Oct., 2009, pp. 383-384.
- [11] A. J. Sinclair, T. A. Lovell, and J. Darling, "RF localization solution using heterogeneous TDOA," *In 2015 IEEE Aerospace Conference*, Montana, USA, Mar., 2015, pp. 1-7.
- [12] J. J. Pérez-Solano, S. Ezpeleta, and J. M. Claver, "Indoor Localization Using Time Difference of Arrival with UWB Signals and Unsynchronized Devices," *Ad Hoc Networks*, vol. 99, pp. 1-11, 2020.
- [13] J. T. Oh, "A Study on PDOP due to the Position Error of Acoustic Sensors in the 3D TDOA Positioning System," *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, vol. 15, no. 1, pp. 199–205. 2015.
- [14] Y. M. Kim, S. S. Yoo, S. H. Yoon, S. -P Lee, & S. Y. Kim, "Performance Analysis of TDOA-Based Indoor Localization according to Acoustic Sources," *Korean Institute of Communications and Information Sciences*, pp. 104-104, 2008.
- [15] T. G. Kim and N. Y. Ko, "Localization of an Underwater Robot Using Acoustic Signal," *The Journal of Korea Robotics Society, The Korea Robotics Society*, Nov. 30, pp. 231-242, 2012.

- [16] B.-K. Ahn, Y.-J. Go, W. Rhee, J.-S. Choi, and C.-S. Lee, "Localization of Underwater Noise Sources Using TDOA (Time Difference of Arrival) Method," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea, The Society of Naval Architects of Korea*, Apr., pp. 121-127, 2011.
- [17] N. Zhu and T. Reza, "A Modified Cross-Correlation Algorithm to Achieve the Time Difference of Arrival in Sound Source Localization," *Measurement and Control*, vol. 52, no. 3-4, pp. 212-221, 2019.
- [18] Y. X. Niu, S. W. Shi, C. D. Qi, and Z. J. Zheng, "Improved localization algorithm with FDOA measurements," *In 2nd Annual International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Information Science (EEEIS 2016)*, Atlantis Press, Shaanxi, China, Dec., 2016, pp. 764-770.
- [19] R. K. Otnes, "Frequency Difference of Arrival Accuracy," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 37, no. 2, pp. 306-308, 1989.
- [20] M. Khalaf-Allah, "Emitter Location Using Frequency Difference of Arrival Measurements Only," *Sensors*, vol. 22, no. 24, p. 9642, 2022.
- [21] S. Kumar, P. Kanadasan & A. Jena, "Performance analysis of TDOA and FDOA for missile tracking application using extended Kalman filter," *In 2021 2nd International Conference on Range Technology (ICORT)*, Chandipur, Balasore, India, Aug., 2021, pp. 1-6.
- [22] Y. J. Son & G. J. Son, "A Study on The Range Estimation of Underwater Acoustic Source using FDOA and TDOA of Multipath Signals," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 22, no. 2, pp. 311-318, 2021.
- [23] B. -Y Min, C. -H An, S. -J Hong, J. -S Jang, and D. -K Kim, "Cramer-Rao Lower Bound (CRLB) Analysis for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Tracking with Randomly Distributed Ground Stations Using FDOA Measurements," *Journal of the Korean Navigation and Port Research*, vol. 15, no. 2, pp. 234-240, 2011.

- [24] W. D. C. Rodrigues and J. A. Apolinário, "An On-the-Fly FDOA-Based Target Localization System," *In 2020 IEEE 11th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS)*, San José, Costa Rica, Feb., 2020, pp. 1-4.
- [25] N. Okello, "Emitter Geolocation with Multiple UAVs," *In 2006 9th International Conference on Information Fusion*, Florence, Italy, Jul., 2006, pp. 1-8.
- [26] B. Y. Min, C. H. An, D. K. Kim, S. J. Hong, J. S. Jang, and U. Y. Pak, "Cramér-Rao Lower Bound Analysis for Many-to-One UAV Tracking using FDOA Measurements," *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 4, no. 5, pp. 706, 2012.
- [27] M. L. Fowler and X. Hu, "Signal Models for TDOA/FDOA Estimation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 44, no. 4, pp. 1543-1550, 2008.
- [28] D. Musicki and W. Koch, "Geolocation Using TDOA and FDOA Measurements," *In 2008 11th International Conference on Information Fusion*, Cologne, Germany, Jun., 2008, pp. 1-8
- [29] D. Musicki, R. Kaune, and W. Koch, "Mobile Emitter Geolocation and Tracking Using TDOA and FDOA Measurements," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 3, pp. 1863-1874, 2009.
- [30] R. M. Vaghefi and R. M. Buehrer, "On the CRLB of TDOA/FDOA Estimation from MIMO Signals," *In 2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Savannah, GA, USA, Apr. 2016, pp.772-778.
- [31] Y. M. Chen, C. L. Tsai, and R. W. Fang, "TDOA/FDOA Mobile Target Localization and Tracking with Adaptive Extended Kalman Filter," *In 2017 International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics & Optimization (ICCAIRO)*, Prague, Czech, May, 2017, pp. 202-206.
- [32] Y. Takabayashi, T. Matsuzaki, H. Kameda, and M. Ito, "Target Tracking Using TDOA/FDOA Measurements in the Distributed Sensor Network," *In 2008 SICE Annual Conference*, Chofu, Japan, Aug., 2008, pp. 3441-3446.

- [33] J. A. Cho, H. Na, S. Kim, and C. Ahn, "Moving-Target Tracking Based on Particle Filter with TDOA/FDOA Measurements," *ETRI Journal*, vol. 34, no. 2, pp. 260-263, 2012.
- [34] A. Mohammed and K. G. Babu, "The Wireless Frameworks Consuming TDOA and FDOA Extents for Mobile Emitter Geolocation and Tracking Applications." *International Journal of Science Engineering and Advance Technology (IJSEAT)*, vol. 3, no. 12, pp. 1413-1418, 2015.
- [35] H. Jung, J. Kang, and S. Kim, "EKF-based Geolocation using TDOA/FDOA Measurements in Dual-Satellite," *In 2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju, Korea, Oct., 2022, pp. 1179-1182.
- [36] A. Elgamoudi, H. Benzerrouk, G. A. Elango, and R. Landry, "Gauss Hermite H_{∞} Filter for UAV Tracking Using LEO Satellites TDOA/FDOA Measurement—Part I," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 201428-201440, 2020.
- [37] H. Shuai, S. Zhu, and C. Li, "Modeling and Error Accuracy Analysis of Three Satellite Interference Source Location System by Low and High Orbit," *In 2019 IEEE 9th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)*, Beijing, China, Jul, 2019, pp. 1-7.
- [38] W. Zhang, G. Zhang, and J. Hu, "Research on Priori Information of TDOA/FDOA in Satellite Communication Based on Ephemeris of Satellite," *In 2011 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, Shaanxi, China, Sep., 2011, pp. 1-4.
- [39] G. Li, M. Zhou, H. Tang, and H. Chen, "A Virtualization Approach to Correct Systematic Errors in Measured TDOA and FDOA for Low Orbit Dual-Satellite Positioning Systems," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2021, pp. 1-11, 2021.

- [40] J. W. Han, Y. S. Lee, D. Choi, J. Park, and H. Kim, "Trend of Satellite Technologies for Signal Information Acquisition," *Journal of Space Technology and Applications*, vol. 2, no. 4, pp. 268-286, 2022.
- [41] Y. B. Wang, X. L. Liang, J. Q. Zhang, B. X. Ren, and K. Jin, "Robust TDOA/FDOA Estimation from Emitter Signals for Hybrid Localization Using UAVs," *Defence Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 81-93, 2022.
- [42] H. J. Ahn, "Performance Degradation Characteristics According to the High Mobility of a Vehicle," *The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 2020 Fall Conference*, Jeju, Korea, pp. 1298-1299, 2020.
- [43] B. Yoon, "Ultra High Temperature Thermostructural Composites," *KIC News*, vol. 17, no. 4, pp. 10-25, 2014.
- [44] N. O'Donoghue, *Emitter detection and geolocation for electronic warfare*, Artech House, 2019.
- [45] R. Kaune, J. Horst & W. Koch, "Accuracy Analysis for TDOA Localization in Sensor Networks," *In 14th international conference information fusion*, Chicago, Illinois, USA, July., 2011, pp. 1-8.
- [46] K. Yang, J. An, X. Bu, and G. Sun, "Constrained Total Least-Squares Location Algorithm Using Time-Difference-of-Arrival Measurements," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 3, pp. 1558-1562, 2009.
- [47] K. C. Ho & Y. T. Chan, "Geolocation of a known altitude object from TDOA and FDOA measurements," *IEEE trans. aerospace and electronic systems*, vol. 33, no. 3, pp. 770-783, 1997.
- [48] H. C. So, Y. T. Chan, and F. K. W. Chan, "Closed-Form Formulae for Time-Difference-of-Arrival Estimation," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 6, pp. 2614-2620, 2008.
- [49] S. Ravindra and S. N. Jagadeesha, "Time of Arrival Based Localization in Wireless Sensor Networks: A Linear Approach," arXiv preprint arXiv:1403.6697, 2014.

- [50] D. -G Kim, Y. -H Kim, J. -W Han, K. -H Song & H. -N Kim, "Emitter Geolocation Based on TDOA/FDOA Measurements and Its Analysis," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 38, no. 9, pp. 746-756, 2013.
- [51] Y. -H Kim, D. -G Kim, J. -W Han, K. -H Song, & H. -N Kim, "Gauss-Newton Based Estimation for Moving Emitter Location Using TDOA/FDOA Measurements and Its Analysis," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 50, no. 6, pp. 62-71, 2013.

감사의 글

논문을 완성할 수 있게 여러 면에서 조언과 아낌없는 지원을 해주신 주변 분들께 감사의 인사를 올립니다.

가장 먼저 지도 교수님이신 황석승 교수님께 감사의 인사를 올립니다. 학위 과정 동안 부족한 저에게 많은 가르침을 주시고, 항상 발전할 수 있도록 도움 주신 교수님께 깊은 감사의 마음을 전합니다.

또한 완성도 있는 학위 논문을 위해 바쁘신 와중에도 논문 심사를 맡아주시고, 아낌없는 조언을 해주신 이충규 교수님, 문지윤 교수님께 감사의 인사를 올립니다.

학위 과정 동안 연구에 어려움이 있을 때마다 옆에서 도와준 적응 신호처리 실험실의 모든 구성원에게 감사의 인사를 올립니다.

마지막으로, 저를 전적으로 믿어주시고 아낌없는 지원을 해주신 부모님께 감사의 인사를 올립니다. 가족들의 조건 없는 사랑과 응원 속에서 무사히 석사과정을 마칠 수 있었습니다. 진심으로 감사드립니다.