

GPS 전파교란원 위치 추정을 위한 TDOA/AOA 복합 기법 설계

Hybrid TDOA/AOA Localization Algorithm for GPS Jammers

임 덕 원*, 강 재 민, 허 문 범
(Deok Won Lim^{1,*}, Jae Min Kang¹, and Moon Beom Heo¹)

¹Satellite Navigation Team, Korea Aerospace Research Institute

Abstract: For a localization system, the TDOA (Time Difference of Arrival) measurement and AOA (Angle of Arrival) measurement are often used for estimating target's positions. Although it is known that the accuracy of TDOA based localization is superior to that of AOA based one, it may have a poor vertical accuracy in bad geometrical conditions. This paper, therefore, proposes a localization algorithm in which the vertical position is estimated by AOA measurements and the horizontal one is estimated by TDOA measurement in order to achieve high 3D-location accuracy. And this algorithm is applied to a GPS jammer localization systems because it has a large value of the DOP (Dilution of Precision) when the jammer is located far away from the system. Simulation results demonstrate that the proposed hybrid TDOA/AOA location algorithm gives much higher location accuracy than TDOA or AOA only location.

Keywords: Localization, TDOA, AOA, GPS, Jammer

I. 서론

지상에서 수신하는 GPS 신호는 약 -160dBW의 낮은 전력을 갖기 때문에 교란 신호에 영향을 받기 쉽다. 따라서 GPS 교란 신호의 영향을 줄이기 위한 연구와 교란원의 위치를 추정하여 대응하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

전파교란원의 위치를 추적하는 대표적인 방법으로 TDOA (Time Difference of Arrival) 기법과 AOA (Angle of Arrival) 기법이 있다. TDOA 기법은 신호의 도달 시각차를 이용하여 타겟의 위치를 추정하는 기법으로서 상대적으로 연산이 간단하다는 장점이 있다. 그러나 교차상관 기반의 TDOA 기법의 경우에 협대역 신호가 입사하면 다수의 상관 피크가 존재하여 위치 추정이 불가하므로 광대역 신호에만 적용할 수 있다. 또한 센서간의 시각 동기가 이루어져야 한다는 제약사항이 있으며, 국부 최솟값(local minima)으로 수렴하거나 발산한다는 단점이 있다[1,2]. AOA 기법은 신호의 입사 도달각을 이용하여 타겟의 위치를 추정하는 기법으로서 센서간의 시각동기가 필요 없고 협대역 신호에도 적용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 배열안테나의 사용으로 인하여 연산량이 많으며, 센서간의 배열안테나를 정렬해야 하고 각 센서에서 RF/IF 변환 채널간 위상을 동기 시켜야 한다는 단점이 있다[3].

따라서 최근에는 TDOA 기법과 AOA 기법을 복합하는 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 대부분 측정치 영역에서 복합하는 기법들이 알려져 있다. 그러나 이들 대부분은 2차원 위치 추정에 대한 연구이며, 정확도 측면에서만 다루고 있다는 한계가 있다[4-9].

본 논문에서는 TDOA 기법과 AOA 기법, 일반적인

TDOA/AOA 복합 기법의 특징을 비교하였으며, 각 기법의 특징을 이용하여 안정적이고 정확하게 3차원 위치를 추정할 수 있는 TDOA/AOA 복합 기법을 제안하였다. 또한 모의실험을 통하여 제시한 기법의 성능을 기존의 기법들과 비교함으로써 그 우수성을 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 위치 추정 기법의 특징과 장단점을 설명하고, III 장에서는 고정밀·고안정의 3차원 위치 추정 기법을 제안한다. IV 장에서는 모의실험결과로부터 제안한 기법의 효용성을 검증하고, V 장에서 결론을 맺는다.

II. 위치 추정 기법의 특징

1. TDOA 기법

TDOA 측정치와 전파교란원의 위치와의 관계는 식 (1)과 같이 비선형 형태로 주어진다.

$$r_{ii} = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} + n_{ii}^{TDOA} \quad (1)$$

여기서 (x, y, z) 는 전파교란원의 위치, (x_i, y_i, z_i) 는 i 번째 센서의 위치, (x_1, y_1, z_1) 는 기준 센서의 위치, n_{ii}^{TDOA} 는 측정 잡음이다. 따라서 일반적으로 식 (2)와 같이 테일러급수 전개로 근사화한 선형 측정식을 가지고 반복적인(Iterative) 형태의 최소자승법(least squares)으로 위치를 추정한다[10].

$$r_{ii} - r_{i1}^0 = \left(\frac{x_0 - x_i}{r_i} - \frac{x_0 - x_1}{r_1} \right) (x - x_0) + \left(\frac{y_0 - y_i}{r_i} - \frac{y_0 - y_1}{r_1} \right) (y - y_0) + \left(\frac{z_0 - z_i}{r_i} - \frac{z_0 - z_1}{r_1} \right) (z - z_0) + n_{ii}^{TDOA} \quad (2)$$

* Corresponding Author

Manuscript received July 17, 2013 / revised August 24, 2013 / accepted October 14, 2013

임덕원, 강재민, 허문범: 한국항공우주연구원 위성항법팀

(dwl@kari.re.kr/kanghw@kari.re.kr/hmb@kari.re.kr)

※ 본 연구는 기초기술연구회의 “재난예방 및 국민안전제고를 위한 위성기반 위치추적기술 연구” 과제의 일환으로 수행되었음.

따라서 초기 위치 (x_0, y_0, z_0) 와 실제 위치가 크게 차이는 경우, TDOA 기법은 국부 최소값에 수렴하여 큰 오차를 야기할 수 있다[2].

2. AOA 기법

AOA 기법은 TDOA 기법과 달리 반복 형태로 위치를 추정하지 않으므로 국부 최소값에 수렴하는 문제는 발생하지 않는다. AOA 측정치 중, 방위각과 전파교란원의 위치와의 관계는 식 (3)과 같이 주어진다.

$$\phi_i = \tan^{-1} \left(\frac{y - y_i}{x - x_i} \right) + n_i^\phi \quad (3)$$

여기서 n_i^ϕ 는 방위각 측정 잡음이다. 식 (3)은 식 (4)과 같이 전개할 수 있으며,

$$\begin{aligned} \frac{\sin(\phi_i - n_i^\phi)}{\cos(\phi_i - n_i^\phi)} &= \frac{y - y_i}{x - x_i} \\ \frac{\sin \phi_i \cos n_i^\phi - \cos \phi_i \sin n_i^\phi}{\cos \phi_i \cos n_i^\phi + \sin \phi_i \sin n_i^\phi} &= \frac{y - y_i}{x - x_i} \end{aligned} \quad (4)$$

$\sin n_i^\phi \cong n_i^\phi$, $\cos n_i^\phi \cong 1$ 로 근사화하면 식 (5)를 얻을 수 있다 [10,11].

$$0 \cong -(x - x_i) \sin \phi_i + (y - y_i) \cos \phi_i + \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} n_i^\phi \quad (5)$$

따라서 측정식은 식 (6)과 같이 정리할 수 있으며, 식 (6)을 가지고 최소자승법을 이용하여 수평 위치를 추정할 수 있다.

$$-x_i \sin \phi_i + y_i \cos \phi_i = -x \sin \phi_i + y \cos \phi_i + \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} n_i^\phi \quad (6)$$

또한 고도각과 전파교란원의 위치와의 관계는 식 (7)과 같이 주어진다.

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{z - z_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}} \right) + n_i^\theta \quad (7)$$

여기서 n_i^θ 는 고도각 측정 잡음이다. 식 (7)은 식 (8)과 같이 전개할 수 있으며,

$$\begin{aligned} \tan(\theta_i - n_i^\theta) &= \frac{z - z_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}} \\ \frac{\sin \theta_i \cos n_i^\theta - \cos \theta_i \sin n_i^\theta}{\cos \theta_i \cos n_i^\theta + \sin \theta_i \sin n_i^\theta} &= \frac{z - z_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}} \end{aligned} \quad (8)$$

$\sin n_i^\theta \cong n_i^\theta$, $\cos n_i^\theta \cong 1$ 로 근사화하면 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} -\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \sin \theta_i - n_i^\theta \cos \theta_i \\ = (z - z_i) \cos \theta_i + (z - z_i) n_i^\theta \sin \theta_i \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서

$$\cos \theta_i = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}},$$

$$\cos \phi_i = (x - x_i) / \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

를 이용하면, 식 (10)을 얻을 수 있다[10,11].

$$0 \cong -(x - x_i) \frac{\sin \theta_i}{\cos \phi_i} + (z - z_i) \cos \theta_i + \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} n_i^\theta \quad (10)$$

최종적으로 식 (11)과 같이 정리한 측정식을 가지고 최소자승법을 이용하여 위치를 추정할 수 있다.

$$-x_i \frac{\sin \theta_i}{\cos \phi_i} + z_i \cos \theta_i = -x \frac{\sin \theta_i}{\cos \phi_i} + z \cos \theta_i + \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} n_i^\theta \quad (11)$$

식 (11)에서 알 수 있듯이 수직 위치는 수평 위치를 추정된 후에 추정하거나, 식 (6)과 식 (11)을 조합하여 한 번에 3차원 위치를 구할 수 있다.

정상적으로 수렴한 경우에 대하여 TDOA 기법으로 위치를 추정된 결과와 AOA 기법으로 위치를 추정된 결과를 비교해보면, 전파교란원이 멀리 떨어진 경우에 DOP의 특성으로 인하여 수평 위치는 TDOA 기법이 더 정확하게 추정하며 수직 위치는 AOA 기법이 더 정확하게 추정하는 것으로 알려져 있다[12].

3. TDOA/AOA 기법

TDOA 기법과 AOA 기법을 복합하여 사용하려면 먼저 AOA 측정식을 식 (12), 식 (13)과 같이 반복 형태로 변경해야 한다.

$$\begin{aligned} -(x_i - x_0) \sin \phi_i + (y_i - y_0) \cos \phi_i \\ = -(x - x_0) \sin \phi_i + (y - y_0) \cos \phi_i + \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} n_i^\phi \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} -(x_i - x_0) \frac{\sin \theta_i}{\cos \phi_i} + (z_i - z_0) \cos \theta_i \\ = -(x - x_0) \frac{\sin \theta_i}{\cos \phi_i} + (z - z_0) \cos \theta_i + \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} n_i^\theta \end{aligned} \quad (13)$$

식 (2), 식 (12), 식 (13)으로부터 TDOA/AOA 복합 측위를 수행할 수 있으며, 측정 행렬은 식 (14)과 같다.

$$\begin{bmatrix} r_{21} - r_{21}^0 \\ \vdots \\ r_{N1} - r_{N1}^0 \\ -(x_1 - x_0) \sin \phi_1 + (y_1 - y_0) \cos \phi_1 \\ \vdots \\ -(x_N - x_0) \sin \phi_N + (y_N - y_0) \cos \phi_N \\ -(x_1 - x_0) \frac{\sin \theta_1}{\cos \phi_1} + (z_1 - z_0) \cos \theta_1 \\ \vdots \\ -(x_N - x_0) \frac{\sin \theta_N}{\cos \phi_N} + (z_N - z_0) \cos \theta_N \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix}
 \begin{pmatrix} x_0 - x_2 & x_0 - x_1 \\ r_2 & r_1 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} y_0 - y_2 & y_0 - y_1 \\ r_2 & r_1 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} z_0 - z_1 & z_0 - z_1 \\ r_2 & r_1 \end{pmatrix} \\
 \vdots & \vdots & \vdots \\
 \begin{pmatrix} x_0 - x_N & x_0 - x_1 \\ r_N & r_1 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} y_0 - y_N & y_0 - y_1 \\ r_N & r_1 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} z_0 - z_N & z_0 - z_1 \\ r_N & r_1 \end{pmatrix} \\
 -\sin\phi_1 & \cos\phi_1 & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots \\
 -\sin\phi_N & \cos\phi_N & 0 \\
 \frac{\sin\theta_1}{\cos\phi_1} & 0 & \cos\theta_1 \\
 \vdots & \vdots & \vdots \\
 \frac{\sin\theta_N}{\cos\phi_N} & 0 & \cos\theta_N
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 x - x_0 \\
 y - y_0 \\
 z - z_0
 \end{bmatrix}
 \quad (14)$$

여기서 N 은 센서의 개수이다.

식 (14)를 이용하면 측정치의 개수가 늘었으므로, TDOA기법이나 AOA기법만 이용하는 경우보다 더 정확한 위치를 추정할 수 있다. 그러나 각 측정 잡음 (n_{ti}^{TDOA} , $\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} n_i^\phi$, $\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} n_i^\theta$) 들의 통계적 특성이 다르므로 각 잡음들의 분산값을 이용하여 가중치(Weight)를 구한 다음에 가중최소자승법(Weighted Least Squares)을 수행해야 한다. 이 때 전파교란원의 위치는 실시간으로 추정해야 하므로 가중치 또한 재귀(Recursive) 형태로 추정해야 한다. 즉 일정 시간이 지나야 정확한 위치를 추정할 수 있다. 또한 복합 기법을 사용함으로써 위치 오차가 줄어들더라도 국부 최소값에 수렴하는 문제를 완전히 피할 수 없다.

III. TDOA/AOA 복합 기법 설계

본 절에서는 안정적이고 정확하게 3차원 위치를 추정할 수 있는 TDOA/AOA 복합 기법을 설계하였으며, 설계한 기법의 순서도는 그림 1과 같다. 그림 1에서 알 수 있듯이, 먼저 AOA 기법으로 수평 위치와 수직 위치를 추정한다. 수평 위치는 식 (7)을 가지고 최소자승법을 수행하여 구할 수 있다.

그런 다음 수직 위치는 식 (7)로부터 구한 수평 위치를 이용하여 식 (15)를 가지고 최소자승법을 수행하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2} \tan\theta_i + z_i \\
 & = z + \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} n_i^\theta
 \end{aligned}
 \quad (15)$$

그러나 각 측정치의 잡음 특성이 다르므로 일반적인 최소자승법을 이용하면 그림 2와 같이 오차가 크게 나타나는 문제가 있다. 따라서 가중최소자승법을 이용해야 하며, AOA 위치 추정 기법의 특성 상, 거리가 멀수록 측정치 오차가 위치오차에 크게 반영되므로 센서와 전파교란원 사이의 거리를 이용하여 식 (16)과 같이 가중치를 계산하여 적용하였다.

$$\alpha_i = \frac{1/\sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2}}{\sum_{i=1}^N \left[1/\sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2} \right]}
 \quad (16)$$

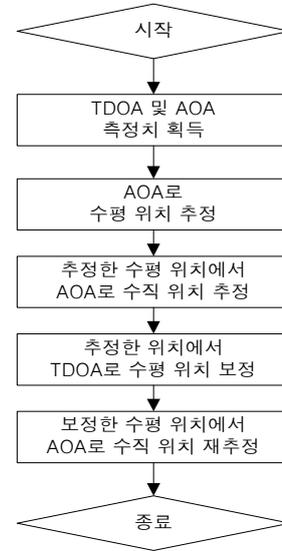


그림 1. 제안한 TDOA/AOA 복합 기법의 순서도.

Fig. 1. Flowchart of proposed TDOA/AOA algorithm.

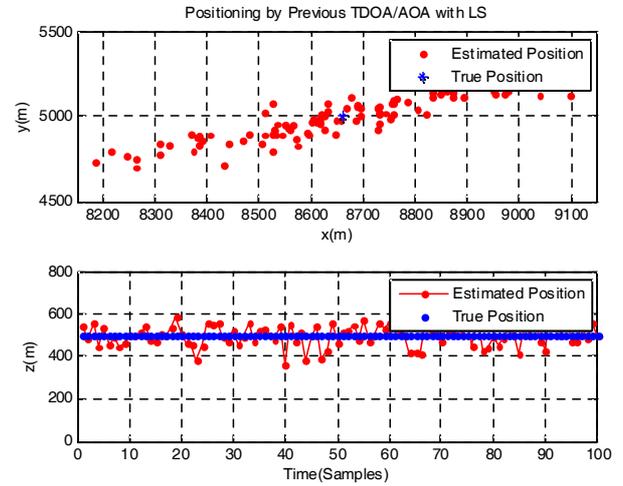


그림 2. LS 기반 TDOA/AOA 기법의 위치 추정 결과.

Fig. 2. Localization result by TDOA/AOA based on LS.

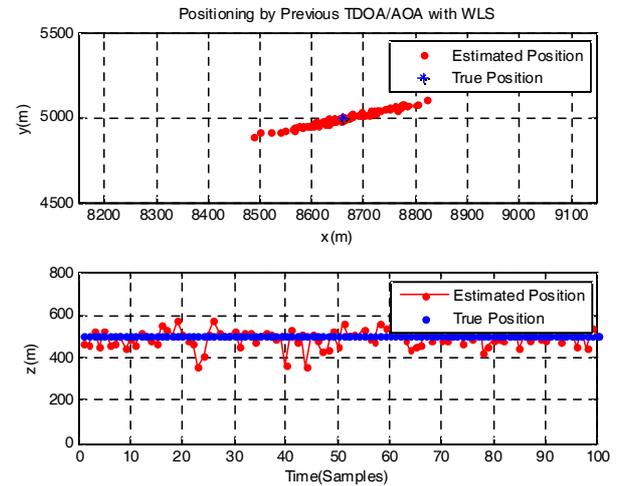


그림 3. WLS 기반 TDOA/AOA 기법의 위치 추정 결과.

Fig. 3. Localization result by TDOA/AOA based on WLS.

이 때 전파교란원도 지상에 있으며, 센서와 전파교란원 사이의 거리는 수평 위치만 가지고 구한 거리와 유사하다고 가정하였다. 식 (16)의 가중치를 적용한 결과, 그림 3과 같이 정확한 위치 추정을 수행하는 것을 확인할 수 있다.

AOA 기법으로 3차원 위치를 추정한 다음, 그 위치를 초기 위치로 두고 TDOA 기법으로 수평 위치를 다시 추정한다. 그 이유는 TDOA 기법의 결과가 국부 최솟값으로 수렴하거나 발산하는 문제를 막기 위함이다.

마지막으로 AOA 기법으로 수직 위치만 다시 추정하는데, 이는 앞 절에서 언급한 바와 같이 수직 위치는 AOA 기법이 더 정확하게 추정할 수 있기 때문이다.

IV. 모의실험 및 성능검증

모의실험을 위하여 4개의 센서를 한 변이 4 km인 정사각형의 각 모서리에 배치하였고, TDOA 측정치 오차의 표준편차는 3 m, AOA 측정치 오차의 표준편차는 1도로 가정하였다. 또한 MATLAB을 이용하여 200 샘플에 대하여 모의실험을 수행하였다.

주어진 환경에서 전파교란원과의 거리를 5 km, 10 km, 15 km, 20 km로 변경하면서 위치 추정 결과를 분석하였으며, 발산하지 않은 경우에 대한 각 기법의 위치 추정 오차(수평, 수직, 3차원)를 표 1에 나타내었고 수렴 상태(정상수렴/국부최소/발산)별 수렴 횟수를 표 2에 나타내었다.

표 1과 표 2의 결과를 보면, TDOA 기법은 전파교란원과의 거리에 따른 모든 경우에 대하여 국부최소에 수렴하거나 발산하는 샘플이 있었으며, 특히 전파교란원과의 거리가 5 km 일 때에는 위치오차가 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수

표 1. 거리에 따른 위치 추정 오차 비교.

Table 1. Comparison of location error according to the distance.

		TDOA	AOA	일반적인 TDOA/AOA	제한한 TDOA/AOA
5km	수평(CEP)	40.48	105.78	33.67	27.56
	수직(RMS)	628.37	120.54	588.09	39.06
	3차원(SEP)	632.41	218.76	597.95	52.63
10km	수평(CEP)	97.15	348.23	118.40	86.76
	수직(RMS)	343.39	108.23	106.76	84.53
	3차원(SEP)	382.25	494.58	215.69	143.17
15km	수평(CEP)	191.82	767.09	261.05	182.28
	수직(RMS)	286.33	137.40	124.34	130.32
	3차원(SEP)	393.69	1027.75	404.56	279.74
20km	수평(CEP)	379.76	1351.67	496.67	320.27
	수직(RMS)	349.05	176.52	166.97	172.09
	3차원(SEP)	634.97	1883.17	761.30	469.20

표 2. 거리에 따른 수렴 상태 비교(정상수렴/국부최소/발산).

Table 2. Comparison of converging status according to the distance.

	TDOA	AOA	일반적인 TDOA/AOA	제한한 TDOA/AOA
5km	326/15.5/151.9	200/0/0	669/133.1/0	200/0/0
10km	154.1/17.8/28.1	200/0/0	196.8/3.2/0	200/0/0
15km	164.6/11.4/24.0	200/0/0	200/0/0	200/0/0
20km	129.4/17.9/52.7	200/0/0	200/0/0	200/0/0

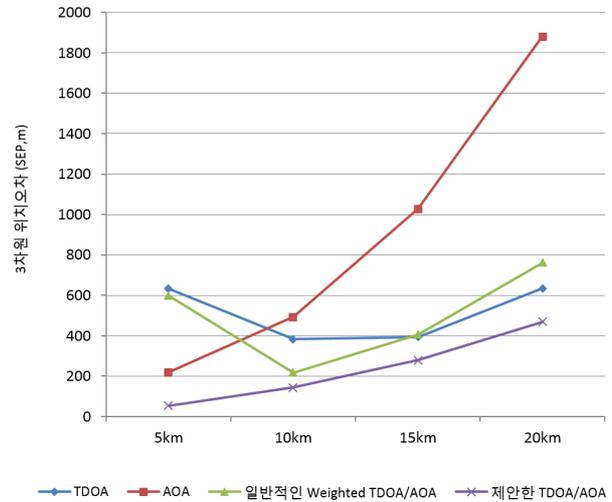


그림 4. 거리에 따른 3차원 위치 추정 오차 비교.

Fig. 4. Comparison of 3D location error according to the distance.

있다. AOA 기법은 모든 경우에 대하여 정상 수렴하는 것을 볼 수 있었으나, 5 km일 때를 제외한 모든 경우에서 오차가 가장 크게 나타났고, 거리에 따른 오차 증가폭도 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 일반적인 TDOA/AOA 기법은 TDOA 기법의 안정도와 AOA 기법의 오차 특성을 개선할 수 있는 것을 확인할 수 있지만, 5 km의 경우는 AOA 기법보다 오차가 크게 나타났고 20 km의 경우는 TDOA 기법보다 오차가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 반면 제한한 기법은 모든 경우에 정상적으로 수렴하였으며, 다른 세 가지 기법보다 더 정확하게 위치를 추정하는 것을 확인할 수 있다. 표 1에서 3차원 위치오차만 그래프로 비교하면 그림 4와 같다.

V. 결론

본 논문에서는 안정적이고 정확하게 3차원 위치를 추정할 수 있는 TDOA/AOA 복합 기법을 제안하였다. 또한 모의실험을 통하여 제안한 기법은 모든 경우에 대하여 정상적으로 수렴하는 것을 확인하였으며, TDOA 기법과 AOA 기법, 기존의 TDOA/AOA보다 위치 추정 오차가 작은 것을 확인하였다. 추후에는 본 연구결과를 기 개발한 전파교란원 위치추적시스템에 탑재하여 그 성능을 실시간으로 확인할 계획이다.

REFERENCES

- [1] Y. T. Chan and K. C. Ho, "A Simple and efficient estimator for hyperbolic location," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 42, no. 8, pp. 1905-1915, Aug. 1994.
- [2] K. C. Ho and W. Xu, "An accurate algebraic solution for moving source location using TDOA and FDOA measurements," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 52, no. 9, pp. 2453-2463, Sep. 2004.
- [3] J. Ramos, C. P. Mathews, and M. D. Zoltowski, "FCA-ESPRIT: A closed-form 2-D angle estimation algorithm for filled circular arrays with arbitrary sampling lattices," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 47, no. 1, pp. 213-217, Jan. 1999.
- [4] L. Cong and W. Zhuang, "Hybrid TDOA/AOA mobile user location of wideband CDMA cellular systems," *IEEE Trans.*

Wireless Communication, vol. 1, no. 3, pp. 439-447, Jul. 2002.

- [5] C.-D. Wann, Y.-J. Yeh, and C.-S. Hsueh, "Hybrid TDOA/AOA indoor positioning and tracking using extended Kalman filters," *Proc. of IEEE 63rd Vehicular Technology Conference*, pp. 1058-1062, Australia, May 2006.
- [6] A. Ferreol, J. Bosse, and P. Larzabal, "A low-cost AOA-TDOA approach for blind geolocation in multi-paths context," *Proc. of 18th European Signal Processing Conference (EUSIPCO-2010)*, pp. 686-690, Denmark, Aug. 2010.
- [7] D. Kim, C. Kim, and J. Ha, K. You "TDOA/AOA based UGV Localization under NLOS conditions," *Proc. of 2011 Information and Control Symposium (in Korean)*, pp. 381-382, Korea, Apr. 2011.
- [8] M. H. Tak and Y. H. Joo, "Localization for cooperative behavior of swarm robots based on wireless sensor network," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 8, pp. 725-730, Aug. 2012.
- [9] Y. J. Lee, H. S. Kim, and H. K. Lee, "A WLAN/GPS hybrid localization algorithm for indoor/outdoor transit area," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 6, pp. 610-618, June 2011.
- [10] A. Broumandan, T. Lin, J. Nielsen, and G. Lachapelle, "Practical results of hybrid AOA/TDOA geo-location estimation in CDMA wireless networks," *Proc. of IEEE 68th Vehicular Technology Conference*, pp. 1-5, Canada, Sep. 2008.
- [11] H. J. Du and J. P. Y. Lee, "Simulation of multi-platform geolocation using a hybrid TDOA/AOA method," *Technical Memorandum of Defense R&D Canada- Ottawa (TM 2004-256)*, Dec. 2004.
- [12] D. W. Lim, Y.-S. Choi, S. J. Lee, M. B. Heo, and G.-W. Nam, "Design of a Jammer Localization System using AOA method," *The Journal of Korea Navigation Institute (in Korean)*, vol. 15, no. 6, pp. 495-501, Dec. 2011.



임 덕 원

2004년 충남대학교 전자공학과 학사 졸업. 2011년 동 대학원 박사 졸업. 2011년~한국항공우주연구원 선임연구원. 관심분야는 GNSS 수신기, Anti-jamming.



강 재 민

2008년 충남대학교 전자공학과 학사 졸업. 2010년 동 대학원 석사 졸업. 2010년~한국항공우주연구원 연구원. 관심분야는 GPS/INS, GNSS 수신기.



허 문 범

1992년 경희대학교 기계공학과 학사 졸업. 1997년 Illinois Institute of Technology 항공기계공학과 석사 졸업. 2004년 동 대학원 박사 졸업. 2005년~한국항공우주연구원 선임연구원. 관심분야는 GNSS, 위성항법, 항행시스템 등.