

시간기반과 각도기반의 측위방식 성능비교 및 오차 특성 분석

Error Analysis of Time-Based and Angle-Based Location Methods

김 동 혁, 송 승 현, 성 태 경*

(Dong-Hyeok Kim, Seung-Hun Song, and Tae-kyung Sung)

Abstract : Indoor positioning is highlighted recently, and various kinds of indoor positioning systems are under developments. Since positioning systems have their own characteristics, proper positioning scheme should be chosen according to the required specifications. Positioning methods are classified into time-based and angle-based one. This paper presents the error analysis of time-based and angle-based location methods. Because measurements of these methods are nonlinear, linearizations are needed in both cases to estimate the user position. In the linearization, Gauss-Newton method is used in both cases. To analyze the position error, we investigate the error ellipse parameters that include eccentricity, rotation angle, and the size of ellipse. Simulation results show that the major axes of TOA and AOA method lie in different quadrants at most region of workspace, especially where the geometry is poor. When the TOA/AOA hybrid is employed, it is found that the error ellipse is reduced to the intersection of ellipses of TOA and AOA.

Keywords : Gauss-Newton method, TOA, TDOA, AOA, hybrid method

I 서론

최근 위치기반서비스(location based service)의 수요가 급증하면서 측위 시스템의 종류 및 방식이 다양해지고 있다. 실외 측위 환경의 경우 GPS를 이용한 서비스가 보편화 되고 있으며 EU에서 추진하고 있는 갈릴레오(GALILEO) 프로젝트가 정상적으로 서비스를 시작하면 위성항법서비스는 더욱 보편화 될 것이다. 하지만 실내 환경의 경우 위성신호를 수신할 수 없기 때문에 위성항법서비스의 대안으로서 많은 측위 시스템이 연구되고 있다. 실내용 무선측위 시스템의 경우 UWB (Ultra Wide-Band), 적외선 (infra-red), 초음파 (ultra-sound), RFID (Radio Frequency IDentification), WLAN (Wireless LAN)등을 이용한 시스템이 연구 중에 있다. 이러한 시스템의 경우 실외 환경과는 다른 실내 환경의 특성 때문에 여러 가지 측위 방식들이 연구되고 있다[1].

측위 방법의 종류로는 TOA (Time of Arrival), TDOA (Time Difference of Arrival), AOA (Angle of Arrival), RSS (Received Signal Strength), 그리고 이들의 혼합방식 (hybrid method)로 나눌 수 있다[1]. 단방향 TOA와 TDOA는 각각 송신기와 수신기사이의 신호 도달 시각과 시간차 측정치를 이용하는 방법이다. 이러한 경우 센서망의 정밀한 시각 동기화가 필요하며, 시각동기 정확도가 측위 시스템의 성능에 영향을 준다. AOA는 수신된 신호의 도달 각도를 측정하는 방식이다. AOA의 경우 센서간의 정밀한 시각동기 없이 정확한 측위를 수행할 수 있는 장점이 있으나 도달 각도를 측정하기 위하여 배열안테나(array antenna)가 필요하다.

RSS는 수신된 신호의 신호세기를 측정하여 측위 하는 방식으로서 다른 방식에 비하여 측위 정확도가 낮기 때문에 본 논문에서는 이를 제외하고 비교하였다. 혼합방식은 2가지 이상의 측위 방법을 혼합하여 사용하며, 주로 시간을 측정하는 방식과 각도를 측정하는 방식을 혼합한 TOA-AOA와 TDOA-AOA를 사용한다.

각 측위 방식의 측정치는 비선형식이다. 따라서 위치를 추정하기 위하여 선형화 과정이 필요하다. 본 논문에서는 테일러급수를 이용한 Gauss-Newton 방법에 의하여 선형화하는 경우를 고려하였다[1]. 이러한 경우 TOA와 TDOA의 최소자승 추정치와 오차공분산 특성이 각각 동일하다는 것은 이미 알려져 있다[2,3]. 따라서 본 논문에서는 TOA와 AOA의 성능을 비교하였다. AOA의 측정치의 경우 배열안테나를 통해 얻어지기 때문에 잡음 모델링이 필요하다. 본 논문은 두개의 안테나에서 수신된 신호를 이용한 2차원 AOA 측정 잡음모델을 제시하였다. 한편, 시간기반과 각도기반의 경우 서로 다른 형태의 오차타원체를 가진다. 따라서 이를 분석함으로써 두 가지 방법을 혼합하였을 경우 측위 성능의 향상을 예상할 수 있다. 본 논문에서는 TOA, AOA, 혼합방법의 오차타원체의 형태와 성능을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

II 각 측위 방식의 측위 알고리즘

1. 측정치 모델

단방향 TOA의 측정치는 센서와 사용자 사이의 거리로 나타나며 i 번째 센서의 측정치는 다음과 같다[4,5].

$$r_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} + c \cdot b + v_{ri} \quad (1)$$

$i=1, 2, 3, \dots, m$

식에서 c 는 빛의 속도, b 는 수신기 시각 바이어스(clock bias), v_{ri} 는 잡음, m 은 센서의 개수, (x, y) 는 사용자의 위치,

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 4. 27., 채택확정 : 2006. 6. 10.

김동혁, 송승현 : 충남대학교 정보통신공학부

(oneoctave@ivlab.cnu.ac.kr/lspheonix@hanafos.com)

성태경 : 충남대학교 전기정보통신공학부(ksaint@cnu.ac.kr)

※ 본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

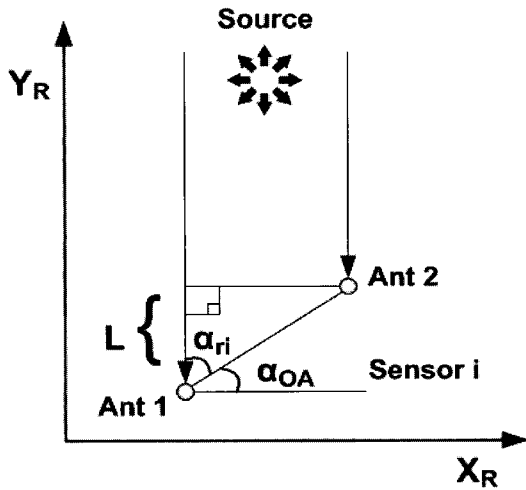


그림 1. AOA의 배열안테나.
Fig. 1. Array antenna for AOA.

(x_i, y_i) 는 i 번째 센서의 위치이다. 측정 잡음의 경우 각 센서로부터 수신되는 신호의 경로가 각각 독립이기 때문에 각 센서로부터 수신되는 신호의 잡음은 서로 독립으로 가정할 수 있다. 본 논문에서는 측정 잡음을 동일한 분산 σ_i^2 을 갖는 i.i.d. (independently and identically distributed) 백색 가우시안으로 가정하였다.

AOA(Angle of Arrival)는 각 센서와 사용자가 이루는 방위각으로 측정치가 결정된다. 따라서 방위각을 측정하기 위한 배열안테나가 필요하다. 그림 1과 같이 배열안테나에 수신된 신호의 거리차 L 을 이용하여 i 번째 센서의 방위각 α_{ri} 를 구할 수 있다[6]. 이때 배열안테나의 정렬이 기준좌표계와 일치하지 않을 경우 각 센서의 orientation angle을 고려하여야 한다. i 번째 센서의 배열안테나가 그림 1과 같이 설치된 경우 기준좌표계에 대한 방위각은 orientation angle α_{OA}^i 과 배열안테나로 측정된 각도 α_{ri} 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha_i = \alpha_{ri} + \alpha_{OA}^i \tag{2}$$

따라서 측정치 α_i 는 기준좌표계와 다음과 같은 관계식을 갖는다[7,8].

$$\tan(\alpha_i) = \frac{y-y_i}{x-x_i} \tag{3}$$

그림 1에서 측정 잡음을 고려할 경우 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$d \cos(\alpha_{ri} + v_{ai}) = L_i + v_{ii} \tag{4}$$

여기서 v_{ai} 는 각도측정 잡음이고 v_{ii} 는 두 개의 안테나에서 수신된 신호의 잡음이다. v_{ii} 가 서로 독립이고 σ_{ai}^2 의 분산을 갖는 i.i.d. 백색 가우시안으로 가정하면 한 개의 기지국에서 얻어지는 측정치와 잡음은 다음과 같다.

$$f_i = \alpha_i + v_{ai}$$

$$v_{ai} \sim N\left(0, \frac{\sigma_{ai}^2}{d^2 \sin^2 \alpha_{ri}}\right) \tag{5}$$

식에서 d 는 안테나 사이의 거리이다.

2. Gauss-Newton 방법을 이용한 선형화 및 추정 방법

TOA의 경우 m 개의 센서로 측정치를 구하여 선형화한 방정식은 다음과 같다[4,5,9].

$$\delta x = H_i \delta x_i + w_i \tag{6}$$

$$\delta x = \begin{bmatrix} r_1 - r_{d1} \\ r_2 - r_{d2} \\ \vdots \\ r_m - r_{dm} \end{bmatrix} \quad H_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial x} & \frac{\partial r_1}{\partial y} \\ \frac{\partial r_2}{\partial x} & \frac{\partial r_2}{\partial y} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial r_m}{\partial x} & \frac{\partial r_m}{\partial y} \end{bmatrix} \quad \delta x_i = \begin{bmatrix} x - x_o \\ y - y_o \\ \vdots \\ b - b_o \end{bmatrix} \quad w_i = \begin{bmatrix} v_{i1} \\ v_{i2} \\ \vdots \\ v_{im} \end{bmatrix}$$

식에서 (x_o, y_o) 는 선형화 기준점(nominal point)이고 r_{ai} 는 i 번째 센서와 선형화 기준점간의 거리이다. (6)을 이용하여 최소자승법(Least Square)으로 구한 δx_i 의 추정치는 다음과 같다.

$$\delta \hat{x}_i = (H_i^T H_i)^{-1} H_i^T \delta x \tag{7}$$

따라서 사용자의 위치는 다음과 같다.

$$\hat{x}_i = x_o + \delta \hat{x}_i \tag{8}$$

최종 추정치는 (8)이 수렴할 때까지 추정치는 선형화 기준점으로 대체하면서 반복적으로 구한다.

AOA에서는 측정치 f_i 를 선형화한다[7].

$$\delta f = H_a \delta x_a + w_a \tag{9}$$

$$\delta f = \begin{bmatrix} f_1 - \alpha_{d1} \\ \vdots \\ f_m - \alpha_{dm} \end{bmatrix} \quad H_a = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x} & \frac{\partial f_m}{\partial y} \end{bmatrix} \quad \delta x_a = \begin{bmatrix} x - x_o \\ y - y_o \end{bmatrix} \quad w_a = \begin{bmatrix} v_{a1} \\ \vdots \\ v_{am} \end{bmatrix}$$

식에서 α_{ai} 는 i 번째 센서와 선형화 기준점과의 방위각이다. (9)를 이용하여 TOA와 같은 절차를 통하여 추정치를 구한다. 이때 v_{ai} 는 (5)에서 보듯이와 같이 센서마다 분산의 크기가 다르므로 가중최소자승법(weighted least square)를 사용해야 한다. TOA와 AOA의 혼합방법의 경우 (6)과 (9)를 합하여 추정치를 구할 때 사용한다.

3. 오차 타원체

시간 기반의 TOA 방식과 각도 기반의 AOA 방식의 오차의 분포는 측정치 모델의 차이로 인하여 서로 다르게 나타나며, 이를 분석하기 위해 오차 타원체를 살펴보았다. 2차원 오차타원체는 그림 2에서 보는 바와 같이 기준좌표계에서 장축 σ_b , 단축 σ_s 를 갖는 오차타원이 θ 만큼 기울어진 모양이며, 다음과 같은 관계식을 갖는다[4].

$$\text{cov}(\hat{x}) = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_b^2 & 0 \\ 0 & \sigma_s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \tag{10}$$

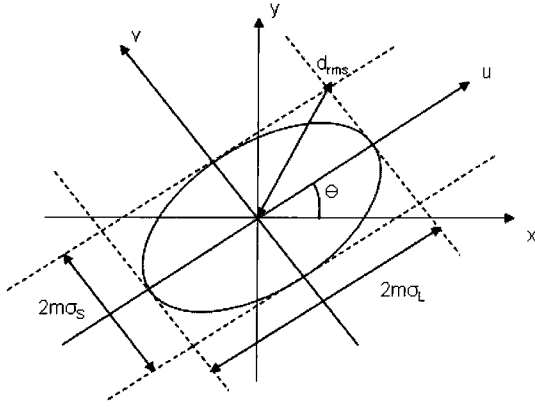


그림 2. 오차 타원체.
Fig. 2. The error ellipse.

따라서 각 방식의 추정치의 공분산을 통하여 오차타원의 파라미터 값을 계산할 수 있다.

측정 잡음의 분산을 σ_i^2 라 하였을 때 TOA방식의 추정치의 공분산은 다음과 같다.

$$\text{cov}(\hat{x}_i) = \sigma_i^2 \cdot (H_i^T H_i)^{-1} \quad (11)$$

AOA 방식의 측정 잡음인 w_a 의 공분산은 다음과 같다.

$$\text{cov}(w_a) = Q_a = \frac{\sigma_a^2}{d^2} \begin{bmatrix} 1/\sin^2 \alpha_{a1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/\sin^2 \alpha_{a2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1/\sin^2 \alpha_{am} \end{bmatrix} \quad (12)$$

따라서 AOA 방식의 추정치의 공분산은 다음과 같다.

$$\text{cov}(\hat{x}_a) = (H_a^T Q_a^{-1} H_a)^{-1} \quad (13)$$

(11)과 (13)을 이용하여 각 방식의 장축, 단축, θ 의 값을 다음과 같이 구할 수 있다[10].

$$\begin{aligned} \tan 2\theta &= \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2}, \quad 0 \leq \theta \leq \pi/2 \\ \sigma_L^2 &= \frac{1}{2} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2}] \\ \sigma_S^2 &= \frac{1}{2} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2}] \end{aligned} \quad (14)$$

(14)의 θ 를 구하는 과정에서 각도의 모호성(ambiguity)문제가 발생할 수 있으며, 이는 다음과 같이 표현된다[10].

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2} \right) + i \frac{\pi}{2}, \quad 0 \leq \theta - i \frac{\pi}{2} \leq \frac{\pi}{2}, \quad i=0,1 \quad (15)$$

식에서 i 는 각도의 모호성을 의미하며, 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$i = \begin{cases} 0, & \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x^2} > 0 \\ 1, & \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x^2} < 0 \end{cases} \quad (16)$$

타원체의 면적의 경우 그림 2에서 보듯이 장축과 단축의 곱을 비교의 기준으로 설정할 수 있으며, 사각형의 면적은 다음과 같이 표현된다.

$$S = 4\sqrt{\sigma_L^2 \sigma_S^2} \quad (17)$$

III. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 MATLAB 프로그램을 이용하여 수행하였고 작업환경의 크기는 12×12[m]로 설정하였다. 사용자의 위치는 X, Y축을 -5[m]에서 5[m]까지 1[m]씩 변화시키면서 121개의 측위점에서 시뮬레이션을 수행하였다. 수렴의 기준은 이전 추정치와 다음 추정치 사이의 거리가 10⁻²[m]내의 차이를 보이면 수렴한 것으로 설정하였다.

센서의 배치는 각 측위 방식별로 DOP (Dilution of Precision)의 영향을 보기위해 그림 3과 같이 ‘-’ 모양으로 배치하였으며 센서의 좌표는 (-6, 6), (6, 6), (6, -6), (0, 6)으로 설정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 측정 잡음은 TOA의 경우 (1)의 측정치 t_i 에 추가되는 잡음이고 AOA는 (4)의 수신되는 신호의 거리차 L_i 에 추가되는 잡음이므로 오차타원체의 상대적인 크기를 고려하여 정하였다. TOA는 σ_t 을 10⁻¹[m]로 하였고 AOA는 σ_a 를 10²[m]로 하였다.

시뮬레이션 결과는 사용자의 위치에 따른 영향을 보기 위하여 121개의 측위점에서 각 100회의 시뮬레이션을 통하여 통계적 수치를 비교하였다. 비교 대상은 추정오차의 표준편차, 발산횟수, 최종 추정치를 구하기까지의 반복횟수로 설정하였다. 또한, 각 방식의 오차타원체의 분포를 살펴보았다.

TOA의 시뮬레이션 결과는 그림 4와 같다. (a)에서 보는 바와 같이 TOA는 (-5, 5)부분에서 100회 모두 발산하였다. 또한 대부분의 지역에서 10회이상 발산하는 것을 확인하였다. (b)의 표준편차는 발산하는 경우를 제외하고 계산하였으며, 작업환경의 중심부에서는 0.2m이내의 표준편차를 보이고 중심부에서 멀어질수록 표준편차가 커지는 것을 확인하였다. (c)의 반복횟수는 발산 지역을 제외하면 5회 이상으로 나타났다.

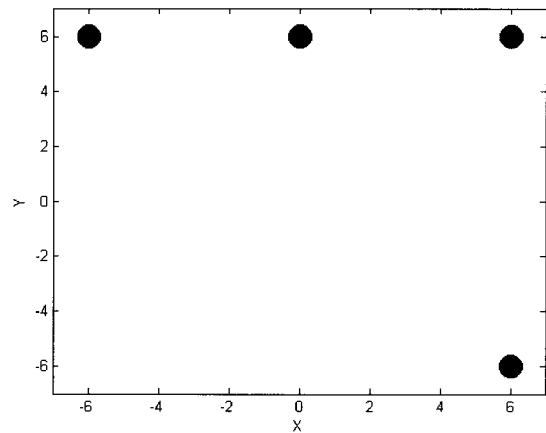
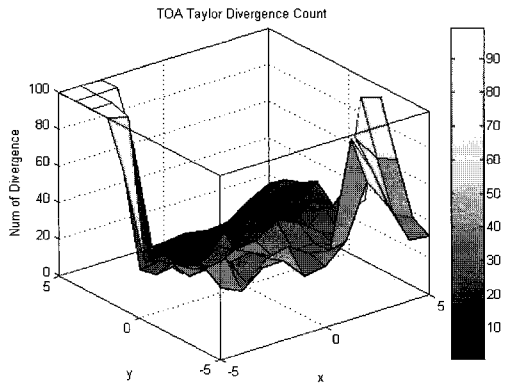
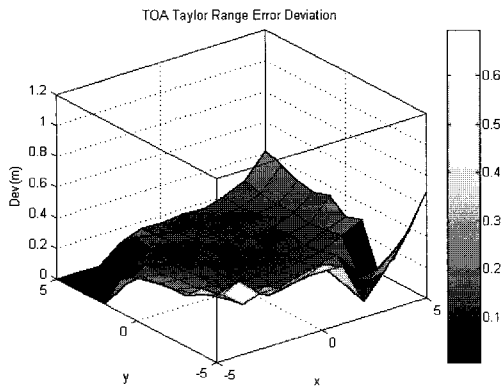


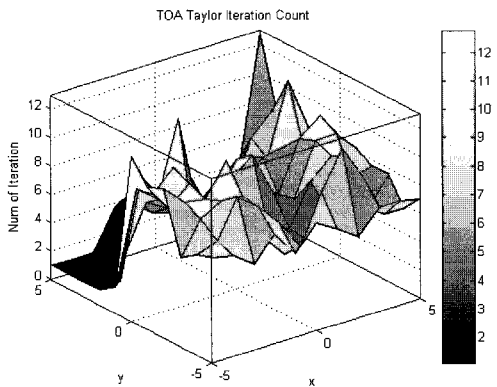
그림 3. 센서 배치.
Fig. 3. Sensor allocation.



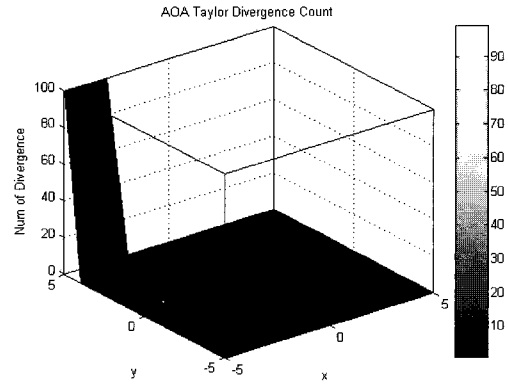
(a) The number of divergences



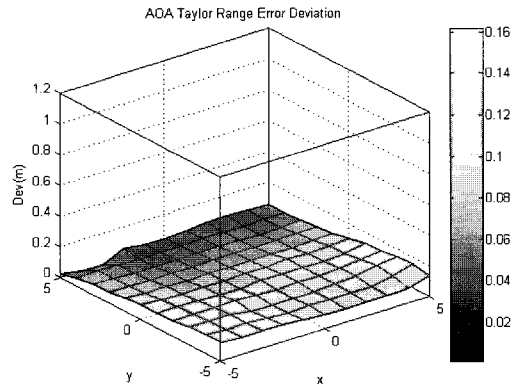
(b) Standard deviation



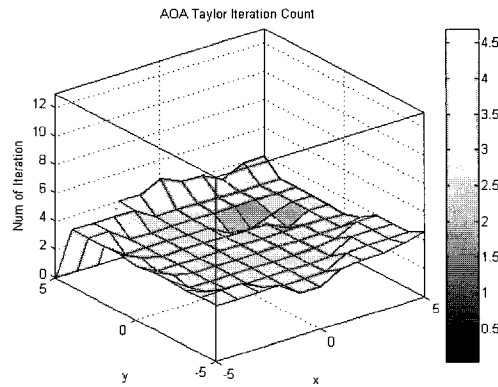
(c) The number of iterations



(a) The number of divergences



(b) Standard deviation



(c) The number of iterations

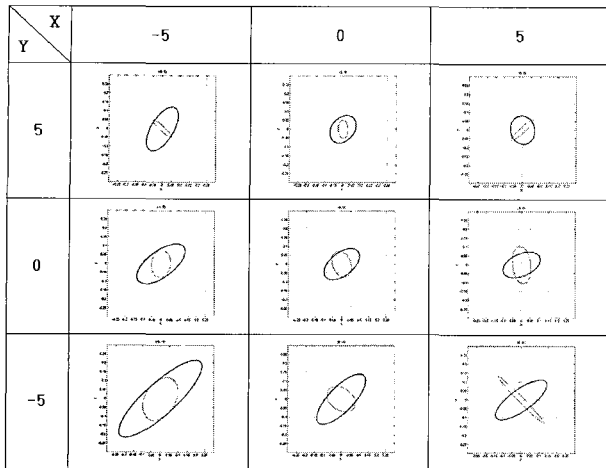
그림 4. TOA 시뮬레이션 결과.
Fig. 4. Simulation results of TOA.

AOA의 시뮬레이션 결과는 그림 5와 같다. (b)의 표준편차는 센서가 없는 지역이 센서가 밀집한 지역보다 0.05m정도 더 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있다. (c)의 반복횟수는 모서리부분에서는 4회 이상이었으며, 그 외의 부분은 2-4회였다. (a)의 발산횟수는 대부분의 지역에서 발산하지 않았고, (-5, 5)부분에서만 100회 모두 발산하였다. TOA가 모든 측위점에서 10회 이상 발산하는데 비해 AOA는 (-5, 5)부분에서만 발산하는 이유는 추정치를 구하기 위한 센서 최소개수의 차이 때문이다. 2차원의 경우 추정치를 구하기 위한 센서의 최소개수는 TOA가 3개이고, AOA는 2개이므로 동

그림 5. AOA 시뮬레이션 결과.
Fig. 5. Simulation results of AOA.

일한 개수의 센서일 경우 AOA의 성능이 더 우수한 것을 알 수 있다.

다음으로 121개의 기준 측위점에서 AOA와 TOA의 오차 타원체의 형태와 파라미터 값을 분석하였으며, 그중의 일부를 그림 6과 표 1에 나타내었다. TOA와 AOA의 오차타원체의 장축은 대부분의 측위점에서 서로 다른 사분면상에 위치한다. 또한, 센서들로부터 가장 먼 지점인 (-5, -5)지점에서 타원체의 크기가 가장 큰 것을 볼 수 있다. 타원체의 이심률의 경우 센서가 이루는 셀의 중심부분에서 작으며 중심부를 벗어날수록 커진다. 121개의 측위점에서 시뮬레이



— : TOA, ... : AOA

그림 6. TOA와 AOA 방식의 오차타원체 분포.

Fig. 6. Error ellipse of TOA and AOA.

표 1. TOA와 AOA 방식의 오차타원체 파라미터.

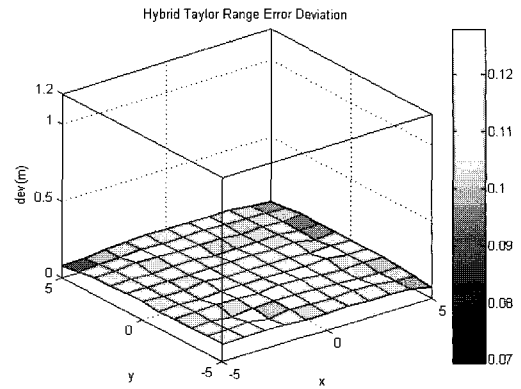
Table 1. Error ellipse parameter of TOA and AOA.

| Y \ X | | -5 | | 0 | | 5 | |
|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | AOA | TOA | AOA | TOA | AOA | TOA |
| 5 | θ | 136.7 | 59.4 | 90.3 | 54.9 | 44.3 | 101.8 |
| | e | 0.979 | 0.889 | 0.963 | 0.642 | 0.986 | 0.542 |
| | i | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | S | 0.031 | 0.094 | 0.027 | 0.073 | 0.035 | 0.075 |
| 0 | θ | 71.49 | 34.11 | 112.5 | 38.06 | 94.68 | 17.95 |
| | e | 0.734 | 0.909 | 0.722 | 0.830 | 0.924 | 0.851 |
| | i | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| | S | 0.068 | 0.119 | 0.062 | 0.086 | 0.085 | 0.086 |
| -5 | θ | 59.87 | 42.72 | 159.0 | 50.28 | 134.7 | 35.74 |
| | e | 0.757 | 0.957 | 0.639 | 0.938 | 0.997 | 0.936 |
| | i | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| | S | 0.105 | 0.164 | 0.078 | 0.125 | 0.051 | 0.102 |

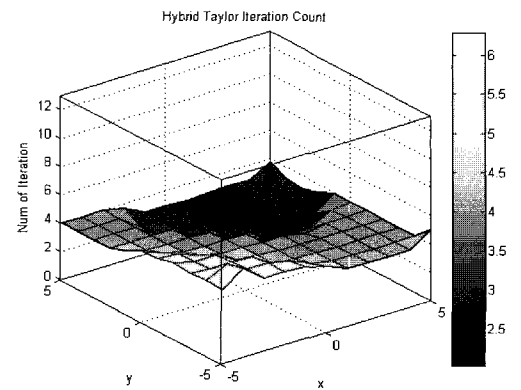
※ θ : rotation angle($^{\circ}$), e: 이심률(eccentricity), i: ambiguity, S: 면적

션을 수행한 결과로 이심률과 면적의 표준편차를 비교하였다. 이심률의 경우 AOA는 0.153이고 TOA는 0.103으로 나타났다. 즉, DOP이 좋지 않는 경우에 AOA의 타원체가 TOA보다 20% 더 날카롭게 형성된다. 면적은 AOA가 0.016이고 TOA는 0.02이며, 면적의 변화는 AOA보다 TOA가 25% 더 크게 나타났다. TOA와 AOA의 타원체 이심률과 회전각을 고려할 때 두 가지 방법을 혼합하여 사용하면 두 가지 방법의 타원체 교집합이 혼합방법의 타원체가 될 것이기 때문에 측위 성능이 향상될 것이라고 예상할 수 있다. 이를 확인하기 위하여 TOA-AOA 혼합방식에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

혼합방법의 시뮬레이션 결과는 그림 7과 같다. 혼합방법은 발산하는 경우가 발생하지 않았기 때문에 발산횟수의 결과는 제외하였다. (a)의 표준편차는 TOA와 AOA 단독의 경우보다 모든 측위점에서 적게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 특정 측위점에서 크게 나타나는 경우도 발생하지 않



(a) Standard deviation



(b) The number of iterations

그림 7. Hybrid TOA-AOA 시뮬레이션 결과.

Fig. 7. Simulation results of hybrid method.

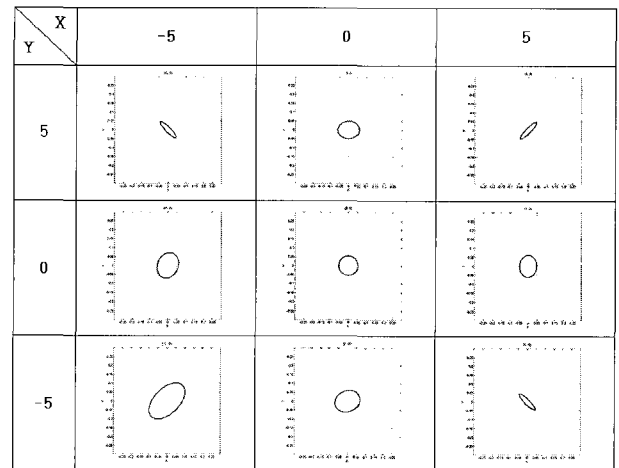


그림 8. Hybrid TOA-AOA 방식의 오차타원체 분포.

Fig. 8. Error ellipse of hybrid TOA-AOA.

았다. 이는 TOA, AOA 방식의 시뮬레이션 결과로 예상하였듯이 서로 다른 방향의 오차가 보정되어 성능이 향상되었음을 보여준다. (b)의 반복횟수는 센서가 없는 지역은 6회 그 외의 지역은 2-4회로 나타났다.

Hybrid TOA-AOA의 오차타원체를 그림 8에 나타내었다. 그림 8의 결과는 오차타원체가 그림 6에서 보인 두 가지

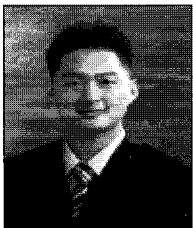
방식의 오차타원체의 교집합 형태인 것을 보여준다. 따라서 타원체의 크기는 그림 6보다 더 작아진 것을 알 수 있으며, 이는 앞에서 예상했던 이유로 인하여 성능이 향상되었음을 보여준다.

IV. 결론

시각기반의 방식과 각도기반의 방식은 측정치의 차이로 인하여 서로 다른 형태의 오차타원체를 형성한다. 본 논문에서는 AOA와 TOA의 방법을 비교함으로써 각 타원체의 형태, 크기 및 회전각에 대한 특성을 살펴보고, 두 가지 방법을 혼합한 경우에 대한 성능을 살펴보았다. 오차타원체의 경우 AOA가 TOA보다 DOP이 안 좋은 경우 이심률이 큰 형태로 날카롭게 나타났고 측위점에 따른 변화도 더 큰 것을 확인하였다. TOA의 경우 위치에 따른 오차타원체의 면적의 변화가 더 크게 나타났다. 타원체의 장축은 대부분의 측위점에서 TOA와 AOA 방식이 서로 다른 사분면에 위치하는 것을 확인하였다. 이러한 연유로 TOA-AOA 혼합방식을 사용하면 추정오차를 대폭 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

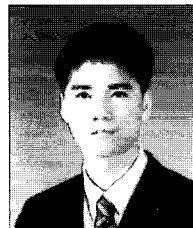
참고문헌

- [1] I. Oppermann, M. Hamalainen, and J. Iinatti, *UWB Theory and Applications*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2004.
- [2] 신동호, 성태경, "TOA기법과 TDOA기법의 위치 오차 특성 및 DOP 비교," 제어·자동화·시스템공학 논문지 제6권 제10호, pp. 924-928, Oct 2000.
- [3] D. H. Shin and T. K. Sung, "Comparisons of error characteristics between TOA and TDOA positioning," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 38, no. 1, pp. 307-311, Jan 2002.
- [4] E. D. Kaplan, "Understanding GPS principles and applications," *ARTECH HOUSE*, Norwood, 1996.
- [5] P. Misra and P. Enge, "Global positioning system," *Ganga-Jamuna Press*, Lincoln, 2001.
- [6] R. Mardiana and Z. Kawasaki, "Broadband radio interferometer utilizing sequential triggering technique for locating fast-moving electromagnetic sources emitted from lightning," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 49, no. 2, pp. 376-381, April 2000.
- [7] A. Pagès-Zamora, J. Vidal Manzano, and D. H. Brooks, "Closed-form solution for positioning based on angle of arrival measurements," *The 13th IEEE Int. Symposium Personal, Indoor and Mobile Radio Communication*, vol. 4, pp. 1522-1526, Sep 2002.
- [8] L. Cong and W. Zhuang, "Hybrid TDOA/AOA mobile user location for Wideband CDMA cellular systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 1, no 3, pp. 439-447, July 2002.
- [9] B. W. Parkinson, J. Jr. Spilker, and P. Axelrad, (eds.), "Global positioning : theory and applications," *ALAA*, Washington, DC, vol. 1, 1996.
- [10] B. Forssell, "Radionavigation systems," *NJ : Prentice Hall*, 1991.



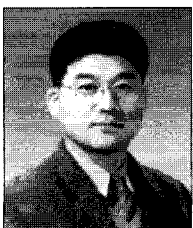
김 동 혁

2005년 충남대 정보통신공학부 졸업.
2005년~현재 충남대학교 정보통신공학과 석사과정. 관심분야는 GPS & GNSS, Signal Processing, Navigation.



송 승 현

2006년 충남대 전기정보통신공학부 졸업. 2006년~현재 충남대학교 정보통신공학과 석사과정. 관심분야는 LR-UWB, GPS & GNSS.



성 태 경

1984년 서울대 제어계측공학과 졸업.
1986년 동 대학원 석사. 1992년 동 대학원 박사. 1997년~현재 충남대학교 전기정보통신 공학부 교수. 관심분야는 GPS & GNSS, 무선측위 신호처리, 텔레메틱스.