

다중경로 환경에서의 TOA방식과 TDOA방식의 측위성능 비교

論 文

58-2-30

Comparisons of Error Characteristics between TOA and TDOA Positioning in Dense Multipath Environment

朴志原* · 朴智熙* · 宋承憲** · 成泰慶†

(Ji-Won Park · Ji-Hee Park · Seung-Hun Song · Tae-Kyung Sung)

Abstract - TOA(time-of-arrival) and TDOA(time-difference-of-arrival) positioning techniques are commonly used in many radio-navigation systems. From the literature, it is known that the position estimate and error covariance matrix of TDOA obtained by GN(Gauss-Newton) method is exactly the same as that of TOA when the error source of the range measurement is only an IID white Gaussian noise. In case of geo-location and indoor positioning, however, multi-path or NLOS(non-line-of-sight) error is frequently appeared in range measurements. Though its occurrence is random, the multipath acts like a bias for a stationary user if it occurs. This paper presents the comparisons of error characteristics between TOA and TDOA positioning in presence of multi-path or NLOS error. It is analytically shown that the position estimate of TDOA is exactly the same as that of TOA even when bias errors are included in range measurements with different magnitudes. By computer simulation, position estimation error and error distribution are analyzed in presence of range bias errors.

Key Words : TOA, TDOA, GN method, Bias error, Error ellipse

1. 서 론

LBS(location-based service)는 현재 전 세계 이동통신 시장에서 가장 활발하게 논의되고 있는 차세대 기술 분야 중 하나로서 국내에서는 최근 위치기반 서비스에 대한 관심이 높아지고 있고 다양한 서비스가 개발되고 있다. 위치기반 서비스를 위해서는 사용자의 위치를 파악해야 하며, GNSS(global navigational satellite system), AGNSS(assisted GNSS), 셀룰러 망을 이용한 지상파측위(geolocation) 시스템과 같은 다양한 방식의 전파항법 시스템이 사용되고 있다. 이러한 기존 시스템을 보완하고 발전시키기 위하여 현재 GNSS 현대화나 UWB WPAN (ultra wideband wireless personal area network) 측위 시스템과 같은 다양한 방식의 무선측위 기술들의 연구개발이 활발히 진행되고 있다[1-5].

일반적으로 전파항법 시스템에서는 전파 지연시간을 측정치로 하는 시각 기반 방법을 사용한다. 단방향 (OWR; one-way ranging) TOA(time-of-arrival) 시스템은 센서와 사용자 간의 전파 도달시간을 측정치로 이용하는 방식이고 TDOA(time-difference-of-arrival) 시스템은 센서 간의 전

파 도달시간 차를 이용하는 방식이다. 양방향 (TWR; two-way ranging) TOA 시스템은 센서와 사용자간의 왕복 지연 시간을 측정한다. 단방향 시스템은 매우 정밀한 센서망의 시간동기(synchronization)가 필요하지만 정밀 측위(precise positioning)가 가능하다[2-4]. 양방향 시스템은 망 동기에 대한 부담은 없으나 송수신기가 사용하는 클럭 주파수의 한계 때문에 일반적으로 단방향 시스템에 비하여 측위 성능이 저하된다.

TOA와 TDOA 측정치 모델은 비선형식으로 표현되기 때문에 사용자의 위치를 추정하기 위해서는 선형화 과정이 필요하다. 본 논문에서는 선형화 방법에 있어 TOA와 TDOA 측위에서 가장 일반적으로 사용되는 GN(Gauss-Newton) 방법을 사용하였다[3,6]. GN 방법은 테일러 급수(Taylor series)를 이용하여 측정치 식을 선형화 하고 ILS(iterated least square) 또는 IWLS(iterated weighted least square)를 이용하여 사용자 위치를 추정한다[7]. GN 방법은 일반적으로 높은 위치 정확도를 갖지만 초기값이 정확하지 않거나 센서의 기하학적 배치가 나쁠 경우 반복적인 수행을 하면서 추정치가 발산하거나 참값이 아닌 값으로 수렴하기도 한다.

GN 방법을 사용할 경우 센서로부터의 측정치가 4개 이상 일 때 TOA 방식과 TDOA 방식의 오차 특성이 같다는 것이 알려져 있다[8]. 하지만 지상파 측위나 실내측위의 환경에서는 의사거리 측정치에 다중경로(multi-path) 및 NLOS(non-line-of-sight) 오차가 흔히 발생하게 된다. 고정된 위치의 사용자에게 대하여 이러한 다중경로 및 NLOS 오차는 의사거리 측정치에 서로 다른 크기의 랜덤 바이어스가 포함되는 결과로 나타난다.

† 교신저자, 正會員 : 忠南大 工大 電氣情報通信工學部
教授 · 工博

E-mail : tksaint@cnu.ac.kr

* 準會員 : 忠南大 工大 電子電波情報通信工學科 碩士課程

** 正會員 : 忠南大 工大 電子電波情報通信工學科 博士課程

接受日字 : 2008年 12月 20日

最終完了 : 2009年 1月 9日

의사거리 측정치에 서로 다른 크기의 바이어스 오차가 있을 경우 TOA 방식과 TDOA 방식의 오차 특성이 다를 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구에서는 지상파 또는 실내측위 환경에서 다중경로 또는 NLOS 오차로 인하여 의사거리 측정치에 바이어스 오차가 발생하는 경우 TOA 방식과 TDOA방식의 측위 성능을 비교한다. 먼저 의사거리 측정치에 바이어스 오차가 있을 경우 TOA 방식과 TDOA 방식의 오차 특성에 대해서 해석적으로 비교한 후 오차 타원체를 이용하여 오차 분포를 분석한다. 마지막으로 MATLAB을 이용한 시뮬레이션을 통해 바이어스 오차로 존재하는 경우에 사용자 위치에 따른 위치 추정 오차의 크기와 오차 분포를 분석한다.

2. 다중경로 환경에서의 TOA 방식과 TDOA 방식의 성능 분석

2.1 측정치 모델

TOA와 TDOA 측위 시스템에서는 사용자의 위치를 구하기 위해 의사 거리 측정치 또는 의사 거리 측정치의 차이를 사용한다. 지상파 측위 및 실내측위에서 의사거리에 포함될 수 있는 오차 요인은 센서 위치 오차, 시각 동기 오차, 다중경로 혹은 NLOS 등과 같은 전파 진행 오차, 수신기 잡음 등이 있다. 이러한 오차 요소 중 다중경로나 NLOS 오차에 의하여 발생하는 의사거리 바이어스 오차와 수신기 잡음을 고려한 3차원 OWR TOA 측정치 모델은 다음과 같다.

$$\rho_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} + c \cdot b + w_i + k_i, \quad (1)$$

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

식 (1)에서 ρ_i 는 의사거리 측정치, $\underline{x}^i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ 는 i 번째 센서 위치, $\underline{x} = [x \ y \ z]^T$ 는 사용자 위치, c 는 빛의 속도로 $3 \times 10^8 \text{m/s}$, b 는 수신기 클럭 바이어스(clock bias), m 은 센서의 개수, w_i 는 영평균이고 분산이 σ^2 인 IID(independently and identically distributed) 백색 가우시안 잡음, k_i 는 다중경로 또는 NLOS로 인한 의사거리 바이어스 오차이다.

TDOA 측정치 모델은 식(1)의 TOA 측정치를 차분한 형태로 나타낸다. TDOA에서는 1번 센서를 기준 센서로 설정할 경우 기준 센서에 대한 TOA 측정치와 i 번 센서에 대한 TOA 측정치의 도달 시간 차이를 측정치로 사용한다.

$$\rho_i - \rho_1 = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} + w_i + k_i - (w_1 + k_1), \quad (2)$$

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

식(2)와 같이 TDOA 측정치는 수신기의 클럭 바이어스가 제거된 형태로 나타나지만 TDOA의 잡음은 TOA 측정 잡음의 차분형태로 나타나게 되어 TOA와 달리 측정 잡음이 독립적이지 않다.

2.2 GN 방법을 이용한 TOA 측위

센서의 개수가 m 개일 경우 식 (1)을 테일러 급수 전개에 의해 선형화하여 행렬 벡터 형태로 표현한 TOA 측정식은 다음과 같다.

$$\delta \underline{\rho} = \mathbf{H}_a \delta \underline{x}^a + \underline{w} + \underline{k} \quad (3)$$

여기서,

$$\delta \underline{\rho} = [\delta \rho_1, \delta \rho_2, \dots, \delta \rho_m]^T = \underline{\rho} - \underline{\rho}_0$$

$$\delta \underline{x}^a = [\delta x \ \delta y \ \delta z \ c \cdot \delta b]^T = \underline{x}^a - \underline{x}_0^a$$

$$\mathbf{H}_a = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & 1 \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{m1} & h_{m2} & h_{m3} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -\frac{x_1(t)-x_0}{r_0'(t)} \\ -\frac{y_1(t)-y_0}{r_0'(t)} \\ -\frac{z_1(t)-z_0}{r_0'(t)} \end{bmatrix}^T$$

$$r_0'(t) = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2}$$

이 식에서 $\underline{\rho}_0$ 는 선형화 기준점의 의사거리 벡터이고 \underline{x}_0^a 는 선형화 기준점의 상태변수 벡터이다. 의사거리 측정 잡음 \underline{w} 의 공분산 행렬은 $E[\underline{w} \cdot \underline{w}^T] = \sigma^2 \mathbf{I}$ 로 가정한다.

식 (3)의 TOA 측정식으로부터 ILS를 이용하여 TOA 추정치 $\hat{\underline{x}}$ 를 추정하면 다음과 같다.

$$\delta \hat{\underline{x}}^a = (\mathbf{H}_a^T \mathbf{H}_a)^{-1} \mathbf{H}_a^T \delta \underline{\rho}$$

$$\hat{\underline{x}}^a = \underline{x}_0^a + \delta \hat{\underline{x}}^a \quad (4)$$

ILS에서 추정한 $\hat{\underline{x}}$ 를 다시 가시 선형화 기준점으로 하여 $\hat{\underline{x}}$ 가 수렴할 때까지 위의 과정을 반복적으로 수행한다.

2.3 GN 방법을 이용한 TDOA 측위

식 (2)를 선형화하여 행렬 벡터 형태로 표현한 TDOA 측정식은 다음과 같다.

$$\delta \underline{\rho}_d = \mathbf{S} \delta \underline{\rho} = \mathbf{S} \mathbf{H}_a \delta \underline{x}^a + \mathbf{S} \underline{w} + \mathbf{S} \underline{k}$$

$$= \mathbf{S} \mathbf{H} \delta \underline{x} + \mathbf{S} \underline{w} + \mathbf{S} \underline{k}$$

$$= \mathbf{H}_d \delta \underline{x} + \underline{w}_d + \underline{k}_d \quad (5)$$

여기서,

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 0 & 1 & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ -1 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{m1} & h_{m2} & h_{m3} \end{bmatrix}$$

$$\delta \underline{x} = [\delta x \ \delta y \ \delta z]^T$$

식 (5)에서 S는 크기가 $(m-1) \times m$ 인 차분 행렬이고 \underline{w}_d 의 공분산 행렬은 $E\{\underline{w}_d \cdot \underline{w}_d^T\} = \sigma^2 \mathbf{S}\mathbf{S}^T$ 이다.

TDOA 방식은 위에서 언급한 바와 같이 TOA 측정치를 차분한 형태이기 때문에 각 측정치의 잡음이 서로 독립적이지 않고 상관(correlated)되어 있다. 잡음의 가중치 행렬(weighting matrix)은 TOA와 같이 단위행렬의 형태가 아닌 각 잡음이 서로 상관된 형태로 나타나게 된다. 따라서 TOA 방식과 달리 IWLS를 이용하여 식 (6)과 같이 $\hat{\underline{x}}$ 를 추정한다.

$$\begin{aligned}\delta \hat{\underline{x}} &= (\mathbf{H}_d^T (\mathbf{S}\mathbf{S}^T)^{-1} \mathbf{H}_d)^{-1} \mathbf{H}_d^T (\mathbf{S}\mathbf{S}^T)^{-1} \delta \underline{\rho}_d \\ &= (\mathbf{H}^T \mathbf{S}^T (\mathbf{S}\mathbf{S}^T)^{-1} \mathbf{S} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{S}^T (\mathbf{S}\mathbf{S}^T)^{-1} \mathbf{S} \delta \underline{\rho} \\ &= (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{P} \delta \underline{\rho} \\ \hat{\underline{x}} &= \underline{x}_0 + \delta \hat{\underline{x}}\end{aligned}\quad (6)$$

여기서,

$$\begin{aligned}\mathbf{P} &= \mathbf{S}^T (\mathbf{S}\mathbf{S}^T)^{-1} \mathbf{S} = \mathbf{I} - \frac{1}{m} \mathbf{1}_m \mathbf{1}_m^T = \mathbf{I} - \frac{1}{m} \mathbf{1}_m \mathbf{1}_m^T \\ \mathbf{1}_m &= [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]^T\end{aligned}$$

식 (6)에서 P는 S의 투영 행렬(projection matrix)이다 [8]. 이후 TOA 방식과 마찬가지로 식 (6)의 추정치 $\hat{\underline{x}}$ 를 가시 선형화 기준점으로 하여 $\hat{\underline{x}}$ 가 수렴할 때까지 앞의 과정을 반복적으로 수행한다.

2.4 TOA 방식과 TDOA 방식의 위치 추정치 관계

의사거리 측정치의 잡음이 IID 백색 가우시안 잡음일 때 TOA 측정치를 이용한 위치 추정치와 TDOA 측정치를 이용한 위치 추정치가 동일하다 [8]. 의사거리 측정치에 바이어스 오차가 있는 경우의 TOA 방식과 TDOA 방식에 따른 위치 추정치 관계는 다음과 같다.

정리 1 : 센서 측정치가 4개 이상일 때 다중경로 또는 NLOS 오차로 인하여 서로 다른 크기의 의사거리 바이어스 오차가 존재하는 경우에도 TOA와 TDOA 측정치의 위치 추정치와 그 오차 공분산 행렬은 동일하다.

증명 : 식 (4)에서 블록 역행렬 기법을 이용하여 $(\mathbf{H}_a^T \mathbf{H}_a)^{-1}$ 을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}[\mathbf{H}_a^T \mathbf{H}_a]^{-1} &= \begin{bmatrix} \mathbf{H}^T \mathbf{H} & \mathbf{H}^T \mathbf{1}_m \\ \mathbf{1}_m^T \mathbf{H} & m \end{bmatrix}^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} & -\frac{1}{m} (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{1}_m \\ -\frac{1}{m} \mathbf{1}_m^T \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} & \frac{1}{m} + \frac{1}{m^2} \mathbf{1}_m^T \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{1}_m \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (7)$$

식 (4)를 이용하여 구한 TOA 방식의 추정 오차를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}\underline{e}^a &= \hat{\underline{x}}^a - \underline{x}^a \\ &= (\mathbf{H}_a^T \mathbf{H}_a)^{-1} \mathbf{H}_a^T (\underline{w} + \underline{k}) \\ &= \begin{bmatrix} (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} & -\frac{1}{m} (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{1}_m \\ -\frac{1}{m} \mathbf{1}_m^T \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} & \frac{1}{m} + \frac{1}{m^2} \mathbf{1}_m^T \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{1}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{H}^T \\ \mathbf{1}_m^T \end{bmatrix} (\underline{w} + \underline{k})\end{aligned}\quad (8)$$

식 (8)로부터 TOA의 위치 추정 오차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\underline{e}_{TOA} &= [\hat{x} - x \quad \hat{y} - y \quad \hat{z} - z]^T \\ &= \left[(\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T - \frac{1}{m} (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{1}_m \mathbf{1}_m^T \right] (\underline{w} + \underline{k}) \\ &= (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \left[\mathbf{I} - \frac{1}{m} \mathbf{1}_m \mathbf{1}_m^T \right] (\underline{w} + \underline{k}) \\ &= (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{P} (\underline{w} + \underline{k})\end{aligned}\quad (9)$$

식 (6)으로부터 구한 TDOA 방식의 추정 오차는 다음과 같다.

$$\underline{e}_{TDOA} = (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{P} (\underline{w} + \underline{k})\quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)에 따라 의사거리 측정치에 바이어스 오차가 존재하는 경우에도 TOA 방식과 TDOA 방식의 위치 추정치가 동일하다. TOA 방식과 TDOA 방식의 위치 추정 오차가 동일하기 때문에 위치 추정치의 오차 공분산 행렬 또한 동일하다. 의사거리 측정치에 바이어스 오차가 있는 경우 잡음 벡터 \underline{w} 와 바이어스 오차 벡터 \underline{k} 를 서로 독립으로 가정하면 두 방식의 오차공분산행렬은 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\begin{aligned}\text{cov}(\underline{e}_{TOA}) &= \text{cov}(\underline{e}_{TDOA}) \\ &= (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{P} \cdot E\{(\underline{w} + \underline{k})(\underline{w} + \underline{k})^T\} \mathbf{P} \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \\ &= \sigma^2 (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} + (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{P} \underline{k} \cdot \underline{k}^T \mathbf{P} \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1}\end{aligned}\quad (11)$$

식 (4)와 식 (6)으로부터 구한 위치 추정치의 바이어스 오차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}[\hat{b}_x \quad \hat{b}_y \quad \hat{b}_z]^T &= (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{P} \underline{k} \\ &= (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \left(\underline{k} - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m k_i \mathbf{1}_m \right)\end{aligned}\quad (12)$$

위치 추정치의 바이어스 오차는 의사거리 바이어스 오차의 크기가 아닌 편차에 의해 결정된다.

전과 항법에서 측위 정확도는 사용자의 위치에 대한 센서의 기하학적인 위치에 따라 다르게 나타난다. 이 현상을 분석하기 위해 주로 오차 타원체를 사용한다 [8-9]. 의사거리 바이어스 오차가 있는 경우에 오차 타원체는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}[\hat{x} - b_x \quad \hat{y} - b_y \quad \hat{z} - b_z]^T &= (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} [\hat{x} - b_x \quad \hat{y} - b_y \quad \hat{z} - b_z]^T \\ &= \mathbf{M} \cdot \sigma^2\end{aligned}\quad (13)$$

식 (13)에서 M은 양의 계수이며, 2차원의 경우 M=2이면 추정오차가 타원체내에 있을 확률이 0.86이다. 그림 1은 의사거리 바이어스 오차가 있을 경우의 2차원 오차 타원체이다.

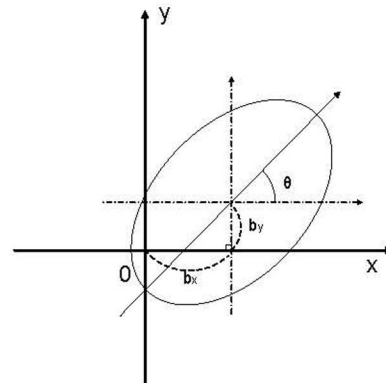


그림 1 의사거리 바이어스 오차가 있을 경우의 2차원 오차 타원체

Fig. 1 An error ellipse in presence of range bias errors

3. 시뮬레이션 결과

의사거리 바이어스 오차가 존재하는 경우의 TOA 방식과 TDOA 방식의 측위 성능을 분석하기 위하여 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 의사거리 바이어스 오차가 있는 경우에도 TOA와 TDOA의 위치 추정 결과가 같으므로 TDOA 측정치를 이용하여 GN 방법으로 위치를 추정한 결과만을 분석하였다. 사용자의 위치는 2차원으로 고정되어 있다고 가정하였다. 작업공간의 크기는 $22 \times 12[m]$ 로 설정하였고 4개의 센서는 그림 2와 같이 '★'로 표현하였으며 비대칭으로 배치하였다. 센서의 기하학적인 배치에 따른 측위의 정확도를 분석하기 위해 그림 2에서 '•'로 표현된 121개의 측위점에서 시뮬레이션을 수행하였다. 통계적인 자료를 얻기 위하여 각 측위점마다 1000번의 실험을 하였다. 시뮬레이션에서 잡음의 분산은 $0.1[m^2]$ 으로 설정하였고 추정치가 $10[cm]$ 이내로 수렴할 때까지 반복 수행하였다. 이때 의사거리 추정 오차는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta r = E \left\{ \sqrt{(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2} \right\} \quad (14)$$

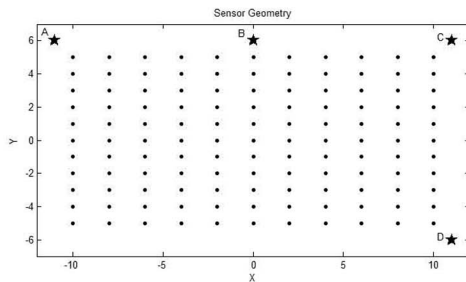
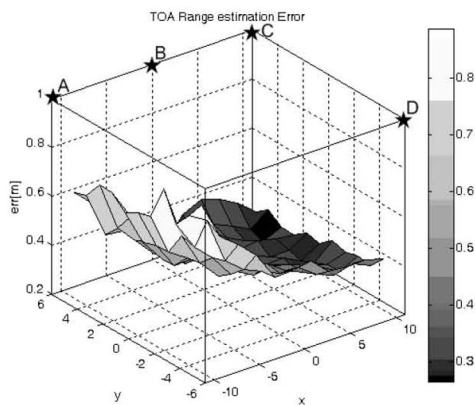
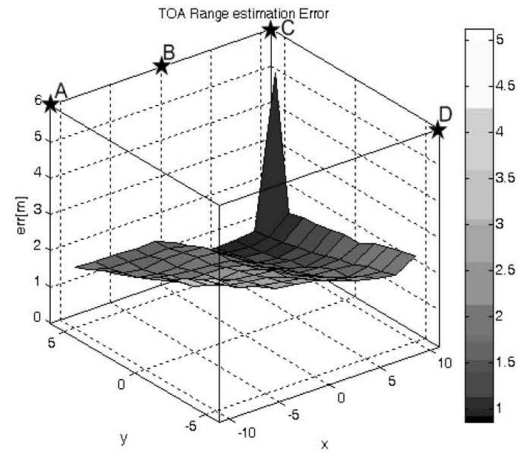


그림 2 센서 배치
Fig. 2 Sensor allocation

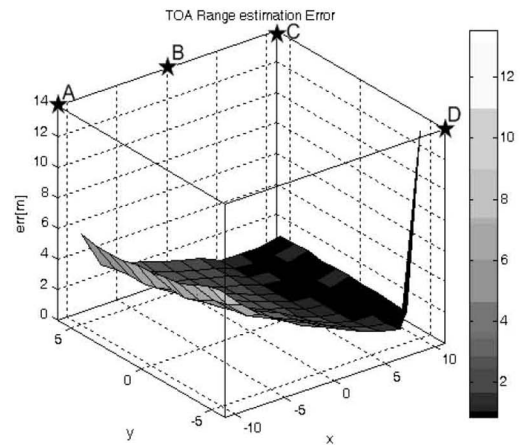
그림 3에서는 GN 방법에서 각 측위점에서의 추정 오차의 크기를 나타내었다. 이때 발산하는 추정치는 그래프에서 제외하였다. 그림 3-(a)는 모든 센서에 바이어스 오차가 없을 경우의 추정 오차 크기를 나타내고 그림 3-(b)~(e)는 각 센서의 의사거리 측정치에 3m의 바이어스 오차가 있을 경우의 추정 오차 범위를 나타낸다. 그림 3-(a)와 같이 의사거리 측정치에 바이어스 오차가 없을 때에는 모든 추정치가 원하는 범위 내로 수렴하였다. 하지만 의사거리 바이어스 오차 크기의 편차가 커짐에 따라 추정 오차가 증가하였다.



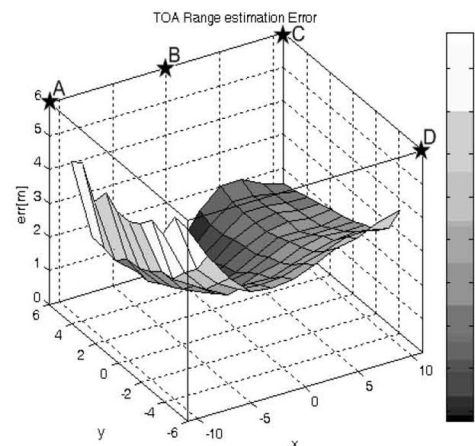
(a) 바이어스 오차가 없는 경우
(a) Without bias errors



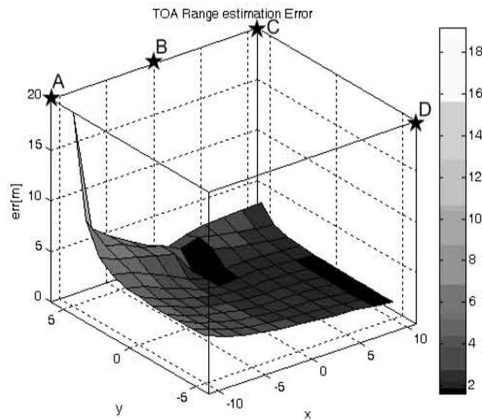
(b) 센서 A에 3m의 바이어스 오차가 있는 경우
(b) 3m bias error at sensor A



(c) 센서 B에 3m의 바이어스 오차가 있는 경우
(c) 3m bias error at sensor B



(d) 센서 C에 3m의 바이어스 오차가 있는 경우
(d) 3m bias error at sensor C



(e) 센서 D에 3m의 바이어스 오차가 있는 경우

(e) 3m bias error at sensor D

그림 3 GN 방법에서의 추정 오차 크기

Fig. 3 Range estimation error in GN method

표 1에서는 그림 3의 각 경우에 대해서 추정 오차의 크기가 가장 큰 측위점과 추정 오차 범위를 나타내었다.

표 1 바이어스 오차로 인한 오차 크기가 가장 큰 측위점 및 추정 오차 범위

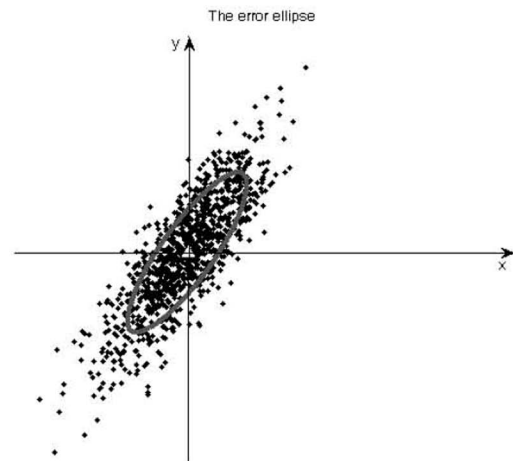
Table 1 The biggest error point and range estimation error

바이어스 오차가 있는 센서 (센서위치)	추정 오차의 크기가 가장 큰 측위점	추정 오차 범위[m]
모두 없음	(-10, -5)	0.26~0.88
A (-11, 6)	(10, 5)	0.86~5.12
B (0, 6)	(10, -5)	0.87~13.53
C (11, 6)	(-10, -5)	0.88~5.42
D (11, -6)	(-10, 5)	1.62~19.18

이 결과로부터 사용자의 위치가 바이어스 오차가 포함된 센서로부터 멀리 떨어져 있을 경우 오차가 커지는 것을 확인할 수 있다.

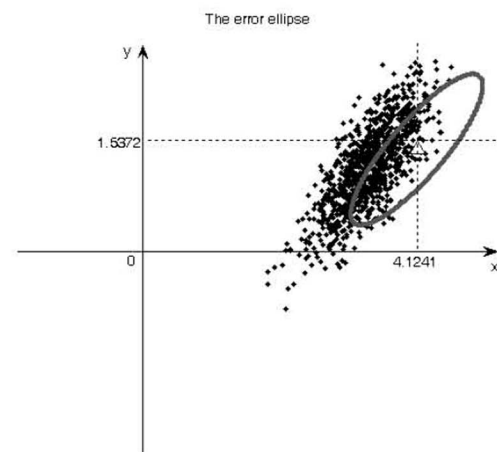
그림 4는 측위점 (-10, -5)에서의 2차원 위치 추정 오차 분포를 나타내었다. 그림 3-(a)에서 보는 바와 같이 바이어스 오차가 없을 경우 (-10, -5)에서 센서의 기하학적 배치가 좋지 않고 가장 큰 추정 오차를 가지므로 이심률이 가장 클 것으로 판단된다. 그래서 이 측위점을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 그림에서 실선으로 그려진 오차 타원체는 예측 값을 표현한 것으로 앞서 그림 1에서 설명한 바와 같이 추정 오차 분포의 86%가 타원체 안에 들어가야 한다. 의사거리 측정치에 바이어스 오차가 없을 경우 그림 4-(a)와 같이 오차 타원체의 중심점이 (0, 0)으로 추정된 오차 분포와 일치하는 것을 확인할 수 있다. 센서 A에 바이어스 오차가 있는 경우에는 그림 4-(b)와 같이 오차 타원체의 중심점이 (4.12,

1.54)로 옮겨진 것을 확인할 수 있다. 하지만 오차 타원체의 중심점과 오차 분포의 중심점에 차이가 있으며 이는 오차 공분산 행렬을 구하기 위한 식 (11)의 오차로부터 발생한다. 즉, H행렬은 식 (3)에서 보이는 바와 같이 ρ_i 의 함수이고 추정치를 이용해서 이를 구하므로 H행렬은 잡음 또는 바이어스 오차에 영향을 받는다. 하지만 식 (11)은 H행렬이 잡음 또는 바이어스 오차에 대해 상관관계가 없다고 가정하고 근사화 되었기 때문에 이로 인하여 타원체의 이심률, 기울기, 중심점에 오차가 발생한다.



(a) 바이어스 오차가 없는 경우

(a) Without bias errors



(b) 센서 A에 3m의 바이어스 오차가 있는 경우

(b) 3m bias error at sensor A

그림 4 측위점 (-10, -5)에서의 2차원 위치 추정 오차 분포

Fig. 4 Distribution of 2-dimensional position estimate error at (-10, -5)

그림 5는 바이어스 오차의 크기에 따른 추정 오차 분포를 나타내었다. 바이어스 오차의 크기를 각각 0, 1, 3, 5[m]로

주고 오차 분포와 예측한 오차 타원체의 변화를 살펴보았다. 그림에서 바이어스 오차가 커질수록 추정 오차 분포의 기울기와 중심점, 이심률이 변화하여 오차 타원체와 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 바이어스 오차가 커질수록 H행렬에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

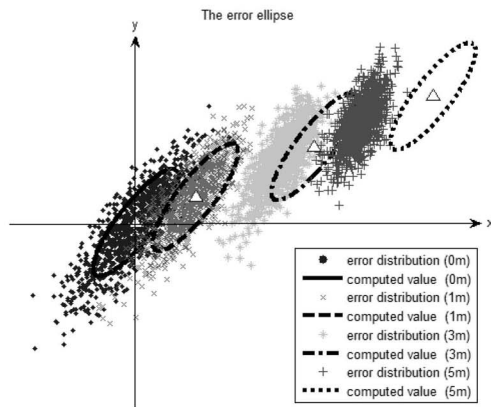


그림 5 바이어스 오차 크기에 따른 위치 추정 오차 분포 변화
Fig. 5 Distribution of position estimate error

3. 결 론

본 논문에서는 전파항법에 사용되는 TOA 방식과 TDOA 방식의 의사거리 측정치에 다중경로 또는 NLOS 오차로 인하여 바이어스 오차가 발생하는 경우의 성능을 분석하였다. 서로 다른 크기의 바이어스 오차가 있을 경우 TOA 방식과 TDOA 방식의 위치 추정치와 오차 공분산 행렬이 정확히 같은 것을 확인하였고 바이어스 오차에 의해 오차 타원체의 중심이 이동되는 것을 보였다. MATLAB을 이용한 시뮬레이션을 통해 의사거리 측정치에 바이어스 오차가 있는 경우의 위치 추정 오차의 크기와 추정 오차의 분포를 살펴보았다. 시뮬레이션 결과로부터 사용자의 위치가 바이어스 오차가 있는 센서로부터 멀리 떨어져 있을 경우에 위치 추정 오차가 커지는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참 고 문 헌

- [1] K. D. McDonald, "The Modernization of GPS: Plans, New Capabilities and the Future Relationship to Galileo," *Journal of Global Positioning Systems*, Vol.1, No.1, pp.1-17, Jul. 2002
- [2] Y. Zhao, "Mobile Phone Location Determination and Its Impact on Intelligent Transportation Systems," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.1, No.1, pp.55-64, Mar. 2000
- [3] J. J. Caffery, et. al., "Overview of Radiolocation in CDMA Cellular System", *IEEE communication Magazine*, pp. 38-45, 1998.
- [4] I. Oppermann, M. Hämmäläinen, and J. Iinatti, "UWB Theory and Applications," John Willy & Sons Ltd., 2004
- [5] T. S. Rappaport, J. H. Reed, and B. D. Woerner, "Position Location Using Wireless Communications on Highways of the Future," *IEEE Communications Magazine*, pp.33-41, Oct.1996
- [6] Don J. Torrieri, "Statistical Theory of Passive Location Systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol.AES-20, pp.183-198, 1984.
- [7] J. M. Mendel, "Lessons in Estimation Theory for Signal Processing, Communications, and Control," Prentice-Hall International, 1995
- [8] 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, Jan/2002, pp. 307-311
- [9] E. D. Kaplan, "Understanding GPS Principles and Applications," ArtechHouse, 1996

저 자 소 개



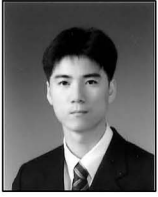
박 지 원 (朴志原)

1985년 12월 18일생. 2008년 충남대 전기정보통신공학부 졸업. 2008년~현재 동대학원 전자전파정보통신공학과 석사과정.
Tel : 042-821-7607
Fax : 042-824-6807
E-mail : jwjsjk@gmail.com



박 지 희 (朴智熙)

1984년 11월 3일생. 2008년 충남대 전기정보통신공학부 졸업. 2008년~현재 동대학원 전자전파정보통신공학과 석사과정.
Tel : 042-821-7607
Fax : 042-824-6807
E-mail : applearoma@naver.com



송 승 헌 (宋 承 憲)

1980년 12월 4일생. 2006년 충남대 전기
정보통신공학부 졸업. 2008년 동 대학원
정보통신공학과 졸업(석사). 2008년~현
재 동 대학원 전자전과정정보통신공학과
박사과정.

Tel : 042-821-7607

Fax : 042-824-6807

E-mail : lsphoenix@hanafos.com



성 태 경 (成 泰 慶)

1961년 4월 12일생. 1984년 서울대 제어
계측공학과 졸업. 1986년 동 대학원 제어
계측공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원
제어계측공학과 졸업(공학박). 1997년~현재
충남대 전기정보통신공학부 교수.

Tel : 042-821-5660

Fax : 042-824-6807

E-mail : tksaint@cnu.ac.kr