

거리정보 기반 무선위치추정을 위한 혼합 폐쇄형 해

Hybrid Closed-Form Solution for Wireless Localization with Range Measurements

조성윤*
(Seong Yun Cho¹)

¹IT Convergence Technology Research Laboratory, ETRI

Abstract: Several estimation methods used in the range measurement based wireless localization area have individual problems. These problems may not occur according to certain application areas. However, these problems may give rise to serious problems in particular applications. In this paper, three methods, ILS (Iterative Least Squares), DS (Direct Solution), and DSRM (Difference of Squared Range Measurements) methods are considered. Problems that can occur in these methods are defined and a simple hybrid solution is presented to solve them. The ILS method is the most frequently used method in wireless localization and has local minimum problems and a large computational burden compared with closed-form solutions. The DS method requires less processing time than the ILS method. However, a solution for this method may include a complex number caused by the relations between the location of reference nodes and range measurement errors. In the near-field region of the complex solution, large estimation errors occur. In the DSRM method, large measurement errors occur when the mobile node is far from the reference nodes due to the combination of range measurement error and range data. This creates the problem of large localization errors. In this paper, these problems are defined and a hybrid localization method is presented to avoid them by integrating the DS and DSRM methods. The defined problems are confirmed and the performance of the presented method is verified by a Monte-Carlo simulation.

Keywords: ranging measurement based wireless localization, ILS, closed-form solution

I. 서론

“위치정보의 보호 및 이용 등에 관한 법률”에서 위치정보는 이동성이 있는 물건 또는 개인이 특정한 시간에 존재하거나 존재하였던 장소에 관한 정보로 정의하고 있다. 이처럼 위치정보는 대상, 시간, 장소의 복합 정보로 현재 다양한 위치기반서비스에서 인증, 생성/추정, 가공, 제공 등의 절차를 거쳐 모바일 단말이나 차량용 텔레매틱스 단말에서 사용되고 있다. 위치를 추정하는 방법으로는 센서 기반과 인프라 기반으로 크게 나눌 수 있으며 GPS의 전 영역 서비스 활성화 및 무선통신 인프라의 발달 그리고 스마트폰의 활성화에 의해 인프라 기반의 저가형 위치추정 기술이 개발되고 활용되고 있다. GPS는 현재 가장 많은 위치정보 제공 인프라로 활용되고 있지만 실내영역에서는 적절한 솔루션으로 활용되지 못하고 있다. 이런 서비스 음영지역 문제를 해결하기 위해 다양한 무선통신 인프라 기반의 위치추정 기술이 연구되고 있으며 이 중에서 IEEE 802.11(WLAN) [1,2], IEEE 802.15.4(ZigBee) [3,4], IEEE 802.15.4a (UWB/CSS) [5-7] 기반의 위치추정 기술이 주요 연구 테마로 자리잡고 있다.

무선통신 인프라 기반으로 위치를 추정하는 방법에는 신호의 전송 시간 정보를 이용하는 방법 [8,9]과 신호의 전송 방향 정보를 이용하는 방법 [10], 그리고 수신된 신호의 세기

정보를 이용하는 방법[2,11] 등이 있다. 이 중에서 위치추정 정확도 측면에서 신호의 전송 시간 정보를 이용하는 방법이 일반적이다. 신호의 전송 시간 정보는 거리정보로 변환할 수 있다. 고정된 인프라의 설치 위치 정보와 고정 인프라와 모바일 단말 사이의 추정된 거리정보를 활용하여 모바일 단말의 위치정보를 추정하는 기술이 가장 광범위하게 이용되고 있으며 GPS 기반 위치추정 기술과 일맥 상통한다. 거리정보는 하나의 비선형 식을 생성할 수 있으며 이 식에 포함되어 있는 모바일 단말의 위치 변수를 추정하는 기법들이 연구되었다[5-7]. 대표적으로 ILS (Iterative Least Squares) [12]기법, DS (Direct Solution) [13]기법, DSRM (Difference of Squared Range Measurements) [7]기법 등이 있다. ILS 기법은 측정치 오차의 제곱이 최소가 되도록 초기 공칭점(nominal point)에 대한 오차를 반복적으로 추정하는 방법으로 가장 널리 사용되고 있다. 이와 달리 나머지 방법들은 폐쇄형 해(closed-form solution)로 비선형 식의 제곱을 통해 직접 해를 구하는 방법이다. 이 방법들은 ILS 기법에 비해 계산량이 작아 대체 기법으로 활용되고 있다. 본 논문에서는 이들 위치추정 기법들을 설명하고 이 기법들의 문제점을 정의한다. 그 결과 ILS 기법에는 다른 기법 대비 큰 계산량과 초기 공칭점 선정에 따른 지역최소(LM: Local Minimum) 문제가 발생하며[12] DS 기법에는 고정 노드들의 설치 위치와 거리 측정치의 오차와의 관계에 의한 허수 해가 발생할 수 있는 영역이 존재하며 이 주위의 영역에서 큰 위치오차가 발생하는 문제를 갖는 것을 보인다. 또한 DSRM 기법은 모바일 단말의 위치가 고정 노드로부터 멀어질수록 거리측정 오차가 거리정보와 결합되어 큰 측정오차를 발생시키며 이로 인한 큰 위치추정 오차가

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received December 11, 2012 / revised March 4, 2013 / accepted March 27, 2013

조성윤: 한국전자통신연구원 융합기술연구부문(sycho@etri.re.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 산업융합기술개발사업의 일환으로 수행하였음(안전성 및 편의성 향상을 위한 운전자 시야 중심 차량용 증강현실 정보제공 시스템 기술 개발).

발생하는 것을 보인다. 이런 문제 정의를 한 다음 DS 기법과 DSRM 기법을 같이 사용하는 혼합형 위치추정 기법을 제시한다. 정의한 기존 위치추정 기법들의 문제점과 제시된 혼합형 위치추정 기법의 성능을 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 검증한다.

본 논문의 구성은 II 장에서 기존 위치추정 기법들의 문제점을 정의하고 이 문제를 해결하기 위한 혼합형 위치추정 기법을 제시하고 III 장에서 시뮬레이션을 통해 이 문제점들을 확인하고 제안한 기법의 성능을 검증한다. 마지막으로 IV 장에서 결론을 맺는다.

II. 문제점 정의 및 이를 해결하기 위한 혼합형 기법 제시

1. 기존의 거리정보 기반 위치추정 기법의 문제점 정의

무선통신 인프라를 활용한 모바일 단말의 위치를 추정하는 기술(무선위치추정기술, wireless localization technology)은 실내항법 및 GPS 대체 항법 등을 목적으로 연구되고 실생활에서 활용되고 있다. 무선위치추정을 위해 사용하는 측정치로는 ToA (Time of Arrival), TWR (Two Way Ranging), TdoA (Time Difference of Arrival), AoA (Angle of Arrival), RSSI (Received Signal Strength Indicator) 등이 있다. 이 중에서 ToA는 고정 노드와 모바일 단말 사이에 시각 동기가 이루어져야 하며, TDoA는 고정 노드들 간의 시각 동기가 이루어져야 하는 단점이 있다. AoA는 모바일 단말이 고정 노드들로부터 멀어질수록 오차가 커지는 단점이 있다. 그리고 RSSI 기반으로 거리를 추정하는 경우 노드들 간의 거리가 멀어질수록 거리추정오차가 커지게 되며 Fingerprinting 기법을 사용하는 경우 데이터베이스를 미리 구축해야 하는 단점을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 시각 동기 제약조건이 없고 거리추정이 정확하며 최근에 위치추정에 활발하게 이용되고 있는 UWB/CSS를 활용한 TWR 방식의 거리추정 정보를 사용하는 것을 가정한 위치추정 기술을 대상으로 한다.

다수의 고정 노드가 설치되어 있고 고정 노드와 응용구간 내에 위치한 모바일 단말 사이에 주기적으로 통신을 통한 거리추정 및 정보공유가 이루어지는 것을 전제조건으로 한다. 이때 위치를 추정하는 기법에는 비선형 식의 근사화를 통한 ILS 기법과 폐쇄형 해인 DS 기법 및 DSRM 기법, 등이 있다. 본 절에서는 ILS 기법, DS 기법 및 DSRM 기법을 설명하고 이들 기술의 문제점을 정의한다.

기본적으로 다음과 같은 거리정보 비선형 식을 사용한다.

$$\begin{aligned}\tilde{\rho}_{A_i,M} &= \sqrt{(x_{A_i} - x_M)^2 + (y_{A_i} - y_M)^2} + \delta\rho_{A_i,M} \\ &= \rho_{A_i,M} + \delta\rho_{A_i,M}\end{aligned}\quad (1)$$

여기서 $\tilde{\rho}_{A_i,M}$ 는 고정 노드 i 와 모바일 단말 사이에 측정된 거리정보이며 $\delta\rho_{A_i,M}$ 는 거리측정오차를 나타낸 것이다. 그리고 (x_{A_i}, y_{A_i}) 와 (x_M, y_M) 는 각각 고정 노드 i 와 모바일 단말의 수평 위치를 나타낸 것이다.

먼저 ILS 기법은 [12]에서 기술된 것과 같이 (1)을 공칭점에서 Taylor 급수 1차진개를 통해 선형화하고 최소자승법으로 공칭점 오차를 추정한다. 다음 새로운 공칭점을 추정된 오차를 사용하여 갱신하는 과정을 반복함으로써 모바일 단말의

위치를 추정하는 방법이다. 이 기법은 초기 공칭점 설정에 따른 지역최소로 수렴하는 문제를 가지며 반복 추정을 하는 과정에서 발생하는 계산량 증가 문제를 갖는다.

DS 기법은 반복 추정을 하지 않고 (1)에서 거리측정 오차를 무시한 다음 양 변을 제곱하여 다음과 같이 폐쇄형으로 해를 구하는 방법이다[13].

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_M(k) \\ \hat{y}_M(k) \end{bmatrix} = (H^T H)^{-1} H^T \left(R_a + R_b \frac{-b + (-1)^k \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \right) \quad (2)$$

여기서 $k \in \{1, 2\}$,

$$H = \begin{bmatrix} -2x_{A_i} & -2y_{A_i} \\ \vdots & \vdots \\ -2x_{A_n} & -2y_{A_n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_a = \begin{bmatrix} \tilde{\rho}_{A_i,M}^2 - (x_{A_i,M}^2 + y_{A_i,M}^2) \\ \vdots \\ \tilde{\rho}_{A_n,M}^2 - (x_{A_n,M}^2 + y_{A_n,M}^2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_b = \overbrace{[-1 \ \cdots \ -1]}^n \quad (5)$$

$$a = ((H^T H)^{-1} H^T R_b)^T ((H^T H)^{-1} H^T R_b) \quad (6)$$

$$b = 2((H^T H)^{-1} H^T R_a)^T ((H^T H)^{-1} H^T R_b) - 1 \quad (7)$$

$$c = ((H^T H)^{-1} H^T R_a)^T ((H^T H)^{-1} H^T R_a) \quad (8)$$

여기서 n 은 모바일 단말과 연결된 고정 노드의 수이며 3 이상이어야 한다.

(2)에서 나타낸 두 후보 해 중에서 잔차(residual)가 작은 하나가 올바른 해이다. 잔차는 다음과 같이 계산된다.

$$res(k) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\tilde{\rho}_{A_i,M} - \sqrt{(x_{A_i} - \hat{x}_M(k))^2 + (y_{A_i} - \hat{y}_M(k))^2} \right)^2} \quad (9)$$

DS 기법의 문제는 (2)의 제곱근의 계산에서 발생한다. 응용구간 내에서 $b^2 - 4ac < 0$ 이 만족하는 구간에서 허수가 발생하므로 두 후보 해 모두 잘못된 값을 갖게 된다. 응용구간 내에서 고정 노드의 배치 상황과 측정치 오차와의 관계에 의해 이런 문제가 발생하는 구간이 존재하게 된다.

DSRM 기법은 (1)의 거리측정 오차를 그대로 유지한 상태에서 다음과 같이 양 변을 제곱하여 폐쇄형 해를 유도한다[7].

$$\begin{aligned}\tilde{\rho}_{A_i,M}^2 &= x_{A_i}^2 - 2x_{A_i}x_M + x_M^2 + y_{A_i}^2 - 2y_{A_i}y_M \\ &\quad + y_M^2 + 2\rho_{A_i,M}\delta\rho_{A_i,M} + \delta\rho_{A_i,M}^2\end{aligned}\quad (10)$$

이 식에서 선형 폐쇄형 식을 만들기 위해 $(x_M^2 + y_M^2)$ 항이 제거되어야 한다. 이를 위해 n 개의 고정 노드 중 하나를 공동 노드(common node)로 설정하고 $n-1$ 개의 다음과 같은 식을 생성한다.

$$\begin{aligned}\tilde{\rho}_{A_i,M}^2 - \tilde{\rho}_{A_c,M}^2 &= (x_{A_i}^2 + y_{A_i}^2) - (x_{A_c}^2 + y_{A_c}^2) \\ &\quad + 2(x_{A_c} - x_{A_i})x_M + 2(y_{A_c} - y_{A_i})y_M \\ &\quad + 2(\rho_{A_i,M}\delta\rho_{A_i,M} - \rho_{A_c,M}\delta\rho_{A_c,M}) + (\delta\rho_{A_i,M}^2 - \delta\rho_{A_c,M}^2)\end{aligned}\quad (11)$$

거리측정 오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta\rho_{A_i, M} = m_{A_i, M} + w_{A_i, M} \quad (12)$$

여기서 $m_{A_i, M}$ 는 다중경로 오차를 의미하며, $w_{A_i, M}$ 는 백색 잡음을 의미한다.

다중경로 오차는 위치추정 단계에서 제거하기 어려우며 UWB나 CSS를 사용한 응용인 경우 다중경로 프로파일 중에서 제일 처음 들어 온 신호를 찾아 거리정보를 추정함으로써 제거할 수 있다. 본 논문에서는 이 오차는 거리추정 단계에서 제거된 것으로 가정한다. 따라서 (11)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{A_i, M} = (x_{A_c} - x_{A_i})x_M + (y_{A_c} - y_{A_i})y_M + (\rho_{A_i, M}w_{A_i, M} - \rho_{A_c, M}w_{A_c, M}) + (w_{A_i, M}^2 - w_{A_c, M}^2)/2 \quad (13)$$

여기서

$$r_{A_i, M} = \frac{\tilde{\rho}_{A_i, M}^2 - \tilde{\rho}_{A_c, M}^2 - (x_{A_c}^2 + y_{A_c}^2) + (x_{A_i}^2 + y_{A_i}^2)}{2} \quad (14)$$

n 개의 고정 노드가 있는 경우 $n-1$ 개의 측정식 (13)을 사용하여 다음과 같이 선형 행렬식을 구성할 수 있다.

$$Z = G \begin{bmatrix} x_M \\ y_M \end{bmatrix} + V \quad (15)$$

여기서

$$Z = [r_{A_1, M} \ \dots \ r_{A_{n-1}, M}]^T \quad (16)$$

$$G = \begin{bmatrix} x_{A_c} - x_{A_1} & y_{A_c} - y_{A_1} \\ \vdots & \vdots \\ x_{A_c} - x_{A_{n-1}} & y_{A_c} - y_{A_{n-1}} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$V = \begin{bmatrix} (\rho_{A_1, M}w_{A_1, M} - \rho_{A_c, M}w_{A_c, M}) + (w_{A_1, M}^2 - w_{A_c, M}^2)/2 \\ \vdots \\ (\rho_{A_{n-1}, M}w_{A_{n-1}, M} - \rho_{A_c, M}w_{A_c, M}) + (w_{A_{n-1}, M}^2 - w_{A_c, M}^2)/2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

이 식에서 측정오차 공분산은 다음과 같이 계산된다.

$$Q = E\{V \cdot V^T\}$$

$$= \sigma_w^2 \begin{bmatrix} \tilde{\rho}_{A_1, M}^2 + \tilde{\rho}_{A_c, M}^2 & \tilde{\rho}_{A_c, M}^2 & \dots & \tilde{\rho}_{A_c, M}^2 \\ \tilde{\rho}_{A_c, M}^2 & \tilde{\rho}_{A_2, M}^2 + \tilde{\rho}_{A_c, M}^2 & \dots & \tilde{\rho}_{A_c, M}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{\rho}_{A_c, M}^2 & \tilde{\rho}_{A_c, M}^2 & \dots & \tilde{\rho}_{A_{n-1}, M}^2 + \tilde{\rho}_{A_c, M}^2 \end{bmatrix}$$

$$+ \sigma_w^3 \begin{bmatrix} \tilde{\rho}_{A_1, M} + \tilde{\rho}_{A_c, M} & \tilde{\rho}_{A_c, M} & \dots & \tilde{\rho}_{A_c, M} \\ \tilde{\rho}_{A_c, M} & \tilde{\rho}_{A_2, M} + \tilde{\rho}_{A_c, M} & \dots & \tilde{\rho}_{A_c, M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{\rho}_{A_c, M} & \tilde{\rho}_{A_c, M} & \dots & \tilde{\rho}_{A_{n-1}, M} + \tilde{\rho}_{A_c, M} \end{bmatrix}$$

$$+ \sigma_w^4 \begin{bmatrix} 0.5 & 0.25 & \dots & 0.25 \\ 0.25 & 0.5 & \dots & 0.25 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0.25 & 0.25 & \dots & 0.5 \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서 σ_w 는 거리측정 오차의 표준편차를 의미하며 $\rho_{A_i, M}$

대신 측정치인 $\tilde{\rho}_{A_i, M}$ 을 사용하여 구성한 것이다.

(16), (17), 그리고 (19)는 계산할 수 있는 값이므로 (15)에서 모바일 단말의 위치는 다음과 같이 가중최소자승법(weighted least squares)으로 추정할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_M \\ \hat{y}_M \end{bmatrix} = (G^T Q^{-1} G)^{-1} G^T Q^{-1} Z \quad (20)$$

이 기법에서 G 는 고정 노드의 위치 및 공통 노드의 선정에 따라 고정된 값이므로 공통 노드를 $rank(G)=2$ 가 되도록 선정하면 문제가 발생하지 않는다. 그러나 (11)에서 나타낸 것과 같이 거리측정 오차가 거리측정 정보와 결합함으로써 모바일 단말의 위치가 고정 노드로부터 멀어질수록 오차가 증가할 것으로 예상할 수 있다.

본 장에서 설명한 세 가지 위치추정 기법의 문제점을 정리하면 다음과 같다. ILS 기법에서는 초기 공칭점 설정에 따른 LM 문제점이 발생할 수 있으며 폐쇄형 해에 비해 계산량이 크다. DS 기법에서는 고정 노드의 배치 상황과 측정치 오차와의 관계에 의해 큰 위치추정 오차가 발생할 수 있다. 그리고 DSRM 기법에서는 모바일 단말이 고정 노드로부터 멀어질수록 추정오차가 증가할 수 있다.

2. 혼합 폐쇄형 해

앞 절에서 정의한 문제점을 해결하기 위해 본 절에서는 혼합 폐쇄형 해를 제시한다. 우선 계산량을 고려해서 폐쇄형 해를 선정한다. 고정 노드가 응용구간 내에 골고루 배치되어 있으면 DSRM 기법을 선정하는 것이 좋다. 그러나 실 환경에서는 이런 가정을 하기 어렵다. 그러나 DS 기법에서는 DSRM 기법과 다른 영역에서 오차를 발생한다. 이런 특징을 고려하여 혼합 폐쇄형 해를 제시하며 그림 1에서 그 순서도를 나타내었다.

먼저 고정 노드들과 모바일 단말 사이의 거리추정을 수행한다. 연결 정보가 모두 위치추정 서버에 전송되면 DS 기법에서 오차가 발생할 수 있는 다음의 조건을 검사한다.

$$b^2 - 4ac > \delta \quad (21)$$

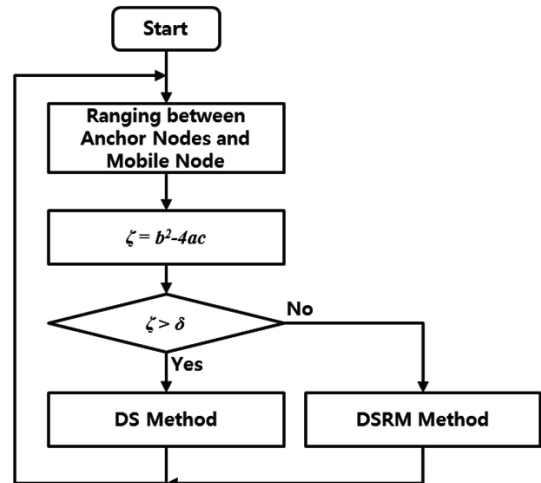


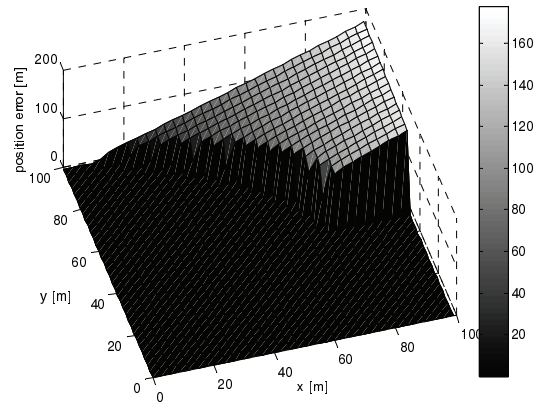
그림 1. 혼합 폐쇄형 해 순서도.
Fig. 1. Flow-chart of hybrid closed-form solution.

만약 (21)이 만족되면 DS 기법의 해가 작은 오차 범위 내에서 추정될 수 있다. 그러나 (21)이 만족되지 않으면 해당 DS 기법의 추정 해는 큰 오차를 포함할 수 있으므로 DSRM 기법의 추정 해를 사용한다. 이때 δ 는 양의 작은 값으로 설정한다. 그 이유는 DS 기법에서 δ 값이 허수가 나오지 않더라도 그 근처에서 오차가 생길 수 있기 때문에 여유 공간을 둔 것이다. 정리하면 다음과 같다.

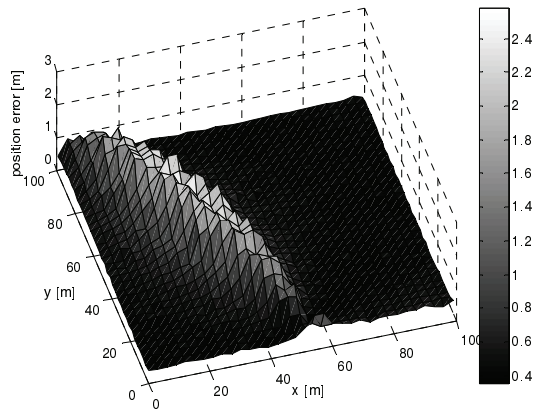
만약 $b^2 - 4ac > \delta$ 이면 (2)를 통해 후보 해를 계산하고 두 후보 해 중에서 (9)를 통해 계산된 잔차가 작은 해를 선택한다. 만약 $b^2 - 4ac \leq \delta$ 이면 (20)을 통해 계산된 해를 최종 해로 선정한다. 이때 δ 는 응용구간 및 거리추정 오차를 고려한 시뮬레이션을 통해 양의 작은 값으로 설정한다.

III. 시뮬레이션 기반 문제점 확인 및 제안된 기법의 성능 검증

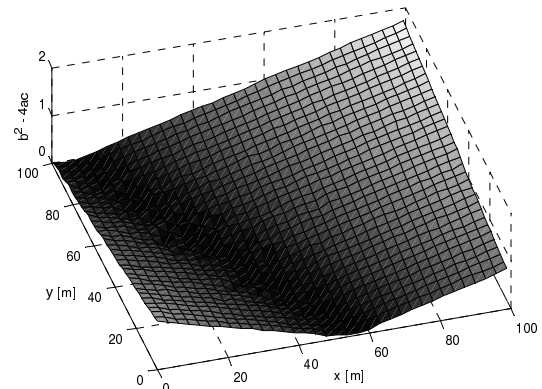
본 논문에서 정의한 위치추정 기법들의 문제점들을 확인하고 제안된 기법의 성능을 검증하기 위하여 MATLAB 기반으로 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 횟수는 100번으로 하였으며 응용구간 및 고정 노드의 위치는 그림 2와 같이 설정하였다. 3개의 고정 노드를 설정하였으며 응용구간 내에서 3m 간격으로 모바일 단말이 위치한다고 가정하였다. 거리추정 랜덤 오차는 $1m(3\sigma)$ 로 설정하였다. 이 시뮬레이션 환경 기반으로 한 시뮬레이션 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)는 ILS 기법의 위치추정 오차를 나타낸 것으로 오른쪽 위의 응용구간에서는 LM 문제가 발생하여 큰 위치추정 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 시뮬레이션에서 초기 위치는 (0, 0)으로 설정하였다. 이 문제는 참고문헌 [12]을 통해 해결될 수 있다. 그러나 그림 3(f)에 나타낸 것처럼 타 기법에 비해 처리 시간이 많이 소요된다. ILS 기법의 반복처리를 위한 공칭점 오차 추정치의 문턱값(threshold)을 0.001m로 설정한 것으로 위치에 따라 다른 처리 시간이 소요되는 것을 볼 수 있다. LM 문제 해결 알고리즘을 사용하는 경우 처리 시간이 그림 3(f)에서 나타낸 것보다 최대 4배로 증가할 것이다. 처리 시간은 MATLAB에서 'tic/toc' 명령어를 사용하여 계산하였다. 그림 3(b)는 DS 기법의 위치추정 오차를 나타낸 것으로 고정 노드 2와 3을 잇는 선 및 이를



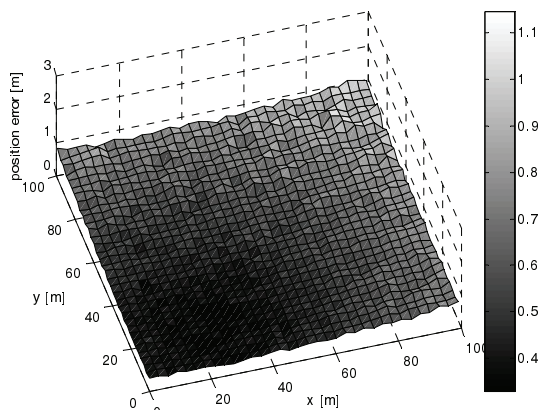
(a) ILS method: location estimation errors.



(b) DS method: location estimation errors.



(c) DS method: $b^2 - 4ac$.



(d) DSRM method: location estimation errors.

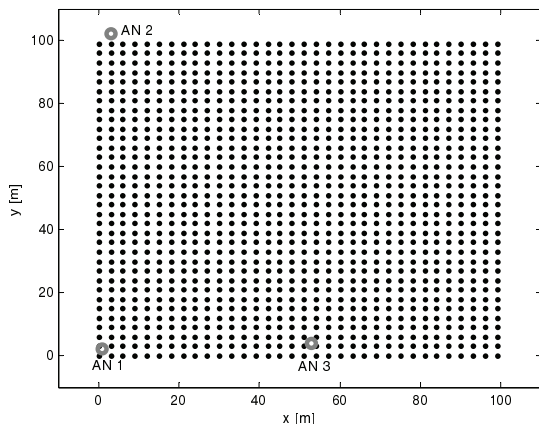
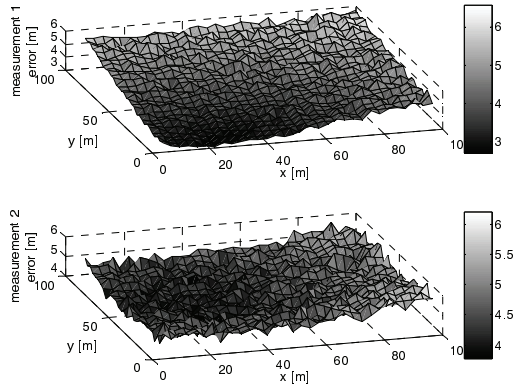
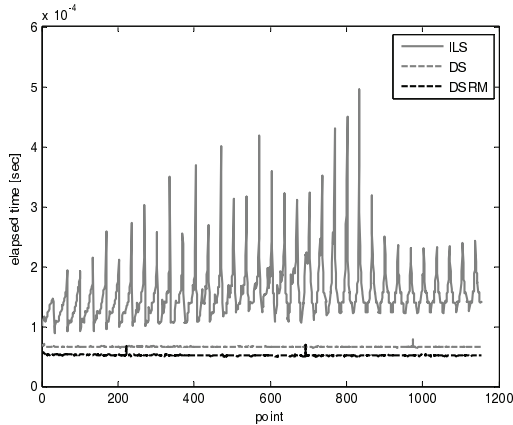


그림 2. 응용구간 및 고정 노드.
Fig. 2. Application area and anchor nodes.



(e) DSRM method: measurement errors.



(f) Processing times according to localization methods.

그림 3. 기존 위치추정 기법 결과 및 문제점.

Fig. 3. Results and problems of the conventional localization methods.

중심으로 한 주위 영역에서 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 그 이유를 분석하기 위해 응용구간 내에서 (2)의 $b^2 - 4ac$ 를 그림 3(c)에 나타내었다. 이 그림을 통해 고정 노드 2와 3을 잇는 선 위에서 이 값이 0에 가까운 값을 갖는 것을 볼 수 있다. DSRM의 위치추정 오차는 그림 3(d)에 나타내었다. 여기서 공통 노드는 고정 노드 3으로 설정하였다. 이 그림에서 고정 구간으로부터 멀리 떨어지는 응용구간의 오른쪽 쪽 영역으로 갈수록 오차가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그 원인을 분석하기 위해 측정치 오차를 그림 3(e)에 나타내었다. 여기서 측정치 오차는 (13)에 나타나 있는 측정치 오차에 해당하는 것을 거리 오차로 나타낸 것으로 다음과 같이 계산한 것이다.

$$e_i = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} \sqrt{(\rho_{A,M} \delta \rho_{A,M} - \rho_{A_3,M} \delta \rho_{A_3,M}) + (\delta \rho_{A,M}^2 - \delta \rho_{A_3,M}^2) / 2} \quad (22)$$

그림 3(d)와 (e)를 분석한 결과 결국 거리추정에 발생한 백색 잡음이 식 유도과정에서 거리 정보와 연관되어 발생하는 측정치 오차에 의해 위치추정 오차가 발생하는 것을 볼 수 있으며 결과적으로 모바일 단말이 고정 노드들로부터 멀어질수록 위치추정 오차가 커지게 된다. 따라서 앞 장에서 정의한 기존의 위치추정 알고리즘의 문제점이 실 환경에서 그대로 발생하는 것을 확인할 수 있다.

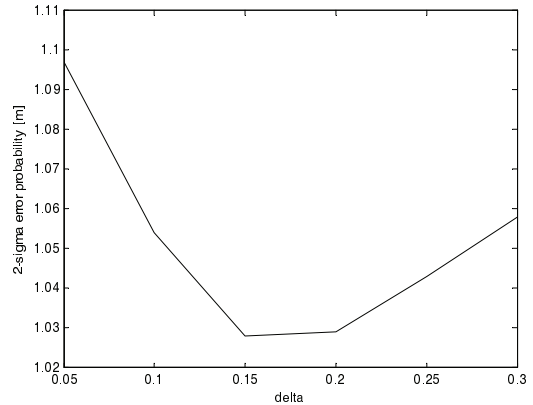
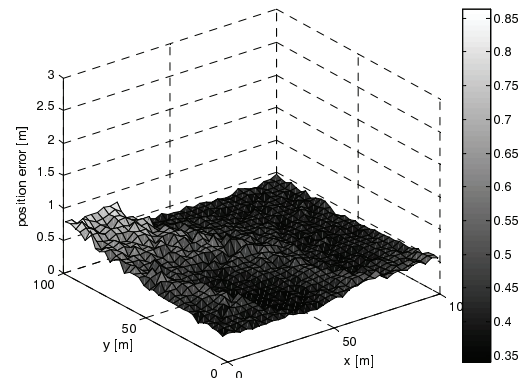


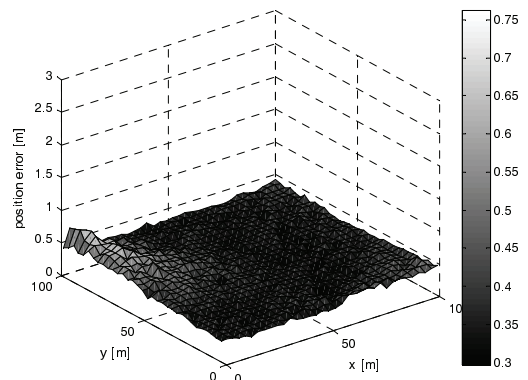
그림 4. δ 에 따른 오차 확률(2σ (95%)).

Fig. 4. Error probability according to δ (2σ (95%)).

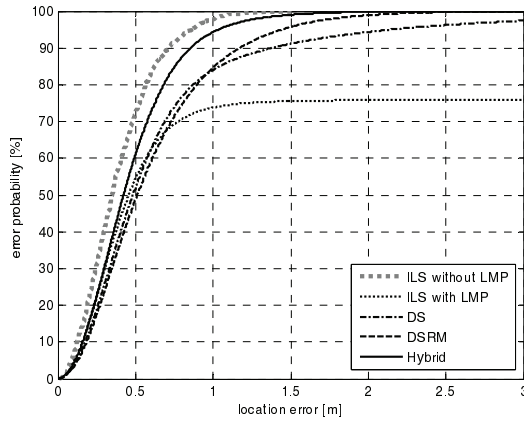
이 문제를 해결하기 위해 제시된 혼합형 기법의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 (21)의 δ 를 설정하기 위해 이 값을 변화시키며 혼합형 기법을 수행한 다음 그 결과의 오차 확률 2σ (95%)를 그림 4에 나타내었다. 이 결과를 기반으로 0.15로 최종 설정하였다. 그림 5와 표 1에서 혼합형 기법의 결과를 나타내었다. 이 결과는 그림 3(b)와 (d)를 혼합한 것으로 (21)의 조건에 의한 결과이다. 이 결과에서 왼쪽 위의 영역에서 오차가 다소 크게 나타나는 것은 그림 3(b), (d)에서 확인할 수 있듯이 이 영역에서 DS 및 DSRM 기법 모두에서 오차가 나타나기 때문이다. 그림 5(b)는 LM 문제를 해결한 경우의 ILS 기법의 추정 오차를 나타낸 것으로 혼합형 해 보다 오차가 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그



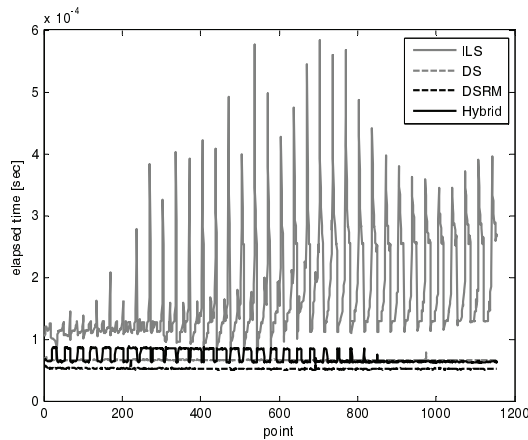
(a) Hybrid method: location estimation errors.



(b) ILS method (without LM problem): location estimation errors.



(c) Error probability.



(d) Processing time according to localization methods.

그림 5. 혼합형 기법의 위치추정 결과와 기존 기법과의 비교.
Fig. 5. Localization results of the hybrid method and comparison with conventional methods.

표 1. 위치추정 기법에 따른 오차 확률(3σ (99.7%)).

Table 1. Error probability according to the localization method (3σ (99.7%)).

위치추정 기법	LM 문제를 해결하지 않는 ILS	LM 문제를 해결한 ILS	DS	DSRM	Hybrid
오차 [m]	174.130	1.295	5.276	2.405	1.820

러나 오차 발생 형태는 혼합형 해와 유사함을 알 수 있다. 오차 확률을 그림 5(c)와 표 2에 나타내었으며 그 결과 제안한 혼합형 기법이 기존의 폐쇄형 해 및 LM 문제를 해결하지 않는 ILS 기법에 비해 우수함을 확인할 수 있다. 또한 LM 문제를 해결한 ILS 기법의 성능이 타 기법에 비해 가장 우수함을 알 수 있다. 그러나 본 논문에서 제시하는 혼합형 해는 ILS 기법에 비해 그림 5(d)에서 나타난 것과 같이 계산량이 매우 작은 폐쇄형 해 이므로 실시간 안정적인 구현을 고려할 때 그 유용함을 본 시뮬레이션을 통해 알 수 있다.

결과적으로 본 논문에서 정의한 기존의 위치추정 알고리즘들의 문제점들을 확인할 수 있으며 이 문제를 해결하기 위해 제안된 혼합형 기법의 성능이 우수함을 시뮬레이션을 통해 알 수 있다. 따라서 본 기술은 거리정보 기반 위치추정

응용 분야에 널리 사용될 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 거리정보 기반 위치추정 기술에서 기존의 추정 기법들의 문제점을 정의하였다. ILS 기법은 폐쇄형 해에 비해 계산량이 많으며 LM 문제점을 갖고 있다. 폐쇄형 해 중 DS 기법은 고정 노드들의 위치와 거리측정 오차와의 관계에 의해 허수 해가 발생할 수 있으며 허수 해 발생 가능 지역 주위에서 큰 위치추정 오차가 발생한다. 그리고 DSRM 기법은 모바일 단말의 위치가 고정 노드들로부터 먼 경우 거리측정 오차가 거리정보와 연관하여 큰 위치추정 오차가 발생한다. 이렇게 정의된 문제점을 시뮬레이션 기반으로 증명하였으며 DS 기법과 DSRM 기법을 결합한 혼합형 위치추정 기법을 제시하고 그 성능을 시뮬레이션 기반으로 검증하였다. 본 논문에서 제시하는 혼합 폐쇄형 해 형태의 위치추정 기법은 거리정보 기반 위치추정 분야에서 정확성 및 안정적인 해 제공을 위해 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대 된다.

REFERENCES

- [1] T. Kitasuka, T. Nakanishi, and A. Fukuda, "Design of WiPS: WLAN-based indoor positioning system," *KMMS*, vol. 7, no. 4, Dec. 2003.
- [2] S. Y. Cho, "Localization of the arbitrary deployed APs for indoor wireless location-based applications," *IEEE Trans. Consumer Electronics*, vol. 56, no. 2, pp. 532-539, May 2010.
- [3] O. Hernandez, V. Jain, S. Chakravarty, and P. Bhargava, "Position location monitoring using IEEE 802.15.4/ZigBee technology," in *Proc. of Freescale's Wireless Connectivity Operation in Mexico*, pp. 67-73.
- [4] E. J. Park, S. Lee, K. C. Lee, and H. H. Kim, "ZigBee location-based human adaptive HVAC system for intelligent building system," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 8, pp. 750-757, Aug. 2012.
- [5] S. Y. Cho and Y. W. Choi, "Access point-less wireless location method based on peer-to-peer ranging of impulse radio ultra-wideband," *IET-Radar, Sonar, and Navigation*, vol. 4, no. 5, pp. 733-743, 2010.
- [6] M. J. Segura, F. A. Auat Cheein, J. M. Toibero, V. Mut, and R. Carelli, "Ultra wide-band localization and SLAM: A comparative study for mobile robot navigation," *Sensors*, vol. 11, pp. 2035-2055, 2011.
- [7] S. Y. Cho and J. Y. Kim, "Multi-pedestrian localization system using P2P ranging information among CSS communication modules," *Telecommunications Review*, vol. 22, no. 4, Aug. pp. 611-628, 2012.
- [8] D. H. Shin and T. K. Sung, "Comparisons of position error characteristics and DOP between TOA and TDOA technique," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 6, no. 10, pp. 923-928, Oct. 2000.
- [9] M. Bocquet, C. Loyez, and A. Benlarbi-Delai, "Using Enhanced_TDOA measurement for indoor positioning," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 10, pp. 612-614, 2005.
- [10] S. H. Lee, D. H. Kim, G. H. Roh, K. S. Park, and T. K. Sung, "Development of an AOA location method using self-tuning weighted least square," *Journal of Control, Automation and*

Systems Engineering (in Korean), vol. 13, no. 7, pp. 683-687, Jul. 2007.

- [11] B. Li, Y. Wang, H. K. Lee, A. Dempster, and C. Rizos, "Method for yielding a database of location fingerprints in WLAN," *IEE Proceedings - Communications*, vol. 152, no. 5, pp. 580-586, 2005.
- [12] S. Y. Cho, "Local minimum problem of the ILS method for localizing the nodes in the wireless sensor network and the clue," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 10, pp. 1059-1066, Oct. 2011.
- [13] I. Biton, M. Koifman, and I. Y. Bar-Itzhack, "Improved direct solution of the global positioning system equation," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 21, no. 1, pp. 45-49, 1998.



조성운

1998년 광운대학교 제어계측공학과 졸업. 2000년 동 대학원 졸업(공학석사). 2004년 동대학원 졸업(공학박사). 2004년 서울대학교 기계항공공학부 BK21 박사 후 연구원. 2004년 9월~현재 한국 전자통신연구원(ETRI) 선임연구원. 2008

년 3월~2013년 2월 과학기술연합대학원대학교(UST) 겸임교수. 관심분야는 항법기술(INS/GPS/Vision/Map 결합항법기술, PDR, WSN 및 무선위치추정기술), MEMS 센서 응용, 선형/비선형 필터 설계, Telematics/LBS.