

# 비선형적 최소제곱법을 위한 효율적인 위치추정기법

이정규\*, 김영준\*, 김성철<sup>o</sup>

## Efficient Localization Algorithm for Non-Linear Least Square Estimation

Jung-kyu Lee\*, YoungJoon Kim\*, Seong-Cheol Kim<sup>o</sup>

### 요약

본 논문은 비선형적 최소제곱법을 위한 효율적인 위치추정기법 연구를 하였다. 비선형적 최소제곱 방식은 선형적 최소제곱 방식에 비해 정확도가 높으며 거리 오차에 대해서 보다 강인한 추세를 보이지만 회기적인 방법을 취하기 때문에 계산량이 매우 많아지는 단점이 있다. 본 논문에서는 비선형적 최소제곱 위치 추정 방식인 Newton method와 Levenberg-Marquardt 방식을 이용하였을 때 추정 위치 정확도와 복잡도 간의 기회비용 관점에서 효율적인 알고리즘을 제시하여 계산량을 줄이면서 성능 열화를 방지할 수 있는 기법을 제시하였다. 시뮬레이션 결과로 추정 위치 정확도와 회기(iteration) 횟수를 구하고 선형적 방식의 위치 추정 성능, 기존의 비선형적 방식, 제안한 방식에 대해 비교 분석하여 제안한 알고리즘을 검증하였다.

**Key Words** : Localization, Non-linear least square estimation, Low complexity

### ABSTRACT

This paper presents the study of the efficient localization algorithm for non-linear least square estimation. Although non-linear least square(NLS) estimation algorithms are more accurate algorithms than linear least square(LLS) estimation, NLS algorithms have more computation loads because of iterations. This study proposed the efficient algorithm which reduced complexity for small accuracy loss in NLS estimation. Simulation results show the accuracy and complexity of the localization system compared to the proposed algorithm and conventional schemes.

### I. 서론

최근 위치추정방식에 대한 연구는 매우 활발하게

진행되고 있으며 상업적으로 이용되고 있는 기술은 GPS 기반 위치 추정 방식이다<sup>[1]</sup>. GPS의 장점은 매우 정확한 시간 동기화, LOS(Line of Sight) 환경, 범지

\* This research was supported by a grant to Bio-Mimetic Robot Research Center funded by Defense Acquisition Program Administration.

\* This work has been supported by the National GNSS Research Center program of Defense Acquisition Program Administration and Agency for Defense Development.

• First Author : Institute of New Media and Communications, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, minishao@maxwell.snu.ac.kr, 학생회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : Institute of New Media and Communications, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, sckim@maxwell.snu.ac.kr, 종신회원

\* Institute of New Media and Communications, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, cylton@maxwell.snu.ac.kr, 학생회원

논문번호 : KICS2014-09-375, Received September 30, 2014; Revised December 5, 2014; Accepted January 6, 2015

구적으로 이용가능하기 때문에 범용성과 정확성을 갖고 있으며 GPS 신호를 수신할 수 있는 수신기만 있다면 무료로 이용가능하기 때문에 상업적인 시스템인 위치기반서비스(Location Based Service)에서는 매우 큰 부분을 차지하고 있다. 하지만 복잡한 도시 환경이나 실내 환경에서는 GPS 신호가 도달하기 힘들며 정확한 위치를 추정하기 힘들기 때문에 보다 정확한 위치를 추정하기 위해서는 기존의 기지국들을 이용하여 RF 기반 위치 추정 방식을 이용한다.

RF를 이용한 위치 추정 방식으로는 시간 지연을 이용한 TOA(Time of Arrival)와 TDOA(Time Difference of Arrival)<sup>[2,3]</sup>, 전파 수신강도를 기반으로 하는 RSSI(Received Signal Strength Indicator)방식<sup>[4,5]</sup>으로 거리를 추정한 후 원의 방정식을 구해 위치를 추정하는 방식이 있으며 추정 각도를 이용하여 위치를 추정하는 기술로는 AOA(Angle of Arrival)기술이 있다<sup>[6]</sup>. 추정 각도를 기반으로 하는 AOA 방식은 최소 2개의 기지국만 있어도 위치를 추정할 수 있다는 장점이 있지만 항상 LOS 환경을 만족해야 되며 각도를 추정하기 위한 다중 안테나(Antenna Array)가 필요하기 때문에 추정 거리 기반 위치 추정 시스템에 비해 복잡한 하드웨어가 필요하다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 추정 거리를 기반으로 위치를 추정하는 가장 대표적인 방식인 최소 제곱법에 대해서 소개하고 그 중 비선형적 최소 제곱법에서의 효율적인 위치 추정 알고리즘을 제안하였다.

추정 거리 기반 위치 추정 시스템은 거리를 추정한 후 위치를 알고 있는 송신기의 좌표 및 추정 거리를 이용하여 최소제곱법으로 위치를 추정한다<sup>[7,8]</sup>. 하지만 추정 거리는 다중경로, 회절, 난반사 등의 환경적 오차를 지니며, 단말기의 시간 동기화 차이에 대한 시스템적 오차 또한 지니고 있으므로 정확히 거리를 추정하기 힘들며 부정확한 추정거리로 인하여 추정 위치 오차가 발생하게 된다. 부정확한 추정 거리로 인한 추정 위치 오차를 최소화 하는 방식인 최소 제곱법은 선형적 최소제곱 방식(LLS)<sup>[9]</sup>과 비선형적 최소제곱 방식(NLS)<sup>[10]</sup>으로 나눌 수 있다. 선형적 방식은 송신기의 위치와 수신기간의 추정 거리를 이용하여 원의 방정식을 구한다음 각 원의 방정식들을 연립하여 선형적 방정식으로 계산한 후 행렬을 구성하여 닫힌 해(closed-form)로 계산하는 방식이며 간단한 역행렬 계산으로 추정 위치를 구할 수 있다. 비선형적 최소제곱 방식은 회기적인 방법을 이용하여 추정 좌표를 업데이트 하며 계산하는 방식으로 선형적 최소제곱 방식에 비해 추정 위치 정확도는 높지만 계산 량은 추정

좌표가 수렴하기까지의 회기 횟수만큼 증가하는 단점이 있다. 하지만 주어진 정보가 송신기의 좌표 및 추정 거리만을 가지고 위치를 추정해야 되기 때문에 정확도가 가장 중요한 지표가 되는 위치 추정 시스템에서는 적은 정보량으로 최대의 효과를 얻을 수 있는 비선형적 최소제곱 방식이 좋다.

비선형적 최소제곱 방식의 가장 큰 단점은 선형적 최소제곱 방식에 비해 계산 량이 많다는 점인데 계산 량이 많아질 경우 위치를 추정할 수 있는 시간이 증가하여 실시간 위치 추정 시스템(Real Time Localization System)에 적용하기 힘들기 때문에 이런 문제를 해결하기 위해 회기 방식을 감소시킬 수 있는 방안이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 정확한 위치를 추정하기 위한 비선형적 최소제곱 방식에서 회기 횟수를 감소시켜 추정 좌표를 구하기 위한 계산 량을 줄이는 방법을 제안한다.

논문의 나머지 내용으로 2장에서는 LLS와 NLS 위치 추정 기법에 대해서 설명을 하고 3장에서는 효율적인 추정 기법에 대한 알고리즘을 제안하며, 4장에서는 시뮬레이션을 통하여 추정 위치 오차를 이용해 제안한 방법에 대한 결과를 분석하고 마지막 5장에서는 결론을 맺는다.

## II. 최소제곱 위치 추정 기법

최소제곱 위치 추정 기법에는 선형적 기법과 비선형적 기법으로 나눌 수 있다. 두 가지 기법의 성능평가 지표로 추정 위치 정확도와 계산 복잡도를 가장 비중 있게 다룬다. 본 절에서는 선형적 최소제곱 방식과 비선형적 최소제곱 방식의 차이를 소개하고 비교한다.

### 2.1 선형적 최소제곱 위치 추정 기법

선형적 최소제곱 위치 추정 방식은 적어도 3개의 위치 좌표를 알고 있는 송신기와 수신기 간의 추정거리와 송신기의 위치를 기준으로 하는 원의 방정식으로 표현된 식을 행렬로 정리한 다음 역행렬을 계산하여 추정 좌표를 구한다. 따라서 정리된 행렬식을 닫힌해(Closed form)에 대한 계산으로 간단히 추정 위치를 얻을 수 있으며 연결된 수신기가 증가하여 행렬의 크기가 증가하더라도 의사 역행렬(pseudo inverse)을 이용하여 추정 위치를 계산할 수 있다. 선형적 최소제곱 위치 추정 방식을 수식으로 나타내면 다음과 같다<sup>[11]</sup>.

$$(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2 = \hat{d}_i^2, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$x_i, y_i$ 는 각 송신기의 직교 좌표계 위치,  $x_r, y_r$ 은 수신기의 추정 좌표,  $\hat{d}_i$  각 송신기별 수신기로 부터의 추정 거리를 의미한다. 식 (1)을 행렬식으로 정리하면 다음과 같다.

$$A\hat{X}=b \tag{2}$$

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_1-x_N) & 2(y_1-y_N) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{N-1}-x_N) & 2(y_{N-1}-y_N) \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$b = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_N^2 + y_1^2 - y_N^2 - \hat{d}_1^2 + \hat{d}_N^2 \\ \vdots \\ x_{N-1}^2 - x_N^2 + y_{N-1}^2 - y_N^2 - \hat{d}_{N-1}^2 + \hat{d}_N^2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

여기서 A 행렬은 추정 위치  $(x, y)$ 에 곱해진 계수를 모은 행렬을 의미하며 b 행렬은 알고 있는 송신기의 좌표 및 추정 거리에 대한 부분을 나타낸다. 추정 위치  $(\hat{x}, \hat{y})$ 를 벡터 x로 표현하면  $Ax = b$ 과 같이 정리 할 수 있다. 하지만 N개의 송신기(4개 이상)가 존재할 경우 x와 행렬 A의 크기(rank)가 맞지 않아 바로 역행렬을 구할 수 없기 때문에 다음과 같이 의사 역행렬(Pseudo inverse)을 이용하여 구한다.

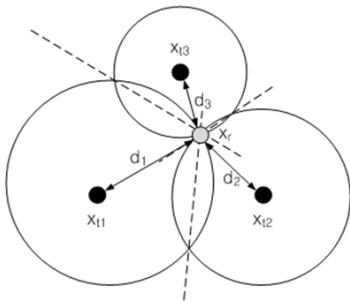


그림 1. 선형적 최소 제곱 추정  
Fig. 1. Linear least square estimation

2.2 비선형적 최소제곱 위치 추정 기법

비선형적 최소제곱 위치 추정 기법은 선형적 위치 추정 기법과 같이 기본적으로 위치를 추정하기 위해서는 위치를 알고 있는 송신기가 적어도 3개 이상 있어야 한다. 송신기와 수신기 간의 추정 거리는 오차를 포함하고 있기 때문에 정확한 추정 거리를 얻기 힘들다. 따라서 정확하지 않은 추정 거리 오차를 최소화 하는 방식이 바로 NLS 방식이며 수식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{est} = \arg \min_p \sum_{i=1}^T [\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \hat{d}_i]^2 \tag{5}$$

여기서  $P_{est}$ 는 추정 위치의 좌표  $(\hat{x}, \hat{y})$ 를 의미하며 수식 (5)를 최소로 만들어 주는 요소 p는 추정 할 수 있는 위치  $(x, y)$ 를 의미한다.  $\hat{d}_i$ 는  $i$ 번 째 송신기에서의 추정 거리를 의미하며  $(x_i, y_i)$ 는  $i$ 번 째 송신기의 위치 좌표를 의미한다.

비선형적 최소제곱 위치 추정 기법은 추정 위치 오차를 가장 작게 만들어 줄 수 있지만 최적의 값을 찾기 위해서는 많은 반복적 계산을 통해 수렴하는 값을 얻기 때문에 선형적 최소제곱 위치 추정 기법 보다 계산 량이 많은 방식이다. 반복적 계산을 통해 추정 위치를 얻기 위한 비선형적 최소제곱 위치 추정 기법 알고리즘<sup>12)</sup>은 Newton 방식과 이 방식의 단점을 보완한 Levenberg Marquardt (LM) method가 있다. 이 외에도 steepest descent 알고리즘과 Gauss Newton 방식이 있지만 추정 방식의 차이가 크지 않기 때문에 본문에서는 대표적인 비선형적 최소제곱 위치 추정 기법 알고리즘이 Newton 방식과 Levenberg-Marquardt 방식에 대해 효율적인 방법을 제안하였다. 비선형적 최소제곱 위치 추정 기법의 기본 형태는 다음과 같다.

$$\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k - t_k Q(\hat{X}_k) F(\hat{X}_k) \tag{6}$$

여기서  $\hat{X}_k$ 는  $k$ 번 째 회기에서의 추정 위치 좌표를 의미하며  $t_k$ 는 임의의 양의 상수,  $Q(\hat{X}_k)$ 는  $F(\hat{X}_k)$ 로부터 계산되는 항목이며,  $F(\hat{X}_k)$ 는 수식 (1)을 변형한  $(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2 - \hat{d}_i^2$ 에 대한 행렬이 된다.

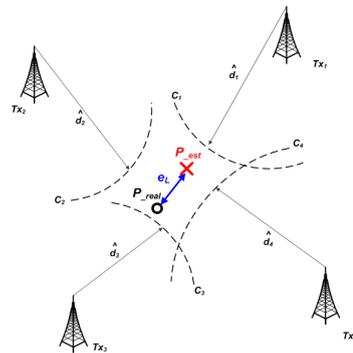


그림 2. 비선형 최소 제곱 추정  
Fig. 2. Non-least square estimation

Newton 방식에서는 수식 (6)에서의  $t_k Q(\hat{X}_k)$ 가  $t_k Q(\hat{X}_k) = \left[ \frac{\partial}{\partial \hat{X}_k} F(\hat{X}_k) \right]^{-1}$  와 같이 정의되며 추정 위치는 다음과 같이 업데이트 된다.

$$\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k - \left[ \frac{\partial}{\partial \hat{X}_k} F(\hat{X}_k) \right]^{-1} F(\hat{X}_k) \quad (7)$$

수식 (7)에 의해 추정 위치는 한 값으로 수렴하게 된다. Newton 방식과 달리 LM 방식은 수식 (7)에서의 역행렬 부분에 non-negative 상수를 더해 역행렬이 존재하지 않을 수 있는 가능성을 줄여준다. 위치를 추정할 때 목적 함수  $F(\hat{X}_k)$ 를 이루는 값들은 송신기의 좌표 값이기 때문에 만약 송신기의 위치가 선형적으로 분포되는 특성일 경우 역행렬이 존재하지 않을 수도 있으며 정확한 선형적인 분포가 아니더라도 x 축 혹은 y 축에 대한 행렬의 고유 값이 다른 한 쪽에 비해 매우 작아져 정확한 위치 추정이 힘든 상황이 발생할 수 있다<sup>[13]</sup>. LM 방식은 이런 Newton 방식의 단점을 보완해줄 수 있다. LM 방식의 업데이트 파라미터인  $t_k Q(\hat{X}_k)$ 는

$$t_k Q(\hat{X}_k) = \left[ \frac{\partial}{\partial \hat{X}_k} F(\hat{X}_k)^T \frac{\partial}{\partial \hat{X}_k} F(\hat{X}_k) + \alpha_k R_{\hat{X}_k} \right]^{-1} \frac{\partial}{\partial \hat{X}_k} F(\hat{X}_k)^T$$

로 정의되며 추정 위치는 다음과 같이 업데이트 된다.

$$\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k - \dots \left[ \frac{\partial}{\partial \hat{X}_k} F(\hat{X}_k)^T \frac{\partial}{\partial \hat{X}_k} F(\hat{X}_k) + \alpha_k R_{\hat{X}_k} \right]^{-1} \frac{\partial}{\partial \hat{X}_k} F(\hat{X}_k)^T F(\hat{X}_k) \quad (8)$$

여기서  $\alpha_k$ 는 양의 상수,  $R_{\hat{X}_k}$ 는  $\hat{X}_k$ 를 구하기 위해 정리된 행렬식 크기만큼의 정치행렬(positive-definite matrix)을 의미하며 대표적인 정치행렬인 단위행렬로 간단히 계산하였다.

위에서 설명한 두 가지 기법에 대해서 정리하면 Newton 방식은 양의 상수  $\alpha_k$  값이 없기 때문에 LM 방식에 비해 회기 횟수가 적은 반면 업데이트 되는 추정 좌표 값에 따라 역행렬이 존재할 수 없거나 singular 행렬에 가까운 값으로 계산 될 경우 계산이 제대로 되지 않는 단점이 있다. 주로 빠른 추정 값을 계산하기 위해서는 Newton 방식을 이용하는 것이 좋지만 안정적으로 추정하기 위해서는 LM 방식을 이용하는 것이 좋다. 업데이트 식에서 역행렬을 계산해야

되는 부분인  $\frac{\partial}{\partial \hat{X}_k} F(\hat{X}_k)$ 는 송신기의 좌표 및 추정 좌표 값에 대한 행렬로 표시가 되며 이는 송신기 좌표의 설정에 따라 결정되기 때문에 주어진 상황에 따라 위치 추정 방법을 결정해야한다. 두 가지 비선형적 위치 추정 방식의 공통된 단점은 송신기의 수가 증가할수록 전역적 최적해(global optimum)에 도달하기 전에 국부 최적해(local optimum)에 회기가 종료 될 가능성이 커지는 문제가 있으며 이 부분은 초기 값 설정에 따라 결과 값이 틀러지기도 한다는 점이다.

### III. 효율적인 비선형적 최소제곱 위치 추정 기법

비선형적 방식으로 위치를 추정할 때 중요한 요소로는 초기 값 설정, 목적 함수, 회기 방식으로 나눌 수 있다. 초기 값을 추정하려는 환경 안에서의 임의의 좌표 값으로 줄 수 있기 때문에 측위 시스템 안에서 정해진 값이라고 가정할 수 있으며 목적 함수는 수식 (7), (8)과 같이 위치를 추정하려는 방식에 따라 수식이 정해져 있기 때문에 본 논문에서는 비선형적 최소제곱 위치 추정 기법에 대한 효율적인 회기 방식을 제안하였다. 회기 횟수를 감소시켜 계산 량을 줄이기 위해서는 목적 함수에 대한 수렴 값 설정이 중요하다. 수식 (5)에서 볼 수 있듯이 추정 위치와 모든 추정 거리와의 차이의 합을 가장 적게 하는 위치를 찾게 되는데 그 차이의 합이 이전의 회기 때의 오차의 합보다 더 이상 작아지지 않을 때 추정 값이 수렴하였다고 판단하게 된다. 하지만 추정 값이 수렴하기 까지 필요한 회기 횟수 중에는 절대적인 차이가 그리 크지 않더라도 수렴할 때까지 계속 회기를 진행하므로 정확도의 이득에 비해 계산 량이 많아지는 현상이 발생한다. 이런 부분에 대해서 얼마간의 추정 위치 오차를 수용한다면 매우 적은 계산 량으로 수렴된 추정 위치를 얻을 수 있다. 먼저 기존의 방식에서 추정 좌표 값이 수렴하는 경우는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$C_k = \sum_{i=1}^T [\sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2} - \hat{d}_i]^2 \quad (9)$$

수식 (5)를 최소화 하는 좌표  $(x_c, y_c)$ 를 추정하는 것이 목적이기 때문에 수식 (9)와 같이 추정 좌표를 수식 (5)에 넣어 계산한 값의 합이 이전 추정 좌표보다 작아질 때까지 추정 좌표를 업데이트 하게 된다. 즉 추정 좌표가 추정 거리  $\hat{d}_i$ 로부터 구해진 원의 방정

식들과의 거리 차이가 최소가 될 때까지 계산을 하게 된다. 수식 (9)가 최소가 되었다는 의미는 이전의 회기보다 값이 더 이상 작아지지 않는 경우를 의미하며 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$C_{k-1} - C_k < 0 \tag{10}$$

수식 (10)처럼 이전 회기의 결과 값보다 현재 회기의 결과 값이 더 클 경우 이전 회기의 추정 좌표의 값이 더 이상 줄어들지 않는 최적의 값이라고 판단하여 추정 위치 좌표로 판단할 수 있다. 추정 좌표를 최적화 하는 방식은 수식 (10)처럼 더 이상 줄어들지 않는 회기까지 추정 좌표를 업데이트 하는 것이 맞지만 추정 위치의 정확도는 절대적인 거리로서 표현이 되기 때문에 추정 좌표의 수렴 구간을 설정해주는 것이 회기 횟수를 줄일 수 있는 방법이 된다. 따라서 본 논문에서는 추정 좌표의 수렴구간을 설정하는 방법에 대해서 다음과 같이 제안하였다.

$$C_{k-1} - C_k < \delta_{th} \tag{11}$$

$$\delta_{th} = C_{k-1} \times P_{percent} \tag{12}$$

이전 회기의 오차 값 보다 현재의 회기의 오차 값의 차이가 항상 양의 값을 갖는 한계 값(threshold)  $\delta_{th}$  보다 작게 되면 수렴하였다고 판단하고 한계 값  $\delta_{th}$ 를 정하는 방식을 수식 (12)로 표현하였다. 기존의 방식은 항상 이전 회기의 오차 값보다 현재 회기의 오차 값이 작아져야 되며 더 이상 작아지지 않을 경우 수렴하였다고 판단하지만 수렴을 하면 할수록 그 차이는 작아지기 때문에 비효율적인 회기 횟수만을 증가시키는 현상이 발생한다. 이런 현상을 방지하기 위해 한계치  $\delta_{th}$  값을 지정해 주면 큰 성능 열화 없이 계산량을 줄일 수 있다.  $\delta_{th}$  값은 이전 회기의 오차 값  $C_{k-1}$ 의 비율(%)로 설정하며 회기가 진행될 때마다  $C_{k-1}$  값과 함께 한계 값 또한 함께 변하기 때문에 기존의 방식의 추정 수렴 값을 크게 변화시키지는 않으면서 회기 횟수는 크게 감소시킬 수 있다. 제안한 방식에 대한 성능 분석은 다음 장에서 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 환경은 10m X 10m 실내 환경에서 Testbed 중심으로 하는 원에 같은 간격으로 송신기를

설치한다. 추정 거리 오차는 Gaussian 정규 분포를 갖게 하였으며 거리에 따라 그 크기를 비례적으로 변하게 설정하였다. 각 시뮬레이션 횟수는 10만 번의 Monte-Carlo 시뮬레이션<sup>[14]</sup>을 수행하였고 최대 회기 횟수는 100번으로 설정하였다. 비선형적 최소제곱 위치 추정 기법들의 초기 값은 Testbed의 중심으로 두어 (5, 5)에서 시작하도록 설정하여 초기 값에 의해 회기 횟수가 급격히 증가하는 것을 방지하였다. 제안한 알고리즘의 한계치  $\delta_{th}$ 는 회기 과정에서 추정 위치와 추정 거리간의 차이의 합,  $C_k$ 을 업데이트 오차로 정의할 때 그 오차의 0.5%, 1%의 값을 한계치로 두어 수렴 구간을 확장시켰다.

그림 3은 추정 거리 오차를 추정 거리 대비 20% 오차를 가우시안(Gaussian) 정규 분포<sup>[15]</sup>를 따르는 환경에서의 각 3개의 위치 추정 알고리즘 결과를 나타낸다. 3개 알고리즘 모두 송신기의 수가 증가할수록 위치 추정 정확도가 증가하는 것을 볼 수 있으며 LM 방식이 다른 방식에 비해 위치 추정 정확도가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만 LM 방식이 Newton 방식에 비해 위치 추정 정확도는 높지만 회기 횟수가 매우 크다. 회기 횟수가 증가하면 전체 시스템의 계산량이 증가하기 때문에 실시간 위치 추정을 할 때는 매우 불리한 점으로 작용한다. 추정 위치를 구하기 위한 시간 및 하드웨어의 한계를 고려하면 작은 오차를 감안하더라도 추정 값으로 수렴하기 위한 회기 횟수를 줄여주는 것이 좋다.

그림 4는 비선형적 최소제곱 위치 추정 기법들인 LM 방식 및 Newton 방식의 회기 횟수를 크게 줄여 주지만 위치 추정 성능의 열화를 방지한 알고리즘을 적용한 결과를 나타낸다. 제안한 알고리즘을 적용하지 않았을 경우 LM 방식은 매우 많은 회기 횟수를 갖지만 약간의 오차를 감안하여 한계 값을 주면 추정 위치에 수렴하기 위한 회기 횟수를 크게 줄여 줄 수 있다.

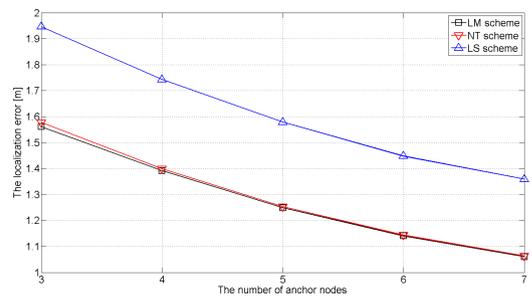


그림 3. 3가지 위치추정 방법에 대한 RMSE 분석  
Fig. 3. RMSE of three localization schemes

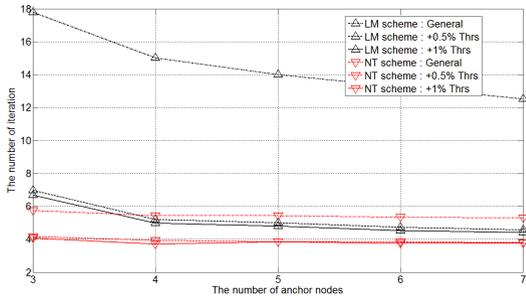


그림 4. 제안한 비선형적 최소제곱법의 회기횟수 분석  
Fig. 4. Number of iterations with proposed scheme

Newton 방식 또한 회기 횟수가 감소되는 것을 볼 수 있다.

그림 5는 같은 환경에서 제안한 알고리즘을 적용하여 위치를 추정한 결과이다. 추정 위치의 정확도는 조금 감소하였지만 회기 횟수를 크게 줄여 전체 시스템의 계산량을 감소시켰다. 선형적 최소제곱 위치 추정 기법은 보다 오차가 크게 발생하지만 한 번의 계산으로 위치를 추정할 수 있다는 장점이 있으며 비선형적 최소제곱 위치 추정 기법은 LS 기법 보다 정확도는 우수하지만 그림 4와 같이 회기 횟수에 따라 계산량이 증가한다는 단점이 있다. 위치 추정 시스템의 계산량을 줄이기 위해 제안한 알고리즘을 적용했을 때 LM 방식과 Newton 방식 모두 선형적 최소제곱 위치 추정 기법에 비해서 보다 좋은 위치 추정 결과를 얻을 수 있었으며 성능 열화에 비해 회기 횟수도 크게 줄일 수 있었다. 그림 4와 그림 5에 대한 성능 분석을 표로 정리하면 다음과 같다.

표 1을 보면 송신기 수 7개를 이용한 위치 추정 오차의 차이는 최대 1.40%로 절대치로는 0.0151m 가 발생한다. 회기 횟수는 송신기 수 3개를 이용한 위치 추정 결과에서 62.52% 감소하였으며 절대치로는 약 11.1회 정도 감소되었다.

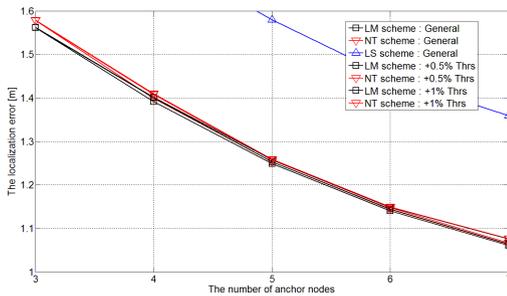


그림 5. 제안한 비선형적 최소제곱법의 RMSE 분석  
Fig. 5. RMSE of NLS schemes with proposed algorithm

표 1. The analysis of simulation results

No. AN	3	4	5	6	7
The Localization Error [m]					
LM	1.5612	1.3918	1.2488	1.1405	1.0608
LM(0.5%)	1.5615	1.4003	1.2529	1.1445	1.0644
LM(1%)	1.5621	1.4019	1.2585	1.1484	1.0759
NT	1.5779	1.3992	1.2534	1.1437	1.0632
NT(0.5%)	1.5782	1.4085	1.2576	1.1482	1.0668
NT(1%)	1.5790	1.4094	1.2588	1.1496	1.0764
The number of iteration					
LM	17.7950	15.0293	13.9967	13.2512	12.5188
LM(0.5%)	6.9778	5.1971	5.0080	4.7191	4.5821
LM(1%)	6.6692	4.9775	4.8020	4.5353	4.4025
NT	5.7527	5.4371	5.4374	5.3517	5.3013
NT(0.5%)	4.1664	3.9279	3.8491	3.8509	3.7929
NT(1%)	4.0758	3.7174	3.8415	3.7643	3.7696

## V. 결론

본 논문에서는 비선형적 최소 제곱법을 위한 효율적인 위치추정기법 연구를 하였다. 제안한 알고리즘을 통해 비선형적 최소 제곱법을 이용한 위치 추정을 할 경우 비효율적인 회기 횟수를 감소시켜 적은 계산량을 이용하여 위치를 추정할 수 있으며 이에 비해 성능 열화가 적기 때문에 매우 효율적이다. 전체 위치 추정 시스템의 계산량이 줄어들면 기존의 위치 추정 시스템보다 더 많은 송신기를 연결하여 추정하여 비슷한 계산량을 가지고 보다 정확한 위치를 추정할 수 있으며 실시간으로 위치를 추정해야 되는 시스템에도 큰 도움을 줄 수 있을 것이라 생각한다. 선형적 위치 추정 알고리즘과 함께 비교 분석을 하여 제안한 비선형적 위치 추정 알고리즘이 가져야 하는 성능 열화 한계치도 파악할 수 있었으며 각 환경 및 위치 추정 시스템에 맞는 알고리즘을 선택할 수 있도록 각 위치 추정 알고리즘의 성능을 분석하였다.

## References

- [1] B. W. Parkinson, and J. J. Spilker. *Global Positioning Systems: Theory and Applications*, vol. 1. Progress Astronautics and Aeronautics, 1996.
- [2] N. Patwari, J. N. Ash, S. Kyperountas, R. L. Moses, and N. S. Correal, "Locating the

- Nodes : Cooperative localization in wireless sensor networks,” *IEEE signal processing Mag.*, vol. 22, pp. 54-69, Jul. 2005.
- [3] J. H. Shin, H. R. Park, and E. Y. Chang, “An ESPRIT-based super-resolution time delay estimation algorithm for real-time locating systems,” *J. KICS*, vol. 38, no. 04, pp. 310-317, Apr. 2013.
- [4] J. Yang and Y. Chen, “Indoor localization using improved RSS-based lateration methods,” *IEEE GLOBECOM*, pp. 1-6, Honolulu, HI, Nov.-Dec. 2009.
- [5] J. K. Lee, S. R. Lee, and S. C. Kim, “Analysis of localization scheme for ship application using received signal strength,” *J. KICS*, vol. 39C, no. 08, pp. 643-650, Aug. 2014.
- [6] V. Y. Zhang and A. K.-S. Wong, “Combined AOA and TOA NLOS localization with nonlinear programming in severe multipath environments,” in *Proc. IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf.*, pp. 1-6, Budapest, 2009.
- [7] N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin, “Gps-less low-cost outdoor localization for very small devices,” *IEEE Pers. Commun.*, vol. 7, no. 5, pp. 28-34, Oct. 2000.
- [8] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, “Survey of wireless indoor positioning techniques and systems,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybernetics, Part C: Appl. Rev.*, vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080, Nov. 2007.
- [9] J. W. Choi, Y. S. Sung, J. S. Kang, and S. C. Kim “Localization algorithms using wireless communication systems,” *Telecommun. Rev.*, vol. 18, no. 2, pp. 261-274, Apr. 2008.
- [10] Y. Zhou, “An efficient least-squares trilateration algorithm for mobile robot localization,” *IEEE Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, pp. 3474-3479, Oct. 2009.
- [11] J. H. Park, J. K. Lee, and S. C. Kim “Algorithm of wireless localization based on RSSI at indoor environment,” *J. KICS*, vol. 36, no. 4, pp. 254-264, 2011.
- [12] J. Yan, C. Tiberius, G. Janssen, P. Teunissen, and G. Bellusci, “Review of range-based positioning algorithms,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 28, no. 8, pp. 2-27, 2013.
- [13] K. Konstantinides and K. Yao, “Statistical analysis of effective singular values in matrix rank determination,” *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, vol. 36, no. 5, pp. 757-763, 1988.
- [14] W. D. Wang and Q. X. Zhu, “RSS-based Monte Carlo localisation for mobile sensor networks,” *IET Commun.*, vol. 2, no. 5, pp. 673-681, May 2008.
- [15] N. Patwari, A. Hero, M. Perkins, N. Correal, and R. O’Dea, “Relative location estimation in wireless sensor networks,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 51, no. 8, pp. 2137-2148, Aug. 2003.
- [16] S. H. Son, H. Choi, H. T. Cho, and Y. J. Baek, “Location information reliability-based precision locating system using NLOS condition estimation,” *J. KICS*, vol. 38, no. 1, pp. 97-108, 2013.

이 정 규 (Jung-kyu Lee)



2008년 2월 : 고려대학교 전자통신공학과 학사  
 2010년 2월 : 서울대학교 전기, 컴퓨터공학부 석사  
 2010년~현재 : 서울대학교 전기, 컴퓨터공학부 박사과정

<관심분야> Localization Algorithm, Wireless Channel modeling, Automotive RADAR.

김 영 준 (YoungJoon Kim)



2012년 2월 : 서울대학교 전기공학부 학사  
 2012년~현재 : 서울대학교 전기, 컴퓨터공학부 박사과정

<관심분야> Sensor Network, Localization Algorithm, Interference Management, Wireless Channel modeling.

김 성 철 (Seong-Cheol Kim)



1984년 2월 : 서울대학교 전기공학  
학과 학사

1987년 2월 : 서울대학교 전기공학  
학과 석사

1995년 2월 : 미국 폴리테크닉  
대학교 박사

1995년~1999년 : AT&T Bell  
lab. Member of Technical Staff

1999년~2003년 : 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 조  
교수

2003년~2008년 : 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 부  
교수

2008년~현재 : 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 정교수  
<관심분야> System Engineering, Channel Modeling,  
Communication Algorithm, MIMO, Relay,  
Localization.