

# 실시간 위치추적 시스템에서 높이 오차를 고려한 TDOA 측정치 기반 테일러 급수 설계 방법

## TDOA Measurement Based Taylor Series Design Method Considering Height Error for Real-Time Locating Systems

강희원, 황동환\*, 박찬식  
(Hee Won Kang<sup>1</sup>, Dong-Hwan Hwang<sup>2</sup>, and Chansik Park<sup>3</sup>)

<sup>1</sup>Korea Ocean Research & Development Institute

<sup>2</sup>Chungnam National University

<sup>3</sup>Chungbuk National University

**Abstract:** This paper proposes a Taylor-series design method which reduces the height error of the tag when readers are arranged at the same height in 3-dimensional space. The proposed method consists of two steps. Firstly, the planar position is estimated by the Taylor-series method using the TDOA measurement. Next, the height is estimated from the estimated planar position. In order to show the validity of the proposed method, computer simulations were performed for the static case and linear trajectory of the tag. Results show that the proposed method gives convergent estimated position and better height estimate than the Taylor series method.

**Keywords:** 3-dimensional space, TDOA, Taylor-series, position tracking

### 1. 서론

물류, 항만, 의료, 군수, 제조 등에서 이동체의 위치 정보를 제공하는 실시간 위치 추적 시스템(RTLS: Real-Time Locating System)의 응용이 점차 확대되고 있다[1]. 위치를 추정하기 위하여 TDOA (Time Difference of Arrival) 측정치를 이용하는 방법은 수신부인 리더들 간의 시각 동기만을 요구하는 장점 때문에 항법(navigation), 감시(surveillance), 항공(aerospace), 지구물리(geophysics) 분야에서 많은 사람들의 관심을 받아 왔다[2,3]. 최근에는 음파를 이용하는 수중 위치 추적 시스템[2,4]이나 이동통신망을 이용하는 지상과 측위(geolocation) 등에서 TDOA 알고리즘에 관해 많은 연구 결과가 발표되고 있다[5-7]. 그런데 TDOA 측정치를 이용할 경우, 기본적으로 위치는 쌍곡선(hyperbola)을 나타내는 비선형 방정식의 교점이 되므로 계산이 복잡하다[4,6].

이제까지 발표된 TDOA 측정치 기반 위치추정 알고리즘을 살펴보면, 대부분 쌍곡선인 복잡한 비선형 방정식의 교점을 직접 구하지 않고 간단한 형태의 선형방정식으로 변형하여 해를 구한다[2,3,8]. TDOA 기반 위치추정 알고리즘은 크게 반복적으로(recursive) 위치를 구하는 테일러급수(taylor-series) 방법[8]과 직접적으로 위치를 구하는 방법으로

나눌 수 있다. 테일러 급수 방법은 직접적으로 위치를 구하는 방법에 비하여 정확한 해를 제공하지만 반복적인 시행 때문에 많은 연산량을 요구하며 시행 시작 시 선택한 초기치에 따라 해가 수렴하지 않은 수도 있다[4]. 직접적으로 위치를 구하는 방법은 정확도는 떨어지지만 한 번의 과정으로 해를 제공하므로 필요한 계산이 적으며 항상 해를 제공하는 장점을 가지고 있다[2,3]. 직접적으로 위치를 구하는 방법으로 Abel 등[2]은 SX (Spherical-Intersection)방법과 SI (Spherical-Interpolation)방법을 제안하였다. SX방법에서는 기준 리더와 태그 사이의 거리를 반지름으로 하는 구와 이 거리와 측정치인 리더사이의 거리차를 더한 것을 반지름으로 하는 구의 교점을 구하는 선형식을 유도하여 위치를 구한다. 그리고 SI 방법에서는 기준 리더와 태그 사이의 거리 오차를 최소화하도록 선형식을 유도하여 위치를 구한다. Chan과 Ho[3]는 QCLS (Quadratic Correction Least Square)방법을 제안하였는데, 기준리더와 태그사이의 거리를 변수로 두어서 2단계로 위치를 계산하는 방법으로 SX와 SI 방법보다 정확성을 향상됨을 보여주었다.

일반적으로 3차원 공간상에서 TDOA 측정치로부터 보다 정확한 위치를 구하기 위하여 테일러 방법을 이용하여 위치를 구할 때, 정확도와 수렴성이 리더의 배치의 영향을 받는 것으로 알려져 있다[9,10]. 즉, 리더의 배치도 설계의 한 요소가 될 수 있으며, 가장 쉬운 배치 중의 하나로 모든 리더를 높이가 일정한 평면상에 둘 수 있다. 이때, 테일러급수 방법으로 위치를 추정하면 높이 오차가 큰 것을 관찰할 수 있다[11,12]. 이것은 위치 계산시의 기하 행렬이 III-condition이 되어 특이(singularity) 문제가 발생하기 때문이다.

본 논문에서는 3차원 공간상에서 TDOA 측정치를 이용하여 테일러 급수 방법으로 위치를 구할 때, 리더를 높이가

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 4. 16., 수정: 2010. 6. 4., 채택확정: 2010. 6. 10.

강희원: 한국해양연구원(kaki127@nate.com)

황동환, 박찬식: 충남대학교 전자공학과

(dhhwang@cnu.ac.kr/chansp@cnu.ac.kr)

※ 본 논문은 지식경제부에서 지원한 지역연계기술개발사업 “UHF 대역 무선통신을 활용한 근거리위치추적시스템 개발”(과제번호:7004180)의 일환으로 수행되었음.

※ 본 논문은 2010년도 ICROS 학술대회에서 초안이 발표되었습니다.

일정한 평면상에 배치하여도 태그의 높이 오차를 줄일 수 있는 알고리즘을 제안하고자 한다. 수평, 수직 위치를 분리하여 순차적으로 추정하는 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 II 장에서는 알고리즘에서 사용할 TDOA 측정치에 관한 표현을 정리하였으며, III 장에서는 테일러급수 방법을 소개하였다. IV 장에서는 본 논문에서 제안하는 3차원 공간상에서 리더의 높이를 일정한 평면상에 배치하여도 태그의 높이 오차를 줄일 수 있는 테일러급수 방법에 관하여 서술한다. V 장에서는 모의실험을 통해 제안한 알고리즘의 유효성을 보였다. 마지막으로 IV 장에서는 본 논문의 결론을 맺었다.

## II. TDOA 측정치

TDOA 측정치를 이용한 위치 추적에서는 두 개의 리더로부터 측정된 신호의 도달 시간의 차이를 이용하여 태그의 위치를 구한다. 그림 1과 같이 두 개의 리더에서 거리의 차가 일정한 점의 자취인 쌍곡선 상에 태그가 존재한다. 3차원 공간에서 태그의 위치는 네 개의 리더로부터 3개의 TDOA 측정치를 구하면 세 개의 쌍곡선 방정식을 얻을 수 있으며, 이 쌍곡선들의 교점이 구하고자 하는 태그의 위치이다.

태그로부터 두 리더까지의 도달시간 차는 다음 식 (1)과 같이 거리 차이로 표현할 수 있다.

$$r_{i,j} = c[(t_i - t_j) - (t_j - t_i)] = c(t_i - t_j) = r_i - r_j \quad (1)$$

여기서  $r_{i,j}$ 는 태그와 두 리더 사이의 거리차이고,  $c$ 는 빛의 속도이고,  $t_i$ 은 태그가 신호를 송신한 시간이고,  $t_i$ 는  $i$ 번째 리더가 신호를 수신한 시간,  $t_j$ 는  $j$ 번째 리더가 신호를 수신한 시간이고,  $r_i$ 는  $i$ 번째 리더와 태그 간의 거리이고,  $r_j$ 는  $j$ 번째 리더와 태그 간의 거리이다.

## III. 테일러급수 방법[8]

테일러급수 방법은 TDOA 측정치를 표현한 비선형 방정식을 초기 위치에서 테일러급수로 전개하여 이차항 이상을 소거하여 구한 선형방정식의 최소자승해를 반복적으로 구하여 위치를 추정한다.

태그와 두 리더 사이 거리의 차이를 태그의 위치와 리더의 위치로 나타내면 식 (2)와 같다.

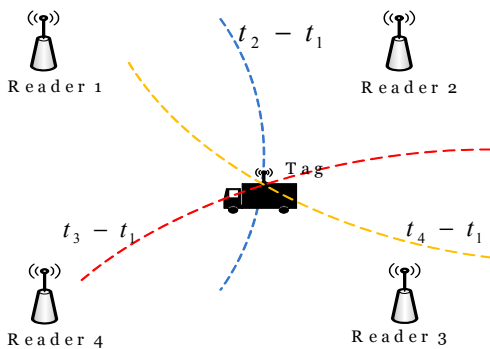


그림 1. TDOA 측정치를 이용한 위치 추적.

Fig. 1. Locating for TDOA measurements.

$$r_{i,j} = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z-z_j)^2} \quad (2)$$

여기서  $(x,y,z)$ 는 태그의 좌표이고,  $(x_i,y_i,z_i)$ 는  $i$ 번째 리더의 좌표이고,  $(x_j,y_j,z_j)$ 는  $j$ 번째 리더의 좌표이다. 식 (2)를 다음 식 (3)과 같이 표현하자.

$$r_{i,j}(x,y,z,x_i,y_i,z_i,x_j,y_j,z_j) = m_{i,j} - e_{i,j} \quad (3)$$

여기서  $m_{i,j}$ 와  $e_{i,j}$ 는 각각 3차원 공간상에서 측정된 거리 차이 측정치와 측정오차이다. 태그의 초기 추정 위치를  $(x_0, y_0, z_0)$ 라 두고 테일러급수로 전개하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{i,j} = r_{(i,j)0} + \frac{\partial r_{(i,j)0}}{\partial x_0} \delta x + \frac{\partial r_{(i,j)0}}{\partial y_0} \delta y + \frac{\partial r_{(i,j)0}}{\partial z_0} \delta z + \dots \quad (4)$$

여기서  $r_{(i,j)0}$ 는  $r_{(i,j)0}(x_0, y_0, z_0, x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j)$ 를 나타낸다. 식 (4)에서 2차항 이상을 소거하면 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$r_{i,j} \cong r_{(i,j)0} + \frac{\partial r_{(i,j)0}}{\partial x_0} \delta x + \frac{\partial r_{(i,j)0}}{\partial y_0} \delta y + \frac{\partial r_{(i,j)0}}{\partial z_0} \delta z \quad (5)$$

$N$ 개의 리더에 대해서  $j$ 를 1로 두면, 식 (5)와 같은 형태의  $N-1$ 개의 식을 얻을 수 있으며 이를 행렬로 표현하여 정리하면 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} h_{(2,1)x} & h_{(2,1)y} & h_{(2,1)z} \\ h_{(3,1)x} & h_{(3,1)y} & h_{(3,1)z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{(N,1)x} & h_{(N,1)y} & h_{(N,1)z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{2,1} - r_{(2,1)0} \\ m_{3,1} - r_{(3,1)0} \\ \vdots \\ m_{N,1} - r_{(N,1)0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_{(2,1)} \\ e_{(3,1)} \\ \vdots \\ e_{(N,1)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서  $h_{(i,1)x}$ ,  $h_{(i,1)y}$ ,  $h_{(i,1)z}$ 는 각각  $\frac{\partial r_{(i,1)0}}{\partial x_0}$  ( $i=2,3,\dots,N$ ),  $\frac{\partial r_{(i,1)0}}{\partial y_0}$  ( $i=2,3,\dots,N$ ),  $\frac{\partial r_{(i,1)0}}{\partial z_0}$  ( $i=2,3,\dots,N$ )이다. 서술을 간단히 하기 위하여 식 (6)을 식 (7)로 표현하자.

$$\mathbf{H}\delta = \mathbf{Z} \quad (7)$$

여기서  $\mathbf{H}$ 는  $\begin{bmatrix} h_{(2,1)x} & h_{(2,1)y} & h_{(2,1)z} \\ h_{(3,1)x} & h_{(3,1)y} & h_{(3,1)z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{(N,1)x} & h_{(N,1)y} & h_{(N,1)z} \end{bmatrix}$ 이고,  $\mathbf{Z}$ 는  $\begin{bmatrix} m_{2,1} - r_{(2,1)0} \\ m_{3,1} - r_{(3,1)0} \\ \vdots \\ m_{N,1} - r_{(N,1)0} \end{bmatrix}$

$-\begin{bmatrix} e_{(2,1)} \\ e_{(3,1)} \\ \vdots \\ e_{(N,1)} \end{bmatrix}$ 이고,  $\delta$ 는  $\begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix}$ 이다. 식 (8)로부터 다음과 같이 위치 변화량  $\delta$ 를 얻을 수 있다.

$$\delta = [\mathbf{H}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{Z} \quad (8)$$

여기서  $\mathbf{Q}$ 는 측정오차의 공분산 행렬이다. 구한 위치 변화량  $\delta$ 를 초기 위치에 다음 식 (9)와 같이 더해준다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (9)에서 구한  $[x \ y \ z]^T$ 를 다시 초기 위치로 두고 식 (4)

부터 식 (8)까지의 과정을 반복하여  $\delta$ 를 구한다. 그리고 식 (9)로부터 위치를 갱신한다. 이러한 과정은  $\delta$ 의 크기가 정해진 정지조건(stop condition)을 만족할 때까지 반복한다.

이 방법은 일반적으로 수렴 시에는 매우 정확한 값을 얻을 수 있지만 초기 위치  $(x_0, y_0, z_0)$ 가 충분히 참값에 가까이 설정되어야 수렴하는 것으로 알려져 있다[4,8].

#### IV. 높이 오차를 줄이기 위한 테일러 급수 방법 설계

본 장에서는 3차원 공간상에서 리더의 높이를 일정한 평면상에 배치할 때, 태그의 높이 오차를 줄일 수 있는 테일러급수 방법에 관하여 서술한다.

TDOA 측정치로부터 태그의 위치  $(x, y, z)$ 를 구하는 테일러 급수 방법과는 달리, 제안하는 알고리즘에서는 2단계로 나누어, 첫 번째 단계에서  $x, y$  값을 먼저 구하고, 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 구한  $x, y$  값을 이용하여  $z$  값을 구한다.

높이인  $z$  축을 생각하지 않은 2차원 평면상에서의 태그와 두 리더 사이 거리의 차이  $f_{i,j}$ 를 다음 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$f(x, y, x_i, y_i, x_j, y_j) = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} \quad (10)$$

식 (10)을 3차원 공간상에서 측정한 거리차이 측정치와 측정오차로 다음 식 (11)과 같이 표현하자.

$$f_{i,j}(x, y, x_i, y_i, x_j, y_j) = m_{i,j} - e_{i,j} \quad (11)$$

식 (11)에서 태그의 초기 추정 위치를  $(x_0, y_0)$ 라 두고 테일러급수로 전개하면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{(i,j)} = f_{(i,j)0} + \frac{\partial f_{(i,j)0}}{\partial x_0} \delta x + \frac{\partial f_{(i,j)0}}{\partial y_0} \delta y + \dots \quad (12)$$

여기서  $f_{(i,j)0}$ 는  $f_{(i,j)0}(x_0, y_0, x_i, y_i, x_j, y_j)$ 를 나타낸다. 식 (12)에서 2차항 이상을 소거하면 식 (13)을 얻을 수 있다.

$$f_{(i,j)} \cong f_{(i,j)0} + \frac{\partial f_{(i,j)0}}{\partial x_0} \delta x + \frac{\partial f_{(i,j)0}}{\partial y_0} \delta y \quad (13)$$

$N$ 개의 리더에 대해서  $j$ 를 1로 두면, 식 (13)과 같은 형태의  $N-1$ 개의 식을 얻을 수 있으며 이를 행렬로 표현하여 정리하면 식 (14)을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} h_{a(2,1)x} & h_{a(2,1)y} \\ h_{a(3,1)x} & h_{a(3,1)y} \\ \vdots & \vdots \\ h_{a(N,1)x} & h_{a(N,1)y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{2,1} - f_{(2,1)0} \\ m_{3,1} - f_{(3,1)0} \\ \vdots \\ m_{N,1} - f_{(N,1)0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_{(2,1)} \\ e_{(3,1)} \\ \vdots \\ e_{(N,1)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서  $h_{a(i,1)x}$ 는  $\frac{\partial f_{(i,1)0}}{\partial x_0}$  ( $i=2,3,\dots,N$ )이고,  $h_{a(i,1)y}$ 는

$\frac{\partial f_{(i,1)0}}{\partial y_0}$  ( $i=2,3,\dots,N$ )이다. 식 (14)의 표현을 간단히 하기 위하여 식 (15)로 표현하자.

$$H_a \delta_a = Z \quad (15)$$

여기서  $H_a$ 는  $\begin{bmatrix} h_{a(2,1)x} & h_{a(2,1)y} \\ h_{a(3,1)x} & h_{a(3,1)y} \\ \vdots & \vdots \\ h_{a(N,1)x} & h_{a(N,1)y} \end{bmatrix}$ 이고,  $\delta_a$ 는  $\begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix}$ 이다. 식 (16)

으로부터 다음과 같이 위치 변화량  $\delta_a$ 를 얻을 수 있다.

$$\delta_a = [H_a^T Q_a^{-1} H_a]^{-1} H_a^T Q_a^{-1} Z \quad (16)$$

여기서  $Q_a$ 는 측정오차의 공분산 행렬이다. 식(16)에서 구한 위치 변화량  $\delta_a$ 를 초기 위치에 다음 식 (17)과 같이 더해준다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix} \quad (17)$$

식 (17)에서 구한  $[x \ y]^T$ 를 다시 초기 위치로 두고 식 (12)부터 식 (17)까지의 과정을 반복하여  $\delta_a$ 를 구한다. 그리고 식 (17)로부터 위치를 갱신한다. 이러한 과정은  $\delta$ 의 크기가 정해진 정지조건(Stop condition)을 만족할 때까지 반복한다.

다음으로 이렇게 구한  $x, y$  값을 식 (3)에 대입하여  $z$  값을 구한다. 식 (3)의 양변을 제곱하여 정리하면 다음 식 (18)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} (m_{i,j} - e_{i,j})^2 &= (x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2 + (x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z-z_j)^2 \\ &\quad - 2\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z-z_j)^2} \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)을  $z$ 만의 변수로 표현하여 간단히 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{known} - 2(z-z_i)^2 = -2\sqrt{AB + (A+B)(z-z_i)^2 + (z-z_i)^4} \quad (19)$$

여기서  $A$ 와  $B$ 는 각각  $(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2$ 와  $(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2$ 를 나타내고,  $V_{known}$ 는  $(m_{i,j} - e_{i,j})^2 - A - B$ 를 나타낸다. 식 (19)의 양변을 제곱하여  $(z-z_i)^2$ 에 관하여 정리하면 식 (20)을 얻을 수 있다.

$$(z-z_i)^2 = \frac{V_{known}^2 - 4AB}{4(V_{known} + A + B)} \quad (20)$$

식 (20)으로부터 식 (21)과 같이  $z$ 를 구할 수 있다.

$$z = z_i \pm \sqrt{\frac{V_{known}^2 - 4AB}{4(V_{known} + A + B)}} \quad (21)$$

본 논문에서 제안한 2단계로 태그의 위치를 구하는 방법은 Kim등 [12]이 무선 센서 네트워크를 대상으로 제안한 방법과 유사한데, [12]에서는 Savarese가 제안한 방법을 개선하여 최소사승법의 가중행렬을 변형하였으며, 특이치 문제를 해결하기 위하여 본 논문과 마찬가지로 2단계로 해를 구하고 있다.

#### V. 모의실험

본 논문에서 제안하는 방법의 유효성을 보이고자 제안한 방법으로 위치를 추정하는 경우와 일반적인 테일러 급수

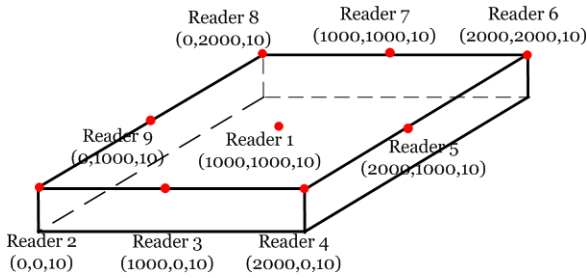


그림 2. 리더 배치.

Fig. 2. Reader arrangement.

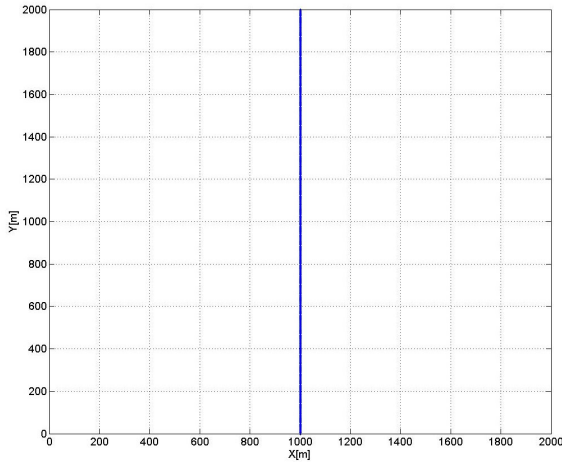


그림 3. 직선 경로.

Fig. 3. Linear trajectory.

방법으로 위치를 추정하는 경우의 결과를 비교하였다.

1. 모의실험 환경

리더를 그림 2와 같이 2000[m]×2000[m]의 공간에 배치하고, 기준 리더인 1번 리더는 (1000, 1000, 10)에 두었다. 먼저, 태그를 지닌 이동체가 (995, 5, 2)의 위치에서 100초 동안 정지하였을 경우에 대하여 100회의 모의실험을 수행하여 위치추적 성능을 살펴보았다. 그리고, 그림 3과 같이 초기 (1000, 0, 2) 위치에서 20[km/h]로 움직이는 직선 경로에 대해 MATLAB을 이용하여, Monte Carlo 방식으로 100회의 모의실험을 수행하였다. 테일러 급수 방법으로 추정할 경우, 초기 위치는 (1000, 0, 5)로 두었고, 제안한 방법으로 추정할 경우, 초기 위치는 (1000, 0)로 두었다. 공분산 행렬구성은 시각오차 50[ns](거리로 환산하면 15[m])만을 고려하여 정규분포로 두었다.

2. 실험 결과

2.1. 정지하였을 경우

정지하였을 경우에 대한 모의실험은 100회 수행하였다 그 결과 테일러 급수 방법은 100번 중 32번만 수렴하였고 나머지는 발산하였다. 그림 4는 테일러 급수 방법을 사용하였을 경우 수렴한 결과 중 하나를 보인 것이고, 그림 5는 제안한 방법을 이용하였을 경우의 결과 중 하나를 보인 것이다.

표 1은 그림 4에 제시한 결과를 수치로 나타낸 것이고 표 2는 그림 5에 제시한 결과를 수치로 나타낸 것이다.

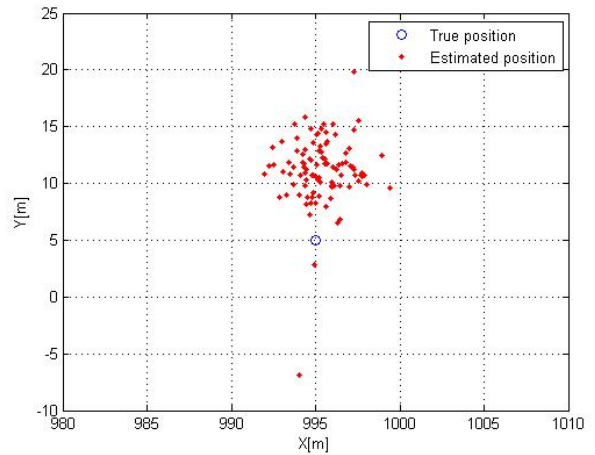


그림 4. 실제 위치와 테일러 급수 방법으로 추정된 위치.

Fig. 4. True position and estimated position by Taylor-series method.

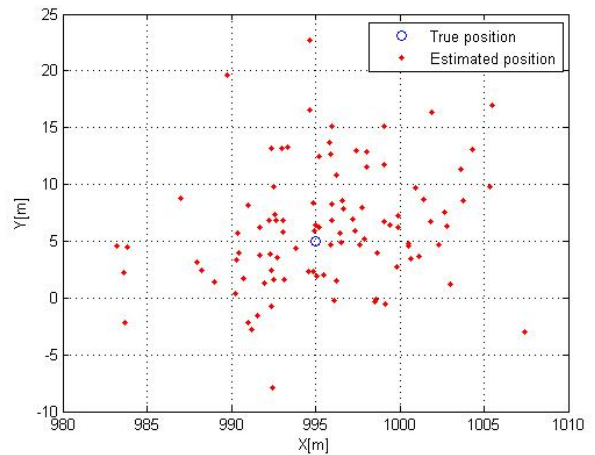


그림 5. 실제 위치와 제안한 방법으로 추정된 위치

Fig. 5. True position and estimated position by proposed method

표 1. 테일러 급수 방법의 결과.

Table 1. Result of the Taylor-series method.

결과		측		
		x[m]	y[m]	z[m]
추정된 위치	평균	995.3345	11.2348	-62.7579
	표준편차	1.4736	2.9761	296.7805
오차	평균	0.3345	6.2348	-64.7579
	표준편차	1.4736	2.9761	296.7805

표 2. 제안한 방법의 결과.

Table 2. Result of the proposed method .

결과		측		
		x[m]	y[m]	z[m]
추정된 위치	평균	995.1528	6.8374	22.8003
	표준편차	5.3892	4.3000	4.9534
오차	평균	0.1528	1.8374	20.8003
	표준편차	5.3892	4.3000	4.9534

위의 결과에서 제안한 방법이 수렴성에서 테일러 방법에 비하여 매우 우수한 것을 볼 수 있다. 두 방법 모두 수렴할 경우, 제안한 방법으로 위치를 구하였을 경우가 테일러 급수 방법으로 위치를 구하였을 경우보다 더 작은 높이 오차를 가지는 것을 알 수 있다. 그런데, 평면 오차는 테일러 급수 방법으로 위치를 구하였을 경우 더 좋은 결과를 보임을 알 수 있다.

2.2 직선 경로로 움직일 경우

정지와 마찬가지로 100회 수행하였다. 테일러 급수 방법은 100번 모두 경로 중에 발산하였다. 제안한 방법은 수렴하였다. 그림 6은 테일러 급수 방법으로 위치를 추정하였을 경우의 결과 중의 하나를 나타낸 것이고 그림 7은 오차를 나타낸 것이다.

그림 7의 결과에서 7초 이후에는 추정 위치가 발산함을 알 수 있다.

그림 8은 제안한 방법으로 위치 추정하였을 경우에 대한 결과의 평균치를 나타낸 것이고, 그림 9는 100회에 대한 위치 오차를 RMSE로 나타낸 것이다. 오차의 특성은 경로의 선정과 리더의 배치에 따라 달라지는데, 이것에 관해서는 참고문헌 [10]에 자세히 서술하고 있으며, 추후에 보다 체계적으로 연구해야 할 내용이다.

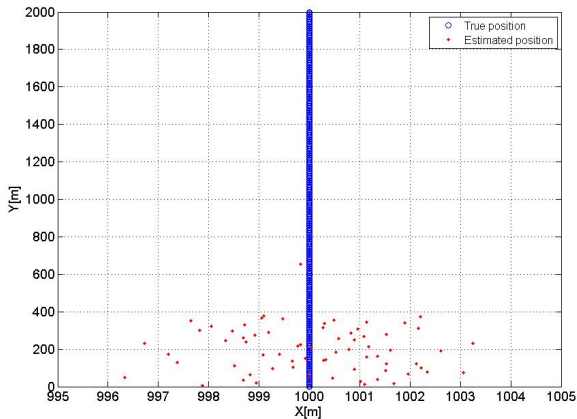


그림 6. 직선 경로와 테일러 급수 방법의 추정 결과.  
Fig. 6. Linear trajectory and estimated result of the Taylor-series method.

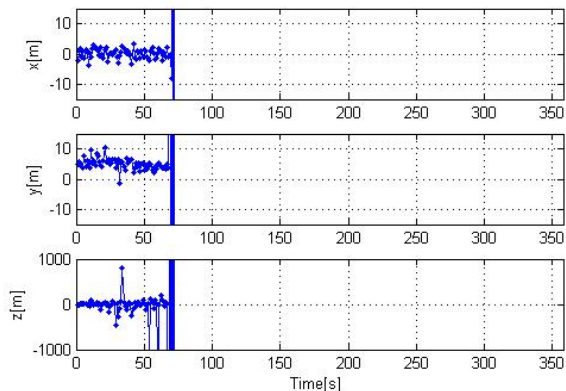


그림 7. 테일러 급수 방법의 위치 오차.  
Fig. 7. Position error of the Taylor-series method.

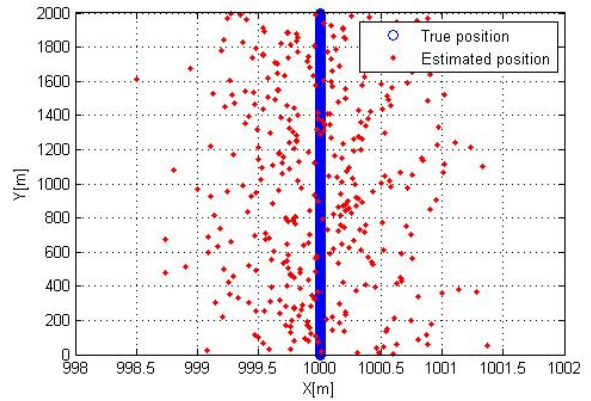


그림 8. 직선 경로와 제안한 방법의 추정 결과의 평균치.  
Fig. 8. Linear trajectory and average of the estimated result of the proposed method.

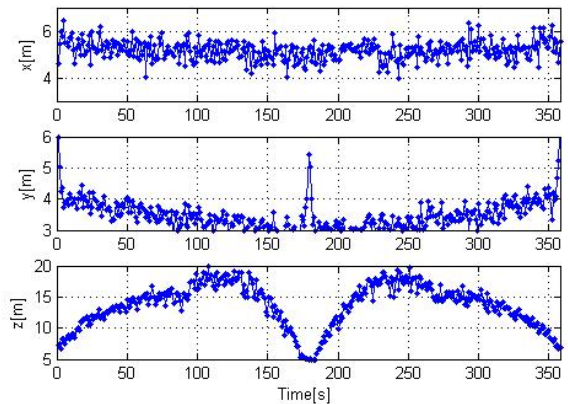


그림 9. 제안한 방법의 위치 오차의 RMSE.  
Fig. 9. RMSE of position errors of the proposed method.

VI. 결론

본 논문에서는 3차원 공간상에서 리더의 높이를 일정한 평면상에 배치하여도 태그의 높이 오차를 줄일 수 있는 테일러 급수 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 2단계로 이루어진 알고리즘으로 먼저 TDOA 측정치를 이용하여 평면에서 테일러 방식으로 위치를 추정하고, 다음으로 이를 이용하여 높이를 추정한다. 정지 상태와 직선 경로에 대하여 모의실험을 통해 제안한 방법의 유효성을 보였다. 제안한 방법을 사용하였을 때, 일반적인 테일러 급수 방법과 비교하여 평면 오차는 조금 더 큰 오차를 가지지만 높이 오차가 줄어드는 것을 확인하였으며 위치 추정 결과가 발산하지 않고 항상 수렴하는 것을 보았다.

추후에는 제안한 방법이 항상 높이 오차를 줄인다는 것 보일 수 있는 해석적인 연구가 필요하다.

참고문헌

[1] 차종섭, 명승일, 이형섭, 채종석, “능동형 RFID 기반 실시간 위치 추적 기술 동향,” 전자통신동향분석 제 24권 제 5호, 한국전자통신연구원, 2009.  
[2] J. O. Smith and J. S. Abel, “Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measure-



- ments,” *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 35, no. 12, pp. 1661-1669, Dec. 1987.
- [3] Y. T. Chan and K. C. Ho, “An efficient closed-form localization solution from time difference of arrival measurements,” *1994 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 2, pp. II/393-II/396, Apr. 1994.
- [4] 이욱, 최종수, “TDOA 기법을 이용한 소음원 위치파악에 관한 연구,” 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, 2006.
- [5] 김동혁, 송승헌, 박경순, 성태경, “TDOA 측정치를 이용한 가중치 추정방식의 QCLS 측위방법,” 전자공학회 논문지 SC편, 제44권 제4호, pp. 236-242, 2007.
- [6] J. James and J. Caffery, *Wireless Location in CDMA Cellular Radio Systems*, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [7] 지준환, 김중규, “CDMA 시스템에서 TDOA 측정을 통한 위치추정에서 Hearability 문제에 관한 연구,” 정보통신연구진흥원 연구보고서, 2000.
- [8] W. H. Foy, “Position-location solution by Taylor-series estimation,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-12, no. 2, pp. 187-194, Mar. 1976.
- [9] 공현민, 성태경, 권영미, “UWB 실내 측위를 위한 TDOA 위치 결정기법,” 대한전자공학회 논문지 TC편, 제42권 제1호, pp. 9-16, 2005.
- [10] 강희원, 임덕원, 황동환, 이상정, “물류 차량의 위치 추적 시스템에서의 TDOA DOP과 리더의 배치,” 제16차 GNSS 워크샵 논문집, 2009.
- [11] 강희원, 황동환, “실내외에서 물류 차량의 TDOA 기반 위치 추적 알고리즘,” 대한전기학회 2009년도 제40회 하계학술대회 2009 논문집, 2009.
- [12] S. B. Kim, C. Park, D. Y. Kang, H. H. Yun, B. C. Ahn, E. J. Cha, and S. J. Lee, “An efficient positioning

algorithm using ultrasound and RF,” *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 544-550, August 2008.

- [13] H. W. Kang, D.-H. Hwang, and C. Park, “Taylor Series Method Design for Reducing Height Error in TDOA-Based Real-Time Locating System,” *Proc. of ICROS Annual Conference 2010*, Chuncheon, Korea, pp.381-382, May 2010.



#### 강희원

2008년 충남대학교 전자공학과 학사 졸업. 2010년 동 대학원 석사 졸업. 2010년~현 한국해양연구원 연구원. 관심분야는 GPS/INS.



#### 황동환

1985년 서울대학교 전기공학과 학사 졸업. 1987년 KAIST 전기 및 전자공학과 석사 졸업. 1991년 동 대학원 박사 졸업. 1996년~현재 충남대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 항법, 통합항법, GNSS 응용



#### 박찬식

1984년 서울대학교 제어계측공학과 학사 졸업. 1986년 동 대학원 석사 졸업. 1997년 동 대학원 박사 졸업. 1996년~현재 충북대학교 전자공학부 교수. 관심분야는 항법 및 유도제어, 지능 교통망.