

이동 로봇을 위한 순방향 링크 AOA 측위 방법

A Forward Link AOA Positioning method for mobile Robots

김 동 혁, 송 승 현, 노 기 흥, 성 태 경*

(Dong-Hyouk Kim, Seung-Hun Song, Gi-Hong Roh, and Tae-kyung Sung)

Abstract : In the conventional AOA(angle-of-arrival) positioning utilizing reverse-link wireless channel, each sensor should be equipped with an array antenna to measure the incident angle of signal transmitting from a tag. To perform the complicated signal processing for angle measurements, sensor size and its power consumption will be large. In some applications like mobile robot location, there exists no strict restriction in tag size or in power consumption. Rather, it is desirable that the sensor would be as small as possible. This paper presents a new AOA positioning method utilizing forward-link channel. Under the assumption that the mobile robot is operating on the flat surface, the measurement model for FLAOA(forward-link AOA) is derived first. Two kinds of position estimation algorithms using FLAOA measurements are proposed; Gauss-Newton method and closed-form solution method. With the proposed methods, we can obtain the attitude of robot as well as its position. Positioning performance of proposed methods is compared by computer simulation. Simulation results show that the closed-form solution method using FLAOA measurements is suitable for indoor robot positioning.

Keywords : angle-of-arrival positioning, gauss-newton method, closed-form solution

I 서론

최근 GPS 등과 같이 전파를 이용하여 위치를 구하는 전파항법(radio-navigation) 시스템이 널리 사용되고 있으며, 새로운 시스템들이 개발 중에 있다. 전파항법 시스템은 사용하는 측정치에 따라 TOA(Time of Arrival)나 TDOA(Time Difference of Arrival)와 같이 전파지연시간(delay time) 측정치를 이용하는 방식과 AOA(Angle of Arrival)와 같이 전파 입사각 측정치를 사용하는 방식으로 구분할 수 있다[1,2]. 단방향(one-way) TOA나 TDOA 방식은 정밀 측위(precise positioning)가 가능하다는 장점이 있지만 이를 위해서는 매우 정밀한 센서 망의 동기(synchronization)가 필요하다. 양방향 TOA 방식은 망 동기에 대한 부담은 없으나 송수신기가 사용하는 클럭 주파수의 한계 때문에 일반적으로 고정밀 측위가 불가능하다. AOA 방식의 경우 열 안테나(array antenna)를 이용해야 하는 제약조건이 있지만 정밀한 망 동기를 하지 않아도 정밀 측위가 가능하다는 장점을 갖는다[3].

기존의 AOA 방식은 이동하는 태그(tag)에서 송신한 역방향 링크(reverse link) 신호를 고정된 위치에 설치된 센서들에서 수신하여 입사각을 구하였다. 이때 입사각 측정치는 열 안테나에 도달하는 신호의 도달시간 차이로부터 얻는다. 따라서 이러한 RLAOA(Reverse Link AOA) 방식은 수신기에서 수행해야 하는 복잡한 신호처리 과정들과 일정 크기 이상을 필요로 하는 열 안테나의 특성 때문에 센서들의 크기가 크고 소비전력이 많다[4].

한편, 이동 로봇과 같은 응용분야에서는 태그의 크기나 소비전력에는 여유가 있는 반면, 센서의 크기나 소비전력은 작은 것을 선호하기도 한다. 이러한 응용분야를 위해서는 센서에서 송신한 순방향 링크(forward link) 신호를 열 안테나를 장착한 태그에서 수신하여 입사각을 측정하는 FLAOA(Forward Link AOA) 방식이 적합하다. 그러나 FLAOA 방식은 태그의 위치뿐만 아니라 자세도 미지 변수이고 이들이 서로 복잡한 비선형 관계식을 갖기 때문에 아직까지 FLAOA 방식에 대한 해를 구하는 효과적인 방법이 제시되지 못하고 있는 실정이었다.

본 논문에서는 이동 로봇이 평지를 주행한다고 가정하고 로봇의 위치뿐만 아니라 방위각(azimuth)도 구할 수 있는 FLAOA 측위 방식으로 해를 구하는 방법을 제안하였다. 먼저 2장에서 FLAOA 방식의 기본 개념을 RLAOA 방식과 비교하여 설명하고 FLAOA 측정치 모델을 제시한다. 다음으로 기존의 RLAOA 방식에서 사용하는 GN(Gauss-Newton) 방법과 CFS(Closed-Form Solution) 방법의 개념을 FLAOA 방식에 도입하여 두 가지 측위 방법을 유도한다. 제안한 방법들은 로봇의 위치뿐만 아니라 방위각도 알 수 있으므로 지능형 이동로봇의 자세 제어에 필요한 정보도 제공할 수 있다. 3장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 본 논문에서 제안한 FLAOA 측정치에 대한 GN 방법 및 CFS 방법의 성능을 비교하고 4장에서 결론을 맺는다.

II 순방향 링크 AOA 측위 방법

1. 순방향 링크 AOA 측정치 모델

AOA 방식은 수신 신호의 입사각을 측정하는 주체에 따라 FLAOA 방식과 RLAOA 방식으로 구분할 수 있다. 그림 1은 이러한 AOA 측위 방식의 원리를 2차원으로 나타낸 것이다. 사용자가 기준 좌표계에 대하여 (x, y) 의 위치에 있고 센서는 (x_i, y_i) 에 위치한다고 가정한다. 그림 1(a)의 RLAOA

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 1. 31., 채택확정 : 2007. 3. 21.

김동혁, 노기흥, 송승현 : 충남대학교 정보통신공학과

(oneoctave@ivlab.cnu.ac.kr/felove17@nate.com/lspheonix@hanafos.com)

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

※ 본 논문은 정정부 및 정보통신 연구진흥원의 정보통신 선도기반기술 개발 사업과 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

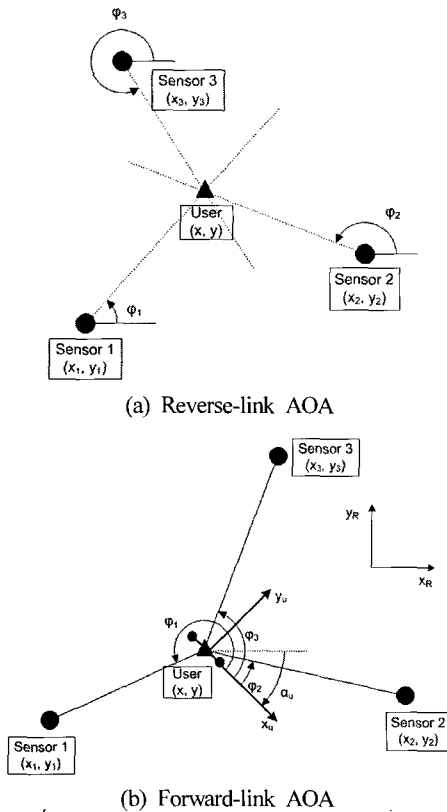


그림 1. AOA 측위 방식의 원리.
Fig. 1. Principle of AOA positioning.

방식에서는 태그가 신호를 송신하고 센서의 열 안테나를 통하여 입사각을 측정한다. 이때 센서는 고정하여 설치하기 때문에 센서의 자세각은 알 수 있는 값이다. 이에 반하여 그림 1(b)의 FLAOA 방식은 센서가 신호를 송신하고 태그의 열 안테나를 통하여 입사각을 측정한다. 평지를 운행하는 로봇에 태그를 고정하여 설치하면 로봇의 방향에 따라 태그의 열 안테나는 기준 좌표계 (x_R, y_R) 에 대하여 α_u 만큼 회전한다. 태그에서 측정하는 각도 ϕ_i 는 로봇의 좌표계 (x_U, y_U) 에 대한 값이므로 α_u 에 영향을 받는다. 따라서 FLAOA 방식의 경우 미지변수가 사용자의 위치뿐만 아니라 방위각이 추가되게 되며, 이론적으로 3개 이상의 각도 측정치가 있으면 2차원에 대한 미지변수를 모두 구할 수 있다. 입사각 측정치는 열 안테나에 도달하는 신호의 도달 시간 차이로부터 얻을 수 있으며, 그 원리를 2차원에서 표현하면 그림 2와 같다. 그림에서 d 는 안테나 사이의 거리이며, 수신 잡음을 고려할 때 열 안테나에서 신호의 도달 시간 차이 l_i 와 신호의 입사각 ϕ_i 는 다음과 같은 관계를 갖는다[5].

$$\begin{aligned} d\cos(\phi_i + n_{\phi i}) &= l_i + v_i, \quad 0 < \phi_i < \pi \\ v_i &= v_{1i} - v_{2i} \end{aligned} \quad (1)$$

식에서 v_{1i}, v_{2i} 는 i 번째 센서에서 송신한 신호를 두 개의 안테나에서 수신할 때 포함되는 측정 잡음이다. (1)의 v_i 가 l_i 에 비하여 충분히 작다고 가정할 때 입사각 잡음 $n_{\phi i}$ 는 다

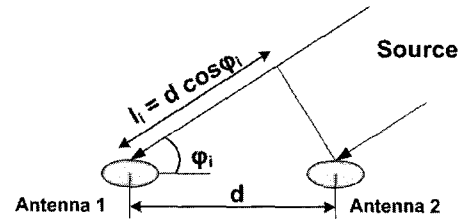


그림 2. 열 안테나에서 입사각을 구하는 원리.
Fig. 2. Computation of incident angle from array antenna signals.

음과 같이 근사화할 수 있다[6].

$$n_{\phi i} \cong \frac{-v_i}{d\sin\phi_i} \quad (2)$$

이때 (1)의 v_{1i}, v_{2i} 가 σ^2 의 분산을 갖는 i.i.d.(independent and identically distributed) 백색 정규 잡음(white Gaussian noise)이라고 가정하면 근사화된 $n_{\phi i}$ 는 $2\sigma^2/(d^2\sin^2\phi_i)$ 의 분산을 갖는 i.i.d. 백색 정규 잡음이다. 한편 입사각은 사용자 위치와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} \tan(\phi_i + \alpha_U) &= \frac{y - y_i}{x - x_i} \\ &= \frac{\tan\phi_i + \tan\alpha_U}{1 - \tan\phi_i \tan\alpha_U}, \quad i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 입사각 측정잡음 $n_{\phi i}$ 가 충분히 작다고 가정할 때 잡음을 고려한 FLAOA 방식의 측정치 모델은 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} z_i &\equiv \tan(\phi_i + n_{\phi i}) \\ &= \frac{\tan\phi_i + \tan n_{\phi i}}{1 - \tan\phi_i \tan n_{\phi i}} \\ &\cong \frac{\tan\phi_i + n_{\phi i}}{1 - n_{\phi i} \tan\phi_i} \\ &\cong \tan\phi_i + \frac{1}{\cos^2\phi_i} n_{\phi i} \\ &= \frac{(y - y_i) - (x - x_i)\tan\alpha_u}{(y - y_i)\tan\alpha_u + (x - x_i)} + \frac{1}{\cos^2\phi_i} n_{\phi i} \\ &\equiv h_i + \frac{1}{\cos^2\phi_i} n_{\phi i} \end{aligned} \quad (4)$$

2. Gauss-Newton 방법을 이용한 FLAOA 측위 알고리즘

GN 방법은 테일러 급수를 1차로 근사화하여 선형 오차 방정식을 구한 후 이를 이용하여 최소자승법으로 추정치를 구하는 방식으로서 TOA, TDOA, 그리고 RLAOA 측정치를 이용한 측위방법에 널리 사용되고 있다[4,6,7]. 본 절에서는 FLAOA 측정치를 이용한 GN 방법을 유도한다. $r = \tan\alpha_u$ 라 할 때 사용자의 위치 및 자세각을 원소로 하는 벡터를 $\underline{x} = [x \ y \ r]^T$ 라 정의하면 (4)는 테일러급수를 이용하여 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\begin{aligned} h_i(\underline{x}) &\cong h_i(\underline{x}_0) + \left. \frac{\partial h_i}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{x}=\underline{x}_0} (\underline{x} - \underline{x}_0) \\ &\quad + \left. \frac{\partial h_i}{\partial y} \right|_{\underline{x}=\underline{x}_0} (y - y_0) + \left. \frac{\partial h_i}{\partial r} \right|_{\underline{x}=\underline{x}_0} (r - r_0) \end{aligned} \quad (5)$$

식에서 x_0 는 선형화 기준점(nominal point)이고 1차 미분은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial h_i}{\partial x} \right|_{x=x_0} &= \frac{-(y_0 - y_i)(1 + r_0^2)}{\{(y_0 - y_i)r_0 + (x_0 - x_i)\}^2} \\ \left. \frac{\partial h_i}{\partial y} \right|_{x=x_0} &= \frac{-(x_0 - x_i)(1 + r_0^2)}{\{(y_0 - y_i)r_0 + (x_0 - x_i)\}^2} \\ \left. \frac{\partial h_i}{\partial r} \right|_{x=x_0} &= \frac{-(x_0 - x_i)^2 - (y_0 - y_i)^2}{\{(y_0 - y_i)r_0 + (x_0 - x_i)\}^2} \end{aligned}$$

(4)와 (5)로부터 다음의 식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta \underline{z} &\equiv \begin{bmatrix} \delta z_1(x) \\ \vdots \\ \delta z_m(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1(x) - h_1(x_0) \\ \vdots \\ z_m(x) - h_m(x_0) \end{bmatrix} \\ &\cong \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial h_1}{\partial x} \right|_{x=x_0} & \left. \frac{\partial h_1}{\partial y} \right|_{x=x_0} & \left. \frac{\partial h_1}{\partial r} \right|_{x=x_0} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \left. \frac{\partial h_m}{\partial x} \right|_{x=x_0} & \left. \frac{\partial h_m}{\partial y} \right|_{x=x_0} & \left. \frac{\partial h_m}{\partial r} \right|_{x=x_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ r - r_0 \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} \frac{1}{\cos^2 \phi_1} n_{\phi_1} \\ \vdots \\ \frac{1}{\cos^2 \phi_m} n_{\phi_m} \end{bmatrix} \\ &\equiv G(x - x_0) + v \end{aligned} \tag{6}$$

(2)의 n_{ϕ_i} 가 $2\sigma^2/(d^2 \sin^2 \phi_i)$ 의 분산을 갖는 i.i.d. 백색 정규 잡음일 때 (6)의 잡음벡터 v 는 영 평균이고 다음과 같은 공분산 행렬을 갖는다.

$$\begin{aligned} Q &= E\{vv^T\} \\ &= \frac{2\sigma^2}{d} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ c^A(\phi_1)s^2(\phi_1) & 1 & & \vdots \\ 0 & c^A(\phi_2)s^2(\phi_2) & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 1 \\ 0 & \dots & 0 & c^A(\phi_m)s^2(\phi_m) \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{7}$$

식에서 $c(\cdot) = \cos(\cdot)$, $s(\cdot) = \sin(\cdot)$ 을 의미하며, 실제로 구현할 때에는 입사각 ϕ_i 의 참값을 알 수 없기 때문에 측정치를 이용하여 Q 의 근사치를 구한다.

GN 방법은 (6)과 같이 근사화된 선형방정식에 순환최소자승법(iterated least square)을 적용하여 추정치를 구한다[6]. 즉, 이전 추정치를 선형화 기준점으로 사용하여 반복적으로 최소자승법으로 추정치를 갱신한다. 이때 (6)의 측정잡음이 센서마다 분산의 크기가 다르기 때문에 가중최소자승법(weighted least square)을 이용하여야 한다. GN 방법은 일반적으로 3~5회 반복하면 수렴한 해를 구할 수 있으나 초기 기준점이 적절히 선택되지 않거나 센서의 기하학적 배치(sensor geometry)가 나쁠 경우에는 추정치가 발산하거나 참값에 수렴하지 못하는 경우가 발생하기도 한다[4,6].

3. Closed-Form Solution 방식의 FLAOA 측위 알고리즘

CFS 방법은 RLAOA 측정식의 형태를 적절히 변형하여

선형식을 구한 후 최소자승법을 이용하여 위치 추정치를 구하도록 제안되었다[4,7]. 본 절에서는 FLAOA 측정치에 대한 CFS 방법을 유도한다. (3)을 다른 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (y - y_i)\tan\phi_i \tan\alpha_u + (x - x_i)\tan\phi_i \\ = (y - y_i) - (x - x_i)\tan\alpha_u \end{aligned} \tag{8}$$

$r = \tan\alpha_u$, $p = x + ry$, $q = rx - y$ 로 정의하고 (8)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$p \tan\phi_i + q - r(y_i \tan\phi_i + x_i) = x_i \tan\phi_i - y_i \tag{9}$$

(9)을 모든 i 에 대하여 행렬-벡터 형태로 표시하면 다음과 같은 선형 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \underline{h}' &\equiv \begin{bmatrix} x_1 \tan\phi_1 - y_1 \\ \vdots \\ x_m \tan\phi_m - y_m \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \tan\phi_1 & 1 & -(y_1 \tan\phi_1 + x_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \tan\phi_m & 1 & -(y_m \tan\phi_m + x_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \\ &\equiv H \underline{x}' \end{aligned} \tag{10}$$

(4)에서의 마찬가지로 입사각 측정잡음 n_{ϕ_i} 가 충분히 작다고 가정하면 (10)으로부터 다음과 같이 잡음을 고려한 측정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \underline{h}' &\equiv \begin{bmatrix} x_1 \tan(\phi_1 + n_{\phi_1}) - y_1 \\ \vdots \\ x_m \tan(\phi_m + n_{\phi_m}) - y_m \end{bmatrix} \\ &\cong \begin{bmatrix} x_1 \tan\phi_1 - y_1 \\ \vdots \\ x_m \tan\phi_m - y_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{x_1}{\cos^2 \phi_1} n_{\phi_1} \\ \vdots \\ \frac{x_m}{\cos^2 \phi_m} n_{\phi_m} \end{bmatrix} \\ &= H \underline{x}' + J \underline{v} \end{aligned} \tag{11}$$

식에서 H 는 (10)에서 정의한 바와 같으며, 실제로 구현할 때에는 H 를 구성하는 입사각 ϕ_i 의 참값을 알 수 없기 때문에 측정치로 대체한다. 또한 v 는 (6)에서 정의한 바와 같으며, J 는 다음과 같이 주어진다.

$$J = \begin{bmatrix} x_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & x_2 & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & x_m \end{bmatrix}$$

(11)에서 잡음 Jv 는 측정되는 센서에 따라 분산의 크기가 다르기 때문에 가중최소자승법을 적용해야 하며, 다음과 같이 \underline{x}' 의 추정치를 구한다.

$$\hat{\underline{x}}' = [H^T(JQJ^T)^{-1}H]^{-1}H^T(JQJ^T)^{-1}\underline{h}' \tag{12}$$

추정치 $\hat{\underline{x}}'$ 로부터 다음과 같이 최종적인 사용자의 위치 및 방위각 추정치를 구한다.

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{\alpha}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\hat{p} + \hat{q}r}{1 + \hat{r}^2} \\ \frac{\hat{p}r - \hat{q}}{1 + \hat{r}^2} \\ \tan^{-1} \hat{r} \end{bmatrix} \quad (13)$$

CFS 방법은 비순환적인 방법이기 때문에 GN 방법과 달리 추정치가 발산하는 문제가 없다. 또한 GN 방법이 최소 3회 이상의 반복횟수가 필요한 것에 비해 CFS 방법은 반복 없이 위치를 추정할 수 있어서 계산량도 상대적으로 적다. 그러나 (11)의 H에서 입사각의 참값을 추정치로 대체하기 때문에 추정치가 측정 잡음에 민감할 수 있다.

III. 실험결과

컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 제한한 FLAOA 측위 방법들의 성능을 분석하였다. 실험은 실내에서 평지를 주행하는 로봇을 가정하고 수행하였기 때문에 고도각(elevation)의 변화는 없으며 방위각(azimuth)의 변화만 존재한다. 따라서 로봇의 위치와 회전각을 추정하여 시뮬레이션 결과를 도출하였다. 작업 공간은 장애물이 없는 공간으로 가정하였고 크기는 12x12[m]로 하였다. 센서의 배치는 DOP(Dilution of Precision)의 영향을 보기위해 그림 3과 같이 비대칭이 되도록 하였으며, 각 센서의 좌표는 (-6, 6)[m], (6, 6)[m], (6, 0)[m], (6, -6)[m]이고 그림 3에 별 모양으로 표시한 지점이다. 일반적으로 전파항법은 사용자의 위치에 따라 센서의 기하학적 배치가 바뀌게 되고 그 결과 측위 성능이 변화하게 된다[8]. 이러한 기하학적 영향을 분석하기 위하여 그림 3에서 도트(dot)로 표시한 바와 같이 x축과 y축에 대하여 각각 1[m] 간격으로 총 121개의 기준점을 설정하고 각각의 기준점에서 100번의 시뮬레이션을 수행하여 구한 추정치들을 이용하여 통계값을 구하였다. 특히 거리 추정오차는 다음과 같이 사용자 위치의 참값과 추정치를 이용하여 구하였다.

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

FLAOA 측정 잡음의 생성을 위하여 (7)에서 $\sigma = 1[cm]$, $d = 10[cm]$ 로 정하였으며, 다중경로 오차는 없고 항상 LOS(Line-of-Sight)가 보장된다고 가정하였다. 한편 GN 방법의 경우에는 위치 추정치가 1[cm] 이내로 수렴할 때까지 계산을 반복하였다.

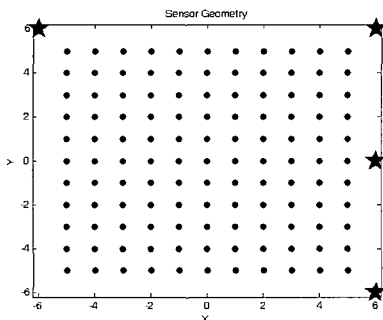
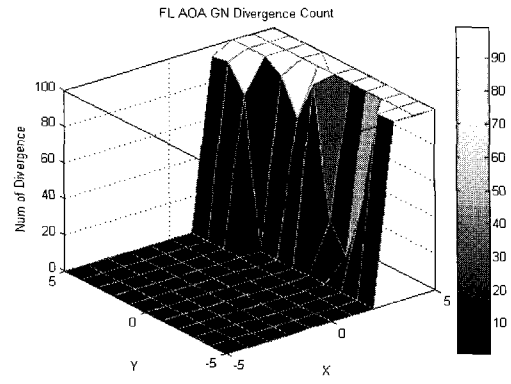
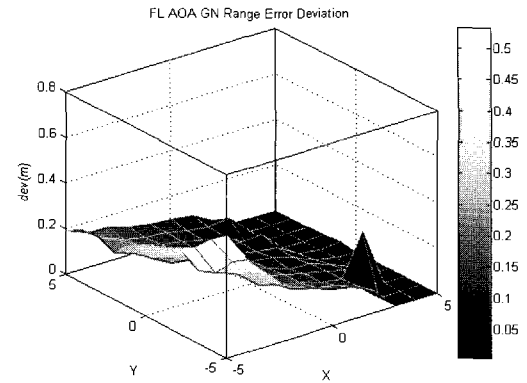


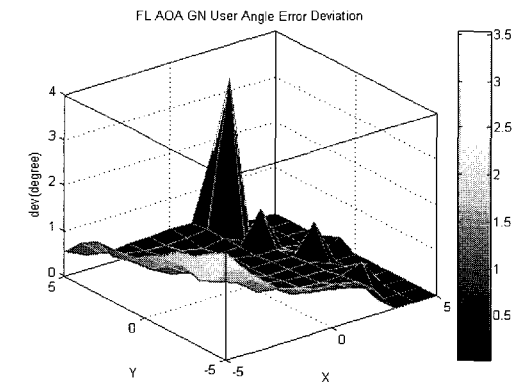
그림 3. 센서의 배치와 측위 기준점.
Fig. 3. Sensor allocation and reference grid points.



(a) Number of divergences



(b) Standard deviation of range estimation error



(c) Standard deviation of azimuth angle error

그림 4. GN 방법의 시뮬레이션 결과.

Fig. 4. Simulation results of AOA positioning using GN Method.

GN 방법을 이용한 FLAOA 측위 알고리즘의 시뮬레이션 결과는 그림 4와 같다. 그림 4(a)에서 보는 바와 같이 센서가 밀집한 지역에서 100회 모두 발산하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상이 발생하는 이유는 사용자 위치와 센서의 거리가 근접한 경우에 사용자 위치 변화에 따른 LOS 벡터의 변화가 심하기 때문이며, 이와 같이 해가 발산하는 경우에는 표준편차의 계산에서 제외하였다. 거리 추정오차의 표준 편차는 센서 셀의 중심부분에서는 약 0.1[m]의 값을 갖지만 DOP이 나쁜 (-5, -5) 부분에 근접할수록 그 값이 약 0.5[m]까지 커지는 현상이 발생하였다. 거리 추정오차의 표

표 1. GN 방법의 거리 추정오차.

Table 1. Range estimation error in GN Method.

X \ Y	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	0.54	0.48	0.41	0.38	0.34	0.31	0.27	0.20	0.23	0.23	0.19
-4	0.40	0.36	0.27	0.24	0.28	0.23	0.18	0.17	0.19	0.17	0.15
-3	0.31	0.28	0.24	0.21	0.22	0.18	0.14	0.14	0.14	0.13	0.15
-2	0.22	0.21	0.16	0.17	0.15	0.14	0.13	0.12	0.12	0.11	0.12
-1	0.19	0.16	0.13	0.13	0.15	0.12	0.11	0.10	0.10	0.11	0.11
0	0.16	0.13	0.12	0.11	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.09	0.10
1	0.14	0.11	0.08	0.09	0.07	0.09	0.08	0.08	0.07	0.08	0.09
2	0.10	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.09	0.02	0.09	0.04
3	-	-	0.25	0.05	0.04	0.02	0.01	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	0.01	0.02	-	-	-

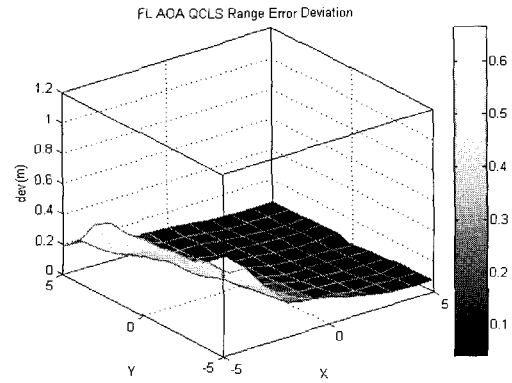
표 2. GN 방법의 사용자 회전각 표준편차.

Table 2. Azimuth angle error in GN Method.

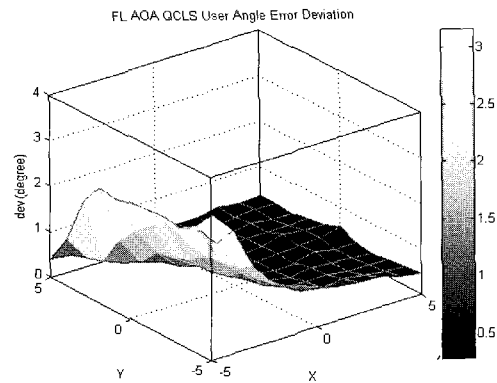
X \ Y	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	2.33	2.15	1.90	1.80	1.51	1.35	1.07	0.97	1.13	0.92	0.54
-4	1.79	1.65	1.22	1.03	1.21	1.00	0.73	0.77	0.76	0.56	0.32
-3	1.40	1.30	1.04	0.87	0.95	0.70	0.49	0.59	0.47	0.41	0.26
-2	1.02	0.97	0.71	0.78	0.63	0.55	0.45	0.49	0.40	0.33	0.29
-1	0.91	0.83	0.62	0.58	0.58	0.43	0.41	0.38	0.38	0.30	0.30
0	0.82	0.66	0.54	0.49	0.42	0.41	0.43	0.35	0.28	0.33	0.35
1	0.73	0.64	0.48	0.46	0.42	0.41	0.36	0.36	0.35	0.36	0.31
2	0.57	0.54	0.49	0.43	0.42	0.37	0.35	1.06	0.16	3.56	1.81
3	-	-	0.66	0.37	0.27	0.99	0.16	0.07	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	0.19	0.03	-	-	-

준편차 값의 자세한 수치는 표 1과 같으며, 표에서 ‘-’는 추정치가 발산한 경우를 나타낸다. 사용자 회전각의 표준편차는 셀의 중심부에서는 0.35~0.6[°]이고 센서가 없는 (-5, -5)부근이나 추정치가 발산하는 지역 부근에서는 약 2.5~3.5[°]까지 증가한다. 이러한 경향은 사용자 위치의 표준편차와 유사하다는 것을 알 수 있다. 사용자 회전각 표준편차의 자세한 수치는 표 2에 나타내었다. 이상의 실험결과에서 보는 바와 같이 FLAOA 방식의 GN 방법은 실내 측위와 같이 작업공간이 작은 경우에는 추정치가 발산하는 경우가 많은 부분에서 발생할 수 있기 때문에 실제로 사용하기 어렵다는 것을 알 수 있다.

CFS 방법을 이용한 FLAOA 알고리즘의 시뮬레이션 결과는 그림 5와 같다. CFS 방법은 비반복적이어서 추정치가 발산하는 경우가 발생하지 않고 계산시간도 적다. 거리 추정오차의 경우 셀 중심부분과 센서가 밀집한 지역에서 0.1~0.2[m]로 나타났고 센서가 없는 부분으로 갈수록 약 0.65[m]까지 증가하였다. 한편 사용자 회전각의 표준편차는 셀의 중심부분과 센서가 밀집한 지역에서 0.3~0.5[°]이고 센서가 없는 부분으로 갈수록 약 3[°]까지 커지는 것을 알 수 있다. 거리 추정오차와 회전각의 표준편차의 자세한 수



(a) Standard deviation of range estimation error



(b) Standard deviation of azimuth angle error

그림 5. CFS 방법의 시뮬레이션 결과.

Fig. 5. Simulation results of AOA positioning using CFS Method.

치는 표 3과 표 4에 제시하였다.

이와 같은 표준편차의 분포 특성은 GN 방법¹⁾에 발산하지 않는 지역에서의 표준편차의 경향과 비슷하다는 것을 알 수 있다. GN 방법이 참값으로 수렴하는 경우에는 CFS 방법보다 표준편차의 크기가 작지만 CFS 방법은 추정치가 발산하는 경우가 발생하지 않는다. 따라서 FLAOA 방식을 실내측위에 이용할 경우에는 CFS 방법으로 구현하는 것이 유리함을 알 수 있다.

표 3. CFS 방법의 거리 추정오차.

Table 3. Range estimation error in CFS Method.

X \ Y	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	0.67	0.58	0.53	0.53	0.51	0.51	0.49	0.51	0.45	0.28	0.19
-4	0.54	0.46	0.46	0.39	0.40	0.37	0.33	0.28	0.21	0.18	0.18
-3	0.37	0.33	0.29	0.28	0.23	0.22	0.21	0.17	0.15	0.14	0.16
-2	0.23	0.22	0.20	0.19	0.17	0.18	0.14	0.14	0.11	0.13	0.12
-1	0.20	0.18	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10	0.10	0.09	0.11
0	0.18	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.08	0.10	0.09	0.10
1	0.14	0.11	0.09	0.08	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08
2	0.11	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07
3	0.08	0.08	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06
4	0.07	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05
5	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05

표 4. CFS 방법의 사용자 회전각 표준편차.

Table 4. Azimuth angle error in CFS Method.

X \ Y	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	3.18	2.76	2.55	2.61	2.58	2.54	2.47	2.52	2.04	1.04	0.41
-4	2.71	2.23	2.34	1.95	2.09	1.89	1.59	1.24	0.59	0.47	0.34
-3	1.75	1.55	1.50	1.46	1.20	1.05	0.99	0.59	0.39	0.36	0.26
-2	1.21	1.16	1.10	0.89	0.79	0.77	0.55	0.44	0.34	0.30	0.31
-1	1.03	0.89	0.69	0.61	0.52	0.47	0.39	0.39	0.32	0.33	0.31
0	0.87	0.58	0.53	0.49	0.43	0.44	0.41	0.36	0.33	0.31	0.31
1	0.74	0.53	0.47	0.41	0.39	0.40	0.35	0.37	0.36	0.34	0.32
2	0.67	0.59	0.49	0.46	0.38	0.43	0.40	0.39	0.33	0.30	0.33
3	0.66	0.52	0.42	0.44	0.50	0.45	0.53	0.40	0.40	0.35	0.41
4	0.53	0.47	0.44	0.40	0.39	0.49	0.47	0.40	0.36	0.39	0.35
5	0.46	0.43	0.40	0.37	0.41	0.59	0.46	0.40	0.34	0.38	0.37

IV. 결론

본 논문에서는 이동로봇을 위한 FLAOA 측위 방식을 제안하였다. FLAOA 방식은 로봇의 위치뿐만 아니라 자세각도 구할 수 있고 센서망의 부담도 적다는 장점을 갖는다. FLAOA 측정치를 이용하는 측위 알고리즘으로 GN 방법과 CFS 방법을 제시하였으며, 시뮬레이션을 통하여 실내용 이동로봇에 대한 두 가지 방법의 측위성능을 비교 하였다. GN 방법은 선형화 기준점으로부터 위치변화량을 추정하는 방식이기 때문에 선형화 기준점에 따라 측위 정확도가 영향을 받으며, 추정치가 발산하는 문제가 발생하였다. CFS 방법은 반복적인 과정 없이 해를 직접 구할 수 있고 계산량도 상대적으로 적다. 시뮬레이션 결과 GN 방법이 참값으로 수렴하는 경우에는 CFS 방법보다 표준편차의 크기가 비슷하거나 작지만 작업공간이 작은 실내 측위에서는 추정치가 발산하는 경우가 자주 발생하였다. 따라서 FLAOA 방식을 실내측위에 이용할 경우에는 추정치가 발산하는 경우가 발생하지 않고 추정성능도 우수한 CFS 방법으로 구현하는 것이 유리함을 알 수 있다.

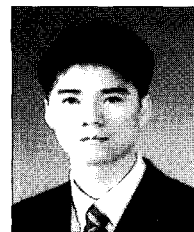
참고문헌

- [1] J. J. Caffery, et al, "Overview of radiolocation in CDMA cellular system," *IEEE communication Magazine*, pp. 38-45, 1998.
- [2] I. Oppermann, M. Hämäläinen, J. Iinatti, *UWB Theory and Applications*, John Willy & Sons Ltd., Chichester, 2004.
- [3] I. Jami, M. Ali and R. F. Ormondroyd: "Comparison of methods of locating and tracking cellular mobiles," *IEE Colloquium on Novel Methods of Location and Tracking of Cellular Mobiles and their System Applications*, vol. 99/046, pp. 1/1-6/1, 1999.
- [4] A. P.-Zamora, J. V. 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.
- [5] 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.
- [6] 김동혁, 송승현, 성태경, "시각기반과 각도기반의 측위 방식 성능비교 및 오차 특성 분석," *제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 12 권 제 10 호*, pp. 962-967, Oct 2006.
- [7] 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.
- [8] E. D., Kaplan, *Understanding GPS Principles and Applications*, ARTECH HOUSE, Norwood, 1996.



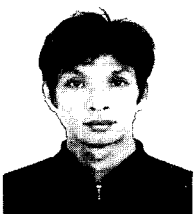
김 동 혁

2005년 충남대 정보통신공학부 졸업. 2007년 동 대학원 석사. 2007년~현재 동 대학원 박사과정. 관심분야는 GPS & GNSS, Signal Processing, Navigation.



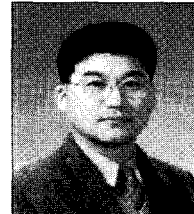
송 승 현

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



노 기 흥

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, 텔레매틱스.