

DOP을 이용한 TDOA 기반의 위치탐지시스템 성능예측

김산해, 조제일, 한진우, 송규하

국방과학연구소

{ksh808, jeil004, yahoo, khsong}@add.re.kr

Performance prediction of TDOA based location systems using DOP

Sanhae Kim, Jeil Jo, Jinwoo Han, Kyuha Song

Agency for Defense Development

요약

본 논문에서는 GPS(Global Positioning System)기반의 위치탐지시스템의 정밀도 저하율인 DOP(Dilution of Precision)을 지상의 다수의 이격된 수신기에서 TDOA(Time Difference of Arrival)를 기반으로 위치를 탐지하는 시스템에 적용하여 그 성능을 예측하고자 한다. 이를 위해 수신기 배치구조와 목표의 위치에 따른 DOP의 분포를 분석하고, 실제 TDOA 기반의 위치탐지 모의실험을 통해 도출된 위치탐지정확도와 DOP을 비교하여 예측된 위치탐지의 정확도 분포가 거의 일치함을 확인하였다.

I. 서론

위성을 이용한 측위의 정확도는 상공에 있는 GPS(Global Positioning System) 위성의 배치에 따라 그 정도가 영향을 받게 된다. 이를 무차원 수치로 나타낸 것이 DOP(Dilution of Precision)이며, 이 수치가 커질수록 정확도가 저하된다. 이를 지상에 설치된 다수의 수신기에 적용하여 위치탐지 성능에 대한 연구가 지속되어 왔다[1]-[3]. 하지만 기존 연구에서는 다양한 수신기 배치구조에 따른 DOP을 구하여 그 분포의 수치만을 분석하거나, 위치탐지정확도의 성능을 평균적인 값으로만 예측하였다.

본 논문에서는 TDOA(Time Difference of Arrival) 기반의 위치탐지시스템에서 수신기 배치구조와 목표의 위치에 따른 DOP의 분포와 실제 발생할 수 있는 오차 등을 포함한 모의실험을 통해 도출된 위치탐지정확도와 DOP의 관계를 비교하여 그 분포가 매우 유사함을 확인하였다. 이는 DOP 분포만으로 수신기 배치와 그 시스템 성능에 따른 위치탐지정확도를 비교적 정확하게 예측하여 활용할 수 있음을 의미한다. 특히, 본 논문에서는 HDOP(Horizontal DOP)과 PDOP(Position DOP)을 이용하여 위치탐지정확도의 대표적 척도인 평면상의 2차원 CEP(Circular Error Probable)와 고도를 포함한 3차원 SEP(Spherical Error Probable)을 예측할 수 있음을 보여준다. 이를 이용하면 TDOA를 이용하는 위치탐지시스템의 설계 및 구축 시, 적은 연산량으로 상대적으로 짧은 시간 안에 그 시스템의 CEP와 SEP로의 위치탐지 성능예측이 가능하다.

II. TDOA 기반의 위치탐지

TDOA 기반의 위치탐지 기술은 그림 1과 같이 목표의 신호를 다수의 이격된 수신기에서 수신한 신호도착시간의 상호간 차이인 TDOA를 이용하여 해당 목표의 위치 정보를 추정한다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 3차원 위치추정을 위하여 N 개의 수신기를 고려한다. N 개의 수신기에서 수신된 목표 신호의 도착시간 t_i 으로부터 $(N-1)$ 개의 TDOA를 추출하고, 이로부터 목표와 수신기간 거리 방정식에 기초하여 형성되는 쌍곡선의 교차점으로 목표의 위치를 추정한다.

목표의 위치를 추정하기 위해 우리가 알 수 있는 정보는 각 수신기의 위치와 각 수신기에서 동일 신호를 수신한 시간이다. 목표의 동일 신호를 i 번째 수신기에서 측정된 시간을 t_i 라 하면 기준이 되는 첫 번째 수신기와 i 번째 수신기 사이의 TDOA, ΔT_{1i} 는 다음과 같다.

$$\Delta T_{1i} = t_i - t_1 \quad (i = 2, 3, \dots, N) \quad (1)$$

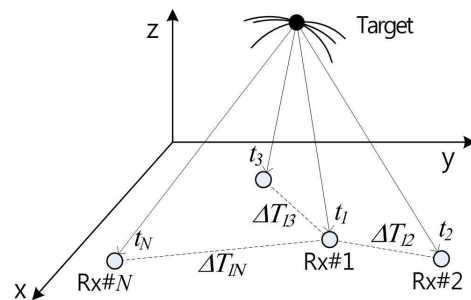


그림 1. TDOA 기반의 위치탐지 개요.

한편, 목표와 i 번째 수신기 간의 거리는 R_i 이라 정의하고, R_1 과 R_i 사이의 거리차이 R_{1i} 는 두 수신기 간 신호 측정 시간의 차이와 빛의 속도 c 의 곱과 같으므로 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} R_{1i} &= c \times \Delta T_{1i} = R_1 - R_i \quad (i = 2, \dots, N) \\ &= \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \\ &\quad - \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 (x_i, y_i, z_i) 는 i 번째 수신기의 위치이고, (x, y, z) 는 목표의 위치이다. 4개 이상의 수신기를 사용하는 경우 최소 3개의 쌍곡선 수식이 식 (2)와 같이 형성되며, 비선형방정식의 해인 이들의 교차점을 구하여 목표의 위치를 구할 수 있다[4].

III. TDOA 위치탐지시스템에서의 DOP

다양한 형태의 DOP을 계산하기 위한 TDOA 기반의 시스템의 기하학적 행렬 H 는 다음과 같이 정의된다[5].

$$H = \begin{bmatrix} \frac{x-x_1}{R_1} - \frac{x-x_2}{R_2} & \frac{y-y_1}{R_1} - \frac{y-y_2}{R_2} & \frac{z-z_1}{R_1} - \frac{z-z_2}{R_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x-x_1}{R_1} - \frac{x-x_N}{R_N} & \frac{y-y_1}{R_1} - \frac{y-y_N}{R_N} & \frac{z-z_1}{R_1} - \frac{z-z_N}{R_N} \end{bmatrix} \quad (3)$$

DOP의 종류로는 2차원 평면 위치오차정도를 나타내는 HDOP, 고도의 오차정도를 나타내는 VDOP(Vertical DOP), 평면과 고도를 모두 고려하

는 3차원적인 위치오차정도를 나타내는 PDOP 그리고 기하학적 위치오차 정도를 나타내는 GDOP(Geometric DOP)이 있으며 이에 따른 수식 표현은 다음과 같다.

$$HDOP = \sqrt{((H^T H)^{-1})_{1,1} + ((H^T H)^{-1})_{2,2}} \quad (4)$$

$$VDOP = \sqrt{((H^T H)^{-1})_{3,3}} \quad (5)$$

$$PDOP = \sqrt{((H^T H)^{-1})_{1,1} + ((H^T H)^{-1})_{2,2} + ((H^T H)^{-1})_{3,3}} \quad (6)$$

$$GDOP = \sqrt{\text{trace}((H^T H)^{-1})} \quad (7)$$

TDOA 기반의 시스템의 기하학적 행렬 H 에는 시간 요소가 없기 때문에 PDOP과 GDOP이 같다[5]. 이와 같이 DOP은 수신기의 배치와 목표의 위치에 따라 그 값이 결정된다. 본 논문에서는 2차원과 3차원의 위치오차 분석을 위해 HDOP과 PDOP을 이용한다.

IV. 모의실험 및 위치탐지정확도 분석

본 논문을 위한 주요 모의실험 환경은 다음과 같다. 목표와 수신기간에 LOS(Line of Sight)환경을 고려하였으며, 모니터링 지역은 첫 번째 기준 수신기로부터 200km로 설정하였다. 수신기의 좌표는 미터 단위로 (0, 0, 200), (22000, 26000, 500), (-30000, -8000, 700), (7000, -30000, 0)로 비대칭적으로 설정하였다. 수신기 간 시각동기화 오차는 20ns로 설정하였으며, 시각해상도는 1ns이다. 또한, 목표의 고도는 10km로 고정하였다.

그림 2의 (a)와 (b)는 모의실험을 통해 도출된 목표기준 CEP와 SEP를 미터 단위로 등고선 그래프로 보여주고 있다. 여기서 목표기준 CEP는 위치정확도의 대표적인 측정치로, 목표의 위치의 2차원 수평좌표를 기준으로 추정된 위치의 50%가 포함되는 원의 반경을 나타낸다. 예를 들어 임의의 위치에서 CEP가 $x[m]$ 가정하면, 추정된 위치가 실제 그 위치에 있는 목표와의 거리 오차가 $x[m]$ 이내일 확률이 50%임을 의미한다[6]. 마찬가지로, 목표기준 SEP는 3차원 좌표를 기준으로 추정된 위치의 50%가 포함되는 구의 반경을 의미한다.

한편, 그림 2의 (c)와 (d)는 동일한 수신기 배치구조에서의 HDOP 분포와 PDOP 분포를 등고선으로 보여주고 있다. 2차원과 3차원에 대한 위치탐지정확도를 분석해보면, 그림 2의 (a)와 (c), 그리고 (b)와 (d)의 등고선의 분포 형태가 거의 일치하고 그 값만 다를 수 있어 다음과 같은 식을 성립할 수 있다.

$$\begin{cases} CEP = HDOP \times T_{CEP, err} \\ SEP = PDOP \times T_{SEP, err} \end{cases} \quad (8)$$

여기서 $T_{X, err}$ 은 위치탐지시스템에서 목표오차범위를 나타내는 인자로 정의한다. 목표오차범위 $T_{X, err}$ 은 시스템의 성능에 따라 달라지므로, 최소한의 지점에서 모의실험 등을 통해 CEP 또는 SEP를 구하여 DOP과의

관계로 인해 도출할 수 있다. 본 논문에서 고려하는 환경에서는 목표의 위치가 (0, 100)km 지점에서 CEP가 약 93m이고 HDOP이 약 19이므로 $T_{CEP, err}$ 은 약 4.895이 된다. 마찬가지로 같은 지점에서 SEP는 약 220m, PDOP은 약 45로 $T_{SEP, err}$ 은 약 4.889이 되어, 본 모의실험 환경에서는 SEP 위치탐지 성능예측에도 같은 값으로 사용할 수 있음을 보여주고 있다. 즉, 그림 2의 HDOP(c)와 PDOP(d)에 $T_{CEP, err}$ 과 $T_{SEP, err}$ 의 값을 5로 동일하게 적용한다면, 등고선이 그려지는 영역이 그림 2의 CEP(a)와 SEP(b)와 거의 일치하게 됨을 확인할 수 있다.

이와 같이 예측하고자 하는 시스템에서 시각동기화 오차 등의 환경을 고려하여 최소 지점에 대한 모의실험을 통하여 목표오차범위 인자를 도출하여 DOP에 적용하면 낮은 연산량으로 빠르게 시스템의 위치탐지정확도를 예측할 수 있다. 여기서, 관찰하고자 하는 지역이 매우 넓거나 보고자 하는 해상도가 커질수록 그 연산량은 상대적으로 매우 급격히 낮아진다. 한편, DOP 분포만으로도 관찰하고자 하는 지역 전체에 대한 위치탐지정확도의 경향을 손쉽게 예측할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 TDOA 기반의 위치탐지시스템에서 수신기의 배치와 목표의 위치만으로 DOP의 분포를 분석하여 시스템의 위치탐지 성능을 예측할 수 있음을 확인하였다. 또한, 시스템의 목표오차범위 인자를 도출하여 적용하면 실제 모의실험을 통한 CEP 또는 SEP와 거의 일치함을 확인하여 매우 낮은 연산량으로 위치탐지정확도를 예측하여 활용할 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Y.-P. Lei, F.-X. Gong, and Yan-Qiu Ma, "Optimal distribution for four-station TDOA location system," *Biomedical Engineering and Informatics Int. Conf.*, vol. 7, pp. 2858-2862, Oct. 2010.
- [2] J. D. Bard and F. M. Ham, "Time difference of arrival dilution of precision and applications," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 47, no. 2, pp. 521-523, Feb. 1999.
- [3] 강희원, 임덕원, 황동환, 이상정, "TDOA기반 위치추적시스템에서 리더 배치와 DOP의 관계," *제어로봇시스템학회논문지*, 제17권, 제1호, pp. 68-71, 2011. 1.
- [4] 공형민, 성태경, 권영미, "UWB 실내 측위를 위한 TDOA 위치결정기법," *전자공학회논문지 TC편*, 제42권, 제1호, pp. 9-15, 2005. 1.
- [5] B. Li, A. Dempster, and J. Wang, "3D DOPs for Positioning Applications Using Range Measurements," *Wireless Sensor Network*, vol. 3, no. 10, pp. 334-340, 2011.
- [6] 김산해, 박진태, 조제일, 송규하, "TDOA 기반의 방향탐지 정보를 이용한 위치탐지 성능 분석," *신호처리학회논문집*, 제25권, 제1호, pp. 167-170, 2012. 9.

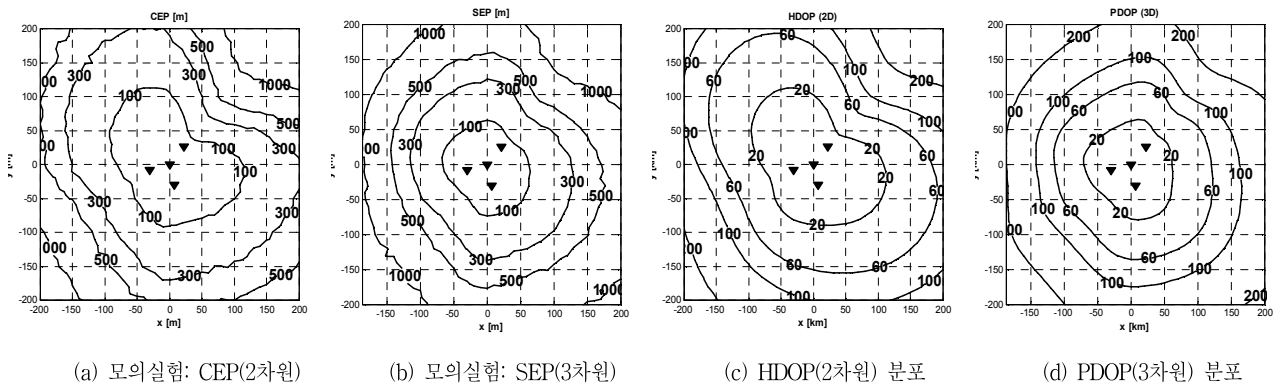


그림 2. 실제 모의실험을 통한 위치탐지정확도와 DOP의 분포.