

위치추정을 위한 TOA 및 TDOA 기법 성능 비교

조성룡¹, 최윤섭¹, 고재영¹, 박찬식², 백정기¹, 지규인³, 이동국⁴, 이상정*

¹충남대학교, ²충북대학교, ³건국대학교, ⁴국방과학연구소, *충남대학교

jackycho@cnu.ac.kr, *eesjl@cnu.ac.kr

A Performance Comparison of TOA and TDOA methods for position estimation

Sung Lyong Cho¹, Yun Sub Choi¹, Jae Young Ko¹, Chansik Park², Jung-Ki Pack¹,
Gyu-In Jee³, D. G. Lee³ and Sang Jeong Lee*

Chungnam National Univ.¹, Chungbuk National Univ.², KonKuk Univ.³,
Agency for Defence Development⁴, *Chungnam National Univ.

요약

GNSS나 WiFi 등 전파를 수신하여 위치를 구하는 응용에서 수신기 위치는 측정치의 종류와 처리방법에 따라 TOA, TDOA 및 AOA 기법으로 나눌 수 있다. TOA 기법은 송신기와 수신기 사이의 전파 도달시간을 측정치로 사용하여 삼각측량법으로 위치를 구하고, TDOA는 위성파와 수신기 사이의 거리 차이를 이용하여 쌍곡선들의 교차점으로 위치를 계산한다. 본 논문에서는 위치 추정을 위한 쉽게 적용 가능한 TOA 기반의 LS, Savarese 기법과 TDOA 기반의 LS, SX 기법을 상용 수신기에서 수집한 원시측정치를 이용하여 항법 성능에 대하여 비교 분석하였다.

I. 서론

위치기반서비스(LBS: Location-Based services)에서 적용되는 무선 측위 기술은 CDMA, WLAN, UWB 등의 무선 통신용 인프라를 사용하여 Cell-ID 및 TOA(Time of Arrival), TDOA(Time Difference of Arrival), AOA(Angle of Arrival), fingerprint 기법 등이 있다[1]. 같은 방법으로 GNSS(Global Navigation Satellite Systems) 기반의 위치 추정에는 무선 측위 기술로 분류되며 TOA, TDOA 및 AOA 기법 등으로 사용자의 수신기 위치를 추정할 수 있다. TOA 기법은 위치가 알려진 다수의 위성과 사용자 수신기 사이의 신호 전송 시간을 측정함으로써 수신기의 위치를 추정한다. TDOA 기법은 위성 사이의 시간 동기를 필요로 하지 않으며 위성들간의 차분함으로써 수신기의 위치를 추정한다. AOA 기법은 배열안테나를 이용하여 신호들의 입사각을 이용하여 수신기의 위치를 추정한다. 본 논문에서는 위치 추정 기법 중에서 TOA와 TDOA 기법에 대해서 설명하고, TOA 기반의 LS(Least Squares estimation), Savarese 기법과 TDOA 기반의 LS, SX(Spherical Intersection) 기법을 구현하고 성능을 비교 분석하였다.

II. 위치 추정 기법

GNSS를 이용한 위치 추정은 다수의 위성 신호로부터 송신된 신호를 수신하여 사용자의 수신기 위치를 추정한다. 단일 수신기를 이용한 위치 추정기법은 위치 추정을 위한 측정치 계산 방법에 따라 TOA 방식과 TDOA 방식으로 구분한다.

1. TOA 기반 위치 추정 기법

TOA 기법은 위성과 수신기 사이의 전송시간을 이용하여 삼각측량법으로 구하며, TOA 기반 거리 측정치는 다음 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$r_i = c \times (t_0 - t_i) \quad (1)$$

여기서 c 는 광속, t_0 는 수신기가 위성 신호를 수신한 시각, t_i 는 i 번 위성이 위성 신호를 송신한 시각이다. 위의 식과 같이 위성신호가 수신기까지의 도달 시간을 계산하려면 수신기는 위성과 시각 동기화 이루어져야 한다. 위성 i 와 수신기 사이의 거리 측정치는 식 (2)로 나타낼 수 있다. 여기서 $S_i = [X_i \ Y_i \ Z_i]^T$ 는 위성 i 의 위치 벡터, $X = [x \ y \ z]^T$ 는 수신기의 위치 벡터, t_u 는 수신기 시계오차, 측정잡음 v_i 는 평균 0이고 표준편차 σ_i 인 AWGN, r_i 는 송신기와 수신기 사이의 거리를 나타낸다.

$$\rho_i = r_i + ct_u + v_i, \quad v_i \sim N(0, \sigma_i^2) \quad (2)$$

LS 기법은 가시위성($n \geq 3$)에서 거리 측정치를 이용하여 위치를 추정을 위한 선형화한 측정 방정식은 (3)과 같다[2].

$$\delta \rho = H_n \delta x + v \quad (3)$$

$$H_n = \begin{bmatrix} h_x^1 & h_y^1 & h_z^1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_x^n & h_y^n & h_z^n & 1 \end{bmatrix}, h_x^i = \frac{X_i - x_0}{r_{0i}}, h_y^i = \frac{Y_i - y_0}{r_{0i}}, h_z^i = \frac{Z_i - z_0}{r_{0i}}$$

여기서 $\delta x = [\delta x \ \delta y \ \delta z \ c \delta t_u]^T$ 는 상태벡터 오차, $\delta \rho = [\delta \rho_1 \ \delta \rho_2 \ \dots \ \delta \rho_n]^T$ 는 의사 거리 오차 벡터, H_n 은 측정행렬, $[h_x^i \ h_y^i \ h_z^i]$ 는 단위 시선벡터, $[x_0 \ y_0 \ z_0]$ 는 선형화 기준점(nominal point), r_{0i} 는 i 위성에서 선형화 기준점까지의 의사거리이다. 식 (3)의 측정방정식을 이용하여 최소 자승법으로 구한 위치 오차 추정은 식(4)와 같다.

$$\hat{\delta x} = (H_n^T H_n)^{-1} H_n^T \delta \rho \quad (4)$$

위치 오차 추정치를 기준점에 더하여 최종위치를 구할 수 있으며, 구해진 위치를 이용하여 위치 오차 추정치가 임계값 이하일 때까지 반복 수행한다. 최소자승법은 다른 위치 추정 기법에 비하여 동작 범위가 좁은 WSN(Wireless Sensor Network)을 이용한 실내항법의 경우 선형화 기준점으로 사용되는 초기 위치 오차 때문에 수렴하지 않는 경우가 발생한다 [3]. 이러한 초기 위치의 영향을 받지 않는 Savarese 기법이 알려져 있다 [3]. Savarese 기법은 측정식 (1)에서 측정 잡음과 수신기 시계오차가 의사 거리에 비해 충분히 작다는 가정하에 양변을 제곱하고, n 개의 위성신호

에서 n 번째 값을 기준으로 i 번째 값을 빼면 식(5)과 같다.

$$2[S_n^T - S_i^T]x = \rho_i^2 - \rho_n^2 - S_i^T S_i + S_n^T S_n \quad (5)$$

가시위성($n \geq 3$)에서의 측정식은 (6)과 같다.

$$2A_s x_s = b_s \quad (6)$$

여기서 $x_s = [x_s \ y_s \ z_s]^T$ 는 Savarese 기법을 이용한 수신기 위치벡터이다. 식 (6)이용한 최소자승법을 적용하면 식 (7)과 같다[3].

$$\hat{x}_s = \frac{1}{2}(A_s^T A_s)^{-1} A_s^T b_s \quad (7)$$

2. TDOA 기반 위치 추정 기법

TDOA 기법은 위성과 수신기사이의 시각 동기가 필요로 하지 않으며, 위성과 수신기 사이의 거리 차만을 이용하여 쌍곡선들의 교차점을 계산하여 구하며, TDOA 기반 거리 측정치는 다음 식 (8)과 같다.

$$\rho_{i,j} = c \times [(t_0 - t_i + t_u) - (t_0 - t_j + t_u)] = c \times (t_i - t_j) \quad (8)$$

여기서 ρ_d 는 두 위성으로부터 수신기까지의 거리간 차이, t_0 은 수신기가 위성신호를 수신한 시각, t_i 는 i 위성에서 송신한 시각, t_j 는 j 위성에서 송신한 시각이다. 간접해의 LS 기법은 가시위성($n \geq 3$)에서 거리간 차이 측정치를 이용하여 위치를 추정을 위한 선형화한 측정 방정식은 (9)와 같다[3].

$$\delta \rho_d = H_{dn} \delta x + w \quad (9)$$

$$H_{dn} = \begin{bmatrix} -h_x^1 + h_x^n & -h_y^1 + h_y^n & -h_z^1 + h_z^n & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -h_x^{n-1} + h_x^n & -h_y^{n-1} + h_y^n & -h_z^{n-1} + h_z^n & 0 \end{bmatrix}$$

여기서 $\delta x = [\delta x \ \delta y \ \delta z \ \delta t_u]^T$ 는 상태벡터 오차, $\delta \rho_d = [\delta \rho_{1,n} \ \delta \rho_{2,n} \ \dots \ \delta \rho_{n-1,n}]^T$ 는 의사거리 오차 벡터, H_{dn} 은 측정행렬이다. 식 (9)의 측정방정식을 이용하여 최소 자승법으로 구한 위치 오차 추정은 식 (10)과 같다.

$$\hat{\delta x} = (H_{dn}^T H_{dn})^{-1} H_{dn}^T \delta \rho_d \quad (10)$$

직접해의 SX 기법은 TDOA 기반 거리 측정치를 j 번째 위성을 위치가 (0, 0, 0)인 기준 위성으로 가정하면 j 번째 위성과 수신기 사이의 의사거리는 $\rho_j = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 이다. 이를 이용하여 측정식을 정리하면 식 (11), (12)와 같다.

$$\rho_i^2 = \rho_j^2 + \rho_{i,j}^2 + 2\rho_j \rho_{i,j} = \rho_j^2 + K_i - 2(X_i x + Y_i y + Z_i z) \quad (11)$$

$$K_i - \rho_{i,j}^2 - 2\rho_j \rho_{i,j} = 2(X_i x + Y_i y + Z_i z) \quad (12)$$

식 (11)을 이용한 측정식을 벡터 형태로 정리하면 식(13)과 같다.

$$\hat{\delta} - 2\rho_j \hat{d} = 2S X_{SX} \quad (13)$$

$$\hat{\delta} = \begin{bmatrix} K_2 - \rho_{2,1}^2 \\ \vdots \\ K_n - \rho_{n,1}^2 \end{bmatrix}, \hat{d} = \begin{bmatrix} \rho_{2,1} \\ \vdots \\ \rho_{n,1} \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix}, X_{SX} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

식 (13)을 최소자승법을 적용하면 식(14)와 같다[4].

$$\hat{X}_{SX} = \frac{1}{2}(S^T S)^{-1} S^T (\hat{\delta} - 2\rho_j \hat{d}) \quad (14)$$

III. 성능 비교 분석

본 논문에서는 상용 수신기(NovAtel Propak-V3)를 이용하여 원시 측정치(Raw Measurements)와 위성의 위치 정보를 RINEX 형식의 파일로 수집하였다. 수집한 정보는 총 900개의 측정치로 1Hz 간격으로 충남대학교 측지점에서 수집하였다. 수집된 측정치의 가시위성 수는 10개로 PDOP은 1.7 이하였다. 위치 추정 기법의 성능 분석은 MATLAB을 이용하여 위치 추정 기법을 구현하고 항법 성능을 비교 분석하였다.

표 1. 위치 추정 오차[RMS]

		X축 평균/ 표준편차[m]	Y축 평균/ 표준편차[m]	Z축 평균/ 표준편차[m]
TOA 기법	LS	-9.5368/ 0.5530	9.6765/ 1.0024	11.5144/ 0.4777
	Sav.	-11.2031/ 0.9111	17.9045/ 1.6978	15.1287/ 0.4908
TDOA 기법	LS	-9.5368/ 0.5530	9.6765/ 1.0024	11.5144/ 0.4777
	SX	-9.6513/ 0.4299	12.6422/ 1.3982	14.0896/ 0.3465

상용 수신기의 경우 GPS L1 신호만을 이용한 위치 추정결과와 RMS가 약 2m인 것보다 나쁜 것을 확인하였다. 이는 위치 추정 기법에 사용한 원시 측정치가 오차 보정을 하지 않은 측정치로 위치 추정 오차를 증가시켰다. 위성 측정치가 4개 이상인 경우 TOA 기반의 LS 기법과 TDOA 기반의 LS 기법[6]은 위치 오차 추정치가 소수점 8자리까지 동일한 것을 확인하였다. TOA의 LS 기법의 성능이 Savarese 기법보다 우수한 성능을 보이는 것은 Savarese 기법의 경우 측정 잡음을 고려하지 않고, 측정치를 제공하는 과정에서 제곱손실(squaring loss)이 발생하며 측정치의 차분 과정에서 다시 오차가 증폭된 것이다[4]. TDOA 기법 중에 LS 기법이 SX 기법보다 성능이 좋은 것은 측정치를 제공하는 과정에서 제곱 손실 발생으로 확인된다.

IV. 결론

본 논문에서는 TOA 기반 위치 추정 기법과 TDOA 기반 위치 추정 기법의 측정치 생성과 기존에 연구된 위치 추정 기법들에 대해서 언급하였다. TOA 기반의 LS, Savarese 위치 추정 기법과 TDOA 기반의 LS, SX 위치 추정 기법을 MATLAB으로 구현하고 상용수신기로 수집한 원시 측정치를 이용하여 항법 성능을 확인하였다. LS 위치 추정 기법은 TOA 기반과 TDOA 기반에서 동일한 성능을 가지며, LS 위치 추정 기법이 Savarese와 SX 위치 추정 기법보다 더 나은 성능을 보였다.

추후에는 본 논문에서 고려한 위치 추정 기법 외의 다른 위치 추정 기법들에 대해서 구현 및 성능을 비교 분석할 예정이다. 기존에 알려진 위치 추정 기법들의 성능을 분석하고 위치 추정 기법의 성능 향상을 위한 위치 추정 기법 연구를 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방위성항법특화 연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 조영수 외 5명, “실내의 연속측위 기술 동향,” 한국전자통신연구원 전자통신동향분석 22권 3호, pp. 20-28, 2007. 06.
- [3] 신동호, 성태경, “TOA기법과 TDOA기법의 위치 오차 특성 및 DOP 비교,” 제어자동화시스템공학 논문지 6권 10호, pp. 924-928, 2000. 10.
- [3] 박찬식, 임재걸, “측정잡음을 고려한 위치결정기법의 성능비교,” 제어로봇시스템학회 논문지 16권 12호, pp. 1176-1181, 2010. 12.
- [4] Julius O. smith, Jonathan S. abel, “Closed-Form Least-Squares Source location Estimation from Range-Difference Measurements,” IEEE Trans. Acoust.. Speech Signal Process., no.12, vel.35, pp. 1661-1669, Dec. 1987.