

GPS/TDOA 혼합을 이용한 무선 측위 알고리즘

손형철, 김욱, 이형근, 자유인, 이장규
 서울대학교, 서울대학교, 서울대학교, 건국대학교, 서울대학교

Mobile Station Location Using GPS/TDOA

Hyung Chul Son, Wuk Kim, Hyung Keun Lee, Gyu In Jee and Jang Gyu Lee
 Seoul National Univ., Seoul National Univ., Seoul National Univ., Konkuk Univ. and Seoul Nati

Abstract - GPS 단독에 의한 이동국의 위치 결정 방법은 도심이나 실내와 같이 위성 가시성이 결여된 환경에서 위치해를 생성하지 못하는 단점이 있다. 반면 TOA나 TDOA에 의한 방법에 의하여 이동국의 위치결정을 시도할 경우 기지국과 이동국 사이의 밀집한 건물 등에 의하여 NLOS 오차가 발생하게 된다.

본 논문에서는 GPS와 TDOA의 상호보완적인 특성을 이용하여 위성 가시성과 NLOS의 문제를 효율적으로 해결할 수 있는 GPS/TDOA 혼합 무선 측위 알고리즘과 NLOS 오차완화 알고리즘을 제안하였다. 이동 통신망에서 획득된 실측 측정치를 이용하여 실험을 수행하였으며, 위치 결정 영역이 확대되고 위치 정확도가 크게 향상됨을 확인 할 수 있었다.

1. 서 론

최근 이동통신망에서 단말기 사용자의 위치를 이용하는 위치 기반 서비스에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 미연방 통신위원회는 향후 미국 내 모든 무선 통신 사업자들에게 위치 정보 서비스를 주요 내용으로 하는 E-911(Enhanced-911) 규정을 마련하기도 하였다.

통신망에서 위치 기반 서비스를 제공하기 위해서는 이동국(mobile station)의 위치를 결정하는 무선 측위 기술이 필요하다. 이러한 무선 측위 방법에는 단말기에 내장된 GPS(Global Positioning System) 수신기를 이용하여 위치를 결정하는 방식과 기지국(base station)과 이동국 사이의 신호를 이용하는 통신망 기반 방식이 있다.

GPS를 이용하는 경우 개방된 실외에서는 매우 정확한 측위가 가능하다. 그러나 건물이 밀집된 도심이나 실내에서는 GPS로 위치를 결정하기 위해 필요한 4개 이상의 가시위성을 확보하기가 어렵고, TTFF(time-to-first-fix)가 길기 때문에 GPS 단독으로 위치를 결정하는데 어려움이 있다.

통신망 기반 방식에는 TOA(time of arrival), TDOA(time difference of arrival), AOA(angle of arrival) 등의 방법이 있다. 통신망 기반 방식의 경우 통화가 가능한 모든 지역에서 위치 결정이 가능하며, 주요한 오차 요인으로는 NLOS(non-line-of sight) 오차가 있다. NLOS는 LOS(line-of-sight)가 건물과 같은 장애물에 의해 차단되는 것을 말하며, 전파가 우회하여 들어오기 때문에 전파가 직접적으로 도달하는 LOS에 비해 전파의 전달 시간이 지연된다. 따라서 시각을 기반으로 하여 거리를 측정하는 TOA나 TDOA 방식에서 편향 오차(bias error)가 발생한다. NLOS 오차에 의해 수백 미터의 위치 오차가 발생하기 때문에 NLOS 오차에 강한 무선 측위 알고리즘의 개발이 필요하다.[1]

본 논문에서는 두 방식의 장단점을 보완하기 위해 GPS와 이동통신망의 신호를 혼합하여 측위의 정확도와 가용성을 확대하는 방법을 제안하고, 위치 정확도 향상을 위해 TDOA의 NLOS오차를 완화하는 알고리즘을 적용하였다. 그리고 실험을 통해 CDMA 통신망에서

TDOA와 GPS 측정치를 이용하여 혼합 위치결정 알고리즘의 성능을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 위치 결정 알고리즘

E-911과 같은 시스템의 위치기반 서비스는 측위를 요구하는 순간에서의 측정치만을 이용하여 위치 결정이 가능해야 하고, 사용자가 움직이지 않고 정지한 상태에서 위치결정이 가능해야 한다. 다음에 소개되는 GPS/TDOA 혼합 위치 결정 알고리즘과 NLOS오차 완화 알고리즘은 측위가 요구되는 순간의 GPS와 TDOA 측정치만을 사용하기 때문에 이러한 시스템에 적합하다.

2.1.1 GPS/TDOA 혼합 위치 결정 알고리즘

TDOA는 두 기지국으로부터 전송된 신호의 전달 지연 시간의 차를 나타내고, 식(1)과 같이 광속을 곱하여 사용자의 위치에서 두 기지국간의 거리 차를 측정할 수 있다. 이는 두 기지국을 초점으로 하는 쌍곡선을 이루게 된다.

$$R_{i,1} = c \cdot \tau_{i,1} = R_i - R_1 = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (1)$$

여기서, (x, y)는 사용자의 위치, (x₁, y₁)은 기준 기지국의 위치이고 (x_i, y_i)는 주변 기지국의 위치이다.

사용자의 2차원 위치를 결정하기 위해서는 2개 이상의 TDOA 측정치가 필요하고, 사용자의 위치는 그림 1과 같이 쌍곡선들의 교점에 놓이게 된다.

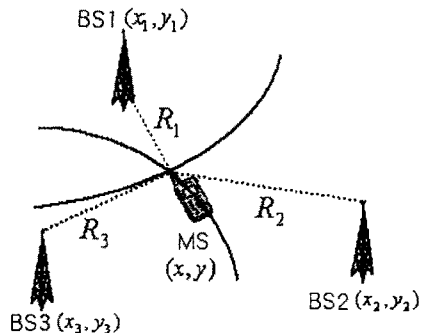


그림 1. TDOA 위치 결정

N개의 GPS 의사거리와 M개의 TDOA가 측정되었을 때, GPS와 TDOA를 혼합하여 이동국의 위치를 결정하기 위해 다음과 같이 반복적인 최소자승법을 사용한다.

$$\begin{aligned} \delta \hat{x} &= (G^T G)^{-1} G^T h \\ \hat{x} &= \hat{x}_0 + \delta \hat{x} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

$$\hat{x} = [x \ y \ b]^T$$

$$h = \begin{bmatrix} \rho_1 - \hat{\rho}_1 \\ \vdots \\ \rho_N - \hat{\rho}_N \\ \hline R_{2,1} - (R_2 - R_1) \\ \vdots \\ R_{M+1,1} - (R_{M+1} - R_1) \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} -\frac{(x_1-x)}{r_1} & -\frac{(y_1-y)}{r_1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{(x_N-x)}{r_N} & -\frac{(y_N-y)}{r_N} & 1 \\ \hline \frac{(x_1-x)}{R_1} & \frac{(x_2-x)}{R_2} & \frac{(y_1-y)}{R_1} & \frac{(y_2-y)}{R_2} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{(x_1-x)}{R_1} & \frac{(x_{M+1}-x)}{R_{M+1}} & \frac{(y_1-y)}{R_1} & \frac{(y_{M+1}-y)}{R_{M+1}} & 0 \end{bmatrix}$$

- (x, y) : 이동국의 2차원 위치
- b : GPS 수신기 시계오차
- (x_N, y_N) : GPS 위성의 위치
- ρ_N : GPS 의사거리
- r_N : GPS 위성과 이동국간의 거리
- (x_M, y_M) : 기지국의 위치
- R_M : 기지국과 이동국간의 거리
- $R_{M,i}$: 기준 기지국과 주변 기지국간의 TDOA

2.1.2 NLOS 오차 완화 알고리즘

이동통신망에서 TDOA를 이용한 측위에서 가장 큰 오차요인은 NLOS 오차이다. 식 (2)는 TDOA 측정치의 NLOS 오차로 인해 위치해가 편향된다. NLOS 오차를 완화하기 위해 Three-Stage Constrained Optimization Filter[2]를 사용한다.

GPS와 TDOA의 혼합 측정 방정식은 다음과 같다.

$$r = h(x) + b(x) + v \quad (3)$$

여기서,

- $x \in R^n$: 이동국의 위치
- $r \in R^m$: GPS 또는 TDOA 측정치
- $h(x)$: 기지국 또는 위성과의 거리
- $b(x)$: 측정치에 포함된 편향 오차
- v : 평균 0, 공분산 R인 측정 잡음

편향 오차를 추정하여 이동국의 위치를 얻기 위한 3단계 위치 추정 필터는 다음과 같다.

$$1 \text{ 단계: } \hat{x} = (H_0^T R^{-1} H_0)^{-1} H_0^T R^{-1} (r - h(x_0) + H_0 x_0)$$

$$2 \text{ 단계: } \begin{aligned} \hat{b} &= \arg \min L(b, \lambda, s) = (z - S \cdot b)^T Q_w^{-1} (z - S \cdot b) \\ &\quad - \mu \cdot \sum_{i=1}^n \ln s_i - \lambda^T \cdot (g(b) - s) \end{aligned}$$

$$3 \text{ 단계: } \hat{x} = \hat{x} + v \hat{b} \quad (4)$$

2.2 실험 및 결과

실험은 4개 이상의 GPS 가시위성의 확보가 어렵고, TDOA의 NLOS 오차가 발생하기 쉬운 5층 건물의 1층 중앙에서 5m 떨어진 실외에서 수행하였다. CDMA 이동통신망의 TDOA를 측정하기 위해 기지국에서 이동국으로 전달되는 순방향 채널의 파일럿 신호(pilot signal)를 이용하였다.

알고리즘의 성능을 평가하기 위하여, 100개의 GPS와 TDOA 측정치를 획득하여 혼합 위치 결정 알고리즘을 적용하고 RMS(root-mean-square) 오차를 계산하였다.

2.2.1 TDOA 측정치 획득

CDMA 이동통신망에서 TDOA를 측정하기 위해 파일럿 채널의 신호를 사용한다. 파일럿 채널은 그림 2와 같이 short PN(Pseudorandom Noise) 코드에 의해 QPSK 확산 변조되어 있다. short PN 코드의 주기는 32768칩(chips)이고, 전송속도는 1.2288Mcps이다.[3] 따라서, 한 칩은 0.813 μsec에 해당한다.

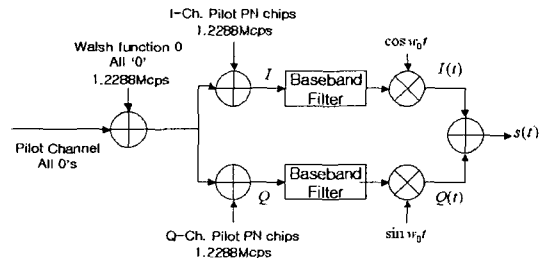


그림 2. 순방향 CDMA 채널에서의 파일럿 채널

현재 CDMA 통신망에서 PN 코드를 이용한 동기는 1/8칩의 분해능으로 이루어진다. 이를 이용하여 TDOA를 측정할 경우, 약 30.5m의 분해능 오차를 갖는다.

동기식 CDMA 시스템에서는 각 기지국을 구분하기 위해 PN 오프셋(offset)을 이용하여 동일한 short PN 코드의 시작점을 달리하는 방식을 사용한다.

기지국으로부터 받은 파일럿 신호의 I와 Q 데이터와 주변 기지국들에 대한 PN 오프셋 정보를 이용하여, 동기누적(coherent-detection integration)과 후 검출 누적(post-detection integration)을 수행하여 기준 기지국과 주변 기지국들의 전파 전달 지연 시간차를 찾는다.[4] 이 시간차가 TDOA에 해당된다.

2.2.2 GPS/TDOA 혼합 위치 결정 결과

실험을 통해 얻어진 GPS 의사거리와 TDOA 측정치를 이용하여 혼합 위치 결정 알고리즘과 NLOS 오차 완화 알고리즘으로 추정된 이동국의 위치와 주변 기지국의 위치를 ENU좌표로 나타내었다. 여기서 이동국의 실제 좌표는 (0,0)이다.

그림3-1은 TDOA만을 사용하여 최소자승법으로 이동국의 위치를 추정한 결과이고, 그림3-2는 GPS와 TDOA 측정치를 혼합 위치 결정 알고리즘과 NLOS 오차 완화 알고리즘을 적용하여 이동국의 위치를 추정한 결과를 나타낸다. 두 알고리즘을 동시에 사용하였을 때 위치 정확도가 크게 향상되는 것을 볼 수 있다.

혼합항법 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 표1에 GPS와 TDOA 측정치 수와 NLOS 오차 완화 알고리즘의 적용 여부에 따른 RMS 오차를 나타내었다. 일반적으로 GPS 위성의 수가 4개 미만인 경우 GPS 단독으로 위치를 결정할 수 없다. 이러한 경우에 TDOA 측정치와

혼합하면 위치 결정이 가능하고, NLOS 오차 완화 알고리즘을 적용하면 TDOA 측정치의 NLOS 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. NLOS 오차 완화 알고리즘을 적용한 결과에서 GPS 0개, TDOA 3개인 경우에 RMS 오차가 103.06m인 반면, GPS 1개, TDOA 3개인 경우에 오차가 113.84m로 GPS 측정치의 수가 증가하였으나, 위치 오차가 약간 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 TDOA 오차에 의해 GPS 수신기 시계오차를 제대로 추정할 수 없기 때문이다. GPS 2개, TDOA 3개인 경우 위치 오차가 47.06m로 크게 줄어드는 것을 볼 수 있다.

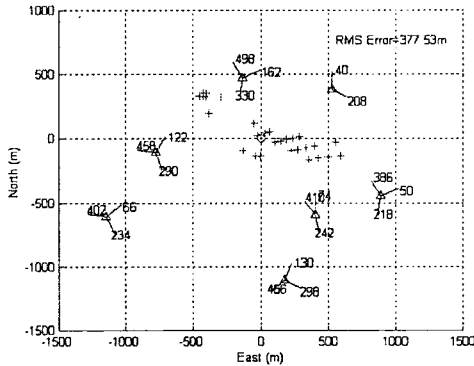


그림3 1. 이동국의 위치 추정 결과 (GPS 0, TDOA 3 / NLOS 오차 완화 적용 ×)

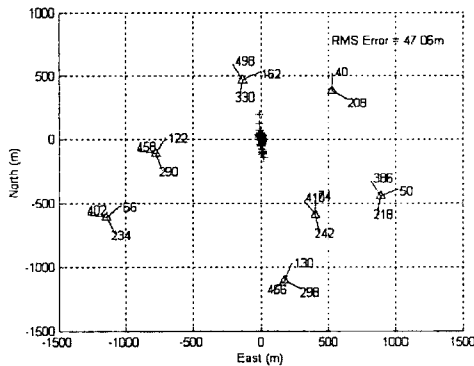


그림3 2. 이동국의 위치 추정 결과 (GPS 2, TDOA 3 / NLOS 오차 완화 적용 ○)

측정치 수		NLOS 오차 완화 적용	RMS Error
GPS	TDOA		
0	3	×	377.53 m
0	3	○	103.06 m
1	3	○	113.84 m
2	3	○	47.06 m

표 1. 혼합항법 성능 평가

3. 결 론

본 논문에서는 이동통신망에서 이동국의 위치를 결정하기 위한 GPS/TDOA 혼합 위치 결정 알고리즘을 제안하고 실제 CDMA 이동통신망에서 TDOA를 측정하여 측위 성능을 평가하였다.

GPS를 이용한 무선 측위 방식의 경우 주위가 개방된 실외에서는 상당히 정확한 위치해를 제공하지만 건물이 밀집된 도심이나 실내에서는 4개 이상의 가시위성을 확

보하기가 어렵기 때문에 이동국의 위치를 결정하지 못하게 된다. 이러한 경우 이동통신망에서의 기지국과 이동국 사이의 신호를 이용하여 얻은 TDOA 측정치를 혼합하여 위치 결정이 가능하다.

본 논문에서 제안한 혼합 위치 결정 알고리즘을 적용하면, GPS만을 이용하는 것보다 위치를 결정할 수 있는 영역이 확대된다. 그러나 TDOA 측정치에는 NLOS 오차가 포함되어 있기 때문에 이동국의 위치를 정확히 추정하기가 어렵다. 이 문제를 해결하기 위해 TDOA의 NLOS 오차를 추정하는 Three-Stage Constrained Optimization Filter를 적용하였다.

실제 이동통신망에서 실험을 통해 GPS/TDOA 혼합 위치 결정 알고리즘과 NLOS 오차 완화 알고리즘을 적용한 결과, 위치 결정 영역이 확대되고 위치 정확도가 크게 향상됨을 확인할 수 있었다.

향후 본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여, 기존에 제안된 무선 측위 알고리즘과 NLOS 오차 완화 알고리즘의 비교 분석을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 2002년 건국대학교 GPS System Lab 국가 지정 연구실 사업, Brain Korea 21 서울대-고려대 정보 기술 사업단 및 삼성전자의 지원에 의한 것이며, 지원에 감사 드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Wylie, M.P. and Holtzman J. , "The Non Line of Sight Problem in Mobile Location Estimation", 5th IEEE Int. Conf. on Universal Personal Communication, Vol.2, pp.827-831, 1996
- [2] Wuk Kim, "Increase of positioning robustness by integration of CDMA and GPS", The 8th GNSS Workshop International Session, pp124-129, 2001
- [3] Man Young Rhee, "CDMA Network Security", Prentice Hall, 1998
- [4] Andrew J. Viterbi, "CDMA Principles of Spread Spectrum Communication", Addison Wesley, 1995