

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.6.191>

IIBC 2016-6-24

TDOA 위치 추정 시스템에서의 신호 샘플링 속도에 따른 위치 오차에 관한 연구

A Study on Positioning Error according to Signal Sampling Rate in TDOA Positioning System

오종택*

Jongtaek Oh*

요 약 실내에서의 위치를 추정하기 위한 기술들과 이를 이용한 다양한 서비스들이 활발하게 연구 개발되고 있다. 다양한 위치 추정 기술들이 있으며 그 중에서 음향 신호를 이용한 TDOA(Time Difference of Arrival) 위치 추정 기술의 정밀도가 가장 높은 장점이 있다. 특히 일반 사용자들이 스마트폰을 보편적으로 사용하므로 스마트폰의 실내 위치를 추정하는 것이 매우 중요하며, 스마트폰에서 음향 신호를 사용하여 상대 위치를 추정하기 위해서는 TDOA 기술이 사용된다. 한 편 음향 신호를 수신하여 상대 위치를 추정하기 위해서는 음향 신호를 디지털 신호로 변환하여 신호 처리를 해야 하는데, 샘플링 주파수가 높을수록 위치 추정 정확도가 증가하지만 신호 처리 시간이 증가하는 단점이 있다. 본 논문에서는 음향 신호의 샘플링 속도에 따른 위치 추정 오차를 분석하고, 위치 추정 장치에서의 적절한 샘플링 속도를 제시한다.

Abstract A development on the indoor positioning technologies and services has been proceeded very actively. Among the several positioning technologies, the TDOA(Time Difference of Arrival) technology using acoustic signal has the best positioning performance. Because so many people use their own smartphones, the location of the smartphone is important, and the TDOA technology should be employed to use the acoustic signal for the positioning. For the digital signal processing with the acoustic signal, the signal should be sampled, and as the sampling rate increases, the positioning accuracy could be improved instead of processing time burden. In this paper, the position estimation error according to the sampling rate is analyzed, and the appropriate sampling rate for the positioning system is proposed.

Key Words : sampling rate, position error, indoor positioning, TDOA

1. 서 론

실외에서의 위치는 동시에 4개 이상의 미국의 GPS(Global Positioning System) 위성의 신호를 수신

받아 절대 좌표를 추정하고 있고, 이를 기반으로 차량 항법 장치를 비롯한 다양한 서비스가 개발되어 사용되고 있다. 또한 스마트폰이 크게 활성화되어 대부분의 사용자들이 항상 스마트폰을 휴대하고 생활하므로 스

*정희원, 한성대학교 전자정보공학과
접수일자: 2016년 9월 12일, 수정완료: 2016년 10월 25일
게재확정일자: 2016년 12월 9일

Received: 12 September, 2016 / Revised: 25 October, 2016

Accepted: 9 December, 2016

*Corresponding Author: jtoh@hansung.ac.kr

Dept. of ICs Engineering, Hansung University, Korea

마트폰에 내장된 GPS 수신기와, 인터넷으로 내려 받을 수 있는 전자 지도를 기반으로 현재의 위치와 목적지에 대한 경로 정보 및 주변 정보에 대해 매우 편리하게 사용할 수 있다.

그러나 사용자가 스마트폰을 가지고 실내로 진입하면 위치 기반 서비스를 거의 사용할 수 없게 된다. 실내에 GPS 위성과 같은 별도의 위치 신호 발생 장치가 없기 때문이다. 대신에 기존에 구축된 무선랜 공유기의 전파 신호나 지자기 신호의 데이터 정보를 스마트폰에서 수신하여 별도의 장치 없이 실내 위치를 추정하는 기술이 활발하게 연구되고 있다. 그러나 해당 신호를 사전에 측정하여 데이터베이스를 구축해야 하는 어려움이 있고, 전파 신호의 변경과 스마트폰 지자기 센서의 보정 필요성 등으로 인해 정밀한 실내 위치 추정은 어려운 상태이다^[1].

하나의 신호원으로부터 여러 개의 수신기까지의 전파 지연 시간을 측정하여 신호원의 상대 위치를 추정하는 TDOA 기술은 오래 전부터 연구되어 왔다^[2,4]. 특히 TOA(Time of Arrival) 방식은 신호 발생의 기준 시간 정보가 필요한 것에 비해 TDOA 방식은 이것이 필요 없으므로 음향 신호를 이용한 스마트폰의 상대 위치 추정에 적합하다. 그 이유는 스마트폰의 경우 범용 단말기이고 기준 시간 정보를 정확하게 전달하는 방법이 없기 때문이다. 즉, 스마트폰의 플래쉬 신호는 스마트폰이 주머니에 있는 경우에 소용이 없으며, 무선랜 신호나 블루투스 신호는 CSMA(Carrier Sensed Multiple Access) 방식을 사용하므로 데이터 전송 시간 지연이 일정하지 않기 때문이다^[5].

스마트폰의 스피커에서 발생되고 실내 위치 추정 장치의 여러 개의 마이크로 수신된 음향 신호는 아날로그 신호이므로 위치 추정 장치에서 스마트폰의 상대 위치를 추정하기 위해서는 디지털 신호로 샘플링되고 양자화 되어야 한다. 통상적으로 디지털 신호 처리 시스템에서 샘플링 속도가 높을수록 또한 양자화 비트수가 많을수록 원래의 아날로그 신호를 충실하게 변환한 것이고, 따라서 처리 결과가 정확해진다. 그러나 샘플링 속도가 높을수록 다량의 디지털 데이터가 생성되므로 디지털 데이터를 저장하는 메모리 공간이 많이 필요하며 신호를 처리하기 위한 계산량과 시간이 급격하게 증가하게 된다.

이것은 저가의 실내 위치 추정 장치와 같은 소형 임

베디드 시스템의 경우 큰 메모리 크기나 많은 계산량은 실시간 처리에 큰 제약 조건이 된다. 특히 음향 신호를 통해서 데이터를 전송하거나, 위치 추정 거리를 멀게 하기 위해서 음향 신호의 길이가 긴 경우에는 샘플링을 해야 하는 시간이 수 초에 해당하므로 샘플링 속도에 따라 저장되는 데이터의 양이 크게 달라진다.

실내 위치 추정 장치에서 수신 신호의 양자화 비트 수는 보통 8 비트이고 샘플링 속도는 개발자가 설정할 수 있다. 따라서 실내 위치 추정을 허용되는 오차 범위 이내에서 수행하기 위해서는 적절한 샘플링 속도를 분석해야 한다. 본 논문에서는 스마트폰의 음향 신호를 사용한 TDOA 방식에 대하여, 음향 신호의 샘플링 속도에 따른 상대 위치 추정 오차를 분석하고, 적절한 샘플링 속도를 도출한다.

II. 스마트폰 실내 위치 시스템의 구조

다음 그림 1은 상대 위치를 추정하기 위하여 음향 신호를 발생하고 이를 수신하여 신호를 처리하는 스마트폰 실내 위치 시스템의 구성도이다^[5].

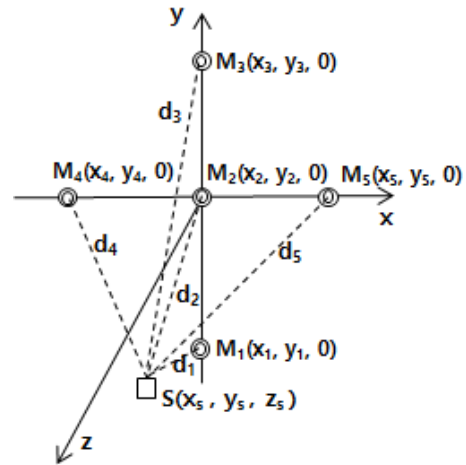


그림 1. 3 차원 공간에서의 5개의 십자 형태의 마이크들과 하나의 신호원 구성도^[5]

Fig. 1. The 3D configuration of cross type 5 microphones and 1 signal source^[5]

S는 음향 신호를 발생시키는 스마트폰의 스피커이고 상대 좌표는 (x_s, y_s, z_s)이다. M₁~M₅는 음향 신호를

수신하기 위한 5개의 마이크들로 동일 평면상에 십자
 가의 형태이고 같은 간격으로 배치되어 있다. $d_1 \sim d_5$ 는
 각각 S와 $M_1 \sim M_5$ 의 거리이다. 이 때, 스마트폰 스피커
 S와 실내 위치 추정 장치의 마이크 M_1 과의 거리 d_1 은
 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$d_1 = \sqrt{(x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2 + (z_s - z_1)^2} \quad (1)$$

또한 다른 스피커들과의 거리 $d_2 \sim d_5$ 도 동일한 방법
 으로 계산할 수 있다. 한 편, 스마트폰과 마이크 M_1 및
 M_2 와의 거리 차이 d_{21} 은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} d_{21} &= d_1 - d_2 \\ &= \sqrt{(x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2 + (z_s - z_1)^2} \\ &\quad - \sqrt{(x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2 + (z_s - z_2)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

우변을 이항하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 2(x_1 - x_2)x_s + 2(y_1 - y_2)y_s + 2d_{21} \cdot d_2 \\ = (x_1^2 - x_2^2) + (y_1^2 - y_2^2) - d_{21}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

식 (2)의 x_s 및 y_s, z_s 의 2차 방정식이 식 (3)의 1차
 방정식으로 선형화되었다. 따라서 다음과 같은 행렬식
 을 이용하여 x_s 및 y_s, z_s 의 신호원 좌표 값을 구할
 수 있다.

$$\begin{aligned} 2 \begin{bmatrix} (x_1 - x_2)(y_1 - y_2)d_{21} \\ (x_3 - x_2)(y_3 - y_2)d_{23} \\ (x_4 - x_2)(y_4 - y_2)d_{24} \\ (x_5 - x_2)(y_5 - y_2)d_{25} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ d_2 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} (x_1^2 - x_2^2) + (y_1^2 - y_2^2) - d_{21}^2 \\ (x_3^2 - x_2^2) + (y_3^2 - y_2^2) - d_{23}^2 \\ (x_4^2 - x_2^2) + (y_4^2 - y_2^2) - d_{24}^2 \\ (x_5^2 - x_2^2) + (y_5^2 - y_2^2) - d_{25}^2 \end{bmatrix} \quad (4) \\ z_s = \sqrt{d_2^2 - (x_s - x_1)^2 - (y_s - y_1)^2} \end{aligned}$$

이 식은 $\vec{Ax} = \vec{b}$ 와 같이 벡터 형식으로 표시할 수 있
 으며,

$$\begin{aligned} \mathbb{A} = 2 \begin{bmatrix} (x_1 - x_2)(y_1 - y_2)d_{21} \\ (x_3 - x_2)(y_3 - y_2)d_{23} \\ (x_4 - x_2)(y_4 - y_2)d_{24} \\ (x_5 - x_2)(y_5 - y_2)d_{25} \end{bmatrix}, \quad \vec{x} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ d_2 \end{bmatrix}, \\ \vec{b} = \begin{bmatrix} (x_1^2 - x_2^2) + (y_1^2 - y_2^2) - d_{21}^2 \\ (x_3^2 - x_2^2) + (y_3^2 - y_2^2) - d_{23}^2 \\ (x_4^2 - x_2^2) + (y_4^2 - y_2^2) - d_{24}^2 \\ (x_5^2 - x_2^2) + (y_5^2 - y_2^2) - d_{25}^2 \end{bmatrix} \text{이다.} \end{aligned}$$

한 편, 신호원의 좌표 x_s 및 y_s, z_s 의 추정 값은
 다음과 같이 Linearized Least Square 방법을 적용하여
 구할 수 있다^[6].

$$\hat{x} = (\mathbb{A}^T \mathbb{A})^{-1} \mathbb{A}^T \vec{b} \quad (5)$$

샘플링 주파수에 따른 상대 위치 추정 오차를 분석
 하기 위한 시뮬레이션 조건으로는, 마이크 사이의 거리
 가 1 m로, 즉 $y_1 = -1$ m, $y_3 = 1$ m, $x_4 = -1$ m, $x_5 =$
 1 m이며 다른 좌표 값은 모두 0 m이다. 마이크와 스마
 트폰의 사이의 거리는 3 m인 평면에서 5 cm 간격으로
 스마트폰을 이동시키며 위 식 (5)을 이용하여 상대 위
 치를 추정한다. 그림 1에서 스마트폰의 상대 위치를 추
 정하는 범위는 $z_s=3$ m인 평면에서 x_s 축 및 y_s 축으로 각
 각 -3 m부터 +3 m까지이다. 동일한 조건에 대해 10회
 씩 시뮬레이션을 하고 각 측정 지점에서의 상대 위치
 추정 오차에 대한 평균을 구하였다.

그림 2는 위의 시뮬레이션 조건에서 샘플링 시간 오
 차가 없는 경우에 대한 RMS(Root Mean Square) 상대
 위치 오차를 시뮬레이션 한 결과이다. x_s 및 y_s 평면
 은 5개의 마이크들과 평행한 평면으로 마이크에서 3 m
 떨어진 거리에 있다. 음향 신호들이 수신된 시간 차이
 측정에 오차가 전혀 없으므로, 상대 위치 추정 오차가
 전혀 없는 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 샘플링 시간 오차는 없으나 마이크와 스마
 트폰 사이의 음향 신호 지연 시간을 측정하는 과정에서
 오차가 발생한 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다. 즉,
 다양한 잡음 신호의 영향으로 디지털 신호 처리 과정에
 서 측정 오차가 발생한 경우이다. 그림 3에서는 중심축

상에서 밖으로 벗어날수록 위치 추정 오차가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 마이크의 위치가 원점에서 x 및 y 방향으로 각각 $-100\text{ cm} \sim 100\text{ cm}$ 의 범위에 설치되므로, x_s 및 y_s 평면의 원점에서 밖으로 벗어날수록 측정 오차에 따른 상대 위치 추정 오차가 급격히 커지기 때문이다. 약 5 mm 의 음향 신호 지연 시간에 대한 거리 차이로 인해, 상대 위치 추정 오차가 매우 크게 증가한 것을 확인할 수 있다.

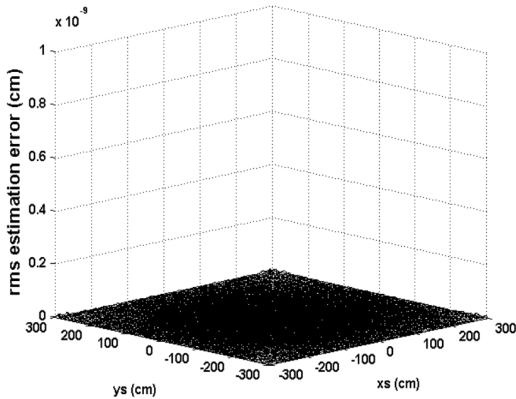


그림 2. 샘플링 시간 오차가 없는 경우에 3 m 거리에서의 RMS 상대 위치 추정 오차
 Fig. 2. The RMS relative position estimation error for the case of no sampling time error

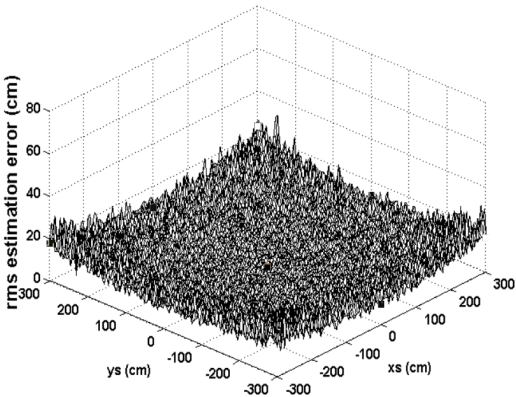


그림 3. 샘플링 시간 오차가 없고 $\sigma=0.5\text{ cm}$ 의 측정 오차가 있는 경우의 RMS 상대 위치 추정 오차
 Fig. 3. The RMS relative position estimation error for the case of no sampling time error and measurement error of $\sigma=0.5\text{ cm}$

III. 샘플링 속도에 따른 위치 오차의 분석

스마트폰 S에서 발생된 음향 신호는 5개의 마이크 $M_1 \sim M_5$ 로 수신되고 디지털 신호로 변환되어 메모리에 저장된다. 각 마이크에서 수신된 신호들의 지연 시간 차이를 측정하기 위해서는 메모리에 저장된 디지털 신호들을 상호 상관시키고 피크 값을 찾아내어 디지털 신호들 사이의 시간 차이를 측정한다. 이 때, 상대 위치 추정 장치에서 음향 신호 수신 및 디지털 신호 처리 알고리즘을 수행하는데, 디지털 신호로 변환하기 위한 샘플링 속도를 장치에서 설정할 수 있다. 또한 신호의 샘플링 속도에 따라 측정되는 수신 지연 시간 차이의 정확도가 다르게 된다. 예를 들어 50 kHz 로 신호를 샘플링하면 샘플링 시간 간격이 $20\ \mu\text{sec}$ 이므로 그 이하로 수신 지연 시간 차이를 측정할 수 없다.

본 논문에서는 샘플링 속도에 따른 상대 위치 추정 오차를 분석하기 위해 MATLAB의 quantiz 함수를 사용하여 시뮬레이션 하였다^[7]. 음향 신호의 샘플링 시간 오차는 샘플링 속도에 반비례한다. 즉, 샘플링 속도가 클수록 수신 지연 시간 측정의 오차가 줄어들어 위치 추정의 정확도가 증가된다.

그림 4는 샘플링 주파수가 200 kHz 이고 샘플링 주기는 $5\ \mu\text{sec}$ 인 경우이다. 이 경우 음향 신호를 5초 동안 스마트폰에서 수신하고 8 비트 디지털 신호로 저장하면 각 마이크 채널별로 1 MByte의 데이터가 저장되어야 하므로 총 5 MByte의 메모리가 필요하고 디지털 신호 처리되어야 하므로 위치 추정을 위한 신호 처리 계산 시간이 많이 소요된다.

그림 4의 상대 위치 추정 오차 패턴을 x_s 와 y_s 평면에서 분석해 보면, 스마트폰 S의 위치에 따라 일정하지 않은 샘플링 시간 오차 때문에 위치 추정 오차의 패턴이 일정하지는 않지만, 원점에서 멀어질수록 상대 위치 추정 오차가 증가하고 있다. 200 kHz 의 샘플링 주파수는 구형 측면에서 볼 때 낮은 주파수임에도 불구하고 원점에서 3 m 정도 떨어진 곳에서는 상대 위치 추정 오차가 약 10 cm에 이르며, 이는 그림 2에서 오차가 전혀 없는 것과 비교하면 매우 큰 차이인 것을 알 수 있다.

한 편, 그림 5는 샘플링 주파수가 22 kHz 이고 마이크들 사이의 시간 지연 차이의 측정 오차가 없는 경우의 RMS 상대 위치 추정 오차이다. 22 kHz 는 일반적인 품질의 오디오 신호 샘플링 주파수이다.

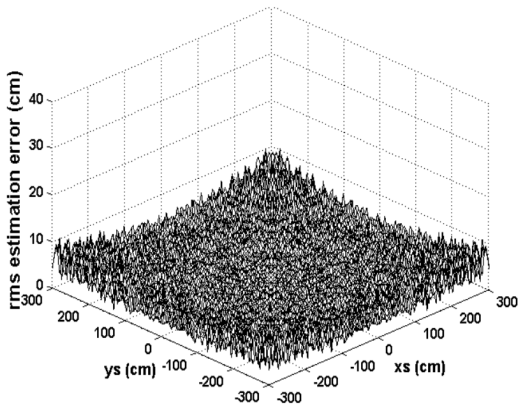


그림 4. 샘플링 주파수가 200 kHz이고 측정 오차가 없는 경우의 RMS 상대 위치 추정 오차

Fig. 4. The RMS relative position estimation error for the case of sampling frequency of 200 kHz and no measurement error

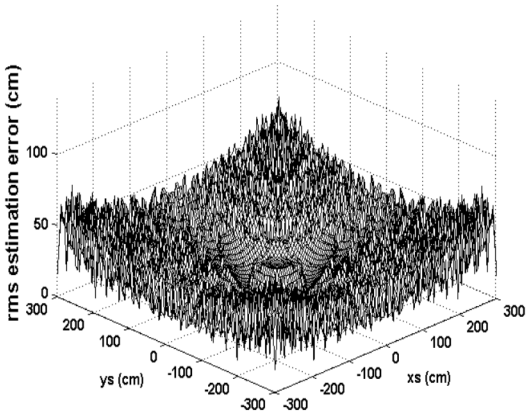


그림 5. 샘플링 주파수가 22 kHz이고 측정 오차가 없는 경우의 RMS 상대 위치 추정 오차

Fig. 5. The RMS relative position estimation error for the case of sampling frequency of 22 kHz and no measurement error

이 경우 원점에서 3 m 떨어진 곳에서 약 60 cm 정도의 상대 위치 추정 오차가 발생하였다. 거리 대비 위치 추정 오차는 약 20%에 해당되므로 매우 큰 오차이나, 적용되는 위치 기반 서비스에 따라서 절대 위치 오차가 60 cm인 경우도 사용될 수는 있다. 따라서 위의 두 가지 경우를 살펴 볼 때, 상대 위치 추정 장치에서의 데이터 처리 시간과 서비스에 필요한 위치 정확도를 고려하여 적절한 수준의 샘플링 주파수 선정이 시스템 설계에서 매우 중요한 요소인 것을 알 수 있다.

그림 6은 샘플링 주파수가 100 kHz이고 스마트폰과 마이크들과의 거리 차이 측정값 오차의 RMS 값이 0.5 cm인 경우이다. 즉, 마이크들과의 지연 시간 차이 측정 오차가 약 15 μ sec에 해당하고 샘플링 간격이 10 μ sec 인 경우이므로 측정 오차가 위치 추정 과정에 더 영향을 미친다. x_s 와 y_s 평면의 원점에서 약 5 cm 정도의 위치 추정 오차가 발생하고 원점에서 3 m 벗어난 지점에서는 약 25 cm 정도의 오차가 발생하므로 비교적 양호한 결과를 보이고 있다.

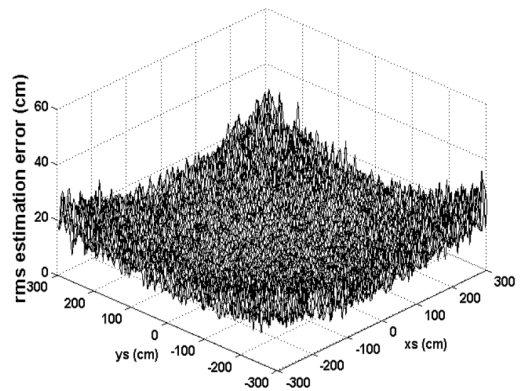


그림 6. 샘플링 주파수가 100 kHz이고 $\sigma=0.5$ cm의 측정 오차가 있는 경우의 RMS 상대 위치 추정 오차

Fig. 6. The RMS relative position estimation error for the case of sampling frequency of 100 kHz and measurement error of $\sigma=0.5$ cm

그림 7은 샘플링 주파수와, 스마트폰과 마이크들의 사이의 거리 차이 측정 오차에 따른 총 RMS 위치 추정 오차의 그래프이다. 전반적으로 샘플링 주파수가 높아짐에 따라 위치 추정 오차가 줄어드는 경향이 있으며 어느 정도 이상이 되면 더 이상 줄어들지 않는 것을 확인할 수 있다. 측정 오차가 없는 이상적인 경우에는 약 200 kHz까지 성능이 좋아지고 있으며, 실제적으로는 측정 오차가 불가피하고 이 경우에는 샘플링 주파수를 80 kHz 이상으로 높여도 성능이 크게 좋아지지 않고 있다.

그림 8은 그림 7을 다른 관점에서 그린 것으로, 측정 오차가 커지면 샘플링 시간 오차보다 측정 오차가 더 커지므로 샘플링 주파수를 높이는 것이 효과가 없다는 것을 보여주고 있다.

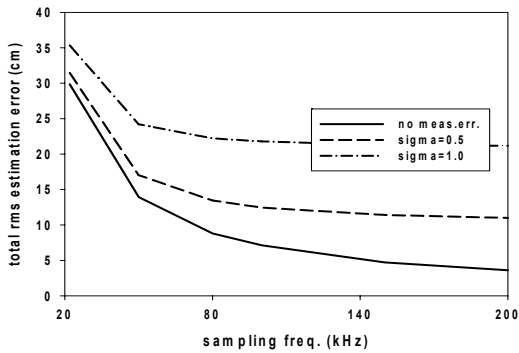


그림 7. 샘플링 주파수와 측정 오차 σ 에 따른 총 RMS 상대 위치 추정 오차
 Fig. 7. The total RMS relative position estimation error for the case of sampling frequency and measurement error of σ

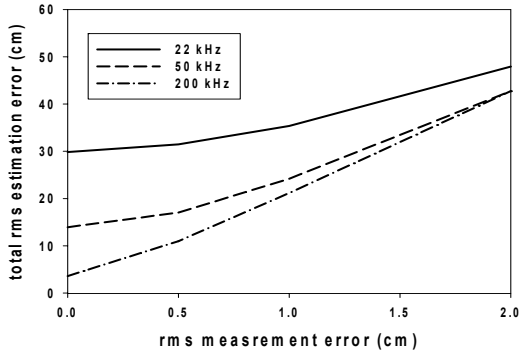


그림 8. 측정 오차 σ 와 샘플링 주파수에 따른 총 RMS 상대 위치 추정 오차
 Fig. 8. The total RMS relative position estimation error for the case of measurement error of σ and sampling frequency

IV. 결론

본 논문에서는 샘플링 시간 오차에 따른 위치 추정 오차를 분석하였으며, 상대 위치 추정 장치에서의 데이터 처리 시간과 위치 추정 정확도를 고려할 때 음향 신호의 샘플링 주파수는 80 kHz에서 100 kHz가 가장 적합하다는 결론을 도출하였다. 이 결과는 실제로 스마트폰을 대상으로 하는 TDOA 방식의 위치 추정 시스템을 구현될 때 활용될 것이다.

References

- [1] S.Son, Y.Park, B.Kim, and Y.Baek, "Wi-Fi Fingerprint Location Estimation System Based on Reliability," J. KICS, vol.38C, no.6, pp.31-539, June 2013.
- [2] S. Zekavat and R. Buehrer, *Handbook of position location: Theory, practice, and Advances*, IEEE Press, 2012.
- [3] G. Wang and H. Chen, "An importance sampling method for TDOA-based source localization," *IEEE Tr. Wireless Comm.*, vol. 10, no. 5, pp. 1560-1568, May 2011.
- [4] Y.Lu and A.Finger, "Ultrasonic beacon-based local positioning system using broadband PN - chirp codes," in proc. Int. Conf. Wireless Optical Comm., Banff, Canada, July 2009.
- [5] J.Oh, "A Study on Trigger Signal to Mitigate Multipath Effect for the 3D TDOA Positioning System," J. IIBC, vol. 14, no. 4, pp.149-155, Aug. 2014.
- [6] K.Ho and W.Xu, "An Accurate Algebraic Solution for Moving Source Location using TDOA and FDOA Measurements," *IEEE Tr. SIGNAL PROCESSING*, vol. 52, no. 9, pp.2453-2463, Sep. 2004.
- [7] http://kr.mathworks.com/help/comm/ref/quantiz.html?s_tid=gn_loc_drop

저자 소개

오 종택(정회원)



- 2000.3. ~ 현재 한성대학교 정보통신공학과 교수
- 1993.12. ~ 2002. 한국통신 무선통신연구소 선임연구원
- 1989.3. ~ 1993.2. 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사 졸업

<관심 분야: 지능형 무선통신 네트워크, Personal Environment Service>

※ 본 연구는 한성대학교 교내학술연구비 지원과제 임