

<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2014.14.1.31>

JIIBC 2014-1-5

3차원 TDOA 위치인식 시스템의 마이크 센서 배열 최적 설계

Optimum Design of the Microphone Sensor Array for 3D TDOA Positioning System

오종택*

Jongtaek Oh*

요 약 실내에서의 위치기반 서비스를 위한 실내 위치 인식 기술에 대한 연구가 활발하다. 음향 신호와 TDOA 기술을 기반으로 하는 3차원 위치 인식 시스템에 있어서, 마이크 센서의 개수와 배열 위치에 따라 추정된 위치의 오차 특성이 달라지므로, 본 논문에서는 마이크 센서의 배열과 측정된 거리 차이값의 오차 크기에 따른 추정 위치의 오차를 DOP로 분석하고, 그 추정 위치 오차 패턴과 추정 위치 오차값을 고려하여 최적의 마이크 배열을 결정하는 방법에 대해서 연구하였다.

Abstract A study on the indoor positioning system has been active recently for the location based service indoors. In the 3 dimensional positioning system based on the acoustic signal and TDOA technology, the error characteristics of the estimated source position would be changed depending on the number of microphones and the pattern of the microphone array. In this paper, the estimated position error according to the measured distance error between the microphones and the signal source is analyzed, and the optimum microphone array is decided considering the estimated position error patterns and the total amount of the estimated position error.

Key Words : 3D positioning, PDOP, sensor array, TDOA

1. 서 론

3차원 공간에서의 신호원의 위치를 추정하기 위한 방법이 연구되어 왔다^[1-4]. 특히 음향 신호를 발생하는 신호원을 여러 개의 마이크들을 이용하여 위치를 추정하는 기술은 스마트폰이 활성화된 현재 시점에서 매우 활용도가 높다. 즉, GPS(Global Positioning system) 신호가 수신되지 못하는 실내에서 스마트폰의 실내 위치를 인식할 수 있다면 실내에서의 위치 기반 서비스에 획기적인 계

기가 될 것이다. 이전에는 무선랜의 신호 세기를 이용하여 실내 위치를 추정하는 기술이 상용화되었으나 위치 오차가 수 m에 이르러 정밀한 위치 기반 서비스가 어려운 상태이다. 스마트폰과 별도의 위치 인식 장치를 사용하여 실내 위치 인식 시스템을 구성하는 경우에, 무선랜이나 블루투스나 같은 근거리 무선 통신 방식에서는 데이터 송수신의 시간 지연을 정확하게 제어할 수 없어 TDOA(Time Difference of Arrival) 기술을 이용해야 한다. 즉, 스마트폰에서 음향 신호를 발생하면 위치 인식 장

*정회원, 한성대학교 정보통신공학과
접수일자 2014년 1월 13일, 수정완료 2014년 2월 2일
게재확정일자 2014년 2월 7일

Received: 13 January, 2014 / Revised: 2 February, 2014

Accepted: 7 February, 2014

*Corresponding Author: jttoh@hansung.ac.kr

Dept. of ICs Engineering, Hansung University, Korea

치에 설치된 여러 개의 마이크로 그 신호를 수신하고, 스마트폰과 각 마이크들 사이의 거리 차이를 측정하여 식 (1)과 같은 쌍곡선 수식에 대입하여 풀면 스마트폰의 상대 위치 좌표를 추정할 수 있다^[5]. 그림 1은 음향 신호원과 마이크 센서의 배열 패턴 사례를 구성한 것이다.

그러나 스마트폰과 각 마이크들 사이의 거리 차이를 측정하는 과정에서 샘플링 시간 간격이나 음향 신호의 왜곡, 잡음 등의 문제로 오차가 발생하게 된다. 따라서 측정된 거리 차이 값들로는 쌍곡선의 수식이 풀리지 않거나 추정된 위치 좌표에 오차가 발생하게 된다. 이렇게 측정된 거리 차이값의 오차에 대한 추정된 위치 좌표의 오차의 비율을 DOP(Dilution of Position)이라고 한다. 위치 추정 알고리즘이나 마이크 센서의 개수 또는 3 차원 센서 배열의 패턴에 따라 DOP가 달라진다. DOP가 작을수록 우수한 성능을 갖는 3차원 위치인식 시스템이다.

본 논문에서는 3차원 위치 추정 알고리즘으로 선형 최소 평균 자승법을 사용하였다^[5]. 이 방법은 쌍곡선 수식을 푸는 방식에 비해 더 정밀한 위치 추정 값을 구할 수 있으며 마이크로프로세서를 사용하여 실시간 처리가 가능하다.

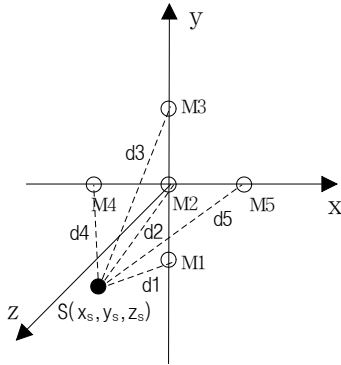


그림 1. 3 차원 공간에서의 5개의 십자 형태의 마이크들과 하나의 신호원 구성도

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

기존의 3차원 DOP를 분석한 논문^[6]에서는 이동통신 기지국을 대상으로 하였으므로, 본 논문의 스마트폰과 마이크를 대상으로 하는 실내 위치 인식 시스템과는 경우가 다르다. 또한 본 논문에서는 DOP의 패턴뿐만 아니라 위치 추정 대상의 일정 면적에 대해 추정된 위치 좌표의 총 오차 값과 그 오차가 일정 수준의 이하에 대한 면

적의 비율, 마이크 센서 사이의 설치 간격에 따른 추정된 위치 좌표의 총 오차 값 등의 새로운 성능 파라미터를 도입하여 비용 및 복잡도에 대비하여 가장 적절한 마이크 센서의 개수와 배열 패턴을 결정하였다.

II. LLMS 알고리즘과 DOP

신호원의 좌표인 x_s 와 y_s , z_s 의 3 차 방정식인 쌍곡선의 수식을 1차 방정식으로 변형하고 행렬식을 이용하여 신호원의 좌표를 구하는 선형 최소 평균 자승 오차 방식(linear least mean squared method)에 대한 연구가 있었다^[5]. 이 방식은 최적화 방식 또는 계산을 반복하는 방식이 아니므로 계산 시간이 매우 짧으며, 비선형 방정식의 경우와 다르게 초기 값 선정의 문제가 없고 최적 해법을 보장하므로 실제 위치 인식 장치에 적용이 가능한 실용적인 방식이다.

선형 최소 평균 자승 오차 방식을 스마트폰을 신호원으로 하는 위치 인식 시스템에 적용하기 위해, 먼저 그림 1과 같이 동일 평면상에 있는 5개의 마이크들과 비동일 평면상의 신호원의 경우에 대한 계산식을 유도한다^[7]. 그림 1에서와 같이 마이크 M1, M2, M3, M4, 및 M5의 좌표를 각각 (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) , (x_4, y_4, z_4) , (x_5, y_5, z_5) 라고 하고, 신호원 S의 좌표를 (x_s, y_s, z_s) 할 때, 마이크 1과 신호원과의 거리 d_1 은 다음과 같다.

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

3 차원 공간에서의 선형 방정식으로 유도하면 그 결과 식은 다음과 같이 변형된다.

$$\mathbb{A} = 2 \begin{bmatrix} (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) & (z_2 - z_1) & d_{12} \\ (x_3 - x_1) & (y_3 - y_1) & (z_2 - z_1) & d_{13} \\ (x_4 - x_1) & (y_4 - y_1) & (z_2 - z_1) & d_{14} \\ (x_5 - x_1) & (y_5 - y_1) & (z_2 - z_1) & d_{15} \end{bmatrix}, \quad \vec{x} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ d_1 \end{bmatrix},$$

$$\vec{b} = \begin{bmatrix} (x_2^2 - x_1^2) + (y_2^2 - y_1^2) + (z_2^2 - z_1^2) - d_{12}^2 \\ (x_3^2 - x_1^2) + (y_3^2 - y_1^2) + (z_2^2 - z_1^2) - d_{13}^2 \\ (x_4^2 - x_1^2) + (y_4^2 - y_1^2) + (z_2^2 - z_1^2) - d_{14}^2 \\ (x_5^2 - x_1^2) + (y_5^2 - y_1^2) + (z_2^2 - z_1^2) - d_{15}^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

마이크 센서 배열이 x-y 평면상에만 있는 경우에는 식 (2)의 행렬 연산에서 singular 오류가 발생하므로 z에 관한 항들을 제외해야 한다. 측정된 신호원과 마이크 센서

들 사이의 거리 차이 값 d_{12} , d_{13} , d_{14} 및 d_{15} 를 수식에 대입하고 $\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T \vec{b}$ 를 계산하면, 신호원의 좌표 x_s 와 y_s , z_s 를 추정할 수 있다. 이 때 측정값 d_{ij} 에 오차가 발생하므로 추정된 신호원의 좌표에도 오차가 생긴다.

한편 측정값 오차에 대한 추정된 위치의 오차를 의미하는 DOP에는 GDOP(Geometric DOP), PDOP(Position DOP) 등이 있는데 TDOA 방식에 대해서는 시간에 대한 미지수가 없으므로 GDOP와 PDOP가 동일하며 다음 식 (3)과 같다^[6].

$$PDOP = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}}{\sigma_r} \quad (3)$$

여기서 σ_x^2 , σ_y^2 와 σ_z^2 는 추정된 신호원의 위치 좌표 값에서 각각 x, y, z축 좌표의 오차의 분산이고, σ_r 은 측정된 신호원과 마이크들 사이의 거리 차이 값의 실제 값과의 오차에 대한 표준 편차이다. 즉, 추정된 위치 좌표 오차 값의 실효값(root mean square)을 측정된 거리 차이 값의 표준편차로 나눈 값이다. 따라서 동일한 측정 오차에 비해 추정된 위치 좌표 값이 정확할수록 PDOP의 값은 작아지게 된다. 동일한 위치 인식 알고리즘 및 시스템에서도 신호원의 위치에 따라 PDOP의 값이 달라지며, 특히 측정 오차 값이나 센서 어레이의 개수 및 배열에 따라 PDOP 값이 크게 달라진다.

다음 그림 2는 5개의 마이크 센서 배열을 사용하고 LLMS 알고리즘을 사용한 TDOA 방식의 3차원 위치 인식 시스템에 대한 PDOP를 모의 실험한 결과이다. 이 때 마이크들 사이의 설치 간격은 100cm이며 측정값 d_{ij} 에 더해진 측정 오차는 가우시안 잡음이며 표준편차는 0.2를 가정하였다. 측정 오차의 표준편차 값이 커질수록 실제의 거리 차이 값과 차이가 커지게 되며 따라서 추정된 위치 좌표의 오차도 증가하게 된다. 실제 실험으로 확인한 바로는 수신된 음향 신호에 대한 샘플링 주파수가 100 kHz이고 8비트 ADC(Analog-to-Digital Converter)를 사용하는 경우에, 측정된 거리 차이 값 오차의 분산은 0.1~0.2 사이에 있다. 마이크의 배열은 그림 1과 같은 형태이고 식 (2)의 LLMS 수식에서와 같이 마이크 M1을 기준으로 하였다. 마이크 배열과 스마트폰과 같은 음향 신호원의 거리는 3 m이고 PDOP를 계산한 면적 구간은 가로 및 세로 각각 10m이다. 추정 위치를 계산하는 지점에서의 PDOP는 추정 위치의 오차를 측정 오차의 표준

편차로 나눈 값이다. 그림 2를 보면 십자 형태의 마이크 배열을 사용하므로 위치 추정의 정확도가 십자 형태의 지점에서는 양호하며 네 모퉁이에서는 정확도가 떨어지는 것을 확인 할 수 있다.

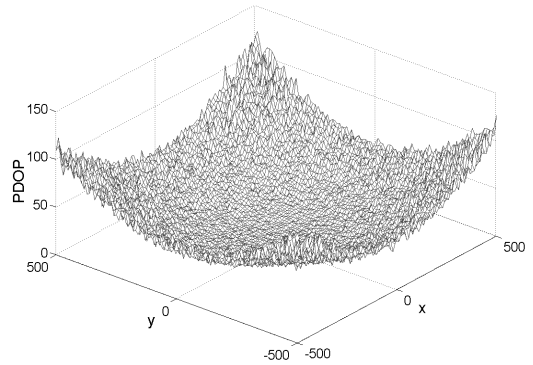


그림 2. 십자 형태의 마이크 배열을 사용한 3차원 위치 인식 시스템의 PDOP 패턴

Fig. 2. The PDOP of the 3D positioning system using the cross type microphone array

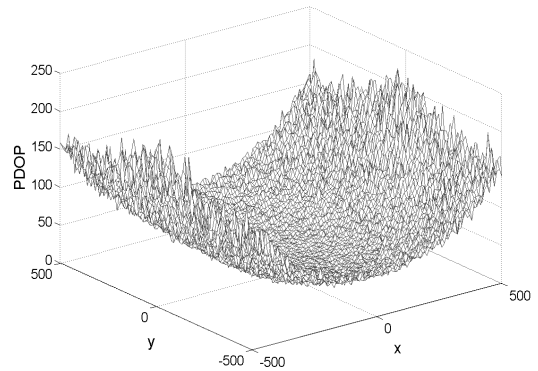


그림 3. 4개의 마이크로 “T” 자 형태의 마이크 배열을 사용한 3차원 위치 인식 시스템의 PDOP 패턴

Fig. 3. The PDOP of the 3D positioning system using the “T” type microphone array consisting of the 4 microphones

또한 그림 3은 4개의 마이크 센서를 사용하여 “T”자 모양의 배열을 구성한 것으로, 그림 1에서 M2, M3, M4와 M5를 사용하였으며 식 (2)를 변형하여 M2를 기준으로 거리 차이 값들을 사용하였다. 다른 모의실험 조건은 전과 동일하다. 모의실험 결과를 보면, y 축 방향으로 일정한 위치 추정 성능을 보이고 있지만 x 축 방향으로 양쪽 끝으로 갈수록 위치 추정 오차가 증가하는 것을

알 수 있다.

이 두 가지의 모의실험 결과를 보면 동일한 위치 추정 알고리즘과 측정 오차의 상황에서도 마이크의 개수와 배열에 따라 위치 추정의 정확도가 매우 달라지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 추정 위치에서의 필요한 정확도와 위치 추정 거리, 위치 추정 구간, 시스템 비용 및 복잡도 등의 요소들을 고려하여 최적의 시스템 설계가 필요하다.

III. 마이크 센서 어레이의 개수에 따른 분석

3 차원 위치 추정을 위한 TDOA 방식의 경우에는 최소한 4개의 센서가 필요하며 “ \perp ”자 모양 또는 십자 모양의 배열이 된다. 일반적으로 L개의 신호 수신 센서가 사용되는 경우에는 $L(L-1)/2$ 개의 거리 차이 값을 얻을 수 있으며, 수신 센서의 개수가 많을수록 식 (2)에서 계산 항이 증가하고 정밀한 위치 좌표를 구할 수 있다. 그러나 센서가 많으면 제작비용과 복잡도가 증가하므로 적절한 가격대비 성능비를 고려하여 센서의 개수를 결정해야 한다. 다음 그림 4는 그림 1의 십자 모양의 5개의 마이크 배열에 하나의 마이크를 더 추가하여 6개의 마이크 배열을 사용했을 때의 PDOP 패턴이다. 이 때 M6 마이크의 좌표는 그림 1에서 (100, 100, 0)이고 다른 조건은 전과 동일하다. 그림 2의 PDOP 패턴에 비해서 전반적으로 위치 추정 오차가 감소하였으며, 특히 (500, -500, 300) 지점과 (-500, 500, 300) 지점은 (-500, -500, 300) 지점과 (500, 500, 300) 지점에 비해서 PDOP 값이 작은 것을 확인할 수 있다.

다음 그림 5는 마이크 센서의 개수에 따른 추정 위치 오차의 총 합을 모의실험으로 구한 것으로 마이크의 개수가 증가함에 따라 추정 위치 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 4개의 마이크에서 5개의 마이크로 사용된 마이크가 한 개 증가된 경우에는 위치 추정 오차가 대폭 감소하였으나, 마이크 수가 5개 이상으로 늘어나는 경우에는 위치 추정 오차가 점진적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 실내 위치 기반 서비스에 필요한 정밀도를 먼저 정의한 후에 요구되는 위치 추정 정확도에 필요한 마이크의 개수를 선정하는 방법이 적절하다.

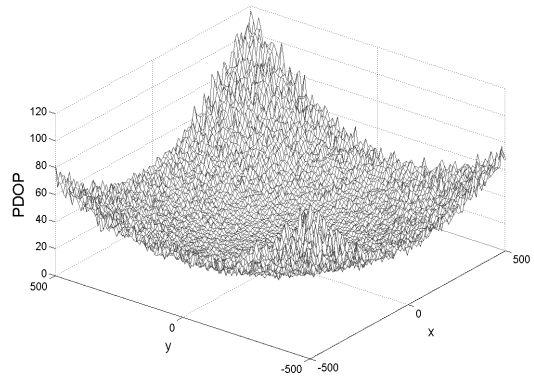


그림 4. 6개의 마이크를 사용한 3차원 위치 인식 시스템의 PDOP 패턴

Fig. 4. The PDOP of the 3D positioning system using the 6 microphones

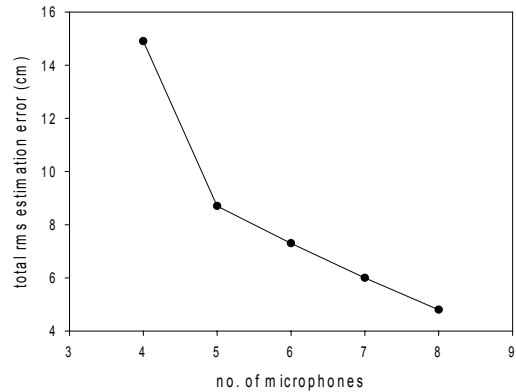


그림 5. 사용된 마이크의 개수에 따른 총 rms 위치 추정 오차
Fig. 5. Total rms position estimation error according to the number of microphones used

IV. 마이크 센서 어레이의 배열에 따른 분석

먼저 마이크 센서 어레이의 설치 패턴과 수식 (2)의 기준 마이크의 선택에 의한 영향을 살펴본다. 그림 6은 그림 3과 동일하게 마이크 4개를 사용하였지만 M1, M3, M4, M5로 그 배열이 다르며 수식 (2)와 같이 마이크 M1을 기준으로 추정 위치 좌표를 계산한 경우이다. 그림 3보다 위치 추정 오차가 훨씬 크며 그 패턴도 매우 다른 것을 알 수 있다.

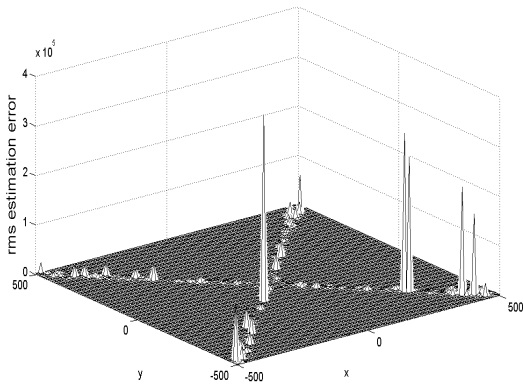


그림 6. 4개의 십자 모양 마이크 배열을 사용한 3차원 위치 인식 시스템의 rms 추정 위치 오차 패턴
 Fig. 6. The rms estimation error pattern of the 3D positioning system using the four microphones

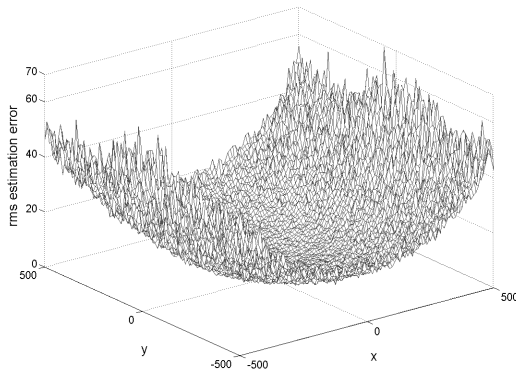


그림 7. 5개의 십자 모양 마이크 배열에서 M1 마이크를 높여서 설치한 3차원 위치 인식 시스템의 rms 추정 위치 오차 패턴
 Fig. 7. The rms estimation error pattern of the 3D positioning system using the five microphones with raised M1

또한 그림 7은 그림 2와 같이 5개의 마이크를 십자 모양으로 배열한 경우인데, 마이크 M1의 설치 위치를 50cm 높여서 (0, -100, 50)의 좌표에 설치한 비평면 마이크 센서 배열의 경우이다. 그림 2와는 위치 추정 오차의 패턴이 매우 다르며 성능도 더 나빠졌다.

실제적으로 실내 위치 기반 서비스를 위해서는 가능한 추정 위치의 정확도가 중요하다. 따라서 마이크들과 3 m 떨어진 z 축 상의 위치에서 각각 가로 10 m 및 세로 10 m의 100 m² 면적에 대하여, rms 위치 추정 오차가 각

각 5 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm 이내인 면적의 누적 백분율을 계산하였다. 그림 8을 보면 앞에서 분석된 마이크의 개수 및 배열 모양에 따라 위치 추정 오차를 분석한 것으로 각각 위치 추정 성능이 다른 것을 확인할 수 있으며, 그림 2와 같이 5개의 마이크를 십자 형태로 배열하고 가운데 마이크 M2를 기준 마이크로 위치를 추정하는 방식이 가장 좋은 성능을 보이고 있다. 즉, 거의 모든 지점에서 위치 추정 오차가 10 cm 이내이다. 그림 3과 그림 6은 4개의 마이크를 사용하지만 배열과 기준 마이크가 다른 경우이다. 그림 3의 경우 마이크 배열이 “⊥”자 모양이고 M2를 기준으로 계산하는 방식으로, 10 cm 이내의 오차가 80%이고 20 cm 이내는 거의 100 %이다. 이 경우에도 측정 오차의 표준편차는 0.2를 가정하였다. 실내 위치 기반 서비스의 종류에 따라 요구되는 위치 추정 정확도가 다르겠지만, 3 m 거리에서 10 cm 이내의 정확도가 80% 라면 많은 경우에 적합할 것으로 예상된다. 사용되는 마이크의 개수가 증가할수록 위치 추정 성능은 증가하지만 비용을 고려하여 적절한 규모의 시스템 설계가 필요하다.

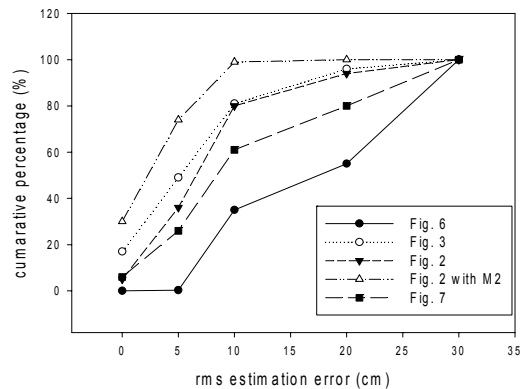


그림 8. 마이크 센서의 개수와 배열 패턴에 따른 추정 오차 크기의 누적 백분율 분포
 Fig. 8. The cumulative percentage of the estimated error according to the number and pattern of the microphone array

한편, 그림 9에서와 같이 마이크의 개수보다 마이크 사이의 설치 간격이 위치 추정 오차에 더 큰 영향을 끼친다. 마이크를 5개 사용하고 십자 모양의 배열이며 M2를 기준으로 하는 위치 인식 시스템에서 측정 오차의 표준편차가 0.2인 경우에 마이크 사이의 간격이 넓어짐에 따라 위치 추정 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그

러나 마이크 사이의 간격이 멀어지면 신호원과의 거리도 멀어지므로 잡음 신호의 세기가 증가하고 장치가 커지므로 설치와 미관상의 어려움이 발생한다. 따라서 마이크 사이의 간격도 적절한 값으로 설계되어야 한다. 그림 9에서는 마이크 센서 배열과 신호원 사이의 거리를 다르게 하며 모의실험을 하였는데 모든 경우에 대해서 마이크 사이의 간격이 50 cm이면 위치 추정 오차가 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 마이크 사이의 설치 간격은 50 cm 정도로 설계하는 것이 바람직하다.

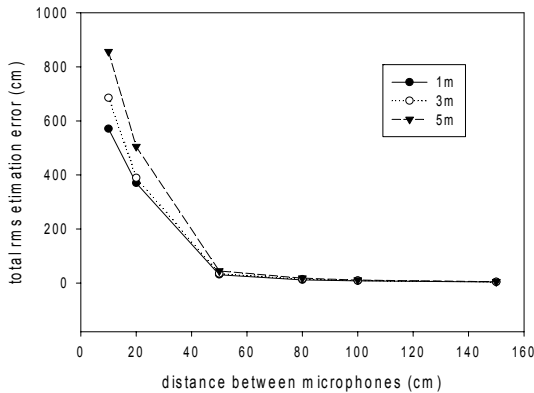


그림 9. 여러 가지의 마이크와 신호원 사이의 거리에 대해서, 마이크사이의 간격에 따른 총 rms 위치 추정 오차
 Fig. 9. The total rms estimation error according to the distance between microphones for the different distance between microphones and signal source

V. 결론

본 논문에서는 LLMS 알고리즘을 사용하는 TDOA 방식의 3차원 위치 인식 시스템에서 사용되는 마이크의 개수 및 배열의 패턴에 대해서 모의실험을 수행하고 그 결과를 분석하여, 비용 및 복잡도 대비 최적의 위치 추정 성능을 갖는 마이크 개수와 배열 패턴을 설계하는 방법을 제안하였으며 이 방법으로 실용적인 시스템 구성이 가능하다.

References

- [1] H.Koyuncu and S.Yang, "A survey of indoor positioning and object locating systems," *IJCSNS*, vol. 10, no. 5, pp.121-128, May 2010.
- [2] Y.Han, "Indoor location system using passive RFID," *J. Korean Inst. Info. Tech.*, vol. 5, no.4, pp. 82-88, Dec. 2007.
- [3] 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.
- [4] A.Mahajan and M.Walworth, "3-D position sensing using the differences in the time-of-flights from a wave source to various receivers," *IEEE Tr. Robotics & Automation*, vol. 17, no. 1, pp.91-94, Feb. 2001.
- [5] S.Zekavat and R.Buehrer, *Handbook of position location: Theory, practice, and Advances*, IEEE Press, 2012.
- [6] B.Li, A.G.Dempster, and J.Wang, "3D DOP for positioning applications using range measurements," *Wireless Sensor Network*, vol. 3, pp.334-340, Oct. 2011.
- [7] J.Oh, "A Study on the Relative Positioning Technologybased on Range Difference and Root Selection," *J. IIBC*, vol. 13, no. 5, pp.85-91, Oct. 2013.

저자 소개

오 종 택(정회원)



- 2000년 3월 ~ 현재 : 한성대학교 정보통신공학과 교수
- 1993년 12월 ~ 2000년 2월 : 한국통신 무선통신연구소 선임연구원
- 1989년 3월 ~ 1993년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사 졸업
- 관심 분야 : 지능형 무선통신 네트워크, Personal Environment Service

※ 본 연구는 한성대학교 교내 연구 장려금 지원과제 임