

스마트폰 기반의 3차원 실내위치 인식

오 종 택*

3D Indoor Positioning System Based on Smartphone

Jong-taek Oh*

요 약

사용자 맞춤형의 지능화 서비스를 위해 실내에서 사용자 및 기기들의 3차원 위치를 인식하는 기술에 대한 중요성이 급증하고 있다. 본 논문에서는 최근 들어 폭발적으로 활성화된 스마트폰에서 음향신호를 발생하고 5개의 마이크들을 십자 형태로 동일 평면상에 배치한 3차원 위치 측정 장치에서 TDOA 방식을 적용하여 스마트폰의 3차원 위치 좌표를 추정하는 2가지 방식을 제안하고 실험적으로 검증하였다.

Key Words : indoor positioning system, 3D, TDOA, smartphone

ABSTRACT

For providing personalized intelligent services to users, 3 dimensional indoor positioning technology to recognize the position of person and equipment becomes important. In this paper, the acoustic signal generated from the proliferated smart phone is received from the 5 microphones equipped in the front panel of 3D positioning system, and the two proposed methods estimate the 3D coordinate of the smart phone, and finally it is verified using the implemented experimental system.

I. 서 론

최근 들어 가전 기기를 비롯한 각종 생활기기에 상 황인식과 같은 지능화 서비스 기능을 도입한 지능형 생활가전에 대한 수요가 급증하고 있다^[1]. 이것은 궁극적으로는 사물지능통신(Machine to Machine: M2M 또는 Internet of Things: IoT)과도 연계되어 모든 기기 또는 노드에도 지능화 기술이 접목되게 될 것이므로 그 폭발적인 잠재 수요에 주목할 필요가 있다. 이런 상황인식 또는 지능화 서비스에 가장 필수적인 기술 중에 하나가 사용자와 각종 기기의 위치를 인식 하는 것이다. 실외에서는 Global Positioning System(GPS)의 지원으로, 위치 오차 수 m 이내의 위치 기반 서비스(Location Based Service: LBS)에서는

관련 기술 개발과 시장 규모가 대폭 확장되었다. 향후에는 실외에서의 사용자 및 기기의 위치정보를 반영한 지능화 서비스가 점진적으로 활성화될 것이다. 그러나 실내에서는 GPS 신호가 수신되지 못해 창가 이외의 지역에서는 거의 위치 정보를 인식할 수 없다. 최근에 실내에서 무선랜의 수신 신호의 세기 정보를 이용한 기술이 개발되어 실제로 공공 지역에 시스템이 설치되고 스마트폰을 이용하여 실내 위치인식 서비스로 활용되고 있다. 위치 인식 오차가 수 m 정도로 크고 사전에 무선랜 수신 신호의 세기를 측정하여 데이터를 만들어야 하는 어려움은 있으나, 기존에 구축된 무선랜망을 활용하므로 구축비용이 다른 방식에 비해 상대적으로 저렴하므로, 거의 최초의 실용적인 실내 위치 인식 시스템(Indoor Positioning System:

* 본 연구는 한성대학교 교내연구장려금 지원과제임

• First Author : 한성대학교 정보통신공학과 무선지능망연구실, jtoh@hansung.ac.kr, 정희원

논문번호 : KICS2013-09-417, 접수일자 : 2013년 9월 23일, 심사일자 : 2013년 11월 20일, 최종논문접수일자 : 2013년 11월 22일

IPS)이라고 할 수 있다^[2]. 실내에서의 위치기반 서비스에 상황인식 또는 지능화 기술을 도입하여 개인 맞춤형 지능형 서비스를 구현하기 위해서는 서비스에 따른 요구사항에 따라 필요한 최대 위치 인식 오차의 크기가 달라진다. 또한 2차원 평면에서의 위치 인식 기능뿐만 아니라 3 차원 입체 공간에서의 위치 인식 기능도 필요하다. 한편 사용자의 휴대장치에서 신호를 발생하여 사용자의 위치를 인식하는 방식에서는, 실내 위치인식을 위해 별도의 사용자 단말기를 휴대하는 방식은 별도 단말기의 비용과 휴대의 번거로움으로 그 실용성이 크게 떨어진다. 따라서 현재 거의 모든 사용자가 휴대하고 있는 휴대폰이나 스마트폰을 활용하여 사용자의 실내 위치를 인식하는 방식은 매우 효과적이다.

공간 천정의 네 모서리에 설치된 네 개의 위치 측정 장치에서 또는 이동 로봇(Mobile Robot)에서 초음파 신호를 발생하고 이를 상대 장치에서 수신하여 각각 두 개의 위치 측정 장치와의 수신 시간 차이를 측정하여 이동 로봇의 실내에서의 상대 위치를 측정하는 방식은 여러 논문에서 발표되었다^[3-5]. 이 방식의 문제점은 네 개의 위치 측정 장치의 설치 좌표를 정확히 알아야 하고, 네 개의 위치 측정 장치 사이의 동작 시간 동기를 정확히 유지해야 하며, 네 개의 측정 장치에서 신호를 발생하는 경우 상호 충돌로 인한 간섭을 줄이기 위한 신호 파형 설계가 어렵고, 네 개의 측정 장치에 별도의 전원 선로와 통신 장치가 준비되어야 한다는 것이다. 이런 어려움으로 인해 실제적으로 활용되는 것이 어렵다. 이전 논문[6]에서는 이런 문제점을 해결하고자, 스마트폰에서 발생하는 음향 신호를 3개의 마이크가 설치된 단일 위치 측정 장치에서 수신하고 각각의 마이크 쌍에서의 수신 시간 차이를 신호처리 방식으로 측정하고, 이를 쌍곡선 수식에 적용하여 스마트폰의 2 차원 좌표를 구하는 Time Difference of Arrival(TDOA) 기반의 실내 위치 인식 기술이 제안되었다. 또한 [7]에서는 임의의 공간에 설치된 마이크 수신기와 선형 최소 평균 자승 오차 방식을 이용하여 3차원의 위치와 음향의 전파 속도를 측정하는 연구가 진행되었다.

본 논문에서는 사용자의 스마트폰 또는 휴대폰을 대상으로 실내에서의 3 차원 위치 좌표를 인식하는 기술을 제안하고 실험을 통해 검증된 결과를 제시한다. 또한 3 차원 실내 위치 인식을 위해 쌍곡선의 교차점을 구하는 방식과 함께 2차의 비선형 쌍곡선 수식을 선형 방정식으로 변형하여 최소 평균

자승 오차 방식을 이용한 위치 좌표 계산 방식을 적용하여 그 결과를 비교하였다.

II. 쌍곡선 교차점 계산 방식

2.1. 기존의 TDOA 기술을 이용한 2차원 위치 인식 방식^[6]

TDOA 기술을 이용하여 신호원의 위치를 인식하기 위해서는 최소한 세 개의 센서가 있어서 두 개의 거리 차이 값이 있어야 한다. 그림 1에서 신호원 S와 마이크 1 및 마이크 3과의 동일 거리 차이에 의한 쌍곡선이 짧은 점선의 점근선의 옆에 표시되어 있고, 신호원 S와 마이크 2 및 3과의 동일 거리 차이에 의한 쌍곡선이 긴 점근선의 옆에 표시되어 있다. 이 두 쌍곡선이 교차하는 지점이 신호원 S의 위치이다. 일반적으로 마이크와 같은 센서의 개수가 N이라고 하면 신호원과 두 센서 사이의 각각의 거리 차이의 값은 $N(N-1)/2$ 개가 존재한다. 따라서 이 경우에는 d_{12}, d_{13}, d_{23} 의 세 개의 거리 차이 값이 있다. 여기서 d_i 를 신호원과 i 번째 센서 사이의 거리라고 할 때, 거리 차이 $d_{ij} = d_j - d_i$ 이다. 추정하려는 미지수인 신호원의 좌표값은 x_s 와 y_s 의 두 개이므로 수식의 개수가 더 많은 과결정(over-determined)인 경우이다. 실제로는 위치 측정 장치의 측정 오차와 잡음에 의한 오차가 존재하므로, 센서가 많을수록 여러 개의 x_s 및 y_s 추정값을 구해서 평균값을 사용하는 것이 유리하다.

마이크 1과 2에 의한 쌍곡선의 수식은 다음 식 (1)과 같고, 마이크 2와 3에 의한 쌍곡선은 다음 식 (2)와 같다.

$$\frac{x^2}{a_1^2} - \frac{y^2}{b_1^2} = 1 \tag{1}$$

$$\frac{(x - \frac{L}{2})^2}{a_2^2} - \frac{y^2}{b_2^2} = \frac{4(x - \frac{L}{2})^2}{d_{23}^2} - \frac{y^2}{(\frac{L}{2})^2 - (\frac{d_{23}}{2})^2} = 1 \tag{2}$$

여기서 L은 마이크 사이의 간격, $d_{13} = 2a_1$, $b_1^2 = L^2 - a_1^2$, $d_{23} = 2a_2$, $b_2^2 = (\frac{L}{2})^2 - a_2^2$ 의 관계가 있다. 두 식을 연립하여 x_s 와 y_s 에 대해서 정리하면 각각 다음 식 (3) 및 (4)와 같다.

$$x_s = \frac{-La_1^2b_2^2 \pm \sqrt{L^2a_1^4b_2^4 - 4c(a_2^2b_1^2 - a_1^2b_2^2)}}{2(a_2^2b_1^2 - a_1^2b_2^2)} \tag{3}$$

$$y_s = b_1 \sqrt{\frac{x_s^2}{a_1^2} - 1} \quad (4)$$

여기서 $c = a_1^2(a_2^2b_2^2 - \frac{L^2}{4}b_2^2 - a_2^2b_1^2)$ 이다.

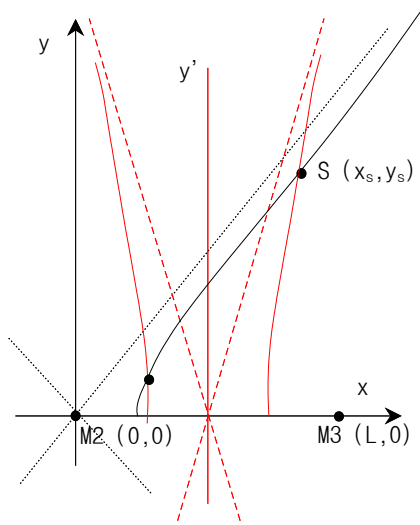


그림 1. TD OA 기술로 위치 좌표 계산을 위한 쌍곡선 모델 (우측 두 개의 마이크와 마이크 3만 표시됨)
Fig. 1. Hyperbola model to calculate the position by the TD OA technology(Only the right two microphones are shown.)

2.2. y_s 선행 계산 방식

기존의 논문에서는 d_{12} , d_{13} , d_{23} 를 측정 한 후, 앞의 (3) 식을 이용하여 먼저 x_s 를 구하고, 이 값을 (4) 식에 대입하여 y_s 를 구하였다. 그런데 일반적으로 마이크들 사이의 거리보다 마이크와 신호원과의 거리가 더 큰 경우에서 위치를 측정하므로 쌍곡선의 기울기가 크게 되며, 따라서 측정 오차가 존재하는 상황에서 x_s 의 작은 오차에 대해 y_s 값의 오차가 커지게 된다. 그러나 x_s 와 y_s 를 구하는 수식은 동일한 수식 (1)과 (2)에서 유도된 것이므로 y_s 를 먼저 구하고 이를 이용하여 x_s 를 구하더라도 동일한 결과를 얻게 된다. 다음 식 (5)와 (6)은 새롭게 유도된 y_s 와 x_s 를 구하는 수식이다. y_s 를 먼저 구한 후에 이를 이용하여 x_s 를 구한다.

$$y_s = \sqrt{\frac{A \pm B}{C}}, \quad (5)$$

$$A = L^2 a_1^2 b_1^2 b_2^4 - 4 a_2^4 b_1^2 b_2^2 - 4 a_1^4 b_1^2 b_2^4 + L^2 a_2^2 b_1^4 b_2^2 + 4 a_1^2 a_2^2 b_1^2 b_2^4 + 4 a_1^2 a_2^2 b_1^4 b_2^2,$$

$$B = 2 L a_1 a_2 b_1^2 b_2^2 \sqrt{D},$$

$$D = L^2 b_1^2 b_2^2 - 4 a_1^2 b_1^2 b_2^2 + 4 a_1^2 b_2^4 + 4 a_2^2 b_1^4 - 4 a_2^2 b_1^2 b_2^2,$$

$$C = 4(a_1^4 b_2^4 - 2 a_1^2 a_2^2 b_1^2 b_2^2 + a_2^4 b_1^4),$$

$$x_s = \frac{a_1 \sqrt{b_1^2 + y_s^2}}{b_1} \quad (6)$$

한 편, 식 (3)을 계산하면 그림 1에서처럼 두 개의 쌍곡선에 의해서 두 개의 교차점이 생성된다. 이 중에서 왼쪽 아래의 교차점은 허근에 해당된다. 만약 d_{12} 까지 사용하여 세 쌍의 쌍곡선을 생성하면 신호원 S에서만 세 개의 쌍곡선이 교차하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 두 쌍의 쌍곡선을 사용하여도 측정된 거리 차이 값의 부호와 마이크 사이의 거리 L을 고려하면 두 개의 근 중에서 어느 것이 신호원의 위치인지 쉽게 구분할 수 있다. 그러나 y_s 를 먼저 구하는 방식에서는 기존의 방식과 다르게 두 개의 근 중에서 구분할 필요가 없다. 그림 1에서 알 수 있듯이 마이크들과 쌍곡선 배치의 특성상 두 개의 y_s 근 중에서 신호원의 위치는 항상 큰 값에 해당된다. 따라서 신호원의 y축 좌표 값은 식 (5)로부터 $y_s = \sqrt{(A+B)/C}$ 이다. y_s 를 먼저 구하는 수식이 좀 더 복잡하기는 하지만 근 중에서 실제 신호원의 위치를 구분해야 하는 복잡함이 없다는 장점이 있다.

2.3. TD OA 기술에 의한 3차원 위치 인식 방식

기존의 논문^[6]에서는 마이크를 일직선상에 배치하여 동일 평면상의 신호원 S의 위치 좌표를 인식하였다. 그러나 실생활에서는 3 차원 공간에서의 위치 좌표를 인식해야 하므로 본 논문에서는 스마트폰의 음향 신호를 수신하기 위한 마이크를 십자 형태로 총 5개를 등 간격으로 배치하였다. 쌍곡선의 교차점을 계산하는 방식으로 3 차원 공간에서의 위치를 인식하기 위해서는 센서들이 일직선상에 배치되어야 하므로, 가능한 마이크의 수를 줄이고, 측정 장치의 전면에 마이크들이 배치되므로 측정 장치의 크기를 줄이기 위해 십자 형태의 배열을 이루게 되었다. 스마트폰에서 발생된 음향 신호를 5개의 마이크들이 동시에 수신하고 메모리에 저장되어 신호 처리 과정을 통해 신호원인 스마트폰과 두 개의 마이크들 사이의 거리 차이를 측정하게 된다. 따라서 거리의 차이 값은 총 10개(=(5×4)/2)를 구할 수 있다.

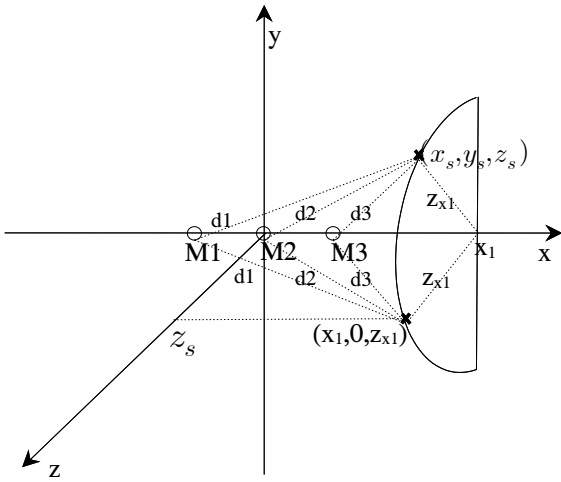


그림 2. 비동일 평면상의 신호원에 의한 위치 인식
Fig. 2. Positioning for non-coplanar signal source

쌍곡선의 교차점을 구하는 방식으로 3 차원 쌍곡선의 방정식을 만들 수 없으므로, 각각 x 축과 y 축으로 나누어서 방정식을 만들고 신호원의 좌표들을 구하며, 최종적으로 신호원의 3 차원 좌표를 구하기 위해 마이크가 배치된 평면과 신호원까지의 거리 z_s 를 구한다. 먼저 마이크 1, 2, 3의 세 개의 마이크로 신호원의 위치를 인식하는 경우에, 이전에는 신호원이 마이크들과 동일한 평면상에 위치하는 것을 가정해 왔다. 그러나 그림 2에서처럼 신호원이 비동일 평면상에 위치하는 경우에, 세 개의 마이크로 각각 수신된 신호의 거리는 반원주상에 임의의 지점에 신호원이 있는 경우와 동일하다. 신호원의 설치 높이 위치 y_s 에 상관없이 세 개의 마이크로 측정된 신호원의 위치 좌표 (x_s, y_s, z_s) 은 반원주상에서 모두 동일하게 추정된다. 즉, x-z 평면상의 신호원의 위치 $(x_1, 0, z_{x1})$ 와 반원주상의 다른 신호원의 위치 (x_s, y_s, z_s) 에 대해 동일하게 위치 좌표가 구해지므로 두 위치를 구분할 수 없다. 이 때 z_{x1} 은 실제의 신호원 위치의 좌표 값 z_s 가 아니라 x_1 에서 신호원까지의 거리가 된다. 따라서 실제 좌표 값인 z_s 와 z_{x1} 은 다르다. 그러므로 일직선상에 위치한 마이크 세 개로는 일직선상의 신호원의 좌표 값 x_1 은 정확히 측정할 수 있으나 거리 z_s 의 값이나 y_s 값을 측정할 수 없다.

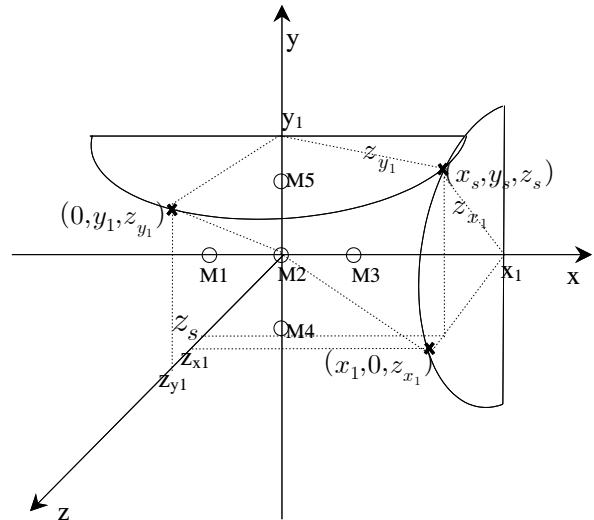


그림 3. 십자 형태의 마이크 배열을 이용한 3차원 위치 인식
Fig. 3. 3D positioning using cross type microphone array

그림 3에서 실제 신호원의 위치는 (x_s, y_s, z_s) 이다. 마이크 1, 2, 3에서 수신된 신호들을 이용하여 신호원의 위치를 추정하면 그림 3에서처럼 신호원의 실제의 x 축 상의 좌표 값 x_1 및 x_1 과 신호원 사이의 거리 z_{x1} 값을 구할 수 있다. 또한 동일한 방법으로 마이크 4, 2, 5에서 수신된 신호들을 이용하여 신호원의 y 축 상의 좌표 값 y_1 및 y_1 과 신호원 사이의 거리 z_{y1} 값을 구할 수 있다. 여기서 두 개의 반원의 교차점이 신호원의 실제 3차원 위치 좌표에 해당된다. 이 때, 원의 방정식 $(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2$ 을 이용하면(여기서 a와 b는 각각 x 축과 y 축에서의 원의 중심점이고, r은 반지름임) 다음과 같이 그림 3에서의 두 개의 반원에 대한 각각의 수식을 유도할 수 있다.

$$y^2 + z^2 = z_{x1}^2 |_{x=x_1}, z \geq 0: \text{마이크 1, 2, 3으로 측정된 } y\text{-}z \text{ 평면상의 반원의 수식}$$

$$x^2 + z^2 = z_{y1}^2 |_{y=y_1}, z \geq 0: \text{마이크 4, 2, 5로 측정된 } x\text{-}z \text{ 평면상의 반원의 수식}$$

신호원의 z 축 상의 실제 좌표 z_s 을 구하기 위해서는 위 두 개의 방정식의 교차점을 구해야 한다. 또한 두 수식이 $x = x_1$ 과 $y = y_1$ 의 조건을 만족해야 하므로, 각각의 수식에 대해서 다음과 같이 두 개의 z_s 값을 구할 수 있다.

$$z_{s1} = \sqrt{z_{x1}^2 - y_1^2}, z_{s2} = \sqrt{z_{y1}^2 - x_1^2} \quad (7)$$

두 개의 z 축 상의 좌표 z_{s1} 과 z_{s2} 는 동일한 값이므로 하나만 구해도 되지만, 실제로는 측정 오차로 두 개의 값이 다를 수 있으므로, 두 개를 구해서 평균을 취하는 방법이 좋다.

제안된 알고리즘의 검증을 위해 임의의 신호원의 좌표 값 $(x_s, y_s, z_s) = (20, 10, 30)$ 와 각각의 마이크 좌표 $M1(-12,0,0)$, $M2(0,0,0)$, $M3(12,0,0)$, $M4(0,-12,0)$, $M5(0,12,0)$ 에 대해서 MATLAB을 이용하여 계산 해보면, $z_{x_1} = 31.6, z_{y_1} = 36.1$ 이 되며, 위 식 (7)로 z_{s1} 과 z_{s2} 를 구해보면 두 값 모두 근사적으로 30이 된다. 따라서 위에서 유도된 3 차원 위치 좌표 추정 알고리즘이 정확한 것으로 확인되었다.

III. 선형 최소 평균 자승 오차 방식

신호원의 좌표인 x_s 와 y_s 의 2차 방정식인 쌍곡선의 수식을 1차 방정식으로 변형하여 행렬식을 이용하여 신호원의 좌표를 구하는 선형 최소 평균 자승 오차 방식(linear least mean squared method)에 대한 연구가 있었다^{4,8)}. 이 방식은 최적화 방식 또는 계산을 반복하는 방식이 아니므로 계산 시간이 매우 짧으며, 비선형 방정식의 경우와 다르게 초기 값 선정의 문제가 없고⁹⁾ 최적 해법을 보장하므로 실제 위치 인식 장치에 적용이 가능한 실용적인 방식이다.

선형 최소 평균 자승 오차 방식을 스마트폰을 신호원으로 하는 위치 인식 장치에 적용하기 위해, 먼저 그림 4와 같이 동일 평면상에 있는 마이크들과 신호원의 경우에 대한 계산식을 유도한다⁸⁾.

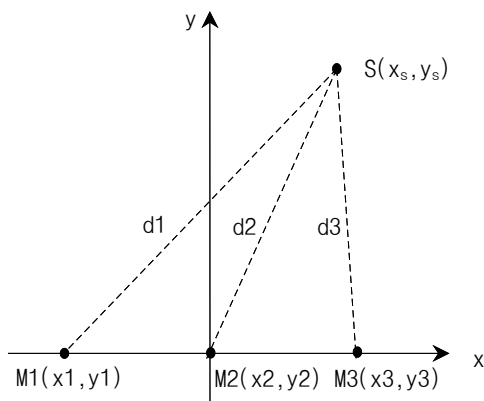


그림 4. 동일 평면상에서의 3개의 마이크들과 하나의 신호원의 구성도
Fig. 4. The configuration of 3 microphones and 1 signal source in a co-plane

마이크 1과 신호원 S와의 거리 d_1 은 다음식과 같다.

$$d_1 = \sqrt{(x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2} \quad (8)$$

또한 다른 마이크들과의 거리 d_2, d_3 는 다음과 같다.

$$d_2 = \sqrt{(x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2} \quad (9)$$

$$d_3 = \sqrt{(x_s - x_3)^2 + (y_s - y_3)^2}$$

신호원과 마이크 1 및 2와의 거리 차이 d_{12} 는 다음과 같다.

$$d_{12} = d_2 - d_1 = \sqrt{(x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2} - \sqrt{(x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2} \quad (10)$$

우변을 이항하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} d_{12} + \sqrt{(x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2} &= \sqrt{(x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2} \\ d_{12}^2 + (x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2 + 2d_{12} \cdot d_1 &= (x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2 \\ 2(x_2 - x_1)x_s + 2(y_2 - y_1)y_s + 2d_{12} \cdot d_1 &= (x_2^2 - x_1^2) + (y_2^2 - y_1^2) - d_{12}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

수식 유도 과정을 통해 식 (10)의 x_s 와 y_s 의 2차 방정식이 식 (11)의 1차 방정식으로 선형화되었다. 따라서 신호원의 좌표를 구하는 식이 선형 방정식이 되었으므로 아래와 같은 행렬식을 이용하여 x_s 와 y_s 의 신호원 좌표 값을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} 2 \begin{bmatrix} (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) & d_{12} \\ (x_3 - x_1) & (y_3 - y_1) & d_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ d_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (x_2^2 - x_1^2) + (y_2^2 - y_1^2) - d_{12}^2 \\ (x_3^2 - x_1^2) + (y_3^2 - y_1^2) - d_{13}^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

이 식은 다음과 같이 벡터 형식으로 표시할 수 있으며,

$$\vec{A}x = \vec{b} \quad (13)$$

여기에서 $\vec{A} = 2 \begin{bmatrix} (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) & d_{12} \\ (x_3 - x_1) & (y_3 - y_1) & d_{13} \end{bmatrix}$, $\vec{x} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ d_1 \end{bmatrix}$,

$\vec{b} = \begin{bmatrix} (x_2^2 - x_1^2) + (y_2^2 - y_1^2) - d_{12}^2 \\ (x_3^2 - x_1^2) + (y_3^2 - y_1^2) - d_{13}^2 \end{bmatrix}$ 이다.

따라서 신호원의 좌표 x_s 와 y_s 의 추정 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

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

한편 위의 방식을 이용하여 3 차원 공간에서의 십자 형태의 마이크들과 신호원의 좌표 관계를 구하기 위한 구성도는 다음 그림 5와 같다.

마이크 1, 2, 3, 4, 5의 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 1 과 신호원과의 거리 d_1 은 다음과 같다.

$$d_1 = \sqrt{(x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2 + (z_s - z_1)^2} \quad (14)$$

그림 4의 동일 평면상의 방법과 동일한 방법으로 그림 5의 3 차원 공간에서의 선형 방정식을 유도하면 그 결과 식은 다음과 같다.

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

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

여기서 $(z_2 - z_1)$ 이나 $(z_2^2 - z_1^2)$ 와 같이 z 에 관련된 항들이 빠진 이유는 마이크들이 모두 동일 평면상에 있어 z_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) 값들이 모두 "0"이므로, 이 값들을 행렬에 포함시키면 행렬이 특이성(singularity)이 되어 역행렬 계산이 되지 않기 때문이다. 그러나 마이크들이 비동일 평면상에 설치된다면 z 에 관련된 항들이 행렬식에 추가되어야 한다.

위 식으로 \vec{x} 을 구하면 z_s 대신에 d_1 을 구할 수 있으므로, 위의 d_1 식을 이용하여 다음과 같이 z_s 을 구해야 한다.

$$z_s = \sqrt{d_1^2 - (x_s - x_1)^2 - (y_s - y_1)^2} + z_1 \quad (16)$$

마이크 1을 기준으로 하면, d_{12} , d_{13} , d_{14} , d_{15} 의 네 개의 거리 차이 값을 사용하여 신호원의 좌표를 구

하게 된다. 그런데 마이크의 개수가 총 5개이므로 $\frac{N(N-1)}{2} = 10$, 즉 총 10개의 거리 차이 값들을 구할 수 있고, 따라서 다른 마이크 하나를 기준으로 동일한 방법으로 신호원의 좌표를 구할 수 있다. 이 때 다른 거리 차이 값들을 사용하므로 구해진 신호원의 좌표 값들의 평균을 구한다면 위치 추정 오차를 줄일 수 있을 것이다.

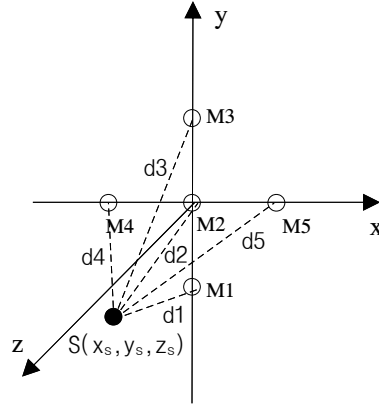


그림 5. 3 차원 공간에서의 십자 형태의 마이크들과 하나의 신호원 구성도
Fig. 5. The 3D configuration of cross type 5 microphones and 1 signal source

마이크 4를 기준으로 또 다른 선형 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\mathbb{A}' = 2 \begin{bmatrix} (x_1 - x_4) & (y_1 - y_4) & d_{41} \\ (x_2 - x_4) & (y_2 - y_4) & d_{42} \\ (x_3 - x_4) & (y_3 - y_4) & d_{43} \\ (x_5 - x_4) & (y_5 - y_4) & d_{45} \end{bmatrix}, \quad \vec{x} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ d_4 \end{bmatrix}$$

$$\vec{b}' = \begin{bmatrix} (x_1^2 - x_4^2) + (y_1^2 - y_4^2) - d_{41}^2 \\ (x_2^2 - x_4^2) + (y_2^2 - y_4^2) - d_{42}^2 \\ (x_3^2 - x_4^2) + (y_3^2 - y_4^2) - d_{43}^2 \\ (x_5^2 - x_4^2) + (y_5^2 - y_4^2) - d_{45}^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$z'_s = \sqrt{d_4^2 - (x_s - x_4)^2 - (y_s - y_4)^2} + z_4 \quad (18)$$

MATLAB을 이용하여 유도된 행렬식을 계산한 결과 신호원의 좌표 (x_s, y_s, z_s) 을 정확하게 추정하였다.

IV. 실험 결과

5 개의 마이크가 십자 형태로 전면에 설치된 실내 위치 인식 장치가 그림 6과 같이 구현되었다. 전면의 5 개의 작은 원들이 마이크이며, 각각의 거리 L은 12

cm이다. 5 개의 마이크로 수신된 스마트폰의 음향 신호는 증폭되고 동시에 100 kHz로 샘플링되어 각각의 메모리에 저장된다. 8 비트의 ATmega128 MPU가 사용되었으며 부동소수점 방식으로 계산되었다. 메모리에 저장된 각각의 신호 파형들은 MPU에서 두 채널씩 읽어와 상호 상관 함수법으로 침투값을 찾아내고 해당되는 시간 지연 값을 측정하며 두 마이크 사이의 거리 차이로 환산하여 위치 좌표 계산에 사용된다. 침투값의 위치를 정확히 찾기 위해서는 스마트폰에서 발생하는 음향 신호가 선형 FM(Frequency Modulation)과 같은 광대역 신호를 사용하는 것이 유리하다⁶⁾. 실험에 사용된 신호는 10 msec의 시간 동안 1 kHz에서 5 kHz로 시간에 따라 선형으로 변화하는 선형 FM(chirp) 신호이다. 동일한 10 msec의 음향 신호가 2초 동안 반복되어 파일에 저장된다. 압축과 재생과정에서의 왜곡을 줄이기 위해 wav 형식의 파일로 선형 FM 신호가 생성되어 스마트폰에 저장되고 스마트폰의 앱 프로그램으로 재생된다.



그림 6. 구현된 3 차원 위치 인식 실험 장치
Fig. 6. The implemented 3D indoor positioning system

표 1. 구현된 실험 장치에서 측정된 거리 차이와 추정된 스마트폰의 위치 좌표 (A: 쌍곡선 교차점, B: 최소 평균자승)
Table 1. Measured difference of arrival and estimated signal source position in the experimental system (A: hyperbola, B: LMS)

coordinate of smart phone	0,12,50		0,-12,50		10,-12,50		20,-12,50	
	calculated	measured	calculated	measured	calculated	measured	calculated	measured
d12	4.04	3.74	-1.4	-1.7	-1.4	-2.0	-1.32	-1.7
d13	5.46	5.78	-5.5	-5.8	-5.4	-6.1	-5.1	-5.8
d14	2.6	2.38	-2.8	-3.1	-4.9	-5.1	-6.7	-6.8

d15	2.6	2.38	-2.8	-2.7	-0.47	-0.68	1.8	1.7
d23	1.4	1.36	-4.0	-4.1	-4.0	-4.1	-3.78	-4.1
d24	-1.4	-1.02	-1.4	-1.0	-3.5	-3.1	-5.39	-5.1
d25	-1.4	-1.02	-1.4	-1.0	0.9	1.4	3.13	3.7
d34	-2.8	-2.38	2.7	3.1	0.43	1.0	-1.6	-1.0
d35	-2.8	-2.38	2.7	3.4	4.9	5.4	6.9	7.8
d45	0	0	0	0.34	4.5	4.4	8.5	8.5
estimated coordinate	A	0,14,58	1,-14,54	15,-16,69	33,-14,64			
	B	0,12,49	1,-14,55	12,-16,61	19,-13,48			

구현된 실험 장치에서 측정된 스마트폰 스피커와 마이크들 사이의 거리 차이와, 이것을 이용하여 쌍곡선 교차점 계산 방식과 선형 최소 평균 자승 오차 방식으로 추정된 스마트폰 스피커의 3차원 위치 좌표 값이 표 1에 있다. 이때 마이크들의 좌표는 각각 M1(-12,0,0), M2(0,0,0), M3(12,0,0), M4(0,-12,0), M5(0,12,0)이다. 음향 신호를 100 kHz로 샘플링하여 신호 처리하므로 오류가 없는 경우에는 거리 차이 오차가 ±0.17 cm 이내이다. 그러나 스마트폰 음향신호의 왜곡과 잡음, 스마트폰 스피커 설치 위치의 오차 등으로 인해 측정 오차가 큰 경우도 발생하고 있다.

몇 개의 임의의 스마트폰 위치에 대해 측정된 거리 차이 값으로 두 가지 방식을 적용하여 스마트폰의 3차원 위치 좌표를 추정해 보면, 실제 스마트폰의 3차원 위치 좌표에 근사하는 것을 확인할 수 있다. 또한 전반적으로 쌍곡선 교차점 계산 방식보다는 선형 최소 평균 자승 오차 방식의 결과가 실제 값에 더욱 접근한다. 거리 차이의 측정값 오차에 따른 위치 추정값의 오차의 영향을 분석하기 위해 GDOP(Geometric Dilution of precision)가 사용된다¹⁰⁾. 쌍곡선 교차점 계산 방식과 선형 최소 평균 자승 오차 방식에 대해 표 1에 측정된 값으로 GDOP를 구하면 각각 35.3과 16.2이고, 최소 평균 자승 오차 방식이 측정 오차에 적게 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 이것은 쌍곡선 교차점 계산 방식의 경우에 각각 x 축과 y 축에 대해 별개로 신호원의 좌표를 구하므로 사용되는 거리 차이의 값이 두 개인 것에 비해, 선형 최소 평균 자승 오차 방식의 경우 네 개의 거리 차이 값이 사용되기 때문이다.

V. 결 론

본 논문에서는 실내에서 스마트폰의 음향신호를 수신하여 3 차원 공간에서의 스마트폰의 위치 좌표를

인식하기 위한 두 가지 방식이 제안되었고, 계산된 두 개의 마이크 사이의 거리 차이 값에 대해서는 정확하게 스마트폰의 위치를 추정하는 것이 확인되었다. 구현된 실험 장치로 측정된 거리 차이 값들을 제안된 두 가지의 방식에 적용하여 스마트폰의 3 차원 위치 좌표를 추정하였는데, 스마트폰에서의 음향 신호 왜곡으로 인해 측정 오차가 발생하였고 따라서 추정된 3 차원 위치 좌표에서도 오차를 확인하였다. 실험 결과는 분석해 보면, 마이크들 사이의 거리 차이 값을 측정하는 과정에서 오차는 피할 수 없으므로 가능한 많은 마이크를 설치하고 계산과정에서 가능한 많은 거리 차이 값을 포함시켜 3 차원 위치 좌표를 추정하는 것이 추정 위치 오차를 줄이는 것에 효과적이다. 또한 스마트폰과 마이크들 사이의 측정된 거리 차이의 오차를 줄이기 위해서 스마트폰에서 발생된 음향 신호가 실제로 선형 FM이 되도록 하는 연구와 마이크들의 설치 거리 차이에 따른 위치 추정 효과를 연구할 필요가 있다.

제안된 기술은 에어컨이나 TV, 오디오, 조명 시스템 등의 각종 생활기기에 적용되어 사용자의 3 차원 위치를 인식하고 스마트폰으로부터 사용자의 ID와 신호도 프로파일 정보를 수신 받아, 자동적으로 개인 맞춤형으로 기기를 설정하는 개인 환경 서비스(Personal Environment Service)에 적용될 수 있다.

References

[1] J. Oh, "A study for the PES service system architecture," *J. Korea Inform. Commun. Soc. (KICS)*, vol. 36, no. 5, pp. 471-476, May 2011.

[2] H. Koyuncu and S. Yang, "A survey of indoor positioning and object locating systems," *Int. J. Comput. Sci. Network Security (IJCSNS)*, vol. 10, no. 5, pp. 121-128, May 2010.

[3] Y. Lu and A. Finger, "Ultrasonic beacon-based local positioning system using broadband PN - chirp codes," in *Proc. Int. Conf. Wireless Optical Commun.*, pp.1-6, Banff, Canada, July 2009.

[4] J. Villadangos, J. Urena, M. Mazo, A. Hernandez, F. Alvarez, J. J. Garcia, C. De Marziani, and D. Alonso, "Improvement of ultrasonic beacon-based local positioning

system using multi-access techniques," in *Proc. IEEE Int. Workshop Intell. Signal Process.*, pp. 352-357, Faro, Portugal, Sep. 2005.

[5] Y. Fukuju, M. Minami, H. Morikawa, and T. Aoyama, "DOLPHIN: An autonomous indoor positioning system in ubiquitous computing environment," in *Proc. IEEE Workshop Software Technol. Future Embedded Syst.*, pp. 53-56, Washington D.C., U.S.A., May 2003.

[6] J. Oh, "A study on relative positioning based on acoustic signal of smart phone," *J. Inst. Webcatsting, Internet, Telecommun. (IWIT)*, vol. 13, no. 1, pp. 229-234, Feb. 2013.

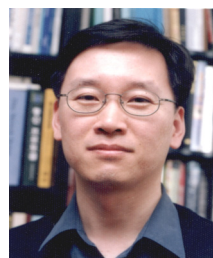
[7] A. Mahajan and M. Walworth, "3-D position sensing using the differences in the time-of-flights from a wave source to various receivers," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 17, no. 1, pp. 91-94, Feb. 2001.

[8] S. Zekavat and R. Buehrer, *Handbook of position location: Theory, practice, and Advances*, IEEE Press, 2012.

[9] G. Wang and H. Chen, "An importance sampling method for TDOA-based source localization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 5, pp. 1560-1568, May 2011.

[10] 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, Oct. 2011.

오 종 택 (Jong-taek Oh)



1986년 2월 한양대학교 전자통신공학과 학사
 1989년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
 1993년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
 1993년 12월~2000년 2월

한국통신 무선통신연구소 선임연구원
 2000년 3월~현재 한성대학교 정보통신공학과 교수
 <관심분야> 지능형 무선통신 서비스, 개인환경서비스, 실내위치인식