다중 센서 환경에서 위치추정 정확도 향상 방안 연구

나인석* · 김영길**

A study on method to improve the detection accuracy of the location at multi-sensor environment

In-seok Na* · Yeong-gil Kim**

요 약

신호원으로부터 발생하는 전파를 이격된 다중센서에서 수신하여 신호원의 위치를 추정하는 시스템에서는 신호원의 위치와 센서들의 위치에 따라 위치탐지 정확도가 저하되는 현상이 나타난다. 이러한 현상을 기하학적 정밀도 저하(GDOP) 효과라 하며, 이러한 효과를 최소화하여 위치탐지 정확도 성능을 향상시키기 위한 방법에 대해 연구가 필요하다. 본 논문에서는 이격 배치된 센서들의 방위 정보를 이용하여 GDOP 효과의 발생 가능성을 추정하고, 위치 추정에서 오차 요인이 되는 센서를 제거하여 GDOP 효과로 인한 성능 저하를 최소화하는 방법에 관한 연구 결과를 서술하겠다.

ABSTRACT

In location finding system using spaced multi-sensor, there is the phenomenon that the position estimation accuracy is degraded by the location of signal sources and the sensors. This phenomenon is called GDOP(Geometric Dilution Of Precision) effect. and to minimize these effects, research is needed on how. In this paper, I will describe how to minimize GDOP effect, estimating possibility of GDOP using AOA(angle of arrival) information of spaced multi sensors, and removing sensor error factor in position estimation.

키워드

다중센서, 위치탐지정확도, 기하학적 정밀도 저하 효과, 방위

Key word

multi-sensor, position estimation accuracy, GDOP effect, angle of arrival

* 정회원 : LIG넥스원(교신저자, nainsuk@lignex1.com)
** 종신회원 : 아주대학교

접수일자 : 2012. 04. 23
심사완료일자 : 2012. 06. 22

Open Access http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.1.248

ⓒ This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

다중 센서를 이용하여 신호원의 위치를 추정하는 방법은 각 센서들에서 측정한 방위정보를 이용하여 방위선(LOB; Line of Bearing)들의 교차점이 신호원의 위치가 되는 삼각법(Triangulation), 센서들 간의 도착시간차(TDOA; Time Difference Of Arrival)의 등시간 선(Isochrone Line)의 교차점이 신호원의 위치가 되는 TDOA 방법, 이러한 방법들을 혼합하여 사용하는 TDOA/삼각법 등이 있다. 신호원의 위치는 센서에서 신호원까지의 방위선이나 등시간 선 등의 교점이 된다. 그러나 실제 환경에서는 방위 측정정확도, 시각 측정정확도, 센서의 위치 측정정확도, 다중경로와 같은 기타 환경적인 영향에 의하여 오차가 발생하며 심지어 교점이 발생하지 않을 수도 있다.

이론적으로 발생할 수 있는 노이즈 요인을 고려한 해의 영역은 교점이 아닌 교점면으로 형성된다. 이 교점면에서 측정 오차가 어떻게 조합되느냐에 따라 어디라도 해가 될 수 있다. 센서의 배치나 센서의 개수, 측정 오차 발생 범위에 따라 이 교점면의 모양과 면적은 달라질 수 있다.

그림 1에서 해가 될 수 있는 영역은 점선의 교점면인 마름모가 된다. 이때 신호원과 센서의 위치에 따라서 마름모의 영역이 달라진다.

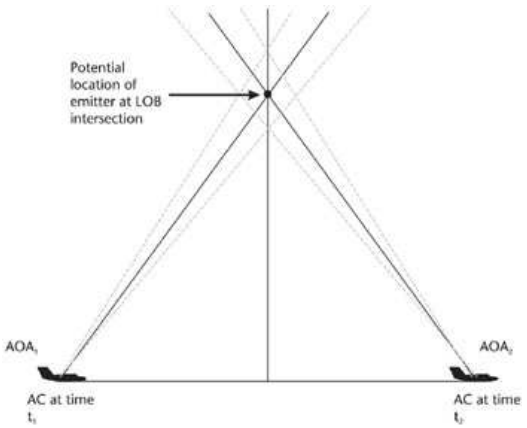

그림 1. LOB의 교점
Fig. 1 Intersection of LOBs

그림 2에서 센서간 이격 거리가 가까우면 가까울수록(b), 신호원의 거리가 원점으로 부터 멀어지면 멀어질수록(c) 해가 될 수 있는 영역의 면적이 증가하게 된다. 이렇게 Geometry상에서 신호원과 센서의 배치에 따라 교점면의 형성이 달라지고 이에 따라 위치추정 정확도의 성능이 저하되는 현상을 GDOP(Geometric Dilution of Precision) 효과라고 한다.

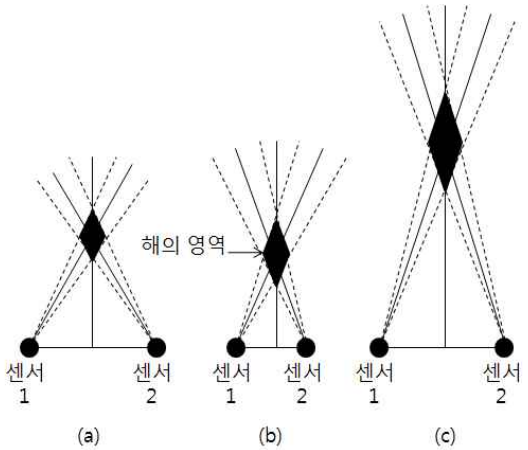

그림 2. LOB 교점면의 변화
Fig. 2 variation of LOBs intersection plane

3개의 센서에서 측정하는 TDOA 등시간 선은 그림 3과 같다. 등시간 선에서의 GDOP효과는 센서간의 이격거리와 신호원 위치에 따라 형성되는 쌍곡선에 의해 결정된다. 그림 3에서 센서는 x축을 기준으로 평행하게 배치하고 신호원 위치를 ①과 ②로 가정하여 해가 될 수 있는 교점면을 비교해보면 신호원이 ①번 위치에 있을 때의 교점면의 면적이 신호원이 ②번 위치에 있을 때 보다 작게 되며, 따라서 위치 추정 정확도가 상대적으로 높다. 센서의 배치에 따라 신호원이 특정위치에 있을 때 교점면이 넓어질 수도, 작아질 수도 있기 때문에 효과적인 센서배치가 일차적으로 위치추정 정확도를 높일 수 있는 방법이라고 할 수 있고, 추가적으로 센서를 고를 수 있는 상황이라면 신호원에 위치에 따라 센서를 선택하여 위치추정을 하면 좀 더 좋은 결과를 기대할 수 있다.

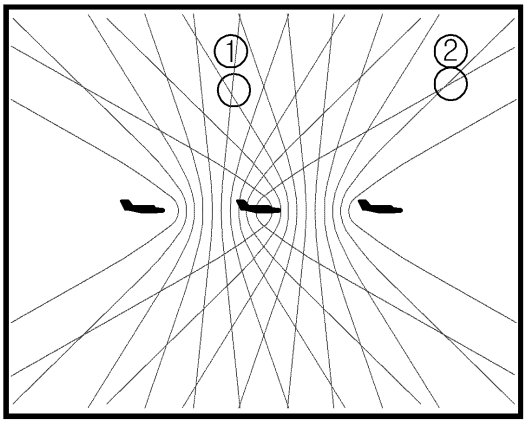

그림 3. 3개 센서의 등시간선
Fig. 3 isochrone line of 3 sensors

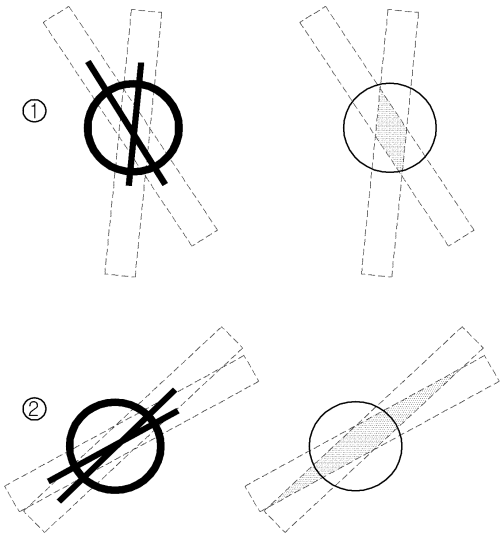

그림 4. 등시간선의 교점면
Fig. 4 intersection plane of isochrone line

하지만 다중 센서 환경에서는 꼭 모든 센서를 이용하여 위치추정 할 필요가 없다. GDOP 효과가 많이 발생 할 수 있는 위치의 센서는 오히려 정확한 위치추정에 방해가 된다. 본론에서는 이러한 센서를 제거하여 위치추정 정확도를 높일 수 있는 방법을 제안하고 M&S를 통하여 검증해 보겠다.

Ⅱ. 본 론

다중 센서 환경에서 측정된 신호원의 방위정보를 이용하여 GDOP 효과가 큰 센서의 정보를 배제하여 위치추정 정확도를 높일 수 있고, 위치추정 방법에 따른 몇가지 알고리즘을 제안한다.

2.1. 삼각법 위치추정 방식의 LOB 선택 알고리즘

n개의 센서를 갖는 다중센서 시스템의 각 센서의 LOB의 교점을 이용할 때 k번째 센서의 기울기가 m_k인 LOB의 방정식 f_k는 아래와 같이 정의된다.

$$f_k = m_k(y - y_k) - (x - x_k) \tag{1}$$

신호원의 위치는 (x,y), 센서 k의 위치는 (x_k,y_k), 기울기 m_k는 센서에서 측정한 신호원의 방위 θ_k를 통하여 구할 수 있다.

$$m_k = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta_k\right) \tag{2}$$

삼각법의 경우 2차원 위치추정이 되고, 위치를 구하기 위한 최소 LOB 개수는 2개이다. 만약 센서가 3개 이상이고, 특정 센서 k의 LOB가 GDOP 효과로 인해 정확도가 떨어진다면, k의 LOB를 제외하고 위치추정을 수행하면 더 좋은 결과를 기대할 수 있다. 센서가 4개인 시스템에서 f1, f2, f3, f4의 4개의 LOB 방정식이 존재하고, 방정식 중 GDOP 효과로 인해 정확도가 떨어지는 방정식을 제외한 2개 이상의 LOB방정식의 교점면을 해로 구할 수 있다. 즉 위치추정 센서의 선택은 LOB의 교점면의 면적이 작아지게 선택되어야 한다.

그 예로 그림 5의 경우 f3와 f4의 기울기가 방향탐지 정확도 오차 범위 이내로 일치하면 신호원에서 먼 LOB 3의 방정식 f3를 제거하여 위치추정을 수행하여 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다.

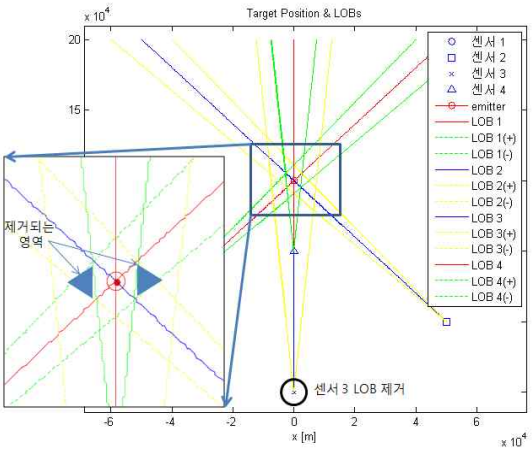

그림 5. LOB의 선택으로 위치 추정 정확도 향상
Fig. 5 improvement of position estimation accuracy as selection of LOB

2.2. TDOA 등시간 위치추정 방식의 쌍곡선 선택 알고리즘

센서가 4개라고 가정하면 TDOA 방정식은 아래와 같이 정의된다. 빛의 속도가 v이고 센서 1,2의 time difference of arrival이 t_{21}이면 등시간 선의 방정식 f_{12}는 식 (3)~(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$f_{12} = d_2 - d_1 - vt_{21} \tag{3}$$

$$d_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} \tag{4}$$

$$d_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \tag{5}$$

다른 센서간의 조합에 따른 등시간 선은 식 (6)~(10)으로 표현할 수 있다.

$$f_{13} = d_3 - d_1 - vt_{31} \tag{6}$$

$$f_{14} = d_4 - d_1 - vt_{41} \tag{7}$$

$$f_{23} = d_3 - d_2 - vt_{32} \tag{8}$$

$$f_{24} = d_4 - d_2 - vt_{42} \tag{9}$$

$$f_{34} = d_4 - d_3 - vt_{43} \tag{10}$$

등시간 선의 교점으로 신호원위치 $p = (x, y, z)$를 추정하는 방법은 식 (11)로 정의할 수 있다.

$$\min_p \| f(p) \|_2^2 = \min_p \{ f_1(p)^2 + f_2(p)^2 + \ldots + f_n(p) \} \tag{11}$$

식 (11)에서 GDOP로 인한 등시간 선의 교점면 면적 증가로 인하여 위치추정 오차가 커질 수 있다. 4개의 센서로 형성되는 등시간 선의 교점면은 그림 6, 7과 같이 나타난다.

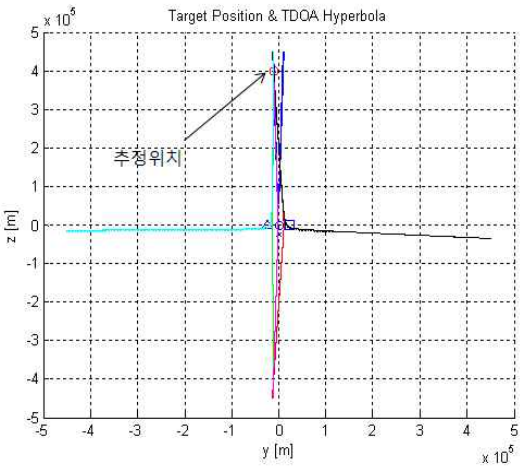

그림 6. TDOA 등시간선 (4개 센서)
Fig. 6 TDOA isochrone line

그림 6에서 GDOP 효과가 크게 발생하는 등시간 선은 1개가 있고 확대해 보면 그림 7에서 f_{31}인 것을 알 수 있다. 식 (11)에서 $p = (x, y, z)$를 구할 때 비선형방정식을 풀기 위하여 최적화하는 과정에서 오차범위가 큰 항이 존재하면 최종 추정 결과의 오차 값은 오차가 큰 항의 오차 값에 따라 결정된다. 따라서 방정식을 푸는데 필요한 최소한의 등시간 선의 방정식만 확보되면 그림 7의 f_{31} 같이 오차가 큰 항은 사용하지 않고 전체시스템의 위치 추정 정확도를 높일 수 있다.

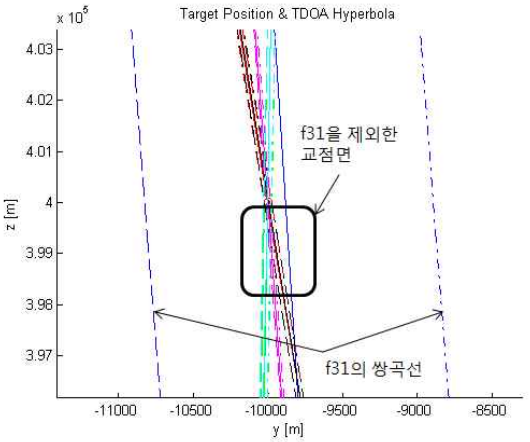

그림 7. 오차가 큰 등시간선 선택
Fig. 7 selection of isochrone line having large error

그림 7에서 오차범위가 넓은 센서3과 센서1의 조합 쌍곡선인 f_{31}의 등시간 선을 제거하면 그림 8과 같이 오차 범위가 줄어든다.

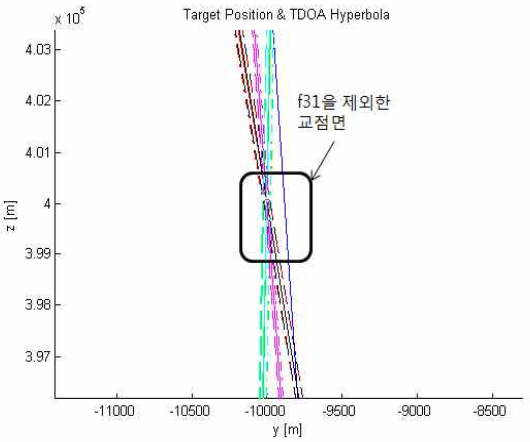

그림 8. 오차가 큰 등시간선 삭제로 위치 추정 정확도 향상
Fig. 8 improvement of position estimation accuracy as removing isochrone line having large error

본 논문에서 제시하는 첫 번째 방법은 그림 9와 같이 다중 센서에서 측정한 신호원의 방위를 이용하여 GDOP 효과가 큰 방정식을 결정하고 이를 제외한 조합으로 신호원의 위치를 추정한다. GDOP 효과가 큰 센서를 결정할 때 각 센서들의 방향 탐지 정확도가 σ RMS라고 하고, 두 센서간의 방위 차이가 $\pm 3\sigma$이내면 GDOP 효과가 클 것이라고 예상할 수 있기 때문에 제거할 센서라고 판단할 수 있다.

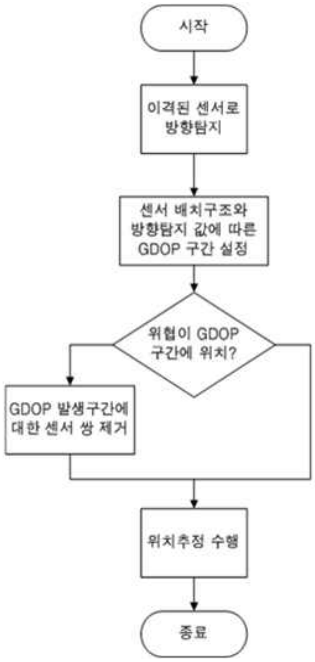

그림 9. 정확도 향상 알고리즘
Fig. 9 algorithm for the improvement of accuracy

다른 방법으로는 GDOP를 수학적으로 계산하여 위치 추정 정확도와의 상관관계를 이용하여 GDOP 효과가 큰 센서를 결정 할 수 있다. 위협위치와 센서위치에 따른 covariance matrix를 cov(x)라고 하면

$$cov(x) = c^2 V_{\delta t}(A^T A)^{-1} \tag{12}$$

$$c^2 V_{\delta t} = 1 \tag{13}$$

$$GDOP = \sqrt{TRACE(A^T A)^{-1}} \tag{14}$$

이고 이때 A matrix는 수신기에 대한 direction cosines matrix이다. 따라서 GDOP는 식 (14)와 같이 정의된다.

또는 각 좌표계에서의 variance를 측정/예측 할 수 있다면 식 (15)와 같이 계산할 수 있다.

$$GDOP = \frac{\sqrt{V_x + V_y + V_z + c^2 V_t}}{c\sqrt{V_{\delta t}}} \tag{15}$$

이렇게 계산된 GDOP 값을 이용하여 위치추정 정확도에 영향을 끼치는 센서를 예측 할 수 있다.

Ⅲ. 결 론

본 논문에서는 이격 배치된 센서들로 입력되는 신호들의 도착시간차 등시간선을 이용한 신호원의 위치추정 방법에서 이격된 센서의 방위 정보를 이용하여 오차가 큰 등시간선을 제거하여 GDOP 효과를 극복하고 위치추정 정확도를 향상 시키는 방법과 GDOP를 계산하여 GDOP 값에 따른 센서를 선택적으로 운용하여 위치추정하여, 위치추정 정확도를 높이는 방법에 대한 연구가 수행되었다.

6개의 등시간선 중 최소 4개 이상의 등시간선만 선택하면 3차원 위치추정이 가능하다. 따라서 두 센서와 신호원에 대한 등시간선 중 GDOP효과로 인하여 오차가 큰 것을 검출하고 위치추정에서 제외하여 위치추정 정확도를 높일 수 있다.

참고문헌

[1] Richard G. Wiley, ELINT The Interception and Analysis of Radar Signals, ARTECH HOUSE, pp. 106-113, 2006.

[2] Richard A. Poisel, Electronic Warfare Target Location Methods, ARTECH HOUSE, pp. 163-167, 2005.

[3] H.C. Lin, Kalman filtering of TDOA/ FDOA Missile tracking system, Thesis, Mar. 2001.

[4] David A. Streight, Maximum-Likelihood Estimators for the Time and Frequency differences of arrival of cyclostationary digital communications signals, Dissertation, Jun. 1999.

[5] Darko Musicki, Regina Kaune, and Wolfgang Koch, "Mobile Emitter Geolocation and Tracking using TDOA and FDOA measurements," IEEE Trans. on Sig. Proc., vol. 58, no. 3, Mar. 2010.

[6] Jeff Mason, "Algebraic Two-Satellite TOA/FOA Position Solution on an Ellipsoidal Earth," IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems, vol. 40, no. 3, Jul. 2004.

[7] Yuki Takabayashi, Takashi Matsuzaki, Hiroshi Kameda, and Masayoshi Ito, Target Tracking Using TDOA/FDOA Measurements in the Distributed Sensor Network, SICE Annual Conference, Aug. 2008.

[8] Paul C. Chestnut, "Emitter Location Accuracy Using TDOA and Differential Doppler," IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems, vol. 18, no. 2, Mar. 1982.

[9] K.C. Ho and Y.T. Chan, "Geolocation of a Known Altitude Object From TDOA and FDOA measurements", IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems, vol. 33, no. 3, Jul. 1997.

[10] K.C. Ho and W. Xu, "An Accurate Algebraic Solution for Moving Source Location Using TDOA and FDOA measurements," IEEE Trans. on Sig. Proc., vol. 52, no. 9, Sept., 2004.

[11] R.Yarlagadda, I.Ali, N.Al-Dhahir and J.Hershey, "GPS GDOP metric", IEE Proc, Radar, Sonar Navig., Vol. 147, No. 5, Oct, 2000.

저자소개

나인석(In-Seok Na)

아주대 전자공학과 학사
아주대 전자공학과 석사
LIG넥스원 수석연구원 (현재)

※관심분야 : 전자전, 통신

김영길(Young-Kil Kim)

고려대 전자공학과 학사
한국과학기술원 석사
ENST(프랑스) 박사
아주대 전자공학과 교수(현재)

※관심분야 : RFID Platform, Embedded system, 초음파 의료기기, Mobile 의료정보 시스템