

근거리 환경에서의 3차원 배열센서 형상 보정 기법 3-Dimensional Sensor Array Shape Calibration in Near Field Environment

류 창 수*, 어 수 해**, 강 현 구***, 유 상 욱****

Chang-Soo Ryu, Soo-Hae Eoh, Hyun-Koo Kang, Sang-Wook Rhyoo

<Abstract>

Most sensor array signal processing methods for multiple source localization require knowledge of the correct shape of array(the correct positions of sensors that consist array), because sensor position uncertainty can severely degrade the performance of array signal processing. In particular, it is assumed that the correct positions of the sensors are known, but the known positions may not represent the true sensor positions. Various algorithms have been proposed for 2-D sensor array shape calibration in far field environment. However, they are not available in near field. In this paper, 3-D sensor array shape calibration algorithm is proposed, which is available in near field.

Key words : *sensor array, calibration, maximum likelihood estimate, near field, array signal processing*

1. 서 론

배열신호처리는 공간상에 일정한 형태로 배열된 배열센서(sensor array)를 이용하여 빔형성, 표적의 위치추정, 표적의 개수, 표적신호의 크기 등을 구하는데 이용하는 기법으로 레이다, 소나, 통신 등 다양한 분야에서 널리 사

용되고 있다^{1,2)}. 일반적으로 배열신호처리는 배열센서의 형상을 정확히 알고 있다는 가정과 함께 이루어진다. 즉, 배열센서를 구성하고 있는 센서들의 위치를 정확히 알고 있다는 가정과 함께 이루어진다. 그러나 실제로 설치작업의 오차, 외부적인 환경 요인 등에 의하여 센서들은 위치오차를 가지며, 이러한 위치오차는

* 정회원, 영남이공대학 전자정보계열, 전임강사
경북대학교, 工博, csryu@ync.ac.kr
** 정회원, 영남이공대학 전자정보계열, 교수
영남대학교, 工博 sheoh@ync.ac.kr
*** 정회원, 영남이공대학 전자정보계열, 교수
東北大學, 工博, kang@ync.ac.kr
**** 정회원, 영남이공대학 전자정보계열, 교수
경남대학교, 工博, rh1112@ync.ac.kr

* Full-time lecturer, Div. of Electronics & Information Engineering, Yeungnam College of Science & Technology
** Professor, Div. of Electronics & Information Engineering, Yeungnam College of Science & Technology
*** Professor, Div. of Electronics & Information Engineering, Yeungnam College of Science & Technology
**** Professor, Div. of Electronics & Information Engineering, Yeungnam College of Science & Technology

배열신호처리 알고리즘의 성능을 현저하게 저하 시킨다.

표적이 센서로부터 충분히 멀리 떨어져 있어 표적에서 발생하는 신호가 평면파로 가정할 수 있는 원거리(far field) 환경에서 센서 위치오차를 보정하기 위한 여러 가지 기법들이 연구 되어져 왔으며, 다양한 알고리즘들이 제안 되었다³⁻⁶⁾. 원거리 환경에서 센서의 위치오차를 보정하는 기법들은 2차원을 가지는 센서의 실제 위치(true position) (x, y) 를 보정신호원(calibration source)을 이용하여 추정하는 기법들이다. 보정신호원은 배열센서의 보정을 위하여 사용하는 신호원으로써 위치와 발생하는 신호의 특성을 알고 있는 신호원이다. 표적이 배열센서에 근접해 있어 표적 신호가 평면파로 가정할 수 없는 근거리 환경에서는 센서 위치는 더 이상 2차원이 아니며 3차원의 센서 위치 (x, y, z) 를 가지게 된다. 이러한 근거리 환경은 배열신호처리의 많은 응용에서 발생하는 상황이다^{7, 8)}.

본 논문에서는 근거리 환경에서 배열센서의 3차원 위치를 보정할 수 있는 센서 위치 보정 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 MLE 비용함수(cost function for maximum likelihood estimation)을 정의하고, 이 비용함수를 최소화함으로써 센서의 실제 위치를 추정한다.

2장에서는 신호모델을 설명하며, 3장에서는 비용함수를 정의하고 이를 이용하여 3차원 센서 위치 보정 기법을 제안한다. 4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 제안한 알고리즘의 성능을 검증하고, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 신호모델

L 개의 센서로 구성된 배열센서가 있으며, 이 센서들의 실제 위치를 추정하기 위하여 위치가 알려진 N 개의 보정신호원을 사용한다고 가정하자. Fig. 1은 배열센서와 보정신호원 사이의 기하학적 구조를 설명하고 있으며, 좌표계는 표기상의 편의를 위하여 구 좌표계를 사용한다. 보정신호원에서 발생한 보정신호를 배열센서에서 수신하였을 때 센서잡음이 존재하는 환경에서 l 번째 센서의 출력은 다음과 같다.

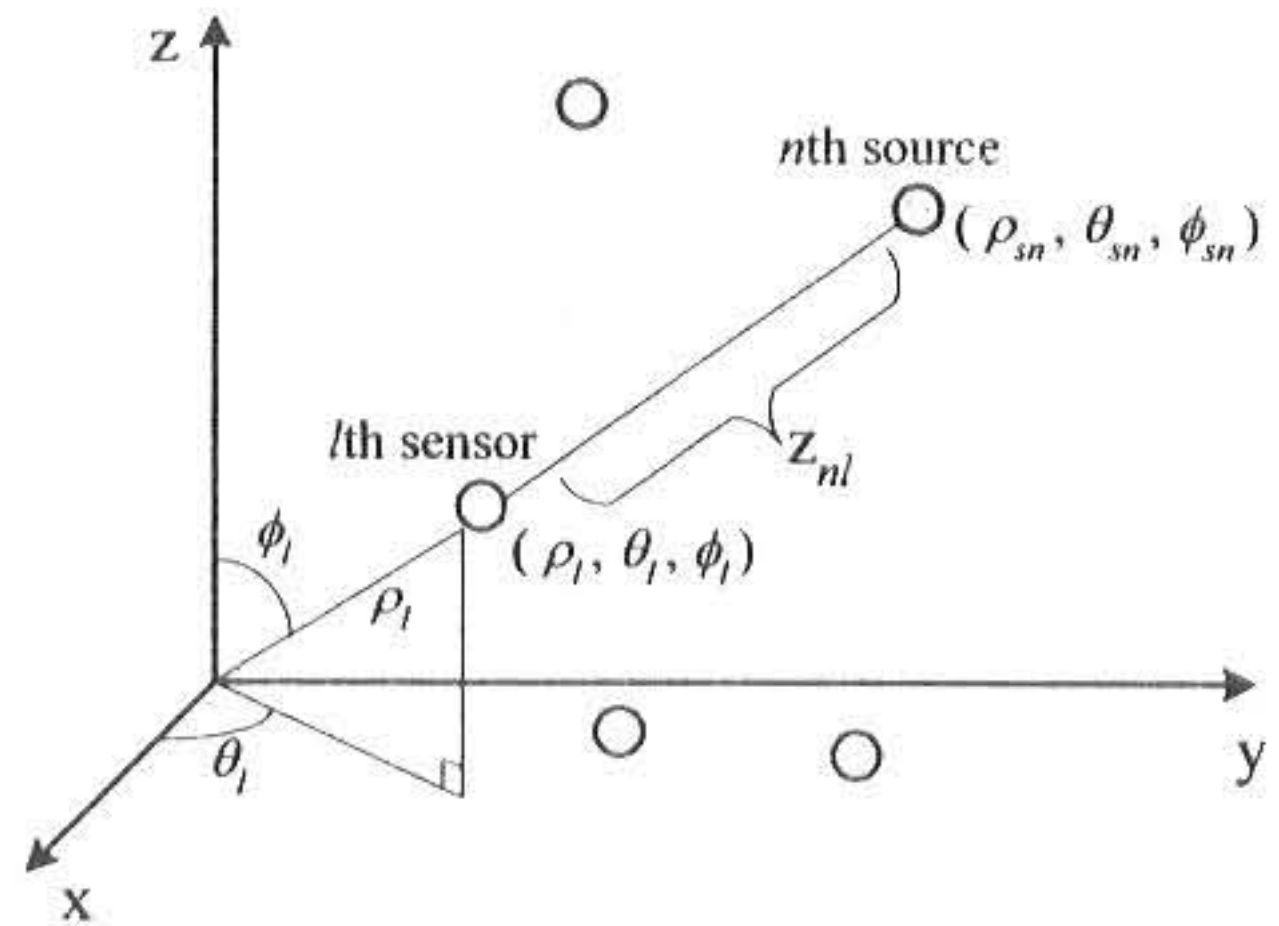


Fig. 1. Geometry of sensor array and calibration sources

$$r_l(t) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{z_{nl}} s_n(t - \tau_{nl}) + e_l(t) \quad (1)$$

여기서 $s_n(t)$ 는 n 번째 보정 신호원이 발생한 보정신호이며, $e_l(t)$ 는 l 번째 센서의 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 백색 가우시안 잡음이다. z_{nl} 은 l 번째 센서 $(\rho_l, \theta_l, \phi_l)$ 와 n 번째 보정신호원 $(\rho_{sn}, \theta_{sn}, \phi_{sn})$ 사이의 거리이며, τ_{nl} 은 n 번째 신호원에서 발생한 보정신호가 l 번째 센서에 도달하는데 까지 필요한 시간지연이다. z_{nl} 과 τ_{nl} 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$z_{nl}(t) = \left\{ \rho_l^2 + \rho_{sn}^2 - 2\rho_l\rho_{sn} [\cos\phi_l\cos\phi_{sn} + \sin\phi_l\sin\phi_{sn}\cos(\theta_l - \theta_{sn})] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\tau_{nl}(t) = \frac{z_{nl}}{c} \quad (3)$$

여기서 c 는 신호의 전송속도이다.

n 번째 신호원에서 발생하는 신호를 수신하는 배열센서의 출력을 벡터 표기법을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{a}(\boldsymbol{\psi}, \rho_{sn}, \theta_{sn}, \phi_{sn})s_n(t) + \mathbf{e}(t) \quad (4)$$

여기서 센서출력벡터 $\mathbf{r}(t)$ 와 잡음벡터 $\mathbf{e}(t)$ 는 복소벡터이며, 다음과 같이 각각 정의한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(t) &= [r_1(t), r_2(t), \dots, r_L(t)]^T \\ \mathbf{e}(t) &= [e_1(t), e_2(t), \dots, e_L(t)]^T \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 T 는 전치(transpose)를 나타낸다. 그리고 식 (4)의 $\mathbf{a}(\psi, \rho_{sn}, \theta_{sn}, \phi_{sn})$ 는 조향벡터(steering vector)이며, 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{a}(\psi, \rho_{sn}, \theta_{sn}, \phi_{sn}) = \left[\frac{1}{z_{n1}} e^{-j\frac{2\pi z_{n1}}{\lambda}}, \frac{1}{z_{n2}} e^{-j\frac{2\pi z_{n2}}{\lambda}}, \dots, \frac{1}{z_{nL}} e^{-j\frac{2\pi z_{nL}}{\lambda}} \right]^T \quad (6)$$

여기서 ψ 는 배열센서의 각 센서들의 3차원 위치 좌표 값을 구성요소로 가지는 벡터이며 다음과 같이 정의한다.

$$\psi = [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_L, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_L, \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_L]^T \quad (7)$$

3. 제안한 배열센서 형상 보정 알고리즘

3.1. 측정조향벡터

보정신호원에서 발생하는 신호를 배열센서에서 수신하여 신호처리 함으로써 측정 조향벡터(measured steering vector)를 구할 수 있다. n 번째 보정신호원에서 발생한 신호를 N_t 개의 단편(snapshot)으로 표본화(sampling)하여 수신하였을 때, 측정 조향벡터는 다음과 같이 표본평균(sample mean)을 구함으로써 추정할 수 있다.

$$\mathbf{a}_m(\rho_{sn}, \theta_{sn}, \phi_{sn}) = \frac{1}{N_t} \sum_{t=1}^{N_t} \mathbf{r}(t) \quad (8)$$

측정 조향벡터와 조향벡터 사이의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_m(\rho_{sn}, \theta_{sn}, \phi_{sn}) \\ = \mathbf{a}(\psi, \rho_{sn}, \theta_{sn}, \phi_{sn}) + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 \mathbf{n} 는 평균이 0이고, I 를 $L \times L$ 단위행

렬이라 할 때 공분산 행렬이 $(\sigma^2/N_t)I$ 인 백색 가우시안 잡음벡터이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{n} = \frac{1}{N_t} \sum_{t=1}^{N_t} \mathbf{e}(t) \quad (10)$$

3.2. 비용함수

N 개의 보정신호원을 사용하여 배열센서의 각 센서 위치를 보정하는 경우, 식 (6)의 조향벡터를 이용하여 위치행렬 A 를 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} A = [& \mathbf{a}(\psi, \rho_{s1}, \theta_{s1}, \phi_{s1}), \mathbf{a}(\psi, \rho_{s2}, \theta_{s2}, \phi_{s2}), \\ & \dots, \mathbf{a}(\psi, \rho_{sn}, \theta_{sn}, \phi_{sn})] \end{aligned} \quad (11)$$

그리고 보정신호원들의 신호를 개별적으로 수신하여 N 개의 측정 조향벡터를 구할 수 있다. 이 N 개의 측정 조향벡터들로 구성된 측정 위치행렬(measured location matrix) A_m 을 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} A_m = [& \mathbf{a}_m(\rho_{s1}, \theta_{s1}, \phi_{s1}), \mathbf{a}_m(\rho_{s2}, \theta_{s2}, \phi_{s2}), \\ & \dots, \mathbf{a}_m(\rho_{sn}, \theta_{sn}, \phi_{sn})] \end{aligned} \quad (12)$$

식 (11)은 센서들의 실제 위치 값과 보정신호원의 알려진 위치 값 사이의 관계를 나타내는 식이며, 식 (12)는 보정신호원에서 발생하는 신호를 센서들이 수신하여 구한 측정값이다. 식 (11)에서 식 (12)를 빼고, 그 결과 값에 Frobenius 크기(norm)를 취함으로써 비용함수를 제안한다. 제안한 비용함수는 식 (7)에서 정의한 센서들의 위치 좌표 값들로 구성된 벡터 ψ 를 변수로 가지며 다음과 같다.

$$\text{cost function} = \|A(\psi) - A_m\|_F^2 \quad (13)$$

여기서 $\| \cdot \|_F$ 는 Frobenius 크기를 나타낸다.

3.3. 배열센서 보정 알고리즘

식 (13)의 제안한 비용함수를 최소화 시키는 문제는 식 (14)의 함수 $f(\psi)$ 를 최소화 문제와 같으며 잘 알려진 사실이다⁴⁾.

$$f(\psi) = \text{Tr}(P_{A^*(\psi)}^\perp A_m^* A_m) \quad (14)$$

여기서 * 는 복소공액전치(complex conjugate transpose)를 나타내며, Tr 은 행렬의 대각성분의 합(trace)를 나타낸다. 그리고 $P_{A^*(\psi)}^\perp$ 는 다음과 같다.

$$P_{A^*(\psi)}^\perp = I - A^*(\psi)((A(\psi)A^*(\psi))^{-1}A(\psi)) \quad (15)$$

배열센서를 구성하는 센서들의 실제 위치는 식 (14)를 최소화하는 벡터 ψ 를 구함으로써 추정할 수 있다. 이 기법은 ML 기법에 기반을 두고 있으며 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\psi}_{ML} &= \arg \min_{\psi} f(\psi) \\ &= \arg \min_{\psi} \text{Tr}(P_{A^*(\psi)}^\perp A_m^* A_m) \end{aligned} \quad (16)$$

L 개의 센서로 구성된 배열센서의 경우 식 (16)은 $3L$ 개의 변수를 가진다. 식 (16)을 최소화하는 최적화 기법(optimization method)들은 많은 다양한 기법들이 있으며 본 논문에서는 직접탐색 기법(direct search method)을 사용한다.

4. 시뮬레이션

제안한 배열센서 보정 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 수행하기 위하여 10개의 센서가 직선으로 구성된 선배열센서(linear sensor array)를 사용하였다.

센서가 설치될 때 알려진 센서의 명목상 위치(nominal position)는 첫 번째 센서가 좌표의 원점 $(0, 0, 0)$ 에 위치하고 있으며, 나머지 센서들은 2.5m의 등 간격으로 x 축 상에 위치하고 있다고 가정하였다. 그리고 센서의 실제 위치(true position)는 명목상의 위치에서 평균적

으로 1.0484m의 센서 위치오차 크기를 가지면서 배치되어 있다고 가정하였다. Fig. 2는 시뮬레이션을 위한 센서의 명목상 위치와 실제 위치에 대한 3차원 구조를 설명하고 있다.

보정신호원은 28개를 사용하였으며, 배열센서로부터 평균 약 150m 떨어진 곳에 다양한 각도로 배치하였다. 보정신호원의 위치는 정확히 알고 있다고 가정하였다.

그리고 세션에서 수신한 신호의 단편(snapshot) 개수는 100개로 하였으며, 최적화를 위한 알고리즘 초기값은 센서의 명목상 위치를 사용하였다.

Fig 3은 보정신호원의 신호크기와 센서 잡음크기의 비를 나타내는 신호대잡음비(signal-to-noise ratio)가 10dB와 30dB 일 때 배열센서를 보정한 결과를 나타낸 것이다. 두 경우 모두 어느 정도 추정오차를 가지지만, 센서의 실제 위치를 추정하고 있음을 확인할 수 있다. 보다 정확한 분석을 위하여 보정하기 전의 각 센서들의 위치오차와 보정한 후의 각 센서들의 위치오차를 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서 센서들의 평균오차가 1.0484m 인 경우, 보정후의 센서 위치오차는 10dB에서는 0.2538m이며 30dB에서 0.0232m임을 확인할 수 있다. 10dB인 경우는 위치오차가 약 75.8% 줄었으며, 30dB인 경우에는 위치오차가 약 97.8% 감소하였다.

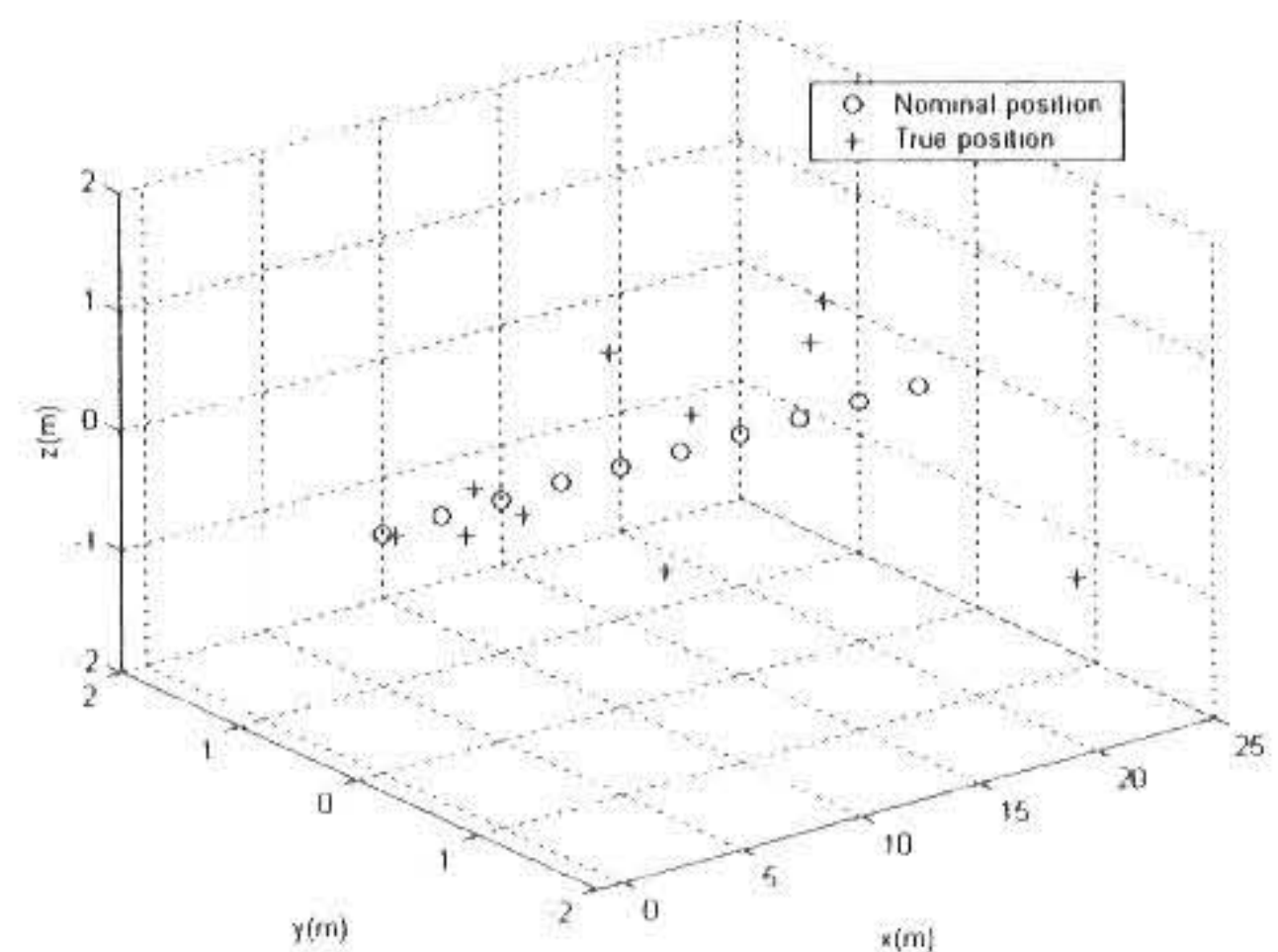
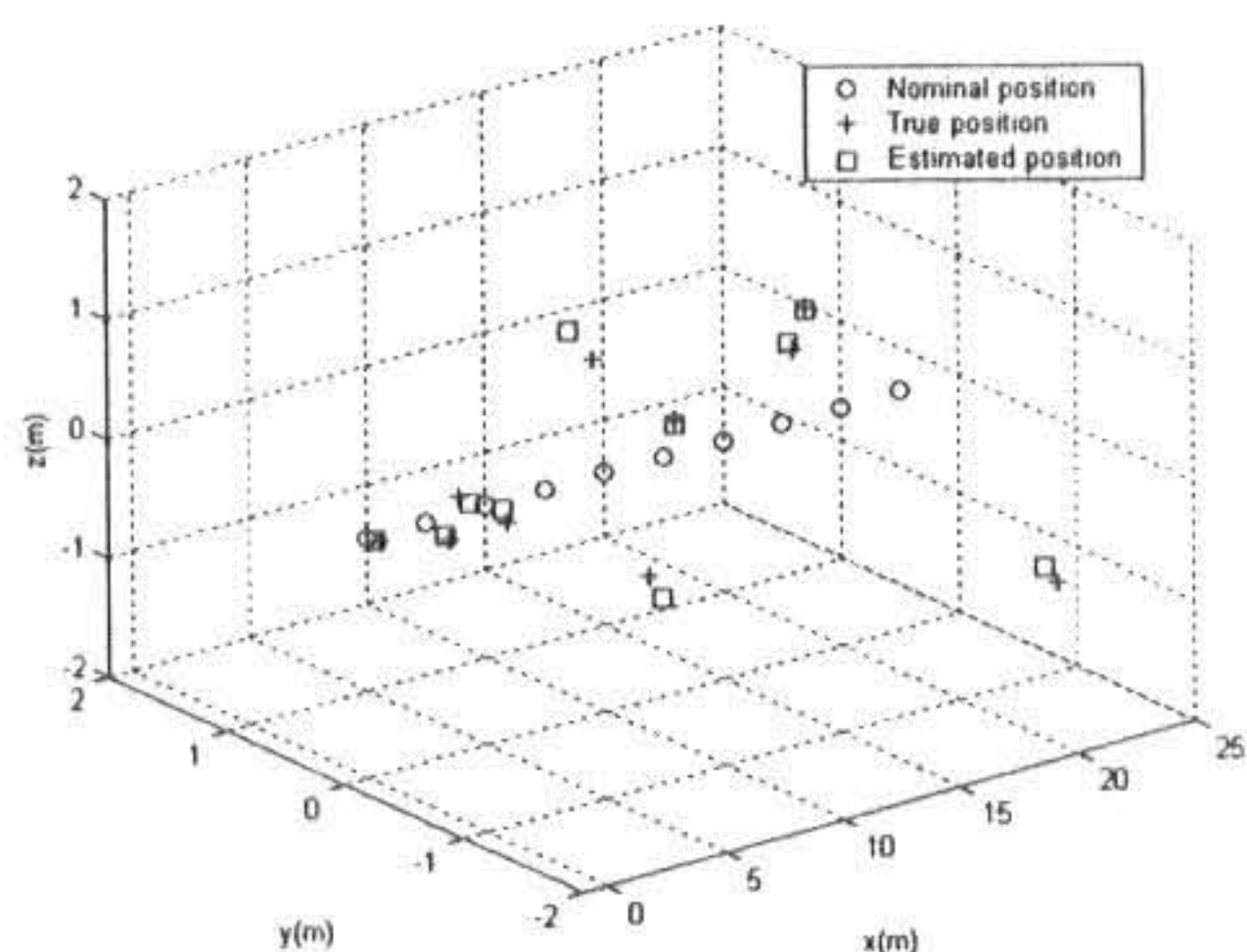
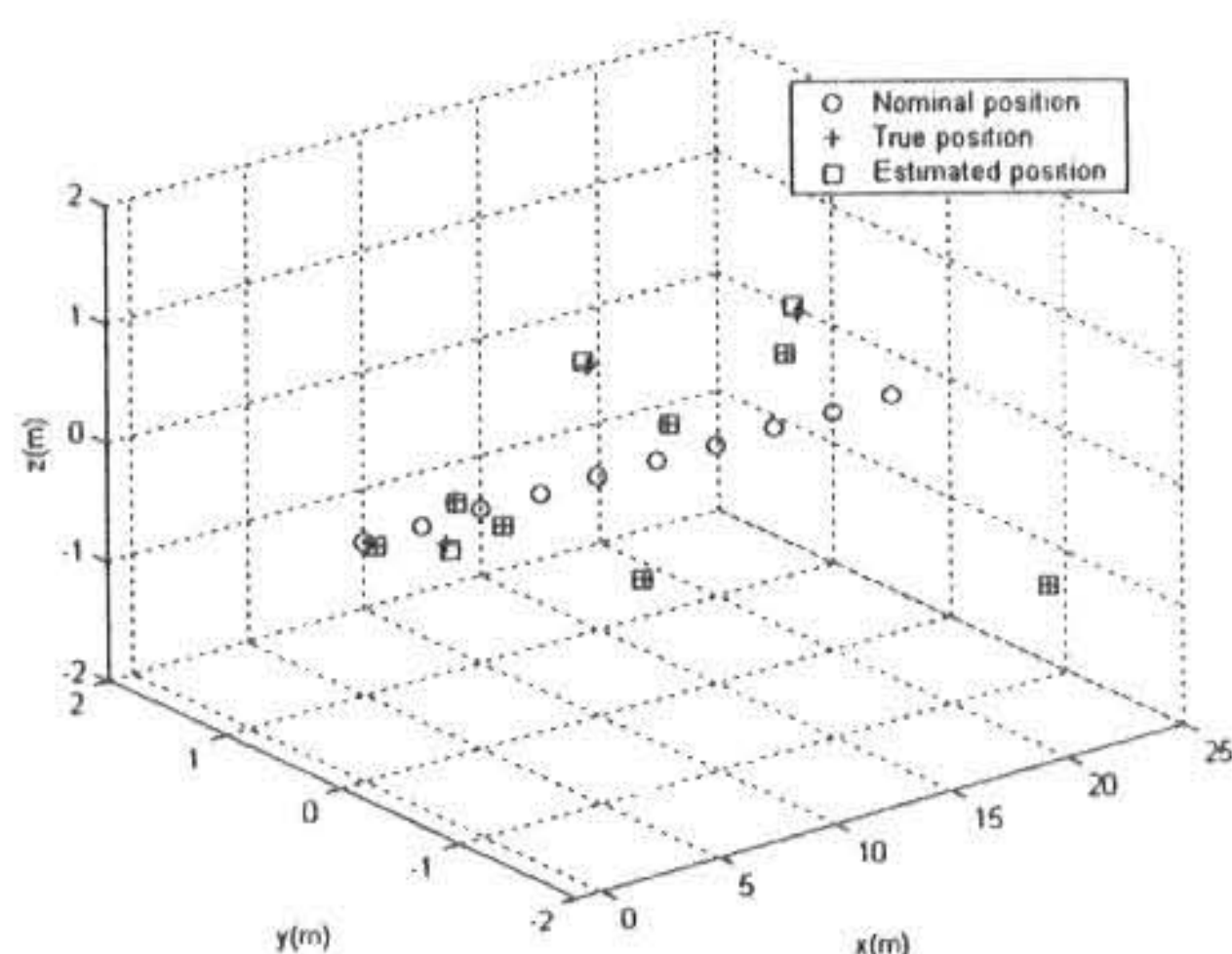


Fig. 2. Nominal and true position of sensors



(a)



(b)

Fig. 3. Sensor array calibration results
(a) SNR = 10 dB (b) SNR = 30 dB

Table 1. Sensor array calibration performance

Sensor number	Sensor position error (m)	Sensor position error(m) after calibration	
		10 (dB)	30 (dB)
1	0.5000	0.0605	0.0036
2	0.5175	0.4053	0.0292
3	0.5467	0.1743	0.0518
4	0.7522	0.1100	0.0094
5	1.1004	0.1717	0.0149
6	0.8561	0.0703	0.0411
7	1.2446	0.1803	0.0044
8	2.0575	0.2960	0.0191
9	0.9528	0.8628	0.0559
10	1.9558	0.2065	0.0029
Average	1.0484	0.2538	0.0232

5. 결론

근거리 환경의 배열신호처리에서 발생할 수 있는 3차원 배열센서 위치보정을 위한 3차원 배열센서 보정 알고리즘이 본 논문에서 제안되었다. 제안한 알고리즘은 신호대 잡음비가 30dB인 경우에 약 97.8%의 센서 위치오차를 감소시키는 성능을 가진다. 그러므로 제안한 알고리즘은 근거리 환경의 배열신호처리 응용에서 배열센서의 형상을 보정하는데 적용할 수 있으며, 배열신호처리의 성능을 향상시킬 수 있다.

참고 문헌

- 1) Don H. Johnson and Dan E. Dudgeon, *Array Signal Processing Conception and Techniques*, Prentice-Hall, 1993.
- 2) S. Unnikrishna Pillai and C. S. Burrus, *Array Signal Processing*, Springer-Verlag New York 1989.
- 3) Boon Chong Ng and Chong-Meng Samson See, "Sensor-array calibration using a maximum-likelihood approach," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol.44, No.6, pp. 827-835, June 1996.
- 4) Chong-Meng Samson See and Boon-Kiat Poh, "Parametric sensor array calibration using measured steering vectors of uncertain locations," *IEEE Transactions on Signal processing*, Vol.47, No.4, pp. 1133-1137, April 1999.
- 5) Ming Zhang and Zhao-Da Zhu, "Array shape calibration using sources in known directions," *Aerospace and Electronics Conference, NAECON 1993*, Vol.1, pp.70-73, May 1993.
- 6) Boon C. Ng and Wee Ser, "Array shape calibration using sources in known locations," *Singapore ICCS/ISITA '92*, Vol. 2, pp. 836-840, Nov. 1992.
- 7) S. H. Lee, C. S. Ryu and K. K. Lee, "Near-field source localisation using

bottom-mounted linear sensor array in multipath environment," *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, Vol. 149, No. 4, pp. 202-206, Aug. 2002.

8) C. M. Lee, K. S. Yoon, J. H. Lee and K. K. Lee, "Efficient algorithm for

localising 3-D narrowband multiple sources," *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, Vol.148, No.1, pp. 23-26, 2001.

(2003년 7월31일 접수, 2003년 11월20일 채택)