

클러스터링 기법을 이용한 음원의 위치추정 성능향상

이호진¹⁾ · 윤경식²⁾ · 이균경^{*,1)}

¹⁾ 경북대학교 IT대학 전자공학부

²⁾ 김천대학교 언어치료학과

Enhancement of Source Localization Performance using Clustering Ranging Method

Ho Jin Lee¹⁾ · Kyung Sik Yoon²⁾ · Kyun Kyung Lee^{*,1)}

¹⁾ School of Electronics Engineering, KyungPook National University, Korea

²⁾ Department of Speech Therapy, Gimcheon University, Korea

(Received 24 August 2015 / Revised 7 January 2016 / Accepted 15 January 2016)

ABSTRACT

Source localization has developed in various fields of signal processing including radar, sonar, and wireless communication, etc. Source localization can be found by estimating the time difference of arrival between the each of sensors. Several methods like the NLS(Nonlinear Least Square) cost function have been proposed in order to improve the performance of time delay estimation. In this paper, we propose a clustering method using the four sensors with the same aperture as previous methods of using the three sensors. Clustering method can be improved the source localization performance by grouping similar estimated values. The performance of source localization using clustering method is evaluated by Monte Carlo simulation.

Key Words : Source Localization(음원위치추정), Clustering Method(클러스터링 기법), Wavefront Curvature Ranging(음파면 곡률 측정기법), NLS cost-function(NLS 비용함수)

1. 서론

음원의 위치를 추정하는 문제는 소나, 레이더, 통신 등 다양한 분야에서 발전되어왔다. 특히 소나의 운용에서 센서에 수신된 음향신호를 이용하여 음원의 위

치를 추정하는 것은 매우 중요한 일이다. 음원의 위치를 추정하는 것은 두 개 이상의 분산된 센서에 도달하는 음파의 시간지연을 추정함으로써 가능하다¹⁻⁴⁾. 수동소나와 같이 음원으로부터 방사된 신호를 이용하여 음원의 위치를 추정하는 기법은 오랫동안 연구되어 왔으며, 그 중 TMA(Target Motion Analysis)는 비교적 정확히 음원의 위치를 추정하는 기법으로 알려져 있다. 하지만 TMA는 음원의 위치추정을 위해 긴 관측

* Corresponding author, kklee@ee.knu.ac.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

시간이 소요되는 단점이 있다. 음파면 곡률 측정 기법(Wavefront Curvature Ranging)은 단시간 내에 음원의 위치를 추정할 수 있는 방법이다^{5,6)}. 이 기법은 센서간의 상호상관함수(Cross-correlation function)를 이용하여 시간지연을 추정함으로써 음원의 위치를 추정한다. 따라서 음원이 협대역 신호의 특성을 가지면, 상호상관함수의 결과는 비슷한 크기의 첨두치가 다수 발생하는 진동특성을 나타낸다. 이러한 진동특성은 잡음에 의해 왜곡이 발생하여 시간지연추정에 있어 모호성을 발생시킨다. 진동특성을 제거하는 방법으로 NLS 비용함수를 이용하는 기법이 제안되었다⁷⁾. 이 방법은 능동소나와 같이 기준신호가 있을 때 효과적으로 진동특성이 제거되지만 수동소나와 같이 기준신호가 없는 경우 효과적인 진동특성 제거를 위하여 curve fitting이 적용된 NLS비용함수를 이용하는 기법이 제안되었다⁸⁾. 이러한 기법들에 의한 시간지연 추정성능은 센서의 개구면(Aperture)과 센서간격에 영향을 많이 받으며, 센서의 개구면이 클수록 시간지연 추정오차가 줄어드는 특성을 갖는다. 기본적으로 음파면 곡률 측정기법을 이용하기 위해 세 개의 센서를 이용한다. 하지만 본 논문에서는 동일한 개구면을 가지는 네 개의 센서를 이용하여 음원의 위치추정성능을 향상시킬 수 있는 클러스터링 기법을 제안한다. 클러스터링 기법은 데이터마이닝 분야에서 오랫동안 발전되어 왔으며⁹⁾, 본 논문에서는 추정치들 간의 거리가 가까운 추정치를 클러스터링하는 기본적인 방법을 이용하여 거리추정 성능을 향상시켰다. 클러스터링 기법을 적용하기 위하여 동일한 개구면을 가지는 네 개의 센서를 이용한다. 이때 센서사이의 간격이 줄어들어서 시간지연추정에 있어 민감해질 뿐만 아니라 프레넬 영역(Fresnel Region)에 만족하는 근거리 영역이 좁아져 최대 탐지거리가 줄어드는 단점을 가지게 된다. 하지만 신호처리에 있어 센서 정보의 증가는 추정하고자하는 대상에 대한 불확실성이 줄어든다. 이러한 장점을 이용하여 거리추정성능을 향상시킬 수 있는 클러스터링 기법을 제안하였다. 방위각에 대한 오차는 크지 않기 때문에 본 논문에서 제안하는 클러스터링 기법은 거리에 대해서만 적용한다.

2. 음파면 곡률 측정 기법

음파면 곡률 측정기법은 근거리 음원에 대한 방위(θ), 거리(R)를 추정하는 기법이다. Fig. 1은 센서가

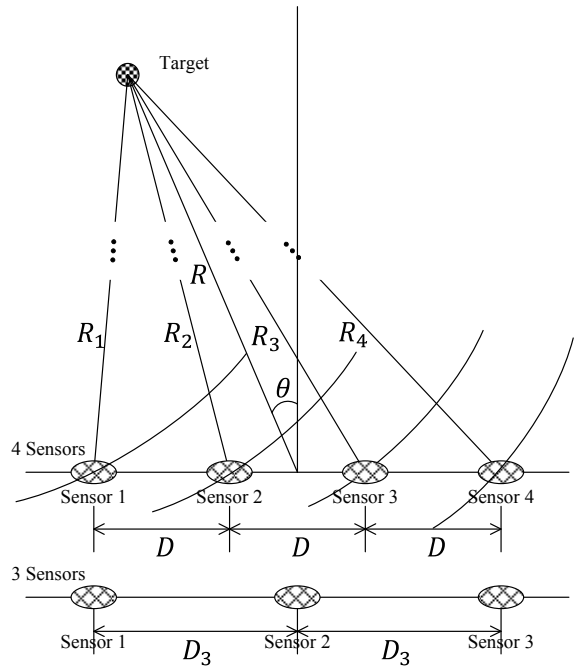


Fig. 1. Signal receiving structure of sensor

네 개일 때 센서의 신호 수신구조이며, 그림 아래쪽에 센서가 세 개일 때 센서의 배치에 대한 그림이 함께 나타나 있다. 음원의 위치는 센서간의 시간지연을 통해 추정할 수 있다. 네 개의 센서를 등간격으로 사용할 때 음원의 방위, 거리에 대한 표현식이 Table 1에서처럼 다양하게 나타난다. Table 1에서 D 는 센서간격, c 는 수중에서 음속, τ_{ab} 는 센서 a 와 센서 b 의 시간지연으로 $\tau_{ab} = (R_b - R_a)/c$ 와 같이 표현된다. D_3 는 센서가 세 개일 때 센서간격이다.

3. NLS 비용함수를 이용한 시간지연추정

센서간 시간지연을 추정하기 위한 기법으로는 상호상관함수가 이용된다. 하지만 음원이 협대역 신호일 경우 상호상관함수에 의한 시간지연 추정은 비슷한 크기의 첨두치가 다수 발생하는 진동특성을 나타내어 시간지연 추정모호성이 발생하게 된다. 따라서 NLS 비용함수를 이용한 시간지연 추정기법을 이용하여 협대역 특성에 의한 진동특성을 제거하고 시간지연을 추정한다. NLS 비용함수를 이용한 시간지연 추정은 식 (1)과 같이 NLS 비용함수를 최소화 하는 위상변이를 통해

Table 1. Equation of target bearing/range

센서 수/case		시간지연	음원의 방위(θ)	음원의 거리(R)
3	1	τ_{21}, τ_{23}	$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{c(\tau_{21} - \tau_{23})}{2D_3}\right)$	$R = \frac{D_3^2 \cos^2\theta}{c(\tau_{21} + \tau_{23})}$
	2	τ_{21}, τ_{32}	$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{c\tau_{32}}{D}\right)$	$R = \frac{D^2 \cos^2\theta}{c(\tau_{21} - \tau_{32})}$
4	3	τ_{21}, τ_{42}	$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{c(\tau_{21} + \tau_{42})}{3D}\right)$	$R = \frac{3D^2 \cos^2\theta}{c(2\tau_{21} - \tau_{42})}$
	4	τ_{21}, τ_{43}	$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{c(\tau_{21} + \tau_{43})}{2D}\right)$	$R = \frac{2D^2 \cos^2\theta}{c(\tau_{21} - \tau_{43})}$
	5	τ_{31}, τ_{42}	$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{c(\tau_{31} + \tau_{42})}{4D}\right)$	$R = \frac{2D^2 \cos^2\theta}{c(\tau_{31} - \tau_{42})}$
	6	τ_{31}, τ_{43}	$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{c(\tau_{31} + \tau_{43})}{3D}\right)$	$R = \frac{3D^2 \cos^2\theta}{c(\tau_{31} - 2\tau_{43})}$
	7	τ_{32}, τ_{43}	$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{c\tau_{32}}{D}\right)$	$R = \frac{D^2 \cos^2\theta}{c(\tau_{32} - \tau_{43})}$

시간지연을 추정한다^[7].

$$C_1(\alpha, \omega) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} |Y(k) - \alpha e^{j\omega k} S(k)|^2 \quad (1)$$

여기서 $Y(k)$ 와 $S(k)$ 는 비교신호와 원신호의 푸리에 변환이며, α 는 신호의 진폭을 의미한다. N 은 신호 전체의 길이이다.

NLS 비용함수는 능동소나와 같이 기준신호가 있는 경우 효과적으로 진동특성을 제거하지만, 수동소나의 경우 기준신호가 없기 때문에 기준센서에 수신된 신호를 원신호로 가정한다. 이러한 기준신호는 잡음이 더해진 상태로 수신되기 때문에 복소비용함수의 왜곡이 발생하여 시간지연 추정오차가 발생한다. 따라서 복소비용함수의 오차를 보정할 추가적인 과정으로 curve-fitting이 적용된 NLS 비용함수 기법을 사용한다.

4. Clustering Ranging 기법

네 개의 센서를 사용하여 음원의 위치를 추정하는

것은 산술적으로 표현식이 15가지 경우의 수가 존재한다. 하지만 모든 경우에서 센서수의 증가가 신호처리적인 이점을 나타내는 것은 아니다. 예를들어 (τ_{21}, τ_{31}) 의 경우처럼 센서 세 개를 사용할 때보다 더 작은 개구면을 가지는 경우의 수 4가지를 제외하였으며, (τ_{21}, τ_{41}) 의 경우처럼 시간지연이 하나의 센서 기준으로 같은 방향으로 계산되어지는 것은 센서간격이 넓은 τ_{41} 에 편향되기 때문에 이러한 경우의 수 5가지를 제외하였다. 이러한 두 가지 조건에 해당하는 경우의 수를 제외하고 나면 Table 1에서처럼 6가지 다른 표현식으로 나타난다. 이러한 추정식에 의한 추정 값들이 설정된 범위안에 존재하는 경우 이를 클러스터(cluster)로 정의한다. 예를 들어 Fig. 2와 같이 3개의 추정값을 이용할 때 유사한 2개의 추정값과 1개의 이상점(outlier)이 발생하면 유사한 2개의 추정값은 클러스터가 된다. 그리고 2개의 추정값의 평균이 최종 추정값으로 결정된다. 추정값 R_i 가 N_c 개인 경우, 클러스터가 생성될 수 있는 조건은 식 (2)와 같이 표현할 수 있으며 이는 추정된 값이 5% 이하 일 경우 클러스터가 되는 것을 의미한다.

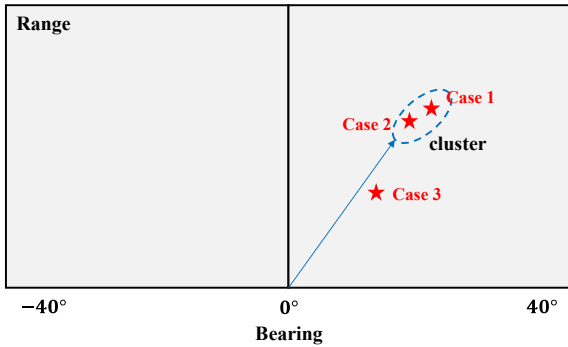


Fig. 2. Clustering ranging method

$$|R_i - R_j| < \max(R_i, R_j) \times 0.05 \quad (2)$$

$$(i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, N_c)$$

클러스터는 여러 개가 존재할 수 있으며, $No. of cluster \leq N_c$ 을 만족한다. 즉, Table 1에 의한 거리추정치가 식 (2)의 조건을 만족하는 경우가 없으면 클러스터 개수가 6이 된다. 식 (2)의 조건을 통하여 클러스터를 구성하였을 때 추정치의 개수가 가장 많은 클러스터가 거리추정치를 구하기 위한 클러스터로 선택되어지며, 이를 이용하는 최종 거리추정치는 각각의 거리추정치의 평균값으로써 식 (3)과 같이 나타난다.

$$R_{cluster} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L R_i \quad (3)$$

여기서 L 은 가장 크기가 큰 클러스터의 추정치 개수를 의미한다.

4.1 clustering ranging 기법의 추정확률 이론치

앞서 네 개의 센서를 이용하여 음원의 위치를 추정하는 표현식을 6가지 제시하였다. 즉, 6가지의 추정치로 클러스터를 만들면 클러스터의 최대크기는 ‘6’이며, 최소 크기는 ‘1’이 된다. 예를 들어 가장 큰 클러스터의 크기가 ‘4-6’의 크기를 가지면 이상점의 개수보다 항상 클러스터의 크기가 크기 때문에 이러한 클러스터는 최종 거리추정치를 구하는 클러스터로 선택되어진다. 하지만 가장 큰 클러스터의 크기가 ‘3’ 이하의 크기를 가지면 동일한 크기의 클러스터가 발생할 수 있다. 일반적으로 추정치들이 서로 독립적인 경우, 동일한 크기의 클러스터가 발생하였을 때 임의의 클러스터를 선택하더라도 음원의 위치 추정성능은 동일하게 나

타난다. 그러나 4개의 센서에 의하여 구한 추정치들은 서로 상관관계(correlation)를 갖는 경우가 발생하기 때문에 독립을 가정할 때보다 추정성능의 저하가 발생한다. 따라서 동일한 크기의 클러스터가 발생하였을 때 추정치간의 상호상관 정도가 가장 낮은 추정치들로 구성된 클러스터에 우선권(priority)을 주어 클러스터를 선택함으로써 추정치가 서로 독립적인 경우와 비슷한 추정성능을 가지도록 하였다. 이처럼 클러스터의 크기에 따라 클러스터링 될 확률을 이론적으로 계산하면 식 (4)와 같이 표현되어진다.

$$P(x) = \frac{n!}{x!(n-x)!} p^x q^{n-x} \quad (4)$$

여기서 n 은 클러스터의 최대크기이다. 즉, 사용할 추정치의 개수와 동일하다. x 는 클러스터의 크기를 의미한다. p 는 추정치의 결과가 참일 확률이며, q 는 추정치가 거짓일 확률이다.

클러스터 기법을 이용한 거리추정의 확률은 식 (4)에 의해서 구해진 클러스터 크기에 따른 확률을 통해 나타나며 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{cluster} = \left\{ \sum_{x \leq n/2} \frac{x}{n} P(x) \right\} + \left\{ \sum_{x > n/2} P(x) \right\} \quad (5)$$

여기서 x, n 은 식 (4)에서와 동일하다. 예를 들어 6개의 표현식 중에 5가지를 이용한다고 가정하면 $n = 5$ 이다. 이때 클러스터의 크기는 $x = 1, 2, 3, 4, 5$ 의 크기를 가질 수 있다. 5가지의 추정치를 이용했는데 클러스터의 크기가 ‘3, 4, 5’라면 이 클러스터는 참인 클러스터로 선택된다. 이러한 크기의 클러스터를 의미하는 것이 식 (5)의 우변의 두 번째 항이다. 클러스터의 크기가 ‘1, 2’라면 참일 수도 거짓일 수도 있는 클러스터로 정의되며 식 (5)의 우변의 첫 번째 항을 나타낸다.

5. 모의실험

본 절에서는 제안된 기법의 성능검증을 위해서 기존의 기법과 제안한 기법을 적용하여 위치추정 성능을 비교하였다. 실험에서 세 개의 센서는 22.5 m, 네 개의 센서는 15 m 간격으로 Fig. 1과 같이 ULA(Uni-form

Line Array)를 가정하였다. 전체 센서의 길이는 45 m로 동일한 개구면을 가지도록 설정하였다. 각 센서에 수신되는 신호 $s(t)$ 는 음원이 방사한 능동신호로써 실제 신호 형태를 고려하여 식 (6)과 같이 $w(t)$ 의 가중치가 주어진 CW(Continuous Wave) 신호를 사용하였으며 가중치 $w(t)$ 는 식 (7)과 같이 정의하였다.

$$s(t) = w(t)\cos(2\pi f_c t) \tag{6}$$

$$w(t) = \begin{cases} 0.5 - 0.5\cos(\pi t/T_w) & 0 \leq t < T_w \\ 1 & T_w \leq t \leq T - T_w \\ 0.5 - 0.5\cos(\pi(t-T)/T_w) & T - T_w < t \leq T \end{cases} \tag{7}$$

여기서 $T_w = T/10$ 이다. 또한 각 센서에 수신되는 잡음신호는 백색잡음을 가정하였다.

Fig. 3은 Table 1에서 음원의 거리추정식에 대한 결과 그래프이다. 클러스터링 기법을 적용하지 않고 추정식 각각에 대하여 방위각에 따른 추정확률을 나타내었다. 음원의 위치는 방위(θ) : $-40^\circ \sim 40^\circ$, 거리(R) : 1.5 km, 신호대잡음비 : 20 dB를 가정하였다. 실제값에 대하여 5% 이내의 값을 나타내면 거리추정이 참이라고 설정하였다. 몬테카를로 시뮬레이션 300회를 시행하였다. 시뮬레이션 결과 각각의 경우에 대해서 음원의 거리추정확률은 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 다음의 결과에 따라 클러스터링 기법을 적용하였을 때 거리추정확률의 성능개선을 다음 시뮬레이션에서 확인하였다.

Fig. 3의 결과에서 각각의 경우의 거리추정확률을 평균적으로 0.54라고 가정하고 클러스터링 기법을 적용하였을 때 기대할 수 있는 성능개선의 이론치는 다음과 같다. $n = 3$ 일 때 $P_{cluster} = 0.6742$, $n = 5$ 일 때 $P_{cluster} = 0.7124$ 단, 각각의 추정치가 모두 독립적이라는 가정 하에 계산되어진 값들이다.

Fig. 4와 Fig. 5는 클러스터링 기법을 이용하여 거리추정확률을 확인하였다. Fig. 4는 방위각에 따른 거리추정확률의 결과이며, 앞서 시행한 시뮬레이션 조건과 동일한 환경에서 실험하였다. Fig. 5는 SNR에 따른 거리추정확률의 결과이며, 방위각(θ) : 15° 에 대한 결과이다. 시뮬레이션 결과와 앞서 계산한 이론치와 비교하였을 때 비슷한 결과를 확인할 수 있었다. 삼각형 모양의 검정색 실선은 센서 세 개를 이용했을 때 거리추정결과를 나타낸 것이다. 원 모양의 빨간색선은 case

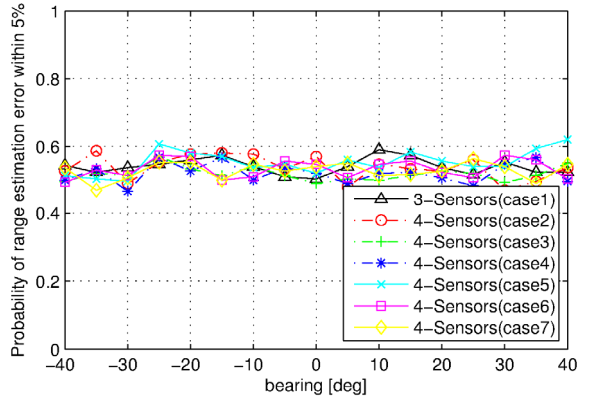


Fig. 3. Probability of range estimation for bearing (non-Clustering)

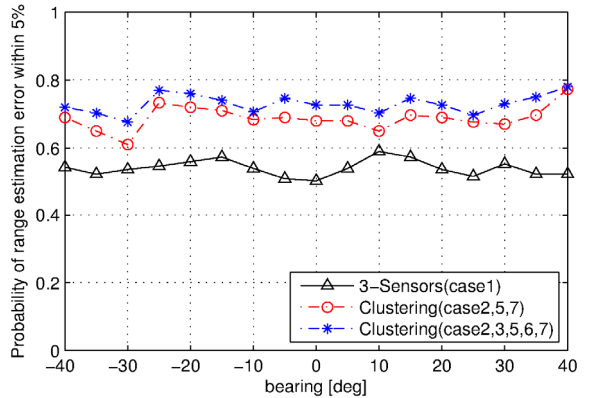


Fig. 4. Probability of range estimation for bearing (Clustering method)

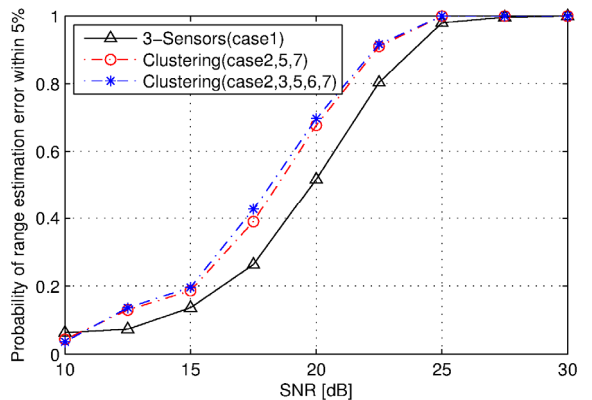


Fig. 5. Probability of range estimation for SNR (Clustering method)

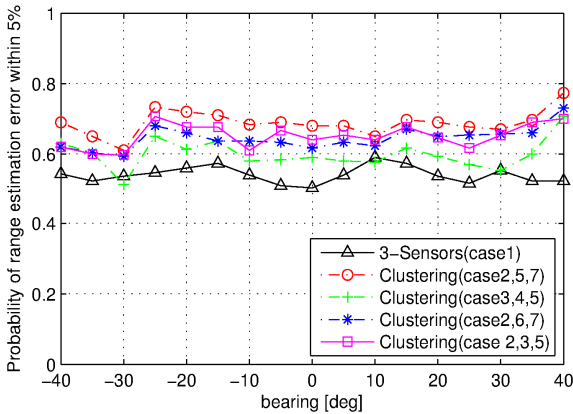


Fig. 6. Probability of range estimation for bearing (Combination of cluster size 3)

2, 5, 7을 이용하여 클러스터링 기법을 적용한 결과이며, 별 모양의 파란색선은 case 2, 3, 5, 6, 7을 이용하여 클러스터링 기법을 적용한 거리추정 결과이다. 추정값을 더 많이 이용할수록 더 나은 성능을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 클러스터의 크기가 3인 경우에 다양한 조합에 대한 거리추정확률이다. 결과에서 확인할 수 있듯이 조합을 어떻게 하느냐에 따라 거리추정성능이 다르게 나타났다. 즉, 추정치들의 상관성이 높으면 거리추정성능의 저하가 발생하므로 추정치간의 독립성이 높은 조합을 선택해야한다.

6. 결론

음원의 위치추정 성능을 향상시키기 위하여 동일한 개구면을 가지는 네 개의 센서를 이용하여 위치를 추정하고 확률모델에 따라 독립적인 위치추정방법에 대해서 클러스터링 기법을 적용하였다. 동일한 개구면을 가지는 네 개의 센서를 사용함으로써 센서 사이의 간격이 줄어들어서 시간지연추정에 있어 민감해지고 프레넬 영역에 만족하는 근거리 영역이 좁아져 최대 탐지거리가 줄어드는 단점이 발생한다. 하지만 센서 정보의 증가와 확률모델 기반의 클러스터링 기법을 이용하여 거리추정 성능을 향상시켰다. 시뮬레이션 결과 거리추정성능은 제안된 기법을 사용하였을 때 우수한 성능을 나타내었다. 클러스터의 조합의 수를 늘려나감에 따라 더 나은 성능을 확인할 수 있었다. 하지만 각

각의 조합들의 상관성이 높아지면 성능의 개선이 줄어들기 때문에 적절한 조합을 선택하는 것이 중요하다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 제안된 기법을 통해 음원의 위치추정성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(계약번호 UD130014DD).

References

- [1] Mark I. Jeffree and Anthony R. Collins, "Intercept Detection and Ranging," Proceeding of UDT Europe 2001, 8A.2, June 2001.
- [2] H. Schmidt and J. P. Schwarz, "Low Frequency Intercept Pulse Ranging," Proceeding of UDT Europe 2006, 8A.3, June 2006.
- [3] Brian G. Ferguson, "Improved Time-delay Estimates of Underwater Acoustic Signals using Beamforming and Prefiltering Techniques," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 238-244, July 1989.
- [4] M. Meister and D. Neumeister, "Advanced Ranging SONAR : Passive Range Measurement with Linear Array," Proceeding of UDT Europe 2005, 2A.2, June 2005.
- [5] G. C. Carter, "Time Delay Estimation for Passive Sonar Signal Processing," IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. ASSP-29, No. 3, pp. 463-470, June 1981.
- [6] B. G. Ferguson and R. J. Wyber, "Wavefront Curvature Passive Ranging in a Temporally Varying Sound Propagation Medium," in OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition, Vol. 4, pp. 2359-2365, 2001.
- [7] Renbiao Wu and Jian Li, "Time-delay Estimation Via Optimizing Highly Oscillatory Cost Functions," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 235-244, July 1998.
- [8] T. J. Jung, D. K. Kim, B. S. Kwon, K. S. Yoon,

K. K. Lee, "Bearing/Range Estimation Method using NLS Cost Function in IDRS System," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 14, No. 4, pp. 590-597, Aug. 2011.

[9] Pang-Ning Tan, Michael Steinbach, Vipin Kumar, "Introduction to Data Mining," Pearson, Boston, p. 769, 2006.