

초음파 혼선 저감을 위한 위상 기반 온오프 복조기

박상호*¹, 박가린*², 백광렬**

Phase Based on Off Keying Demodulator for Reducing Ultrasonic Cross-talk

Sang-Ho Park*¹, Garin Park*², and Kwang-Ryul Baek**

본 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에서 지원하여 연구하였음

요약

다수의 초음파 센서가 공존하는 환경에서 다른 초음파 센서에서 송신한 초음파 신호에 의해 혼선이 발생하고 그에 따른 측정 오차가 발생하는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 초음파 센서별로 ID 코드를 부여하여 ID 코드에 따라 변조된 초음파를 송신하는 코드 분할(Code division) 방식이 개시되고 있다. 그러나 코드 분할 방식만으로 초음파 센서의 혼선을 방지하기 위해 측정 환경 내의 초음파 센서의 수가 많아질수록 코드의 직교성을 보장하기 위한 ID 코드가 매우 길어져야 했다. 본 논문에서 상기 온오프 변조 방식의 코드 분할 방식의 문제점을 해결하기 위한 위상 정보를 활용하여 같은 위상값을 가지는 신호의 집합으로 분리하는 방식의 위상 정보 기반 온오프 복조기를 제안한다. 제안하는 온오프 복조기를 사용한 코드 분할 수행 시 기존 방법 대비 짧은 ID 코드로도 높은 수신률을 달성한다.

Abstract

In an environment in which a plurality of ultrasonic sensors coexist, cross-talk occurs due to ultrasonic signals transmitted from other ultrasonic sensors, resulting in a measurement error. In order to solve this problem, a code division (CD) method in which an ID code is assigned to each ultrasonic sensor and transmits ultrasonic waves modulated according to the ID code is used. However, as the number of ultrasonic sensors in the measurement environment increases in order to prevent cross-talk of ultrasonic sensors using only the CD method, the ID code for ensuring code orthogonality has to be very long. In this paper, we propose a phase information-based on-off demodulator that uses phase information to solve the problem of the on-off modulation method, and divides it into sets of signals having the same phase value. When performing code division using the proposed on-off demodulator, a high reception rate is achieved with a shorter ID code compared to the existing method.

Keywords

ultrasonic crosstalk, multi code ultrasonic, code division ultrasonic, on off keying

* 부산대학교 전기전자공학과
- ORCID¹: <http://orcid.org/0000-0001-6380-301X>
- ORCID²: <http://orcid.org/0000-0002-8379-1754>
** 부산대학교 전자공학과 교수(교신저자)
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2928-2043>

• Received: Apr. 21, 2022, Revised: Jun. 14, 2022, Accepted: Jun. 17, 2022
• Corresponding Author: Kwang-Ryul Baek
Dept. of Electronics Engineering Korea
Tel.: +82-51-510-2460, Email: krbaek@pusan.ac.kr

1. 서론

초음파를 이용한 거리 측정은 초음파를 송신하고 대상체에 의해 반사된 반사파가 수신되면 송신 시점과 수신 시점의 차이에 따른 비행시간(ToF, Time of Flight)을 이용해 거리를 산출하는 순으로 이루어진다[1]. 이러한 초음파를 이용한 거리 측정 기술은, 다수의 초음파 센서가 공존하는 환경에서 다른 초음파 센서에서 송신한 초음파 신호에 의해 혼선이 발생하고 그에 따른 측정 오차가 발생하는 문제가 있었다.

이러한 문제를 해결하기 위해 서로 다른 시간에 초음파를 송신하는 시간 분할(Time division) 방식 [2], 서로 다른 주파수의 초음파를 송신하는 주파수 분할 주파수 분할(Frequency division) 방식[3], 초음파 센서별로 ID 코드를 부여하여 ID 코드에 따라 변조된 초음파를 송신하는 코드 분할(코드 Division) 방식[4][5]이 개시되고 있다. 시간 분할 방식은 측정 환경 내의 초음파 센서의 수가 많아지면 거리 측정 시간 간격이 길어지는 단점이 있으며 주파수 분할 방식은 일반적인 협대역 초음파 센서 대신 광대역 초음파 센서를 사용해야 하므로 제작 비용이 증가하는 문제가 있다. 이에, 초음파 센서의 혼선 방지를 위한 기술로 코드 분할 방식이 널리 사용되고 있다.

그러나, 각 장치에 장착되는 초음파 센서의 개수가 증가하고 한 공간에 다수의 초음파 센서가 밀집되는 상황에서 종래의 코드 분할 방식만으로 초음파 센서의 혼선을 방지하기엔 한계가 있다. 그림 1은 기존의 코드 분할 방식을 사용한 초음파 신호처리 기법을 보여준다.

코드 분할 방식은 그림 2과 같이 '1'과 '1'이 중첩으로 수신된 경우와 '1'과 '0'이 중첩으로 수신된 경우, 모두 '1'로 이진화되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 온오프 변조(On-off keying)를 이용한 종래의 코드 분할 방식[6]은 초음파 신호가 중첩으로 수신되는 경우 각 초음파 신호의 비트를 구분하기가 어려우며, 코드별 직교성(Orthogonality)이 보장되지 않는 문제점이 있다. 또한, 종래의 코드 분할 방식은 측정 환경 내의 초음파 센서의 수가 많아질수록 코드의 직교성을 보장하기 위해 ID 코드가 매우 길어져야 했다.

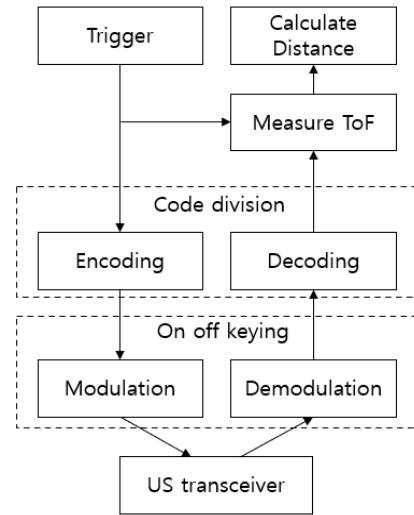


그림 1. 기존 코드 분할 초음파 송수신 신호처리 과정
Fig. 1. Ultrasonic signal processing using traditional code division

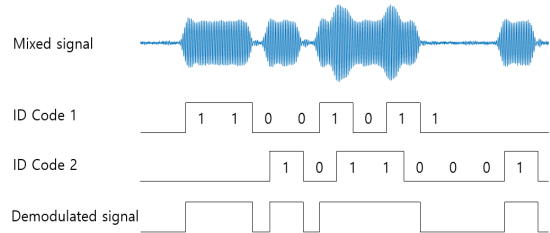


그림 2. 기존 온오프 키잉 복조 결과
Fig. 2. Results of traditional on off keying demodulator

본 논문에서 상기 온오프 변조 방식의 코드 분할 방식의 문제점을 해결하기 위한 것으로 수신 신호의 크기 및 위상 정보를 활용하여 같은 위상값을 가지는 신호의 집합으로 분리하는 방식의 위상 정보 기반 온오프 복조기를 제안한다. 이와 같은 제안 방법은 혼합 신호가 개별 신호로 분리되므로 신호 수신률 및 ID 코드의 길이가 짧아지는 장점을 얻는다.

본 논문은 다음의 순서로 구성된다. 2장에서는 수신 신호부터 코드 분할 디코더 전 단계인 위상 정보 기반 온오프 복조기를 제안하고 3장에서 실험을 통해 제안 방법을 검증한다. 마지막으로 4장에서 결론으로 논문을 마무리한다.

II. 위상 정보 기반 온오프 복조기

제안하는 온오프 키잉 복조기는 그림 3과 같이

초음파 수신부로 초음파 신호를 전달받아 신호처리를 통해 이진화된 코드로 복조하여 코드 분할 디코더에 전달한다. 위상 정보 기반 온오프 복조기는 크게 STFT(Short Time Fourier Transform)를 통한 수신 신호의 위상과 크기를 계산하는 단계, 클러스터링을 통해 혼선 신호의 위상 추정값을 획득하는 단계, 위상 추정값을 이용해 혼선된 신호에서 개별 신호를 분리하는 단계, 마지막으로 분리된 신호의 유효성 검증 및 이진화 단계로 구성된다.

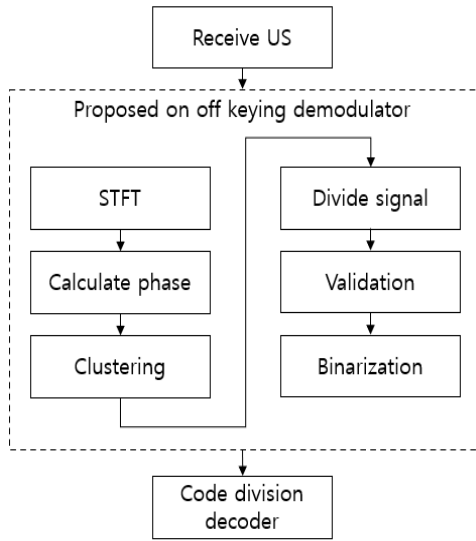


그림 3. 제안하는 온오프 키잉 복조기
Fig. 3. Proposed on-off keying demodulator

수신된 초음파 신호는 샘플링 주파수 f_s 로 샘플링되어 $s_r[n]$ 으로 표기된다. 샘플링된 수신 초음파 신호 $s_r[n]$ 의 위상 및 크기를 계산하기 위해 다음 수식과 같이 STFT[7]를 수행한다.

$$S_r(n, f) = \sum_{m=0}^N s_r[m]w[m-n]e^{-j2\pi fm} \quad (1)$$

여기서 N 은 샘플링 데이터 수, $w[n]$ 는 윈도우 함수이며 Hamm window[8]를 사용한다. 이는 다음 수식과 같다.

$$w[n] = \sin^2\left(\frac{\pi n}{L}\right) \quad (2)$$

여기서 L 은 윈도우 길이이다. STFT 수행 후 초음파

중심 주파수 f_c 에 대한 크기와 위상 정보를 계산하며 다음 수식과 같다.

$$\theta_r[n] = \tan^{-1} \frac{Im(S_r(n, f_c))}{Re(S_r(n, f_c))} \quad (3)$$

다음으로 계산된 위상 정보 중 신호 혼선 전 개별 신호의 위상을 추정하기 위해 클러스터링을 수행한다. 이때 신호의 크기가 작은 시점의 위상 정보는 노이즈이므로 무시하여 수행한다. 본 논문에서는 k-means 클러스터링[9]을 이용하여 n 개의 후보 위상 $[\theta_{c1}, \theta_{c2}, \dots, \theta_{cn}]$ 을 획득했다.

$$[\theta_{c1}, \theta_{c2}, \dots, \theta_{cn}] = \text{k-means}(\theta_r) \quad (4)$$

얻어진 후보 위상 중 임의로 개별 신호의 추정 위상으로 정한 후 신호 분리를 수행한다. 분리된 신호는 신호 유효성 검사를 통해 알맞게 신호가 분리되었는지 검사하며 유효하지 못한 신호라면 추정 위상 신호를 다시 정하여 신호 분리 과정을 재수행한다. 개별 추정 신호의 위상 $\theta_\alpha, \theta_\beta$ 을 이용해서 개별 신호 $s_\alpha[n], s_\beta[n]$ 를 분리하는 수식은 다음과 같다.

$$k[n] = \frac{\sin \theta_\alpha - \tan(\theta_r[n]) \cos \theta_\alpha}{\tan(\theta_r[n]) \cos \theta_\beta - \sin \theta_\beta} \quad (5)$$

$$s_\alpha[n] = \frac{|S_r(n, f_c)|}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_r[n]} (\cos \theta_\alpha + k[n] \cos \theta_\beta)}$$

$$s_\beta[n] = k[n] s_\alpha[n]$$

그림 4에서 식 (5)의 결과를 볼 수 있다. 가장 위 의는 혼합 신호이고 중간은 혼합신호에서 위상을 계산한 결과와 노이즈를 제외한 구간에서 클러스터링을 한 결과를 볼 수 있다. 각 클러스터링 라벨은 초록, 파랑, 빨강으로 표기하였다. 가장 아래 그림은 혼합신호에서 분리된 개별신호이다.

혼합 신호에서 정상적으로 개별 신호로 분리가 되었다면 개별 신호는 온오프 키잉 변조에 따라 코드 당 버스트(Burst)의 형태로 수신된다. 이때 각 비트 당 신호 전압이 일정하다면 분리된 개별 신호가 유효하다고 판별하고 이진화 과정을 수행한다.

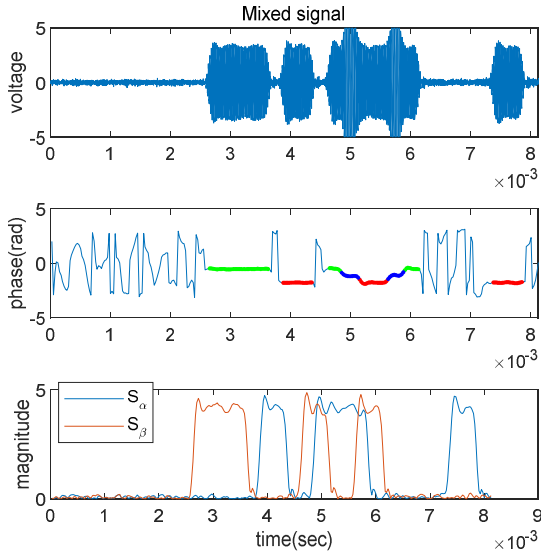


그림 4. 수신 신호의 신호처리 결과, (위) 수신한 혼합 신호, (중간) 수신 신호의 위상 계산값 및 클러스터링 결과, (아래) 혼합 신호의 신호분리 결과

Fig. 4. Results of received signal processing, (Top) Mixed signal, (Middle) Phase and results of clustering, (Bottom) Results of signal division

한 비트당 버스트 펄스(Pulse) 수는 N_b 일 때 한 비트당 데이터 샘플 수는 다음 수식과 같다.

$$N_s = N_b f_s / f_c \quad (6)$$

개별 신호 $s_\alpha[n]$ 에서 신호 수신 시점은 신호 수신 없이 없을 때 노이즈의 표준편차 σ_n 를 기준으로 신호가 $6\sigma_n$ 보다 커지는 첫 번째 시점을 신호 수신 시점 n_r 이라 하고 다음 수식과 같다.

$$n_r = \min_x (\{x \mid 6\sigma_n < s_\alpha[x]\}) \quad (7)$$

신호 수신 시점 n_r 을 기준으로 한 비트당 데이터 샘플 수 N_b 간격으로 데이터 집합을 분리한다. k 번째 비트에 해당하는 데이터 집합 $W(k)$ 은 $\{s_\alpha[x] \mid n_r + (k-1)N_s \leq x < n_r + kN_s\}$ 으로 표현되며 모든 k 에 대하여 데이터 집합의 표준편차가 $\sigma_b(k)$ 가 임계값 T_σ 보다 작으면 신호가 유효하다고 판단한다. 여기서 $\sigma_b(k)$ 는 $\sqrt{\text{Var}(W(k))}$ 으로 계산한다.

마지막으로 유효성 검사를 통과한 신호는 이진화

를 수행한다. 코드는 상호 간의 직교성을 보장하기 위해 비트 0의 수와 비트 1수가 같도록 설계되므로 $W(k)$ 의 평균이 코드 전체 평균보다 크면 비트 1, 작으면 비트 0으로 이진화 한다. 이진화 코드 $c(k)$ 를 계산하는 수식은 다음과 같다.

$$W_m(k) = \sum_{x=n_r+(k-1)N_s}^{n_r+kN_s} s_\alpha[x]/N_s \quad (8)$$

$$c(k) = \begin{cases} 1 & , W_m(k) \geq \sum_{x=1}^K W_m(x)/K \\ 0 & , \text{others} \end{cases}$$

여기서 K 는 코드 길이이다. 이진화 코드 $c(k)$ 는 코드 Division 디코더로 전달되며 나머지 초음파 신호처리 과정이 수행된다.

III. 실험 환경 및 실험 결과

본 논문에서 제안하는 위상 기반 온오프 복조기를 검증하기 위해 실험실 환경의 초음파 송수신 장비를 구성하였다. 실험 장비의 초음파 센서는 (주)하기소닉사의 HG-L40DC를 사용하였고 40kHz의 중심 주파수에 38kHz ~ 42kHz의 대역폭 및 65°의 지향각을 가진다. 또한 그림 5와 같이 센서 주변으로 초음파 흡음제를 부착하여 다중 경로(Multi path) 및 잔향(Reverberation) 효과를 제거하였다. 실험 환경은 가로 10m, 세로 10m, 높이 3m의 실내 공간이다.

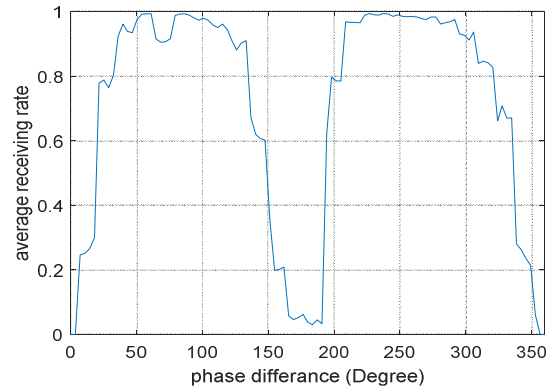


그림 5. 제안 방법의 개별 신호 위상 차이에 따른 평균 수신률

Fig. 5. Average receiving rate verse phase difference of proposed method

위상 기반 온오프 복조기는 두 장치에서 송신한 초음파 신호가 혼합되어 수신되는 환경에서 수신률을 높이기 위한 목적으로 제안되었다. 그러나 두 신호의 위상 차이가 0° 에 가까우면 개별 신호의 위상을 구분하지 못하고 180° 에 가까우면 상쇄 간섭이 생겨 신호의 수신 시점을 찾기 어려워진다. 따라서 실제 환경에서 두 신호의 위상 차이에 따른 수신률이 얼마나 달라지는지 성능 실험을 진행하였다. 1대의 수신기에서 2m 거리에 2대의 송신기를 배치하고 각 송신기의 송신 시점을 조정하여 초음파를 송신하였다. 두 신호의 위상 차이는 $0^\circ \sim 360^\circ$ 범위에서 3.6° 간격으로 500회씩 반복 측정하여 평균 수신률을 측정하였다. 이때 $K=8$, $T_\sigma = 12\sigma_n$ 으로 실험 결과는 그림 5에서 볼 수 있다. 수신률 0.2 이하 구간은 0° 기준 $\pm 10^\circ$, 180° 기준 $\pm 15^\circ$ 로 측정되었다. 해당 구간에서 두 신호의 후보 위상을 클러스터링 과정으로 획득하지 못하여 수신에 실패하였다. 그 외 구간에서는 실험 환경적 요인에 따라 수신률이 변하며 $20^\circ \sim 150^\circ$, $190^\circ \sim 340^\circ$ 구간에서 수신률 0.8 이상을 보였다.

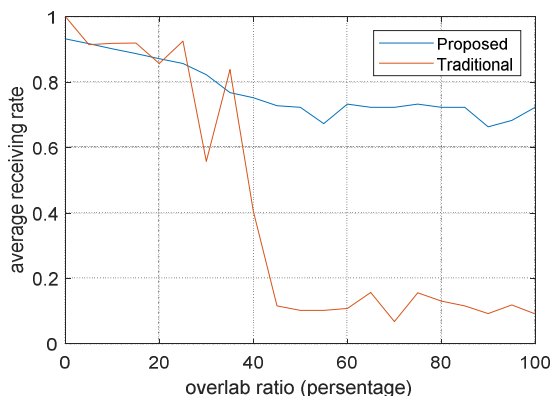


그림 6. 혼선 신호 중첩도에 따른 평균 수신률 비교
Fig. 6. Comparison average receiving rate verse overlap ratio

본 논문에서 제안하는 방법의 수신률 개선을 검증하기 위해 기존 코드 분할 방식[4]의 초음파 신호 처리의 수신률과 비교 검증을 진행하였다. ID 코드 8bit 환경에서 개별 신호의 위상 차이는 균등 랜덤이고 혼합 신호 수신 시 두 신호의 중첩 정도를 100%부터 0%까지 5%단위로 각 500회씩 실험을 진행하여 평균 수신률을 측정하였다. 그림 6에서 실

험 결과를 확인할 수 있다. 두 신호가 40% 미만의 중첩도를 보일 경우, 제안 방법과 기존 방법 모두 평균 수신률 0.8 이상의 성능을 보였다. 그러나 두 신호가 50% 이상의 중첩도에서 기존 방법의 경우 혼선에 의해 방해받아 수신률 0.2 이하의 성능을 보였다. 반면에 제안 방법의 경우 전반적으로 0.7 이상의 수신률을 보이며 두 신호의 중첩도의 의존성이 약하고 위상 차이에 의존성만 보이는 성능을 보였다.

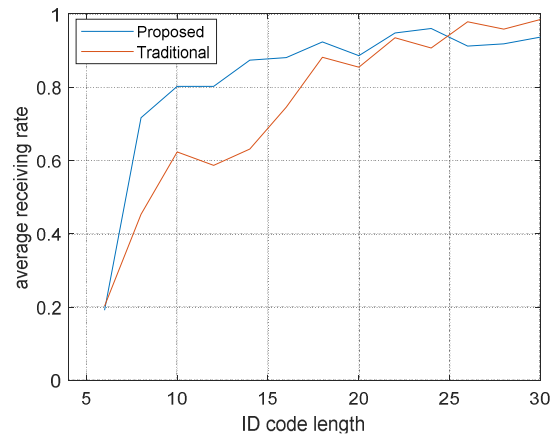


그림 7. ID 코드 길이에 따른 평균 수신률 비교
Fig. 7. Comparison of average reception rate according to ID code length

기존 코드 분할의 수신률을 향상시키기 위해서는 ID 코드를 더 많은 bit를 할당할 수 있다. 제안 방법 또한 ID 코드가 많아지면 수신률이 향상되지만 기존 방법 대비 동일 수신률을 달성하기 위한 ID 코드를 줄일 수 있는 이점이 있다. 따라서 기존 방법과 제안 방법의 ID 코드 길이에 따른 수신률 차이를 검증하기 위한 실험을 진행하였다. 혼합 신호의 중첩도 및 개별 신호의 위상 차이는 균등 랜덤으로 ID 코드 6 bit부터 30 bit 까지 2bit 단위로 각 500회씩 실험을 진행하여 평균 수신률을 측정하였다. 그림 7에서 실험 결과를 확인할 수 있다. 평균 수신률 0.8 이상을 달성하기 위한 최소 ID 코드는 기존 방법 18bit, 제안 방법 10bit로 측정되었으며 평균 수신률 0.9 이상을 달성하기 위한 최소 ID 코드는 기존 방법 22 bit, 제안 방법 14 bit로 측정되어 기존 방법 대비 코드 길이가 60% 정도 작아지는 것을 볼 수 있다.

IV. 결론 및 향후 과제

기존 코드 분할 방식의 초음파 수신 처리 알고리즘의 문제점을 해결하기 위해 수신 신호의 위상 정보를 이용하여 혼합 신호에서 개별 신호를 분리하는 온오프 키잉 복조기를 제안하였다. 제안점을 검증하기 위해 초음파 송수신 장비 및 환경을 구현하여 개별 신호의 위상 차이에 따른 수신률, 기존 방식 대비 수신률 성능 향상을 검증하였다. 개별 신호의 위상 차이가 0° , 180° 에 가까우면 위상을 구분할 수 없는 단점이 있지만 기존 방법 대비 짧은 ID 코드에서 5배 이상의 수신률 향상을 보였다. 또한 평균 수신률 0.8 이상을 달성하기 위한 ID 코드 길이 또한 기존 방법 18 비트, 제안 방법 10 비트로 60% 짧아졌다.

본 논문에서 제안한 위상 기반 온오프 복조기는 혼합 신호에서 후보 위상을 추출한 뒤 이를 바탕으로 신호 분리를 수행한다. 이 과정에 있어서 개별 신호의 위상 차이는 성능에 매우 큰 영향을 준다. 또한, 2개의 개별 신호가 혼합된 경우라면 개별 신호의 위상 및 혼합 시 위상 3가지 위상값을 가지므로 3개의 군집으로 클러스터링을 수행하면 되지만 몇 개의 신호가 혼합되었는지 모르는 경우 이를 수행하기 어렵다. 적은 수의 초음파 송수신 장치가 있는 경우 2개 신호의 혼선이 일어날 가능성이 크지만 더 많은 수의 초음파 송수신 장치가 밀집될 경우 3개 이상의 신호가 혼선될 가능성이 커진다. 따라서 추후 연구로서 몇 개의 신호가 혼선되었는지 혹은 여러 신호가 혼선되었을 경우 타겟 신호만 분리하는 알고리즘의 연구가 이루어진다면 본 논문의 제안 방법이 더욱 가치를 가질 것으로 예상된다.

References

- [1] H. M. Park, S. H. Park, and K. R. Baek, "Multi-Robot Positioning System using Multi-coded Phased-Array Ultrasound", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 25, No. 3, pp. 222-228, Mar. 2019. <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2019.18.0222>.
- [2] P. Cheng, F. Zhang, J. Chen, Y. Sun, and X. Shen, "A distributed TDMA scheduling algorithm for target tracking in ultrasonic sensor networks", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 9, pp. 3836-3845, Sep. 2012. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2208439>.
- [3] S. Lee, B. H. Kim, T. Jeon, Y. Kim, K. Cho, and J. Song, "Frequency division multiple transmission method to utilize the wide bandwidth property of capacitive micromachined ultrasonic transducer arrays", *Medical Imaging 2013: Ultrasonic Imaging, Tomography, and Therapy*, Vol. 8675, Mar. 2013. <https://doi.org/10.1117/12.2006719>.
- [4] W. S. Moon, B. S. Cho, J. W. Jang, and K. R. Baek, "A multi-robot positioning system using a multi-code ultrasonic sensor network and a Kalman filter", *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 8, No. 6, pp. 1349-1355, Jun. 2010. <https://doi.org/10.1007/s12555-010-0622-9>.
- [5] Song, Xiaojun, Dean Ta, and Weiqi Wang, "A base-sequence-modulated Golay code improves the excitation and measurement of ultrasonic guided waves in long bones", *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, Vol. 59, No. 11, pp. 2580-2583, Nov. 2012. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2012.2492>.
- [6] Jiang, Wentao, and William MD Wright, "Ultrasonic wireless communication in air using FDM-OOK modulation", *2014 IEEE International Ultrasonics Symposium*. IEEE, 2014. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2014.0251>.
- [7] K. Paliwal Kuldip and D. Leigh Alsteris, "On the usefulness of STFT phase spectrum in human listening tests", *Speech communication*, Vol. 45, No. 2, pp. 153-170, Feb. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2004.08.001>.
- [8] Stearns W. Charles, "A generalized Hann window for apodization of filtered backprojection PET

images", IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE, Vol. 5, 2005. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2005.1596898>.

- [9] Likas Aristidis, Nikos Vlassis, and J. Jakob Verbeek, "The global k-means clustering algorithm", Pattern recognition, Vol. 36, No. 2, pp. 451-461, Nov. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(02\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(02)00060-2).

저자소개

박 상 호 (Sang-Ho Park)



2016년 2월 : 부산대학교
전자공학과(공학사)
2018년 2월 : 부산대학교
전기전자컴퓨터공학과(공학석사)
2018년 ~ 현재 : 부산대학교
전기전자공학과 박사과정
관심분야 : 임베디드 시스템 및

신호처리

박 가 린 (Garin Park)



2017년 2월 : 부산대학교
전자공학과(공학사)
2019년 2월 : 부산대학교
전기전자컴퓨터공학과(공학석사)
2019년 ~ 현재 : 부산대학교
전기전자공학과 박사과정
관심분야 : 임베디드 시스템 및

신호처리

백 광 렬 (Kwang-Ryul Baek)



1984년 2월 : 부산대학교
전기기계공학과(공학사)
1986년 2월 : KAIST 전기 및
전자공학과(공학석사)
1989년 2월 : KAIST 전기 및
전자공학과(공학박사)
1997년 ~ 현재 : 부산대학교

전자공학과 교수, 컴퓨터 및 정보통신연구소 연구원
관심분야 : 영상처리 및 디지털시스템 설계