

다중 센서를 이용한 음향 센서 시스템의 고장 진단

오원근*

A Fault Detection Scheme in Acoustic Sensor Systems Using Multiple Acoustic Sensors

Won-Geun Oh*

요 약

본 논문에서는 음향 센서 시스템에서 다중 센서를 이용한 실시간 고장 진단 및 데이터 처리 알고리즘을 제안하고 실험을 통해 그 타당성을 입증하였다. 다중 센서 알고리즘은 하나의 물리량 계측을 위해 여러 개의 센서를 동시에 사용하는 방식을 사용하며 효율적으로 센서의 고장을 감지하여 신뢰성 있는 데이터를 출력할 수 있는 방법이다. 이를 음향 센서 시스템에 적용하기 위해 등가 소음레벨 L_{eq} 를 이용한 실시간 고장 진단 및 오류 데이터 처리 알고리즘을 제안하고, 이를 검증하기 위한 실험 장치와 프로그램을 제작하고 실험하였다. 그 결과 다중 센서 알고리즘은 음향 센서 시스템에도 잘 적용되어 일부 센서의 고장 시에도 정확한 데이터 처리가 가능함을 보였다.

ABSTRACT

This paper presents a fault detection and data processing algorithm for acoustic sensor systems using the multiple sensor algorithm that has originally developed for the wireless sensor nodes. The multiple sensor algorithm can increase the reliability of the sensor systems by utilizing and comparing the measurements of the multiple sensors. In the acoustic sensor system, the equivalent sound level(L_{eq}) is used to detect the faulty sensor. The experiment was conducted to demonstrate the feasibility of the multiple acoustic sensor algorithm, and the results show that the algorithm can detect the faulty sensor and validate the data.

키워드

Sensor Fault Diagnosis, Multiple Sensor Systems, Acoustic Sensor Systems, Equivalent Sound Level
센서 고장 진단, 다중 센서 시스템, 음향 센서 시스템, 등가 소음 레벨

1. 서 론

센서를 이용한 데이터 수집에서 센서 자체의 신뢰성은 무엇보다도 중요한 요소이다. 특히 고성능 시스템에서 센서의 고장으로 인한 오동작은 전체 시스템의 신뢰성과 안정성을 해칠 수 있다. 하지만 센서 자체는 환경을 계측하기 위해서 외부에 노출되거나 시

스템의 표면에 위치하는 경우가 많아서 충격이나 오염에 노출될 가능성이 높은 편이다. 또한 센서의 노화, 배터리 고갈, 전자기파로 인한 회로의 오류, 온/습도로 인한 오동작 등으로 인해 항상 고장 발생의 가능성이 있다. 따라서 신뢰성이 중요한 고성능 시스템에서는 운전 중에 각 센서의 이상 유무를 진단하는 고장 진단 알고리즘, 그리고 센서 고장 시 데이터 처

* 순천대학교 멀티미디어공학과 교수(owg@sunchon.ac.kr)

• 접수일 : 2016. 01. 26
• 수정완료일 : 2016. 02. 13
• 게재확정일 : 2016. 02. 24

• Received : Jan. 26, 2016, Revised : Feb. 13, 2016, Accepted : Feb. 24, 2016

• Corresponding Author : Won-Geun Oh
Dept. of Multimedia Engineering, Sunchon National University,
Email : owg@sunchon.ac.kr

리 알고리즘이 필수적으로 운용되어야 한다.

예를 들어 사물인터넷(IoT)나 무선 센서 네트워크에서 사용되는 센서 노드의 오류 처리와 관련된 연구로는 서버 레벨에서 전체 센서 데이터를 처리하여 이상 노드를 검출하는 방법이 있다[1-2]. 그러나 이와 같은 방법은 노드에서 이상 데이터가 출력된 이후의 처리법이며 센서 자체 오류에 대한 진단은 아니다. 또한 노드의 수가 늘어나면 서버의 부하가 증가된다는 단점을 가지고 있다. 센서 노드 자체의 이상을 감지하는 방안으로는 다중센서를 사용한 센서 노드의 고장 진단 알고리즘이 있다[3-4]. 이 알고리즘은 다수의 센서를 사용하여 동일한 대상을 측정된 다음, 각 센서의 값을 비교하여 이상 유무를 판별하여 신뢰성 있는 데이터만을 전송하는 방식이다. 이 구조는 일반적인 센서 시스템보다 센서의 수가 많아지는 단점이 있지만, 간단한 연산으로 이상을 검출할 수 있는 방법이기 때문에 높은 신뢰도가 중요한 응용 분야에는 적합한 방법이라고 할 수 있다.

한편 군사용 탐지 시스템, 보안이나 경비 시스템, 그리고 재난 감지 시스템 등에서 음향 신호는 중요한 역할을 차지하고 있다. 특히 보안이나 탐지 분야에서 음향을 이용하면 360도 전방향의 정보를 수집할 수 있고, 장애물이나 암흑으로 인해 시야 확보가 불가능한 곳에서도 측정할 수 있는 장점이 있어 시각 정보를 얻을 수 없는 경우 중요한 데이터가 된다. 이와 같은 음향을 기반으로 한 시스템에서 음향 센서, 즉 마이크로폰의 신뢰성은 무척 중요하다. 예를 들어 보안 시스템에서 마이크 고장으로 이상 소음이 발생한 경우 감지하지 못한다거나 반대로 정상 소음을 이상 신호로 측정하는 경우 전체 보안 시스템을 신뢰할 수 없는 상황이 될 것이다. 이러한 센서 시스템에서 오류를 검출하고 정상 데이터를 선별하기 위한 기존의 연구는 주파수 분석[5-6]이나 지능형 알고리즘[7-8] 등에 기반을 둔 복잡한 알고리즘을 이용하고 있다. 그러나 이러한 방법은 실제 제한된 능력의 임베디드 시스템에서 처리하기에는 연산량의 부담이 생길 수 있어 항상 적용될 수 있는 것은 아니라는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존의 [9]에서 제안되었던 음향 센서에서 다중 센서 구조를 이용한 실시간 고장 진단 및 오류 데이터 처리 알고리즘을 개선하고, 실험을 통해 유용성을 검증하고자 한다. 이 알고리즘은 다중 센서

시스템을 음향 신호를 수집하는 센서 시스템에 적합하도록 등가 소음레벨(Equivalent Sound Level)을 기준으로 하여 개선한 것으로써, 일부 센서가 고장 나더라도 전체 음향 센서 시스템의 신뢰성을 유지하고 유효 데이터를 확보할 수 있는 장점이 있다. 알고리즘의 실험을 위해 3개의 마이크와 DAQ를 이용한 테스트베드를 구축하고 Labview를 이용한 진단 및 데이터 처리 프로그램을 작성하였다. 실험 결과 다중 음향 센서 알고리즘으로 센서의 고장을 실시간으로 검출하고 처리할 수 있음을 확인할 수 있었다.

논문의 구성은 2장은 다중 센서 시스템의 구조와 동작 알고리즘, 3장은 시뮬레이터를 이용한 모의실험, 그리고 4장은 결론으로 구성된다.

II. 다중 음향 센서 알고리즘

2.1 다중 센서 알고리즘

센서 노드에서 사용된 다중 센서 시스템은 동일한 물리량을 측정하는데 하나의 센서를 사용하지 않고 다수의 센서를 사용하는 구조를 가지고 있다. 이 경우 하나의 센서에 이상이 생기는 경우에도 정상적인 다른 센서의 결과를 이용하여 신뢰성 있는 데이터를 전송할 수 있는 장점이 있다. 다중 센서 노드에서 센서의 이상 유무 판별은 각 센서의 값을 비교하여 특정 센서의 값이 다른 센서의 값과 크게 차이가 나는지를 이용한다. 동작 알고리즘은 다음과 같다[3-4].

- (step 1) 각 센서 출력의 지수 가중합을 계산한다.
- (step 2) 각 센서의 지수 가중합을 비교하여 특정 센서의 값이 일정 수준 이상으로 차이가 나면 해당 센서에 오류가 있는 것으로 판정한다.
- (step 3) 센서에 이상이 없는 경우는 전체 센서의 평균값을 전송하고, 그렇지 않은 경우 고장 센서의 값을 제외한 나머지 센서의 평균값을 전송한다.

이와 같은 다중 센서 구조는 하나의 센서가 잘못될 확률에 비해서 여러 개의 센서가 모두 고장이 날 확률이 더 낮기 때문에 단일 센서를 사용하는 기존의 방식에 비해 오류 있는 측정 데이터 전송에 대한 가

능성을 상당히 낮추고, 보다 신뢰성 있는 센서 노드의 구축이 가능하다는 장점이 있다.

2.2 다중 음향 센서 시스템

음향을 이용한 보안이나 감시 시스템에서는 음압 레벨의 갑작스러운 변화나 일상적이지 않은 음압 레벨을 탐지하여 침입이나 문제가 발생한 것으로 판정하게 된다. 따라서 음향 센서로 사용되는 마이크가 고장으로 인해 비정상적으로 작동하는 경우에는 전체 시스템에 잘못된 정보를 발령하거나 반대로 침입을 탐지하지 못하게 될 수도 있다. 이와 같은 높은 신뢰성이 요구되는 환경에서 음압 레벨 측정 시에는 마이크의 이상을 실시간으로 감지하고 고장 발생 시 오류 데이터를 제거하는 알고리즘이 반드시 필요하다. 본 논문에서는 기존의 센서 노드에서 사용된 다중 센서 알고리즘을 음향 센서에 적용하기 위해서 다음과 같이 가중 평균값 대신 등가 소음레벨 L_{eq} 를 이용하여 오류를 검출하도록 알고리즘을 수정하였다. L_{eq} 는 널리 사용되는 환경소음 측정치 중의 하나이며, 변화하는 소음을 등가의 정상상태 에너지로 변환해서 나타낸 값이다. L_{eq} 의 계산식은 다음과 같다[10].

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right] \quad (1)$$

여기에서 기준음압 $p_0 = 20 \mu Pa$ 이며, $p(t)$ 는 현재 음압을 나타낸다. (1)에서 시간간격 $t_2 - t_1$ 을 125ms로 측정된 것을 short L_{eq} 라고 하는데 이는 IEC 61672 표준안에 기술되어 있으며 현재 대부분의 소음 측정기에서 채택하고 있다. 다중 음향 센서 시스템에서는 먼저 각 마이크에 대해 short L_{eq} 를 계산한 다음, 이 값이 사용자가 설정한 문턱값(threshold) Th 이내인지 아닌지를 계산하여 마이크의 정상 동작 여부를 판별 한다 즉, 다음 (2)와 같이 센서 i 의 등가 소음레벨이 다른 센서 j 의 등가 소음레벨과 일정한 값 이상으로 차이가 나면 센서 i 에 오류가 있는 것으로 판정한다.

$$|L_{eq}^{(i)}(t) - L_{eq}^{(j)}(t)| > Th, \quad \forall i, j, i \neq j \quad (2)$$

여기에서 $L_{eq}^{(i)}(t)$ 는 시간 t 에서 i 번째 센서의 등

가소음레벨이다. 전체 센서 시스템의 최종 출력은 센서에 이상이 없는 경우에는 다음과 같이 전체 센서의 평균값을 출력한다.

$$Output \ of \ a \ sensor = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} L_{eq}^{(i)} \quad (3)$$

여기에서 N_s 는 센서의 개수이다. 만약 특정 센서에 이상이 있는 경우에는 해당 센서를 제외한 나머지의 출력을 평균해서 출력하며, 다수의 센서에서 오류가 발견되는 경우는 센서 시스템 자체의 파손으로 간주하고 시스템 오류 신호를 상위의 관리 프로그램으로 전송한다.

이 알고리즘은 동일한 물리량을 다수의 센서로 측정하는 경우에 만약 특별히 다른 출력을 내는 센서가 있다면 해당 센서에 오류가 있을 것이라는 일종의 ‘다수결’을 가정한 알고리즘이다. 따라서 센서의 수가 많을수록 오류 센서의 검출 가능성이 높아지겠지만 이 경우 비용과 처리 시간의 문제가 발생하게 된다. 따라서 응용 분야에 따라 경제성과 신뢰성을 고려하여 적절한 수의 결정하여야 한다. 전체 센서의 개수와 검출 가능한 오류 센서의 수는 표 1과 같으며, 다중 센서 시스템이 효과가 있기 위해서는 최소 3개의 센서가 사용되어야 한다.

제안된 다중 음향 센서 고장 검출 알고리즘을 순서도로 나타내면 그림 1와 같다.

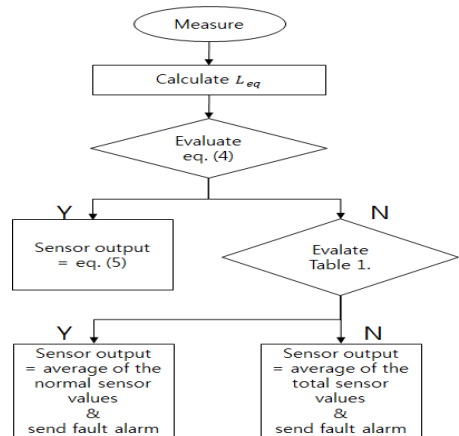


그림 1. 다중 음향 센서 알고리즘의 순서도

Fig. 1 The flow chart of the multiple acoustic sensors algorithm

표 1. 검출 가능한 오류 센서의 수

Table 1. The number of error detectable sensors

Number of sensors	1~2	3~4	5~6	7~8	9~10
Number of error detectable sensors	0	1	2	3	4

III. 실험

3.1 시뮬레이터 구성

제안된 방법을 검증하기 위해 시뮬레이터를 구축하고 실험을 수행하였다. 시뮬레이터의 전체 구성 블록 다이어그램은 그림 2와 같다.

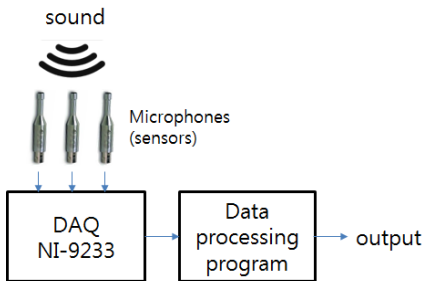


그림 2. 시뮬레이터의 블록 다이어그램
Fig. 2 The block diagram of the simulator

실험을 위한 음향 센서는 PCB사의 1/4인치 무지향성 콘덴서 마이크를 사용하여 구성하였으며, 다중 마이크는 음향 신호가 마이크에 도달하는 시간차와 음압차에 의한 오차를 방지하기 위해서 각 수음부의 위치를 서로 최대한 가까이 배치하였다. 각 마이크로폰의 출력은 DAQ로 입력되어 디지털 신호로 변환된 후 처리 프로그램을 거치도록 하였다. 이때 DAQ는 50kHz의 샘플링률과 24비트 양자화를 지원하는 National Instrument사의 NI-9233을 사용하였다. 그림 3에 전체 시뮬레이터의 사진을 나타내었다.

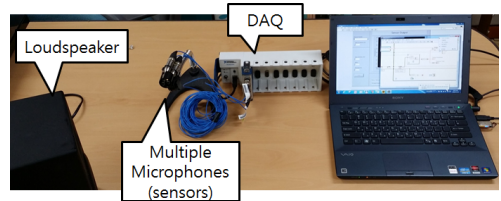


그림 3. 시뮬레이터 사진
Fig. 3 Photo of the simulator setup

센서 오류 진단 및 처리 프로그램은 Labview 언어를 이용하여 작성하였으며, 각 마이크에서 측정된 음압 레벨의 순시값과 시간 변화 그래프, 각 마이크의 오작동 여부를 표시하도록 하였고, 사용자의 설정값은 A, C, Flat weighting과 알고리즘의 파라미터인 문턱값 Th 를 설정할 수 있도록 제작되었다. 전체 프로그램의 Labview 블록 다이어그램의 주요부는 그림 4와 같다.

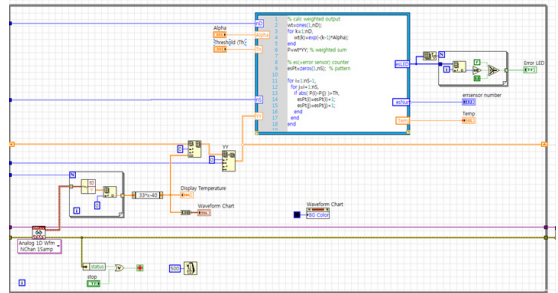


그림 4. 시뮬레이터의 Labview 블록 다이어그램
Fig. 4 Block diagram of the Labview program

3.2 실험 결과

이상에서 기술한 시뮬레이터를 이용해서 다중 센서 알고리즘의 동작을 실험하였다. 실험은 3개의 마이크로폰을 사용하였으며, (1) 모든 센서가 오차 범위 내에서 정상 동작하는 경우와 (2) 센서 하나가 고장으로 비정상적인 값을 출력하는 2가지 경우에 대해서 실시하였다. 그림 5는 모든 센서가 정상 동작하는 경우의 결과 화면이다. 정상 동작 시 3개 마이크에서 측정된 음압레벨은 각각 66.8 dB, 67.4 dB, 그리고 64.7 dB로써, 각 센서의 최대 편차는 2.1dB이다. 이 오차는 각

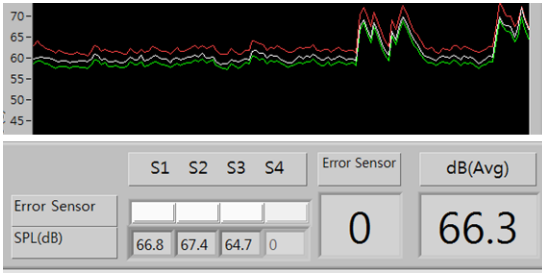


그림 5. 모든 센서의 정상 동작 시 결과 화면
Fig. 5 The simulator output screen of the normal sensor operation

마이크가 가지고 있는 자체 특성이나 연식, 제작 오차 등에 의해서 발생하는 것이며, 아무리 정밀하게 제작된 마이크라 하더라도 약간의 오차를 가지고 있기 때문에 3개의 측정값은 차이를 보일 수 있다. 이 정도의 오차를 센서의 오동작으로 인식할지의 여부는 센서의 정밀도, 사용 목적, 응용 분야 등에 따라서 사용자가 결정하게 된다. 프로그램에서는 이를 사용자 파라미터인 Th 를 이용해서 설정할 수 있으며, 이 실험에서는 $Th = 8$ 인 경우 정상 오차 범위이내에 있는 것으로 판별되었다. 이와 같이 모든 센서가 정상으로 판정되는 경우에는 3개 마이크에서 측정된 음압의 평균값인 66.3 dB를 센서의 출력값으로 표시한다. 이와 같이 센서값을 평균하는 것은 각 센서가 가지고 있는 오차를 상쇄하여 보다 정확한 값을 출력하는 효과가 있다.

그림 6은 앞 실험과 동일한 사용자 파라미터를 설정하였을 때 마이크 1개가 오작동하는 경우의 시뮬레이터 프로그램 화면이다. 이때 3개 마이크에서 측정된 음압은 각각 91.4 dB, 62.6 dB, 그리고 59.4 dB이며, 1번 마이크에 고장이 생겨서 오류값을 출력하고 있는 상태이다. 이 경우 1번 마이크의 이상은 LED가 점멸되고 해당 고장 센서의 번호가 나타난다. 최종 출력값은 이상이 있는 1번 마이크를 제외한 나머지 마이크에서 측정된 값의 평균인 61 dB가 출력된다. 이때 만약 마이크 하나만 사용되었다면 오류값인 91.4 dB가 그대로 사용되어 전체 시스템의 신뢰성에 문제가 생길 수 있을 것이다. 그러나 다중 센서를 사용함으로써 고장 센서가 있는 경우라도 나머지 정상적인 센서의 정보를 이용해 정확한 값을 측정할 수 있었다.

이 실험에서 만약 2개 이상의 센서가 오동작하거나 3개 센서의 값이 모두 Th 범위를 벗어나는 경우에는

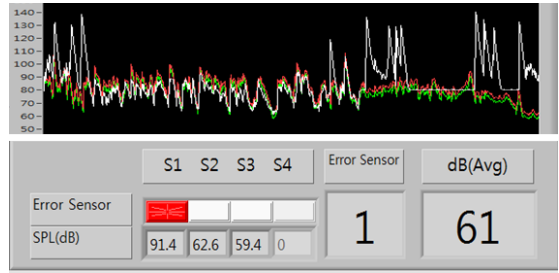


그림 6. 센서 고장 시 결과 화면
Fig. 6 The simulator output screen of the fault sensor operation

어떤 센서가 정상인지 판별이 불가능하다. 이때는 센서 시스템이 모두 손상된 것으로 판정하고 고장 신호를 출력한다. 다만 이 경우에도 측정값은 3개 센서 모두의 평균값을 출력하게 되므로, 하나의 오류 센서의 값을 출력하는 경우 보다는 오차가 줄어들 것으로 기대할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 다중 센서 알고리즘을 음향 센서 시스템에 적용하는 방안을 제안하고 실험을 통해 그 타당성을 입증하였다. 다중 센서 알고리즘은 기존의 느리게 변화하는 신호인 온도나 습도 등에 대해서는 성공적으로 적용된 바 있다. 그러나 음향 신호는 다른 물리량에 비해 비교적 빠르게 변화하며, 소음의 영향이 큰 특징이 있기 때문에 이를 고려하여 등가 소음 레벨 L_{eq} 값을 기반으로 한 다중 센서 알고리즘을 구현하였다.

실험을 위해서 3개의 음향 센서와 DAQ, 그리고 Labview를 이용한 센서 고장 감지 및 데이터 처리 프로그램을 구현하고 정상 동작 및 센서 오류 시의 검출 결과를 보였다. 그 결과 적절한 파라미터 설정에 따라 음향 센서 시스템에서도 다중 센서 알고리즘이 잘 동작함을 확인할 수 있었다. 이와 같이 다중 센서 알고리즘은 일부 센서의 고장에도 불구하고 신뢰성 있는 데이터의 출력이 가능하기 때문에 높은 신뢰성을 필요로 하는 보안, 감시, 탐색, 군사 분야에서 음향 센서 시스템이 사용되는 경우 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2014R1A1A2057077). 또한 이 논문은 2014년 순천대학교 학술기반조성비로 연구되었음.

References

[1] E. Youk, S. Yun, and S. Kim, "Development of fault detection algorithm applicable to sensor network system," *J. of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 17, no. 6, 2007, pp. 760-765.

[2] J. Hur, Y. Lee, and H. Yoon, "Trust-Based Filtering of False Data in Wireless Sensor Networks," *J. of Korean Institute of Information Scientists and Engineers*, vol. 35, no. 1, 2008, pp. 76-90.

[3] W. Oh and S. Lee, "An Effective Algorithm for Diagnosing Sensor Node Faults," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 2, 2015, pp. 283 - 288.

[4] W. Oh, "A simple sensor fault detection algorithm," In *Proc. of Int. Conf. on Computer Science, Data Mining&Mechanical Engineering*, Bangkok, Thailand, Apr., 2015, pp. 132 - 134.

[5] T. Hong and S. Park, "A Case Study of the Breakdown Evaluation to the Rotary Machine," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 2, 2015, pp. 189 - 194.

[6] T. Hong and S. Park, "A Case Study of the Breakdown Evaluation to the Machine at the Steel Company," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 2, 2015, pp. 195-202.

[7] K. Lee, "A Fuzzy Model Based Sensor Fault Detection Scheme for Nonlinear Dynamic Systems," *Trans. Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 56, no. 2, 2007, pp. 407-414.

[8] I. Lee, "ART2 Neural Networks Based Gas Classification and Sensor Fault Diagnosis in the Gas Monitoring System," In *Proc. Korean Institute of Information Technology Summer Conf.*, Mokpo, Korea, Jun. 2009, pp. 358-363

[9] W. Oh, S. Lim, and H. Kim, "A fault detection method for acoustic sensor systems," In *Proc. Conf. 2015 Spring Acoustical Society of Korea*, Busan, Korea, May, 2015, pp.109-109

[10] IEC Standard, *IEC 61672-1: 2013 Electroacoustics - Sound Level Meters - Part 1*. Int. Electrotechnical Commission, 2002.

저자 소개



오원근(Won-Geun Oh)

1989년 한양대학교 전자통신공학과 학사
 1992년 한양대학교 대학원 전자통신공학과 석사
 2007년 한양대학교 대학원 전자통신공학과 박사
 1997년~현재 순천대학교 멀티미디어공학과교수
 ※ 관심분야 : 디지털신호처리, 음향시스템, 음향신호처리, 센서 및 제어시스템 응용