

후각 센싱 데이터의 원격 분류를 위한 무선 통신 시스템 연구

양현수, 백승환*, 이인규*
고려대학교 스마트융합학과, *전자전기공학과

gustn1070@korea.ac.kr, s_baek@korea.ac.kr, inkyu@korea.ac.kr

Olfactory wireless communication system for remote inference

Hyunsoo Yang, Seunghwan Baek*, Inkyu Lee*
Department of Smart Convergence., Korea Univ., Korea
*School of Electrical Eng., Korea Univ., Korea

요약

본 논문에서는 후각 센싱 데이터의 원격 제어를 위한 무선 통신 시스템을 설계하고 실제 응용 가능성을 평가하였다. 송신단의 특징 추출 기법과 다양한 환경 조건 하에서의 센서 반응 데이터를 활용하여 시스템의 성능을 검증하였으며, 최적의 송수신 조건을 도출하였다.

I. 서론

인간의 오감에 관한 연구는 오랫동안 지속되어 왔으며, 감각 기관의 작동 원리를 이해하고 이를 모방하려는 노력이 꾸준히 이루어져 왔다. 예컨대, 이미지 분류 및 분할, 음성 인식, 번역 등은 인간의 시각과 청각을 모방한 기술이며, 전자코(e-nose) [1], [2], 전자혀(e-tongue) 및 햅틱(haptic) 기술은 각각 후각, 미각 및 촉각을 모방한 사례들이다. 특히, 후각의 경우 후각 수용체의 뛰어난 적응력 때문에 반응이 신속하게 감소하는 한계를 가지고 있으며, 이는 건강 및 안전과 밀접하게 연결되어 있다. 예를 들어, 인간이 맡지 못하는 유해 가스 성분을 감지하거나 폐렴 환자의 호기에서 나는 특정 냄새를 통한 신속한 진단은 모두 후각 기능의 응용 분야에 속한다. 이러한 사례들은 잠재적인 위험을 사전에 감지하고, 후각의 한계를 보완하는 것이 왜 중요한지를 잘 보여준다.

후각을 통신에 응용하는 사례는 드물지만, 기체 분자의 확산이 바람이나 습도와 같은 외부 요인에 의해 큰 불확실성을 가진다는 점을 고려할 때, 단일 후각 센서에서 획득된 데이터만을 완전히 신뢰하기는 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다중 후각 센서에서 취득된 정보를 종합하여 분류 작업의 정확도를 향상시킬 필요가 있고, 이 과정에서 통신 기술이 중요한 역할을 할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 후각 센싱 데이터의 특성을 파악하고, 이를 원격으로 분류하기 위한 무선 통신 시스템에 대해 연구를 진행하였다.

II. 본론

본 연구에서는 후각 연구를 수행하기 위해 Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) 라이선스로 제공되는 'Gas sensor arrays in open sampling settings' 오픈 데이터셋을 활용하였다 [3]. 이 데이터셋은 그림 1 에서 확인할 수 있듯이, 다양한 환경 조건 하에서 10 종류의 가스 분자

에 대해 풍속, 센서 작동 전압, 위치를 포함한 세 가지 환경 변수를 고려하여 측정되었다. 데이터 측정을 위해 사용된 72 개의 MOS 센서 어레이는 가스의 산화/환원 반응으로 인한 저항 값의 변화를 감지하는 방식으로 동작하며, 해당 데이터셋은 이러한 변화에 대한 시계열 데이터로 기록되어 있다.

해당 데이터셋으로 단일 가스에 대한 분류를 진행하기에 충분한 정보를 가지고 있는지 검토하기 위해 Fully Connected Network(FCN) 기반의 분류기를 설계하여 정확도를 측정하였다. 실험 결과, 동일한 환경 설정 (e.g., L4, 0.21m/s, 600V)에서는 99.8% 이상의 높은 정확도를 달성하였으며, 서로 다른 환경에서 수집된 데이터를 동일 가스의 데이터로 간주할 때에도 97% 이상의 정확도를 유지하였다. 해당 결과의 이유를 파악하기 위해 환경에 따른 데이터의 변화를 수치적으로 분석해 보았을 때, 주요하게 반응하는 센서의 유무와 경향성이 서로 다른 환경에서도 여전히 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 모델이 분류 작업을 하기위한 충분한 정보량이 여전히 남아있다고 해석할 수 있다. 이러한 결과는 72 개의 센서 어레이로부터 취득된 시계열 데이터가 단일 가스 분류 작업에 충분히 활용될 수 있음을 시사한다.

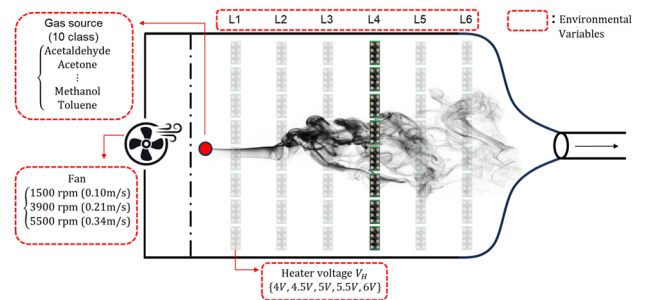


그림 1. 가스 분자 감지를 위한 실험 환경

본 연구에서는 후각 데이터의 원격 제어를 위한 무선 통신 시스템을 다음과 같이 설계하였다. 송신단에서는 72 개 센서 어

레이의 상관 관계를 반영하기 위해 autoencoder 기반 인코더를 사용하여 데이터의 특징을 추출하였고, 이는 노이즈 채널을 통해 전송된다. 전송되는 신호는 시계열 데이터를 일괄적으로 송신하는 것으로 가정하며, 수신단에서는 잡음이 섞인 신호를 기반으로, Fully Connected Network(FCN) 구조를 갖는 분류기를 통해 특정 가스를 분류한다.

원본 데이터 x 는 인코딩 함수 $f_{\theta}: R^n \rightarrow C^k, n = 72 \times \# \text{ of time step}$ 를 거쳐 복소 신호 z 가 되고, 파워 정규화 $\hat{z} = z/\sqrt{z^H z}$ 를 거쳐서 AWGN 채널을 통해 전송된다. 이때 수신 신호 $y = \hat{z} + n, n \sim CN(0, N_0 I)$ 는 디코딩 함수 $g_{\theta}: C^k \rightarrow R^{10}$ 을 통해 특정 가스로 분류된다. 이때 모델의 학습에 사용된 손실 함수는 다중 클래스 분류에서 많이 사용되는 cross-entropy 를 사용했으며, 수식은 $CE = -\sum_i^c t_i \log(p_i)$ 와 같다. 여기서 t_i 는 정답 label 에 해당하며, p_i 는 분류기의 softmax 에서 나온 label 에 해당하는 확률 값이다.

III. 모의실험 및 결론

본 논문에서는 송신단에서의 특징 추출이 분류 정확도에 미치는 영향을 분석하고, 압축률과 신호 대 잡음 비(SNR)의 변화에 따른 샘플링 주기 별 정확도를 조사한다. 이러한 분석을 바탕으로 최적의 송수신기 설계 방안을 제시한다.

송신단에서의 특징 추출 사용에 따른 정확도는 그림 2 의 결과를 통해 확인할 수 있다. 특징 추출의 사용 여부에 따라서 최소 10%, 최대 38%, 평균 26%의 정확도 차이가 관찰되었으며, 이는 송신단에서 특징 추출을 사용했을 때 높은 정확도를 보장할 수 있음을 시사한다. 해당 현상의 원인은 특징 추출을 위한 모델이 노이즈 채널을 고려하여 학습되었기 때문으로 판단되며, 이로 인해 원본 데이터에 비해 노이즈에 대한 강인함이 향상되어 더욱 적합한 특성을 반영할 수 있었다고 분석된다.

또한 노이즈 채널로 인한 성능 경향성은 그림 2 와 그림 4 를 통해 확인할 수 있다. 두 결과 모두 샘플링 주기가 증가함에 따라 정확도가 감소하는 현상을 관찰할 수 있다. 채널의 영향을 받지 않았을 때 샘플링 주기가 길더라도 높은 정확도를 유지할 수 있는 것은 수신기에 제공되는 정보량이 클래스의 수 대비 충분하기 때문으로 해석된다. 이는 샘플링 주기가 짧을 수록 분류기의 softmax 출력에서 나오는 최대 확률이 1 에 수렴하는 것을 통해 간접적으로 확인할 수 있다. 즉 샘플링 주기가 길 때는 최대 확률 값 대비 다른 확률 값과의 분산이 크기 때문에 노이즈 채널에 대한 영향에 더욱 취약하다는 것을 의미한다.

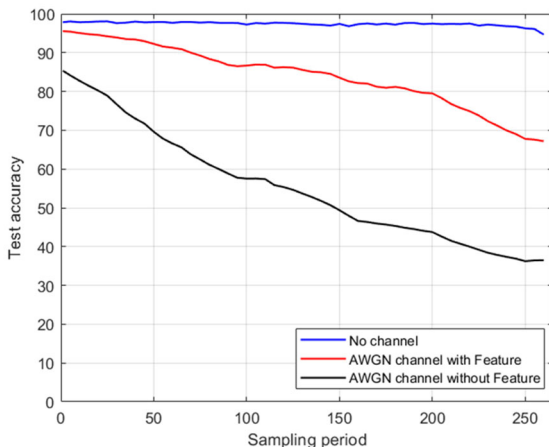


그림 2. 특징 추출 사용에 따른 정확도

압축률의 변화에 따른 샘플링 주기 별 정확도는 그림 3 의 결과를 통해 확인할 수 있다. 압축률에 대한 실험 결과를 볼 때, 단순히 정확도를 기준으로는 샘플링 주기가 1s 일 때가 가장 좋은 경우이지만, 통신에서는 한정된 자원에서 최선의 성능을 내는 것이 중요하기 때문에, 정확도와 함께 전송되는 데이터의 수

또한 고려되어야 한다. 따라서 min-max normalization 기법을 적용하여, 전송 데이터 수와 정확도를 0~1 사이의 score s_b, s_a 로 변환하고, penalty term 개념을 적용하여 $\alpha s_a - (1 - \alpha) s_b$ 를 최대화하는 설계 조건을 찾을 수 있다. 여기서 α 는 정확도와 전송 데이터수의 상대적인 중요도를 나타내는 0~1 사이의 weight 를 나타낸다. 예로 샘플링 주기 1s, 10s, 26s 를 대상으로 α 가 0.5 일 때는 10s 에서 압축률 0.7 인 경우가 score 기준 0.83 으로 최적이 된다.

본 연구는 후각 기반 데이터 통신 시스템의 효율성을 향상시키기 위한 기초적인 이론과 실제 응용 가능성을 탐색하였으며, 특히 후각 센싱과 같이 다양한 환경 요인에 영향을 받는 데이터의 신뢰성 있는 분류를 위한 최적의 송수신기 설계 방안을 제시한다.

본 연구에서는 전체 시계열 데이터를 사용했을 때 최적의 조건에 대해 다루었으며, 통신으로의 확장 가능성에 대한 선행 연구로서 의미를 가진다. 하지만 전체 데이터를 모두 수집하여 분류 작업을 진행하는 것은 위험 상황에 대한 사전 감지로 적합하지 않기 때문에, 지속적인 데이터 전송을 위한 통신 상황으로 확장이 필요할 것으로 보이고, 향후 연구 방향으로 진행하기에 적합하다고 생각한다.

후각 센싱 데이터의 원격 제어 및 분류를 위한 무선 통신 시스템 설계는 향후 스마트 환경 모니터링, 개인 건강 관리 및 산업 안전 등 다양한 분야에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

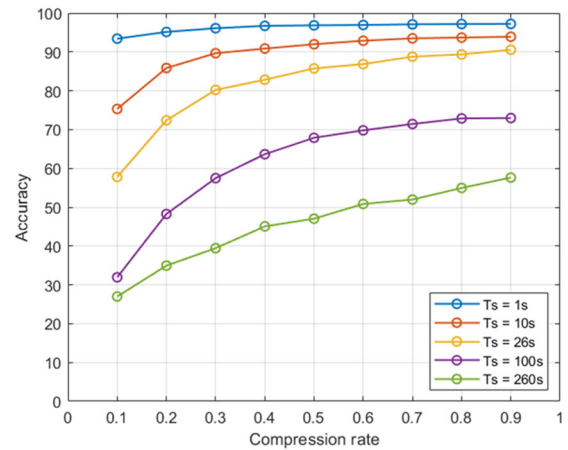


그림 3. 압축률에 따른 정확도

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음. (No. 2022R1A5A1027646.)

참고 문헌

- [1] K. Lee, I. Cho, M. Kang, J. Jeong, M. Choi, K. Y. Woo, K. Yoon, Y. H. Cho, and I. Park, "Ultra-low power e-nose system based on multi micro-LED-integrated, nanostructured gas sensors and deep learning", ACS Nano, vol. 17, pp. 539-551, 2023
- [2] K. Lee, I. Cho and I. Park, "E-Nose System Based on Ultra-Low Power Single Micro-LED Gas Sensor and Deep Learning," 2023 IEEE SENSORS, Vienna, Austria, 2023, pp. 1-4,
- [3] A. Vergara, R. Huerta, et al, "On the performance of gas sensor arrays in open sampling systems using inhibitory support vector machines," Sens. Actuators B: Chem., vol. 185, pp. 462-277, 2013.