

협동 로봇의 모터 결함 탐지 학습을 위한¹⁾ 선택적 FFT 기법

최민서¹, 유동연², 이정원^{1,2}

¹아주대학교 전자공학과

²아주대학교 AI융합네트워크학과

minseo24@ajou.ac.kr, dongso0125@ajou.ac.kr, jungwony@ajou.ac.kr

Flex-FFT for Learning Motor Fault Detection in Collaborative Robots

요 약

산업용 설비의 결함을 예측하기 위해 기기에 탑재된 다양한 센서의 시계열 데이터를 이용한 결함 진단 연구가 확대되고 있다. 센서의 시계열 데이터는 값의 특성이 명확하지 않을 경우, 특징 추출이 제한적이지만, 주파수 영역으로 변환하면 진폭, 피크 주파수 등 데이터의 정보를 다각도로 담고 있어 특성을 추출하는 데에 이점이 있다. 따라서, 본 논문은 FFT(Fast Fourier Transform) 기법을 이용해 분해된 데이터를 조합하여 학습에 적용하는 선택적 FFT 기법을 제안한다. 제안 기법은 협동 로봇의 진동 신호를 이용한 결함 진단에 적용하였으며, 기존 결함 진단 정확도 대비 최대 41.81% 향상된 성능을 보였다.

1. 서론

설비 기기·로봇과 같은 산업용 설비의 결함은 공장 가동 중단을 일으킬 수 있으며, 이는 막대한 손실을 발생시킨다[1]. 또한, 산업용 설비의 결함에 의해 안전하지 않은 작업 환경이 조성될 수 있다[2]. 이를 방지하기 위해 산업용 설비에 탑재된 다양한 센서들을 통해 얻은 전류, 진동, 온도 등의 시계열 데이터를 이용한 결함 탐지 연구가 꾸준히 이루어지고 있다. 하지만, 센서 데이터의 시계열 특성이 명확하지 않으면 정상·결함 신호 양상의 차이가 미흡해 정상·결함을 식별하는 데에 어려움이 있다[3]. 따라서, 시계열 데이터 특성 추출의 어려움을 보완하기 위해 주파수 영역 변환에 의한 시계열 데이터 분석 연구가 증가하고 있다. 주파수 영역은 진폭, 피크 주파수, 고유 주파수, 주파수 에너지 등 데이터의 다양한 특성을 담고 있어 데이터 특성 추출에 이점이 있다[4].

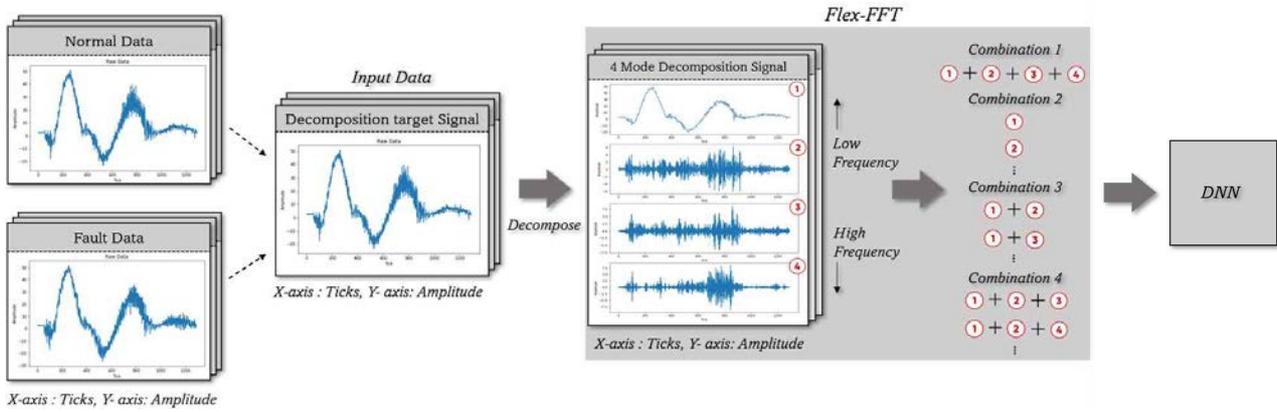
주파수 기반 데이터 분석 연구가 활발해짐에 따라 주파수 도메인 신호를 여러 개로 분해한 후, 재구성하는 다양한 신호분해 기법이 제안되었다.

FFT(Fast Fourier Transform) 기반 신호분해 기법은 설정 분해 모드 수에 따라 일정한 주파수 대역으로 신호를 분해하는 방법이며, 기초적인 진동 분석 방법이다. FFT를 적용한 신호분해 기법으로는 대표적으로 EMD(Empirical Mode Decomposition)[5]와 VMD(Variational Mode Decomposition)[6]가 있다.

EMD는 신호가 다수의 고유 함수 모드(Intrinsic Mode Function, IMF)로 구성됨을 가정하여, 신호를 IMF 별로 분해하는 기법이다. VMD는 비재귀적 모드 추출, 즉, 추정 중심 주파수로 동시에 신호가 분해되며, 노이즈 제거 필터가 있다[6]. EMD와 VMD에 의해 성능 향상을 이루었지만, EMD는 분해된 신호의 스케일이 작은 경우에만 IMF의 고유성을 보장할 수 있다[7]. 또한, VMD는 설정한 대역폭과 분해 개수에 따라 성능 편차가 크고, 내재 필터들과 파라미터 최적화에 많은 시간이 소요된다[8]. 하지만, FFT를 학습에 사용하는 경우, 계산량 축소에 의한 시간 비용 감소와 신호 손실이 없다는 이점이 있다. 따라서 본 논문은 FFT 기법을 통해 분해된 신호를 조합하여 학습하는 선택적 FFT 기법을 제안한다.

선택적 FFT를 협동 로봇의 모터 결함을 찾기 위해 자이로 센서와 가속도 센서 시계열 데이터를 입

1) 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1A2C1007400).



(그림 1) 선택적 FFT 기반 신호 분해·조합 방법

력으로 DNN 학습모델 구축하는데 적용한 결과, 4개의 모드로 분해한 신호의 조합에 따라 결함 탐지 모델 성능이 원본 신호 대비 36.6%~41.81%로 크게 향상되었으며, 최고 성능 92.07%를 얻을 수 있었다. 또한, FFT 주파수 분해를 위한 전처리 시간은 23.457s로 VMD 대비 최소 2215.01s 짧았다. 결과적으로, 일반적인 진동 신호의 경우 선택적 FFT 기반 분해 신호 조합에 의해 학습 성능이 크게 향상되었으며, 동시에 빠른 데이터 전처리가 가능함을 확인하였다.

2. 선택적 FFT에 의한 학습 성능 향상

2.1 센서 시계열 데이터 특징 추출

본 논문은 진동 신호를 이용해 마모된 기어에 의한 협동 로봇의 모터 결함 추출을 목표로 한다. 결함 신호와 정상 신호는 모두 같은 동작을 수행하지만, (그림 1)과 같이 결함 신호의 경우 정상 신호 대비 더 많은 노이즈 데이터가 포함되며, 일반적으로 노이즈 데이터를 고주파 신호로 분류한다. 따라서, 노이즈 데이터의 경향성을 갖는 고주파 신호들을 학습에 적용함으로써 협동 로봇의 모터 결함을 탐지한다.

2.2 선택적 FFT 기반 분할 데이터 조합

본 논문은 분해 대상 신호를 4개의 균일한 주파수 대역으로 분해하여 조합할 것을 제안한다. 즉, 분해 대상 신호의 특성이 많이 반영된 신호들을 조합하여 학습에 유용한 데이터를 반영한다. 조합 방법은 (그림 1)과 같이 원본 신호를 동일한 대역폭을 갖는 4개의 신호(①, ②, ③, ④)로 분해하여 더하는 방식이며, 사용자가 분해 대상 신호의 결함 특성을 보다 명확하게 탐지할 수 있는 조합을 선택한다. 이를 통해 협동 로봇의 모터 결함을 탐지할 수 있다.

3. 실험 및 평가

3.1 실험 환경 및 모델 학습

본 논문은 협동 로봇의 결함 탐지를 위해 자이로 센서와 가속도 센서를 통해 수집한 정상·결함 진동 신호를 주 데이터로 사용한다. 자이로 센서 데이터와 가속도 센서 데이터는 각각 x, y, z축으로 구성되어 있으며, 총 6개의 feature로 학습 데이터를 구성하였다. 학습 모델은 DNN(Deep Neural Network)을 사용하였으며, 구조는 <표 1>과 같다.

<표 1> DNN 구조

Input Size	Number of Layer			Output Size
	1st	2nd	3rd	
1290*6	6	15	7	2

Epochs는 100, Batch size는 32로 설정하였으며, 데이터셋을 섞어가며 수행한 실험 결과 10회의 평균으로 제안한 기법을 평가하였다.

3.2 평가

본 논문의 제안 기법을 기반으로 진동 신호를 4개의 신호로 분해한 후 조합하여 학습 성능을 평가하였다. 실험 결과는 아래 <표 2>와 같다.

<표 2> 분해 데이터 조합 실험 모델 정확도 결과

Combination 1 (Raw Data)				
①+②+③+④				
50.26%				
Combination 2				
①	②	③	④	
50.26%	92.07%	91.57%	89.19%	
Combination 3				
①+②	①+③	①+④	②+③	③+④
50.26%	50.26%	50.26%	89.79%	87.05%
Combination 4				
①+②+③	①+②+④	①+③+④	②+③+④	
50.26%	50.26%	50.26%	86.86%	

• *Combination 1* 실험 결과

모든 분해 신호를 더한 ①+②+③+④ 신호는 원본 신호와 동일하기 때문에 원본 신호의 성능인 50.26%로 도출되었으며, 본 실험에서 사용한 원본 신호의 경우 정상·결합 신호의 특성이 분명하지 않아 낮은 성능을 보였다.

• *Combination 2* 실험 결과

① 신호는 가장 낮은 주파수 대역의 신호로 분해 대상 신호의 메인 패턴을 의미하기 때문에 정상·결합 신호의 차이가 불명확해 50.26%의 성능이 도출되었다. 정상·결합 신호를 분류할 수 있는 고주파수 신호에 해당하는 ②, ③, ④의 경우 정상·결합 특성이 명확하게 다른 양상을 보여 높은 성능이 도출되었다.

• *Combination 3* 실험 결과

① 신호가 포함되는 경우, 정상·결합 신호의 특성 차이가 불명확해 원본 신호의 성능인 50.26%가 도출되었으며, ① 신호를 제외한 ②, ③, ④ 각 신호의 경우 정상·결합 특성이 명확해 원본 데이터의 성능 대비 최대 39.53% 높은 성능이 도출되었다.

• *Combination 4* 실험 결과

*Combination 3*과 같이 정상·결합 신호의 특성 차이가 불명확한 ① 신호가 포함되는 경우, 낮은 성능이 도출되었으며, ②, ③, ④ 신호의 경우 정상·결합 특성이 명확해 원본 신호의 성능 대비 36.6% 높은 성능이 도출되었다.

실험 결과, ②, ③ 신호를 포함하는 경우, 높은 성능이 도출됨을 확인하였다. 결합 신호뿐만 아니라 정상 신호에도 동작 중 노이즈가 발생하는데, 노이즈로 판단될 수 있는 신호는 주로 고주파수 대역인 ④ 신호에 포함된다. 이로 인해, ②, ③ 신호를 정상·결합 신호 분류에 사용하는 경우, ④ 신호보다 결합 특성이 더 명확하여 높은 성능을 보인 것으로 추측된다. 또한, 데이터 전처리의 평균 시간은 23.457s로 VMD(2238.47s) 대비 신속한 전처리 과정이 이루어짐을 확인하였다.

4. 결론

본 논문은 협동 로봇의 결합 탐지를 위해 신호를 분해하고 조합하는 선택적 FFT 기법을 제안한다. 실험 결과, 분해된 신호의 조합으로 최대 92.07%의 성능을 보였으며, 원본 데이터 성능 대비 약 41.81% 향상되는 우수한 결과를 보였다. 본 논문에서 제안한 기법을 통해 신호를 분해하고 조합함으로써, 신속하

고 효과적으로 로봇의 결합 탐지에 기여할 수 있다.

참고문헌

- [1] Tristan Plante, Lucas Stanley, Ashkan Nejadpak, Cai Xia Yang, "Rotating machine fault detection using principal component analysis of vibration signal", 2016 IEEE AUTOTESTCON, IEEE, 2016, 1-7
- [2] Adel Boudiaf, Abederrazek Djebala, Hocine Bendjma, Adel Balaska, Amine Dahane, "A summary of vibration analysis techniques for fault detection and diagnosis in bearing", 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control, International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), 2016, 37-42
- [3] Meng Gan, Cong Wang, Chang'an Zhu, "Construction of hierarchical diagnosis network based on deep learning and its application in the fault pattern recognition of rolling element bearings", Mechanical Systems and Signal Processing, 72-73, 92-104, 2016
- [4] Han-Yun Chen, Ching-Hung Lee, "Vibration Signals Analysis by Explainable Artificial Intelligence(XAI) Approach: Application on Bearing Faults Diagnosis", IEEE Access, 8, 134246-134256, 2020
- [5] Norden E. Huang, Zheng Shen, Steven R. Long, Manli C. Wu, Hsing H. Shih, Quanan Zheng, Nai-Chyuan Yen, Chi Chao Tung and Henry H. Liu, "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis", Royal Society, 454, 1971, 903-955, 1998
- [6] Konstantin Dragomiretskiy, Dominique Zosso, "Variational Mode Decomposition", IEEE Transactions on Industrial Informatics, 62, 3, 531-544, 2014
- [7] Xiyuan Hu, Silong Peng, Wen-Liang Hwang, "EMD Revisited: A New Understanding of the Envelope and Resolving the Mode-Mixing Problem in AM-FM Signals", IEEE Transactions on Signal Processing, 60, 3, 1075-1086, 2012
- [8] Jian Cheng, Yu Yang, Zhantao Wu, Haidong Shao, Haiyang Pan, Junsheng Cheng, "Ramanujan Fourier Mode Decomposition and Its Application in Gear Fault Diagnosis", IEEE Transactions on Industrial Informatics, 18, 9, 6079-6088, 2021