

다중 관점 시간 모델링을 위한 Multi-head TCN 기반 시계열 이상 탐지

박준희, 고영명
포항공과대학교

junparking@postech.ac.kr, youngko@postech.ac.kr

Time Series Anomaly Detection with Multi-head TCN for Multi-view Temporal Modeling

Park Jun Hui, Ko Young Myoung

Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

요약

시계열 이상탐지는 안전성과 직결되는 중요한 문제이다. 특히 제한된 연산 자원 환경에서도 높은 탐지 성능과 효율성을 동시에 만족하는 모델 설계가 요구된다. 이를 위하여 본 연구에서는 TCN 기반 이상탐지 모델인 ModernTCN 을 베이스라인으로 설정하고, 기존 Depthwise Convolution 이 단일한 시간적 관점만을 학습한다는 한계를 확인하였다. 이를 보완하기 위해 Transformer 의 Multi-head Attention 구조에서 영감을 받은 Multi-head TCN 구조를 제안한다. 다양한 시계열 이상 탐지 벤치마크 데이터셋에 대한 실험결과, 제안한 모델은 기존 ModernTCN 대비 전반적으로 향상된 이상탐지 성능을 보였으며, 효율적인 연산 구조를 유지하면서도 성능 개선이 가능함을 확인하였다.

I. 서론

현대 사회에서는 산업 자동화, 스마트 모빌리티, 사물인터넷(IoT) 등의 확산으로 인해 대규모 시계열 데이터가 지속적으로 생성되고 있으며, 이에 따라 시계열 분석은 다양한 산업 및 연구 분야에서 중요한 연구 주제로 부각되고 있다. 특히 시스템의 이상 상태를 조기에 탐지하는 시계열 이상 탐지는 안전성과 직결되는 핵심 문제로, 산업 설비 고장 진단, 차량 및 항공기 센서 분석 등 다양한 응용 분야에서 중요한 역할을 수행한다. 이상 탐지의 정확도가 낮을 경우 시스템 장애나 사고로 이어질 수 있기 때문에, 높은 탐지 성능과 신뢰성을 갖춘 모델에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다.

한편, 시계열 이상탐지는 공장과 같이 충분한 연산 자원과 저장 공간이 확보된 환경뿐만 아니라, 차량 내 센서나 엣지 디바이스와 같이 메모리와 연산 자원이 제한된 환경에서도 필수적으로 요구된다. 이러한 환경에서는 높은 성능뿐만 아니라, 제한된 리소스 하에서도 효율적으로 동작할 수 있는 모델 구조와 실시간 처리 능력이 중요하다. 따라서 시계열 이상 탐지 문제를 해결함에 있어, 성능과 효율성을 동시에 고려한 모델 설계가 필요하다.

이에 본 연구에서는 시계열 분석 모델 중에서도 메모리 사용량과 수행 시간 측면에서 효율적인 구조를 갖는 Temporal Convolutional Network(TCN) 기반 모델을 활용하여 시계열 이상 탐지 문제를 집중적으로 연구하였다. TCN 기반 모델 중 최근 우수한 성능을 보인 ModernTCN[1]을 베이스라인으로 설정하고, 해당 모델 구조의 한계를 파악하고 이를 보완하기 위한 새로운 구조를 제안한다.

II. 본론

ModernTCN 은 Depthwise Convolution 을 활용하여 각 변수 및 특징 차원에 대해 독립적으로 시간 축상의 정보를 학습함으로써 효율적인 시계열 표현을 가능하게 한다[2]. 그러나 기존 Depthwise Convolution 기반 구조는 각 특징이 단일한 관점에서만 시간적 의존성을 학습한다는 한계를 가진다. 즉, 하나의 특징 차원은 하나의 합성곱 필터를 통해서만 시간 축상의 패턴을 인식하게 되며, 다양한 형태의 시간적 관계를 동시에 포착하는 데에는 제약이 존재한다. 이러한 단일 관점의 시간적 모델링은 복잡한 이상 패턴이 존재하는 실제 시계열 데이터 환경에서 표현력 측면의 한계로 작용할 수 있다.

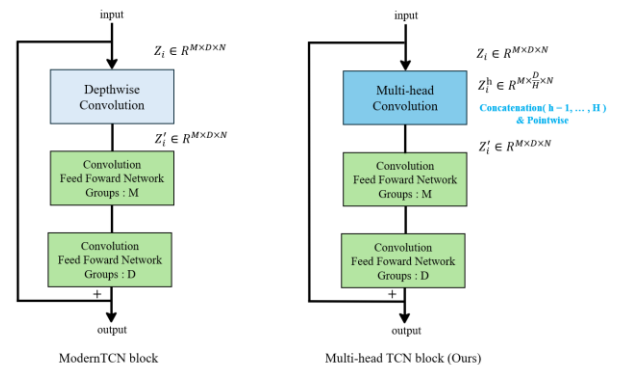


그림 1. Modern TCN 과 Multi-head TCN 의 구조도 비교

이에 본 연구에서는 기존 Depthwise Convolution 을 그대로 사용하는 대신, Transformer 의 Multi-head Attention 구조에서 영감을 받아 다중 특징 관점의

시간적 관계를 학습할 수 있는 Multi-head TCN 구조를 제안한다. 제안하는 구조에서는 입력 특징 차원을 여러 개의 head 로 분할하고, 각 head 에 독립적인 Temporal Convolution 을 수행한다. 이를 통해 모델은 동일한 시간 구간에 대해 서로 다른 필터 관점에서의 시간적 관계성을 병렬적으로 학습할 수 있으며, 단일 합성곱 필터로는 포착하기 어려운 다양한 형태의 시간적 의존성을 효과적으로 표현할 수 있다. 각 head 에서 추출된 시간적 특징들은 이후 채널방향으로 결합되며 1×1 Convolution 을 통해 다시 특징을 정제 및 조합한다. 제안한 Multi-head TCN 은 기존 TCN 의 효율성을 유지하면서도 표현력을 향상시킨다.

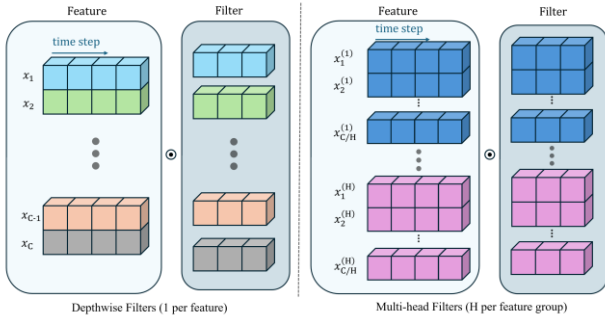


그림 2. Depthwise 와 Multi-head 의 관점 비교

본 연구의 실험은 시계열 이상 탐지 연구에서 널리 사용되는 다섯 개의 벤치마크 데이터셋(SMD, SWaT, PSM, MSL, SMAP)을 대상으로 수행하였다. 해당 데이터셋들은 다양한 산업 및 시스템 환경에서 수집된 다변량 시계열 데이터로 구성되어 있으며, 각 시점에 대해 정상 또는 이상 상태가 레이블로 제공된다. 이를 통해 제안한 모델의 이상 탐지 성능을 다양한 환경에서 비교 및 검증하였다. 모델의 성능 평가는 Precision, Recall, 그리고 F-score 를 기준으로 수행하였다. Precision 은 탐지된 이상 중 실제 이상 비율을, Recall 은 실제 이상 중 모델이 올바르게 탐지한 비율을 의미한다. F-score 는 Precision 과 Recall 의 조화 평균으로, 이상 탐지 성능을 종합적으로 평가하기 위한 지표로 사용된다. 실험 결과, 제안한 Multi-head TCN 은 모든 데이터셋에서 베이스라인인 ModernTCN 과 유사한 연산 규모를 유지하면서도 전반적으로 향상된 이상 탐지 성능을 보였다. 또한 다수의 특징을 하나의 필터로 처리하여 파라미터만 증가시킨 방식은, 특징 공간을 분할해 집중적으로 학습하는 Multi-head 구조 대비 성능이 오히려 저하되었음을 확인하였다.

III. 결론

본 연구에서는 기존 ModernTCN 의 Depthwise Convolution 이 각 특징에 대해 단일한 시간적 관점만을 제공한다는 점을 한계로 정의하고, 이를 보완하기 위해 Multi-head TCN 구조를 제안하였다. 제안한 구조는 여러 특징 관점에서 병렬적으로 분석함으로써, Transformer 의 Multi-head Attention 과 유사하게 다양한 시간적 관계를 효과적으로 포착한다. 그 결과, 제한된 연산 환경에서도 다중 관점 시간 모델링을 통해 모델 효율성을 유지하면서 시계열 이상 탐지 성능을 전반적으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

표 1. 모델별 성능 평가 결과

Metrics		Precision	Recall	F-score
Data				
SMD	Modern	0.8727	0.8164	0.8438
	Multi	0.8729	0.8201	0.8457
SWaT	Modern	0.9574	0.9033	0.9296
	Multi	0.9604	0.9193	0.9394
PSM	Modern	0.9864	0.9326	0.9587
	Multi	0.9875	0.9453	0.9653
MSL	Modern	0.8959	0.7493	0.8161
	Multi	0.8966	0.7518	0.8182
SMAP	Modern	0.9081	0.5593	0.6923
	Multi	0.9082	0.5629	0.6953

표 2. 모델별 파라미터 수와 평균 이상탐지 성능(F-score)

Model (Avg)	Modern (0.8481)	Multi 4 heads (0.8528)	Single head (0.8429)
Data			
SMD	273K	291K	347K
SWaT	8.26M	8.49M	9.12M
PSM	4.27M	4.70M	8.86M
MSL	102K	103K	105K
SMAP	2.24M	2.31M	2.48M

ACKNOWLEDGMENT

이 연구는 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No.RS-2019-II191906, 인공지능대학원지원(포항공과대학교))과 2025 년도 산업통상부 및 한국 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (과제번호: RS-2025-25458052).

참고 문헌

- [1] Donghao Luo and Xue Wang, "ModernTCN: A Modern Pure Convolution Structure for General Time Series Analysis," Proc. International Conference on Learning Representations (ICLR), 2024.
- [2] Andrew G. Howard et al., "MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications," arXiv, 2017.