학위논문요약서		
성명	**학과**	**해당 학위**
김준호	**기계공학과**	**박사**
학위개요	○ 논문제목 • 국문제목: 적합일반화분해 및 심층연산자신경망 기반 생성형 모델을 활용한 동적시스템의 상태 모니터링 • 영문제목: Proper Generalized Decomposition and DeepONet-based Generative Model for Condition Monitoring of Dynamical Systems • 논문심사합격일: 2025.06.11 • 지도교수: 박용화 교수	

주요 내용 요약

Ⅰ. 연구목적

이 논문의 주요 목표는 PGD 기반 축소 차원 모델(ROM)과 Modal-DeepONet을 활용한 생성 모델을 개발하여, 고장 진단에서의 데이터 불균형 문제를 해결하는 것입니다. 구조 동역학에서 자유도가 증가하면 시간 적분을 통한 해석의 계산 비용이 급격히 증가하기 때문에, PGD를 활용해 차원을 축소하고 정상 및 과도 응답을 효율적으로 계산할 수 있도록 하였습니다. 그러나 기존 ROM만으로는 여전히 계산량이 많아, 데이터셋 생성을 위한 AI 기반 생성 모델이 필요합니다. 이를 위해 Modal-DeepONet이 제안되었으며, 공간 모드를 네트워크에 통합하여 다양한 조건에서의 일반화 성능을 향상시켰습니다.

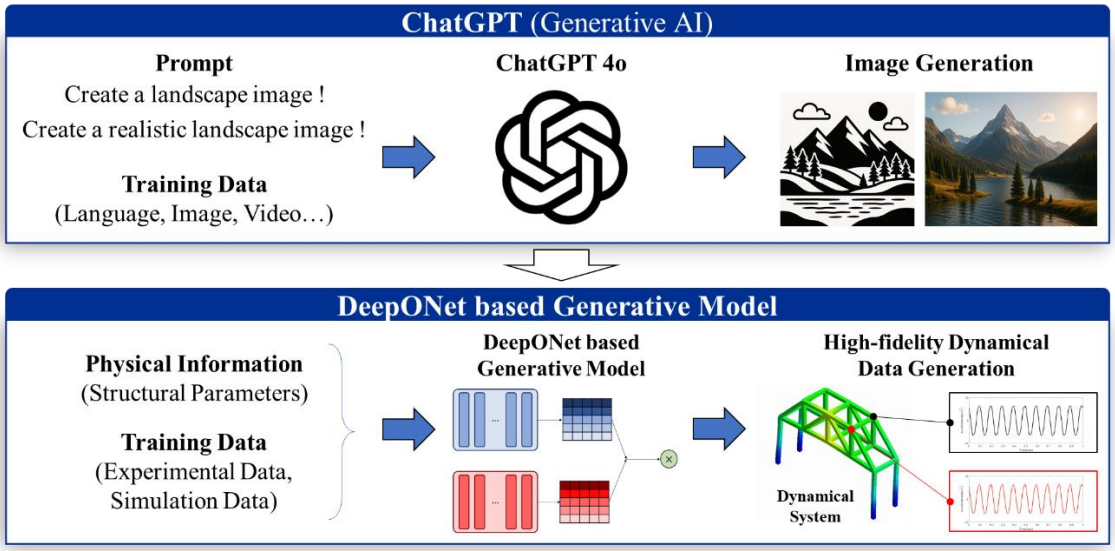

Figure 1. 연구 동기

Ⅱ. 연구내용

1. PGD와 슈팅 기법을 결합한 새로운 접근법 제안:

기존의 슈팅 기법은 큰 자유도를 가진 시스템에서 야코비안 행렬이 커져 계산 부담이 큽니다. 본 연구는 PGD를 이용하여 시간과 공간 문제를 분리하고, 공간 모드만으로 정상 상태를 설명하고 시간 영역은

뉴턴-랩슨으로 초기 조건을 보정함으로써 계산 효율을 크게 향상시켰습니다. 과도 응답은 시간 영역을 여러 구간으로 나누고, 고정점 반복을 통한 보강으로 정확도를 확보했습니다.

2. Modal-DeepONet 구조 제안 및 적용:

기존 DeepONet과 달리, 본 모델은 일반화 좌표(generalized coordinates)를 예측한 뒤, 이를 모드 행렬을 통해 물리 공간으로 변환합니다. 이를 통해 출력 차원을 줄이면서도 고차원 문제에 적용 가능한 정확도와 해석력을 확보할 수 있습니다. 구조는 입력 함수에서 잠재 표현으로 매핑하는 branch network, 도메인 정보를 인코딩하는 trunk network, 그리고 일반화 좌표를 물리적 응답으로 변환하는 모달 변환 계층으로 구성됩니다. 선형 문제에는 선형 고유모드(LNM), 비선형 문제에는 PGD 기반 모드가 사용됩니다.

3.트러스 구조물의 고장 진단을 위한 데이터 생성 및 검증:

데이터가 부족한 상황에서도 효과적인 고장 진단을 위해 PGD 기반 ROM과 Modal-DeepONet을 이용해 데이터를 생성하였습니다. 1D CNN 기반의 고장 진단 알고리즘에 대해, 충분한 데이터, 부족한 데이터, 증강된 데이터 조건을 비교하였고, Modal-DeepONet을 활용한 생성 데이터가 기존 SMOTE와 같은 기법보다 균열 크기 분류에 효과적임을 확인하였습니다.

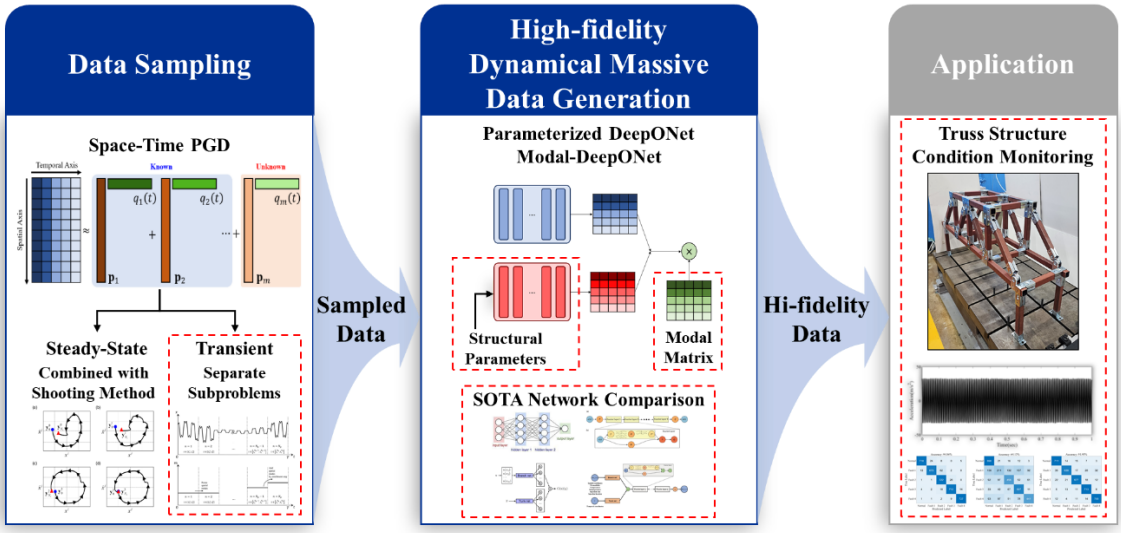

Figure 2. 연구 개요