

Szkoła Doktorska nr 5 Politechniki Warszawskiej
(miejsce zatrudnienia lub kształcenia)

STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

pt. „Zastosowanie sztucznej inteligencji w modelowaniu relacji konstytutywnych
hipersprężystości”

promotor: dr hab. inż. Marcin Gajewski, prof. PW

Rozprawa dotyczy modelowania konstytutywnego materiałów hipersprężystych z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego uzupełnionych o więzy mechaniki ośrodków ciągłych. Mimo że praca mieści się w obszarze inżynierii lądowej, łączy ona zagadnienia sztucznej inteligencji z klasyczną mechaniką ośrodków ciągłych. Przyjęto w niej tezę, że wprowadzenie więzów fizycznych do modeli uczenia maszynowego jest warunkiem koniecznym poprawnego — fizycznie dopuszczalnego i zdolnego do ekstrapolacji — odtwarzania relacji konstytutywnych, a modele wzbogacone o te więzy pozwalają zarówno odkrywać te relacje, jak i rozwiązywać zagadnienia brzegowe oraz identyfikować parametry materiałowe wyłącznie na podstawie danych przemieszczeniowych i sił reakcji podporowych.

Punktem wyjścia jest studium klasycznych metod uczenia maszynowego. Spośród trzynastu przebadanych algorytmów żaden nie spełnił wymagań modelowania konstytutywnego bez wprowadzenia wiedzy kierunkowej. Wykazano przy tym, że typowe metryki (RMSE, R^2) nie uwzględniają spełnienia więzów fizycznych ani zdolności do ekstrapolacji. Stwierdzono, że do tego zadania najlepiej nadają się metody generujące ciągłe, interpretowalne funkcje regresji.

W części poświęconej odkrywaniu związków konstytutywnych przedstawiono identyfikację parametrów klasycznych modeli hipersprężystości oraz określanie nowych relacji z wykorzystaniem metod regresji liniowej i konstytutywnych sieci neuronowych (CANN). Opracowano moduł regresji umożliwiający analizę pełnych, różnorodnych stanów deformacji oraz wprowadzono pojęcie macierzy naprężeniowej cech. Wykazano konieczność uwzględnienia drugiego niezmiennika deformacji izochorycznej dla zestawu danych eksperymentalnych Treloara, a także pokazano, że regresja i CANN prowadzą do odmiennych, lecz poprawnych modeli materiałowych.

Kolejna część rozprawy dotyczy rozwiązywania zagadnień brzegowych metodą sieci neuronowych informowanych fizyką (PINN). Na przykładzie zagadnienia liniowej teorii sprężystości wykazano równoważność implementacji w czystym środowisku PyTorch oraz z użyciem biblioteki DeepXDE, a także przeprowadzono szczegółową analizę zbieżności, obejmującą wpływ normalizacji zmiennych, architektury sieci, sposobu narzucania warunków brzegowych oraz strategii optymalizacji na dokładność i koszt obliczeniowy.

W rozdziale wieńczącym pracę podejście PINN rozszerzono na materiał hipersprężysty, rozwiązując zagadnienie brzegowe rozciąganej tarczy z otworem, a następnie identyfikując parametry konstytutywne modelu Yeoha. W tym celu zaadaptowano opisane w literaturze podejście do identyfikacji, w którym parametry materiałowe wyznaczane są łącznie z wagami sieci na podstawie pól przemieszczeń oraz historii obciążenia, opracowując dla niego modułową, rozszerzalną implementację, możliwą do zastosowania dla innych modeli konstytutywnych i zagadnień brzegowych. Potwierdzono odporność podejścia na szum pomiarowy o poziomie 1%, co wskazuje na możliwość jego zastosowania do rzeczywistych danych eksperymentalnych, np. pochodzących z cyfrowej korelacji obrazu. Ponadto stwierdzono, że dla zagadnień prostych metoda PINN nie przewyższa metody elementów skończonych, a jej potencjał ujawnia się dopiero w zagadnieniach odwrotnych.

Całość rozprawy potwierdza, że metody uczenia maszynowego z uwzględnieniem założeń fizycznych stanowią wartościowe i spójne z prawami mechaniki narzędzie modelowania konstytutywnego oraz identyfikacji parametrów materiałowych.

Słowa kluczowe: sztuczna inteligencja, uczenie maszynowe, konstytutywne sieci neuronowe (CANN), sieci neuronowe informowane fizyką (PINN), modelowanie konstytutywne, hipersprężystość, mechanika ośrodków ciągłych, analiza odwrotna.

.....Mikołaj Miecznikowski.....
(czytelny podpis kandydata)