

Streszczenie

Optymalizacja topologii konstrukcji ma na celu wyznaczenie optymalnego rozkładu materiału w zadanej przestrzeni projektowej przy uwzględnieniu równań równowagi oraz określonych kryteriów funkcjonalnych. W metodach opartych na gęstości, takich jak podejście SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), dominujący koszt obliczeniowy wynika z konieczności wielokrotnego rozwiązywania dużych układów równań metody elementów skończonych w każdej iteracji projektowej. Obciążenie to znacząco wzrasta przy rozdzielczościach istotnych z punktu widzenia inżynierskiego oraz w analizach trójwymiarowych, co ogranicza praktyczne zastosowanie optymalizacji topologii opartej na modelach o wysokiej rozdzielczości w eksploracji przestrzeni projektowej oraz analizach powtarzalnych.

Niniejsza rozprawa przedstawia wielopoziomowe podejście do optymalizacji topologii minimalizującej podatność przy globalnym ograniczeniu objętości w ramach liniowej teorii sprężystości, z weryfikacją prowadzoną w trakcie obliczeń. Główną strategią decyzyjną jest mechanizm zabezpieczający akceptację wielopoziomową (MFAS, Multifidelity Acceptance Safeguard), który okresowo ocenia proponowane rozwiązania uzyskane na siatce zgrubnej poprzez ich weryfikację na siatce dokładnej w trakcie procesu optymalizacji. Aktualizacje projektu są akceptowane wyłącznie wtedy, gdy spełniają kryteria tego mechanizmu; w przeciwnym razie są odrzucane, a stan modelu zgrubnego jest ponownie synchronizowany z ostatnim zaakceptowanym rozwiązaniem w oparciu o siatkę dokładną. Dzięki wbudowaniu procedury weryfikacyjnej bezpośrednio w pętlę obliczeniową, zamiast stosowania jej dopiero po zakończeniu optymalizacji, zaproponowane podejście ogranicza kumulację błędów modelu zgrubnego przy jednoczesnym zachowaniu wiarygodności wyników uzyskiwanych na siatce dokładnej.

W ramach zweryfikowanego podejścia wielopoziomowego uczenie maszynowe zostało włączone jako opcjonalny mechanizm inicjalizacji (warm-start), a nie jako zamiennik optymalizacji opartej na modelach fizycznych. Sieć konwolucyjna typu enkoder–dekoder (U-Net) generuje wstępne rozwiązania na siatce zgrubnej na podstawie geometrii oraz warunków brzegowych, przy czym wszystkie propozycje wygenerowane przez model podlegają temu samemu protokołowi akceptacji–odrzućcia podobnie jak rozwiązania uzyskane wyłącznie metodami zgrubnymi.

Przeanalizowano cztery warianty: metodę referencyjną na siatce dokładnej, nieweryfikowaną metodę wykorzystującą wyłącznie siatkę zgrubną, zweryfikowaną metodę wielopoziomową oraz zweryfikowaną metodę wielopoziomową z inicjalizacją typu U-Net (warm-start). Zaproponowane podejście oceniono na reprezentatywnych problemach testowych w dwóch i trzech wymiarach, a ukierunkowane badania ablacyjne pozwoliły na zbadanie wpływu częstotliwości weryfikacji oraz tolerancji akceptacji. Do oceny obserwowanych różnic w podatności oraz czasie obliczeń wykorzystano eksperymenty z parami identycznych ziaren losowych (paired-seed) oraz testy nieparametryczne. Uzyskane wyniki potwierdzają tezę, że przyspieszenie w optymalizacji topologii staje się istotnie bardziej wiarygodne, gdy jest powiązane z jawną weryfikacją realizowaną bezpośrednio w pętli obliczeniowej.