

Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Instytut Mechaniki Stosowanej

Jan Polak

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Building parametric geometric models for CAD
systems based on topological optimization results

Budowa parametrycznych modeli geometrycznych dla
systemów CAD na podstawie wyników optymalizacji
topologicznej

Promotor: prof. Michał Nowak
Poznań, 2023r.

1 Uzasadnienie celowości tematu

Projektowanie lekkich konstrukcji, pozwalających zminimalizować masę staje się coraz bardziej istotne w procesie projektowania mechanicznego. Problem nie polega tylko na zastosowaniu lekkich materiałów, ale przede wszystkim na użyciu odpowiednich metod projektowania. Podstawową metodą stosowaną obecnie w przemyśle jest wykorzystanie optymalizacji strukturalnej jako sposobu na projektowanie konstrukcji lekkich, ale o wysokiej wytrzymałości. W połączeniu z metodami wytwarzania addytywnego [1–3], optymalizacja strukturalna jest doskonałym sposobem na osiągnięcie rozwiązań znacznie przewyższających rozwiązania możliwe do uzyskania przy zastosowaniu tradycyjnych metod projektowania i wytwarzania.

Oprogramowanie do optymalizacji strukturalnej, z konieczności musi bazować na metodach analizy strukturalnej. Te z kolei - a dominuje tutaj metoda elementów skończonych - wymagają dyskretyzacji analizowanego obszaru, a więc i wynik optymalizacji strukturalnej otrzymywany jest w postaci siatki elementów skończonych. W przypadku zastosowania addytywnych metod wytwarzania problem obróbki wyników może ograniczyć się do wygładzenia powierzchni zoptymalizowanej geometrii. Ale w wielu sytuacjach, a szczególnie gdy po optymalizacji potrzebny jest nadal model parametryczny konieczne jest przeniesienie wyników optymalizacji do systemu CAD, a więc zachodzi konieczność zbudowania modelu parametrycznego [4–7].

W rozprawie podjęto problematykę konstrukcji parametrycznego modelu zbudowanego z prostych geometrii oraz praktycznego zastosowania takiego modelu w procesie przygotowania do wytwarzania addytywnego. Parametryczny model zbudowany z prostych brył został wybrany ze względu na jego prostą obróbkę w systemach CAD, zarówno ręczną, jak i w sposób zautomatyzowany.

2 Cel i zakres pracy

Problem budowy modelu parametrycznego na podstawie wyników optymalizacji topologicznej jest dobrze zbadany i opisany dla dwuwymiarowej domeny optymalizacji. Istnieje wiele podejść, w dużej mierze opartych na technikach rozpoznawania obrazu. Dodanie dodatkowego wymiaru znacząco zwiększa złożoność topologiczną rozwiązań, a co za tym idzie złożoność modeli parametrycznych. Ilość badań i dostępnych podejść do problemów trójwymiarowych jest ograniczona.

Kluczowym celem pracy jest badanie problemu budowy modelu parametrycznego zbudowanego z prostych brył dedykowanego dla biomimetycznego

systemu optymalizacji strukturalnej, rozwijanego na Politechnice Poznańskiej. System, w porównaniu do dominującego na rynku podejścia SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), działa bezpośrednio na siatce elementów skończonych, która jest modyfikowana iteracyjnie przy użyciu biomimetycznego algorytmu bazującego na procesie wzrostu kości beleczkowej. Wyjściowa siatka nie wymaga dodatkowej obróbki, i może zostać wprost użyta jako wejście algorytmu rozpoznawania cech. Przeprowadzone badania ograniczają się do rozpoznawania kształtów przestrzennych działa poprawnie dla układów belkowych, stanowiących istotę rozwiązania dla szerokiego spektrum zadań optymalizacji strukturalnej.

W ramach pracy przeprowadzono szereg zadań badawczych obejmujących:

- przegląd literatury, dostępnych podejść i algorytmów,
- ocenę jakości siatki elementów skończonych generowanej przez biomimetyczny system optymalizacji, identyfikację problemów oraz wydano rekomendacje mające na celu poprawę jakości generowanej siatki,
- wybór dwóch potencjalnych podejść - rozpoznawania cech opartego na transformacji Hougha oraz rozpoznawania cech bazującego na skeletonizacji, implementację proponowanych podejść,
- badania obu podejść używając przypadków badawczych dostępnych w literaturze, syntetycznych przypadków testowych oraz rzeczywistych siatek wygenerowanych przez biomimetyczny system optymalizacji. Badania obejmowały zarówno porównania zaproponowanych miar jakości, jak i analizę strukturalną wygenerowanego modelu parametrycznego,
- badanie użyteczności przedstawionych podejść w przemysłowym procesie projektowania i przygotowania do produkcji

3 Struktura rozprawy doktorskiej

Praca składa się z jedenastu rozdziałów. Do pracy dołączono słownik skrótów oraz spisy tabel i rysunków.

Pierwszym rozdziałem jest wstęp. Drugi rozdział prezentuje istniejący w literaturze stan wiedzy w zakresie tematu badań. Trzeci rozdział zawiera opis biomimetycznego podejścia do optymalizacji strukturalnej. Unikalne cechy podejścia, w szczególności przetwarzanie “warstwa po warstwie” oraz dedykowany generator siatki stanowią punkt wyjścia do dalszych badań i

wymagają szerszego omówienia. Czwarty rozdział definiuje szczegółowe cele badawcze pracy.

W piątym rozdziale dokonana jest ocena bieżącego stanu systemu optymalizacji oraz wydane są rekomendacje dalszego rozwoju. Celem szóstego rozdziału jest badanie nad transformacją Hougha w kontekście rozpoznawania cech wyników optymalizacji strukturalnej. Przedstawione jest działanie algorytmu, jego możliwości użycia w kontekście badań oraz proponowane są miary oceny zgodności modelu parametrycznego z danymi wejściowymi. Siódmy rozdział opisuje podejście bazujące na skeletonizacji siatki wejściowej. Badane podejście wykorzystuje szkielet do wygenerowania początkowego rozwiązania, które jest iteracyjnie ulepszone przy wykorzystaniu algorytmu ewolucyjnego. W ósmym rozdziale omówione są praktyczne aspekty zastosowania przebadanych podejść oraz opisany jest hybrydowy proces przemysłowy umożliwiający zastosowanie wyników badań razem z klasycznym podejściem do obróbki wyników optymalizacji.

Rozdział dziewiąty opisuje wyniki badań. Kolejne podrozdziały opisują kolejno: rezultaty poprawy generatora siatki systemu biomimetycznej optymalizacji, rezultaty testów wykrywania cech przy użyciu transformacji Hougha, rezultaty testów wykrywania cech przy użyciu skeletonizacji oraz wyniki aplikacji zaproponowanego procesu do przygotowania rzeczywistego wyniku optymalizacji do wytwarzania metodami addytywnymi. Rozdział dziesiąty zawiera dyskusję oraz krytyczną refleksję nad wynikami pracy, a rozdział jedynasty zawiera wnioski oraz opis rekomendacje przyszłych badań.

4 Główne wnioski rozprawy doktorskiej oraz jej znaczenie teoretyczne i praktyczne

Celem rozprawy doktorskiej było zbadanie zagadnienia budowy parametrycznych modeli geometrycznych dla systemów CAD na podstawie wyników optymalizacji topologicznej, w szczególności modeli belkowych. Na podstawie przeprowadzonych badań wyciągnięto następujące wnioski:

- generator siatki elementów skończonych, będący częścią biomimetycznego systemu optymalizacji, po analizie oraz wdrożeniu rekomendowanych poprawek spełnia wszystkie wymagania konieczne do wykorzystania wyników w procesie przemysłowym,
- rozpoznawanie cech za pomocą transformacji Hougha działa poprawnie dla danych testowych. Dla danych rzeczywistych wysoka zależność

wyników od jakości wejściowych danych czyni detekcję problematyczną i dalsze badania są konieczne przed przemysłowym wykorzystaniem podejścia,

- podejście oparte na skeletonizacji działa poprawnie zarówno dla danych testowych, jak i rzeczywistych danych. Badane podejście zostało zweryfikowane przy użyciu rzeczywistych danych pochodzących z projektu BioniAMoto i wykazano możliwości wdrożenia wyników,
- zaproponowane hybrydowe podejście daje możliwość łatwego dostosowania wyników optymalizacji do wymogów wytwarzania addytywnego, otwierając tym samym dalsze możliwości badań nad samym procesem przygotowania danych, który jest krokiem pośrednim między optymalizacją strukturalną, a wytwarzaniem.

Uzyskane wyniki stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie:

- rozpoznawania cech opartego o skeletonizację z wykorzystaniem algorytmu ewolucyjnego do optymalizacji początkowego rozwiązania,
- opisu hybrydowego procesu przygotowania wyników optymalizacji do wytwarzania modelu metodami addytywnymi.

Literatura

- [1] W. Wang, D. Munro, C. C. Wang, F. van Keulen, and J. Wu, “Space-time topology optimization for additive manufacturing: Concurrent optimization of structural layout and fabrication sequence,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 61, pp. 1–18, 2020.
- [2] Z. Jihong, Z. Han, W. Chuang, Z. Lu, Y. Shangqin, and W. Zhang, “A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges,” *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 34, no. 1, pp. 91–110, 2021.
- [3] Y. Saadlaoui, J.-L. Milan, J.-M. Rossi, and P. Chabrand, “Topology optimization and additive manufacturing: Comparison of conception methods using industrial codes,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 43, pp. 178–186, 2017.

- [4] S. Larsen and C. G. Jensen, “Converting topology optimization results into parametric cad models,” *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 6, no. 3, pp. 407–418, 2009.
- [5] M. Sehmi, J. Christensen, C. Bastien, and S. Kanarachos, “Review of topology optimisation refinement processes for sheet metal manufacturing in the automotive industry,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 58, pp. 305–330, 2018.
- [6] A. Mandhyan, G. Srivastava, and S. Krishnamoorthi, “A novel method for prediction of truss geometry from topology optimization,” *Engineering with Computers*, vol. 33, no. 1, pp. 95–106, 2017.
- [7] A. Amroune, J.-C. Cuillère, and V. François, “Automated lofting-based reconstruction of cad models from 3d topology optimization results,” *Computer-Aided Design*, vol. 145, p. 103183, 2022.