Recenzja spełnia wymogi formalne

dr hab. inż. Bartłomiej Błachowski, prof. IPPT PAN
Zakład Technologii Inteligentnych
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa
email: bblach@ippt.pan.pl

Warszawa, 29 czerwca 2023 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Kamila Korusa
pt. „Digital twins of bridges: establishing principles of virtualization with practical use cases"

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji jest pismo dr hab. inż. Marcina Stańka, profesora Politechniki Śląskiej - Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej, z dnia 12 maja 2023 r. i dołączona do niego rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Kamila Korusa pt. *„Digital twins of bridges: establishing principles of virtualization with practical use cases"*.

Praca powstała w Katedrze Mechaniki i Mostów. Promotorem Doktoranta jest Pan prof. dr hab. inż. Marek Salamak, a promotorem pomocniczym dr Jan Winkler.

2. Tematyka pracy

Rozprawa dotyczy zagadnień związanych z tworzeniem cyfrowych bliźniaków mostów i wskazuje dwa sposoby ich wykorzystania:

I. Optymalizację projektu mostu łukowego z uwzględnieniem różnej konfiguracji wieszaków.
II. Aktualizację geometrycznego modelu mostu z wykorzystaniem danych pomiarowych w postaci chmury punktów.

Oba zagadnienia są aktualne badawczo i stanowią istotny fragment żywego nurtu optymalizacji i monitorowania stanu technicznego konstrukcji inżynierskich. Przedstawione zagadnienia zostały przeanalizowane w odniesieniu do rzeczywistych obiektów mostowych co dodatkowo podnosi wartość praktyczną pracy. Wykazano zalety stosowania cyfrowych bliźniaków mostów i ich przewagę nad tradycyjnymi modelami geometrycznymi typu CAD (ang. *Computer Aided Design*) czy nawet modelami semantycznymi tworzonymi z wykorzystaniem technik BIM (ang. *Building Information Modeling*). Tematyka rozprawy ma zatem niezaniedbywalny potencjał inżynierski. Podjęcie tak określonej tematyki badań należy uznać za w pełni uzasadnione.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Rada Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport
wpłynęło dnia 3.07.2023
nr 134 zał. —

Wpłynęło dnia 3.07.2023 r.

3. Zakres i treść rozprawy

Rozprawa liczy 205 stron i została napisana w języku angielskim. Podzielona została na 6 rozdziałów zakończonych 4 załącznikami, spisem literatury i podziękowaniami oraz wymaganymi Ustawą krótkim i rozszerzonym streszczeniem sformułowanym zarówno w języku angielskim jak i polskim. Bibliografia liczy 357 pozycji, w tym 1 pozycja współautorstwa Doktoranta, która jest indeksowana w bazie *Scopus*. Dodatkowo Doktorant opublikował 1 artykuł w czasopiśmie branżowym poświęconej tematyce mostowej E-MOSTY (ISSN 2336-8179).

W Rozdziale 1 (*Introduction*) Doktorant zwięźle charakteryzuje motywację do podjęcia tematyki rozprawy, umieszcza ją w szerszym kontekście związanym z potrzebą ciągłego rozwoju inżynierii, w szczególności inżynierii lądowej. Przywołuje dane ekonomiczne i społeczne będące motorem tego rozwoju. Rozdział zamyka zwięzłe omówienie celów rozprawy oraz organizacja dalszej części pracy.

Rozdział 2 (*Digital twins – the next wave in simulations*) poświęcono przedstawieniu zarysu historycznego i poszczególnych etapów rozwoju konceptu cyfrowego bliźniaka w ogólności przywołując pierwsze zastosowania wprowadzone przez NASA w inżynierii kosmicznej. W tym rozdziale przedstawiono również obszerny przegląd literatury i trendy rozwoju technologii cyfrowych bliźniaków na przestrzeni ostatnich lat. Rozdział zakończono ilustracją przedstawiającą ciekawe graficzne podsumowanie w postaci chmury słów kluczowych występujących w publikacjach dotyczących cyfrowych bliźniaków mostów.

W rozdziale 3 (*The concept of digit twins of bridges*) szczegółowo omówiono pojęcie cyfrowych bliźniaków mostów i ich elementów składowych. Kolejno w punktach 3.2 oraz 3.3 omówiono dwie najczęściej stosowane technologie związane z pojęciem cyfrowego bliźniaka mostu: tj. BIM i związany z nim standard IFC (ang. *Industry Foudation Classes*) oraz wspierane uczeniem maszynowym Monitorowanie Stanu Technicznego Konstrukcji (SHM). Dodatkowo Autor zauważa korzyści płynące z popularyzacji w środowisku inżynierskim techniki programowania graficznego do tworzenia parametrycznych modeli konstrukcji i ich późniejszej optymalizacji. W podrozdziale 3.2.2.5 Autor przedstawia przykład tworzenia modelu semantycznego dla sekcji pomostu z wykorzystaniem pliku w standardzie IFC.

Rozdział 4 (*Optimization using visual programming and genetic algorithm*) jest jednym z najważniejszych rozdziałów rozprawy i poświęcony jest optymalizacji konstrukcji mostu łukowego o wielu parametrach projektowych. W rozdziale tym przedstawiono opis programu stworzonego przez Autora przy użyciu języka programowania graficznego *Dynamo* oraz biblioteki elementów skończonych o nazwie *BriefFiniteElement.NET*. Do optymalizacji sformułowanego zadania wykorzystano algorytm genetycznych zaimplementowany w pakiecie *Dynamo Refinery*.

Rozdział zakończony został przykładem numerycznym ilustrującym porównanie optymalnego rozwiązania uzyskanego przez Autora z projektem mostu łukowego znajdującego się przy drodze ekspresowej S3 w środkowo-zachodniej Polsce.

W rozdziale 5 (*Generating synthetic data for point clouds' machine learning automation*) przedstawiono przykład wykorzystania syntetycznie otrzymanej chmury punktów do trenowania sieci neuronowej w celu semantycznej segmentacji danych pomiarowych. Docelowo dane te uzyskiwane będą w wyniku pomiaru skanerem laserowym. Ze względu jednak na pracochłonność procesu oznaczania danych z rzeczywistych pomiarów Autor proponuje stworzenie danych symulacyjnych, które w znaczący sposób pozwolą zautomatyzować proces uczenia. Swój cel Autor

osiąga tworząc program o nazwie *DynamoPCSim* wykorzystujący sieć neuronową znaną jako *PointNet*.

W kończącym rozprawę Rozdziale 6 Doktorant podsumowuje przedstawione przez siebie wyniki symulacji i zarysowuje przyszłe kierunki badań nad tworzeniem cyfrowych bliźniaków mostów.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Rozprawa poświęcona jest problematyce tworzenia cyfrowych bliźniaków mostów, w tym optymalizacji modeli parametrycznych konstrukcji mostowych oraz aktualizacji modeli geometrycznych istniejących mostów na podstawie danych w postaci chmury punktów. Obydwa tematy są aktualne badawczo i dobrze wpisują się w kierunek badawczy związany z nowoczesnymi metodami optymalizacji i monitorowania stanu technicznego konstrukcji inżynierskich.

Doktorant sprawnie posługuje się metodyką prowadzenia badań naukowych w swojej dyscyplinie, to jest 1) rozpoczyna pracę od zarysowania szerokiej problematyki; 2) formułuje matematycznie i analizuje poszczególne zadania, omawia ich warianty i szczególne przypadki; 3) opracowuje numeryczne metody rozwiązania i weryfikuje je na szeregu reprezentatywnych zadań; 4) proponuje i analizuje możliwość praktycznej realizacji opracowanej metodologii; 5) omawia tło literaturowe i umiejscawia w nim swoje wyniki. Taki schemat badań, odzwierciedlony w strukturze rozprawy, potwierdza naukową dojrzałość Doktoranta.

Za interesujące i istotnie oryginalne elementy rozprawy należy uznać przede wszystkim:

- Klarowną i jednolitą systematyzację metodyki tworzenia cyfrowych bliźniaków, poprzez rozszerzenia pojęcia modelu geometrycznego CAD i semantycznego BIM.
- Zastosowanie programowania graficznego przy użyciu języka *Dynamo* w rozwiązywaniu różnorodnych zagadnień inżynierskich.
- Opracowanie dwóch programów obliczeniowych (*BriefFiniteElement.NET* i *DynamoPCSim*) wykorzystujących narzędzia i biblioteki numeryczne udostępniane na licencji *open source*.
- Opracowanie szeregu przykładów obliczeniowych ilustrujących poszczególne etapy tworzenia cyfrowych bliźniaków mostów.
- Analizę porównawczą otrzymanych wyników symulacji numerycznych z danymi dotyczącymi rzeczywistych obiektów mostowych.

Docenić należy również przeprowadzone w 3 rozdziale pracy kompleksowe opracowanie metodyki tworzenia cyfrowych bliźniaków mostów. W rozdziale tym wykazano, że inwestowanie w tworzenie realistycznych modeli mostów zwraca się na wielu etapach ich użytkowania: poczynając praktycznie już od fazy ich projektowania, poprzez monitorowanie ich stanu technicznego w czasie rzeczywistym, kończąc na prognozowaniu ich żywotności.

Na szczególne podkreślenie zasługuje szeroki zakres przeprowadzonych badań, który obejmuje dwa odległe tematy wymagające zastosowania zróżnicowanych metod analizy teoretycznej i technik numerycznych. Objętość tematyczna i struktura pracy świadczy o biegłości Doktoranta w teoretycznej i numerycznej pracy badawczej.

Rozprawa ma charakter badań podstawowych, jednakże opracowane metody odnoszą się bezpośrednio do rzeczywistych problemów projektowych i ich potencjał aplikacyjny należy ocenić jako bardzo istotny. Dotyczy to zarówno zasygnalizowanej w pracy możliwości optymalizacji projektów konstrukcji mostowych jak i aktualizacji ich modeli geometrycznych przy użyciu chmury punktów.

5. Pytania i uwagi dyskusyjne

Recenzent nie zauważył w rozprawie żadnych większych błędów ani zaniedbań. Poniższe uwagi i pytania mają jedynie charakter dyskusyjny i w zamierzeniu mają przyczynić się do zwiększenia przejrzystości i walorów poznawczych rozprawy.

- Na stronie 70 Autor przedstawia schemat blokowy ilustrujący poszczególne moduły składające się na cyfrowego bliźniaka mostu. Elementy składowe tego schematu to centralna baza informacji o konstrukcji w standardzie IFC, moduł odpowiadający za analizę konstrukcji metodą elementów skończonych (MES) oraz interfejs użytkownika w postaci modułu programowania graficznego. Poniżej schematu w opisie Autor przywołuje klasyczną zasadę programowania obiektowego tj. *Zasadę Pojedynczej Odpowiedzialności*, która ma sprawić, że poszczególne składowe cyfrowego bliźniaka mają tylko jeden powód do zmiany. Jest to bardzo ważna zasada i automatycznie generuje ona pytanie: Czy w zaproponowanym podejściu można zastosować inne zasady SOLID? Np. *Open-Closed Principle* postulującą, aby system był otwarty na rozbudowę a zamknięty na modyfikację?

- We wzorze (4-17) Autor zawarł sformułowanie rozszerzonej funkcji celu składającej się z funkcji kosztu materiału oraz funkcji kary, aktywnej, gdy przekroczone zostają ograniczenia związane z wytężeniem elementów konstrukcyjnych. Wprowadzono tutaj też współczynnik kary o wartości 10^6. Wg jakiego kryterium dobrano wartość tego współczynnika?

- Na rys. 4-10 (str.92) zamieszczono studium parametryczne funkcji kosztu w zależności od liczby wieszaków i strzałki łuku. Analizowano 4 warianty układu wieszaków: pionowy, promienisty, ukośny oraz siatkowy, a na wykresie wyróżniony trzy obszary rozwiązań związane z różnymi wartościami funkcji kosztu tj. rozwiązania niespełniające ograniczeń, rozwiązania spełniające ograniczenia o wartościach funkcji kosztu większych niż rozwiązanie referencyjne oraz rozwiązania spełniające ograniczenia o wartościach niższych niż rozwiązanie referencyjne. Powstaje tutaj pytanie: Dlaczego dla wszystkich wariantów układu wieszaków poza układem promienistym obszary te tworzą zbiory spójne, natomiast układ promienisty generuje naprzemiennie rozwiązania spełniające ograniczenia rozdzielane rozwiązaniami niespełniającymi ograniczeń (rys.4-10b)?

- Na str. 116 w zadaniu dotyczącym generowania zbioru punków metodą śledzenia promieni Doktorant podaje, że obliczenia na komputerze typu laptop z procesorem AMD zajęły 13 godz. i 37 min. Czy tego typu obliczeń nie można by znacząco przyspieszyć wykorzystując obliczenia równoległe na karcie graficznej GPU?

6. Pytania i uwagi redakcyjne

Rozprawa sformułowana jest w języku angielskim. Jej angielszczyzna i skład są czytelne i nie wymagają istotnych poprawek. Poniższe uwagi nie mają charakteru merytorycznego, a jedynie techniczno-redakcyjny.

- Ogólna uwaga do wszystkich symboli stosowanych we wzorach, w opisie pod wzorami i w tekście. Dużą poprawę czytelności rozprawa zyskałaby przez zastosowanie takiej samej pochyłej czcionki w tekście do wyróżnienia symboli matematycznych. Uwaga dotyczy

wszystkich rozdziałów pracy

- Na stronie 8 cytowana w najniższej położonej tabelce publikacja ma ucięty tytuł, chodzi zapewne o pracę o numerze [155]
- Na stronie 15 napisano Boening, chodziło zapewne o firmę Boeing
- Na stronie 75 zastosowano akronim VL do zwrotu *visual programming* chodziło raczej o VP
- Na stronie 87 napisano, że wyniki testów obciążeniowych mostu przeprowadzone w 2011 roku przedstawiono w pracy [60]. Chodziło raczej o inną pracę, gdyż [60] to "*Digital Twins in health care: Ethical implications of an emerging engineering paradigm*, Front. Genet. 9 (2018) 1–11."

7. Podsumowanie

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Kamila Korusa dotyczy dwóch aktualnych tematów związanych z cyfrowymi bliźniakami mostów: optymalizacji kosztu oraz aktualizacji modelu geometrycznego. Rozwiązując postawione problemy badawcze Doktorant posłużył się metodyką prowadzenia badań naukowych i wykazał się umiejętnością samodzielnego ich prowadzenia. Osiągnięte wyniki należy uznać za oryginalne i interesujące dla szerszego środowiska naukowego. Rozprawa generuje dalsze problemy badawcze, co potwierdza jej istotność. Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne mają charakter techniczny i nie umniejszają wartości pracy.

Recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez obowiązującą ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz.U. 2018 poz. 1668) z późniejszymi zmianami. Wnioskuję o dopuszczenie rozprawy Pana mgr. inż. Kamila Korusa do publicznej obrony.

Wnioskuję również o wyróżnienie pracy. Wniosek ten uzasadniam ponadprzeciętnie szerokim zakresem istotnie oryginalnych badań przeprowadzonych przez Doktoranta, zarówno teoretycznych, jak i numerycznych, które w moim przekonaniu mogłyby posłużyć za podstawę dwóch oddzielnych prac doktorskich.

Recenzję podpisał
Bartłomiej Błachowski