

dr hab. inż. Anna M. Rakoczy
Zakład Geotechniki, Mostów i Budowli Podziemnych
Instytut Dróg i Mostów
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Warszawska
Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa
e-mail: anna.rakoczy@pw.edu.pl

OPINIA

Rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Kamila Korusa na temat: „Digital twins of bridges: establishing principles of virtualization with practical use cases”.

1. Podstawa Opracowania Recenzji

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport (pismo1460/UMC/RB0-3/2023). Zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport z dnia 27 kwietnia 2023 roku została wyznaczona na Recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Kamila Korusa, a jej przewodniczący dr hab. inż. Marcin Staniek zwrócił się do mnie z prośbą o przyjęcie obowiązków Recenzenta i opracowanie opinii. Niniejsza opinia została wykonana z uwzględnieniem Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz.U. z 2020 r. poz. 85, z późn. zm.)

2. Sylwetka Kandydata

Pan mgr. inż. Kamil Korus uzyskał tytuł magistra 19 marca 2019 roku na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej. W październiku 2019 roku rozpoczął studia doktoranckie w tematyce „Visualisation of Bridges in the form of Digital Twins”. Z dostępnych informacji nie wynika, aby Pan mgr. inż. Kamil Korus ubiegał się uprzednio o nadanie stopnia doktora.

Pan mgr. inż. Kamil Korus od lipca 2017 roku obejmuje stanowisko inżyniera Building Information Modeling (BIM) w firmie CADMost Project. Podczas tego okresu, Doktorant rozwijał swoją praktyczną wiedzę z zakresu BIM, programowania zarówno w tradycyjnych językach C#, Python, jaki i graficznego oraz uczenia maszynowego. Efektem są publikacje, spośród których na szczególną uwagę zasługuje artykuł w czasopiśmie Engineering Structures oraz wystąpienia na międzynarodowych konferencjach.

Pan mgr. inż. Kamil Korus wykazuje również sporą aktywność w zakresie pozyskiwania grantów i odbywanych stażów m.in. w Arizona State University (USA), University of Technology Budapest (Węgry) oraz Mietrung University of Civil Engineering in Tuy Hoa (Wietnam), finansowane przez NAWA.

3. Przedstawienie informacji o ocenianej rozprawie doktorskiej

3.1. Tytuł rozprawy doktorskiej stanowiącej podstawę ubiegania się w aktualnym postępowaniu o nadanie stopnia doktora:

„Digital twins of bridges: establishing principles of virtualization with practical use cases”.

„Cyfrowe bliźniaki Mostów: utworzenie podstaw wirtualizacji z praktycznymi sposobami użytkowania”

3.2. Wskazanie oraz ocena celu pracy kandydata,

Zasadniczym celem rozprawy doktorskiej było określenie podstaw tworzenia cyfrowych bliźniaków (DT) mostów i wskazanie sposobów ich wykorzystywania. Wpisuje się to w ogólne trendy trwającej cyfrowej transformacji. DT rozumiane są tutaj jako cyfrowe odwzorowania realnych obiektów mostowych w ich całym cyklu życia.

Zaproponowany w pracy szablon cyfrowych modeli mostów uwzględnia ogólne zasady idei DT, które są już od pewnego czasu stosowane w inżynierii. Zostały one jednak rozwinięte o unikatowość obiektów mostowych oraz ich warunki funkcjonowania w obszarze inżynierii lądowej. Praktyczność zaproponowanych rozwiązań została uzasadniona konkretnymi przypadkami użycia, które wykorzystują techniki zidentyfikowane jako komponenty proponowanego szablonu DT mostów. Osiągnięcie tego zasadniczego celu rozprawy było możliwe przez realizację kilku poniższych celów pośrednich.

- Ocena aktualnego stanu rozwoju DT w innych dziedzinach poprzez studium dostępnej literatury oraz sprawdzenie przypadków implementacji w obszarze mostownictwa.
- Identyfikacja najważniejszych technik, które mogą być wykorzystane do tworzenia oraz użytkowania DT mostów.
- Opracowanie poszerzonej definicji DT mostów z ich zasadniczymi cechami i z uwzględnieniem faz cyklu życia.
- Przeprowadzenie praktycznej integracji modeli BIM i Metody Elementów Skończonych (MES) w środowisku programowania graficznego na potrzeby tworzenia DT w fazie projektowej, ale przy ograniczonym zakresie i z wykorzystaniem algorytmu optymalizacyjnego do automatyzacji procesu projektowania.
- Propozycja metody generowania syntetycznych chmur punktów w celu tworzenia i aktualizacji modeli geometrycznych cyfrowych bliźniaków w fazie operacyjnej z użyciem algorytmów uczenia maszynowego.

Doktorant wielokrotnie podkreślał w swojej pracy iż „Cyfrowe bliźniaki nie muszą przecież być kompletne i perfekcyjne od samego początku. Koncepcja ta powinna dojrzewać w naturalny sposób, zachęcając użytkowników korzyściami, jakie wynikają z ich stosowania.” Tym samym jest świadomy ograniczenia niniejszej pracy wynikające z czasu jej wykonywania i samej objętości. Zaproponowany opis cech DT wskazuje więc ogólne wytyczne, a nie szczegóły techniczne implementacji.

3.3. Ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych:

W rozprawie doktorskiej zawarto następujące rozdziały:

Rozdział 1 to wprowadzenie, które zawiera motywację oraz cele pracy badawczej.

Rozdział 2 opisuje ideę DT. W rozdziale tym opisano krótką historię DT's pokazujących ich ewolucję i dojrzewanie. Zostały też określone podstawowe definicje, koncepcje oraz zastosowanie cyfrowej współpracy bliźniaczej (sekcja 2.3.1), inżynierii lądowej (sekcja 2.3.2) i mostów (sekcja 2.3.3).

Rozdział 3 to propozycja koncepcji DT's mostów. Rozpoczyna się od analizy specyfiki mostów (rozdział 3.1.1) oraz wymagań praktyków budownictwa (rozdział 3.1.2), które należy rozważyć w celu znalezienia odpowiedniego, praktycznego rozwiązania.

Rozdział 4 przedstawia optymalizację za pomocą programowania wizualnego i algorytmu genetycznego. Opisany algorytm pozwala zintegrować modele BIM i MES w środowisku programowania wizualnego. Opisano tworzenie częściowego DT w fazie projektowania oraz optymalizację geometryczną konstrukcji.

Rozdział 5 opisuje generowanie syntetycznych chmur punktów dla uczenia maszynowego. Przeprowadzony w pracy eksperyment, który polegał na segmentacji semantycznej (ang. semantic segmentation) z użyciem sieci neuronowej potwierdził użyteczność generowanych danych do uczenia maszynowego. Rozwiązanie jest pierwszym krokiem w procesie automatycznego generowania i aktualizowania modeli geometrycznych DT, a w końcu monitorowania zmian geometrycznych w czasie.

Rozdział 6 podsumowuje badania przedstawione w pracy, sformułowane są wnioski oraz identyfikacja ograniczeń i określenie ścieżki dalszych prac.

Organizacja pracy jest poprawna i nie mam do niej żadnych uwag.

3.4. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej:

Studium literatury jest obszerne i obejmuje szeroki zakres tematyczny DT's nie tylko w inżynierii lądowej. Opisane przykłady z literatury wykazały, że w światowej inżynierii mostowej prace nad DT są na początkowym etapie i nadal poszukiwane są narzędzia, które pozwoliłyby na stworzenie kompleksowego DT mostów. Nabierająca rozpędu cyfrowa transformacja niemal wszystkich dziedzin naszego życia kreuje trendy i wymusza na naukowcach odkrywanie nowych dziedzin. W kontekście coraz bardziej przenikających się różnych dyscyplin naukowych i sektorów gospodarki, model DT pozwala na zwiększenie efektywności w obszarze inżynierii lądowej i umożliwia międzybranżową współpracę na cyfrowych platformach wymiany danych.

Tematyka DT jest bardzo dynamiczna i cieszy się dużym zainteresowaniem, dlatego też nieustannie pojawia się wiele nowych prac badawczych w tym temacie. W związku z powyższym, rozprawa doktorska nie zawiera tych pozycji, które pojawiły się od czasu złożenia rozprawy doktorskiej do czasu wykonania recenzji. Kilka pozycji do rozważenia w przyszłych pracach badawczych znajduje się poniżej:

- Chiachío, M., Megía, M., Chiachío, J., Fernandez, J., and Jalón, M.L., "Structural digital twin framework: formulation and technology integration," *Automation in Construction*, vol. 140, 2022.
- Febrianto E, Butler L, Girolami M, Cirak F. Digital twinning of self-sensing structures using the statistical finite element method. *Data-Centric Engineering*. 2022;3(3):e31-e. doi: ARTN e31
- Mirzaei K, Arashpour M, Asadi E, Masoumi H, Li H. Automatic generation of structural geometric digital twins from point clouds. *Sci Rep*. 2022;12(1):22321. Epub 20221224. doi: 10.1038/s41598-022-26307-7. PubMed PMID: 36566317; PubMed Central PMCID: PMC9789981.
- Gürdür Broo D, Bravo-Haro M, Schooling J. Design and implementation of a smart infrastructure digital twin. *Automation in Construction*. 2022;136:104171. doi: 10.1016/j.autcon.2022.104171.
- Futai MM, Bittencourt TN, Carvalho H, Ribeiro DM. Challenges in the application of digital transformation to inspection and maintenance of bridges. *Struct Infrastruct E*. 2022;18(10-11):1581-600. doi: 10.1080/15732479.2022.2063908. PubMed PMID: WOS:000785785100001.
- Wang S, Rodgers C, Zhai G, Matiki TN, Welsh B, Najafi A, et al. A graphics-based digital twin framework for computer vision-based post-earthquake structural inspection and evaluation using unmanned aerial vehicles. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*. 2022;1(1). doi: 10.1016/j.iintel.2022.100003.

3.5. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych,

Proponowany w rozprawie doktorskiej DT mostów wykorzystuje elementy BIM, SHM (Structural Health Monitoring) oraz AI (Artificial Intelligence). Przyjmuje standard IFC (Industry Foundation Classes) jako bazę dla modelu centralnego. Jest też wzbogacony przez dodatkowe techniki (np. programowanie graficzne, chmury punktów). Takie podejście umożliwi realizację procesu wdrażania w sposób ewolucyjny. Założeniem Doktoranta jest to iż DT mostów nie są perfekcyjne od samego początku, koncepcja ta powinna dojrzewać w naturalny sposób, zachęcając użytkowników korzyściami, jakie wynikają z ich stosowania.

Doktorant zidentyfikował techniki i podejścia kluczowe przy tworzeniu i wykorzystywaniu DT obiektów w inżynierii lądowej, między innymi:

- Building Information Modeling (BIM), czyli modelowanie informacji o obiekcie budowlanym;
- Industry Foundation Classes (IFC), czyli otwarty standard opisu obiektu budowlanego;
- Structural Health Monitoring (SHM), czyli monitorowanie stanu technicznego konstrukcji;
- Artificial Intelligence (AI), czyli sztuczna inteligencja;
- Visual Programming (VP), czyli programowanie graficzne;
- Point clouds, czyli chmury punktów.

W przeprowadzonym eksperymencie, Doktorant utworzył skrypt Dynamo, który generował dużą liczbę sparametryzowanych modeli będących wariantami rozpatrywanego mostu łukowego. Zmieniające się parametry obejmowały układ wieszaków w czterech wariantach: pionowym, promienistym, ukośnym i siatkowym. Innymi parametrami były również rozstaw wieszaków lub inaczej ich liczba, strzałka łuku oraz wymiary podstawowych elementów konstrukcyjnych i właściwości materiału.

Optymalizacja z wykorzystaniem programowania graficznego i algorytmu genetycznego automatyzuje głównie początkową fazę projektową. Programowanie graficzne zostało tu wzbogacone funkcjonalnościami MES tworząc jednolite środowisko optymalizacji geometrycznej oraz integracji z modelami BIM. Automatyzujące optymalizację algorytmy pozwalają na analizę zdecydowanie większej liczby wariantów niż w tradycyjnym, iteracyjnym sposobie projektowania. Taka integracja modeli BIM i MES jest kluczowa do uzyskania pełnej funkcjonalności DT mostu.

Kolejne fazy cyklu życia obiektu mostowego dotyczą stosunkowo krótkiego procesu budowy oraz najdłuższej fazy operacyjnej. Tutaj Doktorant zaproponował wykorzystanie chmur punktów, które można pozyskać technikami rekonstrukcji 3D, co w inżynierii lądowej najczęściej realizowane jest przez skanowanie laserowe lub fotogrametrię. Powtarzane okresowo skanowanie fizycznego obiektu, a następnie użycie zaproponowanych algorytmów analizy nowej chmury punktów pozwoli na aktualizację modelu geometrii. Zaktualizowane i porównywane ze sobą kolejne wydania modelu będą mogły być wykorzystane do identyfikacji zmian w geometrii, które z kolei mogą wskazywać na ewentualne nieprawidłowości pracy fizycznego obiektu. W przypadku mostów zlokalizowanych na obszarach z deformacją terenu (np. aktywność górnicza, sejsmiczna lub tunelowanie), taka automatyczna aktualizacja modelu może być wykorzystana do monitorowania stanu deformacji konstrukcji i wynikających z tego zagrożeń bezpieczeństwa.

Przeprowadzony w pracy eksperyment, który polegał na segmentacji semantycznej z użyciem sieci neuronowej potwierdził użyteczność generowanych danych do uczenia maszynowego. Zastosowana architektura sieci neuronowej PointNet została wytrenowana na wygenerowanych syntetycznych chmurach punktów. Następnie przeprowadzona została walidacja na zbiorach testowych. Pierwszy z nich zawierał sceny syntetycznej chmury punktów, a drugi pochodził ze skanowania realnego obiektu.

Utworzony przez Doktoranta symulator dotyczy pozyskiwania danych w postaci chmur punktów potrzebnych do treningu algorytmów uczenia maszynowego. Jest to pierwszy, ale nieodzowny etap tworzenia systemów, które automatyzują wykorzystywanie chmur punktów na potrzeby ekstrakcji informacji, ich segmentacji, a finalnie nawet generowania i aktualizowania geometrycznych modeli cyfrowych bliźniaków. W ten sposób automatycznie aktualizowane modele będą replikowały rzeczywistą geometrię, realizując ideę modelu współlistniejącego z fizycznym obiektem. W przypadku mostów, informacje o zmianach geometrycznych umożliwią między innymi wykrywanie i porównywanie deformacji, monitorowanie stanu technicznego konstrukcji i alarmowanie o niebezpiecznych zjawiskach.

3.6. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Przedstawiona w rozprawie koncepcja DT mostu jest to próba zdefiniowania informacyjnych modeli w odniesieniu do konstrukcji mostowych. Rozprawa omawia techniki, które mogą być wykorzystywane do tworzenia i użytkowania cyfrowych bliźniaków mostów oraz opisuje ich zasadnicze cechy. Zaproponowana koncepcja tych złożonych wirtualnych obiektów obejmuje ogólne zasady tej idei, które przedstawiane są w coraz bogatszej literaturze przedmiotu. Uwzględnia też specyfikę konstrukcji mostów, a także zwyczajowe wymagania stawiane przez potencjalnych użytkowników DT mostów, czyli inżynierów mostowych oraz właścicieli i zarządców infrastruktury mostowej. W ten sposób, DT mostu może być przygotowany do interakcji z innymi obiektami w wirtualnym środowisku.

Podsumowując, omówione wyniki badań i sformułowane wnioski są poprawne i poparte przeprowadzonymi badaniami naukowymi zawartymi w rozprawie doktorskiej.

3.7. Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań,

Przeprowadzony w pracy eksperyment, który polegał na segmentacji semantycznej z użyciem sieci neuronowej potwierdził użyteczność generowanych danych do uczenia maszynowego. Zastosowana architektura sieci neuronowej PointNet została wytrenowana na wygenerowanych syntetycznych chmurach punktów. Następnie przeprowadzona została walidacja na zbiorach testowych. Pierwszy z nich zawierał sceny syntetycznej chmury punktów, a drugi pochodził ze skanowania realnego obiektu.

Doktorant przedstawił pierwszy, ale nieodzowny etap tworzenia systemów, które automatyzują wykorzystywanie chmur punktów na potrzeby ekstrakcji informacji, ich segmentacji, a finalnie nawet generowania i aktualizowania geometrycznych modeli DT. Doktorant wyznaczył przyszłe cele badawcze dotyczące DT mostów, dla których informacje o zmianach geometrycznych umożliwiają między innymi wykrywanie i porównywanie deformacji, monitorowanie stanu technicznego konstrukcji i alarmowanie o niebezpiecznych zjawiskach. Jednak aspekt ten nie został rozpatrzony przez Doktoranta w praktyce i powinien być określony jako przyszłe cele badawcze.

3.8. Informacje o uwagach krytycznych

Komentarze merytoryczne i małe poprawki edytorskie zostały zaproponowane w pliku PDF, który jest załączony do niniejszej opinii.

Poniżej znajdują się te uwagi do których oczekiwana jest odpowiedź Doktoranta:

Komentarz #1:

Rozdział 1.2, strona nr. 3 – “Digital twins do not have to be complete and perfect from the beginning; the concept should mature naturally, alluring practitioners with its benefits. Other important factors are the limitations of time and the scope of the dissertation.” – odczytuję to stwierdzenie jako opinię Doktoranta. Czy nie należałoby podkreślić, że stwierdzenie to jest opinią, a nie rekomendacją. A jeśli jest rekomendacją to proszę o poparcie tego stwierdzenia argumentami rzeczowymi i/lub podobnymi stwierdzeniami w literaturze.

Komentarz #2:

W wielu miejscach rozprawy doktorskiej przewija się hasło BIM i DT w jednym zdaniu lub paragrafie. Proszę o wyjaśnienie różnic, oraz jak te dwa ważne zagadnienia/modele z sobą oddziałują.

Komentarz #3:

Rozdział 4.2.1 „To address this gap, a finite element method package for bar models’ static analyses has been developed as part of the proposed solution.” – proszę o wyjaśnienie czy opracowano metodę czy model MES do rozpatrywanego studium przypadku? Jeśli jest to metoda to dlaczego nie można było użyć standardowych programów MES. Dla modelu MES proszę podać szczegóły dotyczące przyjętych warunków brzegowych, założeń związanych z elementami skończonymi oraz innych ograniczeń wynikających z przyjętego podejścia, np.:

- Czy definicja materiału pozwala na rozpatrywanie naprężenia plastycznego a tym samym modelowania uszkodzeń typu przegub plastyczny czy rysa?
- Czy możliwe jest modelowanie siły jednostkowej i obciążeń ruchomych?
- Czy kształt siatki elementów skończonych jest dowolny? W zaprezentowanym przykładzie przyjęto elementy powierzchniowe trójkątne - czy jest to ograniczenie modelu?

Komentarz #4:

Rozdział 5.2.2, proszę o opisanie schematu przedstawionego na rysunku 5-2. Schemat ten można uznać za jeden z kluczowych w rozprawie doktorskiej; jednak nie ma odpowiedniej interpretacji jak ten schemat działa.

Komentarz #5:

Proszę o dyskusję do stwierdzenia: „DT to wirtualne odzwierciedlenie już wybudowanego obiektu w celu oceny jego faktycznego stanu technicznego oraz narzędzie do efektywnego zarządzania zasobami”. Czy zgadza się Pan z tym stwierdzeniem?

3.9. Ocena, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Zasadniczym celem rozprawy doktorskiej było określenie podstaw tworzenia DT mostów i wskazanie sposobów ich wykorzystywania. Wpisuje się to w ogólne trendy trwającej cyfrowej transformacji i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu.

DT obiektu mostowego zakłada korzystanie z cyfrowego modelu obiektu w całym cyklu życia fizycznego obiektu. Dzięki synchronizacji z fizycznym odpowiednikiem w fazie użytkowania, DT wykracza możliwości modeli projektowych MES i budowlanych BIM. Obiekt i jego wirtualny odpowiednik zaczynają współpracować wymieniając się między sobą informacjami. Dane z fizycznego obiektu zasilają cyfrowy model, który może wpływać na decyzje związane z fizycznym obiektem. DT gromadzi dane, służące odwzorowaniu procesów zachodzących w obiekcie fizycznym. Rejestrowany jest sposób w jaki obiekt reaguje na zmieniające się warunki oraz jak te reakcje zmieniają się w czasie. Analizy takiego złożonego i obszernego zbioru danych pozwalają lepiej zrozumieć działanie samego obiektu. Dane pozwalają również trenować inteligentne algorytmy do rozpoznawania wzorców i anomalii.

O ile w rozprawie doktorskiej temat ten został obszernie i wyczerpująco opisany to zabrakło części wdrożeniowej na istniejącym obiekcie. Dlatego też kierunek rozwoju dalszych prac powinien również wskazywać na zastosowanie DT w zintegrowany sposób z SHM. Wizualna ocena obiektu wraz z odpowiedzią konstrukcji pod obciążeniem dynamicznym pozwala na określenie zmian nośności oraz niezawodność konstrukcji. Ponadto DT powinno w sposób automatyczny odzwierciedlać rzeczywiste obciążenie zmienne, środowiskowe oraz klimatyczne aby móc symulować procesy degradacji konstrukcji.

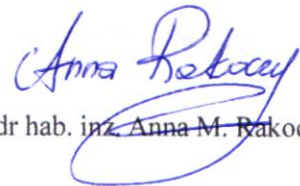
4. Wniosek Końcowy

Na podstawie szczegółowej analizy rozprawy doktorskiej oraz dorobku Pana mgr. inż. Kamila Korusa stwierdzam, że rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport oraz potwierdza umiejętności Doktoranta do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Doktorant, w swojej rozprawie doktorskiej, zidentyfikował techniki i podejścia kluczowe przy tworzeniu DT obiektów w inżynierii lądowej oraz wskazał sposoby ich wykorzystywania. Wpisuje się to w ogólne trendy trwającej cyfrowej transformacji i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu. Osiągnięte wyniki badań i sformułowane wnioski są poprawne i poparte przeprowadzonymi badaniami naukowymi zawartymi w rozprawie doktorskiej. Doktorant sformułował również ograniczenia i kierunki swoich dalszych prac badawczych co podkreśla, że temat jest rozwojowy i istotny dla dyscypliny inżynierii lądowa, geodezja i transport. Przedstawione w niniejszej opinii uwagi krytyczne mają charakter techniczny i nie umniejszają wartości pracy.

Podsumowując, recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez obowiązującą ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz.U. z 2020 r. poz. 85, z późn. zm.).

Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Kamila Korusa do publicznej obrony.



dr hab. inż. Anna M. Rakoczy