

## Ocena pracy doktorskiej

Autor: Mgr inż. Muhammad FAWAD  
Tytuł: Oparty na BIM system monitorowania stanu mostów wspierany przez techniki immersji i rekonstrukcji 3D, do aktualizacji modeli analitycznych i zasobów  
Recenzent: Profesor nadzwyczajny, dr inż. Petr Konečný

### A. Przydział formalny i przedmiot recenzji

Recenzja dokonywana na wniosek profesora nadzwyczajnego Marcina Stańka (Przewodniczący Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej) z dnia 5 lipca 2024 roku.

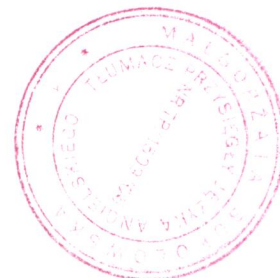
Przedmiotem recenzji jest praca doktorska "BIM-based Framework of Bridge Health Monitoring Supported by Immersive and 3D Reconstruction Techniques for Analytical and Asset Model Updates" przygotowana przez mgr inż. Muhammad[a] FAWAD[A]. Student przygotował pracę pod kierunkiem dwóch promotorów: prof. Marka Salamaka w Polsce i prof. Kálmán[a] Koris[a] na Węgrzech. Przyczyną, dla której praca doktorska ma dwóch promotorów jest przygotowywanie jej w ramach wspólnego programu (tzw. double degree form) na dwóch uczelniach: Politechnice Śląskiej w Gliwicach oraz Uniwersytecie Techniczno-Ekonomicznym w Budapeszcie.

### B. Temat pracy doktorskiej

Wybór tematu pracy i jej wykonanie uważam za bardzo aktualne, ponieważ budownictwo jest najmniej zautomatyzowaną gałęzią przemysłu. W związku z tym, wkład w automatyzację systemów monitorowania stanu mostów, z uwzględnieniem ich specyfiki oraz ich praktyczna adaptacja w przemyśle inżynieryjnym jest odpowiedzią na potrzeby przemysłu. Ponadto wizualizacja wskaźników uszkodzeń strukturalnych w czasie rzeczywistym na miejscu i w odniesieniu do lokalizacji czujnika ma obecnie ograniczone możliwości.

W pracy doktorskiej wprowadzono i oceniono najnowocześniejsze technologie zarówno w projektach pilotażowych na pełną skalę, jak i w warunkach laboratoryjnych. Ponadto praca wywarła na czytelniku bardzo dobre wrażenie ze względu na wykorzystanie modelowania informacji o budynku (ang. Building Information Modeling, BIM), rzeczywistości mieszanej (ang. Mixed Reality, MR), analizy metodą elementów skończonych (ang. Finite Element Analysis, FEA), monitorowania stanu konstrukcji (ang. Structural Health Monitoring, SHM), Internetu rzeczy (ang. Internet of Things, IoT), a także cyfrowych bliźniaków (ang. Digital Twins), aby pomóc w wyborze najbardziej odpowiedniego projektu mostu, a także pomóc w uzyskaniu dostępu do SHM na miejscu za pomocą MR oraz ogólnego przeglądu danych SHM w postaci interfejsu internetowego cyfrowego bliźniaka.

Dlatego też praca ta demonstruje owocne połączenie [możliwości] środowiska akademickiego i praktycznych potrzeb przemysłu i toruje drogę do przyszłości w zakresie cyfryzacji i automatyzacji naszego przemysłu.





### C. Układ pracy doktorskiej i jej elementy

Przedłożona praca zawiera wszystkie oczekiwane części pracy dyplomowej: Wstęp, Definicję celów i zakresu, Rozdział 2 i Rozdziały 3-5, które omawiają tematy związane z celami pracy dyplomowej, w tym ogólny przegląd, metodologię i przedstawione wyniki. Praca zawiera również rozdział podsumowujący, a także odniesienia i załącznik. Praca ma rozsądną strukturę, a wszystkie jej części są ze sobą powiązane. Szczegóły dotyczące poszczególnych rozdziałów są wymienione poniżej:

Rozdział 2 poświęcony jest zagadnieniom systemu zarządzania mostami (ang. bridge management system, BMS) i jego zastosowaniom w SHM mostów. Omówiono w nim konwencjonalne metody, takie jak inspekcje wizualne, a także rolę technologii IoT w SHM, koncentrując się na inteligentnych czujnikach bezprzewodowych i ich komponentach rozwojowych. Podkreślono również korzyści płynące z integracji SHM z BMS, koncentrując się na wyeliminowaniu niedociągnięć tradycyjnych metod inspekcji.

Rozdział 3 analizuje wykorzystanie BIM i technologii cyfrowych w inżynierii mostowej, w tym nowych technologii, takich jak programowanie wizualne, sztuczna inteligencja (AI), metody rekonstrukcji 3D oraz wirtualna/rozszerzona/mieszana rzeczywistość (VR/AR/MR) do oceny i monitorowania stanu mostów. Wprowadza również koncepcję [metody] cyfrowych bliźniaków (ang. Digital Twin), podkreślając jej zalety i zastosowania w zrównoważonym rozwoju mostów. Wreszcie, w części 3.5 omówiono praktyczne wdrożenie technologii VR/MR przy użyciu zestawu Trimble Hololens lub smartfonu wzbogaconego o funkcje rzeczywistości rozszerzonej Trimble Site na przykładzie mostu zaprojektowanego w Sanoku w Polsce.

W Rozdziale 4 omówiono techniki modelowania mostów, koncentrując się na modelowaniu analitycznym i BIM. Wykorzystuje on analizę metodą elementów skończonych (FEM) do oceny uszkodzeń mostów. Ponadto zaproponowano solidny system SHM. Dwa studia przypadków demonstrują praktyczne zastosowanie modelowania analitycznego i metod testowania obciążeń mostów. Jeden z mostów omówionych w rozdziale 4.3 jest zlokalizowany we wschodnich Węgrzech, a drugi (w rozdziale 4.4) jest zlokalizowany w Kurowie w Polsce. Warto wspomnieć, że w rozdziale 4.4, dotyczącym mostu w Kurowie, omówiono również testy obciążeniowe i praktyczne wdrożenie SHM oraz jego integrację z BIM za pośrednictwem IoT. Podkreśla on wykorzystanie IoT do monitorowania stanu mostu w czasie rzeczywistym. Ponadto, w tym pilotażowym badaniu przedstawiono rozwój opłacalnych czujników bezprzewodowych oraz integrację systemów IoT z MR za pomocą silnika gier 3D o nazwie Unity.

Rozdział 5 omawia studium przypadku mostu łukowego Panewnicka, w którym zastosowano techniki rekonstrukcji 3D, koncentrując się na opracowaniu modeli 3D. Analiza elementów skończonych (FEA) jest wykorzystywana do symulacji stanu uszkodzenia mostu i zaproponowania systemu SHM dla mostu, który jest zainstalowany w celu monitorowania parametrów kondycji mostu. Ponadto, rozdział ten syntetyzuje zdobyte umiejętności i narzędzia do opracowania nowatorskiego podejścia do zarządzania zasobami infrastruktury, koncentrując się na rozwoju immersyjnej platformy wykorzystującej metodę cyfrowych bliźniaków (ang. Immersive Bridget Digital Twin Platform, IBDTP). Platforma ma na celu zautomatyzowanie systemu SHM mostu i wykorzystuje urządzenia MR do immersyjnego podejmowania decyzji. Przedstawiono i omówiono praktyczne zastosowania, które są potencjalnie skalowalne dla różnych typów mostów i infrastruktury krytycznej.

Rozdział 6 jest podsumowaniem składającym się z omówienia wyników w celu osiągnięcia celów badawczych, wniosków końcowych, nowych osiągnięć naukowych, praktycznych zastosowań pracy badawczej.

Uwaga: Ponieważ zbadanych mostów jest więcej i trudno było nawigować między poszczególnymi metodami, zastosowanymi procedurami i mostami, w przeglądzie zostaną użyte następujące oznaczenia: Nowo zaprojektowany most w Sanoku w Polsce, który omówiono w rozdziale 3.5 - **Sanok**, modelowanie analityczne mostu we wschodnich Węgrzech omówione w rozdziale 4.3 - **Węgry**, aktualizacja modelu i kalibracja SHM przy użyciu terenowych testów obciążeniowych mostu

zlokalizowanego w Kurowie w Polsce, które omówiono w rozdziale 4.4 - **Kurów**, modelowanie analityczne i przygotowanie Immersive Bridget Digital Twin Platform (IBDTP) dla mostu Panewnicka w Polsce, które omówiono w rozdziale 5 - **most Panewnicka**.

#### **D. Cel pracy doktorskiej**

Głównym celem pracy doktorskiej jest wkład w rozwój immersyjnego zautomatyzowanego systemu monitorowania stanu konstrukcji mostów (SHM) poprzez wykorzystanie metodologii BIM, technik rekonstrukcji 3D, podejścia Internetu rzeczy (IoT) i technologii rzeczywistości mieszanej (MR), w tym koncepcji cyfrowych bliźniaków (ang. Digital Twin).

Cel główny jest podzielony na następujące cele cząstkowe:

1. Opracowanie systemu zarządzania zasobami mostowymi przy użyciu narzędzi analitycznych i modelowania BIM.
2. Propozycja zaawansowanego systemu SHM i jego walidacja.
3. Integracja technologii SHM, BIM i IoT w celu inteligentnego monitorowania stanu infrastruktury.
4. Opracowanie immersyjnej platformy wykorzystującej metodę cyfrowych bliźniaków (IBDTP) z wykorzystaniem technologii Mixed Reality.

Cele pracy zostały osiągnięte.

#### **E. Zastosowane metody i procedury**

Powyższe cele zostały osiągnięte poprzez kilka częściowych zastosowań opisanych w pracy doktorskiej, które pozwoliły na demonstrację badanego i testowanego podejścia.

**3.5 Sanok:** Eksploracja podstawowych zastosowań narzędzi VR/MR do wizualizacji koncepcji mostów podczas faz projektowania oraz ocena koncepcji projektowych mostów za pomocą technologii immersyjnych w przypadku nowo projektowanego mostu w Sanoku. Na miejscu wykonano wizualizację dwóch projektów w skali. Wykorzystano wspólne środowisko danych (ang. Common Data Environment, CDE) z rozszerzeniem MR, model BIM mostu, narzędzia wizualizacyjne (zestaw wirtualny i akcesorium do smartfonu) w celu przetestowania jego możliwości i ograniczeń.

**4.3 Węgrzy:** Wykorzystanie BIM w zarządzaniu zasobami mostowymi, z naciskiem na wykorzystanie narzędzi BIM do rozwoju zautomatyzowanych systemów SHM oraz oparte na BIM modelowanie elementów skończonych (ang. Finite Element, FE) mostów we wschodnich Węgrzech. Zastosowano dwa podejścia do modelowania. Najpierw zastosowano liniowy model statyczny w AXIS VM, a następnie nieliniowy model przygotowany w oprogramowaniu Athena. Wykorzystanie modelu nieliniowego pozwoliło na bardziej precyzyjną ocenę efektu pęknięcia. Wyniki numeryczne zostały porównane z danymi eksperymentalnymi, do których się nie odniesiono. Ponadto, ponieważ władze nie były zainteresowane instalacją systemu SHM, rozważono inne studium przypadku do dalszych badań.

**4.4 Kurów:** Zastosowanie SHM nie było jednak możliwe na Węgrzech. Dlatego do modelowania i walidacji z testem terenowym wybrano inny most, w Kurowie w Polsce, aby skalibrować SHM[.] Badanie integracji technologii IoT z systemami SHM do monitorowania w czasie rzeczywistym i okresowej konserwacji mostów poprzez opracowanie tanich czujników bezprzewodowych. Dlatego też przygotowanie modelu zostało usprawnione poprzez implementację wirtualnego języka programowania (ang. Virtual Programming Language, VPL) przy zastosowaniu Dynamo. VPL pozwolił na generowanie i aktualizację modelu w oparciu o SHM, co skutkowało efektywnym przygotowaniem modelu FEA za pośrednictwem protokołu CADIMP. Mostowy system SHM wykorzystuje technologię IoT do tworzenia wirtualnego modelu sensorycznego, umożliwiając komunikację w czasie rzeczywistym z rzeczywistymi czujnikami. Ten połączony system integruje SHM mierzący dane strukturalne, IoT zbierający różne źródła danych oraz BIM integrujący dane SHM i IoT w celu zapewnienia całościowego obrazu wydajności infrastruktury. Test systemu został



jednak przeprowadzony w skali laboratoryjnej i nie udostępniono żadnych danych na temat skali laboratoryjnej lub modelu wirtualnego dostarczającego rzeczywiste dane SHM.

**5 Most Panewnicka:** Kolejny most i jego model posłużył jako obiekt testowy do opracowania internetowej platformy dla SHM mostów, która zawiera czujniki IoT i integruje MR przy użyciu modeli BrIM. W związku z tym, stworzono platformę wykorzystującą metodę cyfrowych bliźniaków (IBDTP). W tym celu platforma internetowa oparta na IoT została połączona z modelem rzeczywistości mostu BrIM, aby przygotować fundamenty do rozwoju IBDTP. Platforma cyfrowego bliźniaka mostu została opracowana w silniku gier UNITY, osadza ona wirtualne czujniki systemu SHM mostu w modelu rzeczywistym BrIM, umożliwiając komunikację w czasie rzeczywistym między systemami wirtualnymi i rzeczywistymi, co pozwala uzyskać automatyczną funkcjonalność systemu SHM mostu.

Co więcej, ocena wydajności, dokładności i skalowalności IBDTP w porównaniu z tradycyjnymi metodami SHM została przeprowadzona przez wykwalifikowanych inżynierów.

## F. Wyniki i dyskusja

Uwaga: Poniższe komentarze są ponumerowane na podstawie stron, do których się odnoszą: np. 22.1 oznacza pierwszą uwagę dotyczącą strony 22. Uwagi ogólne są numerowane jako rozdział G recenzji i numerowane w kolejności uwag na danej stronie.

**3.5 Sanok:** Przeprowadzono wizualizację na miejscu dwóch mostów w Sanoku, co pomogło władzom w dokonaniu wyboru opartego na immersyjnym doświadczeniu. Na podstawie przeprowadzonych testów założono, że urządzenie HL nie działa dobrze na otwartych przestrzeniach z konstrukcjami o większej rozpiętości. Taki otwarty obszar bez charakterystycznych obiektów o płaskich powierzchniach nie pozwala na pełną wizualizację większego modelu i jego precyzyjne wyświetlenie.

32.1, rys. 3-6: Pełne szczegóły konstrukcyjne są przedstawione na rysunku zgodnie z jego podpisem. Brakuje jednak połączeń cięgieł z konstrukcjami i balustradami. Definicja pełnej szczegółowości nie jest jasna. Aby uniknąć nieporozumień, można zastosować LOD lub podobną definicję.

33.1: W rozdziałach 3-5 mieszają się informacje teoretyczne z pracą własną studenta, co jest nieoczekiwane. Innym podejściem byłoby rozpoczęcie od aktualnego stanu wiedzy i kontynuowanie własnych badań w kolejnych rozdziałach. Jednak ten szczególny rodzaj układu nie obniża ogólnej jakości pracy. Czytelnik ma do dyspozycji spis treści pomagający w nawigacji, a wkład własny jest wyraźnie określony w rozdziale 6.3: Nowe osiągnięcia naukowe.

**4.3 Węgrzy:** Praktyczne zastosowanie tych technik zostało zademonstrowane poprzez studium przypadku mostu RC. W studium przypadku zastosowano analityczne podejście do modelowania, wykorzystujące statyczną i nieliniową analizę 3D do oceny uszkodzeń mostu, w którym stwierdzono rozległe pęknięcia. Następnie zaproponowano zaawansowany system SHM do skutecznego monitorowania uszkodzeń mostu.

46.1: Autor użył terminu "uszkodzenie przemieszczeniowe". Zasadniczo przemieszczenie jest procesem odwracalnym, a kwestia użyteczności w przypadku statycznej odpowiedzi liniowej jest rozważana w podobny sposób, jak w przypadku omówionym w rozdziale 4.32. Dlatego w przypadku odpowiedzi liniowej nie oczekuje się, że przemieszczenie wywołane obciążeniem pozostanie, gdy konstrukcja zostanie odciążona. W związku z tym, o jakich uszkodzeniach wspomina autor w przypadku przemieszczenia?

47.1: Czy AXIS VM umożliwia tworzenie skryptów lub pracę w trybie wsadowym w celu parametrycznego przetwarzania danych wejściowych?

47.2, rys. 4-2: Ugięcie wygląda niesymetrycznie. Co spowodowało asymetrię ugięcia. Jaka kombinacja przypadków obciążeń?

48.1: Analiza nieliniowa za pomocą ATENA zawiera moduł sprężystości, współczynnik Poissona. Nie zostały one jednak wymienione w zastosowaniu oprogramowania AXIS - VM. Czy były one takie

same? Ponadto, nie podano modelu konstytucyjnego dla nieliniowego zachowania betonu. Nie podano również odpowiednich parametrów (energia pęknięcia i inne niezbędne parametry zastosowanego modelu konstytutywnego).

48:3: Doktorant stwierdza: "Maksymalne ugięcie jest obliczone na 20 mm, podczas gdy minimalne ugięcie wynosi 5,4 mm" bez określenia lokalizacji. Minimalne ugięcie w pobliżu podpory jest bliskie zeru. Dlatego brakuje lokalizacji (np. w połowie rozpiętości).

49.1: Wspomniano o plastyczności stali. Jakie są:  $f_y$ ,  $E$  i wykres naprężenie-odkształcenie zastosowanej stali?

49.2: Czy pełzanie i kurczenie są uwzględniane w obliczeniach ATENA?

50.1: Wspomniano o pomiarach na miejscu, ale w tekście nie podano wartości ani odniesienia do raportu z pomiarów.

50.2, 53.1: Kryterium użyteczności jest związane z szerokością rys. Jakie mogą być skutki pęknięć i uszkodzeń otuliny betonowej dla stalowego zbrojenia? Czy korozja zależy tylko od grubości otuliny?

52.1: Czy kąt obrotu można wyprowadzić z pomiarów systemu poziomowania cieczy? Jeśli tak, to w jaki sposób?

52.2: Czy proponowany system IoT może być połączony z kamerą w celu nagrywania pojazdu w przypadku przekroczenia progę wartości załadunku?

**4.4. Kurów:** Drugie studium przypadku dotyczy mostu typu extradosed w Polsce, gdzie model BrIM został opracowany w celu wygenerowania dokładnego parametrycznego modelu FE przy użyciu algorytmu VPL w Dynamo. Model numeryczny został skalibrowany w oparciu o wyniki SHM.

Nie uzyskano jednak pozwolenia na fizyczny dostęp do systemu SHM mostu, więc do praktycznego zobrazowania opracowanego systemu SHM wzmocnionego IoT wykorzystano model mostu w skali laboratoryjnej. Symulacja w skali laboratoryjnej zintegrowała system czujników oparty na IoT z modelem mostu BrIM, z powodzeniem wdrażając SHM mostu w czasie rzeczywistym.

55.1, Rys. 4-9 i Tab. 4-1 pokazują  $E_{cm}$  i  $E_{cm(t)}$  oparte najprawdopodobniej na równaniu 5.1. Czy istnieje test referencyjny do porównania z przewidywaniami numerycznymi?

57.1: Jakie oprogramowanie FEA, które może odczytywać parametryczny język wejściowy CADINP, jest używane w niniejszym opracowaniu?

57.3: Wspomniano, że bezpośrednia metoda modelu analitycznego z modelu BIM nie jest zalecana. Dla przypomnienia, bezpośrednia metoda generowania modelu konstrukcyjnego z BIM z przygotowaniem elementów, które nie są jawne w rzeczywistej konstrukcji, np. twardych łączników, podpór i przypadków obciążeń, jest możliwa np. w programie ArchiCAD z eksportem do otwartego formatu pliku \*SAF, gotowego do użycia w oprogramowaniu do analizy statyczno-wytrzymałościowej.

57.4: Autor stwierdza, że „Topologia przęsła wymaga podziału na sekcje o parametrycznej gęstości zdefiniowanej w otwartym kodzie VPL”. Dlaczego sekcje o zmiennej gęstości? Czy zmiana sztywności i modułu sprężystości lub przekroju nie jest parametrem, który należy zmienić w przypadku pęknięcia?

61.1: Tab. 4-2: Pokazuje, co jest obliczane i mierzone. Nie jest jednak jasne, co jest mierzone i obliczane. W przypadku S2. NI i N2  $U_t = U_e + U_d$ . Nawet jeśli nie jest to przypadek S1 (A1 i B1). Dlatego wydaje się, że  $U_t$  jest obliczane, a  $U_d$  jest mierzone, mimo że w tekście podano, że  $U_t$  jest mierzone, a  $U_d$  jest obliczane teoretycznie (na podstawie analizy FEM). Prosimy o wyjaśnienie.

65.1: Czy projekt SHM podany w tab. 4-3 jest dziełem doktoranta?

70.1: Autor stwierdził: „Początkowy plan tych badań obejmował terenową instalację opracowanych czujników na moście w Kurowie i pomiar danych w warunkach terenowych, ale niestety nie uzyskano pozwolenia na fizyczny dostęp do systemu SHM mostu, więc wykorzystano model mostu w skali laboratoryjnej, nad którym zainstalowano opracowane czujniki IoT i przeprowadzono symulację



systemu SHM mostu z opracowanymi czujnikami bezprzewodowymi w skali laboratoryjnej” Jest to mylące i rodzi dwa pytania:

70.1.a: Jakie dane SHM były dostępne do kalibracji?

70.1.b: Na jakim modelu laboratoryjnym uzyskano dane SHM? W opracowaniu nie znaleziono rysunków technicznych z testów ani żadnych innych bardziej szczegółowych informacji na temat wirtualnego modelu sensorycznego. Więcej szczegółów byłoby pomocne.

G.F.2 Brakowało opisu modelu laboratoryjnego do testowania systemu SHM opartego na IoT. Opis modelu laboratoryjnego byłby mile widziany.

G.F.3 Integracja danych SHM z czujników IoT jest bezsprzecznie bardzo dobrym osiągnięciem. Jednak stwierdzenie: „Konserwacja może być zatem wykonywana z wyprzedzeniem dzięki takim systemom w czasie rzeczywistym, z wyraźną wizualizacją uszkodzeń w formatach graficznych, poprawiając bezpieczeństwo, niezawodność i wydajność infrastruktury przy jednoczesnej optymalizacji prac konserwacyjnych i wykorzystania zasobów do inteligentnego monitorowania stanu infrastruktury”. Optymalizacja jest najprawdopodobniej rozumiana jako zmniejszenie kosztów pracy. Co byłoby niezbędne do optymalizacji prac konserwacyjnych oprócz samych danych.

**5 Most Panewnicka:** W pracy omówiono rozwój immersyjnej platformy cyfrowego bliźniaka mostu, która integruje proponowany system SHM z technologiami BIM, IoT i MR w celu opracowania immersyjnej platformy cyfrowego bliźniaka mostu (IBDTP). Po pomyślnym opracowaniu czujników bezprzewodowych i połączonej platformy internetowej opartej na IoT, system został przetestowany w skali laboratoryjnej dla studium przypadku systemu SHM mostu omówionego w rozdziale 4.6. W tym badaniu, metodologia BIM odegrała rolę pomostu między systemem SHM mostu a opracowanymi czujnikami bezprzewodowymi opartymi na IoT.

72.1: Jakie są kwestie licencyjne lub koszty związane z wykorzystaniem silnika Unity 3D (jeśli takie istnieją)?

72.2: Warto wspomnieć, że istnieje narzędzie Wearecho przeznaczone do projektowania architektonicznego w 3D <https://wearrecho.space/>. Oprogramowanie jest rozwijane w Czechach, a firma współpracuje z uniwersytetami. Być może istnieje możliwość rozszerzenia oprogramowania dla takich interaktywnych zastosowań, które wymagają połączenia za pośrednictwem adresu URL i przygotowania podobnego projektu w silniku gier Unity.

74.1: Tabela 4-7 stwierdza, że tradycyjny SHM umożliwia jedynie monitorowanie poza lokalizacją mostu. Wygląda to na nieporozumienie. Jeśli notebook jest podłączony do rejestratora danych, który znajduje się na miejscu, wyniki są dostępne na miejscu. Co więc oznacza opcja tylko poza lokalizacją.

82.1: Parametry modelu FEA podane w rozdziale 5.4 są tylko skrótowe. Brakuje opisu materiału cięgieł.

G.F.4: Autor użył silnika gry Unity do przeniesienia modelu BrIM do środowiska MR. Jaki był format pliku wymiany (np. \*.lfc?) i jakie były wyzwania?

## G. Inne uwagi, komentarze, sugestie do dyskusji

Poniższe uwagi są numerowane na podstawie strony, której dotyczą: np. 22.1 oznacza pierwszą uwagę dotyczącą strony 22.

22.1: Autor wspomina: „Ta chmura punktów o wysokiej rozdzielczości może następnie analizować różne elementy konstrukcyjne, wykrywać ich odkształcenia i uszkodzenia oraz identyfikować oznaki pogorszenia stanu, takie jak pęknięcia i korozja. Dodatkowo można ją wykorzystać do tworzenia dokładnych modeli, które są kompatybilne z narzędziami BIM i mogą być wykorzystywane jako część systemu zarządzania mostami”. Jednak zaangażowanie człowieka jest nadal konieczne w procesie przekształcania chmury punktów w model 3D i elementy konstrukcyjne. Co doktorant sądzi o możliwym zautomatyzowanym przetwarzaniu chmury punktów?

23.F: Poniższe stwierdzenie wydaje się być sprzeczne lub niezrozumiałe: „Chmura punktów może być jednak wykorzystana do wygenerowania siatek wielokątów, które mogą odwzorować zeskanowaną lub sfotografowaną powierzchnię obiektu. ... Wielokąty mogą być dodatkowo obrazowane (renderowane) przy użyciu algorytmów wygładzania i cieniowania, co jest niemożliwe w przypadku chmur punktów”. Warto więc wyjaśnić, co można wygenerować za pomocą chmur punktów, a czego nie można zrobić za ich pomocą.

24.1: Nie jest jasne, co należy rozumieć przez: „główną różnicą jest punkt wyjścia” w zdaniu: „Kompleksowy model mostu, łączący właściwości BIM i FEM, ściśle przypomina cyfrowego bliźniaka, przy czym główną różnicą jest punkt wyjścia, w dużej mierze wynikający z ewolucji narzędzi do projektowania wspomaganego komputerowo”.

27.1: Rys. 3-3: Rysunki schodów i korytarzy (bez osoby z hełmem i Hololens) wyglądają jak wizualizacja, a podgląd rzeczywisty jest niewidoczny. Wygląda to więc na rzeczywistość wirtualną, a nie mieszaną. Komentarz jest mile widziany.

42.1: Autor napisał: „Liczne niedociągnięcia istniejących mostów żelbetonowych (RC) wynikają z braku szczegółowych zasad trwałości w pierwotnym projekcie, które można zweryfikować, przeprowadzając statyczną i nieliniową analizę strukturalną 3D”. Czy doktorant może bardziej szczegółowo określić, w jaki sposób statyczna i nieliniowa analiza strukturalna 3D może pokonać niedociągnięcia w projektowaniu trwałości z powodu braku szczegółowych zasad trwałości w pierwotnym projekcie?

93.1: Autor stwierdza: „Podczas gdy inne parametry, takie jak ugięcie mostu, zginanie i nośność na ścinanie w stanie granicznym nośności (ang. Ultimate Limit State, ULS) i naprężenia w stanie granicznym użyteczności (ang. Serviceability Limit State, SLS), są satysfakcjonujące...” Czy granica ugięcia jest kryterium dla ULS czy SLS? Ponieważ jednak ocena konstrukcji nie jest głównym celem pracy, nie ma to wpływu na prezentowane osiągnięcia.

99.1: W ramach osiągnięć naukowych, autor stwierdza, że opracował model FEM przy pomocy VPL. Jest to związane z rozdziałem 4.4 (most Kurowski). Czy pozostałe modele BIM i/lub FEA również zostały przygotowane przez autora pracy czy kogoś innego?

100.1: Dalszy rozwój już przedstawionych osiągnięć, takich jak IBDTP, może być prowadzony z uwzględnieniem LCA lub kryterium zrównoważonego i wieloparametrycznego.

## **H. Znaczenie dla praktyki i rozwoju dziedziny badawczej**

Praca stanowi znaczące osiągnięcie w dziedzinie łączenia MR, SHM, IoT oraz zarządzania i modelowania zasobów mostowych, mimo że nie podano wszystkich informacji niezbędnych do powtarzalności analizy strukturalnej. Jednak ten mankament nie zagraża osiągnięciu głównych celów.

Dlatego też, biorąc pod uwagę zalety technologii VR, omawiane badania doktoranckie z powodzeniem przeprowadziły eksperyment terenowy oparty na VR we współpracy z partnerem miejskim jako studium przypadku w celu zademonstrowania koncepcji projektowych przyszłego mostu, pomagając klientom w wyborze ostatecznego projektu budowy mostu.

Wykorzystanie VPL do przygotowania modelu analitycznego opartego na aktualizacji SHM toruje drogę do bardziej zautomatyzowanego przygotowania modeli konstrukcyjnych. Prowadzi to do kolejnego kroku w automatyzacji pracy inżynierów strukturalnych. Co więcej, integracja BIM z danymi SHM i IoT stanowi znaczący krok ku dostarczeniu narzędzia do całościowego spojrzenia na stan infrastruktury, które umożliwiłoby konserwację takich systemów z wyprzedzeniem, w czasie rzeczywistym, z przejrzystą wizualizacją uszkodzeń w formatach tabelarycznych i graficznych. Pozwala to menedżerom zautomatyzować SHM mostów i zaangażować ich we wciągające procesy decyzyjne z wykorzystaniem MR.

Praktyczne wyniki to również identyfikacja ograniczeń sprzętu Hololens MR, gdy model BrIM uzupełniony o wirtualne czujniki przesłane do HL, gdzie wirtualne czujniki (ze scalonym adresem



URL platformy SHM) nie działały w środowisku MR. Problem został rozwiązany przez doktoranta, który zaproponował i rozwiązał ten problem przy użyciu silnika UNITY 3D.

## **I. Aspekty formalne pracy i piśmiennictwo**

Praca doktorska składa się z obszernego przeglądu istniejącej literatury na temat ewolucji zarządzania mostami (BMS), SHM dla mostów oraz przyjęcia zaawansowanych technologii w monitorowaniu i zarządzaniu mostami. Rozdział referencyjny zawiera 243 cytowane prace, w tym 3 publikacje doktoranta (trzy artykuły i jeden referat konferencyjny).

Praca jest dobrze napisana i łatwa w czytaniu, bez znaczących wad. Znalaziono jednak kilka drobnych błędów, które nie wpływają na ogólną jakość pracy. Numer odpowiedniego akapitu oznacza stronę.

4.1 Pusta strona, która wydaje się być zamierzonym zakończeniem rozdziału.

7.1 Wielokrotne odniesienia nie zostały rozdzielone przecinkiem (np. [11][14]. Oczekowaną formą odniesienia byłoby [11], [14].

8.1 Brakuje słowa „Indyjski” przy słowie „Półwysep” („Półwysep Indyjski”).

10.1 Rys. 2-2: "typizacja uszkodzeń" wydaje się niezręczna. A co z "klasyfikacją uszkodzeń"?

22.1-2: Definicja UAV została podwojona zgodnie z następującym cytatem: „UAV (bezzałogowy statek powietrzny) oznacza bezzałogowy statek powietrzny (UAV)". Co więcej, słowo „położenie” również zostało powtórzone na tej samej stronie: „położenie i położenie statku powietrznego”.

77.1-78.1: Dwa betonowe łuki są wymienione w przypadku mostu Panewnicka. Ponadto podpis pod rys. 5-1 zawiera opis „Betonowy most łukowy”. Jest to ogólny opis, mimo że konstrukcja betonowa najprawdopodobniej zawiera zbrojenie, a dźwigar jest sprężony.

G.I.1: Wersja papierowa pracy zawiera losowo umieszczoną kopertę z płytą CD-ROM bez żadnej etykiety i notatki w treści. W związku z tym powstają wątpliwości, co jest w środku.

G.I.2: Co więcej, praca zawiera kilka przykładów mostów i testów laboratoryjnych, w związku z tym nieco mylące jest, jaki rodzaj modelowania i testowania został zastosowany w każdym z przypadków. Tabela z wykazem mostów i dostępnością przeprowadzonych analiz, modeli, obecności interfejsu SHM byłaby pomocna w orientacji.

## **J. Podsumowanie i ocena**

Biorąc pod uwagę ocenę pracy doktorskiej uważam, że stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną doktoranta w dyscyplinie naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport. Potwierdza również umiejętność prowadzenia pracy naukowej, a tym samym spełnia wymagania następujących wymogów legislacyjnych Rzeczypospolitej Polskiej: „Ustawa z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 r. Poz. 1668, z późniejszymi zmianami)”, dlatego wnoszę o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony.

10 września 2024 r.

Profesor nadzwyczajny, dr inż. Petr Konečný  
[podpis elektroniczny z datą 2024.09.10]]

Ja, Małgorzata Sokołowska, tłumacz przysięgły języka angielskiego w Gliwicach, nr wpisu na listę tłumaczy przysięgłych TP/1509/05. Poświadczam zgodność niniejszego tłumaczenia z okazanym mi oryginałem sporządzonym w języku angielskim. Gliwice, dnia 13 września 2024 r. Repertorium nr 576/2024.

**TŁUMACZ PRZYSIĘGŁY  
JĘZYKA ANGIELSKIEGO**

*mgr Małgorzata Sokołowska*

