Recenzja spełnia wymogi formalne

Kraków, 5 lipca 2023 r.

dr hab. inż. Tomasz Owerko, prof. AGH
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska
AGH w Krakowie

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Kamila Korusa „Digital Twins of Bridges: establishing principles of visualization with practical use cases"

Praca doktorska Pana mgr. inż. Korusa pt. „Digital Twins of Bridges: establishing principles of visualization with practical use cases" została napisana w języku angielskim. Jest to wartościowe podejście, ponieważ w oczywisty sposób znacząco poszerza potencjalne grono czytelników. Temat rozprawy obejmuje dwa aspekty: ustalenie zasad wizualizacji oraz praktyczne przypadki użycia dla Cyfrowych Bliźniaków obiektów mostowych. W odczuciu recenzenta taki tytuł jest nieco zaskakujący co najmniej z dwóch powodów. Po pierwsze nie do końca wiadomo, dlaczego Autor postanowił wyodrębnić jeden z przypadków użycia – wizualizację. Po drugie praca ma zdecydowanie koncepcyjny charakter i nie opiera się w sposób bezpośredni o szeroką gamę doświadczeń popartych różnorodnym zastosowaniem różnych przypadków użycia. Literalnie podchodząc do proponowanego tytułu, czytelnik ma oczekiwanie opracowania zasad wizualizacji (co *sensu stricto* nie ma miejsca) oraz zaprezentowania przypadków użycia, które w pracy są przedstawione na podstawie badań literaturowych, a nie na podstawie aktywności badawczej Autora. Innymi słowy ciężar wysiłków naukowych odbiega zarówno od tytułu rozprawy, jak i celu głównego, który sformułował Autor.

Kolejnym dosyć oryginalnym podejściem, nie do końca licującym z przyjętą praktyką w tego typu pracach, jest *de facto* brak sformułowania hipotezy badawczej. Wprawdzie w rozdziale 1.2 Autor opisuje cel pracy oraz cele pomocnicze, ale praca nie jest zorientowana na udowodnienie lub odrzucenie obserwacji naukowej sprecyzowanej w postaci hipotezy. Zdaniem recenzenta to jest błąd, ponieważ da się zauważyć, że w pracy poruszono wiele wątków, ale żaden z nich - łącznie z tymi odnoszącymi się do tytułu - nie są opracowane w bardzo szczegółowy sposób.

W konsekwencji Autor definiuje problem naukowy, posiłkując się celem pracy oraz celami pomocniczymi. Celem rozprawy doktorskiej jest zapewnienie podstaw do tworzenia i

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Rada Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport
wpłynęło dnia 12.07.2023
nr 135 zał. —

wykorzystywania cyfrowych bliźniaków mostów - wirtualnych odpowiedników obiektów w całym ich cyklu życia. W deklaracji Autora proponowana koncepcja odnosi się do ogólnych zasad Cyfrowych Bliźniaków, specyfiki mostów i praktyk stosowanych w branży inżynierii lądowej. Ponadto aspekt praktyczny proponowanych rozwiązań ma być udokumentowany przez nowatorskie przypadki użycia wykorzystujące techniki zidentyfikowane jako komponenty proponowanej koncepcji Cyfrowego Bliźniaka.

Tutaj należy podnieść pewną wątpliwość, mianowicie cel jest zdefiniowany bardzo szeroko, w szczególności dużo szerzej niż tytuł doktoratu, co dla czytelnika jest dosyć mylące. Jest to o tyle niepokojące, że udokumentowane w pracy aktywności naukowe Autora w pełni nie pokrywają merytorycznie ani tytułu, ani celu głównego pracy.

Ponadto Autor definiuje cele pomocnicze:

1. *Ocena obecnego etapu rozwoju cyfrowych bliźniaków poprzez badanie literatury i analizę wdrożeń (w zakresie obiektów mostowych).*
2. *Identyfikacja podstawowych technik tworzenia i wykorzystywania cyfrowych bliźniaków mostów.*
3. *Propozycja podstawowych cech cyfrowych bliźniaków dla mostów w odniesieniu do ich cyklu życia.*
4. *Wdrożenie praktycznej integracji modeli BIM i MES w wizualnym środowisku programistycznym w celu stworzenia częściowego cyfrowego bliźniaka w fazie projektowania z wykorzystaniem algorytmu optymalizacji (w celu automatyzacji procesu projektowania).*
5. *Wdrożenie techniki generowania syntetycznych chmur punktów, mającej na celu tworzenie i aktualizację modeli geometrycznych cyfrowych bliźniaków w fazie operacyjnej za pomocą algorytmów uczenia maszynowego.*

W opinii recenzenta cel numer jeden,choć poprawny, jest standardowym i oczekiwanym elementem budowania opracowania naukowego. Nie jest on unikatowy dla tej pracy, dlatego nieco zaskakuje jego powołanie do rangi celu pomocniczego pracy. Należy jednak podkreślić, że badania literaturowe w pracy są wykonane starannie.

Cel pomocniczy numer dwa jest bardzo istotny z punktu widzenia całej pracy. Autor przedstawia techniki tworzenia modeli cyfrowych, w tym takich, które mogą być fundamentami dla Cyfrowych Bliźniaków, ale raczej trudno obiektywnie zgodzić się, że udokumentował techniki tworzenia samych bliźniaków. Analogicznie w zakresie ich wykorzystania została wykonana poprawna praca – w odniesieniu do wybranych elementów Cyfrowych Bliźniaków. Niestety w zakresie tego celu można wskazać duże braki, w szczególności rażący jest brak dogłębnego omówienia technologii semantycznych. Swoją

drogą dosyć zaskakujące jest, że Autor, formułując szeroki zakres celu pracy, dużo stron poświęca technologiom wspomagającym, np. BIM, wizualizacji, a tak mało możliwościom związanym z ontologiami.

To zaskakujące, bo Autor dużo wysiłku wkłada w odtwórczą pracę związaną z IFC, gdzie hierarchie klas mają odzwierciedlać struktury reprezentujące elementy obiektu mostowego, które - co wynika z natury tego standardu - ewoluują dość wolno, podczas gdy ontologie mogą reprezentować informacje dynamiczne charakterystyczne dla Cyfrowych Bliźniaków (np. dostępne w sieci czujników IoT) i dzięki temu można zakładać, że będą one ewoluować nieustannie. Ponadto ontologie są zazwyczaj znacznie bardziej elastyczne, ponieważ mają reprezentować informacje pochodzące z różnego rodzaju, często heterogenicznych, źródeł danych. Ze względu na proces standaryzacji IFC hierarchie klas są *de facto* statyczne i opierają się na znacznie mniej zróżnicowanych i bardziej ustrukturyzowanych źródłach danych projektowych.

Realizacja celu pomocniczego numer trzy jest w opinii recenzenta najbardziej wartościowym elementem przedłożonej pracy. Zbiór cennych wskazówek popartych podpowiedziami co do metryk, jakie należy uzyskać, powoduje, że czytelnik ma dosyć precyzje wytyczne, dokąd należy dążyć, tworząc podwaliny Cyfrowych Bliźniaków. Oczywiście pewien niedosyt jest spowodowany oczekiwaniem, że Autor zaprezentuje przykład wdrożenia i implementacji Cyfrowego Bliźniaka, korzystając z rekomendacji, których sam udziela.

Cel pomocniczy numer cztery jest sformułowany w sposób, który zawiera dwa niezależne, zdaniem recenzenta, kamienie milowe. W pracy odnajdziemy przykłady zastosowania wizualnego języka skryptowego do optymalizacji procesu projektowego, jednak powiązanie tego faktu z Cyfrowym Bliźniakiem jest dosyć dużym uproszczeniem ze strony Autora pracy. Analogicznie samo powiązanie, swoją drogą dosyć powszechne w obrocie gospodarczym, technologii BIM oraz metody elementów skończonych nie jest jeszcze powodem do stawiania hipotezy, że mamy do czynienia z częściowym Cyfrowym Bliźniakiem, ponieważ Autor nie pokazał, w jaki sposób, ani w jakim zakresie ma zamiar na bieżąco aktualizować model obliczeniowy, a przecież opiera się tylko na statycznych danych projektowych.

Ostatnim celem pomocniczym jest część dotycząca generowania syntetycznych, tj. niebędących wynikiem pomiaru, chmur punktów. Wybór funkcjonalności algorytmu jest zaskakujący ponieważ - kolejny raz w tej pracy - wysiłek Autora w bardzo luźny sposób wiąże

się zarówno z tematem, celem podstawowym, jak i innymi rozdziałami. Jeżeli już stosować możliwości związane z chmurami punktów oraz AI, to warto było pokusić się o adnotację elementów obiektów mostowych i ich wyposażenia w chmurach punktów z pomiarów okresowych lub inwetaryzacyjnych z modelami obiektowymi, np. IFC. Zastosowanie takich aplikacji byłoby bliskie celowości wdrożenia Cyfrowych Bliźniaków dla obiektów mostowych oraz po prostu bardzo praktyczne.

Podsumowując, uzasadnienie wyboru tematu pracy oraz podjętego problemu badawczego jest w domyślnie poprawne, ale interpretacja zakresu badawczego w postaci celów pracy oraz brak sformułowania hipotezy badawczej budzą zastrzeżenia.

Praca składa się z sześciu rozdziałów. Pierwszy z nich ma na celu wprowadzenie czytelnika w opisywaną problematykę, przedstawiając poprawnie argumentowaną motywację dotyczącą zakresu pracy.

Rozdział drugi wprowadza czytelnika w koncepcję Cyfrowych Bliźniaków. Autor wykonał dobrą pracę w zakresie przeglądu literatury. Szkoda jedynie, że sporą uwagę poświęcił na kwestie koncepcji i definicji, a małą wagę przywiązał do aspektów technologicznych.

Rozdział numer trzy jest najbardziej obszerną, z merytorycznego punktu widzenia, częścią doktoratu. Składa się z czterech podrozdziałów, z których dwa pierwsze dotyczące BIM-u, standardu IFC, systemów monitoringu strukturalnego, sztucznej inteligencji, programowania wizualnego i chmur punktów są pracą ściśle odtwórczą. Recenzent nie podziela entuzjazmu do takiego stylu prowadzenia badań, gdzie poruszanych jest bardzo dużo tematów, z których każdy merytorycznie jest bardzo głęboki, a w pracy jest potraktowany niejednokrotnie pobieżnie. Przykładów można podać wiele, na przykład:

- brak zdefiniowania rekomendowanych poziomów LOIN (operowanie na nieaktualnej koncepcji LOD),
- w pracy nie jest poruszony ważny z punktu widzenia Cyfrowych Bliźniaków aspekt utrzymywania w aktualności modeli IFC z wykorzystaniem rozproszonych systemów wersjonowania,
- brak odniesienia i zdefiniowania zawartości modeli IFC z wykorzystaniem standardu IDS,

- brak omówienia klasy ifcSensor do przetrzymywania informacji o czujnikach IoT,
- bardzo pobieżne potraktowanie tematyki SHM,
- wybiórcze traktowanie języków programowania wspierających pracę z modelami,
- brak rzetelnego powiązania rozdzielczości chmur punktów i możliwości modelowania,
- niekonsekwentne potraktowanie kwestii AI (brak odniesień do modeli właściwych do problemów temporalnych, w tym do szeregów czasowych pochodzących z IoT).

Wszystko powyższe prowadzi do postawienia pytania, czy jest sens poruszać w sposób odtwórczy w doktoracie tak szeroką gamę tematów? Czy nie lepiej zawęzić zainteresowania, ale potraktować je z należytą uwagą.

Na drugim spektrum jest zawartość podrozdziałów 3.3 oraz 3.4. Są to części pracy, które recenzent ocenia najwyżej w całej pracy. Mimo że ta część opracowania ma jedynie charakter koncepcyjny, jest zdecydowanie wartościowa. Jedynie, ponieważ Doktorant aspiruje do stopnia naukowego w dziedzinie technicznej, co powinno implikować techniczną i technologiczną implementację przedkładanych postulatów. W podrozdziale 3.3 Autor celnie formułuje postulaty, jakie powinno się mieć na uwadze, tworząc rozwiązania typu Digital Twin. Jest ich dwanaście, a każdy został celnie sformułowany oraz rzetelnie uargumentowany. Następnie w podrozdziale 3.4 Autor definiuje kryteria (możliwe do wyrażenia w formie metryk).

Rozdziały czwarty oraz piąty przedstawiają wyniki opracowania algorytmów. Rozdział czwarty koncentruje się na optymalizacji w procesie projektowym. Recenzent nie został przekonany do celowości tego wysiłku w odniesieniu do celu i zakresu pracy. Gdyby praca dotyczyła wdrożenia technologii BIM, można by się do takiego zastosowania przychylić. Bardzo trudno zrozumieć, dlaczego algorytmy optymalizacyjne nie zostały opracowane i oprogramowane dla zadań bezpośrednio związanych z Cyfrowymi Bliźniakami np. dla analiz predykcyjnych na etapie użytkowania obiektu mostowego.

Efekty pracy przedstawione w rozdziale piątym obejmują wytworzenie aplikacji do generowania syntetycznych chmur punktów na podstawie modeli cyfrowych. Analogicznie jak

w przypadku rozdziału numer cztery, na uznanie zasługuje wysiłek Autora, jedynie kierunek prac w aspekcie tematu pracy jest trudny do zaakceptowania.

Zdaniem recenzenta zawartość pracy w odniesieniu do AI jest dosyć odtwórcza, ale poprawnie jak na przyjętą objętość sformułowana. Sztuczna inteligencja dla przedmiotowej rozprawy jest jedynie tłem, zatem obiektywnie nie należało tu oczekiwać bardzo rozbudowanego aparatu naukowego. Abstrahując od powiązania z celem głównym pracy, warto uznać, że generowanie chmur punktów, które będą miały nadawane automatycznie poprawne etykiety, jest wartościowe, ponieważ tworzenie zbiorów uczących jest niejednokrotnie wąskim gardłem we wdrożeniach AI do dyscypliny Inżynierii Lądowej.

Podsumowując, przedstawiona praca jest dosyć trudna do jednoznacznej oceny. Z jednej strony Doktorant stara się opracować wydajne rozwiązania agregujące najnowsze trendy i technologie w dyscyplinie. Rozdziały praktyczne (czwarty i piąty) wskazują na łatwość nabywania przez Doktoranta wiedzy również z innych niż Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport dyscyplin naukowych. Należy również docenić fakt sformułowania rozprawy w języku angielskim, który w całej rozciągłości pracy jest na poprawnym poziomie.

W kwestii zakresu, na jakim praca szczególnie powinna się koncentrować, dorobek Autora - który ma charakter twórczy - ogranicza się do ważnych, ale koncepcyjnych podrozdziałów 3.3 oraz 3.4. Tym bardziej szkoda, że rozdziały implementujące rozwiązania koncentrują się na aspektach dosyć luźno związanych z tematem i celem głównym pracy, zamiast rzetelnie zilustrować proponowane postulaty Cyfrowych Bliźniaków dla obiektów mostowych.

To wszystko daje podstawy, by sądzić, że mgr inż. Kamil Korus ma predyspozycje (nad którymi musi popracować), aby samodzielnie stawiać istotne dla otoczenia społeczno-gospodarczego hipotezy badawcze. Duża rozpiętość merytoryczna pracy powoduje, że trudno ocenić, czy projektowane rozwiązania są wydajne, natomiast zaproponowane rozwiązania algorytmiczne nie ilustrują postulatów Autora - zatem bez odpowiedzi pozostaje, czy kompetencje Autora obejmują zaplanowanie eksperymentu mającego na celu weryfikację trafności przyjętych założeń.

Na docenienie zasługuje fakt, że w pracy Autor z dużą łatwością stosuje różne rozwiązania, nie ograniczając się do jednej technologii – to dobrze rokuje na przyszłość. Można bezpiecznie założyć, że potrafi prowadzić dogłębną i dobrze przemyślaną analizę możliwości sprawnego i efektywnego doboru rozwiązania do rozpatrywanego problemu. Nie

przyjmuje przy tym dużej liczby warunków brzegowych (tworzy odporne uniwersalne rozwiązania), jednocześnie stawiając swoim rozwiązaniom adekwatne do problemu wymagania techniczne i funkcjonalne.

Autor w swojej pracy podjął się rozwiązania ważnego problemu naukowego, co w znacznym stopniu skończyło się sukcesem. Można przyjąć, że legitymuje się umiejętnościami samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w przyszłości. Praca w dużej części ma charakter twórczy oraz stanowi wartościowy zasób wiedzy. Komplet uwag recenzenta dotyczy aspektów związanych z procesem badawczym, dowodzeniem tezy oraz powiązaniem poszczególnych części, ale nie umniejszają one wartości poznawczej złożonej dysertacji.

W opinii recenzenta recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2020, poz. 85). Składam wniosek o dopuszczenie mgr. inż. Kamila Korusa do obrony publicznej.

Tomasz Owerko

Recenzję podpisał
Tomasz Owerko

* wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz. U. z 2026 r. poz. 1764)
Marzena Gaura