

Prof. Andrzej S. Nowak
Department of Civil Engineering
Auburn University,
Auburn, AL 36849, USA

RECENZJA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR INŻ. PATRYKA ZIOLKOWSKIEGO

pt.: „BADANIA DEFORMACJI KONSTRUKCJI BETONOWYCH PRZY UŻYCIU TECHNIK
TELEDETEKCYJNYCH”

1. Podstawa formalna recenzji

Podstawą opracowania niniejszej recenzji stanowi decyzja Rady Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej oraz pismo nawiązujące do tej decyzji podpisane przez Dziekana Wydziału Prof. dr hab. inż. Krzysztofa Wilde z dn. 24.10.2017.

2. Przedmiot, treść pracy i układ redakcyjny pracy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Patryka Ziolkowskiego pt. „Badania deformacji konstrukcji betonowych przy użyciu technik teledetekcyjnych”. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Krystyna Nagrodzka-Godycka.

Praca doktorska przedłożona do recenzji zawiera 130 stron, w tym: 5 stron bibliografii, 5 stron spis ilustracji, wykaz tabeli wykaz diagramów, 6 stron Załącznika A. Zasadniczą treść rozprawy poprzedza trzystronicowy spis treści. Pracę Autor podzielił na 10 rozdziałów.

Celem pracy było stworzenie procedur i rozwiązań dotyczących stosowania metod optycznych do analizy konstrukcji betonowych. Autor przedstawił najważniejsze problemy i wyzwania w użyciu tych metod do badania deformacji konstrukcji betonowych, które są przedmiotem recenzowanej pracy. W szczególności opisał nowoczesne metody teledetekcyjne i zagadnienia związane z Naziemnym Skanowaniem Laserowym (NSL) i obróbką chmury punktów. Jednym z założeń programu badawczego było zbudowanie bazy danych pomiarowych elementów betonowych poddanych monotonicznemu obciążaniu w rzeczywistej skali. Zbudowana baza danych posłużyła do opracowania procedur i rozwiązań będących celem pracy. Jako oryginalny dorobek autora wyróżnić można opracowanie dwóch metod określania deformacji, które korzystają z danych NSL. Autor wykonał analizę algorytmów redukcyjnych. Przedstawił również analizę zarysowania powierzchni betonu na bazie obrazu z szybkich kamer, w ramach którego wykonano jakościową analizę doboru filtrów obrazu. Autor zaproponował wykorzystanie odwzorowania chmury punktów do budowania modeli Metody Elementów Skończonych (MES). Przetestowano i oceniono szereg algorytmów, które pozwoliły na bazie chmury punktów elementu betonowego zbudować siatkę MES. Podjęty temat ma duże perspektywy rozwoju a użyciu metod teledetekcyjnych do diagnostyki konstrukcji poświęcony będzie rozdział w nowo tworzonej normie Model Code 2020.

Rozdział 1 zatytułowany Cel i Teza Pracy (1 strona) przedstawia krótkie podsumowanie potrzeby zajęcia się Naziemnym Skanowaniem Laserowym, jak również tezę i cel pracy doktorskiej.

Rozdział 2 wprowadza czytelnika w zagadnienia związane z teledetekcją i to, w jaki sposób ta stosunkowo młoda dziedzina rozwijała się w kontekście diagnostyki konstrukcji. Bardzo pomocne są przytoczone podstawowe definicje związane z omawianymi zagadnieniami.

W Rozdziale 3 autor przedstawił proces formułowania metody badawczej. Rozważania nad wyborem metody badawczej poprzedzone zostały przytoczeniem podstaw filozofii nauki. Wynikiem przeprowadzonych rozważań było sformułowanie teorii i zaplanowanie programu badań.

W Rozdziale 4 opisany został bieżący stan wiedzy w zakresie metod teledetekcyjnych. W ramach tego rozdziału opisano fotogrametrię, metody światła strukturalnego i Naziemny Skanowanie Laserowe, przytaczając zwięźle tło historyczne.

W Rozdziale 5 autor zajmuje się poszukiwaniem niszy badawczej w obrębie wybranego przez siebie zagadnienia. Wstępem do rozdziału było przeprowadzenie przez autora analizy literatury w poszukiwaniu opracowań dotyczących, zarówno analizy konstrukcji przy użyciu metod bazujących na NSL i fotogrametrii, jak i w szczególności analizy dotyczącej konstrukcji betonowych. Po przeprowadzeniu rozpoznania autor wyszczególnił problemy i wyzwania, a także określił aspekty, które trzeba wziąć pod uwagę przy planowaniu pracy badawczej.

Rozdział 6 opisuje problematykę zagadnień związanych z Naziemnym Skanowaniem Laserowym: odwzorowanie danych z NSL; błędy pomiarowe na etapie pozyskiwania danych; błędy na etapie post-processingu; dowiązywanie chmury punktów; unifikacja i porządkowanie chmury punktów; segmentacja chmury punktów; badanie deformacji i wykrywanie zmian za pomocą NSL.

Rozdział 7 dotyczy eksperymentalnych badań autora. Jednym z założeń programu badawczego było stworzenie bazy danych pomiarowych z deformacji obiektów betonowych rzeczywistych rozmiarów. Prace laboratoryjne obejmowały wykonanie, poddanie monotonicznemu obciążaniu, które wywołuje deformacje i wykonanie skaningu laserowego czterech belek (3 żelbetowe i 1 sprężona) o różnym układzie zbrojenia. W rozdziale zawarto opis materiałowy, geometrię elementów, sposób przygotowania elementów do skanowania, przygotowanie stanowisk badawczych, specyfikacje techniczne urządzeń, metodykę i przebieg pomiarów, opis odkształceń, morfologię rys, post-processing danych NSL. Chmury punktów pozyskane w ramach badań laboratoryjnych były wykorzystane jako materiał badawczy przy opracowywaniu procedur i rozwiązań, będących przedmiotem dysertacji. Dodatkowo wykonano rejestracje szybką kamerą niszczonej próbki betonowej.

W Rozdziale 8 opisano najważniejsze zagadnienia przetwarzania chmury punktów z NSL.

Rozdział 9 stanowi główny wkład intelektualny autora. Przedstawiono w nim procedury i rozwiązania.

Badanie deformacji za pomocą Metody Translacji Sfer jest to metoda opracowana przez autora, która polega na śledzeniu charakterystycznych obiektów w wirtualnej przestrzeni będącej odwzorowaniem elementu konstrukcyjnego. Charakterystyczne obiekty umieszczone na powierzchni badanego elementu po zeskanowaniu stają się odwzorowaniem w chmurze punktów. Odwzorowania charakterystycznych obiektów zamieniane są w sferyczne obiekty

mesh. Następnie obiekty mesh ze wszystkich odwzorowań elementu w czasie umieszczane są w jednym układzie współrzędnych. Wszystkie układy współrzędnych, dla różnych punktów w czasie, uznać można za tożsamy ze względu na to, że niestosowane były dowiązania na sygnały lokujące. Poprzez śledzenie zmiany położenia obiektów mesh w czasie możliwa jest obserwacja zmiany kształtu badanego elementu (czyt. deformacji). W ramach przeprowadzonych analiz przedstawiono propozycję umieszczenia obiektów charakterystycznych w zależności od badanego elementu betonowego. Przedstawiono warunki brzegowe metody, jej potencjalne zastosowanie, a także dokonano analizy porównawczej z metodami klasycznymi i fotogrametrią: założenia i obserwacje, dobór metodyki w przygotowaniu elementu betonowego do pomiarów, sposób wyznaczania sfer na przykładzie, analiza na bazie własnego materiału badawczego, analiza porównawcza – określanie ugięć, oraz analiza porównawcza dla rozkładu trajektorialnego – sprawdzanie odkształceń.

Autor zaproponował badanie deformacji przy użyciu zakresowej analizy map intensywności. Metoda bazuje na analizie rozkładu barw i ich histogramów, dla różnych punktów w czasie. Kalibrowanie skali odbywało się na podstawie wzorca bazowego umieszczonego na podporze. Według autora, przesunięcie rozkładu barw dla odwzorowania przed i po deformacji wskazuje na zmianę w elemencie. Najbardziej obrazowe jest porównanie wykresów w przekroju środkowym dla rozkładu po wysokości elementu (przed i po deformacji). Wartości przesunięcia odczytane z programu porównano z wartościami z pomiarów klasycznych, a także przedstawiono warunki brzegowe metody. W celu uzyskania równomiernej gęstości chmury punktów i zredukowania jej rozmiarów, autor dokonał analizy doboru filtra redukcyjnego, testując kilka wyselekcjonowanych przez siebie algorytmów. Z zadaniem najlepiej poradził sobie filtr nr 3, który pozwolił na ujednoczenie i redukcję wielkości chmury o 90%, znacząco zmniejszając ilość potrzebnego miejsca do jej przechowywania, przy czym nie zmienił znacząco rozkładu w mapach intensywności. Warto wspomnieć, że duża ilość danych jest jednym z problemów wyszczególnionych w opracowywaniu normy Model Code 2020. Podrozdział składa się z następujących części: założenia i obserwacje, wpływ redukcji szumu na wyniki analizy danych chmury punktów oraz wnioski dotyczące metody.

Poruszając zagadnienie badania konstrukcji betonowych nie sposób nie wspomnieć o zarysowaniu. Zbyt duże szerokości rys i ich rozległa propagacja są sygnałem alarmowym, że z konstrukcją dzieje się coś złego. Analizy przeprowadzone w ramach prac nad dysertacją wskazały, że zastosowanie danych NSL do analizy morfologii rys ma zastosowanie jedynie dla fazy przed i pokrytycznej. Żeby przedstawić praktyczny sposób na określenie stanu zarysowania powierzchni betonowej autor zaproponował analizę obrazu cyfrowego z szybkich kamer. Szybkie kamery są w stanie rejestrować obraz z prędkością nawet do 16 giga-pikseli na sekundę, co pozwoliło uchwycić powstawanie zarysowania betonu w dokładny sposób. W ramach tego zagadnienia autor dokonał jakościowej analizy 9-ciu wyselekcjonowanych przez siebie filtrów obrazu pod kątem znalezienia takiego, który w najlepszy sposób uwidoczniłby stan zarysowania. Podrozdział składa się z następujących części: założenia metody, analiza obrazu oraz wnioski.

Autor zaproponował wykorzystanie danych chmury punktów do automatycznego modelowania metoda elementów skończonych (MES) istniejących konstrukcji betonowych. Jest to innowacyjne podejście mieszczące się w obrębie szeroko pojętej inżynierii odwrotnej. Nie istnieją opracowania literaturowe, które prezentowałyby takie zagadnienia w kontekście

modelowania żelbetu. Celem zadania badawczego było znalezienie, takiego algorytmu przetwarzania chmury punktów, który pozwoliłby na stworzenie siatki MES bez ręcznej obróbki na skanowanym obiekcie. Automatyczne tworzenie siatki MES na odwzorowaniu istniejącego obiektu jest rozwiązaniem, które może być pomocne w inspekcji obiektów, które nie posiadają odpowiedniej dokumentacji i wpisuje się idealnie we współczesne trendy inżynierii odwrotnej. Pomysły opisane w ramach tego podrozdziału stanowią przyczynek do rozwinięcia tej metody. Zagadnienie to posiada ogromne możliwości rozwoju i może zostać poszerzone o wiele innych rozwiązań. Podrozdział składa się z następujących części: przejście pomiędzy chmurą punktów, a modelem MES; zmiana struktury i algorytmy przetwarzania chmury punktów oraz wnioski dotyczące metody.

Ostatni Rozdział 10 stanowi podsumowanie rozważań prowadzonych w dysertacji i wnioski odnośnie opracowanych metod. Przedstawiono, także kierunki, w których opracowane rozwiązania mogą być rozwijane.

3. Ocena merytoryczna pracy

Recenzowana praca obejmuje zarówno część analityczną jak też eksperymentalną. Autor sformułował efektywne podejście do wykorzystania urządzeń laserowych i optycznych, interpretacje wyników pomiarów polowych oraz zademonstrował praktyczne zastosowanie proponowanej metody na przykładzie badań laboratoryjnych.

Treść pracy odpowiada jej tytułowi. Przyjęty przez Autora sposób zredagowania pracy oceniam pozytywnie. Autor precyzyjnie rozdziela dorobek badawczy innych od badań i analiz własnych.

Opiniowaną rozprawę oceniam jako bardzo dobrą. Poniżej wymienione argumenty stanowią uzasadnienie tej oceny.

3.1. Główne osiągnięcia pracy

Głównym wkładem intelektualnym autora jest opracowanie metody wykorzystującej nowoczesne urządzenia laserowo-optyczne do wykrywania stanów granicznych w konstrukcjach betonowych. Temat jest bardzo na czasie, jest duże zainteresowanie bezdotykowymi metodami oceny stanu konstrukcji tak aby zapobiegać awariom, uprzedzając pojawienie się poważnych uszkodzeń. W konstrukcjach betonowych, pojawienie się rys jest ostrzeżeniem o stanie wyteżenia, które może prowadzić do poważnych konsekwencji.

Zaproponowana metoda polega na śledzeniu wirtualnych odwzorowań w chmurze punktów. Zazwyczaj chmurę punktów mierzy się punkt-do-punktu i trzeba ustalić, który punkt przyjąć i do którego dociągnąć linię pomiarową. Problemem jest sprawdzenie stanu przed i po deformacji, skoro struktura chmury punktów jest inna dla każdego pomiaru. Trudno jest używając dotychczasowych metod śledzić całościowy charakter deformacji elementu. Metoda opracowana przez autora polega na tym, że odwzorowania fizyczne obiektów (elementów konstrukcyjnych) są przetworzone do wirtualnych sferycznych obiektów. Testy laboratoryjne potwierdziły, że urządzenie laserowe pozwala na wykrywalność rys w betonie przetestowanym przy zastosowaniu tradycyjnych metod.

Powyższe powoduje iż oceniam wybór tematu pracy doktorskiej jako trafny, aktualny i ważny tak z naukowego jak też praktycznego - inżynierskiego punktu widzenia.

3.2. Uwagi o charakterze dyskusyjnym

Metoda Translacji Sfer jest przedstawiona jako skuteczny sposób na wykrywanie stanów przedawaryjnych i krytycznych na przykładzie konstrukcji betonowych. Jednakże część opisowa metody jest niewystarczająca, zwłaszcza dla potencjalnych użytkowników zajmujących się monitorowaniem istniejących konstrukcji. Użycie narzędzi optycznych (bezdotykowych) jest bardzo atrakcyjną propozycją, pozwala na dużą oszczędność czasu i robocizny a w wielu przypadkach umożliwia wcześniejsze wykrycie zagrożenia. Jednakże przedstawienie tych korzyści również wymaga szerszego omówienia. Dlatego dobrze byłoby gdyby autor przygotował rozszerzony raport z opisem metody translacji sfer wraz z praktycznymi przykładami.

Beton jest traktowany jako materiał jednorodny, ale właściwości mechaniczne charakteryzują się dużym stopniem zmienności. Dlatego ważnym uzupełnieniem pracy byłoby oszacowanie statystycznych parametrów opisujących zmienność. Czy wyniki badań eksperymentalnych są powtarzalne? Na ile otrzymane i przedstawione w pracy wyniki badań są reprezentatywne dla konstrukcji betonowych? Jakie są ograniczenia we wnioskach?

Badania analityczne oraz eksperymentalne przeprowadzone przez autora, jak również analiza dokonana innych badaczy przedstawiona przez autora, zasługuje na szersze podsumowanie.

Rozdział z wnioskami końcowymi powinien być rozszerzony a same wnioski powinny odnieść się do szerszej oceny skuteczności proponowanych przez autora metod.

3.3. Uwagi redakcyjne:

Układ rozdziałów nie jest przejrzysty.

Spis treści – wymaga poprawek – numer strony 2.2, 5.1.3, ...

Naziemny skaning jest w 5.1 a potem znow w 6.

Jakość niektórych fotografii jest niedobra, praktycznie obrazy są nieczytelne.

4. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa została poświęcona poznawczemu i ważnemu z praktycznego punktu widzenia problemowi.

W pracy doktorskiej Autor wykazał się szeroką wiedzą z zakresu literatury przedmiotu, oraz umiejętnością prowadzenia badań eksperymentalnych i poprawnej interpretacji uzyskanych wyników, wykorzystując zaawansowane oprogramowanie komputerowe.

Uwagi sformułowane w p. 3.2 recenzji nie umniejszają merytorycznej wartości pracy.

Podsumowując niniejszą opinię stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Patryka Ziolkowskiego pt. „Badania deformacji konstrukcji betonowych przy użyciu technik teledetekcyjnych” spełnia wszystkie warunki merytoryczne i formalne, którym powinna odpowiadać rozprawa doktorska, określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 - wraz z późniejszymi zmianami. Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Z uwagi na aktualność podjętego tematu i jego znaczenie poznawcze oraz zrealizowane w szerokim zakresie badania eksperymentalne i analizy, w tym komputerowe, powodujące, iż praca ma charakter kompleksowy o znaczeniu praktycznym, wnoszę o rozważenie wyróżnienia recenzowanej rozprawy doktorskiej.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'A. Nowak', is positioned on the right side of the page.