

dr hab. inż. Michał Strach, prof. uczelni
Akademia Górniczo – Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska
Al .A. Mickiewicza 30
30-059 Kraków

Kraków, 09.10.2020 r.

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Marii Kowalskiej

pt.: „Opracowanie metodyki przetwarzania danych z naziemnego skaningu laserowego w pomiarach kontrolnych obiektów inżynierskich”.

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę opracowania niniejszej recenzji stanowi uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport na PW z dnia 07.07.2020 r. oraz pismo nr RNDILiT\96\2020 Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Warszawskiej – prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacza z dnia 13.07.2020 r.

Opinia dotyczy dysertacji podsumowującej przewód doktorski kandydata, zatytułowanej „Opracowanie metodyki przetwarzania danych z naziemnego skaningu laserowego w pomiarach kontrolnych obiektów inżynierskich”. Promotorem w przewodzie jest Pani dr hab. inż. Dorota Zawieska, prof. uczelni, zaś promotorem pomocniczym Pani dr hab. inż. Janina Zaczek-Peplinska. Postępowanie realizowane jest w dyscyplinie naukowej Inżynieria Lądowa i Transport

2. Przedmiot, treść i układ redakcyjny rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji rozprawa jest monografią naukową wydaną przez Politechnikę Warszawską w 2020 r. Monografia liczy 178 stron. Zawiera ona bogato ilustrowany tekst wraz z zamieszczonym na początku streszczeniem w języku polskim i angielskim, spisem treści oraz kończącym wywód wykazem cytowanej literatury. Wykaz ten liczy 71 pozycji literaturowych i 4 źródła internetowe. Wszystkie zostały uporządkowane w kolejności

alfabetycznej. Ponadto w pracy zawarto 16 tabel i 109 rysunków, wśród których znajduje się 5 schematów.

Do monografii została dołączona płyta CD zawierająca elektroniczną wersję monografii wraz z 12 załącznikami.

W badaniach zostało przeanalizowane szerokie spektrum uwarunkowań dotyczących technologii naziemnego skaningu laserowego, zarówno w zakresie czynników mających wpływ na jakość obserwacji, jak i procesu opracowania danych pomiarowych. Autorka na potrzeby swoich badań przeprowadziła gruntowną analizę literatury. Na bazie zdobytej wiedzy zaproponowała autorskie testy laboratoryjne, terenowe i metodykę opracowania danych. Swoje rozwiązania przetestowała przy okazji budowy ściany szczelinowej dla powstającej w okresie badań budowli Mennica Legacy Tower w Warszawie. Na potrzeby analizy i prezentacji wyników zastosowała programy Matlab R2016b i CloudCompare V2.

Praca składa się z ośmiu rozdziałów. Pierwszy z nich określa przedmiot, cel i założenia rozprawy, przybliży także obiekt poddany badaniom oraz zasady realizacji pomiarów kontrolnych obiektów inżynierskich.

Kolejny rozdział przybliży zasady stosowania technologii naziemnego skanowania laserowego (ang. Terrestrial Laser Scanning, TLS). Autorka powołując się na literaturę zaprezentowała metody pomiaru odległości, a także czynniki mające wpływ na jakość obserwacji. Czynniki te pogrupowała na: parametry techniczne skanera, kąt padania wiązki laserowej na inwentaryzowaną powierzchnię, odległości do skanowanego obiektu, właściwości fizyczne badanej powierzchni oraz warunki atmosferyczne panujące w trakcie pomiaru. W dalszej części przedstawiła autorski schemat planowania i prowadzenia pomiarów techniką skanowania laserowego, a także opracowania i analiz wyników. Zwróciła uwagę na rodzaje wyznaczanych zmian w pomiarach kontrolnych obiektów inżynierskich oraz ich wpływ na decyzję o metodzie pomiaru skaningowego. Następnie zaprezentowała metody opracowania danych dla chmur punktów. Znalazły się wśród nich: metody orientacji przestrzennej, filtracji i algorytmy porównywania dla chmur punktów pochodzących z pomiarów TLS.

W trzecim rozdziale Autorka, w oparciu o badania literaturowe, przedstawiła możliwości wykorzystania naziemnego skanowania laserowego w pomiarach kontrolnych betonowych obiektów inżynierskich. Wśród możliwych zastosowań zostały zaprezentowane: monitoring deformacji obiektów mostowych w trakcie testów obciążeniowych, inwentaryzacja architektoniczno – budowlana, inwentaryzacja powierzchni betonowej wraz z oceną jej stanu

technicznego, a także wyznaczenie powstałych pęknięć i szczelin pod wpływem oddziaływania czynników zewnętrznych.

Dwa następne rozdziały stanowią prezentację dorobku Autorki w zakresie metod pomiarów kontrolnych obiektów betonowych z zastosowaniem techniki TLS oraz późniejszego opracowania danych. Rozdział czwarty zawiera analizę czynników i ich wpływ na proces skanowania obiektów betonowych. W kolejnym, piątym rozdziale zostały opisane badania nad sposobami planowania pomiarów, a także opracowania obserwacji na potrzeby analizy wyników. Na podstawie badań określone zostały wytyczne dotyczące sposobu rozmieszczenia stanowisk pomiarowych oraz późniejszej obróbki danych, w tym doboru algorytmów filtracji. W testach oceniających poprawność wyników porównania chmur punktów zostały zastosowane znane i powszechnie stosowane algorytmy: Cloud to Cloud, Cloud to Mesh Distances oraz Multiscale Model to Model Cloud Comparison.

Rozdział szósty jest jednym z najkrótszych, jednocześnie jednym z najważniejszych fragmentów rozprawy. W oparciu o zdobytą wiedzę Autorka przedstawiła własną propozycję zastosowania danych z naziemnego skanowania laserowego w pomiarach kontrolnych betonowych obiektów inżynierskich. Zaproponowana metodyka obejmuje dwa schematy postępowania. Pierwszy z nich dotyczy pozyskiwania i przetwarzania danych, zaś drugi obejmuje etap analizy danych.

W rozdziale siódmym została przedstawiona weryfikacja zaproponowanej autorskiej metodyki przetwarzania danych z naziemnego skanowania laserowego. Opracowanie oparto na danych pochodzących z dwóch obiektów testowych: ściany szczelinowej obiektu Mennica Legacy Tower oraz ściany odpowietrzanej zapory wodnej w Rożnowie. Badania związane ze ścianą szczelinową objęły dwa planowane cykle pomiarowe oraz późniejsze porównanie wyników. W przypadku betonowej ściany zapory wodnej przeanalizowane zostały dane archiwalne pochodzące z pomiarów inwentaryzacyjnych wykonanych w odstępie dwóch lat.

Ósmy rozdział zawiera syntetyczne podsumowanie przeprowadzonych badań oraz najważniejsze wnioski i spostrzeżenia.

3. Uwagi ogólne dotyczące tematyki pracy

Wraz z upływem czasu wszystkie elementy konstrukcyjne ulegają starzeniu tracąc swoje pierwotne właściwości użytkowe. Dodatkowy wpływ czynników niekorzystnych takich jak np.: wilgoć, temperatura czy różnego rodzaju korozje powodują, że w pewnym okresie

użytkowania materiały konstrukcyjne tracą swoje pierwotne właściwości i ulegają powolnej degradacji. W takim przypadku wymagana jest ich szybka naprawa. W tym kontekście ważne jest, aby w odpowiednim czasie zdiagnozować uszkodzenie w konstrukcji i zapobiec jego dalszemu rozwojowi. Zagadnienie diagnostyki i pomiarów kontrolnych konstrukcji betonowych, będących w głównej mierze domeną geodezji, ma ogromne znaczenie techniczne i ekonomiczne. W ostatnich latach w pomiarach geodezyjnych zyskały na popularności techniki skanowania laserowego. Dostarczają one precyzyjnej informacji o geometrii i stanie obiektu. Jedną z najpopularniejszych metod pomiarowych stosowanych w geodezji inżynierskiej jest naziemny skaning laserowy. Dostarcza on quasi-ciągłej informacji o geometrii obiektu w postaci przestrzennie zorientowanej chmury punktów. Każdy z punktów posiada dodatkową informację o intensywności odbicia wiązki laserowej.

Wraz z rozwojem technologii i pojawianiem się nowych urządzeń pomiarowych realizowane są intensywne w tym zakresie prace naukowo – badawcze i wdrożeniowe, zarówno w skali krajowej jak i międzynarodowej. Dobrym przykładem tej działalności jest recenzowana rozprawa doktorska Pani mgr inż. Marii Kowalskiej, wykonana pod kierunkiem Pani prof. Doroty Zawieska i promotora pomocniczego Pani Prof. Janiny Zaczek-Peplinskiej. Praca ta może się niewątpliwie przyczynić do postępu w zakresie racjonalnego i bardziej świadomego wykonywania specjalistycznych pomiarów kontrolnych obiektów inżynierskich z zastosowaniem naziemnych skanerów laserowych. Tematem szczegółowo analizowanym w pracy jest opracowanie metodyki przetwarzania danych z naziemnego skaningu laserowego w pomiarach kontrolnych obiektów inżynierskich.

Celem nadrzędnym, postawionym w rozprawie, jest przedstawienie rozwiązań, które pozwoliłyby na osiągnięcie optymalnej efektywności w pomiarach kontrolnych i inwentaryzacyjnych betonowych obiektów inżynierskich z zastosowaniem naziemnych skanerów laserowych. Aby postawiony cel mógł zostać w pełni zrealizowany przeprowadzono szereg badań laboratoryjnych wstępnych, a następnie właściwych. Rozwiązanie takie wydaje się w pełni słuszne i świadczy niewątpliwie o dobrym przygotowaniu merytorycznym Doktorantki niezbędnym do realizacji postawionego problemu naukowego.

Analizując cele nakreślone w dysertacji stwierdza się, że w badaniach wstępnych przeanalizowano czynniki, których wpływ uznano za istotny w kontekście przedmiotu pracy. Weryfikacji poddano parametry wpływające na jakość danych uzyskanych z pomiaru wykonanego naziemnym skanerem laserowym. Wśród najważniejszych znalazły się: warunki atmosferyczne podczas pomiaru, parametry techniczne skanera, kąt padania wiązki lasera,

odległość od skanowanej powierzchni, właściwości fizyczne obiektu, takie jak kolor, chropowatość, wilgotność i refleksyjność powierzchni. Dla każdego z wymienionych czynników zostały przeprowadzone badania literatury, a także prace eksperymentalne. Jednym z najważniejszych elementów wpływających na jakość i dokładność obserwacji jest odległość mierzonego obiektu od skanera i kąt padania wiązki lasera na próbkowaną powierzchnię. Na potrzeby analiz wspomnianych czynników Doktorantka opracowała autorskie algorytmy w oprogramowaniu Matlab. Przygotowane narzędzia informatyczne umożliwiły wykonanie wizualizacji rozkładu analizowanych wielkości i selekcję punktów do określonych przedziałów wartości. W tej części badań przeprowadzono także testy pomiarowe do różnych powierzchni betonowych. Pozyskany materiał był podstawą do doboru optymalnych algorytmów filtracji chmur punktów, a także ich parametrów. Z kolei na potrzeby wyznaczenia wzajemnej odległości chmur punktów i ich jakościowej oceny zastosowano kilka metod, spośród których najbardziej wiarygodny okazał się algorytm Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2).

W pomiarach inwentaryzacyjnych i kontrolnych wymagana jest wysoka jakość danych. Obserwacje muszą spełniać odpowiednie kryterium dokładności w procesie opracowania wyników oraz umożliwiać porównywanie danych w kolejnych cyklach pomiarowych. Z tego powodu zostały zaproponowane klasy obszarów jednorodnych pogrupowane ze względu na oczekiwaną dokładność odwzorowania powierzchni.

W badaniach właściwych Doktorantka zaproponowała autorską procedurę pozyskiwania i opracowywania danych z naziemnego skaningu laserowego na potrzeby pomiarów kontrolnych obiektów inżynierskich. Metodyka odnosi się do wszystkich etapów prac w technologii TLS. Podzielono ją na trzy grupy, w których dobór parametrów pomiaru został uzależniony od spodziewanej dokładności wyników. Weryfikacja zaproponowanych procedur została przeprowadzona w oparciu o dwukrotne, niezależne cykle pomiarowe ściany szczelinowej obiektu Mennica Legacy Tower. Pozyskane chmury punktów posegregowano w oparciu o zaproponowane klasy obszarów jednorodnych. W dalszej kolejności wyznaczono różnice odległości między nimi z zastosowaniem wspomnianego już algorytmu (M3C2). Następnie zestawiono ze sobą wyniki różnic odległości dla nieprzetworzonej oraz przetworzonej na podstawie algorytmu chmury punktów. Na podstawie porównania wskazano, że nieprzetworzone obserwacje mogą prowadzić do fałszywych wniosków sugerujących zmiany powstałe na mierzonym obiekcie. Powodem jest uwzględnienie w analizach obserwacji uzyskanych przy zbyt dużym kącie padania wiązki lasera, zbyt dużej odległości obiektu pomierzonego z niewystarczającą gęstością.

W badaniach przeprowadzono także analizę możliwości wykorzystania archiwalnych pomiarów skaningowych do określenia zmian geometrycznych obiektu. Za przykład posłużyła betonowa ściana odpowietrzna zapory wodnej w Rożnowie. Otrzymanie wiarygodnych wyników możliwe było dopiero po odpowiedniej obróbce danych.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska obejmuje analizę i metodykę opracowania danych pochodzących z naziemnego skanowania laserowego na potrzeby prowadzenia pomiarów kontrolnych betonowych obiektów inżynierskich. Należy uznać, że tematyka rozprawy jest istotna i aktualna, ma zarówno znaczenie poznawcze, jak i odniesienie do praktyki inżynierskiej.

W pracy Autorka dokonała oceny aktualnego stanu wiedzy w przedmiocie oraz przeprowadziła serię badań eksperymentalnych obejmujących:

- zasady projektowania sieci stanowisk skanera,
- uwzględnienie wpływu geometrii i właściwości fizycznych inwentaryzowanych powierzchni,
- zastosowanie odpowiednich algorytmów przetwarzania i analizy chmur punktów.

Udowodniła, że możliwe jest otrzymanie wiarygodnych informacji o zachodzących zmianach geometrycznych obiektu pod warunkiem doboru odpowiedniego sposobu analizy wyników dla pomiarów kontrolnych.

Recenzowana rozprawa ma charakter analityczno – badawczy. W części badań własnych, dość dobrze opisanych w pracy, zastosowany został precyzyjny, stacjonarny skaner laserowy oraz specjalistyczne oprogramowanie wspierające prowadzenie różnorodnych analiz porównawczych. Przeprowadzony profesjonalnie proces badawczy uwiarygodnia uzyskane rezultaty. Otrzymane wyniki zostały poddane wnikliwej analizie z wyprowadzeniem wniosków pośrednich i końcowych.

Szkoda, że opracowanie ogranicza się jedynie do pomiaru i analizy obiektów betonowych. Takie podejście pozostawia pewien niedosyt. Uwzględnienie innych materiałów, tworzących konstrukcję obiektów inżynierskich, poszerzałoby zakres testów terenowych oraz analiz wyników. Wówczas rozprawa miałaby jeszcze bardziej użyteczny charakter. Postępowanie Doktorantki jest jednak zrozumiałe biorąc pod uwagę, że właśnie beton jest najczęściej stosowanym materiałem w budownictwie inżynierskim.

Można mieć także uwagi do zastosowanej w badaniach aparatury. W testach wykorzystano naziemny skaner laserowy Z+F Imager 5006h. Urządzenie to brało udział zarówno w badaniach laboratoryjnych, jak i pracach terenowych. Na danych pochodzących jedynie ze wspomnianego skanera Autorka przeprowadziła obróbkę obserwacji oraz ich późniejszą analizę. O ile procedura badawcza zaproponowana w pracy jest w pełni poprawna o tyle cennym byłoby pozyskanie materiału pomiarowego z innego skanera laserowego i poddanie go tej samej procedurze analitycznej. Uzyskanie zbliżonych do siebie wyników opracowań z różnych urządzeń pomiarowych potwierdziłoby uniwersalność stosowania opracowanej metody do obróbki i analizy danych.

Można mieć nadzieję, że badania nad technologią skaningu laserowego będą w dalszym ciągu kontynuowane przez Autorkę, a zakres testów zostanie poszerzony także o inne materiały budowlane i urządzenia pomiarowe.

Podsumowując ocenę merytoryczną stwierdzam, że Doktorantka:

- prawidłowo dobrała temat rozprawy doktorskiej, postawiła naukowe tezy oraz wyczerpująco przedstawiła ich dowód,
- wykazała się dostateczną wiedzą w zakresie problematyki okresowych pomiarów kontrolnych obiektów inżynierskich wykonanych z betonu,
- nabyła odpowiednie doświadczenie w projektowaniu pomiarów TLS z uwzględnieniem geometrii i właściwości fizycznych mierzonych obiektów, a także algorytmów w analizach chmur punktów,
- zastosowała nowoczesne narzędzia badawcze, obliczeniowe i analityczne oraz zastosowała naukowe metody obliczeń i analiz numerycznych.

5. Uwagi edytorskie

1. W pracy znajdują się błędy interpunkcyjne i literówki.
2. W tekście, tabelach i rysunkach przy wartościach liczbowych występują separatory dziesiętne, jednak Autorka nie postępowała w tym względzie konsekwentnie. Naprzemiennie występują kropka i przecinek. W zdecydowanej większości jest to jednak kropka, podczas gdy w języku polskim separatorem dziesiętnym jest przecinek.
3. Str. 120 - nieprawidłowy zapis przyimka złożonego „z pośród” zamiast „spośród”
4. Trzydzieści razy pojawiają się nieprawidłowe określenia typu:

dedykowana podziałka kątowna, metodyka lub urządzenie jest *dedykowane* pomiarom. W takich przypadkach należy zastosować określenia typu: przeznaczona do, służąca, mająca zastosowanie.

6. Najważniejsze osiągnięcia w pracy

Dobór tematyki rozprawy doktorskiej jest aktualny, o trendzie rozwojowym, z wyraźnymi elementami oryginalnymi.

W pracy zaprezentowano kompleksowe rozwiązanie podjętego problemu naukowo-badawczego, na które złożyły się: studia literaturowe, planowanie badań, testy laboratoryjne wstępne i zasadnicze, zastosowanie właściwego systemu pomiarowego, pełna analiza zbioru licznych danych, wnikliwy opis analityczny, poprawne i prawidłowe wnioskowanie, wskazanie kierunków dalszych badań.

Do najważniejszych szczegółowych osiągnięć Doktorantki można zaliczyć:

- przeprowadzenie różnych metod filtracji surowych danych z chmur punktów i wskazanie algorytmu S.O.R. jako najlepszego do eliminacji błędnie pomierzonych punktów,
- analizę czterech znanych algorytmów wyznaczania odległości wzajemnej chmur punktów oraz wytypowanie metody Multiscale Model to Model CloudComparison (M3C2), w której wyznaczone są skierowane odległości pomiędzy dwiema chmurami punktów, jako najlepszej do wyznaczania zmian powierzchni,
- autorską, kompleksową propozycję metodyki przetwarzania chmur punktów, opartej na własnych i komercyjnych algorytmach, pozwalającej na uzyskanie danych o oczekiwanej do założonego zadania dokładności.

7. Wnioski końcowe

Warsztat naukowy Pani mgr inż. Marii Kowalskiej, kandydatki ubiegającej się o nadanie stopnia doktora, charakteryzują następujące elementy:

- praca napisana poprawną polszczyzną z zastosowaniem specjalistycznego języka, styl wypowiedzi jest jasny i zrozumiały,

- kandydatka umiejętnie wybrała liczne pozycje literatury przedmiotu badań w przeważającej liczbie w języku angielskim, ale także w języku polskim,
- kandydatka prowadziła badania według założonego planu pracy,
- temat i cel pracy został poprawnie i jasno sformułowany; zakres badań został objaśniony i uzasadniony; narzędzia stosowane na etapie badań terenowych, a także opracowania wyników zostały właściwie dobrane; teza pracy została udowodniona,
- aspekt naukowy i użyteczny pracy jest na wysokim poziomie, wydana praca może stanowić wartościowy materiał naukowo - dydaktyczny.

Rozprawa doktorska spełnia warunki określone w:

- art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668),
- art. 179 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2018 poz. 1669)
- Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. 2018.261)

Pani mgr inż. Maria Kowalska wykazała się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej Inżynieria Lądowa i Transport (dawnej Geodezji i Kartografia) oraz umiejętnością samodzielnych badań. Wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport na Politechnice Warszawskiej o dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Marii Kowalskiej pt.: „Opracowanie metodyki przetwarzania danych z naziemnego skaningu laserowego w pomiarach kontrolnych obiektów inżynierskich”.

