

Prof. dr hab. inż. Bernard Kontny  
Instytut Geodezji i Geoinformatyki  
Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji  
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

## **R E C E N Z J A**

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Izabeli Wilczyńskiej  
na temat:

**„Analiza zastosowania technik geodezyjnych i optoelektronicznych w badaniu stanu geometrycznego belkowych elementów konstrukcyjnych”**

### 1. Podstawa formalna.

Formalną podstawą recenzji jest pismo nr IDDD.0000.20.2016 Dziekana Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji z dnia 23.12.2016 r. przekazujące Uchwałę nr 104/839/2015 Rady Wydziału z dnia 18 listopada 2015 roku, w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy.

### 2. Ogólna charakterystyka pracy.

Rozprawa doktorska obejmuje łącznie 164 strony maszynopisu, w tym 4 strony załączników. Tekst rozprawy podzielono na 7 rozdziałów numerowanych oraz 4 numerowane części końcowe: literatura, spis tabel, spis ilustracji, załączniki. Maszynopis zawiera także streszczenie w języku polskim i angielskim. W pracy zawarto 140 ilustracji i 27 tabel. Spis literatury obejmuje 111 pozycji, w większości wydanych w języku polskim, oraz 19 adresów wykorzystanych w opracowaniu witryn internetowych.

Rozdział pierwszy, „Wstęp”, stanowi wprowadzenie do tematu rozprawy, zawiera też bardzo syntetycznie przedstawiony cel pracy oraz jej tezę. Rozdział drugi zawiera opracowaną na podstawie literatury charakterystykę ogólną obiektu budowlanego oraz charakterystykę belek żelbetowych, stalowych i drewnianych jako jego głównych elementów. Rozdział trzeci, zatytułowany „Charakterystyka metod pomiarowych”, wraz z podrozdziałami, przedstawia obszerny przegląd geodezyjnych, a także niegeodezyjnych metod i technik pomiarowych stosowanych do monitoringu obiektów budowlanych. Zawiera też syntetycznie przedstawione, wybrane elementy procesu przetwarzania danych pomiarowych oraz nieco obszerniejszy podrozdział dotyczący systemów pomiarowych do wyznaczania deformacji, w którym zasygnalizowano też cele i znaczenie pomiarów deformacji oraz podstawowe wymagania stawiane technikom stosowanym do tych pomiarów. Rozdział czwarty opisuje dwie niestandardowe techniki monitoringu zaproponowane przez autorkę do zastosowania w pomiarach budowlanych: pierwszą wykorzystującą zestaw diody laserowej z kamerą CCD oraz drugą bazującą na zastosowaniu czujników MEMS. W obszernym rozdziale piątym przedstawiono opis i wyniki przeprowadzonych w laboratorium badań eksperymentalnych nad wykorzystaniem zestawu różnych, geodezyjnych

i niegeodezyjnych (fizycznych) technik pomiarowych do badania odkształceń dwóch belek żelbetowych. Rozdział ten stanowi zasadniczą część rozprawy. Rozdział szósty zawiera podsumowanie rozprawy i wnioski ogólne, zaś w krótkim końcowym rozdziale siódmym zasygnalizowano perspektywy rozwoju autorskiej metodyki w pomiarach deformacji elementów konstrukcji budowlanych. Załączniki 1 i 2 zawierają kody niewielkich programów pomocniczych zastosowanych przez Autorkę do przetwarzania danych pomiarowych.

### 3. Ocena merytoryczna pracy.

Tematyka rozprawy dotyczy metod pomiarów deformacji elementów konstrukcyjnych budowli inżynierskich, szczególnie metod pomiarów ugięcia belek. Rozprawa zatem mieści się tematycznie w zagadnieniach geodezji inżyniersko-przemysłowej, zwłaszcza zagadnieniach pomiarów przemieszczeń i odkształceń. Ponieważ zaproponowane przez Autorkę metody pomiarowe wykorzystują również niegeodezyjne techniki pomiarowe, rozprawę można traktować jako pracę interdyscyplinarną, na pograniczu geodezji i budownictwa. Tematycznie rozprawa dotyka bezpośrednio problematyki monitorowania stanu bezpieczeństwa obiektów budowlanych. Problemy bezpieczeństwa są zawsze aktualne i niezwykle ważne w nauce i praktyce inżynierskiej, przez co należy uznać wybór tematu rozprawy za trafny i ze wszelkich miar uzasadniony.

Głównym celem pracy (wg Autorki) jest „analiza dokładności i niezawodności zastosowań technik geodezyjnych i urządzeń optoelektronicznych w określeniu zmian geometrycznych belek konstrukcyjnych”. Natomiast główną tezę pracy Doktorantka sformułowała następująco: „techniki optoelektroniczne, a w szczególności urządzenia optoelektroniczne takie jak dioda laserowa, matryca CCD, czujniki MEMS, pozwalają rozszerzyć możliwości technologii i technik geodezyjnych w badaniu stanu geometrii elementów obiektów budowlanych, zwłaszcza belek dźwigarowych. Odnosząc się do tak przedstawionego celu pracy już na wstępie muszę zastrzec, że moim zdaniem nie został on w pełni osiągnięty. O ile bowiem w pracy przedstawiono wyczerpującą analizę dokładnościową badanych metod geodezyjnych i niegeodezyjnych, to zupełnie brak jest w rozprawie stosownej analizy niezawodności tych metod. Problem ten omówię dokładniej w dalszej części recenzji. Natomiast teza pracy, w mojej opinii, została w rozprawie w pełni udowodniona.

Rozdziały drugi i trzeci rozprawy stanowią dość obszerny przegląd literaturowy dotyczący charakterystyki obiektów budowlanych, a w szczególności belek konstrukcyjnych (rozdział 2) oraz metod pomiarowych stosowanych w budownictwie (rozdział 3). O ile rozdział drugi w bardzo przystępny sposób wprowadza czytelnika spoza branży budowlanej w zagadnienia związane z problemami obciążeń belek żelbetowych i drewnianych, to rozdział trzeci, opisujący metody pomiarowe, jest bardzo zróżnicowany. Opisy niektórych metod są bardzo szczegółowe, wręcz podręcznikowe, niektórych zaś lakoniczne i nawet zupełnie niezrozumiałe. Jako przykład można tu przytoczyć trzyzdaniowy opis klinometru naddźwiękowego: „Klinometr naddźwiękowy składa się z szczelnej obudowy, wewnątrz której znajduje się ciecz. Jej poziom jest kontrolowany w kilku punktach za pomocą czujników. Zmiany rejestrowane przez czujniki przekładają się na kąt pochylenia klinometru, a co za tym idzie – kąt pochylenia elementu, do którego klinometr jest przymocowany”. Czy na podstawie takiego opisu czytelnik

jest w stanie zrozumieć, dlaczego ten przyrząd nosi nazwę klinometru naddźwiękowego? Podobnych opisów metod i przyrządów pomiarowych jest w pracy znacznie więcej.

W rozdziale czwartym opisano zasadę działania oraz testy laboratoryjne dwóch metod pomiarowych zaproponowanych przez autorkę: metody laserowej z zastosowaniem zestawu diody laserowej z kamerą CCD oraz metody wykorzystującej czujniki MEMS. Zarówno opis przyrządów pomiarowych jak i metod pomiarów nie budzi tu zastrzeżeń, jest wystarczająco szczegółowy i zrozumiały. Przeprowadzone testy laboratoryjne jednoznacznie wskazują na duże możliwości proponowanych metod. Pewnym mankamentem przedstawionych tu wyników jest wyrażanie parametrów dokładnościowych w pikselach, zależnych przecież od rozdzielczości zastosowanej kamery. Zastosowanie innej kamery zupełnie zmieni wartości tych parametrów. O wiele bardziej obiektywną oceną dokładnościową byłoby przejście do wartości liniowych wyrażanych w metrach (milimetrach).

Najważniejszym, w kontekście celu naukowego pracy i jej tezy, jest rozdział piąty, opisujący badania eksperymentalne oraz ich wyniki. Badania te polegały na pomiarach strzałek ugięcia dwóch belek: żelbetowej i drewnianej, różnymi metodami geodezyjnymi i niegeodezyjnymi oraz porównaniu ich wyników. Eksperyment wykonano w laboratorium wytrzymałości materiałów na specjalnym stanowisku badawczym. Koncepcja oraz opis przeprowadzonych eksperymentów nie budzi zastrzeżeń. Wątpliwości budzi wybór metod pomiarowych, ponieważ jest on różny dla poszczególnych belek. Dla obydwu belek przeprowadzono pomiary niwelacją precyzyjną, naziemnym skanerem laserowym, czujnikiem przemieszczeń liniowych, czujnikami MEMS. Dla belki żelbetowej dodatkowo wykonano pomiar zestawem wskaźnika laserowego i przymiaru liniowego oraz pochyłomierzem. Dla belki drewnianej natomiast wykonano dodatkowo pomiar tachymetrem zwykłym i automatycznym, dalmierzem DISTO oraz zestawem diody laserowej, zwierciadła i tarczy. Wyniki pomiarów tym ostatnim zestawem jednakże nie podlegały dalszym analizom i porównaniom. Nie jest dla mnie zrozumiałym dlaczego nie zastosowano tego samego zestawu metod pomiarowych dla obu belek? Zupełnie niezrozumiałym jest też, dlaczego w badaniach eksperymentalnych (dla obydwu belek) nie zastosowano metody laserowej zaproponowanej przez Autorkę w rozdziale czwartym. Zastosowano, co prawda, pewne warianty tej metody wykorzystujące diodę laserową, ale nie jest to stricte metoda zaproponowana i przebadana laboratoryjnie. Odbiór i analizę tego rozdziału pracy bardzo utrudnia stosowanie różnych wielkości oraz różnych jednostek wielkości mierzonych. Na wykresach i tabelach, oprócz przemieszczeń punktów kontrolowanych wyrażonych w milimetrach stosowane są odczyty na podziałce w centymetrach, pochylenia wyrażone w gradach (to w rozdziale 4), przyspieszenia wyrażone w mg (Autorka nie wyjaśnia, co to za jednostka), współrzędne położenia śladu plamki lasera w milimetrach, czas pomiaru wyrażony w cyklach pomiarowych albo minutach czy sekundach. Autorka przyjmuje (co jest wyraźnie zaznaczone w rozdziale 5.2.3 i 5.3.3) wyniki pomiarów czujnikiem przemieszczeń liniowych jako wielkości odniesienia z uwagi na dokładność pomiarów. Nie ma jednak w całej pracy zestawienia różnic wyników innych metod w stosunku do tak przyjętych wielkości odniesienia. W pomiarach pochyłomierzem oraz czujnikami MEMS wielkości mierzone kątów pochylenia i przyspieszeń wymagają przeliczenia na liniowe wielkości strzałki

ugięcia, Autorka jednak nie podaje algorytmów (wzorów) tych przeliczeń, przez co trudno się odnieść do ich poprawności. Efektem podsumowania pomiarów eksperymentalnych są mało czytelne wykresy oraz (na szczęście czytelne) zestawienia tabelaryczne. Nie są one jednak, moim zdaniem, wystarczająco skomentowane. Zamieszczony komentarz dotyczy bardziej analizy zachowania się belki poddanej obciążeniu niż różnicom wyników poszczególnych metod i technik pomiarów. Bardzo szkoda, że wyniki tak dobrze zaplanowanego i precyzyjnie wykonanego eksperymentu zostały przedstawione w tak nieuporządkowany sposób i tak słabo skomentowane.

Ogromny niedosyt pozostawia, moim zdaniem, rozdział „Podsumowanie i wnioski”. Zawarto w nim bowiem sformułowania o bardzo ogólnym charakterze, zupełnie nie związane z wynikami przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Zamieszczona tabela porównawcza stosowanych technik i technologii pomiarowych bazuje na danych literaturowych, nie zaś na wynikach uzyskanych przez Autorkę. W rozdziale podsumowującym rozprawę Autorka przede wszystkim powinna się odnieść do założonego celu rozprawy (czy został osiągnięty) oraz przyjętej tezy (czy została potwierdzona, czy też odrzucona). Takiego odniesienia niestety brakuje. Spróbuję zatem uzupełnić ten brak w swojej recenzji. Celem pracy, wg Doktorantki, jest analiza dokładności i niezawodności zastosowań technik geodezyjnych i urządzeń optoelektronicznych w określeniu zmian geometrycznych belek konstrukcyjnych. Moim zdaniem Autorka zrealizowała w pełni tylko część dotyczącą analizy dokładnościowej. Pojęcie niezawodności metody lub techniki należałoby najpierw zdefiniować, a następnie określić miarę lub kryteria jej oceny. To zagadnienie w pracy zostało zupełnie pominięte. Na ogół jako „niezawodność” (ang. „reliability”) określa się własność metody mówiącą o tym, czy działa ona poprawnie (czy spełnia wszystkie założone funkcje) przez wymagany czas i w określonych warunkach. Miara niezawodności najczęściej określana jest przez prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia opisanego w definicji tej miary, np. prawdopodobieństwo wystąpienia błędu pomiarowego przekraczającego zadaną wartość w określonej jednostce czasu bądź na określonej ilości prób. W przedstawionej rozprawie nie podjęto tego typu badań. Natomiast teza pracy, mówiąca że „techniki optoelektroniczne, a w szczególności urządzenia optoelektroniczne, takie jak dioda laserowa, matryca CCD, czujniki MEMS, pozwalają rozszerzyć możliwości technologii i technik geodezyjnych w badaniu stanu geometrii elementów obiektów budowlanych, zwłaszcza belek dźwigarowych” moim zdaniem została w pracy w pełni potwierdzona. Co prawda, tylko w warunkach badań laboratoryjnych, ale trudno byłoby oczekiwać od Doktorantki potwierdzenia tej tezy również w warunkach eksploatacyjnych. Wymagało by to instalacji urządzeń pomiarowych na rzeczywistych obiektach budowlanych, co związane jest zarówno z kosztami jak i dostępem do tych obiektów. Według mojej wiedzy Doktorantka takimi możliwościami nie dysponowała.

Na zakończenie pracy znajdujemy krótki rozdział pt. „Perspektywy rozwoju autorskiej metodyki pomiarów deformacji i przemieszczeń elementów konstrukcji budowlanych”, w którym Autorka wskazuje na potencjalne zastosowania zaproponowanych w rozprawie metod pomiarowych. Wskazania te, moim zdaniem, są trafne i właściwie dobrane, aczkolwiek brakuje tu odniesienia do najważniejszej zalety tych metod, jaką bez wątpienia jest możliwość pełnej automatyzacji procesu pomiarowego i włączenia ich w szersze systemy

automatycznego monitoringu. Rozdział ten z powodzeniem mógł być włączony do rozdziału poprzedniego: „Podsumowanie i wnioski”.

Generalnie przedstawioną mi do recenzji rozprawę oceniam pozytywnie. Doktorantka jasno przedstawiła problem naukowy, dokonała przeglądu literaturowego dotychczasowego stanu wiedzy na temat tego problemu, zaproponowała własne sposoby podejścia do problemu w oparciu o znane i dostępne techniki pomiarowe, właściwie zaplanowała eksperyment badawczy i starannie go zrealizowała. Z otrzymanych wyników eksperymentu wyciągnęła właściwe wnioski, aczkolwiek sposób ich przedstawienia w rozprawie pozostawia wiele do życzenia. Przedstawione powyżej mankamenty rozprawy nie podważają, w mojej opinii, jej ogólnie pozytywnej oceny.

#### 4. Uwagi dyskusyjne i krytyczne.

Większość uwag merytorycznych zawarłem już w ocenie merytorycznej, toteż odniosę się tutaj jedynie do kilku problemów wymagających wyjaśnienia lub dyskusji, w porządku ich wystąpienia w treści rozprawy.

W tabelach 7 i 9 (str. 78-79) Autorka podaje parametry statystyczne walidacji metod, m.in. względne odchylenie standardowe powtarzalności oraz współczynnik zmienności wyrażając je w pikselach. Tymczasem są to miary względne i jak wynika z przytoczonych wzorów, bezwymiarowe. Współczynnik zmienności mnożony jest przez 100 i jak miemam, powinien być wyrażony w procentach.

Autorka w kilku miejscach w pracy używa testu F-Snedecora (powinno być Fishera-Snedecora, str. 79; 92) podając wartość krytyczną testu dla  $n-1$  stopni swobody. Rozkład F jest rozkładem dwuwymiarowym i wartość krytyczna zależy od dwóch stopni swobody,  $n_1$  i  $n_2$ . Być może w opisywanych przypadkach są one równe, ale w tekście pracy brak o tym informacji.

Na stronie 83 Autorka napisała, że dokładność pomiarów zestawem diody laserowej, zwierciadła i kamery CCD jest na poziomie podpikselowym. Nie dodała przy tym, że dotyczy to może tylko wartości średniej z serii pomiarów, nie zaś pojedynczego pomiaru, dla którego rozdzielczością pomiarową jest pojedynczy piksel, nie zaś jego część.

Od rozdziału 5.2.2. (str. 99) już do końca rozprawy numeracja rysunków zupełnie nie odpowiada treści pracy, przez co śledzenie rozważań Autorki staje się znacznie utrudnione. Na rysunkach zamieszczonych w tym rozdziale wartości osi oznaczają czas w sekundach (oś pozioma) i przyspieszenie w mg (oś pionowa). Brak wyjaśnienia co to za jednostka: mg? Przyspieszenie w technice wyrażane jest zwykle w metrach na sekundę do kwadratu (układ SI) lub w mikro- lub mili-Galach (dla wartości przyspieszenia siły ciężkości). Jeżeli g oznacza tu wartość tzw. przyspieszenia ziemskiego, to należało o tym wyraźnie napisać i podać przyjętą wartość tej jednostki. Jak wiemy przyspieszenie siły ciężkości w różnych miejscach na powierzchni Ziemi nie jest jednakowe. W legendzie tych rysunków objaśnienia informują, że liniami w różnych kolorach oznaczono napięcie mierzone i napięcie estymowane. Co to za napięcie, skoro na osi pionowej oznaczono przyspieszenie?

W tabeli 18 (str. 125) podano wyniki pomiarów czujnikami przemieszczeń liniowych. W tekście powyżej napisano, że pomiary tym czujnikiem wykonywano w interwale 0,5 sekundy, zaś w tabeli w kolumnie „czas” podano kolejne wartości różniące się o np. 0,002 sekundy.

W podsumowaniu pracy, na str. 142, Doktorantka napisała, że proponowane urządzenia do monitorowania stanu geometrycznego w założeniu mają być jak najtańsze, ale jednocześnie pozwalające na monitorowanie obiektu z odpowiednią dokładnością. Moim zdaniem takie założenie nie jest właściwe. Urządzenia te powinny być przede wszystkim dokładne i niezawodne, a dopiero w dalszej kolejności tanie. Problem oceny niezawodności jednakże w pracy nie został podjęty.

## 5. Uwagi szczegółowe.

Generalnie chciałbym podkreślić dość dobrą jakość edycyjną rozprawy. Układ pracy, odsyłacze, jakość większości rysunków i czytelność tabel, jak i język rozprawy nie budzą większych zastrzeżeń i świadczą o nabytej już umiejętności przygotowywania opracowań naukowych. Podane poniżej uwagi szczegółowe są jedynie pojedynczymi, zauważonymi w trakcie czytania rozprawy, wyjątkami.

Str. 89 – wzór 27, po lewej stronie powinno być  $y_t$ .

Str. 91 – tabela 12 i 13 – brakuje jednostek wielkości w kolumnie „Wyniki”.

Str. 98 – tabela 14 – różne jednostki w obu kolumnach.

Str. 139 i 139, rys. 138 i 139 – źle dobrane oznaczenia, linie powinny się bardziej różnić, np. rodzajem linii (kreskowa, kropkowa, kreska-kropka itd.).

Str. 147 – pozycja [23] – tytuł w języku angielskim, a praca jest w języku polskim.

Str. 161 – nie podano w jakim języku są prezentowane kody źródłowe.

W spisie literatury zamieszczono 12 pozycji, które nie są cytowane w treści pracy. Sądzę jednak, że to tylko błąd edytorski. Autorka zapewne wykorzystała te publikacje w pracy, ale zapomniała umieścić w tekście odpowiednie odnośniki. (Są to pozycje literatury: 23, 31, 32, 33, 34, 52, 70, 83, 86, 97, 98, 99).

## 6. Wniosek końcowy

Przedstawione uwagi krytyczne i dyskusyjne nie obniżają wysokiej, moim zdaniem, wartości pracy. Pozytywna ocena merytoryczna rozprawy upoważnia mnie do stwierdzenia, że Autorka wykazała się dobrą wiedzą teoretyczną w dyscyplinie Geodezja i Kartografia oraz posiadała umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania zawarte w ustawie z dnia 14 marca 2003 roku „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki”. Stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Izabeli Wilczyńskiej do publicznej obrony swojej pracy.

Wrocław, 19 lutego 2016 r.

