

dr hab. inż. Magdalena Rucka, prof. nadzw. PG
Katedra Wytrzymałości Materiałów
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: mrucka@pg.edu.pl
tel.: 58 347 24 97

Gdańsk, 01.04.2019

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Tekielego
pt. "A Vision-Based Measurement System for the Analysis of Structural Element
Deformation Field"

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, dr. hab. inż. Andrzeja Szaraty, prof. PK z dnia 25 lutego 2019 r. i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Tekielego pt. "*A Vision-Based Measurement System for the Analysis of Structural Element Deformation Field*", wykonana pod kierunkiem dr. hab. inż. Marka Słońskiego, prof. PK.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy tematyki wyznaczania pól deformacji na powierzchni badanych elementów poddanych obciążeniom mechanicznym z użyciem metody korelacji obrazów cyfrowych. Praca jest napisana w języku angielskim. Dysertacja liczy 229 numerowanych stron formatu A4 i składa się z 7 rozdziałów: (1) *Introduction*, (2) *Optical measurements*, (3) *Designed system*, (4) *Validation of the designed system*, (5) *Full texts of the papers constituting the doctoral thesis*, (6) *Other practical applications of the designed system*, (7) *Final remarks*, poprzedzonych podziękowaniami (*Acknowledgement*), wykazem oznaczeń i skrótów (*List of Symbols*, *List of Acronyms*), spisem treści (*Contents*) oraz streszczeniami w języku angielskim i polskim. Na końcu rozprawy znajduje się spis literatury (*Bibliography*) obejmujący 120 pozycji, wykaz publikacji naukowych (*List of scientific research*), oświadczenia o udziale procentowym i merytorycznym (*Declarations of co-authorship*), a także spis rysunków i tabel (*List of Figures*, *List of Tables*).

3. Treść rozprawy

W Rozdziale 1 (*Introduction*) Autor dokonuje krótkiego opisu metody korelacji obrazów cyfrowych (ang. *DIC – digital image correlation*) oraz systemów komercyjnych wykorzystujących tę metodę. Na tym tle formułuje główny cel pracy, którym jest zaprojektowanie i zaimplementowanie własnego systemu wizyjnego do analizy pól deformacji elementów strukturalnych, a także szczegółowo opisuje zakres pracy.

Rozdział 2 (*Optical measurements*) ujmuje teoretyczne podstawy metody optycznej. W rozdziale tym zawarto informacje na temat fotografii cyfrowej, systemów wizyjnych

wyznaczania pól deformacji, a także deformacji ośrodków ciągłych. Omówiono metodę korelacji obrazów cyfrowych, ze szczególnym uwzględnieniem technik poprawy rozdzielczości zarejestrowanych obrazów na poziomie subpikseli oraz korekcji dystorsji. Przytoczono także praktyczne wskazówki na temat sposobów przygotowania powierzchni badanych elementów i stosowanych markerów pomiarowych.

W Rozdziale 3 (*Designed system*) zawarto opis systemu wizyjnego *CivEng Vision* zaimplementowanego w środowisku MATLAB. W tej części pracy Autor przedstawił i omówił interfejs zaprojektowanego przez siebie oprogramowania oraz jego główne funkcjonalności obejmujące między innymi takie kwestie jak: dobór punktów i siatek pomiarowych, generację pól deformacji, uzyskiwanie subpikselowej rozdzielczości pomiarów, wykrywanie anomalii na obrazach, korekcję dystorsji, a także zmniejszenie czasu obliczeń poprzez wykorzystanie obliczeń równoległych na procesorach i kartach graficznych.

W Rozdziale 4 (*Validation of the designed system*) zawarto walidację zaprojektowanego systemu. Autor korzystając z przykładów benchmarkowych, przykładów własnych, a także jednego z systemów komercyjnych wykazał wysoką efektywność zaprojektowanego przez siebie systemu wizyjnego.

Rozdział 5 (*Full texts of the papers constituting the doctoral thesis*) stanowi główną część pracy. Zawiera on 4 artykuły opublikowane w czasopismach indeksowanych w bazie Journal Citation Reports. Pierwszy z nich (czasopismo *Composite Structures*, wyd. Elsevier) opisuje zastosowanie metody korelacji obrazów cyfrowych do zobrazowania deformacji próbek wykonanych z różnych typów materiałów kompozytowych, poddanych testowi rozciągania jednoosiowego w maszynie wytrzymałościowej. W pracy porównano wyniki uzyskane za pomocą programu własnego *CivEng Vision*, programu *Ncorr* opracowanego przez naukowców z Georgia Institute of Technology (Atlanta, USA), a także ekstensometrów i czujników przemieszczeń liniowych.

Drugi artykuł (czasopismo *Polymers*, wyd. MDPI) zawiera wyniki badań klejonych połączeń zakładkowych pomiędzy podłożem ceglanym a kompozytem wzmacniającym. Przeprowadzone doświadczenia metodą korelacji obrazów cyfrowych posłużyły do przeanalizowania i wyjaśnienia zależności między właściwościami użytego kleju, a nośnością połączenia.

W kolejnym z artykułów (czasopismo *Measurement*, wyd. Elsevier) metoda DIC została wykorzystana do monitorowania stanu belek szklanych oraz drewniano-szklanych belek kompozytowych podczas procesu zginania.

W ostatnim z cyklu artykułów (czasopismo *Materials*, wyd. MDPI) podjęto badania wytrzymałościowe rozciąganych połączeń klejonych pomiędzy elementami stalowymi. Metodą korelacji obrazów cyfrowych zastosowano do zobrazowania stanu odkształceń na powierzchni nakładek, a uzyskane wyniki w wybranych punktach porównano z pomiarami wykonanymi techniką tensometryczną.

W Rozdziale 6 (*Other practical applications of the designed system*) Autor przedstawił 11 dodatkowych przykładów zastosowania metody korelacji obrazów cyfrowych. Wyniki tych badań zostały opublikowane w innych, niż zawartych w Rozdziale 5 artykułach, a także posłużyły jako przykłady w innych rozprawach doktorskich realizowanych w Politechnice Krakowskiej. Przykłady te obejmowały następujące zagadnienia: badania materiałowe próbek z betonu wysokowartościowego niebrojonych oraz wzmocnionych stalowym zbrojeniem

spiralnym, testy zginania belek żelbetowych oraz belek żelbetowych wzmocnionych elementami stalowymi, badania konstrukcji murowych, badania połączeń adhezyjnych między elementami betonowymi, badania próbek drewnianych, a także testy wykonane na obiektach w skali rzeczywistej (belka podsuwnicowa, przęsło mostowe) i elementach wykonanych w technologii druku 3D.

Rozdział 7 (*Final remarks*) zawiera podsumowanie pracy oraz wnioski końcowe z przeprowadzonych badań doświadczalnych.

4. Ocena rozprawy i uwagi krytyczne

Rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Tekielego dotyczy zagadnień związanych z metodami doświadczalnymi mechaniki ciała stałego. Pomiar przemieszczeń i odkształceń przy użyciu różnego rodzaju czujników (np. ekstensometry, czujniki indukcyjne LVDT) odgrywa ważną rolę w wielu aspektach mechaniki konstrukcji i materiałów. Od wielu lat intensywnie rozwijane są także techniki umożliwiające pomiar tych wielkości w sposób bezstykowy. Obecnie jedną najbardziej popularnych metod jest metoda korelacji obrazów cyfrowych (ang. *DIC – digital image correlation*), która jest przedmiotem ocenianej dysertacji. Zaletą tej metody jest możliwość uzyskania informacji o deformacji nie tylko w wybranych punktach konstrukcji, ale również zobrazowania pełnego pola deformacji na powierzchni badanego elementu. Metoda ta jest rozwijana od lat 80 XX wieku, a jej rozwój związany jest nie tylko z postępowaniem w konstruowaniu coraz bardziej doskonałych aparatów cyfrowych, ale również ze sposobem obróbki danych pomiarowych, w tym ulepszania oprogramowania służącego do cyfrowego przetwarzania obrazów.

Głównym celem recenzowanej rozprawy było opracowanie własnego oprogramowania do analizy pól deformacji z zastosowaniem metody DIC oraz jego zastosowanie do badań materiałów i elementów wykorzystywanych w inżynierii lądowej. Podjęta w pracy tematyka jest nowoczesna i ważna z praktycznego punktu widzenia, wiąże się bowiem z aktualnymi trendami rozwoju metod umożliwiających nieniszczącą ocenę stanu konstrukcji. Szeroki zakres pracy łączy badania doświadczalne, a także działania o charakterze programistycznym i obliczeniowym.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że główna część pracy (Rozdział 5) składa się z czterech artykułów naukowych, które zostały opublikowane w prestiżowych, wysokopunktowanych czasopismach indeksowanych w bazie Journal Citation Reports (*Composite Structures*: IF=4.52, 40 pkt. MNiSW; *Polymers*: IF=2.94, 40 pkt. MNiSW; *Measurement*: IF=2.22, 30 pkt. MNiSW; *Materials*: IF=2.47, 35 pkt. MNiSW). Wątkiem łączącym poszczególne artykuły z przedstawionego cyklu jest zastosowanie metody korelacji obrazów cyfrowych (DIC) do zobrazowania pola deformacji podczas degradacji mechanicznej badanych obiektów.

Publikacje stanowiące cykl prac tworzący Rozdział 5 są wieloautorskie (od 3 do 5 autorów). Do rozprawy dołączono oświadczenia Autora określające jego merytoryczny i procentowy wkład w poszczególne artykuły, potwierdzone przez pozostałych Współautorów. Zakres procentowy udziału Doktoranta wynosi od 15% do 35%. Wkład merytoryczny każdorazowo obejmował cały zakres badań związanych z pomiarami metodą DIC (przygotowanie stanowiska i próbki do pomiarów optycznych, obróbkę danych pomiarowych, a także opis wyników uzyskanych metodą DIC w artykułach).

Uwagi ogólne, wybrane uwagi szczegółowe oraz pytania są przedstawione w poniższych punktach.

Uwagi i pytania do treści rozprawy

- 1) Na str. 19-20 Autor definiuje pomiarowy system wizyjny jako układ składający się z części sprzętowej (urządzenie rejestrujące typu aparat lub kamera, lampa fotograficzna, komputer) oraz oprogramowania dedykowanego do przetwarzania zarejestrowanych obrazów. Natomiast w Rozdziale 3, zatytułowanym *Designed system*, Autor opisuje wyłącznie wytworzone przez siebie oprogramowanie. Czy zatem celem pracy było rzeczywiście opracowanie systemu, czy raczej wyłącznie jego części softwarowej, przy zastosowaniu typowych komponentów hardware'owych?
- 2) Rozdział 3 opisuje zaprojektowany przez Autora system, czy też raczej oprogramowanie bazujące na metodzie DIC. Z lektury tego rozdziału nie wynika jednak, czy zastosowane algorytmy obliczeniowe stanowią nowe podejście, czy są jedynie kompilacją istniejących procedur.
- 3) Jako główną wadę istniejących rozwiązań komercyjnych Autor wymienił fakt, że zawierają one zamknięty kod źródłowy, uniemożliwiając użytkownikom dostęp do pośrednich wyników uzyskiwanych w procesie działania algorytmu (str. 14). Czy Autor udostępnił lub zamierza udostępnić kod swojego programu szerszemu gronu odbiorców?
- 4) W Rozdziale 4 zabrakło porównania pól odkształceń (zarówno pod względem uzyskiwanych wyników, jak i na przykład czasochłonności obliczeń) w odniesieniu do komercyjnego zaawansowanego oprogramowania typu Dantec Dynamics lub GOM. Jedyne porównanie wykonano dla video-ekstensometru Zwick Roell, lecz dotyczyło ono zmiany odkształceń pomiędzy dwoma parami markerów.
- 5) Rozdział 5.1 – w artykule dane pomiarowe przeanalizowano dwoma programami: własnym *CivEng Vison* oraz programem *Ncorr* typu open-source. Uzyskiwany błąd średniokwadratowy pomiędzy metodą DIC a czujnikiem LVDT w niektórych przypadkach był mniejszy dla oprogramowania własnego, a w innych dla oprogramowania *Ncorr*. Skąd wynikały te różnice, czym różnił się algorytm zaimplementowany w obu programach, jakie są wady i zalety obu programów?
- 6) Rozdział 6.7 – w przykładzie dotyczącym próbek betonowych wzmocnionych stalowym zbrojeniem spiralnym Autor napisał, że testy DIC zostały wykonane z użyciem dwóch rodzajów urządzeń: kamery CCD oraz lustrzanki cyfrowej. W rozdziale tym nie pokazano jednak wyników testów z użyciem obu typów aparatów. Ponadto na str. 149 Autor wymienił wszystkie urządzenia użyte do badań przedstawionych w Rozdziale 6, jednak nie ma wśród nich urządzeń z matrycą CCD (są to wyłącznie urządzenia z matrycą CMOS). Jaka zatem kamera CCD została użyta do badań? Jaki jest wpływ użytej matrycy (CCD vs. CMOS) w urządzeniu rejestrującym obrazy na wyniki uzyskiwane metodą DIC?
- 7) We wnioskach Autor podkreślił, że opracowane przez niego oprogramowanie dysponuje kilkoma subpikselowymi metodami poprawy rozdzielczości, które mogą być dobrane odpowiednio do analizowanego przypadku. W rozprawie zabrakło jednak przykładu, na którym efektywność działania tych metod zostałaby porównana. Jakie są kryteria doboru jednej z tych metod w zależności od typu przeprowadzanego testu czy też badanego materiału/konstrukcji?

Język i redakcja rozprawy

Pod względem redakcyjnym rozprawa jest opracowana bardzo starannie. Przyjęty podział pracy na siedem rozdziałów jest logiczny i przejrzysty. Wykresy i rysunki są czytelne, a fotografie mają odpowiednią ostrość i nasycenie. Jedyne drobne zastrzeżenie dotyczy pominięcia numeracji stron pracy w obrębie artykułów stanowiących Rozdział 5, co utrudnia czytanie pracy.

Wybrane uwagi szczegółowe:

- str. 53/6 – jest: „cubic interpolation based on based on a cubic convolution” – powtórzenie słów „based on”;
- błędny opis pozycji bibliograficznej [82] (rok, numer, numery stron) – jest: „pages 1–33, 2017. 59”, powinno być: „58: 1067–1099, 2018”;

5. Wniosek końcowy

Przedłożoną do recenzji rozprawę doktorską oceniam wysoko i uważam za ważne osiągnięcie naukowo-badawcze. Zawiera ona wyniki poszerzające wiedzę w zakresie analizy pól deformacji elementów strukturalnych z zastosowaniem metody korelacji obrazów cyfrowych. Zasadnicze założenia pracy zostały zrealizowane. Przedstawione powyżej uwagi krytycznie nie obniżają w istotny sposób wartości merytorycznej pracy.

Mgr inż. Marcin Tekieli dysponuje ogólną wiedzą techniczną pozwalającą na przygotowanie i przeprowadzenie badań doświadczalnych, a także wykonanie zaawansowanej analizy wyników za pomocą narzędzi cyfrowego przetwarzania obrazów. Praca stanowi rozwiązanie oryginalnego zagadnienia naukowego i wnosi znaczący wkład w rozwój wiedzy w zakresie nowoczesnych metod doświadczalnych w mechanice konstrukcji i materiałów, a także świadczy o umiejętności samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów naukowych przez jej Autora.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę „*O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*” (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z dnia 14 marca 2003 roku) i dlatego **stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr. inż. Marcina Tekielego do publicznej obrony.**

Magdalena Rucka