

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Damiana Cacko

**pt „Implementation of Shear Wave Elastography for Point-of-Care
Ultrasound Imaging”**

**napisanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego
i dr inż. Marcina Lewandowskiego**

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawę opracowania recenzji stanowią:

- Pismo Sekretarza Rady Naukowej IPPT PAN, prof. Zbigniewa Ranachowskiego z dnia 6 grudnia 2023 r. informujące o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Damiana Cacko.
- Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Damiana Cacko pt. „Implementation of Shear Wave Elastography for Point-of-Care Ultrasound Imaging”.

2. Uwagi ogólne

Rozprawa doktorska przygotowana przez Pana magistra inżyniera Damiana Cacko, w ramach doktoratu wdrożeniowego, stanowi rozwiązanie problemu technicznego polegającego na implementacji techniki obrazowania medycznego, ultradźwiękowej elastografii fali poprzecznej (ang. *shear wave elastography*, SWE), w niewielkim urządzeniu typu badawczego. Opracowany i oprogramowany przez Pana Damiana Cacko system jest interfejsem do wieloelementowej głowicy ultradźwiękowej, zapewniającym wsparcie procesu nadawania, odbioru oraz przetwarzania danych. Tematyka pracy jest bardzo aktualna. Z uwagi na szeroką różnorodność implementacji metod SWE między

różnymi producentami, wykazano zmienność w pomiarze parametrów spójnych obiektów pomiarowych. Badania wykazały różnice między różnymi skanerami, parametrami akwizycji i przetwornikami. W niektórych przypadkach zidentyfikowano rozbieżności w pomiarach prędkości fali poprzecznej dochodzące nawet do 25% pomiędzy różnymi systemami i przetwornikami na tym samym urządzeniu. W praktyce konieczne jest zastosowanie unikalnych ograniczeń dla każdej maszyny, co prowadzi do dodatkowych kosztów badań i wprowadza dezorientację w literaturze naukowej. Dowodzi to temu, że w tej dziedzinie pozostaje jeszcze wiele pracy do wykonania w celu zapewnienia pewności korzystania z pomiarów dostarczanych poprzez różne tryby metod elastografii. Rozwiązanie zaproponowane przez Pana Damiana Cacko może znacząco ułatwić to zadanie.

Pan Damian Cacko w swojej rozprawie nie tylko podejmuje ważną tematykę przystosowania wcześniej opracowanej platformy sprzętowej us4R-lite do implementacji innowacyjnych technik w ultradźwiękowej elastografii fali poprzecznej, ale co istotne, próbuje wskazać potencjalne źródła błędów w metodach SWE. Autor rozprawy wykazuje dużą dojrzałość naukową w prezentowaniu wyników badań oraz wyciąganiu wniosków z poszczególnych analiz. Zakres badawczy pracy jest ambitny i wręcz imponujący. Pozytywnie oceniam niniejszą pracę i uważam, że stanowi bardzo dobre źródło informacji dla osób, które planują rozpocząć pracę w wspomnianym obszarze badawczym.

3. Zakres rozprawy

Rozprawa została napisana w języku angielskim i składa się z spisu treści, wykazu oznaczeń, pięciu rozdziałów, spisu literatury oraz streszczeń w języku polskim i angielskim.

W pierwszym rozdziale zawarto wstęp, motywację podjętej tematyki pracy, sformułowano cele, tezę i zakres rozprawy, a także przedstawiono jej układ. Rozdział ten obejmuje krótki przegląd technik elastografii opartych na wykorzystaniu propagacji fal ultradźwiękowych, prezentując ich podstawowe zasady fizyczne, kamienie milowe w rozwoju oraz przegląd najpopularniejszych rozwiązań komercyjnych.

W rozdziale drugim przedstawiono podstawy teoretyczne wybranej przez autora pracy metody dwuwymiarowej elastografii fali poprzecznej (2D SWE). Dokonano przeglądu różnych aspektów tej techniki, w tym znanych podejść modulacji przestrzennych stosowanych w generowaniu siły promieniowania akustycznego (ang. acoustic radiation force, ARF), schematów gromadzenia danych i metod stosowanych w przetwarzaniu

danych w celu rekonstrukcji dwuwymiarowych map sprężystości. Ponadto omówiono kwestie bezpieczeństwa, uwzględniając ograniczenia mające na celu uniknięcie niepożądanych efektów biologicznych na tkankach podczas procedury obrazowania SWE. Na zakończenie rozdziału omówiono źródła niepewności i błędu systematycznego w metodzie 2D SWE oraz wymieniono parametry wpływające na rozdzielczość przestrzenną obrazów uzyskanych w metodach SWE.

Rozdział trzeci poświęcony jest implementacji techniki 2D SWE na platformie badawczej us4R-lite. Opisano część sprzętową, obejmując architekturę systemu us4R-lite oraz rozwój dedykowanej karty/interfejsu (Transmit Push Beamformer Board - TXPB-256) do wieloelementowej głowicy ultradźwiękowej, zapewniającej wsparcie procesu nadawania, odbioru oraz przetwarzania danych dla metod SWE. Opracowany przez doktoranta interfejs został zaprojektowany w celu zwiększenia możliwości nadawczych platformy us4R-lite, aby spełnić wymagania dla metod SWE wykorzystujących ARF. Zaprojektowany w formie modułu rozszerzającego interfejs, który można łatwo zintegrować z systemem us4R-lite, wykorzystuje układy scalone impulsatorów nadawczych jako urządzenia wzbudzające transmisję. Dzięki takiemu rozwiązaniu autor pracy zapewnił generowanie wysokoenergetycznych impulsów ARF do 180 Vpp. System us4R-lite, wzbogacony o moduł TXPB-256, umożliwia generowanie wspomnianych impulsów o dowolnej kombinacji, co pozwala na opracowywanie i ocenę różnych metod SWE opartych na wzbudzaniu ARF.

W kolejnym etapie tego samego rozdziału przedstawiono przegląd architektury i funkcjonalności oprogramowania układowego FPGA. Opisano programową implementację algorytmu rekonstrukcji obrazu. Pozostała część rozdziału skupia się na wysiłkach zmierzających do uzyskania obrazowania w czasie rzeczywistym. Rozwiązanie tego problemu rozpoczęto od oszacowania wymaganej wydajności obliczeniowej i przepustowości danych systemu, co umożliwiło podjęcie odpowiednich decyzji na poziomie architektury oprogramowania. W proponowanym rozwiązaniu osiągnięto wydajność przetwarzania w czasie rzeczywistym dzięki zastosowaniu przetwarzania równoległego, wykorzystującego architekturę CUDA (ang. compute unified device architecture) w procesorach graficznych (ang. graphics processing unit, GPU). Dalej omówiono użyteczności przetwarzania równoległego w kontekście problemu rekonstrukcji obrazu 2D SWE, a następnie zaprezentowano szczegółowy opis przetwarzania danych związanych z każdym etapem algorytmu rekonstrukcji.

Rozdział czwarty obejmuje część eksperymentalną pracy, podzieloną na trzy główne sekcje. Pierwsza sekcja koncentruje się na pomiarze mocy akustycznej systemu, mającym na celu ocenę bezpieczeństwa procedury obrazowania. W drugiej sekcji przedstawiono wyniki walidacji opracowanego systemu oraz ocenę jakości obrazowania 2D SWE. Działanie systemu zostało zweryfikowane eksperymentalnie, a jego wydajność w zakresie pomiaru prędkości fali poprzecznej oceniono na podstawie wybranych wskaźników jakości obrazów uzyskanych przy użyciu komercyjnego fantomu przeznaczonego do badań ultradźwiękowej elastografii. Dodatkowo, przedstawiono niektóre wyniki pośrednie, ujawniające typowe problemy występujące w metodach SWE, które potencjalnie wpływają na jakość obrazowania. W dalszej części dokonano oceny wydajności przetwarzania danych opracowanego systemu oraz wpływu wybranych parametrów rekonstrukcji na czas przetwarzania i jakość obrazowania.

Rozdział 5 stanowi zakończenie niniejszej rozprawy, zawierające podsumowanie przeprowadzonych badań. Po przedstawieniu głównych osiągnięć pracy, omówiono także ograniczenia, zaproponowano potencjalne przyszłe kierunki badań i sformułowano wnioski końcowe.

Spis literatury zawiera 207 pozycji, z czego 3 są współautorstwa doktoranta. Jedna publikacja w czasopiśmie z listy JCR (Applied Sciences) oraz dwa wystąpienia konferencyjne.

4. Ocena merytoryczna (oryginalne osiągnięcia pracy)

W ramach prac projektowo-badawczych doktorant skoncentrował się na dostosowaniu opracowanej przez firmę us4us Sp. z o. o. platformy sprzętowej us4R-lite do implementacji ultradźwiękowego obrazowania medycznego, znanego jako elastografia fali poprzecznej (ang. shear wave elastography, SWE) w oparciu o przemieszczenia tkanki wywołane zdalnie wytwarzaną siłą promieniowania akustycznego (ang. acoustic radiation force, ARF).

Pan Damian Cacko omówił osiągnięte wyniki, przedstawiając jednocześnie obszary ich potencjalnego zastosowania. Wykazał się głęboką wiedzą w badanym obszarze, profesjonalnie ujmując tematykę leżącą na pograniczu kilku dziedzin nauki. Przyjęta metodyka badań jest adekwatna, a analiza i wyniki przeprowadzonej weryfikacji eksperymentalnej posłużyły do sformułowania przekonujących wniosków.

Zaproponowane rozwiązania charakteryzują się cechami nowatorskimi i oryginalnym podejściem. Warto zwrócić uwagę na praktyczne aspekty uzyskanych rezultatów, które posiadają znaczną wartość użytkową.

Podsumowując, uważam, że szczególnie wartościowe i nowatorskie wyniki uzyskane w tej pracy to:

- Opracowanie i oprogramowanie dedykowanego interfejsu TXPB-256 dla systemu badawczego us4R-lite, z wieloelementową głowicą ultradźwiękową, co umożliwiło skuteczne wsparcie procesu nadawania, odbioru oraz przetwarzania danych. Opracowany moduł został zaprojektowany z myślą o zwiększeniu możliwości nadawczych platformy us4R-lite, aby sprostać wymaganiom metod SWE wykorzystujących ARF.
- Projekt oprogramowania sprzętowego dla urządzenia FPGA TXPB-256, co stanowiło istotny wkład w rozwój tej technologii.
- Zapewnienie dużej konfigurowalności opracowanego rozwiązania, umożliwiającego realizację transmisji dla dowolnego algorytmu obrazowania, w tym wysokoenergetycznych sekwencji pobudzeń do 180 Vpp, co jest istotne dla metod SWE z wykorzystaniem ARF. Dzięki możliwości generowania impulsów pchających o dowolnej konfiguracji, system us4R-lite z zainstalowanym modułem TXPB-256 staje się idealnym narzędziem do opracowywania i oceny nowych metod SWE.
- Implementacja kompletnego algorytmu rekonstrukcji obrazu dla dwuwymiarowej metody SWE, umożliwiająca rekonstrukcję mapy sztywności przy użyciu pozyskanych danych kanału RF (and. radio frequency) jako danych wejściowych. Algorytm został dostosowany do działania w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem architektury CUDA dostępnej w kartach graficznych GPU przy użyciu języków programowania Python i CUDA C.
- Poprawna walidacja i weryfikacja opracowanego rozwiązania, co wymagało znacznego nakładu pracy i specjalistycznej wiedzy w różnych obszarach nauki.

5. Uwagi krytyczne (do dyskusji)

Na podstawie dokładnej analizy przedstawionej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że nie pojawiają się krytyczne uwagi o charakterze merytorycznym. Główne uwagi do dyskusji można w skrócie opisać w poniższych punktach:

- 1) Autor przedstawił przegląd literaturowy w drugim rozdziale, który określa jako „szczegółowy”. Moim zdaniem jest to raczej przegląd ogólny, obejmujący szeroki zakres prac związanych z tematyką elastografii fali poprzecznej. To dobrze wykonany, zwięzły przegląd wybranych zagadnień, który daje czytelnikowi solidne zrozumienie omawianej tematyki.
- 2) Doktorant omówił w swojej pracy metody SWE oparte na wyznaczaniu czasu przelotu fali, będące powszechnie stosowanymi technikami w dziedzinie czasu. Jednakże, zauważam brak odniesienia do drugiej grupy metod SWE, bazujących na dziedzinie częstotliwości, które znane są z większej precyzji w porównaniu do metod pierwszej grupy.
- 3) Jednym z obszarów, który autor pracy pominął w swojej rozprawie są metody SWE oparte na uczeniu maszynowym (ang. machine learning, ML), a w szczególności uczenie maszynowe oparte na fizyce (ang. physics-informed machine learning, PIML). W ostatnich latach, podejścia te zdobyły uznanie wielu grup badawczych. Połączenie ML/PIML z technologią CUDA posiada ogromny potencjał w kontekście wyznaczania map sprężystości w czasie rzeczywistym. Wspomniane podejście może stanowić istotny aspekt w kontekście aktualnych trendów badawczych w dziedzinie elastografii ultradźwiękowej.
- 4) W pracy zabrakło omówienia możliwości adaptacji i weryfikacji opracowanego interfejsu do stosowania różnych typów głowic, w tym typu *convex*. Rozważenie ewentualnej adaptacji systemu do innych rodzajów głowic stanowiłoby ważny element dyskusji, uwzględniając potencjalne różnice w charakterystyce i specyfikacji technicznej pomiędzy głowicami. Taka analiza mogłaby rozszerzyć zakres zastosowań opracowanego systemu (monitorowanie tkanek znajdujących się na głębokości powyżej 4 cm) i wprowadzić nowe perspektywy badawcze.
- 5) Warto zauważyć, że w pracy autor skupił się głównie na pomiarze sztywności tkanki, jednakże pominięto bardzo istotny aspekt, jakim jest parametr lepkości lub tłumienia badanego materiału. Zagadnienie to stanowi kluczowy element pełnej charakteryzacji właściwości mechanicznych tkanek. Sugeruję, aby w przyszłych pracach uwzględnić również ten parametr, co mogłoby dostarczyć bardziej kompleksowego obrazu wyników uzyskanych w ramach badań SWE.
- 6) Warto również zwrócić uwagę na możliwość przyszłego porównania wydajności opracowanego rozwiązania z innymi systemami badawczymi, np. firmy Verasonics. Takie porównanie mogłoby dostarczyć dodatkowych cennych informacji

dotyczących konkurencyjności oraz potencjalnych obszarów doskonalenia opracowanego systemu.

6. Podsumowanie

Pan magister inżynier Damian Cacko wykazał się znaczącą wiedzą w szerokiej dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, obejmując w szczególności elektronikę, informatykę, metrologię, propagację fal sprężystych, metody ultradźwiękowe i analizę sygnałów, którą z powodzeniem wykorzystał do opracowania i oprogramowania dedykowanej karty, umożliwiającej implementację techniki obrazowania medycznego, ultradźwiękowej elastografii fali poprzecznej na urządzeniu us4R-lite. Przedstawiona do recenzji praca potwierdza, jak ważne jest łączenie specjalistycznej wiedzy z różnych dziedzin.

Autor zaprezentował w swojej pracy warsztat, który świadczy o jego znacznym doświadczeniu i potencjale naukowym. Uważam, że praca, pod względem naukowym i badawczym, jest bardzo wartościowa. Jednocześnie stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

