

Prof. dr hab. Eugeniusz Rokita
Zakład Biofizyki
Collegium Medicum
Uniwersytet Jagielloński

Kraków, dn. 12 września 2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej pana mgr. inż. Vitaliya Atamaniuka pt. „Rozwój techniki elastografii rezonansu magnetycznego do pomiaru sztywności i lepkości narządów w organizmie ludzkim”.

W ocenianej dysertacji doktorskiej przedstawiono wyniki badań różnych aspektów elastografii rezonansu magnetycznego (MRE). Należy wyraźnie podkreślić, że metoda MRE jest bardziej zaawansowana, zarówno od strony eksperymentalnej jak i obliczeniowej, w stosunku do rutynowo stosowanego w diagnostyce medycznej obrazowania opartego na efekcie magnetycznego rezonansu jądrowego. W rezultacie metoda MRE jest rzadko stosowana w praktyce klinicznej, głównie do wyznaczania parametrów mechanicznych wątroby. Automatycznie odbija się to na liczbie opublikowanych prac z zakresu sprawdzania poprawności diagnostyki wykonanej tą metodą.

Można wyróżnić szereg zagadnień, które wymagają dodatkowych badań, mimo że pierwsze prace opisujące wykorzystanie metody MRE do celów diagnostycznych opublikowano około 30 lat temu. Jako przykłady można podać problemy związane ze standaryzacją warunków badania czy też optymalizacją konstrukcji generatora fal poprzecznych w zależności od badanego narządu. Osobnym zagadnieniem jest lawinowy wzrost wykorzystania sztucznej inteligencji (AI) w diagnostyce medycznej na przestrzeni ostatnich lat. Zupełnie naturalne wydaje się sprawdzenie użyteczności AI w analizie badań metodą MRE, które do tej pory nie zostało wykonane.

Podane powyżej argumenty powodują, że bardzo pozytywnie oceniam podjęcie badań, których wyniki opisano w ocenianej rozprawie. Autor przedstawia w dysertacji wyniki badań obejmujące szerokie spektrum zagadnień, których wspólnym mianownikiem jest metoda MRE. Otwartym pozostaje pytanie, czy metoda MRE zastąpi obecnie stosowane metody diagnostyczne. Opisane w dysertacji badania stanowią próbę odpowiedzi na to pytanie i tym samym są to badania bardzo aktualne.

W recenzji zostanie pominięte szczegółowe omówienie prezentowanych w dysertacji wyników, ponieważ tekst pracy jest ogólnie dostępny. Ograniczę się wyłącznie do wypunktowania uwag krytycznych oraz zagadnień, które uznaje za nowatorskie.

Od strony formalnej praca została przygotowana zgodnie z powszechnie przyjętymi standardami dla dysertacji doktorskich. Osiem rozdziałów merytorycznych uzupełniono streszczeniami w języku polskim i angielskim, wykazami tabel, rysunków i skrótów oraz bibliografią. Zawarte w dysertacji piśmiennictwo obejmuje 159 pozycji. Dowodzi to rozbudowanych studiów literaturowych przeprowadzonych przez Autora. W pracy przedstawiono badania trzech zagadnień, które opisano konsekwentnie w rozdziałach „Materiały i Metody”, „Wyniki” oraz „Dyskusja”. W mojej ocenie taka forma prezentacji utrudnia czytelnikowi zapoznanie się tekstem pracy. Każde z prezentowanych zagadnień powinno zostać omówione niezależnie, stosując schemat przyjęty dla publikacji naukowych.

Ocenę merytoryczną rozważanych w dysertacji zagadnień rozpocznę od uwagi ogólnej dotyczącej tytułu rozprawy. W tekście nie znalazłem żadnych danych dotyczących „lepkości narządów w organizmie ludzkim”. Problem badania lepkości tkanek miękkich (narządów) jest polem badań reologii. Trudno jest doszukać się korelacji metod reologicznych z metodą MRE. Z drugiej strony około połowy tekstu rozprawy powiązane jest ze sztuczną inteligencją, co zostało w tytule dysertacji całkowicie pominięte.

Pierwsza grupa zagadnień rozważanych w rozprawie dotyczy optymalizacji metody MRE w aspekcie diagnostyki zmian patologicznych wątroby. Obecnie jest to najczęściej wykonywane badanie MRE, dopuszczone do zastosowań klinicznych przez instytucje certyfikujące procedury medyczne. W mojej ocenie jest to poprawnie przeprowadzony eksperyment dla dużej grupy przypadków (100 ochotników). Nie mam żadnych uwag krytycznych odnośnie do strony pomiarowej i obliczeniowej eksperymentu. Wykorzystano komercyjnie dostępną aparaturę i oprogramowanie. Dodatkowo nadmieniam, że wyniki badań zostały wcześniej opublikowane (Sci. Rep. 2020;10(1):17887 i Sci. Rep. 2021;11(1):19786). Moja uwaga dotyczy doboru grupy badanych osobników. Stu badanych młodych ochotników zostało wybranych w oparciu o ostre kryteria. U tej grupy wiekowej patologii wątroby występują sporadycznie i na pewno rzadziej niż u osób starszych. Wnioski o charakterze utylitarnym, dotyczące warunków diagnostyki wykonanej

metodą MRE są słuszne jedynie dla wąskiej grupy wiekowej. Przydatność tych wniosków dla praktyki klinicznej jest moim zdaniem mocno ograniczona.

Nie znalazłem natomiast w rozprawie typowo (bio)fizycznego podejścia do uzyskanych wyników. Wyznaczone minimalne i maksymalne wartości sztywności wątroby różnią się o ponad 50%, nadmieniam, że dla wysoce wyselekcjonowanej grupy młodych ochotników. W rozprawie brakuje dyskusji tego problemu. Może jest to wynik różnic osobniczych, ale w tym przypadku powinno się dokonać oszacowania błędów pomiarowych. Zdaje sobie sprawę, że szacowanie błędów w przypadku metody MRE nie jest prostym problemem ze względu na wieloetapowość procedury. W fizyce znane są metody zarówno obliczeniowego jak i eksperymentalnego rozwiązywania tego problemu. Nie jest dla mnie jasne, dlaczego w zamian za wyżej wymienione oszacowania Autor przedstawia w rozprawie wykaz zewnętrznych i wewnętrznych czynników które mają wpływ na sztywność wątroby. Takie informacje są zawarte w wielu podręcznikach akademickich.

Kolejna grupa zagadnień przedstawionych w dysertacji dotyczy wykorzystania w metodzie MRE narzędzi z zakresu sztucznej inteligencji. Jest to aktualnie bardzo popularne podejście stosowane do rozwiązywania problemów w wielu dziedzinach nauki. Moim zdaniem, obserwujemy nawet pewnego rodzaju „epidemię” AI w badaniach naukowych. Autor, zgodnie z obecnymi trendami, przedstawia pierwsze próby wykorzystania narzędzi AI w metodzie MRE do redukcji artefaktów spowodowanych oddychaniem w badaniu wątroby oraz do automatycznej segmentacji mięśnia sercowego. Jest to niewątpliwie nowatorskie podejście do analizy danych w metodzie MRE. Z drugiej strony, istotną wadą badań w tym temacie jest niewielka liczba przypadków poddanych analizie (odpowiednio 41 i 16). Uzyskanie istotnych klinicznie wniosków, nawet z zastosowaniem AI bez względu na architekturę sieci, wymaga jednak przeprowadzenia badań na znacząco większej liczbie przypadków zróżnicowanych pod względem wieku i zaawansowania zmian patologicznych.

Artefakty oddechowe występują we wszystkich metodach obrazowych, gdy czas badania jest porównywalny z czasem wstrzymania oddechu przez pacjenta, W metodzie MRE, AI można zastosować do korekcji finalnych map sztywności lub do korekcji danych pośrednich (obrazy surowe). Optymalizacja wymaga przetestowania wielu możliwości dla dużej grupy przypadków, co znacząco przekracza zakres jednej dysertacji doktorskiej. W

rozprawie weryfikację korekcji obrazów wykonanej z użyciem narzędzi AI, wykonano przez porównanie z obrazami referencyjnymi uzyskanymi przy wstrzymanym wydechu. W rozprawie zastosowano bardzo proste metody ilościowego porównania tekstury obrazów. W diagnostyce obrazowej stosowane są bardziej zaawansowane metody analizy obrazów (radiomika). W mojej ocenie, uzyskane wyniki, szczególnie średnie wartości sztywności wątroby, jednoznacznie potwierdzają celowość kontynuowania badań tego zagadnienia. Z dużym prawdopodobieństwem można przypuszczać, że narzędzia AI pozwolą ograniczyć wpływ artefaktów oddechowych. Oczywiście w dysertacji opisano wstępne wyniki, które wymagają weryfikacji na większej bazie danych. Oceniając rozpowszechnienie metody MRE powstaje pytanie czy takie badania można realnie przeprowadzić.

Narzędzia z zakresu AI wykorzystano także w rozprawie do automatyzacji segmentacji ścian lewej komory serca. Nie jest mi znana żadna stosowana klinicznie procedura diagnostyczna oparta na pomiarze sztywności ściany lewej komory. Można więc traktować te badania jako test nowej procedury diagnostycznej. Z drugiej strony segmentacja lewej komory stosowana jest obecnie w wielu metodach diagnostyki obrazowej do wyznaczenia, użytecznych diagnostycznie, danych anatomicznych i hemodynamicznych. Należy wyraźnie podkreślić, że segmentacja lewej komory jest istotnym problemem w wielu metodach obrazowych, nawet jeśli nie jest korelowana z metodą MRE. Autor wykorzystuje w tej części dysertacji dane zewnętrzne, na których wykonuje testowanie siedmiu architektur sieci, trzech różnych schematów trenowania oraz różnych kombinacji danych wejściowych. Ostatecznie Autor porównuje różne kombinacje zastosowane w obliczeniach, co pozwala wybrać najbardziej optymalne podejście. Pozytywny wynik uzyskany w wstępnych testach potwierdza słuszność przeprowadzenia badań dla obszerniejszej bazy danych. Mam pewne uwagi do bardzo dużych rozrzutów w kwalifikacji punktowej obserwowanej w wynikach obliczeń (rys. 30-32). Autor nie podaje żadnej interpretacji tych wyników.

Trzecie zagadnienie opisane w rozprawie ma charakter czysto eksperymentalny i dotyczy konstrukcji dedykowanego generatora fal ścinających do badania ślinianek przyusznych. Jest to w sumie bardzo proste urządzenie, którego działanie zostało potwierdzone na bardzo nielicznej grupie ochotników (3 przypadki). Niewątpliwą zaletą nowego generatora jest jego bardzo prosta konstrukcja. Przedstawione w dysertacji wstępne wyniki, wymagają jednak weryfikacji na większej liczbie przypadków, co

oczywiście przekracza zakres badań w ramach jednej dysertacji doktorskiej. Osobnym zagadnieniem, które musi zostać sprawdzone w warunkach klinicznych, jest użyteczność wyznaczonej sztywności ślinianki do celów diagnostycznych.

Reasumując omówienie dysertacji pragnę podkreślić, że moja ocena merytoryczna rozprawy jest bardzo pozytywna. Autor przedstawia wyniki badań szerokiego spektrum zagadnień, które są powiązane z elastografią rezonansu magnetycznego. Wysoko oceniam, że przedstawiono w dysertacji zarówno zagadnienia eksperymentalne jak i zaawansowane obliczenia. Ramy czasowe przygotowania rozprawy doktorskiej uniemożliwiają pełne rozwiązanie wszystkich problemów badawczych prezentowanych w dysertacji. Uzyskane wyniki stanowią bardzo rzetelne podstawy do kontynuacji badań.

Kompletując ocenę rozprawy muszę zwrócić uwagę Autorowi na uchybienia dotyczące strony redakcyjnej. Wiele obrazów prezentowanych w tekście jest nieczytelnych (na przykład rys. 27-29). Nadmieniam, że Autor przedstawia w wielu miejscach rozprawy wyniki analizy wizualnej, której rzetelna ocena nie jest możliwa bez dobrej jakości obrazów. Rozumiem ograniczenia dotyczące druku rozprawy. Nie rozumiem natomiast dlaczego Autor nie zastosował prostego rozwiązania, które jest stosowane od wielu lat w radiologii, czyli uzupełnienie tekstu o płytę kompaktową zawierającą wybrane obrazy.

W tekście rozprawy znalazłem także kilka błędów drukarskich i niewłaściwych sformułowań. Ograniczając się tylko do kilku przykładów. Na str. 30 znalazłem niejasne sformułowanie „niepełności spowodowane szumem” oraz wzór „ $R2^* = \dots$ ”, który jest niepoprawny. W wielu miejscach tekstu Autor używa frazy „wartość średnia \pm odchylenie standardowe”, którą można zastąpić skrótem umieszczonym w wykazie skrótów. W innym przypadku skrót występuje w wykazie skrótów, ale nie jest stosowany w tekście (str. 47, TE i TR). Można także spotkać w tekście sytuację odwrotną, tj. skrót, w tekście którego nie ma w wykazie (str. 47, SPIRiT). Nadmieniam jednak, że zauważone błędy redakcyjne nie utrudniają zrozumienia tekstu rozprawy.

Wyżej opisane uwagi dotyczą głównie strony redakcyjnej oraz metodycznej rozprawy i nie umniejszają znacząco w sumie bardzo pozytywnej oceny recenzowanej dysertacji. Uważam, że Autor zawarł w rozprawie wiele bardzo interesujących wyników, które stanowią istotny wkład w rozwój elastografii rezonansu magnetycznego. Moim zdaniem, recenzowana dysertacja zatytułowana „Rozwój techniki elastografii rezonansu magnetycznego do pomiaru sztywności i lepkości narządów w organizmie ludzkim”.

spełnia warunki ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Wnioskuje o dopuszczenie pana mgr. inż. Vitaliya Atamaniuka do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

Uważam także, że oceniana dysertacja pana mgr. inż. Vitaliya Atamaniuka zasługuje na wyróżnienie. Mój wniosek oparty jest na następujących argumentach. Po pierwsze, kompleksowość opisanych w dysertacji badań. Opisano zarówno badania eksperymentalne, badania o charakterze użytkowym dla optymalizacji warunków badania jak i obliczenia z wykorzystaniem narzędzi sztucznej inteligencji. Kolejnym argumentem jest fakt, że duża część zawartych w rozprawie wyników została wykorzystana do przygotowania kilku artykułów opublikowanych w czasopiśmie o międzynarodowym zasięgu lub prezentowana na międzynarodowych konferencjach. Pragnę także podkreślić, że dla przeprowadzenia badań pan mgr inż. Vitaliy Atamaniuk nawiązał współpracę z ośrodkami zagranicznymi, co znacząco rozszerzyło dostępną bazę eksperymentalną i obliczeniową. Jest to bardzo istotna, ale niezbyt popularna umiejętność.



Prof. dr hab. Eugeniusz Rokita