



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Prof. dr hab. Wojciech M. Kwiatek

Kraków, 10 października 2018 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Strona | 1

pt. "Obrazowanie rentgenowskie z kontrastem fazowym i modulacją natężenia promieniowania przy oświetleniu krawędziowym"
autorstwa pana mgr.inż. Bartłomieja Włodarczyka

Recenzowana rozprawa doktorska pt. „Obrazowanie rentgenowskie z kontrastem fazowym i modulacją natężenia promieniowania przy oświetleniu krawędziowym” wykonana została przez pana mgr. inż. Bartłomieja Włodarczyka na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w Warszawie, pod kierunkiem dr. hab. Jarosława Żygierewicza jako promotora oraz dr Beaty Brzozowskiej jako promotora pomocniczego.

Tomografia komputerowa jest stosunkowo młodą techniką badawczą, wykorzystywaną do nieniszczącego obrazowania obiektów ze szczególnym uwzględnieniem ich budowy i struktury wewnętrznej. W tej technice, głównie wykorzystywany jest efekt absorpcji promieniowania rentgenowskiego przechodzącego przez badany obiekt. Jednakże, jak każda technika badawcza ma swoje zalety i wady. Niewątpliwie, jej olbrzymią zaletą jest nieniszczący charakter badań. Choć tu należy zachować pewną powściągliwość w takim stwierdzeniu, albowiem badając obiekty szczególnie biologiczne, należy zwrócić uwagę na możliwość wystąpienia uszkodzeń radiacyjnych. Do wad tej techniki należy zaliczyć bardzo niską czułość na rozróżnienie składników wewnętrznych charakteryzujących się współczynnikami absorpcji o zbliżonych wartościach. Dlatego też, opracowano nowe techniki tomografii wykorzystujące kontrast fazowy. To dzięki obrazowaniu z kontrastem fazowym możliwe stało się rozróżnienie np. różnych struktur tkankowych w obrębie obrazowanych obiektów biologicznych. Obrazowanie z kontrastem fazowym wciąż możliwe jest jedynie na gruncie badań podstawowych w ośrodkach naukowych dysponujących laboratoryjnymi źródłami promieniowania rentgenowskiego lub na liniach pomiarowych w ośrodkach synchrotronowych. Wciąż brak takich



urządzeń, które pozwalałyby prowadzić obrazowanie z kontrastem fazowym na skalę diagnostyki klinicznej.

Z uwagi na istotę zagadnienia pomimo pojawiających się trudności badawczych pan mgr inż. Bartłomiej Włodarczyk postanowił podjąć wyzwanie i zaprojektować oraz wdrożyć, opracowane przez siebie, procedury optymalizacyjne obrazowania z modulowanym natężeniem promieniowania X przy oświetleniu krawędziowym. Zaproponowany układ oraz przeprowadzone symulacje niewątpliwie mogą być przydatne w procesie projektowania i budowy systemu obrazowania dla potrzeb klinicznych.

Strona | 2

Recenzowana rozprawa zawiera się na 179 stronach i jest podzielona na 8 rozdziałów. Rozprawę rozpoczyna streszczenie w języku polskim i angielskim, wprowadzenie zawierające opis założeń, projektu badań, zakresu teoretycznego oraz dyskusji i podsumowania. Następnie zamieszczone są rozdziały od 2 do 8, które można podzielić na: a) rozdziały zawierające podstawy teoretyczne kontrastu absorpcyjnego i fazowego w obrazowaniu rentgenowskim oraz opis procesów powstawania obrazów i metod poprawy ich jakości, są to rozdziały 2 – 4, oraz b) rozdziały zawierające oryginalną pracę nad zagadnieniem opisujące propagację szumu w układzie obrazowania, założenia modelowanego układu obrazowania EIXPCI (*Edge Illumination X-ray Phase Contrast Imaging*) charakterystykę odpowiedzi układu, wyniki modelowania metodą Monte Carlo oraz opis poprawy jakości obrazów z kontrastem fazowym. Pracę kończy rozdział będący podsumowaniem. Do pracy dołączono również dodatek będący uzupełnieniem teoretycznym z zakresu teorii elektromagnetyzmu oraz analizy Fouriera. Na końcu znajduje się spis literatury składający się ze stu siedemdziesięciu pozycji. Spis rysunków, tablic oraz lista algorytmów jak też wykaz dorobku naukowego autora składający się z trzech publikacji znajduje się na początku rozprawy. Szkoda, że autor nie zamieścił spisu używanych skrótów.

Dość jasno określono cel pracy natomiast **nie sformułowano jej tezy**. Mam jednak nadzieję, że podczas obrony doktorant ją sformułuje skoro ma jej bronić.

Praca napisana jest bardzo starannie i dość zwięźle, choć czasami brakuje ścisłości języka naukowego. Układ rozprawy jest nietradycyjny z uwagi na brak typowych rozdziałów zawierających wyniki eksperymentalne. Te przeplatają się z podstawami teoretycznymi. Mnogość wyprowadzeń czy tylko przywołań



różnorodnych wzorów, które nie zawsze spełniają swoją rolę, znacznie utrudnia czytelnikowi śledzenie głównego nurtu wypowiedzi. Nie mniej jednak, nie można zarzucić tej pracy braku poprawności merytorycznej, choć zdarzyły się drobne wyjątki. Szkoda też, że autor wyraźnie nie rozgraniczył części eksperymentalnej od teoretycznej. Choć w przypadku tej pracy można mieć wątpliwość czy jest się uprawnionym do stwierdzenia, że wyróżniamy część eksperymentalną.

Należy podkreślić, że założone cele pracy zostały osiągnięte. Autorowi udało się przeprowadzić analizę czynników wpływających na zmianę kontrastu fazowego, co pozwoliło na otrzymanie bardzo przejrzystych obrazów. Autor zaprojektował i wykonał numeryczne fantomy testowe, które pozwoliły na ocenę odpowiedzi układu przy obrazowaniu absorpcyjnym z kontrastem fazowym. Na uwagę zasługuje zastosowanie fantomów antropomorficznych obszarów głowy i klatki piersiowej w skali rzeczywistej odpowiadającej rozmiarom człowieka. Dla mnie, jako fizyka pracującego z promieniowaniem jonizującym i badającego wpływ tego promieniowania na organizmy żywe, istotnym elementem rozprawy jest też rozdział 7.3.6, w którym autor rozważa wielkość pochłoniętej dawki. Na uwagę zasługuje również wykorzystanie metod opartych o szybkie pakiety graficzne do tzw. *ray-tracing'u*, co skróciło czas rekonstrukcji obrazu oraz zastosowanie transformacji regularyzacyjnych przy odszumianiu obrazów 3D.

Warto podkreślić, że otrzymane przez autora wyniki pozostają w dużej zgodności z wartościami referencyjnymi (np. z IPEM). Ponadto, recenzowana rozprawa stanowi istotny przyczynek do rozwoju metod obrazowania z możliwością ich przyszłego zastosowania klinicznego.

Jednakże z obowiązku recenzenta muszę zwrócić również uwagę na drobne błędy edytorskie, które jednak nie umniejszają wartości rozprawy.

Mam też parę drobnych uwag i pytań, na które z pewnością doktorant odpowie podczas obrony.

- str. 1 – doktorant definiuje skrót metody wykorzystującej efekt częściowego oświetlenia krawędzi pikseli detektora jako EIXPCI od angielskiej nazwy „*Edge-Illumination X-ray Phase Contrast Imaging*”. Później ten skrót brzmi EIXPCi – dlaczego?



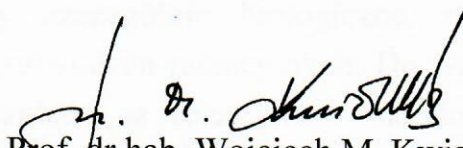
- str. 7 – proszę wyjaśnić co to znaczy, że – *wiązka ulega osłabieniu*? Zapewne mowa tu o zmianie intensywności/natężenia wiązki.
- str. 7 – Stwierdzenie, ...*gdzie $I(x)$ – natężenie wiązki na drodze x w obiekcie...* jest nieprecyzyjne a wręcz błędne.
- str. 9 – Autor przedstawia rysunek zawierający zmianę przekrojów czynnych w zależności od energii fotonów dla węgla – rys. 2.2. Proszę uzasadnić ten wybór.
- str. 12 – Proszę wyjaśnić, co autor rozumie przez stwierdzenie ...*”promieniowanie rentgenowskie w synchrotronach czy lampach rentgenowskich powstaje w wielu niezależnych źródłach”*...?
- str. 17 – błędnie podano jednostkę masy atomowej. Powinno być g/mol lub $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$.
- str. 18 – Autor używa określenia ...*”oddziaływanie promieniowania rentgenowskiego z materią jest raczej słabe”*... proszę wyjaśnić co to znaczy?
- str. 28 – laplasjan to kwadrat symbolu nabla.
- str. 37 i dalej – określenie ...*”zarejestrowane na detektorze”*... jest slangowe raczej należałoby powiedzieć *przez detektor* lub *w detektorze*.
- str. 45 – Proszę wyjaśnić jak należy rozumieć stwierdzenie ...*”częstość próbkowania, jest równa okresowi pierwszej maski (zwykle do kilkudziesięciu μm)”*?
- str. 73 – Stwierdzenie ...*”monochromatyczną wiązkę promieniowania X o długości fali λ (promieniowanie synchrotronowe)...* sugeruje, że promieniowanie synchrotronowe jest promieniowaniem monochromatycznym, co jest nieprawdą.
- str. 84 – Proszę wyjaśnić, co to jest kąt fotonu w stwierdzeniu ... *θ_2 to kąt fotonu wychodzącego...*?
- str. 86 – Proszę wyjaśnić dlaczego przyjęto założenie, że apertury są wykonane ze złota o grubości 130 μm ?
- str. 103 – proszę podać odnośnik literaturowy, na podstawie którego podano energie promieniowania charakterystycznego dla wolframu. Wg bazy danych *X-ray data* wartości te wynoszą odpowiednio: 59,318 keV, 57,981 keV, 67,244 keV oraz 69.013 keV. W rozprawie podano inne wartości.



- str. 104 – Na rysunku 7.1 należało podać tak jak w opisie 80 kVp i 100 kVp .
- str. 105 – rysunek 7.2 zawiera błędny opis. Podane współczynniki przy Al i Cu to zapewne grubości zastosowanych filtrów w mm.
- str. 155 – podana zależność pomiędzy $\mathbf{H}$ i $\mathbf{B}$ jest błędna. Powinno być $\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H}$ gdzie μ_r jest przenikalnością magnetyczną ośrodka a μ_0 jest przenikalnością magnetyczną próżni.

Strona | 5

Podsumowując stwierdzam, że wyniki z przeprowadzonych obliczeń mają istotny wpływ na stan naszej wiedzy w zakresie obrazowania w diagnostyce medycznej i zapewne terapii. Biorąc pod uwagę osiągnięcie oraz zakres prac, jaki został wykonany przez pana mgr. inż. Bartłomieja Włodarczyka w zaplanowanie i przeprowadzenie badań, opracowanie procedur modelowania i symulacji, stwierdzam, że pomimo drobnych uwag, przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określone w *Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* oraz w *Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 r. w sprawie szczegółowego trybu przeprowadzania czynności w przewodach doktorskim i habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora* i **wnioskuje o dopuszczenie pana mgr. inż. Bartłomieja Włodarczyka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**


Prof. dr hab. Wojciech M. Kwiatek