

2018 -10- 25 *W. Bielecki*

Warszawa, 18 października 2018

dr hab. inż. Waldemar Tomasz Smolik, prof. nzw.

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Instytut Radioelektroniki i Technik Multimedialnych
Zakład Elektroniki Jądrowej i Medycznej**Recenzja rozprawy doktorskiej
dla Rady Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego**

Tytuł rozprawy: Obrazowanie rentgenowskie z kontrastem fazowym i modulacją natężenia promieniowania przy oświetleniu krawędziowym

Autor: mgr inż. Bartłomiej Włodarczyk

Promotor: dr hab. n. fiz. Jarosław Żygierewicz

Promotor pomocniczy: dr n. fiz. Beata Brzozowska

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Rozprawa poświęcona jest numerycznej symulacji obrazowania rentgenowskiego z kontrastem fazowym. W ramach pracy badawczej badano metodę obrazowania fazy promieniowania X wykorzystującą oświetlenie krawędziowe pikseli detektora (EIXPCi). Tematyka rozprawy jest mocną jej stroną. Rozpatrywana metoda obrazowania ma znaczenie w rozwoju rentgenowskiej diagnostyki obrazowej.

Celem pracy było opracowanie modelu zjawisk fizycznych i implementacja symulatora numerycznego umożliwiającego optymalizację parametrów obrazowania. Efektem pracy miało być przyspieszenie i umożliwienie konstrukcji systemu obrazowania rentgenowskiego z pomiarem fazy do zastosowań klinicznych. Część rozprawy poświęcono również filtracji obrazów uzyskiwanych tą metodą.

Na wstępie nie sformułowano stawianych w pracy badawczej hipotez. O ile cel pracy badawczej można z trudem wyszukać we wprowadzeniu, to stawiane w rozprawie tezy naukowe można znaleźć dopiero w ostatnich rozdziałach. Chociaż przepisy nie wymagają sformułowania tez, to moim zdaniem przekazują one wiedzę zawartą w rozprawie w sposób esencjonalny.

Główne wnioski z badań są następujące:

- Metoda obrazowania EIXPCi może być zrealizowana za pomocą polichromatycznych źródeł promieniowania X (w szczególności możliwe jest użycie konwencjonalnych źródeł promieniowania rentgenowskiego) oraz typowych, niespecjalistycznych detektorów w postaci paneli płaskich.
- Metoda EIXPCi może być realizowana przy użyciu źródeł promieniowania X o rozmiarach do 100 μm (czyli lamp rentgenowskich używanych w mammografii).
- Opracowany model numeryczny obrazowania metodą EIXPCi umożliwia przewidywanie natężenia sygnału fazy w dowolnym układzie dla obiektów w ludzkiej skali. Możliwa jest optymalizacja geometrii układu.

- Układ obrazowania rentgenowskiego z kontrastem fazowym przy oświetleniu krawędziowym umożliwia rejestrację projekcji przy zachowaniu niskiej dawki i zachowuje jakość krawędzi obiektów widocznych na obrazie.
- Metody regularyzacyjne MS-VST (ang. Multiscale Variance-Stabilizing Transform) z transformacją krzywkową zaimplementowane do układu EIXPCi przewyższają techniki transformacji falkowych.

Dodatkowo w pracy przedstawiono wytyczne dotyczące konstrukcji masek kształtujących wiązkę dla układu EIXPCi.

Rozprawę należy zaliczyć do prac eksperymentalnych ze względu na fakt, że przeprowadzone rozważania teoretyczne zaczerpnięte z literatury miały na celu opracowanie symulatora numerycznego oraz, że do filtracji obrazów wykorzystano znany typ transformacji falkowej.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczącej o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

W pracy nie ma rozdziału poświęconego przeglądowi literatury, co nie ujmuje w żadnym stopniu jej wartości. Ponieważ praca dotyczy zarówno optyki falowej użytej do opisu propagacji promieniowania X jak również przetwarzania obrazów, odpowiednia literatura jest cytowana na bieżąco w rozdziałach poświęconych tym zagadnieniom. Cytowania są dobrane trafnie. Uwzględnione są najnowsze prace innych zespołów badawczych. Liczba cytowań jest bardzo duża – zacytowano 170 prac. Dokonany w rozprawie opis stanu wiedzy świadczy o dużej orientacji autora w podjętej tematyce. Wyciągnięte na podstawie literatury wnioski są prawidłowe. Autor cytuje również swoje 3 artykuły w renomowanych czasopismach, w których zaprezentowane zostały wyniki prac przedstawiane w rozprawie.

Pomimo tak obszernego spisu literatury nie jest on moim zdaniem pełny. W rozprawie brakuje krótkiego przeglądu innych metod realizacji obrazowania z kontrastem fazowym. Porównanie alternatywnych metod z metodą rozważaną w pracy następuje w podsumowaniu, ale bez odwołań do literatury traci ono swoją wagę.

W ramach prac badawczych autor zaimplementował model propagacji promieniowania X w symulacji numerycznej. Brakuje w tej części pracy odniesienia do innych symulatorów używanych w fizyce wysokich energii takich jak GEANT itp., jak również innych prób numerycznego modelowania obrazowania fazy, np. grupy z Université de Lyon, która zajmuje się metodą „X-ray in-line phase-contrast”, a która swój symulator buduje na bazie oprogramowania GEANT (symulacja rozproszenia) i GATE (symulacja optyki falowej).

Opracowany symulator numeryczny wykorzystuje zarówno teorię optyki falowej jak i mechaniki kwantowej. Czy nie istnieją próby opisanie symulowanych zjawisk na gruncie tylko jednej teorii?

Opracowano dwie metody symulacji „symulacja propagacji wielowarstwowej” i „modelowanie hybrydowe”. W rozprawie brakuje szerszej dyskusji dlaczego potrzebne są dwie metody symulacji. Czy dokonano porównania rezultatów obu metod dla prostego obiektu testowego? Czy można zweryfikować jakość symulatora poprzez porównanie z rozwiązaniem analitycznym dla prostego przypadku?

Przy prezentacji własności systemu obrazującego autor nie odwołał się do prac prezentujących pełniejsze spojrzenie na metody oceny jakości systemów obrazowych, przy czym nie uzasadnia też wyboru miar jakości obrazów użytych w badaniach. Stąd, brak jest w pracy badań funkcji przenoszenia modulacji (modulation transfer function – MTF). Zastosowano definicję kontrastu różną od kontrastu stosowanego w obrazowych technikach diagnostycznych.

Cytowania dotyczą wyłącznie literatury anglojęzycznej. W rzeczywistości brak jest literatury w języku polskim w tematyce „phase-contrast X-ray imaging”. Z tego względu autorowi przypadło zadanie wprowadzenia nowych nazw do języka polskiego. O ile termin „obrazowanie rentgenowskie z kontrastem fazowym” jest dla mnie akceptowalny, to terminy „mapy rozkładu kontrastu fazowego” lub „obrazy kontrastu fazowego” budzą zastrzeżenia. Moim zdaniem nazwa obrazu powinna określać parametr fizyczny widoczny na obrazie. Kontrast określa jakość obrazów. Na przykład, w tomografii komputerowej obrazy prezentują przestrzenny rozkład współczynnika osłabiania promieniowania w badanym obiekcie i nie nazywa się ich obrazami kontrastu osłabiania.

Autor twierdzi, że: „W tej rozprawie wprowadzono po raz pierwszy spolszczone nazwy transformacji curvelet – transformacja krzywkowa i transformacji ridgelet - transformacja grzbietkowa”. Po pierwsze, poprawność drugiej nazwy budzi wątpliwości. Ponieważ zdrobnieniem rzeczownika grzbiet jest grzbiecik, to nazwa powinna brzmieć „transformacja grzbiecikowa”. Takiej formy używa w swoich wykładach Prof. Przelaskowski (Wydział MiNI PW). Zdrobnienie w formie „grzbietek”, od której autor prawdopodobnie wywiódł nazwę transformacji, zniknęło z języka polskiego dawno temu. Po drugie terminy krzywkowa, grzbietek lub grzbiecik można znaleźć w książkach Prof. Mokrzyckiego lub Prof. Tadeusiewicza.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Postawione w rozprawie zagadnienia zostały rozwiązane. Autor przeprowadził w tym celu właściwe badania i wybrał właściwe metody. Dokonał analizy teoretycznej zjawisk fizycznych i na tej podstawie opracował symulator zmian fazy w propagacji fal rentgenowskich w obrazowaniu z efektem oświetlenia krawędzi pikseli detektora. Wykonał symulacje dla polichromatycznych źródeł i typowych, niespecjalizowanych detektorów promieniowania X. Zbadał zależność jakości obrazowania od wielkości ogniska źródła. Poprawność modelu propagacji promieniowania X w układzie obrazowania została zweryfikowana poprzez porównanie z danymi eksperymentalnymi uzyskanymi przez inne zespoły badawcze. Omówione w punkcie pierwszym wnioski zostały wywiedzione na podstawie wyników przeprowadzonych badań.

Słusznym kierunkiem jest zaproponowane przez autora zastosowanie transformacji krzywkowych do filtracji obrazów, co wynika z „krawędziowego” charakteru obrazów fazy promieniowania X. Znalazło to potwierdzenie w przedstawionych wynikach filtracji obrazów. Wnioski dotyczące poprawy jakości obrazów nie są jednak pełne i poprawne, co będzie szerzej poruszone dalej.

W rozprawie pominięto pewne, ważne moim zdaniem, zagadnienia. Nie podjęto szerszej dyskusji zależności czynnika fazowego zespolonego współczynnika załamania od liczby atomowej Z . Informacja o charakterze zależności czynnika absorpcyjnego ($\sim Z^4$) i czynnika fazowego ($\sim Z$) pojawia się w podrozdziale 2.3 (str. 19), ale bez analizy tego faktu dla czułości obrazowania. Czynniki fazowy zespolonego współczynnika załamania jest trzy rzędy wielkości większy niż czynnik absorpcyjny w diagnostycznym zakresie energii dla materiałów o niskiej liczbie atomowej Z . Czy jednak sama ta własność zapewnia różnicowanie tkanek miękkich (materiałów o niskim Z) na obrazie fazowym? Jaka jest wrażliwość odbieranego sygnału na zmianę Z ? Moim zdaniem nie zostało to w rozprawie pokazane. W pracy pojawia się co prawda pojęcie „czułości obrazowania” jak również „czułości na zmiany gęstości masowej” (str. 124), jednak brakuje definicji tej wielkości i porównania wartości dla obrazowania osłabiania i fazy.

Analiza porównawcza obu trybów obrazowania (osłabiania i fazy) byłaby bardzo interesująca. Jak wygląda jakość obrazów osłabiania i fazy (MTF, SNR, odległość średniokwadratowa od wzorca)

przy ustalonej dawce pochłoniętej promieniowania jonizującego, takiej samej w obu trybach obrazowania?

Brak oceny rozdzielczości przestrzennej w rozprawie o metodzie obrazowania budzi zdziwienie. Dlaczego w badaniach nie zastosowano numerycznych obiektów testowych stosowanych do badania urządzeń obrazujących, takich jak fantom do badania funkcji przenoszenia modulacji - MTF? Zastosowanie kontrastu zdefiniowanego dla całego obrazu jako miary jakości obrazu nie jest dobrym pomysłem. Funkcja MTF jest dużo lepszą miarą jakości systemu obrazującego, która pokazuje jak kontrast w obiekcie jest przenoszony przez urządzenie (np. aparat rentgenowski) dla różnych częstotliwości przestrzennych (tym samym różnych rozmiarów obiektów). Ze względu na MTF, w analizie urządzeń obrazujących do oceny rozdzielczości przestrzennej obrazów stosuje się definicję kontrastu Michelsona, a nie definicję przedstawioną w pracy.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Rozprawa prezentuje oryginalną metodę analitycznego i numerycznego modelowania obrazowania rentgenowskiego z kontrastem fazy przy oświetleniu krawędziowym oraz jego oryginalną implementację (wykorzystanie biblioteki OpticX). Prezentowana wiedza i badania są na poziomie światowym, a w pewnych aspektach jest unikalna. W ramach pracy po raz pierwszy dokonano symulacji obrazowania fazy dla numerycznego fantomu antropomorficznego. Oryginalne jest również zastosowanie transformacji falkowych (krzywkowych) do filtracji obrazów uzyskiwanych techniką EIXPCi. Z cytowanych w rozprawie publikacji autora wynika, że zaprezentowane w rozprawie prace badawcze były wykonywane w bardzo małym (dwuosobowym) zespole lub są wynikiem indywidualnej pracy autora.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Obszerna rozprawa jest napisana ładnym, poprawnym językiem. W pracy zdarzają się drobne błędy interpunkcyjne i zdania o błędnej składni lub znaczeniu budzącym wątpliwość, ale są to wystąpienia incydentalne.

Rozprawa została zredagowana starannie, chociaż w redakcji tekstu popełniono pewne błędy. Układ pierwszego rozdziału zatytułowanego „Wprowadzenie” budzi następujące zastrzeżenia. Zawartość podrozdziałów 1.1, 1.2, 1.3 i 1.4 nie odpowiada tytułom. Kolejność jest nielogiczna. Opis układu i zawartości pracy poprzedza jej cel. Jaki sens ma wprowadzenie trzydziestego podrozdziału 1.4 „Dyskusja i podsumowanie”, w którym znajdujemy informację, że dyskusja zamyka rozdziały 7 i 8, a podsumowanie jest zawarte w rozdziale ostatnim? Nie jest dla mnie zrozumiałe dlaczego cel pracy został podany dopiero na końcu wstępu w tym podrozdziale.

Występujące w pracy wzory są zaczerpnięte z innych prac z odpowiednim cytowaniem, niektóre wyprowadzenia i definicje zostały słusznie podane w dodatkach. Zdarza się jednak, że nie wszystkie symbole występujące we wzorach są opisane. Czasami opis symboli pojawia się z opóźnieniem, to jest przy opisie wzorów następnych, a czasami opis ten można znaleźć w dodatku. Utrudnia to odbiór tekstu. W niektórych przypadkach został naruszony formalizm matematyczny. Wzory są błędne. Przykładem tego jest rozdział 8.3, gdzie ten sam symbol operatora jest używany raz jako transformata funkcji a raz jako funkcja wektorowa.

W przypadku kilku rysunków brakuje opisu osi (najczęściej rzędnej) lub brakuje jednostki w jakiej podane są wartości.

Lista szczegółowych uwag do pracy jest umieszczona w załączniku do recenzji.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Praca nie ma słabych stron ani głównych wad lecz tylko mankamenty w różnych jej aspektach, zarówno merytorycznych jak i dotyczących formy.

Zastrzeżenia co do zawartości pracy, użytych w rozprawie metod oraz układu pracy zostały poruszone w punktach poprzednich. W tym punkcie zebrane zostały inne wątpliwości merytoryczne.

Niektóre twierdzenie i wnioski pojawiające się w pracy są nazbyt kategoryczne lub niepełne. Na przykład nie mogę się zgodzić z kategorycznym stwierdzeniem autora, że: „przewagę symulacji stanowi fakt, iż wyłącznie obrazy uzyskane z modelowania numerycznego umożliwiają uzyskanie prawdziwej wartości f' ”. Przecież w rzeczywistych pomiarach można wykorzystać obiekt testowy o znanych parametrach i uwzględnić tę informację w modelu numerycznym tego obiektu i w obliczeniach błędu rekonstrukcji.

Przykładem niepełnego wniosku jest twierdzenie, że metoda fazowa wymaga około dwukrotnie dłuższej akwizycji w porównaniu z obrazowaniem atenuacji. Tę zależność należałoby opisać szerzej. Potrzebną ekspozycję na detektorze można osiągnąć zwiększając prąd na lampie rentgenowskiej przy zachowaniu tego samego czasu pomiaru. Wydaje się istotne tutaj porównanie dawki promieniowania jonizującego pochłoniętej przez pacjenta dla obrazowania atenuacji i fazy.

Niektóre wnioski są formułowane na podstawie prac badawczych innych naukowców ale bez cytowania literatury. Tak jest w przypadku wniosków dotyczących porównania metody z oświetleniem krawędziowym z obrazowaniem fazowym realizowanym za pomocą innych technik.

W pracy termin „regularyzacja” jest używany zamiennie z „filtracją” lub „odszumianiem”. Na przykład rozdział 5.4 jest zatytułowany „Odszumianie przy użyciu wieloskalowej transformacji krzywkowej”, podczas gdy w rozdziale 8 używany jest termin „metody regularyzacyjne”. Moim zdaniem terminy regularyzacja i filtracja nie są zamiennie. Czy termin „regularyzacja” jest używany poprawnie? Przy opisie algorytmu iteracyjnego nie jest jasne na czym polega regularyzacja algorytmu iteracyjnego.

Budzi moją wątpliwość wniosek o jakości filtracji, a mianowicie, że „Regularyzacja krzywkowa prowadzi do wyników znacznie bliższych prawdzie (tzw. ground truth) niż metoda FBP.” Nie jest to widoczne na obrazach prezentowanych w pracy. Dla użytych w eksperymencie danych metoda FBP radzi sobie dobrze. Stosunek sygnał szum rośnie o 3 dB przy zastosowaniu algorytmu z „krzywkami”. Wielkość ta nie pasuje do stwierdzenia „znacznie” a raczej do określenia „widocznie”. Przy zmniejszonej liczbie projekcji (z 300 do 80) różnica PSNR dla FBP i „krzywek” zwiększa się z 3 dB do 4 dB a więc tylko o 1 dB. Przy zmniejszonej liczbie projekcji większość iteracyjnych algorytmów radzi sobie lepiej niż algorytm FBP. Na podstawie pokazanych w pracy obrazów można zauważyć, że zastosowana filtracja krzywkowa odtwarza obrazy z artefaktami w postaci kraty. Takie zakłócenia nie występują na obrazach uzyskanych metodą FBP.

Przy opisie FBP popełniony jest standardowy błąd, polegający na przemilczeniu nazwy „okna” filtru, które zostało zastosowane w tym algorytmie. Nie wiadomo w tym momencie, czy nie zastosowano tendencyjnego rozwiązania polegającego na zastosowaniu filtru „RAMP” bez modyfikacji jego charakterystyki za pomocą funkcji „okna” odpowiedniej dla danego poziomu szumu w sygnale.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk fizycznych?

Rozprawa ma charakter eksperymentalny. Przeprowadzone w ramach badań symulacje numeryczne pozwalają ocenić, czy użyty opis teoretyczny pozwala poprawnie modelować analizowane zjawiska fizyczne. Rozprawa ma również znaczenie dla nauk technicznych ze względu na fakt, że w rozprawie przedstawiono wytyczne dotyczące parametrów rentgenowskiego układu obrazującego z kontrastem fazy, co ułatwi jego konstrukcję.

8. Do której kategorii recenzent zalicza rozprawę?

Rozprawę zaliczam do kategorii spełniającej wymagania z wyraźnym nadmiarem.



Waldemar Tomasz Smolik

Załącznik do recenzji. Lista szczegółowych uwag do pracy.

- 1) Str. 1. „dla uzyskania tytułu doktora nauk fizycznych”. O ile mi wiadomo, nie ma takiego tytułu, za to jest stopień naukowy.
- 2) Str. 2 Skrótowiec EIXPCI ma dwie formy w pracy – druga forma z małym ‘i’ na końcu (EIXPCI).
- 3) Wzór 2.6. Brak opisu symbolu Ω .
- 4) Wzór 2.9. Brak objaśnienia zmiennej θ . Wyjaśnienie można znaleźć dopiero w Dodatku A.
- 5) Str. 22. Rysunek 2.6. Schemat zaczerpnięty z literatury: A. Graves „*Phase contrast in x-ray imaging*” PhD Thesis. Powtórzone braki opisu symboli na schemacie. Niepotrzebna informacja, że „rysunek ilustruje”.
- 6) Str. 18. Str. 23. Błędy interpunkcyjne: „aby pokazać jego zależność od gęstości elektronowej obiektu przez który przechodzi promieniowanie”
- 7) Rozdział 3.1.8. Str. 33. Błędne zdanie. „przenikalność elektryczna próżni $\epsilon(\mathbf{r}, t)$ ośrodka zmienia się wolno w porównaniu z długością fali”. Dla próżni to stała fizyczna. Próżni czy ośrodka?
- 8) Str. 30. „stosując teorię splotu”. Powinno być „stosując twierdzenia o splotcie”
- 9) Rozdział 3.2.1. Str. 38. Błędny termin: „twierdzenia splotowego transformacji Fouriera”.
- 10) Str. 38. Pojęcia: „funkcja przenoszenia kontrastu fazowego” i „funkcja przenoszenia kontrastu amplitudowego” nie zostały przedstawione wystarczająco jasno. Brak odniesienia do MTF.
- 11) Str. 39. Czy wraz z częstotliwością przestrzenną CTF nie zanika wskutek aberracji sygnału? Czy nie powinno się dodać funkcji obwiedni?
- 12) Rysunek 3.3. Osie wykresu nie są opisane. Czy na osi odciętych mamy częstotliwość czy częstość przestrzenną?
- 13) Rysunek 3.4. Można było pokazać wiązki bez obiektu i z obiektem. Czy liczba szczelin w obu maskach może być różna? Niektóre piksele nie są wykorzystane? Na rysunku nie zaznaczono współrzędnych!? Nie zaznaczono odległości z_1 , która pojawia się w opisie.
- 14) Str. 45. Błędne sformułowanie. „częstość próbkowania jest równa okresowi pierwszej maski”
- 15) Str. 45. Dlaczego współczynnik załamania nie jest zespolony tak jak w pierwszej części opisu? „delta opisuje rozkład współczynnika załamania w obiekcie”.
- 16) Str. 45. Wzór 3.79. Nie opisano znaczenia niektórych symboli, np. argumentu ‘p’, „y”. Co oznacza symbol ‘p’? Opis pojawia się kilka wzorów dalej na następnej stronie.

- 17) Roz. 3.4.1. Str. 44. Opis dwuwymiarowy oświetlenia krawędziowego budzi wątpliwości. Jeśli oś x jest ortogonalna do płaszczyzny na Rys. 3.4, to współrzędna x powinna być ustalona i opis nie powinien zawierać tej współrzędnej. Niektóre funkcje są funkcjami dwóch zmiennych a inne trzech zmiennych.
- 18) Str. 46. Wzór 3.81. Brak definicji M ? Czy jest to współczynnik powiększenia geometrycznego? Opis pojawia się dopiero za następnym wzorem. ?! 3.82
- 19) Str. 46. Wzór 3.82. Brak funkcji H_{zdef} ? Czy jest równa H_z (wzór 3.83)?
- 20) Str. 48. Skrótowiec „FSP” użyty bez wyjaśnienia pochodzenia z języka angielskiego.
- 21) Str. 50. Wzór 3.95. Jak interpretować czynnik $d/2M$? Czy y_e to położenie dolnej krawędzi szczeliny?
- 22) Str. 50. Nie jest jasne, czym jest odległość a czym przesunięcie pomiędzy dwoma szczelinami?
- 23) Str. 53. „krawędzie obiektu są większe niż rozmiary apertury”. Jaki wymiar jest większy?
- 24) Str. 56. Wzór 3.105. Czy M jest inną wielkością niż powiększenie geometryczne?
- 25) Str. 59. Nie podano żadnego odnośnika do literatury: „Szczegółowe wyprowadzenia transformat można znaleźć w odpowiednich odnośnikach w bibliografii.”
- 26) Str. 60. Rys. 4.1. Rysunek zaczerpnięty z literatury. Brak odwołania do: M. Fadili, J. Starck „Curvelets and Ridgelets”.
- 27) Wzór 4.3. Brak opisu zmiennej $\bar{\Psi}$ (psi z kreską).
- 28) Rozdział 4.3. Niefortunny tytuł sugeruje jakoby Fourier pracował nad transformacją Radona.
- 29) Rozdział 4.3. W tytule jest cyfrowa transformacja Radona a we wzorach pojawiają się całki zamiast sum (wzór 4.7).
- 30) Str. 61. Prawdziwe jest stwierdzenie, że transformatę Radona można wyznaczyć „przez zastosowanie jednowymiarowej odwrotnej transformacji Fouriera do dwuwymiarowej transformacji Fouriera ograniczonej do linii radialnych przechodzących przez punkt środkowy.” Nie jest prawdą, że tę metodę stosuje się w obrazowaniu medycznym. Po pierwsze w obrazowaniu medycznym rozwiązuje się problem odwrotny (wyznacza się odwrotną transformację Radona). Po drugie, w przypadku rozwiązywania problemu odwrotnego (odwrotna transformacja Radona) z wykorzystaniem 2D DFT, uzyskiwane obrazy cechują się większymi artefaktami w porównaniu z algorytmem wykorzystującym 1D FFT (algorytm FBP). W opisie pominięto największy problem tej metody, którą jest interpolacja danych wzdłuż linii radialnych. Dlaczego nie zastosowano wyznaczenia projekcji (transformaty Radona) z definicji?
- 31) Str. 61. Algorytm 4.1. W zdaniu „dla każdej linii, np. dla każdej wartości parametru kąтового” niepotrzebny zwrot „na przykład” zaburza sens zdania.
- 32) Str. 72. Nieprecyzyjne określenie „średnia obrazów”, „odchylenia standardowe obrazów” w odniesieniu do wzoru 4.63. Wydawałoby się, że chodzi o wielowymiarową zmienną losową, zamiast średniej wartości pikseli obrazu.
- 33) Str. 72. Nie opisano jak wyznacza się wartość współczynnika podobieństwa strukturalnego dla całego obrazu. Czy jest to średnia ze współczynnika dla wielu okien lokalnych?
- 34) Str. 73. Rozdział 5. Nie jest dla mnie jasne pojęcie „propagacja szumu” użyte w tytule w odniesieniu do treści rozdziału. Czy chodzi o propagację szumu (błędów obliczeń w sensie numerycznym)? W podrozdziale 5.1 „Charakterystyka szumu dla propagacji w wolnej przestrzeni” raczej chodzi o propagację fali elektromagnetycznej a nie szumu.
- 35) Str. 73. Autor twierdzi, że: „Sygnał fazowy, który obserwujemy w większości technik obrazowania z kontrastem fazowym ma naturę różniczkową i jest w pierwszym przybliżeniu proporcjonalny do pierwszej pochodnej przesunięcia fazowego [70] lub do jego drugiej pochodnej [87]. W związku z tym kontrast absorpcyjny jest zwykle obserwowany wewnątrz struktur, z których składa się obrazowany obiekt, ...”. Moim zdaniem nie ma takiego związku.
- 36) Str. 73. „Inna forma tego sygnału (sygnału fazowego), w porównaniu do sygnału absorpcyjnego, wymaga wprowadzenia nowej definicji współczynnika opisującego stosunek sygnału do szumu.” Czy rzeczywiście jest potrzebna nowa definicja?

- 37) Str. 73. Celem rozdziału 5 miało być zastosowanie model opisującego stosunek sygnał-szum do oszacowania czułości obrazowania. Nie ma w tym rozdziale definicji czułości. Czy w pracy oszacowano czułość (wrażliwość) obrazowania?
- 38) Str. 74. Zdanie wprowadza w błąd: „Szum strukturalny staje się dominujący, gdy rozważamy dużą liczbę fotonów, wtedy szum statystyczny staje się niewielki i jest on przeważający dla małej liczby zaliczeń fotonów.”
- 39) Str. 74. Wzór 5.2 nie jest wystarczająco jasno opisany.
- 40) Str. 77. W rozdziale 5.2 wprowadzono wzór na stosunek sygnał szum na krawędzi obiektu, ale miara ta nie jest wykorzystywana w przeprowadzonych badaniach.
- 41) Str. 77. Rozdział 5.3 „Model szumu Poissona ...”. Dlaczego mowa o modelu?
- 42) Rysunek 7.23. Dla obrazu współczynnika osłabiania nie pokazano słupka skali barwnej. Nie wiadomo, dlaczego powietrze wokół obiektu ma większą wartość wsp. osłabiania niż tkanki miękkie (woda).
- 43) Str. 82. Styl i sens zdania. „Energia początkowa jest wybrana z przedziału odpowiadającego energii promienia lub długości fali.”
- 44) Str. 83. Następujące zdanie ma błąd w składni: „Dla stałego Φ , obszar źródła S , kąt bryłowy”
- 45) Str. 84. „ilość fotonów”. Powinno być „liczba fotonów”.
- 46) Str. 84. Styl i sens zdania. „ Sygnał ma postać natężenia i liczby zdarzeń (promieni X).” Jak zdefiniowane jest natężenie?
- 47) Str. 87. „Transformacja Fouriera funkcji oświetlenia (propagacji) $P(x, y)$ jest obliczona w następujący sposób”. Czy nie powinno być „transformata Fouriera jest dana wzorem”?
- 48) Str. 88. Sens zdania: „Rozkład natężenia fali wynosi $I(x, y) = |\Psi(x, y)|^2$ w postaci obrazu z kontrastem fazowym.”
- 49) Str. 103. Dlaczego stosowane są dwie metody symulacji “symulacja propagacji wielowarstwowej” i „modelowanie hybrydowe”?
- 50) Podrozdział 6.4. Dlaczego nie podano wartości zespolonego współczynnika załamania dla ośrodków (materiałów, tkanek) występujących w obiektach testowych? Szkoda, że wśród prostych fantomów nie znalazł się fantom do badania funkcji przenoszenia modulacji.
- 51) Str. 101. Rysunek 6.10: Nie wiadomo, jaki parametr (osłabianie czy faza) jest pokazany na obrazach.
- 52) Str. 104. Rysunek 7.1: Brak jednostki fluencji fotonów na osi rzędnych.
- 53) Str. 104. Nie podano definicji fluencji fotonów.
- 54) Str. 104. „rozmiar źródła promieniowania”. Może powinno być „rozmiar ogniska”?
- 55) Str. 104. Dla eksperymentów parametry ekspozycji zostały określone niewystarczająco – nie określono prądu na lampie rentgenowskiej. Na wykresach widm energetycznych promieniowania na osi rzędnych pojawia się co prawda fluencja fotonów ale bez określenia jednostek. Brakuje informacji o liczbie fotonów docierających do detektora przy oświetleniu krawędziowym.
- 56) Str. 105. Nie jest jasne na jakiej podstawie wysunięto wniosek, że: z zasady technika obrazowania z oświetleniem krawędziowym może być stosowana bez znaczącego wpływu na MTF i/lub współczynnik efektywności DQE (*ang.* Detective QuantumEfficiency) użytego detektora. Nie zbadano MTF w symulacji.
- 57) Str. 106. W podrozdziale 7.2.1 nie podano wartości składowych zespolonego współczynnika załamania dla wykorzystanych w eksperymencie materiałów. W podrozdziale 7.2.2 wartości te podano.
- 58) Str. 117. Roz. 7.3.2. Potencjał lampy rentgenowskiej. Powinno być „Napięcie na lampie rentgenowskiej”. Potencjał jest na anodzie i katodzie.
- 59) Str. 118. Rys. 7.19. Dlaczego nie uwzględniono mniejszych napięć. Czy dla obrazowania fazowego nie istnieje optymalna w sensie kontrastu wartość napięcia na lampie, tak jak to ma miejsce w obrazowaniu współczynnika osłabiania?
- 60) Str. 120. Rysunek 7.21 Brak słupka skali barwnej z wartościami. Odnosi się do wszystkich obrazów.

- 61) Str. 122. Rysunki 7.23 i 7.25. Brak informacji o różnych parametrach geometrycznych układu pomiarowego (rozmiaru piksela: 50 μm i 85 μm).
- 62) Str. 122. Czy na Rys. 7.23 obrazy (b) i (f) to obrazy osłabienia? Jeśli tak, to dlaczego tkanka kostna na tym obrazie ma mały współczynnik osłabiania promieniowania w porównaniu do tkanek miękkich?
- 63) Str. 122. Nie zbadano poziomu szumu na obrazach współczynnika osłabienia i obrazach fazy. Obrazy fazowe wydają się wnosić informację wysokoczęstotliwościową (informację o krawędziach obiektów) lecz charakteryzują się dużym poziomem szumu. (Rys. 7.23)
- 64) Str. 123. Rysunek 7.25 budzi zastrzeżenia. Dla osłabiania, unormowane wartości współczynnika osłabiania były przeskalowane na indeksy kolorów skali barwnej z uwzględnieniem całego zakresu wartości. Dla fazy tylko wybrany przedział wartości był skalowany do całej skali kolorów, co podniosło kontrast na wyświetlanym obrazie. Dynamika (szerokość przedziału) wartości osłabiania wydaje się być większa niż dynamika wartości fazy. Przeskalowanie tego przedziału do 256 odcieni szarości powoduje, że na wyświetlanym obrazie kontrast pomiędzy pewnymi tkankami jest tracony chociaż istnieje w danych. Na Rys. 7.23 zmiana patologiczna w obszarze mózgu jest widoczna zarówno na obrazie osłabiania jak i fazy. Z drugiej strony obrazy na Rys. 7.25 są pokazane zgodnie z dobrymi zasadami, to znaczy pokazano słupek skali barwnej i wartości przypisane kolorom.
- 65) Str. 124. Podrozdział 7.4. Wniosek o masowej wrażliwości pomiaru fazy i rozdzielczości przestrzennej zostały wyciągnięte na podstawie wzorów. Nie potwierdzono tego eksperymentalnie. Brak analizy funkcji MTF nie pozwala wysnuwać wniosków o rozdzielczości przestrzennej i kontraście w obrazie. Wrażliwość pomiaru może zależeć od wielkości obiektów.
- 66) Str. 125. „Ponadto próbkowanie powoduje pojawianie się szumu z powodu aliasingu wyższych częstotliwości.” Raczej mówimy o zniekształceniach lub artefaktach w sygnale.
- 67) Str. 125. Z wnioskiem: „Tkanki miękkie można z łatwością odróżnić oraz obrazować z wyższą rozdzielczością w porównaniu do konwencjonalnej radiografii, jak pokazano na rysunkach 7.8, 7.23 – 7.26.” można polemizować. Na rysunkach pokazano obrazy osłabiania i fazy, gdzie liczba i rozmiar widocznych szczegółów jest porównywalna – w szczególności na rys. 7.23. Bez porównania funkcji MTF to stwierdzenie jest subiektywne.
- 68) Str. 127. „Dodatkowo, możliwe jest obrazowanie struktur o rozdzielczości piksela.” Styl. Powinno być „o wielkości piksela”. Piksel nie ma rozdzielczości.
- 69) Str. 134. Rozdział 8.2.1. Porównywano filtrację falkową i krzywkową. Szkoda, że nie dokonano porównania z wybranym podstawowym filtrem dolnoprzepustowym.
- 70) Str. 137. Zaprezentowano wyniki filtracji obrazów za pomocą transformacji grzbietkowej dla obiektów sferycznych. W obrazach występują charakterystyczne zakłócenia, których nie ma na obrazach obiektów włókien. Nie skomentowano tej różnicy.
- 71) Str. 142. Rozdz. 8.3. Wzór 8.2. W opisie transformacji prostej nie wyjaśniono znaczenia symboli y^δ i η . Czy to są funkcje czy wektory? Z innych wzorów wynika, że $\mathcal{P}f$ to funkcja dwóch zmiennych a η to wektor.
- 72) Str. 143. Współczynniki rozwinięcia ... są określone na podstawie projekcji To nieprawda. Współczynniki rozwinięcia stanowią wektor niewiadomych w równaniu algebraicznym.
- 73) Str. 143. Wzór 8.4. Nie opisano znaczenia symbolu y_m . Jaki jest jej związek z y^δ ?
- 74) Str. 146. Wzór 8.5. Przy przejściu z opisu analitycznego na opis algebraiczny zmienna s nie powinna być ustalona (niepotrzebny indeks m). Operator $\mathcal{P}$ polega na całkowaniu względem tej zmiennej.
- 75) Str. 146. Wzór 8.5. Jakie jest znaczenie wektora c ?
- 76) Str. 146. „Dodatkowo krzywki pozwalają na użycie analitycznej reprezentacji macierzy systemowej.” Nie rozumiem tego zdania. Raczej funkcje bazowe umożliwiają reprezentację algebraiczną analitycznego problemu prostego.
- 77) Str. 146. Równanie 8.7 jest powtórzeniem równania 8.4.
- 78) Str. 147. Równanie 8.8. We wzorze 8.2 y^δ oznaczał funkcję a w tym wzorze wektor.

- 79) Str. 147. Równanie 8.8. Nie wiadomo, czy problem jest nadokreślony czy niedookreślony. Nie pokazano, że problem odwrotny wymaga regularyzacji. Czy macierz P jest macierzą źle uwarunkowaną numerycznie? Jak zmieni się uwarunkowanie przy redukcji projekcji? Które projekcje zostały uwzględnione przy redukcji liczby projekcji?
- 80) Rys. 8.23. i Rys. 8.24. Obrazy przekrojów są przysłonięte wykresem profili wartości w zrekonstruowanym przekrojach. Trudno ocenić i porównać wizualnie jakość obrazów. Na widocznych fragmentach obrazów można zauważyć, że zastosowana filtracja generuje artefakty w postaci kraty na obrazie, której nie ma na obrazie uzyskanym metodą FBP.
- 81) Str. 155. Dodatek A. Błąd w opisie wzoru (A.4). $H = \mu_0 B$?

