

Dr hab. inż. Jacek Rumiński, prof. PG
Katedra Inżynierii Biomedycznej
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Politechnika Gdańska

Gdańsk, 07.09.2022 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Pluty

pt. „Analityczne statystyczne podejście do problemu rekonstrukcji obrazu z projekcji w zastosowaniu do wielogniskowych spiralnych tomografów komputerowych”.

Promotor: prof. dr hab. inż. Robert Cierniak, Politechnika Częstochowska

Niniejsza recenzja została przygotowana w odpowiedzi na pismo Pani prof. dr hab. inż. Małgorzaty Klimek, Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechniki Częstochowskiej z dnia 22.08.2022 roku (R-WIMil-510-8/17), informującego o powołaniu mnie przez Radę Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Częstochowskiej (uchwała nr 22/2021/2022) na recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Piotra Pluty.

1. Tematyka, cele i tezy rozprawy

Tematyka pracy dotyczy metod rekonstrukcji obrazów w rentgenowskiej tomografii komputerowej. W szczególności związana jest z propozycją i weryfikacją statystycznych, iteracyjnych procedur rekonstrukcyjnych z wykorzystaniem modelu typu ciągły-ciągły (C-C). Tematyka jest aktualna, dotyczy ważnego problemu badawczego i praktycznego w zakresie efektywnej rekonstrukcji obrazów o wysokiej rozdzielczości przy uwzględnieniu potencjalnego obniżania dawki promieniowania rentgenowskiego.

Zarówno tematyka jak i treść pracy związane są z praktycznymi aspektami informatyki technicznej, niemniej uważam, że w znacznym stopniu rozprawa mieści się w zakresie dyscypliny inżynieria biomedyczna.

W rozdziale 1.2 Doktorant przedstawił główny cel pracy jako: „sformułowanie statystycznych algorytmów rekonstrukcyjnych typu MBIR, które działają z wykorzystaniem projekcji uzyskanych w spiralnych urządzeniach TK ze zmiennym ogniskiem (FFS)”. Przedstawiony cel jest bardzo ogólny. Nie wyróżniono czym takie algorytmy miałyby się

wyróżniać od podejść wcześniejszych. Możliwe, że w czasie definicji celu nie były znane żadne, właściwie zweryfikowane algorytmy tej klasy, niemniej w czasie realizacji tej pracy zaproponowano statystyczny algorytm rekonstrukcyjny dla tomografów komputerowych ze zmiennym ogniskiem (np. opublikowany w maju 2021, wcześniej w wersji pre-print: Wang X, MacDougall RD, Chen P, Bouman CA, Warfield SK. Physics-based iterative reconstruction for dual-source and flying focal spot computed tomography. Med Phys. 2021 Jul;48(7):3595-3613. doi: 10.1002/mp.14941). Autor powinien w dyskusji odnieść się do głównego celu swojej rozprawy w kontekście opublikowanych prac. Oczywiście, rozwiązanie proponowane przez Doktoranta jest w szczególności inne (np. dotyczy modelu typu C-C zamiast D-D) niemniej zbyt ogólny cel nie wskazuje stosownych różnic. Pan mgr inż. Piotr Pluta zaproponował jednocześnie drugi cel pracy (bezpośrednio związany z inżynierią biomedyczną): „wykazanie praktycznej przydatności sformułowanych statystycznych algorytmów rekonstrukcyjnych w celu zmniejszenia dawki promieniowania rentgenowskiego pochłanianej przez pacjentów podczas badania TK, z wykorzystaniem odpowiednich symulacji komputerowych.”. Przedstawione w treści pracy eksperymenty szczegółowo nawiązują do tego celu.

Założenia związane z pracą wynikają z kontekstu pracy. Nie są jawnie sprecyzowane w jednej, spójnej części rozprawy, co znacznie ułatwiłoby jej lekturę. Autor nie zdecydował się również na definicję tez czy celów szczegółowych postulujących a priori nowe aspekty proponowanych algorytmów (np. dotyczące parametrów jakości rekonstruowanych obrazów w funkcji czasu obliczeń, itp.). Stosowne parametry oceny proponowanych algorytmów w odniesieniu do wybranych, innych metod zostały jednak zaproponowane i wyznaczone w szeregu eksperymentach.

Podsumowując, cele pracy zostały określone, zaproponowano algorytmy stanowiące określone hipotezy badawcze, które zweryfikowano eksperymentalnie w szeregu badaniach symulacyjnych.

2. Zawartość rozprawy

Rozprawę napisano w języku polskim. Składa się z dziewięciu rozdziałów oraz spisów rysunków, tabel, wykazu literatury, itd. łącznie ze streszczeniami liczy ponad 280 stron. W mojej ocenie jest zbyt obszerna i niepotrzebnie Doktorant opisuje historię tomografii komputerowej pomijając na przykład wprowadzenie tak kluczowych pojęć jak np. sinogram (używając tego pojęcia w odniesieniu do wirtualnych sinogramów na stronie 86). Wyraźnie również brakuje wykazu oznaczeń. Bogactwo wzorów sprawiłoby prawdopodobnie, że wykaz taki znacznie zwiększyłby obszerność rozprawy.

W rozdziale pierwszym Doktorant przedstawia kontekst pracy (motywację), definiuje dwa cele oraz zarysowuje strukturę rozprawy.

Rozdziały 2-4 przedstawiają rys historyczny obrazowania rentgenowskiego oraz podstawowe zagadnienia, podstawy techniczne i matematyczne związane z metodami rekonstrukcyjnymi w rentgenowskiej tomografii komputerowej.

W kolejnych dwóch rozdziałach Pan mgr inż. Piotr Pluta proponuje dwa algorytmy stanowiące istotną propozycję w rozprawie. Pierwszy z tych algorytmów (rozdział 5) wykorzystuje na wejściu bezpośrednie dane pomiarowe (projekcje), natomiast drugi z algorytmów dokonuje niejako przetwarzania wstępnego w celu uzyskania wirtualnych projekcji ze skanowania spiralnego w celu rekonstrukcji tylko pojedynczej warstwy (ang. rebinning). Istotą drugiego podejścia jest również to, że problem rekonstrukcyjny

sformułowano jako zadanie optymalizacyjne. Doktorant szczegółowo opisał teoretyczne aspekty obu algorytmów ilustrując wybrane problemy dobrze przygotowanymi ilustracjami.

Rozdział siódmy przedstawia opis środowiska symulacyjnego (matematyczny model Sheppa-Logana) podkreślając przygotowane, autorskie pakiety oprogramowania dedykowane poszczególnym etapom badań eksperymentalnych (symulacje, odczyt danych DICOM, implementacja algorytmów rekonstrukcyjnych).

Kolejnym, najbardziej obszernym rozdziałem rozprawy (ponad 120 stron) jest opis badań eksperymentalnych. Doktorant przedstawia w rozdziale stosowane metryki, wyniki eksperymentów oraz dyskusję wyników.

Ostatni, dziewiąty rozdział rozprawy, to podsumowanie, w którym Pan mgr inż. Piotr Pluta formułuje wnioski na bazie uzyskanych wyników odniesione do przedstawionych we wstępie celów prac oraz przedstawia potencjalne, przyszłe plany badawcze.

Rozprawa jest w większości poprawnie skonstruowana odnosi się bezpośrednio do etapów eksperymentalnych badań naukowych. Zawiera jednak drobne błędy czy niedociągnięcia, które zostaną przedstawione w dalszej części recenzji.

3. Oryginalne osiągnięcia i ocena merytoryczna rozprawy

Do głównych osiągnięć rozprawy zaliczam opracowanie i eksperymentalną weryfikację:

O1: algorytmu rekonstrukcyjnego w ujęciu statystycznym, wykorzystującego model danych typu C-C w zastosowaniu do wieloogniskowych spiralnych tomografów komputerowych z bezpośrednim użyciem danych z poszczególnych projekcji,

O2: algorytmu rekonstrukcyjnego w ujęciu statystycznym, wykorzystującego model danych typu C-C w zastosowaniu do wieloogniskowych spiralnych tomografów komputerowych z wykorzystaniem metody rebinningu oraz sformułowania tak określonego zadania rekonstrukcyjnego jako problemu optymalizacyjnego,

O3: rozwiązań konstrukcyjnych w formie implementacji procedur wczytywania danych oraz realizacji obliczeń wielowątkowych umożliwiających zwiększenie efektywności obliczeniowej algorytmów rekonstrukcyjnych w ujęciu statystycznym.

W zakresie wskazanych osiągnięć Pan mgr inż. Piotr Pluta przeprowadził szereg eksperymentów z wykorzystaniem głównie danych symulacyjnych z matematycznego fantomu Sheppa-Logana. Wyniki ilościowe i jakościowe zostały właściwie przedstawione prowadząc do wniosku, że w obecności szumu proponowane metody statystyczne radzą sobie znacznie lepiej niż porównywane, znane wcześniej metody (np. Feldkampa).

Wymienione osiągnięcia są bezpośrednio związane z dwoma dyscyplinami: inżynierią biomedyczną oraz informatyka techniczna i telekomunikacją. Doktorant jest współautorem szeregu prac naukowych (wymienionych na końcu rozprawy) bezpośrednio związanych z tematyką rozprawy publikujących informacje częściowo prezentowane również w rozprawie.

Oceniając merytoryczne aspekty rozprawy oraz walory prezentacji wyników dostrzegam pewne braki czy niedoskonałości, które zostaną omówione w kolejnej części opinii.

4. Uwagi krytyczne i pytania do Doktoranta

4.1. Uwagi dotyczące edycji rozprawy

Rozprawa zawiera drobne błędy czy niedoskonałości związane z formą prezentacji treści. Rozdział 8, tak ważny dla rozprawy, jest zbyt obszerny, a brak odpowiedniej struktury (m.in. podziału na bardziej szczegółowe podrozdziały ze stosownym opisem) sprawia, że bardzo trudno rozróżnić, kiedy Autor zaczyna opisywać wyniki kolejnych eksperymentów. Ponadto brak wydzielonego wykazu oznaczeń w pracy pogarsza lekturę rozprawy, szczególnie przy wprowadzaniu niewyjaśnianych w sposób jawny oznaczeń jak np. metoda PP180: „Rysunki (...) prezentują wybrane zrekonstruowane obrazy dla metody PP180 dla wybranych iteracji.”

Inne drobne uwagi edytorskie:

- niektóre rysunki w rozprawie (np. 2.1, 2.2, 2.3) nie są opisane źródłami pochodzenia tych rysunków,
- stawianie kropki na końcu podpisu rysunku jest elementem redundantnym, gdyż samo wyodrębnienie rysunku jest wystarczającym separatorem,
- po ostatniej cyfrze numeru rozdziału stawiamy kropkę zaczynając tytuł z wielkiej litery,
- w niektórych częściach tekstu zdanie jest niewłaściwie podzielone pomiędzy dwoma wierszami, np. str. 26: „(αFFS), [nowa linia] (Rysunek 2.22)”,
- niektóre fragmenty tekstu są zapisane w sposób niewłaściwy, np.: „ (...) dla przykładu np.: (...)” (str. 38), „Znając wartość kąta $\zeta \uparrow$ dla pierwszego ogniska (...)” (str. 95), „(...) trzeba dokonać jego korekty w celu uzyskać wartość (...)” (str. 96), „(...) w pełni zanonimizowane (...)” (str. 201), „(...) w tym podrozdziale (...)” (str. 201) itd.,
- w akapicie: „Podstawiając zależność (4.13) do równania (4.15), otrzymuje się następujący wzór: ” prawdopodobnie chodzi o podstawienie zależności (4.13) do wzoru (4.16).

Chciałbym podkreślić, że przy tak obszernej i złożonej rozprawie liczba drobnych błędów czy doskonałości jest niewielka, a treść pracy jest starannie przygotowana.

4.2. Uwagi merytoryczne i komentarze

W świetle wielu, opublikowanych współautorskich prac dotyczących celów pracy doktorskiej Doktorant nie sprecyzował wystarczająco dokładnie co jest jego osobistym wkładem. W tym zakresie istnieje również pewien dokumentacyjny nieład. W tekście rozprawy Pan mgr inż. Piotr Pluta cytuje tylko niektóre najnowsze publikacje współautorskie związane z celami rozprawy, w szczególności (literatura, str. 277-278):

„[76] M. Waligóra Z. Szymański K. Grzanek F. Pałka V. Piuri R. Cierniak, P. Pluta. A new statistical reconstruction method for the computed tomography using an x-ray tube with flying focal spot. *Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research*, 11(4):271–286, oct 2021. (zacytowano na str. 66).

[77] P. Pluta R. Cierniak. A new statistical iterative reconstruction algorithm for a CT scanner with flying focal spot. In *Artificial Intelligence and Soft Computing*, pages 431–441. Springer International Publishing, 2021. (zacytowano na str. 66 i 241).

„Wykonane symulacje dowiodły, że jakość uzyskiwanych obrazów z zastosowaniem opracowanych statystycznych algorytmów rekonstrukcyjnych jest znacznie lepsza niż w przypadku użycia metod tradycyjnych (FBP). Nie wykonano porównania w stosunku do metody opartej na modelu danych typu D-D, gdyż nie istnieje jeszcze wiarygodny opis takiego rozwiązania dla tomografów ze zmiennym ogniskiem (publikacja opisująca to rozwiązanie jest jak na razie ukazana w serwisie arXiv).” str. 241.

Doktorant za każdym razem wskazuje, że publikacja jest na razie w serwisie arxiv. Otóż praca została opublikowana w czasopiśmie Medical Physics (Wiley) najpierw 13 maja 2021, następnie (prawdopodobnie w wersji drukowanej) 23 czerwca 2021. Oznacza to, że Autor rozprawy miał rok czasu na zapoznanie się z opublikowaną w wersji końcowej, istotną publikacją. Pragnę podkreślić, że algorytmy proponowane przez Doktoranta oraz metoda opisywana we wskazywanej pracy są w szczególności inne, niemniej, w świetle tak sformułowanego celu rozprawy, Pan mgr inż. Piotr Pluta powinien bardzo precyzyjnie odnieść się do omawianej publikacji.

Autor rozprawy zweryfikował metody wykorzystując dane symulacyjne oraz dane pomiarowe (pliki DICOM). W przypadku danych pomiarowych weryfikacja jest bardzo ograniczona, ponieważ wyników „nie można porównać z obrazem oryginalnym, ponieważ autor nie dysponował takimi danymi.” (str. 201). Nie jest dla mnie jasne, dlaczego Doktorant nie przeprowadził badania na fantomie (fantomach), którego użycie jest typowe przy walidacji algorytmów rekonstrukcyjnych (m.in. stosowane we wskazywanej już pracy Xiao Wanga, itp.). W tym kontekście Doktorant na stronie 238 konkluduje:

„Podsumowując wyniki opierające się na rzeczywistych danych pochodzących z badań tomograficznych pacjentów można stwierdzić, że sformułowane statystyczne metody, zawierające iteracyjną procedurę rekonstrukcyjną, przedstawione w ramach niniejszej pracy lepiej radzą sobie z szumem niż metoda tradycyjna oparta na klasycznej metodzie FBP.

Jak już wspomniano podczas podsumowania wyników na matematycznym modelu fantomu głowy, można zauważyć, że ok 2000 iteracji jest wystarczające, aby uzyskać zrekonstruowany obraz przydatny dla diagnostyki medycznej.”

Uważam, że dla obu przytoczonych wniosków nie ma wystarczających przesłanek. W przypadku danych pochodzących od pacjentów Doktorant nie miał stosownego odniesienia oraz nie było przeprowadzone badanie z udziałem lekarzy specjalistów, aby określić przydatność obrazów do diagnostyki medycznej. Na podstawie oceny wzrokowej Autora rozprawy oraz miar globalnych jak MSE można stwierdzić, że metody potencjalnie mogą być przydatne do diagnostyki.

Doktorant wskazał pewne rozwiązania konstrukcyjne związane między innymi z odczytem plików DICOM. Przedstawiony opis metody kodowania danych DICOM (str. 106, rys. 7.7) jest uproszczony i poprawny tylko dla wybranego sposobu kodowania danych (ang. Transfer Syntax). Pliki lub komunikaty DICOM mogą stosować różne metody kodowania. Przypuszczam, że dane DICOM, z których korzystał Doktorant były kodowane metodą domyślną, tj. Implicit VR Little Endian. Autor rozprawy powinien to jednak zaznaczyć wraz z szczegółami dotyczącymi warunków w jakich jego oprogramowanie potrafi wczytywać dane

[78] P. Pluta Z. Filutowicz R. Cierniak, J. Bilski. Realizations of the statistical reconstruction method based on the continuous-to-continuous data model. pages 149–156, 2019. (zacytowano na str. 61).”.

Opublikowane wersje tych prac (zgodnie z informacją na stronach wydawców) mają inną kolejność autorów i oczywiście kompletny opis bibliograficzny:

[76] Cierniak, Robert, Pluta, Piotr, Waligóra, Marek, Szymański, Zdzisław, Grzanek, Konrad, Pałka, Filip and Piuri, Vincenzo. "A New Statistical Reconstruction Method for the Computed Tomography Using an X-Ray Tube with Flying Focal Spot" *Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research*, vol.11, no.4, 2021, pp.271-286. <https://doi.org/10.2478/jaiscr-2021-0016>

[77] Cierniak, R., Pluta, P. (2021). A New Statistical Iterative Reconstruction Algorithm for a CT Scanner with Flying Focal Spot. In: Rutkowski, L., Scherer, R., Korytkowski, M., Pedrycz, W., Tadeusiewicz, R., Zurada, J.M. (eds) *Artificial Intelligence and Soft Computing. ICAISC 2021. Lecture Notes in Computer Science()*, vol 12855. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87897-9_38

[78] Cierniak, R., Bilski, J., Pluta, P., Filutowicz, Z. (2019). Realizations of the Statistical Reconstruction Method Based on the Continuous-to-Continuous Data Model. In: Rutkowski, L., Scherer, R., Korytkowski, M., Pedrycz, W., Tadeusiewicz, R., Zurada, J. (eds) *Artificial Intelligence and Soft Computing. ICAISC 2019. Lecture Notes in Computer Science()*, vol 11509. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20915-5_14

Właściwy opis bibliograficzny Doktorant przedstawił w zamieszczonym na końcu pracy wykazie publikacji, natomiast w spisie literatury do rozprawy opis jest inny. Biorąc ponadto pod uwagę fakt, że niektóre prace współautorskie dotyczące celów rozprawy wymienione w wykazie nie są cytowane w tekście pracy, dlatego sformułowałem w tym zakresie pytanie do Doktoranta zamieszczone w dalszej części recenzji.

Kolejna uwaga, którą uważam za istotną, dotyczy braku odpowiedniego odniesienia się do kluczowej publikacji: Wang X, MacDougall RD, Chen P, Bouman CA, Warfield SK. Physics-based iterative reconstruction for dual-source and flying focal spot computed tomography. *Med Phys*. 2021 Jul;48(7):3595-3613. doi: 10.1002/mp.14941. W pracy tej autorzy formułują i weryfikują statystyczny, iteracyjny algorytm rekonstrukcyjny dla tomografów ze zmiennym ogniskiem (FFS) czyli dokładnie to, co Doktorant założył w ogólnie przedstawionym, pierwszym celu rozprawy. Należy podkreślić, że Pan mgr inż. Piotr Pluta co najmniej dwukrotnie odnosi się w tekście rozprawy do tej publikacji:

„W celu sprostania ograniczeniom, które niosą ze sobą algorytmy bazujące na modelu danych D-D w artykule [90] zaproponowano algorytm, który uwzględni rzeczywistą geometrię akwizycji i wspólnie szacuje obrazy z każdego źródła i ogniska promieniowania rentgenowskiego. Algorytm ten został nazwany: JENG (ang. The Joint Estimation for Native Geometry). Zaprezentowano również obiecujące wyniki dla tego algorytmu, (na chwilę obecną publikacja jest prezentowana na łamach portalu arXiv.org w wersji piątej).” (str. 59)

oraz

DICOM (m.in. jaki obiekt informacyjny – np. CT Image IOD, jakie kodowanie danych obrazu, itd.).

Autor wskazuje na stronie 201: „Dane rzeczywiste do których autor miał dostęp były w pełni zanonimizowane i nie zawierały danych personalnych umożliwiających identyfikację pacjenta. Pacjentom zostały nadane specjalne kody, na podstawie których byli identyfikowani.” Jeśli pacjenci mogli być identyfikowani na podstawie innych kodów to czy istotnie była to pełna anonimizacja?

Podsumowując stwierdzam, że pomimo pewnych braków czy potencjalnych drobnych błędów praca jest wartościowa i oceniam ją pozytywnie. Przy tak obszernej treści pracy oraz przy dużej ilości eksperymentów łatwo o pomyłki. Nie wpływają one jednak istotnie na ocenę końcowych osiągnięć Doktoranta.

4.3. Pytania do Doktoranta

W świetle powyższej dyskusji chciałbym skierować do Doktoranta następujące pytania i prośby:

- P1: W świetle opisu w punkcie 4.2 niniejszej recenzji proszę o doprecyzowanie w punktach własnego wkładu w zakresie celów rozprawy w kontekście opublikowanych wielu współautorskich prac związanych z tematyką rozprawy.

- P2: We wzorze 5.37 obrazy z obu ognisk są uśredniane. Czy Doktorant rozważał inne formy uzyskania wspólnego obrazu (ważenie, interpolacja) z zastosowaniem wyznaczania wag uwzględniających np. parametry przesunięć ognisk?

- P3: Czy Autor badał inne postaci funkcji interpolacyjnych (np. dla 5.15) i czy może skomentować wpływ doboru metod interpolacyjnych na wyniki w odniesieniu do metod rekonstrukcyjnych, które minimalizują wykorzystanie interpolacji (jak np. w pracy Xiao Wanga)?

-P4: Proszę o wskazanie na czym polegała autorska funkcja priorytetowego odczytywania i dekodowania danych DICOM (str. 238), jaki zysk w zakresie czasu odczytu wносиła oraz czy obsługuje różne formaty kodowania danych znane z DICOM.

5. Konkluzja recenzji

Podsumowując, stwierdzam, że postawione w rozprawie cele zostały osiągnięte, metody badawcze właściwie dobrane i zastosowane, a eksperymenty należycie przeprowadzone. Drobne uchybienia w rozprawie nie pomniejszają istotności osiągnięć proponowanego rozwiązania dla przyjętego problemu naukowego. Rozprawa wskazuje na dużą wiedzę teoretyczną i praktyczną Doktoranta w obszarze informatyki technicznej i informatyki oraz inżynierii biomedycznej. Autor pracy doktorskiej wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Dlatego, biorąc pod uwagę przedstawione wyżej wnioski uważam, że recenzowana rozprawa Pana mgr. inż. Piotra Pluty spełnia wymagania w treści odnoszących się do niej ustawy z dnia 14 marca 2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789) oraz ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668, z późn. zm.). Na tej podstawie wnioskuję do Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Częstochowskiej o podjęcie dalszych czynności w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora.


dr hab. inż. Jacek Rumiński, prof. PG
Katedra Inżynierii Biomedycznej, ETI, PG