

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Wiatr  
Wydział Informatyki, Elektroniki  
i Telekomunikacji AGH

Kraków, 19 kwietnia 2014 r.

## Recenzja

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Łukasza Jopka zatytułowana „*Algorytmy segmentacji rentgenowskich obrazów mikrograficznych stopów tytanu*”. Rozprawa została przygotowana pod merytorycznym nadzorem prof. dr. hab. inż. Dominika Sankowskiego, któremu Rada Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej powierzyła funkcję promotora. Funkcję promotora pomocniczego, o której mowa w p. 7 Art. 20 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595), pełnił dr hab. Laurent>About. Recenzję przygotowano na podstawie zlecenia Prodziekana Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej dr. hab. inż. Jacka Kucharskiego z dnia 10 lutego 2014 r., wykonującego uchwałę Rady Wydziału z dnia 10 grudnia 2013 r.

W ocenianej rozprawie przedstawiono zagadnienia związane z badaniami nad budową materiałów będących stopami tytanowymi o budowie krystalicznej oraz nad ich zachowaniem się w różnych warunkach. Obecnie w wielu ośrodkach na świecie prowadzone są takie badania, bowiem stopy tytanu znajdują bardzo szerokie zastosowanie w przemyśle energetycznym, aerodynamicznym, w biomedycynie i wielu innych dziedzinach. Dorobek naukowy zespołu badawczego Prof. Dominika Sankowskiego w obszarze tomografii procesowej spowodował, że narzędziem zastosowanym przez Doktoranta stała się tomografia rentgenowska. Uzyskany dzięki tej metodzie obraz pozwolił

nie tylko zbadać strukturę materiału, ale również wykryć ewentualne uszkodzenia oraz zachodzące we wnętrzu materiału procesy. Uzyskane w tomografii procesowej obrazy są zazwyczaj obrazami o niskiej jakości, dlatego podjęto prace badawcze mające na celu opracowanie algorytmów takiego przetwarzania tych obrazów, aby poprawić możliwości ich analizy. Algorytm taki powinien w szczególności poprawić możliwość wyodrębnienia obiektów.

Opiniowana rozprawa została podzielona na cztery główne części. Część pierwsza zawiera określenie zakresu pracy i przedstawia główną tezę rozprawy. Część druga przedstawia aktualny stan wiedzy, w tym informacje o stopach tytanu, o przetwarzaniu i analizie obrazów oraz o metodach selekcji cech. Zawiera także wprowadzenie w zagadnienia obrazów teksturowych. Część trzecia pracy prezentuje autorskie algorytmy przetwarzania i analizy obrazów, w tym także autorskie modyfikacje dotychczas znanych algorytmów. Część czwarta zawiera wyniki przeprowadzonych prac, w tym sposoby oceny jakości segmentacji, wpływ parametrów algorytmów i szumów na skuteczność przeprowadzanej segmentacji, a także jakościowe i ilościowe wyniki segmentacji obrazów tomograficznych. Jakby oddzielną część piątą stanowią wnioski końcowe i bibliografia. Bibliografia zawiera 153 pozycje, w tym 9 z udziałem Autora rozprawy.

Celem pracy było opracowanie algorytmów do przetwarzanych danych pomiarowych w postaci obrazów tomograficznych pochodzących z badań synchrotronowych stopów tytanowych, głównie poprzez ich segmentację – w celu wykrywania krawędzi  $\alpha$ -kolonii.

Doktorant sformułował następującą tezę rozprawy:

*Autorski algorytm segmentacji wykorzystujący bank filtrów kierunkowych pozwala na poprawne określanie granic struktur płytkowych w obrazach tomograficznych stopów tytanowych.*

Zadaniem analizy obrazów doskonalonych w ramach przedstawionej rozprawy było umożliwienie zbadania zależności jakie zachodzą pomiędzy budową stopów tytanowych a właściwościami tych materiałów. W tym celu Doktorant przeprowadził segmentację obrazów zawierających tę mikrostrukturę. Autor rozprawy opracował stosowny algorytm segmentacji stopów tytanowych. Jego celem było opracowanie skutecznej metody segmentacji obrazów krystalicznych, dwufazowych ( $\alpha + \beta$ ) stopów tytanowych. Do prawidłowej segmentacji wymaga się prawidłowego określenia orientacji kierunkowej

elementów tworzących  $\alpha$ -kolonie, czyli  $\alpha$ -płatków, oraz uwzględnienia właściwości mikrostruktury materiału takich jak np. minimalny rozmiar  $\alpha$ -kolonii.

Rozprawa doktorska zawiera następujące autorskie algorytmy:

- Klepsydrowy filtr kierunkowy i związany z nim bank filtrów.
- Algorytm określania orientacji kierunkowej oparty na dekompozycji *Contourlet* (2D) oraz dekompozycji *Surfacelet* (3D).
- Dwa algorytmy I stopnia rekonstrukcji obiektów reprezentujących tzw.  $\alpha$ -kolonie na podstawie struktur zwanych  $\alpha$ -płatkami (transformata dystansu oraz geodylacja).
- Dwa algorytmy II stopnia klasyfikacji, dokonujące ponownej klasyfikacji obiektów z uwzględnieniem ich przestrzennych relacji.
- Algorytm selekcji cech wykorzystujący kwantowe algorytmy genetyczne.

Opracowane algorytmy zostały zweryfikowane w eksperymentach przeprowadzonych na sztucznie wygenerowanych obrazach i na prawdziwych obrazach mikrotomografii. Zastosowana technika obrazowania to synchrotronowa mikrotomografia rentgenowska. Jest to technika pozwalająca wykonać obrazy z rozdzielczością wynoszącą aż  $0,7 \mu\text{m}$ .

Autor rozprawy zaproponował algorytm selekcji cech wykorzystujący kwantowe algorytmy genetyczne oraz klasyfikator k-NN. Metoda ta pozwala na selekcję bardzo dużych zbiorów cech. Metoda ta jest stosunkowo szybka, a zaproponowany algorytm selekcji cech pozwolił na ocenę ilościową cech tekstury.

Otrzymane rezultaty zostały zweryfikowane za pomocą szeregu testów. Oceniono m.in. wpływ parametrów autorskich detektorów kierunku tekstury (CT, CHG) na rezultaty segmentacji. W tym celu przygotowano sztuczne oraz rzeczywiste obrazy testowe. Zaproponowany algorytm pozwala na poprawną segmentację obrazów 2D i 3D. Granice największych  $\alpha$ -kolonii są poprawnie wykrywane, a orientacja kierunkowa wykrytych  $\alpha$ -kolonii zgodna jest z ich rzeczywistą kierunkowością.

Metoda 3D pozwala ocenić rzeczywistą orientację kierunkową  $\alpha$ -płatków, a co za tym idzie, także  $\alpha$ -kolonii. Badania przeprowadzone przez Autora pozwoliły na znalezienie

korelacji pomiędzy rozwojem szczeliny wewnątrz próbki materiału a jego budową wewnętrzną, co potwierdza zasadność zastosowanej metodologii.

Zaproponowana metoda określania orientacji kierunkowej, oparta na banku filtrów CHG, może znaleźć szerokie zastosowanie wszędzie tam, gdzie istotna jest orientacja kierunkowa tekstury obrazu. Dzięki zastosowaniu konwolucji, bazującej na szybkiej transformacie Fouriera (FFT), algorytm odznacza się znacząco niższą złożonością obliczeniową. Jest to szczególnie ważne w przypadku dużych obrazów (zwłaszcza trójwymiarowych). Ponadto wszystkie istotne parametry tak pojedynczego filtra, jak i całego banku filtrów, mogą być dowolnie zmieniane, a sam bank może być generowany dynamicznie w trakcie pracy algorytmu (co nie jest możliwe w przypadku pozostałych metod określania orientacji kierunkowej tekstury).

Autor wykazał, że zarówno sam filtr CHG, jak i bazująca na nim metoda określania orientacji kierunkowej, mogą znaleźć szerokie zastosowanie. Zaproponowany algorytm segmentacji obrazów stopów tytanowych został zaprojektowany tak, aby przynajmniej pewne jego fragmenty mogły być wykonywane równolegle, przy wykorzystaniu klastra obliczeniowego lub procesora graficznego, co przy obecnych rozwiązaniach obliczeń HPC jest bardzo ważne.

Przystępując do krytycznej oceny należy zauważyć, że oceniana praca wraz z bibliografią obejmuje 184 strony - jest to objętość adekwatna do przedstawionego bardzo obszernego zakresu informacji i wyników badań. Budowa tekstu pracy jest logiczna, a podział na części i rozdziały bardzo dobry. Autor nie ustrzegł się jednak błędów językowych i literowych oraz edytorskich. Niezwykle uciążliwe są bardzo długie podpisy rysunków i tytuły tablic (nawet do 8 linii, wielokrotnie 5 linii). Brak jest tytułów „Wykazu oznaczeń” i „Wykazu skrótów”.

Na polemikę zasługuje tytuł rozprawy „*Algorytmy segmentacji rentgenowskich obrazów mikrograficznych stopów tytanu*”, który w istotny sposób zawęża prezentowany w rozprawie dorobek. W opinii recenzenta dużo lepszy byłby tytuł „*Algorytmy segmentacji rentgenowskich obrazów mikrograficznych na przykładzie stopów tytanu*”. Uwagę tę potwierdza ostatnie zdanie rozprawy zawarte w rozdziale „Wnioski końcowe”: „Autor ma nadzieję, że opracowane przez niego algorytmy będą stosowane przez specjalistów z dziedziny inżynierii materiałowej.” Niezwykle trafne zdanie, które w pełni podziela!

Na osobną polemikę zasługuje użycie w pierwszym zdaniu rozprawy sformułowania „technika informacyjna” dla określenia zapewne technologii informatycznych. Technika informacyjna wiąże się niewątpliwie z zupełnie odległą dziedziną wiedzy i praktyki ... Należy zauważyć, że ten pierwszy akapit rozprawy jest bardzo słaby. Skróty myślowe, niezwykle brak precyzji oraz sformułowania potoczne powiązane z mało precyzyjnym wywodem - np. fragment „zamiast konstruować nowe urządzenia do rozwiązywania istotnych problemów, można wykorzystać komputery klasy PC wraz z odpowiednim oprogramowaniem.”

Pewnym mankamentem rozprawy jest brak zarysowania dalszej perspektywy kontynuowania zrealizowanych już prac badawczych. Odnosi się wrażenie, że Autor zrealizował zamkniętą całość, działając na zlecenie kierownictwa przywołanego we wstępie grantu. Tak też zdefiniował całość pracy w zamkniętym jej tytule – o czym już wspominałem powyżej.

Analiza tekstu rozprawy rodzi pytania szczegółowe:

1. Czym różni się algorytm analizy obrazu tekturowego od klasycznego algorytmu przetwarzania i analizy obrazu ?
2. Czym różnią się pojęcia: obraz z teksturą, obraz tekturowy i obraz teksturowany ?

Dokonując oceny rozprawy należy stwierdzić, że powyższe uwagi krytyczne nie przysłaniają istotnego dorobku Autora zawartego w rozprawie. Wiedza na temat algorytmów przetwarzania obrazów jest znana od wielu lat, lecz nadal prowadzone są liczne prace związane z dalszym jej rozwijaniem i udoskonalaniem. Prace te dotyczą formułowania nowych i modyfikacji wcześniej znanych rozwiązań. Autor wnosi swój wkład w światowe badania nad opracowywaniem nowych algorytmów oraz takim modyfikowaniem algorytmów istniejących, aby mogły one niezwykle skutecznie wykonywać swoje zadania w tomografii materiałów – na przykładzie badania stopów tytanu.

Doktorant opracował autorskie algorytmy dla potrzeb wykazania słuszności postawionej na początku pracy tezy i przeprowadził eksperymenty, które ją potwierdziły. Rozwiązał w trakcie realizacji pracy szereg istotnych problemów szczegółowych, a uzyskane wyniki algorytmiczne można z powodzeniem rozszerzyć także na inne zastosowania tomografii procesowej. Dorobek badawczy Doktoranta jest bardzo przydatny,

ponieważ realizacja algorytmów przetwarzania obrazów pochodzących z tomografii materiałów jest ciągle aktualnym problemem. Prace te uzasadnia także obecny postęp technologiczny. Już osiągnięte efekty winny zachęcić Autora do dalszych prac na tym polu.

Wartość prezentowanych w rozprawie wyników potwierdzają publikacje naukowe Doktoranta. Wyniki swoich prac Autor rozprawy opublikował (będąc pierwszym autorem lub współautorem) w 17 artykułach naukowych w czasopiśmie takich jak Computer Vision and Graphics (Lecture Notes in Computer Science) oraz na konferencjach o zasięgu krajowym i międzynarodowym m.in.: The 13th IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA 2013), 7th World Congress on Industrial Process Tomography (WCIPT7 2013) czy Image Processing & Communications.

Sformułowane uwagi krytyczne i dyskusyjne oraz postawione pytania nie podważają dorobku Autora rozprawy, który jest niezwykle imponujący, ani nie kwestionują wartości uzyskanych przez Niego wyników, stąd spełniwszy obowiązek sformułowania zarówno uwag krytycznych i polemicznych, jak również dostrzeżenia wielu znaczących osiągnięć Autora z przyjemnością konstatuje, że moja opinia o wartości recenzowanej pracy jest zdecydowanie pozytywna. Doktorant sformułował i rozwiązał ważne szczegółowe zagadnienie naukowe, które można w łatwy sposób uogólnić i rozszerzyć na podobne klasy problemów.

Stwierdzam zatem, że opiniowana rozprawa spełnia z wyraźnym nadmiarem wymagania przewidziane dla rozpraw doktorskich w aktualnie obowiązującej Ustawie, dlatego **wnoszę o przyjęcie recenzowanej pracy jako rozprawy doktorskiej oraz wnioskuję o dopuszczenie Autora pracy, mgr. inż. Łukasza Jopka do jej publicznej obrony.**

Biorąc pod uwagę wysoki poziom rozprawy i przeprowadzonych prac eksperymentalnych wnoszę o wyróżnienie przedłożonej rozprawy.

Ł. Wiśniewski