

prof. dr hab. inż. Andrzej Obuchowicz  
Uniwersytet Zielonogórski  
Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych  
e-mail: a.obuchowicz@issi.uz.zgora.pl

Zielona Góra, 10 luty 2023

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Anety Górniak

*Recognition and matching of microscopic images in 2D space*

opracowana na zlecenie

Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja  
Politechniki Wrocławskiej

### 1. Problem badawczy i jego znaczenie

Obrazy mikroskopowe preparatów histologicznych należą do jednych z najbardziej złożonych spośród stosowanych w diagnostyce opartej na obrazowaniu medycznym. Na przykład typowy cyfrowy wirtualny slajd preparatu histologicznego pozyskany z mikroskopu skanującego zajmuje w formacie typu tiff około 1GB pamięci i zawiera około 50GB informacji. Wobec tak dużej złożoności obrazu jednym z głównych problemów diagnostyki wspomaganej komputerowo jest ekstrakcja zbioru cech efektywnych dla zadań klasyfikacji w procesie diagnostycznym. Mimo bogatej literatury przedmiotu, ciągle poszukiwane są techniki segmentacji obiektów na obrazie, ekstrakcji cech i klasyfikacji podwyższające skuteczność systemów automatycznego, bądź półautomatycznego wsparcia diagnozy medycznej. Do tego nurtu należy przypisać przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską, która podejmuje próbę wykorzystania momentów Zernike'a w problemach analizy mikroskopowych

WPLYNEŁO  
16-02-2023

QDN-IT/34/2023

preparatów tkanek. Własności momentów Zernike'a, a zwłaszcza ich niezależność na liniowe przekształcenia obrazów, takie jak transpozycje, obroty, czy odbicia, mogą stanowić element wspomagający redukcję liczby przetwarzanych danych, odporność na szum i uszkodzenia w procesie akwizycji danych z obrazu, czy jego orientacji. Wobec powyższych faktów cele przedstawione w pierwszym rozdziale pracy uznać należy za słuszne i zasadne.

## **2. Wkład autora**

Zasadniczy oryginalny wkład doktorantki to wykazanie przydatności momentów Zernike'a i skumulowanych momentów Zernike'a do kreacji wektorów deskryptorów obrazów histologicznych służących w dalszym etapie do porządkowania sekwencji obrazów mikroskopowych tkanek, jak również w zadaniach identyfikacji typów tkanek. Jakkolwiek aplikacja momentów Zernika była głównym oryginalnym osiągnięciem doktorantki, to, w celu wykazania ich przydatności, podjęła ona trud budowy kompletnych procedur porządkujących i identyfikujących tkanki na obrazach mikroskopowych.

Pierwsze analizowane zagadnienie dotyczyło sekwencjonowania serii nieuporządkowanych, nierównych i niestandardyzowanych slajdów skrawków tkanek. Dyplomantka zaproponowała użycie deskryptorów opartych na skumulowanych momentach Zernike'a. Naturalny porządek sekwencji był odtwarzany na podstawie pomiaru i porównywania różnic pomiędzy deskryptorami.

Zagadnienie identyfikacji tkanek na obrazach histologicznych podjęto według trzech scenariuszy:

- identyfikacja typu tkanki na bazie pełnego obrazu;
- identyfikacja typu tkanki na bazie losowych próbek niskiego rozmiaru pobieranych z pełnego obrazu źródłowego;
- identyfikacja obrazów uszkodzonych i niepełnych w zbiorach obrazów.

W pierwszym przypadku wyznaczone na bazie pełnego obrazu deskryptory Zernike'a poddane zostały procesowi klasyfikacji, która została zrealizowana z użyciem miary błędu średniokwadratowego. Ze względu na przeciętne wyniki identyfikacji

tego podejścia w publikacjach współautorskich doktorantki klasyfikację zrealizowano przy użyciu klasyfikatorów neuronowych, co znacznie poprawiło jakość wyników.

Ze względu na dużą złożoność obliczeniową wyznaczania momentów Zernike'a dla dużych obrazów wysokiej rozdzielczości, w drugim przypadku zaproponowano losowe próbkowanie takich obrazów, w wyniku którego otrzymano serię fragmentów-reprezentantów o mniejszym rozmiarze i klasyfikację wykonywano na bazie kompleksu momentów Zernika wyznaczonych na bazie tych reprezentantów. Otrzymano wyniki zbliżone do przypadku analizy pełnego obrazu, ale przy znacznie niższym koszcie obliczeniowym.

Losowy dobór fragmentów obrazu może doprowadzić do wyboru fragmentów nie-diagnostycznych: uszkodzonych bądź z brzegu obrazu. W trzecim zagadnieniu stosując technikę porównawczą momentów Zernike'a zaproponowano metodę odsiania ze zbioru danych obrazów zawierających takie uszkodzenia.

### **3. Poprawność**

Opiniowana praca, zawarta na 168 stronach, napisana została w języku angielskim. Składa się z 8 rozdziałów, w tym wprowadzenie i podsumowanie, uzupełnionych streszczeniami w języku angielskim i polskim, spisami rysunków i tablic, oraz bibliografią zawierającą 128 pozycji cytowanej literatury, zawierającej wyczerpujący zbiór publikacji obejmujący stan badań prowadzonych w obszarze zainteresowania pracy.

Po wprowadzeniu ujętym w rozdziale pierwszym, w rozdziale drugim doktorantka przedstawiła zagadnienie obrazowania medycznego, z naciskiem położonym na obrazy mikroskopowe, a także omówiła techniki rejestracji cyfrowej obrazów medycznych. Tematem rozdziału trzeciego są wielomiany i momenty Zernike'a, gdzie, obok definicji powyższych, przedstawiono ich własności, wersje dyskretne momentów oraz pokrótce omówiono pewne dotychczasowe zastosowania, szczególności w obszarze przetwarzania obrazów. W rozdziale czwartym przedstawiono definicje i podstawowe własności wektorów destkryptorów bazujących na momentach Zernike'a i skumulowanych momentach Zernika, oraz przedstawiono proponowane podejście opisu za ich pomocą obrazów w kontekście zadań klasyfikacji i podobnych. Ponie-

waż wyznaczenie momentów Zernike'a wymaga przedstawienia obrazów w pewnej skali dyskretyzacji oraz w biegunowym układzie współrzędnych, w rozdziale 5 przedstawiono proces wstępnego przygotowania obrazu do wyznaczania deskryptorów Zernike'a, oraz przedstawiono zagadnienie transformacji geometrycznych w przestrzeni dyskretnej. Rozdziały 6 i 7 zawierają najistotniejsze wyniki prac badawczych doktorantki. Pierwszy z nich zawiera opis praktycznego zastosowania momentów Zernike'a do odtwarzania prawidłowej sekwencji obrazów mikroskopowych. Kolejny dotyczy zagadnień identyfikacji tkanek na bazie momentów Zernike'a wyznaczonych zarówno z całego obrazu histologicznego, jak i na bazie losowych fragmentów reprezentujących oryginalny obraz. W tym rozdziale również zawarto opis selekcji obrazów uszkodzonych w zbiorze obrazów histologicznych z wykorzystaniem momentów Zernike'a. Całość pracy wieńczy bardzo obszerne i szczegółowe podsumowanie w rozdziale 8.

Z merytorycznego punktu widzenia przeprowadzone badania, analizy i dowody są właściwe i poprawnie zrealizowane. Stwierdzenia w większości są uzasadnione, bądź podane są odnośniki do literatury, gdzie odpowiednie uzasadnienie można odnaleźć. Tok głównej myśli rozprawy jest właściwy i dobrze przemyślany. Na szczególne wyróżnienie zasługuje przejrzystość przeprowadzanych rozważań i analiz, jak również niezwykła dbałość o postać edycyjną pracy.

Jednakże uderza brak pewnych elementów, których oczekiwałbym od rozprawy doktorskiej, a także pewna niespójność tematyczna rozdziału drugiego z całością pracy. Przede wszystkim brak mi we wprowadzeniu jawnie postawionego celu, bądź tezy pracy. Brak również podsumowań poszczególnych rozdziałów, w których wyróżniono by istotne wnioski i fakty ułatwiające czytelnikowi śledzenie myśli autora i rozeznanie etapu procesu dążenia do osiągnięcia celu pracy wskazanym we wprowadzeniu. Z braku tych podsumowań wynika bardzo rozległe i szczegółowe końcowe podsumowanie pracy, które zmusza czytelnika do poszukiwania we wcześniejszych rozdziałach uzasadnienia dla tych wniosków. W przypadku formułowania wniosków szczegółowych w podsumowaniach poszczególnych rozdziałów, w rozdziale ostatnim przypomniano by tylko najistotniejsze wnioski wskazujące, że postawiony we wprowadzeniu cel został osiągnięty, bądź teza pracy została udowodniona.

Ponadto, w kontekście głównego nurtu badań opisanych w rozprawie, rozdział 2

zawierający ogólne informacje o technikach obrazowania medycznego, jest rozdziałem, w mojej opinii, zbyt czynnym, nie wnoszącym istotnych informacji dla rozważanych w pracy zagadnień.

#### **4. Komentarze i uwagi**

Część uwag krytycznych związanych z koncepcją i realizacją pracy przytoczono wcześniej, poniżej podaję kilka dodatkowych uwag merytorycznych.

1. Wszystkie scenariusze badań wymagały odpowiedniego przygotowania obrazów do wyznaczania momentów Zernike'a, na przykład transformacja obrazu do koła jednostkowego o centrum w środku masy obrazu. Transformacja z układu kartezjańskiego do układu biegunowego nie jest przekształceniem izomorficznym. Weźmy pod uwagę dwa równoległe odcinki o tej samej długości w układzie kartezjańskim, pierwszy umieszczony bliżej wybranego środka koła jednostkowego, a drugi w pewnym oddaleniu, to odległość kątowa pomiędzy końcami pierwszego odcinka będzie większa niż w przypadku drugiego. Na ile wybór centrum koła jednostkowego wpływa na informację niesioną przez deskryptor Zernike'a? Jaki może mieć to wpływ na jakość późniejszej klasyfikacji?
2. W zagadnieniu porządkowania sekwencji obrazów, środki mas poszczególnych obrazów sekwencji raczej nie będą leżały na jednej prostej – osi budowanego ewentualnie w przyszłości obrazu 3D. Czy fakt ten nie wpływa na analizę różnicową momentów Zernike'a poszczególnych obrazów?
3. W pracy brak porównania efektywności poszczególnych proponowanych technik z technikami znanymi z literatury. Czy przeprowadzono porównania ilościowe proponowanych technik z technikami używanymi wcześniej?
4. Wśród wymienionych na stronie 13 metod pozyskiwania obrazów medycznych zabrakło mi jednych z istotniejszych, które ponadto są analizowane w pracy, czyli mikroskopowe obrazy histologiczne i cytologiczne.

Jakkolwiek praca została napisana z dużą dbałością edycyjną, to pojawiło się kilka niedociągnięć.

1. W tekście pracy pojawiają się błędne odniesienia (w postaci [?]) do literatury (np. na stronie 15), czy rysunków (np. na stronach 64 i 75).
2. Zdaję sobie sprawę, że symbol  $i$  jest dla elektryków „święty” – oznacza natężenie prądu – jednakże wypadałoby we wzorze (3.1) wyjaśnić, że symbol  $j$  reprezentuje jednostkę urojona, zwłaszcza, że we wzorze (3.10) symbolem jednostki urojonej jest  $i$ .
3. Wydaje mi się, że we wzorze (3.6) powinno być  $V_{n(-m)}$  w miejsce  $V_n^{-m}$ .
4. We wzorze (3.8) zabrakło przecinka oddzielającego argumenty wielomianu  $V_{n'm'}$ .
5. W pierwszym zdaniu podrozdziału 3.2.1 (strona 31) powinno być *disciplines* (dyscypliny) w miejsce *disciples* (uczniowie).
6. Wzór (4.1) w indeksie ostatniego momentu w zbiorze zabrakło znaku minus.
7. We wzorze (5.6) dolna linia alternatywy jest redundantna, ponieważ ta linia jest szczególnym przypadkiem wyrażenia znajdującego się powyżej.
8. Przy obrazach w układzie biegunowym na rys. 5.6 warto byłoby dla porównania zamieścić oryginalne obrazy w układzie kartezjańskim po dyskretyzacji.

## 5. Wiedza kandydatki

Podjęty przez doktorantkę w rozprawie problem naukowy wymaga wiedzy i umiejętności z wielu obszarów badawczych, w szczególności z zakresu obrazowania medycznego, technik przetwarzania obrazów i sygnałów, oraz, przynajmniej w podstawowym zakresie, technik uczenia maszynowego. Zawartość treści w rozdziałach wstępnych pracy zapoznającą czytelnika z aspektami teoretycznymi i wprowadzające w tematykę pracy, a także opis jej realizacji w rozdziałach następnych wskazuje na szeroką wiedzę autora rozprawy w powyższych obszarach i umiejętność z niej korzystania. Ponadto doktorantka wykazała się poprawnością terminologiczną i szeroką znajomością literatury przedmiotu.

## 6. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę opinie zaprezentowane w poprzednich punktach, w tym nieliczne uwagi krytyczne, w części natury dyskusyjnej i edytorskiej, i wymagania zdefiniowane przez artykuł 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach i tytule naukowym (z późniejszymi zmianami) **stwierdzam, że:** rozprawa doktorska pani mgr inż. Anety Górniak zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, kandydatka posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie *informatyka techniczna i telekomunikacja* i posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W związku z powyższym **wnoszę** o przyjęcie rozprawy przez odpowiednią Komisję powołaną przez Radę Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Wrocławskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.



