

Szczecin, 16.04.2021

STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Szybka ekstrakcja cech obrotowo niezmienniczych za pomocą obrazów całkowych w zadaniach detekcji

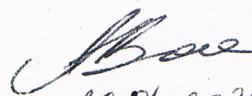
Autor: mgr inż. Aneta Bera

Promotor: dr hab. inż. Przemysław Klęsk, prof. ZUT

Wybór cech (lub inaczej atrybutów czy też zmiennych wejściowych) ma kluczowe znaczenie w wielu zadaniach przetwarzania obrazów np. detekcji obiektów. Klasyczna procedura detekcyjna polega na przebieganiu obrazu tzw. oknem przesuwным (ang. sliding window). Procedura ta jest bardzo wymagająca obliczeniowo, ponieważ okno to najczęściej występuje w wielu skalach. Prowadzi to do analizy dużej liczby okien (fragmentów obrazu), może to być liczba rzędu 10^5 lub nawet 10^6 okien na obraz. W związku z tym, oczywiste jest, że cechy ekstrahowane z pikseli każdego okna nie mogą być zbyt wymagające obliczeniowo, tak aby cała procedura mogła się odbyć w rozsądnym czasie. Prowadzi to więc często do wyboru prostszych cech. Z drugiej strony, wybranie tych bardziej skomplikowanych i kosztownych obliczeniowo może polepszyć jakość otrzymywanych wyników.

Celem niniejszej pracy było opracowanie algorytmu pozwalającego na szybkie ekstrahowanie cech obrotowo niezmienniczych z fragmentów obrazu na potrzeby zadania detekcji obiektów w ramach klasycznej procedury przebiegającej obraz oknem przesuwным.

W pracy skupiono się na cechach generowanych na podstawie momentów Zernike'a i przedstawiono propozycję pozwalającą na obliczanie każdej cechy w czasie stałym – $O(1)$ – tj. niezależnym od liczby pikseli w rozważanym fragmencie obrazu. Zaproponowana technika opiera się na przygotowaniu zbioru specjalnych obrazów całkowych o wartościach zespolonych. W przedstawionym podejściu podstawowym powstają błędy numeryczne ze względu na obliczenia na liczbach zmiennoprzecinkowych oraz użyte rozwinięcia dwumianowe. Dlatego też w dalszej części pracy zaproponowano dodatkową technikę podziału obrazów całkowych oraz bezpieczniejszy numerycznie wzór do wyznaczania momentów Zernike'a. Ponadto, opisana została także rozszerzona przestrzeń cech (obrotowych niezmienników) wykorzystująca zarówno moduły momentów Zernike'a jak i ich odpowiednie iloczyny. Praca zawiera dwa eksperymenty z zadaniami detekcji o różnym poziomie trudności. Na etapie uczenia maszynowego, detektory zostały nauczone (z wykorzystaniem zaproponowanych cech w różnych wariantach) za pomocą algorytmu RealBoost.


16.04.2021

Szczecin, 16.04.2021

DOCTORAL THESIS ABSTRACT

Fast extraction of rotationally invariant features backed with integral images in detection tasks

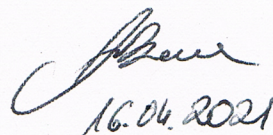
Author: mgr inż. Aneta Bera

Supervisor: dr hab. inż. Przemysław Klęsk, prof. ZUT

The feature selection (attributes or input variables) is essential in many image processing tasks, e.g. object detection. The classic detection procedure uses so-called sliding window in order to scan image content. This window can appear in many scales which makes entire detection procedure very computationally demanding, due to necessity of analyzing large number of windows (image fragments). It can be 10^5 or even 10^6 windows per image. Therefore, it is obvious that the features extracted from the pixels of each window cannot be too computationally demanding, so that the entire procedure can take place in reasonable time. This often leads to a choice of simpler features. On the other hand, selecting these more complex and computationally expensive features may improve the quality of the obtained results.

The aim of this doctoral dissertation was to develop an algorithm that is suitable for fast extraction of rotationally invariant features computed from image fragments within a dense detection procedure, in which the image is scanned by a sliding window.

This work focuses on features based on Zernike moments and proposes a way to calculate each feature in constant time – $O(1)$ – i.e. the extraction time does not depend on the number of pixels in the considered image fragment. The proposed technique is based on a set of special complex-valued integral images. In the basic variant of the presented approach, numerical errors can occur due to calculations on floating point numbers and due to applied binomial expansions. Hence, in further parts of the dissertation, an enhanced variant is proposed, which applies piecewise integral images and a safer formula for calculating Zernike moments. Moreover, the extended space of features (rotational invariants) is presented. It uses both – moduli and suitable products of Zernike moments. This work includes two experiments with detection tasks of different difficulty level. In the machine learning phase, detectors were trained (using proposed features in various variants) by the RealBoost algorithm.



16.04.2021

dr hab. inż. Leszek J. Chmielewski, prof. SGGW
Instytut Informatyki Technicznej
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej

autor rozprawy:

mgr inż. Aneta Bera

Wydział Informatyki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

tytuł rozprawy:

Szybka ekstrakcja cech obrotowo niezmienniczych za pomocą obrazów całkowych w zadaniach detekcji

Recenzja została przygotowana w odpowiedzi na powołanie na recenzenta przez Senat Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie zgodnie z uchwałą z dnia 25 stycznia 2021 r., w związku z przewodem doktorskim Pani mgr inż. Anety Bery, prowadzonym w dyscyplinie informatyka techniczna. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Przemysław Klęsk, prof. ZUT.

1 Zawartość rozprawy

1.1 Omówienie ogólne

Recenzowana praca dotyczy wybranych aspektów koncepcji pomocniczych obrazów całkowych stosowanych przy obliczaniu momentów Zernike'a. Mając te pomocnicze obrazy można obliczyć momenty Zernike'a w czasie stałym, czyli niezależnym od rozmiaru okna, w jakim momenty te są obliczane (okna są kwadratowe). Zasadniczym problemem, który rozwiązano w rozprawie, jest umożliwienie obliczania pomocniczych obrazów w jednym, globalnym układzie współrzędnych kartezjańskich, podczas gdy momenty Zernike'a są zdefiniowane w lokalnych układach współrzędnych biegunowych. Momenty te umożliwiają obliczenie cech obrazu mających właściwość niezmienniczości względem obrotu i skali. Pomocnicze dane przyspieszają obliczenia, jeśli liczy się momenty dla wielu okien w obrazie, co ma miejsce w praktycznych zastosowaniach. Koncepcja ta została opisana w pracy cytowanej w recenzowanej rozprawie jako (Bera, Klęsk i Sychel, 2019), opublikowanej w *IEEE Trans. PAMI*. Ta część rozprawy doktorskiej ma charakter teoretyczny, zaś pozostałe części – praktyczny.

W pracy zaproponowano trzy dalsze metody udoskonalające w praktyce zastosowanie metody momentów Zernike'a. Pierwsza z nich polega na obliczaniu obrazów pomocniczych z pierścieniowych fragmentów obrazów źródłowych, co daje możliwość zwiększenia liczby uzyskiwanych cech. Metoda ta okazała się skuteczna jedynie dla obiektów w obrazie mających proste kształty. Została ona opublikowana również w pracy (Bera, Klęsk i Sychel, 2019) w *IEEE Trans. PAMI*.

Druga metoda dotyczy problemu błędów numerycznych wynikających tego, że różnice rzędów wielkości danych w obrazach pomocniczych w ich kolejnych fragmentach są bardzo wielkie, z powodu występowania wysokich potęg współrzędnych obrazu we wzorach. Dlatego ich reprezentacja w językach programowania jest niewystarczająca dla objęcia zakresu ich wartości, co

powoduje utratę części informacji. Silnie ujawnia się to w różnicach, wykorzystywanych właśnie w obliczeniach cech obrazów. Sposobem na to jest podział danych pomocniczych na obszary, w których dane nie są zniekształcane w używanej reprezentacji. Metodę tę zaprezentowano w publikacji współautorskiej z udziałem Doktorantki cytowanej w pracy jako (Klęsk, Bera i Sychel, 2020), opublikowanej w *Computational Science, Proc. ICCS*.

Trzecie udoskonalenie polega na zastosowaniu i oprogramowaniu rozszerzenia zbioru momentów Zernike'a, a co za tym idzie, liczby cech które można policzyć dla obrazu. Rozszerzenie takie było już sugerowane w literaturze, natomiast w pracy zostało zrealizowane.

Jako mechanizm klasyfikacyjny zastosowano drzewa decyzyjne połączone z kosztami z odpowiedzią rzeczywistoliczbową. Utworzone w ten sposób słabe klasyfikatory zintegrowano za pomocą algorytmu RealBoost. Klasyfikatory stosowano właściwie jako detektory obiektów, klasyfikując podobszary obrazu jako należące do obiektu lub do tła.

Metody przebadano przeprowadzając dwa eksperymenty, jeden na obrazach zawierających prostsze obiekty, a drugi bardziej skomplikowane. Z wyników można wywnioskować, że efekty detekcji są korzystne.

Praca składa się z wprowadzenia, ośmiu rozdziałów, spisów rysunków, tablic i algorytmów oraz bibliografii.

We wprowadzeniu zawarto między innymi opis celu i tezy pracy. Rozdział pierwszy zawiera teorię dotyczącą pomocniczych obrazów całkowych oraz opis procedury detekcyjnej.

W drugim rozdziale opisano teorię momentów Zernike'a, kwestię ich niezmienniczości ze względu na skalowanie oraz niezmienniczość ich modułów ze względu na obrót. Pokazano to wyprowadzając odpowiednie wzory. Dokonano obszernego porównania momentów Zernike'a (ZM) z ortogonalnymi momentami Fouriera-Mellina (OFMM), które z kilku powodów mogłyby być uważane za lepsze deskryptory obiektów, lecz nie można ich szybko obliczać za pomocą pomocniczych obrazów całkowych. Z analizy literatury wynika, że inne momenty używane w podobnych zastosowaniach mają mniej korzystne właściwości.

W rozdziale trzecim opisano kwestie stałoczasowego obliczania momentów Zernike'a. Dokładnie przeanalizowano efektywność algorytmów obliczania całkowych obrazów pomocniczych. Zaprezentowano też koncepcję liczenia cech z pierścieni, zamiast z kwadratowych okien w obrazie, dla zwiększenia liczby uzyskiwanych cech.

Koncepcje te zweryfikowano w rozdziale czwartym na dwóch zbiorach danych obrazowych. Pierwszy zawierał tylko literę „A” pisaną różnymi czcionkami na różnych tłach i uzyskano dla niego dobre wyniki (na danych testowych czułość 0.98, specyficzność $1 - 2 \cdot 10^{-6}$). Drugi zawierał samoloty na zdjęciach rzeczywistych i wyniki uzyskane dla niego zostały przez Autorkę uznane za negatywne (choć na danych walidacyjnych uzyskano czułość około 0.9 przy specyficzności 0.99), zatem w tej koncepcji wyników dla danych testowych nie podano.

W rozdziale piątym zaprezentowano koncepcję podziału obrazów pomocniczych na *kawałki*, dla zaradzenia wspomnianego przekroczenia zakresu wartości możliwego w reprezentacji zmiennych w języku programowania (stosowano typ zmiennoprzecinkowy podwójnej precyzji). Rozdział zamyka analiza nakładu obliczeniowego na obsługę podzielonych obrazów, który nie przekracza 50% wielkości tego nakładu bez podziału.

Rozdział szósty jest poświęcony eksperymentom z opisaną metodą podziału obrazów pomocniczych, z tymi samymi zbiorami obrazów, co poprzednio. Pokazano, że uzyskiwane wyniki są wyraźnie lepsze, niż w metodzie bez podziału. Na zbiorze „A”, podzbiór testowy, uzyskano czułość 0.992 przy specyficzności wynoszącej 1.00 (brak fałszywie pozytywnych rozpoznań). Na zbiorze samolotów uzyskano czułość 0.706 przy specyficzności $1 - 2.8 \cdot 10^{-6}$ (dla porównania

z wynikami bez podziału na kawałki, na danych walidacyjnych z podziałem czułość 0.9 uzyskano dla specyficzności około $1 - 2 \cdot 10^{-5}$).

W podsumowaniu Autorka uczciwie przyznaje, że miary jakości detekcji obiektów nie są lepsze, niż przy zastosowaniu cech Haara lub deskryptora HOG (*Histogram of Oriented Gradients*), co wynika z tego, że informacja zawarta w używanych do detekcji momentach Zernike'a niezbyt wysokich rzędów nie zawiera dostatecznie dokładnej reprezentacji kształtu obiektów. Remedium byłoby zastosowanie momentów znacznie wyższych rzędów, co skomplikowałoby kwestię dokładności numerycznej. Gdyby zastosować zmienne poczwórnej precyzji, te komplikacje znikłyby. Dlatego zdaniem Doktorantki warto pracować nad cechami opartymi na momentach Zernike'a, które ze względu na swą niezmienniczość względem obrotu i szybkość obliczania są atrakcyjną alternatywą dla innych cech obiektów w obrazie.

Bibliografia kończąca rozprawę zawiera około 80 pozycji, w tym jedna z roku 2021, pięć z 2020, dwie z 2019. Doktorantka jest współautorem dwóch z cytowanych publikacji, za 200 i 140 punktów.

1.2 Cel i tezy pracy

Cel pracy został sformułowany we wprowadzeniu:

- Celem pracy jest opracowanie algorytmu umożliwiającego szybkie (stałoczasowe) obliczanie momentów Zernike'a w ramach procedury detekcyjnej, niezależniając się od pozycji okna i liczby pikseli w oknie.

Postawiono następującą tezę:

- Po przygotowaniu odpowiedniego zestawu zespolonych obrazów całkowych przed procedurą detekcyjną, momenty Zernike'a dla każdego kwadratowego okna obrazu mogą zostać wyznaczone w czasie stałym – $O(1)$ – niezależnie od liczby pikseli w oknie.

2 Omówienie treści i wyników rozprawy

2.1 Uwagi pozytywne

Wartość tezy pracy Reprezentacja momentów Zernike'a, zdefiniowanych pierwotnie w układzie biegunowym, w postaci umożliwiającej skorzystanie z danych pośrednich, zdefiniowanych w układzie kartezjańskim, które są jednolite dla całego obrazu, jest oryginalnym i wartościowym osiągnięciem. Jego oryginalność została potwierdzona publikacją w czasopiśmie *IEEE Trans. PAMI*, o wysokim prestiżu (200 punktów MNiSzW). Praca ta została również wyróżniona w Konkursie Oddziału PAN w Gdańsku dla młodych naukowców. Zwraca uwagę łatwość, z jaką Doktorantka przekształca skomplikowane wzory matematyczne. Jest to pozytywna cecha w czasach, gdy dominują podejścia eksperymentalne bazujące na symulacjach komputerowych.

Wartość pozostałych koncepcji udoskonalających metodę z tezy Wprowadzenie obliczania obrazów pomocniczych wymagała solidnej analizy wzorów, dość skomplikowanych. Wprawdzie zaleca się, aby badane okno obrazu mieściło się całkowicie w jednym kawałku, to

jednak oprogramowano również wszystkie inne, mniej korzystne przypadki. Podano oszacowanie dla liczby dodatkowych operacji oparte na solidnie wyprowadzonych wzorach, nie pomijając także podejścia empirycznego (otrzymano zgodne wartości).

Koncepcja liczenia cech tylko z pierścieni jest ciekawa, i choć nie okazała się skuteczna gdy obiekty są skomplikowane, to można ją stosować w innych przypadkach.

Zwiększanie liczby cech opartych na momentach Zernike'a okazało się skuteczne. Również wymagało biegłości matematycznej i rozwiniętych umiejętności porządkowania wzorów.

Koncepcje te zostały również potwierdzone publikacjami, częściowo w czasopiśmie *IEEE Trans. PAMI*, i częściowo w *Computational Science, Proc. ICCS* (140 punktów MNiSzW).

Dobry przegląd literatury Praca jest solidnie osadzona w kontekście literatury dotyczącej podobnych zagadnień. Literatura jest nie tylko zebrana i wzmiankowana, ale także wystarczająco jasno napisano, co istotnego dla problemów opisywanych w rozprawie zawierają kolejne pozycje.

Wysokie wymagania dla miar jakości wyników Uzyskiwane wyniki detekcji mają dokładność przekraczającą 0.99 (dane testowe: Tabl. 4.3, 7.2, zbiór „A”, Tabl. 7.4, zbiór „Samoloty”), zaś wyniki dla danych walidacyjnych, zbiór „Samoloty”, gdzie czułość przekracza 0.9 przy specyficzności 0.99 są potraktowane jako *bardzo słabe* (prawdopodobnie chodzi raczej o to, że jakość na danych testowych była znacznie gorsza, i dlatego jej nie ujawniono). W wielu badaniach takie wyniki byłyby określone jako całkiem dobre, co zamknęłoby drogę do poszukiwania lepszych rozwiązań.

Ilustracja tłumienia informacji blisko środka obiektu W ciekawy i poglądowy sposób przedstawiono to zjawisko dla momentów Zernike'a, ortogonalnych momentów Fouriera–Mellina i momentów zespolonych (Rozdz. 2.5.2, Rys. 2.5). Skorzystano z koncepcji przedstawionej w literaturze (Abu-Mostafa i Psaltis, 1984), ale realizacja tego przedstawienia jest przekonująca.

Bardzo wysoki poziom edycyjny rozprawy Poziom ten ujawnia się szczególnie w staranności i wiedzy o zasadach składania wzorów matematycznych. Jest to bardzo cenne, gdyż ujawnia szacunek dla treści. Zastosowanie tak profesjonalnego narzędzia do składu publikacji, jakim jest $\text{\LaTeX}$, nie załatwia jeszcze wszystkiego; Doktorantka wykazała się także wiedzą.

2.2 Uwagi dyskusyjne i krytyczne

2.2.1 Uwagi merytoryczne

Moje uwagi merytoryczne są nieliczne i należy je traktować raczej jako okazję do dyskusji niż krytykę.

Brak bezpośredniego odniesienia do niezmienniczości cech Ta uwaga odnosi się przede wszystkim do niezmienniczości względem skali, ale w pewnym zakresie także do niezmienniczości względem obrotu. Co do skali, to stosuje się analizę wieloskalową (okna o stopniowo zmieniającej się wielkości), podczas gdy cechy zapewniają w tym zakresie niezmienniczość. Co do obrotu, to odnalazłem jedyne miejsce, gdzie niemal jawnie korzysta się z niezmienniczości, tam gdzie wskazano, że obiekty uczące w zbiorze „A” były obracane w zakresie jedynie od -45° do

45°, a nie w całym zakresie pełnego obrotu. Mimo to, uzyskano dobre wyniki detekcji liter obróconych o dowolny kąt.

Przypuszczam, że sprawę tych dwóch niezmienniczości potraktowano w powyższy sposób świadomie, ale chciałbym usłyszeć komentarz Doktorantki na ten temat.

Brak odniesienia do skutków tłumienia, szumów i drgań momentów Zernike’a w eksperymentalnej części pracy Wspomniany już ciekawy opis zjawiska tłumienia informacji w centralnej części obrazu (Rozdz. 2.5.2, Rys. 2.5) i ilustracja niedokładnej reprezentacji obiektów za pomocą nawet dużej liczby momentów (Rozdz. 2.3, Rys. 2.1) wzbudza u czytelnika zaniepokojenie co do tego, jak w pracy poradzono sobie z tymi problemami. Jednak w dalszej części pracy brak jawnego odniesienia do tych problemów.

2.2.2 Drobne uwagi redakcyjne i techniczne

Uwagi te dotyczą spraw redakcyjnych, które są merytorycznie nieistotne i nie wpływają na ocenę pracy. Zamieszczam je do wiadomości Autorki, która w przeważającej części tekstu złożyła pracę z ogromną dbałością. Omawiam je w kolejności stron.

- S. 9¹⁰: HOG – wszyscy znają ten skrótowiec, ale wyjaśnić trzeba przy pierwszym użyciu (*Histogram of Oriented Gradients*).
- S. 9₄: *W ostatnich czasach (...) 1984 (...) 1995...* : te lata, to być może są *ostatnie czasy* dla mnie, ale chyba nie dla Doktorantki (w sensie *niedawne*).
- S. 13₁₄: *Celem pracy jest opracowanie (...) uniezależniając się...* : wszechobecny błąd, *anakolut*. Co jest celem, a kto się uniezależnia? Anakolut znaleziono również na s. 32¹³⁻¹⁴: *zmieniając kolejność całkowania (...), momenty mogą zostać wyrażone...* . To nie momenty zmieniają kolejność całkowania. Kolejny jest na s. 16₆₋₅: *Obraz całkowity może zostać wyznaczony (...), wykorzystując wzory...* , dalsze na ss. 20¹⁴⁻¹⁵, 20¹⁸⁻¹⁹, 41₁₂₋₁₀ itd.
- S. 16¹: Wiersz zawieszony (bękart), ostatni wiersz akapitu samotnie otwierający nową stronę.
- S. 17₂: Należałoby wyjaśnić oznaczenia w zapisie $(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)$. Domyślamy się, że x_i to wektor cech, a y_i to indeks klasy obiektu uczącego i , $i = 1, \dots, m$. Jednak w opisie Algorytmu 1 (s. 15) zmienna x oznaczała współrzędną poziomą obrazu, zaś z kolei w Algorytmie 2 (s. 18) okazuje się, że zmienna y_i nie jest zwykłym indeksem klasy, bo należy do zbioru $\{-1, +1\}$.
- S. 18 i dalsze: Algorytm RealBoost bywa nazywany Real AdaBoost – niejednorodność nomenklatury.
- S. 20₁₁: *(...) gdzie m_1 i m_2 to liczba przykładów w danym podzbiorze $\rightarrow$ (...) gdzie m_1 i m_2 to liczby obiektów należących do podzbiorów D_1, D_2 , odpowiednio.*
- S. 20₆₋₅: *Proces powtarza się tak długo, aż osiągnięty węzeł nie jest liściem.* To znaczy, kończymy gdy jest liściem, czy gdy nim nie jest?
- S. 21¹⁰: Słowa *decision stumps* jako obce należałoby pisać italikiem.

- S. 21, tekst do wzorów (1.12-1.14): Nie wyjaśniono pojęć *wag* (utożsamianych z *prawdopodobieństwami*) ani *rund*.
- S. 23₅: Nie *rozmiar* zbioru, lecz jego *moc*.
- S. 30, Rys. 2.2, 2.3: Należałoby pokazać używaną skalę barwną.
- S. 31, Rys. 2.4: Trudno dobrać barwy tak, aby się wystarczająco różniły. Bardzo polecam <http://www.ColorBrewer.org>.
- 51₆: Jest trochę nieściśle, bo pokazano nie same indeksy, ale wartości tablicy.
- S. 58, Rys. 4.2 i Tab. 4.2: Oznaczenia [8, 8, 8] użyte na rysunku są wyjaśnione dopiero dalej, w tabeli. Również, nie wiem, jak się mają wartości czułości z tabeli, wynoszące .964 i .951, skoro na odpowiednich wykresach na rysunku w ogóle nie ma danych dla tak małych wartości?
- S. 59, Rys. 4.3: W trzecim rzędzie na żadnym obrazie nie jest wykryta litera P.
- S. 61, Rys. 4.4: Rysunek (c) zawiera przecież fragmenty samolotów, a nawet jeden prawie cały samolot (nieostry), więc są to raczej trudne pozytywy.
- S. 63¹⁴: Po co pisać, że najmniej znaczące cyfry to skrajnie prawe cyfry?
- S. 65⁶: Zamiast pisać w przenośni „*prywatny*” układ współrzędnych, lepiej napisać ściśle *lokalny*.
- S. 73₉: Nie Znak stopnia kąowego wygodnie jest pisać tak: $\$45^\circ$.
- S. 96, Rozdz. 8.1: Rozdział 8 ma wydzielony jeden podrozdział. Jest to błąd edycyjny; problematyczny jest podział na jedną część. Należałoby zastosować konstrukcję jak we Wprowadzeniu, w którym wydzielono nienumerowaną część zawierającą cel i tezę pracy.
- Bibliografia:** Zamieszczenie identyfikatorów DOI pomogłoby wyszukiwać publikacje w sieci.
- Całość pracy:** Byłoby korzystne użycie w składzie tekstu w MiKTeXu pakietu *hyperref*. Bez stosowania dodatkowych zabiegów w wersji elektronicznej rozprawy byłyby wtedy obecne linki do wzorów, tabel, rysunków i przede wszystkim pozycji literatury.

3 Podsumowanie

W rozprawie można wyróżnić istotne elementy oryginalne oraz inne pozytywne aspekty omówione w rozdziale 2.1, zaś uwagi dyskusyjne i krytyczne omówione w rozdziale 2.2 nie umniejszają w istotny sposób wartości pracy.

Cel pracy został osiągnięty, a teza została wykazana.

W rozprawie zaprezentowano oryginalną, wartościową i ciekawą metodę przyspieszającą obliczania cech w których wykorzystano momenty Zernike’a, przy czym osiągnięto czas stały, niezależny od wielkości okna. Metodę tę głęboko rozpracowano, opierając się w znacznym zakresie na uzasadnieniach matematycznych, oraz uzupełniono ją dodatkowymi usprawnieniami. Całość zweryfikowano na przykładach praktycznych.

Wnioski Powyższy opis, uwzględniający uwagi pozytywne jak również uwagi dyskusyjne i krytyczne, uzasadnia moje ostateczne wnioski o następującej treści.

Recenzowana rozprawa w postaci opracowania pisemnego **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego** w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. Rozprawa **prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydatki w tej dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**. Zagadnienie badawcze zostało prawidłowo postawione i skutecznie rozwiązane, a rozwiązanie zostało rzetelnie zweryfikowane. Tym samym rozprawa spełnia wymagania obowiązującego prawa w zakresie rozpraw doktorskich. Rozprawę oceniam pozytywnie i stawiam wniosek o skierowanie jej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Warszawa, dn. 9 kwietnia 2021

dr hab.inż. Marcin Iwanowski, prof. uczelni
Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny
Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Anety Bery pt. „Szybka ekstrakcja cech obrotowo-niezmienniczych za pomocą obrazów całkowych w zadaniach detekcji”

1 Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa liczy 110 stron, w tym 97 stron tekstu zasadniczego. Została napisana w języku polskim i składa się z nienumerowanego wprowadzenia oraz ośmiu rozdziałów.

Wprowadzenie zawiera ogólne omówienie obszaru tematycznego pracy, w tym uczenia maszynowego, ze szczególnym uwzględnieniem kluczowego – z punktu widzenia tematyki pracy – jego etapu przygotowawczego, czyli doboru cech obrazów. W ostatnim akapicie omówiona jest struktura dalszej części dysertacji. W osobnym, nienumerowanym, punkcie podane zostały cel, motywacja i teza pracy.

Pierwszy rozdział pracy zawiera wstęp teoretyczny, który składa się z czterech punktów. W pierwszym omówiono zadanie detekcji i typowe sposoby jej przeprowadzania na obrazach cyfrowych. Kolejny punkt jest poświęcony obrazowi całkowemu, następne dwa – technikom klasyfikacji, które zostały wykorzystane w eksperymentach opisanych w pracy: metodom łączenia słabych klasyfikatorów (boosting) oraz samym tego typu klasyfikatorom.

Rozdział drugi jest omówieniem kluczowych zagadnień i pojęć związanych z momentami Zernika i jako taki stanowi wprowadzenie teoretyczne do zasadniczych rozważań zawartych w pracy. W pierwszym punkcie rozdziału przedstawiono niezbędne definicje poczynając od wielomianów Zernika. Kolejny punkt jest poświęcony kluczowemu z punktu widzenia pracy zagadnieniu niezmienniczości względem obrotu i skalowania. W kolejnych dwóch punktach omówiono związki momentów Zernika z momentami Fouriera-Mellina. Ostatni punkt zawiera przegląd zastosowań obu rodzajów momentów w literaturze.

Rozdział trzeci zawiera najważniejsze osiągnięcie Autorki - algorytm wyznaczania momentów Zernika o złożoności niezależnej od wielkości okna detekcji. W pierwszym punkcie opisano podstawowe przekształcenia niezbędne do wykazania poprawności zaproponowanego rozwiązania. W drugim punkcie pokazano związek obrazów całkowych ze stałym czasem obliczenia momentów bez względu na wielkość okna. W trzecim podpunkcie przedstawiono podstawowe własności rozwiązania, zaś w kolejnym – autorską koncepcję zwiększenia liczby cech poprzez podział okna detekcji na współśrodkowe pierścienie. W ostatnim, piątym punkcie omówiono sposoby przyspieszenia obliczeń z wykorzystaniem tablicy korekcji.

Wyniki testów, zaproponowanej przez Autorkę, metody zostały przedstawione w rozdziale czwartym. Rozdział ten prezentuje rezultaty wstępnych eksperymentów walidacyjnych metody opisanej

w rozdziale poprzedzającym. Eksperymenty zostały przeprowadzone na dwóch zbiorach danych. Ich pierwsza część polegała na detekcji znaków litery 'A' losowo rozmieszczonych na sztucznie wygenerowanych obrazach ze zróżnicowanym tłem. Druga część eksperymentów dotyczyła detekcji sylwetek samolotów na zdjęciach płyt lotnisk. Wyniki przedstawione w rozdziale czwartym są wynikami cząstkowymi, które stanowiły motywację do podjęcia prac badawczych opisanych w dalszej części pracy.

W rozdziale 5 poruszane jest zagadnienie redukcji błędów numerycznych, występujących w metodzie podstawowej, opisanej w rozdziale 3, a które zostały zaobserwowane podczas testów opisanych w rozdziale 4. Rodział rozpoczyna się od analizy przyczyn powstawiania tych błędów. Następnie została zaproponowana technika redukcji błędów numerycznych poprzez podział obrazów całkowych, zaś na końcu rozdziału – omówienie dodatkowych obliczeń wymaganych do poprawnego stosowania zaproponowanej techniki.

W rozdziale szóstym omówiono rozszerzoną przestrzeń niezmienników Zernika, w tym – w punktach – schemat indeksowania przez grupowanie iloczynów oraz procedurę ekstrakcji cech.

Rodział siódmy zawiera opis zrealizowanych eksperymentów zasadniczych metody podstawowej wraz z zaproponowanym mechanizmem redukcji błędów. W eksperymentach zasadniczych wykorzystano te same zbiory danych, które zostały użyte w eksperymentach wstępnych. Ich wyniki opisano w dwóch pierwszych punktach rozdziału. W ostatnim podpunkcie zaprezentowano wyniki eksperymentów wydajnościowych.

Rodział ósmy jest podsumowaniem pracy i zawiera konkluzje wraz z krytyczną analizą osiągniętych wyników oraz wskazaniem dalszych kierunków badań.

Na końcu pracy zamieszczono spisy rysunków, tablic, algorytmów oraz bibliografię zawierającą 77 pozycji literatury, w tym dwie pozycje autorskie.

2 Ocena pracy

Metody i techniki analizy treści obrazowych, na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat, okazały się jednymi z najbardziej intensywnie rozwijających się obszarów w naukach technicznych. Przyczyną tego jest gwałtowny rozwój narzędzi do pozyskiwania, gromadzenia, przesyłu i przetwarzania obrazów pozwalający na tworzenie coraz bardziej efektywnych modeli obliczeniowych. Modeli, które z uwagi na bardzo dużą różnorodność treści obrazowych i mnogość możliwych do realizacji zadań, stają się coraz bardziej złożone i zasobożerne. Dlatego, niezależnie od rozwoju po stronie sprzętowej, niezwykle ważna jest optymalizacja algorytmów obróbki obrazu cyfrowego na wszystkich poziomach, od przetwarzania wstępnego, filtracji, segmentacji, wyznaczania cech aż do etapu stosowania narzędzi uczenia maszynowego.

W tym kontekście tematyka recenzowanej pracy jest aktualna, zaś jej wyniki mogą przyczynić się do poprawy efektywności algorytmów wizyjnych. Celem pracy jest bowiem opracowanie algorytmu umożliwiającego szybkie wyznaczanie momentów Zernika należących do grupy klasycznych cech momentowych obrazów cyfrowych. Tak zdefiniowany cel pozwolił na precyzyjne sformułowanie tezy badawczej, którą jest stwierdzenie, że możliwa jest realizacja algorytmu, realizującego zdanie ekstrakcji momentów Zernika w czasie niezależnym od wielkości okna detekcji.

Metoda podstawowa została przedstawiona w artykule A.Bera, P.Kłesk, D.Sychel "Constant-Time Calculation of Zernike Moments for Detection with Rotational Invariance", opublikowanym w 2019 roku, w prestiżowym czasopiśmie IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence, którego

Doktorantka jest pierwszą autorką. Metoda ta została opisana szczegółowo w rozdziale trzecim pracy. Metoda podstawowa jest wartościowym wkładem w teorię i praktykę metod momentowych. Dzięki zastosowaniu zbioru zespolonych obrazów całkowych (wzór 3.14), które kumulują wartości pośrednie wymagane do wyznaczenia momentów Zernika z wykorzystaniem operatora przyrostu (wzór 3.18), wyznaczanie wartości momentów nie zależy od wielkości okna. Zaproponowane podejście jest przykładem rozwiązania w którym poprawę paramterów wydajnościowych uzyskuje się kosztem zwiększenia wymagań pamięciowych, w tym przypadku niezbędnych do przechowywania zbioru obrazów całkowych. Jest ono ciekawym i zręcznym wykorzystaniem koncepcji obrazu całkowego do optymalizacji czasowej algorytmu wizyjnego.

Drugie, także udokumentowane stosowną publikacją, osiągnięcie jest związane ze zwiększeniem dokładności metody podstawowej poprzez podział obrazów całkowych. Ściślej rzecz ujmując, obrazy te są wyznaczane nie dla całego obrazu jak w koncepcji oryginalnej, lecz dla mniejszych podobrazów, na które jest dzielony obraz wejściowy. Dzięki takiemu podejściu negatywne efekty numeryczne wynikające z wielkości iloczynów kumulowanych w obrazie całkowym są znacząco redukowane. Koncepcja została opisana w artykule konferencyjnym P.Kłesk, A. Bera, D.Sychel "Reduction of Numerical Errors in Zernike Invariants Computed via Complex-Valuesd Integral Images" z roku 2020. Także i to osiągnięcie należy ocenić zdecydowanie pozytywnie.

Weryfikacja obu metod została przeprowadzona dwuetapowo. Celem pierwszego etapu weryfikacji było uzyskanie potwierdzenia skuteczności metody podstawowej oraz określenie warunków brzegowych stosowalności podejścia. Jak wykazały eksperymenty, wraz ze zwiększaniem się rozmiaru obrazu, rosły błędy numeryczne. Efektem wniosków z pierwszego etapu testów było opracowanie metody redukcji tych błędów. Efekty tej redukcji są pozytywne, co pokazują wyniki drugiego etapu testów.

Oprócz dwóch zasadniczych osiągnięć opisanych powyżej Autorka opisała w pracy także i inne, mniejszego kalibru. Jest nim zwiększenie liczby cech przez wyznaczanie momentów we fragmentach okna, tzw. pierścieniach. Takie rozwiązanie, polegające na wyznaczaniu cech w określonych obszarach obrazu, prowadzi do zwiększenia liczby cech i istotnie może przyczynić się do poprawy skuteczności identyfikacji obiektu przez zwiększenie ilości informacji w procesie uczenia.

Warto jednak zaznaczyć, co zresztą Autorka stwierdza w podsumowaniu pracy, iż momenty Zernika nie należą do najbardziej efektywnych wskaźników opisujących treść obrazu. Lepsze efekty detekcji można uzyskać prostszymi i szybszymi algorytmami, takimi jak np. cechy Haara. Ich bezapelacyjną zaletą jest jednak niezmienniczość względem skali i obrotów. Powyższa konkluzja nie neguje w żaden sposób wartości recenzowanej pracy. Jest ona bowiem efektem solidnej i dobrze udokumentowanej pracy badawczej wykonanej przez Autorkę.

3 Uwagi krytyczne

Lektura pracy pozwoliła na sformułowanie następujących uwag krytycznych do dalszej dyskusji:

1. **Złożoność obliczeniowa, a dane wejściowe.** Cel jaki został postawiony przez Autorkę i teza pracy jest całkowicie zrozumiała, i została w pracy skutecznie udowodniona. Jednak użyte w tezie pracy pojęcia "w czasie stałym" i oznaczenie " $O(1)$ " nie oddaje w pełni specyfiki zagadnienia. Złożoność obliczeniową definiuje się jako funkcję rozmiaru danych wejściowych. Złożoność $O(1)$ odnosi się do sytuacji, w której czas realizacji algorytmu nie zależy od rozmiaru tych danych. W odniesieniu do wielkości okna detekcji tak jest w istocie. Jednak

w przypadku metod obrazowych najczęściej za rozmiar danych wejściowych przyjmuje się rozmiar obrazu wejściowego, liczbę jego pikseli. Ostateczną miarą efektywności algorytmu jest bowiem możliwość przetworzenia kompletnego obrazu. Określenie użyte przez Autorkę odnosi się do efektywności wyznaczania cech momentowych w pojedynczym oknie detekcji. Liczba takich okien jest jednak na tyle duża, że wpływa znacząco na efektywność algorytmu rozpatrywaną w odniesieniu do obrazu wejściowego. Na tę ostatnią wpływa także rozmiar samego obrazu, im bowiem jest on większy, tym więcej trwa wyznaczanie obrazu całkowego (złożoność wynosi w tym przypadku $O(n)$, przy czym n jest liczbą pikseli obrazu wejściowego). Jak należałoby oszacować złożoność algorytmu w funkcji danych wejściowych w powyższym rozumieniu ?

2. **Zakres testów.** Teza i cel pracy wprost odnoszą się do efektywności i czasu działania algorytmu. Z tej perspektywy zakres eksperymentów mógłby być szerszy i w większym zakresie dotyczyć zagadnień efektywnościowych. Także w kontekście złożoności algorytmu, ale z punktu widzenia danych wejściowych tj. obrazu na którym przeprowadzana jest detekcja oraz liczby okien detekcji (punkt 1 powyżej). Tego typu eksperymenty miałyby istotne znaczenie dla możliwości praktycznego zastosowania metody.
3. **Analiza statystyczna cech.** Wątkiem, który przewija się w pracy, jest dobór odpowiedniej liczby cech. Mowa jest m.in. o mechanizmie zwiększania ich liczby, czemu służy koncepcja pierścieni (punkt 3.4, którego kończący fragment brzmi "Warto jednak przypomnieć, że główną motywacją jest generowanie większej liczby cech i zapewnienie algorytmowi uczącemu więcej informacji"). W pracy nie przeprowadzono jednak głębszej analizy statystycznej cech, np. w formie analizy korelacyjnej. Analiza taka przeprowadzona, jeśli nie teoretycznie, to przynajmniej na konkretnym zbiorze danych, pozwoliłaby na stwierdzenie jaka jest najwłaściwsza liczba cech, możliwe przecież, że część spośród cech jest silnie ze sobą skorelowana, co mogłoby spowodować nadmierną ich redundancję. Zrealizowana w pracy weryfikacja cech poprzez klasyfikację jest rozwiązaniem słusznym, jednak powinna zostać poprzedzona bardziej szczegółową analizą cech jako takich.
4. **Przykłady praktyczne.** Ciekawe i wartościowe wyniki zaprezentowane w pracy zostały zweryfikowane na przykładach dość prostych. Z uwagi na koncentrację zakresu pracy na wydajności obliczeniowej, takie przykłady można uznać (z zastrzeżeniem uwag z punktu 2) za wystarczające. Szkoda jednak, że w przeprowadzonych badaniach nie przyjęto szerszego ujęcia tematu, które mogłoby polegać na wykazaniu, że proponowane podejście ma zastosowanie do wybranych zagadnień związanych z realnymi wyzwaniem dla systemów wizyjnych, przyczyniając się do istotnego polepszenia wydajności obliczeniowej. Kilka dobrych przykładów takich wyzwań zostało wymienionych w punkcie 2.6 "Momenty Zernika w literaturze", choćby zastosowania do detekcji symboli na schematach elektrycznych czy detekcja poruszających się obiektów.
5. **Uzasadnienie przyjętych założeń.** Podczas testowania algorytmów przyjęto szereg założeń. Założenia te nie zostały jednak dostatecznie wyraźnie umotywowane. Jednym z podstawowych była liczba wyznaczanych cech momentowych: 375, 450, 540,.. Nie zostało jednak wyjaśnione z czego wynikają takie liczby cech. Innym parametrem jest zakres zmienności okna detekcji, pośrednio wynika on (w przypadku Zbioru 1) z wielkości obrazów zbioru uczącego oraz z podanej sumarycznej liczby okien w zbiorze testowym, nie jest to jednak

informacja kompletna. Nie podano także np. na jakie mniejsze obrazy zostały podzielone obrazy lotnisk na zdjęciach ze Zbioru 2. Jeśli bowiem konkurują z pierwszymi testów na zbiorze 2 jest iż kumulacja wartości liczbowych w obrazie całkowym jest przyczyną błędów numerycznych to nasuwa się pytanie jaka jest maksymalna wielkość obrazu dla której błędy takie okazały się znaczące ?

4 Uwagi redakcyjne

Tekst pracy, w jej warstwie informacyjnej, dobrze relacjonuje uzyskane wyniki. Jednak struktura pracy oraz układ rozdziałów i punktów nie zawsze jest czytelna. Pewne rozwiązania kompozycyjne należy ocenić pozytywnie. Takim jest choćby umieszczenie rozdziału "Rezultaty wstępnych eksperymentów" po pierwszej części osiągnięć własnych Autorki opisanych w rozdziale 3, a drugą częścią związaną z poprawą dokładności (rozdział 5). Takie, dość nietypowe przemieszanie opisu osiągnięć własnych i testów, ma tutaj swoje uzasadnienie – wyniki wstępnych eksperymentów były motywacją do podjęcia prac nad poprawą dokładności.

Można jednak znaleźć w pracy także i mniej fortunate rozwiązania kompozycyjne. I tak, rozdział 1 "Wstęp teoretyczny" nie jest w istocie tym czy być powinien. Wprowadzenie teoretyczne do meritum jest bowiem zawarte w rozdziale drugim, zaś pierwszy zawiera omówienie kwestii w isotcie pomocniczych. Dużo lepszym rozwiązaniem byłoby włączenie punktów 1.1 i 1.2 do podstaw teoretycznych zawartych w rozdziale drugim, wraz z przeniesieniem punktów 1.3 i 1.4 dotyczących klasyfikacji do załącznika – w kontekście celu pracy, rodzaj zastosowanych klasyfikatorów ma znaczenie drugorzędne. Drugim niezbyt fortunnym rozwiązaniem jest rozbięcie przeglądu literatury na dwie części – ogólny znajduje się we wprowadzeniu, zajmując większą jego część, zaś drugi dotyczący momentów Zernika - na końcu rozdziału drugiego. Tutaj lepszym rozwiązaniem byłoby umieszczenie na początku pracy pracy odrębnego rozdziału z szerokim przeglądem literatury. Do nieciągnięć kompozycyjnych zaliczyć można także układ i położenie rozdziału 6 pracy. Trudno jest na bazie lektury tego rozdziału zorientować się odnośnie kontekstu i celu stosowania przestrzeni rozszerzonej. Dopiero szersza analiza treści pracy pozwala na pozyskanie wystarczającego zasobu wiedzy w tym zakresie.

W pracy można także znaleźć szereg, mniejszej wagi, niedociągnięć językowych i redakcyjnych, takich jak np.:

- Na str.16 znajduje się następujące zdanie "Od tej pory w tekście pracy f będzie używane jako oznaczenie funkcji obrazu,,. Tymczasem, na str.23 pojawia się inne "w całej pracy używany będzie symbol f dla oznaczenia pewnej funkcji matematycznej, która w zależności od kontekstu może być funkcją dwóch zmiennych ciągłych lub też funkcją obrazu z dwiema zmiennymi dyskretnymi,, , które rozszerza tę pierwotną definicję. Jest to pewna niekonsekwencja.
- Str.37 niepoprawne określenie "zapis na momenty", chodzi przecież o stosowny wzór.
- Na str.40 użyto wdzięcznych, choć raczej nie używanych w takim kontekście, określeń procesu przeglądania obrazu piksel po pikselu: "obraz jest przemierzany (...) oknem", "obraz jest przechodzony oknem".
- Strona 41 określenie "współrzędne zawierają połówki" jest zrozumiałe, lecz dość kolokwialne.

- Na stronach 45 i 46 znajduje się szereg wzorów w których po lewej stronie znajduje się podwójna suma jedynek. Lepszym rozwiązaniem byłoby wpisane w tym miejscu stosownej wielkości liczbowej, wynikającej zakresów sumowania. Użyty zapis, odnosi się do obrazów całkowitych, lecz w zupełności wystarczałoby użycie takiego zapisu jednokrotnie wraz z odpowiednim wyjaśnieniem.
- Str.56 oraz w wielu innych miejscach tekstu użyto znaku kropki ”.” jako separatora części ułamkowej. O ile jest to typowe i poprawne dla języka angielskiego, to w przypadku tekstu napisanego w języku polskim – już nie. Separatorem części ułamkowej w języku polskim jest przecież znak przecinka ”,”.

5 Podsumowanie

Podsumowując, niezależnie od powyższych uwag krytycznych, które w większości są elementem dyskusji nad pracą oraz sugestią ewentualnych dalszych prac badawczych, uważam, że Autorka pracy wykazała swoje wysokie kompetencje w wybranym przez siebie obszarze badawczym. Recenzowana rozprawa zawiera oryginalne rozwiązania problemów naukowych oraz pokazuje umiejętności Autorki w zakresie samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. **Całościowa ocena rozprawy jest pozytywna.** Uważam, że rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez stosowne, aktualnie obowiązujące, akty prawne. Dlatego **wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Anety Bery do publicznej obrony.**



UCHWAŁA NR 230
Senatu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
z dnia 29 listopada 2021 r.

w sprawie nadania mgr inż. Anecie Berze
stopnia doktora

Na podstawie art. 179 ust. 1 i 3 pkt 2b ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1669, z późn. zm.) w związku z art. 14 ust. 2 pkt 5 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jedn. Dz. U. z 2017 r. poz. 1789, z późn. zm.) uchwala się, co następuje:

§ 1.

Senat Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie nadaje mgr inż. Anecie Berze stopień doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

§ 2.

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.

Przewodniczący Senatu

(Rektor

dr hab. inż. Jacek Wróbel, prof. ZUT

UCHWAŁA NR 231
Senatu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
z dnia 29 listopada 2021 r.

w sprawie wyróżnienia rozprawy doktorskiej dr inż. Anety Bery

Na podstawie art. 179 ust. 1 i 3 pkt 2b ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1669, z późn. zm.) w związku z § 3 pkt 4 i § 21 rozporządzenia Prezesa Rady Ministrów z dnia 21 maja 2019 r. w sprawie kryteriów i trybu przyznawania nagród Prezesa Rady Ministrów oraz wzoru wniosku o ich przyznanie (Dz. U. poz. 976) oraz z § 11a ust. 3a uchwały nr 113 Senatu ZUT z dnia 23 września 2019 r. w sprawie określenia sposobu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie (z późn. zm.) uchwała się, co następuje:

§ 1.

Senat Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie wyróżnia rozprawę doktorską dr inż. Anety Bery, pt. „Szybka ekstrakcja cech obrotowo niezmienniczych za pomocą obrazów całkowych w zadaniach detekcji”.

§ 2.

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.

Przewodniczący Senatu

Rektor

dr hab. inż. Jacek Wróbel, prof. ZUT