

Łódź, dn. 25 listopada 2019 r.

dr hab. inż. **Anna Fabijańska**, prof. PŁ
Instytut Informatyki Stosowanej
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki,
Informatyki i Automatyki
Politechnika Łódzka
Ul. Stefanowskiego 18/22
90-924 Łódź

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. **Magdaleny Habrat** na temat:
*Ocena możliwości odwrotnego i nienadzorowanego wyszukiwania grafiki
w zastosowaniach geologicznych*

Promotor: dr hab. inż. Andrzej Bielecki, prof. AGH
Promotor pomocniczy: dr inż. Maciej Dwornik

1. Podstawa sporządzenia recenzji

Niniejsza recenzja została sporządzona na prośbę Pana dr hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. n - Dziekana Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, wyrażoną w piśmie nr WEA/II/B-b/510-11-2/19 z dnia 4 października 2019 r. Recenzja została sporządzona na podstawie przedłożonego tekstu rozprawy.

2. Cel i zakres tematyczny rozprawy

Rozprawa doktorska **Pani mgr inż. Magdaleny Habrat** w ogólnym ujęciu **dotyczy odwrotnego wyszukiwania grafiki**. Jest to problem polegający na znalezieniu w bazie danych, obrazów podobnych pod względem zadanego kryterium do wskazanego obrazu stanowiącego zapytanie. Podobieństwo może dotyczyć zarówno wizualnych cech obrazu, jak i jego treści (ang. *content based image retrieval*, CBIR). Rozwiązania dedykowane odwrotnemu wyszukiwaniu obrazów są stale rozwijane począwszy od lat dziewięćdziesiątych minionego stulecia; często jako odpowiedź na potrzebę indeksowania i przeszukiwania dużych zbiorów danych obrazowych. Obecnie oferowane są również powszechnie, m.in. przez wyszukiwarki internetowe.

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Magdalena Habrat skupia uwagę na **specjalistycznych zastosowaniach wyszukiwania odwrotnego obrazów**, w szczególności na przeszukiwaniu dużych zbiorów danych cyfrowych na potrzeby badań geologicznych. Przedmiot rozważań Doktorantki stanowią obrazy skał uzyskane przy wykorzystaniu mikroskopu optycznego oraz kamery introskopowej. Są to obrazy o charakterystyce znacząco różnej, aniżeli obrazy scen naturalnych, dla których dedykowanych jest większość metod wyszukiwania odwrotnego. W szczególności, w przypadku rozważanej klasy obrazów, podobieństwo wizualne często nie jest jednoznaczne z jednakową przynależnością geologiczną. Ponadto, tego typu

specjalistyczne zastosowania wyszukiwania obrazów opartego na treści spotkały się dotychczas z ograniczoną uwagą badaczy. Z tego też powodu **tematykę rozprawy uważam za aktualną i istotną.**

Jako zasadniczy cel rozprawy Doktorantka stawia sobie zbadanie, czy metody wyszukiwania odwrotnego mogą się sprawdzić w zastosowaniach geologicznych, oraz dokonanie adaptacji istniejących metod CBIR do rozważanej klasy obrazów. Tego typu badania docelowo mają przyczynić się do rozwoju metod nienadzorowanego przeszukiwania zbiorów danych cyfrowych na potrzeby badań geologicznych. **Cel pracy jest zatem wyraźnie zdefiniowany**, podobnie jak trzy tezy, brzmiące:

1. *Możliwa jest konstrukcja nienadzorowanego systemu wyszukiwania obrazem dla obrazów wybranych skał.*
2. *Dobór metody ustalania podobieństwa pomiędzy obrazami wpływa na rezultat wyszukiwania obrazem w mniejszym stopniu niż dobór metody parametryzacji obrazu.*
3. *Postać klucza wyszukiwania determinuje dobór metod składowych algorytmu wyszukiwania obrazem.*

Zakres tematyczny rozprawy, w szczególności fakt, że dotyczy ona zastosowań wizji komputerowej i zawiera elementy przetwarzania i analizy obrazów oraz uczenia maszynowego, pozwala w mojej ocenie zakwalifikować ją do **dyscypliny informatyka.**

3. Układ rozprawy i zawartość poszczególnych rozdziałów

Recenzowana rozprawa obejmuje 169 stron maszynopisu podzielonego na pięć numerowanych rozdziałów poprzedzonych wykazem skrótów i oznaczeń wykorzystanych w pracy. Struktura i podział treści kolejnych rozdziałów w większości tworzą logiczną i spójną całość. Rozdziały 1-2 stanowią wprowadzenie do rozważanego w rozprawie problemu odwrotnego wyszukiwania obrazów w zastosowaniach geologicznych. Rozdziały 3-4 zawierają zasadniczą część rozprawy, w której Doktorantka opisała autorskie rozwiązania, oraz przedstawiła i przeanalizowała wyniki ich działania. Szczegółowa zawartość poszczególnych rozdziałów kształtuje się następująco:

Rozdział 1 przedstawia motywację do podjęcia problemu rozważanego w pracy. Definiuje jej cel, zakres oraz tezy. Ponadto, krótko streszcza zawartość treści kolejnych rozdziałów pracy.

Rozdział 2 stanowi wprowadzenie do problemu wyszukiwania odwrotnego obrazów rozważanego w rozprawie. Autorka wyjaśnia różnicę pomiędzy rodzajami wyszukiwania odwrotnego obrazów. Wprowadza pojęcia wykorzystywane w dalszej części rozprawy. Rozdział prezentuje również ogólną ideę techniki wyszukiwania obrazem wykorzystanej w pracy, oraz dokonuje przeglądu metod składowych rozważanych na poszczególnych etapach działania metody, tj. w procesie parametryzacji treści obrazów oraz ustalania podobieństwa między nimi. W kontekście parametryzacji rozdział dokonuje przeglądu popularnych deskryptorów bazujących na cechach globalnych, lokalnych oraz cechach geometrycznych obiektów. Dla potrzeb zastosowania ostatniej grupy deskryptorów Autorka proponuje trzy metody segmentacji pozwalające dokonać detekcji konglomeratów (spójnych fragmentów skał) z obrazów skał, w celu ich dalszej parametryzacji. W kontekście ustalania podobieństwa obrazów, rozdział przybliża zagadnienia dotyczące redukcji wymiaru przestrzeni cech, metody ustalania skupisk, oraz metody zastosowane do estymacji liczby grup obrazów podobnych.

Rozdział 3 przedstawia bardzo obszerną analizę wpływu poszczególnych składowych rozważanego w rozprawie podejścia do wyszukiwania odwrotnego obrazów na trafność wyników wyszukiwania. Pierwsza część rozdziału charakteryzuje zestaw mikroskopowych obrazów skał wykorzystanych w części eksperymentalnej rozprawy. Następnie, Autorka szczegółowo analizuje

rozkłady globalnych i lokalnych deskryptorów obrazów skał oraz rozkłady cech obiektów obrazu pod kątem ich zdolności do separowania rozważanej klasy obrazów skał w zależności od ich przynależności geologicznej. Rozdział definiuje również miary oceny jakości wyszukiwania, zastosowane podczas eksperymentów obejmujących kolejno: badanie wpływu metody parametryzacji obrazu (tj. wybranego zestawu deskryptorów obrazów), oraz sposobu ustalania podobieństwa obrazów na trafność wyniku wyszukiwania odwrotnego.

W **Rozdziale 4** Autorka przedstawiła przykłady zastosowania rozważanej techniki wyszukiwania odwrotnego zobrazowań skalnych w różnych rzeczywistych scenariuszach, oraz dla różnych form zapytania. Kolejne scenariusze obejmują: (i) wyszukiwanie odwrotne obrazów mikroskopowych skał pod kątem podobieństwa zmienności przestrzeni barw oraz (ii) podobieństwa strukturalnego, (iii) wyszukiwanie odwrotne wizualnie podobnych warstw geologicznych w sygnale wideo pochodzącym z kamery introskopowej, (iv) wyszukiwanie fragmentem obrazu z uwzględnieniem skali lub/i rotacji klucza, oraz (v) wyszukiwanie ręcznie przygotowanym szkicem z uwzględnieniem kształtu konglomeratu lub porowatości skały.

Zasadniczą część rozprawy zamyka podsumowanie zawarte w **Rozdziale 5**. Do pracy dołączony został również wykaz literatury obejmujący 225 pozycji literaturowych z lat 1901-2018 (pośrednio lub bezpośrednio związanych z tematem pracy), spisy tabel i rysunków oraz załącznik zawierający przykłady obrazów skał analizowanych w pracy.

4. Oryginalny wkład Doktorantki

Do oryginalnych osiągnięć Pani mgr inż. Magdaleny Habrat przedstawionych w recenzowanej rozprawie doktorskiej zaliczam:

A. Adaptację technik odwrotnego wyszukiwania obrazem do problemu automatycznego przeszukiwania obrazów skał

W ramach recenzowanej rozprawy mgr inż. Magdalena Habrat **zapropowała ogólną procedurę nienadzorowanego odwrotnego wyszukiwania obrazów skał**. Rozwiązania wyszukiwania odwrotnego istnieją, jednakże Doktorantka dokonała ich adaptacji do szczególnej klasy obrazów geologicznych. Proponowana w rozprawie procedura pozwala na automatyczne i nienadzorowane przeszukiwanie archiwów obrazów geologicznych. Bazuje ona na podobieństwie wizualnym obrazów, co w rozważanym problemie oznacza podobieństwo zmienności barw, tekstury oraz wyglądu obiektów budujących skałę.

Rozwiązanie przedstawione przez mgr inż. Magdalenę Habrat składa się z czterech kroków. Poszczególne kroki obejmują kolejno: (i) wskazanie obrazu stanowiącego klucz wyszukiwania, (ii) parametryzację klucza (tj. opisanie jego zawartości za pomocą zestawu cech – deskryptorów), (iii) ustalenia podobieństwa pomiędzy kluczem, a obrazami w bazie, oraz (iv) prezentację obrazów najbardziej podobnych do klucza wyszukiwania.

Dla każdego z istotnych etapów składowych Doktorantka zaproponowała zestaw możliwych rozwiązań. W szczególności, **na etapie parametryzacji obrazu klucza** Doktorantka proponuje rozważać, albo właściwości wizualne obrazów, albo ich cechy strukturalne. O ile w pierwszym przypadku do opisu treści obrazu zastosowała typowe deskryptory bazujące na rozkładzie barw i teksturze, o tyle w drugim przypadku zaproponowała, aby właściwości strukturalne obrazów definiować w oparciu o cechy geometryczne konglomeratów (tj. charakterystycznych obiektów skał, będących zlepkami różnych części składników skały, sprawiających wrażenie spójnych).

W tym celu zaproponowała cztery podejścia do segmentacji konglomeratów z obrazów mikroskopowych skał, w szczególności:

- segmentację w drodze klasteryzacji poziomów szarości obrazu, z progami ustalonymi na podstawie metody k-średnich;
- segmentację z wykorzystaniem detekcji maksymalnie odstających stabilnych regionów MSER;
- segmentację poprzez detekcję superpikseli SLIC z adaptacyjnym ustalaniem ich liczby;
- segmentację poprzez klasteryzację barw z estymacją liczby skupisk barw (regionów).

Powyższe podejścia charakteryzują się różną dokładnością oraz stopniem uniwersalności.

Do ustalania podobieństwa pomiędzy kluczem, a obrazami w bazie danych, Doktorantka wykorzystwała odległość Euklidesową przyłożoną do wybranego do opisu treści obrazów wektora cech, dokonując redukcji wymiarów przestrzeni cech w wykorzystaniem metody PCA.

Dla potrzeb ostatniego etapu, tj. **prezentacji obrazów najbardziej podobnych do klucza wyszukiwania**, Doktorantka zaproponowała dwa podejścia. Pierwsze z nich bazuje na metodzie klasteryzacji **k-średnich** lub **k-medoidów**, drugie zaś na metodzie **k najbliższych sąsiadów**. W pierwszym przypadku obrazy w bazie danych dzielone są względem podobieństwa na ustaloną liczbę klastrów, a jako rezultat końcowy wyszukiwania prezentowane są obrazy zaliczone do klastra najbliższego (w sensie podobieństwa) do klucza wyszukiwania. Doktorantka zaproponowała, aby w tym podejściu do ustalania liczby klastrów wynikowych zastosować znane z literatury metody estymacji liczby klastrów. Z kolei w drugim podejściu, jako końcowy efekt wyszukiwania Doktorantka proponuje przedstawiać określoną liczbę obrazów najbardziej podobnych pod względem ustalonego kryterium do obrazu stanowiącego zapytanie.

B. Zaplanowanie i przeprowadzenie eksperymentów określających zakres stosowalności rozważanej techniki wyszukiwania odwrotnego obrazów skał oraz jej wariantów

Pani mgr inż. Magdalena Habrat **przeprowadziła szeroką weryfikację eksperymentalną** rozważanego podejścia do wyszukiwania odwrotnego obrazów skał, z wykorzystaniem zbioru 90 obrazów przedstawiających 9 rodzajów skał. Obrazy zarejestrowane zostały z wykorzystaniem polaryzacyjnego mikroskopu optycznego przy zmiennym oświetleniu i stukrotnym powiększeniu. Eksperymenty miały na celu określenie, jak na trafność wyszukiwania wpływają sposób parametryzacji obrazu (tj. wybór deskryptorów opisujących jego treść), oraz sposób określania podobieństwa obrazów.

Podczas analizy wpływu sposobu parametryzacji obrazu Doktorantka rozważyła:

- parametry barwy obrazu (globalna informacja nt. określonej liczby zakresów barw);
- deskryptory globalne (łącznie ponad 40 deskryptorów, bazujących na histogramie obrazów, histogramach sum i różnic obrazu, macierzy współwystępowania pikseli, gęstości różnicy pikseli, macierzy jednorodnych ciągów pikseli, oraz klasyfikacji Tamury),
- deskryptory lokalne, uzyskane metodami SURF (ang. *Speeded Up Robust Features Detector Blob*), BRISK (ang. *Binary Robust Invariant Scalable Keypoints*), HSA (ang. *Harris-Stephens Algorithm*), oraz FAST (ang. *Features From Accelerated Segment Test Algorithm*),
- deskryptory kształtu konglomeratów wyznaczone dla wyników 4 różnych metod segmentacji.

W pierwszym etapie Autorka sprawdziła, jaka jest zdolność rozważonych deskryptorów globalnych do samodzielnego separowania rozważanej klasy obrazów skał w zależności od ich przynależności geologicznej. Następnie, wykorzystwała metodę klasteryzacji k-średnich w celu podziału obrazów na 9 klas odpowiadających rozważanym rodzajom skał. Klasteryzacja wykonana została względem pojedynczych deskryptorów (tj. parametrów barw, deskryptorów globalnych, oraz deskryptorów obiektów), jak również ich kombinacji. Każdorazowo wynik

polegał ocenie pod kątem poprawności dopasowania rezultatów wyszukiwania do obrazu stanowiącego zapytanie. W celu ilościowego opisu rezultatów wyszukiwania, Autorka zaproponowała 4 miary określające: homogeniczność rezultatów grupowania (lokalną – w obrębie jednej klasy, oraz globalną – wyznaczaną dla wszystkich klas), rozbieżność homogeniczności, oraz równomierność grupowania. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów ustaliła, że żaden z rozważanych globalnych deskryptorów nie jest wystarczający do odseparowania wszystkich rozważanych grup skał od siebie na podstawie ich obrazów. Autorka ustaliła ponadto, że w przypadku wyszukiwania obrazów bazującego na podobieństwie wizualnym, najlepsze rezultaty można uzyskać stosując deskryptory barwy, z kolei w przypadku wyszukiwania bazującego na podobieństwie strukturalnym, najlepiej sprawdza się podejście uwzględniające cechy konglomeratów.

W dalszym etapie, Autorka zbadała również jak na poprawność wyszukiwania wpływa redukcja wymiarowości przestrzeni cech. W szczególności, na tym etapie Doktorantka rozważyła 4 wybrane kombinacje cech, które poddała redukcji metodą analizy czynników głównych PCA. Następnie zbadała, jak liczba komponentów głównych wpływa na poprawność grupowania, ustalając, że już 5 komponentów głównych pozwala uzyskać zadowalające wyniki. W ostatnim kroku, Doktorantka przetestowała przydatność znanych metod estymacji liczby klastrów (tj.: indeksy Calinski–Harabasz, Davies–Bouldin, Silhouette oraz Gap statistics) w scenariuszu, gdy wynikowa liczba klas obrazów (rodzajów skał) nie jest znana. Eksperymenty wykazały, że w tym zadaniu najlepiej sprawdza się indeks Calinski–Harabasz, szczególnie gdy wcześniej wykonana została redukcja wymiarowości wektora cech opisującego obraz.

C. Dostosowanie rozważonej techniki wyszukiwania odwrotnego obrazów skał do różnych rzeczywistych scenariuszy wyszukiwania

Pani mgr inż. Magdalena Habrat zaproponowała warianty techniki odwrotnego wyszukiwania obrazów geologicznych dla pięciu różnych scenariuszy wyszukiwania. Cztery z rozważonych scenariuszy dotyczą obrazów mikroskopowych, jeden zaś obrazów makroskopowych skał. Doktorantka rozważyła również różne postacie klucza wyszukiwania. W szczególności były to: obraz, fragment obrazu, fragment obrazu poddany transformacji oraz ręczny szkic przybliżający właściwości poszukiwanego obrazu.

Scenariusz pierwszy obejmował **wyszukiwanie obrazów podobnych wizualnie do klucza, pod kątem barw i ich rozkładu**. W eksperymencie wykorzystanych zostało 5700 obrazów mikroskopowych szlifów cienkich 19 typów skał (po 300 obrazów dla każdego typu). Wyszukiwanie zrealizowane zostało w oparciu o wybrane właściwości rozkładu barw, uzyskując do 100% zgodności wizualnej pomiędzy kluczem a wynikami wyszukiwania, oraz nie mniej niż 60% zgodności w kontekście przynależności geologicznej.

Scenariusz drugi obejmował **wyszukiwanie konglomeratów podobnych strukturalnie do klucza**. W eksperymencie wykorzystanych zostało 800 obrazów mikroskopowych 8 typów skał (po 100 obrazów dla każdego typu). Wyszukiwanie zrealizowano w oparciu o właściwości rozkładu wybranych cech geometrycznych konglomeratów. Do segmentacji konglomeratów Doktorantka wykorzystwała autorską metodę segmentacji w drodze klasteryzacji barw. Wyniki wyszukiwania wykazały niemalże 100% zgodności z kluczem pod kątem podobieństwa strukturalnego, oraz ok. 75% zgodności w kontekście przynależności geologicznej.

Scenariusz trzeci obejmował **wyszukiwanie odwrotne obrazów makroskopowych, przedstawiających warstwy geologiczne podobnie wizualnie do klucza**. Dane wejściowe do eksperymentu stanowiło nagranie wideo (52004 klatki) z kamery introskopowej przedstawiające

wnętrze otworu wiertniczego. Wyszukiwanie, mające na celu lokalizację miejsca zalegania skał, zrealizowane zostało w oparciu o wybrane deskryptory rozkładu jasności obrazu, z uwagi na brak wyraźnych obiektów budujących skałę. W pierwszej kolejności, na podstawie analizy zmian kontrastu obrazu w czasie ruchu kamery, Doktorantka zlokalizowała klatki zarejestrowane w czasie postoju kamery (odrzucając klatki odpowiadające jej przesuwowi). Następnie, klatki niosące istotną informację obrazową pogrupowała względem malejącego podobieństwa względem klucza na trzy klasy, uzyskując blisko 100% prawidłowego rozpoznania.

Scenariusz czwarty obejmował **wyszukiwanie fragmentem obrazu w różnych konfiguracjach**. Były to w szczególności wyszukiwanie fragmentem o oryginalnym rozmiarze dla potrzeb śledzenia konkretnego konglomeratu, wyszukiwanie z uwzględnieniem rotacji klucza wyszukania (w zakresie od 30° do 330°), wyszukiwanie fragmentem obrazu z uwzględnieniem skalowalności klucza (od 4 do 400x), oraz wyszukiwanie w oparciu o klucz poddany jednocześnie rotacji i skali. We wszystkich przypadkach Doktorantka rozważyła dopasowanie punktów kluczowych obrazu z wykorzystaniem porównawczym metod: FAST, MEA, HSA, BRISK i SURF, przy czym jedynie metoda SURF dała akceptowalne rezultaty, pod warunkiem niewielkiego stopnia zniekształcenia klucza. Ponadto, Doktorantka ustaliła, że w przypadku skalowania klucza dużo łatwiejsze do realizacji są przypadki wyszukiwania obrazem powiększonym komputerowo, aniżeli uzyskanym przy innych warunkach akwizycji (ustawieniach mikroskopu).

Scenariusz piąty obejmował **wyszukiwanie odwrotne ręcznie przygotowanym szkicem w dwóch wariantach**. W pierwszym z nich szkic określał **zarys kształtu obiektu** (konglomeratu), w drugim – stanowił **wzorec porowatości skały**. W obu przypadkach Aktorka dokonała wyszukiwania w oparciu o wybrane deskryptory opisujące geometrię obiektu (lub obiektów) klucza, oraz struktur porowych obrazu wydobytych w drodze segmentacji przez klasteryzację poziomów szarości. Deskryptory te zostały znormalizowane w odniesieniu do wymiarów obrazu szkicu tak, aby uniknąć problemów ze skalą. W obu przypadkach, testy przeprowadziła na bazie 50 obrazów mikroskopowych. Dla wyszukiwania porowatości, uwzględniła dodatkowo rozkłady wybranych cech geometrycznych oraz liczbę obiektów. Oba podejścia dały akceptowalne i obiecujące wyniki.

Ww. eksperymenty **potwierdziły** w mojej ocenie **tezy rozprawy**, wykazując, że możliwe jest wyszukiwanie odwrotne obrazów geologicznych, przy czym skuteczność wyszukiwania zależy od sposobu parametryzacji obrazu oraz formy zapytania. **Cel rozprawy został zatem osiągnięty**.

5. Uwagi o charakterze krytycznym i polemicznym

Lektura recenzowanej rozprawy nasuwa także pewne uwagi o charakterze krytycznym oraz polemicznym. Zamieszczam je poniżej. Część z nw. uwag stanowi podstawę do dyskusji podczas publicznej obrony.

- A. Uważam, że tytuł rozprawy nie jest dobrze sformułowany. W szczególności, powinien on bardziej jednoznacznie wskazywać na oryginalne osiągnięcia Autorki, a nie sugerować, że praca jedynie ocenia przydatność istniejących metod CBIR. Ponadto, druga teza rozprawy wydaje mi się dość oczywista.
- B. Rozprawa jest w mojej ocenie zbyt obszerna, a przedstawione analizy – zbyt drobiazgowo. Zrealizowane prace oraz ich wyniki można by przedstawić w sposób dużo bardziej syntetyczny, bez istotnej straty dla wartości naukowej rozprawy. Przykładowo, część poświęcona analizie rozkładu wartości poszczególnych deskryptorów obrazu pod kątem ich zdolności do samodzielnego separowania skał względem ich przynależności geologicznej

(por. Rozdz. 3) powieli wnioski uzyskane w drodze klasteryzacji obrazów skał pod kątem ich podobieństwa względem wybranych cech. Można by także zrezygnować ze szczegółowych rozważań dot. wykorzystania do segmentacji konglomeratów metodami k-średnich oraz MSER w sytuacji, gdy nie odwzorowują one wszystkich istotnych obiektów obrazu.

C. Z drugiej strony, Autorka jest dość oszczędna w słowach, przedstawiając sposób działania swoich metod. Zdarzają się fragmenty, w których tekst rozprawy jest mało precyzyjny, i nie do końca jednoznaczny. Przykładowo:

- s. 19: czym są *sumy pikseli* – liczbą pikseli, czy sumą ich wartości?
- czym jest *jednostkowa erozja morfologiczna* (Algorytm 2.3.3)?
- s. 102: czym jest *opis metod praktycznych przykładów wyszukiwania*?
- S. 109: czym jest *bezwzorcową klasyfikacja k-nn*?
- s. 111: co rozumiemy przez *niewielką (np. dziesięciokrotną) redukcję treści obrazu*?
- s. 149: czym jest *zwiększenie rezultatów grupowania obrazów*?
- rozdział 3.2.1 i następne: jak rozumiem, *wizualizacja deskryptorów* oznacza raczej wizualizację rozkładu wartości deskryptorów;
- rozdział 3.4.1. jak podzielić 255 poziomów jasności na 161 zakresów barw?

Część ww. (i podobnych) niejednoznaczności Autorka mogłaby wyeliminować zastępując słowny opis procedur, bardziej formalnym i precyzyjnym opisem matematycznym.

D. Autorka zdaje się błędnie rozumieć pojęcie (i efekt działania) binaryzacji obrazu. W sytuacji, gdy efektem binaryzacji jest obraz zawierający dwie klasy, Autorka stosuje to pojęcie w odniesieniu do obrazu wynikowego zawierającego kilka klas. Przykładowo na str. 113 wspomina: „*W celu binaryzacji wyżej zaprezentowanych mozaik dokonać ich klasteryzacji w nawiązaniu do liczby głównych dominujących barw. Pozwoli to wyłuskać informację nt. liczby prawdopodobnych, najbardziej charakterystycznych skupień barw na obrazie mozaiki*”. Podobnie w podpisie Rys. 4.11, Autorka wspomina o *binaryzacji progowej barw mozaiki* w sytuacji, gdy prezentowany wynik zawiera kilka klas.

E. Przeprowadzając eksperymenty w różnych scenariuszach wyszukiwania, Autorka manipuluje formami reprezentacji obrazów (skala szarości/barwy), przestrzeniami barw, zestawami deskryptorów wykorzystanymi do opisu treści obrazu, oraz miarami podobieństwa w taki sposób, aby uzyskać jak najlepszy rezultat wyszukiwania w danym scenariuszu. Jest to działanie właściwe w czasie rozwoju i testowania nowych metod. Jednakże w rzeczywistych scenariuszach tego typu podejście jest mało praktyczne. Dlatego wg. mnie w rozprawie zabrakło pewnego usystematyzowania wyników, oraz konkluzji w postaci wyraźnych rekomendacji dot. ustawień parametrów w oparciu, o które należałoby dokonywać wyszukiwanie odwrotne zobrażeń geologicznych.

F. W odniesieniu do trzech metod segmentacji konglomeratów przedstawionych w Rozdziale 2, dla jednoznaczności i spójności opisu, wskazana była by prezentacja wyników działania kolejnych etapów tych metod. Ponadto, z punktu widzenia spójności rozprawy, wskazane byłoby przeniesienie opisu tych metod do Rozdziału 3, gdzie Autorka rozważa wpływ metody segmentacji, na wyniki wyszukiwania względem podobieństwa strukturalnego.

G. Autorka stwierdza w rozprawie, że zaproponowana przez Nią w Rozdziale 4 metoda segmentacji konglomeratów w drodze klasteryzacji barw dostarcza najlepszych wyników spośród wszystkich metod segmentacji rozważonych w rozprawie. Nie przedstawiła jednak wyników na poparcie tej tezy. Jak zatem wypada porównanie np. z metodą SLIC? Jakie są istotne różnice w uzyskanych rezultatach, pomiędzy wykorzystaną przez Autorkę metodą klasteryzacji barw, a metodą mean-shift?

- H. Autorka zdefiniowała własne miary oceny jakości wyszukiwania (s. 65). Miara MO2 nie jest dla mnie jasna. Zdefiniowana jest jako *iloraz 100% oraz liczby klastrów wynikowych do których przyporządkowano obrazy tej samej skały*. Tak zdefiniowana miara nie może dać wartości z zakresu 0-100%, jak podano w pracy. Ponadto, jako uzupełnienie ww. miar warto by wskazać zagregowane macierze pomyłek, dla każdej z rozważanych 9 klas.
- I. W Rozdziałach 4.4.3 i 4.4.4 Doktorantka ocenia jakość wyszukiwania odwrotnego obrazów kluczem poddanym transformacjom (rotacja + skala) na podstawie liczby poprawnie dopasowanych punktów kluczowych SURF. Oceniam, że jest to zbyt surowe kryterium w tym przypadku. Z zamieszczonych przykładów wizualnych wynika, że niezależnie od ich liczby, dopasowane punkty kluczowe w zdecydowanej większości koncentrują się w obszarze poszukiwanego konglomeratu. Należałoby zatem takie wyszukiwanie uznać za poprawne.
- J. Do różnych eksperymentów Doktorantka wykorzystywała różne podzbiory posiadanego zbioru obrazów mikroskopowych (90 obrazów 9 typów skał w eksperymentach z badaniem wpływu sposobu poszczególnych etapów metody na końcowe wyniki wyszukiwania, 5700 obrazów mikroskopowych 19 typów skał przy wyszukiwaniu obrazów podobnych wizualnie podobnych do klucza, 800 obrazów mikroskopowych 8 typów skał przy wyszukiwaniu konglomeratów podobnych strukturalnie do klucza, 50 obrazów mikroskopowych przy eksperymentach dot. wyszukiwania szkicem oraz 7400 obrazów 37 typów skał podczas eksperymentów dot. transformacji geometrycznych klucza wyszukiwania). Nie jest jasne, dlaczego we wszystkich przeprowadzonych eksperymentach nie wykorzystano największego z posiadanych zestawu danych obrazowych (7400 obrazów 37 typów skał). W takim przypadku mogłaby wysnuć najbardziej uniwersalne wnioski dot. działania metod wyszukiwania odwrotnego obrazów geologicznych w różnych scenariuszach.
- K. Jak Autorka ocenia możliwość zastosowania w rozważanym problemie takich miar podobieństwa obrazów, takich jak np. indeks strukturalnego podobieństwa (ang. *SSIM Index*), czy informacja wzajemna (ang. *Mutual Information*)?
- L. Autorka wspomina, że Jej praca ma być m.in. odpowiedzią na konieczność szybkiego przeszukiwania baz obrazów geologicznych. Ile zatem trwa realizacja zapytania odwrotnego z wykorzystaniem rozważanej metody. Jak ten czas zależy od rozmiaru bazy danych (liczby obrazów do przeszukania) oraz rozdzielczości obrazów?
- M. Z punktu widzenia łatwości analizy i interpretacji wyników, na wykresach w Rozdziale 3 (lub w ich podpisie), lepiej było by wskazać nazwy parametrów, zamiast ich oznaczeń.
- N. Nie jest dla mnie zrozumiała idea funkcji dystansu $C(x)$ przedstawiona w Rozdziale 4.3.4. (s.128). Doktorantka definiuje ją jako odległość między dwoma najbliższymi obrazami należącymi do dwóch różnych klas. W obszarze danej klasy $C(x)$ powinno być zatem stałe. Natomiast, na Rys. 4.29 $C(x)$ monotonicznie rośnie. Nie jest też jasny związek funkcji $C(x)$ z metodą k-najbliższych sąsiadów, o której Doktorantka wspomina.

6. Strona edytorska rozprawy

Od strony edytorskiej rozprawa jest przygotowana bardzo starannie (choć Autorka nie ustrzegła się drobnych błędów literowych). Sposób prezentacji danych oraz wyników jest czytelny i nie wzbudza zastrzeżeń. Ilustracja graficzna jest obszerna i właściwie dobrana do treści. Jakość ilustracji jest w zdecydowanej większości odpowiednia (poza Rysunkami 3.11 i 3.12, które są nieczytelne, oraz Rysunkiem 3.46, który dodatkowo ma błędną legendę).

7. Dorobek naukowy Doktorantki

W bazie Scopus zaindeksowanych zostało 11 współautorskich publikacji Pani mgr inż. Magdaleny Habrat z lat 2015-2019. Wśród nich jest siedem artykułów w czasopismach (w tym sześć uwzględnionych w JCR) oraz cztery referaty konferencyjne. Aktualna punktacja czasopism, w których publikowała Doktorantka waha się w zakresie od 40 do 200 punktów. Ilościowo dorobek Doktorantki wygląda więc bardzo dobrze. Spośród ww. artykułów, trzy związane są z tematyką rozprawy doktorskiej. Są to jeden referat konferencyjny, oraz dwie współautorskie prace w czasopismach uwzględnionych w JCR (*Minerals* i *Measurement*). Czasopisma te plasują się poza dyscypliną informatyka. Żadne z nich nie zostało także zaindeksowane w bazie DBLP uwzględniającej wydawnictwa z informatyki, co w kontekście dyscypliny, w której prowadzony jest przewód doktorski mgr inż. Magdaleny Habrat, uważam za istotny minus.

8. Podsumowanie

Pomimo uwag krytycznych uważam, że **rozprawa doktorska Pani mgr inż. Magdaleny Habrat stanowi ciekawy i oryginalny wkład** w rozwój metod wyszukiwania odwrotnego obrazów geologicznych. Zaproponowana w rozprawie ogólna metodologia wyszukiwania zobrażeń skał podobnych do obrazu-zapytania, oraz jej adaptacja do różnych rzeczywistych scenariuszy wyszukiwania i różnych postaci klucza wyszukiwania **stanowią oryginalne rozwiązania** zdefiniowanego na wstępie rozprawy **problemu naukowego**. Wyniki eksperymentów przeprowadzonych przez Autorkę są przekonujące i wskazują na poprawność opracowanych metod, oraz na ich rzeczywistą przydatność.

W celu rozwiązania problemu będącego przedmiotem rozprawy, jej Autorka zastosowała właściwe metody badawcze oraz wykazała umiejętność prawidłowego planowania i realizacji badań, analizy uzyskanych wyników eksperymentalnych i formułowania wniosków.

Zakres tematyczny rozprawy pozwala zakwalifikować ją do **dyscypliny naukowej informatyka**. W dorobku publikacyjnym Doktorantki znajduje się 11 współautorskich prac indeksowanych w bazie Scopus, w tym dwa artykuły związane z tematyką rozprawy, opublikowane w czasopismach posiadających wskaźnik IF, co uważam za dobry wynik.

W związku z powyższym oceniam, że **rozprawa doktorska mgr inż. Magdaleny Habrat spełnia wymagania** określone w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 20 czerwca 2016 r., poz. 882). **Wnoszę zatem o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony.**

Anne Falcj' au' 16