

WYDZIAŁ MATEMATYKI I NAUK INFORMACYJNYCH
POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Porównanie algorytmów ścieniania w odniesieniu do odcisków
palców.

BIOMETRIA
PROJEKT 3 - DOKUMENTACJA

Maciej Momot, Igor Rudolf

29 maja 2025

Spis treści

1	Wstęp	3
2	Opis działania skryptu.	3
3	Eksperymenty	9
3.1	Metodologia	9
3.2	Analiza wykresów	10
3.2.1	Porównanie metod ścieniania	10
3.2.2	Rozkład podobieństw	11
3.2.3	Rozkład minucji	12
3.2.4	Macierz podobieństwa	13
3.3	Wnioski z eksperymentów	13

1 Wstęp

Celem niniejszego projektu było porównanie dwóch algorytmów ścieniania (szkieletyzacji) w kontekście przetwarzania odcisków palców. Ścienianie obrazu binarnego, czyli redukcja linii papilarnych do postaci jednopikselowych szkieletów, stanowi istotny etap w wielu systemach biometrycznych, szczególnie w procesie ekstrakcji cech charakterystycznych, takich jak zakończenia grzbietów i bifurkacje (rozwidlenia).

W ramach projektu zaimplementowano dwa podejścia do ścieniania:

- Szkieletyzację morfologiczną, opartą na iteracyjnym zastosowaniu operacji erozji i otwarcia
- Algorytm K3M, będący szybkim i skutecznym podejściem do ścieniania, wykorzystującym operacje sąsiedztwa pikseli i reguły usuwania zgodne z lokalnymi wzorcami.

Aby poprawić jakość uzyskanego szkieletu i zwiększyć skuteczność detekcji minucji, zastosowano dodatkowe operacje przetwarzania wstępnego i postprocessingowego, takie jak filtracja, poprawa kontrastu czy łączenie przerwanych linii grzbietów. Następnie, na podstawie uzyskanego szkieletu, wykryto dwa typy minucji:

- Zakończenia grzbietów (ridge endings),
- Rozwidlenia grzbietów (bifurcations).

Porównanie algorytmów K3M i morfologicznego przeprowadzono pod kątem ich skuteczności w tworzeniu spójnego i poprawnego szkieletu, umożliwiającego wiarygodną ekstrakcję tych samych minucji z danego odcisku palca. Analiza uwzględniała między innymi jakość zachowania topologii linii papilarnych, odporność na zakłócenia oraz zdolność do poprawnego odwzorowania zakończeń i rozwidleń grzbietów.

Dane, na których testowano algorytmy pochodziły ze zbioru, który utworzyliśmy podczas zajęć laboratoryjnych przy użyciu skanera odcisków palców o nazwie *ZKFinger 9.0*. Zbiór ten zawiera 50 odcisków palców - po 5 odcisków na każdy unikalny palec.

2 Opis działania skryptu.

Szkieletyzacja morfologiczna – opis algorytmu

W projekcie zastosowano własną implementację szkieletyzacji morfologicznej, zgodną z podejściem omawianym na wykładach. Cały pipeline przetwarzania znajduje się w funkcji `morphological_skeleton_improved`. Proces przebiega w kilku głównych krokach:

1. Wczytanie obrazu w skali szarości:

Obraz źródłowy jest wczytywany jako obraz w odcieniach szarości (`cv2.IMREAD_GRAYSCALE`).

2. Zastosowanie CLAHE:

W celu poprawy kontrastu zastosowano adaptacyjną histogramową normalizację kontrastu (CLAHE – Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization), która działa lokalnie na małych obszarach obrazu. Pomaga to uwydatnić drobne struktury, które mogłyby zostać utracone podczas progowania.

3. Filtracja medianowa:

Obraz zostaje wygładzony przy pomocy medianowego filtra (`cv2.medianBlur`), co pozwala zredukować szumy impulsowe bez nadmiernego rozmycia krawędzi.

4. Binarizacja z metodą Otsu:

Użyto automatycznego progowania (metoda Otsu) z inwersją kolorów, aby obszary zainteresowania były białe (255), a tło czarne (0). Dalsze operacje morfologiczne i szkieletyzacja wymagają obrazu binarnego.

5. Operacja otwarcia morfologicznego:

Usuwane są drobne artefakty i pojedyncze piksele za pomocą operacji **opening**, czyli erozji po której następuje dylacja. Dzięki temu usuwane są przypadkowe szumy bez zniekształcenia głównych struktur.

6. Szkieletyzacja morfologiczna:

Wykonywana jest iteracyjna szkieletyzacja morfologiczna:

- W każdej iteracji obraz jest erodowany.
- Różnica pomiędzy obrazem erodowanym a jego otwarciem jest dodawana do wyniku (szkieletu).
- Proces kończy się, gdy obraz erodowany jest całkowicie czarny.

Wynikiem jest cienki, 1-pikselowy szkielet zachowujący kształt struktur.

7. Łączenie końców szkieletów:

Funkcja `connect_endpoints` identyfikuje końce linii w szkielecie (piksele z dokładnie jednym sąsiadem). Dla każdej pary końców, które są wystarczająco blisko siebie (poniżej zadanej odległości) i tworzą prawie poziomy kąt (bliski 0° lub 180°), rysowana jest linia łącząca je. Dzięki temu naprawiane są drobne przerwy w szkieletach.

8. Ponowna szkieletyzacja:

Po dodaniu nowych połączeń między końcami szkielet może zawierać linie o grubości większej niż jeden piksel. Dlatego przeprowadzana jest ponowna szkieletyzacja na zaktualizowanym obrazie, aby ponownie uzyskać szkielet 1-pikselowy.

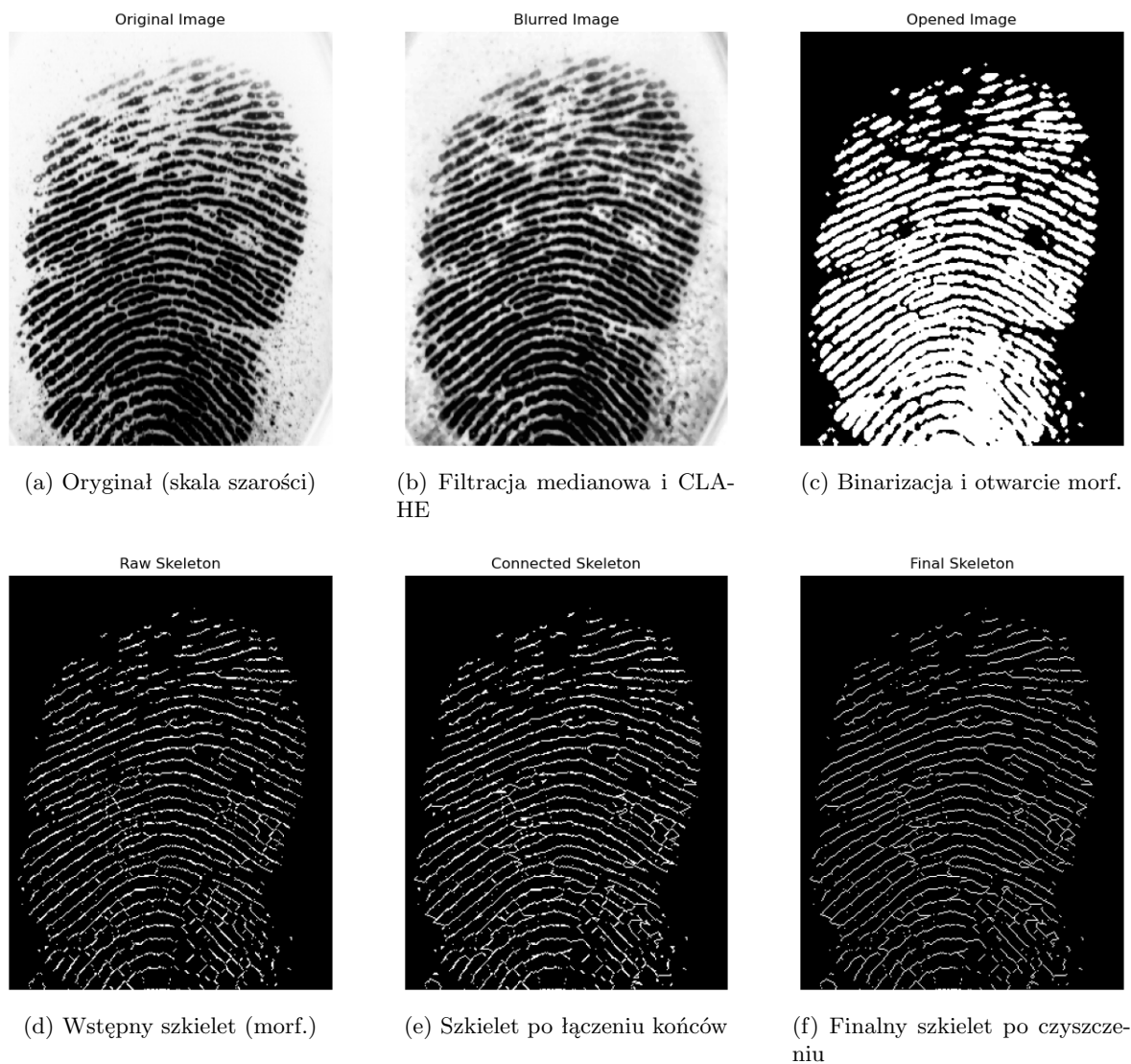
9. Ostateczne przekształcenie:

Na końcu obraz szkieletu jest dodatkowo binarizowany i przekształcany na postać binarną typu `np.uint8`, gdzie piksele tła mają wartość 0, a szkieletu – 255.

Tak przygotowany algorytm łączy podejście morfologiczne z heurystykami postprocessingu (łączenie końców) i umożliwia uzyskanie wyraźnych, ciągłych szkieletów o dobrej reprezentacji struktur w obrazie binarnym.

Kolejne etapy przetwarzania obrazu odcisku palca przy wykorzystaniu szkieletyzacji morfologicznej

Poniżej przedstawiono kolejne kroki modyfikacji zdjęć odcisków palców w procesie szkieletyzacji morfologicznej:



Rysunek 1: Kolejne etapy przetwarzania obrazu odcisku palca: od oryginału po finalny szkielek.

K3M – opis algorytmu

W projekcie zaimplementowano własną wersję algorytmu K3M (K3M thinning), który jest efektywną metodą ścieniania obrazów binarnych. Algorytm K3M charakteryzuje się lepszym zachowaniem struktur liniowych, co jest szczególnie istotne w przypadku linii papilarnych. Cały proces przetwarzania znajduje się w funkcji `improved_k3m_thinning`. Algorytm przebiega następująco:

1. Inicjalizacja:

Algorytm przyjmuje obraz binarny, gdzie obszary linii papilarnych mają wartość 1, a tło wartość 0. Tworzona jest kopia obrazu wejściowego do dalszego przetwarzania.

2. Definicja tablic wyszukiwania (lookup arrays):

Kluczowym elementem algorytmu K3M są tablice wyszukiwania (A0, A1, A2, A3, A4, A5, A1pix), zawierające wartości wag sąsiedztwa, które określają, czy dany piksel powinien zostać usunięty w danej fazie algorytmu. Tablice te zostały zmodyfikowane w stosunku do oryginalnego algorytmu, aby lepiej zachować strukturę linii papilarnych.

3. Obliczanie wag sąsiedztwa:

Dla każdego piksela obliczana jest wartość wagi (weight) na podstawie jego sąsiedztwa 8-połączonego. Waga ta jest sumą wartości z matrycy N dla każdego sąsiada o wartości 1. Pozwala to na zakodowanie układu sąsiadów w pojedynczej wartości liczbowej, co umożliwia szybkie podejmowanie decyzji o usunięciu piksela.

4. Sprawdzanie łączności:

Funkcja `would_break_connectivity` bada, czy usunięcie danego piksela naruszyło by spójność topologiczną szkieletu. Wykorzystuje ona crossing number (CN) - liczbę przejść od 0 do 1 przy cyklicznym przejściu po sąsiedztwie piksela. Jeśli CN \neq 1, usunięcie piksela mogłoby przerwać połączenie lub utworzyć dziurę.

5. Iteracyjne ścienianie:

Algorytm działa iteracyjnie w kilku fazach:

- **Faza 0:** Oznaczanie pikseli brzegowych (border pixels) na podstawie ich wag sąsiedztwa i tablicy A0.
- **Fazy 1-5:** Sekwencyjne usuwanie pikseli brzegowych, których wagi pasują do wzorców zdefiniowanych w tablicach A1-A5, pod warunkiem że nie naruszy to łączności.
- Proces jest powtarzany dopóki zachodzą zmiany lub do osiągnięcia maksymalnej liczby iteracji (15).

6. Zachowanie punktów charakterystycznych:

Algorytm specjalnie dba o zachowanie punktów charakterystycznych takich jak zakończenia (punkty z jednym sąsiadem) i rozwidlenia (punkty z trzema lub więcej sąsiadami). Te punkty są oznaczane jako `endpoints_and_junctions` i nie są usuwane w procesie ścieniania.

7. Końcowa faza ścieniania:

Na końcu aplikowana jest dodatkowa faza ścieniania do szerokości jednego piksela, ale z pominięciem wcześniej zidentyfikowanych punktów charakterystycznych. Piksele, których waga nie znajduje się w tablicy A1pix, są usuwane, o ile nie narusza to łączności.

Po uzyskaniu wstępnego szkieletu, stosowane są dodatkowe operacje postprocessingu:

1. Naprawa przerwanych linii:

Funkcja `repair_broken_ridges` identyfikuje końcówki linii (punkty z jednym sąsiadem) i łączy te, które znajdują się w bliskiej odległości od siebie (nie większej niż zadany parametr `max_gap`). Połączenie jest tworzone tylko wtedy, gdy linia łącząca dwa punkty przechodzi głównie przez tło i nie przecina innych istniejących linii.

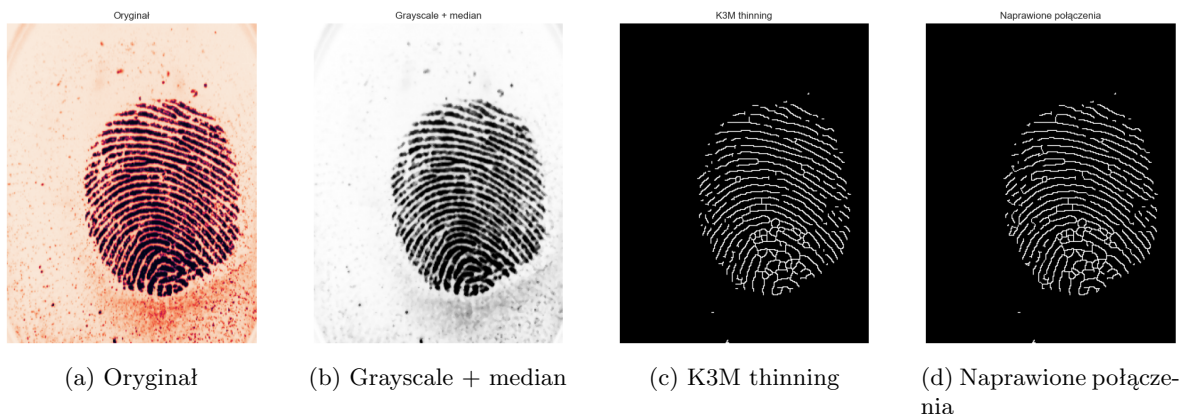
2. Wielokrotna naprawa:

Funkcja `reconnect_broken_ridges` stosuje naprawę przerw kilkakrotnie z różnymi parametrami maksymalnej odległości (3, 5, 7 pikseli), co pozwala zidentyfikować i naprawić zarówno małe, jak i większe przerwy w liniach papilarnych.

Algorytm K3M z przedstawionymi modyfikacjami jest szczególnie dobrze przystosowany do ścieniania obrazów odcisków palców, gdyż zachowuje topologię linii papilarnych oraz dba o punkty charakterystyczne, które są kluczowe w analizie biometrycznej.

Kolejne etapy przetwarzania obrazu odcisku palca przy wykorzystaniu K3M

Poniżej przedstawiono kolejne kroki modyfikacji zdjęć odcisków palców w procesie ścieniania z wykorzystaniem algorytmu K3M:



Rysunek 2: Kolejne etapy przetwarzania obrazu odcisku palca przy użyciu algorytmu K3M.

Proces przetwarzania obrazu z wykorzystaniem algorytmu K3M przebiega w następujących etapach:

1. Obraz oryginalny:

Wyjściowy obraz odcisku palca, zazwyczaj w formacie kolorowym lub w skali szarości, uzyskany bezpośrednio ze skanera *ZKFinger 9.0*. Widoczne są wyraźne linie papilarne wraz z tłem oraz potencjalnymi zanieczyszczeniami obrazu.

2. Konwersja do skali szarości i filtracja:

Obraz jest konwertowany do skali szarości, a następnie stosowany jest filtr medianowy o rozmiarze 3x3, który efektywnie usuwa szum typu "sól i pieprz" zachowując krawędzie. Jak widać na drugim obrazie w rysunku 2, struktura linii papilarnych zostaje zachowana, a drobne zakłócenia zostają wyeliminowane.

3. Binarizacja i K3M thinning:

Obraz jest binaryzowany przy użyciu prostego progowania (wartości ≥ 128 są traktowane jako linie papilarne). Następnie stosowana jest operacja otwarcia morfologicznego w celu usunięcia pojedynczych pikseli szumu. Na tak przygotowanym obrazie binarnym wykonywany jest algorytm K3M, którego efekt widoczny jest na trzecim obrazie. Linie papilarne zostają przekształcone w cienkie, jednopikselowe szkielety, idealnie reprezentujące topologię oryginalnego odcisku.

4. Naprawa połączeń:

W ostatnim etapie stosuje się funkcję `reconnect_broken_ridges`, która identyfikuje bliskie końcówki linii i łączy je, naprawiając w ten sposób przerwane linie papilarne. Proces ten jest kluczowy dla zachowania ciągłości linii, co ma bezpośrednie przełożenie na poprawność wykrywania minucji. Rezultat naprawy połączeń widoczny jest na czwartym obrazie, gdzie wybrane przerwane linie zostały połączone, tworząc bardziej spójny szkielet.

Wykrywanie minucji: zakończeń i bifurkacji

Po uzyskaniu szkieletu, przystąpiono do wykrywania charakterystycznych punktów (minucji), takich jak *zakończenia grzbietów* (ang. *ridge endings*) oraz *bifurkacje* (punkty rozgałęzienia).

Zakończenia linii (ridge endings): Zakończenia linii wykrywane były jako piksele w szkielecie, które mają dokładnie jednego sąsiada w sąsiedztwie 8-połączonym. Można to sformułować alternatywnie jako punkty, dla których tzw. **crossing number (CN)** wynosi dokładnie 1. Crossing number to liczba przejść od wartości 0 do 1 w uporządkowanej sekwencji sąsiadów wokół piksela, traktowana cyklicznie.

Bifurkacje: Bifurkacje są punktami, w których jedna linia rozdziela się na trzy. W detekcji przyjęto dwie główne cechy:

- crossing number = 3 (lub liczba sąsiadów = 3),
- każda z wychodzących gałęzi musi mieć co najmniej zadaną długość (np. 10 pikseli).

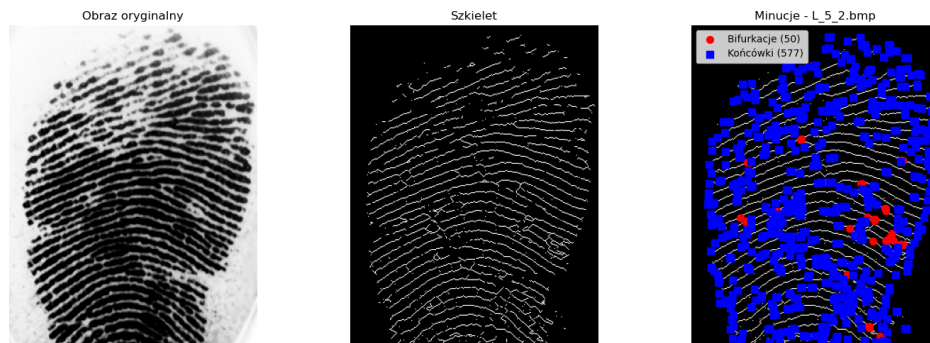
Dodatkowo, w wariancie zaawansowanym, dla punktów kandydackich obliczano kąty pomiędzy wektorami kierunkowymi trzech wychodzących gałęzi. Punkt uznawano za bifurkację tylko wtedy, gdy minimalny kąt pomiędzy dwiema dowolnymi gałęziami przekraczał zadany próg (np. 30°). Zapobiegało to fałszywym detekcjom na skutek szumu.

Wizualizacja: Wykryte bifurkacje i zakończenia były wizualizowane na obrazie szkieletowym:

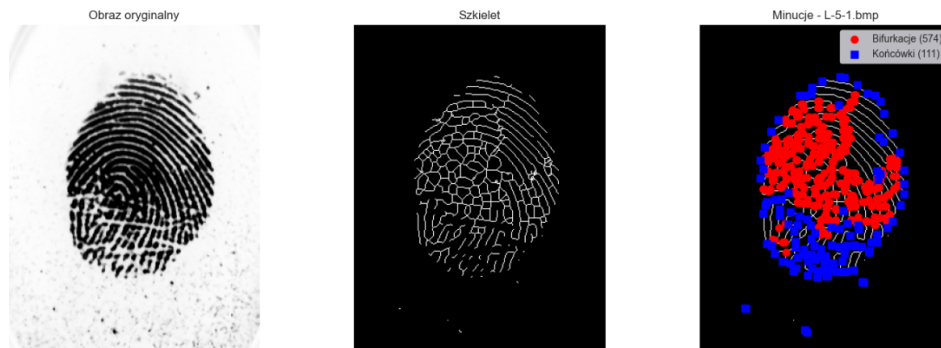
- zakończenia oznaczano niebieskimi kwadratami,
- bifurkacje oznaczano czerwonymi kółkami.

Takie podejście umożliwiło efektywne i selektywne wykrywanie istotnych cech geometrycznych linii papilarnych, niezbędnych do dalszej analizy biometrycznej.

Poniżej przedstawiono efekty oznaczenia bifurkacji i zakończeń dla zdjęcia obrobionego za pomocą szkieletyzacji morfologicznej.



Rysunek 3: Szkielelet z zaznaczonymi minucjami (zakończenia i rozwidlenia) dla obrazu modyfikowanego przez szkieletyzację morfologiczną.



Rysunek 4: Szkielet z zaznaczonymi minucjami (zakończenia i rozwidlenia) dla obrazu modyfikowanego przez K3M.

3 Eksperymenty

W ramach projektu przeprowadziliśmy szereg eksperymentów mających na celu porównanie skuteczności dwóch algorytmów ścieniania: algorytmu K3M oraz szkieletyzacji morfologicznej w kontekście biometrycznej analizy odcisków palców. Eksperymenty te miały pozwolić na ocenę wpływu metody ścieniania na jakość wykrywania minucji oraz zdolność systemu do prawidłowego rozpoznawania odcisków.

3.1 Metodologia

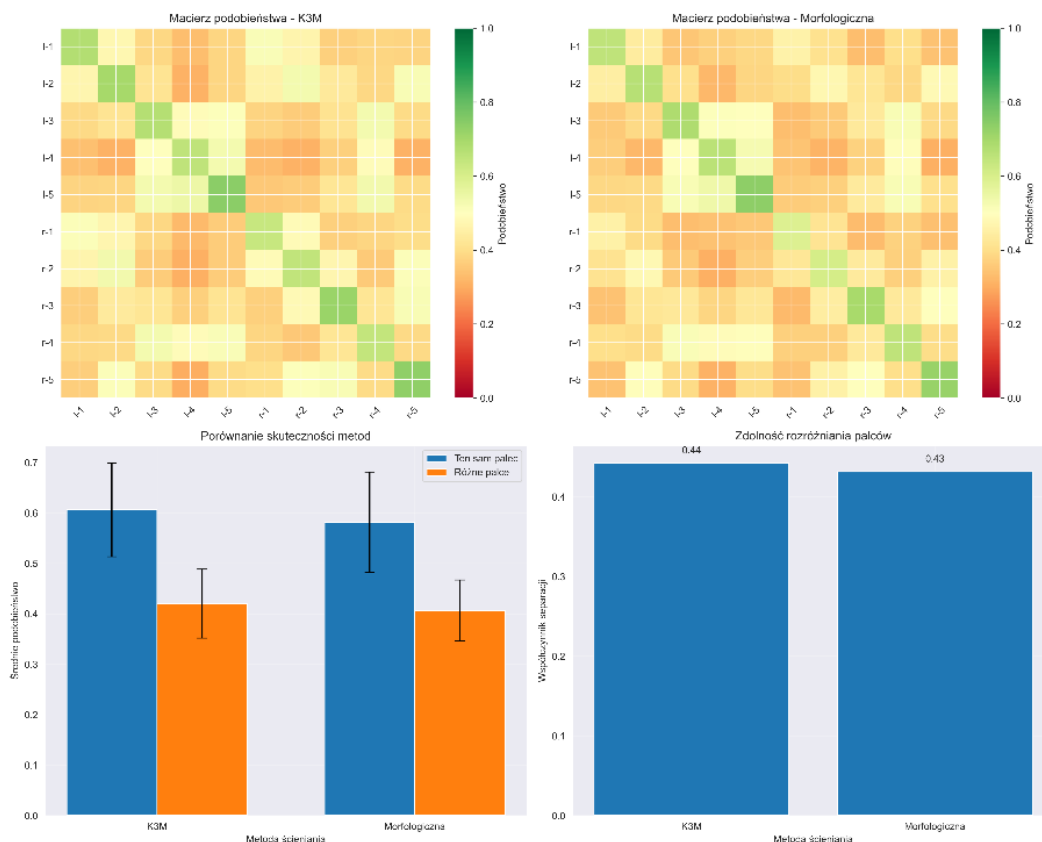
Zaimplementowany przez nas system porównywania odcisków palców składa się z następujących etapów:

1. Przetwarzanie wstępne (filtracja medianowa, binaryzacja)
2. Ścienianie (K3M lub morfologiczne)
3. Wykrywanie minucji (bifurkacje i zakończenia)
4. Ekstrakcja cech i porównywanie odcisków
5. Analiza statystyczna wyników

W eksperymentach wykorzystaliśmy zbiór 50 obrazów odcisków palców pochodzących z 10 różnych palców (po 5 obrazów na każdy palec). Dla każdego obrazu przeprowadziliśmy pełny proces przetwarzania z wykorzystaniem obu metod ścieniania, a następnie porównaliśmy ich skuteczność w kontekście rozpoznawania odcisków.

3.2 Analiza wykresów

3.2.1 Porównanie metod ścieniania



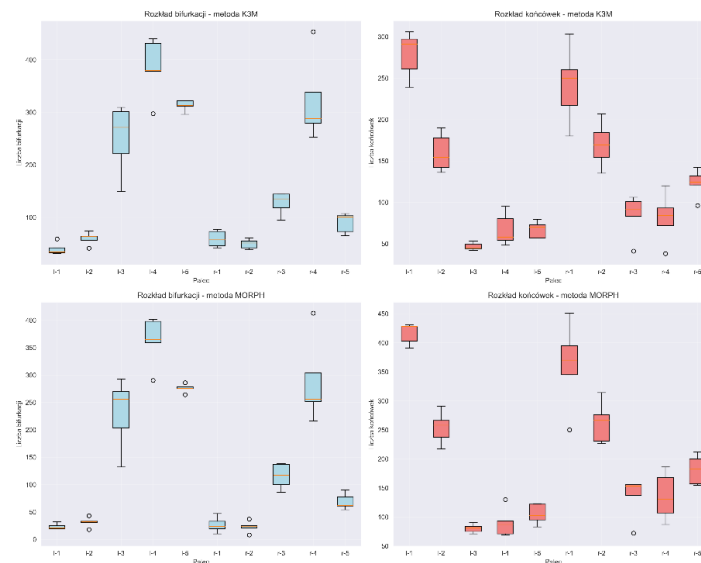
Rysunek 5: Porównanie skuteczności metod ścieniania K3M i morfologicznej

Na rysunku 5 przedstawiono kompleksowe porównanie obu metod ścieniania. W górnej części widoczne są macierze podobieństwa dla metody K3M (po lewej) oraz morfologicznej (po prawej). W macierzach tych wartości na przekątnej odpowiadają podobieństwu między różnymi obrazami tego samego palca, natomiast pozostałe komórki reprezentują podobieństwo między różnymi palcami.

W dolnej części przedstawiono dwa kluczowe wskaźniki: średnie podobieństwo oraz współczynnik separacji. Po lewej widzimy porównanie średniego podobieństwa dla odcisków tego samego palca (niebieskie słupki) oraz różnych palców (pomarańczowe słupki). Zarówno dla metody K3M, jak i morfologicznej, podobieństwo między odciskami tego samego palca jest wyraźnie wyższe niż między odciskami różnych palców, co jest pożądaną cechą systemu biometrycznego.

Po prawej widoczny jest współczynnik separacji, który określa zdolność metody do rozróżniania między odciskami tego samego i różnych palców. Dla obu metod współczynnik ten jest zbliżony (0,42 dla K3M i 0,43 dla metody morfologicznej), co sugeruje podobną skuteczność w kontekście identyfikacji.

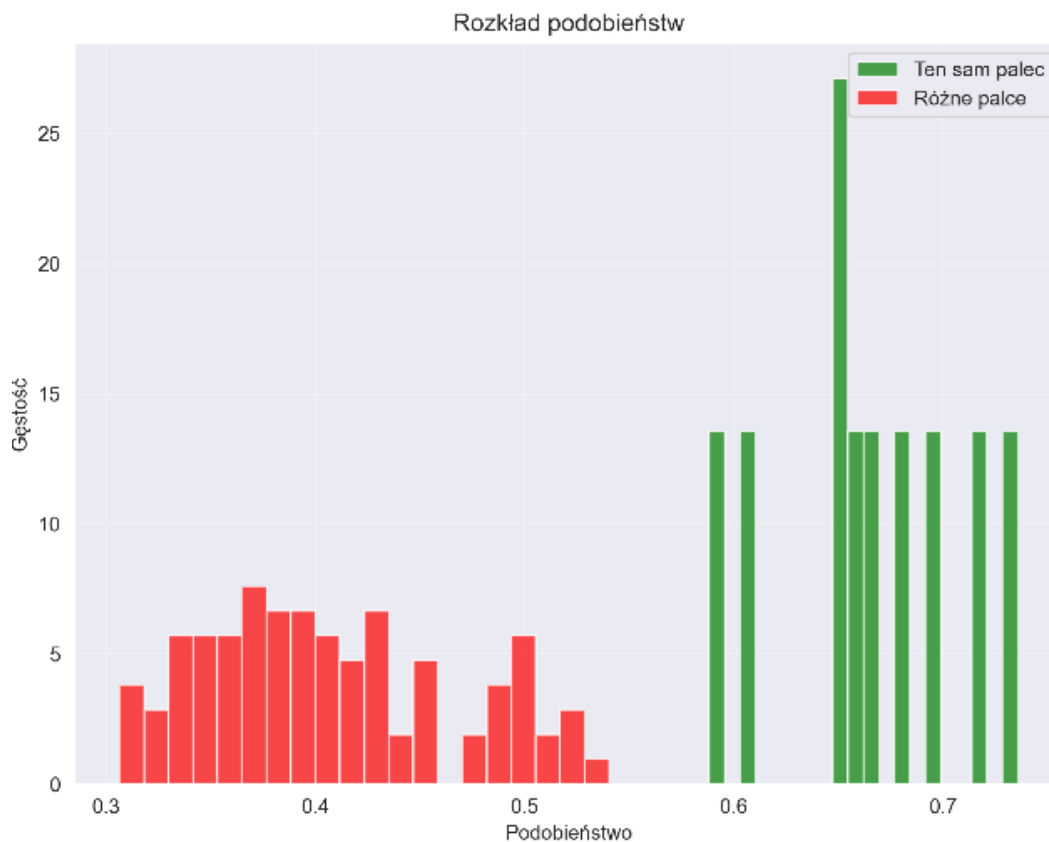
3.2.2 Rozkład podobieństw



Rysunek 6: Rozkład podobieństw dla odcisków tego samego palca i różnych palców

Rysunek 6 pokazuje rozkład podobieństw dla odcisków tego samego palca (zielone) i różnych palców (czerwone). Widoczna jest wyraźna separacja między tymi dwoma rozkładami, co potwierdza zdolność systemu do rozróżniania odcisków. Odciski tego samego palca wykazują znacznie wyższe wartości podobieństwa (głównie w przedziale 0,6-0,7) niż odciski różnych palców (głównie w przedziale 0,3-0,5). Ta separacja jest kluczowa dla skuteczności systemu biometrycznego, gdyż umożliwia ustalenie progu decyzyjnego z niskim poziomem błędów.

3.2.3 Rozkład minucji



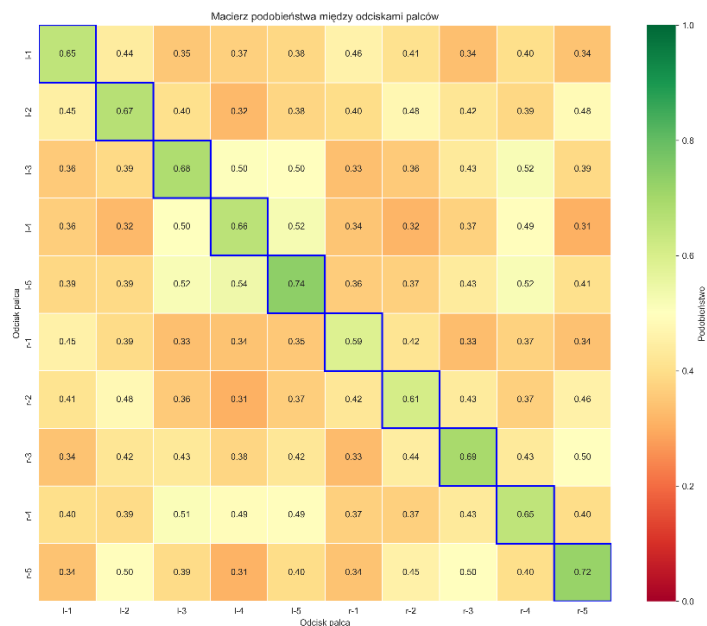
Rysunek 7: Rozkład minucji (bifurkacji i zakończeń) dla różnych palców przy zastosowaniu obu metod ścieniania

Na rysunku 7 przedstawiono rozkład minucji (bifurkacji i zakończeń) dla poszczególnych palców przy zastosowaniu obu metod ścieniania: K3M (górny wiersz) i morfologicznej (dolny wiersz). Możemy zauważyć, że:

- Metoda morfologiczna wykrywa generalnie więcej bifurkacji (dolny lewy wykres) niż metoda K3M (górny lewy wykres).
- Dla zakończeń (prawe wykresy) różnice między metodami są mniejsze, choć metoda morfologiczna również wykrywa ich nieco więcej.
- Różne palce charakteryzują się różnymi wzorcami ilościowymi minucji - niektóre mają znacznie więcej bifurkacji (np. palce l-3, r-2), a inne więcej zakończeń (np. palce l-1, r-5).

Te różnice w ilości wykrywanych minucji mogą wpływać na skuteczność rozpoznawania odcisków. Jednak, jak pokazały wcześniejsze wykresy, mimo tych różnic obie metody osiągają podobną skuteczność w kontekście identyfikacji.

3.2.4 Macierz podobieństwa



Rysunek 8: Macierz podobieństwa między odciskami palców

Rysunek 8 przedstawia szczegółową macierz podobieństwa między wszystkimi palcami w zbiorze danych. Każda komórka macierzy reprezentuje średnie podobieństwo między wszystkimi obrazami danej pary palców. Wartości na przekątnej (zaznaczone niebieskimi ramkami) odpowiadają podobieństwu między różnymi obrazami tego samego palca i oczekujemy, że będą one wyższe niż pozostałe wartości w tej samej kolumnie i wierszu.

Analiza tej macierzy pozwala wyciągnąć następujące wnioski:

- Najwyższe wartości podobieństwa występują na przekątnej, co potwierdza zdolność systemu do rozpoznawania tych samych palców.
- Niektóre palce wykazują wyraźnie wyższe podobieństwo wewnętrzne (np. l-5 z wartością 0.74, r-5 z wartością 0.72), co sugeruje, że ich obrazy są bardziej spójne i łatwiejsze do rozpoznania.
- Inne palce mają niższe podobieństwo wewnętrzne (np. l-1 z wartością 0.65, r-1 z wartością 0.59), co może sugerować większą zmienność w obrazach tych palców lub trudności w ich przetwarzaniu.
- Niektóre pary różnych palców wykazują stosunkowo wysokie podobieństwo (np. l-3 i l-4 z wartością 0.50), co może prowadzić do potencjalnych błędów identyfikacji.

3.3 Wnioski z eksperymentów

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów możemy sformułować następujące wnioski:

1. Obie metody ścieniania (K3M i morfologiczna) wykazują podobną skuteczność w kontekście rozpoznawania odcisków palców, z niewielką przewagą metody morfologicznej w zakresie współczynnika separacji.
2. Metoda morfologiczna wykrywa generalnie więcej minucji (zarówno bifurkacji, jak i zakończeń) niż metoda K3M, co może prowadzić do bardziej szczegółowego opisu odcisku, ale również potencjalnie większej podatności na szum.
3. System wykazuje dobrą zdolność do rozróżniania odcisków tego samego palca od odcisków różnych palców, co jest kluczowe dla jego praktycznego zastosowania.

4. Jakość rozpoznawania różni się w zależności od konkretnego palca, co sugeruje, że niektóre odciski są bardziej charakterystyczne i łatwiejsze do identyfikacji niż inne.
5. Współczynnik separacji na poziomie około 0,42-0,43 dla obu metod oznacza, że średnie podobieństwo dla odcisków tego samego palca jest o około 42-43% wyższe niż dla odcisków różnych palców, co jest dobrym wynikiem dla systemu biometrycznego.

Podsumowując, eksperymenty potwierdziły, że zarówno algorytm K3M, jak i szkieletyzacja morfologiczna stanowią skuteczne metody ścieniania w kontekście biometrycznej analizy odcisków palców. Wybór konkretnej metody może zależeć od specyficznych wymagań aplikacji, takich jak czas przetwarzania, odporność na szum czy szczegółowość analizy.