

## Ocena powtarzalności punktów kluczowych obrazów twarzy z zakresu światła widzialnego i podczerwieni

**Streszczenie.** Artykuł prezentuje wyniki badań mających na celu ocenę powtarzalności punktów kluczowych obrazów twarzy przy zmianie warunków występujących w procesie ich rejestracji. Powyższa analiza została przeprowadzona dla obrazów z zakresu światła widzialnego i podczerwieni.

**Abstract.** The paper presents the results of the research whose objective was to assess the repeatability of image keypoints under changing conditions of acquisition process. The analysis was conducted using visual and infrared images. (Assessment of the repeatability of keypoints detected in visible and infrared face images).

**Słowa kluczowe:** przetwarzanie obrazów, algorytm SIFT, punkty kluczowe obrazu, rozpoznawanie twarzy.

**Keywords:** image processing, SIFT, image keypoints, face recognition.

doi:10.12915/pe.2014.08.48

### Wstęp

Przedmiot identyfikacji tożsamości na podstawie obrazu twarzy przyciąga od kilkunastu lat znaczącą uwagę licznych ośrodków zajmujących się biometrią. Na przestrzeni ostatnich lat rozwinięto kilka podejść do problemu rozpoznawania twarzy. Współczesny kanon w tym zakresie stanowią tzw. metody holistyczne [1-2], traktujące obraz całościowo, tzn. jako macierz pikseli. Alternatywą dla tych metod są metody lokalne, wykrywające i opisujące za pomocą wektora cech jedynie wybrane punkty obrazu pochodzące z jego dekompozycji w przestrzeni skal. Najbardziej znanym przedstawicielem tej klasy metod jest algorytm SIFT (ang. *Scale Invariant Feature Transform*) [3], który zachowuje niezmienniczość opisu wykrytych punktów względem operacji obrotu, skalowania i przesunięcia obiektu na obrazie. Dzięki powyższym własnościom metoda ta znajduje zastosowanie w zadaniach dopasowania obrazów na potrzeby fotometrii oraz w szeroko rozumianym rozpoznawaniu.

Ogólną ideę algorytmu SIFT można zawrzeć w kilku krokach. Pierwszym z nich jest wykrycie ekstremów w obrazach, realizowane za pomocą przetwarzania opartego na Laplasjanie i filtracji Gaussa o różnych skalach. Wykorzystywane są jedynie wyselekcjonowane ekstrema, charakteryzujące się wymaganym kontrastem. Każdemu z tak wykrytych punktów kluczowych (ang. *keypoints*) przypisywana jest orientacja wyrażona kierunkiem dominującego gradientu, względem którego w kolejnym kroku formułuje się ilościowy opis otoczenia danego punktu. Opis ten, uzyskiwany na podstawie wartości gradientu obrazu, zawiera 128 wartości. Dzięki powyższej metodyce przetwarzania, każdy obraz jest reprezentowany przez zbiór deskryptorów odpowiadających jego lokalnym cechom [3].

Realizując zadanie rozpoznawania, powyższe deskryptory należy wyznaczyć dla wszystkich obrazów odniesienia znajdujących się w bazie danych oraz dla obrazu testowego. Klasa, której obrazy odniesienia charakteryzują się największą liczbą punktów kluczowych dopasowanych w sensie minimum pewnej odległości do punktów kluczowych obrazu testowego, jest wskazywana jako wynik rozpoznania.

Źródła literaturowe dotyczące zastosowań algorytmu SIFT skupiają się na problematyce przetwarzania obrazów z zakresu światła widzialnego, dla którego został on opracowany. Szereg pozycji literaturowych, opisujących rozpoznawanie twarzy z wykorzystaniem algorytmu SIFT w ramach klasycznych baz danych obrazowych z zakresu światła widzialnego, jak np. FERET, ORL, Yale wskazuje na istnienie bardzo małych błędów klasyfikacji, które w

większości przypadków nie przekraczają 10% [5]. W praktyce funkcjonowania rzeczywistego systemu identyfikacji tożsamości dystynktywność algorytmu SIFT może zostać jednak dramatycznie ograniczona. Powodem są możliwe zmiany warunków akwizycji obrazu, takich jak ustawianie obiektu względem kamery, wyrażane emocje, kierunek, rodzaj oraz intensywność padającego światła, próby charakteryzacji czy upływ czasu. Dotychczasowe badania autorów [6] wskazują, że wpływ części z nich na proces rozpoznania można ograniczyć dokonując rejestracji i przetwarzania obrazu w zakresie podczerwieni. Ze względu na powyższe uwarunkowania, celem niniejszej pracy jest wyjście na przeciw potrzebie obiektywnej oceny oddziaływania wybranych czynników na funkcjonowanie algorytmu SIFT przy przetwarzaniu obrazów zarówno z zakresu światła widzialnego jak i podczerwieni, która stałaby się podstawą do wypracowania zaleceń dotyczących tworzenia bazy danych odniesienia i warunków akwizycji obrazu testowego.

### Baza danych obrazowych i metodologia badań

W ramach podjętych prac zostało zestawione stanowisko do jednoczesnej akwizycji obrazów w obu zakresach spektralnych. Użyte kamery sterowane były z poziomu komputera z wykorzystaniem opracowanego w tym celu oprogramowania w środowisku MATLAB. Zgromadzona baza danych zawierała zestawy obrazów twarzy zarejestrowane przy kontrolowanych zmianach następujących czynników: kąta ustawienia kamer względem twarzy, kierunku padania światła z dodatkowego źródła, intensywności oświetlenia i rodzaju światła. Zestawienie liczby osób, których obrazy twarzy zostały użyte przy badaniu poszczególnych czynników zawiera tabela 1.

Tabela 1. Charakterystyka zgromadzonej bazy danych

badany czynnik	liczba osób	uwagi
kąt ustawienia kamer względem twarzy	59	Zakres: -50° – 50° Rozdzielczość: 5°
kąt padania światła	51	Zakres: -90° – 90° Rozdzielczość: 30°
intensywność światła	31	Zakres: 80 lx – 200 lx Rozdzielczość: 20 lx
rodzaj światła	31	Żarówka żarowa, świetlówka kompaktowa, żarówka LED

Najbardziej pożądaną własnością algorytmu SIFT, warunkującą skuteczność rozpoznawania obiektów na

obrazach jest powtarzalność detekcji i opisu punktów kluczowych. Można ją określić jako zdolność do wykrywania i kojarzenia tych samych punktów obiektu na różnych jego obrazach. Zdolność powyższą można ocenić metodą polegającą na wyznaczeniu liczby tych punktów kluczowych pomiędzy obrazem odniesienia a obrazem testowym, które ze względu na małą odległość pomiędzy opisującymi je deskryptorami można uważać za dopasowane. Celem uzyskania możliwości dokonywania porównań, zasadne jest posługiwanie się procentem punktów poprawnie wykrytych i skojarzonych jednocześnie na dwu obrazach. Im wyższa wartość takiego wskaźnika, tym więcej punktów może być potencjalnie dopasowanych w zadanych warunkach. W podejściu tym liczbę możliwych przypadków uzyskiwania małych odległości pomiędzy deskryptorami punktów występujących w różnych lokalizacjach badanego obiektu, czyli liczbę błędnych dopasowań, można zmniejszyć na drodze odrzucenia tych przypadków, których współrzędne pionowe lub poziome (zależnie od rodzaju niezmiennego kąta ustawienia kamery względem twarzy w procesie akwizycji obrazu – azymutalnego lub elewacyjnego) znacząco się różnią.

W przeprowadzonych eksperymentach wykorzystano pakiet *VLFeat* [7], zawierający zestaw procedur *mex* Matlab'a implementujących metodę SIFT z możliwością zmiany parametrów wejściowych. Do celów badawczych dostępna jest również procedura obliczeniowa opracowana przez autora algorytmu SIFT [8] jednak nie pozwala ona na wprowadzanie żadnych modyfikacji.

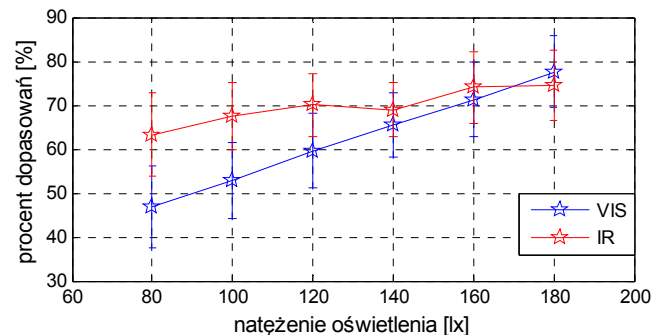
### Zmiany poziomu oświetlenia

Obraz z zakresu światła widzialnego powstaje poprzez detekcję promieniowania odbitego od obserwowanego obiektu. Dlatego też ważne jest zapewnienie odpowiedniego poziomu natężenia światła w trakcie rejestracji obrazu. Utrzymanie stałej intensywności oświetlenia może być jednak kłopotliwe, a przy świetle dziennym praktycznie niemożliwe. Według autora algorytmu SIFT jednorodne zmiany jasności i kontrastu obrazu nie wpływają znacząco na powtarzalność opisu punktów kluczowych metody dzięki zastosowanej normalizacji ich deskryptorów [3].

Alternatywą dla obrazu z zakresu światła widzialnego jest obraz zarejestrowany kamerą termowizyjną. Powstaje on bowiem nie tylko dzięki promieniowaniu odbitemu, ale przede wszystkim dzięki promieniowaniu emitowanemu przez obserwowany obiekt. Z tego względu zmiany warunków oświetleniowych, które mogą wystąpić w praktyce nie powinny wywoływać w zobrazowaniu w podczerwieni aż tak istotnych zmian, jak w obrazie z zakresu widzialnego. Oczywiście poziom zmian zależy od zakresu spektralnego promieniowania emitowanego przez używane źródło światła.

Wykres zamieszczony na rysunku 1 ilustruje zależność poziomu dopasowania punktów kluczowych obrazu twarzy zarejestrowanych w obu wspomnianych zakresach spektralnych od natężenia światła w trakcie rejestracji obrazów testowych. Akwizycja obrazów odniesienia została przeprowadzona przy natężeniu oświetlenia na poziomie 200 lx. Można zauważyć, że zmiana poziomu oświetlenia ma znaczący wpływ na powtarzalność punktów kluczowych obrazu z zakresu światła widzialnego – im większa różnica poziomów oświetlenia w procesie rejestracji obrazu odniesienia i obrazu testowego, tym mniejszy poziom dopasowania ich punktów kluczowych. Przetwarzanie obrazów zarejestrowanych kamerą termowizyjną wykazuje wyraźnie mniejszą zależność poziomu dopasowania punktów kluczowych od zmiany rozpatrywanego czynnika. Niemniej jednak występuje zauważalna tendencja

spadkowa w powtarzalności punktów kluczowych wykrytych na obrazach z zakresu podczerwieni przy wzroście różnicy poziomu zewnętrznego oświetlenia występującego w trakcie procesu ich akwizycji. Fakt ten może świadczyć o wpływie promieniowania emitowanego przez zastosowaną żarówkę żarową na zobrazowanie w podczerwieni. Warto również zauważyć, że w przypadku niewielkiej zmiany natężenia światła w trakcie rejestracji obrazu odniesienia i obrazu testowego stopień dopasowania punktów kluczowych obrazów z zakresu światła widzialnego może być wyższy niż obrazów z zakresu podczerwieni.



Rys. 1. Wykres powtarzalności punktów kluczowych obrazów z zakresu światła widzialnego (VIS) i podczerwieni (IR) w zależności od natężenia światła w procesie akwizycji obrazu testowego

Na zamieszczonych w niniejszej pracy wykresach, oprócz wartości średnich poziomu dopasowania punktów kluczowych obrazu odniesienia i obrazu testowego, wyznaczonych dla wszystkich osób w bazie danych, zaznaczone są również odchylenia standardowe pokazujące rozrzut otrzymanych wyników. Poszczególne wartości odchyłeń są dość duże, ale wynika to ze specyfiki obiektów badań. Na poziom dopasowania punktów kluczowych w wielu przypadkach mają wpływ cechy osobnicze. Ponadto ludzka twarz jest obiektem zmiennym i nawet niewielka niezamierzona zmiana mimiki może znacząco wpłynąć na zarejestrowany obraz.

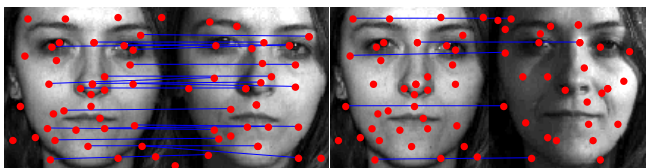
### Zmiany kierunku padania światła

Zmiana kierunku padania światła powoduje niejednorodne zmiany w oświetleniu obserwowanego obiektu, co ma wyraźny wpływ na jego obraz zarejestrowany kamerą pracującą w zakresie światła widzialnego. Algorytm SIFT bazujący na jasności pikseli przetwarzanego obrazu jest wrażliwy na tego typu zmiany. W związku z powyższym można się spodziewać, że zmiana kąta padania światła będzie skutkować zmniejszeniem powtarzalności punktów kluczowych dla obrazów z zakresu promieniowania widzialnego. W przypadku zastosowania kamery termowizyjnej zmiana ustawienia źródła światła względem obiektu powinna mieć znacznie mniejszy wpływ na zarejestrowany obraz.

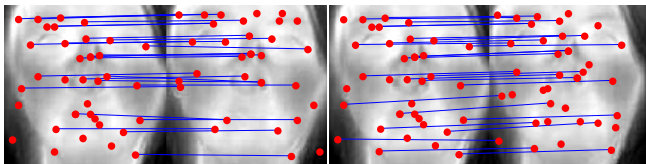
Na rysunku 2 przedstawiono przykłady dopasowań punktów kluczowych obrazów odniesienia, których akwizycji dokonano przy frontalnym kierunku padania światła, i obrazów testowych zarejestrowanych dla różnych kątów padania światła. Analizując rysunki 2a i 2b można zauważyć, że dla obrazów z zakresu promieniowania widzialnego zwiększenie kąta padania światła względem kierunku oświetlenia twarzy przy rejestracji obrazu odniesienia skutkuje spadkiem powtarzalności punktów kluczowych wykrytych na obrazach. Natomiast zależność ta nie występuje przy przetwarzaniu obrazów z zakresu podczerwieni. Stopień dopasowania punktów kluczowych obrazu odniesienia i obrazów testowych zarejestrowanych kamerą termowizyjną przy kącie padania światła równym

30° (rys. 2c) oraz 60° (rys. 2d) dla przedstawionego zestawu obrazów twarzy jest na jednakowym poziomie.

a) procent dopasowań: 49 %    b) procent dopasowań: 13 %

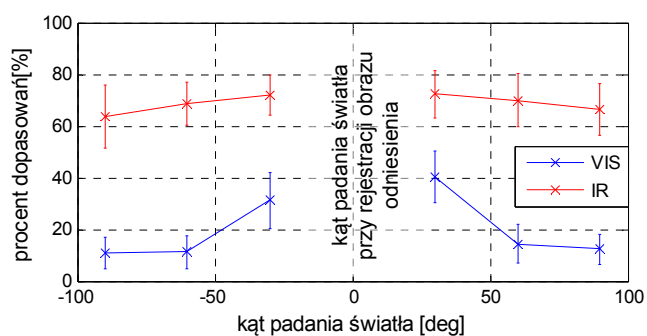


c) procent dopasowań: 70 %    d) procent dopasowań: 70 %



Rys. 2. Ilustracja wykrytych oraz dopasowanych punktów kluczowych obrazów odniesienia i obrazów zarejestrowanych dla kąta padania światła wynoszącego 30° (a, c) i 60° (b, d) dla przypadku akwizycji danych za pomocą kamery z zakresu światła widzialnego (a, b) i podczerwieni (c, d)

Przedstawiony powyżej przykład może mieć charakter osobniczy. Zdecydowanie bardziej obiektywne wyniki, wyznaczone na podstawie obrazów twarzy 51 osób, przedstawione zostały w formie wykresu na rysunku 3. Niewątpliwie w przypadku obrazów z zakresu promieniowania widzialnego zmiana kąta padania światła podczas rejestracji obrazu twarzy znacząco wpływa na powtarzalność punktów kluczowych wykrytych przez algorytm SIFT. Warto zaznaczyć, że dopasowanie na poziomie 10% z wysokim prawdopodobieństwem może wystąpić dla przypadkowych obrazów dwóch różnych osób. Zdecydowanie większą powtarzalność punktów kluczowych przy zmianie kierunku padania światła wykazuje obraz zarejestrowany kamerą termowizyjną. Niemniej jednak, poziom dopasowania punktów kluczowych obrazów z zakresu podczerwieni również zależy od kierunku padania światła w trakcie procesu akwizycji. Uzyskane wyniki potwierdzają, że zobrazowanie termiczne nie jest całkowicie niezależne od wykorzystywanego dodatkowego źródła światła, którym była, podobnie jak w przypadku badania wpływu zmian natężenia światła, żarówka żarowa.



Rys. 3. Wykres powtarzalności punktów kluczowych obrazów z zakresu światła widzialnego (VIS) i podczerwieni (IR) w zależności od kierunku padania światła w procesie akwizycji obrazu testowego

### Zmiany rodzaju źródła światła

Różne źródła światła mogą emitować promieniowanie w różnym zakresie spektralnym. W związku z tym uzasadnione jest zbadanie powtarzalności punktów kluczowych obrazów przy zmianie rodzaju źródła oświetlenia wykorzystywanego w procesie ich rejestracji. Rodzaj światła oświetlającego obiekt podczas akwizycji jego obrazu może mieć wpływ na jego obraz

zarejestrowany zarówno kamerą tradycyjną jak i termowizyjną. Będzie to zależać od zakresu spektralnego promieniowania emitowanego przez dane źródło światła.

W związku z tym, że zmiany natężenia światła podczas akwizycji obrazów również wpływają na powtarzalność ich punktów kluczowych, przy zmianie źródła światła natężenie oświetlenia utrzymywane było na stałym poziomie kontrolowanym za pomocą luksonierza (typ LXP-1). Detekuje on promieniowanie z zakresu widzialnego [9]. Zatem z jego wskazań nie można wnioskować o natężeniu promieniowania o długości fali z zakresu od 7,5 do 13  $\mu\text{m}$  w jakim pracuje wykorzystywana kamera termowizyjna, które również może być emitowane przez badane źródła światła.

Tabela 2. Poziom dopasowania punktów kluczowych obrazu odniesienia i obrazu testowego przy zastosowaniu różnych źródeł światła w trakcie procesu akwizycji obrazów za pomocą kamery pracującej w zakresie promieniowania widzialnego

Źródło światła przy rejestracji obrazu odniesienia	Źródło światła przy rejestracji obrazu testowego		
	Źarówka żarowa	Świetlówka kompaktowa	Źarówka LED
Źarówka żarowa	–	64 %	41 %
Świetlówka kompaktowa	64 %	–	47 %
Źarówka LED	41 %	48 %	–

Tabela 3. Poziom dopasowania punktów kluczowych obrazu odniesienia i obrazu testowego przy zastosowaniu różnych źródeł światła w trakcie procesu akwizycji obrazów za pomocą kamery termowizyjnej

Źródło światła przy rejestracji obrazu odniesienia	Źródło światła przy rejestracji obrazu testowego		
	Źarówka żarowa	Świetlówka kompaktowa	Źarówka LED
Źarówka żarowa	–	62 %	50 %
Świetlówka kompaktowa	61 %	–	51 %
Źarówka LED	51 %	54 %	–

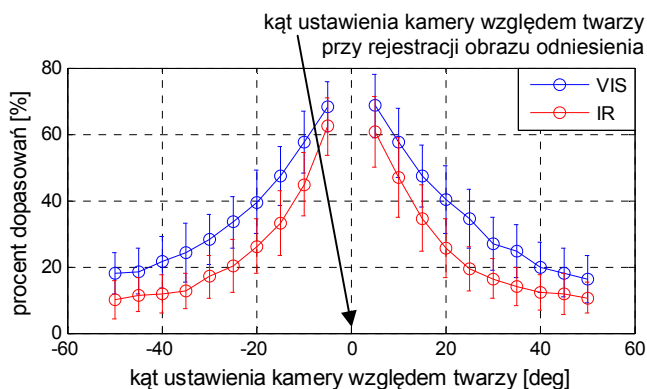
W tabelach 2 i 3 zestawiono wartości średnie poziomów dopasowania punktów kluczowych obrazów odniesienia i obrazów testowych w przypadku ich rejestracji przy zastosowaniu różnych źródeł światła. Można zaobserwować, że obrazy z zakresu światła widzialnego (tabela 2) wykazują podobną zależność jak obrazy zarejestrowane kamerą termowizyjną (tabela 3). Mianowicie powtarzalność punktów kluczowych obrazów, których akwizycję przeprowadzono przy oświetlaniu twarzy za pomocą żarówki żarowej i świetlówki kompaktowej, jest na względnie wysokim poziomie (ponad 60 % dopasowanych punktów). Jednak zastosowanie żarówki LED-owej w trakcie rejestracji jednego z przetwarzanych obrazów znacząco (o około 10 – 20 %) zmniejsza stopień dopasowania ich punktów kluczowych. Wynika to prawdopodobnie z faktu, że charakterystyka promieniowania żarówki LED różni się znacząco od charakterystyk dwóch pozostałych źródeł światła w zakresach w jakich pracują obie wykorzystywane kamery. Natomiast ewentualne różnice w charakterystykach promieniowania żarówki żarowej i świetlówki kompaktowej w mniejszym stopniu wpływają na powtarzalność punktów kluczowych zarejestrowanych obrazów twarzy.

### Zmiany kąta ustawiania kamery względem twarzy

Wysoce pożądaną cechą systemu automatycznej identyfikacji osób na postawie obrazu twarzy jest niewątpliwie bezinwazyjność jego działania, czyli brak aktywnego udziału osoby badanej w procesie pozyskania danych do analizy. Wiąże się to jednak z licznymi problemami, takimi jak zmiana kąta ustawienia kamery względem twarzy zarówno w pionie jak i poziomie, zmiana

mimiki oraz obrót twarzy na obrazie. Specyfika algorytmu SIFT zapewnia dużą jego powtarzalność w przypadku rotacji obiektu na obrazie, znacznie bardziej wrażliwy jest on na zmiany ustawienia obiektu względem urządzenia rejestrującego obraz [3]. W niniejszej pracy przedstawiono wpływ azymutalnego kąta ustawienia kamery względem twarzy na powtarzalność punktów kluczowych.

Wykres zamieszczony na rysunku 4 prezentuje wpływ zmian kąta ustawienia kamery względem twarzy na powtarzalność punktów kluczowych wyznaczanych przez algorytm SIFT. Widoczny jest systematyczny spadek poziomu dopasowania punktów kluczowych obrazu odniesienia i obrazu testowego przy wzroście azymutalnego kąta ustawienia kamery względem obserwowanego obiektu podczas akwizycji danych w przypadku przetwarzania obrazów z zakresu zarówno światła widzialnego jak i podczerwieni. Należało się tego spodziewać, gdyż znaczne zmiany kąta ustawienia kamery względem obiektu powodują istotne zniekształcenia w zarejestrowanym obrazie. Ponadto im większe jego zmiany, tym większa część twarzy, będącej obiektem trójwymiarowym, staje się niewidoczna dla kamery.



Rys. 4. Wykres powtarzalności punktów kluczowych obrazów z zakresu światła widzialnego (VIS) i podczerwieni (IR) w zależności od kąta ustawienia twarzy względem kamery w procesie akwizycji obrazu testowego

Z wykresu zamieszczonego na rysunku 4 wynika również, że przy zmianie kąta ustawienia kamery względem twarzy większą stabilnością punktów kluczowych wykrytych przez algorytm SIFT charakteryzuje się obraz z zakresu światła widzialnego. Należy zaznaczyć, że algorytm ten został skonstruowany na potrzeby przetwarzania właśnie tego typu obrazów. Ponadto warto zauważyć, że w tym przypadku akwizycja całego zestawu obrazów twarzy danej osoby (zarówno obrazu odniesienia jak i wszystkich obrazów testowych) została przeprowadzona przy stałych warunkach oświetleniowych.

### Podsumowanie

Z przeprowadzonych eksperymentów numerycznych wynika, że zmiany warunków akwizycji, takich jak natężenie i rodzaj oświetlenia, kierunek padania światła oraz kąt ustawienia kamery względem fotografowanego obiektu, w różnym stopniu wpływają na powtarzalność punktów kluczowych obrazów twarzy z zakresu światła widzialnego i podczerwieni. W przypadku zmian poziomu natężenia światła oraz kierunku jego padania, większą stabilnością punktów kluczowych charakteryzuje się obraz zarejestrowany kamerą termowizyjną. Można wnioskować, że jest on odporniejszy na zmiany warunków oświetleniowych zapewnianych przez wykorzystywane w procesie akwizycji obrazów źródło światła jakim jest żarówka żarowa. Ponadto można stwierdzić, że algorytm

SIFT w zastosowaniu do obrazów z zakresu światła widzialnego jest bardzo wrażliwy na niejednorodne zmiany oświetlenia występujące w procesie akwizycji. Wynika to zarówno ze sposobu lokalizacji punktów kluczowych jak i metody generacji ich opisu w postaci deskryptorów, które bazują na rozkładzie jasności pikseli obrazu.

Zmiana rodzaju źródła światła wpływa na powtarzalność punktów kluczowych obrazów twarzy zarejestrowanych w obu zakresach spektralnych. Jak już wspomniano, może to być wynikiem różnych charakterystyk spektralnych źródeł światła, które zostały wykorzystane w eksperymentach. Widoczny wpływ rodzaju źródła światła na powtarzalność punktów kluczowych obrazów zarejestrowanych kamerą termowizyjną może świadczyć o tym, że powszechnie używane lampy oświetleniowe emitują zarówno światło widzialne jak i promieniowanie z zakresu podczerwieni.

Badania przeprowadzone dla różnych wartości kąta ustawienia kamery względem twarzy oraz zmian natężenia światła wykazały, że przy zachowaniu stałych warunków oświetleniowych, to obraz z zakresu światła widzialnego charakteryzuje się większą stabilnością punktów kluczowych niż obraz termalny. Przyczyną tego może być fakt, że algorytm SIFT został opracowany i optymalizowany pod kątem przetwarzania obrazów z zakresu światła widzialnego. Możliwe, że dla obrazów zarejestrowanych kamerą termowizyjną pomocne byłyby pewne modyfikacje wykorzystywanej procedury obliczeniowej, np. w zakresie doboru wartości poszczególnych jej parametrów.

Przewaga obrazu termalnego nad obrazem z zakresu światła widzialnego polegająca na większej powtarzalności punktów kluczowych przy zmianach warunków oświetleniowych jest bardzo istotna z punktu widzenia praktycznych zastosowań systemów automatycznej identyfikacji tożsamości. Jednak możliwość zastosowania obrazu termalnego jako danych wejściowych procedury rozpoznawania twarzy wymaga jeszcze badań, m.in. w zakresie powtarzalności punktów kluczowych wraz z wpływem czasu, przy zmianach temperatury otoczenia czy stanu psychofizycznego identyfikowanej osoby.

### LITERATURA

- [1] Turk M. A., Pentland A. P., *Face recognition using eigenfaces*, Journal of Cognitive Neuroscience, 3 (1991), nr 1, 586-591.
- [2] Belhumeur P. N., Hespanha J. P., Kriegman D. J., *Eigenfaces vs. Fisherfaces: Recognition Using Class Specific Linear Projection*, IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence, 19 (1997), Nr 7.
- [3] Lowe D., *Distinctive image features from scale-invariant keypoints*, Int. Journal of Computer Vision, 60 (2004), Nr 2, 91-110.
- [4] Wang Y. Y., Li Z.-M., Wang L., Wang M., *A Scale Invariant Feature Transform Based Method*, Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing, 4 (2013), Nr 2, 73-89.
- [5] Pacan J., Jakubowski J., *Rozpoznawanie twarzy na podstawie cech lokalnych obrazów z zakresu światła widzialnego i podczerwieni*, Przegląd Elektrotechniczny, 89 (2013), Nr 9, 144-147.
- [6] Andrea Vedaldi i Brian Fulkerson: <http://www.vlfeat.org/overview/sift.html>
- [7] David Lowe: <http://www.cs.ubc.ca/~lowe/keypoints/>
- [9] Dokumentacja miernika natężenia oświetlenia typ LXP-1.

**Autorzy:** mgr inż. Jolanta Pacan, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: [jpacan@wat.edu.pl](mailto:jpacan@wat.edu.pl); dr hab. inż. Jacek Jakubowski, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: [jjakubowski@wat.edu.pl](mailto:jjakubowski@wat.edu.pl)