



POLSKO-JAPOŃSKA AKADEMIA TECHNIK KOMPUTEROWYCH

Polsko-Japońska Akademia Technik
Komputerowych

Praca doktorska

SYSTEM WYKRYWANIA I ROZPOZNAWANIA TWARZY NA OBRAZACH

Autor: mgr. inż. Michał Bukowski

Promotor: prof. dr hab. inż. Konrad Wojciechowski

Promotor pomocniczy: insp. dr hab. Iwona Klonowska

Warszawa, wrzesień 2021

Mojej żonie i dzieciom

Spis treści

Spis rysunków	1
Spis tabel	4
Spis publikacji	5
Streszczenie	6
1 Identyfikacja człowieka	12
1.1 Cel i zakres badań	14
2 Identyfikacja twarzoczaszki	16
2.1 Antropometria	16
2.2 Fotogrametria	17
2.2.1 Wprowadzenie	17
2.2.2 Fotogrametria – rozpoznawanie	18
2.3 Morfologia	19
2.4 Nakładanie obrazów	22
2.5 Rekonstrukcja twarzy	23
2.5.1 Metoda tradycyjna	24
2.5.2 Rekonstrukcja twarzy 3D przy wykorzystaniu grafiki komputerowej	25
2.6 Psychologiczne rozpoznawanie twarzy	27
2.7 Identyfikacja przy wykorzystaniu biometrii	28
2.7.1 Bezpieczeństwo systemów biometrycznych służących do rozpoznawania twarzy	30
2.7.2 Niezmienniki	32
2.8 Obserwacja przy wykorzystaniu kamer video	34
2.8.1 Rola monitoringu video w zwalczaniu, wykrywaniu i zapobieganiu przestępczości	35
2.8.2 Pozytywne i negatywne aspekty niejawnego nadzoru	36
2.9 Analiza obrazu	37
2.9.1 Rozdzielczość	37
2.9.2 Ulepszanie obrazu cyfrowego	38
3 Algorytmy rozpoznawania twarzy	40
3.1 Algorytmy rozpoznawania twarzy na obrazie 2D	43
3.1.1 Globalne liniowe techniki rozpoznawania twarzy	43
3.1.2 Globalne nieliniowe techniki rozpoznawania twarzy	49
3.1.3 Lokalne metody rozpoznawania twarzy	53
3.1.4 Metody hybrydowe	55
3.2 Algorytmy rozpoznawania twarzy na obrazie 3D	60
3.2.1 Omówienie modeli 3D twarzy	61
3.2.2 Metody lokalne	62
3.2.3 Metody globalne	63
4 Cechy twarzy	65
4.1 Punkty twarzy	65
4.2 Pomiary liniowe twarzy	71
4.3 Proporcje	73
5 Badanie nieruchomych obrazów	75
5.1 Przedmiot analizy	75
5.2 Pomiary antropometryczne	76
5.3 Przetwarzanie danych	77
5.3.1 Wykorzystanie danych	78

5.4	Wyniki	78
5.5	Omówienie.....	81
5.5.1	Punkty antropometryczne	82
5.5.2	Proporcje i kąty	83
5.5.3	Modelowanie danych	85
5.6	Podsumowanie	89
6	Niepewność pomiarów antropometrycznych.....	91
6.1	Błędy wynikające z lokalizacji punktów antropometrycznych	92
6.1.1	Materiał i metodologia	92
6.1.2	Wyniki	94
7	Błędy w proporcjach twarzy wynikające z fotografii płaskiej.....	99
7.1	Sprzęt wykorzystany do badań	99
7.2	Metodologia badań.....	100
7.3	Wyznaczenie odległości antropometrycznych w obrazie 3d.....	102
7.3.1	ICP – rotacja	104
7.3.2	Kąty Θ i Γ	107
7.3.3	Znormalizowane odległości antropometryczne 3D	109
7.4	Wyznaczenie odległości antropometrycznych w obrazie 2D.....	110
7.4.1	Znormalizowane odległości antropometryczne 2D	111
7.5	Zestawienie znormalizowanych odległości 3D i 2D.....	112
7.6	Wyznaczenie powierzchni umożliwiających przeliczenie odległości antropometrycznych z obrazu 2D na 3D i z 3D na 2 D	116
7.7	Współczynniki A do W dla równań 5 rzędu.....	167
7.8	Podsumowanie	170
8	System wykrywania i rozpoznawania twarzy	171
8.1	Założenia dla systemu do identyfikacji osób.....	171
8.2	Pozycja niezbędna do przeprowadzenia automatycznej identyfikacji	172
8.2.1	Bazy danych dostępne w Policji	172
8.2.2	Ustawienia	173
9	Wnioski końcowe i sugestie dotyczące dalszej pracy	175
9.1	Retrospektywny przegląd projektu	175
9.2	Przyszłe badania.....	178
9.3	Final worlds	180
	Bibliografia.....	181

Spis rysunków

Rysunek 1 Fotografia przedstawiająca cechy morfologiczne ust dwóch kobiet rasy białej.....	21
Rysunek 2 Iceman [www.iceman.it].....	25
Rysunek 3 Ötzi	26
Rysunek 4 Wizualizacja obszarów własnych[Deshpande2020]	44
Rysunek 5 Zrekonstruowane obrazy na podstawie 2D PCA (górne) i PCA (dolne), gdzie d oznacza liczbę wektorów własnych[Jian2004]	45
Rysunek 6 Punkty na twarzy	65
Rysunek 7 Pomiar liniowy	66
Rysunek 8 Zdjęcie twarzy podzielonej na trzy sekcje	73
Rysunek 9 Krzesło.....	76
Rysunek 10 Wybrane punkty antropometryczne oraz linie pomiarowe.....	77
Rysunek 11 Średnie odchylenie standardowe dla O1 do O5 dla proporcji BD/CD...81	
Rysunek 12 Uproszczony model wpływu kąta kamery na obserwowaną długość pomiaru twarzy.....	87
Rysunek 13 Źródła niepewności pomiarowych	92
Rysunek 14 Systemy akwizycji obrazu twarzy (markerowy i bezmarkerowy). System 10 kamer Bonita (strzałki czerwone) i 6 synchronizowanych sprzętowo kamer wideo (strzałki niebieskie).....	100
Rysunek 15 Przykładowa kamera Bonita i kamera wideo.....	100
Rysunek 16 Pierwsza ekspozycja – czapka basebolówka	101
Rysunek 17 Druga ekspozycja – okulary.....	101
Rysunek 18 Trzecia ekspozycja – bez nakrycia głowy	101
Rysunek 19 Czwarta ekspozycja – ekspresja na twarzy	101
Rysunek 20 Markery na nagraniu wideo	101
Rysunek 21 Markery w 3D/punkty w kolorze niebieskim – białe ich nazwy/	102
Rysunek 22 Punkty antropometryczne w formacie .c3d	103
Rysunek 23 Punkty antropometryczne w formacie .csv	103
Rysunek 24 Centroidy x, y i z dla każdej z chwil czasu.....	104
Rysunek 25 Punkty po przesunięciu względem centroidów.....	104
Rysunek 26 Macierze rotacji dla poszczególnych chwil czasu. Pierwsza macierz rotacji (trzy wiersze) dla chwili czasu $t=0$, druga (kolejne trzy wiersze) dla $t+1$, kolejna dla $t+2$	106
Rysunek 27 Wektory translacji dla poszczególnych chwil czasu. Pierwszy wektor translacji (pierwszy wiersz) dla chwili czasu $t=0$, drugi (kolejny wiersz) dla $t+1$, kolejny dla $t+2$	107
Rysunek 28 Wartości kątów Θ i Γ (w radianach) dla każdej chwili t (od $t=512$ do $t=539$) uzyskane z nagrania 20 fps – stąd zmiany kątów są nieznaczące.	109
Rysunek 29 Schemat wyznaczenia odległości 2D	110
Rysunek 30 Wykresy znormalizowanych odległości 3D i 2D w funkcji czasu.....	115
Rysunek 31 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej RH-MH	118
Rysunek 32 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej RH-NOSE1.....	119

Rysunek 33 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej RH-REYE2.....	120
Rysunek 34 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej MH-NOSE1.....	121
Rysunek 35 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej MH-LH.....	122
Rysunek 36 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LH-NOSE1.....	124
Rysunek 37 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LH-LEYE2.....	125
Rysunek 38 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej REYE2-NOSE1.....	126
Rysunek 39 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej REYE2-REYE1.....	127
Rysunek 40 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej REYE2-R1.....	128
Rysunek 41 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej REYE2-R2.....	130
Rysunek 42 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LEYE2-NOSE1.....	131
Rysunek 43 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LEYE2-LEYE1.....	132
Rysunek 44 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LEYE2-L1.....	133
Rysunek 45 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LEYE2-L2.....	134
Rysunek 46 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej NOSE1-REYE1.....	136
Rysunek 47 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej NOSE1-LEYE1.....	137
Rysunek 48 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej REYE1-LEYE1.....	138
Rysunek 49 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej REYE1-R1.....	139
Rysunek 50 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej REYE1-NOSE2.....	140
Rysunek 51 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LEYE1-L1.....	142
Rysunek 52 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LEYE1-NOSE2.....	143
Rysunek 53 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej R2-R1.....	144
Rysunek 54 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej R2-R3.....	145
Rysunek 55 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej R2-R4.....	146
Rysunek 56 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej R1-R3.....	148
Rysunek 57 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej R1-LIPSR.....	149

Rysunek 58 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej R1-NOSE2	150
Rysunek 59 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej L1-NOSE2	151
Rysunek 60 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej L1-LIPSL	152
Rysunek 61 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej L1-L3	153
Rysunek 62 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej L1-L2	154
Rysunek 63 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej NOSE2-LIPSTOP	156
Rysunek 64 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej R4-R3	157
Rysunek 65 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej R3-LIPSR	158
Rysunek 66 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LIPSR-LIPSTOP	159
Rysunek 67 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LIPSR-LIPSL	160
Rysunek 68 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LIPSR-LIPSBOT	162
Rysunek 69 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej L4-L3	163
Rysunek 70 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej L3-LIPSL	164
Rysunek 71 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LIPSL-LIPSTOP	165
Rysunek 72 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LIPSL-LIPSBOT	166
Rysunek 75 Powiększony obraz NOSE1-REYE1	177

Spis tabel

Tabela 1 Definicje punktów antropometrycznych.....	66
Tabela 2 Punkty wybrane przez Purkait'a	68
Tabela 3 Pomiary liniowe stosowane w niniejszym opracowaniu	71
Tabela 4 Średnie i względne odchylenia standardowe dla proporcji	78
Tabela 5 Średnie i względne odchylenia standardowe dla kątów	79
Tabela 6 Średnie odchylenie standardowe dla proporcji BD/CD dla Osoby O1 do O5 oraz wartość średnia z pięciu pomiarów	80
Tabela 7 Średnia i zakres współczynników zmienności (CV) pomiarów proporcji BD/CD, BC/CD, BC/BD, AB/AD, AB/BD, BD/AD, AD/CD dla jednego operatora	94
Tabela 8 Obrazy twarzy	95
Tabela 9 Przykładowe odległości dla punktów w 3D.....	110
Tabela 10 Przykładowe odległości dla punktów w 2D.....	112
Tabela 11 Współczynniki A do W dla wyznaczonych równań 5 rzędu	167

Spis publikacji

1. Przygotowany artykuł naukowy (Rozdział 3 niniejszej pracy) „Algorytmy rozpoznawania twarzy – przegląd” opublikowano w **nr 4(140)/2020 PRZEGLĄDU POLICYJNEGO (THE POLICE REVIEW) journal** (ISSN: 0867-5708, e-ISSN: 2719-9614), **wydawany przez Wyższą Szkołę Policji w Szczytnie (id30276)**
wersja polskojęzyczna
<https://thepolicereview.wspol.eu/resources/html/article/details?id=215272>
wersja anglojęzyczna
<https://thepolicereview.wspol.eu/resources/html/article/details?id=215273>
2. Przygotowany artykuł naukowy (Rozdział 7 niniejszej pracy) „Zależność proporcji antropometrycznych wyznaczanych na podstawie obrazu twarzy od przesłoneń i orientacji głowy przy której został zarejestrowany.”, przyjęty do publikacji w „**POLICJA. KWARTALNIK KADRY KIEROWNICZEJ POLICJI**” journal (ISSN: 1640-9280), **wydawany przez Wyższą Szkołę Policji w Szczytnie (id32511)**

Streszczenie

Antropometrię można wykorzystać w wielu sytuacjach, ale ściśle określonych. Dzięki antropometrii można porównać zdjęcia podejrzanego z potencjalnym sprawcą popełnionego przestępstwa zarejestrowanym na nagraniu wideo, a pozostawionym w materiałach sprawy śledczej jako dowodu. Antropometria nie ma takiego samego wskaźnika sukcesu w identyfikacji, jak DNA czy daktyloskopia opracowana na przełomie XIX i XX wieku. Jednak dowody śledcze w postaci odcisków lub śladów DNA nie zawsze pozostają na miejscu zbrodni. Czasami jedynym dostępnym dowodem przestępstwa jest właśnie nagranie wideo, zawierające wizerunek sprawcy.

W Rozdziale 5 omówionych jest wiele różnych technik, które służą do porównywania obrazów. W tym rozdziale badano wpływ rotacji bryły głowy na proporcje odległości pomiędzy wybranymi punktami antropometrycznymi twarzy oraz kąty pomiędzy odcinakami łączącymi punkty antropometryczne. Obrazy twarzy pięciu osób pozyskano dla różnych kątów *yaw*, *pitch*, orientacji bryły głowy ustawianych z krokiem około 10° w zakresie ruchomości szyi. Polecenia zmiany orientacji głowy w formule „proszę obrócić głowę o około 10° ” były wydawane przez osobę prowadzącą badanie. Wartości zrealizowanego obrotu były wyznaczone z systemu markerowego lub metodami wizji komputerowej. Jako orientację neutralną/początkową bryły głowy przyjęto taką, kiedy osoba patrzy na wprost wzdłuż poziomej osi obiektywu kamery, a linia oczu jest prostopadła do tego kierunku. Wykorzystano cztery punkty antropometryczne twarzy: prawą i lewą ektokantion, nasion i stomion. Obliczono proporcje odległości między tymi punktami oraz kąty tworzone przez linie łączące te same punkty. Wyniki pokazują spójną i przewidywalną zmienność dla pięciu badanych osób. W przypadku rotacji (*yaw*) największą zmienność obserwuje się, gdy poziome linie łączące punkty antropometryczne są połączone z odcinkami ektokanthion/stomion lub nasion/stomion. Mniejsze są różnice w proporcjach pionowych i ukośnych odcinków łączących te punkty. Wyniki z tych pomiarów empirycznych można by wykorzystać do opracowania fotogrametrycznego modelu twarzy, który po skalibrowaniu mógłby zostać wykorzystany do skorygowania pomiarów antropometrycznych pod kątem korekcji zniekształceń spowodowanych rotacją lub pochyleniem głowy. Celem opracowania takiego modelu byłoby wykorzystanie go do obliczenia współczynników korekcyjnych w celu przekształcenia obserwowanych proporcji i kątów z powrotem do wartości odpowiadających

neutralnej orientacji głowy. Skorygowane dane mogłyby następnie zostać wykorzystane na przykład do przeszukania bazy danych proporcji przy twarzy przesłoniętej np. maseczką.

Kolejne badania, to oszacowanie niepewności pomiarów wybranych proporcji twarzy spowodowanej różnym umieszczeniem punktów antropometrycznych przez operatorów analizujących zdjęcia, z uwzględnieniem wkładu niepewności wynikającego z różnych osób wykonujących te zadania. W pierwszej części analizy dokonano przeglądu błędów związanych z pomiarem proporcji twarzy w wyniku różnic w rozmieszczeniu punktów antropometrycznych. Przeprowadzono badania wewnętrzne i międzyoperatorskie w lokalizacji punktów antropometrycznych i, zgodnie z oczekiwaniami, średnia i zakres współczynników zmienności dla zbioru proporcji były większe w przypadku błędu wewnętrznego niż w przypadku błędu międzyoperatorskiego. W drugiej części badania dokonano przeglądu błędów pomiaru proporcji twarzy w wyniku procesu fotografowania. Najmniejszą zmienność w pomiarach twarzy zaobserwowano w serii zdjęć wykonanych przez jednego operatora. Wkład błędów związanych z umieszczeniem punktów antropometrycznych i fotografią został określony, w celu uzyskania ogólnej niepewności oszacowanej na 5%. Przy porównywaniu obrazów 2D w ten sposób należy wziąć pod uwagę oszacowanie niepewności.

Rozdział 7 pracy to analiza zgromadzonego w laboratorium Centrum Badawczo Rozwojowego (CBR) Polsko Japońskiej Akademii Technik Komputerowych (PJATK) materiału, związanego z zarejestrowaniem punktów antropometrycznych przy wykorzystaniu systemu kamer wideo i mocap. Na podstawie tego materiału (21 punktów antropometrycznych naniesionych na twarz osób badanych) wyznaczono 43 wymiary antropometryczne. Następnie wykonano ich rzut na płaszczyznę i wyznaczono ich wielkości w 2D. Wyznaczono ich błędy i określono powierzchnię, która w sposób matematyczny określa zależności pomiędzy unormowanymi wymiarami w 2D i 3D. Określono także średni błąd kwadratowy wymiarów 2D i 3D w zależności od kątów obrotu i pochylenia.

Ostatni rozdział, to omówienie możliwości wykorzystania wyników uzyskanych z systemu służącego go rozpoznawania i identyfikacji osób do celów procesowych i wykorzystania takiej analizy jako dowodu w postępowaniu karnym-sądowym.

Wnioski. Po przeprowadzeniu serii badań stwierdzono, że antropometria, stosowana jako porównawcza metoda identyfikacji, nie generuje wyników możliwych

do wykorzystania jako dowód w sądzie, natomiast umożliwia zgrubną identyfikację osób pozostających w zainteresowaniu służb. Ten wynik był zgodny z oczekiwaniami i zapewnia dobry start do dalszego rozwoju badań związanych z identyfikacją i rozpoznawaniem osób przy wykorzystaniu antropometrii.

Summary

Anthropometry can be used in many but well-defined situations. Thanks to anthropometry, we can compare the photos of the suspect with the potential perpetrator of the committed crime recorded on the video left in the materials of the investigative case as evidence. Anthropometry doesn't have the same success rate for identification as DNA or dactyloscopy developed in the late 19th and early 20th centuries. However, investigative evidence in the form of prints or DNA traces does not always remain at the crime scene. Sometimes the only evidence of a crime available is a video of the perpetrator.

Chapter 5 discusses the many different techniques that can be used to compare images. This chapter examines the effect of the rotation of the head body on the proportions of the distance between the selected anthropometric points of the face and the angles between the segments connecting the anthropometric points. Images of the faces of five people were obtained for various *yaw*, *pitch* angles, head body orientations, set with a step of about 10° in the range of neck mobility. The orders to change the orientation of the head in the formula "please turn the head about 10° " were issued by the person conducting the examination. The values of the realized turnover were determined from the marker system or by computer vision methods. The neutral / initial orientation of the head body is taken as when a person looks straight along the horizontal axis of the camera lens and the eye line is perpendicular to this direction. Four anthropometric points of the face were used: right and left ectocanthion, seed and stomion. The proportions of the distances between these points and the angles formed by the lines connecting the same points were calculated. The results show a consistent and predictable variation for the five subjects. In the case of rotation (*yaw*), the greatest variability is observed when the horizontal lines connecting the anthropometric points are connected with ectocanthion / stomion or seed / stomion segments. The differences in the proportions of vertical and diagonal segments connecting these points are smaller. The results of these empirical measurements could be used to develop a photogrammetric facial model that, after calibration, could be used to correct anthropometric measurements for the correction of distortions caused by rotation or tilting of the head. The purpose of developing such a model would be to use it to calculate correction factors to convert the observed proportions and angles back to values corresponding to the neutral orientation of the head. The corrected data could

then be used, for example, to search a proportions database with a mask obscured, for example, by a face mask.

Another research is the estimation of the uncertainty of measurements of selected facial proportions caused by different anthropometric point placement by operators analyzing the photos, taking into account the contribution of uncertainty resulting from different people performing these tasks. In the first part of the analysis, the errors related to the measurement of facial proportions as a result of differences in the distribution of anthropometric points were reviewed. Internal and inter-operator studies were carried out on the location of anthropometric points and, as expected, the mean and range of the coefficients of variation for the set of proportions were greater in the case of internal error than in the case of inter-operator error. In the second part of the study, errors in measuring facial proportions as a result of the shooting process were reviewed. The lowest variability in face measurements was observed in a series of photos taken by one operator. The contribution of errors related to the anthropometric point placement and the photography was determined in order to obtain an overall uncertainty of 5%. When comparing 2D images in this way, the uncertainty estimate must be taken into account.

Chapter 7 of the work is an analysis of the material collected in the laboratory of the Research and Development Center (CBR) of the Polish-Japanese Academy of Information Technology (PJATK) related to the registration of anthropometric points using a video camera system and mocap. On the basis of this material (21 anthropometric points placed on the face of the respondents), 43 anthropometric dimensions were determined. Then they were shifted onto a plane and their sizes were determined in 2D. Their errors were determined and the surface was determined, which mathematically determines the relationships between the standardized dimensions in 2D and 3D. The mean square error of 2D and 3D dimensions depending on the angles of rotation and tilt was also determined.

The last chapter discusses the possibility of using the results obtained from the system for the recognition and identification of persons for trial purposes. Using such an analysis as evidence in criminal and judicial proceedings.

Conclusions: After conducting a series of studies, it was found that anthropometry, used as a comparative identification method, does not generate results that can be used as evidence in court, but allows a rough identification of people of interest to the services. This result was in line with expectations and provides a good start for the

further development of research related to the identification and recognition of persons using anthropometry.

1 Identyfikacja człowieka

Identyfikacja osób jest niezbędna zarówno ze względów prawnych jak i medycznych. Identyfikacja wymaga porównania i dopasowania co najmniej jednej unikatowej cechy, czy to na podstawie dokumentacji dentystycznej, medycznej, profilu DNA, czy antropometrii [Ubelaker1989]. Proces identyfikacji osób opiera się na porównaniu nieznanego. Wszystkie metody porównywania DNA, odcisków palców, danych dentystycznych czy wektorów cech antropometrycznych polegają na pobieraniu danych od niezidentyfikowanej osoby i porównywaniu ich z tymi samymi danymi od znanej osoby (reidentyfikacja). Metody identyfikacji twarzy oparte na porównaniach obejmują antropometrię, morfologię i nakładanie. Rekonstrukcja twarzy jest jedną z metod identyfikacji, która nie wykorzystuje porównania w tradycyjnym sensie, ale jest stosowana jako metoda ostateczna, gdy nie ma innego możliwego sposobu identyfikacji czy reidentyfikacji danej osoby. Uwzględniając postępy nauki i doniesienia w czasopiśmie naukowych lub na konferencjach, analiza wykorzystująca wzorce DNA [Primorac1996] jest prawdopodobnie najbardziej rozpowszechnioną metodą identyfikacji osób [Randerson2003]. Służy również do pozytywnej identyfikacji np. szczątków ludzkich, przykładowo posłużyła do identyfikacji ofiar ataków terrorystycznych z 11 września 2001 r. [Vastag2002].

Używanie odcisków palców jako środka identyfikacji sięga początku lat 20 XIX wieku, kiedy Johann Purkinje [Wilson1989] stwierdził, że każdy ma inne odciski palców. Pierwszą osobą, która wykorzystwała odciski palców do identyfikacji, w tym przypadku przestępców, był Henry Faulds w 1880 roku. Zrobił to po tym, jak policja pokazała mu kilka zabezpieczonych odcisków palców [Wilson1989] znalezionych na ścianie po dokonaniu napadu. Faulds pobrał odciski palców podejrzanego, który był trzymany w areszcie, i stwierdził, że bardzo różniły się one od tych pobranych ze ściany. Kilka dni później aresztowano kolejnego podejrzanego, którego odciski palców pasowały do zabezpieczonych.

Dokumentacja dentystyczna jest skutecznym sposobem identyfikacji lub potwierdzenia identyfikacji nieznanego osoby, chociaż czasami może to być trudne z powodu braku dokumentacji wstępnej. Jednak nawet w przypadku braku takiej dokumentacji możliwe jest uzyskanie ogólnych informacji na temat płci, wieku i pochodzenia etnicznego. Odontolodzy sądowi pełnią dwie główne role: pomagają

potwierdzić identyfikację osoby oraz badają i porównują ślady ugryzień [Rudnick1984].

Najłatwiejszym sposobem identyfikacji jest rozpoznanie tożsamości osoby na podstawie obrazu twarzy. Każda metoda identyfikacji z omówionych powyżej ma swój cel w zależności od tego, jaki rodzaj cech jest dostępny. Niezależnie od tego, czy dostępne dowody pochodzą z nagrania wideo, czy od naocznego świadka, zastosowanie technik identyfikacji twarzy ma kluczowe znaczenie dla rozpoznania osoby.

Obszar systemów rozpoznawania twarzy ewaluje, tak jak każda inna dziedzina wiedzy. Na całym świecie powstało kilkaset firm specjalizujących się w systemach identyfikacji i rozpoznawania osób. Każda z tych firm wyprodukowała (stworzyła) swój własny, oparty na indywidualnej koncepcji wykrywania i rozpoznawania twarzy, system identyfikacji. Każdy taki system, jeśli producenci chcą go przebadać, poddawany jest szczegółowym testom w National Institute of Standards and Technology U.S. Department of Commerce (NIST). Na podstawie tych badań opracowywany jest raport „Ongoing Face Recognition Vendor Test” (FRVT) zawierający ocenę wytworzonych systemów. Raport tworzony jest przy wsparciu Dyrekcji ds. Nauki i Technologii Departamentu Bezpieczeństwa Wewnętrznego, Biura Zarządzania Tożsamością Biometryczną oraz Laboratorium Badawczego Biometrii NIST. Raporty związane z badaniami systemów publikowane są od czerwca 2017 r. W chwili obecnej ocenianych jest 350 algorytmów będących podstawą systemu. Wśród tych algorytmów nie ma żadnego z Polski (str. 18-23 raportu dostępnego pod adresem https://pages.nist.gov/frvt/reports/11/frvt_11_report.pdf). Nie oznacza to jednak, że w Polsce nie ma systemów identyfikacji i rozpoznawania osób. W 2018 r. konsorcjum Politechniki Warszawskiej, Naukowej i Akademickiej Sieci Komputerowej, Akademii Górniczo-Hutniczej, Polskiej Platformy Bezpieczeństwa Wewnętrznego i Policji opracowało system rozpoznawania i identyfikacji osób BioWiz. BioWiz to komputerowy system służący do identyfikacji biometrycznej twarzy i sylwetki sprawców przestępstw [Biowiz]. Jednak tego rozwiązania nie zgłoszono do badań NIST w ramach raportu FRVT.

1.1 Cel i zakres badań

Celem podjętych badań było określenie właściwości cech antropometrycznych służących do identyfikacji osób, a tym samym ustalenie, czy antropometria jest wystarczająco dokładna i spójna, aby można ją było wykorzystać jako narzędzie identyfikujące w przypadku obrazów twarzy 2D pozyskiwanych w warunkach niekontrolowanych. Istnieje zbyt wiele czynników, które sprawiają, że taka metoda identyfikacji jest subiektywna i nawet wtedy, gdy dostępne są wysokiej jakości zdjęcia wykonane w częściowo kontrolowanym otoczeniu, czynniki takie jak oświetlenie, pozycja głowy, pozycja kamery i doświadczenie operatora mogą przyczynić się do błędnej identyfikacji.

Wielu naukowców uważa, że DNA jest najbardziej niezawodnym sposobem identyfikacji osoby. Pozostaje jednak pytanie co się stanie, gdy nie można pozyskać DNA. DNA nie rozwiązuje wszystkich problemów związanych z identyfikacją – nie można go uzyskać np. z obrazu wideo czy z monitoringu. Dlatego naukowcy stale poszukują nowych metod identyfikacji. Wszystkie idee mają charakter spekulacyjny na początku procesu badawczego, ale nowych pomysłów nie można odrzucić. Muszą być ocenione i przetestowane. Metody takie jak biometria chodu, identyfikacja odcisków uszu i identyfikacja oparta na sygnale mowy są w fazie badań, a identyfikacja na podstawie odcisków obuwia, która ma teraz własną bazę danych, była kiedyś uważana za niejasną.

Potencjał do wykorzystania antropometrii jako metody identyfikacji wytworzyło szerokie zastosowanie kamer monitorujących oraz kamer w telefonach komórkowych. Niewiele jest miejsc, zwłaszcza w środowisku miejskim, w których nie można fotografować ani monitorować. Kamery odgrywają dominującą rolę w dzisiejszym społeczeństwie i antropometria, jeśli ma możliwość, korzysta na tym. Zastosowaniem antropometrii w identyfikacji osoby zainteresowani są obecnie przede wszystkim lekarze medycyny sądowej oraz przedstawiciele organów ścigania [News2004].

Cele niniejszej pracy były następujące [Evison2008]:

- a) Przeprowadzenie przeglądu literatury na temat:
 - różnych metod identyfikacji twarzy;
 - identyfikacji dokonanych przez naocznych świadków i systemy biometryczne;
 - systemów nadzoru wideo i poprawy jakości obrazu;

- b) Określenie niepewności, która może wystąpić w wyniku procesu pomiarowego;
- c) Ocena antropometrii jako metody identyfikacji twarzy oraz określenie stopnia dokładności, z jaką można dokonać identyfikacji osób na podstawie pomiarów antropometrycznych;
- d) Wyznaczenie równania powierzchni, które umożliwi przejście z wymiarów antropometrycznych pozyskanych z obrazu 3D na 2D i odwrotnie.

Powyższe cele zostały omówione i przeanalizowane w celu potwierdzenia lub obalenia następujących hipotez:

- 1. Możliwe jest, dla neutralnej orientacji głowy, określenie zależności pomiędzy wektorem cech biometrycznych wyznaczonym na podstawie współrzędnych 3D i analogicznym wektorem cech biometrycznych wyznaczonym na podstawie współrzędnych 2D punktów antropometrycznych.**
- 2. Możliwe jest określenie funkcyjnej zależności odległości punktów charakterystycznych pozyskanych z obrazu 2D od kątów *yaw* i *pitch* orientacji głowy i określenie na tej podstawie zakresów kątów orientacji głowy, dla których zmiana odległości pozyskanych z obrazu 2D mieści się w zadanym przedziale.**
- 3. Możliwe jest korygowanie wektora cech biometrycznych pozyskanych z obrazu 2D z wykorzystaniem przybliżonej informacji o orientacji głowy.**

2 Identyfikacja twarzoczaszki

Poniższy rozdział stanowi wprowadzenie do identyfikacji twarzoczaszki. Przedstawia różne metody identyfikacji twarzy, w tym antropometrię, morfologię, nakładanie i rekonstrukcję twarzy. Rozdział zawiera również informacje na temat identyfikacji dokonywanych przez naocznych świadków i systemy biometryczne, a kończy się ogólnym opisem systemów monitoringu wideo i technik poprawy obrazu.

2.1 Antropometria

Antropometria [gr. *ánthrōpos* ‘człowiek’, *metréō* ‘mierzę’] to metoda dokonywania pomiarów zarówno u ludzi żywych jak i odnalezionych szkieletów. Jej celem jest zbieranie danych pomiarowych z uwzględnieniem ściśle ustalonych punktów pomiarowych, tzw. punktów antropometrycznych. Zajmuje się pomiarami odcinków, obwodów, kątów między płaszczyznami lub liniami ciała lub szkieletu oraz czaszki. Z uzyskanych wyników pomiarów oblicza się wskaźniki antropometryczne. Wskaźniki te to stosunki liczbowe dwóch lub więcej pomiarów odległości między dwoma określonymi punktami antropologicznymi. Antropometria dzieli się na:

- kranioometrię – pomiary czaszki;
- kranioskopię – metody opisowe jakościowych cech czaszki;
- osteometrię – pomiary kości szkieletu;
- osteoskopię – opis jakościowy kości szkieletu;
- cefalometrię – pomiary czaszki wraz z tkankami;
- cefaloskopię – opis cech jakościowych głowy;
- somatometrię – pomiary ciała człowieka;
- somatoskopię – opis cech jakościowych ciała.

Rozwój antropometrii zapoczątkował, w końcu XVIII wieku, flamandzki anatom Adriaan van den Spiegel (lub Spieghel), który opracował koncepcję punktów antropometrycznych. Pogrupował on kształty ludzkiej czaszki poprzez zastosowanie czterech pomiarów:

- wysokości twarzy od czoła do brody;
- szerokości czaszki pomiędzy skroniami;
- wysokości czaszki od wierzchołka do potylicy;

- odległości pomiędzy wierzchołkiem czaszki i wyrostkiem sutkowatym kości skroniowej.

Powyższe pomiary do dzisiaj są używane w antropometrii kryminalistycznej, i służą określeniu płci oraz rasy człowieka. Piotr Camper również w XVIII wieku wprowadził kolejne pomiary dla czaszki poprzez wprowadzenie kątów orientacji głowy przy zastosowaniu linii biegnącej od środka otworu słuchowego do dolnego brzegu przegrody nosowej [Godycka1956]. Do standaryzacji technik i nomenklatury oraz kodyfikacji metod antropometrycznych w dużej mierze przyczynili się Pierr Paul Broca (francuski chirurg i antropolog) oraz Martin Rudolf (antropolog szwajcarski).

Francuski uczonec a zarazem policjant Alphonse Bertillon był twórcą antropometrii kryminalnej. Opracował system opisu człowieka przy wykorzystaniu 11 pomiarów parametrów ludzkiego ciała obejmujących wzrost, długość i szerokość głowy, rozpiętość ramion, wysokość siedzącą, długość lewego środkowego i małego palca, długość lewej stopy, długość lewego przedramienia, długość prawego ucha i szerokość policzków. Opis ten nazwano *opisem Bertilloniea* od nazwiska twórcy [Cole2002].

2.2 Fotogrametria

Fotogrametria używana jest do wykonywania precyzyjnych pomiarów przy wykorzystaniu wykonanych zdjęć. W przypadku, kiedy pomiarów antropometrycznych dokonuje się na podstawie zdjęć, a nie ciał czy twarzy osób, stosuje się *fotoantropometrię*. Mehmet Yaşar Işcan opisuje *fotoantropometrię* jako „analizę punktów antropometrycznych, wymiarów i kątów w celu ilościowego określenia cech i proporcji twarzy na podstawie zdjęcia” [Iscan1993].

2.2.1 Wprowadzenie

Fotogrametria wywodzi się z eksploracji geometrii, optyki, mechaniki i geofizyki dokonanych przez Leonarda da Vinci oraz z zarysu praw perspektywy Albrechta Dürera [Slama1980]. Obecnie wykorzystywana głównie do tworzenia map ze zdjęć lotniczych, fotogrametria ewoluowała od momentu powstania w 1715 roku, kiedy to Brook Taylora opublikował książkę o perspektywie liniowej, sto lat przed wynalezieniem fotografii [Sharp1951].

Ponieważ fotogrametria wymaga użycia obrazów dwuwymiarowych, istotne jest zrozumienie pojęcia perspektywy. Perspektywa to metoda przedstawiania obiektów

trójwymiarowych na płaszczyźnie dwuwymiarowej, dająca iluzję objętości i przestrzeni [Perspective2007]. Perspektywa linearna dominowała w malarstwie zachodnim od renesansu do końca XIX wieku. Efekt liniowej perspektywy na płaszczyźnie dwuwymiarowej polega na tym, że bliskie obiekty wydają się większe niż te dalej. Aby stworzyć tę iluzję na obrazie z perspektywą, linie równoległe w przestrzeni obiektu wydają się zbiegać w jednym punkcie [Mikhail2001]. Punkty te nazywane są punktami zbiegu i mogą być tak liczne, jak wiele jest zestawów równoległych linii w przestrzeni obiektu.

Oprócz mapowania, fotogrametria ma wiele innych zastosowań. Należą do nich: geologia, leśnictwo, rolnictwo, projektowanie i budownictwo, planowanie miast i autostrad, badania środowiskowe, eksploracja, wywiad wojskowy, medycyna i chirurgia oraz różne inne zastosowania, np. w krawiectwie, gdzie pomiary klienta pozwalają krawcom na szycie indywidualnie dopasowanych garniturów.

2.2.2 Fotogrametria – rozpoznawanie

Fotogrametrycy mogą wykorzystać swoją wiedzę i doświadczenie w fotogrametrii lotniczej i naziemnej. Lotnicza fotogrametria często jest stosowana do rozstrzygania sporów dotyczących gruntów, takich jak spór dotyczący prowadzonych rozległych prac na jednej nieruchomości, które np. wpłynęły na odwadnianie sąsiedniej. Naziemna fotogrametria wykorzystywana jest również np. do określenia odpowiedzialności za śmierć podczas wyścigu łodzi motorowych.

Często przy tego typu badaniach fotogrametrysta proszony jest o wykonanie ich analizy na podstawie zdjęcia przedstawiającego nieznaną scenę, które zostało zrobione nieznanym aparatem. Jak stwierdzono w piątym wydaniu Podręcznika Fotogrametrii [McGlone2004], w tego typu przypadkach „...głównym problemem jest odzyskanie parametrów wewnętrznych i zewnętrznych kamery”, podczas gdy w przypadkach, w których fotogrametria jest wykorzystywana do pomiarów lub pomiarów obiektów za pomocą znanej, metrycznej kamery, stosowane metody są takie same jak w przemysłowej i architektonicznej fotogrametrii bliskiego zasięgu.

Fotogrametria jest często wykorzystywana do analizy wypadków drogowych, poważnych katastrof czy miejsc zbrodni. W pewnych okolicznościach może to być przydatne narzędzie ułatwiające porównanie zdjęcia, np. osoby podejrzanej ze sprawcą obserwowanym na nagraniu, chociaż identyfikacja za pomocą tego środka nie może być stosowana we wszystkich przypadkach. Obrazy zarejestrowane kamerami

telewizji przemysłowej (CCTV) są często trudne do oceny, ponieważ większość obrazów jest niskiej jakości. Aby zapewnić maksymalną dokładność identyfikacji, porównywane zdjęcia powinny być wykonane pod tym samym kątem i z tego samego kierunku, i na tyle wyraźne, aby można było zlokalizować punkty antropometryczne twarzy [Vanezis1996]. Pomocne jest również porównanie zdjęć wykonanych w podobnych warunkach oświetleniowych i w podobnych odstępach czasu. Stwierdzono, że identyfikacje są mniej dokładne przy pomiarze np. tylko czterech rysów twarzy, dlatego korzystne jest porównanie tylu punktów, ile jest dostępnych na zdjęciu [Catterick1992].

Podczas porównywania zdjęć obrazy muszą być wystarczająco duże, aby umożliwić identyfikację punktów antropometrycznych. W przypadkach, w których konieczne jest powiększenie jednej lub obu fotografii, Glen Porter i Gregory Doran mierzyli rozstaw źrenic, aby zapewnić prawidłowe powiększenie [Porter2000]. W swoich badaniach wykonali trzy zdjęcia tej samej osoby, której wizerunek różnił się długością włosów i gęstością zarostu na twarzy. W celu weryfikacji dokonali pomiarów poziomej szerokości twarzy między końcami uszu. Wyniki ich badań pozwoliły stwierdzić, że istnieje duże prawdopodobieństwo, że zdjęcia te w istocie przedstawiają tę samą osobę.

Pomiary ze zdjęć odgrywają ważną rolę w analizie przydatności zdjęć jako materiału dowodowego. Pomiary fotograficzne służą do określenia wzrostu osoby ukazanej na obrazach z monitoringu wideo, a pobrane z twarzy, służą do bezpośredniej identyfikacji, rozpoznania [SWGIT2005]. Czynniki takie jak przyrost masy ciała, wyraz twarzy, wypadanie włosów i pozycja głowy mogą mieć wpływ na wyniki dokonanych pomiarów. Obecnie pomiary twarzy są częściej wykorzystane do negatywnej weryfikacji niż do pozytywnej. Jeśli wymiary twarzy dwóch osób są podobne, można stwierdzić, że obie osoby mogą być takie same, ale nie można stwierdzić, że istnieje pozytywne dopasowanie.

2.3 Morfologia

Morfologia jest definiowana jako forma i struktura obiektu i może być stosowana do wielu różnych zastosowań, w tym identyfikacji. Same cechy morfologiczne nie wystarczą do zidentyfikowania kogoś, ale zamiast tego mogą służyć do porównania co najmniej dwóch osób. Specyficzne cechy charakterystyczne dla jednostki będą

miały głęboki wpływ na wynik domniemanej identyfikacji tej jednostki [Shepherd2003]. Kiedy rejestruje się cechy morfologiczne osobnika, najpierw odnotowuje się jego wzrost, wagę i budowę ciała. Ważne jest również obserwowanie koloru i długości włosów oraz obecności owłosienia na twarzy lub innego owłosienia na ciele. Jeśli to możliwe, fotografowane są rasowe i etniczne cechy wyglądu twarzy, kolor skóry danej osoby oraz wszelkie unikalne cechy, takie jak tatuaże, blizny chirurgiczne, wrodzone deformacje, blizny lub znamiona plemienne, obrzezanie, pieprzyki, brodawki lub inne skazy skórne. Należy też zwrócić uwagę na noszony strój, a także biżuterię, ponieważ mogą one dostarczać informacji o płci, rasie, zawodzie lub statusie społecznym jednostki. Należy jednak pamiętać, że jest wielu mężczyzn, którzy ubierają się w odzież damską i odwrotnie – wiele kobiet nosi odzież męską, więc odzież może nie być sama w sobie cechą orientacyjną. Wiek osoby można określić w przybliżeniu na podstawie ogólnego wyglądu osoby. Z wiekiem obserwuje się bowiem utratę elastyczności skóry, koloru włosów oraz zmiany w stawach spowodowane artretyzmem.

Obecnie prowadzone są analizy morfologiczne wielu cech ludzkiego ciała, w tym wizerunków twarzy [Mardia1996], odcisków palców [Alessandrini2003], zębów [Kolltveit1998] i uszu [Swift2003]. Morfologia została również wykorzystana do określenia płci szczątków ludzkich na podstawie indywidualnych cech czaszki, takich jak otwór nosowy, grzbiet nadoczodołowy i wielkość policzków [Rogers2005]. W porównywaniu obrazów twarzy, cechy morfologiczne są często przeprowadzane jako dowód potwierdzający tożsamość, poprzez nakładanie klasek wideo oraz przy wykorzystaniu innych technik identyfikacji. Analiza morfologiczna może być szczególnie pomocna, gdy dana osoba w jakiś sposób zasłoniła twarz. W badaniu Manabu Yoshino i innych [Yoshino2002] podjęto próbę znalezienia wiarygodnej komputerowej metody porównawczej, która pomoże w identyfikacji osób z zamaskowaną twarzą. Wynikiem tego badania był system, który okazał się wystarczająco wiarygodny, aby zidentyfikować zamaskowane osoby i co równie ważne, autorzy wierzyli, że metoda i wyniki będą łatwe do zrozumienia dla innych.

Porównania morfologiczne można przeprowadzać na zdjęciach lub obrazach wideo osób będących w centrum zainteresowania jako sposób na poszukiwanie podobieństw, a także różnic pomiędzy nimi. Oświetlenie, kąt widzenia, rodzaje zastosowanych kamer i odległość od kamery mogą wpływać na wygląd osoby, a przez to utrudnić jego identyfikację. Porównanie morfologiczne powinno być, o ile to możliwe, częścią

każdego schematu identyfikacji twarzy, pomagając dostarczyć dodatkowych dowodów na poparcie lub obalenie identyfikacji. Przydatnymi cechami, które pomagają w identyfikacji są te, które występują tylko u niewielkiego odsetka populacji, na przykład silnie zaznaczone uszy lub dołek na brodzie. Identyfikowanie i odróżnianie znaków, takich jak brodawki, pieprzyki czy blizny są również szczególnie cenne w procesie identyfikacji.

Opis morfologiczny może znacznie przyczynić się do identyfikacji osób, jednak istnieją także wady eliminujące tego typu metody. Mehmet Yaşar İşcan zauważa, że emocje takie jak złość, strach, szczęście i zaskoczenie mogą znacząco zmienić rysy twarzy. Na morfologię wpływają również zmiany wynikające z choroby, starzenia się i narażenie na działania żywności [Donofrio2000].

Fotografie, które prezentuje Rysunek 1 pokazują, jak zróżnicowana może być cecha twarzy, taka jak usta. Przyglądając się tym zdjęciom można opisać kilka ich cech charakterystycznych, w tym wielkość górnej i dolnej wargi, głębokość rynienki i kształt wcięcia wargi górnej. Analizy morfologiczne mogą być bardzo subiektywne i może istnieć cienka granica między tym, co jedna osoba uznałaby za głęboką lub płytką rynnę w porównaniu z inną. Może to być nieco mniej subiektywne, jeśli dwie rysy twarzy są porównywane bezpośrednio, ale może stać się nieczytelne, gdy rysy twarzy są opisywane osobno.



Rysunek 1 Fotografia przedstawiająca cechy morfologiczne ust dwóch kobiet rasy białej

Po zakończeniu analizy twarzy, z udaną identyfikacją lub bez niej, należy sporządzić raport przedstawiający proces, a także wynik analizy. Wszelkie użyte materiały, takie jak obrazy, muszą być zawarte w raporcie, aby zapewnić możliwość weryfikacji tego, co zostało wykonane. W raporcie odnotowuje się wszelkie podobieństwa lub różnice, w tym wszelkie cechy odróżniające, które sprawiają, że obiekt wyróżnia się na tle innych osób. Ostateczny wniosek jest zwykle sformułowany

w kategoriach „zdecydowanie nie jest tą samą osobą”, „może być tą samą osobą” lub „prawdopodobnie jest tą samą osobą”. Należy również odnieść się do stanu i jakości materiału, umożliwiając czytelnikowi zorientowanie się czy dowody zostały zarejestrowane w złych warunkach, czy warunki zapewniały dobry materiał. Morfologia, w połączeniu z oprogramowaniem komputerowym, może również pomóc w tworzeniu wieloelementowych tablic poglądowych, co przekłada się na zmniejszenie liczby zdjęć wytypowanych do przejrzenia w celu identyfikacji celu.

2.4 Nakładanie obrazów

Techniki nakładania obrazów i wideo mogą być wykorzystywane do identyfikacji zarówno osób zmarłych, jak i żyjących, jednak częściej wykorzystywane są do identyfikacji osób zmarłych. W przypadku zmarłego system ten jest używany, gdy w danym momencie nie ma dostępu do dokumentacji medycznej lub dentystycznej. Można nałożyć na siebie czaszkę i fotografię oraz dwie fotografie. Po ustaleniu tożsamości osoby należy jednak zbadać DNA lub dokumentację dentystyczną, jeśli jest dostępna, w celu potwierdzenia tożsamości. W niektórych przypadkach nakładanie wideo na osoby zmarłe jest lepiej wykorzystywane do wykluczenia kogoś niż do pozytywnej identyfikacji, ponieważ z całą pewnością można stwierdzić, że czaszka i fotografia mogą nie należeć do tej samej osoby [Reddy1973]. Jeśli jednak wydają się podobne, można jedynie stwierdzić bez jednoznacznego dookreślenia, że mogą to być te same osoby.

Nakładanie obrazów wideo zostało zapoczątkowane i opublikowane przez R. Helmera i O. Grőnera w 1977 r. [Helmer2001]. Zaletą tej metody jest to, że obrazy można szybko porównywać i można je łatwo, nałożone, zobaczyć na ekranie [Ghosh2001]. Chociaż istnieją różne sposoby na skonfigurowanie niezbędnego sprzętu do przeprowadzenia nakładania wideo [Yoshino1997], zastosowana aparatura zwykle obejmuje jedną kamerę wideo i jeden monitor na pobranie wizerunku osoby lub pobranie zdjęcia, druga kamera wideo i monitor służą do uzyskania materiału (zdjęć) do porównania [Yoshino2000]. Kolejny element to jednostka miksująca (mikser), która umożliwia mieszanie dwóch obrazów oraz kolejny monitor służący do oglądania zmiksowanego obrazu. Nakładanie wideo jest szczególnie pomocne, jeśli ma na celu dopasowanie nagrania z monitoringu do zdjęcia znanej osoby, z uwagi na

fakt, że osoba pozostająca w zainteresowaniu często próbuje ukryć swój wygląd [Vanezis1996].

W celu identyfikacji osoby, obydwa obrazy, o których mowa powyżej, powinny być zarejestrowane z tego samego punktu widzenia lub co najmniej z bardzo podobnej perspektywy. Gdy oryginalnym obrazem jest fotografia, do uzyskania obrazu i wyświetlenia go na monitorze używa się aparatu cyfrowego. Aby rozpocząć proces identyfikacji, oba obrazy nakłada się na siebie. W ten sposób potwierdza się to, że obrazy zostały wyrównane oraz że zostały wykonane z tej samej perspektywy. Obrazy są następnie wygaszane, po to, aby dokładniej sprawdzić wyrównanie i ewentualnie dopasować pozyskane antropometryczne punkty twarzy. Gdy obrazy są wyrównane, jeden obraz jest cyfrowo przesuwany względem drugiego. Pozwala to skupić się na określonych interesujących rysach lub obszarach twarzy. Obraz można przesuwać poziomo, pionowo lub ukośnie [Shahrom1996].

Naukowcy dyskutują na temat wiarygodności identyfikacji przy wykorzystaniu metody nakładania obrazów. D. Austin-Smith i MR Maples [Austin-Smith1994] przeprowadzili badanie w celu określenia rzetelności identyfikacji przy nakładaniu obrazów. Ich celem było ustalenie, czy taką metodę można stosować niezależnie od innych jako metodę poprawnej identyfikacji. W badaniu porównali 3 ludzkie czaszki z 97 zdjęciami z boku i 98 z przodu. Żadna z tych czaszek nie należała do osób na zdjęciach, a w badaniu nie wykorzystano zębów przednich, co jest bardzo przydatne, gdy dostępna jest karta dentystyczna, a osoba na obrazie badanym jest uśmiechnięta. Po porównaniu z użyciem metody nakładania obrazów wideo, wyniki ich badań wykazały, że 9,6% porównań bocznych i 8,5% porównań czołowych było zgodnych, zatem metoda okazała się mało skuteczna w przypadku konieczności jej zastosowania jako wiarygodnej do bezpośredniej identyfikacji.

2.5 Rekonstrukcja twarzy

Czasami istnieje potrzeba dokonania rekonstrukcji twarzy lub odbudowy jakiejś części twarzy, dzięki czemu będzie zwiększone prawdopodobieństwo pozytywnej identyfikacji osoby. Antropolog, patrząc np. na czaszkę lub szkielet, może zidentyfikować cechy, takie jak rasa, płeć i wiek. Resztą zajmują się naukowcy – specjaliści od identyfikacji. Jeśli zaczyna pojawiać się pojęcie tożsamości osoby, wtedy oznacza to, że przystępujemy do *identyfikacji*. W przypadku braku wskazówek,

kim jest dana osoba, a istnieje taka potrzeba, można zastosować rekonstrukcję twarzy, która ma na celu dostarczenie informacji na temat osoby będącej obiektem zainteresowań. Zastosowana metoda identyfikacji zależy od dostępnych na temat celu materiałów porównawczych.

2.5.1 Metoda tradycyjna

Istnieje kilka sposobów wykonania rekonstrukcji twarzy. Głównym i podstawowym elementem jest materiał źródłowy. Jeżeli przed rozpoczęciem jakiegokolwiek metody odtwarzania wizerunku osoby dostępny jest tylko i wyłącznie materiał kostny (czy to w oryginale, czy na fotografii) to powinno się go bardzo szczegółowo przeanalizować/zbadać, gdyż z czaszki odczytuje się najwięcej informacji o osobie, tj. wieku, płci i rasy. Dużo łatwiej jest, kiedy do dyspozycji jest chociaż profil osoby, gdyż wtedy można dokonać pomiaru części punktów antropometrycznych i przy ich wykorzystaniu odbudować całą twarz. W tradycyjnej metodzie odtwarzania wizerunku osoby przy wykorzystaniu czaszki wykonuje się jej odlew lub w niektórych przypadkach używa się czaszki rzeczywistej, na którą formuje się glinę, aby odtworzyć twarz. Metoda ta została opracowana w Akademii Nauk Związku Socjalistycznych Republik Radzieckich w latach pięćdziesiątych przez rosyjskiego antropologa Michaiła Gierasimowa i od jego nazwiska nazywana jest metodą Gierasimowa [Hołyst2010]. Kolejność działań przy stosowaniu tej metody, to:

- wykonanie odlewu czaszki;
- wbicie w ważne anatomicznie miejsca kołeczków, na których zaznaczana jest grubość tkanki mięśniowej w danym miejscu;
- umieszczenie kulek w oczodołach;
- nałożenie na odlew gliny rzeźbiarskiej do wysokości włożonych kołeczków;
- uzupełnienie o włosy, brwi etc.

Poszczególni naukowcy mogą mieć nieco inny porządek proceduralny, ale generalnie metody są podobne. Przykładowo, Karen T. Taylor [Taylor2001], autorka książki *Forensic Art and Illustration*, w ramach swojej techniki preparacji czaszki przykleja żuchwę do czaszki i umieszcza czaszkę na regulowanym stojaku, ustawiając ją w płaszczyźnie horyzontalnej. Następnie umieszcza znaczniki głębokości tkanki w odpowiednich miejscach. Ważnym, ale często trudnym zadaniem wykonania rekonstrukcji twarzy jest dopasowanie punktów antropometrycznych czaszki do

odpowiadających im punktów orientacyjnych tkanek miękkich [George1993]. Na koniec zabezpiecza się protezy oczu, a glinę wykorzystuje się do budowy grup mięśniowych oraz tkanki podskórnej i skóry, nigdy nie przekraczając markerów tkankowych (kołeczków).

2.5.2 Rekonstrukcja twarzy 3D przy wykorzystaniu grafiki komputerowej

Inną, bardziej współczesną techniką jest rekonstrukcja twarzy za pomocą trójwymiarowej grafiki komputerowej. W przypadku posiadania kości czaszki, do odtworzenia obrazu czaszki w formie cyfrowej w komputerze używa się lasera. Podstawowa zaleta jest taka, że po zeskanowaniu laserem oryginalnej czaszki można ją bezpiecznie przechowywać w laboratorium. Kolejna to fakt, że wykonanie dodatkowych twarzy pasujących do czaszki, ale z różnymi rysami i układem tkanek miękkich, zajmuje stosunkowo niewiele czasu. Użycie programu komputerowego do wykonania rekonstrukcji twarzy zajmuje około jednej do dwóch godzin, co jest okresem znacznie krótszym niż w przypadku metody rzeźbienia.

Iceman (Rysunek 2) to najstarsza i najlepiej zachowana mumia, jaką kiedykolwiek znaleziono.



Rysunek 2 Iceman [www.iceman.it]

Jej wiek szacuje się na 5300 lat. Została odkryta w 1991 roku w Alpach Oetzalskich w Południowym Tyrolu. Ciało znaleziono w legginsach z koziej skóry i trawiastej pelerynie z toporem z miedzianym grotem i strzałami w pobliżu [BBC2000].

Własność mumii była sporna między Włochami a Austrią, ale ostatecznie została przejęta przez Włochy.

Rekonstrukcja twarzy 3D została wykonana przez Department of Forensic Medicine and Science na Uniwersytecie w Glasgow przy użyciu stereolitografii czaszki pobranej ze skanu CT [Vanezis2000]. Następnie, za pomocą oprogramowania komputerowego, do twarzy dodano brodę i wąsy (Rysunek 3). Mumii nadano imię Ötzi.



Rysunek 3 Ötzi

Schematyczny proces rekonstrukcji twarzy z trójwymiarowej grafiki komputerowej przedstawia się następująco.

Przygotowaną czaszkę umieszcza się na uchwycie, a następnie komputerowo obraca w poziomie o 360°. Pozyskany obraz jest digitalizowany i analizowany przez komputer. W ten sposób powstaje obraz 3D. Zazwyczaj operator ręcznie umieszcza na obrazie około czterdziestu punktów antropometrycznych, uwzględniając informacje dotyczące rasy, wieku i płci. W kolejnym kroku z bazy danych wybierana jest „przeciętna” twarz i umieszczanych jest na niej te same czterdzieści punktów antropometrycznych. Operator wyrównuje czaszkę z twarzą i ponownie znaczniki podlegają sprawdzeniu. Trójwymiarowy obraz czaszki nakłada się na twarz, po czym komputer zaczyna automatycznie rekonstruować obraz twarzy na czaszce. Ostateczny obraz można wydrukować lub sfotografować bezpośrednio z monitora i zapisać do wykorzystania w przyszłości. Jest to szczególnie pomocne, gdy identyfikacja cech biometrycznych jest niezbędna w późniejszym terminie. Następnie, do stworzonego

wizerunku dokładane są włosy, które czynią odtworzony obraz bardziej przyjaznym dla oglądającego.

Jednym z problemów, z jakimi borykają się naukowcy stosujący obie metody, jest oszacowanie wielkości i kształtu części tkanek miękkich, takich jak oczy, nos, usta, kolor i styl włosów, kształt brwi i uszu. Dodatkowe wskazówki pomocne przy rozpoznawaniu, ale niedostępne na czaszce, to tatuaże, blizny lub zmarszczki. Czaszka nie dostarcza wskazówek jak te cechy powinny wyglądać, choć one drastycznie zmieniają wygląd twarzy, wpływając tym samym na szanse jej rozpoznania. Cechy niemożliwe do określenia tylko na podstawie analizy kości czaszki, ale mające duży wpływ na identyfikację, takie jak kolor skóry czy fryzura, powinny być w rekonstrukcji możliwie niejednoznaczne. Dla laika ukończona rekonstrukcja często nie przypomina rzeczywistej osoby, ale dla kogoś, kto daną osobę znał, rekonstrukcja może być natychmiast rozpoznawalna. Wykonywanie i wyświetlanie wielu rekonstrukcji z różnymi fryzurami i/lub kolorami może początkowo wydawać się dobrym pomysłem, ale ostatecznie okazało się, że powoduje chaos. Badania przeprowadzone przez Helmera, Roohrichta, Petersona i Mohra [Helmer1993] wykazały, że rekonstrukcje, które miały wyraźne cechy związane z wiekiem lub chorobą, dawały większą zgodność podobieństwa.

2.6 Psychologiczne rozpoznawanie twarzy

Zarówno przetwarzanie informacji wizyjnej [Ellis1975], jak i psychologia rozpoznawania twarzy [Bruce1986] były od lat badane przez naukowców i wykazały, że dokładne rozpoznanie jest bardziej prawdopodobne, gdy dana osoba jest dla nas znajoma [Bruce1986], nawet jeżeli rozpoznawanie odbywa się z wykorzystaniem obrazów o niskiej jakości [Burton1999]. Jednak przy próbie rozpoznania nieznanymi twarzami występuje wysoki poziom błędów. Zostało to wykazane w eksperymentach przeprowadzonych przez Kempa, Towella i Pike'a [Kemp1997], którzy wykazali, że kasjerom trudno było ustalić czy klienci pasują do zdjęcia na ich karcie kredytowej. Kasjerzy wiedzieli, że eksperyment ma miejsce i stwierdzili, że spędzili więcej czasu na sprawdzaniu kart niż zwykle, jednak nadal nieco ponad 50 procent fałszywych kart zostało zaakceptowanych przez kasjerów. Osoby te stały bezpośrednio przed kasjerami, ilustrując trudność próby rozpoznania klienta na zdjęciu.

Dokładność dopasowania twarzy jest również zmniejszona przez zmianę punktu widzenia osoby w stosunku do kamery, która robiła zdjęcie, ale w mniejszym stopniu wpływają na nią zmiany w wyrazie twarzy. Użycie kolorowych fotografii w porównaniu z obrazem w skali szarości nie miało wpływu na wynik rozpoznawania. Jak pokazują eksperymenty Burtona i współautorów, chód, kształt ciała i ubiór miały niewiele wspólnego z rozpoznawaniem ludzi. Mogło to wynikać ze stopnia zażyłości, jaką badani mieli z osobami na filmie. Eksperyment został przeprowadzony przez pracowników uczelni, a badanymi byli studenci, którzy wiedzieli, że eksperyment miał się odbyć na wydziale psychologii i że uczestnicy prawdopodobnie będą związani z uczelnią.

2.7 Identyfikacja przy wykorzystaniu biometrii

Systemy automatycznego rozpoznawania twarzy oparte na biometrii to kolejne podejście stosowane do porównywania wizerunku osób. Takie systemy odgrywają coraz większą rolę identyfikacyjną i są stosowane na lotniskach, w bankach i sklepach detalicznych. Biometria może być stosowana przez trzy odrębne grupy: komercyjną, rządową i sądową [Prabhakar2003]. System biometryczny może identyfikować lub weryfikować tożsamość osoby za pomocą cech fizjologicznych lub behawioralnych człowieka [Jain2003]. Rozpoznawanie odcisków palców jest prawdopodobnie najlepiej znaną obecnie stosowaną technologią biometryczną [Pankanti2000], ale inne wspólne cechy biometryczne, które można wykorzystać do identyfikacji osób, to wzory tęczy, cechy twarzy, mowa, geometria dłoni, kształt ucha i zapach ciała [Hadley2004]. Jednak wszystkie różnią się pod względem użyteczności i dokładności w przeprowadzaniu identyfikacji.

Systemy biometryczne służące identyfikacji osób były wcześniej używane publicznie, na przykład w 2001 roku podczas Super Bowl XXXV w Tampa na Florydzie [Woodward2001], ale wraz z atakami terrorystycznymi w Stanach Zjednoczonych 11 września 2001 roku i wprowadzeniem amerykańskiego systemu Patriot w 2001 roku na pierwszy plan wysunęła się identyfikacja biometryczna. Stany Zjednoczone wymagają, aby każdy paszport zagraniczny wydany po październiku 2005 roku zawierał chip biometryczny z cechami twarzy właściciela, odciskami palców lub skanem tęczy oka, co przyspiesza kontrole graniczne i utrudnia fałszowanie paszportów [Graham-Rowe2005]. Systemy biometryczne

wykorzystywane są w komputerach osobistych i laptopach jako systemy zabezpieczające [Grotta2001], a świadomość identyfikacji biometrycznej stała się bardziej powszechna wśród ogółu społeczeństwa.

Idealny system biometryczny według Phillipsa, Martina, Wilsona i Przybockiego [Phillips2000] wykazuje cztery cechy:

- Wszyscy członkowie danej populacji posiadają cechy identyfikowane biometrycznie, takie jak tęczy, odciski palców lub inne;
- Każdy podpis biometryczny różni się od wszystkich pozostałych w kontrolowanej populacji;
- Podpisy biometryczne nie zależą od warunków, w jakich są zbierane;
- System jest odporny na środki zaradcze.

System biometryczny można podzielić na dwa elementy: moduł rejestracji i moduł identyfikacji [Pankanti2000]. Moduł rejestracji jest częścią systemu, która przygotowuje go do identyfikacji konkretnej osoby, a moduł identyfikacji jest częścią systemu, która ją rozpoznaje. Na przykład w fazie rejestracji, w systemie rozpoznawania twarzy twarz osoby zostałaby zeskanowana, a szablon (wektor cech) zostałby utworzony na podstawie reprezentacji cyfrowej. Szablon może zawierać rozmiar i pozycje nosa, ust i oczu. Szablony wszystkich uwzględnionych osób byłyby przechowywane w bazie danych. Podczas fazy identyfikacji czujnik biometryczny skanuje osobę i uzyskuje dane biometryczne używane do identyfikacji, w tym przypadku twarz, a dane są przenoszone do tego samego rodzaju szablonu, który był używany w poprzedniej fazie. Ten szablon jest porównywany z każdym z wcześniej zapisanych szablonów, aby określić czy istnieje dopasowanie.

Jednym z problemów, z jakim boryka się wielu obywateli, jest wpływ identyfikacji biometrycznych na prywatność jednostki. Raport Hadley z 2004 roku [Hadley2004] cytuje dokument dotyczący bezpieczeństwa na lotniskach, w którym American Civil Liberties Union (ACLU) stwierdza, że organizacja „nie sprzeciwia się stosowaniu technik identyfikacji biometrycznej o udowodnionej dokładności, takich jak skany tęczy oka czy cyfrowe odciski palców, do identyfikacji i uwierzytelnienia osób pracujących w zabezpieczonych obszarach lotnisk”. Jednak ACLU sprzeciwia się stosowaniu danych biometrycznych na wszystkich pasażerach linii lotniczych, ponieważ uważa, że byłoby to naruszenie Czwartej Poprawki do Konstytucji Stanów Zjednoczonych, chroniącej prawo do prywatności. ACLU twierdzi, że możliwe jest,

że dane biometryczne będą ostatecznie nadużywane w taki sam sposób, w jaki karty ubezpieczenia społecznego używane do celów identyfikacyjnych w Stanach Zjednoczonych są wykorzystywane do kradzieży tożsamości.

Zaletą korzystania z systemu biometrycznego jest to, że niezbędne informacje nie mogą być utracone jak klucz lub zapomniane jak skomplikowane hasło. Wady, to ich dokładność, koszt, łatwość użycia i obawa, że informacje takie będą przechowywane poza systemem [Briggs2002]. W przypadku każdego rodzaju systemu bezpieczeństwa znajdują się przestępcy, którzy będą próbowali go obejść, co wymusza nieustanne jego doskonalenie oraz analizowanie zastosowanych zabezpieczeń. W Kuala Lumpur w Malezji, kiedy złodzieje samochodów zorientowali się, że będą potrzebować odcisku palca właściciela samochodu, za każdym razem, aby uruchomić samochód, odcięli palec kierowcy i zabrali go ze sobą [Finger2005]. Ten rodzaj przestępstwa wskazywałby, że sama biometria może nie wystarczyć jako środek odstraszający w zakresie bezpieczeństwa. Bezpieczeństwo biometryczne można zwiększyć, prosząc osobę o użycie oprócz danych biometrycznych również i hasła [Prabhakar2003] lub stosując system, który do identyfikacji wymaga wielu cech biometrycznych.

2.7.1 Bezpieczeństwo systemów biometrycznych służących do rozpoznawania twarzy

Z punktu widzenia różnych służb rozpoznawanie twarzy może być ważnym i potężnym narzędziem w następujących scenariuszach [Peacock2004]:

- a) przeszukiwanie tłumy w celu wyłonienia twarzy wylosowanych z danej bazy zdjęć kandydatów;
- b) wybór najlepszego dopasowania twarzy do tematu zapytania z tablicy wcześniej uzyskanych obrazów;
- c) biorąc pod uwagę wizerunek osoby będącej obiektem zainteresowania, przedstawienie dowodów potwierdzających lub odrzucających hipotezę, że osoba na zdjęciu jest osobą poszukiwaną/celem.

Rozpoznawanie twarzy przy użyciu komputera odbywa się za pomocą pomiarów lub analizy obrazu twarzy jako całości. Systemy rozpoznawania twarzy mają obecnie wysoki poziom błędów i z tego powodu powinny być stosowane jako przesiewowe w celu zmniejszenia liczby możliwych pozytywnych identyfikacji. Ostateczny etap identyfikacji byłby realizowany przez doświadczonego operatora ludzkiego. Niedokładne wyniki z systemów rozpoznawania osób opartych na obrazie twarzy

mogą wystąpić z powodu zmian oświetlenia, kąta, pod którym uchwycono obraz, lub zmieniającego się wyrazu twarzy [Lu2003]. Precyzję systemów rozpoznawania twarzy poprawiono poprzez wprowadzenie technik próbkowania uwzględniających tego typu zmiany. W idealnym przypadku systemy rozpoznawania twarzy powinny pozyskiwać silnie różniące się obrazy różnych osób, ale podobne obrazy tej samej osoby nawet w różnych warunkach środowiskowych [Daugman1997]. Często zdarza się, że różne twarze wyglądają podobnie, gdy są umieszczone w tych samych warunkach oświetlenia, ekspresji lub pozycji, podczas gdy ta sama twarz przy ich zmianie wydaje się inna.

Zaletą systemów rozpoznawania twarzy jest to, że są stosunkowo łatwe w obsłudze i działają szybko. Jednak warunki ich stosowania muszą być „szybkie, niedrogie i właściwe” [R&D2002]. Są również dyskretne, w porównaniu z innymi systemami identyfikacji biometrycznej, nie wymagają od użytkownika stania lub poruszania się w określony sposób, a systemy z roku na rok tanieją [Pentland2000].

Jednym z problemów dotyczących systemów rozpoznawania twarzy, a właściwie wszystkich systemów identyfikacji biometrycznej, jest możliwość uzyskania fałszywego dopasowania lub fałszywego niedopasowania. Zazwyczaj, w systemie identyfikacji biometrycznej komputer określa stopień podobieństwa między danymi wejściowymi a próbką umieszczoną w bazie danych. Wyższy wynik oznacza bardziej prawdopodobne dopasowanie. Wynik musi być równy lub większy od wcześniej ustalonego wyniku progowego, aby można go było uznać za dopasowanie. Aby system był bezpieczniejszy, wartość progowa musiałaby zostać zwiększona, jednak może powodować to wzrost liczby fałszywych niedopasowań. Aby umożliwić zwiększenie liczby zmiennych wejściowych, wynik zestawu musiałby zostać obniżony, ale wówczas mogłaby wzrosnąć liczba fałszywych dopasowań.

Teoretycznie systemy identyfikacji biometrycznej wydają się być bardzo skuteczne, ale poniżej opisane są dwa przykłady, w których wyniki były słabsze od założonych.

Przykład 1

Dwuletni projekt rozpoznawania twarzy, w ramach którego ustawiono 36 kamer monitorujących wokół miasta Ybor w Tampie na Florydzie, uznano za nieudany [United2003]. Kamery wraz z oprogramowaniem do rozpoznawania twarzy miały rozpoznawać rysy twarzy przestępców i uciekinierów w oparciu o bazę danych zawierającą 24 000 zdjęć wykonanych przez Policję oraz zdjęć rodzinnych

udostępnionych do testów. Projekt się nie powiódł, zainstalowane kamery, a co za tym idzie zarejestrowany materiał, doprowadził do aresztowań związanych z wykryciem sprawców przestępstw związanych z walkami gangów i nielegalną sprzedażą narkotyków, a nie zatrzymań i aresztowań osób związanych z wcześniej popełnionymi przestępstwami czy ucieczkami z zakładów karnych.

Przykład 2

W 1998 r. system rozpoznawania twarzy został przetestowany w Hertfordshire w Anglii w Watford Football Club i choć początkowe wyniki nie były tak pozytywne, jak tego oczekiwano, zdecydowano o jego pozostawieniu i wykorzystaniu przez organy ścigania [Hook1998]. Zastosowane oprogramowanie skoncentrowało się na obszarze twarzy między górną częścią brwi a dolną częścią podbródka oraz od jednej strony skroni do drugiej. Pozostawienie systemu doprowadziło do zatrzymań pseudokibiców posiadających aktywny „zakaz stadionowy”.

Prowadzone są nie tylko badania mające na celu uzyskanie dokładnego systemu rozpoznawania twarzy, ale także badania mające na celu ochronę anonimowości osób, które mogą przypadkowo znaleźć się na nagraniach wideo. Newton, Sweeney i Malin [Newton2003] osiągnęli to, zmieniając cyfrowo obrazy twarzy postronnych osób tak, aby oprogramowanie do rozpoznawania twarzy nie mogło dopasować ludzi do ich zarejestrowanych obrazów wideo. Wstępne badania wykazały, że zakrywanie oczu i nosa, zmniejszanie liczby pikseli na twarzy lub zmiana pikseli w skali szarości na czarne lub białe były nieskuteczne w blokowaniu działania oprogramowania do rozpoznawania twarzy. Zastosowany algorytm k-Same uśredniał podobnie wyglądające twarze w taki sposób, że wiele cech pozostawało bez zmiany, ale wynikowy obraz nie był wiarygodny.

2.7.2 Niezmienniki

Jedno z najtrudniejszych wyzwań związanych z porównywaniem obrazów twarzy pojawia się, gdy porównywane są dwa obrazy twarzy pozyskane przy różnych orientacjach głowy lub – co jest równoważne – różnych orientacjach kamery. Szanse na to, że twarze na dwóch fotografiach znajdują się w tym samym dokładnym położeniu, są niskie. Głowice z kamerami mogą obracać się w poziomie, w pionie i po przekątnej, i jest mało prawdopodobne, aby dwa obrazy, zwłaszcza jeśli jedna z osób jest w ruchu, tak jak w nagraniu wideo z monitoringu, będą znajdowały się w tej samej pozycji

względem kamery, co jest niezbędne do uzyskania jak najdokładniejszego porównania obrazu. Przeprowadzono i nadal prowadzi się szeroko zakrojone badania w celu znalezienia sposobów skutecznego rozwiązania tego problemu.

Rozpoznawanie twarzy to duża i ważna część biometrii, ale posiada wiele ograniczeń, głównie właśnie ze względu na problem pozycji twarzy względem kamery [Lu2003]. Aby go rozwiązać, przeprowadzono badania nad opracowaniem metod rozpoznawania twarzy niezależnie od orientacji głowy. Dwie takie metody są opisane poniżej i obie wykazują większy procent rozpoznawania niż w przypadku ich użycia bez transformacji położenia głowy.

Pierwsza metoda wykorzystuje wektory biometryczne twarzy do wyodrębnienia jej cech w celu rozpoznania twarzy dla zakresu rotacji *yaw* do $\pm 30^\circ$, a następnie wykonuje rozpoznanie [Huang2000]. Naukowcy ograniczyli zakres rotacji do $\pm 30^\circ$, ponieważ pozwala to obojgu oczom pozostać na obrazie, a opisywana metoda wykorzystuje lokalizację oczu do pozycjonowania twarzy. Aby oszacować pozycję twarzy θ , jej twórcy używają $\theta = \arcsin\left(\frac{a}{r}\right)$, gdzie a jest odległością między rzutem środka dwojga oczu a środkiem twarzy, a r jest promieniem głowy. Na podstawie wyników badań potwierdzają, że oszacowanie położenia głowy jest istotnym elementem procesu i że wynik tego położenia bezpośrednio wpływa na wyniki identyfikacji. Chociaż naukowcy donoszą o sukcesie tej metody, może ona nie być korzystna do zastosowania, ponieważ ogranicza się do rotacyjnej zmiany pozycji głowy o $\pm 30^\circ$, która wystąpi tylko w częściowej liczbie pozyskanych przypadków.

Druga metoda niezmiennego rozpoznawania twarzy polega na oszacowaniu pozycji głowy poprzez wstępne rozróżnienie punktów na uchu, co prowadzi do lepszego wykrycia punktów biometrycznych twarzy [Chen2007]. W tej metodzie zgrubny kontur twarzy i wartości dziesięciu odległości antropometrycznych twarzy są następnie wykorzystywane do wykrywania punktów usznych. Ponieważ zgrubny kontur twarzy zmieni się, jeśli twarz zmieni się z powodu innej linii włosów lub przyrostu lub utraty wagi, może to ograniczyć tę metodę do porównania osób których obrazy twarzy pozyskano w krótkim przedziale czasu. Ogólna antropometria wykazała, że ucho jest nieefektywną cechą dla dokładnego pomiaru [Farkas1994], najprawdopodobniej ze względu na położenie punktów na różnych płaszczyznach. Chen i Cham przyznają, że punkty uszne nie są wykorzystywane w większości algorytmów rozpoznawania twarzy, ale są ważne w algorytmie szacowania rotacji.

Zgodnie ze zdjęciami zamieszczonymi w artykule [Chen2007], które pokazują przykłady wykrytych punktów uszu, znak umieszczony przez algorytm zawierał punkt granicy ucha i granicy twarzy, ale nie wydawał się być konsekwentnie umieszczany w przykładach, chociaż może to być efektem przedstawionych fotografii. Pozytywnymi cechami tej metody jest to, że pozwala ona na rozpoznanie twarzy przy dużej rotacji i może skutecznie oszacować zarówno obroty, jak i poziome linie bryły głowy.

2.8 Obserwacja przy wykorzystaniu kamer video

Nie ma wiarygodnych szacunków liczby kamer monitorujących obszar Rzeczypospolitej Polskiej, jednak wiadomo, że z roku na rok jest ich coraz więcej. W pracy P. Waszkiewicza [Waszkiewicz2012] można zapoznać się z zarysem historycznym uruchomienia telewizji przemysłowej (CCTV) w miejscach publicznych zarówno na świecie, jak i w Polsce. W Polsce pierwsze kamery pojawiły się w latach 70. na Dworcu Centralnym, natomiast pierwszy system monitoringu miejskiego został uruchomiony w 1997 roku w Koronowie (woj. Kujawsko-Pomorskie). Obecnie, w Warszawie jest około 14 tysięcy kamer monitoringu miejskiego.

Pierwsze kamery monitoringu miejskiego na świecie zostały wykorzystane w Anglii, w 1985 roku. W miejscowości Bournemouth zainstalowano kamery CCTV w celu monitorowania miejskich plaż. W Chinach, w chwili obecnej, jest zainstalowanych najwięcej kamer monitoringu miejskiego. Systemy rozpoznawania czy identyfikacji obywateli są tu najbardziej rozwinięte. Oficjalnie od 2015 roku chińskie władze tworzą bazę danych twarzy obywateli Chin. Baza ta jest następnie łączona z odpowiednimi zdjęciami, które dostarcza się do wyrobienia oficjalnych dokumentów, takich jak dowód osobisty, paszport, prawo jazdy, etc.. Od 2017 roku w Hangzhou (Chiny) można przy wykorzystaniu wizerunku twarzy zapłacić za posiłek w KFC, natomiast w 2019 roku Shenzen przeprowadzono testy płatności przy wykorzystaniu wizerunku twarzy w metrze. Statystycznie rzecz biorąc, według Statistic MRC, rynek wykorzystujący do uwierzytelniania wizerunek twarzy może być w 2026 roku warty 15 miliardów dolarów.

Spółeczeństwo jest monitorowane nie tylko za pomocą kamer wideo, ale także systemów automatycznego rozpoznawania tablic rejestracyjnych, sklepowych

znaczników RFID, triangulacji telefonów komórkowych, kart lojalnościowych sklepów, transakcji kartami kredytowymi, satelitów, listy wyborców, kart pacjentów, osobistych rejestratorów wideo, telefonu, podsłuchów, elektronicznych urządzeń podsłuchowych, ukrytych kamer, plików cookie i wielu innych.

2.8.1 Rola monitoringu wideo w zwalczaniu, wykrywaniu i zapobieganiu przestępczości

Nadzór wideo jest bardzo często wykorzystywany do zwalczania, wykrywania lub zapobiegania przestępczości. Bardzo często jest ostatnim lub być może jedynym „świadkiem” popełnianego przestępstwa. Przykładem tego może być nagranie z monitoringu wideo, które zarejestrowało wizerunek osób odpowiedzialnych za uprowadzenie jedenastoletniej dziewczynki, która następnie została zamordowana przez Carlie Brucii w Sarasocie na Florydzie. Nagranie to doprowadziło do aresztowania podejrzanego, gdy policyjny informator zidentyfikował mężczyznę na nagraniu [Seattetimes.com2004].

W polskich realiach, monitoring wizyjny jest bardzo często wykorzystywany przy identyfikacji sprawców przestępstw stadionowych. W 2009 roku w życie weszła nowa ustawa o bezpieczeństwie imprez masowych i w niej dookreślono obowiązki nałożone na organizatorów co do zainstalowania na obiektach sportowych kamer umożliwiających identyfikację kibiców. Identyfikacja to działania organizacyjno-prawne, umożliwiające ustalenie tożsamości badanego obiektu (osoby) lub zjawiska na podstawie najbardziej charakterystycznych dla niego cech biometrycznych [Kasprzak2006].

Zastosowanie monitoringu wizyjnego np. w Sosnowcu doprowadziło w 2019 roku do ujawnienia [www.sosnowiec.wyborcza.pl2019]:

- a) 1455 przypadków nieprawidłowego parkowania;
- b) 847 przypadków spożywania alkoholu w miejscu publicznym;
- c) 290 osób leżących w miejscu publicznym;
- d) 68 przypadków zakłócenia porządku publicznego;
- e) 2 wypadków;
- f) 53 przypadków podejrzenia kradzieży lub zniszczenia mienia;
- g) 37 przypadków bójki lub pobicia.

Wraz z rozwojem technologicznym, kamery stają się coraz bardziej zaawansowane. W Nowym Orleanie mężczyzna strzelił do kamery z karabinu paintballowego, mając

nadzieję, że zlikwiduje kamerę nadzorowaną przez Policję. Zamiast tego został aresztowany, ponieważ jego wizerunek został zapisany na twardym dysku kamery, zanim ją zniszczył [Foster2005].

Chociaż jakość sprzętu do monitoringu wideo jest coraz lepsza, to jednak wciąż nie zapewnia idealnie czystych obrazów potrzebnych do zapewnienia niepodważalnej identyfikacji. Właśnie w takich przypadkach pomocne byłyby techniki identyfikacji, takie jak np. antropometria. Informacje uzyskane z monitoringu wizyjnego mogą być ważnym dowodem, ponieważ mogą wskazywać na popełnienie przestępstwa, chociaż nie zawsze łatwo jest je rozpoznać, a zatem skazać przestępcę wyłącznie na podstawie dowodów z telewizji przemysłowej. Nadzór wideo może być bardziej wiarygodny niż zeznania naocznych świadków, ponieważ opowiadana historia jest spójna i ciągła. Potwierdza także to, co widział naoczny świadek [Lewis2004]. Konieczna jest jednak pełniejsza analiza, ponieważ nawet przy wyraźnych obrazach wideo dwie różne osoby mogą wyglądać bardzo podobnie. Co więcej, często osoby przebierają się, aby utrudnić rozpoznanie.

Operatorom obsługującym systemy monitoringu wizyjnego może być bardzo trudno utrzymywać stałą uwagę na obrazach z kamer – szczególnie, gdy muszą śledzić dużą liczbę obrazów. New Scientist poinformował o opracowanym oprogramowaniu, które analizuje materiał z telewizji przemysłowej i odnajduje podejrzane paczki lub wykrywa możliwą próbę samobójczą [Hogan2003]. System został przetestowany na stacjach londyńskiego metra i działa, porównując obrazy z kamer CCTV z obrazami z tej samej stacji, ale pustej. Obrazy są analizowane w celu określenia, jakie obiekty różnią się między nimi. System nie wie, co oznaczają obrazy, ale może ostrzec operatora, że istnieje konieczność podjęcia interwencji. Umożliwia także aktywne monitorowanie wybranych kamer.

2.8.2 Pozytywne i negatywne aspekty niejawnej obserwacji wideo

Rozgłos nadany systemom monitoringu wizyjnego sprawił, że obywatele uwierzyli, że każde przestępstwo można łatwo wykryć i udokumentować na podstawie samego monitoringu wideo, podczas gdy w rzeczywistości zarejestrowane wideo jest bardzo często niewyraźne, a precyzyjne szczegóły wizerunku osoby zwykle nie istnieją. Wiele różnych czynników może wpływać na jakość obrazu pozyskiwanego z systemu monitoringu wizyjnego [Aldridge1994], a największą pomocą dla organów ścigania jest umieszczenie kamer i obiektywów wraz z rejestratorami w miejscach, gdzie

popelniane są najbardziej uciążliwe dla społeczeństwa przestępstwa i wykroczenia [SWGIT2005]. Widoczny dla operatora obszar analizy jest największy, kiedy obiektyw kamery jest umieszczony wysoko w stosunku do obiektu. Jednak w tym przypadku szczegół charakteryzujący pojedynczą osobę może być niemożliwy do zobaczenia czy zarejestrowania, przez co nagranie z CCTV staje się bezużyteczne. Kamery umieszczone na małej wysokości mogą pokazywać więcej szczegółów osoby, ale widok z kamery ma większą szansę zostać zasłonięty, a sama kamera ma większe prawdopodobieństwo uszkodzenia w wyniku aktu wandalizmu. Aby uzyskać najbardziej zadowalające informacje z systemu monitoringu, ich właściciele muszą zdecydować, co ich konkretnie interesuje – tj. jakie cechy osób czy zachowań – już w momencie tworzenia czy wręcz projektowania całego systemu monitoringu wizyjnego. Oczywiście, im więcej kamer zostanie rozmieszczonych, tym większy obszar zostanie objęty monitoringiem i tym większe szanse na identyfikację osoby. Należy przy tym pamiętać, że jeśli kamera zostanie umieszczona zbyt daleko, nie zostanie zarejestrowanych wystarczająco dużo szczegółów, które pomogą określić tożsamość celu. Rodzaj obiektywu kamery wideo może również wpływać na to, co jest rejestrowane. Obiektyw szerokokątny może umożliwiać oglądanie dużego obszaru, ale może również zniekształcać obraz (problem rybiego oka). Teleobiektyw, chociaż jest w stanie uzyskać zbliżenia, może również wpływać na słaby monitoring szerokiego obrazu.

2.9 Analiza obrazu

Analiza obrazu obejmuje fotogrametrię, porównanie zdjęć, analizę treści i uwierzytelnianie obrazu. Proces analizy obrazów dzieli się na trzy kategoryczne zadania: interpretację, badanie i przygotowanie techniczne. Pierwsze, interpretacja, polega na wyciąganiu wniosków na podstawie tego, co widać na obrazach. Drugie, wykorzystuje techniki analizy obrazu w celu wydobycia informacji z obrazów. Trzecie to przygotowanie techniczne, czyli przygotowanie wniosków lub obrazów do badania.

2.9.1 Rozdzielczość

Rozdzielczość obrazu odnosi się do liczby pikseli w danym obrazie [microscopemicroscope.org2007]. Rozdzielczość może również odnosić się do wysokości i szerokości obrazu, a także liczby pikseli w całym analizowanym obrazie.

Rozmiar obrazu można zmienić, dostosowując liczbę pikseli, a jakość obrazu można zmienić, kompresując go np. do formatu JPG. Zmniejsza to rozmiar pliku, dzięki czemu można go szybciej załadować do systemu identyfikacji, ale generuje przy tym stratę istotnych dla identyfikacji danych, charakterystycznych dla danej osoby. Obrazy nieskompresowane są zapisywane na przykład jako plik bitmapowy (BMP) lub Tagged Image File Format (TIFF), natomiast obrazy skompresowane są zapisywane na przykład jako pliki Joint Photographic Experts Group (JPEG). Skompresowany obraz traci szczegóły, co obniża jakość obrazu. Jeśli obrazy mają być skompresowane w celu zmniejszenia pliku, nieskompresowany obraz należy zawsze zapisywać jako kopię wzorcową.

2.9.2 Ulepszanie obrazu cyfrowego

Obrazy cyfrowe są powszechnie wykorzystywane między innymi do rejestrowania dowodów popełnienia przestępstwa lub wykroczenia. Często konieczne jest poprawienie obrazu, jaki uzyskano z kamery monitoringu. Jednak w tym przypadku bardzo łatwo jest manipulować obrazami za pomocą oprogramowania umożliwiającego edycję obrazów, jak np. Adobe Photoshop lub GIMP i podobne. W 2002 roku Scientific Working Group on Imaging Technologies (SWGIT) opracowała wytyczne, których należy przestrzegać przy korzystaniu z obrazów cyfrowych [SWGIT2003]. Najważniejsze cechy, to:

- a) zachowanie oryginalnego obrazu do dalszych badań;
- b) rejestrowanie etapów przetwarzania obrazów cyfrowych;
- c) prezentowanie wyniku końcowego jako ulepszony obraz, na podstawie którego można odtworzyć obraz oryginalny, stosując zarejestrowane kroki;
- d) przestrzeganie zaleceń zawartych w dokumencie [SWGIT2005].

W zależności od ich przeznaczenia, obrazy są podzielone na dwie kategorie. Zdjęcia kategorii pierwszej wyrażają to, co zostało zarejestrowane, ale nie jest analizowane przez ekspertów, np. ogólne obrazy miejsca zdarzenia. Obrazy kategorii drugiej są analizowane przez ekspertów, np. obejmują kwestionowane dokumenty lub obrazy kategorii pierwszej, które należy przeanalizować na podstawie innych danych charakteryzujących zdarzenie.

Przed zachowaniem materiału foto/wideo zwraca się szczególną uwagę na umiejscowienie aparatu lub skali odniesienia pomiaru, które mogą mieć wpływ na wytworzony obraz, a jeśli zostaną wykonane nieprawidłowo, mogą wytworzyć

perspektywę lub np. zniekształcenie związane z wykorzystaniem soczewki [Bowers2002]. Akceptowane techniki ulepszania obrazu obejmują regulację jasności i kontrastu oraz równoważenie kolorów. Należy udokumentować stosowane techniki ulepszania obrazu wykonane na zdjęciach szczególnie kategorii drugiej [SWGIT2005] oraz kolejność ich wykonywania. Jednak wszelkie kroki eksploracyjne, które zostały podjęte i nie zostały wykorzystane w ostatecznej analizie, nie muszą być dokumentowane. Wymagania dotyczące dokumentacji obejmują odnotowanie zastosowanego oprogramowania i technik, wraz z ich ustawieniami i parametrami.

3 Algorytmy rozpoznawania twarzy

Klasyfikacja, inaczej system typologii lub typologia antropologiczna, mająca na celu opisanie zróżnicowania systematycznego wewnątrz gatunku *homo sapiens*, istnieje od wielu lat. Już w 1940 roku William Sheldon opracował somatotypy, czyli typy budowy ciała człowieka. Zaproponował on system klasyfikacji, w którym wszystkie możliwe typy ciała zostały scharakteryzowane na podstawie stopnia, w jakim do siebie pasowały, i zakwalifikował je do tych trzech somatotypów [Sheldon1970]: ektomorficznego, mezomorficznego lub endomorficznego. Inne taksonomie zostały opracowane dla kształtu ciała [Alemany2021, Vinué2015], rąk [Jee2016], stóp [Kim2014] lub głowy [Sarakon2021]. Taksonomie pozwalają używać wspólnej terminologii do definiowania konfiguracji części ciała. Zapewniają jednocześnie ustandaryzowany sposób ich opisu. Szeroko stosuje się je w wielu dziedzinach naukowych: humanistycznych (archeologia), inżynieryjno-technicznych (automatyka, informatyka techniczna, inżynieria biomedyczna [Preston1999]), we wszystkich dyscyplinach dziedziny nauk medycznych i nauk o zdrowiu [Ritz-Timme2011] [Massidda2013][Malousaris2008] [Koleva2002] oraz w całej dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych. Ogólnie rzecz biorąc, tego typu systemy typologii są przeznaczone do jakościowej kategoryzacji, opierając się na globalnym wyglądzie części ciała, chociaż w niektórych przypadkach opracowano ilościową analizę wybranych cech w celu uzyskania klasyfikacji.

Ludzie szczególnie rozwinęli swoją zdolność percepcyjną do przetwarzania twarzy i wydobywania informacji z jej rysów [Damasio1986]. Ludzki mózg ma wyspecjalizowaną „sieć neuronową”, która służy do przetwarzania informacji pochodzących z obrazów twarzy innych ludzi [Kanwisher1997]. Pozwala ona człowiekowi identyfikować innych ludzi, ich płeć, wiek i rasę, a nawet oceniać emocje. Wykorzystując zdolność behawioralną człowieka co do postrzegania twarzy i jej cech, dokonuje się atrybucji, takich jak osobowość, inteligencja lub wiarygodność danej osoby, na podstawie wyglądu jej twarzy [Bruce2012]. Od stuleci artyści, badacze i naukowcy próbowali opracować procedury mierzenia i jednocześnie klasyfikowania ludzkich twarzy. Antropometryczna analiza twarzy jest wykorzystywana w różnych dziedzinach nauki, sztuki oraz informatyki. Wykorzystuje się ją w trakcie zabiegów chirurgicznych, działań związanych z kryminalistyką,

tworzeniu sztuki, rozpoznawaniu twarzy [Kong2005], emocji [Tavares2016] oraz oceny cech twarzy człowieka [Buckingham2006].

W ostatnich latach nowe technologie informatyczne otworzyły drogę do automatycznej oceny cech twarzy oraz gestów mimicznych [Boberg2008]. Opracowane metody obliczeniowe, dzięki którym dokonuje się analizy informacji o twarzy [Rojas2014], są coraz lepiej dostosowane do jej klasyfikacji na podstawie kryteriów antropometrycznych lub emocjonalnych [Li2005].

Mówiąc o rysach twarzy, wykorzystano taksonomie w ergonomii, antropologii sądowej, zapobieganiu przestępczości, interakcji człowiek-maszyna lub działaniach online. E-commerce, e-learning, gry, randki czy sieci społecznościowe to dziedziny codziennego życia, w których są wykorzystywane różne klasyfikacje cech twarzy. W takich działaniach powszechne jest używanie cyfrowych reprezentacji ludzi, awatarów (wcieleń), które symbolizują obecność danego człowieka lub działają jako wirtualny rozmówca. Kilka taksonomii rysów twarzy można odnaleźć w literaturze. Na przykład atlas Petera Vanezisa [Vanezis1996] klasyfikuje 23 cechy twarzy, formularz identyfikacji ofiary katastrof DVI (ang. *Disaster Victim Identification*) Interpolu 6, natomiast baza danych DVM (ang. *Data Volume Management*) [Asmann2009] – 45 cech twarzy [Ohlrogge2009]. Abraham Tamir podzielił różne kształty ludzkiego nosa na 14 grup [Tamir2011]. Podziału dokonał na podstawie 1793 zdjęć nosa. Podobne podejście zastosowano do klasyfikacji ludzkich podbródków [Tamir2013]. W tych pracach przeanalizowano i sklasyfikowano duży zbiór fotografii na podstawie podobieństwa cech podbródków.

Zautomatyzowane rozpoznawanie twarzy człowieka jest bardzo złożonym problemem komputerowym o dużym znaczeniu praktycznym. Opiera się na licznych aplikacjach napisanych specjalnie w tym celu. Aplikacje uwzględniają w sposób szczególny zautomatyzowany bezpieczny dostęp, automatyczny nadzór, analizę sądową, szybkie pobieranie informacji z baz danych, np. w departamentach policji, automatyczną identyfikację pacjentów w szpitalach, sprawdzanie oszustw lub tożsamości oraz interakcję człowiek-komputer.

W ostatnich latach skierowano znaczną uwagę badawczą na opracowanie niezawodnych systemów automatycznego rozpoznawania powierzchni, które wykorzystują dwuwymiarowe obrazy [Zhao2003]. Trójwymiarowa technologia rozpoznawania twarzy pojawia się w chwili obecnej ze względu na dostępność ulepszonych urządzeń do trójwymiarowego obrazowania oraz nowoczesnych

szybkich algorytmów przetwarzania. Trójwymiarowe obrazy twarzy pozyskuje się za pomocą urządzeń do trójwymiarowej akwizycji, zbliżonych działaniem do systemu percepcji wzrokowej człowieka. W przypadku automatycznego rozpoznawania twarzy oraz dopasowywania obrazu do wzorca, trójwymiarowe obrazy mają pewne zalety w stosunku do obrazów dwuwymiarowych. Orientację twarzy można skorygować za pomocą obrotu bryły sztywnej w przestrzeni 3D. Obrazy 3D dostarczają również informacji o strukturze twarzy, przykładowo o krzywiznie powierzchni czy odległościach geodezyjnych. Takich informacji nie da się uzyskać z pojedynczego obrazu 2D. Podczas akwizycji obrazu, algorytm rozpoznawania oparty na trójwymiarowej reprezentacji twarzy okazał się być odporny na zmiany warunków oświetlenia [Kukula2004].

Istniejące algorytmy trójwymiarowego rozpoznawania twarzy można podzielić na dwie duże klasy: algorytmy wykorzystujące techniki holistyczne oraz algorytmy oparte na cechach lokalnych [Gupta2007]. Techniki rozpoznawania twarzy wykorzystujące algorytmy holistyczne korzystają z informacji z całej twarzy lub z dużych jej regionów. Możliwe jest podejście, w którym fragmenty powierzchni twarzy są uszeregowane i dopiero wtedy są porównywane. Druga klasa algorytmów wykorzystuje właściwości strukturalne lokalnych cech fizycznych.

Wiele badań wykazało ogromny potencjał algorytmów rozpoznawania twarzy wykorzystujących lokalne cechy twarzy. W teście rozpoznawania twarzy FRVT (ang. *Face Recognition Vendor Test*) przeprowadzonym w 2002 roku [Phillips2003] analizowano dwa algorytmy rozpoznawania twarzy oparte na lokalnych cechach fizycznych twarzy. Pierwszy, oparty na lokalnej analizie jej cech [Penev1996] i drugi, oparty na elastycznym dopasowaniu pęku grafów twarzy (ang. *Elastic Bunch Graph Matching*; dalej jako EBGM) [Wiskott1997]. W EBGM twarz reprezentowana jest jako „elastyczny graf”, składający się z falkowych współczynników transformaty Gabora w określonych punktach odniesienia fragmentach twarzy i euklidesowych odległości między tymi punktami. Michael Hüsken i inni [Hüsken2005] w 2005 roku opracowali algorytm rozpoznawania twarzy 2D + 3D zwany *hierarchicznym dopasowaniem grafów*. Łączy on wyniki dwóch algorytmów 2D EBGM i 3D EBGM. Ich algorytm był również jednym z najlepiej ocenianych w ramach *Face Recognition Grand Challenge* (FRGC; pol. wielkie wyzwanie w rozpoznawaniu twarzy) zorganizowanym właśnie w 2005 roku [Wiskott1997] w celu oceny nowoczesnych

algorytmów rozpoznawania twarzy 3D z uwzględnieniem kryterium minimalizacji czasu działania.

3.1 Algorytmy rozpoznawania twarzy na obrazie 2D

Rozpoznanie twarzy od dawna przyciągało uwagę wielu naukowców. Każdy z nich zaproponował inną technikę rozpoznania twarzy na obrazie 2D. Techniki te można podzielić na trzy podstawowe kategorie. Pierwsza kategoria to podejście globalne (holistyczne). Wykorzystano w niej całą twarz (jej powierzchnię) jako dane wejściowe dla proponowanego systemu rozpoznawania. Dane te następnie rzutowane są na podprzestrzeń o małym wymiarze.

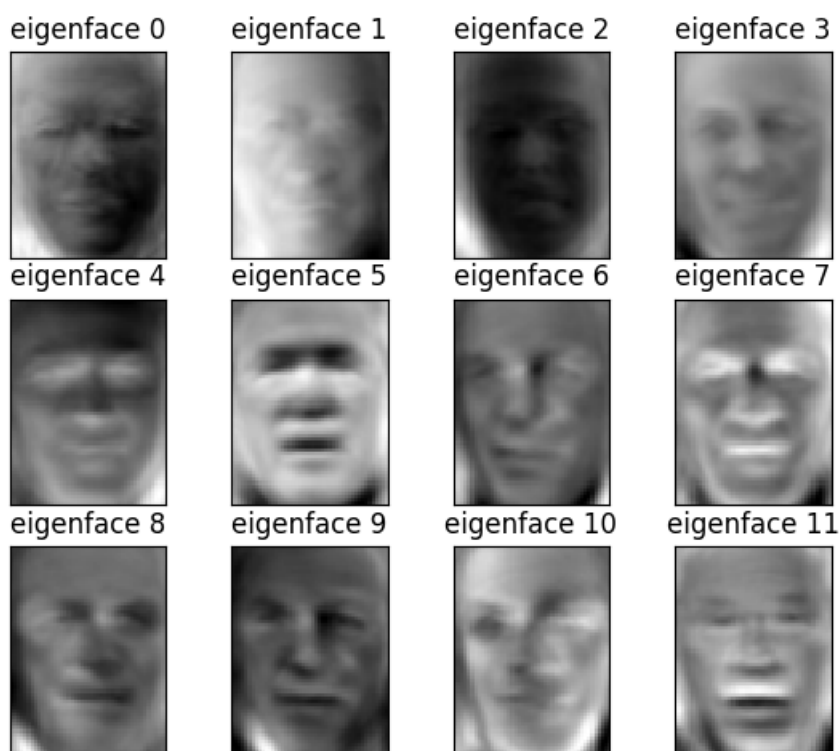
Druga kategoria obejmuje metody lokalne. Nie uwzględnia się w niej całej twarzy, ale tylko niektóre charakterystyczne jej cechy lub obszary, klasyfikowane następnie zgodnie z zdefiniowanymi wcześniej statystykami.

Podejście hybrydowe (hybryda dwóch wyżej wymienionych metod) i metody oparte na modelach statystycznych stanowią trzecią kategorię. Obejmuje ona podejścia hybrydowe, które wykorzystują jednocześnie cechy globalne i lokalne. Kumuluje w sobie pozytywne cechy dwóch powyższych metod. Wykorzystuje także podejście oparte na modelach statystycznych. Modele te formalizują zależności między zmiennymi losowymi za pomocą równań matematycznych, które opisują, w jaki sposób jedna lub więcej zmiennych losowych jest związana z jedną lub większą ich liczbą. Model jest uważany za statystyczny, gdy zmienne nie są deterministyczne, ale stochastyczne.

3.1.1 *Globalne liniowe techniki rozpoznawania twarzy*

Liniowe techniki rozpoznawania twarzy wykorzystują liniowe rzutowanie danych wejściowych interesującego obrazu z przestrzeni o dużej wymiarowości do przestrzeni o stosunkowo małej wymiarowości. Takie rzutowanie ma dwie wady. Pierwsza, to brak możliwości zachowania wypukłych zmian na twarzy, druga, to słabe odwzorowanie odległości euklidesowych pomiędzy punktami antropometrycznymi. Zatem wskaźnik wykrywania i rozpoznawania twarzy przy wykorzystaniu metod liniowych jest niski. Najbardziej popularne liniowe techniki rozpoznawania zostały wymienione poniżej.

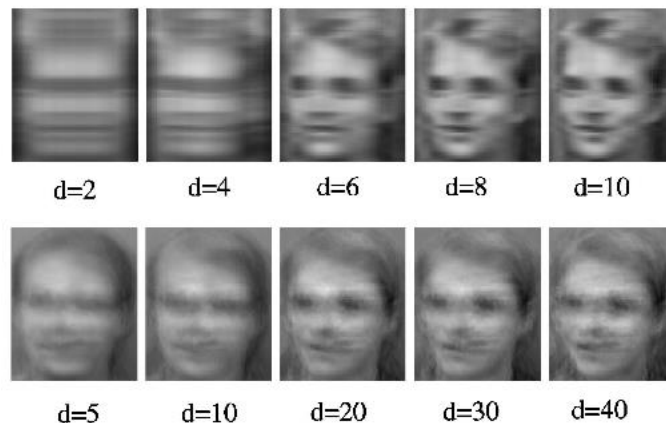
Eigenface [Turku1991] – technika ta odnosi się do opartego na wyglądzie podejścia do rozpoznawania twarzy, które ma na celu uchwycenie zmienności w kolekcji obrazów twarzy i wykorzystanie tych informacji do kodowania i porównywania obrazów poszczególnych twarzy w sposób holistyczny (w przeciwieństwie do metod częściowych lub opartych na elementach). W szczególności, wektory własne są głównymi reprezentacjami rozkładu powierzchni lub, równoważnie, reprezentacjami macierzy kowariancji z zestawu obrazów twarzy, gdzie obraz z N pikselami jest uważany za punkt (lub wektor) w przestrzeni N -wymiarowej. Zatem twarz każdego człowieka może zostać zrekonstruowana z odpowiedniej liniowej kombinacji eigenów i może wynosić np. 7% twarzy A, 3,4% twarzy B itd., podczas gdy twarz kogoś innego będzie miała inną kombinację wektorów własnych. Aby skonstruować macierz kowariancji, każdy obraz twarzy jest przekształcany w wektor, którego każdy element odpowiada intensywności piksela. Takie przekształcenie niszczy geometryczną, dwuwymiarową, strukturę obrazu.



Rysunek 4 Wizualizacja obszarów własnych [Deshpande2020]

Technika 2D PCA (ang. *Principal Component Analysis*, pol. analiza składowych głównych; dalej jako PCA [Jian2004]; dwuwymiarowy PCA) opiera się na macierzach obrazu 2D, a nie na wektorach 1D, więc macierz obrazu nie musi być przekształcana w wektor przed ekstrakcją cech. W tym systemie macierz kowariancji konstruowana

jest bezpośrednio przy użyciu oryginalnych macierzy obrazu, a jej wektory własne są pochodnymi obrazu.



Rysunek 5 Zrekonstruowane obrazy na podstawie 2D PCA (górne) i PCA (dolne), gdzie d oznacza liczbę wektorów własnych [Jian2004]

Niezależna analiza składników (dalej jako ICA – ang. *Independent Component Analysis*) [Hyvärinen2000] jest stosowana aby zdefiniować zasadę działania tego algorytmu, należy użyć statystycznego modelu „zmiennych ukrytych”. Załóżmy, że obserwowanych jest j liniowo zmieszanych elementów x_1, \dots, x_j , utworzonych z n niezależnych komponentów. Wtedy:

$$x_j = a_{j1}s_1 + a_{j2}s_2 + \dots + a_{jn}s_n \text{ dla każdego } j. \quad (1)$$

Korzystając z notacji macierzowej, powyższe równanie można zapisać jako:

$$x = As. \quad (2)$$

Punktem wyjścia dla ICA jest założenie, że składniki s_i są statystycznie niezależne.

ICA jest bardzo blisko związana z metodą nazywaną ślepym separowaniem źródeł (BSS – ang. *Blind Source Separation*) lub separacją sygnałów ślepych. „Źródło” oznacza tutaj oryginalny sygnał, tj. jakiś niezależny element. ICA jest jedną z metod, być może najszerzej stosowaną, do przeprowadzania separacji źródeł.

Wielowymiarowe skalowanie (*Multidimensional Scaling*; dalej jako MDS) [www.ncss.com2021] jest to kolejna dobrze znana technika liniowego zmniejszania wymiarów. Zamiast zachowywać wariancję danych podczas projekcji, technika stara się zachować wszystkie odległości między każdą parą przykładów $\text{dist}(x_i, x_j)$, poszukując liniowej transformacji. Problem minimalizacji można rozwiązać poprzez dekompozycję do wartości własnych przy wykorzystaniu euklidesowej odległości między danymi, które są wykorzystywane. Wyniki z tego algorytmu są zbliżone do

wyników uzyskanych z algorytmu PCA, jednak uzyskuje się je poprzez wykonanie obrotu, a później rzutowania.

Nieujemna faktoryzacja macierzy (*Non-negative Matrix Factorization*; dalej jako NMF) [Lee1999] est to metoda, która – podobnie do algorytmu PCA – widzi twarz osoby jako liniową kombinację wektorową bez użycia pojęcia klasy. Różnica pomiędzy tymi algorytmami polega na tym, że przy wykorzystaniu algorytmu NMF nie ma możliwości, aby wektory będące podstawą kombinacji cech były ujemne.

Liniowa analiza dyskryminacyjna (*Linear Discriminant Analysis*; dalej jako LDA) [Belhumeur1997] funkcjonuje na zasadzie budowania podprzestrzeni dyskryminacyjnej, która umożliwia odróżnienie twarzy różnych ludzi. Zwana jest także liniową dyskryminacją Fishera. Obraz twarzy, który zazwyczaj składa się z dużej liczby pikseli, jest redukowany do niewielkiego zbioru liniowych kombinacji cech dla danej twarzy. Z tych liniowych kombinacji, za pomocą klasyfikatora Fishera tworzony jest następnie jej obraz, określany mianem twarzy Fishera (ang. *Fisher face*).

Jeśli chodzi o liniowe techniki PCA, LDA i ICA analizy podprzestrzeni, prowadzono prace mające na celu poprawę ich wydajności. Na przykład praca wykonana m.in. przez Goncalo Tavaresa poprawiła PCA pod kątem odporności na zmiany pozy/orientacji [Tavares2016]. Podprzestrzeń probabilistyczna została wprowadzona, aby zapewnić bardziej znaczące podobieństwo miary w ramach probabilistycznych. Poza tym m.in. Gavin Buckingham przedstawił kombinację D-LDA (bezpośrednia LDA) i F-LDA (ułamkowa LDA), wariant LDA, w którym funkcje ważone są używane w celu uniknięcia błędnej klasyfikacji spowodowanej przez zbyt bliskie kategorie [Buckingham2006]. W związku z tym zaproponowane zostało podejście oparte na wieloliniowym rozkładzie tensora zestawu obrazów w celu zmniejszenia wpływu kilku czynników związanych z samym systemem rozpoznawania twarzy, takich jak oświetlenie i orientacja [Boberg2008].

Falki Gabora [Kar2013] – aby poprawić rozpoznawanie twarzy stosowane są tzw. Falki Gabora, gdzie wektory transformacji o wysokiej intensywności są wyodrębniane z transformaty falkowej Gabora obrazów twarzy *en face* (na wprost) i stosowane w połączeniu z modelem wykrywania ICA [Hyvärinen2000]. Charakterystyka falki Gabora została uznana za jedną z najlepszych reprezentacji umożliwiających rozpoznawanie twarzy.

Chociaż opisane wyżej metody liniowe unikają wad, jakie posiadały wcześniej opracowane metody identyfikacji – tj. metody geometryczne, nadal nie są one jednak

wystarczająco precyzyjne. Słabo opisują subtelności związane z różnicami geometrycznymi obecnymi w przestrzeni obrazu oryginalnego. W głównej mierze wynika to z ograniczeń w możliwościach zarządzania nieliniowością parametrów w trakcie rozpoznawania twarzy. Zatem odkształcenia mogą zostać wygładzone, a wklęsłości mogą być wypełniane, co może spowodować niekorzystne konsekwencje odnośnie rozpoznawania twarzy.

Kolejne globalne liniowe techniki wykorzystywane do rozpoznawania twarzy, to:

- Regularyzowana analiza dyskryminacyjna (ang. *Regularized Discriminant Analysis*; dalej jako RDA) [Friedman1989]. W tej technice macierze kowariancji warunkowej klasy są zastępowane przez oszacowanie regularne. Po wstępnej analizie metodą, którą przedstawił Jerome H. Friedman [Friedman1989], najpierw oblicza się połączoną (wewnątrz klasy) macierz kowariancji próbki. Następnie za pomocą parametru regularyzacji konwertuje macierz kowariancji klasy na kombinację liniową. Taka procedura ustawia dwuwymiarową siatkę punktów na dwóch płaszczyznach. Ocenia potwierdzone krzyżowo szacowanie ryzyka błędnej klasyfikacji w każdym przepisany punkcie na siatce dwóch płaszczyzn, a następnie wybiera punkt o najmniejszym szacowanym ryzyku jako odpowiednie wartości parametrów regularyzacji.
- RLDA (*Regression; LDA*) [Hastie1995] – technika jest tożsama z LDA, czyli obie działają na podstawie takich samych podstawowych modeli liniowych. Różnica polega na tym, że RLDA optymalizuje prawdopodobieństwo warunkowe, natomiast LDA prawdopodobieństwo pełne.
- NLDA (*Null-space; LDA*) [Liu2004], to naturalne rozszerzenie konwencjonalnego LDA. Nazywane tak w przypadku, kiedy wewnątrz klasy znajduje się macierz osobliwa (ang. *singular matrix*). Gdy wewnątrz klasy macierz jest jednostkowa, może znaleźć w niej podprzestrzeń stanowiącą międzyklasową macierz rozproszenia. Uzyskuje się w ten sposób liniowe kryterium dyskryminacji Fishera.
- *Dual-space* LDA [Wang2004] zostało opracowane w celu wyeliminowania problemów związanych z zastosowaniem LDA dla małej liczby próbek danych tak, aby w pełni wykorzystać dyskryminujące informacje w przestrzeni twarzy. Na podstawie probabilistycznego modelu wizualnego szacuje się widmo wartości własnych w wewnątrzklasowej przestrzeni zerowej macierzy rozrzutu, a analizę

dyskryminacyjną stosuje się zarówno w podprzestrzeni głównej, jak i wewnątrzklasowej podprzestrzeni zerowej macierzy rozproszenia. Oba zestawy cech dyskryminujących są ostatecznie łączone w celu rozpoznania osoby.

- *Boosting* LDA [Lu2021] – zapewnia wysoką precyzję klasyfikacji danych. Algorytm ten zamiast pojedynczych cech do klasyfikowania używa rozpoznanych grup wzorców, które opisywane są jako funkcje. Dodatkowo wykorzystuje dwuetapową iterację ważoną, która polega na zintegrowaniu słabych klasyfikatorów z silnymi klasyfikatorami. Wzajemne informacje powstałe pomiędzy klasyfikatorami wykorzystywane są jako wskaźniki alokacji ich wag. Algorytm ten jest szybszy niż algorytmy oparte na wektorach wsparcia czy sieciach neuronowych.
- *Block* LDA [Nhat2005] – algorytm ten wykorzystuje podzielenie obrazu twarzy na kilka nienakładających się podobrazów o tym samym rozmiarze. Dzięki temu zwiększa się liczba próbek, natomiast wymiar próbki się zmniejsza. Ponadto, aby zmniejszyć wpływ zmienności oświetlenia, wszystkie wykorzystywane obrazy twarzy są przekształcane w obrazy gradientowe. Uzyskany obraz gradientowy jest dzielony na N^2 mniejszych obrazów. Następnie podobrazy są rzutowane na wektory przy wykorzystaniu klasycznego algorytmu LDA. Na koniec stosuje się odległość euklidesową w celu ustalenia wyniku rozpoznania/klasyfikacji.
- Ulepszony dyskryminator liniowy Fisher (ang. *Enhanced Fisher Linear Discriminant*; FLD) [Zhou2004] – algorytm obejmuje równoczesną diagonalizację dwóch wewnętrznych klas macierzy oraz jednej klasy, która powstaje pomiędzy macierzami. Najpierw czyszczona jest macierz klasy, a następnie stosowane jest PCA pomiędzy klasami macierzy rozproszenia, przy wykorzystaniu danych przetworzonych. Celem etapu czyszczenia jest normalizacja macierzy rozproszenia wewnątrz klasy dla jej wzmocnienia. Druga operacja na macierzach maksymalizuje rozproszenie między klasami tak, aby jak najbardziej rozdzielić różne klasy.
- Wspólne wektory dyskryminacyjne (ang. *Discriminative Common Vectors*; DCV) [Visani2021] – ten algorytm zamiast używać własnej macierzy rozproszenia dla danej klasy, używa macierzy rozproszenia wszystkich dostępnych klas. Uzyskuje się w ten sposób wspólne wektory. Nowy zestaw wektorów, zwany dyskryminującymi wektorami wspólnymi, jest wykorzystany do klasyfikacji.

- Dwuliniowa analiza dyskryminacyjna (ang. *Bilinear Discriminant Analysis*; BDA) [Cevikalp2005] – polega na znalezieniu zestawu wag oraz progę tak, aby funkcja dyskryminacyjna maksymalizowała kryterium dyskryminacji, np. wektor danych w dwóch klasach. Metody określania wag i wartości progowej obejmują regresję metodą najmniejszych kwadratów, regresję logistyczną, dyskryminator liniowy Fishera i perceptron jednowarstwowy. Prostota tego algorytmu czyni go dobrym kandydatem do klasyfikacji w sytuacjach, w których dane wykorzystane do uczenia są bardzo ograniczone. Ponadto pozwala na identyfikację klas/elementów zależnych od posiadanych danych.

3.1.2 *Globalne nieliniowe techniki rozpoznawania twarzy*

W przypadku, kiedy wejściowe struktury danych są liniowe, podejścia liniowe opisane powyżej zapewniają ich wierną reprezentację. Jednak, gdy dane są nieliniowe, możliwym rozwiązaniem jest użycie funkcji jądra (ang. *kernel functions*), która umożliwia niejawne porównywanie danych w przestrzeni wysoko wymiarowej, w której problem nieliniowy staje się liniowy. Daje to możliwość zastosowania technik liniowych w przypadku, kiedy wewnętrzna struktura danych pozostaje nieliniowa.

Proces rozpoznania/klasyfikacji polega w tym przypadku na opisanu danych nieliniowych za pomocą produktu liniowego przy wykorzystaniu funkcji kernel. Właśnie w takim kontekście zaproponowano kilka podejść dla metod nieliniowych. Są to:

- Analiza składowych głównych z wykorzystaniem funkcji jądra (ang. *Kernel Principal Component Analysis*; dalej jako KPCA) [Maurer2005] – jest niczym innym jak zastąpieniem, z wykorzystaniem funkcji kernel, klasycznej technologii liniowej PCA do opisu danych nieliniowych. Różnica polega na tym, że w KPCA oblicza się główne wektory własne z wykorzystaniem funkcji kernel, a nie bezpośrednio macierzy kowariancji. Tak zmienione PCA może być postrzegane jako realizacja PCA w przestrzeni wysokowymiarowej przez powiązaną z nią funkcją kernel. KPCA pozwala więc na budowę odwzorowań nieliniowych. Ponieważ technika KPCA opiera się na funkcjach kernel, jej skuteczność w dużej mierze zależy od wyboru tej funkcji. Zazwyczaj używane są funkcje wielomianowe lub funkcja Gaussa [Hoffmann2007]. Metoda KPCA została z dużym powodzeniem wykorzystana do rozwiązania takich problemów, jak

rozpoznawanie osób, rozpoznawanie mowy lub wykrywanie nowych elementów danych zestawów. Jej główną słabością jest rozmiar macierzy jądra, który stanowi kwadrat liczby próbek zbioru treningowego, zatem może szybko osiągać duże wartości (duży rozmiar).

- Maszyna wektorów podpierających (*Support Vector Machine*; dalej jako: SVM) [Shawe-Taylor2004] – jest to technika uczenia się skutecznie wykorzystywana do rozpoznawania wzorca, np. twarzy, z wysoką wydajnością, bez konieczności dodawania większej liczby informacji o obiekcie. Kilka lat wcześniej opisał tę technikę Vladimir Naumovich Vapnik [Vapnik1995], a rozbudował ją Guodong Guo [Guo2000], który wykorzystał SVM opierając się na strategii rozpoznawania za pomocą drzewa binarnego, ze szczególnym uwzględnieniem i rozwiązaniem problemów związanych z rozpoznawaniem twarzy.
- Analiza komponentów niezależnych od jądra (ang. *Kernel Independent Component Analysis*; KICA) [Bach2002] – jest to wydajny algorytm służący do niezależnej analizy komponentów, który szacuje komponenty źródłowe przy wykorzystaniu uogólnionej funkcji wariancji opartej na przestrzeni Hilberta. Jądro tego algorytmu opiera się na korelacji między dwiema zmiennymi losowymi reprezentowanymi w przestrzeni Hilberta, powiązanych z daną mapą obiektów. Badania przeprowadzone przez Francisa Bacha i Michaela I. Jordana [Bach2002] oraz badania przeprowadzone m.in. przez Tommaso Martiriggiano [Martiriggiano2002] wykazały, że jest on bardziej skutecznym algorytmem niż Fast ICA czy PCA.
- Isomap [Weinberger2021] – metoda, która wykazała dobre wyniki w znajdowaniu niskowymiarowych rozmaitości w wysokowymiarowej przestrzeni wejściowej. Podczas, gdy konwencjonalne metody obliczają wartości w celu przedstawienia odległości między próbkami oraz stosują analizę głównych składowych lub podobnie do indukowania rozmaitości liniowych, metoda izomapy szacuje odległość geodezyjną między próbkami, a następnie wykorzystuje wielowymiarowe skalowanie do wyznaczenia rozmaitości niskowymiarowej.
- Maksymalne rozwijanie wariancji (*Maximum Variance Unfolding*; dalej jako MVU) [Yang2002] – metoda ta w przeciwieństwie do metody Isomap uczy się danych z wyznaczonych podobieństw, zachowując zarówno lokalne odległości, jak i kąty między parami wszystkich sąsiadów każdego punktu w danym zestawie

danych. Ponieważ metoda zachowuje w przetwarzaniu lokalną maksymalną wariancję redukcji wymiarowości, nazywa się ją rozwijaniem poziomu maksymalnej wariancji (MVU). Podobnie, jak skalowanie MDS, MVU można zastosować do przypadków, w których są podane np. tylko lokalne podobieństwa obiektów w określonym zestawie danych. W takich przypadkach MVU próbuje znaleźć dane podobne do danych wejściowych. Technicznie rzecz biorąc, MVU stosuje programowanie częściowo skończone¹ (SDP) w celu rozwiązania założeń problemowych.

- Lokalne liniowe osadzenie (ang. *Local Linear Embedding*,; dalej jako LLE) [Socolinsky2004] – w porównaniu do metody Isomap ma szybszą optymalizację po zaimplementowaniu, dzięki wykorzystaniu algorytmów macierzowych. Metoda ta zaczyna swoje działanie od znalezienia zbioru najbliższych sąsiadów każdego punktu. Następnie oblicza zestaw wag dla każdego punktu, który najlepiej opisuje ten punkt jako liniową kombinację jego sąsiadów. Na koniec wykorzystuje technikę optymalizacji opartą na wektorze własnym w celu znalezienia niskowymiarowego osadzania punktów, tak, że każdy punkt jest nadal opisywany za pomocą tej samej liniowej kombinacji swoich sąsiadów. Metoda ta jednak słabo radzi sobie z niejednorodnymi gęstościami próbek, ponieważ nie ma ustalonej jednostki, która zapobiegałaby przesuwaniu środków ciężkości bryły, a wynika to z tego, że różne obszary różnią się gęstością próbek.
- Projekcja z zachowaniem jej lokalizacji (ang. *Locality Preserving Projection*; dalej jako LPP) [He2003] to metoda, która stosuje liniowe mapy rzutowe. Powstają one w wyniku rozwiązania problemu wariacji danych źródłowych, który optymalizuje strukturę zbioru najbliższych sąsiadów. Metoda jest alternatywą dla PCA, jednak rzutuje dane wzdłuż kierunków maksymalnej ich wariancji. Lokalność danych uzyskuje się poprzez znalezienie optymalnych liniowych przybliżeń funkcji własnych operatora Laplace'a Beltramiiego. W rezultacie, LPP ma wiele właściwości charakterystycznych dla technik nieliniowych, takich jak *Laplacian Eigenmaps* lub LLE, jednak jest w pełni liniowe i, co ważniejsze, jest definiowane w otaczającej dane przestrzeni, a nie tylko w punktach danych treningowych. LPP

¹ Programowanie częściowo skończone to dziedzina optymalizacji, która wiele praktycznych problemów związanych z badaniami operacyjnymi i optymalizacją modeluje lub aproksymuje jako częściowo skończone problemy programistyczne.

może być przeprowadzane w oryginalnej przestrzeni danych lub w odtwarzanej przestrzeni jądra Hilberta, do której odzworowane są punkty danych.

- Lokalna Przestrzeń Styczna (*Local Tangent Space Analysis*; LTSA) [Wang2009] – metoda ta modeluje dane z przestrzeni n wymiarowej na przestrzeń m wymiarową, przy czym $m < n$, w ten sposób, że znajduje zbiór k najbliższych sąsiadów każdego punktu, a następnie wydobywa informacje lokalne, obliczając d wektorów własnych, z których następnie powstaje macierz korelacji danych. Kolejny krok to budowa macierzy wyrównania B z punktem początkowym $B=0$. W tym momencie zbiór sąsiedztwa danej reprezentowany jest jako zbiór indeksów dla k najbliższych sąsiadów i transponowany jest do nowej macierzy danych. Następnie obliczane są najmniejsze wektory własne i przyporządkowuje się im globalne współrzędne danych odpowiadające swojej najmniejszej wartości własnej.
- Podejścia neuronowe [Raducanu2021] – rozwój sieci neuronowych umożliwił zmianę skuteczności algorytmów rozpoznawania twarzy. Wykorzystanie sieci neuronowych daje lepsze efekty niż metryka liniowa z uwagi na fakt, że tworzą one bardziej skomplikowane powierzchnie decyzyjne. Sieci mogą być uczone ekstrakcji cech głównych zadanego obrazu w różnych wariantach. Perceptron wielowarstwowy (ang. *multilayer perceptron*; dalej jako MLP) uczony algorytmem propagacji wstecznej daje na wyjściu dokładnie m pierwszych wartości cech głównych celu identyfikacji. W przeciwnym przypadku, otrzymane wartości nie są dokładnie wartościami cech głównych, ale lepiej opisują wektor cech wejściowych. Sieć neuronową w tym wariantcie można uczyć na dwa sposoby. Można stworzyć jedną sieć i uczyć ją przykładami twarzy z wszystkich dostępnych klas lub wygenerować odrębną sieć dla każdej z klas i testować twarze w poszczególnych sieciach. Ekstrakcję cech można realizować także przy pomocy sieci uczonych w sposób nienadzorowany, np. metodą Hebba. W przypadku, kiedy mamy tylko po jednym przykładzie z każdej klasy, typowa dla danej klasy twarz może być otrzymana jako atraktor przy użyciu rekurencyjnych sieci neuronowych, np. sieci Hopfielda. Na podstawie powyższego można powiedzieć, że MLP umożliwia detekcję twarzy, sieć Hebba ekstrakcję jej cech, a sieć Hopfielda umożliwia stworzenie typowej twarzy jako atraktora. Jeżeli będzie analizowana twarz, która nie jest dokładnie frontalna, do znalezienia reprezentacji twarzy najbardziej niezależnej od jej obrotu należy wykorzystać sieci rekurencyjne.

- Sieci Kohonen'a [Lawrence1997] – to jeden z podstawowych typów sieci samoorganizujących się. Ta właściwość daje możliwość adaptacji do wcześniej nieznanymi danych wejściowych, o których bardzo niewiele wiadomo. Sieci Kohonen'a stanowią synonim całej grupy sieci, w których uczenie odbywa się metodą samoorganizującą typu konkurencyjnego. Polega ona na podawaniu na wejścia sieci sygnałów, a następnie wybraniu w drodze konkurencji zwycięskiego neuronu, który najlepiej odpowiada wektorowi wejściowemu. Właśnie taka sytuacja odpowiada rozpoznawaniu twarzy. Mając jeden słabo rozpoznawalny obiekt, można spowodować, że sieć spróbuje go odnaleźć w kolejnych obrazach.
- Splotowe sieci neuronowe [Duffner2021] – typowa splotowa sieć neuronowa składa się z kombinacji trzech podstawowych typów warstw: warstwy splotowej, warstwy aktywacji oraz warstwy redukującej rozmiar. Dodatkową warstwę stanowią klasyczne warstwy neuronowe nazywane warstwami pełnego połączenia. Obraz wejściowy podawany jest na pierwszą warstwę splotową, która wykonuje na nim operacje splotu dyskretnego. Na jej wyjściu otrzymuje się mapę cech. W obszarze analizy operacja splotu wykorzystywana jest do filtracji. Kolejny etap przetwarzania, to nieliniowa funkcja aktywacji, która przetwarza każdy piksel obrazu. Wyjście ostatniej warstwy splotowej trafia na klasyczną sieć neuronową. Cechą odróżniającą głębokie sieci neuronowe od klasycznych systemów klasyfikacji obrazów jest możliwość automatycznej ekstrakcji cech bez udziału badacza.

Wszystkie powyższe metody projekcji przestrzeni obrazów na przestrzeń cech są nieliniowe. Dzięki temu możliwe jest zmniejszenie – choć tylko do pewnego stopnia – wymiaru problemu rozpoznawania/klasyfikacji. Jednakże, chociaż techniki te często poprawiają szybkość rozpoznawania, są zbyt elastyczne, aby były odporne na nowe typy danych, w przeciwieństwie do opisanych powyżej metod liniowych.

3.1.3 Lokalne metody rozpoznawania twarzy

W metodach lokalnych wyodrębnia się określone cechy geometryczne, takie jak szerokość głowy, odległość między oczami czy kącikami ust, a następnie dane te są zapamiętywane jako wektor cech, dzięki któremu można rozpoznać (zidentyfikować) daną osobę.

Metody te można podzielić na dwie klasy. Pierwsza klasa skupia się na sposobie działania detektorów punktów antropometrycznych twarzy, natomiast druga zajmuje

się bardziej rozbudowanymi reprezentacjami informacji przesyłanymi przez te punkty, a nie tylko ich cechami geometrycznymi.

Popularną metodą jest tutaj architektura połączeń dynamicznych (ang. *Dynamic Link Architecture*; DLA). Takie rozwiązanie zaproponował m.in. Daniel Saez Trigueros [Trigueros2021]. W tej metodzie twarz jest reprezentowana za pomocą wykresu jej węzłów. Węzły zawierają współczynniki falkowe Gabora [Lee1996] wyodrębnione dla obszarów wokół zestawu predefiniowanych punktów antropometrycznych twarzy. Podczas próby identyfikacji twarzy, wykresy węzłów są porównywane i mierzone są podobieństwa między ich węzłami graficznymi. Na tej podstawie podejmuje się decyzję o rozpoznaniu osoby. Kolejna metoda wykorzystuje elastyczne dopasowanie grafów wiązek EBGM, w którym współczynniki falkowe Gabora zastąpiono histogramem gradientów kierunkowych (ang. *Histogram of Oriented Gradients*; deskryptory HOG) [Monza2008]. Algorytm ten ma lepszą wydajność w stosunku do DLA z uwagi na właściwości deskryptorów histogramowych obrazu. Są one bardziej odporne na zmiany oświetlenia, rotacji lub małe przemieszczenia. Powodują także większą rozróżnialność grafów twarzy w porównaniu z grafami otrzymywanymi czy to metodą DLA, czy EBGM z wykorzystaniem współczynników falkowych Gabora.

Wektor funkcji geometrycznych [Seyed2018], to metoda wykorzystująca obraz wzorca do bardzo dokładnego wykrywania pozycji interesującego nas punktu w badanym obrazie. Metoda ta wyznacza dla każdego punktu antropometrycznego współczynniki korelacji między obrazem badanym a obrazem wzorca, a następnie poszukuje wartości maksymalnych.

Inną metodą jest model statystyczny twarzy [Yang2018] – wykorzystuje wiele detektorów o specyficznych cechach dla każdej części twarzy, takich jak oczy, nos, usta, podbródek itp. Zakłada się, że można zbudować modele statystyczne kształtów twarzy. Jednak pomimo wielu prac badawczych wciąż nie ma wystarczająco wiarygodnych i dokładnych punktów antropometrycznych, które przy zastosowaniu tej metody dadzą możliwość identyfikacji.

Reasumując, istnieje wiele algorytmów rozpoznawania twarzy opartych na jawnie wyznaczonym wektorze cech. Można je skutecznie wykorzystać do rozpoznawania twarzy, gdy dostępne jest np. tylko jedno zdjęcie referencyjne. Jednak wydajność tych algorytmów zależy od skutecznych algorytmów lokalizowania punktów antropometrycznych twarzy. W praktyce, dokładne zadanie detekcji punktu nie jest

łatwe i nie zostało całkowicie rozwiązane, szczególnie w przypadkach, gdy cechy charakterystyczne twarzy, np. kształt lub wygląd jej obrazu, mogą się znacznie różnić.

Algorytmy opierające się na wyglądzie twarzy bazują na zdefiniowanych lokalnych regionach. Po ich zdefiniowaniu należy wybrać najlepszy sposób reprezentowania informacji o zawartości każdego regionu. Ma to kluczowe znaczenie dla wydajności systemu rozpoznawania, który ma być zastosowany. Powszechnie używane cechy, to: współczynniki Gabora [Brunelli1993], falki Haara [Viola2004], transformaty Fouriera, deskryptory, jak przykładowo transformacja elementu niezmiennego (ang. *Scale-Invariant Feature Transform*; dalej jako SIFT) [Lowe2004], charakterystyki oparte na metodzie lokalnego wzoru binarnego (ang. *Local Binary Pattern*; dalej jako LBP) [Ahonen2004], kwantyzacja fazy lokalnej (LPQ) [Ojansivu2008], deskryptor prawa Webera (WLD) [Chen2010] i binaryzowane funkcje obrazu statystycznego (BSIF) [Kannala2012].

W porównaniu z podejściem globalnym, metody lokalne mają pewne zalety. Po pierwsze, mogą dostarczyć dodatkowych informacji wygenerowanych na podstawie lokalnych regionów. Po drugie, dla każdego rodzaju charakterystyki lokalnej można wybrać najbardziej odpowiedni dla jej opisu wektor cech. Pomimo jednak tych zalet, w podejściu lokalnym wymagana jest integracja danych lokalnych do bardziej ogólnych informacji o strukturze. Ogólnie rzecz biorąc, istnieją dwa sposoby osiągnięcia tego celu. Pierwszym sposobem jest zintegrowanie lokalnych informacji przy użyciu struktur danych, takich jak graf, w którym każdy węzeł reprezentuje lokalną cechę, podczas gdy krawędź między dwoma węzłami reprezentuje relację przestrzenną między nimi. Rozpoznawanie twarzy jest zatem problemem dopasowania dwóch grafów. Drugi sposób polega na wykorzystaniu technik fuzji punktowej: oddzielne klasyfikatory są używane w każdej lokalnej charakterystyce do obliczania podobieństwa. Aby zapewnić globalny wynik końcowej decyzji, uzyskane podobieństwa są następnie łączone, np. przy zastosowaniu zespołów klasyfikatorów (ang. *Ensemble Classifier*) w tym lasów losowych (ang. *Random Forest*) lub klasyfikatorów drzewowych XGBoost i tym podobnych.

3.1.4 Metody hybrydowe

Ta kategoria obejmuje podejścia hybrydowe, które wykorzystują jednocześnie cechy globalne, jak i lokalne, aby najlepiej wykorzystać zalety tych metod. Obejmuje ona również techniki oparte na modelach statystycznych. Ta ostatnia technika

formalizuje relacje między zmiennymi w postaci równań matematycznych, które opisują, w jaki sposób jedna lub więcej zmiennych losowych jest powiązanych z jedną lub większą liczbą zmiennych losowych. Ten model jest uważany za statystyczny, gdy zmienne nie są deterministyczne, ale stochastyczne. Do metod hybrydowych należą:

- Ukryte modele Markowa (ang. *Hidden Markov Model*; dalej jako HMM) [Lal2018] – zaczęły być używane w 1975 roku w różnych dziedzinach, zwłaszcza w rozpoznawaniu głosu. W pełni wykorzystywane były od 1980 r. w rozpoznawaniu mowy. Następnie zastosowano je do rozpoznawania tekstu rękopisu, przetwarzania obrazu, muzyki i bioinformatyki (sekwencjonowanie DNA itp.), a także w kardiologii (segmentacja sygnału EKG). Ukryte modele Markowa, zwane również źródłami Markowa lub probabilistycznymi funkcjami Markowa” są potężnymi narzędziami statystycznymi do modelowania sygnałów stochastycznych. Modele te okazały się skuteczne od czasu ich wynalezienia przez Leonarda E. Bauma i jego kolegów. Mogą być zdefiniowane przez model statystyczny łańcucha Markowa. Model ten złożony jest ze „stanów” i „przejsć”. W przypadku obrazów twarzy znaczące obszary twarzy (włosy, czoło, brwi, oczy, nos, usta i podbródek) są umieszczane w naturalnej kolejności od góry do dołu, jeśli obraz jest pozyskiwany przy małych obrotach. Dla każdego z tych regionów występuje stan od lewej do prawej.
- Transformacja falkowa Gabora w powiązaniu z pseudoukrytym modelem Markowa (ang. *Poisson Hidden Markov Model*; dalej jako GWT-PHMM) [Lee1999] to podejście, które łączy zalety wielorozdzielczości transformacji falkowej Gabora (dalej jako: GWT) z lokalnymi interakcjami występującymi w strukturze twarzy wyrażonymi przez pseudoukryte modele Markowa (ang. *Poisson Hidden Markov Model*; dalej jako HMM). W odróżnieniu od tradycyjnej metody zygzakowego skanowania do ekstrakcji cech, metoda ciągłej analizy powinna być przeprowadzana od lewej górnej strony do prawej, a następnie od góry do dołu i od prawej do lewej itd., aż do prawego dolnego rogu obrazu. Ponadto w przeciwieństwie do tradycyjnego HMM, PHMM nie wymaga warunkowej niezależności stanów dla widocznej sekwencji obserwacji. Wynik ten został osiągnięty dzięki koncepcji lokalnych struktur wprowadzonych przez PHMM wykorzystywanych do wydobywania pasm twarzy i automatycznego wybierania najbardziej informacyjnych cech obrazu twarzy. Ponownie użycie

najbardziej informacyjnych pikseli zamiast całego obrazu sprawia, że proponowana metoda rozpoznawania twarzy jest stosunkowo szybka.

- Systemy rozpoznawania wykorzystujące PCA oraz dyskretną transformację kosinusową (ang. *Discrete Cosine Transform*; dalej jako DCT) w podejściu HMM [Jameel2015] —kiedy nie używamy DCT, PCA stosuje się do zmniejszenia wymiaru, najpierw szczegóły twarzy organizujemy w bloki, a następnie wykonujemy na blokach DCT. Kolejny krok to korzystamy z PCA, ponownie nie wykorzystując odwrotnej transformacji DCT, co tym samym przyspiesza działanie takiego rozwiązania.
- HMM-LBP [Chihaoui2015] – to podejście hybrydowe, które pozwala na klasyfikację obrazu twarzy 2D za pomocą narzędzia LBP. Składa się ono z czterech etapów. Pierwszy rozkłada obraz twarzy na bloki. Kolejny wyodrębnia cechy obrazu za pomocą LBP. Następny oblicza wysokość prawdopodobieństwa, z jakim w danym bloku znajduje się twarz. Ostatni wybiera blok o maksymalnym prawdopodobieństwie.
- Podejście hybrydowe oparte na charakterystycznych wartościach SVD (ang. *Singular Value Decomposition*, pol. rozkład według wartości osobliwych; dalej jako SVD) dla rozkładu falkowego [Hashemi2015] – to skuteczny system rozpoznawania twarzy wykorzystujący wartości własne transformaty falkowej jako wektory cech i sieć neuronową z radialną funkcją bazową (RBF) jako klasyfikator. Za pomocą transformaty falkowej 2D obraz twarzy dekomponowany jest na dwa poziomy, następnie obliczana jest średnia współczynników falkowych w celu znalezienia charakterystycznych centrów.
- Dyskryminacyjny model zmiennej utajonej procesu Gaussa (ang. *Discriminative Gaussian Process Latent Variable Model*; dalej jako DGPLVM) [Urtasun2007] — jest rozszerzeniem GPLVM (ang. *Gaussian Process Latent Variable Model*), w którym proces transformaty gaussowskiej jest mapowany z niskowymiarowej przestrzeni utajnionej do wielowymiarowego zestawu danych, gdzie lokalizacja punktów w przestrzeni utajnionej jest określana przez maksymalizację prawdopodobieństwa procesu Gaussa w odniesieniu do macierzy, w której wiersze reprezentują odpowiednie pozycje utajnionej przestrzeni X. Model ten umieszcza dyskryminator nad ukrytymi w macierzy pozycjami, stosując metodę

przydzielania pozycji tak, aby pozycje różnych klas były od siebie maksymalnie oddalone, a pozycje obiektów tej samej klasy możliwie blisko.

- Analiza dyskryminacyjna różnych rozkładów Gaussa według Riemanna (ang. *Discriminant analysis on riemannian manifold of Gaussian distributions*; dalej jako DARG) [Wang2015] – koncepcją tej metody jest uchwycenie rozkładów podstawowych, założonych danych w każdym zestawie obrazów w celu ułatwienia klasyfikacji i zwiększenia jej niezawodności. W tym celu reprezentuje się zestaw obrazów jako mieszaninę m modeli Gaussa (ang. *Gaussian Mixture M-models*; dalej jako GMM) zawierającą wcześniej określoną liczbę składników Gaussa z określonym prawdopodobieństwem. Biorąc pod uwagę informacje geometryczne, komponenty Gaussa leżą na określonych rozmaitościach Riemanna. Aby poprawnie zakodować taki kolektor Riemanna, DARG wykorzystuje kilka odległości między składnikami Gaussa i wyznacza serię udokumentowanych pozytywnych probabilistycznych rdzeni. W tym ostatnim opracowywana jest ważona analiza różnicowa rdzeni w celu traktowania GMM jako próbek, a ich wyznaczone prawdopodobieństwa jako ich wagi.
- Lokalne deskryptory afiniczne i podobieństwo probabilistyczne [Gao2015] – algorytm ten łączy transformację afiniczną oraz deskryptory cech (SIFT) zgodnie z podobieństwem probabilistycznym ich wystąpienia. Affine SIFT jest rozszerzeniem metody SIFT. Wykrywa lokalne niezmiennicze deskryptory, generuje szereg różnych widoków przy wykorzystaniu transformacji afinicznej. W tym kontekście umożliwia zobrazowanie różnic między obrazem twarzy oraz obrazem wzorca. Jednak ludzka twarz nie jest płaska, ponieważ zawiera ważną dla rozpoznawania twarzy głębię 3D, której algorytm ten nie uwzględnia. Podejście to nie jest skuteczne także w przypadku dużych zmian pozycji/orientacji danej twarzy. Ponadto łączy się z podobieństwem probabilistycznym, które uzyskujemy między obrazem twarzy a wzorcem na podstawie sumy rozkładu różnic kwadratowych w procesie uczenia się online.
- Algorytm hybrydowy wykorzystujący falki PCA i transformatę Gabora [Cho2014] – to podejście, które wykorzystuje algorytm rozpoznawania twarzy podzielony na dwa etapy rozpoznawania. Oparty jest on o cechy globalne i lokalne. W pierwszym etapie rozpoznawania tzw. zgrubnego algorytm stosuje analizę głównych składników (PCA) w celu wstępnej identyfikacji obrazu testowego. Etap rozpoznawania twarzy kończy się na tym etapie, jeśli otrzymany wynik poziomu

ufności okaże się wiarygodny. W przeciwnym razie algorytm wykorzystuje otrzymany wynik do filtrowania obrazów, „najlepszych kandydatów”, o wysokim stopniu podobieństwa i przesyła je do następnego etapu rozpoznawania, w którym stosowane są filtry Gabora.

- Ręczna segmentacja za pomocą filtru Gabora oraz sieci neuronowej [Qasim2014] jest kolejną techniką ekstrakcji cech twarzy, która zapewnia wysoką precyzję rozpoznawania. W tym podejściu rysy topograficzne twarzy są wydobywane podczas ręcznej segmentacji obszarów twarzy, czyli wyznaczania położenia oczu, nosa i ust. Następnie realizowana jest transformata Gabora i dookreślane jest maksimum tych regionów, tak aby obliczyć lokalną ich reprezentację. W fazie uczenia się podejście to wykorzystuje metodę najbliższego sąsiada. Metoda ta jest wykorzystywana do obliczenia odległości między trzema wektorami cech tych regionów oraz odpowiadającymi im wektorami porównawczymi.
- HMM-SVM-SVD [Nefti2015] – to kombinacja dwóch klasyfikatorów: SVM i HMM. Pierwszy z nich jest używany z cechami PCA, podczas gdy drugi jest jednowymiarowym modelem o siedmiu stanach, w których cechy oparte są na SVD. Dzięki temu podejściu wykorzystujemy reguły wyżej wymienionej kombinacji do łączenia wyników.
- Scalanie lokalnych i globalnych cech opartych na transformacji Gabora oraz PCA – to połączenie dwóch rodzajów cech. Lokalnych cech wyodrębnionych przez transformację Gabora i globalnych cech wyodrębnionych przez „przekształcenie konturu”. Etap rozpoznawania jest w końcu dokonywany przez klasyfikator oparty na PCA.
- SIFT-2D-PCA [Singha2014] – to algorytm łączący metodę SIFT z 2D-PCA. Ponieważ SIFT służy do wydobywania charakterystycznych cech, które są niezmiennie względem skalowania, orientacji i oświetlenia, jest to korzystne połączenie dla rozpoznania twarzy, nawet jeśli globalne jej funkcje nie będą dostępne; 2D-PCA służy do wydobywania cech globalnych, a także do zmniejszania rozmiaru obrazu.
- Wielowarstwowy perceptron-PCA-LBP [Somapura2015] – to algorytm wykorzystujący metodę rozpoznawania twarzy stosowaną, kiedy badany podmiot podlega zmianom polegającym na zmianie oświetlenia, pozycji głowy czy mimiki. Dokonuje on globalnej i lokalnej ekstrakcji cech odpowiednio przy użyciu PCA

i LBP. Tak więc te globalne i lokalne cechy są wprowadzane do sieci o nazwie MLP, która realizuje klasyfikację.

- Lokalny wzór kierunkowy (ang. *Local Directional Pattern*; dalej jako LDP) [Kim2013] – wykorzystuje model kierunku lokalnego. W tym podejściu cechę LDP dla każdej pozycji piksela uzyskuje się poprzez obliczenie wartości odpowiedzi obrazu w ośmiu różnych kierunkach. Następnie obraz LDP jest wykorzystywany jako dane wejściowe do ekstrakcji i reprezentacji cech przez 2D-PCA. Jednak do rozpoznawania twarzy wykorzystywany jest klasyfikator najbliższego sąsiada. Chociaż ta metoda ma dobrą dokładność rozpoznawania w różnych warunkach oświetleniowych, działa tylko z płaskimi obrazami pozyskanymi w frontalnej orientacji twarzy.
- Transformacja falkowa i kierunkowa LBP [Wu2014] – zaczyna się to od obróbki wstępnej obrazu za pomocą transformaty falkowej w celu uzyskania szeregu różnych rozdzielczości podobrazów i dekompozycji falkowej w celu uzyskania różnych składników skali. Następnie obliczany jest histogram LBP (ang. *directional weighted*, pol. kierunkowo ważona; DW-LBP) dla różnych ważonych podregionów obrazu twarzy. Test chi kwadrat służy do dopasowania sekwencji histogramu. Ta metoda zmniejsza złożoność obliczeniową i poprawia współczynnik rozpoznawania, ale jest wrażliwa na zamianę orientacji twarzy.

3.2 Algorytmy rozpoznawania twarzy na obrazie 3D

Rozpoznawanie twarzy 2D przez lata modyfikacji i rozwój metod numerycznych osiągnęło wysoki „poziom dojrzałości” oraz wysoki wskaźnik precyzji [Huang2014]. Po latach badań stan techniki rozpoznawania twarzy stale się poprawia i zapewnia coraz dokładniejsze wyniki. Jest to jeden z najbardziej aktywnych obszarów badań w dziedzinie komputerowego przetwarzania obrazów [Drira2013]. Jednak w ciągu ostatnich kilku lat, na skutek rozwoju technologicznego, pojawiły się nowe, bardzo obiecujące kierunki badań [Huang2009]. Pomimo wysokiego wskaźnika skuteczności osiągniętego w rozpoznawaniu twarzy w obrazach płaskich, zauważalne pozostają problemy z uzyskaniem niewrażliwości na zmiany oświetlenia, orientacji twarzy względem osi kamery, parametry akwizycji [Borgi2013]. Panaceum okazało się rozpoznawanie twarzy w reprezentacji 3D, która zawiera informacje o kształcie

powierzchni twarzy. Kilka z najnowszych technik wykorzystujących dane 3D zostało opisane w literaturze [Soltana2021].

Analizując zagadnienie, ostatnie badania wskazują, że połączenie multimodalnego rozpoznawania twarzy 2D i 3D jest dużo dokładniejsze i bardziej niezawodne niż rozpoznawanie jednomodalne [Bowyer2006]. Badania w tym zakresie można odnaleźć w literaturze [LakshmiPrabha2015]. Są one poświęcone uwypuklaniu zalet łączenia reprezentacji twarzy w postaci 2D i 3D. W kolejnych pracach, do technik 3D dołączono techniki głębokiego uczenia się [Balaban2015]. Głębokie sieci neuronowe (ang. *Deep Neural Networks*; DNN) są, jak się wydaje, najlepszymi technikami realizacji szeroko pojętych zadań w zakresie klasyfikacji obrazów, rozpoznawaniu mowy czy rozpoznawaniu twarzy. W szczególności, splotowe sieci neuronowe (ang. *Convolutional Neural Network*; CNN) osiągnęły obiecujące wyniki w rozpoznawaniu twarzy. Opracowano także nowe podejście do rozpoznawania twarzy, czyli obrazowanie w podczerwieni. Ma ono na celu przewyższenie ograniczeń rozpoznawania twarzy, takich jak zmiany oświetlenia, a także przebrania twarzy, które mogą znacznie zmniejszyć dokładność rozpoznawania [Li2021]. Obrazy w podczerwieni są modalnością, która zwróciła zainteresowanym szczególną uwagę ze względu na niezmiennosc wyniku klasyfikacji względem zmian oświetlenia [Friedrich2003]. Rzeczywiście, dane uzyskane za pomocą kamer na podczerwień mają wiele zalet w porównaniu ze zwykłymi kamerami, które działają w widmie widzialnym. Na przykład obrazy twarzy w podczerwieni można uzyskać w każdych warunkach oświetleniowych, nawet w całkowicie ciemnym otoczeniu. Taka technika podczerwieni pozwala osiągnąć wyższy stopień odporności na zmiany wyrazu twarzy [Jeni2012].

Istnieją prace, w których połączono kilka wymienionych powyżej technik. Przykładowo autorzy pracy *Multimodal biometrics based on near-infrared face* [Wang2009] połączyli multimodalne rozpoznawanie twarzy, zaś m.in. Jiquan Ngiam [Ngiam2011] zastosował zarówno multimodalne rozpoznawanie twarzy, jak i głębokie uczenie się.

3.2.1 Omówienie modeli 3D twarzy

Z punktu widzenia wyglądu istotną cechą powierzchni 3D jest jej kształt. Powszechnym sposobem jej przedstawienia jest siatka powierzchniowa. Biorąc pod uwagę zestaw wierzchołków, można skojarzyć z każdym wierzchołkiem nie tylko jego

informacje geometryczne (współrzędne 3D), ale także jego wartości RGB. Podczas pracy z twarzami konieczne jest zarejestrowanie ich we wspólnej siatce wierzchołków, w której każdy wierzchołek ma określoną tożsamość. Można to osiągnąć poprzez proces rejestracji [Ngiam2011], który odwzorowuje kanoniczny szablon siatki na obraz twarzy 3D.

Ludzka twarz jest przedmiotem odkształcalnym. Jej kształt zmienia się dynamicznie wraz z płcią, wiekiem i pochodzeniem etnicznym. Zasadniczo, podstawy modelu kształtu mogą uchwycić te zmiany kształtu. Jednak skonstruowanie takiego modelu wymagałoby ogromnego zestawu szkoleniowego obrazów twarzy 3D, zawierających wszystkie interesujące kształty. Załóżmy, że mamy dużą liczbę próbek uczących dla konkretnej grupy osób zidentyfikowanych według ich wieku lub płci. Bardziej wydajnym rozwiązaniem jest przeniesienie wewnętrznych odmian jednej konkretnej grupy twarzy do drugiej. W tym celu najwłaściwszy wydaje się model twarzy Morphable 3D z mieszanką Gaussa (GM-3DMM) [Koppen2018].

3.2.2 Metody lokalne

Jedną z metod lokalnych jest użycie krzywizn Gaussa do znalezienia 5 punktów antropometrycznych w modelu 3D [Suikerbuik2021]. Jej pomysłodawcy założyli, że właściwy naniesiony punkt antropometryczny może być obciążony maksymalnym błędem ± 4 mm w kierunku osi x, y lub z. Natomiast użycie krzywizny Gaussa i czystej krzywizny w połączeniu z mapami głębokości, aby wyodrębnić obszary oczu i nosa zaproponował Gaile G. Gordon [Gordon1991]. Dopasowanie obszarów oczu i nosa do siebie pozwoliło na osiągnięcie precyzji rozpoznania na poziomie 97% dla zbioru danych 24 obrazów. Zastosowanie zarówno mediany, jak i krzywizny Gaussa do wyboru 35 rysów twarzy opisujących okolice nosa i oczu, opisane zostało w *Face Recognition using 3D Surface-Extracted Descriptors* [Moreno2003]. Najlepszy wskaźnik rozpoznania tą metodą został osiągnięty na neutralnych (bez ekspresji) twarzach ze współczynnikiem rozpoznania wynoszącym 78%.

Zastosowanie momentów Gaussa-Hermit'a jako lokalnych deskryptorów w połączeniu z globalną siatką zaproponowali autorzy artykułu *Automatic 3D Face recognition combining global geometric features with local shape variation information* [Xu2004]. W swoich próbach, pomysłodawcy metody osiągnęli wskaźnik rozpoznania na poziomie 96,1% dla 30 obiektów badanych. Przy 120 obiektach wskaźnik spadł do 72,4%. Taka różnica wynika z rodzaju zastosowanej bazy danych.

Dla 30 obiektów była to baza danych stworzona ręcznie (ang. *Manual DataBase*; MDB), przy 120 obiektach była to baza danych stworzona automatycznie (ang. *Automatic DataBase*; ADM). Dane w MDB mają lepszą jakość niż te w ADB.

Inną metodą lokalną jest wykorzystanie konkretnych cech punktów – ich sygnatur – w celu szczegółowego opisanie punktów w 3D [Chua1997]. Tutaj, przy pomocy sygnatur punktowych, opisane zostało czoło, nos i oczy. Metoda dla sześciu obiektów osiągnęła wskaźnik rozpoznania 100%. Testy przeprowadzone na 50 obiektach zestawiono z wynikami z podejścia falkowego Gabora. Określono poziom rozpoznania zaproponowanej metody na 85%, natomiast podejścia falkowego Gabora na poziomie 87%. Po połączeniu punktów antropometrycznych z obrazu 2D i obrazu 3D obie metody osiągnęły wskaźnik rozpoznawania na poziomie 89% [Ho2000].

Użycie krzywizny Gaussa do zdefiniowania cech kwadratowych łąt zaproponowano w publikacji *Three-Dimensional Surface Curvature Estimation using Quadric Surface Patches* [Douros2021]. Jej autorzy twierdzą, że ich metoda może być stosowana do rozpoznawania wszelkiego rodzaju modeli 3D, nie tylko twarzy. Innym lokalnym deskryptorem kształtu, który okazał się dobrze działać na ludzkich ciałach, był deskryptor kształtu Paquet [Robinette2004].

3.2.3 Metody globalne

Jedną globalną metodę krzywizny zaprezentowano w artykule *3D head model classification by evolutionary optimization of the extended Gaussian image representation* [Wong2004]. Powierzchnię modelu twarzy przedstawiono w publikacji za pomocą rozszerzonego obrazu Gaussa (ang. *Extended Gaussian Image*; EGI), który umożliwia redukcję problemów rozpoznawania twarzy w modelu 3D do problemu podobnego do porównywania histogramów dla modelu twarzy 2D. Jako klasyfikator zastosowano klasyfikator funkcji masowego prawdopodobieństwa wielokrotnego (ang. *Multiple Conditional Probability Mass Function Classifier*; MCPMFC). Klasyfikator ten, testowany na zbiorze danych pięciu obiektów, osiągnął współczynnik rozpoznawania 80,08%. Klasyfikator minimalnej odległości (ang. *Minimum Distance Classifier*; MDC) osiągnął współczynnik rozpoznawania 67,40%. Jednak dalsze testy wykazały, że dla obu metod odsetek rozpoznania spada o 10%, gdy zestaw danych zostanie zwiększony już do 21 osób.

Propozycję użycia kombinacji modelu 3D i tekstury twarzy zaproponowali Theodoros Papatheodorou oraz Daniel Rueckert [Papatheodorou2004] wraz z miarami

podobieństwa dla dwóch modeli 3D bez tekstury i w połączeniu z teksturą. Wyniki wykazały wzrost liczby poprawnie sklasyfikowanych zdjęć czołowych w przypadku uwzględnienia tekstury.

Propozycję wykorzystania profili modeli 3D do rozpoznawania twarzy zaproponowali Charles Beumier, Marc Acheroy [Beumier2000]. Pierwsza próba rozpoznawania twarzy opierała się na trzech profilach jednej twarzy i wykazywała poziom błędu 9%. W drugiej próbie, dołączenie informacji o wartości szarości do procesu dopasowywania [Beumier2001], spowodowało obniżenie błędu do 2,5%. Yijun Wu, Gang Pan i Zhaohui Wu zaproponowali [Wu2003] technikę rozpoznawania twarzy 3D poprzez wyodrębnienie wielu profili poziomych (warstw) modelu 3D, i pasowaniu profili do siebie. Osiągnęli oni poziom błędu od 1% do 5,5% dla danych z 30 obiektami.

4 Cechy twarzy

Badania naukowe wykazują, że twarz z którą się urodziliśmy przedstawia zbiór jednoznacznie identyfikowalnych cech antropometrycznych od momentu urodzenia do momentu śmierci. Dokładnie jednoznacznie identyfikowalne pozostają zależności pomiędzy poszczególnymi częściami twarzy.

4.1 Punkty twarzy

Podstawowym zagadnieniem związanym z antropometrią jest wybór punktów lub obszarów charakterystycznych na twarzy, pomiędzy którymi dokonujemy pomiarów [Malinowski1989]. Antropometryczne punkty twarzy powinny spełniać następujące kryteria:

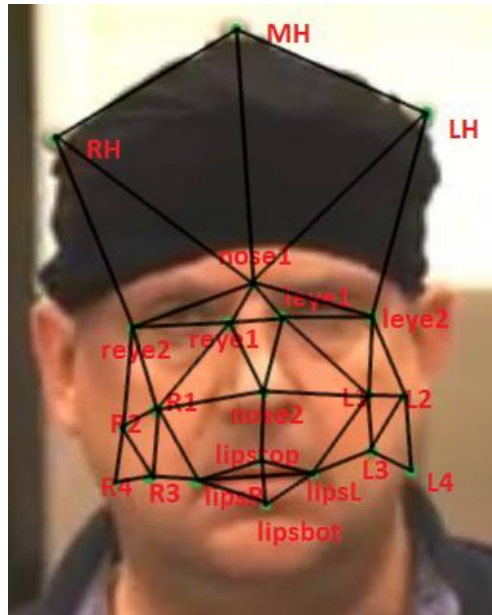
- być jednoznacznie określone i łatwe do identyfikacji;
- znajdować się w obszarach łatwo dostępnych;
- dobrze różnicować i charakteryzować osoby.

21 punktów wybrano do kolejnych badań antropometrycznych. Są to punkty obustronne, czyli znajdujące się symetrycznie po obu stronach twarzy lub pojedyncze.



Rysunek 6 Punkty na twarzy

Z tych punktów wybrano 43 pomiary liniowe i 1 proporcję (reya2 – leya2), jak pokazuje rysunek poniżej (Rysunek 7).



Rysunek 7 Pomiary liniowe

Podane w Tabela 1 Definicje punktów definicje punktów antropometrycznych zaczerpnięto z literatury medycznej [Malinowski1989]. Ich położenie pokazano na Rysunek 6.

Tabela 1 Definicje punktów antropometrycznych

Punkt	Oznaczenie	Definicja
RH	EUR	Euryon Prawy – najbardziej do boku na poprzecznej przekątnej czaszki
MH	V	Vertex – najwyżej położony punkt na głowie
LH	EUL	Euryon Lewy – najbardziej do boku na poprzecznej przekątnej czaszki
NOSE1	N	Nasion – punkt w najgłębszym zagłębieniu nosowo-czołowym
REYE2	EXR	Exocanthion – zewnętrzny kąt oka prawego
REYE1	ENR	Endocanthion – wewnętrzny kąt oka prawego
LEYE1	ENL	Endocanthion – wewnętrzny kąt oka lewego
LEYE2	EXL	Exocanthion – zewnętrzny kąt oka lewego
R1, R2, R3, R4		Punkty antropometryczne policzka prawego
NOSE2	PRN	Pronasale – najbardziej wysunięty do przodu punkt na czubku nosa
L1, L2, L3, L4		Punkty antropometryczne policzka lewego
LIPSR	CHR	Cheilon R – prawy kącik ust
LIPSTOP	LS	Labrale superius – przejście skóry wargi górnej w jej czerwień
LIPSL	CHL	Cheilon L – lewy kącik ust
LIPSBOT	LI	Labrale inferius – przejście skóry wargi dolnej w jej czerwień

Starannie rozważono wybór punktów antropometrycznych, które miały być użyte w dalszych badaniach. Przy wyborze punktów bardzo ważne było, aby można je było jednoznacznie i powtarzalnie wyznaczać na twarzach wszystkich badanych osób. Powinny to być punkty, które operator dokonujący rejestracji materiału wideo, jest w stanie w stanie zidentyfikować i umieścić w tym samym miejscu z dopuszczalnym błędem. Według Fiellera [Fieller2006] kryteriami stosowanymi do określenia udanego wyboru wiarygodnego punktu antropometrycznego są:

- wiedza obserwatora;
- spójność rozmieszczenia punktów antropometrycznych;
- siła dyskryminacyjna;
- punkt antropometryczny widoczny w większości orientacji głowy badanej osoby.

Początkowo, przy wyborze punktów antropometrycznych dla potrzeb niniejszych badań, opierano się na wynikach z badań Farkasa [Farkas1994] i Purkaita [Purkait2004]. W obu tych badaniach wiarygodność punktów antropometrycznych sprawdzono, porównując pomiary bezpośrednie na twarzy z pomiarami pośrednimi wykonanymi na fotografii twarzy. W cytowanych badaniach punkty antropometryczne na twarzy były zaznaczane czarnymi kropkami przed zrobieniem zdjęć i wykorzystywane do pomiarów porównawczych. Zaletą tego podejścia było to, że znacznie łatwiej było zlokalizować punkty na osobie niż na fotografii, ponieważ możliwe było wyczuwanie ich oznak kostnych. W rzeczywistym scenariuszu, w którym porównuje się dwie lub więcej fotografie/obrazy twarzy, tak jak w niniejszej pracy, to podejście nie może być zastosowane.

Bardziej szczegółowe omówienie badań Farkasa i Purkaita jest przedstawione poniżej, ponieważ ma ono duże znaczenia dla niniejszej pracy.

Farkas badał pomiary antropometryczne wykonane na podstawie zdjęć (pośrednie) i zestawiał je z pomiarami antropometrycznymi wykonanymi bezpośrednio na osobach. Punkty antropometryczne mogą być trudniejsze do znalezienia, gdy znajdują się na powierzchni obrazu płaskiego 2D, a nie na żywej osobie. Farkas wykorzystał w swoim badaniu 36 osób z Ameryki Północnej, 18 mężczyzn i 18 kobiet. Wykonał 100 bezpośrednich pomiarów liniowych pomiędzy dwoma punktami antropometrycznymi, po jednym z głowy, twarzy oraz uszu. Ponadto wykonał 60 pomiarów ze zdjęć wykonanych z widoków czołowych i bocznych. Punkty wcześniej

zaznaczano pisakiem na skórze. Pomiary bezpośrednie porównano z pomiarami pośrednimi i odnotowano występujące różnice. Pomiary uznawano za wiarygodne, jeśli różnice między nimi nie przekraczały 1 mm lub 2 stopni. Czterdzieści pomiarów bezpośrednich dotyczyło punktów antropometrycznych, które nie były widoczne ze względu na dwuwymiarowy charakter zdjęć lub były pokryte włosami, co uniemożliwiało ich pozyskanie ze zdjęć. Spośród pomiarów pośrednich, 20 było wiarygodnych, z czego 7 dotyczyło ust, żaden nie wykorzystywał ucha, a 9 to inklinacje, małe obszary twarzy pozostające w relacji kątowej.

Farkas zaobserwował, że glabella może być zablokowana przez krzaczaste brwi, a trychion może być ukryty przez włosy. Trychion to punkt, w którym środkowa płaszczyzna czoła przecina się z linią włosów. Zauważył też, że największym zniekształceniem był pomiar między subnasale a pronasale ze względu na różnicę między płaszczyznami, na których znajdują się naniesione punkty. Stwierdzono jednak, że pomiar między nasadą nosa (nasion) a szczeliną wargową (stomiona) jest precyzyjny, ponieważ oba te punkty były ściśle związane z płaszczyzną ogniskowej aparatu. Farkas zauważył również, że zdjęcia frontalne dostarczały najdokładniejszych pomiarów oczu, warg i ust, ale zdjęcia z profilu były również przydatne, ponieważ dostarczały informacji na temat pomiarów parametrów pionowych, a te w porównaniu z pomiarami bezpośrednimi mieściły się w dopuszczalnym błędzie. Umożliwiały także pomiar nachylenia profilu twarzy.

Badanie przeprowadzone przez Purkait'a polegało na pomiarach odległości między 17 punktami antropometrycznymi. Wybrane punkty zostały wymienione w poniższej Tabeli 2.

Tabela 2 Punkty wybrane przez Purkait'a

Exocanthion (ex)	Postaurale (pa)	Labrale superior (ls)
Endocanthion (en)	Superaurale (sa)	Labrale inferior (li)
Orbitale (or)	Subaurale (sba)	Gonion (go)
Zygion (zy)	Gnathion (gn)	Subalare (sbal)
Subnasale (sn)	Cheilion (ch)	Otobasion inferior (obi)
Tragion (t)	Stomion (sto)	

Purkait wybrał pomiary, w których punkty antropometryczne znajdowały się w tej samej płaszczyźnie, z wyjątkiem zygionu, który służył do sprawdzania wiarygodności pomiarów związanych z danym punktem. W badaniu Purkaita porównano pomiary

bezpośrednie z pośrednimi, a aparat służący do wykonywania zdjęć umieszczono w stałej odległości 80 cm od obiektu, a poziomą płaszczyznę w tym osi obiektywu aparatu w obrazie czołowym zogniskowano na nasion. Stwierdzono, że wartości pomiaru pośredniego były konsekwentnie większe niż te same wymiary mierzone bezpośrednio na twarzy, co przypisano spłaszczeniu cech podczas rzutowania na dwuwymiarową powierzchnię (zdjęcie), a zatem punkty antropometryczne są „wypychane” na boki. Jednak odległości, które wykazywały większe wartości uzyskane z pomiarów bezpośrednich, obejmują te mierzone bezpośrednio wokół oczu (en-ex) i ust (sto-ch). Purkait wyjaśnia to jako wynik modyfikacji (zmian mimicznych) tkanki miękkiej tych dwóch obszarów w trakcie procesu pomiaru.

W badaniu Purkaita dotyczącym pomiarów bezpośrednich odległości, punkty antropometryczne uznawano za zmienne lub zmieniające się znacząco z niewielkimi zmianami w wyrazie twarzy, jeśli dawały pomiary z błędem procentowym powyżej 2%. Przykłady tych pomiarów obejmowały en-en, sto-ch, t-pa, t-go i obi-go. Następnie przeprowadzono bardziej szczegółowe badanie na dwóch osobnikach płci męskiej, aby porównać zmienność danych, gdy te same pomiary powtórzono 10 razy. Dla każdego pomiaru obliczono średnią i odchylenie standardowe. Odległości między punktami antropometrycznymi, które wykazywały statystycznie istotne różnice między średnimi uzyskanymi przez dwóch osoby, obejmowały punkty antropometryczne orbitalne, gnationowe, cheilionowe i gonionowe.

Należy tu także wspomnieć o badaniach finansowanych przez FBI, które przeprowadził Evison [Evison2008]. W tym badaniu pierwotnie wybrano 61 punktów antropometrycznych, ale po ostatecznej weryfikacji pozostawiono ich 30. Evison umieścił te punkty na 35 twarzach i ocenił ich dokładność pomiarową. Punkty te, to goniona, gnation, subnasale i orbitale.

Przy rozważaniu, które punkty antropometryczne uwzględnić w niniejszym badaniu, uwzględniono powyżej przedstawione badania dotyczące rozpoznawania twarzy. Craw, Costen, Kato i Akamatsu do swoich badań wybrali 34 punkty antropometryczne [Craw1999]. Określali te punkty jako „prawdziwe” lub „niepełne” i dokładnie te przyjęli jako przydatne do dalszych badań. Część punktów okazała się być wadliwa. Przykładowo, jako wadliwy punkt przyjęli orientacyjnie opisany punkt „krawędź podbródka w połowie odcinka między dwoma punktami antropometrycznymi, czyli np. środkiem podbródka (gn) i końcem żuchwy (go)”. Unikali używania takich punktów, których lokalizacja może się zmieniać wraz

z upływem czasu, np. takich, jak okolice włosów lub po prostu linia włosów. Zamiast tego skupili się na punktach na „mniejszej” części twarzy, gdzie zmiany położenia punktów antropometrycznych są dużo mniejsze. Punkty „mniejszej” części twarzy wykorzystano w badaniach w niniejszej pracy. Podjęto taką decyzję właśnie z uwagi na ich mniejszą zmienność. Okada, von der Malsburg i Akamatsu [Okada1999] udokumentowali wykorzystanie 20 punktów antropometrycznych. Na podstawie ich badań podjęto decyzję o wykorzystaniu dokładnie 21 punktów antropometrycznych twarzy, zlokalizowanych na „mniejszej” części twarzy (18 punktów), i 3 punktów na czubku głowy przy wykluczeniu włosów, korzystając z nałożonego czepek.

Chociaż niewielka liczba punktów antropometrycznych nie zapewnia wystarczających danych przydatnych do przeprowadzenia identyfikacji twarzy, w szczególności cztery z nich mogą być bardziej korzystne niż inne. Te cztery punkty, to prawy i lewy exocanthion (zewnątrzny kąt oka prawego i lewego – zewnętrzny punkt oka łączący dolną i górną powiekę), nasion (punkt w najgłębszym zagłębieniu nosowo-czołowym) i stomion (miejsce zetknięcia się czerwieni obu warg). Znajdują się one pośrodku twarzy i dzięki temu pozostają stosunkowo nieruchome i nie zmieniają się wraz ze zmieniającym się wyrazem twarzy. Wyjątkiem jest stomion, który może się zmieniać wraz z ekspresją lub rozmową. Te punkty są widoczne np. podczas noszenia kapelusza i nie mają na nie wpływu zmieniające się fryzury lub linie włosów. Są też stosunkowo łatwe do zlokalizowania na zdjęciu. Do dalszych badań przyjęto odległość pomiędzy zewnętrznymi kącikami oczu jako skalę w celu przejścia do przestrzeni proporcji odległości pomiędzy tymi punktami.

Punkty antropometryczne, które zostały wykluczone z niniejszego badania, zostały wyeliminowane na podstawie braku możliwości ich zlokalizowania na zdjęciach. Na przykład tragus (t), znajdujący się na uchu, byłby bardzo trudny do zauważenia na obrazie wideo o niskiej rozdzielczości, który mógłby wprawdzie zostać powiększony, jednak samo zwiększenie rozmiaru obrazu nie poprawiłoby jego jakości, a wręcz ją pogorszyło. Punkty antropometryczne na głowie, takie jak frontotemporale (ft), frontozygomaticus (fz) oraz condylion laterale (cdl), są identyfikowane przez badanie dotykowe, co nie byłoby możliwe przy ich znajdowaniu na zdjęciach. Punkty antropometryczne, które opierają się na włosach, takie jak superciliare (sci), trichion (tr) i vertex (v), mają niewielką wartość, ponieważ linie włosów zmieniają się z czasem i wiekiem obiektu, a zatem mogą nie dawać powtarzalnych wyników w przypadku zdjęć wykonanych w dużej odległości czasowej. Dobrym przykładem jest superciliare,

najwyższy punkt brwi, którego nie można wiarygodnie zidentyfikować u osób z brwiami sztucznie zmodyfikowanymi. Trudne byłoby również zlokalizowanie dowolnego punktu na brwi na obrazie wideo o niskiej rozdzielczości lub takim, który pochodzi z kamery znajdującej się daleko, zwłaszcza jeśli obiekt ma jasne włosy. Wierzchołek, czyli czubek głowy, może się zmieniać w zależności od tego, jaką fryzurę nosi osoba. Ponadto opisthocranium (op) znajduje się z tyłu głowy i dlatego jest bezużyteczny przy próbie identyfikacji kogoś na podstawie rysów twarzy. Wreszcie zygion (zy), według Kolarza i Saltera [Kolarz1997], jest najbardziej bocznym punktem łuku jarzmowego lub kości policzkowej i nie jest punktem stałym, ale jest identyfikowany przez maksymalną szerokość twarzy mierzoną suwmiarką. Jest to również niewykonalne w przypadku porównywania obrazów dwuwymiarowych – czyli zdjęć.

4.2 Pomiary liniowe twarzy

Pomiary liniowe to odległości między punktami antropometrycznymi twarzy. Zostały wybrane w celu określenia proporcji używanych do porównywania obrazów twarzy w postaci wektorów cech antropometrycznych. W zasadzie możliwe jest wyznaczenie 21×20 (tj. 420) odległości z wykorzystaniem 21 punktów antropometrycznych wybranych w pracy. Chociaż jest to możliwe obliczeniowo, praktyczne wymagania nakazują, aby wybrać ich podzbiór, zwłaszcza jeśli każdy pomiar liniowy staje się jednym z pomiarów pary używanej do określenia kątów, gdy liczba możliwych kombinacji to 420×419 czyli 1750980. Ostatecznie wybrano 43 pomiary liniowe, które prezentuje Rysunek 7.

Tabela 3 Pomiary liniowe stosowane w niniejszym opracowaniu

L.p.	Skrót linii pomiarowej	Opis
1.	RH-MH (EUR-V)	EuryonP-Vertex
2.	RH-NOSE1 (EUR-N)	EuryonP-Nasion
3.	RH-REYE2 (EUR-EXR)	EuryonP-ExocanthionR
4.	MH-NOSE1 (V-N)	Vertex-Nasion
5.	MH-LH (V-EUL)	Vertex-EuryonL
6.	LH-NOSE1 (EUL-N)	EuryonL-Nasion
7.	LH-LEYE2 (EUL-EXL)	EuryonL-ExocanthionL
8.	REYE2-NOSE1 (EXR-N)	ExocanthionR-Nasion
9.	REYE2-REYE1 (EXR-ENR)	ExocanthionR-EndocanthionR

L.p.	Skrót linii pomiarowej	Opis
10.	REYE2-R1 (EXR-R1)	ExocanthionR-R1
11.	REYE2-R2 (EXR-R2)	ExocanthionR-R2
12.	LEYE2-NOSE1 (EXL-N)	ExocanthionL-Nasion
13.	LEYE2-LEYE1 (EXL-ENL)	ExocanthionL-EndocanthionL
14.	LEYE2-L1 (EXL-L1)	ExocanthionL-L1
15.	LEYE2-L2 (EXL-L2)	ExocanthionL-L2
16.	NOSE1-REYE1 (N-ENR)	Nasion-EndocanthionR
17.	NOSE1-LEYE1 (N-ENL)	Nasion- EndocanthionL
18.	REYE1-LEYE1 (ENR-ENL)	EndocanthionR- EndocanthionL
19.	REYE1-R1 (ENR-R1)	EndocanthionR-R1
20.	REYE1-NOSE2 (ENR-PRN)	EndocanthionR-Pronasale
21.	LEYE1-L1 (ENL-L1)	EndocanthionL-L1
22.	LEYE1-NOSE2 (ENL-PRN)	EndocanthionL-Pronasale
23.	R2-R1	R2-R1
24.	R2-R3	R2-R3
25.	R2-R4	R2-R4
26.	R1-R3	R1-R3
27.	R1-LIPSR (R1-CHR)	R1-CheilonR
28.	R1-NOSE2 (R1-PRN)	R1-Pronasale
29.	L1-NOSE2 (L1-PRN)	L1-Pronasale
30.	L1-LIPSL (L1-CHL)	L1-CheilonL
31.	L1-L3	L1-L3
32.	L1-L2	L1-L2
33.	NOSE2-LIPSTOP (PRN-LS)	Pronasale-Labrale superius
34.	R4-R3	R4-R3
35.	R3-LIPSR (R3-CHR)	R3-CheilonR
36.	LIPSR-LIPSTOP (CHR-LS)	CheilonR-Labrale superius
37.	LIPSR-LIPSL (CHR-CHL)	CheilonR-CheilonL
38.	LIPSR-LIPSBOT (CHR-LS)	CheilonR-Labrale superius
39.	L4-L3	L4-L3
40.	L3-LIPSL (L3-CHL)	L3-CheilonL
41.	LIPSL-LIPSTOP (CHL-LS)	CheilonL-Labrale superius
42.	LIPSL-LIPSBOT (CHL-LI)	CheilonL-Labrale inferius
43.	LIPSTOP-LIPSBOT (LS-LI)	Labrale superius- Labrale inferius

Chociaż liczba możliwych pomiarów liniowych rośnie wykładniczo wraz z liczbą punktów antropometrycznych, nie wszystkie są wiarygodne lub istotne dla badań podjętych w ramach tej pracy. Decyzję, które punkty pozostają istotne podjęto w momencie ich nakładania na obiekt badany. Zawsze jednak należy wziąć pod uwagę listę pomiarów liniowych opracowaną przez Kolar i Saltera, która obejmuje pomiary stosowane przez wcześniejszych autorów, m.in. Brocę (1879) i Farkasa (1981) [Kolar1997].

Wszystkie punkty pomiarowe zastosowane w niniejszej pracy do potwierdzenia hipotez zostały wybrane w oparciu o prace naukowe Crawl i wsp. oraz Farkasa. Pomiary 23-26, 31-32, 34 i 39, wszystkie obustronne, zostały unikalnie zdefiniowane. Wszystkie pomiary zostały tak wybrane, ponieważ wykorzystują punkty antropometryczne, które pomimo wrażliwości na mimikę twarzy były bardzo dobrze widoczne – nawet, jeśli badany miał na sobie czapkę basebolową (a takie nagranie cech biometrycznych było wykonywane w ramach niniejszej pracy).

4.3 Proporcje

Ponieważ w porównaniach antropometrycznych częściej stosuje się pomiary bezwzględne niż proporcje, było mniej wskazówek co do tego, które proporcje byłyby bardziej wiarygodne lub bardziej odpowiednie. Halberstein [Halberstein2001] zastosował kombinację dwunastu proporcji twarzy i ciała przy porównywaniu zdjęcia z żywym obiektem. Te proporcje, to długość uszu/wysokość twarzy (sa-sba/n-gn), wysokość nosa/długość uszu (n-sn/sa-sba) i szerokość nosa/wysokość nosa (al-al/n-sn). W swoich badaniach Catterick wykorzystał dwie proporcje: n-sn/n-sto oraz n-gn/n-sto.



Rysunek 8 Zdjęcie twarzy podzielonej na trzy sekcje

Podczas procesu selekcji i tworzenia algorytmu do wyznaczania wektora cech biometrycznych twarzy uznano, że twarz składa się z trzech części (Rysunek 8). Górna część zawiera oczy (1), środkowa część zawiera nos (2), a dolna część zawiera usta, brodę oraz podbródek (3). Intuicyjnie oczekuje się, że dłuższe linie między punktami antropometrycznymi znajdującymi się w dwóch różnych częściach twarzy będą stanowić bardziej wiarygodną cechę niż dwie krótkie linie w tej samej części twarzy. Dzieje się tak, ponieważ istnieją niewielkie różnice w rozmieszczeniu punktów antropometrycznych tworzących krótkie linie, co skutkowałyby dużymi zmianami w proporcjach, a to może nie odzwierciedlać prawdziwych różnic między osobnikami.

Większość literatury antropometrycznej omawia wykorzystanie odległości oraz, w mniejszym stopniu, proporcji między punktami antropometrycznymi. Należy jednak zauważyć, że innym sposobem wykorzystania tych punktów na twarzy jest pomiar kątów utworzonych między odcinkami łączącymi je. Powyższe parametry, kąty wraz z proporcjami przedstawiono w kolejnym rozdziale niniejszej pracy.

5 Badanie nieruchomych obrazów

Początkowo przeprowadzono analizę mającą na celu ustalenie czy istnieją podstawy naukowe do stosowania pomiarów antropometrycznych w porównaniach twarzy umożliwiające identyfikację. W rozważaniach uwzględniono wpływ kąta widzenia kamery na pomiary antropometryczne, składające się z proporcji i kątów, wykonane na podstawie zdjęć twarzy pięciu osób. Taka analiza umożliwiła określenie punktów antropometrycznych na twarzy oraz dała możliwość doboru sprzętu i oprogramowania do ich wyznaczania. Ponadto stanowiła dobrą podstawę do rozważenia antropometrii jako metody identyfikacji kryminalistycznej i uzasadnienia dalszych badań używając tych samych punktów.

Dane z takiej analizy można by również wykorzystać do opracowania fotogrametrycznego modelu twarzy, który po skalibrowaniu mógłby zostać wykorzystany do skorygowania pomiarów antropometrycznych pod kątem zniekształceń spowodowanych kątem widzenia kamery, a dokładniej orientacją ramki/układu współrzędnych głowy względem ramki/układu współrzędnych kamery. Celem opracowania takiego modelu byłoby wykorzystanie go do obliczenia współczynników korekcyjnych, które następnie można by wykorzystać do przekształcenia obserwowanych proporcji i kątów z powrotem do orientacji całej twarzy/głowy. Tak przekształcone wyniki można następnie wykorzystać do przeszukania bazy danych proporcji.

5.1 Przedmiot analizy

Do analizy wykorzystano zdjęcia pięciu osób. Zdjęcia przedstawiały dwie kobiety, jedną Angielkę, jedną Polkę oraz trzech mężczyzn z Polski.

Zdjęcia wykonano konwencjonalnym aparatem cyfrowym o rozdzielczości 14,0 megapiksela (Mpix) z automatycznymi ustawieniami (czas otwarcia migawki i przysłony), w warunkach laboratoryjnych z osią obiektywu w płaszczyźnie poziomej. Zdjęcia twarzy wykonywano zmieniając kąt *yaw* od 0° do 90° co 10° zarówno w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara, jak i przeciwnie do ruchu wskazówek zegara. Fotografowane osoby siedziały na krześle obrotowym

umieszczonym na oznaczonej podkładce, aby pokazać położenie kątowe w stosunku do kamery (Rysunek 9).



Rysunek 9 Krzesło

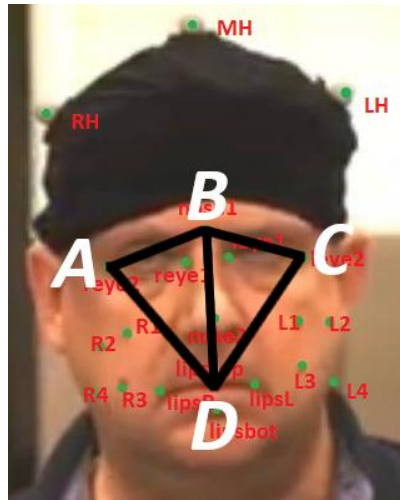
Aby upewnić się, że wszystkie zdjęcia zostały wykonane na tym samym poziomie w pionie i w tej samej odległości od obiektu, aparat został przymocowany do statywu, który został umieszczony w stałej odległości (około jednego metra) od osi obrotu krzesła. Badani zostali początkowo umieszczeni w pozycji pełnej widoczności twarzy. Aby ujednolicić pozycję głowy, badane osoby miały patrzeć prosto przed siebie i starać się być nieruchomo. Każdy badany został poinstruowany, aby utrzymać taką pozycję z otwartymi oczami i zamkniętymi ustami oraz z obojętnym wyrazem twarzy. Dla każdego badanego wykonano tak serię zdjęć co 10° obrotu. W ten sposób dla każdego badanego wykonano łącznie dziewiętnaście zdjęć.

5.2 Pomiary antropometryczne

Zdjęcia zostały pobrane jako pliki JPEG, a do wyznaczenia punktów antropometrycznych na obrazie i przeprowadzenia pomiarów liniowych i kątowych wykorzystano darmowe oprogramowanie GIMP® [Gimp]. Zastosowane oprogramowanie było proste w użyciu i zawierało narzędzie, które umożliwiło operatorowi umieszczenie małego punktu 1x1 pix na każdym wybranym punkcie antropometrycznym. Dodatkowe narzędzia w programie umożliwiły rysowanie linii pomiędzy określonymi już punktami, a obliczeń proporcji i kątów między odcinkami łączącymi te punkty dokonano w programie Excel® [Microsoft].

Do badania pilotażowego wybrano cztery punkty antropometryczne twarzy, jak przedstawiono wcześniej na *Rysunek 10* Wybrane punkty antropometryczne oraz linie pomiarowe, składające się z prawego i lewego exocanthions, stomion i nasion.

Dokonano pomiarów liniowych pomiędzy punktami antropometrycznymi i obliczono między nimi proporcje. Podobnie obliczono kąty.



Rysunek 10 Wybrane punkty antropometryczne oraz linie pomiarowe

5.3 Przetwarzanie danych

Pomiędzy każdą parą punktów antropometrycznych wyznaczono odcinki, otrzymując w sumie 5 pomiarów liniowych. Proporcje i kąty między odcinkami obliczono w następujący sposób. Proporcję P wyznaczono na podstawie zależności :

$$P = \frac{\text{mniejszy pomiar liniowy}}{\text{większy pomiar liniowy}} \times 100. \quad (3)$$

Mierzone proporcje, to:

$$P = \frac{BD}{CD} ; \frac{BC}{CD} ; \frac{BC}{BD} ; \frac{AB}{AD} ; \frac{AB}{BD} ; \frac{BD}{AD} ; \frac{AD}{CD}. \quad (4)$$

Wartości kątów, to:

$$\angle BDC ; \angle BCD ; \angle BAD ; \angle BDA. \quad (5)$$

Uwzględniono obie strony twarzy, ponieważ twarze są zazwyczaj do pewnego stopnia asymetryczne. Uwzględniono również dwa kąty w każdym z dwóch trójkątów, ponieważ kąty ABD i CBD nie zawsze są kątami prostymi. W pewnych przypadkach, zazwyczaj kiedy kamera miała wartość yaw 20^0 po prawej lub lewej stronie, nie można było zaznaczyć jednego z exocanthion. W takim przypadku do obliczeń wykorzystywano tylko i wyłącznie widoczne punkty antropometryczne, nie używano niewidocznego punktu exocanthion i uwzględniano jedynie dostępny punktu nasion i widoczny exocanthion.

5.3.1 Wykorzystanie danych

Obliczone wartości wskaźników proporcji i kątów zapisane w arkuszu kalkulacyjnym Excel® wykreślono na wykresie liniowym względem kąta kamery, co pomogło zilustrować zmiany proporcji i pomiarów kątowych z kątem obrotu obiektu względem kamery. Średnie wartości i względne odchylenia standardowe proporcji i pomiarów kątów dla pięciu badanych osób zostały również określone i umieszczone w odpowiednich tabelach (Tabela 4 i Tabela 5).

5.4 Wyniki

Tabela 4 i Tabela 5 pokazują wartości średnie i względne odchylenia standardowe proporcji i wartości kątów, a Rysunek 11 ilustruje zmienność proporcji i kątów wraz z kątem obrotu badanego dla każdego z pięciu badanych dla proporcji BD/CD. W miejscach, gdzie nie było widocznych punktów antropometrycznych, nie wykonywano pomiarów, zwykle taka sytuacja miała miejsce np. przy obrotach o 20° i więcej. Jak wspomniano wcześniej, działo się tak w momencie, kiedy obiekt badany został obrócony na bok i jeden exocanthion nie był już widoczny.

Przy analizie proporcji i kątów twarzy nie było możliwości uwzględnienia błędów eksperymentalnego związanego z kątem kamery oraz błędów wynikających z naniesienia punktów antropometrycznych, ale na potrzeby niniejszych badań przyjęto, że są to błędy stałe i w identyczny sposób wpłynęły na pomiary dla pięciu badanych osób.

Tabela 4 Średnie i względne odchylenia standardowe dla proporcji

Średnie i % (w nawiasach) względne odchylenia standardowe dla przyjętych proporcji							
Rotacja (stopnie)	BD/CD	BC/CD	BC/BD	AB/AD	AB/BD	BD/AD	AD/CD
-90	92,35 (4,7)	37,72 (27,3)	43,27 (29,9)				
-80	87,72 (3,3)	48,24 (21,8)	58,21 (24,4)				
-70	85,38 (5,2)	53,95 (11,0)	65,19 (16,9)				
-60	83,22 (6,7)	58,35 (12,9)	72,08 (18,9)				
-50	76,00 (5,2)	64,98 (9,9)	86,27 (14,6)				
-40	72,97 (3,0)	64,13 (7,9)	86,55 (9,9)				

Średnie i % (w nawiasach) względne odchylenia standardowe dla przyjętych proporcji							
-30	74,49 (4,2)	67,18 (10,4)	93,19 (10,88)				
-20	73,98 (3,7)	68,35 (5,9)	93,55 (9,9)				
-10	75,00 (3,2)	67,48 (4,4)	90,45 (7,8)	55,26 (6,1)	54,68 (9,2)	83,64 (3,7)	92,75 (4,3)
0	79,19 (2,2)	63,00 (5,0)	80,36 (8,1)	60,45 (4,0)	80,35 (7,4)	76,23 (3,3)	102,67 (0,9)
10	84,19 (1,2)	55,05 (6,1)	69,13 (8,8)	66,79 (5,3)	86,94 (9,1)	71,92 (3,1)	112,65 (2,5)
20				66,88 (6,1)	93,46 (10,5)	76,12 (4,8)	
30				68,95 (7,2)	90,36 (7,9)	75,29 (1,3)	
40				66,18 (8,1)	89,99 (9,8)	74,65 (2,2)	
50				63,87 (7,9)	86,75 (11,9)	77,23 (4,1)	
60				55,98 (12,1)	73,56 (12,9)	79,90 (4,4)	
70				53,28 (12,9)	63,25 (15,1)	83,22 (4,2)	
80				51,36 (21,1)	69,72 (22,8)	57,24 (4,9)	
90				36,98 (29,7)	41,28 (33,1)	92,57 (4,4)	

Tabela 5 Średnie i względne odchylenia standardowe dla kątów

Średnie i % (w nawiasach) względne odchylenia standardowe dla kątów				
Rotacja (stopnie)	BDC	BCD	BAD	BDA
-90	23,95 (27,6)	67,23 (9,5)		
-80	30,68 (21,0)	60,78 (6,1)		
-70	31,08 (12,9)	56,23 (7,9)		
-60	36,49 (14,9)	54,54 (9,2)		
-50	41,58 (11,9)	50,65 (7,1)		
-40	42,31 (9,6)	48,94 (4,8)		
-30	42,86 (9,5)	47,68 (5,1)		

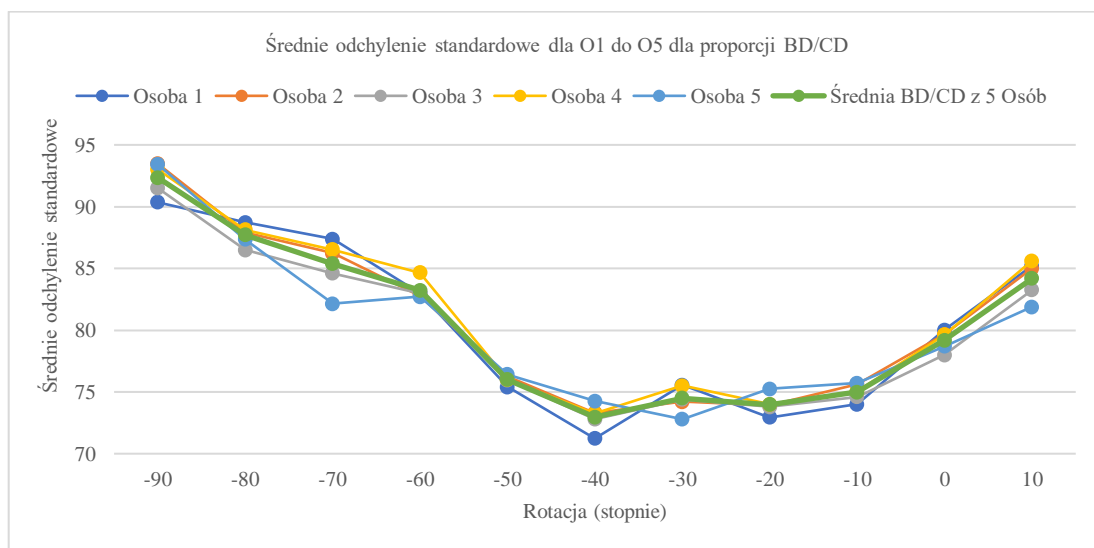
Średnie i % (w nawiasach) względne odchylenia standardowe dla kątów				
-20	43,28 (7,1)	46,82 (4,9)		
-10	42,00 (5,8)	49,15 (4,4)	55,12 (5,3)	31,95 (5,9)
0	38,63 (5,9)	50,86 (2,9)	48,96 (4,3)	28,01 (5,2)
10	33,19 (7,2)	55,25 (2,1)	47,15 (5,0)	39,64 (6,5)
20			46,05 (4,7)	41,93 (7,7)
30			46,98 (2,9)	42,69 (10,2)
40			47,02 (3,1)	41,41 (10,2)
50			48,86 (6,1)	38,89 (9,5)
60			52,26 (6,2)	64,39 (10,9)
70			56,38 (7,2)	31,84 (13,5)
80			58,87 (8,3)	28,74 (20,2)
90			65,12 (10,8)	21,59 (31,0)

Tabela 6 pokazuje średnie odchylenie standardowe dla proporcji BD/CD dla poszczególnych osób badanych oraz jej odchylenie wyznaczone z pięciu pomiarów.

Tabela 6 Średnie odchylenie standardowe dla proporcji BD/CD dla Osoby O1 do O5 oraz wartość średnia z pięciu pomiarów

Rotacja (stopnie)	Osoba 1	Osoba 2	Osoba 3	Osoba 4	Osoba 5	wartość średnia
-90	90,35	93,47	91,5	93,01	93,42	92,35
-80	88,72	87,92	86,5	88,12	87,35	87,72
-70	87,38	86,23	84,6	86,53	82,15	85,38
-60	83	82,8	82,96	84,65	82,71	83,22
-50	75,4	76,23	75,98	75,99	76,42	76,00
-40	71,23	73,29	72,8	73,26	74,26	72,97
-30	75,56	74,2	74,4	75,5	72,79	74,49
-20	72,95	73,9	73,8	74	75,24	73,98
-10	74	75,64	74,6	75,05	75,71	75,00
0	80,01	79,64	78	79,63	78,68	79,19
10	85,2	85	83,26	85,6	81,89	84,19

Poniższy wykres (Rysunek 11) obrazuje powyżej wyznaczone parametry.



Rysunek 11 Średnie odchylenie standardowe dla O1 do O5 dla proporcji BD/CD

5.5 Omówienie

W trakcie wykonywania obliczeń zauważono, że istotne jest, aby zdjęcia były wykonane jak najdokładniej. Istotne jest dokładne ustawienie głowy, co zostało wyeliminowane w kolejnych badaniach wykonanych w PJATK w Bytomiu. Eliminacja polegała na nagraniu wideo, a nie zrobieniu zdjęć i unormowaniu obrazów głów osób badanych względem kamery i trzech osi Eulera. Przy wykonywaniu zdjęć, na których robiono badania, fotograf musiał najpierw ustawić głowę tak, aby obie strony lewa i prawa odpowiadały właściwemu stopniowi rotacji i jak najdokładniej pasowały do siebie. Naturalnym jest, że głowa porusza się lekko, nawet w krótkim czasie, a każde odchylenie w pozycji głowy wpływa na kolejne pomiary wykonane na zdjęciach. Użyte krzesło mogło również wpływać na ustawienie głowy. Gdyby krzesło nie było wypoziomowane, czyli oś obrotu nie była pionowa, to orientacja ramki głowy zmieniałaby się wraz ze zmianą kąta *yaw*. Wszystkie takie efekty przyczyniają się do powstawania stałych błędów pomiarowych. Dobre wyniki zależą nie tylko od umiejętności fotografa i jego umiejętności pozycjonowania głowy, ale także od stabilizacji głowy.

W trakcie robienia zdjęć trzeba też zwrócić uwagę na to, aby zdjęcia były spójne. Najczęściej, kiedy realizuje się je zaczynając od bocznej pozycji przez frontalną do

przeciwległej bocznej, po porównaniu zdjęć nie są one spójne. Trzeba zatem zdjęcia wykonywać co 10^0 na przemian w prawo i w lewo.

Może się okazać, że osoba badana może mieć problemy z utrzymaniem nieruchomo głowy w celu wykonania poprawnej fotografii. Jeśli takie badania miałyby zostać powtórzone, wiele z tych problemów można by rozwiązać za pomocą specjalnie skonstruowanego urządzenia, w którym głowa badanego jest ustawiana we właściwej pozycji i powstrzymywana przed poruszaniem się – na przykład za pomocą kołyski, jak w tomografii komputerowej. Dodatkowo takie urządzenie mogłoby zapewnić, że oś obrotu głowy znajdowałaby się w wybranym miejscu w przekroju głowy. Większość tych niedoskonałości jest wyeliminowana poprzez nagranie wideo dokonane w Laboratorium PJATK w Bytomiu przy wykorzystaniu specjalnego systemu zbudowanego do tego celu. Jego budowa, eksperyment oraz wnioski wynikające z eksperymentu zostaną przedstawione w dalszej części niniejszej pracy.

5.5.1 Punkty antropometryczne

Lokalizacja punktów antropometrycznych do analizy obrazów również wpływa na otrzymane wyniki. Wymagany jest, w tym zakresie doświadczenie, ponieważ rozmieszczenie tych punktów może być bardzo subiektywne i zależne od realizującej je osoby. Na przykład interpretacja lokalizacji lewego lub prawego exocanthion przez jedną osobę może nie być dokładnie taka sama jak interpretacja innej. Znormalizowane znaki również mogą nie być łatwe do zlokalizowania, ponieważ większość obrazów wykorzystywanych do porównań jest dość niskiej jakości. Z tego powodu, w badaniu, punkt exocanthion został umieszczony na większym fragmencie odniesienia, w którym powieka górna zachodziła na powiekę dolną. Każdy z punktów antropometrycznych w tym badaniu został zlokalizowany na fotografiach, a nie przy użyciu trójwymiarowej twarzy osoby badanej, co było podejściem stosowanym w niektórych opublikowanych badaniach. Nie było wskazane porównanie obrazów badanych z obrazem 3D twarzy osoby badanej w celu dokładnej lokalizacji punktów antropometrycznych, ponieważ wszystkie nagrania z kamer, szczególnie telewizji przemysłowej, lub inne nagrania, które wykorzystuje się do porównania są realizowane w 2D.

Do badania, które opisano wcześniej, wybrano punkty, które są względnie stałe na twarzy i poza stromionem nie zmieniają się wraz ze zmieniającym się wyrazem twarzy. Jednym ze sposobów osiągnięcia ciągłości umieszczania byłoby stworzenie nowego

zestawu standardów umieszczania punktów antropometrycznych na fotografiach, z uwzględnieniem różnorodności przypadków dla których są zakładane. Punktem wyjścia może być podzielenie twarzy na małe sekcje z taką samą liczbą linii siatki, na których należy skupić się na każdym punkcie lub, jak wspomniano w poprzednim akapicie, exocanthion można umieścić w miejscu, w którym górna powieka zachodzi na dolną powiekę zamiast bocznego kącika oka. Ważne byłoby, aby nie zwiększać obszaru, w którym można umieścić punkt, ale zamiast tego wybrać większe obszary odniesienia na twarzy. Gdyby miało to zostać zrealizowane, należałoby przeprowadzić szeroko zakrojone badania nad możliwymi alternatywnymi lokalizacjami punktów antropometrycznych, które byłyby zarówno łatwe do znalezienia na standardowych obrazach o niższej jakości, jak i łatwe i odtwarzalne przez różnych operatorów. Punkty antropometryczne, które okazałyby się mniej wiarygodne, można najpierw zbadać, a jeśli badania okażą się obiecujące, można zbudować zupełnie nowy zestaw tych punktów specjalnie dla dziedziny kryminalistyki czy, ściślej rzecz biorąc, medycyny sądowej.

Nie wszystkie punkty antropometryczne były widoczne z każdego kąta patrzenia kamery, ponieważ wiele z nich było przesłoniętych w wyniku obrotu głowy. Wynik ten nie wskazuje, że te punkty nie mają żadnej wartości w rozpoznawaniu twarzy, ale że pod jakimś kątem kamery należy zastosować mniejszy podzbiór punktów i pomiarów odległości pomiędzy nimi. Podejście empiryczne zastosowane w przeprowadzonym badaniu można rozszerzyć na większy zakres pomiarów, co umożliwi określenie użytecznych stożków kątowych widzenia kamery. Obejmuje to również kąt nachylenia, *pitch*, a także pochylenia, *roll*, będących wynikiem obrotu kamery względem osi swojej ramki.

5.5.2 Proporcje i kąty

Jak pokazuje Tabela 4, wszystkie sześć proporcji było dostępnych tylko na zdjęciach zrobionych z przodu lub wykonanych, gdy obiekt był obrócony o 10° w lewo i/lub w prawo w stosunku do aparatu, którym były robione zdjęcia.

Proporcje, które mają niewielkie względne odchylenia standardowe, wskazują na niewielkie zróżnicowanie proporcji lub kątów będące wynikiem obrotu *yaw*. Przykładem jest wskaźnik proporcji AD/CD przy 0° , gdzie proporcja ta była bardzo podobna u wszystkich badanych, a odpowiadające jej względne odchylenie standardowe wynosiło tylko 0,9%. Ten stopień zmienności można wyjaśnić błędem

pomiaru (bardziej szczegółowo zostanie to opisane w dalszej części pracy). Natomiast proporcja BC/BD ma większe względne odchylenie standardowe wynoszące 8.1%, co wskazuje na większy stopień zróżnicowania między osobnikami. Zaobserwowano również różnice w pomiarach kątów między osobnikami w grupie badanej, a jeśli chodzi o proporcje, odchylenie standardowe wzrastało wraz z wzrostem kąta *yaw*.

Implikacją powyższych wyników jest to, że potrzebne są proporcje i kąty, które różnią się między osobnikami na tyle, aby można było jednoznacznie zidentyfikować osobę. W przeciwnym wypadku nie można zastosować antropometrii do ich rozróżnienia. Proporcja AD/CD miałyby niewielką wartość, ponieważ niewiele zmienia się między ludźmi. Przy kącie 0° dwie proporcje BC/BD i AB/BD mają największe odchylenie standardowe. Można je uznać za miarę stosunku szerokości połowy twarzy do wysokości twarzy.

Odległości między punktami antropometrycznymi mierzonymi na zdjęciach zmniejszyły się przy większych kątach kamery, ale błędy w pomiarach pozostały takie same, co znajduje odzwierciedlenie we względnych odchyleniach standardowych. Względne odchylenia standardowe stosunków nie wzrastały proporcjonalnie, gdy którakolwiek z mierzonych odległości stała się mała, co ma miejsce w przypadku skrótów perspektywicznych powodowanych przez kąt patrzenia kamery. Może to być spowodowane błędem w ustawieniu kąta patrzenia kamery. Względne odchylenia standardowe kątów były zgodne z oczekiwaniami dla obrotów w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, ale nie były zgodne z oczekiwaniami dla obrotów parametrów zgodnie z ruchem wskazówek zegara. Najprawdopodobniej jest to spowodowane błędem związanym z obrotem obiektu.

Zmierzone i wyliczone dane empiryczne potwierdzają oczekiwanie, że na pomiary antropometryczne ze zdjęć istotny wpływ ma kąt patrzenia aparatu, względem fotografowanego obiektu. Jeżeli pomiary te są wykorzystywane do porównywania twarzy przedstawionych na obrazach (zdjęciach) lub do identyfikacji nieznannej osoby za pomocą bazy danych obrazów, kąty kamery użyte na dwóch porównywanych obrazach muszą być zbliżone. Alternatywnie, przed użyciem należy uwzględnić kąt kamery i skorygować pomiary do tych, uzyskanych ze standardowego widoku (np. dla kąta zero stopni).

5.5.3 *Modelowanie danych*

Biorąc pod uwagę możliwość porównania zdjęcia znajdującego się w sprawie z obrazem zrobionym z nagrania wideo z monitoringu miejskiego, jest bardzo prawdopodobne, że orientacje twarzy na tych dwóch obrazach będą się od siebie różnić. Gdyby wtedy można było obliczyć współczynnik korygujący, pomogłoby to w rozwiązaniu jednego z podstawowych problemów antropometrii kryminalistycznej, czyli porównania dwóch fotografii wykonanych pod różnymi kątami widzenia kamery. Byłoby to bardzo pomocne w sytuacjach, w których jako część profilu osoby poszukiwanej dostępny jest w celach porównawczych zapis punktów antropometrycznych w widoku z przodu. Każdy obraz uzyskany w czasie późniejszym, który porównuje się z oryginalnym zdjęciem, można w celu niwelacji rotacji twarzy skorygować do widoku z przodu.

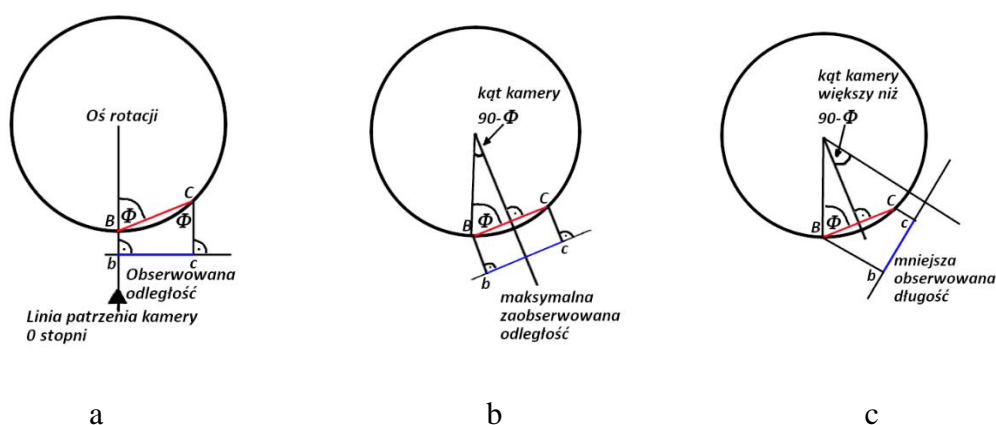
W zasadzie, zmiany mierzonych parametrów można było obliczyć za pomocą matematycznego modelu głowy wykorzystującego geometrię i trygonometrię. Jednak ten typ modelu wymagałby trójwymiarowych danych odnoszących się do przestrzennego rozmieszczenia punktów antropometrycznych, czego nie można uzyskać z pojedynczego dwuwymiarowego obrazu [Siebert2000], chociaż znacznie więcej można dowiedzieć się z sekwencji obrazów płaskich [Urquhart1993]. W praktyce trudno byłoby skonstruować model poprzez bezpośrednie pomiary głowy. Celem opracowania takiego modelu byłoby wykorzystanie go do obliczenia współczynników korekcyjnych w celu przekształcenia obserwowanych proporcji i kątów z powrotem do wartości orientacji na wprost, które mogłyby następnie zostać wykorzystane na przykład do przeszukania bazy danych proporcji i kątów. Ponadto, chociaż wykorzystana konfiguracja eksperymentalna była w jak największym stopniu kontrolowana za pomocą dostępnego sprzętu, wprowadzono nieznanymi wymiary, takie jak dokładna odległość kamery od osi obrotu i położenie głowy badanego względem osi obrotu. Do zbudowania modelu, który pozwalałby na obliczenie odległości dla dowolnego kąta kamery, niezbędny byłby trójwymiarowy skaner, stosowany w rekonstrukcji twarzy.

Wybrane punkty antropometryczne dla tego badania tworzą trójkąty i chociaż podstawową zasadą geometrii jest to, że mając dwa boki lub kąty trójkąta, informacje dla trzeciego można, łatwo znaleźć w sposób analityczny, to jednak ważne w tym badaniu było uwzględnienie danych uzyskanych ze wszystkich stron i kątów

trójkątów. Stało się tak z uwagi na fakt, że punkty antropometryczne znajdują się w przestrzeni trójwymiarowej i leżą w różnych płaszczyznach w stosunku do linii widzenia obiektywu aparatu, podczas gdy fotografie są obrazami dwuwymiarowymi, przedstawiającymi rzuty punktów na płaszczyznę obrazu kamery. Dlatego przewidywano, że będą generować dane inne niż w trójkącie utworzonym z punktów na tej samej płaszczyźnie. Wymagane były zatem pomiary empiryczne wszystkich boków i kątów, aby określić, które z nich dałyby najbardziej reprezentatywne i użyteczne dane.

Wyniki wykazały, że proporcje i kąty zmieniały się w zależności od kąta obrotu głowy względem aparatu, a wykresy wskaźników i kątów w większości tworzyły krzywe z maksimami lub minimami. Biorąc pod uwagę trójkąty prostokątne podobne do tych, które zawiera Rysunek 7, zasady perspektywy nakazują, że gdy zmienia się kąt *yaw* kamery, to poziomy bok trójkąta ulegnie skróceniu, a pionowy pozostanie stały. Oczekiwany rezultat jest to, że proporcja strony poziomej powinna być maksymalna przy 0° i maleć do zera przy 90° , a wykres proporcji w funkcji kąta *yaw* pokaże punkt zwrotny przy 0° . Tak się jednak nie stało, a obecność na wykresach punktów zwrotnych innych niż 0° wyraźnie wskazuje, że punkty antropometryczne nie leżą w jednej płaszczyźnie prostopadłej do osi kamery.

Prostą ilustracją tego typu modelu przedstawia Rysunek 12, na którym poziomy przekrój głowy (wykonany przez nasion) jest przybliżony do okręgu. BC oznacza linię między nasion a prawym exocanthion, przy założeniu, że leży w płaszczyźnie przekroju. Jeżeli kamera znajduje się dostatecznie daleko od obiektu (zakłada się, że to prawda), można założyć, że promienie światła z obiektu docierające do kamery są równoległe, a obserwowana długość BC to *bc*, który jest rzutem odcinka BC na płaszczyźnie obrazu, czyli odpowiada fotografii wykonanej aparatem. Kąt q to kąt między linią 0° a linią BC na twarzy. Rysunek 12a przedstawia obserwowaną długość BC w widoku twarzy na wprost aparatu. Należy zauważyć, że obserwowana długość *bc* jest mniejsza niż BC.



Rysunek 12 Uproszczony model wpływu kąta kamery na obserwowaną długość pomiaru twarzy.

Model wskazuje, że bc będzie maksymalne, gdy kąt kamery będzie równy $90^\circ - \Phi$ (Rysunek 12b). Przy kątach innych niż $90^\circ - \Phi$ (Rysunek 12c), bc zmniejszy się proporcjonalnie do sinusa kąta pomiędzy linią widzenia kamery i $90^\circ - \Phi$. Oczywiście będzie maksimum w obserwowanej długości bc' , a wykres bc' w funkcji kąta kamery również będzie miał maksimum. Podobnie, proporcja obejmująca bc jako licznik będzie również miała tendencję do maksymalizacji, w zależności od miary liniowej użytej do mianownika indeksu.

Model jest uproszczony, ponieważ nie obejmuje kąta pochylenia aparatu ani linii twarzy, ale pokazuje, że w zasadzie pomiary empiryczne, takie jak te wykonane w opisywanym badaniu, można wykorzystać do określenia kątów twarzy, takich jak $90 - \Phi$, czyli dla takich dla których bc jest maksymalne. Kąty takie, jak Φ byłyby trudne do zmierzenia bezpośrednio na twarzy, ale można je uzyskać za pomocą trójwymiarowego skanera. Model można by rozszerzyć tak, aby obejmował proporcje i kąty kamery powyżej lub poniżej płaszczyzny poziomej, i co do zasady mógłby zapewnić oszacowanie pomiarów antropometrycznych, które zostałyby uzyskane podczas pomiaru zdjęć wykonanych pod różnymi kątami kamery. Obejmuje to widok całej twarzy, co pozwala na wprowadzenie współczynników korekcji podczas porównywania zdjęć zrobionych pod różnymi kątami.

W warunkach laboratoryjnych znane będą parametry kamery i kąty jej obrotu. W przypadku wykorzystania zdjęcia, na którym te parametry są nieznane, możliwe jest ich wyznaczenie za pomocą fotogrametrii. Powszechnie stosowane techniki matematyczne, to bezpośrednia transformacja liniowa (DLT), transformacja

8-parametrowa, dopasowanie wiązki i inne metody, oparte na ręcznej konstrukcji linii lub analitycznie ograniczonych równaniach współpłaszczyznowości. W przypadkach, gdy kąty rotacji są nieznane, opracowano system współpracujący z oprogramowaniem do rozpoznawania twarzy, który przy użyciu 30 punktów antropometrycznych twarzy szacuje kąt twarzy [Hirayama2007]. Z punktu widzenia medycyny sądowej, ten typ systemu może być użyty w przypadkach, w których z kamery monitoringu wideo uzyskano wiele obrazów twarzy (o nieznanach kątach). Daje on możliwość wyboru obrazu o takim samym kącie obrotu, jak ten znajdujący się w bazie danych. Ten system może być konstruktywny do wykorzystania w połączeniu z modelem, pozwalającym najpierw określić kąt obrotu twarzy w celu skorygowania pomiarów twarzy z powrotem do widoku frontalnego.

W przypadku, kiedy model głowy o znanych wymiarach miał być zarejestrowany pod nieokreślonym kątem, kąt/orientację kamery względem głowy można oszacować, porównując obserwowane proporcje z rzeczywistymi wartościami (dla widoku frontalnego twarzy). Po skalibrowaniu modelu można wyprowadzić współczynniki korygujące dla pomiarów antropometrycznych wykonanych z obrazów, co pozwoli na przesłanie ich do systemu i przeszukania bazy danych.

Systemy omówione wcześniej w punkcie 2.7.2 niniejszej pracy mają swoje własne specyficzne zależności, które służą do określenia położenia, aby następnie skorygować obrazy z powrotem do widoku frontalnego. Różnica między tymi metodami a omawianym tutaj modelem teoretycznym polega na tym, że stosują bardziej złożone podejście do korygowania obrazów z powrotem do widoku z przodu, następnie wykorzystując otrzymane wyniki w systemie rozpoznawania twarzy. Tworzą często zupełnie nowy obraz frontalny twarzy, podczas gdy opracowany model teoretyczny koncentruje się na konkretnych pomiarach między punktami antropometrycznymi. Możliwe, że przedstawiony w tym opracowaniu model teoretyczny będzie można zastosować do metody porównania pomiarów antropometrycznych podjętych w ramach tych badań.

Takie podejście do rozwiązania problemu porównywania obrazów twarzy pozyskanych dla różnych rotacji głowy może być prostszą koncepcją w porównaniu z bardziej złożonymi metodami opisanymi w punkcie 2.7.2. Uproszczone podejście może być łatwiej dostępne dla grup pozanaukowych, takich jak organy ścigania. Mając wybór: szybszy prostszy system, czy bardziej złożony, czasami ten prostszy może już dostarczyć danych właściwych do podjęcia działań.

Nie ma gwarantowanej metody porównywania obrazów twarzy, która mogłaby być stosowana we wszystkich przypadkach, uwzględniającej każdy kąt rotacji i obrazy twarzy pozyskiwane w różnym wieku. Metody wymagające wyspecjalizowanych parametrów, takich jak obrót o określony kąt, mogą być lepiej stosowane w sytuacjach, w których można kontrolować ten parametr, na przykład w systemach zapewnienia bezpieczeństwa biznesowego. Opisane metody porównywania obrazów twarzy niezależnie od zmian orientacji głowy zajmują się tylko rotacją twarzy, a inne ograniczenia, takie jak wyraz twarzy i oświetlenie, nie są uwzględniane. To pokazuje złożoność ludzkiej twarzy i trudność opracowania oprogramowania, które można wykorzystać do wszystkich rodzajów scenariuszy, takich jak chociażby praca śledcza.

Uzyskane wyniki wykazały stałą zmianę wartości parametrów pomiędzy każdym obrotem o 10° dla każdej osoby. Z uzyskanych wyników można odczytać, że każdy badany ma bardzo podobną krzywą zależności parametrów, zarówno pod względem kątów, jak i proporcji, co wskazuje na przewidywalną zmianę między każdym obrotem o 10° . Biorąc pod uwagę te informacje, możliwe jest oszacowanie, pod jakim kątem zostało zrobione zdjęcie. Jednak z tego badania wynika, że aby spróbować przewidzieć orientację twarzy z akceptowalnym stopniem dokładności, należałoby zbadać znacznie większą grupę referencyjną osób podzielonych na kategorie według płci, pochodzenia etnicznego i budowy twarzy.

5.6 Podsumowanie

Informacji uzyskanych z powyższej analizy nie można zastosować do współczesnych przypadków identyfikacji przy wykorzystaniu parametrów antropometrycznych, chociaż pokazuje ona stopień zmiany proporcji i kątów w odniesieniu do odległości między punktami antropometrycznymi, a zatem sposób, w jaki rysy twarzy zmieniają się wraz z rotacją. Przewidywalna zmienność uzależniona od pozycji twarzy wykazywana jest w wynikach pomiarów (kąty i proporcje) przy użyciu ograniczonej liczby punktów antropometrycznych. Jednak oprócz wykazania takiej przewidywalności, podstawowym pytaniem, które jest poruszane w głównej części pracy, jest to, czy antropometria jest wystarczająco dyskryminująca między jednostkami, zwłaszcza między osobami o podobnej fizjonomii – a zatem, czy taka technika może być przydatna jako dowód potwierdzający podobieństwo lub nawet pozytywną identyfikację w porównaniach

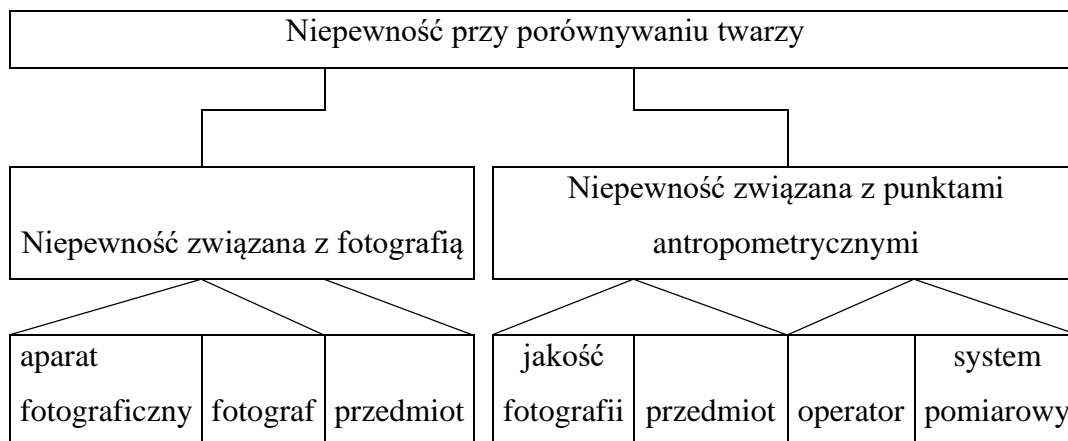
obrazów twarzy. Stwierdzono jednak, że istnieją dowody na wystarczającą potencjalną dyskryminację i należy rozważyć dalsze prace badawcze w tym kierunku.

Powyższe badania jednoznacznie wskazują na możliwość określenia funkcji zależności odległości punktów antropometrycznych pozyskanych z obrazu 2D od kątów *yaw* i *pitch* orientacji głowy i określenie na tej podstawie zakresów kątów orientacji głowy dla których zmiana odległości pozyskanych z obrazu 2D mieści się w zadanym przedziale $\pm 10^0$ (Teza 2) oraz istnienie możliwości korygowania cech biometrycznych pozyskanych z obrazu 2D z wykorzystaniem przybliżonej informacji o orientacji głowy (Teza 3).

6 Niepewność pomiarów antropometrycznych

Celem niniejszego rozdziału jest oszacowanie niepewności w pomiarach wybranych parametrów obrazu twarzy, spowodowanej procesami związanymi z lokalizacją punktów antropometrycznych i robieniem zdjęć, w tym niepewności wynikających z różnych osób wykonujących te zadania. Celem badań jest symulacja efektów występujących w rzeczywistym świecie, ponieważ różni operatorzy na całym świecie różnie rozmieszczają punkty antropometryczne i robią różne zdjęcia z naniesionymi tymi punktami. Ponadto, eksperyment pomoże w omówieniu problemów napotkanych w badaniu omówionym w poprzednim rozdziale, które wystąpiły w wyniku eksperymentalnej konfiguracji kamer.

W dziedzinie kryminalistyki, ocena niepewności co do identyfikacji osoby na podstawie badań punktów antropometrycznych, stała się w ostatnich latach przedmiotem dużej uwagi. Związane jest to w dużej mierze z wykorzystaniem otrzymanych wyników w trakcie rozprawy sądowej a co za tym idzie wydaniem wyroku skazującego lub uniewinniającego. Ważne jest, aby zwrócić uwagę na rozróżnienie między niepewnością a błędem, które zostało wyrażone przez Rowleya [Rowley2001]. Według niego, „Błąd pomiaru jest konsekwencją pomyłki i dlatego można go skorygować, eliminując błąd, a następnie poprawnie powtarzając pomiar. Niepewność można zmniejszyć i oszacować, ale jest to nieodłączna właściwość systemu pomiarowego i nie można jej całkowicie wyeliminować.” Szacowanie niepewności wymaga w pierwszej kolejności oszacowania losowych błędów pomiarowych (wkładów niepewności typu A), ponieważ nie można ich wyeliminować, a w dużej mierze determinują one niepewność pomiarów. Inne źródła niepewności (wkład typu B) to te, które można oszacować bez odwoływania się do badań empirycznych, na przykład dane kalibracyjne przyrządu, specyfikacje producenta lub inne opublikowane źródła. Można je następnie połączyć, w celu uzyskania ogólnego oszacowania niepewności. Źródła wkładu do ogólnej niepewności w odniesieniu do tego typu badań przedstawia Rysunek 13.



Rysunek 13 Źródła niepewności pomiarowych

Ten rozdział jest podzielony na dwie części. Pierwsza zawiera przegląd błędów związanych z pomiarem proporcji twarzy w wyniku różnic w lokalizacji punktów antropometrycznych. W drugiej dokonano przeglądu błędów pomiaru proporcji twarzy w wyniku procesu robienia zdjęć.

6.1 Błędy wynikające z lokalizacji punktów antropometrycznych

Przeprowadzone analizy z wykorzystaniem powtarzalnych danych pozwoliły określić błędy, jakie wystąpiły przy umieszczaniu punktów antropometrycznych. Analizy te były konieczne, ponieważ rozmieszczenie tych punktów jest w pewnym stopniu subiektywne i podlega zmienności. Mierząc stopień zmienności, który wynika z samego procesu pomiarowego, można ustalić kryteria, dzięki którym zostanie dokonane sprawdzenie czy dane obrazy pasowały do siebie, czyli były tożsame, czy były różne.

6.1.1 Materiał i metodologia

Pełny opis materiału badawczego użytego w punkcie 6.1 można znaleźć w kolejnym rozdziale. Dostarczone obrazy wideo przedstawiały mężczyzn i kobiety rasy białej. Twarze były wyświetlane z przodu, ukazując cechy od szyi w górę, w formacie frontalnym.

6.1.1.1 Metoda badania błędu lokalizacji dla jednego operatora

Test został przeprowadzony na zarejestrowanym w PJATK materiale badawczym o wysokiej rozdzielczości i obejmował fotografie twarzy. Obrazy twarzy jednej osoby

były pozyskiwane 10 razy. Umieszczanie punktów antropometrycznych było realizowane przez tego samego operatora przy użyciu tego samego sprzętu i tego samego dnia (tj. w powtarzalnych warunkach). Operator biorący udział w tym badaniu miał doświadczenie zarówno w posługiwaniu się sprzętem, jak i w umieszczeniu wybranych punktów. W tym badaniu wykorzystano łącznie cztery reprezentatywne punkty antropometryczne i sześć proporcji, tak jak w badaniu w poprzednim rozdziale. Wybrane punkty znajdowały się w centralnej części twarzy i były łatwe do zlokalizowania.

Następnie przeprowadzono drugą analizę na obrazach siedmiu różnych osób, z których każda była mierzona raz dziennie przez siedem dni. Wykorzystano te same obrazy zapisane w bazie danych. Badani zostali wybrani losowo, upewniając się, że były to różne osoby, a co za tym idzie naniesienie punktów antropometrycznych obarczone było różnymi trudnościami. Umieszczenie punktów antropometrycznych zostało wykonane na obrazach przez tego samego operatora na tym samym sprzęcie w tym samym czasie, ale tylko raz dziennie. Każdego dnia umieszczanie punktów odbywało się na badanych wybieranych w innej kolejności. Badane warianty nie obejmowały wszystkich możliwych kombinacji (na przykład różni operatorzy, różne urządzenia), ale były istotne dla wyników niniejszego badania.

Na podstawie tych badań wyznaczono współczynnik zmienności dla każdej z czterech proporcji, a wyniki przedstawiono w punkcie 6.1.2.1.

6.1.1.2 Metodologia badań międzyoperatorskich

Analiza została przeprowadzona na materiale badawczym o wysokiej rozdzielczości i obejmowała losowo wybrane próbki obrazów twarzy. Badanie międzyoperatorskie to rozwinięcie poprzednich badań. Przeprowadzone zostało na pełnym zestawie 21 punktów antropometrycznych i 47 proporcji. Punkty twarzy były lokalizowane łącznie na siedmiu obrazach. 5 różnych operatorów robiło to 7 razy każdy. Jeden operator miał wcześniejsze doświadczenie w korzystaniu ze sprzętu i znajomość punktów antropometrycznych. Pozostali operatorzy nie mieli doświadczenia w korzystaniu ze sprzętu, ani wcześniejszej wiedzy na temat antropometrycznych punktów twarzy. Wszyscy operatorzy używali tego samego sprzętu, a każdy operator umieścił punkty na obrazach badanych w ciągu jednego dnia. W wyniku testu udało się wyznaczyć współczynnik zmienności dla każdej odległości/proporcji, a wyniki tej analizy przedstawiono w punkcie 6.1.2.2.

6.1.2 Wyniki

Analizy przeprowadzono w celu określenia błędów w proporcjach/wymiarach antropometrycznych powodowanych błędami lokalizacji punktów antropometrycznych i zrealizowano w dwóch etapach: błędy dla jednego operatora oraz błędy międzyoperatorskie.

6.1.2.1 Analiza pierwsza – wyznaczenie błędu jednego operatora

Średnia i zakres współczynników zmienności (CV) dla proporcji zbadanych obrazów podsumowuje Tabela 7.

Tabela 7 Średnia i zakres współczynników zmienności (CV) pomiarów proporcji BD/CD, BC/CD, BC/BD, AB/AD, AB/BD, BD/AD, AD/CD dla jednego operatora

	Średnia CV % dla n=10		Zakres CV %	
	w ciągu dnia	między dniami	w ciągu dnia	między dniami
odległości	1,28	1,69	0,47 - 1,72	0,58 - 3,27

Wyniki są zgodne z oczekiwanymi, wyznaczonymi wcześniej na podstawie wzorca z tym, że występowały mniejsze różnice w proporcjach w przypadku lokalizacji punktów antropometrycznych na fotografiach w ciągu dnia w stosunku do proporcji, kiedy punkty te były lokalizowane w różnych dniach.

6.1.2.2 Analiza druga – wyznaczanie błędu kilku operatorów

Tabela 8 przedstawia podsumowane wyniki dla każdego obrazu, który został oznaczony przez pięciu operatorów. Średnia i zakres współczynników zmienności (CV) dla 42 proporcji są wymienione wraz ze średnią i zakresem CV po usunięciu wartości odstających. Wartość odstającą zdefiniowano jako CV powyżej 10,0%.

Każdy obraz był mierzony 7 razy przez każdego operatora. W tabeli zestawiono średnią (n=7) i zakres współczynników zmienności uzyskanych przez każdego operatora dla pomiarów proporcji *BD/CD, BC/CD, BC/BD, AB/AD, AB/BD, BD/AD, AD/CD* każdego obrazu.

Tabela 8 Obrazy twarzy

Obraz twarzy 1					
n=7	operator nr 1	operator nr 2	operator nr 3	operator nr 4	operator nr 5
średnia CV %	3,31	7,86	4,25	6,22	10,95
zakres CV %	0,2 - 18,0	0,8 - 51,0	0,2 - 27,5	0,2 - 41,6	0,3 - 112,8
średnia i zakres po usunięciu wartości odstających (CV% powyżej 10%)					
średnia CV %	2,65	3,86	2,65	4,05	3,02
zakres CV %	0,2 - 8,7	0,8 - 9,5	0,2 - 8,9	0,2 - 9,2	0,3 - 10,9
Obraz twarzy 2					
n=7	operator nr 1	operator nr 2	operator nr 3	operator nr 4	operator nr 5
średnia CV %	5,45	2,88	5,23	4,44	3,86
zakres CV %	0,6 - 22,5	0,2 - 12,6	0,5 - 22,8	0,3 - 17,7	0,1 - 22,6
średnia i zakres po usunięciu wartości odstających (CV% powyżej 10%)					
średnia CV %	4,05	2,35	3,58	3,22	2,86
zakres CV %	0,6 - 8,6	0,2 - 7,6	0,5 - 8,1	0,3 - 9,5	0,1 - 7,9
Obraz twarzy 3					
n=7	operator nr 1	operator nr 2	operator nr 3	operator nr 4	operator nr 5
średnia CV %	4,12	2,98	6,55	4,2	6,3
zakres CV %	0,4 - 15,2	0,6 - 11,8	0,3 - 49,5	0,5 - 17,4	0,2 - 95,8
średnia i zakres po usunięciu wartości odstających (CV% powyżej 10%)					

średnia CV					
%	3,1	2,1	2,5	2,8	2,9
zakres CV					
%	0,4 - 9,1	0,6 - 8,5	0,3 - 8,0	0,5 - 9,4	0,2 - 10,1
Obraz twarzy 4					
n=7	operator nr 1	operator nr 2	operator nr 3	operator nr 4	operator nr 5
średnia CV					
%	5,8	3,7	4,6	5,1	2,9
zakres CV					
%	0,9 - 20,3	0,2 - 14,8	0,3 - 22,6	0,3 - 26,8	0,4 - 15,9
średnia i zakres po usunięciu wartości odstających (CV% powyżej 10%)					
średnia CV					
%	4,1	2,5	3	3,1	1,8
zakres CV					
%	0,9 - 8,8	0,2 - 6,9	0,3 - 9,1	0,3 - 8,9	0,4 - 5,3
Obraz twarzy 5					
n=7	operator nr 1	operator nr 2	operator nr 3	operator nr 4	operator nr 5
średnia CV					
%	2,8	8,8	2,8	4,5	4,5
zakres CV					
%	0,3 - 26,7	0,5 - 61,3	0,0 - 13,7	0,8 - 30,1	0,2 - 15,8
średnia i zakres po usunięciu wartości odstających (CV% powyżej 10%)					
średnia CV					
%	2,6	4,5	2,3	3,3	3,3
zakres CV					
%	0,3 - 8,8	0,5 - 8,7	0,0 - 10,2	0,8 - 10,1	0,2 - 9,2
Obraz twarzy 6					
n=7	operator nr 1	operator nr 2	operator nr 3	operator nr 4	operator nr 5
średnia CV					
%	3	5,7	3,2	5,1	3,2

zakres CV %	0,3 - 15,3	0,3 - 35,6	0,4 - 12,1	0,5 - 21,8	0,2 - 14,5
średnia i zakres po usunięciu wartości odstających (CV% powyżej 10%)					
średnia CV %	2,6	4,5	2,3	3,3	3,3
zakres CV %	0,3 - 8,1	0,3 - 9,5	0,4 - 9,3	0,5 - 8,1	0,2 - 9,9
Obraz twarzy 7					
n=7	operator nr 1	operator nr 2	operator nr 3	operator nr 4	operator nr 5
średnia CV %	4,5	6,6	4,2	5,2	2,8
zakres CV %	0,3 - 10,8	0,2 - 25,8	1,2 - 17,6	0,9 - 18,7	0,3 - 12,8
średnia i zakres po usunięciu wartości odstających (CV% powyżej 10%)					
średnia CV %	2,7	2,9	3,1	3,5	1,7
zakres CV %	0,3 - 6,5	0,2 - 10,5	1,2 - 8,6	0,9 - 9,3	0,3 - 6,5
Ogólny średni % po usunięciu wartości odstających (CV% powyżej 10%) dla pięciu operatorów i siedmiu obrazów (n=35) 3,03					

Operator nr 3 był jedynym operatorem w badanej grupie, który miał wcześniejsze doświadczenie w procesie nanoszenia punktów antropometrycznych na twarzy. Uzyskał on najmniejsze średnie CV w 20% testowanych obrazach. Nie musi to oznaczać, że doświadczony operator nieprawidłowo umieścił punkty antropometryczne, a jedynie, że istniało mniejsze zróżnicowanie umiejscowienia tych punktów w stosunku do pozostałych operatorów.

Średnia i zakres CV są większe niż uzyskane w przypadku błędu międzyoperatorskiego i jest to wartość oczekiwana ze względu na zmienność jaką wprowadzają operatorzy. Liczba proporcji uwzględnionych w badaniu w stosunku do różnych operatorów była znacznie większa i wynosiła 42 w porównaniu do 6 dla badania dla jednego operatora. Niektóre z tych przypadków wykorzystują punkty

antropometryczne, które są trudne do lokalizacji i dlatego właśnie średnie współczynniki zmienności są większe. W praktyce, pomiary proporcji wykazujące bardzo duże zróżnicowanie byłyby wykluczone z jakiegokolwiek systemu porównywania obrazów czy przeszukiwania baz danych. W niniejszym badaniu nazwano je „obserwacjami odstającymi” i zdefiniowano jako proporcje dające wartości CV większe niż 10%. Po usunięciu wartości odstających ze średniego CV, dane nadal wykazywały większe średnie CV niż te, które wystąpiły w wyniku badania dla jednego operatora.

7 Błędy w proporcjach twarzy wynikające z fotografii płaskiej

Grupa badana składała się z 7 ochotników – 5 mężczyzn i 2 kobiet. Badani zostali wytypowani losowo, unikając uprzedzeń w odniesieniu do rasy, płci lub wieku. W realizowanych badaniach prowadzonych w CBR PJATK w Bytomiu wykorzystano dane z 6 synchronizowanych kamer Point Grey Grasshopper oraz 10 kamer systemu Vicon Bonita przyjętego jako referencyjny. Nagrania wideo wykonano wszystkim siedmiu ochotnikom. Nikt nie otrzymał wynagrodzenia za udział w badaniach. Z uwagi na ochronę danych osobowych, zdjęcia publikowane w ramach niniejszej pracy przedstawiają Autora, który wyraża zgodę na ich publikację.

7.1 Sprzęt wykorzystany do badań

Dane umożliwiające realizację omawianego podejścia zebrano w laboratorium Centrum Badawczo-Rozwojowego Polsko-Japońskiej Akademii Technik Komputerowych w Bytomiu (CBR PJATK) w laboratorium HFML (ang. *Human Facial Modelling Lab*) z użyciem 6 kamer Point Grey Grasshopper oraz 10 kamer systemu Vicon Bonita przyjętego jako referencyjny.

Wykorzystane kamery NIR Vicon Bonita 10 charakteryzowały się następującymi parametrami:

- rozdzielczość – 1 MP;
- częstotliwość próbkowania do 250 fps;
- 10-bitowa skala szarości.

Z kolei kamery Point Grey Grasshopper 3 scharakteryzowane były przez:

- rozdzielczość 1920 x1200 px;
- prędkości akwizycji 162 fps z globalną migawką;
- precyzyjne obiektywy o ogniskowej 25 mm i jasności 1,4-16.

Dodatkowo wykorzystano trzy kontrolery USB 3.0 z dwoma portami zewnętrznymi o przepustowości 5 Gb/s, programowany synchronizator 6 kamer Point Grey Grasshopper 3 z trybami: autorun, trigrun, syncrun, gaterun, soffrun, oraz komputer sterujący z dyskiem 2x5TB.

Oprogramowanie wykorzystane, to: Vicon Nexus, Vicon Blade, Polygon oraz Meshlab, wraz z zaimplementowanymi dwoma technologiami przenoszenia pozyskanej z wideo mimiki twarzy aktora na neutralną, trójwymiarową siatkę twarzy. Pierwsza technologia wykorzystuje system markerowy Bonita, druga – obrazy z 6 zsynchronizowanych kamer wideo.



Rysunek 14 Systemy akwizycji obrazu twarzy (markerowy i bezmarkerowy). System 10 kamer Bonita (strzałki czerwone) i 6 synchronizowanych sprzętowo kamer wideo (strzałki niebieskie)



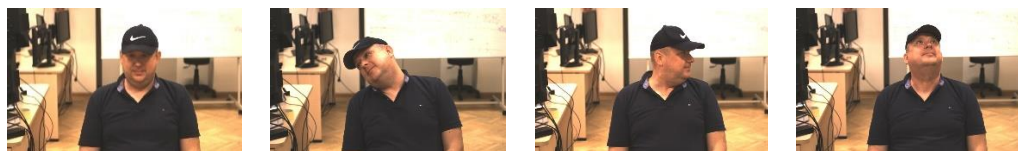
Rysunek 15 Przykładowa kamera Bonita i kamera wideo

7.2 Metodologia badań

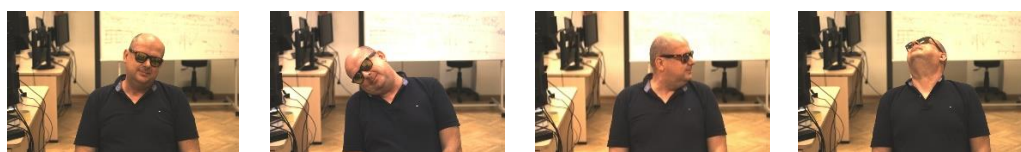
W ramach przeprowadzonych badań zarejestrowano 7 ochotników (dwie kobiety i pięciu mężczyzn). Badani zostali wytypowani losowo, unikając uprzedzeń w odniesieniu do rasy, płci lub wieku. Nikt nie otrzymał wynagrodzenia za udział w badaniach. Z uwagi na ochronę danych osobowych zdjęcia publikowane w ramach niniejszej pracy przedstawiają jednego z autorów, który wyraża zgodę na ich

publikację. Obraz twarzy każdej z osób pozyskiwany był w czterech ekspozycjach. Pierwsza ekspozycja – bez nakrycia głowy, druga – w czapce typu bejsbolówka, trzecia – w okularach, czwarta – wyrażająca ekspresję mimiczną. W trakcie nagrania osoby wykonywały obroty głową wokół trzech prostopadłych osi. Rejestracja każdej z osób przy różnych orientacjach głowy umożliwiła odtworzenie kątów rotacji względem pozycji kanonicznej klasycznie opisywanych jako *roll*, *pitch* i *yaw*. Tym samym, możliwym stało się ustalenie stosunku pozyskanych cech antropometrycznych ze względu na orientację głowy oraz rodzaj obrazowania (2D lub 3D).

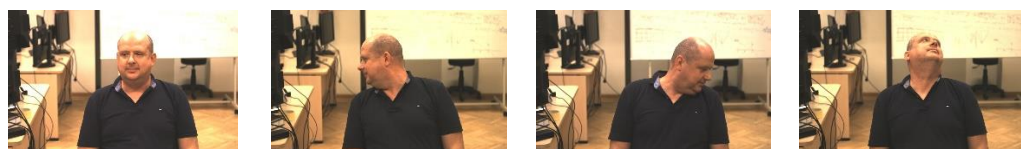
Na rysunkach 16-19 zaprezentowano przykładowe zdjęcia (klatki wycięte z nagranych wideo).



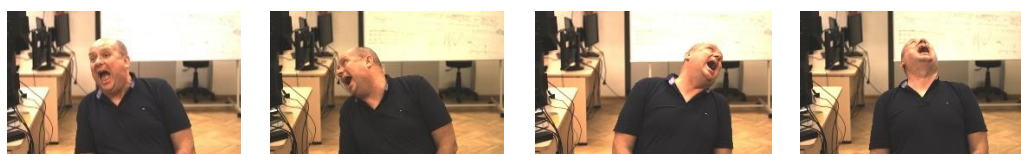
Rysunek 16 Pierwsza ekspozycja – czapka basebolówka



Rysunek 17 Druga ekspozycja – okulary

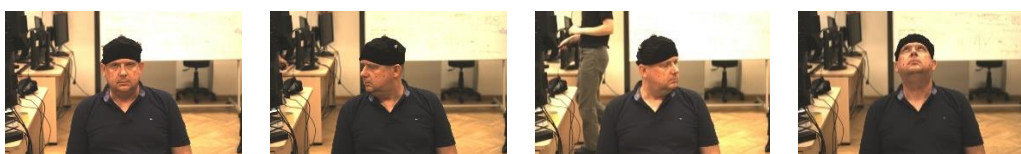


Rysunek 18 Trzecia ekspozycja – bez nakrycia głowy



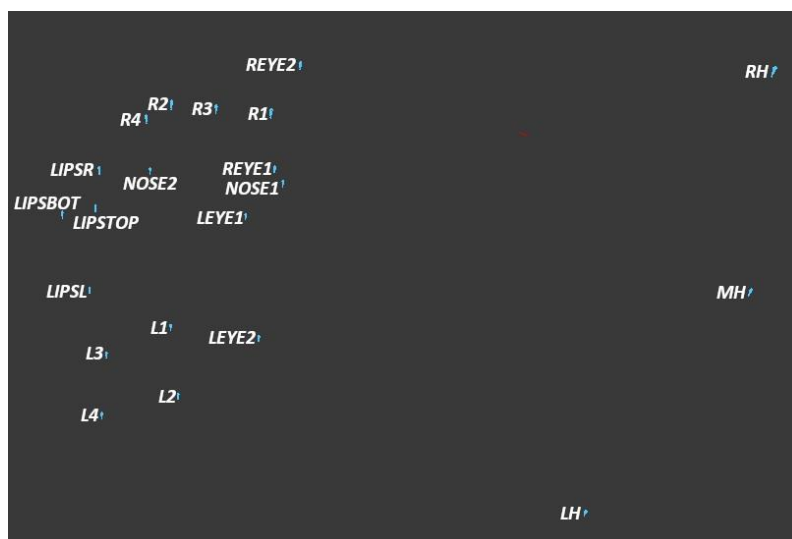
Rysunek 19 Czwarta ekspozycja – ekspresja na twarzy

W ramach kolejnych nagrań, twarz aktora pokryta była markerami odbijającymi światło podczerwone emitowane przez kamery. Rysunek 20 przedstawia przykładowe zdjęcia (klatki wycięte z nagranych wideo).



Rysunek 20 Markery na nagraniu video

Zdjęcie widoczne na rysunku 21 pokazuje zarejestrowany ruch markerów w przestrzeni 3D.



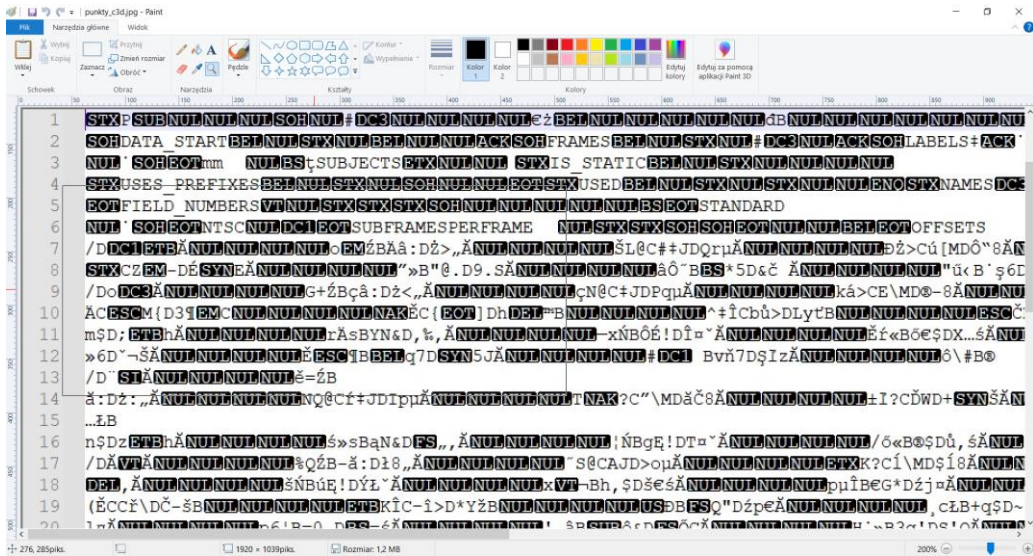
Rysunek 21 Markery w 3D/punkty w kolorze niebieskim – białe ich nazwy/

Powyższe nagrania posłużą do:

- wyznaczenia odległości antropometrycznych w 3D;
- wyznaczenia odległości antropometrycznych w 2D;
- przetestowania napisanej aplikacji do wyznaczania wektora cech antropometrycznych.

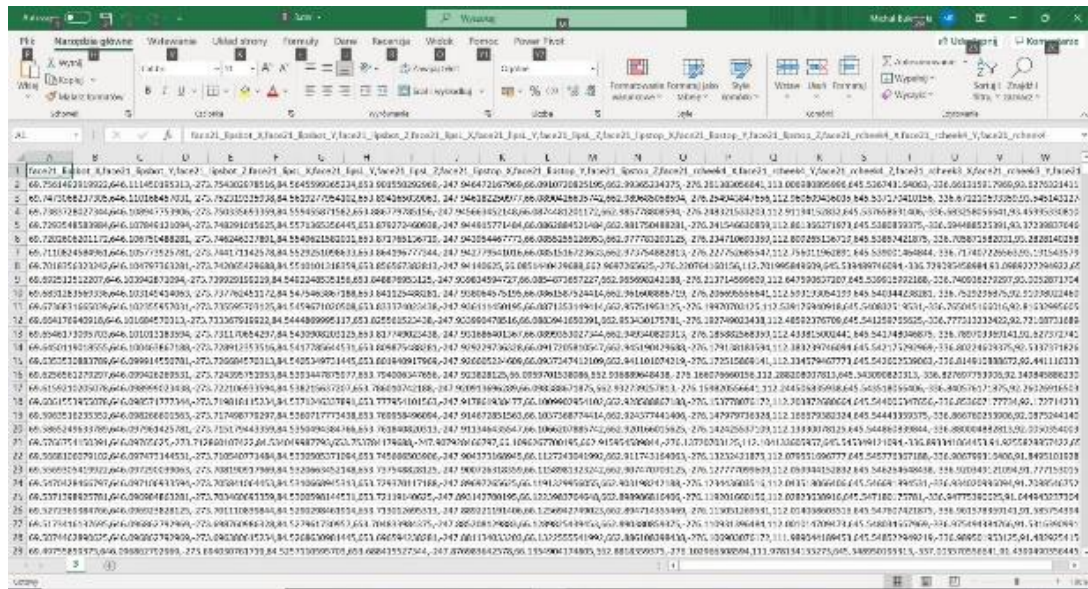
7.3 Wyznaczenie odległości antropometrycznych w obrazie 3d

Zarejestrowane w przestrzeni 3D, za pomocą opisanego wcześniej systemu, naniesione ręcznie punkty antropometryczne zapisano do pliku o formacie C3D [C3DUG]. Każdy z 21 (punkt 4.1) naniesionych punktów posiada kartezjańskie współrzędne x, y i z. Współrzędne zapisane w plikach .c3d przekształcono do formatu CSV. Następnie przegrupowano dane w macierz, w ramach której każdy wiersz reprezentuje kolejne współrzędne x, y i z, natomiast kolumny reprezentują kolejne chwile w czasie. Wyznaczono centroidy i przesunięto współrzędne względem właściwych czasowo centroidów. Jako pozycję bazową przyjęto chwilę czasu $t=0$. Kolejnym etapem było wyznaczenie macierzy rotacji oraz wektorów translacji przy wykorzystaniu algorytmu Iterative Closest Point (ICP) [Arun1987, Besl1992].



Rysunek 22 Punkty antropometryczne w formacie .c3d

W dalszej kolejności, przekształcono współrzędne punktów z .c3d do .csv.



Rysunek 23 Punkty antropometryczne w formacie .csv

Do dalszego przetwarzania danych usunęto nagłówki i przekształcono dane z .csv do .xlsx, grupując współrzędne x, y i z w kolumny. W wierszach arkusza Excel następowały po sobie chwile czasu, w których współrzędne zostały zarejestrowane. Kolejnym krokiem było wyznaczenie centroidów dla każdej z chwil czasu osobno dla x, y i z (Rysunek 24).

```

C:\CSVM\centroidyM.txt - Notepad++
Blik Edycja Szukaj Widok Format Słownika Ustawienia Narzędzia Makra Ułuchom Wtyczki
Okno 2
Nowy dokument tekstowy (5) [t] Nowy dokument tekstowy (4) [t] centroidyM.txt
1 108.2408183698623 ; 706.9133998325893 ; -275.824183872768
2 108.2141218639555 ; 706.9104149228051 ; -275.8259887695313
3 108.18672271001898 ; 706.907459077381 ; -275.8276149204799
4 108.15870375860305 ; 706.904523577009 ; -275.82907322474904
5 108.1301413036529 ; 706.9016142345611 ; -275.83037530908224
6 108.10111727033339 ; 706.8987281436013 ; -275.831532069615
7 108.07171558198475 ; 706.8958478655135 ; -275.83256458100817
8 108.04201271420438 ; 706.892966517858 ; -275.8334757486981
9 108.01209186372304 ; 706.8901628766741 ; -275.83428155808224
10 107.98203459240142 ; 706.8873465401787 ; -275.83495508812326
11 107.95191991896867 ; 706.8845389229912 ; -275.8356279645647
12 107.92192722545007 ; 706.8817632765998 ; -275.8361939929781
13 107.89183970860073 ; 706.8789789109004 ; -275.83670697893433
14 107.86203675043019 ; 706.8762207031251 ; -275.8371727350516
15 107.83249918619792 ; 706.8734770275298 ; -275.83760724748885
16 107.80330857776462 ; 706.8707362583706 ; -275.83802504766555
17 107.77454539707729 ; 706.8680100213915 ; -275.8384384881884
18 107.746289662865 ; 706.8652925037203 ; -275.83885701497394
19 107.71862193518323 ; 706.8625749860491 ; -275.83929588681184
20 107.69162405104866 ; 706.8598807198662 ; -275.8397703624908
21 107.66537457420715 ; 706.8571864536831 ; -275.84028480166484
22 107.63995651971729 ; 706.8545009068081 ; -275.84085446312315
23 107.61524563743959 ; 706.8518066406251 ; -275.84149242582794
24 107.59108479817715 ; 706.849129813058 ; -275.8421899704706
25 107.56752540951686 ; 706.8464471726192 ; -275.84299577985496
length Ln: 1 Col: 1 Pos: 1 Unix (LF) UTF-8 INS

```

Rysunek 24 Centroidy x , y i z dla każdej z chwil czasu

Następnie przesunięto wszystkie punkty względem właściwych czasowo centroidów (Rysunek 25).

```

punkty_po_centroidzieM.txt
1 -38.48466909499403 ; -60.80194963727638 ; 2.0698808942519804
2 -38.466815040225 ; -60.80024646577408 ; 2.0736694335932953 ; -
3 -38.44834990728458 ; -60.79851132347494 ; 2.0772792271209255
4 -38.42934890020466 ; -60.79667445591497 ; 2.080782209124038 ;
5 -38.409880683535604 ; -60.79486374628004 ; 2.084128970191216
6 -38.390034811837296 ; -60.79295421782024 ; 2.087360927036968
7 -38.36987994966054 ; -60.79105050223245 ; 2.0904991513201594
8 -38.34950020199737 ; -60.7890537806918 ; 2.0935465494791288 ;
9 -38.32896350678945 ; -60.787013462611185 ; 2.096519106910250
10 -38.30835142589751 ; -60.784990583147646 ; 2.099399384998264
11 -38.28774297805067 ; -60.782854352678214 ; 2.102260044642719
12 -38.2672001807775 ; -60.78075000000000 ; 2.105111111111111

```

Rysunek 25 Punkty po przesunięciu względem centroidów

W tym momencie przyjęto jako pozycję bazową pozycję w chwili $t_0=0$ i względem tej pozycji wyznaczono macierze rotacji oraz wektory translacji według algorytmu ICP (ang. *Iterative Closest Point*).

7.3.1 ICP – rotacja

ICP to algorytm dający możliwość porównania dwóch chmur punktów oraz określenia ich wzajemnej orientacji, poprzez wyznaczenie macierzy rotacji i wektorów translacji. Pomimo, że jest to dość wolny algorytm, często jest wykorzystywany do porównania lub łączenia skanów 3D.

Zastosowany algorytm ICP zaczerpnięto z [Eggert1997]. Jeżeli założymy, że istnieją dwa odpowiadające sobie zbiory punktów m_i i d_i , gdzie $i = 1 \dots N$, powiązane wzorem:

$$d_i = Rm_i + T + V_i, \quad (6)$$

gdzie R jest standardową macierzą rotacji 3x3, T jest wektorem translacji 3D, a V_i jest wektorem szumu, to znalezienie optymalnego przekształcenia $[R, T]$

odwzorowującego zbiór punktów m_i i d_i zazwyczaj wymaga zminimalizowania błędu np. Metodą Najmniejszych Kwadratów, określonego wzorem:

$$\Sigma^2 = \sum_{i=1}^N \|d_i - \mathbf{R}m_i - \mathbf{T}\|^2. \quad (7)$$

Obliczenie macierzy rotacji. Zbiory punktów m_i i d_i powinny mieć ten sam środek ciężkości. Zatem:

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i, \text{ gdzie } d_{ci} = d_i - \bar{d}, \quad (8)$$

$$\bar{m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i, \text{ gdzie } m_{ci} = m_i - \bar{m}. \quad (9)$$

Na tej podstawie,

$$\Sigma^2 = \sum_{i=1}^N \|d_{ci} - \mathbf{R}m_{ci} - \mathbf{T}\|^2. \quad (7)$$

można przedstawić jako:

$$\Sigma^2 = \sum_{i=1}^N \|d_{ci} - \mathbf{R}m_{ci}\|^2 = \sum_{i=1}^N (d_{ci}^T d_{ci} + m_{ci}^T m_{ci} - 2d_{ci}^T \mathbf{R}m_{ci}). \quad (10)$$

Powyższe równanie minimalizuje się, kiedy jego ostatni człon ma wartość maksymalną, co jest równoważne maksymalizacji śladu macierzy \mathbf{RH} , gdzie \mathbf{H} jest macierzą korelacji zdefiniowaną jako:

$$\mathbf{H} = \sum_{i=1}^N m_{ci} d_{ci}^T. \quad (11)$$

W przypadku, kiedy rozkład wartości macierzy osobliwej \mathbf{H} jest podany przez:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T, \quad (12)$$

to macierz rotacji \mathbf{R} można wyznaczyć z zależności:

$$\mathbf{R} = \mathbf{V}\mathbf{U}^T. \quad (13)$$

Wykorzystano tutaj SVD (ang. *Singular Value Decomposition*), czyli rozkład macierzy korelacji \mathbf{H} na iloczyn trzech specyficznych macierzy. Każdą macierz, np. \mathbf{H} , można przedstawić w postaci trzech innych macierzy $\mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T$, gdzie \mathbf{U} i \mathbf{V} są macierzami ortogonalnymi, a $\mathbf{\Lambda}$ jest macierzą diagonalną (metoda znana jako ortogonalny problem Prokrustesa [Schonemann1966]).

Wyznaczanie wektora translacji, to wyrównanie centroidu d_i z przekształconym przez macierz \mathbf{R} centroidem m_i według poniższego wzoru:

$$\mathbf{T} = \bar{d} - \mathbf{R}\bar{m}. \quad (14)$$

Na tej podstawie wyznaczono macierze rotacji (Rysunek 26) oraz wektory translacji (Rysunek 27) dla każdej z chwil czasu t .

```

1 0.33152066812030484 I 0.4372920807064952 I -0.835984259876016
2 -0.8256558384669366 I 0.5632191205702849 I -0.03281247673514215
3 0.4564936834333269 I 0.7011132992430099 I 0.5477715387002643
4
5 0.3315433367339999 I 0.43746416020270834 I -0.8358852339917392
6 -0.8258004473586232 I 0.5630023364856064 I -0.032893620263593826
7 0.4562155598065273 I 0.7011800607902995 I 0.5479177724262372
8
9 0.3315672547540511 I 0.43763989693561783 I -0.8357837496536074
10 -0.8259470755530516 I 0.5627823714090846 I -0.032976215921918114
11 0.4559326528778389 I 0.7012469772065679 I 0.5480675989313973
12
13 0.33159179398578575 I 0.4378183721180353 I -0.8356805341739162
14 -0.8260952652512142 I 0.5625599253020654 I -0.03305969107026033
15 0.4556462387541619 I 0.7013140548142812 I 0.5482199391021246
16
17 0.33161703845241447 I 0.4379990992247018 I -0.8355758067861944
18 -0.8262443528853777 I 0.5623359907867534 I -0.03314366894150468
19 0.45535745204517447 I 0.7013807971025652 I 0.5483744781831997
20
21 0.331642334088494 I 0.43818135222880417 I -0.8354702058118364
22 -0.8263939162440993 I 0.5621112268408268 I -0.03322745633118476
23 0.4550675306315276 I 0.7014471264596048 I 0.5485302829803358
24
25 0.33166740398708777 I 0.4383644767181462 I -0.8353641832662518
26 -0.8265433396979855 I 0.5618865725766329 I -0.03331046620785187
27 0.45477779270030977 I 0.7015126977537256 I 0.5486866994532702
28

```

length: 770 Ln: 1 Col: 1 Pos: 1 Unix (LF) UTF-8 INS

Rysunek 26 Macierze rotacji dla poszczególnych chwil czasu. Pierwsza macierz rotacji (trzy wiersze) dla chwili czasu $t=0$, druga (kolejne trzy wiersze) dla $t+1$, kolejna dla $t+2$...

```

1 0.0 I 0.0 I 0.0
2 -467.4436948239048 I 389.21153945740036 I -669.7346764229065
3 -467.53350205270704 I 389.3390998954141 I -669.6945835784536
4 -467.62449523602197 I 389.4678129750993 I -669.6533704993835
5 -467.71643749898715 I 389.597068188861 I -669.6109290443648
6 -467.80895591650153 I 389.72661396835605 I -669.5676255807208
7 -467.90172043776715 I 389.85596010930675 I -669.5235539438379
8 -467.99430728387324 I 389.98486273186995 I -669.4792027466187
9 -468.0864325970754 I 390.1128010300498 I -669.434582128147
10 -468.17778561133605 I 390.23950956234575 I -669.3899664229401
11 -468.2679102310235 I 390.3645328347439 I -669.3456733327381
12 -468.3565642182581 I 390.48737606047854 I -669.3017357277638
13 -468.44333920841666 I 390.60780459532 I -669.258526068366
14 -468.527894049873 I 390.7254209070339 I -669.2163172041187
15 -468.6099056474209 I 390.8398442883632 I -669.1752937534472
16 -468.68901547391863 I 390.95075555284996 I -669.1357415493045
17 -468.76493870222066 I 391.05758751295633 I -669.0976796547317
18 -468.8373000564832 I 391.16002320753455 I -669.0614276200254
19 -468.90570320202403 I 391.2579790156472 I -669.0275237739395
20 -468.9698118043449 I 391.35077851019025 I -668.9959989790268
21 -469.0293914226064 I 391.43805489607627 I -668.9668923724447
22 -469.0853699135748 I 391.5216615067123 I -668.9403834637434
23 -469.13889781701675 I 391.60307407367833 I -668.9159141017631
24 -469.1897326506204 I 391.6820072743512 I -668.8936122024601
25 -469.2378063724709 I 391.75822562861146 I -668.873398148122
26 -469.2828762766518 I 391.83171380977615 I -668.8556471446209
27 -469.3249599047839 I 391.90241211439064 I -668.8403583995376
28 -469.3646049840539 I 391.9709386695366 I -668.8271867209116

```

Rysunek 27 Wektory translacji dla poszczególnych chwil czasu. Pierwszy wektor translacji (pierwszy wiersz) dla chwili czasu $t=0$, drugi (kolejny wiersz) dla $t+1$, kolejny dla $t+2$...

7.3.2 Kąty Θ i Γ

Na podstawie macierzy rotacji wyznaczono wartości kątów Θ (kąt od osi x w radianach) i Γ (kąt od osi y w radianach), zgodnie z następującymi zależnościami [Eberly2020]:

- Dla kąta Θ przy macierzy rotacji:

$$\begin{bmatrix} r_{00} & r_{01} & r_{02} \\ r_{10} & r_{11} & r_{12} \\ r_{20} & r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

zatem

Jeżeli $\Theta_y \in (-\pi/2, \pi/2)$, wtedy $\Theta_x = \text{atan2}(r_{21}, r_{22})$;

Jeżeli $\Theta_y = -\pi/2$, wtedy $\Theta_x = 0$;

Jeżeli $\Theta_y = \pi/2$, wtedy $\Theta_x = 0$;

Więc wyliczeń dokonano zgodnie z kodem:

```
if( r20 < +1)
{
    if( r20 > -1)
    {
        thetaY = asin (-r20) ;
        thetaZ = atan2 ( r10 , r00 ) ;
        thetaX = atan2 ( r21 , r22 ) ;
    }
    else
    {
        thetaY = pi / 2 ;
        thetaZ = -atan2(-r12 , r11 ) ;
        thetaX = 0 ;
    }
}
else
{
    thetaY = -pi / 2 ;
    thetaZ = atan2(-r12 , r11 ) ;
    thetaX = 0 ;
}
```

- Dla kąta Γ przy macierzy rotacji:

$$\begin{bmatrix} r_{00} & r_{01} & r_{02} \\ r_{10} & r_{11} & r_{12} \\ r_{20} & r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

zatem

Jeżeli $\Gamma_x \in (-\pi/2, \pi/2)$, wtedy $\Gamma_y = \text{atan2}(r_{20}, r_{22})$;

Jeżeli $\Gamma_x = -\pi/2$, wtedy $\Gamma_y = 0$;

Jeżeli $\Gamma_x = \pi/2$, wtedy $\Gamma_y = 0$;

Więc wyliczeń dokonano zgodnie z kodem:

```
if ( r01 < +1)
{
    if ( r01 > -1)
    {
        thetaZ = asin (-r01) ;
        thetaX = atan2 ( r21 , r11 ) ;
        thetaY = atan2 ( r02 , r00 ) ;
    }
    else
    {
        thetaZ = pi / 2 ;
        thetaX = -atan2(-r20 , r22 ) ;
        thetaY = 0 ;
    }
}
else
{
    thetaZ = -pi / 2 ;
    thetaX = atan2(-r20 , r22 ) ;
    thetaY = 0 ;
}
```

Otrzymano następujące wyniki (Rysunek 28).


```

C:\CSV\Mi\wsp_x_y_dla_t.txt - Notepad++
Plik Edycja Szukaj Widok Format Składnia Ustawienia Narzędzia Makra Uruchom Wtyczki
Okno ?
centroidyMi.txt x Nowy dokument tekstowy (4) txt x wsp_x_y_dla_t.txt x
513 512 I -0.4808557427732196 I 0.8730882941348598
514 513 I -0.4812625899478565 I 0.8727735408953325
515 514 I -0.48166451403051275 I 0.872458854849009
516 515 I -0.48205999055130977 I 0.8721449900678389
517 516 I -0.48244840310246423 I 0.8718324082292354
518 517 I -0.482827626912313 I 0.8715224927115461
519 518 I -0.4831972812521813 I 0.8712155791695465
520 519 I -0.4835603077494415 I 0.8709103942151503
521 520 I -0.4839194558300768 I 0.8706057362184184
522 521 I -0.48427606288232783 I 0.8703013281003277
523 522 I -0.48463092047418005 I 0.8699972037256735
524 523 I -0.4849851489969169 I 0.8696932563440941
525 524 I -0.48533948582160286 I 0.8693896131004112
526 525 I -0.4856953649781068 I 0.8690859892011672
527 526 I -0.48605896670486476 I 0.8687793855057484
528 527 I -0.48643255545690317 I 0.8684690450930652
529 528 I -0.48680438980835156 I 0.8681610658693555
530 529 I -0.4871649765505808 I 0.8678601008490445
531 530 I -0.4875118737502281 I 0.8675676880968589
532 531 I -0.4878426135180198 I 0.867285429423557
533 532 I -0.48815351772709376 I 0.86701394005933
534 533 I -0.4884418906609106 I 0.8667542566636721
535 534 I -0.48870254446044076 I 0.8665100044375331
536 535 I -0.4889409354057182 I 0.8662787971244736
537 536 I -0.4891678688312468 I 0.8660561644292184
538 537 I -0.4893859341901287 I 0.8658421653693958
539 538 I -0.48959749786872697 I 0.8656370205178351
540 539 I -0.4898039035545832 I 0.8654417466625165
length: 19€ Ln: 1 Col: 1 Pos: 1 Unix (LF) UTF-8 INS

```

Rysunek 28 Wartości kątów Θ i Γ (w radianach) dla każdej chwili t (od $t=512$ do $t=539$) uzyskane z nagrania 20 fps – stąd zmiany kątów są nieznaczne.

7.3.3 Znormalizowane odległości antropometryczne 3D

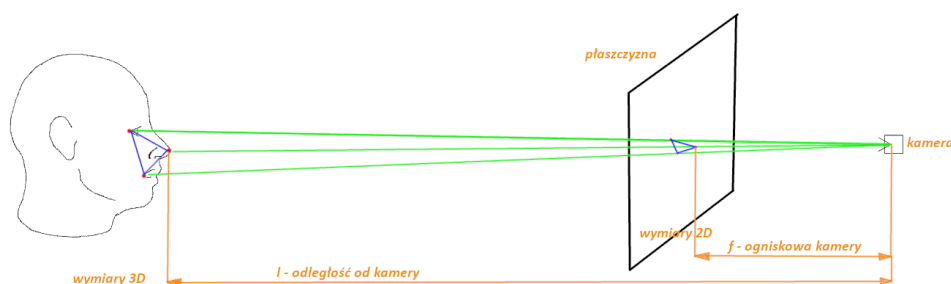
Na podstawie zarejestrowanych w laboratorium PJATK współrzędnych punktów antropometrycznych wyznaczono 43 odległości antropometryczne, które znormalizowano względem wymiaru pomiędzy zewnętrznymi kącikami oczu. Otrzymano 43 odległości dla punktów w 3D (przykładowe wyniki prezentuje Tabela 9), które wyliczono korzystając z metryki Euklidesowej.

Tabela 9 Przykładowe odległości dla punktów w 3D

wym. norm.	RH-MH	RH-NOSE1	RH-REYE2
114,4602734	0,8912638	1,466200063	1,180921544
114,4619751	0,891194738	1,466203672	1,180997153
114,4641552	0,891119	1,466203044	1,181071667
114,466751	0,891037223	1,466198982	1,181145506
114,4697193	0,890950062	1,466192	1,181218443
114,4730791	0,890857784	1,466181592	1,181289728
114,4767255	0,89076147	1,466168946	1,181360287
114,4806334	0,890661282	1,466154705	1,181429997
114,4847938	0,890557522	1,466138413	1,181497861

7.4 Wyznaczenie odległości antropometrycznych w obrazie 2D

Rysunek 29 obrazuje schemat wyznaczenia odległości antropometrycznych na obrazie płaskim 2D przy wykorzystaniu posiadanych odległości antropometrycznych zarejestrowanych w trójwymiarowej przestrzeni.



Rysunek 29 Schemat wyznaczenia odległości 2D

Na twarzy znajdującej się po lewej stronie rysunku zaznaczono trzy przykładowe zarejestrowane punkty antropometryczne. Po prawej stronie umieszczono hipotetyczną kamerę rejestrującą obraz 3D na płaszczyźnie 2D. Charakterystyka tej kamery może być potencjalnie zgodna z charakterystyką kamer będących na wyposażeniu patroli Policji. Ogniskowa takiej kamery, to 22 mm, czyli $f = 22$ mm. Osoba, do której zbliża się patrol, pozostaje w odległości $l = 3000$ mm od obiektywu kamery. Na tej podstawie, przy wykorzystaniu równania płaszczyzny:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (17)$$

oraz równania parametrycznego prostej: $\frac{x-x_0}{x_p-x_0} = \frac{y-y_0}{y_p-y_0} = \frac{z-z_0}{z_p-z_0}$, wyznaczono również

43 odległości antropometryczne, które, tak jak poprzednie, znormalizowano względem odległości pomiędzy zewnętrznymi kącikami oczu.

Wyznaczenie odległości antropometrycznych na obrazie 2D posłuży do opracowania modelu przeliczenia odległości 2D na 3D lub 3D na 2D. Da się także wykazać, że wraz z ruchami w trzech osiach Eulera, odległości antropometryczne zmieniają się (czy to dla obrazów 2D czy dla 3D), przy czym stabilność tych odległości dla 3D jest znacznie wyższa niż dla 2D.

Przyjmijmy następujące założenia (wszystkie odległości mierzone i wyliczane są w mm):

$$P_0 = (100,700,3000) \text{ jest to punkt w } \mathbb{R}^3;$$

$$\overrightarrow{P_0P} = [0,0,3000] \text{ jest to wektor centroid-kamera};$$

$$\vec{n} \perp \overrightarrow{P_0P} = [100,700,0] \text{ jest to wektor prostopadły normalny};$$

Równanie płaszczyzny jest postaci (współrzędne z uległy redukcji):

$$100x + 700y - 500\,000 = 0. \quad (17)$$

Jeśli oznaczymy współrzędne kamery jako (x_0, y_0, z_0) , współrzędne punktu w 3D jako (x_p, y_p, z_p) to wektor:

$$\vec{V} = [x_p - x_0, y_p - y_0, z_p - z_0]. \quad (18)$$

Wykorzystując równanie parametryczne prostej:

$$\frac{x-x_0}{x_p-x_0} = \frac{y-y_0}{y_p-y_0} = \frac{z-z_0}{z_p-z_0} \quad (19)$$

i równanie płaszczyzny:

$$Ax + By + D = 0, \quad (20)$$

można wyznaczyć x i y punktów antropometrycznych na płaszczyźnie jak na rysunku, zgodnie z następującymi wzorami:

$$x = \frac{(x_0-x_p)(y-y_p)}{(y_0-y_p)} + x_p, \quad (21)$$

$$y = \frac{\left(-\frac{D}{A}-x_p\right)(y_0-y_p)+x_0y_p-x_py_p}{x_0-x_p+\frac{B}{A}(y_0-y_p)}. \quad (22)$$

7.4.1 Znormalizowane odległości antropometryczne 2D

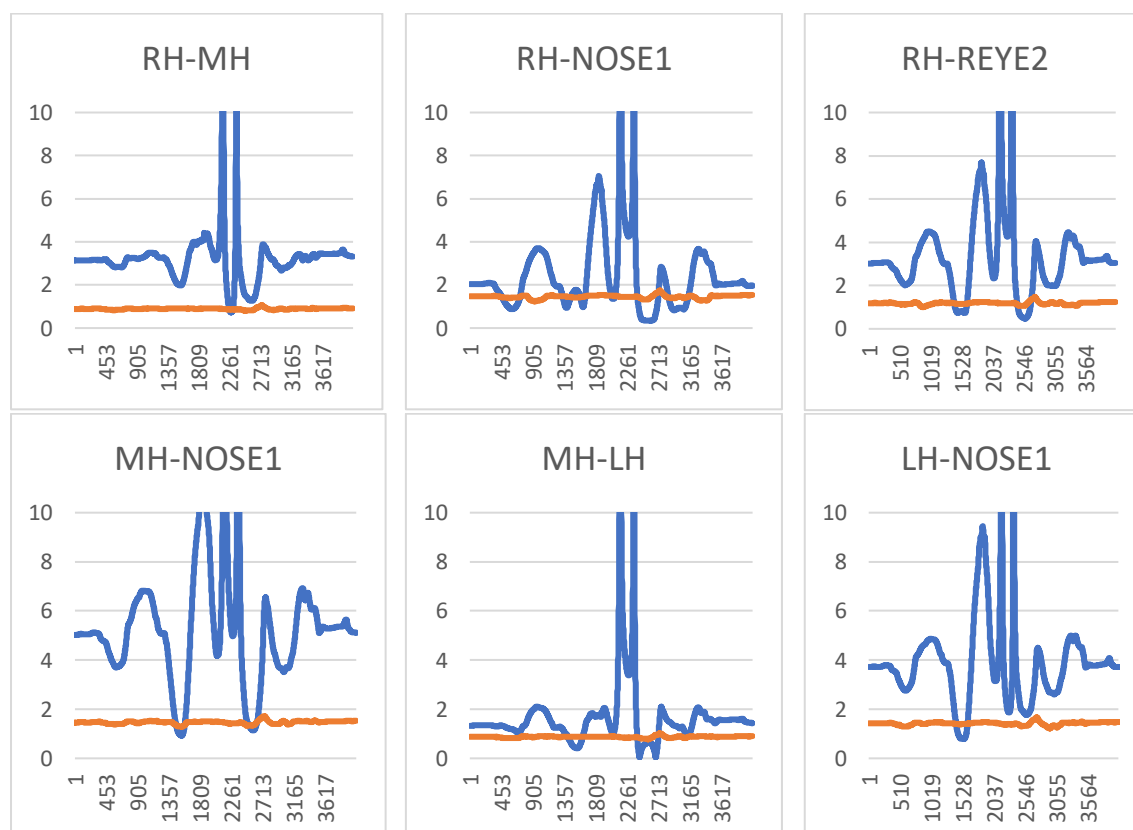
Otrzymano 43 odległości dla punktów w 2D (przykładowe wyniki prezentuje Tabela 10), które wyliczono korzystając z metryki Euklidesowej.

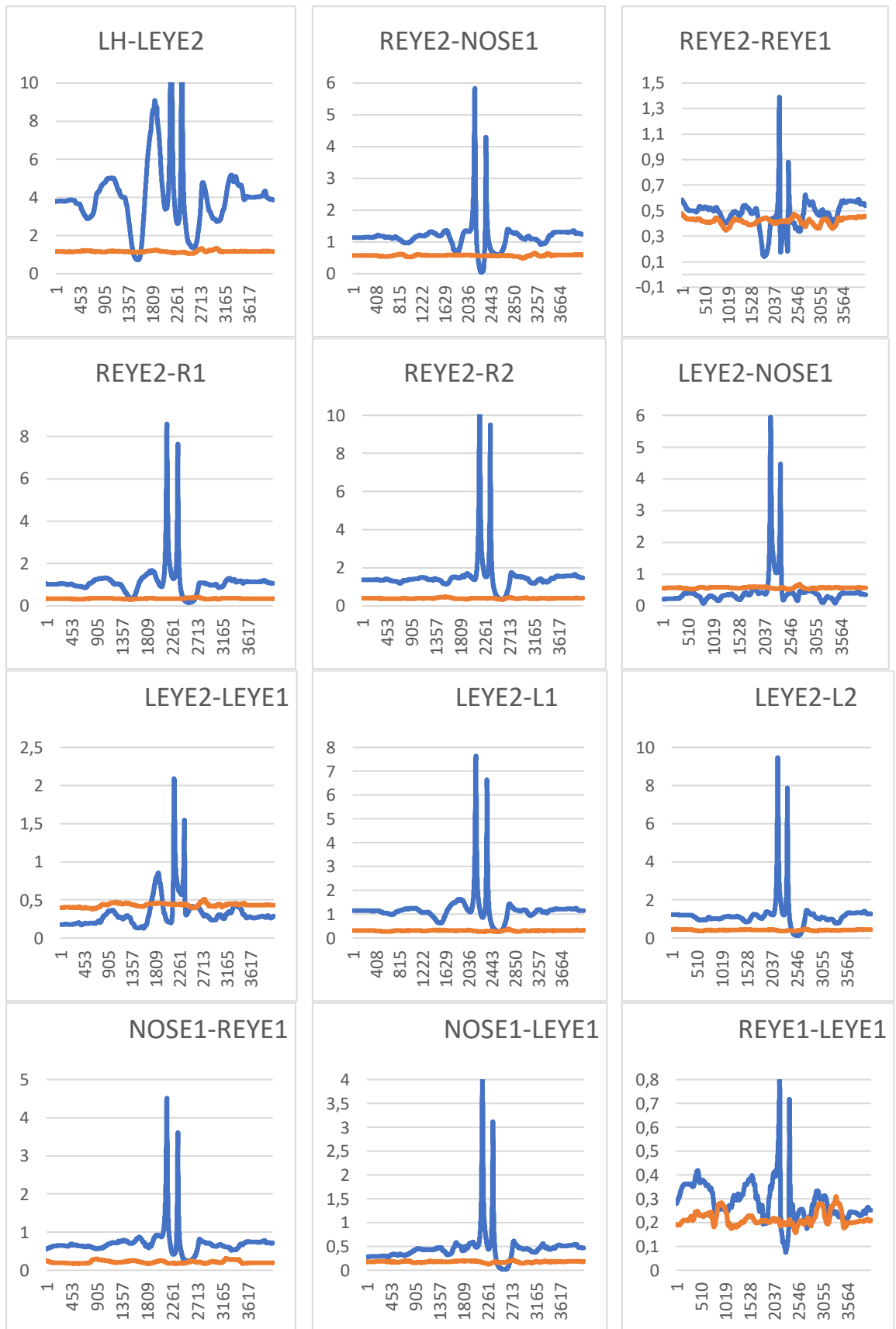
Tabela 10 Przykładowe odległości dla punktów w 2D

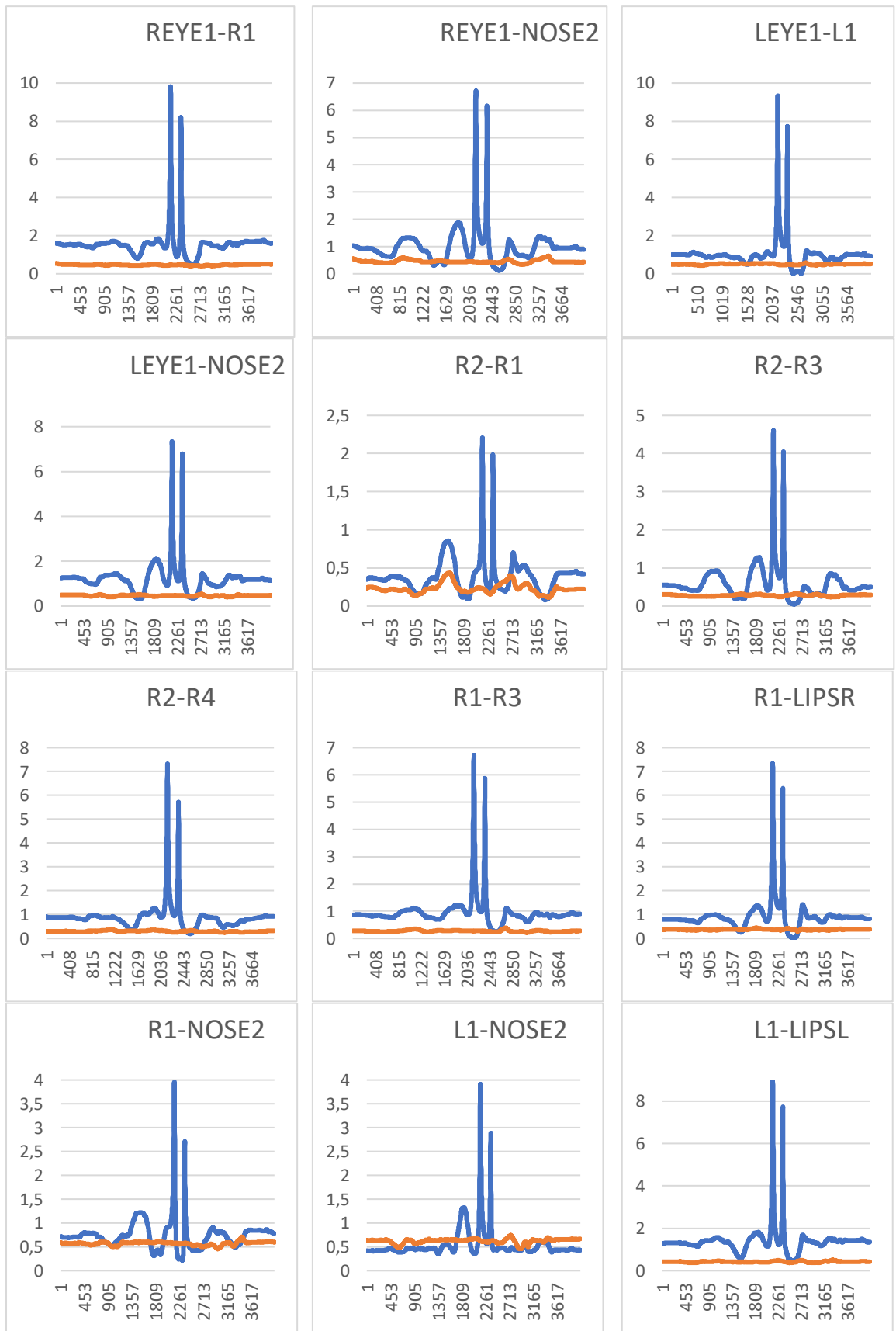
wym. norm.	RH-MH	RH-NOSE1	RH-REYE2
144,811706	3,135647703	2,034700934	3,013884745
144,8170084	3,135554924	2,034766481	3,014003433
144,822809	3,135449046	2,03482755	3,014116138
144,8287368	3,13533202	2,034888843	3,014229161
144,8347579	3,135210934	2,034952803	3,014343403
144,8411688	3,135076377	2,035012554	3,014452022
144,847865	3,134933886	2,035067538	3,014556332
144,8551044	3,134775085	2,035119808	3,014652737
144,8620157	3,134618563	2,0351754	3,014755147

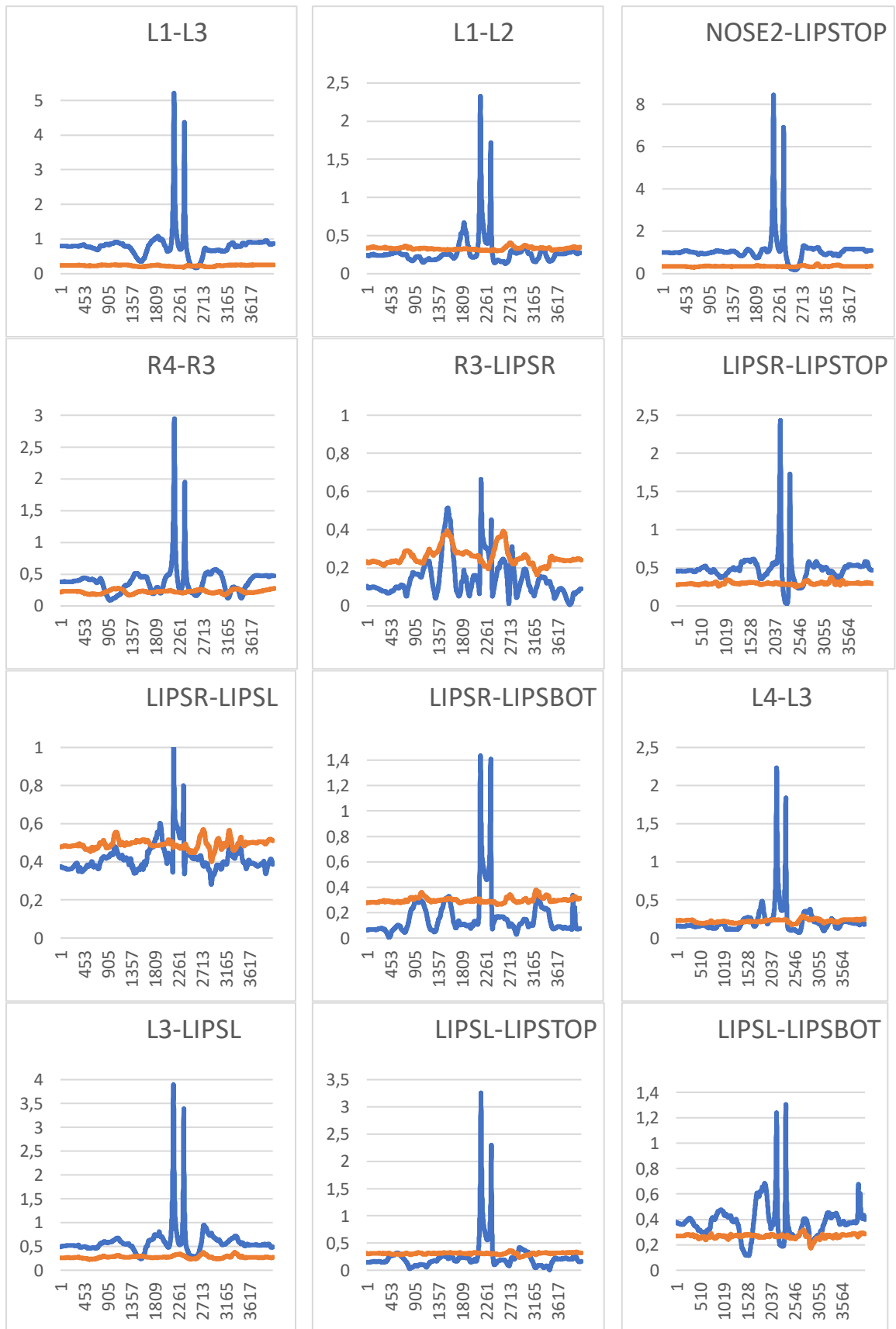
7.5 Zestawienie znormalizowanych odległości 3D i 2D

Poniżej, na Rysunku 30, przedstawiono są wykresy znormalizowanych odległości 3D i 2D w funkcji czasu dla 43 wymiarów uzyskanych z 21 punktów antropometrycznych. Wykresy w kolorze niebieskim są dla odległości antropometrycznych uzyskanych dla obrazu 2D, w kolorze pomarańczowym – dla obrazu 3D. Oś pozioma (x) przedstawia chwile czasu (od 0 do 4065), oś pionowa (y) – wartości unormowanych odległości antropometrycznych.









Rysunek 30 Wykresy znormalizowanych odległości 3D i 2D w funkcji czasu

Z analizy powyższych wykresów wynika, że stabilność znormalizowanych odległości uzyskanych z obrazu 3D jest dużo większa niż stabilność znormalizowanych odległości uzyskanych z obrazu 2D.

7.6 Wyznaczenie powierzchni umożliwiających przeliczenie odległości antropometrycznych z obrazu 2D na 3D i z 3D na 2 D

Wyznaczenie kątów Θ (kąt od osi x) i Γ (kąt od osi y) umożliwi wyznaczenie powierzchni 3D, która umożliwi przeliczenie odległości antropometrycznych z obrazu 2D na 3D i z 3D na 2 D. Dla każdego z wyznaczonych znormalizowanych wymiarów antropometrycznych obliczamy różnicę pomiędzy wymiarami w 2D i 3D. Daje to wartość z, czyli trzeci wymiar szukanej powierzchni. Oś x reprezentowana w mierze kątowej (radiany) obrazuje ruch głową w kierunku *yaw*, natomiast oś y reprezentowana w mierze kątowej (radiany) obrazuje ruch głową w kierunku *pitch*.

W celu wyznaczenia powierzchni zastosowano Metodę Najmniejszych Kwadratów (ang. *Least Squares*, LS) dla równania piątego rzędu. Wykorzystano w tym celu bibliotekę Apache Commons Math zrealizowaną w języku JAVA [Apache2021]. Jest to pakiet bibliotek, który wykorzystuje LS w celu dopasowania modelu parametrycznego do zbioru obserwowanych wartości, minimalizując funkcję kosztu o określonej postaci. W metodzie tej dostępne są dwa algorytmy optymalizujące. Pierwszy oparty jest na metodzie Gaussa-Newtona. Drugi realizuje metodę Levenberga-Marquardta [Levenberg1944,Marquardt1963]. Uzyskane wyniki zweryfikowano, korzystając z funkcji `fit()` pakietu Matlab. `Fit()` jest to funkcja umożliwiająca dopasowanie krzywej lub powierzchni do danych. Przyjęto postać równania powierzchni piątego rzędu, jako:

$$z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 + Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5. \quad (23)$$

Otrzymane wyniki:

Dla proporcji antropometrycznej RH-MH (RH to Euryon Prawy – punkt najbardziej do prawego boku na poprzecznej przekątnej czaszki, MH to Vertex – najwyżej położony punkt na głowie, Rysunek 7) wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio $x=-0.9075696208485221$, $y=0.6947570237757907$, $z=0.18378196834686888$.

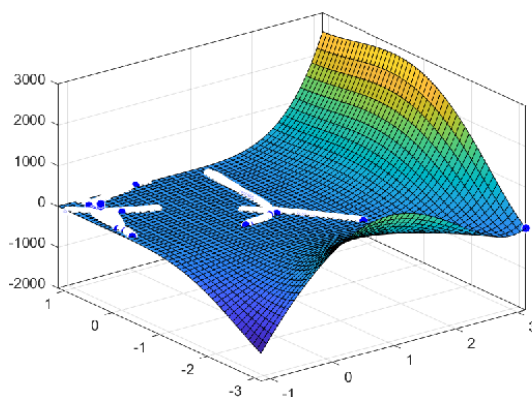
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=4,716	B=6,966	C=8,84	D=-10,77	E=1,518
F=3,01	G=-15,81	H=-12,29	I=9,373	J=4,751
K=6,211	L=-1,079	M=-4,426	N=-12,87	O=-10,08
P=8,895	R=-0,3155	S=-5,677	T=17,7	U=6,67
W=-5,889.				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 4,716 + 6,966x + 8,84y - 10,77x^2 + 1,518xy + 3,01y^2 - 15,81x^3 - 12,29x^2y + 9,373xy^2 + 4,751y^3 + 6,211x^4 - 1,079x^3y - 4,426x^2y^2 - 12,87xy^3 - 10,08y^4 + 8,895x^5 - 0,3155x^4y - 5,677x^3y^2 + 17,7x^2y^3 + 6,67xy^4 - 5,889y^5.$$

Na poniższym Rysunek 31 przedstawiono graficzną interpretację powierzchni wyznaczonej powyższym równaniem. Zauważono, że powierzchnia wyznaczona dla tej proporcji jest symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ . Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -1800 a 2800 jednostek bezwzględnych.



Rysunek 31 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej RH-MH

Dla proporcji antropometrycznej RH-NOSE1 (RH to Euryon Prawy – punkt najbardziej do prawego boku na poprzecznej przekątnej czaszki, NOSE1 to Nasion – punkt w najgłębszym zagłębieniu nosowo-czołowym, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio $x=-0.9075696208485221$, $y=0.6947570237757907$, $z=17.887712538199338$.

Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

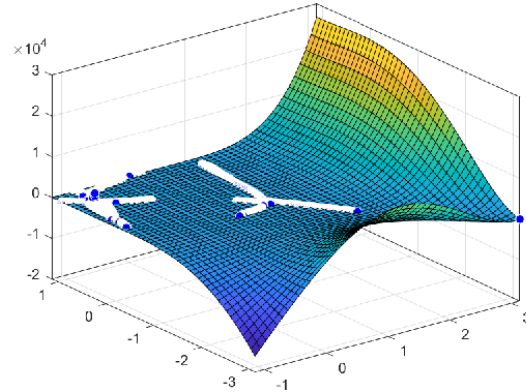
A=22,99	B=78,98	C=132,1	D=-26,27	E=-46,85
F=24,83	G=-177,8	H=-165,1	I=46,02	J=-6,707
K=6,019	L=28,24	M=6,483	N=-74,09	O=-90,15
P=104,7	R=10,11	S=-89,83	T=133,3	U=103,8
W=-36,26				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 22,99 + 78,98x + 132,1y - 26,27x^2 - 46,85xy + 24,83y^2 - 177,8x^3 - 165,1x^2y + 46,02xy^2 - 6,707y^3 + 6,019x^4 + 28,24x^3y + 6,483x^2y^2 - 74,09xy^3 - 90,15y^4 + 104,7x^5 + 10,11x^4y - 89,83x^3y^2 + 133,3x^2y^3 + 103,8xy^4 - 36,26y^5.$$

Na poniższym Rysunek 32 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji RH-MH można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym

jak poprzednia zakresie kątów Θ jak i Γ . Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ , jak i Γ jak RH-MH. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -1.8×10^4 a 2.8×10^4 jednostek bezwzględnych.



Rysunek 32 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej RH-NOSE1

Dla proporcji antropometrycznej RH-REYE2 (RH to Euryon Prawy – punkt najbardziej do prawego boku na poprzecznej przekątnej czaszki, REYE2 to Exocanthion – zewnętrzny kąt oka prawego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio $x=-0.9075696208485221$, $y=0.6947570237757907$, $z=17.887712538199338$.

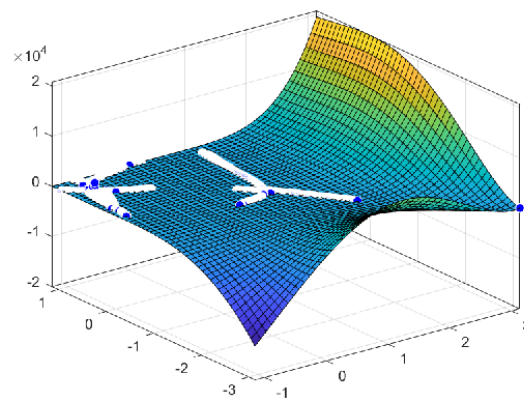
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=24,8	B=57,69	C=98,27	D=-36,21	E=-47,43
F=7,565	G=-130,7	H=-113,4	I=50,51	J=1,299
K=13,32	L=46,96	M=12,44	N=-59,62	O=-70,58
P=77,16	R=-1,636	S=-79,44	T=98,59	U=80,02
W=-25,98				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 24,8 + 57,69x + 98,27y - 36,21x^2 - 47,43xy + 7,565y^2 - 130,7x^3 - 113,4x^2y + 50,51xy^2 + 1,299y^3 + 13,32x^4 + 46,96x^3y + 12,44x^2y^2 - 59,62xy^3 - 70,58y^4 + 77,16x^5 - 1,636x^4y - 79,44x^3y^2 + 98,59x^2y^3 + 80,02xy^4 - 25,98y^5.$$

Na poniższym Rysunek 33 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji RH-NOSE1 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak RH-NOSE1. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -1.8×10^4 a 2.0×10^4 jednostek bezwzględnych.



Rysunek 33 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej RH-REYE2

Dla proporcji antropometrycznej MH-NOSE1 (MH to Vertex – najwyżej położony punkt na głowie, NOSE1 to Nasion – punkt w najgłębszym zagłębieniu nosowoczółowym, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 + Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio

$$x = -0.9075696208485221, y = 0.6947570237757907, z = 16.81726227027788.$$

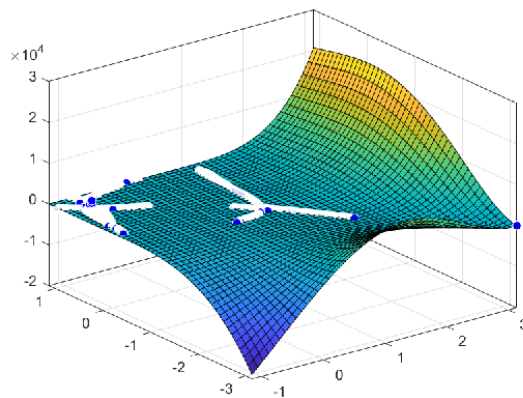
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=32,08	B=56,98	C=106,7	D=-49,39	E=-64,99
F=5,234	G=-136,1	H=-116,6	I=67,67	J=8,092
K=19,46	L=64,51	M=20,13	N=-73,83	O=-88,68
P=83,73	R=-9,616	S=-105,8	T=107,2	U=103,6
W=-24,46				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 32,08 + 56,98x + 106,7y - 49,39x^2 - 64,99xy + 5,234y^2 - 136,1x^3 - 116,6x^2y + 67,67xy^2 + 8,092y^3 + 19,46x^4 + 64,51x^3y + 20,13x^2y^2 - 73,83xy^3 - 88,68y^4 + 83,73x^5 - 9,616x^4y - 105,8x^3y^2 + 107,2x^2y^3 + 103,6xy^4 - 24,46y^5.$$

Na poniższym Rysunek 34 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji RH-REYE2 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak RH-REYE2. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -2.0×10^4 a 2.0×10^4 jednostek bezwzględnych.



Rysunek 34 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej MH-NOSE1

Dla proporcji antropometrycznej MH-LH (MH to Vertex – najwyżej położony punkt na głowie, LH to Euryon Lewy – najbardziej do boku na poprzecznej przekątnej czaszki, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 + Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą

odpowiednio

$x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = -0.2727906495005967$.

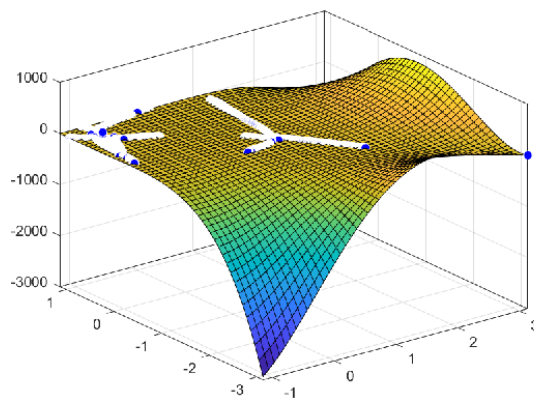
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości :

A=2,276	B=-6,246	C=-1,634	D=-10,13	E=-11,89
F=-1,801	G=7,397	H=12,86	I=20,75	J=10,27
K=7,657	L=12,19	M=-2,097	N=-12,32	O=-8,344
P=-1,234	R=-13,3	S=-17,56	T=5,079	U=10,79
W=-0,1566				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$\begin{aligned} z = & 2,276 - 6,246x - 1,634y - 10,13x^2 - 11,89xy - 1,801y^2 \\ & + 7,397x^3 + 12,86x^2y + 20,75xy^2 + 10,27y^3 + 7,657x^4 + 12,19x^3y \\ & - 2,097x^2y^2 - 12,32xy^3 - 8,344y^4 - 1,234x^5 - 13,3x^4y \\ & - 17,56x^3y^2 + 5,079x^2y^3 + 10,19xy^4 - 0,1566y^5. \end{aligned}$$

Na poniższym Rysunek 35 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji MH-NOSE1 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak MH-NOSE1. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -3000 a 1000 jednostek bezwzględnych



Rysunek 35 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej MH-LH

Dla proporcji antropometrycznej LH-NOSE1 (LH to Euryon Lewy – najbardziej do boku na poprzecznej przekątnej czaszki, NOSE1 to Nasion – punkt w najgłębszym zagłębieniu nosowo - czołowym, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio $x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 16.26589173971945$.

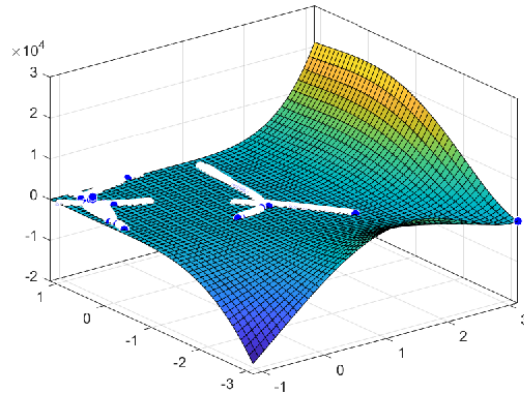
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=29,34	B=59,04	C=102,7	D=-42,55	E=-53,68
F=9,066	G=-137,3	H=-121,6	I=49,57	J=-1,03
K=15,3	L=52,96	M=21,26	N=-63,25	O=-82,4
P=81,73	R=1,553	S=-89,08	T=98,69	U=94,44
W=-20,67				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 29,34 + 59,046x + 102,7y - 42,55x^2 - 53,68xy + 9,066y^2 - 137,3x^3 - 121,6x^2y + 49,57xy^2 - 1,03y^3 + 15,3x^4 + 52,96x^3y + 21,26x^2y^2 - 63,25xy^3 - 82,4y^4 + 81,73x^5 + 1,553x^4y - 89,08x^3y^2 + 98,69x^2y^3 + 64,44xy^4 - 20,67y^5.$$

Na poniższym Rysunek 36 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji MH-LH można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak MH-LH. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -2.0×10^4 a 2.0×10^4 jednostek bezwzględnych.



Rysunek 36 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LH-NOSE1

Dla proporcji antropometrycznej LH-LEYE2 (LH to Euryon Lewy – najbardziej do boku na poprzecznej przekątnej czaszki, LEYE2 to Exocanthion – zewnętrzny kąt oka lewego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie

$$z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 + \\ + Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + \\ Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5. \quad (23). \text{ Przykładowo, dla } t=0, \text{ wartości } x, y \text{ i } z \text{ wynoszą}$$

odpowiednio

$$x = -0.9075696208485221, y = 0.6947570237757907, z = 12.739844548397352.$$

Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości :

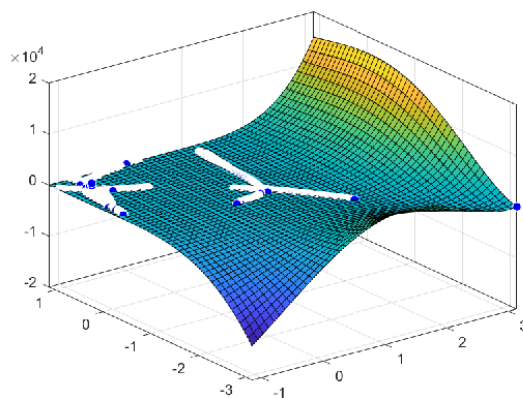
A=29,29	B=44,97	C=77,39	D=-48,87	E=-50,81
F=-4,925	G=-101,2	H=-81,21	I=51,26	J=4,705
K=21,01	L=48,9	M=22,29	N=-50,62	O=-62,22
P=59,14	R=-8,609	S=-75,84	T=74,76	U=70,14
W=-15,87				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 29,29 + 44,97x + 77,39y - 48,87x^2 - 50,81xy - 4,925y^2 \\ - 101,2x^3 - 81,21x^2y + 51,26xy^2 + 4,705y^3 + 21,01x^4 + 48,9x^3y \\ + 22,29x^2y^2 - 50,62xy^3 - 62,22y^4 + 59,14x^5 - 8,609x^4y \\ - 75,84x^3y^2 + 74,76x^2y^3 + 70,14xy^4 - 15,87y^5.$$

Na poniższym Rysunek 37 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji LH-NOSE1 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna

względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak LH-NOSE1. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -1.8×10^4 a 1.8×10^4 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 37 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LH-LEYE2

Dla proporcji antropometrycznej REYE2-NOSE1 (REYE2 to Exocanthion – zewnętrzny kąt oka prawego, NOSE1 to Nasion – punkt w najgłębszym zagłębieniu nosowo - czołowym, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 + Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio

$x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 4.205737460076383$.

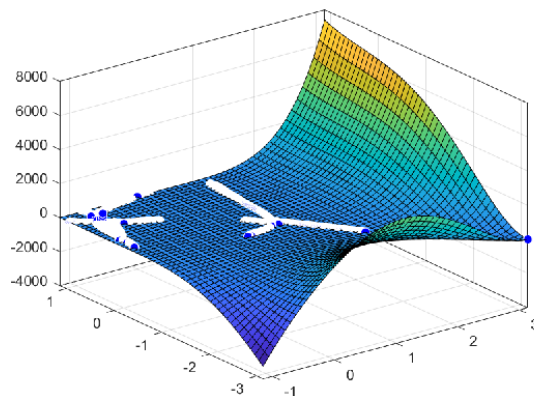
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości :

A=-2,013	B=21,17	C=33,62	D=10,49	E=2,923
F=18,92	G=-47,6	H=-52,71	I=-5,24	J=-8,177
K=-7,786	L=-0,5201	M=-8,209	N=-16,62	O=-20,65
P=28,03	R=12,52	S=-9,196	T=36,89	U=24,94
W=-10,32				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = -2,013 + 21,17x + 33,62y + 10,49x^2 + 2,923xy + 18,92y^2 - 47,6x^3 - 52,71x^2y - 5,24xy^2 - 8,177y^3 - 7,786x^4 - 0,5201x^3y - 8,209x^2y^2 - 16,62xy^3 - 20,65y^4 + 28,03x^5 + 12,52x^4y - 9,196x^3y^2 + 36,89x^2y^3 + 24,94xy^4 - 10,32y^5.$$

Na poniższym Rysunek 38 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji LH-LEYE2 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak LH-LEYE2. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -4000 a 8000 jednostek bezwzględnych.



Rysunek 38 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej REYE2-NOSE1

Dla proporcji antropometrycznej REYE2-REYE1 (REYE2 to Exocanthion – zewnętrzny kąt oka prawego, REYE1 to Endocanthion – wewnętrzny kąt oka prawego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie

$$z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 + Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5. \quad (23).$$

Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio

$$x = -0.9075696208485221, y = 0.6947570237757907, z = 0.12197100774888192.$$

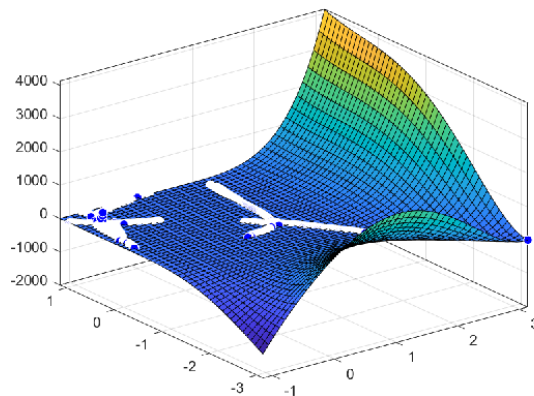
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości :

A=-0,8976	B=12,27	C=19,78	D=5,685	E=-0,5652
F=8,607	G=-27,28	H=-29,3	I=-2,034	J=-5,304
K=-4,446	L=1,494	M=-2,648	N=-7,042	O=-9,967
P=15,95	R=6,172	S=-6,164	T=19,42	U=12,55
W=-5,992				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = -0,8976 + 12,27x + 19,78y + 5,685x^2 - 0,5652xy + 8,607y^2 - 27,28x^3 - 29,3x^2y - 2,034xy^2 - 5,304y^3 - 4,446x^4 + 1,494x^3y - 2,648x^2y^2 - 7,042xy^3 - 9,967y^4 + 15,95x^5 + 6,172x^4y - 6,164x^3y^2 + 19,42x^2y^3 + 12,55xy^4 - 5,992y^5.$$

Na poniższym Rysunek 39 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji REYE2-NOSE1 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak REYE2-NOSE1. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -1800 a 4000 jednostek bezwzględnych



Rysunek 39 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej REYE2-REYE1

Dla proporcji antropometrycznej REYE2-R1 (REYE2 to Exocanthion – zewnętrzny kąt oka prawego, R1 to Punkt charakterystyczny policzka prawego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5.$ (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio $x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 0.3169026966248023$.

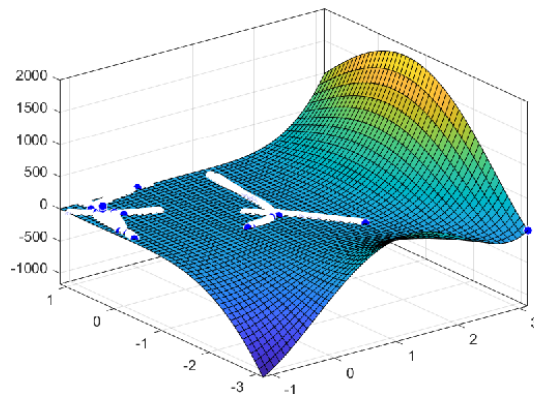
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=6,149	B=3,67	C=7,488	D=-13,14	E=-10,3
F=-6,365	G=-7,923	H=-2,065	I=12,84	J=2,846
K=6,868	L=9,797	M=5,39	N=-5,802	O=-5,54
P=4,617	R=-6,68	S=-12,48	T=7,245	U=5,72
W=-1,738				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$\begin{aligned}
 z = & 6,149 + 3,67x + 7,488y - 13,14x^2 - 10,3xy - 6,365y^2 - 7,923x^3 \\
 & - 2,065x^2y + 12,84xy^2 + 2,846y^3 + 6,868x^4 + 9,797x^3y \\
 & + 5,39x^2y^2 - 5,802xy^3 - 5,54y^4 + 4,617x^5 - 6,68x^4y - 12,48x^3y^2 \\
 & + 7,245x^2y^3 + 5,72xy^4 - 1,738y^5.
 \end{aligned}$$

Na poniższym Rysunek 40 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji REYE2-REYE1 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak REYE2-REYE1. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -1000 a 1800 jednostek bezwzględnych.



Rysunek 40 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej REYE2-R1

Dla proporcji antropometrycznej REYE2-R2 (REYE2 to Exocanthion – zewnętrzny kąt oka prawego, R2 to punkt charakterystyczny policzka prawego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio $x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 2.0489955752720515$.

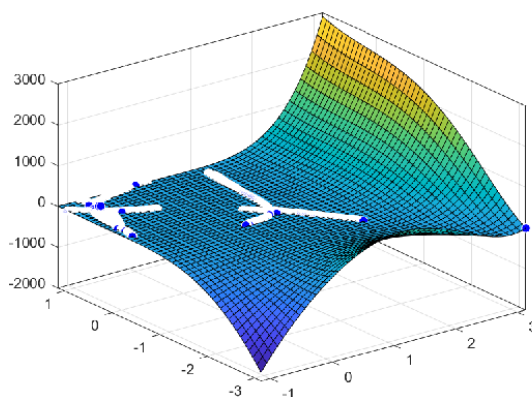
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości :

A=3,205	B=10,42	C=12,1	D=-6,117	E=1,46
F=4,399	G=-19,73	H=-18,41	I=1,268	J=-0,5442
K=2,781	L=-1,4	M=-1,312	N=-9,827	O=-10,6
P=9,654	R=4,202	S=-2,465	T=15,29	U=8,137
W=-3,56				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$\begin{aligned} z = & 3,205 + 10,42x + 12,1y - 6,117x^2 + 1,46xy + 4,399y^2 - 19,73x^3 \\ & - 18,41x^2y + 1,268xy^2 + 0,5442y^3 + 2,781x^4 - 1,4x^3y \\ & - 1,312x^2y^2 - 9,827xy^3 - 10,6y^4 + 9,654x^5 + 4,202x^4y \\ & - 2,465x^3y^2 + 15,29x^2y^3 + 8,137xy^4 - 3,56y^5. \end{aligned}$$

Na poniższym Rysunek 41 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji REYE2-R1 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak REYE2-R1. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -1800 a 3000 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 41 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej REYE2-R2

Dla proporcji antropometrycznej LEYE2-NOSE1 (LEYE2 to Exocanthion – zewnętrzny kąt oka lewego, NOSE1 to Nasion – punkt w najgłębszym zagłębieniu nosowo - czołowym, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 + Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio

$x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 3.2261968244068804$.

Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości :

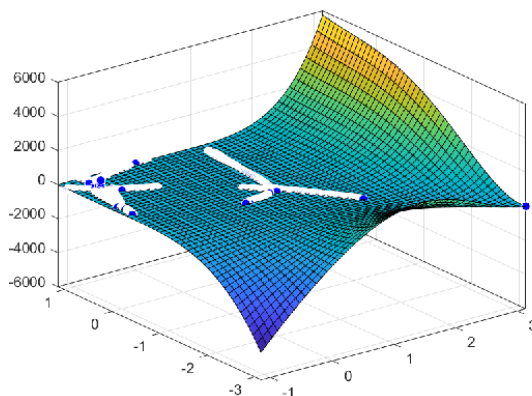
A=-0,2834	B=13,31	C=24,7	D=6,087	E=-3,444
F=13,84	G=-34,23	H=-38,97	I=-1,261	J=-5,112
K=-5,446	L=4,461	M=-1,321	N=-13,19	O=-20,51
P=21,61	R=9,679	S=-13,47	T=23,39	U=24,87
W=-4,469				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = -0,2834 + 13,31x + 24,7y + 6,087x^2 - 3,444xy + 13,84y^2 - 34,23x^3 - 38,97x^2y - 1,261xy^2 - 5,112y^3 - 5,446x^4 + 4,461x^3y - 1,321x^2y^2 - 13,19xy^3 - 20,51y^4 + 21,61x^5 + 9,679x^4y - 13,47x^3y^2 + 23,39x^2y^3 + 24,87xy^4 - 4,469y^5.$$

Na poniższym Rysunek 42 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji REYE2-R2 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod

kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak REYE2-R2. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -5000 a 6000 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 42 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LEYE2-NOSE1

Dla proporcji antropometrycznej LEYE2-LEYE1 (LEYE2 to Exocanthion – zewnętrzny kąt oka lewego, LEYE1 to Endocanthion – wewnętrzny kąt oka lewego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 + Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio

$x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 1.4964854438337447$.

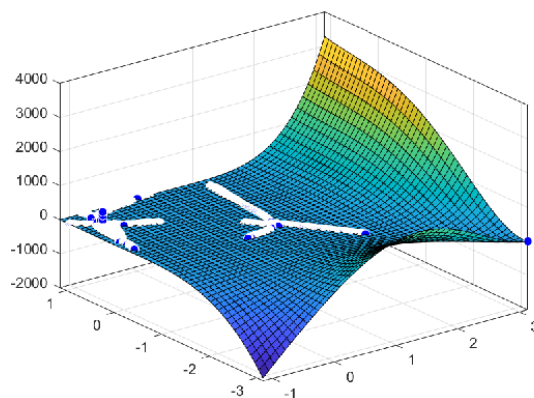
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości :

A=-0,8282	B=8,072	C=15,5	D=4,953	E=-4,179
F=6,832	G=-20,29	H=-22,67	I=-1,011	J=-4,659
K=-3,979	L=4,497	M=0,5794	N=-4,724	O=-9,737
P=12,67	R=4,992	S=-8,302	T=12,12	U=13,12
W=-2,687				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = -0,8282 + 8,072x + 15,5y + 4,953x^2 - 4,179xy + 6,832y^2 - 20,29x^3 - 22,67x^2y - 1,011xy^2 - 4,659y^3 - 3,979x^4 + 4,497x^3y + 0,5794x^2y^2 - 4,724xy^3 - 9,737y^4 + 12,67x^5 + 4,992x^4y - 8,302x^3y^2 + 12,12x^2y^3 + 13,12xy^4 - 2,687y^5.$$

Na poniższym Rysunek 43 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji LEYE2-NOSE1 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak LEYE2-NOSE1. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -2000 a 3500 jednostek bezwzględnych



Rysunek 43 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LEYE2-LEYE1

Dla proporcji antropometrycznej LEYE2-L1 (LEYE2 to Exocanthion – zewnętrzny kąt oka lewego, L1 to Punkty charakterystyczne policzka lewego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio $x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 0.1836044676935869$.

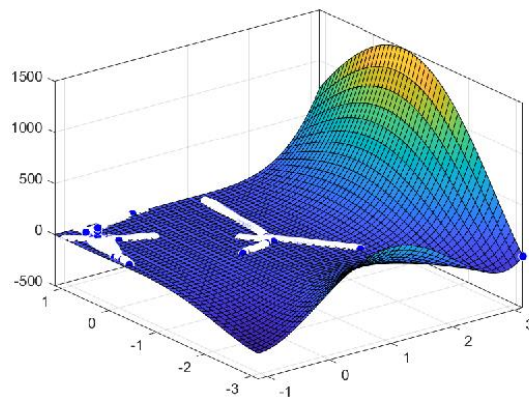
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości :

A=5,592	B=3,021	C=5,17	D=-11,76	E=-9,337
F=-7,323	G=-6,393	H=-0,2599	I=12,54	J=3,82
K=6,003	L=8,483	M=5,885	N=-3,41	O=-3,028
P=3,575	R=-5,963	S=-10,68	T=4,307	U=2,145
W=-2,155				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 5,592 + 3,021x + 5,17y - 11,76x^2 - 9,337xy - 7,323y^2 - 6,393x^3 - 0,2599x^2y + 12,54xy^2 + 3,82y^3 + 6,003x^4 + 8,483x^3y + 5,885x^2y^2 - 3,41xy^3 - 3,028y^4 + 3,575x^5 - 5,963x^4y - 10,68x^3y^2 + 4,307x^2y^3 + 2,145xy^4 - 2,155y^5.$$

Na poniższym Rysunek 44 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji LEYE2-LEYE1 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak LEYE2-LEYE1. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -300 a 300 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 44 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LEYE2-L1

Dla proporcji antropometrycznej LEYE2-L2 (LEYE2 to Exocanthion – zewnętrzny kąt oka lewego, L2 to Punkty charakterystyczne policzka lewego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio $x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 5.151178436504677$.

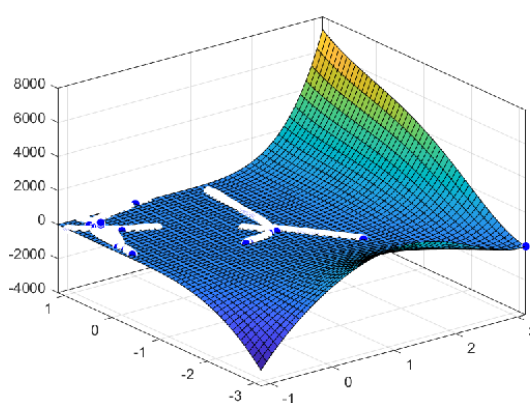
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=-3,877	B=23,91	C=33,06	D=14,29	E=5,973
F=18,47	G=-48,24	H=-53,89	I=-18,35	J=-18,06
K=-9,842	L=-4,143	M=-6,731	N=-9,948	O=-15,42
P=25,35	R=18,35	S=1,969	T=30,43	U=20,71
W=-5,161				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = -3,877 + 23,91x + 33,06y + 14,29x^2 + 5,973xy + 18,47y^2 - 48,24x^3 - 53,89x^2y - 18,35xy^2 - 18,06y^3 - 9,842x^4 - 4,143x^3y - 6,731x^2y^2 - 9,948xy^3 - 15,42y^4 + 25,35x^5 + 18,35x^4y + 1,969x^3y^2 + 30,43x^2y^3 + 20,71xy^4 - 5,161y^5.$$

Na poniższym Rysunek 45 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji LEYE2-L1 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak LEYE2-L1. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -3800 a 7000 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 45 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LEYE2-L2

Dla proporcji antropometrycznej NOSE1-REYE1 (NOSE1 to Nasion – punkt w najgłębszym zagłębieniu nosowo - czołowym, REYE1 to Endocanthion –

wewnętrzny kąt oka prawego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio

$x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 3.9352677050329756$.

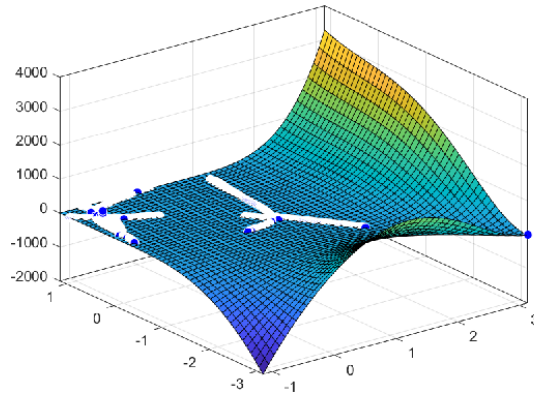
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości :

A=-1,14	B=9,058	C=14,01	D=4,72	E=3,406
F=10,28	G=-20,58	H=-23,49	I=-2,937	J=-2,816
K=-3,272	L=-1,994	M=-5,768	N=-9,843	O=-10,79
P=12,16	R=6,311	S=-3,012	T=17,74	U=12,44
W=-4,41				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = -1,14 + 9,058x + 14,01y + 4,72x^2 + 3,406xy + 10,28y^2 - 20,58x^3 - 23,49x^2y - 2,937xy^2 - 2,816y^3 - 3,272x^4 - 1,994x^3y - 5,768x^2y^2 - 9,843xy^3 - 10,79y^4 + 12,16x^5 + 6,311x^4y - 3,012x^3y^2 + 17,74x^2y^3 + 12,44xy^4 - 4,41y^5.$$

Na poniższym Rysunek 46 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji LEYE2-L2 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak LEYE2-L2. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -2000 a 3000 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 46 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej NOSE1-REYE1

Dla proporcji antropometrycznej NOSE1-LEYE1 (NOSE1 to Nasion – punkt w najgłębszym zagłębieniu nosowo - czołowym, LEYE1 to Endocanthion – wewnętrzny kąt oka lewego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio

$x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 1.7094185015001764$.

Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

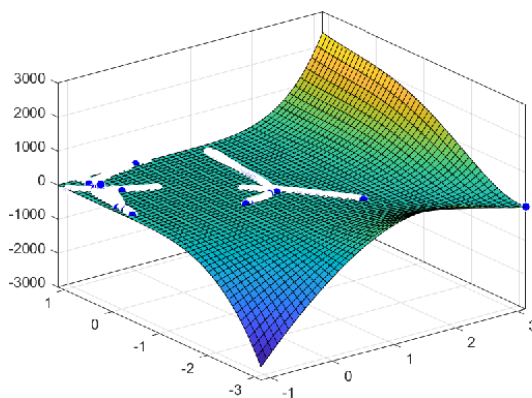
A=0,4782	B=5,115	C=9,146	D=1,223	E=0,956
F=7,264	G=-13,46	H=-16,06	I=-0,6576	J=-0,7026
K=-1,51	L=-0,1808	M=-2,198	N=-8,765	O=-10,99
P=8,596	R=4,604	S=-4,822	T=11,4	U=12,07
W=-1,526				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 0,4782 + 5,115x + 9,146y + 1,223x^2 + 0,956xy + 7,264y^2 - 13,46x^3 - 16,06x^2y - 0,6576xy^2 - 0,7026y^3 - 1,51x^4 - 0,1808x^3y - 2,198x^2y^2 - 8,765xy^3 - 10,99y^4 + 8,596x^5 + 4,604x^4y - 4,822x^3y^2 + 11,4x^2y^3 + 12,074xy^4 - 1,526y^5.$$

Na poniższym Rysunek 47 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji NOSE1-REYE1 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska

w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak NOSE1-REYE1. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -3000 a 2800 jednostek bezwzględnych



Rysunek 47 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej NOSE1-LEYE1

Dla proporcji antropometrycznej REYE1-LEYE1 (REYE1 to Endocanthion – wewnętrzny kąt oka prawego, LEYE1 to Endocanthion – wewnętrzny kąt oka lewego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio

$$x = -0.9075696208485221, y = 0.6947570237757907, z = 2.1079841263478896.$$

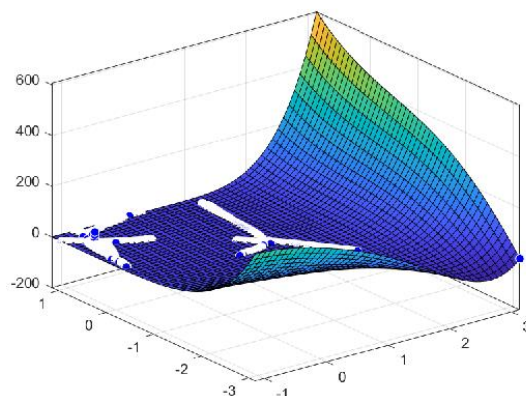
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=0,5146	B=3,137	C=3,64	D=0,1067	E=-0,6198
F=-0,5231	G=-5,014	H=-4,627	I=-2,004	J=-2,804
K=-0,4115	L=0,4168	M=1,416	N=1,387	O=0,4493
P=2,067	R=1,229	S=0,5864	T=1,586	U=-0,2058
W=-0,437				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 0,5146 + 3,137x + 3,64y + 0,1067x^2 - 0,6198xy - 0,5231y^2 - 5,014x^3 - 4,627x^2y - 2,004xy^2 - 2,804y^3 - 0,4115x^4 + 0,4168x^3y + 1,416x^2y^2 + 1,387xy^3 + 0,4493y^4 + 2,067x^5 + 1,229x^4y + 0,5864x^3y^2 + 1,586x^2y^3 - 0,2058xy^4 - 0,437y^5.$$

Na poniższym Rysunek 48 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji NOSE1-LEYE1 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak NOSE1-LEYE1. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -100 a 200 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 48 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej REYE1-LEYE1

Dla proporcji antropometrycznej REYE1-R1 (REYE1 to Endocanthion – wewnętrzny kąt oka prawego, R1 to Punkt charakterystyczny policzka prawego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio

$$x = -0.9075696208485221, y = 0.6947570237757907, z = -0.37147251259742.$$

Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

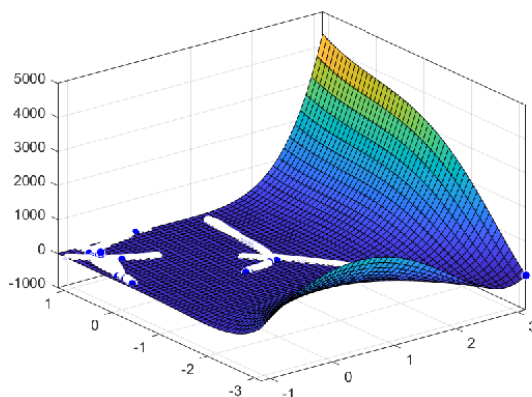
$$A=2,2 \quad B=16,92 \quad C=19,98 \quad D=-3,136 \quad E=-0,00532$$

F=2,65	G=-31,21	H=-28,04	I=-2,118	J=-7,083
K=0,9827	L=-0,5328	M=0,2232	N=-3,308	O=-5,016
P=14,98	R=6,357	S=-0,3455	T=18,08	U=3,166
W=-6,492				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$\begin{aligned}
z = & 2,2 + 16,92x + 19,98y - 3,136x^2 - 0,00532xy + 2,65y^2 \\
& - 31,21x^3 - 28,04x^2y - 2,118xy^2 - 7,083y^3 + 0,9827x^4 \\
& - 0,5328x^3y + 0,2232x^2y^2 - 3,308xy^3 - 5,016y^4 + 14,98x^5 \\
& + 6,357x^4y - 0,3455x^3y^2 + 18,08x^2y^3 + 3,166xy^4 - 6,492y^5.
\end{aligned}$$

Na poniższym Rysunek 49 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji REYE1-LEYE1 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak REYE1-LEYE1. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -100 a 100 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 49 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej REYE1-R1

Dla proporcji antropometrycznej REYE1-NOSE2 (REYE1 to Endocanthion – wewnętrzny kąt oka prawego, NOSE2 to Pronasale – najbardziej wysunięty do przodu punkt na czubku nosa, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 + Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą

odpowiednio

$x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 6.722752809540384$.

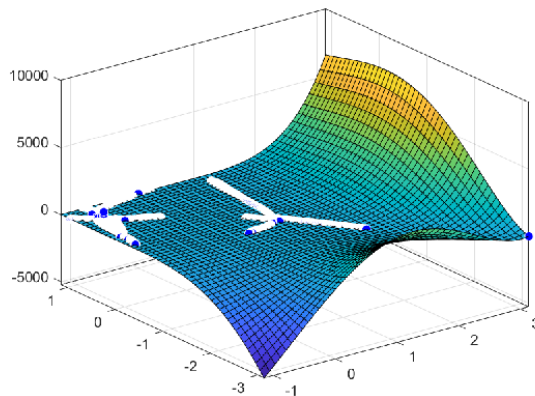
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=12,68	B=19,68	C=33,35	D=-22,88	E=-20,74
F=-1,814	G=-44,15	H=-34,57	I=25,59	J=5,061
K=10,78	L=20,27	M=6,506	N=-24,7	O=-26,9
P=25,95	R=-5,208	S=-33,01	T=35,76	U=29,07
W=-9,329				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$\begin{aligned} z = & 12,68 + 19,68x + 33,35y - 22,88x^2 - 20,74xy - 1,814y^2 \\ & - 44,15x^3 - 34,57x^2y + 25,59xy^2 + 5,061y^3 + 10,78x^4 + 20,27x^3y \\ & + 6,506x^2y^2 - 24,7xy^3 - 26,9y^4 + 25,95x^5 - 5,208x^4y \\ & - 33,01x^3y^2 + 35,76x^2y^3 + 29,07xy^4 - 9,329y^5. \end{aligned}$$

Na poniższym Rysunek 50 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji REYE1-R1 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak REYE1-R1. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -5000 a 7000 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 50 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej REYE1-NOSE2

Dla proporcji antropometrycznej LEYE1-L1 (LEYE1 to Endocanthion – wewnętrzny kąt oka lewego, L1 to Punkt charakterystyczny policzka lewego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy +$

$$Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5. \quad (23).$$

Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio

$x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 1.879679642531337$.

Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=0,3205	B=15,06	C=19,56	D=1,8	E=-0,4586
F=5,286	G=-28,91	H=-28,89	I=-7,023	J=-10,37
K=-2,046	L=0,3523	M=0,6195	N=-2,184	O=-6,3
P=14,3	R=8,641	S=0,04478	T=14,77	U=7,187
W=-3,222				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

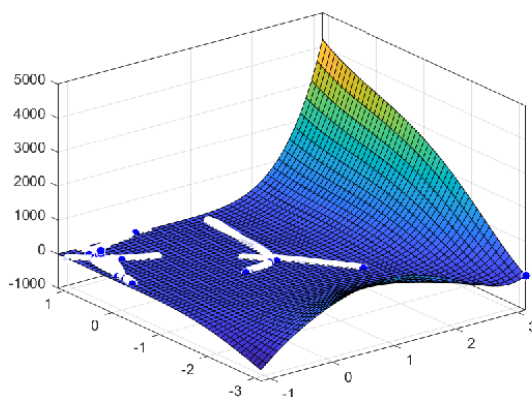
$$z = 0,3205 + 15,06x + 19,56y + 1,8x^2 - 0,4586xy + 5,286y^2$$

$$- 28,91x^3 - 28,89x^2y - 7,023xy^2 - 10,37y^3 - 2,04x^4 + 0,3523x^3y$$

$$+ 0,6195x^2y^2 - 2,184xy^3 - 6,3y^4 + 14,3x^5 + 8,641x^4y$$

$$+ 0,04478x^3y^2 + 14,77x^2y^3 + 7,187xy^4 - 3,222y^5.$$

Na poniższym Rysunek 51 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji REYE1-NOSE2 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak REYE1-NOSE2. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -1000 a 4000 jednostek bezwzględnych



Rysunek 51 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LEYE1-L1

Dla proporcji antropometrycznej LEYE1-NOSE2 (LEYE1 to Endocanthion – wewnętrzny kąt oka lewego, NOSE2 to Pronasale – najbardziej wysunięty do przodu punkt na czubku nosa, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio $x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 4.488637811034833$.

Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

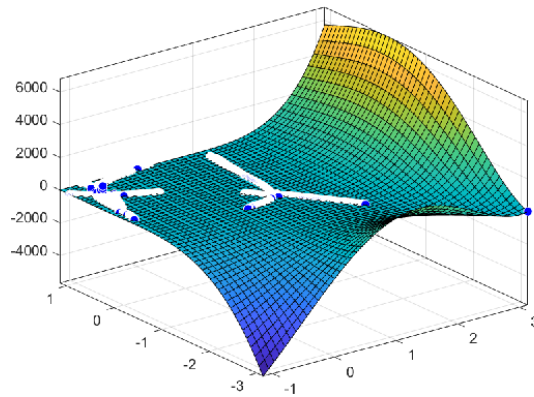
A=14,24	B=15,97	C=28,77	D=-25,99	E=-22,23
F=-4,188	G=-37,48	H=-28,08	I=26,54	J=6,293
K=12,22	L=21,43	M=10,05	N=-23,02	O=-26,85
P=22,62	R=-6,493	S=-34,22	T=29,77	U=28,49
W=-6,596				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 14,24 + 15,97x + 28,77y - 25,99x^2 - 22,23xy - 4,188y^2 - 37,48x^3 - 28,08x^2y + 26,54xy^2 + 6,293y^3 + 12,22x^4 + 21,43x^3y + 10,05x^2y^2 - 23,02xy^3 - 26,85y^4 + 22,62x^5 - 6,493x^4y - 34,22x^3y^2 + 29,77x^2y^3 + 28,49xy^4 - 6,596y^5.$$

Na poniższym Rysunek 52 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji LEYE1-L1 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska

w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak LEYE1-L1. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -6000 a 6000 jednostek bezwzględnych



Rysunek 52 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LEYE1-NOSE2

Dla proporcji antropometrycznej R2-R1 (R2 to Punkt charakterystyczny policzka prawego, R1 to Punkt charakterystyczny policzka prawego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio $x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 2.8445584604407603$.

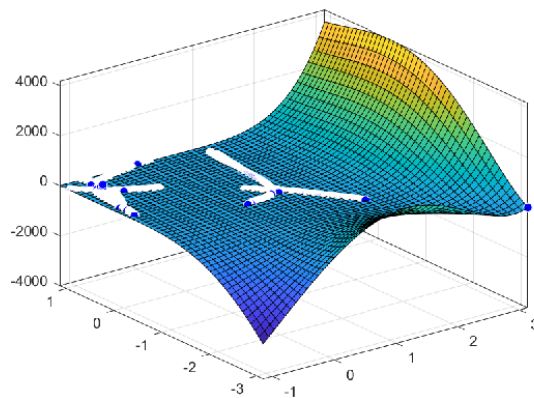
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=9,648	B=13,97	C=19,02	D=-19,64	E=-10,39
F=-2,625	G=-26,62	H=-19,1	I=14,95	J=3,579
K=10,22	L=9,38	M=4,447	N=-14,58	O=-15,52
P=13,47	R=-3,031	S=-15,63	T=21,27	U=13,17
W=-5,858				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 9,648 + 13,97x + 19,02y - 19,64x^2 - 10,39xy - 2,625y^2 - 26,62x^3 - 19,1x^2y + 14,95xy^2 + 3,579y^3 + 10,22x^4 + 9,38x^3y + 4,447x^2y^2 - 14,58xy^3 - 15,52y^4 + 13,47x^5 - 3,031x^4y - 15,63x^3y^2 + 21,27x^2y^3 + 13,17xy^4 - 5,858y^5.$$

Na poniższym Rysunek 53 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej R2-R1 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji LEYE1-NOSE2 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak LEYE1-NOSE2. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -3000 a 4000 jednostek bezwzględnych



Rysunek 53 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej R2-R1

Dla proporcji antropometrycznej R2-R3 (R2 to Punkt charakterystyczny policzka prawego, R3 to Punkt charakterystyczny policzka prawego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio $x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 2.2022806417132617$.

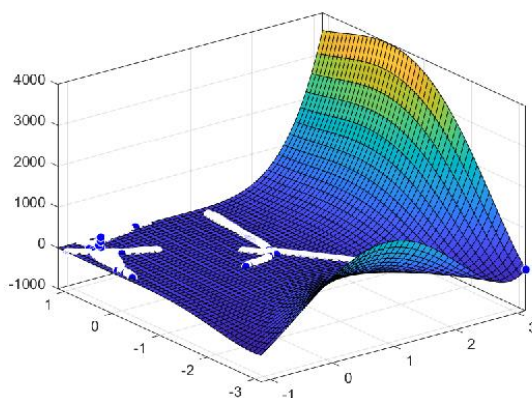
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=7,73	B=16,98	C=23,9	D=-13,67	E=-16
F=-7,964	G=-30,17	H=-20,84	I=11,3	J=-4,507
K=6,182	L=14,64	M=9,387	N=-4,411	O=-6,596
P=14,28	R=-4,126	S=-14,73	T=17,13	U=7,779
W=-5,649				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 7,73 + 16,98x + 23,9y - 13,67x^2 - 16xy - 7,964y^2 - 30,17x^3 - 20,84x^2y + 11,3xy^2 - 4,507y^3 + 6,182x^4 + 14,64x^3y + 9,387x^2y^2 - 4,411xy^3 - 6,596y^4 + 14,28x^5 - 4,126x^4y - 14,73x^3y^2 + 17,19x^2y^3 + 7,779xy^4 - 5,649y^5.$$

Na poniższym Rysunek 54 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej R2-R3 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji R2-R1 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak R2-R1. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -800 a 4000 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 54 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej R2-R3

Dla proporcji antropometrycznej R2-R4 (R2 to Punkt charakterystyczny policzka prawego, R4 to Punkt charakterystyczny policzka prawego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy +$

$Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$
 $+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$
 $Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5.$ (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą
 odpowiednio $x= -0.9075696208485221$, $y= 0.6947570237757907$,
 $z= 0.09534111955175262$.

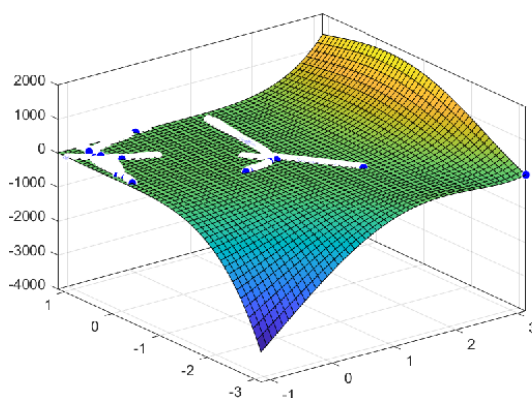
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=5,944	B=0,844	C=1,934	D=-13,97	E=-1,563
F=0,382	G=-4,996	H=-2,792	I=9,528	J=6,613
K=7,804	L=1,737	M=0,2801	N=-12,38	O=-11,72
P=4,077	R=-1,51	S=-8,616	T=8,416	U=9,352
W=-0,175				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$\begin{aligned}
 z = & 5,944 + 0,844x + 1,934y - 13,97x^2 - 1,563xy + 0,382y^2 \\
 & - 4,996x^3 - 2,792x^2y + 9,528xy^2 + 6,613y^3 + 7,804x^4 + 1,737x^3y \\
 & + 0,2801x^2y^2 - 12,38xy^3 - 11,72y^4 + 4,077x^5 - 1,51x^4y \\
 & - 8,616x^3y^2 + 8,416x^2y^3 + 9,3352xy^4 - 0,175y^5.
 \end{aligned}$$

Na poniższym Rysunek 55 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji R2-R3 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak R2-R3. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -3800 a 1800 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 55 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej R2-R4

Dla proporcji antropometrycznej R1-R3 (R1 to Punkt charakterystyczny policzka prawego, R3 to Punkt charakterystyczny policzka prawego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą

odpowiednio $x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$,

$z = 0.311793289132033$), wyznaczone wartości współczynników równania od A do W

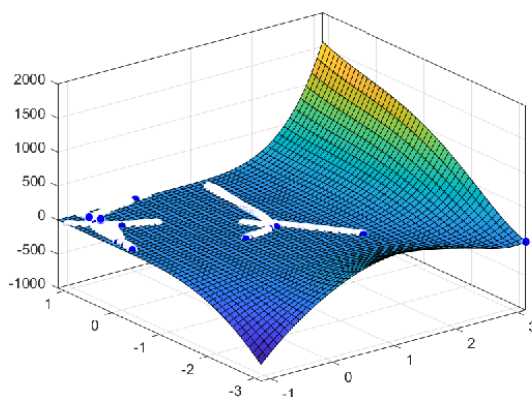
mają następujące wartości:

A=0,5777	B=3,766	C=4,461	D=-1,256	E=2,052
F=3,304	G=-8,652	H=-9,307	I=-0,7576	J=-0,06273
K=0,5165	L=-1,938	M=-1,252	N=-3,977	O=-4,686
P=4,962	R=3,54	S=-0,6326	T=6,197	U=3,675
W=-1,585				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$\begin{aligned} z = & 0,5777 + 3,766x + 4,461y - 1,256x^2 + 2,052xy + 3,304y^2 \\ & - 8,652x^3 - 9,307x^2y - 0,7576xy^2 - 0,06273y^3 + 0,5165x^4 \\ & - 1,938x^3y - 1,252x^2y^2 - 3,977xy^3 - 4,686y^4 + 4,962x^5 \\ & + 3,54x^4y - 0,6326x^3y^2 + 6,197x^2y^3 + 3,675xy^4 - 1,585y^5. \end{aligned}$$

Na poniższym Rysunek 56 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji R2-R4 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak R2-R4. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -800 a 1600 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 56 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej R1-R3

Dla proporcji antropometrycznej R1-LIPSR (R1 to Punkt charakterystyczny policzka prawego, LIPSR to Cheilon R – prawy kącik ust, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą

odpowiednio $x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 0.7626584609455216$), wyznaczone wartości współczynników równania od A do

W mają następujące wartości:

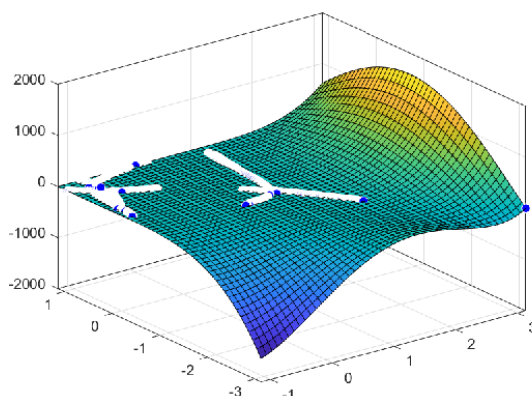
A=7,133	B=2,21	C=4,676	D=-16,42	E=-9,87
F=-7,214	G=-4,73	H=1,761	I=13,52	J=3,985
K=9,051	L=9,44	M=5,671	N=-6,576	O=-5,784
P=2,724	R=-7,47	S=-12,14	T=5,581	U=5,245
W=-0,4857				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 7,133 + 2,21x + 4,676y - 16,42x^2 - 9,87xy - 7,214y^2 - 4,73x^3 + 1,761x^2y + 13,52xy^2 + 3,985y^3 + 9,051x^4 + 9,44x^3y + 5,671x^2y^2 - 6,576xy^3 - 5,784y^4 + 2,724x^5 - 7,47x^4y - 12,14x^3y^2 + 5,581x^2y^3 + 5,245xy^4 - 0,4857y^5.$$

Na poniższym Rysunek 57 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji R1-R3 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak R1-R3. Wartość różnicy proporcji

wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -1600 a 1600 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 57 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej R1-LIPSR

Dla proporcji antropometrycznej R1-NOSE2 (R1 to Punkt charakterystyczny policzka prawego, NOSE2 to Pronasale – najbardziej wysunięty do przodu punkt na czubku nosa, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 + Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio

$x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 6.637296507567965$.

Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

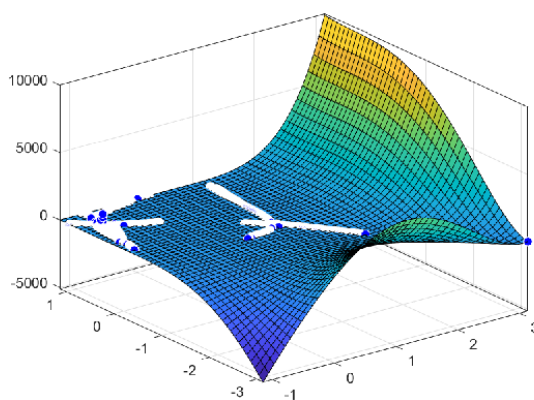
A=5,515	B=29,71	C=47,52	D=-3,76	E=-10,53
F=13,21	G=-65,49	H=-63,87	I=9,022	J=-5,428
K=-0,8263	L=11,52	M=-0,8551	N=-24,82	O=-30,71
P=97,96	R=8,201	S=-25,53	T=48,47	U=35,13
W=-13,43				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 5,515 + 29,71x + 47,526y - 3,76x^2 - 10,53xy + 13,21y^2 - 65,49x^3 - 63,87x^2y + 9,022xy^2 - 5,428y^3 - 0,8263x^4 + 11,52x^3y - 0,8551x^2y^2 - 24,82xy^3 - 30,71y^4 + 97,96x^5 + 8,201x^4y - 25,53x^3y^2 + 48,47x^2y^3 + 35,13xy^4 - 13,43y^5.$$

Na poniższym Rysunek 58 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla

proporcji R1-LIPSR można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak R1-LIPSR. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -5000 a 10000 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 58 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej R1-NOSE2

Dla proporcji antropometrycznej L1-NOSE2 (L1 to Punkt charakterystyczny policzka lewego, NOSE2 to Pronasale – najbardziej wysunięty do przodu punkt na czubku nosa, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 + Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio

$x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 6.71215771486668$.

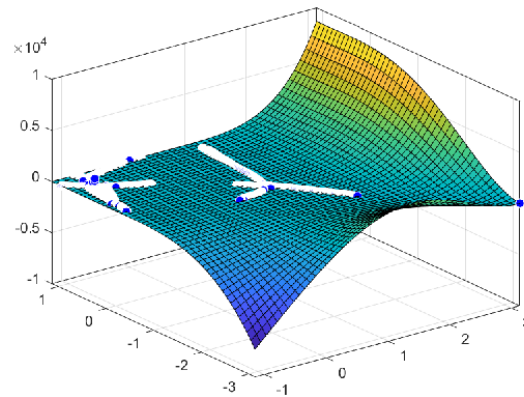
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=7,767	B=23,12	C=41,19	D=-8,4	E=-15,37
F=10,71	G=-55,02	H=-53,84	I=11,52	J=-3,922
K=1,409	L=15,96	M=4,305	N=-24,63	O=-33,68
P=33,2	R=5,668	S=-30,32	T=39,91	U=39,37
W=-7,636				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 7,767 + 23,12x + 41,19y - 8,4x^2 - 15,37xy + 10,71y^2 - 55,02x^3 - 53,84x^2y + 11,52xy^2 - 3,922y^3 + 1,409x^4 + 15,96x^3y + 4,3051x^2y^2 - 24,63xy^3 - 33,68y^4 + 33,2x^5 + 5,668x^4y - 30,32x^3y^2 + 39,91x^2y^3 + 39,37xy^4 - 7,636y^5.$$

Na poniższym Rysunek 59 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji R1-NOSE2 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak R1-NOSE2. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -0.8×10^4 a 0.8×10^4 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 59 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej L1-NOSE2

Dla proporcji antropometrycznej L1-LIPSL (L1 to Punkt charakterystyczny policzka lewego, LIPSL to Cheilon L – lewy kącik ust, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio $x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 0.35161021185934493$), wyznaczone wartości współczynników równania od A do

W mają następujące wartości:

A=8,259	B=-2,038	C=1,37	D=-19,11	E=-14,65
F=-10,12	G=2,49	H=9,262	I=17,41	J=6,061
K=10,42	L=13,86	M=8,893	N=-6,409	O=-6,654

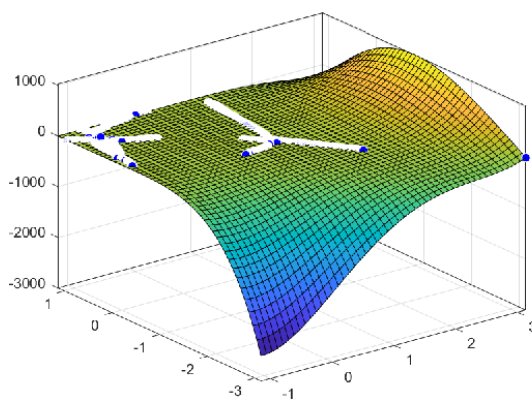
$$P=-0,3366 \quad R=-10,74 \quad S=-16,7 \quad T=0,3505 \quad U=7,294$$

$$W=2,283$$

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 8,259 - 2,038x + 1,37y - 19,11x^2 - 14,65xy - 10,12y^2 + 2,49x^3 + 9,262x^2y + 17,41xy^2 + 6,061y^3 + 10,42x^4 + 13,86x^3y + 8,893x^2y^2 - 6,409xy^3 - 6,654y^4 - 0,3366x^5 - 10,74x^4y - 16,7x^3y^2 + 0,3505x^2y^3 + 7,294xy^4 + 2,283y^5.$$

Na poniższym Rysunek 60 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji L1-NOSE2 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak L1-NOSE2. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -2600 a 1000 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 60 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej L1-LIPSL

Dla proporcji antropometrycznej L1-L3 (L1 to Punkt charakterystyczny policzka lewego, L3 to Punkt charakterystyczny policzka lewego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio

$$x= -0.9075696208485221, y= 0.6947570237757907, z= 0.40237641532537616.$$

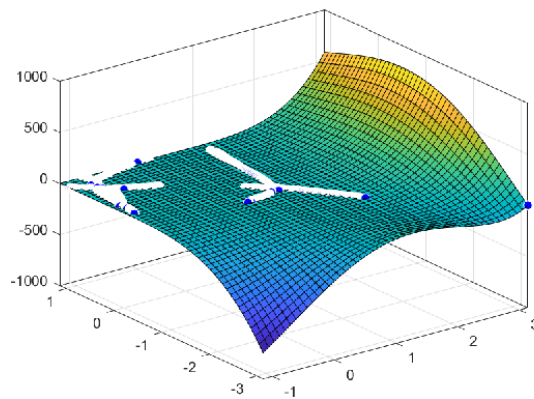
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=2,576	B=1,786	C=2,318	D=-6,668	E=-2,255
F=-1,38	G=-3,539	H=-1,33	I=4,203	J=1,447
K=3,903	L=1,896	M=0,9176	N=-3,56	O=-3,242
P=1,779	R=-1,44	S=-3,299	T=3,621	U=2,306
W=-0,4916				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 2,567 + 1,786x + 2,318y - 6,668x^2 - 2,255xy - 1,38y^2 - 3,539x^3 - 1,33x^2y + 4,203xy^2 + 1,447y^3 + 3,903x^4 + 1,896x^3y + 0,9176x^2y^2 - 3,56xy^3 - 3,242y^4 + 1,779x^5 - 1,44x^4y - 3,299x^3y^2 + 3,621x^2y^3 + 2,306xy^4 - 0,4916y^5.$$

Na poniższym Rysunek 61 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji L1-LIPSL można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak L1-LIPSL. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -800 a 800 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 61 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej L1-L3

Dla proporcji antropometrycznej L1-L2 (L1 to Punkt charakterystyczny policzka lewego, L2 to Punkt charakterystyczny policzka lewego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio $x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 4.7965027395489805$.

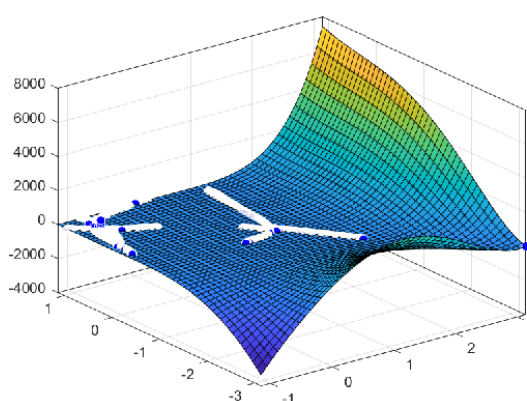
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=1,946	B=24,5	C=35,72	D=2,334	E=-4,564
F=10,59	G=-50,55	H=-50,26	I=-4,121	J=-12,24
K=-3,55	L=5,311	M=-0,4383	N=-12,94	O=-18,28
P=27,25	R=10,88	S=-10,3	T=32,49	U=22,87
W=-6,975				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 1,946 + 24,5x + 35,72y + 2,334x^2 - 4,564xy + 10,59y^2 - 50,55x^3 - 50,26x^2y - 4,121xy^2 - 12,24y^3 - 3,55x^4 + 5,311x^3y - 0,4383x^2y^2 - 12,94xy^3 - 18,28y^4 + 27,25x^5 + 10,88x^4y - 10,3x^3y^2 + 32,49x^2y^3 + 22,87xy^4 - 6,975y^5.$$

Na poniższym Rysunek 62 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji L1-L3 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak L1-L3. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -3800 a 7800 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 62 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej L1-L2

Dla proporcji antropometrycznej NOSE2-LIPSTOP (NOSE2 to Pronasale – najbardziej wysunięty do przodu punkt na czubku nosa, LIPSTOP to Labrale superius

– przejście skóry wargi górnej w jej czerwień, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5. \quad (23).$$

Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio $x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 3.4425109227481863$.

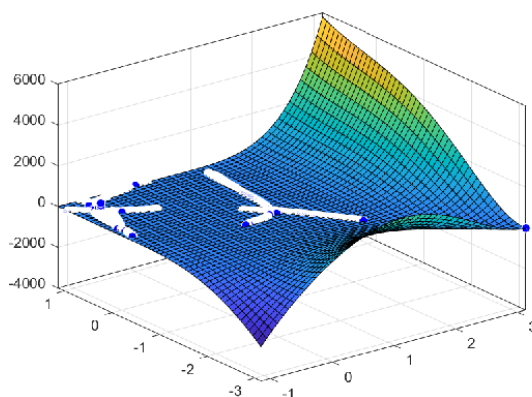
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=-2,514	B=16,58	C=25,1	D=10,63	E=2,981
F=14,88	G=-36,96	H=-41,77	I=-7,728	J=-8,299
K=-7,575	L=-1,687	M=-5,109	N=-10,01	O=-14,63
P=21,25	R=12,57	S=-4,277	T=24,94	U=17,71
W=-6,629				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = -2,514 + 16,58x + 25,1y + 10,63x^2 + 2,981xy + 14,88y^2 - 36,96x^3 - 41,77x^2y - 7,728xy^2 - 8,299y^3 - 7,575x^4 - 1,687x^3y - 5,109x^2y^2 - 10,01xy^3 - 14,63y^4 + 21,25x^5 + 12,57x^4y - 4,277x^3y^2 + 24,94x^2y^3 + 17,71xy^4 - 6,629y^5.$$

Na poniższym Rysunek 63 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji L1-L2 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak L1-L2. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -3800 a 6000 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 63 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej NOSE2-LIPSTOP

Dla proporcji antropometrycznej R4-R3 (R4 to Punkt charakterystyczny policzka prawego, R3 to Punkt charakterystyczny policzka prawego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio $x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 2.674526584539726$.

Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

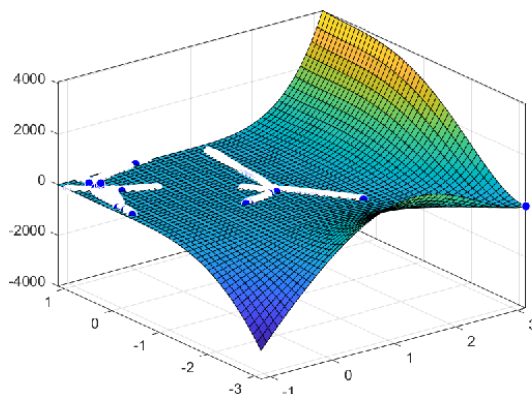
A=1,199	B=9,175	C=16,29	D=0,04363	E=-2,652
F=8,238	G=-23,78	H=-25,03	I=3,66	J=0,1585
K=-0,8931	L=3,022	M=-2,359	N=-12,11	O=-14,76
P=15,22	R=4,765	S=-11,05	T=18,89	U=16,69
W=-4,883				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 1,199 + 9,175x + 16,29y + 0,04363x^2 - 2,652xy + 8,238y^2 - 23,78x^3 - 25,03x^2y + 3,66xy^2 + 0,1585y^3 - 0,8931x^4 + 3,022x^3y - 2,359x^2y^2 - 12,11xy^3 - 14,76y^4 + 15,22x^5 + 4,765x^4y - 11,05x^3y^2 + 18,89x^2y^3 + 16,69xy^4 - 4,883y^5.$$

Na poniższym Rysunek 64 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji NOSE2-LIPSTOP można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna

względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak NOSE2-LIPSTOP. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -3800 a 4000 jednostek bezwzględnych



Rysunek 64 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej R4-R3

Dla proporcji antropometrycznej R3-LIPSR (R3 to Punkt charakterystyczny policzka prawego, LIPSR to Cheilon R – prawy kącik ust, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio $x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 1.4694699618525564$.

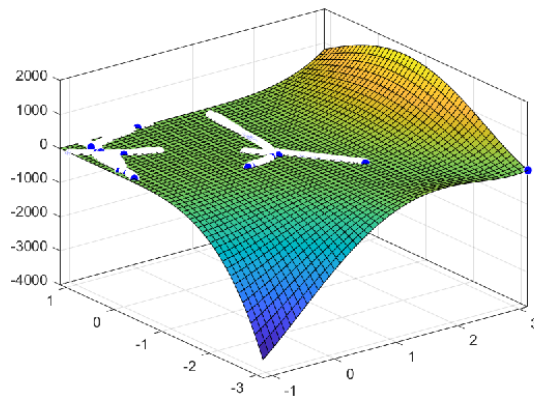
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=9,05	B=-0,158	C=0,3885	D=-21,47	E=-4,891
F=-2,671	G=-2,058	H=2,522	I=16,5	J=11,72
K=12,26	L=4,932	M=1,601	N=-15,62	O=-13,74
P=2,249	R=-5,964	S=-13,22	T=9,27	U=10,34
W=-1,077				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 9,05 - 0,158x + 0,3885y - 21,47x^2 - 4,891xy - 2,671y^2 - 2,058x^3 + 2,522x^2y + 16,5xy^2 + 11,72y^3 + 12,26x^4 + 4,932x^3y + 1,601x^2y^2 - 15,62xy^3 - 13,74y^4 + 2,249x^5 - 5,964x^4y - 13,22x^3y^2 + 9,27x^2y^3 + 10,34xy^4 - 1,077y^5.$$

Na poniższym Rysunek 65 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji R4-R3 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak R4-R3. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -3800 a 1800 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 65 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej R3-LIPSR

Dla proporcji antropometrycznej LIPSR-LIPSTOP (LIPSR to Cheilon R – prawy kącik ust, LIPSTOP to Labrale superius – przejście skóry wargi górnej w jej czerwień, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio

$$x = -0.9075696208485221, y = 0.6947570237757907, z = 2.037816999212.$$

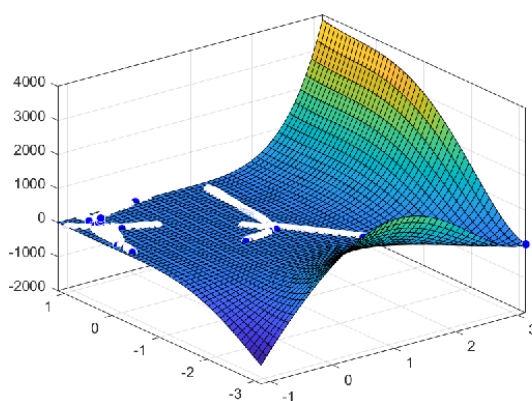
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=0,7889	B=11,62	C=18,49	D=1,536	E=-2,156
F=6,451	G=-25,75	H=-25,87	I=1,849	J=-2,833
K=-1,961	L=2,891	M=-1,755	N=-8,684	O=-10,57
P=15,02	R=3,865	S=-8,224	T=19,37	U=12,38
W=-6,027				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 0,7889 + 11,62x + 18,49y + 1,536x^2 - 2,156xy + 6,451y^2 - 25,75x^3 - 25,87x^2y + 1,849xy^2 - 2,833y^3 - 1,961x^4 + 2,891x^3y - 1,755x^2y^2 - 8,684xy^3 - 10,57y^4 + 15,02x^5 + 3,865x^4y - 8,224x^3y^2 + 19,37x^2y^3 + 12,38xy^4 - 6,027y^5.$$

Na poniższym Rysunek 66 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji R3-LIPSR można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak R3-LIPSR. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -1800 a 4000 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 66 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LIPSR-LIPSTOP

Dla proporcji antropometrycznej LIPSR-LIPSL (LIPSR to Cheilon R – prawy kącik ust, LIPSL to Cheilon L – lewy kącik ust, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 + Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 + Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą

odpowiednio $x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$,
 $z = 0.014620069721435147$.

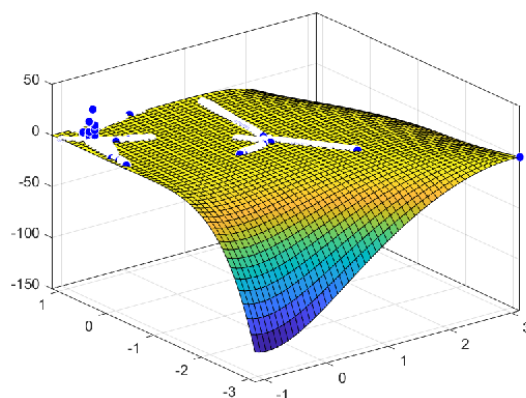
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=0,254	B=0,1611	C=0,2527	D=-0,6901	E=-1,139
F=-0,4653	G=0,1171	H=0,5841	I=0,231	J=-0,1914
K=0,5282	L=0,8367	M=0,5138	N=0,1257	O=-0,1464
P=-0,2575	R=-0,5682	S=-0,6273	T=-0,1472	U=0,4597
W=0,2636				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 0,254 + 0,1611x + 0,2527y - 0,6901x^2 - 1,139xy - 0,4653y^2 + 0,1171x^3 + 0,5841x^2y + 0,231xy^2 - 0,1914y^3 + 0,5282x^4 + 0,8367x^3y + 0,5138x^2y^2 + 0,1257xy^3 - 0,1464y^4 - 0,2575x^5 - 0,5682x^4y - 0,6273x^3y^2 - 0,1472x^2y^3 + 0,4597xy^4 + 0,2636y^5.$$

Na poniższym Rysunek 67 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji LIPSR-LIPSTOP można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45^0 zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak LIPSR-LIPSTOP. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -130 a 10 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 67 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LIPSR-LIPSL

Dla proporcji antropometrycznej LIPSR-LIPSBOT (LIPSR to Cheilon R – prawy kącik ust, LIPBOT to Labrale inferius – przejście skóry wargi dolnej w jej czerwień, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A +$

$Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$
 $+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$
 $Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5.$ (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą
 odpowiednio

$x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 1.0862560847787166$.

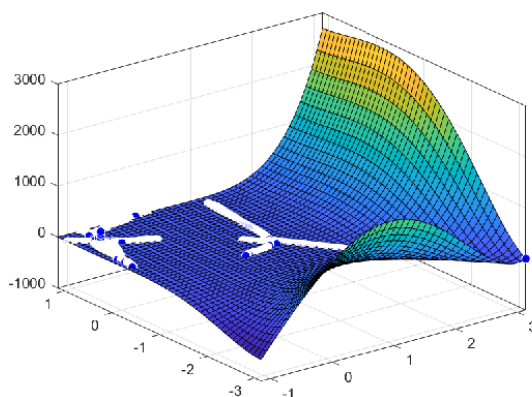
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące
 wartości:

A=2,688	B=9,146	C=13,91	D=-3,893	E=-4,631
F=0,7976	G=-19,28	H=-16,31	I=6,082	J=-0,4918
K=1,452	L=4,866	M=0,532	N=-6,498	O=-6,678
P=10,79	R=-0,2387	S=-8,467	T=14,6	U=7,324
W=-5,318				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$\begin{aligned}
 z = & 2,688 + 9,146x + 13,91y - 3,893x^2 - 4,631xy + 0,7976y^2 \\
 & - 19,28x^3 - 16,31x^2y + 6,082xy^2 - 0,4918y^3 + 1,452x^4 \\
 & + 4,866x^3y + 0,532x^2y^2 - 6,498xy^3 - 6,678y^4 + 10,79x^5 \\
 & - 0,2387x^4y - 8,467x^3y^2 + 14,6x^2y^3 + 7,324xy^4 - 5,318y^5.
 \end{aligned}$$

Na poniższym Rysunek 68 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej
 powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla
 proporcji LIPSR-LIPSL można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska
 w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna
 względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak LIPSR-LIPSL.
 Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na
 obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -800 a 2800 jednostek bezwzględnych



Rysunek 68 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LIPSR-LIPSBOT

Dla proporcji antropometrycznej L4-L3 (L4 to Punkt charakterystyczny policzka lewego, L3 to Punkt charakterystyczny policzka lewego, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio $x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 3.147842850625173$.

Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

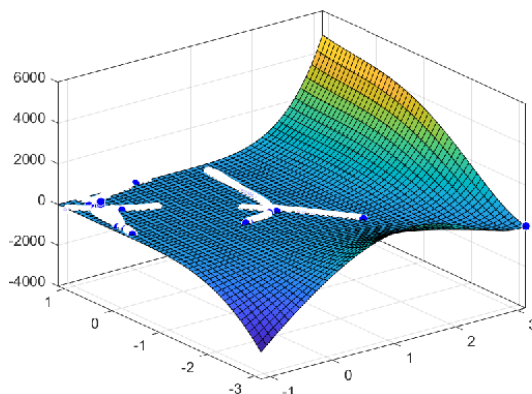
A=0,7104	B=14,74	C=23,84	D=2,282	E=-6,121
F=6,643	G=-32,03	H=-31,75	I=-1,601	J=-8,831
K=-2,577	L=6,66	M=0,5304	N=-8,103	O=-12,23
P=18,1	R=5,74	S=-9,753	T=20,23	U=17,14
W=-3,475				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 0,7104 + 14,74x + 23,84y + 2,282x^2 - 6,121xy + 6,643y^2 - 32,03x^3 - 31,75x^2y - 1,601xy^2 - 8,831y^3 - 2,577x^4 + 6,66x^3y + 0,5304x^2y^2 - 8,103xy^3 - 12,23y^4 + 18,1x^5 + 5,74x^4y - 9,753x^3y^2 + 20,23x^2y^3 + 17,14xy^4 - 3,475y^5.$$

Na poniższym Rysunek 69 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji LIPSR-LIPSBOT można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna

względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak LIPSR-LIPSBOT. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -3800 a 5800 jednostek bezwzględnych



Rysunek 69 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej L4-L3

Dla proporcji antropometrycznej L3-LIPSL (L3 to Punkt charakterystyczny policzka lewego, LIPSL to Cheilon L – lewy kącik ust, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio $x = -0.9075696208485221$, $y = 0.6947570237757907$, $z = 1.129124287288276$.

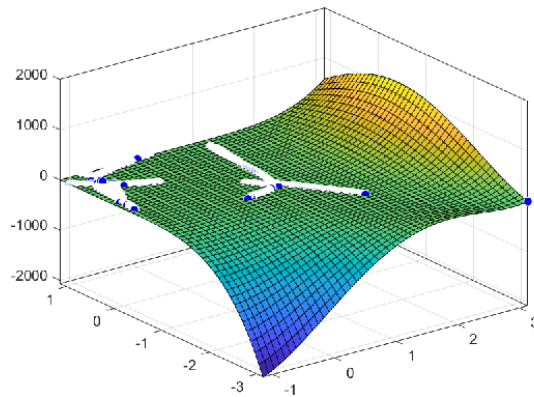
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=5,133	B=0,7962	C=3,914	D=-11,5	E=-9,166
F=-4,344	G=-3,079	H=0,5816	I=10,07	J=3,195
K=6,188	L=8,63	M=5,027	N=-5,658	O=-6,727
P=2,42	R=-4,881	S=-11,46	T=3,234	U=7,561
W=0,7388				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$z = 5,133 + 0,7962x + 3,914y - 11,5x^2 - 9,166xy - 4,344y^2 - 3,079x^3 + 0,5816x^2y + 10,07xy^2 + 3,195y^3 + 6,188x^4 + 8,63x^3y + 5,027x^2y^2 - 5,658xy^3 - 6,727y^4 + 2,42x^5 - 4,881x^4y - 11,46x^3y^2 + 3,234x^2y^3 + 7,561xy^4 + 0,7388y^5.$$

Na poniższym Rysunek 70 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji L4-L3 można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak L4-L3. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -2000 a 1200 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 70 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej L3-LIPSL

Dla proporcji antropometrycznej LIPSL-LIPSTOP (LIPSL to Cheilon L – lewy kącik ust, LIPSTOP to Labrale superius – przejście skóry wargi górnej w jej czerwień, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio

$$x = -0.9075696208485221, y = 0.6947570237757907, z = 2.502985784346308.$$

Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

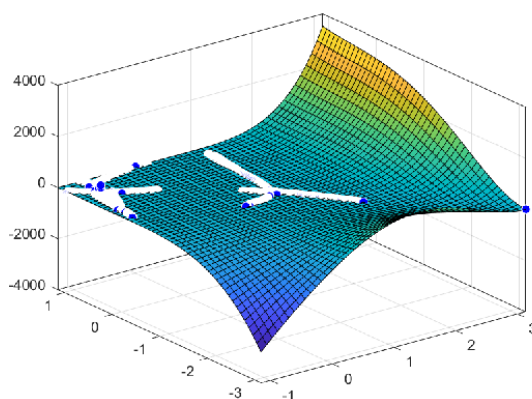
$$A=1,768 \quad B=9,571 \quad C=16,12 \quad D=-0,1902 \quad E=-3,032$$

F=6,397	G=-22,09	H=-23,36	I=0,3497	J=-3,379
K=-1,256	L=3,491	M=0,2193	N=-8,905	O=-12,81
P=12,97	R=4,841	S=-8,285	T=15,41	U=14,87
W=-2,638				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$\begin{aligned}
z = & 1,768 + 9,571x + 16,12y - 0,1902x^2 - 3,032xy + 6,397y^2 \\
& - 22,09x^3 - 23,36x^2y + 0,3497xy^2 - 3,379y^3 - 1,256x^4 \\
& + 3,491x^3y + 0,2193x^2y^2 - 8,905xy^3 - 12,81y^4 + 12,97x^5 \\
& + 4,841x^4y - 8,285x^3y^2 + 15,41x^2y^3 + 14,87xy^4 - 2,638y^5.
\end{aligned}$$

Na poniższym Rysunek 71 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji L3-LIPSL można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak L3-LIPSL. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -3000 a 3900 jednostek bezwzględnych .



Rysunek 71 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LIPSL-LIPSTOP

Dla proporcji antropometrycznej LIPSL-LIPSBOT (LIPSL to Cheilon L – lewy kącik ust, LIPSBOT to Labrale inferius – przejście skóry wargi dolnej w jej czerwien, Rysunek 7) – wyznaczono równanie powierzchni piątego stopnia (Równanie $z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 +$

$$+Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Rx^4y + Sx^3y^2 +$$

$Tx^2y^3 + Uxy^4 + Wy^5$. (23). Przykładowo, dla $t=0$, wartości x , y i z wynoszą odpowiednio

$$x = -0.9075696208485221, y = 0.6947570237757907, z = 1.587430273393064.$$

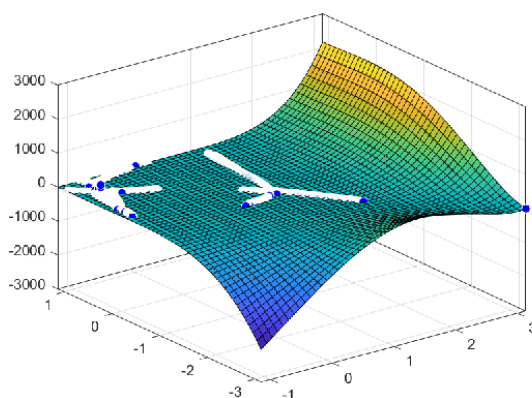
Wyznaczone wartości współczynników równania od A do W mają następujące wartości:

A=3,699	B=6,756	C=11,34	D=-5,503	E=-5,525
F=0,7359	G=-14,53	H=-13,13	I=4,051	J=-1,282
K=2,027	L=5,483	M=2,84	N=-6,481	O=-9,013
P=8,113	R=0,5024	S=-8,421	T=10,07	U=10,03
W=-1,467				

Równanie (23) przyjmuje więc postać:

$$\begin{aligned}
 z = & 3,699 + 6,756x + 11,34y - 5,503x^2 - 5,525xy + 0,1359y^2 \\
 & - 14,53x^3 - 13,13x^2y + 4,051xy^2 - 1,282y^3 + 2,027x^4 + 5,483x^3y \\
 & + 2,84x^2y^2 - 6,481xy^3 - 9,013y^4 + 8,113x^5 + 0,5024x^4y \\
 & - 8,421x^3y^2 + 10,07x^2y^3 + 10,03xy^4 - 1,467y^5.
 \end{aligned}$$

Na poniższym Rysunek 72 przedstawiono graficzną interpretację wyznaczonej powyższym równaniem powierzchni. W porównaniu z powierzchnią wyznaczoną dla proporcji LIPSL-LIPSTOP można zauważyć, iż powierzchnia pozostaje płaska w zbliżonym zakresie kątów Θ jak i Γ jak poprzednia. Jest także symetryczna względem prostej pod kątem 45° zarówno do osi kąta Θ jak i Γ jak LIPSL-LIPSTOP. Wartość różnicy proporcji wyznaczonej na obrazie 3D w stosunku do wyznaczonej na obrazie 2D zawiera się w przedziale pomiędzy -2500 a 2500 jednostek bezwzględnych



Rysunek 72 Graficzna interpretacja powierzchni dla odległości antropometrycznej LIPSL-LIPSBOT

7.7 Współczynniki A do W dla równań 5 rzędu

Tabela 11 Współczynniki A do W dla wyznaczonych równań 5 rzędu

Proporcja	A	Bx	Cy	Dx ²	Exy	Fy ²	Gx ³	Hx ² y	Ixy ²	Jy ³	Kx ⁴	Lx ³ y	Mx ² y ²	Nxy ³	Oy ⁴	Px ⁵	Rx ⁴ y	Sx ³ y ²	Tx ² y ³	Uxy ⁴	Wy ⁵
RH-MH	4,716	6,966	8,84	-10,77	1,518	3,01	-15,81	-12,29	9,373	4,751	6,211	-1,079	-4,426	-12,87	-10,08	8,895	-0,3155	-5,677	17,7	6,67	-5,889
RH-NOSE1	22,99	78,98	132,1	-26,27	-46,85	24,83	-177,8	-165,1	46,02	-6,707	6,019	28,24	6,483	-74,09	-90,15	104,7	10,11	-89,83	133,3	103,8	-36,26
RH-REYE2	24,8	57,69	98,27	-36,21	-47,43	7,565	-130,7	-113,4	50,51	1,299	13,32	46,96	12,44	-59,62	-70,58	77,16	-1,636	-79,44	98,59	80,02	-25,98
MH-NOSE1	32,08	56,98	106,7	-49,39	-64,99	5,234	-136,1	-116,6	67,67	8,092	19,46	64,51	20,13	-73,83	-88,68	83,73	-9,616	-105,8	107,2	103,6	-24,46
MH-LH	2,276	-6,246	-1,634	-10,13	-11,89	-1,801	7,397	12,86	20,75	10,27	7,657	12,19	-2,097	-12,32	-8,344	-1,234	-13,3	-17,56	5,079	10,19	-0,1566
LH-NOSE1	29,34	59,04	102,7	-42,55	-53,68	9,066	-137,3	-121,6	49,57	-1,03	15,3	52,96	21,26	-63,25	-82,4	81,73	1,553	-89,08	98,69	64,44	-20,67
LH-LEYE2	29,29	44,97	77,39	-48,87	-50,81	-4,925	-101,2	-81,21	51,26	4,705	21,01	48,9	22,29	-50,62	-62,22	59,14	-8,609	-75,84	74,76	70,14	15,87
REYE2-NOSE1	-2,013	21,17	33,62	10,49	2,923	18,92	-47,6	-52,71	-5,24	-8,177	-7,786	-0,5201	-8,209	-16,62	-20,65	28,03	12,52	-9,196	36-89	24-94	-10,32
REYE2-REYE1	-0,8976	12,27	19,78	5,685	-0,5652	8,607	-27,28	-29,3	-2,034	-5,304	-4,446	1,494	-2,648	-7,042	-9,967	15,95	6,172	-6,164	19,42	12,55	-5,992
REYE2-R1	6,149	3,67	7,488	-13,14	-10,3	-6,365	-7,923	-2,065	12,84	2,846	6,868	9,797	5,39	-5,802	-5,54	4,617	-6,68	-12,48	7,245	5,72	-1,738
REYE2-R2	3,205	10,42	12,1	-6,117	1,46	4,399	-19,73	-18,41	1,268	0,5442	2,781	-1,4	-1,312	-9,827	-10,6	9,654	4,202	-2,465	15,29	8,137	-3,56
LEYE2-NOSE1	-0,2834	13,31	24,7	6,087	-3,444	13,84	-34,23	-38,97	-1,261	-5,112	-5,446	4,461	-1,321	-13,19	-20,51	21,61	9,679	-13,47	23,39	24,87	-4,469
LEYE2-LEYE1	-0,8282	8,072	15,5	4,953	-4,179	6,832	-20,29	-22,67	-1,011	-4,659	-3,979	4,497	0,5794	-4,724	-9,737	12,67	4,992	-8,302	12,12	13,12	-2,687
LEYE2-L1	5,592	3,021	5,17	-11,76	-9,337	-7,323	-6,393	-0,2599	12,54	3,82	6,003	8,483	5,885	-3,41	-3,028	3,575	-5,963	-10,68	4,307	2,145	-2,155
LEYE2-L2	-3,877	23,91	33,06	14,29	5,973	18,47	-48,24	-53,89	-18,35	-18,06	-9,842	-4,143	-6,731	-9,948	-15,42	25,35	18,35	1,969	30,43	20,71	-5,161
NOSE1-REYE1	-1,14	9,058	14,01	4,72	3,406	10,28	-20,58	-23,49	-2,937	-2,816	-3,272	-1,994	-5,768	-9,843	-10,79	12,16	6,311	-3,012	17,74	12,44	-4,41

NOSE1-LEYE1	0,4782	5,115	9,146	1,223	0,956	7,264	-13,46	-16,06	-0,6576	-0,7026	-1,51	-0,1808	-2,198	-8,765	-10,99	8,596	4,604	-4,822	11,4	12,074	-1,526
REYE1-LEYE1	0,5146	3,137	3,64	0,1067	-0,6198	-0,5231	-5,014	-4,627	-2,004	-2,804	-0,4115	0,4168	1,416	1,387	0,4493	2,067	1,229	0,5864	1,586	-0,2058	-0,437
REYE1-R1	2,2	16,92	19,98	-3,136	-0,00532	2,65	-31,21	-28,04	-2,118	-7,083	0,9827	-0,5328	0,2232	-3,308	-5,016	14,98	6,357	-0,3455	18,08	3,166	-6,492
REYE1-NOSE2	12,68	19,68	33,35	-22,88	-20,74	-1,814	-4415	-34,57	25,59	5,061	10,78	202,7	6,506	-24,7	-26,9	25,95	-5,208	-33,01	35,76	29,07	-9,329
LEYE1-L1	0,3205	15,06	19,56	1,8	-0,4586	5,286	-28,91	-28,89	-7,023	-10,37	-2,04	0,3523	0,6195	-2,184	-6,3	14,3	8,641	0,04478	14,77	7,187	-3,222
LEYE1-NOSE2	14,24	15,97	28,77	-25,99	-22,23	-4,188	-37,48	-28,08	26,54	6,293	12,22	21,43	10,05	-23,02	-26,85	22,62	-6,493	-34,22	29,77	28,49	-6,596
R2-R1	9,648	13,97	19,02	-19,64	-10,39	-2,625	-26,62	-19,1	14,95	3,579	10,22	9,38	4,447	-14,58	-15,52	13,47	-3,031	-15,63	21,27	13,17	-5,858
R2-R3	7,73	16,98	23,9	-13,67	-16,00	-7,964	-30,17	-20,84	11,3	-4,507	6,182	14,64	9,387	-4,411	-6,596	14,28	-4,126	-14,73	17,19	7,779	-5,649
R2-R4	5,944	0,844	1,934	-13,97	-1,563	0,382	-4,996	-2,792	9,528	6,613	7,804	1,737	0,2801	-12,38	-11,72	4,077	-1,51	-8,616	8,416	9,3352	-0,175
R1-R3	0,5777	3,766	4,461	-1,256	2,052	3,304	-8,652	-9,307	-0,7576	-0,06273	0,5165	-1,938	-1,252	-3,977	-4,686	4,962	3,54	-0,6326	6,197	3,675	-1,585
R1-LIPSR	7,133	2,21	4,676	-16,42	-9,87	-7,214	-4,73	1,761	13,52	3,985	9,051	9,44	5,671	-6,576	-5,784	2,724	-7,47	-12,14	5,581	5,245	-0,4857
R1-NOSE2	5,515	29,71	47,526	-3,76	-10,53	13,21	-65,49	-63,87	9,022	-5,428	-0,8263	11,52	-0,8551	-24,82	-30,71	97,96	8,201	-25,53	48,47	35,13	-13,43
L1-NOSE2	7,767	23,12	41,19	-8,4	-15,37	10,71	-55,02	-53,84	11,52	-3,922	1,409	15,96	4,3051	-24,63	-33,68	33,2	5,668	-30,32	39,91	39,37	-7,636
L1-LIPSI	8,259	-2,038	1,37	-19,11	-14,65	-10,12	2,49	9,262	17,41	6,061	10,42	13,86	8,893	-6,409	-6,654	-0,3366	-10,74	-16,7	0,3505	7,294	2,283
L1-L3	2,567	1,786	2,318	-6,668	-2,255	-1,38	-3,539	-1,33	4,203	1,447	3,903	1,896	0,9176	-3,56	-3,242	1,779	-1,44	-3,299	3,621	2,306	-0,4916
L1-L2	1,964	24,5	35,72	2,334	-4,564	10,59	-50,55	-50,26	-4,121	-12,24	-3,55	5,311	-0,4383	-12,94	-18,28	27,25	10,88	-10,3	32,49	22,87	-6,975
NOSE2-LIPSTOP	-2,514	16,58	25,1	10,63	2,981	14,88	-36,96	-41,77	-7,728	-8,299	-7,575	-1,687	-5,109	-10,01	-14,63	21,25	12,57	-4,277	24,94	17,71	-6,629
R4-R3	1,199	9,175	16,29	0,04363	-2,652	8,238	-23,78	-25,03	3,66	0,1585	-0,8931	3,022	-2,359	-12,11	-14,76	15,22	4,765	-11,05	18,89	16,69	-4,883
R3-LIPSR	9,05	-0,158	0,3885	-21,47	-4,891	-2,671	-2,058	2,522	16,5	11,72	12,26	4,932	1,601	-15,62	-13,74	2,249	-5,964	-13,22	9,27	10,34	-1,077
LIPSR-LIPSTOP	0,7889	11,62	18,49	1,536	-2,156	6,451	-25,75	-25,87	1,849	-2,833	-1,961	2,891	-1,755	-8,684	-10,57	15,02	3,865	-8,224	19,37	12,38	-6,027
LIPSR-LIPSL	0,254	0,1611	0,2527	-0,6901	-1,139	-0,4653	0,1171	0,5841	0,231	-0,1914	0,5282	0,8367	0,5138	0,1257	-0,1464	-0,2575	-0,5682	-0,6273	-0,1472	0,4597	0,2636
LIPSR-LIPSBOT	2,688	9,146	13,91	-3,893	-4,631	0,7976	-19,28	-16,31	6,082	-0,4918	1,452	4,866	0,532	-6,498	-6,678	10,79	-0,2387	-8,467	14,6	7,324	-5,318
L4-L3	0,7104	14,74	23,84	2,282	-6,121	6,643	-32,03	-31,75	-1,601	-8,831	-2,577	6,66	0,5304	-8,103	-12,23	18,1	5,74	-9,753	20,23	17,14	-3,475
L3-LIPSL	5,133	0,7962	3,914	-11,5	-9,166	-4,344	-3,079	0,5816	10,07	3,195	6,188	8,63	5,027	-5,658	-6,727	2,42	-4,881	-11,46	3,234	7,561	0,7388

LIPSL- LIPSTOP	1,768	9,571	16,12	-0,1902	-3,032	6,397	-22,09	-23,36	0,3497	-3,379	-1,256	3,491	0,2193	-8,905	-12,81	12,97	4,841	-8,285	15,41	14,87	-2,638
LIPSL- LIPSBOT	3,699	6,756	11,34	-5,503	-5,525	0,1359	-14,53	-13,13	4,051	-1,282	2,027	5,483	2,84	-6,481	-9,013	8,113	0,5024	-8,421	10,07	10,03	-1,467

7.8 Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań udało się potwierdzić, że możliwe jest wyznaczenie cech antropometrycznych twarzy oraz zmiany tych cech, przy wykorzystaniu obrazu płaskiego pozyskanego w niekontrolowanym otoczeniu i porównanie ich z pozyskanymi cechami antropometrycznymi w trójwymiarowej przestrzeni uzyskanymi w otoczeniu kontrolowanym, a co za tym idzie identyfikację osoby z założonym określonym progiem prawdopodobieństwa. Istnieje także możliwość określenia dla neutralnej orientacji głowy zależności pomiędzy wektorem cech biometrycznych wyznaczonym na podstawie współrzędnych 3D i analogicznym wektorem cech biometrycznych wyznaczonym na podstawie współrzędnych 2D punktów antropometrycznych (Teza 1).

8 System wykrywania i rozpoznawania twarzy

W strukturach organizacyjnych służb specjalnych oraz porządku publicznego w Polsce niezbędne są systemy do rozpoznawania i identyfikacji osób – osób zarówno poszukiwanych, jak i będących obiektem zainteresowań, oraz posiadających wydany prawomocnym wyrokiem sądu zakaz, np. przebywania w danym miejscu – na podstawie zarejestrowanego wcześniej wizerunku. Tego typu systemy mogą funkcjonować na podstawie zatwierdzonych przez ustawodawcę przepisów. W art. 2 ust. 2 lit. d rozporządzenia ogólnego [UODO] można przeczytać, że „niniejsze rozporządzenie nie ma zastosowania do przetwarzania danych osobowych przez właściwe organy do celów zapobiegania przestępczości, prowadzenia postępowań przygotowawczych, wykrywania i ścigania czynów zabronionych lub wykonywania kar, w tym ochrony przed zagrożeniami dla bezpieczeństwa publicznego i zapobiegania takim zagrożeniom”. W chwili obecnej, dane biometryczne są w Polsce bardzo często wykorzystywane w postępowaniach prowadzonych przez organy ścigania oraz realizowanych czynnościach operacyjno-rozpoznawczych. Analizując art. 21h ust. 1 pkt 1 i 2 Ustawy o Policji [UoP] Komendant Główny Policji prowadzi zbiory danych daktyloskopijnych, których jest administratorem w rozumieniu przepisów o ochronie danych osobowych, o nazwach: Centralna Registratura Daktyloskopijna (CRD) oraz Automatyczny System Identyfikacji Daktyloskopijnej (AFIS – ang. *Automated Fingerprint Identification System*).

Reasumując, uprawnione podmioty mogą do ustawowych celów przetwarzać dane osobowe, np. w myśl wyżej wymienionych przepisów prawa. Zatem powstanie automatycznych systemów rozpoznawania i identyfikacji osób jest jak najbardziej uzasadnione.

8.1 Założenia dla systemu do identyfikacji osób

Proces automatycznej identyfikacji twarzy zamyka się w następujących krokach:

- pobranie obrazu zawierającego materiał do identyfikacji;
- wstępna obróbka materiału, w tym zlokalizowanie twarzy na pobranym obrazie;

- wyodrębnienie cech antropometrycznych;
- identyfikacja (rozpoznanie) osoby na podstawie wzorca z bazy danych;
- weryfikacja określenia stopnia dokładności identyfikacji.

Główne problemy takiego systemu, to:

- odległość celu identyfikacji od soczewki kamery;
- określenie wpływu oświetlenia;
- pozycja (ustawienie głowy) w celu zwiększenia prawdopodobieństwa w identyfikacji celu;
- zmiany (specjalne/celowe) lub związane z wiekiem w wyglądzie celu identyfikacji;
- widoczność celu identyfikacji;
- wyraz twarzy związany z jej ekspresją.

Każdym z powyższych problemów należałoby zająć się indywidualnie i omówić je z osobna.

8.2 Pozycja niezbędna do przeprowadzenia automatycznej identyfikacji

W ostatnich podrozdziałach Rozdziału 2 niniejszej pracy omówiono główne problemy systemów identyfikacji i rozpoznawania, które przedstawiono także powyżej. Badania przedstawione w Rozdziale 5 i 7 obrazują problemy związane z identyfikacją osoby w przypadku, kiedy głowa pozostaje w pozycji nieustalonej w stosunku do soczewki rejestratora lub kiedy punkty antropometryczne są identyfikowane na obrazie płaskim, a dostępny jest wzorzec pozyskany z kontrolowanego obrazu 3D.

8.2.1 Bazy danych dostępne w Policji

KSIP to Krajowy System Informatyczny Policji, który zawiera wizerunki osób będących obiektem zainteresowania Policji oraz innych służb porządku publicznego czy specjalnych w Polsce. Wizerunki w bazie danych pozyskano poprzez wykonywanie zdjęć sygnalitycznych oraz materiałów dostarczonych do organów ścigania przez osoby pozostające w sprawie.

Zdjęcia sygnalityczne to jedna z technik kryminalistycznych, która polega na wykonaniu serii zdjęć osoby w stałych, niezmiennych i odtwarzalnych warunkach.

Wykonuje się je z profilu prawego, na wprost oraz półprofilu lewego z odległości równej ośmiokrotnej długości ogniskowej obiektywu aparatu wykorzystywanego do tego celu. Często zdjęcia uzupełniane są o prawy półprofil, jeśli pozostaje on bardziej charakterystyczny od lewego, zdjęcie wizerunku całej sylwetki oraz o zdjęcia cech szczególnych, takich jak blizny lub tatuaże. Zasady wykonywania zdjęć określone zostały w Załączniku 7 Zarządzenia nr 6 Komendanta Głównego Policji z dnia 16 maja 2002 roku z późniejszymi zmianami. Ta baza wizerunków osób prowadzona jest zgodnie z obowiązującymi przepisami, które przytoczono we wstępie niniejszego Rozdziału.

Inne dostępne bazy danych możliwe do wykorzystania przy rozpoznawaniu i identyfikacji osób, to np. baza zdjęć dostarczonych do wytworzenia dowodów osobistych, praw jazdy, paszportów etc. Natomiast wykorzystanie ich w tej chwili nie jest do końca umocowane prawnie poprzez ustawy o RODO.

8.2.2 Ustawienia

Na podstawie wyżej wymienionych wytycznych, zdjęcia w bazie danych gromadzone przez Policję słabo nadają się do identyfikacji osoby pozostającej w zainteresowaniu z dużym poziomem ufności. Wynika to z faktu, że:

- zdjęcia są wykonane pod ściśle określonymi kątami ustawienia głowy w stosunku do obiektywu. W rzeczywistości bardzo trudno znaleźć materiał porównawczy, który pod określonym kątem zlokalizuje twarz, dzięki czemu będzie istniała możliwość wyznaczenia punktów antropometrycznych obarczonych takim samym błędem, czy to operatora nanoszącego punkt na zdjęciu, czy kąta pochylenia głowy względem określonych osi Eulera, co opisano w Rozdziale 5;
- zdjęcia wykonane są ze ściśle określoną ekspresją mimiczną twarzy, co również determinuje możliwość ich użycia bez wpływowego materiału porównawczego;
- zdjęcia sygnalityczne wykonane są w ściśle określonych warunkach technicznych w ściśle określonej odległości od obiektywu. Pozyskanie w ten sposób zarejestrowanego materiału porównawczego jest zazwyczaj niemożliwe.

Uwzględniając powyższe, dokładność rozpoznania osoby w porównaniu zdjęć sygnalitycznych z materiałem z monitoringu wypadnie na niskim poziomie skuteczności. Należy zatem rozważyć wykonywanie modeli cech antropometrycznych w specjalnie dostosowanych laboratoriach, w których będzie możliwość wykonania ich zdjęcia z obrazów 3D. Da to sposobność zmierzenia odległości antropometrycznych bez wpływu przekształcenia twarzy na obraz 2D, a następnie przeliczenia ich wielkości względem ustawienia głowy przy uwzględnieniu kątów Eulera w przypadku zarejestrowania wizerunku osoby na obrazie płaskim.

9 Wnioski końcowe i sugestie dotyczące dalszej pracy

Możliwość wykorzystania antropometrii do identyfikacji przestępców – tj. osób pozostających w zainteresowaniu służb – była badana i analizowana od końca XIX wieku, począwszy od wkładu Bertillona. Są osoby, które doceniają ważny wkład Bertillona i mają nadzieję, że wszelkie stare pliki antropometryczne, które zostały utworzone w oparciu o metodę przez niego opracowaną, nie zostały zniszczone i mogą zostać udostępnione do dalszego użytku [Gloor1980].

Na podstawie przeprowadzonych badań udało się potwierdzić hipotezy zerowe przedstawione w Rozdziale 1, tj.:

1. Możliwe jest, dla neutralnej orientacji głowy, określenie zależności pomiędzy wektorem cech biometrycznych wyznaczonym na podstawie współrzędnych 3D i analogicznym wektorem cech biometrycznych wyznaczonym na podstawie współrzędnych 2D punktów charakterystycznych.
2. Możliwe jest określenie funkcyjnej zależności odległości punktów charakterystycznych pozyskanych z obrazu 2D od kątów *yaw* i *pitch* orientacji głowy i określenie na tej podstawie zakresów kątów orientacji głowy, dla których zmiana odległości pozyskanych z obrazu 2D mieści się w zadanym przedziale.
3. Możliwe jest korygowanie wektora cech biometrycznych pozyskanych z obrazu 2D z wykorzystaniem przybliżonej informacji o orientacji głowy.

9.1 Retrospektywny przegląd projektu

Po zapoznaniu się z literaturą przedmiotu badania (Rozdział 3) wybrano pulę punktów antropometrycznych twarzy. Wybrano je tak, aby rozwiązać problem niskiej mocy dyskryminacyjnej uzyskanej przy użyciu początkowych czterech punktów antropometrycznych (Rozdział 5). Do dalszych badań wybrano łącznie 21 punktów antropometrycznych i 43 znormalizowane wymiary antropometryczne. Zwiększona liczba punktów antropometrycznych i wymiarów zapewniłaby dokładniejsze odwzorowanie twarzy niż uzyskano to we wstępnym badaniu, jednak w chwili obecnej, w celu zobrazowania zmian ich wielkości, kiedy są mierzone na obrazie płaskim 2D w stosunku do obrazu przestrzennego 3D, jest ona wystarczająca.

Pomimo problemów opisanych w Rozdziale 5, wyniki wykazały stałą zmianę wartości pomiędzy każdym krokiem (10° obrotu dla każdej osoby). Wyniki ilustrują, że każdy badany podążał za tym samym typem krzywizny, zarówno pod względem kątów, jak i proporcji. Biorąc pod uwagę tę informację, stwierdzono, że możliwe jest oszacowanie, z jakiego kąta zostało zrobione zdjęcie, a w konsekwencji również i obliczenie współczynników korekcji w celu znormalizowania proporcji do ich wartości na całej powierzchni, co zostało zrobione w Rozdziale 7. Jeżeli dziś możliwe jest obliczeniowe korygowanie zniekształconych obrazów z kosmicznego teleskopu Hubble'a, powinno być możliwe udoskonalenie pomiarów antropometrycznych poprzez zastosowanie zaawansowanych algorytmów matematycznych.

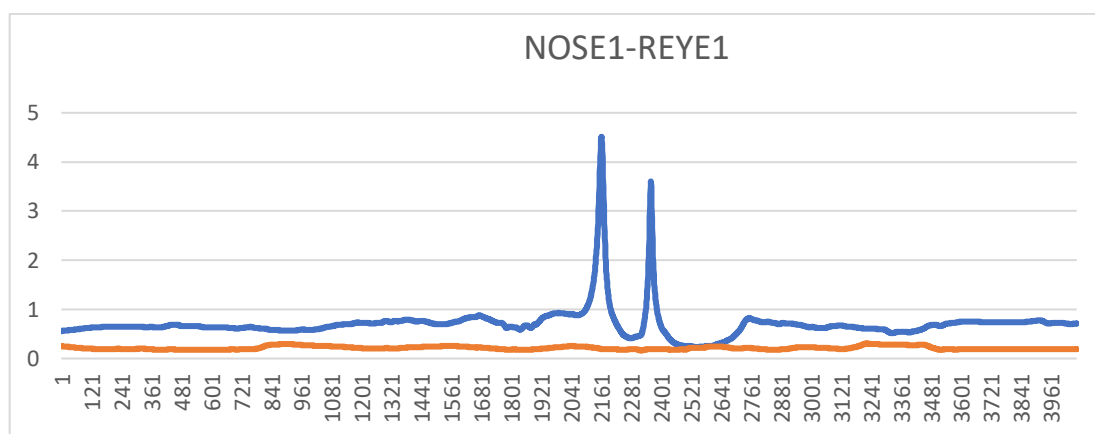
Drugie badanie przeprowadzono w celu rozwiązania konkretnych doświadczalnych problemów projektowych napotkanych we wstępnym pilotażowym badaniu. Polegało ono na tym, że wykorzystano zdjęcia wykonane w ustalonym i ściśle monitorowanym otoczeniu, próbując zminimalizować zmienne, które można było kontrolować, takie jak np. pozycja głowy. Zbadano zdjęcia zrobione przez wielu operatorów, podobnie jak zdjęcia, które robi policja jako zdjęcia sygnalityczne.

Wyznaczono błędy wewnętrzne i międzyoperatorskie, co umożliwiło ocenienie procesu umieszczania punktów antropometrycznych i wstępne określenie efektów wywołanych przez niedoświadczonych operatorów (do dalszej analizy). Połączenie błędów w pomiarach twarzy oraz lokalizacji punktów antropometrycznych przyczynia się do ogólnej niepewności tej metody. Wraz ze wzrostem dokładności pomiarów niepewność będzie w istotny sposób malała, więc konieczne i zasadne są dalsze szczegółowe badania zmienności i dokładności tych parametrów.

Wyznaczone równania umożliwiają także odtworzenie wizerunku 3D osoby, której obraz płaski, np. z profilu, będzie dostępny. Dzięki wyznaczonym parametrom, na obrazie płaskim istnieje możliwość wyznaczenia wielkości antropometrycznych obrazu przestrzennego, dzięki czemu będzie istniała możliwość zamodelowania twarzy w 3D, np. twarzy osoby poszukiwanej.

Wykorzystując 43 proporcje jako wielowymiarowy wektor cech, przeprowadzono badanie w celu porównania dwóch próbek znormalizowanych wyznaczonych wymiarów antropometrycznych, dla wymiarów pozyskanych z obrazu 3D i z obrazu 2D. W laboratorium zarejestrowano wysokiej rozdzielczości film wideo, który wykorzystano do wyznaczenia współrzędnych x, y i z każdego z 21 punktów antropometrycznych. Przy ich wykorzystaniu wyznaczono znormalizowane 43

wymiary antropometryczne oraz wyznaczono te same punkty (ich współrzędne x i y) na płaszczyźnie, która była wyznaczona w miejscu ogniskowej kamery Policjanta wyposażonego w noszoną kamerę nasobną. Dzięki tym badaniom wykazano także, że stabilność parametrów antropometrycznych twarzy, kiedy są one wyznaczane z obrazu 3D, jest znacznie wyższa niż dla obrazu 2D. Na obrazach pokazanych w Rozdziale 7 (jeden z nich, powiększony, przedstawia Rysunek 73) widać, że wymiary uzyskane z obrazu 3D (pomarańczowa linia) są dużo bardziej stabilne (mniejsza fluktuacja), niż wymiary uzyskane z obrazu 2D (niebieska linia).



Rysunek 73 Powiększony obraz NOSE1-REYE1

Błąd średniokwadratowy dla obu wymiarów wynosi:

$$6^2 = 0,214 \quad (24)$$

dla wymiarów uzyskanych z obrazu 3D oraz

$$6^2 = 0,705 \quad (25)$$

dla wymiarów uzyskanych z obrazu 2D.

Z powyższych wniosków wynika jednoznacznie, że zdjęcia sygnalityczne osób wykonane w dozorowanym pomieszczeniu, wykonane przy wykorzystaniu specjalistycznego bardzo dokładnie mierzącego sprzętu, to klucz do sukcesu, kiedy trzeba rozpoznać osobę tylko i wyłącznie na podstawie materiału wideo nieznaney, najczęściej niskiej rozdzielczości. Zasadnym zatem wydaje się doposażenie służb w urzędzenia, które będą tworzyły modele 3D z wizerunku osób podejrzanych lub podejrzewanych, które będą następnie udostępniane organom ścigania, w celu bezpośredniej identyfikacji ustalenia sprawcy popełnienia przestępstwa w myśl przepisów wymienionych np. w Rozdziale 8.

Użyte do badań materiały były najlepszymi dostępnymi obrazami i nagraniami wideo, oferującymi porównywalne obrazy przy tej samej pozycji twarzy. Te obrazy

były również przydatne, ponieważ zostały wykonane tego samego dnia. Nie było zatem możliwości zmiany twarzy ochotnika ze względu na wiek lub wagę.

Podczas przeprowadzania antropometrycznej analizy obrazu, wybrane do porównania obrazy wideo są tak samo ważne, jak korzystanie z usług przeszkolonego operatora, który wykonał materiał porównawczy. Przy pobieraniu materiału pozycja głowy jest niezwykle ważna przy określaniu, które obrazy mają być porównywane. Zarówno proporcje twarzy, jak i opisy morfologiczne rysów twarzy mogą się zmieniać w zależności od pozycji głowy, dlatego ważne jest, aby pozycja głowy była taka sama.

9.2 Przyszłe badania

Ze wstępnych badań jakie wykonano w prezentowanej pracy wynika, że aby spróbować przewidzieć pozycję twarzy z akceptowalnym stopniem dokładności, należałoby zbadać znacznie większą grupę referencyjną osób podzielonych na kategorie według płci, pochodzenia etnicznego i budowy twarzy. Badanie wykazało przewidywalną zmienność wyników (kąty i proporcje) z pozycją twarzy przy użyciu ograniczonej liczby punktów antropometrycznych. Podstawowym pytaniem, na które należy odpowiedzieć, to „Czy antropometria wystarczająco dobrze dyskryminuje jednostki?”. Jest to szczególnie ważne podczas analizowania danych osób o podobnej fizjonomii, aby umożliwić wykorzystanie opisanej techniki jako dowodu potwierdzającego lub nawet do pozytywnej identyfikacji. Dalsze badania muszą określić, w jakim stopniu można dokonać dokładnych porównań zdjęć, które są z podobnego punktu widzenia w stosunku do aparatu fotograficznego, oraz ustalić, jaki jest dopuszczalny zakres różnic położenia między obrazami, który pozwala na wyciągnięcie użytecznych wniosków.

Dalsze badania obrazów 3D z kamer monitorujących mogą pomóc w rozwiązaniu potencjalnych problemów z orientacją głowy a co za tym idzie z dokładnością wyznaczenia wielkości antropometrycznych. Zanim jakiegokolwiek dwa obrazy będą mogły zostać porównane, muszą być zarejestrowane lub przetworzone w ten sposób, aby były widziane z podobnej perspektywy, co może być dość trudne. Gdyby jednak istniał sposób na manipulowanie obrazem tak, aby znajdował się w tej samej pozycji co obraz, z którym jest porównywany, może istnieć większa szansa na dokładną bezpośrednią identyfikację.

Dalsze badania mogą zagłębić się w konkretne przyczyny wpływające na dokładność techniki. Eksperymenty mające na celu przetestowanie odległości kamery lub zniekształcenia wprowadzanego przez oświetlenie, indywidualne zmienne dotyczące systemów nadzoru mogą zostać i powinny być zbadane w celu ustalenia, czy którakolwiek z nich ma większy lub mniejszy wpływ na wyniki niż inne. Wyniki tych badań mogą znacząco wpłynąć na sposób konfigurowania systemów bezpieczeństwa.

Dane uzyskane z badań przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy wykazały, że identyfikacja oparta na obrazie dwuwymiarowym jest słaba, nawet biorąc pod uwagę materiały z najlepszych materiałów wideo. Biorąc pod uwagę dodatkowy nakład czasu potrzebny na dalsze badanie porównania antropometrycznych proporcji twarzy, wskazane byłoby szczegółowe rozważenie fotogrametrii. Korzystając z pakietu fotogrametrycznego na biurku, można opracować trójwymiarową reprezentację twarzy i wykorzystać ją do znalezienia homografii między dwoma obrazami. Obraz 3D pozwoli również na określenie błędu dopasowania, pozwalając odpowiedzieć na pytanie „Czy w obrazie jest wystarczająco dużo informacji, aby można było dokonać porównania?”.

Zamiast używać antropometrii do próby prawdopodobnej identyfikacji, pomocne mogą być badania nad wykorzystaniem tej techniki do zmniejszania liczby osób (lub jako procesu eliminacji) z większej puli podejrzanych. Ponieważ w pracy wykazano, że identyfikacje antropometryczne mają ograniczoną wartość, a badania morfologiczne wykazują ograniczoną wartość, przydatne może być zbadanie, jak można byłoby używać tych dwóch metod w połączeniu, właśnie w celu eliminacji liczby podejrzanych.

Należy rozważyć także dokładniejsze wyznaczenie równania powierzchni, dzięki któremu można wzajemnie wyznaczyć wielkości parametrów 2D lub 3D z właściwych obrazów. Zdaniem autora powierzchnia piątego rzędu w stopniu zadowalającym realizuje funkcję transpozycji wymiarów. Parametry powierzchni piątego rzędu wyliczane za pomocą bibliotek Java lub Matlab są obliczane wystarczająco szybko. Jednak w przypadku bardziej skomplikowanych powierzchni, należałoby użyć funkcji sklepanej (ang. *spline*) w celu zoptymalizowania równania powierzchni. Funkcja sklepana to rzeczywista funkcja gładka, dla której istnieje rodzina podprzedziałów dziedziny o tej własności, że funkcja ta jest wielomianem na każdym z tych przedziałów.

9.3 Final worlds

Wyniki przedstawionego w pracy badania dostarczają użytecznych informacji dla społeczności naukowej. Jeśli antropometria ma być traktowana jako metoda identyfikacji osób i wykorzystywana jako dowód w sądzie, to musi być poparta poważnymi badaniami naukowymi. Celem przedstawionych badań było sprawdzenie naukowej metody identyfikacji, która była stosowana z różnymi wynikami i nie jest jeszcze powszechnie akceptowana w dziedzinie identyfikacji twarzy. Niemniej Autor ma nadzieję, że ten wkład pomoże przekonać badaczy zainteresowanych fotograficzną antropometrią obrazów 2D i 3D, że chociaż testowane badania pokazują, że może istnieć możliwość zawężenia listy podejrzanych z bazy danych, nie jest ona jednak na etapie, na którym można ją wykorzystać do bezpośredniej identyfikacji w celu skazania osoby podejrzanej w sądzie, więc musi być dalej rozwijana.

Zdjęcia sygnalityczne osób wykonane w dozorowanym pomieszczeniu, przy wykorzystaniu specjalistycznego, dokładnego sprzętu to klucz do otrzymania informacji, która posłużyć może trójwymiarowej rekonstrukcji rzeczywistych proporcji antropometrycznych. Pozyskanie takich danych pozwala rozpoznać osobę tylko i wyłącznie na podstawie materiału video nieznannej, najczęściej niskiej rozdzielczości, gdzie niemożliwym jest uzyskanie dokładnych wartości trójwymiarowych proporcji antropometrycznych, gdzie pozyskany materiał video dostarcza nam dużą ilość obrazów twarzy w różnych orientacjach głowy. Zasadnym zatem wydaje się doposażenie służb w urządzenia przeznaczone do wykonywania zdjęć sygnalitycznych, które będą z osób podejrzanych lub podejrzewanych (ich wizerunku) tworzyły trójwymiarowe modele udostępnione następnie w celu bezpośredniej identyfikacji ustalenia sprawcy popełnienia przestępstwa. Utworzenie takich modeli na podstawie danych pozyskanych w ramach systemu monitoringu, jak opisano w [Pęszor2016], choć obiecujące, ograniczone jest jakością pozyskanych nagrań. W przypadku dedykowanych zdjęć sygnalitycznych, stworzonych w kontrolowanych warunkach, jakość rekonstruowanego modelu nie pozostawia wątpliwości co do możliwości pozyskania cech antropometrycznych.

Bibliografia

[Ubelaker1989] Ubelaker DH. Human skeletal remains: Excavation, analysis, interpretation. 2nd Edition ed. Washington D.C.: Taraxacum 1989:118-9,28.

[Primorac1996] Primorac D, Andelinovic S, Definis-Gojanovic M, Drmic I, Rezic B, Baden MM, et al. Identification of war victims from mass graves in Croatia, Bosnia, and Herzegovina by the use of standard forensic methods and DNA typing. J Forensic Sci. 1996;41(5):891-4.

[Randerson2003] Randerson J. Srebrenica victims named at last. New Scientist. 2003;177(2385):6.

[Vastag2002] Vastag B. Out of tragedy, identification innovation. JAMA. 2002;288(10):1221-23.

[Wilson1989] Wilskon C. Written in blood: A history of forensic detection. Wellingborough, North Hamptomshire: Equation 1989.

[Rudnick1984] Rudnick SA. The identification of a murder victim using a comparison of the postmortem and antemortem dental records. J Forensic Sci, JFSCA. 1984 Jan 29(1):349-54.

[Nist] <http://nist.gov>, Ongoing Face Recognition Vendor Test (FRVT) <https://www.nist.gov/programs-projects/face-recognition-vendor-test-frvt-ongoing>, USA (stan na 2021/10/28).

[Biowiz] <https://ppbw.pl/biowiz-system-komputerowy-do-identyfikacji-biometrycznej-twarzy-i-sylwetki-sprawcow-przestepstw/> (stan na 2021/10/28)

[News2004] News. Computer-assisted facial identification. Significance. 2004;1(1):2-5.

[Evison2008] Evison MP, Bruegge RWV. The magna database: A database of threedimensional facial images for research in human identification and recognition. Forensic Sci Com April 2008.

[Godycka1956] Godycka M., Zarys antropometrii, Warszawa, 1956:12.

[Cole2002] Cole SA. Suspect identities: A history of fingerprinting and criminal identification. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press 2002:32-59.

[Iscan1993] Iscan M. Introduction of techniques for photographic comparison: potential and problems. In: Iscan M, Helmer R, eds. Forensic analysis of the skull. New York: Wiley-Liss 1993:57-70.

[Slama1980] Slama CC, ed. Manual of Photogrammetry. 4th ed. Falls Church: American Society of Photogrammetry 1980.

[Sharp1951] Sharp HO. Practical Photogrammetry. New York: The Macmillan Company 1951.

[Perspective2007] Perspective. 2007 Encyclopædia Britannica [cited 2007 18 September]; Available from: <http://www.search.eb.com/eb/article-9059357>

[Mikhail2001] Mikhail EM, Bethel JS, McGlone JC. Introduction to modern photogrammetry. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2001.

[McGlone2004] McGlone JC, Mikhail EM, Bethel J, eds. Manual of Photogrammetry 5th ed. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing 2004.

[Vanezis1996] Vanezis P, Lu D, Cockburn J, Gonzalez A, McCombe G, Trujillo O, et al. Morphological classification of facial feature in adult Caucasian males based on an assessment of photographs of 50 subjects. J Forensic Sci. 1996;41(5):786-91.

[Catterick1992] Catterick T. Facial measurements as an aid to recognition. Forensic Sci Int. 1992;56:23-7.

[Porter2000] Porter G, Doran G. An anatomical and photographic technique for forensic facial identification. Forensic Sci Int. 2000;114:97-105.

[SWGIT2005] SWGIT. Best practices for forensic image analysis. Forensic Sci Com October 2005.

[Shepherd2003] Shepherd R. Simpson's forensic medicine. 12th Edition ed. London: Arnold 2003:49-51.

[Mardia1996] Mardia KV, Coombes A, Kirkbride J, Linney A, Bowie JL. On statistical problems with face identification from photographs. J Appl Stat. 1996;23(6):655-75.

[Alessandrini2003] Alessandrini F, Cecati M, Pesaresi M, Turchi C, Carle F, Tagliabracci A. Fingerprints as evidence for a genetic profile: Morphological study on fingerprints and analysis of exogenous and individual factors affecting DNA typing. J Forensic Sci. 2003;48(3):586-92.

[Kolltveit1998] Kolltveit KM, Solheim T, Kvaal SI. Methods of measuring morphological parameters in dental radiographs Comparison between image analysis and manual measurements. Forensic Sci Int. 1998;94:87-95.

[Swift2003] Swift B, Ruttly GN. The human ear: It's role in forensic practice. J Forensic Sci. 2003;48(1):153-60.

- [Rogers2005] Rogers TL. Determining the sex of human remains through cranial morphology. *J Forensic Sci.* 2005;50(3):493-500.
- [Yoshino2002] Yoshino M, Noguchi K, Atsuchi M, Kubota S, Imaizumi K, Thomas CD, et al. Individual identification of disguised faces by morphometrical matching. *Forensic Sci Int.* 2002;127:97-103.
- [Donofrio2000] Donofrio LM. Fat distribution : A morphologic study of the aging face. *Dermatol Surg.* 2000;26(12):1107-12.
- [Reddy1973] Reddy KSN. Identification of dismembered parts: The medicolegal aspects of the Nagaraju Case. *Forensic Sci.* 1973;2:351-74.
- [Helmer2001] Helmer R, Gróner O. Vereinfachte Schädelidentifizierung nach dem Superprojektions verfahren mit Hilfe einer Video-Anlage. *Zeitschrift für Rechtsmedizin.* 1977;80(3):183-7.
- [Ghosh2001] Ghosh AK, Sinha P. An economised craniofacial identification system. *Forensic Sci Int.* 2001;117:109-19.
- [Yoshino1997] Yoshino M, Matsuda H, Kubota S, Imaizumi K, Miyasaka S, Seta S. Computer-assisted skull identification system using video superimposition. *Forensic Sci Int.* 1997;90:231-44.
- [Yoshino2000] Yoshino M, Matsuda H, Kubota S, Imaizumi K, Miyasaka S. Computerassisted facial image identification system using a 3-D physiognomic range finder. *Forensic Sci Int.* 2000;109:225-37.
- [Vanezis1996] Vanezis P, Brierley C. Facial image comparison of crime suspects using video superimposition. *Sci Justice.* 1996;36:27-34.
- [Shahrom1996] Shahrom AW, Vanezis P, Chapman RC, Gonzales A, Blenkinsop C, Rossi ML. Techniques in facial identification: computer-aided facial reconstruction using a laser scanner and video superimposition. *Int J Legal Med.* 1996;108:194-200.
- [Austin-Smith1994] Austin-Smith D, Maples WR. The reliability of skull/photograph superimposition in individual identification. *J Forensic Sci.* 1994;39(2):446-55.
- [Hołyst2010] Hołyst B., *Kryminalistyka*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010
- [Taylor2001] Taylor KT. *Forensic art and illustration*. Boca Raton: CRC Press LLC 2001.
- [George1993] George RM. Anatomical and artistic guidelines for forensic facial reconstruction. In: Iscan MY, Helmer RP, eds. *Forensic Analysis of the Skull*. New York: Wiley-Liss, Inc. 1993:215-27.

[BBC2000] Iceman keeps scientists guessing. BBC News 2000 1 March 2008 [cited; Available from: <http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/1077816.stm>

[www.iceman.it] www.iceman.it

[Vanezis2000] Vanezis P, Vanezis M, McCombe G, Niblett T. Facial reconstruction using 3-D computer graphics. *Forensic Sci Int.* 2000;108:81-95.

[Helmer1993] Helmer RP, Roohricht S, Petersen D, Mohr F. Assessment of the reliability of facial reconstruction. In: Iscan MY, Helmer RP, eds. *Forensic Analysis of the Skull*. New York: Wiley-Liss, Inc. 1993:229-46.

[Ellis1975] Ellis HD. Recognizing Faces. *Br J Psychol.* 1975;66(4):409-26.

[Bruce1986] Bruce V, Young A. Understanding face recognition. *Br J Psychol.* 1986;77:305-27.

[Bruce1986] Bruce V. Influences of familiarity on the processing of faces. *Perception.* 1986;15:387-97.

[Burton1999] Burton AM, Wilson S, Cowan M, Bruce V. Face recognition in poor-quality video: Evidence from security surveillance. *Psychol Sci.* 1999 May;10(3):243-8.

[Kemp1997] Kemp R, Towell N, Pike G. When seeing should not be believing: Photographs, credit cards and fraud. *App Cog Psychol.* 1997;11:211-22.

[Prabhakar2003] Prabhakar S, Pankanti S, Jain AK. Biometric recognition: Security and privacy concerns. *IEEE Security & Privacy.* 2003 March/April:33-42.

[Jain2003] Jain AK, Ross A, Prabhakar S. An introduction to biometric recognition. *IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology, Special Issue on Image and Video- Based Biometrics.* August 2003.

[Pankanti2000] Pankanti S, Bolle RM, Jain A. Biometrics: The future of identification. *Computer.* 2000 February;33(2):46-9.

[Hadley2004] Hadley C. Your personal passport. *EMBO reports.* 2004;5(2):124-6.

[Woodward2001] Woodward JD. And now, the good side of facial profiling. *The Washington Post.* 2001 February 4;Sect. B.04.

[Graham-Rowe2005] Graham-Rowe D. ID row bad news for transatlantic travellers. *New Scientist.* 2005 April 16(2495):23.

- [Grotta2001] Grotta SW. Bio-Keys - Fingerprint readers, retinal scanners, and facial recognition cameras are being used increasingly by businesses to keep intruders out of corporate networks. Is the future finally here? PC Magazine. 2001 June 5:163.
- [Phillips2000] Phillips PJ, Martin A, Wilson CL, Przybocki M. An introduction to evaluating biometric systems. Computer. 2000 February;33(2):56-63.
- [Pankanti2000] Pankanti S, Bolle RM, Jain A. Biometrics: The future of identification. Computer. 2000 February;33(2):46-9.
- [Hadley2004] Hadley C. Your personal passport. EMBO reports. 2004;5(2):124-6.
- [Briggs2002] Briggs B. Biometrics: Can we have a show of hands? Health Data Management. 2002;10(12):48.
- [Finger2005] Finger chopped off to beat car security. New Scientist. 2005 April 9(2494):4.
- [Prabhakar2003] Prabhakar S, Pankanti S, Jain AK. Biometric recognition: Security and privacy concerns. IEEE Security & Privacy. 2003 March/April:33-42.
- [Peacock2004] Peacock C, Goode A. Automatic forensic face recognition from digital images. Sci Justice. 2004;44(1):29-34.
- [Lu2003] Lu X, Jain AK. Resampling for face recognition. Proc of 4th Int'l Conf on Audio- and Video- Based Biometric Person Authentication (AVBPA); 2003 June 9-11; Guildford, UK; 2003. p. 869-77.
- [Daugman1997] Daugman J. Face and gesture recognition: Overview. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1997;19(7):675-6.
- [R&D2002] Biometrics use growing. R & D. July 2002;44(7):11.
- [Pentland2000] Pentland AS, Choudury T. Face recognition for smart environments. Computer. 2000;33(2):50-5.
- [United2003] Tampa's facial recognition project a flop. United Press International. 2003 August 20;Sect. 1008232w1871.
- [Hook1998] Hook P. Face to face identification. Police Magazine. 1998 October.
- [Newton2003] Newton E, Sweeney L, Malin B. Preserving privacy by de-identifying facial images. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, School of Computer Sciences, Technical Report, CMU-CS-03-119; 2003 March.

[Lu2003] Lu X, Wang Y, Jain AK. Combining classifiers for face recognition. IEEE International Conference on Multimedia & Expo; 2003 July 6-9; Baltimore, MD; 2003. p. 13-6.

[Huang2000] Huang FJ, Zhang H-J, Chen T, Zhou Z. Pose invariant face recognition. Fourth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition 2000 March 26-30; Grenoble, France; 2000.

[Chen2007] Chen Q, Cham W-k. 3D model based pose invariant face recognition from a single frontal view. Electronic Letters on Comp Vis Img Ana. 2007;6(1):13-26.

[Farkas1994] Farkas LG. Anthropometry of the head and face. Second edition ed. New York: Raven Press, Ltd. 1994.

[Waszkiewicz2012] Waszkiewicz P. Monitoring wizyjny miejsc publicznych w dużym mieście na przykładzie Warszawy. Próba analizy kosztów i zysków: PAN Archiwum Kryminologii Tom XXXIV/2012;

[Seattetimes.com2004] Seattetimes.com Man charged after missing girl's body found. [newspaper] 2004 [cited 2005 May 17]; Available from: <http://archives.seattletimes.nwsourc.com/cgi-bin/teaxis.cgi/web/vortex/display?slug=girl07&date=20040207&query=surveillance+video>

[Kasprzak2006] Kasprzak J., B. Młodziejowski, W. Brzęk, J. Moszczyński, „Kryminalistyka”. Wydawnictwo Difin, Warszawa 2006, s. 55

[www.sosnowiec.wyborcza.pl2019] www.sosnowiec.wyborcza.pl

[Foster2005] Foster M. New Orleans tries cameras to watch criminals. The Seattle Times. 2005 March 9.

[Lewis2004] Lewis DL. Surveillance video in law enforcement. J Forensic Ident. 2004;54(5):547-59.

[Hogan2003] Hogan J. Your every move will be analysed. New Scientist. 2003 12 July(2403):4

[Aldridge1994] Aldridge J. Effective CCTV security and safety systems. CCTV Today. 1994;Feb:12-7.

[SWGIT2005] SWGIT. Recommendations and guidelines for using closed-circuit television security systems in commercial institutions: Part 1. Forensic Sci Com January 2005.

[microscopemicroscope.org2007] Image Resolution, size and compression: What does it really mean? [cited 2007 May 8]; resolution]. Available from: <http://www.microscopemicroscope.org/imaging/image-resolution.htm>

[SWGIT2003] SWGIT. Recommendations and guidelines for the use of digital image processing in the criminal justice system. Forensic Sci Com January 2003.

[Bowers2002] Bowers CM, Johansen RJ. Photographic evidence protocol: The use of digital imaging methods to rectify angular distortion and create life size reproductions of bite mark evidence. J Forensic Sci. 2002;47(1):178-85.

[SWGIT2005] SWGIT. Best practices for documenting image enhancement. Forensic Sci Com July 2005.

[Sheldon1970] Sheldon W., Atlas of Men: A Guide for Somatotyping the Adult Image of All Ages, *New York* 1970.

[Alemany2021] S. Alemany i in., Anthropometric survey of the Spanish female population aimed at the apparel industry <https://www.3dbodyscanning.org/cap/papers/2010/10307_11alemany.pdf>, 21 stycznia 2021 r.;

[Vinué2015] G. Vinué, I. Epifanio, S. Alemany, Archetypoids: A new approach to define representative archetypal data, “Computational Statistics and Data Analysis” 2015, Vol. 87, Iss. C.

[Jee2016] S.C. Jee, M.H. Yun, An anthropometric survey of Korean hand and hand shape types, “International Journal of Industrial Ergonomics” 2016, Vol. 53.

[Kim2014] N.S. Kim, W.H. Do, Classification of Elderly Women’s Foot Type, “*Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*” 2014, Vol. 38.

[Sarakon2021] P. Sarakon, T. Charoenpong, S. Charoensiriwath, Face shape classification from 3D human data by using SVM, <https://www.researchgate.net/publication/282382114_Face_shape_classification_from_3D_human_data_by_using_SVM>, 22 stycznia 2021 r.

[Preston1999] T.A. Preston, M. Singh, Redintegrated Somatotyping, “Ergonomics” 1972, Vol. 15; Y.-L. Lin, K.-L. Lee, Investigation of anthropometry basis grouping technique for subject classification, “Ergonomics” 1999, Vol. 42.

[Ritz-Timme2011] S. Ritz-Timme i in., A new atlas for the evaluation of facial features: Advantages, limits, and applicability, “International Journal of Legal Medicine” 2011, Vol. 125;

[Massidda2013] M. Massidda i in., Somatotype of elite Italian gymnasts, “Coll Antropol” 2013, Vol. 37;

[Malousaris2008] G.G. Malousaris i in., Somatotype, size and body composition of competitive female volleyball players, “Journal of Science and Medicine in Sport” 2008, Vol. 11;

- [Koleva2002] M. Koleva, A. Nacheva, M. Boev, Somatotype and disease prevalence in adults, "Reviews on Environmental Health" 2002, Vol. 17, Iss. 1.
- [Damasio1986] A.R. Damasio, Prosopagnosia, "Trends Neurosciente" 1985, Vol. 8; V. Bruce, A. Young, Understanding face recognition, "British Journal of Psychology" 1986, Vol. 77, No. 3.
- [Kanwisher1997] N. Kanwisher, J. McDermott, M.M. Chun, The Fusiform Face Area: A module in human extrastriate cortex specialized for the perception of faces, "Journal of Neuroscience" 1997, Vol. 17, Iss. 11.
- [Bruce2012] V. Bruce, A. Young, Face perception, New York 2012.
- [Kong2005] S.G. Kong i in., Recent advances in visual and infrared face recognition — A review, "Computer Vision and Image Understanding" 2005, Vol. 97.
- [Tavares2016] G. Tavares, A. Mourão, J. Magalhães, Crowdsourcing facial expressions for affective-interaction, "Computer Vision and Image Understanding" 2016, Vol. 147.
- [Buckingham2006] G. Buckingham i in., Visual adaptation to masculine and feminine faces influences generalized preferences and perceptions of trustworthiness, "Evolution and Human Behavior" 2006, Vol. 27, Iss. 5;
- [Boberg2008] M. Boberg, P. Piippo, E. Ollila, Designing Avatars [w:] Proceedings of the 3rd International Conference on Digital Interactive Media in Entertainment and Arts, 10–12 September 2008, Athens Greece 2008;
- [Rojas2014] M.M. Rojas, Automatic prediction of facial trait judgments: Appearance vs. structural models, "PLoS One" 2011, Vol. 6, Iss. 8; A. Laurentini, A. Bottino, Computer analysis of face beauty: A survey, "Computer Vision and Image Understanding", 2014, Vol. 125.
- [Li2005] S.Z. Li, A.K. Jain, Handbook of Face Recognition, New York 2005.
- [Vanezis1996] P. Vanezis i in., Morphological classification of facial features in adult Caucasian males based on an assessment of photographs of 50 subjects, "The Journal of Forensic Sciences" 1996, Vol. 41.
- [Asmann2009] S. Asmann i in. Anthropological atlas of male facial features, Frankfurt 2007; [Ohlrogge2009] S. Ohlrogge i in., Anthropological atlas of female facial features, Frankfurt 2009.
- [Tamir2011] A. Tamir A., Numerical Survey of the Different Shapes of the Human Nose, "Journal of Craniofacial Surgery" 2011, Vol. 22, Iss. 3.

[Tamir2013] A. Tamir, Numerical Survey of the Different Shapes of Human Chin, “Journal of Craniofacial Surgery” 2013, Vol. 24, Iss. 5.

[Zhao2003] W. Zhao i in., Face recognition: a literature survey, “ACM Computing Surveys” 2003, Vol. 35, Iss. 4.

[Kukula2004] E.P. Kukula i in., Effects of illumination changes on the performance of geometrix facevision/spl reg/ 3d frs. [w:] 38th Annual 2004 International Carnahan Conference on Security Technology, Albuquerque, 11–14 October 2004 NM, USA 2004.

[Gupta2007] S. Gupta, M.K. Markey, A.C. Bovik, Advances and challenges in 3D and 2D+3D human face recognition [w:] E.A. Zoeller (eds.), Pattern recognition research horizons, New York 2007.

[Phillips2003] P.J. Phillips i in., Face recognition vendor test 2002 evaluation report, Gaithersburg 2003.

[Penev1996] P.S. Penev, J.J. Atick, Local feature analysis: a general statistical theory for object representation, “Network: Computation in Neural Systems” 1996, Vol. 7, No. 3.

[Wiskott1997] L. Wiskott i in., Face recognition by elastic bunch graph matching, “IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence” 1997, Vol. 19, Iss. 7.

[Hüsken2005] M. Hüsken i in., Strategies and benefits of fusion of 2d and 3d face recognition, “Computer Vision and Pattern Recognition” 2005, Vol. 1

[Turku1991] A. Turk, A.P. Pentland, Face recognition using eigenfaces [w:] IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 3–6 June 1991, Maui, HI, USA 1991.

[Deshpande2020] M. Deshpande, Face Recognition with Eigenfaces, <<https://pythonmachinelearning.pro/face-recognition-with-eigenfaces/>>, 8 grudnia 2020 r.

[Jian2004] Y. Jian i in., Two-dimensional PCA: A new approach to appearance-based face representation and recognition, “IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence” 2004, Vol. 26, Iss. 1.

[Hyvärinen2000] A. Hyvärinen, E. Oja, Independent Component Analysis: Algorithms and Applications, “Neural Networks” 2000, Vol. 13, Iss. 4–5.

[www.ncss.com2021] Chapter 435, Multidimensional Scaling, <<https://www.ncss.com/wp->

content/themes/ncss/pdf/Procedures/NCSS/Multidimensional_Scaling.pdf>, 19
stycznia 2021 r.

[Lee1999] D.D. Lee, H.S. Seung, Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization, "Nature" 1999, Vol. 401.

[Belhumeur1997] P.N. Belhumeur, J.P. Hespanha, D.J. Kriegman, Eigenfaces vs. Fisherfaces: Recognition using class specific linear projection, "IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence" 1997, Vol. 19, Iss. 7.

[Kar2013] A. Kar i in., High performance human face recognition using Gabor based pseudo hidden Markov model, "International Journal of Applied Evolutionary Computation" 2013, Vol. 4, Iss. 1.

[Friedman1989] J.H. Friedman, Regularized discriminant analysis, "Journal of the American Statistical Association" 1989, Vol. 84, No. 405.

[Hastie1995] T. Hastie, A. Buja, R. Tibshirani, Penalized discriminant analysis, "Annals of Statistics" 1995, Vol. 23, No. 1.

[Liu2004] W. Liu, Null space approach of fisher discriminant analysis for face recognition [w:] D. Maltoni, A.K. Jain (eds.), Biometric Authentication, Proceedings of the ECCV 2004 International Workshop on Biometric Authentication, Prague, Czech Republic, 15 May 2004, Berlin–Heidelberg 2004.

[Wang2004] X. Wang, X. Tang, Dual-space linear discriminant analysis for face recognition [w:] Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington, DC, USA, 27 June–2 July 2004.

[Lu2021] J.W. Lu, K.N. Plataniotis, A.N. Venetsanopoulos, Boosting linear discriminant analysis for face recognition, <https://www.researchgate.net/profile/Konstantinos_Plataniotis/publication/224744759_Boosting_linear_discriminant_analysis_for_face_recognition/links/0f31753a4351c1151c000000/Boosting-linear-discriminant-analysis-for-face-recognition.pdf>, 22
stycznia 2021 r.

[Nhat2005] V.D.M. Nhat, S. Lee, Block LDA for face recognition [w:] J. Cabestany, A. Prieto, F. Sandoval (eds.), Computational Intelligence and Bioinspired Systems. Proceedings of the 8th International Work-Conference on Artificial Neural Networks, Barcelona, Spain, 8–10 June 2005, Barcelona 2005.

[Zhou2004] D. Zhou, X. Yang, Face recognition using enhanced fisher linear discriminant model with Facial combined feature [w:] C. Zhang, H.W. Guesgen, W.K. Yeap (eds.), PRICAI 2004: Trends in Artificial Intelligence, Proceedings of the 8th Pacific Rim International, Berlin–Heidelberg 2004.

[Visani2021] Visani M., Garcia C., Jolion J.M., Normalized radial basis function networks and bilinear discriminant analysis for face recognition, <https://www.researchgate.net/publication/4215341_Normalized_Radial_Basis_Function_Networks_and_Bilinear_Discriminant_Analysis_for_Face_Recognition>, 22 stycznia 2021 r.

[Cevikalp2005] H. Cevikalp i in., Discriminative common vectors for face recognition, "IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence" 2005, Vol. 27, Iss. 1.

[Maurer2005] T. Maurer i in., Performance of Geometrix Active IDTM 3D Face Recognition Engine on the FRGC Data [w:] Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 21–23 September 2005 San Diego, CA, USA 2005.

[Hoffmann2007] H. Hoffmann, Kernel PCA for novelty detection, "Pattern Recognit" 2007, Vol. 40, Iss. 3.

[Shawe-Taylor2004] J. Shawe-Taylor, N. Cristianini, Kernel Methods for Pattern Analysis, New York 2004.

[Vapnik1995] V.N. Vapnik, The Nature of Statistical Learning Theory, New York 1995.

[Guo2000] G. Guo, S.Z. Li, K. Chan, Face recognition by support vector machines [w:] Proceedings Fourth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, 28–30 March 2000, Grenoble, France 2000.

[Bach2002] F. Bach, M. Jordan, Kernel independent component analysis, "Journal of Machine Learning Research" 2002, Vol. 3.

[Martiriggiano2002] T. Martiriggiano i in., Face Recognition by Kernel Independent Component Analysis, "IEEE Transactions on Neural Networks" 2002, Vol. 13, Iss. 6.

[Weinberger2021] K.Q. Weinberger, L.K. Saul, Unsupervised learning of image manifolds by semidefinite programming, <https://repository.upenn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1000&context=cis_papers>, 22 stycznia 2021 r.

[Yang2002] Yang M.H., Face recognition using extended isomap [w:] Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, Rochester, USA, 22–25 September 2002, New York 2002.

[Socolinsky2004] D.A. Socolinsky, A. Selinger, Thermal face recognition in an operational scenario, „Conference Proceedings" 2004, Vol. 2.

[He2003] X. He i in., Learning a locality preserving subspace for visual recognition, „Conference Proceedings” 2003, Vol. 1.

[Wang2009] Q. Wang, J. Li, Combining local and global information for nonlinear dimensionality reduction, “Neurocomputing” 2009, Vol. 72, Iss. 10–12.

[Raducanu2021] B. Raducanu, F. Dornaika, Dynamic facial expression recognition using laplacian eigenmaps-based manifold learning, <http://www.cvc.uab.es/~bogdan/Publications/raducanu_ICRA2010.pdf>, 22 stycznia 2021 r.

[Lawrence1997] S. Lawrence i in., Face recognition: A convolutional neural-network approach, “IEEE Transactions on Neural Network” 1997, Vol. 8, Iss. 1.

[Duffner2021] S. Duffner, C. Garcia, Face recognition using non-linear image reconstruction <https://www.researchgate.net/publication/4308236_Face_recognition_using_non-linear_image_reconstruction>, 22 stycznia 2021 r.; T. Zhang i in., Generalized discriminant analysis: A matrix exponential approach, “IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence” 2010, Vol. 40, Iss. 1.

[Trigueros2021] D.S. Trigueros, L. Meng, M. Hartnett, Face recognition: From traditional to deep learning methods, <https://www.researchgate.net/profile/Daniel_Saez_Trigueros2/publication/328685305_Face_Recognition_From_Traditional_to_Deep_Learning_Methods/links/5d19cd21a6fdcc2462b4a85f/Face-Recognition-From-Traditional-to-Deep-Learning-Methods.pdf>, 22 stycznia 2021 r.

[Lee1996] T.S. Lee, Image representation using 2d gabor wavelets, ”IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence” 1996, Vol. 18, Iss. 10.

[Monza2008] Monzo D , HOG-EBGM vs. Gabor-EBGM [w:] 15th IEEE International Conference on Image Processing, ICIP 2008, Malta 2008.

[Seyed2018] M. Seyed, Geometric feature descriptor and dissimilarity-based registration of remotely sensed imagery, <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200676>>, 19 lipca 2018 r.

[Yang2018] Z. Yang Z. i in., Single Image 3D Face Reconstruction Based on Statistical Model, “Journal of Physics: Conference Series” 2018, Vol. 1087, Iss. 5.

[Brunelli1993] R. Brunelli, T. Poggio, Face recognition: Features versus templates, “IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence” 1993, Vol. 15, No. 10.

- [Viola2004] P. Viola, M.J. Jones, Robust real-time face detection, “International Journal of Computer Vision” 2004, Vol. 57, No. 2.
- [Lowe2004] D.G. Lowe, Distinctive image features from scale-invariant keypoints, “International Journal of Computer Vision” 2004, Vol. 60.
- [Ahonen2004] T. Ahonen T., A. Hadid, M. Pietikainen, Face recognition with local binary patterns. In Computer Vision — ECCV 2004, Berlin–Heidelberg 2004.
- [Ojansivu2008] V. Ojansivu, J. Heikkila, Blur insensitive texture classification using local phase quantization [w:] A. Elmoataz i in. (eds.), Image and Signal Processing. 3rd International Conference, ICISP 2008, Cherbourg-Octeville, France, July 1–3, 2008. Proceedings, Berlin–Heidelberg 2008.
- [Chen2010] J. Chen i in., WLD: A robust local image descriptor, “IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence” 2010, Vol. 32, Iss. 9.
- [Kannala2012] J. Kannala, E. Rahtu, BSIF: Binarized statistical im age features [w:] Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition ICPR, 11–15 November 2012 Tsukuba Science City, Japan 2012.
- [Lal2018] M. Lal i in., Study of Face Recognition Techniques: A Survey, “International Journal of Advanced Computer Science and Applications” 2018, Vol. 9, Iss. 6.
- [Jameel2015] S. Jameel, Face recognition system using PCA and DCT in HMM, “International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering” 2015, Vol. 4, Iss. 1.
- [Chihaoui2015] M. Chihaoui i in., Face recognition using HMM-LBP [w:] A. Abraham i in., Hybrid Intelligent Systems, Cham 2015.
- [Hashemi2015] V.H. Hashemi, A.A. Gharahbagh, A novel hybrid method for face recognition based on 2d wavelet and singular value decomposition, “American Journal of Networks and Communications” 2015, Vol. 4, Iss. 4.
- [Urtasun2007] R. Urtasun, T. Darrell, Discriminative Gaussian process latent variable model for classification [w:] Z. Ghahramani, Proceedings of the 24th international conference on Machine learning, Corvallis, OR, USA, 2007, New York 2007.
- [Wang2015] W. Wang i in., Discriminant analysis on riemannian manifold of Gaussian distributions for face recognition with image sets, „Conference Proceedings” 2015, Vol. 1.
- [Gao2015] Y. Gao, H.J. Lee, Viewpoint unconstrained face recognition based on affine local descriptors and probabilistic similarity, “Journal of Information Processing Systems” 2015, Vol. 11, Iss. 4.

[Cho2014] H. Cho i in., An efficient hybrid face recognition algorithm using PCA and GABOR wavelets, “International Journal of Advanced Robotic Systems” 2014, Vol. 11, Iss. 1.

[Qasim2014] A. Qasim, P. Prashan, V. Peter, A hybrid feature extraction technique for face recognition, “International Proceedings of Computer Science and Information Technology” 2014, Vol. 1.

[Nebti2015] S. Nebti, B. Fadila, Combining classifiers for enhanced face recognition, “Advances in Information Science and Computer Engineering” 2015, Vol. 82.

[Singha2014] M. Singha, D. Deb, S. Roy, Hybrid feature extraction method for partial face recognition, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering 2014, Vol. 4.

[Sompura2015] M. Sompura, V. Gupta, An efficient face recognition with ANN using hybrid feature extraction methods “International Journal of Computer Applications” 2015, Vol. 117, No. 17.

[Kim2013] D.J. Kim, S.H. Lee, M.Q. Shon, Face recognition via local directional pattern, “International Journal of Security and its Applications” 2013, Vol. 7, Iss. 2.

[Wu2014] F. Wu, Face recognition based on wavelet transform and regional directional weighted local binary pattern, “Journal of Multimedia” 2014, Vol. 9, No. 8.

[Huang2014] D. Huang i in., 3D face analysis: Advances and perspectives [w:] Z. Sun i in. (eds.), Biometric Recognition: 9th Chinese Conference on Biometric Recognition, CCBR 2014, Shenyang, China, November 7–9, 2014, Proceedings, New York 2014;

[Drira2013] H. Drira i in., 3D face recognition under expressions, occlusions, and pose variations, “IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence” 2013, Vol. 35; [Huang2009] D. Huang i in., 3-D face recognition using eLBP-based facial description and local feature hybrid matching “IEEE Transactions on Information Forensics and Security”, Vol. 7; S. Said i in., Fast and efficient 3D face recognition using wavelet networks [w:] 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 7–10 November 2009, Cairo, Egypt 2009;

[Borgi2013] M.A. Borgi, M. El’Arbi, C.B. Amar C.B., Wavelet network and geometric features fusion using belief functions for 3D face recognition [w:] R. Wilson i in. (eds.), Computer Analysis of Images and Patterns. Proceedings of the 15th International Conference, CAIP 2013, York, UK, 27–29 August 2013, Berlin–Heidelberg 2013;

[Soltana2021] W.B. Soltana i in., Multi library wavelet neural networks for 3D face recognition using 3D facial shape representation, <<https://zenodo.org/record/41296#.YA6mM3ZKh9M>>, 25 stycznia 2021 r.

[Bowyer2006] K.W. Bowyer, K. Chang, P. Flynn, A survey of approaches and challenges in 3D and multimodal 3D+2D face recognition, "Computer Vision and Image Understanding"2006, Vol. 101, Iss. 3.

[Lakshmiprabha2015] N.S. Lakshmiprabha, J. Bhattacharya, S. Majumder, Face recognition using multimodal biometric features [w:] Proceedings of the IEEE International Conference on Image Information Processing (ICIIP), 3–5 November 2011 Shimla, India 2011; S. Radhey, S.Y. Narain, Identifying individuals using multimodal face recognition techniques, "Procedia Computer Science" 2015, Vol. 48.

[Balaban2015] S. Balaban , Deep learning and face recognition: The state of the art, "Proceeding SPIE 2015", Vol. 9457.

[Li2021] S.Z. Li i in., Illumination invariant face recognition using near-infrared images, "IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence" 2007, Vol. 29; D. Huang, Y. Wang, Y. Wang, A robust method for near infrared face recognition based on extended local binary pattern, <<http://rendicahya.lecture.ub.ac.id/files/2018/03/A-Robust-Method-for-Near-Infrared-Face-Recognition-Based-on-Extended-Local-Binary-Pattern.pdf>>, 22 stycznia 2021 r.

[Friedrich2003] G. Friedrich, Y. Yeshurun, Seeing people in the dark: Face recognition in infrared images [w:] H.H. Bülthoff i in. (eds.), Biologically Motivated Computer Vision, Berlin 2003.

[Jeni2012] L.A. Jeni, H. Hashimoto, T. Kubota, Robust facial expression recognition using near infrared cameras, "*Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*" 2012, No. 16.

[Wang2009] R. Wang i in., Multimodal biometrics based on near-infrared face. [w:] K.N. Plataniotis, N.V. Boulgouris, E. Micheli-Tzanakou (eds.), Biometrics: Theory, Methods, and Applications, New Jersey 2009.

[Ngiam2011] J. Ngiam i in., Multimodal deep learning [w:] Proceedings of the 28th International Conference on Machine Learning, ICML 2011, 28 June–2 July 2011, Bellevue, WA, USA 2011.

[Rodriguez2007] J.T. Rodriguez, 3D Face Modelling for 2D+3D Face Recognition, Surrey University, Guildford, UK, 2007, praca doktorska.

[Koppen2018] P. Koppen i in., Gaussian mixture 3D morphable face model, "Pattern Recognition" 2018, Vol. 74.

[Suikerbuik2021] C.A.M. Suikerbuik i in., Automatic feature detection in 3D human body scans, <https://www.researchgate.net/publication/46659540_Automatic_Feature_Detection_in_3D_Human_Body_Scans>, 25 stycznia 2021 r.

[Gordon1991] G.G. Gordon, Face Recognition Based on Depth Maps and Surface Curvature, "Geometric Methods in Computer Vision" 1991, Vol. 1570.

[Moreno2003] A.B. Moreno i in., Face Recognition using 3D Surface-Extracted Descriptors, "Irish Machine Vision and Image Processing Conference Proceedings" 2003, Vol. 2.

[Xu2004] C. Xu i in., Automatic 3D Face recognition combining global geometric features with local shape variation information [w:] Proceedings of the IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, 19 May 2004, Seoul, South Korea 2004.

[Chua1997] Zob. C.S. Chua, R. Jarvis, Point Signatures: A New Representation for 3D Object Recognition, "International Journal on Computer Vision" 1997, Vol. 25; C.S. Chua, F. Han, [Ho2000] Y.K. Ho, 3D human face recognition using point signature [w:] Proceedings Fourth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, 28–30 March 2000, Grenoble, France 2000.

[Douros2021] I. Douros, B.F. Buxton, Three-Dimensional Surface Curvature Estimation using Quadric Surface Patches, <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.98.7059&rep=rep1&type=pdf>>, 25 stycznia 2021 r.

Three-Dimensional Surface Curvature Estimation using Quadric Surface Patches.

[Robinette2004] K.M. Robinette, An Alternative 3D descriptor for database mining [w:] SAE International, Proceedings of the Digital Human Modelling Conference, Pittsburgh 2004.

[Wong2004] H.S. Wong, K.K.T. Cheung, H.S. Ip Horace, 3D head model classification by evolutionary optimization of the extended Gaussian image representation, "Pattern Recognition" 2004, Vol. 37.

[Papatheodorou2004] T. Papatheodorou, D. Rueckert, Evaluation of automatic 4D Face recognition using surface and texture registration [w:] Proceedings of the IEEE International Conference in Automatic Face and Gesture Recognition, 19 May 2004, Seoul, South Korea 2004.

[Beumier2000] C. Beumier, M. Acheroy, Automatic 3D face authentication, "Image and Vision Computing" 2000, Vol. 18, No. 4.

[Beumier2001] C. Beumier, M. Acheroy, Face verification from 3D and grey level clues, "Pattern Recognition Letters" 2001, Vol. 22.

[Wu2003] Y. Wu, G. Pan, Z. Wu, Face Authentication Based on Multiple Profiles Extracted from range data [w:] J. Kittler, S.M. Nixon (eds.), Proceedings of the Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication, Guildford 2003.

[Malinowski1989] red. A. Malinowski, J. Strzałko: Antropologia, PWN, Warszawa – Poznań 1989.

[Fieller2006] Fieller N. Statistical facial identification. 2006 [cited 2007 12 September]; Available from: <http://nickfieller.staff.shef.ac.uk/seminars/faces04-10-06.pdf>

[Purkait2004] Purkait R. Anthropometric landmarks: How reliable are they? Anthropometric landmarks. Med Leg Update. 2004;4(4):133-40.

[Evison2008] Evison MP, Bruegge RWV. The magna database: A database of threedimensional facial images for research in human identification and recognition. Forensic Sci Com April 2008.

[Craw1999] Craw I, Costen N, Kato T, Akamatsu S. How should we represent faces for automatic recognition. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1999 Aug 1999;21(8):725-35.

[Okada1999] Okada K, Malsburg Cvd, Akamatsu S. A pose-invariant face recognition system using linear pemap model. In proceedings of IEICE Workshop of Human Information Processing; 1999; Okinawa; 1999. p. 7-12.

[Kolar1997] Kolar JC, Salter EM. Craniofacial anthropometry Practical measurement of the head and face for clinical, surgical and research use. Springfield, Illinois: Charles C Thomas 1997.

[Halberstein2001] Halberstein RA. The application of anthropometric indices in forensic photography: Three case studies. J Forensic Sci. 2001;46(6):1438-41.

[Gimp] <https://www.gimp.org/> w wersji 2.10.24

[Microsoft] <https://www.microsoft.com/>

[Siebert2000] Siebert JP, Marshall SJ. Human body 3D imaging by speckle texture projection photogrammetry. Sensor Review. 2000;20(3):218-26.

[Urquhart1993] Urquhart CW, Siebert JP. Towards real-time dynamic close range photogrammetry. SPIE Videometrics II. Boston, USA 1993.

[Hirayama2007] Hirayama T, Iwai Y, Yachida M. Integration of facial position estimation and person identification for face authentication. *Syst Comp Jpn.* 2007;38(5):43-58.

[Rowley2001] Rowley AG. Evaluating uncertainty for laboratories: a practical guide and handbook; 2001 January.

[C3DUG] C3D.ORG. n.d. *The C3D File Format: A Technical User Guide*. [online] https://www.c3d.org/docs/C3D_User_Guide.pdf [Dostęp 4 January 2022].

[Arun1987] K. S. Arun, T. S. Huang i S. D. Blostein. Least-Squares Fitting of Two 3-D Point Sets. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-9, no. 5, pp. 698-700, Sept. 1987, doi: 10.1109/TPAMI.1987.4767965.

[Besl1992] P. J. Besl i N. D. McKay. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, no. 2, pp. 239-256, Feb. 1992, doi: 10.1109/34.121791.[Eggert1997] Eggert D.W., Lorusso A., Fisher R.B. Estimating 3-D rigid body Transformations: a comparison of four major algorithms. *Machine Vision and Applications* (1997) 9: 272–290, Germany 1997.

[Schonemann1966] Schönemann P.H. A generalized solution of the orthogonal Procrustes problem. *Psychometrika* 31:1–10, USA 1966.

[Eberly2020] Eberly D. Euler Angle Formulas <https://www.geometrictools.com/> , USA 2020

[Apache2021]<https://commons.apache.org/proper/commons-math/userguide/leastsquares.html>, 2021

[UODO] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/679 z dnia 27 kwietnia 2016 r. w sprawie ochrony osób fizycznych w związku z przetwarzaniem danych osobowych i w sprawie swobodnego przepływu takich danych oraz uchylenia dyrektywy 95/46/WE (ogólne rozporządzenia o ochronie danych) <https://www.uodo.gov.pl/pl/131/224>

[UoP] Ustawa o Policji z dnia 6 kwietnia 1990 r. Dz. U. z 2021 r. poz. 1882

[Gloor1980] Gloor PA. Bertillon's method and anthropological research; a new use for old anthropometric files. *J Forensic Sci Society.* 1980;20:99-101

[Pęszor2016] Pęszor D., Staniszewski M., Wojciechowska M. Facial Reconstruction on the Basis of Video Surveillance System for the Purpose of Suspect Identification. Nguyen N.T., Trawiński B., Fujita H., Hong TP. (eds) *Intelligent Information and Database Systems. ACIIDS 2016. Lecture Notes in Computer Science*, vol 9622. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49390-8_46