

Politechnika Łódzka
Katedra Mikroelektroniki
i Technik Informatycznych

**Zaawansowane metody akwizycji próbek
biometrycznych dla niekooperacyjnych
systemów uwierzytelniania
(streszczenie)**

mgr inż. Damian Kacperski

Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Napieralski
Współpromotor: dr inż. Kamil Grabowski

Łódź, 2019

Spis treści

1	WPROWADZENIE	2
1.1	Motywacja	2
1.2	Cel i zakres pracy	3
1.3	Tezy	4
2	SYSTEMY IDENTYFIKACJI BIOMETRYCZNEJ O ZMNIEJSZONEJ KOOPERACJI PODMIOTÓW UWIERZYTELNIANYCH	5
2.1	Wymagania dotyczące akwizycji zdjęć na potrzeby identyfikacji biometrycznej	5
2.1.1	Akwizycja danych biometrycznych twarzy oraz okolic oka	6
2.1.2	Akwizycja danych biometrycznych tęczówki oka	6
2.1.3	Warunki oświetleniowe	7
2.2	Metodyka akwizycji danych biometrycznych	7
3	KONSTRUKCJA BRAMKI IDENTYFIKACJI BIOMETRYCZNEJ	9
3.1	Wprowadzenie	9
3.2	Realizacja	10
3.2.1	System szerokiego kąta widzenia WFOV	10
3.2.2	Obiektiw akwizycyjny NFOV	10
3.2.3	System doświetlania podczerwienią i wyzwalaniem kamer systemów wizyjnych	12
3.2.4	Jednostka Centralna	12
3.2.5	Oprogramowanie bazowe	12
3.3	Uzyskane rezultaty	15
4	KONSTRUKCJA STANOWISKA AKWIZYCJI DANYCH REJESTRACYJNYCH	16
5	AKWIZYCJA ZDJĘĆ TWARZY PODMIOTÓW W WARUNKACH O ZMNIEJSZONEJ KOOPERACJI	17
5.1	Wprowadzenie	17
5.1.1	Odnajdywanie ruchomych elementów obrazu (A)	17
5.1.2	Przewidywanie pozycji podmiotów (B)	18
5.1.3	Wyznaczanie obszarów poszukiwań (C)	18
5.1.4	Eliminacja obszarów nadmiarowych (D)	19
5.1.5	Odnajdywanie twarzy (E)	19
5.1.6	Znajdowanie odpowiadających twarzy (F)	19
5.1.7	Aktualizacja danych śledzenia (G)	21
6	ZBIORY DANYCH TESTOWYCH	22
6.1	Baza danych COMPACT	22
6.2	Baza danych COMPACT tracking	23
7	TESTY SYSTEMU	25
7.1	Analiza funkcjonowania systemu akwizycji danych biometrycznych	25
7.1.1	Analiza jakości pozyskiwanych obrazów twarzy	25
7.1.2	Analiza jakości pozyskiwanych obrazów tęczówki	25
7.1.3	Skuteczność identyfikacji realizowanej w oparciu o pozyskane próbki biometryczne	26
7.1.4	Analiza właściwości dynamicznych obiektu akwizycyjnego	26
7.2	Algorytm śledzenia i detekcji podmiotów	27
7.2.1	Odnajdywanie ruchomych elementów obrazu	28
7.2.2	Przewidywanie pozycji podmiotów	28
7.2.3	Wyznaczanie obszarów poszukiwań	28
7.2.4	Znajdowanie odpowiadających twarzy	29
8	PODSUMOWANIE I WNIOSKI	31

Rozdział 1

WPROWADZENIE

Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat zaobserwować można znaczny rozwój systemów uwierzytelniania osób opartych na biometrii. Obecnie stosowane algorytmy identyfikacji pozwalają na określanie tożsamości ze skutecznością przekraczającą 99% [1]. Do poprawnego funkcjonowania wymagają jednak wysokiej jakości danych biometrycznych.

Dotychczas, większość realizacji systemów rozpoznawania oparta była na ścisłej współpracy osoby uwierzytelnianej z systemem identyfikacji. W ten sposób pozyskiwanie próbek biometrycznych było znacznie uproszczone i ograniczone do np. umieszczenia głowy na statywie kamery akwizycyjnej w celu pozyskania obrazu tęczówki oka, czy bezpośrednim umieszczeniu palca na czytniku linii papilarnych. W ten sposób uzyskiwano dużą powtarzalność otrzymywanych danych biometrycznych oraz niską zawartość czynników degradacji utrudniających sam proces identyfikacji tj. odmienne pozy osoby na pozyskiwanych obrazach, zmienna mimika, czy zmieniające się warunki oświetleniowe. Z tego powodu rozwiązania te zapewniały wysoką skuteczność funkcjonowania i są wciąż powszechnie stosowane. Ich działanie wiąże się jednak z wieloma ograniczeniami takimi jak długi czas uwierzytelniania pojedynczego podmiotu, czy nawet konieczność posiadania wiedzy o sposobie realizacji uwierzytelniania przez dane urządzenie biometryczne. Skutkuje to tym samym bardzo ograniczoną wydajnością tychże rozwiązań.

W ostatnich latach można natomiast zaobserwować trend do realizacji systemów biometrycznych o zmniejszonej kooperacji. W ten sposób podejmowane są próby maksymalnego ograniczania interakcji z osobami w trakcie ich uwierzytelniania. Próbkę biometryczną pozyskiwane są w sposób automatyczny, bez wymuszania od podmiotów czynności usprawniających proces akwizycji. Niestety pomimo istnienia rozwiązań, realizujących idee systemów o obniżonej kooperacji, ich możliwości są w dalszym ciągu znacznie ograniczone. Rozwiązania te w znaczny sposób ograniczyły wymaganą interakcję z podmiotami uwierzytelnianymi, jednak szybkość akwizycji, czy jakość pozyskiwanych próbek biometrycznych wciąż pozostawia wiele do życzenia. Przeprowadzona przez Autora, wstępna analiza, mająca na celu zidentyfikowanie czynników ograniczających wydajność systemów akwizycji danych biometrycznych dedykowanych dla warunków o obniżonej kooperacji podmiotów uwierzytelnianych, wskazała ograniczoną wydajność stosowanych rozwiązań pozyskiwania danych biometrycznych. Większość przeanalizowanych rozwiązań oparta była bowiem na zastosowaniu przestarzałych technologicznie kamer PTZ, dostępnych na rynku w prawie niezmienionej formie (konstrukcja mechaniczna) od kilkudziesięciu lat. Konstrukcje autorskie realizowane były natomiast zazwyczaj w oparciu o równie wolne mechanizmy wykorzystujące silniki krokowe. Przekonało to Autora do poszukiwania zupełnie odmiennych rozwiązań umożliwiających w przyszłości realizację zaawansowanych systemów akwizycji wyróżniających się wysoką precyzją i szybkością pozyskiwania danych biometrycznych.

1.1 Motywacja

Pomimo istnienia rozwiązań, realizujących idee systemów identyfikacji biometrycznej o zmniejszonej kooperacji, ich możliwości są w dalszym ciągu znacznie ograniczone. Rozwiązania te w znaczny sposób ograniczyły wymaganą interakcję z osobą uwierzytelnianą, jednakże szybkość akwizycji oraz jakość pozyskiwanych próbek biometrycznych wciąż pozostawia wiele do życzenia.

Okazuje się, że akwizycja danych biometrycznych wciąż stwarza duże problemy. Ze względu na brak współpracy podmiotów analizowanych, musi się ona odbywać w sposób bardzo szybki i skuteczny, aby możliwe było pobranie próbek biometrycznych, o jakości umożliwiającej identyfikację. Pokazuje to jednocześnie, że w dziedzinie niekooperacyjnych systemów identyfikacji wciąż pozostaje wiele do zrobienia, a

poszukiwanie nowych rozwiązań jest kluczowe, ponieważ bezpośrednio wpłynie na uproszczenie procesu autoryzacji osób oraz skrócenie czasu jej trwania.

Z tego powodu w Katedrze Mikroelektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Łódzkiej w roku 2013 w ramach projektu "Non-COoperative bioMetric system for Positive AuthenticaTion" (COMPACT) rozpoczęto prace mające na celu opracowanie autorskiego systemu, umożliwiającego realizację identyfikacji biometrycznej w warunkach o zmniejszonej kooperacji podmiotów uwierzytelnianych. Prace prowadzone były w ramach grantu badawczego LIDER/027/591/L-4/NCBR/2013 Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Grant realizowany był pod kierownictwem dr inż. Kamila Grabowskiego przez zespół, w skład którego wchodził: dr inż. Wojciech Sankowski, mgr inż. Michał Włodarczyk oraz Autor tejsze rozprawy.

Jednym z kluczowych zadań, realizowanych na potrzeby projektu, było opracowanie nowych metod zwiększających skuteczność oraz szybkość akwizycji danych biometrycznych.

1.2 Cel i zakres pracy

Niniejsza rozprawa doktorska podsumowuje najważniejsze osiągnięcia Autora w dziedzinie akwizycji danych biometrycznych, w scenariuszach o zmniejszonej kooperacji podmiotów uwierzytelnianych. Badania prowadzone były w Katedrze Mikroelektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Łódzkiej. Realizowano je w ramach projektu COMPACT przy współpracy ww. osób, określanych dalej jako Zespół. Zasadniczym założeniem projektu było natomiast opracowanie i realizacja systemu biometrycznego, umożliwiającego rozpoznanie osób w trakcie ich swobodnego przejścia poprzez bramkę identyfikacyjną. Natomiast za główne cele prowadzonych przez Zespół badań przyjęto rozwój metod pozyskiwania danych biometrycznych oraz zwiększenie skuteczności identyfikacji biometrycznej w warunkach o zmniejszonej kooperacji podmiotów uwierzytelnianych.

W trakcie realizacji prac podjęto również współpracę z dr inż. Hugo Proença, profesorem nadzwyczajnym University of Beira Interior w Portugalii. Ogół badań prowadzonych przez Profesora w ostatnich latach, można scharakteryzować poprzez chęć osiągnięcia celów, umotywowanych analogicznie do tych przyjętych przez Zespół. Podobnie, jego prace ukierunkowane były na rozwój metod pozyskiwania danych biometrycznych oraz zwiększenie skuteczności identyfikacji biometrycznej w warunkach zakładających znaczne ograniczenie współpracy podmiotów uwierzytelnianych z rozwiązaniem. Z tego powodu, w trakcie realizacji prac nad systemem COMPACT, Zespół współpracował z Profesorem. Jednym z elementów tejsze współpracy był staż naukowy, odbyty przez Autora tejsze rozprawy oraz mgr inż. Michała Włodarczyka w jednostce macierzystej Profesora.

Prace nad realizacją projektu COMPACT zostały podzielone pomiędzy uczestników Zespołu, przy założeniu dwóch głównych nurtów realizacji:

- **Akwizycja danych biometrycznych** - mgr inż. Damian Kacperski (Autor rozprawy) - realizacja systemu akwizycji danych biometrycznych. Pozyskiwanie danych niezbędnych do realizacji procesu uwierzytelniania. Implementacja algorytmów umożliwiających odnajdywanie oraz śledzenie osób znajdujących się w obserwowanej przestrzeni systemu. Kontrolowanie warunków oświetleniowych w celu zachowania powtarzalności uzyskiwanych danych.

Zasadniczym celem prac Autora była analiza i implementacja procesu akwizycji oraz usprawnienie jej składowych w celu zwiększenia szybkości i skuteczności pozyskiwania danych biometrycznych, w scenariuszach o zmniejszonej kooperacji podmiotów uwierzytelnianych.

- **Identyfikacja biometryczna** - mgr inż. Michał Włodarczyk - realizacja właściwej analizy biometrycznej systemu COMPACT. Opracowanie algorytmów uwierzytelniania, działających w oparciu o dane biometryczne, pozyskiwane w warunkach o zmniejszonej kooperacji. Wykorzystanie dostarczanych przez Autora próbek, zbieranych przez system akwizycji danych biometrycznych.

Do najistotniejszych osiągnięć Autora w dziedzinie badań nad akwizycją danych biometrycznych w warunkach o zmniejszonej kooperacji podmiotów uwierzytelnianych i opisanych w tejsze pracy, można zaliczyć:

- Opracowanie algorytmu umożliwiającego odnajdywanie i śledzenie osób w przestrzeni obserwowanej systemu wizyjnego, dedykowanego do pracy w warunkach zmniejszonej kooperacji podmiotów.
- Zaprojektowanie oraz implementacja rozwiązania umożliwiającego wykorzystanie obiektywu z wysuniętą źrenicą, wyposażonego w układy zwierciadeł na napędach galwanometrycznych, do akwizycji próbek biometrycznych o jakości wystarczającej do skutecznej identyfikacji biometrycznej.
- Opracowanie metody pozwalającej na znaczne podniesienie skuteczności oraz szybkości śledzenia osób w oparciu o punkty kluczowe twarzy, dane stereowizyjne oraz analizę powstałych modeli trójwymiarowych.
- Udowodnienie, że nasilający się w ostatnich latach trend do redukcji liczby kamer systemów wizyjnych oraz dyskredytacji systemów stereowizyjnych nie zawsze jest słuszny. Przedstawienie wyników badań, które pokazują, że obecność dokładnych informacji o położeniu podmiotów uwierzytelnianych pozwala na przyspieszenie i zwiększenie skuteczności ich śledzenia i detekcji.
- Opracowanie inteligentnego systemu doświetlania podczerwienią umożliwiającego dynamiczne dopasowywanie rozkładu oraz mocy promieniowania dla uzyskania powtarzalnych warunków akwizycji danych biometrycznych dla całej przestrzeni obserwowanej rozwiązania.

1.3 Tezy

Prace badawcze, zrealizowane przez Autora, pozwoliły na sformułowanie następujących tez:

1. Konstrukcja łącząca obiektyw z wysuniętą źrenicą oraz układy zwierciadeł na napędach galwanometrycznych umożliwia akwizycję próbek biometrycznych od osób w ruchu i z odległości o jakości wystarczającej do skutecznej identyfikacji biometrycznej.
2. Wyznaczenie uproszczonego, trójwymiarowego modelu twarzy na bazie punktów kluczowych i danych stereowizyjnych pozwala na znaczne podniesienie skuteczności oraz szybkości algorytmu śledzenia osób.

Rozdział 2

SYSTEMY IDENTYFIKACJI BIOMETRYCZNEJ O ZMNIEJSZONEJ KOOPERACJI PODMIOTÓW UWIERZYTELNIANYCH

2.1 Wymagania dotyczące akwizycji zdjęć na potrzeby identyfikacji biometrycznej

W niniejszym rozdziale zaprezentowane zostały przykładowe systemy identyfikacji biometrycznej. Rozwiązania te, pomimo wykorzystywania odmiennej architektury sprzętowej czy metodyki pozyskiwania danych biometrycznych, podejmowały próbę realizacji bardzo zbliżonej wizji systemu, zdolnego do funkcjonowania w warunkach o zmniejszonej kooperacji podmiotów uwierzytelnianych. Autorzy rozwiązań, w opublikowanych przez siebie pracach, wielokrotnie podejmowali próby definiowania wymagań stawianych przed opracowywanymi rozwiązaniami jednak żaden z nich nie przedstawił jasno skonkretyzowanej listy wymagań jakie powinny zostać spełnione aby mógł zostać określony mianem systemu o zmniejszonej kooperacji podmiotów uwierzytelnianych. Z tego powodu Autor, na podstawie pozyskanych informacji, a szczególnie [2][3][4] oraz na podstawie własnych przekonań, sporządził własną listę kryteriów.

- Dostępność informacji o położeniu każdego z podmiotów obecnych w obserwowanej przestrzeni rozwiązania.
- Możliwość śledzenia wielu osób jednocześnie.
- Nie stosowanie tzw. "kamery śledzącej" czyli rozwiązania w którym pojedyncza kamera np. PTZ odpowiedzialna jest za ciągle podążanie za pojedynczym podmiotem, jak w [5] oraz [6].
- Wzajemne rozróżnianie osób umożliwiające przypisywanie pozyskanych danych biometrycznych do śledzonych podmiotów.
- Ograniczenie kooperacji podmiotów z systemem uwierzytelniania. Brak wymagań określających sposób postępowania osób w trakcie ich uwierzytelniania np. konieczność patrzenia na wprost i podobne.
- Pozyskiwanie danych biometrycznych o jakości wystarczającej do realizacji identyfikacji biometrycznej, weryfikowane np. poprzez normy jakościowe ISO zdefiniowane dla celów biometrycznych.

Warunki panujące w trakcie akwizycji danych biometrycznych w środowiskach o zmniejszonej kooperacji ulegają częstym zmianom. Ze względu na brak współpracy osób uwierzytelnianych, zmieniające się miejsce akwizycji czy zmienne warunki środowiskowe powszechne są sytuacje, utrudniające dokonanie akwizycji. Można do nich zaliczyć:

- **Zmienne warunki oświetleniowe** - zmieniający się rozkład promieni słonecznych, niestałe sztuczne oświetlenie.
- **Zmienne pozy osób** - szczególnie obroty głowy.
- **Chwilowe przesłonięcia twarzy** - przesłonięcia ręką, zasłonięcie przez inną osobę.
- **Trwałe przesłonięcia twarzy** - okulary, maska antysmogowa, chusta, nakrycia głów (w tym specyficzne stroje religijne).

Z tego powodu systemy te bazują często na wykorzystaniu różnych biometryk tj. twarzy czy okolic oka (tzw. periocular) w zależności od sytuacji. W szczególnych przypadkach możliwe jest również wykorzystanie tęczy oka, jednak jej akwizycja jest w tych rozwiązaniach znacznie utrudniona. Z tego powodu często najkorzystniejsza jest akwizycja obszaru całej twarzy z możliwie jak najlepszym zachowaniem każdego detalu. W ten sposób późniejsza analiza wykonanych zdjęć umożliwi dobór odpowiedniej biometryki lub ich łączenie (fuzje).

Jednak, aby możliwe było przeprowadzenie identyfikacji biometrycznej, pozyskiwane obrazy muszą zawierać cechy biometryczne o odpowiedniej jakości. Dlatego konieczne było sformułowanie jasnych wymagań, stawianych pozyskiwanym zdjęciom i określających możliwość przeprowadzenia identyfikacji biometrycznej dla poszczególnych rodzajów biometryk. W celu ich rzetelnego sformułowania Autor, posłużył się informacjami zgromadzonymi w formie norm, opublikowanych przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną ISO.

2.1.1 Akwizycja danych biometrycznych twarzy oraz okolic oka

Wymagania dotyczące jakości pozyskiwanych obrazów, wykorzystywanych na potrzeby realizacji identyfikacji biometrycznej realizowanej w oparciu o biometrię twarzy czy okolic oka, precyzowane są zazwyczaj w oparciu o normę ISO/IEC 19794-5¹. Określa ona wymaganą jakość obrazu twarzy oraz jej umiejscowienie na pozyskanym zdjęciu przy użyciu wymiarów charakterystycznych oraz liczbie pikseli na kluczowych obszarach. Istotne jest jednak, że wielu autorów systemów identyfikacji biometrycznej tj. [7],[6],[8] korzysta ze zmodyfikowanej wersji normy. Na podstawie własnych spostrzeżeń, autorzy zaproponowali znacznie uproszczoną formę weryfikacji określającej możliwość przeprowadzenia identyfikacji biometrycznej na pozyskanym obrazie twarzy. W ten sposób wymiary charakterystyczne oraz liczba pikseli obrazu twarzy zostały zastąpione pojedynczym parametrem. Został on opisany jako IPD (ang. InterPupillary Distance) i określa wymaganą odległość oczu na obrazie twarzy, wyrażoną w pikselach. Wskazano również wartość minimalną parametru umożliwiającą przeprowadzenie identyfikacji biometrycznej na 60 pikseli oraz wartość zalecaną na 120 pikseli. Autor ostatecznie zdecydował o zastosowaniu parametru IPD do oceny możliwości przeprowadzenia identyfikacji biometrycznej na obrazach pozyskiwanych z realizowanego systemu akwizycji próbek biometrycznych.

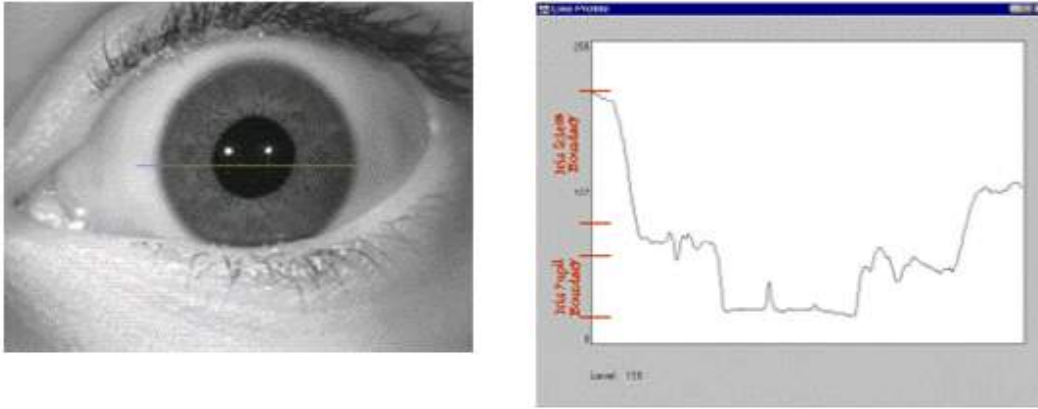
2.1.2 Akwizycja danych biometrycznych tęczy oka

Do wyznaczenia wymagań dotyczących identyfikacji przy użyciu biometrii tęczy oka wykorzystywana jest zazwyczaj norma ISO/IEC 19794-6².

Definiuje ona wymagane parametry obrazu tęczy jakie muszą zostać spełnione, aby możliwe było jego wykorzystanie do przeprowadzenia skutecznej identyfikacji biometrycznej. Najistotniejsze z punktu widzenia konstrukcji systemu akwizycji minimalne wymagania to: rozdzielczość obrazu tęczy 11.76 linii/mm, 256 poziomów szarości, zachowanie obszarów nadmiarowych na zdjęciu 70 pikseli z każdej ze stron tęczy oraz separacja poziomów jasności odpowiednio: 50 - pomiędzy twardówką i tęczówką, 70 - pomiędzy tęczówką i źrenicą, przedstawiona na Rys.2.1

¹ISO/IEC 19794-5 - "Technika informatyczna – Formaty wymiany danych biometrycznych – Część 5: Dane obrazu twarzy"

²ISO/IEC 19794-6 - "Technika informatyczna – Formaty wymiany danych biometrycznych – Część 6: Dane obrazu tęczy"



Rysunek 2.1: Wymagania dotyczące poziomów jasności zdjęć oka według normy ISO/IEC 19794-6.

Wiele publikacji [9][10] odnosi się natomiast do wersji uproszczonej normy, zakładającej weryfikację jakości pozyskanego obrazu tęczówki za pomocą liczby pikseli na jej średnicy. Uproszczenie to bazuje na założeniu że średnica tęczówki każdego człowieka jest bardzo zbliżona i zmienia się w zakresie 9.5 - 13.7mm (mediana 11.8mm). W ten sposób założono jej średni rozmiar oraz wymaganą rozdzielczość na poziomie 11.76 linii/mm i wyznaczono oczekiwane wartości. Wyznaczono trzy zakresy 100-150, 150-200 oraz powyżej 200 pikseli oznaczające kolejno obraz tęczówki niskiej, akceptowalnej oraz dobrej jakości. Ostatecznie, w celu weryfikacji jakości pozyskiwanych obrazów tęczówki Autor wykorzystywał liczbę pikseli na jej średnicy oraz kontrast, weryfikowany poprzez kryterium separacji jasności jak na Rys. 2.1.

2.1.3 Warunki oświetleniowe

Pozyskiwanie dobrej jakości próbek biometrycznych uwarunkowane jest zachowywaniem kontrolowanych i powtarzalnych warunków akwizycji [10] w postaci stabilnych i równomiernych warunków oświetleniowych dla całej przestrzeni akwizycji. Rozwiązaniem wskazanym przez normę jakościową ISO/IEC 19794-6 jest zastosowanie dodatkowego oświetlenia sztucznego w postaci promienników światła podczerwonego o długości fali z zakresu 700-900nm. Dodatkowo, dzięki absorpcji światła przez melaninę³, która dla przedziału 800-900nm uznawana jest za pomijalną możliwe jest znaczne zredukowanie zarówno odbić światła od skóry człowieka, jak i eliminacja czynników nieistotnych i zaburzających pomiar na zbieranych zdjęciach, takich jak kolor skóry czy oka. Z drugiej jednak strony, kwestię bezpieczeństwa podmiotów uwierzytelnianych trzeba uznać za kluczową. Ze względu na znikomą absorpcję światła przez zewnętrzne warstwy oka, promieniowanie przechodzi przez nie jedynie nieznacznie osłabione⁴. Z tego powodu wzrok podmiotów mógłby zostać uszkodzony w przypadku niepoprawnego doboru mocy promiennika podczerwieni. Dlatego m.in. na podstawie normy PN-EN 62471 oraz opracowania [11] wyznaczono maksymalną, średnią wartość natężenia promieniowania $E_{ir} = 100 \frac{W}{m^2}$ pozwalająca na zachowanie bezpieczeństwa podmiotów uwierzytelnianych.

2.2 Metodyka akwizycji danych biometrycznych

Konieczność pozyskiwania wysokich jakościowo danych biometrycznych od podmiotów uwierzytelnianych przy jednoczesnym założeniu ich zmniejszonej kooperacji wymusiła rozwój koncepcji, ułatwiających akwizycje danych biometrycznych z odległości. Wśród dostępnych implementacji najczęściej stosowane są kamery wyposażone w mechanizm PTZ (ang. Pan Tilt Zoom). Umożliwia to zmianę nachylenia, obrotu oraz przybliżania obrazu. W ten sposób możliwa jest zarówno zmiana obserwowanego fragmentu przestrzeni,

³Melanina - grupa naturalnych pigmentów występujących m.in. w skórze czy oku człowieka.

⁴PN-EN 60825-1:201 - Bezpieczeństwo urządzeń laserowych, Część 1: Klasyfikacja sprzętu i wymagania

ale też zmiana przybliżenia optycznego kamery. Podsumowując, rozwiązania zazwyczaj stosowane do realizacji systemów o zmniejszonej kooperacji, można podzielić ze względu na konstrukcję zastosowanych systemów wizyjnych:

- **Rozwiązania typu master-slave** - Zakładają zastosowanie dwóch zależnych systemów wizyjnych w postaci szerokokątnych kamer WFOV (ang. Wide Field Of View) umożliwiających wyznaczanie pozycji podmiotów w obserwowanej przestrzeni systemu oraz kamer wąskiego kąta widzenia (ang. NFOV, Narrow Field Of View) kierowanych na pożądane fragmenty przestrzeni w celu akwizycji danych biometrycznych. Wyróżnić można przy tym rozwiązania oparte na wielu kamerach WFOV i pozwalające na stosowanie stereowizji, czy innych operacji geometrycznych [7] do dokładnego określenia pozycji osób oraz rozwiązania oparte na pojedynczej kamerze WFOV i umożliwiające jedynie estymację położeń⁵.
- **Rozwiązania jedno-kamerowe (ang. Single camera)** - Zakładają wykorzystanie pojedynczej kamery zarówno do obserwacji przestrzeni jak i akwizycji danych biometrycznych. Zapewnia znacznie ograniczoną wydajność. Za każdym razem, kiedy pobierane są dane biometryczne od wskazanego podmiotu, ruch w przestrzeni nie jest analizowany. Utrudnia to również śledzenie wielu podmiotów poprzez zmieniającą się perspektywę oraz zakres rejestrowanego obrazu.

⁵Estymacja położeń osób może być realizowana w oparciu o stałe elementy przestrzeni obserwowanej tj. krawędź budynku, znak drogowy czy wysokość podmiotów [8]

Rozdział 3

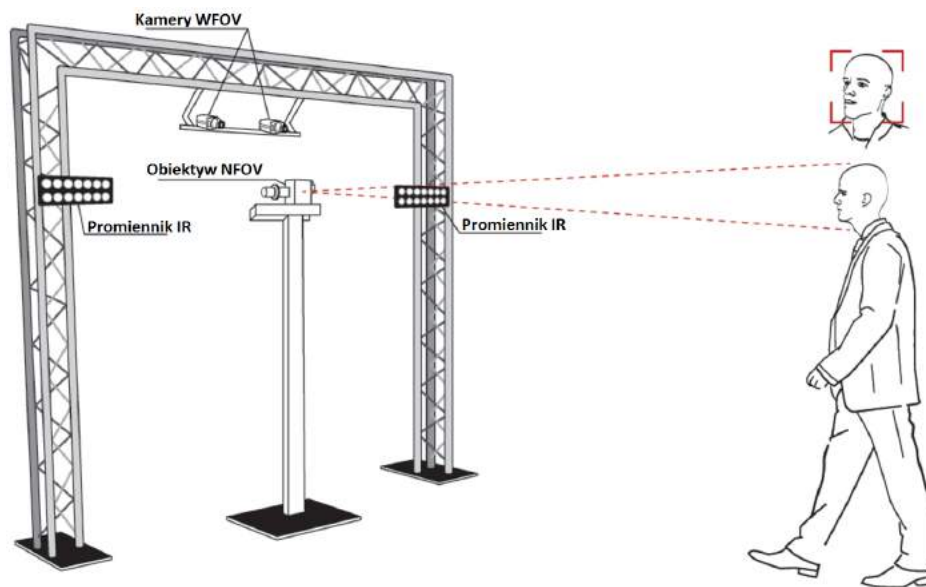
KONSTRUKCJA BRAMKI IDENTYFIKACJI BIOMETRYCZNEJ

3.1 Wprowadzenie

Na podstawie wykonanego i zamieszczonego w dysertacji przeglądu systemów identyfikacji biometrycznej o zmniejszonej kooperacji podmiotów uwierzytelnianych można zaobserwować, że wiele rozwiązań tj. [8], [12], [7] wykorzystuje układy wizyjne, zrealizowane według założeń koncepcji typu master-slave, wspomnianej w poprzednim rozdziale. Można również zauważyć, nasilającą się w ostatnich latach tendencję do wykorzystywania pojedynczej kamery systemu WFOV [8], [13], [14], [15]. Co więcej, rozwiązania oparte na wielu kamerach i wykorzystujące stereowizję do wyznaczania położenia podmiotów w obserwowanej przestrzeni systemu są w ostatnich latach dyskredytowane przez niektórych autorów [16], [7], [8].

Uznano jednak, że posiadanie w rozwiązaniu systemu stereowizyjnego może przynieść wiele korzyści. Wnioski te wysnute zostały na podstawie testów, zrealizowanych w oparciu o ogólnodostępne obrazy pochodzące z systemów stereowizyjnych oraz bibliotekę OpenCV¹ [17]. Przeprowadzone badania, przyniosły bardzo obiecujące wyniki pod względem dokładności pozyskiwanych położenia oraz szybkości ich wyznaczania. Z tego względu przyjęto założenia realizacyjne odmienne od wiodącego trendu, w oparciu o koncepcję master-slave i parę kamer WFOV pracujących w charakterze systemu stereowizyjnego. W ten sposób wykorzystano dwa zależne układy wizyjne: układ dwóch kamer szerokokątnych WFOV oraz kierowany obiektyw wąskokątny NFOV.

Zadaniem pierwszego z nich jest obserwacja przestrzeni i odnajdywanie potencjalnych podmiotów, które mogą zostać zidentyfikowane. Drugi jest natomiast kierowany na wyznaczone miejsca w celu akwizycji wysokiej rozdzielczości obrazów twarzy podmiotów. Dodatkowo, zgodnie z wymaganiami sformułowanymi w poprzednim rozdziale system został wyposażony w promienniki podczerwieni (ang. InfraRed, IR), zapewniające odpowiednie warunki akwizycji próbek biometrycznych. Przyjęta koncepcja realizacji została przedstawiona na Rys. 3.1.



Rysunek 3.1: Założenia konstrukcyjne systemu COMPACT.

¹OpenCV – najpopularniejsza biblioteka funkcji wykorzystywanych podczas przetwarzania obrazu, oparta na otwartym kodzie.

3.2 Realizacja

Do najważniejszych elementów sprzętowych zrealizowanej bramki identyfikacji biometrycznej zaliczyć można:

- System szerokiego kąta widzenia WFOV.
- Obiektyw akwizycyjny NFOV.
- System doświetlania podczerwienią i wyzwaniem kamer systemów wizyjnych.
- Jednostka centralna.

3.2.1 System szerokiego kąta widzenia WFOV

System szerokiego kąta widzenia WFOV zrealizowany został w oparciu o dwie monochromatyczne kamery DMK33GR0134 [18] wyprodukowane przez firmę Imaging Source. Każda z nich wyposażona jest w sensor optyczny wykonany w technologii CMOS o rozdzielczości 1280x960 pikseli i wielkości 1/3". Autor zdecydował o zastosowaniu kamer monochromatycznych ze względu na wyraźnie większą czułość w stosunku do rozwiązań opartych na sensorach kolorowych, co jest szczególnie istotne ze względu na brak dodatkowego doświetlenia w rozwiązaniu dla kamer WFOV. Każda z kamer wyposażona została w obiektyw H614-MQ, wyprodukowany przez firmę Pentax i zapewniający dla wybranej kamery następujące kąty widzenia: w poziomie 43.6° oraz w pionie 33.4° . Kamery zamontowane zostały na zaprojektowanym przez Autora uchwycie umożliwiającym bezpośredni montaż na bramie trawersowej przy zachowaniu stabilnej, również wzajemnej pozycji.

3.2.2 Obiektyw akwizycyjny NFOV

Najpopularniejszym rozwiązaniem, umożliwiającym pozyskiwanie danych biometrycznych i stosowanym przez wielu autorów² zbliżonych realizacji są kamery typu PTZ. Przeprowadzone przez Zespół testy przykładowej kamery PTZ pokazały jednak, że układ mechaniczny, odpowiedzialny za zmianę pozycji obrazowania kamery a jednocześnie za stabilizację obrazu jest obciążony bardzo dużą bezwładnością. Z tego powodu, obraz pozyskiwany w trakcie ruchu kamery, a więc w czasie symulowanego śledzenia osób jest nieostry i zawiera dużą ilość szumu. Z tego powodu podjęto decyzję o konieczności przetestowania rozwiązań alternatywnych.

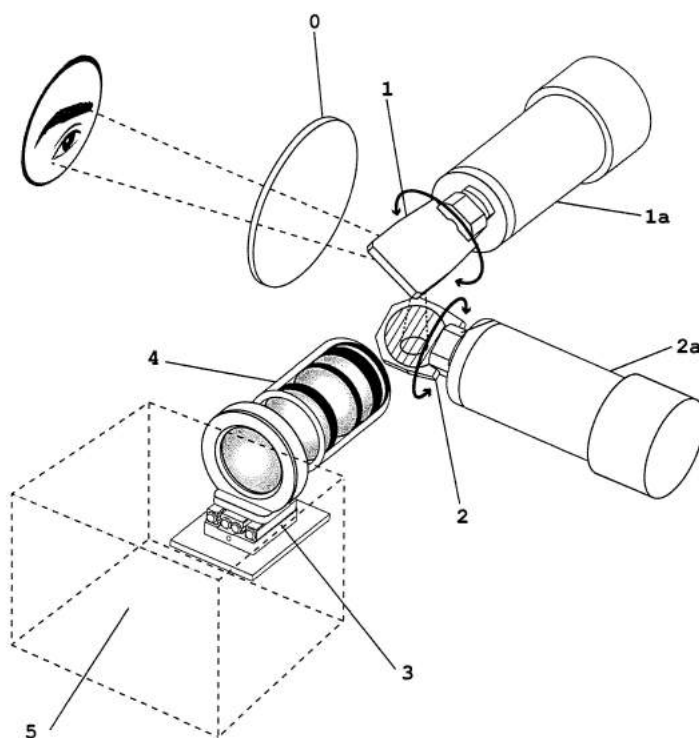
Idea zastosowania silników galwanometrycznych do przemieszczania obszaru obrazowania obiektywu została zainspirowana rozwiązaniem (ang. saccade mirrors) [19], umożliwiającym uproszczone śledzenie ruchu piłeczki pingpongowej w przestrzeni. Niska jakość pozyskiwanych obrazów oraz brak możliwości nastawy ostrości uniemożliwiłoby pozyskiwanie przez nie danych biometrycznych. Dlatego niemożliwe było bezpośrednie odwzorowanie tej konstrukcji. Jednak jego bardzo dobre parametry dynamiczne przekonały Autora do podjęcia próby realizacji dedykowanego obiektywu akwizycyjnego w oparciu o silniki galwanometryczne. W celu zweryfikowania tejże idei, Autor wykonał testowe urządzenie prototypowe w postaci dedykowanych układów galwanometrycznych. Brak dedykowanego zestawu optycznego wymusił zastosowanie sporych rozmiarów zwierciadeł w wykonanym prototypie. Pomimo tego uzyskano bardzo obiecujące rezultaty funkcjonowania, pokazujące nieosiąganą jak dotąd (np. poprzez kamery PTZ) dynamikę przemieszczania przestrzeni obrazowania obiektywu.

Rezultaty te skłoniły Kierownika do rozpoczęcia współpracy z Instytutem Optyki Stosowanej im. Maksymiliana Pluty w Warszawie. Jej głównym założeniem było opracowanie dedykowanego rozwiązania akwizycyjnego, opartego na przetestowanej idei jednak wyposażonego w dedykowany układ optyczny

²Kamery PTZ są powszechnie stosowane przez autorów zbliżonych realizacji, zostało to pokazane w dysertacji w Podrozdziale 2.1.

umożliwiający minimalizację rozmiarów wykorzystywanych zwierciadeł, używanych do modyfikacji przestrzeni obrazowania. W efekcie zrealizowany został prototypowy, kierowany obiektyw z wysuniętą źrenicą oparty na napędach galwanometrycznych. Umożliwiło to uzyskiwanie nieosiągalnie krótkich jak dotąd czasów zmiany przestrzeni obrazowania kamery wynoszących zaledwie kilka milisekund. Dla porównania czas przemieszczenia pozycji obrazowania dla kamer PTZ, często wykorzystywanych w zbliżonych realizacjach to nawet 3 s pomiędzy skrajnymi pozycjami. Szczegółowe testy opracowanego rozwiązania potwierdziły jego zdolność do akwizycji obrazów wysokiej rozdzielczości z różnych miejsc przestrzeni. Co jednak najistotniejsze testy wykonane przez Autora potwierdziły zgodność pozyskiwanych przez obiektyw zdjęć z wymaganiami ujętymi przez normy jakościowe ISO i obejmującymi akwizycję obrazów twarzy i okolic oka ISO/IEC 19794-5 oraz tęczówek oka ISO/IEC 19794-6.

Późniejsze testy wypracowanego rozwiązania pokazały jego znaczną przewagę nad obecnie stosowanymi realizacjami w postaci na przykład kamer PTZ. Szczególnie istotne było znaczne poprawienie parametrów dynamicznych w trakcie akwizycji danych biometrycznych. **Zaowocowało to wspólnym³ zgłoszeniem patentowym P30994PL00/MB (polskim) [20] oraz PCT/IB2016/052,779 (międzynarodowym) [21].** Koncepcja realizacji obiektywu została zaprezentowana na Rys. 3.2 i składa się z następujących elementów: wejściowy filtr podczerwieni (0), ruchome zwierciadła (1, 2) wraz z silnikami galwanometrycznymi (1a, 2a), napęd ostrości (3), układ soczewek (4) oraz kamera (5).



Rysunek 3.2: Koncepcja realizacji obiektywu akwizycyjnego, zgłoszenie patentowe P30994PL00/MB (polskie) [20] oraz PCT/IB2016/052,779 (międzynarodowe) [21].

Obiektyw akwizycyjny NFOV jest z punktu widzenia dysertacji Autora najistotniejszym elementem rozwiązania. Największy wkład Autora w te prace to wykonanie urządzenia prototypowego, przygotowanie wymagań i współpraca z INOS w trakcie realizacji docelowego obiektywu, opracowanie elementów sterujących pracą w czasie akwizycji oraz ich oprogramowanie. Zrealizowany obiektyw NFOV zaprezentowany został na Rys. 3.5.

³Autorami zgłoszenia patentowego byli dr inż. Kamil Grabowski, mgr inż. Damian Kacperski, dr hab. Tadeusz Kryszczyński, mgr inż. Tomasz Kozłowski oraz mgr inż. Michał Włodarczyk.

3.2.3 System doświetlania podczerwienią i wyzwalaniem kamer systemów wizyjnych

Bramka identyfikacji biometrycznej obejmuje funkcjonowanie dwóch zależnych jednak pracujących w różnych warunkach oświetleniowych, systemów wizyjnych. Pierwszy z nich, obiektyw akwizycyjny NFOV został zaprojektowany do pracy w zakresie bliskiej podczerwieni. Wymaga on użycia dodatkowych oświetlaczy, pracujących w zakresie promieniowania o długości fali 800-900nm. Drugi, system szerokiego kąta widzenia został zaprojektowany do pracy w zakresie światła widzialnego, dlatego wymaga wyłączenia promienników IR w czasie akwizycji obrazów. Z tego powodu Autor opracował dedykowany system doświetlania podczerwienią i wyzwalaniem kamer systemów wizyjnych. Przyjęte zostały następujące założenia realizacyjne:

- Zachowanie odrębności wyzwalania kamer obu systemów wizyjnych. Możliwość akwizycji obrazu w różnych momentach czasowych i z różną częstotliwością.
- Zapewnienie warunków oświetleniowych wystarczających dla akwizycji obrazów twarzy podmiotów uwierzytelnianych poprzez obiektyw NFOV.
- Zachowanie bezpiecznego dla oka poziomu promieniowania IR w obserwowanej przestrzeni systemu, zgodnie z normą PN-EN 62471:2010.
- Dynamiczne dostosowywanie mocy promieniowania IR w celu zachowania równomiernych warunków oświetleniowych dla całego obszaru akwizycji obiektywu NFOV.

Rozwiązanie zrealizowane zostało w oparciu o dwa moduły, pracujące w konfiguracji, w której pierwszy pełni rolę jednostki nadrzędnej, drugi zaś podrzędnej. Każdy z nich wyposażony został w 20 szt. diód LED OSRAM SFH4715S sterowanych poprzez dedykowane sterowniki i wyposażonych w kolimatory optyczne, zapewniające pożądaną rozkład promieniowania. Dodatkowo moduł nadrzędny wyposażony został w sterownik wbudowany oparty na procesorze TI ARM® Cortex®-M4F TM4C1294 umożliwiający kontrolowanie pracy harmonogramu akwizycji oraz rozkładu promieniowania poprzez zewnętrzne połączenie TCP/IP.

System doświetlania podczerwienią i wyzwalaniem kamer systemów wizyjnych zarówno od strony sprzętowej jak i oprogramowania wbudowanego został w pełni zrealizowany przez Autora tejże dysertacji.

3.2.4 Jednostka Centralna

Jednostka Centralna systemu została oparta o komputer klasy PC (ang. Personal Computer), wyposażony w procesor Intel® Core™ i7-4770, płytę główną Gigabyte Z97X GAMING 3, dysk półprzewodnikowy SSD Intel 128GB oraz pamięć RAM 16GB HyperX Fury. Dodatkowo zastosowano kartę akwizycji AD-LINK PCIe-GIE64+, wyposażoną w 4 niezależne porty GigE oraz posiadającą wsparcie dla standardu IEEE 802.3af (ang. Power Over Ethernet) i Jumbo Frames⁴ umożliwiającą akwizycję obrazów z kamer systemów wizyjnych.

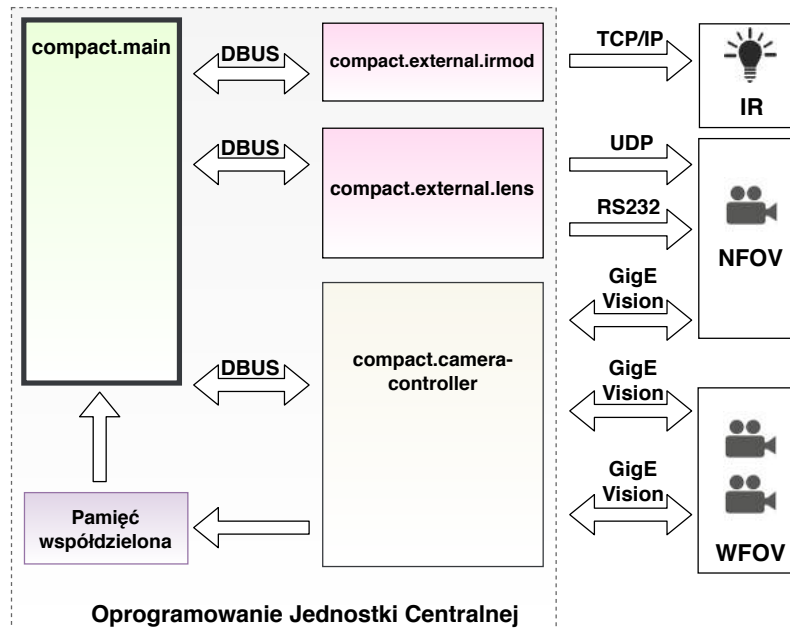
Jednostka Centralna wykorzystana na potrzeby bramki identyfikacji biometrycznej pełni rolę głównej jednostki przetwarzania danych. Zawarte na niej oprogramowanie realizuje zarówno zadania związane z pozyskiwaniem i przetwarzaniem danych z kamer obu systemów wizyjnych jak i komunikacją z zewnętrznymi modułami. Można do nich zaliczyć system doświetlania podczerwienią i wyzwalaniem kamer oraz część sterującą obiektywem akwizycyjnym NFOV.

3.2.5 Oprogramowanie bazowe

Struktura oprogramowania bramki identyfikacji biometrycznej została zaprezentowana na Rys. 3.3. Wyszczególnione zostały zarówno moduły zaimplementowane na Jednostce Centralnej jak i komponenty

⁴Rozszerzenie standardu Ethernet pozwalające na zwiększenie rozmiaru ramki transmisyjnej z 1518B aż do 9 kB.

zewnątrzne, tj. system doświetlania podczerwienią i wyzwalaniem kamer systemów wizyjnych oraz obiektyw wąskiego kąta widzenia.



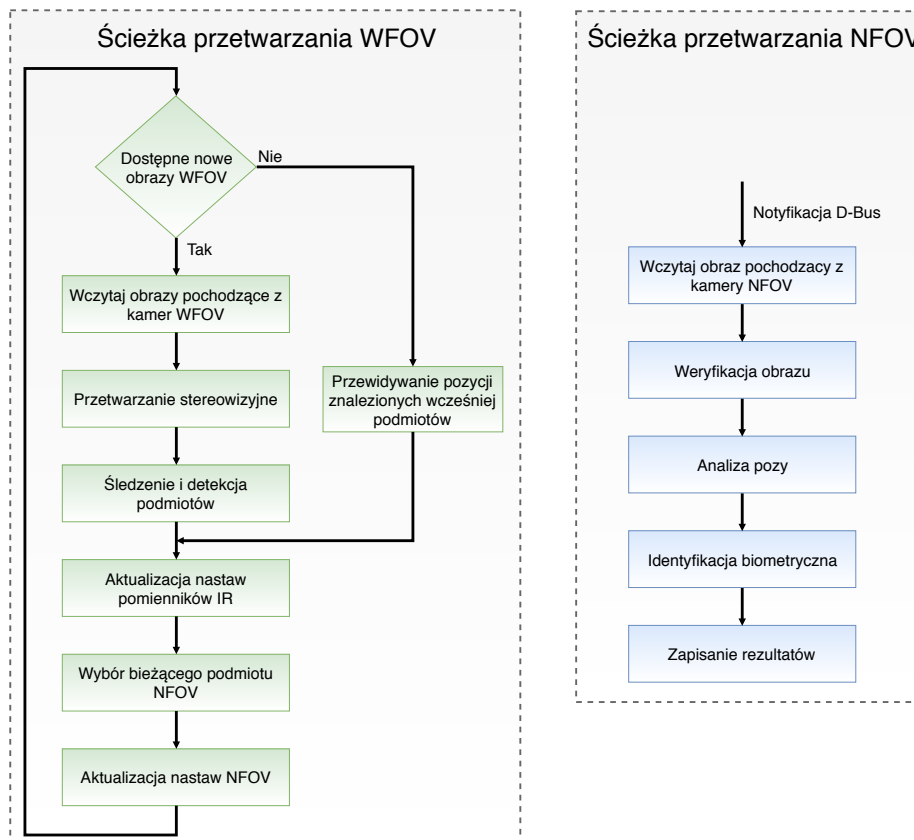
Rysunek 3.3: Struktura oprogramowania bazowego bramki identyfikacji biometrycznej.

Oprogramowanie Jednostki Centralnej zrealizowane zostało w postaci następujących bloków programowych:

- **Serwis compact.camera-controller**
Odpowiedzialny za komunikacje z kamerami obu systemów wizyjnych oraz akwizycję obrazów z kamer.
- **Serwis compact.external.lens**
Odpowiedzialny za komunikacje z obiektywem NFOV. Umożliwia regulację nastaw parametrów obiektywu takich jak: zmiana przestrzeni obrazowania, czy ostrości.
- **Serwis compact.external.irmod**
Odpowiedzialny za komunikacje z systemem doświetlania podczerwienią i wyzwalaniem kamer systemów wizyjnych. Umożliwia zarządzanie dystrybucją światła IR w obserwowanej przestrzeni systemu oraz modyfikację harmonogramu akwizycji systemów wizyjnych.
- **Aplikacja compact.main**
Główna aplikacja sterująca pracą systemu. Zawiera implementację algorytmów funkcjonalnych systemu takich jak algorytmy śledzenia i detekcji, czy algorytmy identyfikacji biometrycznej. Odpowiada również za sterowanie zewnętrznymi modułami takimi jak: system doświetlania podczerwienią i wyzwalaniem kamer systemów wizyjnych czy obiektyw NFOV, realizowane w oparciu o komunikację z serwisami. Asynchroniczny model funkcjonowania pozwala na pracę aplikacji w oparciu o ciągłą realizację ścieżki przetwarzania z jednoczesną obsługą zewnętrznych powiadomień pochodzących z zewnętrznych serwisów. Funkcjonowanie aplikacji zakłada występowanie dwóch niezależnych ścieżek przetwarzania, ścieżki WFOV oraz NFOV. Zostało to zaprezentowane na Rys. 3.4.

Komunikacja między serwisami, a główną aplikacją systemu oparta została o rozwiązanie o nazwie DBUS (ang. Desktop Bus) [22], [23]. Przekazywanie pozyskiwanych z kamer obrazów do aplikacji głównej odbywa się natomiast poprzez pamięć współdzieloną. Ze względu na duże wymagania dotyczące przepustowości, związane ze sporym rozmiarem uzyskiwanych z kamer obrazów, wykorzystano rozwiązanie

bazujące na mechanizmie nazywanym TMPFS (ang. TeMPorary File System), umożliwiającym wydzielenie fragmentu przestrzeni pamięci operacyjnej RAM (ang. Random-Access Memory) i utworzenie w niej tymczasowego systemu plików dostępnego dla użytkowników systemu.



Rysunek 3.4: Ścieżki przetwarzania głównej aplikacji sterującej bramką identyfikacji biometrycznej.

Środowisko symulacyjne

Autor przygotował dedykowane środowisko symulacyjne dla celów pogłębionej analizy offline opracowanych rozwiązań. W ten sposób uzyskano możliwość nie tylko weryfikacji wprowadzanych zmian w opracowanych algorytmach, ale również możliwość porównania zaproponowanych rozwiązań z powszechnie stosowanymi, używanymi przez autorów podobnych systemów. Środowisko zostało w pełni oparte na rozwiązaniach programowych zaprezentowanych na Rys. 3.3. Niektóre elementy zostały jednak zmodyfikowane w taki sposób, aby możliwie było symulowanie pracy systemu COMPACT przy użyciu zapisanych danych offline. Najistotniejsze zmiany obejmowały:

- **Serwis compact.camera-simulator** - zastąpienie serwisu akwizycji obrazów z kamer poprzez serwis symulacyjny. Działa analogicznie do compact.camera-controller jednak wykorzystuje, zamiast obrazów z kamer, zapisane zbiory obrazów pochodzących z kamer WFOV oraz obiektywu NFOV.
- **Serwis compact.external.irmod** - serwis uruchomiony w trybie testowym, zakładającym normalną komunikację z aplikacją główną compact.main, jednak z pominięciem transmitowania wiadomości do systemu doświetlania podczerwienią.
- **Serwis compact.external.lens** - serwis uruchomiony w trybie testowym, zakładającym normalną komunikację z aplikacją główną compact.main jednak z pominięciem transmitowania wiadomości do obiektywu NFOV.

- **Baza danych** - ze względu na zastąpienie serwisu akwizycji obrazów z kamer poprzez serwis symulacyjny, pamięć współdzielona została zastąpiona przez pozyskany wcześniej zbiór obrazów. Na potrzeby rozwijania algorytmów przetwarzania systemu COMPACT zebrane zostały dedykowane zbiory opisane w dalszej części pracy.

Środowisko symulacyjne zrealizowano w taki sposób, aby maksymalnie odwzorowywało funkcjonowanie systemu COMPACT w trakcie pracy przy użyciu danych online. Wykorzystana została m.in. informacja o chwili czasowej pozyskania każdego z obrazów bazy danych. W ten sposób zachowane zostały wszelkie oryginalne opóźnienia związane z akwizycją obrazu poprzez kamery, konwersją typów czy zapisem w pamięci. Co więcej, uzyskano identyczną ścieżkę komunikacji, realizowaną poprzez te same magistrale D-Bus. W ten sposób, z punktu widzenia aplikacji głównej compact.main, tryb symulacyjny jest nierozróżnialny od trybu funkcjonowania w czasie rzeczywistym.

3.3 Uzyskane rezultaty

Przeprowadzona analiza funkcjonowania pokazała, że opracowany przez Autora system akwizycji danych biometrycznych w testach statycznych pozwala na pozyskiwanie próbek biometrycznych zgodnych z normami jakościowymi ISO/IEC 19794-5 oraz ISO/IEC 19794-6. Normy jakościowe dla danych biometrycznych twarzy oraz okolic oka spełnione są dla całego zakresu funkcjonowania obiektywu akwizycyjnego NFOV tj. dla odległości podmiotów z przedziału 0.6 - 3m. Natomiast dla tęczówki są one spełnione dla zakresu najbliższego tj. dla odległości $\sim 0.6m$. Zrealizowana bramka identyfikacji biometrycznej została zaprezentowana na Rys. 3.5.



Rysunek 3.5: Zrealizowana bramka identyfikacji biometrycznej.

Rozdział 4

KONSTRUKCJA STANOWISKA AKWIZYCJI DANYCH REJESTRACYJNYCH

Funkejonowanie części identyfikacyjnej systemu COMPACT wymagało pozyskania wysokiej jakości danych rejestracyjnych podmiotów uwierzytelnianych. Dane rejestracyjne można przy tym rozumieć jako zgromadzony zbiór danych biometrycznych, pozyskanych od podmiotów w trakcie procesu ich rejestracji w systemie. Zbiory te, wykorzystywane są później jako dane wzorcowe, z którymi porównywane są uzyskiwane od podmiotów uwierzytelnianych dane biometryczne. Stanowią więc punkt odniesienia, od którego jakości zależy ostateczny rezultat skuteczności biometrycznej rozwiązania.

W trakcie pracy systemu COMPACT, położenie podmiotów, od których pozyskiwane są dane biometryczne znacznie zmienia się w czasie. Uzyskiwane są obrazy, zawierające zarówno odchylenie głowy związane z kątem akwizycji przez obiektyw NFOV, ale także związane ze zmienną pozą podmiotu. Jest to szczególnie istotne w przypadku biometriki twarzy, czy okolic oka, która pod wpływem zmiany położenia głowy, znacznie zmienia swoją widoczność. Aby zapewnić wysoką skuteczność identyfikacji biometrycznej w systemie COMPACT, konieczne było uzyskanie zbiorów rejestracyjnych, jak najbardziej zbliżonych do danych uzyskiwanych później w trakcie procesu uwierzytelniania.

Z tego powodu Autor wykonał dedykowane stanowisko akwizycji obrazów rejestracyjnych. Głównym założeniem było natomiast uzyskanie możliwości pozyskiwania zbiorów wysokiej jakości obrazów twarzy podmiotów, obejmujących różne ich pozy jednak z zachowaniem ich powtarzalności. Zrealizowane stanowisko zaprezentowane zostało na Rys. 4.1. Jego konstrukcja poprzedzona została dokładną analizą ogólnodostępnych zbiorów danych, które w swoich założeniach zbliżone były do postawionych w dysertacji wymagań. Wybrana koncepcja zakładała wykonanie platformy wyposażonej w dedykowany mechanizm obrotowy oraz sterownik umożliwiające dokładne kontrolowanie obrotu osoby oraz akwizycję obrazów twarzy poprzez kamerę w ściśle określonych momentach rejestracji. Dodatkowo platformę wyposażono w promienniki podczerwieni, umożliwiające odwzorowanie warunków akwizycji zbliżonych do tych uzyskiwanych przez obiektyw akwizycyjny NFOV (akwizycja obrazów w podczerwieni).

Stanowisko akwizycji danych rejestracyjnych zarówno od strony koncepcji i realizacji sprzętowej jak i oprogramowania wbudowanego zostało w pełni zrealizowane przez Autora.



Rysunek 4.1: Zrealizowane stanowisko akwizycji zdjęć rejestracyjnych.

Rozdział 5

AKWIZYCJA ZDJĘĆ TWARZY PODMIOTÓW W WARUNKACH O ZMNIJSZONEJ KOOPERACJI

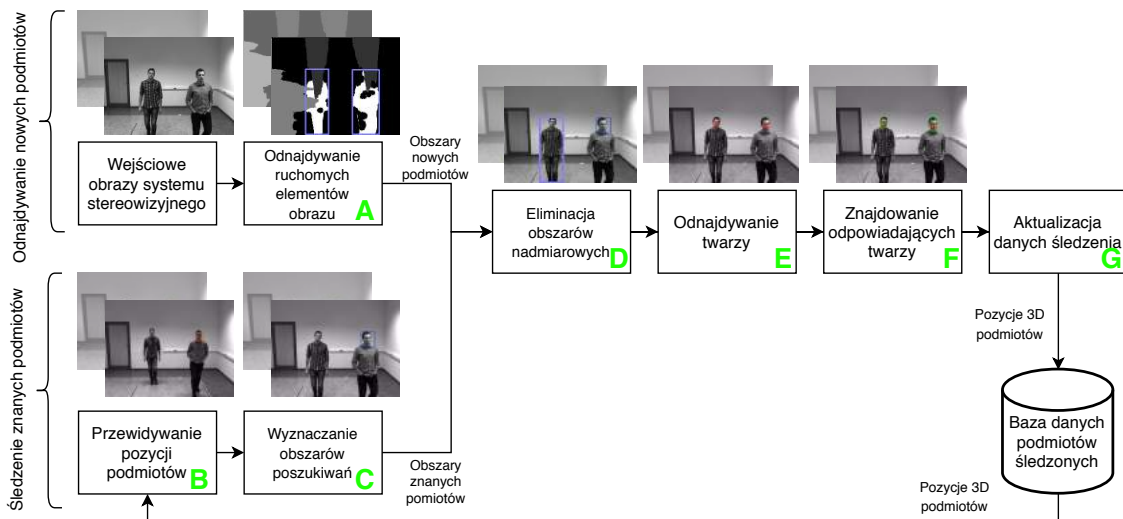
5.1 Wprowadzenie

Algorytm śledzenia i detekcji podmiotów, zrealizowany w pełni przez Autora, stanowi kluczowy element systemu COMPACT. Zapewnia on możliwość nie tylko odnajdywania nowych osób wkraczających w przestrzeń obserwowaną bramki identyfikacji biometrycznej, ale umożliwia też śledzenie tych, będących już na liście podmiotów śledzonych. W ten sposób możliwe staje się ich odróżnianie, kluczowe dla poprawnej akwizycji danych biometrycznych przez obiektyw NFOV. Zaproponowane rozwiązanie zostało przygotowane pod kątem pracy w czasie rzeczywistym, z uwzględnieniem ograniczeń sprzętowych wprowadzanych przez podzespoły opracowanej bramki identyfikacji biometrycznej.

Schemat blokowy opracowanego algorytmu został zaprezentowany na Rys. 5.1. Wyróżnione zostały dwie ścieżki przetwarzania: odnajdywanie nowych oraz śledzenie znanych już podmiotów w obserwowanej przestrzeni systemu.

Odnajdywanie nowych podmiotów - ścieżka realizująca odnajdywanie nowych, jeszcze nieśledzonych podmiotów, znajdujących się w obserwowanej przestrzeni bramki identyfikacji biometrycznej.

Śledzenie odnalezionych podmiotów - ścieżka realizująca śledzenie pozycji podmiotów znajdujących się w obserwowanej przestrzeni systemu jednak znajdujących się już na liście pomiotów śledzonych.



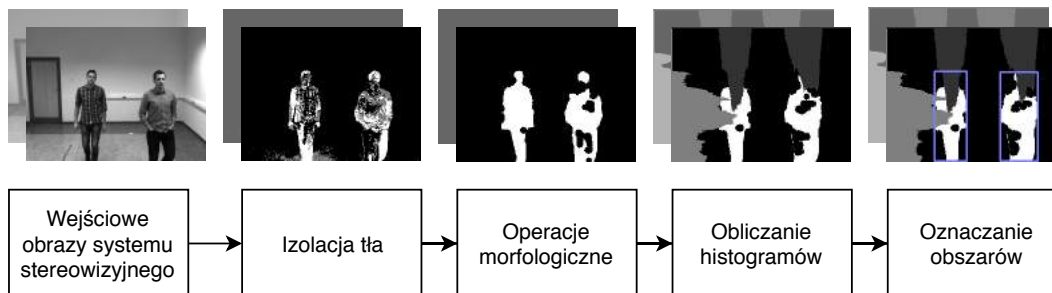
Rysunek 5.1: Zaproponowany algorytm odnajdywania i śledzenia osób w warunkach niekooperacyjnych.

Wyróżnić można również bardziej szczegółowe kroki przetwarzania:

5.1.1 Odnajdywanie ruchomych elementów obrazu (A)

W pierwszym kroku funkcjonowania algorytmu śledzenia i detekcji podmiotów realizowany jest proces odnajdywania osób poruszających się wewnątrz przestrzeni obserwowanej bramki identyfikacji biometrycznej. Na tym etapie odnajdywanie to realizowane jest w sposób pobieżny. Oznacza to, że wyznaczane są jedynie zgrubne obszary występowania podmiotów na obrazach z systemu stereowizyjnego nie zaś dokładna pozycja ich twarzy.

Schemat blokowy realizacji algorytmu zamieszczony został na Rys. 5.2. Zaproponowana przez Autora implementacja zbliżona jest w założeniach do zastosowanej przez Park i inni [7] jednak jej funkcjonowanie zostało dopasowane do pracy w utrudnionych warunkach akwizycji¹. Wykorzystano algorytm izolacji tła w postaci MOG 2 (ang. Mixed Of Gaussian 2) [24] oraz opracowaną przez Autora metodę wyznaczania obszarów zainteresowania opartą o wyznaczanie histogramów oraz operacje morfologiczne. Metoda wykazuje poprawę jakości pozyskiwanych obszarów zainteresowania ROI (ang. Region Of Interest), czyli obecności podmiotów.



Rysunek 5.2: Odnajdywanie osób poruszających się wewnątrz przestrzeni obserwowanej bramki identyfikacji biometrycznej.

5.1.2 Przewidywanie pozycji podmiotów (B)

Dla zagwarantowania wiarygodności procesu uwierzytelniania podmiotów konieczne jest zapewnienie mechanizmu umożliwiającego nieprzerwane rozróżnianie osób znajdujących się wewnątrz przestrzeni obserwowanej bramki identyfikacji biometrycznej. Istotne jest przy tym zarówno utrzymywanie informacji o pozycji podmiotów już uwierzytelnionych jak i odróżnianie ich od tych jeszcze nie poddanych analizie. Uniemożliwiając tym samym kilkukrotne uwierzytelnianie tych samych osób przy jednoczesnym pomiaru pozostałych. Powszechnie stosowaną metodą, zapewniającą ciągłość analizy ruchu podmiotów w czasie jest ich śledzenie.

Wśród dostępnych algorytmów śledzenia, bardzo popularne są metody oparte na przepływie optycznym (ang. optical flow) w tym szczególnie często wykorzystywana [25], [26], [27], [28] jest metoda Lucas-Kanade [29]. Przeprowadzone przez Autora testy pokazały jednak jej dużą złożoność obliczeniową ze względu na funkcjonowanie bezpośrednio na pikselach obrazów wejściowych. Z tego powodu przygotowano Autorską metodę wykorzystującą istotną zaletę zastosowanego w systemie systemu stereowizyjnego w postaci dokładnej informacji² o położeniu podmiotów w przestrzeni obserwowanej bramki identyfikacji biometrycznej. Tym samym złożona obliczeniowo analiza całych obrazów pochodzących z systemu WFOV została zastąpiona przez znacznie uproszczoną analizę pojedynczych punktów opisanych w przestrzeni trójwymiarowej i reprezentujących położenie podmiotów. W celu przewidywania położenia osób na podstawie ich uprzednich pozycji Autor zastosował filtr Kalmana[31]. Umożliwiło to zarówno śledzenie podmiotów w przestrzeni obserwowanej bramki identyfikacji, jak i również określanie nastaw dla obiektu akwizycji.

5.1.3 Wyznaczanie obszarów poszukiwań (C)

W poprzednim kroku pozyskane zostały informacje o przewidywanych pozycjach podmiotów, wyznaczone dla bieżącej chwili czasowej. Zostały one wyrażone w postaci pojedynczych punktów opisanych w przestrzeni trójwymiarowej i reprezentujących zakładane położenie środka ciężkości twarzy każdego z nich.

¹Za utrudnione warunki akwizycji można uznać np. przesłonięcia wzajemne osób, zakrycia częściowe twarzy czy też nienaturalne pozy.

²Pozyskiwane z systemu stereowizyjnego położenie podmiotów wyznaczone jest z dużą dokładnością dochodzącą nawet do pojedynczych milimetrów co zostało potwierdzone przez Zespół i podsumowane w pracy [30]

Informacja o rzeczywistym położeniu śledzonych podmiotów zawarta jest natomiast na dwuwymiarowych obrazach pochodzących z systemu stereowizyjnego. Z tego powodu konieczne jest przeprowadzenie transformacji umożliwiającej przeniesienie punktów w przestrzeni na odpowiadające im pozycje na obrazach dwuwymiarowych. Operacja ta realizowana jest przy użyciu modułu stereowizji przy wykorzystaniu wyznaczonych w trakcie kalibracji macierzy. Dodatkowo, punkty przed transformacją uzupełniane są o informację przestrzenną stanowiącą typowe wymiary głowy człowieka oraz błąd przewidywania pozycji wykorzystanego predyktora. Dzięki temu wyznaczany obszar poszukiwań jest każdorazowo dopasowywany do pozycji podmiotów w przestrzeni i tym samym minimalizowany jest czas potrzebny na detekcję twarzy.

5.1.4 Eliminacja obszarów nadmiarowych (D)

W efekcie realizacji dotychczasowych kroków algorytmu śledzenia i detekcji na obrazach pochodzących z stereowizyjnego systemu szerokiego kąta widzenia oznaczone zostały obszary zainteresowania ROI. Ich zawartość można określić na podstawie kroku w którym zostały wyznaczone: odnajdowanie ruchomych elementów obrazu oraz przewidywanie pozycji podmiotów.

Pierwsze z wymienionych obszarów zawierają informację mniej dokładną, poza istotnym obrazem twarzy obejmują również obraz pozostałej części sylwetki człowieka. Dodatkowo, często nie zawierają one jedynie informacji o podmiotach nieobecnych wcześniej w obserwowanej przestrzeni systemu stereowizyjnego, ale również obejmują obrazy osób będących już na liście podmiotów śledzonych. Z tego powodu konieczne jest wyeliminowanie obszarów nadmiarowych, czyli pominięcie tych obszarów znalezionych przez algorytm izolacji tła, które zawierają obrazy podmiotów już śledzonych. Wyjątek stanowi przypadek, w którym znany już podmiot, przez dostatecznie długi czas pozostaje nieruchomy. Wtedy przez wejściowy algorytm background subtraction zostanie oznaczony jako tło i nie zostanie utworzony dla niego nadmiarowy obszar. Będzie on jednak wciąż śledzony dzięki ścieżce śledzenia znanych podmiotów. Dla pozostałych przypadków, nadmiarowość musi zostać wyeliminowana w taki sposób, że obszary mniej dokładne zostają zastąpione przez obszary dokładniejsze.

5.1.5 Odnajdywanie twarzy (E)

Wyznaczenie rzeczywistych położení osób w przestrzeni obserwowanej bramki identyfikacji jest niezbędne do pozyskania ich danych biometrycznych poprzez obiektyw akwizycyjny. Realizację tego zadania umożliwia zastosowana w systemie stereowizja. Wymaga ona jednak wskazania pozycji twarzy podmiotów na dwuwymiarowych obrazach pochodzących z szerokokątnego systemu wizyjnego.

Poszukiwanie twarzy realizowane jest poprzez algorytm zwany klasyfikatorem, który na podstawie wzorca, w tym przypadku twarzy, umożliwia odnajdywanie na wejściowych obrazach elementów poszukiwanych. W celu wybrania właściwego algorytmu Autor przebadal[32] najpopularniejsze implementacje ostatecznie wybierając algorytm HOG (ang. Histogram of Oriented Gradient)[33]. Umożliwił on nie tylko prawidłowe wskazanie ponad 96% obecnych na obrazach twarzy ale równocześnie zaledwie 1.27% spośród wskazanych miejsc okazało się niepoprawnych.

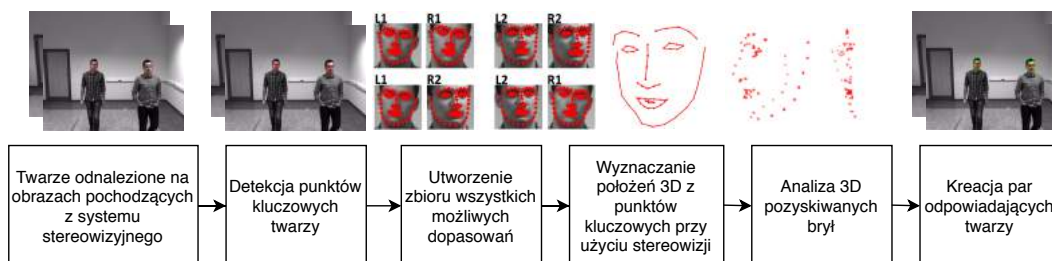
5.1.6 Znajdowanie odpowiadających twarzy (F)

W poprzednim kroku realizacji algorytmu śledzenia i detekcji na obrazach pochodzących z szerokokątnego systemu stereowizyjnego odnalezione zostały twarze osób. W celu określenia rzeczywistych położení podmiotów w przestrzeni trójwymiarowej przy użyciu stereowizji konieczne jest wskazanie odpowiadających twarzy osób na obrazach pochodzących z obu kamer systemu WFOV³. Muszą więc zostać utworzone pary odnalezionych twarzy pochodzące z różnych kamer systemu stereowizyjnego jednak przedstawiające ten sam podmiot. Krok ten jest o tyle istotny, że wskazanie nieprawidłowych par składających się

³Określenie położenia punktu opisanego w przestrzeni trójwymiarowej przy wykorzystaniu skalibrowanego systemu stereowizyjnego wymaga wskazania jego położenia na obrazach pochodzących z kamery lewej oraz prawej.

z twarzy pochodzących od różnych osób lub nie zawierających twarzy spowoduje wyznaczenie błędnych lokalizacji, a tym samym określenie niewłaściwych nastaw dla sterowanego obiektywu wąskokątnego. W ten sposób podjęta zostanie próba pozyskania danych biometrycznych z lokalizacji niezawierającej twarzy podmiotu i zostanie obniżona całościowa wydajność systemu akwizycji. Oczekiwany przez Autora rezultat funkcjonowania algorytmu obejmuje wskazanie prawidłowych par twarzy na obrazach stereowizyjnych oraz oznaczenie błędnych detekcji w celu ich eliminacji z dalszego przetwarzania. Tworzenie par odpowiadających twarzy na obrazach stanowi zazwyczaj dużą trudność ze względu na odmienną perspektywę każdej z kamer. Obszar obserwowany przez każdą z nich dość znacząco różni się, szczególnie dla bliskich odległości. Rozwiązania, w swoich założeniach zbliżone do realizowanej przez Autora bramki identyfikacji biometrycznej wykorzystują zazwyczaj metody oparte o: analizę koloru (np. ubrania), położenie na obrazie czy ekstrakcję cech twarzy. Rezultaty testów pierwszych dwóch metod znacznie odbiegały od oczekiwań. Dokładniej przetestowano natomiast trzecią metodę. Jej funkcjonowanie zakłada realizację ekstrakcji cech przy wykorzystaniu na przykład algorytmu LBPH (ang. Local Binary Patterns Histograms) [34]) w celu pozyskania wzorca charakterystycznego dla każdej odnalezionej twarzy. Pozyskane wzorce, nazywane również wektorami cech są następnie porównywane w celu wyznaczenia tych najbardziej zbliżonych, a więc opisujących ten sam podmiot. Przeprowadzone przez Autora badania pokazały bardzo wysoką skuteczność algorytmu LBPH w poszukiwaniu odpowiadających twarzy osób na obrazach pochodzących z systemu stereowizyjnego, osiągnięta skuteczność na poziomie 96%. Czas realizacji był jednak nieakceptowalnie długi. Dla zbioru testowego w którym maksymalnie pięć podmiotów znajdowało się jednocześnie w przestrzeni obserwowanej bramki identyfikacji biometrycznej, uzyskiwano średnie czasy kreacji par twarzy dochodzące do 100ms co uniemożliwiłoby pracę rozwiązania w czasie rzeczywistym.

Z tego powodu Autor rozpoczął prace nad własną implementacją, której głównym założeniem było uzyskanie wysokiej skuteczności zbliżonej do uzyskiwanej przez algorytm LBPH przy jednoczesnej redukcji czasu kreacji par. W wyniku tychże prac opracowany został algorytm, bazujący na punktach kluczowych twarzy obliczanych symetrycznie przy użyciu danych stereowizyjnych oraz analizie trójwymiarowej. Ścieżka realizacji została przedstawiona na Rys. 5.3.



Rysunek 5.3: Algorytm odnajdywania odpowiadających twarzy na obrazach z kamer stereowizyjnych

W pierwszym etapie dla każdej z twarzy uprzednio odnalezioną na obrazach WFOV realizowana jest detekcja 68 charakterystycznych punktów kluczowych[35]. Następnie tworzony jest zbiór wszystkich możliwych par twarzy pochodzących z kamery lewej oraz prawej. W obrębie każdej z nich, dla każdego z punktów kluczowych wyznaczone jest położenie przy wykorzystaniu stereowizji. W ten sposób dla każdej z par utworzona zostaje bryła, składająca się z 68 punktów opisanych w przestrzeni trójwymiarowej. Kluczowe w realizacji algorytmu było spostrzeżenie Autora, że tylko poprawnie utworzona para, reprezentująca obrazy twarzy tego samego podmiotu, pozwoli na uzyskanie zbioru punktów 3D, które przedstawiać będą bryłę jego rzeczywistej twarzy. Co więcej, będzie ona zawierać informację o rzeczywistym położeniu w trójwymiarowej przestrzeni obserwowanej bramki identyfikacji biometrycznej. Na Rys. 5.4 zaprezentowane zostały przykładowe bryły powstałe dla każdego z trzech rodzajów par: obrazy twarzy przedstawiające tą samą osobę, pochodzące od różnych osób oraz zawierające nieprawidłowo wskazaną twarz.



Rysunek 5.4: Rezultaty uzyskiwane przez algorytm dla różnych dopasowań.

W ostatnim etapie funkcjonowania algorytmu realizowana jest klasyfikacja każdej z utworzonych brył 3D w celu zidentyfikowania tych które zostały utworzone przy użyciu pary obrazów twarzy pochodzących od tego samego podmiotu. Autor zaproponował wykorzystanie następujących czynników weryfikujących:

- **Pozycja w przestrzeni** - bryła znajduje się wewnątrz obserwowanej przestrzeni bramki identyfikacji biometrycznej, nie poza nią.
- **Kształt 3D oraz objętość** - objętość jak i kształt bryły definiowanej przez punkty 3D powinna być zbliżona do twarzy człowieka.
- **Odległość oczu** - odległość oczu oznaczonych przez punkty kluczowe powinna zawierać się w określonym przedziale [36][37].
- **Różnica wysokości** - różnica wartości współrzędnej y położenia punktów kluczowych twarzy podmiotów na obrazach z obu kamer powinna być zbliżona do zera.

Finalny rezultat klasyfikacji wyznaczany jest poprzez wymnożenie otrzymanych rezultatów cząstkowych. Otrzymywana wartość z zakresu $< 0, 1 >$ oznaczająca prawdopodobieństwo poprawności każdej z par i na jej podstawie podejmowana jest decyzja o finalnej kreacji par obrazów twarzy reprezentujących te same podmioty. W bieżącym kroku pozyskana została również informacja o COG każdej z twarzy, która reprezentuje położenie każdego z podmiotów i jest wykorzystywana na potrzeby pozostałych etapów funkcjonowania algorytmu śledzenia i detekcji.

5.1.7 Aktualizacja danych śledzenia (G)

Algorytm kreacji par, opracowany przez Autora i wykorzystany w poprzednim kroku funkcjonowania algorytmu śledzenia i detekcji, umożliwił pozyskanie informacji o położeniu podmiotów w obserwowanej przestrzeni bramki identyfikacji biometrycznej. Wśród nich zawarte są nie tylko informacje o nowych położeniach osób już znajdujących się na liście podmiotów śledzonych, ale również informacje o położeniu nowo-odnalezionych osób.

W ostatnim kroku funkcjonowania algorytmu śledzenia i detekcji dane te wykorzystywane są do aktualizacji listy podmiotów śledzonych. W ten sposób, dla tych już znanych uaktualniana jest informacja o pozycji bieżącej, natomiast dla nowych dodawane są nowe wpisy. W kolejnych iteracjach algorytmu śledzenia i detekcji zaktualizowane wpisy bazy danych służą m.in. do przewidywania pozycji podmiotów na potrzeby ich śledzenia oraz ostatecznie akwizycji danych biometrycznych poprzez obiektyw akwizycyjny.

Rozdział 6

ZBIORY DANYCH TESTOWYCH

W celu dokonania rzetelnej oceny funkcjonowania zrealizowanego przez Autora systemu akwizycji bramki identyfikacji biometrycznej konieczne było pozyskanie dedykowanych zbiorów testowych. W ten sposób możliwe było określenie nie tylko zdolności opracowanego rozwiązania do pozyskiwania danych biometrycznych, ale również określenie wpływu np. liczby osób jednocześnie przebywających w obserwowanej przestrzeni bramki, czy zawartości czynników degradacji na ich ilość i jakość. Ostatecznie, interesujące było również określenie jaka skuteczność identyfikacji biometrycznej jest możliwa do osiągnięcia przy wykorzystaniu danych pozyskiwanych przez zrealizowany system akwizycji. W trakcie prac pozyskano dwa zbiory COMPACT oraz COMPACT tracking. Akwizycja w obu przypadkach odbywała się wewnątrz jednego z pomieszczeń Katedry Mikroelektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Łódzkiej.

6.1 Baza danych COMPACT

Proces tworzenia bazy danych COMPACT, dla każdego z pomiotów, obejmował akwizycje obrazów rejestracyjnych oraz weryfikacyjnych. Celem akwizycji danych rejestracyjnych była kreacja zbiorów próbek biometrycznych, służących później jako wzorce tożsamości w procesie identyfikacji. Zbiory pozyskiwane były przy wykorzystaniu stanowiska akwizycji danych rejestracyjnych, opracowanego przez Autora, w celu uzyskania obrazów różnych pól podmiotów (obrazy twarzy, $< 45^\circ, 45^\circ >$ z krokiem 5°). Obrazy tęczówek pozyskano natomiast przy wykorzystaniu urządzenia I Scan 2, wyprodukowanego przez firmę CrossMatch. Baza danych COMPACT pozyskana została przez mgr inż. Michała Włodarczyka, członka Zespołu.

Dane weryfikacyjne zostały podzielone na dwie grupy: obrazy twarzy pozyskane poprzez obiektyw akwizycyjny NFOV oraz obrazy uzyskane przez stereowizyjny system WFOV. Pojedynczy zbiór zawiera zdjęcia zebrane dla pojedynczego podmiotu w trakcie jego przejścia poprzez bramkę identyfikacji. Obrazy zostały pozyskane w sposób automatyczny dzięki systemowi akwizycji próbek biometrycznych opracowanemu przez Autora. Na Rys. 6.1 zaprezentowane zostały przykładowe obrazy, uzyskane przez stereowizyjny system WFOV oraz obiektyw akwizycyjny dla tej samej chwili czasowej.

W celu uzyskania zróżnicowanego stopnia trudności, tj. różnej zawartości czynników degradacji dla uzyskiwanych obrazów, wprowadzono cztery niezależne scenariusze akwizycji. Pierwsze dwa scenariusze realizowane były w warunkach kontrolowanych, natomiast dwa pozostałe w warunkach niekontrolowanych, zbliżonych do naturalnych. Dla każdego z podmiotów, każdy ze scenariuszy został powtórzony dwukrotnie. W ten sposób dla każdego z nich uzyskanych zostało osiem serii danych. Scenariusze, wykorzystywane w trakcie akwizycji danych weryfikacyjnych, zostały zaprezentowane poniżej.

- **Scenariusz 1:** Podmiot przechodzi poprzez bramkę identyfikacji biometrycznej patrząc na wprost. Pozwala to na uzyskanie obrazów frontalnych, które mogą zostać wykorzystane do wyznaczenia wartości najwyższej uzyskiwanej skuteczności identyfikacji biometrycznej.
- **Scenariusz 2:** Podmiot przechodzi poprzez bramkę patrząc w lewo (pierwsze przejście) oraz w prawo (drugie przejście). Dane wykorzystywane do badań związanych z pozą podmiotu oraz jej wpływem na skuteczność identyfikacji biometrycznej.
- **Scenariusz 3:** Podmiot przechodzi poprzez bramkę identyfikacji biometrycznej rozglądając się w sposób losowy. Obejmuje to zarówno ruch w płaszczyźnie poziomej jak i pionowej. Dane wykorzystywane do badań nad wpływem zmiennej pozy wraz z wprowadzeniem czynnika losowego.

Tabela 6.1: Najistotniejsze cechy bazy COMPACT

Widmo	Bliska podczerwień
Liczba podmiotów	108
Liczba obrazów rejestracyjnych	12312
Liczba obrazów weryfikacyjnych	31078
Średnia liczba obrazów weryfikacyjnych przypadająca na podmiot	287
Rozmiar obrazu	2560x2048 pikseli (rejestracyjne) 3520x2200 pikseli (weryfikacyjne)

- **Scenariusz 4:** Podmiot przechodzi poprzez bramkę rozglądając się w sposób losowy, podobnie jak w poprzednim scenariuszu. W tym jednak przypadku, osoby zostały dodatkowo poproszone o częściowe zakrywanie twarzy, w trakcie wykonywania naturalnych czynności takich jak poprawianie okularów, przeczesywanie włosów, przecieranie oczu czy korzystanie z telefonu komórkowego. Dane umożliwiają zbadanie wpływu zawartości czynników degradacji na ilość i jakość pozyskiwanych danych biometrycznych.

W Tabeli 6.1 zaprezentowane zostały parametry pozyskanej bazy danych COMPACT.



Rysunek 6.1: Przykładowe obrazy uzyskane dla części weryfikacyjnej bazy danych COMPACT. Od lewej: pary obrazów pochodzące z systemu stereowizyjnego oraz obrazy uzyskane przez obiektyw NFOV.

6.2 Baza danych COMPACT tracking

Dane pozyskane wraz z bazą COMPACT były cennym źródłem informacji o jakości funkcjonowania systemu akwizycji. Nie pozwoliły jednak na zweryfikowanie zdolności systemu do funkcjonowania w przypadku

Tabela 6.2: Najistotniejsze cechy bazy COMPACT tracking

Widmo	Bliska podczerwień
Liczba unikalnych podmiotów	12
Liczba obrazów z kamer WFOV	84316
Liczba obrazów z obiektywu NFOV	4218
Średnia liczba obrazów twarzy przypadająca na podmiot	123
Średnia prędkość poruszania się podmiotów	1.24 m/s
Rozmiar obrazów	1280x960 pikseli (WFOV) 3520x2200 pikseli (NFOV)

obecności wielu podmiotów w obserwowanej przestrzeni bramki identyfikacji biometrycznej. Z tego powodu Autor pozyskał dodatkowy zbiór danych w postaci bazy COMPACT tracking. Jego akwizycja nie miała na celu powielania rezultatów uzyskanych dla bazy COMPACT. Dlatego zrezygnowano z realizacji ściśle sprecyzowanych scenariuszy na rzecz naturalnych przejść podmiotów poprzez bramkę identyfikacji biometrycznej. Czynniki degradacji były więc wciąż obecne jednakże jeśli występowały to były efektem nieskrępowanego i nienarzuconego zachowania podmiotów uwierzytelnianych. Różnorodność pozyskiwanych danych uzyskiwana była natomiast poprzez mnogość przejść podmiotów. Założono, że każda z osób obecnych w bazie będzie obecna na przynajmniej dziesięciu przejściach. Dzięki temu baza COMPACT tracking umożliwi odwzorowanie warunków docelowego funkcjonowania opracowanej bramki identyfikacji biometrycznej zakładających znacznie zmniejszoną kooperację podmiotów uwierzytelnianych. W Tabeli 6.2 zaprezentowane zostały parametry pozyskanej bazy danych COMPACT tracking.



Rysunek 6.2: Przykładowe obrazy zawarte w bazie danych COMPACT tracking. Od lewej: obrazy pochodzące z systemu stereowizyjnego oraz obrazy uzyskane przez obiektyw NFOV.

Rozdział 7

TESTY SYSTEMU

W ramach realizacji projektu COMPACT pozyskane zostały dwa zbiory danych w postaci baz COMPACT oraz COMPACT tracking. Z punktu widzenia Autora kluczową ich rolą była możliwość pozyskania informacji na temat jakości funkcjonowania zrealizowanego systemu akwizycji próbek biometrycznych. Przeprowadzone testy zostały podzielone na dwa etapy: analiza funkcjonowania systemu akwizycji danych biometrycznych oraz ocena działania algorytmu śledzenia i detekcji.

7.1 Analiza funkcjonowania systemu akwizycji danych biometrycznych

W pierwszym z etapów określono jakość pozyskiwanych próbek biometrycznych na podstawie ich zgodności z normami jakościowymi ISO/IEC 19794-5 dla pozyskiwanych obrazów twarzy i okolic oka oraz ISO/IEC 19794-6 dla tęczy oka. Następnie zbadano skuteczność identyfikacji biometrycznej osiągniętej przy wykorzystaniu pozyskiwanych próbek biometrycznych oraz parametry dynamiczne opracowanego systemu akwizycji.

7.1.1 Analiza jakości pozyskiwanych obrazów twarzy

Autor, sugerując się pracami innych badaczy [7], [6], [8] skorzystał z uproszczonej formy weryfikacji jakości pozyskiwanych obrazów twarzy, realizowanej na podstawie parametru IPD (ang. InterPupillary Distance). Do jej realizacji przygotował dedykowany skrypt weryfikacyjny, pozwalający określić wartość parametru IPD na każdym z obrazów twarzy zebranych w zbiorach bazy COMPACT oraz COMPACT tracking. Rezultaty zaprezentowane zostały w Tabeli 7.1. Wyróżniona została całkowita liczba zdjęć pozyskanych przez obiektów akwizycyjny dla każdej z baz oraz liczba obrazów zawierających zgodny z wymaganiami obraz twarzy.

7.1.2 Analiza jakości pozyskiwanych obrazów tęczy

W drugim etapie zweryfikowano jakość pozyskiwanych danych biometrycznych tęczy oka. Przeprowadzona analiza pokazała spełnianie kryterium rozdzielczości na każdym z widocznych obrazów tęczy, pozyskanym w odległości 0.6-1m od obiektu. Spełnienie kryterium wysokiego kontrastu oka okazało

Tabela 7.1: Skuteczność pozyskiwania danych biometrycznych zgodnych z normą ISO/IEC 19794-5 przez opracowany system akwizycji.

Scenariusz	COMPACT				COMPACT tracking
	1	2	3	4	-
Liczba obrazów pozyskanych przez obiektów akwizycyjny	4174	3987	4142	3182	4218
Liczba obrazów spełniających wymagania normy ISO/IEC 19794-5	4145	3856	4037	2980	4017
Skuteczność pozyskiwania próbek biometrycznych twarzy zgodnych z normą ISO/IEC 19794-5	99.31%	96.71%	97.47%	93.65%	95.23%

się natomiast dużo trudniejsze. Uzyskanie wymaganej separacji poziomów jasności wynoszącej 50 dla obszaru pomiędzy twardówką i tęczę oraz 70 pomiędzy tęczę a źrenicą było znacznie utrudnione w trakcie dynamicznej akwizycji obrazów. Nie zmienia to jednak faktu, że część obrazów twarzy podmiotów, pozyskiwanych w pobliżu obiektywu (w odległości $\sim 0.6m$) zawierała poprawny i zgodny z wymaganiami normy ISO obraz tęczy oka. Przykładowe pozyskane obrazy tęczy, wraz z wyznaczonym zakresem poziomów jasności zamieszczone zostały w dysertacji Autora.

Analiza danych zawartych w zbiorach COMPACT oraz COMPACT tracking pokazała natomiast problematyczność obszaru akwizycji obiektywu NFOV dla pozyskiwania danych biometrycznych tęczy. W trakcie scenariuszy naturalnych, najlepiej odwzorowujących docelowe warunki pracy systemu, zauważono tendencję podmiotów do przechodzenia poprzez bramkę identyfikacji przy samej jej krawędzi. Sprawia to, że kluczowy dla pozyskiwania obrazów tęczy obszar akwizycji obiektywu¹ jest często omijany przez podmioty uwierzytelniane.

7.1.3 Skuteczność identyfikacji realizowanej w oparciu o pozyskane próbki biometryczne

Zbadano również skuteczność identyfikacji biometrycznej realizowanej w oparciu o pozyskane przez system akwizycji obrazy twarzy. W tym celu posłużono się badaniami zrealizowanymi przez mgr inż. Michała Włodarczyka, zamieszczonymi w jego pracy [38]. Testy zrealizowane zostały w oparciu o trzy wybrane algorytmy, umożliwiające realizację identyfikacji biometrycznej przy użyciu zdjęć twarzy podmiotów. Do oceny jakości pozyskiwanych danych wykorzystano parametr RANK-1. Parametr ten niesie informację o tym jak często wzorzec biometryczny przypisywany jest do właściwej tożsamości (w zamkniętym zbiorze wzorców). Jego wartość w tym przypadku wskazuje z jakim prawdopodobieństwem uwierzytelniany podmiot zostanie prawidłowo zidentyfikowany². Uzyskane rezultaty, dla poziomu ufności 90%, zaprezentowane zostały w Tabeli 7.2.

Tabela 7.2: Skuteczność identyfikacji biometrycznej na obrazach pochodzących z systemu akwizycji

RANK-1	Scenariusz			
	1	2	3	4
ThreePatchLBP	99.20 ± 0.14%	95.48 ± 0.82%	95.20 ± 0.75%	89.03 ± 1.42%
HighDimLBP	99.39 ± 0.47%	95.88 ± 0.97%	96.47 ± 0.86%	93.69 ± 2.15%
ResNet	99.67 ± 0.08%	98.61 ± 0.67%	99.56 ± 0.14%	98.06 ± 0.64%

Przedstawione rezultaty pokazują, że konstrukcja łącząca obiektyw z wysuniętą źrenicą oraz układy zwierciadeł na napędach galwanometrycznych umożliwia akwizycję próbek biometrycznych od osób w ruchu i z odległości o jakości wystarczającej do skutecznej identyfikacji biometrycznej, co dowodzi tezy pierwszej.

7.1.4 Analiza właściwości dynamicznych obiektywu akwizycyjnego

Weryfikacja właściwości dynamicznych obiektywu akwizycyjnego zrealizowana została poprzez analizę porównawczą danych zgromadzonych w zbiorach COMPACT oraz COMPACT tracking. Pierwszy z nich obejmował przejścia pojedynczej osoby poprzez bramkę identyfikacji biometrycznej. Został więc potraktowany jako zbiór referencyjny. W ten sposób określona została maksymalna liczba danych biometrycznych³ jakie jest w stanie pozyskać opracowany system akwizycji w trakcie pojedynczego przejścia podmiotu. Następnie wartość ta została porównana ze zbiorami bazy COMPACT tracking obejmującej przejścia

¹Obszar akwizycji obrazów tęczy został określony w Podrozdziale 3.5 dysertacji.

²Przy założeniu, że tożsamość uwierzytelnianego podmiotu ujęta została w bazie danych rejestracyjnych.

³Dane biometryczne czyli obrazy twarzy podmiotów uwierzytelnianych zgodne z wymaganiami normy jakościowej ISO/IEC 19794-5.

Tabela 7.3: Wpływ liczby podmiotów na skuteczność akwizycji próbek biometrycznych

Liczba próbek biometrycznych pozyskanych od pojedynczego podmiotu przypadających na pojedyncze przejście	Liczba podmiotów w obserwowanej przestrzeni systemu				
	1	2	3	4	5
Średnia	15	8	6	3	2
Minimalna	7	5	3	1	0
Maksymalna	25	19	12	7	4

większej liczby osób (od 2 do 5) poprzez bramkę identyfikacji. Uzyskane rezultaty zostały zgromadzone w Tabeli 7.3.

Dodatkowo przeprowadzona została analiza obejmująca określenie wpływu zawartości czynników degradacji na ilość pozyskiwanych danych biometrycznych w pojedynczym przejściu. W tym celu wykorzystane zostały zbiory bazy COMPACT obejmujące cztery scenariusze różniące się zawartością czynników degradacji. Zostały one dokładniej opisane w Podrozdziale 6.1, natomiast otrzymane rezultaty zaprezentowane zostały w Tabeli 7.4.

Tabela 7.4: Wpływ czynników degradacji na skuteczność systemu akwizycji

Liczba obrazów twarzy uzyskiwanych w pojedynczym przejściu i spełniających wymaganie normy ISO/IEC 19794-5	Scenariusz			
	1	2	3	4
Średnia	20	18	19	15
Minimalna	16	15	10	7
Maksymalna	28	26	32	25

7.2 Algorytm śledzenia i detekcji podmiotów

Analiza funkcjonowania algorytmu śledzenia i detekcji podmiotów zrealizowana została w oparciu o obrazy stereowizyjnego systemu WFOV zgromadzone w zbiorach danych COMPACT oraz COMPACT tracking. Wykorzystano również przygotowane środowisko testowe, umożliwiające odtwarzanie warunków pracy bramki identyfikacji biometrycznej w taki sposób, że zamiast danych rzeczywistych pochodzących z kamer systemów wizyjnych wykorzystywane są zgromadzone wcześniej zapisane dane archiwalne. W ten sposób możliwe było wielokrotne powtórzenie tych samych testów przy zachowaniu identycznych danych wejściowych. Tym samym możliwa była analiza funkcjonowania każdego z kroków algorytmu śledzenia i detekcji.

Przeprowadzone testy pokazały, że dla zbioru bazy danych COMPACT tracking średni całkowity czas pojedynczej iteracji algorytmu śledzenia i detekcji wynosił 47.6 ms. W przypadku pojawienia się w przestrzeni obserwowanej bramki identyfikacji biometrycznej nowego, jeszcze nie śledzonego podmiotu czas ten wzrastał średnio do 84.4 ms. Jednakże wzrost ten związany był zaledwie z pojedynczą iteracją, dla której osoba dodawana była do listy podmiotów śledzonych. Oznacza to, że opracowany algorytm śledzenia i detekcji w przypadku obecności w przestrzeni obserwowanej bramki identyfikacji biometrycznej od dwóch do pięciu podmiotów jest w stanie funkcjonować z szybkością 21 iteracji na sekundę. Analiza przeprowadzona na zbiorze danych COMPACT, obejmującym występowanie w danej chwili tylko jednego podmiotu pokazała jeszcze większą prędkość przetwarzania, na poziomie 29 iteracji na sekundę. Wyniki te pokazują, że opracowane przez Autora rozwiązanie umożliwia śledzenie i detekcję podmiotów uwierzytelnianych w czasie rzeczywistym. Tym samym spełnione zostało jedno z głównych założeń projektowych bramki identyfikacji biometrycznej zakładające funkcjonowanie rozwiązania w czasie rzeczywistym.

7.2.1 Odnajdywanie ruchomych elementów obrazu

Przeprowadzone testy opracowanego przez Autora algorytmu odnajdywania ruchomych elementów obrazu pokazały poprawność jego funkcjonowania. Badania przeprowadzono w odniesieniu do implementacji bazowej algorytmu, opartej na rozpowszechnionym algorytmie Simple Blob Detector [39]. Zaproponowany algorytm wykazał zbliżoną skuteczność dla scenariuszy uproszczonych, dla których podmioty znajdowały się w znacznej odległości, a uzyskiwane (poprzez algorytm izolacji tła) maski były dobrej jakości. Natomiast, dla scenariuszy trudniejszych, obejmujących występowanie wielokrotnych przesłoneń czy zmienność warunków środowiskowych, skutkującą otrzymywaniem gorszej jakości masek tła, algorytm Autora wykazał poprawę w stosunku do algorytmu referencyjnego. Dla obecności trzech podmiotów uzyskano dokładność określania obszarów występowania większą aż o 20% natomiast dla czterech większą o 8%.

Dodatkowo zauważono, że opracowany algorytm funkcjonował w sposób optymalny dla trzech podmiotów znajdujących się w jednej chwili na obrazach. Przestrzeń obserwowana systemem akwizycji obejmuje, szczególnie w położeniu najbliższym bramki identyfikacji biometrycznej, wąski wycinek przestrzeni. Obecność większej liczby podmiotów wymaga więc ich bardzo bliskiej odległości. Z tego powodu znacznie utrudniona zostaje ich separacja na obrazach pochodzących z szerokokątnego systemu stereowizyjnego.

7.2.2 Przewidywanie pozycji podmiotów

W kolejnym kroku wyznaczona została dokładność przewidywania pozycji podmiotów wewnątrz obserwowanej przestrzeni bramki identyfikacji. Pozyskane wyniki dokładności przewidywania pozycji pokazały dużą dokładność opracowanego rozwiązania. Wartość błędu pozyskana dla odległości podmiotu uwierzytelnianego od bramki identyfikacji biometrycznej (oś Oz) była najmniejsza i wynosiła zaledwie 0.41 cm. Jest to szczególnie istotne ze względu na niewielką głęboką ostrości obiektywu akwizycyjnego, która dla najbliższej obsługiwanej odległości 0.6 m wynosi około 1 cm. Błąd przewidywania pozycji dla Osi Ox oraz Oy nie jest natomiast tak krytyczny ponieważ nawet dla najbliższej odległości akwizycji pozyskiwane obrazy twarzy w przypadku przesunięcia o maksymalną wartość błędu w postaci 1.1 cm możliwe będzie pozyskanie poprawnego obszaru twarzy i okolic oka.

Autor podjął również próbę zweryfikowania jakości funkcjonowania opracowanego rozwiązania w odniesieniu do implementacji bazowej, opartej na przepływie optycznym metody Lucas-Kanade. Otrzymane rezultaty pokazały nawet dwukrotne ograniczenie czasu potrzebnego na realizację kroku w przypadku zastosowania metody Autora. Niemożliwe jednak okazało się wiarygodne porównanie dokładności obu metod, przepływ optyczny funkcjonuje w oparciu o analizę dwuwymiarowych obrazów natomiast wykorzystany filtr Kalmana bezpośrednio w oparciu o dane trójwymiarowe.

Otrzymane rezultaty pokazują, że zaproponowane przez Autora rozwiązanie pozwoliło na dwukrotne zredukowanie czasu przewidywania pozycji w odniesieniu do implementacji referencyjnej. Uzyskiwane wartości błędu pokazują natomiast dużą dokładność opracowanego rozwiązania, wystarczającą dla pozyskiwania obrazów twarzy podmiotów uwierzytelnianych przez system akwizycji.

7.2.3 Wyznaczanie obszarów poszukiwań

W realizowanym przez Autora systemie akwizycji danych biometrycznych, wielkość twarzy podmiotów zmienia się nawet dziesięciokrotnie dla położen najdalszych i najbliższych od bramki identyfikacji. Ustalenie stałej wielkości twarzy w trakcie ich odnajdywania na obrazach z systemu stereowizyjnego spowodowałoby znaczny spadek wydajności. Zaproponowane przez Autora rozwiązanie umożliwia dynamiczne dopasowywanie obszaru detekcji do położenia podmiotu na podstawie danych trójwymiarowych.

Testy przeprowadzonego rozwiązania pokazały, że zaproponowane przez Autora rozwiązanie pozwoliło na nawet dziesięciokrotne zmniejszenie obszarów poszukiwań twarzy osób będących już na liście podmiotów śledzonych.

7.2.4 Znajdowanie odpowiadających twarzy

Określanie położenia podmiotów w przestrzeni obserwowanej bramki identyfikacji biometrycznej realizowane jest przy użyciu stereowizji. Wymaga to jednak wskazania obrazów twarzy pochodzących od tych samych osób jednak odnalezionych na zdjęciach z lewej oraz prawej kamery systemu WFOV. Dodatkowo na tym etapie bardzo istotne jest również wyeliminowanie obszarów wskazanych przez detektor jednak nie zawierających twarzy.

Do realizacji tego zadania Autor zaproponował innowacyjną metodę opartą na punktach kluczowych twarzy oraz analizie trójwymiarowej. Ocena jej funkcjonowania przeprowadzona została w odniesieniu do metody bazowej, opartej na ekstrakcji cech w postaci algorytmu LBPH (ang. Local Binary Patterns Histograms). Przetestowano również bardzo uproszczoną implementację bazującą na analizie położenia twarzy podmiotów na obrazach. Uzyskane rezultaty zostały zaprezentowane w Tabeli 7.5.

Tabela 7.5: Skuteczność algorytmu odnajdowania odpowiadających twarzy, zaproponowanego przez Autora.

	Algorytm oparty na analizie współrzędnej y położenia twarzy	Algorytm oparty na ekstrakcji cech (LBPH)	Zaproponowany przez Autora algorytm (Analiza 3D)
Liczba poprawnych par twarzy	2078		
Poprawnie wskazane pary twarzy	1540	2004	2045
Skuteczność	74.1 %	96.44 %	98.41 %
Średni czas przetwarzania	8.2 ms	97.5 ms	13.02 ms

Wyniki przeprowadzonych testów pokazują, że algorytm opracowany przez Autora wykazał największą skuteczność kreacji poprawnych par twarzy wśród przebadanych implementacji. W odniesieniu do najprostszej realizacji obejmującej analizę położenia twarzy na obrazach stereowizyjnych metoda Autora osiągnęła ponad 20 % większą skuteczność przy jednoczesnym zwiększeniu czasu analizy o zaledwie 5 ms. Algorytm bazujący na ekstrakcji cech (LBPH) wykazał natomiast bardzo zbliżoną skuteczność jednak czas kreacji par był ponad siedmiokrotnie dłuższy. Czas realizacji wynoszący prawie 100 ms dla obecności trzech podmiotów w obserwowanej przestrzeni systemu był nieakceptowalnie długi. Zastosowanie algorytmu opartego o ekstrakcję cech LBPH uniemożliwiłoby funkcjonowanie systemu akwizycji w czasie rzeczywistym.

Finalnie Autor zbadał również zdolność opracowanego rozwiązania do eliminacji niepoprawnych wskazań detektora twarzy. Na potrzeby analizy wykorzystano ten sam podzbiór bazy COMPACT tracking, który użyto do weryfikacji skuteczności kreacji par opisanej w pierwszej części bieżącego podrozdziału. Dla lepszej oceny funkcjonowania rozwiązania Autor postanowił dodatkowo wprowadzić do zbioru większą liczbę niepoprawnie wskazanych twarzy. Pozyskane rezultaty zebrane zostały w Tabeli 7.6.

Tabela 7.6: Zdolność algorytmu Autora do eliminacji niepoprawnie odnalezionych twarzy.

	Algorytm oparty na ekstrakcji cech (LBPH)	Zaproponowany przez Autora algorytm (Analiza 3D)
Wszystkie wskazane twarze	5339	
Niepoprawnie wskazane twarze	1469	
Wyeliminowane niepoprawne wskazania	776	1417
Skuteczność	52.82%	96.46%

Uzyskane rezultaty pokazują, że algorytm opracowany przez Autora, pozwala na eliminację większości niepoprawnie wskazanych twarzy. W przeprowadzonym teście wykazał on prawie dwukrotnie większą

skuteczność od algorytmu referencyjnego, bazującego na LBPH. W ten sposób możliwe było prawie całkowite wyeliminowanie wyznaczania nieprawidłowych lokalizacji dla obiektywu akwizycyjnego NFOV.

Algorytm odnajdywania odpowiadających twarzy zaprezentowany przez Autora podczas przeprowadzonych testów wykazał największą skuteczność funkcjonowania spośród przeanalizowanych rozwiązań. Osiągnął skuteczność kreacji par wynoszącą ponad 98% przy zachowaniu bardzo krótkiego czasu analizy wynoszącego zaledwie 13.02 ms dla obecności trzech podmiotów w przestrzeni obserwowanej bramki identyfikacji biometrycznej. Czas ten był jednocześnie ponad siedmiokrotnie krótszy od osiągniętego przez algorytm referencyjny bazujący na LBPH.

Dodatkowo, rezultaty przedstawione w Tabeli 7.6 pokazały jeszcze jedną bardzo istotną zaletę opracowanego rozwiązania. Ponad 96 % niepoprawnych obrazów twarzy podmiotów obecnych w testowanym zbiorze zostało przez algorytm odnalezione i wyeliminowane z finalnej kreacji par. Wynik ten był tym samym prawie dwukrotnie lepszy od osiągniętego przez implementację referencyjną opartą o algorytm LBPH. Oznacza to, że opracowane rozwiązanie umożliwia znaczne podniesienie skuteczności funkcjonowania śledzenia podmiotów poprzez szybszą oraz skuteczniejszą kreację par.

Przedstawione rezultaty pokazują, że wyznaczenie uproszczonego, trójwymiarowego modelu twarzy na bazie punktów kluczowych i danych stereowizyjnych pozwala na znaczne podniesienie skuteczności oraz szybkości algorytmu śledzenia osób, co dowodzi tezy drugiej.

Rozdział 8

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zrealizowane testy pokazały, że wykonany przez Autora system pozyskiwania danych biometrycznych funkcjonuje w sposób prawidłowy i można go określić mianem systemu o zmniejszonej kooperacji podmiotów uwierzytelnianych, zgodnie z przyjętą listą kryteriów. Analiza jakościowa oraz ilościowa danych biometrycznych, pozyskiwanych przez opracowane rozwiązanie przeprowadzona została w oparciu o zgromadzone zbiory danych w postaci baz COMPACT oraz COMPACT tracking. Ich różnorodność w postaci: zawartości czynników degradacji, stosowanych scenariuszy przejść, czy odmiennej liczby podmiotów uwierzytelnianych jednocześnie przebywających w przestrzeni obserwowanej systemu, zapewniła Autorowi możliwość pozyskania informacji bardziej szczegółowych, obrazujących parametry dynamiczne rozwiązania oraz efektywność pracy w warunkach o obniżonej kooperacji podmiotów uwierzytelnianych.

Pozyskiwane wewnątrz obszaru pracy obiektywu akwizycyjnego (patrz Rozdział 3 dysertacji) obrazy twarzy i okolic oka są zgodne z wymaganiami normy jakościowej ISO/IEC 19794-5. Skuteczność ich pozyskiwania¹ dla warunków uproszczonych wynosiła aż 99.31% (baza COMPACT scenariusz 1), natomiast dla najtrudniejszych przetestowanych warunków akwizycji zachowała wciąż bardzo wysoką wartość na poziomie 93.65% (baza COMPACT, scenariusz 4). Dla swobodnych, jednoczesnych przejść wielu osób poprzez bramkę identyfikacji biometrycznej, najlepiej odzwierciedlających warunki o obniżonej kooperacji podmiotów uwierzytelnianych uzyskano rezultat na poziomie 95.23% (baza COMPACT tracking).

Dodatkowa analiza przeprowadzona przez Autora wykazała, że obniżenie skuteczności akwizycji danych biometrycznych podmiotów w warunkach najtrudniejszych spowodowane było głównie niedoskonałością zastosowanego algorytmu detekcji twarzy podmiotów na obrazach stereowizyjnych. Dla znacznych przesłoneń twarzy czy wysokich kątów obrotu głowy objawiających się w trakcie całego przejścia podmiotu poprzez bramkę identyfikacji uniemożliwiał on prawidłowe określenie ich pozycji w przestrzeni. Obniżenie skuteczności akwizycji nie było więc spowodowane niewłaściwą pracą obiektywu akwizycyjnego czy algorytmu śledzenia i detekcji opracowanego przez Autora.

Przeprowadzone testy pokazały również, że w bliskim otoczeniu obiektywu tj. w odległości $\sim 0.6m$ możliwe jest również pozyskiwanie zdjęć tęczówek oczu podmiotu, zgodnych z wymaganiami normy ISO/IEC 19794-6. Liczba udanych akwizycji jest znacznie mniejsza od liczby pozyskiwanych poprawnych danych biometrycznych twarzy czy okolic oka. Co więcej, nie dla każdego przejścia podmiotu poprzez bramkę identyfikacji pozyskiwany jest choćby jeden zgodny z wymaganiami normy ISO obraz tęczówki. Analiza przeprowadzona przez Autora pokazała, że w trakcie swobodnych przejść podmiotów widoczna jest tendencją podmiotów do przechodzenia poprzez bramkę identyfikacji biometrycznej w pobliżu jej krawędzi, a więc z pominięciem kluczowego dla akwizycji obrazów tęczówki obszaru akwizycji (odległość podmiotu od obiektywu $\sim 0.6m$). Pozyskiwanie większej ilości, odpowiednich jakościowo próbek biometrycznych tęczówki wymagałoby zmiany kompozycji systemu w postaci zastosowania dodatkowego obiektywu akwizycyjnego. W ten sposób możliwe byłoby wyeliminowanie problemu omijania przez podmioty przestrzeni, w której możliwe jest pozyskanie próbek biometrycznych tęczówki oka. Niestety ze względu na wysoki koszt obiektywu oraz ograniczony budżet projektu COMPACT zastosowanie drugiego obiektywu NFOV nie było możliwe. Wymuszenie od podmiotów uwierzytelnianych nienaturalnych przejść na wprost obiektywu byłoby natomiast sprzeczne z ideą realizacji rozwiązania o obniżonej kooperacji podmiotów uwierzytelnianych dlatego zostało zignorowane.

W kolejnym etapie zweryfikowana została jakość pozyskiwanych próbek biometrycznych poprzez wyznaczenie wartości skuteczności identyfikacji biometrycznej osiągniętej przy ich wykorzystaniu. Badania

¹Skuteczność pozyskiwania danych biometrycznych może być rozumiana jako liczba pozyskanych, zgodnych z wymaganiami normy ISO/IEC 19794-5, danych biometrycznych w odniesieniu do wszystkich pozyskanych przez obiektyw akwizycyjny obrazów twarzy.

te zrealizowane zostały przez mgr inż. Michała Włodarczyka i dokładniej opisane w jego dysertacji [38]. Otrzymane rezultaty pokazały natomiast, że przy wykorzystaniu danych biometrycznych twarzy pozyskiwanych przez system akwizycji Autora możliwe jest określenie tożsamości podmiotu² ze skutecznością dochodzącą do $99.67 \pm 0.08\%$ (Biometria twarzy, algorytm ResNet, baza COMPACT scenariusz 1). Natomiast dla najtrudniejszych przetestowanych warunków akwizycji, odzwierciedlających warunki o obniżonej kooperacji podmiotów uwierzytelnianych i obejmujących liczne czynniki degradacji tj. przesłonięcia twarzy podmiotów, obroty głowy czy zmienna mimikę uzyskano skuteczność identyfikacji biometrycznej na poziomie $98.06 \pm 0.64\%$ (Biometria twarzy, algorytm ResNet, baza COMPACT scenariusz 4). Dowodzi to, że zrealizowany przez Autora system akwizycji umożliwia akwizycję danych biometrycznych twarzy o wysokiej jakości i umożliwiającą realizację identyfikacji biometrycznej z bardzo wysoką skutecznością.

Otrzymane wartości skuteczności identyfikacji biometrycznej wyznaczone zostały dla pozyskanych, pojedynczych obrazów twarzy podmiotów uwierzytelnianych. Co jednak istotne, w większości przypadków, w trakcie pojedynczego przejścia podmiotów poprzez bramkę identyfikacji pozyskiwanych jest znacznie więcej zdjęć ich twarzy. Analiza przeprowadzona przy wykorzystaniu bazy danych COMPACT tracking pokazała, że nawet w przypadku obecności czterech osób w przestrzeni obserwowanej systemu pozyskiwane są średnio trzy obrazy twarzy każdej z nich podczas przejścia poprzez bramkę. Natomiast w przypadku obecności trzech osób, co zostało przez Autora wskazane w pracy jako optymalne warunki funkcjonowania rozwiązania, pozyskiwanych jest średnio aż sześć obrazów twarzy. Opracowany przez Autora algorytm śledzenia i detekcji pozwala na rozróżnianie osób znajdujących się w obserwowanej przestrzeni systemu dlatego możliwe jest przyporządkowanie pozyskiwanych danych biometrycznych do poszczególnych podmiotów, a tym samym zwiększenie wiarygodności funkcjonowania rozwiązania.

Z przedstawionych analiz wynika, że konstrukcja łącząca obiektyw z wysuniętą źrenicą oraz układy zwierciadeł na napędach galwanometrycznych umożliwia akwizycję próbek biometrycznych od osób w ruchu i z odległości o jakości wystarczającej do skutecznej identyfikacji biometrycznej, co dowodzi tezy pierwszej.

Ostatnim zrealizowanym etapem oceny opracowanego przez Autora systemu akwizycji była analiza funkcjonowania algorytmu śledzenia i detekcji. Testy przeprowadzone zostały na pozyskanych uprzednio zbiorach baz danych COMPACT oraz COMPACT tracking. Wykorzystano również środowisko symulacyjne (patrz Podrozdział 3.3 dysertacji) umożliwiające wielokrotne odtwarzanie warunków pracy bramki identyfikacji biometrycznej w taki sposób, że zamiast danych rzeczywistych pochodzących z kamer systemów wizyjnych wykorzystane zostały zgromadzone wcześniej zapisane dane archiwalne.

Pierwszym problemem na jaki natrafił Autor w trakcie realizacji algorytmu śledzenia i detekcji był bardzo długi czas odnajdywania twarzy na obrazach stereowizyjnych. Uzyskiwana wartość na poziomie $2 \times 184ms$ dla pary obrazów stereowizyjnych uniemożliwiłaby prace rozwiązania w czasie rzeczywistym i dlatego została uznana za niedopuszczalnie dużą. Proste techniki ograniczania czasu poszukiwania twarzy w postaci na przykład parametryzacji jej oczekiwanego rozmiaru nie mogły zostać zastosowane przez bardzo dużą jej rozbieżność. Szerokość obszaru twarzy na obrazie zmieniała się bowiem w zakresie 50 – 1000 pikseli. Zaproponowane przez Autora wykorzystanie algorytmu izolacji tła oraz analizy histogramów pozwoliło na ograniczenie obszaru poszukiwania nawet o 89.6% (Baza COMPACT tracking) w przypadku obecności 1 podmiotu w przestrzeni obserwowanej systemu oraz 68.1% w przypadku jednoczesnej obecności 3 podmiotów, co zostało przez Autora określone jako optymalne warunki funkcjonowania rozwiązania. Co istotne, zaproponowana przez Autora metoda oparta na analizie histogramów wykazała poprawę dokładności wyznaczania obszarów poszukiwania podmiotów w odniesieniu do implementacji bazowej, szczególnie dla scenariuszy trudniejszych, obejmujących występowanie wielokrotnych przesłonięć czy zmienności warunków środowiskowych.

W trakcie analizy funkcjonowania algorytmu śledzenia i detekcji potwierdzono również słuszność zastosowania systemu stereowizyjnego w rozwiązaniu. Opracowany przez Autora algorytm śledzenia podmiotów oparty na filtrze Kalmana i pracujący bezpośrednio na punktach opisanych w przestrzeni trójwymiarowej

²Przy założeniu jego obecności w zbiorze rejestracyjnym.

wykazał zbliżoną skuteczność funkcjonowania do implementacji bazowej opartej na analizie realizowanej bezpośrednio na stereowizyjnych obrazach 2D. Jednocześnie jednak czas niezbędny na jej zrealizowanie ograniczony został ponad dwukrotnie. Dodatkowo informacja o dokładnym położeniu każdej osoby w przestrzeni obserwowanej bramki identyfikacji biometrycznej pozwoliła na znaczne ograniczenie obszarów poszukiwań twarzy w przypadku śledzenia znanych już podmiotów. Dzięki temu obszar ten dopasowywany był w sposób dynamiczny, w zależności od odległości podmiotu od bramki. W ten sposób możliwe było jego zminimalizowanie a tym samym ograniczenie czasu potrzebnego na detekcję twarzy. Dla najdalszych odległości uzyskano nawet dziesięciokrotną redukcję szerokości obszaru poszukiwań. Zaniechanie stosowania tegoż rozwiązania wymusiłoby stosowanie stałej wielkości obszaru o wymiarach największej możliwej do odnalezienia twarzy (uzyskiwanej dla odległości najbliższej bramki).

Najistotniejszym z punktu widzenia dysertacji Autora elementem algorytmu śledzenia i detekcji była metoda odnajdywania odpowiadających twarzy umożliwiająca późniejsze określanie położenia w przestrzeni obserwowanej bramki identyfikacji biometrycznej podmiotów poprzez system stereowizyjny. Realizacja metody umożliwiała zarówno wskazywanie twarzy tych samych podmiotów na obrazach z kamer stereowizyjnych jak i odrzucanie obszarów wskazanych przez detektor jednak nie zawierających twarzy. Początkowe kroki realizacji prac obejmowały przetestowanie metod (patrz Podrozdział 5.1.6 dysertacji) stosowanych przez innych autorów, zbliżonych rozwiązań. Otrzymane wyniki pokazały ich niską skuteczność (analiza położenia na obrazach 2D) lub dużą złożoność obliczeniową (ekstrakcja cech) i skłoniły Autora do poszukiwania rozwiązania alternatywnego.

W ten sposób opracowany został algorytm, bazujący na punktach kluczowych twarzy, danych stereowizyjnych oraz analizie trójwymiarowej. Autor zauważył, że tylko poprawnie utworzona para wskazanych przez detektor obszarów, reprezentująca obrazy twarzy tego samego podmiotu, pozwoli na uzyskanie zbioru punktów 3D (utworzonych na podstawie punktów kluczowych), które przedstawiać będą bryłę rzeczywistej twarzy. W ten sposób analizując wszystkie możliwe pary obszarów wskazanych przez detektor możliwe jest określenie par obrazów twarzy pochodzących od tych samych osób jak i odrzucenie obszarów niepoprawnych.

Analiza funkcjonowania metody, przeprowadzona przy wykorzystaniu zbioru bazy danych COMPACT tracking pokazała bardzo wysoką skuteczność kreacji odpowiadających twarzy na poziomie 98.41%. W odniesieniu do konkurencyjnej, najprostszej realizacji obejmującej analizę położenia twarzy na obrazach stereowizyjnych metoda Autora osiągnęła ponad 20% większą skuteczność przy jednoczesnym zwiększeniu czasu analizy o zaledwie 5 ms. Natomiast wykorzystywany w zbliżonych realizacjach algorytm bazujący na ekstrakcji cech wykazał skuteczność na poziomie 96.44%, czyli zbliżoną do zaproponowanej metody. Czas kreacji par metody zaproponowanej przez Autora był jednak wielokrotnie krótszy (12.02 ms zamiast 97.5 ms).

Przeprowadzona analiza pokazała również, że metoda opracowana przez Autora, pozwala na eliminację większości (96.46%) niepoprawnie wskazanych przez detektor obszarów, niezawierających twarzy. W odniesieniu do przetestowanej implementacji bazowej funkcjonującej w oparciu o ekstrakcję cech stanowiło to ponad dwukrotną poprawę skuteczności eliminacji (96.46% oraz 52.82%). Opracowana przez Autora metoda pozwala więc nie tylko na realizację kreacji par odpowiadających twarzy, czy eliminację niepoprawnych wskazań detektora ale również zapewnia bardzo wydajną pracę, uzyskując czasy przetwarzania nieosiągalne dla przetestowanych metod o zbliżonej skuteczności funkcjonowania. Można więc stwierdzić, że opracowana przez Autora metoda pozwala na zwiększenie skuteczności śledzenia osób poprzez zachowanie wysokiej poprawności w kreacji par odpowiadających twarzy oraz eliminacji niepoprawnie wskazywanych obszarów. Dlatego stanowi również bardzo istotny element uzyskiwanej skuteczności akwizycji danych biometrycznych, gdyż pozwala maksymalnie ograniczać niepoprawne lokalizacje akwizycji.

Przedstawione rezultaty pokazują, że wyznaczenie uproszczonego, trójwymiarowego modelu twarzy na bazie punktów kluczowych i danych stereowizyjnych pozwala na znaczne podniesienie skuteczności oraz szybkości algorytmu śledzenia osób, co dowodzi tezy drugiej.

Potencjalne kierunki rozwoju opracowanej bramki identyfikacji biometrycznej są następujące:

- Przeprowadzona przez Autora analiza funkcjonowania rozwiązania wykazała, że obniżenie skuteczności akwizycji danych biometrycznych podmiotów w warunkach najtrudniejszych spowodowane było głównie niedoskonałością zastosowanego algorytmu detekcji twarzy podmiotów na obrazach stereowizyjnych. Dla znacznych przesłoneń twarzy czy wysokich kątów obrotu głowy objawiających się w trakcie całego przejścia podmiotu poprzez bramkę identyfikacji uniemożliwił on prawidłowe określenie ich pozycji w przestrzeni. Z tego powodu Autor planuje w przyszłości zbadanie innych algorytmów detekcji twarzy w celu odnalezienia rozwiązania alternatywnego, zapewniającego wyższą skuteczność detekcji w przypadku znacznych przesłoneń twarzy czy wysokich kątów obrotu głowy podmiotów.
- Liczba danych biometrycznych tęczówek, pozyskiwanych przez opracowany system akwizycji jest znacznie mniejsza od liczby pozyskiwanych poprawnych danych biometrycznych twarzy czy okolic oka. Istotny jest natomiast fakt, że dobrej jakości dane biometryczne tęczówki pozwalają na znaczne zmniejszenie błędu określania niewłaściwej tożsamości³. Dlatego w przyszłości Zespół planuje rozszerzyć możliwości opracowanego rozwiązania o dynamiczne dobieranie algorytmu identyfikacji w zależności od typu pozyskanych od osoby danych biometrycznych. W ten sposób pozyskanie odpowiedniej jakości zdjęć tęczówki podmiotu uwierzytelnianego pozwoliłoby na zwiększenie skuteczności jego identyfikacji.
- Opracowany przez Autora algorytm śledzenia i detekcji pozwala na rozróżnianie osób znajdujących się w obserwowanej przestrzeni systemu dlatego możliwe jest przyporządkowanie pozyskiwanych danych biometrycznych do poszczególnych podmiotów. W ten sposób możliwe jest zastosowanie tzw. fuzji czyli użycie większej liczby próbek biometrycznych pochodzących od tej samej osoby do realizacji uwierzytelniania. Technika ta pozwala zazwyczaj na zwiększenie osiąganych wartości skuteczności identyfikacji biometrycznej, szczególnie w przypadku pozyskiwania danych biometrycznych zawierających na przykład przesłonecia. Zespół planuje wykorzystanie fuzji danych biometrycznych w przyszłych pracach realizowanych nad rozwiązaniem.

³Jak zaprezentowano w Rozdziale 1 dysertacji Autora, biometria tęczówki oka wykazuje bardzo niski błąd niesłusznego odrzucenia oraz niesłusznej akceptacji w odniesieniu na przykład do biometrii twarzy.

Bibliografia

- [1] D. Thakkar. Top five biometrics: Face, fingerprint, iris, palm and voice. <https://www.bayometric.com/biometrics-face-finger-iris-palm-voice>. Accessed: 2018-03-01.
- [2] G. Medioni, J. Choi, C. H. Kuo, and D. Fidaleo. Identifying noncooperative subjects at a distance using face images and inferred three-dimensional face models. 2009.
- [3] J. Neves and H. Proença. Icb-rw 2016: International challenge on biometric recognition in the wild. 2016.
- [4] H. Proença. Non-cooperative iris recognition: Issues and trends. 2011.
- [5] Xuhui Zhou, Robert T. Collins, Takeo Kanade, and Peter Metes. A master-slave system to acquire biometric imagery of humans at distance. *First ACM SIGMM International Workshop on Video Surveillance*, pp. 113–120, 2003.
- [6] F. Juefei-Xu and M. Savvides. Unconstrained periocular biometric acquisition and recognition using cots ptz camera for uncooperative and non-cooperative subjects. *2012 IEEE Workshop on the Applications of Computer Vision (WACV)*, pp. 201–208, 2012.
- [7] U. Park, H. C. Choi, A. K. Jain, and S. W. Lee. Face tracking and recognition at a distance: A coaxial and concentric ptz camera system. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, pp. 1665–1677, 2013.
- [8] J. C. Neves, J. C. Moreno, S. Barra, and H. Proença. Acquiring high-resolution face images in outdoor environments: A master-slave calibration algorithm. *2015 IEEE 7th International Conference on Biometrics Theory, Applications and Systems (BTAS)*, pp. 1–8, 2015.
- [9] Kien Nguyen, Clinton Fookes, Raghavender R. Jillela, Sridha Sridharan, and Arun Ross. Long range iris recognition: A survey. *Pattern Recognition*, pp. 123–143, 2017.
- [10] JC Scharcanski, H. Proença, and E. D. Du. Signal and image processing for biometrics : State of the art and recent advances. 2014.
- [11] A. Wolska. Wybrane problemy związane z oceną zagrożenia promieniowaniem optycznym. *Prace Instytutu Elektrotechniki*, 2012.
- [12] F. W. Wheeler, R. L. Weiss, and P. H. Tu. Face recognition at a distance system for surveillance applications. *2010 Fourth IEEE International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems (BTAS)*, pp. 1–8, 2010.
- [13] Metin Tarhan and Erdiñç Altuğ. A catadioptric and pan-tilt-zoom camera pair object tracking system for uavs. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, pp. 119–134, 2011.
- [14] C. S. Yang, Ren-Hao Chen, Chao-Yang Lee, and Shou-Jen Lin. Ptz camera based position tracking in ip-surveillance system. *2008 3rd International Conference on Sensing Technology*, pp. 142–146, 2008.
- [15] C. H. Chen, Y. Yao, D. Page, B. Abidi, A. Koschan, and M. Abidi. Heterogeneous fusion of omnidirectional and ptz cameras for multiple object tracking. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, pp. 1052–1063, 2008.
- [16] Guodong Guo, Michael Jones, Paul Beardsley, Guodong Guo, Michael J. Jones, and Paul Beardsley. A system for automatic iris capturing. *First ACM SIGMM International Workshop on Video Surveillance*, pp. 113–120, 2005.
- [17] Camera calibration with opencv. https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/calib3d/camera_calibration/camera_calibration.html. Accessed: 2018-02-23.
- [18] The imaging source industrial cameras. <https://www.theimagingsource.com/products/industrial-cameras/>, 2018. Accessed: 2018-04-21.
- [19] K. Okumura, H. Oku, and M. Ishikawa. High-speed gaze controller for millisecond-order pan/tilt camera. pages 6186–6191, May 2011.

- [20] K. Grabowski, D. Kacperski, T. Kryszczyński, and T. Kozłowski. Kierowane urządzenie, system akwizycji cech biometrycznych oraz sposób akwizycji cech biometrycznych. *Zgłoszenie patentowe P30994PL00/MB*, 2016.
- [21] K. Grabowski, D. Kacperski, T. Kryszczyński, and T. Kozłowski. Guided optical device, biometric data acquisition system and method of biometric data acquisition. *WO Patent App. PCT/IB2016/052,779*, 2016.
- [22] B. Ward. How linux works, 2nd edition: What every superuser should know. 2014.
- [23] Jeroen Vermeulen. Introduction to d-bus. <https://www.freedesktop.org/wiki/IntroductionToDBus/>. Accessed: 2018-03-24.
- [24] Z. Zivkovic. Improved adaptive gaussian mixture model for background subtraction. *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition*, pp. 28-31, 2004.
- [25] M. Danelljan, G. Hager, F. S. Khan, and M. Felsberg. Accurate scale estimation for robust visual tracking. 2014.
- [26] João F. Henriques, Rui Caseiro, Pedro Martins, and Jorge Batista. Exploiting the circulant structure of tracking-by-detection with kernels. *Computer Vision – ECCV 2012: 12th European Conference on Computer Vision*, pp. 702-715, 2012.
- [27] Q. Dao Vu and S. T. Chung. Real-time robust human tracking based on lucas-kanade optical flow and deep detection for embedded surveillance. *2017 8th International Conference of Information and Communication Technology for Embedded Systems (IC-ICTES)*, pp. 1-6, 2017.
- [28] K. F. Sim and K. Sundaraj. Human motion tracking on broadcast golf swing video using optical flow and template matching. *2010 International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics*, pp. 169-173, 2010.
- [29] Bruce D. Lucas and Takeo Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 2*, pp. 674–679, 1981.
- [30] Wojciech Sankowski, Michał Włodarczyk, Damian Kacperski, and Kamil Grabowski. Estimation of measurement uncertainty in stereo vision system. *Image Vision Computing*, 61:70–81, 2017.
- [31] R. E. Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems. *ASME Journal of Basic Engineering*, 1960.
- [32] D. Kacperski, M. Włodarczyk, and K. Grabowski. Research on human silhouette detection methods for a non-cooperative biometric system. January 2015.
- [33] N. Dalal and B. Triggs. Histograms of oriented gradients for human detection. *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, pp. 886-893, 2005.
- [34] T. Ahonen, A. Hadid, and M. Pietikainen. Face recognition with local binary patterns. *Computer Vision - ECCV 2004*, pp. 469-481, 2004.
- [35] V. Kazemi and J. Sullivan. One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees. *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014.
- [36] George Smith and David A. Atchison. The eye and visual optical instruments. *Cambridge University Press*, pp. 36-46, 1997.
- [37] Neil A. Dodgson. Variation and extrema of human interpupillary distance. *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI*, pp. 36-46, 2004.
- [38] M. Włodarczyk. Biometric recognition in less-cooperative environments. *Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka*, 2019.
- [39] Opencv opencv simple blob detector. https://docs.opencv.org/2.4.13.4/modules/features2d/doc/common_interfaces_of_feature_detectors.html?highlight=blob#SimpleBlobDetector. Accessed: 2018-05-27.